

第三十一章 防雷保护与 间接接触电击防护技术

第一节 雷电现象、种类和性质

一、雷电现象及雷电的种类

(一) 雷电现象

雷电是雷云之间或雷云对地面放电的一种自然现象。在雷雨季节里,地面上的水分受热变成水蒸气,并随热空气上升,在空气中与冷空气相遇,使上升气流中的水蒸气凝成水滴或冰晶,形成积云。云中的水滴受强烈气流的摩擦产生电荷,而且微小的水滴带负电,小水滴容易被气流带走形成带负电的云,较大的水滴留下来形成带正电的云。由于静电感应,带电的云层在大地上表面会感应出与云块异性的电荷,当电场强度达到一定值时,即发生雷云与大地之间的放电;在两块异性电荷的雷云之间,当电场强度达到一定值时,便发生云层之间放电。放电时伴随着强烈的电光和声音,这就是雷电现象。

雷云放电时,也是由于雷云中的电荷逐渐聚集增加使其电场强度达到一定程度时,周围空气的绝缘性能就被破坏,于是正雷云对负雷云之间或者雷云对地之间,发生强烈的放电现象。其中尤以雷云对地放电(直接雷击)对地表的供电网络和建筑物的破坏性最大。

雷云是产生雷电的基本因素,而雷云的形成必须具有下列三个条件:

1. 空气中有足够的水蒸气;
2. 有使潮湿的空气能够有上升并凝结为水珠的气象或地形条件;
3. 具有气流强烈持久地上升的条件。

雷电过电压是由雷云放电产生的,它是一种壮观的自然现象,包括闪电和雷鸣两种现象,两者相伴出现,因而常称之为雷电。最常见的雷云有热雷云和锋面雷云两种。垂直上升的湿热气流升至2~5km高空时,湿热气流中的水分逐渐凝结成浮悬的小水滴,小水滴越聚越多形成大面积的乌黑色积云。若此类积云由于某种原因而带电荷则称为热雷云。此外,水平移动的气流因温度不同,当冷、热气团相遇时,冷气团的容量较大,推举热气团上升。在它们的广泛的交界面上,热气团中的水分突然受冷凝结成小水滴及冰晶而形成翻腾的积云,此类积云如带电荷称为锋面雷云。一般情况,锋面雷云波及的范围比热雷云大得多,可能有几公里甚至十几公里宽的大范围地区,流动的速度可高达每小时100~200km。因此,它所形成的雷电危害性也较大。

雷云对地之间的电位是很高的,它对大地有静电感应。此时雷云下面的大地感应出异性的电荷,两者之间构成了一个巨大的空间电容器。雷云中或是在雷云对地之间,电场强度各处不一样。当雷云中任一电荷聚集中心处的电场强度达到25~30kV/cm时,空气开始游离,成为导电性的通道,叫做雷电先导。雷电先进展进到离地面大约在100~300m高度时,地面受感应而聚集的异号电荷更加集中,特别是易于聚集在较突起或较高的地面突出物上,于是形成了迎雷先导,向空中的雷电先导快速接近。当两者接触时,这时地面的异

号电荷经过迎雷先导通道与雷电先导通道中的电荷发生强烈的中和,出现极大的电流并发出光和声,这就是雷电的主放电阶段。主放电阶段存在的时间极短,一般约 $50 \sim 100 \mu\text{s}$,电流可达数十万安。主放电阶段结束后,雷云中的残余电荷继续经放电通道入地,称为余辉阶段。余辉电流为 $100 \sim 1000\text{A}$,持续时间一般为 $0.03 \sim 0.15\text{s}$ 。雷云放电波形,见图 31-1。

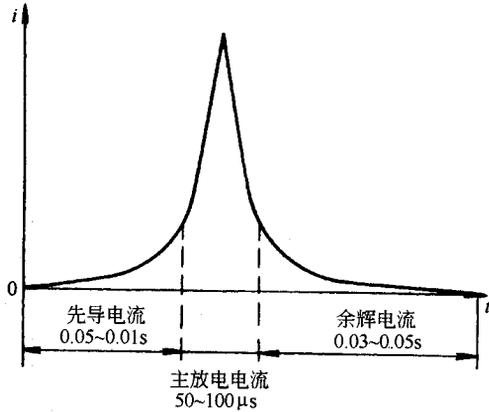


图 31-1 雷云放电波形图

由于雷云中可能同时存在着几个电荷聚集中心,所以第一个电荷聚集中心完成对地的放电后,紧接着第二个、第三个电荷聚集中心也可能沿第一次放电通道再次中和放电。因此雷云放电经常出现多重性,常见的为 2~3 次,每次的放电间隔时间从几百微秒到几百毫秒不等,放电电流都比第一次小得多,且逐次减小。

雷电对电力系统而言,是一种极大的威胁。根据英国、美国、前苏联电力部门的统计数字,在所有电力系统中,破坏正常运行事故,有 50%~60% 是由于大气过电压引起的。

(二) 雷电的种类

雷电的种类可分为直击雷、感应雷、雷电波侵入及球雷四种。

1. 直击雷

有时雷云较低,周围又没有带异性电荷的云层,而在地面上突出的树木或建筑物等,感应出异性电荷,雷云就会通过这些物体与大地之间直接放电,这种直接击在建筑物或其他物体的雷击,称为直击雷。

由于受直接雷击,被击物体产生很高的电位,而引起过电压,流过的雷电流可达几十千安甚至几百千安,对设备、架空线及建筑物产生极大的破坏作用,如架空线上产生几千千伏的高压后,会引起线路的闪络放电,发生短路事故,而且会波及变电所、发电厂,引起严重的后果。

雷击放电大多数具有‘重复放电’的性质。产生极大的雷电流,引起地面建筑物和其他物体的损坏,甚至发生爆炸和引起火灾。

2. 感应雷

感应雷又称雷电感应,它是由于雷电流的强大电场和磁场变化产生的静电感应和电磁感应引起的。它能造成金属部件之间产生电火花放电。静电感应的特点是,当雷云出现在导体的上空时,由于感应作用,使导体上感应带有与雷云的异性电荷,雷云放电时,在导体上的感应电荷得不到释放,致使导体与地面之间形成很高的电位差。电磁感应的特点是,由于雷电流的幅值和陡度迅速变化,在它周围的空间里,会产生强大的变化的电磁场,在其中的导体感应产生极大的电动势,若有回路,则产生很大的感应电流,而产生危害。

3. 雷电波侵入

由于雷电对架空线路或金属导体的作用,所产生的雷电波就可能沿着这些导体侵入建筑物内,危及人身安全或损坏设备。

雷电波侵入的事故时有发生,在雷害事故中占相当大的比例。

4. 球雷

通常认为球雷是一个炽热的等离子体,温度极高,并发生紫色或红色的发光球体,直径在 10~20cm 以上。

球雷常沿地面滚动或在空气中飘动,能通过烟囱、门、窗或其他缝隙进入建筑物内部,或无声消失,或伤害人身和破坏物体,甚至发生剧烈的爆炸,引起严重的后果。

二、雷电参数

为了对大气过电压采取保护措施,必须知道雷电参数。但雷电活动是由大自然气象变化所形成,各次雷云与放电条件千差万别,故其参数只能是多次观测所得的统计数据,现将常用的几种雷电参数介绍如下:

(一) 雷电通道的波阻抗

主放电时的雷电通道,是充满离子的导体,可看成和普通导线一样,对雷电流呈现一定的阻抗,此时雷电压波与电流波幅值之比 U_m/I_m 称为雷电流通道的波阻抗 Z_0 。在防雷设计时,通常取 Z_0 等于 300Ω 。

(二) 雷电流幅值

雷电流具有冲击特性。雷电流幅值即雷电冲击电流的最大值,亦即放电时雷电流的最大值。

雷电流幅值可高达数十千安至数百千安。根据我国各地测得的统计数据,绘制出的雷电概率曲线见图 31-2。

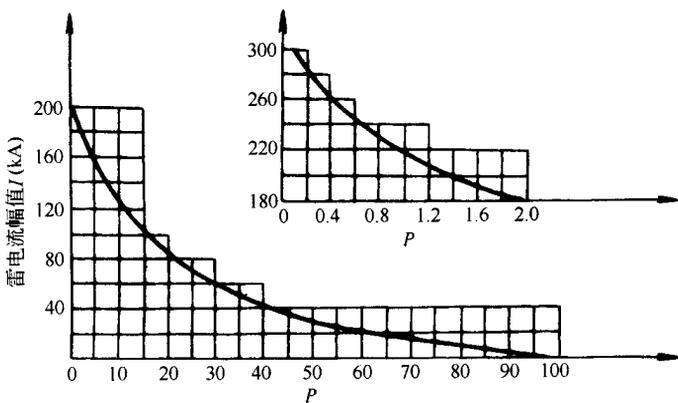


图 31-2 我国雷电流概率曲线

图中所示的概率曲线也可用下式表达:

$$\lg P = -\frac{I}{108}$$

式中 P ——雷电流幅值概率(%) ;

I ——雷电流幅值(kA)。

对于 100kA 的雷电流幅值,可用计算或图中查得,其概率为 11.9%,即每 100 次雷击中,大约有 12 次雷击的雷电流达到 100kA。

我国西北地区、内蒙古、西藏、东北边境地区的雷电活动较弱,电流幅值的概率可用下式表达:

$$\lg P = -\frac{I}{54}$$

(三) 雷电流的波形与陡度

雷电流 I 随时间 t 上升的速率,称为雷电流陡度。

雷电流是一种冲击波,其幅值和陡度随各次放电条件而异,一般幅值大的陡度也大。幅值和最大陡度都出现在波头部分,故防雷设计只考虑波头部分。实测得到的雷电波头近似半余弦曲线,如图 31-3 所示。

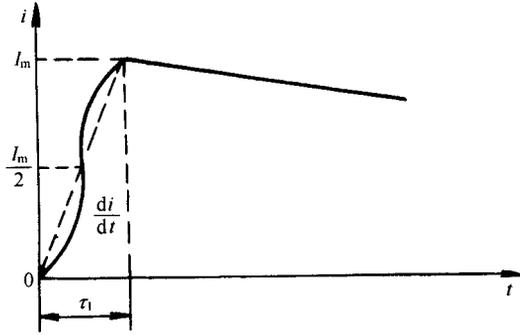


图 31-3 雷电流波形图

雷电流的计算式,为

$$i = \frac{I_m}{2}(1 - \cos \omega t)$$

式中 I_m ——电流幅值(kA),

式中的角速度 ω 由波头时间 τ_1 决定。

雷电波的特征用电流(电压)幅值(kA或kV)、波头长度 τ_1 (μs)、波长 τ_2 (μs)表示。 τ_1 是指雷电流由零开始升到最大幅值的时间,一般为 $1 \sim 4 \mu\text{s}$ 。 τ_2 是雷电流由开始到波尾部分降至最大幅值的一半时所经过的时间,一般为 $40 \sim 50 \mu\text{s}$,并用 \pm 号表示其极性。

雷电流波头部分上升速度称雷电流陡度,分为最大陡度 α_{\max} 与平均陡度 α_{av} ,分别为

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &= \left. \frac{di}{dt} \right|_{\text{max}} = \frac{d\left[\frac{I_m}{2}(1 - \cos \omega t)\right]}{dt} \\ &= \frac{I_m}{2} \omega \sin \omega t \end{aligned}$$

最大陡度发生在波头中间,此时 $\omega t = \frac{\pi}{2}$,故

$$\alpha_{\max} = \frac{I_m}{2} \omega$$

$$\alpha_{\text{av}} = \left. \frac{di}{dt} \right|_{\text{av}} = \frac{I_m}{\tau_1} = \frac{I_m}{\pi/\omega} = \frac{I_m \omega}{\pi}$$

式中 $\tau_1 = \pi/\omega$,是因为 $i = I_m$ 时, $\omega t = \pi$ 则 $t = \tau_1 = \pi/\omega$ 。故雷电流最大陡度为平均陡度的 $\pi/2$ 倍。

在我国的防雷设计中,取 $\tau_1 = 2.6 \mu\text{s}$,故雷电流的平均陡度为

$$\alpha_{\text{av}} = \left. \frac{di}{dt} \right|_{\text{av}} = \frac{I_m}{2.6}, \quad \text{kA}/\mu\text{s}$$

(四) 雷暴日(或小时)

雷暴日(小时)是指一年中有雷电活动的天(小时)数,用它表示雷电活动的强度。

我国地域辽阔,各地气候特征及雷雨期的长短不同,所以雷电活动频繁度在不同的地区是不一样的。雷暴日(小时)的多少和纬度有关。北回归线(北纬 23.5°)以南一般在 $80 \sim 133$ 个,北纬 23.5° 到长江流域一带约为 $40 \sim 80$ 个,长江以北大部分地区和东北地区多在 $20 \sim 40$ 个的之间,西北地区最弱,大多为 10 个左右甚至更少。我国规定平均雷暴日不超过 15 个的地区叫少雷区,超过 40 个的地区叫多雷区。在防雷设计上,要根据雷暴日数的多少而因地制宜。

(五) 雷电冲击过电压

雷电时的冲击过电压很高,直击雷的冲击过电压可用下式表达:

$$u_z = iR_c + L \frac{di}{dt}$$

式中 μ_z ——直击雷冲击过电压(kV);

i ——雷电流(kA);

R_c ——防雷装置的冲击接地电阻(Ω);

$\frac{di}{dt}$ ——雷电流陡度(kA/ μ s);

L ——雷电流通路的电感(μ H)。

由此可见,直击雷冲击过电压由两部分组成,前一部分决定于雷电流的大小,后一部分决定于雷电流陡度。应当注意,直击雷冲击过电压除决定于雷电流的特征外,还决定于雷电流通道的波阻抗。

(六)雷击电磁脉冲

雷击电磁脉冲是一种干扰源,是指闪电直接击在建筑物防雷装置和建筑物附近所引起的效应。绝大多数是通过连接导体的干扰,如雷电流或部分雷电流、被雷击中的装置的电位升高以及电磁辐射干扰。

(七)年预计雷击次数

年预计雷击次数是表征建筑物可能遭受雷击的一个频率参数。它和年平均雷暴日有关,但呈非线性关系。经验公式为:

$$N_d = 0.024KT_d^{1.3} \cdot A_e$$

式中 N_d ——建筑物的年预计雷击次数(次/年)(d/年);

T_d ——年平均雷暴日数,按当地气象台、站资料确定;

A_e ——与建筑物截收雷击次数相同的等效面积(单位为 km^2);

K ——校正系数,在一般情况下取1;在下列情况下取相应的数值:①位于旷野孤立的建筑物取2;②金属屋面的砖木结构建筑物取1.7;③位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物以及特别潮湿的建筑物取1.5。

国家标准《建筑物防雷设计规范》推荐的计算式为:

$$N_g = 0.024T_d^{1.3}$$

式中 N_g ——建筑物所处地区雷击大地的年平均密度(次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$)

$$N = kN_g A_e$$

建筑物等效面积 A_e 应为其实际平面积向外扩大后的面积,其计算方法,如下:

$$D = \sqrt{H(200 - H)}$$

$$A_e = [LW + \chi(L + W) \cdot \sqrt{H(200 - H)} + \pi H(200 - H)] \cdot 10^{-6}$$

式中 D ——建筑物每边的扩大宽度(m);

L 、 W 、 H ——分别为建筑物的长、宽、高(m)。

当建筑物的高 $H \geq 100\text{m}$ 时,其每边的扩大宽度应按等于建筑物的高 H 计算;建筑物的等效面积的计算式为:

$$A_e = [LW + 2H(L + W) + \pi H^2] \cdot 10^{-6}$$

当建筑物各部位的高不同时,应沿建筑物周边逐点算出最大扩大宽度,其等效面积 A_e 应按每点最大扩大宽度外端的连接线所包围的面积计算。

三、雷电的危害

雷电有时带来严重的危害,就其破坏因素来说,雷电有以下三方面的破坏作用。

(一)电效应

数十万至数百万伏的冲击电压可击毁电气设备的绝缘,烧断电线或劈裂电杆,造成大规模的停电,绝缘损坏还可能引起短路,导致火灾或爆炸事故,巨大的雷电流流经防雷装置时会造成防雷装置的电位升高,这

样的高电位同样可以作用在电气线路、电气设备或其他金属管道上,它们之间产生放电。这种接地导体由于电位升高,而向带电导体或与地绝缘的其他金属物放电的现象。叫做反击。反击能引起电气设备绝缘破坏,造成高压窜入低压系统,可能直接导致接触电压和跨步电压造成事故。可使金属管道烧穿,甚至造成易燃易爆物品着火和爆炸。

雷电流的电磁效应,在它的周围空间里就会产生强大而变化的磁场,处于这电磁场中间的导体就会感应出很高的电动势。这种强大的感应电动势可以使闭合回路的金属导体产生很大的感应电流,引起发热及其他破坏。

当雷电流入地时,在地面上就会因雷电流引起跨步电压,造成人身触电事故。

(二)热效应

巨大的雷电流(几十至几百千安)通过导体,在极短的时间内转换成大量的热能。雷击点的发热量约为500~2000J,造成易燃易爆物品燃烧或造成金属熔化、飞溅而引起火灾或爆炸事故。

(三)机械效应

被击物遭到严重破坏,这是由于巨大的雷电流通过被击物时,使被击物缝隙中的气体剧烈膨胀,缝隙中的水分也急剧蒸发为大量气体,因而在被击物体内部出现强大的机械压力,致使被击物体遭受严重破坏或发生爆炸。

第二节 配电装置的侵入雷电波保护

一、保护措施

配电装置对侵入雷电波的过电压保护是采用阀型避雷器及与阀型避雷器相配合的进线保护段等保护措施。

110kV及以下的配电装置电气设备绝缘与阀型避雷器通过雷电流为5kA幅值的残压进行配合。

进线保护段的作用,在于利用其阻抗来限制雷电流幅值和利用其电晕衰耗来降低雷电波陡度,并通过进线段上管型避雷器的作用,使之不超过绝缘配合所要求的数值。

二、架空进线保护

为防止或减少近区雷击闪络,对未沿全线架设避雷线的35~110kV架空送电线路,应在变电所1~2km的进线段架设避雷线,避雷线的保护角不宜超过20°,最大不能超过30°。

其变电所的进线段,应采用图31-4所示的保护接线。

在木杆或木横担钢筋混凝土杆线路进线段的首端,应装设一组管型避雷器 GB_1 ,其工频接地电阻不宜超过10 Ω 。铁塔或铁横担、瓷横担的钢筋混凝土杆线路,以及全线有避雷线的线路,其进线段首端,一般不装设管型避雷器 GB_1 。

在雷季,如果变电所35~110kV进线的隔离开关或断路器可能经常断路运行,同时线路侧又带电,则必须在靠近隔离开关或断路器处装设一组管形避雷器 GB_2 。 GB_2 外间隙值的整定,应使其在断路运行时,能可靠地保护隔离开关或断路器,而在闭路运行时,不应动作,并应处于母线阀型避雷器的保护范围内。如 GB_2 整定有困难,或无适当参数的管型避雷器,可用阀型避雷器或保护间隙代替。

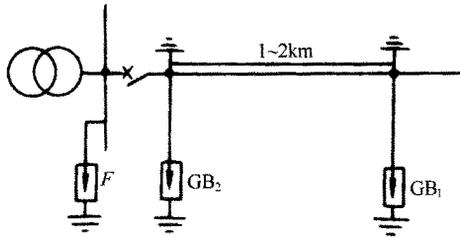


图 31-4 35~110kV 变电所进线保护接线

三、电缆进线保护

变电所的 35kV 及以上电缆进线段，在电缆与架空线的连接处应装设阀型避雷器，其接地端应与电缆的金属外皮连接。对三芯电缆，末端的金属外皮应直接接地，见图 31-5 (a)。对单芯电缆，为防止在电缆外皮中产生环流，只允许将电缆一端的外皮直接接地，而另一端应经接地器 FJ 或保护间隙 JX 接地，见图 31-5 (b)，也可用氧化锌避雷器进行保护。

如电缆长度不超过 50m 或虽超过 50m，但经校验，装一组避雷器即能符合保护要求，在图 31-5 中只装 F_1 或 F_2 。

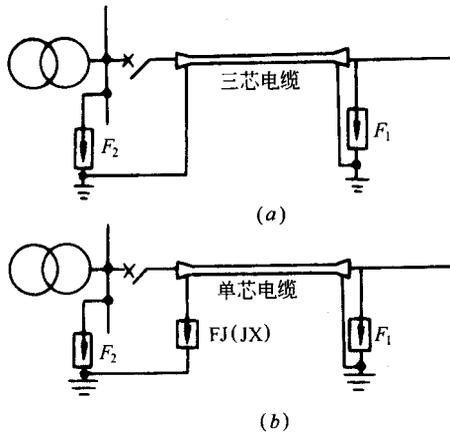


图 31-5 具有 35kV 及以上电缆段的变电所进线保护接线

如电缆长度超过 50m，且断路器在雷季可能经常断路运行，应在电缆末端装设管型避雷器或保护间隙。连接电缆段的 1km 架空线路，应架设避雷线。

如果全部进线全长均为地下电缆，则变电所可不安装防护雷电过电压的避雷器。

四、阀型避雷器与被保护设备间的最大电气距离的确定

1. 确定阀型避雷器与被保护设备间的最大电气距离时，侵入波的幅值应取进线段的绝缘冲击强度。侵入波计算陡度应取表 31-1 所列数值。

2. 装有标准绝缘水平的设备和标准特性避雷器的变电所，阀型避雷器与主变压器、并联电抗器、电压互感器间的最大电气距离，对一路进线和两路进线可分别按图 31-6 和图 31-7 确定，与其他电器的最大电气距离可相应增大 35%。在图 31-6 和图 31-7 中，35~110kV 级系按普通阀型避雷器计算。

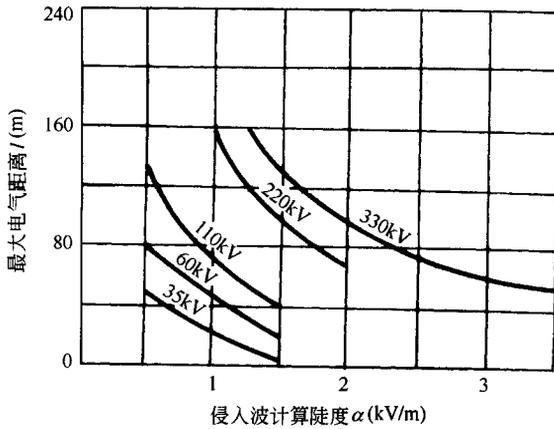


图 31-6 一路进线的变电所中, 避雷器与变压器的最大电气距离与侵入波计算陡度的关系曲线

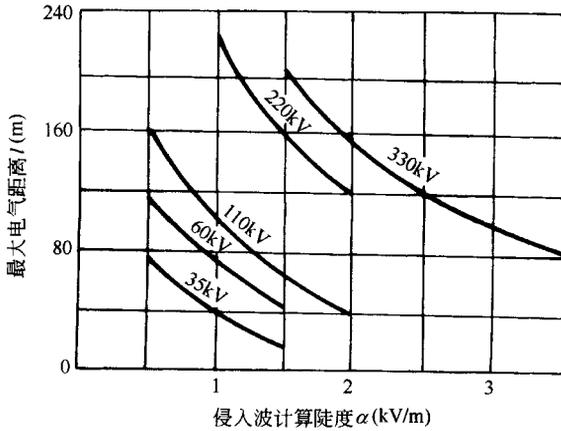


图 31-7 两路进线的变电所中, 避雷器与变压器的最大电气距离与侵入波计算陡度的关系曲线

3. 变电所雷季经常运行的进线超过两路时, 阀型避雷器与被保护设备间的最大电气距离可较图 31-17 的数值增大(3 路进线可增加 20% A 路及以上进线可增大 35%)。此外, 还应根据变电所可能改变的运行方式进行必要的校验。但可不考虑事故或检修的短时运行方式。

表 31-1 变电所侵入波计算陡度

额定电压 (kV)	侵入波计算陡度(kV/m)	
	1km 进线段	2km 进线段或全线有避雷线
35	1.0	0.5
60	1.1	0.6
110	1.5	0.75

4. 对电气接线比较特殊的变电所, 可用计算方法或通过模拟试验确定最大电气距离。

5. 使用双回路杆塔的线路, 有同时遭受雷击的可能, 确定避雷器与变压器的最大电气距离时, 应按一回路考虑, 且在雷季中, 应尽量避免将其中一回路断开。

6. 阀型避雷器与主变压器及其他被保护设备的电气距离,应尽量缩短。如阀型避雷器与主变压器的电气距离超过允许值,应在主变压器附近增设一组阀型避雷器。

五、变压器侵入波保护

1. 自耦变压器保护

自耦变压器一般除有高、中压自耦绕组外,还有低压非自耦绕组,可能出现高低压绕组运行、中压开路和中低压绕组运行、高压开路的运行方式。当入侵波从高压端线路袭来,高压端电压为 U_0 时,其初始和稳态电位分布以及最大电位包络线都和中性点接地的绕组相同,见图 31-8(a)。在开路的中压端子 A' 上可能出现的最大电位约为高压侧电压 U_0 的 $2/K$ 倍(K 为高压侧与中压侧绕组的变比),这样可能使处于开路的中压端套管闪络,因此在中压侧与断路器之间应装设一组避雷器,以便当中压侧断路器开路时保护中压侧绝缘。当高压侧开路,中压侧有雷电波入侵,中压侧电压为 U_0' 时,初始和稳态电位分布如图 31-8(b),由中压端 A' 到开路的高压端 A 的稳态分布是由中压端 A' 到中性点 O 的稳态分布的电磁感应而形成的。在振荡过程中 A 点电位可达高压端 A 点的稳态电压的两倍。

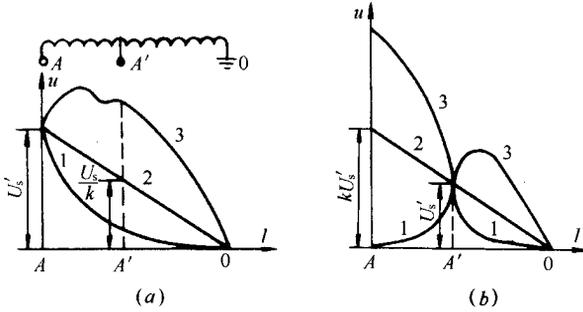


图 31-8 自耦变压器中有雷电波入侵时的最大电位包络线

(a) 高压端 A 进波 (b) 中压端 A' 进波

1—初始电压分布 2—稳态电压分布 3—最大电位包络线

这将危及开路的高压侧,因此在高压侧与断路器之间也应装设一组避雷器。

此外,当中压侧有出线(相当于 A' 点经线路波阻抗接地)而高压侧有雷电波入侵时, A 相当于接地,雷电波电压大部分将加在自耦变压器绕组的 AA' 绕组上,可能使其损坏。同理,当高压侧连有出线而中压侧进波时也有类似情况。这种情况显然在 AA' 绕组愈短(即变比越小)时愈危险,因此当变比小于 1.25 时,在 AA' 之间还应装加一组避雷器,如图 31-9(a)中虚线 F_3 ,此避雷器的灭弧电压应大于高压或中压侧接地短路条件下 AA' 所出现的最高工频电压,也可采用图 31-9(b)所示的“自耦”避雷器保护方式。

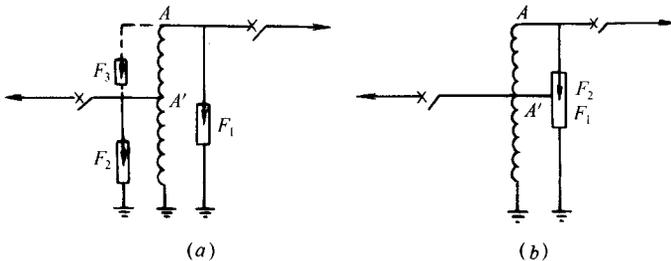


图 31-9 保护自耦变压器的避雷器配置

(a) 一般避雷器配置 (b) 自耦避雷器配置

如采用图 31-9a 的保护接线,在自耦绕组任一侧接地短路条件下, F_2 所承受的最高工频电压不应超过其灭弧电压。

35kV 及以下自耦变压器,还应在串联绕组的两端跨接阀型避雷器 F_2 (图 31-9b)。

使用氧化锌避雷器保护自耦变压器时,当高压侧侵入波,若中压侧避雷器先于高压侧避雷器动作,中压侧避雷器可能因能量小而损坏。因此,在选择避雷器时,应校核中压侧的避雷器,使其额定电压不低于高压侧换算到中压侧的电压值。

2. 三绕组变压器和分裂绕组变压器保护

(1)与架空线路连接的三绕组变压器(包括一台变压器与两台电机相连的分裂绕组变压器)的 3~10kV 绕组,如有开路运行的可能,应采取防止静电感应电压危及该绕组绝缘的措施——在其一相出线上装设一只阀型避雷器,但如该绕组连有 25m 及以上金属外皮电缆段,则可不装设避雷器。

(2)当三绕组变压器高、中压之间的变比较大(如 220/35kV),而中压侧又有长时间开路运行可能时,则应考虑在中压侧的一相出口上加装一只阀型避雷器。

(3)分裂绕组变压器同样有可能在其中一个分支绕组断开时,另一绕组仍继续运行,故应在每个分支绕组的一相出口处装一只阀型避雷器。

对于电力变压器和所有电压的自耦变压器,以及弱绝缘的 110kV 的变压器,在避雷器与变压器之间不应装设开关设备。

3. 避雷器的配置原则

阀型避雷器的安装位置和组数,应根据电气设备的雷电冲击绝缘水平和避雷器特性以及侵入波陡度,并结合配电装置的接线方式确定。

避雷器至电气设备的允许距离还与雷雨季节经常运行的进线路数有关。进线数越多则允许距离可相应增大,断路器、隔离开关、耦合电容器等电器的绝缘水平比变压器为高。因此,避雷器至这些设备的最大允许距离可增大。

上述允许距离应在各种长期可能的运行方式下都符合要求,但一般不考虑事故或检修的短时运行方式。

六、3~10kV 配电装置的保护

变电所的电力变压器及 3~10kV 的配电装置,应在每组母线和每路架空进线上装设阀型避雷器和保护接线。

避雷器与 3~10kV 主变压器的最大电气距离,规定如下:

- ①进线数为 1 时,最大电气距离为 15m;
- ②进线数为 2 时,最大电气距离为 23m;
- ③进线数为 3 时,最大电气距离为 27m;
- ④进线数大于 4 时,则最大电气距离为 30m。
- ⑤如各架空进线,均有电缆段时,避雷器与主变压器的最大电气距离不受限制。

有电缆段的架空线路,避雷器应装设在电缆头附近,其接地端应和电缆金属外皮相连。

3~10kV 配电所,当无所用变压器时,可在每路进线上装设阀型避雷器或管型避雷器。

避雷器应以最短的接地线与变电所、配电所的主接地网连接(包括通过电缆金属外皮连接)。避雷器附近应装设集中接地装置,见图 31-10。

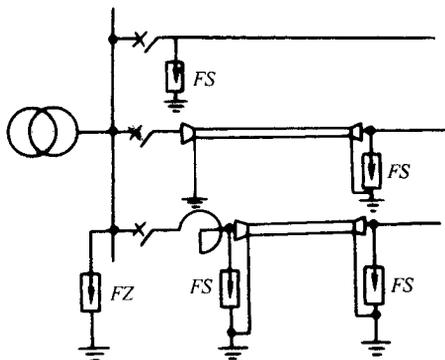


图 31-10 3~10kV 配电装置雷电侵入波的保护接线

七、旋转电机的防雷

1. 发电机、同期调相机、大型电动机等旋转电机，如直接与架空线相连接，称为直配电机。此时，因线路上的雷电波可以直接侵入电机。所以这种旋转电机必须有防雷保护措施。

由于旋转电机冲击耐压值较低，仅为变压器的 $1/2.5 \sim 1/4$ 倍，电机主绝缘的冲击系数接近于 1，电机的绝缘受到机械、电、热和化学的作用，绝缘容易老化，所以电机的绝缘的实际冲击耐压还会降低。对电机的主绝缘、匝间绝缘和中心点绝缘，必须采取防雷保护。

2. 保护旋转电机用的磁吹避雷器（FCD 型）的保护性能与电机绝缘水平的配合裕度很小，电机出厂冲击耐压值只比避雷器残压高 $8\% \sim 10\%$ 左右。

作用在直配电机上的大气过电压有两类，一类是与电机相连的架空线路上的感应雷过电压；另一类是由雷直击于与电机相连的架空线路而引起的。感应雷过电压出现的机会较多。如前述，感应雷过电压是由线路导线上的感应电荷转为自由电荷所引起的，在相同的感应电荷下增加导线对地电容可以降低感应过电压。

3. 旋转电机的防雷保护措施

旋转电机常采取的防雷保护措施。如下：

① 为了限制作用在电机上的感应过电压，使之低于电机的冲击耐压强度值，可在发电机电压母线上装设电容器。

② 旋转电机的防雷保护要根据发电机的容量、重要性以及当地雷电活动的情况，因地制宜地处理。考虑到对直配电机的防雷保护还不能达到十分完善的地步，故我国规定 60000kW 以上的发电机不宜与架空线直接相连。

③ 为了保护匝间绝缘，必须将入侵波陡度限制在 $5\text{kV}/\mu\text{s}$ 以下。

④ 一般来说，发电机绕组中性点是不接地的，三相进波时在直角波头情况下，中性点电压可达相端电压的两倍，因此，必须对中性点采取保护措施。试验表明，入侵波陡度降低时，中性点过电压也随之减小，当入侵波陡度降至 $2\text{kV}/\mu\text{s}$ 以下时，中性点过电压将不超过相端的过电压。

⑤ 在每台发电机出线母线处装设一组 FCD 型避雷器，以限制入侵波幅值，同时采取进线保护措施以限制流经 FCD 型避雷器中的雷电流使之小于 3kA 。

⑥ 进线段保护

为了限制流经 FCD 中的雷电流使之小于 3kA ，需要设置进线保护段。图 31-11 所示为电缆与管型避雷器联合作用的典型进线保护段。雷电波入侵时，管型避雷器 GB 动作，电缆芯线与外皮经 GB 短接在一起，雷电流流过 GB 和接地电阻 R_1 所形成的电压 iR_1 同时作用在外皮与芯线上，沿着外皮将有电流 i_2 流向电机侧，于是在电缆外皮本身的电感 L_2 上将出现压降 $L_2 \frac{di_2}{dt}$ ，此压降是由环绕外皮的磁力线变化所造成的，这些

磁力线也必然全部与芯线相匝链 结果在芯线上也感应出一个大小相等其值为 $L_2 \frac{di_2}{dt}$ 的反电动势来,此电动势阻止雷电流从 A 点沿芯线向电机侧流动,也即限制了流经 FCD 的雷电流,如果 $L_2 \frac{di_2}{dt}$ 与 iR_1 完全相等,则在芯线中就不会有电流流过,但因电缆外皮末端的接地引下线总有电感 L_3 存在(假定电厂接地网的接地电阻很小,可略去)则 iR_1 与 $L_2 \frac{di_2}{dt}$ 之间就有差值,差值愈大则流经芯线的电流就愈大,使流经 FCD 的电流得到进一步限制。

⑦为了保护中性点绝缘,除了限制入侵波陡度 a 不超过 $2kV/\mu s$ 外,尚需在中性点加装避雷器,考虑到电机在受雷击时可能有单相接地存在,中性点将出现相电压,故中性点避雷器的灭弧电压应大于相电压。当电机额定电压为 3kV 时,可选用 FCD-2、FZ-2 型避雷器;额定电压为 6kV 时,可选用 FCD-4、FZ-4 型避雷器;额定电压为 10kV 时,可选用 FCD-6、FZ-6 型避雷器。

若电机中性点不能引出,则需将每相电容增大至 $1.5 \sim 2\mu F$,以进一步降低入侵波陡度,确保中性点绝缘。

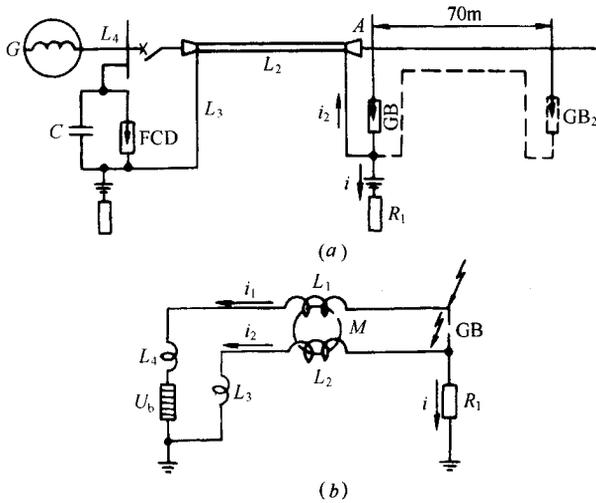


图 31-11 有电缆段的进线保护接线

(a)原理接线 (b)等值计算电路 L_1 —电缆芯线的自感;

L_2 —电缆外皮的自感; L_3 —电缆末端外皮接地线的自感;

L_4 —电缆末端至发电机之间连接线的电感; M —电缆外皮与芯线

间的互感; U_0 —FCD 磁吹避雷器 3kA 下的残压;

R_1 —电缆首端 GB 的接地电阻以上皆为三相进波时的参数

若无合适的管型避雷器,则 GB_1 和 GB_2 可用 FS_1 和 FS_2 代替,见图 31-12。

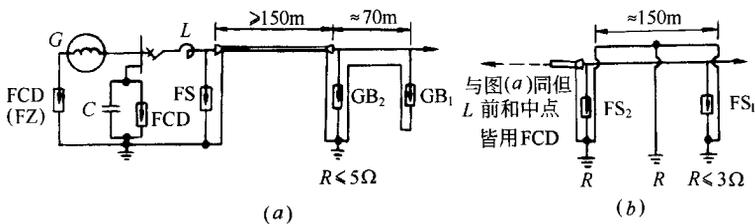


图 31-12 25000~60000kW 直配电机的保护接线图

(a)使用管型避雷器 GB (b)使用 FS 型避雷器

最好将电抗器前面的和中性点的避雷器均改为 FCD 型磁吹避雷器。在 $\frac{l_b}{2}$ 处再装设一组管型避雷器 GB₂, 见图 31-13 中虚线所示。图中 FS 是用来保护开路状态的断路器或隔离开关的。

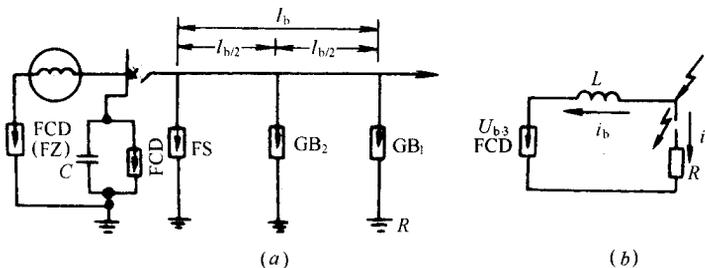


图 31-13 1500~6000kW 以下直配电机和
少雷区 6000kW 以下直配电机的保护接线图
(a) 原理接线 (b) 等值计算电路

⑧根据我国运行经验,在一般情况下,无架空直配线的电机不需要装设电容器和避雷器。在多雷区,特别重要的发电机,则宜在发电机出线上装设一组 FCD 型避雷器。

⑨若发电机与变压器之间有长于 50m 的架空母线或软联线时,对此段母线除应对直击雷进行保护外,还应防止雷击附近而产生的感应过电压,此时应在电机每相出线上加装不小于 0.15 μ F 的电容器或磁吹避雷器。

在发电机电压母线上装设电容器,以限制入侵波陡度 a 和降低感应过电压。在变电所中限制 a 的主要目的是为了限制由变压器与避雷器之间的距离而引起的电压差。而在直配电机防雷保护中,由于避雷器直接装在台电机的出线处,故上述问题不突出,限制 a 的主要目的是保护匝间绝缘和中性点绝缘。

通常采取在发电机电压母线上装设电容器的办法来降低入侵波陡度,如图 31-14 所示。若入侵波为幅值 U_0 的直角波,则发电机母线上电压(即电容 C 上电压 U_c)可按图 31-14(b) 的等值电路计算,计算结果表明,每相电容为 0.25~0.5 μ F 时,能够满足 $a < 2kV/\mu s$ 的要求,同时也能满足限制感应过电压使之低于电机冲击耐压强度的要求。

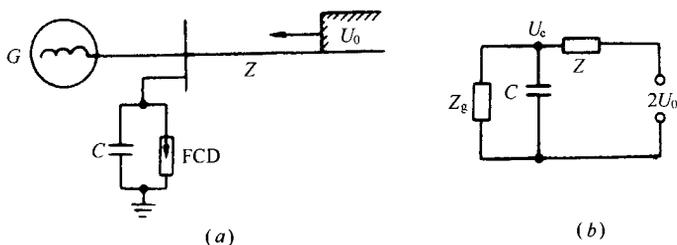


图 31-14 电机母线上装设电容 C 以限制来波陡度
(a) 原理接线图 (b) 等值电路 Z_g —发电机波阻

⑩容量较小(6000kW 以下)或少雷区的直配电机可不用电缆进线段,其保护接线如图 31-13(a) 所示。在进线保护段长度 l_b 内,应装设避雷针或线,入侵波使 G_1 动作形成图 31-13(b) 的等值电路,流经 FCD 的雷电流与 G_1 的接地电阻 R 有关, R 愈小,则流经 FCD 的雷电流愈小,进线长度愈长其等值电感 L 愈大,则流经 FCD 的雷电流也愈小,建议:

$$\text{对 } 3kV \sim 6kV \text{ 线路 } \frac{l_b}{R} \geq 200$$

$$\text{对 } 10kV \text{ 线路 } \frac{l_b}{R} \geq 150$$

一般进线段长度 l_b 可取为 450~600m。

⑪大容量(25000~60000kW)直配电机的典型防雷保护接线如图 31-12(a) 所示。图中 L 为限制工频短

路电流用电抗器,非为防雷专设, L 前加设一组FS避雷器以保护电抗器和电缆终端,由于 L 的存在,入侵波到达 L 处将发生反射使电压提高。

八、小容量变电所的保护

1. 电抗线圈的应用

35kV变电所的进线,如架设避雷线有困难,或在土壤电阻率大于 $500\Omega\cdot\text{m}$ 的地区,进线段难以达到所需的耐雷水平时,可在进线的终端杆上装设一组电抗线圈 L' ,以代替进线段的避雷线,并可采用图31-15所示的保护接线。

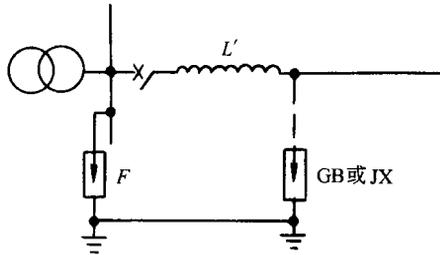


图 31-15 用电抗线圈代替进线段避雷线的保护接线

电抗线圈的电感值可采用约 $1000\mu\text{H}$,其结构应符合绝缘强度的要求。

2. 简化保护接线

(1)容量为 $3150\sim 5000\text{kVA}$ 的35kV变电所,可根据负荷的重要性及雷电活动的强弱等条件适当简化保护接线。变电所进线段的长度可减少到 $500\sim 600\text{m}$,但其首端管型避雷器 GB_1 或保护间隙 JX 的接地电阻不应超过 5Ω ,并应采用图31-16所示的保护接线。

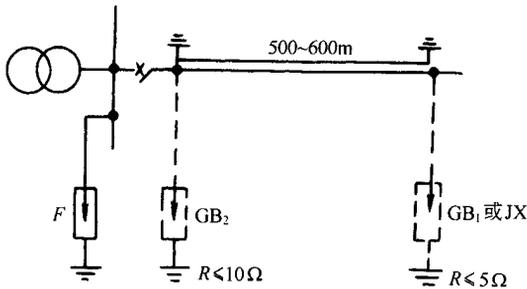


图 31-16 3150~5000kVA 35kV 变电所的简化保护接线

(2)容量为 3150kVA 以下的35kV供非重要负荷变电所,根据雷电活动的强弱,可采用图31-17(a)的保护接线,容量为 1000kVA 及以下的变电所,可采用图31-17(b)的保护接线。

(3)容量为 3150kVA 以下的35kV供非重要负荷分支变电所,可采用图31-18(a)(b)的保护接线。

(4)保护接线简化的变电所,阀型避雷器与主变压器和电压互感器的最大电气距离不宜超过 10m 。

九、六氟化硫全封闭电器的保护

对于雷电侵入波的保护,一般只用一组避雷器就能保护整个变电所,但对母线很长的变电所,应按保护

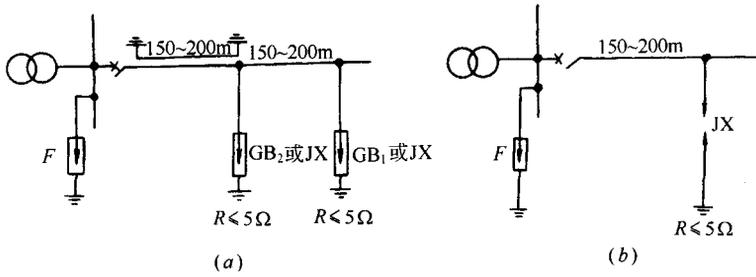


图 31-17 容量为 3150kVA 以下的 35kV 变电所的简化保护接线

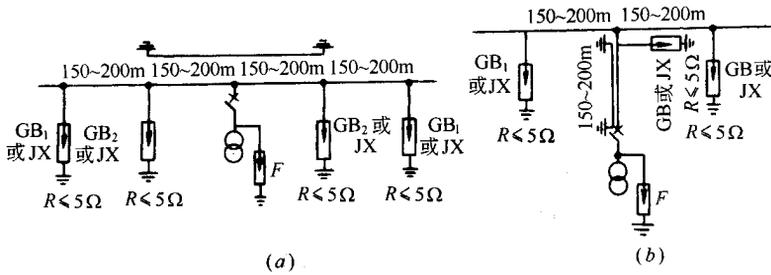


图 31-18 容量为 3150kVA 以下的 35kV 分支变电所的简化保护接线

范围核算是否需增设附加的避雷器。对线路进线的架空线与六氟化硫全封闭管线或电缆段连接处,必须装设一组避雷器进行保护。这种变电所的典型保护接线如图 31-19 所示。

十、进线段管型避雷器和保护间隙的选择

1. 管型避雷器的选择

(1) 管型避雷器开断续流的上限,考虑非周期分量,不应小于安装处短路电流最大有效值,开断续流的下限,不考虑非周期分量,不得大于安装处短路电流的可能最小数值。

(2) 如按开断续流的范围选择管型避雷器,最大短路电流应按雷季系统最大运行方式计算,并包括非周期分量的第一个半周电流有效值。计算时,可先算出周期分量,若短路发生在发电厂附近时,将周期分量乘以 1.5,若离发电厂较远,乘以 1.3,作为包括非周期分量的全短路电流的有效值。最小短路电流应按雷季系统最小运行方式计算,且不包括非周期分量。

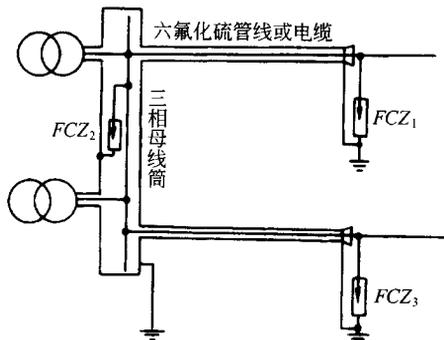


图 31-19 六氟化硫全封闭组合变电所的保护接线

(3) 在使用管型避雷器过程中,随着动作次数增加,管径逐渐增大,下限电流将升高,故选择下限电流时

要留有裕度。

(4) 管型避雷雷器的伏秒特性, 决定于内外火花间隙的大小。内部火花间隙的长度不希望太小, 应使其工频放电电压高于系统的操作电压水平。管型避雷雷器的外间隙值列于表 31-2 中, 在实际使用中, 只要被保护绝缘的冲击水平允许, 应该尽量选取较大的数值。

表 31-2 管型避雷雷器外间隙的数值

额定电压(kV)	3	6	10	20	35	60	110*	110**
外间隙最小数值(mm)	8	10	15	60	100	200	350	400
外间隙最大数值(mm)	—	—	—	150~ 200	250~ 300	350~ 400	400~ 500	400~ 500

*—中性点直接接地系统; **—中性点不直接接地系统。

2. 进线段保护间隙的选择

(1) 如客型避雷雷器的灭弧能力不能符合要求, 可采用保护间隙, 并应尽量与自动重合闸装置配合。保护间隙不应小于表 31-3 所列数值。

表 31-3 保护间隙的主间隙最小值

额定电压(kV)	3	6	10	20	35	60	110*	110**
主间隙最小值(mm)	8	15	25	100	210	400	700	750

*—中性点直接接地系统;

**—中性点不直接接地系统。

(2) 保护间隙的结构应符合下列要求:

- ① 应保证间隙稳定不变;
- ② 应防止间隙动作时电弧跳到其他设备上, 以免与间隙并联的绝缘子受热损坏、电极被烧坏;
- ③ 间隙的电极宜镀锌。

(3) 电压为 63~110kV 的保护间隙, 可装设在耐张绝缘子串上。中性点非直接接地的电力网, 应使单相间隙动作时有利于灭弧, 电压为 3~35kV 级, 宜采用角形保护间隙。

3~35kV 的保护间隙, 宜在其接地引下线中串联一辅助间隙, 以防止外物使间隙短路。

辅助间隙的数值, 规定如下:

- ① 额定电压为 3kV 时, 外间隙最小数值为 5mm;
- ② 额定电压为 6~6kV 时, 外间隙最小数值为 10mm;
- ③ 额定电压为 26kV 时, 外间隙最小数值为 15mm;
- ④ 额定电压为 35kV 时, 外间隙最小数值为 20mm。

第三节 TT、IT 与 TN 系统

一、TT 系统

(一) TT 系统的原理

我国绝大部分地面企业的低压配电网都采用星形接法的低压中性点直接接地的三相四线配电网,如图 31-20 所示。这不仅是因为这种配电网能提供一组线电压和一组相电压,便于动力和照明由同一台变压器供电,而且还在于这种配电网具有较好的过电压防护性能,且一相故障接地时单相电击的危险性较小,故障接地点比较容易检测等优点。低压中性点的接地常叫做工作接地,中性点引出的导线叫做中性线。由于中性线是通过工作接地与零电位大地连在一起的,因而中性线也叫做零线。这种配电网的额定供电电压为 0.23/0.4kV(相电压为 0.23kV,线电压为 0.4kV),额定用电电压为 220/380V(相电压为 220V,线电压为 380V),220V 用于照明设备和单相设备,380V 用于动力设备。

接地的配电网中发生单相电击时,人体承受的电压接近相电压。也就是说,在接地的配电网中,如果电气设备没有采取任何防止间接接触电击的措施,则漏电时触及该设备的人所承受的接触电压可能接近相电压,其危险性大于不接地的配电网中单相电击的危险性。

图 31-20 所示为设备外壳采取接地措施的情况。这种做法类似不接地配电网中的保护接地,但由于电源中性点是直接接地的,而与 IT 系统有本质区别。这种配电防护系统称为 TT 系统。第一个字母 T 表示电源是直接接地的。这时,如有一相漏电,则故障电流主要经接地电阻 R_E 和工作接地电阻 R_N 构成回路。漏电设备对地电压和零线对地电压分别为

$$U_E = \frac{R_E R_p}{R_N R_E + R_N R_p + R_E R_p} U$$

$$U_N = \frac{R_N R_E + R_N R_p}{R_N R_E + R_N R_p + R_E R_p} U$$

式中: U ——配电网相电压;

R_p ——人体电阻。

一般情况下, $R_N \ll R_p$, $R_E \ll R_p$ 。式(31-1)和式(31-2)可简化成

$$U_E \approx \frac{R_E}{R_N + R_E} U$$

$$U_N \approx \frac{R_N}{R_N + R_E} U$$

显然, $U_E + U_N = U$,且 $U_E/U_N = R_E/R_N$ 。与没有接地相比较,漏电设备上对地电压有所降低,但零线上却产生了对地电压。而且,由于 R_E 和 R_N 同在一个数量级,二者都可能远远超过安全电压,人触及漏电设备或触及零线都可能受到致命的电击。

另一方面,由于故障电流主要经 R_E 和 R_N 构成回路,如不计及带电体与外壳之间的过渡电阻,其大小为

$$I_E \approx \frac{U}{R_N + R_E}$$

由于 R_E 和 R_N 都是欧姆级的电阻,因此, I_E 不可能太大。这种情况下,一般的过电流保护装置不起作用,不能及时切断电源,使故障长时间延续下去。例如,当 $R_E = R_N = 4\Omega$ 时,故障电流只有 27.5A,能与之相适应的过电流保护装置是十分有限的。

正因为如此,一般情况下不能采用 TT 系统。除非采用其他防止间接接触电击的措施确有困难,且土壤

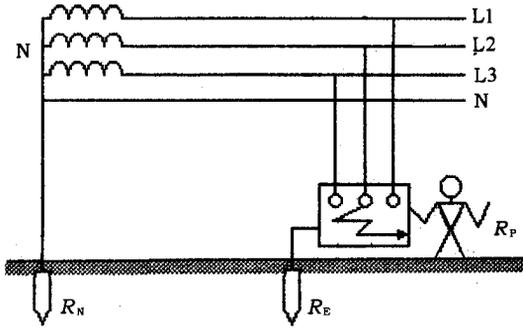


图 31-20 TT 系统

电阻率较低的情况下,才可考虑采用 TT 系统。而且在这种情况下,还必须同时采取快速切除接地故障的自动保护装置或其他防止电击的措施,并保证零线没有电击的危险。

(二) TT 系统的应用

采用 TT 系统时,被保护设备的所有外露导电部分均应同接向接地体的保护导体连接起来。采用 TT 系统应当保证在允许故障持续时间内漏电设备的故障对地电压不超过某一限值,即

$$U_E = I_E R_E \leq U_L$$

在第一种状态下,即在环境干燥或略微潮湿、皮肤干燥、地面电阻率高的状态下, U_L 不得超过 50V;在第二种状态下,即在环境潮湿、皮肤潮湿、地面电阻率低的状态下, U_L 不得超过 25V。故障最大持续时间原则上不得超过 5s。对于其他电压限值,允许故障持续时间不应超过表 31-4 所列和图 31-21 所示的数值。表 31-4 中,人体阻抗与人体电流两栏数值是与图 31-21 中的两组曲线相对应的。图 31-21 中, I_1, I_1, Z_1 曲线相应于第一种状态, I_2, I_2, Z_2 曲线相应于第二种状态。

表 31-4 允许故障持续时间

预期的接触电压/v	第一种状态			第二种状态		
	人体阻抗/ Ω	人体电流/mA	持续时间/s	人体阻抗/ Ω	人体电流/mA	持续时间/s
25	—	—	—	1 075	23	> 5
50	1 725	29	> 5	925	54	0.47
75	1 625	46	0.60	825	91	0.30
90	1 600	56	0.45	780	115	0.25
110	1 535	72	0.36	730	151	0.18
150	1 475	102	0.27	660	227	0.10
220	1 375	160	0.17	575	383	0.035
280	1 370	204	0.12	570	491	0.020
350	1 365	256	0.08	565	620	—
500	1 360	368	0.04	560	893	—

为实现上述要求,可在 TT 系统中装设剩余电流保护装置(漏电保护装置)或过电流保护装置,并优先采用前者。

TT 系统主要用于低压共用用户,即用于未装备配电变压器,从外面引进低压电源的小型用户。

二、IT 系统

IT 系统即保护接地系统,保护接地是最古老的安全措施。到目前为止,保护接地仍然是应用最广泛的安全措施之一,不论是交流设备还是直流设备,不论是高压设备还是低压设备,都采用保护接地作为必须的安全技术措施。

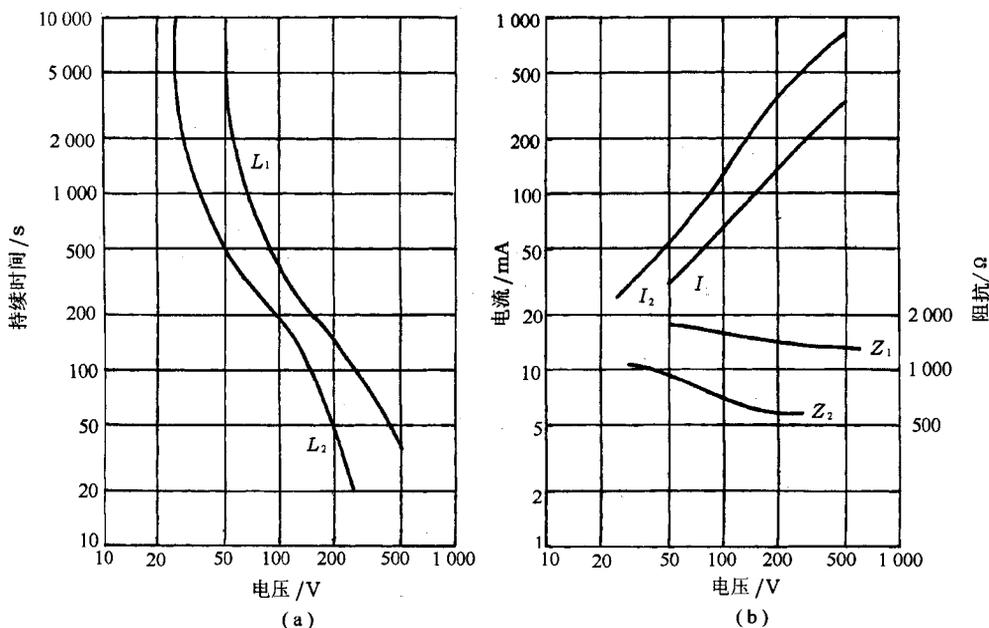


图 31-21 允许故障持续时间
(a)持续时间 (b)人体电流和人体阻抗

(一) 接地的基本概念

所谓接地,就是将设备的某一部位经接地装置与大地紧密连接起来。

1. 接地分类

按照接地性质,接地可分为正常接地和故障接地。正常接地又有工作接地和安全接地之分。工作接地指正常情况下有电流流过,利用大地代替导线的接地,以及正常情况下没有或只有很小不平衡电流流过,用以维持系统安全运行的接地。安全接地是正常情况下没有电流流过的起防止事故作用的接地,如防止触电的保护接地、防雷接地等。故障接地是指带电体与大地之间的意外连接,如接地短路等。

2. 接地电流和接地短路电流

凡从接地点流入地下的电流即属于接地电流。

系统一相接地可能导致系统发生短路,这时的接地电流叫做接地短路电流,如 0.23/0.4kV 系统中的单相接地短路电流。在高压系统中,接地短路电流可能很大,接地短路电流 500A 及以下的称小接地短路电流系统,接地短路电流大于 500A 的称大接地短路电流系统。

3. 流散电阻和接地电阻

接地电流入地下后自接地体向四周流散,这个自接地体向四周流散的电流叫做流散电流。流散电流在

土壤中遇到的全部电阻叫做流散电阻。

接地电阻是接地体的流散电阻与接地线的电阻之和。接地线的电阻一般很小,可以忽略不计,因此,在绝大多数情况下可以认为流散电阻就是接地电阻。

4. 对地电压和对地电压曲线

电流通过接地体向大地作半球形流散。因为半球面积与半径的平方成正比,所以半球的面积随着远离接地体而迅速增大,因此,与半球面积对应的土壤电阻随着远离接地体而迅速减小,至离接地体 20m 处,半球面积已达 $2\,500\text{m}^2$,土壤电阻已可小到忽略不计。这就是说,可以认为在离开接地体 20m 以外,电流不再产生电压降了。或者说,至远离接地体 20m 处,电压几乎降低为零。电气工程上通常说的“地”就是这里的地,而不是接地体周围 20m 以内的地。通常所说的对地电压,即带电体与大地之间的电位差,也是指离接地体 20m 以外的大地而言的。简单地说,对地电压就是带电体与电位为零的大地之间的电位差。显然,对地电压等于接地电流和接地电阻的乘积。

如果接地体由多根钢管组成,则当电流自接地体流散时,至电位为零处的距离可能超出 20m。

从以上讨论可以知道,当电流通过接地体流入大地时,接地体具有最高的电压。离开接地体后,电压逐渐降低,电压降落的速度也逐渐降低。

如果用曲线来表示接地体及其周围各点的对地电压,这种曲线就叫做对地电压曲线。图 31-22 所示的是单一接地体的对地电压曲线,显然,随着离开接地体,曲线逐渐变平,即曲线的陡度逐渐减小。

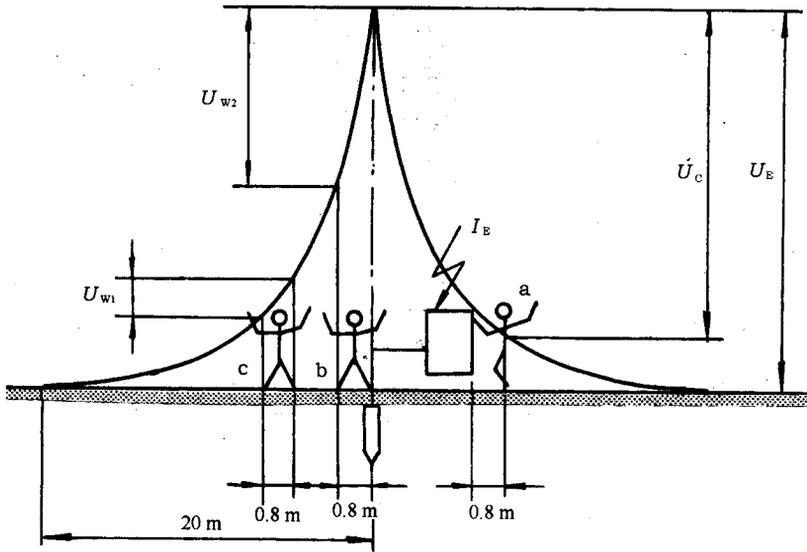


图 31-22 对地电压曲线

5. 接触电动势和接触电压

接触电动势是指接地电流自接地体流散,在大地表面形成不同电位时,设备外壳与水平距离 0.8m 处之间的电位差。

接触电压是指加于人体某两点之间的电压,如图 31-22 所示。当设备漏电,电流 I_E 自接地体流入地下时,漏电设备对地电压为 U_E ,对地电压曲线呈双曲线形状。a 触及漏电设备外壳,其接触电压即其手与脚之间的电位差。如果忽略人的双脚下面土壤的流散电阻,接触电压与接触电动势相等。图 31-22 中, a 的接触电压为 U_c 。如果不忽略脚下土壤的流散电阻,接触电压将低于接触电动势。

6. 跨步电动势和跨步电压

跨步电动势是指地面上水平距离为 0.8m(人的跨距)的两点之间的电位差。

跨步电压是指人站在流过电流的地面上,加于人的两脚之间的电压,如图 31-22 中的 U_w1 和 U_w2 。如果忽略脚下土壤的流散电阻,跨步电压与跨步电动势相等。人的跨步一般按 0.8m 考虑,大牲畜的跨步通常按

1.0~1.4m考虑。图 31-22 中 *b* 紧靠接地体位置,承受的跨步电压最大;*c* 离开了接地体,承受的跨步电压要小一些。如果不忽略脚下土壤的流散电阻,跨步电压也将低于跨步电动势。

(二) IT 系统的安全原理

图 31-23a 所示的在不接地配电网中,当一相碰壳时,接地电流 I_E 通过人体和配电网对地绝缘阻抗构成回路。如各相对地绝缘阻抗对称,即 $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$, 则运用戴维南定理可以比较简单地求出人体承受的电压和流经人体的电流。运用戴维南定理可以得出图 31-23 上所示的等值电路。等值电路中的电动势为网络二端开路,即没有人触电时该相对地电压。因为对称,该电压即相电压 U , 该阻抗即 $Z/3$ 。根据等值电路,不难求得人体承受的电压和流过人体的电流分别为

$$U_p = \frac{R_p}{R_p + Z/3} U = \frac{3R_p}{3R_p + Z} U \quad (31-3)$$

$$I_p = \frac{U}{R_p + Z/3} = \frac{3U}{3R_p + Z} \quad (31-4)$$

式中: U ——相电压;

U_p, I_p ——人体电压和人体电流;

R_p ——人体电阻;

Z ——各相对地绝缘阻抗。

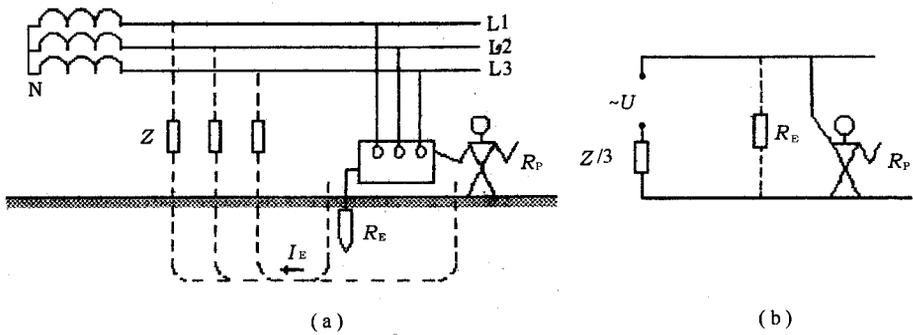


图 31-23 IT 系统安全原理

(a) 示意图 (b) 等效电路图

(图中虚线为有保护接地的情况)

绝缘阻抗 Z 是绝缘电阻 R 和分布电容 C 的并联阻抗。对于对地绝缘电阻较低,对地分布电容又很小的情况,由于绝缘阻抗中的容抗比电阻大得多,可以不考虑电容。这时,可简化式(31-3)和式(31-4),求得人体电压和人体电流分别为

$$U_p = \frac{3R_p}{3R_p + R} U$$

$$I_p = \frac{U}{3R_p + R}$$

对于对地分布电容较大,对地绝缘电阻很高的情况,由于绝缘阻抗中的电阻比容抗大得多,可以不考虑电阻。这时,也可简化复数运算,求得人体电压和人体电流分别为

$$U_p = \frac{3R_p}{\left| 3R_p - j \frac{1}{\omega C} \right|} U = \frac{3\omega R_p C U}{\sqrt{9\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}}$$

$$I_p = \frac{3\omega C U}{\sqrt{9\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}}$$

如果各相对地绝缘阻抗不对称,即 $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$, 则计算比较麻烦,这时,可用基尔霍夫定律计算。令中性点对地点压为 U_N , 根据基尔霍夫电压定律则可列出各相对地电压的相量为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_1 &= \dot{U}_1 - \dot{U}_N \\ \dot{U}'_2 &= \dot{U}_2 - \dot{U}_N \\ \dot{U}'_3 &= \dot{U}_3 - \dot{U}_N \end{aligned} \right\}$$

式中, $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$ 分别为变压器低压边输出的相电压。根据基尔霍夫电流定律可写出各电流之间的关系为

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 + \dot{U}_p = 0$$

再运用欧姆定律得到

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{Z_1} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_N}{Z_2} - \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{Z_3} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_p} = 0$$

整理后可求得

$$\dot{U}_N = \left(\frac{\dot{U}_1}{Z_1} + \frac{\dot{U}_2}{Z_2} + \frac{\dot{U}_3}{Z_3} + \frac{\dot{U}_3}{R_p} \right) \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{R_p} \right)$$

由以下各式不难知道,在不接地配电网中,单相电击的危险性决定于配电网电压、配电网对地绝缘电阻和人体电阻等因素。

【例题】设电网各相对地电压均为 220V,各相对地绝缘电阻均可视为无限大,各相对地电容均为 $0.55\mu\text{F}$,人体电阻为 2000Ω ,试判断单相电击的危险性。

解:在给定人体电阻的情况下判断人体触电的危险性,必须求出通过人体的电流。将上述条件代入对应的公式,可求得人体电压和人体电流分别为

$$U_p = \frac{3\omega R_p C U}{\sqrt{9\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}} = \left[\frac{3 \times (2\pi \times 50) \times 2000 \times (0.55 \times 10^{-6}) \times 220}{\sqrt{9 \times (2\pi \times 50)^2 \times 2000^2 \times (0.55 \times 10^{-6})^2 + 1}} \right] \text{V} = 158.3 \text{V}$$

$$I_p = \frac{U_p}{R_p} = \left(\frac{158.3}{2000} \right) \text{mA} = 79. \text{mA}$$

通过例题的计算可以说明,即使是在低压不接地配电网中,单相电击也有致命的危险。本章后面将要讲到,与同样电压的接地配电网相比,不接地配电网中单相电击的危险性较小。

如图 31-23 中虚线所示的那样,设备上有接地,情况将发生极大的变化。这时,接地电阻 R_E 与人体电阻 R_p 并联,一般情况下 $R_E \ll R_p$,漏电设备故障对地电压(即人体可能承受低压的极限)可表示为

$$U_E = \frac{3R_E}{3R_E + Z} \dot{U}$$

因为 $R_E \ll |Z|$,所以漏电设备故障对地电压大大降低。只要适当控制 R_E 的大小,即可限制该故障电压在安全范围之内。例如,在例题给定数据的条件下,如有 $R_E = 4\Omega$,则人体电压降低为 4.6V,人体电流减小为 2.3mA。

上面这种做法,即将在故障情况下可能呈现危险对地电压的金属部分经接地线、接地体同大地紧密地连接起来,把故障电压限制在安全范围以内的做法就称为保护接地。在不接地配电网中采用接地保护的系统,这种系统即为 IT 系统。字母 I 表示配电网不接地或经高阻抗接地,字母 T 表示电气设备外壳接地。

只有在不接地配电网中,由于其对地绝缘阻抗较高,单相接地电流较小,才有可能通过保护接地把漏电设备故障对地电压限制在安全范围之内。

(三) 保护接地的应用范围

1. 各种不接地配电网

保护接地适用于各种不接地配电网,包括交流不接地配电网和直流不接地配电网,也包括低压不接地配电网和高压不接地配电网。在这类配电网中,凡由于绝缘损坏或其他原因而可能呈现危险电压的金属部分,除另有规定外,均应接地。它们主要包括:

- (1) 电机、变压器、电器、携带式或移动式用电器具的金属底座和外壳;
- (2) 电气设备的传动装置;
- (3) 屋内外配电装置的金属或钢筋混凝土构架,以及靠近带电部分的金属遮栏和金属门;
- (4) 配电、控制、保护用的屏(柜、箱)及操作台等的金属框架和底座;
- (5) 交、直流电力电缆的金属接头盒、终端头和膨胀器的金属外壳和电缆的金属护层,可触及的金属保护

管和穿线的钢管；

- (6) 电缆桥架、支架和井架；
- (7) 装有避雷线的电力线路杆塔；
- (8) 装在配电线路杆上的电力设备；
- (9) 在非沥青地面的居民区内,无避雷线的小接地短路电流架空电力线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔；
- (10) 电除尘器的构架；
- (11) 封闭母线的外壳及其他裸露的金属部分；
- (12) 六氟化硫封闭式组合电器和箱式变电站的金属箱体；
- (13) 电热设备的金属外壳；
- (14) 控制电缆的金属护层。

2. 电气设备的某些金属部分

电气设备下列金属部分,除另有规定外,可不接地：

(1) 在木质、沥青等不良导电地面,无裸露接地导体的干燥的房间内,交流额定电压 380V 及以下,直流额定电压 440V 及以下的电气设备的金属外壳,但当有可能同时触及上述电气设备外壳和已接地的其他物体时,则仍应接地。

(2) 在干燥场所,交流额定电压 127V 及其以下,直流额定电压 110V 及其以下的电气设备的外壳。

(3) 安装在配电屏、控制屏和配电装置上的电气测量仪表、继电器和其他低压电器等的外壳,以及当发生绝缘损坏时不会在支持物上引起危险电压的绝缘子的金属底座等。

(4) 安装在已接地金属框架上的设备,如穿墙套管等(但应保证设备底座与金属框架接触良好)。

(5) 额定电压 220V 及其以下的蓄电池室内的金属支架。

(6) 由发电厂、变电所和工业、企业区域内引出的铁路轨道。

(7) 与已接地的机床、机座之间有可靠电气接触的电动机和电器的外壳。

此外,木结构或木杆塔上方的电气设备的金属外壳一般也不必接地。

(四) 接地电阻的确定

从保护接地的原理可以知道,保护接地的基本原理是限制漏电设备外壳对地电压在安全限值 U_L 以内,即漏电设备对地电压 $U_E = I_E R_E \leq U_L$ 。各种保护接地的接地电阻就是根据这个原则来确定的。

1. 低压设备接地电阻

在 380V 不接地低压系统中,单相接地电流很小,为限制设备漏电时外壳对地电压不超过安全范围,一般要求保护接地电阻 $R_E \leq 4\Omega$ 。

当配电变压器或发电机的容量不超过 100kVA 时,由于配电网分布范围很小,单相故障接地电流更小,可以放宽对接地电阻的要求,取只 $R_E \leq 10\Omega$ 。

2. 高压设备接地电阻

(1) 小接地短路电流系统。如果高压设备与低压设备共用接地装置,要求设备对地电压不超过 120V,其接地电阻为

$$R_E \leq \frac{120}{I_E}$$

式中： R_E ——接地电阻 Ω ；

I_E ——接地电流, A。

如果高压设备单独装设接地装置,设备对地电压可放宽至 250V,其接地电阻为

$$R_E \leq \frac{250}{I_E}$$

小接地短路电流系统高压设备的保护接地电阻除应满足式(31-5)和式(31-6)的要求外,还不应超过 10Ω 。以上两个式子中的 I_E 为配电网的单相接地电流,应根据配电网的特征计算和确定。

(2) 大接地短路电流系统。在大接地短路电流系统中,由于接地短电流很大,很难限制设备对地电压不

超过某一范围,而是靠线路上的速断保护装置切除接地故障。要求其接地电阻为

$$R_E \leq \frac{2000}{I_E}$$

但当接地短路电流 $I_E > 4000\text{A}$ 时,可采用

$$R_E \leq 0.5\Omega$$

3. 发电厂和区域变电站的接地电阻

发电厂和区域变电站的接地具有综合接地的性质,即发电机和变压器的工作接地,其他设备的保护接地(或重复接地)以及防雷接地共用的一套接地装置。随着发电厂或变电所容量的不同,接地短路电流在很大的范围内变化,使得对地电压也在很大的范围内变化,因此,接地电阻的大小可能不足以说明接地装置所能保证的安全程度,这就有必要从限制接触电压和跨步电压的角度去要求。

在小接地短路电流系统中,发生单相接地时,一般不迅速切除故障。为了安全,要求接触电压和跨步电压不超过 50V 。考虑到人脚底下土壤的电阻,接触电动势和跨步电动势大于接触电压和跨步电压。如果用一个半径为 8cm 的圆盘代替人的一只脚,则一只脚的接地电阻可按 3ρ 计算。

对于接触电动势,两脚并联,接地电阻为 $3\rho/2$;对于跨步电动势,两脚串联,接地电阻为 6ρ 。如果人体电阻按 1500Ω 考虑,则两脚并联和两脚串联时脚底下的电压降分别为

$$U_{cp} = \frac{50}{1500} \times \frac{3}{2} \rho = 0.05\rho$$

$$U_{ws} = \frac{50}{1500} \times 6\rho = 0.2\rho$$

式中: U_{cp} ——两脚并联电压降(接触), V ;

U_{ws} ——两脚串联电压降(跨步), V ;

ρ ——土壤电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

由此得到允许的接触电动势和跨步电动势分别为

$$E_c = 50 + 0.05\rho$$

$$E_w = 50 + 0.2\rho$$

式中: E_c ——接触电动势, V ;

E_w ——跨步电动势, V ;

ρ ——土壤电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

在大接地短路电流系统中,大接地保护保护装置动作很快,故障时间很短。这时,人体允许电流可按下式引起心室动的电流来考虑,即

$$I = \frac{165}{\sqrt{t}}$$

式中: I ——引起心室动的电流, mA ;

t ——电流通过人体的时间, s 。

如果人体电阻按 1500Ω 考虑,则接触电压和跨步电压不得超过

$$U_c > \frac{165}{\sqrt{t}} \times \frac{1}{1000} \times 1500 = \frac{247.5}{\sqrt{t}} \approx \frac{250}{\sqrt{t}}$$

$$U_w > \frac{250}{\sqrt{t}}$$

式中: U_c ——接触电压, V ;

U_w ——跨步电压, V ;

t ——电流通过人体的时间, s 。

考虑到人脚底下土壤的电阻,可得到允许的接触电动势和跨步电动势分别为

$$E_c = \frac{250 + 0.25\rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_w = \frac{250 + \rho}{\sqrt{l}}$$

按照接触电动势和跨步电动势的允许值,可以对接地装置提出适当的要求。

4. 架空线路和电缆线路的接地电阻

小接地短路电流系统中,无避雷线的高压电力线路在居民区的钢筋混凝土杆直接地,金属杆塔应接地,其接地电阻不宜超过 30Ω 。

中性点直接接地的低压系统的架空线路和高、低压共杆架设的架空线路,其钢筋混凝土杆的铁横担和金属杆应与零线连接,钢筋混凝土的钢筋宜与零线连接。与零线连接的电杆可不另做接地。

沥青路面上的高、低压线路的钢筋混凝土和金属杆塔以及已有运行经验的地区,可不另设人工接地装置,钢筋混凝土的钢筋、铁横担和金属杆塔,也可不与零线连接。

三相三芯电力电缆两端的金属外皮均应接地。

变电所电力电缆的金属外皮可利用主接地网接地。与架空线路连接的单芯电力电缆进线段,首端金属外皮应接地。如果在负荷电流下,末端金属外皮上的感应电压超过 $60V$,末端宜经过接地器或间隙接地。

在高土壤电阻率地区,接地电阻难以达到要求数值时,接地电阻允许值可以适当提高。例如,低压设备接地电阻允许达到 $10 \sim 30\Omega$,小接地短路电流系统中高压设备接地电阻允许达到 30Ω ,发电厂和区域变电站的接地电阻允许达到 15Ω 等。

(五) 绝缘监视

在不接地配电网中,发生一相故障接地时,其他两相对地电压升高,可能接近相电压,这会增加绝缘的负担,增加触电的危险。这时,如某设备另一相漏电,即使该设备上有合格的保护接地,也不可能将其故障电压限制在安全范围以内。而且,不接地配电网中一相接地的接地电流很小,线路和设备还能继续工作,故障可能长时间存在。这对安全是非常不利的。因此,在不接地配电网中,需要对配电网进行绝缘监视(接地故障监视),并设置声光双重报警信号。

低压配电网的绝缘监视,是用三只规格相同的电压表来实现的,接线如图 31-24 所示。配电网对地电压正常时,三相平衡,三只电压表读数均为相电压;当一相接地时,该相电压表读数急剧降低,另两相则显著升高。即使系统没有接地,而是一相或两相对地绝缘显著恶化时,三只电压表也会给出不同的读数,引起工作人员的注意。为了不影响系统中保护接地的可靠性,应当采用高内阻的电压表。

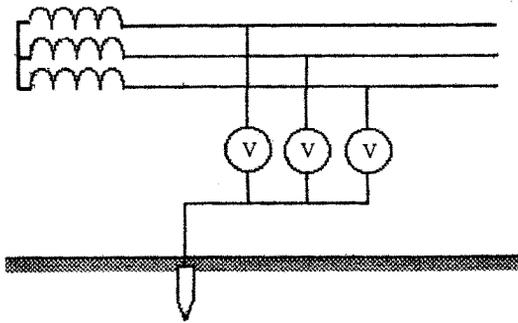


图 31-24 低压配电网绝缘监视

高压配电网的绝缘监视如图 31-25 所示。监视仪表(器)通过电压互感器同配电网连接。互感器有两组低压线圈:一组接成星形,供绝缘监视的电压表用;另一组接成开口三角形,开口处接信号继电器。正常时,三相平衡,三只电压表读数相同,三角形开口外电压为零,信号继电器 KS 不动作。当一相接地或一、两相绝缘明显恶化时,三只电压出现不同读数,同时三角形开口处出现电压,信号继电器动作,发出信号。

这种绝缘监视装置是以监视三相对地平衡为基础的,对于一相接地故障很敏感,但对三相绝缘同时恶化,即三相绝缘同时降低的故障是没有反映的。其另一缺点是当三相绝缘都在安全范围以内,但相互差别较大时,会给出错误的指示或信号。由于这两种情况很少发生,上述绝缘监视装置还是可用的。

在低压配电网中,为了比较准确地检测配电网对地绝缘情况,可以借用专用方法测量绝缘阻抗。图 31

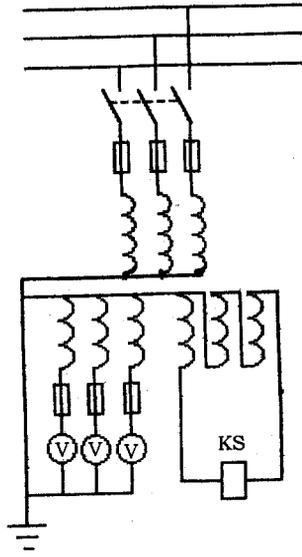


图 31-25 高压配电网绝缘监视

-26 表示一种无源测量装置的基本线路。按下 SB1 时,测得该相对地电压 U;按下 SB2 时,测得该相接地电流 I,由此可得三相配电网对地导纳近似为

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{I}{U}$$

如接通 SA1,重复上述测定,通过电压表读数 U_G 和电流表读数 I_G 可求得这时三相电网对地导纳近似为

$$Y_G = \sqrt{(G + G_G)^2 + B^2} = \frac{I_G}{U_G}$$

而接通 SA2,重复上述测定,可求得

$$Y_B = \sqrt{G^2 + (B + B_B)^2} = \frac{I^B}{U^B}$$

比较上列各项可求得

$$G = \frac{Y_G^2 - Y^2 - G_G^2}{2G_G}$$

$$B = \sqrt{Y^2 - G^2}$$

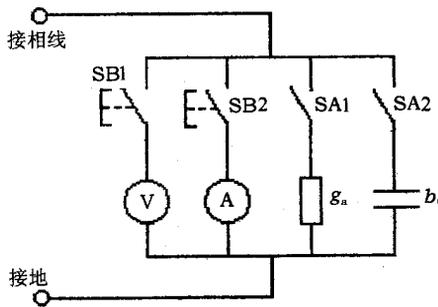


图 31-26 配电网绝缘阻抗无源测量

图 31-27 表示有源测量装置的基本线路。按电压表和电流表读数,经适当转换,即可求得绝缘阻抗值。如在人为电流回路中加入整流和滤波环节,则可测得绝缘电阻。为了提高灵敏度,可经桥式整流后用直流毫安表测量电流或直流流比计式仪表测量电流。

不接地配电网两相故障接地时,原则上应符合 TT 系统的要求。不接地配电网两相故障接于同一接地装

置时 原则上应符合 TN 系统的要求。

(六) 过电压的防护

配电网中出现过电压的原因很多。由于外部原因造成的有雷击过电压、电磁感应过电压和静电感应过电压 ;由内部原因造成的有操作过电压、谐振过电压以及来自变压器高压侧的过渡电压或感应电压。

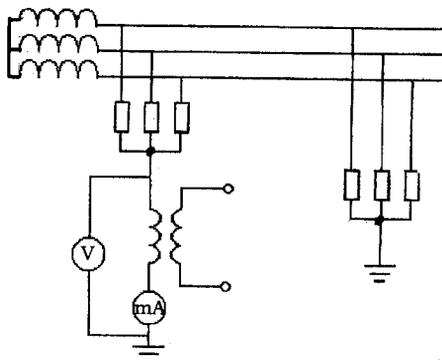


图 31-27 配电网绝缘阻抗有源测量

对于不接地配电网 ,由于配电网与大地之间没有直接的电气连接 ,在意外情况下可能产生很高的对地电压。例如 ,当高压一相与低压中性点短接时(见图 31-28a) ,低压侧对地电压将大幅度升高。如该变压器为 10/0.4kV 的变压器 ,采用 $Y_{yn0}(Y/Y_0-12)$ 接法 ,则低压中性点对地电压 U_{N0} 升高到将近 5800V。由电压相量图(见图 31-28b)可知 ,其他各相对地电压 U_{1E} 、 U_{2E} 、 U_{3E} 也将升高到略低于或略高于 5800V。这将给低压系统的安全运行造成极大的威胁。

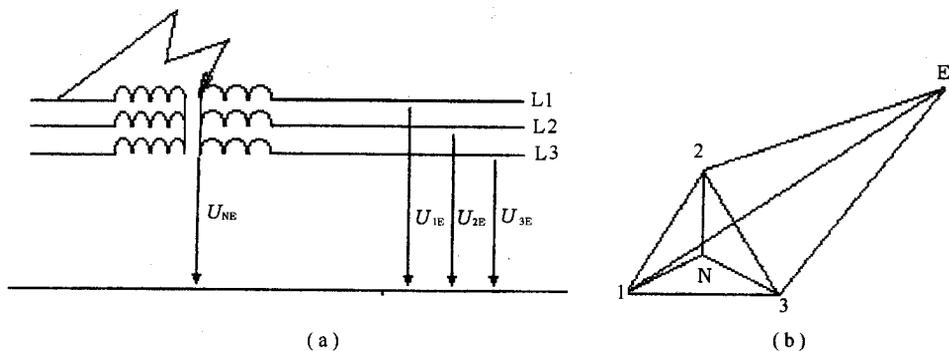


图 31-28 不接地电网高压窜低压

(a) 示意图 (b) 相量图

为了减轻过电压的危险 ,在不接地低压配电网中 ,应当如图 31-29 所示的那样 ,把低压配电网的中性点或者一相经击穿保险器接地。

击穿保险器主要由两片黄铜电极夹以带小孔的云母片组成 ,其击穿电压大多不超过额定电压的 2 倍。正常情况下 ,击穿保险器处在绝缘状态 ,配电系统不接地 ;当过电压产生时 ,云母片带孔部分的空气隙被击穿 ,故障电流经接地装置流入大地。这个电流即高压系统的接地短路电流 ,它可能引起高压系统过电流保护装置动作 ,切除故障 ,断开电源。如果这个电流不大 ,不足以引起保护装置动作 ,则可以通过选定适当的接地电阻值控制低压系统电压升高不超过 120V。为此 ,接地电阻应为

$$R_E \leq \frac{120}{I_{HE}}$$

式中 R_E ——接地电阻 Ω ;

I_{HE} ——高压系统单相接地短路电流 ,

通常情况下, $R_E \leq 4 \Omega$ 是能满足上述要求的。

正常情况下, 击穿保险器必须保持绝缘良好。否则, 不接地配电网变成接地配电网, 用电设备上的保护接地将不足以保证安全。因此, 对击穿保险器的状态应经常检查, 或者如图 31-29 所示, 接入两只相同的高内阻电压表进行监视。正常时, 两只电压表的读数各为相电压的一半。如果击穿保险器内部短路, 一只电压表的读数降低至零, 而另一只电压表的读数上升至相电压。必要时, 防护装置应当设置监视击穿保险器绝缘的声、光双重报警信号。为了不降低系统保护接地的可靠性, 监视装置应具有很高的内阻。

为了抑制可能的过电压振荡, 可在不接地配电网的电源中性点或人为中性点与大地之间接一阻抗值为 5~6 倍相电压电压值的阻抗。

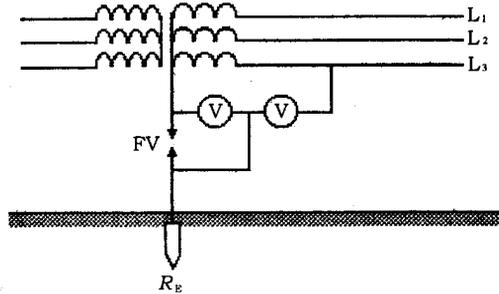


图 31-29 过电压保护及监视

三、TN 系统

TN 系统即保护接零系统。由于保护接零和保护接地都是防止间接接触电击的安全措施, 做法上又存在一些相似之处, 因此, 有些人没有严格区分这两种措施, 不能鉴别某些不妥当的说法和做法。“保护接零”一词在我国已经得到普及。这一名词有利于明确区分不接地配电网中的保护接地, 还有利于区分中性线和零线, 有利于区分工作零线和保护零线, 有其独特的科学性。

(一) TN 系统的安全原理及类别

TN 系统中的字母 N 表示电气设备在正常情况下不带电的金属部分与配电网中性点之间金属性的连接, 亦即与配电网保护零线(保护导体)的紧密连接。这种做法就是保护接零。或者说, TN 系统就是配电网低压中性点直接接地, 电气设备接零的保护接零系统。

保护接零的原理如图 31-30 所示。当某相带电部分碰连设备外壳(即外露导电部分)时, 通过设备外壳形成该相对零线的单相短路, 短路电流 I_{SS} 能促使线路上的短路保护元件迅速动作, 从而把故障部分设备断开电源, 消除电击危险。

在三相四线配电网中, 应当区别工作零线和保护零线。前者即中性线, 用 N 表示; 后者即保护导体, 用 PE 表示。如果一根线既是工作零线又是保护零线, 则用 PEN 表示。

TN 系统分为 TN-S、TN-C-S、TN-C 三种方式, 如图 31-31 所示。TN-S 系统的保护零线是与工作零线完全分开的; TN-C-S 系统干线部分的前一部分保护零线是与工作零线共用的; TN-C 系统的干线部分保护零线是与工作零线完全共用的。

(二) TN 系统速断和限压的要求

在接零系统中, 单相短路电流越大, 保护元件动作越快; 反之, 动作越慢。单相短路电流决定于配电网电压和相零线回路阻抗。稳态单相短路电流 I_{SS} 按下式计算:

$$I_{SS} = \frac{U}{Z_L + Z_{PE} + Z_E + Z_T} = \frac{U}{Z}$$

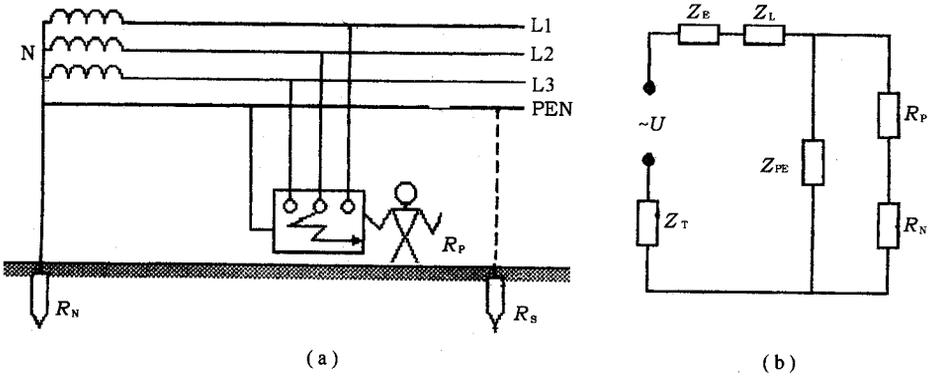


图 31-30 保护接零原理

(a)原理图 (b)等效电路

式中： U ——配电网相电压；

Z_L ——相线阻抗；

Z_{PE} ——保护零线阻抗；

Z_E ——回路中电器元件阻抗；

Z_T ——变压器计算阻抗；

Z ——相零线回路阻抗， $Z = Z_L + Z_{PE} + Z_E + Z_T$ 。

显然，相零线回路阻抗不能太大，以保证发生漏电时有足够的单相短路电流，迫使线路上的保护元件迅速动作。

就电流对人体的作用而言，电流通过人体的持续时间越长，致命的危险性越大，引起心室颤动所需要的电流越小。因此确定速断保护的動作时间应当同时考虑可能的接触电压。

认为保护接零只起过电流速断保护作用，而不能降低漏电设备对地电压也是不对的。由接零等值电路可以求出保护装置动作前漏电设备对地电压为

$$\dot{U}_E \approx \frac{R_P}{R_P + R_N} \dot{I}_{SS} Z_{PE} \approx \frac{R_P}{R_P + R_N} \frac{Z_{PE}}{Z} \dot{U} = \frac{R_P}{R_P + R_N} \frac{Z_{PE}}{Z_T + Z_E + Z_L + Z_{PE}} \dot{U}$$

如线路截面较小，保护零线与相线紧邻敷设。由于电抗比较小，其范围也比较容易确定，对地电压可按下式简化计算：

$$U_E = K_c U \frac{R_{PE}}{R_L + R_{PE}}$$

式中： R_L ——相线电阻；

R_{PE} ——保护线电阻；

K_c ——计算系数， $K_c = 0.6 \sim 1$ 。

如令 $m = R_{PE}/R_L$ ，则上式可简化为

$$U_E = C_u \frac{m}{1+m} U$$

如导体材质相同，则 m 即为相线截面与保护线截面之比。对于电缆和绝缘导线， $m \approx 1 \sim 3$ 。应当指出，与不接地配电网不同，在这里欲将漏电设备对地电压限制在某一安全范围内是困难的。例如，在相电压 $U = 220V$ 的条件下，当 $m = 1.6667$ 时， $U_E = 110V$ ；当 $m = 1.0465$ 时， $U_E = 90V$ ；当 $m = 0.7426$ 时， $U_E = 75V$ 等。这些数值都远远超过安全电压值。

由于地面对地电压曲线分布规律随接地体特征及其施工方式而异，发生触电的位置又受工艺过程等因素的影响，最大接触电压可能难以确定，也就无法利用。为此，国家标准以额定电压为依据作了一个比较简

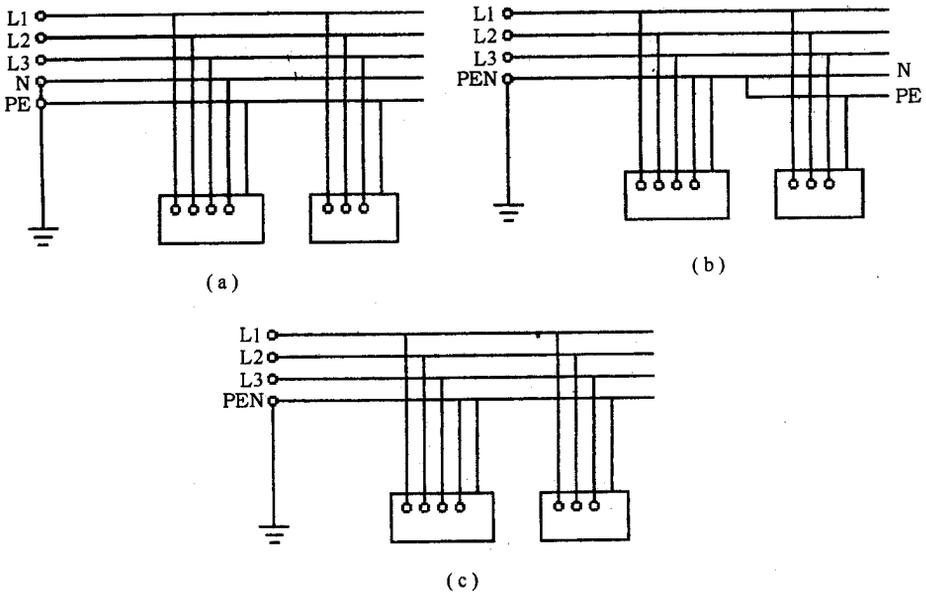


图 31-31 TN 系统

(a) TN-S 系统 (b) TN-C-S 系统 (c) TN-C 系统

明的规定:对于相线对地电压 220V 的 TN 系统,手持式电气设备和移动式电气设备末端线路或插座回路的短路保护元件应保证相、零线短路持续时间不超过 0.4s。配电线路或固定式电气设备的末端线路应保证短路持续时间不超过 5s。后者之所以放宽规定是因为这些线路不常发生故障,而且接触的可能性较小,即使触电也比较容易摆脱的缘故。如配电箱引出的线路中,除固定设备的线路外,还有手持式、移动式设备或插座线路,短路持续时间也不应超过 0.4s。否则,应采取能将故障电压限制在许可范围内的等电位联结措施。这里,5s 的时限主要是从热稳定的要求考虑的,只是个时间限值,而非人为延时,这些规定与国际标准基本符合。

为了实现保护接零要求,可以采用一般过电流保护装置或剩余电流保护装置。

(三) 保护接零的应用范围

保护接零用于中性点直接接地的 220/380V 三相四线配电网。在这种配电网中,接地保护方式(TT 系统)难以保证安全,不能轻易采用。在这种系统中,凡因绝缘损坏而可能呈现危险,对地电压的金属部分均应接零。要求接零和不要求接零的设备和部位与保护接地的要求大致相同。

TN-S 系统可用于有爆炸危险、火灾危险性较大或安全要求较高的场所,宜用于独立附设变电站的车间。TN-C-S 系统宜用于厂内设有总变电站,厂内低压配电的场所及民用楼房。TN-C 系统可用于无爆炸危险、火灾危险性不大、用电设备较少、用电线路简单且安全条件较好的场所。

在接地的三相四线配电网中,应当采取接零保护。但在现实中,往往会发现如图 31-32 所示的接零系统中个别设备只接地、不接零的情况,即在 TN 系统中个别设备构成 TT 系统的情况。这种情况是不安全的。在这种情况下,当接地的设备漏电时,该设备和保护零线(包括所有接零设备)对地电压分别为

$$U_E = \frac{R_E}{R_N + R_E} U$$

$$U_N = U - U_E = \frac{R_N}{R_N + R_E} U$$

式中, R_E 为该设备的接地电阻; R_N 为工作接地与零线上所有其他接地电阻的并联值。这时的故障电流不太大,不一定能促使短路保护元件动作而切断电源,危险状态将在大范围内持续存在。因此,除非接地的设备或区段装有快速切断故障的保护装置,否则,不得在 TN 系统中混用 TT 方式。

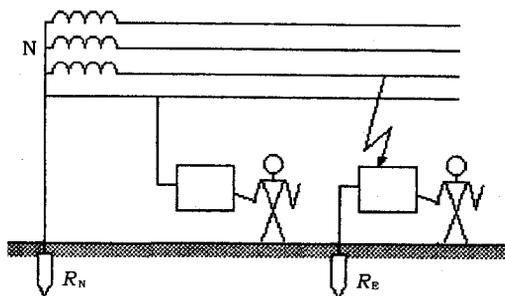


图 31-32 保护方式选择

如果将接地设备的外露金属部分再同保护零线连接起来,构成 TN 系统,其接地成为后面将要介绍的重复接地,这对安全是有益无害的。

在同一建筑物内,如有中性点接地和中性点不接地的两种配电方式,则应分别采取保护接零措施和保护接地措施。在这种情况下,允许二者共用一套接地装置。

(四) 重复接地

重复接地指零线上除工作接地以外的其他点的再次接地。按照国际电工委员会的提法,重复接地是为了保护导体在故障时尽量接近大地电位的在其他附加点的接地。其实质与上述的定义基本上是一致的。重复接地是提高 TN 系统安全性能的重要措施。

1. 重复接地的作用

接地总是会限制对地电压的,但如果仅仅这么说,那就不太具体了。为此,现从以下几方面详细说明重复接地的作用。

(1) 减轻零线断开或接触不良时电击的危险性。在很多情况下,保护零线(PE 线、PEN 线)断开或接触不良的可能性是不能完全排除的。图 31-33a 表示没有重复接地的接零系统零线断线。如图所示,当零线断开,后方又有一相碰壳时,故障电流经过触及设备的人体和工作接地构成回路。因为人体电阻比工作接地电阻 R_N 大得多,所以在断线处以后,人体几乎承受全部相电压。

如图 31-33b 所示,零线后方有重复接地 R_S ,情况就不一样了。这时,较大的故障电流经过 R_S 和 R_N 构成回路。在断线处以后,设备对地电压 $U_{SE} = I_E R_S$;在断线处以前,设备对地电压 $U_{NE} = I_E R_N$ 。因为 U_{SE} 和 U_{NE} 都小于相电压,所以事故严重程度一般都减轻了一些。图 31-33 中的下方是相应情况下的电位分布曲线。

在保护零线断线的情况下,即使没有设备漏电,而是三相负荷不平衡,也会给人身安全造成很大的威胁。在这方面,重复接地有减轻危险或消除危险的作用。根据规定,在中性点直接接地的配电系统中,单相 220V 用电设备应均匀地分配在三相线路,由负荷不平衡引起的中性线电流一般不得超过变压器额定电流的 25%。如果零线完好,这 25% 的不平衡电流只在零线上产生很小的电压降,对人身没有伤害。但是,如果零线断裂,断线处以后的零线可能会呈现数十伏乃至接近相电压的危险电压。如图 31-34a 所示,在两相停止用电,仅一相保持用电的特殊情况下,如果零线断线,电流经过该相负荷、人体、工作接地构成回路。因为人体电阻较大,所以大部分电压降在人体上,造成触电危险。如果像图 31-34b 那样,零线或设备上装有重复接地,则设备对地电压即为重复接地上的电压降。一般情况下, R_S 与负载电阻或 R_N 比较不会是太大的数值,其电压降只是电源相电压的一部分,从而减轻或消除了触电的危险性。例如,假定该相负荷为 1kW,则其电阻 $R_L = 48.4\Omega$;再假定 $R_N = 4\Omega$, $R_S = 10\Omega$,可求得对地电压为

$$U_E = I_E R_S = \frac{R_E}{R_N + R_L + R_S} U = \left(\frac{10}{4 + 48.4 + 10} \times 220 \right) V \approx 35V$$

这个电压对人来说是没有太大危险的。

在零线断线情况下,重复接地一般只能减轻零线断线时触电的危险,而不能完全消除触电的危险。

应当指出,在 TN-S 系统中,工作零线(N 线)断线也是不安全的。这时,如果三相负荷不平衡,负载中性点将发生“漂移”。若电源相电压分别为 U_u, U_v, U_w ,负载阻抗分别为 Z_u, Z_v, Z_w ,则运用基尔霍夫定律不难

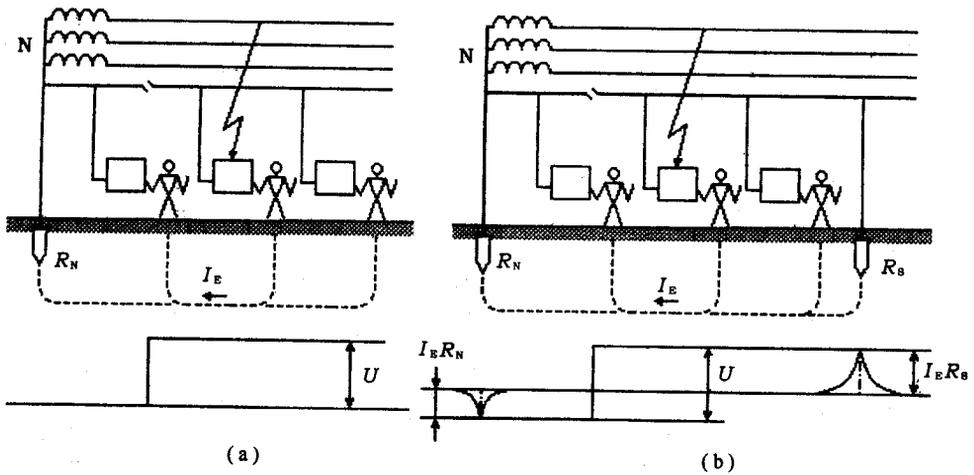


图 31-33 零线断线与设备漏电

(a)无重复接地 (b)有重复接地

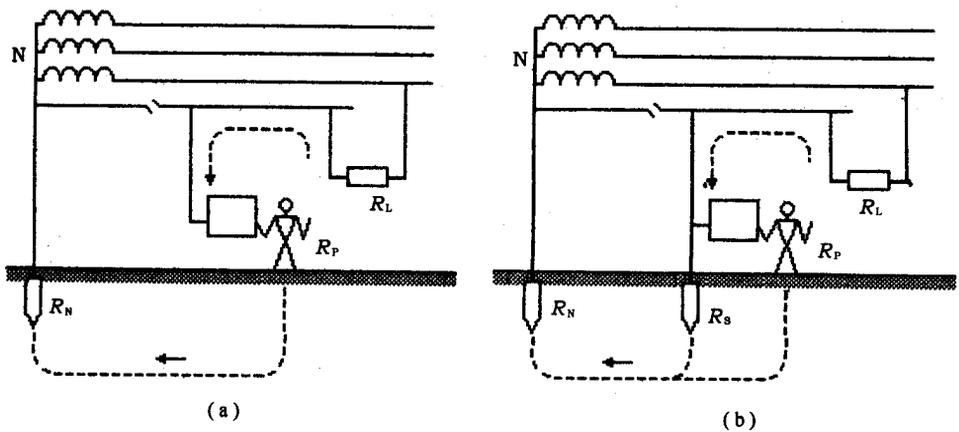


图 31-34 零线断线与不平衡负荷

(a)无重复接地 (b)有重复接地

求得负载中性点和各相电压分别为

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \left(\frac{\dot{U}_u}{Z_u} + \frac{\dot{U}_v}{Z_v} + \frac{\dot{U}_w}{Z_w} \right) \left(\frac{1}{Z_u} + \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{Z_w} \right) \\ \left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_u - \dot{U}_N \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_v - \dot{U}_N \\ \dot{U}_3 &= \dot{U}_w - \dot{U}_N \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

设 $Z_u = 2Z_v = 5Z_w$, $U_u = U_v = U_w = 220\text{V}$, 则可按上式求得 $\dot{U}_N = 99.15 \angle 113.9^\circ \text{V}$, $\dot{U}_1 = 297.46 \angle -139^\circ \text{V}$, $\dot{U}_2 = 265.20 \angle -99.0^\circ \text{V}$ 和 $\dot{U}_3 = 126.02 \angle -109.1^\circ \text{V}$, 其相量图如图 31-35 所示。显然, 第一相过电压严重, 用电设备有烧坏的可能; 第二相过电压也比较严重, 若持续时间延长, 用电设备也有烧坏的可能; 第三相电压不足, 用电设备不可能正常工作。毫无疑问, 这种运行状态是危险的。应当指出, 如果是 TN-C-S 系统或 TN-C 系统的 PEN 线, 其上有重复接地, 则上述故障带来的危险将大大减轻。这时, 负载中性点对地电压为

$$\dot{U}_N = \left(\frac{\dot{U}_u}{Z_u} + \frac{\dot{U}_v}{Z_v} + \frac{\dot{U}_w}{Z_w} \right) \left(\frac{1}{Z_u} + \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{Z_w} + \frac{1}{Z_N} \right)$$

式中： Z_N ——负载中性点与电源中性点之间的阻抗。

该阻抗为工作接地电阻与重复接地电阻之和，即 $Z_N = R_N + R_S$ 。如设 Z_U, Z_V, Z_W 为纯电阻，且 $R_U = 2R_V = 5R_W = 100\Omega$ 和 $U_U = U_V = U_W = 220V$ ，如有 $R_N = 4\Omega, R_S = 7\Omega$ 则可计算得到 $\dot{U}_N = 44.07\angle 133.9^\circ V, \dot{U}_1 = 252.52\angle -7.2^\circ V, \dot{U}_2 = 236.05\angle -109.7^\circ V$ 和 $U_3 = 177.54\angle 116.6^\circ V$ 。显然，电压不平衡受到了抑制，危险程度降低。当然，在工作零线与保护零线合用的情况下，工作零线断线就是保护零线断线，必将有触电的危险性。例如，在上面这个例子中，由于 $U_N = 44.07V, R_N = 4\Omega, R_S = 7\Omega$ 将使断线后段的零线和接零设备带有 28.04V 的对地电压，同时使断线前段的零线和接零设备带有 16.03V 的对地电压。电压虽然不高，但在高度触电危险场所或特别触电危险场所，仍不能排除由电击引起致命伤害的可能性；另一方面，如果在场的所有爆炸性混合物，上述故障电压引起的放电火花将有很大的引燃危险。

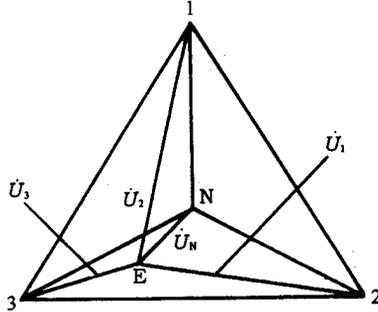


图 31-35 负载中性点‘漂移’图

(2) 降低漏电设备的对地电压。同一般接地措施一样，重复接地也有降低故障对地电压（等化对地电位）的作用。

图 31-36a 是没有装设重复接地的保护接零系统，当发生碰壳短路时，线路保护元件应能迅速动作，切断电源。但是，如因某种原因，保护系统失灵，则危险状态将延续下来。即使保护接零系统没有失灵，从发生碰壳短路起，到保护元件动作完毕止的一段时间内，设备外是带电的。该设备对地电压为

$$U_E = \left| \frac{Z_{PE}}{Z_L + Z_{PE}} \right| U$$

式中： Z_{PE} ——中性点至故障点间零线阻抗；

Z_L ——中性点至故障点间相线阻抗。

显然，零线阻抗越大，设备对地电压也越高。这个电压通常高于安全电压。应当指出，企图用降低零线阻抗的办法来获得设备上的安全电压是不现实的。例如，如果要求设备对地电压 $U_E = 50V$ ，则在 220/380V 系统中，相线电压降为 $(220 - 50)V = 170V$ ，零线阻抗与相线阻抗之比为 $50:170 \approx 1:3.4$ ，即零线阻抗约为相线的 1/3.4，或者说零线导电能力应当为相线导电能力的 3.4 倍。这显然是很不经济，也是不现实的。当然，只要条件允许，加大零线总是有利于安全的。正因为如此，通常总是把建筑用金属结构、生产用金属装备同保护零线连接起来，实现等电位联结。

在上述情况下，如果像图 31-36b 那样加上重复接地 R_S ，则触电危险可以减轻。这时，短路电流大部分通过零线成回路，导致漏电设备对地电压降低，而中性点对地电压升高，二者分别为

$$U_E = \frac{R_S}{R_S + R_N} \left| \frac{Z_{PE}}{Z_L + Z_{PE}} \right| U$$

$$U_N = \frac{R_S}{R_S + R_N} \left| \frac{Z_{PE}}{Z_L + Z_{PE}} \right| U$$

应当注意，迅速切断电源是保护接零的基本保护方式。如不能实现这一基本保护方式，即使有重复接地，往往也只能减轻危险，而难以消除危险，而且危险范围还有所扩大，见图 31-33 和图 31-36 中下方的电位分布曲线。

(3) 缩短漏电故障持续时间。因为重复接地和工作接地构成零线的并联分支，所以当发生短路时能增大

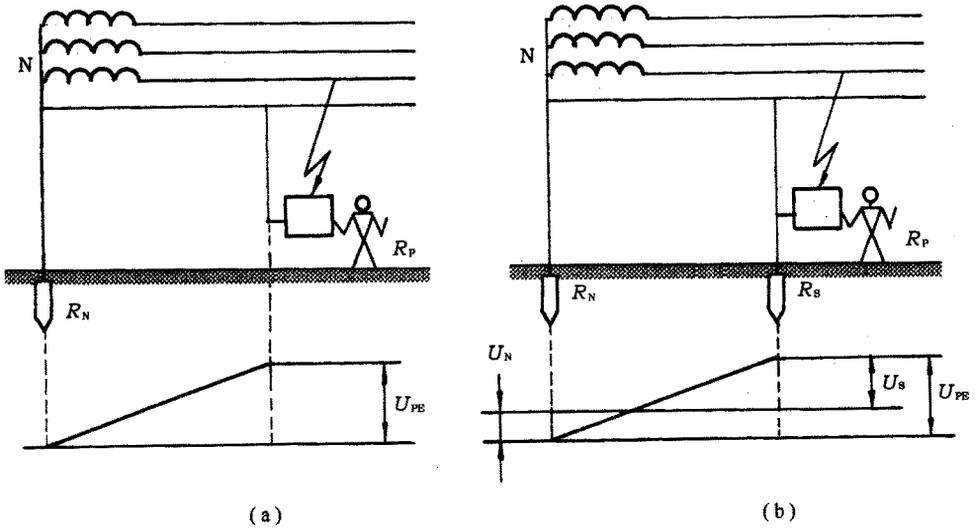


图 31-36 重复接地降低设备漏电对地电压

(a)无重复接地 (b)有重复接地

单相短路电流,而且线路越长,效果越显著,这就加速了线路保护装置的动作,缩短了漏电故障持续时间。

(4)改善架空线路的防雷性能。架空线路零线上的重复接地对雷电流有分流作用,有利于限制雷电过电压。

4. 重复接地的要求

电缆或架空线路引入车间或大型建筑物处、配电线路的最远端及每 1km 处、高低压线路同杆架设时,共同敷段的两端应做重复接地。

线路上的重复接地宜采用集中埋设的接地体,车间内宜采用环形重复接地或网络重复接地。零线与接地装置至少有两点连接,除进线处的一点外,其对角线最远点也应连接,而且车间周围过长,超过 400m 者,每 200m 应有一点连接。

一个配电系统可敷设多处重复接地,并尽量均匀分布,以等化各点电位。

每一重复接地的接地电阻不得超过 10Ω;在变压器低压工作接地的接地电阻允许不超过 10Ω 的场合,每一重复接地的接地电阻允许不超过 30Ω,但不得少于三处。

(五)工作接地

按照 IEC 的提法,工作接地指配电网的一点在变压器或发电机近处的接地,这与本书的定义是完全一致的。

工作接地的主要作用是抑制故障时配电网对地电压不致升高太多,以免过分增加触电的危险性,并减轻绝缘的额外负担或防止绝缘击穿。其次,由于接地的配电网中单相接地故障电流可达到数安乃至数十安,故障比较容易检测,故障点也比较容易确定。

图 31-37a 表示没有工作接地的三相四线接零系统发生一相接地的情况。这时,配电网各相对地电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_{1E} &= U_{2E} \approx \sqrt{3} U \\ U_{3E} &\approx 0 \\ U_{NE} &\approx U \end{aligned} \right\}$$

式中:U——配电网相电压。

显然,中性线及所有接中性线的电气设备外露导电部分都成了十分危险的带电体,同时,未接地的两相单相触电的危险性大大增加。而且,由于接地电流不大,这种危险状态可能持续下去。因此,这种配电网是

不宜采用的。

如果像图 31-37b 那样,中性点有工作接地,则中性点的“漂移”受到限制。这时,接地电流 I_E 经故障接地电阻 R_E 和工作接地电阻 R_N 成回路。由电压相量图(见图 31-37c)可以知道,各相对地电压都发生了变化,并可用下列计算式表达

$$\left. \begin{aligned} U_{NE} &\approx \frac{R_N}{R_N + R_E} U \\ U_{3E} &\approx \frac{R_E}{R_N + R_E} U \\ U_{1E} = U_{2E} &\approx \sqrt{U^2 + U_{NE}^2 + UU_{NE}} \end{aligned} \right\}$$

当 $U = 220V$, $U_{NE} = 50V$ 时,不难按式(31-7)求得 $U_{1E} = U_{2E} = 249V$, $U_{3E} = 70V$ 。这就是说,如能限制 $U_{NE} \leq 50V$,即可限制未接地两相对地电压不超过 250V,即将其对地电压限制在对地电压低压的范围以内。

根据前苏联试验,长度 30~50m 的裸导线接触地面时,流散电阻高达数百欧甚至上千欧。只有在裸导线接触潮湿土壤(埋进泥地中)时,流散电阻才降低为 15~20Ω;只有当裸导线落入塘、湖、河里或直接接触零地的金属构件时,流散电阻才降低到 2~5Ω。显然,IEC 关于假设故障接地电阻为 10Ω 的建议比较少见。如假设 $R_E = 10 \sim 20\Omega$,则当 $U_{NE} \leq 50V$ 时,要求 $R_N \leq 2.9 \sim 5.9\Omega$ 。我国规范规定,一般情况下要求 $R_N \leq 4\Omega$,这一规定能保证足够的安全条件。虽然当 $R_N \geq 13.6\Omega$ 时,看上去不能保证 $U_{NE} \leq 50V$,但如考虑零线上的重复接地,情况又不一样了。例如,当 $R_E = 10\Omega$ 时,如取 $R_N = 4\Omega$, $R_S = 10\Omega$,可求得 $U_{NE} = 48.9V$,仍符合安全条件。在高土壤电阻率地区, R_E 值较高,可放宽要求,限制 $R_E \leq 10\Omega$ 。

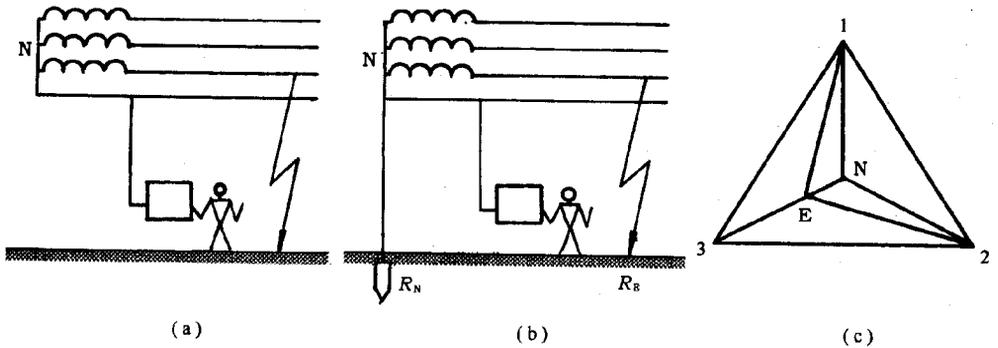


图 31-37 工作接地的作用

(a)无工作接地 (b)有工作接地 (c)有工作接地的相量图

低压配电网有工作接地时,各种过电压都受到一定的限制。下面以高压 10kV、低压 0.4kV 的配电系统为例,分析工作接地对过电压的限制作用。如图 31-38a 所示,尽管高压相线对地电压将近 5800V,但当高压侧意外与低压侧发生短接时(图中是与低压中性点短路),由于 10kV 系统为不接地电网,单相接地电流 I_{HE} 不超过 20~30A,如能控制 $R_N \leq 4\Omega$,即可限制中性点对地电压 U_{NE} 不超过 80~120V。如变压器为 $Y_{,nNO}$ 接法,可由如图 31-38b 所示的电压相量图求得各相对地电压,第一相约为 244~260V、第二相约为 303~340V、第三相约为 166~140V。

由于过电压受到限制,既减轻了触电的危险性,又控制了各导体间产生过大的电位差,减轻了由放电火花所造成的火灾的危险性。

(六)保护接零的计算

保护接零的计算主要是单相短路电流的计算。前面已经说明,保护接零实质上就是当发生碰壳事故时,借保护零线形成单相短路,迫使线路上的保护元件迅速动作而切除故障。下面讨论线路、保护元件和单相短路电流之间的关系。线路保护元件能否迅速动作,主要决定于单相短路电流的大小和保护元件动作电流的大小。

保护元件通常是熔断器和低压断路器瞬时动作过电流脱扣器,其动作时间决定于电流的大小。电流越

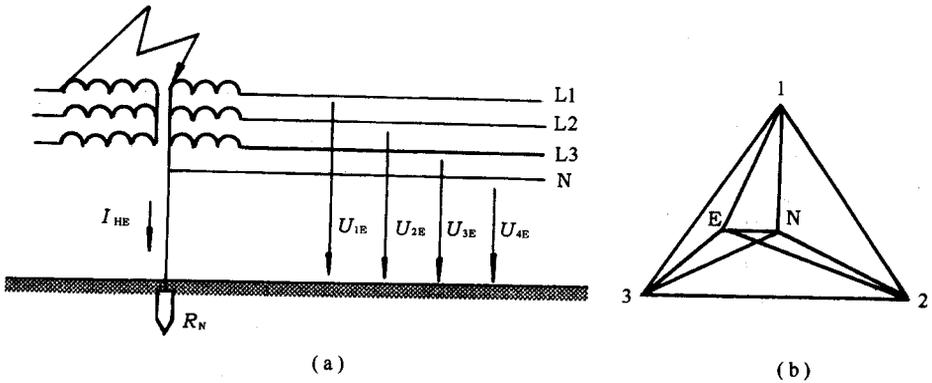


图 31-38 接地电网高压窜低压

(a)示意图 (b)相量图

大,动作越快,电流越小,动作越慢。所以,从保障安全的角度考虑,希望单相短路电流大一些,也就是希望相-零线回路的阻抗小一些。但降低阻抗要求加大线路的截面,从而增加材料消耗,增加投资。既要考虑安全,又要考虑经济,二者之间需作合理安排。

另一方面,对于确定的线路,也就是确定了短路电流,保护元件的动作电流调整得越小,动作越快;反之,动作越慢。从安全角度考虑,当然是把保护元件的动作电流调整得小一些好。但保护元件的动作电流太小,会造成不必要的跳闸,妨碍正常工作。所以,选择或调整保护元件要兼顾安全和运行两方面的要求。

1. 短路电流的特征

发生短路时,由于短路电流在电源设备内阻抗上产生电压降,供电电压有所降低。但是,在低压系统,如用户安装容量较小时,可以不必考虑高压边输入电压的变化。如电源电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

式中: U_m ——电源电压幅值;

α ——短路瞬间电压的初相位角。

则短路电流符合以下微分方程

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (31-8)$$

式中: R ——回路电阻;

L ——回路电感。

式(31-8)是一个一阶线性常系数非齐次微分方程,其解由稳态分量(周期分量) i' 和暂态分量(非周期分量) i'' 组成,即

$$i = i' + i'' = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \beta) + C e^{-Rt/L}$$

式中: β ——短路回路阻抗角,其大小为

$$\beta = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

C ——积分常数,决定于初始条件。当 $t = 0, i = 0$ 时,可求得

$$C = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \beta) = I_0$$

短路电流曲线如图 31-39 所示。

在低压配电网中,因为电感一般都比较小,非周期分量衰减都较快,只在短路后第一个周期才可能出现接近短路电流稳态值幅值 2 倍的冲击值。冲击系数按下式计算:

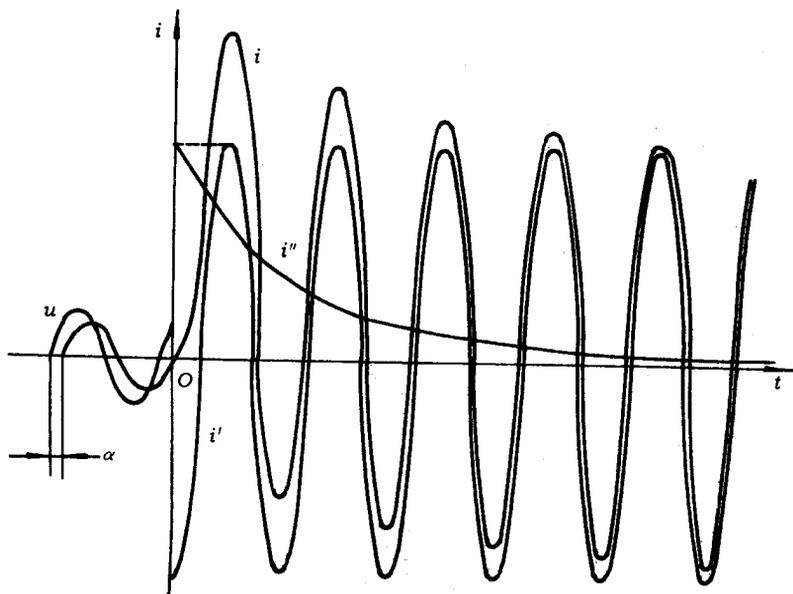


图 31-39 短路电流曲线

$$K_i = 1 + e^{-0.01R/L}$$

2. 单相短路电流的计算

应当指出,单相短路电流决定于相-零线回路阻抗,即决定于相-零线回路的设计。一般配电线路都是按照长期允许负荷、机械强度、电压损失等项要求设计的。这样设计的线路,一般都有足够的截面积,能保证足够的单相短路电流,满足保护接零的要求。因此,只是在线路很长等少数情况下,才有必要计算单相短路电流来进行检验。

低压系统的短路电流用有名值计算,而且不考虑供电电压的下降,即当做无限大功率的电源考虑。

本节前面已列出单相短路电流的计算式。不应该把这个计算式看做是在单一回路中应用欧姆定律求得的结果,而应该看做是不对称三相电路的计算结果。

设单相短路电流发生在空载状态,并设 U 相发生短路,则 $I_{EV} = I_{EW} = 0, U_{EU} = 0$ 。根据对称分量法可以求得 U 相的正序、负序和零序电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_{EU1} &= \frac{1}{3}(I_{EN} + I_{EV}) \angle -120^\circ + I_{EW} \angle 120^\circ = \frac{1}{3} I_{EU} \\ I_{EU2} &= \frac{1}{3}(I_{EU} + I_{EV} \angle 120^\circ + I_{EW} \angle -120^\circ) = \frac{1}{3} I_{EU} \\ I_{EU0} &= \frac{1}{3}(I_{EU} + I_{EV} + I_{EW}) = \frac{1}{3} I_{EU} \end{aligned} \right\} \text{由此得到}$$

$$I_{EU1} = I_{EU2} = I_{EU3} = \frac{1}{3} I_{EU}$$

又因为

$$\dot{U}_{EU} = \dot{U}_{EU1} + \dot{U}_{EU2} + \dot{U}_{EU0} = 0$$

$$\dot{U}_{EU1} = \dot{U}_U - \dot{I}_{EU1} Z_1$$

$$\dot{U}_{EU2} = \dot{U}_U - \dot{I}_{EU2} Z_2$$

$$\dot{U}_{EU0} = \dot{U}_U - \dot{I}_{EU0} Z_0$$

$$\dot{U}_U - \dot{I}_{EU1} Z_1 - \dot{I}_{EU2} Z_2 - \dot{I}_{EU0} Z_0 = 0$$

所以

代入 I_{EU} 得到

$$\dot{U}_U - \frac{\dot{U}_{EU}}{3}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = 0$$

最后得到

$$i_{EU} = \frac{3\dot{U}_U}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

式中： Z_1 ——相—零线回路的正序阻抗之和；

Z_2 ——相—零线回路的负序阻抗之和；

Z_3 ——相—零线回路的零序阻抗之和。

对于线路， $Z_1 = Z_2 = Z_L$ ， $Z_0 = Z_L + 3Z_{PE}$ ；对于相线上装设的电气元件， $Z_1 = Z_2 = Z_0 = Z_E$ 。因此，单相短路电流可表示为

$$I_{SS} = \frac{U}{Z_L + Z_{PE} + Z_E + \frac{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}}{3}}$$

式中： Z_{T1} ——变压器的正序阻抗；

Z_{T2} ——变压器的负序阻抗；

Z_{T0} ——变压器的零序阻抗。

如设 $Z_T = (\frac{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0}}{3})$ ，则得到与本节前面所列同样的表达式。计算时，相电压 U 取 230V，并应考虑其可能的波动。

显然，只要分别找到变压器、电路元件、相线、保护零线的电阻和电抗，即可求得单相短路电流。

3. 相—零线回路阻抗

(1) 变压器的阻抗。星形接法的变压器的正、负序电阻和电抗可按铭牌给定的数据近似计算。变压器的零序阻抗决定于变压器的结构和接线方式，无法根据铭牌数据简单计算。变压器零序阻抗可通过试验求得。星形接法变压器的零序阻抗参见表 31-5。

表 31-5 变压器的零序阻抗

变压器容量/kVA	零序电阻/ Ω	零序电抗/ Ω	零序阻抗/ Ω
20	1.050	3.340	3.50
30	0.963	2.570	2.75
50	0.818	1.620	1.82
100	0.427	0.790	0.90
180	0.276	0.425	0.52
320	0.174	0.242	0.30
560	0.110	0.151	0.18

变压器阻抗在相零线回路阻抗中一般只占很小的一部分，对于容量较大的变压器，其阻抗往往可忽略不计。

(2) 电路元件的阻抗。最常见的电路元件是刀开关、低压断路器和电流互感器。刀开关的阻抗主要是触头部分的电阻。低压断路器的阻抗除触头部分的电阻外，还包括过电流脱扣线圈的电阻和电抗。电流互感器的阻抗指其一次线圈的电阻和电抗。这部分阻抗很小，一般可忽略不计。

(3) 导线的阻抗。计算相—零线回路阻抗时，相线温度按 70℃ 考虑，零线温度按 40℃ 考虑。

导线电阻可按下式计算：

$$r = \frac{\rho l}{S}$$

式中： ρ ——导线电阻率；

l ——导线长度；

S ——导线截面积。

20℃时导电用铜的电阻率 软态的为 $17.48\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$,硬态的为 $17.9\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$;20℃时导电用铝的电阻率 ,软态的为 $28.3\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$,硬态的为 $29\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$;20℃时导电用铁的电阻率为 $97.8\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ 。由于导线实际温度往往高于 20℃ ,实际截面又可能小于标称截面 ,展开长度又可能略大于导线长度以及交流电流的趋肤效应 ,按式 (31-9)得到的计算值都小于实际值。因此 ,为了得到比较准确的结果 ,应根据温度、导线规格等条件 ,将计算值乘以 1.04~1.15 的系数。

导线电抗包括内电抗和外电抗。对于圆截面长直导体 ,可以按以下步骤求内电抗的表达式 :

①由欧姆环路定律 $\oint H \cdot dl = I$ 求出导体内磁场强度和磁感应强度分别为

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2}$$

$$B = \frac{\mu Ir}{2\pi R^2}$$

式中 : I ——流过导线的电流 ;

R ——导线半径 ;

μ ——导线材料磁导率。

②由积分运算求内磁链

$$\Psi = \int_0^R d\Psi = \int_0^R \frac{r^2}{R^2} d\varphi = \int_0^R \frac{r^2}{R^2} B dS = \int_0^R \frac{r^2}{R^2} l dr = \frac{\mu l r}{8\pi}$$

式中 : l ——导线长度。

③求单位长度的内电抗为

$$X_{io} = \frac{\omega L}{l} = \frac{\omega \Psi}{l I} = \frac{\omega \mu}{8\pi}$$

对于图 31-40 所示的同轴电缆 ,如利用金属包层作电流回路 ,金属包层的内电抗包括自电抗和互电抗两部分。单位长度的内电抗为

$$X_{io} = \frac{\omega \mu}{8\pi(R_3^2 - R_2^2)} (R_3^4 + 3R_2^4 - 4R_2^2 R_3^2 + R_2^4 \ln \frac{R_3}{R_2}) - \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{R_3}{R_2}$$

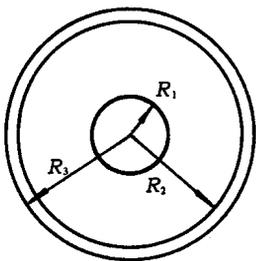


图 31-40 同轴电缆电抗计算

图 31-40 所示的同轴电缆单位长度的外电抗为

$$X_0 = \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

如电缆的金属包层不用作电流回路 ,则电缆的电抗仅包括电缆芯线的内电抗和芯线与金属包层之间的外电抗。

对于图 31-41 所示电流回路 ,可按以下步骤求出外电抗的表达式 :

①运用叠加原理求出两导体之间的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu I}{2\pi x} + \frac{\mu I}{2\pi(D-x)}$$

②由积分运算求得外磁链为

$$\Psi = \int_R^{D-R} d\Psi = \int_R^{D-R} B l dx = \frac{\mu l l}{\pi} \ln \frac{D-R}{R} \approx \frac{\mu l l}{\pi} \ln \frac{D}{R}$$

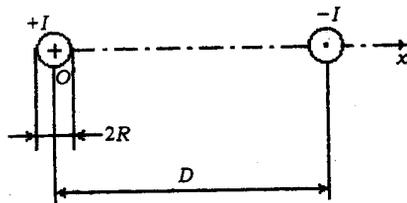


图 31-41 单回路电抗计算

③单位长度的外电抗为

$$X_0 = \frac{\omega L}{\pi} \ln \frac{D}{R}$$

导线电抗亦可按架空线 $0.35 \sim 0.4 \Omega/\text{km}$ 、电缆 $0.8 \Omega/\text{km}$ 近似取用。

工程上编制有一些不同导线及不同相—零线回路的每单位长度阻抗值的资料,可简化短路电流的计算。

(七)速断保护元件

具体地说,接零系统中的速断保护元件是短路保护元件或剩余电流保护(漏电保护)元件。常见短路保护元件是熔断器和低压断路器的电磁式过电流脱扣器。剩余电流保护将在有关内容介绍。

必须明确,接零系统中的短路保护元件不仅仅是保护设备和线路,而且是防止间接接触电击的主要单元,其动作时间必须满足要求。

除动作时间外,接零系统中的速断保护亦应符合热稳定等短路保护要求。

应当指出,由于相—零线回路阻抗的计算和测量都不是很方便,取得单相短路电流的准确数值往往会遇到困难,而接零线路中的保护元件又起着保障人身安全的重要作用,因此,应严格控制保护元件的动作电流。在不致错误切断线路、不影响正常工作的前提下,保护元件的动作电流越小越好。

为了不影响线路正常工作,保护元件应能躲过线路上的最大冲击电流而不动作。如异步电动机的堵转电流高达额定电流的 $5 \sim 7$ 倍,保护元件应能躲过电流,不妨碍电动机正常启动。例如,用熔断器保护单相电动机时,熔体的额定电流应为电动机额定电流的 $1.5 \sim 2.5$ 倍。

断路器动作很快,应要求其瞬时(或短延时)动作过电流脱扣器的整定电流大于线路上的峰值电流。

我国新标准(GB 50054—95)规定,如在接零系统中采用熔断器作为短路保护元件,当要求故障持续时间不超过 5s 时,单相短路电流 I_{ss} 与熔体额定电流 I_{FU} 的比值不应小于表 31-6 所列数值;当要求故障持续时间不超过 0.4s 时,单相短路电流 I_{ss} 与熔体额定电流 I_{FU} 的比值不应小于表 31-7 所列数值。

当中性线导电能力不低于相线导电能力时,不必考虑中性线的过电流保护。即使中性线的导电能力低于相线的导电能力,但相线上的短路保护元件能保护中性线或正常情况下流过中性线的电流比相线电流小得多,亦不必考虑中性线的短路保护。

表 31-6 故障持续时间 $\leq 5\text{s}$ 时的 $I_{\text{ss}}/I_{\text{FU}}$ 最小值

熔体额定电流/A	4 ~ 10	12 ~ 63	80 ~ 200	25 ~ 500
$I_{\text{ss}}/I_{\text{FU}}$	4.5	5.0	6.0	7.0

表 31-7 故障持续时间 $\leq 0.4\text{s}$ 时的 $I_{\text{ss}}/I_{\text{FU}}$ 最小值

熔体额定电流/A	4 ~ 10	16 ~ 32	40 ~ 63	80 ~ 200
$I_{\text{ss}}/I_{\text{FU}}$	8	9	10	11

如中性线不能被相线上的保护元件保护,可在中性线上装设保护元件。但其动作应当只能断开相线或同时断开相线和中性线,而不能只断开中性线,不断开相线。因此,不允许在有保护作用的零线上装设单极开关或熔断器。例如,在三相四线系统中三相设备的保护零线,以及在有接零要求的单相设备的保护零线上,都不允许装设单极开关或熔断器。如果采用低压断路器,只有当过电流脱扣器动作后能同时切断相线时,才允许在零线上装设过电流脱扣器。

第四节 保护导体与接地装置

一、保护导体

保护导体断开或缺陷除可能导致触电事故外,还可能导致电气火灾和设备损坏。因此,必须保证保护导体的可靠性。

(一)保护导体的组成

保护导体包括保护接地线、保护接零线和等电位联结线。保护导体分为人工保护导体和自然保护导体。

交流电气设备应优先利用自然导体作保护导体。例如,建筑物的金属结构(梁、柱等)及设计规定的混凝土结构内部的钢筋,生产用的起重机的轨道,配电装置的外壳、走廊、平台、电梯竖井、起重机与升降机的构架,运输皮带的钢梁,电除尘器的构架等金属结构,配线的钢管,电缆的金属构架及铅、铝包皮(通信电缆除外)等均可用作自然保护导体。在低压系统,还可利用不流经可燃液体或气体的金属管道作保护导体。在非爆炸危险环境,如自然保护导体有足够的截面积,可不再另行敷设人工保护导体。

人工保护导体可以采用多芯电缆的芯线、与相线同一护套内的绝缘线、固定敷设的绝缘线或裸导体等。

保护干线(保护导体干线)必须与电源中性点和接地体(工作接地、重复接地)相连。保护支线(保护导体支线)应与保护干线相连。为提高可靠性,保护干线应经两条连接线与接地体连接。

利用母线的外护物作保护导体时,外护物各部分电气连接必须良好,并不会受到机械破坏或化学腐蚀,其导电能力必须符合要求,而且每个预定的分接点应能与其他保护导体连接。利用电缆的外护物或导线的穿管作保护零线时,亦应保证连接良好和有足够的导电能力。利用设备以外的导体作保护零线时,除保证连接可靠、导电能力足够外,还应有防止变形和移动的措施。

利用自来水管作保护导体必须得到供水部门的同意,而且水表及其他可能断开处应予跨接。

煤气管等输送可燃气体或液体的管道原则上不得用作保护导体。

为了保持保护导体导电的连续性,所有保护导体,包括有保护作用的PEN线上均不得安装单极开关和熔断器;保护导体应有防机械损伤和化学腐蚀的措施,保护导体的接头应便于检查和测试(封装的除外);可拆开的接头必须是用工具才能拆开的接头,各设备的保护(支线)不得串联连接,即不得用设备的外露导电部分作为保护导体的一部分。此外,还应注意,一般不得在保护导体上接入电器的动作线圈。

(二)保护导体的截面积

为满足导电能力、热稳定性、机械稳定性、耐化学腐蚀的要求,保护导体必须有足够的截面积。

如规定断开时间不超过5s,保护导体最小截面应符合下列热稳定要求:

$$S_{PE} \geq \frac{I_{SS} \sqrt{t}}{K} \text{ 式中: } S_{PE} \text{——保护导体最小截面积, mm}^2;$$

I_{SS} ——可能的单相短路电流有效值, A;

t ——短路保护动作时间, s;

K ——决定于保护零线类型的计算系数,按表31-8至表31-10选取。

按以上方法确定保护线,其阻抗约制的单相短路电流必须与速断条件相适应,所考虑的温度应当是连接点的温度,如系爆炸危险环境,极限温度应另行确定。

表 31-8 绝缘保护线或与绝缘物接触的裸保护线的 K 值

绝缘种类		聚氯乙烯 ^①	乙丙橡胶 ^②	丁基橡胶
极限温度/°C		100	250	220
K 值	铜	143	176	166
	铝	95	116	110
	钢	52	64	60

注 ①即 PVC。

②即 EPR、XLPE。

表 31-9 电缆芯线作保护线的 K 值

绝缘种类		聚氯乙烯	乙丙橡胶	丁基橡胶	油浸纸
初始温度/°C		70	90	85	—
极限温度/°C		160	250	220	—
K 值	铜	115	143	131	107
	铝	76	94	87	71

表 31-10 裸导体保护线的 K 值

条 件		极限范围 ^① (可见部分)	正常条件	火灾危险场所
铜	温度/°C	500	200	150
	K 值	228	159	133
铝	温度/°C	300	200	150
	K 值	125	105	91
钢	温度/°C	500	200	150
	K 值	82	58	50

注 ①所指温度不得损害接头质量。

当保护线与相线材料相同时,保护线可以直接按表 31-11 选取,如果保护线与相线材料不同,可按相应

的阻抗关系考虑。这时,不必考虑上述热稳定的要求。

除应用电缆芯线或金属护套作保护线外,有机械防护的保护零线不得小于 2.5mm^2 ,没有机械防护的不得小于 4mm^2 。

表 31-11 保护零线截面选择表

S_L/mm^2	S_{PE}/mm^2
$S_L \leq 16$	S_L
$16 < S_L \leq 35$	16
$S_L > 35$	$S_L/2$

兼作工作零线的保护零线的 PEN 线的最小截面积除应满足不平衡电流的导电要求外,还应满足保护接零可靠性的要求。为此,要求铜质 PEN 线截面积不得小于 10mm^2 ,铝质的不得小于 16mm^2 ,如系电缆芯线,则不得小于 4mm^2 。

(三) 等电位联结

等电位联结指保护导体与建筑物的金属结构、生产用的金属装备以及允许用作保护线的金属管道等用于其他目的的不带电导体之间的联结(包括 IT 系统和 TT 系统中各用电设备金属外壳之间的联结)。

保护导体干线应接向总开关柜。总开关柜内保护导体端子排与自然导体之间的联结称为总等电位联结。总开关柜以下,如采用放射式配电,则保护导体作为支线分别接向用电设备或配电箱(配电箱以下都属于支线);如采用树干式配电,应从总开关柜上引出保护导体干线,再从该干线向用电设备或配电箱引出保护支线。对于用电设备或配电箱,如其保护接零难以满足速断要求,或为了提高保护接零的可靠性,可将其与自然导体之间再进行联结。这一联结称为局部等电位联结或辅助等电位联结。等电位联结的组成如图 31-42 所示。

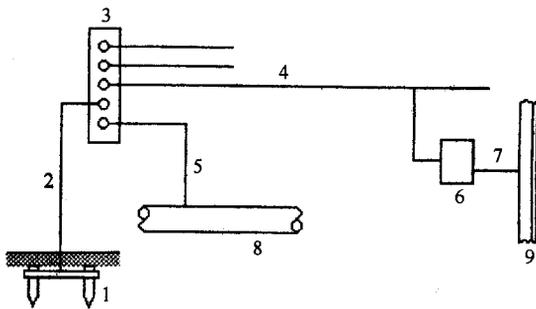


图 31-42 等电位联结

- 1—接地体 2—接地线 3—保护导体端子排 4—保护导体;
- 5—主等电位联结导体 6—装置外露导电部分 7—局部等电位联结导体
- 8—可连接的自然导体 9—装置以外的接零导体

总等电位联结导体的最小截面不得小于最大保护导体的 $1/2$,但不得小于 6mm^2 ;如系铜线,也不需大于 25mm^2 。两台设备之间局部等电位联结导体的最小截面不得小于两台设备保护导体中较小者的截面。设备与设备外导体之间的局部等电位联结线的截面不得小于该设备保护零支线的 $1/2$ 。

通过等电位联结可以实现等电位环境。等电位环境内可能的接触电压和跨步电压应限制在安全范围内。采用等电位环境时应采取防止环境边缘处危险跨步电压的措施,并应考虑防止环境内高电位引出和环境外低电位引入的危险。

(四) 保护导体的安装

由变压器中性点引出的保护导体应与配电方式相适应。对于放射式配电系统,该保护导体应采用相应截面的导体直接从变压器中性点引至低压开关柜内的保护导体端子排上。对于变压器干线式配电系统,则从变压器中性点引出的保护导体不必经过总开关而可以直接向保护接零干线。

户外架空线路一般没有自然导体可作为保护零线,而应当用同样的方法架设保护零线,零线截面由机械强度和导电能力确定。户内架空线路可采用起重机轨道、车间金属结构等自然导体作保护零线。作保护零线的自然导体与相线之间的距离不宜超过 6m。如没有自然导体可用,宜采用与相线相同材料的导体作保护零线。

电缆线路应利用其专用保护芯线和金属包皮作保护零线。如电缆没有专用保护芯线,应采用两条电缆的金属包皮作保护零线,并最好再沿电缆敷设一条 20mm×4 mm 的扁钢作为辅助保护零线。仅有一条电缆时,除利用其金属包皮外,还须敷设一条 20mm×4mm 的扁钢。

对于穿管线路,包括从低压开关柜至架空线路的穿管线路,从低压开关柜至用电设备的穿管线路,从架空线路引至配电箱的穿管线路以及从配电箱引至用电设备的穿管线路,一般均可用钢管作为保护零线。

有关保护导体安装及连接的其他要求见第五节中有关接地线的要求。

(五) 相 - 零线回路检测

相 - 零线回路检测是 TN 系统的主要检测项目,主要包括保护零线完好性、连续性检查和相 - 零线回路阻抗测量。测量相 - 零线回路阻抗是为了检验接零系统是否符合规定的速断要求。

1. 相 - 零线回路阻抗停电测量法

相 - 零线回路阻抗停电测量接线如图 31-43 所示,开关 QS1 断开为切除电力电源, QS2 为下,其他开关合上以接通试验回路。试验变压器可采用小型电焊变压器(约 65V)或行灯变压器(50V 以下)。试验变压器二次线圈接入表计后再接向一条相线和保护零线。为了检验熔断器 FU1,应在 a 处使相线与零线短接,测量回路阻抗。为了检验熔断器 FU2,应在线路末端,即在 b 处使相线与零线短接,测量回路阻抗。所测量的阻抗应由电压表读数 U_M 和电流表读数 I_M 直接算出,即

$$Z_S = \frac{U_M}{I_M}$$

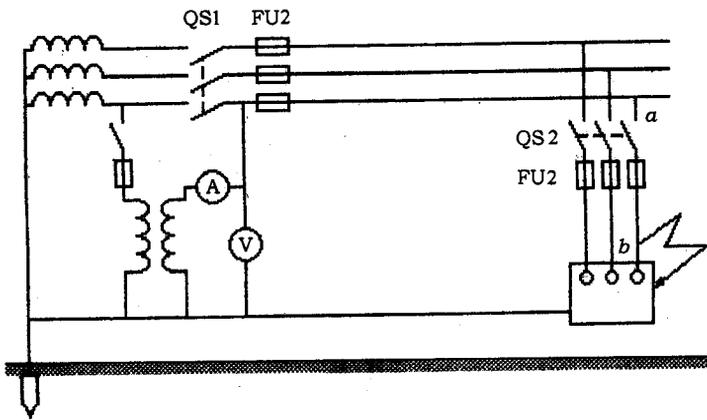


图 31-43 停电测量相 - 零线回路阻抗

这样测量得到的结果不包括配电变压器的阻抗,计算短路电流时应加上变压器的阻抗。为了减小测量误差,测量应尽量靠近变压器。

如零线上有其他原因产生的不平衡电流流过,这种测量方法将带有一定的误差。对此误差,应设法消除。

为了安全,测量用变压器 T 应采用双线圈变压器。因为测量时带有一定的电压,而零线的分布,特别是

自然保护导体的利用,又可能使测量电压延伸到意想不到之处,所以测量前应掌握零线的大致情况。为确保安全,测量中要集中指挥,并设专人联络。

2. 相-零线回路阻抗不停电测量法

如果现场停电有困难,则只能应用不停电测量法。不停电测量法有辅助负荷法和电压调整法。当电网电压波动较大时,辅助负荷法测量结果的误差较大。这里仅介绍电压调整法。

电压调整法需要一套电压变换设备,其接线如图 31-44 所示。电压变换设备把线电压变换成相电压。接通开关 S 前,调整电压变换设备,使 a、b 两端电压恰好等于相电压。这时,电压表读数为零。接通开关后,有电流沿相-零线回路和电阻 RP 流通,c、b 两点之间的电压即电阻 RP 上的电压降 UR,电压表读数 UM 应为相电压与 UR 之差,即

$$U_M = U - U_R$$

这个电压即消耗在相-零线回路阻抗上的电压降。因此,可求得相-零线回路阻抗为

$$Z_{SO} = \frac{U_M}{I_M}$$

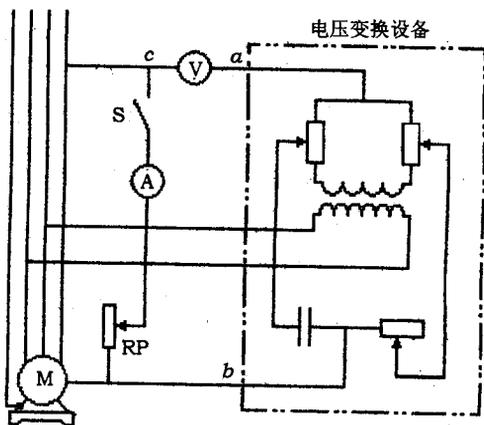


图 31-44 电压调整法测量相-零线回路阻抗

式中: I_M ——电流表读数,即通过电阻 RP 的电流。

不停电测量法测量得到的结果是包括配电变压器阻抗在内的相-零线回路全阻抗。不停电测量相-零线回路阻抗时,如果零线部分有断裂处或接触不良,设备外壳可能呈现不允许的电压,因此,测量用辅助装置的电阻和电感都必须有较高的数值,电阻值和感抗值均宜在 10kΩ 以上。

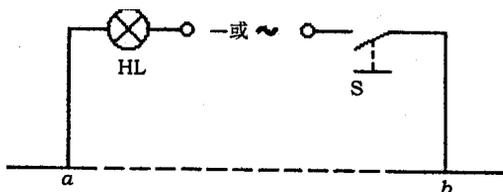


图 31-45 零线连续性测试

3. 零线连续性测试

为了检查零线的连续性,即检查零线是否完整和接触良好,可以采用低压试灯法,其原理如图 31-45 所示。在外加直流或交流低电压作用下,电流经试灯沿 a、b 两点之间的零线构成回路。如果试灯很亮,说明发暗或不稳定,说明 a、b 两点之间的零线断裂或接触不良。试灯也可用电流表代替,借电流表的指示来作判断。外加低压源可用直流电源,也可从双线圈变压器取得交流电源。如果安全条件许可,可适当提高试验电压。必要时,可配用电流互感器测量试验电流。

二、接地装置

接地装置是接地体(极)和接地线的总称。运行中电气设备的接地装置应当始终保持在良好状态。

(一)自然接地体和人工接地体

自然接地体是用于其他目的,且与土壤保持紧密接触的金属导体。例如,埋设在地下的金属管道(有可燃或爆炸性介质的管道除外)、金属井管,与大地有可靠连接的建筑物的金属结构、水工构筑物及类似构筑物的金属管、桩等自然导体均可用作自然接地体。利用自然接地体不但可以节省钢材和施工费用,还可以降低接地电阻和等化地面及设备间的电位。如果有条件,应当优先利用自然接地体。当自然接地体的接地电阻符合要求时,可不敷设人工接地体(发电厂和变电所除外)。在利用自然接地体的情况下,应考虑到自然接地体拆装或检修时,接地体被断开,断口处出现的电位差及接地电阻发生变化的可能性。自然接地体至少应有两根导体在不同地点与接地网相连(线路杆塔除外)。利用自来水管及电缆的铅、铝包皮作接地体时,必须取得主管部门同意,以便互相配合施工和检修。

人工接地体可采用钢管、角钢、圆钢或废钢铁等材料制成。人工接地体宜采用垂直接地体,多岩石地区可采用水平接地体。垂直埋设的接地体可采用直径为40~50mm的钢管或40mm×40mm×4mm至50mm×50mm×5mm的角钢。垂直接地体可以成排布置,也可以作环形布置。水平埋设的接地体可采用40mm×4mm的扁钢或直径为16mm的圆钢。水平接地体多呈放射形布置,也可成排布置或环形布置。

变电所经常采用以水平接地体为主的复合接地体,即人工接地网。复合接地体的外缘应闭合,并做成圆弧形。

为了保证足够的机械强度,并考虑到防腐蚀的要求,钢质接地体的最小尺寸见表31-12。电力线路杆塔接地体引出线应镀锌,截面积不得小于50mm²。

表 31-12 钢质接地体和接地线的最小尺寸

材料种类		地 上		地 下	
		室内	室外	交流	直流
圆钢直径/mm		6	8	10	12
扁钢	截面/mm ²	60	100	100	100
	厚度/mm	3	4	4	6
角钢厚度/mm		2.0	2.5	4. -	6.0
钢管管壁厚度/mm		2.5	2.5	3.5	4.5

表 31-13 低压电气设备外露铜、铝接地线截面积

材料种类	铜/mm ²	铝/mm ²
明设的裸导线	4	6
绝缘导线	1.5	2.5
电缆接地芯或与相线包在同一保护套内的多芯导线的接地芯	1.0	1.5

(二) 接地线

交流电气设备应优先利用自然导体作接地线。在非爆炸危险环境,如自然接地线有足够的截面积,可不再另行敷设人工接地线。

如果车间电气设备较多,宜敷设接地干线。各电气设备外壳分别与接地干线连接,而接地干线经两条连接线与接地体连接。各电气设备的接地支线应单独与接地干线或接地体相连,不应串联连接。接地线的最小尺寸亦不得小于表 31-12 规定的数值。低压电气设备外露接地线的截面积不得小于表 31-13 所列的数值。选用时,一般应比表中数值选得大一些。接地线截面应与相线载流量相适应。

接地线的涂色和标志应符合国家标准。非经允许,接地线不得作其他电气回路使用。不得用蛇皮管、管道保温层的金属外皮或金属网以及电缆的金属护层作接地线。

(三) 接地装置的安装

典型角钢垂直接地体如图 31-46 所示。每一垂直接地体的垂直元件不得少于 2 根。垂直元件的长度以 2~2.5m 左右为宜,太短了增加流散电阻,太长了施工困难,增加钢材的消耗,而且接地电阻减小甚微。相邻垂直元件之间的距离不宜小于其长度的 2 倍。接地体垂直元件上端用扁钢或圆钢焊接成一个整体。为了减小自然因素对接地电阻的影响,接地体上端离地面深度不应小于 0.6m(农田地带不应小于 1m),并应在冰冻层以下。接地体的引出导体应引出地面 0.3m 以上。接地体离独立避雷针接地体之间的地下距离不得小于 3m,离建筑物墙基之间的地下距离不得小于 1.5m。

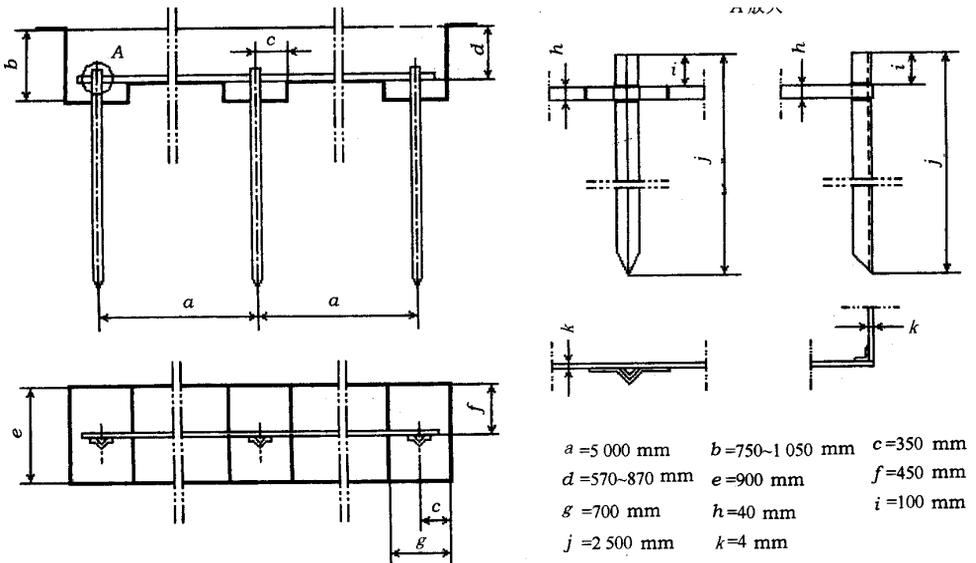


图 31-46 角钢接地体安装

普通垂直接地体可打入地下。对于挖坑埋设者,回填土不应夹有石块、建筑垃圾等杂物,并应分层夯实。接地体宜避开人行道和建筑物出入口附近。接地装置应尽量避免敷设在土壤中含有电解时排出活性物质或各种溶液等腐蚀性较强的地带,如不能避开,则应采取防腐蚀措施。必要时可采用外引式接地装置,否则应采取改良土壤的措施。接地体的引出线和连接部位应作防腐处理。

为防止机械损伤和化学腐蚀,接地线与铁路或公路的交叉处及其他可能受到损伤处,均应穿管或用角钢保护。如穿过铁路,接地线应向上拱起,以便有伸缩余地,防止断开。接地线穿过墙壁、楼板、地坪时,应敷设在明孔、管道或其他坚固的保护管中。接地线与建筑物伸缩缝、沉降缝交叉时,应弯成弧状或另加补偿连接件。

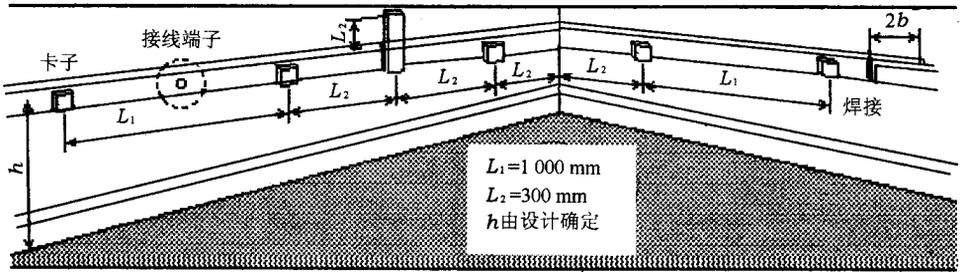
接地线的位置应便于检查,并不应妨碍设备的拆卸和检修。

室内接地干线的做法可参考图 31-47。图中,高度 H 由设计确定,一般为 250mm 左右;至墙的距离 s 为 10~15mm;卡子弯高 h 可参考表 31-14 选取。

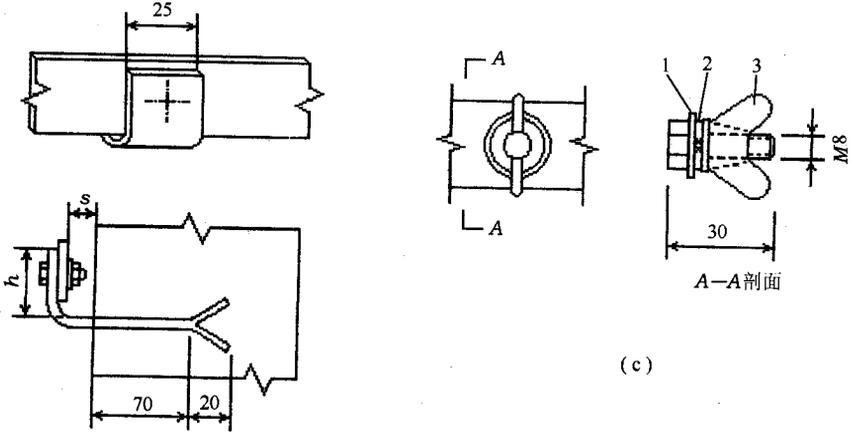
对于能与大地构成闭合回路且经常流过电流的直流接地装置的接地线,应沿绝缘垫板敷设,不得与金属管道、建筑物和设备的构件有金属连接。直直接地线和接地体的最小尺寸应大于交流接地线和接地体的最小尺寸(见表 31-12)。

表 31-14 接地支持卡子弯高

接地干线镀锌扁钢/mm × mm	卡子弯高/mm
15 × 4	20
25 × 4	30
40 × 4	45



(a)



(b)

(c)

图 31-47 接地干线安装

(a) 安装示意图 (b) 支持卡子安装图 (c) 接线端子图

1—镀锌垫圈 2—弹簧垫圈 3—蝶形螺母

很多厂房采用网络接地体。当网络接地体外部的跨步电动势大于允许数值时,应当采取适当的措施。其措施主要有:

第一,敷设图 31-48 所示的帽檐式均压条,即在网络外较网络深的地方埋设两条与网络连接在一起的均压条,以降低网络近处的跨步电动势。

第二,敷设图 31-49 所示的互不连接的均压条。这时,对地电压曲线陡度减小,跨步电势降低。

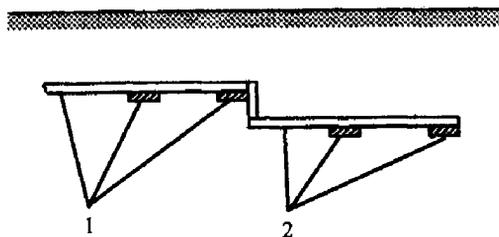


图 31-48 帽檐式均压条
1—网络均压条 2—帽檐式均压条

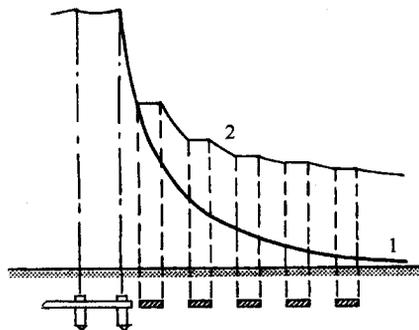


图 31-49 网络外均压条及对地电压曲线
1—无均压条 2—有均压条

第三,在地面敷设卵石、砾石或沥青层,以提高跨步电动势的允许值。

采取网络接地方式的安全实质在于限制故障时可能出现的接触电动势和跨步电动势。采用这种方法应当注意防止高电位引出和低电位引入的可能性。由于网络可能呈现较高的对地电压,如将网络内由高电位引出,则可能在网络外造成触电危险;如将网络外由低电位引入,则可能在网络内造成触电危险。

(四) 接地装置的连接

接地装置的连接必须保证设备至接地体之间导电的连续性。

利用建筑物的钢结构、起重机轨道、工业管道、电缆的金属外皮等自然导体作接地线时,其伸缩缝或接头处应另加跨接线,以保证连续可靠。自然接地体与人工接地体之间务必连接可靠。

接地体、接地线的连接应采用焊接,并应采用搭接,不得有虚焊。扁钢与扁钢搭接长度不得小于扁钢宽度的2倍,且至少在三个棱边施焊;圆钢与圆钢、圆钢与扁钢搭接长度不得小于圆钢直径的6倍,且至少在两边施焊;扁钢与钢管、扁钢与角钢焊接时,除应在接触部位两侧进行焊接外,并应在连接处焊以圆弧形或直角形卡子(包板),或直接将扁钢弯成圆弧形或直角形与钢管焊接。

接地线与管道的连接可采用螺纹连接或抱箍螺纹连接(见图31-50),但必须采用镀锌件,以防止锈蚀,保持接触良好。在有振动的地方,应采取防松措施。

(五) 接地装置设计的条件

接地装置是安全装置,设计时首先应该考虑的是接地电阻允许值、接触电动势和跨步电动势允许值、可靠的连接、足够的防腐蚀能力和热稳定性等安全要求,当然,作为设计也必须考虑到节省投资和施工方便等经济原则。

从技术角度考虑,接地装置设计须考虑以下条件:

1. 土壤类型

土壤类型是决定土壤电阻率的主要因素。

2. 土壤分层

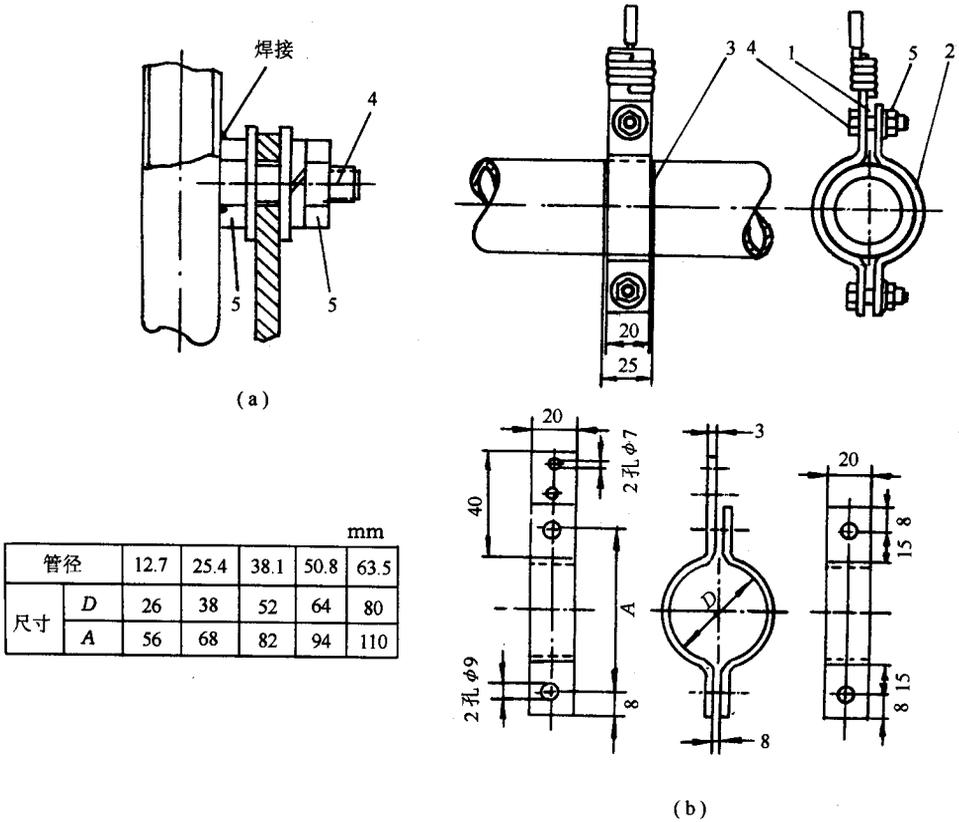


图 31-50 接地线连接

(a) 焊接螺丝连接 (b) 卡箍螺丝连接

1—扁钢长箍 2—扁钢短箍 3—铅封垫 4—螺钉 5—螺母

各种土壤的类型和深度对各种接地体的流散电阻都有很大影响。

3. 岩层性质及深度

岩层性质及深度是决定接地体埋设深度和施工方式的主要依据之一。此外,如岩层有断裂,将不利于保持水源。

4. 水源位置

土壤水源包括邻近水源和地下水源,也是决定接地体施工方式的主要依据之一。

5. 静水位变化

有关静水位随季节变化的资料,是考虑接地体埋设深度的主要依据之一。

6. 冻土层深度

由于冻土壤的电阻大大增加,因而接地体应埋设在冰冻层以下。

7. 最大接地短路电流

对于电力系统的接地装置,应考虑到系统发展增大短路电流的可能性。短路电流持续时间由继电保护设计确定。对于兼作防雷接地的接地装置,应考虑冲击电流的影响。

(六) 降低接地电阻的施工法

1. 高土壤电阻率地区

在高土壤电阻率地区,可采用下列各种方法降低接地电阻。

(1) 外引接地法。将接地体引至附近的水井、泉眼、水沟、河边、水库边、大树下等土壤电阻率较低的地方,或者敷设水下接地网,以降低接地电阻。外引接地装置应避开人行道,以防跨步电压电击;穿过公路的外

