常用电工计算

周希章 主编

CHANGYONG DIANGONG JISUAN

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

常用电工计算

主编　周希章
参编　周　全　赵　柳

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内容提要

本书共五章，包括电路和磁路计算、电机及变压器计算、电器及电工仪表计算、电力电子技术计算、工厂供电计算等内容。

本书理论联系实际，选材适当，内容准确可靠，文字精炼，通俗易懂，是在基层工矿企业工作的技术人员和中高级电工的工作手册和实用参考书，还可供大、中专院校师生阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

常用电工计算/周希章主编. -北京：中国电力出版社，2001
ISBN 7-5083-0724-0

Ⅰ.常… Ⅱ.周… Ⅲ.电工-计算 Ⅳ.TM11

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 052135 号

中国电力出版社出版、发行
（北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn）
北京密云红光印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 18.625 印张 412 千字
印数 0001—5000 册 定价 30.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

前　言

《常用电工计算》是在原版（1983年1月出版）的基础上，结合近二十年来电工技术的发展，增加了不少新内容，使其更充实、完善，计算的范围更广泛，更实用。在选材和编写上，力求做到理论联系实际，尽量用精练的语言，阐明与计算有关的电工基础理论，有一定的理论高度和深度；又注意到知识的科学性、专业性、系统性和完整性；并在阐明理论的基础上，联系生产实际，列举了电工技术方面约250个计算例题，做了详细的理论分析和计算。主要内容包括电路和磁路计算、电机及变压器计算、电器及电工仪表计算、电力电子技术计算、工厂供电计算等。

本书的名词术语全部采用最新国家标准，单位全部采用法定计量单位，并力求全书统一。

本书第一章由周全执笔；第五章由赵柳执笔；其余章节由周希章执笔，并负责全书统稿工作。

本书编写过程中，承蒙朱健南教授级高工、傅守业高工，提出了许多宝贵意见，特此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，谬误和不妥之处在所难免，恳切地希望读者提出批评指正，以便进一步修改、充实和完善。

编者

2001 年 3 月

目　录

前言

第一章　电路和磁路计算 …… 1

第一节　基本定律及应用 …… 1

一、欧姆定律、电阻和电导 …… 1

二、焦耳—楞次定律、电能和电功率 …… 15

三、基尔霍夫定律 …… 19

四、磁场的基本物理量和基本定律 …… 27

五、磁路定律 …… 38

第二节　线性直流电路计算 …… 50

一、电阻串并联电路 …… 50

二、电阻的星形联结和三角形联结的等效互换 …… 68

三、电源的串联、并联和混联 …… 70

四、支路电流法 …… 77

五、节点电位法 …… 80

六、回路电流法 …… 87

七、叠加原理和替代原理 …… 90

八、有源二端网络的等效电源定理 …… 96

第三节　交流电路计算 …… 99

一、交流电的基本性质 …… 99

二、单相正弦交流电路计算 …… 105

三、三相正弦交流电路计算 …… 124

第四节　简单电路过渡过程计算 …… 132

一、过渡过程初始条件的确定 …… 132
二、一阶电路分析计算 …… 134
三、二阶电路分析计算 …… 148

第二章　电机及变压器计算 …… 158

第一节　电机计算 …… 158
一、电机参数计算 …… 158
二、交流电机重绕改装计算 …… 172
三、直流电机简易重绕计算 …… 241
四、单相电动机重绕改装计算 …… 248
第二节　变压器计算 …… 290

三、直流串励电动机起动电阻计算 …… 403
第四节　电工仪表使用中的计算 …… 409
一、电表量程的扩大 …… 409
二、有功电度数的计算 …… 413
三、电气测量指示仪表的误差及准确度 …… 415

第四章　电力电子技术计算 …… 422

第一节　整流电路计算 …… 422
一、单相整流电路 …… 422
二、三相整流电路 …… 436
三、单相可控整流电路 …… 442
第二节　晶体管电路计算 …… 457
一、数字电路基础 …… 457
二、交流放大器 …… 482
三、晶体管的开关特性 …… 499
四、门电路 …… 505
五、简单稳压电路计算 …… 512

第五章　工厂供电计算 …… 521

第一节　负荷计算 …… 521
一、按需要系数法确定计算负荷 …… 521
二、按二项式系数法确定计算负荷 …… 534
三、单位负荷法 …… 540
第二节　导线和电缆截面的选择计算 …… 541
一、按发热条件选择计算 …… 541
二、按容许电压损失选择计算 …… 545
三、按经济电流密度选择计算 …… 560
第三节　其他方面的计算 …… 565

一、提高功率因数计算 …… 565
二、接地和防雷计算 …… 573
参考文献…… 584

第一章

电路和磁路计算

第一节　基本定律及应用

一、欧姆定律、电阻和电导

（一）欧姆定律

欧姆定律是计算线性电路的最基本定律，在应用时常分以下三种形式。

（1）一段无源支路的欧姆定律。

图 1-1 是闭合回路中的一段支路，在这一段支路中仅有电阻，故又叫一段电阻电路的欧姆定律。当导体的温度不变时，通过一段无源支路的电流与支路两端电压成正比，与电阻成反比。当电流与电压的参考方向一致时，欧姆定律为

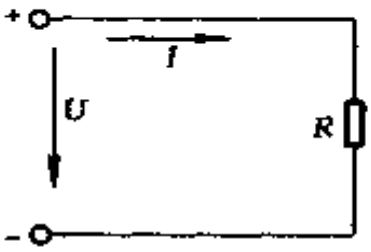


图 1-1　不包含电源的一段电路

$$I=\frac{U}{R} \tag{1-1}$$

式中　I——支路电流，A；

U——支路两端电压，V；

R——电阻，Ω。

上式也可表示成

$$U = IR \tag{1-2}$$

或

$$R = \frac{U}{I} \tag{1-3}$$

上面提到的电流、电压的参考方向均可任意选定，参考方向也可称为正方向，以电流为例，如电流的实际方向与参考方向一致时，就把电流定为正值；反之，当电流的实际方向与参考方向相反时，电流就定为负值。

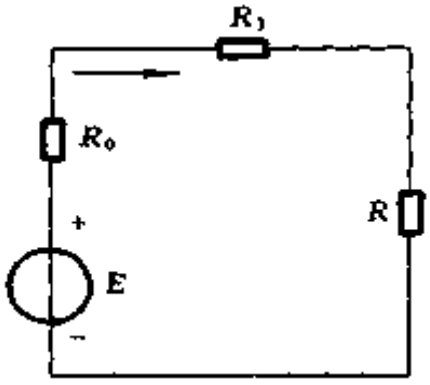
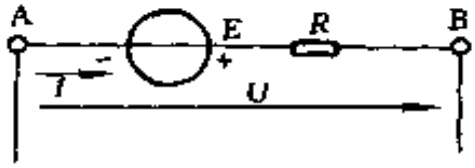
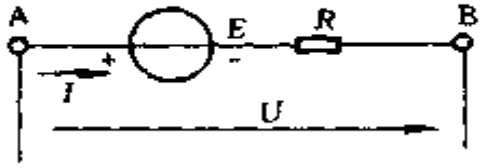


图 1-2　一段包含电源的电路

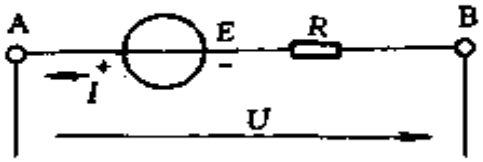
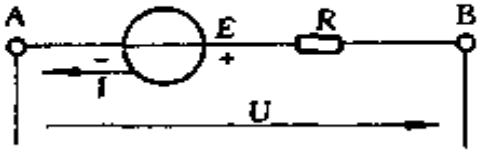
(2) 一段含源支路的欧姆定律。

图 1-2 是一段包含电源的电路，当导体的温度不变时，通过一段含源支路的电流不仅与支路的端电压有关，还与支路的电动势有关。含源支路欧姆定律表达式的形式还取决于电动势 E、电压 U 与电流 I 参考方向的选择，如表1-1 所示。

表 1-1　　一段含源支路的欧姆定律

电　路	欧姆定律表达形式	说　明
 (a)	$I = \frac{E+U}{R}$	E、U 的方向与 I 的方向一致
 (b)	$I = \frac{-E+U}{R}$	E 与 I 的方向相反，U 与 I 的方向一致

续表

电　路	欧姆定律表达形式	说　明
 (c)	$I=\frac{E-U}{R}$	E 与 I 的方向一致，U 与 I 的方向相反
 (d)	$I=\frac{-E-U}{R}$	E、U 的方向与 I 的方向相反

（3）全电路的欧姆定律。

全电路的欧姆定律，也叫回路的欧姆定律，图 1-2 是最简单的闭合回路，通过该闭合回路的电流与回路的电动势成正比，而与回路的全部电阻值成反比。当回路电动势与回路电流的方向一致时，它们的关系如下

$$I=\frac{E}{\Sigma R} \tag{1-4}$$

$$\Sigma R=R_0+R_1+R \tag{1-5}$$

式中　E——回路的电动势，V；

ΣR——回路中的总电阻，Ω；

R_0——电源内阻，Ω；

R——负载电阻，Ω；

R_1——回路中连线的电阻，Ω。

综上所述，欧姆定律既可用于一段电路，也可用于全电

路。我们在计算时，应根据已知条件正确地使用欧姆定律。

1. 已知电压、电阻求电流

例 1-1 某电炉，已知炉丝电阻为 10Ω，如接在 220V 电路上，求电流为多少？如改接到 380V 电路上，电流又为多少？

解 当电压为 220V 时，电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{10} = 22(\mathrm{A})$$

如改接到 380V 电路上，电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{10} = 38(\mathrm{A})$$

例 1-2 某电子管灯丝电阻为 21Ω，加在该电子管灯丝上的电压为 6.3V，求流过电子管灯丝上的电流为多少？

解 由欧姆定律，电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6.3}{21} = 0.3(\mathrm{A})$$

例 1-3 晶体管电路基极偏流计算：在图 1-3 中已知 $E_c = 12\mathrm{V}$，$R_b = 100\mathrm{k}\Omega$，求基极偏流 $I_b = ?$

解 因为基极 b 和发射极 e 间电阻比偏流电阻 R_b 小得多，计算时可忽略不计，利用欧姆定律得

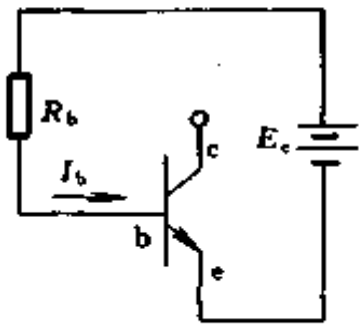


图 1-3 例 1-3 电路

$$I_b = \frac{E_c}{R_b} = \frac{12}{100 \times 10^3}$$
$$= 120 \times 10^{-6} = 120(\mu\mathrm{A})$$

调节 R_b，就可以调节偏流。

例 1-4 某直流电动机电枢内阻 $R_a = 0.4\Omega$，电动机额定电压 $U_N = 220\mathrm{V}$，如果电动机直接起动，求起动

电流 I_s 为多少？

解 由欧姆定律求起动电流

$$I_s = \frac{U_N}{R_a} = \frac{220}{0.4} = 550(A)$$

例 1-5 图 1-4 电路，已知 $E = 110V$，发电机内阻 $R_i = 0.2\Omega$，导线电阻 $R_L = 0.4\Omega$，负载电阻 $R = 9\Omega$，求：

(1) 电路在正常工作情况下的电流 I；

(2) 当负载两端发生短路时，电源中通过的电流 I'；

(3) 当电源两端发生短路时，电源中通过的电流 I''。

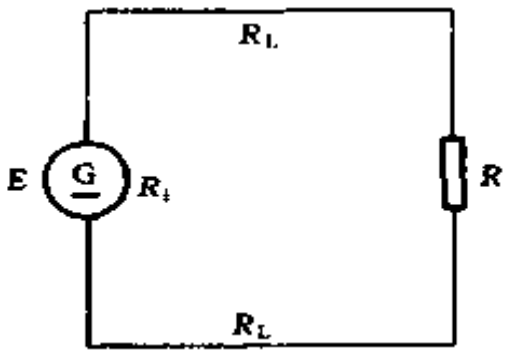


图 1-4 例 1-5 电路

解 由全电路欧姆定律可得

(1) 正常工作时的电流为

$$I = \frac{E}{R_i + 2R_L + R} = \frac{110}{0.2 + 2 \times 0.4 + 9}$$

$$= \frac{110}{10} = 11(A)$$

(2) 当负载两端发生短路时，因短路导体的电阻接近于零，所以通过电源的电流为

$$I' = \frac{E}{R_i + 2R_L} = \frac{110}{0.2 + 2 \times 0.4} = 110(A)$$

(3) 当电源两端发生短路时，通过电源的电流为

$$I'' = \frac{E}{R_i} = \frac{110}{0.2} = 550(A)$$

例 1-6 图 1-5 是用固定电流法测定表头灵敏度的线路，已知 $E=1.55\text{V}$，$R_g=20\text{k}\Omega$，表内阻 $R_c=1.65\text{k}\Omega$，当电路接通后，指针指在 44.2 格（满刻度为 50 格），求表头灵敏度是多少？

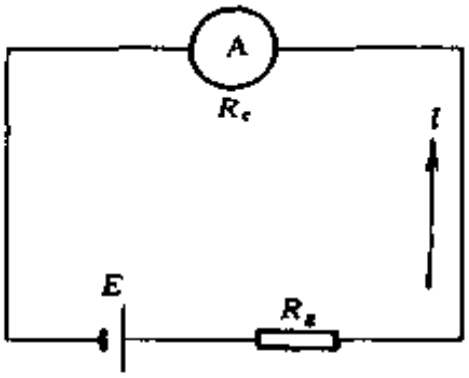


图 1-5 例 1-6 电路

解 表头的灵敏度是指表头指针从标度尺零点偏转到满刻度时所通过的电流。电流越小，灵敏度越高。测定表头灵敏度就是测定它的满刻度（又称满量限）电流。本例是测定表头灵敏度的方法之一。利用欧姆定律，首先求出通过表头中的固定电流为

$$I=\frac{E}{R_g+R_c}$$

因指针偏转数与电流成正比，故

$$\frac{I}{I_c}=\frac{44.2}{50}$$

表头灵敏度为

$$I_c=I\frac{50}{44.2}=\frac{E}{R_g+R_c}\times\frac{50}{44.2}$$

$$=\frac{1.55}{(20+1.65)\times10^3}\times\frac{50}{44.2}$$

$$=0.000081(\text{A})=81(\mu\text{A})$$

2. 已知电压、电流求电阻

例 1-7 例 1-4 中的直流电动机，已知额定电流 $I_N=$

50A，若将起动电流降低到额定电流的 2 倍，问应在电枢回路中串联多大电阻？

解 要解此题，首先可用全电路欧姆定律求出总电阻 ΣR，因为电枢具有一定的内阻，总电阻 ΣR 减去电枢内阻 R_a，就是需要串联的电阻 R_s。具体步骤如下：

（1）用全电路欧姆定律求总电阻

$$\Sigma R = \frac{U_N}{2I_N} = \frac{220}{2 \times 50} = 2.2(\Omega)$$

（2）求串联电阻 R_s

$$R_s = \Sigma R - R_a = 2.2 - 0.4 = 1.8(\Omega)$$

例 1-8 已知 100W，220V 灯泡的电流为 0.4545A●，求灯泡的热电阻为多少？

解 灯泡电阻系非线性电阻，但它的热电阻仍可用欧姆定律来求解。

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.4545} = 484(\Omega)$$

例 1-9 图 1-6 测量二极管正向电阻电路，需加入限流电阻 R，试验时 AB 两端电压最大可达 30V，测二极管最大电流是 100mA，二极管正向电阻不计，求 R 为多少？

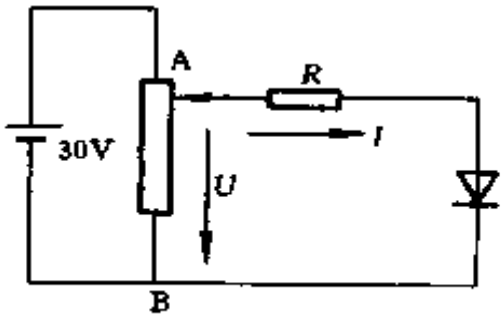


图 1-6 例 1-9 电路

解

$$\frac{U}{I} = \frac{30}{100 \times 10^{-3}} = 300\ (\Omega)$$

● 本书全部例题的解答，一般取 4 位有效数字。

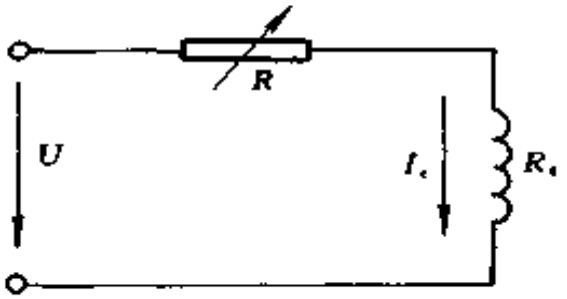


图 1-7　例 1-10 电路

例 1-10　图 1-7 是用变阻器 R 调节直流电机励磁电流 I_e 的电路，设电机励磁绕组的直流电阻 R_e 为 275Ω，额定电压 U 为 220V，如果要求励磁电流在 0.8～0.5A 范围内变动，问需要串联什么规格的励磁变阻器 R？

解　设励磁电流为 0.8A 时，需要串联的电阻为 R_1；励磁电流为 0.5A 时，需要串联的电阻为 R_2。

因
$$R = \frac{U}{I_e} - R_e$$

故
$$R_1 = \frac{220}{0.8} - 275 = 275 - 275 = 0(\Omega)$$

$$R_2 = \frac{220}{0.5} - 275 = 440 - 275 = 165(\Omega)$$

查变阻器手册，可以选用 CB-3 型、300W、180Ω 励磁变阻器（其他型号也行，只要电阻大于 165Ω，电流大于 0.8A 即可）。

3. 已知电阻、电流求电压

例 1-11　有一电工仪表，内阻 $R_c = 1k\Omega$，使表针满偏转电流 $I_c = 100\mu A$，求此电表两端电压 $U_c = ?$

解　由欧姆定律，电压

$$U_c = R_c I_c = 1000 \times 100 \times 10^{-6} = 0.1(V)$$

例 1-12　如果人体最小的电阻为 800Ω，已知通过人体的电流为 50mA 时，就会引起呼吸器官麻痹，不能自主摆脱

电源，试求安全工作电压是多少？

解 由欧姆定律，电压

$$U = IR = 0.05 \times 800 = 40(\text{V})$$

例 1-13 发电机的端电压为 115V，经过电阻为 0.05Ω 的导线输电给电动机，如果这台电动机取用的电流为 100A，求电动机输入端的电压为多少？

解 由欧姆定律，电阻上压降

$$U = IR = 100 \times 0.05 = 5(\text{V})$$

电动机输入端电压 = 115 − 5 = 110（V）

（二）导体电阻的计算

导体电阻的大小与导体的长度成正比，与横截面积成反比，并与材料性质有关，可用下列关系式表示

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{1-6}$$

式中 R——导体的电阻，Ω；

ρ——导体的电阻率，Ω·m。不同的导体，有不同的电阻率，其数值随着温度的变化而改变。通常，我们在各种手册中查到的电阻率为温度 20℃时的数值；

l——导体的长度，m；

A——导体截面积，mm^2。

因为导体的电阻率是随温度的变化而改变，所以导体的电阻也随温度的变化而改变。一般，金属的电阻都随温度的增加而增大，但碳、石墨等材料的电阻则随温度的上升而下降。实验证明，在一般工作温度范围内，电阻与温度的关系可视为线性，用下式表示

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \tag{1-7}$$

式中 R_2——温度为 t_2 时导体的电阻，Ω；

R_1——温度为 t_1 时导体的电阻，Ω；

α——以温度 t_1 为基准时，导体电阻温度系数，$℃^{-1}$。每种导体在一定的温度下有一定的温度系数。电阻温度系数等于温度每变动1℃时，每欧电阻的变动量。

常用导电材料的电阻率和电阻温度系数见表 1-2。

表 1-2　　常用导电材料的电阻率和电阻温度系数

名称	符号	电阻率 ($10^{-8}\Omega\cdot m$) (20℃)	电阻温度系数 ($10^{-3}℃^{-1}$) (20℃)
银	Ag	1.59	+3.80
铜	Cu	软态 1.724	软态 +3.93
		硬态 1.777	硬态 +3.81
金	Au	2.40	+3.40
铝	Al	软态 2.8	软态 +4.07
		硬态 2.826	硬态 +4.03
钠	Na	4.60	+5.40
钼	Mo	4.77	+3.30
钨	W	5.48	+4.50
锌	Zn	6.10	+3.70
镍	Ni	6.90	+6.0
铁	Fe	9.78	+5.0
铂	Pt	10.5	+3.0
锡	Sn	11.4	+4.20

续表

名称	符号	电阻率 ($10^{-8}\Omega\cdot m$) (20℃)	电阻温度系数 ($10^{-3}℃^{-1}$) (20℃)
铅	Pb	21.9	+3.90
汞	Hg	95.8	+0.89
锰铜		42.3	±0.01
康铜		48.0	±0.04
石墨		800	−0.20
碳	C	4000	−0.30

（三）电导和电导率

衡量导体传导电流本领的物理量，称为电导，它是电阻的倒数，以 G 表示，单位为 S。

$$G = \frac{1}{R} \tag{1-8}$$

电导率是衡量物质导电性能的参数，电导率是电阻率的倒数，以 γ（或 σ）表示，单位为 S/m。

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \tag{1-9}$$

引用了电导后，欧姆定律可以写成

$$I = GU \tag{1-10}$$

例 1-14 铝母排的截面尺寸为 50mm×5mm，电阻率 $\rho = 0.0283\times10^{-6}\Omega\cdot m$，长度为 50m，问它的电阻是多少？

解 设铝母排电阻为 R

$$R = \rho\frac{l}{A} = 0.0283\times10^{-6}\times\frac{50}{50\times5\times10^{-6}}$$
$$= 0.0057(\Omega)$$

例 1-15 聚氯乙烯绝缘软铜线的规格为 7 股 1.70mm，长度为 200m，问它的电阻是多少？已知铜线的电阻率 $\rho = 0.0172\times10^{-6}\Omega\cdot m$。

解 设铜线截面为 A

$$A = n\frac{\pi d^2}{4} = 7\times\frac{\pi(1.7)^2}{4} = 15.89(mm^2)$$

标称截面为 $16mm^2$

铜线电阻 $R = \rho\frac{l}{A} = 0.0172\times10^{-6}\times\frac{200}{16\times10^{-6}}$

$= 0.215\ (\Omega)$

例 1-16 某设备需用直径为 1.6mm 的康铜电阻丝绕制的电阻，电阻值需 5Ω，问其长度为多少？已知康铜电阻丝的电阻率 $\rho = 0.48\times10^{-6}\Omega\cdot m$。

解 康铜电阻丝截面

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1.6)^2}{4} = 2.01(mm^2)$$

因 $$R = \rho\frac{l}{A}$$

故电阻丝长度

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{5\times2.01\times10^{-6}}{0.48\times10^{-6}} = 20.94(m)$$

例 1-17 一根长度为 50m 的镍铬铁合金线，它的电阻为 11.2Ω，求它的截面是多少？已知镍铬铁合金的电阻率 $\rho = 1.12\times10^{-6}\Omega\cdot m$。

解

因 $R = \rho\frac{l}{A}$

故 $A = \frac{\rho l}{R} = \frac{1.12\times10^{-6}\times50}{11.2} = 5\times10^{-6}m^2 = 5(mm^2)$

例 1-18 一导线长 1000m，直径为 5mm，电阻为 2Ω。求长度为 500m，直径为 1mm 的同样材料做成的导线的电阻是多少？

解

因
$$R_1 = \rho \frac{l_1}{A_1}$$
$$R_2 = \rho \frac{l_2}{A_2}$$
$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$$
$$A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

故
$$\rho = \frac{R_1 A_1}{l_1} = \frac{R_2 A_2}{l_2}$$

即
$$\frac{R_1 \frac{\pi d_1^2}{4}}{l_1} = \frac{R_2 \frac{\pi d_2^2}{4}}{l_2}$$
$$\frac{R_1 d_1^2}{l_1} = \frac{R_2 d_2^2}{l_2}$$
$$\frac{2 \times 5^2}{1000} = \frac{R_2 \times 1^2}{500}$$

所以导线电阻
$$R_2 = \frac{2 \times 25 \times 500}{1 \times 1000} = 25(\Omega)$$

例 1-19 某铜线线圈在 20℃时的电阻是 0.15Ω，问在 40℃时的电阻是多少？已知在 20℃时铜线的电阻温度系数 $\alpha = 0.00393℃^{-1}$。

解 设 50℃时线圈的电阻为 R_2

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$
$$= 0.15[1 + 0.00393(40 - 20)]$$
$$= 0.15 \times 1.0786 = 0.1618(\Omega)$$

例 1-20 CJ12-100 型交流接触器线圈，在 20℃时的直流电阻值为 13.8Ω，通电后温度升高，此时测量线圈的直流电阻值为 14.885Ω，求线圈的温升是多少？

解 温升 $t = t_2 - t_1$

在 20℃时线圈的电阻温度系数

$$\alpha = 0.00393℃^{-1}$$

因 $$R_2 = R_1(1 + \alpha t)$$

所以 $$t = \frac{R_2 - R_1}{R_1\alpha} = \frac{14.885 - 13.8}{13.8 \times 0.00393}$$

$$= \frac{1.085}{0.054234} = 20(℃)$$

例 1-21 用电阻法测量电机绕组的温度，就是利用绕组的直流电阻在温度升高后电阻值相应增大的原理。试证：绕组的温升

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(235 + t_1)$$

式中 t_2——试验结束时的绕组温度，℃；

t_1——试验开始时的绕组温度，℃；

R_2——试验结束时绕组的电阻，Ω；

R_1——试验开始时绕组的电阻，Ω。

证 电机绕组一般由铜线制成，铜线在 0℃时的电阻温度系数 $\alpha = 0.00427℃^{-1}$

设0℃时绕组的电阻为 R_0

则 $$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$$

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$$

故 $$R_0 = \frac{R_2}{1 + \alpha t_2} = \frac{R_1}{1 + \alpha t_1}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t_2}{\frac{1}{\alpha} + t_1}$$

因 $$\alpha = 0.00427$$

故 $$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0.00427} = 234.2 \approx 235$$

所以 $$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + t_2}{235 + t_1}$$

即 $$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{235 + t_2 - (235 + t_1)}{235 + t_1} = \frac{t_2 - t_1}{235 + t_1}$$

所以 $$t_2 - t_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(235 + t_1) = \Delta t$$

说明：若以环境温度 t_0 为标准，线圈的温升 $\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(t_1 + 235) + (t_1 - t_0)$。

二、焦耳—楞次定律、电能和电功率

（一）电能

我们知道电流通过灯丝会发光，通过电炉会发热，通过电动机会带动机器转动。由此可见，在任何有电流通过的闭合电路里，都要发生能量的转换。把电能转换成其他形式的能，叫做电流作功，简称电功，亦称电能。电流在一段电路上所作的功，与这段电路两端的电压、通过的电流以及通电

时间成正比，可用下式表示

$$W = IUt \tag{1-11}$$

式中 W——电能，J；

I——通过的电流，A；

U——电路两端电压，V；

t——通电时间，s。

$$1J = 1V \times 1A \times 1s$$

这就是说，若负载的端电压为 1V，通过的电流为 1A，在 1s 内所做的功就是 1J（焦耳）。

根据欧姆定律，以 $I=\frac{U}{R}$，$U=IR$ 分别代入式（1-11）中，可得到如下关系

$$W = \frac{U}{R}Ut = \frac{U^2}{R}t \tag{1-12}$$

或

$$W = IIRt = I^2Rt \tag{1-13}$$

（二）电功率

功率表示能量传递的快慢程度。从力学中知道，功率在数值上等于每秒钟内所做的功。电流的功率也同样在数值上等于电流在每秒钟内所做的功，可用下式表示

$$P = \frac{W}{t} \tag{1-14}$$

式中 P——电流的功率，W；

W——电流的功，J；

t——时间，s。

1W 就是 1s 内做 1J 的功。

由式（1-11）、（1-12）、（1-13）可求出

$$P = \frac{W}{t} = \frac{IUt}{t} = IU \tag{1-15}$$

$$P=\frac{W}{t}=\frac{U^2t}{Rt}=\frac{U^2}{R} \tag{1-16}$$

$$P=\frac{W}{t}=\frac{I^2Rt}{t}=I^2R \tag{1-17}$$

所以 1W 也等于 1A×1V。

在电功率很大的场合，常用 kW 做单位，1kW = 1000W。在电功率很小的场合，则用 mW 或 μW 做单位，1mW = 1/1000W，1μW = 1/10^6W = 10^{-6}W。

（三）一度电是多少

一度电是电能的一种单位。知道了用电设备的电功率，乘上用电时间，就能算出它的电功来，也就是说消耗了多少电能。

从 $W=Pt$ 式中，可知 1J = 1W·s 但在实际中嫌 J 这个单位太小，常用小时（h）作为时间单位。

$$1W\times1h=1W\cdot h$$

在大多数情况下，功率以 kW 计量，时间以 h 计量，则电能的单位就是 kW×h，称为 kW·h，1kW·h 就是常说的一度电。它与 J 的换算关系为

$$1kW\cdot h=1000\times3600=3600000\ (J)$$

（四）焦耳—楞次定律

电流通过导体时，导体中所产生的热量与导体本身的电阻、电流强度的平方和电流通过的时间成正比，这个关系叫做焦耳——楞次定律。

1844～1845 年，俄国科学家楞次和英国科学家焦耳，由大量实验得出：电阻为 1Ω 的导体内，通过的电流为 1A 时，在 1s 内能产生 0.24cal 的热量。焦耳——楞次定律的公

式为

$$Q = 0.24I^2Rt = 0.24IUt \qquad (1\text{-}18)$$

Q 的单位是 cal（卡），1000cal＝1kcal

在我国的法定计量单位中，Q 的单位为 J，1cal = 4.1868J。

例 1-22 5A 的电流通过 4Ω 的电阻，经过 10s 后，计算电流在这段时间内所做的功和功率是多少？

解 设电流所做的功为 W，功率为 P

$$W = I^2Rt = 5^2 \times 4 \times 10 = 1000(J)$$

$$P = I^2R = 5^2 \times 4 = 100(W)$$

例 1-23 一个电熨斗需用电流 3.5A，若发热元件的电阻是 40Ω，求其功率为多少？

解 $P = I^2R = 3.5^2 \times 40 = 490$（W）

例 1-24 一电炉，电流为 5A，接在电压为 220V 电路上，求电炉功率是多少？若使用了 8h，电炉消耗的电能为多少？

解 $P = UI = 220 \times 5 = 1100 = 1.1(kW)$

$$W = Pt = 1.1 \times 8 = 8.8(kW \cdot h) = 8.8(度)$$

例 1-25 220V、1000W 电灯泡钨丝的热电阻是多少？

解

因 $$P = \frac{U^2}{R}$$

所以 $$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484(\Omega)$$

例 1-26 若一电灯泡，两端电压是 36V，灯丝的热电阻是 32.4Ω，问灯泡的额定功率是多少？

解

$$P=\frac{U^2}{R}=\frac{36^2}{32.4}=40\ (\mathrm{W})$$

例 1-27 某车间使用 25W 电烙铁 100 只，每天用电 6h，每月 25 天计，问用电多少度？

解 $W=Pt=0.025\times100\times25\times6=375$（度）

例 1-28 一只 500W 的电灯，接在 220V 的线路上，求电灯取用的电流是多少？

解 $$I=\frac{P}{U}=\frac{500}{220}=2.273\ (\mathrm{A})$$

例 1-29 80W 的扩音机，每天使用 3h，问每月（以 26 天计）耗电量为多少？

解

$$W=Pt=80\times3\times26=6240\ (\mathrm{W\cdot h})=6.24\ (\text{度})$$

例 1-30 某电炉的电阻为 22Ω，接到 220V 的电源上，经过 1h，求这段时间内电流所放出的热量是多少？

解

$$Q=0.24\frac{U^2}{R}t=0.24\times\frac{220^2}{22}\times3600$$

$$=1900800(\mathrm{cal})=1900.8(\mathrm{kcal})=7958(\mathrm{kJ})$$

三、基尔霍夫定律

复杂电路的计算中，需要应用基尔霍夫定律。基尔霍夫定律有两条。为了了解基尔霍夫定律，先就图 1-8 解释几个名词。

（1）支路。电路中每个分支叫支路。图 1-8 中的 AF、

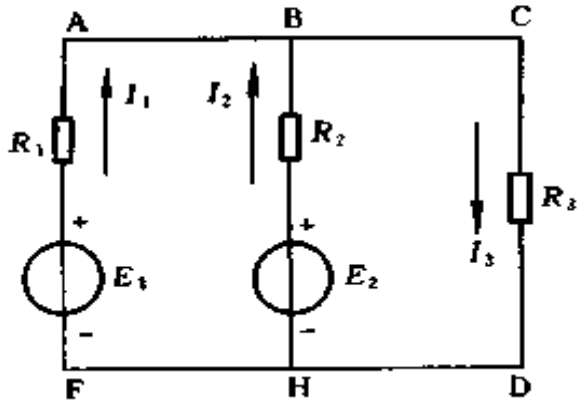


图 1-8　支路与节点

BH、CD 都是支路。支路 AF、BH 中有电源，称为有源支路；支路 CD 中没有电源，称为无源支路。

（2）节点。3 个或 3 个以上支路的连接点叫节点。图1-8中的 B 点、H 点都是节点。

（3）回路。电路中任一闭合路径称为回路。图 1-8 中的 ABCDHFA、ABHFA、BCDHB 都是回路。

（4）网孔。在回路内部不含有任何支路的回路叫网孔，因为它就象渔网中的小孔一样。图 1-8 中回路 ABHFA、BCDHB 都是网孔，而回路 ABCDHFA 则不是网孔。

（5）网络。一般把比较复杂的电路叫做网络，但电路和网络这两个名词并无明确的区别，它们可以相互通用。

（一）基尔霍夫第一定律

该定律也叫基尔霍夫电流定律，这个定律指出，在电路中流入任意一个节点的电流 ΣI_{in}必定等于流出该节点的电流 ΣI_{ex}，即

$$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{ex} \tag{1-19}$$

也可以这样说，在一个节点上电流的代数和恒等于零，即

$$\Sigma I = 0 \tag{1-20}$$

关于电流方向问题，可预先假定，如求得的电流是正值，表示电流的实际方向与标定方向相同；如求得的电流是负值，表示电流的实际方向与标定方向相反。在图 1-9 中，假定了电流方向后，根据基尔霍夫第一定律可列出

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$$

基尔霍夫第一定律一般应用于节点，但也可以推广应用于任意假定的封闭面。图 1-10 中 S 将 R_3、R_4，R_5 所构成的三角形 abc 全部包围起来，流进 S 面电流应等于流出 S 面电流。

因

$$I_1 = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_2 = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_3 = I_{ca} - I_{bc}$$

所以

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{ab} - I_{ca} + I_{bc} - I_{ab} + I_{ca} - I_{bc} = 0$$

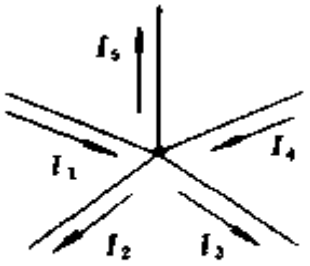


图 1-9　基尔霍夫第一定律示例

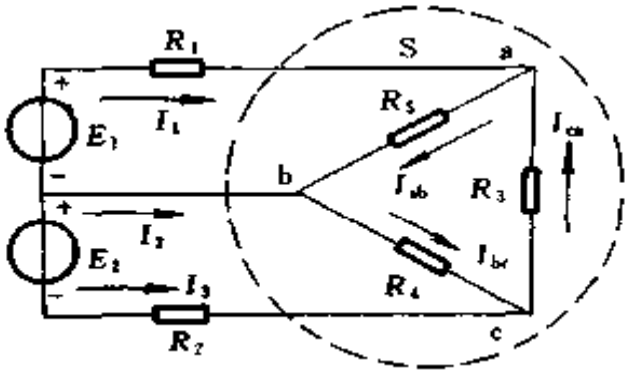


图 1-10　电路的广义节点

这就是说对封闭面 S 也存在一个方程式

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

即

$$\Sigma I = 0$$

对晶体三极管来说，也可以假定一个封闭面 S 把晶体三极管包围起来，如图 1-11 所示。根据基尔霍夫第一定律可得

$$i_e = i_b + i_c$$

（二）基尔霍夫第二定律

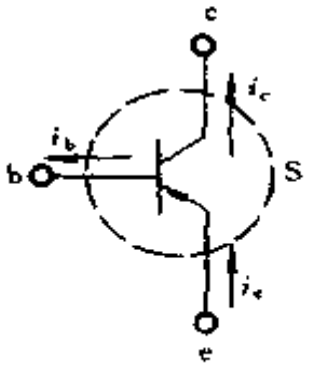


图 1-11　晶体三极管

该定律也叫基尔霍夫电压定律，这个定律指出，电路中任一回路内各段电压的代数和为零，即

$$\Sigma U = 0 \qquad (1\text{-}21)$$

也可以说回路中各电位升 ΣU_b 之和必定等于各电位降 ΣU_d 之和，即

$$\Sigma U_b = \Sigma U_d \qquad (1\text{-}22)$$

如果各支路是由电阻和电动势所构成，基尔霍夫第二定律可以这样说：任一回路内，电阻上电压降的代数和等于电动势的代数和，即

$$\Sigma E = \Sigma IR \qquad (1\text{-}23)$$

在图 1-12 电路中，沿 E_1ABE_1 闭合回路可得到

$$E_1 = I_1R_1 + I_3R_3$$

沿 E_2ABE_2 闭合回路可得到

$$E_2 = I_2R_2 + I_3R_3$$

对晶体三极管来说，三个极之间的电压关系，也符合基尔霍夫第二定律。在图 1-13 中有

$$U_{ce} = U_{cb} + U_{be}$$

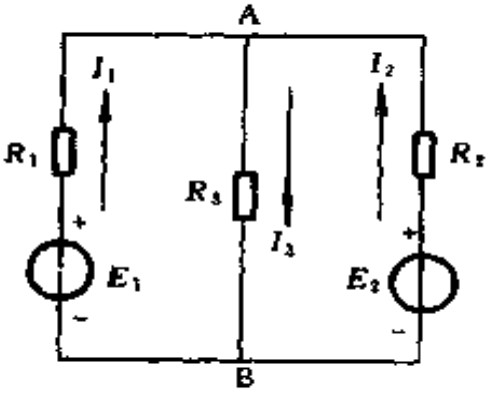


图 1-12　基尔霍夫第二定律示例

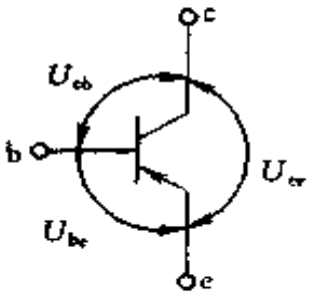


图 1-13　晶体三极管

例 1-31 在图 1-14 所示电路中，各支路电流的参考方向均已指定，今已知 $I_1=5A$，$I_3=3A$，求 $I_2=?$

解 根据基尔霍夫第一定律，在节点 a 处有

$$\Sigma I = I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

所以 $$I_2 = I_3 - I_1 = 3 - 5 = -2A$$

电流 I_2 为负值，说明电流 I_2 的实际方向与它的参考方向相反，即电流 I_2 实际由 a 点流向 b 点。

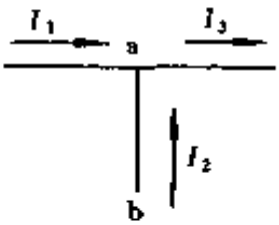


图 1-14 例 1-31 电路

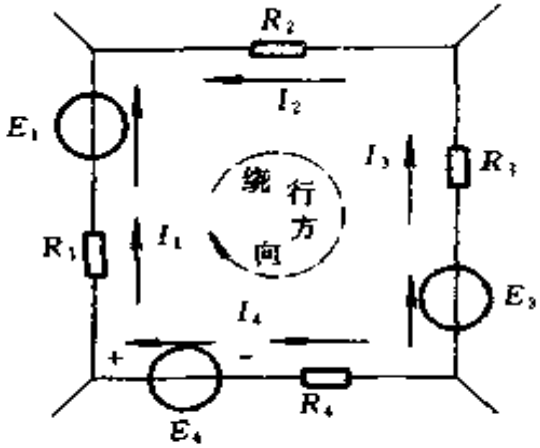


图 1-15 例 1-32 电路

例 1-32 应用基尔霍夫第二定律，列出图 1-15 所示回路电压方程。

解 列式之前先假定回路绕行方向和各支路电流的参考方向，如图 1-15 中所示。假定了这些方向后，可按下述原则取方程式中各项的正负号，如电流方向与回路绕行方向相同，电流在电阻上产生的电压降取正号，相反则取负号；电动势 E 与回路绕行方向相同取正号，相反则取负号。图 1-15中，I_1 和 I_4 的参考方向与回路绕行方向相同，故电压 I_1R_1 和 I_4R_4 取正号；I_2 和 I_3 的参考方向与回路绕行方向相反，故电压 I_2R_2 和 I_3R_3 取负号；电动势 E_1 和 E_4 的方

向与回路绕行方向相同，取正号；电动势 E_3 的方向与回路绕行方向相反，故取负号。有了这些规定后，按式（1-23），该回路的回路电压方程为

$$E_1 + E_4 - E_3 = I_1R_1 + I_4R_4 - I_2R_2 - I_3R_3$$

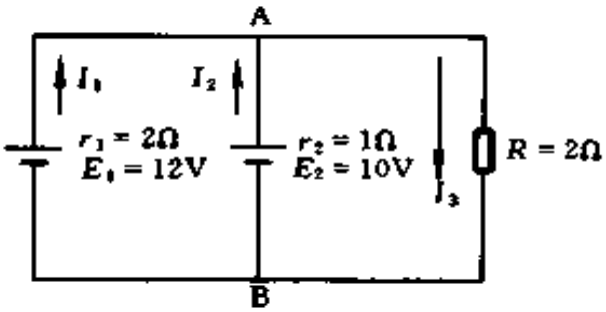


图 1-16　例 1-33 电路

例 1-33　图 1-16 内的两电池组，一个电池组的电动势为 12V，内电阻为 2Ω；另一个电池组为 10V，内电阻为 1Ω。两电池组并联后，再与 2Ω 的外电阻相连接，问各支路内的电流为多少？

解　设各支路内的电流分别为 I_1，I_2，I_3，其方向如图所示。

应用基尔霍夫第二定律，列出回路电压方程。

$ARBE_1A$ 回路

$$E_1 = I_1r_1 + I_3R \qquad ①$$

$ARBE_2A$ 回路

$$E_2 = I_2r_2 + I_3R \qquad ②$$

应用基尔霍夫第一定律，列出节点 A（或 B）电流方程。

$$I_1 + I_2 = I_3 \qquad ③$$

将已知条件代入式①、②得

$$12 = 2I_1 + 2I_3 \qquad ④$$

$$10 = I_2 + 2I_3 \qquad ⑤$$

将式③分别代入④、⑤式得

$$12 = 2I_1 + 2(I_1 + I_2) = 4I_1 + 2I_2 \quad ⑥$$

$$10 = I_2 + 2(I_1 + I_2) = 2I_1 + 3I_2 \quad ⑦$$

⑦×2 得

$$20 = 4I_1 + 6I_2 \quad ⑧$$

⑧－⑥得

$$20 - 12 = 4I_1 + 6I_2 - 4I_1 - 2I_2$$

$$8 = 4I_2$$

所以 $$I_2 = \frac{8}{4} = 2(\text{A})$$

以 $I_2 = 2\text{A}$ 代入⑦式得

$$10 = 2I_1 + 3 \times 2 = 2I_1 + 6$$

$$2I_1 = 10 - 6 = 4$$

所以 $$I_1 = \frac{4}{2} = 2(\text{A})$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2 + 2 = 4(\text{A})$$

故此情况下，每一电池组供给外电路 2A。

例 1-34 在电桥电路中（图 1-17），如要测量某电阻的阻值，可将待测电阻放在 R_4 位置，当 a、b 两端接入电源，调节 R_1、R_2、R_3，直到 $I_A = 0$，即可求得被测电阻的阻值 R_4，求 R_4 为多少？

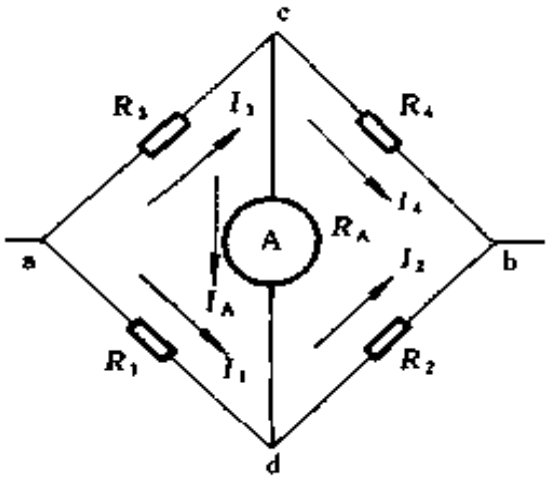


图 1-17 例 1-34 电路

解 根据基尔霍夫第一定律，对 c、d 节点分别有

$$I_3 = I_4 + I_A$$

$$I_2 = I_1 + I_A$$

因 $$I_A = 0$$

所以 $$I_3 = I_4$$

$$I_1 = I_2$$

根据基尔霍夫第二定律，列出回路电压方程。

acda 回路

$$R_3 I_3 + R_A I_A - R_1 I_1 = 0$$

因 $$I_A = 0$$

所以 $$R_3 I_3 - R_1 I_1 = 0 \quad ①$$

cbdc 回路

$$R_4 I_4 - R_2 I_2 - R_A I_A = 0$$

因 $$I_A = 0$$

所以 $$R_4 I_4 - R_2 I_2 = 0$$

即 $$\frac{I_4}{I_2} = \frac{R_2}{R_4} \quad ②$$

以 $I_3 = I_4$，$I_1 = I_2$ 代入①式得

$$R_3 I_4 - R_1 I_2 = 0$$

所以 $$\frac{I_4}{I_2} = \frac{R_1}{R_3} \quad ③$$

比较②、③两式，可得

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad ④$$

上式说明电桥平衡时，两对角线电阻值的乘积相等。

由④式得

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

如已知 $R_1=10\Omega$、$R_2=5\Omega$、$R_3=18\Omega$，

则 $$R_4=\frac{R_2R_3}{R_1}=\frac{5\times18}{10}=9\ (\Omega)$$

四、磁场的基本物理量和基本定律

（一）磁场的基本物理量

1．磁通密度 B

磁通密度又叫磁感应强度，它是表征磁场中某给定点的磁效应强弱和方向的一个物理量。其数值表示该点磁效应的强弱，其方向就是该点的磁场方向。B 的单位是特［斯拉］●，简称特（T）。

2．磁导率 μ

它是衡量磁场媒质导磁性能的一个物理量，单位为亨［利］每米（H/m）。真空的磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m。

3．相对磁导率 μ_r

物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 之比，称为该物质的相对磁导率 μ_r，即

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0} \tag{1-24}$$

4．磁场强度 H

它是表征磁场中某点励磁作用强弱和方向的物理量，单位为安［培］每米（A/m）。磁场强度的大小在数值上等于磁通密度与磁导率之比，即

$$H=\frac{B}{\mu} \tag{1-25}$$

5．磁通［量］Φ

● ［ ］内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字。以下相同。

通过一给定曲面的总磁力线数，称为通过该曲面的磁通，单位为韦［伯］（Wb）。在均匀磁场中通过垂直于磁场的面积 A 的磁通是

$$\Phi = BA \tag{1-26}$$

式中　Φ——磁通，Wb；

B——磁通密度，T；

A——垂直于磁场的面积，m^2。

（二）磁场的基本定律

1．全电流定律

在磁场中，磁场强度沿任何闭合曲线的线积分，等于穿过该闭合曲线的电流代数和，即

$$\oint Hdl = \Sigma I \tag{1-27}$$

式中，凡积分路径的方向和电流的方向符合右手螺旋定则时，电流取正；反之取负。H 的分布与电流的分布、媒质的分布有关。

2．右手螺旋定则

电流通过导线，导线周围就产生磁场。应用螺旋定则，可确定磁场方向与电流方向之间的关系，如图 1-18 所示。

（1）对于直线形导线，可以右手拇指代表导线中的电流方向，弯曲的其余四指则表示磁场方向。或以螺旋旋进、旋

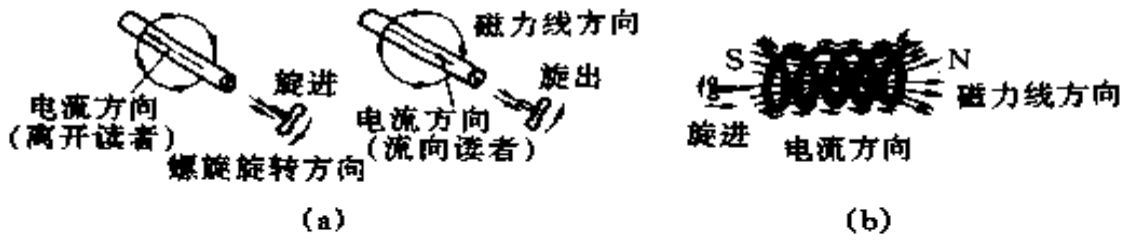


图 1-18　决定导线磁场方向的螺旋定则

（a）直线形导线；（b）螺旋形导线

出的方向，代表导线中的电流方向，螺旋柄旋转的方向，就代表磁场的方向。

（2）对于螺旋形导线，可用弯曲的四指方向表示导线中的电流方向，拇指所指的方向则表示磁场方向。或以螺旋柄旋转的方向，代表导线中的电流方向，螺旋旋进、旋出的方向，就代表磁场的方向。

3．安培定律及左手定则

该定律及定则描述载流导线在磁场中受力的大小和方向，与磁场、电流的大小和方向之间的关系。如果磁场是均匀的，且导线电流方向与磁力线方向相互垂直，其受力的大小可由安培定律确定。电磁力 F 为

$$F = BlI \tag{1-28}$$

式中　F——电磁力，N；

B——磁通密度，T；

l——导线在磁场中的有效长度，m；

I——导线中的电流，A。

若导线电流方向与磁力线方向不垂直，具有夹角 θ，则受力的大小为

$$F = BlI\sin\theta \tag{1-29}$$

电磁力的方向可用左手定则确定，伸左手于磁场内，使手心面向 N 极，以四指与拇指互成直角，如四指表示导体中的电流方向，则拇指所指即为导体运动方向，如图 1-19 所示。左手定则也称为电动机定则。

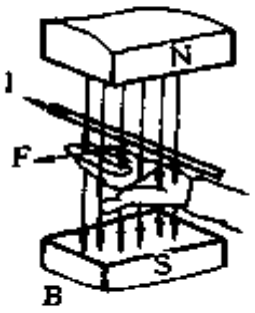


图 1-19　左手定则

4．电磁感应基本定律和右手定则

当导体（线）在磁场中运动或磁场在

导体周围运动，均能使导体切割磁力线而感应产生电动势，这种现象称为电磁感应。由电磁感应所得的电流称为感应电流。

（1）楞次定律。闭合回路中的感应电流方向，总是企图使感应电流本身所产生的通过回路面积的磁通，去补偿或反抗引起感应电流的磁通改变，这一结论称为楞次定律。

（2）法拉第电磁感应定律。不论任何原因使通过回路面积的磁通发生变化时，回路中产生的感应电动势与磁通对时间的变化率成正比，即

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{1-30}$$

式中 e——感应电动势，V；

Φ——磁通，Wb；

t——时间，s。

式（1-30）中的负号，表明了感应电动势的方向，是楞次定律的数学表示。使用上式时，要在回路上先任意规定一个绕行方向作为回路的正方向，再用右手螺旋定则确定这回路的正法线 n 的方向，如图 1-20 所示。则通过回路面积的磁通 Φ 与正法线 n 方向相同者规定为正值，相反者为负值。于是，e 的正、负完全由 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ 决定；如 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t>0$，则 $e<0$，表示感应电动势的方向与回路上所选定的绕行正方向相反；如 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t<0$，则 $e>0$，表示感应电动势的方向与选定的绕行方向相同。图 1-20 中对线圈中磁通变化的四种情况，分别画出了感应电动势的方向。

应该指出，式（1-30）讨论的是单匝回路的感应电动势。如果感应回路不止 1 匝，而是 N 匝串联，且每匝中通过的磁通是相同的，按法拉第电磁感应定律，N 匝线圈中

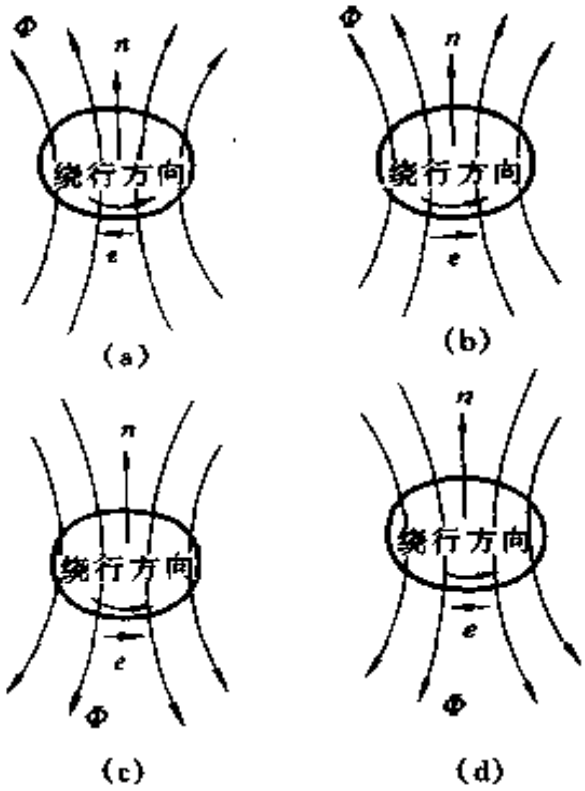


图 1-20　使用公式 $e=-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ 确定感应电动势方向的说明

(a) $\Phi>0$, $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}>0$, $e<0$; (b) $\Phi>0$, $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}<0$, $e>0$;

(c) $\Phi<0$, $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}<0$, $e>0$; (d) $\Phi<0$, $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}>0$, $e<0$

的总电动势应为

$$e=-N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}(N\Phi)}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} \tag{1-31}$$

$$\psi=N\Phi \tag{1-32}$$

习惯上，常把 ψ 称为线圈的磁通匝数或磁通链数，简称磁链。

(3) 直导线中的感应电动势。在均匀磁场中，当导线运动方向、磁场方向及导线三者互相垂直时，导线中的感应电

动势为

$$e = Blv \tag{1-33}$$

式中 e——感应电动势，V；

B——磁通密度，T；

l——导线在磁场中的有效长度，m；

v——导线运动速度，m/s。

感应电动势的方向，可用右手定则来决定，伸右手于磁场内，使手心面向 N 极，以四指与拇指互成直角，如拇指表示导体运动方向，则四指所指即为感应电动势方向，如图1-21所示。右手定则也称发电机定则。

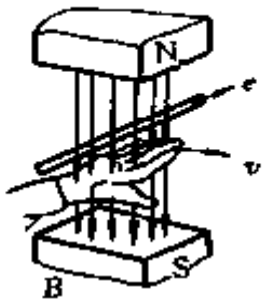


图 1-21 右手定则

(4) 自感应。由于通电回路中电流产生的磁通发生变化，而在回路自身中激起感应电动势的现象，称为自感现象，相应的电动势称为自感电动势。

自感电动势的大小与电流变化率成正比，可用下式表示

$$e_L = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1-34}$$

式中 e_L——自感电动势，V；

L——自感系数（自感），H；

i——电流，A；

t——时间，s。

式（1-34）中的负号，表明了自感电动势将反抗回路中电流的变化。这就是说，当电流增加时，自感电动势与原来电流的方向相反；当电流减小时，自感电动势与原来电流的方向相同。

当回路中的电流不变时，自感电动势为零。

（5）互感应。两个载流回路中的电流发生变化时，相互在对方回路中激起感应电动势的现象，称为互感现象。

图 1-22 中两个邻近的载流回路 1 和 2，电流分别为 i_1 和 i_2，i_1 产生的通过回路 2 的磁通为 Φ_{21}，i_2 产生的通过回路 1 的磁通为 Φ_{12}。

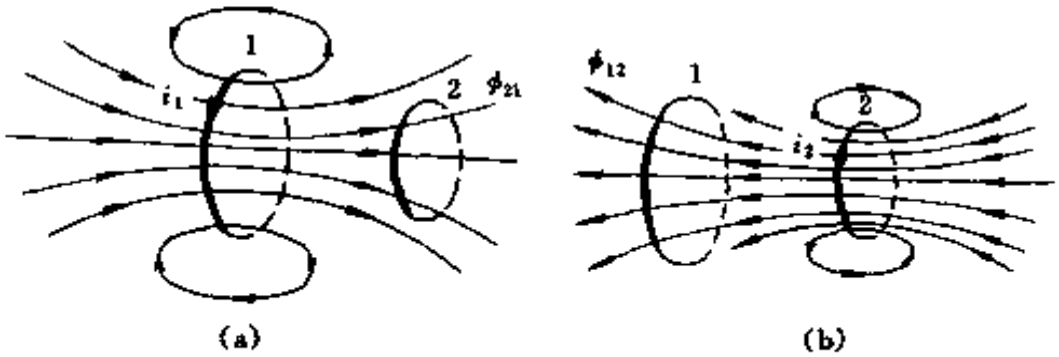


图 1-22　互感现象

（a）i_1 产生通过回路 2 的磁通；（b）i_2 产生通过回路 1 的磁通

应用法拉第电磁感应定律，可以得出

$$e_{21} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{21}}{\mathrm{d}t} = -M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \tag{1-35}$$

$$e_{12} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{12}}{\mathrm{d}t} = -M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \tag{1-36}$$

$$\Phi_{21} = Mi_1 \tag{1-37}$$

$$\Phi_{12} = Mi_2 \tag{1-38}$$

式中　e_{21}——回路 1 中电流变化而在回路 2 中激起的电动势，V；

e_{12}——回路 2 中电流变化而在回路 1 中激起的电动势；V；

M——两回路的互感系数（互感），H。

如果回路是两个线圈，分别有 N_1、N_2 匝，且在第二

线圈通有电流 i_2 时，通过第一线圈的每匝的磁通都为 Φ_{12}；在第一线圈通有电流 i_1 时，通过第二线圈的每匝磁通也都为 Φ_{21}。应用法拉第电磁感应定律，可知

$$e_{21} = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

$$e_{12} = -N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt}$$

相应的感应电动势仍可表示为

$$e_{21} = -M \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{12} = -M \frac{di_2}{dt}$$

不过这时 Φ_{21}、Φ_{12}与 M、i_1、i_2 之间的关系应改用下式表示

$$N_2\Phi_{21} = Mi_1 \tag{1-39}$$

$$N_1\Phi_{12} = Mi_2 \tag{1-40}$$

当 $i_1 = i_2 = 1$ 单位时，$N_2\Phi_{21} = N_1\Phi_{12} = M$。可见两个线圈的互感系数在量值上等于其中一个通有单位电流时，另一线圈的磁通链数。

例 1-35 有一单匝线圈放在磁极间的均匀磁场中，磁通密度 $B = 0.8T$，线圈 ab 边长为 10cm，bc 边长为 6cm（图 1-23）。当线圈中电流为 1A 时，求作用于线圈上的电磁力矩是多少？

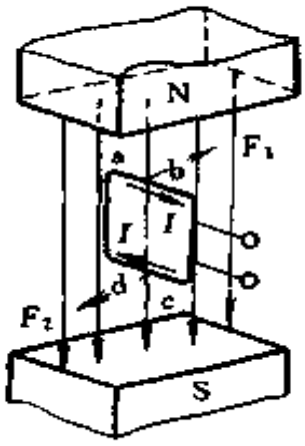


图 1-23 例 1-35 电路

解 作用于线圈 ab 边与 cd 边的电磁力

$$F_1 = F_2 = BlI$$

$$= 0.8 \times 0.1 \times 1 = 0.08N$$

线圈的 bc 与 da 边与磁场平行（$\sin 0^\circ = 0$），所以没有电磁力的作用。

用左手定则确定电磁力 F_1、F_2 的方向如图中所示，都和图面垂直，F_1 向里，F_2 向外，它们的垂直距离为 bc 边的长度，即 0.06m，故这一对力作用于线圈上的力矩 M 为

$$M = 0.08 \times 0.06 = 0.0048(\mathrm{N \cdot m})$$

例 1-36 电感 $L = 500\mathrm{mH}$ 的线圈，忽略电阻，设在某一瞬时，电流每秒增加 5A，求此时线圈两端的电压是多少？

解 线圈两端电压即自感电压，其大小为

$$e_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 500 \times 10^{-3} \times 5 = 2.5(\mathrm{V})$$

例 1-37 在图 1-24 表示的均匀磁场中，穿过磁极极面的磁通 $\Phi = 0.0384\mathrm{Wb}$，磁极边长 a 和 b 分别为 4cm 和 8cm，求磁极间的磁通密度 B 是多少？

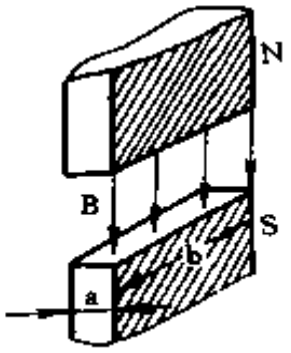


图 1-24 例 1-37 电路

解

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.0384}{0.04 \times 0.08} = 12\ (\mathrm{T})$$

例 1-38 如图 1-25 所示的长螺线管，长度为 l，共有 N 匝线圈，通有电流 I，试用全电流定律证明长螺线管内的磁通密度 $B = \mu NI/l$。

解 由于螺线管相当长，管内中央部分的磁场是均匀的，方向与螺线管的轴线平行，管的外侧，磁场强度很微弱，可以忽略不计。

为计算螺线管中央部分内部某点 P 的磁场强度，通过 P 点作一矩形的闭合线 abcd，如图所示，沿此闭合线取 H 矢

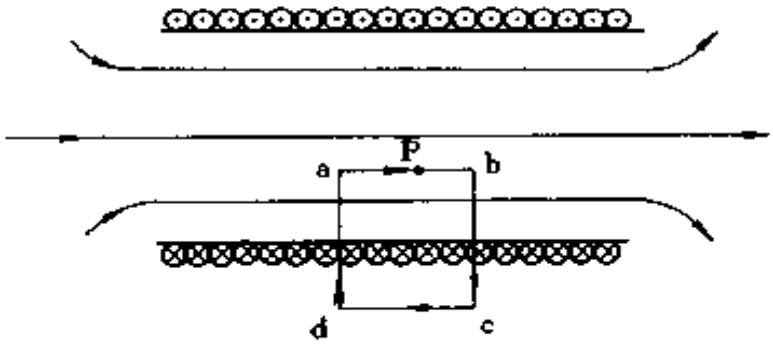


图 1-25　应用全电流定律计算长螺管内磁场

量的线积分。在线段 cd 上，以及在线段 bc 和 da 的管外部分上，$H=0$；在线段 bc 和 da 的管内部分上，$H\neq0$，但是 dl 与 H 相互垂直，即 $\cos(H, dl)=0$。因此，沿闭合线 abcd 的 H 矢量的线积分为

$$\oint H_l dl = \int_{ab} H_l dl + \int_{bc} H_l dl + \int_{cd} H_l dl + \int_{da} H_l dl$$

$$= \int_{ab} H_l dl$$

因为管内磁场是均匀场，方向自 a 至 b，所以

$$\int_{ab} H_l dl = H\int_{ab} dl = H\overline{ab}$$

螺线管内每单位长度有 $N/l=n$ 匝线圈，通过每匝的电流为 I，所以闭合线 abcda 所包围的总电流为 $\overline{ab}nI$，根据右手螺旋定则，这总电流为正值。根据全电流定律得

$$\oint H_l dl = H\overline{ab} = \overline{ab}nI$$

所以
$$H = nI \tag{1-41}$$

或
$$H = \frac{NI}{l} \tag{1-42}$$

于是有
$$B = \mu H = \mu\frac{NI}{l} = \mu nI \tag{1-43}$$

例 1-39 在图 1-26 中，C_1 表示一长螺线管（称为一次线圈），长为 l，截面积为 A，共有 N_1 匝；C_2 表示另一长度和截面积都和 C_1 相同的共轴螺线管（称为二次线圈），共有 N_2 匝。螺线管内磁介质的磁导率为 μ，求：

（1）这两共轴螺线管的互感系数是多少？

（2）两螺线管的自感系数与互感系数的关系如何？

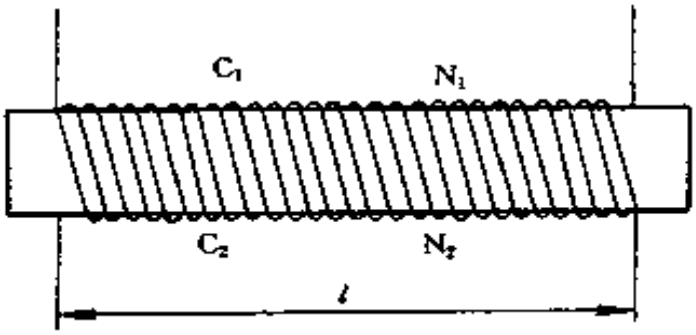


图 1-26 两个共轴螺线管互感系数的计算

解 （1）设一次线圈中通有电流 I_1，管内磁通密度 B 和磁通 Φ 分别为

$$B = \mu \frac{N_1 I_1}{l}$$

$$\Phi = BA = \mu \frac{N_1 I_1}{l} A$$

通过二次线圈的磁通也为 Φ，所以二次线圈的磁通链数为

$$N_2 \Phi = \mu \frac{N_1 N_2 I_1}{l} A$$

按互感系数的定义

$$M = \frac{N_2 \Phi}{I_1}$$

所以

$$M = \mu \frac{N_1 N_2}{l} A$$

（2）一次线圈通有电流 I_1 时，一次线圈自己的磁通链数为

$$N_1 \Phi = \mu \frac{N_1^2 I_1}{l} A$$

按自感系数的定义

$$L = \frac{N_1 \Phi}{I_1}$$

所以一次线圈的自感系数

$$L_1 = \mu \frac{N_1^2 A}{l}$$

同理，二次线圈的自感系数

$$L_2 = \mu \frac{N_2^2 A}{l}$$

由此可见

$$M^2 = L_1 L_2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

必须指出，只有上述耦合的线圈才有 $M = \sqrt{L_1 L_2}$ 的关系；一般情况时，$M = k\sqrt{L_1 L_2}$，而 $0 \leqslant k \leqslant 1$，$k$ 称为耦合系数，k 值视两线圈的相对位置而定。

五、磁路定律

（一）*磁路的欧姆定律*

图 1-27 为一简单的无分支磁路，设无分支磁路由某种铁磁物质构成，其横截面面积为 A，平均长度为 l。若平均长度远比横截面的线性尺寸大得多，可近似地认为磁通在横截面上的分布是均匀的，则有

$$\Phi = BA = \mu HA \quad (1\text{-}44)$$

式中 Φ——磁通，Wb；

B——磁通密度，T；

A——横截面积，m^2；

μ——磁导率，H/m；

H——磁场强度，A/m。

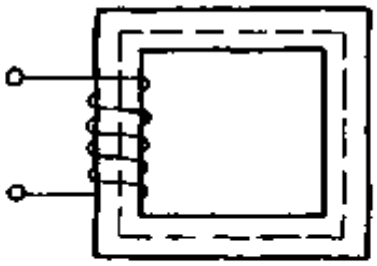


图 1-27 无分支磁路

另外，设通电线圈的匝数为 N，电流为 I，则有

$$NI = Hl \quad (1\text{-}45)$$

由式（1-44）、（1-45）可以得出

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu A}} \quad (1\text{-}46)$$

$$F = NI \quad (1\text{-}47)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (1\text{-}48)$$

式中 F——磁路中产生磁通的磁化力，称为磁通势，A；

R_m——磁阻，H^{-1}。

有了磁通势 F、磁阻 R_m 的概念，可得到

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1\text{-}49)$$

在形式上，式（1-49）与电路的欧姆定律相似，称为磁路欧姆定律。磁路中的磁通 Φ 对应于电路中的电流 I；磁路中的磁动势 F 对应于电路中的电动势 E；磁路中的磁阻 R_m 对应于电路中的电阻 R。

若令 $\Lambda = \frac{1}{R_m}$，则式（1-49）又可写成

$$\Phi = \Lambda F \quad (1\text{-}50)$$

式中　Λ——磁导，H。

（二）磁路的基尔霍夫第一定律

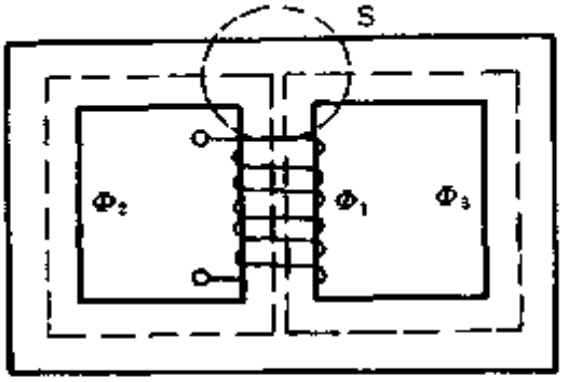


图 1-28　有分支磁路

对于有分支磁路，如图 1-28 所示，任取一闭合面 S，穿过闭合面磁通的代数和必为零，也就是说进入闭合面的磁通，等于离开闭合面的磁通。这就是磁路基尔霍夫第一定律，可用下式表示

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

或

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

即

$$\Sigma\Phi = 0 \tag{1-51}$$

式中，如果把穿出闭合面 S 的磁通前面取正号，则穿进闭合面的磁通前面取负号。

应用磁路基尔霍夫第一定律时，应包括穿出该节点的漏磁通。

（三）磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路的闭合回路中，磁通势的代数和等于该回路中磁压降的代数和，即

$$\Sigma F = \Sigma IN = \Sigma\Phi R_m = \Sigma Hl \tag{1-52}$$

关于磁通势和磁压降的正负，均取决于绕组中电流 I 产生的磁通 Φ 的方向，I 和 Φ 的方向按右手螺旋定则确定。如 Φ 的方向与所选定的回路绕行方向相同，IN、Hl 取正号；否则取负号。

（四）磁路定律的应用

1. 恒定磁通无分支磁路的计算

这是磁路计算中最简单的一种。无分支磁路的主要特点是在漏磁通忽略不计时，磁路中处处都有相等的磁通 Φ。计算时可按下述步骤进行：

1）根据磁路中各部分的材料和截面进行分段，要求每一段磁路是均匀的（材料相同和截面积相等）。

2）根据磁路尺寸算出各段的截面积和平均长度，在计算截面积时，必须注意，由涂有绝缘漆的硅钢片堆叠而成的铁心，根据几何尺寸计算出来的面积是表观面积，磁力线通过的面积应按有效面积来计算，故应乘以叠压系数。令叠压系数（也叫填充系数）为 k

$$k = \frac{\text{有效面积}}{\text{表观面积}}$$

一般厚度为 0.5mm 的硅钢片，k 为 0.92 左右；厚度为 0.35mm 的硅钢片，k 为 0.86 左右。

磁路中有气隙时，磁通会向外扩张，造成边缘效应，增大了空气隙的有效面积。当空气隙长度 δ 很小时，有效面积可按下述近似公式计算。

对于矩形截面的铁心，如图 1-29（a）所示。空气隙的有效截面积

$$A_a = (a + \delta)(b + \delta) \approx ab + (a + b)\delta \quad (1\text{-}53)$$

对于圆形截面的铁心，如图 1-29（b）所示。空气隙的有效截面积

$$A_a = \pi\left(r + \frac{\delta}{2}\right)^2 \approx \pi r^2 + \pi r\delta \quad (1\text{-}54)$$

3）根据已知的磁通计算，各段的磁通密度 $B = \Phi/A$，

计算时的单位是，Φ 为 Wb，B 为 T，H 为 A/m。

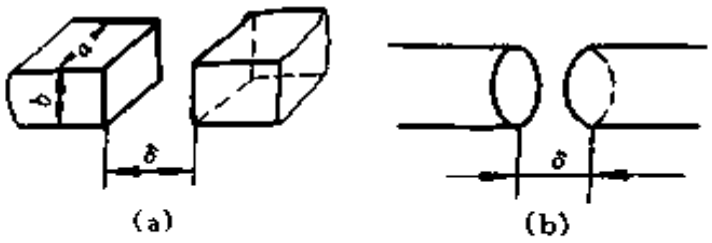


图 1-29　磁路铁心截面

(a) 矩形截面；(b) 圆形截面

4）根据每一段的磁通密度 B 求磁场强度 H。对于铁磁材料可查基本磁化曲线，如图 1-30 所示。对于空气隙就要用下式计算

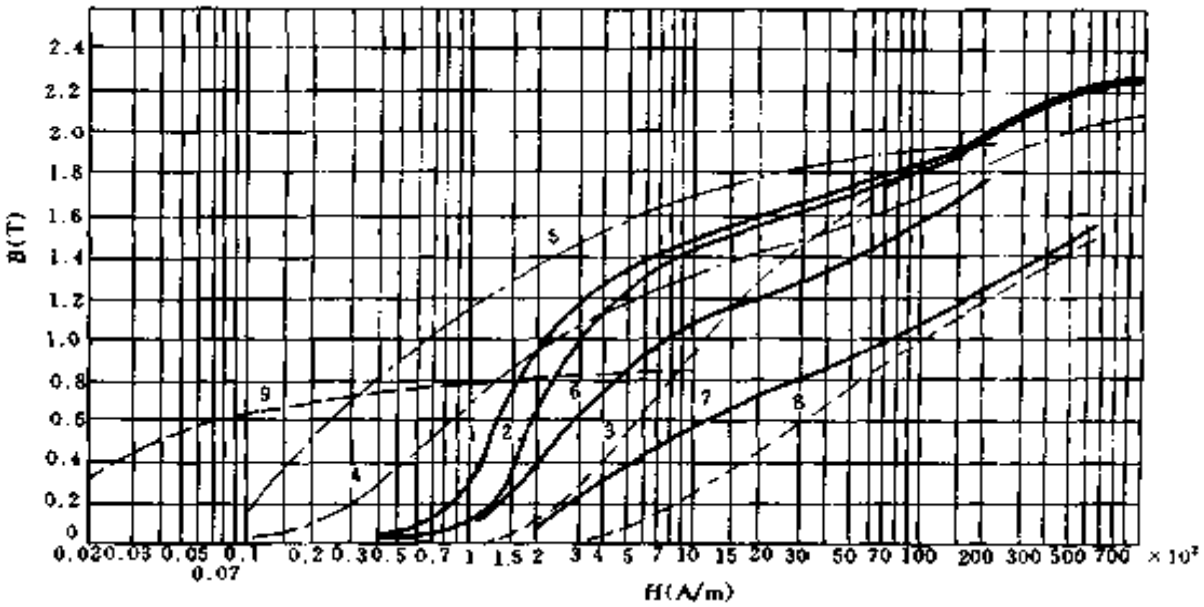


图 1-30　各种材料的磁化曲线

1—普通电磁纯铁，已退火；2—10 号优质碳素钢，已退火；3—20 号优质碳素钢，已退火；4—D4 硅钢板；5—D330 冷轧硅钢板；6—可锻铸铁；7—HT100 灰铸铁，已退火；8—HT100 灰铸铁，未退火；9—1J79 铁镍合金

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} = \frac{B_a}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$= 795800 B_a \qquad (1\text{-}55)$$

5）根据每一段的磁场强度和中心线长度，求出每一段的磁压降 $H_1 l_1$、$H_2 l_2$、$H_3 l_3$、……。

6）按照磁路基尔霍夫第二定律求出所需的磁通势。

例 1-40 某用 D4 硅钢片叠成的电磁铁，为了对衔铁有足够的电磁吸力，要求气隙磁通密度 B_a 有 1T，铁心尺寸如图 1-31 所示，求需要多大磁通势？

解

$$\Phi = B_a A_1 = 1 \times 0.001 = 0.001(\text{Wb})$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{0.001}{0.001} = 1(\text{T})$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{0.001}{0.0008} = 1.25(\text{T})$$

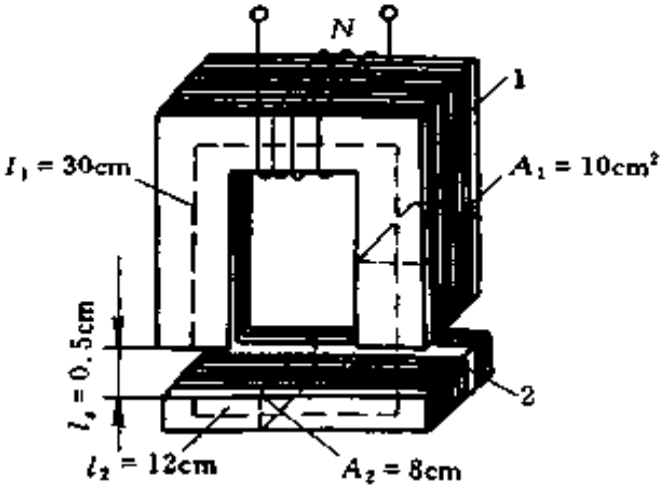


图 1-31 例 1-40 电路

1—铁心；2—衔铁

在这里应该指出的是，空气隙的截面认为和 A_1 一样，

没有作出修正。这一点当气隙长度小于其截面短边的 20% 时是允许的。

从图 1-30 中 D4 硅钢片的磁化曲线上找出

$B_1=1\text{T}$ 时，对应的 $H_1=250\text{A/m}$

$B_2=1.25\text{T}$ 时，对应的 $H_2=700\text{A/m}$

$H_a=8\times10^5B_a=8\times10^5\times1\text{A/m}=8\times10^5\text{A/m}$

由式（1-45）、（1-47）可得

$$\begin{aligned}\text{磁通势 } F &= NI=H_1l_1+H_2l_2+2H_al_a\\&=250\times0.3+700\times0.12+2\times8\times10^5\\&\quad\times0.5\times10^{-2}\\&=75+84+8000=8159\ (\text{A})\end{aligned}$$

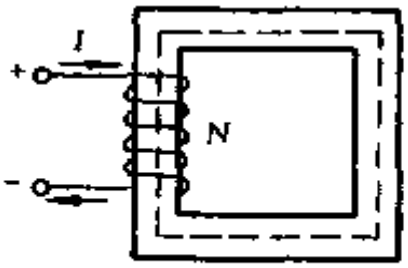


图 1-32　例 1-41 电路

例 1-41　图 1-32 中，线圈的铁心是由铸铁制成，已知铁心的平均长度为 40cm，线圈的匝数 $N=360$ 匝，并用直流励磁，现要求铁心中的 B 值等于 0.7T，求磁动势 F 及电流 I 各为多少？

解　从图 1-30 中铸铁的磁化曲线上，查出当 $B=0.7\text{T}$ 时，$H=1800\text{A/m}$

$$F = IN = Hl = 1800\times0.4 = 720(\text{A})$$

$$I=\frac{F}{N}=\frac{720}{360}=2(\text{A})$$

例 1-42　在图 1-33 的磁路中，已知材料是 D4 硅钢片，其叠压系数 k 为 0.9，励磁绕组匝数为 120 匝，求在该磁路中获得 $\Phi=0.0015\text{Wb}$ 所需的励磁电流是多少？

解　（1）根据图中磁路特点，应分成三段来计算。每段的中心线长度和截面积为

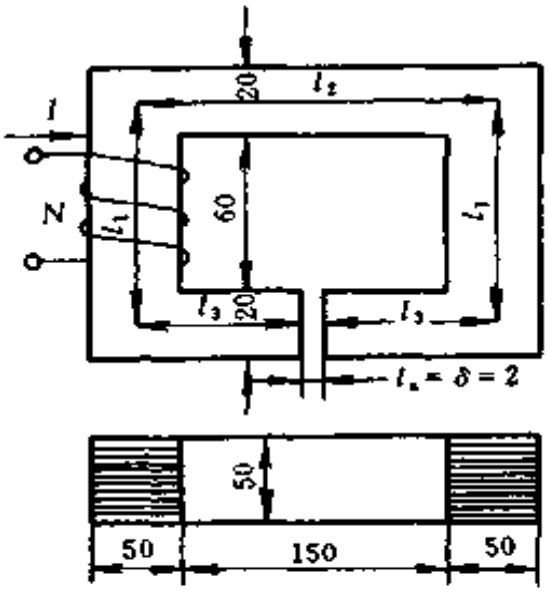


图 1-33　例 1-42 电路

图中单位为 mm

$$L_1 = 2l_1 = 2(60 + 20) = 160(\text{mm}) = 0.16(\text{m})$$

$$L_2 = l_2 + 2l_3 = (150 + 50) + 2\left(25 + \frac{150 - 2}{2}\right)$$

$$= 200 + 2 \times 99 = 398(\text{mm}) = 0.398(\text{m})$$

$$l_a = \delta = 2(\text{mm}) = 0.002(\text{m})$$

$$A_1 = 50 \times 50 \times 0.9 = 2250(\text{mm}^2) = 0.00225(\text{m}^2)$$

$$A_2 = 50 \times 20 \times 0.9 = 900(\text{mm}^2) = 0.0009(\text{m}^2)$$

因铁心截面为矩形，参照图 1-29（a）和计算空气隙有效截面积的公式，本例中空气隙的有效截面积

$$A_a = 20 \times 50 + (20 + 50) \times 2 = 1140(\text{mm}^2)$$

$$= 0.00114(\text{m}^2)$$

（2）每段的磁通密度

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{0.0015}{0.00225} = 0.667(\text{T})$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{0.0015}{0.0009} = 1.667(\mathrm{T})$$

$$B_a = \frac{\Phi}{A_a} = \frac{0.0015}{0.00114} = 1.316(\mathrm{T})$$

（3）每段的磁场强度由图 1-30 中的磁化曲线上查得

$$H_1 = 100\mathrm{A/m}$$

$$H_2 = 8000\mathrm{A/m}$$

空气隙中的磁场强度

$$H_a = 8 \times 10^5 B_a = 8 \times 10^5 \times 1.316 = 1052800(\mathrm{A/m})$$

（4）每段的磁压降

$$H_1 L_1 = 100 \times 0.16 = 16(\mathrm{A})$$

$$H_2 L_2 = 8000 \times 0.398 = 3184(\mathrm{A})$$

$$H_a l_a = 1052800 \times 0.002 = 2105.6(\mathrm{A})$$

（5）总磁通势

$$F = NI = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_a l_a$$
$$= 16 + 3184 + 2105.6 = 5305.6(\mathrm{A})$$

励磁电流

$$I = \frac{F}{N} = \frac{5305.6}{120} = 44.21(\mathrm{A})$$

2. 电磁铁的吸力计算

（1）直流电磁铁吸力 F 的计算

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B^2 A \tag{1-56}$$

式中 B——磁通密度，T；

A——铁心截面积，m^2；

F——吸力，N。

（2）交流电磁铁吸力 F 的计算

$$F=\frac{10^7}{16\pi}B_m^2A \tag{1-57}$$

或

$$F=\frac{10^7}{8\pi}B^2A \tag{1-58}$$

式中 F——吸力的平均值，N；

B_m——交变磁通密度的最大值，T；

B——交变磁通密度的有效值，T；

A——铁心截面积，m^2。

3．交流铁心线圈电路

当线圈两端外加一正弦交变电压时，在它周围就会产生交变磁场，设铁心中的主磁通是正弦交变的磁通，则线圈中的感应电动势也是正弦交变电动势。

忽略铁心中的线圈电阻和漏抗所产生的压降，有如下关系式

$$U\approx E=4.44fN\Phi_m \tag{1-59}$$

或

$$U\approx E=4.44fNB_mA \tag{1-60}$$

式中 U——加于线圈电压的有效值，V；

f——加于线圈电压的频率，Hz；

N——线圈的匝数；

Φ_m——主磁通最大值，Wb；

B_m——磁通密度最大值，T；

A——铁心截面积，m^2。

由式（1-59）、（1-60）可得线圈的匝数

$$N = \frac{U}{4.44 f \Phi_m} \tag{1-61}$$

或

$$N = \frac{U}{4.44 f B_m A} \tag{1-62}$$

根据磁路基尔霍夫第二定律，可求得线圈励磁电流的计算公式为

$$I = \frac{H_m l_m + H_a l_a}{\sqrt{2} N} \tag{1-63}$$

式中 I——励磁电流的有效值，A；

H_m——铁心内的磁场强度的最大值（按照 B_m 值从磁化曲线中找出），A/m；

H_a——气隙的磁场强度的最大值（按照 $H_a = B_m/\mu_0$ 计算），A/m；

l_m——静铁心和动铁心的平均磁路总长（气隙除外），m；

l_a——铁心两端空气隙的总长度，m；

N——线圈匝数。

例 1-43 图 1-34 为一直流电磁铁，它的磁路由 D4 硅钢片叠成的铁心、铸钢做的衔铁和空气隙 3 部分组成。图中尺寸为：$a = 20\text{cm}$，$b = 160\text{cm}$，$c = 25\text{cm}$，$d = 100\text{cm}$，$h = 30\text{cm}$，$l_a = 0.1\text{cm}$，线圈匝数 $N = 2600$ 匝，硅钢片铁心的叠压系数 $k = 0.91$，问需在磁路中获得 $\Phi = 0.06\text{Wb}$ 所需的励磁电流 I 是多少？电磁铁吸力 F 有多大？

解 （1）求励磁电流 I

从图中可计算各段磁路长度及相应的截面积

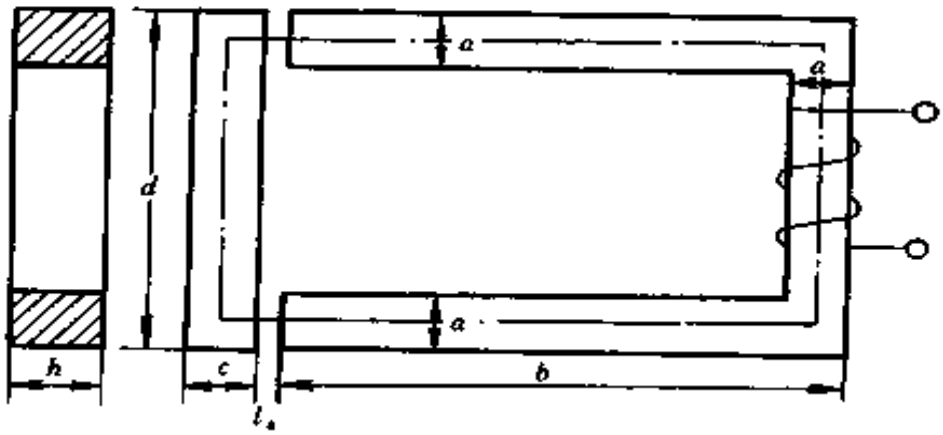


图 1-34　例 1-43 电路

铁心磁路长 $l_1=\left(b-\frac{a}{2}\right)\times 2+(d-a)$

$=\left(160-\frac{20}{2}\right)\times 2+(100-20)$

$=300+80=380$（cm）

衔铁磁路长 $l_2=\left(\frac{c}{2}\times 2\right)+(d-a)$

$=\left(\frac{25}{2}\times 2\right)\times(100-20)$

$=25+80=105$（cm）

空气隙长 $l_a=0.1$cm

铁心截面 $A_1=0.91\times a\times h=0.91\times 20\times 30$

$=546$（cm^2）

衔铁截面 $A_2=c\times h=25\times 30=750$（$cm^2$）

空气隙截面 $A_a=a\times h=20\times 30=600$（$cm^2$）

每段磁通密度

$$B_1=\frac{\Phi}{A_1}=\frac{0.06}{546\times 10^{-4}}=1.099(\mathrm{T})$$

$$B_2=\frac{\Phi}{A_2}=\frac{0.06}{750\times 10^{-4}}=0.8(\mathrm{T})$$

$$B_a = \frac{\Phi}{A_a} = \frac{0.06}{600 \times 10^{-4}} = 1(\mathrm{T})$$

从图 1-30 中的磁化曲线可查得相应的磁场强度

$$H_1 = 400\mathrm{A/m}$$

$$H_2 = 140\mathrm{A/m}$$

空气隙中的磁场强度

$$H_a = 8 \times 10^5 B_a = 8 \times 10^5 \times 1(\mathrm{A/m})$$

从式 $I = \frac{\Sigma Hl}{N}$ 可求出 I

$$I = \frac{\Sigma Hl}{N} = \frac{H_1 l_1 + H_a l_a + H_2 l_2}{N}$$

$$= \frac{400 \times 3.8 + 8 \times 10^5 \times 0.1 \times 10^{-2} + 140 \times 1.05}{2600}$$

$$= \frac{1520 + 800 + 147}{2600} = \frac{2467}{2600} = 0.949(\mathrm{A})$$

(2) 求电磁铁吸力 F

$$F = \frac{10^7}{8\pi} B_1^2 A_1 = \frac{10^7}{8\pi} \times 1.1^2 \times 546 \times 10^{-4}$$

$$= 26287(\mathrm{N})$$

第二节　线性直流电路计算

一、电阻串并联电路

(一) 串联电路

如在一段电路上，把几个电阻一个接着一个地连接起来，并使其中没有分岔的支路，这种连接方式叫做串联。如

图 1-35 所示。串联电路的特点为：

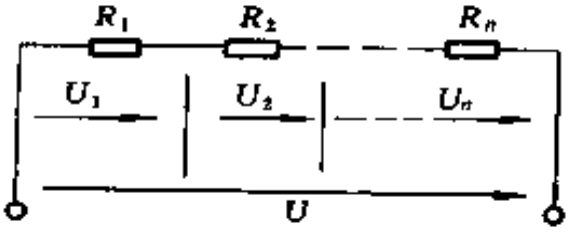


图 1-35 串联电路

（1）电流处处相同，即流过 R_1，R_2，R_3，…，R_n 的电流为同一电流。

（2）总电压等于各个电阻上电压的代数和，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n$$

其中 $U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; \cdots; U_n = IR_n$。

（3）根据欧姆定律，电路中的总电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2 + \cdots + U_n}{I}$$

$$= \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \cdots + \frac{U_n}{I}$$

$$= R_1 + R_2 + \cdots + R_n \qquad (1\text{-}64)$$

这就是说，串联电路中，总电阻 R 等于各个串联电阻之和。

如用电导表示，则

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \cdots + \frac{1}{G_n}} \qquad (1\text{-}65)$$