引线 埋设深度不应小于 0.8m。

外引接地对于工频接地电流是有效的。对于冲击接地电流或高频接地电流,由于外引接地线本身感抗急剧增加,可能达不到预期的目的。

(2) 接地体延长法。延长水平接地体,增加其与土壤的接触面积,可以降低接地电阻。但采用这种方法同样应当注意外引接地法可能遇到的问题。

(3) 深埋法。在不能用增大接地网水平尺寸的方法来降低流散电阻的情况下,如果周围土壤电阻率不均匀,可在土壤电阻率较低的地方深埋接地体以减小接地电阻。

深埋接地体具有流散电阻稳定,受地面施工影响小,地面跨步电动势低,便于土壤化学处理等优点。

(4) 化学处理法。这种方法是在接地周围置换或加入低电阻率的固体或液体材料,以降低流散电阻。

采用固体材料置换时,可以开挖如图 31-51 所示的人工接地坑或人工接地沟。为保证施工质量,应将置换材料捣碎,并保持 25%~30% 的含水量,填入前应给坑(沟)壁洒水,以保证置换材料与坑(沟)壁之间接触良好,填入时应分层夯实。此外,还应注意避开在冰冻季节施工,回填时上端宜填入一层粘土,所用接地体直径应适当加大。应用这种施工方法时,可以采用氯化钙、电石渣、氧化锌渣、氯化钠(食盐)、烧碱、木炭、粘土等多种废渣作为置换材料。所用材料应当是电阻率低、不易流失、性能稳定、易于吸收和保持水分、腐蚀性弱、施工方便和价格低廉的材料。

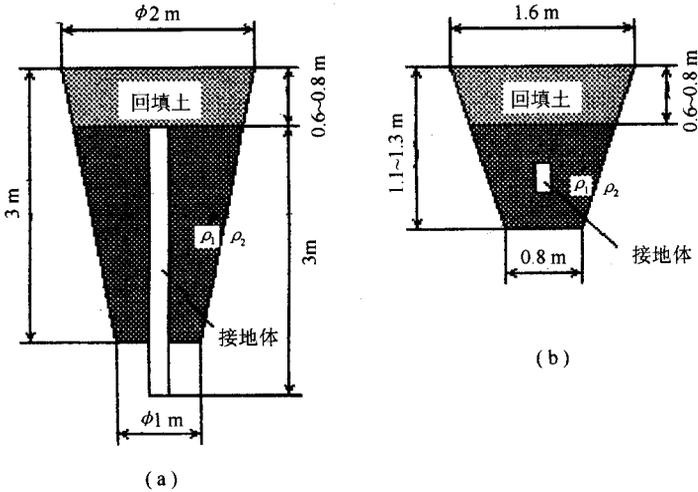


图 31-51 人工接地和接地沟

(a) 接地坑 (b) 接地沟

用氯化钠(食盐)、硫酸铜或硫酸镁(泻利盐)作为减阻剂材料时,可采用图 31-52 所示的施工方法。在接地体周围对称地打下 4 口井,井深大于接地体长度的 1/2,井内壁衬以多孔管,井口上端加混凝土井口和混凝土盖,再向井内逐步注入减阻材料即可。当流散电阻上升超过三天后测量值的 20% 时,应当适当补充减阻剂。这种施工方法有利于减缓减阻材料的流失,而且补充方便。如果要求不高,可采用简化施工方法。其方法是在接地体周围开挖深度 0.25m 的环形槽,并在槽内填以减阻材料和覆盖层。这种方法所注入或填用的减阻材料的用量为

$$Q = KPL^3$$

式中: Q^3 ——减阻材料用量, kg;

K ——材料系数,氯化钠取 1.834、硫酸镁取 0.917、硫酸铜取 2.070;

P ——土壤含水量, %;

L ——接地体长度, m。

液体减阻剂是特制的化学溶剂,其组成见表 31-16。使用时,先在水中加入 A 剂搅拌、溶解,再加 B 剂

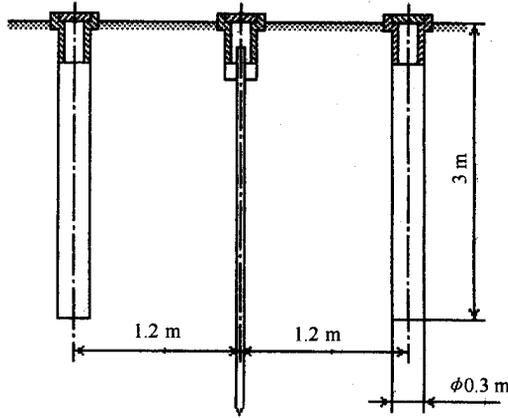


图 31-52 减阻施工图

充分搅拌溶解,待 A 剂、B 剂完全溶解后加 C 剂混合,然后加入 D 剂。A、B、C、D 剂与水混合后,须经充分搅拌再注入预留的孔洞中。如土壤系疏松的砂土,应将药剂放置成乳状再注入孔洞。如在冬季施工 B 剂应加倍。

表 31-15 液体减阻剂配方

配合剂	原料名称	质量 或体积	质量比	作用
A 剂	氯化钾 (KCl) 氯化镁 (MgCl ₂)	1.5kg 1.5kg	KCl : MgCl ₂ 为 1 : 1	强电解质是降低土壤电阻率的主要溶剂
B 剂	一水硫酸氢钠 (NaHSO ₄ ·H ₂ O)	0.4kg	—	硬化剂
C 剂	尿醛树脂	4kg	尿素 : 甲醛 为 1 : 2.5	聚合成网状胶体,包含水分和电解质
D 剂	尿素 聚乙烯醇 水	0.8kg 0.5kg 2.7kg	尿素 : 聚乙烯醇 : 水 为 2 : 1 : 6	填充网状胶体的空格,使水分和强电解质不易流失
水	水	20L		混合用
合计		30L		

为了防止冲洗和流失,可采用凝胶类减阻材料。丙烯酰胺凝胶(含丙烯酰胺为 91.62%)、硅酸钠凝胶(含硅酸钠为 97.62%)、亚铁氰化铜凝胶等都属于这类减阻材料。将这些材料加水注入地下,经过不长时间即凝成胶体,基本上不再受水的影响而流失。此外,石墨和水混合形成的糊状物也可作为这种减阻材料使用。

(5) 换土法。这是指接接地坑内换上低电阻土壤以降低接地电阻的方法。这种方法可用于多岩石地区。

2. 冻土地区

在冻土地区,为提高接地质量,可以采用下列各种措施:

- (1) 将接地体敷设在融化地带或融化地带的水池、水坑中;
- (2) 敷设深钻式接地体,或充分利用井管或其他深埋在地下的金属构件作接地体;
- (3) 在房屋融化盘内敷设接地体;

- (4) 除深埋式接地体外,再敷设深度为 0.5m 的延长接地体,以便在夏季地层表面化冻时起流散作用;
- (5) 在接地体周围人工处理土壤,以降低冻结温度和土壤电阻率。

(七) 流散电阻的计算

流散电阻是接地电阻的主要成分。在工频条件下,如果接地线不长,可以认为流散电阻就是接地电阻。因为流散电流是三维空间里的电流,所以计算比较麻烦。流散电阻主要决定于接地装置的结构和土壤电阻率。

1. 土壤电阻率

土壤是不良导体,其电阻率约为金属的 $1 \times 10^9 \sim 10 \times 10^9$ 倍。但是,土壤的过流面积比导线的大得多,因此,接地体外土壤的流散电阻是可以控制在一定范围之内的。

土壤电阻率受很多因素的影响,在很大范围内变化。其主要影响因素如下:

(1) 土壤种类。因为干燥土壤的导电能力极小,所以,土壤的种类对其电阻率的直接影响不大。但是,不同土壤含有不同性质和不同数量的溶解物质,对水的保持能力也不同,加之有不同的分散度等条件,使得不同种类土壤的电阻率相差很大。由于测量方法和土壤条件的差异,各种土壤电阻率的资料也有很大的差异。如无实测资料,不同种类土壤和水的电阻率可参考表 31-16 中所列数值。

表 31-16 土壤和水的电阻率

$\Omega \cdot m$

种类	名称	近似值	变动范围		
			较湿时 (多雨区)	较干时 (少雨区)	地下水含 盐碱时
泥土	陶粘土	10	5 ~ 20	10 ~ 100	3 ~ 10
	泥炭、沼泽地	20	10 ~ 30	50 ~ 300	3 ~ 10
	捣碎的木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土、白垩土	50	30 ~ 100	50 ~ 300	10 ~ 30
	粘土	60	30 ~ 100	50 ~ 100	10 ~ 30
	砂质粘土	100	30 ~ 300	80 ~ 1000	3 ~ 10
	黄土	200	100 ~ 200	250	30
	含砂粘土、砂土	300	100 ~ 1000	> 1000	30 ~ 100
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化粘土、下层红色页岩	500(相对湿度 30%)	—	—	—
	表层土夹石、下层石子	600(相对湿度 30%)	—	—	—
	砂	砂子、砂砾	1000	250 ~ 1000	1000 ~ 2500
砂层深度大于 10m,地下水较深的草原或地面粘土深度不大于 1.5m,底层多岩石的地区		1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5 000	—	—	—
	多岩石地带	5 000	—	—	—
	花岗岩	200 000	—	—	—
矿石	金属矿石	0.01 ~ 1	—	—	—

种类	名称	近似值	变动范围		
			较湿时 (多雨区)	较干时 (少雨区)	地下水含 盐碱时
混凝土	在水中	40 ~ 45	—	—	—
	在湿土中	100 ~ 200	—	—	—
	在干土中	500 ~ 1 300	—	—	—
	在干燥的大气中	12 000 ~ 18 000	—	—	—
水	海水	1 ~ 5	—	—	—
	湖水、塘水	30	—	—	—
	泥水	15 ~ 20	—	—	—
	泉水	40 ~ 50	—	—	—
	地下水	20 ~ 70	—	—	—
	溪水	50 ~ 100	—	—	—
	河水	30 ~ 280	—	—	—
	污秽的水	300	—	—	—
	蒸馏水	1 000 000	—	—	—

(2) 土壤含水量。土壤含水量较低时,随着含水量的增加,土壤中盐、酸、碱的溶解量增加,离子导电性提高,土壤电阻率降低。含水量大约在 15% ~ 20% 时,土壤电阻率变化不大;含水量超过 75% 以上时,水多于土,可能由于溶解物浓度降低而使土壤电阻率升高。一般土壤含水量旱季约为 10%、雨季约为 35%。砂和砂质粘土的土壤电阻率随含水量的变化,如图 31-53 所示。

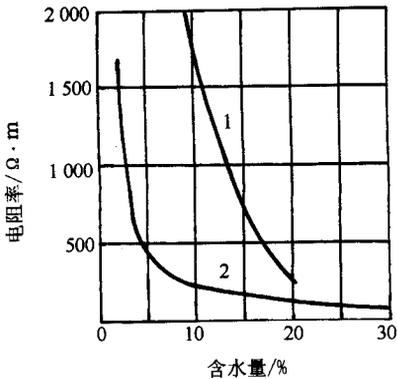


图 31-53 含水量对土壤电阻率的影响
1—砂土 2—砂质粘土

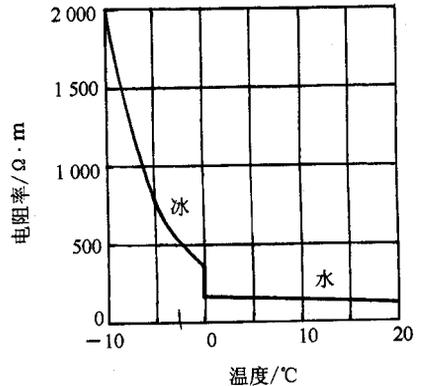


图 31-54 温度对土壤电阻率的影响

(3) 土壤温度。图 31-54 是含水量为 16.2% 的砂质粘土的电阻率与温度的关系曲线。当温度从 0℃ 上升时,由于溶解和电离程度增加,土壤电阻率下降。这一趋势一直到水分蒸发为止。当温度下降为 0℃ 时,由于水分冻结,电阻率急剧上升;当温度继续下降时,电阻率明显上升。因此,接地体应埋设在冻土层以下,以减小不同季节的影响。

(4) 土壤化学成分。土壤中含有盐、碱、酸等成分时,电阻率显著降低。含水量 15%、温度 17℃ 时砂质粘土的电阻率与含盐量的关系见表 31-17。

表 31-17 含盐量对土壤电阻率的影响

土壤中盐的质量分数/%	土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$
0	10 700
0.1	1 800
1	460
5	190
10	130
20	100

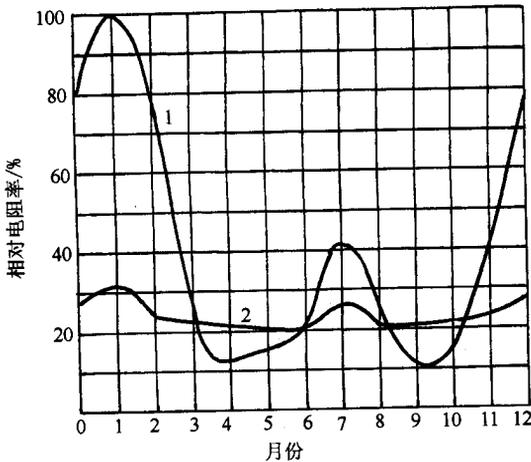


图 31-55 季节对土壤电阻率的影响

1—深 0.7m, 2—深 2.5m

(5)土壤物理性质。土壤越密实,电阻率越低。当土壤承受的压力由 2kPa 增加到 20kPa 时,电阻率降低 10%~30%。这就是为什么要把接地体周围的回填土夯实的道理。

土壤颗粒大小也影响其电阻率。粗颗粒土壤由于能结合较多的水而比细颗粒土壤的电阻率低。

此外,土壤掺有金属及其他导电杂质时,电阻率显著降低。

(6)季节的影响。由于土壤含水量和土壤温度受季节影响很大,因此,随着季节的变化,土壤电阻率也跟着变化。接地体埋设深度越小,季节影响越大。图 31-55 是土壤电阻率的相对值随季节变化的曲线。当然,对于不同地区,由于自然条件不同,变化规律是不尽一致的。

为了考虑季节的影响,引进一个季节系数 ψ 。季节系数 ψ ,即可能出现的最大土壤电阻率与测量得到的土壤电阻率的比值,即

$$\psi = \frac{\rho_{\max}}{\rho_M}$$

式中: ψ ——土壤季节系数;

ρ_{\max} ——最大电阻率;

ρ_M ——测量电阻率。

相应地,不同情况的土壤季节系数见表 31-18。

表 31-18 土壤季节系数

土壤性质	深度/m	ψ_1	ψ_2	ψ_3
粘土	0.5~0.8	3	2	1.5
粘土	0.8~3	2	1.5	1.4
陶土	0~2	2.4	1.36	1.2
砂砾盖以陶土	0~2	1.8	1.2	1.1
园地	0~2	—	1.32	1.2
黄沙	0~2	2.4	1.56	1.2
有黄沙的砂砾	0~2	1.5	1.3	1.2
泥炭	0~2	1.4	1.1	1.0
石灰石	0~2	2.5	1.51	1.2

注 ① ψ_1 用于测量前数天降雨量较大的条件。

② ψ_2 用于中等含水量的条件。

③ ψ_3 用于干燥或测量前数天降雨量很小的条件。

除上述外,土壤电阻率还与电场强度有关。随着电场强度增加(不发生击穿),土壤电阻率可能下降 10%~70%。显然,土壤电阻率不是一个常数,而是随着电压的升高而降低。

在进行接地设计时,应就地测量土壤电阻率的数据。如果没有实测数据,可应用这里介绍的资料。但必须考虑土壤分布、分层等条件的影响。

2. 人工接地体的流散电阻

(1) 静电比拟法的应用。流散电阻是接地体外所有电阻的叠加,似乎可以积分求解。但是,除平埋的半球接地体外,其他形状的接地体由于边界条件的限制是很难或者根本没有办法积分求解的。

流散电阻构成的场是电流场。如果接地体的电导率比土壤的电导率小得多,可以认为在接地体与土壤的界面上,电流密度矢量(或电流线)垂直于界面。这一情况与静电场中电位移矢量(或电位移线)垂直于电极表面的情况是一致的。因此,两种场具备了相似性,即具备了可比拟的条件。

下面研究电流场中电导与静电场中电容的比拟关系。

在电流场和静电场中,电导 G 和电容 C 可分别表示为

$$G = \frac{I}{\varphi}$$

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

式中 φ ——电极电位;

I ——自接地体流出的电流;

Q ——电极上的电量。

电流场中的电流和静电场中的电量可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} I &= \oint_s \delta dS = \oint_s \gamma EdS = \gamma \oint_s EdS \\ q &= \oint_s DdS = \oint_s \epsilon EdS = \oint_s EdS \end{aligned} \right\}$$

式中 δ ——电流密度;

γ ——电导率;

D ——电位移;

ϵ ——介电常数;

E ——电场强度；

S ——零线或接地线最小截面积。

由上列关系可以求得

$$G = \frac{I}{\varphi} = \frac{\gamma/\varepsilon \cdot q}{\varphi} = \frac{\gamma}{\varepsilon} C \quad (31-10)$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\varepsilon \rho}{C} \quad (31-11)$$

由此可见,只要可以比拟,即可先求出与待求电流场对应的静电场中的电容 C ,再由式(31-10)和式(31-11)求出电导 G 和电阻 R 。

我们所研究的两种场都是电极以外的区域,不论哪种场,其电位函数都符合拉普拉斯方程。如果两种场又有同样的边界,那么,根据惟一性定理,二者的解都应有同样的形式。这就是可以比拟的理论基础。

(2)单一接地体。

①球形接地体。图 31-56 所示的半球接地体的流散电阻可以积分运算。设半球半径为 s_0 ,取元电阻得

$$dR = \frac{\rho ds}{2\pi s^2}$$

式中 ρ ——土壤电阻率；

s ——离球心的距离。

全部流散电阻为

$$R = \int_{s=s_0}^{s=\infty} dR = \int_{s_0}^{\infty} \frac{\rho ds}{2\pi s^2} = \frac{\rho}{2\pi s_0}$$

如有电流 I_E 经该接地体向大地流散,则接地体和周围各点电位(对地电压)分别为

$$\varphi_{E_0} = \frac{I_E \rho}{2\pi s_0}$$

$$\varphi_E = \frac{I_E \rho}{2\pi s}$$

式中 I_E ——接地体的流散电流。

埋入地下有限深度为 t 的球形接地体,如图 31-57 所示,周围地面各点对地电压为

$$\varphi_E = \frac{I \rho}{2\pi \sqrt{x^2 + t^2}}$$

当 x 较小时,式(31-12)可能带来较大误差。

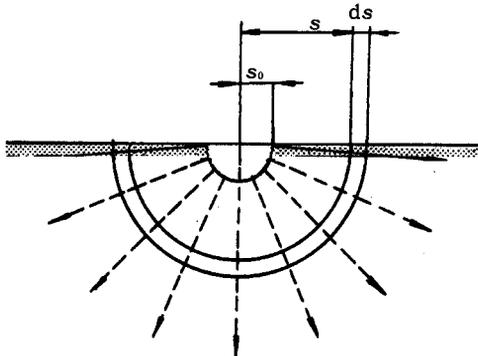


图 31-56 半球接地体的流散电阻

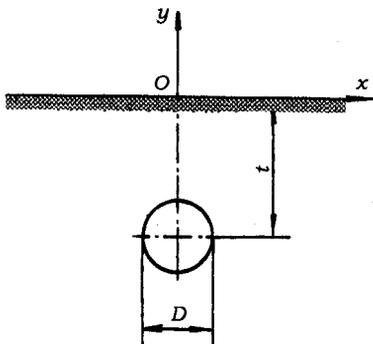


图 31-57 地下球形接地体的流散电阻

②竖埋管形接地体。图 31-58 是上端与地面齐平的管形接地体。这时,场的等位面不完全相似,积分求解是很困难的,而用比拟法求解要简单得多。该方法是将接地体看做是电容的一个极,先求电容,再转换

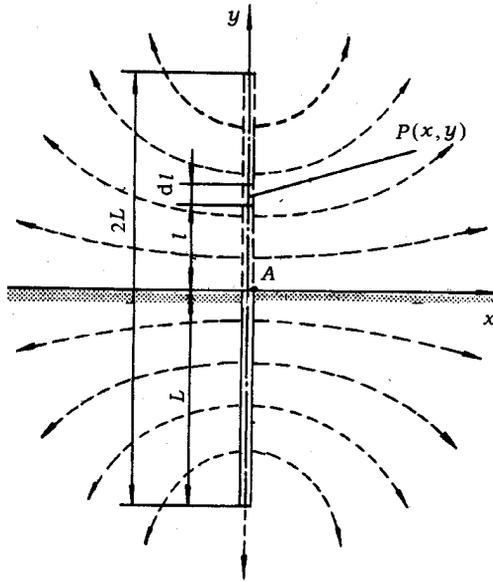


图 31-58 管形接地体的流散电阻

成电阻。因电极周围媒质不对称,先在地面上方取电极的镜像(虚线),将不均匀媒质的问题转换为无限均匀媒质的问题。电极周围的场是属于二维空间的子午面场。因此,可以只考虑某一个子午面,并取直角坐标。设管径 d 比管长 L 小得多,其上电荷集中在轴心,并均匀分布,且线电荷密度为 τ 。如取无限远处为电位参考点,则空间任一点 $P(x, y)$ 电位为

$$\varphi = \int_{-L}^{+L} \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon r} = \int_{-L}^{+L} \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon \sqrt{x^2 + (y-L)^2}} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(y+L) + \sqrt{x^2 + (y+L)^2}}{(y+L) + \sqrt{x^2 + (y-L)^2}}$$

为简单起见,选 A 点求电极电位,即

$$\varphi_A = \frac{\tau}{4\pi\epsilon} \ln \frac{L + \sqrt{(d/2)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(d/2)^2 + L^2}}$$

运用 $d \ll L$ 的条件作近似处理得到

$$\varphi_A = \frac{\tau}{4\pi\epsilon} \ln \frac{4L}{d}$$

于是,可求得电容及电流场中的电导分别为

$$C = \frac{Q}{\varphi} = \frac{\tau 2\pi}{\varphi_A} = \frac{4\pi\epsilon L}{\ln(4L/d)}$$

$$G = \frac{\gamma}{\epsilon} C = \frac{4\pi\gamma L}{\ln(4L/d)}$$

因为应用了镜像法,将电容和电导都扩大了 1 倍,所以原接体的流散电阻应为

$$R = \frac{1}{G/2} = \frac{1}{2\pi\gamma L} \ln \frac{4L}{d} = 0.3665 \frac{\rho}{L} \lg \frac{4L}{d}$$

由电位表达式不难求出地面电位分布为

$$\varphi_E = \frac{I_E}{2\pi\gamma L} \ln \frac{L + \sqrt{x^2 + L^2}}{x}$$

式中 I_E ——所研究的接地体的流散电流。

对于上端在地面以下,地面深度为 l 的竖埋管形接地体,可用类似方法求得流散电阻为

$$R = \frac{1}{4\pi\gamma L} \left(\ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+3L}{4t+L} \right) = 0.3665 \frac{\rho}{L} \left(\lg \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+3L}{4t+L} \right)$$

地面电位分布为

$$\varphi_E = \frac{I}{2\pi\gamma L} \ln \frac{(-t + \sqrt{x^2 + t^2})(L+t + \sqrt{x^2 + (L+t)^2})}{x^2}$$

当接地体深埋地下时,其附近地面电位降低,电位梯度减小。

③水平管形接地体。对于平放地面,中心线与地面重合的管形接地体(见图 31-59),如 $d \ll L$,可用同样方法求得流散电阻为

$$R = \frac{1}{\pi\gamma L} \ln \frac{2L}{d} = 0.733 \frac{\rho}{L} \lg \frac{2L}{d}$$

其周围电位分布与距离 r 和方向角 θ 有关,运用积分计算求得

$$\varphi_E = \frac{1}{2\pi\gamma L} \ln \left(\frac{L - 2r \cos\theta + \sqrt{4r^2 + L^2 - 4Lr \cos\theta}}{4r^2 \sin^2\theta} \right) \\ \left(L + 2r \cos\theta + \sqrt{4r^2 + L^2 + 4Lr \cos\theta} \right)$$

对于平埋地下,深度 $t \gg d$ 的管形接地体,也可用同样方法求得其流散电阻为

$$R = \frac{1}{2\pi\gamma L} \left[\ln \frac{2L}{d} + \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + 16t^2}}{4t} \right] = \\ 0.3665 \frac{\rho}{L} \left[\lg \frac{2L}{d} + \lg \frac{L + \sqrt{L^2 + 16t^2}}{4t} \right]$$

地面电位分布为

$$\varphi_E = \frac{I}{2\pi\gamma L} \ln \left(\frac{L - 2r \cos\theta + \sqrt{4t^2 + 4r^2 + L^2 - 4rL \cos\theta}}{4(t^2 + r^2 + L^2 \cos^2\theta)} \right) \\ \left(L + 2r \cos\theta + \sqrt{4t^2 + 4r^2 + L^2 + 4rL \cos\theta} \right)$$

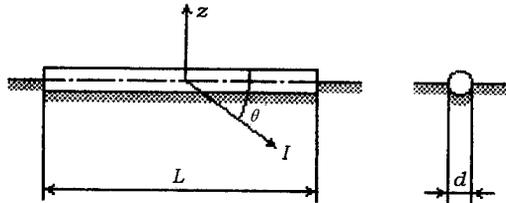


图 31-59 水平管形接地体的流散电阻

④框形接地体。框形接地体的流散电阻也可按类似方法求得。例如,对于图 31-60 所示的平埋地下的圆截面圆环形或方框形接地体,如 $D \gg t \gg d$ 或 $a \gg t \gg d$,则其流散电阻分别为

$$R = 0.336 \frac{\rho}{\pi D} \lg \frac{1.2 \sqrt{\pi D}}{dt} \\ R = 0.336 \frac{\rho}{4a} \lg \frac{88a^2}{dt}$$

⑤板形接地体。平置于地面、直径为 D 的圆盘形接地体(见图 31-61)的流散电阻和地面电位分布为

$$R = \frac{\rho}{2D}$$

$$\varphi_E = \frac{I}{\pi\gamma D} \arcsin \frac{D}{2x}$$

直埋地下的矩形接地体(见图 31-62)的流散电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t} \right)$$

平置于地面的矩形板的流散电阻为

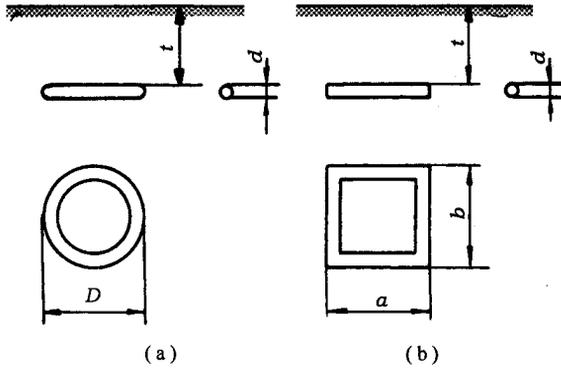


图 31-60 框形接地体的流散电阻

(a) 环形 (b) 框形

$$R = \frac{\rho}{\pi a} \ln \frac{4a}{b}$$

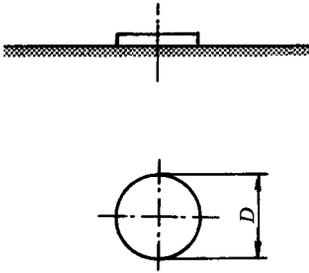


图 31-61 平埋圆盘接地体的流散电阻

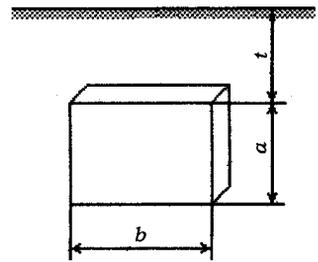


图 31-62 竖埋板形接地体的流散电阻

(3) 复合接地体。单一接地体的流散电阻往往不能满足要求,而且容易因腐蚀等原因而受到损坏。因此,要求埋设两个以上的接地体,并互相连接起来,组成复合接地体。由若干单一接地体组成的复合接地体,由于地中电流线互相排挤,从每一单一接地体流散的电流受到限制(见图 31-63),使得总流散电阻大于各单一接地体流散电阻的并联值。因此,对于复合接地体,引进一个利用系数 η_p 。

所谓利用系数,即单一接地体流散电阻的并联值与复合接地体流散电阻的比值。对于结构相同的单一接地体,其总流散电阻为

$$R_n = \frac{R_0}{\eta_p}$$

式中: R_0 ——单一接地体的流散电阻;

n ——单一接地体的根数。

显然,利用系数总是小于 1,最多也只能接近于 1。

简单接地体的利用系数可以计算。对于图 31-64 所示的由两根直埋钢管组成的接地体,运用叠加原理可求得地面电位分布为

$$\varphi_E = \frac{I}{4\pi\gamma L} \ln \frac{[L + \sqrt{L^2(x-D/2)^2}] [L + \sqrt{L^2 + (x+D/2)^2}]}{(x-D/2) [x+D/2]}$$

流散电阻为

$$R_2 = \frac{1}{4\pi\gamma L} \ln \frac{4[L(L + \sqrt{L^2 + D^2})]}{Dd}$$

式中: R_2 ——双管接地的流散电阻 Ω ;

L ——管长度 m ;

D ——相邻管之间距离 m ；

d ——管直径 m ；

r ——电导率 S/m 。

当 $L = 3m, d = 0.06m, D = 6m$ 时,可求得双管接地体的流散电阻 $R_2 = 0.1533\rho$ (ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$),而单管接地体的流散电阻为

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\gamma L} \ln \frac{4L}{d} = 0.2811\rho$$

不难求得利用系数

$$\eta = \frac{R_0}{nR_2} = \frac{0.2811}{2 \times 0.1533} = 0.9167$$

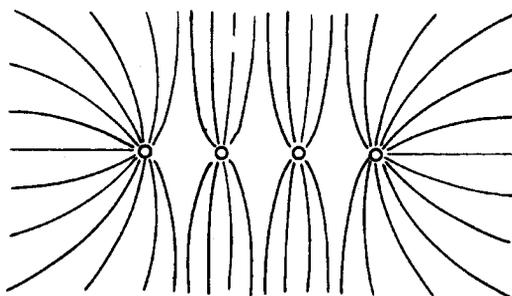


图 31-63 多管接地体的流散电阻

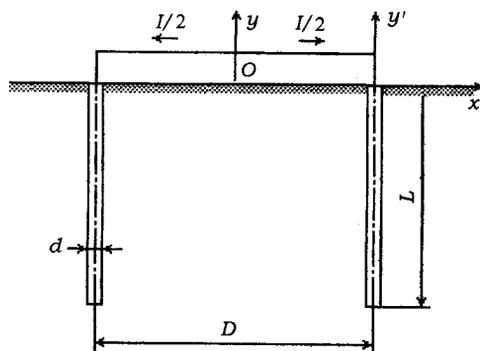


图 31-64 双管接地体的流散电阻

组合接地体内侧(包括下面要介绍的复合接地体内侧)的电位分布比外侧的电位分布要平缓得多,且组合接地体外侧电位分布比单一接地体的外侧电位分布也要平缓一些。

直线排列的 n 个垂直接地体的流散电阻可按下式计算：

$$R_v = \frac{r}{n} + \frac{\rho}{2D} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n} \right)$$

式中： r ——单一接地体的流散电阻；

ρ ——平均土壤电阻率；

D ——相邻接地体之间的距离。

环形排列的 n 个垂直接地体的流散电阻亦可按下式计算：

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi nL} \left(\ln \frac{2L}{d} - 1 + \frac{2L}{D} \ln \frac{2n}{\pi} \right)$$

式中： ρ ——平均土壤电阻率；

L ——单一接地体长度；

d ——单一接地体直径；

D ——接地体的间距。

n 个垂直接地体构成非单一性环状接地体的流散电阻可按式计算：

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi nL} \left[\ln \frac{2L}{d} - 1 + \frac{2K_1 L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1) \right]$$

式中： K_1 ——面积系数，按图 31-65 选取；

A ——接地网面积。

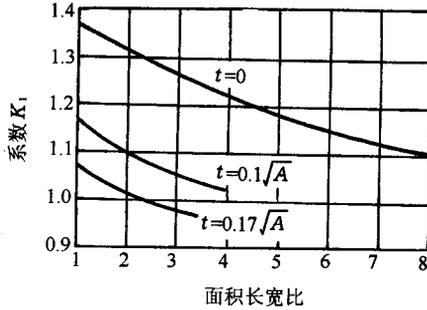


图 31-65 面积系数 K_1 曲线

垂直接地体间连接导体的流散电阻可按式计算：

$$R_w = \frac{\rho}{\pi L_w} \ln \frac{1.27L_w}{\sqrt{dt}}$$

式中： L_w ——水平接地体总长；

d ——水平接地体直径；

t ——深度。

按照式(31-13)计算垂直接地体间连接导体的流散电阻时，包括垂直 0 接地体及其间连接导体在内的环形复合接地体的流散电阻按下式计算：

$$R = \frac{R_v R_w - R_c^2}{R_v + R_w - 2R_c}$$

式中， R_c 按下式计算：

$$R_c = \frac{\rho}{\pi L_w} \ln \frac{2L_w}{L}$$

不同形状水平接地体的流散电阻可按式计算：

$$R_w = \frac{\rho}{2\pi L_w} \left(\ln \frac{L_w^2}{td} + K_2 \right)$$

式中： L_w ——水平接地体总长；

t ——水平接地体埋设深度；

d ——水平接地体直径或等效直径；

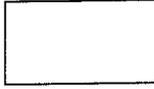
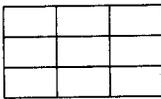
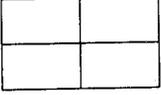
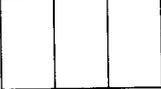
K_2 ——水平接地体形状系数。

水平接地体形状系数 K_2 按表 31-19 和表 31-20 选取。

表 31-20 水平接地体形状系数

形状								
K_2	0.000	0.378	0.867	2.140	5.270	8.810	1.680	0.480

表 31-21 网格接地体形状系数

网格结构	网格边长比				
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
	1.71	1.76	1.86	2.10	2.34
	3.29	3.31	3.35	3.41	3.67
	4.95	5.16	5.44	6.00	6.52
	4.33	4.43	4.73	5.04	5.61
	8.55	8.94	9.40	10.3	11.11

由垂直接地体和水平接地体组成的网络接地体的流散电阻也可按下式计算：

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$$

式中： R_1 ——垂直接地体的接地电阻；

R_2 ——水平接地体的接地电阻；

R_3 ——垂直接地体部分与水平接地体部分之间的电阻，可按下式计算：

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi L_w} \left(\ln \frac{2L_w}{L} + K_1 \frac{L_w}{\sqrt{A}} - K_3 + 1 \right)$$

式中： L_w ——水平接地体总长；

L ——垂直接地体总长；

K_1, K_3 ——计算系数,可分别按图 31-65 和图 31-66 确定。

(4)简化计算。在初步设计时,如果要求不高,可采用简化公式粗略计算接地体的流散电阻。

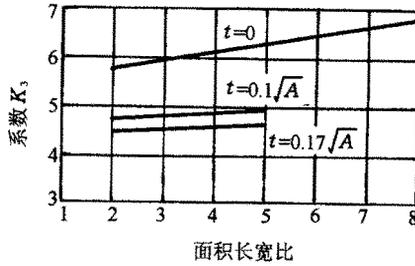


图 31-66 面积系数 K_3 曲线

以水平接地体为主,且边缘闭合复合接地体的流散电阻可按下式计算：

$$R = \frac{\sqrt{\pi} \rho}{4 \sqrt{A}} \frac{\rho}{2\pi L_T} \ln \frac{2L_T^2}{\pi dt \times 10^4}$$

式中： A ——接地网面积；

L_T ——接地体(包括垂直接地体)总长；

d ——水平接地体的直径或等效直径；

t ——水平接地体埋设的深度。

如仅有水平接地体,该式可简化为

$$R = 0.444 \frac{P}{\sqrt{\pi} + L_w} \frac{P}{L_w}$$

几种接地体的简代计算式见表 31-21。

表 31-21 流散电阻的简化计算式

接地体类型		简化计算式	备注
名称	特征		
单根直接地体	长度为 3m 左右	$R \approx 0.3\rho$	ρ 为土壤电阻率 $\Omega \cdot m$
单根水平接地体	长度为 60m 左右	$R \approx 0.03\rho$	
n 根水平接地体	$n \leq 12$, 每根长 60m 左右	$R \approx \frac{0.062\rho}{n+12}$	
复合接地体 (接地网)	以水平接地体为主,接地网面积 $A \geq 100m^2$	$R \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{A}} = 0.28 \frac{\rho}{r}$	A 为接地网面积 m^2 r 为面积等于 A 的等效圆半径 m
板形接地体	平放地面	$R \approx 0.44 \frac{\rho}{\sqrt{A}}$	A 为平板面积 m^2
	平埋地下	$R \approx 0.22 \frac{\rho}{\sqrt{A}}$	
	竖埋地下	$R \approx 0.253 \frac{\rho}{\sqrt{A}}$	

(5) 等效直径。对于圆钢和钢管以外其他形状的型钢,如角钢、槽钢等制作的接地体,可先求得其实等效钢管的直径,再应用以上计算式求得流散电阻。等边角钢的等效直径为

$$d = 0.842b$$

式中: b ——角钢宽度。

不等边角钢的等效直径为

$$d = 0.708 \sqrt[4]{b_1 b_2 (b_1^2 + b_2^2)}$$

式中: b_1, b_2 ——角钢两边的宽度。

槽钢的等效直径为

$$d = 0.92 \sqrt[9]{b^2 h^2 (b^2 + h^2)}$$

式中: b, h ——槽钢的宽度和高度。

扁钢的等效直径为

$$d = 0.5b$$

式中: b ——扁钢宽度。

(6) 多层土壤的流散电阻。以上研究的都是无限均匀土壤中的流散电阻,这种理想条件在实际上是很难找到的,实际上最常见到的是多层土壤。各层土壤的成分、密度、温度、含水量等都不相同或不完全相同。这种情况当然会对接地体的流散电阻产生很大的影响。

多层土壤中流散电阻的计算更加复杂。对于单一接地体,可用镜像法,并结合叠加原理计算流散电阻。对于复合接地体,比较常用的办法是先求得多层土壤的等效电阻率 ρ_q ,再用多层土壤的等效电阻率 ρ_q 代替均匀土壤的电阻率 ρ ,直接运用均匀土壤中的计算公式计算流散电阻。等效电阻率可近似计算,亦可通过实验测定。

对于上、下两层电阻率分别为 ρ_1, ρ_2 的双层土壤中的垂直接地体沿正方形网格周边布置的复合接地体,等效电阻率可按下列式计算:

$$\rho_q = \rho \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^K$$

式中:指数 K 按下列二式计算:

$$K = 0.3 \left(1 + 0.26 \ln \frac{h_1}{L} \right), 0.1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1$$

$$K = 0.4 \left(\frac{h_1 - t}{L} + 0.272 \ln \frac{D\sqrt{2}}{L} \right), 1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10$$

式中: ρ_1 ——上层土壤电阻率;

ρ_2 ——下层土壤电阻率;

h_1 ——上层土壤深度;

L ——垂直接地体长度;

D ——相邻垂直接地体间的距离。

3. 自然接地体的流散电阻

(1) 电缆和管道的流散电阻。电缆和长度为2km以上管道的流散电阻按下式计算:

$$R = K \sqrt{r_1 r_2} \coth \left(\sqrt{\frac{r_1}{r_2}} L \right)$$

式中: r_1 ——沿电缆或管道直线方向每厘米的流散电阻 Ω/cm 。 $r_1 = 1.69 \rho$ (ρ 为土壤电阻率 Ω/cm);

r_2 ——沿电缆或管道直线方向每厘米电缆外皮或管道的电阻 Ω/cm ;

L ——电缆或管道长度, m;

K ——电缆麻层影响系数,取1.2~1.8。

一束 n 条同截面电缆的流散电阻 R_n 按下式计算:

$$R_n = \frac{R}{\sqrt{n}}$$

长度为 2 km 以下的管道的流散电阻按下式计算：

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \lg \frac{L^2}{dt}$$

式中： ρ ——土壤电阻率；

d ——管道直径；

L ——管道长度；

t ——埋设深度。

(2) 钢筋混凝土基础的流散电阻。输配电线钢筋混凝土基础的流散电阻可按表 31-22 的简化公式近似计算。

表 31-22 钢筋混凝土基础的流散电阻简化计算式

接地体类型		简化计算公式
钢筋混凝土杆的自然接地体	单杆	$R \approx 0.3\rho$
	双杆	$R \approx 0.2\rho$
	拉线单、双杆	$R \approx 0.1\rho$
	一个拉线盘	$R \approx 0.28\rho$
装配式基础的自然接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.1\rho$
	门形杆塔	$R \approx 0.06\rho$
	V 形拉线门形杆塔	$R \approx 0.09\rho$
沿装配式基础周围敷设的深埋式接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.07\rho$
	门形杆塔	$R \approx 0.04\rho$
	V 形拉线门形杆塔	$R \approx 0.045\rho$
深埋式接地体与装配式基础自然接地的综合接地体	单柱式杆塔	$R \approx 0.05\rho$
	门形杆塔	$R \approx 0.03\rho$
	V 形拉线门形杆塔	$R \approx 0.04\rho$

注：表中 ρ 为土壤电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

整个工厂地下基础(包括管网)的流散电阻可按下式近似计算：

$$R = \beta R_q$$

式中： R_q ——工厂总平面范围内等效平板接地体的流散电阻；

β ——计算系数，按图 31-67 选取。

在图 31-67 中， λ 为建筑密度，即工厂生产性建筑物所占面积与工厂总平面面积的比值。曲线 1 相应于均匀土壤，曲线 2 相应于分层土壤，且上层深度为 3m，其土壤不均匀系数为

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = -0.8$$

(3) 架空地线的流散电阻。架空地线(避雷线)的接地电阻可按下式计算：

$$R = \sqrt{r r_x} \cot\left(\sqrt{\frac{r_x}{r} n}\right)$$

式中： r ——每基杆塔的流散电阻；

r_x ——每挡避雷线的电阻；

n ——带避雷线的杆塔数。

当 $n > 29$ 时, 计算式可简化为

$$R = \sqrt{nr_x}$$

(八) 接地测量

各种接地装置的接地电阻应当定期测量, 以检查其可靠性, 一般应当在雨季前或其他土壤最干燥的季节测量。雨天一般不应测量接地电阻, 雷雨天不得测量防雷装置的接地电阻。对于易于受热、受腐蚀的接地装置, 应适当缩短测量周期。凡新安装或设备大修后的接地装置, 均应测量接地电阻。

1. 接地电阻的测量

接地电阻可用电流表-电压表法测量或接地电阻测量仪法测量。本书仅介绍接地电阻测量仪法。最常见的接地电阻测量仪是电位差计型接地电阻测量仪。这种接地电阻测量仪本身能产生交变的接地电流, 不需外加电源, 电流极和电压极也是配套的, 使用简单, 携带方便, 而且抗干扰性能较好, 因此应用十分广泛。

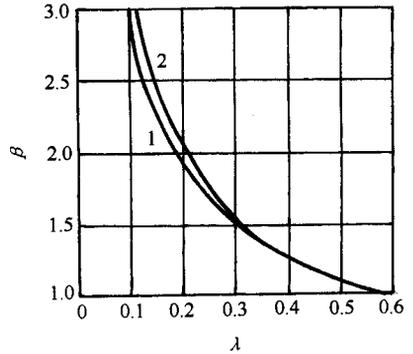


图 31-67 全厂地下基础 β 值曲线

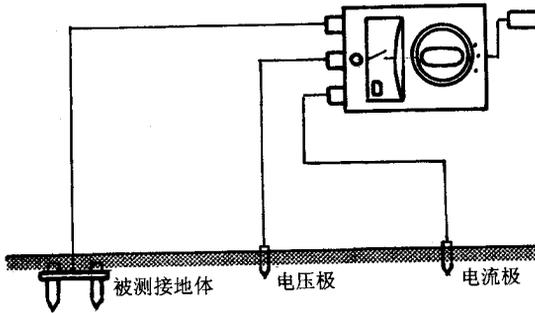


图 31-68 接地电阻测量仪外部接线

这种测量仪器的本体由手摇发电机(或电子交流电源)和电位差计式测量机构组成, 其主要附件是 3 条测量电线和两支辅助测量电极。测量仪有 E、P、C 三个接线端子或 C2、P2、P1、C1 四个接线端子。测量时, 在离被测接地体一定的距离向地下打入电流极和电压极。测量接线如图 31-68 所示, E 端或 C2、P2 端并接后接于被测接地体, P 端或 P1 端接于电压极, C 端或 C1 端接于电流极。选好倍率, 以大约 120r/min 左右的转速转动摇把时, 即可产生 110~115Hz 的交流电流沿被测接地体和电流极构成回路, 同时, 调节电位器旋钮, 使仪表指针保持在中心位置, 即可直接由电位器旋钮的位置(刻度盘读数)结合所选倍率读出被测接地电阻值。

测量仪内部接线如图 31-69 所示。在测量过程中, 当电位差计取得平衡, 检流计指针指向中心位置时, B 点与 P 点(或 P1 点)的电位相等, 即 $U_{E-P} = U_{E-B}$ (或 $U_{C2P2-P1} = U_{C2P2-B}$)。由此不难得到

$$I_1 R_E = I_2 R_{0-B}$$

如电流互感器的变流比为 $K_I = I_1 / I_2$, 则

$$R_E = \frac{I_2}{I_1} R_{0-B} = \frac{R_{0-B}}{K_I}$$

因为 K_I 为仪器给定的某一固定值, 所以, 可以直接由 R_{0-B} 按比例给出 R_1 。

如被测接地电阻很小, 且接线很长, 接线电阻可能带来较大的误差时, 应将仪器上的 C2、P2 端子拆开, 分别接向被测接地体。

不论用哪种方法测量接地电阻, 均应将被测接地体与其他接地体分开, 以保证测量的正确性。测量接地电阻应尽可能把测量回路同电力网分开, 以有利于测量的安全, 也有利于消除杂散电流引起的误差, 还能防止将测量电压反馈到与被测接地体连接的其他导体上而引起事故。

测量电极间的连线应避免与邻近的高压架空线路平行, 以防止感应电压的危险。测量电极的排列应避免

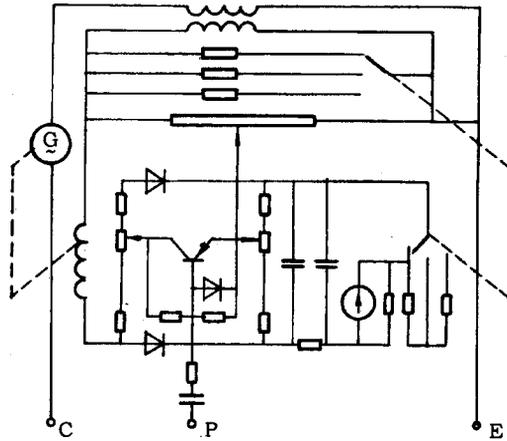


图 31-69 接地电阻测量仪内部接线

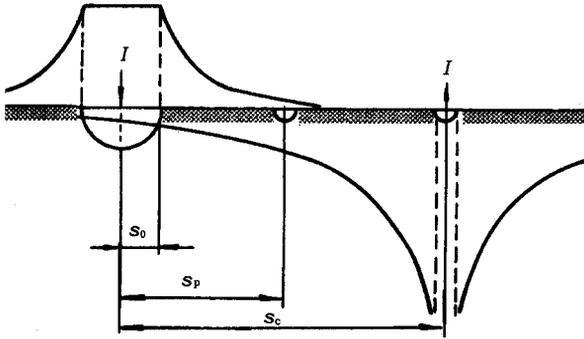


图 31-70 测量电极位置

免与地下金属管道平行,以保证测量结果的真实性

如测量电极位置选择不当,会产生很大的测量误差,而且土壤电阻率越高,测量误差越大。现以直线排列的半球接地体为例,分析测量电极位置选择不当所引起的误差和测量电极正确位置的选择。

如图 31-70 所示,测量仪所测得的流散电阻为

$$R_M = \frac{\rho}{2\pi s_0} - \frac{\rho}{2\pi s_p} + \frac{\rho}{\pi(s_c - s_p)} - \frac{\rho}{2\pi s_c}$$

而理论上半球接地体的流散电阻为

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi s_0}$$

测量值的绝对误差和相对误差分别为

$$\Delta R_a = R_M - R_0 = \frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{s_p} + \frac{1}{s_c - s_p} - \frac{1}{s_c} \right)$$

$$\Delta R_r = \frac{R_M - R_0}{R_0} \times 100\% = s_0 \left(-\frac{1}{s_p} + \frac{1}{s_c - s_p} - \frac{1}{s_c} \right)$$

设 $s_0 = 2\text{m}$, $s_p = 80\text{m}$, $s_c = 60\text{m}$, $\rho = 100\Omega \cdot \text{m}$, 可求得 $R_0 \approx 7.958\Omega$, $\Delta R_a \approx 0.332\Omega$, 得 $\Delta R_r \approx 4.17\%$ 。如 $s_0 = 20\text{m}$, 其他条件不变, 则 ΔR 不变, 但 ΔR_r 增大为 41.7% 。在后一种情况下, 即使将 s_0 扩大为 120m , s_p 扩大为 100m , 仍然有 $\Delta R_a \approx 0.504\Omega$, $\Delta R_r \approx 63.8\%$ 。由此可见, 如果测量电极位置选择不当, 可能产生很大的误差, 接地体占地越大时误差越大, 而且, 简单加大测量距离不一定能减小误差。因此, 必须适当选择测量距离。

对于图 31-71 所示的半球形接地极, 欲消除测量误差, 即使 $\Delta R_a = 0$, 必须保证

$$-\frac{1}{s_p} + \frac{1}{s_c - s_p} - \frac{1}{s_c} = 0$$

解此方程得 $s_p = 0.618s_c$ 。如果符合这个条件,各误差互相抵消,刚好测量得到真值。

对于平放地面的圆盘形接地体和测量电极,同样可以证明:当 $s_p = 0.618s_c$ 时,测量误差为零。

对于图 31-72 所示三角形排列的半球形或平置于地面的圆盘形被测接地体和测量电极,不难证明 $s_{cp} = 0.5s_c = 0.55s_p$ 时误差为零。这时,连线夹角接近 29° 。

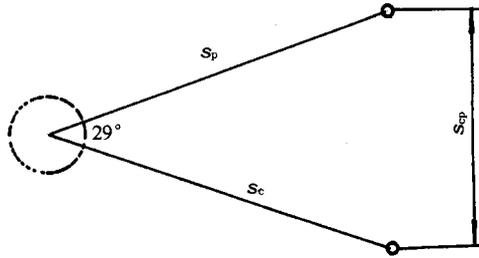


图 31-71 测量电极三角形排列

实际上被测接地体和测量电极既不是半球形的,也不是圆盘形的,最佳距离多少有些偏离上述理论关系。但对占地面积较大的网络接地体,上述关系是有指导意义的。当取 s_c 为接地网对角线长度的 2~3 倍,取 $s_c = 0.618s_c$ 时,即可得到满意的测量结果;如果有条件可取 s_c 为接地网对角线长度的 4~5 倍。对于集中埋设的小型复合接地体,可取 $s_c = 80\text{m}$;对于单管垂直接地体,可取 $s_c = 40\text{m}$;电流极与电压极之间的距离,一般应大于 20m,但当电流极由多根栏地体组成时,应大于 40m。当然,如果条件允许,可将电压极位置选择在不受被测接地体和电流极影响的零电位处。

上述关系都是对均匀土壤而定的,如果土壤不均匀,电极位置应作适当调整。

测量接地电阻还应该考虑到由交流电的磁场引起的感抗和交变极化构成的容抗、地下杂散电流等因素造成的影响。

2. 土壤电阻率的测量

土壤电阻率是接地设计的原始资料,可用电流表、电压表法测量或接地电阻测量仪测量。

一种测量办法是在取样地段垂直打入一根钢管,测量其流散电阻,再按下式换算即可得到土壤电阻率为

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln(4L/d)}$$

如果 $L = 2\text{m}$, $d = 0.06\text{m}$, 测量电极长度为 0.3m, 电极直线排列, 并取 $s_p = 20\text{m}$, $s_c = 40\text{m}$, 则由测量电极位置引起的误差不超过 1%。

传统电阻率测量采用四极法,如图 31-72 所示。四极法是将 4 个电极等距离排列成一条直线,测量中间两个电极之间的电压或电阻。如果测得中间两极之间的电阻为 R , 则土壤电阻率可按下式计算:

$$\rho = \frac{\pi LR}{\ln[\chi L + \sqrt{D^2 + L^2} (L + \sqrt{4D^2 + L^2})]}$$

如果埋入深度 $L \leq D/20$, 土壤电阻率可按下式计算:

$$\rho = 2\pi DR$$

对于不均匀土壤或分层土壤,取不同的极间距离 D , 将得到不同的 ρ 值。

(九) 接地装置的检查和维护

对接地装置进行定期检查的主要内容有:各部位连接是否牢固,有无松动,有无脱焊,有无严重锈蚀,接地线有无机械损伤或化学腐蚀,涂漆有无脱落,人工接地体周围有无堆放强烈腐蚀性物质,地面以下 50cm 以内接地线的腐蚀和锈蚀情况如何,接地电阻是否合格。

对接地装置进行定期检查的周期为:变、配电站接地装置,每年检查一次,并于干燥季节每年测量一次接地电阻;对车间电气设备的接地装置,每两年检查一次,并于干燥季节每年测量一次接地电阻;防雷接地装置,每年雨季前检查一次;避雷针的接地装置,每 5 年测量一次接地电阻;手持电动工具的接零线或接地线,

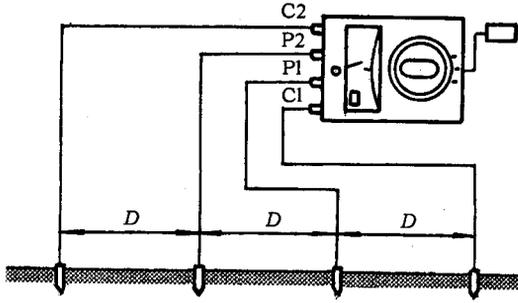


图 31 - 72 四极法测量土壤电阻率

每次使用前进行检查 ;有腐蚀性的土壤内的接地装置 ,每 5 年局部挖开检查一次。

应对接地装置进行维修的情况有 :焊接连接处开焊 ,螺丝连接处松动 ,接地线有机械损伤、断股或有严重锈蚀、腐蚀 ,锈蚀或腐蚀 30% 以上者应予更换 ,接地体露出地面 ,接地电阻超过规定值。

第三十二章 过电压与漏电保护

第一节 工频与谐振过电压

一、工频过电压

工频过电压的性质

工频过电压的频率为工频或接近工频,幅值不高,在中性点不接地或经消弧线圈接地的系统,约为工频电压的 $\sqrt{3}$ 倍,在中性点直接接地系统中,一般不允许超过1.5倍。

工频过电压常发生在故障引起的长线切合过程中。在发电机暂态电势 E'_G 为常数时,工频过电压处于暂态状态,持续时间不超过1s。由于在0.1~1s以内,工频过电压仅变化2%~ $\sqrt{3}$ %,一般多取0.1s左右的暂态数值作为参考值。此后,发电机自动电压调整器发生作用, E'_G 变化,在2~3s以后,系统进入稳定状态。此时的工频过电压称为工频稳态过电压。工频过电压的变化过程见图32-1。

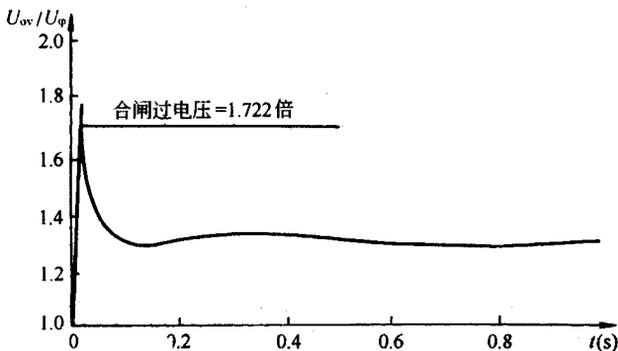


图 32-1 合空线时工频过电压的变化

工频过电压对220kV及以下电网的电气设备没有危害,在设计时可不考虑。

二、谐振过电压

(一) 谐振过电压的性质

电网中的电感、电容元件,在一定电源的作用下,并受到操作或故障的激发,使得某一自由振荡频率与外加强迫频率相等,形成周期性或准周期性的剧烈振荡,电压振幅急剧上升,出现严重谐振过电压。

谐振过电压的持续时间较长,甚至可以稳定存在,直到破坏谐振条件为止。谐振过电压可在各级电网中发生,危及绝缘,烧毁设备,破坏保护设备的保护性能。

各种谐振过电压可以归纳为三种类型:线性谐振、铁磁谐振和参数谐振。

限制谐振过电压的基本方法,一是尽量防止它发生,这就要在设计中做出必要的预测,适当调整电网参数,避免谐振发生。二是缩短谐振存在的时间,降低谐振的幅值,削弱谐振的影响。一般是采用电阻阻尼进行抑制。

(二) 线性谐振过电压及其限制

1. 线性谐振过电压的特点

(1) 参与谐振的各电参量均为线性。电感元件不带铁心或带有气隙的铁心,并与电容元件组成串联回路。

(2) 谐振发生在电网自振频率与电源频率相等或相近时。

(3) 多为空载线路不对称接地故障的谐振、消弧线圈补偿网络的谐振和某些传递过电压的谐振等。

2. 消弧线圈补偿网络的消谐

消弧线圈网络在全补偿运行状态(脱谐度 $V=0$),当发生单相接地、网络中出现零序电压时,便发生消弧线圈与导线对地电容的串联线性谐振。一般线路阻尼率不超过 5%。因此,这种谐振将会使中性点位移达 $0.5U_{\phi}$ 。

消除这种谐振的方法是采用欠补偿或过补偿运行方式。

一般装在电网的变压器中性点的消弧线圈,以及具有直配线的发电机中性点的消弧线圈采用过补偿方式(即 $V<0$)。这样可以保证在线路进行切除操作时或发生线路断线时,使容抗更大,不会产生谐振。

对于采用单元连接的发电机中性点的消弧线圈,一般采用欠补偿方式($V>0$)。这是因为单元接线的网络容抗比较固定,亦不易发生断线而采用欠补偿方式,发电机回路电容量较大,对于限制电容耦合传递过电压有利。

3. 变压器传递过电压的限制

变压器的高压侧发生不对称接地故障、断路器非全相或不同期动作而出现零序电压时,将通过电容耦合传递至低压侧。此时低压侧的传递过电压 U_2 为:

$$U_2 = U_0 (C_{12} / (C_{12} + C_0))$$

式中 U_1 ——高压侧出现的零序电压(kV);

C_{12} ——高低压绕组之间的电容(μF);

C_0 ——低压侧相对地电容(μF)。

这种过电压具有工频性质,将会危及绝缘或损坏避雷器。

避免产生零序过电压是防止变压器传递过电压的根本措施。这就要求尽量使断路器三相同期动作、避免在高压侧采用熔断器设备等。

在低压侧每相加装 $0.1\mu\text{F}$ 以上的对地电容,加大线路对地电容,是一种可靠的限制方法。

(三) 铁磁谐振过电压及其限制

1. 铁磁谐振过电压的特点

(1) 谐振回路由带铁心的电感元件(如空载变压器、电压互感器)和系统的电容元件组成。因铁心电感元件的饱和现象,使回路的电感参数呈非线性。

(2) 共振频率可以等于电源频率(基波共振),也可为其简单分数(分次谐波共振)或简单倍数(高次谐波共振)。

(3) 在一定的情况下可自激产生,但大多需要有外部激发条件。回路中事先经历过足够强烈的过渡过程的冲击扰动,它可突然产生或消失,当激发消除后,常能自保持。

(4) 在一定的回路损耗电阻的情况下,其幅值主要受到非线性电感本身严重饱和的限制。

2. 断线引起的铁磁谐振过电压的限制

电网因断线、断路器非全相动作、熔断器一相或两相熔断等而造成非全相运行时,电网电容与空载或轻

载运行的变压器的励磁电感可能组成多种多样的串联谐振回路,产生基频、分频或高频谐振。它可使电网中性点位移、绝缘闪络、避雷器爆炸。

限制断线引起的铁磁谐振过电压的措施为:

- (1) 在线路上不采用熔断器。
- (2) 采取措施,保证断路器不发生非全相拒动,或在发生拒动时,利用保护装置作用于上一级跳闸。
- (3) 在中性点接地电网中,操作中中性点不接地的负载变压器时,将变压器中性点临时接地。

3. 电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压的限制

中性点不接地系统中,由于电压互感器突然合闸,一相或两相绕组出现涌流,线路单相弧光接地时出现暂态涌流以及发生传递过电压时,可能使电磁式电压互感器三相电感程度不同地产生严重饱和,形成三相或单相共振回路,激发各次谐波谐振过电压。其中以分频谐振过电压危害最大,严重时可使电压互感器过热爆炸。

可采用下列措施消除由于电压互感器饱和引起的铁磁谐振过电压。

- (1) 选用励磁特性较好的电磁式电压互感器,或只用电容式电压互感器。
- (2) 在零序回路中加阻尼电阻。电压互感器开口三角绕组为零序电压绕组,在此绕组两端装设 $R \leq 0.4X_m$ 的电阻(X_m 为互感器在电压作用下归算至三角绕组上的单相绕组的励磁阻抗)。当只在网内一台电压互感器装设电阻时, X_m 应为网内所有电压互感器励磁阻抗的并联值。这种情况可能使电阻阻值过小,超过电压互感器的容量负担。此时,可通过低周波继电器,以便只在发生分频谐振时将电阻短时接入三角绕组,也可用零序过电压继电器将电阻投入 I_{min} ,然后再自动切除。

对于 35kV 及以下电网,推荐用白炽灯泡代替电阻。35kV 电网可接 220V、500W 灯泡,6~10kV 电网可接 220V、200W 灯泡。

- (3) 增大对地电容,可以破坏谐振条件。在 10kV 及以下母线上,装设中性点接地的星形接线电容器组(或用一段电缆代替架空线),使对地容抗 X_{c0} 满足:

$$X_{c0}/X_m < 0.01$$

- (4) 在电压互感器一次绕组的中性点或开口三角形绕组上装设微机消谐器

微机消谐器是一种利用微机进行谐波判断、监测、治理、报告结果的一种装置,它可准确地判断出发生谐振的频率、地点及谐振的程度,并作为阻尼量投入的确定的依据。装置的优点是抗干扰能力强,消谐频率范围宽,调试维护方便而又简单。

微机消谐器是利用 CPU 来控制并联在电压互感器二次侧开口三角形绕组上的晶闸管的运行状态,对电压互感器二次侧开口三角形的电压进行巡回监测,连续的对电网运行状态及有关参数进行采集处理,快速进行傅氏分析,并能判断是单相接地、过渡过程还是电网谐振等,然后确定执行元件晶闸管的投入。正常运行时,电压互感器开口三角形绕组的零序电压为零,或接近零,此时晶闸管关断,对电力系统没有任何影响。当电网不对称运行或发生故障时,微机会根据零序电压和频率的大小,进行计算分析和判断,并显示和发出声光信号,启动执行元件晶闸管,进行强阻尼,抑制了谐振。谐振消除后,该装置又作出相应的指示并记录。

微机消谐器的硬件框图。见图 32-2,软件框图见图 32-3。

4. 串联补偿电网中铁磁谐振过电压的限制

线路接有串联电容 C 和并联电抗 L 即形成 L—C 串联回路。当关合线路首端断路器,或在线路末端故障跳闸或投入串联补偿 C 时,都会引起回路的过渡过程和铁芯电感的涌流现象,从而激发谐振。由于 C 和 L 均较大,共振总是具有低频(1/3 次或更低次谐波)性质。

限制这种过电压的措施有:

- (1) 利用串联补偿装置的主保护间隙,在串补两端出现较高过电压时,瞬时击穿,将阻尼电阻接入回路中。
- (2) 并联电抗器的中性点经 100Ω 左右的电阻接地,可以阻止谐振的产生。

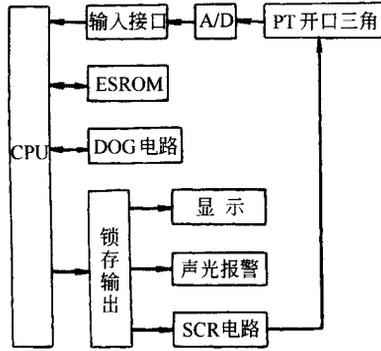


图 32-2 微机消谐装置的硬件框图

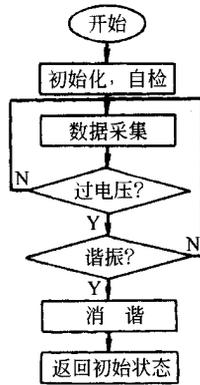


图 32-3 微机消谐装置的软件框图

第二节 操作过电压

一、操作过电压的性质

电网中的电容、电感等储能元件,在发生故障或操作时,由于其工作状态发生突变,将产生充电再充电或能量转换的过渡过程,电压的强制分量叠加以暂态分量形成操作过电压。其作用时间约在几毫秒到数十毫秒之间,倍数一般不超过 $4U_{\phi}$ 。

操作过电压的幅值与波形与电网的运行方式、故障类型、操作对象有关,再加上操作过程中其他多种随机因素的影响,使得对操作过电压的定量分析,太多依靠实测统计和模拟研究。

故障形态不同或操作对象不同,产生过电压的机理也不同。因而所采取的针对性限制措施也各异。

二、操作过电压的允许水平

操作过电压是决定电网绝缘水平的依据之一,特别是在超高压电网中,有时起着决定性的作用。目前,我国有关规程规定选择绝缘水平时,计算用操作过电压水平如下:

1. 相对地

35~63kV 及以下(非直接接地)内过电压 $4.0U_{\phi}$ 。

2. 相间

3~110kV,宜取相对地内过电压的 1.3~1.4 倍。

确定相间绝缘时,两相的电位宜分别取相间过电压的 +60% 和 -40%。

三、间歇电弧过电压及其限制

1. 间歇电弧过电压的性质

中性点不接地,电网发生单相接地时流过故障点的电流为电容电流。经验表明,在 3~10kV 电网的电容电流超过 30A、35kV 及以上电网的电容电流超过 10A 时,接地电弧不易自行熄灭,常形成熄灭和重燃交替的间歇性电弧。因而导致电磁能的强烈振荡,使故障相、非故障相和中性点都产生过电压。

这种过电压一般不超过 $3.0U_{\phi}$,极少达到 $3.5U_{\phi}$,低于绝缘的耐受水平。但它波及全电网,持续时间长,易发展成为相同故障,特别是对绝缘较弱的旋转电机构成威胁,影响安全运行。

2. 限制措施

在 3~10kV 电网的单相接地电流超过 30A 或 35kV 及以上电网超过 10A 时,可在中性点和大地之间接入消弧线圈,以减少单相接地电流,促成电弧自熄,防止发展成相间短路或烧损设备。在大型发电机回路和 6~10kV 电网,亦可采用高电阻接地的方式。

消弧线圈并不能限制间歇性电弧过电压的最大值,甚至在某些情况下可使过电压值更大。但它可使燃弧时间大为缩短,减少重燃次数,从而降低高幅值过电压出现的概率。

四、开断空载变压器过电压及其限制

1. 开断空载变压器过电压的性质

空载变压器的激磁电流很小,因此在开断时不一定在电流过零时熄弧,而在某一数值下被强制切断。这时,储存在电感线圈上的磁能将转化成为充电于变压器杂散电容上的电能,并振荡不已,使变压器各电压侧均出现过电压。

当变压器的铁心材料为热轧硅钢片、线圈型式为连续式线圈时,励磁电流多为额定电流的百分之几,杂散电容约为数千 pF,开断空载变压器过电压较高,一般不超过 $4.0U_{\phi}$,当变压器采用冷轧硅钢片、纠结式线圈时,激磁电流一般不超过额定电流的百分之一、杂散电容亦较大,因而过电压一般不超过 $3.0U_{\phi}$ 。

2. 限制措施

对冷轧硅钢片、纠结式线圈、110kV 及以下电压的变压器,一般不需对开断空载变压器过电压进行保护。除此以外,均应采取保护措施。

开断空载变压器过电压的能量很小。其对绝缘的作用不超过雷电冲击波的作用。因此,采用普阀式避雷器即可获得可靠保护效果。但需注意:

(1) 避雷器应接在断路器和变压器之间,在非雷雨季节也不得断开。

(2) 如果变压器的高低压侧电网中性点接地方式一致,避雷器可在高压侧或低压侧只装一组。如果中性

点接地方式不一致,而且利用低压侧的避雷器保护高压侧时,低压侧应装磁吹避雷器。

(3)对6~10kV容量较小的干式变压器,当采用真空断路器时,可在一次侧加设 $0.1\mu\text{F}$ 左右的电容器。若将电容器安装在低压侧,电容值应取 $C_2=0.1K^2$ (K 为变压器的变比)。

(4)灭弧性能较差的断路器,或者断路器断口间装有1万欧以上的高阻值并联电阻,或者变压器的某一电压侧连接有大于100m的电缆时,断开空载变压器过电压会大为降低。但在工程设计中不宜采用上述方法作为专门的限制措施。

五、开断并联电抗器过电压及其限制

1. 开断并联电抗器过电压的性质

并联电抗器在超高压系统中中和静止补偿装置中都需要装设。开断并联电抗器和开断空载变压器一样,都是开断电感性负载,开断过程中如出现截流,就会产生过电压。但两者有以下两点不同:

(1)开断的电流为电抗器的额定电流,远比开断空载变压器的激磁电流要大。

(2)切断电流时,断路器断口间的瞬态恢复电压固有频率不同,开断变压器的频率为数百Hz,开断电抗器却为数千Hz或更大,使断路器更难开断。

国外的统计表明,大的开断电流反而截流值较低,不会产生过高的过电压。但高频率的恢复电压会给无分闸并联电阻的断路器带来熄弧困难,容易产生重燃,并可能产生高额重燃过电压,损坏断路器。

2. 限制措施

(1)选用带分闸并联电阻的断路器。

(2)在断路器与并联电抗器之间装设磁吹避雷器或氧化锌避雷器。

(3)在超高压并联电抗器前不装设断路器,把并联电抗器视为线路的一部分,用线路断路器进行操作。

(4)电压较低的并联电抗器,采用了熄弧能力较强的真空断路器时,可在回路中装设CR吸收装置。它可以降低截流值,扼制重燃时的高频电流,减缓过电压波头,使断路器易于熄弧。电容值及电阻值通过试验确定。

六、开断高压电动机过电压及其限制

1. 开断高压电动机过电压的性质

开断高压电动机也是开断感性负载。它可能产生三种类型的过电压:截流过电压、三相同时开断过电压和高频重燃过电压。

截流过电压主要发生在电动机空载运行开断时,而更高的过电压则发生在电动机启动或制动过程中开断。因为此时电动机的磁场储能要大得多。振荡频率高于1kHz,过电压制值可高达5~6倍。

三相同时开断过电压和高频重燃过电压多产生在使用截流能力很强的真空断路器的情况下。三相同时开断,必然有两相的截流值很大,所以实际上也是一种截流过电压的表现形式。

高频重燃过电压是由于开断后产生的高频振荡,使断路器发生多次重燃造成的。此频率高达 $10^5\sim 10^6\text{Hz}$,陡度极大,幅值随着重燃次数的增加而提高,可达4~5倍。

开断高压电动机过电压容易损坏断路器,并严重危害电动机的主绝缘和匝间绝缘。电动机容量越小,这种过电压越高。当6kV电动机容量小于200kW时,或者采用真空断路器时应采取保护措施。

2. 限制措施

(1)在电动机与断路器之间装设氧化锌避雷器。氧化锌避雷器的参数应与电动机的绝缘水平相配合。选择方法见本章绝缘配合部分。

(2)当采用了真空断路器时,为了降低过电压陡度,可在避雷器旁并联一组 $0.5\mu\text{F}$ 左右的电容器。

(3)在回路中安装电容—电阻限压装置。电容和电阻串联。电容可为 $0.5\sim 5\mu\text{F}$,电阻可为数十到数百

欧。其作用是消耗过电压的能量,并限制重燃时的高频电流。

七、开断空载长线过电压及其限制

1. 开断空载长线过电压的性质

空载长线相当于一个容性负载。在断路器开断工频电容电流过零熄弧后,便会有一个接近幅值的相电压被残留在线路上。若此时断路器触头发生重燃,相当于一次合闸,使线路重新获得能量。电压波的振荡反射,使过电压按重燃次数依次递增。

开断空载长线过电压具有明显的随机性。断路器触头的重燃、重燃后电弧熄灭的角度和断路器的同期性能等都是随机变量,因而使这种过电压难以进行定量计算,大多需要借助实测统计。过电压的大小尚与母线电容量、出线回路数、线路长度、电源阻抗等因素有关。但是,只要断路器不发生重燃,这种过电压将不会超过 2 倍。

国内统计,使用重燃次数较少的空气断路器,不超过 U_{ϕ} 的 2.6 倍,使用少油断路器,不超过 2.8 倍,使用有中值或低值分压电阻的空气断路器不超过 2.2 倍,在中性点非直接接地的 63kV 及以下电网中,不超过 3.5 倍。这种过电压符合正态分布规律。

目前,我国 220kV 及以下电网,使用的油断路器重燃较多,故开断空载长线过电压就成为确定这些电网绝缘水平的控制条件。

2. 限制措施

(1) 采用不重燃或重燃率较低的断路器:我国目前生产的空气断路器、带有压油活塞的少油断路器和六氟化硫断路器,在开断空载长线时重燃率较低。

(2) 断路器加装分闸并联电阻:并联电阻在开断过程中短时接入回路,可以泄放残留电荷,降低恢复电压,从而避免重燃或降低重燃过电压。阻值一般取数千欧(为中值电阻),可按下式估计:

$$R = 3(\omega C_0)$$

式中 R ——并联电阻阻值(Ω);

C_0 ——线路对地电容 μF ;

ω ——角频率, $= 2\pi f$ 。

在 110 中性点直接接地电网中,过电压最大值为 $2.8U_{\phi}$,低于绝缘水平 $3U_{\phi}$,而且少油断路器装置并联电阻困难,故一般不装并联电阻。

(3) 线路侧接入电磁式电压互感器:由于电磁式电压互感器直流电阻约为 $3 \sim 15\text{k}\Omega$,通过它泄放残留电荷,可使重燃过电压降低 30% 左右。当线路很长,超过了断路器保证的切空线长度时,可采用此辅助措施。

(4) 并联电抗器

并联电抗器的存在,可使线路电压振荡频率接近于工频,恢复电压上升速率下降,可以避免重燃或者降低重燃后的过电压幅值。应注意,一般并不为限制这种过电压而专门设置并联电抗器。

(5) 采用磁吹避雷器或氧化锌避雷器;一般将此措施作为最后一道防线。

八、开断电容器组过电压及其限制

1. 开断电容器组过电压的性质

开断电容器组产生过电压的原理与开断空载导线过电压类似,都是由于断路器重燃引起的。开断三相中性点不接地的电容器时,再加上断路器三相不同期,会在电容器端部、极间和中性点上都出现较高的过电压。

过电压的幅值会随着重燃次数增加而递增。如果开断电容器时,母线上带有线路或其他电容器组,将会降低重燃后的初始电压,从而降低过电压幅值。减小断路器三相的不同期性,将减小中性点的位移电压,从

而降低对地过电压。

2. 限制措施

(1) 将电容器组分为若干小组,分别用断路器进行操作控制。当被切除的电容器容量相对于母线电容较小时,由于过电压起始值的降低,将降低重燃率或降低过电压幅值。需注意,电容器分组的目的,主要是为了无功调节的方便,兼顾断路器的开断能力和避雷器的通流能力。

(2) 当电容器组容量在数千 kVar 以上时,可采用灭弧能力强的少油断路器、六氟化硫断路器或真空断路器。因为开断操作时该类断路器不发生重燃,将是限制这种过电压的根本措施。

(3) 在多油断路器上加装分闸并联电阻,能够改善断路器开断口上的恢复电压,也能够降低重燃后的过电压,还能够抑制尖合电容器冲击电流的幅值。并联电阻选择的原则如下:当以减少发生重燃为目的时,并联电阻为

$$R = (2.5 \sim 3) X_c$$

式中 R ——并联电阻(Ω);

X_c ——电容器组容抗(Ω)。

如果断路器开断性能较差,装设了并联电阻,仍不能保证不发生重燃,则应力求使重燃过电压最低。此时

$$R = (0.3 \sim 0.5) X_c$$

(4) 装设避雷器保护。由于电容器的极间绝缘要比对地(外壳)绝缘弱,10s 工频耐压仅为额定电压的 2.15 倍,应注意加强对极间绝缘的保护。只要能够保护住极间绝缘,中性点位移得到控制,断路器断口的恢复电压便会降低,重燃可能性大大减少,也就相应地解决了相对地保护问题。相反,如果仅保护相对地绝缘,并不能保护极间的绝缘。因此,推荐图 1-25 所示接线供工程设计参考,并以采用氧化锌避雷器为宜。

第三节 变配电所的过电压保护

变配电所的过电压保护,包括防直击雷保护、雷电侵入波过电压保护和变配电所高压侧的简易保护三部分。

一、防直击雷保护

防直击雷保护的措施如下:

1. 变电所的屋外配电装置应装设防直击雷保护装置。对已在相邻高建筑物保护范围内的设备,可不装防直击雷的保护装置。配电室如应设防直击保护装置,当屋顶上有金属结构时,将金属部分接地;当屋顶为钢筋混凝土结构时,将其焊接成网接地;当结构为非导电的屋顶时,采用避雷网保护,网格尺寸为 $(8 \sim 10) \text{m} \times (8 \sim 10) \text{m}$,每隔 10~20m 应设引下线接地。引下线处应设集中接地装置并和接地网连接。

2. 35kV 及以下的屋外高压配电装置宜采用独立避雷针或避雷线保护。避雷针、避雷线应设独立的接地装置,接地电阻不应超过 10 Ω 。当有困难时,其接地装置可与主接地网连接,但从避雷针与主接地网的地下连接点至 35kV 及以下高压设备与主接地网的地下连接点之间,接地体的长度不应小于 15m。

3. 装有避雷针、避雷线的构架上的照明灯电源线,必须采用直接埋地的带金属外皮的电缆或穿入金属管中的导线,当电缆外皮或金属管埋地长度在 10m 以上时,才允许与 35kV 及以下配电装置的接地网及低压配电装置相连接。独立避雷针不应设在人员经常通行的地方,避雷针及其接地装置与道路或建筑物的出入口等的距离不宜小于 3m,否则应采取均压措施或敷设砾石或沥青地面。

4. 装在构架上的避雷针应与接地网连接,并应在其附近装设集中接地装置。装有避雷针的构架上,接地部分与带电部分间的空气中距离不应小于绝缘子串的长度;但在空气污秽地区,如有困难,空气中距离可按

非污秽区标准绝缘子串的长度确定。装在架构(不包括变压器门型架构)上的避雷针与主接地网的地下连接点至变压器接地线与主接地网的地下连接点之间,沿接地体的长度不应小于15m。

5. 在变压器门型架构上和离变压器主接地线小于15m的配电装置的架构上,当土壤电阻率大于 $350\Omega\cdot\text{m}$ 时,可装设避雷针、避雷线。其要求如下:

① 装在变压器门型架构上的避雷针应与接地网连接,并应沿不同方向引出3~4根放射形水平接地体。每根水平接地体离避雷针架构3~5m处应装设一根垂直接地体。

② 直接在3~35kV变压器的所有绕组出线上或在离变压器电气距离不大于5m处装设阀型避雷器。高压侧电压为35kV的变电所,在变压器门型架构上装设避雷针时,配电装置接地电阻不应超过 4Ω (不包括架构基础的接地电阻)。

6. 35kV配电装置,在土壤电阻率不大于 $500\Omega\cdot\text{m}$ 的地区,允许将线路的避雷线引接到出线门型架构上,但应装设集中接地装置。在土壤电阻率大于 $500\Omega\cdot\text{m}$ 的地区,避雷线应架设到线路终端杆塔为止。从线路终端杆塔到配电装置的一档线路保护,可采用独立避雷针,也可在线路终端杆塔上装设避雷针。

7. 不允许在装有避雷针、避雷线的构筑物上架设通信线、广播线和低压线。

8. 独立避雷针与配电装置带电部分、变电所电力设备接地部分、架构接地部分之间的空气距离应满足

$$S_k \geq 0.2R_{ch} + 0.1h$$

式中 S_k ——空气中距离(m);

R_{ch} ——独立避雷针的冲击接地电阻(Ω);

h ——避雷针检验点的高度(m)

9. 独立避雷针的接地装置与变电所接地网间的地中距离为

$$S_d \geq 0.3R_{ch}$$

式中 S_d ——地中距离(m)

10. 一端绝缘另一端接地的避雷线与配电装置带电部分、变电所电力设备接地部分以及架构接地部分间的空气距离为

$$S_k \geq 0.2R_{ch} + 0.1(h + \Delta l)$$

式中 S_k ——空气距离(m);

h ——避雷线支柱的高度(m);

Δl ——避雷线上校验的雷击点与接地支柱的距离(m)

对两端接地的避雷线空气中距离 S_k 应为

$$S_k \geq \beta' [0.2R_{ch} + 0.1(h + \Delta l)]$$

$$\beta' = \frac{L_2 + h}{l_2 + \Delta l_1 + 2h}$$

式中 β' ——避雷线分流系数;

Δl ——避雷线上校验的雷击点与最近支柱间的距离(m);

l_2 ——避雷线上校验的雷击点与另一端支柱间的距离(m),

$$l_2 = l - \Delta l_1;$$

l ——避雷线两支柱间距离(m)

11. 避雷线的接地装置与变电所接地网的地中距离 S_d ,当避雷线一端绝缘,另一端接地时

$$S_d \geq 0.3\beta'R_{ch}$$

此外,对避雷针和避雷线,空气中距离不小于5m,地中距离不宜小于3m。

二、雷电侵入波过电压保护

雷电侵入波过电压保护的有关规定如下:

1. 变电所应采取措施防止或减少近区雷击闪络。未沿全线架设避雷线的 35kV 架空线路,应在变电所 1~2km 的进线段架设避雷线。进线保护段上的避雷线保护角不应超过 20°,最大不应超过 30°。

2. 未沿全线架设避雷线的 35kV 架空线路,在变电所的进线段,应按下列要求装设排气式避雷器:

①在木杆或木横担钢筋混凝土杆线路进线段首端,应装设一组排气式避雷器,工频接地电阻不宜超过 10Ω。铁塔或铁横担、瓷横担的钢筋混凝土杆线路,以及全线有避雷线的线路,其进线段首端,一般不装设排气式避雷器。

②在雷雨季节,如变电所 35kV 进线的隔离开关或断路器可能经常断路运行,同时其线路侧又带电,则应在靠近隔离开关或断路器处装设一组排气式避雷器,其外间隙值的整定,应使其在断路运行时,能可靠地保护隔离开关或断路器,而在闭路运行时,不应动作。若避雷器的间隙值整定有困难,或无适当参数的排气式避雷器,可用阀型避雷器代替。

3. 变电所的 35kV 进线段,在电缆与架空线的连接处应装设阀型避雷器,其接地端应与电缆的金属外皮连接。对三芯电缆末端的金属外皮应直接接地;对单芯电缆,应经接地器或保护间隙接地。

4. 如电缆长度不超过 50m,或虽超过 50m,但经校验装设一组避雷器即能符合保护要求时,可以在电缆首端或母线上装设一组阀型避雷器。

5. 如电缆长度超过 50m,且断路器在雷雨季节可能经常断路运行,应在电缆末端装设排气式避雷器或阀型避雷器。连接电缆的 1km 架空线路,应架设避雷线。电缆线路一变压器组接线的变电所,可不装设阀型避雷器。

6. 具有架空进线的 35kV 变电所敞开式高压配电装置,每组母线上应装设阀型避雷器,阀型避雷器至主变压器、电磁式电压互感器的最大电气距离超过下列允许值时,应在主变压器附近增设一组阀型避雷器。

其允许值规定如下:

①进线长度为 1km 时,允许值为 26~54m;

②进线长度为 1.5km 时,允许值为 40~76m;

③进线长度为 2km 时,允许值为 52~104m。

进线路数越多时,允许值为较大值。

7. 变电所内所有阀型避雷器应以最短的接地线与配电装置的主接地网连接,同时应在其附近装设集中接地装置。

8. 35kV 装有标准绝缘水平的设备和标准特性阀型避雷器,且高压配电装置采用单母线、双母线或分段的电气主接时,碳化硅普通阀式避雷器与主变压器、电磁式电压互感器间的最大电气距离按上述允许值确定,对其他电器的最大电气距离可相应增加 35%。

9. 35kV 开关站应根据其重要性和进线路数等条件,在每路进线上或母线上装设阀式避雷器。

10. 不接地及经消弧线圈接地系统中的变压器中性点,一般不装设保护装置;中性点接有消弧线圈的变压器,如有单进线运行可能,也应在中性点装设保护装置。该保护装置应选用碳化硅普通阀型避雷器或有串联间隙的金属氧化物避雷器,其额定电压为:当系统指标称电压为 35kV 时,普通避雷器的额定电压为 41kV,金属氧化物避雷器的额定电压为 42kV。

11. 与架空线连接的三绕组变压器的低压绕组若有开路运行的可能,变压器低压绕组出线上需装设一组阀型避雷器。若该绕组连有 25m 及以上埋地金属外皮电缆段,则可不装设避雷器。

12. 变电所 3~10kV 配电装置(包括电力变压器),在每组母线和架空进线上装设阀型避雷器,并采用保护接线。母线上阀型避雷器与主变压器的最大电气距离如下:

①进线路数为 1 时,最大电气距离为 15m;

②进线路数为 2 时,最大电气距离为 23m;

③进线路数为 3 时,最大电气距离为 27m;

④进线路数 ≥ 4 时,最大电气距离为 30m。

13. 有电缆段的架空线路,阀型避雷器应装设在电缆头附近,其接地端应与电缆金属外皮相连。如各架空线均有电缆段,阀型避雷器与主变压器的最大电气距离不受限制。

阀型避雷器应以最短的接地线与主变电所、配电所的主接地网连接(包括通过电缆金属外皮连接)。阀

型避雷器附近应装设集中接地装置。

3~10kV 配电所,当无所用变压器时,可在每路进线上装设阀型避雷器。

三、35/6~10kV 变电所高压侧的简易保护

35/6~10kV 变电所高压侧防雷保护措施如下:

1. 变电所的 35kV 进线,若架设避雷线有困难或在地阻率大于 $500\Omega\cdot\text{m}$ 的地区,进线段杆塔接地电阻难以达到 10Ω 以下时,可在进线的终端杆上装设一组电抗线圈和一组排气式避雷器或保护间隙。

2. 容量为 3150~5000kVA 的变电所 35kV 侧,可根据负荷的重要性及雷电活动的强弱等条件,适当简化保护接线。变电所进线段的避雷线长度可减少至 500~600m,但其首端排气式避雷器或保护间隙的接地电阻不应超过 5Ω 。

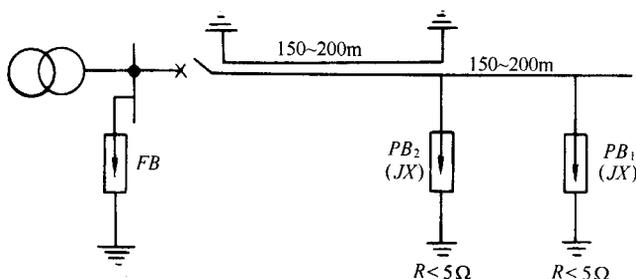


图 32-4 容量为 3150kVA 以下的 35kV 变电所的简易保护接线

3. 容量为 3150kVA 以下,供非重要负荷的变电所 35kV 侧,根据雷电活动的强弱。可采用图 32-4 的保护接线,容量为 1000kVA 及以下的变电所可采用图 32-5 的保护接线。

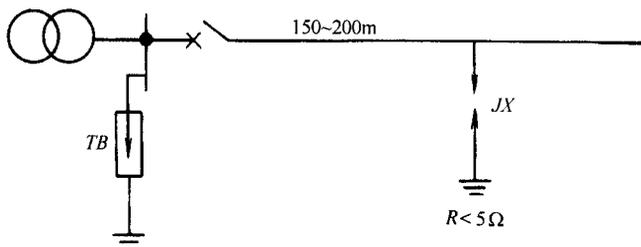


图 32-5 容量为 3150kVA 以下的 35kV 变电所的简易保护接线

4. 容量为 3150kVA 以下供非重要负荷的 35kV 分支变电所,根据雷电活动强弱采用短分支线或长分支线的保护接线。

5. 简易保护接线的复电所 35kV 侧,阀型避雷器与主变压器和电压互感器的最大电气距离不应超过 10m。

6. 3~10kV 配电系统中的配电变压器,应装阀型避雷器保护。保护装置应尽量靠近变压器装设,其接地线应与变压器低压侧中性点以及金属外壳和低压避雷器接地线连在一起接地。

7. 多雷区的 3~10kV 的配电变压器,其接线方式为 Y_{y0} 和 Y_{y} 时,除在高压侧装设避雷器外,还应在低压侧装设一组阀型避雷器,以防止反复换波和低压侧雷电侵入波击穿高压侧绝缘,但厂区内的变压器,可根据运行经验确定。低压中性点不接地的配电变压器,应在中性点装设击穿保险器。

8. 35/0.4kV 配电变压器,其高低压侧均应用阀型避雷器保护。

9. 3~10kV 柱上断路器和负荷开关应装设阀型避雷器保护。经常断路运行而又带电的柱上断路器、负荷开关或隔离开关,在带电侧装设阀型避雷器,其接地线应与柱上断路器等的金属外壳连接,且接地电阻不

应超过 10Ω 。装在架空线上的电容器,应装设阀型避雷器保护。

10. 在多雷区或易遭雷击的地段,直接与架空线路连接的电能表应装设防雷装置。

11. $220/380\text{V}$ 低压架空线路接户线的绝缘子铁脚应接地,接地电阻不应超过 30Ω 。土壤电阻率在 $200\Omega\cdot\text{m}$ 及以下的铁横担钢筋混凝土杆线路,由于连续多杆自然接地作用,可不另设接地装置。

屋内有电气设备接地装置的建筑物,在建筑物入口处应将绝缘子铁脚与该接地装置相连接,可不另设接地装置。年平均雷暴日数不超过 30 天的地区、低压线路被建筑物等屏蔽的地区,以及接户线距低压线路接地点不超过 50m 的地方,接户线绝缘子铁脚可不接地。

第四节 漏电保护装置的原理与分类

一、漏电保护装置的原理

电气设备漏电时,将呈现出异常的电流和电压信号。漏电保护装置通过检测此异常电流或异常电压信号,经信号处理,促使执行机构动作,藉助开关设备迅速切断电源。根据故障电流动作的漏电保护装置是电流型漏电保护装置,根据故障电压动作的是电压型漏电保护装置。早期的漏电保护装置为电压型漏电保护装置,因其存在结构复杂、受外界干扰动作特性稳定性差、制造成本高等缺点,已逐步被淘汰,取而代之的是电流型漏电保护装置。电流型漏电保护装置得到了迅速的发展,并占据了主导地位。目前,国内外漏电保护装置的研制生产及有关技术标准均以电流型漏电保护装置为对象。下面主要对电流型漏电保护装置(即 RCD)进行介绍。

(一) 漏电保护装置的组成

图 32-6 是漏电保护装置的组成方框图。其构成主要有三个基本环节,即检测元件、中间环节(包括放大元件和比较元件)和执行机构。其次,还具有辅助电源和试验装置。

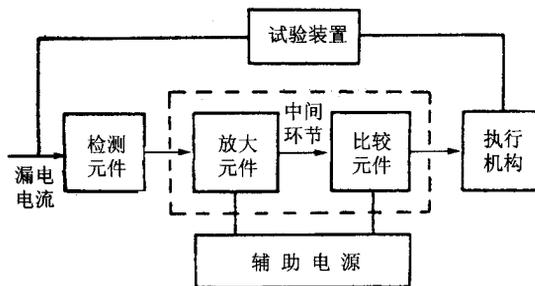


图 32-6 漏电保护器组成框图

1. 检测元件。它是一个零序电流互感器,如图 32-7 所示。图中,被保护主电路的相线和中性线穿过环形铁心构成了互感器的一次线圈 N_1 ,均匀缠绕在环形铁心上的绕组构成了互感器的二次线圈 N_2 。检测元件的作用是将漏电电流信号转换为电压或功率信号输出给中间环节。

2. 中间环节。该环节对来自零序电流互感器的漏电信号进行处理。中间环节通常包括放大器、比较器、脱扣器(或继电器)等,不同型式的漏电保护装置在中间环节的具体构成上型式各异。

3. 执行机构。该机构用于接收中间环节的指令信号,实施动作,自动切断故障处的电源。执行机构多为带有分励脱扣器的自动开关或交流接触器。

4. 辅助电源。当中间环节为电子式时,辅助电源的作用是提供电子电路工作所需的低压电源。

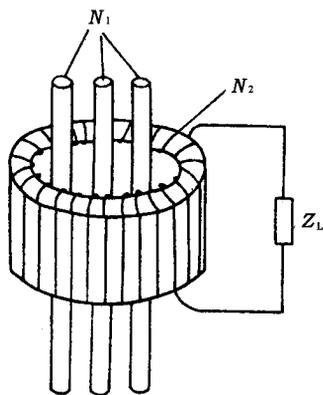


图 32-7 漏电电流互感器

5. 试验装置。这是对运行中的漏电保护装置进行定期检查时所使用的装置。通常是用一只限流电阻和检查按钮相串联的支路来模拟漏电的路径,以检验装置能否正常动作。

(二) 漏电保护装置的工作原理

图 32-8 是某三相四线制供电系统的漏电保护电气原理图。现通过此图,对漏电保护装置的原理进行说明。图中 TA 为零序电流互感器,GF 为主开关,TL 为主开关 GF 的分励脱扣器线圈。

在被保护电路工作正常、没有发生漏电或触电的情况下,由克希荷夫定律可知,通过 TA 一次侧电流的相量和等于零。这使得 TA 铁心中磁通的相量和也为零。TA 二次侧不产生感应电动势。漏电保护装置不动作,系统保持正常供电。

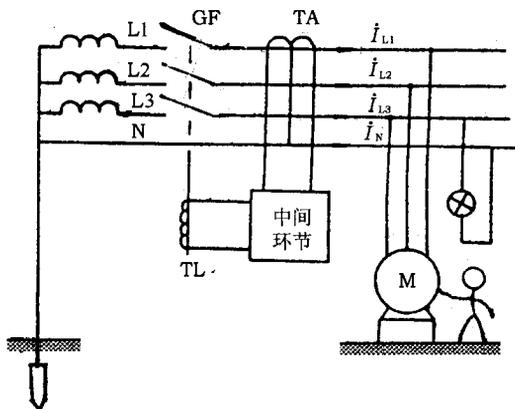


图 32-8 漏电保护器工作原理

当被保护电路发生漏电或有人触电时,由于漏电电流的存在,通过 TA 一次侧各相负荷电流的相量和不再等于零,即产生了剩余电流。这就导致了 TA 铁心中磁通的相量和也不再为零,即在铁心中出现了交变磁通。在此交变磁通作用下,TA 二次侧线圈就有感应电动势产生。此漏电信号经中间环节进行处理和比较,当达到预定值时,使主开关分励脱扣器线圈 TL 通电,驱动主开关 GF 自动跳闸,迅速切断被保护电路的供电电源,从而实现保护。

二、漏电保护装置的分类

(一)按漏电保护装置中间环节的结构特点分类

1. 电磁式漏电保护装置。其中间环节为电磁元件,有电磁脱扣器和灵敏继电器两种型式。电磁式漏电保护装置因全部采用电磁元件,使得其耐过电流和过电压冲击的能力较强,因而无需辅助电源,当主电路缺相时仍能起漏电保护作用。但其灵敏度不易提高,且制造工艺复杂,价格较高。

2. 电子式漏电保护装置。其中间环节使用了由电子元件构成的电子电路,有的是分立元件电路,有的是集成电路。中间环节的电子电路用来对漏电信号进行放大、处理和比较。其特点是灵敏度高、动作电流和动作时间调整方便、使用耐久。但电子式漏电保护装置对使用条件要求严格,抗电磁干扰性能较差,当主电路缺相时,可能会因失去辅助电源而丧失保护功能。

(二)按结构特征分类

1. 开关型漏电保护装置。它是一种将零序电流互感器、中间环节和主开关组合安装在同一机壳内的开关电器,通常称为漏电开关或漏电断路器。其特点是:当检测到触电、漏电后,保护器本身即可直接切断被保护主电路的供电电源。这种保护器有的还兼有短路保护及过载保护功能。

2. 组合型漏电保护装置。它是一种由漏电继电器和主开关通过电气连接组合而成的漏电保护装置。当发生触电、漏电故障时,由漏电继电器进行信号检测、处理和比较,通过其脱扣器或继电器动作,发出报警信号,也可通过控制触点去操作主开关切断供电电源。漏电继电器本身不具备直接断开主电路的功能。

(三)按安装方式分类

1. 固定位置安装、固定接线方式的漏电保护装置;
2. 带有电缆的可移动使用的漏电保护装置。

(四)按极数和线数分类

按照主开关的极数和穿过零序电流互感器的线数可将漏电保护装置分为:单极二线漏电保护装置、二极漏电保护装置、二极三线漏电保护装置、三极漏电保护装置、三极四线漏电保护装置和四极漏电保护装置。其中,单极二线漏电保护装置、二极三线漏电保护装置、三极四线漏电保护装置均有一根直接穿过零序电流互感器而不能被主开关断开的中性线。

(五)按运行方式分类

1. 不需要辅助电源的漏电保护装置;
2. 需要辅助电源的漏电保护装置。此类中又分为辅助电源中断时可自动切断的漏电保护装置和辅助电源中断时不可自动切断的漏电保护装置。

(六)按动作时间分类

按动作时间可将漏电保护装置分为:快速动作型漏电保护装置、延时型漏电保护装置和反时限型漏电保护装置。

(七)按动作灵敏度分类

按动作灵敏度可将漏电保护装置分为:高灵敏度型漏电保护装置、中灵敏度型漏电保护装置和低灵敏度型漏电保护装置,

第五节 漏电保护装置的技术参数与应用

一、漏电保护装置的主要技术参数

(一) 关于漏电动作性能的技术参数

关于漏电动作性能的技术参数是漏电保护装置最基本的技术参数,包括漏电动作电流和漏电动作时间。

1. 额定漏电动作电流 ($I_{\Delta n}$)。它是指在规定的条件下,漏电保护装置必须动作的漏电动作电流值。该值反映了漏电保护装置的灵敏度。

我国标准规定的额定漏电动作电流值为 6mA, 10mA (15mA), 30mA (50mA) (75mA), 100 mA (200 mA), 300 mA, 500 mA, 1 000 mA, 3 000 mA, 5 000 mA, 10 000 mA, 20000 mA 共 15 个等级(带括号的值不推荐优先采用)。其中, 30mA 及其以下者属高灵敏度,主要用于防止各种人身触电事故; 30mA 以上至 1000mA 者属中灵敏度,用于防止触电事故和漏电火灾; 1000mA 以上者属低灵敏度,用于防止漏电火灾和监视一相接地事故。

2. 额定漏电不动作电流 ($I_{\Delta no}$)。它是指在规定的条件下,漏电保护装置必须不动作的漏电不动作电流值。为了防止误动作,漏电保护装置的额定不动作电流不得低于额定动作电流的 1/2。

3. 漏电动作分断时间。它是指从突然施加漏电动作电流开始到被保护电路完全被切断为止的全部时间。为适应人身触电保护和分级保护的需要,漏电保护装置有快速型、延时型和反时限型三种。快速型适用于单级保护,用于直接接触电击防护时必须选用快速型的漏电保护装置。延时型漏电保护装置人为地设置了延时,主要用于分级保护的首端。反时限型漏电保护装置是配合人体安全电流—时间曲线而设计的,其特点是漏电电流愈大,则对应的动作时间愈小,呈现反时限动作特性。

快速型漏电保护装置动作时间与动作电流的乘积不应超过 $30\text{mA}\cdot\text{s}$ 。

我国标准规定漏电保护装置的動作時間見表 32-1,表中額定電流 $\geq 40\text{A}$ 的一欄適用於組合型漏電保护装置。

延时型漏电保护装置延时时间的优选值为 0.2 s, 0.4 s, 0.8 s, 1 s, 1.5 s, 2 s。

(二) 其他技术参数

漏电保护装置的其他技术参数的额定值主要有:

1. 额定频率为 50Hz;
2. 额定电压为 220V 或 380V;
3. 额定电流 (I_n) 为 6A, 10A, 16A, 20A, 25A, 32A, 40A, 50A (60A), 63A (80A), 100A (125A), 160A, 200A, 250A (带括号值不推荐优先采用)。

(三) 接通分断能力

漏电保护装置的接通分断能力应符合表 32-2 的规定。

二、漏电保护装置的应用

(一) 漏电保护装置的选用

选用漏电保护装置应首先根据保护对象的不同要求进行选型,既要保证在技术上有效,还应考虑经济上的合理性。不合理的选型不仅达不到保护目的,还会造成漏电保护装置的拒动作或误动作。正确合理地选用漏电保护装置,是实施漏电保护措施的关键。

表 32-1 漏电保护装置的動作时间

额定动作 电流 $I_{\Delta n}$ /mA	额定电流 /A	動作时间/s			
		$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	0.5A	$5I_{\Delta n}$
≤ 30	任意值	0.2	0.1	0.04	—
> 30	任意值	0.2	0.1	—	0.04
	≥ 40	0.2	—	—	0.15

表 32-2 漏电保护开关的分断能力

额定动作电流 $I_{\Delta n}$ /mA	接通分断电流/A
$I_{\Delta n} \leq 10$	≥ 300
$10 < I_{\Delta n} \leq 50$	≥ 500
$50 < I_{\Delta n} \leq 100$	≥ 1000
$100 < I_{\Delta n} \leq 150$	≥ 1500
$150 < I_{\Delta n} \leq 200$	≥ 2000
$200 < I_{\Delta n} \leq 250$	≥ 300

1. 动作性能参数的选择:

(1) 防止人身触电事故。用于直接接触电击防护的漏电保护装置应选用额定动作电流为 30mA 及其以下的高灵敏度、快速型漏电保护装置。

在浴室、游泳池、隧道等场所,漏电保护装置的额定动作电流不宜超过 10mA。

在触电后,可能导致二次事故的场合,应选用额定动作电流为 6mA 的快速型漏电保护装置。

漏电保护装置用于间接接触电击防护时,着眼点在于通过自动切断电源,消除电气设备发生绝缘损坏时因其外露可导电部分持续带有危险电压而产生触电的危险。例如,对于固定式的电机设备、室外架空线路等,应选用额定动作电流为 30 mA 及其以上的漏电保护装置。

(2) 防止火灾。对木质灰浆结构的一般住宅和规模小的建筑物,考虑其供电量小、泄漏电流小的特点,并兼顾到电击防护,可选用额定动作电流为 30 mA 及其以下的漏电保护装置。

对除住宅以外的中等规模的建筑物,分支回路可选用额定动作电流为 30mA 及其以下的漏电保护装置;主干线可选用额定动作电流为 200mA 以下的漏电保护装置。

对钢筋混凝土类建筑,内装材料为木质时,可选用 200 mA 以下的漏电保护装置;内装材料为不燃物时,应区别情况,可选用 200mA 到数安的漏电保护装置。

(3) 防止电气设备烧毁。由于作为额定动作电流选择的上限,选择数安的电流一般不会造成电气设备的烧毁,因此,防止电气设备烧毁所考虑的主要是与防止触电事故的配合和满足电网供电可靠性问题。通常选用 100mA 到数安的漏电保护装置。

2. 其他性能的选择。对于连接户外架空线路的电气设备,应选用冲击电压不动作型漏电保护装置。

对于不允许停转的电动机,应选用漏电报警方式,而不是漏电切断方式的漏电保护装置。

对于照明线路,宜根据泄漏电流的大小和分布,采用分级保护的方式。支线上用高灵敏度的漏电保护装置,干线上选用中灵敏度的漏电保护装置。

漏电保护装置的极线数应根据被保护电气设备的供电方式选择,单相 220V 电源供电的电气设备应选用二极或单极二线式漏电保护装置;三相三线 380V 电源供电的电气设备应选用三极式漏电保护装置;三相四线 220/380V 电源供电的电气设备应选用四极或三极四线式漏电保护装置。

漏电保护装置的额定电压、额定电流、分断能力等性能指标应与线路条件相适应。漏电保护装置的类型应与供电线路、供电方式、系统接地类型和用电设备特征相适应。

(二) 漏电保护装置的安裝

1. 需要安装漏电保护装置的场所有:带金属外壳的 I 类设备和手持式电动工具,安装在潮湿或强腐蚀等恶劣场所的电气设备,建筑施工工地的电气施工机械设备,临时性电气设备,宾馆类的客房内的插座,触电危险性较大的民用建筑物内的插座,游泳池、喷水池或浴室类场所的水中照明设备,安装在水中的供电线路和电气设备,以及医院中直接接触人体的电气医疗设备(胸腔手术室除外)等均应安装漏电保护装置。

对于公共场所的通道照明及应急照明电源,消防用电梯及确保公共场所安全的电气设备的电源,消防设

备(如火灾报警装置、消防水泵、消防通道照明等)的电源、防盗报警装置的电源,以及其他不允许突然停电的场所或电气装置的电源,若在发生漏电时上述电源被立即切断,将会造成严重事故或重大经济损失。因此,在上述情况下,应装设不切断电源的漏电报警装置。

2.不需要安装漏电保护装置的设备或场所有:使用安全电压供电的电气设备,一般环境情况下使用的具有双重绝缘或加强绝缘的电气设备,使用隔离变压器供电的电气设备,在采用了不接地的局部等电位联结安全措施的场所中适用的电气设备,以及其他没有间接接触电击危险场所的电气设备。

3.漏电保护装置的安装要求 漏电保护装置的安装应符合生产厂家产品说明书的要求,应考虑供电线路、供电方式、系统接地类型和用电设备特征等因素。漏电保护装置的额定电压、额定电流、额定分断能力、极数、环境条件以及额定漏电动作电流和分断时间,在满足被保护供电线路和设备的运行要求时,还必须满足安全要求。

安装漏电保护装置之前,应检查电气线路和电气设备的泄漏电流值和绝缘电阻值。所选用漏电保护装置的额定不动作电流应不小于电气线路和设备正常泄漏电流最大值的2倍。当电气线路或设备的泄漏电流大于允许值时,必须更换绝缘良好的电气线路或设备。

安装漏电保护装置不得拆除或放弃原有的安全防护措施,漏电保护装置只能作为电气安全防护系统中的附加保护措施。

漏电保护装置标有电源侧和负载侧,安装时必须加以区别,按照规定接线,不得接反。如果接反,会导致电子式漏电保护装置的脱扣线圈无法随电源切断而断电,以致长时间通电而烧毁。

安装漏电保护装置时,必须严格区分中性线和保护线。使用三极四线式和四极四线式漏电保护装置时,中性线应接入漏电保护装置。经过漏电保护装置的中性线不得作为保护线,不得重复接地或连接设备外露可导电部分。

保护线不得接入漏电保护装置。

漏电保护装置安装完毕后应操作试验按钮试验3次,带负载分合3次,确认动作正常后,才能投入使用。

漏电保护装置接线方式可见表32-3。

(三)漏电保护装置的运行

1.漏电保护装置的运行管理。为了确保漏电保护装置的正常运行,必须加强运行管理。

(1)对使用中的漏电保护装置应定期用试验按钮试验其可靠性。

(2)为检验漏电保护装置使用中动作特性的变化,应定期对其动作特性(包括漏电动作电流值、漏电不动作电流值及动作时间)进行试验。

(3)③运行中漏电保护器跳闸后,应认真检查其动作原因,排除故障后再合闸送电。

2.漏电保护装置的误动作和拒动作分析:

(1)误动作。它是指线路或设备未发生预期的触电或漏电时漏电保护装置产生的动作。误动作的原因主要来自两方面:一方面是由漏电保护装置本身的原因引起;另一方面是由来自线路的原因引起。

注:①L1、L2、L3为相线;N为中性线;PE为保护线;PEN为中性线和保护线合一;为单相或三相电气设备;

为单相照明设备;为漏电保护器;为不与系统中接地点相连的单独接地装置,作保护接地用。

②单相负载或三相负载在不同的接地保护系统中的接线方式图中,左侧设备为未装有漏电保护器,中间和右侧为

装用漏电保护器的接线图。

③在TN系统中使用漏电保护器的电气设备,其外露可导电部分的保护线可接在PEN线,也可以接在单独接地装

置上形成局部TT系统,如TN系统接线方式图的右侧设备的接线。

由漏电保护装置本身引起误动作的主要原因是质量问题。如装置在设计上存在缺陷,选用元件质量不良,装配质量差,屏蔽不良等,均会降低保护器的稳定性和平衡性,使可靠性下降,从而导致误动作。

表 32-3 漏电保护装置接线方式

接地型式	单相(单极或双极)	三相	
		三线(三极)	四线(三极或四极)
TT			
TNC			
TN-S			
TN-C-S			

注 L1 L2 KL3 为相线 N 为中性线 PE 为保护线 PEN 为中性线和保护线合一； 为单相或三相电气设备；

为单相照明设备； 为漏电保护器； 为不与系统中接地点相连的单独接地装置，作保护接地用。

由线路原因引起误动作的原因主要有：

①接线错误。例如，保护装置后方的零线与其他零线连接或接地，或保护装置的后方的相线与其他支路的同相相线连接，或将负载跨接在保护装置电源侧和负载侧等。

②绝缘恶化。保护器后方一相或两相对地绝缘破坏或对地绝缘不对称降低，都将产生不平衡的泄漏电流，从而引发误动作。

③冲击过电压。冲击过电压产生较大的不平衡冲击泄漏电流，从而导致误动作。

④不同步合闸。不同步合闸时，先于其他相合闸的一相可能产生足够大的泄漏电流，从而引起误动作。

⑤大型设备启动。在漏电保护装置的零序电流互感器平衡特性差时，大型设备的大启动电流作用下，零序电流互感器一次绕组的漏磁可能引发误动作。

此外,偏离使用条件,制造安装质量低劣,抗干扰性能差等都可能引起误动作的发生。

(2)拒动作。

它是指线路或设备已发生预期的触电或漏电而漏电保护装置却不产生预期的动作。拒动作较误动作少见,然而其带来的危险不容忽视。造成拒动作的原因主要有:

①接线错误。错将保护线也接入漏电保护装置,从而导致拒动作。

②动作电流选择不当。额定动作电流选择过大或整定过大,从而造成拒动作。

③线路绝缘阻抗降低或线路太长。由于部分电击电流经绝缘阻抗再次流经零序电流互感器返回电源,从而导致拒动作。

此外,零序电流互感器二次线圈断线,脱扣元件粘连等各种各样的漏电保护装置内部故障、缺陷均可造成拒动作。

第三十三章 电气线路与建筑防雷保护

电气线路可分为电力线路和控制线路。前者完成输送电能的任务,后者供保护和测量的连接之用。电气线路是电力系统的重要组成部分,它除满足供电可靠性或控制可靠性的要求外,还必须满足各项安全要求。

第一节 电气线路的类型与特征

电气线路的种类很多,就其敷设方式来分,可分为架空线路、电缆线路、穿管线路等,就其性质来分,可分为母线、干线和支线,就其绝缘情况来分,可分为裸线和绝缘线等。

一、架空线路

凡是档距超过 25m,利用杆塔敷设的高、低压电力线路都属于架空线路。架空线路主要由导线、杆塔、绝缘子、横担、金具、拉线及基础等组成。

架空线路的导线用以输送电流。架空线路导线多采用钢芯铝绞线、硬铜绞线、硬铝绞线和铝合金绞线。因为铝导线易受碱性和酸性物质的侵蚀,所以腐蚀性强烈的场所应采用铜导线。厂区内(特别是有火灾危险的环境)的低压架空线路宜采用绝缘导线。

架空线路的杆塔用以支承导线及其附件,有钢筋混凝土杆、木杆和铁塔之分。水泥杆经久耐用、不受气候影响,不易腐蚀,维护简单,应用最为广泛。按其功能,杆塔可分为以下几种:

(一) 直线杆(塔)

直线杆(塔)位于线路的直线段上,仅作支持导线、绝缘子和金具用。在正常情况下,直线杆(塔)能承受线路侧面的风力,但不承受线路方向的拉力。直线杆占全部电杆数的 80% 以上。

(二) 耐张杆(塔)

耐张杆(塔)位于线路直线段上的几个直线杆之间。这种电杆在断线事故或架线时紧线的情况下,能承受一侧导线的拉力。

(三) 跨越杆(塔)

跨越杆(塔)位于线路跨越铁路、公路、河流等处,是高大、加强的耐张型杆。

(四) 转角杆(塔)

转角杆(塔)位于线路改变方向的地方。这种电杆可能是耐张型的,也可能是直线型的,视转角的大小而定。它能承受两侧导线的合力。

(五) 终端杆(塔)

终端杆(塔)位于导线的首端和终端。在正常情况下,能承受线路方向全部导线的拉力。

(六)分支杆(塔)

分支杆(塔)位于线路的分支处。这种电杆在主线路方向上有直线型与耐张型两种,在分路方向则为耐张型。

架空线路的横担用以支承导线,常用的横担有木横担、铁横担和瓷横担。木横担具有良好的防雷性能,但易腐朽,使用时应作防腐处理。铁横担坚固耐用,但防雷性能不好,并应作防锈处理。瓷横担是绝缘子与普通横担的组合体,结构简单,安装方便,电气绝缘性能也比较好,但瓷质较脆,机械强度较差。

架空线路的绝缘子用以支承、悬挂导线并使之与杆塔绝缘,分为针式绝缘子、蝶式绝缘子、悬式绝缘子、陶瓷横担绝缘子和拉紧绝缘子等。为确保线路安全运行,不应采用有裂纹、破损或表面有斑痕的绝缘子。

架空线路的金具主要用于固定导线和横担,包括线夹、横担支撑、抱箍、垫铁、连接金具等金属器件。

架空线路的拉线及其基础用以平衡杆塔各方向受力,保持杆塔的稳定性。

架空线路造价低、机动性强、便于检修。但是,架空线路妨碍交通和建设,易受空气中杂物的污染,而且,架空线路可能碰撞或过分接近树木及其他高大设施或物件,导致电击、短路等事故。

二、电缆线路

电力电缆线路主要由电力电缆、终端头和中间接头等三部分组成。

(一)电力电缆

电力电缆分为油浸纸绝缘电缆、交联聚乙烯绝缘电缆和聚氯乙烯绝缘电缆。它主要由导电芯线、绝缘层和保护层组成。芯线分铜芯和铝芯两种。绝缘层分浸渍纸绝缘、塑料绝缘、橡皮绝缘等几种。保护层分内护层和外护层。内护层分铅包、铝包、聚氯乙烯护套、交联聚乙烯护套、橡胶等多种;外护层包括黄麻衬垫、钢铠、防腐层等。

电缆可敷设在电缆沟或电缆隧道中,也可按规定的要求直接埋入地下。直接埋在地下的方式,容易施工,散热良好,但检修、更换不方便,不能可靠地防止外力损伤,而且易受土壤中酸、碱物质的腐蚀。

(二)电缆终端头

电缆终端头分户外、户内两大类。户外用的有铸铁外壳、瓷外壳的终端头和环氧树脂的终端头;户内用的主要有尼龙和环氧树脂的终端头。环氧树脂终端头成形工艺简单,与电缆金属护套有较强的结合力,有良好的绝缘性能和密封性能,应用最为普遍。

(三)电缆中间接头

电缆中间接头主要有铅套中间接头、铸铁中间接头和环氧树脂中间接头。10kV及以下的中间接头多采用环氧树脂浇注。

电缆终端头和中间接头是整个电缆线路的薄弱环节,约有70%的电缆线路故障发生在终端头和中间接头上,可见其安全运行对减少和防止事故有着十分重要的意义。

电缆线路的特点是造价高,不便分支,施工和维修难度大。与架空线路相比,电缆线路除不妨碍市容和交通外,更重要的是供电可靠,不受外界影响,不易发生因雷击、风害、冰雪等自然灾害造成的故障。在现代化企业中,电缆线路得到了广泛的应用,特别是在有腐蚀性气体或蒸气,或易燃、易爆的场所应用最为广泛。

三、户内配线

户内配线种类繁多,其配线方式应根据环境条件、负荷特征、建筑要求等因素确定。各种配线方式的适用范围见表33-1。

第二节 线路安全要求与负荷计算

一、线路防护

各种线路对酸、碱、盐温度、湿度、灰尘、火灾和爆炸等外界因素应有足够的防护能力。为此,不同环境中导线和电缆及其敷设方式的选用可按表 33-2 进行。

表 33-1 配线方式适用范围

导线类别		塑料护配线	绝缘线						裸导线	
敷设方式		直敷配线	瓷、塑料夹板	鼓形绝缘子	针式绝缘子	焊接钢管	电线管	硬塑料管	绝缘子明设	
环境特征	干燥	生产	○	○	○	○	○	○	+	○
		生活	○	○	○	+	○	○	+	×
	潮湿		+	×	-	○	○	+	○	+
	特别潮湿		×	×	-	○	+	×	○	-
	高温		×	×	○	○	○	○	×	○
	振动		-	×	○	○	○	○	-	○ ^③
	多尘		+	×	-	+	○	○	○	+
	腐蚀		+	×	×	+	+ ^②	×	○	-
	火灾危险环境	H-1	-	×	×	+ ^①	○	○	-	+ ^④
		H-2	-	×	×	×	○	○	-	+ ^④
H-3		-	×	×	+ ^①	○	○	-	+ ^④	
爆炸危险环境	Q-1	×	×	×	×	○	×	×	×	
	Q-2	×	×	×	×	○	×	×	×	
	Q-3	×	×	×	×	○	×	×	-	
	G-1	×	×	×	×	○	×	×	×	
	G-2	×	×	×	×	○	×	×	×	
户外		×	×	+ ^⑤	○	+	×	×	×	

注 表中“○”为推荐采用;“+”为可以采用;“-”为建议不采用;“×”为不允许采用。

①线路应远离可燃物质,且不应敷设在未抹灰的木天棚、墙壁及可燃液体管道的栈桥上。

②钢管镀锌并刷防腐漆。

③不宜用铝导线(因其韧性差,受振动易断),应当用铜导线。

④可用裸导线,但应采用熔焊或钎焊连接,需拆卸处用螺栓可靠连接。在 H-1 级、H-3 级场所宜有保护罩,当用金属网罩时,网孔直径不应大于 12mm。在 H-2 级场所应有防尘罩。

⑤用在不受阳光直接曝晒和雨雪不能淋着的场所。

表 33-2 线路敷设方式选择

环境特征	线路敷设方式	常用电线、电缆型号
正常干燥环境	绝缘线瓷珠、瓷夹板或铝皮卡子明配线	BBLX ,BLV ,BLVV
	绝缘线、裸线瓷瓶明配线	BBLX ,BLV ,LJ ,LMJ
	绝缘线穿管明敷或暗敷	BBLX ,BLX
	电缆明敷或沿电缆沟敷设	ZLL ,ZLL11 ,VLV ,YJV ,XLV ,ZLQ
潮湿和特别潮湿的环境	绝缘线瓷瓶明配线(高度 > 3.5m)	BBLX ,BLV
	绝缘线穿塑料管、钢管明敷或暗敷	BBLX ,BLV
	电缆明敷	ZLL11 ,VLV ,YJV ,XLV
多尘环境(不包括火灾及爆炸危险粉尘)	绝缘线瓷珠、瓷瓶明配线	BBLX ,BLV ,BLVV
	绝缘线穿钢管明敷或暗敷	BBLX ,BLV
	电缆明敷或沿电缆沟敷设	ZLL ,ZLL11 ,VLV ,YJV ,XLV ,ZLQ
有腐蚀性的环境	塑料线瓷珠、瓷瓶配线	BLV ,BLVV
	绝缘线穿塑料管明敷或暗敷	BB1V ,BLV ,BV
	电缆明敷	VLV ,YJV ,ZLL11 ,XLV
火灾危险环境	绝缘线瓷瓶明配线	BBLX ,BLV
	绝缘线穿钢管明敷或暗敷	BBLX ,BLV
	电缆明敷或沿电缆沟敷设	ZLL ,ZLQ ,VLV ,YJV ,XLV ,XLHF
爆炸危险环境	绝缘线穿钢管明敷或暗敷	BBV ,BV
	电缆明敷	ZL20 ,ZQ20 ,VV20
户外配线	绝缘线、裸线瓷瓶明配线	BBLF ,BLV - 1 ,LJ
	绝缘线穿钢管沿外墙明敷	BBLF ,BBLX ,BLV
	电缆埋地	ZLL11 ,ZLQ2 ,VLV ,VLV - 2 ,YJV ,VJV2

由表 33-2 可知,特别潮湿环境应采用硬塑料管配线或针式绝缘子配线,高温环境应采用电线管或焊接钢管配线、针式绝缘子配线,多尘(非爆炸性粉尘)环境应采用各种管配线,腐蚀性环境应采用硬塑料管配线,火灾危险环境应采用电线管或焊接钢管配线,爆炸危险环境应采用焊接钢管配线等。

二、导线连接

导线的接头是电气线路的薄弱环节,接头常常是发生故障的地方。接头接触不良或松脱会增大接触电阻,使接头过热而烧毁绝缘,还可能产生火花。严重的会酿成火灾和触电事故。因此,接头务必牢靠、紧密,接头的机械强度不应低于导线机械强度的 80%,接头的绝缘强度不应低于导线的绝缘强度,接头部位的电阻不得大于原线段电阻的 1.2 倍。工作中,应当尽可能减少导线的接头,接头过多的导线不宜使用。对于可移动线路的接头,更应当特别注意。

特别是铜导体与铝导体的连接,如没有采用铜铝过渡段,经过一段时间使用之后,很容易松动。松动的

原因如下：

第一，铝导体在空气中数秒钟之内即能形成厚 $3 \sim 6\mu\text{m}$ 的高电阻氧化膜。氧化膜将大幅度提高接触电阻，使连接部位发热，产生危险温度。接触电阻过大还造成回路阻抗增加，减小短路电流，延长短路保护装置的动作时间，甚至阻碍短路保护装置动作。

第二，铜和铝的线胀系数不同，铜的线胀系数为 $16.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，铝的线胀系数为 $23.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，即铝的线胀系数较铜的大 36%，发热时使铝端子增大而本身受到挤压，冷却后不能完全复原。经多次反复后，连接处逐渐松弛，接触电阻增加，如连接处出现微小缝隙，则遇空气进入，将导致铝导体表面氧化，接触电阻大大增加；如连接处的缝隙进入水分，将导致铝导体电化学腐蚀，接触状态将急剧恶化。

第三，由于铜和铝的化学活性不同，因此，当有水分进入铜、铝之间的缝隙时，将发生电解，使铝导体腐蚀，必然导致接触状态迅速恶化。

第四，当温度超过 75°C ，且持续时间较长时，聚氯乙烯绝缘将分解出氯化氢气体。这种气体对铝导体有腐蚀作用，从而增大接触电阻。

正因为如此，在潮湿场所、户外及安全要求高的场所，铝导体与铜导体不能直接连接，必须采用铜铝过渡段。对运行中的铜、铝接头，应注意检查和紧固。

三、负荷计算

负荷计算的目的是：①确定导线截面，确定变压器及开关电器的容量；②校验电压损失，选择和整定保护元件；③确定电能消耗量和无功补偿装置。第一个目的需要用到 30min 的平均最大负荷电流，第二个目的需要用到 1s 左右的最大负荷电流，第三个目的需要用到一段时间（一昼夜、一年等）内的平均负荷电流。

负荷计算的方法很多，如需要系数法、二项式法、单位产品耗电量法、单位面积功率法、ABC 法等。本书仅介绍 ABC 法。

（一）设备功率的确定

进行负荷计算时，需将用电设备按其性质分为不同的用电设备组，然后确定设备计算功率。

用电设备的额定功率 P_n 或额定容量 S_n 是指铭牌上的数据。对于不同负载持续率下的额定功率或额定容量，应换算为统一负载持续率下的有功功率，即设备计算功率 P_c 。

1. 连续工作制电动机的设备计算功率

连续工作制电动机的设备计算功率等于额定功率。

2. 断续或短时工作制电动机的设备计算功率

断续或短时工作制电动机（如起重用电动机等）的设备计算功率按下式换算为负载持续率 100% 时的有功功率

$$P_c = P_n \sqrt{\epsilon_n}$$

式中： P_c ——设备的额定功率 kW；

P_n ——电动机额定功率 kW；

ϵ_n ——电动机额定负载持续率。

3. 电焊机的设备计算功率

电焊机的设备计算功率是指将额定容量换算到负载持续率 100% 时的有功功率

$$P_c = S_n \sqrt{\epsilon_n} \cos\varphi$$

式中： S_n ——电焊机额定容量 kVA；

$\cos\varphi$ ——功率因数。

4. 电炉变压器的设备计算功率

电炉变压器的设备计算功率是指额定功率因数时的有功功率。其计算式为

$$P_c = S_n \cos\varphi$$

式中 S_n ——电炉变压器的额定容量 kVA。

5. 整流设备计算功率

整流设备计算功率是指额定直流功率。

6. 成组用电设备的计算功率

成组用电设备的计算功率是指不包括备用设备在内的所有单个用电设备的设备功率之和。

7. 照明设备的计算功率

照明设备的计算功率为灯泡上标出的额定功率,对于荧光灯及高压水银灯等还应计入镇流器的功率损耗,将灯具的额定功率分别增加 20% 及 30%。

(二) 负荷计算的 ABC 法

ABC 法是应用单元功率的概念,把繁杂的功率运算简化为台数运算的方法。该方法运用概率论的原理求出计算负荷与设备容量之间的关系,计算结果比较准确。这种方法可列表计算,简单易行。其计算公式为

$$P_c = P_m + \alpha \sigma_s$$

式中: P_m ——平均功率;

α ——计算系数 $\alpha = 3$ 时出现概率为 99.9% $\alpha = 1.5$ 时出现概率为 93.3% ,一般情况下取 $\alpha = 1.5$ 即可。

σ_s ——负荷均方差,如令 P 为有功功率,则 $\sigma_s = \sqrt{P^2 - P_m^2}$ 。

对于多台设备,ABC 法的实用计算式为

$$P_c = DK_L(A + C \sqrt{A + 2B})$$

式中: D ——单台等值功率,取值越大,计算精度越低,取值越小,计算精度越高。一般取 $D = 3\text{kW}$;

K_L ——利用系数。

$$K_L = \frac{A_1 K_{L1} + A_2 K_{L2} + \dots}{A_1 + A_2 + \dots}$$

各种设备的利用系数见表 5-11。成组设备的利用系数 A, B, C 计算如下:

系数 A 按下式计算:

$$A = \sum_{i=1}^m n_i K_i$$

式中: K_i ——等值系数,按 $K_i = \frac{P_{ni}}{D}$ 计算(P_{ni} 为第 i 台设备的额定功率),并按四舍五入的原则取数;

n_i ——第 i 种功率设备的台数。

系数 B 按下式计算:

$$B = \sum_{i=1}^m n_i \frac{K_i(K_i + 1)}{2}$$

系数 C 按下式计算:

$$C = 15 \sqrt{\frac{1}{K_L} - 1}$$

如欲求得计算电流,则需求得成组设备的功率因数。成组设备功率因数角的正切值按下式计算:

$$\tan \varphi = \frac{A_1 K_{L1} \tan \varphi_1 + A_2 K_{L2} \tan \varphi_2 + \dots}{A_1 K_{L1} + A_2 K_{L2} + \dots}$$

各种设备的 $\cos \varphi$ 和 $\tan \varphi$ 见表 33-3。取得成组设备的计算功率 P_c 和功率因数以后,可按下式计算三相设备的电流

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} \cos \varphi}$$

表 33-3 利用系数 K_L 值

用电设备组名称	K_L	C	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
一般工作制小批生产用金属切削机床,小型车、刨、插、铣、钻床、砂轮机	0.10~0.12	4.5	0.50	1.73
一般工作制大批生产用金属切削机床,小型车、刨、插、铣、钻床、砂轮机	0.14	3.7	0.6	1.33
重工作制金属切削机床、冲床、自动车床、六角车床、粗磨、铣齿、刨、铣、立车、镗床等	0.16	3.3	0.53	1.51
小批生产金属热加工机床、锻锤传动装置、锻造机、拉丝机、清理转磨筒、碾磨机等	0.17	3.2	0.60	1.33
大批生产金属热加工机床	0.20	3.0	0.65	1.17
生产用风机	0.55	1.3	0.80	0.75
卫生用风机	0.5	1.5	0.80	0.75
泵、空气压缩机、电动发电机组	0.55	1.3	0.85	0.62
移动式电动工具	0.05	7.0	0.50	1.73
不联锁的提升机、皮带运输机、螺旋运输机等连续运输机	0.035	2.0	0.75	0.88
联锁的提升机、皮带运输机、螺旋运输机等连续运输机	0.5	1.5	0.75	0.88
吊车及电葫芦($\epsilon=100\%$)	0.15~0.20	3.5	0.5	1.73
电阻炉、干燥箱、加热设备	0.55~0.65	1.2	0.95	0.33
电阻护、干燥箱、加热设备	0.35	2.0	1.00	0.00
试验室用小型电热设备	0.6~0.65	1.2	0.87	0.56
3~10t 电弧炼钢炉	0.50	1.5	0.80	0.75
0.5~1.5t 电弧炼钢炉	0.65	1.1	0.85	0.62
0.25~0.5t 电弧炼钢炉	0.25	2.5	0.60	1.33
单头电焊用电动发电机组	0.50	1.5	0.70	1.02
多头电焊用电动发电机组	0.25	2.5	0.35	2.67
单头电焊变压器	0.30	2.3	0.35	2.67
多头电焊变压器	0.30	2.3	0.50	1.73
自动弧焊机缝焊机及点焊机	0.25	2.5	0.60	1.33
对焊机及铆钉加热器	0.25	2.5	0.70	1.02
低频感应电炉	0.75	0.9	0.35	2.67
高频感应电炉(用电动发电机组)	0.75	0.9	0.80	0.65
高频感应电炉(用真空管振荡器)	0.65	1.1	0.65	1.17

第三节 电气线路常见故障

电气线路故障可能导致触电、火灾、停电等多种事故。下面对电气线路的常见故障作一简要分析。

一、架空线路故障

架空线路敞露在户外,会受到气候和环境条件的影响。雷击、大雾、大风、雨雪、高温、严寒、洪水、烟尘和灰尘、纤维等都会从不同的方面对架空线路造成威胁。

当风力超过线路杆塔的稳定度或机械强度时,就会使杆塔歪倒或损坏。这种事故一般是在出现了超出设计所考虑的风速条件时才会发生。如果杆塔因锈蚀或腐朽而使机械强度降低,即使在正常风力下也可能发生这种事故。大风还可能导致混线及接地事故,也可能发生倒杆事故。此外,风力还可能引起导线、避雷线的混线事故。

雨水对架空线路的重要影响是造成停电事故和倒杆。毛毛细雨能使脏污的绝缘子发生闪络,从而引起停电事故,倾盆大雨又可能造成山洪爆发而冲倒线路杆塔。

雷电击中线路时,有可能使绝缘子发生闪络或击穿。

导线、避雷线覆冰时,不仅加重了导线和杆塔的机械负载,而且使导线弧垂增大,造成对地安全距离不足。当覆冰脱落时,又会使导线、避雷线发生跳动,引起混线。

高温季节,导线会因气温升高,弧垂加大而发生对地放电,严冬季节,导线又因气温下降收缩而使弧垂减小,承担不了过大的张力而拉断。

周围环境对架空线路安全运行的影响,视环境的不同而不同。例如,化工厂或沿海区域的线路容易发生污闪,河道附近的线路易遭受冲刷,路边和采石厂附近的线路易受外力的破坏等。

季节和环境是密切相关的。例如,化工区的线路常在大雾季节或雨雪季节发生故障,河道附近的线路也只在雨汛季节才会受到洪水的损害。

生产排出来的烟尘和其他有害气体会使厂矿架空线路绝缘子的绝缘水平显著降低,以致在空气湿度较大的天气里发生闪络事故;在木杆线路上,因绝缘子表面污秽,泄漏电流增大,会引起木杆、木横担燃烧事故。有些氧化作用很强的气体会腐蚀金属杆塔、导线、避雷线和金具。

此外,鸟类在横担上筑巢,人们在线路附近开山采石、放风筝,向空中抛物以及线路附近有高大树木等,都可能造成线路短路或接地。

架空线路的事故虽然大部分是由自然灾害造成的,但这些事故并非是不可避免的。对于正确设计和施工的线路,只要电气工作人员严格贯彻执行有关运行、检修规程,切实做好日常的巡视、维护和检修工作,架空线路的安全运行就会有可靠的保证。

为保证架空线路正常运行,应针对各种可能发生的事故采取相应的预防性措施。

污闪事故是由于绝缘子表面脏污引起的。绝缘子表面污秽物的性质不同,对线路绝缘水平的影响也不同。一般的灰尘容易被雨水冲洗掉,对绝缘性能的影响不大。但是,化工、水泥、冶炼等厂矿排放出来的烟尘对绝缘子危害极大。煤尘的主要成分是氧化硅和氧化硫,水泥厂排放的飞尘,主要成分是氧化硅和氧化钙;沿海地区绝缘子表面的污物,主要是氯化钠。这些物质都降低绝缘子的绝缘水平。空气越潮湿,危害越严重。加强绝缘子清扫,增加绝缘子片数以加大爬电距离,采用地蜡、石蜡、有机硅等防尘性涂料,以及加强巡视、测试和维修,都有利于防止污闪事故。

雷电会给架空线路的安全运行带来很大的威胁,为了提高线路的耐雷水平,防止雷击事故,可以装设避雷线或避雷针以防止导线直接遭受雷击;可以安装管型避雷器,防止雷电侵入波的危害;可以配置自动重合闸,防止雷击闪络或其他放电造成停电事故;可以在中性点装设消弧线圈,以减轻雷击或其他原因造成单相

接地的危险。

架空线路还会遇到洪水、大风、冰雪等原因造成的事故。为了防洪,汛期应加强巡视检查。必要时,在杆塔周围打防洪桩,提高杆塔的稳定性。为了防止风害,也应加固电杆,加强巡视检查和测试,还应调整导线的弧垂,修剪线路附近的树木,清除周围的杂物等。为了防止覆冰事故,应加强观察气候的变化,如已经覆冰,可采用通电加热或机械的办法予以除冰。

二、电缆线路故障

就故障现象而言,电缆故障包括机械损伤、铅皮(铝皮)龟裂及胀裂、终端头污闪、终端头或中间接头爆炸、绝缘击穿、金属护套腐蚀穿孔等故障。

就事故原因而言,电缆故障包括外力破坏、化学腐蚀或电解腐蚀、雷击、水淹、虫害等自然灾害和施工不妥、维护不当等人员过失等几类。

应当指出,这些因素往往是互相联系、互相影响的。例如,由于电缆长时间过载运行或散热不良,造成铅皮龟裂,并由此引起绝缘浸水,以致发生绝缘击穿或中间接头爆炸等事故。

电缆常见故障和防止方法如下:

第一,由于外力破坏的事故占电缆事故的50%,为了防止这类事故,应加强对横穿河流、道路的电缆线路和塔架上电缆线路的巡视和检查。在电缆线路附近开挖地面时,应采取有效的安全措施,对于施工中已挖开的电缆,应加以保护。

第二,由于管理不善或施工不良,电缆在运输、敷设过程中可能受到机械损伤。运行中的电缆,特别是直埋电缆,可能由地面施工或小动物(主要是白蚁)啃咬受到机械损伤。对此,应加强管理,保证敷设质量,做好标记,保存好施工资料,严格执行破土动工制度等。

第三,电缆虫害最多见的是白蚁。白蚁可造成铅、铝皮穿孔,从而导致绝缘受潮而击穿。为此,在电缆四周可喷洒防蚁、灭蚁的化学药剂。老鼠等小动物啃咬也会使电缆受到损伤,对此也应采取适当的防护措施。

第四,由于施工、制作质量差或弯曲、扭转等机械力的作用,可能导致电缆终端头漏油。对此,应严格施工,保证质量,并加强巡视。

第五,由于质量不高、检查不严、安装不良(如过分弯曲、过分密集等),环境条件太差(如环境温度太高等),运行不当(如过负载、过电压等),运行中的电缆可能发生绝缘击穿,铅包发生疲劳、龟裂、胀裂等损伤。对此,除针对以上原因采取措施外,还应加强巡视,发现问题及时处理。

第六,为了防止电缆终端头污闪事故,对运行中的电缆,应当用专用绝缘工具予以清扫,也可在终端头套管上涂以防污涂料。在污秽地区,可以采用电压高一级的终端头。

第七,由于地下杂散电流和非中性物质的作用,电缆的金属铠装或铅、铝包皮可能受到电化腐蚀或化学腐蚀。化学腐蚀是由于土壤中酸、碱、氯化物、有机体腐烂物、炼铁炉灰渣等杂物造成的,电化学腐蚀则是由于直流机车及其他直流装置经大地流通的电流造成的。为了防止化学腐蚀,可将电缆穿在防腐的管道中敷设。对于运行中的电缆,除应定期开挖泥土查看电缆外,还应对土壤作化学分析。为了防止电化学腐蚀,应提高直流机车轨道与大地之间的绝缘,以限制直流泄漏电流。电缆与直流机车轨道平行时,其间距离不得小于2m,或者电缆穿绝缘管敷设,电缆与地下大金属物件接近时,也应采取绝缘措施。为了防止电化学腐蚀,电缆铠装的电位不得超过1V。

第八,由于浸水、导体连接不好、制作不良、超负荷运行,以及由于污闪等原因均可能导致电缆终端头或中间接头爆炸。对此,亦应针对不同原因采取适当措施,并加强检查和维修。

此外,过热是电气线路的常见故障,线路过热可能是多种原因造成的。例如,线路过载、接触不良、线路散热条件被破坏、运行环境温度过高、短路(包括金属性短路和非金属性短路)、严重漏电、电动机过于频繁地启动等不安全状态均可能导致线路过热。对此,应加强运行监视,严格控制电缆的负荷电流和电缆温度。

第四节 建筑物防雷分类与防雷措施

一、建筑物防雷分类

建筑物根据其重要性、使用性质和类别、发生雷电事故的可能性和后果进行分类,分为三类。

(一)一类防雷建筑物

凡符合下列情况,为一类防雷建筑物:

1. 凡制造、使用或贮存有炸药、火药、起爆药、火工品等大量爆炸物质的建筑物,因电火花而引起爆炸,会造成巨大破坏和人身伤亡者。
2. 具有0区或10区爆炸危险环境的建筑物。
3. 具有1区爆炸危险环境的建筑物,因电火花而引起爆炸,会造成巨大破坏和人身伤亡者。

(二)二类防雷建筑物

凡属于下列情况之一时,应划为第二类防雷建筑物:

1. 国家级重点文物保护的建筑物。
2. 国家级的会堂、办公建筑物、大型展览和博览建筑物、大型火车站、国宾馆、国家级档案馆、大型城市的重要给水水泵房等特别重要的建筑物。
3. 国家级计算中心、国际通信枢纽等对国民经济有重要意义且装有大量电子设备的建筑物。
4. 制造、使用或贮存爆炸物质的建筑物,且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。
5. 具有1区爆炸危险环境的建筑物,且电火花不易引起爆炸或不致造成巨大破坏和人身伤亡者。
6. 具有2区或11区爆炸危险环境的建筑物。
7. 工业企业内有爆炸危险的露天钢质封闭气罐。
8. 预计雷击次数大于0.06次/a的部、省级办公建筑物及其他重要或人员密集的公共建筑物。
9. 预计雷击次数大于0.3次/a的住宅、办公楼等一般性民用建筑物。

建筑物年预计雷击次数的计算式为:

$$N = kN_g A_e$$

式中 N ——建筑物预计雷击次数(次/a);

k ——校正系数,在一般情况下取1,在下列情况下取相应数值:位于旷野孤立的建筑物取2,金属屋面的砖木结构建筑物取1.7,位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水露头处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物,以及特别潮湿的建筑物取1.5;

N_g ——建筑物所处地区雷击大地的年平均密度(次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$));

A_e ——与建筑物截收相同雷击次数的等效面积(km^2)。

(三)三类防雷建筑物

凡属于下列情况之一时,应划为第三类防雷建筑物:

1. 省级重点文物保护的建筑物及省级档案馆。
2. 预计雷击次数大于或等于0.012次/a,且小于或等于0.06次/a的部、省级办公建筑物及其他重要或人员密集的公共建筑物。
3. 预计雷击次数大于或等于0.06次/a,且小于或等于0.3次/a的住宅、办公楼等一般性民用建筑物。
4. 预计雷击次数大于或等于0.06次/a的一般性工业建筑物。
5. 根据雷击后对工业生产的影响及产生的后果,并结合当地气象、地形、地质及周围环境等因素,确定需

要防雷的 21 区、22 区、23 区火灾危险环境。

6. 在平均雷暴日大于 15d/a 的地区,高度在 15m 及以上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物;在平均雷暴日小于或等于 15d/a 的地区,高度在 20m 及以上的烟囱、水塔等孤立的高耸建筑物。

二、建筑物的防雷措施

(一) 第一类防雷建筑物的防雷措施

1. 防直击雷的措施

第一类防雷建筑物防直击雷的措施如下:

(1) 应装设独立避雷针或架空避雷线(网),使被保护的建筑物及风帽、放散管等突出屋面的物体均处于接闪器的保护范围内。架空避雷线的网格尺寸不应大于 5m×5m 或 6m×4m。

(2) 排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等的管口外的以下空间应处于接闪器的保护范围内。当有管帽时应按表 33-4 确定,当无管帽时,应为管口上方半径 5m 的半球体。接闪器与雷闪的接触点应设在上述空间之外。

表 33-4 有管帽的管口外处于接闪器保护范围内的空间

装置内的压力与周围空气压力的压力差 (kPa)	排放物的密度	管帽以上的垂直高度 (m)	距管口处的水平距离 (m)
< 5	大于空气	1	2
5 ~ 25	大于空气	2.5	5
≤ 25	小于空气	2.5	5
> 25	大或小于空气	5	5

(3) 排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等,当其排放物达不到爆炸浓度、长期点火燃烧——排放就点火燃烧时,及发生事故时排放物才达到爆炸浓度的通风管、安全阀,接闪器的保护范围可仅保护到管帽,无管帽时可仅保护到管口。

(4) 独立避雷针的杆塔、架空避雷线的端部和架空避雷网的各支柱处应至少设一根引下线。对用金属制成或有焊接、绑扎连接钢筋网的杆塔、支柱,宜利用其作为引下线。

(5) 独立避雷针和架空避雷线(网)的支柱及其接地装置至被保护建筑物及与其有联系的管道、电缆等金属物之间的距离(图 33-1)应符合下列表达式的要求,但不得小于 3m:

① 地上部分:当 $h_x < 5R_i$ 时

$$S_{al} \geq 0.4(R_i + 0.1h_x)$$

当 $h_x \geq 5R_i$ 时

$$S_{al} \geq 0.1(R_i + h_x)$$

② 地下部分:

$$S_{sl} \geq 0.4R_i$$

式中 S_{al} ——空气中距离(m);

S_{sl} ——地中距离(m);

R_i ——独立避雷针或架空避雷线(网)支柱处接地装置的冲击接地电阻(Ω);

h_x ——被保护物或计算点的高度(m)。

(6) 架空避雷线至屋面和各种突出屋面的风帽、放散管等物体之间的距离(图 33-1)应符合下列表达式的要求,但不应小于 3m:

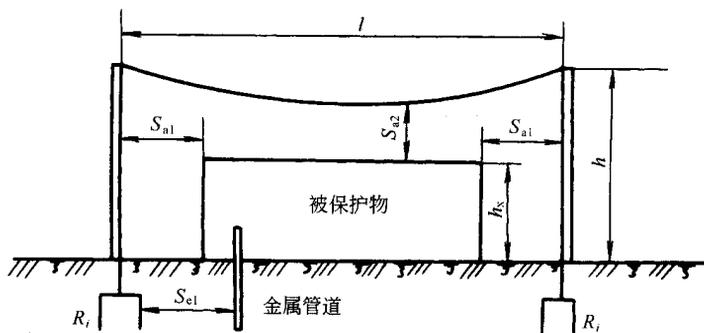


图 33-1 防雷装置至被保护物的距离

①当 $(h + \frac{1}{2}) < 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geq 0.2R_i + 0.05(h + \frac{1}{2})$$

②当 $(h + \frac{1}{2}) \geq 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geq 0.05R_i + 0.05(h + \frac{1}{2})$$

式中 S_{a2} ——避雷线(网)至被保护物的空气中距离(m);

h ——避雷线(网)的支柱高度(m);

l ——避雷线的水平长度(m);

(7) 架空避雷网至屋面和各种突出屋面的风帽、放散管等物体之间的距离,应符合下列表达式的要求,但不应小于 3m:

当 $(h + l_1) < 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geq \frac{1}{n} 0.4R_i + 0.05(h + l_1)$$

当 $(h + l_1) \geq 5R_i$ 时

$$S_{a2} \geq \frac{1}{n} 0.1R_i + 0.1(h + l_1)$$

式中 l_1 ——从避雷网中间最低点沿导体至最近支柱的距离(m);

h ——从避雷网中间最低点沿导体至最近支柱并有同一距离 l_1 的个数。

(8) 独立避雷针、架空避雷线或架空避雷网应有独立的接地装置,每一引下线的冲击接地电阻不宜大于 10Ω。在土壤电阻率高的地区,可适当增大冲击接地电阻。

2. 防雷电感的措施

(1) 建筑物内的设备、管道、构架、电缆金属外皮、钢屋架、钢窗等较大金属物和突出屋面的放散管、风管等金属物,均应接到防雷电感的接地装置上。

金属屋面周边每隔 18~24m 应采用引下线接地一次。

现场浇制的或由预制构件组成的钢筋混凝土屋面,其钢筋宜绑扎或焊接成闭合回路,并应每隔 18~24m 采用引下线接地一次。

(2) 平行敷设的管道、构架和电缆金属外皮等长金属物,其净距小于 100mm 时应采用金属线跨接,跨接点的间距不应大于 30m;交叉净距小于 100mm 时,其交叉处亦应跨接。

当长金属物的弯头、阀门、法兰盘等连接处的过渡电阻大于 0.03Ω 时,连接处应用金属线跨接。对有不少于 5 根螺栓连接的法兰盘,在非腐蚀环境下,可不跨接。

(3) 防雷电感应的接地装置应和电气设备接地装置共用,其工频接地电阻不应大于 10Ω 。防雷电感应的接地装置与独立避雷针、架空避雷线或架空避雷网的接地装置之间的距离应符合要求。

屋内接地干线与防雷电感应接地装置的连接,不应少于 $2m$ 。

3. 防雷电波侵入的措施

(1) 低压线路宜全线采用电缆直接埋地敷设,在入户端应将电缆的金属外皮、钢管接到防雷电感应的接地装置上。当全线采用电缆有困难时,可采用钢筋混凝土杆和铁横担的架空线,并应使用一段金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入,其埋地长度应符合下列表达式的要求,但不应小于 $15m$:

$$l \geq 2\sqrt{\rho}$$

式中 l ——金属铠装电缆或护套电缆穿钢管埋于地中的长度(m);

ρ ——埋电缆处的土壤电阻率($\Omega \cdot m$)。

在电缆与架空线连接处,尚应装设避雷器。避雷器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子铁脚、金具等应连在一起接地,其冲击接地电阻不应大于 10Ω 。

(2) 架空金属管道,在进出建筑物处,应与防雷电感应的接地装置相连。距离建筑物 $100m$ 内的管道,应每隔 $25m$ 左右接地一次,其冲击接地电阻不应大于 20Ω ,并宜利用金属支架或钢筋混凝土支架的焊接、绑扎钢筋网作为引下线,其钢筋混凝土基础宜作为接地装置。

埋地或地沟内的金属管道,在进出建筑物处亦应与防雷电感应的接地装置相连。

4. 防侧击雷的措施

(1) 从 $30m$ 起每隔不大于 $6m$ 沿建筑物四周设水平避雷带并与引下线相连;

(2) $30m$ 及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物与防雷装置连接。

(二) 第二类防雷建筑物的防雷措施

1. 防直击雷措施

(1) 第二类防雷建筑物防直击雷措施,应采用装在建筑物上的避雷网(带)或避雷针或由其混合组成的接闪器、避雷网(带),应沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设,并应在整个屋面组成不大于 $10m \times 10m$ 或 $12m \times 8m$ 的网格。所有避雷针应采用避雷带相互连接。

(2) 突出屋面的放散管、风管、烟囱等物体,保护方式注意下列事项:

① 排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管等管道应符合设计要求。

② 排放无爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、烟囱、爆炸危险环境的自然通风管,装有阻火器的排放爆炸危险气体、蒸气或粉尘的放散管、呼吸阀、排风管,其金属物体可不装接闪器,但应与屋面防雷装置相连。另外在屋面接闪器保护范围之外的非金属物体应装接闪器,并与屋面防雷装置相连。

(3) 引下线不得少于两根,并应沿建筑四周均匀和对称布置,其间距不应大于 $18m$ 。当仅利用建筑四周的钢柱或柱子钢筋作为引下线时,可按跨度设引下线,但引下线的平均间距不应大于 $18m$ 。

(4) 每根引下线的冲击接地电阻不应大于 10Ω 。防直击雷接地应和防雷电感应、电气设备等接地共用同一接地装置,并与埋地金属管道相连;当不共用、不相连时,两者间在地中的距离应符合下列表达式的要求,但不应小于 $2m$:

$$S_{e2} \geq 0.3K_c R_i$$

式中 S_{e2} ——地中距离(m);

K_c ——分流系数。单根引下线应为 1 ,两根引下线及接闪器不成闭合环的多根引下线应为 0.66 ,接闪器成闭合环或网状的多根引下线应为 0.44 。

在共用接地装置与埋地金属管道相连的情况下,接地装置应围绕建筑物敷设成环形接地体。

(5) 利用建筑物的钢筋作为防雷装置时应符合下列规定:

(1) 建筑物宜利用钢筋混凝土屋面、梁、柱、基础内的钢筋作为引下线。通常所规定的建筑物尚宜利用其作为接闪器。

(2) 当基础采用硅酸盐水泥和周围土壤的含水量不低于 4% 及基础的外表面无防腐层或有沥青质的防腐层时,宜利用基础内的钢筋作为接地装置。

(3) 敷设在混凝土中作为防雷装置的钢筋或圆钢,当仅一根时,其直径不应小于 10mm。被利用作为防雷装置的混凝土构件内有箍筋连接的钢筋,其截面面积总和不应小于一根直径为 10mm 钢筋的截面积。

(4) 利用基础内钢筋网作为接地体时,在周围地面以下距地面不小于 0.5m,每根引下线所连接的钢筋表面积总和应符合下列表达式的要求:

$$S \geq 4.24k_c^2$$

式中 S ——钢筋表面积总和(m^2)。

(5) 当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时,接地体的规格尺寸不应小于表 33-5 的规定。

表 33-5 第二类防雷建筑物环形人工基础接地体的规格尺寸

闭合条形基础的周长(m)	扁钢(mm)	圆钢 根数×直径(mm)
> 60	4×25	2× ϕ 10
> 10.5 < 60	4×50	4× ϕ 10 或 3× ϕ 12
< 40	钢材表面积总和 > 4.24m ²	

注 1. 当长度相同,截面相同时,宜优先选用扁钢。

2. 采用多根圆钢时,其敷设净距不小于直径的 2 倍。

3. 利用闭合条形基础内的钢筋作接地体时可按本表校验。除主筋外,可计入箍筋的表面积。

(6) 构件内有箍筋连接的钢筋或成网状的钢筋,其箍筋与钢筋的连接、钢筋与钢筋的连接应采用土建施工的绑扎法连接或焊接。单根钢筋或圆钢或外引预埋连接板、线与上述钢筋的连接应焊接或采用螺栓紧固的卡夹器连接。构件之间必须连接成电气通路。

(7) 当土壤电阻率 ρ 小于或等于 $3000\Omega \cdot m$ 时,在防雷的接地装置同其他接地装置和进出建筑物的管道相连的情况下,防雷的接地装置可不计及接地电阻值,但其接地体应符合下列规定之一:

① 防直击雷的环形接地体的敷设应符合设计要求,但土壤电阻率 ρ 的适用范围应放大到小于或等于 $3000\Omega \cdot m$ 。

② 利用槽形、板形或条形基础的钢筋作为接地体,当槽形、板形基础钢筋网在水平面的投影面积或成环的条形基础钢筋所包围的面积 A 大于或等于 $80m^2$ 时,可不另加接地体。

③ 对 6m 柱距或大多数柱距为 6m 的单层工业建筑物,当利用柱子基础的钢筋作为防雷的接地体并同时符合下列条件时,可不另加接地体:

a. 利用全部或绝大多数柱子基础的钢筋作为接地体;

b. 柱子基础的钢筋网通过钢柱,钢屋架,钢筋混凝土柱子、屋架、屋面板、吊车梁等构件的钢筋或防雷装置互相连成整体;

c. 在周围地面以下距地面不小于 0.5m,每一柱子基础内所连接的钢筋表面积总和大于或等于 $0.82m^2$ 。

2. 防雷电感应的措施

(1) 建筑物的防雷电感应的措施应符合下列要求:

① 建筑物内的设备、管道、构架等主要金属物,应就近接至防直击雷接地装置或电气设备的保护接地装置上,可不另设接地装置。

② 平行敷设的管道、构架和电缆金属外皮等长金属物应符合设计要求,但长金属物连接处可不跨接。

③ 建筑物内防雷电感应的接地干线与接地装置的连接不应少于两处。

(2) 防止雷电流流经引下线和接地装置时产生的高电位对附近金属物或电气线路的反击,应符合下列要求:

① 当金属物或电气线路与防雷的接地装置之间不相连时,其与引下线之间的距离应按下列表达式确定:当 $l_x < 5R_1$ 时

$$S_{a3} \geq 0.3k_c(R_i + 0.1l_x)$$

当 $l_x \geq 5R_i$ 时

$$S_{a3} \geq 0.075k_c(R_i + l_x)$$

式中 S_{a3} ——空气中距离(m);

R_i ——引下线的冲击接地电阻(Ω);

l_x ——引下线计算点到地面的长度(m)。

②当金属物或电气线路与防雷的接地装置之间相连或通过过电压保护器相连时,其与引下线之间的距离应按下列表达式确定:

$$S_{a4} \geq 0.075k_c l_x$$

式中 S_{a4} ——空气中距离(m);

l_x ——引下线计算点到连接点的长度(m)。

当利用建筑物的钢筋或钢结构作为引下线,同时建筑物的大部分钢筋、钢结构等金属物与被利用的部分连成整体时,金属物或线路与引下线之间的距离可不受限制。

③当金属物或线路与引下线之间有自然接地或人工接地的钢筋混凝土构件、金属板、金属网等静电屏蔽物隔开时,金属物或线路与引下线之间的距离可不受限制。

④当金属物或线路与引下线之间有混凝土墙、砖墙隔开时,混凝土墙的击穿强度应与空气击穿强度相同,砖墙的击穿强度应为空气击穿强度的1/2。当距离不能满足设计要求时,金属物或线路应与引下线直接相连或通过过电压保护器相连。

⑤在电气接地装置与防雷的接地装置共用或相连的情况下,当低压电源线路用全长电缆或架空线换电缆引入时,宜在电源线路引入的总配电箱处装设过电压保护器;当变压器的接线方式为Y_{yn0}或D_{yn11}时,设在木建筑物内或附设于外墙处时,在高压侧采用电缆进线的情况下,宜在变压器高、低压侧各相上装设避雷器;在高压侧采用架空进线的情况下,除按国家现行有关规范的规定在高压侧装设避雷器外,尚宜在低压侧各相上装设避雷器。

3. 防雷电波侵入的措施

(1) 防雷电波侵入的措施,应符合下列要求:

当低压线路全长采用埋地电缆或敷设在架空金属线槽内的电缆引入时,在入户端应将电缆金属外皮、金属线槽接地,对建筑物,上述金属物尚应与防雷的接地装置相连。

(2) 通常的建筑物,其低压电源线路应符合下列要求:

①低压架空线应改换一段埋地金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入,其埋地长度应符合设计计算的要求,但电缆埋地长度不应小于15m。入户端电缆的金属外皮、钢管应与防雷的接地装置相连。在电缆与架空线连接处尚应装设避雷器。避雷器、电缆金属外皮、钢管和绝缘子铁脚、金具等应连在一起接地,其冲击接地电阻不应大于10 Ω 。

②平均雷暴日小于30d/a地区的建筑物,可采用低压架空线直接引入建筑物内,但应符合下列要求:

A. 在入户处应装设避雷器或设2~3mm的空气间隙,且应与绝缘子铁脚连在一起接到防雷的接地装置上,其冲击接地电阻不应大于5 Ω 。

B. 入户处的电杆绝缘子铁脚,应用金属接地,靠近建筑物的电杆,其冲击接地电阻不应大于10 Ω ,其余电杆不应大于20 Ω 。

(3) 建筑物的低压电源线路应符合下列要求:

①当低压架空线转换金属铠装电缆或护套电缆穿钢管直接埋地引入时,其埋地长度应大于或等于15m。

②当架空线直接引入时,在入户处应加装避雷器,并将其与绝缘子铁脚、金具连在一起接到电气设备的接地装置上。靠近建筑物的两基电杆上的绝缘子铁脚应接地,其冲击接地电阻不应大于30 Ω 。

(4) 架空和直接埋地的金属管道在进出建筑物处应就近与防雷的接地装置相连;当不相连时,架空管道应接地,其冲击接地电阻不应大于10 Ω 。建筑物引入、引出该建筑物的金属管道在进出处应与防雷的接地装置相连,对架空金属管道尚应在距建筑物约25m处接地一次,其冲击接地电阻不应大于10 Ω 。

4. 防侧击雷的措施

高度超过 45m 的钢筋混凝土结构、钢结构建筑物,尚应采取以下防侧击和等电位的保护措施:

- (1) 钢构架和混凝土的钢筋应互相连接。钢筋的连接应符合规范第 3.3.5 条的要求;
- (2) 应利用钢柱或柱子钢筋作为防雷装置引下线;
- (3) 应将 45m 及以上外墙上的栏杆、门窗等较大的金属物与防雷装置连接;
- (4) 竖直敷设的金属管道及金属物的顶端和底端与防雷装置连接。

(三) 第三类防雷建筑物的防雷措施

1. 防直击雷的措施

① 第三类防雷建筑物防直击雷的措施,宜采用装设在建筑物上的避雷网(带)或避雷针或由这两种混合组成的接闪器。避雷网(带)应沿屋角、屋脊、屋檐和檐角等易受雷击的部位敷设。并应在整个屋面组成不大于 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 或 $24\text{m} \times 16\text{m}$ 的网格。

平屋面的建筑物,当其宽度不大于 20m 时,可仅沿周边敷设一圈避雷带。

② 每根引下线的冲击接地电阻不宜大于 30Ω ,对要求较高的建筑物则不宜大于 10Ω 。其接地装置宜与电气设备等接地装置共用。防雷的接地装置宜与埋地金属管道相连。当不共用、不相连时,两者间在地中的距离不应小于 2m 。

在共用接地装置与埋地金属管道相连的情况下,接地装置宜围绕建筑物敷设成环形接地体。

③ 建筑物宜利用钢筋混凝土屋面板、梁、柱和基础的钢筋作为接闪器、引下线和接地装置,应符合下列规定:

A. 利用基础内钢筋网作为接地体时,在周围地面以下距地面不小于 0.5m ,每根引下线所连接的钢筋表面积总和应符合下列表达式的要求:

$$S \geq 1.89k_c^2$$

式中 S ——钢筋表面积总和(m^2)。

B. 当在建筑物周边的无钢筋的闭合条形混凝土基础内敷设人工基础接地体时,接地体的规格尺寸不应小于表 33-6 的规定。

表 33-6 第三类防雷建筑物环形人工基础接地体的规格尺寸

闭合条形基础的周长(m)	扁钢(mm)	圆钢 根数×直径(mm)
> 60	4×25	1× $\phi 10$
> 40 至 < 60	4×20	4× $\phi 10$ 或 2× $\phi 8$
< 40	钢材表面积总和 > 1.89m^2	

注 1. 当长度相同、截面相同时,宜优先选用扁钢。

2. 采用多根圆钢时,其敷设净距不小于直径的 2 倍。

3. 利用闭合条形基础内的钢筋作接地体时可按本表校验。除主筋外,可计入箍筋的表面积。

④ 当土壤电阻率 ρ 小于或等于 $3000\Omega \cdot \text{m}$ 时,在防雷的接地装置同其他接地装置和进出建筑物的管道相连的情况下,防雷的接地装置可不计及接地电阻值,其接地体应符合设计要求,钢筋表面积总和常为大于或等于 0.37m^2 。

⑤ 突出屋面的物体的保护方式应符合设计要求。

⑥ 砖烟囱、钢筋混凝土烟囱,宜在烟囱上装设避雷针或避雷环保护。多支避雷针应连接在闭合环上。

第五节 防雷击电磁脉冲保护

防雷击电磁脉冲是在建筑物遭受直接雷击或附近遭雷击的情况下 线路和设备防过电流和过电压 即防在上述情况下产生的电涌。

若建筑物已按防雷分类列入第一、二或三类防雷建筑物 ,它们已设有防直击雷装置。在不属于第一、二或三类防雷建筑物的情况下 ,用滚球半径 60m 的球体在所涉及的建筑物四周及上方滚动 ,当不触及该建筑物时 ,它即处在其他建筑物或物体的保护范围内 ;反之 ,则不处于其保护范围内。

一个信息系统是否需要防雷击电磁脉冲 ,应在完成直接、间接损失评估和建设、维护投资预测后认真分析综合考虑 ,做到安全、适用、经济。

在设有信息系统的建筑物需防雷击电磁脉冲的情况下 ,当该建筑物没有装设防直击雷装置和不处于其他建筑物或物体的保护范围内时 ,宜按第三类防雷建筑物采取防直击雷的防雷措施。在要考虑屏蔽的情况下 ,防直击雷接闪器宜采用避雷网。

在工程的设计阶段不知道信息系统的规模和具体位置的情况下 ,若预计将来会有信息系统 ,应在设计时将建筑物的金属支撑物、金属框架或钢筋混凝土的钢筋等自然构件、金属管道、配电的保护接地系统等与防雷装置组成一个共用接地系统 ,并应在一些合适的地方预埋等电位连接板。

为了分析估计在防雷装置和做了等电位连接的装置中的电流分布 ,应将雷电流看成是一个电流发生器 ,它向防雷装置导体和与防雷装置做了等电位连接的装置注入可能包含若干雷击的雷电流。

一、防雷区

将需要保护的空間划分为不同的防雷区 ,以规定各部分空间不同的雷击电磁脉冲的严重程度和指明各区交界处的等电位连接点的位置。

各区以在其交界处的电磁环境有明显改变作为划分不同防雷区的特征。

通常 ,防雷区的数越高电磁场强度越小。

将需要保护的空間划分成不同防雷区的一般原则见图 33-2。

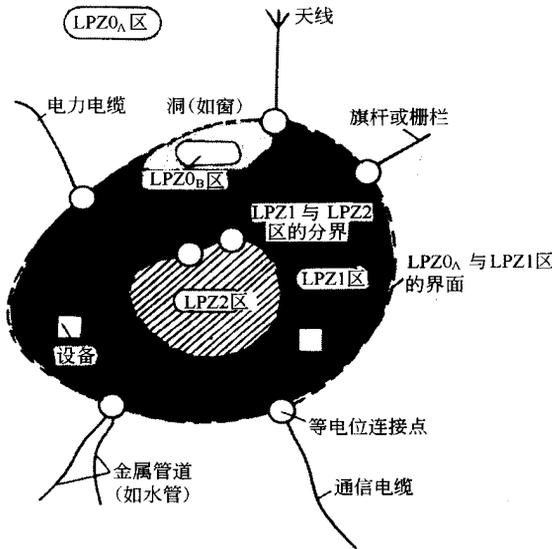


图 33-2 将一个需要保护的空間划分为不同防雷区的一般原则

将一建筑物划分为几个防雷区和做符合要求的等电位连接的例子见图 33-3 此处所有电力线和信号线从同一处进入被保护空间 LPZ1 区,并连接于 LPZ0_A 或 LPZ0_B 与 LPZ1 区界面处的等电位连接带 1 上做等电位连接。这些线路在设于 LPZ1 与 LPZ2 区界面处的内部等电位连接带 2 上再做等电位连接。将建筑物的外屏蔽 1 连接到等电位连接带 1,内屏蔽 2 连接到等电位连接带 2。LPZ2 是这样构成,使雷电流不能导入此空间,也不能穿过此空间。

防雷区应按下列原则划分:

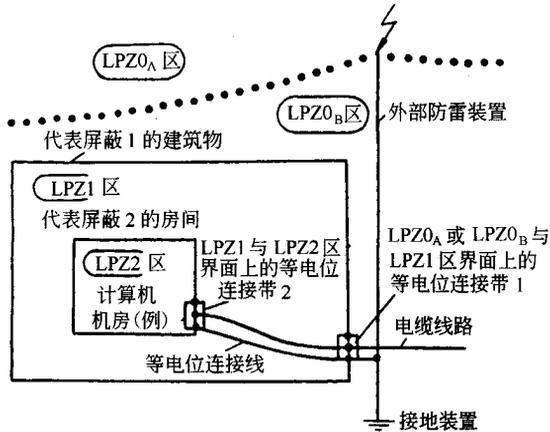


图 33-3 将一建筑物划分为几个防雷区和做符合要求的等电位连接的例子

1. LPZ0A 区:本区内的各物体都可能遭到直接雷击和导走全部雷电流,本区内的电磁场强度没有衰减。

2. LPZ0B 区:本区内的各物体不可能遭到大于所选滚球半径对应的雷电流直接雷击,但本区内的电磁场强度没有衰减。

3. LPZ1 区:本区内的各物体不可能遭到直接雷击,流经各导体的电流比 LPZ0_B 区更小,本区内的电磁场强度可能衰减,这取决于屏蔽措施。

4. LPZ_n+1 后续防雷区:当需要进一步减小流入的电流和电磁场强度时,应增设后续防雷区,并按照需要保护的物体所要求的环境区选择后续防雷区的要求条件。

在两个防雷区的界面上应将所有通过界面的金属物做等电位连接,并宜采取屏蔽措施。

二、屏蔽、接地和等电位连接

为减少电磁干扰的感应效应,宜采取以下的基本屏蔽措施:建筑物和房间的外部设屏蔽措施,以合适的路径敷设线路,线路屏蔽。这些措施宜联合使用。

为改进电磁环境,所有与建筑物组合在一起的大尺寸金属件都应等电位连接在一起,并与防雷装置相连,但第一类防雷建筑物的独立避雷针及其接地装置除外。如屋顶金属表面、立面金属表面、混凝土内钢筋和金属门窗框架。

在需要保护的空間内,当采用屏蔽电缆时,其屏蔽层应至少在两端并宜在防雷区交界处做等电位连接,当系统要求只在一端做等电位连接时,应采用两层屏蔽,外层屏蔽按前述要求处理。

在分开的各建筑物之间的非屏蔽电缆应敷设在金属管道内,如敷设在金属管、金属格栅或钢筋成格栅形的混凝土管道内,这些金属物从一端到另一端应是导电贯通的,并分别连到各分开的建筑物的等电位连接带上。电缆屏蔽层应分别连到这些带上。

当建筑物或房间的大空间屏蔽是由诸如金属支撑物、金属框架或钢筋混凝土的钢筋等自然构件组成时,这些构件构成一个格栅形大空间屏蔽,穿入这类屏蔽的导电金属物应就近与其做等电位连接。

—钢筋混凝土建筑物等电位连接的例子见图 33-4。

屏蔽是减少电磁干扰的基本措施。

屏蔽层仅一端做等电位连接和另一端悬浮时,它只能防静电感应,防不了磁场强度变化所感应的电压。为减少屏蔽芯线的感应电压,在屏蔽层仅一端做等电位连接的情况下,应采用有绝缘隔开的双层屏蔽,外层屏蔽应至少在两端做等电位连接。在这种情况下外屏蔽层与其他同样做了等电位连接的导体构成环路,感应出一电流,因此产生减低源磁场强度的磁通,有利于减少电磁干扰。

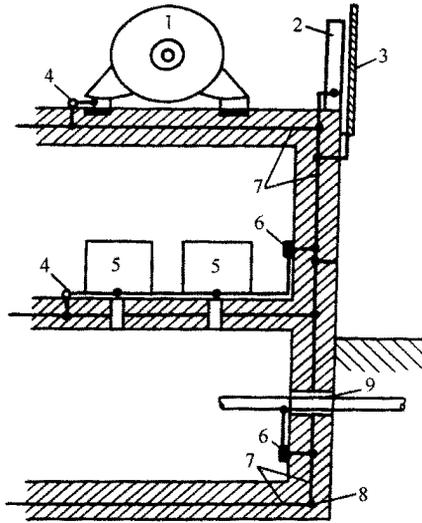


图 33-4 一钢筋混凝土建筑物内等电位连接的例子

1—电力设备 2—钢支柱 3—立面的金属盖板 4—等电位连接点 5—电气设备;
6—等电位连接带 7—混凝土内的钢筋 8—基础接地体 9—各种管线的共用入口

当采用 S 型等电位连接网络时,信息系统的所有金属组件应与共用接地系统的各组件有大于 $10kV \cdot 1.2/50_{\mu s}$ 的绝缘的例子见图 33-5。加绝缘的目的是使外来的干扰电流不会进入所涉及的电子装置。

当对屏蔽效率未做试验和理论研究时,磁场强度的衰减应按下列方法计算。

1. 在闪电击于格栅形大空间屏蔽以外附近的情况下,当无屏蔽时所产生的无衰减磁场强度 H_0 , 相当于处于 LPZ0 区内的磁场强度,应按下式计算:

$$H_0 = i_0 / (2 \cdot \pi \cdot S_a)$$

式中 H_0 ——磁场强度(A/m);

i_0 ——雷电流(A);

S_a ——雷击点与屏蔽空间之间的平均距离(m),见图 33-6。当有屏蔽时,在格栅形大空间屏蔽内,即在 LPZ1 区内的磁场强度从 H_0 减为 H_1 ,其值应按下式计算:

$$H_1 = H_0 / 10^{SF/20} \text{ (A/m)}$$

式中 SF——屏蔽系数(dB),

2. 在闪电直接击在位于 LPZ0A 区的格栅形大空间屏蔽上的情况下,其内部 LPZ1 区内 V_s 空间内某点的磁场强度 $H1$ 应按下式计算:

$$H1 = k_H \cdot i_0 \cdot W / (d_w \cdot \sqrt{d_r})$$

式中 H_1 ——磁场强度(A/m);

d_r ——被考虑的点距 LPZ1 区屏蔽顶的最短距离(m);

d_w ——被考虑的点距 LPZ1 区屏蔽壁的最短距离(m);

k_H ——形状系数($1/\sqrt{m}$)取 $k_H = 0.0(1/\sqrt{m})$;
 W —— LPZ1 区格栅形屏蔽的网格宽(m)

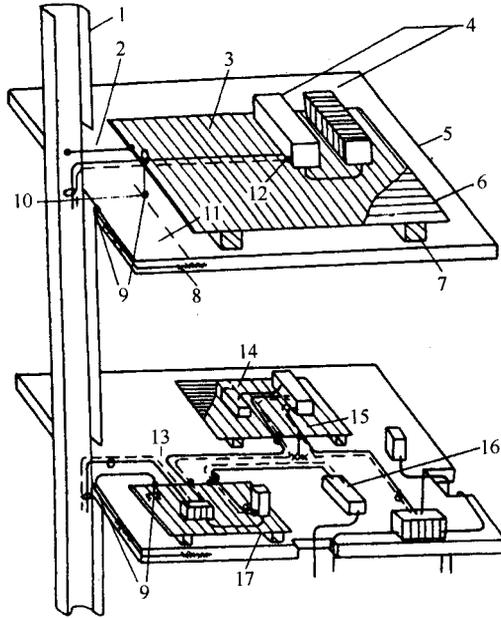


图 33-5 建筑物内混合等电位连接的设计例子

- 1—低阻抗电缆管道,建筑物共用接地系统的一个组合单元
- 2—单点连接点与电缆管道之间的连接
- 3—LPZ2 区;
- 4—LPZ3 区,由设备屏蔽外壳构成,即系统组 1 的机架
- 5、8—钢筋混凝土地面
- 6—等电位连接网络 1;
- 7—等电位连接网络 1 与建筑物共用接地系统之间的绝缘物,其绝缘强度大于 $10kV, 1.2/50_{\mu s}$;
- 9—电缆管道、等电位连接网络 1、系统组 2 与地面钢筋的等电位连接
- 10—单点连接点 1
- 11—LPZ1 区;
- 12—连到机架的电缆金属屏蔽层
- 13—单点连接点 2
- 14—系统组 2
- 15—单点连接点 3;
- 16—采用一般等电位连接的原有设备和装置
- 17—系统组 2

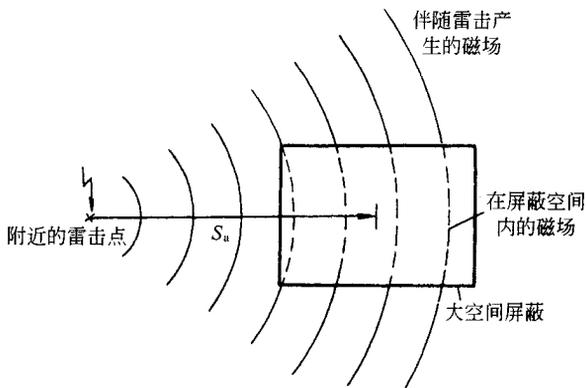


图 33-6 附近雷击时的环境情况

S_a 广雷击点至屏蔽空间的平均距离

计算值仅对距屏蔽格栅有一安全距离 $d_{s/2}$ 的空间 V_s 内有效, $d_{s/2}$ 应符合下式的要求:

$$d_{s/2} = W \quad (m)$$

信息设备应仅安装在 V_s 空间内。

信息设备的干扰源不应取紧靠格栅的特强磁场强度。

3. 流过包围 LPZ2 区及以上区的格栅形屏蔽的分雷电流将不会有实质性的影响作用,处在 LPZ_n 区内 LPZ_{n+1} 区的磁场强度将由 LPZ_n 区内的磁场强度 H_n 减至 LPZ_{n+1} 区内的 H_{n+1} ,其值可近似地按下式计算:

$$H_{n+1} = H_n / 10^{kF/20} \quad (\text{A/m})$$

穿过各防雷区界面的金属物和系统,以及在一个防雷区内部的金属物和系统均应在界面处做符合下列要求的等电位连接。

① 所有进入建筑物的外来导电物均应在 LPZ0_A 或 LPZ0_B 与 LPZ1 区的界面处做等电位连接。当外来导电物、电力线、通信线在不同地点进入建筑物时,宜设若干等电位连接带,并应将其就近连到环形接地体、内部环形导体或此类钢筋上,它们在电气上是贯通的并连到接地体,含基础接地体。

环形接地体和内部环形导体应连到钢筋或金属立面等其他屏蔽构件上,宜每隔 5m 连接一次。

② 各后续防雷区界面处的等电位连接:

穿过防雷区界面的所有导电物、电力线、通信线均应在界面处做等电位连接。应采用一局部等电位连接带做等电位连接,各种屏蔽结构或设备外壳等其他局部金属物也连到该带。

用于等电位连接的接线夹和电涌保护器应分别估算通过的雷电流。

③ 所有电梯轨道、吊车、金属地板、金属门框架、设施管道、电缆桥架等大尺寸的内部导电物,其等电位连接应以最短路径连到最近的等电位连接带或其他已做了等电位连接的金属物,各导电物之间宜附加多次互相连接。

④ 一信息系统的的所有外露导电物应建立一等电位连接网络。由于按照本章规定实现的等电位连接网络均有通大地的连接,每个等电位连接网不宜设单独的接地装置。

接地、等电位连接和共用接地系统的构成,见图 33-7。

三、电涌保护器

电涌保护器,又称为浪涌保护器或过电压保护器,其作用是限制瞬态过电压和分走电涌电流的器件。

有关使用电涌保护器的规定如下:

1. 当电源采用 TN 系统时,从建筑物内总配电盘(箱)开始引出的配电线路和分支线路必须采用 TN-S 系统。

2. 本章原则上规定要在各防雷区界面处做等电位连接,但由于工艺要求或其他原因,被保护设备的安装位置不会正好设在界面处而是设在其附近,在这种情况下,当线路能承受所发生的电涌电压时,电涌保护器可安装在被保护设备处,而线路的金属保护层或屏蔽层宜首先于界面处做一次等电位连接。

3. 在屏蔽线路从室外的 LPZ0_A 或 LPZ0_B 区进入 LPZ1 区的情况下,线路屏蔽层的截面 S_c 应符合下式规定:

$$S_c \geq i_{iq1} 10^6 / U_{ik} \quad (\text{mm}^2)$$

式中 i_{iq1} ——流入屏蔽层的雷电流(kA);

ρ_c ——屏蔽层的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$) 20℃时铁为 $138 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,

铜为 $17.24 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$,铝为 $28.264 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$;

l_c ——线路长度(m);

U_{ik} ——线路绝缘的耐冲击电压值(kV)。

4. 电涌保护器必须能承受预期通过它们的雷电流,并应符合以下两个附加要求:通过电涌时的最大钳压,有能力熄灭在雷电流通过后产生的工频续流。

在建筑物进线处和其他防雷区界面处的最大电涌电压,即电涌保护器的最大钳压加上其两端引线的感应电压应与所属系统的基本绝缘水平和设备允许的最大电涌电压协调一致。为使最大电涌电压足够低,其两端的引线应做到最短。

在不同界面上的各电涌保护器还应与其相应的能量承受能力相一致。

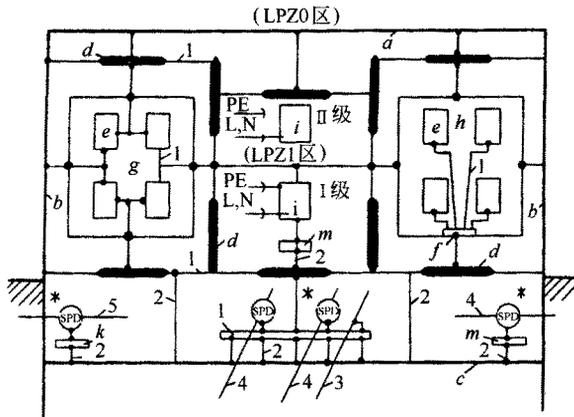


图 33-7 接地、等电位连接和共用接地系统的构成

- 注：
a—防雷装置的接闪器以及可能是建筑物空间屏蔽的一部分，如金属屋顶；
b—防雷装置的引下线以及可能是建筑物空间屏蔽的一部分，如金属立面、墙内钢筋；
c—防雷装置的接地装置（接地体网络、共用接地体网络）以及可能是建筑物空间屏蔽的一部分，如基础内钢筋和基础接地体；
d—内部导电物体，在建筑物内及其上不包括电气装置的金属装置，如电梯轨道、吊车、金属地面、金属门框架、各种服务性设施的金属管道、金属电缆桥架、地面、墙和天花板的钢筋；
e—局部信息系统的金属组件，如箱体、壳体、机架；
f—代表局部等电位连接带单点连接的接地基准点（ERP）；
g—局部信息系统的网形等电位连接结构；
h—局部信息系统的星形等电位连接结构；
i—固定安装引入 PE 线的 I 级设备和不引入 PE 线的 II 级设备；
k—主要供电线路和电力设备等电位连接用的总接地带、总接地母线、总等电位连接带，也可用作共用等电位连接带；
l—主要供信息线路和信息设备等电位连接用的环形等电位连接带、水平等电位连接导体，在特定情况下采用金属板。也可用作共用等电位连接带。用接地线多次接到接地系统上做等电位连接，宜每隔 5m 进行一次；
m—局部等电位连接带；
 1—等电位连接导体；
 2—接地线；
 3—服务性设施的金属管道；
 4—信息线路或电缆；
 5—电力线路或电缆；
 *—进入 LPZ1 区处，用于管道、电力和通信线路或电缆等外来服务性设施的等电位连接。

5. 选择 220/380V 三相系统中的电涌保护器时，其最大持续运行电压 U_c 应符合下列规定：

- (1) IT 系统中， U_c 不应小于 $1.55U_0$ 。
- (2) TN 和 TT 系统中， U_c 不应小于 $1.15U_0$ 。
- (3) IT 系统中， U_c 不应小于 $1.15U$ （ U 为线间电压）。

U_0 是低压系统相线对中性线的标称电压，在 220/380V 三相系统中， $U_0 = 220V$ 。

6. 在供电的电压偏差超过所规定的 10% 以及谐波使电压幅值加大的场所，应根据具体情况对氧化锌压敏电阻 SPD 提高⑤所规定的 U_c 值。

7. 在 LPZ0_A 或 LPZ0_B 区与 LPZ1 区交界处，在从室外引来的线路上安装的 SPD，应选用符合 I 级分类试验的产品。

8. SPD 所得到的电压保护水平加上其两端引线的感应电压以及反射波效应不足以保护距其较远处的被保护设备的情况下,尚应在被保护设备处装设 SPD,其标称放电电流 I_n 不宜小于 $8/20_{\mu s}$ 3kA。

SPD 不大于 10m 时,若该 SPD 的电压保护水平加上其两端引线的感应电压小于被保护设备耐压水平的 80%,一般情况在被保护设备处可不装 SPD。

9. SPD 之间设有配电盘时,若第一级 SPD 的电压保护水平加上其两端引线的感应电压保护不了该配电盘内的设备,应在该盘内安装第二级 SPD,其标称放电电流不宜小于 $8/20_{\mu s}$ 5kA。

10. 在考虑各设备之间的电压保护水平时,若线路无屏蔽尚应计及线路的感应电压,在考虑被保护设备的耐压水平时宜按其值的 80% 考虑。

11. 在一般情况下,当在线路上多处安装 SPD 且无准确数据时,电压开关型 SPD 与限压型 SPD 之间的线路长度不宜小于 10m,限压型 SPD 之间的线路长度不宜小于 5m。

12. 在一般情况下,I、II 类设备应考虑采取防操作过电压的措施。

四、防雷名词术语

有关建筑防雷的名词术语,常用的见表 33-7。

表 33-7 建筑防雷常用名词术语

名 词 术 语	解 释
接 闪 器	直接截受雷击的避雷针、避雷带(线)、避雷网,以及用作接闪的金属屋面和金属构件等
引 下 线	连接接闪器与接地装置的金属导体
接地装置	接地体和接地线的总合
接 地 体	埋入土壤中或混凝土基础中作散流用的导体
接 地 线	从引下线断接卡或换线处至接地体的连接导体;或从接地端子、等电位连接带至接地装置的连接导体
防雷装置	接闪器、引下线、接地装置、电涌保护器及其他连接导体的总合
直 击 雷	闪电直接击在建筑物、其他物体、大地或防雷装置上,产生电效应、热效应和机械力者
雷电感应	闪电放电时,在附近导体上产生的静电感应和电磁感应,它可能使金属部件之间产生火花
静电感应	由于雷云的作用,使附近导体上感应出与雷云符号相反的电荷,雷云主放电时,先导通道中的电荷迅速中和,在导体上的感应电荷得到释放,如不就近泄入地中就会产生很高的电位
电磁感应	由于雷电流迅速变化在其周围空间产生瞬变的强电磁场,使附近导体上感应出很高的电动势

名 词 术 语	解 释
雷电波侵入	由于雷电对架空线路或金属管道的作用,雷电波可能沿着这些管线侵入屋内,危及人身安全或损坏设备
信息系统	建筑物内许多类型的电子装置,包括计算机、通信设备、控制装置等的统称
向下闪击	开始于雷云向大地产生的向下先导。一向下闪击至少有一首次短时雷击,其后可能有多次后续短时雷击并可能含有一次或多次长时间雷击
向上闪击	开始于一接了地的建筑物向雷云产生的向上先导。一向上闪击至少有一其上有或无叠加多次短时雷击的首次长时间雷击,其后可能有多次短时雷击并可能含有一次或多次长时间雷击
雷击	闪击中的一次放电
短时雷击	脉冲电流的半值时间 T_2 短于 2ms 的雷击
长时间雷击	电流从波头起自峰值 10% 至波尾降至峰值 10% 之间的时间长于 2ms 且短于 1s 的雷击
雷 击 点	雷击接触大地、建筑物或防雷装置的那一点
雷 电 流	流入雷击点的电流
单位能量	一闪击时间内雷电流平方对时间的积分。它代表雷电流在一单位电阻上所产生的能量
雷击电磁脉冲	是一种干扰源。本规范指闪电直接击在建筑物防雷装置和建筑物附近所引起的效应。绝大多数是通过连接导体的干扰,如雷电流或部分雷电流、被雷电击中的装置的电位升高以及电磁辐射干扰
防雷区	需要规定和控制雷击电磁环境的那些区
等电位连接	将分开的装置、诸导电物体用等电位连接导体或电涌保护器连接起来以减小雷电流在它们之间产生的电位差
等电位连接带	将金属装置、外来导电物、电力线路、通信线路及其他电缆连于其上以能与防雷装置做等电位连接的金属带
等电位连接导体	将分开的装置诸部分互相连接以使它们之间电位相等的导体
等电位连接网络	由一个系统的诸外露导电部分做等电位连接的导体所组成的网络
共用接地系统	一建筑物接至接地装置的所有互相连接的金属装置,包括防雷装置
接地基准点	一系统的等电位连接网络与共用接地系统之间惟一的那一连接点
电涌保护器 (浪涌保护器,过电压保护器)	目的在于限制瞬态过电压和分走电涌电流的器件。它至少含有一非线性元件

名 词 术 语	解 释
最大持续运行电压 U_c	可能持续加于电涌保护器的最大方均根电压或直流电压,等于电涌保护器的额定电压
标称放电电流 I_n	流过 SPD、8/20、 μs 电流波的峰值电流。用于对 SPD 做 II 级分类试验,也用于对 SPD 做 I 级和 II 级分类试验的预处理
冲击电流 I_{imp}	规定包括幅值电流 I_{peak} 和电荷 Q
II 级分类试验的最大 放电电流 I_{max}	流过 SPD、8/20、 μs 电流波的峰值电流。用于 II 级分类试验。 I_{max} 大于 I_n
I 级分类试验	用标称放电电流 I_n 、1.2/50 μs 冲击电压和最大冲击电流 I_{imp} 做的试验。最大冲击电流在 10ms 内通过的电荷 (Q_{A_s}) 等于幅值电流 I_{peak} (kA) 的二分之一,即 (Q_{A_s}) = 0.5 I_{peak} (kA)
II 级分类试验	用标称放电电流 I_n 、1.2/50 μs 冲击电压和最大放电电流 I_{max} 做的试验
混 合 波	发生器产生 1.2/50 μs 冲击电压加于开路电路和 8/20 μs 冲击电流加于短路电路,开路电压的符号为 U_{oc}
III 级分类试验	用混合波(1.2/50 μs 、8/20 μs)做的试验
电压开关型 SPD	无电涌出现时为高阻抗,当出现电压电涌时突变为低阻抗。通常采用放电间隙、充气放电管、闸流管和三端双向可控硅元件作这类 SPD 的组件。有时称这类 SPD 为“短路开关型”或“克罗巴型”SPD
限压型 SPD	无电涌出现时为高阻抗,随着电涌电流和电压的增加,阻抗跟着连续变小。通常采用压敏电阻、抑制二极管作这类 SPD 的组件。有时称这类 SPD 为“钳压型”SPD
组合型 SPD	由电压开关型组件和限压型组件组合而成,可以显示为电压开关型或限压型或这两者都有的特性,这决定于所加电压的特性

第三十四章 电气设备安全与触电保护

电气设备种类很多 本章仅介绍低压用电设备、低压电器和变、配电设备的安全要求。

第一节 用电设备安全

绝大多数用电设备是低压用电设备。低压用电设备种类极多 本节所涉及的用电设备只是一些最常用的、危险性较大的低压设备 ,主要包括电动机、手持电动工具、照明装置等电气设备。

一、用电设备的环境条件和外壳防护等级

空气中介质的状态 ,以及其他环境参数都影响触电的危险性。例如 ,潮湿、导电性粉尘、腐蚀性蒸气和气体对电气设备的绝缘起破坏作用 ,大幅度降低其绝缘电阻 ,可能造成电气设备的外壳、机座等金属部件带上危险的电压 ,并由此酿成触电事故。在这种情况下 ,如果环境温度较高 ,人体电阻降低 ,将更加增大触电的危险性。又如 ,导电性地板以及电气设备附近有金属接地物体存在 ,使得容易构成电流回路 ,从而增大触电的危险性。因此 ,应根据环境特征 ,选用适当防护型式的用电设备。电气设备的结构及所采取的安全措施应能防护所在环境中各种不安全因素的影响。

(一) 用电环境类型

工作环境或生产厂房可按多种方式分类。按照电击的危险程度 ,用电环境分为三类 ,即无较大危险的环境、有较大危险的环境和特别危险的环境。

1. 无较大危险的环境。正常情况下 ,有绝缘地板(如木地板) ,没有接地导体或接地导体很少的干燥、无尘环境 ,属于无较大危险的环境。或者说 ,这些环境不具备有较大危险和特别危险环境的特征。普通住房、办公室、某些实验室、仪表装配车间等均属于无较大危险的环境。

2. 有较大危险的环境。下列环境均属于有较大危险的环境 :

(1) 空气相对湿度经常超过 75% 的潮湿环境 ;

(2) 环境温度经常或昼夜间周期性地超过 35℃ 的炎热环境 ;

(3) 含导电性粉尘 ,即生产过程中排出工艺性导电粉尘(如煤尘、金属尘等) ,并沉积在导线上或进入机器、仪器内的环境 ;

(4) 有金属、泥土、钢筋混凝土、砖等导电性地板或地面的环境 ;

(5) 工作人员同时一方面接触接地的金属构架、金属结构、工艺装备 ;另一方面又接触电气设备的金属壳体的环境。

机械厂的金工车间和锻工车间 ,冶金厂的压延车间、拉丝车间、电炉电极车间、电刷车间、煤粉车间、水泵房、空气压缩站、成品库、车库等都属于有较大危险的环境。

3. 特别危险的环境。下列环境均属于特别危险的环境 :

(1) 室内天花板、墙壁、地板等各种物体都潮湿 ,空气相对湿度接近 100% 的特别潮湿的环境 ;

(2) 室内经常或长时间存在对电气设备的绝缘或导电部分产生破坏作用的腐蚀性蒸气、气体、液体等化

学活性介质或有机介质的环境；

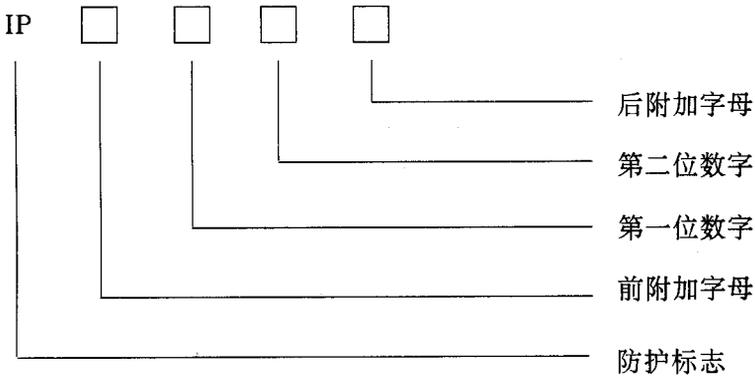
(3)具有两种及两种以上有较大危险环境特征的环境(例如,有导电性地板的潮湿环境、有导电性粉尘的炎热环境等)。

很多生产厂房,如铸造车间、酸洗车间、电镀车间、电解车间、漂染车间、化工厂的大多数车间,以及发电厂的所有车间、室外电气装置设置区域、电缆沟等,都属于特别危险环境。

(二)电气设备外壳防护等级

电机和低压电器的外壳防护包括两种防护,第一种防护是对固体异物进入内部的防护以及对人体触及内部带电部分或运动部分的防护,第二种防护是对水进入内部的防护。

根据 GB4208—84 标准,外壳防护等级按如下方法标志:



第一位数字表示第一种防护型式等级,第二位数字表示第二种防护型式等级。仅考虑一种防护时,另一位数字用“×”代替。前附加字母是电机产品的附加字母,W表示气候防护式电机,R表示管道通风式电机;后附加字母也是电机产品的附加字母,S表示在静止状态下进行第二种防护型式试验的电机,M表示在运转状态下进行第二种防护型式试验的电机。如无需特别说明,附加字母可以省略。

第一种防护分为7级。各级防护性能见表34-1。

表 34-1 电气设备第一种防护性能

防护等级	简称	防护性能
0	无防护	没有专门的防护
1	防护大于 50mm 的固体	能防止直径大于 50mm 的固体异物进入壳内;能防止人体的某一大面积部分(如手)偶然或意外触及壳内带电或运动部分,但不能防止有意识地接近这些部分
2	防护大于 12mm 的固体	能防止直径大于 12mm 的固体异物进入壳内;能防止手指的触及壳内带电或运动部分 ^①
3	防护大于 2.5mm 的固体	能防止直径大于 2.5mm 的固体异物进入壳内;能防止厚度(或直径)大于 2.5mm 的工具、金属线等触及壳内带电或运动部分 ^{① ②}
4	防护大于 1mm 的固体	能防止直径大于 1mm 的固体异物进入壳内;能防止厚度(或直径)大于 1mm 的工具、金属线等触及壳内带电或运动部分

防护等级	简称	防护性能
5	防尘	能防止灰尘进入达到影响产品正常运行的程度,能完全防止触及壳内带电或运动部分 ^①
6	尘密	能完全防止灰尘进入壳内,能完全防止触及壳内带电运动部分 ^①

注 ①对用同轴外风扇冷却的电动机,风扇的防护应能防止其风叶或轮辐被试指触及;在出风口,直径 50mm 的试指插入时,不能通过护板。

②不包括泄水孔,泄水孔不应低于第 2 级的规定。

第二种防护分为 9 级。各级防护性能见表 34-2。

表 34-2 电气设备第二种防护性能

防护等级	简称	防护性能
0	无防护	没有专门的防护
1	防滴	垂直的滴水不能直接进入产品的内部
2	15°防滴	与垂线成 15°角范围内的滴水不能直接进入产品内部
3	防淋水	与垂线成 60°角范围内的淋水不能直接进入产品内部
4	防溅	任何方向的溅水对产品应无有害的影响
5	防喷水	任何方向的喷水对产品应无有害的影响
6	防海浪或强力喷水	强烈的海浪或强力喷水对产品应无有害的影响
7	浸水	产品在规定的压力和时间下浸在水中,进水量应无有害影响
8	潜水	产品在规定的压力下长时间浸在水中,进水量应无有害影响

二、电动机

电动机是工业企业最常用的用电设备,其作用是把电能转换为机械能。作为动力机,电动机具有结构简单、操作方便、价格低、效率高等优点。因此,在各方面被广泛应用。厂矿中电动机消耗的电能占总能耗量的 50% 以上。可见,电动机的安全运行是保证厂矿正常生产的基本条件之一。

(一) 电动机的选用

电动机种类很多,有直流电动机和交流电动机。交流电动机又分为同步电动机和异步电动机(即感应电动机),而异步电动机又分为绕线式电动机和笼型电动机。

电动机的电磁机构由定子部分和转子部分组成。直流电动机的定子上装有极性固定的磁极,直流电源经整流子(换向器)接入转子(电枢),转子电流与定子磁场相互作用产生机械力矩使转子旋转。直流电动机结构复杂,可靠性较低,但有良好的调速性能和启动性能。直流电动机主要用于电机车、轧钢机、大中型提升机等调速或启动要求高的设备。

交流电动机的定子(电枢)上装有不同型式的交流绕组,接通交流电源后即产生旋转磁场。同步电动机转子上装有极性固定的磁极。定子接通交流电源后,转子开始旋转,至转速达到同步转速(旋转磁场转速)的

95%时,转子经滑环接通直流电源,电动机进入同步运转。同步电动机的结构也比较复杂,但同步电动机可以通过励磁电流的调节改变定子电流的相位,使同步电动机成为容性负载。因此,同步电动机可为电网提供无功功率。同步电动机主要用于不需调速的、不频繁启动的大型设备。

异步电动机转子上都不接电源,由定子产生的旋转磁场在转子绕组中产生感应电动势和感应电流,感应电流再与旋转磁场作用产生电磁转矩,拖动转子旋转。工作在电动机状态的异步电动机,转速必定低于同步转速。否则,其间不发生感应(转子不切割磁力线),不产生电磁转矩。绕线式电动机转子绕组经滑环与外部电阻器等元件连接,用以改变启动特性和调速。绕线式电动机主要用于启动、制动控制频繁和启动困难的场合,如起重机械和一些冶金机械等。

笼型电动机的转子绕组是笼状短路绕组,结构简单,工作可靠,维护方便,但启动性能和调速性能差。笼型电动机广泛用于各种机床、泵、风机等多种机械的电力拖动,是应用最多的电动机。

应根据环境条件,选用相应防护等级的电动机。例如,多尘、水土飞溅或火灾危险场所应选用封闭式电动机,爆炸危险场所应选用防爆型电动机等。

电动机的功率必须与生产机械负荷的大小及其持续和间断的规律相适应。电动机功率太小,势必造成电动机过载工作,造成电动机过热。过热对电动机的绝缘是很不利的,它不仅会加速绝缘的老化,还会缩短电动机的使用年限,而且还可能由于绝缘损坏而造成触电事故。

(二)异步电动机的基本特性

1. 同步转速和转差率。异步电动机的同步转速是指旋转磁场的转速。同步转速决定于电源频率和极对数,其相互关系为

$$n_0 = \frac{60}{2\pi} \Omega_0 = \frac{60f}{p}$$

式中 n_0 ——同步速度 r/min ;

Ω_0 ——同步角速度 rad/s ;

f ——电源频率 Hz ;

p ——极对数。

异步电动机的转差率为实际转速与同步转速之差用百分数表示的相对值,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

异步电动机的额定转差率多在 2% ~ 6% 之间。

2. 电磁转矩。异步电动机的电磁转矩为

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (34-1)$$

式中 C_m ——决定于电动机结构的系数;

Φ ——气隙中的每极磁通,决定于定子电压和电动机结构;

I_2 ——转子电流;

φ_2 ——转子功率因数。

将 $I_2 = sE_{20} / \sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}$ 和 $\cos \varphi_2 = r_2 / \sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}$ 代入式(34-1)得

$$M = C_m \Phi E_{20} \frac{s r_2}{r_2^2 + (sx_{20})^2} \quad (34-2)$$

式中 x_{20} ——转子堵转时的每相阻抗;

E_{20} ——转子堵转时的电动势。

由式 34-1 可知,异步电动机的转矩特性如图 34-1 所示, s 很小时, M 大致与 s 保持正比接近; s 关系于 1 时, M 大致与 s 保持反比关系。靠近 $s=0$ 的侧,转矩取得最大值 M_{\max} ,称最大转矩,相应的转差率 s_m 称临界转差率; $s=1$ 时的转矩称堵转转矩。

将式(34-1)对 s 取得偏导,并令 $\frac{\partial M}{\partial s} = 0$,可求得最大转矩和临界转差率为

$$M_{\max} = C_m \Phi E_{20} \frac{1}{2x_{20}}$$

$$s_m = \frac{r_2}{x_{20}}$$

将 $s = 1$ 代入 M 的表达式,可得到堵转转矩为

$$M_s = C_m \Phi E_{20} \frac{r_2}{r_2^2 + x_{20}^2}$$

由以上异步电动机的转矩特性可以知道,最大转矩为转子电阻无关,但随着转子电阻增大,临界转差率也增大,其机械特性如图 34-2 所示。图 34-2 中,曲线 1 转子电阻最大,曲线 6 转子电阻最小。

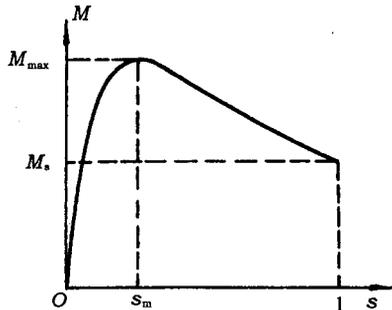


图 34-1 异步电动机的转矩特性

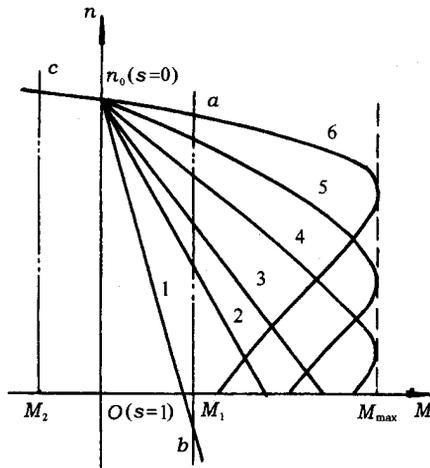


图 34-2 异步电动机的机械特性

绕线式电动机就是利用这一特性来实现平稳启动和调速的。

(三) 异步电动机的运行状态

异步电动机有如下几种运行状态

1. 异步运行状态,即 $0 < n < n_n, M > 0$ 的状态。图 34-2 中,对应负载转矩 M_1 的 a 点即异步运行状态。异步运行状态是最常见的电动机拖动状态。

2. 反接制动状态,即 $n < 0, M > 0$ 的状态。图 34-2 中,对应负载转矩 M_1 的 b 点即反接制动状态。

3. 发电制动状态,即 $n > n_0, M < 0$ 的状态。图 34-2 中,对应负载转矩 M_2 的 c 点即发电制动状态。

在转换位能、动能的机械上,一台电动机可能运行于上述几种不同的状态。此外, $n = n_0$ 状态为同步状态, $n = 0$ 状态为堵转状态,这两种状态一般不会长时间出现。

(四) 感应式电动机启动、调速和制动

1. 启动。启动瞬间,感应式电动机转子绕组以同步速度切割旋转磁场,产生的感应电动势很大,使得这一瞬间的电流高达电动机额定电流的5~7倍。启动电流太大可能大幅度增加线路上的电压降,可能导致该设备启动失败,还可能导致其他设备停车,甚至还可能造成设备和线路的损坏。因此,公用低压配电网中,10kW以上的笼型电动机、小区低压配电室供电的15kW以上的笼型电动机、专用变压器供电的启动时电压损失不超过10%~15%的电动机,均应采取减压启动方式。

笼型电动机常用的减压启动方式是Y— Δ 启动和自耦减压启动。Y— Δ 启动是启动时再将三相绕组按星形连接,待启动接近终了时再将三相绕组改成三角形连接。由于启动电压降低为额定电压的 $1/\sqrt{3}$,相电流也降低为直接启动时的 $1/\sqrt{3}$,线电流则降低为直接启动时的 $1/3$,堵转转矩也降低为直接启动时的 $1/3$ 。自耦减压启动时电动机经自耦变压器降压(比较多见的是将电源电压降低为80%和65%)接通电源,启动临近终了时甩掉自耦变压器,直接接通电源。对于将电源电压降低为80%的自耦减压启动,相电流也降低为直接启动时的80%,线电流则降低为直接启动时的64%,堵转转矩也降低为直接启动时的64%。此外,笼型电动机还采用介于Y— Δ 启动和直接启动之间的延边三角形减压启动,还采用定子绕组串电抗或电阻启动等启动方式。

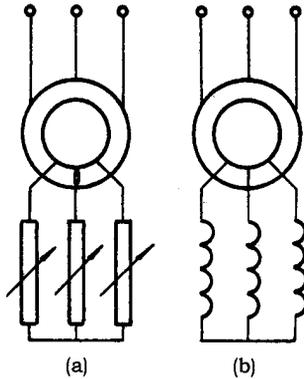


图 34-3 绕线式电动机启动
(a) 接变阻器 (b) 接频敏变阻器

绕线式电动机常采用转子绕组串电阻器或频敏变阻器的启动方式,如图34-3a所示。开始启动时,在转子电路中串入外接电阻,既能限制堵转电流,又能取得较大的堵转转矩,然后逐级切除外接电阻,使电动机平稳加速,最后全部切除外接电阻,并将转子绕组短路,电动机转入正常运行。如果外接电阻是按长时工作设计的,则这种方法可用于异步电动机调速。因为电阻要消耗能量,所以这种方法是不够经济的。如图34-3b所示,可以用频敏变阻器代替普通的电阻器。频敏变阻器实质上是铁心功率损耗较大的电抗器。开始启动时,转子频率高,变阻器的阻抗也大,随着转子转速增加,转子频率降低,变阻器的阻抗自动减小,启动完毕后,切除变阻器,并将转子短路。频敏变阻器结构简单,不需逐级切换,可靠性较高,而且便于实现自动控制。

2. 调速。感应式电动机调速性能不好。笼型电动机可采用变频调速和变极调速。前者所用设备比较复杂,但调速性能好,发展较快;后者为有级调速,而且调速范围不大。绕线式电动机可采用外接电阻器调速,其调速范围可达3:1。

3. 制动。电动机可采用机械制动和电气制动。机械制动是借制动电磁铁和闸瓦制动器实现制动的。电气制动包含电动机定子绕组断开电源后,经电阻器短接或接入直流电源的能耗制动、电动机转速超过同步转速的发电制动以及电动机转速反向或电源反接的反接制动。

4. 反转。改变三相电源的相序,即将三相电动机的电源任意调换两相,即可改变旋转磁场的方向,实现电动机的反转。

(五) 异步电动机不对称运行

异步电动机允许在一定范围内降低容量, 不对称运行。例如, 三相电动机可以甩开一相, 将其余两相中的一相直接接单相电源, 另一相串联电容后接单相电源作单相电动机运行。但是, 故障不对称运行往往是烧毁电动机和导致电击事故的主要原因。

1. 三相电动机缺一相运行。三相 380V 电动机缺一相后, 变成 380V 单相运行, 旋转磁场变成脉振磁场。可以证明, 一个脉振磁场能够分解为两个大小相等、转向相反的旋转磁场。每个旋转磁场的大小为脉振磁场的 1/2。这时, 电动机的转矩特性如图 34-4 所示。

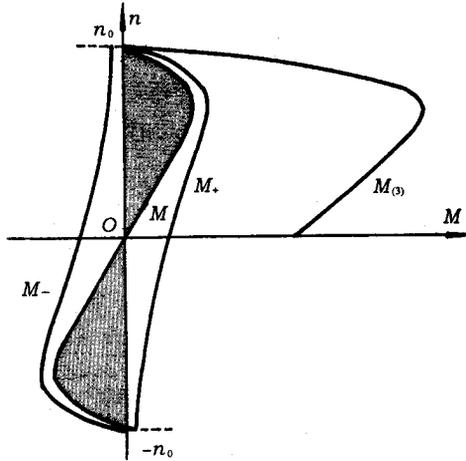


图 34-4 缺一相运行的机械特性

显然, 这时的机械特性是对坐标原点对称的机械特性, $n = 0$ 时 $M = 0$, 即电动机在停止状态理论上是不能启动的。因为电动机的堵转电流比正常工作的电流大得多。所以, 在这种情况下接通电源时间过长或多次频繁地接通电源, 将导致电动机烧毁。

通过简单的换算可以证明, 正转转矩 M_+ 和反转转矩 M_- 的最大值均为正常运行转矩 $M_{(3)}$ 最大值的 1/4。因此, 运行中的三相电动机缺一相时, 如负载转矩很小, 仍可维持运转, 仅转速略有降低, 并发出异常声响。但是, 对于恒转矩负载, 则线路电流将增加为正常时的 $\sqrt{3}$ 倍, 运行时间过长也会烧毁电动机。

为防止缺一相运行烧毁三相电动机, 可以采取多种保护方案。其中, 有利用电压变化的方案, 也有利用电流变化的方案。

2. 三相电动机两相一零运行。这是一种十分危险的运行方式。三相电动机两相一零运行是由于一条相线与接向金属外壳的保护零线接错造成的。这时电动机外壳带电, 触电危险性很大。此时, 供给电动机的电压为不对称三相电压: 一个线电压和两个相电压(见图 34-5a), 并可表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= U \angle 0^\circ \\ \dot{U}_2 &= \frac{U}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ \\ \dot{U}_3 &= \frac{U}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ \end{aligned} \right\}$$

应用对称分量法可求得 $U_+ = 2U/3$, $U_- = U/3$ 。因此, 正转转矩约为额定转矩的 4/9, 反转转矩约为额定转矩的 1/9(见图 34-5b)。

这种故障不同于三相电动机缺一相运行。在这种情况下, 堵转转矩为额定堵转转矩的 1/3。因此, 如果负载转矩不大, 接通电源时, 电动机仍能正向启动, 运行时转速变化很小, 异常声音也不明显。正因为如此, 这种故障状态可能给人以错觉, 使人忽略电动机外壳带电的危险。

(六) 电动机安全运行条件

新安装的三相笼型异步电动机在投入运行前应检查接法是否正确, 与电源电压是否相符, 防护是否完好

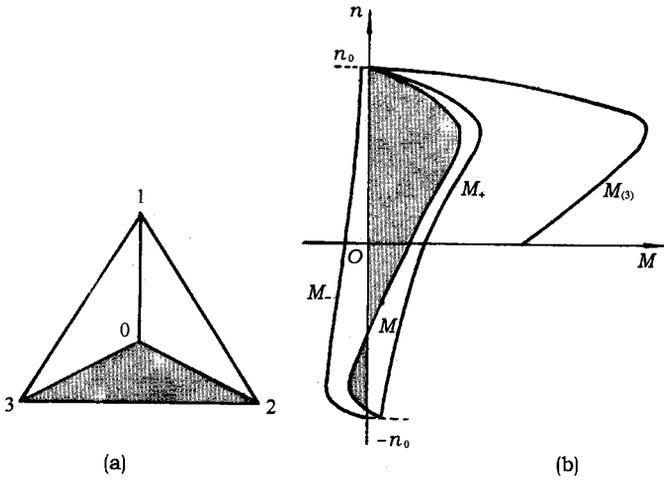


图 34-5 三相电动机两相一零运行

(a) 电压相量 (b) 机械特性

(Y 系列电动机防护等级为 IP44) 外壳接零或接地是否良好, 绝缘电阻是否合格, 各部螺丝是否紧固, 盘车是否正常, 启动装置是否完好。带负荷前应空载运行一段时间, 空载试运行转向、转速、声音、振动、电流应无异常。

1. 运行参数。电动机的电压、电流、频率、温升等运行参数应符合要求。电压波动不得超过 $-5\% \sim 10\%$, 电压不平衡不得超过 5% , 电流不平衡不得超过 10% 。当环境温度为 35°C 时, 电动机的允许温升可参考表 34-3 所列数值; 环境温度低于 35°C 时, 电动机功率可增加 $(35-t)\%$, 但最多不得超过 $8\% \sim 10\%$; 环境温度高于 35°C 时, 电动机功率应降低 $(t-35)\%$ 。电动机振动的双幅值不应超过 $0.05 \sim 0.12\text{mm}$; 电动机的声音应当轻而均匀; 电动机的滑动接触处只允许有不连续的或微弱的火花。直流电动机在额定工作状态下滑动接触处的火花不应大于 $1\frac{1}{2}$ 级, 在短时过电流时或短时过转矩时不应大于 2 级, 仅在无变阻器直接启动或逆转瞬间允许达到 3 级。各级火花特征如下:

$1\frac{1}{4}$ 级——电刷边缘小部分有微弱的火花或红色小火花;

表 34-3 电动机允许温升

部位	绝缘等级					测量方法
	A	E	B	F	H	
绕组	70	85	95	105	130	电阻法
铁心	70	85	95	105	130	温度计法
滑环	70					温度计法
滚动轴承	80					温度计法
滑动轴承	45					温度计法

可增加 $(35-t)\%$, 但最多不得超过 $8\% \sim 10\%$; 环境温度高于 35°C 时, 电动机功率应降低 $(t-35)\%$ 。电动机振动的双幅值不应超过 $0.05 \sim 0.12\text{mm}$; 电动机的声音应当轻而均匀; 电动机的滑动接触处只允许有不连续的或微弱的火花。直流电动机在额定工作状态下滑动接触处的火花不应大于 $1\frac{1}{2}$ 级, 在短时过电流时或短

时过转矩时不应大于 2 级, 但在无变阻器直接启动或逆转瞬间允许达到 3 级。各级火花特征如下:

- 1 $\frac{1}{4}$ 级——电刷边缘小部分有微弱的火花或红色小火花;
 - 1 $\frac{1}{2}$ 级——电刷边缘大部分或全部有轻弱的火花;
 - 2 级——电刷边缘全部或大部有较强烈的火花;
 - 3 级——电刷整个边缘有强烈的火花并有火花飞出。
2. 绝缘 电动机的各项绝缘指标应符合要求, 其绝缘电阻亦可参见表 34-4。

表 34-4 电动机绝缘电阻允许值

额定电压/V	6000			< 500			≤42		
绕组温度/°C	20	45	75	20	45	75	20	45	75
交流电动机定子绕组/MΩ	25	15	6	3	1.5	0.5	0.15	0.1	0.05
绕线式转子绕组和滑环/MΩ	-	-	-	3	1.5	0.5	0.15	0.1	0.05
直流电动机电枢绕组和换向器/MΩ	-	-	-	3	1.5	0.5	1.15	0.1	0.05

3. 保护。电动机的保护应当齐全。用熔断器保护时, 熔体额定电流应取为异步电动机额定电流的 1.5 倍(减压启动)或 2.5 倍(全压启动)。用热继电器保护时, 热元件的电流不应大于电动机的额定电流的 1.1~1.25 倍。电动机最好有失压保护装置, 重要的电动机应装设缺相保护单元。电动机的外壳应根据电网的运行方式可靠接零或接地。

4. 维护和维修。电动机应保持主体完整、零附件齐全、无损坏并保持清洁。电动机应定期进行检修和保养工作。日常检修工作包括清除外部灰尘和油污。检查轴承并换补润滑油, 检查润滑油、滑环和整流子并更换电刷, 检查接地(零)线, 紧固各螺丝, 检查引出线连接和绝缘, 检查绝缘电阻等。启动设备应与电动机同时检修。交流电动机大修后的试验项目包括测量各部位的绝缘电阻, 500kW 以上的电动机测量吸收比, 定子绕组和绕线式转子绕组进行交流耐压试验(40kW 以下只用摇表测绝缘电阻), 定子绕组进行极性测定、空载试验, 高压 500kW 以上者进行直流耐压试验。

5. 外观。电动机应保持主体完整、零附件齐全、无损坏并保持清洁。

6. 资料。除原始技术资料外, 还应建立电动机运行记录、试验记录、检修记录等资料。

(七)电动机故障处理

电动机或其控制电器内起火冒烟、剧烈振动、温度超过允许值并继续上升、转速突然明显下降、三相电动机缺相运行、电动机内发出撞击声或其控制电器、被拖动物机械严重故障时, 应停止运行。异步电动机的常见故障及处理方法见表 34-5。

表 34-5 异步电动机故障分析和处理

故障现象	原因分析	处理方法
不能启动或转速下降	(1) 电源电压过低 (2) 熔断器熔断一相或其他连接处断开一相 (3) 定子绕组断路 (4) 绕线式转子内部或外部断路或接触不良 (5) 笼型转子断条或脱焊 (6) 定子三角形接线的误接星形接线 (7) 负载过大或机械卡住	(1) 检查电源 (2) 用兆欧表和万用表检查有无断路或接触不良 (3) 用兆欧表和万用表检查有无断路或接触不良 (4) 用兆欧表和万用表检查有无断路或接触不良 (5) 将电动机接到 15% ~ 30% 额定电压的三相电源上并测量三相电流,如电流随转子位置变化,说明有断条或脱焊 (6) 检查接线并改正 (7) 检查负载及机械部分
启动时响声大,且三相电流相差大	定子绕组首、末端接反	用低压单相交流电源、指示灯、电压表等器材确定绕组的首、末端,重新接线
三相电流不平衡	(1) 电源电压平衡 (2) 定子绕组短路 (3) 定子绕组匝数错误 (4) 定子绕组部分线圈接线错误	(1) 检查电源 (2) 检查有无局部过热 (3) 测量绕组电阻 (4) 检查接线并改正
过热	(1) 过载 (2) 电源电压太高 (3) 定子铁心短路 (4) 定、转子相碰(扫膛) (5) 通风散热障碍 (6) 环境温度过高 (7) 定子绕组短路或接地 (8) 接触不良 (9) 缺相运行 (10) 线圈接线错误 (11) 受潮 (12) 启动过于频繁	(1) 减载或更换电动机 (2) 检查并设法限制电压波动 (3) 检查铁心 (4) 检查铁心、轴、轴承、端盖等 (5) 检查风扇、通风道等 (6) 加强冷却或更换电动机 (7) 检查绕组直流电阻、绝缘电阻等 (8) 检查各接点 (9) 检查电源及定子绕组连续性 (10) 对照图纸检查并改正 (11) 烘干 (12) 按规定频率启动
电刷冒火、滑环过热或烧坏	(1) 电刷牌号不对 (2) 电刷压力过小或大 (3) 电刷与滑环接触不严密 (4) 滑环不平、不圆或不清洁	(1) 更换电刷 (2) 调整电刷压力:一般电动机为 17.7 ~ 24.5kPa,牵引和起重电动机为 24.5 ~ 39.2kPa (3) 研磨电刷 (4) 修理滑环

故障现象	原因分析	处理方法
内部冒烟、起火	(1)电刷下方火花太大 (2)内部过热	(1)调整、修理电刷和滑环 (2)消除过热原因
振动和响声大	(1)地基不平,安装不好 (2)轴承缺陷或装配不良 (3)转动部分不平衡 (4)轴承或转子变形 (5)定子或转子绕组局部短路 (6)定子铁心压装不紧 (7)设计定、转子槽数配合不妥	(1)检查地基及安装 (2)检查轴承 (3)必要时做静平衡及动平衡试验 (4)检查转子并找正 (5)拆开电动机,用仪表检测 (6)检查铁心并重新压紧 (7)允许运行

三、单相电气设备

单相电气设备指照明设备、日用电器、小型电动工具、小电炉及其他小型电气设备。统计资料表明,单相设备上的触电事故及其他事故都比较多,因此,要特别重视单相电气设备的安全措施。

(一)通用安全要求

1. 防触电措施。单相电气设备数量大、种类多、分布广,使得人们与这些设备接触的机会多,触电的可能性较大。这些设备经常是在人的紧握之下运行的,人与设备之间的电阻小,一旦漏电,将有较大的电流通过人体,而且操作者可能因痉挛而抓住带电体,不能脱离电源,使得触电的危险性加大。这些设备有很大的移动性,其电源线容易受拉、磨而漏电,电源线连接处容易脱落而使金属外壳带电,从而导致触电事故。这些设备没有固定的工位,运行时振动大,而且可能在恶劣的条件下运行,本身容易损坏而使金属外壳带电,从而导致触电事故。此外,单相设备都由一条相线和一条工作零线供电,容易混淆工作零线与保护零线之间的关系和接法,并由此造成事故。因此,这类设备触电的危险性较大,事故发生率较大。所以,必须对这类设备采取有力的防触电措施。

(1)单相电气设备防触电分类。按照防止触电的保护方式,单相电气设备分为以下五类:

0级电器。这种电器仅仅依靠基本绝缘来防止触电。基本绝缘是指加在带电体上,提供基本保护以防止触电的绝缘。0级电器采用绝缘材料的外壳时,外壳本身构成全部基本绝缘或构成基本绝缘的一部分;采用金属材料的外壳时,外壳与其内部带电部件之间有基本绝缘隔开。0级电器可以有双重绝缘或加强绝缘的Ⅱ级结构部件,也可以有在超低安全电压下工作的Ⅲ级结构的部件。

0I级电器。这种电器也是依靠基本绝缘来防止触电的,也可以有双重绝缘或加强绝缘的部件,以及在安全电压下工作的部件。这种设备的金属外壳上装有接地(零)的端子,但不提供带有保护芯线的电源线。

I级电器。这种电器除依靠基本绝缘外,还有一个附加的安全措施。当基本绝缘失效后,可能意外带电的金属部件不致带来触电的危险。接零和接地都可用作这种设备的附加安全措施。I级电器可以有双重绝缘或加强绝缘的Ⅱ级结构部件,也可以有在超低安全电压下工作的Ⅲ级结构部件。

Ⅱ级电器。这种电器具有双重绝缘和加强绝缘的安全防护措施。按外壳构成,Ⅱ级电器分为三类:第一类是绝缘外壳的Ⅱ级电器。这类电器除了铭牌、螺钉、铆钉等小物件外,所有金属部件都在基本上连成一体的绝缘外壳内,该外壳构成补充绝缘或加强绝缘的一部分或全部。第二类是金属外壳的Ⅱ级电器。这类电器有基本上连成一体的金属外壳,其内最好采用双重绝缘,不得已时可采用加强绝缘。第三类是兼有以上两类外壳的复合型Ⅱ级电器。Ⅱ级电器可以有在超低安全电压下工作的Ⅲ级结构部件。Ⅱ级电器的绝缘必须符合第七章加强绝缘的要求。

Ⅲ级电器。这种电器依靠超低安全电压供电来防止触电。超低安全电压的供电电源必须符合的要求。Ⅲ级电器内不得产生比超低安全电压高的电压。

(2) 接地和接零。Ⅰ级和Ⅱ级电器必须采取保护接地或保护接零措施,在不接地配电网中,应当采用保护接地;在中性点接地的配电网中,应当采用保护接零。如采用保护接零,所有支线部分,保护零线应与工作零线分开,保护接零的支线应接向零干线,所有有保护作用的零线(包括PE线和PEN线)上都不得装有开关和熔断器。为了减轻短路或过载造成火灾的危险,工作零线上可以装有开关和熔断器。对于三相四线配电路,为了避免一相负载过大或短路影响其他两相的工作,工作零线上不应装有熔断器。

2. 防火措施。所列的电气火灾的原因对于单相电气设备也是适用的。其中,线路年久失修、绝缘老化引起短路,线路过负载运行,接头松动,电器积尘、受潮,热源接近电器或电器接近易燃物或通风、散热失效等是导致电气火灾的重要原因。据统计,由于各种短路引起的单相设备电气火灾占全部电气火灾的20%以上。其中,相当一部分是由于电气线路安装方式不合格、间距不够或位置选择不当造成的。接头松动也是引起单相设备电气火灾的重要原因,由此原因引起的火灾占全部电气火灾的10%以上。

电炉、灯泡、日光灯镇流器等电器应避开易燃物,周围不得有不利通风的障碍物,以防热量积累过热。

各种单相电气设备的温度和温升不得超过允许值,为此,各种单相设备必须在规定的电压和规定的工作方式下运行。

对运行中的单相设备,应经常检查和清扫,不能让单相设备带故障运行。消除积尘不但有利于防止漏电,还可以防止积尘受潮酿成短路火灾。

不论是长时使用还是短时使用的单相设备,用完后应及时切断电源。对于使用后要收藏的单相设备,特别是电炉、电熨斗、电烙铁等温度高、热容量大的电器,必须静置一段时间,待冷却后再予包装。如使用中意外停电,一定要注意切断电源,这方面的教训是十分深刻的。据统计,由于疏忽、忘记切断电源而引起的电气火灾占10%以上。

导线接头应始终保持接触紧密,固定连接处不得松动,并保持有足够的触头压力,插接头的连接件也不得松动,应有足够的压力。各接头部位的温度不得有明显升高。

(二) 电气照明

电气照明广泛用于生产和生活的各个领域。充足的照明是改善劳动环境、保障安全生产的必要条件。照明设备不正常运行可能导致火灾,也可能导致人身事故。

1. 电气照明的类别及特点。按光源的性质,电气照明分为热辐射光源照明和气体放电光源照明。前者是由电流通过钨丝使之升温达到白炽状态而发光的照明器具,如白炽灯、碘钨灯等照明灯具,其特点是发光效率低。后者是利用电极间气体放电产生可见光和紫外线,再由可见光和紫外线激发灯管或灯泡内壁上的荧光粉使之发光的照明器具,如日光灯、高压汞灯、高压钠灯等照明灯具,其发光效率可达白炽灯的3倍左右。

就照明功能而言,电气照明可分为工作照明和事故照明(包括应急照明)。工作照明又分为用于整个场地的一般照明和用于工作场地的局部照明。

一般照明的电源采用220V电压,但若灯具达不到要求的最小高度时,应采用36V安全电压。凡有较大危险的环境里的局部照明灯和手持照明灯(行灯),应采用36V或24V安全电压。在金属容器内、水井内、特别潮湿的地沟内等特别危险环境中使用的手持照明灯,应采用12V安全电压。

在爆炸危险环境、中毒危险环境、火灾危险性较大的环境及手术室之类一旦停电即关系到人身安全的环境、500人以上的公共环境、一旦停电使生产受到影响会造成大量废品的环境等都应该有事故照明(至少应有应急照明)。事故照明线路不能与动力线路或照明线路合用,而必须有自己的供电线路。事故照明的几种供电方式如图34-6所示,其中,图34-6a是不具备变电站(室)的情况,图34-6b是有一个变电站的情况,图34-6c是有两个变电站的情况。某些事故照明应根据需要安装自动切换装置,如一般照明与事故照明共用照明器具,且当事故照明采用直流电源时,因直流电源一般还要同时供给控制线路用电而不允许接地,所以,在中性点接地系统中,直流电源从不接地的的工作零线引进照明器具。

就灯具防护型式而言,除普通型灯具外,还有防水型灯具、防尘型灯具和防爆型灯具等。

2. 电气照明安装及安全要求。照明装置由灯具、灯座、线路和开关等设备组成。安装照明装置应注意以

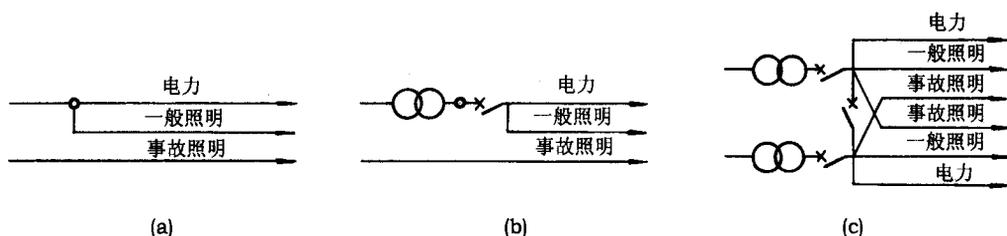


图 34-6 事故照明供电

下要求：

(1)应根据环境条件选用适当防护型式的照明装置。爆炸危险环境应选用防爆型灯具，在有腐蚀性气体、蒸气或特别潮湿的环境，应选用防水型灯具；户外也应选用防水型灯具；多尘环境应选用防尘型灯具；浴室照明可采用墙上开孔，孔底装反射镜、孔口装玻璃板密封的照明方式。

(2)灯座分卡口灯座和螺口灯座。卡口灯座的带电部分封闭在里面，比较安全，但卡口灯座能承受的重量较小。螺口灯座的螺旋部分容易暴露在外，接线时必须将相线接在顶芯上，中性线（工作零线）接在螺口上。为了安全，应采用带电部分不暴露在外面的螺口灯座。为了防止火灾，除敞开式灯具外，凡 100W 及其以上的照明器应采用瓷灯座。从安全角度考虑，灯座不宜带有开关或插座。

(3)户内吊灯灯具高度一般不应小于 2.5m。在干燥的非生产环境，如受条件限制，户内吊灯灯具高度允许降低为 2~2.2m；户内吊灯灯具位于桌面上方等人碰不到的地方时，则灯具高度允许降低为 1.5m。户外灯具高度一般不应小于 3m，墙上灯具高度可减为 2.5m；不足上述高度时应加防护。其他灯具安装高度可参考表 34-6 所列数据。

表 34-6 照明灯具安装高度

光源种类	反射器类型	灯泡容量/W	最小高度/m
白炽灯	搪瓷反射器	≤100	2.5
		100~200	3.0
		300~500	3.5
		>500	4.0
	乳白玻璃漫射罩	≤100	2.0
		100~150	2.5
		300~500	3.0
高压汞灯	搪瓷反射器	≤250	5.0
	铝抛光反射器	≥400	6.0
高压钠灯	搪瓷反射器	250	6.0
	铝抛光反射器	400	7.0
卤钨灯	搪瓷反射器	500	6.0
	铝抛光反射器	1000~2000	7.0
金属卤化物灯	搪瓷反射器	500	6.0
	铝抛光反射器	1000~2000	≥14.0

(4) 灯具安装应牢固可靠。户外灯具除要考虑承受本身重量外,还要考虑承受风力。1kg 以下的灯具可采用软导线自身吊装,吊盒及灯座内均应做防拉脱结扣。1~3kg 的灯具应采用吊链或吊管安装,采用吊链安装者,导线应编叉在吊链内;采用吊管安装者,吊管直径不得小于 10mm,管内导线不得有接头。质量在 3kg 以上的灯具应采用预埋件,用吊管安装。带自在器的软导线应穿软塑料管并应采用安全型灯座。

(5) 照明灯具、日光灯镇流器等发热元件不能紧贴可燃物安装,其间应留有足够的距离,周围可燃物不得阻碍灯具通风。

(6) 灯具若带电金属件、金属吊管和吊链应采取接零(或接地)措施。

(7) 每一照明支路上熔断器熔体的额定电流不应超过 15~20A,每一照明支路上所接的灯具,室内原则上不超过 20 盏(插座应按灯计入),室外原则上不超过 10 盏(节日彩灯除外)。

(8) 照明配线应采用额定电压 500V 的绝缘导线。凡重要的政治活动场所、易燃易爆场所、重要的仓库等均应采用金属管配线。凡重要的政治活动场所、重要的控制回路和二次回路、移动的导线和剧烈振动处的导线、特别潮湿场所和严重腐蚀场所等均应采用铜导线。照明线路应避开暖气管道,其间距离不得小于 30cm。

(9) 配电箱内单相照明线路的开关必须采用双极开关,照明器具的单极开关必须装在相线上。照明开关应排列整齐,便于操作,相邻开关相线、零线的配置及开、合的位置都应当一致。接线必须保证开关在断开位置时灯具不得带电。

(10) 照明线路的相线和工作零线上都应装有熔断器。熔断器熔体的额定电流原则上按过载保护确定。熔体额定电流不应大于线路导线的许用电流,熔体的临界熔断电流不应大于线路导线许用电流的 1.45 倍。从不影响线路正常工作的角度考虑,熔体额定电流应符合下式要求:

$$I_{FU} \leq KI_L$$

式中: I_{FU} ——熔体额定电流;

I_L ——计算负荷电流;

K ——无量纲计算系数。对于白炽灯、碘钨灯和荧光灯,取 $K=1$;对于高压水银灯,RL 系列熔断器取 $K=1.3 \sim 1.7$,RC 系列熔断器取 $K=1 \sim 1.5$ 。

(11) 对于照明线路上低压断路器的热脱扣器,其动作电流按下式确定:

$$I_{FR} \leq 0.8 \sim 1I_C$$

式中: I_{FR} ——热元件的整定电流;

I_C ——导体许用电流。

(12) 非生产环境的单相插座应按每个 2.5A 计入照明负荷。安装插座应注意插座不得贴近平开关安装,也不得安装在床头或桌面上,以免误触插孔内带电导体。明装插座的高度一般不应低于 1.3m,暗装插座的高度不应低于 0.3m。在托儿所、幼儿园等小孩容易触及的环境,插座的高度不宜低于 1.8m,否则,必须使用安全型插座。单相插座遵循“上相(L)下零(N)右相(L)左零(N)”的原则。插座的保护线(PE 线)插孔应位于上方,凡要求接零或接地的环境,均应采用带有保护插孔的插座,即单相设备用三孔插座。在同一用电区域,不同电压等级的插座应有明显区别,以防止互相插错。

车间照明线路的绝缘电阻,每伏工作电压不得低于 1000 Ω ;在特别潮湿的环境,可以放宽至每伏工作电压 500 Ω 。

(三) 手持电动工具和移动式电气设备

手持电动工具包括手电钻、手砂轮、冲击电钻、电锤、手电锯等工具。移动式设备包括蛙夯、振捣器、水磨石磨平机、电焊机等电气设备。使用手持电动工具应当注意以下安全要求:

1. 辨认铭牌,检查工具或设备的性能是否与使用条件相适应。
2. 检查其防护罩、防护盖、手柄防护装置等有无损伤、变形或松动。
3. 检查电源开关是否失灵、破损,是否牢固,接线有无松动。
4. 电源线应采用橡皮绝缘软电缆,单相用三芯电缆、三相用四芯电缆。电缆不得有破损或龟裂,中间不得有接头。
5. I 类设备应有良好的接零或接地措施,且保护导体应与工作零线分开。保护零线(或地线)应采用截

面积 $0.75 \sim 1.5\text{mm}^2$ 以上的多股软铜线,且保护零线(或地线)最好与相线、工作零线在同一护套内。

6. 使用 I 类手持电动工具应配用绝缘用具,并根据用电特征安装漏电保护器或采取电气隔离及其他安全措施。

7. 绝缘电阻合格,带电部分与可触及导体之间的绝缘电阻 I 类设备不低于 $2\text{M}\Omega$, II 类设备不低于 $7\text{M}\Omega$ 。

8. 根据需要装设漏电保护装置。

9. II 类和 III 类手持电动工具修理后,不得降低原设计确定的安全技术指标。

10. 电动工具用毕及时切断电源,并妥善保管。

上述手持电动工具的使用要求对于一般移动式设备也是适用的。

交流弧焊机的一次侧额定电压为 380V ,二次侧空载电压为 70V 左右,额定工作电压为 30V 左右,工作电流达数十至数百安,电弧温度高达 6000°C 。由其工作参数可知,交流弧焊机的火灾危险和电击危险都比较大。安装和使用交流弧焊机应注意以下问题:

第一,安装前应检查弧焊机是否完好,绝缘电阻是否合格(一次侧绝缘电阻不应低于 $1\text{M}\Omega$,二次侧绝缘电阻不应低于 $0.5\text{M}\Omega$)。

第二,弧焊机应与安装环境条件相适应,并应安装在干燥、通风良好处,不应安装在易燃易爆环境、有腐蚀性气体的环境、有严重尘垢的环境或剧烈振动的环境,并应避免高温、水池处。室外使用的弧焊机应采取防雨雪、防尘土的措施。工作地点远离易燃易爆物品,下方有可燃物品时应采取适当的安全措施。

第三,弧焊机一次侧额定电压与电源电压相符合,接线应正确,应经端子排接线。多台焊机尽量均匀地分接于三相电源,以尽量保持三相平衡。

第四,弧焊机一次侧熔断器熔体的额定电流略大于弧焊机的额定电流即可,但熔体的额定电流应小于电源线导线的许用电流。

第五,二次侧线长度一般不应超过 $20 \sim 30\text{m}$,否则,应验算电压损失。

第六,弧焊机外壳应当接零(或接地)。

第七,弧焊机二次侧焊钳连接线不得接零(或接地),二次侧的另一条线也只能一点接零(或接地),以防止部分焊接电流经其他导体构成回路。

第八,移动焊机必须停电进行。

为防止运行中的弧焊机熄弧时 70V 左右的二次侧电压带来电击的危险,可以装设空载自动断电安全装置,这种装置还能减少弧焊机的无功损耗。

第二节 变、配电设备安全

一、变、配电所

不论是从配电网引进高压电源还是自己备有发电设备的工业企业,都必须有相应的变、配电装置。完成变电和配电工作的场所叫做变、配电所(站或室)。有的场所只有配电任务,没有变电任务,则根据电压的高低,叫做高压配电所或低压配电所。

(一)变、配电所的组成

变、配电所包括多种高压设备和一些低压设备,如变压器、互感器、避雷器、电力电容器、高低压开关、高低压母线等。变、配电所是企业的动力枢纽。变、配电设备的安全运行对企业的安全生产有十分重要的意义。

35kV 及其以上的变、配电所,由于变、配电设备体积较大,要求的安全间距也较大,为了节省投资,多建成户外变、配电所。户外变、配电所占面积大,建筑面积小,土建费用低,但受环境的影响比较严重。 10kV

及其以下者,由于变、配电设备的体积和安全间距较小,为了便于管理,多建成户内变、配电所。户内变、配电所占地面积小,建筑费用高,适用于市内居民密集的地区和周围空气受到污染的地区。一般变、配电所由高压配电室、低压配电室、值班室、变压器室和电容器室等组成。

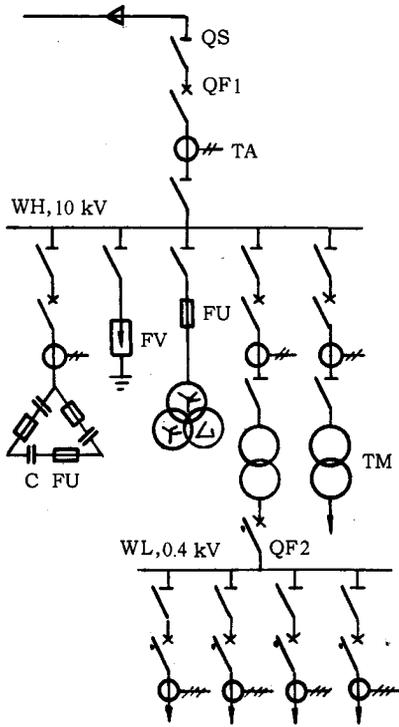


图 34-7 变、配电所接线图

不同变、配电所的接线方式有较大的差别。变、配电所的接线方式用单线图表示。单线图是用一条线代替同样功能和同样连接的三条线以表示三相电路。典型的变、配电所单线图如图 37-7 所示。图中, QS 是高压隔离开关或低压刀开关, QF 是高、低压断路器, TM 是电力变压器, TA 是电流互感器, TV 是电压互感器, WH 和 WL 是高压母线和低压母线, FV 是避雷器, C 是电力电容器, FU 是熔断器。由图可知,变、配电所装有电力变压器,高、低压开关电器,电力电容器,高、低压母线,仪用互感器,测量仪表,继电保护装置等多种高、低压电气设备。

就 10kV 母线而言,图 34-7 所示的为单电源单母线主接线方式。除这种方式外,还有双电源不分段单母线主接线方式(见图 34-8a)、双电源分段单母线主接线方式(见图 34-8b)、单电源双母线主接线方式(见图 34-8c)、双电源双母线主接线方式(见图 34-8d)、桥式接线主接线方式(见图 34-8e)等。主接线方式决定于用电特征(供电可靠性、容量和经济指标)。主接线方式应便于操作、便于维修和便于事故处理。

(二) 变、配电所容量

确定变、配电所的容量有多种方法,比较常用的是按用电设备的配备进行负荷计算,并根据补偿后的结果确定变电所的容量。确定变、配电所的容量时应考虑到未来的发展,留有一定的裕量。

考虑到备用的必要和运行的经济性,有时应选用两台容量较小的变压器代替一台容量较大的变压器。但是,随着变压器数量的增加,维护管理费用也要增加,而且高、低压开关和网络也随着

增加和复杂化。因此,变压器台数不宜太多,单台容量不宜太小。

(三) 变、配电所的一般安全要求

变、配电所的一般安全要求包括建筑设计、设备安装、运行管理等方面的要求。

1. 变、配电所的位置。其位置应符合供电、建筑、安全的基本原则。从供电角度考虑,变、配电所应接近负荷中心,以降低有色金属的消耗和电能损耗;变、配电所进出线应方便等。从生产角度考虑,变、配电所不应妨碍生产和厂内运输;变、配电所本身设备的运输也应当方便。从安全角度考虑,变、配电所应避开易燃易爆场所;变、配电所宜设在企业的上风侧,并不得设在容易沉积粉尘和纤维的场所;变、配电所不应设在人员密集的场所。变、配电所的选址和建筑还应考虑到灭火、防蚀、防污、防水、防雨、防雪、防震以及防止小动物钻入的要求。

车间变、配电所多采用附设变电所。这种变、配电所有一面墙或两面墙与车间共用,可以外附,也可以内附。在车间面积不足或环境特殊、工艺设备经常变动的情况下,宜采用外附变、配电所。此外,在由一个变电所供给几个车间用电的情况下,或在有防火、防爆、防尘、防腐蚀等特殊要求的情况下,可采用车间外的独立变电所。在大型车间或在车间内有大型集中负荷的情况下,可采用车间内独立变电所。为了充分利用空间,可采用地下或梁架上的车间变、配电结构等。

2. 建筑结构。高压配电室耐火等级不应低于二级;低压配电室耐火等级不应低于三级;油浸电力变压器室应为一级耐火建筑;对于不易取得钢材和水泥的地区,可以采用三级耐火等级的独立单层建筑。

变、配电所各间隔的门应向外开;门的两面都有配电装置时,门应向两个方向开。门应为非燃烧体或难燃烧体材料制作的实体门。长度超过 7m 的高压配电室和长度超过 10m 的低压配电室至少应有两个门。

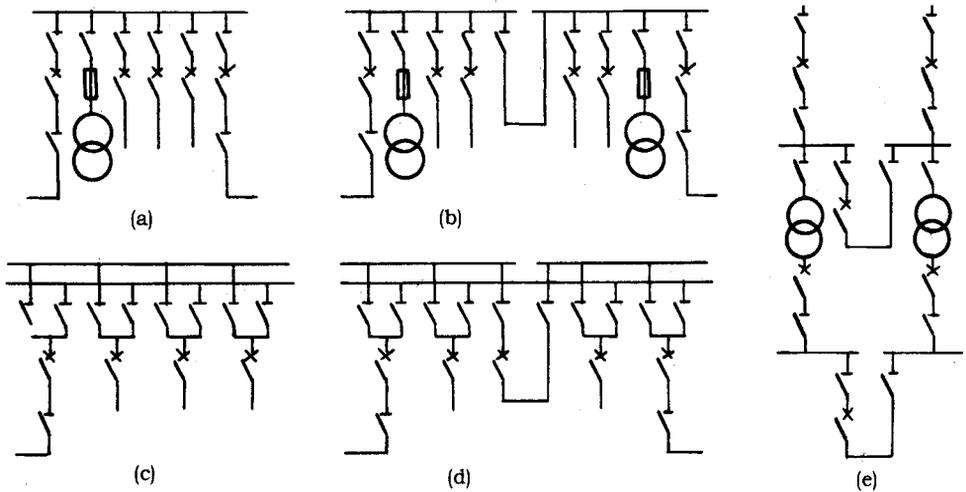


图 34-8 变、配电所主接线

(a)双电源不分段单母线 (b)双电源分段单母线 (c)单电源双母线
(d)双电源双母线 (e)桥式接线

蓄电池室应隔离安装。有充油设备的房间与爆炸危险环境或有腐蚀性气体存在的环境毗邻时,墙上、天花板上以及地板上的孔洞应予封堵。

户内油量 60kg 以下的开关可安装在开敞式间隔内,油量 60~600kg 的开关应安装在防爆间隔内,油量 600kg 的开关或变压器应安装在互相隔离的防爆室内。户内油量 600kg 以上的充油设备必须有事故蓄油设施;户外 600kg 以上者,地面应铺以碎石或卵石层。

户内变、配电所单台设备油量达到 600kg 者应有贮油坑或挡油设施。贮油坑应能容纳 100% 的油,挡油设施应能容纳 20% 的油,并能将油排至安全处。室外变、配电所单台设备油量达到 1000kg 者应有挡油设施,挡油设施也应能容纳 20% 的油。

3. 间距、屏护和隔离。变、配电所各装置间距和屏护应符合要求。

户外变、配电装置与建筑物应保持规定的防火间距。变压器容量越大,或贮罐容量越大、建筑物耐火等级越低,则要求的间距越大。

不论是户内的还是户外的配电装置,一般都少不了裸露的带电部分。为了防止电弧烧伤或金属熔化溅出烫伤,应将可能产生电弧的部件隔离开来。为了防止检修时错误地触及带电部分,应在母线与母线之间、母线与隔离开关之间,以及不同线路的设备之间设立永久的或临时的防护遮栏。

对于安装在车间或公共场所的配电装置,宜采用保护式结构。如果采用开敞式结构,户内的配电装置须设置适当的遮栏或栅栏;户外的配电装置须设置栅栏或围墙。

户外油量 2500kg 的两台变压器之间的净距不足 10m 时,中间应加防火墙。户外变压器距建筑物不足 5m 时,变压器正投影以外 3m 以内的范围内不得有门窗或通风孔。

变、配电所的围墙,变、配电设备的围栏,变、配电所各室的门窗,通风孔的小动物栏网,开关柜的门等屏护装置应保持完好,并应根据需要做明显的标志(如“止步,高压危险!”等),并予上锁。

户内充油设备油量 60kg 以下者允许安装在两侧有隔板的间隔内,油量 60~600kg 者须装在有防爆隔墙的间隔内,600kg 以上者应安装在单独的间隔内。

4. 通风。蓄电池室有可燃气体产生,必须有良好的通风。变压器室、电容器室等有较多热量排放,必须有良好的自然通风,必要时采取强迫通风。进风口均宜在下方,出风口均宜在上方。

5. 联锁装置。为了避免注意力不集中造成事故,应当采用必要的联锁装置。如油断路器与隔离开关操动机构之间的联锁装置,电力电容器的开关与其放电负荷之间的联锁装置,禁区门上的联锁装置等。为了避免注意力不集中造成事故,还可以安装指示灯或其他信号装置。

6. 电气设备正常运行。保持电气设备正常运行包括观察电流、电压、功率因数、油量、油色、温度指示、接点状态等是否正常,观察设备和线路有无损坏,是否严重脏污以及观察门窗、围栏等辅助设施是否完好,听其声音是否正常,注意有无放电声等异常声响,闻有无焦糊味及其他异常气味。

变、配电装置的三相母线 U 或 L1、V 或 L2、W 或 L3 分别涂黄、绿、红色,零母线一般涂黑色。

7. 安全用具和灭火器材。变、配电所应有绝缘杆、绝缘夹钳、绝缘靴、绝缘手套、绝缘垫、绝缘站台、各种标示牌、临时接地线、验电器、脚扣、安全带、梯子等各种安全用具,具体内容详见有关章。变、配电所应配备可用于带电灭火的灭火器材,如二氧化碳灭火器、干粉灭火器等。

8. 管理制度。变、配电所应建立并执行各项行之有效的规章制度,如工作票制度、操作票制度、工作许可制度、工作监护制度、值班制度、巡视制度、检查制度、检修制度及防火责任制、岗位责任制等。

二、变压器

电力变压器是静止的电气设备,起升高或降低电压的作用。工业企业用的变压器均起降低电压的作用,通常是把 6~10kV 的高压电降低为 0.4kV 的低电压,供给电气设备使用,这种变压器称为配电变压器。变压器是变配电站的核心设备。

按照冷却方式,电力变压器分为油浸自冷式、风冷式、水冷式和干式变压器;按照调压方式,变压器分为无载调压和有载调压变压器;按照绕组数量,变压器分为单绕组、双绕组和三绕组变压器;按照相数,变压器分为单相变压器和三相变压器。

(一) 变压器电磁分析方法

变压器的电磁分析方法是有代表性的分析方法,除变压器外,这种方法对互感器、感应电动机也是适用的。

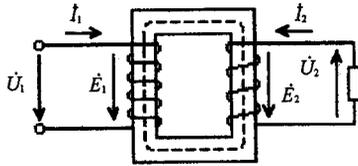


图 34-9 正方向规定

1. 正方向的规定。为了便于计算,须先规定电压、电流等电磁量的正方向。如图 34-9 所示,先规定电压 U_1 的正方向,再规定电流 I_1 的正方向;由电流的正方向规定磁通 Φ 和电动势 E_1 的正方向;再由磁通 Φ 的正方向规定电流 I_2 的正方向;最后由电流 I_2 的正方向规定电压 U_2 和电动势 E_2 的正方向。应当指出,正方向是人为规定的,可以不按上述方法规定,但一经规定之后,在分析问题过程中就不得再行改变。正方向宜根据习惯和直观的原则确定。

2. 变压器基本方程组。参照图 34-10 根据电动势平衡的原则,可以列出电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2$$

式中 r_1 ——一次线圈的电阻;

r_2 ——二次线圈的电阻;

x_1 ——一次线圈的漏磁通造成的自感电抗;

x_2 ——二次线圈的漏磁通造成的自感电抗;

Z_1 ——一次线圈的阻抗;

Z_2 ——二次线圈的阻抗。

根据

$\dot{E}_1 = -jN_1\omega\Phi$ 和 $\dot{E}_2 = -jN_2\omega\Phi$ 可知

$$\dot{E}_1 = \frac{N_1}{N_2}\dot{E}_2 = k\dot{E}_2$$

式中： k ——一、二次线圈匝数之比，即变压器的变压比。

若将电动势看做负值电压，可得

$$\dot{E}_1 = k\dot{E}_2 = -\dot{I}_0(r_m + jx_m) = -\dot{I}_0 Z_m$$

式中： I_0 ——励磁电流；

r_m ——励磁电阻；

x_m ——励磁电抗；

Z_m ——励磁阻抗。

设变压器负载时的磁通与空载时的相同，可得到磁动势平衡方程式为

$$N_1\dot{I}_1 + N_2\dot{I}_2 = N_1\dot{I}_0$$

设二次线圈的匝数为 N'_2 ，且 $N'_2 = N_2$ ，则可使问题大大简化。这种方法叫做归算或折合。归算后的二次边参数为： $\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ ， $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/k$ ， $r'_2 = k^2 r_2$ ， $x'_2 = k^2 x_2$ 。据此，可得到变压器的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{E}'_1 &= \dot{E}'_2 = -\dot{I}'_0 Z_m \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

如果忽略一次线圈和二次线圈的阻抗，则 $U_1 \approx E_1$ ， $U_2 \approx E_2$ ， $k = N_1/N_2 \approx U_1/U_2$ ，如果忽略励磁电流，则

$$k = N_1/N_2 \approx I_2/I_1 \approx U_2/U_1$$

3. 等效电路和相量图。根据基本方程组，可绘制变压器的等效电路（如图 34-10 所示）。因为励磁阻抗比漏阻抗大得多，所以，变压器短路时可以只考虑漏阻抗，变压器空载时可以只考虑励磁阻抗。

根据基本方程和等效电路，可以作出图 34-11 所示的变压器的相量图。图中 φ 为负载功率因数角， θ 为铁心功率损失角。

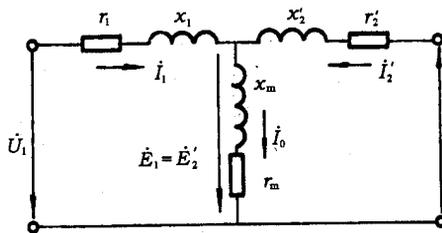


图 34-10 变压器等效电路

(二) 变压器的技术参数

变压器的技术参数指额定容量、额定电压、阻抗电压等参数。铭牌中应标有变压器的型号、额定技术参数及其他提供给用户的必备资料。

1. 变压器的额定容量 S_N 。它是变压器在正常工作条件下能发挥出来的最大容量，指视在功率，单位为 kVA。

2. 变压器的额定电压。它包括一次额定电压 U_{1N} 和二次额定电压 U_{2N} ，均指线电压。由于允许高压电源电压在 $\pm 5\%$ 的范围内浮动，一次额定电压往往只表示电压等级，二次额定电压指空载电压。

铭牌中连接组标号 Y_N/y₀ 表示高压绕组星形接法，低压绕组中性点直接接地并接出中性线的星形接法（相应的旧标志方法为 Y/Y0-12），低压侧额定电压 0.4kV 的配电变压器都采用这种连接组。

冷却方式 ONAN 表示油浸自冷式变压器。

3. 阻抗电压。它是表示变压器内阻抗大小的参数。阻抗电压由短路试验求得。变压器短路试验在高压

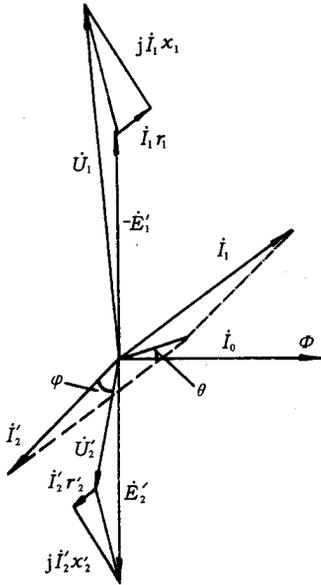


图 34-11 变压器相量图

边进行单相变压器短路试验接线如图 34-12 所示。图中 N 、 A 和 W 分别表示电压表、电流表和功率表。逐渐升高试验电压至额定电流时读取所施加的电压，这个电压称为短路电压，记作 U_{1K} 。因为变压器短时励磁阻抗可以不予考虑，所以短路电压可以写为

$$U_{1K} = I_{1N} [(r_1 + r_2') + (jx_1 + x_2')] = I_{1N} Z_K$$

式中： I_{1N} ——变压器高压边额定电流；

Z_K ——变压器短路阻抗。

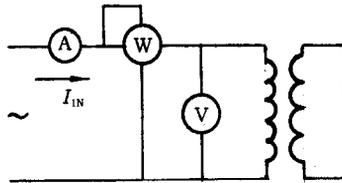


图 34-12 变压器短路试验接线

短路电压与额定电压之比即变压器的阻抗电压。阻抗电压用百分数表示，即

$$U_K = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \times 100\%$$

10kV 变压器的阻抗电压在 4% ~ 6% 之间，35kV 变压器的阻抗电压多在 6.5% ~ 7.5% 之间；大容量变压器的阻抗电压偏大。

变压器的额定电流指线电流，三相电力变压器的额定电流按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} I_{1N} &= \frac{S}{\sqrt{3} U_{1N}} \\ I_{2N} &= \frac{S}{\sqrt{3} U_{2N}} \end{aligned} \right\}$$

除上述技术参数外，有的变压器铭牌上还有空载电流、空载损耗、短路损耗、温升等参数。

空载电流是在低压侧加上额定电压进行空载试验时测得的电流。变压器空载电流的大小决定于变压器的电磁结构。10 ~ 35kV 变压器的空载电流大多在额定电流的 2% ~ 6% 之间。变压器越大，空载电流所占比例越小。例如，10kV SL7 系列变压器 100kVA 的空载电流为 4.2%，500kVA 的空载电流为 3.2%，1000kVA 的

空载电流为 2.5% 的 300kVA 的空载电流为 2.0% 等。单相变压器空载试验接线如图 34-13 所示。注意,此图与短路试验的不同。短路试验在高压侧进行,而空载试验是在低压侧进行。短路试验时电流表接在电源侧、电压表接在负荷侧,而空载试验时电流表接在负荷侧、电压表接在电源侧。空载损耗基本上是铁心中的功率损耗,简称铁损,大致与电压的平方成正比,其大小决定于 $I_m^2 R_m$ 。

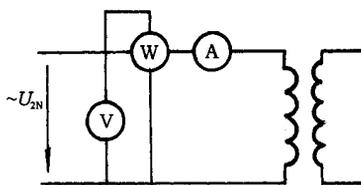


图 34-13 变压器空载试验接线

短路损耗是做变压器短路试验时测得的功率损耗,基本上是绕组中的功率损耗,简称铜损,大致与电流的平方成正比。其大小决定于 $I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$ 。

温升是变压器温度与环境温度之差,温升限值决定于绝缘材料的种类。

(三) 变压器结构

油浸电力变压器由器身、油箱、冷却装置、保护装置和出线装置组成。器身包括铁心、绕组(线圈)、绝缘、引线和分接开关;油箱包括油箱本体和油箱附件(放油阀、接地螺钉、小车、铭牌等);冷却装置包括散热器和冷却器;保护装置包括储油柜、油标、安全气道、吸湿器、测温元件和气体继电器;出线装置包括高、低压套管。

变压器的铁心是由铁心柱和铁轭组成的闭合磁路,用厚度 0.35 ~ 0.5mm 的硅钢片叠压或卷绕而成。变压器绕组套装在铁心(柱)上。绕组是变压器的电路部分,用绝缘铜导线或绝缘铝导线绕制而成。绕组与绕组之间、绕组与铁心之间都有良好的绝缘,并留有不同型式的槽道,以便于散热和循环冷却。

油浸电力变压器的铁心和绕组都浸没在绝缘油里。变压器里的油兼有散热、绝缘、防止内部元件和材料老化以及内部发生故障时熄灭电弧的作用。

容量稍大的变压器,油箱外焊有散热管,油经过油箱的散热管循环流动,把绕组和铁心发出的热量散发到空气中去。大型变压器还可采用加装风扇、强迫油循环以及水内冷等冷却方式。

油浸电力变压器上设计有下列多种安全部件:

1. 储油柜和油标。储油柜又叫油枕,其简图如图 34-14 所示。储油柜容积为油箱容积的 1/10。储油柜位于油箱上部,其下部有油管与油箱连通。储油柜的作用是给油的热胀冷缩留有缓冲余地,保持油箱始终充满油,同时,由于有了储油柜,减小了油与空气的接触面积,可减缓油的氧化。储油柜上有油标,供观察之用。储油柜经吸湿器或注油器与外界相通。储油柜上还有集污盒、取油样放油阀等附件。

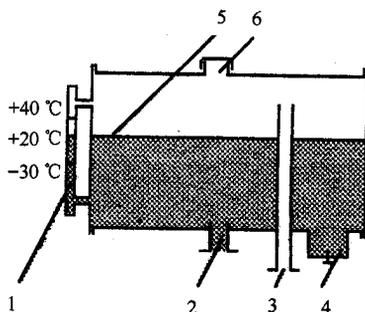


图 34-14 储油柜

- 1—油位计 2—接油箱法兰;
- 3—接呼吸器法兰 4—集污盒;
- 5—注油孔 6—油面线

2. 呼吸器,又称吸湿器,装在储油柜的下方或侧面。呼吸器主要由玻璃筒、干燥剂(硅胶)、底罩、连接

管等组成(见图 34-15)。其连接管上方伸进储油柜,且其上端高出储油柜内油面。呼吸器是变压器储油柜内部空间与变压器外部空间连接的通道。外部空气进入变压器内部时,空气先经底罩内的变压器油过滤,再经干燥剂吸潮。其作用是使油箱内、外压力保持一致,并减缓油箱内变压器油的氧化和受潮,延长其使用期限。干燥剂在干燥情况下呈浅蓝色,吸潮达到饱和状态时呈淡红色。饱和的硅胶在 140℃ 高温下烘焙 8h 后可恢复使用。

3. 气体继电器。变压器的气体继电器安装在变压器油箱与储油柜之间连接油管的中部。气体继电器主要由上油杯、下油杯、永久磁铁、干簧接点、挡板、连接线、接线盒、橡胶衬垫和放气螺丝等组成,其原理如图 34-16 所示。气体继电器的作用是:当变压器内部发生故障时给出信号或切断电源;当变压器内部发生轻微故障时或其他原因产生少量气体,气泡上升,在气体继电器内上方空间集聚,或者漏油至一定程度时,气体继电器内油面降低,上油杯和永久磁铁一起下降;当永久磁铁接近干簧接点至一定程度时,干簧接点闭合,接通信号回路,使信号继电器动作或接通报警电路,发出轻故障信号(轻度瓦斯动作信号);当变压器内部发生严重故障时,变压器内部产生大量气体,油流冲动气体继电器的挡板,下油杯和永久磁铁一起迅速下降,干簧接点迅速闭合,接通变压器中断路器的跳闸回路,断路器掉闸,同时,重故障信号回路接通,信号继电器动作掉牌并报警,发出重故障信号(重度瓦斯动作信号)。

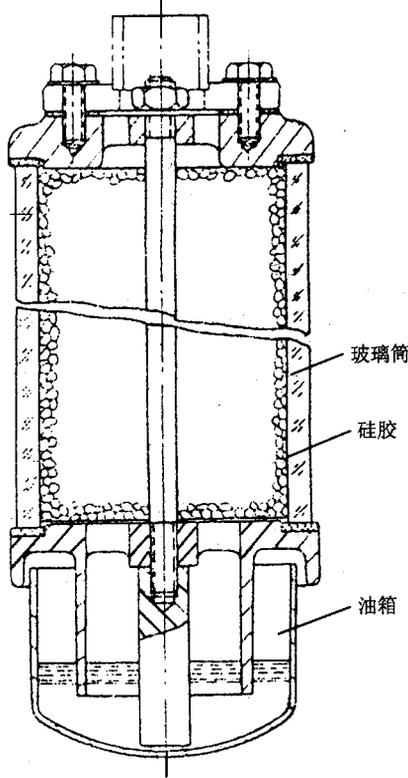


图 34-15 呼吸器

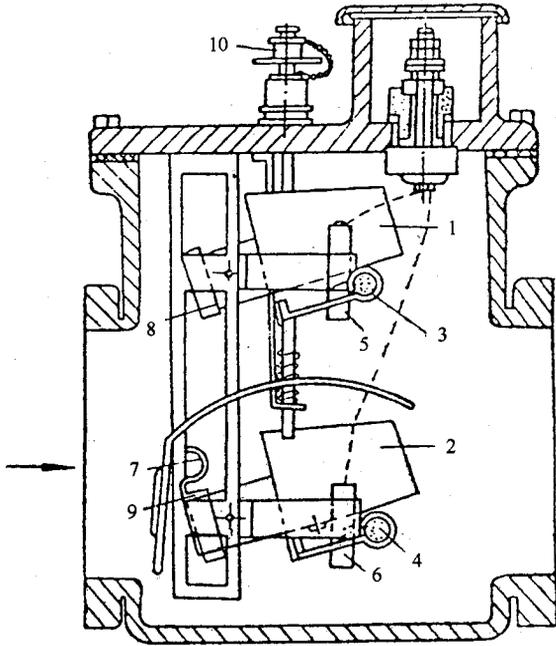


图 34-16 气体继电器

1—上油杯 2—下油杯 3—永久磁铁；

5 6—干簧接点 7—挡板 8 9—平衡锤；10—放气塞

单台容量 400kVA 以上的变压器，一般均要求安装气体继电器。

4. 防爆管。大型变压器或安全要求高的变压器装有防爆管。防爆管装在变压器大盖上面，下端与变压器油箱相连，上端弯曲向外。防爆管主要由钢管和安全阀片（低强度的玻璃膜片或酚醛树脂膜片）组成。当变压器内部发生放电等严重故障，内部压力剧增时，安全阀片被冲破，泄去变压器内部压力，防止变压器变形或爆炸。

5. 绝缘套管。油浸式变压器一般采用瓷质绝缘套管，干式变压器采用树脂浇铸的套管。高、低压绝缘套管的作用是使高、低压绕组引线与油箱保持良好绝缘，并对引线予以固定。

6. 分接开关。它是用于改变变压器一次绕组抽头，借以改变变压比，调整二次侧电压的专用开关。分接开关分为有载调压和无载调压两种。用户变压器配备的一般都是无载调压分接开关。电压 10kV、容量不超过 6300kVA 变压器分接开关的接线如图 34-17 所示。该分接开关有 I、II、III 三挡位置，相应的变压比分别为 10.5/0.4kV、10/0.4kV、9.5/0.4kV，分别适用于电压偏高、电压适中、电压偏低的情况。当分接开关在 II 挡位置时，如二次侧电压偏高，应往上调到 I 挡位置；如二次侧电压偏低，则应往上调到 III 挡位置。无载调压分接开关的操作必须在停电后进行。改变挡位前、后均须用万用电表和电桥测量绕组的直流电阻。线间直流电阻偏差不得超过平均值的 2%。

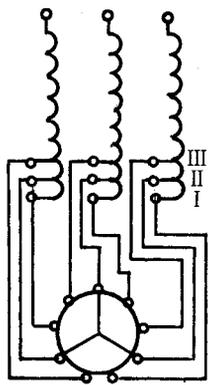


图 34-17 分接开关

7. 测温元件。安装在变压器油箱上部或铭牌附近的温度计或测温元件用于测量温度。

除上述保护装置和安全配件外，变压器还有接地螺钉、油箱放油阀、小车等附件。

(四) 变压器的安装

安装变压器前，应检查变压器外观有无缺陷，零、附件是否齐全、完好，各部密封是否完好，有无渗、漏油痕迹，油面是否在允许范围之内等。变压器安装位置的选择应考虑到运行、安装和维修的方便。

1. 户内变压器的安装。户内变压器的安装应注意以下问题：

(1) 油浸电力变压器的安装应略有倾斜,从没有储油柜的一方向有储油柜的一方应有 $1\% \sim 1.5\%$ 的上升坡度,以便油箱内意外产生的气体能比较顺利地进入气体继电器。

(2) 变压器各部件及本体的固定必须牢固。

(3) 电气连接必须良好,铝导体与变压器的连接应采用铜铝过渡接头。

(4) 变压器的接地一般是其低压绕组中性点、外壳及其阀型避雷器三者共用的接地。变压器的工作零线应与接地线分开,工作零线不得埋入地下,接地必须良好,接地线上应有可断开的连接点。

(5) 变压器防爆管喷口前方不得有可燃物体。

(6) 变压器室必须是耐火建筑。变压器室的门应以非燃材料或难燃材料制成(木质门应包铁皮),并向外开。变压器室不得开窗。单台变压器油量超过 600kg 时,变压器下方应有储油坑,坑内应铺以厚 25cm 以上的卵石层,地面应向坑边稍有倾斜。变压器室应有通风考虑,排风温度不宜高于 45°C ,空气进、出口应有百叶窗和铁丝网,以防止小动物钻入而引起短路事故。

(7) 居住建筑物内安装的油浸式变压器,单台容量不得超过 400kVA 。

(8) 为了维护安全,安装变压器时应考虑把油标、温度计、气体继电器、取油放样油阀等放在最方便的地方,通常是在靠近门的一面,而且这一面应留有稍大的间距。变压器宽面推进者低压面应在外侧,窄面推进者储油柜端应在外侧。 10kV 变压器壳体距门不应小于 1m ,距墙不应小于 0.8m (装有操作开关时不应小于 1.2m); 35kV 变压器距门不应小于 2m ,距墙不应小于 1.5m 。

(9) 为了变压器散热良好,变压器的下方应设有通风道,墙上方或屋顶应有排气孔。注意通风孔和排气孔都应装设铁丝网,以防小动物钻入而引起事故。变压器采用自然通风时,变压器室地面应高出室外地面 1.1m 。

(10) 变压器二次母线支架的高度不应小于 2.3m ,高压母线两侧应加遮栏。母线的安装应考虑到可能的吊心检修。一次和二次引线均不得使绝缘套管受力。

(11) 变压器室的门应上锁,并在外面悬挂“高压危险!”的警告牌。

户外变压器的安装。其安装方式有地上安装、台上安装和柱上安装等三种。变压器容量不超过 315kVA 者可柱上安装, 315kVA 以上者应地上安装或台上安装。就安全要求而言,户内变压器安装的第①~⑤项对于户外变压器也是实用的。户外变压器的安装还应注意以下问题:

(1) 户外变压器的一次引线和二次引线均应采用绝缘导线。

(2) 柱上变压器应安装平稳、牢固,腰栏应用直径为 4mm 的镀锌铁丝缠绕四圈以上,且铁丝不得有接头,缠绕必须紧密。

(3) 柱上变压器底部距地面高度不应小于 2.5m ,裸导体距地面高度不应小于 3.5m 。

(4) 变压器台高度一般不应低于 0.5m ,其围栏高度不应低于 1.7m ,变压器壳体距围栏不应小于 1m ,变压器操作面距围栏不应小于 2m ,围栏上应有明显标志。

(5) 变压器室围栏上应有“止步,高压危险!”的明显标志。

(五) 变压器安全运行

1. 变压器运行参数。新投入的变压器在带负荷前,应空载运行 24h ,运行中变压器的运行参量应当符合规定。例如,高压侧电压偏差不得超过额定值的 $\pm 5\%$,低压最大不平衡电流不得超过额定电流的 25% ,温度和温升不得超过规定值,声音不得太大或不均匀。另外,套管应保持清洁,外壳和低压中性点接地应保持完好,接线端子不应过热等。

变压器允许过负载运行,但允许过载的时间必须与过载前上层油温和过载量相适应。油浸电力变压器的允许过载时间可参考表34-7确定。

表 34-7 油浸电力变压器允许过载时间

min

过负载量/%	过载前上层油温						
	18℃	24℃	30℃	36℃	42℃	48℃	54℃
5	350	325	290	240	180	90	10
10	230	205	170	130	85	10	-
15	170	145	110	80	35	-	-
20	125	100	75	45	-	-	-
25	95	75	50	25	-	-	-
30	70	50	30	-	-	-	-
35	55	35	15	-	-	-	-
40	40	25	-	-	-	-	-
45	25	10	-	-	-	-	-
50	15	-	-	-	-	-	-

油浸电力变压器采用的绝缘纸、木材、棉纱是 A 级绝缘材料。由于 A 级绝缘材料的最高工作温度为 105℃, 因此变压器发热元件温度不得超过 105℃。因而, 绕组温升不得超过 65℃, 铁心表面温升不得超过 70℃, 油箱上层油温最高不得超过 95℃, 但为了减缓变压器油变质, 上层油温最高不宜超过 85℃。

如发现运行中变压器的温度过高, 应及时处理, 如环境温度未发生变化, 负荷电流和电源电压也没有变化, 下列原因可造成变压器温度过高:

- (1) 变压器绕组匝间短路或层间短路。
- (2) 变压器分接开关接触不良。
- (3) 变压器铁心片间绝缘损坏或压紧螺杆绝缘损坏使铁心短路。

(4) 变压器负荷电流过大且延续时间过长或三相负荷严重不平衡, 或电源电压偏高或电源缺相, 或散热故障或环境温度过高等。

2. 变压器并联运行。为了提高运行的经济性和供电的可靠性, 在很多情况下, 需要用两台容量较小的变压器并联起来代替一台容量较大的变压器。两台变压器并联运行是两台变压器一次侧和二次侧的同名端都连在一起的运行方式。单相变压器的并联运行接线如图 34-18 所示。变压器并联运行的基本要求是并联回路内不产生有害的环流, 而且负荷合理分配。为此, 变压器并联运行应当满足以下条件:

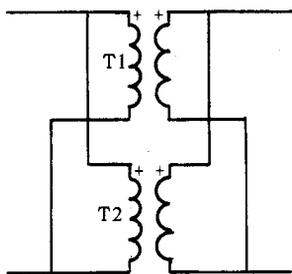


图 34-18 单相变压器的并联运行

(1) 两变压器的额定变压比应当相等, 满足 $U_{a1} = U_{a2}$ 的条件。否则, 二次并联回路中将产生差值电动势。由于并联回路内的阻抗很小, 该差值电动势将在二次并联回路中产生很大的环流。由于电磁感应, 一次回路中也将产生很大的环流。环流将增加变压器的发热, 降低变压器的出力, 环流过大也可能烧毁变压器。为

此, 并联变压器变压比的偏差不得超过 0.5%。

(2) 两变压器的连接组必须同相。否则, 即使各变压器二次电压数值相等, 即 $U_{a1} = U_{a2}$, 但由于二者的相位不同也会在二次并联回路中存在差值电动势, 并产生危险的环流。

(3) 两变压器的阻抗电压最好相等, 阻抗电压相差不宜超过 10%。因为并联变压器自身的负载率与阻抗电压成反比, 所以, 如果两台变压器的阻抗电压相等, 则各自的负载率相等; 如果两台变压器的阻抗电压不相等, 则阻抗电压高的负载率低, 阻抗电压低的负载率高。在后一情况下, 阻抗电压低的变压器满负载时, 阻抗电压高的变压器将不能满负载运行; 而阻抗电压高的变压器满负载时, 阻抗电压低的变压器将过负载运行。因此, 并联变压器的阻抗电压不相等将造成并联变压器组负荷分配不合理, 使并联变压器组出力降低。

(4) 两变压器的容量之比一般不应超过 3:1。由于制造上的原因, 如容量相差太大, 阻抗电压的条件将得不到满足。并联变压器容量不同时, 容量较大的变压器的阻抗电压应当低一些。

(六) 变压器保护

高压 10kV 变压器一般只装有防雷保护、过电流保护(包括短路保护和过负载保护)和气体保护。

1. 防雷保护。变压器的防雷保护主要是指对沿线路传来的高压冲击波的防护, 这种保护是借助于在变压器进线上安装避雷器来实现的。变压器防雷保护用的避雷器多采用阀型避雷器。避雷器的典型接线如图 34-20 所示。

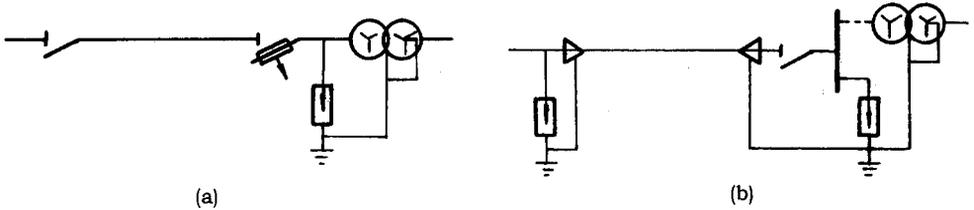


图 34-19 避雷器接线

(a) 户内安装 (b) 户外安装

对于高压侧和低压侧都可能产生高压冲击波的变压器, 应当如图 34-20 所示那样, 在变压器的低压侧另装一组低压避雷器。这组避雷器对于防止电压反变换波也是有用的。雷击在高压线路时, 极大的接地电流在高、低压共用的接地装置上产生较高的电压。这一电压加在低压绕组的中性点上, 产生流过低压绕组的电流, 并在高压绕组上再产生一个感应电动势。这种经接地连接、电磁感应再返回到高压侧的电压波就称为电压反变换波。

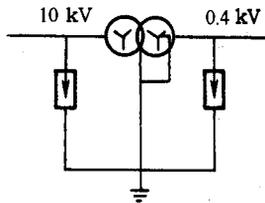


图 34-20 两侧避雷器接线

避雷器与变压器之间的电气距离越小越好, 一路进线者, 该距离不得超过 15m, 两路进线者, 该距离不得超过 23m。阀型避雷器应垂直安装, 电气连接必须良好、可靠, 瓷套应无损坏, 应保持清洁, 密封应良好。避雷器的引线截面积铜线不得小于 16mm^2 , 铝线不得小于 25mm^2 , 避雷器的接地线截面积铜线不得小于 16mm^2 , 钢线不得小于 25mm^2 。每年 3 月至 10 月, 避雷器应投入运行, 投入运行前应测量绝缘电阻、泄漏电流和非线性系数, 对于无并联电阻的避雷器还应测量工频放电电压。

阀型避雷器虽是安全保护装置, 但其本身存在着爆炸危险。当避雷器密封不良而受潮进水时, 当电网发生单相接地故障而发生铁磁谐振产生持续的过电压时, 以及当阀型避雷器质量低劣、电阻阀片通流容量不够、非线性特性不好或匹配不当或因某种原因不能切断工频续流时, 均可能导致避雷器爆炸。

运行中阀型避雷器的瓷套不应有裂纹、破损、闪络痕迹或严重污染,避雷器上的接线和接地线应连接良好,不应有烧伤痕迹或断股,避雷器瓷套管上、下端的密封应良好,油漆不应脱落,避雷器内部和外部连接处不应有异常声响等。凡有人值班时,每班巡视检查一次,无人值班时,每周巡视检查一次,遇雷雨天气等特殊情况下,应增加巡视检查次数。

2. 继电保护

(1) 继电保护概要。继电保护的作用是在正常条件下,经电压互感器、电流互感器等元件接入电路,监视设备和线路的运行状态。在变压器油面下降、温度偏高、负荷过大、气体继电器信号动作以及不接地系统发生单相接地等不正常情况下,继电保护动作,发出信号,提醒值班人员尽快处理。当系统中发生短路等故障时,继电保护可靠动作,切除故障部位,确保非故障部位安全运行,切除故障后,再借助继电保护装置启动自动重合闸重新接通电源或投入备用电源。

继电保护装置必须满足选择性、快速性、灵敏性和可靠性的要求。

(2) 气体保护(瓦斯保护)。气体继电器信号动作后,应严密监视电压、电流、温度、声响、油面、油色等运行参数或状态。如不能确定原因,应分析气体继电器里的气体。如气体无色、无味且不可燃,说明是空气,变压器可继续运行,如气体可燃,说明变压器内部有故障,则应停电检修。

气体继电器信号动作可能是由于内部轻故障造成的,也可能是由于渗油、漏油使油面降低太多造成的,还可能是由于加油、滤油时空气带入内部,温度升高后气体析出造成的。

气体继电器动作断路器跳闸,可能是由于内部严重故障,或变压器严重漏油致使油面迅速降低,或二次回路故障造成的。气体继电器动作断路器跳闸后,应将变压器与配电网完全断开,仔细检查油箱、防爆管有无变化,并应收集气体进行分析。黄色不易燃气体是变压器内部木质绝缘过热分解出来的,灰白色带有强烈气味的可燃气体是变压器内部纸、布类绝缘材料过热分解出来的,黑色或深灰色带有焦油味的易燃气体是变压器内部发生放电,绝缘油过热分解出来的。气体继电器动作断路器跳闸后,未查明原因及未排除故障前不得合闸送电。

(3) 熔丝保护。变压器高压侧熔断器的主要作用是保护变压器。当变压器内部短路或高压引线短路时,该熔丝应迅速烧断。容量 100kVA 及其以下的变压器,熔丝额定电流应按变压器额定电流的 2~3 倍选择;容量 100kVA 以上的变压器,熔丝额定电流应按变压器额定电流的 1.5~2 倍选择。

变压器低压侧熔断器主要用作变压器及低压干线的短路保护,并具有过载保护的功能。低压侧熔断器的熔体应按变压器二次负荷电流或二次额定电流选择。

(4) 反时限过电流保护。通常说的反时限过电流保护包含电流速断保护和反时限过电流保护,其保护特性如图 34-21 所示。图中, I_K 以上为速断保护范围, I_K 以下为反时限保护范围。这种保护特性由 GL 型过流继电器提供。

速断保护是瞬时动作的,属于短路保护,其动作电流应躲开线路上的峰值电流,保护范围是按变压器高压绕组的一部分(或线路全长的 70%~80%)确定的。这就是说,速断保护有死区,速断保护需要有过电流保护的配合。

反时限过电流保护的动作时间不是固定的,而是与故障电流的大小保持反时限的关系,即故障电流越大,则动作时间越短。其最小动作电流应躲过线路上的最大负荷电流。其保护范围是线路的全长,可作为速断保护的后备保护和变压器低压侧故障的穿越性保护。多级保护者,为满足选择性的要求,反时限过电流保护的级差为 0.7s。

(5) 时限过电流保护。通常说的定时限过电流保护包含电流速断保护和定时限过电流保护,其保护特性如图 34-22 所示。图中, I_K 以上为速断保护范围, I_K 以下为定时限保护范围。这种保护特性由电流继电器、时间继电器、信号继电器和中间继电器提供。

其速断保护与上述速断保护完全一样,也需要有过电流保护的配合。

定时限过电流保护的动作时间是固定的,与故障电流的大小无关,只要故障电流达到或超过继电保护装置的整定电流,继电保护装置即在确定时间内完成动作并切断线路。多级保护者,其级差为 0.5s。其他与反时限过电流保护相同。

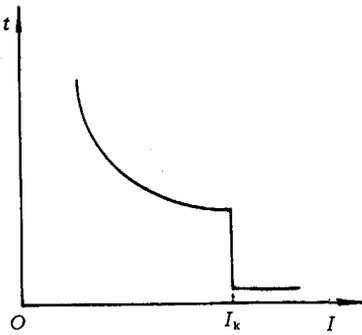


图 34-21 反时限过电流保护特性

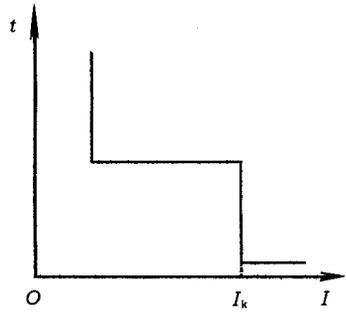


图 34-22 定时限过电流保护特性

三、互感器

互感器的原理与变压器相似，其功能是把线路上的高电压变换成低电压，把线路上的大电流变换成小电流，以便于各种测量仪表和继电保护装置使用。变换电压的叫电压互感器，变换电流的叫电流互感器。有了互感器，不但大大简化了仪表和继电器的结构，有利于仪表和继电器产品的标准化，而且能使工作人员远离高压部分，免受高压威胁。

我国生产的电压互感器二次侧额定电压均为 100V，我国生产的电流互感器二次侧额定电流均为 5A。

(一) 电流互感器

电流互感器类似一台一次线圈匝数少、二次线圈匝数多的变压器。由于二次侧串联的是阻抗很小的电流表和其他仪器仪表的电流线圈，运行中的电流互感器又类似工作在短路状态的变压器。电流互感器是按照一、二次侧电流与一、二次线圈匝数成反比的规律检测一次侧电流的。应当指出，电流互感器的一次电流决定于一次侧负荷的大小，而与二次侧负荷无关。在规定的范围内，电流互感器的二次侧电流也与二次侧负荷无关，而只决定于一次侧电流的大小。

1. 电流互感器的种类。电流互感器的种类很多，按绝缘型式，可分为瓷绝缘、浇注绝缘等型式的电流互感器；按安装方式，可分为支柱式、穿墙式、母线式等型式的电流互感器。例如，LA-10 型为穿墙式、额定电压为 10kV 的电流互感器，LQJ-10 型为线圈式、树脂浇注、额定电压为 10kV 的电流互感器等。

2. 电流互感器的技术参数：

(1) 电流互感器的额定电压，指电流互感器一次线圈可以接用的线路的额定电压，而不是一次线圈或二次线圈端子之间的电压。

(2) 电流互感器的变流比，指一次线圈额定电流与二次侧额定电流之比。因为电流互感器的二次侧电流都是 5A，所以变流比决定于一次侧额定电流。

电流互感器的精度等级是用电流的相对误差表示的，即

$$\Delta I_r = \frac{K_1 I_2 - I_{1N}}{I_{1N}}$$

式中 ΔI_r ——电流相对误差（也叫做变流比误差）；

K_1 ——变流比；

I_2 ——实测二次侧电流；

I_{1N} ——一次额定电流。

该相对误差即为电流互感器的精度等级。例如 0.5 级电流互感器的电流相对误差为 $\pm 0.5\%$ 。应当指出，精度只表示一次侧电流在一定范围以内电流互感器的误差。随着一次侧电流的变化，互感器的误差不是

不变的。10kV 电流互感器能保证一次侧电流为额定电流的 10~15 倍时电流相对误差不超过 10%。应根据二次侧负荷的性质选用适当精度的电流互感器。电能计量应选用 0.5 级的电流互感器,电流测量可选用 1 级或 0.5 级的电流互感器,继电保护可选用 3 级的电流互感器。

(3) 电流互感器的容量,指电流互感器二次侧允许接入的视在功率。二次侧串接的负载越多,视在功率也就越大。因此,尽管二次侧电流不决定于二次侧负荷的大小,电流互感器的二次侧负荷也不能无限增加,否则,电流互感器有烧毁的可能。电流互感器的容量常用二次侧阻抗表示。

3. 电流互感器的接线和安装。电流互感器最常用的接线方式是 Y 形接线和 V 形接线(见图 34-23)。Y 形接线主要用于对称和不对称三相电路(包括三相四线线路)电流的测量和继电保护;V 形接线主要用于对称和不对称的三相三线电路电流的测量及继电保护。

电流互感器的安装接线应注意以下问题:

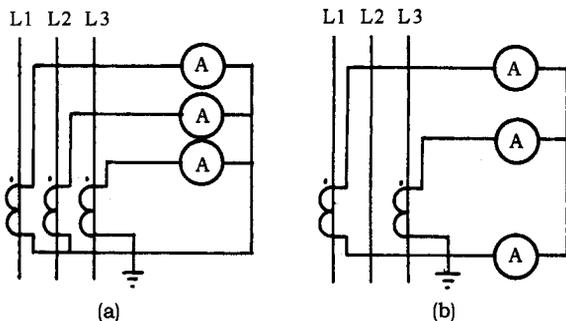


图 34-23 电流互感器接线

(a) Y 形接线 (b) V 形接线

(1) 二次回路接线应采用截面积不小于 2.5mm^2 的绝缘铜线,排列应当整齐,连接必须良好,盘、柜内的二次回路接线不应有接头。

(2) 为了减轻电流互感器一次线圈对外壳和二次回路漏电的危险,其外壳和二次回路的一点应良好接地。

(3) 对于接在线路中的没有使用的电流互感器,应将其二次线圈短路并接地。

(4) 为避免电流互感器二次回路开路的危险,二次回路中不得装熔断器。

(5) 电流互感器二次回路中的总阻抗不得超过其额定值。

(6) 电流互感器的极性和相序必须正确。

4. 电流互感器安全运行要点。运行中的电流互感器二次回路开路是十分危险的,其危险性表现在以下几方面:

(1) 由于没有二次侧电流的平衡作用,铁心磁通大大增加,而感应电动势与磁通成正比,导致二次侧电压大大升高(数百伏至数千伏),既带来电击的危险,又可能击穿二次侧线路或二次侧元件的绝缘。此时,铁心将发出嗡嗡声,如击穿绝缘,还将发出放电声和电火花。

(2) 由于铁心磁通大大增加,造成铁心发热,可能烧毁互感器,并发出焦糊味、冒烟。

(3) 由于磁通大大增加,铁心饱和而带有较大的剩磁,使互感器精度降低。

(4) 由于二次侧电流为零,电流表、功率表指示为零,电能表铝盘不转动且发出“嗡嗡”声,电流继电器也不能正常动作,从而不能对一次侧电路进行监视和保护。

电流互感器不得长时间过载运行。否则,铁心温度太高将导致误差增大,绝缘加速老化,甚至烧毁。电流互感器只允许在 1.1 倍额定电流下长时间运行。

电流互感器巡视检查的主要内容是各接点有无过热现象,有无异常气味和异常声响,瓷质部分是否清洁,有无放电痕迹。对于充油型电流互感器,还应检查油面是否正常,有无渗油、漏油等。

(二) 电压互感器

电压互感器与变压器的工作原理完全相同。但是,电压互感器二次侧并联连接的是阻抗很大的电压表

和其他仪器仪表的电压线圈,运行中的电压互感器类似工作在开路状态的变压器。在规定的范围内,电流互感器的二次侧电压与二次侧负荷无关,而只决定于一次侧电压。

1. 电压互感器的种类。电压互感器的种类也很多,按绝缘型式,分为油浸式、干式、浇注式等型式的电压互感器;按照相数,分为单相电压互感器和三相电压互感器;按结构型式,分为五柱三线圈式、接地保护式、带补偿线圈式等型式的电压互感器。例如,JDJ-10型为单相、油浸绝缘、额定电压为10kV的电压互感器;JSJW-10型为三相、油浸绝缘、五柱三线圈、额定电压为10kV的电压互感器等。

2. 电压互感器的技术参数:

(1) 电压互感器的额定电压,指电流互感器一次线圈的额定电压(线电压),变压比指一次线圈额定电压与二次侧额定电压(100V)之比。

电压互感器的精度等级用电压的相对误差表示,即

$$\Delta U_r = \frac{K_U U_2 - U_{1N}}{U_{1N}}$$

式中 ΔU_r ——电压相对误差(也叫做变压比误差);

K_U ——变压比;

U_2 ——实测二次侧电压;

U_{1N} ——一次侧额定电压。

该相对误差即电压互感器的精度等级。例如,3级电压互感器的电压相对误差为 $\pm 3\%$ 。同样,应当根据二次侧负荷的性质选用适当精度的电压互感器。电能计量、电流测量、继电保护应分别选用0.5级、1级(或0.5级)、3级的电压互感器。

(2) 电压互感器的额定容量,指在功率因数 $\cos\varphi = 0.8$ 的条件下,电压互感器二次侧允许接入的视在功率。电压互感器二次侧并联的负载越多,视在功率也就越大。因此,尽管二次侧电压与二次侧负荷的关系不大,电压互感器的二次侧负荷也不能无限增加,否则,电压互感器有烧毁的可能。

3. 电压互感器的接线和安装。电压互感器常用的接线方式是 Y_0/Y_0 开口 Δ 接线和V/V接线(如图34-24所示)。 Y_0/Y_0 开口 Δ 接线是10kV系统中广泛应用的接线方式。这种接线方式除可用于线电压、相电压的测量和一般继电保护之外,接在 Y_0 形接线的二次绕组上的电压表可用作系统的绝缘监视,接在开口 Δ 接线的二次绕组上的电压继电器可发出接地报警信号。采用 Y_0/Y_0 开口 Δ 接线时,除电压互感器二次绕组的一点必须接地外,其一次绕组的中性点也必须接地。V/V接线可用于测量线电压和连接功率表、电度表及电压继电器。这种接线方式的优点是简单、经济、一次侧没有接地点,不足之处是不能测量对地电压,不能起绝缘监视和接地保护的作用。

电压互感器的安装接线应注意以下问题:

(1) 二次回路接线应采用截面积不小于 1.5mm^2 的绝缘铜线,排列应当整齐,连接必须良好,盘、柜内的二次回路接线不应有接头。

(2) 与电流互感器相同,电压互感器的外壳和二次回路的一点也应良好接地。用于绝缘监视的电压互感器的一次绕组中性点也必须接地。

(3) 为防止电压互感器一、二次回路短路的危险,一、二次回路都应装有熔断器。接成开口三角形的二次回路即使发生短路,也只流过微小的不平衡电流和三次谐波电流,故不装设熔断器。

(4) 电压互感器二次回路中的工作阻抗不得太小,以避免超负载运行。

(5) 电压互感器的极性和相序必须正确。

4. 电压互感器安全运行要点。熔断器是电压互感器惟一的保护装置,必须正确选用和维护。一次侧熔断器的保护范围是互感器的一次线路和互感器本身,并可作为二次侧短路故障状态下的穿越性保护;二次侧熔断器的保护范围是互感器的二次线路。

对于10kV的电压互感器,一次侧应当选用RN2或RN4型有限流作用的专用熔断器。其熔丝额定电流为0.5A,电流为0.6~1.8A时的熔断时间不超过1min,熔丝电阻为 $100\Omega \pm 7\Omega$ 。电压互感器二次侧熔断器于户内安装的可选用RL_{6F}系列额定电流10A的熔断器,配用3—5A的熔丝;于室外安装的,可选用RM系列额定电流15A的熔断器,配用6A的熔丝。

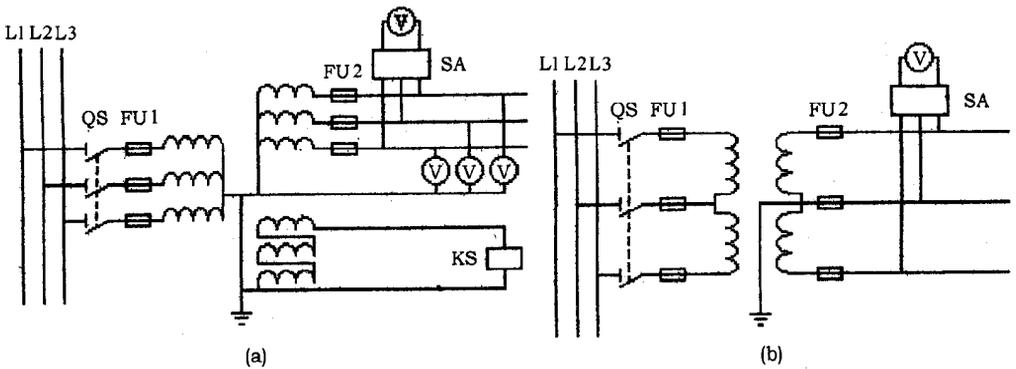


图 34-24 电压互感器接线

(a) Y_0/Y_0 /开口 Δ 接线 (b) V/V 接线

电压互感器二次侧熔丝熔断一般是由二次侧短路造成的。一次侧熔丝熔断则可能是由于互感器本身或一次线短路或套管闪络造成的,也可能是由于互感器二次侧短路穿越作用于一次侧造成的,或可能是由于过电压使互感器铁心饱和导致一次电流急剧增大造成的。不论是高压熔丝熔断还是低压熔丝熔断,更换相同规格的熔丝试验后,如再次熔断,说明有比较严重的短路故障,不可再次更换送电,而必须做进一步的检查和试验。这时,应先排除故障,再考虑更换熔丝送电。

电压互感器巡视检查中,应注意有无放电声及其他噪声,有无冒烟,有无异常气味,瓷绝缘表面是否发生闪络放电,引线连接点是否过热,有无打火,有无严重渗油、漏油,二次侧仪表指示是否正常等。

运行中的电压互感器发生下列故障时应予停电:瓷套管破裂或闪络放电;高压线圈击穿,有放电声、冒烟,发出臭味;连接点打火;严重漏油;外壳温度超过允许温度且继续上升;高压熔丝连续两次熔断。

第三节 电气事故种类与人体触电形式

最常见的电气事故是短路事故,以及电气设备爆炸、火灾事故,还有电气误操作事故。人体触电形式有:与带电体直接接触触电、跨步电压触电、接触电压触电等几种形式。

一、常见电气事故类型

(一) 短路事故

“短路”是指供电系统中相线与相线短接或相线碰到中性线、相线接地(中性点直接接地系统)。三根相线短接称为三相短路,两相短接称为两相短路,相线与中性线短接称为单相短路,在中性点直接接地的电力系统中一根相线接地就构成单相接地短路,若两相接地则构成两相接地短路。无论哪种类型短路,由于负载被短接,从电源到短路点阻抗很小,所以电路中将会出现很大的短路电流,其数值为额定电流的几倍到几十倍甚至上百倍,发生这样大的电流的短路事故,而造成严重后果。

短路电流会使电气设备导体严重发热,严重时甚至会使导体烧红、熔化,使绝缘损坏,使电气设备严重破坏,甚至起火燃烧。短路电流的导体间产生极大的电动力,使设备机械变形,甚至使设备破坏,并且电源到短路点间电压突然降低,电动机有可能停止转动,严重时破坏电力网的运行稳定性,甚至使电力系统发生解列,造成大面积的停电事故。短路事故(包括单相接地短路)会严重干扰广播电视、通信、计算机系统,使这些电子设备不能正常运行。

造成短路事故的原因很多,归纳起来有如下几个方面:

1. 绝缘损坏,如电气设备长期过负荷运行,加剧绝缘老化;机械原因损伤绝缘,过电压和雷击使绝缘损坏,以及短路电流过大而烧坏绝缘。

2. 误操作而引起短路事故。误操作经常引起事故。

3. 高压导体间绝缘距离不够,引起空气击穿,造成短路事故。

4. 导电物,包括导线错误短接,引起短路事故。

5. 小动物或飞禽跨接裸导体而引起短路。

(二) 电气设备爆炸及电气火灾

电气设备发生爆炸和电气火灾是常见的电气事故。除设计、制造和施工的原因外,在运行中电气设备过热、发生电火花或电弧是引起电气火灾和爆炸的根源,而周围再有易燃、助燃和易爆物质,则加剧和加速了事故的发生。短路故障和电气接触不良和接触处打火,产生明火是引起火灾和爆炸的很重要的直接原因,各种电炉等加热电器具、装置和设备因采取的措施不够。而造成的火灾和爆炸事故比例也很高。

目前的消防系统,包括智能建筑的消防联动系统,尽管有烟感、温感、监控等很自动化的技术措施,有消防中心,有报警,消防泵会自动启动,防火墙能自动下落进行区域隔离,喷淋装置可以自动喷水,但是这还都是事后的措施,即使做到智能化,也是火灾发生以后再来进行消除。从源头就进行预测和预防的措施和研究尚大大的不足。

有资料表明,可以预测漏电流,来预防电气火灾,因为漏电流带来的人身触电事故较为常见,而电气火灾通常是由于高温、电火花、电弧甚至是火球而引起,所以在防止短路、接触打火、高温高热、雷击等方面加强防范措施,才能真正做到电气防火。

当然,这是对漏电流作狭义的理解,假如从广义上理解漏电流,认为一切不符合规定而流动的电流,都是漏电流,那么引起电气火灾或爆炸的电流,都可以认为是漏电流,则这种漏电流的测量和电气火灾的预防,其覆盖含义是极为广泛的,但是通常的漏电流是比较容易预测和预防,而广义的漏电流的预测和预防,仍然是比较复杂,也是比较困难的。

(三) 电气误操作

常见的电气误操作事故有:

1. 带负荷拉合隔离开关;

2. 带电挂接地线;

3. 带接地线合闸;

4. 误入带电间隔;

5. 误拉合开关。

在带负荷拉合隔离开关时,产生强大的电弧,甚至发生弧光短路,引起电气设备损坏,致使人被烧伤,甚至引起人身死亡和大面积停电现象,带来极其重大的损失。

带电挂接地线时,或带接地线合闸会引起接地短路。

误入带电间隔会引起人身触电和停电事故。

误拉合开关,造成不应有的停电事故或发生触电和设备损坏。

在此,应强调的是,应从设计上采取措施。应设计的产品具有的特性是:在误操作时只是达不到原有的目的,而不应有事故发生。这一点在弱电装置中设计得比较有效,强电产品的防误操作设计应予以高度重视。

二、人体触电形式

人体触电的形式有:与带电体直接接触触电、跨步电压触电、接触电压触电等。

(一) 人体与带电导体直接接触触电

人体直接接触带电导体后造成的触电,称之为直接接触触电。对于高压系统,在与带电导体的距离小于

该电压的放电距离造成对人体放电,也属于直接接触触电的范畴。其中包括单相触电、两相触电、三相触电等几种类型。

设备不停电的安全距离,与电压等级有关,见表 34-8。

表 34-8 设备不停电时的安全距离

电压等级(kV)	安全距离(m)	电压等级(kV)	安全距离(m)
10及以下	0.70	220	3.00
20~35	1.00	330	4.00
60~110	1.50	550	5.00

(二)跨步电压触电

由跨步电压的产生而引起的人体触电称为跨步电压触电。跨步电压的大小决定于人体离接地点的距离和人体两脚之间的距离。离接地点越近、两脚距离越大,跨步电压的数值就越大。高压导体发生接地时,室内离故障点必须大于 4m,室外应大于 8m。

(三)接触电压触电

电气设备的金属外壳带电时,人若碰到带电外壳,造成触电,这种触电称之为接触电压触电。

接触电压是指人站在带电金属外壳旁,人手触及外壳时,其手、脚之间承受的电位差。

有时触电摔跌,更甚者是从高空摔跌,会引起更严重的后果,这种事故时有发生。

第四节 正常条件与故障条件下的触电防护

一、正常条件下的触电防护

(一)利用遮栏或外壳的完全防护

遮栏或外壳用来将带电部分与外部完全隔开,以避免从经常接近的方向或任何方向直接接触及带电部分。采用这种防护应考虑如下问题:

1. 选取相应的防护等级

外壳具有防止人触及或接近内部带电部分及运动部件,防止固体异物进入及防止水进内部达到有害程度的功能。本章只涉及触电防护方面,它的防护等级的选取取决于电气设备和装置的环境和应用条件、电压区段、带电部分所处的操作区域和部位。

操作区域可分为:正常操作区域——操作人员在此区域完成系统或设备的操作,所以防护等级较高;电气操作区域——只有专业人员才能进入,且需打开或移去遮栏才能进入,所以防护等级较正常操作区域低;封闭的电气操作区域——只有专业人员且需使用工具、钥匙等才能进入或实现了连锁的区域,防护等级很低。后两种区域应当配设危险警告标志。

在选择包括外壳防护等级在内的触电防护措施时,设备或设施的标称(或额定)电压值是应当考虑的因素之一。

常常将 1kV 及以下的标称电压值划分为两个区段。交流电压区段的划分见表 34-9。

表 34-9 交流电压区段(V)

区 段	接 地 系 统		不接地或不有效接地
	相-地	相-相	相 间
I	$U \leq 50$	$U \leq 50$	$U \leq 50$
II	$50 < U \leq 600$	$50 < U \leq 1000$	$50 < U \leq 1000$

直流区段的划分见表 34-10。

表 34-10 直流电压区段(V)

区段	接 地 系 统		不接地或不有效接地系统
	极-地	极-极	极 间
I	$U \leq 120$	$U \leq 120$	$U \leq 120$
II	$120 < U \leq 900$	$120 < U \leq 1500$	$120 < U \leq 1500$

遮栏和外壳防护等级的最低要求见表 34-11。

表 34-11 用遮栏或外壳对带电部分作直接接触防护时的最低防护等级要求

电压范围 (交流)	操作区域内	电气操作区域内	封闭的电气 操作区域内
$50V < U \leq 1kV$	对易触及的遮栏,外壳或顶表面实行防护等级为 IP2X 或 IP4X 的完全防护。这种防护特别适用于外壳上可能用作站立表面的那些部分 ^②	当 $U \leq 660V$ 或在伸臂范围内可同时触及的带电部分没有压差时,实行防护等级为 IP1X 的部分防护 当 $U > 660V$,实行防护等级为 IP2X 的完全防护 对易触及的遮栏,外壳的顶表面,当 $U > 660V$ 时实行防护等级为 IP4X 的完全防护 这种防护特别适用于外壳上可能用作站立表面的那些部分	当 $U \leq 660V$ 时,不设保护,防护等级为 IPOX 当 $U > 660V$ 或在伸臂范围,内可同时触及的带电部分没有压差时,实行防护等级为 IP1X 的部分防护
$U > 1kV$	伸臂范围内实行防护等级为 IP5X 的完全防护 伸臂范围外实行防护等级为 IP2X 的部分保护	伸臂范围内实行防护等级为 IP5X 的完全防护 伸臂范围外实行防护等级为 IP1X 的部分防护	实行防护等级为 IP1X 的部分防护

2. 遮栏和外壳的强度及稳定性

遮栏和外壳应紧固到位,其材料、尺寸及结构必须具有足够的稳定性和耐久性,以承受在正常使用中可能出现的机械压力、碰撞和不当操作引起的应力应变,在遮栏、外壳与带电部分之间应根据正常工作条件及预计的外界影响确定相应的距离。

3. 遮和栏或外壳的开启或拆卸

遮栏、外壳及其部件(例如门、盖)的开启和拆卸必须满足如下条件之一:

(1) 使用钥匙或工具；

(2) 采用联锁装置，以使开启或拆卸遮栏、外壳及其部件时自动切断内部带电部分的供电，而且只有在遮栏、外壳及其部件恢复原位时才能自动或手动恢复供电；

(3) 内部插入网罩。在带电部位与遮栏、外壳之间插入中间隔离网罩，使得开启和拆卸遮栏、外壳及其部件时不会触及到带电部分。这些网罩可以是固定的，也可以在开启或拆卸操作时自动滑入其位。

4. 电气间隙和爬电距离

电气间隙与爬电距离均属绝缘配合的问题。在外壳和遮栏防护的完全防护中也必须考虑。

不同带电部分之间、带电部分与大地（包括接地的外露可导电部分和外部可导电部分）之间，当空气间隙（空间距离）小到一定值时，在电场的作用下，空气介质将被击穿，绝缘将失效或暂时失效。因此在不同带电部分之间、带电部分与大地、外壳、遮栏之间，至少应当保持不会发生空气击穿的安全距离，这个距离在电气技术中就是电气间隙。

电气工程技术中还有一个与电气间隙值有关的参数，这就是安全距离。这是保证安装、操作、维修安全不可缺少的技术参数，后面将专门阐述。安全距离和电气间隙在工程设计规范中统称为净距。

爬电距离又称漏电距离，它是在两个导电部分之间沿着绝缘材料表面的最短距离要求，爬电距离过小就会在绝缘材料表面产生闪络，即沿着绝缘材料表面产生击穿现象，从而使固体绝缘失效。

在确定电气间隙和爬电距离时，除了应当考虑诸多通常因素外，还应考虑每类设备和装置的各自应用条件。在先进的设备和装置标准中均有电气间隙和爬电距离的规定。

在设有过电压限制的绝缘配合系统中，在非均匀电场条件下，不同安装类别和不同对地电压的电气设备在海拔 2000m 处的冲击耐受电压值和不同安装类别和不同污染等级下的最小电气间隙值见表 34-12。

表 34-12 最小电气间隙值

由额定系统电压确定的相对地电压 U (交流有效值和直流值 χ V)	冲击耐压 电气间隙 对污染等级 2 3 4			对于非均匀电场条件相应于安装类别(过电压类别)和相应的最小电气间隙(mm)的冲击耐压			
				安装类别(过电压类别)			
				I	II	III	IV
$U \leq 50$	冲击耐压(V)			330	500	800	1500
	电气间隙 mm	污染等级	2	0.2	0.2	0.2	0.5
			3	0.8	0.8	0.8	0.8
			4	1.6	1.6	1.6	1.6
$50 < U \leq 100$	冲击耐压(V)			500	800	1500	2500
	电气间隙 mm	污染等级	2	0.2	0.2	0.3	1.5
			3	0.8	0.8	0.8	1.5
			4	1.6	1.6	1.6	1.6
$100 < U \leq 150$	冲击耐压(V)			800	1500	2500	4000
	电气间隙 mm	污染等级	2	0.2	0.5	1.5	3.0
			3	0.8	0.8	1.5	3.0
			4	1.6	1.6	1.6	3.0

由额定系统电压确定的相对地电压 U (交流有效值和直流值 λV)	冲击耐压 电气间隙 对污染等级 2 3 4			对于非均匀电场条件相应于安装类别(过电压类别)和相应的最小电气间隙(mm)的冲击耐压			
				安装类别(过电压类别)			
					I	II	III
$150 < U \leq 300$	冲击耐压(V)			1500	2500	4000	6000
	电气间隙 mm	污染等级	2	0.5	1.5	3.0	5.5
			3	0.8	1.5	3.0	5.5
			4	1.6	1.6	3.0	5.5
$300 < U \leq 600$	冲击耐压(V)			2500	4000	6000	8000
	电气间隙 mm	污染等级	2	1.5	3.0	5.5	8
			3	1.5	3.0	5.5	8
			4	1.6	3.0	5.5	8
$600 < U \leq 1000$	冲击耐压(V)			4000	6000	8000	12000
	电气间隙 mm	污染等级	2	3.0	5.5	8	14
			3	3.0	5.5	8	14
			4	3.0	5.5	8	14

在微环境中不同污染等级、不同工作电压、不同绝缘材料组别情况下最小爬电距离见表 34-13。

表 34-13 最小爬电距离

电器的额定绝缘电压或工作电压 (V)交流有效值或直流值④	印刷线路材料爬电距离 mm			电器长期承受电压的爬电距离(mm)										
	污染等级			污染等级			污染等级				污染等级			
	1	2	1	2			3				4			
	①	②	①	材料组别			材料组别				材料组别			
				I	II	III _a III _b	I	II	III _a	III _b	I	II	III _a	III _b
10	0.025	0.04	0.08	0.4	0.4	0.4	1	1	1		1.6	1.6	1.6	
12.5	0.025	0.04	0.09	0.42	0.42	0.42	1.05	1.05	1.05		1.6	1.6	1.6	
16	0.025	0.04	0.1	0.45	0.45	0.45	1.1	1.1	1.1		1.6	1.6	1.6	
20	0.025	0.04	0.11	0.48	0.48	0.48	1.2	1.2	1.2		1.6	1.6	1.6	
25	0.025	0.04	0.125	0.5	0.5	0.5	1.25	1.25	1.25		1.7	1.7	1.7	
32	0.025	0.04	0.14	0.9	0.53	0.53	1.3	1.3	1.3		1.8	1.8	1.8	

电器的额定绝缘电压或工作电压 (V)交流有效值或直流值 ^④	印刷线路材料爬电距离 mm			电器长期承受电压的爬电距离(mm)										
	污染等级			污染等级 2			污染等级 3				污染等级 4			
	1	2	1	材料组别			材料组别				材料组别			
	①	②	①	I	II	III _a III _b	I	II	III _a	III _b	I	II	III _a	III _b
40	0.025	0.04	0.16	0.56	0.8	1.1	1.4	1.6	1.8		1.9	2.4	3	
50	0.025	0.04	0.18	0.6	0.85	1.2	1.5	1.7	1.9		2	2.5	3.2	
63	0.04	0.063	0.2	0.63	0.9	1.25	1.6	1.8	2		2.1	2.6	3.4	
80	0.063	0.1	0.22	0.67	0.95	1.3	1.7	1.9	2.1		2.2	2.8	3.6	
100	0.1	0.16	0.25	0.71	1	1.4	1.8	2	2.2		2.4	3.0	3.8	
125(127)	0.16	0.25	0.28	0.75	1.05	1.5	1.9	2.1	2.4		2.5	3.2	4	
160	0.25	0.4	0.32	0.8	1.1	1.6	2	2.2	2.5		3.2	4	5	
200(208)	0.4	0.63	0.42	1	1.4	2	2.5	2.8	3.2		4	5	6.3	
250	0.56	1	0.56	1.25	1.8	2.5	3.2	3.6	4		5	6.3	8	
320	0.75	1.6	0.75	1.6	2.2	3.2	4	4.5	5		6.3	8	10	
400(415)	1	2	1	2	2.8	4	5	5.6	6.3		8	10	12.5	
500	1.3	2.5	1.3	2.5	3.6	5	6.3	7.1	8.0		10	12.5	16	
630(690)	1.8	3.2	1.8	3.2	4.5	6.3	8	9	10		12.5	16	20	
800(830)	2.4	4	2.4	4	5.6	8	10	11	12.5		16	20	25	
1000	3.2	5	3.2	5	7.1	10	12.5	14	16	③	20	25	32	
129			4.2	6.3	9	12.5	16	18	20		25	32	40	③
1600			5.6	8	11	16	20	22	25		32	40	50	
2000			7.5	10	14	20	25	28	32		40	50	63	
2500			10	12.5	18	25	32	36	40		50	63	80	
3200			12.5	16	22	32	40	45	50		63	80	100	

①材料组别 I、II、III_a、III_b。

②材料组别 I、II、III_a。

③此区域内爬电距离尚未规定，材料组别 III_b 一般不推荐用于 630V 以上污染等级 3，也不推荐用于污染等级 4。

④在工作电压为 32V 及以下的绝缘上不会产生漏电起痕现象，但是必须考虑电解腐蚀的可能性，为此也规定了最小爬电距离。

电器的额定绝缘电压或工作电压值按 R10 数系选择。

(二) 利用绝缘的完全防护

这种防护是用绝缘材料将电部分全部包裹起来，从而防止在正常工作条件下与带电部分的任何接触。

这种防护,要求绝缘设计必须考虑在运行中长期经受的机械、化学、电气及热应力的影响(例如摩擦、碰撞、拉压、扭曲、高低温及变化、电蚀、大气污染、电解液等产生的应力影响),因为这些影响均可能是绝缘失败。通常情况下,油漆、瓷漆、普通纸、棉织物、金属氧化膜及类似材料,极易在应用环境和自然环境条件下改变其绝缘性能,因此由它们构成的覆盖层不能作为单独的绝缘防护层。

覆盖的绝缘层应足够牢固,不采用破坏性手段不会被除掉。

任何电气设备和装置,都应根据其环境和应用条件,对带电部分的绝缘防护规定绝缘性能参数。绝缘电阻、泄露电流、介电强度是其中的最主要的参数。对直接接触防护,至少应采取基本绝缘。

(三)设置阻挡物的防护

阻挡物用于防止无意的直接接触,但不能阻止有意触及带电部件。

这种防护通常在成套电气设施中采用,例如变配电站、电气试验场所。由于阻挡物的防护功能有限,因此在采用时应附设警告信号灯、警告信号标志等。

为了防止身体无意触及带电部分,可以采用遮栏、栏杆、扶手、链绳、隔板等阻挡物;在正常操作场所则需采用板状、网状、筛状阻挡物。

装设在现场的阻挡物不必采取特殊的固定措施,移动时不必使用工具或钥匙等,但应防止人们无意碰倒或移位。

(四)带电部分置于伸臂范围之外的防护

伸臂范围从预计有人的场所的站立面算起,直到人能用手达到的界限为止。置于伸臂范围之外的防护就是严禁在伸臂范围以内存在具有不同电位的能同时被人触及的部分。

图 34-25 示出了极限伸臂范围。这个极限是按人体测量学给出的人体统计尺寸并考虑了适当的安全裕度规定的。这个极限已被身材高大的美国、加拿大及德国、法国等欧洲国家所接受,所以对我国是安全可行的。图中 s 为预计有人站立的面,上半部图为正视剖面,下半部图为俯视图。长度 2.50m 通常为站立时的伸臂范围极限,1.25m 和 0.75m 分别为平伸、蹲坐、屈膝、跪、俯卧等操作姿势的伸臂范围极限。

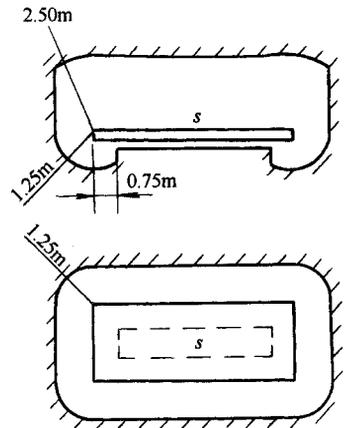


图 34-25 伸臂范围

(五)采用漏电流动作保护器的附加防护

漏电流动作保护器又称剩余电流动作保护器。它是一种在规定的条件下当漏电流达到或超过给定值时,能自动切断供电的开关电器或组合电器,通常用于故障情况下自动切断供电的防护。

将保护器的动作电流限定在 30mA 以内,是考虑到该电流在正常环境条件下,短时间内通过人体不会造成器官的损害。

应当特别指出,正常工作条件下的直接接触防护不能单独用漏电流动作保护器替代,这种保护只是为了加强直接接触防护。

(六)安全距离

为了防止在操作和维修中触及带电部分,保证操作维修人员动作的功效或舒适性,在电气设备和部件的安装定位时,在带电部分与人或与所在场所的墙壁之间;在开关、手柄等操纵控制机构与墙壁之间;在相对安置的操纵控制机构之间,都应留有符合安全要求的距离,这个距离就是安全距离。

带电部分到外部围栏的距离见图 34-26。

户外设施中在可进入区域的平面上带电部分的最低高度见图

34-27。

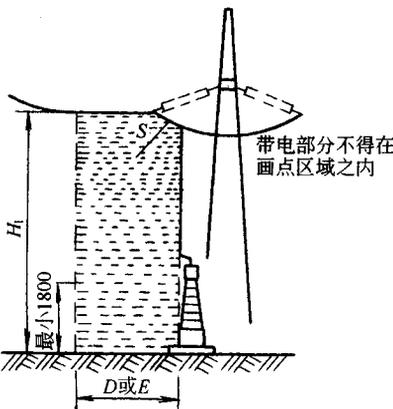


图 34-26 带电部分到外部围栏的距离

H_1 —架空动力线对地最小距离;

D 、 E —带电部分到外部围栏的最小距离;

S —带电部分至接地部分之间的电气间隙

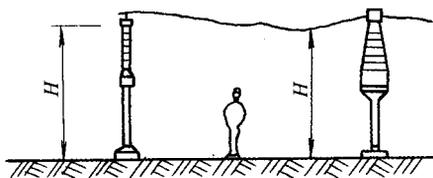


图 34-27 户外设施中在可进入区域的平面上带电部分的最低高度
H—在可进入区域的平面上带电部分的最小距离

带电部分包含架空线,因此在设计选择安全距离时必须预先考虑保证使最小距离不致由于导线下垂、风力、短路时电动力等原因而减小。

户内设施操作和维修通道的最小距离见表 34-14。

户外设施操作场地裸露的带电部分的最小距离见表 34-15。

表 34-14 户外设施操作场地裸露的带电部分的最小距离(mm)

1	2	3			6		7
额定电压 U_n (kV)	在可进入区域,带电部分的最低高度 H	在设施内从带电部分到遮栏的水平距离			从带电部分到外部围栏的水平距离		
		A	B	C	D	E	
		板状遮栏,最低高度为 1 800mm	筛或网状遮栏,最低高度为 1 800	第 3、4 列所述型式高度低于 1 800 的遮栏或有扶手、链、绳的遮栏,最低高度都是 1 100	板状围栏,最低高度 1 800	筛或网状围栏最低高度 1 800	
	$H = S + 2300$ $H_{min} = 2600$	$A = S$	$B = S + 100$	$C = S + 300$ $C_{min} = 600$	$D = S + 1000$	$E = S + 1500$	
1~10	2600	200	300	500	1200	1700	
15~20	2600	300	400	600	1300	1800	
35	2600	400	500	700	1400	1900	
63	2950	650	750	950	1650	2150	
110	3300	1000	1100	1300	2000	2500	
220	4100	1800	1900	2100	2800	3300	

1. S 为“带电部分至接地部分之间”的电气间隙。

2. 对板状遮栏和围栏,水平距离应从离带电部分最近的面测量。

3. 对链或绳,水平距离必须加上下垂。

为保证在事故情况下安全撤离,应当根据应用条件对通道出口做适当的规定。例如:当低电压配电室的长度大于6m时,其屏后应设置两个通向本室或其他房间的出口,如两个出口间的距离超过15m时,还应增加出口。对建筑物内的配电室,当长度超过8m时,应设两个出口,并应尽量布置在配电室的两端。当楼上、楼下均为配电室时,位于楼上的配电室至少应设一个出口通向室外。

额定电压为30kV及以下的户外设施的带电部分的距离要求见图34-28。

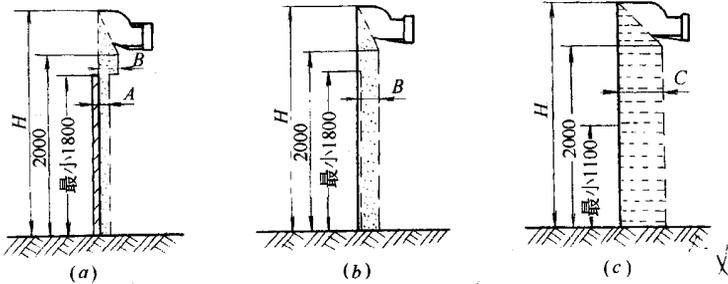


图34-28 额定电压30kV(包括30kV)以下的户外设施的带电部分的距离

(a)板状遮栏 (b)筛或网状遮栏 (c)含有扶手、链或绳的遮栏

H——在可进入区域的平面上带电部分的最小距离;A、B和C——在设施内从带电部分到遮栏的水平距离的最小距离

注:带电部分不得在画点区域之内。

额定电压在30kV以上的户外设施与带电部分的距离要求,见图34-29。

额定电压1kV及以下的户外电气装置,当通道长度超过20m时,必须留有两个进出口;长度短于20m,但超过6m时,也可留有两个进出口。额定电压1kV以上的户外电气装置,长度超过6m就必须留有两个进出口,对很长的通道建议多设些进出口。

通道出口处的门通常应当向外开,两个相邻配电室之间如果有门,则应能向两个方向开,不用手就可以开;门内外要留有空地,面积至少等于1.5m²,长宽大致相等。

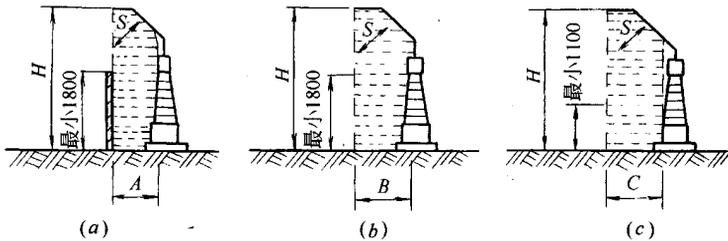


图34-29 额定电压30kV以上的户外设施与带电部分的距离

(a)板状遮栏 (b)筛或网状遮栏 (c)含有扶手、链或绳的遮栏

H——可进入区域的平面上带电部分的最小距离(见表3-22第2列);

A、B、C——在设施内从带电部分到遮栏水平距离的最小距离;S——“带电部分至接地部分之间”的电气间隙

注:带电部分不得在画点区域之内。

二、故障条件下的触电防护

(一)根据电气设备防电击方式的不同,电气设备分为四类:

1.类设备 具有可导电的外壳只有单一的基本绝缘,且无保护线端子,当基本绝缘损坏时,外壳呈现故障电压。0类设备只能在对地绝缘的环境中使用,或用隔离变压器等安全电源供电。

2. I 类设备。和 0 类设备相同,但其外露导电部分上配置有连接保护线的端子。在工程设计中对此类设备需用保护线与它作接地连接,并在电源线路装设保护电器,使其在规定时间内切断故障电路。

3. II 类设备。除基本绝缘外,还增设附加绝缘以组成双重绝缘,或设置相当于双重绝缘的加强绝缘,或在设备结构上作相当于双重绝缘的等效处理,使这类设备不会因绝缘损坏而发生接地故障。因此在工程设计中不需再采取防护措施。

4. III 类设备。额定电压采用 50V 及以下的特低电压,此电压与人体的接触不致造成伤害。在工程设计中常用一次为 380V 或 220V 的隔离变压器供电。

(二)基本要求

1. 接触电压限值和切断故障电路时间的要求

I 类设备自动切断故障电路防间接电击措施的保护原理在于当设备绝缘损坏时,尽量降低接触电压值,并限制此电压对人体的作用时间,以避免导致电击事故。为防电击,正常环境中当接触电压超过 50V 时,应在规定时间内切断故障电路。在配电线路保护中称作接地故障保护,以区别于一般的单相短路保护。

自动切断故障电路保护措施的设置要求,应注意与下述条件相适应:

- (1) 电气装置的系统接地型式(TN、TT 或 IT 系统);
- (2) 电气回路中保护线的截面;
- (3) 电气设备的使用状况(固定式、手握式或移动式)。

2. 接地和总等电位联结

接地和总等电位联结都是降低建筑物电气装置接触电压的基本措施。外露导电部分应通过 PE 线接地,其作用已为人所熟知。总等电位联结的作用在于使各导电部分以及地面的电位趋于接近,从而降低接触电压。总等电位联结还具有另一重要作用,即它能消除或降低自外部窜入建筑物电气装置内的危险电压。如果建筑物或装置内未作总等电位联结,或位于总等电位联结作用区以外,则应补充其他保护措施。

在电气装置或建筑物内,不论采用何种接地系统,应将下列导电部分互相联结,以实施总等电位联结。

- (1) 进线配电箱的保护母线或端子;
- (2) 接往接地极的接地线;
- (3) 金属给、排水干管;
- (4) 煤气干管;
- (5) 暖通和空调立管;
- (6) 建筑物金属构件。

建筑物金属构件和各种金属管道有多点自然接触,如有具体困难,视情况也可不联结。一般在进线处或进线配电箱近旁设接地母排(端子板),将上述联结线汇接于此母排上,见图 34-30。

3. 局部等电位联结

作总等电位联结后,如果电气装置或其一部分在发生接地故障时,其接地故障保护不能满足前述接触电压限值或切断故障电路时间要求时,应在局部范围内作局部等电位联结,即将该范围内上述相同部分互相联结。其联结方法可用等电位联结母线汇接,也可在伸臂范围内将可同时触及的导电部分互相直接联结。

(三)TN 系统

1. 对保护电器动作特性的要求

TN 系统的接地故障为金属性短路时,其保护电器的动作特性应符合下式:

$$Z_s I_{op} \leq U_0$$

式中 Z_s ——接地故障回路阻抗(Ω),它包括故障电流所流经的相线、保护线和变压器的阻抗,故障处因被熔焊,故不计其阻抗;

I_{op} ——保证保护电器在规定的时间内自动切断故障电路的动作电流(A);

U_0 ——相线对地标称电压,为 220V。

TN 系统允许最大切断接地故障回路时间表 34-16。

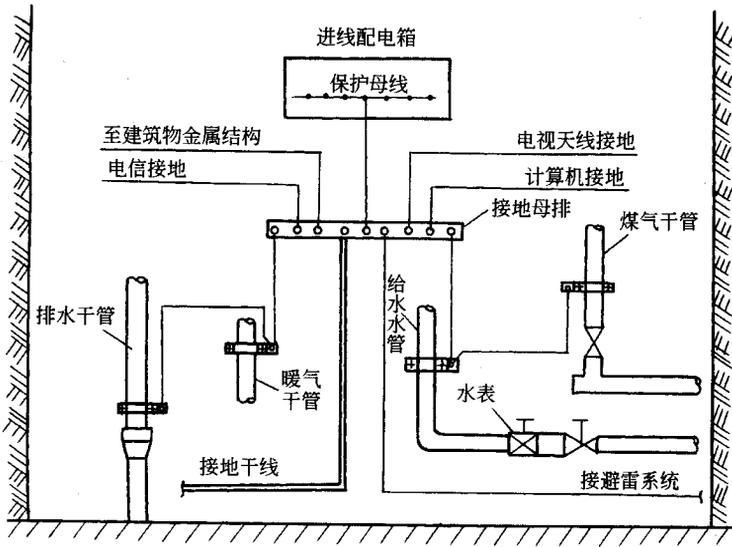


图 34-30 总等电位联结

表 34-16 TN 系统允许最大切断接地故障回路时间

回路类别	允许最大切断故障回路时间(s)
配电线路或给固定式电气设备供电的末端回路	5 ^①
插座回路或给手握式或移动式电气设备供电的末端回路	0.4 ^②

①5s 的切断时间考虑了防电气火灾以及电气设备和线路绝缘的热稳定要求,也考虑了躲开大电动机启动时间和故障电流小时保护电器动作时间长等因素。

②0.4s 的切断时间考虑了总等电位联结的作用、相线与保护线不同截面比以及电源电压 $\pm 10\%$ 偏差变化等因素。

2. 一般环境中局部等电位联结应用示例

(1) 当配电线路较长,故障电流较小,过电流保护动作时间超过规定值时,可不放大线路截面以缩短动作时间,而以作局部等电位联结代之。

局部等电位联结降低接触电压见图 34-31 和图 34-32。

(2) 如果同一配电盘既供电给固定式设备,又供电给手握式或移动式设备。当前者发生接地故障时,引起的危险故障电压将通过保护线蔓延到后者的金属外壳,而前者的切断故障时间可达 5s,这可能给后者的使用者带来危险。

其局部等电位联结降低接触电压见图 34-33。

3. 相线与大地短路危害的防止

当相线与大地间发生直接短路故障时,由于故障点阻抗较大,故障电流 I_E 较小,线路首端的过流保护电器往往不能动作,使 I_E 持续存在。 I_E 在电源的接地极上将产生电压降 $I_E R_B$,此电压即电源中性点对地的故障电压。此故障电压将沿保护线蔓延至用电设备的外壳上。