（4）串联电路中的分压公式

$$U_1 = U\frac{R_1}{R_1 + R_2 + \cdots + R_n} = U\frac{R_1}{R} \qquad (1\text{-}66)$$

$$U_2 = U\frac{R_2}{R_1 + R_2 + \cdots + R_n} = U\frac{R_2}{R}$$

$$U_n = U\frac{R_n}{R_1 + R_2 + \cdots + R_n} = U\frac{R_n}{R}$$

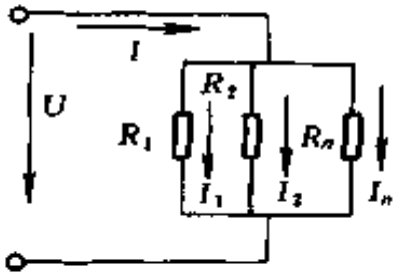


图 1-36　并联电路

（二）并联电路

如把几个电阻的一端连在一起，而把它们的另一端连在另一点，这种连接方式叫做并联。如图 1-36 所示。并联电路的特点为：

（1）加在各并联支路两端的电压相等。

（2）总电流等于各分支电路的电流的代数和，即

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

（3）电路中总电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \tag{1-67}$$

如用电导表示，则为

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n \tag{1-68}$$

上述并联总电阻公式可用下述方法推导出。由欧姆定律可知 $I_1=\frac{U}{R_1}$；$I_2=\frac{U}{R_2}$；…；$I_n=\frac{U}{R_n}$。

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + \cdots + I_n \\ &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \cdots + \frac{U}{R_n} \\ &= U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}\right) \end{aligned}$$

因　$$I = \frac{U}{R}$$

所以　$$\frac{U}{R} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}\right)$$

即 $$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

（4）两个电阻并联时，并联电路的分流公式为

$$I_1=I\frac{R_2}{R_1+R_2} \tag{1-69}$$

$$I_2=I\frac{R_1}{R_1+R_2}$$

例 1-44 今有 3 对并联电阻，它们的阻值分别为（1）$R_1=20\Omega$，$R_2=20\Omega$；（2）$R_1=20\Omega$，$R_2=60\Omega$；（3）$R_1=20\Omega$，$R_2=6000\Omega$。求这三种情况下的等效电阻是多少？从计算结果可以看出什么问题？

解 （1）$R_1=20\Omega$，$R_2=20\Omega$ 时，等效电阻

$$R=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{20\times20}{20+20}=10(\Omega)$$

（2）$R_1=20\Omega$，$R_2=60\Omega$ 时，等效电阻

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{20\times60}{20+60}=15(\Omega)$$

（3）$R_1=20\Omega$，$R_2=6000\Omega$，等效电阻

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{20\times6000}{20+6000}=19.93(\Omega)$$

从上述计算结果可看出：

（1）等效电阻比并联电阻中最小的一个电阻还要小。

（2）两个阻值相同的电阻并联后，等效电阻等于并联电阻值的一半。

（3）两个并联电阻的阻值相差悬殊，如 $R_1\ll R_2$，工程上计算电阻时，往往略去阻值大的电阻 R_2，认为等效电阻 $R\approx R_1$。

例 1-45 图 1-37 电路中，已知 $E=6V$，$R_1=30k\Omega$，$R_2=15k\Omega$，求总电阻 $R=?$，$U_1=?$，$U_2=?$

解 总电阻

$$R = R_1 + R_2 = 30 + 15 = 45(k\Omega)$$

由欧姆定律得

$$U_1 = \frac{E}{R}R_1 = \frac{6}{45} \times 30 = 4(V)$$

$$U_2 = \frac{E}{R}R_2 = \frac{6}{45} \times 15 = 2(V)$$

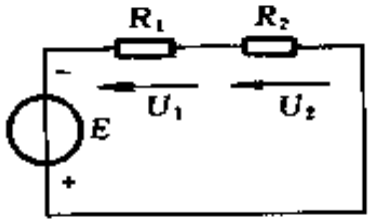


图 1-37 例 1-45 电路

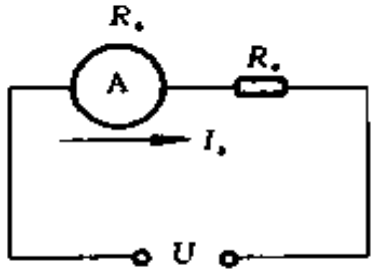


图 1-38 例 1-46 电路

例 1-46 图 1-38 中的表头参数为 $I_a=50\mu A$，内阻 $R_a=3k\Omega$，用此表头测量 10V 电压，需要在表头回路中串联多大电阻？

解 设串联电阻为 R_s

因
$$I_a = \frac{U}{R_a + R_s}$$

故
$$50 \times 10^{-6} = \frac{10}{3000 + R_s}$$

$$10 = 50 \times 10^{-6}(3000 + R_s)$$

$$50 \times 10^{-6}R_s = 10 - 50 \times 10^{-6} \times 3000$$

即
$$50 \times 10^{-6}R_s = 9.85$$

所以 $R_s = \dfrac{9.85 \times 10^6}{50} = 1.97 \times 10^5 = 197(\text{k}\Omega)$

例 1-47 图 1-39 中某发电机向负载 R_2 供电，因线路较长，导线上的电压降不可忽略，导线电阻 $R_1 = 0.4\Omega$，并已知负载电阻 $R_2 = 10.5\Omega$，发电机端电压 $U_1 = 226\text{V}$，求导线上电压降 ΔU 和负载电阻 R_2 上电压 U_2 各为多少？

解 外电路总电阻

$$R = 2R_1 + R_2 = 2 \times 0.4 + 10.5 = 11.3(\Omega)$$

电路中电流

$$I = \frac{U_1}{R} = \frac{226}{11.3} = 20(\text{A})$$

线路上电压降 $\Delta U = 2IR_1 = 2 \times 20 \times 0.4 = 16$（V）

负载两端电压 $U_2 = U_1 - \Delta U = 226 - 16 = 210$（V）

例 1-48 在图 1-40 电路中，电源电压为 12V，$R_1 = 5\text{k}\Omega$，$R_2 = 10\text{k}\Omega$，用灵敏度为 5000Ω/V 和 20kΩ/V 的两种万用表分别测量 R_1 两端电压，万用表的量程为 10V，问这两种万用表测量的结果分别为多少？测量的相对误差有多大？$\left(\text{相对误差 } \beta = \dfrac{|\text{测量值} - \text{真值}|}{\text{真值}} \times 100\%\right)$ 如 $R_1 = 50\text{k}\Omega$，$R_2 = 100\text{k}\Omega$，结果又如何？

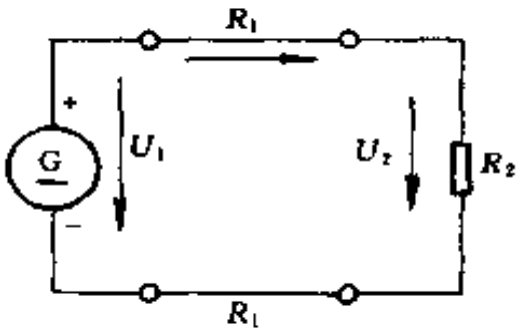


图 1-39 例 1-47 电路

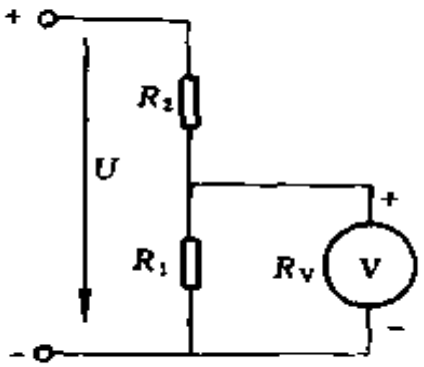


图 1-40 例 1-48 电路

解 （1）先根据电阻串联分压的关系，求出在没有接入电表时，电阻 R_1 两端的电压，可得

$$U_1 = U\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 12 \times \frac{5}{5 + 10}$$

$$= 12 \times \frac{5}{15} = 4(\text{V})$$

用计算方法得出的这个电压数值叫做真值。

（2）设 5000Ω/V，10V 量程万用表的内阻为 R_{V1}

$$R_{V1} = 10 \times 5000 = 50000(\Omega) = 50(\text{k}\Omega)$$

用它测量时，相当于在电阻 R_1 上并联了电阻 R_{V1}，这时的等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_{V1}}{R_1 + R_{V1}} = \frac{5 \times 50}{5 + 50} = 4.545(\text{k}\Omega)$$

这个电阻与 R_2 串联，改变了电路的分压比，再利用分压公式，可求得 R_1 两端的电压

$$U'_1 = U\frac{R}{R_2 + R} = 12 \times \frac{4.545}{10 + 4.545} = 3.75(\text{V})$$

测量的相对误差为

$$\beta = \frac{|3.75 - 4|}{4} \times 100\% = 6.25\%$$

（3）设 20000Ω/V，10V 量程万用表的内阻为 R_{V2}

$$R_{V2} = 10 \times 20 = 200(\text{k}\Omega)$$

等效电阻为

$$R' = \frac{R_1 R_{V2}}{R_1 + R_{V2}} = \frac{5 \times 200}{5 + 200} = 4.878(\text{k}\Omega)$$

电表测量数值

$$U''_1 = U\frac{R'}{R_2 + R'} = 12 \times \frac{4.878}{10 + 4.878}$$

$$= 12 \times \frac{4.878}{14.878} = 3.934(\text{V})$$

测量的相对误差

$$\beta' = \frac{|3.93 - 4|}{4} \times 100\% = 1.75\%$$

(4) 当 $R_1 = 50\text{k}\Omega$，$R_2 = 100\text{k}\Omega$ 时

$$R = \frac{R_1 R_{V1}}{R_1 + R_{V1}} = \frac{50 \times 50}{50 + 50} = 25(\text{k}\Omega)$$

$$R' = \frac{R_1 R_{V2}}{R_1 + R_{V2}} = \frac{50 \times 200}{50 + 200} = 40(\text{k}\Omega)$$

$$U'_1 = U\frac{R}{R_2 + R} = 12 \times \frac{25}{100 + 25} = 2.4(\text{V})$$

$$U''_1 = U\frac{R'}{R_2 + R'} = 12 \times \frac{40}{100 + 40} = 3.428(\text{V})$$

$$\beta = \frac{|2.4 - 4|}{4} \times 100\% = 40\%$$

$$\beta' = \frac{|3.43 - 4|}{4} \times 100\% = 14.25\%$$

由上面的计算结果可以看出，用内阻小的万用表测量电阻上的电压，比用内阻大的万用表测量时的测量误差大，当电阻值增大时，测量误差也随着增大。故测量阻值大的电阻时，一定要用内阻大的万用表。

(三) 并联电阻值的简易计算

让我们来讨论一下几个不同阻值电阻并联后阻值的情

况。若按照并联电阻的计算公式，当然可以计算出来，但有些情况可利用下述方法，能更快的得出结果。

（1）n 个相等的电阻并联时，它的总电阻 R_p 等于任一支路电阻 R_b 的数值除以并联数 n，即

$$R_p = \frac{R_b}{n} \tag{1-70}$$

（2）两个电阻并联，设大电阻为 R，小电阻为 r，并联电阻 R_p 可用下式计算

$$R_p = \frac{R}{\frac{R}{r} + 1} \tag{1-71}$$

上述计算方法是这样考虑得出的，例如 80Ω 和 20Ω 电阻并联，可以把 20Ω 看成 4 个 80Ω 电阻并联而成，即$\frac{80}{20}=4$，再加上原来那个 80Ω 电阻，一共是 5 个 80Ω 电阻并在一起，这时总电阻就是$\frac{80}{5}=16\Omega$。由此总结出上面的公式，用大电阻除以小电阻，商加 1，再去除大电阻，就可得出并联电阻值。

如果有好几个电阻并联，则可以用最大的一个分别除以其余的，把商加在一起再加 1，然后再去除最大的电阻，比如 300Ω，100Ω，50Ω，200Ω 四个并联，则有：300/100 = 3，300/50 = 6，300/200 = 1.5，3 + 6 + 1.5 + 1 = 11.5，R_p = 300/11.5≈26.1Ω。

（3）在某些多个电阻并联电路中，可采用组合法求并联电阻值。

组合法就是先观察这些并联电阻中，那两个电阻的并联值易求且为整数，将它们作为一组，再将该组合的并联值与

另一电阻组合，也使其结果易求，这样依次类推，求出总电阻。

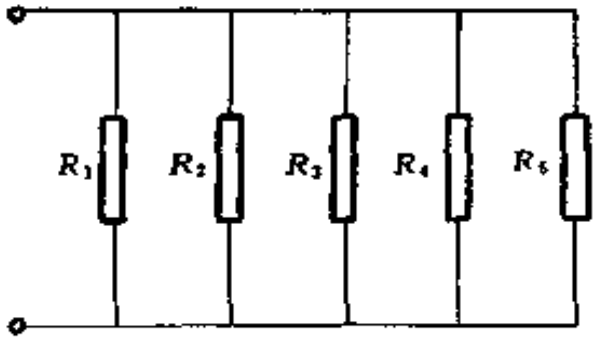


图 1-41　例 1-49 电路

例 1-49　求图 1-41 中并联电阻值是多少？已知 $R_1 = 60\Omega$，$R_2 = 20\Omega$，$R_3 = 7\Omega$，$R_4 = 30\Omega$，$R_5 = 10\Omega$。

解　(1) 将 R_1 与 R_4 作为一组，其并联值

$$R_{14} = \frac{60 \times 30}{60 + 30} = 20(\Omega)$$

(2) 将 R_{14}与 R_2 组合，其并联值 $R_{142} = \frac{20}{2} = 10\ (\Omega)$

(3) 将 R_{142}与 R_5 作为一组，其并联值 $R_{1425} = \frac{10}{2} = 5\ (\Omega)$

(4) 最后将 R_{1425}与 R_3 并联，其总电阻 $R_p = \frac{5 \times 7}{5 + 7} = \frac{35}{12}\ (\Omega)$

组合法还可以这样来进行，即同时分别对某两个电阻进行多个组合，再将它们的并联值又重新组合以求出总电阻值。

例 1-50　求图 1-42 中并联电阻值是多少？已知 $R_1 = 5\Omega$，$R_2 = 6\Omega$，$R_3 = 4\Omega$，$R_4 = 1\Omega$，$R_5 = 3\Omega$，$R_6 = 20\Omega$。

解　(1)将 R_1 与 R_6 组合，其并联值 $R_{16} = \frac{5 \times 20}{5 + 20} = 4(\Omega)$

(2) 将 R_2 与 R_5 组合，其并联值 $R_{25} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2\ (\Omega)$

(3) 将 R_{16}与 R_3 组合，其并联值 $R_{163} = \frac{4}{2} = 2\ (\Omega)$

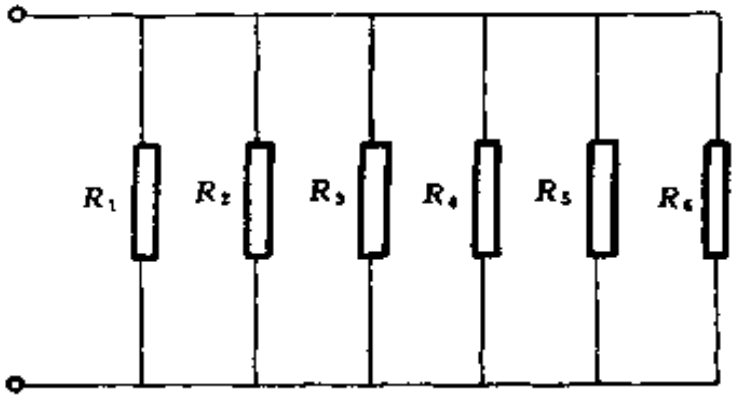


图 1-42　例 1-50 电路

(4) 将 R_{163}与 R_{25}组合，其并联值 $R_{16325}=\frac{2}{2}=1$ (Ω)

(5) 最后将 R_{16325}与 R_4 组合，求出总电阻 $R_p=\frac{1}{2}=0.5$ (Ω)

从上两例中可以看出，组合法只需作一些简单的运算，而且多数情况下心算就可完成，较之用公式或依次并联求解要简便得多。

(四) 混联电路

在一个电路中，既有电阻的串联，又有电阻的并联，称为混联电路。

计算混联电路时，可以采用以下一些比较实用的方法。

1. 逐步合成法

用以下例题说明逐步合成的方法。

例 1-51　已知 $R_1=R_2=R_3=5\Omega$，$R_4=10\Omega$，$U=100V$，如图 1-43 所示，求总电阻 R、总电流 I 各为多少？

解　设 R_2 和 R_3 串联电阻为 R_{23}，R_{23}和 R_4 并联电阻为 R_{234}

$$R_{23}=R_2+R_3=5+5=10(\Omega)$$

$$R_{234} = \frac{R_{23} \times R_4}{R_{23} + R_4} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5(\Omega)$$

$$R = R_1 + R_{234} = 5 + 5 = 10(\Omega)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{10} = 10(\mathrm{A})$$

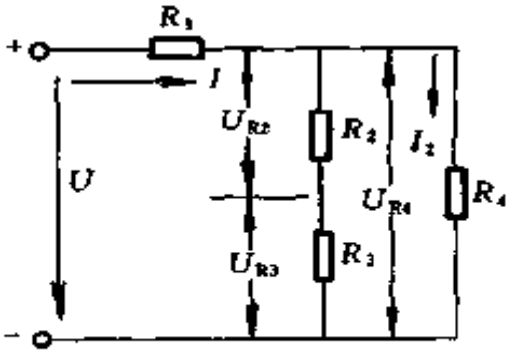


图 1-43　例 1-51 电路

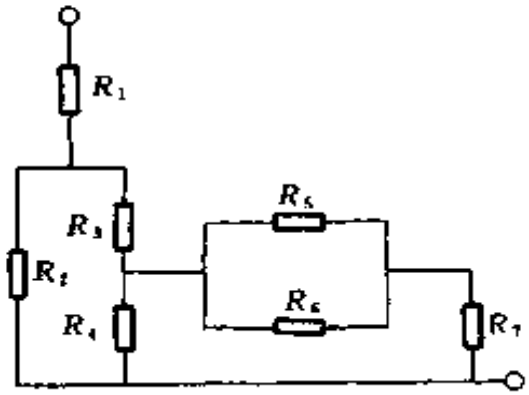


图 1-44　例 1-52 电路

例 1-52　求图 1-44 的等效电阻是多少?

解　用符号“//”表示并联

(1) R_5，R_6 并联，其阻值为

$$R_5 \,//\, R_6 = \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}$$

(2) R_7 与 $R_5 // R_6$ 串联，这条支路的总电阻为 $R_7 + (R_5 // R_6)$，再与 R_4 并联，其等效电阻为

$$R_4 \,//\, [R_7 + (R_5 \,//\, R_6)] = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_7 + \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}}}}$$

(3) R_3 与 $R_4 // [R_7 + (R_5 // R_6)]$ 串联，再与 R_2 并联，其阻值与 R_1 串联，就是总的等效电阻，可用下式表示

$$R = R_1 + \cfrac{1}{\cfrac{1}{R_2} + \cfrac{1}{R_3 + \cfrac{1}{\cfrac{1}{R_4} + \cfrac{1}{R_7 + \cfrac{1}{\cfrac{1}{R_5} + \cfrac{1}{R_6}}}}}}$$

例 1-53 图 1-45 所示是一个常用的电阻分压器电路，电阻分压器的固定端 a、b 接向电源，固定端 b 与活动端 c 接至负载，利用分压器上滑动触头 c 的滑动，可向负载 R_3 输出一个可变电压。现已知电源电压 $U=24V$，负载电阻 $R_3=200\Omega$，滑动触头 c 位于分压器的中间，分压器两端电阻 $R_1=R_2=600\Omega$，试求开关 S 在开断和接通两种情况下的电压 U_2、负载电压 U_3、以及分压器两段电阻中的电流 I_1 和 I_2 各为多少？

解 (1) S 断开时，将图 1-45 (a) 改绘成 1-45 (b)，等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 = 600 + 600 = 1200\ (\Omega)$$

分压器两段电阻中的电流相等，即

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{24}{1200} = 0.02\ (A)$$

$$U_2 = I_2 R_2 = 0.02 \times 600 = 12\ (V)$$

$$U_3 = I_3 R_3 = 0$$

(2) S 闭合时，将图 1-45(a)改绘成 1-45(c)等效电阻为

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 600 + \frac{600 \times 200}{600 + 200} = 750\ (\Omega)$$

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{24}{750} = 0.032\ (A)$$

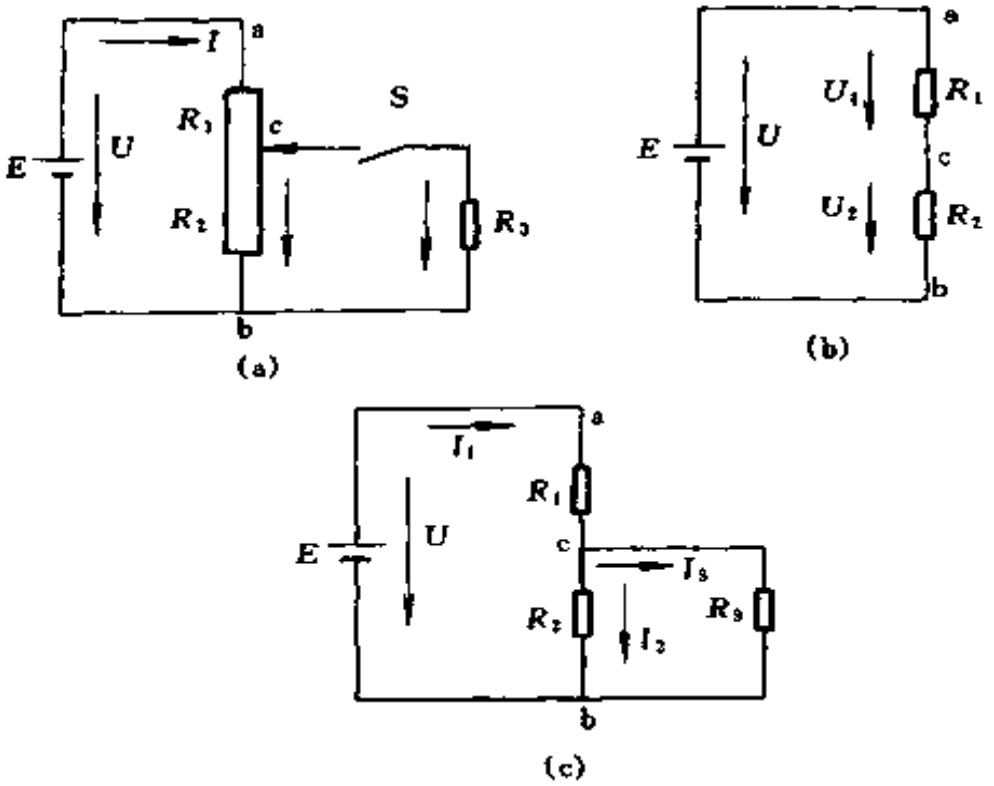


图 1-45　例 1-53 电路

(a) 分压器电路；(b) S断开时电路；(c) S闭合时电路

$$I_2 = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.032 \times \frac{200}{600 + 200} = 0.008\ (\mathrm{A})$$

$$U_3 = U_2 = 600 \times 0.008 = 4.8\ (\mathrm{V})$$

由上面的计算可见，S闭合后（即接入负载），分压器ac段电流由 0.02A 增加到 0.032A，所以在选择分压器时，不能认为$\frac{U}{R_1 + R_2}$的值小于分压器的额定电流，用时就万无一失了，必须考虑负载的影响。

2. 平衡电桥分析法

含有平衡电桥的电路，可用平衡电桥分析法求解。图 1-46(a) 为一电桥电路，如果两对臂电阻乘积相等，即 $R_1R_4 = R_2R_3$，则该电桥平衡。在平衡电桥中，c、d 两点

电位相等，故将桥 R_5 断开或短接均不影响原电路，如图 1-46（b）和图 1-46（c）所示。根据图 1-46（b）或图 1-46（c）可方便的求出 a、b 间的等效电阻。

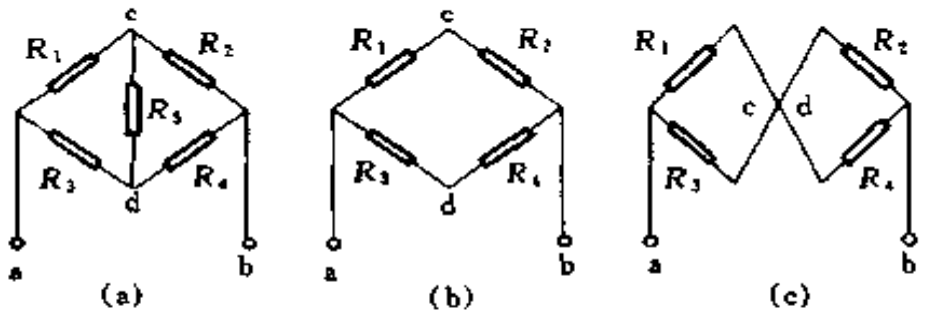


图 1-46　含有平衡电桥的电路

（a）原电路；（b）R_5 断开；（c）R_5 短接

例 1-54　在图 1-46(a) 中，已知 $R_1=1\Omega, R_2=2\Omega, R_3=4\Omega, R_4=8\Omega, R_5=10\Omega$，求 a、b 间的等效电阻是多少？

解　因　$R_1R_4=1\times8=8$

$R_2R_3=2\times4=8$

故该电路为平衡电桥电路，可用图 1-46（b）或图 1-46（c）求解。

（1）按图 1-46（b）

$$R_{12}=R_1+R_2=1+2=3\ (\Omega)$$

$$R_{34}=R_3+R_4=4+8=12\ (\Omega)$$

$$R_{ab}=\frac{R_{12}R_{34}}{R_{12}+R_{34}}=\frac{3\times12}{3+12}=\frac{36}{15}=2\frac{2}{5}\ (\Omega)$$

（2）按图 1-46（c）

$$R_{13}=\frac{R_1R_3}{R_1+R_3}=\frac{1\times4}{1+4}=\frac{4}{5}\ (\Omega)$$

$$R_{24}=\frac{R_2R_4}{R_2+R_4}=\frac{2\times8}{2+8}=\frac{16}{10}=\frac{8}{5}\ (\Omega)$$

$$R_{ab}=R_{13}+R_{24}=\frac{4}{5}+\frac{8}{5}=\frac{12}{5}=2\frac{2}{5}\ (\Omega)$$

例 1-55 求图 1-47（a）中 a、b 间的等效电阻是多少？已知 $R_1=30\Omega$，$R_2=60\Omega$，$R_3=20\Omega$，$R_4=40\Omega$，$R_5=60\Omega$，$R_6=36\Omega$。

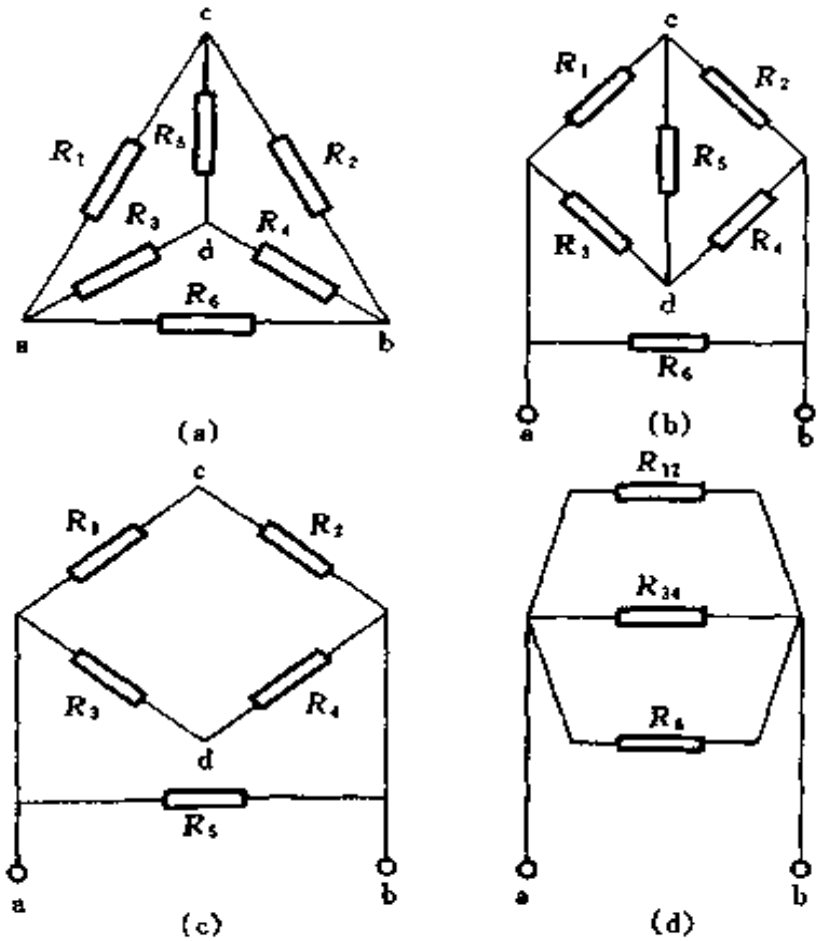


图 1-47 例 1-55 电路

（a）原电路；（b）变换成电桥电路；（c）R_5 断开；（d）R_5 短接

解 将图 1-47（a）稍加变形即呈图 1-47（b）所示。这是一电桥电路。

因
$$R_1R_4=30\times40=1200$$
$$R_2R_3=60\times20=1200$$

故该电桥平衡，R_5 可以短路或断开。R_6 为与输入端并联的电阻，对电桥毫无影响。这样，电路可简化为图 1-47（c）和图 1-47（d）。

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 30 + 60 = 90\ (\Omega)$$

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 20 + 40 = 60\ (\Omega)$$

$$R_{1234} = \frac{R_{12}R_{34}}{R_{12} + R_{34}} = \frac{90 \times 60}{90 + 60} = \frac{5400}{150} = 36\ (\Omega)$$

$$R_{ab} = \frac{36}{2} = 18\ (\Omega)$$

3. 缩点法

化简电阻电路的关键在于正确判断电阻的串、并联关系，尤其是并联关系。判断各电阻是否为并联，就看各电阻是否接在相同的两节点之间。一般情况下，并联关系是比较容易直接判断的。然而，有些电路电阻间的并联关系不太明显，公共节点往往是用联结线联结的等位点。此时，采用缩点法，则并联关系就会一目了然。

缩点法就是尽可能缩短电路中的联结线，将其联结的各节点——等位点（电位相等的节点）缩为一点，而后化简求解的方法。

例 1-56 求图 1-48（a）所示电路 a、b 间的等效电阻是多少？

解 图 1-48 (a)中 c 与 e，f 与 b 分别为联结线联结的等位点，均可收缩为一点，联结线被收缩掉，等效电路如图 1-48(b)所示。此时，可以看出 R_2 与 R_3 并联，R_4 与 R_5 并联，它们的等效电阻分别为

$$R_{23} = \frac{8}{2} = 4\ (\Omega)$$

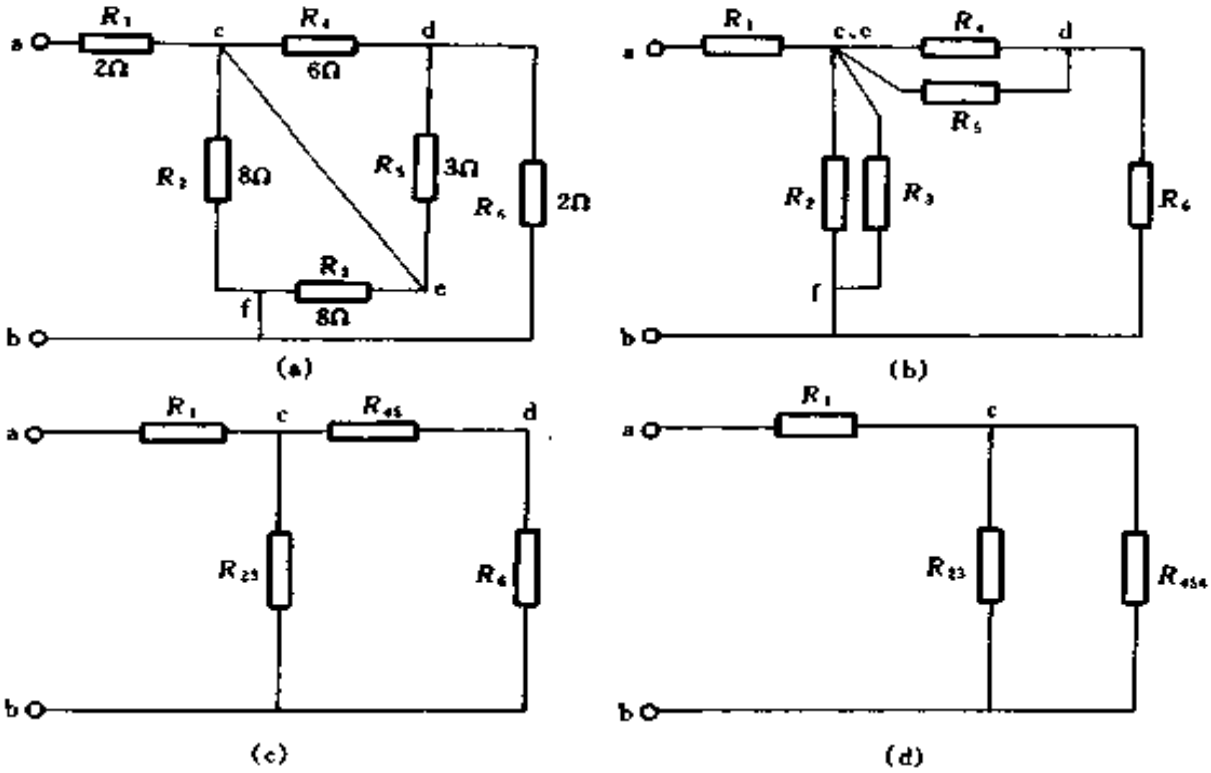


图 1-48　例 1-56 电路

(a) 原电路；(b) 缩短 c 与 e，f 与 b 联结线；

(c) 简化电路；(d) 进一步简化电路

$$R_{45}=\frac{R_4R_5}{R_4+R_5}=\frac{6\times3}{6+3}=2\ (\Omega)$$

电路简化为图1-48(c)所示。由图可见，R_{45}与 R_6 串联，其等效电阻为

$$R_{456}=2+2=4\ (\Omega)$$

电路进一步简化为1-48(d)所示。由图可见，R_{23}与 R_{456}并联，再与 R_1 串联，故 a、b 间的等效电阻为

$$R_{ab}=R_1+\frac{R_{23}R_{456}}{R_{23}+R_{456}}=2+\frac{4\times4}{4+4}=4\ (\Omega)$$

需要注意的是，缩点时一定要保持原电路电阻间的联结

关系不变，否则化简后的电路就不与原电路等效了。

二、电阻的星形联结和三角形联结的等效互换

利用三角形联结和星形联结的相互等效变换，有时会使电路计算简单。注意这种等效变换，必须保证变换前后网络的外特性不变，即在两种网络的任意两个端点间加上相同的电压时，从各对应端点流出流入的电流也相等。还应注意，这种变换只适用于不包含电源的网络（无源网络）。如果网络的任何支路中包含电源，则其变换问题不属于讨论范围之内。

图 1-49 中，(a) 为星形电路，(b) 为三角形电路。

星形联结内的电阻 R_a，R_b，R_c 可以用一个等效的三角形联结的电阻 R_{ab}，R_{bc}，R_{ca}来代替。

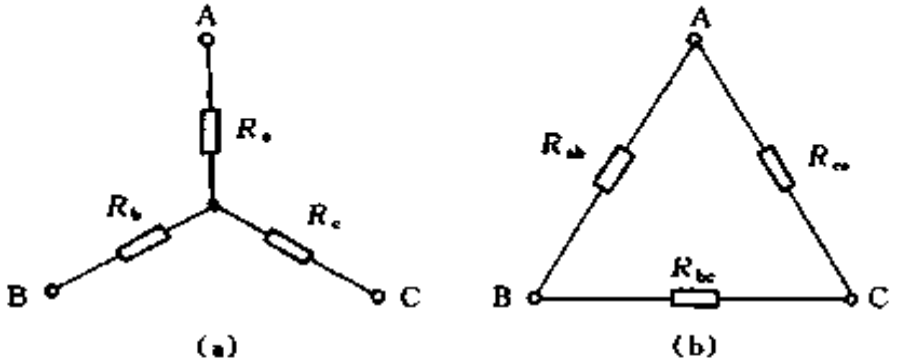


图 1-49　星形联结和三角形联结的等效互换

(a) 星形联结；(b) 三角形联结

$$\left.\begin{aligned} R_{ab} &= R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c} \\ R_{bc} &= R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a} \\ R_{ca} &= R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b} \end{aligned}\right\} \tag{1-72}$$

如 $$R_a = R_b = R_c = R_s$$

则 $$R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = 3R_s \tag{1-73}$$

同样，三角形联结中的三个电阻 R_{ab}，R_{bc}，R_{ca}也可用其等效的电阻 R_a，R_b，R_c 来代替。

$$\left.\begin{aligned} R_a &= \frac{R_{ca}R_{ab}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}} \\ R_b &= \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}} \\ R_c &= \frac{R_{bc}R_{ca}}{R_{ab}+R_{bc}+R_{ca}} \end{aligned}\right\} \tag{1-74}$$

如 $$R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = R_d$$

则 $$R_a = R_b = R_c = \frac{R_d}{3} \tag{1-75}$$

例 1-57 求图 1-50 中 m_1、m_2 点间的电阻是多少？

解 图 1-50(a) 中，4Ω 和 9Ω 的电阻串联，可用 13Ω 电阻替代，变换成图1-50(b)中电路，该电路中 2Ω，5Ω，13Ω 电阻是三角形联结，用 R_a，R_b，R_c 替代，变换成星形联结，可大大简化计算。

由式（1-74）得

$$R_a = \frac{2\times5}{2+5+13} = 0.5\ (\Omega)$$

$$R_b = \frac{2\times13}{2+5+13} = 1.3\ (\Omega)$$

$$R_c = \frac{13\times5}{2+5+13} = 3.25\ (\Omega)$$

将 R_a，R_b，R_c 值代入图 1-50(c) 中，可得出结果。图中 1.3Ω + 3.7Ω = 5Ω，3.25Ω + 1.75Ω = 5Ω，5Ω 电阻与 5Ω 电阻并联，其电阻值为 2.5Ω，再与 0.5Ω 电阻串联得

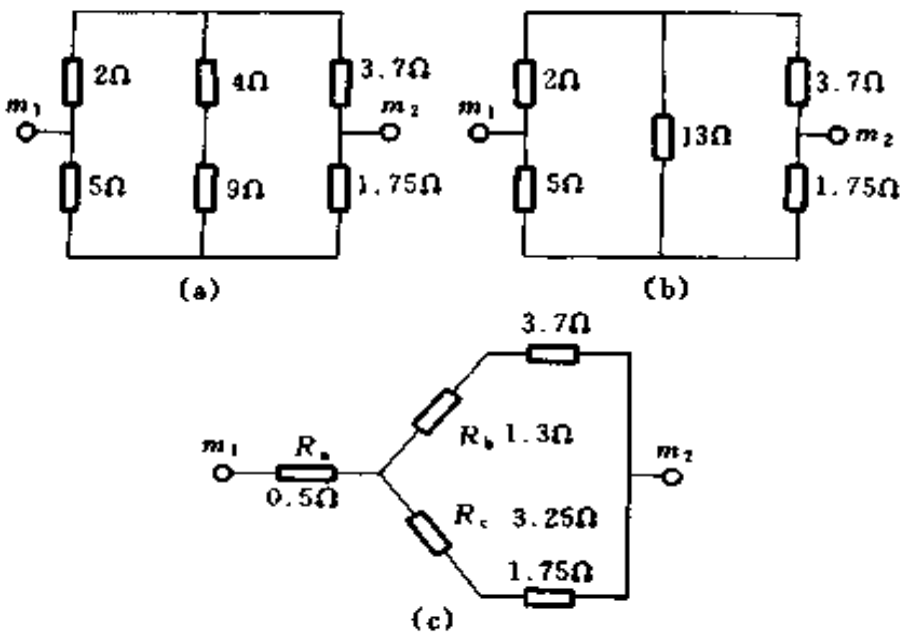


图 1-50　例 1-57 电路

(a) 原电路；(b) 简化电路；(c) 等效星形变换

$$0.5+2.5=3\ (\Omega)$$

所以 m_1、m_2 点间电阻为 3Ω。

三、电源的串联、并联和混联

(一) 电压源与电流源

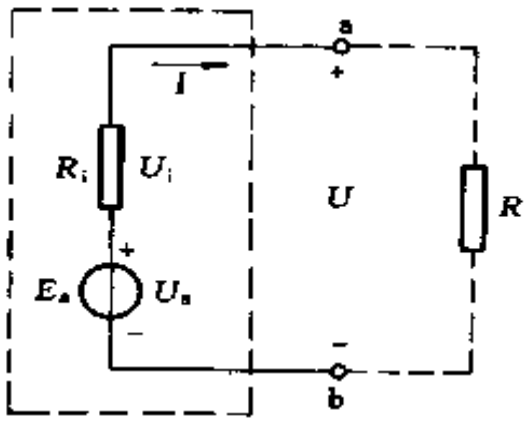


图 1-51　电压源电路

用一个恒定电动势 E_s 和一个内电阻 R_i 相串联的电路来表示的电源，称为电压源，如图 1-51 所示。如果 $R_i=0$，则负载端电压恒等于 E_s，这样的电压源，称为恒压源。

用一个恒定电流 I_s 和一个内电阻 R_i 相并联的电路，称为电流源，如图 1-52 所示。如果 $R_i=\infty$，则流经负载的电

流恒等于 I_s，这样的电流源，称为恒流源。

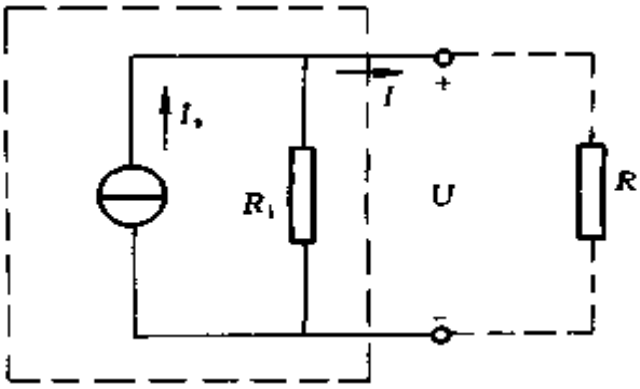


图 1-52　电流源电路

（二）电压源与电流源的等效变换

在保持输出电压和输出电流不变的条件下，电压源和电流源相互之间可以等效变换，如图 1-53 所示。

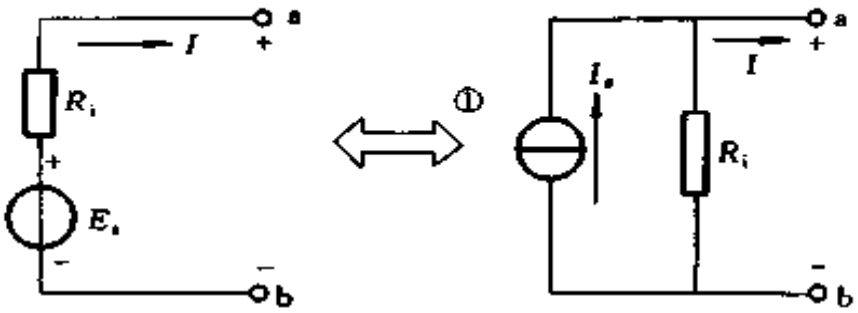


图 1-53　电压源与电流源的等效变换

等效变换的公式是

$$I_s=\frac{E_s}{R_i} \tag{1-76}$$

或

$$E_s=I_sR_i \tag{1-77}$$

需要注意的是：变换时，I_s 和 E_s 的方向应该是一致的，

---

① ⇨表示等效，⟺表示相互等效。

内阻 R_i 仅改变接法，其数值是不变的。恒压源和恒流源之间没有等效关系，这是因为对恒压源（$R_i=0$）讲，其短路电流 I_s 为∞；对恒流源（$R_i=\infty$）讲，其空载电压 U_0（即欲等效的 E_s）为∞。

例 1-58 求与图 1-54(a) 所示电压源等效的电流源以及与图 1-54(c) 所示电流源等效的电压源。

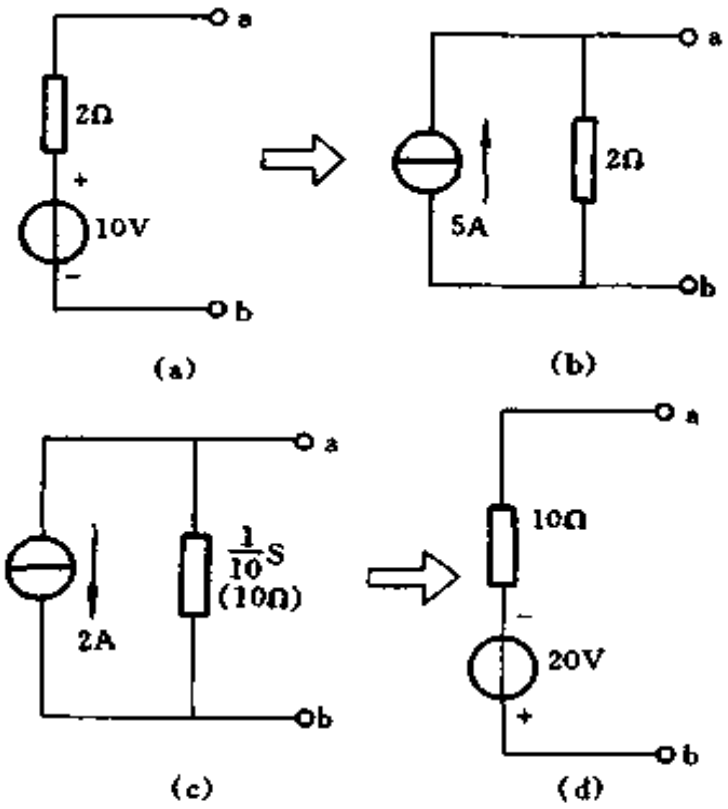


图 1-54 例 1-58 电路

(a) 电压源；(b) 等效的电流源；(c) 电流源；

(d) 等效的电压源

解 图1-54(a)所示电路中，$E_s=10\text{V}$，$R_i=2\Omega$，故得等效电流源中的电流 I_s 为

$$I_s=\frac{E_s}{R_i}=\frac{10}{2}=5\text{A}$$

I_s 的方向如图1-54(b)中等效电流源所示。

对于图1-54(c)所示的电流源，$I_s = 2A$，$G_i = 1/10S$，故有

$$R_i = \frac{1}{G_i} = 10\Omega$$

$$E_s = R_i I_s = 10 \times 2 = 20V$$

等效电压源见图 1-54(d)。

（三）电源的串联

电源串联、并联和混联时，可以简化成一个等效电源。

1．电压源串联

几个电压源串联时，可以简化成一个等效的电压源，其等效电动势等于各个电压源的电动势的代数和；而其等效内电阻等于各个电压源的内电阻之和。图1-55(a) 为两个电压源相串联的电路，图 1-55(b) 为和图 1-55(a) 的等效电路。图中

$$E_s = E_{s1} + E_{s2}$$

$$R = R_1 + R_2$$

2．电流源串联

几个电流源串联时，应先把它们等效变换成电压源，然后再把这些电压源简化成一个等效电压源。

（四）电源的并联和混联

1．电流源并联

几个电流源并联时，可以简化成一个等效的电流源，其等效电流等于各个电流源的电流的代数和；而其等效内电导等于各个电流源的内电导之和。图 1-56(a) 为两个电流源相并联的电路，图 1-56（b）为图 1-56（a）的等效电路。图中

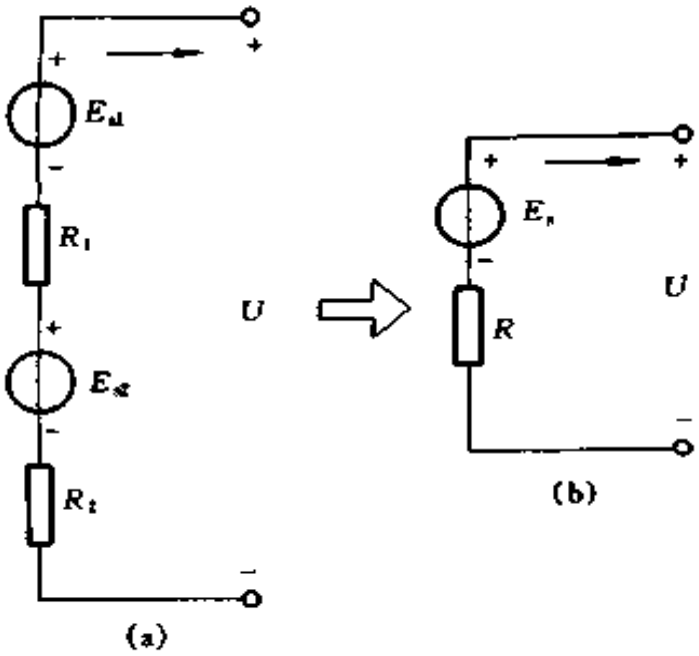


图 1-55　电压源的串联

(a) 原电路；(b) 等效电压源

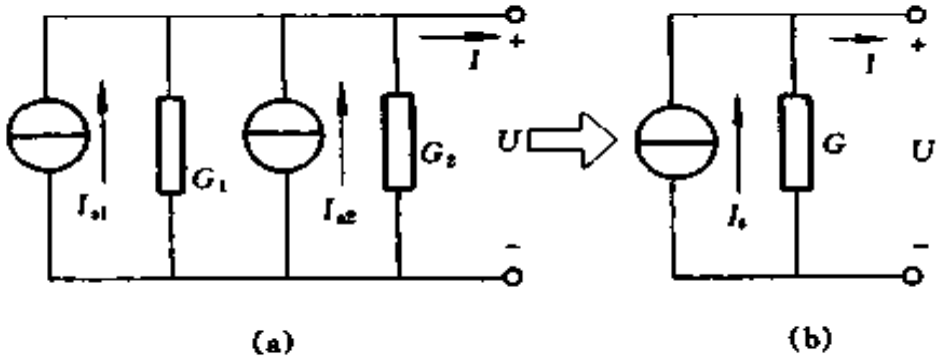


图 1-56　电流源的并联

(a) 原电路；(b) 等效电路

$$I_s = I_{s1} + I_{s2}$$

$$G = G_1 + G_2$$

2. 电压源并联

几个电压源并联时，应先把它们等效变换成电流源，然

后再把这些电流源简化成一个等效的电流源。

3. 电源混联

若干个电压源或电流源作混联时，就其两端来说，总可以简化成一个电压源或一个电流源。经过这样处理后，可使电路的分析和计算得到简化。请看下面的例题。

例 1-59 电路如图 1-57(a) 所示，求各支路电流是多少？

解 把电动势为 4V 的电压源变换成电流源，电流为 2A 的电流源变换成电压源，如图 1-57(b) 所示。其中，两个 2Ω 的电阻相并联，可以变换成 1 个 1Ω 的电阻。再把这个内阻为 1Ω 的电流源变换成电压源，就得到图1-57(c)。在这个图中，有

$$I=\frac{8-2-2}{4+3+1}=0.5\ (\mathrm{A})$$

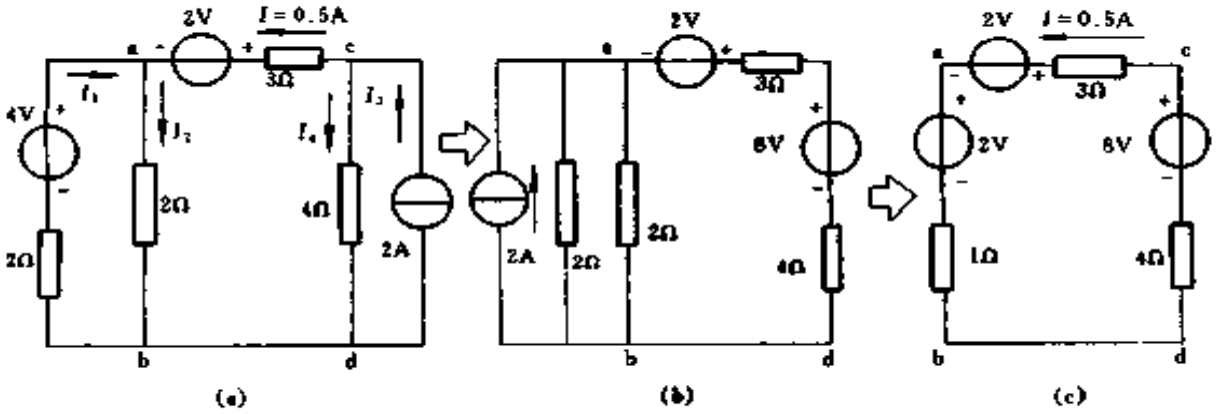


图 1-57 例 1-59 电路

(a) 原电路；(b) 等效电路 1；(c) 等效电路 2

因为从图 1-57(a) 变换成图 (c) 时，只有 2V 与 3Ω 相串联的支路是没有经过变换的部分，故知在图 1-57(a) 的 ac 支路中电流为

$$I=0.5\mathrm{A}$$

又因为 $$I_3=2\text{A}$$

故 $$I_4=I_3-I=2-0.5=1.5\ (\text{A})$$

为了求出电流 I_1、I_2，必须先根据图 1-57(c) 求出 U_{ab}。

$$U_{ab}=2+1\times0.5=2.5\ (\text{V})$$

再根据图 1-57 (a)可求出

$$I_2=\frac{2.5}{2}=1.25(\text{A})$$

$$I_1=1.25-0.5=0.75(\text{A})$$

例 1-60 在图 1-58 中，已知 $E_{s1}=12\text{V}$，$R_1=6\Omega$，$I_{s2}=10\text{A}$，$R_3=12\Omega$，求各支路电流及理想电流源的端电压是多少？

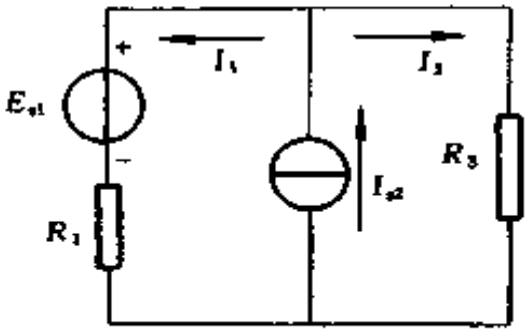


图 1-58 例 1-60 电路

解 该题可用下列两种方法求解

(1) 一种解法是把理想电流源与其并联的电阻 R_3 作为一个电流源看待，并把它变换为等效的电压源。如图 1-59 (a)所示，其中

$$E_{s2}=R_3I_{s2}=12\times10=120\ (\text{V})$$

$$I_1=\frac{E_{s2}-E_{s1}}{R_1+R_3}=\frac{120-12}{6+12}=6\ (\text{A})$$

再从图 1-58 中知

$$I_3=I_{s2}-I_1$$

故 $$I_3=10-6=4\ (\text{A})$$

理想电流源的端电压为

$$U_s = R_3 I_3 = 12 \times 4 = 48 \ (\text{V})$$

(2) 另一种解法是把理想电压源 E_{s1} 与其串联的电阻 R_1 作为一个电压源看待，并把它变换为等效的电流源，如图 1-59(b) 所示，其中

$$I_{s1} = \frac{E_{s1}}{R_1} = \frac{12}{6} = 2 \ (\text{A})$$

再把理想电流源合并，得图 1-59(c)，其中

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = 2 + 10 = 12 \ (\text{A})$$

根据分流公式，得到

$$I_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I_s = \frac{6}{6 + 12} \times 12 = 4 \ (\text{A})$$

再从图 1-58 中知

$$I_1 = I_{s2} - I_3 = 10 - 4 = 6 \ (\text{A})$$

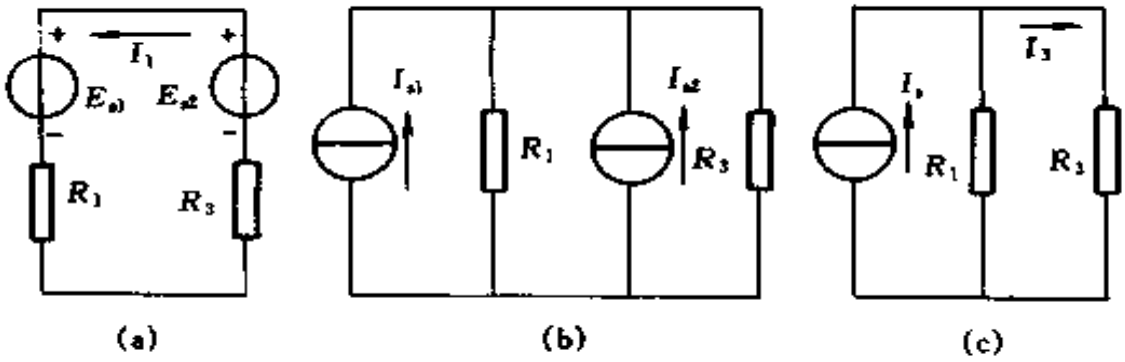


图 1-59　图 1-58 的等效简化

(a) 变换成等效电压源；(b) 变换成等效电流源；(c) 两电流源合并

四、支路电流法

以支路电流为未知量，用基尔霍夫定律对节点和回路列出所需要的方程组，而后解出各未知支路电流，这种方法称为支路电流法。

对于一个复杂电路，如果有 m 条支路，就有 m 个未知电流。对 n 个节点用基尔霍夫第一定律可列出 $n-1$ 个独立的电流方程；再根据基尔霍夫第二定律可列出 $m-(n-1)$ 个独立的电压方程。这样总共可以得到 $(n-1)+m-(n-1)=m$ 个方程式，用 m 个方程式可求解 m 个支路电流。

例 1-61 在图 1-60 所示电路中，两台参数不一致的发电机并联运行，共同向负载供电。两台发电机的电动势分别为 $E_1=440\text{V}$，$E_2=400\text{V}$，它们的内阻分别为 $R_1=0.5\Omega$，$R_2=1\Omega$，负载电阻 $R_3=21\Omega$。试用支路电流法求每台发电机中的电流以及它们各自输出的功率是多少？

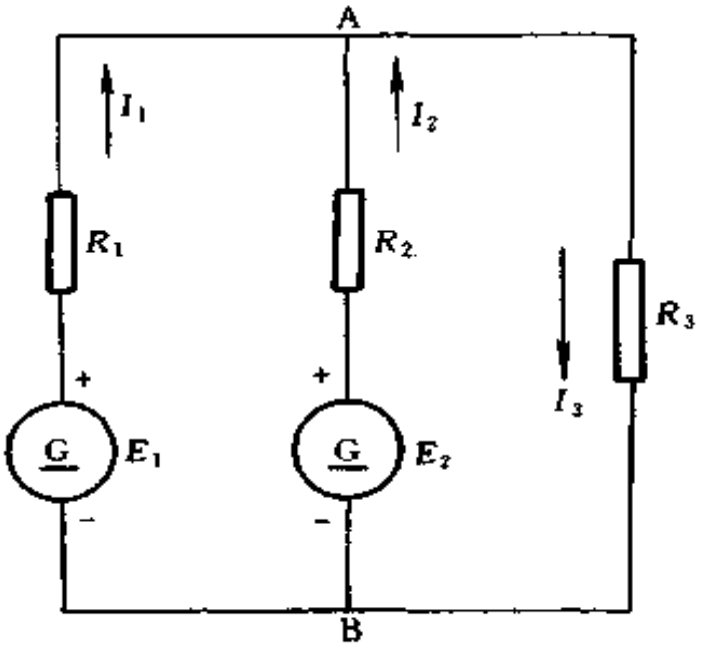


图 1-60 例 1-61 电路

解 (1) 选定各支路电流的参考方向，如图中所示。

(2) 这个电路的节点数 $n=2$，故只能列出一个独立的电流方程。对节点 A，有

$$I_1+I_2-I_3=0$$

（3）这个电路的支路数 $m=3$，故独立回路数为 $m-(n-1)=3-(2-1)=2$，今选取网孔为独立回路，且沿顺时针方向绕行回路，故得电压方程为

回路 ABE_1R_1A

$$R_1I_1-R_2I_2=E_1-E_2$$

回路 ABR_3A

$$R_2I_2+R_3I_3=E_2$$

以已知数据代入，得到下列三元一次联立方程，即

$$I_1+I_2-I_3=0 \quad ①$$

$$0.5I_1-I_2=40 \quad ②$$

$$I_2+21I_3=400 \quad ③$$

（4）对上列①②③联立方程求解，可得

$$I_1=40\text{A}$$

$$I_2=-20\text{A}$$

$$I_3=20\text{A}$$

两台发电机的端电压，即负载上的电压

$$U_{AB}=R_3I_3=21\times20=420\text{V}$$

第 1 台发电机的功率

$P_1=U_{AB}I_1=420\times40=16800$（W）$=16.8$（kW）

第 2 台发电机的功率

$P_2=U_{AB}I_2=420\times(-20)=-8400(\text{W})=-8.4$（kW）

上面计算表明，第 2 台发电机不但没有输出功率，反而吸收功率。

由此可以看出，参数不等的发电机并联运行效果不好，当发电机感应电动势数值相差较大时，甚至有的发电机成了负载，加重了其它发电机的负担。同理，电动势不等的蓄电

池不宜并联运行。

五、节点电位法

节点电位是指在电路中任选一个节点作为参考节点，设这个节点的电位为零，其他节点对此参考点的电压的简称。

一个具有 n 个节点，m 条支路的电路，当选定任一节点为参考节点后，以其余 $n-1$ 个节点电位为未知量，按基尔霍夫电流定律可列出独立的 $n-1$ 个电流方程，求出各节点电位，再用基尔霍夫电压定律或欧姆定律求出各支路电流，这就是节点电位法。

1. 两个节点电路

图1-61 为两个节点的电路，选定 b 为参考点，即有 $V_b=0$,则节点电位 V_a 可用下式表示

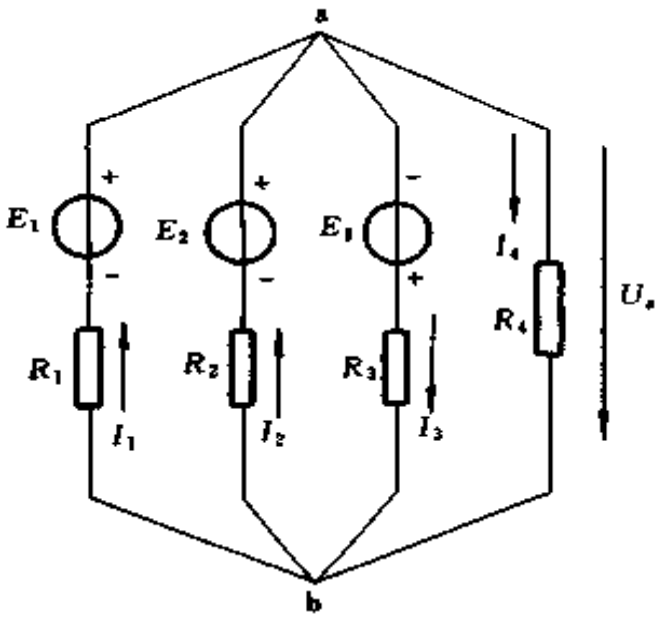


图 1-61　两个节点的电路

$$V_a=\frac{\Sigma\frac{E}{R}}{\Sigma\frac{1}{R}}=\frac{\frac{E_1}{R_1}+\frac{E_2}{R_2}-\frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}} \tag{1-78}$$

在式（1-78）分子中，当电动势的方向同节点电位的方向（由节点指向参考点）相反时取“+”；相同时取“-”。

求出 V_a 后，就可以用欧姆定律计算各支路电流。

$$I_1=\frac{E_1-V_a}{R_1}$$

$$I_2=\frac{E_2-V_a}{R_2}$$

$$I_3=\frac{E_3+V_a}{R_3}$$

$$I_4=\frac{V_a}{R_4}$$

2. 3 个及 3 个以上节点电路

用节点电位法解题步骤如下：

（1）指定参考节点，节点电位参考方向均指向参考节点。

（2）连到本节点的电流源，其电流流向节点时，取电流为“+”，反之取“-”。如果有电压源，将电压源换成电流源。

（3）以节点电位为未知的待求量，列节点电位方程。如电路中一共具有 n 个独立节点，则其节点电位方程为

$$\left.\begin{aligned}&G_{11}V_1+G_{12}V_2+\cdots+G_{1n}V_n=I_{s11}\\&G_{21}V_1+G_{22}V_2+\cdots+G_{2n}V_n=I_{s22}\\&\qquad\cdots\\&G_{n1}V_1+G_{n2}V_2+\cdots+G_{nn}V_n=I_{snn}\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}79)$$

式中 G_{11}、G_{22}、……——各节点的自电导，它们总是正的，S；

G_{12}、G_{13}、……——各节点的互电导，它们总是负的，S；

I_{s11}、I_{s22}、…——流入各节点的理想电流源的电流的代数和，流入为“+”，流出为“−”，A；

V_1、V_2、…——各节点的电位，V。

(4) 解出节点电压，并用欧姆定律求出各支路电流。

例 1-62 在图 1-62 所示电路中，已知 $E_{s1}=6V$，$R_1=2\Omega$，$R_2=2\Omega$，$R_3=0.5\Omega$，$R_4=1\Omega$，$E_{s5}=2V$，$R_5=1\Omega$，$E_{s6}=8V$，$R_6=4\Omega$，$R_7=4\Omega$，求各支路电流是多少？

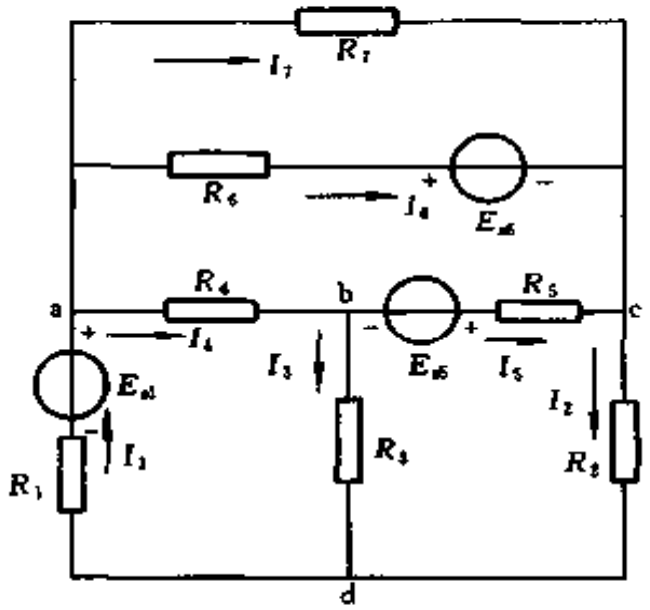


图 1-62 例 1-62 电路

解 为了直接写出节点电位方程，将图 1-62 中的电压源变换成电流源，如图 1-63 所示。其中

$$I_{s1}=\frac{E_{s1}}{R_1};\ I_{s5}=\frac{E_{s5}}{R_5};\ I_{s6}=\frac{E_{s6}}{R_6}$$

$$G_1=\frac{1}{R_1};\ G_2=\frac{1}{R_2};\ G_3=\frac{1}{R_3};$$

$$G_4=\frac{1}{R_4};\ G_5=\frac{1}{R_5};\ G_6=\frac{1}{R_6};\ G_7=\frac{1}{R_7}$$

在图 1-62 中，R_1、R_5、R_6 中的电流为 I_1、I_5、I_6，而在图 1-63 中，G_1、G_5、G_6 中的电流不再是 I_1、I_5、I_6，故记为 I'_1、I'_5、I'_6。

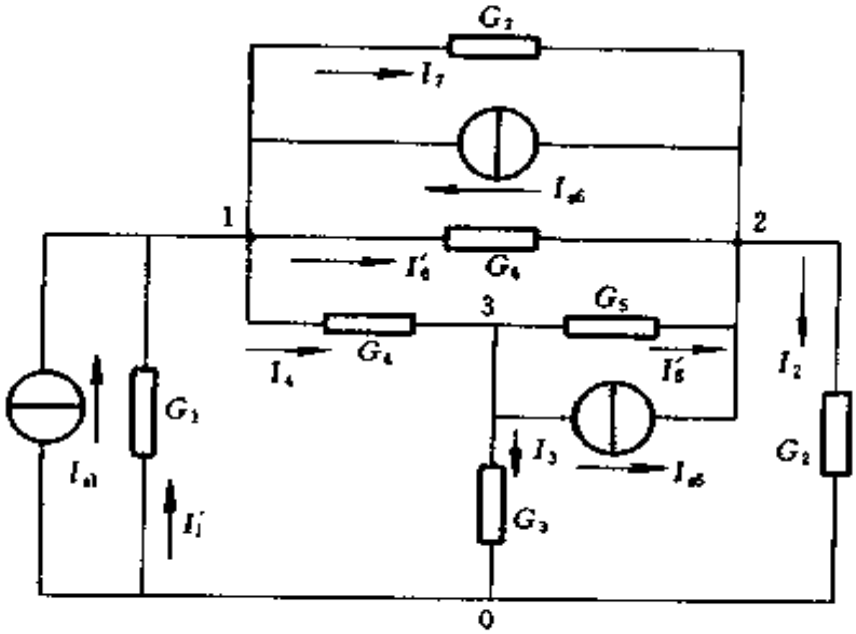


图 1-63　图 1-62 的等效电路

从图 1-63 中可求出：

$$G_{11}=G_1+G_4+G_6+G_7=\frac{1}{2}+1+\frac{1}{4}+\frac{1}{4}=2(\mathrm{S})$$

$$G_{22}=G_2+G_5+G_6+G_7=\frac{1}{2}+1+\frac{1}{4}+\frac{1}{4}=2(\mathrm{S})$$

$$G_{33}=G_3+G_4+G_5=\frac{1}{0.5}+1+1=4(\mathrm{S})$$

$$G_{12}=G_{21}=-(G_6+G_7)=-\left(\frac{1}{4}+\frac{1}{4}\right)=-0.5(\mathrm{S})$$

$$G_{23}=G_{32}=-G_5=-1(\mathrm{S})$$

$$G_{3t} = G_{13} = -G_4 = -1(\mathrm{S})$$

$$I_{s11} = I_{s1} + I_{s6} = \frac{6}{2} + \frac{8}{4} = 5(\mathrm{A})$$

$$I_{s22} = I_{s5} - I_{s6} = \frac{2}{1} - \frac{8}{4} = 0$$

$$I_{s33} = -I_{s5} = -\frac{2}{1} = -2(\mathrm{A})$$

故节点电位方程组为

$$2V_1 - 0.5V_2 - V_3 = 5 \quad ①$$

$$-0.5V_1 + 2V_2 - V_3 = 0 \quad ②$$

$$-V_1 - V_2 + 4V_3 = -2 \quad ③$$

上述三元一次方程组，可用行列式法求解

$$D = \begin{vmatrix} 2 & -0.5 & -1 \\ -0.5 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$= 16 - 0.5 - 0.5 - 2 - 1 - 2 = 10$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} 5 & -0.5 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -2 & -1 & 4 \end{vmatrix} = 40 - 1 - 4 - 5 = 30$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 2 & 5 & -1 \\ -0.5 & 0 & -1 \\ -1 & -2 & 4 \end{vmatrix} = 5 - 1 + 10 - 4 = 10$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 2 & -0.5 & 5 \\ -0.5 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & -2 \end{vmatrix} = -8 + 2.5 + 10 + 0.5 = 5$$

故

$$V_1=\frac{D_1}{D}=\frac{30}{10}=3\ (\mathrm{V})$$

$$V_2=\frac{D_2}{D}=\frac{10}{10}=1\ (\mathrm{V})$$

$$V_3=\frac{D_3}{D}=\frac{5}{10}=0.5\ (\mathrm{V})$$

各支路电流为

$$I'_1=-G_1V_1=-\frac{1}{2}\times 3=-1.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_1=I_{s1}+I'_1=\frac{6}{2}-1.5=1.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=G_2V_2=\frac{1}{2}\times 1=0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=G_3V_3=\frac{1}{0.5}\times 0.5=1\ (\mathrm{A})$$

$$I_4=G_4(V_1-V_3)=1(3-0.5)=2.5\ (\mathrm{A})$$

$$I'_5=G_5(V_3-V_2)=1(0.5-1)=-0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_5=I_{s5}+I'_5=\frac{2}{1}-0.5=1.5\ (\mathrm{A})$$

$$I'_6=G_6(V_1-V_2)=\frac{1}{4}(3-1)=0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_6=I'_6-I_{s6}=0.5-\frac{8}{4}=-1.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_7=G_7(V_1-V_2)=\frac{1}{4}(3-1)=0.5\ (\mathrm{A})$$

例 1-63 3 个电源并联运行，联结到汇流排上，供电给 2 个负载，见图 1-64(a)，已知 $E_1=120\mathrm{V}$，$E_2=116\mathrm{V}$，$E_3=121\mathrm{V}$，内电阻 $R_1=0.8\Omega$，$R_2=0.4\Omega$，$R_3=0.8\Omega$，负载电阻 $R_4=8\Omega$，$R_5=4\Omega$，求各电源及负载中的电流是多少？

解 将图 1-64(a) 改画成图 1-64(b)，可知该电路是一个两个节点电路，由式 (1-78) 可求得节点 1 电位 V_1 为

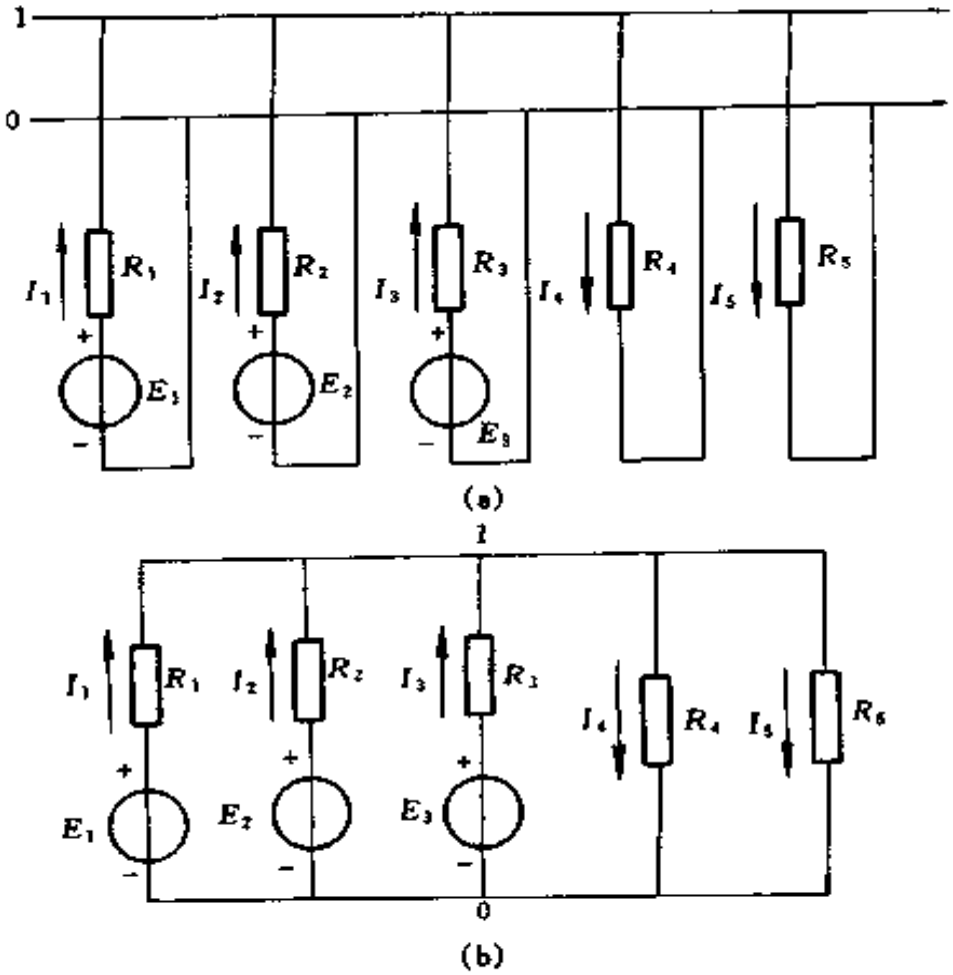


图 1-64　例 1-63 电路

(a) 原电路；(b) 改画后的电路

$$V_1 = \frac{\dfrac{E_1}{R_1} + \dfrac{E_2}{R_2} + \dfrac{E_3}{R_3}}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \dfrac{1}{R_4} + \dfrac{1}{R_5}}$$

$$= \frac{\dfrac{120}{0.8} + \dfrac{116}{0.4} + \dfrac{121}{0.8}}{\dfrac{1}{0.8} + \dfrac{1}{0.4} + \dfrac{1}{0.8} + \dfrac{1}{8} + \dfrac{1}{4}}$$

$$= \frac{591.25}{5.375} = 110\ (\mathrm{V})$$

再由欧姆定律可知

$$I_1=\frac{E_1-V_1}{R_1}=\frac{120-110}{0.8}=12.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=\frac{E_2-V_1}{R_2}=\frac{116-110}{0.4}=15\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=\frac{E_3-V_1}{R_3}=\frac{121-110}{0.8}=13.75\ (\mathrm{A})$$

$$I_4=\frac{V_1}{R_4}=\frac{110}{8}=13.75\ (\mathrm{A})$$

$$I_5=\frac{V_1}{R_5}=\frac{110}{4}=27.5\ (\mathrm{A})$$

六、回路电流法

一个具有 n 个节点，m 条支路的电路，它的独立回路数是 $l=m-n+1$。可以选择 l 个独立回路电流作为未知量，根据基尔霍夫电压定律列出独立的 l 个电压方程进行求解，这种方法称为回路电流法。

回路电流方程● 的普遍形式为

$$\left.\begin{aligned}&R_{11}I_1+R_{12}I_2+\cdots+R_{1l}I_l=E_{11}\\&R_{21}I_1+R_{22}I_2+\cdots+R_{2l}I_l=E_{22}\\&\qquad\cdots\\&R_{l1}I_1+R_{l2}I_2+\cdots+R_{ll}I_l=E_{ll}\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}80)$$

式中 R_{11}、R_{22}……——各回路的自电导，它们总是正的，Ω；

R_{12}、R_{13}……——各回路的互电导，相邻两回路电流通过公共支路时，参考方向相同时取

● 回路电流方程是以回路电流为未知的待求量，实际上它来源于回路电压方程。

"+"；相反时取"－"，Ω；

I_1、I_2……——选取的回路电流，A；

E_{11}、E_{22}……——各回路的回路电动势，它们等于回路中各电源电动势的代数和，凡是回路绕行方向是从电源电动势的参考"－"极走向"+"极，这个电动势就是正的，反之则是负的，V。

对于平面电路，可以选取网孔作为独立回路。

解出回路电流之后，按支路电流与回路电流的关系，可求出支路电流。各支路电流为通过该支路的回路电流的代数和，如果回路电流方向与支路电流参考方向一致，取"+"，相反时取"－"。

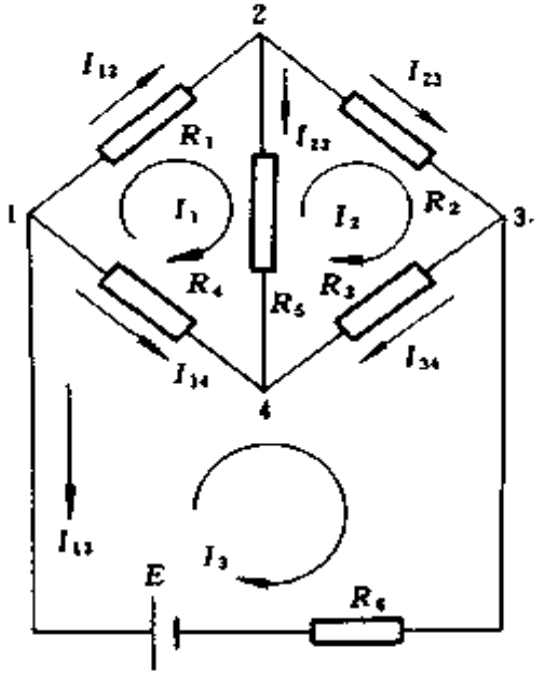


图 1-65　例 1-64 电路

例 1-64　图 1-65 是桥形电路，已知 $R_1 = 10\Omega$，$R_2 = 20\Omega$，$R_3 = 25\Omega$，$R_4 = 30\Omega$，$R_5 = 20\Omega$，$R_6 = 3\Omega$，$E = 11V$，求各支路电流是多少？

解　各支路电流参考方向及回路电流方向如图中所示。

$$R_{11} = R_1 + R_5 + R_4 = 10 + 20 + 30 = 60\ (\Omega)$$

$$R_{22} = R_2 + R_3 + R_5 = 20 + 25 + 20 = 65\ (\Omega)$$

$$R_{33} = R_6 + R_4 + R_3 = 3 + 30 + 25 = 58\ (\Omega)$$

$$R_{12}=R_{21}=-R_5=-20\ (\Omega)$$
$$R_{23}=R_{32}=-R_3=-25\ (\Omega)$$
$$R_{31}=R_{13}=-R_4=-30\ (\Omega)$$
$$E_{33}=E=11\ (\mathrm{V})$$

回路电流方程为

$$60I_1-20I_2-30I_3=0 \quad ①$$
$$-20I_1+65I_2-25I_3=0 \quad ②$$
$$-30I_1-25I_2+58I_3=11 \quad ③$$

即

$$3I_1-I_2-1.5I_3=0 \quad ④$$
$$-4I_1+13I_2-5I_3=0 \quad ⑤$$
$$-6I_1-5I_2+11.6I_3=2.2 \quad ⑥$$

用行列式解④、⑤、⑥三元一次联立方程

$$D=\begin{vmatrix}3 & -1 & -1.5\\ -4 & 13 & -5\\ -6 & -5 & 11.6\end{vmatrix}$$
$$=452.4-30-30-117-75-46.4=154$$

$$D_1=\begin{vmatrix}0 & -1 & -1.5\\ 0 & 13 & -5\\ 2.2 & -5 & 11.6\end{vmatrix}=11+42.9=53.9$$

$$D_2=\begin{vmatrix}3 & 0 & -1.5\\ -4 & 0 & -5\\ -6 & 2.2 & 11.6\end{vmatrix}=13.2+33=46.2$$

$$D_3=\begin{vmatrix}3 & -1 & 0\\ -4 & 13 & 0\\ -6 & -5 & 2.2\end{vmatrix}=85.8-8.8=77$$

各回路电流为

$$I_1=\frac{D_1}{D}=\frac{53.9}{154}=0.35\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=\frac{D_2}{D}=\frac{46.2}{154}=0.3\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=\frac{D_3}{D}=\frac{77}{154}=0.5\ (\mathrm{A})$$

各支路电流为

$$I_{12}=I_1=0.35\ (\mathrm{A})$$

$$I_{23}=I_2=0.3\ (\mathrm{A})$$

$$I_{13}=I_3=0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_{14}=I_3-I_1=0.5-0.35=0.15\ (\mathrm{A})$$

$$I_{24}=I_1-I_2=0.35-0.3=0.05\ (\mathrm{A})$$

$$I_{34}=I_2-I_3=0.3-0.5=-0.2\ (\mathrm{A})$$

七、叠加原理和替代原理

（一）叠加原理

在电路中具有两个或两个以上电源作用时，电路内任一支路中的电流和电压，等于电路中各个电源单独作用所产生的电流和电压的代数和，这就是叠加原理。

使用叠加原理时应注意：

（1）只能用来计算线性电路的电流和电压，对非线性电路，叠加原理不适用。

（2）在考虑某一电源单独作用时，应将其他电源去掉，对电压源应短接其电动势，但保留其内阻；对电流源应断开其恒流源，并保留其内阻。

（3）各电源单独作用产生的电流和电压的方向与电路中电流和电压参考方向相同为正，反之为负。

(4) 在线性电路中，对于功率也不能用叠加原理来计算，因为不能把功率写成各电动势或恒定电流的一次函数。

例 1-65 应用叠加原理计算图 1-66(a) 中 R_3 中的电流及理想电流源的端电压是多少？已知 $E_1=12V$，$R_1=6\Omega$，$I_{s2}=10A$，$R_3=12\Omega$。

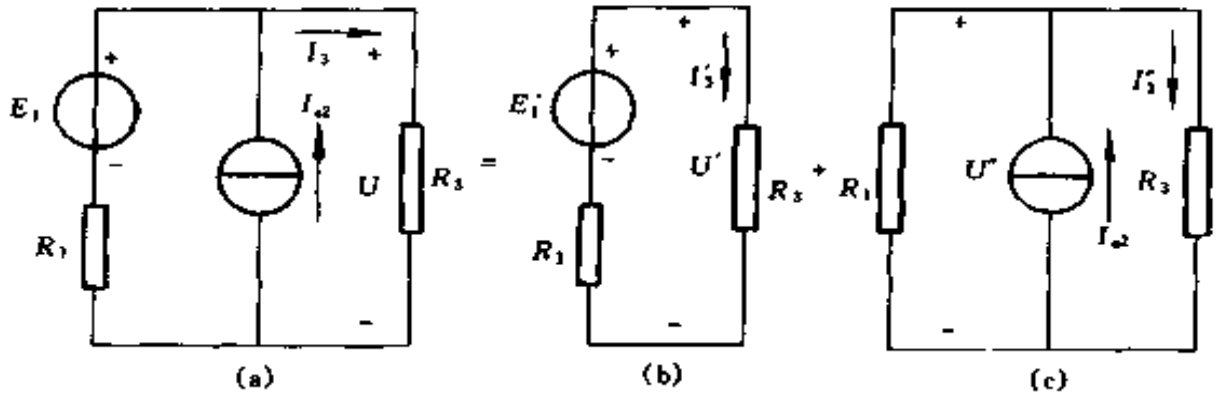


图 1-66 例 1-65 电路

(a) 原电路；(b) E_1 作用，I_{s2}不作用电路；

(c) I_{s2}作用，E_1 不作用电路

解 (1) E_1 单独作用时，将理想电流源开路，如图 1-66(b) 所示。从图中可知

$$I_3'=\frac{E_1}{R_1+R_3}=\frac{12}{6+12}=\frac{2}{3}\ (A)$$

$$U'=R_3I_3'=12\times\frac{2}{3}=8\ (V)$$

(2) I_{s2}单独作用时，将理想电压源短路，如图 1-66(c) 所示。根据分流公式有

$$I_3''=\frac{R_1}{R_1+R_3}I_{s2}=\frac{6}{6+12}\times10=\frac{10}{3}\ (A)$$

$$U''=R_3I_3''=12\times\frac{10}{3}=40\ (V)$$

(3) E_1 和 I_{s2}共同作用时

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{2}{3} + \frac{10}{3} = 4 \ (\text{A})$$

$$U = U' + U'' = 8 + 40 = 48 \ (\text{V})$$

例 1-66 用回路电流法求图 1-67(a) 中 ab 支路电流是多少？并用叠加原理加以验证。图中电流源 $I_s = 2\text{A}$，电压源 $E = 2\text{V}$，电阻 $R_1 = 3\Omega$，$R_2 = 2\Omega$，$R_3 = 2\Omega$。

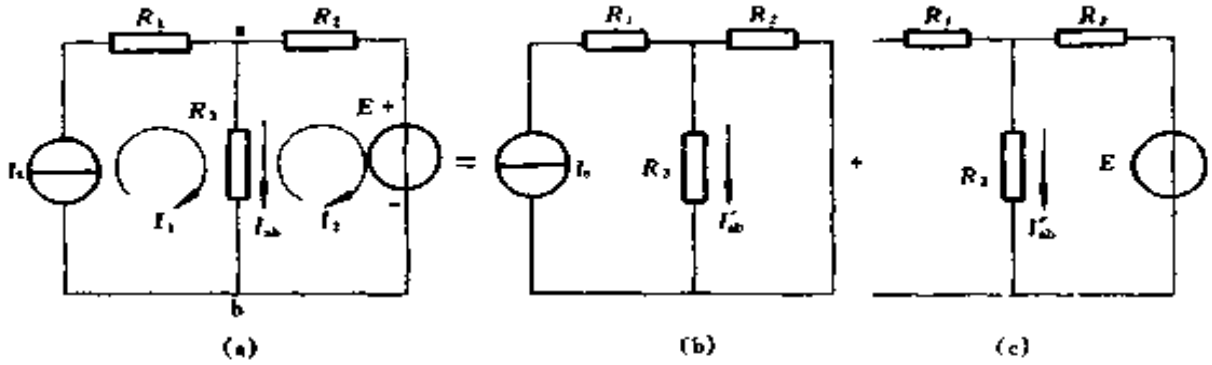


图 1-67 例 1-66 电路

(a) 原电路；(b) E 不作用电路；(c) I_s 不作用电路

解 (1) 用回路电流法求解电路，先标定支路 I_{ab}和回路电流 I_1、I_2 的方向，如图 1-67(a) 中所示。对于第一个回路来说，由于 I_s 是电流源，即回路电流 I_1 已经给定，所以

$$I_1 = I_s = 2 \ (\text{A})$$

对于第二个回路来说，有

$$R_{22} = R_2 + R_3 = 2 + 2 = 4 \ (\Omega)$$

$$R_{21} = -R_3 = -2 \ (\Omega)$$

$$E_{22} = -E = -2 \ (\text{V})$$

所以回路电流方程为

$$-2I_1 + 4I_2 = -2$$

即 $$-I_1+2I_2=-1$$

所以 $$I_2=\frac{-1+I_1}{2}=\frac{-1+2}{2}=0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_{ab}=I_1-I_2=2-0.5=1.5\ (\mathrm{A})$$