相线对大地短路引起的对地故障电压见图 34-34。

4. 保护电器的选用

TN 系统的接地故障多为金属性短路,故障电流较大,可利用原来作过负荷保护和短路保护的过电流保护电器(熔断器、低压断路器)兼作接地故障保护,这是 TN 系统的优点。但在某些情况下,如线路长、导线截

面小的情况,过电流保护电器常不能满足规定的切断故障电路时间要求,则采用漏电保护器作专门的接地故障保护最为有效,此时必须设置专门的 PE 线。

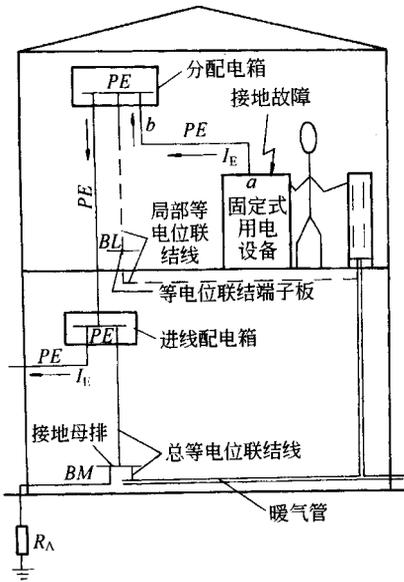


图 34-31 局部等电位联结降低接触电压(一)

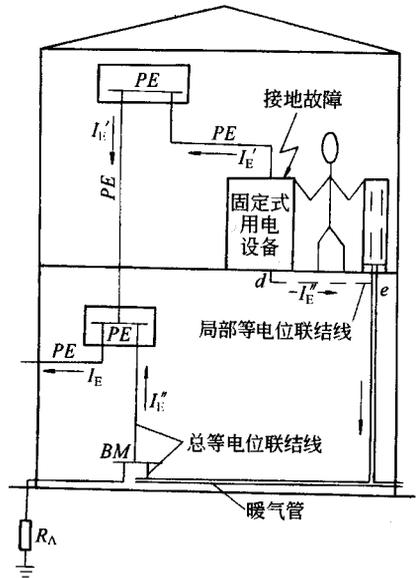


图 34-32 局部等电位联结降低接触电压(二)

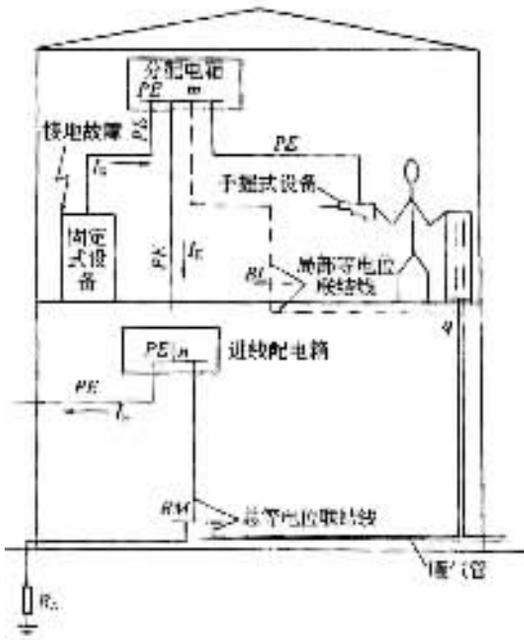


图 34-33 局部等电位联结降低接触电压(三)

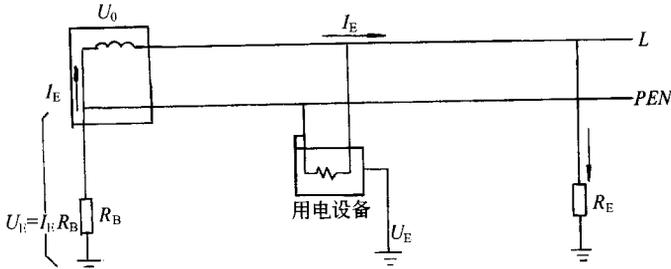


图 34-34 相线对大地短路引起对地故障电压

5. 重复接地的设置

在 TN 系统中,宜将保护线与附近接地良好的金属导体相连接,使保护线的电位尽量接近地电位,降低发生接地故障和 PEN 线断线时外露导电部分和保护线的对地故障电压。

基本以上要求,在电源线进入建筑物内电气装置处应尽量利用自然接地体作重复接地。通常自进线配电箱的 PE(PEN)母线引出保护线至配电箱近旁的接地母排上,再自此母排引出接地线至接地极。

(四) IT 系统

1. 对保护电器动作特性的要求

IT 系统发生接地故障时,故障电路内包含有外露导电部分接地极和电源接地极的接地电阻。与 TN 系统相比,IT 系统故障电路阻抗大,故障电流小,故障点未被熔焊而呈现接触电阻,其阻值难以估算。因此用预期接触电压值来规定对保护电器动作特性的要求,如当预期接触电压等于或大于 50V 时,保护电器应在规定时间内切断故障电路。计算时未计故障点接触电阻,使计算所得的预期接触电压偏大,从而留有一定的裕量。

$$I_{Op} R_A \leq 50V$$

式中 R_A ——电气装置外露导电部分接地极和 PE 线电阻之和 (Ω);

I_a ——使保护电器在规定时间内可靠动作的电流 (A) 此规定时间对固定式设备为 5S。

2. 接地极的设置

在 IT 系统内,原则上各保护电器所保护的外露导电部分应分别接至各自的接地极上,以免故障电压的互窜。但实际上难以实现,这时可采用共同的接地极。对于分级装设的漏电保护器,由于各级的延时不同,宜尽量分设接地极,以避免保护线的互相连通。

(五) IT 系统

1. 第一次接地故障时对保护电器动作特性的要求

IT 系统发生第一次一相接地故障时,故障电流为另两相对地电容电流的相量和,故障电流很小,外露导电部分的故障电压限制在 50V 及以下,不构成对人体的危害,不需中断供电,这是 IT 系统的主要优点。发生第一次接地故障后应由绝缘监察器发出信号,以便及时排除故障,避免另两相再发生接地故障形成相间短路使过电流保护动作,引起供电中断。

2. 第二次接地故障(异相)时对保护电器动作特性的要求

当 IT 系统的外露导电部分单独地或成组地用各自的接地极接地时,如发生第二次接地故障(异相),故障电流流经两个接地极电阻,其防电击要求和 TT 系统相同。

IT 系统内外露导电部分用各自的接地极接地的方法见图 34-35。

IT 系统内外露导电部分用共同的接地极接地的方法见图 34-36。

3. IT 系统不宜配出中性线

IT 系统配出中性线后可取得照明、控制等用的 220V 电源电压。但配出中性线后,如果它因绝缘损坏对地短路,因中性线接近地电位,绝缘监察器不能检测出故障而发出信号,中性线接地故障将持续存在,此 IT 系统将按 TT 系统运行。

中性线发生接地故障后 IT 系统按 TT 系统运行的方式见图 34-37。

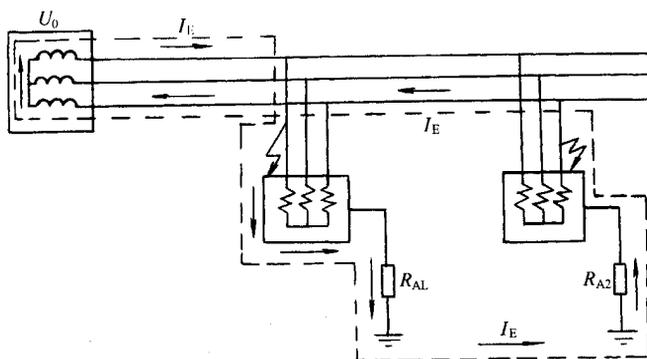


图 34-35 IT 系统内外露导电部分用各自的接地极接地

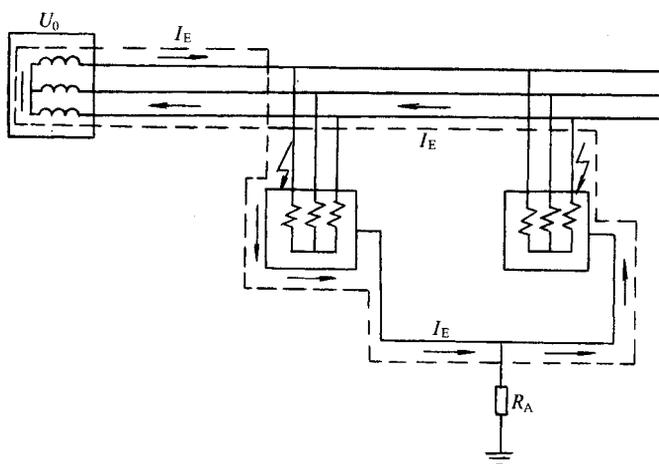


图 34-36 IT 系统内外露导电部分用共同的接地极接地

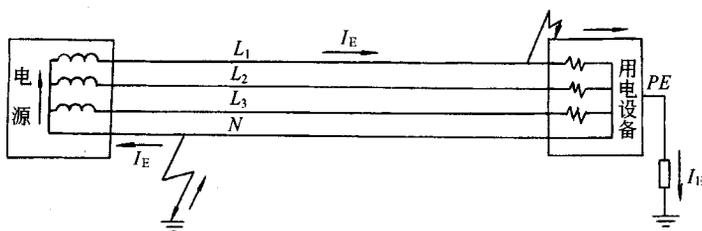


图 34-37 中性线发生接地故障后 IT 系统按 TT 系统运行

第五节 电气工作的安全防护

电气工作的安全措施有组织与管理措施和技术措施两大类。

一、保证安全工作的组织措施

在电气设备上工作,保证安全的组织措施有:工作票制度、工作许可制度、工作监护制度、工作间断、转移和终结制度等。

二、保证安全工作的技术措施

在保证安全工作的组织措施的同时,为确保电气工作安全,还必须实施有效的技术措施,如在全局停电或部分停电的电气设备上工作必须完成停电、验电、装设接地线、悬挂标示牌和装设遮栏等技术措施。

三、低压带电工作的安全措施

在低压电气设备和线路上触电的比例相当大,所以必须做好各种安全工作,例如:

1. 低压带电工作应有专人监护,使用有绝缘柄的工具,并站在干燥的绝缘物上进行工作。
2. 对于高、低压同杆架设的线路,假如要在低压线路上工作时,应先检查与高压线的距离,采取防止误碰高压线的措施。
3. 工作人员必须穿长袖工作服、工作裤,严禁穿汗背心、短裤进行带电工作。要穿戴好绝缘鞋、绝缘手套和安全帽,高处作业时还应系好安全带。
4. 在工作中要认清相线、零线,要严格按顺序拆搭。断开导线时应先断相线,后断零线;搭接导线时顺序应相反,人体在工作中不允许同时接触任何两根导线。
5. 工作中不允许用钢卷尺或夹有金属丝的皮卷尺、线尺进行测量工作。也不得使用锉刀及金属物制成的毛刷等工具。
6. 在带电的电流互感器二次回路上工作时,应有人监护,并站在绝缘垫上工作。电流互感器二次严禁开路,电压互感器二次严禁短路。

在低压电气设备和线路上工作,应尽可能停电进行,以确保工作安全。

四、保证变配电所安全运行的组织措施

变配电所的安全运行直接关系到电力系统的安全运行和用户的可靠供电。因此,变配电所的安全运行是电气工作的重要任务。

为了保证变配电所安全可靠运行,在变配电所内有一系列规章制度,这些制度都是保证电气设备安全运行和保证变配电所安全运行所必须的,是长期运行工作的总结,必须严格认真执行。

执行工作票、操作票制度和执行交接班制度、巡回检查制度、定期试验、切换制度。还有倒闸操作制、运行分析制、检验验收制、技术培训制、资料和设备管理制度等都是保证安全的重要措施。

五、正确使用电气安全用具

电气安全用具是用来防止电气工作人员在工作中发生触电、电弧灼伤、高空摔跌等事故的重要工具。电气安全用具分绝缘安全用具和防护安全用具两大类。绝缘安全用具具有:绝缘棒、绝缘夹钳、验电器、绝缘手

套、绝缘靴、绝缘鞋、绝缘垫、绝缘站台等。其中绝缘棒、绝缘夹钳、验电器的绝缘强度能长期承受工作电压，并能在该电压等级产生的内过电压时保证人身安全。而绝缘手套、绝缘靴、绝缘鞋、绝缘垫、绝缘站台等安全用具的绝缘强度不能承受电气设备和线路的工作电压，只能加强基本安全用具的保护作用，用来防止接触电压、跨步电压对工作人员的危害，并不能直接接触高压电气设备的带电部分。

一般防护安全用具还有携带型接地线、临时遮栏、标示牌、警告牌、安全带、防护目镜等。这些安全用具是用来防止工作人员触电、电弧灼伤或高空坠落，它与上述绝缘安全用具不同的是，它们不起绝缘作用，而起防护作用，以保证安全。

第六节 静电的危害与解电急救

一、静电的危害

在带电导体周围有电场产生，在高压输电线路和变电所设备周围，就存在高压电场。根据静电感应原理，在周围的物体上会有电荷积累。有时还因为其他原因，如摩擦起电等，物体上就带有静电，甚至衣物和纸张上带有静电，给人有很强的刺激，黑暗中还能看到许多火花，并发出噼叭的声响。带静电的纸张还像一把锋利的刀子，将人体特别是手指割破。人体接触带静电的物体，电荷向人体移动，有时像一个电容器对电阻放电，有时像一个电容器向另一个电容器充电，对人体产生电击的感觉。

静电产生的原因很多。如固体材料的起电通常由于接触、分离起电、物理效应起电、感应起电等。压电效应、热电效应、感应带电都属于物理效应起电。液体流动带电、液体——气体界面起电——即雷纳效应。气体如在管道内加压流动时接触、分离的机会将大大增加，同时气体加压后流动速度非常快，这样就会带有很高的静电，加之在气体内部存在大量的灰尘、金属粉末、液滴、水锈等微小颗粒，就更增大带电的可能性。

静电放电的形式有电晕放电、刷形放电、堆积粉尘的放电、火花放电等。

静电的一次放电能量，可按式进行计算：

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} QU = \frac{Q^2}{2C}$$

式中 W ——一次放电能量；

C ——物体的静电电容；

U ——物体放电时的电位与放电后剩余电位之差；

Q ——物体一次放电的电量。

静电在静电喷涂、静电除尘、静电选矿、静电纺纱、静电复印等诸多方面得到广泛应用。但随着石油化工、塑料等高分子聚合物的发展，生产规模和自动化程度的不断提高，通信、网络和无线电技术的发展，城市环境，特别是电磁场环境发生巨大的变化，经济、科技发展，生活水平提高的同时，静电产生的几率越来越高，静电积聚和放电的能量越来越大。若再不对静电的认识加以提高，不采取有效的控制措施，静电危害的现象越来越多，越来越严重，甚至引起人身触电、静电放电引起火灾和爆炸事故。静电灾害目前已占整个事故的10%左右，个别领域可高达34%之多，这是一个不可忽视的数字。

静电危害包括四个方面：①呈现静电力作用或高压击穿作用，主要是使产品质量下降或造成生产故障。②呈现高压静电对人体的作用，产生“人体电击”。在一般场合，虽然尚未发现静电电击危及人的生命安全，但近年静电发生频繁，且伤害程度有加重的趋势，值得人们重视。③静电放电过程是将电场能转换成声、光、热能的形式，热能可作为火源，可能使易燃气体、可燃液体或爆炸性粉尘发生火灾或爆炸事故。静电和导体中的电流都有可能产生危害，而静电的发生比起电流更难预料和控制，也可以说静电产生的离散性比电流大得多。这样也就使一旦产生的灾害就更难预料性，从而使得灾害更加难以控制。④静电放电过程所产生

的电磁场是射频辐射源,对广播、电视、通信是干扰源,甚至会引起计算机误动作,引起更大的电磁危害。

二、触电急救

触电急救,事关人命。预防是最重要的,万一发生触电事故后,急救更重要。所以,电气工作人员和有关人员必须熟练掌握触电急救的方法。

人触电后,常出现神经麻痹、呼吸中断、心跳停止等现象,呈现昏迷不醒的症状。常见的是“心跳、呼吸停止,瞳孔放大,血管硬化,身上出现尸斑或者尸僵。迅速进行现场救护,采取正确的救护方法,正确的触电急救程序是:解脱电源、迅速诊断、心肺复苏、抢救过程中的再判断、抢救过程中触电伤员的移动与转院、触电伤员好转后的处理。以及杆上或高处的触电急救、外伤处理。还有触电者生还好转后的心理治疗等步骤。

首先使触电者迅速脱离电源,而且方法正确,更应防止急救人员的再触电,造成事故的扩大。

1.脱离低压电源:应迅速拉开电源开关、刀开关、拔除电源插头等;或是使用绝缘工具、干燥的木棒、木板、绳索等绝缘物设法解脱触电者,也可抓住触电者干燥而不贴身的衣服,将触电者拖开电源,切不可碰到金属等导电物体和触电者的裸露身躯;也可戴绝缘手套、用干衣服绝缘后解脱触电人员;也可站在绝缘的木板或绝缘垫等绝缘物上,救护者在可靠的绝缘情况下进行救护,用干木板等绝缘材料垫到触电者身下也是解脱电源的方法,若用绝缘可靠的斧、刀、钳等将电源线一相一相地剪断也是解脱电源的方法,有时还用干木棍将电源线挑开或断开。但这些方法,其目的是以最快的速度使触电者脱离电源,并保证了救护人员的安全。发生触电的情况千变万化,救护者必须冷静、有序的因地制宜进行处置。

2.脱离高压电源:触电者触及高压电源,或过近的接近高压电源而造成触电的情况,因为电压高,所以一般的绝缘物对救护人员不能保证安全,救护人员应用各种电气知识迅速判断一下电压等级,是6kV、10kV、35kV或更高的电压,从高压线绝缘子的数目可估计出电压等级,绝缘子节数越多,电压越高。而高压电源的电源开关距离远,切断电源的难度大。所以,这时应立即快速通知有关部门停电,戴上绝缘手套、穿上绝缘靴、拉开高压断路器或用相应电压等级的绝缘工具拉开跌落式熔断器,切断电源线。救护人员在抢救过程中应特别注意保持自身与周围带高压导体足够的安全距离,高压电触电,因为抢救不当,经常造成事故的扩大,甚至造成多人死亡。非专业人员确实很难做到。所以高压触电应强调采取强有力的措施来进行预防,尤其是下雨雷电季节,应经常告诫人们,最好远离高压带电线、高压带电装置或设备,并有严格的规章制度来保证。

3.在抢救触电者脱离电源的注意事项如下:救护人员不允许采用金属和其他潮湿的或绝缘不良的物品作为救护工具;未采取任何绝缘措施,救护人员不允许直接触及触电者的皮肤和潮湿衣服;在使触电者脱离电源的过程中,救护人员应用单手操作,以防自身触电;当触电者站立或位于高处时,应采取防止触电者在脱离电源而摔跌的措施;当夜间发生触电事故时,应考虑切断电源后的临时照明,以利救护。应严防触电事故的扩大,救护人员的触电,特别是非电气专业人员,因为缺乏电气知识和没有操作经验,使后果更为严重。电气专业人员、甚至是有操作经验和有救护经验的人员,也不可麻痹大意、慌张,应该沉着、冷静、胆大心细,强有力的责任心,采取有效的、正确的、适用于现场情况的措施,使救护工作进行顺利。在救护工作进行中,应防止乱指挥、瞎出主意,应该即时产生一名现场的有权威的指挥者,大家互相配合、有条不紊地进行抢救,并具备一个良好的氛围,使抢救工作进行得更好。

触电者脱离电源后,应立即将其抬到空气流通、温度适宜的地方,并根据触电伤害的情况进行紧急救护,同时请医生前往抢救。

当触电者的伤害不太严重,未失去知觉、神智清醒,能感到心慌、乏力、肢体发麻时,应使触电人休息,保持安静、平和,并严密注视触电者有无异常变化。

当触电者还能呼吸,心脏尚在跳动但失去知觉时,应使其休息、保持平静、松开衣服以便呼吸通畅,进行通畅气道、口对口或口对鼻的人工呼吸和胸外按压,是心肺复苏法支持生命的三项基本措施,同时加强观察。

若触电者已停止呼吸,心脏微有跳动但已失去知觉时,应立即进行人工呼吸。若触电者停止呼吸,心脏也停止跳动且完全失去知觉时立即进行口对口(鼻)的人工呼吸及胸外心脏挤压人工呼吸或用两者相结合的

方法进行现场救护。

常用的人工呼吸法有口对口(鼻)人工呼吸法、牵手人工呼吸法、仰卧压胸法、俯卧压背法等。进行人工呼吸时应注意:

1. 迅速解开触电者领扣及裤带,清除口腔内的杂物及假牙等,解除一切妨碍触电者呼吸的障碍。
2. 人工呼吸的动作要有节奏,两人替换时也要注意节奏,并保持稳定的压力。
3. 严禁给触电者注射强心剂。
4. 要保持触电者的体温并保持空气流通。
5. 坚持人工呼吸不能中断,直到触电者恢复自然呼吸为止。
6. 如触电者开始均匀呼吸时,应暂停人工呼吸。

人工胸外按压法是采用人工机械方法按压心脏,代替心脏跳动,以达到血液循环的目的。其操作步骤如下:

1. 使触电者朝天仰卧,后背着地接触面较大。
2. 救护者位于触电者一侧或骑跨在触电者腰部,两手交叠,手掌根部放在正确的压点上,即心口窝稍高,两乳头间略低、胸骨下1/3处。
3. 救护人员两臂伸直,掌根略带冲击地用力垂直下压,压陷深度3~5cm(儿童和瘦弱者酌减)。
4. 压到要求程度后,立即全部放松,但放松时救护人员的掌根不得离开胸壁。按压必须有效,有效的标志是按压过程中可触及触电者颈动脉跳动为准。
5. 应以均匀速度进行按压,80次/min左右,每次按压和放松的时间应保持相等。
6. 胸外按压与口对口(鼻)人工呼吸同时进行,应有节奏,其节奏为:单人抢救时,每按压15次后吹气2次(即15:2),重复均匀地进行;双人抢救时,每按压5次后由另一人吹气1次(即5:1),重复均匀地进行。凡触电者心脏停止跳动或不规则的颤动情况下,可立即采用人工胸外按压法进行抢救。

现场抢救是触电急救的重要手段,在抢救过程中,每隔几分钟应判定一次,每次判定时间不应超过5~7s。现场抢救人员要坚持不懈,在未得到更好的条件,如专业医务人员到现场前,现场急救人员不应轻易的放弃人工呼吸和胸外按压等现场抢救。

抢救过程中触电伤员的移动与转院时应注意的事项如下:

- (1)心肺复苏应在现场就地坚持进行,不得随意移动伤员,确需移动时,抢救中断时间不得超过30s。
- (2)移动触电伤员或将伤员送医院时,应使伤员卧躺,如平躺在担架上,并在伤员背部垫以平整硬的阔木板。在移动或转院过程中,抢救仍不中断;心跳、呼吸停止的要继续采取心肺复苏法进行抢救,或遵照医生的意见进行救护。
- (3)创造条件,用塑料袋装入碎冰屑做成帽状包绕在触电伤员头部,露出眼睛,使胸部温度降低,促使心、肺、脑的完全复苏。

触电伤员好转后应注意的事项如下:

- (1)如果触电伤员的心跳和呼吸经抢救后都已恢复,可以暂停心肺复苏法的操作,但心跳、呼吸恢复的短期内还有可能再次出现骤停现象,应严密监护,决不能麻痹大意,当再次骤停时,仍应再次抢救。
- (2)初期恢复后,有可能神志不清、精神恍惚、躁动、情绪反常等,应设法使触电伤员平静,并安排安静的环境,得到亲人、同事和朋友精心照料,或者请医生服用必要的药物。

杆上或高处触电急救应注意的事项如下:

- (1)发现杆上或高处有人触电,应争取时间及早在杆上或高处开始抢救,采取紧急呼救措施。为了保证救护人员的安全,以免事故扩大,救护人员登高时,应该随身携带必要的工具和绝缘物品及牢固的绳索等。
- (2)救护人员应在确认触电人员已解脱电源,且救护人员所涉及的环境与危险电源有足够的距离,或者说在安全距离内无危险电源,这时,才能去接触触电人员进行触电抢救。特别要注意防止触电和救护人员发生高空坠落的可能性。
- (3)触电人员解脱电源后,应将伤员扶卧在救护人员的安全带上,并注意保持伤员气道的通畅。
- (4)救护人员应迅速给触电者进行诊断与判定,如触电者的神经反应、呼吸和心脏的跳动情况,观察左右手的脉搏情况。

(5) 如触电伤员呼吸和心跳停止,应立即进行口对口(或鼻)吹气2次,再测试颈动脉,如有搏动,则每5s吹气一次,连续多次。如颈动脉无搏动时,可用空心拳头叩击心前区2次,促使心脏复跳。

(6) 高处发生触电,为使抢救更为有效,应尽早设法将触电伤员在有安全措施的情况下移至地面(如在将伤员移动至地面前,再口对口(鼻)吹气4次)。

(7) 伤员移至地面后,应立即采取心肺复苏法继续坚持人工抢救。

对于现场触电抢救,除上述的不允许注射强心针外,对肾上腺素之类的药物也要慎用,药物治疗或其他医疗措施,应由医生经过医疗诊断后再应进行处置,医院对触电伤员应按急诊处理,医务工作者应发扬高度的人道主义和救死扶伤的精神,以极其负责任的态度,和积极的有效措施来抢救触电伤员,让触电者妙手回春。

对于电伤和摔跌造成外伤时,应防止细菌侵入引起感染,移动时特别注意防止摔跌骨折而刺破皮肤、血管、周围组织,甚至损伤神经,以免引起伤情加重。如伤口出血不严重,可用消毒纱布盖住伤口、压紧止血,外伤表面,可用无菌盐或清洁的温开水冲洗后,有条件时用消毒纱布、防腐绷带进行包扎处理,无条件时只能用干净的布带、或扯下干净衣服进行包扎,也是止血的有效措施,然后转医院治疗。伤口出血严重时,立即压迫止血,并及时紧急送医院治疗。

高压触电时,可能会造成大面积的严重电弧灼伤,有时深达骨骼,处理难度很大,若现场没有医务人员,则可用无菌生理盐水或清洁的温开水冲洗,再用酒精消毒,然后用消毒布单包扎,并迅速送医院治疗。

对于因触电摔跌四肢骨折的触电者,应首先止血、包扎,然后用木板、竹板等临时将骨折肢体临时固定,决不用冒然推拿复位,然后迅速送医院治疗。

触电伤员、特别是较重的触电伤员恢复健康后,心理上因触电而产生了严重的伤害,虽然身体已经康复,但精神和思想上会产生和以前不一样的念头,特别是对“电”会产生种种不正确的看法,甚至再也不愿意去从事电气工作,特别是带电工作。也有的完全相反,电一下没什么,结果胆大了而心不细,甚至有的因为女友或爱人是从事电气工作的,也增加了对“电”的恐惧感,增加了几分担心和忧虑。所有这些,是我们电工界的人士不愿意见到的结果。对于触电者康复以后的心理状态,以往电工界很少关心,随着物质生活的提高、精神生活的丰富,电气技术的发展,用电量的增加,电器具、电装置、电设备的增加,对触电的认识也要深入,触电伤员康复后的心理治疗问题也得到了电工界的重视,进而更有利于触电伤员的身心健康,更有利于电气事业的发展,更有利于电气技术水平的提高。

第三十五章 电气防火防爆技术

第一节 电气火灾的原因与防火措施

一、电气火灾的原因

电气火灾的直接原因有短路、过载、接触点接触不良、接触电阻大而发热,严重时变为火源。电弧火花、漏电、雷电等,甚至静电及摩擦也将引起火灾的事也时有发生。有的电气火灾是人为的,例如思想麻痹,疏忽大意,不遵守防火法规,违反操作规程和缺乏电气防火安全知识等。从电气防火的机理看,电气设备的质量低劣,安装使用不当,维护保养不良,检修不及时,电气设备和电器元件的错误连接和处理不当,以及雷击、静电等是造成电气火灾的重要原因。

过载使导体中的电能转变成热能,热量 $Q = 0.24I^2 \cdot R \cdot t$ (式中 I 为电流, R 为电阻, t 为时间)。从式中可以看出热量 Q 和电流 I 的平方成正比,可见电流和发热的关系。当导体和绝缘物局部过热,达到一定温度时,就会引起火灾。

短路是电气设备最严重的一种故障状态。无论是两相相间短路、三相相间短路或是对地短路,短路时,在短路点或导线连接松弛的电气接头处,均会产生电弧或火花,电弧温度很高,可达 6000°C 以上,甚至即刻产生大火球。不但能引燃导线本身的绝缘材料,还能使铜导线化为灰尽直至汽化,甚至将附近的可燃材料、易燃品引燃产生爆炸。

导线的连接处发生接触不良,因为接触电阻增大而引起局部过热,过热的触头接触处接触电阻又迅速增大,产生火花,造成点火源。

电炉、电取暖器、电熨斗等电热设备和电热器具,甚至是一个灯泡,在正常通电的状态下,就是一个高温热源,相当于一个火源,当其产品低劣、安装使用不当,长期通电无人监督管理时,且周围有可燃物、易燃品时,受到高温烘烤而起火。

近代的设备常常是高速旋转和运行的物体,“高速度”象征着时代的步伐,但是从另一个角度看,“高速度”,如发电机、电动机的高速旋转,干枯润滑不良的轴瓦和轴承,其摩擦的能量是原始人的钻木所不能比拟的,那引起火灾的机理就很容易理解了。

雷电是害,除直击雷外,还有感应雷,雷电反击,雷电波的侵入和球雷等。防雷是电气安全的重要内容;而防雷也是电气防火的重要内容。因为,雷电危害的共同特点是放电时总要伴随机械力、高温和强大的火花产生,使建筑物遭受破坏,使输电线或电气设备损坏,甚至引起如油罐爆炸、堆场着火,造成火灾事故。因为,雷电是在大气中产生的,雷云是大气电荷的载体,当雷云与地面构筑物接近到一定距离后,高电位的雷云就会击穿空气而放电,产生闪电,并伴随雷鸣。雷云电位可达 $104 \sim 105\text{kV}$,雷电流可达 50kA ,若以 $\frac{1}{10^5}\text{s}$ 的时间放电,其放电能量约为 $10^7(\text{W}\cdot\text{s})$ 这个大能量能使人致死,并为易燃易爆物质点火能量的 100 万倍,这就是雷电引起火灾的机理。

静电起火问题越来越引起人们的重视,随着现代化工业的发展,特别是石油化工、塑料、橡胶、化纤工业、

造纸、印刷和金属磨粉等工业的发展,随着现代化的生活,各种各样能产生静电的电气、电子设备和器具的增加,各种静电对金属的放电,静电产生的电击,甚至产生静电火花,点燃周围的可燃物、易燃品以及爆炸混合物,时有静电火灾事故的发生。

二、常规电气防火措施

(一) 提高导体长期运行允许电流

提高导体长期运行允许电流,是减少导体的发热,使导体发热温度控制在允许温度之内,对导体、如电线、电缆防火有很大的意义。

提高导体长期运行允许电流的方法很多,经常采用的方法有:减小导体电阻、增大导体的散热面积、提高散热系数等。实质上是两种方法,即是减少发热和增加散热,这是符合发热和散热平衡原理的。若不平衡时,发热越来越多,散热越来越差,则导致火灾的危险性就越大。

减小导体电阻的有效方法是:采用电阻率小的导体(电阻率 $\rho = R \cdot \frac{S}{l}$ 则电阻率 ρ 越大,电阻 R 就越大,又由 $Q = 0.24I^2 \cdot R \cdot t$ 式中得知,当电流 I 和时间 t 一定时,电阻 R 越大,发热量 Q 就越大)。另外减小导体的接触电阻,显然可提高导体允许温度,还有适当增加导体的截面,也是对防火有利的。因为截面增大,导体的电阻减小,发热量下降,但是随着截面积的增加,集肤效应也增加,这是对有效控制发热不利的。

导体的散热面积和导体的几何形状有关,在截面积相同时,圆柱形外表面最小,所以母线很少使用圆柱形,因为散热面积越大,无论是对流、传导和辐射,越有利于散热,对降低温度(升)有利,从而有利于防火。

提高散热系数有利于散热,提高散热系数的方法很多,常用的方法有:改善冷却方式,如采用强迫冷却;合理布置导体,以提高自然对流放热率。导体表面涂漆,可提高辐射散热能力。导线明敷时应加强自然通风,不应覆盖,处理不当均将使导体升温,诱发火灾事故。采用耐热绝缘材料,提高导体绝缘的耐热性能,自然是防火的有效措施。绝缘材料耐热性能的提高,标志着绝缘生产水平,还标志着科技发展的水平。

(二) 高低压电器采取灭弧措施

电弧是引起火灾的重要因素,设计高低压电器时历来非常重视灭弧问题。

电弧燃烧时,弧隙在高温作用下,形成新带电质点的游离过程和带电质点的不断复合与扩散,使带电质点减少的去游离过程是同时进行的。当游离速度大于去游离速度时,电弧稳定燃烧,若去游离速度大于游离速度时,则电弧熄灭。只要设法削弱游离作用,加强去游离作用,就能使电弧熄灭。去游离的方式有复合和扩散两大类。

高低压电器常采用的灭弧基本方法有:气吹灭弧、油吹灭弧、电磁灭弧、狭缝灭弧、将长弧分成若干短弧、提高触头的分离速度、利用多断口灭弧等。

(三) 变配电所(室)的电容器室的防火措施

电容器在变配电所用来作为提高功率因数用,常称功率因数($\cos\varphi$)补偿,还有供高压开关试验用。由于电容器数量较多,尤其是高压电容器,其芯子装在油箱内,充以电容器油,一旦发生火灾引起爆炸,救险工作难度很大,造成的损失大,后果严重。一定要采取防火措施,以保证安全。

电容器常发生渗漏油、鼓肚和喷油等故障现象,这是导致火灾的原因。所以运行时应防止过电压(运行电压 $U < 1.1U_N$,运行电流 $I < 1.3I_N$),运行时通风应良好,室内温度 $t < 40^\circ\text{C}$ 。加强维护,接地线牢固、接触良好。设备应有可靠的保护装置,电容器室应设置固定灭火器。

(四) 电缆竖井的防火措施

竖井是电缆敷设和综合布线的垂直通道,为现代楼宇和高层建筑必不可少;另外发电厂的主控室和锅炉房等也有竖井设计。竖井常采用砖和混凝土砌筑而成。在现代楼宇和高层建筑中竖井常位于电梯井道两侧和楼梯走道附近,由每层的配电小间连接而成。有的是强弱电都在一起,常常是强电、弱电电缆和布线在竖井用墙作隔离。

竖井有烟囱效应,若一旦发生火灾,容易使火势扩大,造成严重后果,所以电缆竖井也必须采取有效的防火措施。

竖井内不允许有明火,采用的电器要有良好的灭弧装置,强电电缆和弱电布线最好分开并有隔离。

竖井在地面或每层楼板处,应设有防火门,宜做成封闭式,底部与隧道或沟相连,竖井中每层楼板均应隔开,穿行管线或电缆孔洞,必须采用防火材料封堵。

(五) 蓄电池室的防火措施

蓄电池室是蓄电池组充放电工作的专门场所,在供电系统常设有专门的蓄电池室,由蓄电池组作为操作回路、信号回路和保护回路提供直流电源。蓄电池组在通信系统的程控交换机房等地方也作为直流电源,也有采用专用的 UPS 电源,以保证在市电停电时,通信系统仍然正常工作。这对于智能建筑等现代楼宇都是非常重要的。

蓄电池是电能与化学能互相转化的装置。充电时,将电能转变为化学能储存起来,放电时,它又将化学能转变为电能,供用电设备使用。周而复始,反复工作。

充、放电过程化学反应是可逆的,化学反应方程式为: $\text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Pb} \xrightleftharpoons[\text{充电}]{\text{放电}} \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{PbSO}_4$ 由此反应式看出,蓄电池充电终期,正负极板上的 PbSO_4 已大部转变为 PbO_2 和 Pb (绒状铅)。若再继续充电,充电电流只起分解水的作用,结果在负极便有氢气逸出,在正极便有氧气释出,化学反应方程式为 $2\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2 \uparrow + \text{O}_2 \uparrow$ 。这样,电解液中的硫酸并未减少,仅是水被分解成氢(H_2)和氧(O_2)逸出,产生严重的冒气现象。结果是使板极活性物质脱落损坏,消耗水分,既浪费蒸馏水和电能,又潜在有火灾甚至爆炸危险。虽然蓄电池的爆炸不经常发生,但是,尤其是变配电站,蓄电池爆炸事故是非常惊人的。

防止氢、氧气体产生气泡的有效办法是适当减小充电电流。

蓄电池室的防火措施很多,主要是建筑设计有严格的要求、通风有严格的要求、对室内温度进行严格控制、对电气防爆采取措施等。

蓄电池必须放在专用不燃的房间内,并分别用耐火极限不低于 2.5h 的非燃烧体墙、耐火极限不小于 1.5h 非燃烧体楼板与其他部位隔开。为防止室内形成通风不良的死角,顶棚应作成平顶,不宜采用折板屋盖和槽形屋面板。室内地坪要求能耐酸。墙壁、顶棚板和台架宜涂耐酸漆。门窗宜向外打开并涂以耐酸油漆。入口处应经过套间,大蓄电池室应设有贮藏酸及配制电解液的专门套间。

蓄电池室内应有良好的通风装置,采用自然通风和抽风设备,以保证室内含氢量和含酸量分别控制在 0.7% 和 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。通风设备的空气流量 $V = 0.07 \times I \cdot n$ (m^3/h) [式中 I ——最大充电电流; n —蓄电池组的电池只数]。

蓄电池室和调酸室的温度不应低于 10°C ,否则宜采用采暖措施(又宜用蒸汽和热水装置采暖)。管道要严防漏汽和漏水。

通风机和照明灯应采用防爆式,电源开关箱宜安装在蓄电池室外。供配电线路应采用钢管布线,蓄电池连接的导线明线宜使用裸导线。电炉等器具应慎用。选用密封式或防酸隔爆式蓄电池或采用碱性镉镍密封蓄电池等,都是有效的防火防爆措施。

第二节 消防中心主机的操作

一、消防中心

(一) 消防中心的设置

根据防火要求,凡设有火灾自动报警和自动灭火系统,或设有自动报警和机械防排烟设施的楼宇(例如

旅馆、酒店和其他公共建筑物) ,都应设有消防中心(消防控制室和消防值班室) ,负责整座大楼火灾的监控与消防工作的指挥。消防控制室既是防火活动的管理中心 ,又是火灾发现并发出警告、引导疏散、扑灭初期火灾及其他原因发生事故的处理中心 ,也是消防部门设在本大楼实施灭火救灾的指挥中心 ,它的地位极为重要 ,因此 ,消防控制室应至少设置一个集中报警控制器和必要的消防控制设备。设在消防控制室外的集中报警控制器 ,均应将火灾报警信号和消防联动控制信号送至消防控制室。

消防控制室对保护建筑物重点部位、消防通道和消防器材放置位置要全面掌握 ,可以绘图列表 ,也可以用模拟盘显示及电视屏幕显示 ,采用什么方法显示上述情况 ,可根据消防控制设备的具体情况来确定。

在智能建筑物中 ,一般消防中心是与建筑物自动化的监控中心设置在一起的。

(二)消防中心控制装置的组成

消防控制室设备根据需要可由以下部分或全部控制装置组成 :①集中报警控制器 ;②室内消火栓系统的控制装置 ;③自动喷水灭火系统的控制装置 ;④泡沫、干粉灭火系统的控制装置 ;⑤卤代烷、二氧化碳等管网灭火系统的控制装置 ;⑥电动防火门、防火卷帘的控制装置 ;⑦通风空调、防烟排烟设备及电动防火阀的控制装置 ;⑧电梯控制装置 ;⑨火灾事故广播设备控制装置 ;⑩消防通讯设备等。

(三)消防中心的作用和控制方式

消防中心的控制功能有 :

1. 灭火系统的控制。包括各种介质 ,如液体、气体、干粉的喷洒装置的控制 ;
2. 灭火辅助系统的控制。包括防止火灾扩大的各种设备 ,如防火门、防火卷帘以及防排烟设备的控制 ;
3. 火灾报警系统、人员疏散指示系统和消防指挥系统的控制 ;
4. 消防专用通讯设备的控制。

消防控制室的控制方式有以下三类 :

1. 自动控制方式。火灾发生时 ,火灾探测器将探测到的信号自动送到消防控制室 ,自动发生报警信号 ,并自动控制灭火系统 ,如自动喷水灭火系统、卤代烷灭火系统动作 ,同时向控制器发回信号 ,告知当前设备所处状态。

2. 联动控制方式。消防系统中某种装置或设备动作后而使其相关的设备动作的控制方式。例如 ,排烟口或排烟阀动作后 ,连锁启动排烟风机 ,并停止相应的通风和空调设备。

3. 手动控制方式。这是消防设备中常用的一种控制方式 ,有些消防设备既可手动控制也可由控制室控制。例如 ,消防水泵、防火卷帘门等。

二、主机的操作

主机的规格品种很多 ,操作方法也有所不同 ,但有其共同的特点。现以 JB - TB - 2000 - ZN905 型二总线制模拟量通用火灾报警控制器为例进行简要的说明。

(一)功能键的使用

1. 火灾报警。JB - TB - 2000 - ZN905 型二总线制模拟量通用火灾报警控制器中的主 CPU 不断访问各个探测器接口板和区域报警控制器 ,被选中的探测器接口板或区域报警控制器返回包括火警信号和故障信号在内的各种状态信息。如有火警信息则显示首火警号、首火警时间、续火警号 ,并打印出火警号和火警时间 ,火警灯闪亮 ,发出火警变调音。与此同时查区联动表和探测器联动表 ,得出所要联动的设备号 ,并通过联动总线发出联动命令。火警发生后 ,如果按有关菜单功能键可显示出首火警的发展曲线。如果发生大面积火灾 ,报警探测器的数量多于 48 个时 ,按 ↓ 键或 ↓ 键可上下滚动一行 ,按 PGUP 键或 PGDN 键可上下滚动一页显示出其余的火警探测器号。

2. 探测器故障报警。在警戒状态下 ,主机接收到探测器故障信息 ,系统显示出故障号并打印出故障号和故障发生时间 ,与此同时发出故障音和故障灯闪亮。如果发生大面积故障时 ,故障探测器数多于 56 个 ,在一个屏幕显示不下时 ,按 ↑ 键或 ↓ 键可上下滚动一行 ,按 PGUP 键可 PGDN 键可上下滚动一页 ,显示出其余的故

障探测器号。

3.分机故障报警。如果某个探测器接口板或区域报警控制器发生故障或连线发生故障,主机与分机通信失败,显示出故障分机号、打印出故障分机号和故障发生时间、发出故障音和故障灯闪亮。

4.消音功能键。当发生火灾或系统发生故障而发出火警音或故障音时按消除报警音。

5.对讲功能键。当发生火警时按此键可进入对讲状态,此时本机可与区域控制器或对讲分机进行全双工对讲。平时按此键不起作用。

6.自检功能键。在警戒状态下按此键,系统执行自检程序,并显示和打印出感烟火灾探测器的数量、感温火灾探测器的数量、手动报警器的数量和输入模块的数量。然后对液晶显示器、火警灯、预警灯、音响系统等进行检查。

7.主菜单命令(需输入密码后执行)。菜单键用来进入主菜单功能。按菜单键,按屏幕提示要求输入密码后,执行主菜单命令管理程序,在显示屏上显示出:

- | | |
|-----------|----------|
| 0.显示火警 | 1.显示预警 |
| 2.显示故障探测器 | 3.显示故障区域 |
| 4.显示火警曲线 | 5.进入状态菜单 |
| 6.进入打印菜单 | 7.显示过去记录 |

显示出的数字是要选择的命令代码,此时按数值键则进入相应的命令状态。

菜单命令的中文内容如下:“0”显示火警探测器号;“1”显示预警探测器号;“2”显示故障探测器号;“3”显示故障区域号;“4”显示探测器火警曲线;“5”进入状态菜单;“6”进入打印菜单;“7”显示过去记录。

在主菜单状态下,按“0”、“1”、“2”、或“3”键进入显示程序,屏幕分别显示出火警探测器号、预警探测器号、故障探测器号和故障区域号。如果显示内容超出56时,按↓键或↑键可上下滚动一行,按PGUP或PGDN键可上下滚动一页,显示出其余的探测器号。按“ESC”键退出显示程序。

在主菜单命令下,按“4”键执行火警曲线显示程序,如果有火警,读入火警曲线数据,并在显示屏上显示出来,按“ESC”键退出显示火警曲线程序。

在主菜单下,按“7”键可以看到过去的火警记录和联动启动记录。

8.在主菜单命令状态下,按“5”键进入状态菜单管理程序,显示屏显示出如下内容:

状 态 菜 单

- | | |
|-----------|-----------|
| 0.显示有效区域 | 1.显示有效探测器 |
| 2.修改探测器类型 | 3.区联动表 |
| 4.探测器联动表 | 5.修改时间 |

显示的数字是所要选择的命令代码,此时按数值键则进入相应命令状态。

菜单命令的中文内容如下:“0”显示有效区域号;“1”显示有效探测器号;“2”显示、修改探测器类型;“3”区联动表管理;“4”探测器联动表管理;“5”修改时间显示。

(1)在状态菜单中,按“0”键进入显示有效区域号程序显示所有有效区域号。

(2)按“1”键进入显示有效探测器号程序,同时能显示6个探测器号,其显示格式为:

VALID	DETECTORS	ZONE :AA
XXXX	YYYY	ZZZZ

其中 XXXX 是以区域号或总线号为高二位,以探测器号为低二位的四位探测器地址号;YYYY 是根据用户需要所指定的与房间号或其他所要显示的号码相一致的四位显示号 ZZZZ 是探测器所读入的反映环境因素的数据,AA 是区域号。

按 ↑ 键或 ↓ 键可上下滚动一行,按 PGUP 键或 PGDN 键可上下滚动一页,按 ZDNEUP 键使区域号加一,按 ZONEDN 键使区域号减一。在开机进行登记之后,应利用此功能对每个区域进行检查,判断所有探测器是否全部读入成功,而且探测器的输入值是否在允许范围之内。否则应检查探测器线路和读入失败的探测器。

(3)按 '2'键,进入显示修改探测器类型程序。该功能同时显示 7 个探测器号,其显示格式为:

DETN	DISPN	VALID	GRADE	TYPE
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T
XXXX	YYYY	Z	G	T

其中 XXXX 是以区域号或总线号为高二位,以探测器号为低二位的四位探测器地址号;YYYY 是用户需要所指定的房间号或与其他所要显示的号码相一致的四位显示号。

Z 是探测器的开关 Z 为 '1' 时探测器有效,Z 为 '0' 时探测器无效。修改它可手动切除有故障探测器或增加探测器。

G 是探测器的灵敏度等级:G 等于 '1' 时为 1 级灵敏度,G 等于 '2' 时为 2 级灵敏度,G 等于 '3' 时为 3 级灵敏度。初始化时,把灵敏度等级定在 2 级。若要修改探测器灵敏度等级时,把光标移到 'G' 位置敲入所需数值即可。

T 是探测器类型,T 的数值与探测器类型对应关系见表 35-1。

表 35-1 T 的数值与探测器类型对照表

T	探测器类型	2	感温火灾探测器
0	离子感烟火灾探测器	3	手动报警器
1	光电感烟火灾探测器	4	输入模块

初始化时,把探测器类型定为离子感烟火灾探测器,若要修改探测器类型时,把光标移到 'T' 位置输入所需数值即可。

按 ← 键光标左移,按 → 键光标右移,按 ↑ 键使光标上移,如果光标在显示屏第一行显示屏向下滚动一行,

按 ↓ 键使光标下移,如果光标在显示屏最后一行显示屏向上滚动一行,按 PGUP 使显示屏向上滚动一页,按 PGDN 使显示屏向下滚动一页,按 ZONEUP 键使区域号加 1,按 ZONEDN 键使区域号减 1。例如:

DETN	DISPN	VALID	GRADE	TYPE
4019	0119	1	2	0
4020	0120	1	1	2
4021	0121	1	2	3
4022	0201	1	2	0
4023	0202	0	2	0
4024	0203	1	2	2
4025	0204	1	2	3

上表中第一行表示探测器 4019 号被显示为 0119(即一楼十九号),该探测器有效,灵敏度等级为二级,是离子感烟探测器;第二行表示探测器 4020 号被显示为 0120(即一楼二十号),该探测器有效,灵敏度等级为一级,是感温火灾探测器;第三行表示探测器 4021 号被显示为 0121(即一楼二十一号),该探测器有效,是手动报警器;第四行表示探测器 4022 号被显示为 0201(即二楼一号),灵敏度等级为二级,是离子感烟火灾探测器,以此类推。

按“ESC”键可退出修改探测器类型程序。

(4)区联动表管理。状态菜单下,按“3”键,进入显示、修改区联动表程序。其显示格式为:

QU	LIAN	DONC	BLAOQUHAO	YY	INSERT	ON	XXXX	XXXX
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX

插入到光标所在位置,本来的字符后移一位。“INSERTOFF”是替换方式,所输入的字符替换光标所在位置的字符。光标操作同区联动表管理,只是按“DEL”键删除光标所在屏向下滚动一行,按 ↓ 键使光标下移,如果光标在显示屏最后一行显示屏向上滚动一行,按 PGUP 使显示屏向上滚动一页,按 PGDN 使显示屏向下滚动一页,按 ZONEUP 键使区域号加 1,按 ZONEDN 键使区域号减 1,按“DEL”键可删除光标所在位置的外控模块号。

按“ESC”键可退出区联动表管理程序。

⑤探测器联动表管理。状态菜单中,按“4”键,进入显示,修改探测器联动表程序。其显示格式为:

DET	TABLE		INSERT	ON	SS
* XX	YY&ZZ	AAAA,	BBBB		

探测器联动表里面的 XX、YY、ZZ 代表三个 SS 区域的探测器号,AAAA、BBBB 代表外控模块号,火警为逻辑“1”,警戒状态为逻辑“0”。这一逻辑关系式的意义是 SS 区域的 XX 探测器与 YY 探测器位置的字符。

按“ESC”键可退出探测器联动表管理程序。

⑥校时。状态菜单中,按“5”键进入校时程序。其显示格式为:

1999	08	21	10	21	00
------	----	----	----	----	----

校时,按当时的时间输入时间值即可,按“ESC”键退出校时程序。

三、操作程序表

为了使操作者方便地操作并便于记忆,从而熟练地操作,节省操作者查阅操作指南和说明书的时间,将操作方法浓缩在一张图中,见图 3-59。

第三节 火灾自动报警系统

现代火灾自动报警系统发展迅速,很多新型探测器和复合型探测器的不断涌现,使探测性能越来越完善,火灾确定准确度大为提高。

一、新型探测器的发展

1. 取样分析探测器 采用灵敏度吸气式感烟探测器,采用激光计数分析方法,统计空气中的烟雾颗粒,探测出初期火灾,灵敏度比传统型感烟探测器高出近 1000 倍。由于其测量室的设计特点加上其激光器件的可靠性,使其工作几乎不受光源老化以及由于测量室长期工作受污染后所产生的背景干扰信号的影响,有效地提高了探测的可靠性。

2. 摄像机监视探测器 以摄像机摄入的图像做的火警依据,通过计算机进行图像处理,将火灾与背景(如各种非火源的照明)区分开来,其系统具有灵敏度可调、抗干扰能力强的特点,并适用于大空间、大面积火灾监测,而且宜组网能兼做防盗报警。

3. 一氧化碳探测器 CO 报警器是根据空气中的一氧化碳含量变化早于烟雾和火焰的生成而制成的。它的影响速度快,能测出 $1 \sim 20 \times 10^{-6}$ 的变化,而且对水蒸气和粉尘不敏感。它采用了高分子固体电解质电化学式感应 CO 浓度,因而灵敏度可达 20×10^{-6} 次方,而且耗电少,时效稳定性好、寿命长,还带有氧化还原反应的监视装置,具有自我诊断寿命功能。

二、火灾自动报警系统趋向于智能化

传统的火灾自动报警系统与现代火灾自动报警系统之间的区别主要在于探测器本身的性能,由于量探测器改为模拟量传感器是一个质的飞跃。传感器把现场烟的浓度及上升速率或其他感受参数以模拟信号形式实时地传输给控制器,使系统确定火灾的数据处理能力和智能化程度大大提高,减少了误报率。

区别之二是信号处理方法作了彻底的改进,即把探测器中模拟信号不断地送到控制器中去判断,并采用适当的算法去辨别虚假或真实的火警,判断其火灾蔓延的程度和探测器使用中受污染的状况,这种高精度的信号处理技术,使系统具有了较高的“智能化。”

现代和传统的火灾报警系统主要性能比较,见表 35-2。

表 35-2 火灾报警系统主要性能比较

探 测 器	传动火灾自动报警系统	现代火灾自动报警系统
	开关量	模拟量
火灾探测报警阈值	不随外界环境变化调整	随外界环境变化调整
探测器灵敏度的变化	无零点补偿	“零点”自动补偿
火灾信号分析能力	火灾信号简单延迟分析	火灾信号各种分析算法
系统组诊断	无	有
误报率	20:1	至少降低一个数量级

另外,火灾报警系统按智能的分配方式可分为三种:

- 1.探测器的智能化 此系统探测部分为智能型,控制部分为开关量信号接收型。
- 2.控制器的智能化 此系统中探测器本身相当于传感器,它将探测的火灾信号参数以模拟信号输出至控制器,由控制器对这些信号进行处理,判断是否发生了火灾。
- 3.探测及控制组合智能化 此系统是根据智能作用的不同,由探测器和控制器分别进行各自的信号采集和处理,其可靠性更好,探测器传输信号为数字式,抗干扰性强。

第四节 电气引燃源与危险环境

一、电气引燃源

为了防止电气火灾和爆炸,首先应了解电气火灾和爆炸的原因。电气装置运行中产生的危险温度、电火花及电弧是电气火灾和爆炸的直接原因。

(一)危险温度

电气设备运行时总是要发热的。首先,导体总是有电阻的,使得电流通过导体要消耗一定的电能,其大小为

$$\Delta W = I^2 R t$$

式中 ΔW ——在导体上消耗的电能, W;

I ——流过导体的电流, A;

R ——导体的电阻, Ω ;

t ——通电时间, s。

这部分电能使导体发热,温度升高。显然,这部分热量与电流的平方成正比,与导体电阻的一次方成正比。其次,对于电动机、变压器等利用电磁感应进行工作的电气设备,由于使用了铁心,交变电流的交变磁场在铁心中产生磁滞损耗和涡流损耗,使铁心发热,温度升高。铁心磁通密度越高,电流频率越高,铁心钢片厚度越大,这部分热量越大。一般电气设备用铁钢片在磁通密度为 1T、频率为 50Hz 的条件下,单位质量的功率损耗多在 1~2W/kg 之间。此外,有机械运动的电气设备由于摩擦也会引起发热,电气设备的漏磁、谐波也会引起发热等都会使温度升高。

正确设计、正确施工、正确运行的电气设备,稳定运行时,发热与散热平衡,其最高温度和最高温升都不会超过某一允许范围。但当电气设备的正常运行遭到破坏时,发热量增加,温度升高,出现危险温度,在一定

条件下即可能引起火灾。引起电气设备过度发热的不正常运行大体有以下几种情况：

1. 短路

发生短路时,线路中电流增大为正常时的数倍乃至数十倍,使得温度急剧上升,大大超过允许范围。如果温度达到可燃物的引燃温度,即引起燃烧。

当电气设备的绝缘老化变质或受到高温、潮湿、或腐蚀的作用而失去绝缘能力,可能导致短路。绝缘导线直接缠绕、勾挂在铁钉或铁丝上时,由于磨损和铁锈腐蚀,很容易使绝缘破坏而短路。设备安装不当或工作疏忽,可能使电气设备的绝缘受到机械损伤而短路。由于雷击等过电压的作用,电气设备的绝缘可能遭到击穿而短路。所选用设备的额定电压太低,不能满足工作电压的要求,可能击穿而短路。由于维护不及时,导电性粉尘或纤维进入电气设备内部,也可能导致短路。由于管理不严,小动物、霉菌及其他植物也可能导致短路。在安装和检修中,由于接线和操作错误,也可能引起短路。此外,雷电放电电流极大,有类似短路电流但比其更为强烈的热效应,也可能引起火灾。

2. 过负载

过负载也会引起电气设备过热。造成过负载大体有如下三种情况：

一是设计、选用线路或设备不合理,或没有考虑足够的裕量,以致在正常负载下出现过热。

二是使用不合理,即线路或设备的负载超过额定值或连续使用时间过长,超过线路或设备的设计能力,由此造成过热。管理不严,乱拉乱接,容易造成线路或设备过负载运行。

三是设备故障运行会造成设备和线路过负载,如三相电动机一相运行或三相变压器不对称运行均可能造成过负载。

3. 接触不良

接触部位是电路的薄弱环节,是产生危险温度的主要部位之一。

不可拆卸的接头连接不牢、焊接不良或接头处夹有杂物,都会增加绝缘电阻而导致接头过热。可拆卸的接头连接不紧密或由于振动而松动,也会导致接头发热。可开闭的触头,如刀开关的触头、断路器的触头、接触器的触头、插销的触头等,如果没有足够的接触压力或表面粗糙不平等,均可能增大接触电阻,产生危险温度。对于铜、铝接头,由于铜和铝的理化性能不同,接触状态逐渐恶化,会导致接头过热。

4. 铁心过热

对于电动机、变压器、接触器等带有铁心的电气设备,如果铁心短路(片间绝缘破坏)或线圈电压过高,或通电后铁心不能吸合,由于涡流损耗和磁滞损耗增加,都将造成铁心过热并产生危险温度。

5. 散热不良

各种电气设备在设计和安装时都考虑有一定的散热或通风措施。如果这些措施遭到破坏,如散热油管堵塞、通风道堵塞、安装位置不当、环境温度过高或距离外界热源太近,均可能导致电气设备和线路过热。

6. 漏电

漏电电流一般不大,不能促使线路熔丝动作。如漏电电流沿线路比较均匀地分布,则发热量分散,火灾危险性不大,但当漏电电流集中在某一点时,可能引起比较严重的局部发热,引燃成灾。漏电电流常常流经金属螺丝或钉子,使其发热而引起木制构件起火。

7. 机械故障

对于带有电动机的设备,如果转动部分被卡死或轴承损坏,造成堵转或负载转矩过大,都会导致电动机过热。电磁铁卡死,衔铁吸合不上,线圈中的大电流持续不减小,也会造成过热。

8. 电压太高或太低

电压太高,除使铁心发热增加外,对于恒阻抗设备,还会使电流增大而发热。电压太低,除可能造成电动机堵转、电磁铁衔铁吸合不上,使线圈电流大大增加而发热外,对于恒功率设备,还会使电流增大而发热。

(二)电热器具和照明灯具引燃源

电热器具是将电能转换成热能的用电设备。常用的电热器具有小电炉、电烤箱、电熨斗、电烙铁、电褥子等。

电炉电阻丝的工作温度高达 800°C ,可燃与之接触的或附近的可燃物。电炉连续工作时间过长,将使温度过高(恒温炉除外),烧毁绝缘材料,引燃起火。电炉电源线容量不够,可导致发热起火。电炉丝使用时

间过长,截短后继续使用,将使发热增加,乃至引燃其他材料成灾。

电烤箱内物品烘烤时间太长、温度过高,可能引起火灾。使用红外线加热装置时,如误将红外光束照射到可燃物上,也可能引起燃烧。

电熨斗和电烙铁的工作温度高达 500~600℃,能直接引燃可燃物。电褥子通电时间过长,将使电褥子温度过高而引起火灾;电褥子铺在床上,经常受压、揉搓、折叠,致使电热元件受到损坏,如电热丝发生短路,将因过热而引起火灾;将电褥子折叠使用,破坏其散热条件,亦可导致起火燃烧。

灯泡和灯具工作温度较高,如安装、使用不当,均可能引起火灾。白炽灯泡表面温度随灯泡功率大小和生产厂家不同而差异很大,在一般散热条件下,其表面温度可参考表 35-3。200w 的灯泡紧贴纸张时,十几分钟即可将纸张点燃。高压水银灯灯泡表面温度与白炽灯相近,400W 的为 150~250℃;卤钨灯灯管表面温度较高,1000W 卤钨灯表面温度高达 500~800℃。

表 35-3 白炽灯泡表面温度

灯泡功率/W	40	75	100	150	200
表面温度/℃	55~60	140~200	170~220	150~230	160~300

当供电电压超过灯泡额定电压,或大功率灯泡的玻璃壳发热不均匀,或水溅到灯泡上时,都能引起灯泡爆碎。炽热的钨丝落到可燃物上,将引起可燃物燃烧。

灯座内接触不良,使接触电阻增大,温度上升过高,可引燃可燃物。日光灯镇流器运行时间过长或质量不高,将使发热增加,温度上升,如超过镇流器所用绝缘材料的引燃温度,亦可引燃成灾。

(三)电火花和电弧

电火花是电极间的击穿放电,电弧是大量电火花汇集而成的。

一般电火花的温度很高,特别是电弧,温度高达 8000℃。因此,电火花和电弧不仅能引起可燃物燃烧,还能使金属熔化、飞溅,构成危险的火源。在有爆炸危险的场所,电火花的电弧是一个十分危险的因素。

电火花大体包括工作火花和事故火花两类。工作火花指电气设备正常工作或正常操作过程中所产生的电火花,例如,刀开关、断路器、接触器、控制器接通和断开线路时会产生电火花;插销拔出或插入时的火花;直流电动机的电刷与换向器的滑动接触处、绕线式异步电动机的电刷与滑环的滑动接触处也会产生电火花(没有足够的压力、接触不严密或接触表面脏污时,会产生较大的火花)等。

切断感性电路时,断口处将产生比较强烈的电火花或电弧。其火花能量较大,危险性也较大。其火花能量可按下式估算:

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2$$

式中: L ——电路中的电感;

I ——电路中的电流。

当该火花能量超过周围爆炸性混合物的最小引燃能量时,即可能引起爆炸。

事故火花包括线路或设备发生故障时出现的火花。如导线过松、连接松动或绝缘损坏导致短路或接地时产生的火花;电路发生故障,熔丝熔断时产生的火花;沿绝缘表面发生的闪络等。

事故火花还包括由外部原因产生的火花,如雷电直接放电及二次放电火花、静电火花、电磁感应火花等。除上述外,电动机转子与定子发生摩擦(扫膛),或风扇与其他部件相碰也都会产生火花,这是由碰撞引起的机械性质的火花。

就电气设备着火而言,外界热源也可能引起火灾。如变压器周围堆积杂物、油污并由外界火源引燃,可能导致变压器喷油燃烧甚至爆炸事故。

电气设备本身,除多油断路器、电力变压器、电力电容器、充油套管、油浸纸绝缘电力电缆等设备可能爆破外,以下情况可能引起空间爆炸:

第一,周围空间有爆炸性混合物,在危险温度或电火花作用下引起空间爆炸;

第二,充油设备的绝缘油在高温电弧作用下气化和分解,喷出大量油雾和可燃气体,引起空间爆炸;
 第三,发电机的氢冷装置漏气或酸性蓄电池排出氢气等,形成爆炸性混合物,引起空间爆炸。

二、危险环境

为了正确选用电气设备、电气线路和各种防暴设施,必须正确划分所在环境危险区域的大小和级别。

(一)气体、蒸气爆炸危险环境

根据爆炸性气体混合物出现的频繁程度和持续时间,将此类危险环境分为0区、1区和2区。

1. 各级区域的特征

(1) 0区(0级危险区域)。它是指正常运行时连续出现或长时间出现或短时间频繁出现爆炸性气体、蒸气或薄雾的区域。除了封闭的空间,如密闭的容器、储油罐等内部气体空间外,很少存在0区。虽然爆炸性气体的浓度高于爆炸上限,但是可能进入空气而达到爆炸极限范围内的环境仍划为0区。例如,固定盖顶的液体储罐,当液面以上空间未充惰性气体时应划为0区。

(2) 1区(1级危险区域)。它是指正常运行时可能出现(预计周期性出现或偶然出现)爆炸性气体、蒸气或薄雾的区域。

(3) 2区(2级危险区域)。它是指正常运行时不出现,即使出现也只能是短时间偶然出现爆炸性气体、蒸气或薄雾的区域。

上述正常运行是指正常的开车、运转、停车,作为产品的危险性物料的取出,密闭容器的开闭,产品安全阀、排气阀等工作状态。正常运行时,所有设备运行参数均在其设计范围之内。

(4) 非爆炸危险区域。凡符合下列条件之一者可划为非爆炸危险区域:

- ① 没有释放源,且不可能有易燃物质侵入的区域。
- ② 易燃物质可能出现的最大体积分数不超过爆炸下限 10% 的区域。
- ③ 易燃物质可能出现的最大体积分数超过 10%,但其年出现小时不超过图 35-1 限定范围的区域。

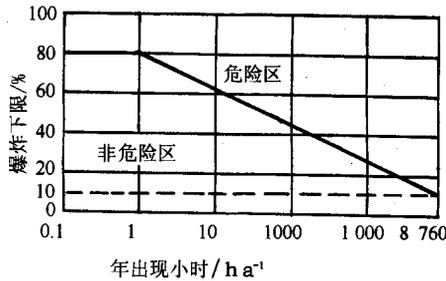


图 35-1 非爆炸危险区域的划分

④ 在生产过程中使用明火的设备附近,或使用表面温度超过该区域易燃物质引燃温度的炽热部件的设备附近。

⑤ 在生产装置外露天或敞开安装的输送爆炸危险物质的架空管道地带(但阀门处须按具体情况另行考虑)。

2. 释放源和通风条件的影响

释放源是划分爆炸危险区域的基础。释放源分为连续释放、长时间释放或短时间频繁释放的连续级释放源,正常运行时周期性释放或偶然释放的一级释放源,正常运行时不释放或不经常且只能短时间释放的二级释放源,以及包含上述两种以上特征的多级释放源。

通风情况是划分爆炸危险区域的重要因素。通风分为自然通风、一般机械通风和局部机械通风等三种类型。良好的通风标志是混合物中危险物质的浓度被稀释到爆炸下限的 1/4 以下。

划分危险区域时,应综合考虑释放源和通风条件,并应遵循以下原则:

(1)对于自然通风和一般机械通风的场所,连续级释放源一般可使周围形成0区,第一级释放源可使周围形成0区,第二级释放源可使周围形成1区(包括局部通风)。可降低爆炸危险区域的范围和等级,甚至可将环境降低为非爆炸危险区域。如没有通风,应提高区域危险等级,第一级释放源可能导致形成1区,第二级释放源可能导致形成2区。但是,良好的通风可使爆炸危险区域的范围缩小或可忽略不计,或可使其等级降低,甚至划分为非爆炸危险区域。因此,释放源应尽量采用露天、开敞式布置,达到良好的自然通风以减低危险性和节约投资。相反,若通风不良或通风方向不当,可使爆炸危险区域范围扩大,或使危险等级提高。即使在只有一个级别释放源的情况下,不同的通风方式也可能把释放源周围的范围变成不同等级的区域。

(2)局部通风在某些场合稀释爆炸性气体混合物比自然通风和一般机械通风更有效,因而可使爆炸危险区的区域范围缩小(有时可小到忽略不计)或使等级降低,甚至划分为非爆炸危险区域。

(3)释放源处于无通风的环境时,可能提高爆炸危险区域的等级,连续级或第一级释放源可能导致0区,第二级释放源可能导致1区。

(4)在障碍物、凹坑、死角等处,由于通风不良,局部地区的等级要提高,范围要扩大。另一方面,堤或墙等障碍物有时可能限制爆炸性混合物的扩散而缩小爆炸危险范围(应同时考虑到气体或蒸气的密度)。

3. 危险区域的范围

危险区域的范围大小受下列因素的影响:

(1)释放量。释放量大,其范围也增大。

(2)释放速度。当释放量恒定不变,释放速度增高到引起湍流的速度时,将其释放的易燃物质在空气中的浓度进一步稀释,其范围将缩小。

(3)混合物的浓度。易燃物质浓度增加,爆炸危险区域的范围可能扩大。

(4)爆炸下限。爆炸下限越低,爆炸危险区域的范围将越大。

(5)闪点。如果闪点高于易燃液体的最高温度,就不会形成爆炸性混合物。闪点越低,爆炸危险区域的范围将扩大。

(6)密度。气体或蒸气密度大,爆炸危险区域的水平范围将增大。

(7)液体温度。若温度在闪点以上,所加工液体的温度上升,爆炸危险区域的范围扩大。

(8)通风量。通风量增加,爆炸危险区域的范围将缩小。

(9)通风障碍。如有阻碍通风的障碍,则危险范围扩大;如阻碍爆炸性混合物扩散,则危险范围可能缩小。

在进行爆炸危险区域的等级和范围划分时,应参照同类企业相似厂房的实际情况综合考虑,即使是同一种类的生产过程,由于厂房通风以及其他因素不同,也可能导致不同的等级和范围。

在建筑物内部,一般以室(房间)为单位划分爆炸危险区域,但根据生产的具体情况,当室内空间很大而释放源的释放量又很小时,可以不以室为单位划分。

露天或半开敞的建筑物,应根据释放源的级别和通风情况划分。

考虑到爆炸性气体不同的密度和不同的通风条件,典型爆炸危险区域的划分如图35-2至图35-6所示。图中未注明的释放源均为第二级释放源。

与爆炸危险环境相邻的环境,由于爆炸性混合物可能侵入,有时也应划为一定级别的危险环境。

由于厂区位置或其他原因,不得不把配电室等安装和使用非防爆电气设备的房间布置在1区或2区时,如房间采用正压或连续稀释措施,则可降为非爆炸危险环境。

如相邻环境与爆炸危险环境相比有很大空间,其危险等级可根据具体情况划定。对于地下工程,相邻环境的危险等级应根据通风条件决定是否允许降低。

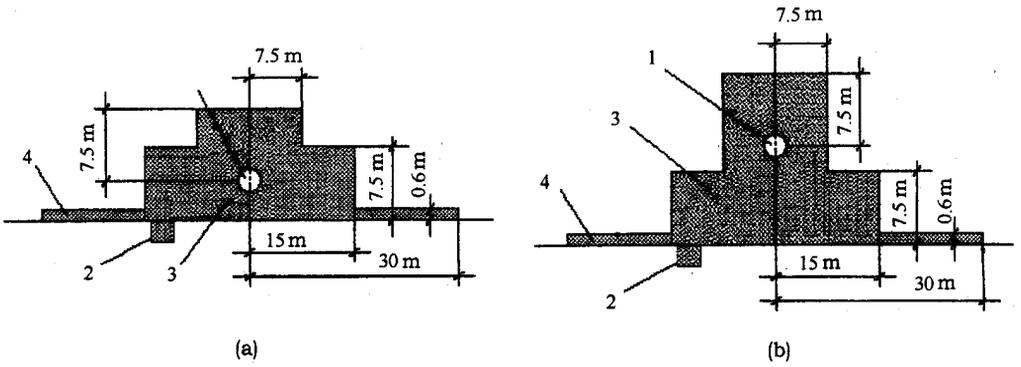


图 35-2 蒸气密度大于空气密度、通风良好的爆炸危险区域

(a) 释放源接近地面 (b) 释放源离开地面

1—第二级释放源 2—1区 3—2区 4—附加2区

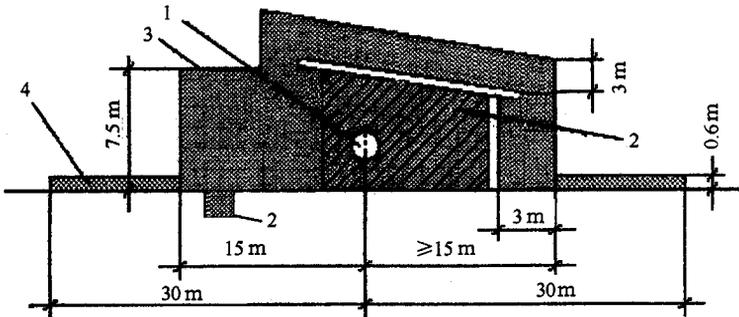


图 35-3 蒸气密度大于空气密度、通风不良的爆炸危险区域

1—第二级释放源 2—1区 3—2区 4—附加2区

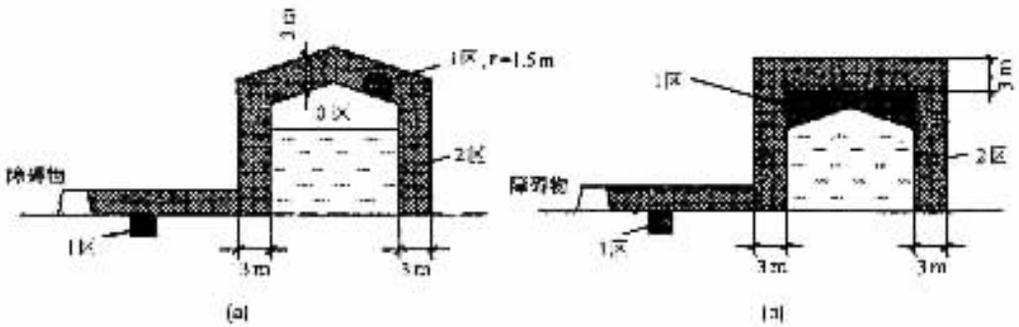


图 35-4 蒸气密度大于空气密度、户外贮罐的爆炸危险区域

(a) 固定式 (b) 浮顶式

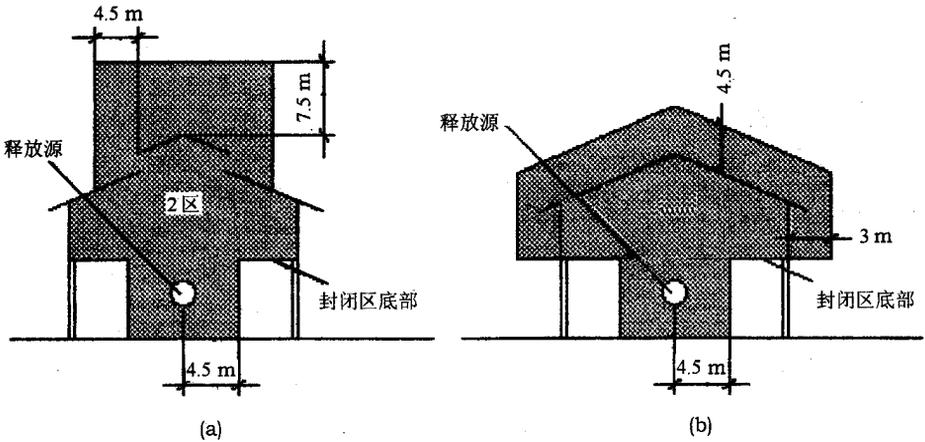


图 35-5 蒸气密度小于空气密度的压缩机的爆炸危险区域
(a)通风良好 (b)通风不良

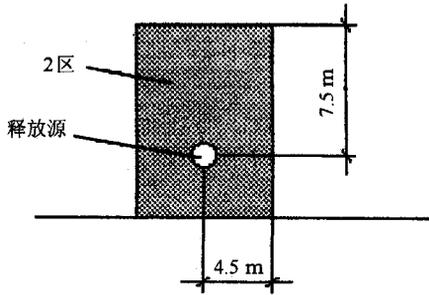


图 35-6 蒸气密度小于空气密度、
通风良好的爆炸危险区域

(二) 粉尘、纤维爆炸危险环境

粉尘、纤维爆炸危险区域是指生产设备周围环境中,悬浮粉尘、纤维量足以引起爆炸以及在电气设备表面会形成层积状粉尘、纤维而可能形成自然或爆炸的环境。在 GB4208—84 标准中,根据爆炸性气体混合物出现的频繁程度和持续时间,将此类危险环境划为 10 区和 11 区。

1. 10 区(10 级危险区域)。它是指正常运行时连续或长时间或短时间频繁出现爆炸性粉尘、纤维的区域。

2. 11 区(11 级危险区域)。它是指正常运行时不出现爆炸性粉尘、纤维,仅在不正常运行时短时间偶然出现爆炸性粉尘、纤维的区域。

划分粉尘、纤维爆炸危险环境的等级时,应考虑粉尘量的大小、爆炸极限的高低和通风条件。对于气流良好的开敞式或局部开敞式建筑物或露天装置区,在考虑爆炸极限等因素的具体情况后,可划分为低一级的危险区域。如装有足够除尘效果的除尘装置,且当该除尘装置停止运行时,爆炸性粉尘环境中的工艺机组能联锁停车,也可划分为低一级的危险区域。

为粉尘爆炸危险环境服务的排风机室,应与被排风环境的危险等级相同。

3. 以下两种情况可划为非爆炸危险区域:

(1) 为粉尘爆炸危险环境送风,且与粉尘爆炸危险环境有隔墙的送风机室,当其通向粉尘爆炸危险环境的风道设有能防止爆炸性粉尘侵入的安全装置,如单向流通风道或设有能阻火的安全装置;

(2) 环境中使用爆炸危险物质的量不大,且在排风柜内或风罩下进行操作的。

划分悬浮粉尘的危险区域时,应考虑在环境中悬浮粉尘形成的条件、颗粒度、粉尘浓度、处理方法、粉尘

从设备或管道中向外泄漏的情况、泄漏量的大小,以及考虑到粉尘使用量、作业空间大小,有无有效的换气装置、机械装置的故障及引起粉尘悬浮的可能性,机械装置的配置、隔离情况和操作条件等。

划分层积粉尘的危险区域时,应考虑自燃的可能性及每一单位时间内尘降堆积量的大小,机械装置的形状和配置,有无粉尘飞扬,通风是否良好,清扫次数和清扫难度等。应特别注意加热表面形成的层积粉尘,如果堆积层厚度大,在较低温度下也会自燃甚至爆炸。

划分邻近厂房的危险区域时,应根据粉尘或纤维扩散和沉积的具体情况划定其危险等级和范围。

对于非开敞危险环境,应以生产厂房为单位划分危险区域。划分方法如图 35-7 所示。图中,厂房为 10 区时用括号外数字,厂房为 11 区时用括号内数字。在厂房为 10 区的情况,通风良好时用斜线上方的数字,通风不良时用斜线下方的数字。

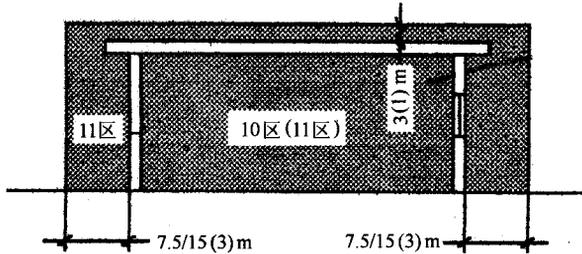


图 35-7 10 区、11 区爆炸危险区域划分

对于开敞和半开敞环境,厂房边界以内划为 10 区者,开敞面以外水平距离 $7.5m$ (通风不良时为 $15m$) 地面和屋面以上 $3m$ 的空间应划为 11 区;厂房边界以内划为 11 区者,开敞面以外水平距离 $3m$ 、地面以上 $3m$ 、屋面以上 $1m$ 的空间也应划为 11 区。

对于集中的露天装置,应以装置群体轮廓线外水平距离 $3m$ 、垂直距离 $3m$ 的空间作为分区界限或 11 区界限,如其内为 10 区,则其外水平距离 $15m$ 、垂直距离 $3m$ 的空间划为 11 区。

(三) 火灾危险环境

火灾危险环境分为 21 区、22 区和 23 区,与旧标准 H-1 级、H-2 级和 H-3 级火灾危险场所一一对应,分别为有可燃液体、有可燃粉尘或纤维、有可燃固体存在的火灾危险环境。

第五节 防爆电气设备与电气线路

爆炸危险环境使用的电气设备,结构上应能防止由于在使用中产生火花、电弧或危险温度成为安装地点爆炸性混合物的引燃源。

一、防爆电气设备

1. 防爆电气设备类型

按照使用环境,防爆电气设备分成两类:Ⅰ类为煤矿井下用电气设备;Ⅱ类为工厂用电气设备。按防爆结构型式,防爆电气设备分为以下类型:

(1) 隔爆型。这类设备是具有能承受内部的爆炸性混合物爆炸而不致受到损坏外壳,而且不致使内部爆炸通过外壳任何结合面或结构孔洞引起外部爆炸性混合物爆炸的电气设备。

隔爆型电气设备的外壳用钢板、铸钢、铝合金、灰铸铁等材料制成。

隔爆型电气设备可经隔爆型接线盒(或插销座)接线,亦可直接接线。连接处应有防止拉力损坏接线端

子的设施,应有密封措施,连接装置的结合面应有足够的长度。

隔爆型电气设备的紧固螺栓和螺母须有防松装置,不透螺孔须留有 1.5 倍防松垫圈厚度的余量;紧固螺栓不得穿透外壳,周围和底部余厚不得小于 3mm。螺纹啮合不得少于 6 扣,啮合长度的要求是:容积为 100cm^3 及其以下者不得小于 5mm,容积为 100cm^3 以上者不得小于 8mm。

正常运行时产生火花或电弧的电气设备须设有联锁装置,保证电源接通时不能打开壳、盖,而壳、盖打开时不能接通电源。

(2)增安型。这类设备是在正常时不产生火花、电弧或高温的设备上采取措施以提高安全程度的电气设备。

增安型设备的绝缘带电部件的外壳防护不得低于 IP44,裸露带电部件的外壳防护不得低于 IP54。引入电缆或导线的连接件应保证与电缆或导线连接牢固、接线方便,同时还须防止电缆或导线松动、自行脱落、扭转,并能保持足够的接触压力。在正常工作条件下,连接件的接触压力不得因温度升高而降低,连接件不得有可能损伤电缆或导线的棱角,正常紧固时不得产生永久变形和自行转动;不允许用绝缘材料部件传递接点压力。用于连接多股线的连接件须采取措施,防止导线松股,使用铜铝导线连接时,应采用铜铝过渡接头。

(3)充油型。这类设备是将可能产生电火花、电弧或危险温度的带电零、部件浸在绝缘油中,使之不能点燃油面上方爆炸性混合物的电气设备。

充油型设备外壳上应有排气孔,孔内不得有杂物;油量必须足够,最低油面以下油面深度不得小于 25mm,油面指示必须清晰,油质必须良好,油面温度 T1 ~ T4 组不得超过 100°C ,T5 组不得超过 80°C ,T6 组不得超过 70°C 。充油型设备应当水平安装,其倾斜度不得超过 5° ,运动中不得移动,机械连接不得松动。

直流开关设备不得制成充油型设备。

(4)充砂型。这类设备是将细粒物料充入设备外壳内,令壳内出现的电弧、火焰、壳壁温度或粒料表面温度不能点燃壳外爆炸性混合物的电气设备。

充砂型设备的外壳应有足够的机械强度,其防护不得低于 IP44。细粒填充材料应填满外壳所有空隙,颗粒直径为 0.25 ~ 1.6mm。填充时细粒材料含水量不得超过 0.1%。

(5)本质安全型。这类设备是正常状态下和故障状态下产生的火花或热效应均不能点燃爆炸性混合物的电气设备。

本质安全型设备按安全程度分为 ia 级和 ib 级。前者是在正常工作、发生一个故障及发生两个故障时不能点燃爆炸性混合物的电气设备,主要用于 0 区;后者是正常工作及发生一个故障时不能点燃爆炸性混合物的电气设备,主要用于 1 区。

本质安全型设备导线的许用电流可参考表 35-4 所列数据。除特殊情况外,该型设备及其关联设备外壳防护等级不得低于 IP20,煤矿井下采掘工作面的不得低于 IP54。其外部连接可以采用接线端子与接线盒或采用插接件,接线端子之间、接线端子与外壳之间均应有足够的距离,插接件应有防止拉脱的措施。

表 35-4 本质安全型设备导线的许用电流(T1 ~ T4)

导线截面/ mm^2	0.17	0.03	0.09	0.19	0.28	0.44
最大许用电流/A	1.0	1.65	3.3	5.0	6.5	8.3

本质安全型电路应有安全栅。安全栅是由限流元件(如金属膜电阻、非线性组件等)限压元件(如二极管、齐纳二极管等)和特殊保护元件(如快速熔断器等)组成的可靠性组件。电路中的半导体管均应双重化。

本质安全电路端子与非本质安全电路端子之间的距离不得小于 50mm。

本质安全电路的电源变压器的二次电路必须与一次电路之间保持良好的电气隔离。如一次绕组与二次绕组相邻,其间应隔以绝缘板或采取其他防止混触的措施。

(6)正压型。这类设备是向外壳内充入带正压的清洁空气、惰性气体或连续通入清洁空气,以阻止爆炸性混合物进入外壳内的电气设备。

正压型设备按充气结构分为通风、充气、气密等三种型式。保护气体可以是空气、氮气或其他非可燃

体。其外壳防护不得低于 IP44。

这类设备的外壳内不得有影响安全的通风死角。正常时,其出风口气压或充气气压不得低于 196Pa。当压力低于 98Pa 或压力最小处的压力低于 49Pa 时,自动装置必须发出报警信号或切断电源。

这种设备应有联锁装置,保证运行前先通风、充气。运行前通风、送气的总量最少不得小于设备气体容积的 5 倍。运行前通风时间可按下式计算

$$t = \frac{K(V + V_p)}{Q}$$

式中:K——容积倍数,一般 $K \geq 5$;

V——设备气体容积 m^3 ;

V_p ——管道气体容积 m^3 ;

Q——气体流量 m^3/s 。

这种设备在运行中,火花、电弧不得从缝隙或出风口吹出。

(7)无火花型。这类设备是在防止产生危险温度、外壳防护、防冲击、防机械火花、防电缆事故等方面采取措施,以防止火花、电弧或危险温度的产生来提高安全程度的电气设备。

(8)特殊型。这类设备是上述各种类型以外的或由上述两种以上型式组合成的电气设备。

2. 防爆电气设备的标志

隔爆型设备用字母 d 标志,增安型设备用字母 e 标志,本质安全型设备用字母 ia 和 ib 标志,正压型设备用字母 p 标志,充油型设备用字母 o 标志,充砂型设备用字母 q 标志,无火花型设备用字母 n 标志,特殊型设备用字母 s 标志。

防爆型电气设备外壳的明显处,须设制清晰的永久性凸纹标志。设备外壳的明显处须设置铭牌,并可靠固定,铭牌的右上方应有明显的“EX”标志。

完整的防爆标志依次标明防爆型式、类别、级别和组别。例如:d II BT3 表示 II 类 B 级 T3 组的隔爆型电气设备,ia II AT5 表示 II 类 A 级 T5 组的 ia 级本质安全型电气设备。如有一种以上复合防爆型式,应先标出主体防爆型式,然后标出其他防爆型式,如 ep II BT4,表示主体为增安型,并有正压型部件的防爆型电气设备。对于只允许用于某一种可燃性气体或蒸气环境的电气设备,可直接用该气体、蒸气的分子式或名称标志,而不必注明级别和组别,如 d II (NH_3) 或 d II 氨,表示用于氨气环境的隔爆型电气设备。对于 II 类电气设备,可以标温度组别,也可以标最高表面温度,亦可二者都标出。例如,最高表面温度 125℃ 的工厂,用增安型电气设备可标志为 e II BT4,或 e II B(125℃),或 e II B(125℃)T4。

3. 爆炸危险环境中电气设备的选用

(1)一般原则。选择电气设备前,应掌握所在爆炸危险环境的有关资料,包括环境等级和区域范围划分,以及所在环境内爆炸性混合物的级别、组别等有关资料。

应根据电气设备使用环境的等级、电气设备的种类和使用条件选择电气设备。

所选用的防爆电气设备的级别和组别不应低于该环境内爆炸性混合物的级别和组别。当存在两种以上的爆炸性物质时,应按混合后的爆炸性混合物的级别和组别选用。如无据可查又不可能进行试验时,可按危险程度较高的级别和组别选用。

爆炸危险环境内的电气设备必须是符合现行国家标准并有国家检验部门防爆合格证的产品。

爆炸危险环境内的电气设备应能防止周围化学、机械、热和生物因素的危害,应与环境温度、空气湿度、海拔高度、日光辐射、风沙、地震等环境条件下的要求相适应。其结构应满足电气设备在规定的运行条件下不会降低防爆性能的要求。

矿井用防爆电气设备的最高表面温度,无煤粉沉积时不得超过 450℃,有煤粉沉积时不得超过 150℃。工厂气体、蒸气爆炸危险环境用防爆电气设备的最高表面温度不得超过表 35-5 的规定。工厂粉尘、纤维爆炸危险环境用防爆电气设备的最高表面温度不得超过表 35-6 的规定。粉尘、纤维爆炸危险环境一般电气设备的最高表面温度不得超过 125℃,若沉积厚度 5mm 以下时低于引燃温度 75℃,或不超引燃温度的 2/3。

表 35-5 气体、蒸气爆炸危险环境电气设备最高表面温度

组别	T1	T2	T3	T4	T5	T6
最高表面温度/℃	450	300	200	135	100	85

表 35-6 粉尘、纤维爆炸危险环境电气设备最高表面温度

组别	电气设备表面或零部件温度极限值			
	无过负载可能的设备		有过负载可能的设备 ^②	
	极限温度	极限温升 ^①	极限温度	极限温升
T11	215	175	190	150
T12	160	120	140	100
T13	110	70	100	60

注 ①极限温升是指环境温度 40℃时的温升。

②有过负载可能的设备是指电动机和电力变压器。

在爆炸危险环境,应尽量少用携带式设备和移动式设备,应尽量少安装插座。

为了节省费用,应设法减小防爆电气设备的使用量。首先,应当考虑把危险的设备安装在危险环境之外,如果不得不安装在危险环境内,也应当安装在危险较小的位置。

采用非防爆型设备隔墙机械传动时,隔墙必须是非燃烧材料的实体墙,穿轴孔洞应当封堵,安装电气设备的房间的出口只能通向非爆炸危险环境,否则,必须保持正压。

(2)气体、蒸气爆炸危险环境的电气设备选型:

①旋转电机。低压旋转电机防爆结构选型见表 35-7。表 35-7 至表 35-12 中符号意义如下:○表示适用;△表示尽量避免采用;×表示不适用。

表 35-7 旋转电机防爆结构选型

电气设备类别	爆炸危险环境区别						
	1 区			2 区			
	隔爆型	正压型	增安型	隔爆型	正压型	增安型	无火花型
笼型感应电动机	○	○	△	○	○	○	○
绕线型感应电动机	△	△		○	○	○	×
直流电动机	△	△	-	○	○	○	
电磁滑差离合器(无电刷)	○	△	×	○	○	○	△

注 1 绕线型感应电动机及同步电动机采用增安型时,其主体是增安型防爆结构,发生电火花的部分应是隔爆型或正压型防爆结构。

2 无火花电动机选型只适用于具有比空气轻的介质的场所内。对于具有比空气重的介质通风不良的场所或户内,应慎重考虑。

②变压器。低压变压器、互感器、电抗器防爆结构选型见表 35-8。

表 35-8 变压器防爆结构选型

电气设备类别	爆炸危险环境区别						
	1 区			2 区			
	隔爆型	正压型	增安型	隔爆型	正压型	增安型	充油型
变压器(包括启动用)	△	△	×	○	○	○	○
电感线圈(包括启动用)	△	△	×	○	○	○	○
仪用互感器	△		×	○		○	○

③ 低压控制电器。低压开关和控制器类设备防爆结构选型见表 35-9。

表 35-9 低压开关和控制器类设备防爆结构选型

电气设备类别	爆炸危险环境区别										
	0 区		1 区				2 区				
	本质安全型	本质安全型	隔爆型	正压型	充油型	增安型	本质安全型	隔爆型	正压型	充油型	增安型
开关、断路器			○					○			
熔断器			△					○			
控制开关及按钮	○	○	○		○		○	○		○	
电抗器启动器和启动补偿器			△				○				○
启动用金属电阻器			△	△		×		○	○		○
电磁阀用电磁铁			○		×		○		○		
操作箱、柜		○	○			○	○				
配电盘			△				○				

注 1 电抗器启动器和启动补偿器采用增安型时,是指将隔爆结构的启动运转开关操作部件与增安型防爆结构的电抗线圈或单绕组变压器组成一体的结构。

2 电磁摩擦制动器采用隔爆型时,是指将制动片、滚筒等机械部分也装入隔爆壳体内的结构。

3 在 2 区内电气设备采用隔爆型时,是指除隔爆型外,也包括主要有火花部分为隔爆结构而其外壳为增安型的混合结构。

4 0 区安装的控制开关及按钮仅允许用 ia 级电气设备。

④ 照明灯具。照明灯具类设备防爆结构选型见表 35-10。

表 35-10 照明灯具类设备防爆结构选型

电气设备类别	爆炸危险环境区别			
	1 区		2 区	
	隔爆型	增安型	隔爆型	增安型
固定式灯	○	×	○	○
移动式灯	△		○	
携带式电池灯	○		○	
指示灯类	○	×	○	○
镇流器	○	△	○	○

⑤信号及其他设备。信号及其他电气设备防爆结构选型见表 35-11。

表 35-11 信号及其他电气设备防爆结构选型

电气设备类别	爆炸危险环境区别								
	0 区	1 区				2 区			
	本质安全型	本质安全型	隔爆型	正压型	增安型	本质安全型	隔爆型	正压型	增安型
信号、报警装置	○	○	○	○	×	○	○	○	○
插接装置			○				○		
电气测量表计			○	○	×		○	○	○

注 0 区信号、报警装置仅允许用 ia 级电气设备。

(3) 粉尘、纤维爆炸危险环境电气设备的选型。粉尘、纤维爆炸危险环境电气设备的选型见表 35-12。

表 35-12 10 区、11 区电气设备防爆结构选型

电气设备类别		爆炸危险环境区别						
		10 区			11 区			
		尘密型	正压型	充油型	尘密型	正压型	IP65	IP54
变压器		○	○		○			
配电装置		○	○					
电动机	笼型	○	○					○
	带电刷					○		
电器和仪表	固安安装	○	○	○			○	
	移动式	○	○				○	
	携带式	○					○	
照明灯具		○			○			

(4)火灾危险环境电气设备选型。火灾危险环境电气设备的选型见表 35-13。

表 35-13 火灾危险环境电气设备防护结构选型

电气设备类别		火灾危险环境级别		
		21 区(H-1 级)	22 区(H-2 级)	23 区(H-3 级)
电机	固定安装	IP44	IP54	IP21
	移动式和携带式	IP54		IP54
电器和仪表	固定安装	充油型、IP54、IP44	IP65	IP22
	移动式和携带式			IP44
照明灯具	固定安装	保护型	防尘型	开启型
	移动式和携带式	防尘型		保护型
配电装置		防尘型		保护型
接线盒				

注 1 在 21 区内安装的 IP44 型电机正常运行时有火花的部分(如滑环)应装在全封闭的罩子内。在 21 区内固定安装的电器和仪表,在正常运行有火花时,不宜采用 IP44。

2 在 23 区内固定安装的正常运行时有火花的电机(如滑环电机)不应采用 IP21 型,而应采用 IP44。

3 移动式和携带式照明灯具的玻璃罩应有金属网保护。

4 表中防护等级的标志见国家标准 GB4208—84《外壳防护等级的分类》。

在选用电动机等电气设备时,还应当注意到,在潮湿环境应选用有耐湿绝缘的防滴式电动机,水土飞扬环境应选用防溅式电动机,多尘环境应选用封闭式电动机,有腐蚀性气体或蒸气的环境应选用有耐蚀绝缘的封闭式电动机。

二、防爆电气线路

在爆炸危险环境中,电气线路安装位置、敷设方式、导体材质、连接方法等的选择均应根据环境的危险等级进行。

1. 气体、蒸气爆炸危险环境的电气线路

(1)电气线路位置的选择。在爆炸危险性较小或距离释放源较远的位置,应当考虑敷设电气线路。例如,当爆炸危险气体或蒸气比空气重时,电气线路应在高处敷设,电缆则直接埋地敷设或电缆沟充砂敷设;当爆炸危险气体或蒸气比空气轻时,电气线路宜敷设在低处,电缆则采取电缆沟敷设。

电气线路宜沿有爆炸危险的建筑物的外墙敷设。当电气线路沿输送易燃气体或易燃液体的管道栈桥敷设时,应尽量沿危险程度较低的管道一侧敷设。当易燃气体或蒸气比空气重时,电气线路应在管道上方;当易燃气体或蒸气比空气轻时,电气线路应在管道下方。

电气线路应避免可能受到机械损伤、振动、污染、腐蚀及受热的地方,否则,应采取防护措施。

10kV 及其以下的架空线路不得跨越爆炸危险环境;当架空线路与爆炸危险环境邻近时,其间距离不得小于杆塔高度的 1.5 倍。

(2)线路敷设方式的选择。爆炸危险环境中,电气线路主要有防爆钢管配线和电缆配线,其敷设方式及适用范围见表 5-14。爆炸危险环境不得明敷绝缘导体。

表 35-14 气体、蒸气爆炸危险环境的配线方式

配线种类	配线方式	爆炸危险环境区别	
		1 区	2 区
防爆钢管配线	明设	○ ^①	○
	暗设	△	△
电缆	直接埋设	△	○
	电缆沟(充砂)	△	○
	电缆隧道	△	△
	电缆桥架 ^①	○	○

注 ①○——适用 △——尽量避免。

②应注意环境防火。

固定敷设的电力电缆应采用铠装电缆。固定敷设的照明、通讯、信号和控制电缆可采用铠装电缆和塑料护套电缆。非固定敷设的电缆应采用非燃性橡胶护套电缆。煤矿井下高压电缆宜采用铠装、不滴流式电缆。

不同用途的电缆应分开敷设。钢管配线应使用专用镀锌钢管或使用处理过内壁毛刺且做过内、外壁防腐处理的水管或煤气管。

两段钢管之间、钢管与钢管附件之间、钢管与电气设备之间应用螺纹连接,螺纹啮合不少于 6 扣,并应采取防松和防腐蚀措施。

钢管与电气设备直接连接有困难处,以及管路通过建筑物的伸缩缝、沉降缝处应装挠性连接管。

(3) 隔离密封。敷设电气线路的沟道以及保护管、电缆或钢管在穿过爆炸危险环境等级不同的区域之间的隔墙或楼板时,应用非燃性材料严密堵塞。

隔离密封盒的位置应尽量靠近隔墙,墙与隔离密封盒之间不允许有管接头、接线盒或其他任何连接件。

隔离密封盒的防爆等级应与爆炸危险环境的等级相适应。隔离密封盒不应作为导线的连接或分线用。在可能引起凝结水的地方,应选用排水型隔离密封盒。钢管配线的隔离密封盒应采用粉剂密封填料。

电缆配线的保护管管口与电缆之间,应使用密封胶泥进行密封。在两级区域交界处的电缆沟内应采取充砂、填阻火材料或加设防火隔墙。

(4) 导线材料选择。由于铝导体的机械强度差,易于折断,需要过渡连接而加大接线盒,且连接技术难以保证,铝芯导线和铝芯电缆的安全性能较差,如有条件,爆炸危险环境应优先采用铜线。

爆炸危险环境危险等级 2 区的范围内,当配电线路的导线连接以及电缆的封端采用压接、熔焊或钎焊时,电力线路也采用截面积 4mm^2 及以上的铝芯导线或电缆,照明线路可采用截面积 2.5mm^2 及其以上的铝芯导线或电缆。

爆炸危险环境危险等级 1 区的范围内,配电线路应选用铜芯导线或电缆。

在有剧烈振动处应选用多股铜芯软线或多股铜芯电缆。煤矿井下不得采用铝芯电力电缆。

爆炸危险环境内的配线,一般采用交联聚乙烯、聚乙烯、聚氯乙烯或合成橡胶绝缘的、有护套的电线或电缆。爆炸危险环境宜采用有耐热、阻燃、耐腐蚀绝缘的电线或电缆,不宜采用油浸纸绝缘电缆。

在爆炸危险环境,低压电力、照明线路所用电线和电缆的额定电压不得低于工作电压,并不得低于 500V。工作零线应与相线有同样的绝缘能力,并应在同一护套内。

选用电气线路时,还应当注意到:干燥无尘的场所可采用一般绝缘导线,潮湿、特别潮湿或多尘的场所应采用有保护的绝缘导线(如铅皮导线)或一般绝缘导线穿管敷设;高温场所应采用有瓷管、石棉、瓷珠等耐热绝缘的耐热线;有腐蚀性气体或蒸气的场所可采用铅皮线或耐腐蚀的穿管线。

(5) 允许载流量。为避免可能的危险温度,爆炸危险环境的允许载流量不应高于非爆炸危险环境的允许载流量。1 区、2 区绝缘导线截面和电缆截面的选择,导体允许载流量不应小于熔断器熔体额定电流和断路

器长延时过电流脱扣器整定电流的 1.25 倍。引向低压笼型感应电动机支线的允许载流量不应小于电动机额定电流的 1.25 倍。

线路电压 1000V 以上的导线和电缆应按短路电流进行热稳定校验。电缆的最小截面应符合下式要求：

$$S_{\min} \geq \frac{I_{\infty} \sqrt{t_i}}{C}$$

式中： S_{\min} ——铁心最小截面积， mm^2 ；

I_{∞} ——短路电流稳定值，A；

C ——与材料有关的系数，铜芯电缆取 162，铜导体取 175，铝导体取 92；

t_i ——通过短路电流的假想时间，s。

(6) 电气线路的连接。1 区和 2 区的电气线路不允许有中间接头，但若电气线路的连接是在与该危险环境相适应的防护类型的接线盒或接头盒附近的内部，则不属于此种情况。1 区宜采用隔爆型接线盒，2 区可采用增安型接线盒。

2 区的电气线路若选用铝芯电缆或导线与铜线连接时，必须有可靠的用铜铝过渡接头。导线的连接或封端应采用压接、熔焊或钎焊，而不允许使用简单的机械绑扎或螺旋缠绕的连接方式。

电气线路与电气设备引入装置之间的连接方式按表 35-15 选定。

表 35-15 电气线路与电气设备的连接方式

引入型式		钢管配 线工程	引入型式			移动式 电缆 ^②
引入装置	密封方式		橡胶、塑料护套电缆	铅包电缆	铠装电缆	
压盘式、压紧螺母式	密封圈式	○	○	○	○	○
压盘式	浇封式 ^①		○	○	○	

注 ① 浇封式引入装置为有放置电缆头空腔的装置。

② 移动式电缆须采用有喇叭口的引入装置。

③ 除移动式电缆和铠装电缆外，引入口均须用带的螺纹的保护钢管与引入装置的螺母相连接。

气体、蒸气爆炸危险环境配线技术要求见表 35-16 和表 35-17。

表 35-16 气体爆炸危险环境电缆配线技术要求

类别	电缆明设或在沟内敷设时的最小截面			接线盒	移动式 电缆
	电力电缆	照明电缆	控制电缆		
1 区	铠装，铜芯 2.5 mm^2 及其以上	铠装，铜芯 2.5 mm^2 及其以上	铠装，铜芯 2.5 mm^2 及其以上	隔爆型	重型
2 区	铠装，铜芯 1.5 mm^2 及其以上，铠装，铝芯 4 mm^2 及其以上	非铠装，铜芯 1.5 mm^2 及其以上，铝芯 2.5 mm^2 及其以上	非铠装，铜芯 1.5 mm^2 及其以上	隔爆型、增安型、防尘型	中型

注 1 2 区的明设塑料护套电缆，当其敷设方式采用能防止机械操作的电缆槽板、托盘或槽盒方式时，可采用非铠装电缆。

2 可燃气体或蒸气比空气轻且不会受鼠、虫等损害时，在 2 区电缆沟内敷设的电缆可采用非铠装电缆。

3 铝芯绝缘导线或电缆的连接与封端应采用压接、熔焊或钎焊；当与电气设备（照明灯具除外）连接时，应采用适当的过渡接头。

4 电缆线路不应有中间接头。

表 35-17 气体爆炸危险场所钢管配线技术要求

类别	钢管明配线路用绝缘导线的最小截面积			接线盒和分支盒	管子连接要求
	电力电缆	照明电缆	控制电缆		
1 区	铜芯 2.5mm ² 及其以上	铜芯 2.5mm ² 及其以上	铜芯 2.5mm ² 及其以上	隔爆型	Dg25mm 以下的钢管, 螺纹啮合不少于 5 扣, 并有锁紧螺母; Dg32mm 及以上者不少于 6 扣
2 区	铜芯 1.5mm ² 及其以上或铝芯 4mm ² 及其以上	铜芯 1.5mm ² 及其以上或铝芯 2.5mm ² 及其以上	铜芯 1.5mm ² 及其以上	隔爆型、增安型、防尘型	Dg25mm 以下的螺纹啮合不少于 5 扣, 对 Dg32mm 及以下者不少于 6 扣

- 注 1 钢管应采用 GB3901-82 规定的低压流体输送用镀锌焊接钢管。
 2 为了防腐蚀, 钢管连接的螺纹部分应涂以铅油或磷化膏。
 3 在可能凝结冷凝水的场所, 管线上应装设排除冷凝水的密封接头。
 4 防尘型盒类宜用于 2 区中危险性较小处。

2. 粉尘、纤维爆炸危险环境的电气线路

粉尘、纤维爆炸危险环境电气线路的技术要求与相应等级的气体、蒸气爆炸危险环境电气线路的技术要求基本一致, 即 10 区、11 区的电气线路可分别按 1 区、2 区考虑。粉尘、纤维爆炸危险环境电气线路的敷设方式及适用范围见表 35-18。

表 35-18 粉尘、纤维爆炸危险环境电气线路选型

配线方式	区域危险等级	
	10 区	11 区
本质安全型电气设备的配线工程	○	○
低压镀锌钢管配线工程	×	○
电缆工程	低压电缆	×
	高压电缆	×

粉尘、纤维爆炸危险环境配线技术要求见表 35-19 和表 35-20。

表 35-19 粉尘爆炸危险环境电缆配线技术要求

类别	电缆最小截面积	接线盒	移动电缆
10 区	铠装,铜芯 2.5mm ² 及其以上	隔爆型	重型
11 区	铠装,铜芯 1.5mm ² 及其以上,铠装,铝芯 2.5mm ² 及其以上	隔爆型,也可用防尘型	中 型

注 1 在 11 区内电缆明设时可采用非铠装电缆,敷设方式应能防止机械损伤。

2 在封闭电缆沟内,可采用非铠装电缆。

3 铝芯绝缘导线或电缆的连接与封端应采用压接。

表 35-20 粉尘爆炸危险环境钢管配线技术要求

类别	绝缘导线的最小截面积	接线盒、分支盒	管子连接要求
10 区	铜芯 2.5mm ² 及其以上	隔爆型	螺纹啮合不少于 6 扣
11 区	铜芯 1.5mm ² 及其以上 铝芯 2.5mm ² 及其以上	任意一种防爆类型,也可采用防尘型	螺纹啮合不少于 6 扣

注 1 钢管应采用 GB3901-82 的规定,低压流体输送用镀锌焊接钢管。

2 为了防腐蚀,钢管连接的螺纹部分应涂以铅油或磷化膏。

3 在可能凝结冷凝水的场所,管线上应装设排除冷凝水的密封接头。

3. 火灾危险环境的电气线路

火灾危险环境的电气线路应避免可燃物。10kV 及其以下的架空线路不得跨越爆炸危险环境,邻近时其间距不得小于杆塔高度的 1.5 倍。

火灾危险环境电气线路选型见表 35-21。

表 35-21 火灾危险环境的电气线路

序号	配线方式	21 区(H-1 级)	22 区(H-2 级)	23 区(H-3 级)
1	非铠装电缆	○	○	○
2	明设钢管配线	○	○	○
3	非燃性护套绝缘导线	○	○	○
4	明设硬塑料管配线	○	○	○
5	瓷绝缘子明设绝缘导线(远离可燃物)	○	○	○
6	起重机滑触线(下方无可燃物)	×	×	○

当绝缘导线采用针式或鼓形绝缘子敷设时,应注意远离可燃物质,不在未抹灰的木质吊顶和木质墙壁等处敷设,不在木质闷顶内以及可燃液体管线栈桥上敷设。

在火灾危险环境,移动式和携带式电气设备应采用移动式电缆。

在火灾危险环境内,须采用裸铝、裸铜母线时,应符合下列要求:

- (1) 不需拆卸检修的母线连接处,应采用熔焊或钎焊。
- (2) 螺栓连接(例如母线与电气设备的连接)应可靠,并应防止自动松脱。
- (3) 在 21 区(H-1 级)和 23 区(H-3 级),母线宜装设金属网保护罩,其孔眼直径应能防止直径大于

12mm 的固体异物进入壳内,在 22 区(H-2 级)应有防护外罩。

(4)在露天安装时,应有防雨、雪措施。

火灾危险环境可采用铝导线,当采用铝芯绝缘导线时,应有可靠的连接和封端。火灾危险环境电力、照明线路和电缆的额定电压不应低于网络的额定电压,且不低于 500V。

第六节 危险物质与电气防火防爆措施

一、危险物质

在大气条件下,气体、蒸气、薄雾、粉尘或纤维状的易燃物质与空气混合,点燃后燃烧能在整个范围内传播的混合物称为爆炸性混合物。能形成上述爆炸性混合物的物质称为爆炸危险物质。凡有爆炸性混合物出现或可能有爆炸性混合物出现,且出现的量足以要求对电气设备和电气线路的结构、安装、运行采取防爆措施的环境称为爆炸危险环境。

爆炸危险物质分为以下三类:

I 类 矿井甲烷;

II 类 爆炸性气体、蒸气、薄雾;

III 类 爆炸性粉尘、纤维。

(一)危险物质分级分组

闪点、燃点、引燃温度、爆炸极限、最小点燃电流比、最大试验安全间隙、蒸气密度是危险物质的主要性能参数。危险物质是按其性能参数分级分组的。

1. 闪点

在规定的试验条件下,易燃液体能释放出足够的蒸气并在液面上方与空气形成爆炸性混合物,点火时能发生闪燃(一闪即灭)的最低温度。易燃液体的闪点见表 35-22。

2. 燃点

燃点是物质在空气中点火时发生燃烧,移去火源仍能继续燃烧的最低温度。

对于闪点不超过 45℃ 的易燃液体,燃点仅比闪点高 1~5℃,一般只考虑闪点,不考虑燃点。对于闪点比较高的可燃液体和可燃固体,闪点与燃点相差较大,应用时有必要加以考虑。

3. 引燃温度

引燃温度又称自燃点或自燃温度,是指在规定的试验条件下,可燃物质不需要外来火源即发生燃烧的最低温度。一些气体、蒸气的引燃温度见表 35-22;一些粉尘、纤维的引燃温度见表 35-23;一些固体的引燃温度见表 35-24。

表 35-22 爆炸性气体、蒸气的性能参数

物质名称	引燃温度 组别	引燃温度 /℃	闪点/℃	容积爆炸极限		蒸气密度 (空气为 1)
				下限/%	上限/%	
I 级						
甲烷	T1	537	气体	5.0	15.0	0.55
II A 级						
硝基甲烷	T2	415	36	7.1	63	2.11

物质名称	引燃温度 组别	引燃温度 /℃	闪 点/℃	容积爆炸极限		蒸气密度 (空气为 1)
				下限/%	上限/%	
氯代甲烷(甲基氯)	T1	625	气体	7.1	18.5	1.78
乙烷	T1	515	气体	3.0	15.5	1.04
溴乙烷	T1	511	< -20.0	6.7	11.3	3.76
1,4-二氧杂环乙烷	T4	180	12.2	2.0	22.0	3.03
1,2-二氯乙烷	T2	412	13.3	6.2	16.0	3.40
丙烷	T1	466	气体	2.1	9.5	1.56
3-氯-1,2-环氧丙烷	T2	385	28.0	2.3	34.4	3.28
丁烷	T2	365	气体	1.5	8.5	2.05
氯丁烷	T3	245	-12.0	1.8	10.1	3.20
戊烷	T3	285	< -40.0	1.4	7.8	2.49
己烷	T3	233	-21.7	1.2	7.5	2.79
庚烷	T3	215	-4.0	1.1	6.7	3.46
辛烷	T3	210	12.0	0.8	6.5	3.94
壬烷	T3	205	31	0.7	5.6	4.43
癸烷	T3	205	46.0	0.7	5.4	4.90
氯乙烯	T2	413	气体	3.8	29.3	2.16
苯乙烯	T1	490	32.0	1.1	8.0	3.59
甲醇	T1	455	11.0	5.5	36.0	1.10
乙醇	T2	422	11.1	3.5	19.0	1.59
丙醇	T2	405	15	2.1	13.5	2.07
丁醇	T2	340	29	1.4	10.0	2.55
戊醇	T3	300	32.7	1.2	10.5	3.04
二甲醚	T3	240	气体	3.0	27.0	1.59
乙醚	T4	170	-45.0	1.7	48.0	2.55
二丁醚	T4	175	25.0	1.5	7.6	4.48
甲乙酮	T1	505	-6.1	1.8	11.5	2.48
丙酮	T1	537	-19.0	2.5	13.0	2.00
乙醛	T4	140	-37.8	4.0	57.0	1.52
丁醛	T3	203	-6.7	1.4	12.5	2.48
甲酸甲酯	T2	450	< -20	5.0	20.0	2.07
乙酸乙酯	T2	400	-4.4	1.1	11.5	3.04

物质名称	引燃温度 组别	引燃温度 /℃	闪 点/℃	容积爆炸极限		蒸气密度 (空气为 1)
				下限/%	上限/%	
乙酸	T1	485	40.0	4.0	17.0	2.07
乙酸酐	T2	315	49.0	2.0	10.2	3.52
乙腈	T1	524	5.6	4.4	16.0	1.42
丙烯腈	T1	481	0	2.8	28.0	1.83
甲胺	T2	430	气体	5.0	20.7	1.07
苯	T1	555	11.1	1.2	8.0	2.70
噻吩	T2	395	- 1.1	1.5	12.5	2.90
呋喃	T2	390	0	2.3	14.3	2.30
甲苯	T1	535	4.4	1.2	7.0	3.18
二甲苯	T1	465	30	1.0	7.6	3.66
乙苯	T2	430	15	1.0	7.8	3.66
萘	T1	540	80	0.9	5.9	4.42
氨	T1	630	气体	15.0	28.0	0.59
一氧化碳	T1	605	气体	12.5	74.0	0.97
氰化氢	T1	538	- 17.8	5.6	41.0	0.93
硫化氢	T3	260	气体	4.3	45.0	1.19
汽油	T3	280	- 42.8	1.4	7.6	3.40

II B 级

环丙烷	T1	465	气体	2.4	10.4	1.45
环氧乙烷	T2	425	气体	3.0	100.0	1.52
乙烯	T2	425	气体	2.7	34.0	0.97
1,3-丁二烯	T2	415	气体	1.1	12.5	1.87
乙醚	T4	170	- 45.0	1.7	48.0	2.55
乙基甲基醚	T4	190	气体	2.0	10.1	2.07
丙烯醛	T3	-	< - 20	2.8	31.0	1.94
城市煤气	T1	-	气体	5.3	32.0	-

II C 级

乙炔	T2	305	气体	1.5	82.0	0.90
氢	T1	560	气体	4.0	75.0	0.07
二硫化碳	T5	102	- 30	1.0	60.0	2.64
水煤气	T1		气体	7.0	72.0	—

表 35-23 易燃易爆粉尘、纤维的性能参数

粉尘种类	物质名称	引燃温度组别	高温表面沉积 5mm 粉尘的引 燃温度/℃	云状粉 尘的引 燃温度 /℃	爆炸极 限/ gm^{-3}	粉尘平均 粒径/ μm	危险性 种类
火药	一号硝化棉	T13	154	—	—	100 目	爆
	黑火药	T12	230	—	—	100 目	爆
炸药	梯恩梯	T12	220	—	—	—	爆
	奥克托金	T12	220	—	—	—	爆
	黑索金	T13	159	—	—	—	爆
	特屈儿	T13	168	—	—	—	爆
	泰安	T13	157	—	—	—	爆
矿物	铝(表面处理)	T11	320	590	37~50	10~15	爆
	铝(含油)	T12	230	400	37~50	10~20	爆
	铁粉	T12	242	430	153~240	100~150	易导
	镁	T11	340	470	44~59	5~10	爆
	红磷	T11	305	360	48~64	30~50	易燃
	炭黑	T12	535	>690	36~45	10~20	易导
	锌	T11	430	530	212~284	10~15	易导
	电石	T11	325	555	—	<200	易燃
	锆石	T11	305	360	92~123	5~10	易导
化学药品	萘	T11	熔融升华	505	29~39	40~50	易燃
	苯二(甲)酸	T11	熔融	650	60~83	80~100	易燃
	硫磺	T11	熔融	235	—	30~50	易燃
	结晶紫	T11	熔融	475	46~70	15~30	易燃
	阿斯匹林	T11	熔融	405	31~41	60	易燃

粉尘种类	物质名称	引燃温度组别	高温表面沉积 5mm 粉尘的引 燃温度/℃	云状粉 尘的引 燃温度 /℃	爆炸极 限/ gm^{-3}	粉尘平均 粒径/ μm	危险性 种类
合成树脂	聚乙烯	T11	熔融	410	26 ~ 35	30 ~ 50	易燃
	聚苯乙烯	T11	熔融	475	27 ~ 37	40 ~ 60	易燃
	聚乙烯醇	T11	熔融	450	42 ~ 55	5 ~ 10	易燃
	聚丙烯酯	T11	熔融炭化	505	35 ~ 55	5 ~ 7	易燃
	聚氨酯(类)	T11	熔融	425	46 ~ 63	50 ~ 100	易燃
	聚乙烯四钛	T11	熔融	480	52 ~ 71	< 200	易燃
	聚乙烯氮戊环酮	T11	熔融	465	42 ~ 58	10 ~ 15	易燃
	聚氯乙烯	T11	熔融炭化	595	63 ~ 86	4 ~ 5	易燃
	酚醛树脂(酚醛清漆)	T11	熔融炭化	520	36 ~ 49	10 ~ 20	易燃
橡胶天然树脂	聚丙烯腈	T11	炭化	505	—	5 ~ 7	—
	有机玻璃粉	T11	熔融炭化	435	—	—	易燃
	骨胶(虫胶)	T11	沸腾	475	—	20 ~ 50	易燃
	硬质橡胶	T11	沸腾	360	36 ~ 40	20 ~ 30	易燃
	天然树脂	T11	熔融	370	38 ~ 52	20 ~ 30	易燃
	松香	T11	熔融	325	—	50 ~ 80	易燃
沥青蜡类	硬蜡	T1	熔融	400	26 ~ 36	30 ~ 50	易燃
	绕沥青	T11	熔融	620	—	50 ~ 80	易燃
	硬沥青	T11	熔融	620	—	50 ~ 150	易燃
	软沥青(EP54)	T11	熔融	620	—	50 ~ 80	易燃
农产品	小麦谷物粉	T11	290	420	—	15 ~ 30	易燃
	筛米粉	T11	270	410	—	50 ~ 100	易燃
	马铃薯淀粉	T11	炭化	430	—	20 ~ 30	易燃
	黑麦谷物粉	T11	305	430	—	50 ~ 100	易燃
	砂糖粉	T11	熔融	360	77 ~ 99	20 ~ 40	易燃
纤维粉	啤酒麦芽粉	T11	285	405	—	100 ~ 150	易燃
	亚麻粕粉	T11	285	470	—	—	易燃
	菜种渣粉	T11	炭化	465	—	400 ~ 600	易燃
	烟草纤维	T11	290	485	—	50 ~ 100	易燃
	软木粉	T11	325	460	44 ~ 59	30 ~ 40	易燃

粉尘种类	物质名称	引燃温度组别	高温表面沉积 5mm 粉尘的引 燃温度/℃	云状粉 尘的引 燃温度 /℃	爆炸极 限/ gm^{-3}	粉尘平均 粒径/ μm	危险性 种类
燃料粉	有烟煤粉	T11	235	595	41 ~ 57	5 ~ 10	导
	贫煤粉	T11	285	680	34 ~ 45	5 ~ 7	导
	无烟煤粉	T11	> 430	> 600	—	100 ~ 150	导
	木炭粉(硬质)	T11	340	595	39 ~ 52	1 ~ 2	易导
	泥煤焦炭粉	T11	360	615	40 ~ 54	1 ~ 2	易导
	石墨	T11	不着火	> 750	—	15 ~ 25	导
	炭黑	T11	535	> 690	—	10 ~ 20	导

表 35-24 固体的引燃温度

物质名称	引燃温度/℃	物质名称	引燃温度/℃
黄(白)磷	60	硫	260
纸张	130	木炭	350
棉花	150	萘	515
布匹	200	葱	470
焦炭	700	赤磷	200
煤	400	三硫化四磷	100
赛璐珞	140	松香	240
木材	250	沥青	280

爆炸性气体、蒸气、薄雾按引燃温度分为 6 组,其相应的引燃温度范围见表 35-27,爆炸性粉尘、纤维按引燃温度分为 3 组。其相应的引燃温度范围见表 35-28。

4. 爆炸极限

爆炸极限分为爆炸浓度极限和爆炸温度极限,后者很少用到,通常所指的都是爆炸浓度极限。该极限是指在一定的温度和压力下,气体、蒸气、薄雾或粉尘、纤维与空气形成的能够被引燃并传播火焰的浓度范围。该范围的最低浓度称为爆炸下限、最高浓度称为爆炸上限。气体、蒸气、粉尘、纤维的爆炸极限见表 35-22 和表 35-23。

环境温度越高,燃烧越快,爆炸极限范围越大。例如,乙醇 0℃ 时的爆炸极限是 2.55% ~ 11.8%,50℃ 时是 2.5% ~ 12.5%,而 100℃ 时是 2.25% ~ 12.53%。

随着压力升高,绝大多数气体混合物的爆炸下限略有下降,爆炸上限明显上升。例如,甲烷与空气的混合物,当压力分别为 0.098MPa、0.98MPa、4.9MPa 和 12.25MPa 时,爆炸极限分别为 5.6% ~ 14.3%、5.9% ~ 17.2%、5.4% ~ 29.4% 和 5.1% ~ 45.7%。当压力减小至一定程度时,爆炸极限范围缩小至某一点,也有极少数相反的情况。例如,干燥的一氧化碳与空气混合物的爆炸极限随着压力的升高反而缩小。

氧含量升高,爆炸下限变化不大,爆炸上限明显升高,使得爆炸极限范围扩大。例如,乙烯在空气中的爆炸极限是 3.1% ~ 32%,在纯氧中的爆炸极限则是 3.0% ~ 80%。丙烷在空气中的爆炸极限是 2.2% ~ 9.5%,

在纯氧中的爆炸极限则是 2.3% ~ 55%。

混合气体中惰性气体含量增加,爆炸极限范围缩小。例如,汽油蒸气与空气的混合气体的爆炸极限为 1.4% ~ 7.6%。当含有 10% 的二氧化碳时,爆炸极限范围缩小为 1.4% ~ 5.6%;当含有 20% 的二氧化碳时,爆炸极限范围缩小为 1.8% ~ 2.4%;当含有 28% 以上的二氧化碳时,该混合气体不再发生爆炸。

当容器细窄时,由于容器壁的冷却作用,爆炸极限范围变小。当容器直径减小至一定程度时,火焰不能蔓延,可消除爆炸危险,这个直径叫做临界直径。如甲烷的临界直径为 0.4 ~ 0.5mm,氢和乙炔的临界直径为 0.1 ~ 0.2mm。

引燃源温度越高,加热面积越大或作用时间越长,都使得爆炸极限范围越大。例如,对于甲烷,100V,1A 的电火花不会引起爆炸,2A 的电火花可引起爆炸,爆炸极限为 5.9% ~ 13.6%;3A 电火花的爆炸极限扩大为 5.85% ~ 14.8%。

5. 最小点燃电流比

最小点燃电流比 (MICR) 是指在规定试验条件下,气体、蒸气、薄雾等爆炸性混合物的最小点燃电流与甲烷爆炸性混合物的最小点燃电流之比。气体、蒸气、薄雾按最小点燃电流比的分级见表 35-27。

6. 最小引燃能量

除最小点燃电流外,还经常用到最小引燃能量。最小引燃能量是指规定的试验条件下,能使爆炸性混合物燃爆所需最小电火花的能量。如果引燃源的能量低于这个临界值,一般不会着火。

一些可燃气体、蒸气与空气的爆炸性混合物的最小引燃能量见表 35-26,一些粉尘与空气的爆炸性混合物的最小引燃能量见表 35-26。

表 35-25 可燃气体、蒸气与空气的爆炸性混合物的最小引燃能量

名称	化学式	体积分数/%	最小引燃能量/mJ
乙炔	$\text{HC} \equiv \text{CH}$	7.73	0.02
乙烯	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	6.52	0.096
丙烯	$\text{CH}_3\text{CH} = \text{CH}_2$	4.44	0.282
二异丁烯	$(\text{CH}_3)_2\text{CCH}_2(\text{CH}_3) = \text{CH}_2$	1.71	0.96
甲烷	CH_4	9.50	0.33
丙烷	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$	4.02	0.31
戊烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	2.55	0.49
乙腈	CH_3CN	7.02	6.00
乙胺	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$	5.28	2.40
乙醚	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	3.37	0.49
乙醛	CH_3CHO	7.72	0.376
丙烯醛	$\text{CH}_2 = \text{CHCHO}$	5.64	0.13
甲醇	CH_3OH	12.24	0.215
丙酮	CH_3COCH_3	4.97	1.15
乙酸乙酯	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{C}_2\text{H}_5$	4.02	1.42
乙烯基醋酸	$\text{CH}_2 = \text{CHCH}_2\text{COOH}$	4.44	0.70
苯	C_6H_6	2.71	0.55

名称	化学式	体积分数/%	最小引燃能量/mJ
甲苯	$C_6H_5CH_3$	2.27	2.50
二硫化碳	CS_2	6.52	0.015
氨	NH_3	21.8	680
氢	H_2	29.6	0.02
硫化氢	H_2S	12.2	0.077

表 35-26 粉尘与空气爆炸性混合物的最小引燃能量

名称	层积状	悬浮状	名称	层积状	悬浮状
铝	1.6	10	聚乙烯	-	30
铁	7	20	聚苯乙烯	-	15
镁	0.24	20	酚醛树脂	40	10
钛	0.008	10	醋酸纤维	-	11
锆	0.0004	5	沥青	4~6	20~25
锰铁合金	8	80	大米	-	40
硅	2.4	80	小麦	-	50
硫	1.6	15	大豆	40	50
硬脂酸铝	40	10	砂糖	-	30
阿司匹林	160	25	硬木	-	20

最小引燃能量受混合物性质、引燃源特征、压力、浓度、温度等因素的影响。纯氧中的最小引燃能量小于空气中的引燃能量。压力减小最小引燃能量明显增大。例如,当压力分别为 0.98MPa、0.78MPa、0.59MPa 和 0.39MPa 时,乙炔分解爆炸的最小引燃能量分别为 3mJ、6mJ、12mJ 和 32mJ。在某一浓度下,最小引燃能量取得最小值,离开这一浓度,最小引燃能量都将变大。

7. 最大试验安全间隙

最大试验安全间隙(MESG),是衡量爆炸性物品传爆能力的性能参数,是指在规定的试验条件下,两个经间隙长为 25mm 连通的容器,一个容器内燃爆时不致引起另一个容器内燃爆的最大连通间隙。气体、蒸气、薄雾爆炸性混合物按最大试验安全间隙的分级见表 35-27。

(二) 危险物质分组和分级举例

气体、蒸气危险物质分组、分级举例见表 35-27。

表 35 - 27 爆炸性气体的分类、分级和分组

类和级	最大试验安全间隙	最小点燃电流比	引燃温度(℃)及组别						
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	
			T > 450	300 < T ≤ 450	200 < T ≤ 300	135 < T ≤ 200	100 < T ≤ 135	85 < T ≤ 100	
I	1.14	1.0	甲烷						
II A	0.9 ~ 1.14	0.8 ~ 1.0	乙烷、丙烷、丙酮、氯苯、苯乙炔、氯乙炔、甲苯、苯胺、甲醇、一氧化碳、乙酸乙酯、乙酸、丙烯酸腈	丁烷、乙醇、丙烯、丁醇、乙酸丁酯、乙酸戊酯、乙酸酐	戊烷、庚烷、癸烷、辛烷、汽油、硫化氢、环己烷	乙醚、乙醛			亚硝酸乙酯
II B	0.5 ~ 0.9	0.45 ~ 0.8	二甲醚、民用煤气、环丙烷	环氧乙烷、环氧丙烷、丁二烯、乙炔	异戊二烯	—	—	—	—
II C	≤ 0.5	≤ 0.45	水煤气、氢、焦炉煤气	乙炔	—	—	—	二硫化碳	硝酸乙酯

注：最大试验安全间隙与最小点燃电流比在分级上的关系只是近似相等。

粉尘、纤维按其导电性和爆炸性分为 III A 级和 III B 级。其分组、分级举例见表 35 - 28。

表 35-28 爆炸性粉尘的分级、分组

级别和种类		引燃温度(℃)及组别		
		T11	T12	T13
		T > 270	200 < T ≤ 270	140 < T ≤ 200
Ⅲ A	非导电性可燃纤维	木棉纤维、烟草纤维、纸纤维、亚硫酸盐纤维、人造毛短纤维、亚麻	木质纤维	—
	非导电性爆炸性粉尘	小麦、玉米、砂糖、橡胶、染料、苯酚树脂、聚乙烯	可可、米糖	—
Ⅲ B	导电性爆炸性粉尘	镁、铝、铝青铜、锌、钛、焦炭、炭黑	钨(含钨)、铁、煤	—
	火炸药粉尘	—	黑火药、TNT	硝化棉、吸收药、黑索金、特屈儿、泰安

注：在确定粉尘、纤维的引燃温度时，应在悬浮状态和沉积状态的引燃温度中选用较低的数值。

二、电气防火防爆措施

电气防火、防爆措施是综合性的措施。其他防火、防爆措施对于防止电气火灾和爆炸也是有效故。

(一) 消除或减少爆炸性混合物

消除或减少爆炸性混合物属一般性防火防爆措施。例如：采取封闭式作业，防止爆炸性混合物泄漏；清理现场积尘，防止爆炸性混合物积累；设计正压室，防止爆炸性混合物侵入；采取开式作业或通风措施，稀释爆炸性混合物；在危险空间充填惰性气体或不活泼气体，防止形成爆炸性混合物；安装报警装置，当混合物中危险物品的浓度达到其爆炸下限的 10% 时报警，等等。

在爆炸危险环境，如有良好的通风装置，能降低爆炸性混合物的浓度，从而降低环境的危险等级。

蓄电池可能有氢气排出，应有良好的通风。变压器室一般采用自然通风，若采用机械通风时，其送风系统不应与爆炸危险环境的送风系统相连，且供给的空气不应含有爆炸性混合物或其他有害物质。几间变压器室共用一套送风系统时，每个送风支管上应装防火阀，其排风系统应独立装设。排风口不应设在窗口的正下方。

通风系统应用非燃烧性材料制作，结构应坚固，连接应紧密。通风系统内不应有阻碍气流的死角。电气设备应与通风系统连锁，运行前必须先通风，通过的气流量不小于该系统容积的 5 倍时才能接通电气设备之电源，进入电气设备和通风系统内的气体不应含有爆炸危险物质或其他有害物质。在运行中，通风系统内的正压不应低于 266.64Pa，当低于 133.32Pa 时，就自动断开电气设备的主电源或发出信号。通风系统排出的废气，一般不应排入爆炸危险环境。对于闭路通风的防爆通风型电气设备及其通风系统，应供给清洁气体以补充漏损，保持系统内的正压。电气设备外壳及其通风、充气系统内的门或盖子上，应有警告标志或连锁装置，防止运行中错误打开。爆炸危险环境内的事故排风用电动机的控制设备应设在事故情况下便于操作的地方。

(二) 隔离和间距

隔离是将电气设备分室安装，并在隔墙上采取封堵措施，以防止爆炸性混合物进入。电动机隔墙传动

时,应在轴与轴孔之间采取适当的密封措施,将工作时产生火花的开关设备装于危险环境范围以外(如墙外),采用室外灯具通过玻璃窗给室内照明等都属于隔离措施。将普通拉线开关浸泡在绝缘油内运行,并使油面有一定高度,保持油的清洁,将普通日光灯装入高强度玻璃管内,并用橡皮塞严密堵塞两端等都属于简单的隔离措施。后者只用作临时性或爆炸危险性不大的环境的安全措施。

户内电压为 10kV 以上、总油量为 60kg 以下的充油设备,可安装在两侧有隔板的间隔内;总油量为 60~600kg 者,应安装在有防爆隔墙的间隔内;总油量为 600kg 以上者,应安装在单独的防爆间隔内。

10kV 及其以下的变、配电室不得设在爆炸危险环境的正上方或正下方,变电室与各级爆炸危险环境毗连,以及配电室与 1 区或 10 区爆炸危险环境毗连时,最多只能有两面相连的墙与危险环境共用。配电室与 2 区或 11 区爆炸危险环境毗连时,最多只能有三面相连的墙与危险环境共用。10kV 及其以下的变、配电室也不宜设在火灾危险环境的正上方或正下方,也可以与火灾危险环境隔墙毗连。配电室允许通过走廊或套间与火灾危险环境相通,但走廊或套间应由非燃性材料制成,而且除 23 区(H-3 级)火灾危险环境外,门应有自动关闭装置。1000V 以下的配电室可以通过难燃材料制成的门与 2 区爆炸危险环境和火灾危险环境相通。

变、配电室与爆炸危险环境或火灾危险环境毗连时,隔墙应用非燃性材料制成。与 1 区和 10 区环境共用的隔墙上,不应有任何管子、沟道穿过;与 2 区或 11 区环境共用的隔墙上,只允许穿过与变、配电室有关的管子和沟道,孔洞、沟道应用非燃性材料严密堵塞。

毗连变、配电室的门及窗应向外开,并通向无爆炸或火灾危险的环境。

变、配电站是工业企业的动力枢纽,电气设备较多,而且有些设备工作时产生火花和较高温度,其防火、防爆要求比较严格。室外变、配电站与建筑物、堆场、储罐应保持规定的防火间距,且变压器油量越大,建筑物耐火等级越低及危险物品储量越大者,所要求的间距也越大,必要时可加防火墙。还应当注意,露天变、配电装置不应设置在易于沉积可燃粉尘或可燃纤维的地方。

为了防止电火花或危险温度引起火灾,开关、插销、熔断器、电热器具、照明器具、电焊设备和电动机等应根据需要,适当避开易燃物或易燃建筑构件。起重机滑触线的下方不应堆放易燃物品。

10kV 及其以下架空线路,严禁跨越火灾和爆炸危险环境;当线路与火灾和爆炸危险环境接近时,其间水平距离一般不应小于杆柱高度的 1.5 倍;在特殊情况下,采取有效措施后允许适当减小距离。

(三)消除引燃源

为了防止出现电气引燃源,应根据爆炸危险环境的特征和危险物的级别和组别选用电气设备和电气线路,并保持电气设备和电气线路安全运行。安全运行包括电流、电压、温升和温度等参数不超过允许范围,还包括绝缘良好、连接和接触良好、整体完好无损、清洁、标志清晰等。

保持设备清洁有利于防火。设备脏污或灰尘堆积既降低设备的绝缘又妨碍通风和冷却,特别是正常时有火花产生的电气设备,很可能由于污垢过多而引起火灾。因此,从防火角度,也要求定期或经常地清扫电气设备,以保持清洁。

在爆炸危险环境,应尽量少用携带式电气设备,少装插销座和局部照明灯。为了避免产生火花,在爆炸危险环境更换灯泡应停电操作。基于同样理由,在爆炸危险环境内一般不应进行测量操作。

(四)爆炸危险环境接地和接零

爆炸危险环境的接地、接零比一般环境要求高。

1. 接地、接零实施范围

除生产上有特殊要求的以外,一般环境不要求接地(或接零)的部分仍应接地(或接零)。例如,在不良导电地面处,交流 380V 及其以下、直流 440V 及其以下的电气设备正常时不带电的金属外壳,交流 127V 及其以下、直流 110V 及其以下的电气设备正常时不带电的金属外壳,还有安装在已接地金属结构上的电气设备,以及敷设有金属包皮且两端已接地的电缆用的金属构架均应接地(或接零)。

2. 整体性连接

在爆炸危险环境,必须将所有设备的金属部分、金属管道、以及建筑物的金属结构全部接地(或接零)并连接成连续整体,以保持电流途径不中断。接地(或接零)干线宜在爆炸危险环境的不同方向且不少于两处

与接地体相连,连接要牢固,以提高可靠性。

3. 保护导线

单相设备的工作零线应与保护零线分开,相线和工作零线均应装有短路保护元件,并装设双极开关同时操作相线和工作零线。1区和10区的所有电气设备和2区除照明灯具以外,其他电气设备应使用专门接地(或接零)线,而金属管线、电缆的金属包皮等只能作为辅助接地(或接零)。除输送爆炸危险物质的管道以外,2区的照明器具和20区的所有电气设备,允许利用连接可靠的金属管线或金属桁架作为接地(或接零)线。保护导线的最小截面,铜导体不得小于 4mm^2 ,钢导体不得小于 6mm^2 。

4. 保护方式

在不接地配电网中,必须装设一相接地时或严重漏电时能自动切断电源的保护装置或能发出声、光双重信号的报警装置。在变压器中性点直接接地的配电网中,为了提高可靠性,缩短短路故障持续时间,系统单相短路电流应当大一些。其最小单相短路电流不得小于该段线路熔断器额定电流的5倍或低压断路器瞬时(或短延时)动作电流脱扣器整定电流的1.5倍。

(五) 消防供电

为了保证消防设备不间断供电,应考虑建筑物的性质、火灾危险性、疏散和火灾扑救难度等因素。

高度超过24m的医院、百货楼、展览楼、财政金融楼、电信楼、省级邮政楼和高度超过50m的可燃物品厂房、库房,以及超过4000个座位的体育馆,超过2500个座位的会堂等大型公共建筑,其消防设备(如消防控制室、消防水泵、消防电梯、消防排烟设备、火灾报警装置、火灾事故照明、疏散指示标志和电动防火门、卷帘、阀门等)均应采用一级负荷供电。

户外消防用水量大于 $0.03\text{m}^3/\text{s}$ 的工厂、仓库或户外消防用水量大于 $0.035\text{m}^3/\text{s}$ 的易燃材料堆物、油罐或油罐区、可燃气体储罐或储罐区,以及室外消防用水量大于 $0.025\text{m}^3/\text{s}$ 的公共建筑物,应采用6kV以上专线供电,并应有两回线路。超过1500个座位的影剧院,户外消防用水量大于 $0.03\text{m}^3/\text{s}$ 的工厂、仓库等,宜采用由终端变电所两台不同变压器供电,且应有两回线路,最末一级配电箱处应自动切换。

对某些电厂、仓库、民用建筑、储罐和堆物,如仅有消防水泵,而采用双电源或双回路供电确有困难,可采用内燃机作为带动消防水泵的动力。

鉴于消防水泵、消防电梯、火灾事故照明、防烟、排烟等消防用电设备在火灾时必须确保运行,而平时使用的工作电源发生火灾时必须停电,从保障安全和方便使用出发,消防用电设备配电线路应设置单独的供电回路,即要求消防用电设备配电线路与其他动力、照明线路(从低压配电室至最末一级配电箱)分开单独设置,以保证消防设备用电。为避免在紧急情况下操作失误,消防配电设备应有明显标志。

为了便于安全疏散和火灾扑救,在有众多人员聚集的大厅及疏散出口处、高层建筑的疏散走道和出口处、建筑物内封闭楼梯间、防烟楼梯间及其前室,以及消防控制室、消防水泵房等处应设置事故照明。

(六) 电气灭火

火灾发生后,电气设备和电气线路可能是带电的,如不注意,可能引起触电事故。根据现场条件,可以断电的应断电灭火,无法断电的则带电灭火。电力变压器、多油断路器等电气设备充有大量的油,着火后可能发生喷油甚至爆炸事故,造成火焰蔓延,扩大火灾范围,这是必须加以注意的。

1. 触电危险和断电

电气设备或电气线路发生火灾,如果没有及时切断电源,扑救人员身体或所持器械可能接触带电部分而造成触电事故。使用导电的火灾剂,如水枪射出的直流水柱、泡沫灭火器射出的泡沫等射至带电部分,也可能造成触电事故。火灾发生后,电气设备可能因绝缘损坏而碰壳短路,电气线路可能因电线断落而接地短路,使正常时不带电的金属构架、地面等部位带电,也可能导致接触电压或跨步电压触电危险。

因此,发现起火后,首先要设法切断电源。切断电源应注意以下几点:

- (1) 火灾发生后,由于受潮和烟熏,开关设备绝缘能力降低,因此,拉闸时最好用绝缘工具操作。
- (2) 高压应先操作断路器而不应该先操作隔离开关切断电源,低压应先操作电磁启动器而不应该先操作刀开关切断电源,以免引起弧光短路。
- (3) 切断电源的地点要选择适当,防止切断电源后影响灭火工作。

(4) 剪断电线时,不同相的电线应在不同的部位剪断,以免造成短路。剪断空中的电线时,剪断位置应选择

2. 带电灭火安全要求

有时,为了争取灭火时间,防止火灾扩大,来不及断电,或因灭火、生产等需要,不能断电,则需要带电灭火。带电灭火须注意以下几点:

(1) 应按现场特点选择适当的灭火器。二氧化碳灭火器、干粉灭火器的灭火剂都是不导电的,可用于带电灭火。泡沫灭火器的灭火剂(水溶液)有一定的导电性,而且对电气设备的绝缘有影响,不宜用于带电灭火。

(2) 用水枪灭火时宜采用喷雾水枪,这种水枪流过水柱的泄漏电流小,带电灭火比较安全。用普通直流水枪灭火时,为防止通过水柱的泄漏电流通过人体,可以将水枪喷嘴接地(即将水枪接入埋入接地体,或向地面网络接地板,或接向粗铜线网络鞋套);也可以让灭火人员穿戴绝缘手套、绝缘靴或穿戴均压服操作。

(3) 人体与带电体之间保持必要的安全距离。用水灭火时,水枪喷嘴至带电体的距离,电压为 10kV 及其以下者不应小于 3m,电压为 220kV 及其以上者不应小于 5m。用二氧化碳等有不导电灭火剂的灭火器灭火时,机体、喷嘴至带电体的最小距离:电压为 10kV 者不应小于 0.4m,电压为 35kV 者不应小于 0.6m 等。

(4) 对架空线路等空中设备进行灭火时,人体位置与带电体之间的仰角不应超过 45°。

3. 充油电气设备的灭火

充油电气设备的油,其闪点多在 130~140℃ 之间,有较大的危险性。如果只在该设备外部起火,可用二氧化碳、干粉灭火器带电灭火。如火势较大,应切断电源,并可用清水灭火。如油箱破坏,喷油燃烧,火势很大时,除切断电源外,有事故储油坑的应设法将油放进储油坑,坑内和地面上的油火可用泡沫扑灭。要防止燃烧着的油流入电缆沟而顺沟蔓延,电缆沟内的油火只能用泡沫覆盖扑灭。

发电机和电动机等旋转电机起火时,为防止轴和轴承变形,可令其慢慢转动,用喷雾水灭火,并使其均匀冷却,也可用二氧化碳或蒸气灭火,但不宜用干粉、砂子或泥土灭火,以免损伤电气设备的绝缘。

第五篇 电气控制与
测 试 篇

第三十六章 电气自动控制系统的分类与功能

自动控制就是无人直接参与下,应用检测仪表和控制装置对设备或过程进行控制,使其达到预期的状态或性能指标。

一个自动控制系统主要由控制器和控制对象两大部分组成。控制对象是指被控制的设备或过程,表征设备或过程运行状态且需要加以控制的行为参数称为系统的输出(量)或被控参数。对控制对象产生控制作用的整套自动化仪表或装置称为控制器。希望系统输出应具有的变化规律称为系统的参考输入。

控制系统归纳起来应满足以下两个方面的性能要求:

(1)跟随输入 控制系统的输出量应跟随参考输入的变化而变化。在一些控制系统中,参考输入不随时间变化,因此输出量也保持恒定。而在另一些系统中,如雷达天线跟踪飞行目标的控制系统中、弧焊机器人末端跟踪焊缝轨迹的控制系统中,参考输入则是随时间变化的运动轨迹,要求控制系统的输出能够跟踪输入轨迹的变化而变化。

(2)抗干扰 控制系统还受到外界干扰(扰动)的影响,使系统输出偏离参考输入。因此,控制的目标除了跟随输入外,还要求控制系统具有抗干扰的能力,即输出量(被控参数)尽量不受干扰的影响。

第一节 自动控制系统的分类

一、控制系统按系统结构分类

(一)开环控制系统

如果控制器与控制对象之间只有正向作用而没有反向作用,如图 36-1a 所示,这样的控制系统称为开环控制系统。开环系统没有输出反馈,误差不能得到纠正,因而控制精度不高。如果扰动因素较少,并且能够测量,可以对扰动进行补偿,如图中虚线所示。

(二)闭环控制系统

如果控制器与控制对象之间既有正向作用又有反向作用。这样的控制系统称为闭环控制系统。在图 36-1b 中,系统输出通过负反馈与参考输入比较,得到误差,而控制作用 $u(t)$ 是根据误差产生的。因此,闭环控制系统也称为反馈控制系统。由于输出反馈作用,被控参数受干扰的影响将会减小甚至消除,从而提高了控制精度。同时,被控参数对系统内部元件参数的变化(内扰)不敏感,因而降低了对除反馈环节外其它环节的要求。然而,由于引入输出反馈,可能产生振荡或稳定性的问题。

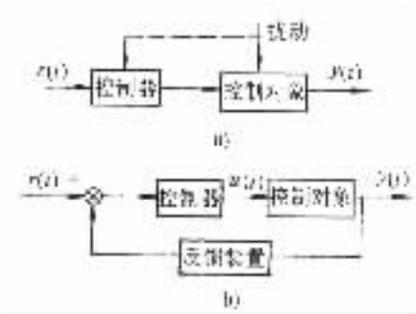


图 36-1 开环控制系统和闭环控制系统
a)开环控制系统 b)闭环控制系统

(三)复合控制系统

复合控制是前馈和反馈相结合的一种控制方式。

二、控制系统按任务分类

1. 调节系统 参考输入恒定的控制系统称为调节系统,又称定值控制系统,调节系统的任务是在任何扰动作用下使被控参数维持在恒定的期望数值;
2. 随动控制系统 若参考输入随时间任意变化,控制系统的输出应能以一定的精度跟随参考输入变化而变化,这种系统称为随动控制系统或跟踪系统;
3. 程序控制系统 参考输入按预先安排好的规律变化的控制系统。

三、控制系统按数学模型分类

(一)线性控制系统

若系统中各个组成环节的动态特性都可以用线性微分(或差分)方程描述,这种系统称为线性控制系统。线性系统可利用叠加原理求解。进一步,如果线性系统的特性(结构和参数)不随时间变化,则可以用线性常系数微分方程描述,这种系统称为线性定常(或线性时不变 LTI)系统。如果线性微分方程的系数是时间的函数,则对应的系统称为线性时变系统。

(二)非线性控制系统

若系统中存在非线性元件,系统的动态过程就必须用非线性微分方程描述,这种系统称为非线性控制系统。对于非线性系统,叠加原理是不适用的。对于非本质的非线性特性,其输入-输出曲线可以在变量变化范围不大时用直线代替曲线,简化为线性关系处理。而对于本质非线性特性,输入-输出关系或具有间断点、折断点,或具有非单值关系,就必须用非线性控制理论进行分析和设计。

四、控制系统按信号分类

(一)连续控制系统

连续控制系统中各组成环节的输入、输出信号都是连续时间变量的函数。连续控制系统的动态过程一般用微分方程描述。

(二)离散控制系统

离散系统中某些环节的输入或输出信号在时间上是离散的,即间断地仅在离散的采样时刻取值。离散控制系统通常分为采样控制系统和数字控制系统两大类。常见的离散控制系统如图 36-2 所示。在采样系统中,连续信号经过采样变成脉冲序列信号,而在数字控制系统中,采样信号还需要量化为数字编码信号。离散系统的动态过程一般用差分方程来描述。

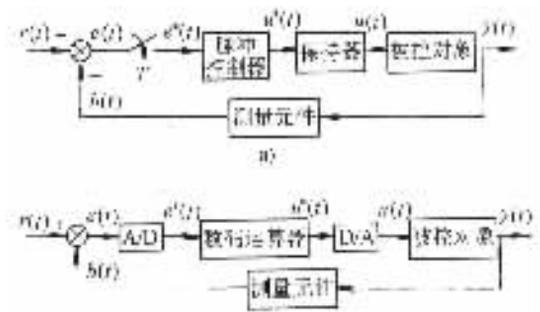


图 36-2 常见的离散控制系统

a) 采样控制系统 b) 数字控制系统

五、单变量与多变量控制系统

只有一个参考输入量和一个输出量的控制系统,称为单变量(SISO)控制系统。如果一个控制系统的参考输入量多于一个,或输出量多于一个,则称为多变量(MIMO)控制系统。

除上述分类方法外,控制系统还可按系统的规模划分为一般系统、大系统和巨系统;也可按系统的所具有的智能程度高低划分为普通系统和智能系统。

第二节 自动控制系统的性能要求与指标

一、自动控制系统的性能要求

可概括为三个方面:稳定性、准确性和快速性。对于调节系统,要求能快速地克服扰动影响,使被控参数准确地恢复到给定值;对于随动系统,既要求输出能快速准确地跟随参考输入的变化而变化,而又不受扰动的影响。

二、控制系统的阶跃响应和性能指标

阶跃信号 $u_s(t)$ 兼有瞬时突变和保持恒定的特点,用它作为参考输入可以全面地考验系统在稳定性、快速性和准确性等方面的表现。对于随动系统,除阶跃信号外,有时还用斜坡信号 $r(t) = tu_s(t)$ 和抛物线信号 $(t^2/2)u_s(t)$ 作为典型试验信号。控制系统在单位阶跃输入作用下的暂态响应如图 36-3 所示。

系统性能指标定义如下:

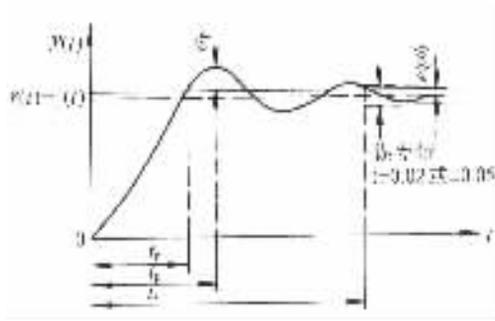


图 36-3 系统单位阶跃响应

- 1. 稳态误差 暂态过程结束后,系统进入稳态时输出 $y(\infty)$ 与期望值之差。
- 2. 超调量 暂态过程中,系统输出与稳态输出 $y(\infty)$ 之间的最大偏差,即

$$\sigma\% = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

- 3. 调节时间 系统输出达到新的稳态值所需要的过渡过程时间。调节时间 t_s 定义为当 $t \geq t_s$ 时, $|y(t) - y(\infty)| \leq \Delta$

式中 Δ ——误差带,一般取 $y(\infty)$ 的 2% 或 5%。

除上述指标外,还有一些其它指标,如上升时间 t_r ——系统输出第二次达到稳态值所需的时间;峰值时间 t_p ——系统输出达到最大值 y_{\max} 所需的时间;衰减率——系统输出的相邻两个符号相同的峰值衰减的百分数。

三、误差积分指标

误差积分指标是一种综合性能指标,它是在单位阶跃信号作用下系统误差的函数的积分值。常用的误差积分指标有如下几种:

误差平方积分指标(ISE)

$$J_1 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

误差绝对值积分指标(IAE)

$$J_2 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

时间乘误差绝对值积分指标(ITAE)

$$J_3 = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

时间乘误差平方积分指标(ITSE)

$$J_4 = \int_0^{\infty} te^2(t) dt$$

无论采用哪一种误差积分指标,指标值愈小,整个响应过程中总体说来误差愈小。ISE 和 IAE 对于不同时间的误差同等对待。而在 ITAE 和 ITSE 中,由于误差的权重随时间增大,因而有利于消除暂态过程后期的“爬行”现象。

四、鲁棒性(稳健性)

指系统抵御各种扰动因素影响的能力,如系统结构和参数的不确定性,以及外界干扰。引起系统结构变异或参数扰动的原因是多方面的,如由于对象的模型误差、元器件制造公差及老化、零部件磨损和系统运行环境的变化等。系统性能受参数扰动影响的属性称为系统的参数灵敏度。如果一个控制系统对上述扰动因素的灵敏度低,则称该系统的鲁棒性好。

第三十七章 电气控制线路设计方法

第一节 电气控制原理线路设计的方法

原理线路设计是原理设计的核心内容。在总体方案确定之后,具体设计是从电气原理图开始的,各项设计指标是通过控制原理图来实现的,同时它又是工艺设计和编制各种技术资料的依据。

一、电气原理图设计的基本步骤

1. 根据选定的拖动方案及控制方式设计系统的原理框图,拟订出各部分的主要技术要求和主要技术参数。
2. 根据各部分的要求,设计出原理框图中各个部分的具体电路。对于每一部分的设计总是按主电路→控制电路→辅助电路→联锁与保护→总体检查→反复修改与完善的步骤进行。
3. 绘制总原理图。按系统框图结构将各部分联成一个整体。
4. 正确选用原理线路中每一个电器元件,并制订元器件目录清单。

对于比较简单的控制线路,例如普通机床的电气配套设计,可以省略前两步,直接进行原理图设计和选用电器元件。但对于比较复杂的自动控制线路,例如专用的数控生产机械或者采用微机或电子控制的专用检测与控制系统,要求有程序预选、刀具调整与补偿和一定的加工精度、生产效率、自动显示、各种保护、故障诊断、报警、打印记录等,就必须按上述过程一步一步进行设计。只有各个独立部分都达到技术要求,才能保证总体技术要求的实现,保证总装调试的顺利进行。

二、电气原理图的设计方法及设计实例

电气原理图的设计方法主要有分析设计法和逻辑设计法两种,分别介绍如下。

1. 分析设计法

所谓分析设计法是根据生产工艺的要求去选择适当的基本控制环节(单元电路)或经过考验的成熟电路,按各部分的联锁条件组合起来并加以补充和修改,综合成满足控制要求的完整线路。当找不到现成的典型环节时,可根据控制要求边分析边设计,将主令信号经过适当的组合与变换,在一定条件下得到执行元件所需要的工作信号。设计过程中,要随时增减元器件和改变触点的组合方式,以满足拖动系统的工作条件和控制要求,经过反复修改得到理想的控制线路。由于这种设计方法是以熟练掌握各种电气控制线路的基本环节和具备一定的阅读分析电气控制线路的经验为基础,所以又称为经验设计法。

分析设计法的特点是无固定的设计程序,设计方法简单,容易为初学者所掌握,对于具有一定工作经验的电气人员来说,也能较快地完成设计任务,因此在电气设计中被普遍采用。其缺点是设计方案不一定是最佳方案,当经验不足或考虑不周时会影响线路工作的可靠性。

下面通过 C534J1 立式车床横梁升降电气控制原理线路的设计实例,进一步说明分析设计法的设计过程。这种机构无论在机械传动或电力传动控制的设计中都有普遍意义,在立式车床、摇臂钻床、龙门刨床等设备中均采用类似的结构和控制方法。

(1) 电力拖动方式及其控制要求 为适应不同高度工件加工时对刀具的需要,要求安装有左、右立刀架的横梁能通过丝杠传动快速作上升下降的调整运动。丝杠的正反转由一台 2JH61-4 型三相交流异步电动机拖动(13kW, 380/660V, 27.6/16A, 1330r/min),同时,为了保证零件的加工精度,当横梁移动到需要的高度后应立即通过夹紧机构将横梁夹紧在立柱上。每次移动前要先放松夹紧装置,因此设置另一台 JD42-4 型(2.8kW, 220/380V, 10.5/6.1A, 1430r/min)三相交流异步电动机拖动夹紧放松机构,以实现横梁移动前的放松和到位后的夹紧动作。在夹紧、放松机构中设置两个行程开关 SQ1 与 SQ2,如图 37-1 所示,分别检测已放松与已夹紧信号。

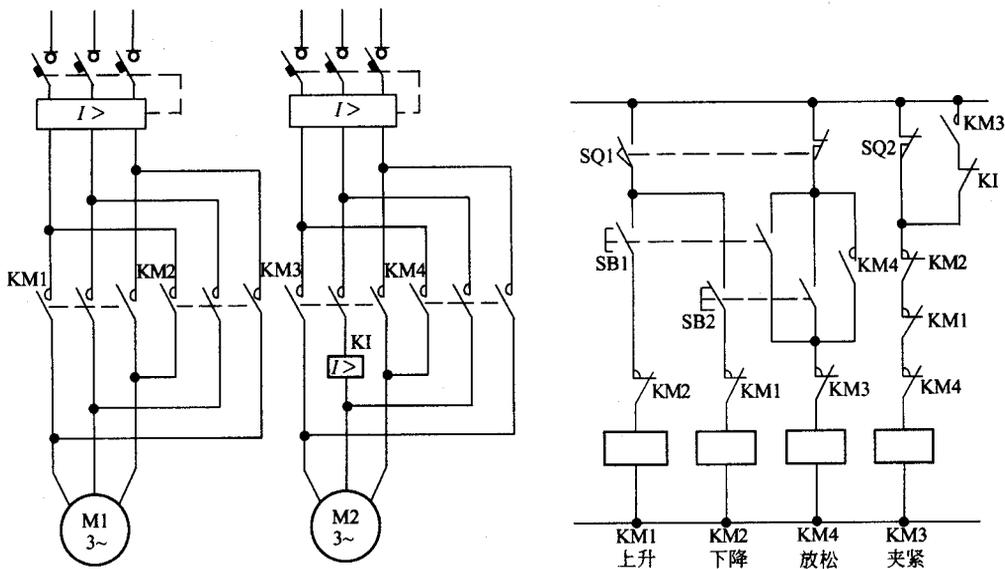


图 37-1 主电路及控制电路设计草图之一

(2) 横梁升降控制要求

① 采用短时工作的点动控制。

② 横梁上升控制动作过程。按上升按钮→横梁放松(夹紧电动机反转)→压下放松位置开关→停止放松→横梁自动上升(升/降电动机正转)→到位松开上升按钮→横梁停止上升→横梁自动夹紧(夹紧电动机正转)→已放松位置开关松开,已夹紧位置开关压下,达到一定夹紧紧度→上升过程结束。

③ 横梁下降控制动作过程。按下降按钮→横梁放松→压下已放松位置开关→停止放松,横梁自动下降→到位松开下降按钮→横梁停止下降并自动短时回升(升/降电动机短时正转)→横梁自动夹紧→已放松位置开关松开,已夹紧位置开关压下并夹紧至一定紧度→下降过程结束。

可见下降与上升控制的区别在于到位后多了一个自动的短时回升动作,其目的在于消除移动螺母上端面与丝杠的间隙,以防止加工过程中因横梁倾斜造成的误差,而上升过程中移动螺母上端面与丝杠之间不存在间隙。

④ 横梁升降动作应设置上、下极限位置保护。

(3) 设计过程

① 根据拖动要求设计主电路。由于升、降电动机 M1 与夹紧放松电动机 M2 都要求正反转,所以采用 KM1、KM2 及 KM3、KM4 接触器主触点变换相序控制。

考虑到横梁夹紧时有一定的紧度要求,故在 M2 正转即 KM3 动作时,其中一相串接电流继电器 KI 检测电流信号,当 M2 处于堵转状态,电流增长至动作值时,过电流继电器 KI 动作,使夹紧动作结束,以保证每次

夹紧紧度相同。据此便可设计出如图 37-1 所示的主电路。

②设计控制电路草图。如果暂不考虑横梁下降控制的短时回升,则上升与下降控制过程完全相同。当发出“上升”或“下降”指令时,首先是夹紧放松电动机 M2 反转(KM4 吸合),由于平时横梁总是处于夹紧状态,行程开关 SQ1(检测已放松信号)不受压, SQ2(检测已夹紧信号)处于受压状态,将 SQ1 常开触点串在横梁升降控制回路中,常闭触点串于放松控制回路中(SQ2 常开触点串在立车工作台转动控制回路中,用于联锁控制)因此在发出上升或下降指令时(按 SB1 或 SB2)先放松, KM4 吸合(SQ2 立即复位),当放松动作完成时 SQ1 受压, KM4 释放, KM1(或 KM2)自动吸合,实现横梁自动上升(或下降)。上升(或下降)到位,放开 SB1(或 SB2)停止上升(或下降),由于此时 SQ1 受压, SQ2 不受压,所以 KM3 自动吸合,夹紧动作自动发出,直到 SQ2 压下,再通过 KI 常闭触点与 KM3 的常开触点串联的自锁回路,继续夹紧至过电流继电器动作(达到一定的夹紧紧度)控制过程自动结束。按此思路设计的草图如图 37-1 所示。

③完善设计草图。图 37-1 设计草图功能不完善,主要是未考虑下降的短时回升。下降到位的短时回升,是满足一定条件下的结果,此条件与上升指令是“或”的逻辑关系,因此它应与 SB1 并联,应该是下降动作结束即用 KM2 常闭触点与一个短时延时断开的时间继电器 KT 触点的串联组成,回升时间由时间继电器控制。于是便可设计出如图 37-2 所示的设计草图之二。

④检查并改进设计草图。检查设计草图之二,在控制功能上已达到上述控制要求,但仔细检查会发现 KM2 的辅助触点使用已超出接触器拥有数量,同时考虑到一般情况下不采用二常开二常闭的复合式按钮,因此可以采用一个中间继电器 KA 来完善设计。设计草图之三如图 37-3 所示。其中 R-M、L-M 为工作台驱动电动机 M 正反转联锁触点,即保证机床进入加工状态,不允许横梁移动。反之,横梁放松时就不允许工作台转动,是通过行程开关 SQ1 的常闭触点串联在 R-M、L-M 的控制回路中来实现。另一方面,在完善控制电路设计过程中,进一步考虑横梁的上、下极限位置保护,采用限位开关 SQ3(上限位)与 SQ4(下限位)的常闭触点串接在上升与下降控制回路中。

⑤总体检查设计线路。控制线路设计完毕,最后必须经过总体检查,因为分析设计往往会考虑不周而存在不合理之处或有进一步简化的可能。主要检查内容有:是否满足拖动要求与控制要求,触点使用是否超出允许范围,电路工作是否安全可靠,联锁保护是否考虑周到,是否有进一步简化的可能等。

2. 逻辑设计法

逻辑设计法是利用逻辑代数这一数学工具来进行电路设计,即根据生产机械的拖动要求及工艺要求,将执行元件需要的工作信号以及主令电器的接通与断开状态看成逻辑变量,并根据控制要求将它们之间的关系用逻辑函数关系式来表达,然后再运用逻辑函数基本公式和运算规律进行简化,使之成为需要的与或关系式,根据最简式画出相应的电路结构图,最后再作进一步的检查和完善,即能获得需要的控制线路。

采用逻辑设计法能获得理想、经济的方案,所用元件数量少,各元件能充分发挥作用,当给定条件变化时,能指出电路相应变化的内在规律,在设计复杂控制线路时,更能显示出它的优点。

任何控制线路,控制对象与控制条件之间都可以用逻辑函数式来表示,所以逻辑法不仅能用于线路设计,也可以用于线路简化和读图分析。逻辑代数读图法的优点是各控制元件的关系能一目了然,不会读错和遗漏。

例如,前面设计所得控制电路图 37-3 中,横梁上升与下降动作发生条件与电路动作可以用下面的逻辑函数式来表示。

$$KA = SB1 + SB2$$

$$KM4 = \overline{SQ1} \cdot (\overline{KA} + KM4) \cdot \overline{RM} \cdot \overline{LM} \cdot \overline{KM3}$$