(2) 用叠加原理进行验算

1) 当 I_s 单独作用时，电压源 E 短路，如图 1-67(b) 所示，根据分流公式有

$$I'_{ab}=I_s\frac{R_2}{R_2+R_3}=2\times\frac{2}{2+2}=1\ (\mathrm{A})$$

2) 当 E 单独作用时，电流源开路，如图 1-67(c) 所示，根据欧姆定律得

$$I''_{ab}=\frac{E}{R_2+R_3}=\frac{2}{2+2}=0.5\ (\mathrm{A})$$

所以 $I_{ab}=I'_{ab}+I''_{ab}=1+0.5=1.5\ (\mathrm{A})$

上式结果与前面的计算结果一致。

(二) 替代原理

不论是线性电路，还是非线性电路，都可以用替代原理进行计算。

(1) 对于电路中的任何一条支路，如已知它的端电压，可以把这条支路去掉，以一个理想电压源替代，这个理想电压源的电动势的大小和极性，应和原支路的端电压相同。这样替代后不会影响电路中其他部分的电流和电压。

(2) 电路中的任何一条支路，也可以根据其已知的电流，用一个理想电流源来代替，这个理想电流源的恒定电流的大小和方向，应和原支路中的电流相同。这样替代后也不会影响电路中其他部分的电流和电压。

例 1-67 在图 1-68(a) 的电路中，已知 $E_1=110V$，

$R_1=R_3=5\Omega$，$R_2=R_4=10\Omega$，求各支路中的电流及电阻 R_2 两端电压是多少？并用替代原理重新计算各支路电流。

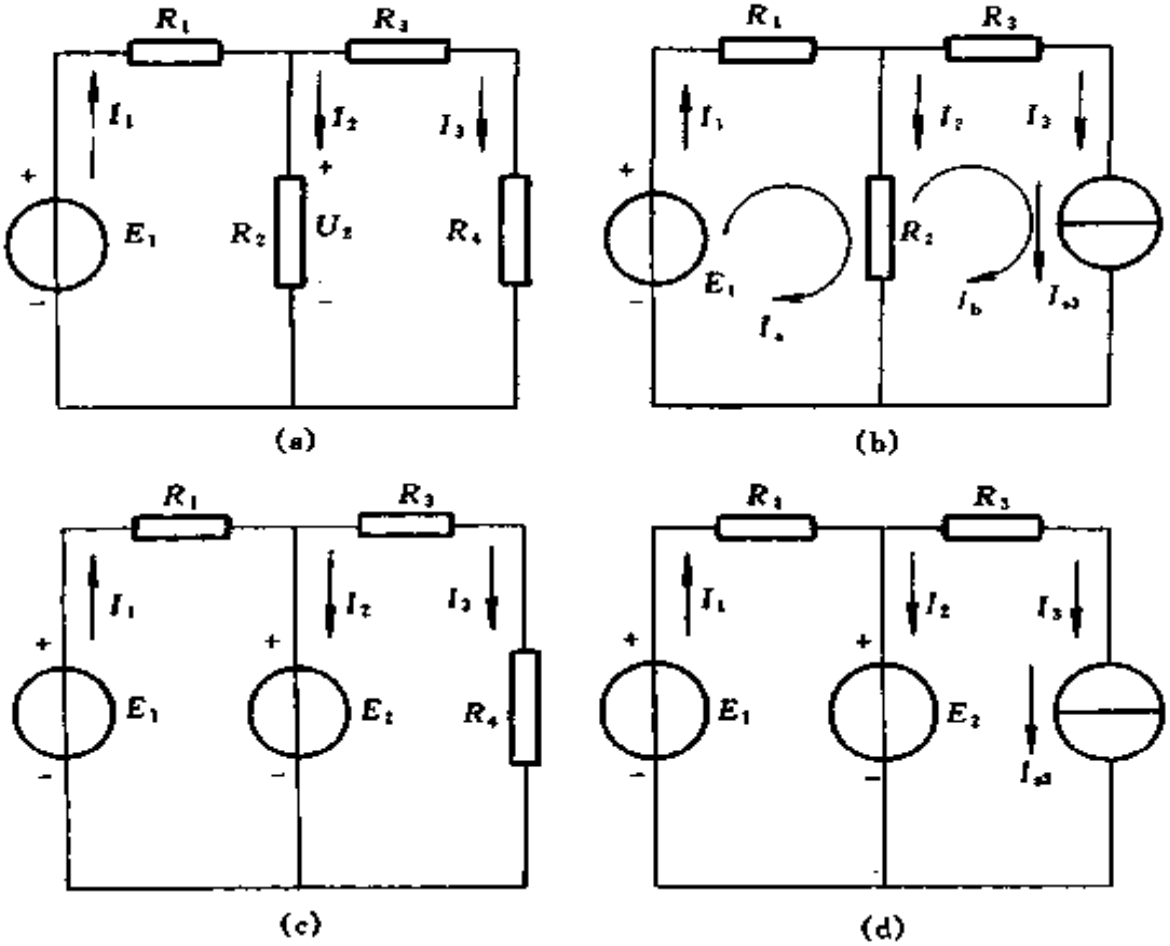


图 1-68　例 1-67 电路

(a) 原电路；(b) 用 I_{s3}代替 R_4；(c) 用 E_2 代替 R_2；

(d) 用 E_2 代替 R_2，I_{s3}代替 R_4

解　(1) 在图1-68(a)中，总电流

$$I_1=\frac{E_1}{R_1+\dfrac{R_2(R_3+R_4)}{R_2+R_3+R_4}}=\frac{110}{5+\dfrac{10(5+10)}{10+5+10}}=10\ (\mathrm{A})$$

应用分流公式有

$$I_2=\frac{R_3+R_4}{R_2+R_3+R_4}I_1=\frac{5+10}{10+5+10}\times 10=6\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=I_1-I_2=10-6=4\ (\mathrm{A})$$

$$U_2=R_2I_2=10\times 6=60\ (\mathrm{V})$$

(2) 将电阻 R_4 用理想电流源 $I_{s3}=4\mathrm{A}$ 代替，如图1-68(b)所示。下面用回路电流法来求解。

因为 I_{s3}是电流源，即回路电流 I_b 已经给定，所以

$$I_b=I_{s3}=4\ (\mathrm{A})$$

对于 I_a 回路有

$$(R_1+R_2)I_a-R_2I_b=E_1$$

即

$$(5+10)I_a-10\times 4=110$$

$$15I_a=150$$

所以

$$I_a=\frac{150}{15}=10\ (\mathrm{A})$$

$$I_1=I_a=10\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=4\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=I_1-I_3=10-4=6\ (\mathrm{A})$$

(3) 将电阻 R_2 用理想电压源 $E_2=60\mathrm{V}$ 代替，如图1-68(c)所示。从图中可知

$$I_1=\frac{E_1-E_2}{R_1}=\frac{110-60}{5}=10\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=\frac{E_2}{R_3+R_4}=\frac{60}{5+10}=4\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=I_1-I_3=10-4=6\ (\mathrm{A})$$

(4) 同时将电阻 R_4 用理想电流源 $I_{s3}=4\mathrm{A}$ 代替，电阻 R_2 用理想电压源 $E_2=60\mathrm{V}$ 代替，如图1-68(d)所示。从图中可知

$$I_1=\frac{E_1-E_2}{R_1}=\frac{110-60}{5}=10\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=4\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=I_1-I_3=10-4=6\ (\mathrm{A})$$

上述 4 种计算结果完全相同。

八、有源二端网络的等效电源定理

（一）戴维南定理

该定理也叫有源二端网络的等效电压源定理：任何一个线性有源二端网络总可以简化成一个等效的电压源。电压源的恒定电动势 E_s 等于原来有源二端网络的开路电压 U_0，内电阻 R_i 等于该网络中电源均为零时在其端口处所得到的等效电阻。通常，把这个有源二端网络的等效电压源电路叫做戴维南等效电路，如图 1-69 所示。

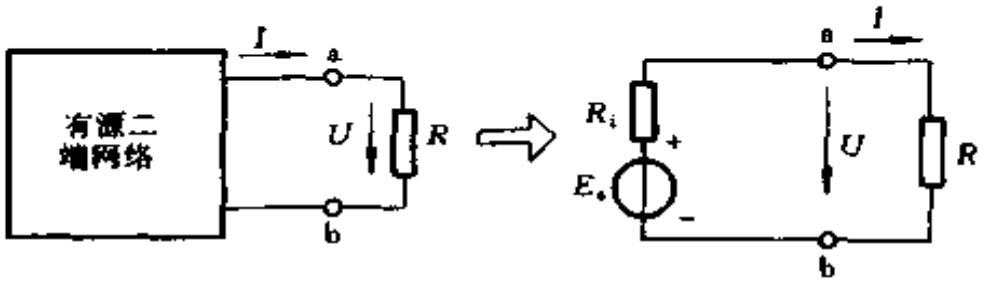


图 1-69　戴维南定理

（二）诺顿定理

该定理也叫有源二端网络的等效电流源定理：任何一个线性有源二端网络总可以简化成一个等效的电流源。电流源的 I_s 等于原来有源二端网络的短路电流 I_k，内电阻 R_i 等于该网络中电源均为零时在其端口处所得到的等效电阻。通常，把这个有源二端网络的等效电流源电路叫做诺顿等效电路，如图1-70所示。

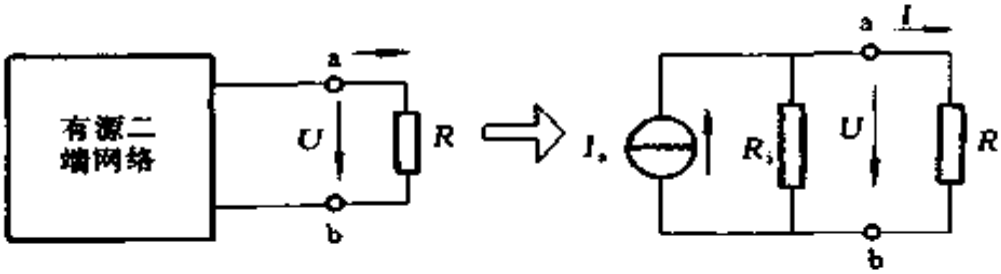


图 1-70　诺顿定理

例 1-68　利用戴维南定理求图1-71(a)中流过 R 的电流 I_0 为多少？已知：$R=2\Omega$；$r_1=2\Omega$；$r_2=1\Omega$；$E_1=12V$；$E_2=10V$。

解　(1) 决定 E_s。电路如图 1-71(b)所示，由全电路欧姆定律

$$I=\frac{E_1-E_2}{r_1+r_2}=\frac{12-10}{1+2}=\frac{2}{3}\ (A)$$

$$E_s=U_0=Ir_2+E_2=\frac{2}{3}\times 1+10$$

$$=10\frac{2}{3}\ (V)$$

(2) 决定 R_i。电路如图1-71(c)所示

$$R_i=\frac{r_1r_2}{r_1+r_2}=\frac{2\times 1}{2+1}=\frac{2}{3}\ (\Omega)$$

(3) 计算 I_0

$$I_0=\frac{E_s}{R+R_i}=\frac{10\frac{2}{3}}{2+\frac{2}{3}}=4\ (A)$$

例 1-69　用戴维南定理求图 1-72 (a) 中流过 R_L 的电

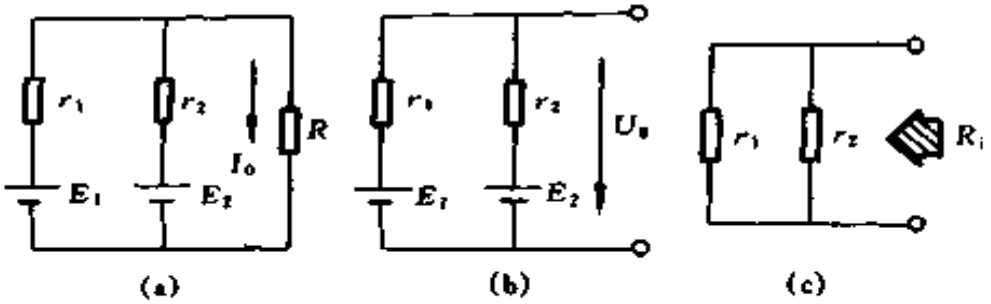


图 1-71　例 1-68 电路

(a) 原电路；(b) 决定 E_s 电路；(c) 决定 R_i 电路

流 I 为多少？已知：$E_1 = 12V$，$R_1 = 150\Omega$，$R_2 = 450\Omega$，$R_L = 67.5\Omega$。

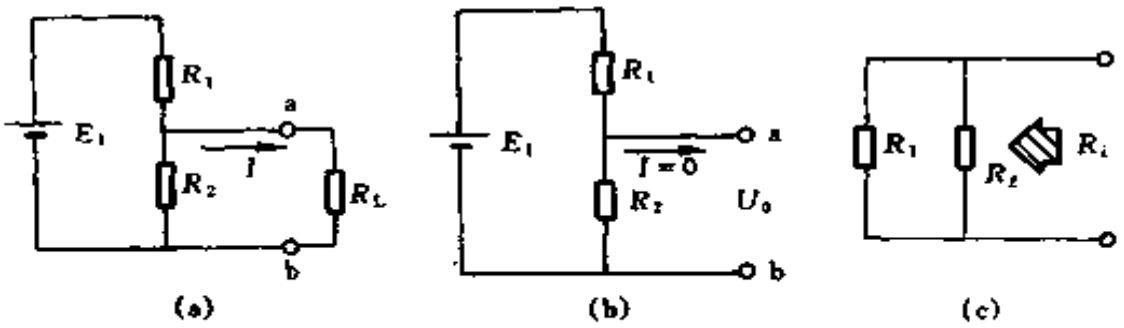


图 1-72　例 1-69 电路

(a) 原电路；(b) 决定 E_s 电路；(c) 决定 R_i 电路

解　(1) 决定 E_s。电路如图 1-72(b)所示

$$E_s = U_0 = R_2 \times \frac{E_1}{R_1 + R_2}$$

$$= 450 \times \frac{12}{450 + 150} = 9 \ (V)$$

(2) 决定 R_i。电路如图 1-72 (c) 所示

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{450 \times 150}{450 + 150} = 112.5 \ (\Omega)$$

(3) 计算 I

$$I=\frac{E_s}{R_L+R_i}=\frac{9}{112.5+67.5}=0.05\ (A)$$

第三节　交流电路计算

一、交流电的基本性质

（一）交流电的周期、频率和角频率

周期或频率是用来衡量交流电变化快慢的物理量。

1. 周期

交流电变化一周所需的时间称周期，用 T 表示，单位是 s。周期越短，表示交流电变化越快。

2. 频率

在单位时间（1s）内，交流电重复变化的周数叫频率，用 f 表示，单位为 Hz。

1Hz 就是每秒变化一周，频率越高，表明交流电变化越快。

频率的单位还有 kHz 和 MHz。

$$1MHz=10^6Hz;\ 1kHz=10^3Hz$$

我国工业电力网频率为 50Hz（工频），周期为 0.02s。

3. 频率和周期的关系

$$f=\frac{1}{T} \tag{1-81}$$

或

$$T=\frac{1}{f} \tag{1-82}$$

4. 角频率

交流电单位时间内变化的角度，单位是 rad/s，用 ω 表示。

因交流电变化一周，变化了 2π 弧度，故有

$$\omega = 2\pi f \tag{1-83}$$

或

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{1-84}$$

例 1-70 求 $f_1 = 50\text{Hz}$ 和 $f_2 = 1000\text{kHz}$ 时的角频率和周期各为多少？

解 （1）$f_1 = 50\text{Hz}$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \times 50 = 314\ (\text{rad/s})$$

$$T_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{50} = 0.02\ (\text{s})$$

（2）$f_2 = 1000\text{kHz}$

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi \times 1000 \times 1000 = 6.28 \times 10^6\ (\text{rad/s})$$

$$T_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6}\ (\text{s}) = 1\ (\mu\text{s})$$

（二）交流电的瞬时值、最大值、有效值和平均值

1．瞬时值

在任何一个瞬时的交流电的数值，叫做瞬时值，一般用小写的字母表示，如 i、e 和 u 等。

2．最大值

最大值也叫幅值或峰值，在一个周期中，所出现的最大瞬时值称为最大值。在正弦交流电路中用 I_m，U_m，E_m分别表示电流、电压和电动势的最大值。

3．有效值

若把交变电流 i 和直流 I 分别通过两个阻值相同的电阻 R，如果在一个周期内，它们各自在电阻上产生的热量相等，则此直流值叫做该交变电流的有效值。

我们平时讲的交流电 220V、380V、测量用的交流电表

和万用表交流档的读数等，均指有效值。

在电工技术中，如果没有特别说明，凡是讲交流电动势，电压与电流都是指有效值，电气设备和元件所标的额定电压和额定电流，以及交流仪表上电压和电流的刻度，一般也是指有效值。有效值用大写的英文字母 U、I 和 E 表示。有效值也叫均方根值。

正弦交流电有效值和最大值的关系

$$\left.\begin{aligned} U_m &= \sqrt{2}U = 1.414U \\ I_m &= \sqrt{2}I = 1.414I \\ U &= 0.707U_m \\ I &= 0.707I_m \end{aligned}\right\} \tag{1-85}$$

4. 平均值

正弦交流电流的波形，正负半周所包含的面积是相同的。故一般所指的平均值是指一个周期内绝对值的平均值，也就是正半周的平均值。

正弦交流电平均值与最大值的关系

$$\left.\begin{aligned} U_{av} &= \frac{2}{\pi}U_m = 0.637U_m \\ I_{av} &= \frac{2}{\pi}I_m = 0.637I_m \\ E_{av} &= \frac{2}{\pi}E_m = 0.637E_m \end{aligned}\right\} \tag{1-86}$$

5. 波形因数与波顶因数

它是用来反映周期交流量波形性质的，分别以 K_f 与 K_c 表示，它们的定义与在正弦交流量中的值如表 1-3 所示。

表 1-3　　波形因数和波顶因数

名　称	定　义　式	正弦交流中的值
波形因数 K_f	$K_f=\frac{有效值}{平均值}$	$K_f=\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}I_m}{\frac{2}{\pi}I_m}=1.11$
波顶因数 K_c	$K_c=\frac{最大值}{有效值}$	$K_c=\frac{I_m}{\frac{1}{\sqrt{2}}I_m}=1.414$

（三）相位、初相位和相位差

正弦交流电可用图 1-73 所示正弦曲线来描述，也可用下列三角函数来表示：

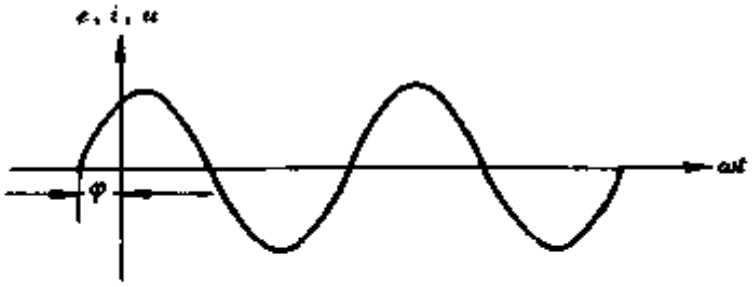


图 1-73　正弦交流电波形

$$\left.\begin{aligned} e &= E_m\sin(\omega t+\varphi) \\ u &= U_m\sin(\omega t+\varphi) \\ i &= I_m\sin(\omega t+\varphi) \end{aligned}\right\} \tag{1-87}$$

1. 相位

正弦交流电压（电流，电动势）瞬时值的表达式中的电角度，称为正弦交流电的相位角（简称相位），即式中的 $\omega t+\varphi$。

2. 初相位

当 $t=0$ 时的相位 φ，称为初相位（简称初相）。初相可

为正值，也可为负值。

3．相位差

相位差也叫相角差，两个同频率交流电的相位之差叫做相位差，用 ψ 表示。当 $e_1 = E_m\sin(\omega t + \varphi_1)$，$e_2 = E_m\sin(\omega t + \varphi_2)$ 时，

$$\psi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1\text{-}88)$$

由此可见，两个同频率交流电的相位差，就等于它们的初相之差。

当 $\varphi_1 - \varphi_2 > 0$，即 e_1 初相大于 e_2 的初相时，e_1 的变化比 e_2 领先，这种情况叫做 e_1 相位超前于 e_2，或 e_2 相位滞后于 e_1。

当 $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$，即 $\varphi_1 = \varphi_2$，则 e_1 与 e_2 同时到达正的最大值或零位或负的最大值，这种情况叫做 e_1 与 e_2 同相位，简称同相。

当 $\varphi_1 - \varphi_2 = 180°$，它们同时通过零点，但当 e_1 到达正的最大值时，e_2 却到达负的最大值，e_1 到达负的最大值时，e_2 却到达正的最大值，这种情况叫 e_1 与 e_2 反相位，简称反相。

在电子线路中，反相应用较多。

（四）正弦交流电的三要素

综上所述，正弦交流电中的幅值（或有效值）、角频率（或频率、周期）和初相是确定正弦交流电变化情况的 3 个重要数值，所以叫正弦交流电的三要素。知道了三要素，正弦交流电的变化情况也就完全确定下来了。

例 1-71 如用交流电压表测得交流电压是 220V，求此交流电压的最大值是多少？如用交流电流表测得交流电流为 10A，求此交流电流的最大值是多少？

解 (1) $U_m=\sqrt{2}U=\sqrt{2}\times 220=311.1$ (V)

(2) $I_m=\sqrt{2}I=\sqrt{2}\times 10=14.14$ (A)

例 1-72 已知一正弦交流电流 $i=5\sin(1000t+30^\circ)$ A，问最大值、角频率、频率和初相角各为多少？

解 (1) 电流的最大值 $I_m=5A$

(2) 角频率 $\omega=1000\text{rad/s}$

(3) 频率 $f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{1000}{2\pi}=159.2$ (Hz)

(4) 初相角 $\varphi=30^\circ$

例 1-73 已知一正弦电流 $i=5\sin(\omega t+30^\circ)$ A，$f=50\text{Hz}$，问在 $t=0.1\text{s}$ 时，电流的瞬时值为多少？

解 当 $f=50\text{Hz}$ 时，

$$\omega=2\pi f=2\pi\times 50=314.2\ (\text{rad/s})$$

当 $t=0.1\text{s}$ 时，

$$\omega t=314.2\times 0.1=31.42\ (\text{rad})$$

故 $$i=5\sin(31.4+30^\circ)\ (\text{A})$$

式中的相位角 31.4 和 30°不能直接相加，需将弧度换算成角度，即

$$31.4\times\frac{180^\circ}{\pi}=1800^\circ=5\times 360^\circ$$

所以 $$i=5\sin(5\times 360^\circ+30^\circ)=5\sin 30^\circ=5\times\frac{1}{2}$$
$$=2.5(\text{A})$$

例 1-74 已知 $e_1=E_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{4}\right)$，$e_2=E_m\sin\omega t$，求 e_1 与 e_2 的相位差是多少？

解 $\psi=\varphi_1-\varphi_2=\frac{\pi}{4}-0=\frac{\pi}{4}=45^\circ$

例 1-75 下面两个正弦量，哪一个超前？它们之间的相位差是多少？

$$u = 311\sin\left(314t + \frac{\pi}{6}\right)\text{V}$$

$$i = 5.2\sin\left(314t - \frac{\pi}{4}\right)\text{A}$$

解 u 和 i 为同频率正弦量，$\varphi_u = \frac{\pi}{6}$，$\varphi_i = -\frac{\pi}{4}$，

相位差 $\psi = \varphi_u - \varphi_i = \frac{\pi}{6} - \left(-\frac{\pi}{4}\right)$

$$= \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4} = \frac{5\pi}{12} > 0$$

因 $\psi > 0$，说明 $\psi_u > \varphi_i$，电压超前电流 $\frac{5}{12}\pi$ $\left(或\frac{5}{12} \times 180^\circ = 75^\circ\right)$。

例 1-76 已知某正弦电流，当 $t = 0$ 时的瞬时值 $i(0) = 0.5\text{A}$，并已知其初相角为 30°，问有效值是多少？

解 $i = I_m\sin(\omega t + 30^\circ)$

$t = 0$ 时，$i(0) = I_m\sin30^\circ = 0.5(\text{A})$

所以 $$I_m = \frac{0.5}{\sin30^\circ} = \frac{0.5}{0.5} = 1(\text{A})$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707(\text{A})$$

二、单相正弦交流电路计算

（一）交流电路中的电压和电流

交流电路中，电阻、电感和电容都是影响电流的因素，现就下述 8 种情况分别讨论。

1. 纯电阻电路

白炽灯、电炉或变阻器等负载，它们的电感同电阻值相

比是极小的，可略去不计，这种负载所组成的交流电路，在实用上认为是纯电阻电路，如图 1-74 所示。在纯电阻电路中，电流与电压同相位，其电流，电压间的关系可按欧姆定律计算。

$$I_r = \frac{U_r}{R}; U_r = I_r R; R = \frac{U_r}{I_r} \tag{1-89}$$

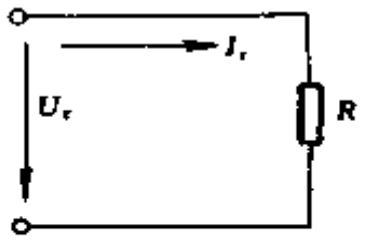


图 1-74　纯电阻电路

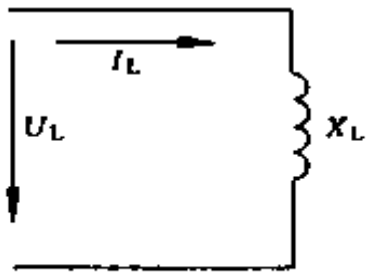


图 1-75　纯电感电路

2. 纯电感电路

若把线圈的电阻略去不计，则线圈就只含有电感，这种线圈被认为是纯电感线圈。当把它与电源接通后，就组成一纯电感电路，如图 1-75 所示。在纯电感电路中，通过的正弦电流要比加在它两端的正弦电压滞后 $\pi/2$ 电角度，即电流与电压间存在 90°的相位差，它们的相量关系如图 1-76 所示。其数量关系如下：

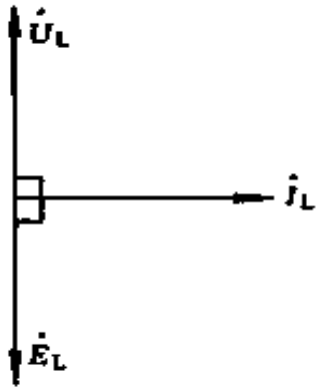


图 1-76　纯电感电路相量图

$$\left.\begin{aligned} I_L &= \frac{U_L}{X_L} \\ U_L &= I_L X_L \\ X_L &= \frac{U_L}{I_L} \end{aligned}\right\} \tag{1-90}$$

上式中的 X_L 称为电感抗（简称感抗），它的单位是 Ω。

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \tag{1-91}$$

式中 ω——角频率，rad/s；

L——电感量，H；

f——频率，Hz。

3. 纯电容电路

图 1-77 表示仅含电容的交流电路，称为纯电容电路。纯电容电路中通过的正弦电流要比加在它两端的正弦电压导前 $\pi/2$ 电角度，即电流与电压间存在 90°的相位差，它们的相量关系如图 1-78 所示，其数量关系如下

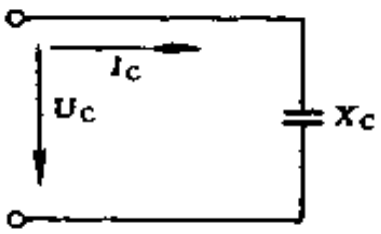


图 1-77 纯电容电路

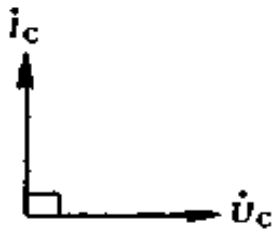


图 1-78 纯电容电路相量图

$$I_c = \frac{U_c}{X_c};\ U_c = I_c X_c;\ X_c = \frac{U_c}{I_c} \tag{1-92}$$

上式中的 X_c 称为电容抗（简称容抗），它的单位是 Ω。

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{1-93}$$

式中 ω——角频率，rad/s；

C——电容器的电容，F；实际电容器的电容往往比一法拉小得多，通常采用 μF 和 pF 作为电容的单位。

$$1\mu F = 10^{-6} F$$

$$1pF = 10^{-12} F$$

f——频率，Hz。

4. 电阻、电感串联电路

该电路又称 RL 串联电路，在此电路中，电流滞后电压 φ 角，或电压超前电流 φ 角，其相量关系如图 1-79（b）所示。

在 RL 串联电路中，通常以电阻两端的电压、感抗两端的电压以及电路的总电压三者的有效值 U_R、U_L、U 为三边，正好组成一个直角三角形，称为电压三角形，如图 1-80 所示。因此在 RL 串联电路的计算中，决不能用代数相加的方法求总电压，这一点应特别注意。

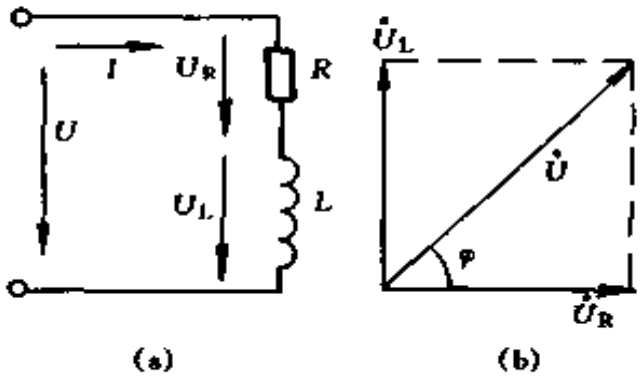


图 1-79 电阻电感串联电路

（a）电路图；（b）相量图

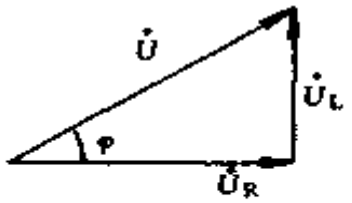


图 1-80 电压三角形

由电压三角形求得

$$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}=\sqrt{(IR)^2+(IX_L)^2}$$

$$=I\sqrt{R^2+X_L^2}=I\,|Z|$$

或

$$I=\frac{U}{\sqrt{R^2+X_L^2}}=\frac{U}{|Z|} \tag{1-94}$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\frac{U}{I} \tag{1-95}$$

式中 $|Z|$——阻抗（复阻抗的模），Ω。

在 RL 串联电路中，电阻 R，感抗 X_L 及阻抗 $|Z|$ 之间

也符合直角三角形三边之间的关系，可组成一阻抗三角形，其形状与电压三角形相似，如图 1-81 所示。由阻抗三角形可知电流与总电压之间的相位差可由下式求得

$$\varphi = \arccos\frac{R}{|Z|} \tag{1-96}$$

或

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_L}{R} \tag{1-97}$$

5. 电阻、电容串联电路

该电路又称 RC 串联电路，在此电路中，电流超前电压 φ 角，或电压滞后电流 φ 角，其相量关系如图 1-82（b）所示。U_R、U_c、U 也可组成一电压三角形，如图 1-83（a）所示。由电压三角形可得

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{(IR)^2 + (IX_C)^2}$$

$$I = \sqrt{R^2 + X_C^2} = I\,|Z|$$

或

$$I = \frac{U}{|Z|}$$

$$|Z| = \frac{U}{I} \tag{1-98}$$

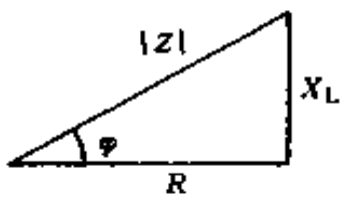


图 1-81　阻抗三角形

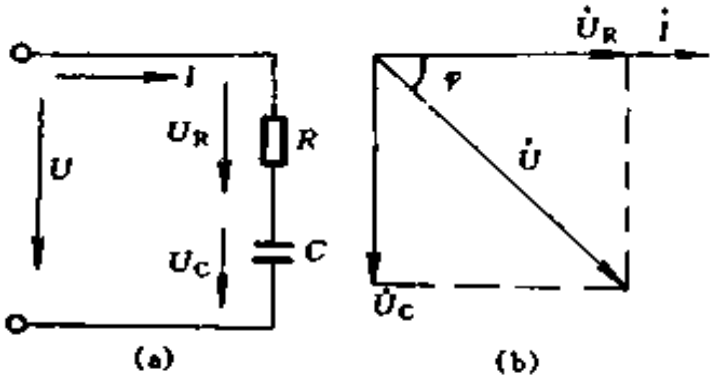


图 1-82　电阻电容串联电路

（a）电路图；（b）相量图

R、X_c、$|Z|$也可组成一阻抗三角形，如图 1-83(b)所示。

$$\varphi = \arccos \frac{R}{|Z|}$$

或

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_C}{|Z|} \tag{1-99}$$

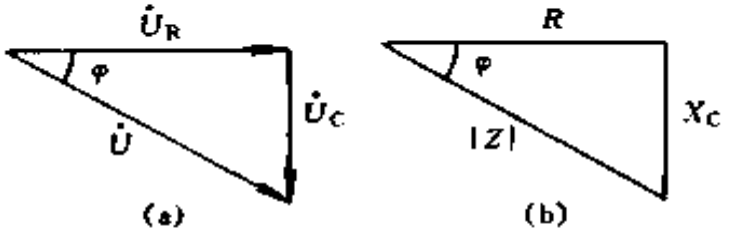


图 1-83　电阻电容串联电路的电压和阻抗三角形

(a) 电压三角形；(b) 阻抗三角形

6. 电阻、电感和电容串联电路

该电路又称 *RLC* 串联电路，电路和相量关系如图 1-84 所示。在此电路中，阻抗

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{1-100}$$

$$X = X_L - X_C \tag{1-101}$$

式中　X——电抗，Ω。

该电路电压三角形和阻抗三角形如图 1-85 所示。

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} \tag{1-102}$$

或

$$\varphi = \arccos \frac{R}{|Z|} \tag{1-103}$$

在 *RLC* 串联电路中，一般有下列三种情况：

1) $X_L > X_C$，$\dot{I}$ 滞后于 $\dot{U}$，电路呈感性。图1-84(b)所画相量图就是这种情况。

2) $X_L = X_C$，$\dot{I}$ 与 $\dot{U}$ 同相，相量关系如图 1-86 所示。

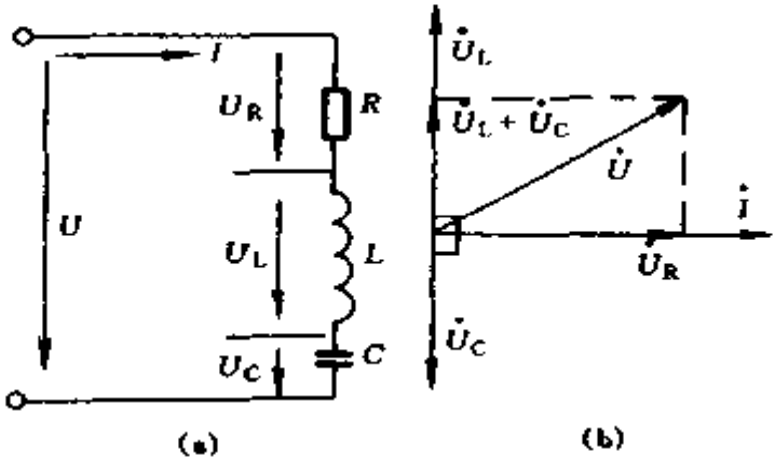


图 1-84　电阻、电感和电容串联电路

(a) 电路图；(b) 相量图

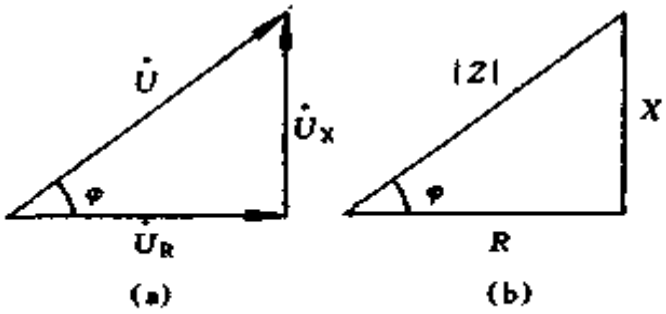


图 1-85　电阻、电感和电容串联电路电压和阻抗三角形

(a) 电压三角形；(b) 阻抗三角形

3) $X_L < X_C$，$\dot{I}$ 超前 $\dot{U}$，电路呈容性。相量关系如图 1-87 所示。

因为流过 R、L、C 中电流相同，所以画相量图时以电流作为参考相量。

7. 电阻、电感和电容并联电路

该电路又称 RLC 并联电路，电路如图 1-88 所示。在此电路中，电流有效值和电压有效值有如下关系

$$I=\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{\omega L}-\omega C\right)^2}\,U \qquad (1\text{-}104)$$

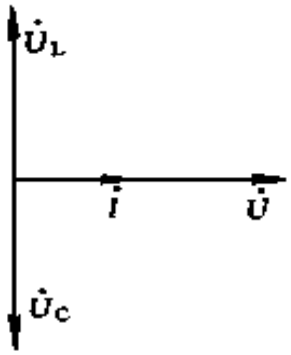


图 1-86　$X_L=X_C$，I 与 U 同相时相量图

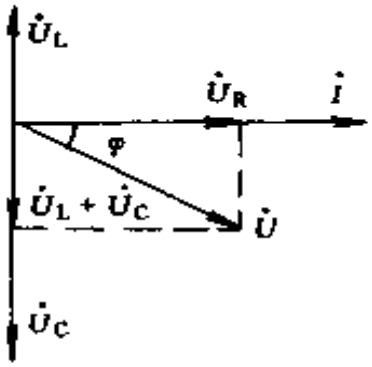


图 1-87　$X_L<X_C$，I 超前 U 时相量图

上式中出现了电阻 R、感抗 $X_L=\omega L$ 和容抗 $X_C=1/\omega C$ 的倒数，分别称为电导 G、感纳 B_L 和容纳 B_C，即

$$\left.\begin{aligned}
&\text{电导} && G=\frac{1}{R}\\
&\text{感纳} && B_L=\frac{1}{X_L}=\frac{1}{\omega L}\\
&\text{容纳} && B_C=\frac{1}{X_C}=\omega C\\
&\text{电纳} && B=B_L-B_C=\frac{1}{\omega L}-\omega C
\end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}105)$$

B_L、B_C、B 的单位和 G 相同，均为 S。

将 G、B_L、B_C 和 B 代入电压有效值和电流有效值的关系式中，则

$$I=\sqrt{G^2+(B_L-B_C)^2}\,U=|Y|U \qquad (1\text{-}106)$$

$$|Y|=\sqrt{G^2+(B_L-B_C)^2}=\sqrt{G^2+B^2} \qquad (1\text{-}107)$$

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{B}{G} \qquad (1\text{-}108)$$

式中　$|Y|$——导纳（复导纳的模），S；

φ——导纳角。

该电路的相量图如图 1-89 所示。导纳三角形和电流三角形如图 1-90 所示。图 1-89 中的相量图以电压相量为参考。

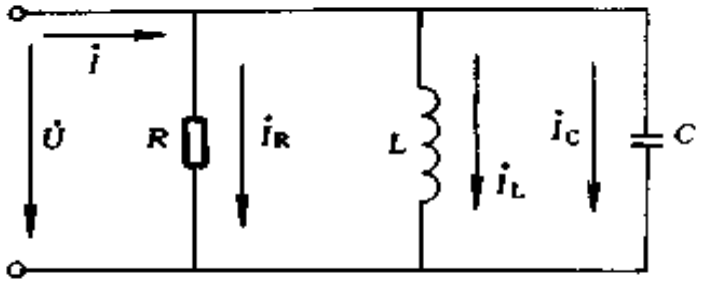


图 1-88　电阻、电感和电容并联电路

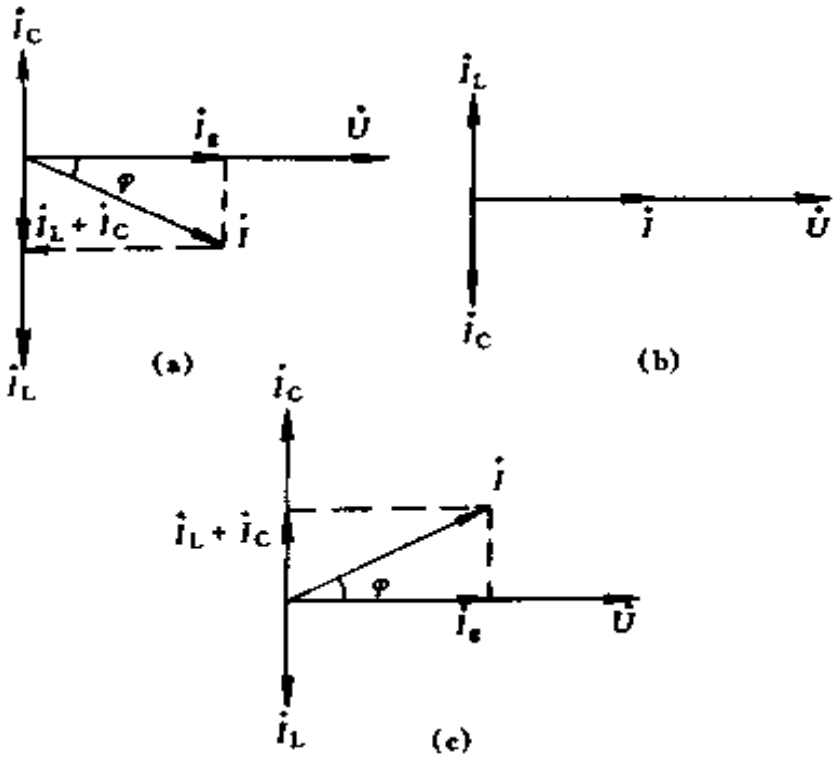


图 1-89　电阻、电感和电容并联电路相量图

(a) $B_L>B_C$，$\dot{I}$滞后于 $\dot{U}$，电路呈感性；(b) $B_L=B_C$，$\dot{I}$与 $\dot{U}$同相；(c) $B_L<B_C$，$\dot{I}$超前于 $\dot{U}$，电路呈容性

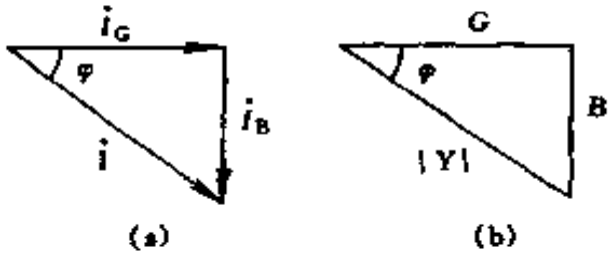


图 1-90　电阻、电感和电容并联电路电流和导纳三角形
(a) 电流三角形；(b) 导纳三角形

8. 电路的谐振

谐振为电路中可能发生的一种特殊现象，在工程中有广泛的应用，但有时又应加以避免。当含有电感线圈和电容器的无源二端网络接上电源后，当电源的频率和电路的参数符合一定条件时，它的电抗（或电纳）将等于零，电路呈电阻性，而电流与外施电压同相，这种工作状态称为谐振。

在 RLC 串联电路产生谐振时，反映到电感电容的两个电位降的互相抵消上，即 $U_L - U_C = 0$，故叫电压谐振。在 RLC 并联电路产生谐振时，是由于两个电流 I_L 和 I_C 的互相抵消而形成，故叫电流谐振。

不论是电压谐振，还是电流谐振，它们的谐振条件均为

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \tag{1-109}$$

谐振角频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1-110}$$

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1-111}$$

例 1-77　把 $L = 0.1\text{H}$ 的电感线圈接在 220V50Hz 的交

流电源上，求感抗 X_L 和电流 I 各为多少？

解 $X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 0.1 = 31.41\ (\Omega)$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{31.41} = 7.004\ (A)$$

例 1-78 将电容为 800μF 的电容器接在电压为 220V，频率为 50Hz 的交流电源上，求 X_C 和 I 各为多少？

解 $X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 800 \times 10^{-6}} = 3.981\ (\Omega)$

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{3.981} = 55.26\ (A)$$

例 1-79 把电阻 $R = 6\Omega$、电感 $L = 25.5mH$ 的线圈接在频率为 50Hz，电压为 220V 的电路上，分别求 X_L、$|Z|$、I、U_R、U_L 为多少？

解 $X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 25.5 \times 10^{-3} = 8.007 \approx 8\ (\Omega)$

$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\ (\Omega)$

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{10} = 22\ (A)$$

$$U_R = IR = 22 \times 6 = 132\ (V)$$

$$U_L = X_L = 22 \times 8 = 176\ (V)$$

例 1-80 已知高频扼流圈的电感 $L = 0.05mH$，当频率为 700kHz 时，其感抗为多少？

解 $X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 700 \times 10^3 \times 0.05 \times 10^{-3} = 219.8\ (\Omega)$

例 1-81 收音机中某线圈的电感为 0.2mH，试求当频率为 600kHz 和 860kHz 时的感抗为多少？如果要使其中产生 0.01mA 的电流，试求这两种频率下线圈两端所应有的电压数值为多少？

解 （1）当 $f=600\text{kHz}$ 时

$X_L=2\pi fL=2\pi\times600\times10^3\times0.2\times10^{-3}=753.6\ (\Omega)$

$U_L=IX_L=0.01\times753.6=7.536\ (\text{mV})$

（2）当 $f=860\text{kHz}$ 时

$X_L=2\pi\times860\times10^3\times0.2\times10^{-3}=1080\ (\Omega)$

$U_L=0.01\times1080=10.8\ (\text{mV})$

例 1-82 100Ω 电阻与 10μF 电容器串联，接在频率为 50Hz 的交流电路中，当电流为 0.6A 时，求电阻两端电压、电容器两端电压和外加电压各为多少？

解 $X_C=\dfrac{1}{2\pi fC}=\dfrac{1}{2\pi\times50\times10\times10^{-6}}=318.5\ (\Omega)$

$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{100^2+318.5^2}=333.8\ (\Omega)$

$U_R=IR=0.6\times100=60\ (\text{V})$

$U_C=IX_C=0.6\times318.5=191.1\ (\text{V})$

$U=I|Z|=0.6\times333.8=200.3\ (\text{V})$

例 1-83 *RLC* 串联电路，已知 $L=500\mu\text{H}$，电容 C 为可变电容，变化范围在 10～290pF，$R=10\Omega$，若外施正弦电压的频率为 1000kHz，问电容 C 为何值时，电路发生谐振？

解 因

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

故

$$C=\frac{1}{\omega_0^2L}=\frac{1}{(2\pi f_0)^2L}$$

所以

$$C=\frac{1}{(2\pi\times1000\times10^3)^2\times500\times10^{-6}}$$

$$=\frac{1}{4\pi^2\times10^{12}\times500\times10^{-6}}$$

$$=50.66\times10^{-12}(\text{F})=50.66(\text{pF})$$

例 1-84 *RLC* 串联电路，已知 $L=20\text{mH}$，$C=200\text{pF}$，$R=100\Omega$，问电路的谐振频率 f_0 为多少？

解 $$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{20\times10^{-3}\times200\times10^{-12}}}$$
$$=79.58\times10^3\text{Hz}=79.58\ (\text{kHz})$$

（二）交流电功率和功率因数

1. 瞬时功率

交流电路中任一瞬间的功率称为瞬时功率。如某部分电路，其端电压的瞬时值为 u，电流的瞬时值为 i，则该部分电路的瞬时功率为

$$p=ui \tag{1-112}$$

2. 有功功率

交流电路的瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率，又叫有功功率，以 P 表示，单位为 W。

$$P=UI\cos\varphi \tag{1-113}$$

3. 表观功率

上式中的 UI 乘积虽也有功率的量纲，但它不是电路实际消耗的功率，称为表观功率，以 S 表示，单位为 VA。表观功率也叫视在功率。

$$S=UI \tag{1-114}$$

4. 无功功率

为了计算上的需要（如电力系统的设计），引入了无功功率的概念，以 Q 表示，单位为 var。

$$Q=UI\sin\varphi \tag{1-115}$$

电路的无功功率也具有功率的量纲，但一般 Q 没有什么物理意义。

5. 功率因数

有功功率表达式中的 $\cos\varphi$ 称为功率因数。表观功率只有乘以功率因数之后才是电路的有功功率。

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} \tag{1-116}$$

$\cos\varphi$ 中的 φ 角称为功率因数角。φ 角有正有负，φ 角的正负不影响 $\cos\varphi$ 的值，但说明了电路阻抗的性质是容性还是感性，所以功率因数常需注明滞后（$\varphi>0$）或超前（$\varphi<0$）。

6. 功率三角形

表观功率 S，有功功率 P 与无功功率 Q 符合下述关系。

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{1-117}$$

三种功率可以构成一个与阻抗三角形完全相似的直角三角形，称为功率三角形，如图 1-91 所示。S 与 P 的夹角就是功率因数角。

7. 功率因数的提高

提高功率因数，可以充分提高输电与发电设备利用率，在技术经济上都有着极重要的意义。提高功率因数常用的方法是加装补偿电容器或同步补偿器，另外尽量不使电动机空载或轻载运行，也能提高功率因数。

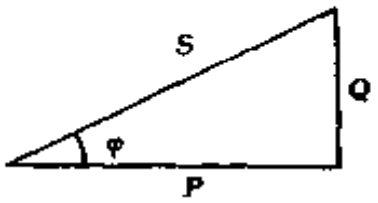


图 1-91　功率三角形

例 1-85　用电压表和电流表测量某负载的电压和电流分别为 110V 和 50A，用瓦特表测量其功率为 3300W，问表观功率、功率因数和无功功率各为多少？

解　表观功率 $S = UI = 110 \times 50 = 5500$（VA）

$$\text{功率因数}\ \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{3300}{5500} = 0.6$$

$$\text{无功功率}\ Q = UI\sin\varphi$$

因 $\cos\varphi=0.6$，查三角函数表得 $\varphi=53°8'$、$\sin\varphi=0.8$，所以　$Q=110\times50\times0.8=4400$（var）

例 1-86　把电阻 $R=6\Omega$、电感 $L=25.5\text{mH}$ 的线圈接在 $f=50\text{Hz}$，$U=220\text{V}$ 的交流电路中，问电路中的电流 I、有功功率 P、表观功率 S 和功率因数 $\cos\varphi$ 各为多少？

解　（1）因 $X_L=2\pi fL=2\pi\times50\times25.5\times10^{-3}\approx8$（Ω）

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{6^2+8^2}=10\ (\Omega)$$

所以

$$I=\frac{U}{|Z|}=\frac{220}{10}=22\ (\text{A})$$

（2）$\cos\varphi=\dfrac{R}{|Z|}=\dfrac{6}{10}=0.6$

（3）$P=UI\cos\varphi=220\times22\times0.6=2904$（W）

（4）$S=UI=220\times22=4840$（VA）

例 1-87　有一支日光灯和一只白炽灯并联接在 $f=50\text{Hz}$，电压 $U=220\text{V}$ 的电源上，电路如图 1-92 所示，日光灯的额定电压 $U_N=220\text{V}$，取用功率 $P_1=40\text{W}$，功率因数 $\cos\varphi_1=0.5$，白炽灯的额定电压 $U_N=220\text{V}$，取用功率 $P_2=60\text{W}$，问电流 I_1，I_2，I 及整个电路的功率因数 $\cos\varphi$ 各为多少？

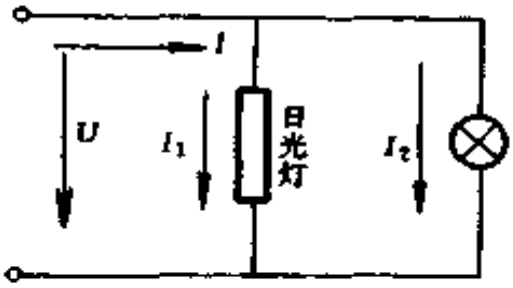


图 1-92　例 1-87 电路

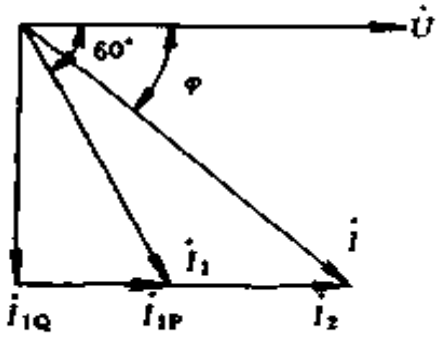


图 1-93　例 1-87 相量图

解 (1) $I_1=\dfrac{P_1}{U\cos\varphi_1}=\dfrac{40}{220\times0.5}=0.3636$ (A)

(2) $I_2=\dfrac{P_2}{U}=\dfrac{60}{220}=0.2727$ (A)

(3) 因 $\cos\varphi_1=0.5$

所以 $\varphi_1=60°$，即 $\dot{I}_1$ 比 $\dot{U}$ 滞后 60°，$\dot{I}_2$ 与 $\dot{U}$ 同相位，将 $\dot{I}_1$，$\dot{I}_2$ 合成后便求得总电流 $\dot{I}$，如图 1-93 所示。

$$
\begin{aligned}
I &= \sqrt{I_{1Q}^2+(I_{1p}+I_2)^2}\\
&= \sqrt{(I_1\sin\varphi_1)^2+(I_1\cos\varphi_1+I_2)^2}\\
&= \sqrt{(0.3636\sin60°)^2+(0.3636\cos60°+0.2727)^2}\\
&= \sqrt{(0.3636\times0.866)^2+(0.3636\times0.5+0.2727)^2}\\
&= \sqrt{(0.3149)^2+(0.4545)^2}\\
&= \sqrt{0.0992+0.2066}\\
&= 0.553(\mathrm{A})
\end{aligned}
$$

(4) $\varphi=\mathrm{arctg}\dfrac{I_1\sin\varphi_1}{I_1\cos\varphi_1+I_2}$

$$=\mathrm{arctg}\frac{0.3636\times0.866}{0.3636\times0.5+0.2727}$$

$$=\mathrm{arctg}\frac{0.3149}{0.4545}=\mathrm{arctg}0.6928$$

查三角函数表得 $\varphi=34°43'$

所以 $\cos\varphi=\cos34°43'=0.822$

$\cos\varphi$ 也可由下式求得

$$\cos\varphi=\frac{P_1+P_2}{UI}=\frac{40+60}{220\times0.553}=0.822$$

例 1-88 有一电感性的负载，其取用功率 $P=10\text{kW}$，功率因数 $\cos\varphi_1=0.6$，把它接到 220V，50Hz 的交流电源上，今欲使电路的功率因数提高到 0.9，应并联多大的电容器？

解 （1）当 $\cos\varphi_1=0.6$ 时，电感性负载从电源取用的电流为

$$I_1=\frac{P}{U\cos\varphi_1}=\frac{10\times10^3}{220\times0.6}=75.76\ (\text{A})$$

因 $\cos\varphi_1=0.6$，查三角函数表得 $\varphi_1=53°8'$

故 $\sin\varphi_1=0.8$

或按下式计算

$$\sin\varphi_1=\sqrt{1-\cos^2\varphi_1}=\sqrt{1-(0.6)^2}$$
$$=\sqrt{0.64}=0.8$$

电流 I_1 的无功分量为

$$I_{1Q}=I_1\sin\varphi_1=75.76\times0.8=60.6\ (\text{A})$$

（2）当电路的功率因数提高到 0.9 时，取用电源的电流应为

$$I_2=\frac{P}{U\cos\varphi_2}=\frac{10\times10^3}{220\times0.9}=50.5\ (\text{A})$$

因 $\cos\varphi_2=0.9$

故 $\sin\varphi_2=\sqrt{1-\cos^2\varphi_2}=\sqrt{1-(0.9)^2}$

$$=\sqrt{0.19}=0.4359$$

电流 I_2 的无功分量为

$$I_{2Q}=I_2\sin\varphi_2=50.5\times0.4359=22.01\ (\text{A})$$

（3）上述电流关系，可用图 1-94 中的相量图表示。由相量图可知并联电容器后，总电流的无功分量减少，其所减

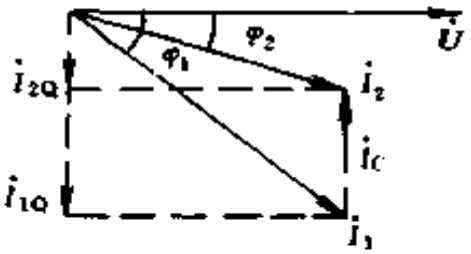


图 1-94　例 1-88 相量图

少的部分就是电容器支路中的电流，由此得

$$I_C = I_{1Q} - I_{2Q}$$
$$= 60.6 - 22.01$$
$$= 38.59\ (A)$$

$$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{220}{38.6} = 5.7\ (\Omega)$$

因
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

所以
$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 5.7}$$
$$\approx 558 \times 10^{-6}\ (F) = 558\ (\mu F)$$

在一般情况下，并联电容器按 kvar 计算

因
$$Q = UI\sin\varphi$$

所以
$$Q_1 = 220 \times 75.76 \times 0.8 = 13334\ (var)$$
$$= 13.33\ (kvar)$$
$$Q_2 = 220 \times 50.5 \times 0.4359 = 4843\ (var)$$
$$= 4.843\ (kvar)$$
$$Q_C = Q_1 - Q_2 = 13.33 - 4.843 = 8.487\ (kvar)$$

例 1-89　某电站以 $U = 220kV$ 的高压向某地输送 $P = 240MW$ 的电力，若输电线路的总电阻 $R = 10\Omega$，试计算当功率因数由 0.6 提高到 0.9 时，输电线上一年中少损耗多少电能？

解　当 $\cos\varphi_1 = 0.6$ 时，取用电流

$$I_1 = \frac{P}{U\cos\varphi_1} = \frac{240 \times 10^6}{22 \times 10^4 \times 0.6} = 1818\ (A)$$

当 $\cos\varphi_2 = 0.9$ 时，取用电流

$$I_2=\frac{P}{U\cos\varphi_2}=\frac{24\times10^7}{22\times10^4\times0.9}=1212\ (\mathrm{A})$$

一年中输电线上可以少损耗的电能是

$$\begin{aligned}W&=(I_1^2-I_2^2)Rt\\&=(1818^2-1212^2)\times10\times365\times24\\&=(3305124-1468944)\times10\times365\times24\\&=1836180\times10\times365\times24\\&=160849368000\ (\mathrm{W\cdot h})\\&\approx1.6\times10^8\ (\text{度})=1.6\ \text{亿度}\end{aligned}$$

例 1-90 某变电所输出的电压为 220V，额定表观功率为 4400kVA，向电压为 220V，功率因数为 0.72，额定功率为 396kW 的工厂供电，问能供给几个这样的工厂？若用户把功率因数提高到 0.9，又能供给几个这样的工厂？

解 变电所输出的额定电流

$$I_N=\frac{S_N}{U_N}=\frac{4400\times10^3}{220}=20000\ (\mathrm{A})$$

当功率因数为 0.72 时，每一工厂取用的电流为

$$I=\frac{P_N}{U\cos\varphi}=\frac{396\times10^3}{220\times0.72}=2500\ (\mathrm{A})$$

能供给的工厂数为

$$\frac{I_N}{I}=\frac{20000}{2500}=8\ (\text{个})$$

当功率因数提高到 0.9 时，每一工厂取用的电流为

$$I'=\frac{P_N}{U\cos\varphi_2}=\frac{396\times10^3}{220\times0.9}=2000\ (\mathrm{A})$$

这时能供给的工厂数是

$$\frac{I_N}{I'}=\frac{20000}{2000}\text{个}=10\ \text{个}$$

三、三相正弦交流电路计算

（一）相、线电流和相、线电压的概念

在分析和计算由三相电源、三相负载（也可能有单相负载）、以及连接这些电源和负载的导线所组成的三相电路中，经常要用到相、线电压和相、线电流的概念，现分述如下：

为了解其概念，先介绍几个常用术语

端线（俗称火线）——连接电源和负载各相端点的导线，称为端线。

中点（中性点）——三相电源中三个绕组末端（也可以是三个绕组首端）的联结点，称为三相电源中点或中性点，三相负载星形连接点，称为负载的中点或中性点。

中线——连接电源中点和负载中点的导线，称为中线（有时以大地作为中线，此时中线又称为地线）。

线电压——端线之间的电压称为线电压。

相电压——每相绕组或每相负载上的电压，称为相电压。

线电流——流过端线的电流称为线电流。

相电流——流过各相绕组或各相负载的电流称为相电流。

下面讨论电源和负载的两种连接方式，即星形联结和三角形联结时的相、线电压和相、线电流之间的关系。

1．星形联结（Y联结）

如图 1-95 所示，图中 $\dot{U}_{AB}$、$\dot{U}_{BC}$、$\dot{U}_{CA}$ 为线电压；$\dot{U}_{AN}$、$\dot{U}_{BN}$、$\dot{U}_{CN}$为相电压；N 为电源中性点；N′为负载中性点；NN′连线称为中线。

星形联结时，电源的线电压与相电压的相量图如图

1-96 所示。

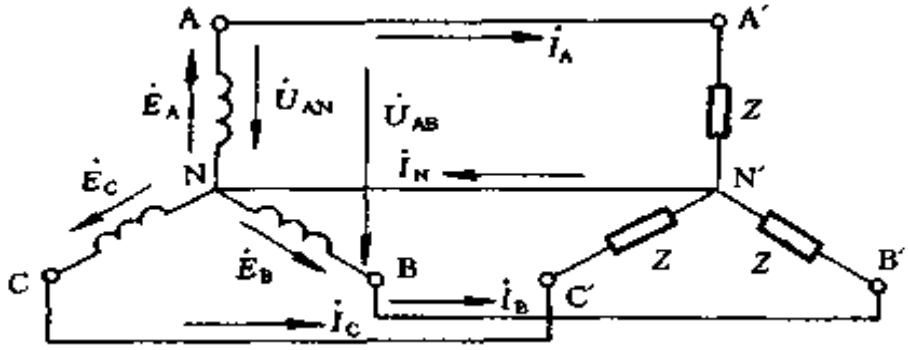


图 1-95　三相电源和三相负载的星形联结

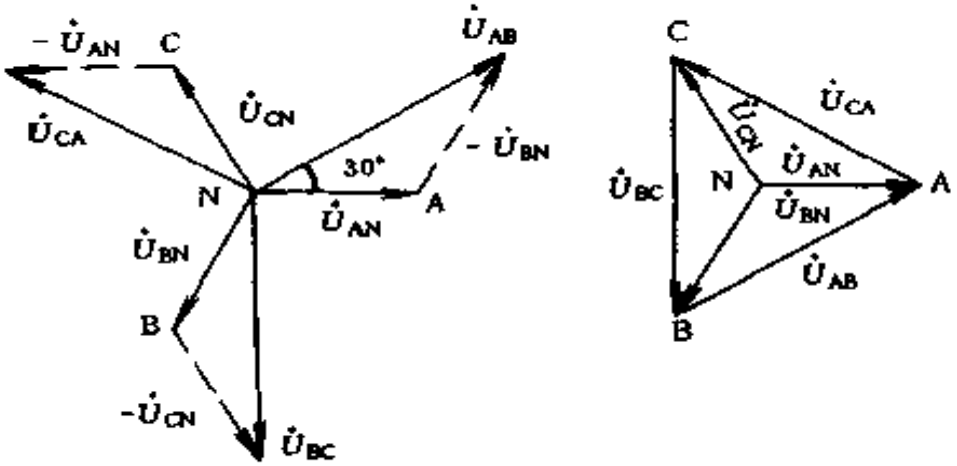


图 1-96　星形电源的线电压与相电压的相量图

从相量图上可看出，线电压超前相电压 30°电角度，即 $\dot{U}_{AB}$超前 $\dot{U}_{AN}$30°，$\dot{U}_{BC}$超前 $\dot{U}_{BN}$30°，$\dot{U}_{CA}$超前 $\dot{U}_{CN}$30°。

当星形电源各相电动势对称时，线电压也是对称的，彼此间相位差为 120°。从数量关系来看，线电压有效值是相电压有效值的$\sqrt{3}$倍。即

$$\left.\begin{aligned} U_{AB}&=\sqrt{3}\,U_{AN}\\ U_{BC}&=\sqrt{3}\,U_{BN}\\ U_{CA}&=\sqrt{3}\,U_{CN}\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}118)$$

对星形负载来说，如果相电压 $\dot{U}_{A'N'}$、$\dot{U}_{B'N'}$、$\dot{U}_{C'N'}$ 是对称的，那么线电压 $\dot{U}_{A'B'}$、$\dot{U}_{B'C'}$、$\dot{U}_{C'A'}$ 也是对称的，它们的有效值也是相电压的$\sqrt{3}$倍，彼此间相位差也是 120°。$\dot{U}_{A'B'}$ 超前 $\dot{U}_{A'N'}$30°，$\dot{U}_{B'C'}$超前 $\dot{U}_{B'N'}$30°，$\dot{U}_{C'A'}$超前 $\dot{U}_{C'N'}$30°。

星形联结时，线电流等于相电流。

2．三角形联结（△联结）

如图 1-97 所示。

三角形联结时，相电压等于线电压。

线电流滞后相电流 30°，即 $\dot{I}_A$ 滞后 $\dot{I}_{A'B'}$30°；$\dot{I}_B$ 滞后于 $\dot{I}_{B'C'}$30°；$\dot{I}_C$ 滞后 $\dot{I}_{C'A'}$30°。

相量关系如图 1-98 所示。

从数量关系看，线电流有效值等于相电流有效值的$\sqrt{3}$倍。即

$$\left.\begin{aligned} I_A &= \sqrt{3} I_{A'B'} \\ I_B &= \sqrt{3} I_{B'C'} \\ I_C &= \sqrt{3} I_{C'A'} \end{aligned}\right\} \tag{1-119}$$

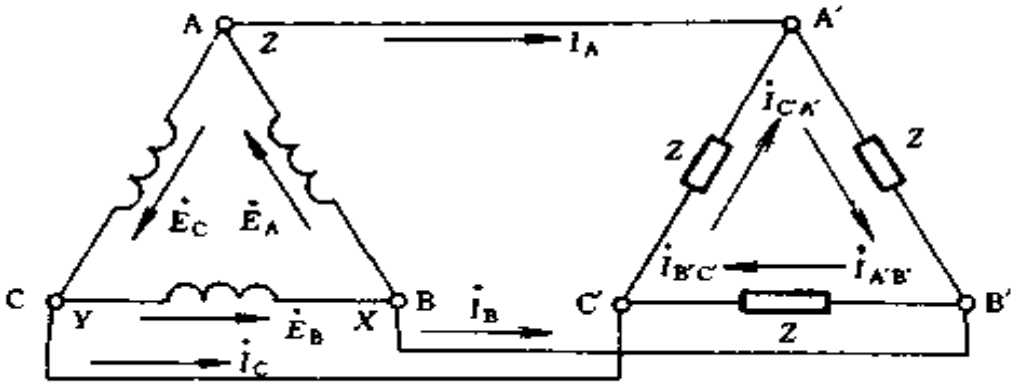


图 1-97　三相电源和三相负载的三角形联结

（二）对称三相电路计算

1. 计算方法

在对称星形联结的三相电路中，由于电源和负载的对称性，各相的电压和电流都是对称的，只要算出一相的电压和电流，其他两相的电压和电流就可以直接写出。而且因为电源中点和负载中点的电位相等，故各相的电流仅由各相的电压和阻抗所决定，因而各相的计算具有独立性。于是可以取出其中一相进行计算，这是计算对称三相电路独有的特点。对于其他连接方式的对称三相电路，总可以把它变换成对称的星形联结，然后进行计算。

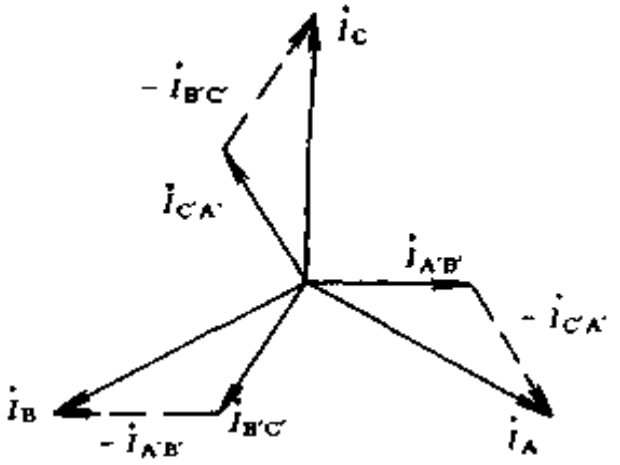


图 1-98　三角形联结时各电流的相量图

2. 三相电路的功率计算

在三相对称电路中，不论那种连接方式都是

$$P=3U_pI_p\cos\varphi \tag{1-120}$$

或

$$P=\sqrt{3}U_lI_l\cos\varphi \tag{1-121}$$

$$Q=3U_pI_p\sin\varphi \tag{1-122}$$

或

$$Q=\sqrt{3}U_lI_l\sin\varphi \tag{1-123}$$

$$S=3U_pI_p \tag{1-124}$$

或

$$S=\sqrt{3}U_lI_l \tag{1-125}$$

式中　U_p——三相电路相电压，V；

I_p——三相电路相电流，A；

U_l——三相电路线电压，V；

I_l——三相电路线电流，V；

φ——相电压超前于相电流的角度。

在三相对称电路中，瞬时功率 p 也等于平均功率 P。这种性质叫做瞬时功率的平衡性，它是对称三相制的重要优点之一。为什么会有这种性质？简单说明如下：

交流电路的瞬时功率，包含两部分，一部分为 $UI\cos\varphi$，是不随时间变化的恒定量，另一部分为 $-UI\cos(2\omega t-\varphi)$，是以两倍于电源频率随时间作正弦变化的分量，用数学公式可表示为

$$\begin{aligned} p &= ui = [\sqrt{2}U\sin\omega t][\sqrt{2}I\sin(\omega t-\varphi)] \\ &= 2UI\sin\omega t\sin(\omega t-\varphi) \\ &= UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t-\varphi) \end{aligned}$$

三相对称电路有

$$p_A = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t-\varphi)$$

$$p_B = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t-\varphi-120^\circ)$$

$$p_C = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t-\varphi-240^\circ)$$

$$\begin{aligned} p &= p_A + p_B + p_C \\ &= 3UI\cos\varphi - UI[\cos(2\omega t-\varphi) \\ &\quad + \cos(2\omega t-\varphi-120^\circ) \\ &\quad + \cos(2\omega t-\varphi-240^\circ)] \\ &= 3UI\cos\varphi \end{aligned}$$

所以 $$p = p_A + p_B + p_C = 3U_pI_p\cos\varphi = P \qquad (1\text{-}126)$$

例 1-91 今有一台三相电阻炉，其每相电阻 $R=8.68\Omega$，试问（1）在 380V 线电压下，接成三角形和接成星形时各从电网取用多少功率？（2）在 220V 线电压下，三角

形联结的功率是多少？

解 （1）三角形联结

$U_p = U_l$

$I_l = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3}\frac{U_p}{R} = \sqrt{3}\frac{380}{8.68} = 75.83$（A）

$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 75.83 \times 1$

$= 49911$（W）≈ 50（kW）

（2）星形联结

$I_l = I_p = \frac{U_p}{R} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 8.68} = 25.27$（A）

$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 25.27 \times 1$

$= 16633$（W）≈ 16.7（kW）

（3）当线电压为 220V 时

$I_p = \frac{U_p}{R} = \frac{220}{8.68} = 25.3$（A）

$I_l = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \times 25.3 = 43.82$（A）

$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi = \sqrt{3} \times 220 \times 43.82 \times 1$

$= 16698$（W）≈ 16.7（kW）

例 1-92 某三相三线制供电线路上接入三组电灯负载，如图 1-99（a）所示，设线电压为 380V，每一组电灯负载的电阻是 500Ω，试计算：

（1）在正常工作时，电灯负载的电压和电流为多少？

（2）如果 A 相断开时，其他两相负载的电压和电流为多少？［图 1-99（b）］

（3）如果 A 相发生短路（熔断器尚未熔断），其他两相的电压和电流为多少？［图 1-99（c）］

（4）如果采用三相四线制供电，［图 1-99（d）］当一相

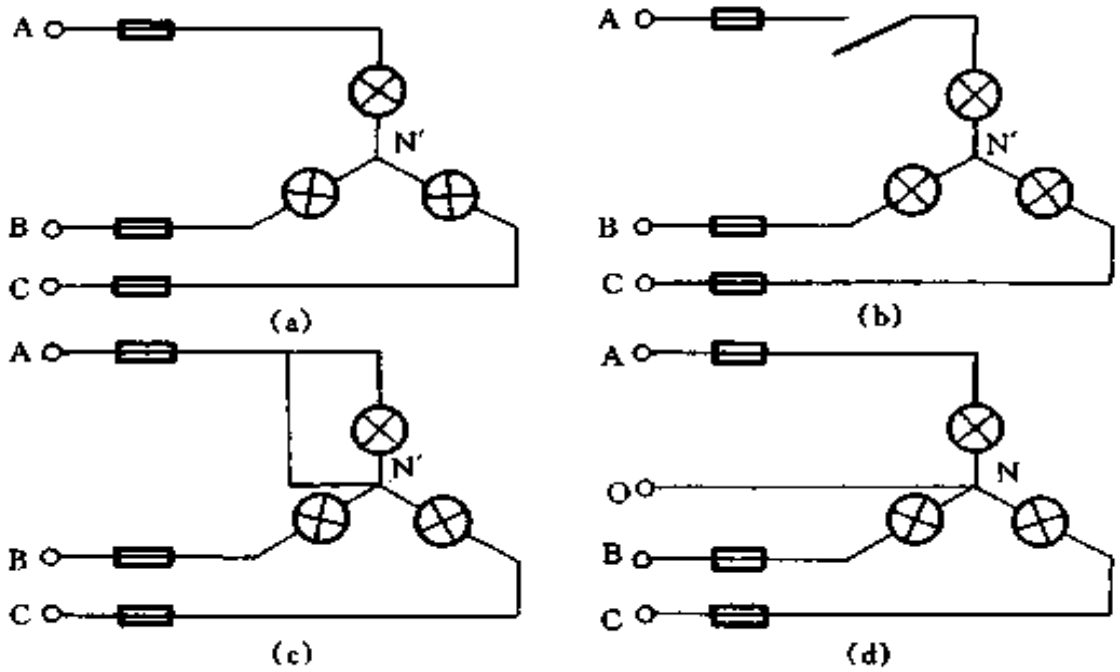


图 1-99　例 1-92 电路

(a) 原电路；(b) A 相断开；(c) A 相短路；(d) 三相四线制供电

断开或一相短路时，其他各相负载的电压和电流为多少？

解　(1) 在正常情况下，由于对称关系，负载相电压大小相等，即

$$U_{AN'}=U_{BN'}=U_{CN'}=\frac{U_{AB}}{\sqrt{3}}=\frac{380}{\sqrt{3}}=220\ (\mathrm{V})$$

每相负载阻抗　$Z=R=500\ (\Omega)$

每相负载的相电流等于线电流，即

$$I_A=I_B=I_C=\frac{U_{AN'}}{R}=\frac{220}{500}=0.44\ (\mathrm{A})$$

(2) 当 A 相断开时，BC 两相负载串接在线电压 U_{BC} 上，由于两阻抗性质是完全相同的，所以相电压为该线电压的一半，即

$$U_{BN'}=U_{CN'}=\frac{380}{2}=190\ (\mathrm{V})$$

这时相电流

$$I_B = I_C = \frac{U_{BN'}}{R} = \frac{190}{500} = 0.38\ (A)$$

这个数值小于电灯负载的额定电流，所以此时电灯较暗。

（3）当 A 相短路时，线电压通过短路线直接加在 B、C 相负载的两端，所以这时两相的相电压等于线电压，即

$$U_{BN'} = U_{CN'} = 380\ (V)$$

这时流过负载中电流

$$I_A = I_B = \frac{380}{500} = 0.76\ (A)$$

这个数值已超过电灯负载的额定电流，此时灯光很亮，灯丝将很快烧断。

从以上计算可看出，如果低压照明电路采用三相三线制供电时，当一相负载断线时，其他两相负载电压低于额定值，负载不能正常工作。当一相负载短路时，其他两相负载的电流是正常情况下的$\sqrt{3}$倍，造成过载，但熔断器不一定熔断，就会烧坏设备。

（4）采用三相四线制，当 A 相断开时，加在 B、C 电灯负载两端的电压不变。

$$U_{BN'} = U_{CN'} = 220V$$

所以负载仍能正常工作。

当一相短路时，该相电流大大超过额定值，熔断器迅速熔断，以保护设备，但其余两相仍能正常工作（它的现象是 B、C 两相电灯负载将突然亮一下，因瞬间 N′与 A 点同电位，待 A 相熔断器断开后，然后正常发光）。

由此可以看出，照明电路的中线能保证在某一相发生故

障情况下，其余两相仍能正常工作，因此在中线里决不允许安装熔断器，而且对中线接头地方均应进行定期检查，保证接触良好。

例 1-93 有一三相负载的有功功率 P 为 20kW，无功功率 Q 为 15kvar，问该负载的功率因数为多少？

解 因表观功率 $S=\sqrt{P^2+Q^2}=\sqrt{20^2+15^2}$

$$=25\ (\text{kVA})$$

所以 $$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{20}{25}=0.8$$

第四节 简单电路过渡过程计算

一、过渡过程初始条件的确定

在电路中，电源的突然接通或切断，某些参数的改变，某一元件的突然变换等，统称为换路。当电路进行换路时，就要引起稳定状态的改变。电路从一个稳定状态变化到另一个稳定状态一般不能立刻完成，而是需要有一个过渡过程。过渡过程也叫动态过程。

在过渡过程中，电路中各电压、电流之间的关系，除了服从基尔霍夫定律外，还必须满足初始条件。初始条件是根据电路的初始状态，即换路瞬间的电容电压和电感电流来算出的。初始值可用换路定则进行计算，即

$$\left.\begin{aligned} i_L(0_+)&=i_L(0_-)\\ u_C(0_+)&=u_C(0_-)\end{aligned}\right\}\qquad(1\text{-}127)$$

式中 $i_L(0_-)$ ——换路前终了瞬间电感元件上的电流，A；

$i_L(0_+)$ ——换路后的初始瞬间电感元件上的电流

（初始值），A；

$u_C(0_-)$ ——换路前终了瞬间电容元件两端电压，V；

$u_C(0_+)$ ——换路后的初始瞬间电容元件两端电压（初始值）V。

例 1-94 在图 1-100（a）所示的电路中，开关 S 原来是打开的，电路已达稳态。已知：$E=36V$，$R_1=2\Omega$，$R_2=2\Omega$，$R_3=3\Omega$。求当开关 S 闭合后一瞬间的各支路电流及电感 L 端电压是多少？

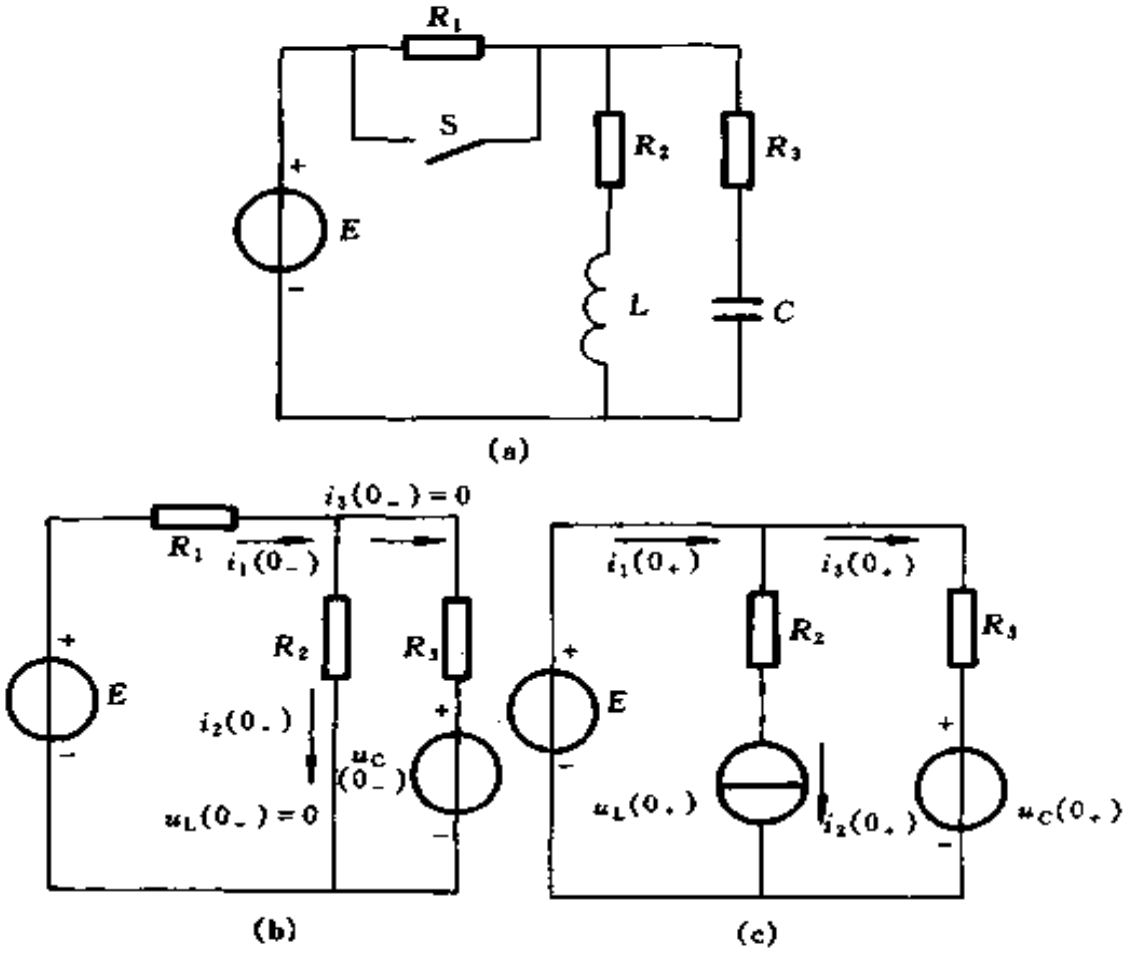


图 1-100 例 1-94 电路

（a）原电路；（b）换路前一瞬间的等效电路；

（c）换路后一瞬间的等效电路

解 开关 S 闭合前电路为稳态，电感相当于短路，电容相当于开路。因此，可以画出换路前一瞬间的等效电路如图 1-100（b）所示。因而有

$$u_L(0_-)=0$$

$$i_3(0_-)=0$$

$$i_1(0_-)=i_2(0_-)=\frac{E}{R_1+R_2}=\frac{36}{2+2}=9\ (\mathrm{A})$$

$$u_C(0_-)=R_2 i_2(0_-)=2\times 9=18\ (\mathrm{V})$$

根据换路定则，有

$$i_2(0_+)=i_2(0_-)=9\ (\mathrm{A})$$

$$u_C(0_+)=u_C(0_-)=18\ (\mathrm{V})$$

再根据替代原理，得出换路后一瞬间的等效电路如图 1-100（c）所示。由此算出

$$i_3(0_+)=\frac{E-u_C(0_+)}{R_3}=\frac{36-18}{3}=6\ (\mathrm{A})$$

$$i_1(0_+)=i_2(0_+)+i_3(0_+)=9+6=15\ (\mathrm{A})$$

$$u_L(0_+)=E-R_2 i_2(0_+)=36-2\times 9=18\ (\mathrm{V})$$

可以看出，在开关 S 闭合时，电感端电压由零跃变到 18V，电容中电流由零跃变到 6A。

二、一阶电路分析计算

只包含一个储能元件（电容或电感）的电路，称为一阶电路，因为这种电路是用一阶微分方程来描述的。当储能元件是线性电容或电感时，所得微分方程是一阶常系数线性微分方程。

（一）一阶电路的零输入响应

电路在输入为零（即无外加激励）时，由非零初始状态

引起的响应叫做零输入响应。因此它与电路的初始状态和电路的特性有关。电路的初始状态就是电容电压的初始值 $u_C(0_+)$ 或电感电流的初始值 $i_L(0_+)$，而时间常数 τ 则体现了一阶电路的固有特性。

在 RC 电路中，电容电压满足

$$RC\frac{du_C}{dt}+u_C=0\ (t\geqslant 0) \tag{1-128}$$

其解答为

$$u_C=u_C(0_+)\,e^{-\frac{t}{\tau}}\quad (t\geqslant 0) \tag{1-129}$$

$$\tau=RC \tag{1-130}$$

在 RL 电路中，电感电流满足

$$\frac{L}{R}\frac{di_L}{dt}+i_L=0\quad (t\geqslant 0) \tag{1-131}$$

其解答为

$$i_L=i_L(0_+)\,e^{-\frac{t}{\tau}}\quad (t\geqslant 0) \tag{1-132}$$

$$\tau=\frac{L}{R} \tag{1-133}$$

因为在没有外加激励的情况下，电容或电感中的储能总要逐渐衰减到零，所以 u_C 和 i_L 都是随时间按照指数规律逐渐衰减到零的。

由于电路中电阻元件的电压和电流的关系是欧姆定律，电容和电感的电压和电流的关系是微分或积分形式，而一个指数函数的导数或微分仍然是一个指数函数，所以一阶电路中所有的电压和电流都具有相同的时间常数。

例 1-95 图 1-101（a）中，当开关 S 闭合后，电容器充电，求电路的时间常数 τ 是多少？已知 $E=9V$，$R_1=6k\Omega$，$R_2=3k\Omega$，$C=1000pF$。

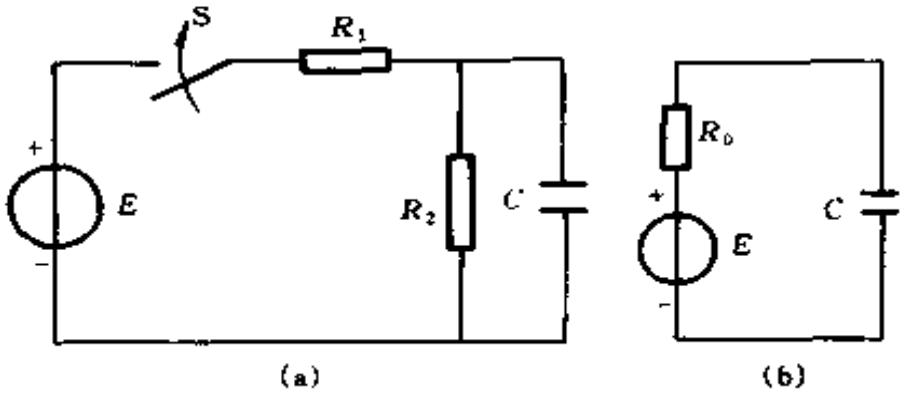


图 1-101　例 1-95 电路

(a) 原电路 (b) 等效电路

解　应用戴维南定理将图 1-101 (a) 等效为图 1-101 (b) 所示的电路

$$\tau = R_0 C$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2 \ (\mathrm{k\Omega})$$

所以　$\tau = 2 \times 10^3 \times 1000 \times 10^{-12} = 2 \times 10^{-6}$ (s)

例 1-96　在图 1-102 (a) 中，已知 $R_1 = 3\mathrm{k\Omega}$，$R_2 = 3\mathrm{k\Omega}$，$R_3 = 6\mathrm{k\Omega}$，$C = 5\mu\mathrm{F}$，开关 S 打开时电容已充电到 15V，极性如图中所示。在 $t = 0$ 时将开关 S 闭合，试求开关闭合后 u_C、i_1、i_2、i_3 随时间而变化的规律。

解　应用戴维南定理将图 1-102 (a) 等效为图 1-102 (b) 所示的电路

等效电阻

$$R_{ab} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 3 + \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 5 \ (\mathrm{k\Omega})$$

时间常数

$$\tau = R_{ab} C = 5 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-6} = 0.025 \ (\mathrm{s})$$

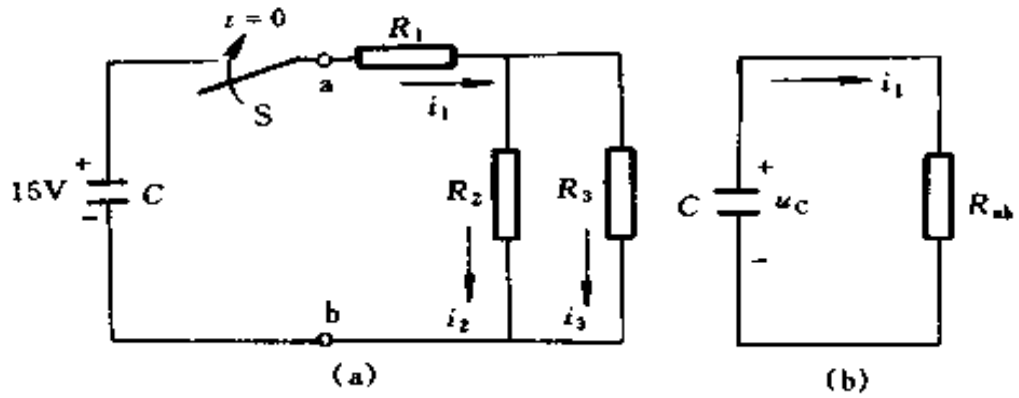


图 1-102　例 1-96 电路

(a) 原电路；(b) 等效电路

根据式（1-129），可知电容电压

$$u_C = 15e^{-\frac{t}{0.025}} = 15e^{-40t}\ (\mathrm{V}) \qquad (t \geqslant 0)$$

放电电流为

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{15}{5\times10^3}e^{-40t} \\ &= 3\times10^{-3}e^{-40t}\ (\mathrm{A}) \\ &= 3e^{-40t}\ (\mathrm{mA}) \qquad t\ (\geqslant 0) \end{aligned}$$