在横梁动作之初总处于夹紧状态, SQ1 为 0(不受压), SQ2 为 1(受压),因此,在 R-M、L-M、KM3 均为 0 的情况下,只要发出上升或下降指令 KM4 得电放松(夹紧解除 SQ2 由 1→0)直到 SQ1 受压(状态由 0→1),放松动作才结束。

$$KM1 = SQ1 \cdot (\overline{SB2} \cdot \overline{KA} + KA \cdot KT) \cdot \overline{KM2} \cdot \overline{SQ3}$$

$$KM2 = SQ1 \cdot \overline{SB1} \cdot \overline{SQ4} \cdot KA \cdot \overline{KM1}$$

$$KM3 = \overline{KA} \cdot \overline{KM4} \cdot (\overline{SQ2} \cdot \overline{KT} + KM3 \cdot \overline{KI})$$

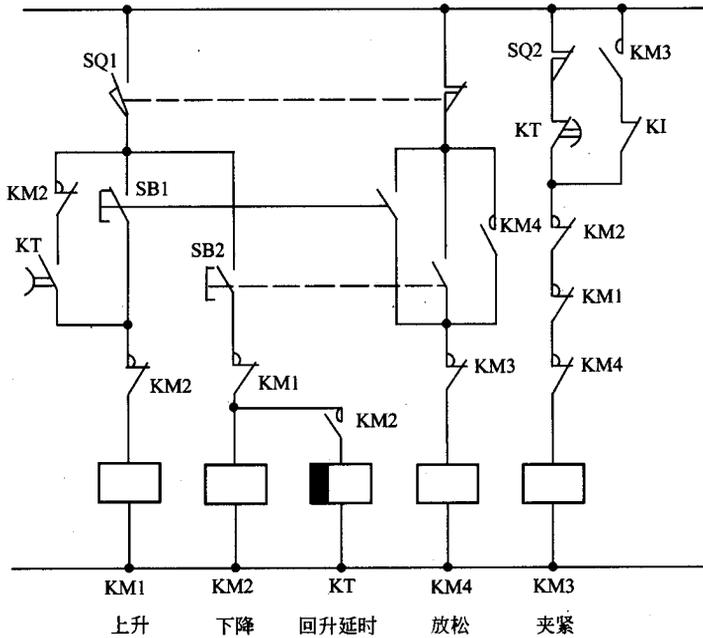


图 37-2 控制回路设计草图之二

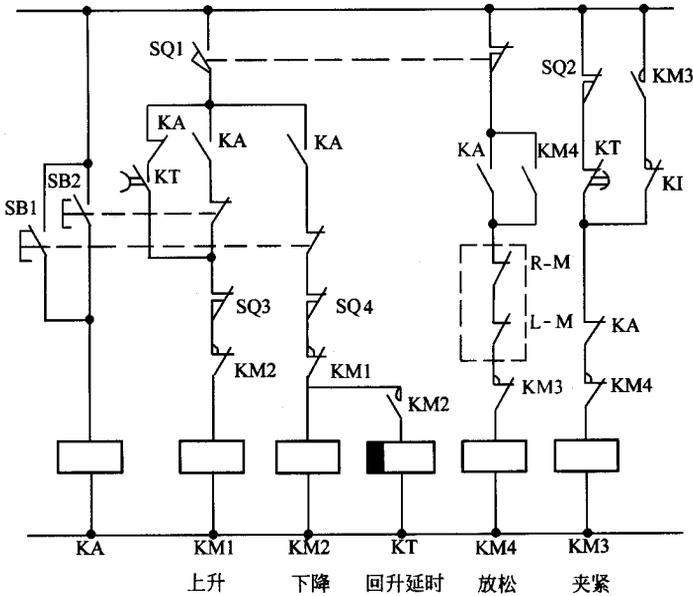


图 37-3 控制回路设计草图之三

可见,上升与下降动作只有在完全放松即 SQ1 受压情况下才能发生,当发出上升指令(SB1 为 1)只可能 KM1 为 1,发出下降指令只可能 KM2 为 1。放松结束后实现自动上升或下降的目的。达到预期高度,解除上升,KA 为 0,上升动作立即停止。KM3 得电自动进入夹紧状态,直至恢复原始状态,即 SQ1 不受压, SQ2 受压,自动停止夹紧动作。

若解除的是下降指令,KA 为 0,下降动作立即停止,但由于 KT 失电时其触点延时动作,在延时范围内 KM1 短时得电使横梁回升,KT 触点延时动作后,回升结束, KM3 得电自动进入夹紧状态,直至过电流继电器动作,夹紧结束。

逻辑电路有两种基本类型,对应的设计方法也各有不同。

(1) 组合逻辑电路 其特点是执行元件的输出状态只与同一时刻控制元件的状态有关,输入、输出呈单方向关系,即输出量对输入量无影响。它的设计方法比较简单,可以作为经验设计法的辅助和补充,用于简单控制电路的设计,或对某些局部电路进行简化,进一步节省并合理使用电器元件与触点。举例说明如下。

①设计要求。某电动机只有在继电器 KA1、KA2、KA3 中任何一个或两个动作时才能运转,而在其他条件下都不运转,试设计其控制线路。

②设计步骤如下。

列出控制元件与执行元件的动作状态表,如表 37-1 所示。

根据表 37-1 写出 KM 的逻辑代数式:

$$KM = KA1 \cdot \overline{KA2} \cdot KA3 + \overline{KA1} \cdot KA2 \cdot KA3 + KA1 \cdot \overline{KA2} \cdot \overline{KA3} + KA1 \cdot KA2 \cdot \overline{KA3} + \overline{KA1} \cdot KA2 \cdot \overline{KA3}$$

利用逻辑代数基本公式化简最简“与或”式:

$$\begin{aligned} KM &= \overline{KA1} \cdot (\overline{KA2} \cdot KA3 + KA2 \cdot KA3 + KA2 \cdot \overline{KA3}) + \\ &KA1 \cdot (\overline{KA2} \cdot \overline{KA3} + \overline{KA2} \cdot KA3 + KA2 \cdot \overline{KA3}) \\ &= \overline{KA1} \cdot [KA3 \cdot (\overline{KA2} + KA2) + KA2 \cdot \overline{KA3}] + KA1 \cdot [\overline{KA3} \cdot (\overline{KA2} + KA2) + \overline{KA2} \cdot KA3] \\ &= \overline{KA1} \cdot (KA3 + KA2 \cdot \overline{KA3}) + KA1 \cdot (\overline{KA3} + \overline{KA2} \cdot KA3) \\ &= \overline{KA1} \cdot (KA2 + KA3) + KA1 \cdot (\overline{KA3} + \overline{KA2}) \end{aligned}$$

根据简化了的逻辑式绘制控制电路,如图 37-4 所示。

表 37-1 状态表

KA1	KA2	KA3	KM
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

(2) 时序逻辑电路 其特点是输出状态不仅与同一时刻的输入状态有关,而且还与输出量的原有状态及其组合顺序有关,即输出量通过反馈作用,对输入状态产生影响。这种逻辑电路设计要设置中间记忆元件(如中间继电器等),记忆输入信号的变化,以达到各程序两两区分的目的。其设计过程比较复杂,基本步骤如下。

①根据拖动要求,先设计主电路,明确各电动机及执行元件的控制要求,并选择产生控制信号(包括主令信号与检测信号)的主令元件(如按钮、控制开关、主令控制器等)和检测元件(如行程开关、压力继电器、速度继电器、过电流继电器等)。

②根据工艺要求作出工作循环图,并列主令元件、检测元件以及执行元件的状态表,写出各状态和特征码(一个以二进制表示一组状态的代码)。

③为区分所有状态(重复特征码)而增设必要的中间记忆元件(中间继电器)。

④根据已区分的各种状态的特征码,写出各执行元件(输出)与中间继电器、主令元件及检测元件(逻辑

变量)间的逻辑关系式。

⑤化简逻辑式,据此绘出相应控制线路。

⑥检查并完善设计线路。

由于这种方法设计难度较大,整个设计过程较复杂,在一般常规设计中,很少单独采用。具体设计过程可参阅专门论述资料,这里不再进一步介绍。

三、原理图设计中应注意的问题

电气控制设计中应重视设计、使用和维护人员在长期实践中总结出来的许多经验,使设计线路简单、正确、安全、可靠、结构合理、使用维护方便。通常应注意以下问题。

1. 选择控制电源

尽量减少控制线路中电源的种类,控制电源用量,控制电压等级应符合标准等级。在控制线路比较简单的情况下,可直接采用电网电压,即交流 220V、380V 供电,以省去控制变压器。当控制系统使用电器数量比较多时,应采用控制变压器降低控制电压,或用直流低电压控制,既节省安装空间,又便于采用晶体管无触点器件,具有动作平稳可靠、检修操作安全等优点。对于微机控制系统应注意弱电控制与强电电源之间的隔离,不能共用零线,避免引起电源干扰。照明、显示及报警等电路应采用安全电压。电气控制线路常用的电压等级如表 37-2 所示。

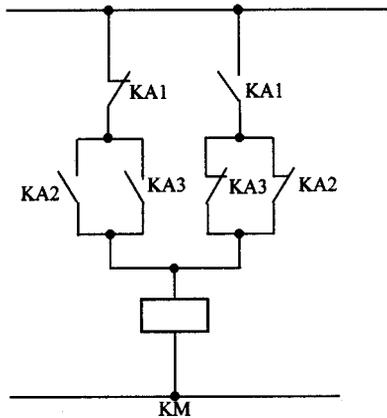


图 37-4 控制电路

表 37-2 常用控制电压等级

控制线路类型	常用的电压值/V		电源设备
交流电力传动的控制线路较简单者	交流	380/220	不用控制电源变压器
交流电力传动的控制线路较复杂者		110(127)/48	采用控制电源变压器
照明及信号指示线路		48/24/6	采用控制电源变压器
直流电力传动的控制线路	直流	220,110	整流器或者直流发电机
直流电磁铁及电磁离合器的控制线路		48/24/12	整流器

2. 选择电器元件

尽量减少电器元件的品种、规格与数量。在电器元件选用中,尽可能选用性能优良、价格便宜的新型器件,同一用途尽可能选用相同型号。电气控制系统的先进性总是与电器元件的不断发展、更新紧密联系在一起,因此,设计人员必须密切关注电机、电器技术、电子技术的新发展,不断收集新产品资料,以便及时应用于控制系统设计中,使控制线路在技术指标、稳定性、可靠性等方面得到进一步的提高。

3. 减少通电器的数量

正常工作过程中,尽可能减少通电器的数量,以利节能,延长电器元件寿命以及减少故障。

4. 合理使用电器触点

在复杂的继电器接触控制线路中,各类接触器、继电器数量较多,使用的触点也多,线路设计应注意以下问题。

(1) 主副触点的使用量不能超过限定对数,因为各类接触器、继电器的主副触点数量是一定的。设计时应注意尽可能减少触点使用数量,如图 37-5(b)比(a)就节省了一对触点。因控制需要触点数量不够时,可以采用逻辑设计化简方法,改变触点的组合方式,以减少触点使用数量,或增加中间继电器来解决。

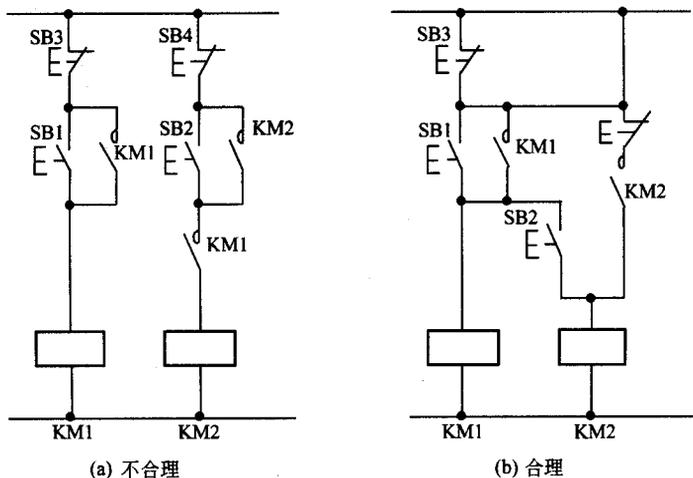


图 37-5 减少线路触点使用量

(2) 检查触点容量是否满足控制要求,避免因使用不当而出现触点烧坏、熔焊的故障。要合理安排接触器主副触点的位置,避免用小容量继电器去切断大容量负载。总之,要计算触点断流容量是否满足被控制负载的要求,还要考虑负载性质(阻性、容性、感性等),以保证触点工作寿命和可靠性。

5. 正确连线

具体应注意以下几个方面。

(1) 正确连接电器线圈。电压线圈通常不能串联使用,即使用两个同型号电压线圈也不能采用串联施加额定电压之和的电压值,因为电器动作总有先后之差,如图 37-6(a)所示。若 KM1 先动作, KM2 后动作,就可能由于动作过程中阻抗变化造成电压分配不均匀。当需要两个电器同时工作时,其线圈应采用如图 37-6(b)所示的并联接法。

对于电感较大的电器线圈,例如电磁阀、电磁铁或直流电机励磁线圈等则不宜与相同电压等级的接触器或中间继电器直接并联工作,否则在接通或断开电源时会造成后者的误动作。

(2) 合理安排电器元件及触点位置。对一个串联回路,各电器元件或触点位置互换,并不影响其工作原理,但从实际连线上却影响到安全、节省导线等各方面的问题。如图 37-7 所示两种接法,两者工作原理相同,但是采用图 37-7(a)接法既不安全而且浪费导线。因为限位开关 SQ 的常开、常闭触点断开时,由于电弧可能造成电源短路,很不安全,而且采用这种接法电气箱到现场要引出四种线,很不合理,图 37-7(b)所示的接法较合理。

(3) 注意避免出现寄生回路。在控制电路的动作过程中,如果出现不是由于误操作而产生的意外接通

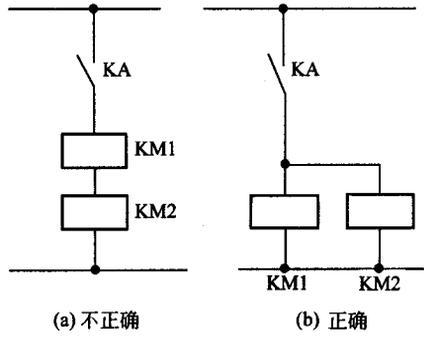


图 37-6 线圈连接

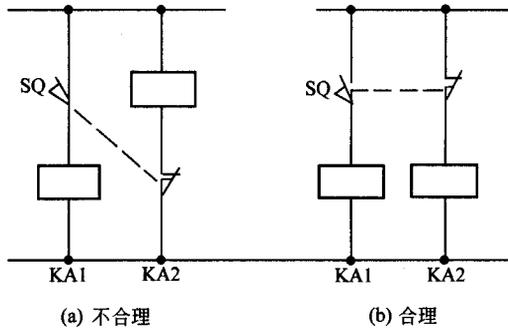


图 37-7 触点连接

的电路 称为寄生回路。图 37-8 所示为电动机可逆运行控制线路,为了节省触点,指示灯 RHL 和 LHL 采用图中所示的接法。此线路在电动机正常工作情况下能完成启动、正反转及停止操作。如果电动机在正转中 (KMR 吸合) 发生过载,FR 触点断开时会出现图中虚线所示的寄生回路。由于 RHL 电阻较小,接触器在吸合状态下的释放电压较低,因而寄生回路的电流有可能使 KMR 无法释放,电动机在过载时得不到保护而烧毁。

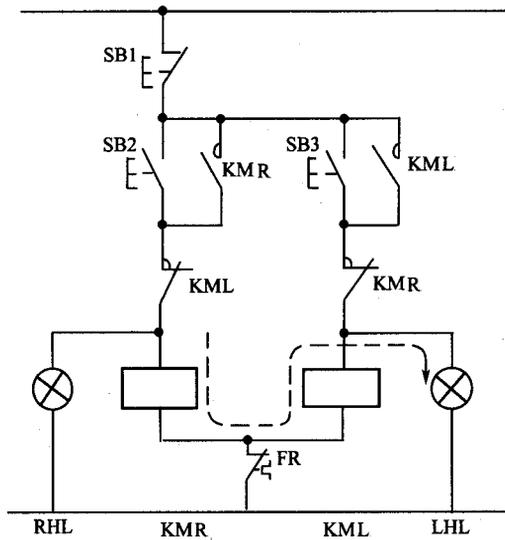


图 37-8 寄生回路

第二节 特殊控制环节设计

一、三相笼型异步电动机全压启动控制

三相笼型异步电动机由于结构简单、价格便宜、坚固耐用等一系列优点获得了广泛的应用。它的控制线路都是由继电器、接触器、按钮等有触点电器组成的。

1. 全压启动控制电路

三相笼型异步电动机全压启动控制线路如图 37-9 所示。它是一个常用的最简单的控制线路,由刀开关 QS、熔断器 FU、接触器 KM 的主触点、热继电器的热元件与电动机 M 构成主电路。

(1) 线路的工作原理 启动时,合上 QS,引入三相电源。按下 SB2,交流接触器 KM 的线圈通电,接触器主触点闭合,电动机接通电源,直接启动运转。同时与 SB2 并联的常开辅助触点 KM 闭合,使接触器吸引线圈继续通电,从而保持电动机的连续运行。这种依靠接触器自身辅助触点而使其线圈保持通电的现象称为自锁。这一对起自锁作用的辅助触点,则称为自锁触点。

要使电动机 M 停止运转,只要按下停止按钮 SB1,将控制电路断开即可。这时接触器 KM 断电释放,KM 的常开主触点将三相电源切断,电动机 M 停止旋转。当手松开按钮后,SB1 的常闭触点在复位弹簧的作用下,虽能恢复到原来的常闭状态,但接触器线圈已不再能依靠自锁触点通电了,因为原来闭合的自锁触点早已随着接触器的断电而断开。

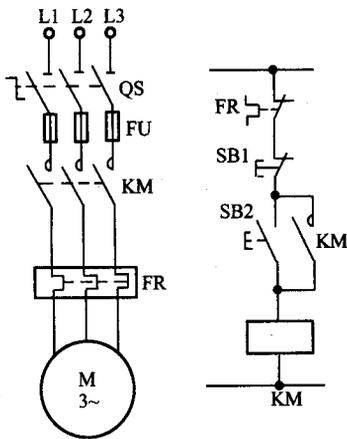


图 37-9 全压启动控制线路

(2) 电路的保护环节

① 熔断器 FU 作为电路的短路保护,但达不到过载保护的目。这是因为一方面熔断器的规格必须根据电动机启动电流大小作适当选择;另一方面还要考虑熔断器保护特性的反时限特性和分散性。所谓分散性,是指各种规格的熔断器的特性曲线差异较大,即使是同一种规格的熔断器,其特性曲线也往往有很大不同。

② 热继电器具有过载保护作用。由于热继电器的热惯性比较大,即使热元件流过几倍额定电流,热继电器也不会立即动作。因此,在电动机启动时间不太长的情况下,热继电器是经得起电动机启动电流冲击而不动作的。只有在电动机长时间过载下 FR 才动作,断开控制电路,使接触器断电释放,电动机停止旋转,实现电动机过载保护。

③欠压保护与失压保护是依靠接触器本身的电磁机构来实现的。当电源电压由于某种原因而严重欠压或失压时,接触器的衔铁自行释放,电动机停止旋转。而当电源电压恢复正常时,接触器线圈也不能自动通电,只有在操作人员再次按下启动按钮 SB2 后电动机才会启动,这又叫零压保护。

控制线路具备了欠压和失压保护能力之后,有如下三个方面的优点。

第一,防止电压严重下降时电动机低压运行。

第二,避免电动机同时启动而造成的电网电压严重下降。

第三,防止电源电压恢复时,电动机突然启动运转造成设备和人身事故。

2. 电动机的点动控制线路

生产实际中,有的生产机械需要点动控制,还有些生产机械在进行调整工作时采用点动控制。

实现点动控制的几种电气控制线路如图 37-10 所示。

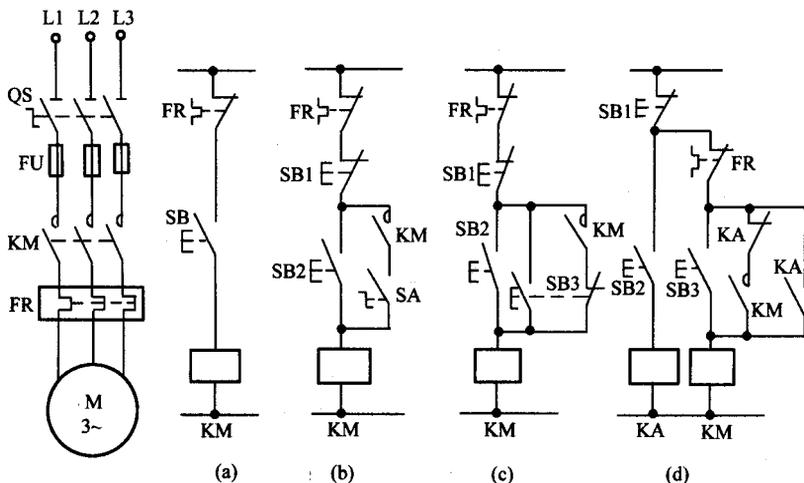


图 37-10 实现点动的几种控制线路

(1)最基本的点动控制线路 如图 37-10(a)所示,当按下点动启动按钮 SB 时,接触器 KM 通电吸合,主触点闭合,电动机接通电源。当手松开按钮时,接触器 KM 断开释放,主触点断开,电动机被切断电源而停止旋转。

(2)带手动开关 SA 的点动控制线路 如图 37-10(b)所示,当需要点动时,将开关 SA 打开,操作 SB2 即可实现点动控制。当需要连续工作时合上 SA,将自锁触点接入,即可实现连续控制。

(3)利用复合按钮实现点动的控制线路 如图 37-10(c)所示。点动控制时,按下点动按钮 SB3,其常闭触点先断开自锁电路,常开触点后闭合,接下来接通启动控制电路,KM 线圈通电,主触点闭合,电动机启动旋转。当松开 SB3 时,KM 线圈断电,主触点断开,电动机停止转动。若需要电动机连续运转,则按启动按钮 SB2 即可,停机时需按停止按钮 SB1。

(4)利用中间继电器实现点动的控制线路 如图 37-10(d)所示,利用点动启动按钮 SB2 控制中间继电器 KA,KA 的常开触点并联在 SB3 两端,控制接触器 KM,再控制电动机实现点动,当需要连续控制时按下 SB3 按钮即可,当需要停止时按下 SB1 按钮。

3. 电动机的正反转控制线路

在生产加工过程中,往往要求电动机能够实现可逆运行,如机床工作台的前进与后退,主轴的正转与反转,起重机吊钩的上升与下降等,这就要求电动机可以正反转。由电动机原理可知,若将接至电动机的三相电源进线中的任意两相对调,即可使电动机反转。所以可逆运行控制线路实质上是两个方向相反的单向运行线路,但为了避免误动作引起电源相间短路,又在这两个相反方向的单向运行线路中加设必要的互锁。

电动机正反转控制线路如图 37-11 所示。该图为利用两个接触器的常闭触点 KM1、KM2 起相互控制作用,即利用一个接触器通电时,其常闭辅助触点的断开来锁住对方线圈的电路。这种利用两个接触器的常闭辅助触点互相控制的方法叫作互锁,而两对起互锁作用的触点便叫作互锁触点。

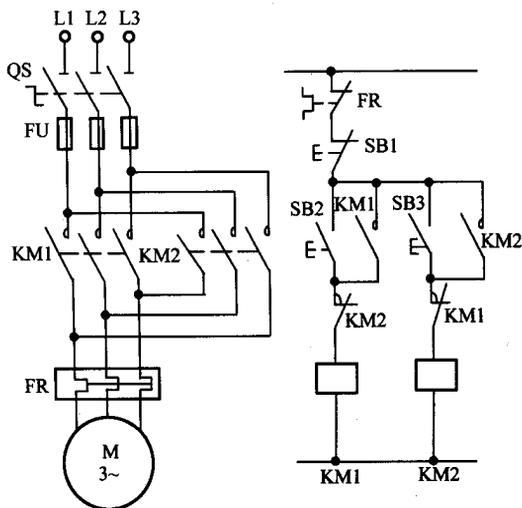


图 37-11 三相异步电动机正反转控制线路

4. 自动往复行程控制线路

在生产实践中,有些生产机械的工作台需要自动往复运动,如龙门刨床、导轨磨床等。最基本的自动往复循环控制线路如图 37-12 所示,它是利用行程开关实现往复运动控制。

限位开关 SQ_1 放在左端需要反向的位置,而 SQ_2 放在右端需要反向的位置,机械挡铁要装在运动部件上。启动时,利用正向或反向启动按钮,如按正转按钮 SB_2 , KM_1 通电吸合并自锁,电动机作正向旋转,带动机床运动部件左移,当运动部件移至左端并碰到 SQ_1 时,将 SQ_1 压下,其常闭触点断开,切断 KM_1 接触器线圈电路,同时其常开触点闭合,接通反转接触器 KM_2 线圈电路,此时电动机由正向旋转变为反向旋转,带动运动部件向右移动,直到压下 SQ_2 限位开关,电动机由反转又变成正转,这样驱动部件进行往复的循环运动。

由上述控制情况可以看出,运动部件每经过一个自动往复循环,电动机要进行两次反接制动过程,将出现较大的反接制动电流和机械冲击。因此,这种线路只适用于容量较小、循环周期较长、电动机转轴具有足够刚性的拖动系统中。另外,在选择接触器容量时应比一般情况下选择的容量大一些。

利用限位开关除了可实现往复循环控制之外,还可实现控制进给运动到预定点后自动停止的限位保护等电路,其应用相当广泛。

二、三相笼型异步电动机降压启动控制

较大容量的笼型异步电动机(大于 10kW)因启动电流较大,一般都采用降压方式来启动,启动时降低加在电动机定子绕组上的电压,启动后再将电压恢复到额定值,使之在正常电压下运行。枢电流和电压成正比,所以降低电压可以减小启动电流,不致在电路中产生过大的电压降,减少对线路电压的影响。

常用的降压启动有串电阻(或电抗)、 Y/Δ 、自耦变压器及延边三角形启动等方法。

1. 定子串电阻降压启动控制线路

定子串电阻降压启动控制线路如图 37-13 所示。电动机启动时在三相定子电路中串接电阻,使电动机定子绕组电压降低,启动结束后再将电阻短接,电动机在额定电压下正常运行。这种启动方式由于不受电动机接线形式的限制,设备简单,因而在中小型生产机械中应用较广。机床中也常用这种串电阻降压方式限制启动及制动时的电流。

控制线路工作原理如下。

合上电源开关 QS ,按启动按钮 SB_2 , KM_1 得电吸合并自锁,电动机串电阻 R 启动,接触器 KM_1 得电同时,时间继电器 KT 得电吸合,其延时闭合常开触点的延时闭合使接触器 KM_2 不能得电,电动机串接电阻 R 启

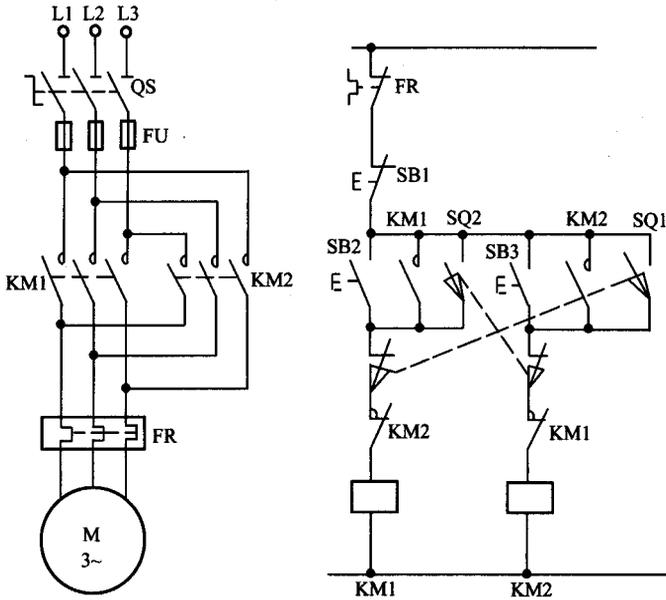


图 37-12 自动往复循环控制线路

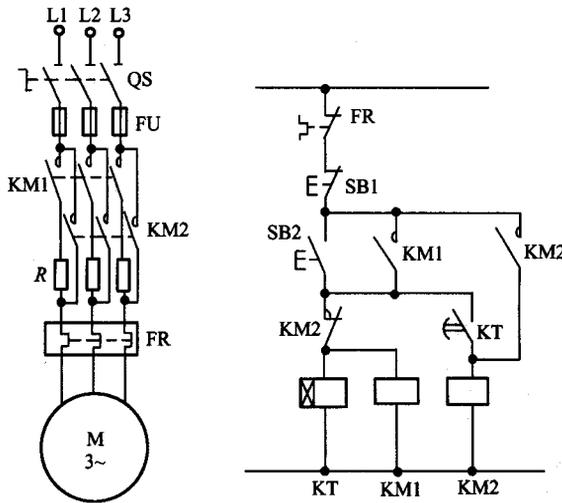


图 37-13 定子串电阻降压启动控制线路

动,经一段延时后, KM2 得电动作,将主回路电阻 R 短接,电动机在全压下进入稳定正常运转。

接触器 KM2 得电后,用其常闭触点将 KM1 及 KT 线圈电路电源切断,同时 KM2 自锁。这样,在电动机启动后,只有 KM2 得电使之正常运行。

启动电阻一般采用由电阻丝绕制的板式电阻或铸铁电阻,功率大,能够通过较大电流,但能量损耗较大,为了节省能量可采用电抗器代替电阻,但其价格较贵,成本较高。

2. Y/Δ 降压启动控制线路

正常运行时定子绕组接成三角形的笼型异步电动机,可采用 Y/Δ 的降压启动方法来达到限制启动电流的目的。

启动时,定子绕组首先接成星形,待转速上升到接近额定转速时,将定子绕组的接线由星形接成三角形,电动机便进入全压正常运行状态。

图 37-14 所示为常用的 Y/Δ 降压启动控制线路。启动时 KM1、KM3 通电,电动机接成星形。经时间继电器 KT 延时,转速上升到接近额定转速时, KM3 断电, KM2 通电,电动机接成三角形,进入稳定运行状态。

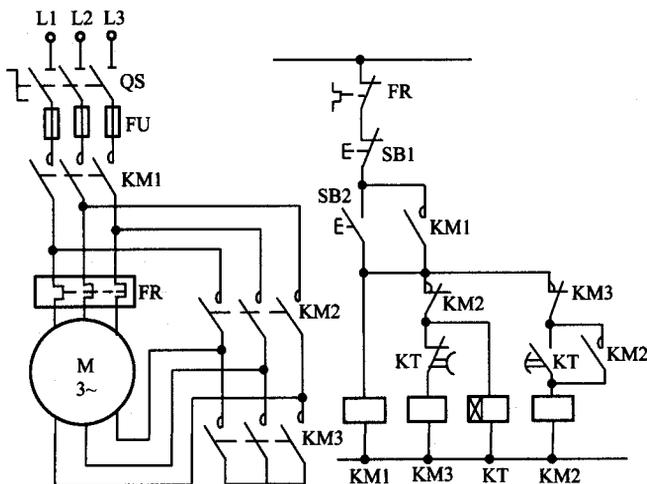


图 37-14 Y/Δ 降压启动控制线路

三相笼型异步电动机采用 Y/Δ 启动时,定子绕组星形连接状态下启动电压为三角形连接启动电压的 $1/3$,启动转矩为三角形连接直接启动转矩的 $1/3$,启动电流也为三角形连接直接启动电流的 $1/3$ 。与其他降压启动相比, Y/Δ 启动投资少、线路简单,但启动转矩小。这种启动方法适用于空载或轻载状态下启动,同时,这种降压启动方法,只能用于正常运转时定子绕组接成三角形的笼型异步电动机。

3. 自耦变压器降压启动控制线路

在自耦变压器降压启动的控制线路中,电动机启动电流的限制是依靠自耦变压器的降压作用来实现的。电动机启动的时候,定子绕组得到的电压是自耦变压器的二次电压,一旦启动完毕,自耦变压器便被短接,额定电压即电源电压直接加于定子绕组,电动机进入全电压正常工作。

图 37-15 所示为自耦变压器降压启动的控制线路。启动时,合上电源开关 QS,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 的线圈和时间继电器 KT 的线圈通电,KT 瞬时动作的常开触点闭合自锁,接触器 KM1 主触点闭合,将电动机定子绕组经自耦变压器接至电源,开始降压启动。时间继电器 KT 经过一定延时后,其延时常闭触点打开,使接触器 KM1 线圈断电, KM1 主触点断开,从而将自耦变压器从电网上切除。而延时常开触点闭合,使接触器 KM2 线圈通电,于是电动机直接接到电网上运行,完成了整个启动过程。

自耦变压器降压启动方法适用于启动较大容量的电动机,启动转矩可以通过改变抽头的连接位置得到改变。它的缺点是自耦变压器价格较贵,而且不允许频繁启动。

一般工厂常用的自耦变压器启动方法是采用成品的补偿降压启动器,这种成品的补偿降压启动器包括手动、自动操作两种形式。手动操作的补偿器有 OJ3、QJ5 等型号,自动操作的补偿器有 XJ01 型和 CTZ 系列等。

三、三相绕线转子异步电动机的启动控制

三相绕线转子电动机的优点之一是转子回路可以通过滑环的外接电阻来达到减小启动电流、提高转子电路功率因数和启动转矩的目的。在一般要求启动转矩较高的场合,绕线转子电动机得到了广泛的应用。

1. 转子回路串接电阻启动控制线路

串接在三相转子回路中的启动电阻,一般都接成星形。在启动前启动电阻全部接入电路,在其启动的过程中,启动电阻被逐段地短接。短接的方式有三相电阻不平衡短接法和三相电阻平衡短接法两种。所谓不平衡短接是每相的启动电阻轮流被短接,而平衡短接是三相的启动电阻同时被短接。

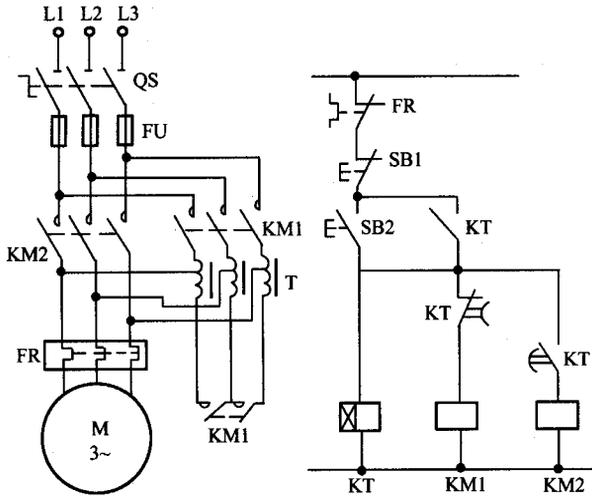


图 37-15 自耦变压器降压启动控制线路

串接在绕线转子异步电动机转子回路中的启动电阻，无论采用不平衡或平衡短接法，其作用基本相同。但由于凸轮控制器中各对触点闭合顺序一般按不平衡短接法设计，这样使得控制电路简单，所以这时采用不平衡短接法。凡是启动电阻应用接触器来短接时，全部采用平衡短接法。这里仅分析接触器控制的平衡短接法启动控制线路。

图 37-16 所示是绕线式电动机转子串接电阻的启动线路，它是利用电动机转子电流大小的变化来控制电阻切除的。K11、K12、K13 为电流继电器，其线圈串接在电动机转子电路中。这三个继电器的吸合电流都一样，但释放电流不一样。其中，K11 的释放电流最大，K12 次之，K13 最小。刚启动时启动电流很大，K11，K12，K13 都吸合，它们的常闭触点断开，这时加速接触器 KM2、KM3、KM4 不动作，全部电阻接入。当电动机转速升高后电流减小，K11 首先释放，它的常闭触点闭合，使接触器 KM2 线圈通电，短接第一段转子电阻 1R。这时转子电流逐渐下降，使 K12 释放，接触器 KM3 线圈通电，短接第二段启动电阻 2R。如此下去，直到将转子全部电阻短接，电动机启动完毕。

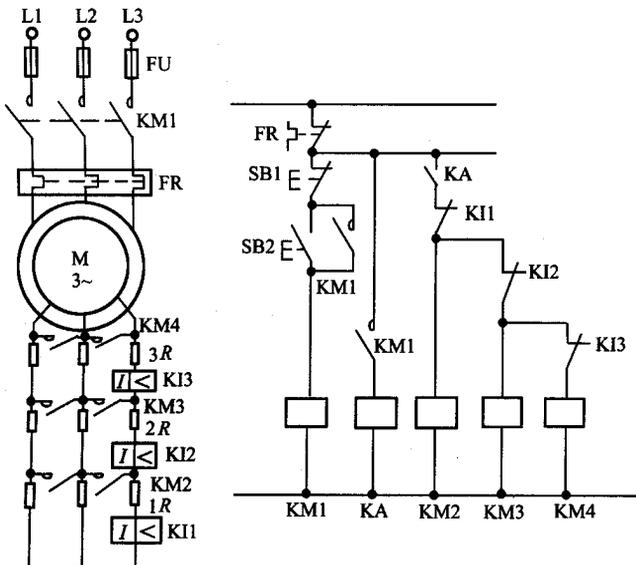


图 37-16 电流原则控制转子电路串电阻启动控制线路

2. 转子回路串频敏变阻器启动控制线路

绕线转子异步电动机转子回路串接电阻的启动方法,在电动机启动过程中,由于逐段减小电阻,电流和转矩突然增加,产生一定的机械冲击。同时,由于串接电阻启动线路复杂,工作很不可靠,而且电阻本身比较笨重,能耗大,控制箱体积较大。

频敏变阻器的阻抗能够随着转子电流频率的下降自动减小,所以它是绕线转子异步电动机较为理想的一种启动设备,常用于较大容量的绕线式异步电动机的启动控制。

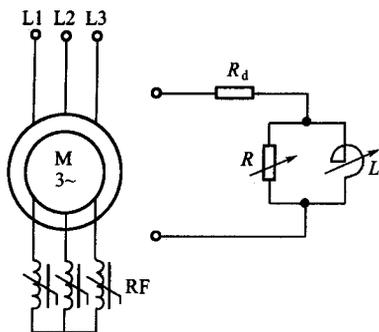


图 37-17 频敏变阻器的等效电路

频敏变阻器实质上是一个铁心损耗非常大的三相电抗器。它由数片 E 型钢钢板叠成,具有铁心、线圈两个部分,制成开启式,并采用星形接线,将其串接在转子回路中,相当于转子绕组里接入一个铁损很大的电抗器。频敏变阻器的等效电路如图 37-17 所示。图中 R_d 为绕组直流电阻, R 为铁损等值电阻, L 为等值电感, R 、 L 值与转子电流频率相关。

在启动过程中,转子频率是变化的。刚启动时,转速 $n = 0$,转子电势频率 f_2 最高($f_2 = f_1$),此时频敏变阻器的电感与电阻均为最大,因此,转子电流相应受到抑制。由于定子电流取决于转子电流,从而使定子电流不致很大。又由于启动中,串入转子电路中的频敏变阻器的等效电阻和等效电抗是同步变化的,因而其转子电路的功率因数基本不变,从而保证有足够的启动转矩,这是采用频敏变阻器的另一个优点。

当转速逐渐上升时,转子频率逐渐减小,当电机运行正常时, f_2 很低,又由于其阻抗与 f_2^2 成正比,所以其阻抗变得很小。

由以上分析可见,在启动过程中,转子等效阻抗及转子回路感应电动势都是由大到小,从而实现了近似恒转矩的启动特性。这种启动方式在空气压缩机等设备中获得了广泛应用。

图 37-18 所示是采用频敏变阻器的启动控制线路,该线路可以实现自动和手动控制。自动控制时将开关 SA 扳向“自动”,当按下启动按钮 SB2,利用时间继电器 KT 控制中间继电器 KA 和接触器 KM2 的动作,在适当的时间将频敏变阻器短接。开关 SA 扳到“手动”位置时,时间继电器 KT 不起作用,利用按钮 SB3 手动控制中间继电器 KA 和接触器 KM2 的动作。启动过程中,KA 的常闭触点将热继电器的发热元件 FR 短接,以免因启动时间过长而使热继电器误动作。

在使用频敏变阻器的过程中,如遇到下列情况可以调整匝数或气隙:启动电流过大或过小,可设法增加或减小匝数;启动转矩过大,有机械冲击,而启动完毕时的稳定转速又偏低,可增加上下铁心间的气隙,以使启动电流略微增加,启动转矩略微减小。

四、三相异步电动机的制动控制

三相异步电动机从切除电源到完全停止旋转,由于惯性的关系,总要经过一段时间,这往往不能适应某些生产机械工艺的要求,如万能铣床、卧式镗床、组合机床等,无论是从提高生产效率,还是从安全及准确停车等方面考虑,都要求电动机能迅速停车,要求对电动机进行制动控制。制动方法一般有两类:机械制动

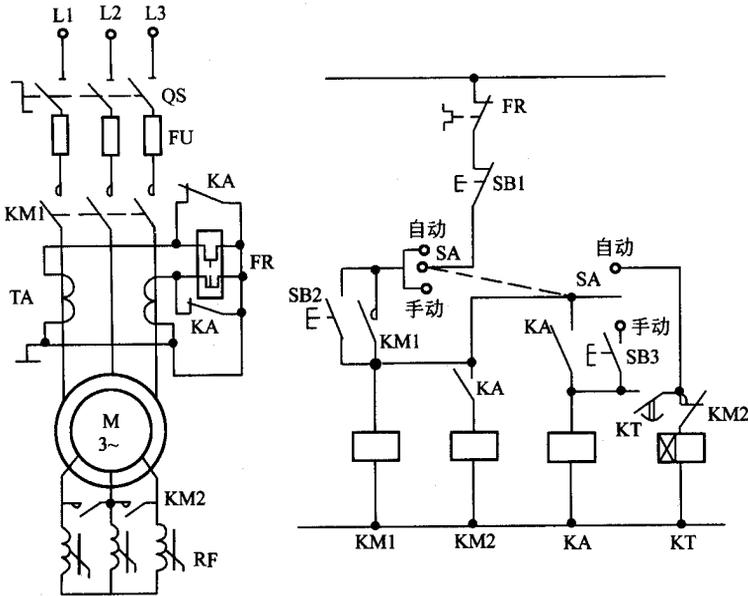


图 37-18 绕线转子异步电动机应用频敏变阻器的控制线路

和电气制动。机械制动是用机械装置来强迫电动机迅速停车,电气制动实质上是在电动机停车时,产生一个与原来旋转方向相反的制动转矩,迫使电动机转速迅速下降。下面着重介绍电气制动控制线路。它包括反接制动和能耗制动。

1. 反接制动控制线路

反接制动是利用改变电动机电源的相序,使定子绕组产生相反方向的旋转磁场,因而产生制动转矩的一种制动方法。

由于反接制动时转子与旋转磁场的相对速度接近于两倍的同步转速,所以定子绕组中流过的反接制动电流相当于全电压直接启动时电流的两倍,因此,反接制动的特点之一是制动迅速,效果好,冲击大,通常仅适用于 10kW 以下的小容量电机。为了减小冲击电流,通常要求在电动机主电路中串接一定的电阻以限制反接制动电流,这个电阻称为反接制动电阻。反接制动电阻的接线方法有对称和不对称两种接法,显然,采用对称电阻接法可以在限制制动转矩的同时,也限制制动电流,而采用不对称制动电阻的接法,只是限制了制动转矩,未加制动电阻的那一相,仍具有较大的电流。反接制动的另一要求是在电动机转速接近于零时,及时切断反相序电源,以防止反向再启动。

反接制动的关键在于电动机电源相序的改变,且当转速下降接近于零时,能自动将电源切除。为此采用了速度继电器来检测电动机的速度变化。在 120 ~ 3000r/min 范围内速度继电器触点动作,当转速低于 100r/min 时,其触点恢复原位。图 37-19 所示为反接制动的控制线路。

启动时,按下启动按钮 SB2,接触器 KM1 通电并自锁,电动机 M 通电旋转。在电动机正常运转时,速度继电器 KS 的常开触点闭合,为反接制动做好了准备。停车时,按下停止按钮 SB1,常闭触点断开,接触器 KM1 线圈断电,电动机 M 脱离电源,由于此时电动机的惯性还很高,KS 的常开触点依然处于闭合状态,所以 SB1 常开触点闭合时,反接制动接触器 KM2 的线圈通电并自锁,其主触点闭合,使电动机定子绕组得到与正常运转相序相反的三相交流电源,电动机进入反接制动状态,使电动机转速迅速下降。当电动机转速接近于零时,速度继电器常开触点复位,接触器 KM2 线圈电路被切断,反接制动结束。

2. 能耗制动控制线路

所谓能耗制动,就是在电动机脱离三相交流电源之后,定子绕组上加一个直流电压,即通入直流电流,利用转子感应电流与静止磁场的作用达到制动的目的。根据能耗制动时间控制原则,可用时间继电器进行控制,也可以根据能耗制动速度原则,用速度继电器进行控制。

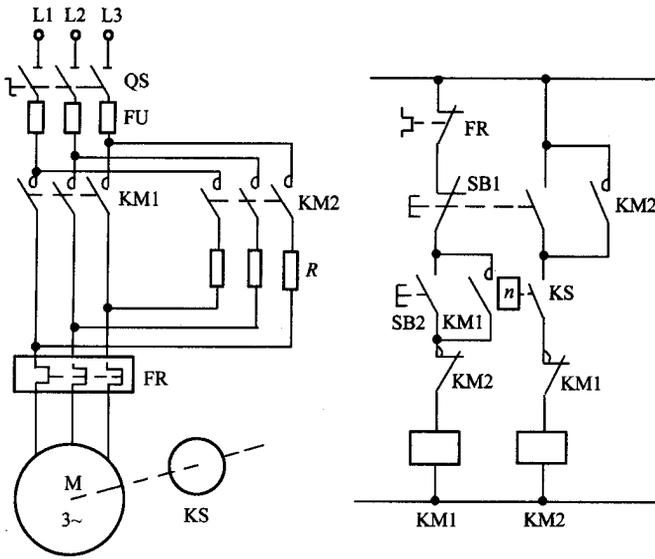


图 37-19 电动机单向反接制动控制线路

图 37-20 所示为时间原则控制的能耗制动控制线路。在电动机正常运行时,若按下停止按钮 SB_1 ,电动机由于 KM_1 断电释放而脱离三相交流电源,而直流电源则由于接触器 KM_2 线圈通电, KM_2 主触点闭合而加入定子绕组。时间继电器 KT 线圈与 KM_2 线圈同时通电并自锁,于是电动机进入能耗制动状态。当其转子的惯性速度接近于零时,时间继电器延时打开的常闭触点断开接触器 KM_2 线圈电路。由于 KM_2 常开辅助触点的作用是为了考虑 KT 线圈断线或机械卡住故障时,电动机在按下按钮 SB_1 后能迅速制动,两相的定子绕组不致长期拉入能耗制动的直流电流。该线路具有手动控制能耗制动的能力,只要使停止按钮 SB_1 处于按下的状态,电动机就能实现能耗制动。

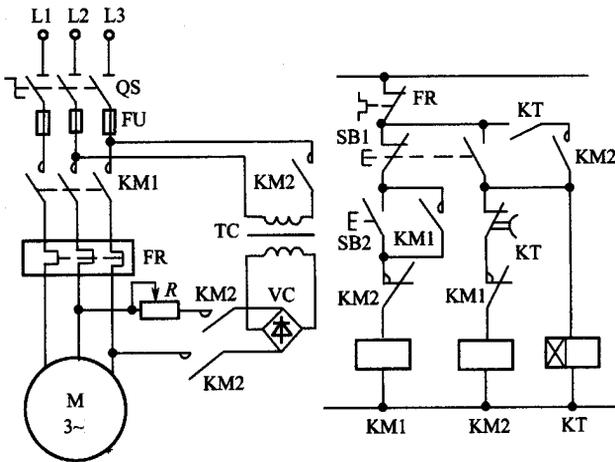


图 37-20 时间原则控制的能耗制动控制线路

图 37-21 所示为速度原则控制的能耗制动控制线路。该线路与图 37-20 所示的控制线路基本相同,这里仅是控制电路中取消了时间继电器 KT 的线圈及其触点电路,而在电动机轴端安装了速度继电器 KS ,并且用 KS 的常开触点取代了 KT 延时打开的常闭触点。该线路中的电动机在刚刚脱离三相交流电源时,由于电动机转子的惯性速度仍然很高,速度继电器 KS 的常开触点仍然处于闭合状态,所以接触器 KM_2 线圈能够依靠 SB_1 按钮的按下通电自锁。于是,两相定子绕组获得直流电源,电动机进入能耗制动。当电动机转子

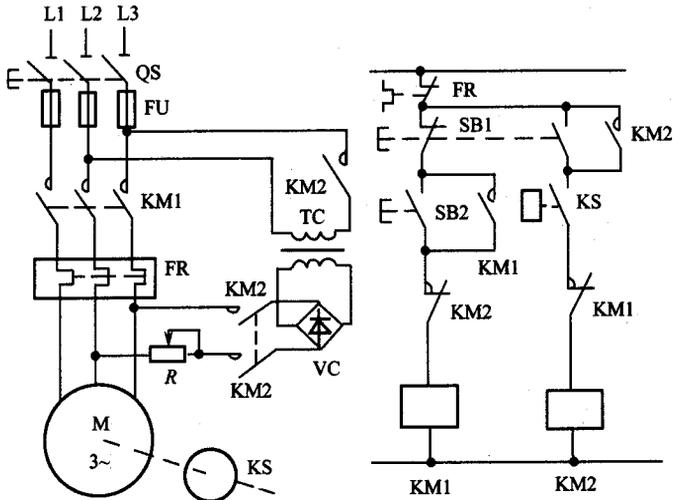


图 37-21 速度原则控制的能耗制动控制线路

的惯性速度接近零时,KS 常开触点复位,接触器 KM2 线圈断电而释放,能耗制动结束。

第三节 电气控制工艺设计

工艺设计的目的是为了满足不同电气控制设备的制造和使用要求。工艺设计必须在原理设计完成之后进行。在完成电气原理设计及电器元件选择之后,就可以进行电气控制设备总体配置,即总装配图、总接线图设计,然后再设计各部分的电器装配图与接线图,并列出各部分的元件目录、进出线号以及主要材料清单等技术资料,最后编写使用说明书。

一、电气设备总体配置设计

各种电动机及各类电器元件根据各自的作用,都有一定的装配位置,例如拖动电动机与各种执行元件(电磁铁、电磁阀、电磁离合器、电磁吸盘等)以及各种检测元件(限位开关、传感器、温度、压力、速度继电器等)必须安装在生产机械的相应部位。各种控制电器(接触器、继电器、电阻、自动开关、控制变压器、放大器等)、保护电器(熔断器、电流、电压保护继电器等)可以安放在单独的电气箱内,而各种控制按钮、控制开关、各种指示灯、指示仪表、需经常调节的电位器等,则必须安放在控制台面板上。由于各种电器元件安装位置不同,在构成一个完整的自动控制系统时,必须划分组件,同时要解决组件之间、电气箱之间以及电气箱与被控制装置之间的连线问题。

1. 划分组件的原则

(1) 功能类似的元件组合在一起。例如,用于操作的各类按钮、开关、键盘、指示检测、调节等元件集中为控制面板组件;各种继电器、接触器、熔断器、照明变压器等控制电器集中为电器板组件;各类控制电源、整流、滤波元件集中为电源组件等。

(2) 尽可能减少组件之间的连线数量,接线关系密切的控制电器置于同一组件中。

(3) 强弱电控制器分离,以减少干扰。

(4) 力求整齐美观,外形尺寸、重量相近的电器组合在一起。

(5) 便于检查与调试,需经常调节、维护和易损元件组合在一起。

2. 电气控制设备的各部分及组件之间的接线方式

(1) 电器板、控制板、机床电器的进出线一般采用接线端子(按电流大小及进出线数选用不同规格的接线端子)。

(2) 电气箱与被控制设备或电气箱之间采用多孔接插件,便于拆装、搬运。

(3) 印制电路板及弱电控制组件之间宜采用各种类型标准接插件。

电气设备总体配置设计任务是根据电气原理图的工作原理与控制要求,将控制系统划分为几个组成部分,称为部件。以龙门刨床为例,可划分为机床电器部分(各拖动电动机、抬刀机构电磁铁、各种行程开关和控制站等)、机组部件(交磁放大机组、电动机发电机组等)以及电气箱(各种控制电器、保护电器、调节电器等)。根据电气设备的复杂程度,每一部分又可划分成若干组件,如印制电路板组件、电器安装板组件、控制面板组件、电源组件等。要根据电气原理图的接线关系整理出各部分的进出线号,并调整它们之间的连接方式。

总体配置设计是以电气系统的总装配图与总接线图形式来表达的,图中应以示意形式反映出各部分主要组件的位置及各部分接线关系、走线方式及使用管线要求等。

总装配图、接线图(根据需要可以分开,也可以并在一起画)是进行分部设计和协调各部分组成一个完整系统的依据。总体设计要使整个系统集中、紧凑,同时在场址允许条件下,对发热厉害、噪声振动大的电器部件,如电动机组、启动电阻箱等尽量放在离操作者较远的地方或隔离起来;对于多工位加工的大型设备,应考虑两地操作的可能。总电源紧急停止控制应安放在方便而明显的位置。总体配置设计合理与否将影响到电气控制系统工作的可靠性,并关系到电气系统的制造、装配质量、调试、操作及维护是否方便。

二、元件布置图的设计与绘制

电器元件布置图是某些电器元件按一定原则的组合。例如,电气控制箱中的电器板、控制面板、放大器等等。电器元件布置图的设计依据是部件原理图(总原理图的一部分)。同一组件中电器元件的布置应注意以下问题。

1. 体积大和较重的电器元件应安装在电器板的下面,而发热元件应安装在电器板的上面。
2. 强电弱电分开并注意屏蔽,防止外界干扰。
3. 需要经常维护、检修、调整的电器元件安装位置不宜过高或过低。
4. 电器元件的布置应考虑整齐、美观、对称。外形尺寸与结构类似的电器安放在一起,以利加工、安装和配线。
5. 电器元件布置不宜过密,要留有一定的间距。若采用板前走线槽配线方式,应适当加大各排电器间距,以利布线和维护。

各电器元件的位置确定以后,便可绘制电器布置图。布置图是根据电器元件的外形绘制,并标出各元件间距尺寸。每个电器元件的安装尺寸及其公差范围,应严格按产品手册标准标注,作为底板加工依据,以保证各电器的顺利安装。

在电器布置图设计中,还要根据部件进出线的数量(由部件原理图统计出来)和采用导线规格,选择进出线方式,并选用适当接线端子板或接插件,按一定顺序标上进出线的接线号。

三、电器部件接线图的绘制

电器部件接线图是根据部件电气原理及电器元件布置图绘制的。它是表示成套装置的连接关系,是电器安装与查线的依据。接线图应按以下要求绘制。

1. 接线图和接线表的绘制应符合 GB6988 中 5-86《电气制图接线图和接线表》的规定。
2. 电器元件按外形绘制,并与布置图一致。

3. 所有电器元件及其引线应标注与电气原理图中相一致的文字符号及接线号。
4. 与电气原理图不同,在接线图中同一电器元件的各个部分(触点、线圈等)必须画在一起。
5. 电气接线图一律采用细线条。走线方式有板前走线及板后走线两种,一般采用板前走线。对于简单电气控制部件,电器元件数量较少,接线关系不复杂,可直接画出元件间的连线。但对于复杂部件,电器元件数量多,接线较复杂的情况,一般是采用走线槽,只要在各电器元件上标出接线号,不必画出各元件间连线。
6. 接线图中应标出配线用的各种导线的型号、规格、截面积及颜色要求。
7. 部件的进出线除大截面导线外,都应经过接线板,不得直接进出。

四、电气箱及非标准零件图的设计

在电气控制比较简单时,控制电器可以附在生产机械内部,而在控制系统比较复杂,或生产环境及操作的需要时通常都带有单独的电气控制箱,以利制造、使用和维护。

电气控制箱设计要考虑以下几方面问题:

1. 根据控制面板及箱内各电气部件的尺寸确定电气箱总体尺寸及结构方式。
2. 结构紧凑,外形美观,要与生产机械相匹配,应提出一定的装饰要求。
3. 根据控制面板及箱内电器部件的安装尺寸,设计箱内安装支架(采用角铁、槽钢、扁铁或直接由外壳弯出筋条作固定架),并标出安装孔或焊接安装螺栓尺寸,或注明采用配作方式。
4. 从方便安装、调整及维护要求,设计其开门方式。
5. 为利于箱内电器的通风散热,在箱体适当部位设计通风孔或通风槽。
6. 为便于电气箱的搬动,应设计合适的起吊钩、起吊孔、扶手架或箱体底部带活动轮。

根据以上要求,先勾画出箱体的外形草图,估算出各部分尺寸,然后按比例画出外形图,再从对称、美观、使用方便等方面考虑进一步调整各尺寸比例。

外形确定以后,再按上述要求进行各部分的结构设计,绘制箱体总装图及各面门、控制面板、底板、安装支架、装饰条等零件图,并注明加工要求,视需要选用适当的门锁。

大型控制系统,电气箱常设计成立柜式或工作台式,小型控制设备则设计成台式、手提式或悬挂式。电气箱的品种繁多,造型结构各异,在箱体设计中应注意吸取各种型式的优点。

非标准的电器安装零件,如开关支架、电气安装底板(胶木板或镀锌铁板)、控制箱的有机玻璃面板、扶手、装饰零件等,应根据机械零件设计要求,绘制其零件图,凡配合尺寸应注明公差要求,并说明加工要求,如镀锌、油漆、刻字等。

五、各类元器件及材料清单的汇总

在电气控制系统原理设计及工艺设计结束后,应根据各种图纸,对本设备需要的各种零件及材料进行综合统计,按类别画出外购件汇总清单表、主要材料消耗定额表及辅助材料消耗定额表,以便采购人员、生产管理部门按设备制造需要备料,做好生产准备工作。这些资料也是成本核算的依据。特别是对于生产批量较大的产品,此项工作尤其要仔细做好。

六、编写设计说明书及使用说明书

新型生产设备的设计制造中,电气控制系统的投资占有很大比重。同时,控制系统对生产机械运行可靠性、稳定性起着重要的作用。因此,控制系统设计方案完成后,在投入生产前应经过严格的审定,为了确保生产设备达到设计指标,设备制造完成后,又要经过仔细的调试,使设备运行处在最佳状态。设计说明书及使

用说明书是设计审定及调试、使用、维护过程中必不可少的技术资料。

设计及使用说明书应包含以下主要内容。

1. 拖动方案选择依据及本设计的主要特点。
2. 主要参数的计算过程。
3. 设计任务书中要求各项技术指标的核算与评价。
4. 设备调试要求与调试方法。
5. 使用、维护要求及注意事项。

第三十八章 线性定常控制系统的数学模型

第一节 控制系统模型的构成

一、控制系统的模型

描述控制系统动态特性的数学表达式称为系统的数学模型,它是分析和设计系统的依据。数学模型应当既能足够准确地反映系统的动态特性,又具有较简单的形式。实际系统都程度不同地存在非线性和分布参数特性,如果这些因素影响不大,则可忽略不计。在正常工作点附近变化时,可以用线性化模型来处理;但当系统在大范围内变化时采用线性化的模型就会带来较大误差。

可以根据系统内部的变化机理写出有关的运动方程,或者通过实验测取系统的输入-输出数据,然后对这些数据进行处理,从而建立系统的数学模型。前者是机理法,后者是测试法,又称系统辨识。

二、微分方和差分方程

微分方程是连续系统最基本的数学模型,可按下列步骤建立:

1. 将系统划分为单向环节,并确定各个环节的输入量、输出量。单向环节是指后面的环节无负载效应,即后面的环节存在与否对该环节的动态特性没有影响。
 2. 根据系统内部机理,通过简化、线性化、增量化建立各个环节的微分方程。
 3. 消去中间变量,保留系统的输入量、输出量,得出系统的微分方程。
 4. 整理成标准形式,将含输出量的项写在方程左端,含输入量的项写在右端,并将各导数项按降阶排列。
- 设 $n \geq m$, 则单输入-单输出系统的微分方程的一般形式为

$$y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_{n-1} y'(t) + a_n y(t) = b_0 u^{(m)}(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \dots + b_{m-1} u'(t) + b_m u(t) \quad (38-1)$$

离散系统在某一时刻 kT 的输出 $y(k)$, 可能既与同一时刻的输入与同一时刻的输入 $u(k)$ 有关, 又与过去时刻的输入 $y(k-1), \dots, u(k-m)$ 有关, 而且还与过去时刻的输出 $u(k-1), \dots, y(k-n)$ 有关。因此, $n \geq m$ 时, 输入和输出之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} & y^{(k)} + a^1 y^{(k-1)} + \dots + a^n y^{(k-n)} \\ & = b^0 u^{(k)} + b^1 u^{(k-1)} + \dots + b_m u^{(k-m)} \end{aligned} \quad (38-2)$$

不失一般性,可以假定 $u(k) = 0, y(k) = 0, k < 0$ 。设 $n \geq m$, 则上述系统也可以表示为

$$y(k+n) + a_1 y(k+m-1) + \dots + a_n y(k) = b_0 u(k+m) + b_1 u(k+m-1) + \dots + b_m u(k)$$

(38-3)

三、传递函数

通过求解微分方程对系统动态过程进行分析是十分繁琐的,为此,可用拉氏(Laplace)变换,将微分方程变成代数方程。一个线性定常系统,当初始条件为零时,输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比,称为该系统的传递函数,即

$$G(s) = \left. \frac{Y(s)}{X(s)} \right|_{\text{初始条件为零}} \quad (38-4)$$

式中 $G(s)$ ——系统传递函数;

$X(s)$ 、 $Y(s)$ ——系统输入与输出的拉氏变换。

对于微分方程(38-1)描述的系统,假定输入是在 $t=0$ 时开始作用于系统,并且初始条件为零,即 $u(0) = \dot{u}(0) = \dots = u^{(m-1)}(0) = 0$, $y(0) = \dot{y}(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0$ 。对式(38-1)进行拉氏变换,设 $n \geq m$,得

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} = \frac{b(s-z_1) \dots (s-z_m)}{(s-p_1) \dots (s-p_n)} \quad (38-5)$$

式中 z_1, \dots, z_m ——传递函数的零点;

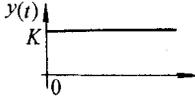
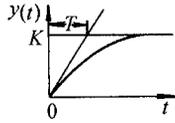
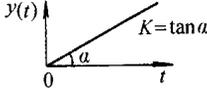
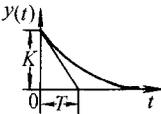
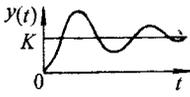
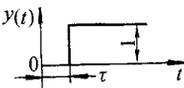
p_1, \dots, p_n ——极点。

传递函数完全取决于系统本身的结构和参数,它与输入信号无关,传递函数 $G(s)$ 的拉氏反变换 $g(t)$ 就是系统在单位脉冲信号 $\delta(t)$ 输入时的响应,即单位脉冲响应。传递函数的极点是系统的特征根,它们决定了系统固有的自由运动模态 $e^{p_i t}$, $i=1, \dots, n$,见表 38-1。系统的零状态响应是由输入的极点对应的模态和传递函数极点对应的模态的线性组合,而传递函数零点则影响各个模态在系统响应中的相对大小。一些典型环节的传递函数及阶跃响应见表 38-1。

表 38-1 极点和对应的模态

极点类型	模 态
单重实数极点 p	e^{pt}
单重复数极点 $\alpha \pm j\beta$	$e^{\alpha t} \cos \beta t, e^{\alpha t} \sin \beta t$
r 重实数极点 p	$e^{pt}, t e^{pt}, \dots, t^{r-1} e^{pt}$
r 重复数极点 $\alpha \pm j\beta$	$e^{\alpha t} \cos \beta t, e^{\alpha t} \sin \beta t, t e^{\alpha t} \cos \beta t, t e^{\alpha t} \sin \beta t, \dots, t^{r-1} e^{\alpha t} \cos \beta t, t^{r-1} e^{\alpha t} \sin \beta t$

表 38-2 典型环节的传递函数及单位阶跃响应

环节名称	传递函数	单位阶跃响应
比例环节	K	
非周期环节	$K(Ts + 1)$	
积分环节	K/s	
实际微分环节	$KTs/(Ts + 1)$	
振荡环节	$K(T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)$	
延迟环节	e^{-Ts}	

脉冲传递函数,又称 Z 传递函数,定义为零初始条件下离散控制系统输出的 Z 变换与输入的 Z 变换之比,记之为 $\alpha(z)$,即

$$\alpha(z) \triangleq \left. \frac{Y(z)}{R(z)} \right|_{\text{零初始条件}} \quad (38-6)$$

考虑由 n 阶差分方程式 38-2 描述的离散控制系统。对差分方程进行 Z 变换,假设系统初始条件为零,利用平移定理,可得系统的脉冲传递函数

$$\alpha(z) = \frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n-1} z^{-n+1} + a_n z^{-n}} \quad (38-7)$$

在脉冲传递函数中 z^{-1} 称为一步延迟环节。与连续系统中的积分器 s^{-1} 相仿, z^{-1} 用于离散系统中,表示

不同采样时刻状态之间的关系。

第二节 控制系统的频域模型

一、频率特性

稳定的线性系统在正弦信号输入下,由于系统固有的运动模态将随时间衰减到零,稳态输出响应为同频的正弦信号。稳态输出与输入信号的幅值比和相位差是频率的函数,称为系统的频率特性。只要将传递函数中的复变量 s 替换为 $j\omega$,就可得到频率特性的复数表达式。

(1) 幅相频率特性 频率特性的复数形式为

$$G(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega) \quad (38-8)$$

式中 $R(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 分别是频率特性的实部和虚部。若用幅值比和相位差表示,可得到幅相频率特性

$$G(j\omega) = M(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = |G(j\omega)| \angle G(j\omega) \quad (38-9)$$

$$M(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{Q(\omega)}{R(\omega)}$$

式中 $M(\omega)$ 称为幅频特性, $\varphi(\omega)$ 称为相频特性,它们都是频率的函数。

将不同频率下的 $M(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 作为矢径和极角在 (ω, φ) 平面绘制的曲线,称为系统(或环节)的幅相频率特性,又称频率特性的极坐标图。幅相频率特性也可以通过实验测取,这时输入信号频率 ω 的变化范围通常取 0 到 ∞ 。

(2) 对数频率特性 利用开环频率特性研究闭环系统的动态、稳态性能是频率法的一大优点。系统的开环频率特性等于回路中各串联环节的频率特性的乘积

$$G(j\omega) = G_1(j\omega)G_2(j\omega)\dots G_n(j\omega) = M(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (38-10)$$

$$M(\omega) = M_1(\omega)M_2(\omega)\dots M_n(\omega)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \dots + \varphi_n(\omega)$$

将幅值 $M(\omega)$ 用 dB 分贝表示,得

$$L(\omega) = 20\lg M(\omega) = 20\lg M_1(\omega) + 20\lg M_2(\omega) + \dots + 20\lg M_n(\omega) = \sum_{i=1}^n 20\lg M_i(\omega) = \sum_{j=1}^n L_j(\omega) \quad (38-11)$$

以频率 ω 为横坐标(对数分度),以 $L(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 为纵坐标(均匀分度)的开环幅频和相频特性曲线又称为伯德(Bode)图,它表示了系统的对数频率特性。

二、典型环节的频率特性

典型环节频率特性表达式及极坐标图和 Bode 图见表 38-3。

表 38-3 典型环节的频率特性

环节名称	频率特性	幅相频率特性图	对数频率特性图
比例环节 $G(s) = K$	$G(j\omega) = Ke^{j0}$ $L(\omega) = -20lgK$ $\varphi(\omega) = 0$		
积分环节 $G(s) = 1/s$	$G(j\omega) = \frac{1}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}}$ $L(\omega) = -20lg\omega$ $\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$		
非周期环节 $G(s) = 1/(Ts + 1)$	$M(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$ $\varphi(\omega) = -\arctan \omega T$ $L(\omega) = -20lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$		
振荡环节 $G(s) = 1/(T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1)$	$M(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\zeta\omega T)^2}}$ $\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta\omega T}{1 - \omega^2 T^2}$		
延迟环节 $G(s) = e^{-\tau s}$	$G(j\omega) = e^{-j\omega\tau}$ $L(\omega) = 0$ $\varphi(\omega) = -\omega\tau$		

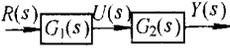
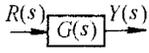
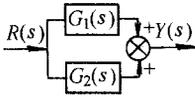
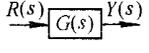
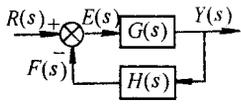
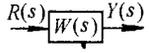
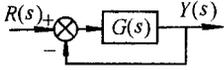
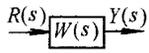
若干个典型环节串联时,只需分别将各环节的对数幅频特性曲线和相频特性曲线叠加即可得到总的频率特性。在右半 s 平面既无极点又无零点并且不存在延迟环节的系统称为最小相位系统。在具有相同幅频特性的系统中,最小相位系统的相位变化范围是最小的。

第三节 控制系统传递函数

一、系统结构图及等效变换

控制系统的结构图,又称为框图,是系统中各个环节的传递函数和信号流向的图解表示。对于复杂系统,可以通过结构图等效变换求出系统的传递函数。等效变换的原则是输入输出等效,如表 38-4 所示。

表 38-4 框图简化原则

联结方式	框图	等效环节框图	等效环节传递函数
串联			$G(s) = G_1(s)G_2(s)$
并联			$G(s) = G_1(s) + G_2(s)$
反馈联结			$W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{G(s)}{1 + G_0(s)}$
单位反馈联结			$W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$

表中对于反馈联结的闭环系统有以下定义：

前向通道传递函数 $G(s)$ ：

输出量 $Y(s)$ 与作用误差信号 $E(s)$ 之比

反馈通道传递函数 $H(s)$ ：

反馈信号 $F(s)$ 与输出 $Y(s)$ 之比

开环传递函数 $G_0(s) = G(s)H(s)$ ：

反馈信号 $F(s)$ 与作用误差信号 $E(s)$ 之比

闭环传递函数 $W(s)$ ：

输出量 $Y(s)$ 与输入量 $R(s)$ 之比

二、信号流程图

信号流程图是线性代数方程组的一种图解表示。当控制系统的微分方程组经过拉氏变换变成以 s 为变量的代数方程组后,就可画出系统的信号流程图。当然,也可以根据系统的框图画出信号流程图,如图 38-1 所示。

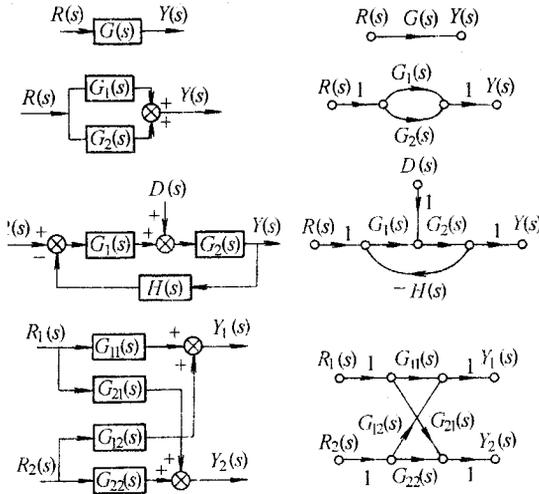


图 38-1 结构图与对应的信号流程图

信号流程图中的每个节点代表一个变量,两个节点间的传递函数称为支路增益,每个变量等于所有指向该节点的支路的增益与相应节点变量的乘积之和。一个通路的增益是构成该通路的各支路增益的乘积。起始并终止在同一节点的通路称为回路。应用信号流程图计算系统输入-输出总增益(系统传递函数)的梅逊(Mason)公式为

$$P = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \Delta_k}{\Delta}$$

$$\Delta = 1 - \sum L_1 + \sum L_2 - \dots + (-1)^m \sum L_m \tag{38-12}$$

式中 $\sum L_1$ ——所有不同回路增益之和;
 $\sum L_2$ ——任何两个互不接触回路增益乘积之和;

第四节 控制系统的状态空间模型

一、动态方程

能完全决定系统运动状态的最小一组独立变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 称为状态变量。已知系统在初始时刻 t_0 的状态变量 $x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0)$ 以及 $t \geq t_0$ 时的控制作用 $u(t)$ 就可以惟一地确定系统在 $t \geq t_0$ 时的状态。由状态变量 x_1, \dots, x_n 为坐标所构成的 n 维空间称为状态空间,列向量 $(x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ 称为

时刻 t 的状态向量,简称状态,它对应状态空间中的一个点,状态点随时间在状态空间中的运动曲线称为系统的状态轨迹。

线性定常系统的状态空间表达式为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (38-13)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (38-14)$$

式中 $x(t)$ 是 n 维状态向量, $\dot{x}(t)$ 是状态对时间的一阶导数 $\frac{d}{dt}x(t)$, $y(t)$ 是 m 维输出向量, $u(t)$ 是 r 维输入向量, A 、 B 、 C 、 D 分别为 $n \times n$ 、 $n \times r$ 、 $m \times n$ 、 $m \times r$ 矩阵。式 38-13 称为状态方程,式 38-14 称为输出方程,状态方程和输出方程统称为系统的动态方程。通常,系统可以简记为 $\Sigma(A, B, C, D)$ 。

令初始状态 $x(0) = 0$,对动态方程进行拉氏变换,可得系统传递函数(矩阵)

$$G(s) = C[sI - A]^{-1}B + D = \frac{\text{Cof}[sI - A]^{-1}B}{\text{de}(sI - A)} + D \quad (38-15)$$

式中,行列式 $\text{de}(sI - A)$ 称为系统的特征多项式,它的根称为特征根。

多输入多输出离散系统的状态方程的一般形式为

$$x(k+1) = Fx(k) + Gu(k) \quad (38-16)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (38-17)$$

式中, $u(k)$ 为 r 维输入向量, $y(k)$ 为 m 维输出向量。

连续的控制对象 $\Sigma(A, B, C, D)$ 可离散化为式 38-16 和 38-17,其中 $F = e^{AT}$, $G = \int_0^T e^{At}d(38-18)T$ 为采样周期(38-18)。

二、标准型

动态方程表示了系统的状态变量与输入输出之间的关系,是系统完整的描述。对于同一控制系统,状态变量的选择不是惟一的,但状态变量的个数是不变的,它等于系统的阶次,并且系统的特征根和传递函数(矩阵)也是不变的。传递函数对应的动态方程不是惟一的,其中与传递函数阶次相等的那一类称为传递函数的最小实现。为了方便,通常使用几种标准型,如能控标准型,能观标准型,基于特征值的标准型(约当型、对角线型)。

例如对于单输入单输出系统

$$G(s) = \frac{b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (38-19)$$

能控标准型为

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (38-20)$$

$$C_c = [b_m \quad b_{m-1} \quad \dots \quad b_0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

能观标准型为

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_{n-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_1 \end{bmatrix} = A_c^T$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} b_m \\ \vdots \\ b_{m-1} \\ b_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = C_c^T \quad (38-21)$$

$$C_0 = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1] = B_c^T$$

状态空间模型借助数字计算机可实现对多输入多输出(MIMO)系统、时变系统、非线性系统的最优控制、自动应控制等等。

三、线性定常系统状态方程的求解

线性定常系统(38-13)在 $u(t) \equiv 0$ 时的自由运动是状态方程的齐次解。

$$\dot{x}(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) \quad (38-22)$$

式中 $x(t_0) = x_0$ 为初始状态, $e^{A(t-t_0)}$ 是矩阵指数, 又称状态转移矩阵, 定义为

$$e^{A(t-t_0)} = I + A(t-t_0) + \frac{A^2(t-t_0)^2}{2!} + \dots + \frac{A^k(t-t_0)^k}{k!} + \dots \quad (38-23)$$

状态转移矩阵也可通过对式(38-13)进行拉氏变换求解:

$$e^{At} = L^{-1}[(sI - A)^{-1}] = L^{-1}\left[\frac{adj(sI - A)}{\det(sI - A)}\right] \quad (38-24)$$

若 $u(t) \neq 0$ 线性定常系统的运动是状态方程的非齐次解:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (38-25)$$

第三十九章 非线性控制系统

第一节 非线性系统的稳定性分析

一、非线性系统稳定性分析的线性近似法

线性近似法又称李亚普诺夫第一方法。考虑非线性自治系统,将 (x) 在平衡状态 x_e 附近按泰勒级数展开,并注意到在平衡状态 x_e 处 $f(x_e) = 0$,有

$$f(x) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_e} \tilde{x} + g(x_e, \tilde{x}) \quad (39-1)$$

式中 $\tilde{x} = x - x_e$ 是偏差向量, $g(x_e, \tilde{x})$ 是级数中所有 \tilde{x} 等于和高于二阶的项,而

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_e} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \bigg|_{x=x_e} = A \quad (39-2)$$

称为雅可比矩阵。非线性系统在平衡状态 x_e 邻域的线性化近似模型为

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} \quad (39-3)$$

李亚普诺夫证明了:如果 A 的所有特征值的实部均为负,则线性化近似模型渐近稳定,并且原非线性系统的平衡状态 x_e 也是渐近稳定的;只要 A 有一个特征值的实部为正,则线性化模型不稳定,原非线性系统的平衡状态 x_e 也不稳定;如果 A 的所有特征值的实部均不为正,但至少有一个特征值的实部为零,则线性化模型在李亚普诺夫意义下稳定,但在这种情况下,不能对非线性系统得出任何结论,原非线性系统的平衡状态 x_e 是否稳定取决于被忽略的高阶项。

二、李亚普诺夫直接法

简称直接法,又称李亚普诺夫第二方法。它可以不求解系统的运动方程,直接用李亚普诺夫稳定性定理判断平衡点的稳定性。

定理 1 设自治系统的状态方程为

$$\dot{x} = f(x) \quad \text{平衡状态 } x_e = 0 \quad f(0) = 0 (t \geq t_0)$$

(39-4)

若存在一个具有连续一阶偏导数的标量函数 $V(x)$,且满足下列条件:1) $V(x) > 0$,即 $V(x)$ 是正定的;2) $\dot{V}(x) < 0$,即 $\dot{V}(x)$ 是负定的;3) $V(x) \rightarrow 0$ 当且仅当 $x \rightarrow 0$ 时成立,则平衡状态 $x_e = 0$ 是渐近稳定的。

$\dot{V}(x) \leq 0$, 即 $\dot{V}(x)$ 是负半定的, 则系统的平衡状态 $x_c = 0$ 在李亚普诺夫意义下稳定。

定理 2 对于系统 39-4, 若存在一个具有连续一阶偏导数的标量函数 $V(x)$, 且满足下列条件 (1) $V(x)$ 是正定的 (2) $\dot{V}(x)$ 是负定的, 则系统的平衡状态 $x_c = 0$ 是渐近稳定的。进一步, 若 (3) 当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时, $V(x) \rightarrow \infty$, 则系统的平衡状态 $x_c = 0$ 是大范围 (全局) 渐近稳定的。

定理 3 对于系统 39-4, 若存在一个具有连续一阶偏导数的标量函数 $V(x)$, 且满足下列条件 (1) $V(x)$ 是正定的 (2) $\dot{V}(x)$ 是负半定的, 而且除了原点外, 系统状态轨迹上 $\dot{V}(x)$ 不恒为零, 则系统的平衡状态 $x_c = 0$ 是渐近稳定的。

定理 4 对于系统 39-4, 若存在一个具有连续一阶偏导数的标量函数 $W(x)$, 且满足下列条件 (1) $W(x)$ 在原点的某一邻域内是正定的 (2) $\dot{W}(x)$ 在同样的邻域内也是正定的, 则系统的平衡状态 $x_c = 0$ 是不稳定的。

关于李亚普诺夫稳定性定理的说明 (1) 上面四个定理讨论的是平衡状态在原点时的稳定性。对于不在原点的平衡状态, 可以通过坐标变换平移到坐标原点。(2) 定理 1~3 中的标量函数 $V(x)$ 称为李亚普诺夫函数, 它可以看作自治系统中储存的“能量”, 而 $\dot{V}(x)$ 表示系统储能衰减的速度。李亚普诺夫函数的选择尚无通用方法。对于同一个系统, 可以存在许多个李亚普诺夫函数 (3) 定理 1~3 仅是稳定的充分条件, 不是必要条件。(4) 关于非自治系统的稳定性, 见参考文献 [12]。

第二节 非线性系统的线性化

一、线性化近似方法

若非线性系统只限于在指定的工作点附近变化, 或只限于在期望的参考轨线附近小扰动, 则可以通过线性化处理。考虑系统

$$\dot{x} = f(x, u) \tag{39-5}$$

它的参考轨线满足方程

$$\dot{x}^* = f(x^*, u^*) \tag{39-6}$$

如图 39-1 中实线表示。参考输入 $u^*(t)$ 产生参考轨线 $x^*(t)$, 系统的实际轨线在图中用虚线表示, 它与参考轨线之间的关系为 $x = x^* + \delta x, u = u^* + \delta u$ 。

系统的原始非线性方程 39-5 可以表示为

$$\frac{d}{dt}(x^* + \delta x) = \dot{x}^* + \delta \dot{x} = f(x^* + \delta x, u^* + \delta u) \tag{39-7}$$

由于假设扰动非常小, 将上式按泰勒级数在参考轨迹附近展开, 其第 j 个分量为

$$\dot{x}_j^* + \delta \dot{x}_j \approx f_j(x^*, u^*) + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \delta x_n + \frac{\partial f_j}{\partial u_1} \delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial u_r} \delta u_r \tag{39-8}$$

利用式 39-6, 式 39-8 变为

$$\dot{x} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \delta x_n + \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \delta u_r, j = 1, 2, 3, \dots, n \tag{39-9}$$

或写成矩阵形式:

$$\delta \dot{x} = A \delta x + B \delta u \tag{39-10}$$

式中 A 和 B 称为雅可比 (Jacobian) 矩阵,

$$A = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \right|_{\substack{x = x^* \\ u = u^*}}$$

$$B = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \right|_{\substack{x = x^* \\ u = u^*}} \quad (39-11)$$

雅可比矩阵中所有偏导数是沿参考轨道求值的。方程 39-10 非常重要,它说明尽管描述参考轨道的原始微分方程是非线性的,但是在小扰动下可以进行线性化处理。这种方法又称为小扰动法或摄动法。

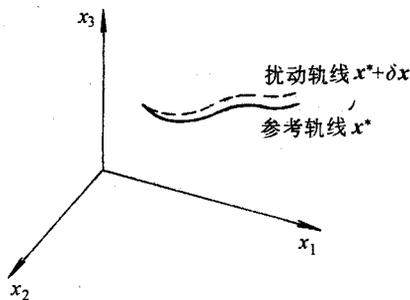


图 39-1 参考轨线与扰动轨线

二、反馈线性化

反馈线性化是 80 年代发展起来的一种新颖的非线性控制设计方法。它的基本思想是通过代数变换将一个非线性系统的动态特性全部地或部分地转换成线性动态特性,从而可以应用成熟的线性控制方法。与处理小扰动的线性化方法完全不同,反馈线性化是通过严格的状态变换与反馈而达到的。

最简单形式的反馈线性化,就是抵消非线性并施加一个期望的线性动态特性。假定系统由能控标准型表示,即

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ f(x) + l(x)u \end{bmatrix} \quad (39-12)$$

式中 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1}]^T$ 是状态向量, x_n 是标量输出, $f(x)$ 和 $l(x)$ 是状态的非线性函数, u 为标量控制输入。在上式中,若选取控制输入

$$u = \frac{v - f(x)}{l(x)} \quad (39-13)$$

就能抵消掉非线性而得到一个简单的输入-输出关系

$$x^{(n)} = v \quad (39-14)$$

控制律可取为

$$v = -a_0 x - a_1 \dot{x} - \dots - a_{n-1} x^{(n-1)} \quad (39-15)$$

选择系数 $a_i, i=0, 1, \dots, n-1$, 使多项式 $s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0$ 所有特征根的实部均为负,从而保证系

统

$$x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_1\dot{x} + a_0x = 0 \tag{39-16}$$

具有指数衰减的特性,即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) \rightarrow 0$ 。

对于踪参考轨迹 $x_d(t)$ 的系统,可取

$$v = x_d^{(n)} - a_0e - a_1\dot{e} - \dots - a_{n-1}e^{(n-1)} \tag{39-17}$$

式中 $e = x(t) - x_d(t)$ 为跟踪误差,该控制律可以保证 $x(t)$ 按指数规律衰减到零,从而实现指数收敛跟踪。

反馈线性化分为输入-状态线性化和输入-输出线性化两大类。输入-状态线性化可实现系统完全线性化,而输入-输出线性化只能实现部分的线性化。这两种方法已成功地应用于一些工程实际问题。然而,反馈线性化方法也存在以下局限性(1)并不对所有的非线性系统都适用(2)要求对全部状态量进行测量;(3)当参数不确定或模型未包括对象某些动态特性时,系统鲁棒性没有保障。

第三节 相平面法与描述函数法

一、相平面法

(一)相轨迹和相平面图

(1)相平面法 求解二阶系统的一种图解方法。考虑非线性二阶系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \tag{39-18}$$

它的状态空间是以 x_1 为横坐标, x_2 为纵坐标的平面,通常称为相平面。给定初始状态 $x(0) = x_0$,方程 39-18 确定一个解 $x(t)$ 。当时间 t 变化时,状态点 (x_1, x_2) 在相平面上运动,形成一条曲线,称为相轨迹。对于各种可能的初始状态,可以得到一族相轨迹。相平面和相轨迹族总称为相平面图或相图。

(2)相轨迹的斜率 二阶系统可以表示为微分方程。

$$\ddot{x} + f(x, \dot{x}) = 0 \tag{39-19}$$

选取状态变量 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}$, 则可得到相轨迹的斜率为

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{dx_2/dt}{dx_1/dt} = \frac{-f(x_1, x_2)}{x_2} \tag{39-20}$$

若相轨迹与 x 轴相交,且在交点上 $f(x_1, x_2) \neq 0$, 则相轨迹曲线与 x 轴垂直相交。

(3)奇点 相平面上的一个点 (x, \dot{x}) 只要不同时满足 $\dot{x} = 0$ 和 $f(x, \dot{x}) = 0$, 则通过该点的相轨迹的斜率就由式(39-20)唯一确定,这种点称为常点,通过常点的相轨迹只有一条。同时满足 $\dot{x} = 0$ 和 $f(x, \dot{x}) = 0$ 的点称为奇点(平衡点)。通过奇点的相轨迹不止一条,且斜率不同。线性系统一般只有一个奇点,或者可能存在一个连续分布的奇点集合。然而,非线性系统往往有一个以上的孤立奇点。例如,系统

$$\ddot{x} + 0.6\dot{x} + 3x + x^2 = 0 \tag{39-21}$$

有二个奇点 $(0, 0)$ 和 $(-3, 0)$ 。两个奇点附近,相轨迹完全不同,如图 39-2 所示。

(二)极限环的稳定性

相平面上极限环是一条孤立的封闭相轨迹。孤立和封闭反映了极限周期运动的特征。极限环附近的相轨迹要么收敛于它,要么从它发散。极限环内部(外部)的相轨迹,永远不可能穿过极限环进入它的外部(内部)。极限环按稳定性可分为三类(见图 39-3)(1)稳定极限环 当 $t \rightarrow \infty$ 时,极限环附近的所有相轨迹都收敛于该极限环,这种极限环对应稳定的自持振荡。(2)不稳定极限环 当 $t \rightarrow \infty$ 时,极限环附近所有相轨迹都从该极限环发散。(3)半稳定极限环当 $t \rightarrow \infty$ 时,极限环内部(外部)的相轨迹都收敛于该极限环,而极限

环外部(内部)的相轨迹都从该极限环发散。

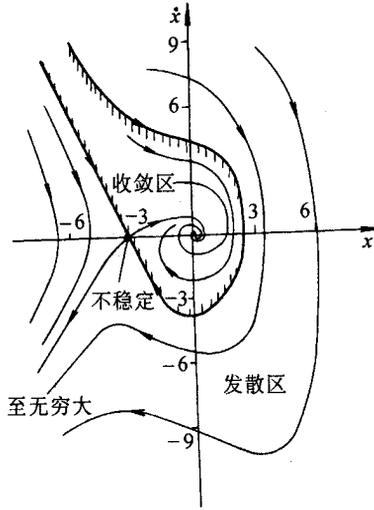


图 39-2 式(39-21)表示的非线性系统的相图

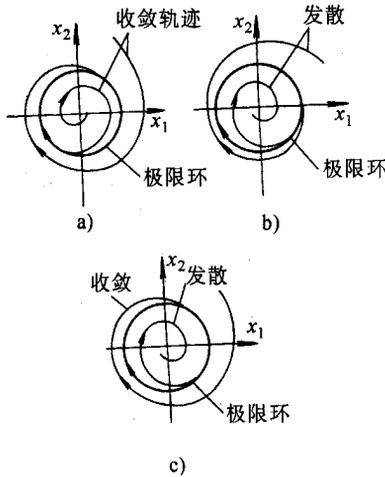


图 39-3 稳定、不稳定和半稳定极限环
a) 稳定极限环 b) 不稳定极限环 c) 半稳定极限环

二、描述函数法

(一) 非线性系统的描述函数

描述函数是线性系统频率响应概念的推广。假定非线性系统可以看成由一个非线性环节 N 和线性部分 $G(s)$ 串联组成,如图 39-4 所示。

假设 N 的输入是正弦信号 $x(t) = A \sin \omega t$, 输出为周期信号

$$\begin{aligned}
 u(t) &= W_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin k\omega t + b_k \cos k\omega t) \\
 &= W_0 + \sum_{k=1}^{\infty} W_k \sin(k\omega t + \phi_k)
 \end{aligned}$$

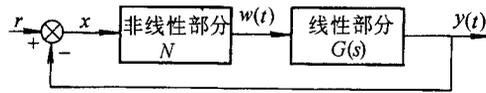


图 39-4 非线性系统

(39-22)

由直流分量 W_0 基波和高次谐波组成。在 $u(t)$ 作用下，系统的线性部分 $G(s)$ 的输出 $y(t)$ 也包含有相应的频率分量，各个分量的幅值和相位取决于 $u(t)$ 中各次谐波的幅值和相位，以及线性部分的频率特性 $G(j\omega)$ 。

若非线性特性 N 关于原点对称，则 $u(t)$ 中直流分量为零，同时设 $u(t)$ 中的谐波分量相对于基波很小，并且线性部分 $G(j\omega)$ 具有较好的低滤波特性，则 $y(t)$ 中无直流分量，谐波分量也很小。这时可认为在非线性环节的输入 $u(t)$ 中，只有基波 $w_1(t) = W_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ 起作用，非线性环节的特性就可用输出中基波分量 $w_1(t)$ 与输入信号 $x(t)$ 之间的关系近似描述。

非线性元件的描述函数定义为输出中基波分量与正弦输入的复数符号之比

$$N(A, \omega) = \frac{W_1}{A} e^{j\phi_1} \tag{39-23}$$

若非线性环节中不包含储能元件， $u(t)$ 则与频率无关，描述函数只是输入的振幅的函数， $N = N(A)$ 。如果非线性环节的特性是单值且关于原点对称， $u(t)$ 为奇函数。式 39-22 中， $W_0 = 0, b_k = 0, \phi_k = 0$ ，描述函数是实数型非线性增益。

描述函数与线性系统的频率特性函数虽然都是用正弦输入和输出信号表示，但描述函数是振幅和频率的函数，而线性系统的频率特性与输入信号振幅无关。

(二) 非线性系统的描述函数分析

描述函数可以用来分析非线性系统的稳定性，判断系统是否存在极限环并确定极限环的幅值和频率，如果图 39-5 中的非线性特性与频率 ω 无关，系统存在自持振荡的必要条件为

$$N(A)G(j\omega) + 1 = 0 \quad G(j\omega) = -\frac{1}{N(A)} \tag{39-24}$$

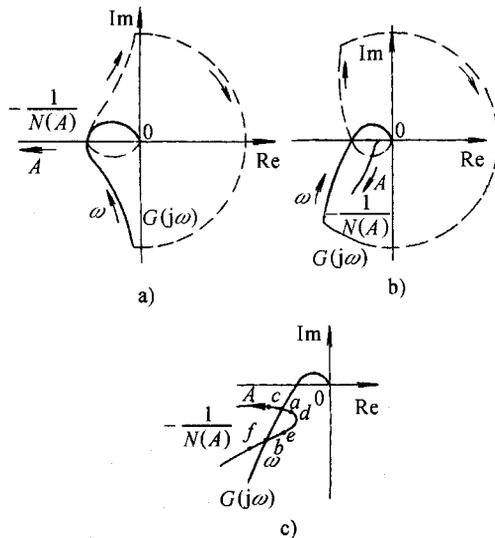


图 39-5 非线性系统的稳定性

如果系统的线性部分是最小相位的，根据奈氏稳定性判据：当 ω 从 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时，若 $-1/N(A)$ 曲线没有被 $G(j\omega)$ 曲线包围，如图 39-5a 所示，则系统是稳定的；若 $-1/N(A)$ 曲线被 $G(j\omega)$ 曲线包围，如图 39-5b 所示，则系统是不稳定的；若 $-1/N(A)$ 曲线与 $G(j\omega)$ 曲线相交，如图 39-5c 所示，则系统有可能产生自持振荡，其振幅和频率为交点上 $-1/N(A)$ 曲线的 A 值与 $G(j\omega)$ 曲线的 ω 值。若在交点处，当幅值 A 增大

时, $-1/N(A)$ 曲线向 $G(j\omega)$ 曲线包围区域以内移动, 则该交点的自持振荡是不稳定的, 如图 39-5c 中的 b 点。反之, 当 A 增大时, $-1/N(A)$ 曲线向 $G(j\omega)$ 曲线包围区域以外移动, 则该交点的自持振荡是稳定的, 如图 39-5 中的 a 点就对应着稳定的自持振荡。

描述函数法是近似方法, 如果曲线 $-1/N(A)$ 与 $G(j\omega)$ 几乎垂直相交, 则所得结果的准确度比较高。若曲线 $-1/N(A)$ 与 $G(j\omega)$ 几乎相切, 则以上判断的准确性在很大程度上依赖于 $G(j\omega)$ 的低通滤波特性。

若描述函数同时为振幅和频率的函数, 即 $N = N(A, \omega)$ 则可按图 39-5 绘制曲线族 $N(A, \omega)G(j\omega)$ 。复平面上曲线 $N(A, \omega)G(j\omega)$ 穿过 $(-1, 0)$ 点表示可能产生自持振荡, 振幅为该曲线的 A 值, 频率为点 $(-1, 0)$ 上的 ω 值。

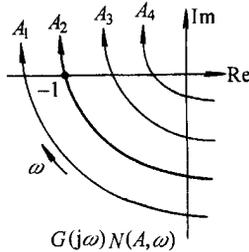


图 39-6 方程 $G(j\omega)N(A, \omega) + 1 = 0$ 的图解法

在非线性和控制系统中, 应用描述函数法可以通过降低系统增益、引入校正网络或速度反馈, 来消除不希望产生的自持振荡。

第四十章 电气控制故障分析与调试

第一节 起重机电路故障分析

起重机是一种用来起吊和放下重物,以及在固定范围内装卸、搬运材料的起重机械,广泛应用于工矿企业、车站、港口、仓库和建筑工地等场所。按其结构的不同,起重机可分为桥式起重机、门式起重机、塔式起重机、旋转起重机和缆索起重机等,其中桥式起重机用得最为普遍。下面以 10t 桥式起重机为例,对其在运行中可能存在的故障进行分析。

一、电气控制线路分析

10t 桥式起重机电气控制线路如图 40-1 所示。

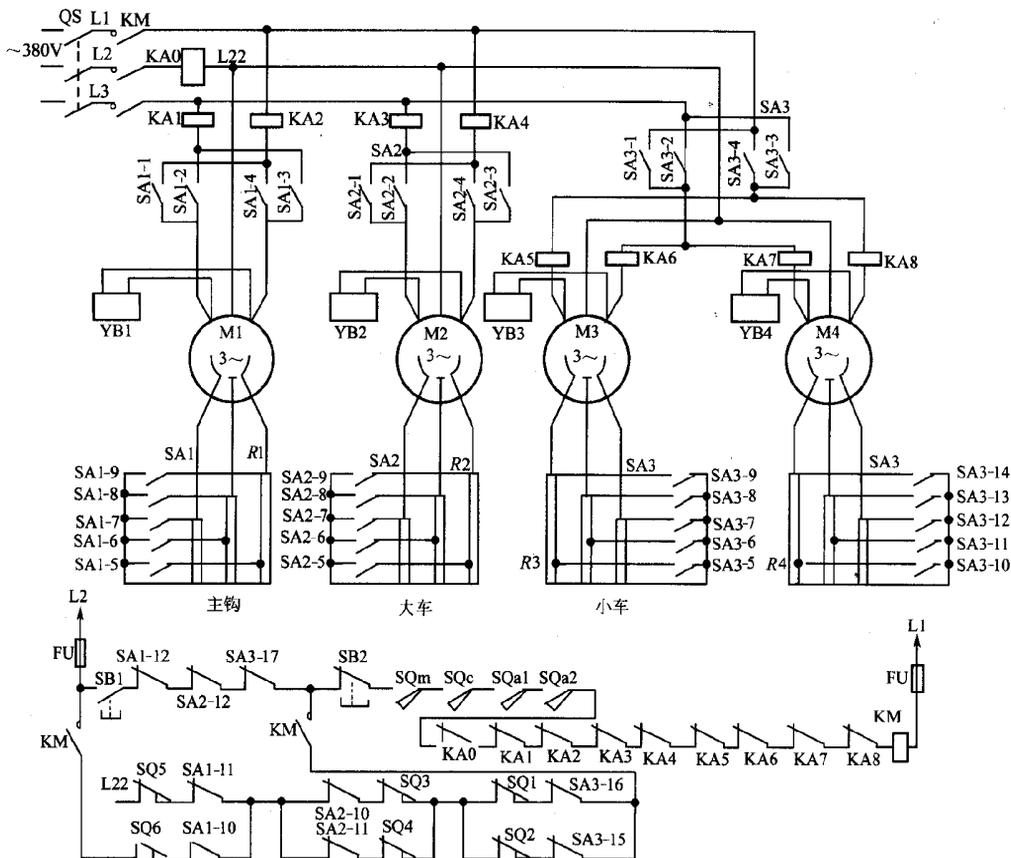


图 40-1 10t 桥式起重机电气控制线路

起重机有 4 台电动机拖动 :M1 为提升电动机 ;M2 为小车电动机 ;M3、M4 为大车电动机。R1 ~ R4 是 4 台电动机的调速电阻。电动机的转速用左右各有 5 个操作位置的凸轮控制器控制。SA1 控制 M1 ,SA2 控制 M2 ,SA3 控制 M3 和 M4。分别用制动器 YB1 ~ YB4 进行停车制动。

二、常见故障分析与处理

起重机电气设备在运行过程中的故障可分为两类 :即电气设备本身的故障和操作中发生的故障。下面就其主要电气设备以及操作中经常出现的故障进行分析 ,并指出相应的解决办法。

1. 交流制动电磁铁的故障及排除办法 交流制动电磁铁的故障及排除办法如表 40 - 1 所示。

表 40 - 1 交流制动电磁铁的故障及排除办法

故 障	故障原因	排除方法
线圈过热	①电磁铁的牵引力过载 ②在工作位置上电磁铁可动部分与静止部分有间隙 ③制动器的工作条件与线圈的特性不符 ④线圈的电压与线路电压不符	①调整弹簧的压力或重锤位置 ②调整制动器的机械部分 ,可以消除间隙 ③换以符合工作条件的线圈 ④更换线圈 ,如为三相电磁铁 ,可将三角形改接成星形连接
产生较大的响声	①电磁铁过载 ②磁导体工作表面脏污 ③磁面变曲	①调整弹簧压力或变更重锤位置 ②清除磁导体表面上的脏污 ③调整机械部分 ,以消除磁路弯曲现象
电磁铁不能克服弹簧及重锤重量的力	①电磁铁过载 ②所采用的线圈电压大于线路电压 ③线路中电压显著降低	①调整制动器的机械部分 ②更换线圈或将星形连接改成三角形连接 ③消除引起线路中电压下降的原因

2. 继电器 - 接触器的故障及排除方法 继电器 - 接触器的故障及排除方法如表 40 - 2 所示。

表 40 - 2 继电器 - 接触器的故障及排除方法

故 障	故障原因	排除方法
接触器线圈过热	①线圈过载 ②线圈有短路现象 ③活动磁导体没有在应在的部位	①减少动触点对静触点的压力 ②更换线圈 ③检查磁导体有无歪斜、卡住及脏物等 ,并消除

故障	故障原因	排除方法
接触器有响声	①线圈过负荷 ②磁导体工作面脏 ③磁铁系统歪斜 ④短路环损坏	①减少动触点对静触点的压力 ②消除工作面脏污 ③进行调整 ④更换
接触器动作	①磁导体活动部分,固定部分太远 ②底板的上部比下部突出	①把磁导体两部分靠近 ②接触器严格垂直安装
电压切断后,磁铁系统不落下	①底板的下部比上部突出 ②触点压力不足	①接触器严格垂直安装 ②调节压力
触点过热或烧焦	①可动触点对静止触点的压力太小 ②触点脏污	①调节弹簧压力 ②清除脏污

3. 控制器的故障及排除方法 – 控制器的故障及排除方法如表 40-3 所示。

表 40-3 控制器的故障及排除方法

故障	故障原因	排除方法
控制器在工作过程中产生卡住或冲动现象	①接触指粘在铜片上 ②定位机构发生故障	①调整接触指的位置 ②检查并修理固定销
接触指与铜片间冒火	①接触指与铜片间接触不良 ②控制器过载	①调整接触指对铜片的压力(利用调整螺丝或弹簧来调) ②改变工作规范或更换控制器
控制器元件和指杆被烧	①元件与指杆接触不良 ②控制器容量偏小	①调节指杆压力 ②更换大容量控制器

4. 操作过程中的故障及排除方法 操作过程中的故障及排除方法如表 40-4 所示。

表 40-4 操作过程中的故障及排除方法

故障	故障原因	排除方法
合上保护盘上的闸刀开关时,操作电路的熔断器熔断	操作电路中与保护器械相连的一相接地	检查绝缘并消除接地现象

故障	故障原因	排除方法
主接触器不能接通	① 闸刀开关未合上 ② 紧急开关未合上 ③ 入孔未关闭 ④ 控制器未放在工作位置上 ⑤ 线路无电压 ⑥ 操作电路的熔断器熔丝熔断 ⑦ 接触器线圈坏	①~④检查有关电器的状况,根据情况分别处理之 ⑤查清无电压的原因并消除之 ⑥更换熔丝 ⑦更换线圈
当主接触器合上后,引入线上的熔断器熔断	该相接地	用兆欧表找出接地点,并消除之
当主接触器合上后,过电流继电器动作和接触器自动释放	控制器的电路接地	将保护盘至控制器的导线断开,然后再将其逐步接上,每当接上一根导线后,要合上一次接触器。根据过电流继电器动作确定接地的导线,再用兆欧表找出接地点
当控制器合上后,过电流继电器动作	① 过电流继电器的整定值不符 ② 定子线路接地 ③ 机械部分某一环卡死	① 调整继电器的电流值,使其为电动机额定电流的 225% ~ 250% ② 用兆欧表找出绝缘损坏的地方 ③ 检查机械部分并消除故障
当控制器合上时,电动机不转动	① 一相断电,电动机发出响声 ② 线路上无电压 ③ 控制器接触指与铜片未接触 ④ 转子电路断线 ⑤ 继电器发生故障	① 找出断电原因,并消除之 ② 用指示灯检查有无电压,若无电压,应加上 ③ 检查控制器,使其接触指与铜片接触好 ④ 检查转子电路 ⑤ 检查继电器
当控制器合上后,电动机仅能在一个方向转动	① 控制器中定子电路或终端开关电路的接触指与铜片未接触 ② 终端开关有故障 ③ 配线有故障	① 检查控制器,并调整接触指,使它与铜片接触良好 ② 消除终端开关的故障 ③ 用试灯找出故障处并消除之

故障	故障原因	排除方法
电动机不能发出额定功率,速度减慢	①制动器未完全松开 ②转子或电枢电路中的启动电阻未完全切除 ③线路中的电压下降 ④机构卡住	①检查并调整制动机构 ②检查控制器,并调整其接触指 ③消除引起电压下降值超过标准的原因 ④检查机构并消除故障
三相交流起重机构改变原有运动方向	检修线路时将电动机的相序接错	更换任意两相导线恢复相序
当终端开关的杠杆动作时,相应的电动机不断电	①终端开关的电路发生短路现象 ②接至控制器的导线次序错乱	①检查引至终端开关的导线 ②检查接线系统
在起重机运行中接触器短时断电	接触器线圈电路中联锁触点的电压不足	检查各联锁触点的压力
当操作控制器切断后,接触器不释放	操作电路中有接地	用兆欧表找出接地点,并排除之
磁力控制器不全部工作	①不工作的接触器电路中的联锁触点发生故障 ②操作控制器的触点发生故障	①按起重机电路参数检查联锁触点并调整之 ②按电路图检查并调整操作控制器的触点
启动时,电动机不平稳,在控制器的最后位置上,有时速度减低	①转子回路有断开处 ②控制器转子部分有故障 ③控制器和电阻之间的配线有错误	①检查转子回路接线,检查电阻器有无损坏元件 ②修理和调整控制器 ③按原理图检查接线,并更正接线错误
电动机只能单方向旋转	①某方向的接触器线圈烧坏 ②线路中某处有断线	①更换线圈 ②找出断线处并接好
控制器的手把和操纵轮转不动或转不到头	①定位机构有毛病 ②指杆落在凸轮块的下面	①检查定位机构 ②调整指杆的位置

第二节 常见的故障分析方法

由于应用在不同的场合,因而各种电气控制线路具有不同的特点。但对于各种不同电气控制线路的故障,采用的分析方法是大同小异的,也就是所谓的基本检修方法。这些方法包括直观法、电压测量法、电阻测

量法、对比法、置换元件法、逐步开路法、强迫闭合法和短接法等。实际检修时,要综合运用上述方法,并根据积累经验,对故障现象进行分析,快速准确地找到故障部位,采取适当方法加以排除。

一、直观法

直观法是根据电器故障的外壳表现,通过目测、鼻闻、耳听等手段,来检查、判断故障的方法。

(一)检查步骤

1. 调查情况 向机床操作者和故障在场人员询问故障情况,包括故障外部表现、大致部位、发生故障时环境情况(如有无异常气体、明火等,热源是否靠近电器,有无腐蚀性气体侵蚀,有无漏水等),是否有人修理过、修理的内容等。

2. 初步检查 根据调查的情况,看有关电器外部有无损坏,连线有无断路、松动,绝缘有无烧焦,螺旋熔断器的熔断指示器是否跳出,电器有无进水、油垢,开关位置是否正确等。

3. 试车 通过初步检查,确认不会使故障进一步扩大和造成人身、设备事故后,可进行试车检查。试车中要注意有无严重跳火、冒火、异常气味、异常声音等现象,一经发现应立即停车,切断电源。注意检查电机的温升及电器的动作程序是否符合电气原理图的要求,从而发现故障部位。

(二)检查方法及注意事项

1. 用观察火花的方法检查故障 电器的触点在闭合、分断电路或导线线头松动时会产生火花,因此可以根据火花的有无、大小等现象来检查电器故障。例如,正常固紧的导线与螺钉间不应有火花产生,当发现该处有火花时,说明线头松动或接触不良。电器的触点在闭合、分断电路时跳火,说明电路是通路,不跳火说明电路不通。当观察到控制电动机的接触器主触点两相有火花,一相无火花时,无火花的触点接触不良或这一相电路断路。三相中有两相的火花比正常大,另一相比正常小,可初步判断为电动机相间短路或接地。三相火花都比正常大,可能是电动机过载或机械部分卡住。在辅助电路中,若接触器线圈电路为通路,衔铁不吸合,要分清是电路断路,还是接触器机械部分卡住造成的。可按一下启动按钮,如按钮常开触点在闭合位置,断开时有轻微的花火花,说明电路为通路,故障在接触器本身机械部分卡住等,如触点间无火花,说明电路是断路。

2. 从电器的动作程序来检查故障 机床电器的工作程序应符合电器说明书和图纸的要求,如某一电路上的电器动作过早、过晚或不动作,说明该电路或电器有故障。还可以根据电器发出的声音、温度、压力、气味等分析判断故障。另外,运用直观法,不但可以确定简单的故障,还可以把较复杂的故障缩小到较小的范围。

3. 注意事项

(1) 当电器元件已经损坏时,应进一步查明故障原因后再更换,不然会造成元件的连续烧坏。

(2) 试车时,手不能离开电源开关,以便随时切断电源。

(3) 直观法的缺点是准确性差,所以,不经进一步检查不要盲目拆卸导线和元件,以免延误时机。

二、测量电压法

(一)检查方法和步骤

1. 分阶测量法 电压的分阶测量法如图 40-2 所示。

当电路中的行程开关 SQ 和中间继电器的常开触点 KA 闭合时,按启动按钮 SB1 接触器 KM1 不吸合,说明电路有故障。检查时把万用表扳到电压 500V 挡位上,首先测量 A、B 两点电压,正常值为 380V。然后按启动按钮不放,同时将黑色测试棒接到 B 点上,红色测试棒按标号依次向前移动,分别测量标号 2、11、9、7、5、3、1 各点的电压。电路正常的情况下,B 与 2 两点之间无电压,B 与 11~1 各点电压均为 380V。如 B 与 11 间无

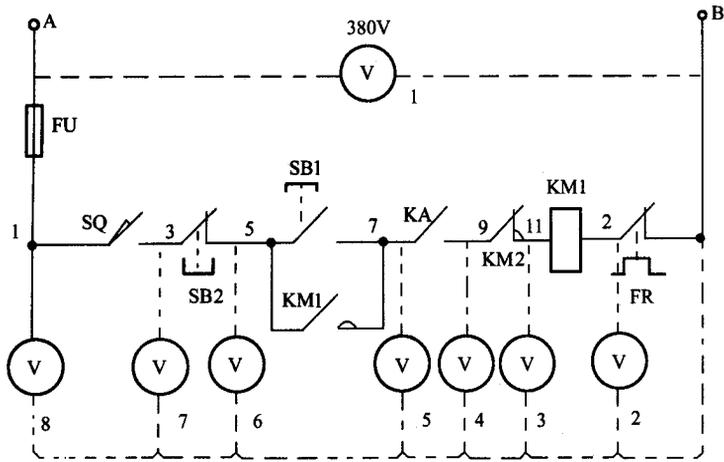


图 40-2 电压的分阶测量法

电压,说明是电路故障,可将红色测试棒前移。当移至某点时电压正常,说明该点前开关触点是完好的,此点以后的开关触点或接线断路。一般是此后第一个触点(即刚刚跨过的触点)或连线断路。例如,测量到9时电压正常,说明接触器KM2的常闭触点或9所连导线接触不良或断路。究竟故障在触点上还是连线断路,可将红色测试棒接在KM2常闭触点的接线柱上,如电压正常故障在KM2的触点上,如没有电压,说明连线断路。根据电压值来检查故障的具体方法如表40-5所示。

表 40-5 分阶测量法所测电压值(单位为V)及故障原因

故障现象	测试状态	B~2	B~11	B~9	B~7	B~5	B~2	B~1	故障原因
SB1 按下时 KM1 不吸合	SB1 按下	380	380	380	380	380	380	380	FR 接触不良
		0	380	380	380	380	380	380	KM1 本身有故障
		0	0	380	380	380	380	380	KM2 接触不良
		0	0	0	380	380	380	380	KA 接触不良
		0	0	0	0	380	380	380	SB1 接触不良
		0	0	0	0	0	380	380	SB2 接触不良
		0	0	0	0	0	0	380	SQ 接触不良

在运用分阶测量法时,可以向前测量(即由B点向标号1),也可以向后测量(即由标号1向B点测量)。用后一种方法测量时当标号1与某点(标号2与B点除外)电压等于电源电压时,说明刚刚测过的触点或导线断路。

维修实践中,根据故障的情况也不必逐点测量,而多跨几个标号测试点,如B与11、B与3等。

2.分段测量法 触点闭合时各电器之间的导线在通电时其电压降接近于零。而用电器、各类电阻、线圈通电时,其电压降等于或接近于外加电压。根据这一特点,采用分段测量法检查电路故障更为方便。电压的分段测量法如图40-3所示。按下按钮SB1时,如接触器KM1不吸合,按住按钮SB1不放,先测A、B两点的电源电压。电压在380V,而接触器不吸合,说明电路有断路之处,可将红、黑两测试棒逐段或者重点测相邻两点标号的电压。如电路正常,除11与2两标号间的电压等于电源电压380V外,其他相邻两点间的电压都应为零。如测量某相邻两点电压为380V,说明该两点所包括的触点或连接导线接触不良或断路。例如,标号3与5两点间电压为380V,说明停止按钮接触不良。当测电路电压无异常,而11与2间电压正好等于电

源电压,接触器 KM1 仍不吸合,说明线圈断路或机械部分卡住。

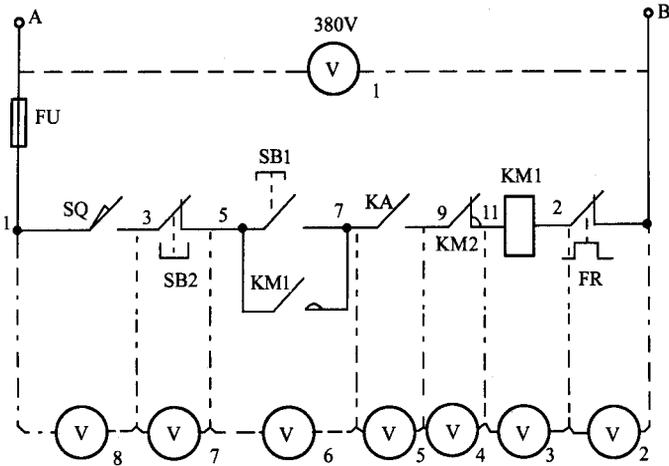


图 40-3 电压的分段测量法

对于机床电器开关及电器相互间距离较大,分布面较广的设备,由于万用表的测试棒连线长度有限,用分段测量法检查故障比较方便。

3. 点测法 机床电器的辅助电路电压为 220V 且零线接地的电路,可采用点测法来检测电路故障,如图 40-4 所示。把万用表的黑色测试棒接地,红色测试棒逐点测 2、11、9 等点,根据测量的电压情况来检查电气故障,这种测量某标号与拉地电压的方法称为点测法(或对地电压法)。用点测法测量电压值及判断故障的原因如表 40-6 所示。

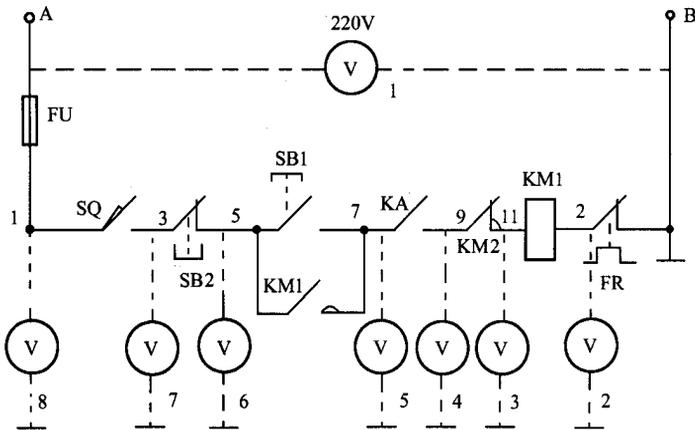


图 40-4 电压的点测法

表 40-6 点测法所测电压值(单位为 V)及故障原因

故障现象	测试状态	2	11	9	7	5	3	1	故障原因
SB1 按下时 KM1 不吸合	SB1 按下	220	220	220	220	220	220	220	FR 接触不良
		0	220	220	220	220	220	220	接触器 KM1 本身有故障
		0	0	220	220	220	220	220	KM2 接触不良
		0	0	0	220	220	220	220	KA 接触不良
		0	0	0	0	220	220	220	SB1 接触不良
		0	0	0	0	0	220	220	SB2 接触不良
		0	0	0	0	0	0	220	SQ 接触不
		0	0	0	0	0	0	0	FU 熔断

(二) 注意事项

1. 用分阶测量法时, 标号 11 以前各点对 B 点应为 220V, 如低于该电压(相差 20% 以上, 不包括仪表误差)时可视为电路故障。

2. 分段或分阶测量到接触器线圈两端 11 与 2 时, 电压等于电源电压, 可判断为电路正常; 如不吸合, 说明接触器本身有故障。

3. 电压的三种检查方法, 可以灵活运用, 测量步骤也不必过于死板, 除点测法在 220V 电路上应用外, 其他两种方法是通用的, 也可以在检查一条电路时用两种方法。在运用以上三种方法时, 必须将启动按钮按住不放才能测量。

三、测量电阻法

(一) 检查方法和步骤

1. 分阶测量法 电阻的分阶测量法如图 40-5 所示。当确定电路中的行程开关 SQ、中间继电器触点 KA 闭合时按启动按钮 SB1, 接触器 KM1 不吸合, 说明该电路有故障。检查时先将电源断开, 把万用表扳到电阻挡位上, 测量 A、B 两点电阻(注意, 测量时要一直按下按钮 SB1)。如电阻为无穷大, 说明电路断路。为了进一步检查故障点, 将 A 点上的测试棒移至标号 2 上, 如果电阻为零, 说明热继电器触点接触良好。再测量 B 与 11 两点间电阻, 若接近接触器线圈电阻值, 说明接触器线圈良好。然后将两测试棒移至 9 与 11 两点, 若电阻为零, 可将标号 9 上的测试棒前移, 逐步测量 7-11、5-11、3-11、1-11 各点的电阻值。当测量到某标号时电阻突然增大, 则说明测试棒刚刚跨过的触点或导线断路。分阶测量法既可从 11 向 1 方向移动测试棒, 也可从 1 向 11 方向移动测试棒。

2. 分段测量法 电阻的分段测量法如图 40-6 所示。先切断电源, 按下启动按钮, 两测试棒逐段或重点测试相邻两标号(除 2-11 两点外)的电阻。如两点间电阻很大, 说明该触点接触不良或导线断路。例如, 当测得 1-3 两点间电阻很大时, 说明行程开关触点接触不良。这两种方法适用于开关、电器在机床上分布距离较大的电气设备。

(二) 注意事项

测量电阻法的优点是安全, 缺点是测量电阻值不准确时容易造成判断错误。为此应注意以下几点。

1. 用电阻测量法检查故障时一定要断开电源。

2. 如所测量的电路与其他电路并联, 必须将该电路与其他电路断开, 否则电阻不准确。

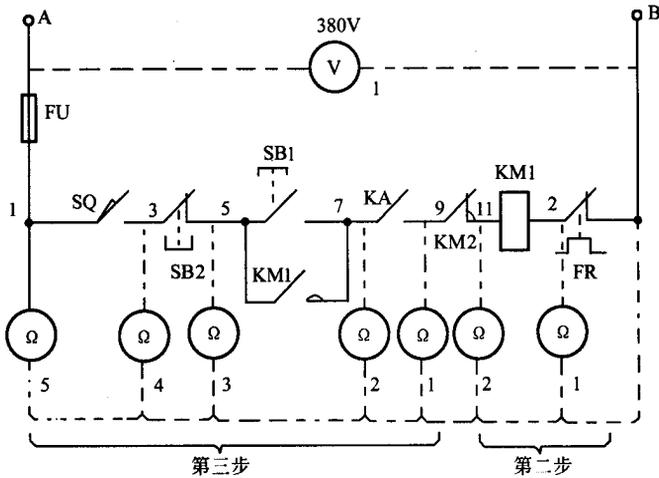


图 40-5 电阻的分阶测量法

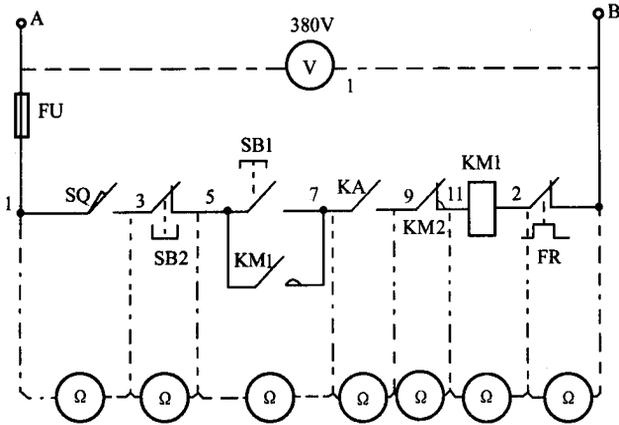


图 40-6 电阻的分段测量法

3. 测量高电阻电器件, 万用电表要扳到适当的挡位。在测量连接导线或触点时, 万用电表要扳到 $R \times 1$ 的挡位上, 以防仪表误差造成误判。

四、强迫闭合法

在排除机床电气故障时, 经过直观法检查后没有找到故障点, 而手下也没有适当的仪表进行测量, 可用一绝缘棒将有关继电器、接触器、电磁铁等用外力强行按下, 使其常开触点或衔铁闭合, 然后观察机床电气部分或机械部分出现的各种现象, 如电动机从不转到转动, 机床相应的部分从不动到正常运行等。利用这些外部现象的变化来判断故障点的方法叫强迫闭合法。

(一) 检查方法和步骤

检查一条回路的故障: 在异步电动机控制电路(见图 40-4)中, 若按下启动按钮 SB1, 接触器 KM 不吸合, 可用一细绝缘棒或绝缘良好的螺丝刀(注意手不能碰金属部分), 从接触器灭弧罩的中间孔(小型接触器用两绝缘棒对准两侧的触点支架)快速按下, 然后迅速松开, 可能有如下情况出现。

1. 电动机启动, 接触器不再释放, 说明启动按钮 SB1 接触不良。

2. 强迫闭合时,电动机不转,但有“嗡嗡”声,松开时看到三个触点都有火花,且亮度均匀。其原因是电动机过载或辅助电路中的热继电器 FR 常闭触点跳开。

3. 强迫闭合时,电动机运转正常,松开后电动机停转,同时接触器也随之跳开,一般是辅助电路中的熔断器 FU 熔断或停止、启动按钮接触不良。

4. 强迫闭合时电动机不转,有“嗡嗡”声,松开时接触器的主触点只有两触点有火花。说明电动机主电路一相断路,接触器一主触点接触不良。

(二) 注意事项

用强迫闭合法检查电路故障,如运用得当,比较简单易行,但运用不好也容易出现人身和设备事故,所以应注意以下几点。

1. 运用强迫闭合法时,应对机床电路控制程序比较熟悉,对要强迫闭合的电器与机床机械部分的传动关系比较明确。

2. 用强迫闭合法前,必须对整个故障的电气设备、电器作仔细的外部检查,如发现以下情况,不得用强迫闭合法检查。

- (1) 具有联锁保护的正反转控制电路中,两个接触器中有一个未释放,不得强迫闭合另一个接触器。
- (2) Y- Δ 启动控制电路中,当接触器 KM Δ 没有释放时,不能强迫闭合其他接触器。
- (3) 机床的运动机械部件已达到极限位置,又弄不清反向控制关系时,不要随便采用强迫闭合法。
- (4) 当强迫闭合某电器时可能造成机械部分(机床夹紧装置等)严重损坏时,不得随便采用。
- (5) 用强迫闭合法时,所用的工具必须有良好的绝缘性能,否则,会出现比较严重的触电事故。

五、短接法

电路或电器的故障大致归纳为短路、过载、断路、接地、接线错误、电器的电磁及机械部分故障等六类。诸类故障中出现较多的为断路故障,它包括导线断路、虚连、松动、触点接触不良、虚焊、假焊、熔断器熔断等。对这类故障除用电阻法、电压法检查外,还有一种更为简单可靠的方法,就是短接法。方法是用一根良好绝缘的导线,将所怀疑的断路部位短接起来,如短接到某处,电路工作恢复正常,说明该处断路。

(一) 检查方法和步骤

1. 局部短接法 局部短接法如图 40-7 所示。当确定电路中的行程开关 SQ 和中间继电器常开触点 KA 闭合时,按下启动按钮 SB1,接触器 KM1 不吸合,说明该电路有故障。检查时,可首先测量 A、B 两点电压,若电压正常,可将按钮 SB1 按住不放,分别短接 1-3、3-5、7-9、9-11 和 B-2。当短接到某点,接触器吸合,说明故障就在这两点之间。具体短接部位及故障原因如表 40-7 所示。

表 40-7 短接部位及故障原因

故障现象	短接标号	接触器 KM1 的动作情况	故障原因
按下启动按钮 接触器 KM1 不吸合	B-2	KM1 吸合	FR 接触不良
	11-9	KM1 吸合	KM2 常闭触点接触不良
	9-7	KM1 吸合	KA 常开触点接触不良
	7-5	KM1 吸合	SB1 触点接触不良
	5-3	KM1 吸合	SB2 触点接触不良
	3-1	KM1 吸合	SQ 触点接触不良
	1-A	KM1 吸合	熔断器 FU 接触不良或熔断

2. 长短接法 长短接法如图 40-8 所示,是指依次短接两个或多个触点或线段,用来检查故障的方法。

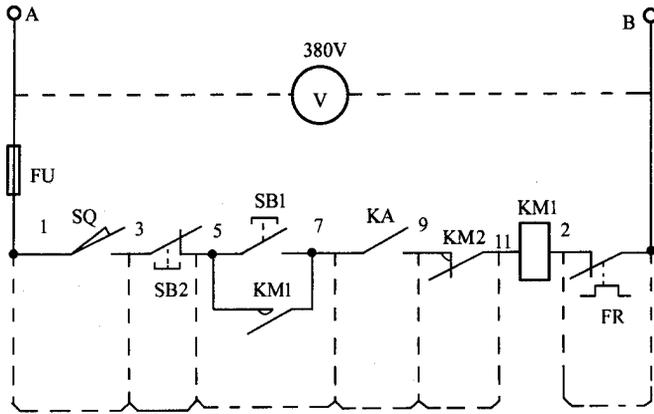


图 40-7 局部短接法

这样做既节约时间,又可弥补局部短接法的某些缺陷。例如,两触点 SQ 和 KA 同时接触不良或导线断路(见图 40-6),短接法检查电路故障的结果可能出现错误的判断,而用长短接法一次可将 1-11 短接,如短接后接触器 KM1 吸合,说明 1~11 这段电路上一定有断路的地方,然后再用局部短接的方法来检查,就不会出现错误判断的现象。

长短接法另一个作用是把故障点缩小到一个较小的范围之内。总之,应用短接法时可长短结合,加快排除故障的速度。

(一) 注意事项

1. 应用短接法是用手拿着绝缘导线带电操作的,所以一定要注意安全,避免发生触电事故。
2. 应确认所检查的电路电压正常时,才能进行检查。

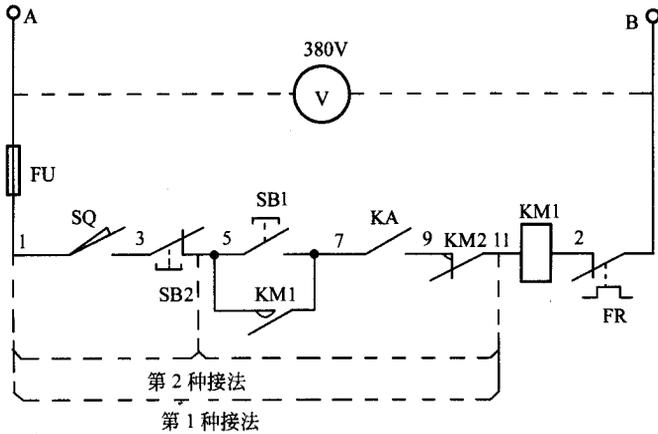


图 40-8 长短接法

3. 短接法只适于压降极小的导线、电流不大的触点之类的短路故障。对于压降较大的电阻、线圈、绕组等断路故障,不得用短接法,否则就会出现短路故障。

4. 对于机床的某些要害部位,要慎重行事,必须保障电气设备或机械部位不出现事故的情况下才能使用短接法。

5. 在怀疑熔断器熔断或接触器的主触点断路时,先要估计一下电流。一般在 5A 以下时才能使用,否则,容易产生较大的火花。

六、其他检查方法

(一) 检查方法和步骤

1. 对比法 在检查电气设备故障时,总要进行各种方法的测量和检查,把已得到的数据与图纸资料及平时记录的正常参数相比较来判断故障,对无资料又无平时记录的电器,可与同型号的完好电器相比较,来分析检查故障,这种检查方法叫对比法。

对比法在检查故障时经常使用,如比较继电器、接触器的线圈电阻、弹簧压力、动作时间、工作时发出的声音等。

电路中的电器元件属于同样控制性质或多个元件共同控制同一设备时,可以利用其他相似的或同一电源的元件动作情况来判断故障。例如,异步电动机正反转控制电路,若正转接触器 KM1 不吸合,可操纵反转,看接触器 KM2 是否吸合,如吸合,则证明 KM1 电路本身有故障。再如反转接触器吸合时,电动机两组运转,可操作电动机正转,若电动机运转正常,说明 KM2 主触点或连线有一相接触不良或断路。

2. 置转换元件法 某些电器的故障原因不易确定或检查时间过长时,为了保证机床的利用率,可置换同一相性能良好的元器件实验,以证实故障是否由此电器引起。

运用置换元件法检查时应注意,当把原电器拆下后,要认真检查是否已经损坏,只有肯定是由于该电器本身因素造成损坏时,才能换上新电器,以免新换元件再次损坏。

3. 逐步开路法 遇到难以检查的短路或接地故障,可重新更换熔体,把多支路并联电路一路一路逐步或重点地从电路中断开,然后通电试验。若熔断器不再熔断,故障就在刚刚断开的这条支路上。然后再将这条支路分成几段,逐段地接入电路。当接入某段电路时熔断器又熔断,证明故障就在这段电路及其电器元件上,这种方法简单,但容易把损坏不严重的电器元件彻底烧毁。为了不发生这种现象,可采用逐步接入法。

4. 逐步接入法 电路出现短路或接地故障时,换上新熔断器逐步或重点地将各支路一条一条的接入电源,重新试验,当接到某段时熔断器又熔断,故障就在这条电路及其所包括的电器元件上,这种方法叫逐步接入法。

(二) 注意事项

开路法或逐步接入法是检查故障时较少用的一种方法,它有可能使故障的电器损坏得更甚,而且拆卸的线头特别多,很费力,只在遇到较难排除的故障时才用这种方法。在用逐步接入法排除故障时因大多数并联支路已经拆除,为了保护电器,可用较小容量的熔断器接入电路进行试验。对于某些不易购买且尚能修复的电器元件,出现故障时,可用欧姆表或兆欧表进行接入或开路检查。

第三节 机床电路故障分析

机床在运行中要受到许多不利因素的影响,例如,电器动作时的机械振动、因过电流而导致电器元件绝缘老化、电弧烧灼、自然磨损、环境温度和湿度的影响、有害介质的侵蚀等,还有元器件的质量问题、自然寿命等原因,使机床电路不可避免地会出现各种各样的故障。加强日常的维护保养和定期检修可使机床在一定时期内不出或少出故障。对故障要认真对待,查明原因,及时处理,以便尽快排除故障,保证机床尽早地恢复正常运行。

机床电路的故障主要分为两大类:一类是有明显的外部特征,如电器和电机过热、冒烟、发出焦臭味或火花等,这类故障用直观检测法就能排除;另一种故障没有明显的外部特征,要根据机床电路的特征,选择适当的或多种检查方法,达到排除故障的目的。

在金属切削机床中,车床应用极为广泛,而且所占比例最大。它能车削外圆、内圆、端面、螺纹、螺杆及定

型表面,并可用钻头、绞刀进行加工。车床加工的主要运动是主轴通过卡盘或顶尖带动工件的旋转运动和溜板带动刀架的纵向或横向直线运动。另外,还有辅助运动。现以 C620 型卧式车床为例来说明。

一、车床电气线路

如图 40-9 所示,它由主电路、控制电路和照明电路组成,各环节及其元件的作用如下。

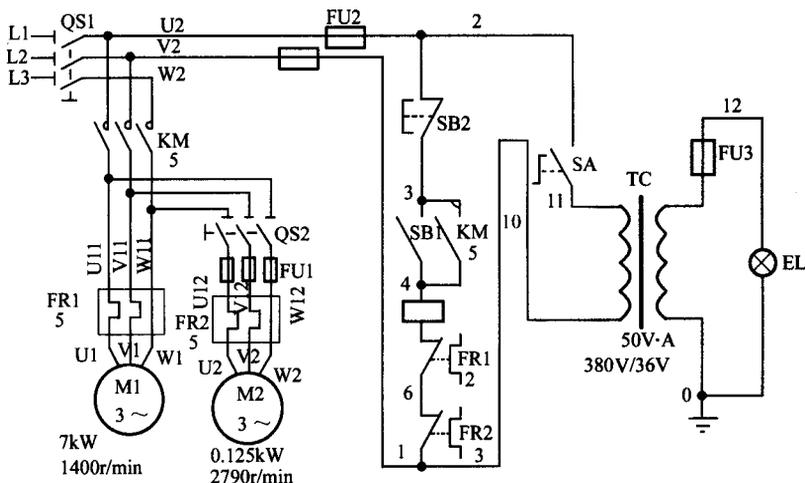


图 40-9 C620 型卧式车床电气线路

(一) 主电路

主电动机 M1 拖动主轴旋转和刀架的自动进给运动,通电与断电由接触器 KM 的常开触头控制,主轴通过摩擦离合器实现正反转。主电动机运转后,才能启动冷却泵电动机 M2,是否需要冷却,由开关 QS2 控制。热继电器 FR1 和 FR2 分别用作主电动机 M1 和冷却泵电动机 M2 的过载保护,它们控制的常闭触头串联后接在控制电器中。FU1 作为冷却电动机的短路保护。主开关 QS1 为机床总电源开关。

(二) 控制电路

按下启动按钮 SB1,接触器 KM 线圈通电使铁心吸合,主电路中 3 个常开触头闭合,主电动机 M1 得电启动运转,同时接触器 KM 的常开辅助触头(3-4)闭合,使控制电路自锁,在启动按钮 SB1 松开时,仍保证接触器 KM 的线圈通电。

按下停止按钮 SB2,控制电路断开,接触器 KM 线圈失电,主电路中的触头跳开,主电动机断电而停止转动。

无论哪一台电机过载,使相应热继电器的常闭触头断开,控制回路断电而导致接触器 KM 失电释放,主触头跳开,电机停转而起到保护作用。接触器 KM 本身具有失电压保护功能,当电压低于额定电压的 85% 时,接触器 KM 的电磁吸力小于铁心上的弹簧力而自行释放,可以避免因电压太低而造成的事故。FU2 作为控制电路的短路保护。

(三) 照明电路

照明安全电压为 36V,用开关 SA 控制。FU3 用作短路保护。照明电路必须接地,以确保人身安全。

二、常见故障分析

(一) 主轴电动机不能启动

主轴电动机不能启动通常为如表 40-8 中所列的情况。主轴电动机不能启动可按以下程序处理。

1. 首先检查进入开关 QS1 的三相电源是否正常,再检查控制回路的熔断器 FU2 是否熔断。

2. 如上述检查正常,再检查控制电路是否断路,包括回路中各接线端子和触点接触是否良好。如果是因热继电器动作使控制回路断路,切不可简单复位了事,必须查明原因,对症处理。

表 40-8 C620 车床主轴电动机不能启动

故障现象	故障原因
按下启动按钮就不能启动	①主电路失电 ②控制电路失电或断路 ③接触器卡死,不能吸合 ④机床传动机构卡死
运行中自然停机,然后不能启动	①热继电器动作 ②机床频率启动或吃刀量过大 ③电动机电压低于额定值太多,导致负载电流过大 ④电动机本身故障,如绕组碰壳、匝间短路等
按下启动按钮后,电动机不转,而发出“嗡嗡”声	电动机因缺一相电而造成单相运行,导致没有启动转矩
按停止按钮后再不能重新启动	控制回路所接的两相电源,其中有一相失电
按下启动按钮熔断器就烧断	①主电路或控制电路有短路点 ②机床传动机构卡死 ③电动机严重匝间短路和相间短路

3. 如果控制电路没有问题,说明故障必然在主电路。除接线和接触器的触头松脱或接触不良外,还可能是接触器卡死不能吸合或电动机定子绕组断线。

4. 凡属于短路故障,可用兆欧表检查电动机的相间、相对地的电阻是否为零;用万用表检查控制电路和接触器 KM 进线,看其线间或线对地电阻是否为零。找出短路点修复即可。

(二) 主轴电动机不能停车

车床需要停车时,按下停止按钮 SB2,电动机不能停转,说明接触器 KM 的三副主触头仍然接在一起,其原因是主触头熔焊在一起或是接触器不能释放,后者是由于接触器机械卡死、铁心剩磁太大或动铁心与静铁心的接触面有油污造成的。

主触头熔焊不能停车时,必须切断电源主开关 QS1,电机停转后,更换主触头。接触器不能释放,只要对症处理即可。

(三) 主轴电动机能启动但不能自锁

按下启动按钮,电动机能启动,但松开启动按钮,电动机就停转。由于接触器 KM 常开辅助触头有自锁作用,如不能自锁,无疑是此触头接线松脱或接触不良,对症处理,即可排除故障。

(四) 车床照明灯不亮

原因是灯泡坏、照明电路熔断器 FU3 或照明变压器一次或二次绕组断路。逐次检查,排除故障。如果熔断器 FU3 熔断是因短路所致,必须先查明短路原因,排除以后再更换熔断器的熔体。

第四节 调试方法

电气控制线路是为生产机械服务的,生产中使用的机械设备种类繁多,其控制线路和拖动控制方式各不相同,所以对电气控制线路的调试方法有一定的差异。然而,从整体上看,在调试的步骤、手段、处理方法上是大致相同的。为此,下面将对调试电气控制线路的共性问题进行讨论。

一、调试的基本任务

为了实现生产机械的工作任务以及达到规定的静态、动态性能指标,必须在系统安装竣工并经质量检验合格后,进行认真细致的调试工作。这是确保系统安全可靠、合理进行的必要手段。为此,应做到以下几方面要求。

按技术文件及图纸对各单体设备、附属装备进行外观检查,关键尺寸检查,装配质量及部件互换性检查,接线检查,绝缘试验等常规的检验,以发现整个系统的设备及附件在经过长途搬运、仓库保管以及安装过程中有无损坏、差错或其他隐患。找出并核对系统中各电源装置的极性、相序以及各单元之间的正确连接关系。将所有保护装置均按设计要求进行整定。对每一单元进行特性测定、调整、试验,使其工作在最合理的工作状态——达到满意的技术指标。通过调试,使得整个系统获得较为理想的静态特性和动态指标。验证在各种状态下,系统工作的可靠性,以及各种事故状态下保护装置的可靠性。通过调试,校核设计文件的正确性及提供修改设计的必要依据。

二、调试前的准备工作

1. 应具备完整的设计图纸、说明书(包括有关计算)以及主要设备的技术文件。
2. 应编制详尽的系统调试大纲,明确规定各单元、各环节以及整个系统的调试步骤、操作方法、技术指标。
3. 应挑选对本系统有一定了解的熟练技术人员和电工参加调试工作,必要时可邀请有关设计人员及厂家技术人员参加调试。
4. 除一般常用的仪器、仪表、工具、器材、备品、配件等应齐备完好外,还应准备好被调试系统所需的专用仪器和仪表,如双踪示波器等。
5. 为确保调试安全顺利进行,应具有可切断全部电源的紧急总开关,并认真考虑调试时的各种安全措施。

三、调试前的检查

1. 设备安装检查。
2. 线路检查。
3. 绝缘检查。

四、调试的一般顺序

由于不同的电气控制线路的工作任务各不相同,所以调试过程的顺序不一定相同。但主要顺序是基本一样的。

1. 先查线,后操作,通电前先检查线路。
2. 先保护,后操作,先做保护部分整定,后调试操作部分。
3. 先单元,后整体,先调单元部分,后调整体部分。
4. 先静态,后动态,先调静态工作点,后调动态响应。
5. 先模拟,后真实,先带电阻性模拟负载试验,后带真实负载。
6. 先开环,后闭环,系统调试时先做开环调试,后做闭环调试。
7. 先内环,后外环,双闭环系统调试时先做内环调试,后做外环调试。
8. 先低压,后高压,整个系统投入时,先送低压电调试,然后再投入高压。
9. 先轻载,后重载,试运行可以先带轻负载,后带重负载、过负载。
10. 先手动,后自动,试运行先做手动操作试验,满意后再投入自动系统试验。
11. 先正常,后事故,试运行先按正常情况下操作,然后按各种事故状态试验,以考核整个系统工作可靠性。

某些情况在经过认真准备以后,也可以不按上述先后顺序进行调试,例如,可以不经过模拟试验而直接带真实负载,不过,应当谨慎而行。电气控制线路的调试是一项极其复杂的工作,它需要调试者具有丰富的实践经验,扎实的理论知识,严谨的工作作风和认真细致的工作态度。对于初学者,应当在有经验的教师指导下从每一个细节学起,逐步增加自己的实践经验和调试能力。

第四十一章 最优控制和自适应控制 及其智能控制

第一节 最优控制^[4,5]

一、基于变分法的最优控制问题求解

最优控制是经典控制理论发展到现代控制理论的重要标志之一。这里“最优”一词指的是相对于某一给定性能指标最优,如使控制过程的时间最短,燃料消耗最少,或者误差最小,而不是任何性能指标下都是最优的。

给定受控系统的状态方程

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

寻求不受约束的控制向量 u , 使系统从初始状态

$$x(t_0) = x_0$$

在时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内转移到 $x(t_f)$ 且满足等式约束

$$g[x(t_f), t_f] = 0$$

这里 g 为 q 维向量函数, 并使指标 J 取极值

$$J = S[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, t) dt$$

利用变分法求解最优控制时, 首先构造哈密尔顿函数 H 和增广泛函 J_a 。

$$H = L(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) = H(x, u, \lambda, t)$$

$$J_a = S[x(t_f), t_f] + \nu^T g[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} [H(x, u, \lambda, t) - \lambda^T \dot{x}] dt$$

式中, ν 为 n 维、 v 为 q 维拉格郎日乘子向量。

由变分 $\delta J_a = 0$ 导出的极值必要条件为:

$$\text{伴随方程} \quad \dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial \lambda}$$

$$\text{状态方程} \quad \dot{x} = f(x, u, t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$$

$$\text{控制方程} \quad \frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$\text{终端约束} \quad g[x(t_f), t_f] = 0$$

$$\text{横截条件} \quad \lambda(t_f) = \frac{\partial S}{\partial x(t_f)} + \frac{\partial g^T}{\partial x(t_f)}$$

用计算机联立求解上面五个方程, 可得到最优控制问题的数值解。

二、极小值原理与动态规划

用变分法求解最优控制问题时,均假定控制 u 不受约束,并且存在惟一的偏导数 $\partial H/\partial u$ 。然而任何实际的控制量均限制在允许范围内变化,即

$$u \in \Omega \text{ 或 } |u_i| \leq a_j, i=1, \dots, r$$

有些问题中 $\partial H/\partial u$ 不存在,在这些情况下,可利用极小值原理求解。

极小值原理:使性能指标取极小的最优控制,必定是允许控制中使 H 取极小的控制,即满足

$$H(x^*, \lambda^*, u^*(t)) \leq H(x^*, \lambda^*, u(t)), u \in \Omega$$

利用极小值原理求解有输入约束的最优控制问题的步骤为(1)用式(41-2)取代控制方程41-1(2)对于任意 x, λ , 按照使 H 极小(全局极小)的原则预选 u , 获得一组 u 的候选函数(3)利用 u 的候选函数,与伴随方程、状态方程、终端约束和横截条件联立确定最优解。

动态规划是利用最优性原理来解决离散系统多级决策问题,也可用来解决有输入约束的最优控制问题。最优性原理是:设 $t_1 \in [t_0, t_f]$ 则自 t_1 至 t_f 的最优控制序列,必与由 t_0 至 t_f 的最优控制序列中的 t_1 至 t_f 那部分序列相一致;自 $x(t_1)$ 出发的最优轨线,必与由 $x(t_0)$ 出发的最优轨线中 t_1 至 t_f 的那部分相重合。

动态规划法把一个难于处理的多级决策过程化为一个多次一步决策的问题。连续系统最优化问题可以通过离散化,成为一个多阶段决策问题,再用离散动态规划求其最优控制并使它逼近连续系统的最优控制。动态规划求解最优问题与变分法、极小值原理所得的结果相同。

三、线性系统二次型性能指标的最优控制

线性系统的二次型性能指标的一般形式为

$$J = \frac{1}{2} x^T(t_f) S x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt$$

式中, $S, Q(t), R(t)$ 为对称权矩阵, $S, Q(t)$ 半正定, $R(t)$ 正定。

J 中的第一项 $x^T(t_f) S x(t_f)$ 是强调状态的终值为最小,积分符号里面的两项分别代表 t_0 到 t_f 期间的累积误差和控制能量的消耗。终端时刻 t_f 有限时,称为有限时间调节器问题; t_f 无限时,称为无限时间调节器问题。

(一)有限时间状态调节器

已知线性时变系统

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0$$

可按下列步骤求解最优控制律 $u^*(t)$,使式(41-3)中性能指标最小:

$$u^*(t) = -R^{-1} B^T P(t) x^*(t)$$

其中, $m \times n$ 增益矩阵 $P(t)$ 是下列黎卡提(Riccati)方程的终值问题的解

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) \\ &\quad - A^T(t)P(t) - P(t)A(t) - Q(t) \\ P(t_1) &= S \end{aligned}$$

$x^*(t)$ 是最优轨线,它是下列微分方程初值问题的解

$$\dot{x}(t) = [A(t) - B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t)]x(t), \quad x(t_0) = x_0$$

由于 $P(t)$ 是时变矩阵,有限时间状态最优调节器系统甚至当系数矩阵 $A(t), B(t)$ 以及权矩阵 $Q(t), R(t)$ 都是常数矩阵时也是时变的。

(二) 定常状态调节器

对于线性定常系统 $\Sigma(A, B, C)$, 当 $t_f \rightarrow \infty$ 时, $R(t)$ 变成常数矩阵, 最优状态调节器是一个定常的反馈系统。这时, 式 41-3 中 $S=0, Q, R$ 为常数矩阵。存在惟一的最优控制规律

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T P x^*(t)$$

式中, P 为下列黎卡提代数方程的非负定解

$$PBR^{-1}B^T P - A^T - PA - Q = 0$$

最优轨线 $x^*(t)$ 是下列线性定常齐次方程的初值问题的解

$$\dot{x}(t) = (A - BR^{-1}B^T P)x(t) \quad x(t_0) = x_0$$

以上状态调节器问题的结果可以推广到最优输出调节器问题。

(三) 最优跟踪问题

最优状态调节器只能克服脉冲型扰动对系统状态的影响。工程上关心的另一类问题是最优跟踪, 即要求系统输出 $y(t)$ 尽量接近给定的期望轨线 $y_d(t)$, 并使某种性能指标为最小。最优跟踪的二次型性能指标可定义为

$$J = \frac{1}{2} e^{\gamma t_f} S \alpha(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} e^{\gamma t} [Q(x(t))\alpha(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt$$

式中, $\alpha(t) = y_d(t) - y(t)$ 为跟踪误差, t_f 固定, $S, Q(t)$ 半正定, $R(t)$ 正定。

完全能观的线性时变系统 $\Sigma(A(t), B(t), C(t))$ 最优跟踪问题的解存在且惟一, 即

$$u^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t) [P(t)x^*(t) - \alpha(t)]$$

式中 $P(t)$ 是下列黎卡提方程终值问题的解:

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= P(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t) - A^T(t)P(t) \\ &\quad - P(t)A(t) - C^T(t)Q(t)C(t) \\ P(t_f) &= C^T(t_f)S C(t_f) \end{aligned}$$

n 维向量 $i(t)$ 是下列微分方程终值问题的解:

$$\begin{aligned} \dot{i}(t) &= [A(t) - B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t)]^T i(t) \\ &\quad - C^T(t)Q(t)y_d(t) \\ i(t_f) &= C^T(t_f)S y_d(t_f) \end{aligned}$$

最优轨线 $x^*(t)$ 是下列微分方程初值问题的解:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A(t) - B(t)R^{-1}(t)B^T(t)P(t)]x(t) \\ &\quad + B(t)R^{-1}(t)B^T(t)i(t) \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned}$$

控制规律 41-4 中, 状态线性反馈 $-R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x(t)$ 构成最优跟踪系统的闭环部分。 $R^{-1}(t)B^T(t)i(t)$ 可以看成是系统的外部控制输入。

四、卡尔曼(Kalman)滤波器

卡尔曼滤波器具有自适应增益调节能力。与维纳(Wiener)滤波器相比, 卡尔曼滤波器容易通过程序在数字计算机上实现, 并且适用于非平稳过程(时变状态空间模型)和非线性系统。

给定离散时间状态方程和输出方程

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F(k)x(k) + G(k)u(k) + u(k) \\ y(k) &= C(k)x(k) + v(k) \end{aligned}$$

式中, $u(k)$ 是系统噪声, $v(k)$ 是测量噪声。假定 $u(k)$ 和 $v(k)$ 是不相关的零均值高斯白噪声, $x(0)$ 是高斯随机向量。它们满足:

$$E[u(k)] = 0 \quad E[u(k)v^T(j)] = Q(k)\delta_{jk}$$

$\alpha(k)$ 半正定

$$E[x(k)] = 0 \quad E[x(j)v^T(k)] = R(k)\delta_{jk}$$

$R(k)$ 正定

$$E[x(0)] = \bar{x}(0)$$

$$E\{[x(0) - \bar{x}(0)][x(0) - \bar{x}(0)]^T\} = P_0$$

$$E\{[x(0) - \bar{x}(0)]w^T(k)\} = 0$$

$$E\{[x(0) - \bar{x}(0)]v^T(k)\} = 0$$

式中, 当 $j = k$ 时 $\delta_{jk} = 1$, $j \neq k$ 时 $\delta_{jk} = 0$, E 表示均值, P 为协方差矩阵。

卡尔曼滤波是按照系统的运动规律, 利用输出量测值序列和估计误差协方差矩阵 $P(k)$ 不断地对状态估计值进行修正的递推过程。最优估计的判据是估计误差协方差 $P(k)$ 达到极小值。 $P(k)$ 极小意味着估计误差 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 的均方值 $E\{e^T(k)e(k)}$ 为极小。

给定 $y(0), y(1), \dots, y(k)$ 估计 $x(n)$ 的问题, 可分为: 滤波, 确定当前最优估计 $\hat{x}(k)$; 预估, 当 $n > k$ 时, 确定最优估计 $\hat{x}(n)$; 平滑, 当 $0 \leq n < k$ 时, 确定最优估计 $\hat{x}(n)$ 。

1. 离散系统(式 41-5)的预估型卡尔曼滤波器算法如下:

$$\hat{x}(0) = \bar{x}(0) \quad P(0) = P_0$$

卡尔曼增益:

$$K_e(k) = F(k)P(k)C^T(k) \times [R(k) + \alpha(k)P(k)C^T(k)]^{-1}$$

$$\hat{x}(k+1) = F(k)\hat{x}(k) + \alpha(k)u(k) + K_e(k)[y(k) - \alpha(k)\hat{x}(k)]$$

$$P(k+1) = Q(k) + [F(k) - K_e(k)\alpha(k)]P(k)F^T(k)$$

离散系统(式 41-5)的当前估计型卡尔曼滤波器算法如下:

初始化:

$$\hat{x}(0) = \bar{x}(0), N(0) = P_0$$

$$K_e(0) = N(0)C^T(0)[R(0) + \alpha(0)N(0)C^T(0)]^{-1}$$

$$\hat{x}(0) = \hat{x}(0) + K_e(0)[y(0) - \alpha(0)\hat{x}(0)],$$

$$P(0) = [I - K_e(0)\alpha(0)]N(0)$$

递推方程:

$$\hat{x}(k+1) = F(k)\hat{x}(k) + \alpha(k)u(k)$$

$$N(k+1) = F(k)P(k)F^T(k) + Q(k)$$

$$K_e(k+1) = N(k+1)C^T(k+1)[R(k+1) + \alpha(k+1)N(k+1)C^T(k+1)]^{-1}$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1) + K_e(k+1)[y(k+1) - \alpha(k+1)\hat{x}(k+1)]$$

$$P(k+1) = [I - K_e(k+1)\alpha(k+1)]N(k+1)$$

2. 稳态卡尔曼滤波器 系统(式 41-5)进入稳态以后, $F(k), \alpha(k), C(k), R(k)$ 和 $Q(k)$ 都变成常数矩阵。如果系统能观能控, 卡尔曼增益 $K_e(k)$ 和估计误差协方差将趋于常数矩阵。

稳态预估型卡尔曼滤波算法为

$$\hat{x}(k+1) = F\hat{x}(k) + G u(k) + K_e[y(k) - \alpha\hat{x}(k)]$$

$$K_e = FPC^T(R + CPC^T)^{-1}$$

$$P = Q + FPF^T - FPC^T(R + CPC^T)^{-1}CPF^T$$

稳态当前估计型卡尔曼滤波算法为

$$\hat{x}(k+1) = F\hat{x}(k) + G u(k)$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1) + K_e[y(k+1) - \alpha\hat{x}(k+1)]$$

$$K_e = NC^T(R + CNC^T)^{-1}$$

$$N = Q + FNF^T - FNC^T(R + CNC^T)^{-1}CNF^T$$

五、系统辨识

仅仅应用物理定律来建立对象的精确数学模型,通常是不可能的,对象某些参数必须由试验确定。通过试验建立模型并估计最优参数值叫做系统辨识。对于给定的任务,在同一类数学模型中,应当选择那些既能反映对象的动态性能,同时参数数目又最少的模型。

在进行系统辨识时,必须引入一个性能指标来衡量模型与实验数据符合的程度,一般可取为误差的平方和。这样就可以通过最小二乘法来进行参数最优估计。考虑图 41-1 中的真实对象和它的模型,真实对象 $G(z, \xi)$ 不全已知,其中 ξ 代表设计者尚不得知的因素。假设用系统运动机理得到的脉冲传递函数为

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}}$$

系数 a_1, a_2, \dots, a_n 和 b_0, b_1, \dots, b_n 是系统的参数。输入序列 $u(0), u(1), \dots, u(N)$ 将激励起对象的全部固有模态,得到的输出序列为 $y(0), y(1), \dots, y(N)$ 。

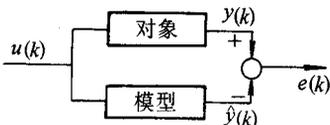


图 41-1 数学模型与真实对象之间的输出误差

根据式 41-6 $y(k)$ 的估计值

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) = & -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots \\ & - a_ny(k-n) + b_0u(k) + b_1u(k-1) \\ & + \dots + b_nu(k-n) \end{aligned}$$

参数估计值误差定义为 $\epsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k)$, 则

$$\begin{aligned} y(k) = & -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots \\ & - a_ny(k-n) + b_0u(k) + b_1u(k-1) \\ & + \dots + b_nu(k-n) + \epsilon(k) \end{aligned}$$

写成矩阵形式:

$$y(N) = H(N)P(N) + \epsilon(N)$$

$$H(N) = \begin{bmatrix} y(n-1) & \dots & \dots & y(0) & u(n) & \dots & \dots & u(0) \\ y(n) & \dots & \dots & y(1) & u(n+1) & \dots & \dots & u(0) \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ y(N-1) & \dots & \dots & y(N-n) & u(N) & \dots & \dots & u(N-n) \end{bmatrix}$$

式中

$$y(N) = \begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} \quad \epsilon(N) = \begin{bmatrix} \epsilon(n) \\ \epsilon(n+1) \\ \vdots \\ \epsilon(N) \end{bmatrix}$$

$$H(N) = \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1(N) \\ -a_2(N) \\ \vdots \\ -a_n(N) \\ b_0(N) \\ b_1(N) \\ \vdots \\ b_n(N) \end{bmatrix}$$

参数估计性能指标定义为

$$J_N = \frac{1}{2} \sum_{k=n}^N \epsilon^2(k) = \frac{1}{2} \epsilon^T(N) \epsilon(N)$$

参数最优估计为

$$\hat{p}(N) = [H^T(N)H(N)]^{-1} H^T(N) y(N)$$

为了保证 $H^T(N)H(N)$ 的逆存在, 输入序列应当充分地随时间而变化, 不能象阶跃信号那样的常量函数。

通常, 观测值按顺序获得, 希望随 N 增加顺序得到最小二乘估计值。这就是递推辨识, 它使参数估计随着 N 增加而改进。当得到新数据 $u(N+1), y(N+1)$ 时, 参数估计值更新为

$$\hat{p}(N+1) = \hat{p}(N) + K(N+1) [y(N+1) - h(N+1)\hat{p}(N)]$$

式中

$$h(N+1) = [y(N) \quad y(N-1) \dots y(N-n+1) \quad u(N+1) \quad u(N) \dots u(N-n+1)]$$

$$K(N+1) = \frac{[H^T(N)H(N)]^{-1} h^T(N+1)}{1 + h(N+1) [H^T(N)H(N)]^{-1} h^T(N+1)}$$

在系统辨识中, 有时对不同的误差取不同的权重, 这时参数估计的性能指标定义为

$$J_N = \frac{1}{2} \epsilon^T(N) W(N) \epsilon(N)$$

式中, $W(N)$ 为正定权矩阵。

确定辨识系统模型的阶数及滞后时间叫做阶数辨识。对于最小二乘法, 当其参数估计无偏时, 估计误差序列应当是白噪声序列, 且与输入序列不相关。因此可以计算误差序列自相关函数或检查误差序列与输入序列的相关情况来确定阶数。

除最小二乘法外, 还采用其它一些方法进行系统辨识, 如广义最小二乘法, 增广矩阵法, 极大似然法, 随机逼近法, 相关分析法, 辅助变量法。

第二节 自适应控制

一、模型参考自适应控制系统

自适应控制器 MRAS (Model Reference Adaptive System) 具有修正本身特性参数以适应对象和扰动的动态特性变化的能力。比较成熟的自适应控制系统有两大类。

模型参考自适应控制系统由参考模型、被控对象、反馈控制器和调整控制器参数的自适应机构组成, 如图 41-2a 所示。它由两个环路组成。其中, 内环是由被控对象和控制器组成的普通反馈回路, 而控制器的

参数则由外环调整。参考模型的输出 y_m 直接反映了对象如何理想地响应参考输入 r 。

当参考输入 $r(t)$ 同时加到系统和参考模型的入口时,由于对象的初始参数未知,控制器的初始参数不可能调整得很好。开始运行时,系统输出 $y(t)$ 与模型输出 $y_m(t)$ 不可能完全一致,存在偏差 $e(t)$ 。由 $e(t)$ 驱动自适应机构,改变控制器的参数,使 $y(t)$ 逐步逼近 $y_m(t)$,直到 $y(t) = y_m(t)$ 为止。当对象特性在运行中发生变化时,控制器参数的自适应调整过程与上述过程完全一样。

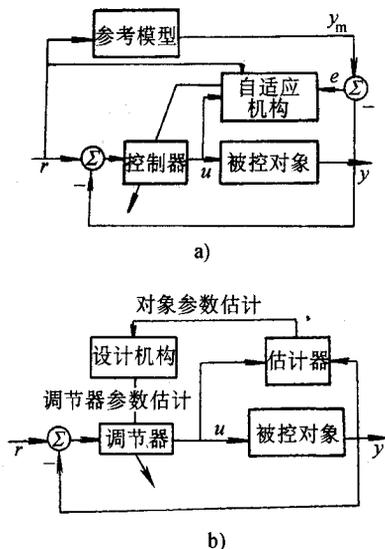


图 41-2 自适应控制系统

a) 模型参考自适应控制系统

b) 自校正调节器

设计模型参考自适应系统的核心问题是如何设计自适应调整律(自适应机构的算法),可以利用局部参数优化方法或者李亚普诺夫稳定性理论和波波夫(Popov)超稳定性理论来设计。

二、自校正调节器 STR

STR(Self-tuning Regulator)的结构如图 41-2b 所示。其中估计器是用来对被控对象数学模型进行在线辨识。由于估计的是对象参数,调节器参数还要经过设计机构才能得到。自适应调节器也可以看成由内环和外环组成。调节器的参数由递推参数估计器和设计机构组成的外环进行校正。系统的过程建模和控制设计都是自动进行。每个采样周期都要更新一次。

由于调节器的控制规律是多种多样的,如 PID 调节、误差积分指标调节等等,而且参数估计的方法也是多种多样的,因此自校正调节器的方案可以采用各种不同的控制规律和估计方法来设计。

第三节 智能控制

一、神经元

人工神经网络的研究始于 50 年代末 60 年代初,由于它能对非线性控制系统进行描述和处理,80 年代中期以后得到了普遍重视和发展。

神经元是神经网络的基本单元,结构如图 41-3 所示。输入为 x_1, x_2, \dots, x_N 。输入的阈值为 w_0 (可看成为一个数值为 -1 的输入量),神经元的输入和输出 z 之间的关系为

$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i x_i + w_0 z(x) = f(y)$$

其中 w_1, w_2, \dots, w_N 是输入 x_1, x_2, \dots, x_N 对神经元的权重。改变权重就可以改变神经网络的特性。 $f(y)$ 是非线性激励函数,最常用的见图 41-4。

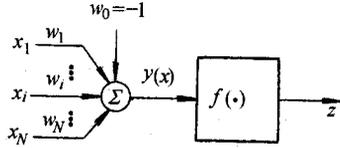


图 41-3 神经元基本结构

二、前馈神经网络

最常用的神经网络有前馈网络和反馈网络。一般前馈网络具有多层结构,至少为三层。图 41-5 所示的前馈网络中,第一层称为输入层,第二层称为隐藏层,第三层称为输出层。输入层单元的作用只是将输入信号送到隐藏层各单元的输入端,并不做任何计算。隐藏层和输出层的单元都是神经元,具有运算功能。它们的非线性激励函数 $f(\cdot)$ 一般采用 Sigmoid 函数,见图 41-4c。

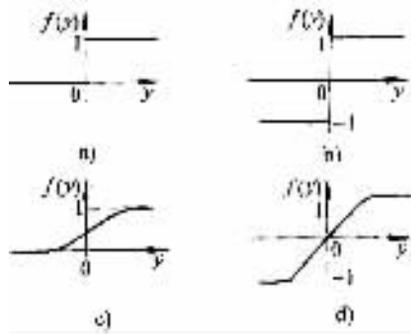


图 41-4 神经元中常用的非线性激励函数

$$\begin{aligned} \text{a)} & f(y) = 1(y) & \text{b)} & f(y) = \text{sgn}(y) \\ \text{c)} & f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}} & \text{d)} & f(y) = \frac{1 - e^{-y}}{1 + e^{-y}} \end{aligned}$$

图 41-5 中,各层中每一个单元的输出都直接与紧接的下一层的各单元的输入端相连接,层与层之间没有反馈作用,这种网络称为前馈网络。各层的单元数又称节点数,输入层的节点数等于输入变量个数,输出层的节点数等于输出变量个数。至于隐藏层的单元个数,理论证明,对于一个三层的前馈网络,只要选择足够多的隐节点,总可以任意逼近一个平滑的非线性函数。这样,前馈网络就可以用来实现非线性系统的建模、辨识和控制。隐藏层的节点数可以逐步由少增多,通过仿真试验,直到逼近的非线性函数达到要求的精度。

二、反馈神经网络

图 41-6 所示的网络称为 Hopfield 网络,它由单层节点组成。假定单元的非线性函数具有图 41-4a、b 的形式,即其输出仅取 0, 1 或 -1, +1。在每一时刻,整个网络的状态由 0 和 1 或 -1 和 +1 组成的 n 维向量表示, n 为网络的节点数。当网络中某单元的状态改变时,网络的状态也随之改变。Hopfield 网络中每一单元都与其它单元相连接。每个单元的输出又反馈到其他各单元的输入,使网络在没有外部输入时能保持在