根据分流公式，可求出

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{R_3}{R_2+R_3}i_1 = \frac{6}{3+6}\times3\times10^{-3}e^{-40t} \\ &= 2\times10^{-3}e^{-40t}\ (\mathrm{A}) = 2e^{-40t}\ (\mathrm{mA}) \qquad (t\geqslant 0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_3 &= \frac{R_2}{R_2+R_3}i_1 = \frac{3}{3+6}\times3\times10^{-3}e^{-40t} \\ &= 1\times10^{-3}e^{-40t}\ (\mathrm{A}) = e^{-40t}\ (\mathrm{mA}) \qquad (t\geqslant 0) \end{aligned}$$

（二）一阶电路的零状态响应

一阶电路在零初始状态下对外加激励的响应，也就是说，在激磁开始作用前的一瞬间储能元件没有储存能量的电路对外加激励的响应，叫做零状态响应。它满足非齐次微分

方程，其解答包含两部分，一是特解；一是相对应的齐次方程的通解。当外加激励为直流电压或电流时，无论是电容电压或者是电感电流都是从零按照指数规律上升到它的稳态值的，u_C 和 i_L 都含有一个因子 $(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$，其中，τ 与零输入响应时相同。具体分析请看下面的例题。

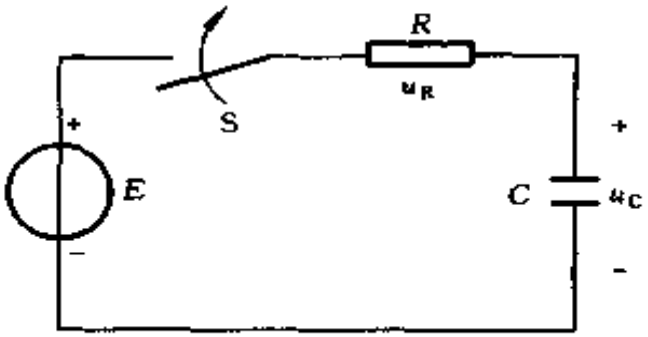


图 1-103　例 1-97 电路

例 1-97　在图 1-103 的电路中，电容原未被充电。已知 $E=100\text{V}$，$R=1000\Omega$，$C=10\mu\text{F}$。在 $t=0$ 时将开关 S 闭合，问：（1）$t\geqslant 0$ 时的 u_C 和 i 是多少？（2）u_C 达到 50V 所需的时间是多少？

解　（1）换路后电路的微分方程为

$$RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=E \tag{1-134}$$

$$u_C=u_{cp}+u_{ch} \tag{1-135}$$

式（1-135）中，u_{cp}为一阶常系数线性非齐次微分方程的特解；u_{ch}为相对应的齐次微分方程的通解。

当电路到达稳态后，电容相当于开路。因此有

$$u_{cp}=E=100\text{V}$$

u_{ch}为下式的通解

$$RC\frac{\mathrm{d}u_{ch}}{\mathrm{d}t}+u_{ch}=0$$

故　$$u_{ch}=A\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}=A\mathrm{e}^{-\frac{t}{1000\times10\times10^{-6}}}=A\mathrm{e}^{-100t}$$

所以 $$u_C = 100 + Ae^{-100t}$$

因 $$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$$

于是 $$0 = 100 + A$$

即 $$A = -100$$

$$u_C = 100 - 100e^{-100t} = 100(1 - e^{-100t})\ (\mathrm{V}) \qquad (t \geqslant 0)$$

$$\begin{aligned} i &= C\frac{du_C}{dt} \\ &= 10 \times 10^{-6} \times 100 \times 100e^{-100t} \\ &= 0.1e^{-100t} \quad (\mathrm{A}) \qquad (t \geqslant 0) \end{aligned}$$

(2) 设开关S闭合后，经过 t_1s，u_C 充电到50V，则

$$50 = 100(1 - e^{-100t_1})$$

$$100e^{-100t_1} = 50$$

$$-100t_1 = \ln 0.5 = -0.693$$

$$t_1 = \frac{0.693}{100} = 0.00693\ (\mathrm{s}) = 6.93\ (\mathrm{ms})$$

(三) 一阶电路的全响应

当输入和初始状态都不为零时，电路的响应叫做全响应。全响应可以分解为两个分量：即强制分量和自由分量。当外加激磁为常量或周期函数时，强制分量又叫稳态分量。强制（稳态）分量只与输入激励有关，当输入为直流时，稳态分量也是恒定的；当输入为正弦量时，稳态分量也是同频率的正弦量。自由分量也叫暂态分量，它既与初始状态有关，也与输入有关，但其变化规律则与输入无关。

全响应也可以从叠加的观点分解为两个分量：即零输入响应和零状态响应。在求电路的全响应时，可以把非零初始电容电压和非零初始电感电流作为一种理想电压源和理想电流源看待，这些特殊电源与外加输入电源共同作用在电路

上，然后利用叠加原理分别进行计算。当外加电源为零时，得到的是零输入响应；当特殊电源为零时，得到的是零状态响应。

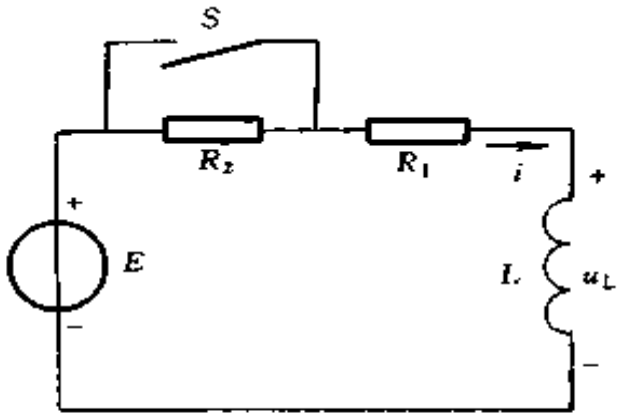


图 1-104　例 1-98 电路

零输入响应和暂态分量都满足齐次方程，它们的形式相同，但常数不同。暂态分量的常数是在最后才确定的，它必然和稳态分量也有关系，因而暂态分量的常数与输入也有关系，它是初始条件和稳态分量的初始值之差。零输入响应则与输入无关，它的常数只与初始条件有关。

例 1-98　在图 1-104 所示电路中，在 $t=0$ 时将开关 S 打开，S 打开前电路已达稳态。已知 $E=12\text{V}$，$R_1=2\Omega$，$R_2=4\Omega$，$L=0.6\text{H}$。求开关 S 打开后电路中的电流 i 及电感电压 u_L 是多少？

解　换路前

$$i\ (0_-)\ =\frac{E}{R_1}=\frac{12}{2}=6\ (\text{A})$$

换路后，电流 i 的稳态分量为

$$i_p=\frac{E}{R_1+R_2}=\frac{12}{2+4}=2\ (\text{A})$$

电流 i 的暂态分量为

$$i_h=Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

电路的时间常数为

$$\tau=\frac{L}{R_1+R_2}=\frac{0.6}{2+4}=0.1\ (\mathrm{s})$$

故 $$i=i_p+i_h=2+Ae^{-\frac{t}{0.1}}=2+Ae^{-10t}$$

根据换路定则，有

$$i\ (0_+)=i\ (0_-)=I_0=6\ (\mathrm{A})$$

因而 $$I_0=i_p+A$$

即 $$A=I_0-i_p=6-2=4\ (\mathrm{A})$$

所以 $$i_h=4e^{-10t}$$

$$i=i_p+i_h=2+4e^{-10t}\ (\mathrm{A})\qquad (t\geqslant 0)$$

电感电压为

$$\begin{aligned}u_L&=L\frac{di}{dt}\\&=0.6\times 4\times(-10)\ e^{-10t}\\&=-24e^{-10t}\ (\mathrm{V})\qquad (t\geqslant 0)\end{aligned}$$

本题也可用下列方法求解：

电流的零输入响应为

$$i'=i\ (0_+)\ e^{-\frac{t}{\tau}}=6e^{-10t}$$

电流的零状态响应为

$$\begin{aligned}i''&=\frac{E}{R_1+R_2}\ (1-e^{-\frac{t}{\tau}})\\&=\frac{12}{2+4}\ (1-e^{-10t})=2\ (1-e^{-10t})\end{aligned}$$

故电路的全响应为

$$\begin{aligned}i&=i'+i''=6e^{-10t}+2-2e^{-10t}\\&=2+4e^{-10t}\ (\mathrm{A})\qquad (t\geqslant 0)\end{aligned}$$

计算结果相同。

（四）求解一阶电路全响应的三要素法

在一阶电路中，可用下列公式来求解过渡过程，即

$$f(t)=f(\infty)+\{f(0_+)-[f(\infty)]_{t=0_+}\}e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1-136}$$

式中 $f(t)$——待求量；

$f(\infty)$——待求的稳态解，即稳态分量；

$f(0_+)$——待求量的初始值；

τ——电路的时间常数。

τ、$f(\infty)$ 和 $f(0_+)$ 这三个基本量，叫做三要素。只要熟练地判断出这 3 个量，将其代入式（1-136）中，过渡过程的问题就迎刃而解了。

对于外加激励是直流的情况，$f(\infty)$ 不是时间的函数，即 $[f(\infty)]_{t=0+}=f(\infty)$，则上式可变为

$$f(t)=f(\infty)+[f(0_+)-f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1-137}$$

1. 用三要素法计算 *RC* 电路充电过程的电流和电压

图 1-103 为 *RC* 串联电路（充电），现分析计算如下：

（1）零状态 $[u_C(0_-)=0]$

根据式（1-137）有

$$u_C=u_C(\infty)+[u_C(0_+)-u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

因 $u_C(\infty)=E$

$u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$

$$\tau=RC$$

所以 $u_C=E-Ee^{-\frac{t}{RC}}=E(1-e^{-\frac{t}{RC}})\qquad(t\geqslant 0)$

$$i(t)=i(\infty)+[i(0_+)-i(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

因 $i(\infty)=0$

$$i(0_+)=\frac{E}{R}$$

$$\tau=RC$$

所以 $$i=\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t\geqslant 0)$$

$$u_R=Ri=Ee^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t\geqslant 0)$$

(2) 非零状态 $[u_C(0_-)=u_{CO}]$

因 $$u_C(0_+)=u_C(0_-)=u_{CO}$$

$$u_C(\infty)=E$$

$$\tau=RC$$

所以 $$u_C=E+(u_{CO}-E)e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t\geqslant 0)$$

因 $$i(0_+)=\frac{E-u_C(0_+)}{R}=\frac{E-u_{CO}}{R}$$

$$i(\infty)=0$$

$$\tau=RC$$

所以 $$i=\frac{E-u_{CO}}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t\geqslant 0)$$

2. 用三要素法计算 RC 电路放电过程电流和电压

在图 1-105 中，电路已稳定，$u_C=E$，在 $t=0$ 时，开关 S 从 1→2，电容器 C 放电。

因 $u_C(0_+)=u_C(0_-)$

$=E$

$u_C(\infty)=0$

$\tau=RC$

所以 $u_C=Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (t\geqslant 0)$

因 $i(0_+)=-\frac{E}{R}$

$i(\infty)=0$

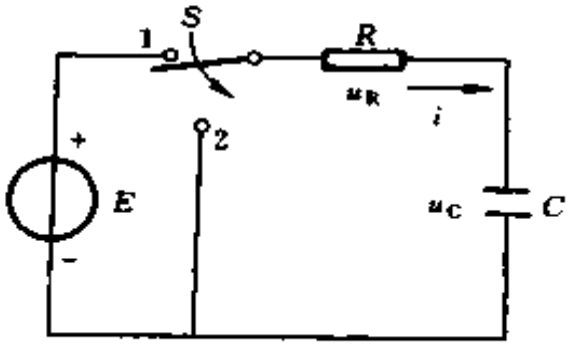


图 1-105 RC 串联电路（放电）

$$\tau = RC$$

所以 $$i = -\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t \geqslant 0)$$

$$u_R = Ri = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \qquad (t \geqslant 0)$$

3. 用三要素法计算 RL 电路过渡过程电流和电压

(1) RL 电路与直流电压源接通（图 1-106）

1）电路电流

$$i(0_+) = 0$$

$$i(\infty) = \frac{E}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$i = \frac{E}{R} + \left(0 - \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \qquad (t \geqslant 0)$$

2）电路电压

$$u_L(0_+) = E$$

$$u_L(\infty) = 0$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

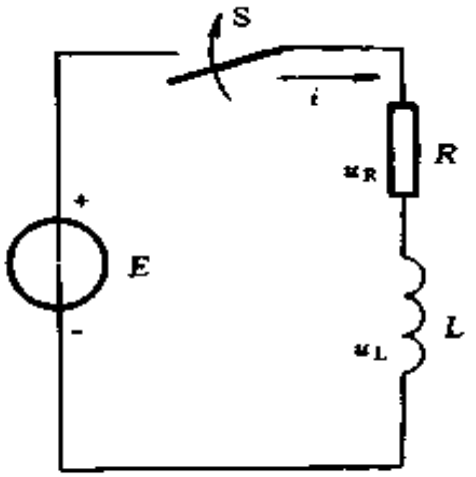


图 1-106 RL 与电压源串联电路

$$u_L = 0 + (E - 0)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$= Ee^{-\frac{R}{L}t} \quad (t \geqslant 0)$$

$$u_R = Ri = E(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

$$(t \geqslant 0)$$

(2) RL 电路稳定后从电源断开并短接（图 1-107）

1）电路电流

$$i(0_-)=\frac{E}{R}$$

$$i(0_+)=i(0_-)=\frac{E}{R}$$

$$i(\infty)=0$$

$$\tau=\frac{L}{R}$$

$$i=0+\left(\frac{E}{R}-0\right)e^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{E}{R}e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$(t\geqslant 0)$$

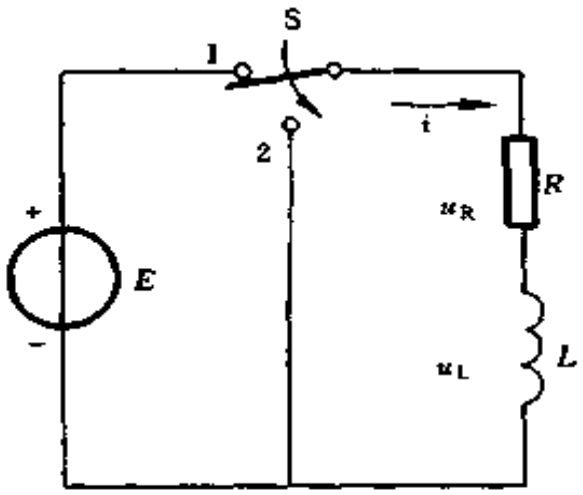


图 1-107　*RL* 短接电路

2）电路电压

$$u_L=u_R=-Ri=-\frac{E}{R}Re^{-\frac{R}{L}t}=-Ee^{-\frac{R}{L}t}\qquad(t\geqslant 0)$$

例 1-99　图 1-108 所示电路中，输入电压信号 $u_i(t)$ 是矩形波，输出电压信号 $u_o(t)$ 是尖脉冲波，用作自动控制系统中的触发信号，要求尖脉冲波形幅值为 5V，脉冲波宽度 $t_p=0.001s$，求矩形波的幅值及脉宽 t_w 应是多少？

解　要产生尖脉冲波形，$t_W\gg\tau$，一般取 $t_W\geqslant 10\tau$，这样的电路称为微分电路。

尖脉冲宽度是从其幅值 U_{om}，下降到 $0.1U_{om}$所需要的时间 t_p，因

$$u_o=U_{im}e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$RC=\tau$$

故有　$$0.1U_{om}=U_{im}e^{-\frac{t_p}{RC}}$$

取　$$U_{om}=U_{im}$$

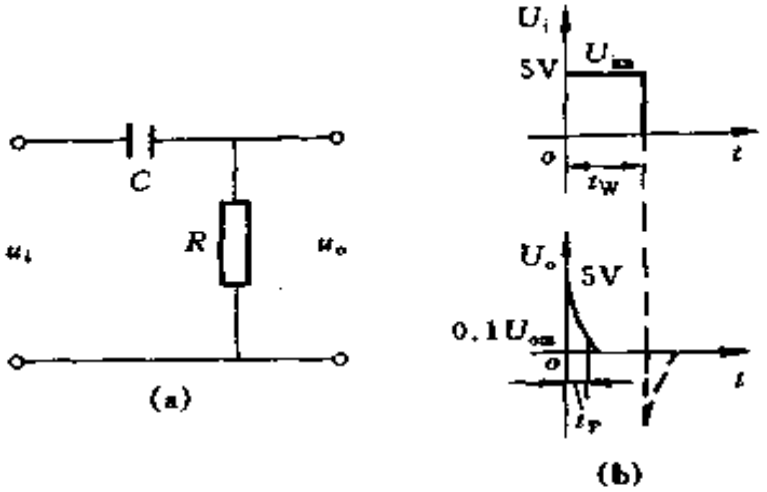


图 1-108　例 1-99 电路

(a) 电路图；(b) 波形图

则有
$$0.1U_{im}=U_{im}e^{-\frac{t_p}{\tau}}$$
即
$$0.1=e^{-\frac{t_p}{\tau}}$$
$$\ln 0.1=-\frac{t_p}{\tau}$$
$$\tau=\frac{-t_p}{\ln 0.1}=\frac{-t_p}{-2.303}=\frac{0.001}{2.303}=0.0004\ (\mathrm{s})$$

取矩形波宽 $t_W=10\tau=0.004$ (s)

矩形波幅值 U_{im} = 尖脉冲波形幅值 $U_{om}=5\mathrm{V}$。

例 1-100　在图 1-109 电路中，R、L 是直流发电机励磁线圈的内阻和电感，电感较大，R_e 是调节励磁电流用的。当开关 S 将电源断开时，为了防止开关触头烧坏，用一个泄放电阻 R_d 与线圈连接，同时电源断开，经过一段时间后，再将开关扳到 3 的位置，使电路完全断开。已知：$E=220\mathrm{V}$，$L=10\mathrm{H}$，$R=80\Omega$，$R_e=30\Omega$，在电路已达稳定状态时，开关断开电源而与 R_d 接通。试求：（1）设 $R_d=1000\Omega$，开关接通 R_d 后的 $u_{RL}(0_+)$ 是多少？（2）为了使

$u_{RL}(0_+)$ 不超过 220V，R_d 应为多少？(3) 写出 u_{RL} 的表达式。

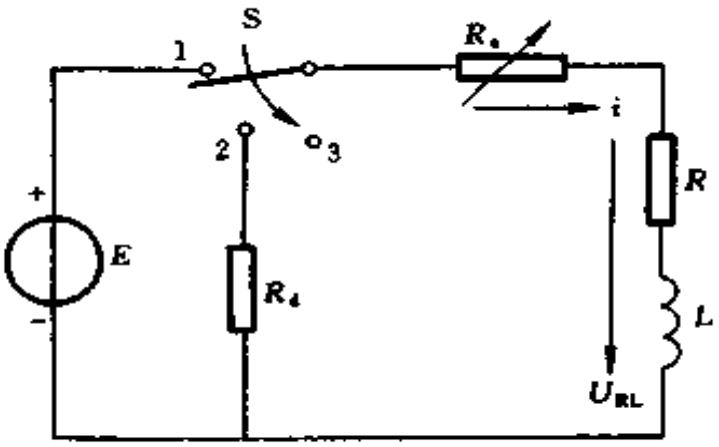


图 1-109　例 1-100 电路

解　换路前（S 置 1 处）

$$i=\frac{E}{R_e+R}=\frac{220}{30+80}=2\ (\mathrm{A})$$

(1)
$$\begin{aligned}u_{RL}(0_+)&=i(0_+)(R_e+R_d)\\&=i(0_-)(R_e+R_d)\\&=2\times(30+1000)=2060\ (\mathrm{V})\end{aligned}$$

(2)
$$u_{RL}(0_+)=i(0_+)(R_e+R_d)$$
$$220=2\times(30+R_d)$$
$$R_d=\frac{160}{2}=80\ (\Omega)$$

可选取 $R_d\leqslant 80\ (\Omega)$，这样可以使 $u_{RL}(0_+)\leqslant 220$ (V)

(3)
$$\begin{aligned}u_{RL}&=-Ee^{-\frac{R+R_e+R_d}{L}t}\\&=-220e^{-\frac{80+30+80}{10}t}\\&=-220e^{-19t}\ (\mathrm{V})\qquad(t\geqslant 0)\end{aligned}$$

三、二阶电路分析计算

用二阶微分方程来描述的电路统称为二阶电路，包含一个电感和一个电容的电路是这类电路的典型例子，简称 *RLC* 电路。*RLC* 电路过渡过程的性质取决于电路元件的参数。

（一）*RLC* 电路放电过程的电流和电压计算

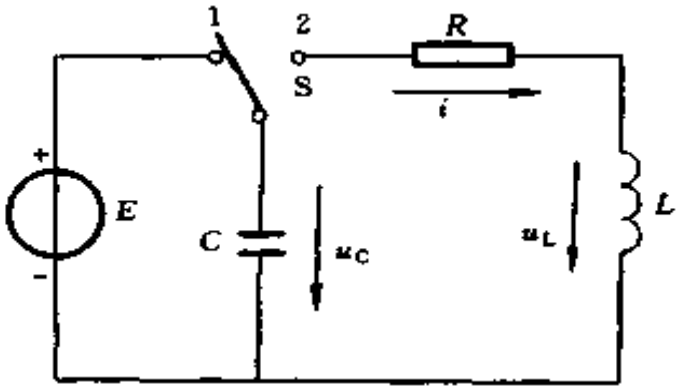


图 1-110　*RLC* 放电电路

在图 1-110 所示电路中，开关 S 在位置 1 时已充电结束，即 $u_C(0_-)=E$。在 $t=0$ 时，S 扳到位置 2，电路发生放电过渡过程。该电路的微分方程为：

$$LC\frac{d^2u_C}{dt^2}+RC\frac{du_C}{dt}+u_C=0 \quad (t\geqslant 0) \qquad (1\text{-}138)$$

这是一个二阶常系数线性微分方程。为了求解上述方程，先设 $u_C=Ae^{pt}$，代入式（1-138），就得到它的特征方程：

$$LCp^2+RCp+1=0 \qquad (1\text{-}139)$$

式（1-139）的根，即特征根为

$$p_1=-\frac{R}{2L}+\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\frac{1}{LC}} \qquad (1\text{-}140)$$

$$p_2=-\frac{R}{2L}-\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\frac{1}{LC}} \tag{1-141}$$

电流和电压的计算可分3种情况：

1．$R>2\sqrt{\frac{L}{C}}$的情况（非振荡放电过程）

$$u_C=\frac{E}{p_2-p_1}\left(p_2e^{p_1t}-p_1e^{p_2t}\right) \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-142}$$

$$i=-\frac{E}{L\left(p_2-p_1\right)}\left(e^{p_1t}-e^{p_2t}\right) \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-143}$$

$$u_L=-\frac{E}{p_2-p_1}\left(p_1e^{p_1t}-p_2e^{p_2t}\right) \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-144}$$

$$u_R=-\frac{RE}{L\left(p_2-p_1\right)}\left(e^{p_1t}-e^{p_2t}\right) \qquad (t\geqslant 0) \tag{1-145}$$

u_C、u_L、i 随时间变化的曲线如图1-111所示。由式（1-140）和式（1-141）可知，p_1、p_2都是负的，且$|p_1|<|p_2|$，即$p_1>p_2$，故$t>0$时，$e^{p_1t}>e^{p_2t}$，电压u_C从E开始一直单调地衰减到零，即电容一直处于放电状态。由于$p_2-p_1<0$，电流i始终为正，也说明电容一直处于放电状态，u_C一定是单调下降的。当$t=0$时，$i=0$，当$t=\infty$时，仍有$i=0$，而在放电过程中始终有$i>0$，且是连续的，所以i一定有一个极大值i_{max}，这个极大值发生在$t=t_m$，即$di/dt=0$或$u_L=0$之时，因而有

$$p_1e^{p_1t_m}-p_2e^{p_2t_m}=0$$

或

$$\frac{e^{p_1t_m}}{e^{p_2t_m}}=e^{(p_1-p_2)t_m}=\frac{p_2}{p_1}$$

故

$$t_m=\frac{\ln\frac{p_2}{p_1}}{p_1-p_2}$$

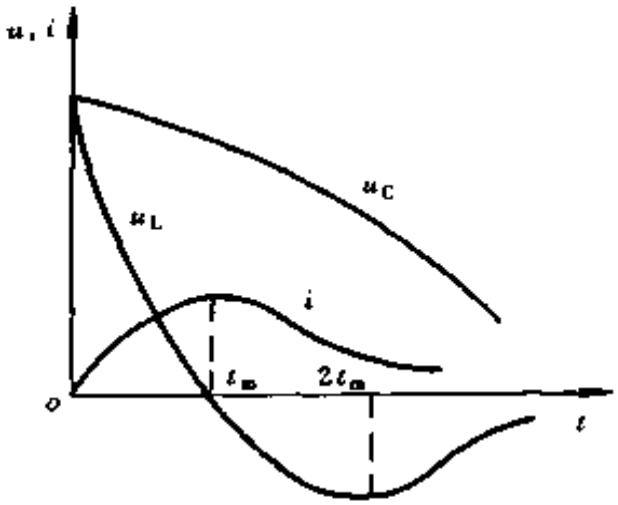


图 1-111　非振荡放电过程中 u_C、u_L 和 i 随时间变化的曲线

放电开始，即 $t=0$ 时，由于 $i=0$，$u_R=0$，故电感电压 $u_L=u_C=E$。在 t_m 以前，因为电流是增长的，$di/dt>0$，故电感电压 u_L 为正；在 t_m 时刻，$di/dt=0$，电感电压 $u_L=0$；在 t_m 以后，因为电流不断减小，$di/dt<0$，故电感电压 u_L 为负。

放电终了，即 $t=\infty$ 时，电感电压 u_L 又为零。因此在两个零值之间，电感电压 u_L 有一个最小值。对 u_L 求导一次，然后令 $du_L/dt=0$，就可以确定 u_L 极小值发生的时间为

$$t=\frac{2\ln\frac{p_2}{p_1}}{p_1-p_2}=2t_m$$

在整个放电过程中，能量的转换是按下述方式进行的。在 $0<t<t_m$ 期间，u_C 减小，i 增大，说明电容不断释放能量，电场能量减少；电感不断吸收能量，磁场能量增加；而电阻则总是消耗能量的。在这个阶段中，电容放出的电场能

量，一部分转化为磁场能量储存在电感中，一部分则为电阻所消耗。当 $t>t_m$ 时，u_C 和 i 都在不断减小，电容和电感都向外释放能量，它们放出的能量全部为电阻所消耗。

2. $R<2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 的情况（振荡放电过程）

$$u_C=\frac{\omega_0}{\omega'}Ee^{-\delta t}\sin\left(\omega' t+\operatorname{arctg}\frac{\omega'}{\delta}\right)\quad(t\geqslant 0)\tag{1-146}$$

$$i=\frac{E}{\omega' L}e^{-\delta t}\sin\omega' t\quad(t\geqslant 0)\tag{1-147}$$

$$u_L=\frac{\omega_0}{\omega'}Ee^{-\delta t}\sin\left(\omega' t+\pi-\operatorname{arctg}\frac{\omega'}{\delta}\right)\quad(t\geqslant 0)\tag{1-148}$$

$$\omega'=\sqrt{\omega_0^2-\delta^2}\tag{1-149}$$

$$\delta=\frac{R}{2L}\tag{1-150}$$

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}\tag{1-151}$$

式中 δ——衰减系数，它的数值越大，振荡过程中衰减得越快；

ω'——电路的固有振荡角频率。

u_C、i 及 u_L 随时间变化的曲线如图 1-112 所示。由曲线和式（1-146）、（1-147）、（1-148）可以看出，u_C、i 和 u_L 都是振幅按照指数规律 $e^{-\delta t}$ 衰减的同频率的正弦量，这种过程叫做衰减振荡的放电过程。

在理想情况下，即电路中没有电阻时，则 $\delta=R/2L=0$，$\omega'=\omega_0=1/\sqrt{LC}$，故有

$$u_C = E\sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (t \geqslant 0) \qquad (1\text{-}152)$$

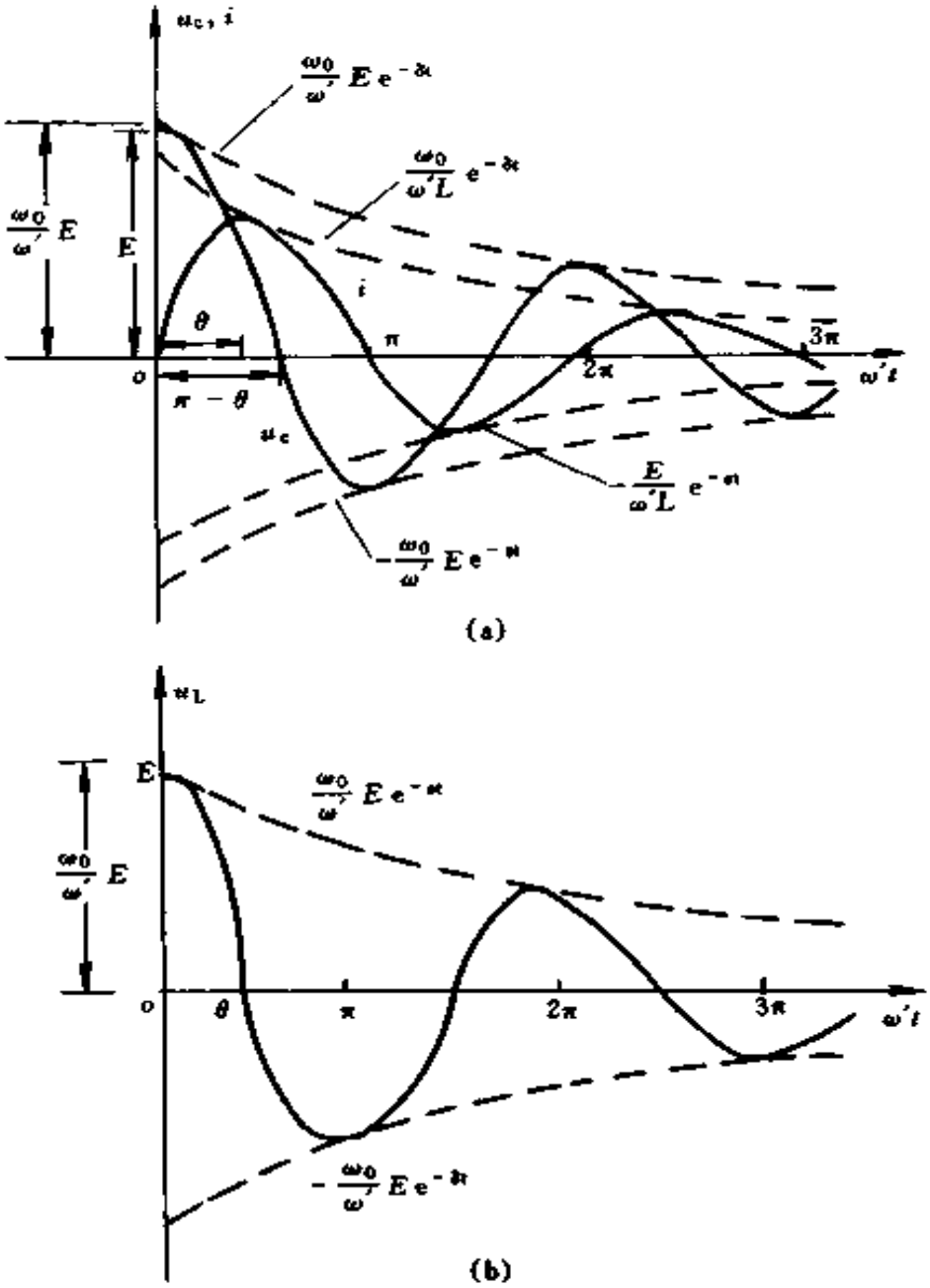


图 1-112　振荡放电过程中 u_C、i_L 和 u_L 随时间变化的曲线

(a) u_C 和 i 曲线；(b) u_L 曲线

$$i=\frac{E}{\omega_0 L}\sin\omega_0 t \quad (t\geqslant 0) \tag{1-153}$$

$$u_L=E\sin\left(\omega_0 t-\frac{\pi}{2}\right) \quad (t\geqslant 0) \tag{1-154}$$

即 u_C、i、u_L 都是正弦函数，它们的振幅并不衰减。这时，振荡会无限制地持续下去，形成等幅自由振荡。

3．$R=2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 的情况（非振荡放电过程）

$$u_C=E\ (1+\delta t)\ e^{-\delta t} \quad (t\geqslant 0) \tag{1-155}$$

$$i=\frac{E}{L}te^{-\delta t} \quad (t\geqslant 0) \tag{1-156}$$

$$u_L=E\ (1-\delta t)\ e^{-\delta t} \quad (t\geqslant 0) \tag{1-157}$$

从上三式可以看出，它们仍属于非振荡放电类型，但是，正好介于非振荡和振荡之间，所以叫做临界非振荡放电的过程。电阻 $R=2\sqrt{L/C}$ 叫做临界电阻。

例 1-101 图 1-113 为高压开关厂试验油断路器熄灭电弧能力的电路，需要在油断路器 QF 中通以数十千安的工频正弦交流电流。首先合上开关 S1，开关 S2 断开，电容器充电到电压 $U_C=U_0$；然后打开 S1，合上 S2，于是电容器对电感线圈放电。已知 $C=3800\mu F$，$U_0=14.14kV$，忽略线圈电阻，试求：(1) 要产生工频电流，L 值应为多少？(2)

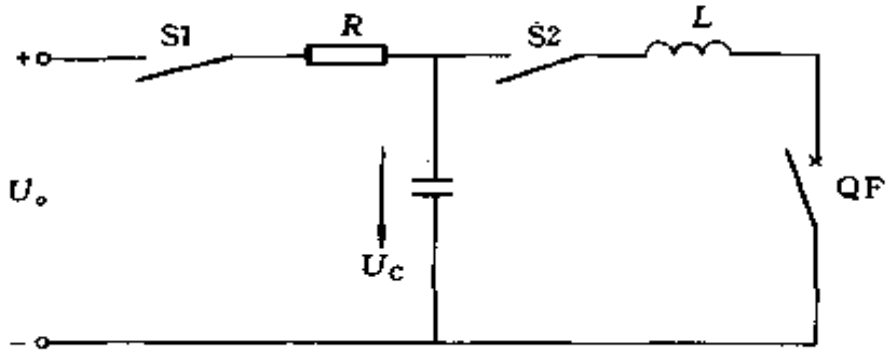


图 1-113 例 1-101 电路

振荡电路放电电流 i 及有效值和电容器两端电压 u_C 是多少?

解 (1) 试验需要电流的频率 $f=50\text{Hz}$，故振荡角频率 $\omega_0=2\pi f=314$ (rad/s)。

因 $R=0$，故

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

所以 $$L=\frac{1}{\omega_0^2C}=\frac{1}{314^2\times3800\times10^{-6}}$$

$$=2.669\times10^{-3}\ (\text{H})\ =2.669\ (\text{mH})$$

(2) 根据式 (1-153) 有

$$i=\frac{14.14\times10^3}{314\times2.669\times10^{-3}}\sin314t$$

$$=16.87\times10^3\sin314t\ (\text{A})\ (t\geqslant0)$$

放电电流幅值

$$I_m=16.87\ (\text{kA})$$

放电电流有效值

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=\frac{16.87}{\sqrt{2}}=11.93\ (\text{kA})$$

(3) 根据式 (1-152) 有

$$u_C=14.14\times10^3\sin\left(314t+\frac{\pi}{2}\right)\ (\text{V})\qquad (t\geqslant0)$$

(二) *RLC* 电路充电过程的电流和电压计算

在图 1-114 所示电路中，电容器原没有充电，即 $u_C(0_-)=0$，在 $t=0$ 时，合上开关 S，直流电源通过 R、L 对电容器 C 充电。充电过程电流和电压计算分三种情况：

1. $R>2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (非振荡的充电过程)

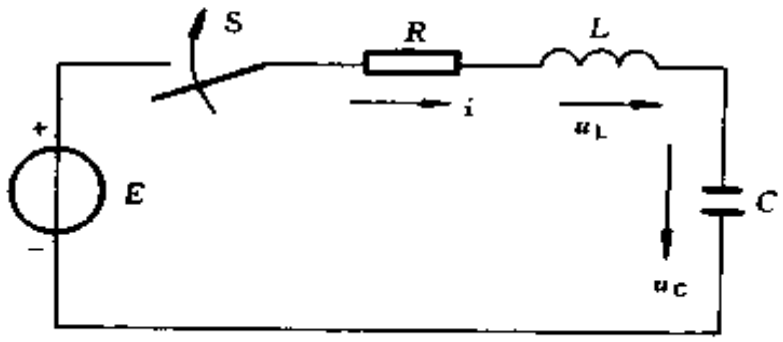


图 1-114　*RLC* 充电电路

$$u_C = E - \frac{E}{p_2 - p_1}\left(p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}\right) \qquad (t \geqslant 0)$$

(1-158)

$$i = \frac{E}{L\ (p_1 - p_2)}\left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right) \qquad (t \geqslant 0) \quad (1\text{-}159)$$

$$u_L = \frac{E}{p_1 - p_2}\left(p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}\right) \qquad (t \geqslant 0) \quad (1\text{-}160)$$

2. $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$（振荡的充电过程）

$$u_C = E - \frac{\omega_0}{\omega'} E e^{-\delta t} \sin\left(\omega' t + \operatorname{arctg}\frac{\omega'}{\delta}\right) \qquad (t \geqslant 0)$$

(1-161)

$$i = \frac{E}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t \qquad (t \geqslant 0) \qquad (1\text{-}162)$$

$$u_L = -\frac{\omega_0}{\omega'_0} E e^{-\delta t} \sin\left(\omega' t - \operatorname{arctg}\frac{\omega'}{\delta}\right) \qquad (t \geqslant 0)$$

(1-163)

3. $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$（临界非振荡的充电过程）

$$u_C = E - E\ (1 + \delta t)\ e^{-\delta t} \qquad (t \geqslant 0) \qquad (1\text{-}164)$$

$$i = \frac{E}{L} t e^{-\delta t} \qquad (t \geqslant 0) \qquad (1\text{-}165)$$

$$u_C = E\ (1 - \delta t)\ e^{-\delta t} \qquad (t \geqslant 0) \qquad (1\text{-}166)$$

例 1-102 图 1-115 是电火花加工设备的 RLC 脉冲电压发生器电路。已知：$E = 300\text{V}$，$R = 50\Omega$，$L = 0.06\text{H}$，$C = 1\mu\text{F}$。试求加工频率和电容器最大充电电压是多少？

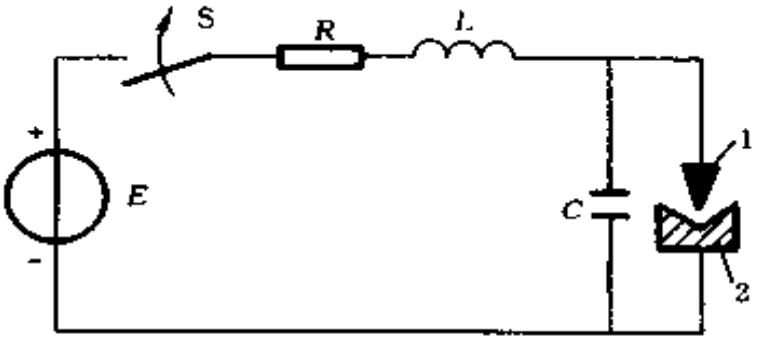


图 1-115 例 1-102 电路

1—工件电极；2—被加工的工件

解 $$2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{0.06}{1 \times 10^{-6}}} = 489.9\ (\Omega)$$

由 $R = 50\Omega$ 可知

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.06 \times 1 \times 10^{-6}}} = 4082\ (\text{rad/s})$$

$$\delta = \frac{R}{2L} = \frac{50}{2 \times 0.06} = 416.7\ (\text{rad/s})$$

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{(4082)^2 - (416.7)^2} = 4061\ (\text{rad/s})$$

加工频率 $f = 2$ 倍振荡频率

故 $$f=\frac{\omega'}{\pi}=\frac{4061}{\pi}=1293\ (\mathrm{Hz})$$

当 $\omega' t=\pi$ 时，$u_C=U_{cm}$，故出现 U_{cm}的时间为

$$t=\frac{\pi}{\omega'}=\frac{\pi}{4061}=7.736\times10^{-4}\ (\mathrm{s})$$

$$\begin{aligned}U_{cm}&=E-\frac{\omega_0}{\omega'}E\mathrm{e}^{-\delta t}\sin\left(\omega' t+\mathrm{arctg}\frac{\omega'}{\delta}\right)\\&=300-\frac{4082}{4061}\times300\mathrm{e}^{-417\times7.73\times10^{-4}}\\&\quad\sin\left(\pi+\mathrm{arctg}\frac{4061}{416.7}\right)\\&=300+\frac{4082}{4061}\times300\mathrm{e}^{-0.3223}\times0.9948\\&=300+216=516\ (\mathrm{V})\end{aligned}$$

第二章

电机及变压器计算

第一节　电机计算

一、电机参数计算

（一）异步电动机

1. 异步电动机的同步转速

异步电动机是依靠定子绕组通入三相电流，产生旋转磁场，磁场切割转子导体，在导体里产生感应电动势，由于转子导体接成闭合回路，而有电流流通，电流在磁场中受到力的作用，从而使转子转动。

异步电动机中旋转磁场的转速，称为同步转速，用符号 n_1 表示。

同步转速 n_1 与电源频率、定子绕组磁极对数的关系用下式表示

$$n_1=\frac{60f}{p} \tag{2-1}$$

式中　n_1——同步转速，r/min；

f——电源频率，Hz；

p——磁极对数。

2. 异步电动机转差率

异步电动机的同步转速 n_1 与转子转速 n_2 的转速差

（即相对转速）与同步转速 n_1 之比，称为异步电动机的转差率，用 s 表示，即

$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1} \tag{2-2}$$

三相异步电动机在额定负载时，其转差率很小，约为0.02～0.06。

由式（2-2）可得，电动机转速

$$n_2=n_1(1-s) \tag{2-3}$$

异步电动机的转差率与转子感应电动势的频率 f_2 有如下关系。

因为旋转磁场以相对速度 $n_1-n_2=sn_1$ 切割转子绕组，所以转子感应电动势的频率

$$f_2=\frac{p(n_1-n_2)}{60}=\frac{pn_1}{60}s=sf_1 \tag{2-4}$$

例 2-1 有一台 10 极异步电动机，接在频率为 50Hz 的电源上，问它的同步转速是多少？

解

$$n_1=\frac{60f}{p}=\frac{60\times50}{5}=600\ (\mathrm{r/min})$$

例 2-2 有一台 6 极异步电动机，其额定转速 $n_N=975$ r/min，电源频率 $f_1=50$Hz，求此电动机在额定负载时的转差率 s 为多少？

解 同步转速 $n_1=\frac{60f_1}{p}=\frac{60\times50}{3}=1000\ (\mathrm{r/min})$

$$s=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{1000-975}{1000}=0.025=2.5\%$$

例 2-3 某异步电动机的转速 $n_2=480$r/min，电源频率为 $f_1=50$Hz，电动机同步转速 $n_1=500$r/min，求磁极对数

p 和转差率 s 各为多少?

解
$$p=\frac{60f_1}{n_1}=\frac{60\times 50}{500}=6$$
$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1}=\frac{500-480}{500}=0.04=4\%$$

例 2-4 有一台 8 极异步电动机，其转差率 $s=4\%$，电源频率 $f_1=50\text{Hz}$，求电动机转速和转子电流频率各为多少?

解 电动机转速
$$n_2=\frac{60f}{p}(1-s)$$
$$=\frac{60\times 50}{4}(1-0.04)$$
$$=750\times 0.96=720\ (\text{r/min})$$
转子电流频率
$$f_2=sf_1=0.04\times 50=2\ (\text{Hz})$$

3. 异步电动机的主要技术数据及其换算

(1) 额定功率 P_N。电动机在额定条件下的输出功率，叫额定功率，也叫额定容量。单位是 kW。

(2) 额定电压 U_N。电动机正常运行时，定子绕组端应加的线电压。

(3) 额定电流 I_N。在额定电压和额定频率的电源下，负载达到额定功率时的定子电流，称电动机的额定电流或满载电流。

(4) 额定转速。电动机在额定电压，额定频率并满载工作时，转子每分钟的转数称额定转速。

(5) 额定功率因数 $\cos\varphi_N$。电动机在额定电压及频率下，以额定功率工作时的功率因数，称额定功率因数。

（6）效率 η。电动机轴上的输出功率与输入功率的比称为效率。

（7）额定转矩 T_N。电动机在额定输入和额定转速下的轴端转矩，称额定转矩。

$$T_N = 9555\frac{P_N}{n_N} \tag{2-5}$$

式中　T_N——额定转矩，N·m；

P_N——额定功率，kW；

n_N——额定转速，r/min。

电动机的额定功率 P_N 可用下式计算

$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N \eta \tag{2-6}$$

（8）起动转矩 T_s。电动机在接通电源的一瞬间（$s=1$，$n_2=0$）的电磁转矩，称为起动转矩。起动转矩大于电动机轴上的反转矩时，转子便旋转起来。

（9）过载能力（过载系数）λ_m。最大转矩 T_m 与额定转矩的比值，称为电动机的过载能力。

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} \tag{2-7}$$

异步电动机的过载能力一般为 1.8～2.5。

起重、冶金用异步电动机过载能力可达 3.3～3.4。

（10）起动能力 λ_s。起动转矩 T_s 与额定转矩的比值，称为电动机的起动能力。

$$\lambda_s = \frac{T_s}{T_N} \tag{2-8}$$

异步电动机的起动能力一般为 1.1～1.8。

4. 异步电动机减压起动时起动电流和起动转矩的计算方法

笼型异步电动机减压起动的方法常用的有两种：

（1）星三角减压起动。如果电动机在正常运转时作三角形联结，起动时可先把它接成星形，使加在每相绕组上的电压降低到额定值的 $1/\sqrt{3}$，可使起动电流减少，图 2-1 是定子绕组的两种联结，Z 是电动机起动时，定子绕组每相的等值阻抗。

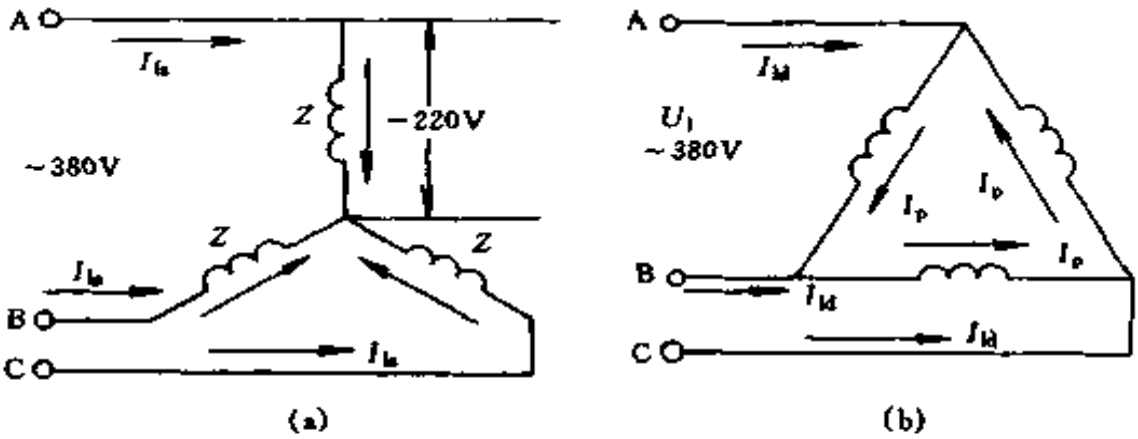


图 2-1　定子绕组的两种联结

（a）起动时作星形联结；（b）运转时作三角形联结

定子绕组作三角形联结直接起动时，电网线电流是绕组每相电流的$\sqrt{3}$倍，即

$$I_{ld}=\sqrt{3}I_p=\sqrt{3}\frac{U_l}{Z}$$

定子绕组作星形联结减压起动时，电网线电流就是定子绕组每相电流，即

$$I_{ls}=\frac{U_l}{\sqrt{3}Z}$$

比较两种联结起动时的起动电流，得到

$$\frac{I_{ls}}{I_{ld}}=\frac{\dfrac{U_l}{\sqrt{3}Z}}{\dfrac{\sqrt{3}U_l}{Z}}=\frac{U_l}{\sqrt{3}Z}\times\frac{Z}{\sqrt{3}U_l}=\frac{1}{3} \tag{2-9}$$

这就是说，在同样电源电压下，用星形联结减压起动时，起动电流只有用三角形联结直接起动时的 1/3。下面再来分析起动转矩的变化情况。因为异步电动机的转矩与加在定子绕组两端电压的平方成正比，所以

$$\frac{T_{ss}}{T_{sd}}=\left(\frac{\dfrac{U_l}{\sqrt{3}}}{U_l}\right)^2=\left(\frac{U_l}{\sqrt{3}}\times\frac{1}{U_l}\right)^2=\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2=\frac{1}{3} \tag{2-10}$$

这就是说，星形联结减压起动时，起动转矩也降低，只有三角形联结直接起动时的 1/3，故星角减压起动只适用于轻载或空载起动。

（2）自耦变压器减压起动。它是利用三相自耦变压器，将电动机接在自耦变压器二次侧，使加在定子绕组上的电压小于电网电压，从而可减少起动电流。

三相自耦变压器通常作星形联结，采用了三相自耦变压器后，起动电流究竟能降低多少，起动转矩又有什么变化，现分别说明如下：

1）通常自耦变压器有 80%、65% 两种抽头方式。设自耦变压器一次电压为 U_1，电流为 I_1，二次电压（加到电动机定子上的电压）为 U_2，二次电流（加到电动机定子上的电流）为 I_2，有

$$\frac{I_1}{I_2}\approx\frac{U_2}{U_1}$$

如自耦变压器抽头为 65%，则 $U_2=65\%\,U_l$

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{65\%U_1}{U_1}=65\%$$

$$I_1=65\%I_2$$

若电动机直接起动，加在电动机上的起动电流为 I_s，现加在电动机上的电压只有原来的65%，故加在电动机上的电流也只有65%I_s，故对电网来说，电流更小了。

$$I_1=65\%I_2$$

$$I_2=65\%I_s$$

故 $$I_1=65\%\times65\%I_s=43.25\%I_s$$

如抽头为80%，则

$$I_1=80\%\times80\%I_s=64\%I_s$$

2）设全压起动时，起动转矩为 T_s

抽头为65%时，起动转矩＝ $(65\%)^2T_s=42.25\%T_s$

抽头为80%时，起动转矩＝ $(80\%)^2T_s=64\%T_s$

例2-5 已知Y100L2-4型异步电动机的额定功率 $P_N=3kW$，额定电压为220/380V，额定效率 $\eta_N=82.5\%$，额定功率因数 $\cos\varphi_N=0.81$，额定转速 $n_N=1420r/min$，频率 $f_1=50Hz$，电源电压为380V，求电动机额定电流 I_N，额定转矩 T_N，额定转差率 s_N 和定子绕组的磁极对数各为多少？

解 $$I_N=\frac{P_N}{\sqrt{3}U\cos\varphi_N\eta_N}$$

$$=\frac{3000}{\sqrt{3}\times380\times0.81\times0.825}=6.83\ (A)$$

$$T_N=9555\frac{P_N}{n_N}=9555\frac{3}{1420}=20.19\ (N\cdot m)$$

$$s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{1500-1420}{1500}=0.02=2\%$$

$$p=\frac{60f_1}{n_1}=\frac{60\times50}{1500}=2$$

例 2-6 某异步电动机的$\frac{T_s}{T_N}=1.3$，若把电动机的端电压降低 30%（即加在定子绕组上的电压仅为其额定电压的 70%），且起动时轴上的反转矩 $T_L=\frac{1}{2}T_N$，问电动机能否起动，为什么？

解 因异步电动机的转矩与电压的平方成正比，当加在定子绕组上的电压为额定电压的 70%时，电动机的电磁转矩就只有原来转矩的 $(70\%)^2=49\%$。

$$T_s=1.3T_N$$

当端电压降低 30%时，起动转矩

$$T'_s=1.3\times49\%\,T_N=63.7\%\,T_N$$

现轴上反转矩 $T_L=\frac{1}{2}T_N$

$$63.7\%\,T_N>\frac{1}{2}T_N$$

故 $T'_s>T_l$，电动机能够起动。

例 2-7 Y180M-2 型三相异步电动机的额定值 $P_N=22\text{kW}$，$n_N=2940\text{r/min}$，$U_N=380\text{V}$，$I_N=42.2\text{A}$，$\cos\varphi_N=0.89$，$\frac{I_s}{I_N}=7$，$\frac{T_s}{T_N}=2.0$，$\frac{T_m}{T_N}=2.2$，求 η_N，T_N，T_s，T_m 各为多少？当电动机作星形联结时的起动电流 I_s 为多少？

解

$$\eta_N=\frac{P_N}{\sqrt{3}U_NI_N\cos\varphi_N}$$

$$=\frac{22\times1000}{\sqrt{3}\times380\times42.2\times0.89}$$
$$=0.89=89\%$$

$$T_N=9555\frac{P_N}{n_N}=9555\times\frac{22}{2940}=71.5\ (\mathrm{N\cdot m})$$

$$T_s=2.0T_N=2.0\times71.5=143\ (\mathrm{N\cdot m})$$

$$T_m=2.2T_N=2.2\times71.5=157.3\ (\mathrm{N\cdot m})$$

当电动机作星形联结时，

$$I_s=7I_N\times\frac{1}{3}=7\times42.2\times\frac{1}{3}=98.47\ (\mathrm{A})$$

例 2-8 Y200L-4 型异步电动机，额定功率 $P_N=30\mathrm{kW}$，额定电压为 380V，额定电流 $I_N=56.8\mathrm{A}$，$\frac{I_s}{I_N}=7.0$，额定转矩 $T_N=195\mathrm{N\cdot m}$，起动转矩 $T_s=390\mathrm{N\cdot m}$。

（1）如果负载转矩为 300N·m，问在 $U_1=U_N$ 和 $U_1=0.8U_N$ 两种情况下，电动机能否起动？

（2）当电源电压为 380V，如用自耦变压器减压起动，起动时电动机端电压降到电源电压的 64%，问起动转矩和线路起动电流为多少？这时负载转矩应小于多少，电动机才能起动？

解 （1）在 $U_1=U_N$ 时，$T_s=390\ (\mathrm{N\cdot m})>300\ (\mathrm{N\cdot m})$，所以能起动。

在 $U'_1=0.8U_N$ 时，$T_s=(0.8)^2\times390=249.6\ (\mathrm{N\cdot m})$，$T_s<300\ (\mathrm{N\cdot m})$，电动机不能起动。

（2）当电源电压为 380V，电动机作星联结时，直接起动时的起动电流

$$I_s=7.0I_N=7.0\times56.8=397.6\ (\mathrm{A})$$

设用自耦变压器减压起动时，电动机和线路上的起动电

流分别为 I'_s 和 I''_s，则

$$\frac{I'_s}{I_s}=0.64,\ I'_s=0.64\times397.6=254.5\ (A)$$

$$\frac{I''_s}{I'_s}=0.64,\ I''_s=(0.64)^2\times397.6=162.9\ (A)$$

设减压起动时的起动转矩为 T'_s，则

$T'_s=(0.64)^2\times390=159.7\ (N\cdot m)$

故负载转矩应小于 159.7N·m 电动机才能起动。

（二）直流电机

1．电动势方程式

$$E=C_e n\Phi \tag{2-11}$$

$$C_e=\frac{pN}{60a} \tag{2-12}$$

式中 E——感应电动势，V；

n——电机转速，r/min；

Φ——每个磁极的气隙磁通，Wb；

C_e——电机的电动势常数，也叫结构常数，与电机结构有关，对已制造好的电机而言，C_e 为定值；

p——磁极对数；

N——电枢绕组的有效导体数；

a——电枢绕组中的支路对数。

一台已经制造好的电机，p、N、a 都是固定不变的，所以，C_e 是一个不变的常数。这样一来，感应电动势 E 就和气隙磁通 Φ 和电机转速 n 成正比了。

2．转矩方程式

$$T=C_t\Phi I_a \tag{2-13}$$

$$C_t = \frac{pN}{2\pi a} \tag{2-14}$$

式中 T——电机的电磁转矩，N·m；

Φ——每个磁极的气隙磁通，Wb；

I_a——电枢电流，A；

C_t——电机的转矩常数，也是一个与电机结构有关的常数；

p——磁极对数；

N——电枢绕组的有效导体数；

a——电枢绕组中的并联支路对数。

3．电动势常数和转矩常数的关系

因
$$C_e = \frac{pN}{60a}$$
$$C_t = \frac{pN}{2\pi a}$$

所以
$$\frac{C_e}{C_t} = \frac{\frac{pN}{60a}}{\frac{pN}{2\pi a}} = \frac{pN}{60a} \times \frac{2\pi a}{pN} = 0.105 \tag{2-15}$$

4．电动势平衡方程式

（1）直流发电机电动势平衡方程式

$$U = E - R_a I_a \tag{2-16}$$

或
$$I_a = \frac{E - U}{R_a}$$

式中 U——电枢端电压，V；

R_a——电枢内阻，Ω；

I_a——电枢电流，A。

（2）直流电动机电动势平衡方程式

$$U = E + R_a I_a \tag{2-17}$$

或 $$I_a=\frac{U-E}{R_a}$$

将 $E=C_e\Phi n$ 代入上式可得

$$I_a=\frac{U-C_e\Phi n}{R_a} \tag{2-18}$$

或 $$n=\frac{U-I_aR_a}{C_e\Phi} \tag{2-19}$$

例 2-9 某直流并励发电机的电动势 E 为 230V，接上负载后端电压为 220V，励磁回路的电阻是 440Ω，若发电机输出电流为 79.5A，求电枢电流 I_a、电枢绕组内阻 R_a、电枢绕组和励磁绕组的功率损失以及发电机输出的电功率各为多少？

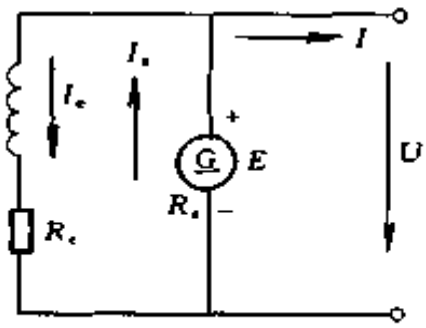


图 2-2 例 2-9 电路

解 电路如图 2-2 所示。由欧姆定律得

$$I_e=\frac{U}{R_e}=\frac{220}{440}=0.5\ (\text{A})$$

由基尔霍夫第一定律得

$$I_a=I+I_e$$
$$=79.5+0.5=80\ (\text{A})$$

由电动势平衡方程式得

$$U=E-I_aR_a$$

$$R_a=\frac{E-U}{I_a}=\frac{230-220}{80}=0.125\ (\Omega)$$

电枢绕组功率损失

$P_a=I_a^2R_a=80^2\times0.125=800$ (VA)

励磁绕组功率损失

$P_e=I_e^2R_e=0.5^2\times440=110$ (VA)

发电机输出电功率

$P=UI=220\times79.5=17490$ (VA) ≈17.5 (kVA)

例 2-10 某并励电动机接在 220V 的直流电源上，电动机满载时取用的电流为 50A，转速为 1500r/min，电枢电阻 $R_a=0.25\Omega$，励磁回路电阻 $R_e=450\Omega$，电动机空载时取用的电流是 6A，求空载时电动机的转速为多少？这台电动机从空载到满载的转速降落是电动机满载转速的百分之几？电路如图 2-3 所示。

解 $E=U-I_aR_a$

满载时 $E=220-50\times0.25=207.5$（V）

空载时 $E_0=220-6\times0.25=218.5$（V）

因 $E=C_en\Phi$

故 $\dfrac{E}{E_0}=\dfrac{C_en_N\Phi}{C_en_0\Phi}=\dfrac{n_N}{n_0}$

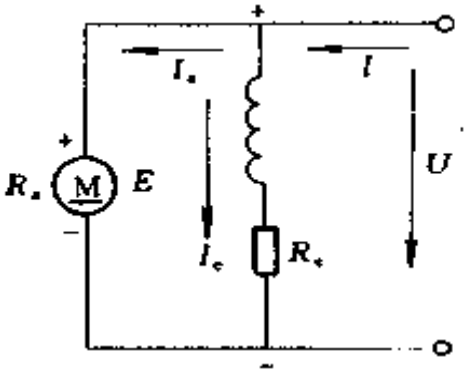


图 2-3 例 2-10 电路

$n_N=1500\text{r/min}$

$$n_0=\frac{E_0n_N}{E}=\frac{218.5\times1500}{207.5}=1580\ (\text{r/min})$$

$$\frac{1580-1500}{1500}=\frac{80}{1500}=0.053=5.3\%$$

例 2-11 一台并励电动机在额定负载下的电枢电流 $I_a=26.6\text{A}$，端电压 $U_N=110\text{V}$，如果直接起动，电枢绕组的起动电流 $I_s=390\text{A}$，为了把电枢绕组的起动电流限制到 $I'_s=2I_a$，问应接入多大的起动电阻 R_s？

解 起动时，$E=0$，$U_N=I_sR_a$

故电枢内阻

$$R_a=\frac{U_N}{I_s}=\frac{110}{390}=0.282\ (\Omega)$$

接入起动电阻后

$$I'_s=\frac{U_N}{(R_a+R_s)}=2I_a$$

$$U_N=2\ (R_a+R_s)\ I_a$$

$$R_s=\frac{U_N-2R_aI_a}{2I_a}$$

$$=\frac{110-2\times0.282\times26.6}{2\times26.6}$$

$$=\frac{110-15}{2\times26.6}=1.786\ (\Omega)$$

例 2-12 有一台 Z2 型并励直流电动机，$P_N=7.5kW$，$U_N=110V$，$\eta=83\%$，$n_N=1000r/min$，$R_e=41.5\Omega$，电枢回路总电阻（包括电刷接触电阻）$R=0.1504\Omega$，在额定负载时，在电枢回路内串入电阻 $R_s=0.5246\Omega$。求（1）电枢回路串入电阻前的电磁转矩 T；（2）电枢回路串入电阻后，若负载转矩不因转速变化而改变，则到达稳定状态后的转速为多少？

解 （1）输入功率

$$P_1=\frac{P_N}{\eta}=\frac{7.5\times10^3}{0.83}=9036\ (W)$$

输入电流

$$I=\frac{P_1}{U_N}=\frac{9036}{110}=82.15\ (A)$$

励磁电流

$$I_e=\frac{U_N}{R_e}=\frac{110}{41.5}=2.65\ (A)$$

电枢电流

$$I_a=I-I_e=82.15-2.65=79.5\ (A)$$

电枢回路功率损失

$P_a = I_a^2 R_s = (79.5)^2 \times 0.1504 = 950.6$（W）

励磁回路功率损失

$$P_e = I_e^2 R_e = (2.65)^2 \times 41.5 = 291.4 \text{（W）}$$

电磁功率

$P = P_1 - (P_a + P_e) = 9036 - (950.6 + 291.4) = 7794$（W）

电磁转矩

$$T = 9555 \frac{P}{n_N} = 9555 \times \frac{7.794}{1000} = 74.47 \text{（N·m）}$$

（2）电枢回路串入电阻前

因 $$n_N = \frac{U_N - I_a R}{C_e \Phi}$$

所以 $$C_e \Phi = \frac{U_N - I_a R}{n_N} = \frac{110 - 79.5 \times 0.1504}{1000} = 0.098$$

电枢回路串入电阻 R_s 后

$$n = \frac{U_N - I_a (R + R_s)}{C_e \Phi}$$

$$= \frac{110 - 79.5 (0.1504 + 0.5246)}{0.098}$$

$$= \frac{110 - 79.5 \times 0.675}{0.098}$$

$$= \frac{110 - 53.66}{0.098}$$

$$= 575 \text{（r/min）}$$

二、交流电机重绕改装计算

（一）三相异步电动机改变电压的计算

1. 改变绕组并联路数和接线方式

改变绕组电压通常可以用改变绕组并联路数，又改变绕组连接方式来实现。计算公式如下

表 2-1　　三相绕组改变接线的电压比（%）

原来绕组联结方式	改压后的联结方式														
	1Y联结	2Y联结	3Y联结	4Y联结	5Y联结	6Y联结	7Y联结	8Y联结	9Y联结	10Y联结	11Y联结	12Y联结	13Y联结	14Y联结	15Y联结
1Y联结	100	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10	9.1	8.3	7.7	7.1	6.67
2Y联结	200	100	66.7	50	40	33.3	28.6	25	22.2	20	18.2	16.7	15.4	14.3	13.3
3Y联结	300	150	100	75	60	50	42.9	37.5	33.3	30	27.3	25	23.1	21.4	20
4Y联结	400	200	133.3	100	80	66.7	57.1	50	44.4	40	36.4	33.3	30.8	28.6	26.7
5Y联结	500	250	166.7	125	100	83.3	71.4	62.5	55.6	50	45.5	41.7	38.5	35.7	3.33
6Y联结	600	300	200	150	120	100	85.7	75	66.7	60	54.5	50	46.2	42.9	40
7Y联结	700	350	233.3	175	140	116.7	100	87.5	77.8	70	63.6	58.3	53.8	50	46.7
8Y联结	800	400	267	200	160	133.3	114.3	100	88.9	80	72.7	66.7	61.5	57.1	53.3
9Y联结	900	450	300	225	180	150	128.6	112.5	100	90	81.8	75	69.2	64.3	60
10Y联结	1000	500	333	250	200	166.7	142.9	125	111.1	100	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7
11Y联结	1100	550	366.9	275	220	183.3	157.1	137.5	122.2	110	100	91.7	84.6	78.6	73.3
12Y联结	1200	600	400	300	240	200	171.4	150	133.3	120	109	100	92.3	85.7	80
13Y联结	1300	650	433.3	325	260	216.7	185.7	162.5	144.4	130	118.2	108.3	100	92.9	86.7
14Y联结	1400	700	466.7	350	280	233.3	200	175	155.6	140	127.3	116.7	107.7	100	93.3
15Y联结	1500	750	500	375	300	250	214.3	187.5	166.7	150	136.4	125	115.4	107.1	100

续表

原来绕组联结方式	改压后的联结方式														
	1Y联结	2Y联结	3Y联结	4Y联结	5Y联结	6Y联结	7Y联结	8Y联结	9Y联结	10Y联结	11Y联结	12Y联结	13Y联结	14Y联结	15Y联结
1△联结	100	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10	9.1	8.3	7.7	7.1	6.67
2△联结	200	100	66.7	50	40	33.3	28.6	25	22.2	20	18.2	16.3	15.4	14.3	13.3
3△联结	300	150	100	75	60	50	42.9	37.5	33.3	30	27.3	25	23.1	21.4	20
4△联结	400	200	133.3	100	80	66.7	57.1	50	44.4	40	46.4	33.3	30.8	28.6	26.7
5△联结	500	250	166.7	125	100	83.3	71.4	62.5	55.6	50	45.5	41.7	38.5	35.7	33.3
6△联结	600	300	200	150	120	100	85.7	75	66.7	60	54.5	50	46.2	42.9	40
7△联结	700	350	233.3	175	140	116.7	100	87.5	77.8	70	63.6	58.3	53.8	50	46.7
8△联结	800	400	267	200	160	133.3	114.3	100	88.9	80	72.7	66.7	61.5	57.1	53.3
9△联结	900	450	300	225	180	150	128.6	112.5	100	90	81.8	75	69.2	64.3	60
10△联结	1000	500	333	250	200	166.7	142.9	125	111.1	100	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7
11△联结	1100	550	366.9	275	220	183.3	157.1	137.5	122.2	110	100	91.7	84.6	78.6	73.3
12△联结	1200	600	400	300	240	200	171.4	150	133.3	120	109	100	92.3	85.7	80
13△联结	1300	650	433.3	325	260	216.7	185.7	162.5	144.4	130	118.2	108.3	100	92.9	86.7
14△联结	1400	700	466.7	350	280	233.3	200	175	155.6	140	127.3	116.7	107.7	100	93.3
15△联结	1500	750	500	375	300	250	214.3	187.5	166.7	150	136.4	125	115.4	107.1	100

续表

原来绕组联结方式	改压后的联结方式														
	1Y联结	2Y联结	3Y联结	4Y联结	5Y联结	6Y联结	7Y联结	8Y联结	9Y联结	10Y联结	11Y联结	12Y联结	13Y联结	14Y联结	15Y联结
1△联结	173.2	86.6	57.7	43.3	34.6	28.9	24.7	21.7	19.2	17.3	15.7	14.4	13.3	12.4	11.5
2△联结	346.4	173.2	115.5	86.6	69.2	57.8	49.4	43.4	38.4	34.6	31.4	28.8	26.6	24.7	23.1
3△联结	519.6	259.8	173.2	129.9	103.8	86.7	74.1	65.1	57.6	51.9	47.1	43.2	39.9	37.1	34.6
4△联结	692.8	346.4	230.8	173.2	138.4	115.6	98.8	86.8	76.8	69.2	62.8	57.6	53.2	47.5	46.2
5△联结	866	433	288.5	216.5	173	144.5	123.5	108.5	96	86.5	78.5	72	66.5	61.9	57.7
6△联结	1039.2	519.6	346.2	259.8	207.6	173.4	148.2	130.2	115.2	103.8	94.2	86.4	79.8	74.2	69.3
7△联结	1212.4	656.2	403.9	303.1	242.2	202.3	172.9	151.9	134.4	121.1	109.9	100.8	93.1	86.6	80.8
8△联结	1325.6	692.8	461.6	344	276.8	231.2	197.6	173.6	157.6	138.4	125.6	115.2	106.4	74.7	88.4
9△联结	1558.8	779.4	519.3	389.7	311.4	260.1	222.3	195.3	172.8	155.7	141.3	129.6	119.7	111.3	103.9
10△联结	1732	866	577	455	346	289	247	217	192	173	157	144	133	123.7	115.5
11△联结	1905.2	952.6	634.7	476.3	380.6	317.9	271.7	238.7	211.2	190.3	172.7	158.4	146.3	136	127
12△联结	2078.4	1039.2	692.4	519.6	415.2	346.8	296.4	260.4	230.4	227.6	188.4	172.8	159.6	148.5	138.6
13△联结	2251.6	1125.8	750.1	562.9	449.8	375.7	321.1	282.1	249.6	214.9	204.1	187.2	172.9	160.8	150
14△联结	2424.8	1212.4	807.8	606.2	484.4	404.6	345.8	303.8	268.8	242.2	219.8	201.6	186.2	173.6	161
15△联结	2598	1299	865.5	649.5	519	433.5	370.5	325.5	288	259.5	235.5	216	199.5	186	132.5

续表

方式						
9Y 联结	10Y 联结	11Y 联结	12Y 联结	13Y 联结	14Y 联结	15Y 联结
6.4	5.8	5.2	4.8	4.4	4.12	3.85
2.8	11	10.5	9.6	8.9	8.3	7.7
.9.2	17.3	15.7	14.4	13.3	12.4	11.5
5.7	23.1	21	19.3	17.8	16.5	15.4
2.1	28.9	26.3	24	22.2	20.6	19.3
8.5	35	31.5	28.9	26.6	24.7	23.1
4.9	40.4	36.8	33.7	31.1	28.9	26.9
1.3	46.2	42	38.5	35.5	33	30.8
7.7	52	47.2	43.3	4.0	37.1	34.6
4.2	57.7	52.5	48.1	44.4	41.2	38.5
0.6	53.5	57.7	52.9	48.8	45.5	42.3
79	69.3	63	59.7	53.3	49.5	46.2
3.4	75.1	6.82	62.6	57.7	53.6	50
9.6	81.2	72.8	67.2	61.6	57.7	53.9
96	87	78	72	66	61.8	57.8

$$u\% = \frac{U'_1}{U_1} \times 100\% \tag{2-20}$$

式中　$u\%$——改接前后的电压比；

U_1——电动机改接前的线电压，V；

U'_1——电动机改接后所要求的线电压，V。

按计算出来的 $u\%$，查表 2-1 可找出改接的方案。从表选出的 $u'\%$值，再与计算出的 $u\%$ 值比较，其电压差的绝对值百分数不应大于 5%。

在改接时，还要考虑电动机的极数，因为绕组的并联路数受电动机的极数限制。电动机各种极数所允许的并联支路数见表 2-2。

表 2-2　各种极数下所允许的并联支路数（双层绕组）

电动机极数	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
可能并联的支路数	1	1 2	1 2 3	1 2 4	1 2 5	1,2 3,4	1 2 7	1,2 4,8	1,2 3,6 9	1,2 4,5 10	1,2 11	1,2 4,6 8,12	1,2 13	1,2 4,7 14	1,2 3,5
	2	4	6	8	10	6, 12	14	16	18	20	22	24	26	28	15, 30

例 2-13　有 1 台 3000V，8 极，1 路 Y 连接的异步电动机，要使用到 380V 电源上，应如何改变绕组连接？

解　改压前后的电压比为

$$u\% = \frac{380}{3000} \times 100\% = 12.67\%$$

查表 2-1，原来绕组连接方式为 1Y 连接的一栏，第 1 行的第 8 列得 8Y 连接的数字为 12.5%最为接近，从表 2-2 中知 8 极电动机最大可能并联支路数为 8 路，所以可以改为 8 路并联 Y 连接。

改接后电压差绝对值的百分数为

$$\Delta U=\left|\frac{u'\%-u\%}{u'\%}\right|\times 100\%=\left|\frac{12.5-12.67}{12.5}\right|\times 100\%$$
$$=1.36\%<5\%$$

故允许改接。

例 2-14 有 1 台 3000V，22 极，1 路△联结的三相异步电动机，要使用在 460V 的电源上，应如何改变绕组联结？

解 改压前后的电压比为

$$u\%=\frac{460}{3000}\times 100\%=15.33\%$$

查表 2-1，原来绕组联结方式为 1△联结的一栏，第 31 行的第 11 列得 11Y 联结的数字为 15.7% 最为接近。由于原来电动机极数为 22 极，查表 2-2，可以接出 11 路并联。其电压差绝对值的百分数为

$$\Delta U=\left|\frac{u'\%-u\%}{u'\%}\right|\times 100\%$$
$$=\left|\frac{15.7-15.33}{15.7}\right|\times 100\%=2.35\%<5\%$$

故允许改接。

2. 改电压的重绕计算

(1) 改压后的每槽匝数

$$N'_s=\frac{U'_1}{U_1}N_s \tag{2-21}$$

式中 N'_s——重绕后绕组的每槽匝数；

N_s——重绕前绕组的每槽匝数；

U'_1——重绕后的电源电压，V；

U_1——重绕前的电源电压，V。

(2) 改压后的导线截面积

$$A' = \frac{U_1}{U'_1} A \qquad (2\text{-}22)$$

式中 A'——重绕后的导线截面积，mm^2。如果较大，可并绕或按表 2-2 的规定采用 2 路以上的并联支路数；

A——重绕前的导线截面积，mm^2。

对于绕线转子异步电动机，不论改变接线或重绕定子线圈时，它的转子绕组可以不必变动。

改压时应注意以下几点：

1）当高压改为低压时，由于槽内绝缘所占比例降低，有条件都可增大导线截面积，实际截面积可选择比计算值 A' 大。由实际合理的槽满率来最后确定导线截面积，这样可提高电动机效率，降低电动机温升。

2）当低压改高压时，由于槽内绝缘加厚，按公式计算出的截面积 A' 应适当减少，最终也由槽满率校验结果来确定。

3）考虑老电动机槽内绝缘较厚，所以对加粗导线直径有利，这样通过改电压也可提高电动机效率。因此，建议适当放粗一挡以上的导线规格。

例 2-15 有 1 台老式 20kW，220/380V，△/Y 联结三相异步电动机，定子绕组导线为双纱包铜线，用 5 根 ϕ1.56mm 并绕，每槽 14 匝，双层绕组。为限制起动电流，要求改成 380V，△联结运行，起动时为 Y 联结。试计算重绕数据。

解 重绕后的每槽匝数 N'_s

$$N'_s = N_s \frac{U'_1}{U_1} = 14 \times \frac{380}{220} = 24.18 \text{（匝）}$$

取 N'_s 为 24 匝

重绕后的导线截面积 A'

$$A' = A\frac{U_1}{U'_1} = 5\times\frac{\pi\times1.56^2}{4}\times\frac{220}{380} = 5.533\ (\text{mm}^2)$$

如选 4 根 ϕ1.35mm 导线并绕，其截面积为 5.726mm^2；4 根 ϕ1.30mm 导线并绕，其截面积为 5.309mm^2。故可选 4 根 ϕ1.35mm 导线并绕。

为了提高电动机效率，充分利用槽面积，还可按下面方法计算导线截面积：

ϕ1.56mm 双纱包铜线的绝缘外径为 ϕ1.85mm，如改用高强度漆包线时，其绝缘外径仍为 ϕ1.85mm，则铜线外径为 ϕ1.74mm。考虑导线绝缘减薄后，它的截面积为

$$A' = A\frac{U_1}{U'_1} = 5\times\frac{\pi\times1.74^2}{4}\times\frac{220}{380} = 6.883\ (\text{mm}^2)$$

如用 5 根 ϕ1.35mm 导线并绕，其截面积为 7.157mm^2，和 5.726mm^2 截面积相比，增加 25% 的截面积，电动机效率可提高 3%左右。

表 2-3 为绝缘外径相同的各种电磁裸线径对照表，供参考。

表 2-3　　绝缘外径相同的各种电磁裸线径对照表　　(mm)

绝缘导线外径	油性漆包圆铜裸线径型号 Q	高强缩醛和聚酯漆包圆铜裸线径型号 QZ、QQ	双纱包圆铜裸线径型号 ME①	双玻璃丝包圆铜裸线径型号 SBEC	单丝漆包圆铜裸线径型号 QSR 或 QST①	氧化膜铝裸线径	单纱漆包圆铜裸线径型号 QM①
0.09	0.07	0.06	—	—	—	0.07	—
0.10	0.08	0.07	—	—	—	0.08	—

续表

绝缘导线外径	油性漆包圆铜裸线径型号 Q	高强缩醛和聚酯漆包圆铜裸线径型号 QZ、QQ	双纱包圆铜裸线径型号 ME[1]	双玻璃丝包圆铜裸线径型号 SBEC	单丝漆包圆铜裸线径型号 QSR 或 QST[1]	氧化膜铝裸线径	单纱漆包圆铜裸线径型号 QM[1]
0.11	0.09	0.08	—	—	—	0.09	—
0.12	0.10	0.09	—	—	—	0.10	—
0.13	0.11	0.10	—	—	0.05	0.11	—
0.14	0.12	0.11	—	—	0.06	0.12	—
0.15	0.13	0.12	—	—	0.07	0.13	—
0.16	0.14	0.13	—	—	0.08	0.14	—
0.17	0.15	0.14	—	—	0.09	0.15	—
0.19	0.17	0.15	—	—	0.11	0.17	—
0.20	0.18	0.16	—	—	0.12	0.18	—
0.21	0.19	0.17	—	—	0.13	0.19	—
0.22	0.20	0.18	—	—	0.14	0.20	—
0.23	0.21	0.19	—	—	0.15	0.21	—
0.24	0.21	0.20	—	—	0.16	—	—
0.25	0.23	0.21	—	—	0.17	0.23	—
0.28	0.25	0.23	—	—	0.19	0.25	—
0.30	0.27	0.25	—	—	0.20	0.27	—
0.32	0.29	0.27	—	—	0.21	0.29	0.20
0.34	0.31	0.29	—	—	0.23	0.31	0.21
0.36	0.33	0.31	—	—	0.25	0.33	0.23
0.38	0.35	0.33	0.20	—	0.27	0.35	0.25
0.41	0.38	0.35	0.21	—	0.29	0.38	—
0.44	0.41	0.38	0.23	—	0.31	0.41	0.27
0.47	0.44	0.41	0.25	—	0.35	0.44	0.31
0.50	0.47	0.44	0.27	—	0.38	0.47	0.33
0.53	0.49	0.47	0.29	—	0.41	0.49	0.35
0.55	0.51	0.49	0.33	—	0.44	0.53	0.38
0.58	0.53	0.51	0.35	—	0.47	0.55	0.41

续表

绝缘导线外径	油性漆包圆铜裸线径型号 Q	高强缩醛和聚酯漆包圆铜裸线径型号 QZ、QQ	双纱包圆铜裸线径型号 ME①	双玻璃丝包圆铜裸线径型号 SBEC	单丝漆包圆铜裸线径型号 QSR 或 QST①	氧化膜铝裸线径	单纱漆包圆铜裸线径型号 QM①
0.60	0.55	0.53	0.38	—	0.49	0.57	—
0.62	0.57	0.55	0.38	—	0.49	0.59	0.44
0.64	0.59	0.57	0.41	—	0.51	0.62	0.47
0.66	0.62	0.59	0.44	—	0.53	0.64	0.49
0.69	0.64	0.62	0.47	—	0.57	0.67	0.51
0.72	0.67	0.64	0.49	—	0.59	0.69	0.53
0.75	0.69	0.67	0.53	0.51	0.62	0.72	0.57
0.77	0.72	0.69	0.55	0.53	0.64	0.74	0.59
0.80	0.74	0.72	0.57	0.57	0.67	0.77	0.62
0.83	0.77	0.74	0.59	0.59	0.69	0.80	0.64
0.86	0.80	0.77	0.62	0.62	0.72	0.83	0.67
0.89	0.83	0.80	0.67	0.67	0.74	0.86	—
0.92	0.86	0.83	0.69	0.69	—	0.90	0.72
0.95	0.90	0.86	0.72	0.72	0.80	0.93	0.74
0.99	0.93	0.90	0.74	0.74	0.83	0.96	0.80
1.02	0.96	0.93	0.77	0.77	0.86	1.00	0.83
1.05	1.00	0.96	0.80	0.80	0.90	1.04	0.86
1.11	1.04	1.00	0.86	0.86	0.96	1.08	0.90
1.15	1.08	1.04	0.90	0.90	1.00	1.12	0.96
1.19	1.12	1.08	0.96	0.93	1.04	1.16	—
1.23	1.16	1.12	—	0.96	1.08	1.23	1.00
1.27	1.20	1.16	1.00	1.00	1.12	1.25	1.04
1.31	1.25	1.20	1.04	1.04	1.16	—	1.08
1.36	1.30	1.25	1.08	1.08	1.20	1.30	1.12
1.41	1.35	1.30	1.12	1.12	1.25	1.35	1.20
1.46	1.40	1.35	1.16	1.16	1.30	1.40	1.25

续表

绝缘导线外径	油性漆包圆铜裸线径型号 Q	高强缩醛和聚酯漆包圆铜裸线径型号 QZ、QQ	双纱包圆铜裸线径型号 ME①	双玻璃丝包圆铜裸线径型号 SBEC	单丝漆包圆铜裸线径型号 QSR 或 QST①	氧化膜铝裸线径	单纱漆包圆铜裸线径型号 QM①
1.51	1.45	1.40	1.20	1.20	1.35	1.45	—
1.56	1.50	1.45	1.25	1.25	1.40	1.50	1.35
1.61	1.56	1.50	1.30	1.30	1.45	1.56	1.40
1.67	1.62	1.56	1.40	1.40	1.50	1.62	1.45
1.73	—	1.62	1.45	1.45	1.56	1.68	1.50
1.79	—	1.68	1.50	1.50	1.62	1.74	1.56
1.85	—	1.74	1.56	1.56	1.68	1.81	1.62
1.93	—	1.81	1.62	1.62	1.74	1.88	1.68
2.00	—	1.88	1.68	1.68	1.81	1.95	1.74
2.07	—	1.95	1.74	1.74	1.88	2.02	1.81
2.14	—	2.02	1.81	1.81	1.95	2.10	—
2.23	—	2.10	1.95	—	2.02	—	—
2.39	—	2.26	2.10	—	—	2.26	—
2.57	—	2.44	—	—	—	2.44	—

①系淘汰产品。

3. 采用延边三角形联结改电压方法

电动机绕组除了改变Y、△联结方式外，还有一种延边三角形联结方式，用⅄表示。延边三角形联结是把每相绕组分成两部分，一部分接成△联结，另一部分接成Y联结，通常Y、△部分匝数按1:1分配（也可按其他匝数分配，比

如 1:2 或 2:1 等，但太复杂了)。

计算方法也是先算出线电压比值 $u\%$，然后查表 2-4，使查出的比值 $u'\%$ 接近 $u\%$，便可找出所需的联结方式。

例 2-16 1 台 100kW、500V，4 极三相异步电动机，1Y 联结，欲改接线，在三相 380V 电源上使用，问如何改接?

解：计算出

$$u\% = \frac{380}{500} \times 100\% = 76\%$$

查表 2-1，查不到接近 $u\%$ 的比值，所以结论是重绕，但如果采用抽头为 1:1 的 Δ 联结方式，查表 2-4 就可以解决，可查出 $u'\% = 78.9\%$。电压差比值为

$$\Delta U = \left|\frac{u'\% - u\%}{u'\%}\right| \times 100\% = \left|\frac{78.9\% - 76\%}{78.9\%}\right| \times 100\%$$

$$\approx 3.6\% < 5\%$$

可以改接。

因为 $u'\% = 78.9\%$，电动机改接后合适的电源电压应为 $78.9\% \times 500 = 394.5$ (V)，现电源实际电压为 380V。所以这台电动机相当于降低电压运行。设电动机原来的转矩为 T，降低电压后的转矩为 T'

$$T' = \left(\frac{380}{394.5}\right)^2 T = 0.9278T$$

故电动机的转矩只有原来转矩的 92.78%。

设电动机原来的功率为 P，降低电压后的功率为 P'

$$P' = \frac{380}{394.5} P = 0.9632P$$

故电动机的功率只有原来的 96.32%。

实践指出，长期运行在 80% 的额定负载下的电动机属正常。

表 2-4　　绕组改接抽头为 1:1 的 Δ 联结时的电压比　　(%)

改后联结方式	原来的联结方式															
	1Y联结	2Y联结	3Y联结	4Y联结	5Y联结	6Y联结	8Y联结	10Y联结	1△联结	2△联结	3△联结	4△联结	5△联结	6△联结	8△联结	10△联结
1 Δ 联结	78.9	158	237	316	394	474	631	789	136.4	273.2	409	546	628	819	1091	1364
2 Δ 联结	39.5	78.9	118	158	197	237	316	395	68.3	136.4	204.5	273	341	409	546	683
3 Δ 联结	26.3	57.6	78.9	105	131	158	211	263	45.5	91	136.4	182	227	273	364	455
4 Δ 联结	19.7	39.5	59.2	78.9	98.5	118	158	197	34.1	68.2	103	176	171	204	273	341
5 Δ 联结	15.8	31.6	47.4	63.2	78.9	94.9	126	158	27.3	54.6	82	109	136.4	164	218	273
6 Δ 联结	13.2	26.3	39.4	52.6	65.6	78.9	105	131	22.8	45.5	68.2	91	114	136	182	228
8 Δ 联结	9.36	19.7	29.6	39.5	49.3	59.3	78.9	98.6	17.1	34.2	51.2	68.3	85.3	103	136	171
10 Δ 联结	7.89	15.8	23.7	31.6	39.5	47.4	63.1	78.9	13.6	27.3	40.9	54.6	68.2	81.9	109	136

（二）三相异步电动机空壳重绕的计算

1．重绕前需测量的数据

定子铁心外径：D_{se}，cm

定子铁心内径：D_{si}，cm

定子铁心长度：l_s，cm

定子槽数：Z_s

定子槽净面积：A_s，mm^2

定子齿宽：b_t，cm

定子轭高：h_y，cm

测量定子铁心齿宽时，对于半开口圆底槽（梨形槽）平行齿取实际宽度；对于半开口平底槽（梯形槽、矩形槽）非平行齿取离最狭处 1/3 齿高处的宽度为计算值，见图 2-4。或按下式计算：

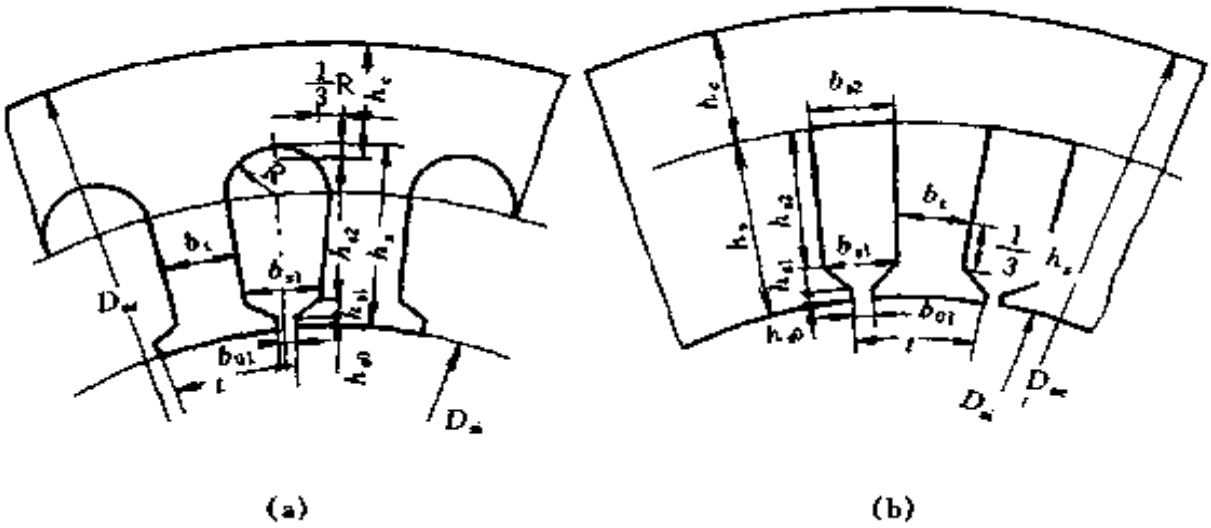


图 2-4　定子槽形尺寸

（a）半开口圆底槽（梨形槽），平行齿；

（b）半开口平底槽（梯形槽、矩形槽），非平行齿

图 2-4（a）所示平行齿

$$b_t=\frac{\pi\ (D_{si}+2h_{s0}+2h_{sf})}{Z_s}-b_{st} \qquad (2\text{-}23)$$

图 2-4（b）所示非平行齿

$$b_t=\frac{\pi\ (D_{si}+\frac{2}{3}h_s)}{Z_s}-b_{st} \qquad (2\text{-}24)$$

测量轭高时，对于图 2-4（a）的圆底槽为

$$h_y=\frac{D_{se}-D_{si}}{2}-h_s+\frac{R}{3} \qquad (2\text{-}25)$$

对于图 2-4（b）的平底槽为

$$h_y=\frac{D_{se}-D_{si}}{2}-h_s \qquad (2\text{-}26)$$

测量槽净面积，可按下列公式计算：

图 2-5（a）槽形

$$A_s=\frac{2R+b_{s1}}{2}\ (h_s'-h)\ +\frac{\pi R^2}{2} \qquad (2\text{-}27)$$

图 2-5（b）槽形

$$A_s=\frac{b_{s1}+2R_1}{2}\ (h_s'-h)\ +\frac{\pi R_2^2}{2} \qquad (2\text{-}28)$$

图 2-5（c）槽形

$$A_s=\frac{\pi R_2^2}{2}+\frac{(b_{s1}+b_{s2})}{2}\ (h_s'-h)\ +R_2b'_{s2} \qquad (2\text{-}29)$$

图 2-5（d）槽形

$$A_s=\frac{(b_{s1}+b_{s2})}{2}\ (h_s'-h) \qquad (2\text{-}30)$$

图 2-5（e）槽形

$$A_s=\frac{(b_{s1}+b_{s2})}{2}\ (h_s'-h) \qquad (2\text{-}31)$$

式中　h——槽楔厚度，一般取 2～4mm。

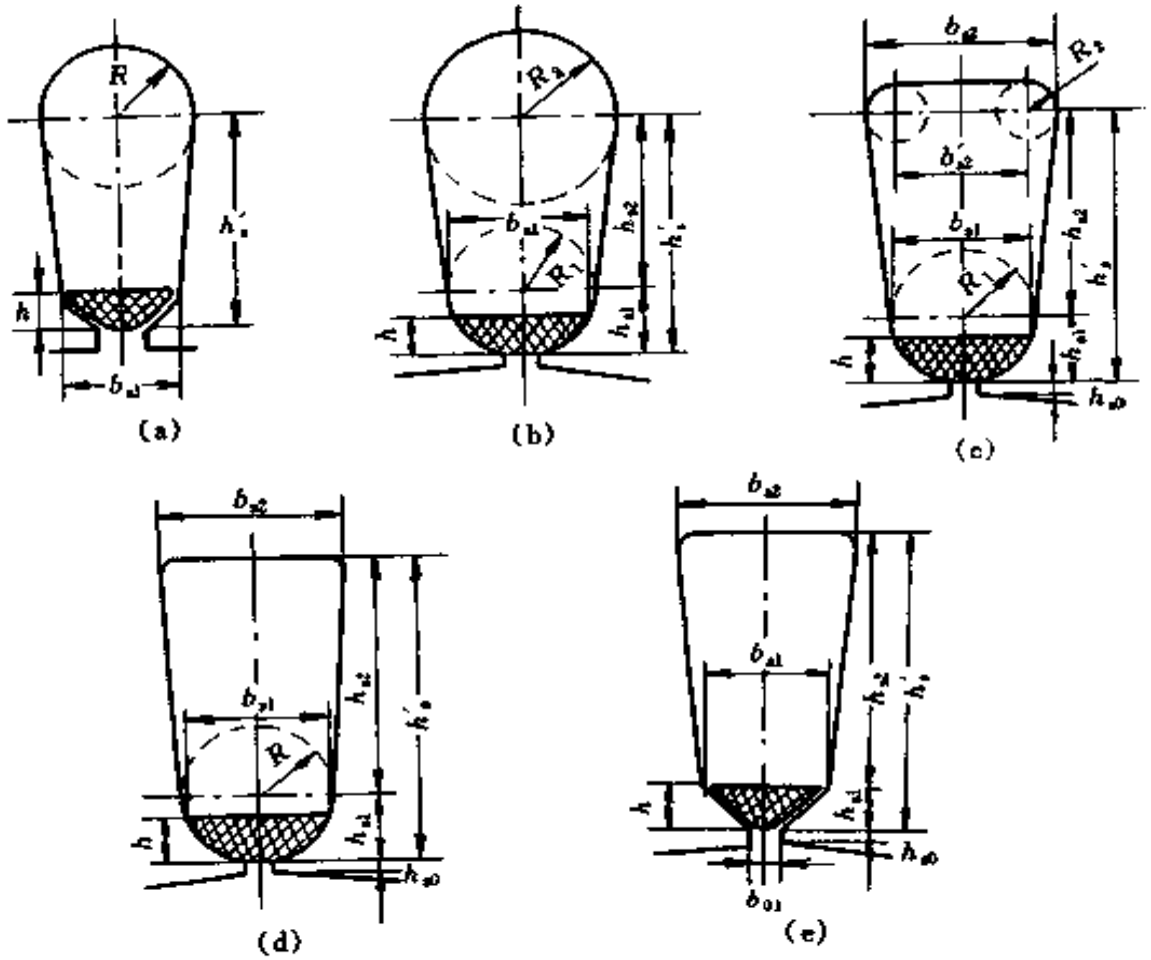


图 2-5　定子槽形

(a) 槽形 a; (b) 槽形 b; (c) 槽形 c; (d) 槽形 d; (e) 槽形 e

2. 计算步骤

(1) 极数计算。

$$2p = (0.35 \sim 0.4)\ \frac{Z_s b_t}{h_y} \qquad (2\text{-}32)$$

式中　p——极对数;

Z_s——定子槽数;

b_t——定子齿宽, cm;

h_y——定子轭高, cm。

(2) 极距计算。

$$\tau = \frac{\pi D_{si}}{2p} \tag{2-33}$$

式中　τ——极距，cm；

D_{si}——定子铁心内径，cm。

(3) 气隙磁通密度选择。

根据铁心尺寸从表 2-5 中选择气隙磁通密度 B_g。

(4) 每极磁通计算。

$$\Phi = \alpha_p B_g \tau K_{Fe} l_s \tag{2-34}$$

式中　Φ——每极磁通，Wb；

α_p——极弧系数，它与极数及磁路饱和程度有关，可先按表 2-6 决定电动机饱和系数 K_s，再根据 K_s 查表 2-7 得极弧系数 α_p；

B_g——气隙磁通密度，T；

τ——极距，m；

K_{Fe}——铁心叠压系数，$K_{Fe}=0.92\sim0.95$，本书取 $K_{Fe}=0.92$；

l_s——定子铁心长度，m。

表 2-5　小型异步电动机定子绕组电磁设计参考数据

数值名称		极数			
		2	4	6	8
线负荷 A (A/cm)	防护式	235～380	240～360	260～370	265～380
	封闭式	150～300	170～330	190～300	180～320
气隙磁通密度 B_g (T)	防护式	0.65～0.76	0.70～0.85	0.75～0.85	0.70～0.85
	封闭式	0.55～0.67	0.60～0.80	0.65～0.82	0.67～0.80
轭磁通密度 B_y (T)	防护式	1.40～1.58	1.40～1.65	1.30～1.59	1.10～1.45
	封闭式	1.25～1.54	1.19～1.58	1.17～1.53	1.0～1.35

续表

数值名称		极数			
		2	4	6	8
齿磁通密度 B_t（T）	防护式	1.50～1.65	1.45～1.65	1.45～1.60	1.45～1.60
	封闭式	1.40～1.56	1.40～1.57	1.35～1.59	1.35～1.59
防护式电动机定子绕组电流密度 J_P（A/mm²）	10kW以下	5.0～6.5	5.5～6.5	5.5～6.5	5.0～6.0
	10～30kW	5.0～6.5	5.0～6.0	5.0～6.0	5.0～6.0
	30～100kW	5.5～6.2	5.0～6.0	5.0～6.0	5.0～5.5
封闭式电动机定子绕组电流密度 J_c（A/mm²）	10kW以下	5.0～6.0	5.0～6.5	5.5～7.0	5.0～6.0
	10～30kW	4.5～5.5	4.5～6.0	4.5～6.0	4.0～5.5
	30～100kW	3.5～4.5	3.5～5.0	4.0～5.1	4.0～5.5

表 2-6　　饱和系数 K_s 的选取

电动机极数	2	4	6	8
饱和系数 K_s	1.05～1.15	1.15～1.30	1.25～1.40	1.30～1.45

表 2-7　　极弧系数 α_p 的选取

饱和系数 K_s	1.1	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40
极弧系数 α_p	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.717
饱和系数 K_s	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	
极弧系数 α_p	0.725	0.733	0.747	0.747	0.753	0.76	

（5）轭磁通密度计算。

$$B_y=\frac{\Phi}{2h_y l_s\times 0.92} \tag{2-35}$$

式中　B_y——轭磁通密度，T，计算结果应在表 2-5 范围内；

h_y——定子轭高，m。

（6）齿磁通密度计算。

$$B_t=\frac{\Phi}{\alpha_p\frac{Z_s}{2p}b_t l_s\times 0.92} \tag{2-36}$$

式中 B_t——齿磁通密度，T，计算结果应在表 2-5 范围内；

b_t——定子齿宽，m。

（7）确定绕组因数及接法。

1）压降因数 K_V 的选取。见表 2-8。

表 2-8 压降因数 K_V

功率范围	极数			
	2	4	6	8
10kW 以下	0.89～0.93	0.87～0.92	0.87～0.91	0.88～0.90
10～30kW 以下	0.94～0.96	0.93～0.95	0.92～0.93	0.91～0.93
30～125kW	0.95～0.98	0.95～0.96	0.94～0.95	0.93～0.94

2）确定绕组型式。

3）确定线圈节距。单层线圈采用全节距 y

$$y=\frac{Z_s}{2p} \tag{2-37}$$

双层线圈采用短节距，短矩因数 K_s 按下式计算

$$K_s=\sin\beta 90^\circ \tag{2-38}$$

$$\beta=\frac{y}{Z_p} \tag{2-39}$$

式中 β——短距比，一般取 $\beta=0.8\sim0.9$；

Z_p——每极槽数。

4）按下列公式或查表 2-9 决定绕组因数 K_w。

$$K_w=K_d K_s \tag{2-40}$$

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}q\right)}{q\sin\frac{\alpha}{2}} \tag{2-41}$$

$$\alpha = \frac{2p\pi}{Z_s} \tag{2-42}$$

式中 K_d——分布因数；

K_s——短距因数；

q——每极每相槽数；

α——用电角度表示的槽距角。

5）确定绕组接线方式。

6）根据电源电压确定每相定子绕组承受的电压 U_p。

（8）每相绕组线圈匝数计算。

$$N_p = \frac{K_v U_p \times 10^{-2}}{2.22 K_w \Phi} \tag{2-43}$$

式中 K_v——压降因数；

K_w——绕组因数。

（9）每槽导线数计算。

$$N_s = \frac{3aN_P}{Z_s} \tag{2-44}$$

式中 a——定子绕组并联支路数；

Z_s——定子槽数。

（10）导线直径计算。

1）计算带绝缘的导线直径 d_{wi}

$$d_{wi} = \sqrt{\frac{S_f A_e}{N_s}} \tag{2-45}$$

$$A_e = A_s - A_i \tag{2-46}$$

式中　d_{wi}——带绝缘的导线直径，mm；

S_f——槽满率，一般控制在 75%～80%；

A_e——槽有效面积，mm^2；

N_s——每槽导线数；

A_s——槽净面积，mm^2；

A_i——槽绝缘所占面积，mm^2。

槽绝缘所占面积，对于梨形槽［图 2-5（a）］可按下式计算：

绕组为双层绕组

$$A_i = \Delta i\ (2h_s' + \pi R + 2R + b_{s1}) \tag{2-47}$$

绕组为单层绕组

$$A_i = \Delta i\ (2h_s' + \pi R) \tag{2-48}$$

式中　Δi——槽绝缘厚度，mm。对于 E 级绝缘 $\Delta i = 0.25 \sim 0.40$mm；B 级绝缘 $\Delta i = 0.25 \sim 0.45$mm；F 级绝缘 $\Delta i = 0.35 \sim 0.50$mm；H 级绝缘 $\Delta i = 0.45 \sim 0.50$mm。

2）计算导线直径 d_W。根据带绝缘的导线外径，可参考表 2-3 选取所需的导线直径。

（11）选取电流密度 J。小型异步电动机的电流密度见表 2-5。

（12）相电流计算

$$I_P = aA_wJ \tag{2-49}$$

式中　I_P——相电流，A；

A_w——导线截面积，mm^2。

（13）线负荷计算

$$A=\frac{3aNI_P\times10^2}{\pi D_{si}} \tag{2-50}$$

式中 A——线负荷，A/cm。计算结果应在表 2-5 范围内；

D_{si}——定子铁心内径，cm。

（14）电动机的功率计算

$$P=\sqrt{3}U_lI_l\cos\varphi\eta\times10^{-3} \tag{2-51}$$

式中 P——电动机额定功率，kW；

U_l——电动机额定电压（线电压），V；

I_l——电动机额定电流（线电流），A；

$\cos\varphi$——电动机功率因数；

η——电动机效率。

电动机 $\cos\varphi$ 和 η 的近似值，可参考表 2-10 选取。

例 2-17 有 1 台封闭式笼型异步电动机，无铭牌及定子绕组，试进行重绕计算。测得定子铁心的数据如下：

定子铁心外径：$D_{se}=32.7$cm

定子铁心内径：$D_{si}=23$cm

定子铁心长度：$l_s=22$cm

定子槽数：$Z_s=54$

定子槽形：如图 2-4（a）和图 2-5（a）所示，$b_{01}=0.35$cm，$b_{s1}=0.58$cm，$R=0.4$cm，$h_{s0}=0.08$cm，$h_{s1}=0.08$cm，$h_s=2.53$cm，$h=0.3$cm，$h_s'=2.05$cm

解 （1）按定子槽形尺寸，计算

1）定子齿宽 b_t。由式（2-23）得

$$b_t=\frac{\pi(23+2\times0.08+2\times0.08)}{54}-0.58$$

$$=0.7767\ (\text{cm})$$

2）定子轭高 h_y。由式（2-25）得

表 2-9　　三相双层绕组（60°相带）绕组因数表

每极每相槽数 q	绕组线圈节距 y（以槽数计）																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.866	1.0	0.866																	
$1^1/_{10}$	0.778	0.946	0.903																	
$1^1/_8$	0.766	0.941	0.915	0.695																
$1^1/_5$	0.732	0.924	0.942	0.783																
$1^1/_4$	0.711	0.910	0.951	0.829																
$1^3/_{10}$	0.689	0.893	0.954	0.863																
$1^3/_8$		0.869	0.954	0.903	0.722															
$1^2/_5$		0.861	0.953	0.913	0.747															
$1^1/_2$		0.831	0.945	0.945	0.831															
$1^3/_5$		0.795	0.923	0.954	0.883	0.718														
$1^5/_8$		0.786	0.917	0.954	0.898	0.74														
$1^7/_{10}$		0.762	0.901	0.955	0.919	0.800														
$1^3/_4$		0.747	0.890	0.953	0.932	0.826														
$1^4/_5$		0.732	0.877	0.949	0.941	0.853	0.695													
$1^7/_8$		0.710	0.859	0.941	0.950	0.886	0.753													
$1^9/_{10}$		0.703	0.852	0.937	0.952	0.894	0.770													
2		0.683	0.837	0.932	0.966	0.933	0.837	0.683												
$2^1/_{10}$			0.802	0.905	0.952	0.94	0.87	0.747												
$2^1/_8$			0.796	0.901	0.951	0.944	0.88	0.762												
$2^1/_5$			0.778	0.887	0.946	0.951	0.903	0.804	0.659											

续表

每极每相槽数 q	绕组线圈节距 y（以槽数计）																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$2^1/_4$			0.766	0.877	0.941	0.954	0.915	0.827	0.695											
$2^3/_{10}$			0.754	0.867	0.935	0.955	0.925	0.848	0.727											
$2^3/_8$			0.737	0.852	0.926	0.955	0.937	0.875	0.779											
$2^2/_5$			0.732	0.847	0.923	0.954	0.941	0.883	0.782	0.645										
$2^1/_2$			0.711	0.829	0.91	0.951	0.951	0.91	0.829	0.711										
$2^3/_5$			0.689	0.807	0.893	0.943	0.954	0.927	0.863	0.764										
$2^5/_8$			0.682	0.802	0.889	0.941	0.955	0.931	0.870	0.775	0.650									
$2^7/_{10}$			0.669	0.786	0.877	0.933	0.955	0.941	0.891	0.808	0.695									
$2^3/_4$				0.778	0.869	0.928	0.954	0.946	0.903	0.827	0.722									
$2^4/_5$				0.769	0.861	0.923	0.953	0.949	0.913	0.844	0.747									
$2^7/_8$				0.754	0.848	0.913	0.948	0.953	0.925	0.867	0.78	0.668								
$2^9/_{10}$				0.75	0.844	0.91	0.947	0.954	0.929	0.874	0.79	0.681								
3				0.735	0.831	0.902	0.945	0.96	0.945	0.902	0.831	0.735								
$3^1/_{10}$				0.714	0.811	0.884	0.932	0.954	0.948	0.916	0.857	0.775	0.67							
$3^1/_8$				0.71	0.806	0.882	0.93	0.953	0.95	0.92	0.864	0.784	0.682							
$3^1/_5$				0.697	0.794	0.87	0.923	0.951	0.953	0.93	0.882	0.811	0.718							
$3^1/_4$				0.689	0.787	0.863	0.917	0.948	0.954	0.936	0.894	0.827	0.74							
$3^3/_{10}$				0.681	0.778	0.856	0.912	0.946	0.955	0.941	0.903	0.842	0.76	0.659						

续表

每极每相槽数 q	绕组线圈节距 y（以槽数计）																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$3^3/_8$				0.669	0.766	0.845	0.905	0.94	0.915	0.946	0.915	0.868	0.787	0.695						
$3^2/_5$					0.762	0.841	0.901	0.939	0.955	0.948	0.919	0.890	0.796	0.706						
$3^1/_2$					0.747	0.828	0.890	0.932	0.953	0.953	0.932	0.907	0.828	0.747						
$3^3/_8$					0.732	0.813	0.877	0.923	0.945	0.955	0.941	0.927	0.853	0.782	0.695					
$3^3/_4$					0.71	0.792	0.859	0.908	0.941	0.955	0.950	0.925	0.886	0.807	0.753					
$3^4/_5$					0.703	0.785	0.852	0.903	0.937	0.954	0.952	0.932	0.894	0.84	0.77	0.685	0.677			
4					0.677	0.76	0.812	0.865	0.925	0.949	0.958	0.949	0.925	0.885	0.829	0.76	0.747			

每极每相槽数 q	绕组线圈节距 y（以槽数计）																							
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$4^1/_5$	0.731	0.802	0.86	0.905	0.936	0.952	0.954	0.949	0.912	0.87	0.814	0.762												
$4^1/_4$	0.725	0.796	0.855	0.901	0.933	0.951	0.955	0.944	0.919	0.88	0.811	0.803												
$4^2/_5$	0.707	0.778	0.83	0.887	0.924	0.945	0.955	0.951	0.833	0.902	0.859	0.827												
$4^1/_2$	0.695	0.766	0.827	0.877	0.915	0.941	0.954	0.954	0.941	0.915	0.877	0.848	0.792	0.727										

续表

每极每相槽数 q	绕组线圈节距 y(以槽数计)																							
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$4^3/5$	0.682	0.752	0.811	0.867	0.907	0.935	0.951	0.955	0.946	0.925	0.892	0.875	0.827	0.779	0.703									
$4^3/4$		0.737	0.80	0.852	0.894	0.926	0.946	0.955	0.952	0.937	0.912	0.882	0.831	0.782	0.718	0.645								
$4^4/5$		0.731	0.794	0.847	0.887	0.922	0.944	0.954	0.953	0.941	0.917	0.910	0.814	0.829	0.774	0.711								
5		0.711	0.774	0.829	0.874	0.910	0.936	0.951	0.957	0.951	0.936	0.931	0.905	0.87	0.827	0.775	0.716	0.653						
$5^1/4$		0.682	0.747	0.802	0.85	0.889	0.919	0.941	0.951	0.955	0.947	0.941	0.92	0.891	0.853	0.808	0.755	0.695						
$5^2/5$		0.669	0.731	0.788	0.836	0.877	0.909	0.933	0.945	0.955	0.952	0.945	0.928	0.902	0.869	0.827	0.778	0.722	0.659					
$5^1/2$		0.659	0.722	0.778	0.827	0.869	0.902	0.928	0.945	0.954	0.954	0.953	0.933	0.925	0.9	0.867	0.827	0.78	0.727	0.668				
$5^3/4$			0.698	0.754	0.804	0.848	0.884	0.913	0.935	0.948	0.955	0.954	0.945	0.929	0.904	0.874	0.836	0.79	0.739	0.681				
$5^4/5$			0.693	0.75	0.80	0.844	0.881	0.91	0.933	0.947	0.954	0.956	0.953	0.942	0.924	0.896	0.867	0.828	0.783	0.732	0.676			
6			0.676	0.732	0.783	0.828	0.867	0.898	0.924	0.942	0.953	0.954	0.955	0.948	0.936	0.916	0.89	0.857	0.814	0.775	0.725	0.67		
$6^1/5$			0.658	0.714	0.765	0.811	0.850	0.884	0.911	0.932	0.954	0.953	0.955	0.95	0.938	0.92	0.895	0.864	0.827	0.784	0.796	0.682		
$6^1/4$			0.656	0.71	0.761	0.806	0.846	0.882	0.908	0.93	0.954	0.951	0.953	0.953	—	0.93	—	0.882	—	0.811	—	0.718		
$6^2/5$				0.697	—	0.794	—	0.87	—	0.923	—	0.948	—	0.954	—	0.936	—	0.894	—	0.827	—	0.74		
$6^1/2$				0.689	—	0.787	—	0.863	—	0.917	—	0.946	0.953	0.955	0.951	0.94	0.924	0.903	0.875	0.842	0.804	0.76	0.711	0.65
$6^3/5$				0.681	0.731	0.778	0.819	0.856	0.887	0.912	0.932	0.94	0.951	0.955	0.953	0.946	0.933	0.915	0.891	0.862	0.827	0.787	0.743	0.642
$6^3/4$				0.669	0.711	0.766	0.808	0.845	0.877	0.905	0.925	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.695
7						0.747	—	0.828	—	0.83	—	0.932	—	0.953	—	0.953	—	0.932	—	—	—	—	—	0.747

注　如果是 120°相带（每对极 3 个极相组）的绕组时，还应将上述的绕组系数乘以 0.866。

表 2-10　　三相异步电动机的 η_N 和 $\cos\varphi_N$

额定功率 P_N (kW)	J02 型								Y 系列（统一设计）							
	2 极		4 极		6 极		8 极		2 极		4 极		6 极		8 极	
	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$	η_N (%)	$\cos\varphi_N$
0.55(0.6)	—	—	74	0.76	—	—	—	—	—	—	70.5	0.76	—	—	—	—
0.75(0.8)	77.5	0.85	76.5	0.77	75	0.70	—	—	73	0.84	72.1	0.76	72.5	0.70	—	—
1.1	79.5	0.86	79	0.79	77	0.72	—	—	76	0.86	79	0.78	73.5	0.72	—	—
1.5	81	0.87	80.5	0.81	78.5	0.74	—	—	79	0.85	79	0.79	77.5	0.74	—	—
2.2	82.5	0.87	82	0.83	80.5	0.76	80.5	0.68	82	0.86	81	0.82	80.5	0.74	81	0.71
3	84	0.88	83.5	0.84	82.5	0.78	82.5	0.72	82	0.87	82.5	0.81	83	0.76	82	0.72
4	85.5	0.88	85	0.85	84	0.79	84	0.75	85.5	0.87	84.5	0.82	84	0.77	84	0.73
5.5	86.5	0.88	86	0.86	85	0.80	85	0.77	85.5	0.88	85.5	0.84	85.3	0.78	85	0.74
7.5	87.5	0.88	87	0.87	86	0.81	86	0.78	86.2	0.88	87	0.85	86	0.78	86	0.75
(10)	87.5	0.88	87.5	0.87	87	0.82	87	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—
11 (13)	88	0.88	88	0.88	87.5	0.83	87.5	0.81	87.2	0.88	88	0.84	87	0.78	86.5	0.77
15 (17)	88.5	0.90	89	0.88	88.5	0.84	88	0.82	88.2	0.88	88.5	0.85	89.5	0.81	88	0.76
18.5	—	—	—	—	—	—	—	—	89	0.89	91	0.86	89.8	0.83	89.5	0.76
22	88.5	0.90	89.5	0.88	89	0.85	88.5	0.82	89	0.89	91.5	0.86	90.2	0.83	90	0.78
30	89.5	0.91	90	0.88	89.5	0.86	89	0.83	90	0.89	92.2	0.87	90.2	0.85	90.5	0.80
37 (40)	90	0.91	91	0.89	90.5	0.87	90	0.84	90.5	0.89	91.8	0.87	90.8	0.86	91	0.79
45	—	—	—	—	—	—	—	—	91.5	0.89	92.3	0.88	92	0.87	91.7	0.80
55	90	0.92	91.5	0.89	91.5	0.88	91	0.84	91.4	0.89	92.6	0.88	91.6	0.87	92	0.81
75	91	0.92	92	0.89	92	0.89	—	—	91.4	0.89	92.7	0.88	92	0.87	92	0.81
90 (100)	92	0.92	92	0.90	—	—	—	—	92	0.89	93.5	0.88	92	0.87	92.5	0.82

注　括号内的功率为 J02 型电动机的功率。

$$h_y=\left(\frac{32.7-23}{2}-2.53+\frac{0.4}{3}\right)=2.453\ (\text{cm})$$

3）定子槽净面积 A_s。由式（2-27）得

$$A_s=\frac{2\times0.4+0.58}{2}(2.05-0.3)+\frac{\pi\times0.4^2}{2}$$

$$=1.4588\ (\text{cm}^2)$$

（2）确定电源电压为三相 50Hz，380V。

（3）估算极数。由式（2-32）得

$$2p=(0.35\sim0.4)\frac{Z_s b_t}{h_y}$$

$$=(0.35\sim0.4)\frac{54\times0.7767}{2.453}$$

$$=5.984\sim6.839$$

取 $2p=6$

（4）求极距。由式（2-33）得

$$\tau=\frac{\pi D_{si}}{2p}=\frac{\pi\times23}{6}=12.04\ (\text{cm})$$

（5）选择气隙磁通密度。因电动机为封闭式 6 极，从表 2-5 中选取气隙磁通密度 $B_g=0.8\text{T}$。

（6）计算每极磁通。因电动机为 6 极，从表 2-6 中选 $K_s=1.30$，从表 2-7 中选 $\alpha_p=0.7$，由式（2-34）可得

$$\Phi=0.7\times0.8\times0.1204\times0.22\times0.92=0.0136\ (\text{Wb})$$

（7）验算轭磁通密宽。由式（2-35）得

$$B_y=\frac{\Phi}{2h_y l_s\times0.92}=\frac{0.0136}{2\times0.0245\times0.22\times0.92}=1.371\ (\text{T})$$

其值在表 2-5 中 B_y 的范围内（1.17～1.53T）。

（8）验算齿磁通密度。由式（2-36）得

$$B_t=\frac{\Phi}{\alpha_p\frac{Z_S}{2p}b_t l_S\times 0.92}$$

$$=\frac{0.0136}{0.7\times\frac{54}{6}\times 0.00776\times 0.22\times 0.92}$$

$$=1.374\ (\mathrm{T})$$

其值在表 2-5 中 B_t 允许的 1.35～1.59T 范围内。

(9) 确定绕组因数及接法。由表 2-8 取 $K_v=0.93$，并确定绕组为双层绕组，采用△联结。

取 $\beta=0.9$，有

$$y=\beta Z_p=0.9\times\frac{54}{6}=8.1$$

取 $y'=8$，即 1～9 槽

故 $\beta=\frac{y'}{Z_p}=\frac{8}{9}$

$$K_s=\sin\beta 90^\circ=\sin\frac{8}{9}\times 90^\circ=0.9848$$

$$K_d=\frac{\sin\left(\frac{p\pi}{Z_s}q\right)}{q\sin\frac{p\pi}{Z_s}}=\frac{\sin\left(\frac{3\times 180^\circ}{54}\times 3\right)}{3\sin\frac{3\times 180^\circ}{54}}=0.9599$$

$$K_w=K_sK_d=0.9848\times 0.9599=0.9453$$

(10) 计算每相绕组线圈匝数。由式 (2-43) 得

$$N_p=\frac{K_vU_p\times 10^{-2}}{2.22K_w\Phi}=\frac{0.93\times 380\times 10^{-2}}{2.22\times 0.9453\times 0.0136}=123.8\ (\text{匝})$$

取 $N_p=126$ (匝)

(1) 计算每槽导线数

$$N_s=\frac{3aN}{Z_s}=\frac{3\times 2\times 126}{54}=14\ (\text{匝})$$

（12）计算导线直径

1）计算带绝缘的导线直径 d_{wi}。因绕组采用双层绕组，B级绝缘，取 $\Delta i=0.25$mm，槽绝缘所占面积为

$$A_i=\Delta i\ (2h_s'+\pi R+2R+b_{s1})$$
$$=0.25\ (2\times20.5+\pi\times4+2\times4+5.8)$$
$$=16.84\ (\text{mm}^2)$$

槽有效面积为

$$A_e=A_s-A_i=145.88-16.84=129.04\ (\text{mm}^2)$$

取槽满率 $S_f=0.78$，由式（2-45）可得

$$d_{wi}=\sqrt{\frac{0.78\times129.04}{14}}=2.68\ (\text{mm})$$

用 2 根导线并绕，故每根带绝缘的导线直径为 1.34mm。

2）选用高强度漆包线，由表 2-3 可知选用的导线直径为 1.25mm，即 2-Φ1.25mm。

（13）计算相电流 I_p。从表 2-5 中选取电流密度 $J=5.2\text{A/mm}^2$，由式（2-49）可得

$$I_p=2\times2\times\frac{\pi\times1.25^2}{4}\times5.2=25.5\ (\text{A})$$

（14）验算线负荷 A。由式（2-50）可得

$$A=\frac{3aNI_p\times10^2}{\pi D_{si}}=\frac{3\times2\times126\times25.5\times10^2}{\pi\times23}$$
$$=26680\ (\text{A/m})$$
$$=266.8\ (\text{A/cm})$$

A 的值在表 2-5 中线负荷为 190～300A/cm 的范围内。

（15）计算电动机的功率 P。从表 2-10 中选取 $\cos\varphi=0.85$，$\eta=89\%$，则有

$$P = 3U_p I_p \cos\varphi\eta \times 10^{-3}$$
$$= 3 \times 380 \times 25.5 \times 0.85 \times 89\% \times 10^{-3}$$
$$= 21.99 \approx 22\text{kW}$$

上述结果与实际较接近。

（三）三相异步电动机改变极数的计算

改变异步电动机极数一般适用于笼型异步电动机。对于绕线转子异步电动机，除了改变定子绕组极数外，还要改变转子绕组的极数，故很少采用。

1．改极计算时应考虑的问题

（1）定、转子槽配合校验。

1）为防止堵转时产生同步附加转矩，要使下面不等式成立，即

$$Z_r \neq Z_s \tag{2-52}$$

$$Z_r \neq 6pk \tag{2-53}$$

2）为防止电动机运行时产生同步附加转矩，要使下面不等式成立，即

$$Z_r \neq Z_s + 2p \tag{2-54}$$

$$Z_r \neq Z_s + p \tag{2-55}$$

$$Z_r \neq 6pk + p \tag{2-56}$$

3）为防止电磁制动运转时产生同步附加转矩，要使下面不等式成立，即

$$Z_r \neq Z_s - 2p \tag{2-57}$$

$$Z_r \neq Z_s - p \tag{2-58}$$

$$Z_r \neq 6pk - p \tag{2-59}$$

4）为防止产生电磁振动和噪声，要使下面不等式成立，即

$$Z_r \neq Z_s \pm i \tag{2-60}$$

$$Z_r \neq Z_s \pm 2p \pm i \tag{2-61}$$

$$Z_r \neq Z_s \pm p \pm i \tag{2-62}$$

$$Z_r \neq 6pk \pm i \tag{2-63}$$

$$Z_r \neq 6pk \pm 2p \pm i \tag{2-64}$$

式中 Z_r——转子槽数；

Z_s——定子槽数；

i——1、2、3；

p——电动机极对数；

k——自然整数，如 1、2、3、…n。

按上面给出的不等式进行验证，如不符合要求，还要按经验数据查槽配合。因此，上面介绍的校验条件不是绝对的，这是因为每台电动机结构不尽相同，同时还有直槽和斜槽之别。为了便于确定正确的槽数比，在表 2-11 中介绍了槽数比推荐值，可供参考。

表 2-11　　三相异步电动机定、转子槽数推荐表

极数	定子槽数	转子槽数	
		直槽	斜槽
2	18	—	16，26
	24	[16]，32	(18),20,(30),(31),33,34,35
	30	22，38	(18),20,21,23,(24),37,39,40
	36	26，28，44，46	25，27，29，43，45，47
	42	33，34，50，52	—
	48	38，40，56，58	37，39，41，55，57，59

续表

极数	定子槽数	转子槽数	
		直槽	斜槽
4	24	[32]	16, [20], 22, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, (44), (46)	(24), 27, (28), (30), [32], 45, 48
	42	34, (50), 52, 54	(33), 34, [38], (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (39), 40, [44], 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 42, (48)	33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	(34), 36, 62, [64]	35, 44, 61, 63, 65
	54	—	58, 62
	72	58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113

续表

极数	定子槽数	转子槽数	
		直槽	斜槽
10	60	44，46，74，76	57，69，77，78，79
	90	66，72，74，76，104，106，108，110，112，114	70，71，73，87，93，107，109
	120	86，88，92，94，96，98，102，104，106，134，140，142，144，146	99，101，103，117，123，137，139
12	72	56，64，80，88	69，75，80，89，91，92
	90	68，70，74，82，98，106，110	(71)，(73)，86，87，93，94，(107)，109
	108	86，88，92，100，116，124，128，130，132	84，89，91，104，105，111，112，125，127
	144	124，128，136，152，160，164，166，168，170，172	125，127，141，147，161，163

注 圆括号中的槽数具有较坏的起动性能，方括号中的槽数不能在制动情况下进行。

(2) 改变电动机转速时，不宜使改极前后电动机转速相差过大，尤其是对于提高转速的改制。例如不宜将 6 极电动机改为 2 极，否则改制后定子轭部磁通密度将显著增加。也不宜将 4 极电动机改为 10 极，因改制后电动机功率和定子轭部磁通密度都将显著减小。

(3) 提高电动机转速时，应考虑转子和转轴的机械强度

是否容许，轴承是否会过热等，必要时要进行验算。

1）转子圆周速度按下式计算

$$v=\frac{\pi D_r n}{60\times 1000} \tag{2-65}$$

式中 v——转子圆周速度，m/s；

D_r——转子外径，mm；

n——转子转速，r/min。

笼型异步电动机 v 在 40～60m/s 范围内。

2）电动机转矩按下式计算

$$T_N'=T_N\frac{P_N'/n_N'}{P_N/n_N} \tag{2-66}$$

式中 T_N'——改极后电动机额定转矩，N·m；

T_N——改极前电动机额定转矩，N·m；

P_N'——改极后电动机额定输出功率，kW；

P_N——改极前电动机额定输出功率，kW；

n_N'——改极后电动机额定转速，r/min；

n_N——改极前电动机额定转速，r/min。

改极时，如保持输出功率不变，则电动机的额定转矩与转速成反比。

（4）增加电动机转速，线圈节距增大，端部轴向长度增大，这时应考虑是否能保证线圈与端盖之间的绝缘距离。对于低压电动机，这段距离要求 7～10mm。

（5）降低转速时，由于通风冷却条件变坏，要考虑电动机散热问题，最好将风扇结构作相应的改变。

2. 改极简易计算方法

对于 20 世纪 60 年代以后国内外生产的异步电动机，如果旧绕组数据齐全，在改极时，不必进行复杂重绕计算，只

要按表 2-12 所给出的计算公式进行简易计算便可获得重绕数据。

表 2-12　　改极简易计算公式

极数改变	每相串联匝数	导线截面积（mm^2）	电动机功率（kW）
2 极改 4 极	$N_4=(1.4\sim1.5)\frac{\alpha_4K_{w2}}{\alpha_2K_{w4}}N_2$	$A_4=(0.75\sim0.8)\frac{\alpha_2}{\alpha_4}A_2$	$P_4=(0.55\sim0.6)P_2$
2 极改 6 极	$N_6=(1.82\sim2.1)\frac{\alpha_6K_{w2}}{\alpha_2K_{w6}}N_2$	$A_6=(0.6\sim0.64)\frac{\alpha_2}{\alpha_6}A_2$	$P_6=(0.39\sim0.42)P_2$
4 极改 2 极	$N_2=(0.7\sim0.75)\frac{\alpha_2K_{w4}}{\alpha_4K_{w2}}N_4$	$A_2=(1.2\sim1.27)\frac{\alpha_4}{\alpha_2}A_4$	$P_2=(1.3\sim1.4)P_4$
4 极改 6 极	$N_6=(1.3\sim1.4)\frac{\alpha_6K_{w4}}{\alpha_4K_{w6}}N_4$	$A_6=(0.8)\frac{\alpha_4}{\alpha_6}A_4$	$P_6=0.7P_4$
4 极改 8 极	$N_8=(1.63\sim1.82)\frac{\alpha_8K_{w4}}{\alpha_4K_{w8}}N_4$	$A_8=(0.72)\frac{\alpha_4}{\alpha_8}A_4$	$P_8=0.56P_4$
6 极改 2 极	$N_2=(0.53\sim0.64)\frac{\alpha_2K_{w6}}{\alpha_6K_{w2}}N_6$	$A_2=(1.38\sim1.53)\frac{\alpha_6}{\alpha_2}A_6$	$P_2=(1.63\sim1.82)P_6$
6 极改 4 极	$N_4=(0.75\sim0.85)\frac{\alpha_4K_{w6}}{\alpha_6K_{w4}}N_6$	$A_4=(1.15\sim1.20)\frac{\alpha_6}{\alpha_4}A_6$	$P_4=(1.25\sim1.30)P_6$
6 极改 8 极	$N_8=(1.25\sim1.30)\frac{\alpha_8K_{w6}}{\alpha_6K_{w8}}N_6$	$A_8=(0.90)\frac{\alpha_6}{\alpha_8}A_6$	$P_8=0.8P_6$
8 极改 4 极	$N_4=(0.6\sim0.81)\frac{\alpha_4K_{w8}}{\alpha_8K_{w4}}N_8$	$A_4=(1.26\sim1.38)\frac{\alpha_8}{\alpha_4}A_8$	$P_4=(1.5\sim1.63)P_8$
8 极改 6 极	$N_6=(0.8\sim0.95)\frac{\alpha_6K_{w8}}{\alpha_8K_{w6}}N_8$	$A_6=(1.1\sim1.15)\frac{\alpha_8}{\alpha_6}A_8$	$P_6=(1.2\sim1.25)P_8$

表 2-12 中 K_w 为绕组因数，K_{w2}表示 2 极时的绕组因数，K_{w4}表示 4 极时的绕组因数……；α 表示槽距角，α_2 表示 2 极时的槽距角，α_4 表示 4 极时的槽距角……。余类推。

例 2-18 J02-72-6 型 22kW 老式电动机，已知 $U_N=380V$，△联结，$I_N=43.2A$，$Z_s/Z_r=54/44$，$\alpha_1=2$，$y_1=1\sim9$ 槽，线圈匝数 $N_c=14$，线规：2－ϕ1.2mm 并绕。要求改为 4 极，试求新绕组数据。

解（1）查定、转子槽数推荐表 2-11，由于表内没有此推荐值，所以利用以下的公式校验，校验后均符合要求，说明允许改 4 极运行。

$44\neq54$；$44\neq12k$；$44\neq54+4$；$44\neq54+2$；$44\neq12k+2$；$44\neq54-4$；$44\neq54-2$；$44\neq12k-2$；$44\neq54\pm i$；$44\neq54\pm4\pm i$；$44\neq54\pm2\pm i$；$44\neq12k\pm i$；$44\neq12k\pm4\pm i$。

（2）计算 K_{w6}、K_{w4}、α_6 和 α_4。

1）计算 K_{w6}和 α_6

每极每相槽数

$$q_6=\frac{Z_s}{3\times2p}=\frac{54}{3\times6}=3$$

槽距角

$$\alpha_6=\frac{60^\circ}{3}=20^\circ$$

每极槽数

$$Z_{p6}=\frac{54}{6}=9$$

短距比

$$\beta_6=\frac{y_6}{Z_{p6}}=\frac{8}{9}$$

短距因数

$$K_{s6}=\sin\beta_6 90^\circ=\sin\frac{8}{9}\times 90^\circ$$
$$=0.9848$$

分布因数

$$K_{d6}=\frac{\sin\left(\frac{\alpha_6}{2}q_6\right)}{q_6\sin\frac{\alpha_6}{2}}=\frac{\sin\left(\frac{20^\circ}{2}\times 3\right)}{3\sin\frac{20^\circ}{2}}=0.9599$$

绕组因数

$$K_{w6}=K_{d6}K_{s6}=0.9599\times 0.9848=0.9453$$

2）计算 K_{w4}和 α_4

$$q_4=\frac{54}{3\times 4}=4\frac{1}{2}$$

$$\alpha_4=\frac{60^\circ}{\frac{9}{2}}=\frac{40^\circ}{3}$$

$$Z_{p4}=\frac{54}{4}=\frac{27}{2}$$

取 $y_4=1\sim 9$ 槽，则

$$\beta_4=\frac{y_4}{Z_{p4}}=\frac{8}{\frac{27}{2}}=\frac{16}{27}$$

$$K_{s4}=\sin\beta_4 90^\circ=\sin\frac{16}{27}\times 90^\circ=0.8021$$

$$K_{d4}=\frac{\sin\left(\frac{\alpha_4}{2}q_4\right)}{q_4\sin\frac{\alpha_4}{2}}=\frac{\sin\left(\frac{\frac{40^\circ}{3}}{2}\times\frac{9}{2}\right)}{\frac{9}{2}\sin\frac{\frac{40^\circ}{3}}{2}}=0.9571$$

$$K_{w4}=K_{d4}K_{s4}=0.9571\times0.8021=0.7677$$

（3）计算 N_4。查表 2-12 得到 N_4 为

$$N_4=(0.75\sim0.85)\frac{\alpha_4K_{w6}}{\alpha_6K_{w4}}N_6$$

如系数取 0.85，则

$$N_4=0.85\times\frac{\frac{40}{3}\times0.9543}{20\times0.7677}\times14=9.862\text{（匝）}$$

取 $N_4=10$ 匝

（4）计算导线截面。查表 2-12，知

$$A_4=(1.15\sim1.20)\frac{\alpha_6}{\alpha_4}A_6$$

原 6 极时用 2 根 $\phi1.2$mm 导线并绕，故

$$A_6=2\times\frac{\pi\times1.2^2}{4}=2.262\ (\text{mm}^2)$$

如系数取 1.20，则

$$A_4=1.2\times\frac{20}{\frac{40}{3}}\times2.262=4.072\ (\text{mm}^2)$$

如取 3 根同截面积导线并绕，则每根导线截面积为

$$A_4'=\frac{4.072}{3}=1.357\ (\text{mm}^2)$$

导线直径为

$$d_4=\sqrt{\frac{4A_4'}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\times1.357}{\pi}}=1.314\ (\text{mm})$$

所以可选 3 根 $\phi1.30$mm 导线并绕。

（5）计算改极后电动机功率。查表 2-12，知

$$P_4=(1.25\sim1.30)P_6$$

如系数取 1.30，则

$$P_4 = 1.30 \times 22 = 28.6 \text{ (kW)}$$

故电动机功率约为 28kW。

本例中的绕组因数亦可从表 2-9 中直接查出。

（四）绕组导线替代计算

导线代用的原则是保持电流密度和每匝电压基本不变，从而保证电动机性能基本不变。

1. 改变并绕根数的计算

为了嵌线方便和容易整理端部，往往将选用的圆粗导线改为几根相同直径的圆导线并绕，但总截面积不应超过原来的截面积。其计算公式为

$$A_w = \frac{A_w'}{n} \tag{2-67}$$

式中 A_w——改用并绕后每根导线截面积，mm^2；

A_w'——原用导线截面积，mm^2；

n——改用导线的并绕根数。

例 2-19 有 1 台电动机重绕计算需导线截面积为 $4.52mm^2$，如用 1 根导线绕制，其直径为 $\phi 2.4mm$，由于导线太粗，拟用 4 根同直径导线并绕，试求导线直径是多少？

解

$$A_w = \frac{A_w'}{n} = \frac{4.52}{4} = 1.13 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.13}{\pi}} = 1.199 \text{ (mm)}$$

故可选用 4 根 $\phi 1.2mm$ 导线并绕。

2. 改变并联支路数计算

由于原来计算的导线截面过粗，考虑用多根并联细导线代替，但超过 4 根后绕制有困难，这时可采用增加绕组的并

联支路数的办法来减少线圈的并绕根数，其计算公式为

$$A_w = A_w' \frac{a'}{a} \tag{2-68}$$

式中 A_w——改变并联支路后的导线截面积，mm^2；

A_w'——绕组原来导线截面积，mm；

a'——绕组原来的并联支路数；

a——绕组改变后的并联支路数。

由于减少了导线截面以后，会引起导线发热，故需增加每槽 的导线根数，其计算公式为

$$N_s = N_s' \frac{a}{a'} \tag{2-69}$$

式中 N_s——改绕后的每槽导线数；

N_s'——绕组原来的每槽导线数。

必须注意，改变后的并联支路数应满足 $2p/a$ 为整数的条件，否则并联支路数不能成立。

例 2-20 如有 1 台 6 极电动机，绕组为 1 路星形双层叠绕，导线截面积为 $5.9mm^2$，每槽导线数 $N_s = 16$ 根/槽，试选标准导线。

解 如用 1 根导线，其直径为

$$d_w = \sqrt{\frac{4 \times 5.9}{\pi}} = 2.74 \text{ (mm)}$$

查电磁线手册知和直径为 Φ2.74mm 相近的标准导线为 Φ2.63mm 和 Φ2.83mm，导线截面误差大，而且线径太粗，嵌线困难。若改选直径 Φ1.12mm 导线，用 6 根并绕，则并绕根数太多，绕制不方便。为此拟改为 3 路并联，以满足极数与并联支路数关系的条件。

$$\frac{2p}{a} = \frac{6}{3} = \text{整数}$$

线圈导线截面积为

$$A_w = A_w' \frac{a'}{a} = 5.9 \times \frac{1}{3} = 1.967 \ (\text{mm}^2)$$

可选用标准导线 Φ1.12mm 2 根并绕，其截面积为

$$A_w = 2 \times \frac{\pi \times 1.12^2}{4} = 1.97 \ (\text{mm}^2)$$

改变后的每槽导线数为

$$N_s = N_s' \frac{a'}{a} = 16 \frac{3}{1} = 48 \ (\text{根/槽})$$

故双层绕组的每个线圈匝数为 24 匝，电动机绕组的接线方式可不改变。

3. 改变绕组联结方式计算

当电源电压、绕组型式和并绕根数不变时，把 Y 联结的绕组改为△联结，线圈匝数要增加$\sqrt{3}$倍，导线截面积减少$\sqrt{3}$倍；反之，△联结的绕组改为 Y 联结时，线圈匝数要减少$\sqrt{3}$倍，导线截面积要增加$\sqrt{3}$倍。

(1) Y 联结改△联结

$$N_{cd} = \sqrt{3} N_{cs} \tag{2-70}$$

$$A_{wd} = \frac{1}{\sqrt{3}} A_{ws} \tag{2-71}$$

或

$$d_{wd} = 0.76 d_{ws} \tag{2-72}$$

(2) △联结改 Y 联结

$$N_{cs} = \frac{1}{\sqrt{3}} N_{cd} \tag{2-73}$$

$$A_{ws} = \sqrt{3} A_{wd} \tag{2-74}$$

$$d_{ws} = 1.32 d_{wd} \tag{2-75}$$

在式 (2-70) ～式 (2-75) 中

N_{cs}、N_{cd}——分别表示Y联结和△联结时的线圈匝数；

A_{ws}、A_{wd}——分别表示Y联结和△联结时的导线截面积，mm^2；

d_{ws}、d_{wd}——分别表示Y联结和△联结时的导线线径，mm。

例 2-21 有1台电动机修理重绕，原为1路Y形联结，每槽导线数 $N_s=28$ 根/槽，导线直径 $\phi 1.35$mm，因无这种规格的导线，试求能用何种规格导线代用？

解 （1）采用2根导线并绕

原导线截面积为

$$A'_w=\frac{\pi\times 1.35^2}{4}=1.431\ (mm^2)$$

并绕后每根导线截面积为

$$A_w=\frac{A'_w}{2}=\frac{1.431}{2}=0.7155\ (mm^2)$$

导线直径为

$$d_w=\sqrt{\frac{4\times 0.7155}{\pi}}=0.9545\ (mm)$$

故可选标准直径为0.96mm的2根导线并绕。

（2）改Y联结为△联结

$d_{wd}=0.76d_{ws}=0.76\times 1.35=1.026\ (mm)$

故可选 $\Phi 1.04$mm 的标准导线。

改为△联结后，每槽导线数应改为

$$N_{sd}=\sqrt{3}N_{ss}=\sqrt{3}\times 28\approx 48\ (根/槽)$$

4. 查表计算法

表2-13为并联支路数 a 不变时，圆导线代用表，可供参考。

表 2-13　　圆导线代用表（α 不变）　　(mm)

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
0.47	—	0.62	—
0.49	—	0.64	—
0.51	—	0.67	—
0.53	—	0.69	—
0.55	—	0.72	—
0.57	—	0.74	—
0.59	—	0.77	—
0.62	—	0.44，0.69	0.47
0.64	—	0.44，0.72	0.49
	—	0.47，0.69	—
	—	0.49，0.69	—
0.67	—	0.46，0.77	0.51
	—	0.49，0.74	—
	—	0.49，0.74	—
	—	0.51，0.72	—
	—	0.55，0.69	—
0.72	—	0.44，0.83	0.55
	—	0.47，0.83	—
	—	0.49，0.80	—
	—	0.51，0.80	—
	—	0.55，0.77	—
	—	0.59，0.74	—
	—	0.62，0.72	—
	—	0.64，0.69	—
0.74	—	0.96	0.57
	—	0.44，0.86	—
	—	0.47，0.86	—
	—	0.49，0.83	—
	—	0.51，0.83	—
	—	0.55，0.80	—
	—	0.57，0.80	—
	—	0.59，0.77	—
	—	0.62，0.74	—
	—	0.64，0.74	—
	—	0.69，0.69	—

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
0.77	—	1.0	0.59
	—	0.47，0.90	—
	—	0.53，0.86	—
	—	0.55，0.86	—
	—	0.57，0.83	—
	—	0.59，0.83	—
	—	0.62，0.80	—
	—	0.67，0.77	—
	—	0.69，0.74	—
	—	0.72，0.72	—
0.80	—	1.04	—
	—	0.44，0.96	—
	—	0.49，0.93	—
	—	0.51，0.93	—
	—	0.53，0.90	—
	—	0.55，0.90	—
	—	0.59，0.86	—
	—	0.62，0.86	—
	—	0.64，0.86	—
	—	0.67，0.80	—
	—	0.69，0.80	—
	—	0.72，0.77	—
	—	0.74，0.74	—
0.83	0.47～0.69	1.08	—
	—	0.44，1.00	—
	—	0.51，0.96	—
	—	0.53，0.96	—
	—	0.57，0.93	—
	—	0.59，0.93	—
	—	0.62，0.90	—
	—	0.67，0.86	—
	—	0.72，0.83	—
	—	0.74，0.80	—
	—	0.77，0.77	—

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
0.86	0.44，0.74	1.12	—
	0.47，0.72	0.47，1.04	—
	0.51，0.69	0.51，1.0	—
	—	0.59，0.96	—
	—	0.64，0.93	—
	—	0.67，0.90	—
	—	0.69，0.90	—
	—	0.72，0.86	—
	—	0.74，0.86	—
	—	0.77，0.83	—
	—	0.80，0.80	—
0.90	0.47，0.77	0.49，1.08	0.69
	0.51，0.74	0.55，1.08	—
	0.53，0.72	0.57，1.04	—
	0.55，0.72	0.62，1.00	—
	0.57，0.69	0.64，1.00	—
	—	0.69，0.96	—
	—	0.72，0.93	—
	—	0.74，0.93	—
	—	0.77，0.90	—
	—	0.80，0.86	—
	—	0.83，0.83	—
0.93	0.47，0.80	0.49，1.12	—
	0.51，0.77	0.51，1.12	—
	0.53，0.77	0.57，1.08	—
	0.55，0.74	0.59，1.08	—
	0.57，0.72	0.64，1.04	—
	0.62，0.69	0.69，1.00	—
	—	0.72，1.00	—
	—	0.77，0.96	—
	—	0.80，0.93	—
	—	0.86，0.86	—

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
0.96	0.44，0.86	1.25	0.74
	0.47，0.83	0.49，1.16	—
	0.49，0.83	0.51，1.16	—
	0.53，0.80	0.57，1.12	—
	0.57，0.77	0.59，1.12	—
	0.62，0.74	0.64，1.08	—
	0.64，0.72	0.67，1.08	—
	0.67，0.69	0.72，1.04	—
	—	0.77，1.00	—
	—	0.83，0.96	—
	—	0.86，0.93	—
	—	0.90，0.90	—
1.0	0.44，0.90	0.53，1.20	0.73
	0.51，0.86	0.55，1.20	—
	0.55，0.83	0.62，1.16	—
	0.57，0.83	0.64，1.16	—
	0.59，0.80	0.69，1.12	—
	0.64，0.77	0.74，1.08	—
	0.67，0.74	0.80，1.04	—
	0.69，0.72	0.86，1.00	—
	—	0.90，0.96	—
	—	0.93，0.93	—
1.04	0.47，0.93	0.55，1.25	0.80
	0.51，0.90	0.57，1.25	—
	0.53，0.90	0.64，1.20	—
	0.57，0.86	0.72，1.16	—
	0.59，0.86	0.74，1.16	—
	0.62，0.83	0.80，1.12	—
	0.67，0.80	0.83，1.08	—
	0.69，0.77	0.90，1.04	—
	0.72，0.74	0.93，1.00	—
	0.74，0.74	0.96，0.96	

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
1.08	0.49，0.96	0.57，1.30	0.83
	0.51，0.96	0.59，1.30	0.44，0.69
	0.55，0.93	0.67，1.25	—
	0.59，0.90	0.69，1.25	—
	0.64，0.86	0.74，1.20	—
	0.69，0.83	0.77，1.20	—
	0.72，0.80	0.83，1.16	—
	0.77，0.77	0.86，1.10	—
	—	0.93，1.08	—
	—	0.96，1.04	—
	—	1.00，1.00	—
1.12	0.49，1.00	0.57，1.35	0.49，0.69
	0.51，1.00	0.59，1.35	0.86
	0.57，0.96	0.67，1.30	—
	0.59，0.96	0.69，1.30	—
	0.62，0.93	0.77，1.25	—
	0.67，0.90	0.80，1.25	—
	0.72，0.86	0.86，1.20	—
	0.74，0.83	0.90，1.16	—
	0.77，0.80	0.96，1.12	—
	0.80，0.80	1.00，1.08	—
	—	1.04，1.04	—
1.16	0.44，1.08	0.59，1.40	0.44，0.77
	0.51，1.04	0.62，1.40	0.47，0.74
	0.53，1.04	0.69，1.35	0.49，0.74
	0.59，1.00	0.72，1.35	0.51，0.72
	0.64，0.96	0.80，1.30	0.55，0.69
	0.64，0.93	0.86，1.25	—
	0.72，0.90	0.93，1.20	—
	0.74，0.90	0.96，1.20	—
	0.77，0.86	1.00，1.16	—
	0.80，0.83	1.04，1.12	—
	—	1.08，1.03	—

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
1.20	0.44，1.12	1.56	0.44，0.80
	0.51，1.08	0.62，1.45	0.49，0.77
	0.53，1.08	0.64，1.45	0.53，0.74
	0.59，1.04	0.72，1.40	0.55，0.72
	0.67，1.00	0.80，1.35	0.57，0.72
	0.72，0.96	0.83，1.35	0.59，0.69
	0.77，0.93	0.90，1.30	0.90
	0.80，0.90	0.96，1.25	—
	0.83，0.86	1.04，1.20	—
	—	1.08，1.16	—
	—	1.12，1.12	—
1.25	0.47，1.16	0.67，1.50	0.47，0.83
	0.55，1.12	0.69，1.50	0.51，0.80
	0.57，1.12	0.77，1.45	0.55，0.77
	0.62，1.08	0.80，1.45	0.59，0.74
	0.64，1.08	0.86，1.40	0.62，0.72
	0.69，1.04	0.93，1.35	—
	0.74，1.00	0.96，1.35	—
	0.80，0.96	1.00，1.30	—
	0.83，0.93	1.08，1.25	—
	0.86，0.90	1.12，1.20	—
	—	1.16，1.16	—
1.30	0.49，1.20	0.69，1.56	0.47，0.86
	0.51，1.20	0.72，1.56	0.49，0.86
	0.57，1.16	0.80，1.50	0.53，0.83
	0.59，1.16	0.83，1.50	0.57，0.80
	0.64，1.12	0.90，1.45	0.59，0.80
	0.67，1.12	0.93，1.45	0.62，0.77
	0.72，1.08	1.00，1.40	0.67，0.72
	0.74，1.08	1.04，1.35	—
	0.77，1.04	1.12，1.30	—
	0.83，1.00	1.16，1.25	—
	0.90，0.93	1.20，1.20	—

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
1.35	0.49，1.25 0.51，1.25 0.62，1.20 0.67，1.16 0.69，1.16 0.74，1.12 0.77，1.12 0.80，1.08 0.86，1.04 0.90，1.00 0.96，0.96 — —	0.72，1.62 0.74，1.62 0.83，1.56 0.86，1.56 0.93，1.50 0.96，1.50 1.00，1.45 1.04，1.45 1.08，1.40 1.12，1.40 1.16，1.35 1.20，1.30 1.25，1.25	0.44，0.93 0.49，0.90 0.55，0.86 0.57，0.86 0.59，0.83 0.64，0.80 0.67，0.77 0.72，0.74 0.72，0.72 — — — —
1.40	0.49，1.30 0.51，1.30 0.62，1.25 0.64，1.25 0.72，1.20 0.74，1.20 0.77，1.16 0.80，1.16 0.83，1.12 0.90，1.08 0.93，1.04 —	0.74，1.68 0.77，1.68 0.86，1.62 0.90，1.62 0.96，1.56 1.00，1.56 1.08，1.50 1.12，1.45 1.16，1.45 1.20，1.40 1.25，1.35 1.30，1.30	0.51，0.93 0.53，0.93 0.57，0.90 0.62，0.86 0.67，0.83 0.69，0.80 0.74，0.77 — — — — —
1.45	0.53，1.35 0.55，1.35 0.62，1.30 0.64，1.30 0.72，1.25 0.74，1.25 0.80，1.20 0.83，1.20 0.86，1.16 0.93，1.12 0.96，1.08 1.00，1.04	0.77，1.74 0.80，1.74 0.90，1.68 0.93，1.68 1.00，1.62 1.08，1.56 1.12，1.56 1.16，1.50 1.20，1.50 1.25，1.45 1.30，1.40 1.35，1.35	0.47，1.00 0.53，0.96 0.55，0.96 0.59，0.93 0.65，0.90 0.69，0.86 0.72，0.83 — — — — —

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
1.50	0.53，1.40 0.55，1.40 0.64，1.35 0.67，1.35 0.74，1.30 0.77，1.30 0.80，1.25 0.90，1.20 0.96，1.16 1.00，1.12 1.04，1.08 —	1.95 0.80，1.81 0.83，1.81 0.90，1.74 0.93，1.74 0.96，1.74 1.04，1.68 1.12，1.62 1.20，1.56 1.30，1.50 1.35，1.45 1.40，1.40	0.47，1.04 0.53，1.00 0.55，1.00 0.62，0.96 0.67，0.93 0.69，0.90 0.74，0.86 0.77，0.83 0.80，0.80 — — —
1.56	0.67，1.40 0.69，1.40 0.77，1.35 0.80，1.35 0.86，1.30 0.93，1.25 1.00，1.20 1.04，1.16 1.08，1.12 — — —	2.02 0.80，1.88 0.83，1.88 0.93，1.81 0.96，1.81 1.08，1.74 1.16，1.68 1.20，1.68 1.25，1.62 1.35，1.56 1.40，1.50 1.45，1.45	0.47，1.08 0.49，1.08 0.55，1.04 0.59，1.04 0.62，1.00 0.64，1.00 0.69，0.96 0.74，0.93 0.77，0.90 0.83，0.83 — —
1.62	0.72，1.45 0.74，1.45 0.80，1.40 0.83，1.40 0.90，1.35 0.96，1.30 1.04，1.25 1.08，1.20 1.12，1.16	2.10 0.82，1.95 0.86，1.95 1.00，1.88 1.12，1.81 1.25，1.74 1.30，1.68 1.40，1.62 1.50，1.50	0.51，1.12 0.52，1.12 0.59，1.08 0.67，1.04 0.72，1.00 0.77，0.96 0.80，0.93 — —

续表

原导线直径 d_w	绕组联结方式不变时，代用的导线直径 d_{w1}、d_{w2}	绕组联结由△联结改Y联结时，代用导线直径 d_{w3}、d_{w4}	绕组联结由Y联结改△联结时，代用导线直径 d_{w5}、d_{w6}
1.68	0.74，1.50	0.86，2.02	0.44，1.20
	0.77，1.50	0.90，2.02	0.53，1.16
	0.83，1.45	0.94，1.95	0.55，1.16
	0.86，1.45	0.98，1.95	0.62，1.12
	0.93，1.40	1.16，1.88	0.69，1.08
	1.00，1.35	1.25，1.81	0.74，1.04
	1.08，1.30	1.30，1.81	0.80，1.00
	1.12，1.25	1.35，1.74	0.83，0.96
	1.16，1.20	1.45，1.68	0.90，0.90
	—	1.50，1.62	—
	—	1.56，1.56	—
1.74	0.77，1.56	2.26	0.55，1.20
	0.80，1.56	0.90，2.10	0.57，1.20
	0.86，1.50	0.93，2.10	0.62，1.16
	0.90，1.50	1.08，2.02	0.64，1.16
	0.96，1.45	1.20，1.95	0.69，1.12
	1.04，1.40	1.30，1.88	0.72，1.13
	1.08，1.35	1.40，1.81	0.77，1.08
	1.12，1.35	1.50，1.74	0.83，1.04
	1.16，1.30	1.62，1.62	0.86，1.00
	1.25，1.20	—	0.90，0.96
1.81	0.90，1.56	1.40，1.95	0.69，1.20
	0.93，1.56	1.45，1.88	0.72，1.16
	1.00，1.50	1.56，1.81	0.74，1.16
	1.08，1.45	1.62，1.74	0.80，1.12
	1.16，1.40	1.68，1.68	0.86，1.08
	1.20，1.35	—	0.90，1.04
	1.25，1.30	—	0.93，1.00
1.88	0.83，1.68	—	0.57，1.30
	0.86，1.68	—	0.59，1.30
	0.93，1.62	—	0.67，1.25
	0.96，1.62	—	0.69，1.25
	1.04，1.56	—	0.77，1.20
	1.12，1.50	—	0.83，1.16
	1.16，1.50	—	0.90，1.12
	1.20，1.45	—	0.93，1.08
	1.25，1.40	—	—
	1.30，1.35	—	—

例 2-22 有 1 台电动机，原为△联结，导线直径为 ϕ1.30mm，求改为Y联结时有哪几种导线代用方案？

解 查表 2-13 得出，对应原导线直径 ϕ1.30mm，由△联结改为Y联结时代用导线有以下 11 组，即：ϕ0.69mm，ϕ1.56mm；ϕ0.72mm，ϕ1.56mm；ϕ0.80mm，ϕ1.50mm；ϕ0.83mm，ϕ1.50mm；ϕ0.90mm，ϕ1.45mm；ϕ0.93mm，ϕ1.45mm；ϕ1.00mm，ϕ1.40mm；ϕ1.04mm，ϕ1.35mm；ϕ1.12mm，ϕ1.30mm；ϕ1.16mm，ϕ1.25mm 和 ϕ1.20mm，ϕ1.20mm。

5. 绕组接线方式和并联路数同时改变的导线代用

在选用代用导线的实际过程中，往往是在改变电动机绕组接线的同时，也改变绕组的并联路数，这时改变后的导线线径 d_w 和线圈匝数 N_c，可按下面公式计算出来

$$d_w = \xi_d d_w' \tag{2-76}$$

$$N_c = \xi_N N_c' \tag{2-77}$$

式中 d_w'、N_c'——分别表示电动机原来导线的线径和线圈匝数；

ξ_d、ξ_N——分别表示电动机导线线径系数和线圈匝数系数。这些系数可直接由表 2-14 中查取。分子表示 ξ_d、分母表示 ξ_N。

例 2-23 某老式 55kW，8 极三相异步电动机，已知线圈匝数 N_c=8 匝，导线为 2-ϕ1.45mm 和 2-ϕ1.35mm 并绕，绕组并联路数 a = 4，双层绕组，电压 220V/380V，电流 187A/108A，接线△/Y。要求改后的电压为 380V，△联结，同时可改变绕组的并联路数。求代用导线的规格？

解 已知原并联路数为 4，Y 联结，8 极，从表 2-2 可知，改成△联结时，可能接出的并联路数有 1、2、4、8 等 4 种。

查表 2-11 可知，当接成 1 路△联结时，$\xi_d=1.52$，$\xi_N=0.43$；2 路△联结时，$\xi_d=1.07$，$\xi_N=0.87$；4 路△联结时，$\xi_d=0.76$，$\xi_N=1.73$；8 路△联结时，$\xi_d=0.54$，$\xi_N=3.44$。

（1）如仍用两种导线，双根并绕，当 4Y 联结改为 1△联结时，导线直径为

$$d_w=\xi_d d_w'=1.52\times1.45=2.204\ (\text{mm})$$

$$d_w=\xi_d d_w'=1.52\times1.35=2.052\ (\text{mm})$$

故可采用 2-ϕ2.2mm 和 2-ϕ2.0mm 导线并绕，但考虑工艺性问题，应采用 4 根以上导线并绕方案，使导径变细。设 2 根 ϕ2.2mm 导线截面积为 A_{w1}，2 根 ϕ2.0mm 导线截面积为 A_{w2}，有

$$A_{w1}=2\times\frac{\pi\times2.2^2}{4}=7.602\ (\text{mm}^2)$$

$$A_{w2}=2\times\frac{\pi\times2^2}{4}=6.283\ (\text{mm}^2)$$

如用 4 根导线并绕，则

$$d_{w1}=\frac{1}{2}\times\sqrt{\frac{4\times7.602}{\pi}}=1.556\ (\text{mm})$$

$$d_{w2}=\frac{1}{2}\times\sqrt{\frac{4\times6.283}{\pi}}=1.414\ (\text{mm})$$

因此，新的导线和并绕根数为：4 根 ϕ1.4mm 导线并绕和 4 根 ϕ1.56mm 导线并绕。可见减少并联路数（由 4 路 Y 联结改 1 路△联结），导线并绕根数增加了，这样给绕线工艺带来困难。

改变后的线圈匝数为

$N_c=\xi_N N_c'=0.43\times8=3.44$（匝）

表 2-14　　绕组改接线后的线径系数 ξ_d 和匝数系数 ξ_N

绕组改接前 $\frac{\xi_d}{\xi_N}$ / 绕组改接后	一路 Y 联结	二路 Y 联结	三路 Y 联结	四路 Y 联结	五路 Y 联结	六路 Y 联结	八路 Y 联结	十路 Y 联结	一路 △ 联结	二路 △ 联结	三路 △ 联结	四路 △ 联结	五路 △ 联结	六路 △ 联结	八路 △ 联结	十路 △ 联结
一路 Y 联结	1.0/1.0	1.41/0.50	1.73/0.33	2.0/0.25	2.24/0.20	2.45/0.17	2.83/0.125	3.16/0.10	1.32/0.58	1.86/0.29	2.28/0.19	2.63/0.15	2.92/0.12	3.23/0.10	3.78/0.07	4.16/0.06
二路 Y 联结	0.71/2.0	1.0/1.0	1.22/0.67	1.41/0.50	1.58/0.40	1.73/0.33	2.0/0.25	2.24/0.20	0.93/1.16	1.32/0.58	1.61/0.39	1.86/0.29	2.06/0.23	2.28/0.19	2.64/0.15	2.94/0.11
三路 Y 联结	0.58/3.0	0.82/1.50	1.0/1.0	1.15/0.75	1.29/0.60	1.41/0.50	1.63/0.38	1.83/0.30	0.76/1.73	1.08/0.87	1.32/0.58	1.52/0.43	1.70/0.35	1.86/0.29	2.15/0.22	2.14/0.17
四路 Y 联结	0.50/4.0	0.71/2.0	0.87/1.33	1.0/1.0	1.12/0.80	1.22/0.67	1.41/0.50	1.58/0.40	0.66/2.32	0.93/1.16	1.14/0.77	1.32/0.58	1.47/0.46	1.61/0.39	1.86/0.29	2.08/0.23
五路 Y 联结	0.45/5.0	0.63/2.5	0.78/1.67	0.89/1.25	1.0/1.0	1.09/0.83	1.26/0.63	1.41/0.50	0.59/2.89	0.83/1.44	1.02/0.96	1.18/0.72	1.32/0.58	1.44/0.48	1.67/0.36	1.86/0.29
六路 Y 联结	0.41/6.0	0.58/3.0	0.71/2.0	0.82/1.50	0.91/1.20	1.0/1.0	1.15/0.75	1.29/0.60	0.54/3.46	0.76/1.73	0.93/1.15	1.08/0.87	1.20/0.69	1.32/0.58	1.52/0.43	1.70/0.35
八路 Y 联结	0.35/8.0	0.50/4.0	0.61/2.67	0.71/2.0	0.79/1.6	0.87/0.33	1.0/1.0	1.12/0.80	0.47/4.6	0.66/2.72	0.81/1.52	0.93/1.20	1.04/0.95	1.14/0.79	1.32/0.58	1.47/0.46
十路 Y 联结	0.32/10	0.45/5.0	0.58/3.3	0.63/2.5	0.71/2.0	0.78/1.67	0.89/1.25	1.0/1.0	0.42/5.8	0.59/2.9	0.72/1.9	0.83/1.5	0.93/1.20	1.02/1.0	1.18/0.72	1.32/0.58

续表

绕组改接前 $\frac{\xi_d}{\xi_N}$ / 绕组改接后	一路 Y 联结	二路 Y 联结	三路 Y 联结	四路 Y 联结	五路 Y 联结	六路 Y 联结	八路 Y 联结	十路 Y 联结	一路 △ 联结	二路 △ 联结	三路 △ 联结	四路 △ 联结	五路 △ 联结	六路 △ 联结	八路 △ 联结	十路 △ 联结
一路 △联结	0.77/1.73	1.07/0.86	1.32/0.58	1.52/0.43	1.69/0.35	1.86/0.29	2.15/0.22	2.41/0.17	1.0/1.0	1.41/0.50	1.73/0.33	2.0/0.25	2.24/0.20	2.45/0.17	2.83/0.13	3.16/0.10
二路 △联结	0.54/3.46	0.76/1.73	0.93/1.15	1.07/0.87	1.20/0.69	1.32/0.58	1.52/0.43	1.70/0.35	0.71/2.0	1.0/1.0	1.22/0.67	1.41/0.50	1.58/0.40	1.73/0.33	2.0/0.25	2.24/0.22
三路 △联结	0.44/5.19	0.62/2.59	0.76/1.73	0.88/1.30	0.98/1.04	1.07/0.87	1.24/0.65	1.40/0.52	0.58/3.0	0.82/1.50	1.0/1.0	1.15/0.75	1.29/0.60	1.41/0.50	1.63/0.38	1.83/0.30
四路 △联结	0.38/6.92	0.54/3.46	0.66/2.31	0.76/1.73	0.85/1.38	0.93/1.15	1.07/0.86	1.21/0.69	0.50/4.0	0.71/2.0	0.87/1.33	1.0/1.0	1.12/0.80	1.22/0.67	1.41/0.50	1.58/0.40
五路 △联结	0.34/8.65	0.48/4.33	0.59/2.88	0.68/2.16	0.76/1.73	0.83/1.44	0.96/1.18	1.07/0.86	0.45/5.0	0.63/2.5	0.78/1.67	0.90/1.25	1.0/1.0	1.10/0.83	1.27/0.63	1.41/0.50
六路 △联结	0.31/10.4	0.48/5.19	0.59/3.46	0.68/2.60	0.76/2.08	0.83/1.73	0.96/1.30	1.07/1.04	0.41/6	0.58/3	0.71/2	0.82/1.50	0.91/1.2	1.0/1.0	1.15/0.75	1.29/0.60
八路 △联结	0.27/1.38	0.39/6.88	0.47/4.64	0.54/3.44	0.60/2.80	0.66/2.32	0.76/1.73	0.85/1.38	0.35/8	0.50/4	0.61/2.67	0.71/2	0.79/1.6	0.87/1.33	1.0/1.0	1.12/0.8
十路 △联结	0.24/1.73	0.34/8.6	0.42/5.8	0.48/4.3	0.54/3.5	0.59/2.9	0.68/2.16	0.76/1.73	0.32/10	0.45/5	0.58/3.3	0.63/2.5	0.71/2.0	0.78/1.67	0.90/1.25	1.0/1.0

可见在匝数分配上也有困难，只能采用 3.5 匝，间隔使用 3 匝和 4 匝，不便于嵌线。

（2）当 4Y 联结改为 4△联结时，导线直径为

$$d_w = \xi_d d'_w = 0.76 \times 1.45 = 1.102 \text{（mm）}$$

$$d_w = \xi_d d'_w = 0.76 \times 1.35 = 1.026 \text{（mm）}$$

因此，可以选用 2 根 ϕ1.12mm 和 2 根 ϕ1.04mm 导线并绕。

改绕后的线圈匝数为

$$N_c = \xi_N N'_c = 1.73 \times 8 = 13.84 \text{（匝）}$$

故可选用 14 匝。

（3）4Y 联结改为 8△联结时，导线直径为

$$d_w = \xi_d d'_w = 0.54 \times 1.45 = 0.783 \text{（mm）}$$

$$d_w = \xi_d d'_w = 0.54 \times 1.35 = 0.729 \text{（mm）}$$

故可选用 2 根 ϕ0.8mm 和 2 根 ϕ0.72mm 导线并绕。考虑绕制的工艺性，可改用 1 根 ϕ1.16mm 和 1 根 ϕ1.0mm 导线并绕。

改绕后的线圈匝数为

$$N_c = \xi_N N'_c = 3.44 \times 8 = 27.52 \text{（匝）}$$

故可选用 28 匝。

（4）在采用△、Y 改变的代用导线计算时，要考虑到电动机的起动方式，如果是采用 Y-△减压起动，则在起动时必须按 Y 联结，运行时按△联结。

（五）单速电动机改为单绕组双速电动机的改绕计算

1. 改绕前的准备

（1）为改绕计算的需要和比较改绕后的性能，应测量和记录好原始数据，一般应包括以下各项：①额定功率 P_N；

②额定电压 U_N；③额定电流 I_N；④额定转速；⑤联结方式；⑥定子铁心外径 D_{se}；⑦定子铁心内径 D_{si}；⑧定子铁心长度 l_s；⑨定子轭高 h_y；⑩定子齿宽 b_t；⑪每槽导线数 N_s；⑫导线线径（裸线）；⑬节距 y；⑭绕组型式；⑮定子槽数 Z_s；⑯转子槽数 Z_r 等。

（2）检查定、转子槽数配合是否适宜所改的极数，可参考表 2-11。

（3）为使三相绕组对称，需满足下列两条件中的 1 条

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\text{整数} \tag{2-78}$$

$$\frac{Z_s}{tm}=\text{整数} \tag{2-79}$$

式中 q——每极每相槽数；

p——电动机极对数；

m——相数；

t——Z_s 和 p 的最大公约数。

（4）根据改绕电动机的工作特点，由单绕组倍极比双速电动机特性表 2-15 选取性能相应的接线方案。

表 2-15　　单绕组倍极比双速电动机特性

序号	极数（2p）a	极数（2×2p）b	转矩比	功率比	特性
	联结方法	联结方法	T_b/T_a	P_b/P_a	
1	2Y	Y	1	0.5	恒转矩
2	2Y	2Y	2	1	恒功率
3	2Y	△	1.732	0.866	可变转矩
4	△	2Y	2.3	1.15	可变转矩
5	2△	Y	0.577	0.288	可变转矩

例 2-24　1 台三相异步电动机定子为 36 槽，欲改成4/6 极，或 4/8 极双速，试判断能否得出对称绕组。另 1 台三相

异步电动机定子 24 槽，欲改成 4/6 极双速，是否能得出对称绕组？

解 （1）定子 36 槽，改为 4/6 极

4 极时

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

6 极时

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{36}{6\times3}=2$$

3 和 2 均为整数，故能得到对称绕组。

（2）定子 36 槽，改为 4/8 极

8 极时

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{36}{8\times3}=\frac{3}{2}=1\frac{1}{2}$$

故改为 8 极时，为分数槽绕组。为了作出判断，求 $Z_s=36$和 $p=4$ 的最大公约数 t，$t=4$，于是有

$$\frac{Z_s}{tm}=\frac{36}{4\times3}=3$$

3 为整数，可以肯定 8 极也能得出对称绕组。

（3）定子 24 槽，改为 4/6 极

4 极时

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{24}{4\times3}=2$$

能得出对称绕组

6 极时

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{24}{6\times3}=\frac{4}{3}=1\frac{1}{3}$$

$Z_s=24$ 和 $p=3$ 的最大公约数 $t=3$

$$\frac{Z_s}{tm}=\frac{24}{3\times3}\neq整数$$

故 6 极时不能得出对称绕组。

2. 改绕计算方法

(1) 原电动机有关数据计算

1) 极距 τ。计算公式同式 (2-33)。

2) 齿距 t

$$t=\frac{\pi D_{si}}{Z_s} \tag{2-80}$$

3) 每槽导线数 N_s。

4) 每相绕组串联匝数 N_p

$$N_p=\frac{N_s Z_s}{2ma} \tag{2-81}$$

式中 a——每相绕组并联支路对数。

5) 计算气隙磁通密度 B_g

$$B_g=\frac{K_v U_N\times10^{-2}}{2.22a_p N_p K_w \tau l_s} \tag{2-82}$$

式中 B_g——气隙磁通密度，T；

K_v——压降因数，可参考表 2-8 选取；

K_w——绕组因数，可从表 2-9 中查出，亦可按式 (2-38)～(2-42) 求得。

τ——极距，m；

l_s——定子铁心长度，m。

6) 计算齿部磁通密度

$$B_t=\frac{B_g t}{0.92b_t} \tag{2-83}$$

式中 B_t——齿部磁通密度，T。

7）计算轭部磁通密度

$$B_y=\frac{a_p\tau B_g}{2h_y} \tag{2-84}$$

式中　B_y——轭部磁通密度，T。

（2）改绕计算

1）计算两种极数下的极距。计算公式同式（2-33）。

2）根据原绕组估算改绕后的每槽导线数

$$N_s=\frac{U_pK_w'a}{U_p'K_wa'}N_s' \tag{2-85}$$

式中　N_s'、N_s——改绕前、后绕组每槽导线数，根/槽；

U_p'、U_p——改绕前、后绕组每相电压，V；

a'、a——改绕前、后绕组并联支路对数；

K_w'、K_w——改绕前、后绕组因数。

3）计算改绕后两种极数的每相串联匝数。用式（2-81）分别求取。

4）改绕后双速的气隙磁通密度比，以下角标 m 代表多极数，l 代表少极数。

$$\frac{B_{gm}}{B_{gl}}=\frac{K_{vm}U_{pm}N_{pl}K_{wl}p_m}{K_{vl}U_{pl}N_{pm}K_{wm}p_l} \tag{2-86}$$

式中　B_{gm}——多极数的气隙磁通密度，T；

B_{gl}——少极数的气隙磁通密度，T；

K_v——压降因数，数值参考表 2-8 选取，每相串联的匝数多 K_v 较小；反之较大。一般小功率电动机取较小值；

U_p——相电压，V；

N_p——每相串联匝数。

5）核算双速时的气隙磁通密度

①计算基准极数的气隙磁通密度，按式（2-82）计算。

②根据磁通密度比计算另一极数的气隙磁通密度

$$B_{gm}=\frac{B_{gm}}{B_{gl}}B_{gl} \tag{2-87}$$

6）核算双速时的齿部磁通密度

①计算基准极数的齿部磁通密度，按式（2-83）计算。

②根据磁通密度比计算另一极数的齿部磁通密度

$$B_{tm}=\frac{B_{gm}}{B_{gl}}B_{tl} \tag{2-88}$$

7）核算双速时的轭部磁通密度。根据两种不同的极距和气隙磁通密度，按式（2-84）分别计算。

核算的各部磁通密度最好不要超过原电动机的数值，特别是改绕的电动机属降低转速时，磁通密度还应考虑降低一些。而一般也应在允许范围内，电动机各部磁通密度的允许值见表2-5。如在核算中发现某部磁通密度超过允许值时，应增加匝数重新算，否则，将会引起过大的空载电流和运转发热。

8）计算连绝缘的导线直径

$$d_{wi}=d'_{wi}\sqrt{\frac{N'_s}{N_s}} \tag{2-89}$$

式中 d_{wi}——改绕后的连绝缘的导线直径，mm；

d'_{wi}——原来的连绝缘的导线直径，mm；

N'_s——原来每槽导线数，根/槽；

N_s——改绕后每槽导线数，根/槽。

根据计算结果，选相近标准导线直径 d_w。

9）估算电动机输出功率。改绕后按原来电流密度不变的情况下，与原来电动机相同极数的双速电动机输出功率，可由下式计算

$$P_N=\frac{U_p a d_w^2}{U_p' a' (d_w')^2}P_N' \tag{2-90}$$

式中 a——改绕后绕组并联支路对数；

a'——原来电动机绕组并联支路对数；

d_w——改绕后的导线直径，mm；

d_w'——原来电动机绕组导线直径，mm；

P_N'——原来电动机的额定功率，kW。

双速电动机的功率比

$$\frac{P_{Nm}}{P_{Nl}}=\frac{U_{pm}a_m}{U_{pl}a_l}K_f \tag{2-91}$$

式中 K_f——考虑到低速通风散热差而需降低功率使用的系数，一般 K_f 取 0.7～0.95。

改绕后的另一极数下的电动机输出功率可根据双速功率比求得。

例 2-25 1 台 4 极三相异步电动机，改为 4/6 极双速电动机，试计算改绕后的绕组数据。已知该电动机原始数据如下：

额定功率 $P_N=11\text{kW}$

额定电压 $U_N=380\text{V}$

额定电流 $I_N=22.07\text{A}$

接线方式 1△联结

极数 $2p=4$

定子槽数 $Z_s=36$

转子槽数 $Z_r=26$

定子外径 $D_{se}=26\text{cm}$

定子内径　$D_{si}=17cm$

铁心长度　$l_s=15.5cm$

定子齿宽　$b_t=0.75cm$

定子轭高　$h_y=2.57cm$

每槽导线数　$N_s=28$ 根/槽

绕组型式　单层交叉式

线圈节距　$y=8$

导线直径　2-Φ1.3mm

解　(1)选择绕组方案

1）查表 2-11，从表中可以看出，定子 36 槽，转子 24 槽，对 4 极和 6 极来说，均是较好的配合。

2）因 $Z_s/2pm=36/12=3$，故可安排三相对称绕组。

3）改绕双速后，为使电动机能在两个极数下均有较高的输出功率，采用不规则分布的反转向方案，绕组因数 $K_{w4}=0.72$，$K_{w6}=0.88$；联结方式为：4/6 极-2Y/△，引出线 6 根。图 2-6 为槽矢量图，图 2-7 为绕组联结图，图 2-8 为接线圆图。

(2) 原电动机有关数据计算

1）定子齿距

$$t=\frac{\pi D_{si}}{Z_s}=\frac{\pi\times 17}{36}=1.484\ (\text{cm})$$

2）每相串联匝数

$$N_p=\frac{N_s Z_s}{2ma}=\frac{28\times 36}{2\times 3\times 1}=168\ (\text{匝/相})$$

3）每极每相槽数

$$q=\frac{Z_s}{2pm}=\frac{36}{4\times 3}=3$$

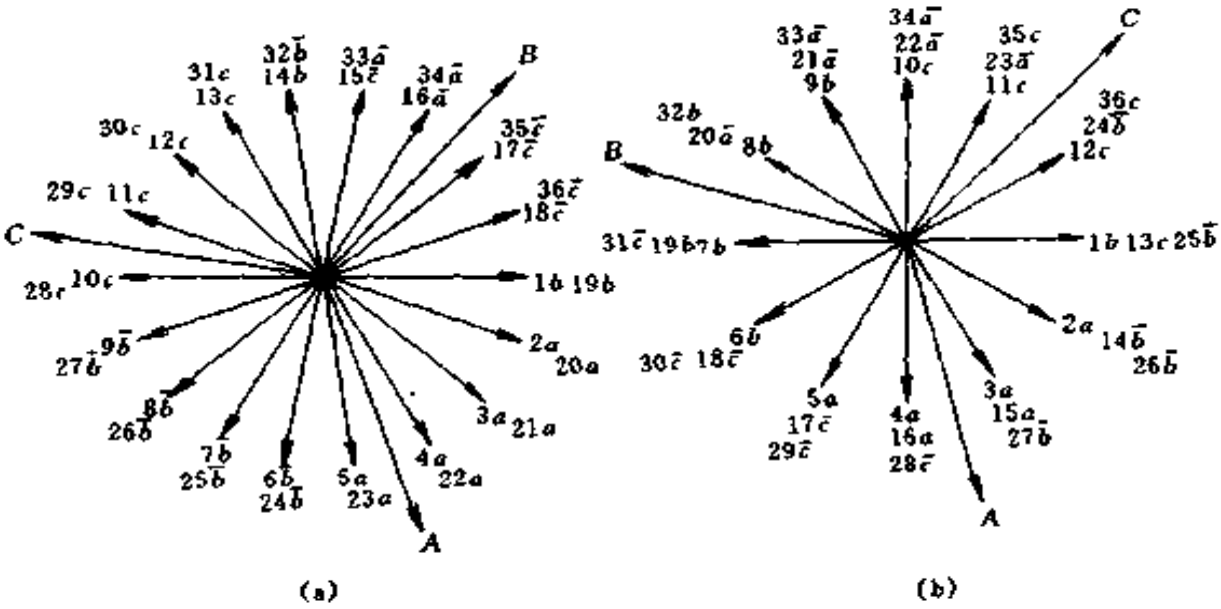


图 2-6　4/6 极 36 槽非正规分布槽矢量图

(a) 4 极；(b) 6 极

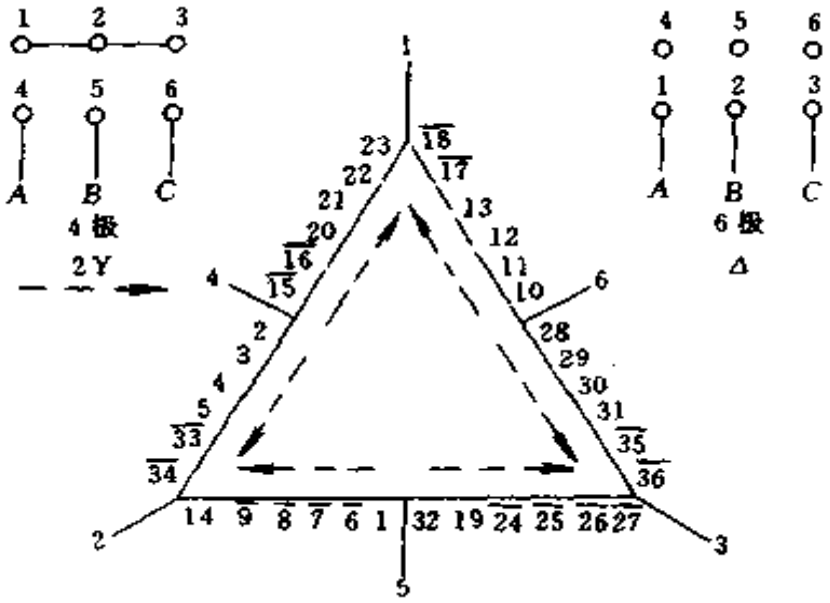


图 2-7　4/6 极双速电动机绕组联结图

4）查表 2-9，可知绕组因数 $K_w=0.945$。

5）气隙磁通密度。查表 2-8，取压降因数 $K_v=0.93$，查表 2-6，表 2-7 取 $a_p=0.7$，则气隙磁通密度为

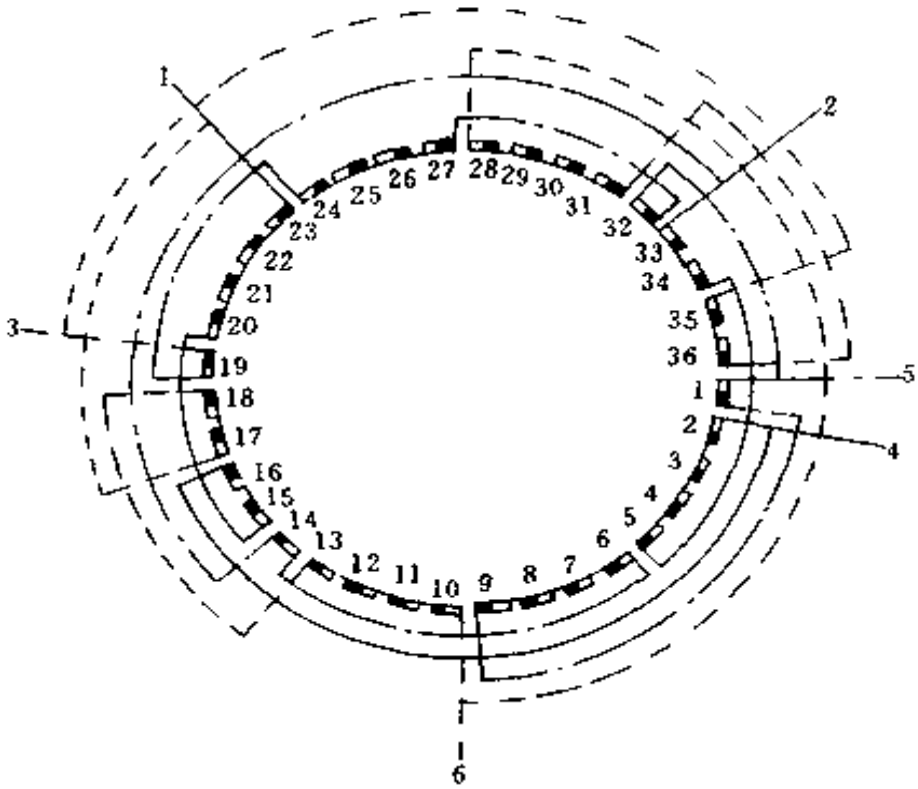


图 2-8　4/6 极双速电动机 2Y/△接线圆图

$$B_g=\frac{K_v U_N\times 10^{-2}}{0.7\times 2.22 N_p K_w \tau l_s}$$

$$=\frac{0.93\times 380\times 10^{-2}}{1.554\times 168\times 0.945\times \frac{\pi\times 0.17}{4}\times 0.155}$$

$$=0.6921\ (\mathrm{T})$$

6）齿部磁通密度

$$B_t=\frac{B_g t}{0.92 b_t}=\frac{0.6921\times 1.484}{0.92\times 0.75}=1.488\ (\mathrm{T})$$