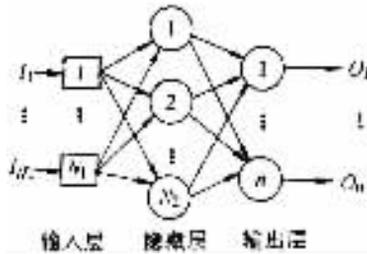


图 41-5 三层前馈网络

一个稳定状态。图中 w_{ji} 是由单元 i 到单元 j 的权重。权重表示单元相互连接的强度。数学分析表明,由于 Hopfield 网络中 $w_{ji} = w_{ij}$, 网络的状态能够收敛,即最终能够达到一个稳定的状态。

图 41-6 是 Hopfield 网络连接的另一种表示。图中,处理单元排成一横行,用圆圈表示,单元之间的相互连接用单元下面的网格表示。网格的交点表示权重。权重如何进行初始设定,则依赖于具体的应用。Hopfield 网络的每一个状态都与一个“能量值”对应。网络中单元状态的改变是随机地,异步地进行,与生物神经元受到随机的外界刺激而发生的改变方式相似。如果网络的能量随着状态的改变而愈来愈小,最终将达到一个稳定的状态。一个 Hopfield 网络可以有许多的稳定状态,它们可能对应局部极小值和全局极小值。因此, Hopfield 网络可以用于系统优化计算和模式识别中的联想记忆。

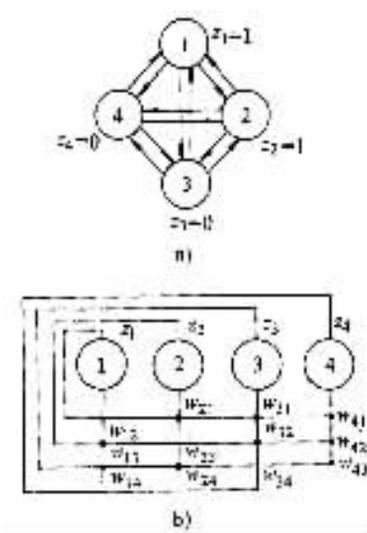


图 41-6 Hopfield 网络结构

三、神经网络的学习

利用一批已知的输入、输出数据集合来自动调节网络的权重,使网络获得要求的输入输出特性,称为网络的学习或训练。由于希望的输出是给定的,好像有教师示教一样,所以也称为监督训练。经过足够多的已知的输入输出模式的训练以后,网络就能够将训练模式以外的新的输入向量正确地映射成为希望的输出向量。

训练前馈神经网络时,首先将输入加到前馈网络的输入端,利用网络的实际输出与希望输出之间的误差来改变网络的权重,直到使数据集中所有输入输出对(模式)的误差的均方值达到最小,网络就能产生希望的综合响应。

单层网络每个神经元的正确响应就是网络希望的输出,因此,单层网络的训练很简单。但是它只能实现

线性映射或解决模式识别中的线性分类问题,如果希望解决非线性映射和分类问题,必须采用多层前馈。对于多层网络,隐藏层神经元的响应要求应当如何正确表达,一直是网络训练的主要障碍。直到最近误差反传算法的出现,训练多层前馈网络才成为可能。误差反传首先利用输出层的实际输出与希望输出之间的误差反传传播到隐藏层,形成隐藏层输出节点的误差,再利用最小均方误差算法或其它算法不断改进神经元的权重,从而达到网络训练的目的。

四、基于神经网络的系统辨识和控制

作为一种建模方法,可利用非线性系统的输入输出数据训练神经网络,使对象的动态特性和复杂映射关系隐含在网络之中。

(一)前馈建模

训练一个神经网络使其描述一个系统的前馈部分的动态特性称为前馈建模。将神经网络与辨识对象并联,对象输出与网络输出之间的误差,即预报误差,可用来训练网络。这是一种监督学习,对象的输出是学习的目标值。多层前馈神经网络和预报误差直接反传算法是一种可行的训练算法。为了将对象的动态特性引入到网络中,最直接的办法是增加神经网络的输入,将对象过去的输入和输出量引入网络。

(二)逆建模

动态系统的逆建模一般有以下几种方法:

1.直接法 图 41-7 中,在对象 P 的输入端施加一组控制信号 u , 输出信号 y 作为神经网络 NN_c 的输入,神经网络的输出为 u_c 。用误差 $e = u - u_c$ 训练 NN_c ,使得 $e \rightarrow 0$,这样经过充分训练以后,神经网络 NN_c 即成为对象的逆模型。

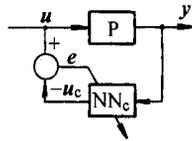


图 41-7 用直接法训练逆模型

直接法的原理简单,但其训练集的分布范围必然大于其工作范围,因此它不是“目标指引的”。直接法的另一个缺点是它只能离线进行训练。

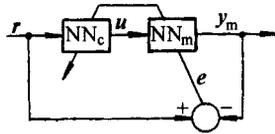


图 41-8 用间接法训练逆模型

2.间接法 图 41-8 中, NN_m 是一个已经训练好的正模型,被训练的逆模型 NN_c 串联在它前面,构成前馈控制。参考输入与 NN_m 的输出之间的误差信号 $e = r - y_m$ 经过 NN_m 反传即可修正 NN_c 的权系数。经过充分训练以后, $e \rightarrow 0$, NN_c 即可作为对象的逆模型。

用间接法训练逆模型时,训练样本 r 和 y_m 的工作范围通常是已知的,所以训练是“目标指引的”。另外,间接法还具有可以在线训练的优点。但是在训练 NN_c 的过程中,如果 NN_c 参数的初值选择不当,控制系统有可能不稳定。

(三)反馈误差法

反馈误差法是一种前馈-反馈控制系统。图 41-9 中,反馈控制器 K 可以是常规控制器或模糊控制器,神经网络 NN_c 作为前馈控制器,对象的控制量 $u = u_f + u_c$ 。训练的开始时,即使 NN_c 的参数不合适,但由于

K 的作用仍能使控制系统稳定工作。 NN_c 是以 u_f 作为偏差信号进行学习的, 经过充分的训练以后, $u_f \rightarrow 0$, $u_c \rightarrow u$ 这时 $y \rightarrow r$, $e \rightarrow 0$, 反馈控制不再起作用, 此时 NN_c 即训练成为对象的逆模型。

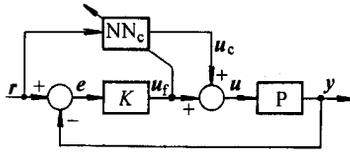


图 41-9 用反馈误差法训练逆模型

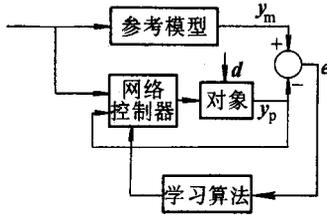


图 41-10 非线性系统的模型参考控制结构

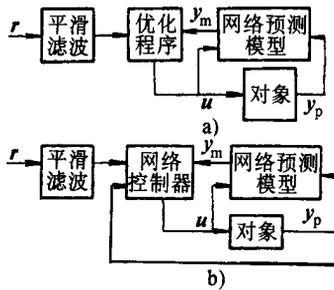


图 41-11 基于神经网络的预测控制

反馈误差法是“目标指引的”，通常是在线训练的，当然也可以离线运行。

五、基于神经网络的几种控制结构

动态系统模型及其逆可直接用于控制, 下面讨论几种比较可行的控制方案。

(一) 监督控制

许多控制系统由人来提供反馈控制作用。对于一些特殊任务, 实际上很难获得被控对象的解析的数学模型, 因此只能设计模拟操作人员作用的拟人控制器。这类控制方式称为监督控制, 它可用神经网络或专家系统来实现。在这里, 训练神经网络类似于学习获得操作人员经验的前馈网络模型。网络的输入利用从系统传感器得到的反馈信息, 输出尽可能接近操作人员的控制作用。

(二) 直接逆控制

直接逆控制将对象的逆模型直接与对象串联, 为的是使组合系统实现恒等映射。这时网络的作用相当于开环控制器。由于缺乏反馈, 这种方法的鲁棒性较差。可以通过在线学习, 对逆模型的参数进行在线调整, 使鲁棒性局部得到改善。

(三) 模型参考控制

图 41-10 中, 稳定的参考模型的输出是闭环系统的希望输出, 控制目标是使对象输出 $y_p(t)$ 渐近趋向参考模型的输出 $y_m(t)$ 。

(四) 预测控制

图 41 - 11a 中,网络预测模型产生的对象未来的输出送入一个优化程序,算出适当的控制 u ,优化的约束条件是对象的动态模型。

进一步,训练一个网络控制器来产生与优化程序相同的 u 。一旦训练完成,优化程序就用固定的网络控制器代替,如图 41 - 11b 所示。

第四十二章 介电强度测试

第一节 冲击电压下的介电强度测试

各种高压电气设备在运行中,难免要遭受大气过电压和操作过电压,为了检验这些设备承受这种过电压的能力,需要进行冲击电压下的介电强度试验。

一、冲击电压的波形及发生器

冲击电压下的介电强度试验中,采用的冲击电压波形是模拟实际运行中出现概率最大的冲击电压波形,这是根据大量实测统计的结果规定出的各种标准波形。常用的有两种,一是模拟雷电冲击波,即大气过电压的冲击波;二是模拟操作过电压的冲击波,包括事故短路、开关动作等产生的冲击波。大气过电压全波如图 42-1a 所示,波头 T_f 为 $1.2 \pm 30\% \mu\text{s}$,波尾 T_i 为 $50 \pm 2\% \mu\text{s}$,可表示为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 。波头的定义是:通过冲击波峰值的 0.3 和 0.9 两点 A 与 C 连一直线,与横坐标交于 O 点,与通过峰值的平行线交于 D 点,则 OD' 即为波头的时间 T_f 。波尾是冲击波下降到峰值的一半时, H 点所对应的横坐标上 H' 与 O 点间的时间间隔 T_i 。冲击波峰值的偏差不超过 $\pm 3\%$,峰值上产生的过冲击振荡幅值要小于峰值的 5%。这种雷电冲击全波应用最广,绝缘材料的冲击电压击穿试验也采用此标准波。

模拟操作过电压的冲击全波电压,如图 42-1b 所示。波头是电压从零开始上升到峰值的时间;波尾是电压从零开始到下降达峰值一半时的时间间隔。标准操作波的波头 T_f 为 $2500 \pm 20\% \mu\text{s}$,波尾 T_i 为 $250 \pm 20\% \mu\text{s}$,通常以 $2500/250 \mu\text{s}$ 表示。峰值允许偏差为 $\pm 3\%$ 。在特殊情况下, T_f 可以在 $100 \sim 500 \mu\text{s}$ 间取值。

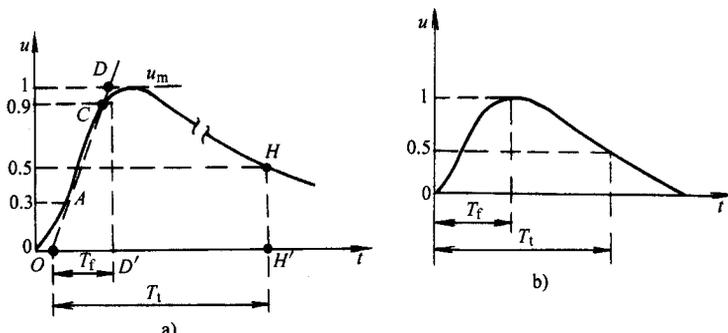


图 42-1 冲击电压波形

a) 雷电波全波 b) 操作波

除了上述两种冲击全波之外,还有应用于不同场合下的截波,截波的波形可以参阅 GB311.3。

$1.2/50 \mu\text{s}$ 的全波冲击电压,是通过冲击电压发生器产生的,它的工作原理是:用多个电容器并联充电,而后串联放电产生脉冲高电压,这个脉冲高电压对负载电容 C_a 充电形成冲击电压的波头,同时 C_a 、 C_i 上的电

荷又经负载电阻 R_l 放电而形成波尾。如图 42-2 所示, 试验变压器 T 将工频电压升高, 经整流器整流, 在电容器 C_i 上得到电压 u_i , 当 u_i 足够高时, 使球隙 G 放电, 这时 C_a 两端电压的变化可以分析如下

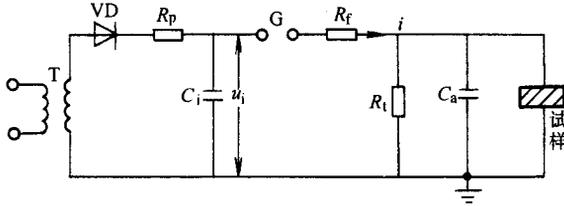


图 42-2 冲击电压发生器的原理图

$$u_i(t) = iR_f + u_a(t) \quad (42-1)$$

$$i = -C_i \frac{du_i}{dt} = \frac{u_a}{R_l} + C_a \frac{du_a}{dt} \quad (42-2)$$

式中各符号见图 42-2 将式(42-2)代入式(42-1)再微分得

$$\frac{du_i}{dt} = R_f \left(\frac{du_a}{R_l dt} + C_a \frac{d^2 u_a}{dt^2} \right) + \frac{du_a}{dt} \quad (42-3)$$

比较式(42-2)与式(42-3)可得

$$R_f C_a \frac{d^2 u_a}{dt^2} + \left(\frac{R_f}{R_l} + \frac{C_a}{C_i} + 1 \right) \frac{du_a}{dt} + \frac{u_a}{C_i R_l} = 0$$

即

$$R_l R_f C_i C_a \frac{d^2 u_a}{dt^2} + (R_f C_i + R_l C_a + R_l C_i) \frac{du_a}{dt} + u_a = 0$$

上式可以简化表示为

$$K_1 \frac{d^2 u_a}{dt^2} + K_2 \frac{du_a}{dt} + u_a = 0 \quad (42-4)$$

式中

$$K_1 = R_l R_f C_i C_a, K_2 = R_f C_i + R_l C_a + R_l C_i$$

解式(42-4)的特征方程为

$$K_1 \gamma^2 + K_2 \gamma + 1 = 0$$

$$\gamma_{1,2} = \frac{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - 4K_1}}{2K_1}$$

实际线路的参数满足

$$K_2^2 > 4K_1$$

所以 γ 为实数而且都是负数, 其通解为

$$u_a = A e^{\gamma_1 t} + B e^{\gamma_2 t} \quad (42-5)$$

$$\frac{du_a}{dt} = -A \gamma_1 e^{\gamma_1 t} - B \gamma_2 e^{\gamma_2 t} \quad (42-10)$$

上式中 A 、 B 系数可以根据边界条件确定, 边界条件是

$$t=0 \text{ 时 } u_a = 0; i = \frac{u_i}{R_f} = C_a \frac{du_a}{dt}$$

代入式(42-5)和(42-10)得

$$A = -B$$

$$\frac{u_i}{R_f} = C_a (-A \gamma_1 - B \gamma_2) = A C_a (\gamma_2 - \gamma_1)$$

所以

$$A = -B = \frac{u_i}{C_a R_f (\gamma_2 - \gamma_1)}$$

设 $\gamma = \frac{1}{T} \gamma_1 = \frac{1}{T_2}$, 代入式(42-5)得

$$u_a = \frac{u_i T_1 T_2}{C_a R_f (T_1 - T_2)} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (42-10)$$

从式(42-10)可以看出, u_a 可以看成是两个指数衰减叠加而成, 如图 42-3 所示。现求波头的时间 T_f 如下。

设 $u_a = 0.3u_m$ 时, $t = t_a$; $u_a = 0.9u_m$ 时, $t = t_b$, 根据线路的实际参数, $T_1 \gg T_2$, t_a, t_b 都很小, 所以 $e^{-t_a/T_1} \approx 1$, $e^{-t_b/T_1} \approx 1$

$$\begin{cases} 0.3u_m \approx u_m(1 - e^{-t_a/T_2}) \\ 0.9u_m \approx u_m(1 - e^{-t_b/T_2}) \end{cases} \quad (42-10)$$

或者

$$\begin{cases} 0.7u_m \approx u_m e^{-t_a/T_2} \\ 0.1u_m \approx u_m e^{-t_b/T_2} \end{cases} \quad (42-10)$$

式(42-10)除以式(42-10)得

$$t_b - t_a = T_2 \ln 7 = 1.95 T_2 \approx 1.95 C_a R_f$$

式中 T_2 —— C_a 充电过程的时间常数, $T_2 = -1/\gamma \approx C_a R_f$

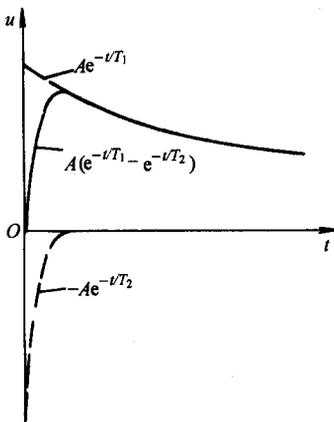


图 42-3 冲击电压形成图

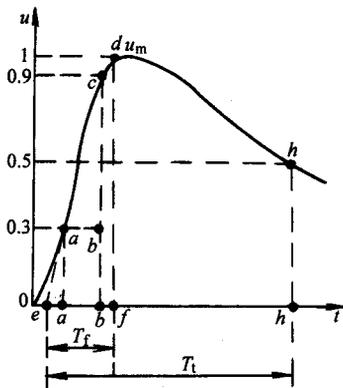


图 42-4 计算波头波尾的示意图

从图 42-4 可以看出 $\triangle abc$ 与 $\triangle def$ 相似, 即

$$\frac{t_f - t_e}{t_b - t_a} = \frac{1}{0.9 - 0.3}$$

所以, 波头 $T_f = t_f - t_e \approx 1.95 C_a R_f / 0.6 = 3.25 C_a R_{f0}$

同理可以求出波尾 T_t : 当 $u_a = u_m/2$ 时, $t = t_h$, 波尾的衰减基本上决定于 T_1 , 可以略去 T_2 一项, 所以

$$\frac{1}{2} u_m = u_m e^{-t_h/T_1}$$

所以 波尾 $T_1 = t_h - t_e \approx t_h = T_1 \ln 2 = T_1 0.693 \approx 0.7 C_1 R_1$

式中 T_1 —— C_1 放电的时间常数, $T_1 = 1/\gamma_1 \approx C_1 R_1$ 。

由于线路中杂散参数的影响和上述计算式本身的近似性, 实测的波头、波尾往往与计算值有明显差别, 因此在设计中可以应用上述式子估算波头、波尾。在冲击发生器装置完成后, 还要用脉冲示波器观察波形, 并通过 R_p 、 R_l 调整波头、波尾, 使之满足 $1.2/50\mu s$ 的标准波要求。

冲击电压的介电强度试验中, 冲击电压幅值往往要求很高, 用上述简单线路, 不论是变压器、整流器还是电容器都难以满足要求。为了解决这个问题, 可以采用多台电容器并联充电, 然后通过球隙放电把多台电容器串联起来, 产生很高的冲击电压。如图 42-5 所示, T 为试验变压器; VD 为整流器; C'_i 为充放电电容器; G 为放电球隙; R_p 为限流电阻; R 为阻塞电阻, 阻止放电过程电容器上电荷的泄漏, R_f 是波头电阻; R_l 、 C_a 分别为负载电阻和电容。在点火球隙没有放电之前, 所有球隙都是开路的。这时上面一排电容器是在电源正半周时充电, 下面一排电容器在负半周充电。经过若干周期之后, 每个电容器上的电压 u_c 都接近变压器输出的工频电压的峰值 u'_m , 即在线路上 1、3、5 各点的电压为 u_c , 2、4、6 各点的电压为 $-u_c$ 。

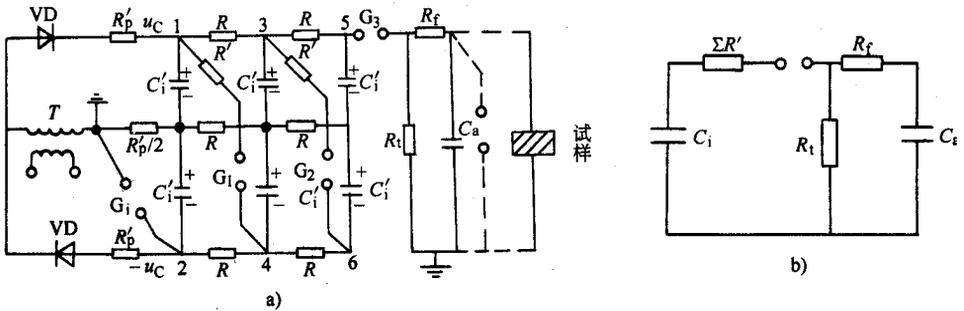


图 42-5 多级冲击电压发生器线路

一旦点火球隙放电, 点 2 强迫接地, 点 1 电位抬高为 $2u_c$, 点 1 与点 4 之间的电压 u_{14} 变为 $3u_c$, 于是球隙 G_1 放电。 G_1 一放电, 点 4 的电位强制为 $2u_c$, 点 3 的电位抬高到 $4u_c$, 3、6 两点之间的电压为 $5u_c$, 于是 G_2 放电。 G_2 一放电, 点 6 的电位强制为 $4u_c$, 于是点 5 电位抬高到 $6u_c$ 。这时 6 个电容器通过 G_1 、 G_2 球隙短路串联起来, 相当于图 42-1 中的 C_i , 电压 $u_i = 6u_c$ 。当球隙 G_3 放电时, C_a 两端的电压就是冲击电压的峰值, 约为 $6u_c$ 的全波冲击电压。冲击电压的幅值是靠调节各球隙的距离来实现的, 每一对球隙中, 总有一个是固定的, 而另一个是连接在一条连动杆上, 调节时各球隙同时拉开, 各球隙的距离保持一定的比例, 以保证先后放电的次序。最高电压可以接近于 mu'_m , m 是放电时串联的电容器个数; u'_m 是变压器输出的工频高压峰值。

为了使叠加在冲击电压峰值上的振荡幅值小于 $5\% u_m$, R_f 不能太小, 应满足

$$R_f \geq 1.4 \sqrt{\frac{L(C_i + C_a)}{C_i C_a}}$$

式中 L ——回路的电感。

在多级冲击电压发生器中, R'_f 为阻尼电阻, 用以抑制在各级小回路中产生振荡。等效电路图如图 42-5b 所示, $C_i = C'_i/n$ 。

冲击电压发生器的效率 η 是以输出的冲击电压峰值 u_m 与 C'_i 上的最高电压 u_i 之比来表示的。从图 42-2 可以看出, 设冲击电压达到峰值时, C_i 上的电压为 u_{im} , 则

$$u_m = u_{im} \frac{R_l}{R_f + R_l}$$

假定在 C_a 上电压上升到 u_m 这段极短的时间内, C_l 、 C_a 上的电荷总和不变, 则

$$C_i u_i = u_{im} C_i + u_m C_a = u_{im} \left(C_i + C_a \frac{R_l}{R_f + R_l} \right)$$

因为 $R_l \gg R_f$, 上式可简化为

$$C_i u_i = u_{in}(C_i + C_a) = u_m \left(\frac{R_f + R_l}{R_l} \right) (C_i + C_a)$$

因此效率为

$$\eta = \frac{u_m}{u_i} = \frac{C_i}{C_i + C_a} \frac{R_l}{R_f + R_l}$$

上式中各参数的选择,首先要满足冲击电压波形的要求,减小 C_a , R_f 就要增大,而且 C_a 太小,分布电容、试样电容对波形的影响增大。因此, C_a 一般选择在几百 pF 范围内, C_i 约大于 $10C_a$, R_l 也是约大于 $10R_f$, 这样,效率就接近于 80%。为了进一步提高效率,可以采用高效率冲击发生器。

图 42-10 是高效率冲击发生器的线路图,其特点是把波头电阻和波尾电阻都分散接到各级中去,如图 42-10a 所示。其工作原理与上述一般冲击电压发生器的相同。不同的只是 R_f 和 R_l 都分散接到各级小回路中,取消了图 42-4a 中的 R'_l 球隙 G_3 及部分充电电阻 R , 于是其等效电路简化为如图 42-10b 所示的电路。图中, $R_f = nR'_f$; $R'_l = n(R'_l + R'_f)$; n 为主电容器的个数。与图 42-5b 相比,少了 $\Sigma R'$, 于是对 C_a 充电产生的冲击电压的峰值 u_m 就很接近于 C_i 上的最高电压 u_i , 这就提高了这种发生器的效率。但由于 R'_l 会使主电容器上的电荷在球隙放电过程中泄漏掉一些,可能造成放电动作不稳定。因此,要采用双球隙放电或多级点火等措施来解决这个问题。

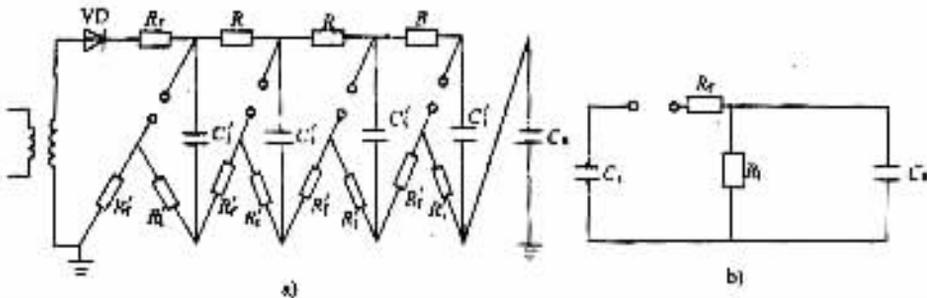


图 42-6 高效率冲击电压发生器线路

a) 线路图 b) 原理图

上述冲击电压发生器也可用以产生各种截波,只要在负载电容 C_a 两端并取一点火球隙,调节点火的时间,就可使冲击电压波在不同部位截断而形成不同的截波。

操作电压可以用上述冲击电压发生器产生,也可以用变压器产生。在采用冲击电压发生器时,由于波头增长,发生器的效率要降低,因此必须用图 42-6 所示的高效率线路,但由于 R_f 、 R_l 都增大, R 的影响就不能忽略,简化的原理图应改为图 42-7 所示,图中 $R_n = nR$ 。 C_a 两端输出的电压为

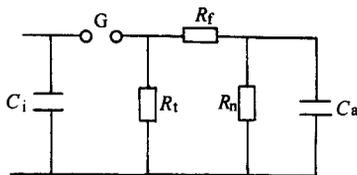


图 42-7 操作波发生器的原理图

$$u_a = \frac{u_c T_1 T_2}{C_a R (T_1 - T_2)} [e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}]$$

$$\text{式中 } \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{C_i R (R_f + R_n) + C_a R_n (R_f + R_l)}{2 C_i C_a - R_l R_n}$$

$$\pm \frac{[C_i R (R_f + R_n) + C_a R_n (R_f + R_l)]^2 - 4 C_i C_a R_f R_l R_n (R_f + R_l + R_n)}{2 C_i C_a R_f R_l R_n}$$

可以根据上式计算操作波的波头电阻 R_f 、波尾电阻 R_l 以及充电电阻 R_n 。

利用变压器产生操作波的原理及线路见图 42-8。在变压器的低压绕组一侧，接一脉冲电压发生器。当球隙 G 放电后，已充电的主电容 C_1 通过波头电阻 R_f 、一次侧和二次侧绕组的漏感 L_1 、 L_2 向二次侧的等效电容 C_a 充电。当 C_a 充到最大值后， C_1 、 C_a 同时通过变压器的励磁电感 L_3 放电，于是在二次侧就可得到操作冲击电压。这种方法在现场对变压器进行操作波耐压试验是比较方便的。

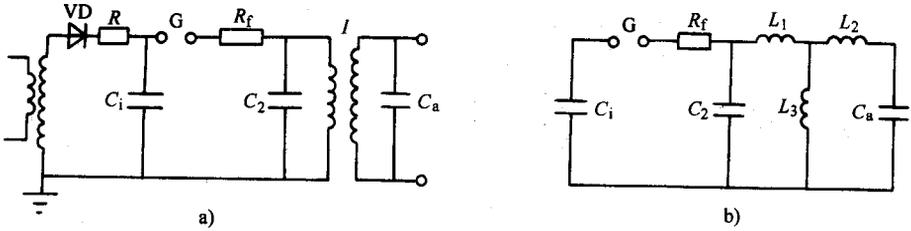


图 42-8 操作波发生器
a) 线路图 b) 原理图

二、冲击电压的测量

试验标准要求(1.2/50) μ s 标准全波和波尾截断波和(1/5) μ s 短波的幅值测量误差不超过 3%；1 μ s 以内波头截断波的幅值测量误差不超过 5%；波头及波尾的时间测量误差不超过 $\pm 10\%$ 。

目前广泛采用的冲击电压的测量方法有两种，一种是球隙 50% 放电法，这只能测量冲击电压的峰值；另一种是分压器加上脉冲示波器或峰值表。用峰值表也只能测量峰值，而用示波器则不但可以测量各种冲击电压的峰值，而且可以测量瞬时值及观察波形。

(一) 球隙测量法

球隙测量法与测量工频电压时相似，所不同的是冲击电压作用在球隙上的时间很短，球隙放电电压有较明显的分散性，因此要用 50% 放电法来测量。这里的 50% 是指球隙放电的次数占施加于球隙上的冲击电压次数的 50%。测量是这样进行的，固定被测的冲击电压不变，并连续施加到测量球隙上，逐渐调小测量球隙的距离，直到发生器产生 10 次冲击电压时，球隙上出现 4~6 次放电。记下这时球隙的距离，就可在附录 E 中查得冲击电压的峰值。

为了减小测量结果的分散性，在测量之前先让球隙放电 2~3 次，当测量的电压较低 (≤ 50 kV) 或放电球的直径小于 12.5cm 时，要用紫外线或其他射线照射球的间隙，使该处空间中有一定数量的有效电子，以保证放电稳定。同时球隙连续放电时，各次放电的间隔时间也会影响放电电压值，一般规定两次冲击电压测量的间隔时间为 1min。球隙放电测量法比较简单、可靠，但操作麻烦，而且不能观察波形。

(二) 分压器

在近代高压试验室中，很多都是用高压脉冲示波器来测量冲击电压，但示波器的显像板上能够承受的电压也仅是 1~2kV，所以要测更高的冲击电压，必须用分压器，从很高的待测电压中分出一定比例的低电压进行测量。冲击电压分压器有电阻分压器和电容分压器两种基本形式。为了改善分压器的性能，近年来又发展了并联阻容分压器和串联阻容分压器两种。

1. 电阻分压器 电阻分压器的电阻值约为 $10^4\Omega$ ，要求是无感电阻，其温度系数小，而且体积小。通常把电阻浸在变压器油中，可以提高局部放电的起始电压，同时也可以提高散热性能。

随着电压的增高，分压器高压臂电阻对地的杂散电容 C_g 造成的误差增大，为了减小这种误差，要在高压端加一个圆形的屏蔽环或锥形的屏蔽罩。屏蔽环、屏蔽罩与分压器的本体之间存在杂散电容 C_e ，于是通过 C_e 流进分压器的电流可以部分补偿通过 C_g 流出分压器的电流，使得分压器上电压的分布比较均匀，并使通过高低压两臂的电流相等。这种装有屏蔽环或罩的电阻分压器称为屏蔽电阻分压器，如图 42-9 所示。从图中尺寸可以看出，为达到分压器上电位分布基本均匀的目的，锥形屏蔽罩的直径可比圆环形的减小一半。

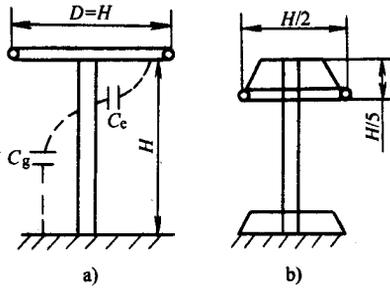


图 42-9 电阻分压器

a) 带有屏蔽环 b) 带有屏蔽锥

分压器装置在高压试验区,而示波器安放在测量室内,这两者之间的距离有几米到几十米,通常用高频

同轴电缆把分压器和示波器连接起来。这种电缆的损耗很小,可以忽略。它的波阻抗 $Z \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$,波在其中传播的速度 $v \approx 1/\sqrt{LC}$,衰减系数 $a = R_r/2Z$ 。上述各式中, L 、 C 分别为电缆单位长度的电感和电容; R_r 为长电缆导体包括芯子及外皮层的电阻。设在电缆的首端输入电压为 $u_0(t)$ 经过 x 距离后输出电压为

$$u_x = e^{-ax} u_0\left(t - \frac{x}{v}\right) = e^{-ax} u_0\left(t - \sqrt{LC}x\right)$$

由此可见,冲击波在电缆中传播 x 距离后,不但幅值衰减 e^{-ax} 倍,而且时间也延迟了 $\sqrt{LC}x$ 。通常延迟时间约在 $10^{-1} \mu s$ 数量级左右。

虽然电缆不是很长,但由于被测的冲击电压波形很陡,波长很短,相对来看电缆还是应看做一根长线。如果电缆终端的阻抗不匹配,则波在终端就会出现反射。波在电缆两端来回反射,就形成了振荡。为了避免出现这种情况,就要在电缆的终端接一匹配电阻 $R_c = Z$,如图 42-10 所示。这时分压器的分压比为

$$k_v = \frac{R_1 + \frac{R_2 Z}{R_2 + Z}}{\frac{R_2 Z}{R_2 + Z}} = \frac{R_1 R_2 + R_1 Z + R_2 Z}{R_2 Z}$$

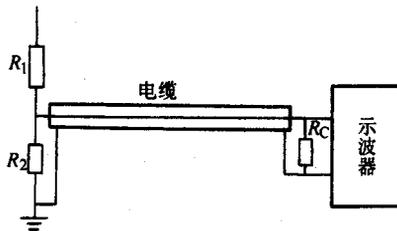


图 42-10 电阻分压器接线图

2. 电容分压器 电容分压器消耗的能量极少,没有因发热带来的麻烦,它还可以用来调节冲击电压的波形,但由于其电容量 C 比电阻分压器的杂散电容要大得多,高压引线容易引起振荡,所以必须在高压引线末端接入阻尼电阻 R_D ,高压引线造成的响应时间常数为 $T = R_D C$ 。此时间常数比带有屏蔽的电阻分压器大得多,因此,对于测量很陡的截波,电容分压器的响应特性,不如屏蔽电阻分压器。电容分压器比较适于测量雷电全波和操作波。

电容分压器的高压臂可以是单个高压电容器,称为集中式电容分压器,也可以是由多个电容器串接组成,称为分布式电容分压器。前者最好采用高压电极靠近底座的标准电容器,以避免用过长的电缆连接低压臂的电容器而造成的误差;后者要用残余电感很小并能承受短路放电的脉冲电容器。低压臂的电容量较大,而且通过的电流变化很快,在低压臂测量系统的回路中将会出现不可忽略的感应电动势,为了消除这一误差,除了测试回路的面积要尽可能缩小之外,把低压臂电容器做成同轴式的,或用铝箔电极延伸到介质外边而不用引线片的卷制元件做成的电容器,以尽可能地减小低压臂的残余电感。

从分压器连接到示波器的电缆,同样也要在终端接匹配阻抗,但不能像电阻分压器那样在末端接 R_C ,因为一般 R_C 只有几十欧, C_2 上的电荷通过 R_C 会很快泄漏掉。因此,要将 R_C 串接在电缆的始端,末端让它产生全反射,如图 42-11a 所示。 $R_C = Z$ 冲击电压经电阻 R_C 降低一半,到达终端反射增高一倍,因此示波器上测得的电压即为低压臂上的电压,这时分压比为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

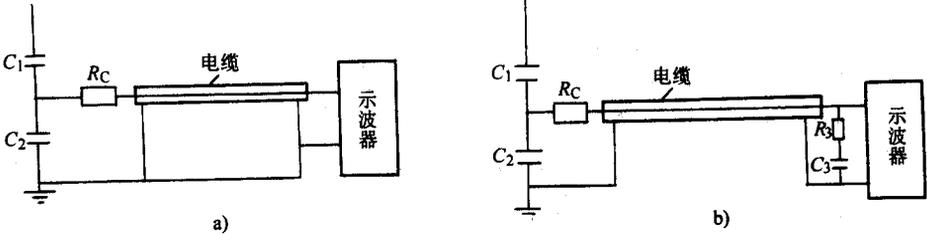


图 42-11 电容分压器接线图

a) 末端无匹配阻抗 b) 末端有匹配阻抗

由于电缆始端阻抗也不匹配,终端反射波到达始端时也产生反射,这一反射波再达终端时,叠加在第一次到达的电压波上,使幅值平缓上升,如图 42-12 所示。这样经过几次来回反射,每隔 2τ (τ 是波在电缆长度上传输经历的时间, $\tau = l/v$, l 为电缆长度, v 为行波速度) 输出电压就会出现起伏,一般经过 5τ 之后就基本稳定了。稳定之后,电缆阻抗就可以看做一个电容 C_a 的容抗,这时分压比变为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_a}{C_1}$$

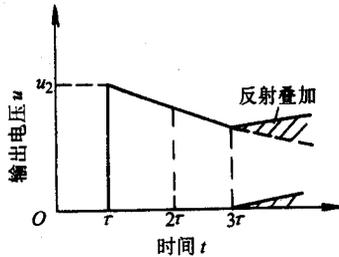


图 42-12 电容分压器输出波形示意图

通常 $C_2 \gg C_a$, 由此造成的误差不大。为了提高准确度,可在电缆末端接上 $R_3 C_3$, 如图 42-11b 所示。 $R_3 = Z$, $C_3 + C_a = C_1 + C_2$ 。这样,在初始时刻电缆呈现的阻抗是波阻抗,由于 C_3 阻抗小,可略之,电缆两端都有匹配阻抗,故分压比为

$$\frac{u_1}{u_2} = 2 \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)$$

到稳态后,电缆呈现的阻抗为容抗,分压比为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_a + C_3}{C_1} = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)$$

由此可见,初始和稳态的分压比就保持一样了。

3. 阻容分压器。为了克服电阻分压器和电容分压器各自的缺点,近年来发展了电阻和电容混合的阻容分压器,阻容分压器又可分为串联和并联两种类型。

(1) 并联阻容分压器。对于电阻分压器,采用了屏蔽罩之后,可以改善分压器上的电压分布。为了使分压器上的电压分布更为均匀,要在高压臂纵向并接电容,这些纵向电容和对地电容在一起使分压器上的电压分布均匀。在高压臂的低端,对地电容比高端大,因此在高端接的纵向电容应比低端大。

另一种并联阻容分压器是以分布式电容分压器为基础。这种分压器在测量直流电压时,由于各电容器的绝缘电阻不均匀,使分压器上电压分布不均匀。为了改善电压分布,在电容器旁并联电阻,其阻值要比绝缘电阻小得多,但比一般电阻分压器的电阻大,大约为 $10^8 \sim 10^9 \Omega$ 。

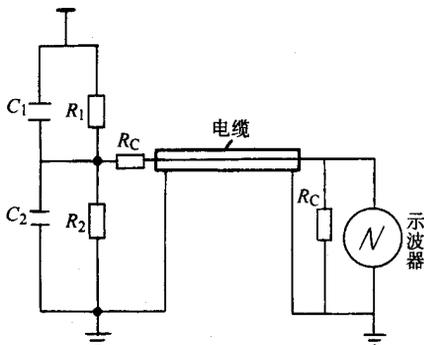


图 42-13 并联阻容分压器线路图

图 42-13 为并联阻容分压器的等效线路图,当用它来测量一个波尾较长的冲击波时,波头部分电压变化很快,分压比决定于 $(C_1 + C_2) / C_1$,波尾部分电压变化缓慢,分压比决定于 $(R_1 + R_2) / R_2$ 。为了对不同的电压分压比都保持不变,要求

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

为了消除电缆的终端反射,在电缆的始端和末端都接上匹配电阻 $R_3 = R_4 = Z$ 。在示波器上测得的电压 u'_2 为低压臂上电压的一半,因此分压比为

$$\frac{u_1}{u'_2} = 2 \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

(2) 串联阻容分压器。在分布式电容分压器中,除了高压引线的电感之外,还有电容器本身存在的残余电感及电容器之间的接线电感,这些电感与分压器的电容及对地电容组成的回路必然会产生振荡,这种振荡的频率较低。另一种振荡是高压引线及分压器内部的波反射引起的振荡,这种振荡的频率较高。为了消除这些振荡,可以用一个阻尼电阻集中接在高压引线的末端,但其效果不如把阻尼电阻分散接到高压臂的各电容器之间。没有串接电阻时,电容分压器本身的波阻抗约为 200Ω ,而高压引线的波阻抗约为 300Ω 。因此可以用串接电阻来调节分压器本身的波阻抗,使之与高压引线的波阻抗匹配。同时串接在分压器内部的电阻,对分压器内部的波过程有衰减作用。由此可见,这种串联阻容分压器对消除振荡更有效。

要消除低频振荡的临界阻尼电阻 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C_1}}$,在实际阻容分压器中,通常为了减少响应时间而宁可稍带振荡,阻尼电阻可以在 $(0.25 \sim 1.5)\sqrt{\frac{L}{C_1}}$ 范围内取值,其中 L 为整个测量回路的电感值; C_1 为分压器高压臂的电容值。

在串联阻容分压器中,对变化很快的高频电压,分压比决定于 $(R_1 + R_2) / R_2$;对变化很缓慢的低频电压,分压比决定于 $(C_1 + C_2) / C_1$ 。只要满足 $(R_1 + R_2) / R_2 = (C_1 + C_2) / C_1$ 时,不论对变化快还是慢的电压,分压比都保持不变。在低压臂测量回路中,电缆的阻抗匹配与电容分压器相同。分压器的接线如图 42-14 所示。这时示波器上测得的电压为 u'_2 。

$$\frac{u_1}{u'_2} = 2 \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

4. 分压器测量系统的性能及校验方法 分压器测量系统的性能主要体现在分压比正确及响应特性好。分压器的分压比误差在 $\pm 1\%$ 以内,而且要求稳定。测定分压比的方法有两种,一种是测量分压系统部件的阻抗,来计算分压比。通常是用精密的电桥来测量电阻或电容,要求测量电阻的误差不超过 $\pm 0.2\%$,测量电容的误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。另一种是在输入端加上 1kHz 以下的电压,直接测量输入和输出电压之比。电

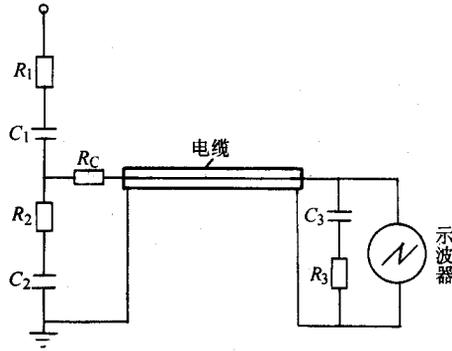


图 42-14 串联阻容分压器线路图

压峰值的测量误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。

分压器的响应特性有两种，一种称为频率响应，另一种称为方波响应。前者是在分压器的输入端施加幅值一定、频率可调的正弦波电压，在输出端测量不同频率的输出电压幅值，再根据这个幅频特性来评价分压器的响应特性。后者是在输入端施加一个方波电压，从示波器上测得输出的电压波形，这种波形有时很复杂，基本上可以分为两种类型，一种是指数衰减型，另一种是振荡衰减型，如图 42-15 所示。响应波形的起始部分常常有点迟延，上升很慢而且很模糊，很难确定真实的起始零点。实际上常在响应上升最陡的部分做一切线，以它与时间轴的交点作为起始点 $0'$ 。由 $0'$ 做垂直线上升与方波幅值的水平线相交，这一直线与响应曲线之间的面积，定义为响应时间（纵坐标数值已归一化而无单位，因此面积可表示时间）。对于振荡衰减型响应波形，规定单位幅值线下面的面积为正，上面的面积为负，响应时间取其代数和，即

$$T = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + \dots$$

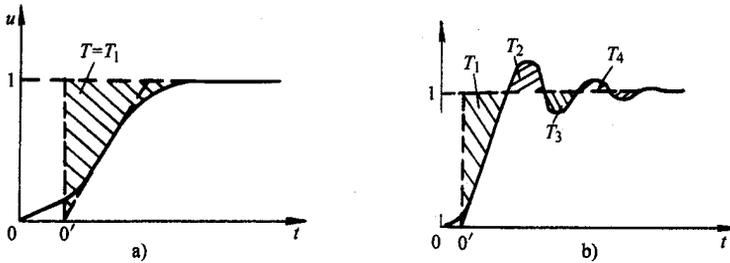


图 42-15 分压器的响应

a) 指数衰减型 b) 振荡衰减型

这时， T 就不能反映分压器系统响应的优劣。为此，把响应曲线与单位幅值线第一次相交以前这块面积称为部分响应时间 T_1 ，对指数衰减型响应， $T = T_1$ 。分压器系统测量不同的冲击波时，对方波响应的要求列于表 42-1 中。

表 42-1 方波响应时间的规定值

被测冲击波形	响应时间 T	部分响应时间 T_1
$(1.2/50) \mu\text{s}$ 全波、波尾截波	$T \leq 0.2 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 0.2 \mu\text{s}$
$(1.2/5) \mu\text{s}$ 短波、波头截波	$T \leq 0.05 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 0.25 \mu\text{s}$

测量冲击电压用的高压脉冲示波器,要求能测变化迅速的一次过程,普通示波器是测量周期性重复出现的信号,示波管的荧光屏上同一点受到许多电子的连续轰击,即使单个电子的能量不大,也可出现足够亮度的光点。高压脉冲示波器是测量一次过程,为了获得足够亮度的光点,必须使单个电子具有较大的能量,这就需要较高的加速电压,通常要比普通示波器的约高 10 倍(约 20kV),但高能量的电子束如长期作用在荧光屏上,会烧坏荧光屏。因此,在不加被测信号时,电子射线是被闭锁的,只有当被测信号到达的瞬间它才能射到荧光屏上,被测信号消失后又将自动闭锁。这个功能是靠光点释放(或称增辉)装置来完成的。它是装在示波管阴极前面的一个控制栅极,改变这个栅极的电位,可以改变电子射线的强度。当这栅极的电位负到一定程度时,电子射线就截止,这就是闭锁状态,当一个适当的正脉冲施加到这个栅极上时,电子射线就被释放出来,这个脉冲消失后,又恢复自锁状态。

为了能够测得一个完整的冲击电压波形,在电子射线到达荧光屏前,就要开始水平方向的扫描,接着被测信号到达垂直方向的偏转板上。这三个步骤要在极短的时间内(μs 级)顺序完成。因此,在测试系统中必须有满足这一要求的同步装置。图 42-16 是这种装置的线路图。从图中可以看到,当电压 u_c 足够高时,球隙 G 放电,产生一个脉冲电压,经 R_A 、 R_B 分压后,分别送去触发示波器的增辉(光点释放)及扫描装置。同时经过 $R_d C_d$ 时延后,加到冲击电压发生器的点火球隙 G_i 上。于是发生器产生的被测冲击电压,经过分压器及电缆的时延,到达示波器的垂直偏转板。只要调节好 $R_d C_d$,就可以实现上述的时序同步的要求。

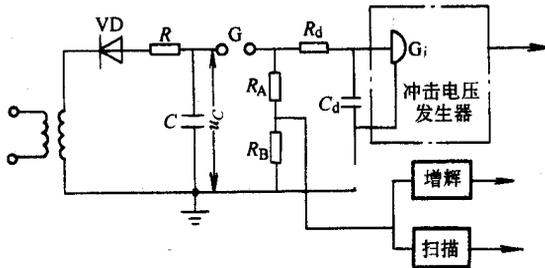


图 42-16 同步装置线路图

采用峰值表来测量冲击电压的峰值是比较经济和方便的。图 42-16a 是配合电阻分压器用的峰值表线路,当冲击电压是正极性时,二极管 VD_1 导通,通过电阻 R_4 对电容 C_m 充电,直到 C_m 两端的电压达到分压器低压臂 R_2 两端的电压,然后 C_m 对 C_u 放电, C_u 两端的电压逐渐上升到一定值,这一数值在线路参数一定时,就可代表被测电压的峰值。当冲击电压是负极性时,二极管 VD_2 导通,其他过程与正极性冲击电压一样。图 42-17b 是配合电容分压器用的峰值表线路,当被测电压为正脉冲时, VD_1 导通,对 C_4 充电,达到 C_2 上的最高电压,然后被测电压衰减, C_4 对 C_u 放电, C_u 上的电压可以代表被测电压。当被测电压是负脉冲时, VD_2 导通,对 C_3 充电,当被测电压衰减后, C_3 对 C_u 放电, C_u 上的电压极性与测正脉冲时相同。

三、冲击电压下介电强度的试验程序

对电工产品进行冲击试验时,先要观察冲击电压的波形是否符合标准波形的要求,对能自复的绝缘结构,如绝缘子、套管的表面放电,可先施加试验电压的 80% 左右,对不能自复的绝缘结构,只能施加更低的电压,如 50% 或 70% 左右。在冲击电压波形符合要求的前提下,才可对试样进行试验。对非自复绝缘,一般规定对试样连续施加三次试验电压,如果试样都不发生放电,则可认为试样是合格的。对自复性绝缘,要对试样连续施加 15 次试验电压,如果破坏性放电不超过 2 次,就可认为产品合格。

对于绝缘材料的冲击击穿试验,是用标准全波。试验时要逐级升高冲击电压,第一次施加的电压幅值约为试样击穿电压的 70%,以后每级增加第一级电压的 10% 左右,直到发生击穿。每次施加电压的时间间隔不少于 30s,试样在击穿时,至少要经受 3 次冲击电压,即击穿要发生在第三次冲击或以后,否则就应降低第一级电压幅值,重新进行试验。

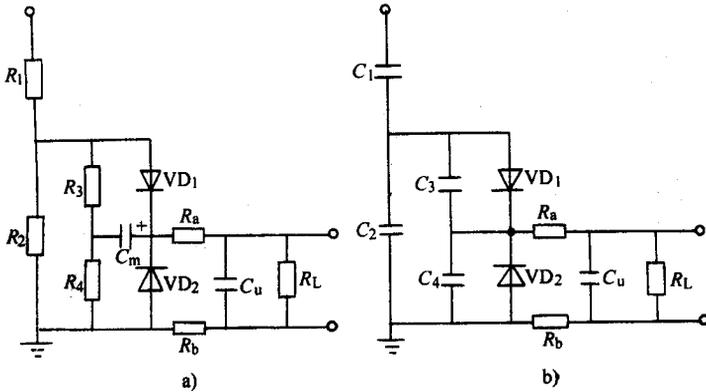


图 42-17 峰值表线路

a) 配合电阻分压器用的 b) 配合电容分压器用的

绝缘材料在冲击电压下的介电强度是以冲击电压的峰值 u_B 与绝缘材料的平均厚度 d 之比来表示的 (单位为 kV/mm), 即

$$E_B = \frac{u_B}{d}$$

因此, 击穿必须发生在全波的峰值或波尾, 而不能发生在波头。若发生在波头, 就要降低电压继续进行试验。

第二节 工频电压下的介电强度测试

工频电源应用最广, 材料在工频下的击穿场强比直流和冲击电压下的都低, 因此对于绝缘材料, 通常都是做工频下的击穿试验。绝缘材料的介电强度, 一般是指在工频下的介电强度。电工设备的例行试验中, 一般也是做工频耐压试验。

一、升压方式

做介电强度试验时, 电压要从零按一定方式和速度上升到规定的试验电压或击穿电压。升压方式和速度有以下几种。

1. 快速升压 电压从零上升到击穿电压所经历的时间, 约为 10 ~ 20s。根据击穿场强的高低, 可以选择不同的升压速度, 现行标准中规定为 100V/s、200V/s、500V/s、1000V/s、2000V/s、5000V/s, 最常用的是 500V/s。

2. 20s 逐级升压 电压逐级升高, 每级停留 20s, 各级电压的数值可参阅表 42-2。在表 42-2 中第一级电压约为快速升压击穿值的 40% 的电压, 如某材料用快速升压测得击穿电压为 5kV, 则在表 42-2 中可查得 2kV 为第一级电压, 在此电压下经受 20s, 若试样不击穿, 再升高到第二级, 即 2.2kV, 再停 20s, 若不击穿再加高一级, 直到试样击穿为止。升压过程要尽量快, 升压时间计算在下一级的 20s 之内。击穿电压是取能承受 20s 的最高一级的电压值, 如击穿发生在升压过程尚未达到 20s, 就应取前一级的电压作为击穿电压。在试样击穿之前必须已加过 5 级电压。即击穿应发生在第 6 级或更高的电压等级上, 否则应降低第一级电压重新再进行试验。显然, 逐级加压比快速加压电压作用的时间长, 所以测得的击穿电压比较低。

表 42-2 逐级升压规定的各级电压值

(单位 kV)

0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95					
1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9					
2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8
5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5					
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19					
20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
50	55	60	65	70	75	80	85	90	95					
100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200				

3. 慢速升压 从快速升压的击穿电压的 40% 开始, 以较慢的速度升压, 使击穿发生在 120 ~ 240s 内, 电压上升的速度可选取 2V/s、5V/s、10V/s、20V/s、50V/s、100V/s、200V/s、500V/s、1000V/s。

4. 60s 逐级升压 与 20s 逐级升压相似, 只是每级停留的时间为 60s。

5. 极慢速升压 从快速升压击穿电压的 40% 开始, 以极慢的速度升压, 使击穿发生在 300 ~ 600s 内。升压速度可选取 1V/s、2V/s、5V/s、10V/s、20V/s、50V/s、100V/s、200V/s。这种方式的升压速度慢, 电压作用时间更长, 测得的击穿电压更低, 试验结果比较可靠。

二、试验设备与装置

进行工频电压下的介电强度试验, 必须有一套高压试验装置, 包括高压试验变压器、调压器以及控制和保护装置等。

(一) 高压试验变压器

工频高电压一般都是通过试验变压器升压获得的。试验变压器应具有足够的额定电压和容量, 而且输出电压的波形没有畸变。

1. 试验变压器的电压 试验变压器的额定电压等级, 要根据试样的试验电压等级来选定。对于绝缘材料的试验, 一般可取 50 ~ 100kV。对于绝缘结构可能高达 1000kV 以上, 但单台变压器的电压等级太高, 不但经济效益不好, 而且运输也困难, 目前在外国, 单台变压器电压等级不超过 1000kV, 在国内最高做到 750kV。如果试验电压高于单台变压器的额定电压, 则可采用多台变压器串接以获得更高的试验电压。

图 42-18 是两台变压器串接的原理图。第一台变压器 T_1 的高压侧绕组 n_2 的一端接地, 另一端串联一绕组 n_3 , 这个绕组供电给第二台变压器 T_2 。 T_2 的低、高压绕组的公共端与 T_2 的外壳连接, 处于 T_1 的高压端电位。因此, T_2 的外壳对地要有相应的绝缘支柱。这第二台变压器的输出电压为两台变压器高压侧电压之和。

从图 42-18 可以看出, 通过试样的电流 I 同时流过两台变压器的高压侧绕组, 即 n_2 和 n_5 。输出的视在功率为

$$S = 2UI$$

式中 S ——输出的视在功率(kV·A);

$2U$ ——输出电压(kV);

I ——输出电流(A)。

第二台变压器的容量为 $S_2 = UI$, 而第一台变压器的容量, 除了本身输出 UI 之外, 还要供给第二台的视在功率 UI , 因此它的容量为 $2UI$ 。输出的视在功率与设备的总容量之比为 $2UI/3UI = 2/3$ 。依此类推, 用三

台高压端电压为 U 的变压器串接,可获得输出电压为 $3U$,而设备容量的利用率为 $3UI/(1+2+3)UI = 1/2$ 。串接的级数增加,输出的电压增高,但设备容量的利用率降低,而且内阻抗增大,因此也不宜采用过多的级数。目前最多的是采用三级串接,如我国目前最高的工频试验电压 2250kV,就是用三台 750kV 的变压器串接获得的。

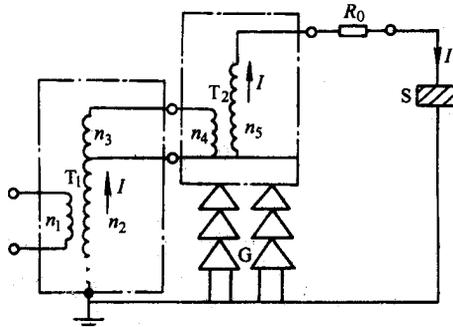


图 42-18 串接变压器原理图

$T_1、T_2$ —变压器 G —绝缘柱 S —试样
 R —保护电阻 $n_1 \sim n_5$ —绕组

对于容量较大的试样,可以通过串联谐振回路获得比试验变压器更高的电压。图 42-19 为串联谐振的原理图。对于一定容量 C_X 的试样,可以调节电抗器的电感 L 或改变试验电压的频率,使之满足谐振条件

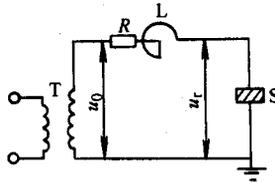


图 42-19 串联谐振回路原理图

T —试验变压器 L —电抗器
 S —试样 R —调节电阻

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_X}$$

式中 ω ——试验电压的角频率(rad/s);

C_X ——试样的电容量(F);

L ——电抗器的电感(H)。

当回路达到谐振时,试样两端的电压为

$$U_X = QU_0$$

式中 U_0 ——试验变压器的输出电压;

Q ——谐振回路的品质因数。通常 Q 值可达 20~80,这就说明试样两端的电压可比试验变压器的输出电压高 20~80 倍。试验变压器提供的电流为 U_0/R ,提供的功率为 U_0^2/R 。 R 为谐振回路总的等效电阻,包括接入的调节电阻、电抗器和导线的电阻、电晕损耗以及介质损耗等。

在谐振回路中,电抗器上的电压与试样上的电压大小相等,相位相反。当试验电压很高时,要制做单台高压调谐电抗器是不经济的,这时可以将调谐电感接在调谐变压器的低压侧,组成一台高压调谐电抗器,并可将多台这样的电抗器串接起来,使之能够承受超高压试验电压,如图 42-20 所示。

用串联谐振回路,不但能提高试验电压,而且电压波形好,又比较安全。因为谐振时只对工频基波谐振,只有基波电压提高 Q 倍,其他谐波分量相对就小得多了。同时,一旦试样发生击穿, C_X 变了,回路失去了谐

振,试样两端电压立即自动跌落。在表面闪络或液体击穿试验中,发生一次放电之后,电压的重建过程变得缓慢了,这有利于在一次放电后切断电源,不致于连续发生放电。

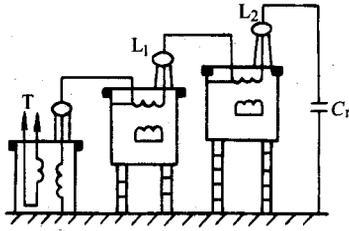


图 42-20 串联谐振装置示意图

T—变压器 L_1 、 L_2 —调谐电抗器

C_X —试样电容

2. 变压器的容量 绝缘材料的击穿试验和电工设备的耐压试验中,试样都是容性阻抗。试样在击穿前绝缘电阻很高,因此试验变压器的容量,可以根据试样在试验电压下通过的容性电流来计算;

$$S = U_2 \omega C_X$$

式中 U ——试验电压(V);

ω ——角频率(rad/s);

C_X ——试样电容量(F)。

绝缘材料击穿试验用的试样,电容量一般是几十到几百 pF,击穿电压一般不超过 100kV,因此选用额定电压为 100kV,容量为 10kV·A 的变压器已足够。对于电工设备做耐压试验的变压器容量要大一些,高压侧的电流为 1A 或更大。

对于电容量特别大的试样,如电力电容器、长电缆等,则必须采用电抗器与试样并联,补偿容性电流,以减小变压器的容量。

采用超低频正弦电压对大电容试样做耐压试验,可以大大降低变压器的容量。如用 0.1Hz 的超低频电压,变压器容量可以减小到 50Hz 时的 1/500,但 0.1Hz 下的介电强度 $E_{0.1}$ 要略高于 50Hz 下的介电强度 E_{50} 。对于电机绝缘, $E_{0.1}/E_{50}$ 的比值根据经验约为 1.15~1.2,对于各种绝缘结构,这个比值不是一个很稳定的值,因此目前还难以用 0.1Hz 来取代 50Hz 的试验电压。

3. 电压波形 工频电压的波形应为正弦波,正弦波的峰值与有效值之比称为波形因数。标准正弦波的波形因数为 $\sqrt{2}$ 。要求波形因数不超过 $\sqrt{2}(1 \pm 5\%)$ 。

波形畸变会影响介电强度的试验结果,这是由于一方面高次谐波会降低击穿场强;另一方面试样的击穿是决定于电压的峰值,而一般测量电压的仪表都是测有效值,如果波形畸变,则同一峰值的电压测得的有效值就不同了。

产生波形畸变的原因,除了电源本身有 3 次或 5 次等高次谐波之外,主要是变压器的非线性激磁电流造成的。当变压器的一次侧加上正弦电压时,铁心中的磁通也是正弦变化的,激磁电流 I_0 决定于磁化曲线,如图 42-21 所示。由于磁化曲线是非线性的,激磁电流就变成非正弦的了,激磁电流经过调压器产生的电压降 U_2 也是非正弦变化的。试验变压器的输入电压为

$$U_1 = k(U_s - U_2)$$

式中 U_s ——电源电压;

U_2 ——激磁电流流经调压器产生的电压降;

k ——调压器的电压比。

于是 U_1 波形发生畸变。调压器的漏抗愈大,这种畸变就愈严重。

为了改善电压波形,可以在调压器和试验变压器之间接入滤波器,如图 42-22 所示。滤波器中电感 L 与电容 C 的数值根据要滤掉的谐波频率 f 来选取,但电容不宜选择太大,以免调压器过载,一般部大于 $10\mu\text{F}$; 电感量按 $L = 1/(2\pi f)^2 C$ 计算。

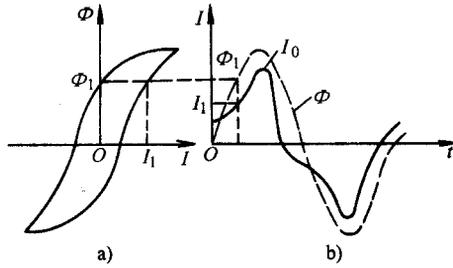


图 42-21 变压器的磁化曲线

- a) 磁通 Φ 与激磁电流 I 的关系
- b) 磁通及激磁电流的波形

电网电压中的高次谐波,往往是以三次谐波为主,而线电压中不含三次谐波,因此将调压器一次侧接线电压,也可能改善电压波形。

(二)调压器

试验电压要求从零开始,以一定方式和速度上升。电压的调节是靠调压器来实现的,常用的调压器有自耦调压器和移圈调压器两种。

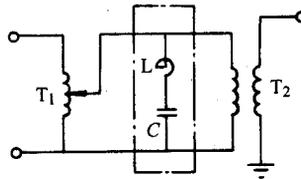


图 42-22 滤波器接线图

- T_1 — 调压器 T_2 — 变压器
- L — 电抗器 C — 电容器

1. 自耦调压器 自耦调压器是在铁心上只绕一个线圈,线圈的两端为一次侧,接电源。一次侧与二次侧有一公共连接端头,这个端头必须接中线或接地。二次侧的另一接头是一个滑动的触点,可以沿整个线圈移动,当触点与公共端相距增大时,电压上升。这种调压器结构简单、体积小、漏抗小而且价格也便宜。但在输出电流较大时,触点在移动过程会因接触不好而出现火花。因此,一般它只适用于容量为几千伏安以下,油浸式的容量则可达几十千伏安。

2. 移圈调压器 容量大的调压器都用移圈调压器。这种调压器是由三个线圈套在一个铁心上组成,如图 42-23 所示。线圈 I 和 II 匝数相等,但绕向相反。两个线圈串接,另一端接输入电压。输出电压由下面一个线圈的两端引出。线圈 III 是一个短路线圈,紧套在线圈 I、II 的外边,可以上下移动。

移圈调压器是靠移动短路线圈改变其他两个线圈的漏磁通,从而改变在 I、II 两个线圈上的电压分配来实现调节输出电压的。如果没有短路线圈,则线圈 I、II 产生的主磁通相互抵消,两个线圈上的电压就按各自的漏磁通 Φ_1 、 Φ_2 分配。当线圈 III 在最低位置与线圈 II 重合时,线圈 II 的漏磁通完全通过线圈 III,使线圈 III 感应产生的磁通 Φ_3 与 Φ_2 大小相等方向相反,正好相互抵消。于是输入的电压全部降落在线圈 I 上,线圈 II 上电压输出为零。当线圈 III 向上移动时, $\Phi_3 < \Phi_2$, 线圈 II 输出电压逐渐增大。当线圈 III 在中间位置时, $\Phi_1 = \Phi_2$, 输出电压为输入的 1/2。当线圈移到上端与线圈 I 完全重合时, $\Phi_1 = 0$, 输入电压全部降落在线圈 II 上,输出电压达到最大值,于是只要移动线圈 III,从最低位置到最高位置,输出电压就连续地由零上升到最大值。

移圈调压器靠电磁耦合而不用机械触点,因此调压过程不会出现火花,容量可以做得很大,但它的漏抗比较大,使用中应注意波形畸变。

3. 控制线路 控制线路要满足下列要求:

- (1) 只有在试验人员撤离高压试验区,并关好安全门之后,才能加上电压进行试验。

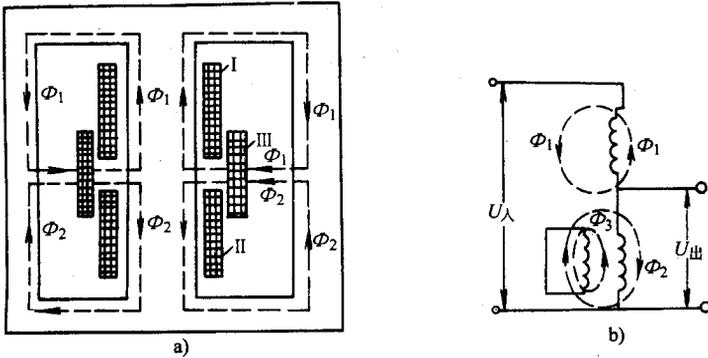


图 42-23 移圈调压器

a) 结构图 b) 原理图

(2) 升压必须从零开始,以一定方式和速度上升。

(3) 在试样发生击穿时,能自动切断电源。在自动控制线路中,能自动使电压下降到零。

最简单的非自动调压介电强度试验装置如图 42-24 所示。图中 S_1 是装在安全门上的限位开关,只有安全门闭合时开关才闭合。 S_2 是装在调压器零位置的限位开关,只有当调压器电压调到零时才闭合。 KA_2 是继电器,当它通过电流时,带动四个常开的触点闭合,其中 K_1 、 K_2 起自锁作用,即当控制电路接通后, K_1 、 K_2 闭合,这时即使 S_3 、 S_2 打开,控制回路也不会切断。 K_3 、 K_4 闭合,调压器就接上电源,可以进行试验。 KA_1 是过载释放器,或称过电流继电器。当试样击穿时,电流突然增大,过载释放器动作,将串接在控制回路中的常闭触点 K_5 打开,切断控制回路,从而切断电源。如果在试验过程中发生意外,要紧急切断电源,只要按下开关 S_4 即可。

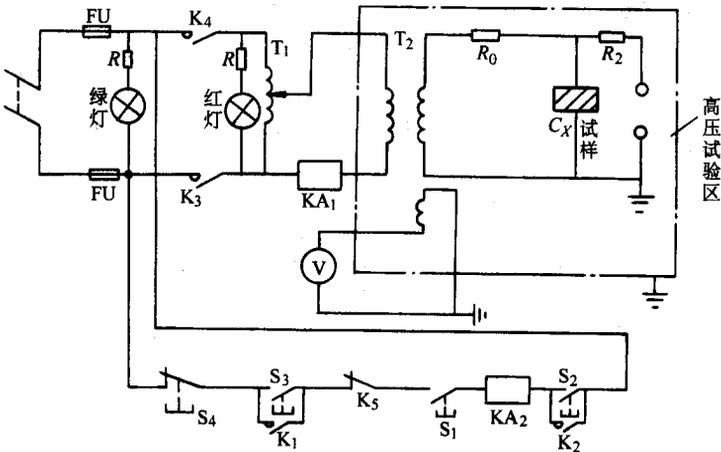


图 42-24 工频介电强度试验线路(手动式)

T_1 —调压器 T_2 —试验变压器 KA_1 —过电流继电器 KA_2 —继电器

R_0 、 R_2 —保护电阻 S_3 、 S_4 —按钮 S_1 、 S_2 —限位开关 FU —保险丝

自动调压的介电强度试验线路如图 42-25 所示。调压器是由电动机 M 来带动的。 S_1 、 S_3 、 S_4 、 KA_1 、 KA_2 以及其所带动的 K_1 、 K_3 、 K_4 和 K_5 四个触点的作用都和图 42-24 中的一样。 KA_2 带动的 K_6 触点是保证只有一切都正常, KA_2 接通时才能升压。在升压过程,一旦试样发生击穿, K_6 就打开,电动机停止正转,电压不再上升,接着 KA_2 的常闭触头 K_{11} 闭合,电机反转,电压自动退回到零。“升毕断”和“降毕断”两个限位触点,分别装在调压器的最高电压和零电压位置上。当电压上升到变压器的额定电压时,打开“升毕断”触点,使电机停止,以保护设备,当电压下降到零时,打开“降毕断”,使电机停止转动。 KA_3 的 K_9 和 KA_3 的 K_{12} 两个常闭触点是保证控制电机正反转的,并保证两组触头由 KA_3 控制的 K_{13} 、 K_{14} 、 K_{15} 和由 KA_4 控制的 K_{16} 、 K_{17} 、 K_{18} 不会同

时闭合,以免电源直接短路。KA₃的K₂、KA₄的K₁₀触点都是起自锁作用的。如果调压器开始时不在零位置,只要控制回路接通电源,电动机就反转,直到下降到零位置后才停止。若是做耐压试验,让电压上升到试验电压值时,按“停”按钮,电压就保持在那里,经过一定耐压时间后,再按“降”按钮,电压就自动下降到零为止。此线路比较可靠、方便。

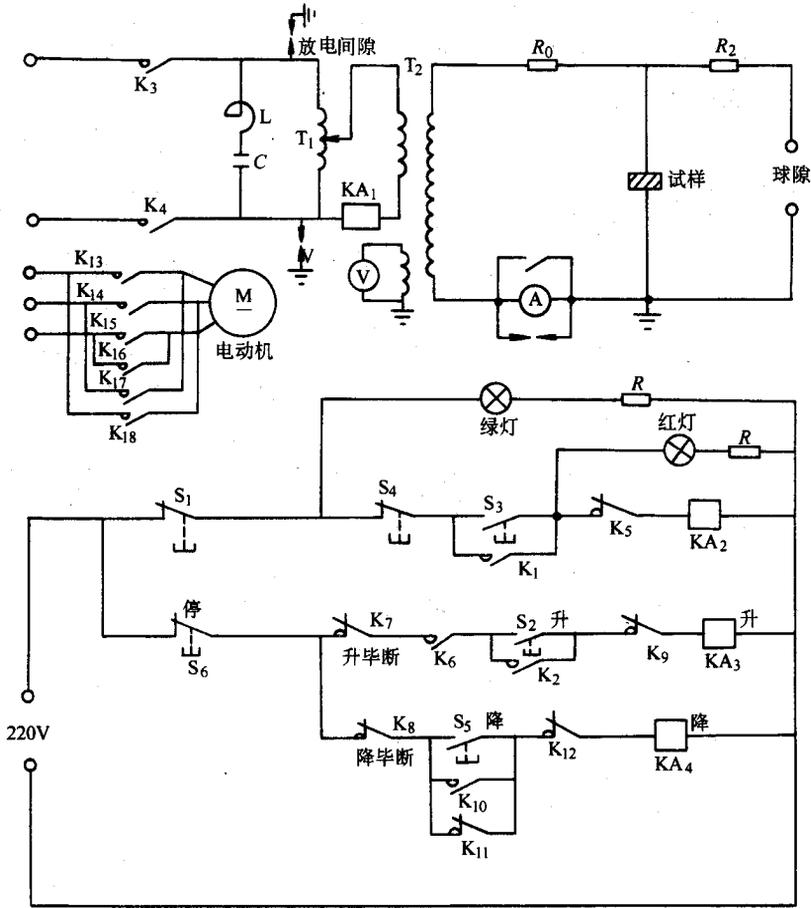


图 42-25 工频介电强度试验线路(自动的)

近年来,计算机已开始应用于介电强度试验的控制系统中来,应用单片机或微机组成的控制系统,可以通过键盘选择不同的升压方式和速度。升压、降压是由单片机或微机控制步进电动机带动调压器来完成的。当试样击穿时,由高压回路发生信号去切断电源,同时中断计算机正在执行的程序,转入高压击穿及降压程序,使调压器快速下降到零位。整个切断过程时间小于6ms。这样,就可以实现整个试验过程的自动化。

保护和接地 高电压试验中,必须非常注意人身及设备的安全。除了在控制线路中已采用过载释放器、安全门开关、调压器限位开关之外,在试验回路的低压部分有可能出现高电压的各点,都要接上放电间隙。一旦在这些地方出现高电压,放电间隙放电,强迫该点接地。

当试样击穿或闪络时,为了限制流过变压器的电流并使变压器高压端电位变化缓慢,以改善由此产生的脉冲在高压绕组间的分布和消除可能出现的振荡,同时也为了保护测量铜球和电极在击穿时不会烧坏,在高压测试回路中应接保护电阻R₀、R₂。保护电阻的大小,一方面要满足上述要求,另一方面也要避免试验时在电阻上产生过大的电压降和击穿时过载释放器有足够大的电流,从而能够在几个电压周期内切断电源。一般选用0.1~0.5Ω/V,例如额定电压为50kV的变压器,可以选用约20kΩ的保护电阻。

由于试验电压很高,当试样击穿或放电球隙放电时,将有很大的电流通过接地线。如果接地电阻较大,

就会显著升高接地线的电位而造成危险,测试回路中各接地点与接地体的连接线应采用尽量短的多股线,以减小电阻和电感。

高压试验区应装有保护围栏,围栏的入口处应装有联锁开关和信号灯,并备有接地棒。每次试验完毕在试验人员进入高压区接触高压部件前,必须先用接地棒把高压部件接地,以免电源没有切断,或有剩余电荷危害人身安全。在进行高电压试验时,必须严格遵守高电压操作规程。

三、工频高电压的测量

工频高电压的测量方法很多,可以直接测量试样两端的电压,如用静电电压表、球隙放电测量法等,也可以把高电压变换为低电压进行测量,如分压器、电压互感器等,还可以通过测量变压器低压绕组或特别绕制的测量绕组的电压换算高压端的电压。各种测量方法各有优缺点,应根据实际情况合理选用。各种方法测量的误差都要求不超过 3%,测量用的仪表一般要求为 0.5 级。

1. 静电电压表 高电压静电电压表是由两个极板组成的,一个极板固定,另一个由弹簧连接,可以移动。当极板上施加电压 U 时,电场力所做的功使电场能量发生变化,即

$$F dL = d\left(\frac{1}{2} Cu^2\right) = \frac{1}{2} u^2 d\left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{L}\right)$$

式中 F ——电场力(N);

C ——两个极板所组成的电容(F);

dL ——极板移动的距离(m);

A ——极板的面积(m^2);

ϵ_r ——相对介电常数。

$$F = \frac{1}{2} u^2 \frac{dC}{dL} = \frac{1}{2} u^2 d\left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{L}\right) / dL = -\frac{1}{2} u^2 \epsilon_0 \epsilon_r A / L^2$$

$$u = L \sqrt{\frac{2F}{\epsilon_0 \epsilon_r A}}$$

由此可见,通过极板间受力的大小,可以测定极板间的电压,但分度是非线性的。

静电电压表的内阻很大,它决定于电极间的绝缘电阻,其电容很小,约 5~50pF。在交流电压下测得的是有效值。目前最高电压等级可做到 500kV。静电电压表是依靠电场力工作的,因此空间电场、电荷对它的影响很明显,在使用中应予以注意。

2. 球隙测量法 在确定条件下,球隙间空气的放电电压与球隙的距离有一定的关系,见附录 E,因此可以利用球隙放电时的距离来测量电压。这里所指的确定条件,一方面是要保证球隙间电场均匀,另一方面是球隙中的空气要符合规定的标准状态。为此,球隙间的距离 s 和球的直径 D 应满足 $0.05D \leq s \leq 0.5D$;周围物体与铜球间的距离不小于铜球直径的 5 倍,铜球的表面应光洁、干燥。球隙间的大气条件规定温度为 20°C ,湿度为 65%,气压为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。如果测量时大气条件与标准状态有差异,则从表中查得的放电电压值要乘以校正系数 K , K 值可从表 42-3 中查得。

表 42-3 球隙击穿电压的校正系数

空气相对密度 δ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	1	1.05	1.10
校正系数 K	0.72	0.77	0.81	0.86		1	1.05	1.09

表 42-3 中,空气相对密度 δ 可按经验式计算

$$\delta = 51.45 \times \frac{p}{273 + t}$$

式中 p ——大气压力(Pa);
 t ——温度(°C)。

测量时,最好先让球隙放电几次,当放电比较稳定后重复测三次,每次间隔时间不少于1min,取三次读数的平均值作为测量结果,要求每一测量值与平均值之差不超过3%,然后,可以在附录E表中查得相应的电压值。

我国标准GB311—64中详细说明了用球隙法测量电压的有关规定,在工频下测得的是电压的峰值。这种方法的测量结果可靠,但装置占地面积较大,测量比较麻烦,一般只用于校准其他测试仪器。

3.互感器测量法 电压互感器是变比和角差都很精确的降压变压器,它将高电压变换为低电压进行测量。电压互感器的电压比 k 为已知,则在二次侧测得的电压乘以 k 就得到一次侧的高电压值。这种方法测量非常方便、可靠,因而在电网上普遍采用,但造价比较高。

4.分压器法 分压器是由一个高阻抗与低阻抗串接而成的。被测的高电压绝大部分降落在高阻抗上,于是可以从低阻抗两端测得的电压,通过分压比换算得到被测的高电压。对于工频交流电压,在电压较低时,如小于100kV时,可以用最简单的电阻分压器。当电压很高时,电阻分压器的功率损耗大、发热严重,同时体积大、分布电容的影响严重,因此采用电容分压器更为合适。

图42-26是电容分压器的原理图。被测电压施加于分压器的两端,电容器 C_1 的电容量很小,一般取50~100pF,但要承受几乎全部试验电压。电容器 C_2 的电容量很大,电压降只有几十到几百V,可以用静电电压表或峰值表测量 C_2 两端的电压 u_2 ,被测电压为

$$u = \frac{C_1 + C_2}{C_1} u_2 = k_C u_2$$

$k_C = (C_1 + C_2) / C_1$ 称为电容分压比。由于各种杂散电容的影响,上述计算式计算的结果往往与实测的分压比有差别。通常应在分压器安装好后,用高精度的仪表实测 u 及 u_2 ,从而得到分压比 k_C 。

为了防止在 C_2 上出现高电压造成危险, C_2 两端应接上放电保护间隙,而且 C_2 的一端必须牢牢接地。

5.测量绕组法 有许多试验变压器本身带有一个测量绕组,设此绕组的匝数与高压绕组的匝数比为 k_i ,则高压端的电压 u_2 就等于此绕组的电压 u_1 乘以 k_i ,即 $u_2 = k_i u_1$ 。有的试验变压器不用测量绕组,就在低压绕组测得电压 u_1 ,用高低压绕组的匝数比 k_i 乘以 u_1 来指示高压端的电压 u_2 。但由于 u_2 、 u_1 的比值不完全决定于匝数比,所以这种方法的准确度要比用测量绕组的低。

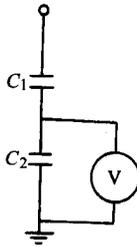


图 42-26 电容分压器原理图

用绕组法测得的是试验变压器高压端的开路电压 u ,当试验回路接上试样时,试样两端的电压 u_x 不一定等于 u 。从图42-27中可以看出,整个试验回路包括试样电容 C_x 、保护电阻 R_0 以及变压器的内阻抗 R_i 、 L_i 。在这个回路中

$$\dot{u} = \dot{u}_x + \dot{u}_L + \dot{u}_r$$

式中 \dot{u}_x 、 \dot{u}_L 、 \dot{u}_r ——分别为 C_x 、 L 以及 $R_0 + R_i$ 上的电压。

这些电压降之和用相量表示如图42-27b、c所示。从图中可以看出,当 \dot{u}_L 较大、 \dot{u}_r 较小时,可能出现 $\dot{u} < \dot{u}_x$,即测量值小于实际试样上承受的电压值。当 \dot{u}_L 很小、 \dot{u}_r 较大时,可能出现测量值偏大。这种误差将随试样电容量的改变而变化。因此,对于电容量相近的试样,可用一个精确的静电电压表或球隙,做一校正曲线,以后测量时,就可用此校正曲线来校准测量结果。

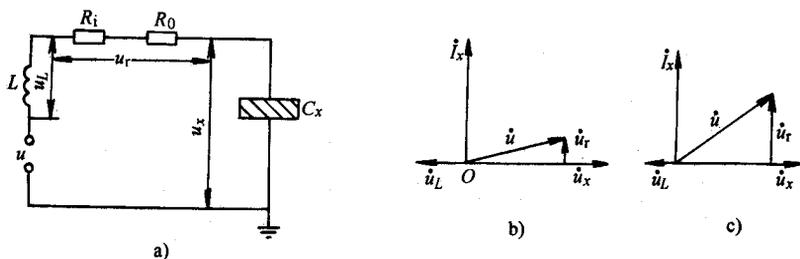


图 42-27 测试回路的电压分布图

a) 测试回路 b) $u < u_x$ c) $u > u_x$

第三节 直流电压下的介电强度测试

在生产和科学研究中,有不少电气设备是在直流电压下运行的,对于这些设备,当然要做直流电压下的介电强度试验。另外还有一此设备虽然不属于直流电气设备,但由于其电容量很大,如电力电容器、长电缆等,工频试验变压器的容量不能满足要求,又没有补偿电抗器时,就不得不采用直流来代替交流的介电强度试验,但由于直流和工频交流下的击穿机理不同,施加的试验电压应有差别。这要参阅有关产品的试验标准确定。

一、直流高电压试验装置

进行直流电压下的介电强度试验时,升压方式和速度与工频交流电压下的规定相同。直流高电压可以通过各种方法获得。在介电强度试验中,一般采用高压整流,即先通过变压器升高工频电压,然后通过高压整流器变为直流高压。所有控制线路与保护装置都与工频电压下所用的相同。

(一) 高压整流

介电强度试验用的高压电源应能满足以下要求:

1. 电压等级应满足试验电压的要求。
2. 设备容量应能输出 10~20mA 电流。
3. 电压脉动系数

$$S = \frac{U_2 - U_1}{2U_a} \leq 3\%$$

式中符号见图 42-28c。图 42-28a 是最简单的半波整流电路图。从试验变压器 T 输出工频高压,经高压整流器 VC 整流,在滤波电容器 C 上就得到直流高压 U_C 。由于高压整流器只能正向导通,当电容器 C 上已有电压时,必须等待工频电压的瞬时值更高时,整流器才能导通,使电容器的电压继续提高,大约要经过 15 倍时间常数 (RC) 后, U_C 可达到 $0.9u_m$ 如图 42-28b 所示。

另外,滤波电容器 C 并联有泄漏电阻 R_c ,整流器件的反向电阻也不是无穷大,因此在整流器没有导通的时间内,电容器 C 上的电荷会泄漏掉一些, U_C 要下降到 U_1 ,到下一个周期整流器导通时, U_C 又上升到最大值 U_2 ,见图 42-27c。通常是以平均值 $U_a = (U_1 + U_2)/2$ 代表直流电压值。用脉动系数 S 来表征这种电压的脉动程度,即

$$S = \frac{U_2 - U_1}{2U_a} = \frac{\Delta Q/C}{2U_a} = \frac{I_c T_2}{2U_a C} = \frac{U_a T_2/R_c}{2U_a C} = \frac{T_2}{2R_c C}$$

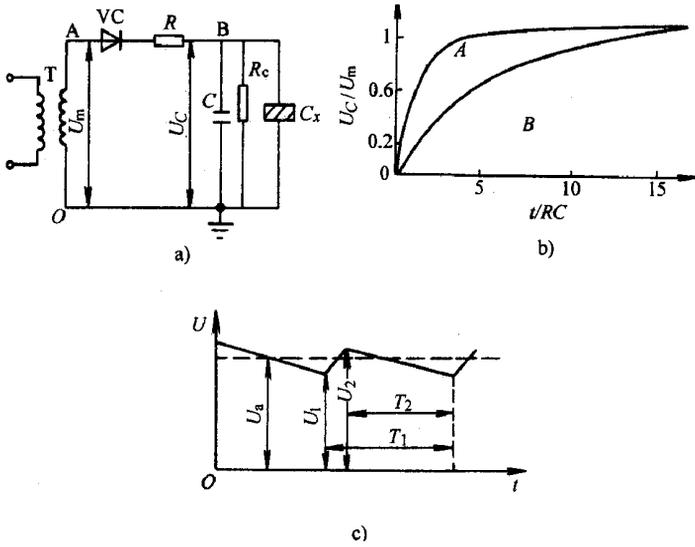


图 42-28 半波整流电路

a) 整流线路 b) U_C 的上升过程 c) U_C 的脉动

式中 ΔQ ——电容器 C 泄漏的电荷；

T_2 ——泄漏的时间；

I_c ——平均泄漏电流。

由此可见，用全波和桥式整流或提高交流电压的频率以缩短 T_2 。以及增大 R_c 和 C ，都可以改善脉动系数。

图 42-29a 是全波整流线路，图 42-29b 是桥式整流线路。这两种整流电路，不但电压的脉动系数小，而且通过整流器的电流只有输出电流的一半。全波整流要用两个整流器，而且要求变压器有中心抽头。桥式整流要用四个整流器，但每个整流器承受的反向峰值电压只有半波和全波整流的一半。

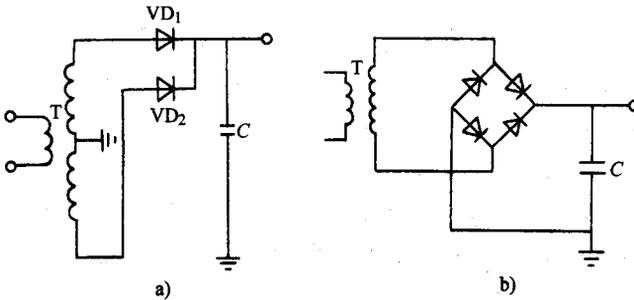


图 42-29 整流电路图

a) 全波整流 b) 桥式整流

近年来，最普遍采用的高压整流器，是用硅二极管串接起来的硅堆。目前我国生产的硅堆的反向峰值电压可达几百千伏，平均电流可达上百毫安。如果需要更高的电压，可以将若干个硅堆串接起来，如图 42-30 所示。为了使每一个硅堆承受的电压均等，要在硅堆上并接一个由 R_A 、 C_A 组成的均压阻抗。限流电阻 R_B 可以分散串接在各硅堆之间，也可以集中一个电阻与硅堆串相接，其阻值应在试样发生击穿或闪络时，使通过硅堆的电流小于允许的最大瞬时电流值。硅堆在 0.5s 内允许的瞬时电流，可比额定工作电流大 10 倍。在半波和全波整流电路中，反向峰值电压约为 $2u_m$ ，桥式整流中约为 u_m 。

(二) 倍压整流

上述几种高压整流线路所能获得的最高直流电压，只能是接近试验变压器输出电压的峰值 u_m 。要获得

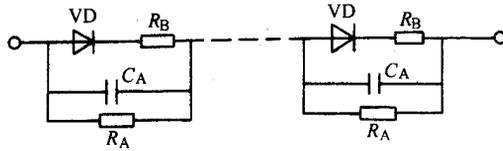


图 42-30 硅堆串原理图

比 u_m 更高的直流电压 就要采用倍压整流电路。图 42-31 是倍压整流的线路 ;图 42-31b 是在倍压过程中该线路各点上电位的变化。表 42-4 分析图 42-31b 所示的倍压过程各点电位的变化。

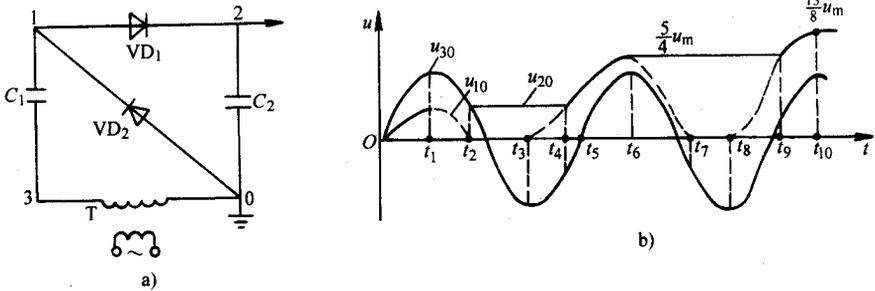


图 42-31 倍压整流线路及工作原理图

a) 倍压整流线路 b) 倍压过程

表 42-4 中,在 $t_4 \sim t_5$ 时间内, VD_1 导通, C_1 上原有的电荷 $C_1 u_m$ 与 C_2 上原有电荷 $C_2 u_m/2$ 重新分配。若 $C_1 = C_2 = C$, 则每个电容器上的电荷为 $(Cu_m + \frac{1}{2} Cu_m/2)$, 因此 C_1 、 C_2 上的电压变为 $3u_m/4$ 然后,在 $t_5 \sim t_6$ 时间内, $u_{30} > 0$, 电源对 C_1 反向充电, C_2 正向充电, 使 C_1 上的电压 u_{13} 降低 $u_m/2$, 使 C_2 上的电压又增中 $u_m/2$, 即达到 $5u_m/4$ 。同理,在 $t_9 \sim t_{10}$ 时间内, C_1 、 C_2 上原有电荷重新分配, 使 C_1 、 C_2 上的电压为 $(u_m + \frac{5}{4} u_m)/2$, 再加上电源在正半周对 C_1 、 C_2 充电, 使 C_1 的电压降为 $5u_m/8$, C_2 的电压增加到 $13u_m/8$ 。这样经过若干周期后, C_2 上的电压 u_{20} 就可接近 $2u_m$ 约为试验变压器的最高电压峰值的 2 倍。

表 42-4 倍压过程各点电位变化的分析表

t	u_{30}	VD_1	VD_2	u_{13}	u_{10}	u_{20}
$0 \sim t_1$	$0 \sim u_m$	通	止	$0 \sim -\frac{1}{2} u_m$	$0 \sim +\frac{1}{2} u_m$	$0 \sim +\frac{1}{2} u_m$
$t_1 \sim t_2$	$u_m \sim +\frac{u_m}{2}$	止	止	$-\frac{1}{2} u_m$	$+\frac{1}{2} u_m \sim 0$	$+\frac{1}{2} u_m$
$t_2 \sim t_3$	$+\frac{1}{2} u_m \sim -u_m$	止	通	$-\frac{1}{2} u_m \sim +u_m$	0	$+\frac{1}{2} u_m$
$t_3 \sim t_4$	$-u_m \sim -\frac{u_m}{2}$	止	止	$+u_m$	$0 \sim +\frac{u_m}{2}$	$+\frac{1}{2} u_m$
$t_4 \sim t_5$	$-\frac{u_m}{2} \sim 0$	通	止	$+u_m \sim +\frac{3}{4} u_m$	$+\frac{1}{2} u_m \sim +\frac{3}{4} u_m$	$+\frac{1}{2} u_m \sim +\frac{3}{4} u_m$
$t_5 \sim t_6$	$0 \sim +u_m$	通	止	$+\frac{3}{4} u_m - \frac{1}{2} u_m$ $= +\frac{1}{4} u_m$	$(1 + \frac{1}{4}) u_m$ $= +\frac{5}{4} u_m$	$+(\frac{3}{4} + \frac{1}{2}) u_m$ $= +\frac{5}{4} u_m$

$t_6 \sim t_7$	$+u_m \sim -\frac{u_m}{4}$	止	止	$+\frac{1}{4}u_m$	$+\frac{5}{4}u_m \sim 0$	$+\frac{5}{4}u_m$
$t_7 \sim t_8$	$-\frac{u_m}{4} \sim -u_m$	止	通	$+\frac{u_m}{4} \sim +u_m$	0	$+\frac{5}{4}u_m$
$t_8 \sim t_9$	$-u_m \sim +\frac{u_m}{4}$	止	止	$+u_m$	$0 \sim +\frac{5}{4}u_m$	$+\frac{5}{4}u_m$
$t_9 \sim t_{10}$	$+\frac{u_m}{4} \sim +u_m$	通	止	$+u_m \sim \frac{5}{8}u_m$	$+\frac{5}{4}u_m \sim +\frac{13}{8}u_m$	$+\frac{5}{4}u_m \sim +\frac{13}{8}u_m$

若要更高的直流电压,可以把几级倍压电路串接在一起,如图 42-32 所示。每一级都能获得约 $2u_m$ 的直流电压。若有 n 级串联,则可得约 $2num_0$ 的直流电压,但级数愈多,内阻抗愈大,实际输出电压比 $2num_0$ 小得愈多,同时脉动系数也愈大。因此,级数不宜太多,一般不超过 5 级。采用不对称多级串接,结构简单,造价低。采用对称多级串接如图 42-32b 所示,输出电流可增大一倍,并且能够减小脉动系数。

二、直流高电压的测量

直流高电压的测量,有一些与工频交流相同,如可以用静电伏特计和球隙直接测量试样两端的电压。虽然静电伏特计测得的是有效值,球隙测得的是峰值,但只要直流电压的脉冲系数不大,它们与直流下的平均值都基本上相同。此外,还有些方法可用于直流电压的测量。不论哪一种测量方法,测量的误差都要求不大于 3%。

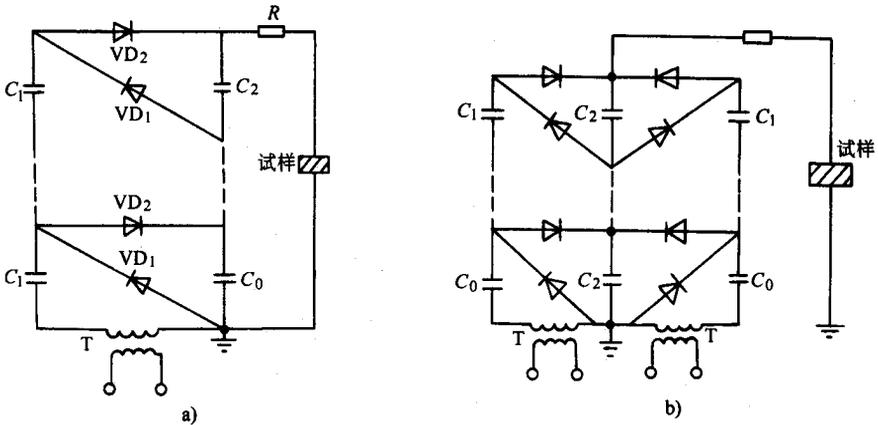


图 42-32 多级倍压电路图

a) 对称式 b) 不对称式

(一) 高电阻与毫安表串接法

用一个精确的高电阻与一个毫安表串接,被测电压 U 施加在它的两端,如图 42-34 所示。由于毫安表的内阻远小于高电阻 R ,因此毫安表通过的电流 $I = U/R$ 。 R 为已知电阻,于是被测电压 U 就可以通过毫安表测得的电流 I 来显示。为了安全起见,在毫安表两端要并接一个放电器,当出现高电压时,放电器放电,把毫安表短路并强制接地。

(二) 电阻分压器

当被测电压很高时,要采用电阻分压器,最简单的电阻分压器是用一个高电阻与一个低电阻串接组成,设高电阻为 R_1 ,低电阻为 R_2 ,施加在分压器两端的电压为 U ,在低压电阻两端测得的电压为 U_2 ,则

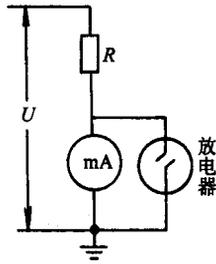


图 42-33 高电阻与毫安表串接法

$$U = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_2 = k_r U_2$$

式中 k_r ——电阻分压比, $k_r = (R_1 + R_2) / R_2$ 。

为了提高分压器的精确度,可采用双臂桥式电阻分压器,如图 42-34 所示。图中 R_A 、 R_B 是电阻值较小、精确度很高的辅助电阻,经过两次调节电桥平衡,可以用 R_A 、 R_B 的比值来测定分压比。

第一次将 R_A 、 R_B 短路,调节 R_C 使电桥平衡,这时

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R'_1}{R'_2 + R_C}$$

第二次将 R_A 、 R_B 接入电桥回路,调节 R_B 使电桥重新达到平衡,这时

$$\frac{R_1 + R_A}{R_2 + R_B} = \frac{R'_1}{R'_2 + R_C} = \frac{R_1}{R_2}$$

所以

$$\frac{R_1 + R_A}{R_2 + R_B} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$k_r = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{R_A + R_B}{R_B}$$

这种分压器的分压比的误差不超过 1%。将高压臂的电阻浸在油中,可以改善散热并提高起始放电电压。在高压臂电阻周围加上一个屏蔽层,并给屏蔽层以一定的电位。可以改善高压臂电阻附近的电场分布。这也是提高高压臂中局部放电起始放电电压的有效措施。

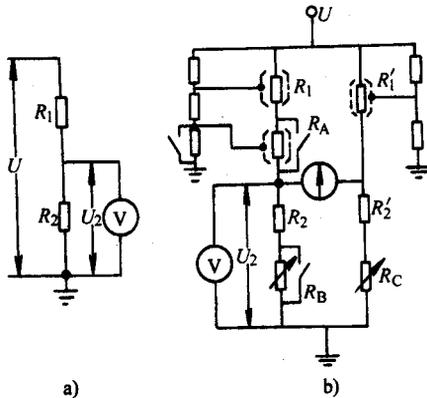


图 42-34 双臂桥式电阻分压器

a)原理图 b)双臂桥式线路

第四节 叠加电压下的介电强度测试

电工设备在使用中,有时要承受两种甚至两种以上的电压,如直流电压上叠加交流电压或冲击电压、交流电压上叠加冲击电压等。为了考验电工设备承受这些叠加电压的能力,或研究在这些叠加电压下绝缘的介电特性,就需要进行叠加电压下的介电强度试验。

一、直流与工频电压叠加

图 42-35 是在直流电压上叠加交流电压的线路图,图中 R_1 、 R_c 为限流电阻; C_1 为滤波电容; C_c 为隔离直流电压的电容; R_a 与微安表串联,用以测量直流高压; C_2 与电压表串联测量交流高压。这样,交直流电压就可以同时加到试样上。

二、直流与冲击电压叠加

图 42-35 是直流与冲击电压叠加的线路图。图中 R_1 是限流电阻; C_c 为隔离直流的电容; R_a 与微安表串联用以测量直流; C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 组成的并联阻容分压器用以测量冲击电压。这样,在试样上就可以同时叠加直流和冲击电压。

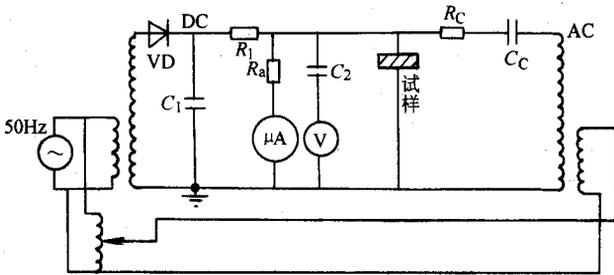


图 42-35 交直流电压叠加线路

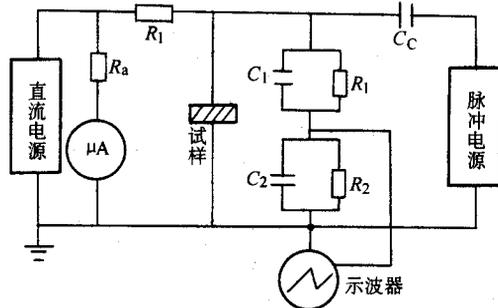


图 42-36 直流与冲击电压叠加的线路

第四十三章 传感器测试技术

第一节 电感式传感器测试

电感式传感器是利用线圈自感或互感的变化来实现测量的一种装置,可以用来测量位移、振动、压力、流量、重量、力矩等各种非电物理量。

一、自感式传感器

(一)简单自感传感器的原理及特性

图 43-1 是简单自感传感器结构的示意图。它由线圈、铁心和衔铁所组成。线圈是套在铁心上的。在铁心与衔铁之间有一个空气隙,其厚度为 δ 。根据磁路的基本知识,传感器线圈的电感量可按下式计算:

$$L = \frac{N^2}{\sum R_m}$$

式中 N 为线圈匝数; $\sum R_m$ 为以平均长度表示的磁路的总磁阻。如果空气隙原度 δ 较小,而且不考虑磁路的铁损,则总磁阻为

$$\sum R_m = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}$$

式中 l_i 为各段导磁体的磁路平均长度; μ_i 为各段导磁体的磁导率; S_i 为各段导磁体模截面积; δ 为空气隙的厚度; μ_0 为空气隙的磁导率($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \text{H/cm}$); S 为空气隙截面积。

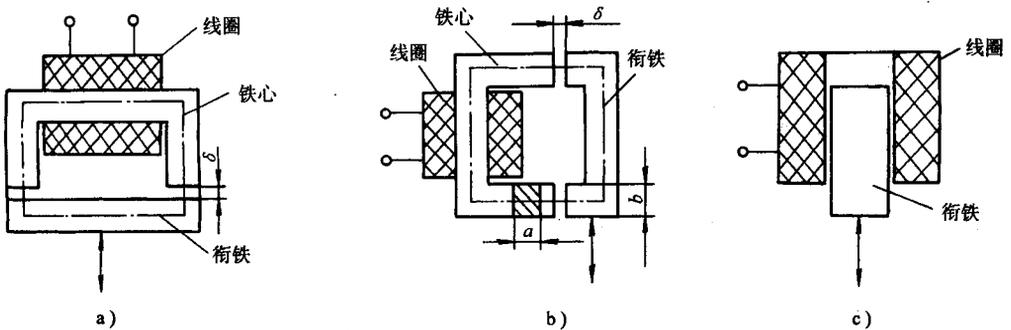


图 43-1 简单自感传感器结构示意图

a)变间隙型 b)变截面型 c)螺管型

因为一般空气隙的磁阻比导磁体的磁阻大很多,故在计算时,可忽略导磁体磁阻,则有:

$$L = \frac{N_2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (43-1)$$

这就是简单自感传感器的基本工作特性表达式。上式表明,当保持 S 不变,则 L 为 δ 的单值函数,可构成变气隙型传感器;如果保持 δ 不变,使 S 随位移变化,则可构成变截面型传感器。它们分别如图 43-1a、b 所示。

同时,如图 43-1c 所示,线圈中放入圆柱形铁芯,也是一个可变自感。使衔铁作上下位移,自感量将相应变化,这就可构成螺管型传感器。

1. 变间隙型自感传感器的工作特性 如果保持 S 不变,只改变气隙厚度的大小,此时传感器工作特性为:

$$L = \frac{N_2 \mu_0 S}{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)}$$

当 $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$ 时,电感变化量为:

$$\Delta L = L - L_0 = \frac{\Delta\delta}{L_0\delta_0 - \Delta\delta}$$

式中, $L_0 = N^2 \mu_0 S / (2\delta_0)$

上式可改写成:

$$\Delta L = L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \right]$$

当 $\Delta\delta/\delta_0 \ll 1$ 时,可将上式展开成麦克劳林级数:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \left[1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \dots \right] \\ &= L_0 \left[\frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \dots \right] \end{aligned} \quad (43-2)$$

同理, $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ 时,电感量减小,即:

$$\Delta L = L_0 - L = L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0 + \Delta\delta}$$

把上式展开为级数:

$$\Delta L = L_0 \left[\frac{\Delta\delta}{\delta_0} - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (43-3)$$

而第二项以后是非线性项,含有 n 次方的非线性。若仅考虑二次方非线性,其非线性误差为:

$$\gamma_{12} = \left| \frac{L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0} - L_0 \left[\frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^2 \right]}{L_0 \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \right| \times 100\% = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \times 100\%$$

可见,非线性误差是比较严重的。为改善非线性误差, $\Delta\delta/\delta_0$ 不能太大,通常取 $\Delta\delta/\delta_0 = 0.1 \sim 0.2$ 。

2. 变截面积型自感传感器的工作特性 从式(43-1)可知,其工作特性是线性的,其灵敏度为:

$$k = \frac{dL}{dS} = \frac{n^2 \mu_0}{2\delta}$$

3. 螺管型自感传感器的工作特性 螺管型电感传感器的工作原理是基于线圈磁力线汇泄路径上磁阻变化。线圈的电感量与衔铁插入的深度有关,其结构示意图如图 43-2 所示。

假定线圈内磁场强度是均匀的,且 $l_c < l$,则单个线圈的电感量与衔铁插入长度 l_c 的关系,即输出特性为:

$$L = \frac{4\pi^2 N^2}{l_2} [lr^2 + (\mu_m - 1)l_c r_c^2] \times 10^{-7}$$

式中, L 为单个线圈的电感量(H); N 为单个线圈的匝数; r 为线圈的平均半径(m); l 为单个线圈的长度(m); l_c 为衔铁插入的长度(m); r_c 为磁通作用半径,由衔铁半径及端部气隙的大小决定(m); μ_m 为某一种具体结构的铁心有效磁导率。

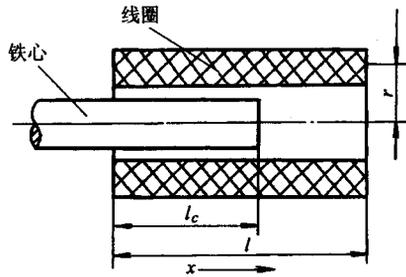


图 43-2 螺管型电感传感器结构示意图

磁通作用半径 r_c 与边缘效应有关,即与气隙长度 $(\delta = l - l_c)$ 和磁心直径有关,它可由下式算得:

$$r_c = \frac{d}{2}(1 + \alpha)$$

式中 α 可根据 δ 、 d 之值由图 43-3 查得。

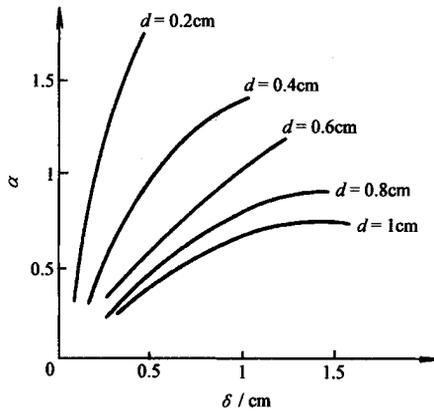


图 43-3 磁通作用半径计算的修正曲线

螺管型电感传感器的灵敏度可由上式求导得出

$$k = \frac{dl}{dl_c} = \frac{4\pi^2 N^2}{l^2} (\mu_m - 1) r_c^2 \times 10^{-7} \quad (43-5)$$

从式(43-5)可知线圈和衔铁尺寸一定时,电感相对变化量与衔铁插入长度的相对变化量成正比,但由于线圈内磁场强度沿轴向分布不均匀,实际上传感器的输出特性是非线性。

上述三种自感传感器各具特点:变气隙式灵敏度高,非线性误差大,测量范围小;变面积式灵敏度较低,但线性度好,测量范围大;螺管式灵敏度低,测量范围大,结构简单,具有一定非线性。

(二) 差动自感传感器

上述简单自感传感器虽然结构简单,运用方便,但也有缺点,具有初始电感,线圈流向负载的电流不为零,衔铁永远受有吸力,线圈电阻受温度影响引起温度误差,灵敏度低等。因此,实际中应用较少,常用差动自感传感器。上述三种自感传感器均可构成差动结构,以下以变间隙式差动自感传感器为例加以说明。

变间隙式差动自感传感器原理见图 43-4。它由一个公共衔铁和上、下两个对称的线圈 L_1 和 L_2 组成。

当被测量为零时, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$, $L_1 = L_2 = L_0$, $I_1 = I_2$, $\Delta I = I_1 - I_2 = 0$, 负载 Z_L 上输出电压 $\dot{U}_0 = 0$ 。

当在被测量作用下,衔铁向上位移 $\Delta\delta$, 则 $\delta_1 = \delta_0 - \Delta\delta$, 此时 $L_1 = L_0 + \Delta L_1$, 展开成麦克劳林级数, 见式(43-2)。

此时 $\delta_2 = \delta_0 + \Delta\delta$, $L_2 = L_0 - \Delta L_2$, 展开成麦克劳林级数, 见式(43-3)。

在差动自感传感器中,电感变化量 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ 。将式(43-2)和(43-3)相加得:

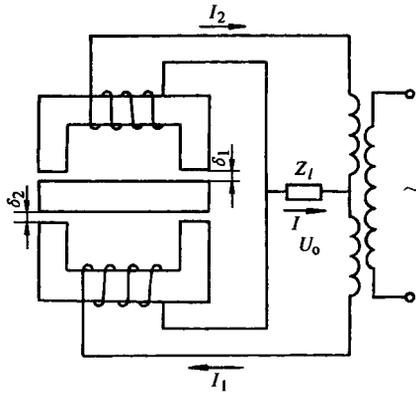


图 43-4 变气隙式差动自感传感器

$$\Delta L = 2L_0 \left[\frac{\Delta\delta}{\delta_0} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta_0} \right)^3 + \frac{\Delta\delta^5}{\delta_0^5} + \dots \right] \quad (43-6)$$

上式中第一项是线性项,其灵敏度为:

$$k = \frac{\Delta L}{\Delta\delta} = \frac{2L_0}{\delta_0}$$

上式与式(43-4)比较可见,差动自感传感器的灵敏度是简单自感传感器的2倍。

由式(43-6)可见,差动自感传感器仅含奇次方非线性项,其三次方非线性误差为:

$$\gamma_{13} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \times 100\%$$

非线性得到很大的改善。

同理,变面积式和螺管式差动自感传感器也能得到提高灵敏度和改善线性度的同样的结论。

(三) 测量电路

1. 基本测量电路 基本测量电路通常都采用交流电桥,如图43-5所示。电桥的两臂 Z_1 和 Z_2 为传感器中的两个线圈的阻抗,另两臂为电源变压器二次线圈的两半(每一半的电压为 $\dot{U}/2$,输出电压取自 A、B 两点。假定 O 点为参考零电位,则 A 点的电压为:

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{U}Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

B 点的电位为:

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{U}}{2}$$

则有输出电压

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{1}{2} \right) \dot{U} \quad (43-7)$$

当衔铁处于中心位置时,由于两线圈完全对称,因此 $Z_1 = Z_2 = Z$,代入式(43-7),得:

$$\dot{U} = 0$$

当衔铁向下移动时,下面线圈的阻抗增加,即 $Z_1 = Z + \Delta Z$,而上面线圈的阻抗减小,即 $Z_2 = Z - \Delta Z$,故此时的输出电压为:

$$\dot{U}_0 = \left(\frac{Z + \Delta Z}{2Z} - \frac{1}{2} \right) \dot{U} = \frac{\Delta Z}{2Z} \dot{U} \quad (43-8)$$

若传感器线圈为高 Q 值,即线圈电阻远远小于其电感阻抗,即 $r \ll \omega L$ 时,其输出电压的有效值为

$$U_0 = \frac{\omega \Delta L}{2 \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} U$$

式中 ω 为电源角频率。

同理,当传感器衔铁上升同样大小的距离时,可推得:

$$\dot{U}_0 = \left(\frac{Z + \Delta Z}{2Z} - \frac{1}{2} \right) \dot{U} = -\frac{\Delta Z}{2Z} \dot{U} \quad (43-9)$$

其有效值为:

$$U_0 = \frac{-\omega \Delta L}{2 \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} U$$

比较式(43-8)和式(43-9)可知,当衔铁向上移动和向下移相同距离时,其输出大小相等,方向相反。

由于电源电压 \dot{U} 是交流,所以尽管式中有正负号,还是无法加以分辨。为了能够示出衔铁运动的方向,提高检测性能,可采用带相敏整流的交流电桥,如图43-6所示。其工作原理:当衔铁处于中间位置时,则 $Z_1 = Z_2 = Z$,电桥处于平衡状态,输出电压 $U_0 = 0$;当衔铁上移,使上线圈阻抗增大, $Z_1 = Z + \Delta Z$,而下线圈阻抗减少 $Z_2 = Z - \Delta Z$ 。

如果输入交流电压为正半周,即A点电压为正,B点电压为负,则二极管 VD_1 、 VD_4 导通, VD_2 、 VD_3 截止,这样,在 $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow B$ 支路中,C点电位由于 Z_1 的增大而比平衡时C点的电位降低;在 $A \rightarrow F \rightarrow D \rightarrow B$ 支路中,D点电位由于 Z_2 的降低而比平衡时D点的电位增加,所以D点电位高于C点电位,此时直流电压表正向偏转。

如果输入交流电压为负半周,即A点电压为负,B点电压为正,则二极管 VD_2 、 VD_3 导通, VD_1 、 VD_4 截止,这样,在 $B \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow A$ 支路中,C点的电位。由于 Z_2 的减小而比平衡时降低。而在 $B \rightarrow D \rightarrow Z \rightarrow A$ 支路中,D点的电位由于 Z_1 的增加比平衡时的电位增加。所以仍然是D点电位高于C点电位,直流电压表正向偏转。这就是说只要衔铁上移,不论输入电压是正半周还是负半周,电压表总是正向偏转,即输出电压总为正。

同理可以分析出,当衔铁下移时,电压表总是反向偏转,即输出电压总为负。

可见采用带相敏整流的交流电桥,得到的输出信号既能反映位移的大小,又能反映衔铁运动的方向,并能消除残余电压,改善输出特性。其输出特性如图43-7所示。

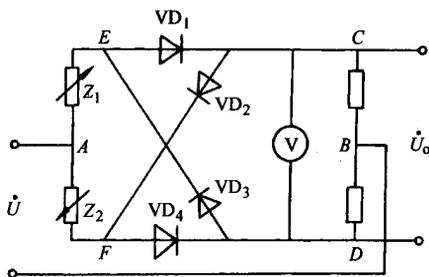


图43-6 带相敏整流的测量电桥

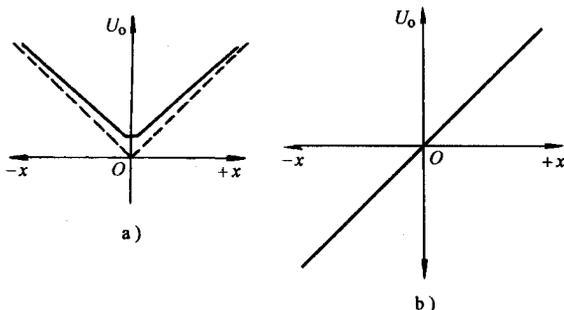


图43-7 整流器输出特性

a)具有零点残余电压的输出特性 b)带相敏整流的输出特性

2. 数字化测量电路 阻抗测量的数字化仪器已得到日益广泛的应用,它具有测量精度高,反应迅速,使用方便等优点。

图 43-8 是数字化测量的原理框图。图中, \dot{U}_s 为电源电压,向已知限流电阻 R_N 提供稳定的电流 i ,设 \dot{U}_s 的瞬时值为:

$$\dot{U}_s = U_{sm} \sin \omega t$$

设运算放大器 A_1 为理想放大器,其输入电流 $I_i = 0$,闭环增益为 k ,则输出为:

$$\dot{U}_o = k \frac{R_x + jX_x}{R_N + R_x + jX_x} \dot{U}_s$$

式中, $R_x + jX_x = Z_x$ 为被测阻抗。

由于限流电阻 $R_N \gg |Z_x|$,上式可简化为:

$$\dot{U}_o = \frac{kR_x}{R_N} \dot{U}_s + j \frac{kX_x}{R_N} \dot{U}_s \quad (43-10)$$

上式中实部 $(kR_x/R_N)U_{sm} \sin \omega t$ 经相敏检波器 1,其输出是直流电压,再经由 A_2 组成的有源滤波后输出平滑的直流电压 U_R 为:

$$U_R = \frac{kR_x}{2R_N} U_{sm}^2$$

可见, U_R 正比于被测阻抗的实部 R_x 。

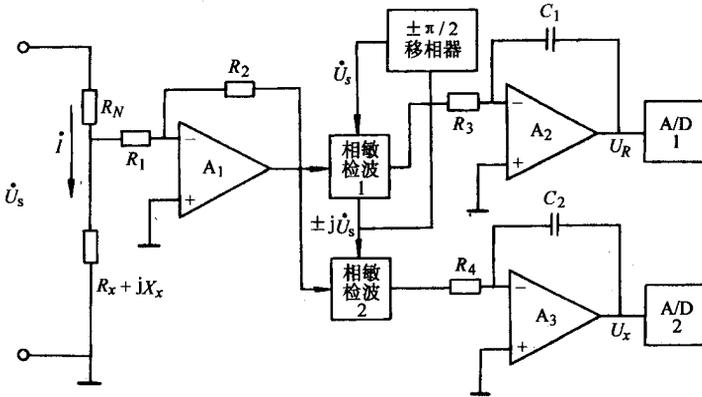


图 43-8 阻抗的数字测量原理框图

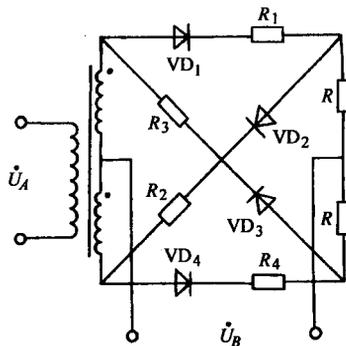


图 43-9 相敏检波电路

式 43-10 中的虚部 $(kX_x/R_N)U_{sm} \sin(\omega t \pm \pi/2)$ 经相敏检波器 2,被整流成直流电压,经由 A_3 组成的有源滤波器变成平滑的直流信号 U_x 为:

$$U_x = \frac{kX_x}{2R_N} U_{sm}^2$$

全波相敏检波电路见图 43-9。图中 $VD_1 \sim VD_4$ 是全桥式检波; $R_1 \sim R_4$ 为了补偿 $VD_1 \sim VD_4$ 的温度特性; R 是负载电阻 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 分别是被测电压和开关电压,其瞬时值为

$$\dot{U}_A = U_{Am} \sin \omega_A t$$

$$\dot{U}_B = U_{Bm} \sin \omega_B t$$

式中, $|U_{Bm}| \gg |U_{Am}|$, $VD_1 \sim VD_4$ 的导通与截止完全由 \dot{U}_B 决定。在这一条件下,相敏检波电路的输出电压 U_o 为:

$$U_o = U_{(\omega_A - \omega_B)} = \frac{8U_{Am}R}{\pi} \cos(\omega_B - \omega_A)t$$

由上式可见,当 $\omega_A = \omega_B$ 时

$$U_o = \frac{8U_{Am}R}{\pi}$$

这说明被测电压 $U_A = U_{Am} \sin \omega t$ 被检波成直流电压。

图 43-8 中相敏检波器 1 的开关电压是由稳定电压源 \dot{U}_s 提供的,其频率和相位与被测电压 \dot{U}_o 的实部相同,相敏检测器 2 的开关电压由 \dot{U}_s 经移相器移相后变成 $\pm j\dot{U}_s$ 提供,其相位和频率也与被测电压 \dot{U}_o 虚部相同,满足同相位同频率的要求。

滤波器 A_2 和 A_3 输出的直流电压 U_R 和 U_x 分别经 A/D 转换器 1 和 2 转换成数字量,经译码、显示,完成阻抗的数字化测量。

图 43-8 被测阻抗 ($R_x + jX_x$) 接在运算放大器 A_1 的输入回路,适用于测量较小的阻抗,若测量较大的阻抗,可将被测阻抗替代运算放大器 A_1 中的 R_2 ,原来被测阻抗的位置接一个精密的固定电阻。该电路是电感和电容两用的测量电路。

(四) 自感传感器的应用

1. JGH 型电感测厚仪 如图 43-10 所示。自感传感器的两个线圈 L_1 和 L_2 作为两个相邻桥臂,另外两个桥臂采用了电容 C_1 和 C_2 。在测量对角线输出端,采用四只二极管 VD_1 、 VD_2 、 VD_3 和 VD_4 作为相敏整流器,在相敏整流器的输出接有电压表 V ,在二极管中串联四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 作为附加电路,目的是为了减少由于温度变化时,相敏整流器的特性变化所引起的误差,所以这四个电阻尽可能选用温度系数较小的绕线电阻。电桥的电源由变压器 T 供给,而变压器一次侧采用磁饱和稳压器 R_7 和 C_4 。电路中的 C_3 起滤波作用, RP_1 作调节电桥电路零位用。 RP_2 用来调节指示器满刻度用, HL 为电源指示灯。

2. BYM 型压力传感器 如图 43-11 所示。当被测压力 P 变化时,弹簧管的自由端产生位移,带动与自由端刚性连接的自感传感器的衔铁发生移动,使传感器的线圈中的电感值一个增加,另一个减小。传感器输出信号的大小,决定于衔铁位移的大小,输出信号的相位,决定于衔铁移动的方向。整个机心装在一个圆形的金属盒内,用接头螺纹与被测压力相连。

二、差动变压器式传感器

差动变压器式传感器的工作原理是把被测量的变化转换成互感系数 M 的变化。传感器本身是互感系数可变的变压器,由于接线为差动工作方式,故称差动变压器式传感器。同时,由于它是基于互感变化的原理,故又称互感式传感器。

(一) 基本结构和工作原理

互感式传感器的基本结构如图 43-12 所示。它由铁心、线框、以及两个或多个线圈组成。一、二次侧之

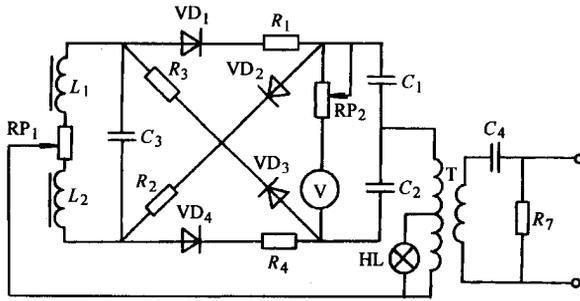


图 43-10 JGH 测厚仪测量电路

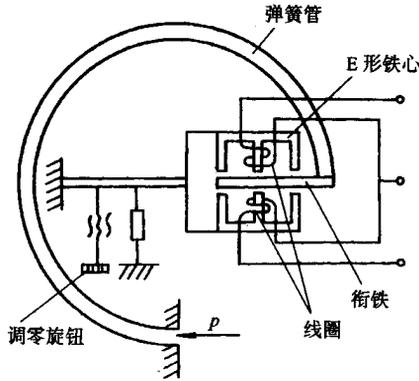


图 43-11 BYM 型压力传感器

间耦合能随衔铁对两个线圈的相对移动而改变,即能把被测量位移转换为传感器的互感变化。当具有适当频率的电压激励一次绕组时,二次侧的输出电压将会随互感的改变而变化,从而将被测位移转换为输出电压。对于差动变压器传感器来说,当衔铁在中间位置时,两个二次绕组的互感相同,因而由一次激励所产生的两个二次电动势相同,即 $E_{21} = E_{22}$ 。由于两个二次绕组是反向串联的,故差动输出电压为零。当衔铁向二次绕组一边移动时,一边绕组的互感增大,另一边绕组的互感减小,这就使互感增大的绕组产生较大的感生电动势 E_{21} ,而互感减小的绕组将产生较小的感生电动势 E_{22} ,差动输出电压 $E_2 = E_{21} - E_{22}$,不为零,其大小与衔铁的位移成正比。同理,衔铁反向运动,输出电压的关系不变,但相位相反。

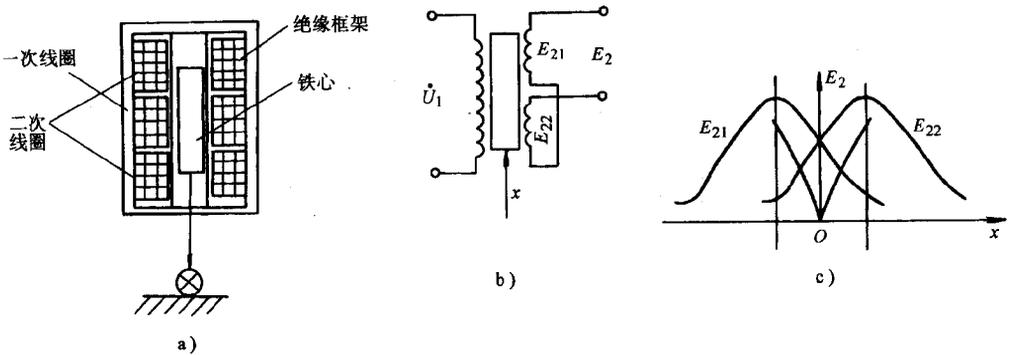


图 43-12 互感式传感器的基本结构图

a) 结构 b) 原理图 c) 输出特性

(二) 基本特性

1. 等效电路 当忽略差动变压器的涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等影响时,则可以看作是一个理想的

差动变压器,其等效电路如图 43-13a 所示。

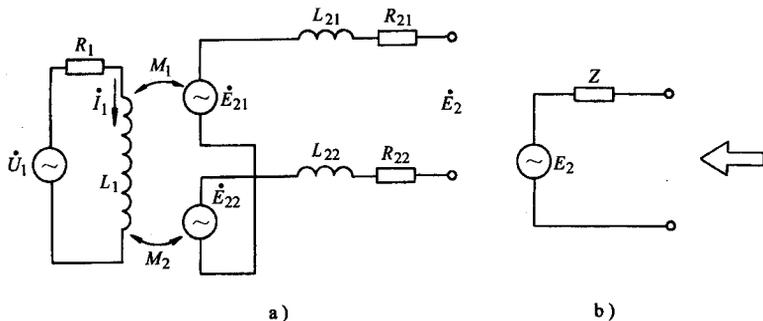


图 43-13 差动变压器的等效电路

图中, \dot{U}_1 为一次线圈励磁电压; \dot{E}_{21} 和 \dot{E}_{22} 分别为一、二次线圈的输出电压; L_1 为一次线圈自感; R_1 为一次线圈有效电阻; M_1 和 M_2 分别为一次线圈与二次线圈的两个绕组的互感; L_{21} 和 L_{22} 分别为两个二次绕组的自感; R_{21} 和 R_{22} 分别为两个二次绕组的有效电阻, \dot{E}_2 为空载时差动输出电压。

由图 43-12 可推出:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

$$\dot{E}_{21} = -j\omega M_1 \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_{22} = -j\omega M_2 \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22}$$

式中 ω 为激励电压 U_1 的角频率。

$$M_1 = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} = \frac{N_2 N_1}{R_{M1}}$$

$$M_2 = \frac{N_1 \Phi_{22}}{I_1} = \frac{N_1 N_2}{R_{M2}}$$

式中, R_{M1} 和 R_{M2} 分别为通过一次线圈和两个二次线圈的磁阻。

因此,可得空载输出电压为:

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = -j\omega (M_1 - M_2) \frac{\dot{U}_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

其有效值为:

$$E_2 = \frac{\omega (M_1 - M_2)}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \dot{U}_1 \quad (43-10)$$

差动变压器工作时,衔铁向一边移动,设

$$M_1 = M + \Delta M, M_2 = M - \Delta M \quad (43-11)$$

式中, M 为衔铁在中心位置时一、二次线圈之间的互感,这时 $M_1 = M_2 = M$ 。

将式(43-11)代入式(43-12)中得:

$$E_2 = \frac{2\omega \Delta M U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

若衔铁反向移动,则有:

$$E_2 = \frac{-2\omega\Delta MU_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$$

差动变压器的输出阻抗为：

$$Z = R_{21} + R_{22} + j\omega L_{21} + j\omega L_{22}$$

阻抗模为：

$$|Z| = \sqrt{(R_{21} + R_{22})^2 + (\omega L_{21} + \omega L_{22})^2}$$

这样从输出端看进去,差动变压器可等效为电压 E_2 、复阻抗为 $Z = R_{21} + R_{22} + j\omega L_{21} + j\omega L_{22}$ 的一个电压源,如图 43-13b 所示。

2. 灵敏度 差动变压器的灵敏度是指在单位励磁电压下,铁心移动单位位移时的输出电压或电流,以 $V/(mm \cdot V)$ 或 $mA/(mm \cdot V)$ 表示。一般差动变压器的灵敏度可达 $0.1 \sim 0.5V/(mm \cdot V)$ 或 $100mA/(mm \cdot V)$ 。

差动变压器的灵敏度受其结构和励磁电压,频率影响。在结构方面,提高线圈的 Q 值,增大衔铁的直径,选用导磁性能好,铁损小,涡流损耗小的导磁材料,可以提高灵敏度。提高输入励磁电压也会提高灵敏度。这是因为增大输入励磁电压,在传感器结构参数不变的条件下励磁电流增加,因此灵敏度也提高。励磁电源的频率提高,灵敏度也提高,但这仅在一定频率范围内有此现象,频率增加超过一定范围,灵敏度反而下降。这是因为高频时,导线有效电阻增加,涡流损耗、磁滞损耗增加的缘故。一般励磁频率为 $10Hz \sim 50kHz$ 。

3. 线性范围 理想的差动变压器二次侧输出电压应与铁心位移成线性关系,实际上由于铁心的长度、直径、材质和线圈骨架的形状、大小的不同均对线性度有直接的关系。差动变压器一般线性范围约为线圈骨架长度的 $1/10 \sim 1/4$ 。由于差动变压器中间部分磁场是均匀的且较强,所以只有中间部分线性较好。

4. 温度特性 差动变压器受温度影响机械结构的膨胀、收缩、线圈电阻的变化,会使测量精度下降。由于机械部分热胀冷缩,影响测量精度达数 μm 到 $10\mu m$ 左右,如果要把机械部分的温度影响限制在 $1\mu m$ 的范围内,则需把差动变压器在使用环境中放置 24h 后,方可进行测量。

在造成温度误差的各项中,影响最大的是线圈电阻的变化,特别是在低频激励时尤为显著。一般,铜线的电阻温度系数约为 $+0.4 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 对于小型差动变压器,其在较低激励频率下使用时,其温度系数较大,约为 $-0.3 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 对于大型差动变压器,其使用频率高,温度系数就小,约为 $(-0.1 \sim 0.05) \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

铁心的磁特性、磁导率、铁损、涡流损耗也随温度变化而变化,但数值较小,可略去不计。

差动变压器一般使用温度为 80°C ,特别制造的高温型可以用到 150°C 。

5. 零点残余电压及其消除方法 当差动变压器铁心位于中间位置时,由于对称的两个二次线圈反向串联,理论上感生电动势应大小相等方向相反,因而差动输出电压应该为零,但实际情况并不为零,总会有一个很小的输出电压 U_0 。这个电压一般称为“零点残余电压”,使传感器的输出特性不过零点,如图 43-14a 所示。

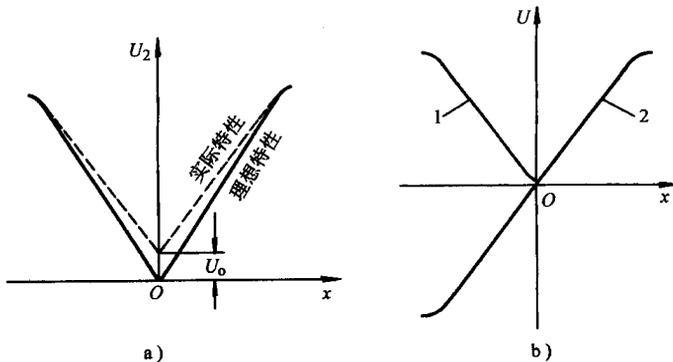


图 43-14 零点残余电压及其消除

a) 零点残余电压 b) 带相敏整流电路的特性曲线

零点残余电压的存在使得传感器输出特性在零位附近的范围内不灵敏,不利于测量,并会带来测量误

差。因而零点残余电压的大小是评定差动变压器性能优劣的重要指标。

零点残余电压产生的原因：

- (1) 由于二次线圈结构上的不对称 故引起线圈感应电动势幅值不等 相位不同。
- (2) 铁心材料 B-H 曲线的非线性造成输出电压含有高次谐波(主要是三次谐波)。
- (3) 励磁电压含有高次谐波。

零点残余电压的消除方法：

- (1) 尽可能保证传感器的几何尺寸 线圈电气参数和磁路的对称。
- (2) 采用适当的测量电路 例如相敏整流电路 使其特性由特性曲线 1 变成特性曲线 α (见图 43-14b) 这样不仅使输出电压能反映铁心移动的方向 而且可以减小零点残余电压。
- (3) 采用适当的补偿电路减小零点残余电压。在差动变压器的二次侧串、并联适当数值的电阻电容元件 当调整这些元件时 可使零点残余电压减小。一些典型的补偿线路如图 43-14 所示。

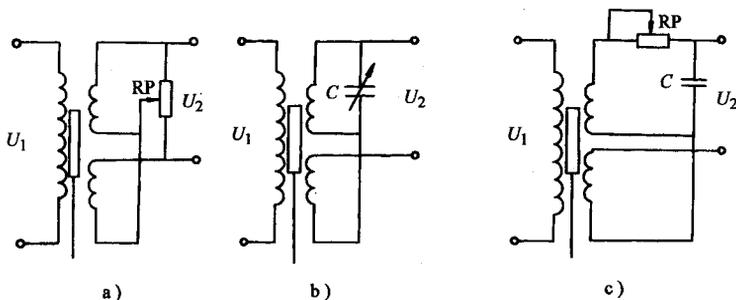


图 43-15 补偿线路

a) 电阻补偿 b) 电容补偿 c) 电阻电容补偿

(三) 差动变压器的测量电路

差动变压器最常应用的测量电路是差动整流电路,如图 43-15 所示。把两个二次电压分别整流后,以它们的差为输出(ab 端),这样,二次电压的相位和零点残余电压都不必考虑。

图 43-16 中的图 a 和图 b 用在连接低阻抗负载的场合,是电流输出型。图 c 和图 d 用在连接高阻抗负载的场合,是电压输出型。

(四) 差动变压器的应用

1. CPC-A 型差压计 其原理见图 43-17。差压 Δp 由膜片转变成硬心的位移,即为差动变压器铁心的位移 $\Delta x \propto K\Delta p$ 。7555 与其外围阻容元件组成 1kHz 振荡电路,其输出方波作为差动变压器一次绕组的激励电源,幅值 12V。VD₁、VD₂ 组成电压输出型检波电路。RP₁ 零点调整,RP₂ 满度调整。磁电系电压表指示出差压大小。电压表 V 两端的电压也可供 3 1/2 位 DVM 显示。

例 图 43-18 是由差动变压器 T₁ 和 T₂ 组成的无差平衡系统。波纹膜片传递系数 k_p,T₁ 和 T₂ 的传递系数为 k_{T1} = k_{T2} = k_T,放大器的放大倍数 k_v,力矩马达的传递系数 k₁,凸轮的传递系数为 k_F。分析其工作原理、画出传递系统组成框图和求 α 与户 P_x 的关系式。

解 当被测压力变化时,经波纹膜片转变成差动变压器 T₁ 铁心的位移 $x = k_p P_x$ 。T₁ 输出电压 \dot{U}_1 变化,因此 $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \Delta \dot{U} \neq 0$ 经放大后驱动力矩马达转动,仪表指针产生偏转,同时经凸轮带动差动变压器 T₂ 的铁心位移,其输出 \dot{U}_2 变化,当 $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \Delta \dot{U} = 0$ 时,系统处于新的平衡状态。从而指针的偏转角。指示出被测压力的 P_x 的大小。

因此,可画出传递系数框图,见图 43-19。此系统为具有深度负反馈系统,其输入输出关系为：

$$\alpha = \frac{k_p k_{d1} k_A k_M}{1 + k_A k_M k_f / k_{d2}} P_x \text{ 当 } k_A k_M k_f / k_{d2} \gg 1 \text{ 时,上式可简化为:}$$

$$\alpha = \frac{k_p}{k_f} P_x$$

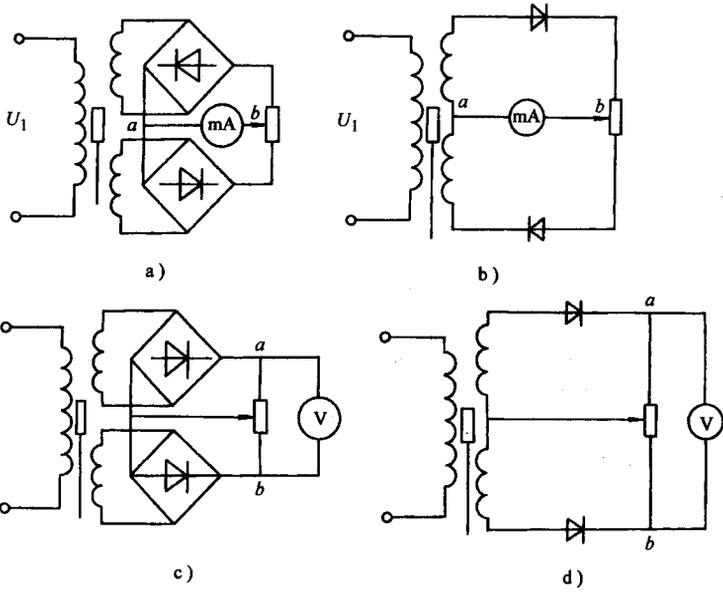


图 43-16 差动整流电路

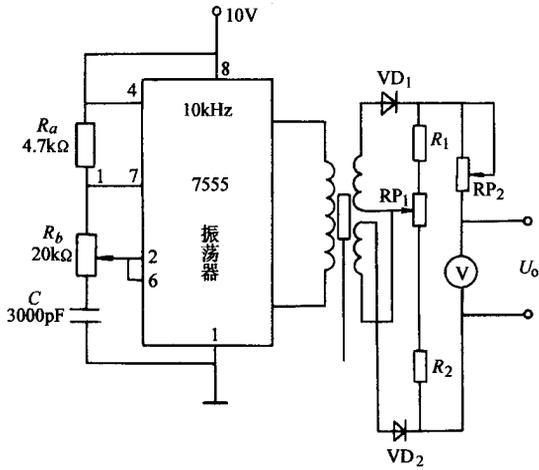


图 43-17 CPC-A 差压计

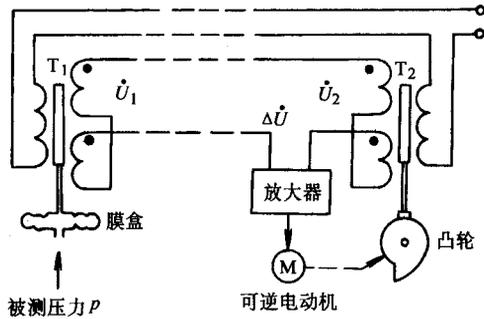


图 43-18 T_1 和 T_2 组成的平衡系统

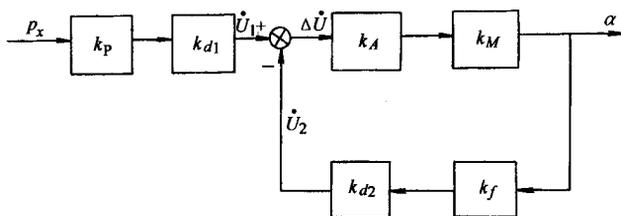


图 43-19 传递系数框图

指针转角与被测压力成正比。此外还可通过走纸记录机构记录被测压力之值。此电路可用于电远传转子流量计。

2. 差动变压器测速装置 其原理见图 43-20。由差动变压器(检测元件)、交、直流激励电源、加法器、减法器、电压跟随器和放大器组成。

运放 A_1 及其阻容元件组成文氏振荡器, 振荡频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 470k\Omega \times 68pF} \approx 5kHz$$

输出信号经整流、滤波后控制场效应管的导通状态, 使振荡器能满足幅值条件 ($A_F \geq 3$)。

直流电源由 A_2 及电阻组成电压跟随器, 调 $10k\Omega$ 电位器可调输出直流电压。

运放 A_3 为加法器。交、直流电源在加法器输入端相加, 由于 $R = 10k\Omega$, 则

$$V_+ = \frac{\frac{U}{R} + \frac{E}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{U + E}{2}$$

$$i = \frac{V_-}{\sqrt{R_{L1}^2 + (\omega L_1)^2}} = \frac{V_-}{\sqrt{R_{L1}^2 + (\omega L_1)^2}} = \frac{V + E}{2Z}$$

$$= \frac{U_m}{2Z} \sin\omega t + \frac{E}{2Z} = I_0 + I_m \sin\omega t$$

式中, $Z = [R_{L1}^2 + (\omega L_1)^2]^{\frac{1}{2}}$, I_0 为直流分量; I_m 为交流分量的幅值; i 为差动变压器的激励电流。

当被测量以速度 $u = dx/dt$ 作用于差动变压器的铁心时, 其二次侧感应的电动势为:

$$E = \frac{d[M(x)(t)]}{dt}$$

式中, $M(x)$ 为一次侧与二次侧的互感, 一次侧与两个二次侧的互感分别为:

$$M_1(x) = M_0 - \Delta M(x) = M_0 - kx$$

$$M_2(x) = M_0 + \Delta M(x) = M_0 + kx$$

由上面三式得二次侧两个电动势:

$$E_1 = kI_0 \frac{dx}{dt} + kI_m \frac{dx}{dt} \sin\omega t - (M_0 - kx)I_m \omega \cos\omega t$$

$$E_2 = +kI_0 \frac{dx}{dt} + kI_m \frac{dx}{dt} \sin\omega t + (M_0 + kx)I_m \omega \cos\omega t$$

上两式相减, 得差动变压器的输出电压为:

$$\Delta E = 2kI_0 \frac{dx}{dt} + 2kI_m \frac{dx}{dt} \sin\omega t + 2I_m \omega k \cos\omega t$$

式中, ω 为激励电源的角频率。

用低通滤波器滤除含有 ω 各项, 得:

$$\Delta E = 2kI_0 \frac{dx}{dt} = k_v v$$

差动变压器的输出电动势经过 A_6 组成的减法器后其输出电压正比于被测速度 v 。

A_4 和 A_5 为电压跟随器; A_7 、 A_8 组成三阶有源滤波器。 A_9 为电压放大器, 输出电压可供数字电压表测量、

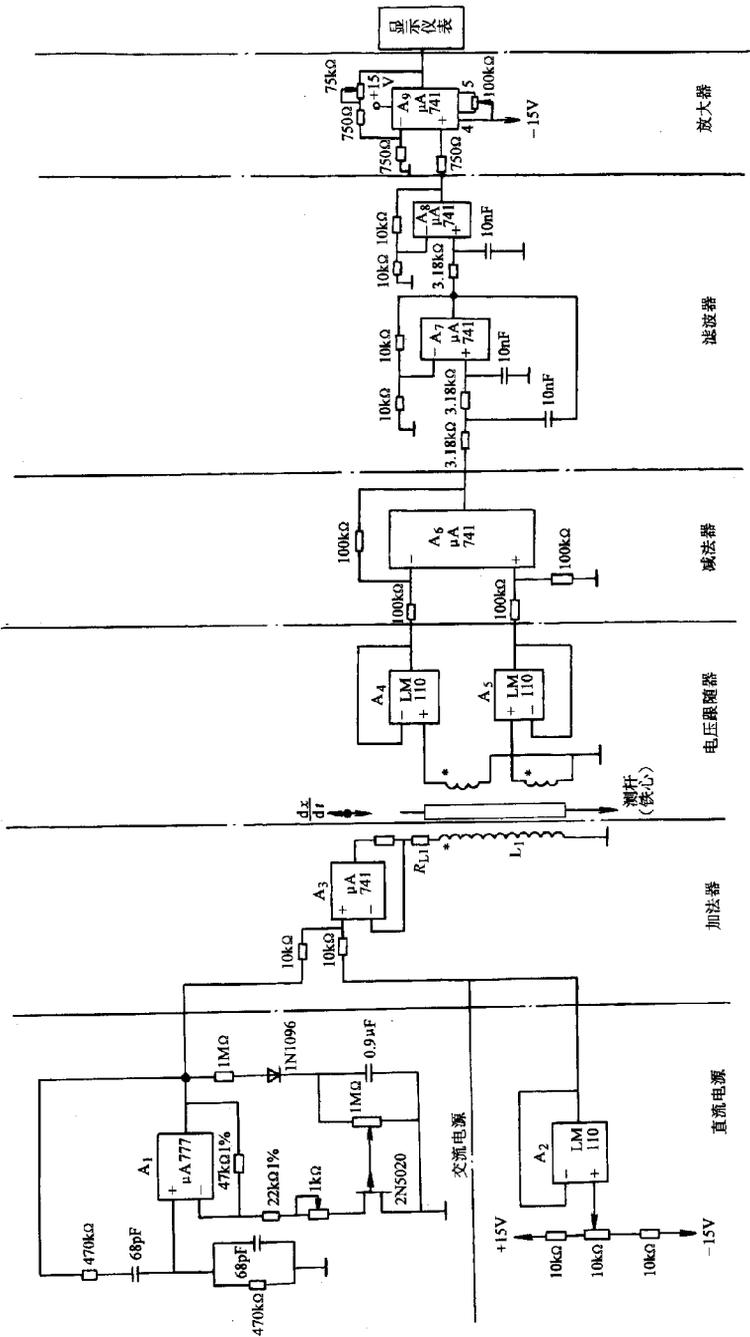


图 43-20 差动变压器测速装置

显示速度。

由于速度的积分就是位移 $x = \int v dt$ ，所以滤波后加入积分环节，可用于测量振动、位移。由于速度的微分代表加速度，因此，加入微分环节，也可用于测量加速度 $a = dv/dt$ 。

运放 A_9 中 $100k\Omega$ 电位器的作用为调零，即当被测瞬时速度 $v = 0$ 时，调该电位器使输出电压为零。 $75N\Omega$ 电位器的作用为调满度，即当被测速度为 v_{max} 时，调节该电位器使输出电压 $U_{omax} = 10V$ 。该装置测量瞬时

度,而不是平均速度,测量范围为 $10 \sim 20\text{mm/s}$ 。

3.差动变压器式加速度传感器 见图 43-21。由上、下各两片弹簧片将质量块 m 支承于传感器的壳体上,测量时壳体与被测对象刚性连接,这样将被测加速度转变成质量块 m 的位移,即 $x = ka$ 。质量块是导磁材料,它既是质量块,又是差动变压器的铁心,将铁心位移转变成差动变压器二次侧输出电压 U_o 变化。

4.差动变压器式角位移传感器 差动变压器也可以做成改变导磁截面积的变截面型传感器,用来测量角度位移,其结构如图 43-22 所示。它通常可测到几角秒的微小位移,输出的线性范围一般在 $\pm 10^\circ$ 左右。这种传感器又称微同步器,图 43-22 所示 E 形微同步器。

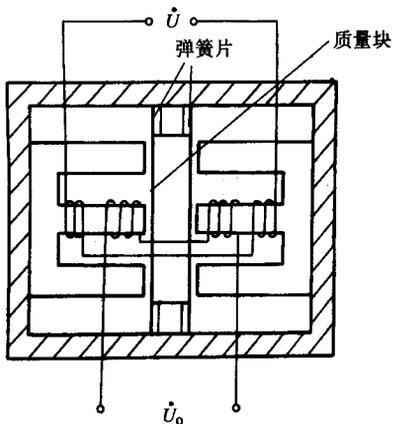


图 43-21 差动变压器式加速度传感器

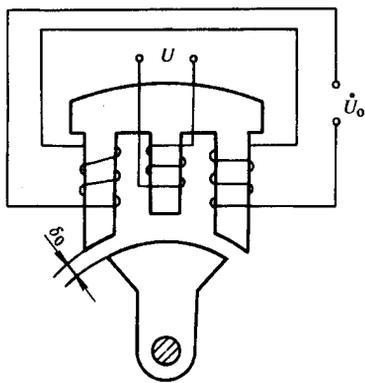


图 43-22 E 形微同步器

三、电涡流式传感器

成块的金属在变化着的磁场中或在磁场中作切割磁力线运动时,金属内部都会产生感应电动势形成电流,这种电流就称电涡流。建立在电涡流效应原理上的传感器,即电涡流式传感器。

涡流的大小与金属的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、厚度 t 以及线圈与金属体的距离 x 、线圈励磁电源的角频率 ω 等参数有关。固定其中若干参数,就能按涡流大小测量出另外一些参数。

涡流传感器的最大特点是可以对一些参数进行非接触连续测量,动态响应好,灵敏度高,测量线性范围大 ($300\mu\text{m} \sim 1000\text{mm}$)、抗干扰能力强,所以在工业中应用越来越广。它可以用来测量振动、位移、厚度、转速、温度、硬度等参数,还可以进行无损探伤,因而也是一种有发展前途的传感器。

涡流传感器在金属体上产生的电涡流,其渗透深度与传感器线圈的励磁电流的频率有关,所以涡流传感器主要可分高频反射和低频透射两类。

(一) 高频反射涡流传感器

高频反射涡流传感器是一只固定在框架上的扁平线圈(见图 43-23)。当没有测量体接近时,传感器的线圈由于高频电流 i 的激励,将产生一个高频交变磁场 ϕ_i 。当被测导电体靠近传感器时,根据电磁感应定律,在被测导电体的表面将产生与交变磁场相交链的电涡流(涡流作用范围一般为线圈外径的 1.4 倍),此涡流又将产生一磁场 ϕ_e ,而 ϕ_e 总是抵抗 ϕ_i 的存在。被测导体靠近通有高频电流的传感器时,除存在涡流效应外,还存在磁效应,结果改变了传感器的电参数,使线圈的 Q 值下降。

传感器工作的等效电路见图 43-24。假定传感器线圈原有电阻为 R_1 ,电感 L_1 ,在无导体靠近时其复阻抗为:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (43-12)$$

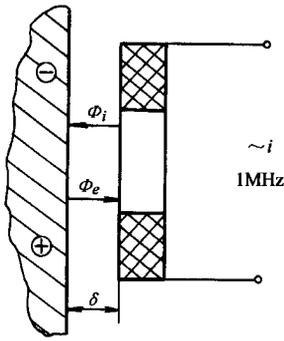


图 43-23 高频反射涡流传感器原理图

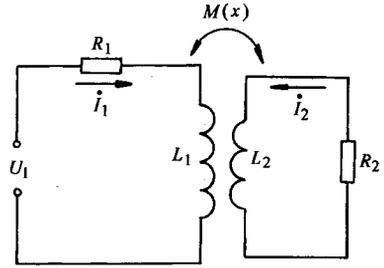


图 43-24 等效电路图

当有被测导体靠近传感器线圈时，则成为一个耦合电感，线圈与导体之间存在一个互感系数 M ，互感系数随线圈与导体之间距离的减小而增大。被测导体可看作一匝短路线圈，其电阻为 R_2 ，电感为 L_2 。

由图 43-24 可列出下列方程：

$$\begin{aligned} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 &= U_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned}$$

联立求解上两式得：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z'_1} = \frac{\dot{U}_1}{\left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2 \omega L_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right]}$$

由上式可得：

$$Z'_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]$$

比较式 (43-12) 和式 (43-13) 可知，当导体靠近传感器时，其有效电阻增加，反射电感减小，从而使线圈的斜下降。

对于一个没有被测导体的谐振到某一谐振频率 f 的传感器，其阻抗最大，谐振回路的压降最大。当被测导体引入时，回路将失谐，当被测体为非铁磁性材料或硬磁材料时，回路 Q 值下降，线圈等效电感减小，谐振峰右移；当被测体为软磁材料时，情况类似，只不过随导体逐渐靠近线圈，谐振峰越来越向左偏移，如图 43-25 所示。

高频涡流传感器线圈阻抗 Z 与被测体材料的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、激励频率 f 以及传感器线圈与被测物体间的距离 x 有关，用数学式可表示为：

$$Z = F(\rho, x, f, \mu)$$

当电源频率 f 以及 $\rho\mu$ 恒定时，被测体与线圈间的距离 x 与线圈的阻抗 Z 呈单值函数关系，如果被测材料一定时，可写成

$$Z = F(x)$$

当被测 x 变化时， Z 将发生变化，通过测量电路把 Z 的变化转换成电压 U 的变化。这样就达到了把位移转换为电量的目的。输出电压与位移的关系曲线见图 43-26。同理，固定其它三个参量，而使 ρ 或 μ 为变量，可用于检测材料的电阻率 ρ 或磁导率 μ 的变化，这就是涡流传感器用于无损探伤的原理。

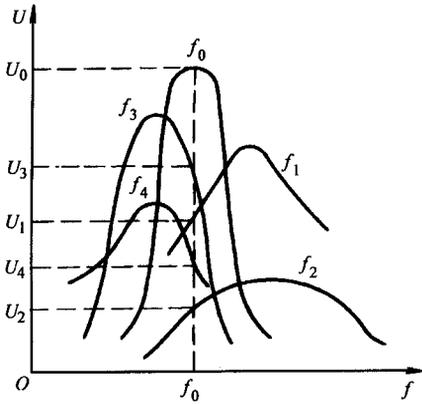


图 43-25 谐振特性曲线

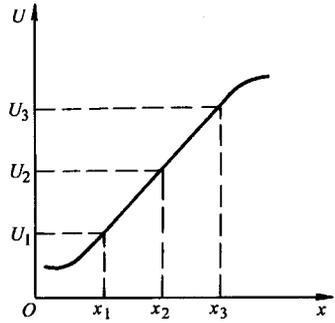


图 43-26 $U=f(x)$ 特性曲线

(二) 低频透射涡流传感器

低频透射式电涡流传感器采用低频激励,因而能得到较大的贯穿深度,可用于测量金属的厚度。图 43-27 为低频透射涡流传感器原理图。

传感器由两个线圈组成,一个为发射线圈,一个为接收线圈,并分别位于被测物体的两侧。由振荡器产生的低频电压 \dot{U}_1 加到发射线圈 L_1 两端,则接收线圈 L_2 两端将产生感应电压 \dot{U}_2 。若两线圈之间不存在被测物体 M ,则 L_1 的磁力线就能较多地穿过 L_2 ,于是在 L_2 上感生电压 \dot{U}_2 最大。当放入一块金属板 M 后,由于 L_1 产生的磁力线穿过 M 并在其中产生涡流 i ,这就损耗了部分磁场能量,使到达 L_2 的磁力线减小,从而使 \dot{U}_2 下降。 M 的厚度 d 越大,涡流越大, \dot{U}_2 就越小。可见, \dot{U}_2 的大小间接反映了 M 的厚度 d ,这就是测厚的原理。

事实上,被测金属块 M 中的涡流大小与其化学成分(主要影响为电阻率 ρ)和物理状态(特别是温度)有关,因此引起相应的测试误差,并限制了测厚的应用范围,但可以采用校正和恒温的办法进行补偿。

在不同频率下对同一种材料的 $\dot{U}_2=f(d)$ 关系曲线如图 43-28 所示。从图可以看出:为了得到较好的线性度,应选用较低的测试频率(通常为 1kHz 左右),但灵敏度有所下降,而渗透深度有所增加。

在一定频率下,不同 ρ 值改变了渗透深度和 $\dot{U}_2=f(d)$ 的曲线形状。为使测量不同 ρ 的材料所得到的曲线形状相近,就需在 ρ 变动时,保持渗透深度不变,相应地改变频率。实践表明,测量 ρ 较小的材料(如紫铜)时,选用较低的频率(500Hz),而测量 ρ 较大的(如黄铜、铝)材料时,则选用较高的频率(2kHz),能使测厚仪得到较好的线性度和灵敏度。

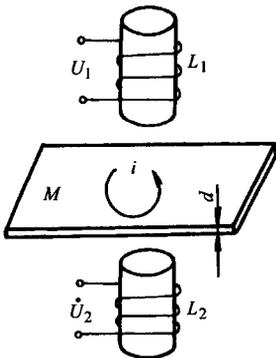


图 43-27 低频透射涡流传感器原理图

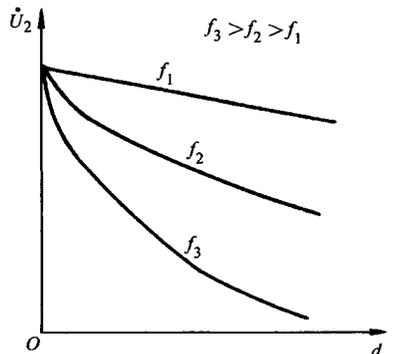


图 43-28 不同频率下的 $U_2=f(d)$ 关系曲线

(三) 测量电路

根据电涡流传感器原理,被测参数变化可以转换成传感器线圈的 Q 值、等效阻抗 Z 和等效电感上的变化,利用测量电路把这些参数转换为电量输出。其测量电路可采用谐振测量电路,也可采用电桥电路。谐振测量电路根据其输出是电压的幅值还是频率,又可分为调幅和调频两种。

1. 桥式测量电路 为了提高稳定性和灵敏度,对差动式传感器可采用桥式测量电路,电路原理如图 43-29 所示。 Z_1 、 Z_2 是传感器的两个线圈,它们与电阻 R_1 、 R_2 、电容 C_1 、 C_2 组成电桥的四个臂,其工作电源可由石英晶体振荡器组成的具有高稳定度的电源供给。测量时线圈阻抗变化,电桥电路则把线圈阻抗变化转换成电压幅值的变化,完成有关参数的测量。

2. 谐振幅值测量电路 如图 43-30 所示。传感器线圈 L 和固定电容 C 组成并联谐振回路,由石英晶体振荡器提供一个频率(如 f_0)稳定的高频激励电流 I_0 。在无被测导体时,使电路的 L_0 谐振回路的谐振频率

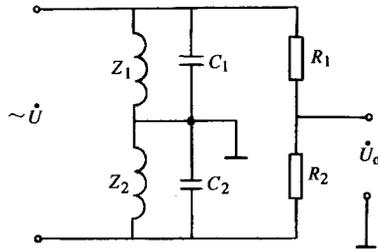


图 43-29 桥式测量电路

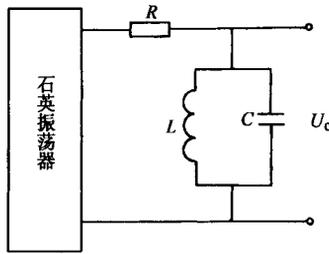


图 43-30 谐振幅值测量电路

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

即使 f_0 等于振荡器的振荡频率,此时并联谐振电路的阻抗最大,其输出电压 U 最大。

在非磁性材料被测导体靠近传感器线圈时,线圈的等效电感减小,回路的谐振频率升高,谐振峰右移,谐振回路工作在失谐状态,这时频率为 f_0 的电流流入流过并联谐振电路的电压降由原来的 U_0 下降为 U_1 ;当进一步靠近线圈时,线圈的 L 进一步减小,因此对应于 f_0 的阻抗更小,因此压降又由 U_1 下降为 U_2 ...