7）轭部磁通密度

$$B_y=\frac{a_p \tau B_g}{2h_y}=\frac{0.7\times\frac{\pi\times 0.17}{4}\times 0.6921}{2\times 0.0257}=1.258\ (\mathrm{T})$$

（3）改绕计算

1）极距

$$\tau_4=\frac{\pi\times 17}{4}=13.35\ (\text{cm})$$

$$\tau_6=\frac{\pi\times 17}{6}=8.901\ (\text{cm})$$

2）改绕后每槽导线数估算。以原来 4 极为基准，原来额定电压 380V，1△联结；改绕后的 4 极是 2Y 联结，相电压为 220V，并联支路 $a=2$，故每槽导线数为

$$N_s=\frac{U_p K'_w a}{U'_p K_w a}N'_s=\frac{220\times 0.945\times 2}{380\times 0.72\times 1}\times 28=42.55\ (\text{根/槽})$$

取 $N_s=42$ 根/槽，绕组采用双层叠绕，每个线圈为 21 匝。

3）改绕后每相串联匝数

$$N_{p4}=\frac{N_s Z_s}{2ma}=\frac{42\times 36}{2\times 3\times 2}=126\ (\text{匝/相})$$

因为 6 极为 1△联结，$a=1$，故

$$N_{p6}=\frac{42\times 36}{2\times 3}=252\ (\text{匝/相})$$

4）改绕后双速的磁通密度比。选压降因数 $K_{v4}=0.93$，$K_{v6}=0.92$，故

$$\frac{B_{g6}}{B_{g4}}=\frac{K_{v6}U_{p6}N_{p4}K_{w4}p_6}{K_{v4}U_{p4}N_{p6}K_{w6}p_4}$$

$$=\frac{0.92\times 380\times 126\times 0.72\times 3}{0.93\times 220\times 252\times 0.88\times 2}=1.048$$

5）核算双速气隙磁通密度

$$B_{g4}=\frac{K_{v4}U_{p4}\times10^{-2}}{2.22a_pN_{p4}K_{w4}\tau_4l_s}$$

$$=\frac{0.93\times220\times10^{-2}}{1.554\times126\times0.72\times0.1335\times0.155}\approx0.7014\ (\mathrm{T})$$

$$B_{g6}=B_{g4}\times1.048=0.7\times1.048=0.7336\ (\mathrm{T})$$

6）核算双速时的齿部磁通密度

$$B_{t4}=\frac{B_{g4}t}{0.92b_t}=\frac{0.7014\times1.48}{0.92\times0.75}=1.504\ (\mathrm{T})$$

$$B_{t6}=\frac{B_{g6}}{B_{g4}}B_{t4}=1.048\times1.504=1.576\ (\mathrm{T})$$

7）核算双速时的轭部磁通密度

$$B_{y4}=\frac{a_p\tau B_{g4}}{2h_y}=\frac{0.7\times\frac{\pi\times0.17}{4}\times0.7014}{2\times0.0257}=1.275\ (\mathrm{T})$$

$$B_{y6}=\frac{a_p\tau B_{g6}}{2h_y}=\frac{0.7\times\frac{\pi\times0.17}{4}\times0.7336}{2\times0.0257}=1.334\ (\mathrm{T})$$

从以上核算可见，两种极数下的各部磁通密度均接近于原来数值，并在电动机各部允许磁通密度范围内（见表2-5），所以可取每槽导线数 $N_s=42$ 根/槽，双层绕组的每个线圈为21匝。

8）选用导线。查表2-3得原来单根导线直径为Φ1.3mm，连绝缘的导线直径 $d'_{wi}=1.41$mm，故改绕后连绝缘的导线直径为

$$d_{wi}=d'_{wi}\sqrt{\frac{N'_s}{N_s}}=1.41\sqrt{\frac{28}{42}}=1.151\ (\mathrm{mm})$$

故可选用2-Φ1.04mm高强度漆包圆铜线。

9）估算电动机输出功率。改绕后 4 极时电动机输出功率为

$$P_{N4}=\frac{U_p a d_w^2}{U_p' a' (d_w')^2}P_{N4}'=\frac{220\times2\times1.04^2}{380\times1\times1.3^2}\times11=8.152\ (\text{kW})$$

联系数 $K_f=0.95$，则 6/4 极的功率比为

$$\frac{P_{N6}}{P_{N4}}=\frac{U_{p6}a_6}{U_{p4}a_4}K_f=\frac{380\times1}{220\times2}\times0.95=0.8205$$

改绕后 6 极时电动机输出功率为

$$P_{N6}=8.152\times0.8205=6.689\ (\text{kW})$$

三、直流电机简易重绕计算

（一）直流电机改电压计算

1．并励或他励绕组改压计算

（1）重绕后导线截面积

$$A_{wE}'=\frac{U_e'}{U_e}A_{wE} \tag{2-92}$$

式中 A_{wE}'——重绕后绕组导线截面积，mm^2；

A_{wE}——重绕前绕组导线截面积，mm^2；

U_e'——重绕后励磁绕组电压，V；

U_e——重绕前励磁绕组电压，V。

（2）重绕后励磁绕组每极匝数

$$N_{pE}'=\frac{U_e'}{U_e}N_{pE} \tag{2-93}$$

式中 N_{pE}'——重绕后励磁绕组每极匝数；

N_{pE}——重绕前励磁绕组每极匝数。

2．串励绕组改压计算

（1）重绕后串励绕组每极匝数

$$N'_{pD}=\frac{U'_e a'}{U_e a}N_{pD}=\frac{A_{wD}a'}{A'_{wD}a}N_{pD} \tag{2-94}$$

式中 N'_{pD}——重绕后串励绕组每极匝数；

N_{pD}——重绕前串励绕组每极匝数；

a'——重绕后串励绕组并联支路数；

a——重绕前串励绕组并联支路数；

A_{wD}——重绕前串励绕组导线截面积，mm^2；

A'_{wD}——重绕后串励绕组导线截面积，mm^2。

（2）重绕后串励绕组导线截面积

$$A'_{wD}=A_{wD}\frac{a'N_{pD}}{aN'_{pD}} \tag{2-95}$$

3．换向极绕组改压计算

（1）重绕后换向极绕组每极匝数

$$N'_{pc}=N_{pc}\frac{U'_e a'_c}{U_e a_c} \tag{2-96}$$

式中 N'_{pc}——重绕后换向极绕组每极匝数；

N_{pc}——重绕前换向极绕组每极匝数；

a'_c——重绕后换向极绕组并联支路数；

a_c——重绕前换向极绕组并联支路数。

（2）重绕后换向极绕组导线截面积

$$A'_{wc}=A_{wc}\frac{U_e}{U'_e}=A_{wc}\frac{N_{ec}a'_c}{N'_{ec}a_c} \tag{2-97}$$

式中 A'_{wc}——重绕后换向极绕组导线截面积，mm^2；

A_{wc}——重绕前换向极绕组导线截面积，mm^2。

4．电枢绕组改压计算

（1）电枢绕组有效导线数计算

$$N'_a = N_a \frac{U'_e}{U_e} \tag{2-98}$$

式中 N'_a——重绕后电枢绕组有效导线数；

N_a——重绕前电枢绕组有效导线数。

（2）电枢绕组每槽导线数计算

$$N'_s = \frac{N'_a}{Z_a} \tag{2-99}$$

式中 N'_s——重绕后电枢绕组每槽导线数；

Z_a——电枢槽数。

（3）电枢绕组每槽绕组元件数计算

$$u = \frac{K}{Z_a} \tag{2-100}$$

式中 u——电枢绕组每槽绕组元件数；

K——换向片数。

（4）电枢绕组每元件匝数计算

$$N'_c = \frac{N'_s}{2u}$$

式中 N'_c——电枢绕组每元件匝数。

（5）电枢绕组导线截面积

$$A'_{wa} = A_{wa} \frac{U_e}{U'_e} \tag{2-101}$$

式中 A'_{wa}——重绕后电枢绕组导线截面积，mm^2；

A_{wa}——重绕前电枢绕组导线截面积，mm^2。

例 2-26 1 台 Z2-72 型直流电动机，已知额定功率 13kW，额定电压 110V，额定电流 142.3A，额定转速 1000r/min，并励。电枢绕组每元件 1 匝，总电枢导线数 N_a=250根，电枢槽数 Z_a=25，并联支路数 a=2，导线 2-

1.16mm×4.7mm，4 极，换向片数 $K=125$。主极绕组每极匝数 520 匝，导线 Φ1.08mm。换向极绕组每极匝数 19 匝，导线 2.63mm×12.5mm。现拟改为 220V 使用，试计算改压重绕数据。

解 （1）电枢绕组计算

1）有效导线数

$$N'_a = N_a \frac{U'_e}{U_e} = 250 \times \frac{220}{110} = 500 \text{（根）}$$

2）每槽导线数

$$N'_s = \frac{N'_a}{Z_a} = \frac{500}{25} = 20 \text{（根）}$$

3）每槽绕组元件数

$$u = \frac{K}{Z_a} = \frac{125}{25} = 5$$

4）每元件匝数

$$N'_c = \frac{N'_s}{2u} = \frac{20}{2 \times 5} = 2 \text{（匝）}$$

5）导线截面积

$$A'_{wa} = A_{wa} \frac{U_e}{U'_e} = 2 \times 1.16 \times 4.7 \times \frac{110}{220} = 1.16 \times 4.7 \ (\text{mm}^2)$$

故将原来 2 根 1.16mm×4.7mm 导线改为单根绕即可。

（2）主极绕组计算

1）导线截面积

$$A'_{wE} = A_{wE} \frac{U'_e}{U_e} = \frac{\pi \times 1.08^2}{4} \times \frac{220}{110} = 1.832 \ (\text{mm}^2)$$

2）导线直径

$$d_{wE} = \sqrt{\frac{4 \times 1.832}{\pi}} = 1.527 \ (\text{mm})$$

故可采用 2 根 Φ0.77mm 导线并绕。

3）每极匝数

$$N'_{pE}=N_{pE}\frac{U'_e}{U_e}=520\times\frac{220}{110}=1040\text{（匝/极）}$$

(3) 换向极绕组计算

1）绕组匝数

$$N'_{pc}=N_{pc}\frac{U'_e a'_c}{U_e a_c}$$

令 $a'_c=a_c=1$，则有

$$N'_{pc}=19\times\frac{220}{110}=38\text{（匝/极）}$$

2）绕组导线截面积

$$A'_{wc}=A_{wc}\frac{U_e}{U'_e}=2.63\times12.5\times\frac{110}{220}=16.44\ (\text{mm}^2)$$

按 16.4mm² 选择合适的导线，或者选 2.63mm × 6.4mm 导线。

（二）直流电机绕组重绕计算

1. 仅知道电动机励磁电压和励磁电流时的励磁绕组重绕计算方法

(1) 初步计算

1）估算绕组电阻值

$$R_e=\frac{U_e}{K_e I_e} \tag{2-102}$$

式中 R_e——励磁绕组电阻估算值，Ω；

U_e——励磁绕组电压，V；

K_e——励磁磁动势余量系数，一般取：电动机 K_e=1.05～1.15；发电机 K_e=1.2～1.3；

I_e——励磁绕组电流，A。

2）根据电机类型和通风方式，选择合适电流密度，一般取：小型电机 $J_e=3\sim5A/mm^2$；中大型电机 $J_e=2\sim3A/mm^2$。

3）计算导线截面积

$$A_{we}=\frac{I_e}{J_e} \tag{2-103}$$

式中 A_{we}——励磁绕组导线截面积，mm^2。

4）估算线圈平均匝长

$$l_e=2\ (b_{\infty}+l_{\infty}+0.012)\ (1.2\sim1.6)\ \times10^2 \tag{2-104}$$

式中 l_e——主极线圈平均匝长，cm；

b_{∞}——主极铁心宽度，m；

l_{∞}——主极铁心长度，m。

5）线圈匝数计算

$$N_e=\frac{4600A_{we}a_eR_e}{2pl_e} \tag{2-105}$$

（2）准确计算。根据初步计算结果，选择较接近的线规和匝数，并根据线圈实际尺寸算出准确平均匝长，再计算励磁绕组准确的电阻。计算公式与初步计算公式相同。

例 2-27 1 台 Z2-72 型，22kW 直流电动机，已知励磁电压 $U_e=220V$，励磁电流 $I_e=1.9A$，4 极，有铁心，需配制励磁线圈，试初步计算励磁线圈的数据。

解 （1）估算绕组电阻值，取 $K_e=1.05$

$$R_e=\frac{U_e}{K_eI_e}=\frac{220}{1.05\times1.9}=110.3\ (\Omega)$$

（2）计算导线截面积，取 $J_e=4A/mm^2$

$$A_{we}=\frac{I_e}{J_e}=\frac{1.9}{4}=0.475\ (\text{mm}^2)$$

$$d_{we}=\sqrt{\frac{4A_{we}}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\times0.475}{\pi}}=0.7777\ (\text{mm})$$

可选标准导线 Φ0.77mm，则

$$A'_{we}=\frac{\pi\times0.77^2}{4}=0.4657\ (\text{mm}^2)$$

（3）估算线圈平均匝长。测量得到主极铁心宽度 $b_\infty=0.068\text{m}$；主极铁心长度 $l_\infty=0.16\text{m}$，故

$$l_e=2\ (0.16+0.068+0.012)\times120=57.6\ (\text{cm})$$

（4）计算线圈匝数

$$N_e=\frac{4600\times0.4657\times1\times110.3}{2\times2\times57.6}=1026\ (\text{匝})$$

2. 换向极绕组重绕计算

如果不知道原有的换向极绕组数据，可换下式估算

$$N_{pc}=K_c\frac{N_a a_c}{8a_a p} \tag{2-106}$$

式中 N_{pc}——换向极绕组每极匝数；

K_c——系数。2 极电动机用 1 个换向极时 K_c 取 1.2～1.3；4 极电动机用 4 个换向极时，K_c 取 1.15～1.25。

N_a——电枢绕组总匝数；

a_c——换向极绕组并联支路数；

a_a——电枢绕组并联支路对数；

p——电机的极对数。

例 2-28 上例电动机，已知电枢绕组总匝数 $N_a=500$ 匝，电枢并联支路对数 $a_a=1$，换向极绕组并联支路数 $a_c=$

1，计算换向极绕组每极匝数是多少？

解　取 $K_c=1.2$

$$N_{pc}=K_c\frac{N_a a_c}{8a_a p}=1.2\times\frac{500\times1}{8\times1\times2}=37.5\text{（匝/极）}$$

故可取 $N_{pc}=37$ 匝/极或 38 匝/极

四、单相电动机重绕改装计算

（一）交流分相电动机重绕改装计算

1. 改压计算

改压计算时应在原绕组电流密度与每匝承受电压不变的条件下进行。

（1）改压后的每极匝数

主绕组　$$N'_m=N_m\frac{U'}{U}\tag{2-107}$$

辅绕组　$$N'_a=N_a\frac{U'}{U}\tag{2-108}$$

式中　N'_m、N'_a——改压后主、辅绕组每极匝数；

N_m、N_a——改压前主、辅绕组每极匝数；

U、U'——改压前、后的电压，V。

（2）改压后的导线截面积

主绕组　$$A'_{wm}=A_{wm}\frac{U}{U'}\tag{2-109}$$

辅绕组　$$A'_{wa}=A_{wa}\frac{U}{U'}\tag{2-110}$$

式中　A'_{wm}、A'_{wa}——改压后主、辅绕组导线截面积，mm^2；

A_{wm}、A_{wa}——改压前主、辅绕组导线截面积，mm^2。

（3）改压后运转电容器的容量

$$C'_t=C_t\frac{A'_{wm}U}{A_{wm}U'}\tag{2-111}$$

式中　C'_t——电动机改压后所用电容器的容量，μF；

C_t——电动机原来所用电容器的容量，μF。

（4）改压后起动电容器的容量

$$C_s' = C_s \frac{A_{wm}' U}{A_{wm} U'} \tag{2-112}$$

式中 C_s'——电动机改压后所用的起动电容器的容量，μF；

C_s——电动机原来所用电容器的容量，μF。

例 2-29 某进口电容运转电动机，原使用电压 127V，主绕组每极匝数 $N_m = 216$ 匝，$d_{wm} = 0.55$mm；辅绕组每极匝数 $N_a = 237$ 匝，$d_{wa} = 0.51$mm；运转电容器 $C_t = 16\mu F$。今欲改为 220V 电压使用，试求改绕数据。

解（1）改为 220V 电压后，主、辅绕组每极匝数

$$N_m' = N_m \frac{U'}{U} = 216 \times \frac{220}{127} = 374 \text{（匝/极）}$$

$$N_a' = N_a \frac{U'}{U} = 237 \times \frac{220}{127} = 410 \text{（匝/极）}$$

改压重绕后绕组型式及各槽导体分配百分比不变。

（2）改压后的导线选择。原导线截面积

$$A_{wm} = \frac{\pi d_{wm}^2}{4} = \frac{\pi \times 0.55^2}{4} = 0.2376 \ (\text{mm}^2)$$

$$A_{wa} = \frac{\pi d_{wa}^2}{4} = \frac{\pi \times 0.51^2}{4} = 0.2043 \ (\text{mm}^2)$$

改压后的导线截面积

$$A_{wm}' = A_{wm} \frac{U}{U'} = 0.2376 \times \frac{127}{220} = 0.1372 \ (\text{mm}^2)$$

$$A_{wa}' = A_{wa} \frac{U}{U'} = 0.2043 \times \frac{127}{220} = 0.1179 \ (\text{mm}^2)$$

改压后的导线直径

$$d_{wm}' = \sqrt{\frac{4A_{wm}'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.1372}{\pi}} = 0.418 \ (\text{mm})$$

$$d'_{wa}=\sqrt{\frac{4A'_{wa}}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\times0.1179}{\pi}}=0.3875\ (\text{mm})$$

主绕组选用 Φ0.41mm 标准导线，截面积为 0.132mm²；辅绕组选用 Φ0.38mm 标准导线，截面积为 0.113mm²。

（3）改压后运转电容器容量

$$C'_t=C_t\frac{A'_{wm}U}{A_{wm}U'}=16\times\frac{0.1372\times127}{0.2376\times220}=5.333\ (\mu F)$$

选用 6μF 标准电容器。

2. 改变接线方式

对于电压改变成倍数关系的电动机，可视原绕组的具体情况，采用改变绕组联结方式进行改压。例如 220V 改为 110V 时，可将原绕组的支路数增加一倍，即原 1 路串联改为 2 路并联；若是两路并联的 110V 绕组，同样可改为 1 路串联的 220V 电动机。当然，如不具备改接条件时，就必须进行重绕改压。

3. 改极计算

（1）定转子槽数配合的选择。

为保证电动机的技术性能，定转子槽数的配合应满足一定的关系。

1）为避免起动时可能出现的“死点”，槽数应满足下式关系

$$\frac{Z_s-Z_r}{2pm}\neq\text{整数} \tag{2-113}$$

$$\frac{Z_s}{Z_r}\neq\text{整数} \tag{2-114}$$

式中 Z_s——定子槽数；

Z_r——转子槽数；

p——绕组极对数；

m——定子相数，对分相起动电动机 $m=1$；电容运转电动机 $m=2$。

2）为避免机械特性 $T=f(s)$ 产生凹点，应满足下式关系

$$Z_s-Z_r\neq\pm 2p \tag{2-115}$$

3）为减少振动与噪声，应满足下式关系

$$Z_s-Z_r\neq\pm 1 \tag{2-116}$$

$$Z_s-Z_r\neq\pm 2 \tag{2-117}$$

$$Z_s-Z_r\neq\pm(2p\pm 1) \tag{2-118}$$

$$Z_s-Z_r\neq\pm(2p\pm 2) \tag{2-119}$$

目前国产单相电动机定子槽数上限是 36 槽，为使改极电机性能良好，推荐采用表 2-16 中的槽配合。

表 2-16　单相电动机改极时定转子槽配合推荐表

极数 $2p$	定子槽数 Z_s	转子槽数 Z_r
2	12	15，18
2	16	10
2	18	12，15，21
2	24	18，27，28，31
4	12	15
4	16	10
4	18	15
4	24	16，17，18，22，30
4	36	26，34，42
6	36	48
8	24	36
8	36	40

(2) 改极电动机的功率

$$P' = P\frac{(d'_{wm})^2}{d_{wm}^2} \tag{2-120}$$

式中 P、P'——改极前、后电动机功率，W；

d_{wm}、d'_{wm}——改极前，后主绕组的线径，mm。

(3) 铁心磁路饱和程度的校核。

增加极数重绕时，核算齿部磁通密度应控制在 1.8T 以内，最高也不宜超过 2.2T，而且只能在气隙磁通密度和轭部磁通密度较低的条件下实施。减少极数重绕时，应核算轭部磁通密度，一般可放宽到 1.85T。

气隙磁通密度由下式求取

$$B_g = \frac{K_v U_N \times 10^{-2}}{2.22 a_p \times 2p\tau l_s N_m K_{wm}} \tag{2-121}$$

式中 B_g——气隙磁通密度，T；

K_v——压降因数，一般取 $K_v = 0.7 \sim 0.94$；

a_p——极弧系数，可按表 2-6 和表 2-7 选取；

p——绕组极对数；

τ——定子极距，m；

l_s——铁心长度，m；

N_m——主绕组每极匝数；

K_{wm}——主绕组因数。

下面介绍分相电动机定子绕组因数计算方法。

1) 分相起动电动机。由于主绕组与辅绕组占槽不等，绕组因数必须分别计算。辅绕组在起动后脱离电源，为提高铁心的有效利用率，通常都使主绕组占总槽数的 2/3，即 $Q_m/Q_a = 2$；同时，当采用单层绕组时，为消除磁动势曲线

中的三次谐波，常取 $y=\frac{2}{3}\tau$，这时分相电动机的绕组因数可由下面的简化式求出：

主绕组因数

$$K_{wm}=\frac{0.75\times 2p}{Q_m\sin\left(\frac{90^\circ}{\tau}\right)} \tag{2-122}$$

辅绕组因数

$$K_{wa}=\frac{0.434\times 2p}{Q_a\sin\left(\frac{90^\circ}{\tau}\right)} \tag{2-123}$$

式中　Q_m、Q_a——主、辅绕组分别占槽数。

2）分相运转电动机。电容分相运转电动机工作时是“两相”绕组同时投入运行，主、辅绕组各占槽数相等，故其绕组因数也相等。

全距单层绕组因数

$$K_w=\frac{0.707}{q\ \sin\left(\frac{45^\circ}{q}\right)} \tag{2-124}$$

短距双层绕组因数

$$K_w=\frac{0.707}{q\ \sin\left(\frac{45^\circ}{q}\right)}\sin\left(90^\circ\frac{y}{\tau}\right) \tag{2-125}$$

式中　q——一极相组槽数。

3）分相电动机正弦绕组因数。虽然合理分配主、辅绕组可在主绕组中自行消除三次谐波，但五、七次谐波依然存在，将可能导致电动机性能下降，甚至不能过渡到正常运转。为了有效地削弱各种高次谐波，近年来，在单相电动机中普遍采用正弦绕组。

绕组因数

$$K_w = \Sigma K_n \sin a_n \tag{2-126}$$

$$K_n = \frac{\sin\ (x_n - x_n')}{\Sigma \sin\ (x - x')} \tag{2-127}$$

式中 $a_1 \cdots a_n$——每极线圈对磁极中心的电角度；

$K_1 \cdots K_n$——正弦绕组各同心线圈占每极线圈的匝数比；

$x - x'$——用槽数表示的同心线圈号。

当主、辅绕组采用不同的分布方案时，其绕组因数也不相同，故其计算繁琐，一般可根据选用的正弦绕组分布方案由表 2-17 中查得。

（4）改极后主绕组每极匝数

$$N_m' = N_m \frac{2p\tau B_g K_{wm}}{2p'\tau' B_g' K_{wm}'} \tag{2-128}$$

改极后辅绕组每极匝数

$$N_a' = K N_m' \frac{K_{wm}}{K_{wa}} \tag{2-129}$$

式中 K——变比系数。对于高内阻分相起动取 $K = 0.4 \sim 0.7$；电容分相起动 $K = 0.75 \sim 1.25$；电容运转 $K = 0.96 \sim 1.7$。

（5）改极后的导线选择。

改极后一般保持原来电流密度，但每极占槽数及每相串联匝数都变了，因此，改极后的导线是在主绕组在槽中导体总截面积相等的条件下求取。即

$$A_{wm}' = A_{wm} \frac{N_{sm}}{N_{sm}'} \tag{2-130}$$

$$N_{sm} = \frac{4N_m p}{Z_m} \tag{2-131}$$

表 2-17　　正弦绕组分布方案

方案序号	每极槽数	每极每槽导体数百分比（%）																			平均节距 y_p	基波绕组系数 K_{w1}
		槽号																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
1	3	50	50	50	50																2	0.75
2	4	41.4	58.6		58.6	41.4															2.83	0.828
3		57.7	42.3			42.3	57.7														4.15	0.856
4		50	36.6	13.4	13.4	36.6	50														3.73	0.776
5	6	36.6	63.4				63.4	36.6													4.73	0.915
6		26.8	46.4	26.8		26.8	46.4	26.8													4	0.804
7		54.2	45.8					45.8	54.2												6.08	0.912
8		41.1	35.1	23.8			23.8	35.1	41.1												5.36	0.827
9	8	35.2	64.8						64.8	35.2											6.7	0.95
10		23.5	43.4	33.1				33.1	43.4	23.5											5.81	0.87
11		19.9	36.8	28	15.3		15.3	28	36.8	19.9											5.23	0.796
12		34.7	65.3							65.3	34.7										7.69	0.96
13		22.7	42.6	34.7					34.7	42.6	22.7										6.76	0.893
14		18.5	34.7	28.3	18.5			18.5	28.3	34.7	18.5										6.06	0.82
15	9	52.2	47.8						47.8	52.2											7.05	0.928
16		39.5	34.8	25.7				25.7	34.8	39.5											6.28	0.856

续表

方案序号	每极槽数	每极每槽导体数百分比（%） 槽号 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	平均节距 y_p	基波绕组系数 K_{w1}
17	9	34.6	30.6	22.7	12.1		12.1	22.7	30.6	34.6											5.75	0.793
18		51.8	48.2									48.2	51.8								10.04	0.959
19		36.6	34.1	29.3							29.3	34.1	36.6								9.15	0.91
20		29.9	27.8	24	18.3					18.3	24	27.8	29.9								8.39	0.855
21		26.8	25	21.4	16.5	10.3			10.3	16.5	21.4	25	26.8								7.83	0.806
22		25.9	24.1	20.7	15.9	10	3.4	3.4	10	15.9	20.7	24.1	25.9								7.59	0.783
23	12	34.1	65.9										65.9	34.1							10.68	0.978
24		21.4	41.4	37.2								37.2	41.4	21.4							9.68	0.936
25		16.4	31.8	28.5	23.3						23.3	28.5	31.8	16.4							8.83	0.883
26		14.1	27.3	24.5	20	14.1				14.1	20	24.5	27.3	14.1							8.15	0.829
27		13.2	25.4	22.8	18.6	13.2	6.8		6.8	13.2	18.6	22.8	25.4	13.2							7.73	0.79
28		35.1	33.8	31.1											31.1	33.8	35.1				13.08	0.947
29		27.6	26.5	24.5	21.4									21.4	24.5	26.5	27.6				12.21	0.91
30	16	23.5	22.6	20.8	18.2	14.9							14.9	18.2	20.8	22.6	23.5				11.43	0.869
31		21.1	20.4	18.7	16.4	13.4	10					10	13.4	16.4	18.7	20.4	21.1				10.79	0.829
32		19.9	19.2	17.6	15.4	12.7	9.4	5.8			5.8	9.4	12.7	15.4	17.6	19.2	19.9				10.34	0.798

续表

方案序号	每极槽数	每极每槽导体数百分比（%） 槽号 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	平均节距 y_p	基波绕组系数 K_{w1}
33	16	20.8	40.8	38.4												38.4	40.8	20.8			13.65	0.963
34		15.5	30.3	28.5	25.7										25.7	28.5	30.3	15.5			12.71	0.929
35		12.7	24.9	23.4	21.1	17.9								17.9	21.1	23.4	24.9	12.7			11.87	0.889
36		11.1	21.8	20.5	18.5	15.7	12.4						12.4	15.7	18.5	20.5	21.8	11.1			11.14	0.848
37		10.3	20	18.9	17.2	14.4	11.3	7.9				7.9	11.3	14.4	17.2	18.9	20	10.3			10.58	0.812
38		27	26.2	24.6	22.2											22.2	24.6	26.2	27		14.16	0.927
39		22.7	22	20.6	18.6	16.1									16.1	18.6	20.6	22	22.7		13.36	0.892
40		20.1	19.5	18.2	16.5	14.2	11.5							11.5	14.2	16.5	18.2	19.5	20.1		12.61	0.855
41	18	18.5	17.9	16.8	15.2	13.2	10.6	7.8					7.8	10.6	13.2	15.2	16.8	17.9	18.5		12.01	0.821
42		17.6	17.1	16	14.5	12.5	10.2	7.5	4.6			4.6	7.5	10.2	12.5	14.5	16	17.1	17.6		11.58	0.795
43		15.2	29.9	28.6	26.3												26.3	28.6	29.9	15.2	14.68	0.943
44		12.3	24.3	23.2	21.3	18.9										18.9	21.3	23.2	24.3	12.3	13.8	0.91
45		10.6	20.9	20	18.4	16.4	13.7								13.7	16.4	18.4	20	20.9	10.6	13	0.873
46		9.6	18.9	18.1	16.7	14.7	12.4	9.6						9.6	12.4	14.7	16.7	18.1	18.9	9.6	12.33	0.837
47		9	17.8	17	15.7	13.8	11.6	9	6.1				6.1	9	11.6	13.8	15.7	17	17.8	9	11.83	0.806

式中　A_{wm}、A'_{wm}——主绕组改极前、后的导线截面积，mm^2；

N_{sm}、N'_{sm}——主绕组改极前、后的每槽平均导体数，根/槽。

改极后的辅绕组导线由原绕组比值系数 t_D 求出

$$d_{wa}=t_D d_{wm} \tag{2-132}$$

式中　t_D——导线直径比值系数。

例 2-30　有 1 台单相电容运转 2 极电动机，$P_N=90W$，$U_N=220V$，$I_N=0.87A$。今需改为 4 极，试求新绕组参数。已知原绕组参数为

（1）定子铁心数据

外径 $D_{se}=9cm$，内径 $D_{si}=4.8cm$，铁心长 $l_s=4cm$，轭高 $h_y=0.95cm$，齿高 $h_t=1.15cm$，齿宽 $b_t=0.25cm$，定子槽数 $Z_s=24$ 槽，转子槽数 $Z_r=18$ 槽。

（2）绕组参数

主绕组线径 $d_{wm}=0.42mm$，导线截面积 $A_{wm}=0.1385mm^2$；

辅绕组线径 $d_{wa}=0.25mm$，导线截面积 $A_{wa}=0.049mm^2$。

主、辅绕组绕组因数 $K_{wm}=K_{wa}=0.783$。

主绕组线圈匝数分布如下：

$$N_{c1\text{-}12}=139,\ N_{c2\text{-}11}=130,\ N_{c3\text{-}10}=111,$$
$$N_{c4\text{-}9}=85,\ N_{c5\text{-}8}=53,\ N_{c3\text{-}7}=18;$$

主绕组占槽数 $Q_m=24$。

辅绕组线圈匝数分布如下：

$$N_{c7\text{-}18}=195,\ N_{c8\text{-}17}=182,\ N_{c9\text{-}16}=156;$$
$$N_{c10\text{-}15}=119,\ N_{c11\text{-}14}=75,\ N_{c12\text{-}13}=25;$$

辅绕组占槽数 $Q_a=24$。

解 （1）改极后槽配合检验

$$\frac{Z_s-Z_r}{2p'm}=\frac{24-18}{4\times2}\neq\text{整数}$$

$$\frac{Z_s}{Z_r}=\frac{24}{18}\neq\text{整数}$$

$$Z_s-Z_r=24-18\neq2p=4$$

$$Z_s-Z_r=24-18\neq\pm1,\pm2,\pm(2p\pm),\pm(2p-2)$$

检验改极后的众多条件中，只有振动、噪声的 8 个条件中的 $Z_s-Z_r\neq2p+2$ 不能满足，而其他条件均能符合要求，故基本能满足改极条件。

（2）原绕组参数计算

1）极距 $\tau=\frac{\pi D_{si}}{2p}=\frac{\pi\times4.8}{2}=7.54$（cm）

2）每极匝数

主绕组：$N_m=\Sigma N_{cm}=536$（匝/极）

辅绕组：$N_a=\Sigma N_{ca}=752$（匝/极）

3）气隙磁通密度选 $K_v=0.92$，$a_p=0.66$

$$B_g=\frac{K_vU_N\times10^{-2}}{2.22a_p\tau l_s2pN_mK_{wm}}$$

$$=\frac{0.92\times220\times10^{-2}}{2.22\times0.66\times0.0754\times0.04\times2\times536\times0.783}$$

$$=0.5457\ (\mathrm{T})$$

4）主、辅绕组变比系数

$$K=\frac{N_aK_{wa}}{N_mK_{wm}}=\frac{752\times0.783}{536\times0.783}=1.403$$

5）主、辅绕组导线比值系数

$$t_D = \frac{d_{wa}}{d_{wm}} = \frac{0.25}{0.42} = 0.5952$$

6）主绕组每槽平均导体数

$$N_{sm} = \frac{4N_m p}{Z_m} = \frac{4 \times 536}{24} = 89 \text{（根/槽）}$$

（3）选用改极布线方案

改为 4 极后的每极槽数

$$Z_p = \frac{Z_s}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{（槽）}$$

由表 2-17 选用方案 6，绕组因数 $K'_{wm} = K'_{wa} = 0.804$，主、辅绕组布线如图 2-9 所示。

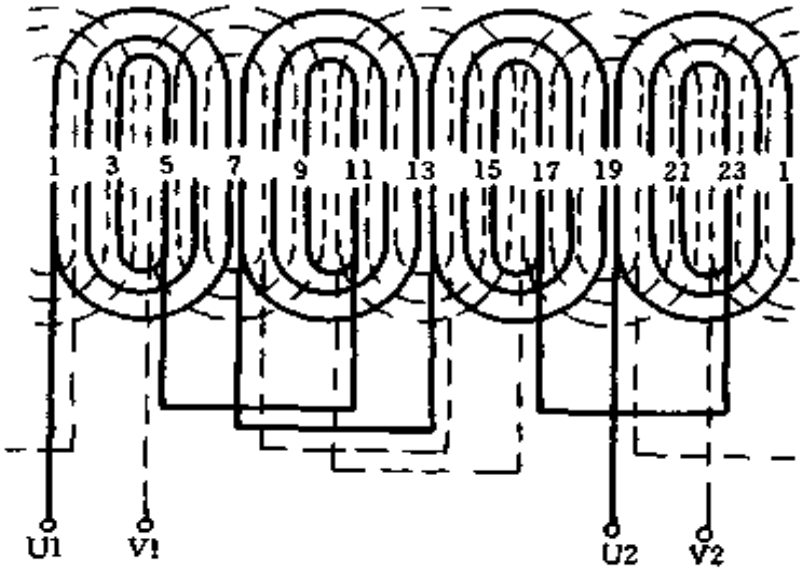


图 2-9　3/3 型正弦绕组展开图

（$Z_s = 24$，$2p = 4$）

改为 4 极后，主、辅绕组的占槽相等，即

$$Q'_m = Q'_a = 20 \text{ 槽}$$

（4）改极后主、辅绕组匝数计算

1）改极后基本参数计算

①极距　　$\tau' = \frac{\pi \times 4.8}{4} = 3.77$（cm）

②齿距　$t = \frac{\pi D_{si}}{Z_s} = \frac{\pi \times 4.8}{24} = 0.6283$（cm）

③气隙磁通密度。一般情况下，$B_g = 0.3 \sim 0.65$T，因改绕是增加极数，拟提高气隙磁通密度，取 $B'_g = 0.65$T。

2）主绕组每极匝数

$$N'_m = N_m \frac{2p\tau B_g K_{wm}}{2p'\tau' B'_g K'_{wm}}$$

$$= 536 \frac{2 \times 7.54 \times 0.546 \times 0.783}{4 \times 3.77 \times 0.65 \times 0.804} = 438 \text{（匝/极）}$$

3）辅绕组每极匝数。取 $K = 1.4$

$$N'_a = KN'_m \frac{K'_{wm}}{K'_{wa}} = 1.4 \times 438 \frac{0.804}{0.804} = 613 \text{（匝/极）}$$

4）主绕组各线圈匝数。查表 2-17，选用方案 6

$N'_{c1\text{-}7} = N'_m K_1 = 438 \times 0.268 = 117$（匝）

$N'_{c2\text{-}6} = N'_m K_2 = 438 \times 0.464 = 204$（匝）

$N'_{c3\text{-}5} = N'_m K_3 = 438 \times 0.268 = 117$（匝）

5）辅绕组各线圈匝数

$N'_{c4\text{-}10} = N'_a K_1 = 613 \times 0.268 = 164$（匝）

$N'_{c5\text{-}9} = N'_a K_2 = 613 \times 0.464 = 285$（匝）

$N'_{c6\text{-}8} = N'_a K_3 = 613 \times 0.268 = 164$（匝）

（5）磁通密度校验。增极改绕校验齿部磁通密度，按下式计算

$$B_t = \frac{B'_g t}{0.92 b_t} \tag{2-133}$$

故　　$B_t = \frac{0.65 \times 0.628}{0.92 \times 0.25} = 1.775\text{T} < 1.85\text{T}$

实际磁通密度在合理范围内。

(6) 改极后的绕组导线选择

1) 主绕组每槽平均导线数

$$N'_{sm}=\frac{4N'_m p}{Q'_m}=\frac{4\times438\times2}{20}=175\ (\text{根/槽})$$

2) 主绕组导线截面积

$$A'_{wm}=A_{wm}\frac{N_{sm}}{N'_{sm}}=0.1385\frac{89}{175}=0.07\ (\text{mm}^2)$$

导线直径为

$$d'_{wm}=\sqrt{\frac{4\times0.07}{\pi}}=0.2985\ (\text{mm})$$

故可选取标准线径 $d'_{wm}=0.31\text{mm}$

3) 辅绕组导线直径

$$d'_{wa}=t_D d'_{wm}=0.595\times0.31=0.1845\ (\text{mm})$$

故可选用标准导线直径 $d'_{wa}=0.19$ (mm)

(7) 改极后的输出

1) 改极电动机的功率

$$P'_N=P\frac{(d'_{wm})^2}{d^2_{wm}}=90\frac{0.31^2}{0.42^2}=49.03\ (\text{W})$$

取 $P'_N=50\text{W}$

2) 电动机电流。由图 2-10 查得 $\eta\cos\varphi=0.36$

$$I'_N=\frac{P'_N}{U_N\eta\cos\varphi}=\frac{50}{220\times0.36}=0.63\ (\text{A})$$

3) 主绕组电流

$$I'_m=\frac{I'_N}{\sqrt{2}}=\frac{0.63}{\sqrt{2}}=0.45\ (\text{A})$$

4) 辅绕组电流

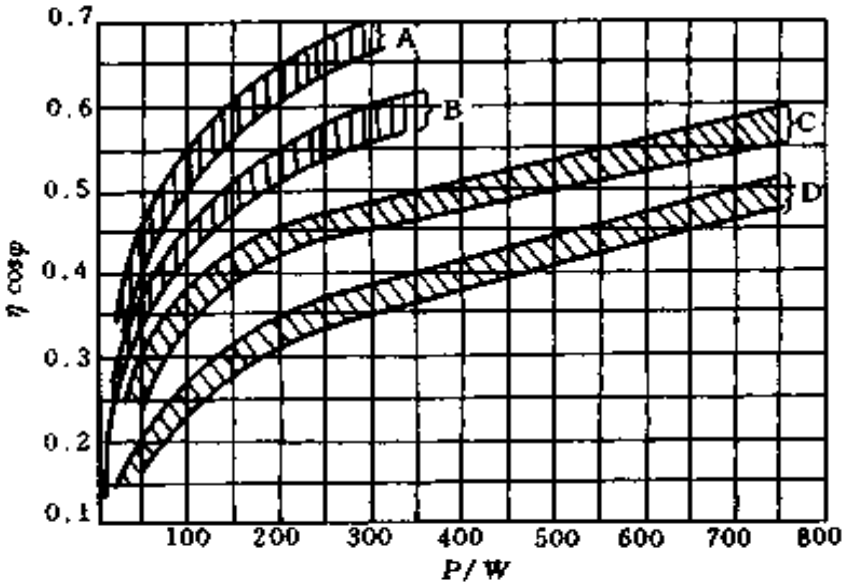


图 2-10　分相电动机的电能效率曲线

A—2 极电容运转；B—4 极电容运转；

C—2 极分相起动；D—4 极分相起动

$$I'_a = \frac{I'_m}{K} = \frac{0.45}{1.4} = 0.32\ (A)$$

(8) 改极后线负荷校验。电容运转电动机按式(2-134)计算;分相起动电动机按式(2-135)计算。电容运转电动机

$$A = \frac{2\ (N_{pm} I_m + N_{pa} I_a)}{\pi D_{si}} \qquad (2\text{-}134)$$

式中　A——线负荷，A/cm。一般 $A = 80 \sim 220$A/cm；台扇类电动机取 $A = 120 \sim 160$A/cm；外转子吊扇取 $A = 100 \sim 130$A/cm；

N_{pm}——主绕组每相匝数；

N_{pa}——辅绕组每相匝数；

I_m——主绕组电流，A；

I_a——辅绕组电流，A；

D_{si}——定子铁心内径，cm。

分相起动电动机

$$A=\frac{2N_{pm}I_m}{\pi D_{si}Q_m/Z_s} \tag{2-135}$$

式中 Z_s——定子铁心槽数；

Q_m——主绕组占槽数。

由式（2-134）可得

$$A=\frac{2\ (N'_{pm}I'_m+N'_{pa}\ I'_a)}{\pi D_{si}}$$

$$=\frac{2\ (N'_mI'_m+N'_aI'_a)\ 2p}{\pi D_{si}}$$

$$=\frac{2\ (438\times0.45+613\times0.32)\ \times4}{\pi\times4.8}=208.6\ (\mathrm{A/cm})$$

改极后实际线负荷在允许范围内。

（9）电动机分相元件选择

1）电动机效率估算。当功率为25～400W时，可由下列经验公式求取

$$\eta=K_g\sqrt{75.7-\left(\frac{P_N}{50}-9\right)^2}+0.215 \tag{2-136}$$

式中 K_g——经验系数。$K_g=0.048\sim0.055$，对分相起动或极数多者取小值；电容运转或极数少者取较大值。

功率大于400W的电动机取 $\eta=0.64\sim0.7$。

选 $K_g=0.055$，由式（2-136）可得

$$\eta=0.055\sqrt{75.7-\left(\frac{50}{50}-9\right)^2}+0.215=0.403$$

2）功率因数估算

$$\cos\varphi=\frac{\eta\cos\varphi}{\eta}=\frac{0.36}{0.403}=0.893$$

3）运转电容器选择。当电源频率为 50Hz 时，电容量为

$$C_r=2400\frac{I_N}{2pU_N\cos\varphi} \tag{2-137}$$

式中 C_r——电容量，μF。

由式（2-137）可得

$$C_r=2400\frac{0.63}{4\times220\times0.893}=1.924\ (\mu F)$$

电容器的工作电压按下式选择

$$U_r=(1.42\sim2.3)\ U_N \tag{2-138}$$

由式（2-138）可得

$$U_r=(1.42\sim2.3)\times220=312.4\sim506\ (V)$$

由上计算可选用 2μF、500V 交流密封金属化纸介电容器。

4. 空壳重绕计算

（1）极对数的确定。

电动机的极数可根据实际需要，并结合铁心原来参数决定。但作为恢复重绕，电动机能绕成的极数，对 220V50Hz 的单相电动机，可按式（2-32）估算，亦可由下式估计

$$p=0.28\frac{D_{si}}{h_y} \tag{2-139}$$

式中 p——电动机极对数，取整数；

D_{si}——定子铁心内径，cm；

h_y——定子轭高，cm。

（2）电动机功率估算

1）电动机输入功率由下式估算

$$P_i = \frac{D_{si}^2 l_s B_g A n_0}{10^5} \tag{2-140}$$

式中 P_i——电动机输入功率，VA；

D_{si}——定子铁心内径，cm；

l_s——定子铁心长度（叠厚），cm；

B_g——气隙磁通密度，T；$B_g=0.3\sim0.7$T，通常，2极电动机取较小值；电扇类电动机一般取$B_g=0.35\sim0.5$T。

A——线负荷，A/cm。取值见式（2-134）中符号说明；

n_0——同步转速，r/min。

2）额定功率估算

$$P_N = P_i \eta\cos\varphi \tag{2-141}$$

式中 P_N——电动机额定功率，W；

$\eta\cos\varphi$——电能效率。一般只有0.18～0.68，可假设初选值后，转换到P'_N，再由图2-10选取。

（3）电动机电流

1）输入电流

$$I = \frac{P_N}{U_N \eta\cos\varphi} \tag{2-142}$$

2）主绕组电流

分相起动电动机

$$I_m = I = \frac{P_i}{U_N} \tag{2-143}$$

电容运转电动机

$$I_m = \frac{I}{\sqrt{2}} \tag{2-144}$$

3）辅绕组电流。分相起动电动机辅绕组只在起动时接入电源；电容运转电动机辅绕组在运行时仍接入电源，其运行电流约为

$$I_a = \frac{I_m}{K} \tag{2-145}$$

$$K = \frac{N_a K_{wa}}{N_m K_{wm}} \tag{2-146}$$

式中　K——变比系数；

N_a——辅绕组匝数；

N_m——主绕组匝数；

K_{wa}——辅绕组因数；

K_{wm}——主绕组因数。

（4）电动机磁通密度校验

1）气隙有效磁通计算

$$\Phi = \alpha_p \tau l_s B_g \times 10^{-4} \tag{2-147}$$

式中　Φ——气隙有效磁通，Wb；

α_p——极弧系数，一般情况下，分相电动机 $\alpha_p = 0.66 \sim 0.73$；

τ——极距，cm；

l_s——定子铁心长度，cm；

B_g——气隙磁通密度，T。

2）定子齿部磁通密度校验。仍用式（2-133）

$$B_t = \frac{B_g t}{0.92 b_t}$$

式中　B_t——齿部磁通密度，T。计算值不应超过 1.4～

1.8T，比较合理的取值是1.3～1.5T；

t——定子齿距，cm；

b_t——定子槽齿宽，cm。

3）定子轭部磁通密度校验

$$B_y=\frac{\Phi}{2h_y l_s}\times 10^4 \tag{2-148}$$

式中 B_y——轭部磁通密度，T。比较合理的取值是 B_y=1.0～1.55T，最高不宜超过1.85T；

h_y——定子铁心轭高，cm；

l_s——定子铁心长度，cm。

（5）定子绕组因数计算。

见式（2-122）～式（2-127）。

（6）主绕组计算

1）主绕组每相匝数

$$N_{pm}=\frac{K_v U_N}{4.44 f\Phi K_{wm}} \tag{2-149}$$

式中 K_v——压降因数，取 K_v=0.7～0.9，功率大者取较大值；

K_{wm}——主绕组因数。

2）每极匝数

$$N_m=\frac{N_{pm}}{2p} \tag{2-150}$$

3）主绕组导线直径

$$d_{wm}=1.13\sqrt{\frac{I_m}{J}} \tag{2-151}$$

式中 d_{wm}——主绕组导线直径，mm；

J——导线电流密度，A/mm²。一般取 J = 4～

8A/mm²；对台扇类电动机 $J=4\sim7A/mm^2$；外转子吊扇电动机 $J=3\sim5A/mm^2$；洗衣机电动机 $J=4.5\sim7.5A/mm^2$；脱水机电动机 $J=5\sim8.5A/mm^2$；冰箱压缩机组电动机 $J=3.5\sim5.1A/mm^2$。

（7）辅绕组计算

1）辅绕组每极匝数 N_a。见式（2-129）。

2）辅绕组导线直径 d_{wa}。见式（2-132）。

$$d_{wa}=t_D d_{wm}$$

式中 t_D——导线直径比值系数。电阻起动取 $t_D=0.45\sim0.75$；电容起动取 $t_D=0.55\sim0.8$；电容运转 $t_D=0.73\sim1.07$。

（8）线负荷校验

1）分相起动电动机见式（2-135）。

2）电容运转电动机见式（2-134）。

（9）分相电容器选择

1）起动电容器选择。当电源频率为 50Hz 时，起动电容量

$$C_s=\frac{6600\sqrt{I}}{U_N(1-\eta\cos\varphi)} \tag{2-152}$$

式中 C_s——起动电容量，μF；

I——电动机电流，A。

起动电容器的工作电压

$$U_s\geqslant(0.65\sim1.36)U_N \tag{2-153}$$

2）运转电容器选择。见式（2-136）～式（2-138）。

例 2-31 有 1 台无铭牌无绕组的脱水用单相电容运转电动机，测得定子铁心尺寸为：内径 $D_{si}=7cm$，叠厚 $l_s=$

2.04cm，轭高 $h_y=0.75$cm，齿宽 $b_t=0.48$cm，槽数 $Z_s=24$，试计算重绕参数。

解（1）确定电动机极对数

$$p=0.28\frac{D_{si}}{h_y}=0.28\frac{7}{0.75}=2.613$$

取 $p=2$，即 $2p=4$ 极

（2）电动机功率估算

1）输入功率。选气隙磁通密度 $B_g=0.6$T，线负荷 $A=120$A/cm，可得

$$P_i=\frac{D_{si}^2 l_s B_g A n_0}{10^5}$$

$$=\frac{7^2\times2.04\times0.6\times120\times1500}{10^5}=108\ (\text{VA})$$

2）额定输出功率。预选 $\eta\cos\varphi=0.4$，则预选功率 $P'_N=108\times0.4=43.2$W，由图2-10查得 $\eta\cos\varphi=0.32$，故有

$$P_N=P_i\eta\cos\varphi=108\times0.32=34.56=35\ (\text{W})$$

（3）电动机磁通密度校验

1）定子极距

$$\tau=\frac{\pi D_{si}}{2p}=\frac{\pi\times7}{4}=5.498\ (\text{cm})$$

2）定子齿距

$$t=\frac{\pi D_{si}}{Z_s}=\frac{\pi\times7}{24}=0.9163\ (\text{cm})$$

3）气隙有效磁通。选极弧系数 $\alpha_p=0.66$，则有

$$\Phi=\alpha_p\tau l_s B_g\times10^{-4}$$

$$=0.66\times5.5\times2.04\times0.6\times10^{-4}$$

$$=4.443\times10^{-4}\ (\text{Wb})$$

4）定子齿部磁通密度

$$B_t=\frac{B_g t}{0.92b_t}=\frac{0.6\times0.9163}{0.92\times0.48}=1.245\ (\mathrm{T})$$

5）定子轭部磁通密度

$$B_y=\frac{\Phi}{2h_y l_s}\times10^4=\frac{4.443\times10^{-4}}{2\times0.75\times2.04}\times10^4$$
$$=1.452\ (\mathrm{T})$$

由上计算可知定子磁通密度均在允许范围内，故初选 $B_g=0.6\mathrm{T}$ 可以使用。

（4）定子绕组因数计算。定子绕组选用图 2-11 所示的双平面单层同心绕组，且主、辅绕组型式相同，故绕组因数

$$K_{wm}=K_{wa}=\frac{0.707}{q\sin\left(\frac{45^\circ}{q}\right)}=\frac{0.707}{3\sin\left(\frac{45^\circ}{3}\right)}=0.9105$$

（5）绕组匝数计算

1）主绕组每相匝数。选压降因数 $K_v=0.7$，则有

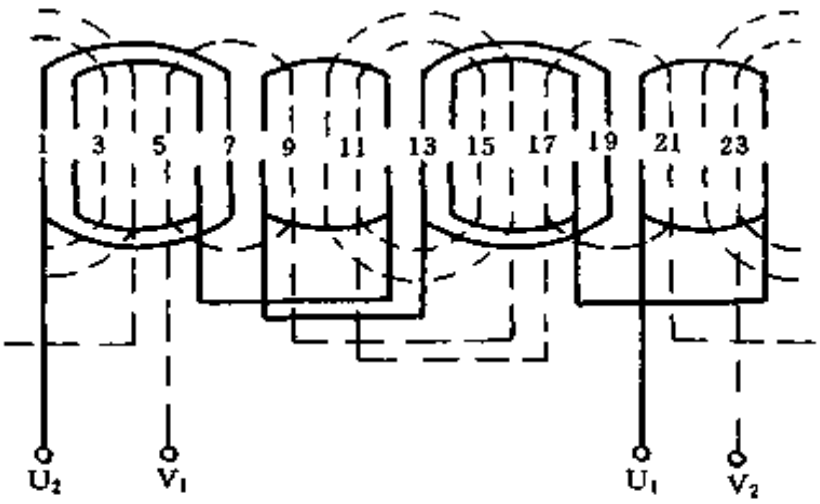


图 2-11　电容运转电动机（双平面）绕组展开图

（$Z_s=24$，$2p=4$，$Q_m/Q_a=1$）

$$N_{pm}=\frac{K_v U_N}{4.44 f\Phi K_{wm}}=\frac{0.7\times 220}{4.44\times 50\times 4.44\times 10^{-4}\times 0.9105}$$

$=1716$（匝/相）

2）主绕组线圈匝数

主绕组线圈数　　$Q_m=6$

线圈匝数　$N_m=\frac{N_{pm}}{Q_m}=\frac{1716}{6}=286$（匝）

3）辅绕组每相匝数。选变比系数 $K=1.5$

$$N_{pa}=KN_{pm}\frac{K_{wm}}{K_{wa}}=1.5\times 1716\times\frac{0.91}{0.91}=2574\text{（匝/相）}$$

4）辅绕组线圈匝数

辅绕组线圈数　　$Q_a=6$

线圈匝数　　$N_a=\frac{N_{pa}}{Q_a}=\frac{2574}{6}=429$ 匝

（6）电动机电流

1）电动机输入电流

$$I=\frac{P_N}{U_N\eta\cos\varphi}=\frac{35}{220\times 0.32}=0.4972\text{（A）}\approx 0.5\text{（A）}$$

2）主绕组电流

$$I_m=\frac{I}{\sqrt{2}}=\frac{0.5}{\sqrt{2}}=0.3536\text{（A）}\approx 0.35\text{（A）}$$

3）辅绕组电流

$$I_a=\frac{I_m}{K}=\frac{0.35}{1.5}=0.2334\text{（A）}\approx 0.23\text{（A）}$$

（7）导线选择

1）主绕组导线直径。选导线电流密度 $J=6.5\text{A/mm}^2$，可得

$$d_{wm}=1.13\sqrt{\frac{I_m}{J}}=1.13\sqrt{\frac{0.35}{6.5}}=0.2622\ (\text{mm})$$

故可选用标准导线 Φ0.27mm 高强度漆包线。

2）辅绕组导线直径。选比值系数 $t_D=0.8$，可得

$$d_{wa}=t_D d_{wm}=0.8\times0.27=0.216\ (\text{mm})$$

故可选用标准导线 Φ0.21mm 高强度漆包线。

（8）线负荷校验

$$A=\frac{2\ (N_{pm}I_m+N_{pa}I_a)}{\pi D_{si}}$$

$$=\frac{2\ (1716\times0.35+2574\times0.23)}{\pi\times7}=108.5\ (\text{A/cm})$$

实际线负荷与预选值接近，并在允许范围内。

（9）分相电容器选择

1）电动机运行效率。选经验系数 $K_g=0.053$，可得

$$\eta=K_g\sqrt{75.7-\left(\frac{P_N}{50}-9\right)^2}+0.215$$

$$=0.053\sqrt{75.7-\left(\frac{35}{50}-9\right)^2}+0.215=0.353$$

2）电动机功率因数

$$\cos\varphi=\frac{\eta\cos\varphi}{\eta}=\frac{0.32}{0.353}=0.907$$

3）运转电容器选择

$$C_r=2400\frac{I_N}{2pU_N\cos\varphi}$$

$$=2400\times\frac{0.5}{4\times220\times0.907}=1.5\ (\mu\text{F})$$

4）电容器电压

$$U_r=(1.42\sim2.3)\ U_N=(1.42\sim2.3)\times220$$

$=312.4\sim506$（V）

故可选用500V、1.5μF交流密封金属化纸介电容器。

（二）罩极式单相电动机空壳重绕计算

1．电动机的功率计算

$$P_{ex}=\frac{\alpha_p D_{si}^2 l_s B_g A}{18.3p} \tag{2-154}$$

式中 P_{ex}——电动机输出功率，W；

α_p——极弧系数，$\alpha_p=0.6\sim0.9$；

D_{si}——定子铁心内径，cm；

l_s——定子铁心叠厚，cm；

B_g——气隙磁通密度，T。一般小功率的2极台扇取 $B_g=0.3\sim0.42$T；4极台扇及稍大功率电动机（如吊扇等）取 $B_g=0.45\sim0.75$T；较大功率的鼓风机取 $B_g=0.65\sim0.8$T；

A——线负荷，A/cm。一般取 $A=60\sim200$A/cm；

p——电动机极对数。

2．电动机电流

$$I=\frac{P_{ex}}{K_v U_N} \tag{2-155}$$

式中 K_v——压降因数，一般取 $K_v=0.8\sim0.94$，大功率取大值。

3．磁通密度校验

（1）定子轭部磁通密度

$$B_y=\frac{\sigma\Phi}{1.86h_y l_s}\times10^4 \tag{2-156}$$

式中 B_y——轭部磁通密度，T；

σ——主绕组漏磁系数，分布绕组 $\sigma=1$；集中凸极

绕组 $\sigma=1.1\sim1.16$；

Φ——有效磁通，Wb。计算同分相电动机；

h_y——定子轭高，cm。

轭部磁通密度的合理范围，凸极式取 $B_y=0.8\sim1.0T$；隐极式取 $B_y=1.1\sim1.55T$，最高不得超过 1.8T。

（2）定子齿部磁通密度

$$B_t=\frac{1.57\Phi}{0.92Qb_tl_s}\times10^4 \tag{2-157}$$

式中 B_t——定子齿部磁通密度，T。凸极式 $B_t=0.8\sim1.0T$；隐极式分布绕组 $B_t=1.5\sim1.8T$，最高不宜超过 1.9T；

Q——每极槽数。

b_t——定子齿宽，cm。对凸极式电动机是指凸极宽度。

4. 主绕组每极匝数

当 $f=50Hz$ 时由下式计算

$$N_m=\frac{K_vU_N}{222\Phi2pK_{wm}} \tag{2-158}$$

式中 K_{wm}——主绕组因数。集中绕组 $K_{wm}=1$；分布绕组同分相电动机。

5. 绕组导线直径选择

$$d_{wm}=1.13\sqrt{\frac{I}{J}} \tag{2-159}$$

式中 J——导线电流密度，A/mm^2。一般小功率电动机取 $J=3\sim5A/mm^2$；较大功率如鼓风机等可取 $J=4.5\sim6.5A/mm^2$。

6. 罩极绕组计算

（1）凸极式电动机短路环计算。凸极式罩极电动机的罩极绕组（短路环）通常为1匝，当被罩极面为1/3时，短路环截面积由下式计算

$$A_{sr}=(1\sim2)\frac{l_m N_m A_{wm}}{l_{sr}2p} \tag{2-160}$$

式中 l_m——主绕组线圈平均匝长，cm。可根据铁心实测；

A_{wm}——主绕组导线截面积，mm^2；

l_{sr}——罩极环平均匝长，cm。由铁心实测。

（2）分布式罩极绕组计算

1）分布式罩极绕组的布线方式。分布式罩极电动机的主绕组布线与分相电动机相同，但罩极绕组的磁动势轴线与主轴线相交约为45°电角。罩极绕组采用同心式线圈，它可以设计成各自短接，也可设计成连绕后短接。罩极绕组的起始槽视电动机所需转向而定，但必须安排在主绕组每极线圈的对称一侧，如图2-12所示，使其罩住主极面的1/2～2/3。因此，罩极绕组同心线圈的最大节距由下式选择

$$y_{sr}=\left(\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}\right)\frac{Z_s}{2p} \tag{2-161}$$

2）罩极绕组导线选择。罩极绕组导线直径由下式决定

$$d_{ws}=(1.73\sim2.5)\,d_{wm} \tag{2-162}$$

式中 d_{ws}——罩极绕组导线直径，mm；

d_{wm}——主绕组导线直径，mm。

3）罩极绕组匝数

$$N_{sr}=\frac{P_{sr}\rho l_{sr}}{e^2 A_{ws}} \tag{2-163}$$

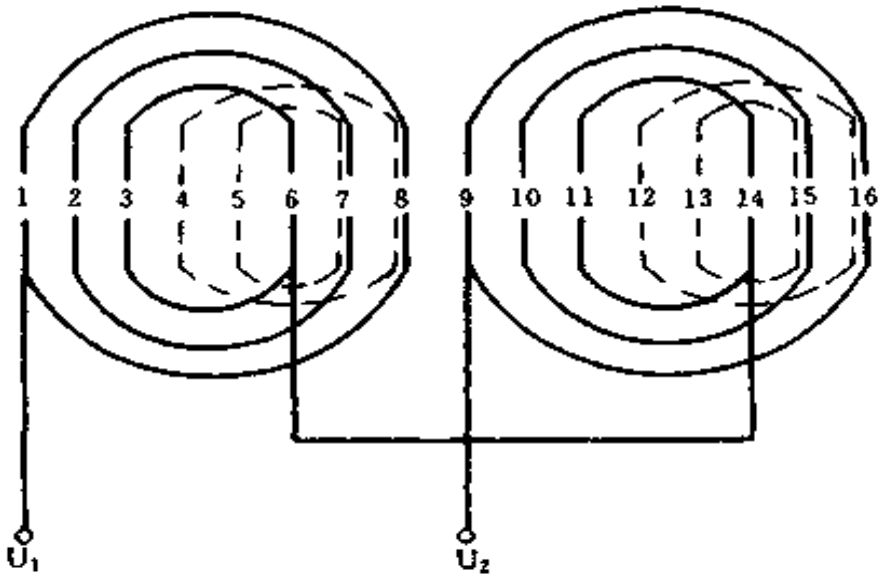


图 2-12　分布式罩极绕组展开图

($Z_s=16$，$2p=2$)

——代表主绕组；- - -代表罩极绕组

$$e=\frac{U_N}{2pN_m} \tag{2-164}$$

式中　P_{sr}——罩极绕组消耗功率，W。一般取 $P_{sr}=20\sim30$W；

ρ——罩极绕组材料的电阻率，Ω·cm，铜材取 $\rho_{20}=1.8\times10^{-2}\Omega\cdot$cm；

l_{sr}——每匝平均长度，m，根据罩极绕组平均节距，在铁心中试绕实测；

e——每匝电动势，V/匝；

A_{ws}——罩极绕组导线截面积，mm^2。

例 2-32　有 1 台鼓风机用的罩极电动机，无绕组，无铭牌，经实测铁心内径 $D_{si}=4.8$cm，叠厚 $l_s=3$cm，齿宽 $b_t=0.5$cm，轭高 $h_y=1.2$cm，定子槽数 $Z_s=16$ 槽。试求 2

极绕组重绕数据。

解 （1）绕组型式选择。为提高电动机起动和运行性能，主绕组拟采用正弦绕组。

每极槽数 $Q=\frac{Z_s}{2p}=\frac{16}{2}=8$（槽/极）

拟选用表2-17中的方案8，绕组系数 $K_{wm}=0.827$

各槽线圈匝数分配百分比：$K_1=41.1\%$；$K_2=35.1\%$；$K_3=23.8\%$。

（2）每极磁通。选 $\alpha_p=0.65$，$B_g=0.71T$，极距 $\tau=7.54cm$，可得

$$\Phi=\alpha_p B_g \tau l_s\times10^{-4}=0.65\times0.71\times7.54\times3\times10^{-4}$$
$$=10.44\times10^{-4}\ (Wb)$$

（3）磁通密度校验

1）定子轭部磁通密度。取 $\sigma=1$，可得

$$B_y=\frac{\sigma\Phi}{1.86h_y l_s}\times10^4=\frac{10.44\times10^{-4}}{1.86\times1.2\times3}\times10^4$$
$$=1.559\ (T)$$

2）定子齿部磁通密度

$$B_t=\frac{1.57\Phi}{0.92Qb_t l_s}\times10^4=\frac{1.517\times10.44\times10^{-4}}{0.92\times8\times0.5\times3}\times10^4$$
$$=1.485\ (T)$$

校验磁通密度均在合理范围内。

（4）主绕组匝数计算

1）主绕组每极匝数。选 $K_v=0.93$

$$N_m=\frac{K_v U_N}{222\Phi 2pK_{wm}}=\frac{0.93\times220}{222\times10.44\times10^{-4}\times2\times0.827}$$
$$=534\ (匝/极)$$

2）每极线圈匝数分配

$$N_{c1\text{-}8}=K_1N_m=0.411\times534=220\ (匝)$$

$$N_{c2\text{-}7}=K_2N_m=0.351\times534=187\ (匝)$$

$$N_{c3\text{-}6}=K_3N_m=0.238\times534=127\ (匝)$$

(5) 电动机电流

1) 电动机输出功率。选 $A=95A/cm$，可得

$$P_{ex}=\frac{\alpha_p D_{si}^2 l_s B_g A}{18.3p}=\frac{0.65\times4.8^2\times3\times0.71\times95}{18.3\times1}$$

$$=166\ (VA)$$

2) 电动机电流

$$I=\frac{P_{ex}}{K_v U_N}=\frac{166}{0.93\times220}=0.81\ (A)$$

(6) 主绕组导线直径。选导线电流密度 $J=5.8A/mm^2$，可得

$$d_{wm}=1.13\sqrt{\frac{I}{J}}=1.13\sqrt{\frac{0.81}{5.8}}=0.42\ (mm)$$

故可选用 Φ0.41mm 高强度漆包圆铜线。

(7) 罩极绕组计算

1) 罩极绕组导线直径

$$d_{ws}=(1.73\sim2.5)\ d_{wm}=(1.73\sim2.5)\times0.41$$

$$=0.7093\sim1.025\ (mm)$$

选用 Φ0.9mm 铜导线，导线截面积为 $A_{ws}=0.6362mm^2$。

2) 分布式罩极绕组最大线圈节距

$$y_{sr}=\left(\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}\right)\frac{Z_s}{2p}=\left(\frac{1}{2}\sim\frac{2}{3}\right)\frac{16}{2}=4\sim5.333\ (槽)$$

罩极绕组采用每极两线圈，其节距分别为

$y_{sr1}=5$ (1～6) 槽；$y_{sr2}=3$ (2～5) 槽

3）罩极绕组每线圈匝数。由铁心试绕实测每匝平均长度 $l_{sr}=0.42$m。

①每匝电动势

$$e=\frac{U_N}{2pN_m}=\frac{220}{2\times534}=0.206\ (\text{V/匝})$$

②绕组匝数

$$N_{sr}=\frac{P_{sr}\rho l_{sr}}{e^2A_{ws}}=(20\sim30)\ \frac{1.8\times10^{-2}\times0.42}{0.206^2\times0.6362}$$

$$=5.6\sim8.4\ (\text{匝})$$

选 $N_{sr}=6$ 匝。每极为 2 只线圈，每只线圈为 3 匝，两线圈串联后短接。

（三）交直流两用串励电动机重绕计算

1. 改压计算

（1）改压后定子每极匝数

$$N_s'=N_s\frac{U'}{U} \tag{2-165}$$

式中 N_s'——改压后定子绕组每极匝数，匝/极；

N_s——改压前定子绕组每极匝数，匝/极；

U'——改压后的使用电压，V；

U——改压前的使用电压，V。

（2）改压后定子绕组导线直径

$$d_{ws}'=d_{ws}\sqrt{\frac{U}{U'}} \tag{2-166}$$

式中 d_{ws}'——改压后定子绕组导线直径，mm；

d_{ws}——改压前定子绕组导线直径，mm。

（3）改压后的电枢绕组元件匝数

$$N_a'=N_a\frac{U'}{U} \tag{2-167}$$

式中　N'_a——改压后电枢绕组元件匝数，匝；

N_a——改压前电枢绕组元件匝数，匝。

（4）改压后电枢绕组导线直径

$$d'_{wa}=d_{wa}\sqrt{\frac{N_a}{N'_a}} \tag{2-168}$$

式中　d'_{wa}——改压后电枢绕组导线直径，mm；

d_{wa}——改压前电枢绕组导线直径，mm。

例 2-33　有 1 单相串励电动机，原用电压为 110V，今欲改为 36V 安全电压，试求重绕数据。已知该电动机原始数据为：电压 110V，极数 $2p=2$；电枢绕组：元件匝数 $N_a=38$ 匝，导线直径 $d_{wa}=0.34$mm；定子绕组：每极匝数 $N_s=102$ 匝/极，导线直径 $d_{ws}=0.48$mm。

解　（1）改为 36V 定子每极匝数

$$N'_s=N_s\frac{U'}{U}=102\times\frac{36}{110}=33.38\text{（匝/极）}$$

取 $N'_s=33$ 匝/极

（2）改压后定子绕组导线直径

$$d'_{ws}=d_{ws}\sqrt{\frac{U}{U'}}=0.48\sqrt{\frac{110}{36}}=0.839\text{（mm）}$$

选用 Φ0.83mm 高强度漆包圆铜线。

（3）改压后电枢绕组元件匝数

$$N'_a=N_a\frac{U'}{U}=38\times\frac{36}{110}=12.44\text{（匝）}$$

取电枢绕组元件匝数 $N'_a=13$ 匝。

（4）改压后电枢绕组导线直径

$$d'_{wa}=d_{wa}\sqrt{\frac{N_a}{N'_a}}=0.34\sqrt{\frac{38}{13}}=0.5813\text{（mm）}$$

选用 Φ0.58mm 高强度漆包圆铜线。

2. 空壳重绕计算

(1) 电动机功率估算。根据实测定、转子铁心尺寸和初选数据，用下式计算输入功率

$$P_i = \frac{\alpha_p D_{ae} l_a B_g A n}{8.6 \times 10^4} \tag{2-169}$$

式中 P_i——电动机输入功率，VA；

α_p——极弧系数，取 $\alpha_p = 0.6 \sim 0.7$；

D_{ae}——电枢铁心外径，cm；

l_a——电枢铁心叠厚，cm；

B_g——气隙磁通密度，T，取 $B_g = 0.35 \sim 0.5$T，大功率取较大值；

A——电枢线负荷，A/cm，一般取 $A = 60 \sim 120$A/cm，短时工作制可提高到 160A/cm；

n——电动机工作转速，r/min。一般为 4000～15000r/min。

电动机输出功率

$$P_{ex} = \frac{3\eta}{2+\eta} P_i \tag{2-170}$$

式中 P_{ex}——电动机输出功率，W；

η——电动机效率，一般取 0.5～0.6。

(2) 电枢电流

$$I_a = \frac{P_{ex}}{\eta \cos\varphi U_N}$$

$$U_N \leqslant K e_c \tag{2-171}$$

式中 I_a——电枢电流，A；

$\cos\varphi$——电动机功率因数，一般 $\cos\varphi = 0.9 \sim 0.95$；

U_N——电动机额定电压，通常在 36～250V 之间选取，但它必须满足式（2-171）；

K——换向片数；

e_c——相邻换向片间电压，一般 $e_c \leqslant 6 \sim 8V$。

（3）电枢绕组总导体数

$$N_a = \frac{\sqrt{2} \times 60 a E_a}{p n \phi} \tag{2-172}$$

$$E_a = \frac{2+\eta}{3} U_N \cos\varphi \tag{2-173}$$

式中 N_a——电枢绕组总导体数，根；

a——电枢绕组并联支路对数，对 2 极单叠绕组 $a=1$；4 极电动机 $a=2$；

E_a——电枢电动势，V；

p——极对数；

Φ——每极磁通，Wb。

$$\Phi = \alpha_p \tau B_g l_a \times 10^{-4} \tag{2-174}$$

式中 τ——极距，cm；

l_a——铁心长度（叠厚），cm。

（4）电枢元件匝数

$$N_{ae} = \frac{N_a}{2K} \tag{2-175}$$

计算的 N_{ae}值取整数后，修正 N_a 实际值。

（5）电枢绕组导线直径

$$d_{wa} = 1.13\sqrt{\frac{I_a}{J n_a}} \tag{2-176}$$

式中 d_{wa}——电枢绕组导线直径，mm；

J——导线电流密度，A/mm^2，根据电动机工作情

况而定。一般连续工作时，取 $J=5\sim6.5A/mm^2$；负载持续率为 60% 时，取 $J=6.5\sim8.5A/mm^2$；负载持续率为 40% 时，取 $J=8\sim10A/mm^2$；

n_a——电枢绕组并绕根数。

(6) 定子绕组计算

1) 定子绕组每极匝数

$$N_s=K_a\frac{N_a}{2} \tag{2-177}$$

式中 N_s——定子绕组每极匝数，匝/极；

K_a——变换系数，当 $2p=2$ 时，取 $K_a=0.1\sim0.25$；$2p=4$ 时，$K_a=0.05\sim0.1$。

2) 定子绕组导线直径

$$d_{ws}=(1.34\sim1.45)\,d_{wa} \tag{2-178}$$

式中 d_{ws}——定子绕组导线直径，mm。

计算后选用标准规格导线。

3) 定子附加直流绕组计算。直流励磁绕组总磁动势根据去磁条件，由下式估算

$$F=(0.84\sim0.95)\,\tau A \tag{2-179}$$

式中 F——总磁动势，A；

τ——极距，cm；

A——线负荷，A/cm。

在直流电源工作时，电动机效率也略有提高，一般取 $\eta'=0.6\sim0.8$，大功率可取较大值。

在直流电源上的运行电流为

$$I_d=\frac{P_{ex}}{\eta' U_N} \tag{2-180}$$

式中　η'——直流供电时电动机效率。

直流励磁绕组总匝数

$$N_d = \frac{F}{I_d} \tag{2-181}$$

直流励磁绕组附加匝数

$$N_{da} = \frac{N_d}{2} - N_s \tag{2-182}$$

式中　N_{da}——直流励磁绕组附加匝数，匝/极；

N_s——定子绕组交流供电时每极匝极，匝/极。

直流附加绕组导线选择

$$d_{wd} = d_{ws}\sqrt{\frac{I_d}{I_a}} \tag{2-183}$$

式中　d_{wd}——直流附加绕组导线直径，mm；

d_{ws}——定子绕组导线直径，mm；

I_d——直流电源上的运行电流，A；

I_a——电枢电流，A。

(7) 校验

1) 电枢铁心轭部磁通密度校验

$$B_y = \frac{\Phi}{1.86 h_y l_a} \times 10^4 \tag{2-184}$$

式中　B_y——电枢铁心轭部磁通密度，T，长期工作制 $B_y \leqslant 1.3 \sim 1.5$T；短时工作制可放宽到 $B_y \leqslant 1.5 \sim 1.7$T。当验算磁通密度过高时，应重选 B_g 值复算。

2) 电枢铁心齿部磁通密度校验

$$B_t = \frac{B_g t_a}{0.92 b_a} \tag{2-185}$$

式中　B_t——电枢铁心齿部磁通密度，T，长期工作制取 $B_t \leqslant 1.3 \sim 1.5$T；短时工作制取 $B_t \leqslant 1.5 \sim 1.7$T。如验算磁通密度过高时，应重选 B_t 值复算；

t_a——电枢齿距，cm；

b_a——电枢槽齿宽度，cm。

3）线负荷校验

$$A = \frac{N_a I_a}{6.28 D_{ae}} \tag{2-186}$$

式中　A——线负荷，A/cm，实际线负荷应在允许范围内，最好使与初选值的偏差小于±10%，如相差过大时要重选 B_g 及 A 值予以重算。

例 2-34　有 1 台无绕组交直流两用串励电动机空壳，实测数据如下：电枢铁心外径 $D_{ae}=5$cm，电枢铁心叠厚 $l_a=5.2$cm，电枢铁心轭高 $h_y=0.9$cm，电枢齿宽 $b_a=0.26$cm，电枢槽数 $Z_a=19$，换向片数 $K=38$，电动机极数 $2p=2$。今拟用于 220V 交直流电源，试按短时工作制求出重绕数据。

解　（1）电动机功率估算。选气隙磁通密度 $B_g=0.5$T，线负荷 $A=130$A/cm，转速 $n=10000$r/min，极弧系数 $\alpha_p=0.66$。

1）电动机输入功率

$$P_i = \frac{\alpha_p D_{ae}^2 l_a n B_g A}{8.6\times10^4}$$

$$= \frac{0.66\times5^2\times5.2\times10000\times0.5\times130}{8.6\times10^4}$$

$$=648.5\ (\text{VA})$$

2）电动机输出功率。取效率 $\eta=0.6$，则有

$$P_{ex}=\frac{3\eta}{2+\eta}P_i=\frac{3\times0.6}{2+0.6}\times648.5=449\ (\mathrm{W})$$

选 $P_{ex}=450\mathrm{W}$ 试算

3）电枢电流。取电动机功率因数 $\cos\varphi=0.9$，则有

$$I_a=\frac{P_{ex}}{\eta\cos\varphi U_N}=\frac{450}{0.6\times0.9\times220}=3.79\ (\mathrm{A})$$

（2）电枢绕组匝数计算

1）每极磁通

$$\tau=\frac{\pi D_{ae}}{2p}=\frac{\pi\times5}{2}=7.854\ (\mathrm{cm})$$

$$\Phi=\alpha_p\tau B_g l_a\times10^{-4}=0.66\times7.854\times0.5\times5.2\times10^{-4}$$
$$=13.48\times10^{-4}\ (\mathrm{Wb})$$

2）电枢电动势

$$E_a=\frac{2+\eta}{3}U_N\cos\varphi=\frac{2+0.6}{3}\times220\times0.9=171.6\ (\mathrm{V})$$

取 $E_a=170\mathrm{V}$

3）电枢绕组总导体数

$$N_a=\frac{\sqrt{2}\times60aE_a}{pn\Phi}=\frac{\sqrt{2}\times60\times1\times170}{1\times10000\times13.48\times10^{-4}}$$
$$=1070\ (\text{根})$$

4）电枢绕组元件匝数

$$N_{ae}=\frac{N_a}{2K}=\frac{1070}{2\times38}=14.08\ (\text{匝})$$

取电枢绕组元件 $N_{ae}=14$ 匝，实际绕组总导体数为

$$N_a=2KN_{ae}=2\times38\times14=1064\ \text{根}$$

5）电枢绕组导线选择

取导线电流密度 $J=10\text{A/mm}^2$，并绕根数 $n_a=K/Z_a=38/19$ 根 $=2$ 根，故有

$$d_{wa}=1.13\sqrt{\frac{I}{Jn_a}}=1.13\sqrt{\frac{3.79}{10\times 2}}=0.4919\ (\text{mm})$$

取标准导线直径 $d_{wa}=0.49\text{mm}$，导线实际截面积 $A_{wa}=0.1886\text{mm}^2$。

（3）定子绕组计算

1）交流励磁每极匝数。选变换系数 $K_a=0.2$，每极匝数为

$$N_s=K_a\frac{N_a}{2}=0.2\times\frac{1064}{2}=106.4\ (\text{匝/极})$$

取 $N_s=106$ 匝/极

2）交流绕组导线直径

$$d_{ws}=(1.34\sim 1.45)\ d_{wa}=(1.34\sim 1.45)\times 0.49$$
$$=0.6566\sim 0.7105\ (\text{mm})$$

选用标准导线直径 $d_{ws}=0.67\text{mm}$，导线实际截面积 $A_{ws}=0.3526\text{mm}^2$。

3）定子附加直流绕组匝数

在直流供电下工作时，直流励磁绕组总磁通势

$$F=(0.84\sim 0.95)\ \tau A$$
$$=(0.84\sim 0.95)\times 7.854\times 130$$
$$=857.7\sim 970\ (\text{A})$$

取 $F=900\text{A}$

设在直流电源运行时的效率 $\eta'=0.7$，则直流电流为

$$I_d=\frac{P_{ex}}{\eta' U_N}=\frac{450}{0.7\times 220}=2.92\ (\text{A})$$

直流励磁绕组总匝数

$$N_d = \frac{F}{I_d} = \frac{900}{2.92} = 308 \text{（匝）}$$

直流励磁绕组附加匝数

$$N_{da} = \frac{N_d}{2} - N_s = \frac{308}{2} - 106 = 48 \text{（匝/极）}$$

直流附加绕组导线选择

$$d_{wd} = d_{ws}\sqrt{\frac{I_d}{I_a}} = 0.67\sqrt{\frac{2.92}{3.79}} = 0.588 \text{（mm）}$$

选用标准导线直径 $d_{wd} = 0.59\text{mm}$。

（4）校验

1）电枢铁心轭部磁通密度校验

$$B_y = \frac{\Phi}{1.86 h_y l_a} \times 10^4 = \frac{13.48 \times 10^{-4}}{1.86 \times 0.9 \times 5.2} \times 10^4$$
$$= 1.549 \text{（T）}$$

2）电枢铁心齿部磁通密度校验

$$B_t = \frac{B_g t_a}{0.92 b_a} = \frac{B_g \dfrac{\pi D_{ae}}{Z_a}}{0.92 b_a}$$
$$= \frac{0.5 \times \pi \times 5}{0.92 \times 0.26 \times 19} = 1.728 \text{（T）}$$

3）线负荷校验

$$A = \frac{N_a I_a}{6.28 D_{ae}} = \frac{1064 \times 3.79}{6.28 \times 5} = 128.4 \text{（A/cm）}$$

4）换向器使用条件校验

$$e_c = \frac{U_N}{K} = \frac{220}{38} = 5.789 \text{（V）} \leqslant 6 \sim 8 \text{（V）}$$

因是短时工作制，各校验值均在允许范围内。

第二节　变压器计算

一、小型单相变压器计算

(一) 变压器的基本原理

图 2-13 是单相变压器原理图，当交流电压 U_1 加到一次侧绕组后，交流电流 I_1 流入该绕组，产生励磁作用，在铁心中产生交变磁通 Φ，这个交变磁通不仅穿过一次侧绕组，同时也穿过二次侧绕组，它分别在两个绕组中产生感应电动势。这时如果二次侧与外电路的负载接通，便有交变电流 I_2 流出，负载端电压即为 U_2。

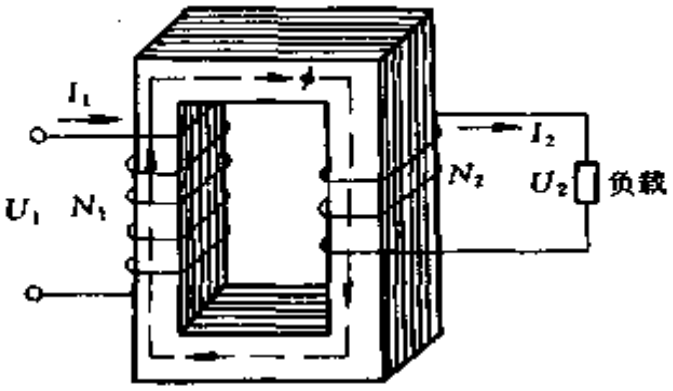


图 2-13　单相变压器原理图

根据电磁感应定律可以推导出：

一次侧绕组感应电动势

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A \times 10^{-4} \tag{2-187}$$

二次侧绕组感应电动势

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A \times 10^{-4} \tag{2-188}$$

式中　B_m——铁心中最大的磁通密度，T；

A——铁心截面积，cm^2；

f——电源频率，工频为 50Hz；

N_1——一次侧绕组的匝数；

N_2——二次侧绕组的匝数。

将上面两式相比得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{2-189}$$

忽略一、二次绕组本身的阻抗压降，可认为 $U_1 \approx E_1$，$U_2 \approx E_2$，于是式（2-189）可以化成

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_u \tag{2-190}$$

这个关系证明了一、二次侧电压之比，近似等于一、二次侧绕组匝数之比，这个比值称为变压器的变压比。

当 $N_1 > N_2$ 时，$K_u > 1$，此时 $U_1 > U_2$，这时的变压器称为降压变压器。

当 $N_1 < N_2$ 时，$K_u < 1$，此时 $U_1 < U_2$，这时的变压器称为升压变压器。

忽略一、二次绕组中的漏磁和功率传递过程中的能量损耗，则输入功率应等于输出功率。

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

或

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

所以

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = K_i = \frac{1}{K_u} \tag{2-191}$$

这个关系说明了变压器的一、二次侧电流之比等于一、二次侧绕组匝数的反比。

以上这些式子就是变压器计算的基本关系式。

例 2-35 某单相变压器的一次电压 $U_1=3000V$，其变压比 $K_u=5$，求二次电压 U_2 为多少？当二次电流 $I_2=60A$ 时，求一次电流 I_1 为多少？

解 因 $$\frac{U_1}{U_2}=K_u$$

所以 $$U_2=\frac{U_1}{K_u}=\frac{3000}{15}=200(V)$$

因 $$\frac{I_1}{I_2}=\frac{1}{K_u}$$

所以 $$I_1=\frac{I_2}{K_u}=\frac{60}{15}=4(A)$$

例 2-36 现欲设计一变压器，使电压自 220V 降到 24V，假设一次绕组匝数为 1320，问二次绕组匝数为多少？

解 因 $$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$$

所以 $$N_2=\frac{U_2N_1}{U_1}=\frac{24\times1320}{220}=144(匝)$$

例 2-37 某焊接用变压器，其低压绕组有 1 圈，输出为 300A，若高压绕组有 30 圈，问通过电流多少？

解 因 $$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}$$

所以 $$I_1=\frac{I_2N_2}{N_1}=\frac{300\times1}{30}=10(A)$$

例 2-38 某单相控制变压器，一次绕组电压为 380V，二次有两个绕组，其电压分别是 127V 和 36V，如一次绕组匝数为 760，问二次绕组应分别为多少匝？如在 36V 电路中，接入 40W 的电灯 2 盏，问此时一、二次绕组中电流为

多少？（灯泡电压为 36V）

解 设二次绕组中 127V 绕组匝数为 N_2，36V 绕组匝数为 N_3。

$$N_2 = \frac{U_2 N_1}{U_1} = \frac{127 \times 760}{380} = 254(匝)$$

$$N_3 = \frac{U_3 N_1}{U_1} = \frac{36 \times 760}{380} = 72(匝)$$

在 36V 电路中，接入 40W 电灯时，因

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{36} = 1.11(A)$$

在电压为 36V 的二次绕组中有电灯两盏，所以 36V 绕组中电流

$$I_3 = 2 \times 1.11 = 2.22(A)$$

一次绕组中电流

$$I_1 = \frac{N_3 I_3}{N_1} = \frac{72 \times 2.22}{760} = 0.21(A)$$

（二）小型单相变压器的计算

下面介绍一种简便的小功率变压器的计算方法，它适合于 1000VA 以下的小型壳式变压器，虽然是一种近似的方法，但已能满足一般工厂生产的需要。

计算步骤如下：

1. 确定变压器的额定容量

变压器的二次容量为

$$S_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 + \cdots + U_n I_n \qquad (2\text{-}192)$$

式中 S_2——变压器二次容量，VA；

U_2、U_3、$\cdots U_n$——二次侧各绕组电压有效值，V；

I_2、I_3、$\cdots I_n$——二次侧各绕组电流有效值，A。

变压器在传递功率过程中，本身存在着铁损和铜损，故一次容量比二次容量大。

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} \tag{2-193}$$

式中 η——变压器的效率。η 总是小于 1，变压器的容量越小，η 也越小，η 的数值见表 2-18。

表 2-18 小容量变压器效率值

二次容量 S_2	小于 10 (VA)	10～30 (VA)	30～80 (VA)	80～200 (VA)	200～400 (VA)	400 以上 (VA)
η	0.6	0.7	0.8	0.85	0.9	0.95

变压器的额定容量 $S = \frac{S_1 + S_2}{2}$ (2-194)

2. 确定变压器铁心截面积 A_c

变压器的铁心中柱截面 A_c 的大小与变压器的额定功率有关，可按下列经验公式计算，即

$$A_c = K_0\sqrt{S} \tag{2-195}$$

式中 A_c——变压器铁心截面积，cm^2；

K_0——经验系数，它是根据铁心材料好坏得出的经验数据，一般可根据所采用硅钢片的磁通密度来选取。当 B 为 1.2～1.5T 时，$K_0 = 1$；B 为 0.8～1.0T 时，$K_0 = 1.6 \sim 1.25$；B 为 0.6～0.7T 时，$K_0 = 2$；

S——变压器的额定容量，VA。

$$A_c = a \times b \tag{2-196}$$

式中 a——铁心中柱宽，cm；

b——铁心净叠厚，cm。

根据计算所得 A 值，结合实际情况确定铁心尺寸 a 与 b 的大小。

国产小功率变压器常用的标准铁心片有 GEI 型和 GEIB 型两种，形状和尺寸符号见图 2-14，铁心规格和尺寸见表 2-19。

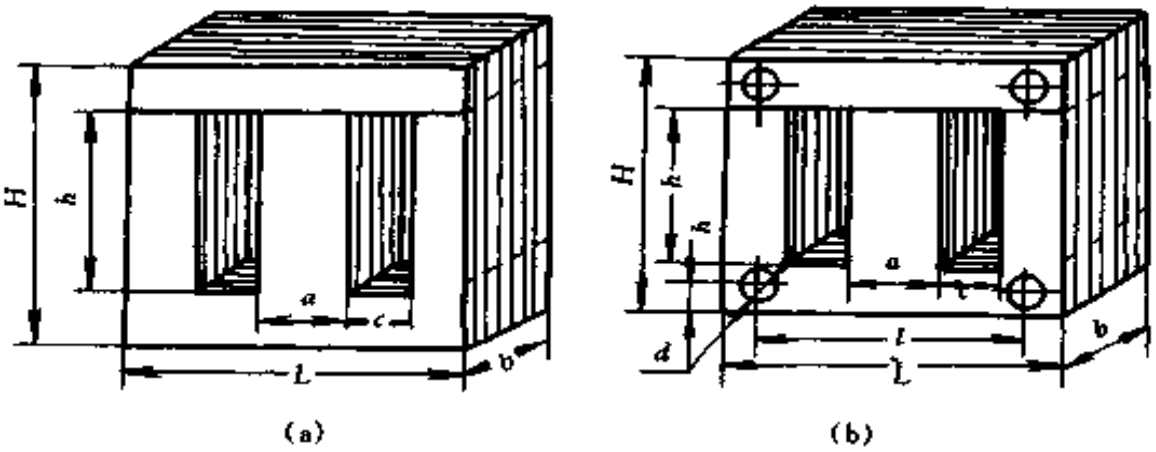


图 2-14　小功率变压器常用标准铁心

(a) GEI 型；(b) GEIB 型

表 2-19 中的中间舌片净截面积是这样计算出来的，因为铁心是由涂绝缘漆的硅钢片叠压成的，故应将 a 乘 b 再乘以叠压系数，0.35mm 厚热轧硅钢片取叠压系数 $K_c=0.91$，0.35mm 厚冷轧硅钢片取叠压系数 $K_c=0.94$；0.5mm 厚热轧硅钢片取叠压系数 $K_c=0.92$，0.5mm 厚冷轧硅钢片取叠压系数 $K_c=0.95$。

3. 计算每个绕组的匝数

设 N_i 表示变压器每感应 1V 电动势所需绕的匝数，即

$$N_i=\frac{N}{E}=\frac{10^4}{4.44fB_mA} \tag{2-197}$$

关于 B_m 值，不同的硅钢片是不一样的，当变压器容量

表 2-19　　国产小功率变压器常用的标准铁心片规格

铁心片型号	铁心规格(mm) $a\times b$	尺寸(mm) c	H	h	L	l	d	h_1	参考数据 中间舌片净面积(cm^2) 铁心片厚度(mm) 冷轧 0.35	冷轧 0.5	热轧 0.35	热轧 0.5
GEI10	10×12.5	6.5	31	18	36				1.18	1.19	1.14	1.15
	10×15								1.41	1.43	1.37	1.38
	10×17.5								1.64	1.66	1.59	1.61
	10×20								1.88	1.90	1.82	1.84
GEI12	12×15	8	38	22	44				1.69	1.71	1.64	1.66
	12×18								2.03	2.05	1.97	1.99
	12×21								2.37	2.39	2.29	2.32
	12×24								2.70	2.74	2.62	2.65
GEI14	14×18	9	43	25	50				2.37	2.39	2.29	2.32
	14×21								2.76	2.79	2.68	2.70
	14×24								3.16	3.19	3.06	3.09
	14×28								3.68	3.72	3.57	3.61
GEI16	16×20	10	48	28	56				3.01	3.04	2.91	2.94
	16×24								3.61	3.65	3.49	3.53
	16×28								4.21	4.26	4.08	4.12
	16×32								4.81	4.86	4.66	4.71
GEIB19	19×24	12	57.5	33.5	67	55	4	6	4.29	4.33	4.15	4.20
	19×28								5.00	5.05	4.84	4.89
	19×32								5.72	5.78	5.53	5.59
	19×38								6.79	6.86	6.57	6.64

续表

铁心片型号	铁心规格(mm) $a\times b$	尺寸(mm) c	H	h	L	l	d	h_1	参考数据 中间舌片净面积(cm^2) 铁心片厚度(mm) 冷轧 0.35	冷轧 0.5	热轧 0.35	热轧 0.5
GEIB22	22×28	14	67	39	78	64	5	7	5.79	5.85	5.61	5.67
	22×33								6.82	6.90	6.61	6.68
	22×38								7.86	7.94	7.61	7.69
	22×44								9.10	9.20	8.81	8.91
GEIB26	26×33	17	81	47	94	77	5	8.5	8.07	8.15	7.81	7.89
	26×39								9.53	9.63	9.23	9.33
	26×45								11.0	11.1	10.6	10.8
	26×52								12.7	12.8	12.3	12.4
GEIB30	30×38	19	91	53	106	87	6	9.5	10.7	10.8	10.4	10.5
	30×45								12.7	12.8	12.3	12.4
	30×52								14.7	14.8	14.2	14.4
	30×60								16.9	17.1	16.4	16.6
GEIB35	35×44	22	105.5	61.5	123	101	6	11	14.5	14.6	14.0	14.2
	35×52								17.1	17.3	16.6	16.7
	35×60								19.7	20.0	19.1	19.3
	35×70								23.0	23.3	22.3	22.5
GEIB40	40×50	26	124	72	144	118	6	13	18.8	19.0	18.2	18.4
	40×60								22.6	22.8	21.8	22.1
	40×70								26.3	26.6	25.5	25.8
	40×80								30.1	30.4	29.1	29.4

在 100VA 以下，通常冷轧硅钢片 DW240-35、DW265-35 的 B_m 取 1.0～1.2T；当变压器容量为 100～1000VA 时，B_m 可取 1.2～1.5T。当变压器容量在 100VA 以下，热轧硅钢片 DR320-35、DR280-35、DR360-50、DR315-50 的 B_m 取 0.8～1.0T；当变压器容量为 100～1000VA 时，B_m 取 1.0～1.2T。

如果不知道硅钢片的牌号，按经验可以将硅钢片扭一扭，如硅钢片薄而脆，则磁性能较好（俗称高硅），B_m 可取得大些；若硅钢片厚而软，则磁性能较差（俗称低硅），B_m 值可取得小些。一般 B_m 可取在 0.7～1.0T 之间。

因电源频率为 $f=50\text{Hz}$，于是有

$$N_i = \frac{N}{E} = \frac{45}{B_m A} \tag{2-198}$$

根据计算所得 N_i 值乘以每个绕组的电压，就可以算得每个绕组的匝数，即

$$N_1 = U_1 N_i; N_2 = U_2 N_i; N_3 = U_3 N_i; \cdots$$

其中二次侧的绕组应增加 5% 的匝数，以便补偿负载时的电压降。

4. 计算绕组的导线直径 d_w

首先选取电流密度 J，求出各绕组导线的截面积 A_w

$$A_w = \frac{I}{J} \tag{2-199}$$

因

$$A_w = \frac{\pi}{4} d_w^2$$

所以

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{I}{J} \times \frac{4}{\pi}} = 1.13\sqrt{\frac{I}{J}} \tag{2-200}$$

电流密度 J 一般可按下述方法选取：

100VA 以下连续使用的变压器取 $J = 2.5\text{A/mm}^2$；

100VA 以上连续使用的变压器取 $J=2A/mm^2$；变压器短时工作时，电流密度可以取大一些，即 $J=4\sim5A/mm^2$。

如果 $J=2.5A/mm^2$，则

$$d_w = 1.13\sqrt{\frac{I}{2.5}} = 0.715\sqrt{I} \tag{2-201}$$

一次绕组导线直径为

$$d_{w1} = 0.715\sqrt{I_1} \tag{2-202}$$

二次绕组导线直径为

$$d_{w2} = 0.715\sqrt{I_2} \tag{2-203}$$

电流 I_1 按下式计算

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} \times (1.1 \sim 1.2) \tag{2-204}$$

式中　1.1～1.2——考虑变压器空载励磁电流大小的经验系数。

计算出的线径，如与线规不符，应根据线规选用与其相近的线径。

5. 核算

根据已知绕组的匝数、线径、绝缘厚度等来核算变压器绕组所占铁心窗口的面积，它应小于铁心实际窗口（见图 2-14）面积（$h\times c$），否则绕组有放不下的可能。

根据选定的窗口高，计算绕组每层可绕的匝数 n_1

$$n_1 = \frac{0.9h}{d'_w} \tag{2-205}$$

式中　0.9——考虑线圈框架两端约空出 5% 地位不绕线；

d'_w——包括绝缘厚的导线外径，mm。

因此每组绕组需绕的层数 m_1 为

$$m_1 = \frac{N}{n_1} \tag{2-206}$$

每个线圈所需厚度 δ 为

$$\delta = m_l(d'_w + \delta_l) + \delta_i \tag{2-207}$$

式中 δ_l——层间绝缘厚度，mm；

δ_i——绕组间绝缘厚度，mm。

一、二次绕组的总厚度 δ_Σ 为

$$\delta_\Sigma = (\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + \cdots) \times (1.1 \sim 1.2) \tag{2-208}$$

式中 δ_0——线圈框架厚度，mm；

1.1～1.2——保险系数。

计算所得 δ_Σ 必须小于铁心窗口宽度 c，如根据计算发现线圈太小或太大，可按实际情况适当增减铁心厚度和导线直径，然后再行计算，直至合适为止。

例 2-39 计算一台一次为 220V，二次为 36V，1.11A 的机床照明变压器，铁心用热轧硅钢片（磁通密度 B_m = 1.0T）。

解 （1）确定变压器的额定容量

$$S_2 = U_2 I_2 = 36 \times 1.11 = 39.96 \approx 40(\text{VA})$$

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$$

查表 2-18 知 $\eta = 0.8$

所以 $$S_1 = \frac{40}{0.8} = 50(\text{VA})$$

变压器的额定容量

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{40 + 50}{2} = 45(\text{VA})$$

（2）确定变压器铁心截面 A_c

$$A_c = K_0\sqrt{S}$$

因 $$B = 1.0\text{T}, \text{选 } K_0 = 1.25$$

故 $$A_c = 1.25\sqrt{45} = 8.385\text{mm}^2$$

按表 2-19 选用小功率变压器常用标准热轧硅钢片 GEIB26 型，其尺寸为

$$a \times b = 26 \times 39\text{mm}^2$$

硅钢片厚度为 0.35mm

铁心净截面积为 9.23mm^2

(3) 计算每个绕组的匝数

每伏匝数

$$N_i = \frac{45}{B_m A} = \frac{45}{1 \times 9.23} = 4.875(\text{匝}/\text{V})$$

绕组匝数

$$N_1 = U_1 N_i = 220 \times 4.875 = 1073(\text{匝})$$

$$N_2 = 1.05 U_2 N_i = 1.05 \times 36 \times 4.875 = 184(\text{匝})$$

(4) 计算绕组导线直径

$$I_1 = 1.2 \frac{S_1}{U_1} = 1.2 \times \frac{50}{220} = 0.273(\text{A})$$

取电流密度 $J = 2.5\text{A}/\text{mm}^2$

$$d_{w1} = 0.715\sqrt{0.273} = 0.374(\text{mm})$$

$$I_2 = 1.11\text{A}$$

$$d_{w2} = 0.715\sqrt{1.11} = 0.753(\text{mm})$$

一次绕组选用直径为 0.38mm 高强度漆包线，二次绕组选用直径为 0.77mm 高强度漆包线，连同绝缘漆的线径为

$$d'_{w1} = 0.44\text{mm}$$

$$d'_{w2} = 0.86\text{mm}$$

(5) 核算

由表 2-19 知窗高 $h = 47\text{mm}$

每层可绕的匝数

$$n_{l1} = \frac{0.9h}{d'_{w1}} = \frac{0.9 \times 47}{0.44} = 96(\text{匝})$$

$$n_{12}=\frac{0.9h}{d'_{W2}}=\frac{0.9\times 47}{0.86}=49(匝)$$

每组绕组需绕的层数

$$m_{11}=\frac{N_1}{n_{11}}=\frac{1073}{96}=11.18(层),取\ 12\ 层$$

$$m_{12}=\frac{N_2}{n_{12}}=\frac{184}{49}=3.755(层),取\ 4\ 层$$

绕组绝缘选用如下：

对地（铁心）绝缘：用0.15mm青壳纸和0.05mm聚脂薄膜各1张。

绕组间绝缘：用0.15mm青壳纸和0.05mm聚脂薄膜各1张，$\delta_i=0.15+0.05=0.2$（mm）。

绕组层间绝缘：

一次绕组用白玻璃纸1层 $\delta_1=0.04$mm

二次绕组用电缆纸1层 $\delta_2=0.07$mm

绕组框架用1mm厚弹性纸制成，外包对地绝缘，其厚为 $\delta_0=1+0.05+0.15=1.2$（mm）

绕组的总厚度 $\delta_\Sigma=(\delta_0+\delta_1+\delta_2)\times(1.1\sim1.2)$

$$\begin{aligned}\delta_\Sigma&=\{\delta_0+[m_{11}(d'_{W1}+\delta_1)+\delta_i]\\&\quad+[m_{12}(d'_{W2}+\delta_2+\delta_i]\}\times1.2\\&=\{1.2+[12(0.44+0.04)+0.2]\\&\quad+[4(0.86+0.07)+0.2]\}\times1.2\\&=\{1.2+5.76+0.2+3.72+0.2\}\\&\quad\times1.2=13.3(\text{mm})\end{aligned}$$

由表2-19知铁心窗口宽度 c 为17mm，计算的绕组厚度 $\delta_\Sigma<c$，所以设计是可行的。

二、三相变压器计算

（一）三相变压器的基本参数

1．额定容量

表示在额定使用条件下，变压器的输出能力，以表观功率 kVA 表示，对三相变压器而言，额定容量表示三相容量的和。

2．额定电压

表示变压器各绕组在空载时的额定电压值，以 V 或 kV 表示，在三相变压器中，如无特殊说明，额定电压都是指线电压。

3．额定电流

变压器各绕组在额定负载情况下的电流值，以 A 表示，在三相变压器中，如无特殊说明，额定电流都是指线电流。

4．联结组标志

代表变压器各个相绕组的联结法和相量关系的符号，为便于生产管理和简化运行，下列五种联结组是标准联结组，即

Y，yn0；Y，d11；YN，d11；Y，y0；YN，y0

它们分别适用于下列场合：

（1）Y，yn0 用于二次电压为 400/230V 的配电变压器，采用三相四线制方式供低压动力与照明混合负载，最大容量通常不超过 1800kVA。

（2）Y，d11 用于二次电压高于 400V 的情况，常用于降压变压器。

（3）YN，d11 用于高压侧要求接地的高压（110kV 以上）输电系统中。

（4）Y，y0 供给三相动力负载。

（5）YN，y0 用于一次侧中性点需要接地的场合。

实际网络中，最常用的是前三种联结组。

5. 各量之间的关系

$$S = 3U_pI_p = \sqrt{3}U_lI_l \tag{2-209}$$

式中 S——三相变压器容量，VA；

U_p——相电压，V；

I_p——相电流，A；

U_l——线电压，V；

I_l——线电流，A。

绕组作 Y 联结时

$$U_l = \sqrt{3}U_p \tag{2-210}$$

$$I_l = I_p \tag{2-211}$$

绕组作△联结时

$$U_l = U_p \tag{2-212}$$

$$I_l = \sqrt{3}I_p \tag{2-213}$$

例 2-40 S7-500/10 型三相电力变压器 1 台，联结组标号为 Y，yn0。电压比为 10/0.4kV，求一、二次相、线电压，相、线电流各为多少？

解 (1) 一次线电压 $U_{1l}=10\text{kV}$

(2) 一次相电压

$$U_{1p} = \frac{U_{1l}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773(\text{V})$$

(3) 一次线电流＝一次相电流

$$I_{1l} = I_{1p} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{1l}} = \frac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times10^4} = 28.9(\text{A})$$

(4) 二次线电压 $U_{2l}=400\text{V}$

(5) 二次相电压

$$U_{2p} = \frac{U_{2l}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9(V)$$

(6) 二次线电流＝二次相电流

$$I_{2l} = I_{2p} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{2l}} = \frac{500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 721.7(A)$$

(二) 小型三相变压器计算

1. 每匝电压的确定

$$e'_t = (0.3 \sim 0.45)\sqrt{S_N} \qquad (2\text{-}214)$$

式中 e'_t——每匝电压，V/匝；

S_N——三相变压器额定容量，kVA。

2. 铁心直径 D

$$D_c = K\sqrt[4]{S_p} \qquad (2\text{-}215)$$

式中 D_c——铁心计算直径，cm；

K——系数，查表 2-20；

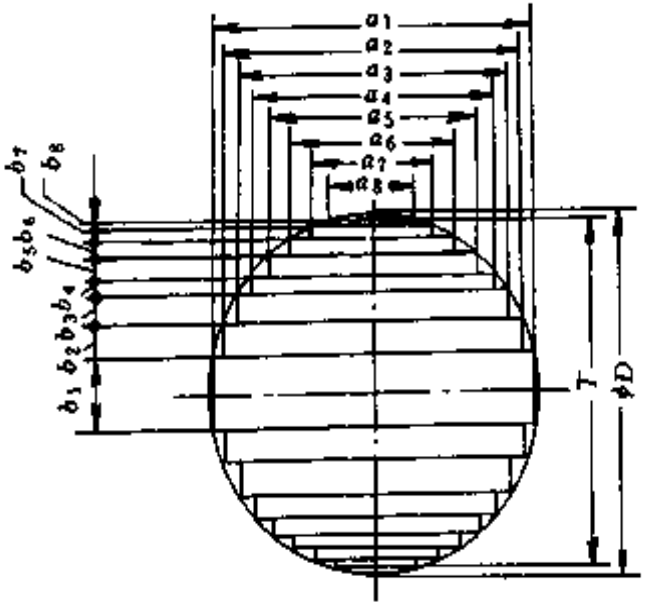
S_p——每柱容量，VA。

根据计算直径 D_c，按表 2-21 选出标准铁心直径 D，同时查出铁心截面积 A 和各级铁片尺寸和厚度。

表 2-20　　系数 K 值

变压器类别		S_N 与 S_p 的关系	K			
			铝线圈		铜线圈	
			冷轧	热轧	冷轧	热轧
三相双绕组		$S_p = S_N/3$	5.0～5.4	5.6～6.0	5.3～5.7	6.0～6.4
三相三绕组		$S_p = S_N/2$	4.8～5.2	5.4～5.6	5.1～5.5	5.8～6.2
单相双绕组		$S_p = S_N/2$	5.0～5.4	5.6～6.0	5.3～5.7	6.0～6.4
单相三绕组		$S_p = 3S_N/4$	4.8～5.2	5.4～5.8	5.1～5.5	5.8～6.2
效益系数 $K_1 = 0.5$	三相自耦	$S_p = K_1 S_N/2$	4.8～5.2	5.4～5.8	5.1～5.5	5.8～6.2
	单相自耦	$S_p = 3K_1 S_N/4$				

表 2-21　　多级阶梯形铁柱规格尺寸表



外接圆直径 D(mm)	表观面积(毛面积) A_c' (cm^2)	净面积 A_c(cm^2)			铁柱宽度(mm)								铁柱厚度(mm)								
		0.91 A_c'	0.92 A_c'	0.95 A_c'	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	T
70	34.30	31.21	31.56	32.95	65	60	50	35	20				26	5	6	6	3				66
75	39.90	36.31	36.71	37.91	70	65	55	40	25				27	5	7	6	4				71
80	45.30	41.22	41.68	43.04	75	65	55	40	25				28	9	6	5	4				76
85	51.00	46.41	46.92	48.45	80	70	60	45	25				28	10	6	6	4				80

续表

外接圆直径 D(mm)	表观面积(毛面积) A_c' (cm^2)	净面积 A_c(cm^2)			铁柱宽度(mm)								铁柱厚度(mm)								
		0.91 A_c'	0.92 A_c'	0.95 A_c'	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	T
90	57.75	52.55	53.13	54.86	85	75	65	50	30				29	10	7	6	5				85
95	64.30	58.52	59.16	61.09	90	80	65	50	30				30	11	9	5	5				90
100	70.95	64.57	65.27	67.40	95	85	70	55	30				31	11	9	6	6				95
105	79.50	72.35	73.14	75.53	100	90	80	65	50	30			32	11	7	7	5	4			100
110	87.15	79.31	80.18	82.79	105	95	85	70	55	30			33	11	7	8	5	5			105
115	95.00	86.45	87.40	90.25	110	100	90	75	55	30			34	11	8	7	7	5			110
120	104.10	94.73	95.77	98.90	115	105	90	75	60	35			34	12	11	7	5	5			114
125	112.80	102.65	103.78	107.16	120	110	95	80	60	35			35	12	11	8	6	5			119
130	122.55	111.52	112.75	116.42	125	115	100	85	65	35			35	13	11	8	7	6			125
135	132.00	120.12	121.44	125.40	130	115	105	85	65	40			37	17	7	10	7	5			129
140	141.95	129.18	130.59	134.85	135	120	110	90	70	40			37	18	7	10	7	7			135
145	152.20	138.50	140.02	144.59	140	125	110	95	70	40			38	18	10	8	8	7			140
150	165.00	150.15	151.80	156.75	145	135	120	105	90	65	40		38	14	12	9	6	8	4		144
155	175.80	159.99	161.74	167.01	148	140	125	110	90	70	40		45	11	12	9	9	6	5		149
160	188.30	171.35	173.24	178.89	155	145	130	115	95	70	40		40	14	13	9	8	8	6		156

续表

外接圆直径 D(mm)	表观面积(毛面积) A_c' (cm²)	净面积 A_c(cm²)			铁柱宽度(mm)								铁柱厚度(mm)								
		0.91 A_c'	0.92 A_c'	0.95 A_c'	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	T
165	199.46	181.51	183.50	189.49	160	148	135	115	95	70	35		41	16	11	12	8	7	6		161
170	211.55	192.51	194.63	200.97	165	155	140	120	100	75	45		41	14	14	12	8	8	5		163
175	224.30	204.11	206.36	213.09	170	160	140	125	100	75	45		41	15	17	9	10	8	5		169
180	237.30	215.94	218.32	225.44	175	160	145	125	105	80	45		42	20	12	12	8	8	6		174
185	250.44	227.90	230.40	237.92	180	165	148	130	110	80	45		43	20	14	10	9	9	6		179
190	263.65	239.92	242.56	250.47	185	170	155	135	110	85	50		43	21	12	12	11	7	7		183
195	278.50	253.44	256.22	264.58	185	175	160	140	115	85	50		62	12	13	12	11	9	6		188
200	292.50	266.18	269.10	277.88	195	180	160	140	115	85	50		44	21	17	11	11	8	7		194
205	308.60	280.83	283.91	293.17	200	185	165	145	120	90	50		45	22	16	12	11	9	7		199
210	322.08	293.09	296.31	305.98	200	185	170	148	120	90	55		64	18	11	13	12	9	6		202
215	339.20	308.67	312.06	322.24	210	195	175	148	125	95	55		46	23	17	15	10	8	8		208
220	353.60	321.78	325.31	335.92	210	200	180	155	130	95	55		66	13	17	15	11	10	7		212
225	372.65	339.11	342.84	354.02	215	200	180	160	130	100	55		67	18	16	15	13	9	8		219
230	387.10	352.26	356.13	367.75	220	205	185	160	135	100	55		67	19	16	14	10	11	8		223

续表

外接圆直径 D(mm)	表观面积(毛面积) A_c' (cm^2)	净面积 A_c(cm^2)			铁柱宽度(mm)								铁柱厚度(mm)								
		0.91 A_c'	0.92 A_c'	0.95 A_c'	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	T
235	404.20	367.82	371.86	383.99	225	210	185	165	135	100	65		68	19	19	12	12	10	7		226
240	422.90	384.84	389.07	401.76	230	215	195	170	140	105	65		69	19	17	14	13	11	7		231
245	445.10	403.22	407.65	420.95	235	220	200	180	155	130	100	60	68	20	16	13	11	10	8	7	238
250	460.90	419.42	424.03	437.86	240	225	210	185	165	135	100	60	70	20	13	16	10	11	9	7	242
255	480.70	437.44	442.24	456.67	245	230	215	185	165	135	100	60	72	19	14	19	10	10	9	7	248
260	500.34	455.31	460.31	475.32	248	235	220	195	170	140	105	65	78	17	14	16	13	11	9	7	252
265	517.10	470.56	475.73	491.25	255	240	225	200	175	140	110	60	70	21	14	17	12	13	8	9	258
270	539.60	491.04	496.43	542.62	260	245	225	205	175	145	110	65	76	19	18	13	15	11	9	8	262
275	557.83	507.63	513.20	529.94	265	248	230	205	180	145	110	65	73	23	16	16	12	13	9	8	267
280	581.06	528.76	534.58	552.01	270	255	235	210	180	148	115	65	74	21	19	16	15	11	9	8	272
285	600.80	546.73	552.74	570.76	275	260	240	215	185	155	115	70	74	21	19	17	15	11	10	8	276
290	621.90	565.93	572.15	590.81	280	265	245	220	185	155	120	70	76	21	19	16	17	12	9	9	282
295	643.16	585.28	591.71	611.00	285	270	248	220	185	155	120	70	76	21	21	18	17	11	9	8	286
300	663.20	603.51	610.14	630.04	290	275	255	225	195	160	115	70	77	21	19	20	15	13	12	7	291

3. 磁通密度 B_m 的选择

磁通密度大小取决于硅钢片牌号、厚度及变压器容量大小，初步可按表 2-22 选用。

表 2-22　　磁通密度 B_m 的选择

硅钢片种类		每柱容量 S_p (kVA)		
		5 以下	5～35	35 以上
油浸式变压器	热轧片	0.9～1.2	1.2～1.4	1.4～1.45
	冷轧片	1.1～1.4	1.4～1.6	1.6～1.65
干式变压器	热轧片	0.9～1.0	1.0～1.2	1.1～1.2
	冷轧片	1.0～1.2	1.1～1.3	1.2～1.4

4. 绕组匝数计算

(1) 二次绕组匝数 N_2

$$N'_2 = \frac{U_2}{e'_t}, \text{取整数} \tag{2-216}$$

则

$$e_t = \frac{U_2}{N_2} \tag{2-217}$$

(2) 一次绕组匝数 N_1。N_1 有 ±5% 或 ±2.5% 分抽头，其匝数计算如下

$$N_1\ (+5\%) = 1.05N_2 \frac{U_1}{U_2} \tag{2-218}$$

$$N_1\ (-5\%) = 0.95N_2 \frac{U_1}{U_2} \tag{2-219}$$

$$N_1\ (+2.5\%) = 1.025N_2 \frac{U_1}{U_2} \tag{2-220}$$

$$N_1\ (-2.5\%) = 0.975N_2 \frac{U_1}{U_2} \tag{2-221}$$

5. 绕组电流计算

可按照式（2-209）～式（2-213）进行计算。

6. 选择电流密度

绕组中电流密度初算时，可按表 2-23 选择。注意表中数值为铜线时的电流密度，如使用铝线，其电流密度应相应降低 30%左右。电流密度与绕组结构也有关，若平行绕制的应取小值；通风散热条件好的可取大值。

表 2-23　　绕组中平均电流密度　　（A/mm²）

每柱容量 S_p (kVA)		5 以下	5～15	15～25	25 以上
油浸变压器中		2～2.5	2.5～3.5	3～4	3.5～4.5
干式变压器中	内线圈	1.2～1.5	1.2～1.5	1.5～2	1.5～2
	外线圈	1.5～2	1.5～2	2～2.5	2.5～3

7. 计算绕组导线截面积和选择导线

根据绕组电流和选取的电流密度计算绕组导线截面，并选择标准导线。

8. 铁心尺寸计算

（1）铁轭部截面积。铁心为三相三柱式时

$$A_y = (1.05 \sim 1.10)A_c \tag{2-222}$$

式中　A_y——铁轭部截面积，cm²；

A_c——铁心柱净面积，cm²。

（2）铁轭高度

$$h_y = \frac{A_y}{K_{Fe}T} \tag{2-223}$$

式中　h_y——铁轭高度，cm；

A_y——铁轭部截面积，cm²；

K_{Fe}——叠压系数，热轧硅钢片 $K_{Fe}=0.91\sim0.92$；冷轧硅钢片 $K_{Fe}=0.93\sim0.94$；

T——铁心柱总厚度，cm。

（3）铁心柱窗口高度 h_c。

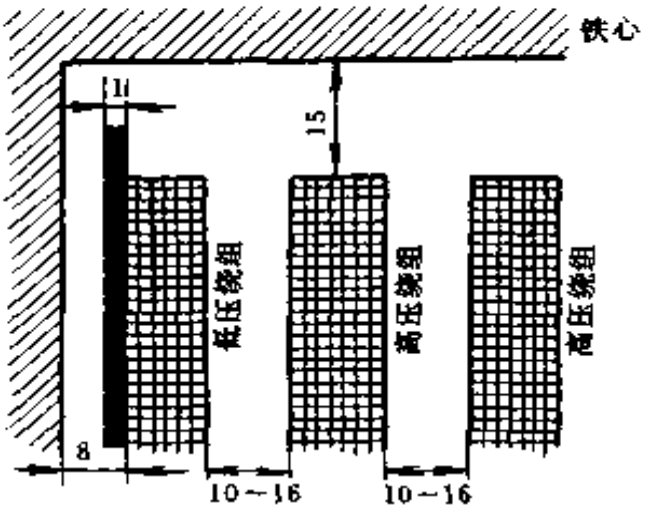


图 2-15　变压器的绝缘距离

（图中数字均以 mm 计）

它为绕组高加二倍主绝缘距离（绕组到铁轭的距离），这个距离不仅要考虑电气强度，而且还要考虑绕组通风散热及使内绕组的引出线能顺利地引出等因素。试验电压 5kV 以下的主绝缘最小距离（不分绝缘级别）如图 2-15 所示。对圆筒式绕组，此距离应包括端部绝缘（镶头）的高度。

9. 绕组排列与布置

（1）绕组的排列。

应在漏抗允许的范围内并使结构最合理，散热条件良好而用料最省。对干式变压器来说，绕组的外形结构应考虑到它的机械强度和简化装配。一般采用单层和多层圆筒式，但外层绕组尽可能不用单层圆筒式，因机械强度不够，导线易松动。绕组的层数应为双数，以使引出线在同一端。

（2）确定绕组外形尺寸。

绕组高度由绕组每匝的高度（包括绝缘）乘以每层的匝数加上端部绝缘的高度来决定。绕组的最大径向尺寸等于铁心外径与绕组各层导线总厚，加上各层间绝缘的厚度，再加

上层间通风道厚度，以上总和再加5%的余量。

绕组层间安放的撑条数视绕组直径的大小选定。一般采用双数（4、6、8、10条……），内外撑条应放置同一位置，才能保持应有的机械强度。

绕组排布好后，由绕组最大径向尺寸，再加上绕组间绝缘距离（一般为20mm左右），即可决定中心距尺寸 M。

10. 计算绕组铜重

$$G_{cu} = 8.9 l_t A_w N \times 10^{-3} \tag{2-224}$$

式中 G_{cu}——绕组铜重，kg；

l_t——绕组平均匝长，cm；

A_w——绕组导线截面积，cm^2；

N——绕组匝数。

由于未考虑引出线及导线绝缘的重量，所以实际使用导线时，一般还要适当增加5%～10%的重量。

11. 计算铁重

对三柱铁心式

$$G_{Fe} = 3 \times 7.6 h_c A_c \times 10^{-3} + 2 \times 7.6 l_y A_y \times 10^{-3} \tag{2-225}$$

式中 G_{Fe}——铁心净重，kg；

h_c——铁心柱窗口高度，cm；

A_c——铁心截面积，cm^2；

l_y——铁轭长，cm；

A_y——铁轭截面积，cm^2。

例 2-41 有一台 $S_N = 50kVA$ 三相变压器，$f = 50Hz$，一次额定电压 $U_{1N} = 380V$，二次额定电压 $U_{2N} = 190V$，绕组联结组别为 D，y11，干式变压器，铜绕组，试计算变压

器铁心、绕组、导线截面积。

解 （1）电流计算

$$I_{1l}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{50\times10^3}{\sqrt{3}\times380}=75.96(A)$$

$$I_{1p}=\frac{I_{1l}}{\sqrt{3}}=\frac{75.96}{\sqrt{3}}=43.85(A)$$

$$I_{2l}=I_{2p}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{50\times10^3}{190\times\sqrt{3}}=151.9(A)$$

（2）电压计算

$$U_{1l}=U_{1p}=380V$$

$$U_{2l}=190V$$

$$U_{2p}=\frac{U_{2l}}{\sqrt{3}}=\frac{190}{\sqrt{3}}=109.7(V)$$

（3）决定每匝电压

$$e'_t=0.45\sqrt{S_N}=0.45\sqrt{50}=3.182(V/匝)$$

（4）计算铁心直径 D

取 $K=6.4$，可得

$$D_c=K\sqrt[4]{S_p}=6.4\sqrt[4]{\frac{50}{3}}=12.93(cm)$$

选标准直径 $D=130mm$，查表 2-21 得净面积 $A_c=111.52cm^2$，选用 DR280-35 热轧硅钢片，铁心叠压系数 $K_{Fe}=0.91$，铁心柱截面尺寸如图 2-16 所示。铁心为 6 级铁心，叠厚 $T=12.5cm$。

铁轭截面积

$$A_y=1.1A_c=1.1\times111.52=122.7(cm^2)$$

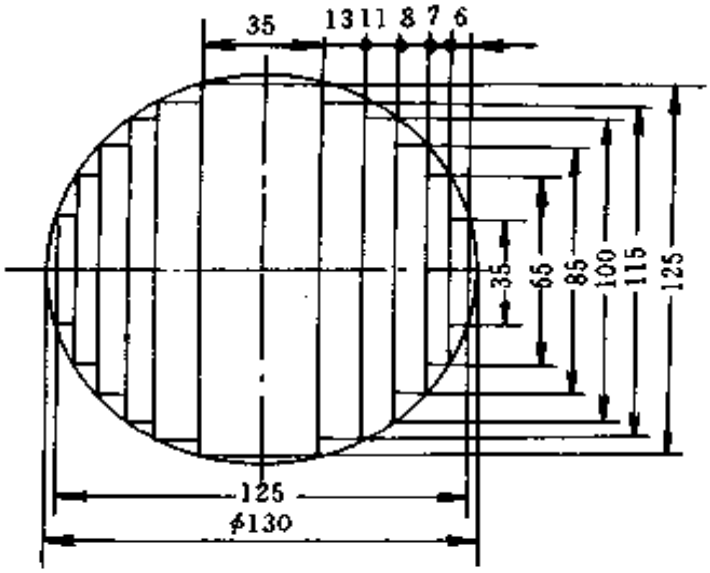


图 2-16　铁心柱截面尺寸

铁轭高度

$$h_y = \frac{A_y}{K_{Fe}T} = \frac{122.7}{0.91 \times 12.5} = 10.79(\text{cm})$$

取 $h_y = 10.8\text{cm}$

(5) 计算绕组匝数

二次绕组匝数

$$N_2 = \frac{U_{2p}}{e'_t} = \frac{109.7}{3.182} = 34.48(\text{匝})$$

取 $N_2 = 34$ 匝

则 $$e_t = \frac{U_{2p}}{N_2} = \frac{109.7}{34} = 3.226(\text{V/匝})$$

一次绕组匝数

$$N_1 = \frac{U_{1p}}{e_t} = \frac{380}{3.226} = 117.8(\text{匝})$$

取 $N_1=118$ 匝

(6) 计算绕组导线截面积

高压绕组为外绕组，按表2-23，取 $J_1=2.5A/mm^2$，可得

$$A_{w1}=\frac{I_{1p}}{J_1}=\frac{43.85}{2.5}=17.54(mm^2)$$

低压绕组为内绕组，取 $J_2=2A/mm^2$，可得

$$A_{w2}=\frac{I_{2p}}{J_2}=\frac{151.9}{2}=75.95(mm^2)$$

(7) 绕组型式与排列

内绕组采用双层圆筒式，外绕组采用多层圆筒式。内外绕组都不采用绝缘筒。图 2-17 为绕组布置。

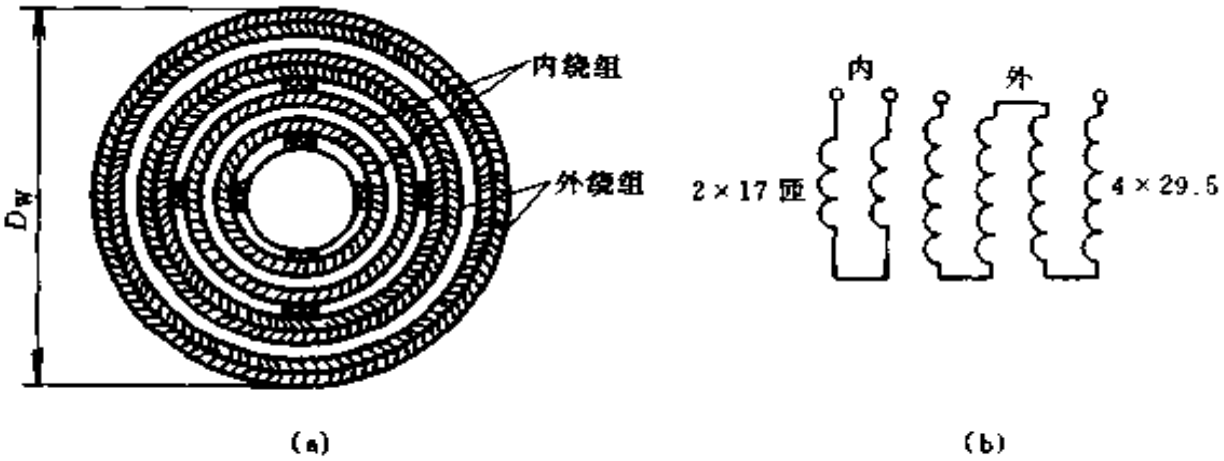


图 2-17 绕组布置

(a) 布置图；(b) 联结原理图

内绕组导线选用线规为 2.8mm×7.10mm/3.21mm×7.43mm（分子为裸线尺寸，分母为带绝缘尺寸）双玻璃丝包线，采用 2 并 2 叠绕双层圆筒式，在每层绕组中间换位 1 次，每层匝数为 17 匝。

绕组高度

$$h'_{w2} = 7.43 \times 2 \times (17 + 1) \times 1.03 = 275.5(\text{mm})$$

其中匝数加 1 是考虑到实际绕制中，17 匝导线要占相当于 18 匝导线的地位；乘 1.03 是考虑绕制系数。

取每端端部绝缘为 5.5mm，所以内绕组总高为

$$h_{w2} = h'_{w2} + 2 \times 5.5 = 275.5 + 11$$
$$= 286.5(\text{mm}) \approx 287(\text{mm})$$

外绕组导线选用线规为 2.24mm × 8mm/2.65mm × 8.33mm 双玻璃丝包线，每层绕 29.5 匝，共绕 4 层。

绕组高度

$$h'_{w1} = (29.5 + 1) \times 8.33 \times 1.03 = 261.7(\text{mm})$$

取每端端部绝缘为 12.4mm，所以外绕组总高为

$$h_{w1} = h'_{w1} + 2 \times 12.4 = 261.7 + 24.8$$
$$= 286.5 \approx 287(\text{mm})$$

内、外绕组高度相同。

在铁心与内绕组间留有厚度为 10mm 的风道（绝缘距离）撑条 4 根，宽度为 15mm。所以绕组线模尺寸：Φ150mm×286.5mm，高、低压绕组可用 1 只线模，先绕内绕组，后绕外绕组。

在内绕组的两层中间留有风道 10mm，内、外绕组之间留有风道 12mm，外绕组的第 2、3 层之间留有风道 10mm，撑条按圆周均匀安放 6 根，其宽度为 15mm，长 285mm，厚度为各自的风道厚。

绕组的最大径向尺寸为

$$D_w = [130 + 2(10 + 3.21 + 10 + 3.21 + 12 + 2 \times 2.65$$
$$+ 10 + 2 \times 2.65)] \times 1.05 = 260(\text{mm})$$

乘 1.05 是考虑绕制系数。

取柱间绕组的间隔宽 $b = 20\text{mm}$

则柱中心距

$$M = D_w + b = 260 + 20 = 280(\text{mm})$$

(8) 决定绕组铜重

内绕组第 1 层的平均直径

$$d_1 = 130 + 2 \times 10 + 3.21 = 153.2(\text{mm})$$

第 1 层的平均匝长

$$l_{t1} = \pi d_1 = \pi \times 153.2 = 481.3(\text{mm})$$

三柱匝数共 51 匝，绕组导线截面积

$$A_{w2} = 4 \times 2.8 \times 7.10 = 79.52(\text{mm}^2)$$

于是第 1 层绕组的铜重

$$G_{cu1} = 8.9 l_{t1} A_{w2} N \times 10^{-3}$$

$$= 8.9 \times 48.13 \times 0.7952 \times 51 \times 10^{-3} = 17.37(\text{kg})$$

内绕组第 2 层的平均直径

$$d_2 = 130 + 2 \times 10 + 2 \times 3.21 + 2 \times 10 + 3.21 = 179.6(\text{mm})$$

第 2 层的平均匝长

$$l_{t2} = \pi d_2 = \pi \times 179.6 = 564.2(\text{mm})$$

三柱匝数共 51 匝，绕组导线截面积 $A_{w2} = 79.52\text{mm}^2$

于是第 2 层绕组的铜重

$$G_{cu2} = 8.9 \times 56.42 \times 0.7952 \times 51 \times 10^{-3} = 20.36(\text{kg})$$

外绕组第 1、2 层的平均直径

$$d_3 = 130 + 2 \times 10 + 2 \times 3.21 + 2 \times 10 + 2 \times 3.21$$

$$+ 2 \times 12 + 2 \times 2.65 = 212.1(\text{mm})$$

外绕组第 1、2 层的平均匝长

$$l_{t3} = \pi d_3 = \pi \times 212.1 = 666.3(\text{mm})$$

三柱匝数共 $3\times59=177$ 匝，绕组导线截面积

$$A_{w1}=2.24\times8=17.92(\text{mm}^2)$$

于是外绕组第 1、2 层绕组铜重

$$G_{cu3}=8.9l_{t3}A_{w1}N\times10^{-3}$$

$$=8.9\times66.63\times0.1792\times177\times10^{-3}=18.81(\text{kg})$$

外绕组第 3、4 层的平均直径

$$d_4=130+2\times10+2\times3.21+2\times10+2\times3.21$$

$$+2\times12+4\times2.65+2\times10+2\times2.65=242.7(\text{mm})$$

外绕组第 3、4 层的平均匝长

$$l_{t4}=\pi d_4=\pi\times242.7=762.5(\text{mm})$$

三柱匝数共 177 匝，绕组导线截面积 $A_{w1}=17.92$ (mm^2)

于是外绕组第 3、4 层绕组铜重

$$G_{cu4}=8.9l_{t4}A_{w1}N\times10^{-3}$$

$$=8.9\times76.25\times0.1792\times177\times10^{-3}=21.52(\text{kg})$$

内绕组铜重

$$G_{cui}=G_{cu1}+G_{cu2}=17.37+20.36=37.73(\text{kg})$$

外绕组铜重

$$G_{cue}=G_{cu3}+G_{cu4}=18.81+21.52=40.33(\text{kg})$$

以上是计算值重，实际用量应加 5%～10%的裕量。

(9) 决定铁重

铁心外形尺寸如图 2-18 所示，绕组与铁轭的绝缘距离取 15mm，于是铁心窗高

$$h_c=h_w+2\times15=287+30=317(\text{mm})$$

铁轭长

$$l_y=2M+D=2\times280+130=690(\text{mm})$$

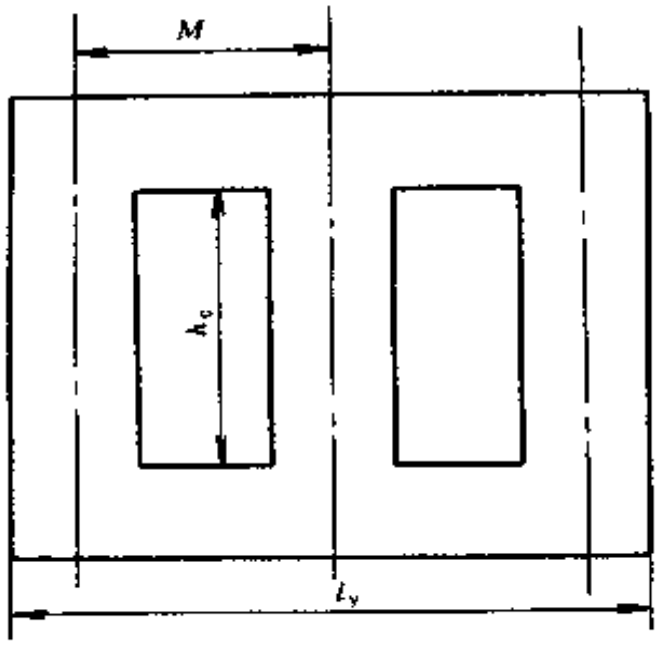


图 2-18　铁心外形尺寸

铁重

$$G_{Fe} = 3 \times 7.6 h_c A_c \times 10^{-3} + 2 \times 7.6 l_y A_y \times 10^{-3}$$
$$= (3 \times 7.6 \times 31.7 \times 111.52 + 2 \times 7.6 \times 69 \times 122.7) \times 10^{-3} = 209.3(\text{kg})$$

第三章

电器及电工仪表计算

第一节　低压电器选用计算

一、熔断器选用计算

（一）熔断器类型的选择

选择熔断器类型时，所依据的主要是负载的保护特性、短路电流的大小和使用场合。例如，作电网配电用，应考虑采用一般工业用熔断器；保护硅元件，则应选择保护半导体器件熔断器；供家庭使用，则应考虑螺旋式或半封闭插入式熔断器。

（二）一般工业用熔断器的选用

（1）按电网电压选用相应电压等级的熔断器。

（2）按配电系统中可能出现的最大短路电流，选择有相应分断能力的熔断器。

（3）根据被保护负载的性质和容量，选择熔体的额定电流。

1）电动机直接起动时，熔体电流可按下式选择

$$I_{fN} = \frac{I_s}{K} \tag{3-1}$$

式中　I_{fN}——熔断器熔体额定电流，A；

I_s——电动机的起动电流，A；

K——系数，决定于电动机的起动情况和熔断器特性，见表 3-1。除按表 3-1 中的规定选择 K 值外，还可根据起动时间来确定 K 值大小，见表 3-2。

选择熔断器熔体电流时，应注意不能选得太小。如果选择过小，易造成某一相熔断而发生电动机单相运转。

2）多台笼型异步电动机共用一组熔断器时，熔体额定电流

$$I_{fN} \geqslant K_1[I_{SM} + I_{N(n-1)}] \tag{3-2}$$

K_1——考虑负载情况的系数，一般情况取 $K_1=0.4$；

I_{SM}——被保护电路中最大一台电动机（或同时起动的电动机组）的起动电流，A；

$I_{N(n-1)}$——被保护电路中，除最大一台电动机（或同时起动的电动机组）以外的其他电动机额定电流之和，A。

表 3-1　根据熔断器特性和电动机起动情况选择 K 值

熔断器型号	熔体材料	熔体电流（A）	K	
			电动机轻载起动	电动机重载起动
RT0	铜	50 及以下	2.5	2
		60～200	3.5	3
		200 以上	4	3
RM10	锌	60 及以下	2.5	2
		80～200	3	2.5
		200 以上	3.5	3

续表

熔断器型号	熔体材料	熔体电流(A)	K	
			电动机轻载起动	电动机重载起动
RM1	锌	10～350	2.5	2
RL1	铜、银	60及以下	2.5	2
		80～100	3	2.5
RC1A	铅、铜	10～200	3	2.5

表 3-2　　按起动时间确定 K 值

起动时间（s）	K	起动时间（s）	K
3以下	4～2.8	8以上	2～1.7
3～8	2.8～2	起动频繁	2～1.7

3）控制线路的短路保护。在交流控制线路中，熔断器接在控制变压器的二次，熔体的额定电流 I_{fN}按下式选取

$$I_{fN} \geqslant \frac{S_N + 0.1S_s}{U_s} \tag{3-3}$$

式中　S_N——控制变压器的额定容量，VA；

S_s——线路中最大电器的吸引线圈起动容量，或几个电器的吸引线圈同时起动容量之和，VA；

U_s——控制变压器二次电压，V。

不用控制变压器时，控制线路的熔体额定电流 I_{fN}按下式选取

$$I_{fN} \geqslant 0.4[I_s + I_{N(n-1)}] \tag{3-4}$$

式中　I_s——线路中最大电器（或几个电器同时起动）的吸引线圈起动电流，A；

$I_{N(n-1)}$——线路中最大电器（或同时起动的几个电器）以外的其他电器吸引线圈的额定电流之和，A。

负载比较平稳的控制线路，如照明线路，熔体额定电流 I_{fN}可按下式选取

$$I_{fN} > I_{LN} \tag{3-5}$$

式中　I_{LN}——负载额定电流，A。

（4）根据熔体的额定电流，确定熔管的额定电流。通常，熔管的额定电流宜大于，至少也得等于熔体的额定电流。

（5）在配电系统中，各级熔断器应互相配合，以实现保护的选择性。

（三）保护半导体器件熔断器的选用

（1）不可控整流电路中，当熔断器接在交流侧时，其熔体额定电流 I_{fN}按下式选取

$$I_{fN} \geqslant K_1 I_{dm} \tag{3-6}$$

式中　K_1——与整流电路形式有关的系数（见表 3-3）；

I_{dm}——可能使用的最大整流电流，A。

表 3-3　　系数 K_1 在不同整流电路时的数值

整流电路形式	单相半波	单相全波	单相桥式	三相半波	三相桥式	双星形六相
K_1 值	1.57	0.785	1.11	0.575	0.816	0.29

如果熔断器与整流元件串联，则按整流元件的额定电流选择。考虑到整流元件的电流是以平均值计算，而且它同有效值之比大约为 1:1.5，因此取熔体的额定电流 I_{fN}为

$$I_{fN} \geqslant 1.5 I_F \tag{3-7}$$

式中　I_F——整流元件的额定电流（平均值）。

（2）可控整流电路中，系数 K_1 的数值除与线路形式有关外，还与晶闸管元件的导通角有关，见表 3-4。

如果保护半导体器件，熔断器是同晶闸管串联，则其选择方法仍同不可控整流电路一样。

（3）额定电压的选择。当熔断器接在交流侧时，其额定电压 U_{fN}应大于线路正常工作时的电压有效值，考虑电源电压的上波动（一般+10%），还应留有适当的余地，即

$$U_{fN} \geqslant 1.1U_{v1} \tag{3-8}$$

式中　U_{v1}——整流变压器二次线电压有效值，V。

表 3-4　系数 K_1 在不同整流电路及不同导通角时的数值

电路形式	K_1 值					
	导　通　角					
	180°	150°	120°	90°	60°	30°
单相半波	1.57	1.66	1.88	2.22	2.78	3.99
单相桥式	1.11	1.17	1.33	1.57	1.97	2.82
三相桥式	0.816	0.828	0.865	1.03	1.29	1.88

保护半导体器件的熔断器接在直流侧时，其额定电压应是所在线路直流电压的 1.4～2 倍，才能安全可靠地使用。

例 3-1　某三相异步电动机采用 RM10 型熔断器作短路保护，试选择熔断器额定电流。已知电动机的 $P_N=4kW$，$U_N=380V$，△联结，$\cos\varphi_N=0.87$，$\eta_N=0.855$，$I_S/I_N=7$。电动机轻载起动。

解　（1）电动机额定电流

$$I_N=\frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\cos\varphi_N\eta_N}$$

$$=\frac{4000}{\sqrt{3}\times380\times0.87\times0.855}=8.17(A)$$

（2）电动机起动电流

$$I_S = 7I_N = 7 \times 8.17 = 57.19(A)$$

(3) 熔体额定电流。根据表 3-1 选 $K=2.5$，可得

$$I_{fN} = \frac{I_S}{K} = \frac{57.19}{2.5} = 22.88(A)$$

根据计算得出的熔体额定电流，可选用 RM10-60 型熔断器，它的额定电流为 60A，熔体额定电流为 25A。

例 3-2 某照明供电线路，采用熔断器作短路保护，已知照明负载为 220V、500W 白炽灯 6 盏，问熔断器的额定电流是多少？

解 照明负载额定电流为

$$I_{LN} = 6 \times \frac{500}{220} = 13.64(A)$$

根据 $I_{fN} > I_{LN}$，可选用 RL1-15 型熔断器，它的额定电流为 15A，熔体额定电流也为 15A。

例 3-3 某机床控制电路，使用 BK-150 型，150VA，380/127V 控制变压器，试选择控制变压器二次回路的熔断器。已知控制电路中容量最大的交流接触器吸引线圈起动容量为 132VA。

解 熔体额定电流为

$$I_{fN} = \frac{S_N + 0.1S_S}{U_S} = \frac{150 + 0.1 \times 132}{127} = 1.285(A)$$

故可选 RL1-15 型，15A 螺旋式熔断器，熔体额定电流为 2A。

例 3-4 某控制电路，采用线圈电压为 380V 的接触器、继电器控制，不用控制变压器，已知电路中容量最大的交流接触器吸引线圈起动电流为 4.5A，该接触器起动时，其它已接通的接触器、继电器吸引线圈的吸持电流为 0.8A，试

选择控制电路的短路保护熔断器。

解 控制电路的熔体额定电流为

$$I_{fN} \geqslant 0.4[I_S + I_{N(S-1)}] = 0.4[4.5 + 0.8] = 2.12(A)$$

故可选用 RL1-15 型，15A 螺旋式熔断器，熔体额定电流为 4A。

例 3-5 某平面磨床电磁吸盘整流电源采用单相桥式整流电路，电磁吸盘的额定电压为直流 110V，额定电流为直流 1.54A，整流元件为 4 只 300V、1A 硅整流二极管，试选择交流侧和直流侧的保护熔断器。

解 （1）交流侧的保护熔断器。从表 3-3 可知 $K_1 = 1.11$，现 $I_{dm} = 1.54A$，故有

$$K_1 I_{dm} = 1.11 \times 1.54 = 1.709(A)$$

$$I_{fN} \geqslant 1.709A$$

可选用 RLS1 型 500V、10A 半导体器件保护熔断器，熔体额定电流 3A。

（2）直流侧保护熔断器。因输出直流电压为 110V，直流电流为 1.54A，故熔断器的额定电压 $U_{fN} >$（1.4～2）× 110V，额定电流 $I_{fN} > 1.54A$，可选用 RL1-15 型交流 380V，15A 螺旋式熔断器，熔体电流为 2A。

二、热继电器选用计算

（一）一般方法

保护长期工作或间断长期工作的电动机时热继电器的选用计算方法是：

（1）一般情况下，按电动机的额定电流选取，使热继电器的整定值为（0.95～1.05）I_N（I_N 为电动机的额定工作电流），或选取整定范围的中值为电动机的额定工作电流。

（2）保护 Y-△起动电动机，当热继电器的 3 个热元件

分别串接在△联结的各相绕组内，热继电器的整定电流应按电动机 $1/\sqrt{3}$的额定电流整定。

（3）保护并联电容器的补偿型电动机，只有有功电流流经热继电器，热继电器的整定电流可按下式近似进行整定

$$I_t = \frac{I_N \cos\varphi}{0.9} \tag{3-9}$$

式中 I_t——热继电器整定电流，A；

I_N——电动机额定电流，A；

$\cos\varphi$——电动机功率因数。

（二）作图法

用于保护反复短时工作电动机的热继电器，每小时允许的操作次数，与电动机的起动过渡过程、通电持续率及负载电流等因素有关。复合加热的热继电器，在反复短时工作下每小时允许的操作次数，可按图 3-1 所示的速查曲线选用。间接加热的热继电器每小时允许的操作次数，比按图 3-1 速查曲线选用的次数稍高。当电动机每小时的操作次数较高时，可选用带速饱和电流互感器的热继电器。

图 3-1 及其应用方法是根据下列公式绘制和确定的。反复短时工作允许操作频率为

$$f_o = K_c \frac{3600}{t_s\left(\frac{K_s^2}{K_L^2} - 1\right)}\left[\left(\frac{1.1K_t}{K_L}\right)^2 - \frac{TD}{100}\right] \tag{3-10}$$

式中 f_o——允许操作频率，次/h；

K_c——计算系数，$K_c = 0.8 \sim 0.9$；

t_s——电动机起动时间，s；

K_s——电动机起动电流倍数（即其起动电流与其额定电流之比）；

K_L——电动机负载电流倍数（即其负载电流与其额定电流之比）；

K_t——热继电器额定整定电流与电动机额定电流之比；

TD——通电持续率。

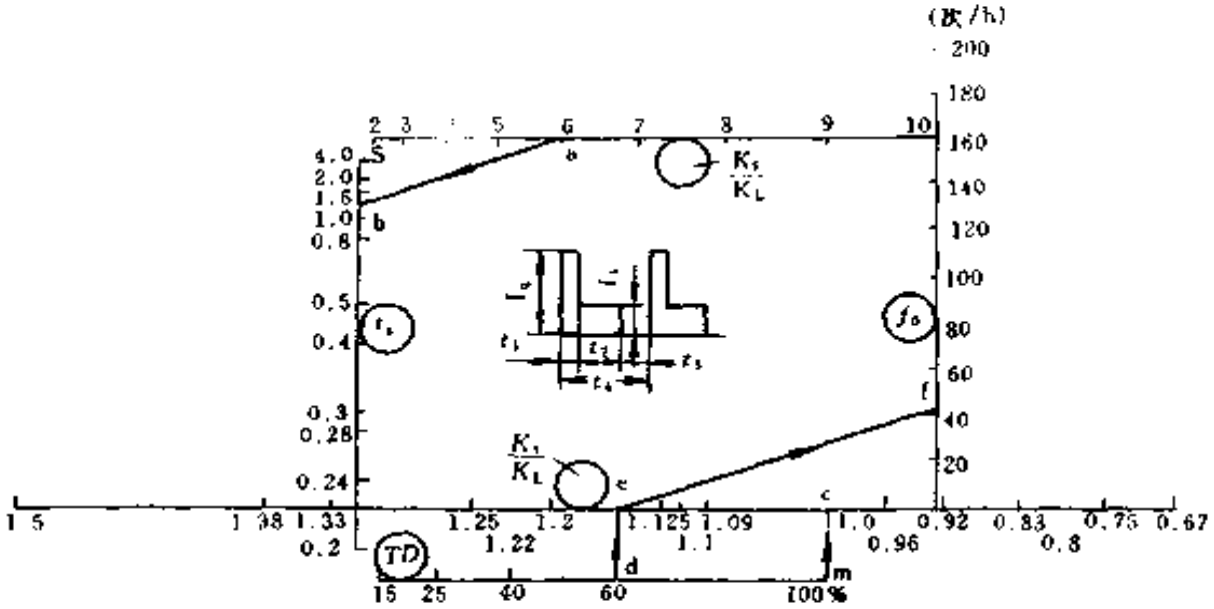


图 3-1　热继电器允许操作频率估算图

例 3-6　设已知 $K_s=6$，$t_s=1.2s$，$K_L=1$（满负载），$K_t=1$，$TD=60\%$，求热继电器的最大允许操作频率。

解　首先在 K_s/K_L 轴上取比值＝6（a 点），在 t_s 轴上取值 1.2s（b 点），连接 ab 两点作一直线；其次，在 K_t/K_L 轴上取比值＝1（c 点），并在 TD 线的 100% 端点 m 处作直线 mc；再次，以 TD 线上 60% 处的 d 点为起点，作直线平行于 mc，交 K_t/K_L 轴于 e 点；最后，过 e 点作直线 ef 平行于 ab，并与 f_o 轴交于 f 点，在 f 点读得 $f_o=45$ 次/h，即为热继电器用于该电动机时的每小时允许操作次数。

例 3-7　有一台水泵电动机，已知它的额定电流 $I_N=8.2A$，问应选多大的热继电器进行过载保护？

解 设热继电器的整定电流为 I_t

$$I_t=(0.95\sim1.05)I_N=(0.95\sim1.05)\times8.2$$
$$=7.79\sim8.61A$$

可选用 JR14-20 型热继电器，整定电流为（6.8～11）A。

例 3-8 某机床拖动直流发电机的交流异步电动机，采用 Y-△起动，并用热继电器作过载和断相保护，已知电动机为 55kW，380V，△联结，102.5A，试选择热继电器。

解 如选用不带断相保护的热继电器，需将三个热元件分别串接在△联结的各相绕组内，一般的三相热继电器也能在一相断线时起保护作用。此时热继电器的整定电流为

$$I_t=\frac{I_N}{\sqrt{3}}=\frac{102.5}{\sqrt{3}}=59.18\ (A)$$

可选用 JR9-300 型热继电器，整定电流为 56～86A。

例 3-9 某交流异步电动机，用电容器进行个别补偿，用热继电器进行保护，已知电动机的额定电流为 141A，$\cos\varphi_N=0.87$，试选择热继电器。

解 热继电器的整定电流为

$$I_t=\frac{I_N\cos\varphi}{0.9}=\frac{141\times0.87}{0.9}=136.3\ (A)$$

可选用 JR14-150 型热继电器，整定电流为 96～150A。

三、断路器选用计算

（一）交流断路器选用计算

1. 选择电气参数的一般原则

（1）断路器的额定工作电压大于或等于线路额定电压。

$$U_{bN}\geqslant U_{lN} \tag{3-11}$$

式中 U_{bN}——断路器额定工作电压，V；

U_{lN}——线路额定电压，V。

（2）断路器的额定电流大于或等于线路计算负载电流。

$$I_{bN} \geqslant I_{cl} \tag{3-12}$$

式中 I_{bN}——断路器的额定电流，A；

I_{cl}——线路计算负载电流，A。

（3）断路器的额定短路通断能力大于或等于线路中可能出现的最大短路电流，一般按有效值计算。

如果选用的断路器额定电流与要求相符，但额定短路通断能力小于断路器安装点的线路最大短路电流，必须提高选用断路器的额定电流，而按线路计算负载电流选择过电流脱扣器的额定电流。如果这样还不能满足要求，则可考虑下述三种方案解决：

1）采用级联保护（或称串级保护）方式，利用上一级断路器和该断路器一起动作来提高短路分断能力。采用这种方案时，需将上一级断路器的脱扣器瞬动电流整定在下级断路器额定短路通断能力的80%左右。

2）采用限流断路器。

3）采用断路器加后备熔断器。

（4）线路末端单相对地短路电流大于或等于1.25倍断路器瞬时（或短延时）脱扣器整定电流。这对负载电流较小，配电线路较长的情况尤为重要。因为线路较长时，末端短路电流较小，单相对地短路电流就更小。在三相四线制中相零短路时，对地短路电流还要小些，有时比过电流脱扣器整定的电流还要小，不能使过电流脱扣器动作，因而在单相对地时失去保护。在这种情况下，考虑在零线上装设电流互感器（其二次接电流继电器，对地短路时，继电器动作使断路器分断），或采用带零序电流互感器的线路（或漏电继电器）来解决。采用这些方法时，变压器中性点均应接地。

（5）断路器欠电压脱扣器额定电压等于线路额定电压。

$$U_{uV} = U_{lN} \tag{3-13}$$

式中　U_{uV}——断路器欠电压脱扣器额定电压，V。

是否需要欠电压保护，应按使用要求而定，并非所有断路器都需要带欠电压脱扣器。在某些供电质量较差的系统，选用带欠电压保护的断路器，反而会因为电压波动造成不希望的断电。如必须带欠电压脱扣器，则应考虑有适当的延时。

（6）具有短延时的断路器，若带欠电压脱扣器，则欠电压脱扣器必须是延时的，其延时时间应大于或等于短路延时时间。

（7）断路器的分励脱扣器额定电压等于控制电源电压。

$$U_{sr} = U_c \tag{3-14}$$

式中　U_{sr}——断路器的分励脱扣器额定电压，V；

U_c——控制电源电压，V。

（8）电动传动机构的额定工作电压等于控制电源电压。

2．配电用断路器的选用计算

除考虑上述一般选用原则外，还需考虑把系统的故障限制在最小范围内，防止故障时扩大停电区域，为此，需增加下列选用原则：

（1）断路器的长延时动作电流整定值小于或等于导线容许载流量。对于采用电线电缆的情况，可取电线电缆容许载流量的 80%。

（2）3 倍长延时动作电流整定值的可返回时间大于或等于线路中最大起动电流的电动机的起动时间。

（3）短延时动作电流整定值按下式选用

$$I_{sd} \geqslant 1.1\ (I_{cl} + 1.35K_s I_N) \tag{3-15}$$

式中 I_{sd}——短延时动作电流，A；

I_{cl}——线路计算负载电流，A；

K_s——电动机的起动电流倍数；

I_N——电动机额定电流，A。

（4）瞬时电流整定值按下式选用

$$I_{in} \geqslant 1.1\ (I_{cl} + K_p K_s I_{Nm}) \tag{3-16}$$

式中 I_{in}——瞬时电流，A；

K_p——电动机起动电流的冲击系数，一般取 $K_p = 1.7 \sim 2$；

I_{Nm}——最大的1台电动机的额定电流，A。

（5）短延时的时间阶梯，按配电系统的分段而定。一般时间阶梯为2～3级。每级之间的短延时时差为0.1～0.2s，其可返回时间应保证各级的选择性动作。选定短延时阶梯后，最好按被保护对象的热稳定性加以校核。

3．电动机保护用断路器的选用计算

电动机保护用断路器可分为两类：

1）断路器只作保护而不负担正常操作。

2）断路器兼作保护和不频繁操作用。

选用原则：

（1）$I_{sl} = I_N$ （3-17）

式中 I_{sl}——长延时电流整定值，A；

I_N——电动机额定电流，A。

（2）瞬时整定电流 I_{in}

1）保护笼型异步电动机时

$$I_{in} = (8 \sim 15)\ I_N \tag{3-18}$$

2）保护绕线转子异步电动机时

$$I_{in}=(3\sim6)I_N \tag{3-19}$$

(3) $$t_{6s}\geqslant t_s \tag{3-20}$$

式中 t_{6s}——6倍长延时电流整定值的可返回时间，s。按起动时负载的轻重，可选用可返回时间为1、3、5、15s中的某1档。

4. 导线保护断路器的选用计算

(1) $$I_{sl}\leqslant I_{cl} \tag{3-21}$$

式中 I_{sl}——长延时整定电流值，A；

I_{cl}——线路计算负载电流，A。

(2) $$I_{in}=(6\sim20)I_{cl} \tag{3-22}$$

式中 I_{in}——瞬时整定电流值，A。

5. 断路器与上下级电器保护特性配合要求

(1) 断路器的长延时特性应低于被保护对象的允许过载特性。

(2) 低压侧主开关短延时脱扣器与高压侧过电流保护继电器的配合级差为0.4～0.7s，视高压侧保护继电器的型式而定。

(3) 低压侧主开关过电流脱扣器保护特性低于高压侧熔断器的熔化特性。

(4) 上级断路器短延时整定电流大于或等于1.2倍下级断路器短延时或瞬时（若下级无短延时）整定电流。

(5) 上级断路器的保护特性和下级断路器的保护特性不能交叉。在级联保护方式时可以交叉，但交点短路电流应为下级断路器的80%。

(6) 断路器与熔断器配合时，一般熔断器作后备保护。应选择交接电流 I_B 小于断路器的额定短路通断能力的80%，当短路电流大于 I_B 时，应由熔断器动作。

(7) 在具有短延时和瞬时动作的情况下，上级断路器瞬时整定电流小于或等于断路器的延时通断能力，大于或等于

1.1 倍下级断路器进线处的短路电流。

例 3-10 某风机，拟用断路器兼作保护和不频繁操作用，已知风机电动机为 7.5kW，15.4A，$I_S/I_N=7.0$，试选择断路器。

解 $I_N=15.4A$

故断路器脱扣器的额定电流≥15.4A

$$I_S=7.0I_N$$

故断路器脱扣器的瞬时整定电流 $I_{in}>7I_N$

可选用 DZ5-20/330 型塑料外壳式断路器，热脱扣器额定电流为 20A，整定电流调节范围为 15～20A，电磁脱扣器整定电流调节范围为 $(8\sim12)I_N$。

例 3-11 设有如图 3-2 所示的配电系统，其设备参数见表 3-5，电动机 M_1、M_2 均为轻载起动，$I_{cl}=600A$，试选用各级断路器。选用前对各级故障点进行了短路电流计算，计算结果为：$I_{k1}=31.5kA$，$I_{k2}=29.7kA$，$I_{k3}=19.12kA$，$I_{k4}=12.22kA$，末端单相对地短路电流 $I'_{k4}=4.9kA$。

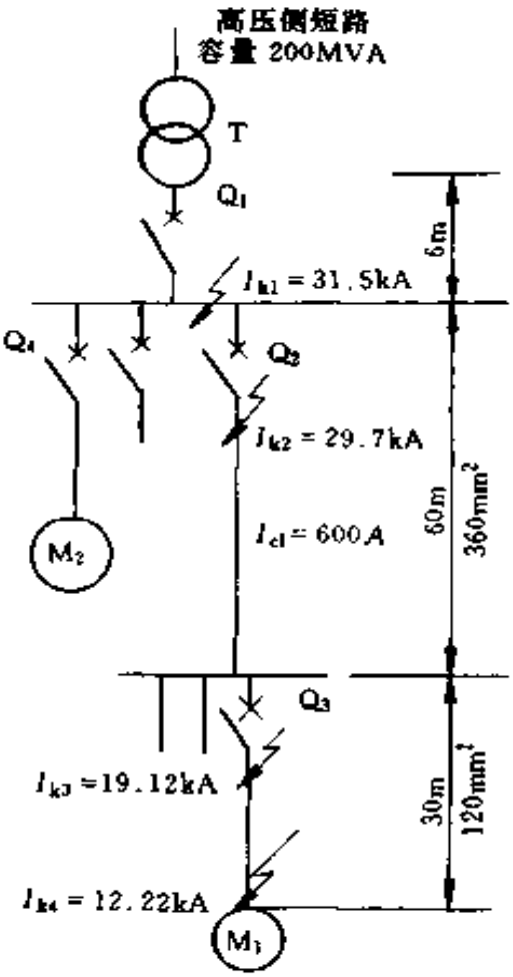


图 3-2 例 3-11 配电系统单线原理图

解 (1) 选择电动机保护断路器 Q_3。因 $I_N=182.4A$，故可选额定电流为

200A 的断路器。由于 $I_{k3}=19.12kA$，应选额定通断能力为 20kA 的断路器。电网电压为 380V，故断路器的额定电压为 380V。查产品样本，可选万能式 DW15-200 型（短路分断能力为 20kA）或 DWX15-200 型（短路分断能力为 50kA）断路器。断路器的整定值为：

表 3-5　　例 3-11 配电系统设备参数

符号	名　称	性　能　参　数
T	变压器	1000kVA，$U_k=4\%$，$I_{N2}=1445A$
M_1	电动机 1	100kW，$I_N=182.4A$，$K_s=6.5$
M_2	电动机 2	180kW，$I_N=329A$，$K_s=5.8$

长延时动作电流整定值为 200A，瞬时整定电流 $I_{in}=12I_N=12\times182.4=2189$（A）。

当线路末端发生单相对地短路，$I'_{k4}=4.9$（kA）

$$\frac{I'_{k4}}{I_{in}}=\frac{4900}{2189}=2.238>1.25$$

故断路器 Q_3 能够动作起到保护作用。

考虑到电动机 M_1 轻载起动，6 倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 5s。

（2）选择配电断路器 Q_2。因 $I_{cl}=600A$，故可选用额定电流为 630A 断路器。由于 $I_{k2}=29.7kA$，应选用延时短路通断能力为 30kA 的断路器。查找产品样本，630A 断路器都无这样大的延时短路通断能力，只好跨级选用 DW15-1000断路器，其延时短路通断能力为 30kA，采用 630A 过电流脱扣器。

断路器 Q_2 是配电系统的第 2 级，故短延时时间取 0.2s。

短延时动作电流整定值为

$$I_{sd} \geqslant 1.1\ (I_{cl} + 1.35K_s I_N)$$
$$= 1.1\ (600 + 1.35 \times 6.5 \times 182.4)$$
$$= 2421\ (A)$$

可整定在 2800A，约为脱扣器额定电流的 4.5 倍。

3 倍长延时动作电流整定值的可返回时间取 8s.

按上述 5（7）的内容，$I_{in} = 1.1 \times 19.12 = 21.03$（kA），在此设 Q_3 进线处短路电流亦为 19.12kA，可整定在 22kA。

（3）选择断路器 Q_1。因 Q_1 是变压器主保护开关，变压器二次额定电流 $I_{N2} = 1445A$，故选用 DW15-1600 型断路器，但由于它的延时通断能力为 30kA，不能满足 $I_{k1} = 31.5kA$ 的要求，需跨级选用 DW15-2500 断路器，其延时通断能力为 40kA，将其瞬时整定电流整定在 $1.1 \times 29.7 = 32.67kA$，由于该值小于 DW15-2500 断路器的短延时短路通断能力，所以不要瞬时脱扣器也可满意地工作。但是这个方案不太经济，如果为了节约投资，可考虑放弃（30～31.5）kA 之间的选择性（而且这个区域很小），仍可采用 DW15-1600 断路器，只需将瞬时动作电流整定在 30kA 即可。当短路电流大于 30kA 时，让断路器瞬时断开，既保护了配电系统，也保护了断路器本身。

短延时时间可取 $0.2 + 0.2 = 0.4$（s）

短延时动作电流整定值可按式（3-15）计算

$$I_{sd} \geqslant 1.1\ (1445 + 1.35 \times 5.8 \times 329) = 4423\ (A)$$

可整定在 4500A。

长延时动作电流整定值可整定在 1600A，3 倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 15s。

现将各级断路器的保护特性绘于同一坐标图中，可以看

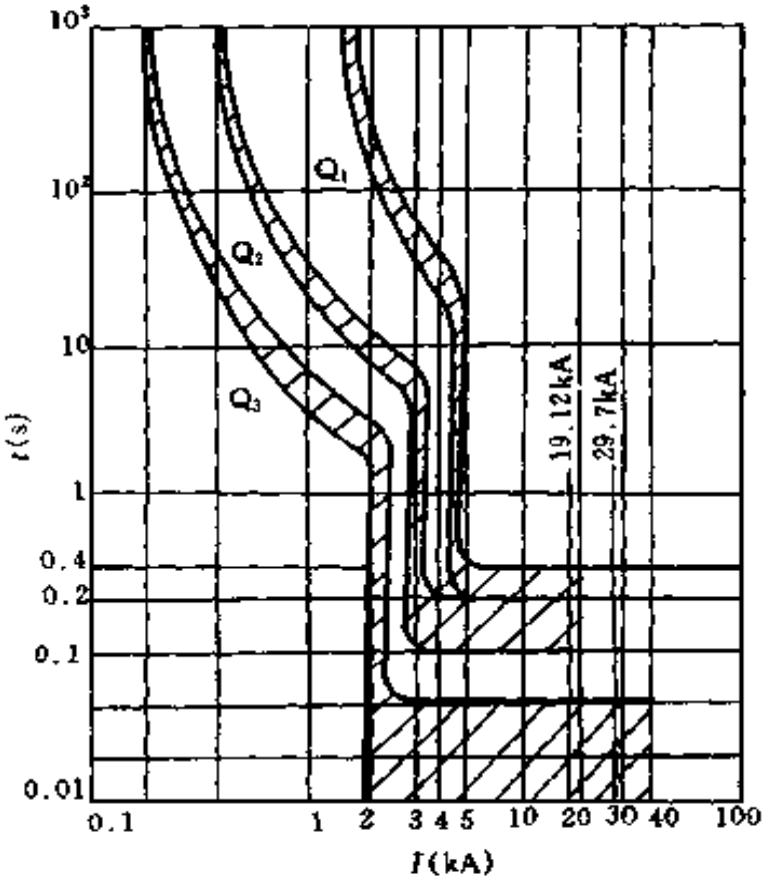


图 3-3　例 3-11 中各级断路器的保护特性

出 Q_1、Q_2、Q_3 各断路器可达到协调配合动作。

（4）选择断路器 Q_4。此断路器的特点是直接靠近变压器安装，短路电流较大，其值为 31.5kA。电动机 M_2 的负载为空气压缩机，不频繁起动。若选用可直接起动又可进行短路保护的断路器来代替熔断器＋接触器，或一般断路器＋接触器，则可简化线路，较为经济。选用 DWX15-400 型限流式断路器可满意地工作，其短路通断能力为 50kA，具有电磁操作机构，可像接触器同样的方式操作。

其脱扣器长延时动作电流整定值可按 0.85 倍额定电流调整，即 $400\times0.85=340$（A）。

瞬时动作电流整定值为 12 倍断路器额定电流，即 12×

400＝4800A。空气压缩机属轻载起动，可选用6倍长延时动作电流值时的可返回时间为5s。

（二）直流断路器选用计算

直流断路器的选用条件

（1）额定工作电压＞直流线路的电压。考虑到反接制动和逆变条件，应大于2倍电路电压。

（2）额定电流≥直流线路的负载电流。对于短时周期负载，可按其等效发热电流考虑。

（3）过电流动作整定值≥电路正常工作电流最大值，对于起动直流电动机，应避过电动机的起动电流。

（4）逆流动作整定值＜被保护对象允许的逆流数值。

（5）额定短路通断能力＞电路可能出现的最大短路电流。对于快速断路器初始电流上升陡度（初始 di/dt）＞电路可能出现最大短路电流的初始上升陡度。

（6）快速断路器分断的 I^2t＜与其配合的快速断路器的 I^2t。

四、制动电磁铁选用计算

（一）选用原则

选择电磁制动器，应考虑以下几个方面的问题。

1．电源性质

一般来说，制动电磁铁的电源应与有关的电动机的电源一致。其次应考虑每小时关合次数，如果超过了300次，要用直流电磁铁，不应当用交流电磁铁。

2．行程长短

主要决定于配用的机械制动装置。长行程制动电磁铁既可用于带式制动器，也可用于弹簧制动器，短行程制动电磁铁则只适用于弹簧制动器。长行程制动器抱闸和松闸时间都

较长，安装面积和空间都大，短行程制动器则相反。一般来说，中小型制动器，如普通工作母机和小吨位起重机所用制动器，多采用短行程制动电磁铁，而大中型制动器为了得到较大的制动力矩，往往采用长行程制动电磁铁。

3. 并联线圈还是串联线圈

一般情况，串励直流电动机的制动装置采用串励制动电磁铁，并励直流电动机的制动装置采用并励制动电磁铁。有时，为了安全，在1台电动机的保护中，既用了串励制动电磁铁，又用了并励制动电磁铁。

4. 确定制动电磁铁容量

（二）确定制动电磁铁容量的方法

1. 直动式制动电磁铁

对衔铁作直线运动的制动电磁铁，有如下关系

$$F_{em}h_aK_a \geqslant F_b l_g \frac{1}{\eta} \tag{3-23}$$

式中 F_{em}——电磁铁的吸力，N；

h_a——衔铁行程，mm；

K_a——衔铁行程利用系数，通常在0.8～0.85之间；

F_b——制动瓦压在制动轮上的压力 N；

l_g——调整好的制动瓦与制动轮之间的空隙，mm；

η——制动装置杠杆系统的效率，一般为0.9～0.95。

2. 转动式制动电磁铁

对衔铁作旋转运动的制动电磁铁，应满足下式

$$T_{em}\varphi K_a \geqslant F_b l_g \frac{1}{\eta} \tag{3-24}$$

式中　T_{em}——在最大回转角下的电磁转矩，N·cm；

φ——衔铁最大容许回转角，rad。

例 3-12　图3-4 为某提升机械的机械传动示意图，系统中的拖动电动机是绕线转子异步电动机，其型号为 YZR180L-8，P_N = 11kW，n_N = 700r/min，U_{1N} = 380V，I_{1N} = 27A，U_{2N} = 173V，I_{2N} = 44A，$\cos\varphi_N$ = 0.77，η_N = 81.1%，能起吊的重量为 5t。电动机起停工作频繁，其电源为三相交流电。为此，选用 MZS1 型长行程三相交流制动电磁铁，配用弹簧制动装置，试选择电磁铁的具体规格。

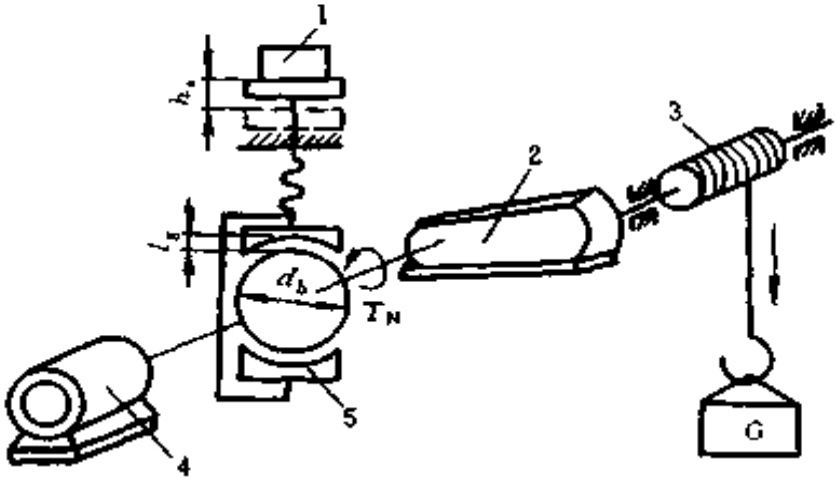


图 3-4　某提升机构的机械传动示意图

1—制动电磁铁；2—变速机构；3—卷扬机构；

4—卷扬电动机；5—制动器

解　(1) 计算电动机轴上的额定转矩

$$T_N = 9555\frac{P_N}{n_N} = 9555\frac{11}{700} = 150.2\ (\text{N·m})$$

(2) 计算制动转矩

$$T_b = K_s T_N \tag{3-25}$$

式中　T_b——制动转矩，N·m；

K_s——安全系数，低速电动机，取 K_s = 1.75；高速

电动机，取 $K_s=2\sim2.5$。

取 $K_s=2$，可得

$$T_b=2\times150.2=300.4\ (\mathrm{N\cdot m})$$

(3) 选取 l_g 和制动轮直径 d_b。l_g 和 d_b 可按表 3-6 选取。

表 3-6　　l_g 与 d_b 选择表

项　目	制动轮直径 d_b/mm							
	100	200	300	400	500	600	700	800
计算制动转矩 T_b (N·m)	19.6	147	490	1078	1960	3920	6370	9800
空隙距离 l_g (mm)	0.5	0.75	1.0	1.5	1.5	1.75	1.75	2.0

因 147N·m<300.4N·m<490N·m，选取

$$d_b=300\mathrm{mm},\ l_g=1.0\mathrm{mm}$$

(4) 计算为保证 T_b 需加在制动瓦上的额定压力 F_b

$$F_b=\frac{2T_b}{\mu d_b} \tag{3-26}$$

式中　μ——摩擦系数，见表 3-7。此处，鉴于制动瓦材料为兰令皮，故取 $f=0.45$。

表 3-7　　制动瓦材料摩擦系数

制动瓦材料	μ（干燥）	μ（潮湿）
钢	0.15~0.2	0.1~0.15
生铁	0.15~0.2	0.1~0.15
木	0.3~0.4	0.25~0.3
兰令皮	0.4~0.5	0.3~0.4

$$F_b=\frac{2\times300.4}{0.45\times0.3}=4450\ (\mathrm{N})$$

(5) 计算制动电磁铁的电磁吸力 F_{em} 和行程 h_a。取 $\eta=0.9$ 及 $K_a=0.85$，按式（3-23）应有

$$F_{em}h_a \geqslant F_b l_g \frac{1}{\eta}\frac{1}{K_a}=4450\times 1\times\frac{1}{0.9}\times\frac{1}{0.85}$$
$$=5817\ (\mathrm{N\cdot mm})$$

(6) 选择制动电磁铁。根据以上计算，选取 MZS1-15 型交流三相制动电磁铁，其数据为：电压 380V，电磁吸力 $F_{em}=200\mathrm{N}$，衔铁重 4.5kg，衔铁行程 $h'_a=50\mathrm{mm}$，$F'_{em}=200-4.5\times 9.8=155.9$（N）。

(7) 核算

$$F'_{em}h'_aK_a=155.9\times 50\times 0.85=6626\ (\mathrm{N\cdot mm})$$

$$F_b l_g \frac{1}{\eta}=4450\times 1\times\frac{1}{0.9}=4944\ (\mathrm{N\cdot mm})$$

所以 $F'_{em}h'_aK_a > F_b l_g \dfrac{1}{\eta}$

以上选择符合制动要求。

五、交流接触器选用计算

（一）电动机负载时的选用

交流接触器吸引线圈电压由控制电路电压而定。主触头额定电流由下面经验公式计算：

$$I_{mc}=\frac{P_N\times 10^3}{KU_N} \tag{3-27}$$

式中 I_{mc}——主触头额定电流，A；

P_N——被控制的电动机额定功率，kW；

K——常数，一般取 1～1.4；

U_N——电动机的额定电压，V。

实际选择时，接触器的主触头额定电流大于上式计算值。

（二）非电动机负载时的选用

非电动机负载有电阻炉、电容器、变压器、照明装置等，选配接触器时，除考虑接通容量外，还应考虑使用中可能出现的过电流，现分述如下。

1. 电热设备

电流波动最大值不超过 $1.4I_N$，可按下式选用

$$I_{tc} \geqslant 1.2I_N \tag{3-28}$$

式中 I_{tc}——接触器额定发热电流，A；

I_N——被控电热设备额定电流，A。

如接触器铭牌上未注明 I_{tc}值，可按工作电流相等原则选用。

2. 电容器

用接触器控制电容器时，应考虑电容器的合闸电流、持续电流和在负载下的电寿命。现推荐采用表 3-8 的数据。对于更大容量的电容器，常串接电阻，以使接触器的接通电流减少 50%。

表 3-8　　电容器选配接触器参考表

型　号	电容器额定工作电流 I_C（A）	电容器标称容量 Q_c（kvar）	
		电容器额定工作电压 U_c=220V	U_c=380V
CJ10-10	7.5	3	6
CJ10-20	12	5	8
CJ10-40	30	12.5	20
CJ10-60	53	25	40
CJ10-100	80	30	60
CJ10-150	105	40	75
CJ20-250	130	50	100

3. 电焊变压器

表 3-9 为电焊变压器选配接触器参考表。经验表明，焊接时的分断电流平均比接通电流大 2～4 倍，而且为单相负载，因此所用接触器的 3 极可以并联使用。

4. 照明装置

由于电压增加使得工作电流增加，故选用时不得超过接触器持续电流的 90%。今将常用的照明装置种类、起动电流和选用电器时的原则列表 3-10 供参考。

表 3-9　　电焊变压器选配接触器参考表

型　号	I_N/A	S_N (kVA)		I_K (A)	
		$U_N=220V$	$U_N=380V$	$U_N=220V$	$U_N=380V$
CJ10-60	30	11	20	300	300
CJ10-100	53	20	30	450	450
CJ10-150	66	25	40	600	600
CJ20-250	105	40	70	1050	1050
CJ20-250	130	50	90	1800	1800

注　U_N、I_N、S_N、I_K 分别表示变压器的额定电压、额定电流、额定容量、短路时一次侧最大短路电流。

例 3-13　有一台三相笼型异步电动机，$P_N=18.5kW$，$U_N=380V$，试选择交流接触器。

解

$$I_{mc}=\frac{P_N\times10^3}{KU_N}$$

取 $K=1.2$，有

$$I_{mc}=\frac{18.5\times10^3}{1.2\times380}=40.57\ (A)$$

故可选 CJ10-60 型接触器。

例 3-14 有 1 台三相电阻炉，已知 $P_N=45kW$，电阻丝作 Y 联结，电压为 380V，试选择控制接触器。

表 3-10　　照明装置选用数据参考表

种类	功率因数补偿装置	起动电流	功率因数	起动时间(s)	选数根据
钨丝灯		$16I_N$	0.9		工作电流和起动电流
荧光灯	无 有	I_N $20I_N$	0.5 0.9		长期工作电流 起动电流
荧光高压汞灯	无 有	$1.6I_N$ $2I_N$	0.4~0.6 0.95	<5 <5	长期工作电流 起动电流
钠灯	无 有	$1.6I_N$ $20I_N$	0.4~0.6 0.95	5~8 5~8	70%长期工作电流 70%长期工作电流和起动电流
金属卤化物灯(高压)	无 有	$1.4I_N$ $20I_N$	0.5 0.95	5~12 5~12 (在 $1.6I_N$)	70%长期工作电流
金属卤化物灯(低压)	无 有	I_N $2I_N$	0.3 0.95	5~12 5~12 (在 $1.6I_N$)	70%长期工作电流