若被测导体为软磁材料时,情况类似,只不过随导体的逐渐靠近线圈,谐振峰越来越向左移动,得到的谐振曲线如图 43-25 所示。这个特性是非线性特性曲线,使用时必须注意使用范围,以得到较好的线性工作状态。传感器在工作过程中,输出电压(U_0 、 U_1 、 U_2 、...)对应的频率始终不变,其幅值只随位移的变化而变化,因此这是一个调幅测量电路。

3. 调频测量电路 测量电路见图 43-31。传感器线圈 L 作为一个电感元件接入振荡器中。该测量电路由两大部分组成,即电容的三点式振荡器和射极输出器。

电容三点式振荡器产生一个高频正弦波,其频率随传感器线圈 $L(x)$ 的变化而变化,该频率信号通过 C_4 耦到射极输出器,再由频率计读得输出信号的大小。

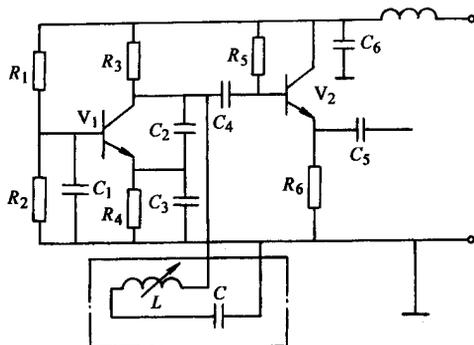


图 43-31 调频测量电路

(四) 电涡流传感器的应用实例

1. 厚度测量 利用电涡流传感器无接触地测量金属板的厚度的测量原理见图 43-32。为了防止测量过程中金属板上下波动引起测量误差, 故在金属板上下各安装一电涡流传感器, 其距离为 D , 而它们与板的上下表面的距离分别为 d_1 和 d_2 , 因此, 被测金属板的厚度为:

$$d = D - (d_1 + d_2)$$

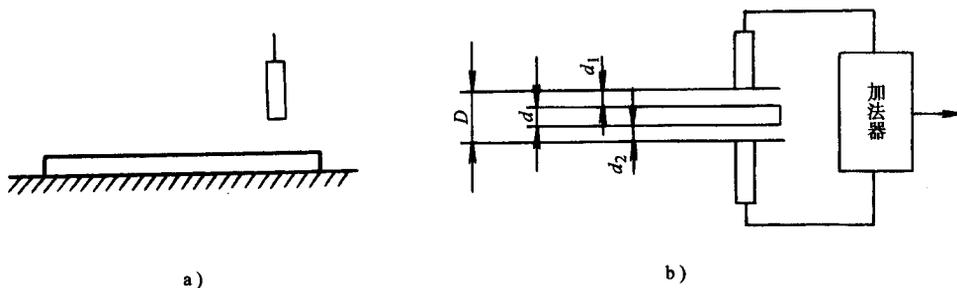


图 43-32 厚度测量实例

两个传感器工作时分别将 d_1 和 d_2 转换成相应的电压在加法器中相加, 加法器的输出电压代表了 $d_1 + d_2$ 。然后再与两传感器间距离 D 相应的设定电压相减, 就得到与被测厚度 d 相对应的电压值, 该电压可供显示仪表显示或经 A/D 转换后, 利用 LED 显示。

2. 转速测量 在旋转体的轴上刚性连接上开有 n 个槽或齿轮的金属调制盘, 在盘的旁边安装一个电涡流传感器, 见图 43-33。当旋转体转动时, 金属调制盘与传感器的距离周期性地改变, 因此传感器输出信号也周期性改变, 该信号经放大和整形后变成一系列脉冲, 可用数字式频率计进行测量。设测得的频率为 f (Hz), 则被测转轴的转速 N 为:

$$N = \frac{f}{n} \times 60$$

电涡流传感器应用广泛, 由于篇幅所限, 仅介绍两个应用实例, 读者可参考有关文献。

四、压磁式传感器

压磁式传感器也是测力传感器中的一种, 它是利用压磁效应原理工作的。

(一) 工作原理

当铁磁材料受机械力作用时, 其内部产生应变, 引起导磁率 μ 的变化。当外加机械力消失后, 其磁导率 μ 复原。通常把在机械变形(拉伸、压缩、扭曲等)作用下, 所引起的磁性质的变化称为压磁效应。

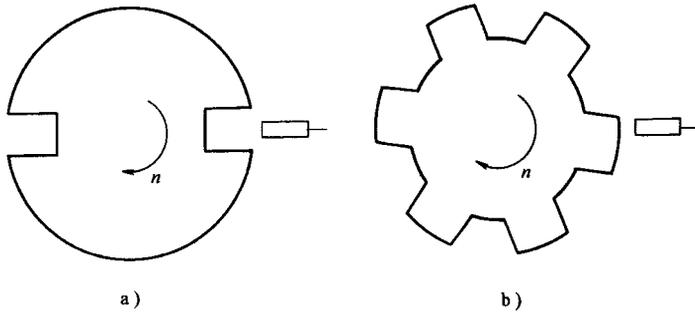


图 43-33 转速测量原理图

铁磁材料的压磁效应的规律是：铁磁材料受拉力作用时，在力的作用方向磁导率 μ 提高，而在与作用力垂直的方向，磁导率降低；铁磁材料受到压力作用时，磁导率 μ 的变化刚好相反。

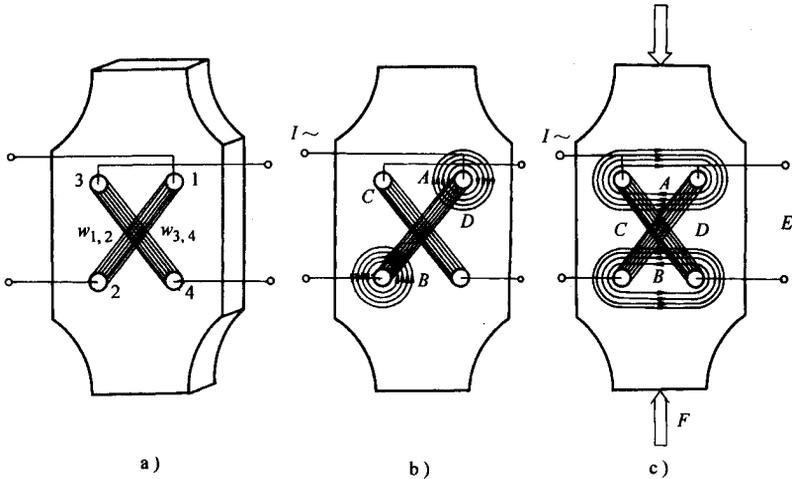


图 43-34 压磁传感器原理

利用铁磁材料在外力作用下磁导率 μ 的变化这一规律，构成了压磁传感器，见图 43-34。在一定形状的铁磁材料（例如硅钢片、坡莫合金等）的适当位置开四个孔，1 与 2 孔间绕有励磁绕组 $w_{1,2}$ ，3 与 4 孔间绕有测量绕组 $w_{3,4}$ ，见图 43-34a。在励磁绕组 $w_{1,2}$ 通以交变电压 U_1 ，若无外力作用，由于铁磁材料的磁导率 μ 在各个方向上均相同， $w_{1,2}$ 建立的磁力线见图 43-34b，磁力线不与测量绕组 $w_{3,4}$ 交链，故 $w_{3,4}$ 不产生感应电动势。若传感器受压力 F 作用，由于与 F 垂直方向铁磁材料的磁导率 μ 增加，而与 F 相同方向的磁导率 μ 降低，故有磁力线与 $w_{3,4}$ 交链，因此 $w_{3,4}$ 绕组有感应电动势 \dot{U} 输出，见图 43-34c。测量绕组 $w_{3,4}$ 输出的电动势 \dot{U} 为：

$$\dot{U} = kU_1 \frac{w_1}{w_2} F$$

式中 w_1 和 w_2 分别是励磁绕组和测量绕组的匝数； U_1 为励磁电压 (V)； k 为与励磁电压和频率有关的系数 (1/N)； F 为被测力 (N)。

由式可见，压磁传感器的输出 \dot{U} 与被测力 F 的关系是线性的，而且当 $F=0$ 时， $\dot{U}=0$ 。但是，实际上由于结构上不完全对称、励磁电压中含有高次谐波及铁磁材料的 $B-H$ 曲线有弯曲部分等原因，致使 $F=0$ 时， $\dot{U} \neq 0$ ，而 $\dot{U} = U_0$ ， U_0 称为零点残余电压，见图 43-35。在测量电路中必须对 U_0 进行补偿。

(二) 压磁传感器的形状

压磁传感器的常见形状见图 43-36。图 a 的灵敏度较高，可测量 $5 \times 10^5 \text{N}$ 以下的力。图 b 是图 a 的改进

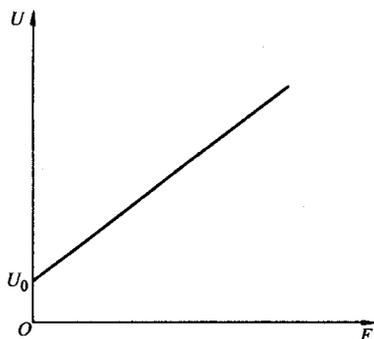


图 43-35 压磁传感器的输出特性

型,在受力面下开两个小孔,分散了部分力到四个孔的两侧,提高了测量上限,但灵敏度有所减小。图 c 为中字型,分别在 1、3 铁心柱上绕上励磁绕组和测量绕组,测量上限较小,灵敏度高,但零点残余电压较大。图 d 称为“田中”形,主要特点是灵敏度较高,常用于测量 5000N 以下的力。

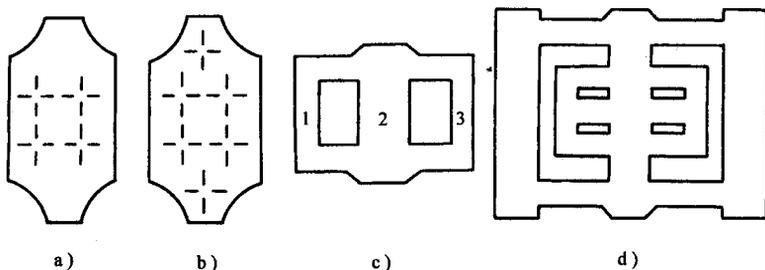


图 43-35 压磁传感器的形状

(三) 测量电路

由上式可见,在铁磁材料未达到磁饱和条件下,提高励磁电压 U_1 和两绕组的匝数比 w_1/w_2 均能提高传感器的输出电压 U 。因此压磁传感器的输出信号幅值较大。其测量电路不需要信号放大环节,只需要有稳定的励磁电源和良好的检波、滤波以及调零电路等。图 3-37 是压磁传感器测量电路的组成框图。

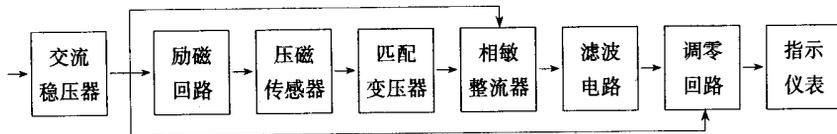


图 43-37 压磁传感器测量电路框图

(四) 压磁传感器的特点及应用范围

与其它传感器相比,压磁传感器具有输出功率大、抗干扰能力强、精度高、线性好、寿命长、维护方便、运行条件低(能在一般有灰尘、水和腐蚀性气体的环境中长期运行)等特点。因此,很适合在重工业、化学工业部门应用,是一种十分有发展前途的传感器。

目前,压磁传感器已在冶金、矿山、造纸、印刷、运输等各个工业部门中广泛应用。特别是在各种自动化系统中用来测量轧钢机的轧制力、钢带张力、卷扬机的定量自动提升、纸张的张力、吊车提物的自动称重、配料斗的称重、金属切削过程的切削力以及电梯安全保护等各个方面。

第二节 电容式传感器测试

电容式传感器利用电容器的原理,将非电量(如物位、压力、温度等)转化为电容量,从而实现非电量到电量的转化与测量。

一、基本工作原理

平板电容器和圆筒形电容器,见图 43-38,若忽略其边缘效应,平板电容器的电容为:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \epsilon A}{d} = \frac{\epsilon A}{d}$$

式中, C 为电容量(F); d 为两平行极板间的距离(m); ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数($= 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$); ϵ 为极板间介质的介电常数; A 为极板相互遮盖面积。

圆筒形电容器的电容为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(R/r)}$$

式中, C 为电容量(F); l 为圆筒长度(m); R 为外圆筒半径(m); r 为内圆筒半径(m)。

由此可见,电容式传感器的基本工作原理是通过改变电容器的 ϵ_r 、 d 、 A (或 l)参数中的任何一个,从而实现电容 C 的改变,因此常把电容式传感器分为三个类型,即变间隙型、变面积型和变介电常数型。

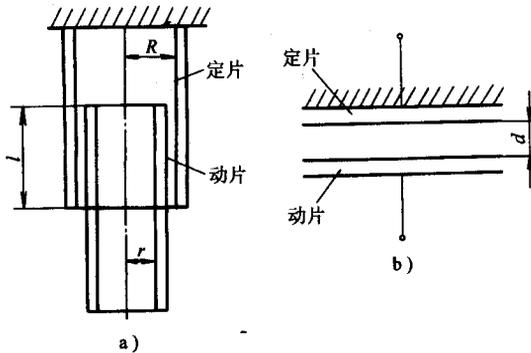


图 43-38 两种常用电容器

a) 圆筒形电容 b) 平板电容

二、电容式传感器的结构类型及主要特性

(一) 变间隙型

变间隙型电容式传感器结构如图 43-39a 所示。其电容特性表达式为:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \epsilon A}{d} = \frac{\epsilon A}{d}$$

由特性表达式知, C 与 d 成反比为双曲线关系,见图 43-39b。当极板变化范围限制在一个远小于 d 的 Δd 区间,则可把 ΔC 与 Δd 的关系近似看作为直线关系。当 d 减小 Δd 时,则电容增加 ΔC 为:

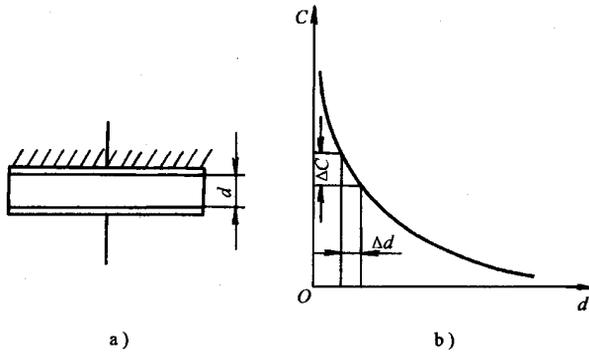


图 43-39 变间隙型电容器及其特性

a) 结构图 b) 特性曲线

$$\Delta C = \frac{\epsilon A}{d - \Delta d} - \frac{\epsilon A}{d}$$

此时, 电容的相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d/d}{1 - \Delta d/d}$$

若 $\Delta d/d \ll 1$, 则

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta C}{d}$$

传感器的灵敏度为:

$$k = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C}{d}$$

这是假定 $d \gg \Delta d$ 推得的结果, 事实上变间隙型传感器的输出特性为:

$$\Delta \frac{C}{C} = \frac{\Delta d}{d} \left[1 + \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^3 + \dots \right]$$

式中所得的高次项就是变间隙型电容传感器的非线性误差。

(二) 变面积型

变面积型电容式传感器的结构型式见图 43-40。

1. 角位移变面积型 如图 43-40a 所示, 当转动动片一个角度 θ , 遮盖面积就要发生变化, 电容量也随之改变。当 $\theta = 0$ 时

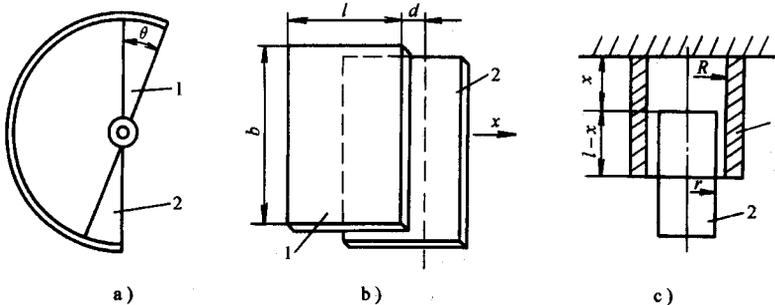


图 43-40 变面积型电容传感器

1- 动片 2- 定片

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{d}$$

当 $\theta \neq 0$ 时

$$C_{\theta} = \frac{\varepsilon A(1 - \theta/\pi)}{d} = C_0(1 - \theta/\pi)$$

可见电容量 C 的变化与其转角成线性关系。

2. 板状线位移变面积型 如图 43-40b 所示, 当动极板沿箭头所示方向移动 x 时, 传感器的电容量为:

$$C_x = \frac{\varepsilon b(l - \theta/\pi)}{d} = C_0\left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

其灵敏度为:

$$K = \frac{dC_x}{dx} = -\frac{\varepsilon b}{d}$$

由式可见, 增大 b 可提高传感器的灵敏度。

3. 筒状线位移变面积型 如图 43-40c 所示, 当动板圆筒沿轴向移动 x 时

$$C_x = \frac{2\pi\varepsilon(l-x)}{\ln(R/r)} = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln(R/r)}\left(1 - \frac{x}{l}\right) = C_0\left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

其灵敏度为:

$$k = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(R/r)}$$

(三) 变介电常数型

当电容极板之间的介电常数发生变化时, 电容量也随之发生变化, 根据这个原理可构成变介电常数型电容式传感器。它可以用来测量物位, 含水量及成分分析等。图 43-41 所示的电容式液位传感器就是变介电常数型的传感器。

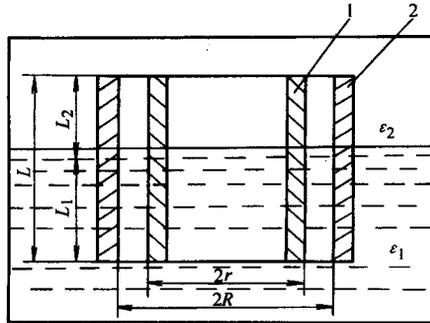


图 43-41 电容式液位传感器

1-同心圆筒形内极板 2-同心圆筒形外极板

在被测介质中放入两个同心圆筒形极板, 大圆筒内径为 R , 小圆筒内径为 r 。当被测液体的液面在同心圆筒间变化时, 传感器电容随之变化, 其容量为:

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 = \frac{2\pi(L - L_1)\varepsilon_2}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi L_1\varepsilon_1}{\ln(R/r)} \\ &= \frac{2\pi L_2\varepsilon_2}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi L_1}{\ln(R/r)}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \end{aligned}$$

式中, C_1 为液体介质间的电容; C_2 为气体介质间的电容; ε_1 为液体介质的介电常数; ε_2 为气体介质的介电常数; L_1 、 L_2 为液体、气体介质的高度。

若令

$$\begin{aligned} \frac{2\pi L_2\varepsilon_2}{\ln(R/r)} &= A \\ \frac{2\pi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\ln(R/r)} &= B \end{aligned}$$

则式可写成

$$C = A + BL_1$$

可见,传感器电容容量 C 与液位高度 L_1 成正比。

(四) 差动电容式传感器

为了提高电容式传感器的灵敏度和变间隙型电容器的线性度,在实际测量中常采用差动电容传感器,如图 43-42 所示。

为什么差动电容传感器能提高灵敏度和改善线性度呢?下面以变间隙型差动电容传感器为例来加以说明。

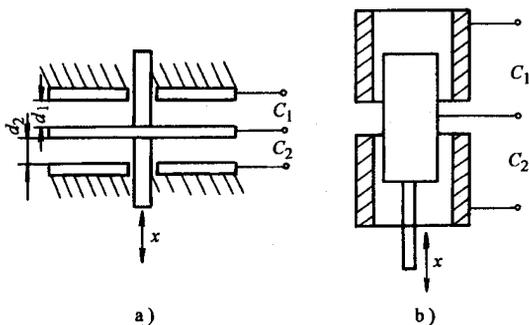


图 43-42 差动电容传感器原理图

a) 变间隙式 b) 变面积式

图 43-42 中,中间为动片,两边的为定片,当动片向上移动 Δd 时,则

$$d_1 = d_0 - \Delta d$$

$$C_1 = C_0 + \Delta C_1$$

$$d_2 = d_0 + \Delta d \quad C_2 = C_0 - \Delta C_2$$

已知

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{d_0}$$

则移动 Δd 后

$$C_1 = C_0 + \Delta C_1 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} = \frac{\epsilon A / d_0}{1 - \Delta d / d_0}$$

$$C_2 = C_0 - \Delta C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d} = \frac{\epsilon A / d_0}{1 + \Delta d / d_0}$$

通常 $\Delta d / d_0 \ll 1$, 所以按级数展开可写成:

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left[\frac{\Delta d}{d_0} \right]^3 + \dots \right]$$

$$C_2 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left[\frac{\Delta d}{d_0} \right]^3 + \dots \right]$$

传感器电容量的变化为:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right]$$

比较式可知,其灵敏度提高了一倍,线性度得到了很大的改善。

三、测量电路

电容式传感器的测量电路的种类很多,目前较常采用的有电桥电路、调频电路、脉冲调宽电路和运算放大器式电路等。

(一) 电桥电路

电容式传感器常用交流电桥和变压器电桥作为测量电路。交流电桥的分析方法与直流电桥相似,详见电阻应变传感器一节,变压器桥路的分析方法详见电感传感器一节。

例 图 43-43 是电容式自平衡液位测量仪原理框图,试求指针偏转角 θ 与液位 h 的表达式。

解:由图可见,当 $h=0$ 时, $C_x = C_{x0} = C_0$,且电位器 RP (阻值 R) 的电刷在 o 点,即 $R=0$,此时电桥应平衡,桥路输出电压 $U_{ac} = 0$ 则

$$\frac{C_{x0}}{C_0} = \frac{R_4}{R_3}$$

当液位为 h 时, $C_x = C_{x0} + \Delta C$, $\Delta C = k_1 h$, k_1 为电容传感器的灵敏度。此时 $U_{ac} \neq 0$,经放大的,使单相电动机转动,经后带动指针转动,同时带动电位器的电刷移动,直到 $U_{ac} = 0$,系统重新平衡为止,此时

$$\frac{C_{x0} + \Delta C}{C_0} = \frac{R_4 + R}{R_3}$$

联立求解上面两式得:

$$R = \frac{R_3}{C_0} \Delta C = \frac{R_3}{C_0} k_1 h$$

由于指针转角 θ 与电位器电刷同轴相边,它们间的关系为:

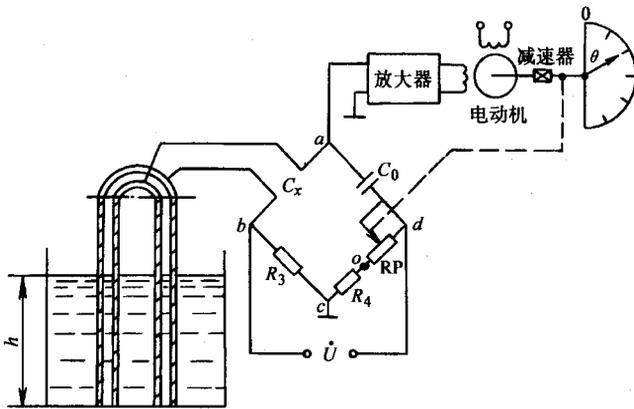


图 43-43 电容式自平衡液位计原理框图

$$\theta = k_2 R$$

因此

$$\theta = \frac{R_3}{C_0} k_1 k_2 h$$

k_2 为比例系数。

可见,指针偏转角 θ 与液位高度 h 成比例。

(二) 调频电路

将电容传感器接入高频振荡器的 LC 谐振回路,作为回路的一部分。当被测量变化使传感器电容改变时,振荡器的振荡频率 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 随之改变,即振荡器频率受传感器电容调制,因此称作调频电路。测

定频率或经鉴频器将频率变化转换成电压幅值的变化,就可测得被测量的变化。

调频电路原理图如图 43-44 所示。图中 C_0 为电容传感器电容, C_1 为固定电容, C_i 为寄生电容。设 $C = C_1 + C_i + C_0 \pm \Delta C$, 且 $C_2 = c3 \gg C$, 此时振荡器的振荡频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_1 + C_i + C_0 \pm \Delta C}}$$

振荡频率除与传感器电容有关外,还受回路中其它参数影响。如果这些参数受外界因素影响时,同样会引起频率的变化而影响测量精度。因此要求电路元件参数稳定,并需采取稳频措施及减小环境温度等的影响。

调频电路的灵敏度高,可测到 $0.01\mu\text{m}$ 级位移变化量,频率输出易于得到数字输出而不需要用 A/D 变换器,能获得高电平(伏特级)直流信号,抗干扰能力强,可以发送、接收实现遥测遥控。但调频电路的频率受温度和电缆电容影响较大,除需采用稳频措施外,还需加入非线性校正电路以减小传感器本身的非线性。

(三)差动脉冲调宽电路

差动脉冲调宽电路如图 43-45 所示。该电路由比较器 A_1 、 A_2 、双稳态触发器及电容充放电回路所组成; C_1 、 C_2 为传感器的差动电容,双稳态触发器的两个输出端用作线路输出。

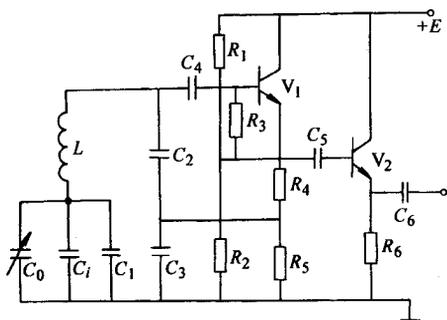


图 43-44 调频电路原理图

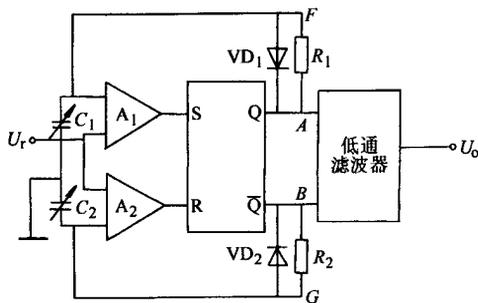


图 43-45 差动脉冲调宽电路

设电源接通时双稳态触发器的 Q 端为高电位, \bar{Q} 端为低电位, 此时 A 点能通过 R_1 对 C_1 充电, G 点由于二极管 VD_2 的作用被钳制在低电位(即 \bar{Q} 的低电位)。当 F 点的电位高于参考电压 U_r 时, 比较器 A_1 产生一脉冲, 触发双稳态触发器翻转, Q 端输出变为低电位, 而 \bar{Q} 端变为高电位, 这时 C_2 充电, G 点电位逐渐升高, C_1 放电, F 点经二极管 VD_1 从电位 U_r 降至零, 当 G 点电位高于 U_r 时, 比较器 A_2 产生一脉冲, 使触发器又翻转一次, 电位 A 点成高电位, B 点为低电位, 又重复上述过程。如此周而复始, 在双稳态触发器的两输出端各自产生一宽度受 C_1 、 C_2 调制的脉冲方波。方波脉冲宽与 C_1 、 C_2 的关系如下: 当 $C_1 = C_2$ 时, 线路上各点电压波形如图 43-46 所示。A、B 两点间的平均电压为零。但当 C_1 、 C_2 值不相等时, 如 $C_1 > C_2$ 则 C_1 、 C_2 充放电时间常数发生变化, 电压波形如图 43-46b 所示, A、B 两点间的平均电压不再为零。输出直流电压经低通滤波器后, 就可得到与传感器两电容差值成正比的电压 U_0 , 即

$$U_0 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_1 - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_1$$

式中, T_1 、 T_2 分别为电容 C_1 、 C_2 的充电时间; U_1 为触发器输出的高电位。

由于 U_1 的值是已定的, 因此输出直流电压 U_0 随 T_1 、 T_2 而变, 即随 U_A 和 U_B 的脉冲宽度而变, 电容 C_1 和 C_2 的充电时间为:

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_r}$$

当充电电阻 $R_1 = R_2 = R$ 时

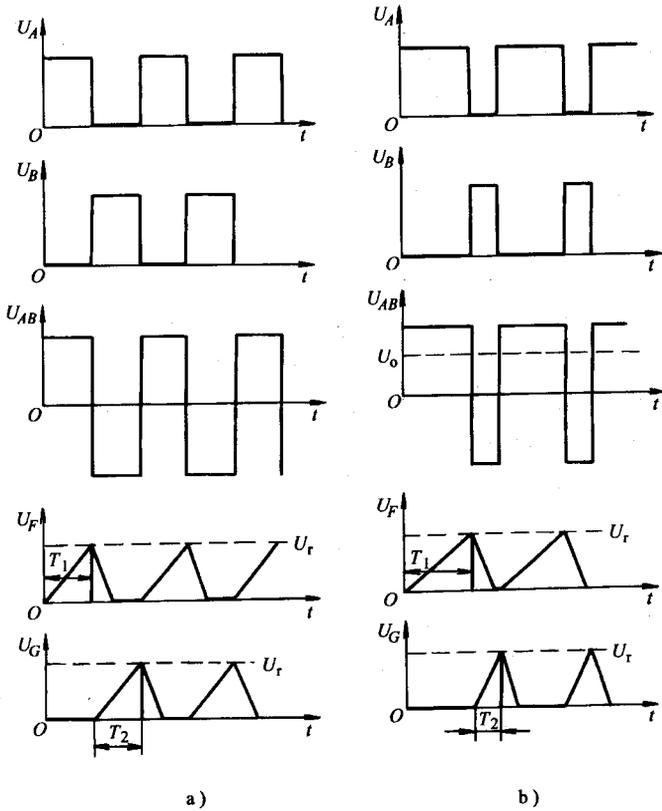


图 43-46 各点电压波形

a) $C_1 = C_2$ b) $C_1 > C_2$

$$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$$

式说明,差动电容的变化使充电时间不同,从而合双稳态触发器输出端的方波脉宽不同而产生输出。而且不论是变面积型或变间隙型电容传感器均能获得线性输出。

肪冲调宽电路还具有如下特点:

1. 不需要特殊电路,只要经过低通滤波器就可以得到较大的直流输出。
2. 不需要高频发生器。
3. 由于低通滤波器的作用,对输出矩形波的纯度要求不高。

(四) 运算放大器式电路

利用运算放大器的高增益、高输入阻抗的特点,可以克服变间隙型电容传感器特性的非线性关系,使其输出信号能与输入机械位移呈线性关系,其电路原理见图 43-47 所示。

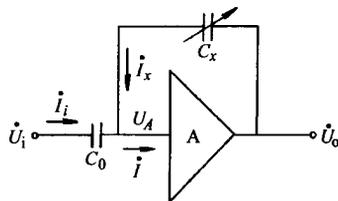


图 43-47 运算放大器式测量电路

假定运算放大器的增益很高(一般达 10^5 以上),测量时,输入电压不使和大器饱和,即所要求的输入电压很小,几乎为零。因此可以认为 $\dot{U}_A \approx 0$ 与地电位近似相等,称为“虚地”。同时,由于放大器的输入阻抗很高(0.5~几兆欧),放大器所吸取的电流 $\dot{i} \approx 0$ 。根据基尔定律可列出如下方程;

$$\begin{cases} \dot{U} = -j \frac{1}{\omega C_0} \dot{I}_i + \dot{U}_A \\ \dot{U}_o = -j \frac{1}{\epsilon C_x} \dot{I}_x + \dot{U}_A \\ \dot{I}_i + \dot{I}_x = \dot{I} \end{cases}$$

将 $\dot{U}_A \approx 0$ $\dot{i} \approx 0$ 代入,解得:

$$\dot{U}_o = -\dot{U} \frac{C_0}{C_x}$$

将 $C_x = \epsilon A/d$ 代入式,则得:

$$\dot{U}_o = \dot{U} \frac{C_0}{\epsilon A} d$$

由此可见,输出电压与动片的机械位移 d 成线性关系,这就从原理上克服了单个变间隙型电容传感器特性的非线性误差问题。需要指出的是,由于增益 $k \neq \infty$ 且输入阻抗 $Z_i \neq \infty$,所以仍然具有一定的非线性误差。为了防止干扰和减小杂散分布电容的影响,必须采取特殊措施即所谓的驱动电缆技术。

四、电容传感器的特点及其应用范围

电容传感器的特点是:结构简单,灵敏度高,分辨率高,能感受 $0.01\mu\text{m}$ 甚至更小的位移,无反作用,需要的动作能量低,动态响应好,可实现无接触测量,能在恶劣的环境下工作,缺点是:输出特性非线性,受分布电容影响大。但是随着新工艺,新材料问世,特别是电子技术的发展,使干扰和寄生电容等问题不断得到解决,因此越来越广泛地应用于各种测量中。电容传感器可以用来测量直线位移、角位移、振动振幅(可测至 $0.05\mu\text{m}$ 微小振幅),尤其适合测量高频振动振幅、精密轴系回转精度、加速度等机械量。还可用来测量压力、差压、液位、料面、成分含量(如油、粮食、木材的含水量)及非金属材料的涂层、油膜等的厚度。此外,也可以用来测量电介质的温度、密度、厚度等。在自动检测和控制系统中也常常用来作为位置信号发生器。采用单边式电容传感器,即把被测物作为电容器的一个电极,另一个电极则在传感器内,它可以用来测定料位、振动振幅,具有测量精度高,快速准确的特点。

下面介绍一些电容传感器的应用实例。

1. 集成 IC 电容式加速度测试仪 该测试仪是由 AD 公司生产的单片集成电路 ADXL50。其内部集成了电容传感器、振荡器、解调器、前置放大器、缓冲放大器和基准电源等。仅需在外部接些阻容元件就能用于测量加速度。测量范围 $\pm 50g$,耐冲击可达 $2000g$ 。具有体积小,精度高,方向性好等特点。

ADXL50 内部框图见图 43-48。振荡器产生 1MHz 的脉冲信号供给电容传感器进行调制。传感器是在弹簧片上并联 42 个差动电容敏感元件,以便提高灵敏度。传感器敏感元件结构见图 43-49。中心片为动片,当加速度为零时,见图 a;当加速不为零时,见图 b。

传感器、解调器和前置放大器之间的联系见图 43-50。振荡器输出的方波经差动电容调制和跟随后送入解调器解调变成直流信号。差动电容调制后中心片输出的波形见图 43-51 图 a 为加速度为零的情况,由于两固定片上脉冲信号幅值相等相位相反,所以中心片输出某一直流电平。图 b 为有加速度情况,由于 C_{s1} 和 C_{s2} 容量不等,两固定片上的脉冲相位不同,中心片上有脉冲信号输出。经解调成直流信号和前置放大,一路经 8 脚输出;另一路径 $3\text{M}\Omega$ 电阻反馈回到中心片;第三路经缓冲放大器由 9 脚输出(见图 43-48)。使用单一 $+5\text{V}$ 电源时,若加速度为零($C_{s1} = C_{s2}$)输出电压为 1.8V ,受到加速度作用时,其灵敏度为 19mV/g ,满量程 $\pm 50g$,则输出电压变化量为 $\pm 0.95\text{V}$ 。输出电压可用磁电系电流表来指示或经 A/D 转换后用数字显示。

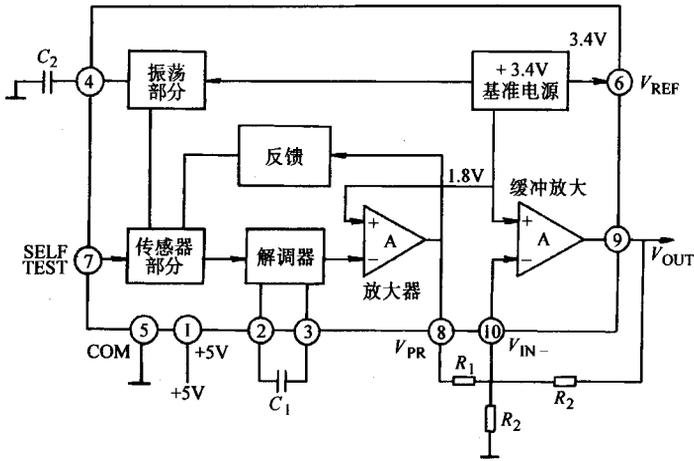


图 43-48 ADXL50 的内部框图

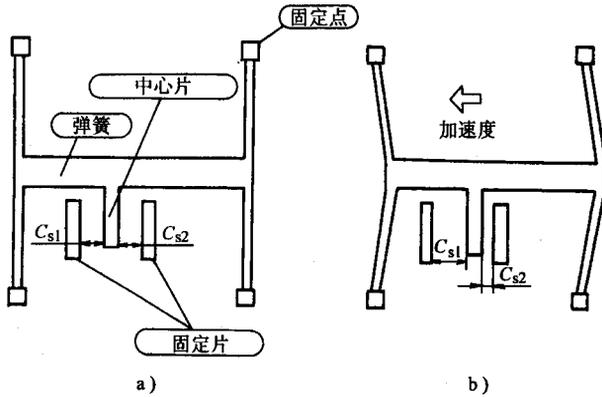


图 43-49 传感器敏感元件的结构
a) 静止时 b) 有加速度时

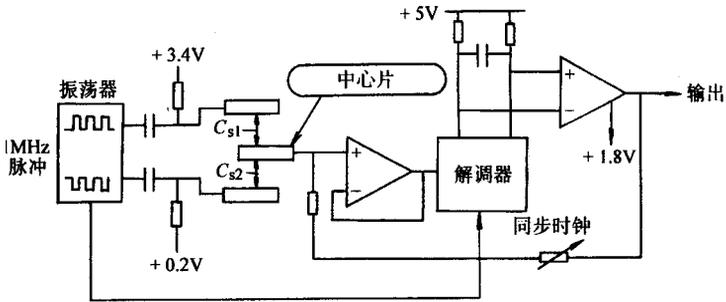


图 43-50 传感器与解调器和前置放大器的连接

用 ADXL50 构成加速度测试仪的基本接线见图 43-52。图中 R_{P1} 作用零点调整, R_{P2} 作用是量程调整。根据测量范围的大小, 改变外接阻容即可, 量程与外接阻容的关系见表 43-1。

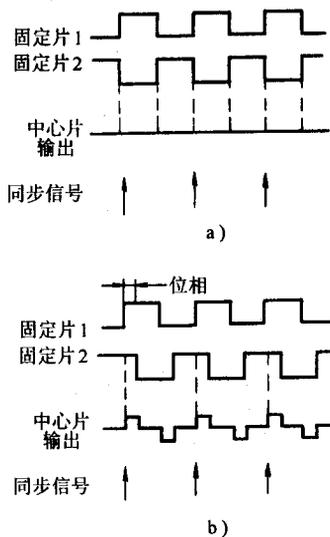


图 43-51 中心片输出信号波形

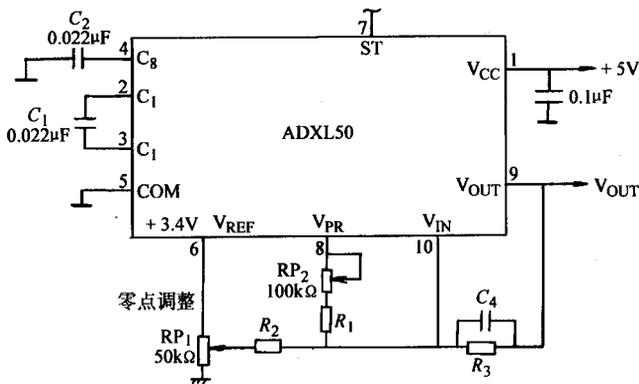


图 43-52 加速度测试仪的基本电路

表 43-1 外接阻容与量程的关系

量 程	灵敏度 (mV/g^{-1})	$\text{RP}_2/\text{k}\Omega$	$\text{R}_1/\text{k}\Omega$	$\text{R}_3/\text{k}\Omega$	$\text{C}_4/\mu\text{F}$
$\pm 10\text{g}$	200	5	21.5	249	0.0022
$\pm 20\text{g}$	100	5	23.7	137	0.0039
$\pm 40\text{g}$	50	10	34	1.05	0.0056
$\pm 50\text{g}$	40	10	43.3	105	0.0056

图 43-53 为 $\pm 10\text{g}$ 加速速度测试仪的实用电路。A/D 转换器采用具有译码、并可直接驱动 LCD 的 31/2 位转换器 ICL7106。由于加速度变化非常迅速，显示器跟不上其变化，因此在 A/D 转换器前加了 TA75358 和场效应晶体管 2SK363 组成的正向峰值保持电路，这样，显示的是最大加速度值。

2. 电容式传声器 电容式传声器较压电式和电动式传声器具有许多优点，它主要应用于商品质的电声系统和高精度的声级计中。电容式传声器原理见图 43-54。金属膜片 4 与背极板 3 组成一个空气介质电容

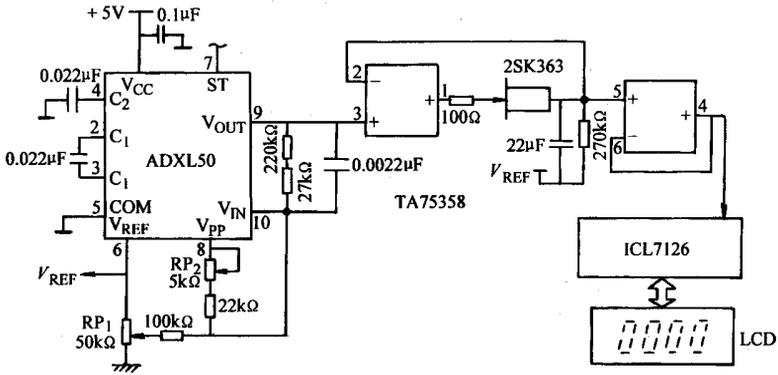


图 43-53 ±10g 加速度测试仪实用电路

器,金属膜片随被测声压而振动,从而改变电容器两极板间的距离 d 。设极板间覆盖面积为 S ,极板间初始距离为 d ,声压增加时, $d = d_0 - \Delta d$ 根据电容传感器的原理,电容器增量 ΔC 为:

$$\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \frac{\Delta d}{d_0} + \frac{\Delta d}{d_0} + \dots \right]$$

式中, C_0 为电容器的初始电容。

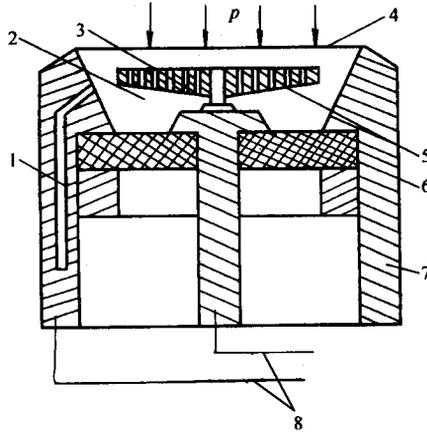


图 43-54 电容式传声器

- 1 - 毛细孔 2 - 内腔 3 - 背极板 4 - 膜片
- 5 - 阻尼孔 6 - 绝缘体 7 - 壳体 8 - 引线

当 $\Delta d \ll d_0$ 时

$$\Delta C \approx C_0 \frac{\Delta d}{d_0}$$

当声压的变化频率远小于膜片的固有频率时,则声压与电容极间距离的关系为:

$$\Delta d = \frac{r^2}{8F} P$$

式中, r 为膜片的半径; F 为膜片的张力; P 为声压。

由上两式得:

$$\Delta C = \frac{C_0 r^2}{8F d_0} = k_p P$$

式中 $k_p = \frac{C_0 r^2}{8 F d_0} = \text{常数}$ 。

由上式可见,电容变化量与声压成正比。

传声器将电容的变化量 ΔC 转换成电压的变化量 ΔU 而输出。图 43-55 为传声器接入负载和加上极化电压 U_p 的等效电路。图中 R_p 为极化电压 U_p 的内阻; R 为前置放大器的等效输入电阻; C_s 为分布电容。由图可见,回路的时间常数 τ 为:

$$\tau = (C + C_s) \frac{R_p R}{R_p + R}$$

式中, C 为传声器的电容。

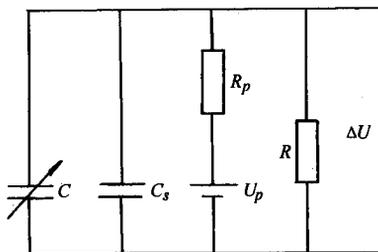


图 43-55 电容式传声器的等效电路

τ 足够大,电容 C 变化时,极化电压来不及补偿或抽取 C 上的电荷,因此, C 上的电荷可视为常数

$$q = (C_0 + C_s)U_0 = (C_0 + \Delta C + C_s)U$$

式中, U_0 为 $C = C_0$ 时的电压, $U_0 = RU_p / (R + R_p)$; U 为 $C = C_0 + \Delta C$ 时的电压, $U = (C_0 + C_s)U_0 / (C_0 + \Delta C + C_s)$

由此可见 ΔU 为:

$$\Delta U = U - U_0 = \frac{\Delta C}{C_0 + \Delta C + C_s R + R_p} U_p$$

将上式代入上式,得

$$\Delta U = - \frac{1}{C_0 + C_s R + R_p} k_p U_p = K_p$$

式中 $k = - \frac{k_p U_p R}{(C_0 + C_s)(R + R_p)} = \text{常数}$ 。

可见,传声器输出电压增量 ΔU 与被测声压 p 成正比。

式的先决条件为 τ 很大,电容 C 上的电荷 q 为常数。要满足这一条件,要求 k 和 R_p 阻值很高(几百兆欧以上),因此前置放大器的输入阻抗应在 $10^8 \Omega$ 以上。

电容式传声器灵敏度高(50mV/Pa 以上),测量范围宽(10 ~ 170dB),性能稳定,精度高,常用于精密级噪声测量,但价格较贵。

第三节 压电式传感器测试

压电式传感器的工作是基于某些材料的压电效应,它是一种发电式传感器。在外力作用下压电材料的表面上会产生电荷,从而把力转换成电荷,所以它能测量那些与力有关的参量(如压力、应力、加速度、振动等),故压电元件又称为压敏元件。由于压电效应是可逆的,即当沿一定方向对压电材料施加外力使之变形时,在一定表面上产生电荷,当外力去除后,又重新回到不带电状态,这就是正压电效应,如果在压电材料的

极化方向加一电场,它本身将产生变形,外加电场撤去,变形也随之消失,这就是逆压电效应。可见,压电式传感器是一种典型的双向传感器。由于压电式传感器具有体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、高频特性好、灵敏度和信噪比高等特点,因此被广泛应用于电子、通信、航空、医学等方面。随着电子技术的发展,集成化、智能化的新型压电式传感器也正在被开发出来。

一、压电材料及其特性

具有压电效应的电介质称为压电材料。具有压电效应的物质很多,如天然形成的石英,人工制造的压电陶瓷、压电半导体,某些高分子材料等都具有良好的压电效应。现以石英晶体和一般压电陶瓷材料为例来说明其压电效应的机理。

石英晶体是最常用的压电晶体之一。天然结构的石英晶体的理想外形是正六面体,其外形如图 43-56 所示。

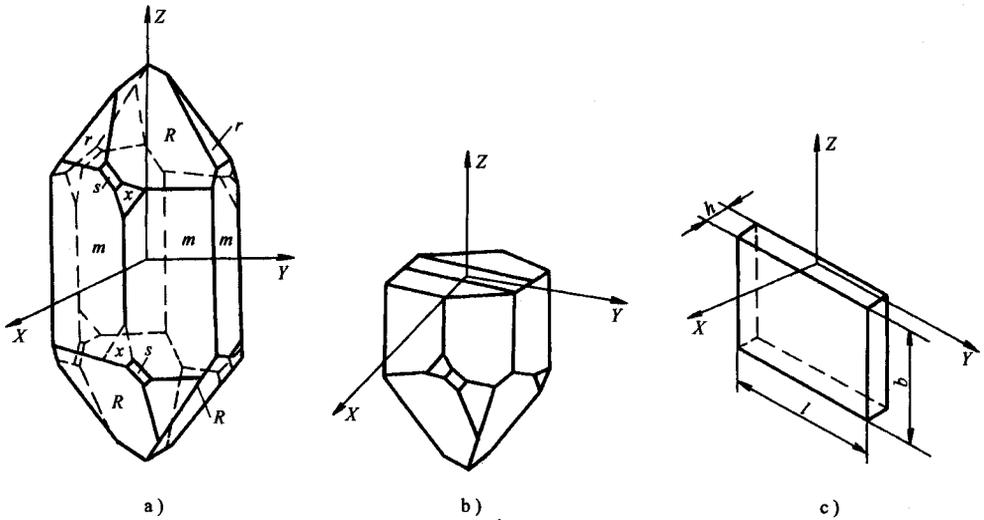


图 43-56 石英晶体
a) 左旋石英晶体的外形 b) 坐标系 c) 切片

由于晶体的物理特性与晶轴方向有关。所谓晶轴就是研究晶体物理特性时选定的参考方向。在晶体学中规定,不论是左旋或右旋石英晶体都采用右手直角坐标系表示晶体的方向,如图 43-56b 所示。其中 X 轴是平行相邻棱柱面内夹角的等分线,垂直于此轴的晶面上的压电效应最强故称为电轴,垂直于六边形对边的轴线 Y 轴称机械轴,在电场作用下,沿该轴方向的机械变形最为明显;在垂直于 X、Y 轴的纵轴 Z 轴方向没有压电效应,此轴称为光轴或中性轴。

假设从石英晶体上切下一片平行六面体,它的晶面分别平行于 X、Y、Z 轴,见图 43-56 c。当沿电轴(X 轴)方向受压缩力 F_X 时,则在与电轴垂直的平面上产生电荷

$$q_X = d_{11} F_X$$

式中, d_{11} 为压电系数(C/N); F_X 为 X 轴方向压缩力(N)。

可见 Q_K 正比于 F_X , 与晶片几何尺寸无关,电荷极性见图 43-57a。

若在 X 轴方向施加同样大小的拉力 F_X , 仍在 X 轴平面产生电荷为:

$$q_X = -d_{11} F_X$$

式中,各符号的物理意义同式(43-57),“-”号表示产生电荷的极性相反,见图 43-57。

若在 Y 方向施加压缩力 F_Y , 电荷仍出现在垂直于 X 轴平面上。

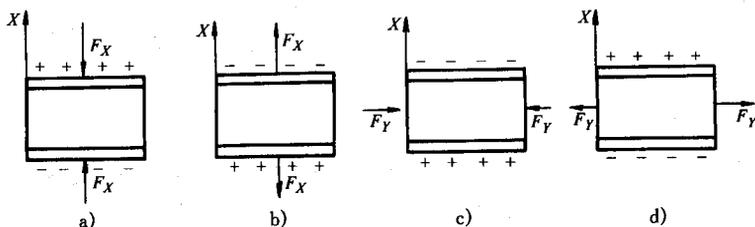


图 43-57 受力方向与电荷极性关系

$$q_x = d_{12} \frac{l}{h} F_y$$

式中 d_{12} 为 y 轴压电系数 (C/N); l 为晶片长度 (m); h 为晶片厚度 (m); 在石英轴对称条件下 $d_{12} = -d_{11}$ 。因此, 上式可写成:

$$q_x = -d_{11} \frac{l}{h} F_y$$

“-”表示沿 y 轴施加压缩力与沿 X 施加压缩力产生电荷极性是相反的, 见图 43-57c。

同理, 沿 y 轴方向施加拉力 F_y , 产生电荷为

$$q_x = d_{11} \frac{l}{h} F_y$$

电荷极性见图 43-57d。

由式可见, 沿 y 轴施加作用力时, 产生的电荷与晶片的几何尺寸有关。

压电陶瓷具有非常好的压电效应, 当它受到沿极化方向的作用力时, 将在垂直于极化方向的平面产生电荷:

$$q = d_{33} F$$

式中 d_{33} 为压电系数 (C/N); 厚度变形时为 d_{33} ; 长度变形时为 d_{31} 。压电陶瓷的压电系数是石英的压电系数的几十倍到上百倍。

二、压电材料

应用于压电式传感器的压电元件的材料一般有两类: 一为压电晶体, 例如石英晶体; 另一类为压电陶瓷, 例如钛酸钡、锆钛酸铅等。

(一) 压电晶体

1. 石英晶体 具有良好的压电效应, 压电系数 $d_{11} = 2.1 \times 10^{-12} \text{C/N}$; 其压电系数和介电常数温度稳定性相当良好, 机械强度高, 绝缘性能好。但是天然石英晶体资源较少, 价格昂贵, 常在标准传感器中使用。

2. 水溶性压电晶体 最早发现的是酒石酸钾钠, 压电系数 $d_{11} = 3 \times 10^{-9} \text{C/N}$, 灵敏度较高, 但其易受潮, 机械强度较低, 绝缘性能稍差。故只限于在室温和较干燥场合使用。

酒石酸钾钠属于单斜晶系晶体, 属于该类的晶体还有: 酒石酸乙二铵、酒石酸二钾、硫酸锂等。属于正方晶系的有: 磷酸二氢钾、磷酸二氢氨、砷酸二氢钾和砷酸二氢氨等。

(二) 压电陶瓷

将各组分按照一定的比例混合均匀后在高温中烧结而成压电陶瓷。然后在 $100 \sim 170^\circ\text{C}$ 下, 对两根电极的极化面加以高电压 ($1 \sim 4 \text{kV/mm}$) 进行极化, 使单晶排列整齐, 才具有压电特性。对压电陶瓷, 垂直于极化面的轴称为 X 轴, 而垂直于 X 轴为 Y 轴, 它没有 Z 轴。

压电陶瓷的种类繁多, 常用的有钛酸钡和锆钛酸铝压电陶瓷。

1. 钛酸钡 $d_{33} = 107 \times 10^{-12} \text{C/N}$, 可见压电系数是石英晶体的数十倍。有较强的机械强度, 介电常数较高, 绝缘性能良好, 性能稳定。因此得到广泛使用。

2. 锆钛酸铝 其压电系数 $d_{33} = (200 \sim 500) \times 10^{-12} \text{C/N}$,其机电参数随温度和时间等外界因素的变化很小,性能稳定,工作温度可达 200°C ,也是常用的压电陶瓷。

此外,还有铌酸盐系列和铈镁酸铝系列压电陶瓷等。

三、压电传感器的等效电路和测量电路

(一) 等效电路

压电转换元件受力作用时产生电荷,因此它相当于一个电荷发生器。当元件受力作用产生电荷时,我们可以把它看作为一个电容器,其容量为:

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{t} A$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$) ; ϵ_r 为压电材料的介电常数 ; A 为压电片面积 ; t 为压电片厚度 ; C_a 为压电元件的电容

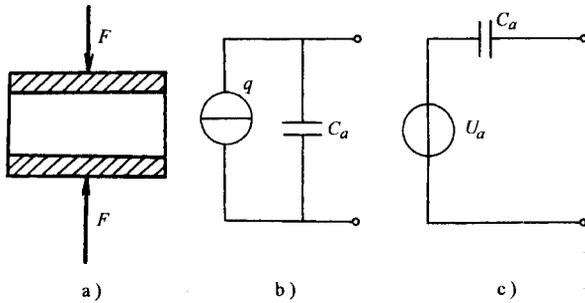


图 43-58 压电传感器的等效电路

a) 结构图 b) 等效电荷源 c) 等效电压源

因此,可以把压电传感器等效成一个电荷源与电容的并联,如图 43-58 所示。也可以等效成一个电压源与电容串联的电路,如图 4-108c 所示。根据等效电路,其开路电压为:

$$U_a = q / C_a$$

由于压电传感器本身具有泄漏电阻 R_a ,因此由外力 F 作用所产生的电荷不可能长期保留,它要经过 R_a 放电,其关系曲线见图 43-59。

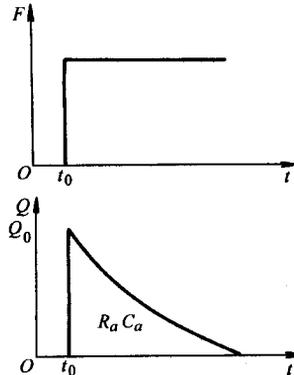


图 43-59 压力传感器电荷响应曲线

压电传感器工作时,它要与测量电路相连接,于是就必须要考虑电缆电容 C_c ,放大器输入电阻 R_i ,输入电容 C_i 的影响,因此可得到压电传感器完整的等效电路,如图 43-60 所示。

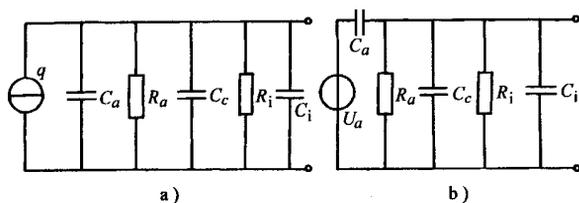


图 43-60 压电传感器完整的等效电路

a) 电荷源等效电路 b) 电压源等效电路

压电传感器的灵敏度有两种表示方法：一种是表示为单位输入量的电压值，称为电压灵敏度 k_u ；另一种是表示为单位输入量的电荷值，称电荷灵敏度 k_q ，它们的关系可以通过压电元件的电容 C_a 联系起来，即

$$k_u = \frac{k_q}{C_a}$$

(二) 测量电路

压电传感器本身的内阻很高，而输出的能量又微弱，为了提高测量精度减小误差，就必须设置前置放大器。前置放大器的作用就是将压电传感器的高阻抗输出变换成低阻抗输出，并将其微弱的输出信号加以适当放大。根据压电传感器的工作原理及等效电路，它的输出可以是电压信号也可以是电荷信号。因此，相应的前置放大器也有两种，即电压放大器与电荷放大器。

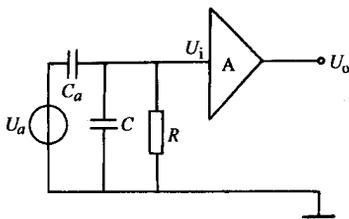


图 43-61 压电传感器及电压放大器等效电路

1. 电压放大器 压电传感器与电压放大器连接的等效电路，如图 43-61 所示。

图中等效电阻 $R = R_{0R_i}$ ，等效电容 $C = C_c + C_i$ 。

如果压电陶瓷元件受到交变力 $F = F_m \sin \omega t$ 的作用，则产生的电荷与电压均按正弦规律变化

$$q = d_{33} F = d_{33} F_m \sin \omega t = d_{33} F_m \sin \omega t$$

$$U = \frac{d_{33} F_m}{C_a} \sin \omega t$$

送到放大器输入端的电压为 U_i ，把它写成复数形式时，则为：

$$\dot{U} = d_{33} F \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_a + C)}$$

前置放大器的输入电压幅值为：

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_a + C)^2}}$$

输入电压与作用力的相位差为：

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan \omega R (C_a + C)$$

在理想情况下，传感器的绝缘电阻 R_{0a} 和放大器输入电阻 R_i 都为无穷大，极 R 也无限大，电荷没有泄漏，式可知，放大器输入电压（即传感器开路电压）的幅值为：

$$U_{am} = \frac{d_{33} F}{C_a + c}$$

这样,放大器的实际输入电压 U_{im} 与理想情况下的输入电压 U_{am} 之幅值比为:

$$\frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\omega R (C_a + C)}{\sqrt{1 + (\omega R)^2 (C_a + C)^2}}$$

令 $\omega_1 = \frac{1}{R(C_a + C)} = \frac{1}{\tau}$

式中, τ 为测量回路的时间常数 $\tau = R(C_a + C)$

式可分别定成如下形式:

$$\frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\frac{\omega}{\omega_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}}$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)$$

由此得到电压幅值比和相角与频率比的关系曲线,见图 43-62。

(1)由图可见当被测力 F_x 为静动力($\omega = 0$)或低频缓变信号($\omega \rightarrow 0$), $N_{im} = 0$ 或 $V_{im} \rightarrow 0$, 这说明压变物理量。这很容易理解,因为 R_a 和 R_i 不可能无穷大,电荷会通过 R_a 和 R_i 泄漏掉。

(2)当 $\omega/\omega_1 \gg 1$, 即 $\omega\tau \gg 1$ 时, U_{im} 随被测信号频率变化不大。当 $\omega/\omega_1 \geq 3$, 可近似看作 U_{im} 与被测信号频率 ω 无关。这说明测量回路时间常数 τ 一定的条件下,传感器的高频响应相当好。这是压电式传感器很突出的优点。

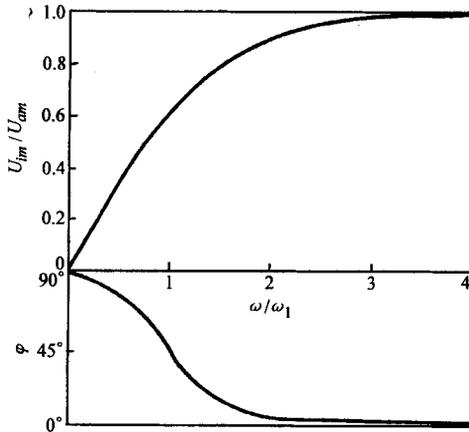


图 43-62 电压幅值比和相角与频率比的关系曲线

(3)当 $0 < \omega/\omega_1 < 3$ 时,随着被测量频率 ω 的减小,传感器的灵敏度明显下降。这说明压电传感器的低频响应差。为扩展传感器的频响范围,必须提高测量回路的时间常数 τ ,提高 τ 的惟一方法是提高放大器的输入电阻 R_i ,而不能增加电容,因为增加电容会减小传感器的灵敏度。由式可得传感器的灵敏度为:

$$k_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\frac{1}{(\omega R)^2} + (C_a + C)^2}}$$

因为 $\omega R \gg 1$, 传感器的灵敏度为:

$$k_u = \frac{d_{33}}{C_a + C} = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i}$$

上式表明,由于电缆电容 C_c 及放大器输入电容 C_i 的存在,使灵敏度减小。如果更换连接电缆,则必须重新校正灵敏度,以保证其测量精度。

2. 电荷放大器 压电传感器配用电压放大器时,其电压灵敏度随电缆的分布电容变化而变化,因此更换不同长度的电缆时要对灵敏度进行重新校正。而采用电荷放大器则免此麻烦。电荷放大器(又称冲击测量

放大器)实际上是一种具有深度负电容反馈的高增益运算放大器,它与电压传感器连接时的等效电路如图 43-63 所示。

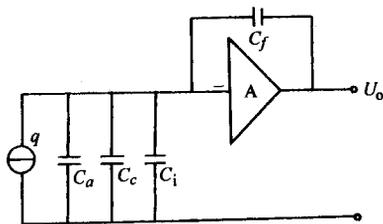


图 43-63 电荷放大器等效电路

图中,忽略了放大器的输入电阻 R_i 和传感器的漏阻 R_s 。由“虚地”原理可知,反馈电容 C_f 折合到放大器输入端的等效电容为:

$$C'_f = (1 + k)C_f$$

式中, k 为放大器的开环放大倍数。

这样, C_a 、 C_c 、 C_i 和 C'_f 四个电容并联,输出电压为:

$$U_o = \frac{-kq}{C_a + C_c + C_i + (1 + K)C_f}$$

只要开环放大倍数足够高,满足 $(1 + k)C_f \gg (C_a + C_c + C_i)$,则上式可简化为:

$$U_o = -\frac{q}{C_f}$$

式中“-”表示输出信号与输入信号反相。

式可见,输出电压 U_o 正比于输入电荷 q ,传感器的灵敏度与分布电容无关,因此连接电缆可长达数百米,甚至千米,灵敏度却无明显下降,显示了电荷放大器的突出优点。

必须指出,压电传感器的前置放大器,无论是电压放大器或电荷放大器都必须具有很高的输入阻抗,通常需达 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ 。高输入阻抗的运放种类很多。

四、压电传感器的应用

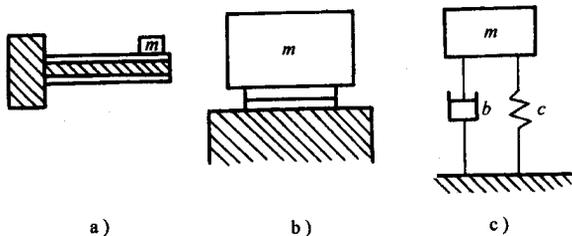


图 43-64 压电式加速传感器结构原理图

a)梁式 b)压缩式 c)等效图

(一)压电式加速度传感器

压电式加速度传感器由于具有良好的频率特性,量程大(能测 $0 \sim 10^5 g$ 的加速度),结构简单,工作可靠,使用方便等特点,故在振动和冲击测试技术中占主导地位,它约占各种振动、冲击传感器总数的 80% 以上。目前世界各国用作为加速量值传递标准的高、中频标准加速度传感器均为压电式传感器。目前压电式加速度传感器广泛地应用于航空、机械、电子、矿业等各个领域的振动、冲击的测试、信号分析、环境模拟实验、故

障诊断等。

压电加速度传感有圆片式、双晶片式、音叉式和膜盒式多种结构,但其基本工作原理相同,是典型的惯性式传感器,其结构原理及等效作用系统见图 34-64。

在压电加速度传感器中,压电片可等效为刚度为 c 的弹簧。工作质量块 m 的位移即弹簧的变形(弹簧的位移振幅 A),弹簧力 $F = cA$,它与被测加速度的关系为 $F = -ma$,这就是作用在压电片使之产生电荷的力,因此单个压电片表面电荷为:

$$q = d_{33}F = -d_{33}ma$$

从式可见,压电片表面电荷与加速度成正比。其电荷灵敏度为:

$$k_p = \frac{q}{a} = -d_{33}m$$

其电压灵敏度为:

$$k_u = \frac{d_{33}m}{C_a} = \frac{k_q}{C^a}$$

这就是压电式加速度传感器的测量原理。

图 43-65 为微振动测量仪电原理图。图中,压电加速度传感器选用 PV-96 型,其灵敏度为 $k_q = 10000\text{pC/g}$ ($1\text{g} = 9.8\text{m/s}^2$),即在 1g 加速度作用下产生 10000pC 的电荷,静电容 $C_a = 6000\text{pF}$;测量振动频率 $0.1 \sim 100\text{Hz}$ 。 IC_1 为电荷放大器, C_c 为引线电容。由式可知, IC_1 的输出电压为:

$$V_{o1} = \frac{10000 \times 10^{-12}\text{C}}{300 \times 10^{-12}\text{F}} = -33\text{V}$$

所以电荷放大器的灵敏度为:

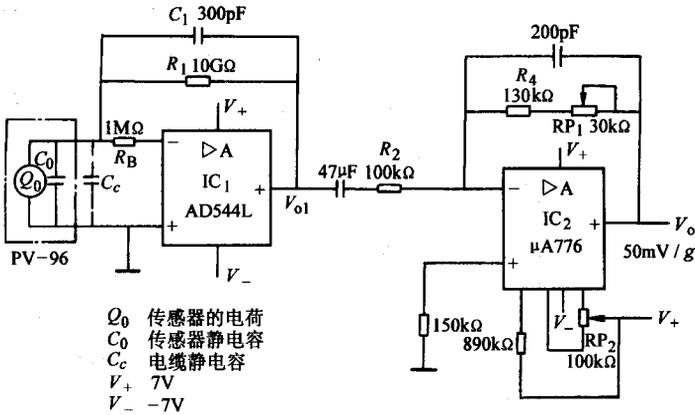


图 43-65 微振动测量仪电原理图

$$k_{ol} = \frac{V_{o1}}{g} = -\frac{33\text{V}}{\text{gal}} = -33.7\text{mV}(\text{gal})$$

式中 $1\text{gal} = 1/(980\text{g}) = 1\text{cm/s}^2$ 。

电荷放大器的频率响应由 R_1 、 C_1 决定

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 0.053\text{Hz} \approx 0.1\text{Hz}$$

R_B 为运放 IC_1 的保护电阻,避免因输入电压过高而损坏,且起到提高 IC_1 输入阻抗的作用。

IC_2 是反相放大器,其闭环增益为:

$$K_{F2} = -\frac{R_4 + RP_1}{R_2} = -1.48$$

调整 RP_1 可实现 $K_{F2} = 1.48$,是满度调整电位器,因此可求得测试仪的灵敏度为:

$$K_U = (-1.48) \times \frac{-33.7\text{mV}}{\text{gal}} = 50\text{mV}(\text{gal}) = 48.8\text{V/g}$$

本电路输出最大为 6V, 则测量上限为:

$$a_{max} = \frac{6V}{48.8V} = 0.12_{gal}$$

IC₂ 中电位器 RP₂ 的作用是调零。

IC₁ 和 IC₂ 的选择应注意选择低噪声运放, 而且具有低输入电压、低偏置和低失调漂移等特性。电容 C₁ 和 C₂ 的选择容量尽可能小和漏电流小。IC₁ 级应该用聚四氟乙烯支架绝缘子进行绝缘。

(二) 压电式力传感器

压电式力传感器具有频带宽、灵敏度高、线性度好、动态误差小的特点, 特别适用测量动态力。它可以用来测量发动机内部燃烧压力、真空度等动态和均布压力, 缺点是不适于测量长时间作用的静态力。

图 43-66 为电子气压表原理电路图。

天气变化与气压的变化密切相关, 气压升高预示天气变晴, 气压下降预示天气变阴或下雨。该电子气压表用 10 只 LED 指示气压值(从 96~105kPa), 另用三只 LED 指示气压变化的趋势。克服了传统玻璃管式指针气压表的许多缺点。

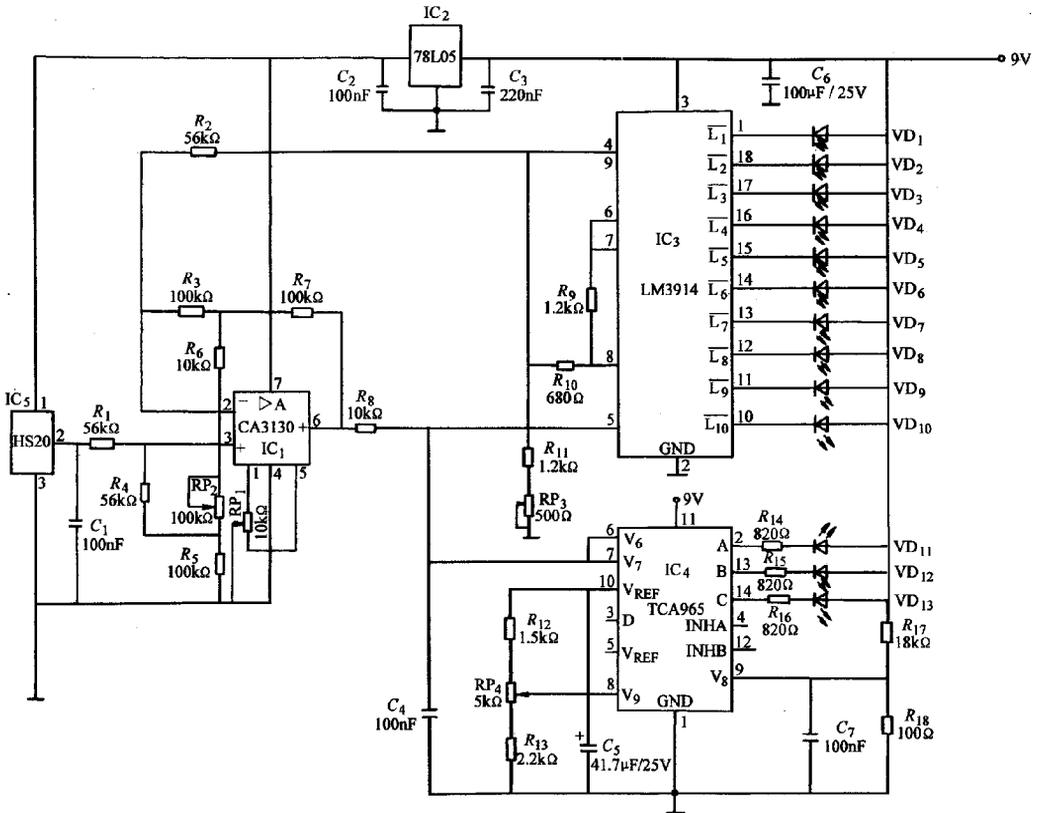


图 48-66 电子气压表电路图

该电子气压表选用 Bosch 公司生产的 HS20 型压电式压力传感器。该传感器内含高阻抗前置放大器。当气压从 96kPa 变化到 105kPa 时, 传感器输出电压从 2.125~2.400V, 且具有很好的线性度。该传感器是三端元件: 1 脚接 5VDC 电源, 3 脚参考地, 2 脚输出电压。该传感器的满度值为 200kPa。

78L05 为集成稳压块, 输出高稳定度 5V 电压给 HS20, 以克服因电压不稳定引起的测量误差。

IC₁ 为高输入阻抗放大器, BP₁ 为调零, RP₂ 为调整放大倍数。IC₁ 输出一路送给 IC₃ 显示气压值; 另一路送给 IC₄ 显示气压变化趋势。

IC₃ 是 LED 闪烁驱动器 LM3914, 其输出端 L₁~10 分别接发光二极管 VD₁~VD₁₀, 以指示气压值。VD₁~

VD₁₀旁边分别刻度 96 ~ 105kPa(标准气压为 101.3kPa), IC₃ 根据输入电平的高低仅驱动一只发光二极管发光,便可读出气压值。LM3914 内部有精密基准电压,并通过 R₂ 输出以稳定 IC₁ 反相输出端的基准电压。14 ~ L10 是恒流源驱动 LED,故不需限流电阻。调节 RP₃ 可校准气压刻度盘的读数。

IC₄ 是窗口鉴别器。RP₄ 用来调节窗口的中心电平,即气压稳定时(101.3kPa),调节 RP₄ 使发光二极管 VD₁₂刚好点亮。当气压升高时,VD₁₁点亮;当气压下降时,VD₁₃点亮。

第四节 光电式传感器测试

由于微电子技术、光电半导体技术、光导纤维技术和光栅技术的发展,光电传感器的应用与日俱增。它是将光信号转换成电信号的转换器,其基本结构见图 43-67。

一、光电效应及器件

光照射在某些物质上,物质的电子吸收光子的能量而释放电子的现象称为光电效应。释放的电子叫光电子,能产生光电效应的物质叫光电材料。光电效应一般有外光电效应、光导效应和光生伏特效应。根据光电效应制造的转换元件称为光电元件或光敏元件。

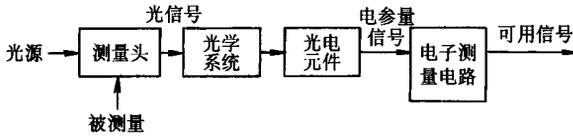


图 43-67 光电式传感器的基本结构

(一) 外光电效应及器件

光照射在光电材料上,材料表面的电子吸收光子的能量,若电子吸收的能量足够大时,电子会克服正离子的束缚脱离材料的表面而进入外界空间,从而改变了光电材料的导电性能,这种现象称为外光电效应。

根据爱因斯坦的光子假设,光子是运动着的粒子流,每种光子的能量为 $h\gamma$,其中 γ 为光子的频率, h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。可见,不同频率的光子具有不同的能量。假设光子的全部能量交给电子,电子能量将增加,增加的能量一部分用于克服正离子的束缚,另一部分转换成电子的动能。根据能量守恒定律

$$h\gamma = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

式中 m 为电子的质量, v 为电子的运动速度; A 为电子所做的逸出功。

式为爱因斯坦光电效应方程。由此可见

① 电子吸收的能量大于逸出功 A 时才能产生外光电效应。光子的能量恰等于逸出功,即

$$h\gamma_0 = A$$

式中 γ_0 为光电材料产生外光电效应的固有频率。

不同的物质具有不同的固有频率。光子的 γ 必须大于 γ_0 才能产生外光电效应,否则,无论光强如何和照射时间的长短如何,皆不能产生外光电效应。

② 光电子的初动能取决于光子频率,与光强无关。因为一定的物质,电子的逸出功是常数。

③ 单位时间内逸出的电子数量与光强度成正比,故光电流与光强成正比。

④ 电子一次性吸收光子的全部能量,无需能量存储时间,故光电子发射迅速。

根据外光电效应制造的光电元件有光电管、充气光电管和光电倍增管。

1. 光电管 光电管种类繁多,典型产品有真空光电管和充气光电管。由于真空光电管有稳定性好、惰性小和温度系数小等优点,故它是自动检测中常用的检测元件,其工作原理见图 43-68。

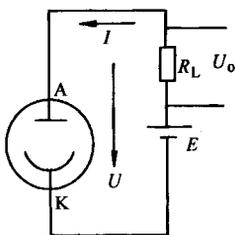


图 43-68 光电管的工作原理

由图可见,在真空玻璃管内密封有光电阳极 A 和光电阴极 K,阴极 K 表面涂有逸出功小的化合物,例如铯、氧化铯和铋化铯等。当光线照射在光电阴极 K 上时,电子从阴极表面逸出,并被光电阳极的正电场吸引,外电路产生光电流 I,在负载电阻 R_L 上的压降 U_o 为输出电压。

2. 光电倍增管 与光电管比较,光电倍增管有光电流放大作用,这是由于有 n 个对光电流进行放大的“倍增极”的缘故。“倍增极”或称为“次阴极”,它受到电子轰击后能发射更多的“次级电子”。各倍增极上顺次加上愈来愈高的正电压,使得前级的次电子加速轰击下一倍增极,见图 43-69。

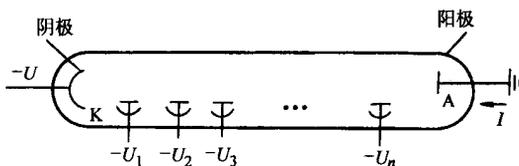


图 43-69 光电倍增管的工作原理

$$|U| > |U_1| > |U_2| > \dots > |U_n|$$

设阴极 K 发射 δ 个电子,则第一倍增极发射 δ^2 个次电子,那么第 n 个倍增极发射 δ^n 个次电子,则阳极 A 收集到的电子数为 δ^n 。例如 $\delta = 4, n = 10$,则光电倍增管的放大倍数 $K = 4^{10} \approx 10^6$,可见,其放大倍数相当高,即使极微弱的光照也能对外电路提供较大的电流。

光电倍增管的主要参数:

(1) 倍增系数

$$M = (C' \delta)^n = C \delta^n$$

式中, C' 为各次阴极的电子收集率; C 为总的电子收集率; δ 为各阴极的电子倍增系数。

(2) 阴极灵敏度和总灵敏度 每一个光子在阴极上能发射的平均光电子数,称为阴极灵敏度。每一个光子激发阴极后,在阳极上能收集到的平均电子数,称为总的灵敏度。

由于光电倍增管的灵敏度很高,其最高灵敏度可达 $10A/lm$,因此不能受强光,否则容易损坏。

(3) 暗电流 不受光照时,加上电压,此时的阳极电流,称为暗电流。这是由于热激发的缘故。暗电流随着温度的升高而增大。

(二) 光导效应及器件

绝大多数高电阻率的半导体,当受光照射时,吸收光子能量,其电阻率降低的导电现象称为光导效应,它属于内光电效应。

光照某些半导体时,若光子的能量大于半导体禁带的能级宽度,则电子从价带跃迁到导带,形成自由电子,同时,价带留下相应的空穴。电子、空穴仍留在半导体内,并参与导电,在外电场作用下形成光电流。

产生光导效应的条件是光子的能量必须大于半导体禁带的能级宽度,因此每一种半导体皆有其固有入射光频率。

除金属外,多数绝缘体和半导体都有光导效应,半导体尤为显著。根据光导效应制造的光电元件有光电电阻和光导管,以光电阻的应用较为广泛。

当光照射在光电阻上时,其导电性能增加,电阻值下降,光强度愈强,其阻值愈小;若停止光照,其阻值恢复到原始值。

光电阻的主要参数:

(1) 暗电阻和亮电阻 在一定温度下,无光照时的零功率电阻称为暗电阻,暗电阻比较大。在一定温度下,受光照时的零功率电阻称为亮电阻,亮电阻比较小。暗电阻与亮电阻之比的范围为 10~1000 之间。

(2) 暗电流与亮电流 在一定外加电压下,流过暗电阻之电流称为暗电流,通常暗电流很小。在一定外加电压下,流过亮电阻的电流,称为亮电流,通常亮电流比较大。

(3) 光电流 亮电流与暗电流之差称为光电流。

(4) 灵敏度 无光照时的阻值与受光照时的阻值的相对变化量,称为光电阻的灵敏度。灵敏度通常在 $10^2 \sim 10^6$ 之间。

(三) 光生伏特效应及器件

半导体受光照射产生电动势的现象称为光生伏特效应。据此效应制造的光电器件有光电池、光电二极管、光电三极管、光控晶闸管和光耦合器等。

1. 光电池 它的工作原理见图 43-70a。在 N 型半导体上扩散一个 P 区,两交界面上形成 PN 结。当光线照射于 P 区时,若光子的能量大于半导体禁带的能级宽度,在 P 区表面激发电子—空穴对。P 区表面电子—空穴对的浓度最大,越向 PN 结浓度愈小,因此,电子空穴对向 PN 结扩散。若电子空穴对到达 PN 结前来不及复合,在 PN 结势垒电场的作用下,将电子加速推向 N 区,空穴留在 P 区。因此, N 区有电子积累, P 区缺少电子,从而形成电动势。在外电路接通情况下,向负载电阻 R_L 源源不断地提供电流。

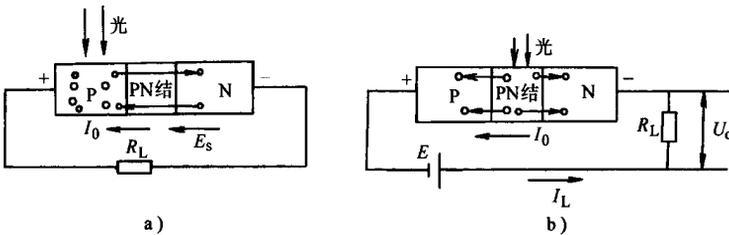


图 43-70 光电池和光敏二极管的工作原理

a) 光电池 b) 光敏二极管

根据材料不同,有硅光电池、硒光电池、砷化镓光电池和锗光电池。前三种得到广泛的使用。

2. 光电二极管 其结构和工作原理与光电池相似,见图 43-70b。光电二极管的受光点在 PN 结上。无光照时,即使有 PN 结势垒电场和外电场的作用,其电流 I_0 几乎为零;有光照时,在 PN 结产生电子空穴对,在 PN 结势垒电场作用下,将电子拉向 N 区,而空穴推向 P 区,从而形成电流 I_L ,其方向与光电流 I_0 一致。 I_L 于负载电阻 R_L 上的压降即为输出电压 U_o 。

光电二极管的型号有 2GU 和 2DU,前者多为两根引出脚,后者多为三根引出脚,使用时,将称为环极的引出脚接地,以提高其抗干扰能力。

3. 光电三极管 光电三极管的电符号及工作原理见图 43-71。与光电二极管比较,光电三极管有两个 PN 结。当光照射在基—集极的 PN 结上时,则产生电子—空穴对。在 PN 结势垒电场的作用下,电子向 N 区(集电极)移动,空穴向 P 区(基极)移动,从而形成光电流 I_b 。空穴在基区的积累,提高了基—射结的偏置,发射极的多数载流子穿过很薄的基区向集电极移动,在外电场作用下形成集电极电流 I_c , $I_c = \beta I_b$,其中 β 为光电三极管的电流放大倍数。可见,光电三极管的灵敏度较光电二极管的高。

4. 光控晶体闸流管 光控晶体闸流管是近几年来发展的光电半导体元件,代号为 GSCR,其结构和工作原理见图 43-72。

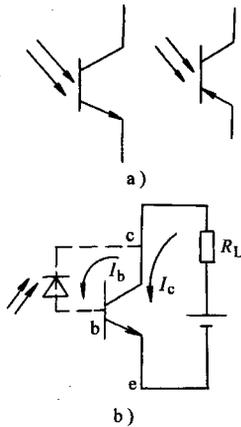


图 43-71 电符号及工作原理
a)电符号 b)工作原理

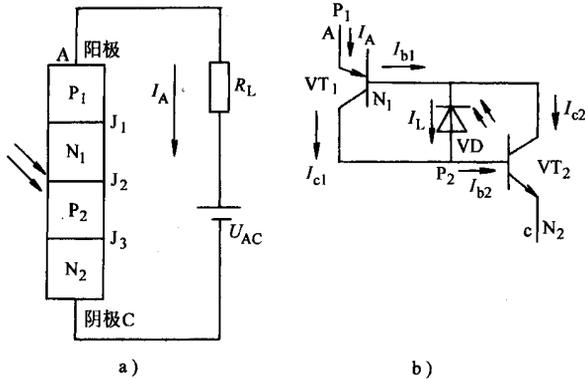


图 43-72 结构及工作原理
a)结构 b)工作原理

由图可见,光控晶闸管是PNPN四层元件。阳极加正电压,阴极加负电压时, J_2 结处于反向偏置。 N_1P_2 可视为反偏光电二极管VD; $P_1N_1P_2$ 可视为PNP三极管 VT_1 ; $N_1P_2N_2$ 可视为NPN三极管 VT_2 。VD、 VT_1 和 VT_2 的等效电路见图43-72b。设 VT_1 和 VT_2 的电流放大倍数为 β_1 和 β_2 。无光照时VD反偏, I_L 很小,故 I_{b1} 和 I_{b2} 很小,故 I_A 很小。当光照射 J_2 结时, I_L 增加, I_{b1} 增加, I_{c1} 增加;从而引起 I_{b2} 增加, I_{c2} 增加, I_{c2} 的增加进一步引起 I_A 、 I_{c1} 进一步增加,形成正反馈过程。由此可见,光控晶闸管的 J_2 结一旦受到能产生光伏效应的光照射,光控晶闸管就全导通,其电流 I_A 为:

$$I_A = \beta_1 \beta_2 I_L$$

光控晶闸管一旦导通,即使撤去光源,它仍能维持导通状态,除非 U_{AC} 反向或小于光控晶闸管的阈值电压时,光控晶闸管才会截止。

5. 光耦合器 它是近几年来发展起来的新型光电半导体器件,其工作原理与输入输出特性,见图43-73。

发光二极管具有单向导电特性。当发光二极管VD加上正向电压后,其PN结势垒电场降低,载流子的扩散运动大于漂移运动,P区的空穴注入N区,N区的电子注入P区。注入的电子和空穴相遇产生复合而释放能量,释放的能量主要以单色光出现。单色光被光敏三极管接收,致使 I_c 增加, I_c 在 R_L 上的压降 U_o 即为输出电压。

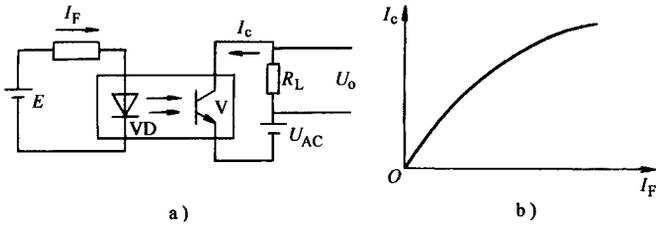


图 43-73 工作原理与输入输出特性

a)工作原理 b)输入输出特性

光耦合器的输入输出特性是非线性的,见图 43-73b,使用时要加以注意。

二、光电器件的特性

了解光电器件的特性对使用光电器件是极为重要的。

(一)光照特性

光照特性是指光电器件外加电压一定时,光电流 I 与入射的光照度之间的关系。

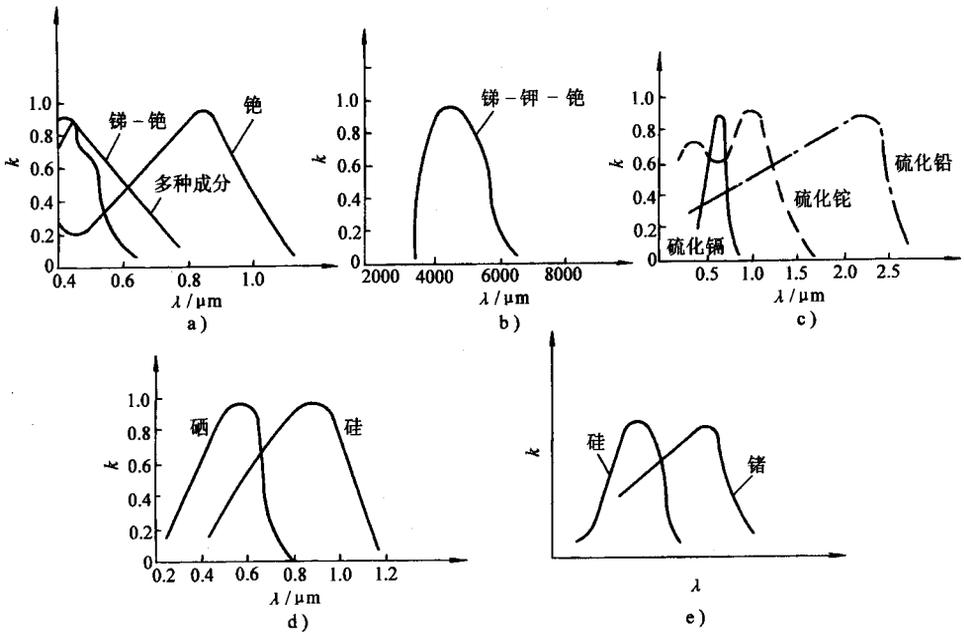


图 43-74 光电特性与光照特性

a)光电管 b)光电倍增管 c)光电阻 d)硅光电池 e)光电三极管 f)光电二极管

各种光电元件的光照特性,见图 43-74。其中,图 a、b 为光电管和光电倍增管的光照特性,图 c、d、e 和 f 分别为光电阻、硅光电池、光电三极管和光电二极管的光照特性。

由于真空光电管的阳极电流仅取决于阴极发射的电子,故其光照特性是线性的,见图 43-74a。

光电倍增管的光照特性在相当宽的范围内保持线性。而光通量增加到一定数值后,特性曲线明显偏离线性。这是由于后几级倍增极不能全部收集前一级的次电子的缘故。因此灵敏度有所降低,见图 43-74b。

光电阻的光照特性是非线性的,见图 43-74c。故它不宜作为线性检测元件,宜作开关元件用于自动控制系统中。

光电池的光照特性见图 43-74d。其开路电压在很窄的范围内保持线性,当照度增加到一定程度时,光生电动势削弱了 PN 结势垒电场的作用,故光生电动势趋于恒定。短路电流在很宽的范围内保持良好的线性,外电阻愈小,光电流与照度之间的线性度愈好。因此,利用光电池作为检测元件时,应以电流源形式使用。

硅光电二极管的光照特性线性度较好,见图 43-74e。硅光电二极管的光照特性在弱光时线性度较差。

(二) 光谱特性

光电元件外加电压一定时,其输出电流与入射单色光的波长之间的函数关系,即 $I = f(\lambda)$,称为光电元件的光谱特性。各种光电元件的光谱特性见图 43-75。图中,横坐标为入射光的波长 λ ,纵坐标为相对灵敏度 $k = I/I_{\max}$ 。

由图可见,不同材料制造的光电元件其光谱特性差别很大,某种材料制造的光电元件只对某一波长的入射光具有最高的灵敏度。因此,选择光电元件时,要考虑光源的波长,或者选择光源时,要同时考虑光电元件的峰值波长,以得到最高的灵敏度。

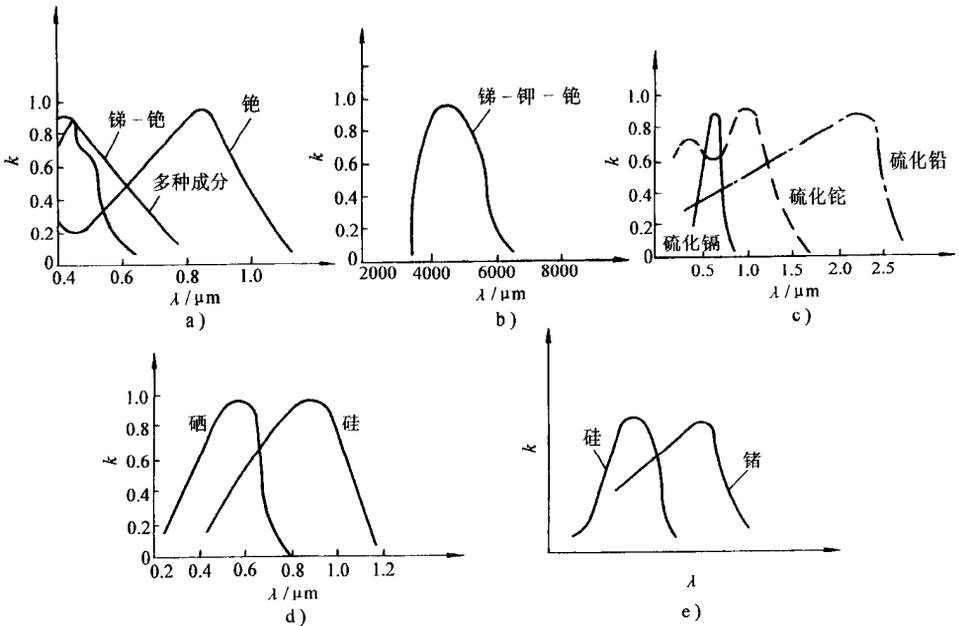


图 43-75 光电元件的光谱特性

a)真空光电管 b)光电倍增管 c)光电阻 d)光电池 e)光电三极管

(三) 伏安特性

伏安特性是指在给定的光通量或照度下,光电流与外加电压之间的关系,即 $I = f(U)$ 。各种元件的伏安特性见图 43-76。

由图可见,真空光电管、光电倍增管和光电三极管的伏安特性与晶体三极管的伏安特性相似,仅以入射光的强度代替晶体三极管的基极电流 I_b 而已,见图 43-76a、b、e。

图 43-76c 为光电阻的伏安特性,可见,有光照与无光照的伏安特性差别较大。在光照情况下,若电压升高到某一数值,光电阻会产生“击穿”现象(即烧毁)。

由图 43-76d 可见,光电池的负载电阻 $R_L < 0.5k\Omega$ 时,伏安特性的线性度较好, R_L 增加,线性度变差。

(四) 频率特性

频率特性是指外加电压和入射光强一定时,光电流 I 与入射光的调制频率 f 之间的关系,即 $I = \varphi(f)$ 。

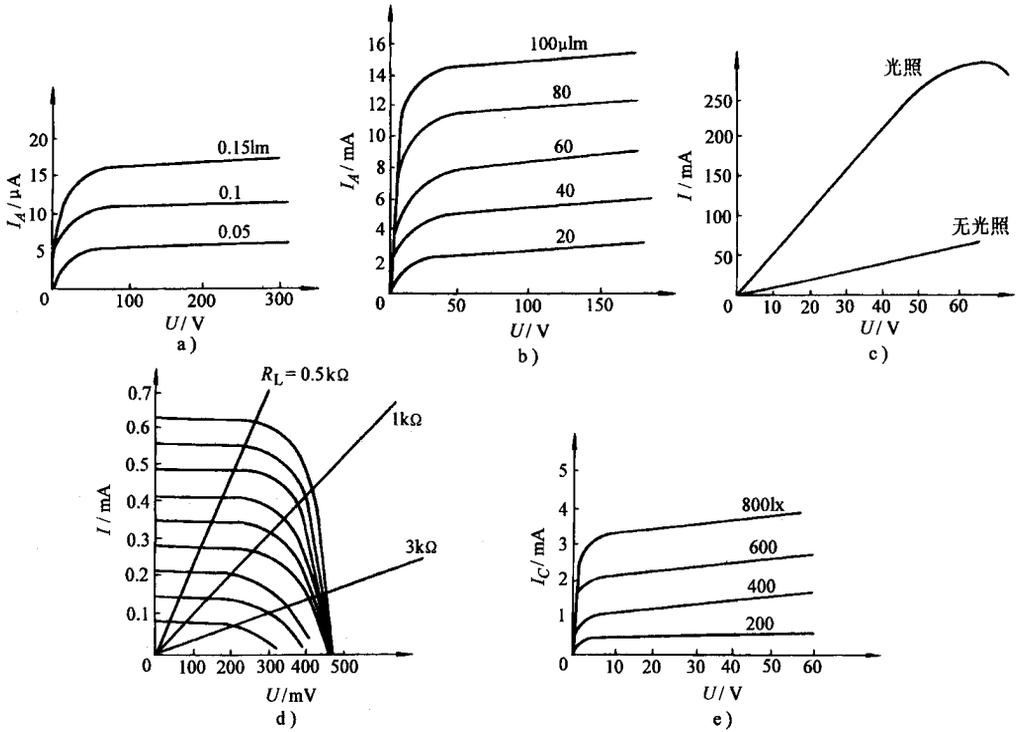


图 43-76 伏安特性

a)真空光电管 b)光电倍增管 c)光电阻 d)光电池 e)光电三极管

各种光电元件的频率特性见图 43-77。图中 横坐标为入射光的调制频率 纵坐标为光电流的相对灵敏度 $k = I/I_{max}$ 。

由图可见 利用外光电效应原理制造的光电元件的频率特性较好 例如氧化铯真空光电管其最高调制频率可达 1MHz 见图 43-77a。利用光生伏特效应原理制造的光电元件的频率特性次之 见图 43-77c、d。不同材料制成的同一类光电元件 其频率特性相差甚远。光电二极管的频率特性较光电三极管的频率特性好 这是由于光电三极管的基射结存在结电容和间载流子穿越基区需要时间的缘故的缘故。利用内光电效应原理制造的光电元件的频率特性最差 见图 43-77b 这是由于俘获载流子和释放电荷都需要一定时间的缘故。

在应用角光电元件时 必须考虑光电元件的频率特性与调制光的频率 否则会引起较大的动态误差。

(五) 温度特性

光电元件为半导体器件 其特性受温度的影响较大。各种光电元件的温度特性见图 43-78。图 43-78a 为硅光电池的温度特性 由图可见 开路电压随温度的升高迅速下降 短路电流随温度的升高而增加很小。图 43-78b 为光电阻的光谱温度特性 随着温度的升高 其光谱峰值向短波方向移动。图 43-78c 为光电三极管的温度特性 暗电流随温度的升高增加很快 这是由于热激发的缘故。光电流随温度的升高却增加很少 主要由光激发的电流决定。

综上所述 光电元件的特性受温度的影响比较严重 在使用中必须采取温度补偿或恒温措施 以保证足够的精确度。

三、光电元件信号的检测方法

1. 透射式 恒光源发出的光通量为 Φ_0 经被测物质后衰减为 Φ 其关系为：

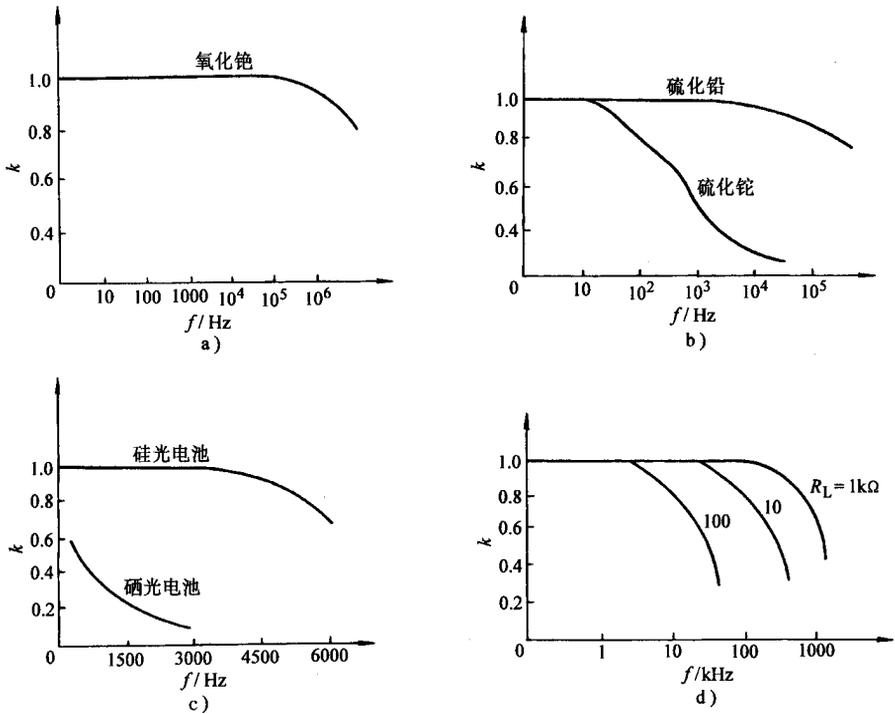


图 43-77 频率特性

a)真空光电管 b)光电阻 c)光电池 d)光电三极管

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu d}$$

式中 μ 为被测对象的吸收系数; d 为被测对象的厚度。

光电元件将光通量 Φ 转换成光电流。此法可用于检测流体和固体的透明度、混浊度、厚度及吸收系数等,见图 43-79a。

2. 反射式 恒光源的光通量 Φ_0 经被测对象后损失了部分光通量,到达光电元件的光通量为 Φ ,见图 43-79b。此法可用于测量物体表面的粗糙度、反射率及转速等。

3. 辐射式 见图 43-79c。被测对象辐射的光通量 Φ_0 投射到光电元件上,转换成光电流。此法可用于测量温度及与温度有关的参数。例如光电高温计和光电比色高温计等是根据该原理测温的。

4. 遮挡式 恒光源的光通量 Φ_0 被测对象遮挡了一部分,到达光电元件的光通量为 Φ ,见图 43-79d。此法可用于测量物体的几何尺寸、振动、位移和膨胀系数等。

5. 开关式 原理与遮挡式相似。光源的连续光被测物体调制为脉冲光投射到光电元件上,转换成电流或电压脉冲。例如,计算机的光电输入、产品计量、转速和开关量等均用此法。

四、光电传感器的应用

光电传感器可用于测量机械量、热工量和成分量等,在工程上得到广泛的应用。

1. 光电测厚仪 光电测厚仪的原理见图 43-80。

由图可见,它采用透射式信号检测方法。对式两边取对数得:

$$\ln \Phi = \ln \Phi_0 - \mu d$$

$$d = \frac{1}{\mu} (\ln \Phi_0 - \ln \Phi)$$

故

上式即为光电测厚仪的测厚基本方程。

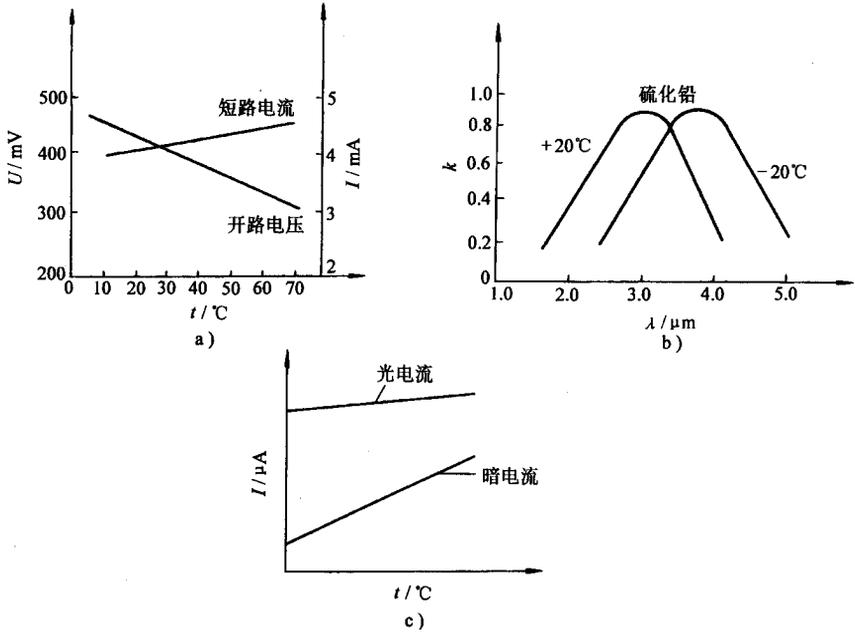


图 43-78 温度特性

a) 光电池 b) 光电阻的光谱温度特性 c) 光电三极管

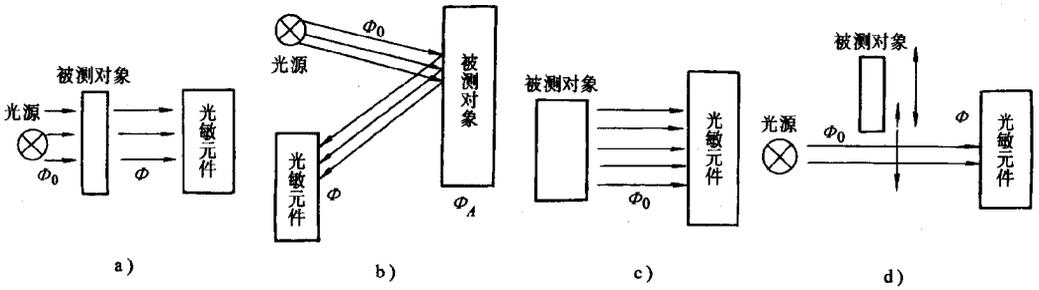


图 43-79 光电元件的信号检测方法

a) 透射式 b) 反射式 c) 辐射式 d) 遮挡式

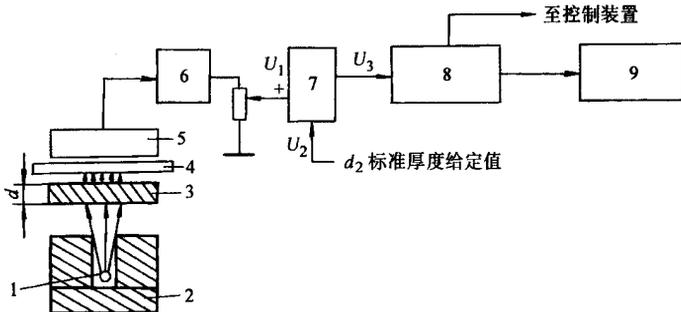


图 43-80 光电测厚仪的原理

1—放射源 2—保护罐 3—被测物 4—闪烁片 5—光电倍增管
 6—测量电路 7—差值放大器 8— $\frac{1}{2}$ 数字电压板 9—LED显示器

放射源辐射 α 、 β 或 γ 射线 其恒强度为 Φ_0 经被测物衰减为 Φ 射线经闪烁片转换成光子 光子在光电倍增管中转换成与之对应的光电流或光电压 经测量电路转换成电压 U_1 , U_1 与代表标准厚度 d_2 的标准电压 U_2 在差值放大器中进行比较 其差值电压 U_3 与被测厚度和标准厚度之差 $\Delta d = (d_1 - d_2)$ 成正比。 U_3 经 31/2 位数字电压板转换成数字量供 LED 显示器显示被测厚度与标准厚度之偏差值。

由式可见 厚度 d 与射线强度间为非线性的 因此 在测量电路中应进行线性化处理。

此外 数字信号可送到计算机等控制装置对被测厚度进行自动控制。

2. 电力系统自动并网装置 发电机投入电网运行常采用准同步投运法。准同步投运法必须满足：①三相相序一致；②频率一致；③相位一致；④电压幅值相等。其中第一个条件在系统设计时已经满足。后三个条件必须同时满足才能并网，可见，人工并网比较困难，采用光电自动并网装置比较容易实现。该装置的原理见图 43-81。

本装置采用光电遮挡式检测原理。在电压表 V_A 、 V_B 和 V_C 零刻度线处钻一小孔，于指针两侧安装小灯泡和光电元件。当 V_A 、 V_B 、 V_C 的指针均处于零刻度线（说明发电机端电压和电网电压均相等）时，指针遮挡射向光电元件的光线，控制电路自动并网，见图 43-81a。

光电控制线路见图 43-81b。发电机起动后，合上开关 $S_2 \sim S_4$ 和 S_{1-1} 、 S_{1-2} 装置正常工作。若 V_A 、 V_B 和 V_C 指针均不处于零刻度线（或其中有一电压表指针不处于零刻度线），光电阻 $R'_1 \sim R'_3$ 均受光（或其中一个光电阻受光）， $V_1 \sim V_6$ 均导通，继电器 $K_1 \sim K_3$ 线圈带电，其常闭触点 K_{11} 、 K_{21} 和 K_{31} 断开，电磁起动器 KM 失电，常开触点 KM 断开，不能并网。若电压表 V_A 、 V_B 和 V_C 均指在零刻度线， $R'_1 \sim R'_3$ 均不受光， $V_1 \sim V_6$ 均截止， $K_1 \sim K_3$ 均失电， K_{11} 、 K_{21} 和 K_{31} 闭合，电磁起动器 KM 带电，其常开触点 KM 闭合，从而实现自动并网。

3. 光电液位控制装置 光电液位控制原理见图 43-82。

由图 43-82a 可见，液位低于探头 A 和高于探头 B 时，由于浮球对光线的遮挡作用，均产生相应的控制作用，自动控制液位处于 A、B 探头之间。

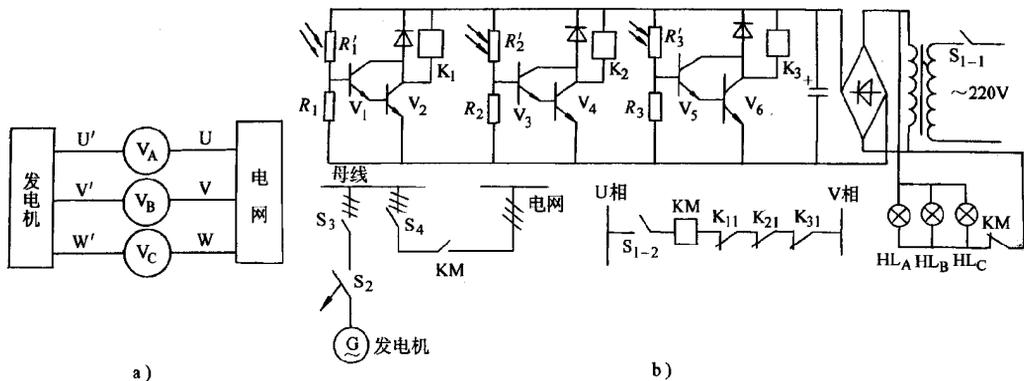


图 43-81 发电机自动并网装置

a)原理示意图 b)光电控制线路

合上开关 Q 和 S，由于 K_2 常开，电磁起动器 KS 不带电， $K_{S1} \sim K_{S3}$ 断开，即使液位低于 A 探头，电动机仍不能起动。

按下起动按钮 SB，+12V 在 R_2 上的压降导致 A_4 输出低电平，继电器 K 带电，触点 K_2 和 K_1 闭合， $K_{S1} \sim K_{S3}$ 闭合，电动机起动泵液。此时 VD_B 受光，由于 K_1 的自保持作用，维持 U_4 为低电平，继续泵液。

随着时间的推移，液位上升。当液位上升到 A 探头位置时， VD_A 无光照而截止， U_2 为低电平， VD 导通，仍能维持 U_4 为低电平，继续泵液。

当液位上升到 B 探头位置时，由于浮球的挡光作用， VD_B 截止， U_4 为高电子，继电器 K 失电，KS 失电， $K_{S1} \sim K_{S3}$ 断开，停止泵液。

液位处于 A、B 探头间时，不产生控制动作。只有液位下降到 A 探头位置时，浮球挡光， VD_A 由导通变截止， U_2 为低电平，致使 U_4 为低电平，K 带电， K_2 闭合，KS 带电，起动电机泵液。

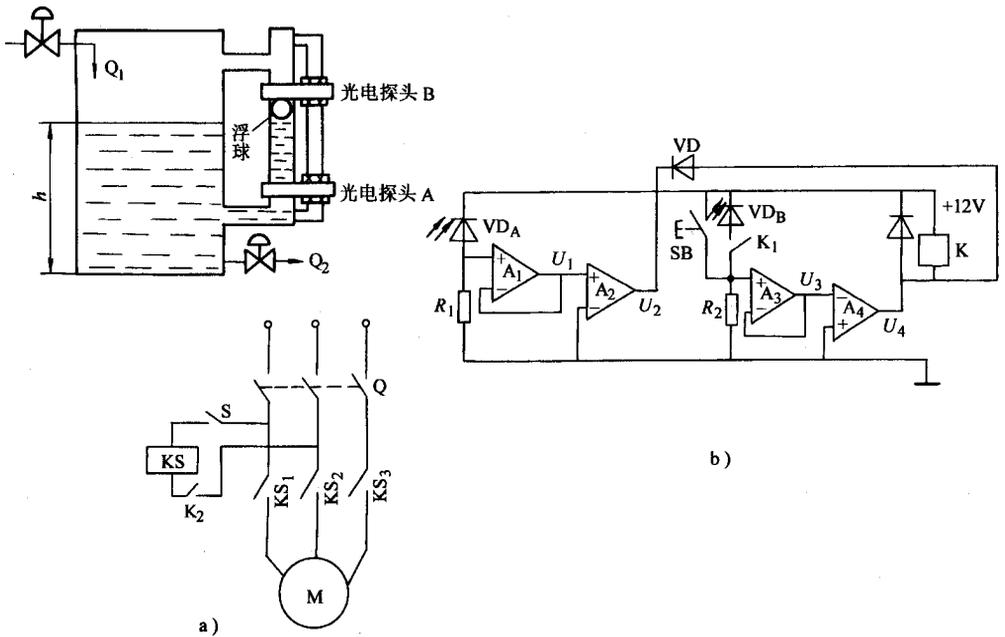


图 43-82 光电液位控制原理

a) 继电器控制示意图 b) 控制线路

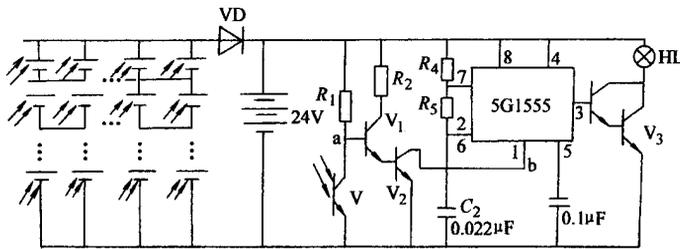


图 43-83 光电自动航标灯的工作原理

4. 光电自动航标灯 工作原理见图 43-83。图由光电池组和镍镉蓄电池组分别供电。光电三极管 V 为控制元件。白天阳光充足时，光电池组向镍镉蓄电池组充电，此时 V 饱和导通，a 点为低电平，b 点为高电平，5G555 和 R、C 元件组成的振荡器停振，航标灯 HL 熄灭。晚上或白天光线不足，V 截止，a 点为高电平，b 点为低电平，接通 5G555 之电源，振荡器输出一定频率的方脉冲，经复合管 V₃ 驱动 HL 闪烁。

5. 光电数字转速表 光电数字转速表的工作原理见图 43-84。

图 a 是在电动机的转轴上涂上 n 条黑白相间的条纹，电动机转动时，反光与不反光交替出现，电动机每转一周，光电元件接收 n 个反射光脉冲，并转换成 n 个电脉冲，经放大整形输出一系列方波脉冲，由数字式频率计测量出电动机的转速。

图 b 是在电动机轴上固定一个调制盘，将发光二极管的恒定光调制成随时间变化的调制光。例如，在调制盘上以一定的角度留 6 个遮光齿，则在 10s 的计数值上就可读出每分钟的转速。若在调制盘上开 60 个小孔，则在 1s 内的计数值，就能直接读出每分钟的转速。

6. 数字照度仪 图 43-85 为数字照度仪的电原理图。

本照度仪的照度单位用勒克斯 (lx)，1 勒克斯等于 1 流明 (lm) 的光通量均匀照在 1m² 表面上所产生的照度。本仪器的量程分二档，一档满度值 200lx，另一档满度值为 2000lx，用开关 S_{1a} 来切换。

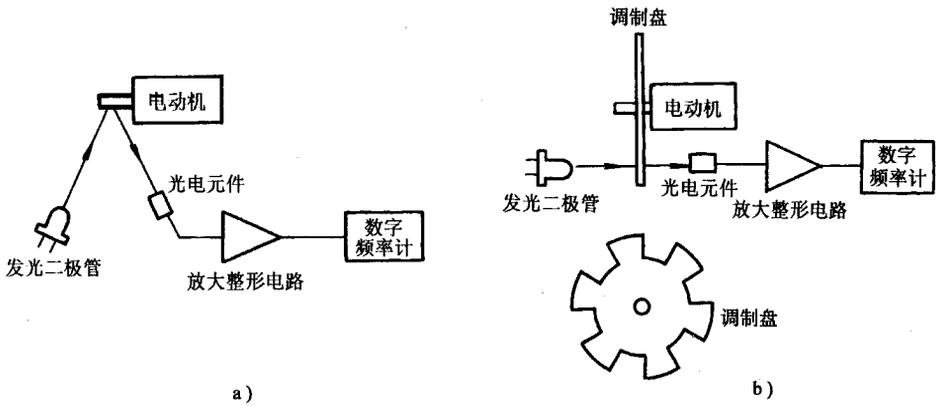


图 43-84 光电数字转速表工作原理

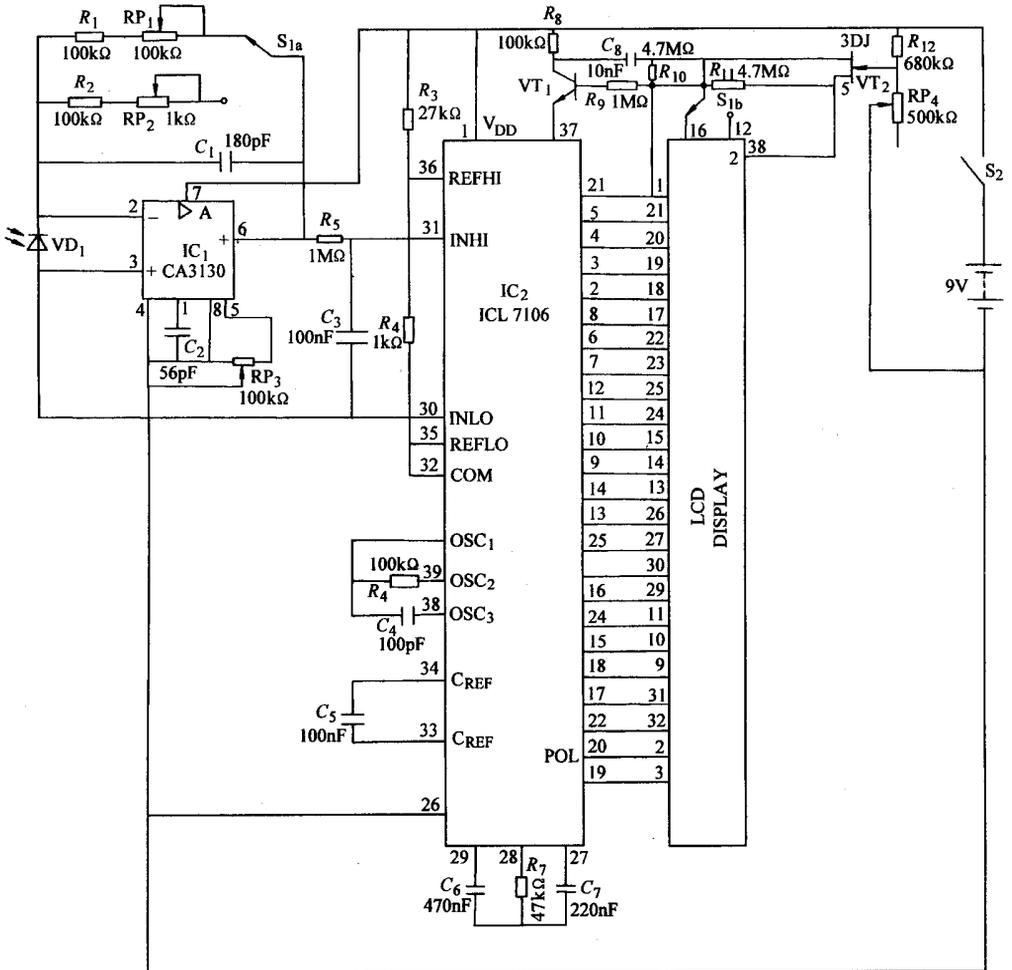


图 43-85 数字照度仪的电原理图

照度检测元件用光敏二极管 VD_1 ,其峰值波长在 $5 \sim 6\mu\text{m}$ 之间,测量结果才与人感觉的照度相吻合。当光照射在光电二极管 VD_1 上时,它将光信号转换成电信号,电信号的大小随光的强弱成比例。

高输入阻抗运放 IC_1 (CA3130) 组成光电变换电路。它把 VD_1 光电流的变化转换成电压的变化,对电信号进行整形、放大、滤波,并变成稳定的输出电压。 C_1 与运放 IC_1 组成有源滤波器;当 S_{1a} 置于 $0 \sim 200\text{lX}$ 档时,调整 RP_1 便调整了该级的增益;当 S_{1a} 置于 $0 \sim 2000\text{lX}$ 档时,调整 RP_2 便调整了该级的增益。可见 RP_1 和 RP_2 为满度调节电位器。 RP_3 调整零点。

A/D 转换器选用带有 BCD 七段译码和驱动 LCD 的 31/2 位的 ICL7106。7106 的参考电压 U_{REF} 是固定的,其 U_{DI} (1 脚) 与 COM (32 脚) 之间的电压为 2.8V ,这是 7106 内部电路设计时定下来的。因此

$$U_{\text{REF}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times 2.8\text{V} = \frac{1}{27 + 1} \times 2.8\text{V} = 100\text{mV}$$

也就是说由 7106 组成的电压表的基本量程为 200mV 。可将 R_4 改为可变电阻,以改变 U_{REF} ,达到调节量程的目的。

本照度仪用 9V 干电池作电源,当电池电压下降到 7.5V 时,测量误差太大,因此采用电池电压指示装置。它由场效应晶体管 VT_2 来完成。所选用的液晶显示器带有“←”符号标记。调节电位器 RP_4 ,使得电池电压为 7.5V 时, VT_2 导通,点亮“←”标记。

VT_1 显示 LCD 的小数点,小数点定于十分位。

第五节 激光式传感器测试

激光技术是 20 世纪 60 年代迅速发展起来的新技术,在各行各业获得极为广泛的应用。

一、激光发射原理

(一) 激光的形成

正常分布下的原子,多处于低能级 E_1 ,除非受外界作用,原子将长期保持这一稳定状态。若在外界光子作用下,原子吸收光子的能量 $h\lambda$,只要吸收的能量足够大,原子就从低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 ,这一过程称为激发,见图 43-86a。激发过程应满足

$$E = h\lambda = E_2 - E_1$$

式中, E 为光子能量。

处于高能级 E_2 的原子,在外界光子的诱发下,会从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ,释放能量而发射与外界诱发的光子性质完全相同的光子,简单地说,入射一个光子放大为两个光子,这一过程称为光子的受激辐射,见图 43-86b。

当然,不是所有外来光都能产生受激辐射的,因为一束光进入介质后,由于光和物质的相互作用,在介质中同时引起两个过程——吸收和受激辐射过程。若因介质吸收而失去的光子数多于因受激而补充的光子数,光强度会逐渐变弱;若受激辐射而补充的光子数多于介质吸收而减小的光子数,则进入介质的光愈传递愈强,形成受激辐射光源。

为了形成受激辐射,必须设法使某一高能级的原子数多于低能级的原子数。原子数的这种分布称为粒子的反转分布。能形成粒子反转分布的工作介质称为增益介质。

光通过增益介质,由于受激辐射的光子数多于吸收而损失的光子数而使光子数不断增加,强度不断增强,这一过程称为光放大。

有了受激辐射和光放大,并不意味着就产生激光。因为受激辐射和放大的光还必须多次放大重复,以提

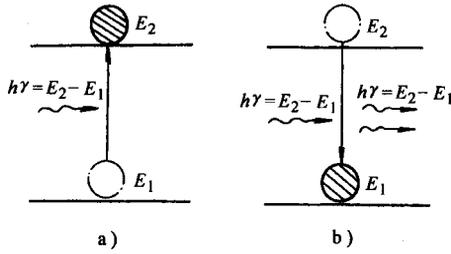


图 43-86 激发与受激辐射

a) 激发过程 b) 受激辐射过程

高光的密度。光学谐振腔就是用以实现使受激放大的光多次放大重复,并控制光束传播方向的装置。

综上所述,产生激光必须满足下列四个条件:

1. 外光子能引起增益介质的受激放大;
2. 受激放大多次重复;

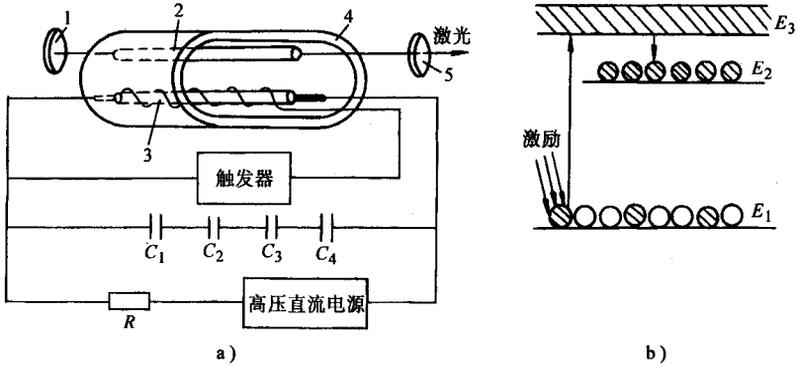


图 43-87 红宝石激光器的原理

a) 结构图 b) 能级图

1—全反射镜 2—红宝石棒 3—脉冲氙灯 4—聚光器 5—部分反射镜

3. 受激放大的光沿某一方向传播;
4. 受激放大后,光能密度不断增加。

(二) 激光器的类型及其工作原理

红宝石激光器的工作原理见图 43-87。

在椭圆形聚光器 4 内密封红宝石棒 2 和脉冲氙灯 3。红宝石棒的基质为 Al_2O_3 , 掺入重量比约 0.05% 的铬离子 Cr^{3+} , 以形成激光。图 43-87a 中, R 为限流电阻; $C_1 \sim C_4$ 为储能电容。

触发器输出的高压脉冲点亮氙灯, 发射强烈的脉冲光, 照射到红宝石棒上, 若满足式条件, 大量的铬离子从低能级跃迁到吸收能级 E_3 , 见图 43-87a。由于 E_3 能级为激发态能级寿命仅为 $10^{-9}s$, 故 E_3 能级是不稳定的。铬离子会自发跃迁到 E_2 能级, 其激发态能级寿命约为几个毫秒数量级, 因此 E_2 称为亚稳态能级。由此可见, 激光器工作介质实现了亚稳态能级 E_2 粒子数的反转分布, 从而形成受激辐射。

受激辐射的光子沿谐振腔轴向传播, 经全反射镜 1 和部分反射镜 5 的往返多次反射, 轰击红宝石棒处于激发能级的原子, 使光子的数量激增, 充分利用了增益介质重复放大的能力, 从而形成强大的受激辐射光——激光, 由部分反射镜射出。

(三) 氦氖激光器

由于氦氖激光器具有稳定性好, 单色性强, 功率小和寿命长等突出的优点, 因此是应用最广泛的一种激光器。

氦氖激光器由放电管 V 和反射镜 M_1 、 M_2 组成光学谐振腔, 见图 43-88a 放电管 V 内充以一定压力和一

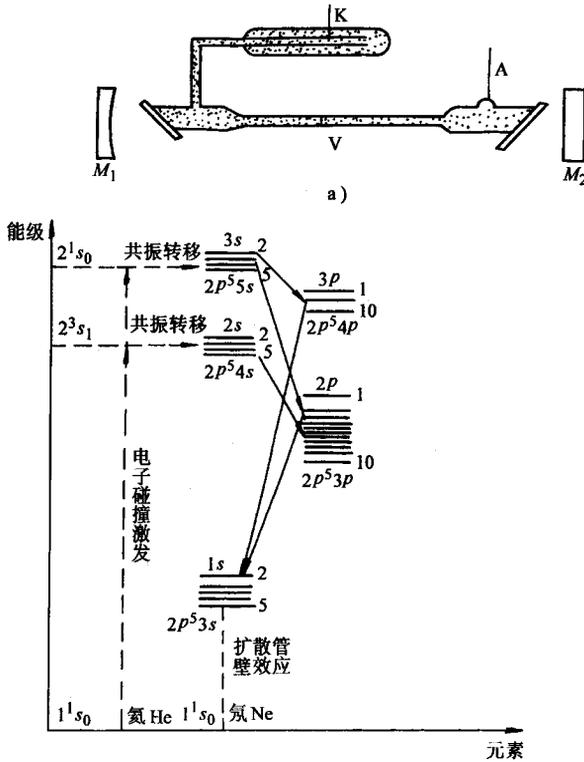


图 43-88 氦氖激光器原理
a) 氦氖激光器的结构 b) 能级图

定比例的氦氖混合气体, A 和 K 分别为放电管 V 的阳极和阴极。M₁ 和 M₂ 镀有多层介质膜, 每层介质膜厚度为激光的半个波长(λ/2)。M₂ 有一定的透射率, 以便激光束从 M₂ 射出。

两电极接通激发电源, 放电管放电, 氦氖混合气体在波长适当的光子撞击下, 基态的氦(He)原子受电子冲击, 跃迁到 2³s₁(19.8eV)及 2¹s₀(20.6eV)的两个亚稳态能级。亚稳态能级的 He 原子和基态的氖(Ne)原子碰撞, 将 Ne 原子激发到 2s(19.78eV)和 3s(20.66eV)态, 亦即 Ne 的这些态被选择地激发, 这一过程称为共振转移, 见图 43-88b。Ne 从 3s 态到 3p 态和 2s 态到 2p 的跃迁分别发出波长为 3.39μm 和 1.15μm 的光波, 可采用振荡谱线的方法抑制这两种波长的光波。从 3s 态跃迁到 2p 态发出波长为 0.6328μm 的光波。由于从 3p 态跃迁到 1s 态和 2p 态跃迁到 1s 态是很快的过程, 寿命很短, 因此 3s 态和 2p 态之间形成粒子数反转。波长为 0.6328μm 的光波沿谐振腔轴向传播, 经反射镜多次反射得到放大, 强度得到加强。激光束由反射镜 M₂ 射出。

(四) 半导体激光器

半导体激光器的典型产品是以砷化镓(GaAs)为增益介质的激光器。它利用相同材料的 P 型和 N 型半导体构成 PN 结。当两电极施加适当高的正向电压时, 靠 PN 结正向注入电流来激发增益介质, 通常称这种“注入方式”为泵激方式。直接利用垂直于 GaAs 半导体 PN 结的两个端面为谐振腔(110 面), 因而受激发的光子得到放大。砷化镓激光器的结构见图 43-89。

二、激光的特点

激光器发出的光具有许多普通光不可比拟的特点。

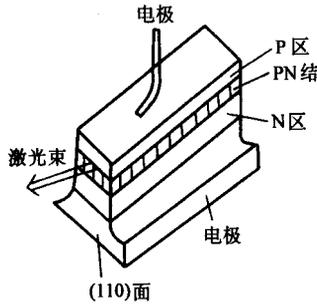


图 43-89 砷化镓激光器的结构

(一)高方向性

高方向性即高平行度,指光束的发散角小。因此,通常称激光为平行光。这样的光束照射出去,在1km处,照射面积的直径仅有10cm左右。

(二)高亮度

一台较高水平的红宝石矩形脉冲激光器的亮度,比太阳表面的亮度高200亿倍,比高压脉冲氙灯的亮度高37亿倍。这是由于激光器发出的光束发散角小、光能在空间高度集中的缘故。

(三)高单色性

单色光是指谱线宽度很窄的一段光波。用 λ 表示波长, $\Delta\lambda$ 表示谱线宽度,愈小,单色性愈好。在普通光源中,单色性最好的光源是氪灯(K_0^{86}),其 $\lambda=0.6057\mu\text{m}$, $\Delta\lambda=4.7\times 10^{-7}\mu\text{m}$,普通氦氖激光器发出的激光,其 $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, $\Delta\lambda=10^{-12}\mu\text{m}$ 。可见,激光的谱线宽度比普通光源提高了几万倍,因此,激光是最好的单色光源。

(四)高相干性

相干性是指相干波在迭加区得到稳定的干涉花纹所表现的性质,而激光是最好的相干光源。

综上所述,激光是目前最亮的光源,而且其单色性最纯,会聚角最小,光束最准直,射得最远和相干性最好。

三、激光传感器的应用

激光传感器可用于测量物体的几何尺寸、振动、位移、速度、加速度、转角、方向、探伤及成分分析等。由于具有精度高、量程范围宽、反应迅速、非接触、抗干扰能力强和易于数字化等一系列优点,因此应用极为广泛。

利用激光的高方向性制成的车速测量仪,是公路车辆速度监测常用的仪器,其工作原理见图43-90。该仪器有两套安全相同的光学系统,见图43-90a。光学系统的作用是把激光束经发射透镜、光栅和接收透镜后,准确地投射在光敏元件上。

图43-90b为原理框图。它由信号放大、整形电路、最小单片机系统(CPU、EPROM)、PIO、打印接口和LED显示等部分组成。光敏元件将激光束转变成电信号,并经放大、整形后送入CPU进行处理和运算,经PIO口送LED显示和打印。

设两激光束相隔100m,车速为 v ,行走时间为 t ,则

$$S = vt = 100\text{m} = 10^2\text{m}$$

$$v = \frac{10^2\text{m}}{t}\text{则}$$

汽车切割第一束激光束时,CPU令计数器开始计数;当切割第二束激光束时,CPU令计数器停止计数,设主振频率为 $f_0 = 100\text{kHz}$,计数器的计数值为 N ,则

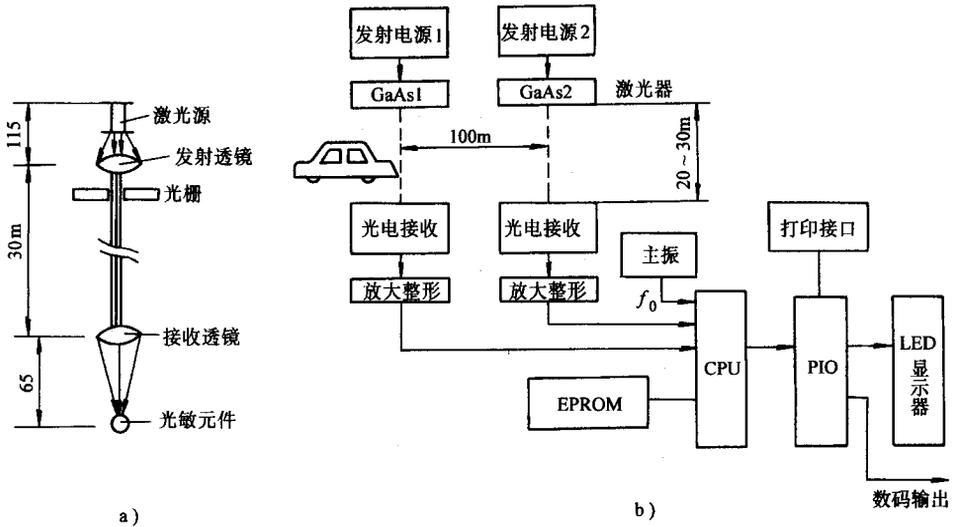


图 43-90 激光车速测量仪
a) 光学系统 b) 原理框图

$$N = f_0 t = \frac{10^2 f_0}{v}$$

$$v = \frac{10^2 f_0}{N} = \frac{10^7}{N} \text{ m/s}$$

因此

通常车速以 km/h 表示, 则

$$v = \frac{10^7 \times 3600}{N \times 10^3} \text{ km/s} = \frac{36 \times 10^6}{N} \text{ km/h}$$

式即为速度换算公式

本仪器使用砷化镓半导体激光器, 其阈值电流大于 30A。因此激发电源必须为 30~80A, 电压峰值为 500~600V 的矩形脉中。需要完全相同的两套激发电源。

第六节 气敏传感器测试

气敏传感器利用了气体的某些物理化学性质, 将被测气体的某些特定成分转换成便于测量的电信号。气敏传感器具有测量范围宽, 精度高, 灵敏度高, 工作可靠, 体积小, 成本低等一系列特点。它的应用范围已渗透到包括工业、农业、生活、国防、防灾、医疗、环保等各个领域, 见图 43-91。

气敏传感器大致可分为物理性和化学性两大类。物理性的气敏传感器是通过电流、电导率、光的折射等物理量的变化来实现气体成分的测定的。化学性气敏传感器是通过化学反应或电化学反应引起物理量的变化实现测量的。

气敏传感器的种类敏多, 就其检测方法来分, 计有: 半导体式、光干涉式、红外吸收式、热导率式、氢焰离子化式、隔膜离子电极式、定电电解式和浓度差电池式等。在为数众多的气敏传感器中, 半导体式气敏元件的发展最为迅速, 因它便于与后继的晶体管放大器集成化, 故它的应用最为广泛。

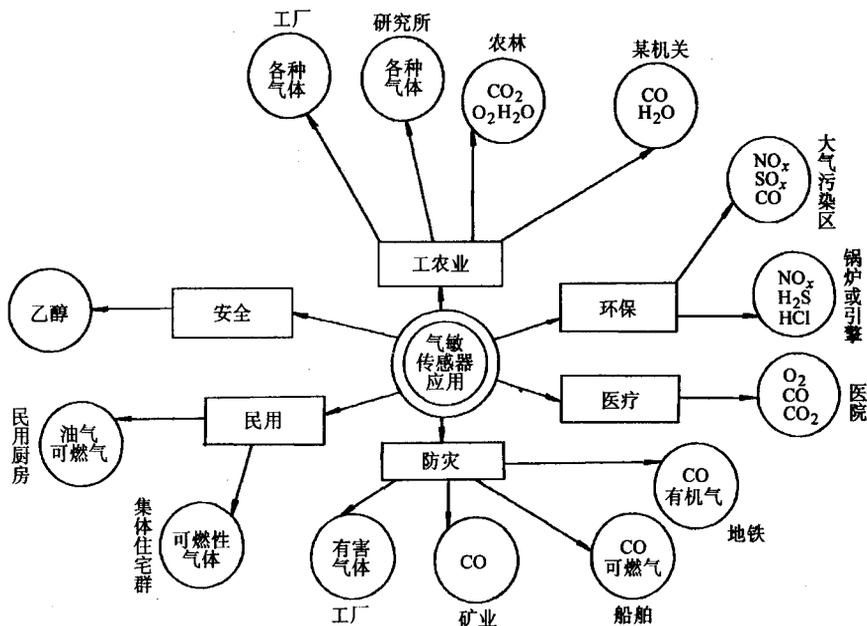


图 43-91 气敏传感器主要应用领域

一、半导体气敏传感器

(一) 工作原理

气敏电阻由非化学配比的金属氧化物按一定的比例混合，并加入粘合剂成型和高温烧结而成，分 N 型和 P 型两种。气敏电阻的结构见图 43-92a。

气敏电阻还有薄膜型、厚膜型和场效应晶体管型等。

工作原理见图 43-92b，通电后，元件被加热，阻值迅速下降，一般经 2~10min 后，阻值达稳定状态，这一状态称为初始稳定状态。到达初始稳定状态时间的长短与环境条件有关。必须指出，使用元件时必须预热，待元件达到初始稳定状态时，才能开始测量。

当加热的气敏电阻表面接触并吸附被测气体时，被吸附的气体分子首先在表面扩散而失去动能，此期间部分气体分子被蒸发，剩余的气体分子被离解而固定在吸附位置上。若气敏元件材料的功率函数比被吸附气体分子的电子的亲合力小，则被吸附的气体分子就从元件表面夺取电子，以阴离子形式被吸附。具有阴离子吸附性质的气体称为氧化性气体。气敏元件吸附氧化性气体会使载流子的数目减少，从而表现出元件的阻值增加，如图 3-92b 中虚线所示。若气敏元件的材料功率函数大于被吸附气体的离子化动能，被吸附的气体的电子被元件俘获，而以阳离子形式被吸附。具有阳离子吸附特性的气体称为还原性气体（如 H_2 、CO、乙醇、乙醚及轻汽油等）。还原性气体被吸附时，会使载流子的数目增加，表现出元件的阻值减小的特性，如图 43-92b 中实线所示。

(二) 特性参数

1. 固有电阻值 在 R_a 常温下，气敏元件在洁净的空气中的电阻值称为气敏元件的固有电阻值。 R_a 一般在数十到数百千欧范围。

2. 灵敏度 表征气敏元件的灵敏度通常有下列几个参数：

(1) 电阻比灵敏度 指元件的固有电阻与在规定气体浓度下气敏元件的电阻之比，即

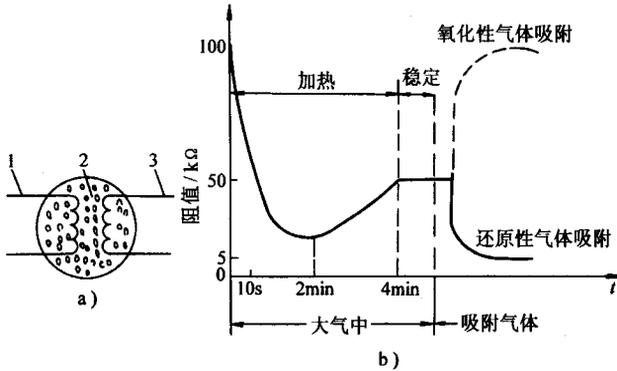


图 43-92 气敏电阻的结构及原理

a) 结构 b) 工作原理

1—加热电极 2—气敏材料 3—信号引出电极

$$K = \frac{R_a}{R_y}$$

(2) 气体分离度 气体浓度分别为 c_1 、 c_2 时, 气敏元件的电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 之比, 即

$$\alpha = \frac{R_{c1}}{R_{c2}}$$

(3) 电压灵敏度 指气敏元件在固有电阻值时的输出电压 U_0 与在规定浓度下负载电阻的输出电压 U_g 之比, 即

$$k_U = \frac{U_a}{U_g}$$

3. 分辨率 指气敏元件对被测气体的识别以及对干扰气体的抑制能力, 即

$$s = \frac{U_g - U_a}{U_{gi} - U_a}$$

式中, U_{gi} 为在规定浓度下, 元件在第 i 种气体中负载电阻上的电压。

4. 时间常数 气敏元件与某一特定浓度的气体接触开始, 直到元件的阻值达到此浓度下稳定阻值的 63.2% 为止, 所需时间称为元件在该浓度下的时间常数 τ_c 。

5. 恢复时间 由气敏元件脱离某一浓度的气体开始, 到元件的阻值恢复到固有电阻 R_a 的 36.8% 为止所需时间称为恢复时间 t_r 。

(三) 测量电路

由前述可知, 这类气敏元件是电阻性元件, 其阻值随被测气体的浓度变化而变化。因此, 测量电路的任务是将电阻的变化转换成电压、电流的变化, 见图 43-93。图中, 气敏元件为 6 根引出脚元件, CD 为加热电极; 应用时, A, A 短接、 B, B 短接。 AA 和 BB 均为信号输出电极。 AA 与 BB 之间等效为一只电阻 R , 因此

$$U_o = \frac{R_L}{R + R_L} L$$

二、热导式气敏传感器

见图 43-94a 为热导式气敏元件的结构。在小容器内绕有铂丝, 在铂丝上烧结金属氧化物作为敏感元件, 被测气体可进出小容器。此外, 在相同体积的密封容器内, 用相同的铂丝绕制一个标准电阻 R_1 。将气敏元件 R 与 R_1 、 R_2 、 R_3 接成桥路, 见图 43-94b。电源 U 提供适当大小的电流 I 给气敏元件加热。

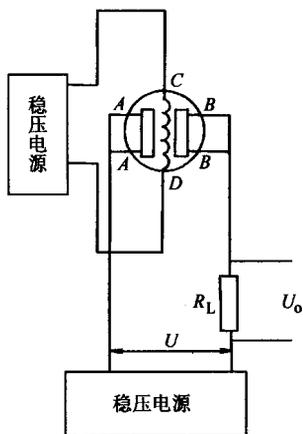


图 43-93 测量电路

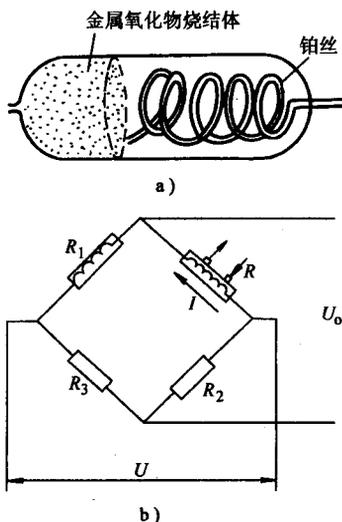


图 43-94 热导式气敏传感器
a) 结构 b) 测量电路

向气敏元件的容器内通入被测气体,气体浓度的变化,便引起气敏元件吸附作用变化,从而引起气敏元件的电导率、热导率和散热条件,作相应的变化,导致元件的温度变化,阻值作相应的变化,即

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta T = r_0 \alpha k C$$

式中 α 为元件的电阻温度系数, R_0 为常温下洁净气体时气敏元件的电阻, ΔT 为温度变化量, c 为被测气体的百分浓度, k 为转换系数。

设电桥接成全桥且 c 变化时, $R \ll R_0$ 则可见 U_0 与被测气体的百分浓度 c 成正比。

$$U_0 = \frac{u}{4} \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\omega k \alpha}{4} C = k_c C$$

三、气敏传感器的应用

(一) 抽油烟机自动起动及报警

本装置(见图 43-95)利用对阳离子吸附作用的 N 型半导体气敏元件作为敏感元件,对所有还原性气体起敏感作用。检测灵敏度高于 0.1%。利用双向三极晶体管 VT 作为控制元件。本装置除用于厨房抽油烟机外,还可用于公用场合(如舞厅、卡拉 OK 厅)非易燃易爆场合的自动抽风、报警以及消防等。

合上电源,气敏元件预热。若被检测的气体浓度低于由电位器 R_p 的设定值,UR 电位较低,因此, $U_1 \sim U_4$ 均为低电平, VD_2 导通, V 截止, VT 关断。

若被检测气体浓度高于设定值,则气敏元件 R 的阻值迅速减小, UR 为高电平, U_1 、 U_2 为高电平, V 导通,因此 VT 导通,电动机起动。与此同时, U_4 也为高电平,接通振荡器电源,蜂鸣器发出声音报警。 A_1 输出的高电平,使发光二极管 VD_1 (红色)导通,实现灯光报警。

本装置利用四运放 LM324(含 $A_1 \sim A_4$)元件数量少、功耗低、工作可靠。

(二) 防止司机酗酒开车控制器

酒后开车易出事故,为防止酒后开车,保障人民生命及财产安全,需安置防止酒后开车控制器,其原理见图 43-96。

本装置用 QM-J₁ 酒敏元件作为敏感元件。在驾驶室内合上开关 S,若司机没喝酒,气敏元件 R 的阻值很高, U_a 为高电平, U_1 为低电平, U_2 为高电平,继电器 K_2 失电, K_{2-2} 常闭触点闭合, VD_2 发绿光, K_{2-1} 闭合,

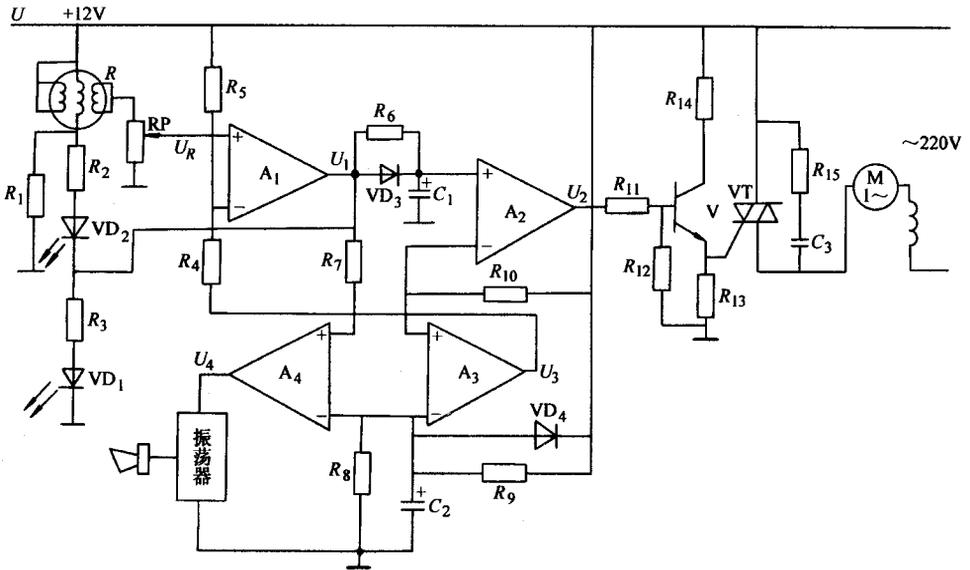


图 43-95 抽油烟机自动起动及报警装置

能点火起动发动机。

若司机酗酒,气敏元件 R 的阻值急剧下降, U_0 为低电平, U_1 为高电平, U_2 低电平,继电器 K_2 带电, K_{2-2} 常开触点闭合, VD_1 发红光,给司机警告信号,此外 K_{2-1} 断开,无法起动发动机。

若司机拔出气敏元件 R ,继电器 K_1 失电, K_{1-1} 断开,仍不能起动发动机。 K_{1-2} 触点的作用是长期加热气敏元件,保证装置处于预备工作状态。

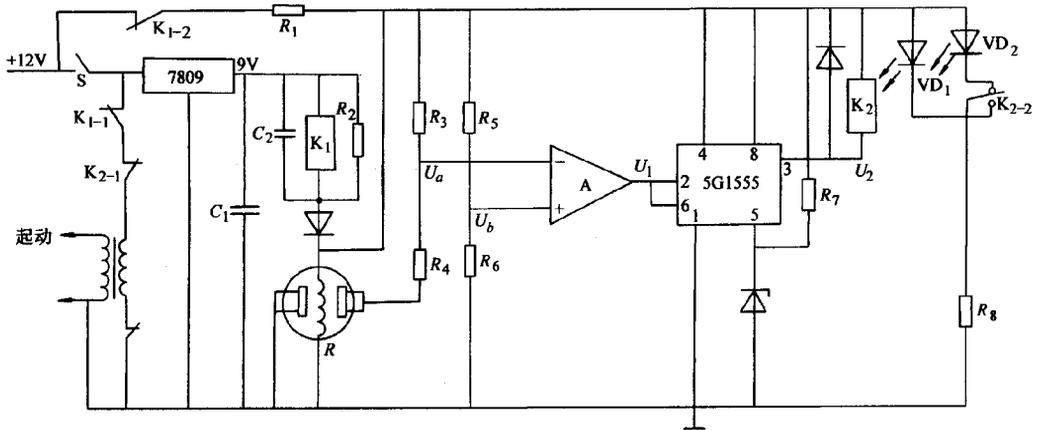


图 43-96 防止酒后开车控制器

第四十四章 自动测试系统

第一节 GPIB 系统

一、GPIB 标准

GPIB 标准是由美国 HP 公司于 1972 年推出的。IEEE 和 IEC 分别于 1978 和 1979 年颁布了完整的标准文本 IEEE488—1978 和 IEC625 - 1—1979。我国于 1984 年颁布了程控测量仪器接口系统专业标准 ZBY207.1—84,其内容完全等同于 IEC652 - 1—1979。

GPIB 标准文本包括接口系统的功能规范、电气规范和机械规范等部分。

二、GPIB 系统结构

GPIB 系统的接口能力与总线结构如图 44-1 所示。

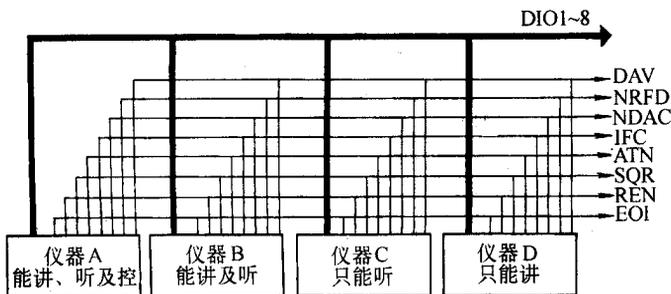


图 44-1 GPIB 系统的接口能力与总线结构

GPIB 系统中的器件根据各自职能分为四种,即控者、讲者兼听者、听者和讲者。控者发送各种接口消息,完成任命讲者和听者、执行串行查询、管理等操作。讲者发送器件消息,听者接收器件消息。

数据输入输出线采用位并行、字串行、双向异步方式传送数据,最大传输速率不超过 1MB/s 。各信号线采用 TTL 电平、负逻辑。GPIB 系统中的仪器总数最多为 15 台,采用 25 芯 (IEEE488 为 24 芯) 无源电缆线和双向叠接式连接器把它们相互连接起来。连接器引脚的信号线排列见表 44-1。可使用的线缆长度有 0.5、1、2 和 4m。

三、GPIB 系统的信号线

GPIB 系统共有 16 条信号线,即 8 条数据线、3 条数据字节传输控制总线(握手线)和 5 条接口管理线。其名称和用途见表 44-2。

四、GPIB 系统的消息分类

GPIB 系统中传送的消息分类如图 44-2 所示。本地消息是仪器内部接口功能和仪器功能之间传送的。远地消息是通过总线传送的,它又分为管理接口功能的接口消息和测量数据等仪器消息。

表 44-1 连接器引脚的信号线排列

IEC625 标准				IEEE488 标准			
引 脚	信号线	引 脚	信号线	引 脚	信号线	引脚	信号线
1	DIO1	14	DIO5	1	DIO1	13	DIO5
2	DIO2	15	DIO6	2	DIO2	14	DIO6
3	DIO3	16	DIO7	3	DIO3	15	DIO7
4	DIO4	17	DIO8	4	DIO4	16	DIO8
5	REN	18	地(5)	5	EOI	17	REN
6	EOI	19	地(6)	6	DAV	18	地(6)
7	DAV	20	地(7)	7	NRFD	19	地(7)
8	NRFD	21	地(8)	8	NDAC	19	地(8)
9	NDAC	22	地(9)	9	IFC	21	地(9)
10	IFC	23	地(10)	10	SRQ	22	地(10)
11	SRQ	24	地(11)	11	ATN	23	地(11)
12	ATN	25	地(12)	12	屏蔽	24	逻辑地
13	屏蔽	26	地(13)	13	屏蔽	25	逻辑地

表 44-2 GPIB 系统的信号线

组 别	代 号	信号线名称	信号线驱动器	用 途
数据输入输出总线	DIO1 ~ DIO8	数据输入输出线 1~8	讲者、听者、控者	传输接口消息和器件消息
三 条握手线	DAV	数据有效线	讲者、控者	传送 DAV 消息 ; “1” 时 , 表示 DIO 线上的数据有效 听者可以接收
	NRFD	未准备接收数据线	讲者、听者、控者	传送 RFD 消息 ; “0” 时 , 表示系统中的各仪器已做好接收数据的准备
	NDAC	数据未收到线	讲者、听者控者	传送 DAC 消息 ; “0” 时 , 表示系统中的各仪器已接收完数据
接 口管理总线	ATN	注意线	控 者	传送 ATN 消息 , 低电平时 , 表明 DIO 上是接口消息 , 高电平时 , 表明 DIO 上是器件消息
	IFC	接口消除	控者	传送 IFC 消息 , 低电平时 , 使相位的接口功能回到初始状态
	REN	远地可能	控者	传送 REN 消息 , 低电平时 , 使仪器处于可远控之下
	EOI	结束或识别	讲者、控者	当此线为低电平且 ATN 线为高电平时 , 表示 DIO 线上传送的字节序列结束 ; 当此线为低电平且 ATN 线也为低电平时 , 表示控者执行并行查询
	SRQ	服务请求线	讲者、听者	传送 SRQ 消息 , 低电平时 , 表示系统中有仪器提出服务请求

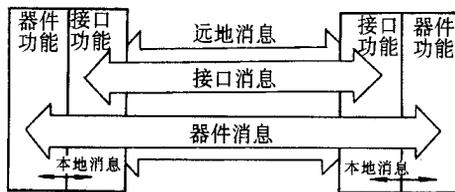


图 44-2 GPIB 系统的消息分类

五、GPIB 系统十种接口功能

GPIB 规定了十种接口功能 , 它们的用途见表 44-3。每种接口功能具备不同的子功能 , 可供仪器设计者根据需要选择。

表 44-3 GPIB 系统十种接口功能

接口功能	子功能	作 用
讲者 T	基本讲者	收到 MTA 进入讲者寻址态
	只讲	在本地消息作用下进入讲者寻址态
	收到 MTA 取消讲寻址	处于讲寻址态的仪器被寻址为听者时自动取消讲寻址态
讲者 T	串行查询	能在控者进行串行查询时发出表明该仪器状态的 STB 消息
听者 L	其本听者	收到 MTA 进入听者寻址态
	只听	在本地消息作用下进入听者寻址态
	收到 MTA 取消听寻址	处于听寻址态的仪器被寻址为讲者时自动取消听寻址态
源握手 SH	完全的能力	控制 DAV 消息的发送,为发送数据的仪器与接收数据的仪器进行三线握手联络,以保证准确无误地传送 DIO 线上的数据
受者握手 AH	完全的能力	控制 RFD、DAC 消息的发送,为发送数据的仪器与接收数据的仪器进行三线握手联络,以保证准确接收 DIO 线上的数据
控者 C	系统控者	当要求能发送 IFC 和 REN 消息的系统控者工作时就进入系统控者工作态
	发送 IFC 消息	作为系统控者工作时可应要求发出 IFC 消息
	发送 REC 消息	作为系统控者工作时可应要求发出 REN 消息
	发送接口消息	责任控者通过 DIO 线发送各种接口消息控制系统进行各种操作
	响应服务请求	责任控者具有的反映 SRQ 线状态的能力
	接收控制	能从责任控者接受对总线的控制权
	转移控制	责任控者可将总线的控制权让给其他仪器
	自己获得控制权	系统控者通过发出 IFC 消息使自己成为责任控者
	并行查询	发出识别消息进行并行查询并获得 PPR 消息
同步取控	当控者功能由监听态回到作用态时,为保证数据正确传送而采取的措施	

接口功能	子功能	作 用
服务请求 SR	完全的能力	仪器通过 SRQ 线向控者提出服务请求,在响应串行通信时发出 RQS 消息
远地/ 本地 RL	完全的能力	仪器既能通过远地也能通过本地控制,并可封锁本地的控制
远地/ 本地 RL	无本地封锁	仪器既能通过远地也能通过本地控制,不能封锁本地的控制
并行查询 PP	远地编组	通过接收控制器发来的接口信息确定响应并行查询时,用哪根 DIO 线和用哪种电平,当控制器发出并行查询时发出 PPR _n 消息
	本地编组	通过本地消息确定响应并行查询时,用哪根 DIO 线和用哪种电平,当控制器发出并行查询时发出 PPR _n 消息
仪器清除 DC	完全的能力	当收到通用命令或寻址命令时均能使器件功能回到初始状态
	无选择仪器清除	仅在收到通用命令时可使器件功能回到初始状态
仪器触发 DT	完全的能力	当收到控制器发来的触发命令时,触发仪器的操作

第二节 VXI 总线系统

一、VXI 总线文本

1987 年开始发展的模块式仪器系统总线,能适应高速度、高性能、体积小要求,是未来仪器与系统的发展方向。VXI 总线文本包括对系统主机箱的机械结构及尺寸、插件(模块)的尺寸、连接器、电磁兼容、机箱冷却及电源等方面的要求,也对 VXI 总线器件的分类及总线、系统构成和控制方式、通信协议等有关问题进行了定义和说明。VXI 总线系统的机械结构如图 44-3 所示。

二、VXI 总线系统的特点

VXI 总线是 1987 年由美国多家仪器公司联合推出的新一代测量仪器用总线系统。它的特点是(1)模块式结构 采用标准的主机箱和插件式(模块式)结构,组建灵活方便,对于不同国家、不同供货厂商的插件式仪器具有兼容性(2)小型便携 系统内的所有插件都牢固地插入一至几个主机架内,从而使系统有更紧凑的整体性,容易做到小型、便携(3)高速传输 最高数据传输速率可达 40Mbit/s(4)适应性、灵活性强 它不仅使用不同厂家的插件组成各种测试系统,且可灵活方便地插放或更换插件,适应不同的测量需要。

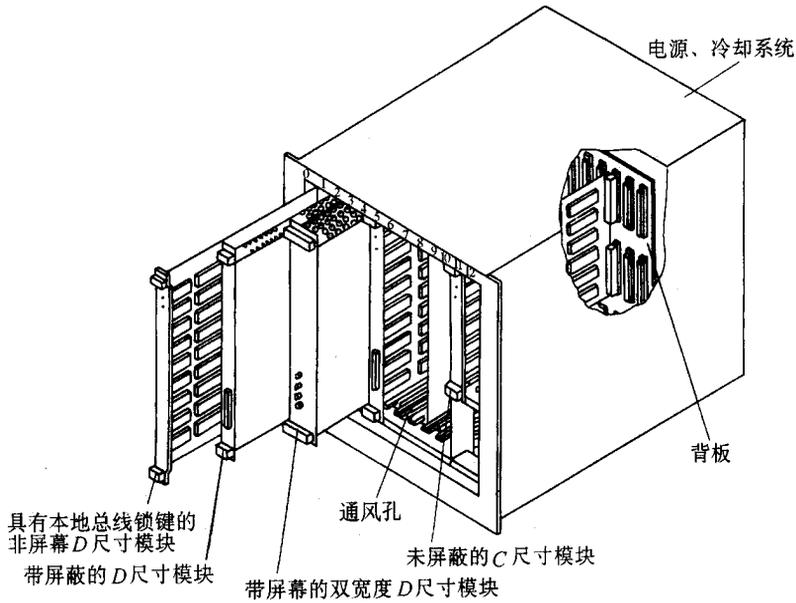


图 44-3 VXI 总线系统的机械结构

三、VXI 总线系统的组成结构

VXI 总线系统的基本逻辑单元称作器件。它可以是独立的仪器,也可以是其他的电子部件。这些器件安装在被称作模块的插件上。每个模块包含一个或多个器件;一个器件也可占据多个模块。一个 VXI 总线系统最多可容纳 256 个器件。

VXI 总线规定了分层式通信协议,如图 44-4 所示。根据所支持的通信协议 VXI 总线器件可分成 4 种类型:基于寄存器的器件、基于消息的器件、存储器器件和扩展器件。VXI 总线之间的通

信基于一种命令者/从者层次关系,这是 VXI 总线系统的核心。命令者能控制一个或多个从者器件,它也是总线的控制者。需要时,它可以得到对总线的控制权,与从者进行基于寄存器的或基于消息的通信。从者能在一命令者控制下向命令者发送信号或请求中断。在多层次命令者/从者系统中,某一器件可以是本层次的命令者,同时又是上一层次的从者,这种层次是以分层的通信协议为基础的。

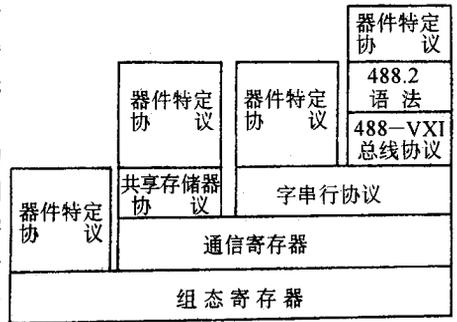


图 44-4 VXI 总线分层式通信协议

VXI 总线系统规定了四种模块尺寸,如图 44-5 所示。其中 A 尺寸带有 P1 连接器,B 和 C 尺寸带有 P1 和 P2 连接器,D 尺寸带有 P1、P2 和 P3 连接器。所有连接器都是 96 个引脚,分 A、B、C 三列排开。模块从主机箱前方插入,经 P1、P2、P3 连接器分别与主机箱背板上的 J1、J2、J3 连接器相连,通过背板上的 VXI 总线信号线实现各器件间的通信。VXI 总线的总线构成及其分布见图 44-5b。

VXI 总线主机箱内有 13 个插槽,从左向右依次为 0~12 号槽。0 号槽上的模块应包括资源管理器件或 0 号槽器件。其余 12 个槽可放置组成系统所需的器件。

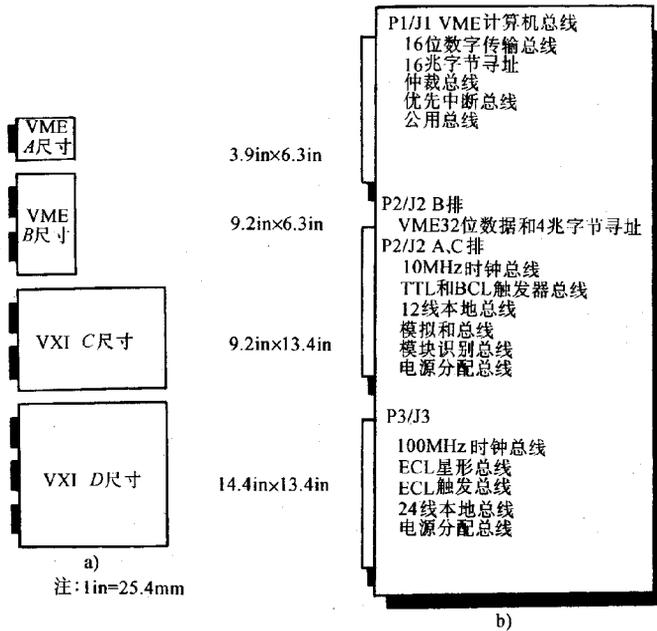


图 44-5 VXI 总线系统模块尺寸和总线构成

a) VXI 总线模块尺寸 b) VXI 总线构成及其分佈

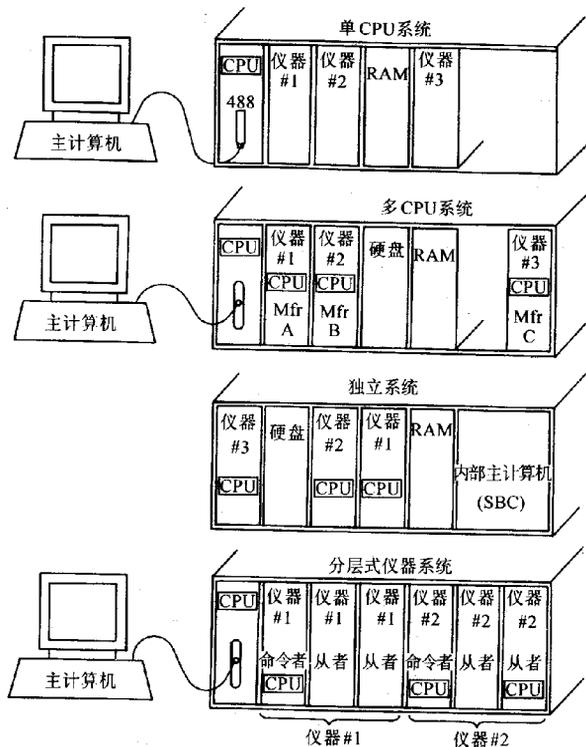


图 44-6 VXI 总线系统的典型结构

四、VXI 总线基本模块和系统典型结构

已有数百种 VXI 总线模块和各种尺寸的主机箱、开发工具(包括硬、软件)投放市场,设计人员可方便地选择所需主机箱与模块组建自动测试系统。VXI 总线基本模块有:数字电压表、数字示波器、通用计数器、功率表、信号发生器、波形发生器、A/D 和 D/A 转换器、继电器(开关)阵列等具有各种通用仪器功能的模块以及系统控制器、0 号槽模块等产品。

图 44-6 是几种 VXI 总线系统的典型结构。系统可以由外部计算机通过 GPIB 或其他接口进行控制,也可由主机箱内的系统控制器(嵌入式计算机)直接控制。为了扩展系统,还可以将多个 VXI 总线主机箱并联起来组成 MXI 总线系统。

第四十五章 信号的时域、频域及数据域测试

第一节 通用示波器的组成及分类

如前所述,由于电子示波器具有许多特点,所以它已成为时域测量技术中最为灵活而多用的电子仪器。

一、通用示波器的基本组成

电子示波器是利用被测电压控制示波管中的电子束,通过电子束的偏转反映被测信号的变化。由电子束轰击在荧光屏上而激发出亮光,亮光连成的轨迹就代表了被测信号的波形。为了使显示的波形达到一定的精度,电子示波器必须由若干部分组成。就通用示波器而言,无论何种类型都由如图 45-1 所示的六大部分组成。

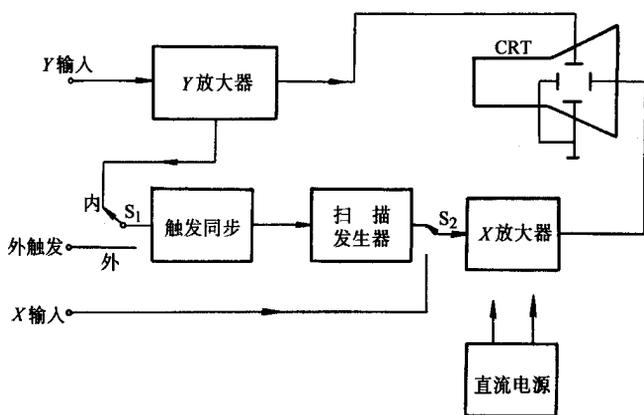


图 45-1 电子示波器的基本组成

y 放大器用于放大被测信号,控制电子束的垂直偏转;扫描发生器用于产生锯齿波电压,经 X 放大器使电子束形成水平扫描;当不需要扫描时,由开关 S_2 转换到 X 输入端,放大 X 轴输入信号;同步触发电路为了使显示的波形稳定。当由被测信号实现同步时,开关 S_1 置于“内”处,当需外接同步信号时, S_1 置于“外”处。

二、波形显示原理

(一) 示波管

示波管由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成,这三个部分密封在玻璃壳内,成为大型电真空器件,见

图 45-2。就其用途而言,它是把电信号变成光信号的转转换器。

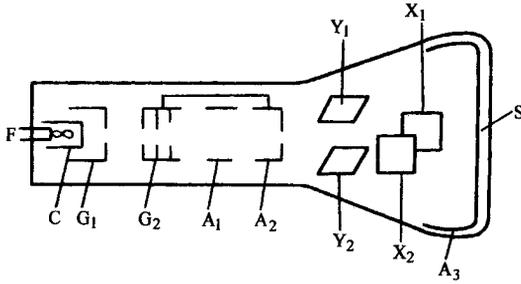


图 45-2 示波管结构示意图

1. 电子枪 电子枪的作用是发射电子并形成很细的高速电子束。它由灯丝(F)阴极(C)栅极(G₁)前加速极(G₂)第一阳极(A₁)和第二阳极(A₂)组成。灯丝F用加热阴极,阴极C在灯丝的加热下发射电子,栅极套在阴极外边,其顶端有小孔,电位低于阴极电位,对阴极发射的电子起控制作用,调节栅极电位可以控制射向荧光屏的电子流密,从而调节了荧光屏上亮点的辉度(即示波器面板上“辉度”旋钮的作用)。

第一阳极A₁和第二阳极A₂都是与阴极同轴的圆筒,A₁的电位远高于阴极,A₂的电位高于A₁。前加速极G₂位于G₁与A₁之间,与A₂相连,对电子束起加速作用。

由G₁、G₂、A₁和A₂构成一个对电子束的控制系统,见图45-3。图中,调节电位器RP₁

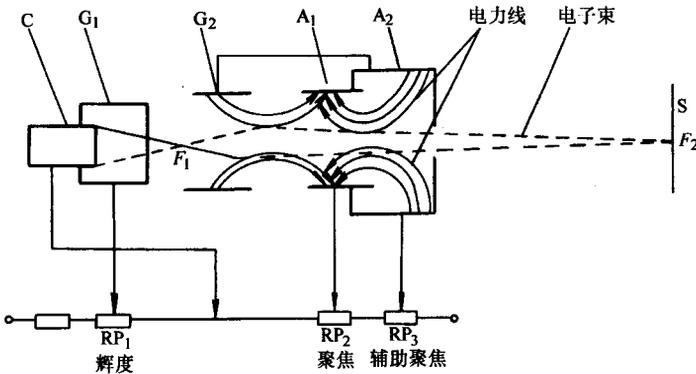


图 45-3 示波管的聚焦原理

就改变了阴极G₁的负电位,从而控制射向荧光屏的电子流密度,达到调节辉度的目的,故RP₁是辉度调节电位器。调节RP₂改变第一阳极A₁的电位,改变了G₂、A₁和A₂所形成的静电场,当电子束进入该静电场后,受电场的作用使其向轴线靠拢,所以RP₂称为聚焦电位器。调节RP₃也就改变了第二阳极A₂的电位,同样也改变G₂、A₁和A₂形成的静电场,RP₃称为辅助聚焦电位器。电位器RP₁、RP₂和RP₃都在示波器的面板上。如果A₁与G₂、A₂上的电位调节合适,电子束恰好聚焦在荧光屏S中心点F₂处,会聚成细小的亮点,以保证显示波形的清晰度。

G₂内有隔板,A₂顶部中心有小孔,它们都加有较高正电位,可截获偏离轴线的电子,故有利于电子束的聚焦。

A₁内部没有隔板,不截获电子,流过它的电流几乎为零。调节辉度改变电子流密度时,A₁电位不会变化,从而避免了调节辉度对聚焦的影响。

2. 偏转系统 由图45-2可见,在第二阳极A₂的后面,由两对相互垂直的偏转板组成偏转系统。靠近第二阳极的是Y偏转板,测量被测电压的波形时,经Y通道放大后的被测信号加于Y偏转板,控制电子束产生垂直偏转。在Y偏转板的后面离荧光屏较近的是水平偏转板,称为X偏转板,观测信号波形时,在X偏转板上加的是锯齿波扫描电压,控制电子束产生水平偏转。由此可见,荧光屏上显示的波形是电子束沿Y和X

两个方向运动合成的轨迹。

电子束在偏转板电场的作用下偏转的位移大小,可由下式决定(见图 45-4):

$$Y = \frac{Ul}{2U_{A2}d}U_Y$$

式中, l 为偏转板的长度(cm); L 为偏转板右边缘到荧光屏的距离(cm); d 为两偏转板之间的距离(cm); U_{A2} 为第二阳极与阴极间的电压(V); U_Y 为偏转板间的电压(V)。

上式 L 、 l 、 d 均为常数,当聚焦调好后 U_{A2} 也基本不变。由式可以看出:

- (1) 荧光屏上亮点偏转距离 Y 与加于偏转板上的电压 U_Y 成正比。
- (2) 我们定义亮点在荧光屏上偏转 1cm 所需加于偏转板上的电压峰峰值为偏转灵敏度,即

$$k_Y = \frac{U_Y}{Y} = \frac{2U_{A2}d}{Ul}$$

此值愈小表示偏转灵敏度愈高。它是与被测电压 U_Y 无关的常数。

当然 X 偏转板也有偏转灵敏度

$$k_x = \frac{U_x}{X}$$

(3) 欲提高灵敏度,可增加偏转板的长度 l 和偏转板到荧光屏的距离 L 及减小偏转板间的距离 d ,但减小 d 会使偏转板间的电容增加,引起被测信号波形畸变;

(4) 减小第二阳极电压 U_{A2} 也可以提高灵敏度,但 U_{A2} 低亮点辉度变弱,故在偏转系统后加了第三阳极 A_3 为后加速阳极,称为先偏转后加速系统,见图 45-4a,后加速电极加 10~15kV 以上高压。 A_3 用石墨做成环形,均匀分压,使电位均匀。

为了增加电子束偏转角,偏转板采用弯折形偏转结构,见图 45-4b。

3. 荧光屏 荧光屏一般为圆形曲面或矩形平面,其内壁沉积有荧光物质,形成荧光膜。它受到电子轰击后,将动能转化为光能形成亮点。当电子束随被测电压偏转时,这些亮点的轨迹就形成了信号的波形。

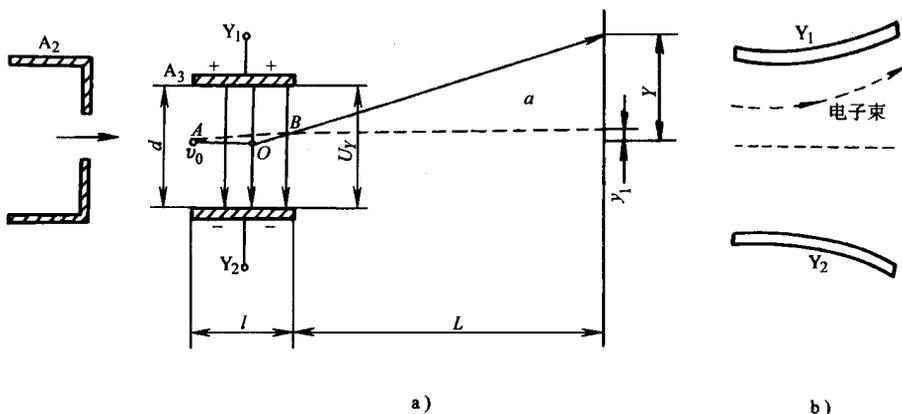


图 45-4 电子束的偏转规律

当电子停止轰击后,荧光膜还能持续发光,持续发光的时间称为余辉时间。 $10\mu\text{s} \sim 1\text{ms}$ 为短余辉, $1\text{ms} \sim 0.1\text{s}$ 为中余辉, $0.1 \sim 1\text{s}$ 为长余辉。观测高频信号宜用短余辉示波管,观测缓慢变化信号宜用长余辉示波管,一般用途时用中余辉示波管。

电子束轰击在荧光屏上,只有少部分能量转化为光能,大部分转化为热能。所以不应当使亮点长时间停留在一处,以免荧光物质损坏而形成斑点。

圆形荧光屏屏幕利用效率不高,线性度较差。中间比较平整部分称为有效面积。矩形荧光屏有效面积较大。使用示波器时应尽量使波形显示在有效面积内。

荧光屏有内标尺和外标尺两种。外标尺会产生视差,内标尺准确度高。

(二) 波形显示原理

1. 电子束的运动轨迹 如前所述电子束的运动轨迹取决于 Y 偏转板和 X 偏转板两个静电场合成作用, 打在荧光屏上亮点的位置取决于加在 Y 和 X 偏转板上的电压。

(1) 当 Y 和 X 偏转板不加任何信号(或两对板的电位分别相等)时, 亮点打在荧光屏的中心位置。

(2) 若仅在 Y 偏转极加上一个随时间变化的电压 u_Y , 例如正弦波电压, 则电子束沿垂直方向运动, 其轨迹是一条垂直直线。

(3) 若仅在 X 偏转板上加正弦电压 u_X , 则电子束仅沿水平方向运动, 其轨迹是一条水平线。

(4) 若在 X 和 Y 偏转板上同时加上同一正弦波电压($u_X = u_Y$)按二者合成作用的结果, 其轨迹是一条斜线, 见图 45-5。

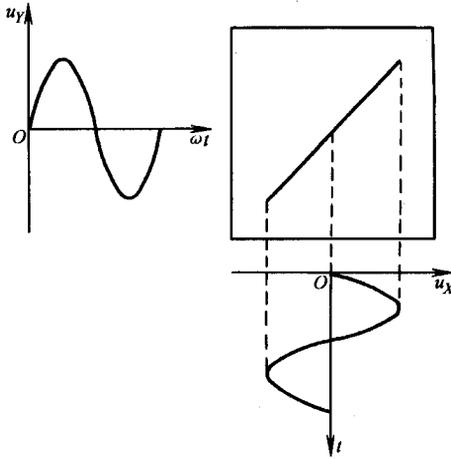


图 45-5 $u_Y = u_X = u_m \sin \omega t$ 时

电子束的轨迹

由此可见, 上述四种情况都不能显示被测电压 u_Y 的波形。为了显示 u_Y 的波形, 必须在 Y 偏转板上加有被测电压 u_Y 的同时, 在 X 偏转板上加上随时间线性变化(锯齿波电压)的扫描电压。

2. 扫描——时间基准 在 X 偏转板上加锯齿波电压时, 电子束在屏幕上按时间沿水平方向展开, 形成时间基准线。当仅在 X 偏转板上加锯齿波电压时, 亮点沿水平方向作等速移动。当扫描电压到达最大值(U_m)时, 亮点亦达到最大偏转, 然后从该点迅速返回到起始点。若扫描电压周期变化时, 在屏幕上就显示一条水平亮线, 这个过程称为扫描。

在 X 偏转板有扫描电压的同时, 在 Y 偏转板上加被测信号电压, 就可将其波形显示在荧光屏上, 见图 45-6。

图中 u_Y 的周期为 T_Y , 若扫描电压 u_X 的周期 T_X 等于 T_Y 在 u_X 和 u_Y 的共同作用下, 亮点的轨迹正好是一条与 u_Y 相同的正弦曲线。亮点从 0 点到 1、2、3、4 点的移动为正程, 从 4 点迅速返回到 0' 点的移动为回程, 图 45-6 中, 由于锯齿波是理想锯齿波, 故回程时间为零。

由于扫描电压随时间作线性变化, 即 $u_X = k_1 t$, 屏幕上的 X 轴就转换成时间轴, 亮点在水平方向偏移的距离式中, k_X 为水平偏转灵敏度。

由上式可见, X 的大小可代表时间的长短。

$$X = \frac{u_X}{k_X} = \frac{k_1 t}{k_X} = kt$$

3. 同步的概念 图 45-6 所示是 $T_X = T_Y$ 的情况, 在屏幕上显示一个正弦波形。若 $T_X = 2T_Y$ 则可观测到两个周期信号电压波形, 见图 45-7。如果波形多次重复出现, 而且重叠在一起, 就可以观测到一个稳定的图像。

由图 45-7 可见, 欲增加显示波形的周期个数, 则应增加扫描电压 u_X 的周期。这在使用示波器时应当

有意识地进行调节。屏幕上显示波形的周期个数

$$n = \frac{T_X}{T_Y}$$

上述 T_X 均为 T_Y 的整数倍的情况。若 T_X 不是 T_Y 的整数倍,由于每次扫描的起始点不一致,故屏幕上显示的波形是不稳定的。

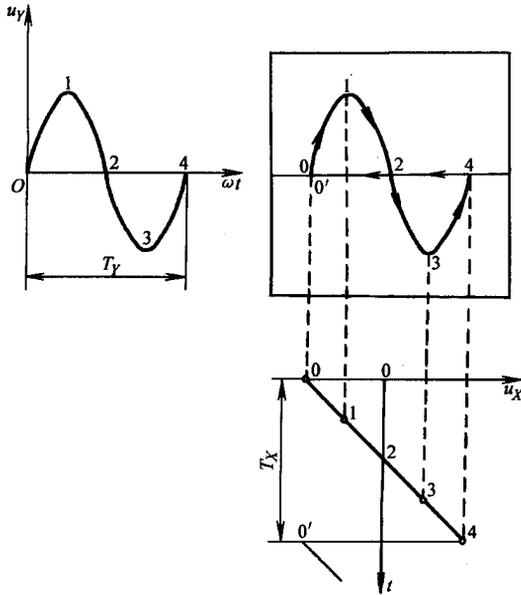


图 45-6 波形显示原理

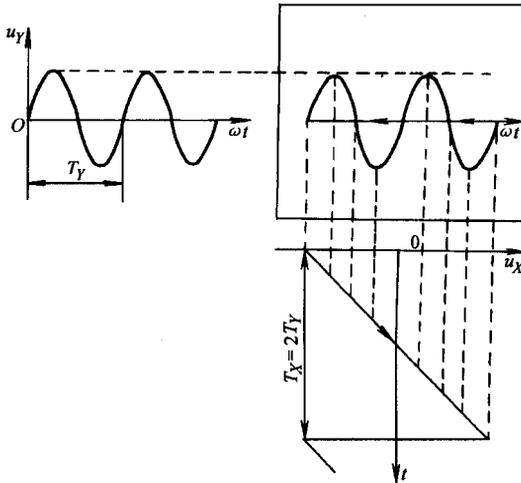


图 45-7 $T_X = 2T_Y$ 时显示的波形

由此可见,为了在屏幕上获得稳定的图象, T_X 必须等于 T_Y 的整数倍,即 $T_X = nT_Y$,以保证每次扫描起始点都对应信号电压 u_Y 的相同相位点上,这种过程称为同步。

三、电子示波器的分类

示波器的分类方法不一,根据其用途和特点一般可分为五类:

1. 通用示波器 通用示波器是采用单束示波管组成的示波器。通用示波器又有单踪示波器和多踪示波器之分。多踪示波器由单束示波管和电子开关组成。

2. 多束示波器(亦称多线示波器) 多束示波器是采用多束示波管组成的示波器,在屏幕上显示的每条波形都是由单独的电子束所形成。

以上两类示波器根据 Y 通道的频带宽度 f_B 又可分为下列四种:

(1) 简易示波器 $f_B < 500\text{KHz}$

(2) 低频示波器 $f_B = 0.5 \sim 1\text{MHz}$

(3) 普通示波器 $f_B = 5 \sim 60\text{MHz}$

(4) 宽带示波器 $f_B > 60\text{MHz}$

3. 取样示波器 将高频信号以取样方式转换成低频信号,然后再用类似通用示波器的方式进行显示。用于观测 300MHz 以上的高频信号及脉宽为几个纳秒的窄脉冲信号。

4. 记忆与存储示波器 它是一种具有存储信息功能的示波器。将单过程、非周期信号或缓变信号长时间地保留在屏幕上或存储于电路中,供分析、比较用。利用记忆示波管实现存储功能的称为记忆示波器;利用半导体数字存储器的称为数字存储示波器。

5. 特殊示波器 它是指能满足特殊用途或具有特殊装置的专用示波器,例如高压示波器等。

目前,示波器的种类繁多,正向着拓宽频带、提高灵敏度、多功能、数字化、程控化以及和微型计算机通信等方向发展。

第二节 智能化数字存储示波器

一、智能示波器的组成原理及工作方式

图 45-8 示出了具有代表性的智能化数字存储示波器的组成原理框图。由图可见,垂直偏转部分、水平偏转部分和 CRT 显示部分与传统示波器的原理基本相似,所不同的是微机控制与存储部分。各部分电路之间通过总线结构连接,操作者对仪器的控制是利用面板的键盘通过总线向 CPU 传送控制信号来实现的。整机的工作在程序控制下进行。

(一) 基本工作方式

有模拟工作方式和数字存储工作方式两种。操作者可用键盘来选择。

1. 模拟工作方式 若选择该方式,CPU 控制将 D/A(1)和 D/A(2)与功率放大器断开,把来自前置放大器(1)或(2)的被测信号直接接入功放电路和触发发生器电路。其工作原理与传统的示波器没有两样。

智能化数字存储示波器保留模拟工作方式的原因有二:其一是充分利用仪器的硬、软件的潜力;其二是在模拟方式下,工作带宽不受 A/D 转换速度的影响,可观测更高频率的信号。一般地说,存储方式的上限频率 $f_{\max} = 20 \sim 40\text{MHz}$ 时,其模拟方式的工作频率可达 100MHz,这样就弥补了工作带宽的不足。

必须指出,数字存储示波器在模拟方式所显示的是实时波形,较存储方式显示的波形具有更高的保真度。

2. 存储工作方式 在该方式下,CPU 控制将被测信号接入 S/H、A/D 和触发发生器,将 A/D 转换的数据

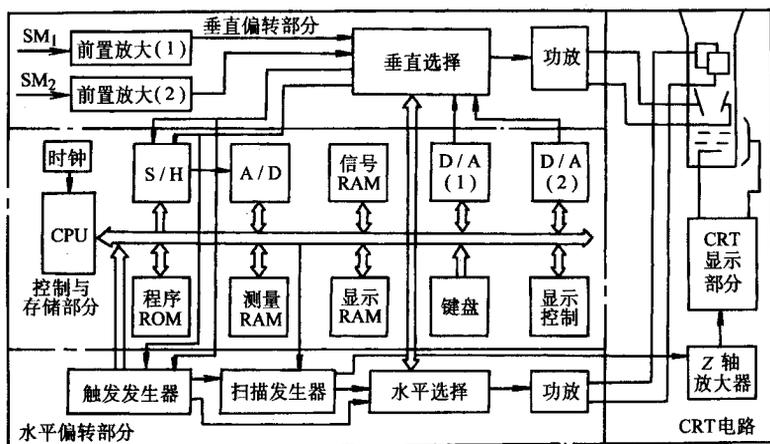


图 45-8 智能化数字存储示波器原理框图

按一定方式存入信号 RAM 中,此时 D/A 转换器并不工作。当触发形成时,向 CPU 发出触发信号,CPU 接到触发信号后,命令 S/H 和 A/D 继续转换的同时,起动 D/A 对信号 RAM 中的数据逐一变换,复现成模拟信号送到功放。在水平扫描作用下,在 CRT 上显示由采样点组成的波形。

由此可见,在存储方式下,CRT 所显示的是非实时波形,而是由采样点数据经 D/A 复现的波形,采样点数据越多,复现的波形的保真度越高。

(二) 控制与数字存储电路

该部分是数字存储示波器的核心,与传统的示波器是完全不同的。由图 45-8 可见,CPU、程序存储器 ROM、信号 RAM、测量 RAM 和显示 RAM 等构成微机系统,而 S/H、A/D、D/A、键盘和显示控制等均作为微机系统的外围设备挂在总线上。该部分电路主要完成工作模式设定、信号变换与存储、测量和显示控制四种功能。下面分别叙述。

1. 工作模式设定 包括模拟或存储方式选择、触发方式选择、单通道或双通道输入选择、测量项目选择和显示方式选择。所有这些选择都可利用键盘在观测前预先设定,或在观测时临时添加。某些智能示波器开机或复位后,在 CRT 上显示一份工作模式菜单,使用者可通过填写菜单进行工作模式的设定。

2. 信号变换与存储 这是智能化数字存储示波器的基本功能。被测信号的数字化和存储过程是在仪器的工作程序的控制下进行的。数据的存储方式与工作方式的设置有关,当无测量选择时,CPU 仅安排被测信号数据的存储,当有测量项目时,将包括测量计算的数据的存储与变换。

3. 数字测量功能 该部分包括 S/H、A/D、测量 RAM 等器件均是对电压进行数字化测量的基本硬件,再辅以相应的软件,即可实现对波形参数的数字化测量和存储。测量项目设定后,CPU 执行工作程序,将信号 RAM 中的数据进行预定的计算,计算的中间结果或最终结果和待显示的数据,都存储于测量 RAM 和显示 RAM 中。波形参数的测量、计算、存储、波形显示和参数显示是同时进行的。

4. 显示控制电路 智能化数字存储示波器的显示远比模拟示波器复杂。这部分包括显示 RAM 和显示控制电路,在 CPU 执行屏幕编辑子程序的控制下实现。在 CRT 上显示的信息包括被测信号的波形及波形参数、量程、时基、单位、触发点的位置、波形及波形段的英文命名等。这样不但便于分析,而且在绘图输出时可作为技术档案的记录。

二、智能示波器的主要功能及应用

(一) S/H 与 A/D 转换

该电路是示波器数字存储工作方式的基础部件。S/H 和 A/D 转换的最高工作速度直接影响数字存储

示波器的工作带宽。S/H 的速度远比 A/D 转换的高度高得多 故数字存储示波器的额定工作带宽主要受 A/D 转换速度的限制。

根据采样定理 若被观测的信号 $x(t)$ 的最高频率为 f_{max} ,只要采样频率大于 $2f_{max}$,就可以由采样序列 $x(k)$ 不失真地复现。 $x(t)$ 通常称 $2f_{max}$ 为奈奎斯特 (Nyquist) 极限频率。对于数字存储示波器而言 若 A/D 转换的最高频率为 $2f_{max}$ 则只能不失真地复现频率低于 f_{max} 的信号。例如 日本松下 VP-5740 数字存储示波器 A/D 转换的最高频率为 $f_{max} = 100\text{MHz}$,它只能不失真地复现频率小于 50MHz 的信号 故给出存储方式的带宽为 35MHz 。但是其模拟工作方式的带宽可达 100MHz ,因为它不受 A/D 转换速度的限制 而仅受前置放大器、功放在 CRT 管的最高工作频率的限制。

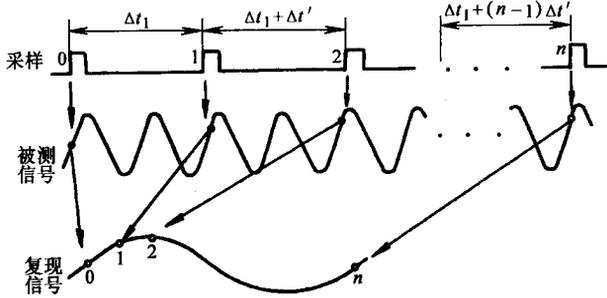


图 45-9 等价采样原理示意图

数字存储示波器的采样方式有两种：

1. 实时采样 是最常用的采样方式。实时采样通常是等时间间隔的 ,采样点的顺序也与存储和显示的顺序相同。不但在技术上易于实现 而且对频率在带宽内的信号具有理想的复现能力。由于时间上的顺序性 使采样—存储—显示软件变得更简单。

2. 等价采样 (Equivalent Sampling) 也称为等效采样 其原理见图 45-9。

由图可见 把频率极高的周期信号分成若干段分别采样。采样时间间隔安排如下：

第 1 段 $\Delta t_1 = \Delta t_1$

第 2 段 $\Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t'$

第 3 段 $\Delta t_3 = \Delta t_1 + 2\Delta t'$

⋮

第 n 段 $\Delta t_n = \Delta t_1 + (n-1)\Delta t'$

式中 $\Delta t'$ 是采样时间间隔的增量。这样就在信号的不同周期上取得幅值变化的信息。虽然复现的信号在周期上被扩展了 但保留了其基本变化规律 (如图中的正弦波)。等价采样可将数字存储示波器在数字存储方式下的工作带宽扩展到与模拟方式下的带宽相同。

(二) 触发方式

有常态触发和预置触发 (延迟触发) 两种方式。开机或复位后自动进入常态触发 而预置触发必须通过键盘预设。

1. 常态触发 同模拟示波器一样 可利用面板上的旋钮设置触发电平和极性。常态触发的硬件配制和软件框图见图 45-10a 和 b。

由图可见 被观测信号同时接触发发生器和 S/H、A/D 及信号 RAM。在触发未形成前 信号经 S/H、A/D 不断存入信号 RAM 中 直到信号 RAM 存满为止。若信号 RAM 已满 触发信号仍未形成 则用最新的数据

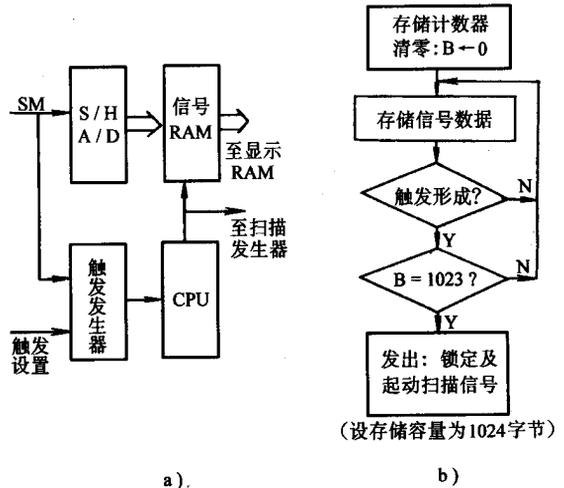


图 45-10 常态触发原理

a) 硬件配置 b) 软件框图

更新信号 RAM 中最早的数据。若触发已形成,但信号 RAM 仍未满,则 CPU 命令继续将数据存入信号 RAM,直到装满,才发出起动扫描信号,起动水平扫描电路产生扫描电压。

在常态触发下,触发点可选在被复现波形的左端、右端和其它任意位置上。

2. 预置触发 在示波器的键盘上设定延迟量,通常以触发点之前的分格数(记作 div)给定。延迟量不同,则触发点不同,可观测到触发点前后不同波形段的波形,用于观测非周期或单次信号特别适用。

预置触发依靠常态触发的硬件配置,利用微机的计算和控制能力来实现。当触发电平、极性和延迟量设置好后, S/H、A/D 不断地将数据存入信号 RAM,同时存储计数器计数。设信号 RAM 有 M 个数据单元,延迟量的数据为 N 个,则触发点后应采集的数据为 (M - N) 个。因此,当触发形成时,CPU 将存储计数器的内容变成 (M - N),同时开始减法计数,当计数器减至零时,停止向信号 RAM 存储。此时触发点在存储器中的位置以及在复现波形上的位置,恰好符合预延迟的要求。图 45-11 为预置触发软件框图。图中,由于设有 $B < M$ 这一分支,使预置触发具有长时间地搜索期望信号波形的能力。因此,对于单次或非周期信号或者难以捕捉的信号,可以通过延迟量的正确设置,取得完整的复现波形。图 45-12 是不同预置的波形图。可见,通过预置量的正确设置,可使欲观测波形得到稳定的显示。

预置触发常用于捕捉干扰信号在被测信号上的位置。例如,在数字系统中,可将数据流接入数字存储示波器,将触发点预置于屏幕中央,干扰脉冲一出现即可形成触发,屏幕上显示干扰脉冲的波形在数据流中的位置,也可用 X-Y 记录仪记录。操作者不必担心期望的信号一闪即逝,因为数字存储示波器对单次信号的捕捉和记录能力是模拟示波器无法比拟的。

某些数字存储示波器可同时设置上、下两个触发电平,当信号的上升沿电平超过上触发电平和下降沿超过下触发电平时,可产生上、下两次触发,称为窗口触发。这种触发方式用于捕捉和记录情况不明的信号是特别有效的。

(三) 存储器及存储方式

智能数字存储示波器的存储器主要有三种,分述如下:

1. 信号存储器及存储方式 信号 RAM 用来存储被采样的数据。在 S/H 和 A/D 电路起动后即开始对采样的数据进行有效存储。两个输入通道的双踪示波器有单通道顺序存储和双通道交替存储。

(1) 单通道顺序存储 用键盘设定为单通道输入时,采样数据按采样时间先后存入信号 RAM,见图 45-13。设信号 RAM 的容量为 1KB 字节,其地址为 0000 ~ 1023,共 1024 个存储单元,单元地址即为采样数据的序号,相应单元的内容是该序号数据的值。当第 1023 号数据存入 1023 单元(已存满)后,若触发仍未形成,则冲掉第 0000 号数据,并所有数据前移一个单元,最新的采样数据存入 1023 单元,直到触发形成为止,从而保证数据系列的正确顺序。单通道存储控制程序流程图见图 45-14。

(2) 双通道数据交替存储 其硬件配置原理见图 45-15。用交替存储方式可在 CRT 上复现的两条信号

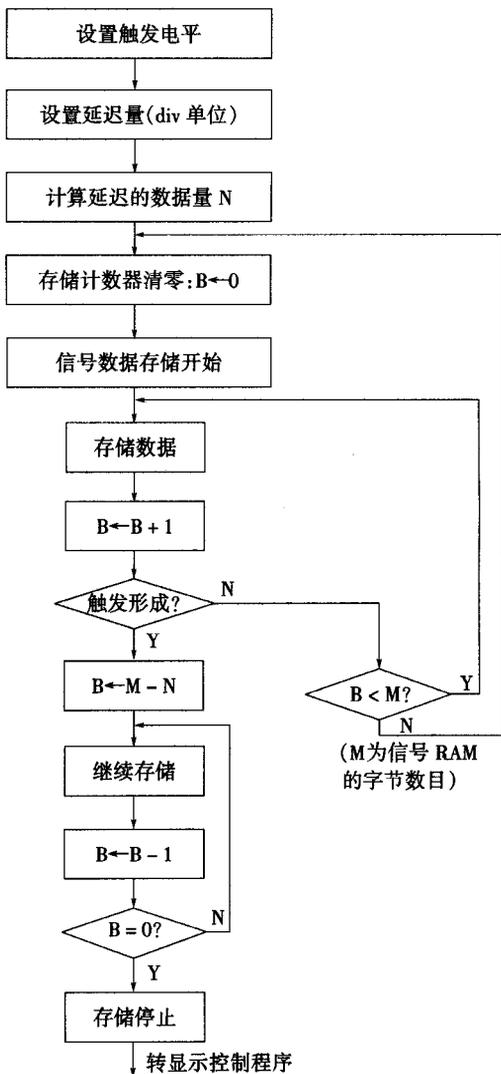


图 45-11 预置触发软件框图

波形保持原有的时间关系。CPU 控制使开关 S_1 、 S_2 交替闭合, 交替接入信号 SM_1 和 SM_2 经 S/H 和 A/D 转换, 并将采样数据交替存入信号 RAM, 见图由图 45-16。可见 SM_1 存于偶地址单元, SM_2 存于奇地址单元。对于 1KB 字节信号 RAM, 信号 SM_1 和 SM_2 的数据存储量大容量各占 1/2, 即 521B。

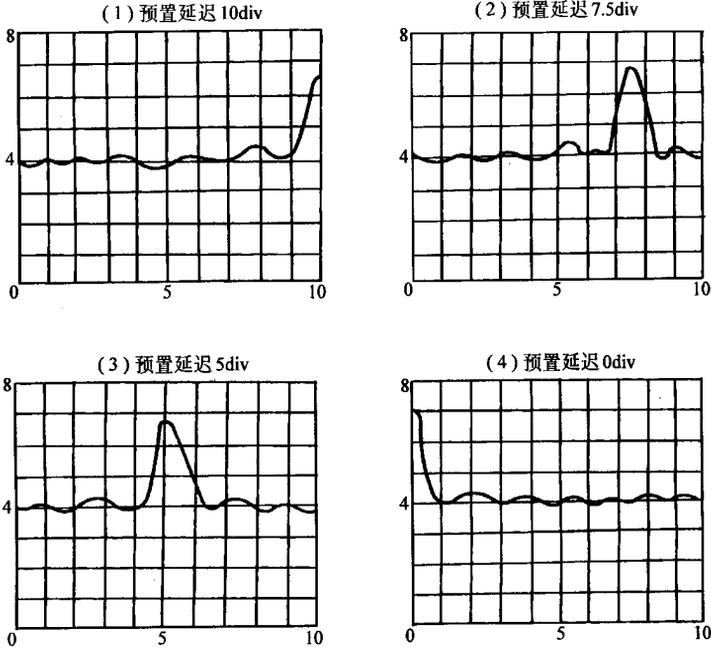


图 45-12 不同预置量的波形图

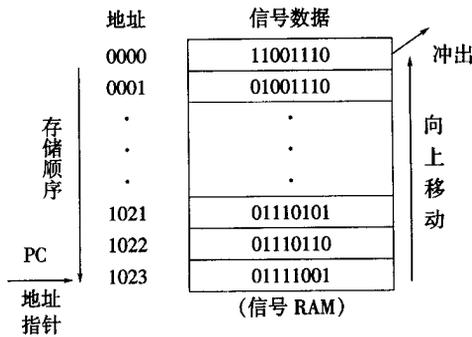


图 45-13 单通道数据存储

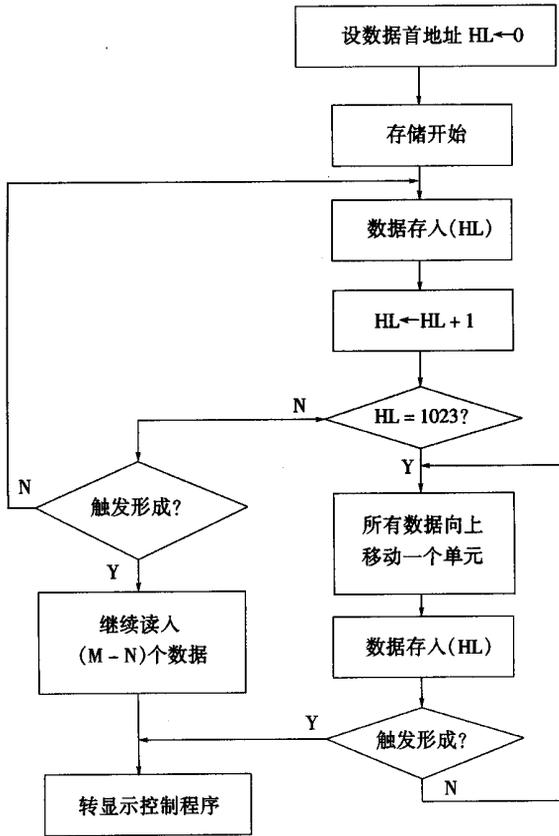


图 45-14 单通存储控制程序流程图

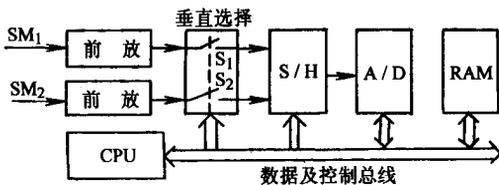


图 45-15 双通道硬件原理框图

地址	信号数据
0000	SM ₁
0001	SM ₂
0002	SM ₁
0003	SM ₂
.	.
.	.
.	.
1022	SM ₁
1023	SM ₂

(信号 RAM)

图 45-16 双通道信号存储格式

双通道数据的奇偶存储方式,很容易实现 $1/2$ 防护功能(Half Protect Function)。用面板的“防护选择”开关选择,可实现对某一通道或两个通道的数据锁定,被锁定的通道的波形长时间停留在 CRT 上,便于与另一通道的变化的波形进行比较。这种防护功能可由硬件或软件实现,智能化数字示波器通常用软件来实现,其软件流程框图见图 45-17。

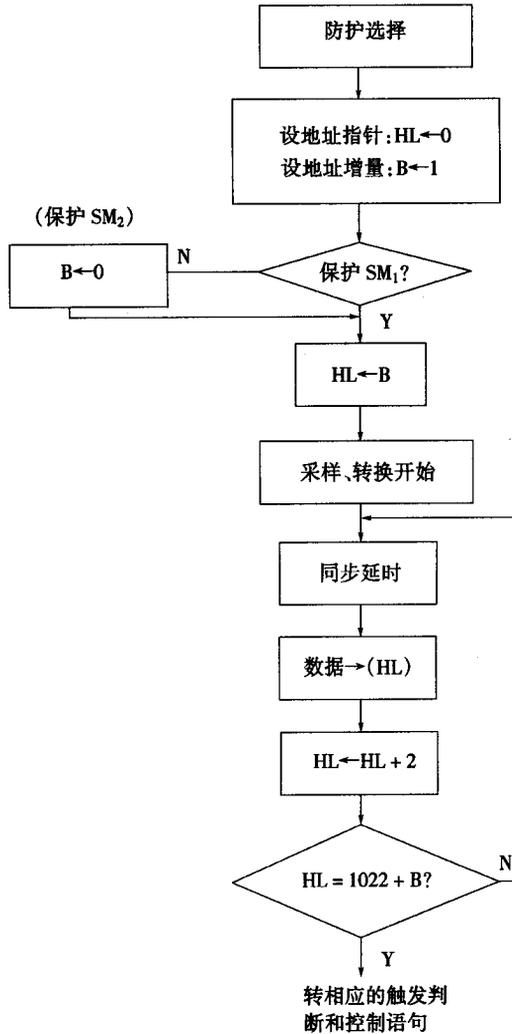


图 45-17 1/2 防护程序流程图

利用 1/2 防护功能可实现两个波形之间的比较、运算(+、-、×、÷)以及错误识别等多种用途。

2. 参考存储器 主要用于存储参考波形的数据,以便于与其它波形进行比较。例如,将数字系统中时钟振荡器信号的数据存入参考存储器中,在需要时把它显示在 CRT 上,与其它波形比较,往往可发现数字系统定时错误或其它时间配合错误。

参考存储器的内容一般是由信号 RAM 调来的。在面板上按下“参考存储”键,即可起动数据转移程序,完成参考存储。通常参考存储器用电池供电,以长期存储数据。这是智能数字存储示波器的主要特点之一。

3. 显示缓冲存储器 在 CRT 上显示的不仅仅是实测波形,还可包括参考波形、工作状态字(量程、时基、工作方式、功能等),以及在使用波形参数测量功能时,显示测量结果的指示值等。所有这些被显示的数据均来自信号 RAM、参考 RAM、字符 ROM 及测量 RAM 等,它们与显示 RAM 的关系见图 45-18。其中测量 RAM 用于存放测量或计算的中间数据和结果。

为了使所有待显示数据按一定位置同时显示在 CRT 上,CPU 控制下将所有数据重新排列存储到显示缓冲存储器中。实际上 CRT 显示的所有信号都由显示缓冲存储器直接提供。

(四) 扫描发生器

由前述可知,模拟示波器由密勒积分电路产生锯齿波扫描电压,由于扫描电压正程具有非线性和具有一

定的回扫时间 ,CRT 上显示的波形失真。数字存储示波器利用 D/A 转换产生扫描电压 ,可克服上述缺点。图 45 - 19 是两种扫描电压的比较。

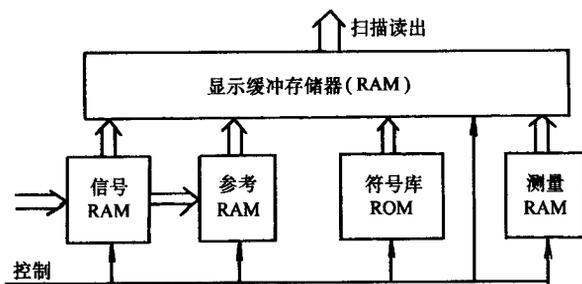


图 45 - 18 存储部件的关系

图 45 - 20 是由数字电路和 D/A 组成的扫描发生器框图。

1. 振荡信号源 采用 CPU 的石英晶体振荡器 ,具有高度的频率稳定性。
2. 前置分频器 利用非同步或同步计数器组成 ,按扫描时基要求进行分频。
3. 后置分频器 与前置分频器配合根据所需时基向 D/A 提供所需信号 ,以驱动 D/A 的开关电路 ,以产生所需的扫描电压。
4. 时序控制器 根据时基选择开关选定的时基控制前、后分频器产生所需脉冲 ,从而控制 D/A 产生所需的扫描电压。

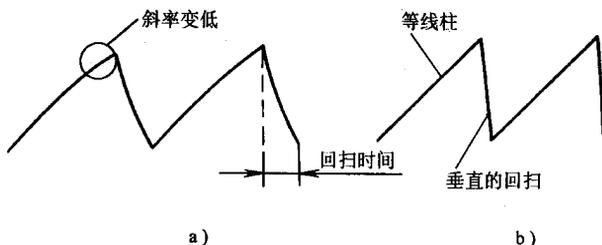


图 45 - 19 两种扫描电压比较

a) 密勒积分器扫描电压 b) D/A 产生的扫描电压

5. D/A 转换器 按后置分频器输出的数字脉冲信号 ,产生所需时基的扫描电压。D/A 每累加一个脉冲 ,其输出的扫描电压按一定量化关系产生一阶梯波 ,见图 45 - 21 图中 , ΔU 为阶梯的步进(量化)电压 ,若输出的扫描电压为 U_{omax} 、D/A 输入数字为 N 位 ,则 $\Delta U = U_{\text{omax}}/2^N$ 。

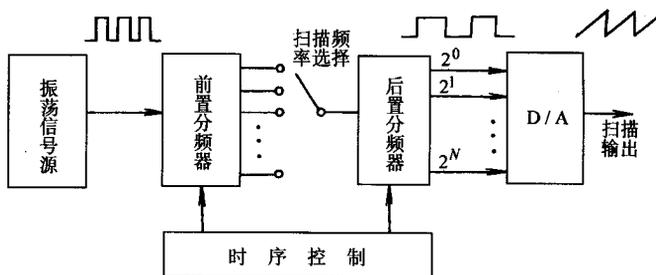


图 45 - 20 数字扫描发生器原理框图

图 45 - 21 中 ,阶梯的时间宽度 Δt 也是每两个信号数据读出的时间间隔 ,即阶梯的上跳沿是向信号 RAM 顺序‘读’出数据的‘读’命令。

(五)显示方式

智能化数字存储示波器由于微机的强大的控制、计算和存储能力,可实现多种灵活的显示方式,以适应不同波形的观测。

1. 存储显示 是基本的显示方式。如前所述,在一次触发形成和完成信号 RAM 的存储后,将显示缓冲存储器的数据顺序读出送到 D/A 转换,在水平扫描作用下被测信号波形稳定显示在 CRT 上,见图 45-22。CRT 上同时显示两个被测电压和两个参考电压的波形。图中“TRIG ↓”表示触发点位置,0.2ms/div 和 0.1ms/div 表示不同时基,50mV/div 表示垂直灵敏度。触发点位置、时基和垂直灵敏度将随操作者的调节而改变。

2. 卷动 (ROLL)显示方式 特别适合观测一长串波形中随机出现的突发性(如干扰)信号。利用键盘设置为卷动显示时,显示波形将由 CRT 右边推出,向左移动,在左端消失。当异常(如干扰)波形出现时,按下 ROLL 按键,将此波形保持在 CRT 上或存入参考 RAM 中,作更细致的观测和分析。

3. 抹迹显示方式 适用于观测长串波形中在一定条件下才会发生的瞬态信号。

在该方式下,应按预期的瞬态信号设置触发电平和极性,仪器工作在末端触发和预置触发。当信号 RAM 已存储满,但瞬态信号未出现,实现末端触发,CRT 显示一幅画面,保持一段时间,信号 RAM 重新存入数据(全部更新)若瞬态信号仍未出现,再显示一幅画面,这样一幅画面一幅画面地更新显示下去,直到预期瞬态信号出现,立即实现预置触发,将捕捉的瞬态信号稳定地显示在 CRT 上。

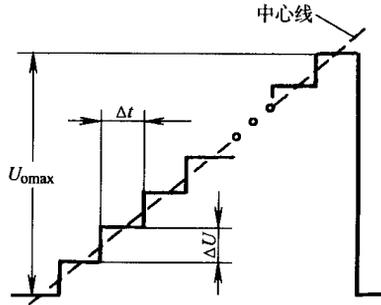


图 45-21 D/A 输出的扫描电压

利用“1/2 防护”功能也能将异常瞬态信号的波形保留在 CRT 上。

4. 插值显示 与模拟示波器不同,加于 Y 偏转板的电压是经 D/A 离散处理后的量化电压,在 CRT 上复现的波形是由一系列离散点组成的曲线。当这些点的垂直密度和水平密度差异较大时,人能正确地连接这些点,形成正确的波形识别和判断。当这些点的垂直密度和水平密度差异不大或两个方向的密度都很大时,人就很难正确连接这些点形成波形,这种现象称为视觉混淆现象,见图 45-23。当被测信号频率为采样频率的 25 倍以上时,点显示就会造成严重的视觉混淆。

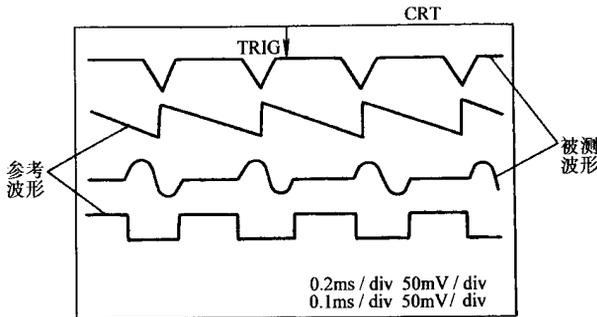


图 45-22 存储显示的一个实例

为了克服视觉混淆,又不降低带宽,数字示波器常采用插值显示技术。所谓插值显示是指用适当的直线

或曲线连接两相邻的点,使在 CRT 上显示出完整的连续的信号波形。图 45-23b 是图 a 的插值显示波形。常采用矢量插值、正弦插值和脉冲插值三种方式,用面板的键盘来选择。

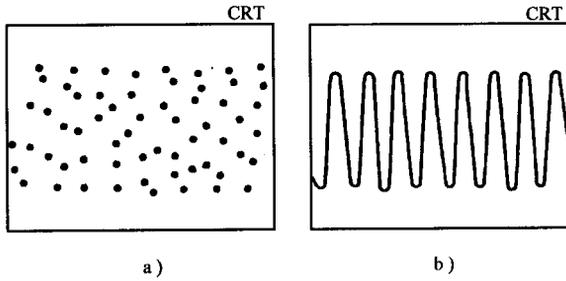


图 45-23 波形的点显示和插值显示

a) 正弦波点显示 b) 正弦波插值显示

(1) 矢量插值 适用于对各种波形的插值显示。矢量插值是用不同斜率的直线段连接相邻的点形成波形。当被观测的信号频率为 A/D 采样频率的 1/10 以下时,采用矢量插值显示可得到满意的效果。

(2) 脉冲插值 它仅在水平方向上实现点的连接,因此仅适用于开关或方脉冲信号的插值显示。

(3) 正弦插值 它以 $\sin x/x$ 函数运算后,用曲线连接各数据点的显示方式,特别适用于观测正弦信号波形。被观测信号频率为 A/D 采样频率的 1/2.5 时,正弦插值显示的波形效果特别好。观测开关或方脉冲波形时,正弦插值会在脉冲前沿产生尖峰状失真。

图 45-24 是利用脉冲插值和正弦插值在 CRT 上显示同一波形的图例。

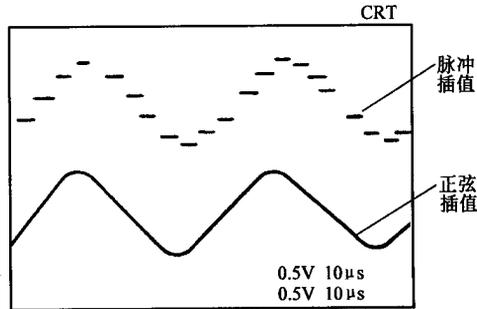


图 45-24 脉冲和正弦插值显示的波形

由上述可见,数字示波器的显示能力不仅包括了模拟示波器的所有显示功能,如扩展等,而且远远优于模拟示波器,其某些特殊功能(如参考比较显示、卷动显示等)具有极大的使用价值。

(六) 测量与计算功能

智能化数字示波器内部有微机系统、A/D 和 D/A 等硬件,除了能在 CRT 上显示被测信号波形和波形参数外,还具备了数字化测量仪器仪表的所有功能。例如,可测量信号两点的电位差、相位差、平均值、峰—峰值、有效值、周期、频率、信号前后沿的时间以及数理统计等。这是由于智能化数字存储示波器具有强大的运算和控制能力的缘故。

1. 光标测量法 这是常用的波形参数测量法。在面板键盘的设置和控制下,在 CRT 上显示两条水平光标线和两条垂直光标线,这些光标线可作步进的移动。这些光标线与显示的波形分别交于光标①和光标②,见图 45-25。由图可见在顺序存储方式下,光标①和②对应于信号 RAM 的地址和数据分别为 dre1、dat1 和 dre2、dat2,设采样时间间隔为 Δt ,则光标①和②的时间间隔 ΔT 和电位差 ΔU 可用下两式计算:

$$\text{时间间隔 } \Delta T = (\text{dre2} - \text{dre1}) \times \Delta t$$

$$\text{电位差 } \Delta U = \text{dat2} - \text{dat1}$$

可见,由键盘设定不同的测量和计算项目,仪器就可根据光标位置进行测量和计算,并将结果以十进制

数显示在 CRT 上。

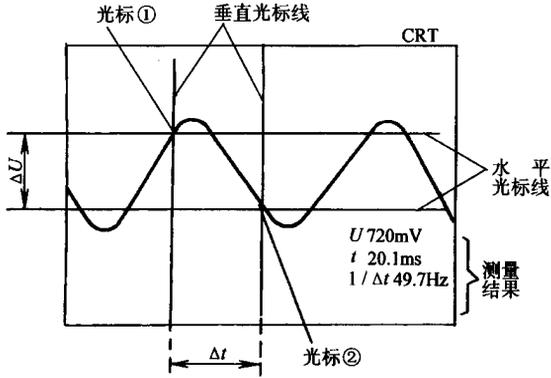


图 45-25 光标测量法

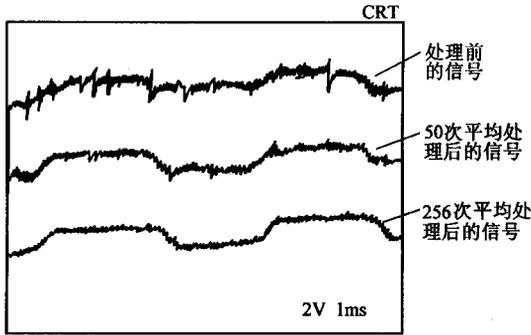


图 45-26 波形的平均值处理

2. 波形的平均值处理 对波形进行平均值处理可改善波形的信噪比,可在 CRT 上观测到淹没在噪声中的信号波形,见图 45-26。由图可见,一个频率和幅值几乎无法辨认的信号,经过 50 次平均值处理后,其波形已经可能观测到,若经过 256 次平均值处理,其波已能完全复现出来。平均值处理次数 N 可由键盘设定。

必须指出,平均值处理功能对于复现带有高频噪声的信号特别有效,而对于噪声频率与信号频率相近时,效果不明显,反而会使波形完全失真。

3. 两波形的 +、-、 \times 运算 使用者在观测 SM_1 和 SM_2 时,对该两个信号进行 +、-、 \times 运算。运算后的波形自动取代 SM_1 的波形,即 $(SM_1) + (SM_2) \rightarrow (SM_1) \pm (SM_2)$

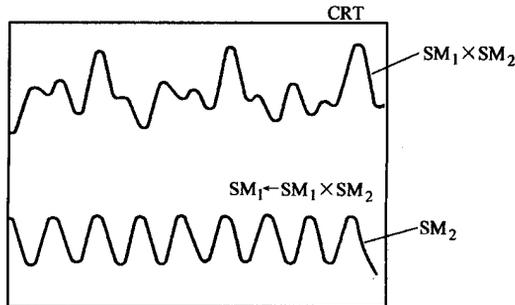


图 45-27 波形的乘积

$-(SM_2) \rightarrow (SM_1) \pm (SM_2) \rightarrow (SM_1) \times (SM_2)$ 因此,在 CRT 上显示的是运算结果的波形。例如,设 SM_1 为电流

波形 SM_2 为电压波形,进行 $(SM_1) \times (SM_2)$ 运算后, SM_1 处显示的是功率波形,见图 45-27。

4. 波形参数与给定数据的运算 智能化数字存储示波器测得的各种波形参数(如前、后沿时间、脉冲宽度、占空比、频率等)能与由键盘输入的给定数据进行 $+$ 、 $-$ 、 \times 、 \div 运算。运算的结果以十进制数显示在 CRT 上。此外,有些数字示波器还可进行微分和积分运算,例如松下 VP-5740-A 型。

5. 窗口判断功能 其典型应用是判断脉冲波形的幅值和宽度是否符合要求,或检查信号 RAM 或显示电路的工作是否正常,具体做法是,利用键盘设定水平和垂直各两条光标线,组成一个“窗口”,见图 45-28。若显示的信号波形落入窗口内,CRT 上显示“yes”,否则,显示“No”。显示“yes”时说明信号 RAM 中有符合窗口范围的数据。

由上述可见,智能化数字存储示波器是模拟示波技术、计算机技术和数字化测量技术有机结合的产物,其结构和功能是多种多样的。前面所介绍的各种功能和实现方法,仅具有一定的代表性,并不能概括其技术的全貌。

目前,智能化数字存储示波器发展很快,已广泛使用 16 位、32 位 CPU 芯片取代 8 位 CPU 芯片,数字信号协处理机、高速存储器及直接存储技术和高速 A/D、D/A 转换器将大量被使用,以提高仪器的控制和计算能力。但是,带宽和价格始终是智能化数字存储示波器是否能取代模拟示波器的两个至关重要的问题。这两个问题的突破性解决,是主要研究方向之一。

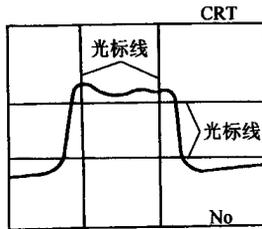


图 45-28 窗口判断功能

第三节 信号的频谱分析

如前所述,电信号既可以用时域分析法来分析,也可以用频域分析法来分析,但它们分析的角度和适用场合是不同的。频域分析法用于测量各种电信号的电平、频响、频率纯度和谐波失真以及网络特性等是有效的。其典型仪器是频谱分析仪。本节主要介绍频谱分析仪的原理、工作特性及其应用。

一、频谱分析仪的种类

根据频谱分析仪的工作原理,可分如下几种类型:

1. 多通道滤波式 该类频谱分析仪需要大量的窄带滤波器,用电子开关依次切换各个通道,各谐波分量依次通过各滤波器后削去负半波,送到 CRT 上显示出谱线。

这种方法虽然可行,但滤波器很多,带宽很难做到很窄,故分辨率和灵敏度较低,目前已很少使用。

2. 扫频滤波式 利用扫描信号对电调谐带通滤波器进行扫频,以覆盖所需的频带。然后检波削去负半周送到 CRT 上显示出谱线。

此种频谱仪虽结构简单、价格便宜,但灵敏度低,分辨率差,特性曲线不均匀。目前也已很少使用。

3. 扫频外差式 这种频谱仪是将被测信号经过一次或多次混频后。其差频分别经过中频放大,然后检波并送到 CRT 上显示出谱线。它具有许多优点,目前常用的频谱仪都是基于这种原理工作的。

4. 时基压缩式 这类频谱仪适用于低频信号的分析,例如声学、机械振动和生物电信号等。它的工作原理是,首先对被测信号进行实时采样,经 A/D 转换变成数字量存储于存储器中,然后快速读出经 D/A 转换复现成高频信号,送到外差式频谱分析仪中进行分析。

5. 快速傅里叶变换(FFT)式 首先对被测信号进行实时采样、A/D 变换和数据存储,然后用电子计算机完成频谱分析。根据这一原理组成的频谱分析仪使仪器具有更多的功能,例如,除了能测量幅频特性、相频特性、延时特性和回波损耗等参数外,还能给出传递函数以及用于各种随机信号的测量等。电子计算机在频谱分析中的应用,使仪器的各项性能指标有了很大的提高。

二、频谱分析仪的工作原理

结合本课程的性质,这里仅介绍中频频谱分析仪和低频频谱分析仪的工作原理。

(一)中频频谱分析仪的原理

中频外差式频谱分析仪有一次混频滤波式和多次混频滤波式两种。一次混频滤波式的滤波特性所获得的窄脉冲,实际上是一个动态幅频特性图形,不是一条理想的线条。而且其选频特性较差,灵敏度和频率分辨率较低,故较多使用多次混频滤波式组成中频频谱分析仪。图 45-29 示出了四次混频、滤波和中放的频谱分析仪的原理框图。这类仪器可获得较好的性能指标。

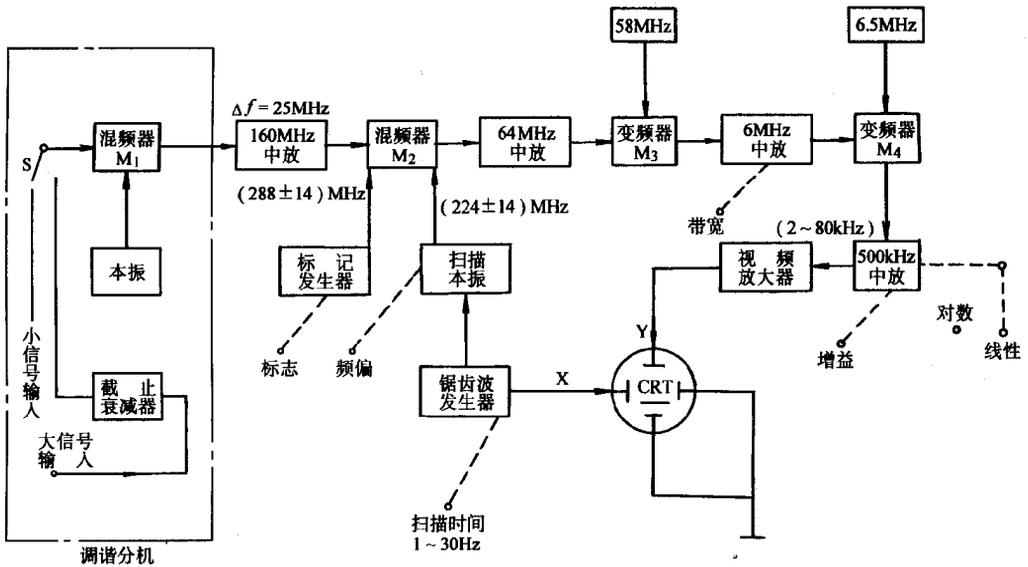


图 45-29 中频频谱仪方框图

本仪器除了 10 ~ 50MHz 信号频带的带宽是 5MHz 外,其余信号的带宽均是 25MHz。幅度较大的信号由衰减器衰减后由选择开关送到第一级混频器输入端,而小幅度信号直接送到第一级混频器。在第一级混频器中与本机振荡信号混频和滤波后得到 160MHz 中频信号,经过 160MHz 的中频放大器放大,该放大器是个线性的选频放大器。其输出在第二级混频器 M₂ 中跟扫描振荡器输出的信号和标记发生器输出的信号进行混频、滤波,然后将差频是 64MHz 的中频信号送到第二级中频选频放大器中放大。扫描振荡器是一个压控振荡器,其输出信号的频率受锯齿波发生器输出的扫描信号调制,其中心频率是 224MHz,扫描宽度是 28MHz。标记发生器输出信号的频率为 (288 ± 14)MHz。第二级中放后的信号在第三级混频器中与 58MHz 的本机振荡信号再次混频和滤波,输出 6MHz 的信号经第三级选频中放(6MHz)放大。然后再经第四级混频器与 6.5MHz 的本机振荡信号混频和滤波,其输出为 500kHz 的中频信号,在第四级中放中进行放大。本级放大电路有线性放大器和对数放大器可供选择。为了扩展显示器的显示动态范围,可选择线性放大器。仪器的增益

调节也设计在这一级。最后经视频放大和利用检波器削去负半波送到显示器的 Y 偏转板,使光点产生垂直位移。锯齿波发生器产生的锯齿波经 X 轴放大器后,送到 X 偏转板,使光点产生水平偏移,从而显示出被测信号的频谱。

由于扫频本机振荡器输出的扫频信号的频率与锯齿波扫描电压的幅值成正比,所以屏幕上显示的水平亮线就成为频率基准线。

下面对一部分电路进行分析。

1. 频率可调振荡器 这部分电路的简化原理图见图 45-30。由图可见,晶体管 V 与其连接的电感 L 和电容 C 组成电容三点式振荡器,其振荡频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

可见,调节电容 C 即可改变振荡器的频率。电容 C₉ ~ C₁₁ 的作用是频率补偿。采用优质电容器可使频率稳定度达到 10⁻⁴ 数量级。振荡信号通过电容 C₁₂ 耦合到放大器 A。

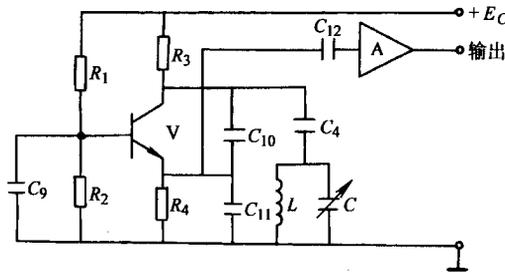


图 45-30 调频振荡器简化原理图

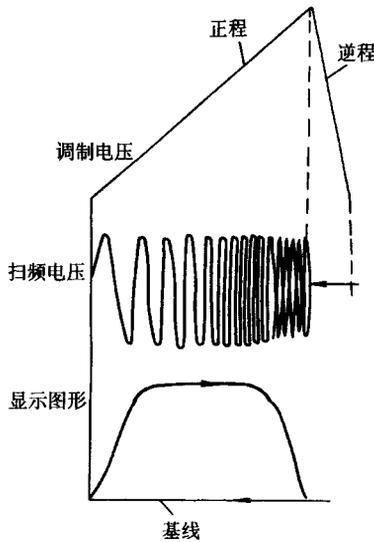


图 45-31 扫描电压与图形显示的关系

放大器 A 由两级组成,前级是由晶体管组成具有负反馈的反相放大器,以稳定振荡信号的幅值;第二级是由晶体管组成的射极跟随器进行阻抗变换,其发射极的电位器调节输出电压的幅值,然后送到混频器。

2. 扫描本机振荡器 本电路输出频率与扫描控制电压的幅值成比例的扫频信号,见图 45-31。振荡器的控制电压和显示器的扫描电压均用锯齿波电压。其正程产生扫频信号,而返程停止扫频,屏幕上亮点回扫。屏幕上 X 轴的亮线成为频率基准线。

电路形式与调频振荡器相同,见图 45-32。图中,上部分是扫频振荡器,下部分是扫频控制器。在锯齿波电压的调制下,其输出信号是扫频信号。晶体管 V_3 与电感线圈 L_1 和变容二极管 VD_{C1} 、 VD_{C2} 组成电容三点式振荡器,其振荡频率由式决定。调节 C_7 可以微调扫频信号的中心频率 f_0 。

(1)变容二极管的扫频原理 变容二极管的结电容随着施加的反向偏置电压的大小而变化。结电容 C_D 与电压 U 的关系,可用下式表示:

$$C_D = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U}{U_D}\right)^n}$$

式中, C_0 为零偏压时的结电容; U_D 为 PN 结的正向压降(硅管为 0.7V); n 为电容变化指数(1/3 ~ 5)。

将变容二极管接入振荡电路后,随着其反向电压的变化,振荡器的振荡频率亦发生变化。设扫描电压为

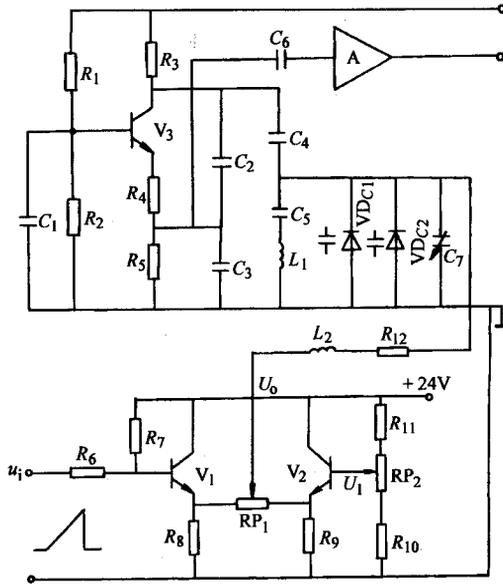


图 45-32 扫频振荡器

$U = U_0 + U_m \cos \omega_s t$, 其中 U_0 是直流偏置电压; U_m 为扫描电压的幅值; ω_s 为扫描电压的角频率, 则式可写成

$$C_D = \frac{C_0}{\left[1 + \frac{1}{U_D}(U_0 + U_m \cos \omega_s t)\right]^n} = \frac{C_{D0}}{(1 + m \cos \omega_s t)^n}$$

式中 $m = U_m / (U_D + U_0)$ 为电容调制度; $C_{D0} = C_0 [1 + (U_0 / U_D)]^n$ 为直流偏置电压 U_0 时的结电容。

由上式可见, 结电容被扫描电压所调制, 调制的规律取决于 n 和 m 。将变容二极管接入振荡回路, 其瞬时振荡频率为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LG_D}} = \frac{1}{\sqrt{LG_{D0}}} (1 + m \cos \omega_s t)^{n/2} = \omega_0 (1 + m \cos \omega_s t)^{n/2}$$

式中, ω_0 为直流偏置电压 U_0 时, 回路振荡的角频率, 即扫频的中心频率。

由上式可见, 如果取 $n = 2$ 时

$$\omega = \omega_0 (1 + m \cos \omega_s t)$$

此时获得线性扫频。同时, 电容调制度愈深 (m 愈大) 扫频宽度愈宽。

(2)扫频控制电路 这部分电路见图 45-32 的下部, 由晶体管 V_1 和 V_2 组成射极跟随器, 电位器 RP_1 的动触头输出到扫频振荡器。分析时, 可将两个射极跟随器等效为两个信号源, 见图 45-33。图中, $U_s(t)$ 是扫描电压; U_1 是固定直流电压; $U_f(t)$ 是输出电压; $R_1 + R_2 = RP_1$ 。由图可求出 $U_f(t)$ 为:

$$U_f(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} [U_s(t) - U_1] + U_1$$

可见,扫频控制电路的输出 $U_0(t)$ 也是个锯齿波电压,其幅值大小取决于电位器两边电阻 R_1 和 R_2 的分压,调节电位器 RP_1 即可改变振荡器调制电压的幅值,从而改变了扫频宽度。

同时还可看出,调节电位器 RP_2 可改变直流偏置电压 U_1 的大小,从而控制了扫频信号的中心频率 f_{00} 。

若调节 RP_2 使 $U_1 = (U_{sm} + U_{sn})/2$, 其中 U_{sm} 和 U_{sn} 分别是锯齿波的最高电平和最低电平。此时正是锯齿波电压正程时间了的一半,即

$$U_0(t) = U_0(T/2) = (U_{sm} + U_{sn})/2 = U_1$$

由式可知,此时 $U_0(t) = U_1$, 且与 $R_1/(R_1 + R_2)$ 无关。这就说明,调节 RP_1 改变扫频宽度时,不影响显示器屏幕中心的扫描电压 $U_0(T/2)$, 它是个常量。因此保证了扫频信号的中心频率不因扫频宽度的改变而变化,它只取决于直流偏置电平 U_1 之值。

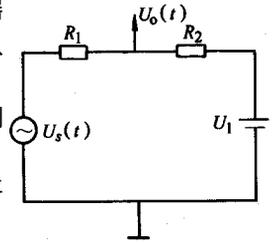


图 45-33 扫频控制器的等效电路

3. 混频器 混频电路有二极管混频器、环形混频器和双三极管混频器。由于双三极管混频器的结构简单,无需变压器和有一定的混频增益,故得到广泛的应用。电路形式见图 45-34。图中, V_1 和 V_2 组成平衡混频器, V_3 和 V_4 是两级射极跟随器,点划线框内的 LC 元件是低通滤波器。 u_s 和 u_k 分别是扫频信号和调制信号,它们分别加于 V_2 和 V_1 的基极,二极管的公共集电极电阻 R_3 上获得混频信号。设三极管 V_1 和 V_2 完全对称,并且 $R_1 = R_4$ 。

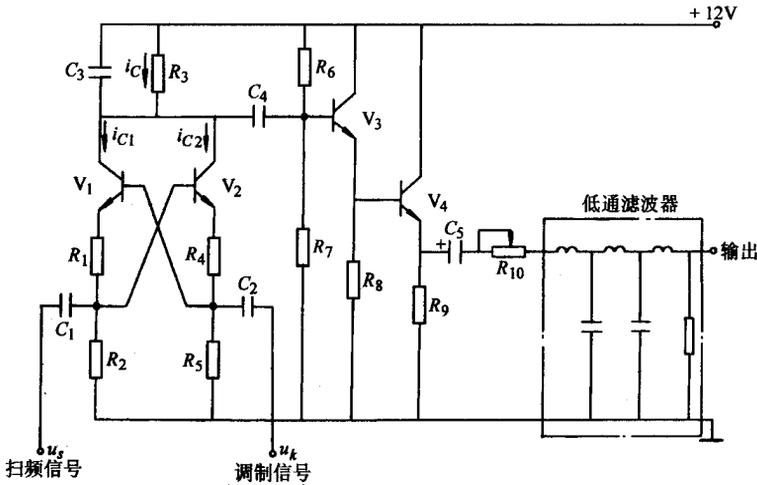


图 45-34 双三极管混频器

设二个混频信号分别为：

$$u_s(t) = U_{sm} \sin \omega_s t$$

$$u_k(t) = U_{km} \sin \omega_k t$$

并且调制信号 $U_k(t)$ 的幅值远远大于扫频信号 $u_s(t)$ 的幅值,故两晶体管工作状态完全由 $u_k(t)$ 决定,一个管子饱和导通,另一个管子必然截止,工作于开关状态。设二晶体管的开关函数分别为 $K_1(t)$ 和 $K_2(t)$, 导通时它的值为 1,截止时它的值为 0,见图 45-35。

由图 45-35 可见, $K_1(t)$ 开关函数是个方波,可以按傅里叶级数展开

$$K_1(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\sin 3\omega t - \frac{1}{3} \sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \mp \frac{1}{n} \sin n\omega t \right)$$

可见,除了基波 $\sin \omega t$ 外,还含有 3, 5, 7, ... 等奇次谐波。

由图 45-35 可写出 $K_2(t)$ 的表达式

$$k_2(t) = 1 - k_1(t)$$

(45-11)

由图 45-34 可写出晶体管 V_1 和 V_2 的基射电压分别为：

$$U_{de1} = U_k - U_s$$

(45-2)

$$U_{be2} = U_s - U_k$$

(45-3)

当晶体管 V_1 和 V_2 导通进入放大区时，它们的集电极电流分别为：

$$i_{C1} = g_m U_{de1} K_1(t)$$

$$i_{C2} = g_m U_{be2} K_2(t)$$

式中 g_m 为 V_1 和 V_2 的动态跨导。

流经电阻 R_3 的集电极电流为：

$$i_c = i_{c1} + i_{c2} = g_m [U_{be1} k_1(t) + U_{be2} k_2(t)]$$

将式 (45-1)、式 (45-2) 和式 (45-3) 代入上式得：

$$i_c = g_m [\alpha (U_k - U_s) K_1(t) - (U_k - U_s)]$$

将式代入上式得：

$$i_c = \frac{4g_m}{\pi} \left(U_{km} \sin^2 \omega_k t + \frac{1}{3} U_{km} \sin \omega_k t \sin 3\omega_k t - U_{sm} \sin \omega_s t \sin \omega_k t - \frac{1}{3} U_{sm} \sin \omega_s t \sin 3\omega_k t + \dots \right)$$

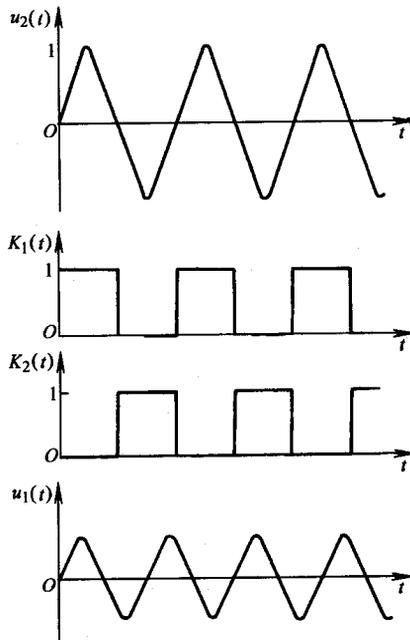


图 45-35 开关函数波形图

上式用三角函数和差公式化简，则可知 i_c 中包含有下列频谱分量：

- (1) 直流分量；
- (2) 调制信号 $U_k(t)$ 的偶次谐波 $2\omega_k, 4\omega_k, \dots$ ；
- (3) 差频信号 $\omega_k - \omega_s$ 以及和频信号 $\omega_k + \omega_s$ ；
- (4) 旁频信号 $3\omega_k + \omega_s, 3\omega_k - \omega_s$ 等等。

将混频信号画成频谱图,见图 45-36。



图 45-36 混频器的输出频谱

由图 45-36 可见,其它信号的频率与差频 $\omega_k - \omega_s$ 相差甚远,很容易用低通滤波器滤掉。

在图 45-34 中,集电极电流 i_c 在公用电阻 R_3 上产生压降,经 V_3 和 V_4 两级射极跟随器进行阻抗变换,然后经 LC 低通滤波器,输出仅含两个信号的差频信号,送到下一级中放。

4. 频标电路 频标是频率标尺的简称。用于对显示器屏幕上的水平方向的频率线进行刻度,以便读出各谐波分量的频率值。

频标的种类很多,产生的方法各异。由于篇幅所限,这里仅介绍产生通用频标的方法。

通用频标产生电路的原理框图见图 45-37。频率随时间线性变化的扫频信号 f 与谐波发生器产生的谐波信号 nf_s 在混频器中进行混频。由于谐波信号 nf_s 含有按自然数 $1, 2, 3, \dots$ 排列的各次谐波,故它是个频谱极宽的谐波信号。当两个信号在混频器里混频时,扫频信号扫到每一个谐波频率时,都会发生一次零差频过程,这样就会产生一系列菱形频标。这一系列菱形频标就组成了通用频标,如图 45-38 所示。

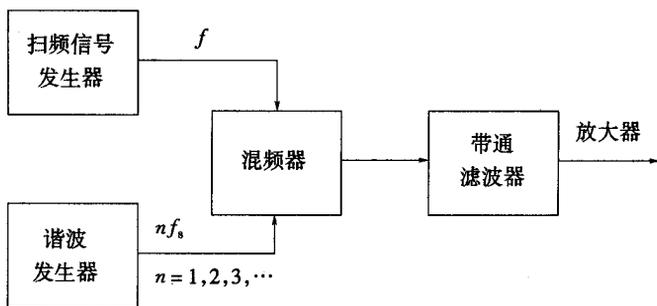


图 45-37 形成通用频标的原理框图

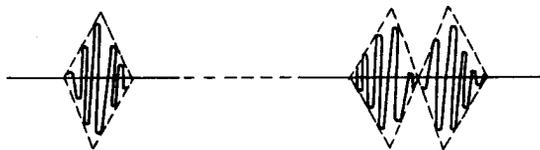


图 45-38 菱形频标的形状

由混频器的混频原理可知,除了零差频外,输出信号中还含有许多其它频率的信号,因此必须用带通滤波器将差频中频率高的一部分和零差频附近的低频信号滤掉,只保留零差频点左右对称的一部分低频差频信号的波形,故滤波器输出是一系列菱形通用频标。

图 45-39 为一种实用频标电路的框图。

石英晶体振荡器及整形电路产生 100kHz 的方波脉冲,不经分频或经十进分频后送到窄脉冲形成电路,将方波脉冲整形为前沿很陡的尖脉冲 f_s 。在混频器中与扫频信号 f 进行混频,当扫频信号扫到 100kHz 或 10kHz 的整数倍时,两信号产生零差频,经低通滤波器滤去零差频附近的信号后,去触发单稳态触发器,其输出是尖状脉冲频标送显示器进行频率刻度。

由于这一频标电路输出的是针状脉冲,所占宽度较小,从而提高了测量的分辨率。

图 45-40 示出了一种实用的窄脉冲形成电路,它是一个由阶跃二极管 VD 组成的窄脉冲形成电路

图中,晶体管 V_1 是高 β 值的高速开关管,它工作于限幅放大状态。 V_2 和 V_3 是两级射极跟随器,其作用

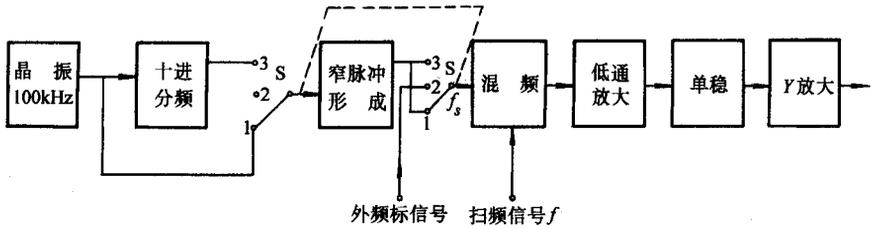


图 45-39 一种实用频标电路的框图

是阻抗变换和隔离,以防止阶跃尖脉冲的倒灌。阶跃二极管 VD、电容 C_3 、 C_4 以及 R_7 和 R_p 组成窄脉冲形成电路。电源 E_- 、 R_p 和 R_7 决定阶跃管 VD 的静态偏置电流 I_F 的大小。调整 R_p , 可以获得最佳的窄脉冲波形。

当输入端有方脉冲输入时,如果选用 2CJX 型阶跃管,电路参数选择合适,在幅值为 1V、50MHz 方波信号输入下,可获得前沿为 0.4ns 的方脉冲输出。

5. 对数放大器的原理 第四级中放(50kHz)中,有对数放大器和线性放大器可供选择。图 45-41 示出了对数放大原理。

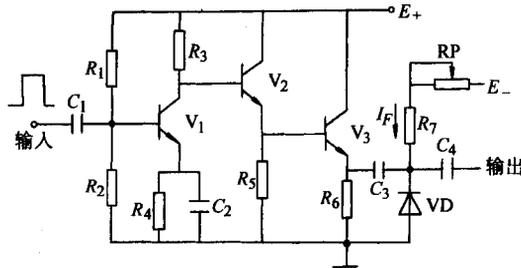


图 45-40 窄脉冲形成电路

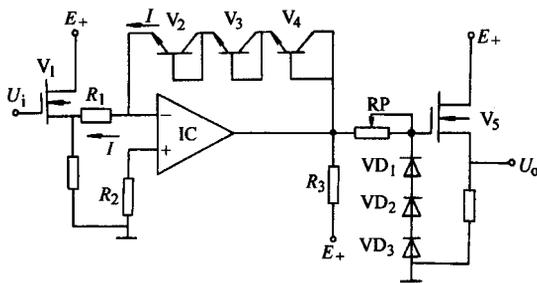


图 45-41 对数放大器原理

图中场效应晶体管 V_1 是为了阻抗变换,集成运算放大器 IC 和接成二极管的 $V_2 \sim V_4$ 组成了对数放大器; E_+ 和 R_3 给 $V_1 \sim V_4$ 提供偏置电流,对数放大器接成负反馈放大器。二极管 $VD_1 \sim VD_3$ 是补偿元件。 V_5 接成射极输出器用来提高输入阻抗和驱动能力。

根据二极管的伏安特性,并结合图 45-41,流过二极管的电流为:

$$I = I_D(e^{-au_0} - 1)$$

式中 I_D 为二极管的反向饱和电流; u_0 为二极管两端电压; $a = q/(kT)$, q 为电子电荷量($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C), k 为玻耳兹曼常数($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T 为绝对温度。

当 $U_0 \gg 1/a$ 时,则

$$I = I_D e^{-aU_0}$$

首先讨论反馈回路中接一只二极管的情况。设 IC 是理想的运算放大器,则流过 R_1 的电流和二极管电流相等,即

$$\frac{U_i}{R_1} = I_D e^{-aU_o}$$

由上式解出 U_o 为:

$$U_o = -\frac{1}{a} \ln \frac{U_i}{R_1 I_D}$$

在常温下, $T = 300K$,将数据代入,可得 $1/a = 26mV$ 。代入式中,并换成以 10 为底的常用对数,则有

$$U_o = -60 \lg \frac{U_i}{R_1 I_D} mV$$

此式说明,对数放大器的传输特性是: U_i 增大 10 倍, U_o 约减小 60mV,在反馈回路中接三只二极管,则 U_o 约减小 180mV。

由于 U_i 是交流信号, U_o 通过反馈二极管反馈回到输入端,实际上 $V_2 \sim V_4$ 工作在平方律特性,故对放大器的运算规律产生影响。因此,在运放的输出端接三只二极管,利用二极管的非线性对放大器的误差进行补偿,调节电位器 RP 即可达到最佳补偿,从而减小运算误差。

这种频谱分析仪结构简单,成本低,在小信号测量时,使用方便,但灵敏度低,动态范围较小,最大频偏只有 25MHz。尽管如此,目前仍然是一种常用仪器。

(二) 低频频谱分析仪的原理

分析或测量频率较低的信号如声学、振动和生物电信号等,频谱仪必须解决的问题是选用窄带滤波器。要使窄带滤波器获得较好的频率响应特性,要求扫描频率必须很慢,但这样难以得到清晰的显示。解决的方法之一是用数据存储显示器。图 45-42 为典型的低频频谱分析仪原理框图。

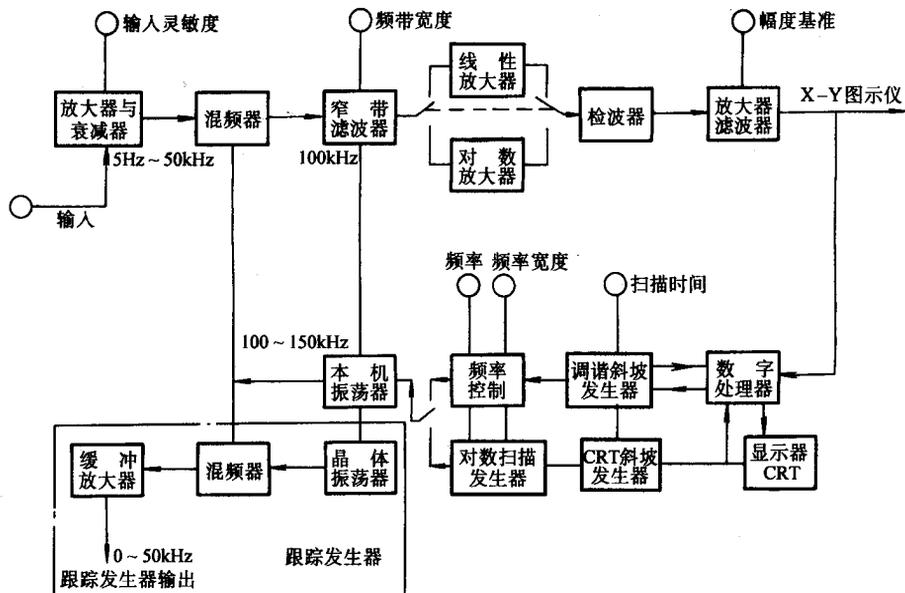


图 45-42 典型的低频频谱分析仪原理框图

5Hz ~ 50kHz 的低频被测信号在前置放大器中经过衰减和放大到一定的电平。在混频器中与 100 ~ 150kHz 的扫频信号混频, 50kHz 的差频信号经窄带滤波器滤去其它频率的谐波送入中频放大器。可选择线性放大器或对数放大器以满足不同的要求。中频放大后进行平均值检波、滤波和直流放大后分两路输出: 一路送到机外的 X-Y 图仪描绘出相应的频谱图; 另一路送到数字处理部分进行数据处理。

数据处理器的作用是进行数据的采样、A/D 转换、D/A 转换和控制 CRT 显示器显示频谱。同时控制调

谐斜坡发生器、频率控制器,从而控制本机振荡器,产生频率稳定性很高的扫频信号。因为仪器使用了频带非常窄的滤波器,故如果本振的扫频信号不稳定,将导致滤波器的频响加宽。因此采用变容二极管 LC 压控振荡器,振荡频率为 1~1.5kHz,经 10 分频后变成 100~150kHz 的扫频信号,提高了频率稳定性。

100~150kHz 的扫频信号与 100kHz 的晶体振荡器输出信号在混频器中混频,其差频 0~50kHz,经缓冲放大后的输出是跟踪信号发生的输出信号。跟踪发生器输出信号的频率紧跟仪器调谐的中心频率。频谱仪与跟踪发生器的组合应用,可以扩展仪器的功能。

由上述可见,低频频谱仪与前述的扫频外差式频谱仪相似,下面仅对它的一些特殊性技术作扼要的介绍。

1. 自适应的扫描速度 所谓自适应的扫描速度就是指扫描速度根据输入信号的幅值作适当的调整。图 45-43 示出了自适应扫描信号的波形。图中, U_R 是所选定的某一阈值电压,当检测到谱线幅值小于这个阈值时,扫描速度比正常速度加速 20 倍。只有当扫描线通过的谱线幅度超过阈值 6dB 时,扫描先返回,再停止一段时间,然后以所选择的速度扫描,这样可使得谱线有个清晰的显示。因为设置的阈值往往比显示的频率基准线上的噪声电平高一些,故显示在基线的噪声被抑制掉,好像被削波限幅一样。

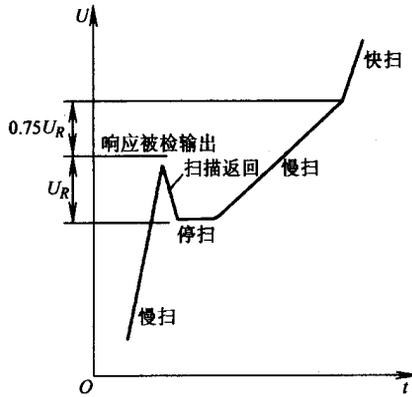


图 45-43 自适应扫描信号波形

2. 采用频率负反馈稳频措施 为了使本振的振荡频率与控制电压成严格的线性关系,以提高本振的频率精确度,故采用了精密鉴频器,见图 45-44。由图可见,它是一个频率负反馈系统,由 10 分频器与精密鉴频器组成反馈环节,输入信号和反馈信号在误差放大器中进行比较。可以证明,压控振荡器的控制电压 U_4 对振荡器输出信号的频率的线性度取决于鉴频器的特性。其比较过程简述如下:

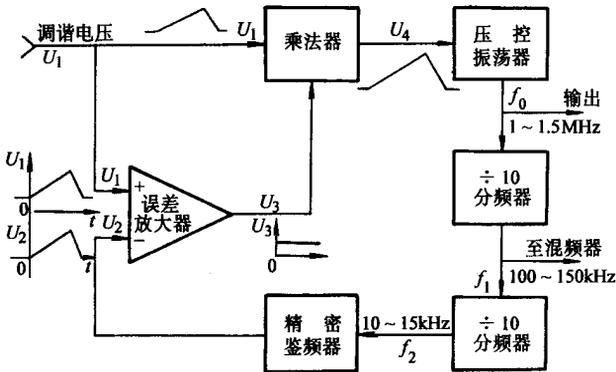


图 45-44 精密鉴频器方案

压控振荡器实际上是前述的变容二极管电容三点式振荡器,输出信号的频率 f_0 为 1~1.5kHz,经 10 分频变成 f_1 为 100~150kHz,一路送到混频器;另一路经反馈回路 10 分频成 f_2 为 10~15kHz。 f_2 信号经鉴频器转换成与之成正比的线性电压 U_2 ,即 $U_2 = kf$ 。可见 f 在 10~15kHz 内变化时, U_2 就线性增加。 U_2 与从斜

坡发生器来的斜坡电压 U_1 在误差放大器中比较。若 U_2 与 U_1 完全一致,误差放大器的输出电压 U_3 是恒定的直流电压。在乘法器中,斜坡电压 U_1 与 U_3 相乘,其输出 U_4 的波形仍然是与 U_1 完全一致的波形。如果压控振荡器输出信号的频率为非线性(例如频率 f_1 高端偏高,设 f_1 由 150kHz 变成 160kHz),经鉴频器后输出电压也是高端偏高,经误差放大后, U_3 不是恒定直流电压,而是对应 U_1 的高端位置 U_3 偏低,相乘后, U_4 的高端也偏低,从而使压控振荡器的输出信号频率高端下降,因此实现严格的线性扫频。

如前所述,扫频的线性度取决于鉴频器的特性。本仪器用精密数字鉴频器,其原理框图见图 45-45。

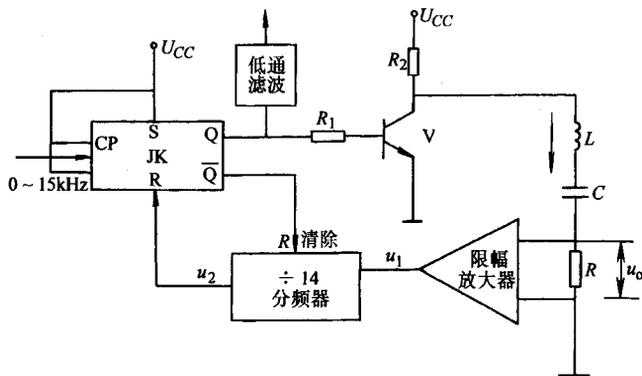


图 45-45 精密数据鉴频器原理图

数字鉴频器的输出信号由 JK 触发器的 Q 端经低通滤波后送到误差放大器的输入端(反相端)。10~15kHz 的扫频信号加于 JK 触发器的脉冲输入端 CP,在扫频正弦波信号的某一个周期内,当波形经过零点时触发器翻转一次。设某时刻 Q 端为低电平,晶体管 V 截止, U_{cc} 经电感 L 对 C 充电;当触发脉冲到来时,晶体管由截止变饱和和导通, C 通过 L、V 对“地”放电,由于电感 L 的作用,放电过程将产生等幅的正弦振荡。合理选择 L、C 参数,使其振荡频率为 280kHz。振荡信号在电阻 R (8Ω) 上的压降经限幅放大后变成近似的方波,经 14 分频后使 JK 触发器复位。因此 JK 触发器的输出脉冲宽度为 $50\mu\text{s}$,是个恒定值,它取决于 LC 振荡的频率。JK 触发器 Q 端的正跳变使分频器复位。可见鉴频器脉冲宽度是稳定的。但是输入信号频率(10~15kHz)变化时,JK 触发器的周期也作线性变化。其变化规律是:输入信号频率增加,输出脉冲周期减小,经低通滤波后,其直流平均值增加。例如输入信号为 10kHz 时,脉宽为 $50\mu\text{s}$,其周期是 $100\mu\text{s}$,鉴频器输出信号的直流平均值为:

$$U_o = \frac{50\mu\text{s}}{100\mu\text{s}} \times U_m = \frac{1}{2} U_m$$

式中, U_m 为 JK 触发器输出的高电平值,是常数。当输入信号为 15kHz 时,其周期为 $66\mu\text{s}$,脉宽仍为 $50\mu\text{s}$,因此 U_o 变为:

$$U_o = \frac{50\mu\text{s}}{66\mu\text{s}} \times U_m = 0.75 U_m$$

由此可见,当输入的扫频信号频率在 10~15kHz 内变化时,鉴频器的输出信号电压在 $0.5 \sim 0.75 U_m$ 内作线性变化,保持严格的线性扫频,频率稳定度很高,能满足仪器的要求。

3. 信号的数字处理 用 CMOS 的 RAM 存储数据是低频频谱仪常用的方法。它能节省功耗,市电断电时能用电池长期保持存储的数据,且能较容易实现扫描电压的上升和下降。

数据处理部分的框图见图 45-46。图中随机存储器 RAM 选用 1024×8 阵列。在 1024 个地址单元中,每一个都对应着显示器 CRT 的 X 轴的一个位置。每个地址存储的数据都是二进制 8 位,它代表 Y 轴信号的幅度,即 Y 轴信号用 256 个电平来表示,其精确度可达 0.4% ($1/256$)。

时钟脉冲 CP_1 分别控制地址多路开关 S 和 10 位 CRT 地址计数器。在 CP_1 的控制下,多路开关可以接向 10 位 A/D 转换器或接向 10 位 CRT 地址计数器。 CP_1 为高电平时为写 RAM,低电平时为读 RAM; CP_2 为高电平时,起动 A/D 和允许缓冲器输出数据; CP_3 为高电平时写 RAM。这三个脉冲的相位关系见 45-47。

代表被测信号各次谐波分量平均值的直流电压 U_i 经 8 位 A/D 转换为数字量。调谐斜坡发生器输出的

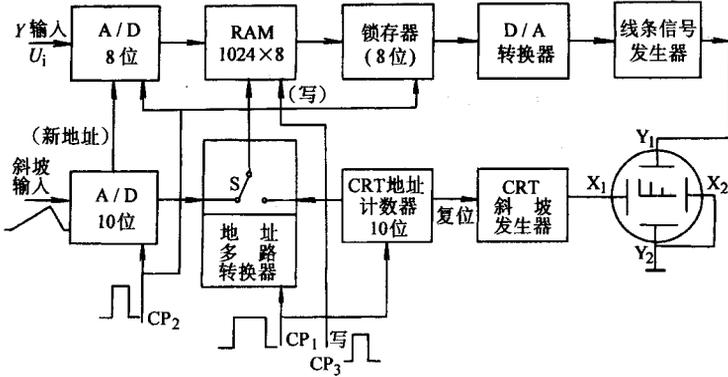


图 45-46 数字处理部分框图

斜坡电压经 10 位 A/D 转换成各次谐波分量的地址。

当 CP_1 为高电平时, CP_3 亦为高电平, 将 10 位 A/D 转换器的地址和 8 位 A/D 转换器的数据写入 RAM 中, 同时 10 位 CRT 地址计数器加 1, 并且复位 CRT 斜坡发生器, 产生锯齿波电压实现同步扫描。当 CP_1 为低电平时, CP_2 为高电平, CP_2 起动两个 A/D 转换器开始转换, 为下一次写 RAM 准备好数据, 同时允许缓冲器的数据输出到 D/A 转换器, 而 CP_1 的低电平将 RAM 中的数据读到缓冲器锁存, 为下一次输出数据作准备。送到 D/A 的数据转换成模拟量, 给线条发生器变换成线条送到 Y 放大器放大后送到显示器的 Y 偏转板, 使电子束产生垂直偏转。同时 CRT 发生器输出 50Hz 固定频率的斜坡电压进行 X 轴扫描产生频率基准线。对每一个取样值而言, Y 偏转是一个亮点, 而 256 个亮点连成的轨迹确定一条亮线。

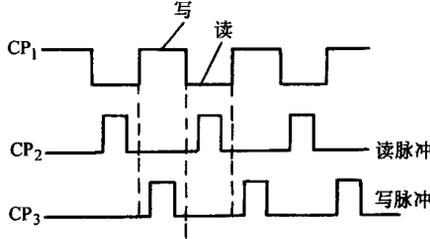


图 45-47 三个脉冲的相位关系

调谐斜坡电压扫描速度很慢, 在每个 X 轴位置都有几个写状态。例如最长扫描时间为 2000s。X 轴有 1024 个地址, 在每个地址停留约 2s。这一段时间内 Y 轴的信号可以变化, 输入信号的最高频率是 50kHz, 因此共有 10^5 个写状态。

三、频谱分析仪的工作特性

扫频外差式频谱分析仪的主要工作特性有幅频特性、频率特性和扫频特性。

1. 幅频特性

(1) **量程** 被分析的信号包含有各种频率分量, 而且各频率分量的幅值相差甚远, 故要求仪器要有非常宽的量程, 一般都在 120dB 以上。

(2) **动态范围** 频谱仪的动态范围上限主要由非线性失真来决定, 而动态范围的下限主要由仪器的剩余响应决定。剩余响应是指没有信号输入时, 由于内部或外部的某些干扰, 屏幕上仍出现一些不需要的显示。动态范围一般在 60~120dB 内。

(3) **灵敏度** 它表征了仪器测量微小信号的能力。显示幅度为满度时输入信号的电平值称为灵敏度。

仪器的灵敏度越高,动态范围就越大。

2. 频率特性

(1) 频率范围 能够被分析的输入信号的频率的上、下限之间的频段称为频谱仪的频率范围。

(2) 频率分辨率 频谱仪能区分的最小谱线间隔称为频率分辨率。它表征辨别两个很接近的频率分量的能力。中频放大器和滤波器的带宽都是影响频率分辨率的主要因素。

3. 扫频特性

(1) 扫频宽度(分析频谱) 频谱仪在一次分析中所显示的频率范围称为扫频宽度。扫频宽度愈宽,愈能观测被测信号的全貌,但其频谱分辨力较低,不宜分析频谱细节。通常扫频宽度是可调的。

每厘米对应的扫频宽度称为频宽因数。用 kHz/cm 或 MHz/cm 表示。

(2) 分析时间和扫频速度 完成一次频谱分析所需的时间称为分析时间,即是本机振荡器频率扫完整个扫频宽度所需的时间。扫频宽度与分析时间之比称为扫频速度。

扫频速度对灵敏度和频率分辨率是有影响的。可以证明,扫频速度快,频率分辨率要变坏,灵敏度也要下降。要合理选择扫频速度,以保证有较高的灵敏度和较好的分辨率。

四、频谱分析仪的应用范围

1. 测量信号的参数 由频谱分析仪的原理可知,用频谱仪可以测量信号本身(即基波)及各谐波分量的频率,各谐波分量之间的间隔,根据谱线的抖动情况可以判断信号频率的稳定度。

直接显示基波及各次谐波的幅度,可以测量信号的失真度及判断失真的性质。

由于频谱仪具有高性能的选频特性,可用作选频电压表,例如测量工频干扰的大小。

可以对调制信号的调幅度、调幅失真度等进行测量。例如,调幅信号、频率和相位调制信号以及脉冲调制信号等的调幅度和调幅失真度均可用频谱仪来测量。

由于频谱仪具有较高的灵敏度,故对小信号的频谱测量成为易事。

2. 噪声测量 这方面的应用包括信号噪声的测量,随机噪声的测量以及放大器噪声系数的测量。频谱仪广泛应用于各种家用电器、电子仪器仪表以及各种电子设备的噪声测量。

3. 电子设备的调试 通过频谱仪显示信号的各种频率成分及幅度,利用频谱仪来调试分频器、倍频器、混频器、衰减器、频率合成器以及数字电路等是很方便的。

对于非电量的测量,通过转换器均可用频谱仪进行测量。

4. 网络分析 利用频谱仪测试线性网络和非线性网络的失真度以及网络的幅频特性是很方便的。

5. 信号仿真测量 在电声设备的制作和调试过程中,通过频谱仪对各种电声设备的频谱进行精确的测量,然后与被仿真的电声设备进行精确的对比,从而提高电声设备的仿真效果。同理,通过频谱仪的协助,也可实现语言、音乐仿真。

6. 用于国防 目前,在国防方面常利用电磁波的干扰与反干扰,跟踪与反跟踪进行对抗。此时可利用频谱仪对敌方的电台发射的信号进行有效的侦察、搜索和监视。在航空航天技术中也得到广泛的应用,例如用于测试各种发射和接收设备的性能和观察卫星地面站各种设备的工作情况等。

第四节 示波器的选择

一、示波器的选择

示波器的种类很多,新产品日新月异,对使用者来说,如何根据被测信号的特点正确选择示波器,是一个

很重要的问题。

(一) 一般选择原则

通常根据被测信号的特点、测试目的和经济性来综合选择，一般原则为：

1. 只定性观测信号波形的形状，而且是正弦波，频率也不高。从经济方面考虑可选用简易示波器。
2. 欲对被测信号的幅度或时间进行定量测量，信号为脉冲波或频率较高的正弦波，应选择宽频带示波器。
3. 希望显示的两个信号波形是相互独立的，可选择双线示波器。
4. 希望更多的 y 通道显示，可选择四踪、八踪示波器。
5. 欲测量低频缓慢变化的信号，可选择长余辉慢扫描示波器。
6. 希望对波形的任何局部突出显示，可选择双扫描示波器。
7. 如果希望将波形存储起来以便事后进行分析研究，可选择记忆示波器或数字存储示波器。
8. 欲观测频率高于 100MHz 的周期性信号，可选择取样示波器。
9. 特殊用途的应选择专用示波器，例如高压示波器等。

(二) 按示波器的性能来选择

如果按示波器性能的适用范围来选择，应主要考虑下列三项主要指标：

1. 频带宽度 频带宽度 f_B 决定了示波器可以观测周期性连续信号的最高频率或脉冲信号的最小宽度。由于脉冲波形具有多种谐波成分，欲要真实地显示脉冲波形，y 通道必须具有足够的 f_B 。 f_B 值与被测信号最高频率 f_m 的关系如图 45-48 所示。图中 δ 是最高频端幅度降低的百分比。由图可见，观测 $f_m = 100\text{MHz}$ 的信号，欲 $|\delta| < 8\%$ ，则需选择 $f_B = 200\text{MHz}$ 的示波器；欲 $|\delta| < 3\%$ ，则需选择 $f_B = 330\text{MHz}$ 的示波器。这就说明，要想得到幅度基本不衰减的显示，选择示波器的 f_m 要等于 f_B 的 3 倍以上。显然，若选择示波器的 f_B 值与 f_m 相近是不合适的。

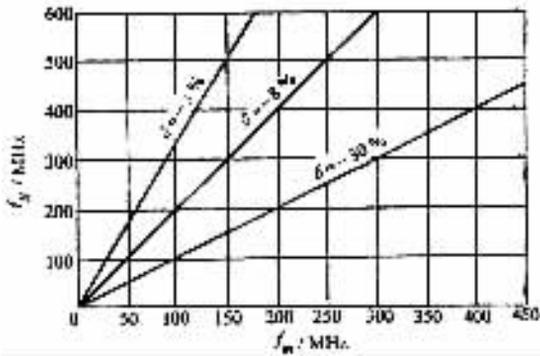


图 45-48 示波器的 f_B 与信号最高频率的关系

由式可知，示波器的带宽 f_B 与上升时间的关系为：

$$f_B t_{r0} \approx 350$$

式中 f_B 和 t_{r0} 的单位分别是 MHz 和 ns。

如果选择示波器的上升时间 t_{r0} 等于被测信号的上升时间 t_{rs} 的 1/3 时，

$$t_{r0} = \frac{1}{3} t_{rs}$$

应选择示波器

$$f_B \approx \frac{350}{t_{r0}} = \frac{350}{\frac{1}{3} t_{rs}} \approx \frac{1000}{t_{rs}}$$

若选 $t_{r0} = \frac{1}{5} t_{rs}$ 时

$$f_B \approx \frac{1750}{t_{rs}}$$

若被测信号的上升时间 $t_{rs} = 30\text{ns}$, 取示波器的 $t_{r0} = t_{rs}/3$, 则根据式 45-4 应选示波器的带宽 $f_B = 35\text{MHz}$; 若取 $t_{r0} = t_{rs}/5$, 就需选 $f_B = 55\text{MHz}$ 的示波器。通常取 t_{r0} 为 t_{rs} 的 1/5 为宜。

2. Y 轴灵敏度 它反映了在 Y 方向展开被测信号的能力。观测电子电路中的电信号, 其最高灵敏度应在几毫伏至几十毫伏数级; 若观测生物电信号, 应选择高灵敏度示波器, 例如 SRD-1 型生物示波器, 最高灵敏度为 $10\mu\text{V}_{p-p}/\text{cm}$ 。

3. 扫描速度 它反映了在 x 方向展开被测信号的能力。扫描速度愈高, 能够展开高频信号或窄脉冲波形的能力愈强。但在观测缓变信号时, 又要求扫描速度低一些。总之, 对一台示波器而言, 扫描速度范围愈宽愈好。

第五节 逻辑分析仪的原理及应用

一、逻辑分析仪的组成

逻辑分析仪的种类很多, 虽然在通道数量、采样速度、存储容量、触发方式和显示方式等有较大区别, 但其组成的基本原理却是相同的, 见图 45-49。

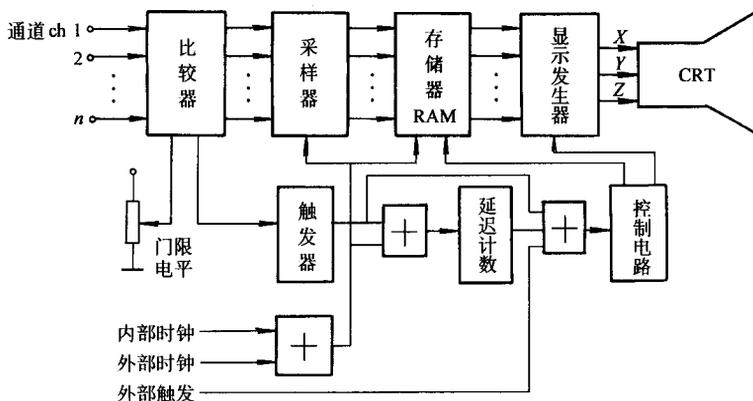


图 45-49 逻辑分析仪的组成框图

由图可见, 逻辑分析仪的结构与智能化数字存储示波器是极为相似的, 实际上, 它是一台数字化的多线示波器, 由于它分析的是数字系统的逻辑电平关系, 所以也称为逻辑示波器。它的输入通道比较多, 例如 8、16、32、64 通道等, 所以它能同时观测多通道的信号。

输入信号经过多通道逻辑测试探头获得并行数据, 送至电压比较器与外部设定的门限电子比较, 大于门限电平值的信号在相应的线上输出高电平, 反之输出低电平。

这些高、低电平的信号送至采样器, 在采样脉冲控制下进行采样, 并将采样数据按顺序存入存储器 RAM 中, 设 RAM 的容量为 1K(1024 单元), 可以记录所有输入通道在 1024 次采样中所得到的数据。存储结束后, 在控制电路的控制下, RAM 中的数据按顺序逐一读出, 在显示发生器中形成 X、Y、Z 三个轴向的模拟信号, 由 CRT 按设定的显示方式显示出被测量的信息。

二、逻辑分析仪的功能

1. 可同时存储和观测多通道信号 由于能同时存储和观测多通道并行信号,故它相当于多线数字化存储示波器,便于对数字系统正常运行的数据流的逻辑关系进行观测和分析。

2. 触发功能 逻辑分析仪有多种触发方式,可由面板上的“触发字选择”来控制。在进行数字信号观测时,如何选择触发方式是至关重要的。

(1) 组合触发 逻辑分析仪具有“字识别”触发功能,把输入的数据字与使用者预设定的“触发字”相比较,若符合便产生一次触发。

每一输入通道均可取 1、0、x 三种触发条件;“1”表示某通道为高电平时才产生触发;“0”表示为低电平时才产生触发;“x”表示不受触发条件限制。这样,在各通道电平同时满足预设定的“触发字”时,才能产生触发信号。

以图 45-50 为例,“ch0(“1”)”、“ch3(“1”)”表示 0 与 3 通道组合触发条件为高电平;“ch1(“0”)”表示触发条件为低电平;“ch2(“x”)”表示 2 通道信号不影响触发条件。这样,“ch0 和 ch3 信号出现高电平、而 ch1 信号出现低电平时便可产生触发信号,即满足“相”与“条件”下产生触发信号。

在内存中保存有由触发点开始的各通道的状态值,因此就很容易捕捉到数字系统数字总线或地址总线上出现的特定的数据(或地址)时的有关信息。

(2) 延迟触发 通常每个通道的存储量为 256~1024 位,存储容量有限。因此,常采用由产生触发点开始的数字延迟方法,称为延迟触发,见图 45-51。图中,“ t_{d1} ”和“ t_{d2} ”为延迟时间,可由面板键盘设定。图 a 为正延迟(即滞后触发),图 b 为负延迟(即超前触发)。

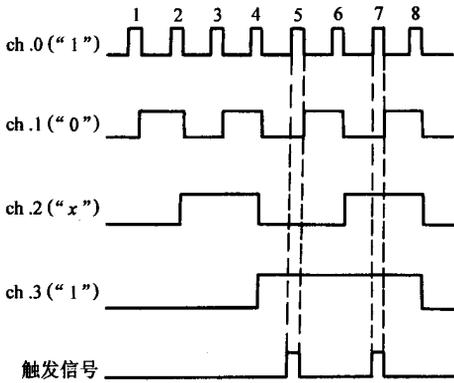


图 45-50 组合触发方式

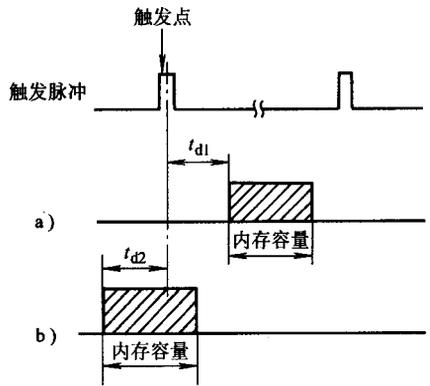


图 45-51 延迟触发方式
a) 正延迟 b) 负延迟

被测系统的并行输入数据加到多通道探极,在被测系统或仪器内部的时钟控制下存入 RAM 中,触发未形成时,都不断存入,因此可把触发前的状态保存起来。

利用延迟触发观测跳动性的偶然故障是比较有效的,可看到跳动出现前后的有关波形,便于分析产生故障的原因。

(3) 限定触发 逻辑分析仪可用内部时钟或外部时钟控制。当用内部时钟时,利用限定逻辑“与”条件,从外时钟中选出满足一定条件的时钟脉冲作为触发脉冲,以达到有选择性地存储数据。例如,限定触发探极内有外时钟线、 Q_1 和 Q_2 三根引线。根据需要分别接于被测电路中,其波形见图 45-52。限定条件可选为 $Q_0 \cdot Q_1$ (与逻辑)、 $Q_0 + Q_1$ (或逻辑)、 Q_0 和 Q_1 均可设定为 1、0、或 x 触发。图中,“ Q_0 ”设定为“1”,“ Q_1 ”为“0”,则,“ $Q_0 \cdot Q_1$ ”时的有效时钟脉冲为图中第 3 和第 7 个脉冲。

(4) 毛刺“触发” 该方式可在输入信号中检出毛刺脉冲(干扰脉冲)。它利用滤波器从输入信号中取出

一定宽度的脉冲作为触发信号,以利于寻找由于外界干扰而引起误动作的原因。

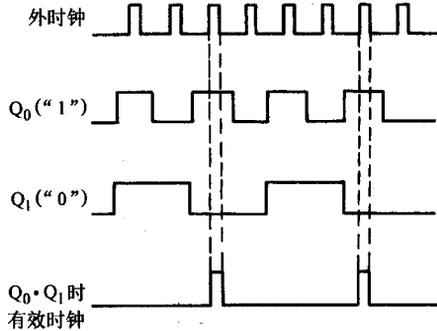


图 45-52 限定触发方式

3. 显示功能 与智能化数字存储示波器一样,通过键盘选择可使存于 RAM 中的数据全部或一部分稳定地显示于 CRT 上。

(1) 定时显示 它是以逻辑电平与时间的关系将 RAM 中的内容显示于 CRT 上。显示的波形由于是经过整形后的波形,高电平表示 1,低电平表示 0,而不是被测点信号的实际波形,所以称为“伪波形”。这种方式可以将 RAM 的全部内容按通道顺序显示出来,也可以改变通道顺序显示,便于分析和比较,见图 45-53。以这种方式显示的称为逻辑定时分析仪(或时间分析仪)。这种显示方式类似于数字化多线示波器。仪器内部设有时钟源,其频率比被测系统的信号频率高得多,所以在单位时间内可以显示更多的信息。主要用于测试数字系统硬件时总线上数据流的时序关系和寻找毛刺干扰等。

(2) 状态表式显示 将 RAM 的内容以各种数制(2、8、10 和十六进制)显示在 CRT 上。用数字表格形式显示,图 45-54 为二进制状态显示。

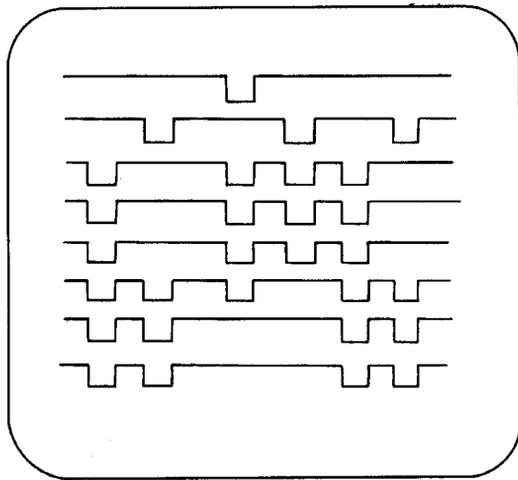


图 45-53 定时显示方式

以状态表式显示构成的分析仪称为逻辑状态分析仪,显示各通道在每一个时钟脉冲作用下所处的状态。仪器内部没有时钟源,用被测系统的时钟来控制其记录速度。主要用于调试和检测软件。

现在的逻辑分析仪多数都同时具有上述两种显示功能,用于调试数字系统特别方便。

(3) 数据比较式显示 仪器内有两组存储器,一组存放被测数据,另一组存放标准数据或正常操作时的数据。当用状态表显示时,两个存储器中的内容可以同时显示出来,加以比较,两者不同的数据以高亮度字显示,以利醒目,便于找出故障的原因。

0000	0000	0111	1110
0000	0000	0111	1101
0000	0000	0111	1100
0000	0000	0111	1011
0000	0000	0111	1010
0000	0000	0111	1001
1111	1111	1111	1010
1111	1111	1111	1011
0010	0100	1001	0100
1001	0010	0010	0110
0100	0100	0100	0000
0001	0100	0011	0010
0000	0100	0111	0000
0100	0011	1001	0000
0000	1001	0010	1001
1001	0010	0010	0100

图 45-54 状态表式显示

三、逻辑分析仪的工作过程

1. 数据的采集 逻辑分析仪与被测系统通过“专用多路探极线”连接在一起,它是将若干个探极集中起来,其触针细小,便于探测高密度集成电路。

被测系统的电平经比较器统一为高或低电平(1或0电平),比较器的阈值由面板的键盘给定。对输入数据的采样,是通过时钟控制进行的。

(1)同步采样 时钟脉冲来自被测系统(即外时钟),只有在外时钟脉冲存在时,才存储输入的数据,并用字符“0”和“1”显示。

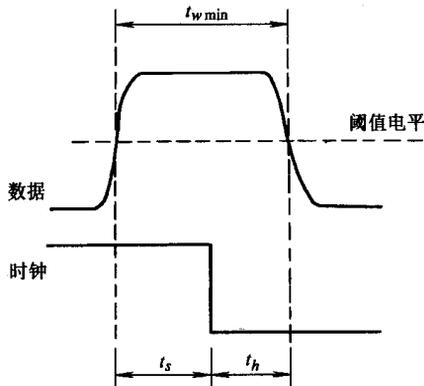


图 45-55 同步采样时被测脉冲的最小宽度

为了采集数据,必须使输入数据在时钟脉冲的建立时间 t_s 和保持时间 t_h 内维持不变,见图 45-55。这一段时间用于检测和存储一个逻辑状态。用 $t_{w\min} = t_s + t_h$ 表示能测量的最小脉冲宽度,这时最高时钟脉冲频率为:

$$f_{\max} = \frac{1}{t_{w\min}} = \frac{1}{t_s + t_h}$$

(2)异步采样 在仪器内部的时钟脉冲控制下对被测系统的输入数据进行采样。内时钟的频率比被测

系统的时钟频率高得多,因此,在单位时间内采集的信息量增多,提高了分辨率,从而显示的数据更精确。

图 45-56 是同步采样与异步采样工作波形的比较。同步采样时,由于时钟频率较低,两时钟脉冲边沿之间的干扰无法检测出来。用异步采样时,由于时钟频率较高,不仅能采集输入数据的逻辑状态,而且还能将通道 2 的小幅值干扰记录下来。当然若干扰脉冲极窄也难以检测。

2. 数据存储 通常用 RAM 存储数据,若 RAM 数据已满,但触发仍未形成, RAM 按“先进先出”的规则,自动从头开始将原存人的数据清除,再存入新数据,直到触发形成为止。触发方式与存储和显示的数据有关。

(1) 始端显示方式 是指在触发形成后,再延长一段时间 RAM 才停止存入数据,故可显示触发后的输入数据。

(2) 终端显示方式 是指触发一旦形成立即停止向 RAM 存入数据,故可观测触发形成前的输入状态。

(3) 延迟显示方式 是指在触发形成前 RAM 已存入一部分数据,当触发形成时,借助延迟计数器再存入少量数据,与数字存储示波器中的“预置触发”原理一样。因此,可观测触发形成时附近的输入数据。

(4) 自激 采用这种方式时,被测数据不断地被采样和存入 RAM,待 RAM 存满后,便自动地进入显示过程。

3. 工作过程

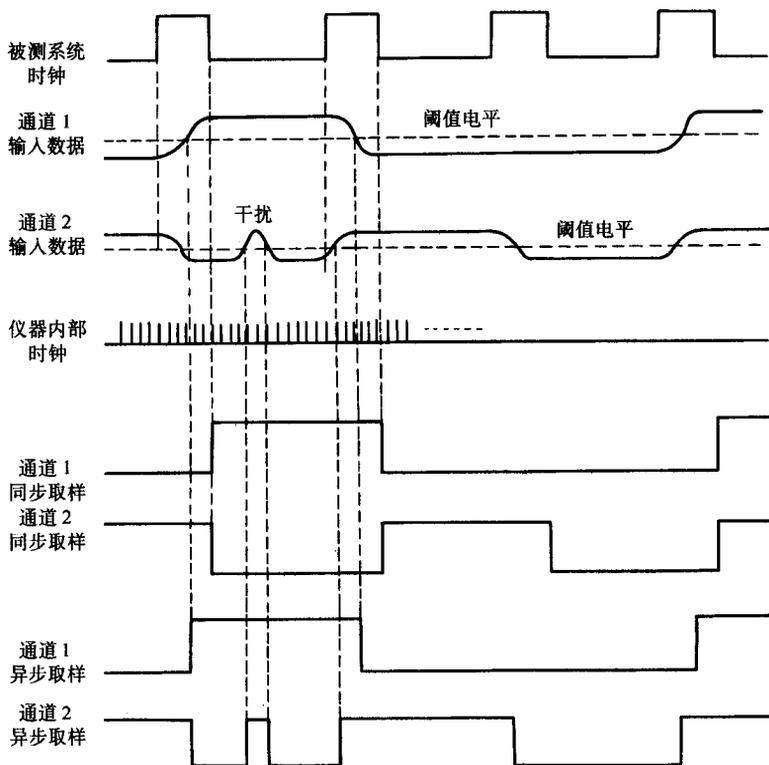


图 45-56 同步采样与异步采样工作波形的比较

由上述可见,将数据采集、存储、触发和显示结合起来,便是其基本工作过程。由于采用了数字存储技术,可将被测数据的采集、存储和显示过程分开进行,见图 45-57。

在数据采集期间,在时钟脉冲作用下,根据预置的触发方式,对被测数据进行采样和存储,存储结束后自动转入显示阶段。

在显示期间,将数据从 RAM 中取出,通过显示发生器转换后在 CRT 上显示出来。被测数据逐组逐组地显示完毕后,根据需要再次产生存储指令,再次采样和存储数据,如此往复下去,即可完成逻辑量的分析和测量。

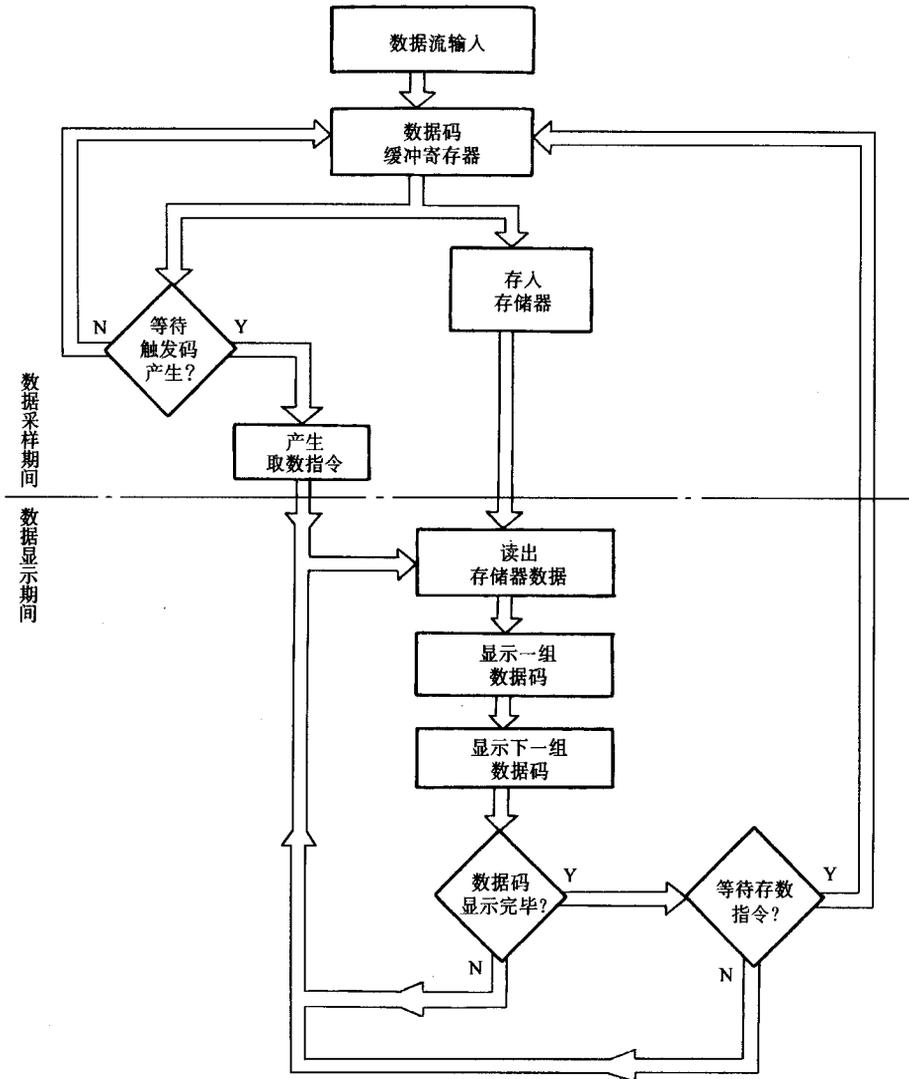


图 45-57 数据采集和显示流程图

四、逻辑分析仪的应用

主要用于测试数字集成电路的逻辑功能、微机系统的逻辑状态和检测数字系统的故障等,现举数例说明。

1. 测试数字逻辑和数字集成电路 逻辑分析仪特别适用于大规模或超大规模数字集成电路和各种型式的存储器的测试,对计算技术的研究很有帮助。例如 检查一个存储器的功能时,可将存储器片子接入逻辑分析仪,选择合适的触发显示方式,CRT上显示一定规律的波形。若波形不正常,可以通过不正常的波形分析,找出逻辑错误的位置。

2. 测试时序关系和干扰信号 检测数字系统中各信号间时序关系、信号的延迟时间以及各种干扰脉冲等。

例如,测试某数字系统的时序关系,利用多路探极线将待测点的数据送入逻辑分析仪,采用定时显示方

式 ,CRT 上便能显示出其时序关系图形 ,见图 45 - 53。计算机的外部设备 ,例如磁带机或磁盘机等 ,在使用中常会出现窄干扰脉冲 ,利用逻辑分析仪可迅速而准确地捕捉并显示出来。

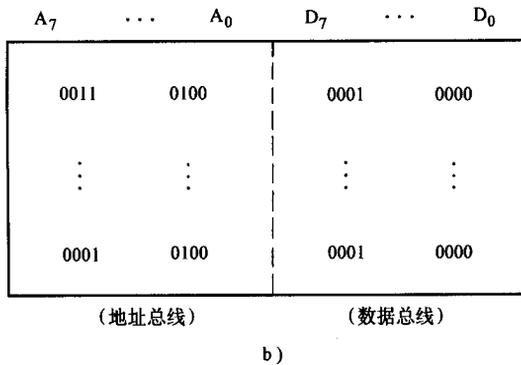
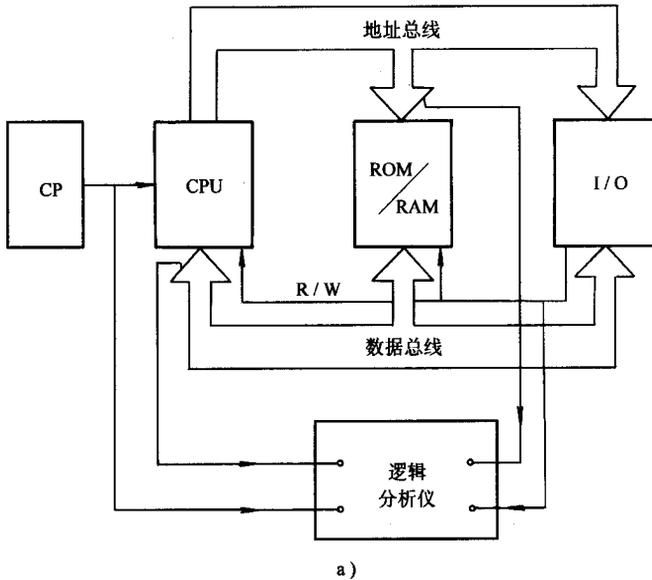


图 45 - 58 微机系统检测接线方法和显示

3. 检测微机系统的运行情况 在微机系统的调试或维修过程中 ,CPU、ROM、RAM、I/O 口及外围设备 ,通过地址总线 ,数据总线和控制信号线联系 ,多数是多路并行 ,有的达到 16 位或 32 位以上。采用图 45 - 58a 接法 ,利用多路探极线将 CP、CPU、ROM/RAM 及 I/O 等的地址总线、数据总线及 R/W 分别接入逻辑分析仪。利用“读写控制 (R/W) 信号作为触发信号 ,于是微机系统正常运行时的脉冲源、地址总线和数据总线上的数据便可在 CRT 上显示出来 ,见图 45 - 58b。当发现故障时 ,可利用不同的触发显示方式 ,显示出故障前后的数据 ,从而可迅速排除故障 ,提高调试或维修效率。

第四十六章 抗干扰测试技术

抗干扰技术在电子测量及自动控制系统中是一个不容忽视的重要问题。因为干扰不仅会影响测量精度,严重时甚至会使用仪表无法正常工作,在自动控制系统中,干扰轻则影响控制精度,降低产品质量,重则使系统控制失灵,损坏设备造成事故。因此,采取适当的抗干扰措施,消除或削弱各种干扰就显得非常必要。

为了有效地抑制和排除干扰,必须清楚地了解干扰的来源及其传输的途径,以便采取有效的措施加以防护。

第一节 干扰源及干扰的耦合方式

所谓干扰,就是指影响测量结果或作用于控制系统的各种无用信号。产生干扰信号的干扰源一般可分为外部干扰和内部干扰两种。

一、干扰的来源

(一) 外部干扰

外部干扰主要来自自然界的干扰以及各种电气设备运行产生的干扰(又称人为干扰)。

1. 自然干扰 各种自然现象,如闪电、雷击、宇宙射线、环境(温度、湿度等)变化均可产生自然干扰。这些干扰对测量仪表及自动控制系统的运行会产生不良影响,特别是对通信、导航设备影响尤为严重。

2. 人为干扰 人为干扰主要是指各种电气设备运行时所产生的电磁干扰。如大容量电气设备起、停可能引起电网电压波动;开关的通断会引起电火花,霓虹灯、电焊、电车的运行也会引起射频干扰;在大功率输电系统中,大电流输电线周围会产生强大的交变电磁场,因此对安装在输电线附近的仪表及与之平行的信号线会产生干扰。

(二) 内部干扰

内部干扰主要是指测量电路内部各种元器件的噪声所引起的干扰。例如,电阻中随机性的自由电子的热运动引起的热噪声;半导体、电子管内载流子的随机运动引起的散粒噪声;开关或两种导体相接时,由于接触不良会导致接触面的电导率起伏,从而产生所谓的接触噪声;由于工艺设计、布线不合理等出现寄生参数、泄漏电阻等耦合形成寄生反馈造成干扰。

对于电子测量装置的内部干扰,可以通过装置的正确设计及零部件的合理布局加以消除或削弱;对于来自外部的干扰可以通过适当的抗干扰措施加以解决。

二、干扰的耦合方式

各种干扰源所产生的噪声,必然要经过各种耦合通道进入测量电路而影响测量结果。换句话说,就是形

成干扰影响必须具备三个要素：干扰源、干扰的耦合通道、被干扰对象。因此研究和分析干扰的传输途径，对于掌握干扰的实质及抑制和消除干扰是至关重要的一环。而切断干扰传输的途径是抑制、削弱各种干扰的重要手段之一。

(一) 静电耦合(电容性耦合)

由于两个电路之间存在着分布电容，当其中一个电路的电位发生变化时，该电路的电荷就会通过分布电容传送到另一个电路，这就是静电耦合。静电耦合干扰的示意图见图 46-1。在被干扰的电路输入端所产生的干扰为：

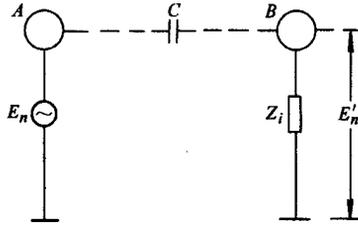


图 46-1 静电干扰示意图

$$E'_n = \frac{j\omega CZ_i}{1 + j\omega CZ_i} E_n$$

若 $|j\omega CZ_i| \leq 1$ ，则上式可简化为：

$$E'_n = j\omega CZ_i E_n$$

由上式可知， E'_n 与干扰源和被干扰对象之间的分布电容 C 成正比，也与干扰源的工作频率 ω 、被干扰对象的输入阻抗 Z_i 成正比。因此，合理布线减小寄生电容，就可减小静电耦合干扰。

(二) 磁场耦合(互感性耦合)

当两个电路之间有互感存在时，一个电路中的电流产生变化就会通过磁场耦合到另一个电路。例如，检测信号线处于强磁场或通过大电流电网附近时，就会产生磁场耦合而出现干扰信号。电气设备中变压器线圈的漏磁就是一种常见的磁场干扰。磁场耦合干扰电路见图 46-2。感应干扰为：

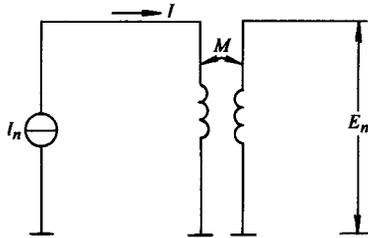


图 46-2 磁场耦合干扰

$$E_n = j\omega MI$$

由式可知， E_n 与干扰源和被干扰对象之间的互感系数 M 成正比，也与干扰源的工作电流 I 和频率 ω 成正比。

(三) 漏电流耦合

由于测量电路内部的元件支架、接线柱、印制电路板或外壳绝缘不良而存在漏电阻产生漏电流引起的干扰，称漏电流耦合。其干扰记为：

$$E'_n = \frac{Z_i}{R + Z_i} E_n$$

式中， R 为漏电阻； Z_i 为被干扰电路的输入阻抗。

漏电流耦合电路见图 46-3。

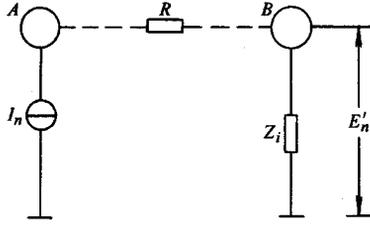


图 46-3 漏电流耦合电路示意图

(四) 共阻抗耦合

共阻抗耦合干扰的产生是由于两个以上的电路有共阻抗。当一个电路中的电流流经共阻抗产生电压降时,就成为其它电路的干扰电压,其大小与共阻抗的阻值及干扰源的电流大小成正比。

1. 通过电源内阻的共阻抗耦合干扰 多级放大器或多个单元测量电路共用一个电源时,就会产生共阻抗干扰。这是因为电源的内阻不可能为零,每一个电路工作时都需要电流,因此造成电源内阻压降变化,从而产生共阻抗干扰。解决的办法是减小电源内阻,各个电路接入去耦滤波电路,减小电源内阻压降对各级的干扰。

2. 通过公共地线的共阻抗耦合干扰 在测量电路中,各单元电路都有各自的地线,如果这些地线不是一点接地,各级电流流经公共地线时,在地线电阻上产生电压降,该电压就成为其它单元电路的干扰电压。解决的办法是采用一点接地,即将每一单元电路接地点汇成一点,然后再将各接地点接到公共地线上去。

第二节 干扰的表示方法

根据干扰进入仪器的测量电路方式不同可将干扰分为串模干扰和共模干扰。

一、串模干扰

串模干扰是由外界条件引起的、叠加在被测信号的干扰信号,并通过测量的输入通道一直进入测量系统的干扰。串模干扰的种类分为直流和交流两种,其等效电路如图 46-4 所示。图中 U_i 为输入信号, U_n 为干扰信号。

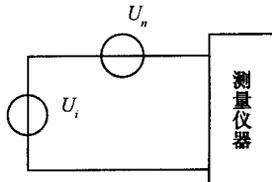


图 46-4 串模干扰的等效电路

抗串模干扰能力的表示——串模抑制比 (SMRR)

$$\text{SMRR} = 20 \lg \frac{U_{nm}}{\Delta U_n} (\text{dB})$$

式中, U_{nm} ——串模干扰源电压的峰值;

ΔU_n ——串模干扰引起的误差电压的有效值。

二、共模干扰

共模干扰是相对公共地电位为基准点,在仪器的两输入端上同时出现的干扰,共模干扰电压的产生可归纳为以下三类。

1. 由被测信号源的特点产生

例如具有双端输出的差分放大器和不平衡电桥等不具有对地电位的形式而产生的共模干扰。如图 46-5 所示。

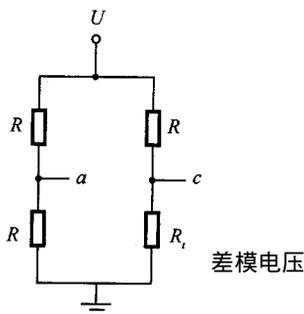


图 46-5 共模电压

$$\begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{2} U \\
 U_c &= \frac{R_t}{R_t + R} U \\
 &= U - \frac{R}{R_t + R} U \\
 &= \frac{1}{2} U + \frac{1}{2} U - \frac{R}{R_t + R} U
 \end{aligned}$$

$$U_{ac差} = \frac{R}{R_t + R} U - \frac{1}{2} U$$

$$U_{ac共} = \frac{1}{2} U$$

2. 电磁场干扰

当高压设备产生的电场同时通过分布电容耦合到无屏蔽的输入线而使之具有对地电位时,或者交流大电流设备的磁场通过双输入线的互感感应到双输入线上时,都可能产生共模干扰。

例图 46-(a)中,若 U_H 很高,通过局部电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 耦合到无屏蔽的双输入线上的对地电压 U_1 及 U_2 :

$$U_1 = \frac{\frac{1}{C_3}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3}} U_H = \frac{C_1}{C_1 + C_3} U_H$$

$$U_2 = \frac{C_2}{C_2 + C_4} U_H$$

当 $U_1 = U_2$ 时产生共模干扰电压。当 $U_1 \neq U_2$ 时,既有共模干扰电压又有差模干扰电压。

图 46-(b)表示大电流导体的电磁场在双输入线中感生的干扰电动势 E_1 及 E_2 亦有相似的性质。发 $E_1 = E_2$ 产生共模干扰。当 $E_1 \neq E_2$ 既产生共模干扰又产生差模干扰电动势 $E_n = E_1 - E_2$ 。

3. 由于不同地电位引起

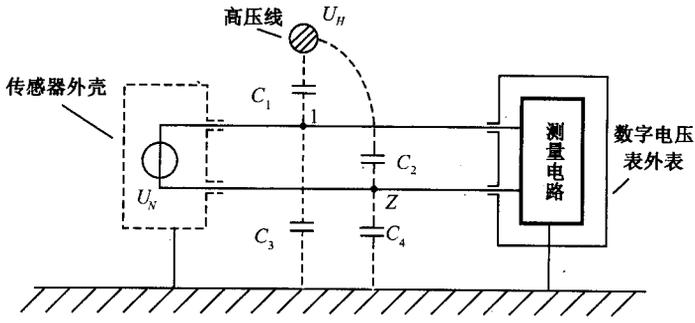
当被测信号源与测量仪器相隔较远,而不能实现共同的“大地点”上接地时,或者接地系统导体中流有强电设备的大电流而使各点电位不同,造成两接地点的电位差,即产生共模干扰电压,如图 46-7 所示。

仪器的抗共模干扰能力用共模抑制比表示:

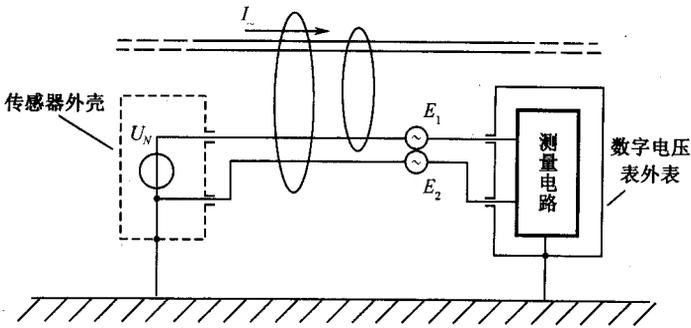
$$CMR = 20 \lg \frac{U_{cm}}{\Delta U_c} (\text{dB})$$

式中, U_{cm} ——共模干扰源电压的峰值;

ΔU_c ——共模干扰引起的误差电压。



(a)



(b)

图 46-6 电磁场干扰引起共模电压

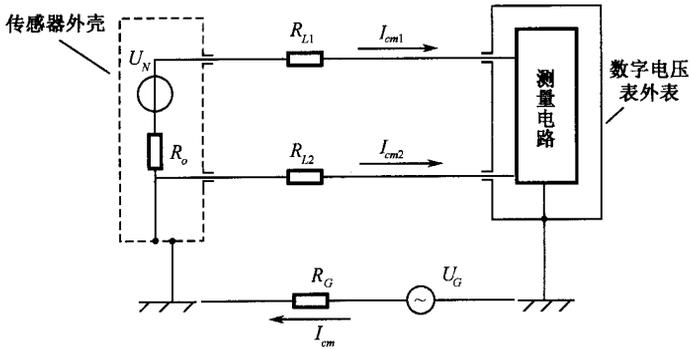


图 46-7 地电位差 U_{ce} 形成共模干扰电压

第三节 干扰的测试与抑制技术

工程测量中,可能会碰到各种各样的干扰,根据干扰在测量电路输入端的作用方式及其与信号电压的关系,可以将干扰信号分为差模干扰和共模干扰两种。

一、差模干扰及其抑制

差模干扰在工程上又称为串模干扰、常态干扰或正态干扰。

差模干扰是干扰信号与有用信号相叠加的一种干扰,它可以表现为电压叠加方式,也可以表现为电流叠加方式。差模干扰等效电路见图 46-8。图中 U_n 为差模干扰等效电压; I_n 为差模干扰等效电流; Z_n 表示干扰源的等效阻抗。

差模干扰是由外部引起的、迭加在被测电压上的干扰信号,它有直流和交流两种形式。交流差模干扰主要由交变电磁场引起(对测量仪表说,主要为工频交变电磁场);直流差模干扰主要由接触电动势和热电动势以及漏电阻引起。差模干扰作用见图 46-9。图中 e_i 为交变电磁场对信号接收端引起的差模干扰电动势; e_n 是接触电动势和热电动势引起的直流差模干扰电动势; e_R 是漏电阻引起的干扰电动势。

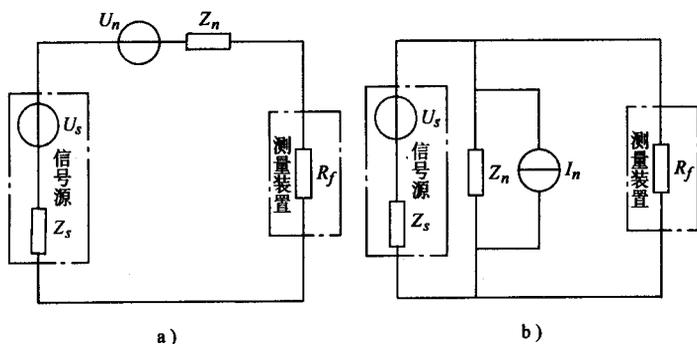


图 46-8 模干扰等效电路

a) 电势源串联形式 b) 电流源并联形式

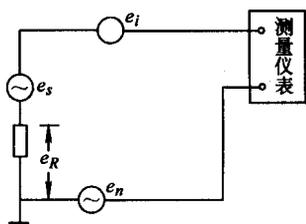


图 46-9 差模干扰示意图

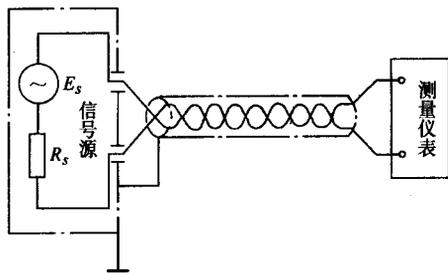


图 46-10 工频差模干扰的防护

对差模干扰的抑制能力用差模抑制比表示,其符号为 SMRR。

$$SMRR = 20 \lg \left\{ \frac{E_{cd}(\text{峰值}, V)}{\Delta e(\text{峰值}, V)} \right\} \text{ dB}$$

它表示在特定频率(对测量仪表规定为工频 50Hz)上,差模干扰的峰值 E_{cd} 与由它所产生的读数误差有效值与峰值 Δe 之比。

对于差模干扰可以采用滤波的方法加于衰减削弱,但是,它影响测量的动态特性。为了消除工频电磁场所产生的干扰,仪表的输入信号线要采用双绞导线,并把输入信号屏蔽起来再接地,接法见图 46-10。

二、共模干扰及其抑制

共模干扰在工程又称为同相干扰或纵向干扰。

共模干扰是相对于公共的电位基准地(接地点),在信号接收器的两输入端同时出现的干扰。共模干扰只有在转化为差模干扰后,才对测量电路起干扰作用。共模干扰的等效电路见图 46-11。

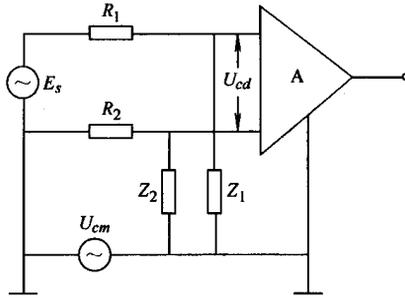


图 46-11 共模干扰的等效电路

产生共模干扰的原因很多。例如,在远距离测量中,使用长电缆时由于地电流的原因,使传感器端的地电位与测量仪表的地电位之间存在电位差引起共模干扰。又如,变压器一次侧电压,会通过一、二次侧间分布电容,以及整流器、信号电路和信号电路与地之间的分布电容形成电流回路而干扰测量仪器工作,这就是常见的所谓工频干扰,漏电流也是共模干扰的一种形式。

(一) 共模干扰抑制比

在测量电路和仪表受共模干扰作用以后,只有当共模干扰转换为差模干扰时,才会对测量电路或仪表产生有害的影响。即测量电路或仪表受共模干扰影响的大小,取决于共模干扰转换为差模干扰的转换率。为了表征测量电路或仪表对共模干扰的抑制能力,通常用共模抑制比(CMRR)表示。

其表示方法有两种:一种是:

$$\text{CMRR} = 20 \lg \frac{U_{cm}}{U_{cd}}$$

式中, U_{cm} 为作用在测量电路和仪表上的共模干扰电压; U_{cd} 为测量电路或仪表在 U_{cm} 作用下,转换为信号输入端所呈现的差模干扰信号电压。

CMRR 的另一种表示方法是:

$$\text{CMRR} = 20 \lg \frac{K_M}{K_C}$$

式中, K_M 是差模增益; K_C 是共模增益。

用测量电路或仪表的差模增益与共模增益之比来表示共模抑制能力在计算上更为方便。

(二) 共模抑制比的计算

在远距离长电缆差动测量电路(见图 46-12)中,两接地点(传感器地和仪表地)之间的电位差 U_{cm} 就是共模干扰源。长电缆对线路地的分布电容和漏电阻所合成的阻抗 Z_1 、 Z_2 是共模干扰源的阻抗,也是产生共模干扰的原因。设输入信号线(长电缆)的等效电阻为 R_1 、 R_2 。由图可知,在共模干扰电压 U_{cm} 的作用下,放大器输入端出现不平衡电压 U_{cd} ,此电压 U_{cd} 就是由共模电压 U_{cm} 转换而来的等效差模电压。由图可得

$$U_{cd} = U_{cm} \left(\frac{Z_1}{R_1 + Z_1} - \frac{Z_2}{R_2 + Z_2} \right)$$

因此,该电路的共模抑制比为:

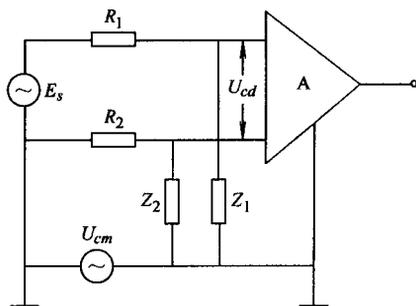


图 46-12 两点接地的共模干扰源

$$\begin{aligned} \text{CMRR} &= 20\lg \frac{U_{cm}}{U_{cd}} \\ &= 20\lg \frac{(R_1 + Z_1)(R_2 + Z_2)}{R_2 Z_1 - R_1 Z_2} \end{aligned}$$

由上式可见,当 $R_2 Z_1 = R_1 Z_2$ 时,即测量电路差动输入完全平衡时,共模抑制比趋于无限大。但实际上,这是难以做到的。在一般情况下,有 $Z_1 Z_2 \gg R_1 R_2$ 。当 $Z_1 = Z_2 = Z$ 时,上式可简化为

$$\text{CMRR} \approx 20\lg \frac{Z}{R_2 - R_1}$$

由此可见,若长电缆传输电阻对称(即 $R_1 = R_2$),减小电缆对地的分布电容和漏电流(即增大 Z_1 、 Z_2),可提高测量电路的共模抑制能力。目前,在数字电压表中广泛采用的所谓“双层屏蔽”就是根据这一思路制成的。

三、干扰抑制技术

抑制干扰不仅是测量电路和仪表设计的重要课题,也是制造、装配和系统调试的主要技术关键之一。为了抑制干扰,就必须弄清干扰的来源、性质、传递途径、耦合方式以及引进干扰的位置,并分别情况采取相应的措施以达到抑制干扰的目的。

抑制干扰通常可从以下三个方面来考虑:首先是,消除或抑制干扰源,这是最基本也是最有效的措施。例如,大功率变压器会产生很大的工频干扰,如果条件许可,把变压器搬迁掉,便可以从根本上消除变压器带来的工频干扰。又如,电路接触不良、虚焊也会产生干扰,找出虚焊,排除接触不良,就可以根除这类干扰。然而,当干扰源的存在不能人为地加以排除时(如自然干扰,大功率电台发射电磁波的干扰等)就必须采取其它措施来抑制这些干扰。抑制干扰的第二种措施是阻截干扰传递途径。如前所述,当干扰源的存在不为人的意志而转移时,采取阻截干扰途径是抑制干扰的主要措施之一。例如采用屏蔽措施来抑制电、磁场的干扰,利用浮置技术和提高绝缘强度来抑制干扰等。第三种是提高被干扰对象对干扰的抑制能力。合理设计、布置电路,精心挑选元器件,尽可能使差动放大器输入两端对称,以提高共模干扰的抑制能力。必要时可采用平均、相关和数据处理等新技术来抑制可能出现的干扰。下面主要分析抑制电磁干扰的有关措施。

(一) 屏蔽技术

屏蔽技术是抑制电、磁场干扰的重要措施。正确的屏蔽可抑制干扰源(如电源变压器、线圈等干扰源),或阻截干扰进入仪表内部。根据干扰源的形式可采用不同的屏蔽措施。

1. 静电屏蔽 所谓静电屏蔽,就是用一个金属罩(铜或铝)把信号源或测量电路包封起来并接地,使屏蔽盒内的电力线不会传到外部,起到了抑制干扰源的作用,同时外部的电力线也不会进入盒内成为干扰,这就起到了阻截干扰的传输途径的作用,所以静电屏蔽能有效地抑制电场干扰。图 46-13 是静电屏蔽的原理图。

2. 电磁屏蔽 电磁屏蔽的作用是抑制高频电磁场的干扰。电磁屏蔽的原理是利用高频电磁场能在屏蔽导体内产生电涡流,再利用电涡流产生的反磁场来抵消高频干扰磁场,从而达到磁屏蔽的目的,屏蔽罩接地

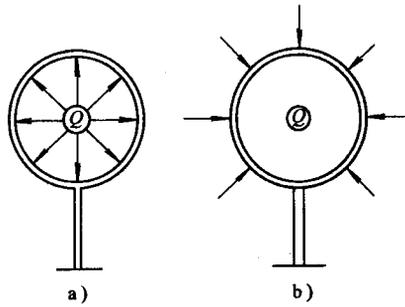


图 46-13 静电屏蔽原理

a) 抑制干扰源 b) 阻截干扰传输

时,则兼具静电屏蔽作用。

电磁屏蔽效果的估算。在电磁屏蔽中,由于屏蔽导体中所产生电涡流的方向与被屏蔽线圈中电流方向相反,因此在屏蔽罩外部,屏蔽导体内感应电涡流所产生的磁场与线圈磁场相反,从而抑制了线圈所产生的干扰磁场,起到了磁场屏蔽的作用。

电磁屏蔽的原理见图 46-14。设被屏蔽的电磁线圈的电流为 I_1 ,电感量为 L_1 ;屏蔽导体的电阻为 R ,电感为 L_2 ,其感应电涡流为 I_2 。线圈与屏蔽导体间的互感系数为 M 时,根据电磁感应原理可得:

$$\dot{I} = \frac{j\omega M \dot{I}_1}{R + j\omega L_2}$$

在高频时,有 $R \ll \omega L_2$

由此可见,当 ω 很大时, \dot{I}_2 与 \dot{I}_1 成正比,而与频率无关。但当频率很低,即 $R \gg \omega L_2$ 时则

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M \dot{I}_1}{R}$$

这时 \dot{I}_2 受频率的影响很大,说明低频时,在屏蔽导体上所感生的电涡流小,即抑制线磁场的的能力差,屏蔽的效果差。因此,这种电磁屏蔽仅适用于高频。

3. 磁屏蔽 如前所述,电磁屏蔽适用于高频磁场干扰,其对低频磁场干扰的抑制效果很差。因此,对低频磁场的屏蔽,要用高导磁率的材料(如坡莫合金等)作屏蔽罩,使干扰磁力线在屏蔽罩内构成回路,阻截磁力线向外扩散,从而抑制了低频磁场干扰。磁屏蔽原理见图 46-15。必须注意的是,屏蔽罩要有一定的厚度,以减小磁阻。

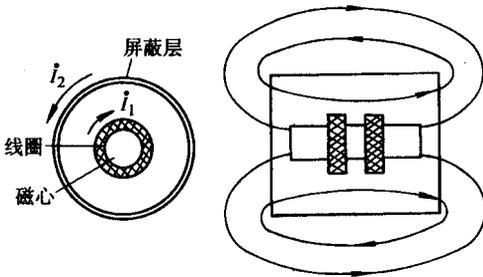


图 46-14 电磁屏蔽原理

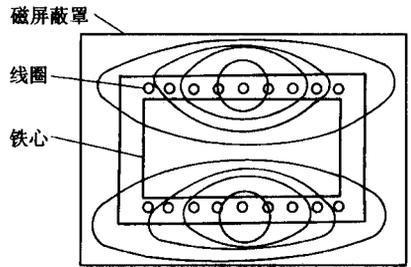


图 46-15 磁屏蔽原理

4. 驱动屏蔽 驱动屏蔽又称有源屏蔽,其屏蔽原理是将屏蔽导体的电位,经严格的 1:1 电压跟随器去驱动屏蔽层导体的电位,而使两者电位相等,就可以有效地抑制由于分布电容引起的静电耦合干扰。屏蔽原理见图 46-16。图中, E_n 是导体 N 的干扰源, B' 是导体 B 的屏蔽导体。设导体 N 对屏蔽层 B' 的分布电容为 C_1 ,导体 B 对屏蔽层 B' 的分布电容为 C_2 , Z_i 是导体 B 对地的阻抗。

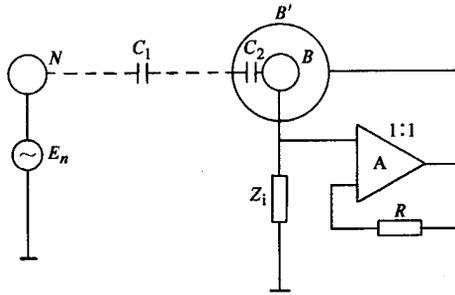


图 46-16 驱动屏蔽原理

当屏蔽层 B' 作为静电屏蔽时, B' 接地即可。此时, 只有在理想情况下, 导体 B 才不受干扰源 E_n 的影响。但实际上, 理想的静电屏蔽是不存在的。因为分布电容 C_1 、 C_2 的存在, 干扰源仍能通过分布电容耦合到导体 B 上而产生干扰作用。如果采用驱动屏蔽技术, 即把 B 导体的电位经 1:1 电压跟随后接到屏蔽层 B' 导体上, 则导体 B 和屏蔽导体 B' 的电位将相等, 这就使导体 B 与其屏蔽导体 B' 之间的空间没有电力线存在。因此, 干扰源 E_n 的电场就不会影响导体 B 。虽然导体 B 与屏蔽导体 B' 之间的分布电容 C_2 客观上还存在, 但由于 B 、 B' 之间等电位, 因此, 分布电容 C_2 不起任何作用。这就是驱动屏蔽抑制干扰的实质。

(二) 接地技术

在抗干扰措施中接地是与屏蔽紧密相关的, 无论是电缆屏蔽还是屏蔽罩都必须有一个适当的接地点, 才能有效地抑制干扰。如果接地点选择不当, 不但不能抑制干扰, 反而会引起干扰, 而使系统无法正常工作。可见接地技术不容忽视。

1. 一点接地准则 如果一个测量系统分别设有信号地线(信号公共基准零电位), 又有交流电源地线和安全保护地线时, 则需将三种地线连在一起, 再通过一点接地。这就是一点接地的准则, 其接线原理见图 46-17。

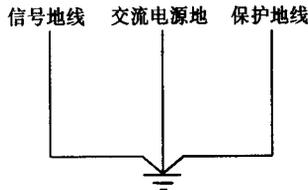


图 46-17 三种地线一点接地

如果一个测量系统在两个不同点接地, 因两接地点不易获得同一地电位, 故对两点(多点)接地电路造成干扰。这时地电位差就成为测量系统的共模干扰源, 见图 46-18a。在信号源处有一接地点, 在测量放大器处又有一个接地点, 这两个接地点的地电位差就是引入共模干扰的主要来源。图中 U_n 是两点接地之间的电位差, R_n 为地电阻; R_i 为放大器的输入阻抗; R_1 、 R_2 为信号线的等效电阻; R_s 、 U_s 为信号源内阻和信号源电压。

当 $U_n = 1000\text{mV}$, $R_n = 0.01\Omega$, $R_s = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 1\Omega$, $R_i = 10\text{k}\Omega$ 时, 对两点电路, 经计算, 加在放大器输入端 R_i 上的干扰电压达 90mV 。也就是说, 地电位差的干扰电压几乎全部加在放大器上, 这个干扰将使测量电路无法正常工作。如果采用一点接地(即把其中一点悬空与地隔离), 如图 46-18b 所示, 则干扰将得到明显的抑制。对图 46-18b 来说, 由于只是在放大器的输入部分接地, 信号源与地隔离, 这就相当于信号源对地有一个很大的接地阻抗 Z_{Gn} , 若 $Z_{Gn} = 1\text{M}\Omega$, 在上述同样参数下, 放大器输入 R_i 上的干扰电压只有 $0.09\mu\text{V}$, 可见干扰电源大大减小。测量系统单点接地是消除共模干扰的重要技术措施。

2. 电缆屏蔽层的接地 在使用带屏蔽层的传输电缆时, 如果测量系统是一点接地, 则电缆的屏蔽层也应一点接地。即电缆屏蔽层应接至该测量系统所设置的接地点。当信号源为测量系统的接地点时, 电缆屏蔽层应接到信号源的接地端(公共端); 如果测量系统的接地点设在测量电路(放大器)时, 则电缆屏蔽层应接到测

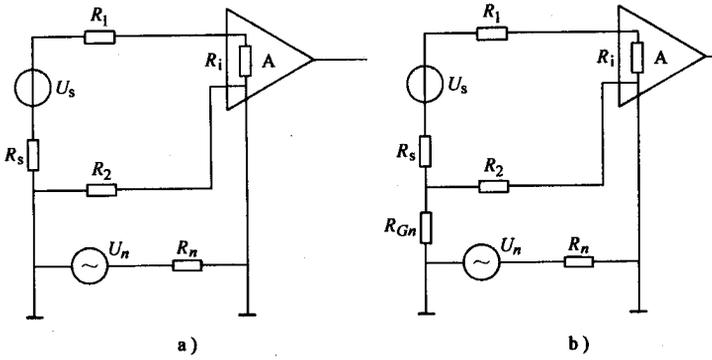


图 46-18 接地测量系统

a) 两点接地 b) 信号源与地隔离的一点接地

量电路的接地端(公共端)。

(三) 浮置(浮空、浮接)技术

电子测量装置的信号放大器公共地不接外壳,也不接大地,则称浮置。测量系统被浮置后,其测量电路与机壳或大地之间的阻抗明显提高(相当于绝缘电阻),这就阻断了干扰电流的通路,因此浮置与接地相比能大大减小共模干扰电流。

图 46-19 是某测温系统中被浮空的前置放大器。

图中前置放大器通过三个变压器与外界相联系,即输出变压器 T_1 , 反馈变压器 T_2 和电源变压器 T_3 。由于这三个变压器的隔离作用,使共模干扰不会产生回路电流。前置放大器不接地,也不接外壳,处于浮空状态。两个屏蔽层之间也相互绝缘。外层屏蔽层(仪表外壳)接大地,内层屏蔽通过变压器屏蔽与屏蔽电缆的屏蔽层相接一直延伸到信号源接地处。因此,浮空后的前置放大器能大大的抑制地电位差所造成的共模干扰。

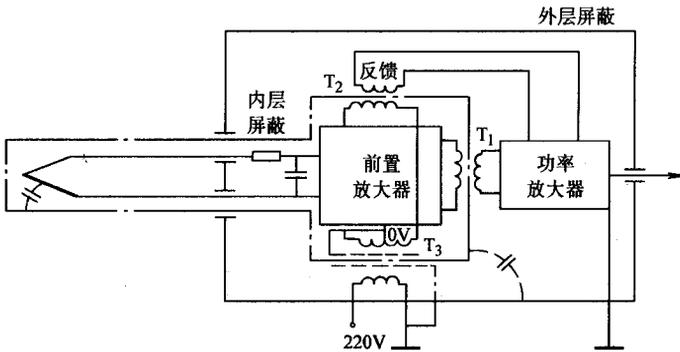


图 46-19 浮空测量系统前置放大器

四、其它抑制干扰的措施

采用滤波器抑制高、低频干扰,特别是由导线引入的干扰是非常有效的措施。采用去耦滤波器可以抑制电源内阻产生的干扰。

为了切断共模干扰的电流回路,可采用各种隔离器件,如光耦合器、耦合变压器等。对于脉冲电路中的噪声抑制,可以采稳压管或二极管组成的脉冲干扰隔离门,阻断幅值较小的干扰脉冲。对于幅值和宽度都大于正常脉冲信号的干扰,则需采取相关量法来解决。相关量法的基本思路是,找出脉冲信号相关量,相关量

与脉冲信号同时作用到与门上,仅当两输入皆有信号时,才能使与门打开送出脉冲信号,这样就抑制了干扰脉冲。

在测量电路中,电源变压器是工频干扰的主要来源。变压器的漏磁通和变压器一、二次绕组之间的分布电容是引起干扰的原因。抑制绕组间分布电容产生干扰的措施,主要是将变压器一次侧、二次侧进行屏蔽。变压器屏蔽层的连接是具有两层屏蔽时,一次绕组的屏蔽接信号源地,二次绕组屏蔽层接测量电路的零信号电位基准线。为了提高共模干扰抑制比,可采用具有三层屏蔽的变压器。其连接方法是,一次侧屏蔽层接电网地(大地),中间屏蔽层接仪表的外壳,二次侧屏蔽层接测量电路的公共基准电位,参见图 46-19。

在实际被测信号中,往往含有各种噪声和干扰,其振幅和相位随时间的变化是无规则的,它们影响测量结果,出现随机误差。为了消除和减小测量中的随机误差,在智能化仪表中,利用微处理器的数据处理功能,对测量数据进行软件处理,可消除测量中出现的随机误差。同时,利用软件程序的灵活性,很容易设计出低通、高通、带通等数字滤波器,使得测量的数据更为真实可靠。

对于测量电路或仪表内部元件的安排和走线布线装配等也必须给予充分的注意。在实践中经常发现,同样原理的电路,同样的元件,仅仅是由于元件的安排位置和走线布线的方式不同,结果使电路的技术特性差异很大。由此可见,电路(特别前置放大级)元件的安排和走线、布线的方式也是非常重要的,实质上它也是抗干扰措施的一个重要方面。

为了能有效地抑制干扰,在安排仪表内部元部件及设计走线布线的装配工艺时,一般应遵循以下原则:

1. 电路元件的安装位置应尽量根据信号的传输顺序排成一直线的走向,即按输入级、放大级、信号转换级、输出级的次序安排。不要相互交叉和混合安排,防止引起寄生耦合,避免造成互相干扰或产生自激振荡。
2. 对于电磁感应耦合元件(如变压器、扼流圈、振荡线圈等)的安装位置应远离输入级。它们之间也尽量安排得远一些,使其漏磁通互不影响。
3. 高输入阻抗放大器输入级的印制电路板走线应设计屏蔽保护环,防止漏电流经线路板绝缘电阻流入输入端。
4. 低电平测量电路中的电源变压器和输入变压器除相互远离外,还必须加屏蔽罩。
5. 对于电路较复杂、单元电路较多的仪表,可将有关单元电路分块装配,必要时将输入级与高频振荡级均用屏蔽层隔离。

6. 仪表内的布线原则

- (1) 输入级的弱信号线与输出级的强信号级以及电源线应尽量远离。
- (2) 直流信号线与交流信号线应远离。
- (3) 输入级与其它可能引起寄生耦合的线,严禁平行走线,彼此应尽量远离。
- (4) 低电平信号地线、交流电源地线和金属机壳地线应分开设置,最后集中一点接地。
- (5) 输入电缆的屏蔽层应选择适当的接地点。

以上所述只是一种基本考虑原则,实施时要根据实际情况,对具体问题进行具体分析,合理调整,切不可生搬硬套。

第四节 电源干扰的测试与抑制方法

常用的电网干扰抑制措施有电路滤波器、切断噪声变压器等。

(1) 电路滤波器

线路滤波器的内部结构如图 46-20 所示,由纵向扼流圈 L 和滤波电容 C 组成。1、2 为交流电网电源输入端口,3 为外部接地端,4、5 为电源输出端。恰当地确定 L 和 C 的数值,可有效地抑制电网中 100kHz 以上的干扰与噪声。

(2) 切断噪声变压器

切断噪声变压器的结构、铁芯材料、形状以及线圈位置都比较特殊,可以切断高频噪声磁通,使之不能感

应到二次绕组 既能切断共模噪声又能切断差模噪声。

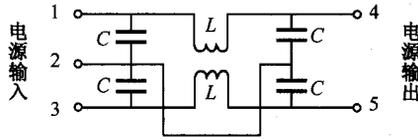


图 46-20 线路滤波器结构

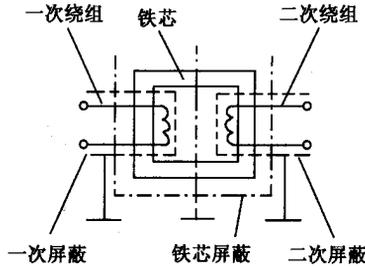


图 46-21 切断噪声变压器

图 46-21 中切断噪声变压器的一次侧、二次侧绕组分别绕在铁芯的不同处,且铁芯选用高频时有效磁导率尽量低的材料。干扰与噪声因频率高,在通过铁芯向二次侧绕组交连时被显著地衰减。而变压器中的有用信号因频率较低,仍可被正常地传输。切断噪声变压器还将一次、二次绕组和铁芯分别予以屏蔽并接地,切断了更高频率的干扰与噪声通过分布电容向二次侧绕组的传播。采用切断噪声变压器,可使测控设备对电网干扰与噪声的抑制能力显著地提高,用脉冲干扰模拟器测得对电网干扰抑制的敏感阈值可达 5 000 V 以上。