注　I_N 为照明灯具的额定电流。

解　$$I_N=\frac{P_N}{\sqrt{3}U_N}=\frac{45\times10^3}{\sqrt{3}\times380}=68.37\ (A)$$

$$I_{tc} \geqslant 1.2 I_N = 1.2 \times 68.37 = 82.04 \text{ (A)}$$

故可选 CJ10-100 型接触器。

六、低压电器线圈修理计算

（一）交流电压线圈改变电压时的换算

按式（3-29）确定线圈的匝数，按式（3-30）确定线圈的导线截面。

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} \tag{3-29}$$

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} \tag{3-30}$$

式中 N_2——原有线圈的匝数；

N_1——改绕后线圈的匝数；

U_2——改绕后线圈的电压，V；

U_1——原有线圈的电压，V；

d_2——改绕后线圈的导线直径，mm；

d_1——原有线圈的导线直径，mm。

（二）交流电压线圈数据不明时的计算

线圈的近似匝数可由式（3-31）确定。

$$N = \frac{U \times 10^4}{4.44 fBA} \tag{3-31}$$

式中 N——线圈的匝数；

U——线圈的电压值，V；

f——电源频率，一般为 50Hz；

B——铁心中极（E 形）或边极（U 形）的磁通密度，T，一般可选取 1.1～1.4T；

A——铁心中极或边极的截面面积，cm^2。

为了计算方便，图 3-5 画出了绕组每匝感应电压值与铁

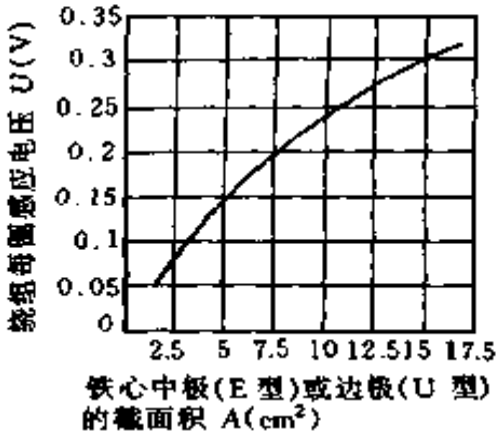


图 3-5 每匝线圈感应电压值与铁心截面积的关系

截面面积的关系曲线。知铁心中极或边极截面面积即可由图中找出每匝感应电压值。线圈电压除以每匝感应电压值就可得出线圈的近似匝数。

图 3-6 画出了磁系统窗口面积充填系数 K_{c1} 与窗口面积的关系曲线。由于充填系数与很多因素有关，因此在一个很大的范围内变动。一般有骨架的线圈选取较小值，无骨架的线圈选取较大值。充填系数 K_{c1} 乘窗口面积即得线圈的铜线总截面积，然后根据匝数确定铜导线的截面积或直径，并进而确定导线的标号及直径。

根据所选定的导线，计算绕组面积充填系数 K_{c2}。图 3-7画出了线圈绕组面积充填系数 K_{c2} 与导线型号及线径的关系曲线，并以此校验上述计算值。如两者相接近，则证明所选导线是恰当的，并能绕下。否则应重新计算，直到所选

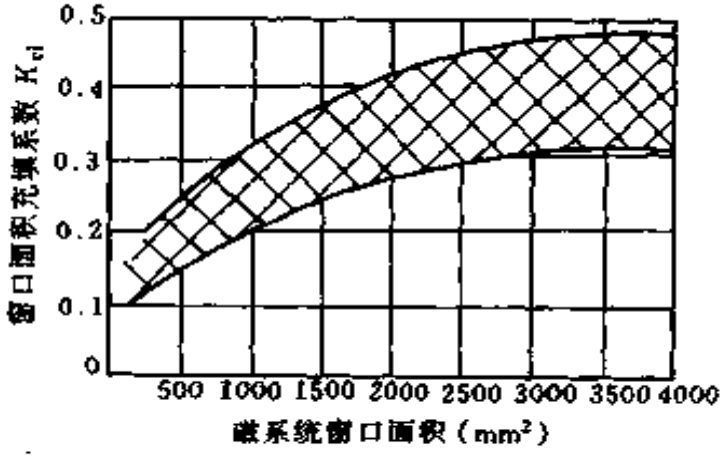


图 3-6 磁系统窗口面积充填系数 K_{c1} 与窗口面积的关系

取的导线型号及直径符合图 3-7 的关系。

按上述数值绕制的线圈，在试验中如发现吸力不足，应适当减少圈数；如温升过高应适当增加圈数；如温升过高但吸力裕度又不大时，则保持匝数不变而适当增大线径。

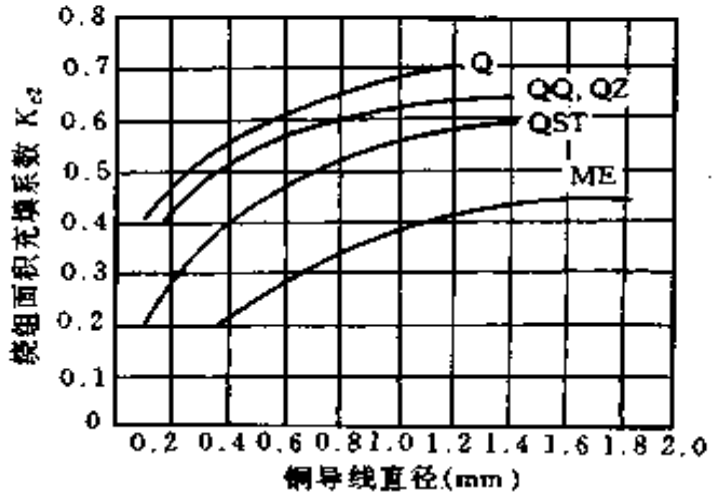


图 3-7 线圈计算面积充填系数 K_{c2}
与导线型号及线径的关系

（三）直流电压线圈改变电压时的换算

可按下列各式确定线圈的导线直径、匝数、20℃时的直流电阻：

$$d_2 = d_1\sqrt{\frac{U_1}{U_2}} \tag{3-32}$$

$$N_2 = N_1\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \tag{3-33}$$

$$R_2 = R_1\frac{N_2}{N_1}\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \tag{3-34}$$

式中 R_2——改绕后线圈的直流电阻，Ω；

R_1——原有线圈的直流电阻，Ω。

（四）直流线圈改变通电持续率时的换算

线圈导线的直径按式（3-35）换算，匝数及直流电阻仍按式（3-33）及式（3-34）换算，但此时的线圈电压并不改变。

$$d_2 = d_1\sqrt{\frac{J_{c1}}{J_{c2}}} \tag{3-35}$$

式中 J_{c1}——原线圈的通电持续率；

J_{c2}——改绕后线圈的通电持续率。

例 3-15 已知 CJ8-150 型交流接触器带有 E 形磁系统，线圈有骨架，尺寸如图 3-8 所示。当线圈电压为 380V 时，问应选用多大线径的导线，线圈的匝数为多少？

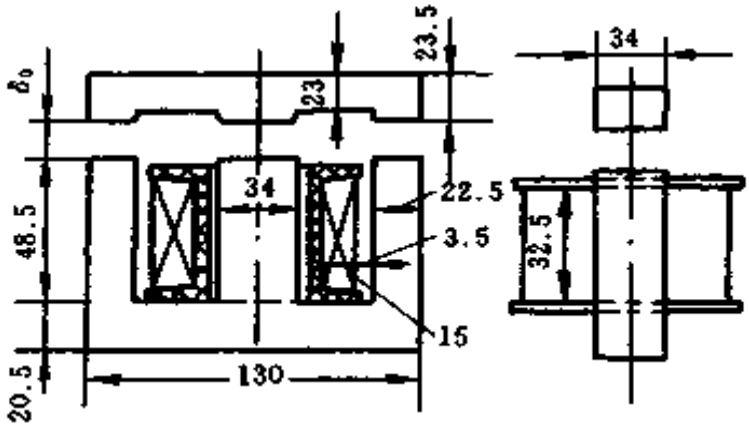


图 3-8 CJ8-150 型接触器磁系统图

解 由图 3-8 得出：

铁心中极截面面积

$$A = 3.4 \times 3.4 = 11.56\ (\text{cm}^2)$$

磁系统窗口面积

$$A_1 = \left(\frac{130 - 34 - 22.5 \times 2}{2}\right) \times 48.5 = 1237\ (\text{mm}^2)$$

线圈绕组空间面积

$$A_2 = 15 \times 32.5 = 487.5 \text{（mm}^2\text{）}$$

由图 3-5 查出每匝感应电压为 0.27V，则 380V 时的近似匝数

$$N = \frac{380}{0.27} = 1400 \text{（匝）}$$

由图 3-6 查出窗口面积充填系数 K_{c1} 为 0.23～0.375，由于线圈有骨架并由弹簧支承，因此取最小值，即 $K_{c1} = 0.23$。

铜线总面积

$$A_3 = K_{c1} \times A_1 = 0.23 \times 1237 = 284.5 \text{（mm}^2\text{）}$$

导线直径

$$d = \sqrt{\frac{A_3}{\frac{\pi}{4}N}} = \sqrt{\frac{284.5 \times 4}{\pi \times 1400}} = 0.5087 \text{（mm）}$$

选用 QZ 型漆包铜线，线径为 0.51mm。

绕组面积充填系数

$$K'_{c2} = \frac{A'_3}{A_2} = \frac{\pi\left(\frac{0.51}{2}\right)^2 \times 1400}{487.5} = 0.587$$

由图 3-6 查出 QZ 型漆包铜线，当线径为 0.51mm 时的充填系数 $K_{c2} = 0.56$，因 $K'_{c2} > K_{c2}$，故按上述匝数与线径绕组空间不够，应重新估算。

因匝数是按式（3-31）得出的，式中 B 可以在很大范围内变化，故可根据线圈绕组空间面积，已定的导线线径及 K_{c2} 重新估算匝数。

K'_{c2} 应 $< K_{c2}$，绕组才能绕得下，现 K_{c2} 为 0.56，令 $K'_{c2} = 0.52$，则有

$$\frac{\pi\left(\frac{0.51}{2}\right)^2 N}{487.5}=0.52$$

故 $$N=\frac{487.5\times0.52}{\pi\left(\frac{0.51}{2}\right)^2}=1241\text{（匝）}$$

根据计算结果，初步定出 CJ8-150 型交流接触器线圈，当电压为 380V 时的匝数为 1241 匝，QZ 型聚酯漆包铜线，线径为 0.51mm，可按上述线圈数据绕制样品，验证吸力与温升。

例 3-16 CJ10-60 型交流接触器，线圈电压为 220V 时，采用直径为 0.51mm 漆包铜线，线圈匝数为 1100 匝，当线圈电压改为 380V 和 127V 时，问需用导线的直径和匝数各为多少？

解 （1）当电压为 380V 时

$$N_2=\frac{N_1U_2}{U_1}=\frac{1100\times380}{220}=1900\text{（匝）}$$

$$d_2=d_1\sqrt{\frac{U_1}{U_2}}=0.51\sqrt{\frac{220}{380}}=0.388\text{（mm）}$$

取标准线径 0.38mm

（2）当电压为 127V 时

$$N_3=\frac{N_1U_3}{U_1}=\frac{1100\times127}{220}=635\text{（匝）}$$

$$d_3=d_1\sqrt{\frac{U_1}{U_3}}=0.51\sqrt{\frac{220}{127}}=0.67\text{（mm）}$$

第二节　电阻的热计算

一、电热电器计算

（一）单支合金电热元件计算

根据电热电器的工作温度及其他一些因素，按合金电热元件表面负荷曲线图（图 3-9 和图 3-10）或合金电热元件负荷数据（表 3-11），选定合适的电热合金材料及其表面负荷，依据电热元件的额定功率 P 和工作电压 U，采用计算

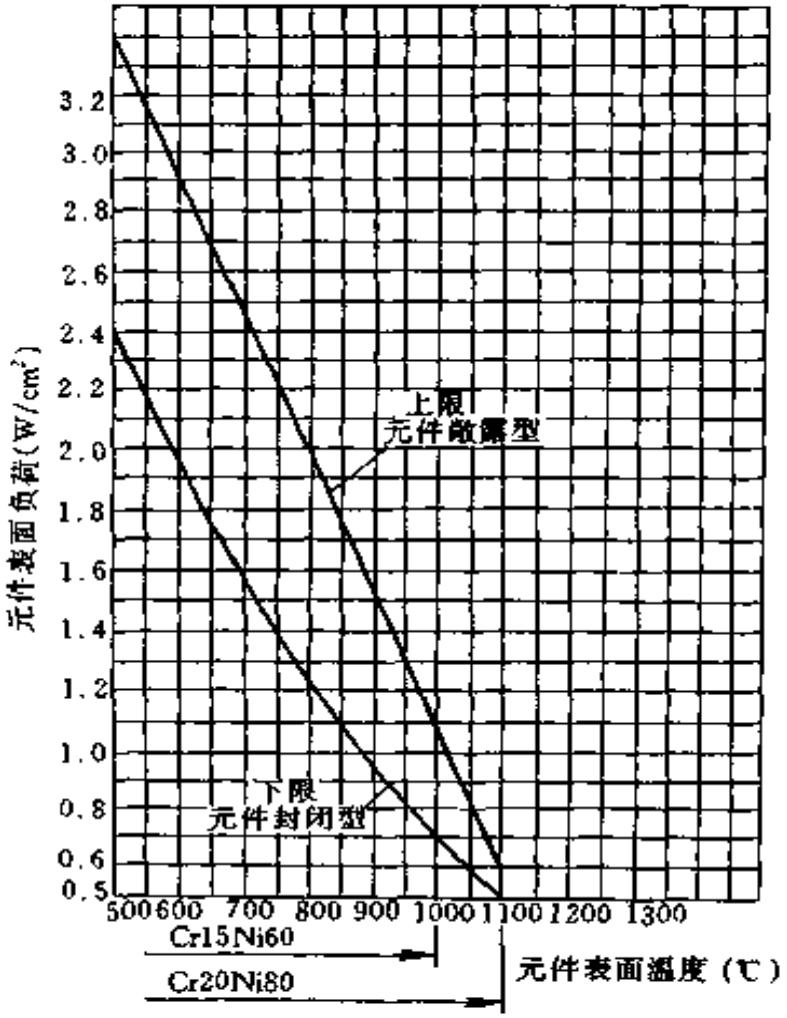


图 3-9　镍铬合金电热元件表面负荷曲线图

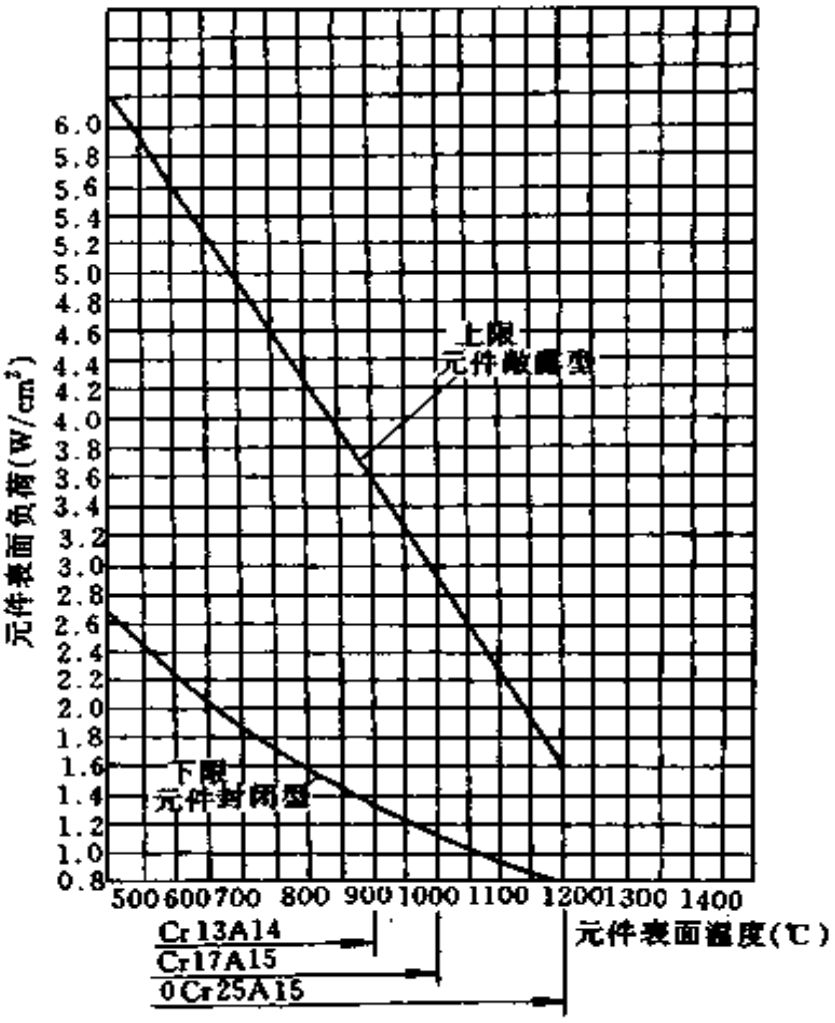


图 3-10 铁铬铝合金电热元件表面负荷曲线图

法或图解法求出所需的电热材料尺寸，也可以由给定的材料尺寸来核算表面负荷的选取是否恰当。

1. 计算法

单支元件功率

$$P=\frac{U^2}{R_t} \tag{3-36}$$

单支元件工作温度下的电阻值

$$R_t=\rho_t\frac{l}{A}=\rho_{20}c_t\frac{l}{A} \tag{3-37}$$

表 3-11　家用电热器具中合金电热元件负荷数据

电热器具名称	结构型式		表面负荷(W/cm²)
日用电炉	开启式		4～8
	封闭式	不带控温	8～15
		带控温	15～25
电熨斗	云母骨架		5～8
	管状元件带控温		20～30
电烙铁	外热式		4～8
	内热式		6～10
电饭锅	铸铝管状元件带控温		10～20
电热水器	电热丝直接浸在水中		30～40
	管状元件		10～20

表面负荷

$$\omega=\frac{P}{A_t} \tag{3-38}$$

式中　P——单支元件功率，W；

U——单支元件工作电压，V；

R_t——单支元件工作温度下的电阻值，Ω；

ρ_t——元件工作温度下的电阻率，$\Omega\cdot mm^2/m$；

l——元件的展开长度，m；

A——元件的截面积，mm^2；

ρ_{20}——元件 20℃时的电阻率，$\Omega\cdot mm^2/m$。常用合金电热元件的 ρ_{20}见表 3-12；

c_t——元件电阻率温度修正系数。常用的合金电热元件电阻率温度修正系数见图 3-11、图 3-12 和表 3-13；

ω——表面负荷，W/cm；

A_t——元件发热表面积，cm^2。

表 3-12　　常用合金电热元件物理参数表

合金牌号	20℃时电阻率 ρ_{20} $\times 10^{-6}$ (Ω·m)	密度 ρ $\times 10^{-3}$ (kg/m³)	比热 c (J/kg·K)	导热系数 λ (W/m·K)	熔点 (℃)	抗张强度 (MPa)	伸长率 (不小于 %)
Cr20Ni80	1.09±0.05	8.4	0.4396	1005	1400	637～784	20
Cr15Ni60	1.12±0.05	8.2	0.4605	753.6	1390	637～784	20
1Cr13Al4	1.26±0.08	7.4	0.4899	879.2	1450	588～735	12
0Cr13Al6Mo2	1.4±0.10	7.2	0.4940	816.4	1500	686～833	12
0Cr25Al5	1.4±0.10	7.1	0.4940	766.2	1500	637～784	12
0Cr27Al7Mo2	1.5±0.10	7.1	0.4940	753.6	1520	686～784	10

表 3-13　　合金电热元件在不同温度下电阻率温度修正系数 c_t

牌　号	温　度　(℃)						
	20	100	200	300	400	500	600
Cr20Ni80	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026
Cr15Ni60	1.000	1.013	1.029	1.046	1.062	1.074	1.073
1Cr13A14	1.000	1.015	1.029	1.044	1.059	1.074	1.089
0Cr13A16Mo2	1.000	1.001	1.003	1.007	1.014	1.028	1.048
0Cr25Al5	1.000	1.002	1.005	1.008	1.013	1.017	1.022
0Cr27A17Mo2	1.000	0.997	0.994	0.992	0.992	0.992	0.992

续表

牌　号	温　度　(℃)					
	700	800	900	1000	1100	1200
Cr20Ni80	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038	—
Cr15Ni60	1.083	1.089	1.097	1.105	—	—
1Cr13Al4	1.104	1.120	1.134	—	—	—
0Cr13Al6Mo2	1.053	1.057	1.060	1.063	1.066	1.069
0Cr25Al5	1.026	1.029	1.031	1.034	1.036	1.040
0Cr27Al7Mo2	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992

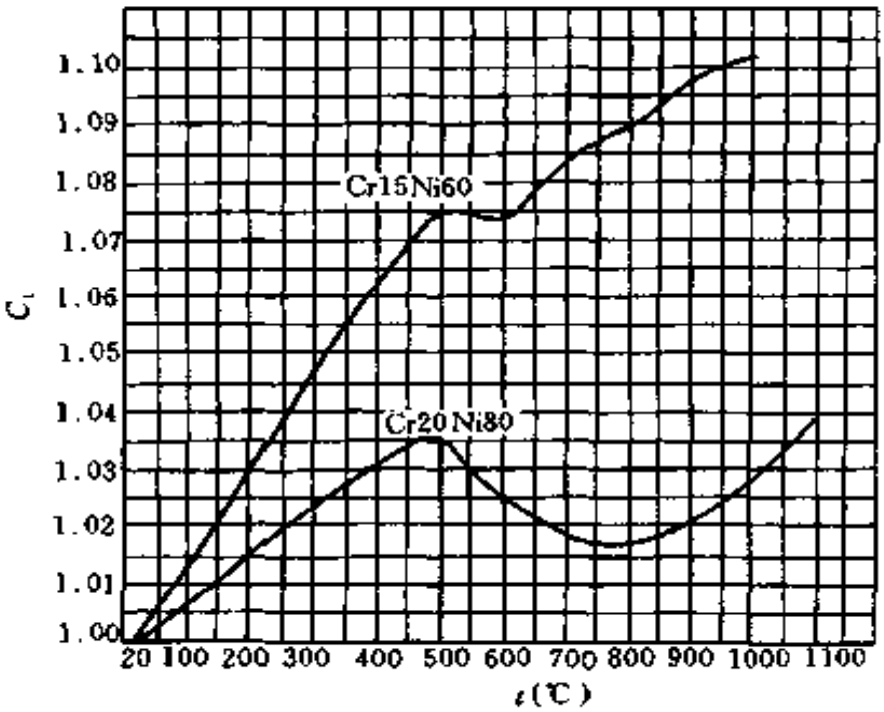


图 3-11　镍铬合金电热元件电阻率温度修正系数 c_t 与温度的关系曲线

将式（3-36）、（3-37）合并得

$$l=\frac{U^2A}{\rho_{20}c_tP} \tag{3-39}$$

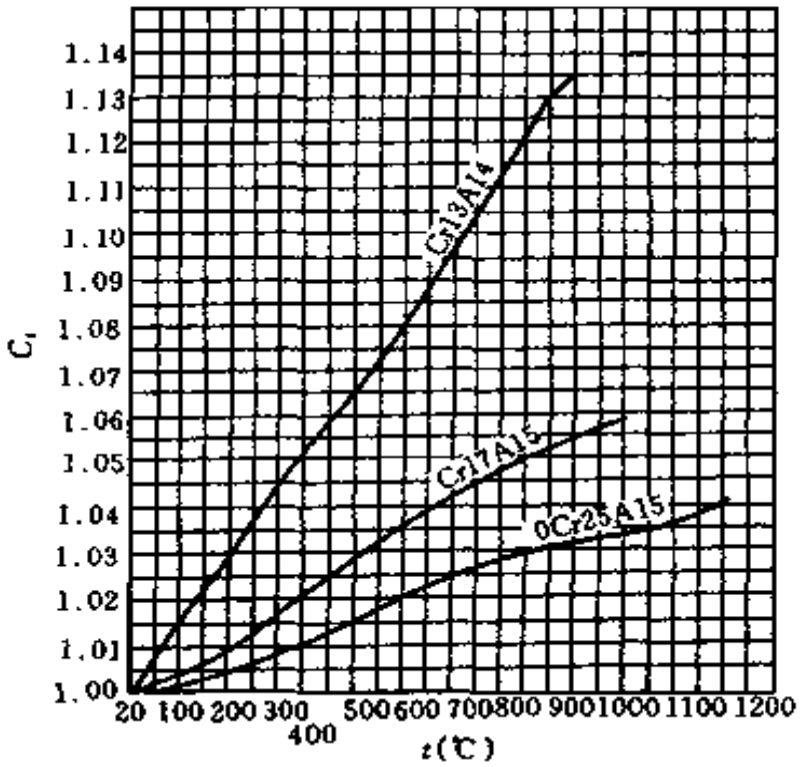


图 3-12 铁铬铝合金电热元件电阻率温度修正系数 c_t 与温度的关系曲线

对圆丝来讲

$$A=\frac{\pi d^2}{4} \tag{3-40}$$

$$A_t=10\pi dl \tag{3-41}$$

式中 d——圆丝直径，mm。

将式（3-40）、式（3-41）代入式（3-38）和式(3-39)中，提出 l 且合并为

$$l=\frac{P}{10\pi d\omega}=\frac{U^2\pi d^2}{4\rho_{20}c_tP} \tag{3-42}$$

$$d^3=\frac{4\rho_{20}c_tP^2}{10\pi^2\omega U^2}$$

$$d=\sqrt[3]{\frac{4\rho_{20}c_t P^2}{10\pi^2\omega U^2}}=0.3435\sqrt[3]{\frac{\rho_{20}c_t P^2}{\omega U^2}} \tag{3-43}$$

将式（3-43）代入式（3-42）得

$$l=0.0927\sqrt[3]{\frac{U^2 P}{\rho_{20}c_t\omega^2}} \tag{3-44}$$

对扁丝来讲，假定扁丝截面边长之比 $b/a=m$，则有

$$A_t=ab=ma^2 \tag{3-45}$$

$$A=2(a+b)\ l\times 10=20la\ (m+1) \tag{3-46}$$

将式（3-45）、（3-46）代入式（3-38）和式（3-39）中，提出 l 且合并为

$$l=\frac{U^2 ma^2}{\rho_{20}c_t P}=\frac{P}{20\omega a\ (m+1)}$$

$$a^3=\frac{\rho_{20}c_t P^2}{20\omega U^2 m\ (m+1)}$$

$$a=\sqrt[3]{\frac{\rho_{20}c_t P^2}{20\omega U^2 m\ (m+1)}} \tag{3-47}$$

式中　a——扁丝厚度，mm；

　　b——扁丝宽度，mm。

式中 m 值一般取 5～12，令

$$K_a=\sqrt[3]{\frac{1}{20m\ (m+1)}}$$

$$K_b=ma$$

则公式（3-47）又可写成：

$$a=K_a\sqrt[3]{\frac{P^2\rho_{20}c_t}{U^2\omega}} \tag{3-48}$$

$$b=ma=K_b\sqrt[3]{\frac{P^2\rho_{20}c_t}{U^2\omega}} \tag{3-49}$$

式中系数 K_a、K_b 值见表 3-14。

表 3-14　　K_a 与 K_b 值

m	5	6	7	8	9	10	11	12
K_a	0.1186	0.106	0.0963	0.0886	0.0822	0.0769	0.0724	0.0684
K_b	0.5928	0.636	0.6741	0.7088	0.7399	0.769	0.7959	0.821

2. 计算查表法

为简化计算，通常采用式（3-50）先计算出单位电阻的散热面积 A_r，然后查表 3-15 电热合金材料规格表，从表中找到相应的 A_r（取较大值），这样便可得到丝径规格 d，确定 d 值后就可算出电热丝材料长度 l。

$$A_r = \frac{P^2}{U^2 \omega} \tag{3-50}$$

式中　A_r——单位电阻散热面积，cm^2/Ω。

$$l = \frac{R_{20}}{R_l} = \frac{U^2}{Pc_t R_l} \tag{3-51}$$

$$R_{20} = \frac{U^2}{Pc_t} \tag{3-52}$$

式中　R_{20}——20℃时电热丝电阻，Ω；

R_l——单位长度的电阻，Ω。

3. 图解法

图 3-13、图 3-14 分别为 Cr15Ni60 镍铬合金和 0Cr25A15 铁铬铝合金电热元件计算图。由图根据元件的功率或电流，再结合表面负荷值，可直接查得所需合金材料的线径和长度。

表 3-15　　电热合金材料规格表

d (mm)	R_l (Ω/m)		G (g/m)		A_r (cm^2/Ω)	
	镍铬 Cr20Ni80	铁铬 0Cr25A15	镍铬 Cr20Ni80	铁铬 0Cr25A15	镍铬 Cr20Ni80	铁铬 0Cr25A15
2.0	0.3470	0.446	26.1	22	181.1	141
1.8	0.4283	0.551	21.1	18	132	102
1.6	0.542	0.697	16.69	14	92.72	72.2
1.4	0.7081	0.910	12.78	11	62.12	48.3
1.3	0.823	1.058	11.026	9.4	49.82	38.5
1.2	0.9657	1.238	9.4	8	39.196	33
1.0	1.388	1.783	6.52	5.6	22.64	17.6
0.9	1.713	2.200	5.28	4.5	16.5	12.7
0.8	2.168	2.790	4.172	3.6	11.59	9
0.7	2.75	3.640	3.29	2.7	8.1	6.03
0.6	3.855	4.953	2.35	2	4.89	3.8
0.5	5.551	7.135	1.63	1.4	2.83	2.2
0.45	6.853	8.820	1.32	1.13	2.063	1.605
0.40	8.674	11.13	1.05	0.9	1.449	1.13
0.35	11.01	14.1	0.82	0.7	1.013	0.78
0.30	15.42	19.8	0.59	0.505	0.6112	0.475
0.25	22.21	28.6	0.41	0.35	0.3537	0.274
0.20	34.7	44.5	0.26	0.222	0.1811	0.14

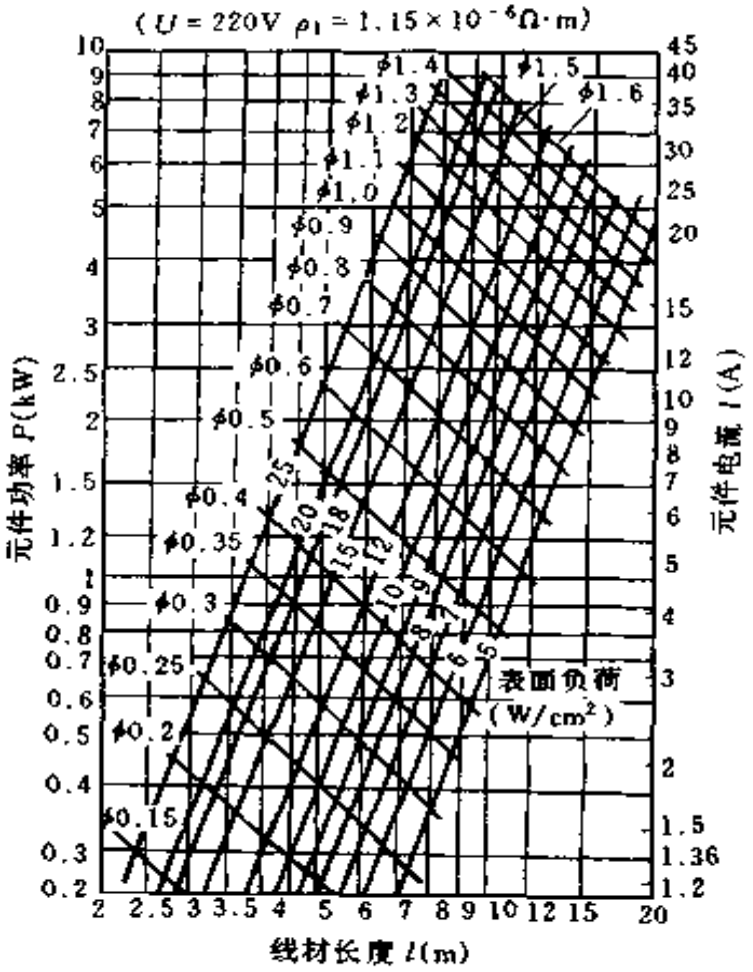


图 3-13　镍铬合金电热元件计算图

例 3-17　已知开启式电炉的功率为500W，电源电压为220V，电炉要求的工作温度为 1100℃，求所需要电热丝的直径和长度。

解　(1) 应用计算法。根据电炉要求的工作温度为1100℃，按表 3-16 选用 0Cr25Al5 铁铬铝合金丝。再按表 3-13 查出在 1100℃ 时该材料的电阻率温度修正系数 c_t = 1.036。查表 3-12 知 0Cr25Al5 在 20℃ 时的电阻率为 1.4Ω·mm²/m，故 $\rho_t = \rho_{20} c_t = 1.4 \times 1.036 = 1.4504$ (Ω·mm²/m)。

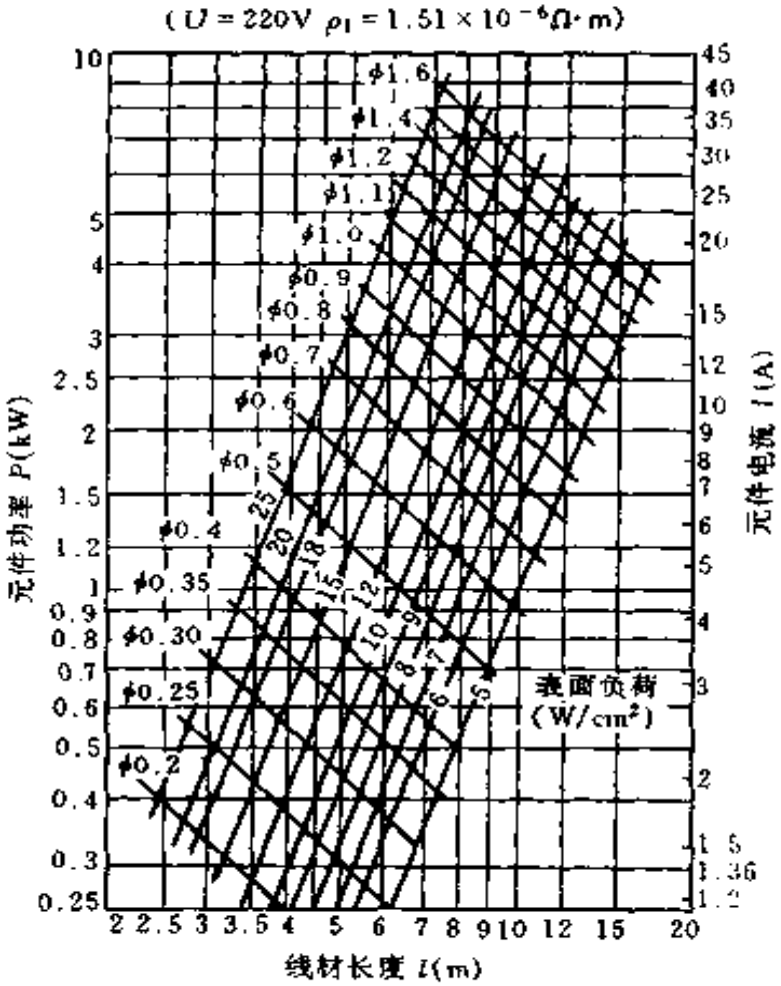


图 3-14　铁铬铝合金电热元件计算图

参考表 3-11 开启式电炉的表面负荷可选 5W/cm^2，按公式（3-43）和（3-42）计算线径 d 和长度 l

$$d=0.3435\sqrt[3]{\frac{500^2\times1.4504}{220^2\times5}}=0.393\ (\text{mm})$$

取 $d=0.4\text{mm}$

$$l=\frac{220^2\pi\times0.4^2}{4\times1.4504\times500}=8.387\ (\text{m})$$

(2) 应用计算查表法。按公式（3-50）算出 A_r，查表 3-15，就可得到 d 值。

表 3-16　　合金电热元件最高使用温度

合金牌号	规　格 (mm)	电热元件使用温度（℃）	
		常用最高	极　限
Cr20Ni80	ϕ0.15～0.40	900～950	1000
	ϕ0.41～0.95	950～1000	1050
	ϕ1.0～3.0	1000～1050	1100
	$\phi>3$; $a>1.5$	1050～1100	1150
Cr15Ni60	ϕ0.15～0.40	900～925	950
	ϕ0.41～0.95	925～950	975
	ϕ1.0～3.0	950～975	1000
	$\phi>3$; $a>1.5$	975～1000	1050
1Cr13Al4	ϕ0.15～0.40	750～775	900
	ϕ0.41～0.95	775～800	1000
	ϕ1.0～3.0	800～825	1050
	$\phi>3$; $a>1.5$	825～850	1100
0Cr13Al6Mo2	ϕ0.15～0.40	1000～1050	1150
	ϕ0.41～0.95	1050～1100	1200
	ϕ1.0～3.0	1100～1150	1250
	$\phi>3$; $a>1.5$	1150～1200	1300
0Cr25Al5	ϕ0.15～0.40	925～1000	1100
	ϕ0.41～0.95	1000～1075	1150
	ϕ1.0～3.0	1075～1150	1250
	$\phi>3$; $a>1.5$	1150～1200	1300
0Cr27Al7Mo2	ϕ0.15～0.40	1100～1150	1250
	ϕ0.41～0.95	1150～1200	1300
	ϕ1.0～3.0	1200～1250	1350
	$\phi>3$; $a>1.5$	1250～1300	1400

注　表中 ϕ 为圆丝直径；a 为扁丝厚度。

$$A_r=\frac{500^2}{220^2\times 5}=1.033\ (\mathrm{cm}^2/\Omega)$$

查表 3-15，可知 $d=0.40\text{mm}$

同时查得 $R_1=11.13\Omega$，按公式（3-51）可求出 l

$$l=\frac{220^2}{500\times1.036\times11.13}=8.395\ (\text{m})$$

（3）应用图解法。由图 3-14 查得 500W 处的水平线与表面负荷 5W/cm^2 的交点，从而可求出线径 $d=0.4\text{mm}$ 和线长 $l=8\text{m}$。

以上三种计算方法得出的结果基本相同。

（二）碳化硅电热元件计算

1．简介

碳化硅（SiC）电热元件按其形状不同又称为硅碳棒或硅碳管。它是用碳化硅作为原料，经高温再结晶制成。可在 1250～1400℃工作温度下长期工作，碳化硅电热元件的最高工作温度可达 1500℃。

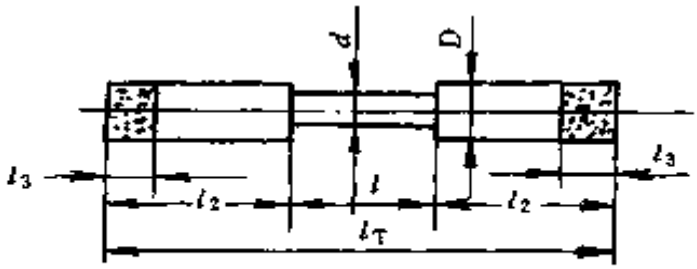
碳化硅电热元件的电阻率在室温至 900℃时，由大变小，在 900～1450℃范围内则由小变大。在 1400℃时为 $1000\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$左右。

碳化硅电热元件的特点是高温强度高；硬而脆；元件间的电阻值一致性较差。易老化，电阻随使用时间延长而增大。因此，一般使用碳化硅电热元件时，须配用调压装置。

碳化硅电热元件按其形状可分：棒型、管型、等直径型、单端接线式的双螺纹型、两端接线式的无螺纹型、E 型等特殊规格的碳化硅电热元件。其中以棒型和单螺纹管形使用较多，其外形尺寸规格和有关技术参数见表 3-17 和表 3-18。

碳化硅电热元件的表面负荷 ω 值可从图 3-15 或表 3-19 中直接查出。

表 3-17　硅碳棒尺寸规格，每支电阻值及允许负荷



d—发热段直径，mm；D—接线端直径，mm；l—发热段长度，mm；l_2—接线端长度，mm；l_3—喷铝部长度，mm；l_T—元件总长度，mm

规格 $d/l/l_2$	各部尺寸（mm）						发热段表面积 πdl (cm^2)	1400℃时电阻 ±10% (Ω)	下列炉温时每支元件的允许负荷 ω(元件温度=1450℃)			
	发热段		接线端		喷铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (ω=26.3)	1200℃ (ω=20.5)	1300℃ (ω=13.47)	1400℃ (ω=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
6/60/75	6	60	12	75	25	210	11.31	2.2	297	232	152.3	55.5
6/100/130	6	100	12	130	25	360	18.85	3.5	496	386	254	92.6
8/100/85	8	100	14	85	30	270	25.1	2.4	660	515	338	123.2
8/100/130	8	100	14	130	30	360	25.1	2.4	660	515	338	123.2
8/150/85	8	150	14	85	30	320	37.7	3.6	992	773	508	185.1
8/150/150	8	150	14	150	30	450	37.7	3.6	992	773	508	185.1
8/180/60	8	180	14	60	30	300	45.2	4.4	1189	927	609	222
8/180/150	8	180	14	150	30	480	45.2	4.4	1189	927	609	222
8/200/85	8	200	14	85	30	370	50.3	4.8	1323	1031	678	247
8/200/150	8	200	14	150	30	500	50.3	4.8	1323	1031	678	247
8/250/100	8	250	14	100	30	450	62.8	6.2	1652	1287	846	308
8/250/150	8	250	14	150	30	550	62.8	6.2	1652	1282	846	308
8/300/85	8	300	14	85	30	470	75.4	7.4	1983	1546	1016	370
8/400/85	8	400	14	85	30	570	100.5	10	2640	2060	1354	493
12/100/200	12	100	18	200	35	500	37.7	1.1	992	773	508	185.1
12/150/200	12	150	18	200	35	550	56.5	1.7	1486	1158	761	277
12/200/200	12	200	18	200	35	600	75.4	2.2	1983	1546	1016	370
12/250/200	12	250	18	200	35	650	94.2	2.8	2480	1931	1269	463
12/300/200	12	300	18	200	35	700	113.1	3.4	2970	2320	1523	555
12/300/250	12	300	18	250	35	800	113.1	3.4	2970	2320	1523	555

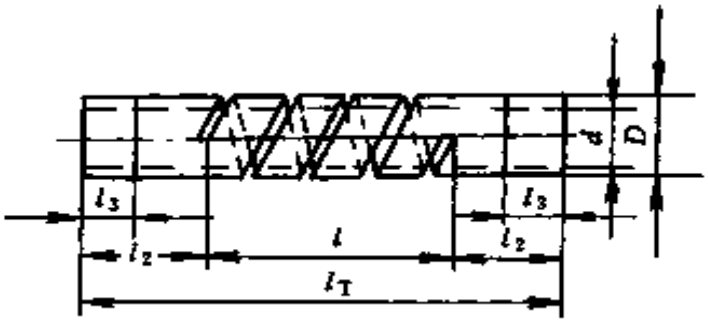
续表

规格 $d/l/l_2$	各部尺寸（mm）						发热段表面积 πdl (cm^2)	1400℃时电阻 ±10% (Ω)	下列炉温时每支元件的允许负荷 ω(元件温度=1450℃)			
	发热段		接线端		喷铝长度 l_3	全长 l_1			1100℃ (ω=26.3)	1200℃ (ω=20.5)	1300℃ (ω=13.47)	1400℃ (ω=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
14/200/250	14	200	22	250	40	700	88	1.8	2310	1804	1185	432
14/200/350	14	200	22	350	40	900	88	1.8	2310	1804	1185	432
14/250/205	14	250	22	250	40	750	110	2.2	2890	2260	1482	540
14/250/350	14	250	22	350	40	950	110	2.2	2890	2260	1482	540
14/300/250	14	300	22	250	40	800	131.9	2.6	3470	2700	1777	648
14/300/350	14	300	22	350	40	1000	131.9	2.6	3470	2700	1777	648
14/400/250	14	400	22	250	40	900	175.9	3.5	4630	3610	2370	864
14/400/350	14	400	22	350	40	1100	175.9	3.5	4630	3610	2370	864
14/500/250	14	500	22	250	40	1000	220	4.4	5790	4510	2960	1080
14/500/350	14	500	22	350	40	1200	220	4.4	5790	4510	2960	1080
14/600/250	14	600	22	250	40	1100	264	5.2	6940	5410	3560	1296
14/600/350	14	600	22	350	40	1300	264	5.2	6940	5410	3560	1296
18/250/250	18	250	28	250	50	750	141.4	1.3	3720	2900	1905	694
18/250/350	18	250	28	350	50	950	141.4	1.3	3720	2900	1905	694
18/300/250	18	300	28	250	50	800	169.6	1.7	4460	3480	2280	833
18/300/350	18	300	28	350	50	1000	169.6	1.7	4460	3480	2280	833
18/300/400	18	300	28	400	50	1100	169.6	1.7	4460	3480	2280	833
18/400/250	18	400	28	250	50	900	226	2.3	5940	4630	3040	1110
18/400/350	18	400	28	350	50	1100	226	2.3	5940	4630	3040	1110
18/400/400	18	400	28	400	50	1200	226	2.3	5940	4630	3040	1110
18/500/250	18	500	28	250	50	1000	283	2.7	7440	5800	3810	1390

续表

规格 $d/l/l_2$	各部尺寸（mm）						发热段表面积 πdl (cm^2)	1400℃时电阻 ±10% (Ω)	下列炉温时每支元件的允许负荷 ω(元件温度=1450℃)			
	发热段		接线端		喷铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (ω=26.3)	1200℃ (ω=20.5)	1300℃ (ω=13.47)	1400℃ (ω=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
18/500/350	18	500	28	350	50	1200	283	2.7	7440	5800	3810	1390
18/500/400	18	500	28	400	50	1300	283	2.7	7440	5800	3810	1390
18/600/250	18	600	28	250	50	1100	339	3.4	8920	6950	4570	1664
18/600/350	18	600	28	350	50	1300	339	3.4	8920	6950	4570	1664
18/600/400	18	600	28	400	50	1400	339	3.4	8920	6950	4570	1664
18/800/250	18	800	28	250	50	1300	452	4.6	11890	9270	6090	2220
18/800/350	18	800	28	350	50	1500	452	4.6	11890	9270	6090	2220
18/800/400	25	300	38	400	70	1100	236	1.0	6210	4840	3180	1159

表 3-18 单螺纹硅碳管尺寸规格、每支电阻值及允许负荷



d—硅碳管内径，mm；D—硅碳管外径，mm；l—螺纹带长度，mm；
l_2—接线端长度，mm；l_3—喷铝部长度，mm；l_T—元件总长度，mm

规格 $D/d\times l/l_2$	各部尺寸（mm）							1400℃时电阻（Ω）	下列炉温时每支元件的允许负荷 ω（元件温度=1450℃）			
	直径		螺纹带长度 l	接线端长度 l_2	喷铝长度 l_3	全长 l_T	发热部表面积 πdl (cm²)		1100℃（ω=26.3）	1200℃（ω=20.5）	1300℃（ω=13.47）	1400℃（ω=4.91）
	外径 D	内径 d										
40/30×200/100	40	30	200	100	30	400	251	3～6	6600	5150	3380	1232
40/30×300/100	40	30	300	100	30	500	377	5～8	9920	7730	5080	1851
40/30×400/100	40	30	400	100	30	600	503	7～10	13230	10310	6780	2470
50/40×300/100	50	40	300	100	35	500	471	4～7	12390	9660	6340	2310
50/40×400/100	50	40	400	100	35	600	628	6～9	16520	12870	8460	3080
50/40×500/100	50	40	500	100	35	700	785	8～11	20600	16090	10570	3850
60/50×400/100	60	50	400	100	40	600	754	5～7	19830	15460	10160	3700
60/50×500/100	60	50	500	100	40	700	942	7～10	24800	19310	12690	4630
60/50×600/100	60	50	600	100	40	800	1131	9～12	29700	23200	15230	5550

续表

规格 $D/d\times l/l_2$	各部尺寸（mm）							1400℃时电阻（Ω）	下列炉温时每支元件的允许负荷 ω（元件温度=1450℃）			
	直径		螺纹带长度 l	接线端长度 l_2	喷铝长度 l_3	全长 l_T	发热部表面积 πdl（cm^2）		1100℃（ω=26.3）	1200℃（ω=20.5）	1300℃（ω=13.47）	1400℃（ω=4.91）
	外径 D	内径 d										
70/60×500/100	70	60	500	100	45	700	1100	7～10	28900	22600	14820	5400
70/60×600/100	70	60	600	100	45	800	1319	8～11	34700	27000	17770	6480
70/60×700/100	70	60	700	100	45	900	1593	9～12	40500	31500	20700	7560
80/70×600/100	80	70	600	100	50	800	1508	7～10	39700	30900	20300	7400
80/70×700/100	80	70	700	100	50	900	1759	8～11	46300	36100	23700	8640
80/70×800/100	80	70	800	100	50	1000	2010	9～12	52900	41200	27100	9870
90/80×600/100	90	80	600	100	55	800	1696	7～10	44600	34800	22800	8330
90/80×700/100	90	80	700	100	55	900	1979	8～11	52000	40600	26700	9720
90/80×800/100	90	80	800	100	55	1000	2260	9～12	59400	46300	30400	11100
100/90×600/100	100	90	600	100	60	800	1885	7～10	49600	38600	25400	9260
100/90×700/100	100	90	700	100	60	900	2200	8～11	57900	45100	29600	10800
100/90×800/100	100	90	800	100	60	1000	2510	9～12	66000	51500	33800	12320

注　因硅碳管内部散热条件比外部差得多，故仅以其外表面作为发热部表面积。

表 3-19　　碳化硅电热元件在不同元件温度和炉温下的表面负荷　　(W/cm²)

元件温度(℃)	炉温(℃)											
	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550
1100	4.63	2.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1150	7.37	5.19	2.74	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1200	10.41	8.23	5.78	3.04	—	—	—	—	—	—	—	—
1250	13.77	21.60	9.15	6.41	3.37	—	—	—	—	—	—	—
1300	17.47	15.29	12.84	10.1	7.06	3.70	—	—	—	—	—	—
1350	21.6	19.38	16.93	14.19	11.15	7.78	4.09	—	—	—	—	—
1400	26.0	23.9	21.4	13.67	15.63	12.26	8.57	4.48	—	—	—	—
1450	30.9	28.8	26.3	28.6	20.5	17.17	13.47	9.39	4.91	—	—	—
1500	36.2	34.1	31.7	28.9	25.9	22.5	18.82	14.73	10.26	5.35	—	—
1550	42.1	39.9	37.5	34.7	31.7	28.3	24.6	20.5	16.05	11.15	5.80	—
1600	48.4	46.2	48.8	41.0	38.0	34.6	30.9	26.8	22.4	17.46	12.11	6.32

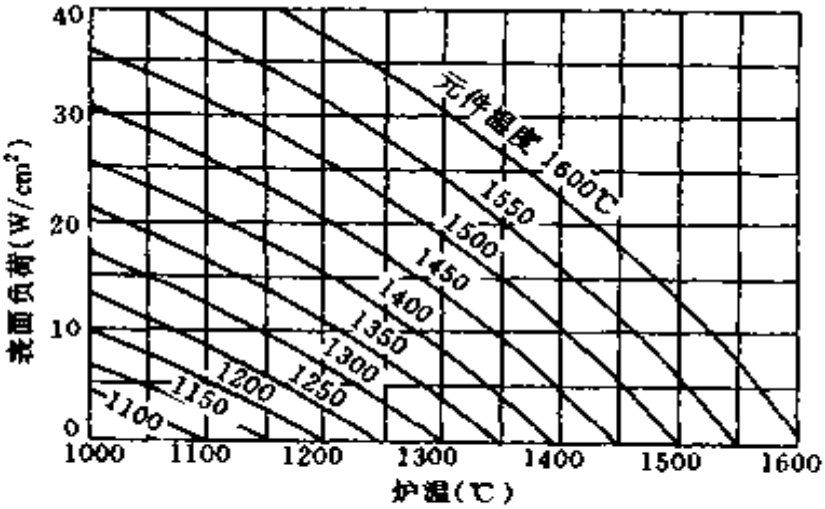


图 3-15　表面负荷对碳化硅电热元件和炉内温度的关系

2. 计算方法

(1) 根据所需总功率 P 及上面算出的元件表面负荷 ω，即可用下式先算出碳化硅电热元件的发热部总面积

$$A=\frac{P}{\omega} \tag{3-53}$$

式中 A——发热部总面积，cm^2；

P——电炉总功率，W；

ω——元件表面负荷，W/cm^2。

(2) 根据电炉或其它电热电器的实际尺寸，从表 3-17 或表 3-18 中选定一种合适的碳化硅电热元件发热部长度 l 和接线端长度 l_2。表中同一发热部长度的元件有几种直径可供选择，选定后就可用下式算出元件支数。

对于硅碳棒，有

$$n=\frac{A}{\pi dl} \tag{3-54}$$

对于硅碳管，有

$$n=\frac{A}{\pi Dl} \tag{3-55}$$

式中 n——元件支数；

A——发热部总面积，cm^2；

d——发热段直径，cm；

l——发热段长度，cm；

D——硅碳管外径，cm。

在三相电炉中，须把 n 凑成 3 的倍数。

(3) 支数确定以后，再用下式算出每支元件功率 P_1

$$P_1=\frac{P}{n} \tag{3-56}$$

(4) 每支元件的表面负荷

表 3-17 与表 3-18 中所列不同温度下每支元件的允许负荷，是把元件温度规定为 1450℃，从表 3-19 或图 3-15 中查得炉温在 1100℃、1200℃、1300℃和 1400℃时的表面负荷分别为 26.3、20.5、13.47 和 4.91W/cm^2。把它们分别乘以每支元件发热部表面积 πdl（棒）或 πDl（管），求得各种规格的元件在不同炉温下的每支元件的允许负荷。这一允许负荷在电热元件使用过程中不得超过，否则将加速元件老化，缩短使用寿命。

硅碳棒之间及硅碳棒与炉墙或工件之间的最小距离见表 3-20。

表 3-20　　硅碳棒之间及硅碳棒与炉墙或工件之间的最小距离（mm）

硅碳棒工作段直径	ϕ6	ϕ8	ϕ12	ϕ14	ϕ18	ϕ25	ϕ30
硅碳棒中心之间最小距离	25	33	50	58	75	103	124
硅碳棒与炉墙或工件间的最小距离	19	25	30	44	57	79	94

二、电阻炉功率的确定

（一）合金电阻炉按炉膛容积估算电炉功率

经验表明，对于普通箱式电阻炉和井氏电阻炉，其炉膛容积 V 和电炉功率 P 之间的关系见表 3-21。

（二）硅碳棒电阻炉功率的确定

硅碳棒电阻炉需要配用调压器，电阻炉的功率可根据炉膛的表面积按下列方法计算：

对箱式、井氏电阻炉，可按表 3-22 中的公式估算。在炉膛较大时，表中系数取较大值。

对隧道式电阻炉，当工作温度为 1350℃时，其功率按式（3-57）估算

表 3-21　　炉膛容积 V 和电炉功率 P 的关系

炉温 ℃	功　率（kW）	单位炉墙面积功率（kW/m²）
1200	$P=(100\sim150)\sqrt[3]{V^2}$	15～20
950	$P=(75\sim100)\sqrt[3]{V^2}$	10～15
650	$P=(50\sim75)\sqrt[3]{V^2}$	6～10
400	$P=(35\sim50)\sqrt[3]{V^2}$	5～7

注　1. V 表示炉膛按名义尺寸计算的容积，m^3。

2. 电炉功率的计算公式中的系数，对大型电炉取较小值；对小型电炉取较大值；对箱式电炉取较小值；对井氏电炉取较大值。

$$P=(4\sim5)K_tA \tag{3-57}$$

式中　P——电阻炉功率，kW；

K_t——调压安全系数，取 1.2～1.3；

A——炉膛表面积，m^2。

当工作温度为 1400℃时，其功率按式（3-58）估算

$$P=10K_tA \tag{3-58}$$

表 3-22　　硅碳棒电阻炉功率估算表

炉温（℃）	功　率（kW）
1350	$P=(10\sim20)K_tA$
1200	$P=(10\sim20)K_tA$
950	$P=(10\sim20)K_tA$
650	$P=(6\sim10)K_tA$
400	$P=(4\sim7)K_tA$

注　1. 表中 A—炉膛表面积，m^2。

2. 表中 K_t—调压安全系数，取 1.2～1.3。

例 3-18 有一箱式电阻炉，炉膛尺寸为 950mm×450mm×450mm，炉温为 950℃，问电炉功率是多少？

解

$$V=950\times10^{-3}\times450\times10^{-3}\times450\times10^{-3}$$
$$=0.1924\ (\mathrm{m}^3)$$

根据炉温 950℃，查表 3-21 得

$$P=(75\sim100)\sqrt[3]{0.1924^2}=25\sim33.33\ (\mathrm{kW})$$

选取 30kW。

例 3-19 有一井式电阻炉，炉膛直径 d 为 600mm，高 h 为 2500mm，炉温为 950℃，问电炉功率是多少？

解 （1）根据炉膛容积计算

$$V=\frac{\pi}{4}d^2h=\frac{\pi}{4}\times0.6^2\times2.5=0.7069\ (\mathrm{m}^3)$$

查表 3-21 得

$$P=(75\sim100)\sqrt[3]{0.7069^2}=59.51\sim79.35\ (\mathrm{kW})$$

（2）根据单位炉墙面积功率计算

$$A=\pi dh+\frac{\pi}{4}d^2\times2$$
$$=\pi\times0.6\times2.5+\frac{\pi}{4}\times0.6^2\times2$$
$$=5.278\ (\mathrm{m}^2)$$

查表 3-21 得

$$P=(10\sim15)\times5.278=52.78\sim79.17\ (\mathrm{kW})$$

由上计算可以看出两种方法结果是相近的。取 $P=70\mathrm{kW}$。

例 3-20 已知电阻炉总功率为15kW，以△联结方式接入电网，炉温为 1400℃，元件温度为 1450℃，炉膛壁厚为

200mm，炉膛宽为 300mm。试计算碳化硅棒的尺寸规格与所需支数。

解 根据炉温及元件温度，由表 3-19 查取 $\omega=4.91$ W/cm^2，按式（3-53）可得发热部总面积为

$$A=\frac{P}{\omega}=\frac{15\times10^3}{4.91}=3055\ (\text{cm}^2)$$

根据炉膛尺寸查表 3-17，（取 300mm，l_2 取 250mm，则 d 可取 12mm、14mm 或 18mm，其发热段表面积分别为 113.1cm^2、131.9cm^2、169.6cm^2。

按式（3-54）可得元件支数分别为

$$n_1=\frac{A}{\pi d_1 l}=\frac{3055}{131.1}=27$$

$$n_2=\frac{A}{\pi d_2 l}=\frac{3055}{131.9}=23.16$$

$$n_3=\frac{A}{\pi d_3 l}=\frac{3055}{169.6}=18$$

为了便于三相负载平衡，可取规格为 12mm×300mm×250mm 硅碳棒 27 根或 18mm×300mm×250mm 硅碳棒 18 根。

第三节 电动机控制电阻计算

一、绕线转子异步电动机起动、调速、制动电阻计算

（一）起动电阻的计算

1. 转子串接对称起动电阻的计算

（1）分析法。

1）首先确定需要的起动级数 m。起动级数视电动机容量及负载性质而定。电动机容量愈大，以及要求平均起动转矩值大且切换时冲击小，则需要的起动级数愈大。一般数据可参见表 3-23。

表 3-23　　绕线转子电动机起动级数 m

电动机容量 (kW)	接触器继电器控制时起动级数 m	
	全　负　载	半　负　载
0.75～7.5	1	1
10～20	2	2
22～35	2～3	2
35～55	3	2～3
60～95	4～5	3
100～200	4～5	3
220～370	6	4

2）确定起动级数 m 以后，求 λ 值

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_N T_1^*}} \tag{3-59}$$

式中　λ——最大起动转矩与切换转矩之比值，$\lambda = T_1/T_2$；

T_1——量大起动转短，应小于电动机的临界转矩 T_{cr}，一般取 $T_1 \leqslant 0.8T_{cr}$，或 $T_1 = 1.8 \sim 2.0T_N$，N·m；

T_2——切换转矩，一般取 $T_2 = 1.0 \sim 1.2T_N$ 或 $T_2 = 1.1 \sim 1.2T_L$（最大负载转矩），N·m；

T_1^*——最大起动转矩对电动机额定转矩的标幺值；

s_N——电动机额定转差率。

3）求电动机的额定电阻 r_N 值

$$r_N = s_N R_{2N} \tag{3-60}$$

$$R_{2N} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} \tag{3-61}$$

式中　R_{2N}——电动机转子额定电阻，Ω；

U_{2N}——当 $s=1$ 时电动机转子额定电压，V；

I_{2N}——电动机转子额定电流，A。

4）确定各级起动电阻值

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= \lambda r_N \\ R_2 &= \lambda R_1 = \lambda^2 r_N \\ R_3 &= \lambda R_2 = \lambda^3 r_N \\ &\cdots\cdots \\ R_m &= \lambda R_{m-1} = \lambda^m r_N \end{aligned}\right\} \tag{3-62}$$

或

$$\left.\begin{aligned} RA_1 &= r_N(\lambda - 1) \\ RA_2 &= RA_1 \lambda \\ RA_3 &= RA_2 \lambda \\ &\cdots\cdots \\ RA_m &= RA_{m-1} \lambda \end{aligned}\right\} \tag{3-63}$$

各级起动电阻见图 3-16。

（2）图解法。

下面以图 3-16 所示的 3 级起动电路为例，说明如何用图解法确定各级起动电阻值。

1）用百分值绘出电动机的自然机械特性，如图 3-17 上的 n_1Bg 线段。

2）选定最大起动转矩 T_1 和切换转矩 T_2。图 3-17 中假定取 $T_1=2T_N$，从 n_1 点到 T_1 点画直线 n_1k，在 T_1 和 T_2 之间绘制起动曲线，如果绘出的曲线与所确定的起动级数相符，则所选定的 T_1、T_2 值是合适的，否则应调整 T_1 或 T_2 值并重新绘制。

3）通过 T_N 点做直线与各级起动特性曲线分别交于 B、C、D、E 各点，则各级起动电阻值为

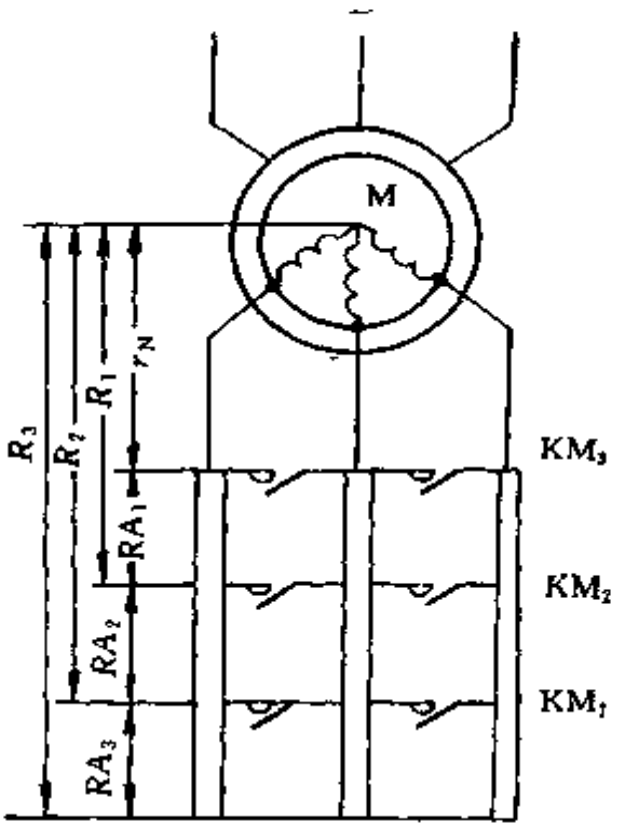


图 3-16　绕线转子电动机转子串接 3 级起动电阻线路图
（按 KM_1、KM_2、KM_3 动作次序依次短接电阻 RA_3、RA_2、RA_1）

$$\left.\begin{aligned} RA_1 &= \frac{BC}{AF}R_{2N} \\ RA_2 &= \frac{CD}{AF}R_{2N} \\ RA_3 &= \frac{DE}{AF}R_{2N} \end{aligned}\right\} \tag{3-64}$$

式中　R_{2N}——转子额定电阻，Ω。

例 3-21　YZR250M2-8 型绕线转子异步电动机，$P_N=37kW$，$n_N=720r/min$，$U_{2N}=330V$，$I_{2N}=70A$，负载转矩 $T_L=0.75T_N$，求 3 级起动时各级起动电阻。

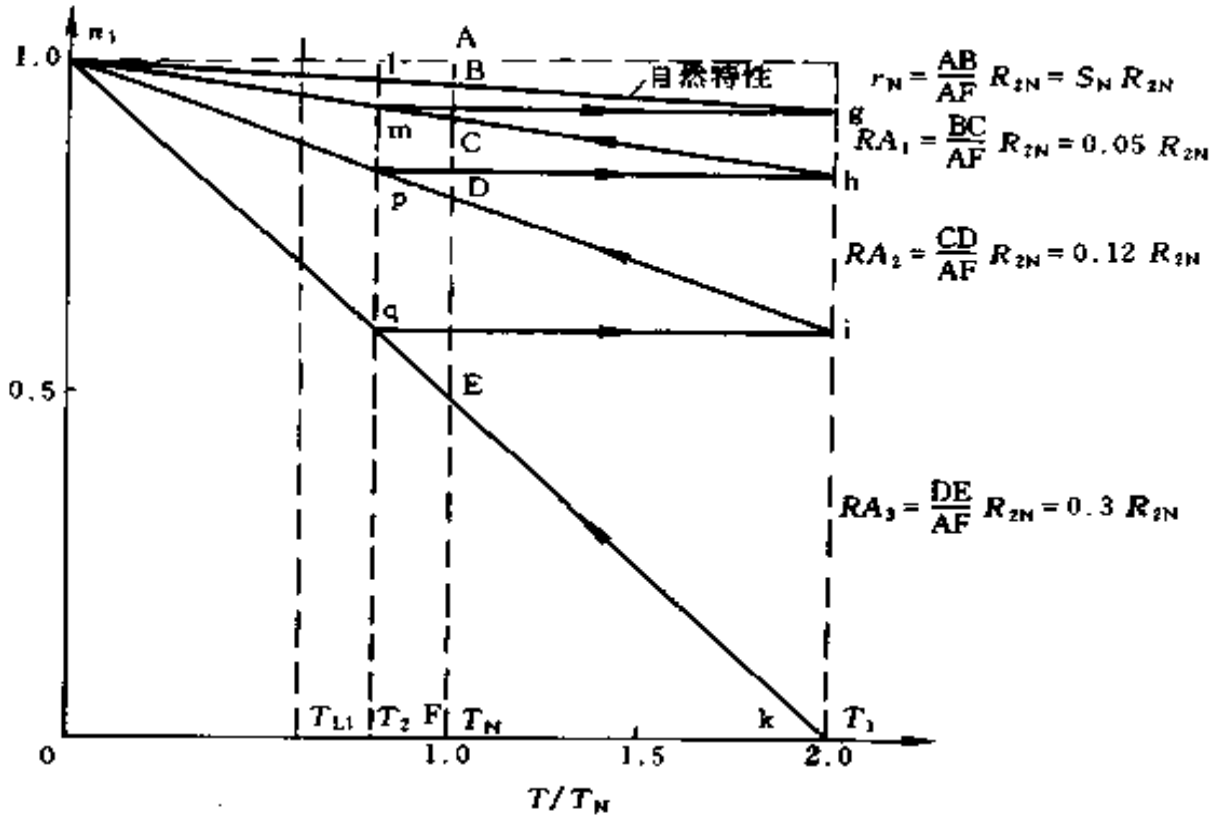


图 3-17　用图解法求起动电阻

解　(1) 电动机额定转差率

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{750-720}{750} = 0.04$$

(2) 电动机的额定电阻

$$r_N = \frac{s_N U_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{0.04 \times 330}{\sqrt{3} \times 70} = 0.1089(\Omega)$$

(3) 确定 λ。取 $T_1 = 2T_N$，$m = 3$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{s_N T_1^*}} = \sqrt[3]{\frac{1}{0.04 \times 2}} = 2.32$$

(4) 校验 T_2

$$T_2 = \frac{T_1}{\lambda} = \frac{2T_N}{2.32} = 0.862T_N > T_L$$

故 T_1、T_2 选定的值符合要求。

（5）各级起动电阻

$R_1=\lambda r_N=2.32\times0.1089=0.2526\ (\Omega)$

$R_2=\lambda R_1=2.32\times0.2526=0.586\ (\Omega)$

$R_3=\lambda R_2=2.32\times0.586=1.3595\ (\Omega)$

$RA_1=r_N\ (\lambda-1)\ =0.1089\times1.32=0.1437\ (\Omega)$

$RA_2=RA_1\lambda=0.1437\times2.32=0.3334\ (\Omega)$

$RA_3=RA_2\lambda=0.3334\times2.32=0.7735\ (\Omega)$

2．转子串接不对称起动电阻的计算

绕线转子异步电动机转子电路中串入不对称三相电阻起动，可以减少电阻段数和短接电阻触头数目，简化控制器的结构，或减少加速接触器的数目。三相不对称电阻起动方法，在中小型起重设备上广泛应用。

三相转子不对称电阻阻值，可以用对称的等效电阻计算，通常使三相转子不对称电阻的实际值 R_a、R_b、R_c 为等比级数，设等比级数为 λ，其等效对称电阻值相当于不对称的转子电路中每相电阻所构成等比级数中的中值 R_b，因此只要我们首先按照对称电阻来计算各级起动电阻值，即为不对称电阻中的中值，其余二相一个是等效电阻的 λ 倍，另一相是等效电阻的 $1/\lambda$ 倍。

不对称起动电阻计算步骤：

（1）先按对称起动电阻计算，求出各级的电阻值，此值即不对称电阻起动时各级的等效对称电阻。

（2）确定各级不对称电阻的数值，在任一级以对称电阻的数值为准，使一相电阻与它相等，其它两相电阻分别是它的 λ 倍和 $1/\lambda$ 倍。在第一级时，哪一相电阻最小，在第二级时为最大；在第一级时，哪一相电阻中值，在第二级时为最小；在

第一级时，电阻最大，在第二级时为中值，依次类推。

（3）求出各段电阻的数值，不对称电阻计算见表 3-24。图 3-18 画出了它们的各级不对称电阻切换情况，图中 4 级共用 5 段电阻（最后一级两段电阻同时切除）。

图中接点标号的阻值见表 3-25。

表 3-24　　三相不对称起动电阻计算表

控制器位置	等效对称电阻（Ω）	三相不对称电阻（Ω）			三相的分段电阻（Ω）		
		A	B	C	A	B	C
5	r_N	r_N	r_N	r_N	—	—	—
4	$R_1=\lambda r_N$	$R_3=\lambda^2 r_N$	$R_1=\lambda r_N$	r_N	$(\lambda^2-1)r_N$	$(\lambda-1)r_N$	—
3	$R_2=\lambda R_1$	$R_2=\lambda^2 r_N$	$R_1=\lambda r_N$	$R_3=\lambda^3 r_N$	—	—	$(\lambda^3-1)r_N$
2	$R_3=\lambda R_2$	$R_2=\lambda^2 r_N$	$R_4=\lambda^4 r_N$	$R_3=\lambda^3 r_N$	—	$(\lambda^4-\lambda)r_N$	—
1	$R_4=\lambda R_3$	$R_5=\lambda^5 r_N$	$R_4=\lambda^4 r_N$	$R_3=\lambda^3 r_N$	$(\lambda^5-\lambda^2)r_N$	—	—

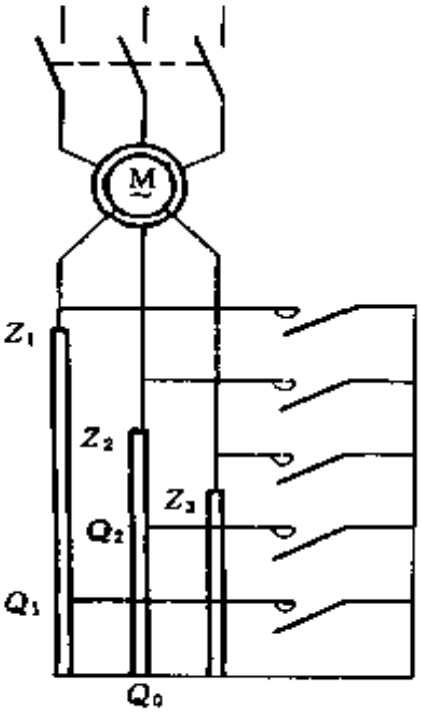


图 3-18　绕线转子异步电动机转子串接不对称起动电阻

表 3-25　　相当图 3-18 中接点标号的阻值

电阻接点标号	电　阻　值
Z_2-Q_2	$RA_1=(\lambda-1)r_N$
Z_1-Q_1	$RA_2=(\lambda^2-1)r_N$
Z_3-Q_0	$RA_3=(\lambda^3-1)r_N$
Q_2-Q_0	$RA_4=(\lambda^4-1)r_N$
Q_1-Q_0	$RA_5=(\lambda^5-\lambda^2)r_N$

例 3-22 仍为例 3-21 中电动机，如采用不对称三相电阻 4 级起动，求各段的电阻值。

解 (1) 仍取 $T_1=2T_N$，现 $m=4$，故

$$\lambda=\sqrt[m]{\frac{1}{s_N T_1^*}}=\sqrt[4]{\frac{1}{0.04\times 2}}=1.88$$

(2) 三相不对称电阻值为

$$R_1=\lambda r_N=1.88\times 0.1089=0.2047\ (\Omega)$$

$$R_2=\lambda^2 r_N=\lambda R_1=1.88\times 0.2047=0.3848\ (\Omega)$$

$$R_3=\lambda^3 r_N=\lambda R_2=1.88\times 0.3848=0.7234\ (\Omega)$$

$$R_4=\lambda^4 r_N=\lambda R_3=1.88\times 0.7234=1.36\ (\Omega)$$

$$R_5=\lambda^5 r_N=\lambda R_4=1.88\times 1.36=2.5568\ (\Omega)$$

(3) 各级切除的分段电阻值为

$$RA_1=R_1-r_N=(\lambda-1)r_N$$
$$=0.2047-0.1089=0.0958(\Omega)$$

$$RA_2=R_2-r_N=(\lambda^2-1)r_N$$
$$=0.3848-0.1089=0.2759(\Omega)$$

$$RA_3=R_3-r_N=(\lambda^3-1)r_N$$
$$=0.7234-0.1089=0.6145(\Omega)$$

$$RA_4=R_4-R_1=(\lambda^4-\lambda)r_N$$
$$=1.36-0.2047=1.1553(\Omega)$$

$$RA_5=R_5-R_2=(\lambda^5-\lambda^2)r_N$$
$$=2.5568-0.3848=2.172(\Omega)$$

（二）预备级及反接级电阻的计算

1. 预备级电阻的计算

一般预备级转矩为

$$T_S = (0.4 \sim 0.8)T_N \tag{3-65}$$

式中 T_S——预备级上起动转矩，N·m；

T_N——电动机额定转矩，N·m。

预备级电阻为

$$R_p = \left(\frac{s_{crb}}{s_{cr}} - 1\right) r_N \tag{3-66}$$

$$s_{crb} = s_b\left[\lambda_m \frac{T_N}{T_S} + \sqrt{\left(\lambda_m \frac{T_N}{T_S}\right)^2 - 1}\right] \tag{3-67}$$

$$s_{cr} = s_N\left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}\right) \tag{6-68}$$

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} \tag{3-69}$$

式中 R_p——预备级电阻，Ω；

s_{crb}——电动机转速为 n_b 时的临界转差率；

s_{cr}——电动机临界转差率；

r_N——电动机额定电阻，Ω；

s_b——电动机转速为 n_b 时的转差率，因 $n_b=0$，所以 $s_b=(n_1-n_b)/n_1=1$；

λ_m——电动机的过载能力。

2. 反接级电阻的计算

起重机反接运转时，反接级电阻计算方法与预备级电阻计算方法一样，在有预备级时，预备级就是反接级。

例 3-23 某绕线转子异步电动机，$P_N=22kW$，$n_N=715r/min$，$I_{2N}=59.1A$，$U_{2N}=234V$，$\lambda_m=2.96$，当预备级起动转矩 $T_S=0.4T_N$，求预备级电阻是多少？

解 （1）电动机额定转差率

$$s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{750-715}{750}=0.0467$$

（2）电动机额定电阻

$$r_N=\frac{s_N U_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}}=\frac{0.0467\times 234}{\sqrt{3}\times 59.1}=0.1068\ (\Omega)$$

（3）电动机临界转差率

$$s_{cr}=s_N(\lambda_m+\sqrt{\lambda_m^2-1})$$

$$=0.0467(2.96+\sqrt{2.96^2-1})=0.2683$$

（4）求 s_{crb}

$$s_{crb}=s_b\left[\lambda_m\frac{T_N}{T_S}+\sqrt{\left(\lambda_m\frac{T_N}{T_S}\right)^2-1}\right]$$

$$=1\times\left[2.96\times\frac{1}{0.4}+\sqrt{\left(2.96\times\frac{1}{0.4}\right)^2-1}\right]$$

$$=14.732$$

（5）求预备级电阻

$$R_p=\left(\frac{s_{crb}}{s_{cr}}-1\right)r_N=\left(\frac{14.732}{0.2683}-1\right)\times 0.1068$$

$$=5.757(\Omega)$$

（三）在任何转速时串接电阻计算

在任何转速 n_a 时，额定负载 T_L 串接电阻值为

$$R_a = \left(\frac{s_{cra}}{s_{cr}} - 1\right) r_N \tag{3-70}$$

$$s_{cra} = s_a\left[\lambda_m \frac{T_N}{T_L} + \sqrt{\left(\lambda_m \frac{T_N}{T_L}\right)^2 - 1}\right] \tag{3-71}$$

式中 s_{cra}——转速为 n_a 时的临界转差率。

若额定负载 T_L 等于额定转矩 T_N 时，则

$$R_a = \left(\frac{s_a}{s_N} - 1\right) r_N \tag{3-72}$$

例 3-24 电动机的参数同例 3-23，求在 300r/min 时带动额定转矩应串入多大电阻？

解 （1）根据例 3-23 的计算值，有

$$s_N = 0.0467$$

$$r_N = 0.1068\Omega$$

（2）计算 s_a

$$s_a = \frac{n_1 - n_a}{n_1} = \frac{750 - 300}{750} = 0.6$$

（3）计算 R_a

$$R_a = \left(\frac{s_a}{s_N} - 1\right) r_N = \left(\frac{0.6}{0.0467} - 1\right) \times 0.1068$$

$$= 1.265(\Omega)$$

（四）电源反相反接制动电阻计算

起重机械经常使用改变定子电源相序，使电动机定子的

旋转磁场反向，电动机所产生的转矩方向与转速方向相反，从而产生制动作用，其线路如图 3-19 所示，特性如图 3-20 所示。

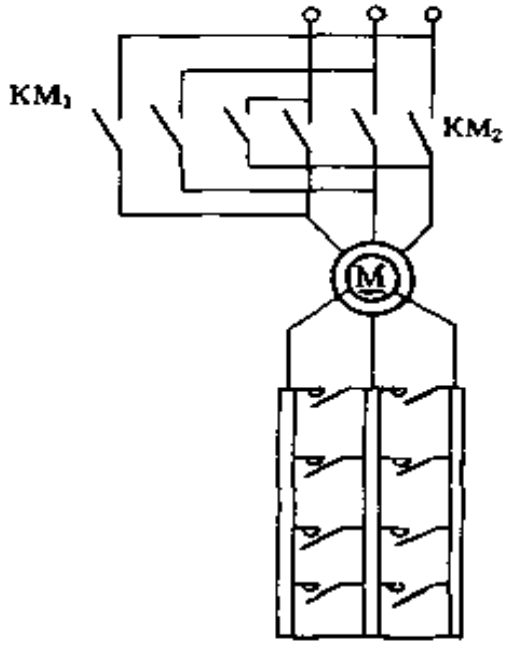


图 3-19　绕线转子电动机反接制动电路图

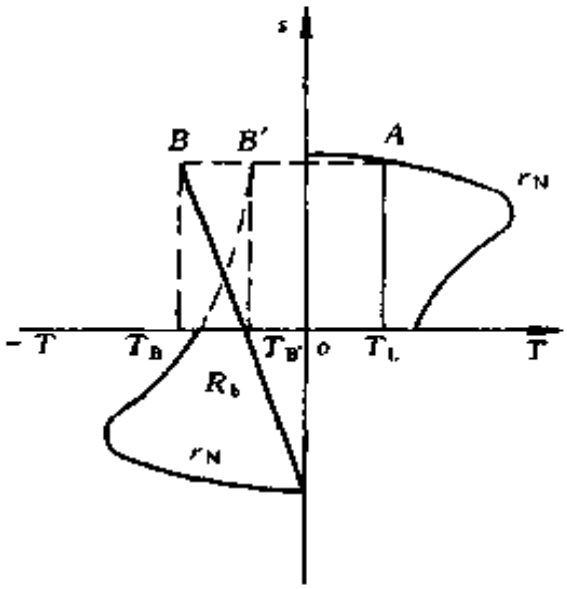


图 3-20　改变相序后反接制动的机械特性曲线

反接制动时电动机转子电压较高，有较大的反接电流，为了限制反接电流，在转子中必须串入反接制动电阻 R_b。

采用反接制动停车时要注意两点：

（1）由于电源相序刚刚反接的瞬间，转子中的感应电动势 E_2 比起动时转子电动势还要高（因为此时 $s>1$），为了限制冲击电流，转子内必须串入一个比起动电阻还要大的附加电阻来限制反接制动电流和增加制动转矩。

（2）当转子运行速度下降到零时，必须立即切除定子电源，否则电动机将反向起动。

其反接制动电阻

$$R_b = \left(\frac{s_{crB}}{s_{cr}} - 1\right) r_N \tag{3-73}$$

$$s_{crB} = s_B\left[\lambda_m \frac{T_N}{T_b} \pm \sqrt{\left(\lambda_m \frac{T_N}{T_b}\right)^2 - 1}\right] \tag{3-74}$$

$$s_B = \frac{-n_1 - n_B}{-n_1} \tag{3-75}$$

式中 R_b——串入的反接制动电阻，Ω；

s_{crB}——在转速为 n_B 时的临界转差率；

s_B——在转速为 n_B 时的转差率；

T_b——起始制动转矩，N·m。

例 3-25 电动机的参数同例 3-23，在转速 $n_B = 715$ r/min，起始制动转矩 $T_b = -2T_N$ 时，应串入多大制动电阻？

解 (1) 根据例 3-23 的计算值，有

$$s_{cr} = 0.2683$$

$$r_N = 0.1068\Omega$$

(2) 计算 s_B

$$s_B = \frac{-n_1 - n_B}{-n_1} = \frac{-750 - 715}{-750} = 1.953$$

(3) 计算 s_{crB}

$$s_{crB} = s_B\left[\lambda_m \frac{T_N}{T_b} \pm \sqrt{\left(\lambda_m \frac{T_N}{T_b}\right)^2 - 1}\right]$$

$$= 1.953\left[\frac{2.96}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2.96}{2}\right)^2 - 1}\right]$$

$$s_{crB1} = 5.021$$

$$s_{crB2} = 0.7597$$

(4) 计算 R_b

$$R_{b1}=\left(\frac{s_{crB1}}{s_{cr}}-1\right)r_N=\left(\frac{5.021}{0.2683}-1\right)\times 0.1068$$
$$=1.892(\Omega)$$
$$R_{b2}=\left(\frac{s_{crB2}}{s_{cr}}-1\right)r_N=\left(\frac{0.7597}{0.2683}-1\right)\times 0.1068$$
$$=0.1956(\Omega)$$

二、直流他励电动机起动、调速、制动电阻计算

（一）起动电阻的计算

1. 图解法求直流他励电动机的起动电阻

直流他励电动机的起动电阻值用图解法来确定比较方便，以图 3-21 所示的三级电阻起动电路为例来说明如何用图解法确定起动电阻。

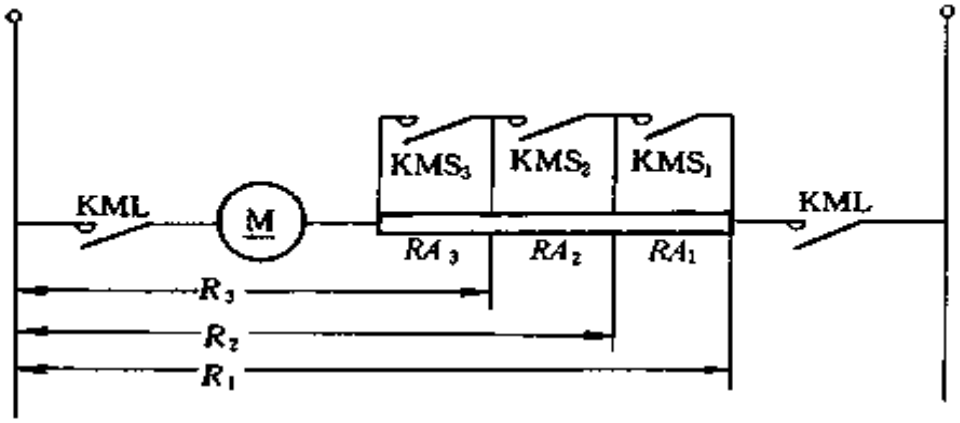


图 3-21　直流他励电动机 3 级起动电阻电路图

（按 KMS_3、KMS_2、KMS_1 次序分别短接 RA_3、RA_2、RA_1）

（1）绘制固有特性（图 3-23）中的 n_1g 直线），只要求出线上两个点的数据，就可绘出这条直线。一般选择理想空载点（$T=0$，$n=n_1$）及额定运行点（$T=T_N$，$n=n_N$）较为方便。

因额定转速 n_N 可从电动机的产品样本或电动机的铭牌上找到，故只要求出 n_1 和 T_N，就可画出固有特性。

求 n_1 的方法如下

$$n_1 = \frac{U_N}{C_e \phi_N} \tag{3-76}$$

式中　U_N——额定电压，V。

$$C_e \phi_N = \frac{E_N}{n_N} = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \tag{3-77}$$

式中　I_N——额定电流，A。

U_N、I_N、n_N 均可从电动机的产品样本或电动机的铭牌上找到，只有电枢电阻 R_a 为未知，R_a 包括电枢绕组、换向极绕组和补偿绕组的电阻，它的数值在产品样本和铭牌上是找不到的。如果电动机已有，R_a 可用电桥测量，如果没有电动机，可用近似方法估算。

常用的 Z 系列和 ZZ 系列直流电机，可从图 3-22 的 $R_a/R_N = f\ (P_N)$ 曲线中查得。其中额定功率 P_N 的单位是 kW，R_N 是额定电阻。

$$R_N = \frac{U_N}{I_N} \tag{3-78}$$

已知 U_N、I_N，故可算出 R_N，由 P_N 查出 R_a/R_N 后，再乘以 R_N，就可得出需要的 R_a。

如要考虑电刷电阻和电刷与换向器的接触电阻 r_C，可近似地取

$$r_C = \frac{\Delta U_C}{I_N} \tag{3-79}$$

式中　ΔU_C——电刷及其与换向器接触电阻的电压降，V。通常金属石墨电刷 $\Delta U_C = 0.6$V(包括正负两个极性的电刷)；碳石墨、石墨及电化石墨电刷 $\Delta U_C = 2$V(包括正负两个极性的电刷)。

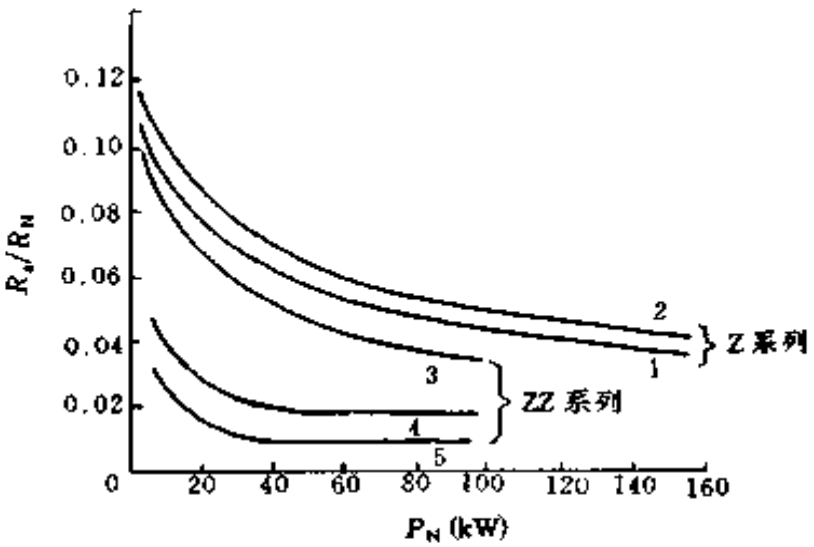


图 3-22　Z 系列和 ZZ 系列直流电动机绕组在 60℃ 下的电阻与额定功率的关系

1—Z 系列他励直流电动机电枢绕组电阻；2—Z 系列他励直流电动机包括稳定绕组的电枢电阻；3—ZZ 系列直流电动机电枢绕组电阻；4—ZZ 系列串励电动机绕组的电阻；5—ZZ 系列复励电动机串励绕组电阻

如果身边没有图 3-22 所示的曲线，可以根据电动机在额定负载下的铜耗近似地计算。由铭牌数据算出电动机在额定功率下的总损耗 ΔP_N

$$\Delta P_N = U_N I_N - P_N \times 10^3 \tag{3-80}$$

通常电动机在额定功率下的铜耗 $I_N^2 R_a$ 约占总损耗的 1/2～2/3，于是有

$$I_N^2 R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)(U_N I_N - P_N \times 10^3)$$

由此得电枢电阻 R_a

$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)\left(\frac{U_N}{I_N} - \frac{P_N \times 10^3}{I_N^2}\right) \tag{3-81}$$

算出 R_a，已知 U_N、I_N、n_N，即可计算 $C_e\phi_N$ 和 n_1，因而可得理想空载点。

求 T_N 的方法如下

$$T_N = C_t\phi_N I_N \tag{3-82}$$

式中 I_N 为已知数据，因 $C_t\phi_N = 9.55C_e\phi_N$，$C_e\phi_N$ 前面已算出，则 T_N 即可算出，即可得出额定运行点。

知道理想空载点和额定运行点，通过该两点的连线即为固有特性。

(2) 选取起动过程中的最大电流 I_1 与电阻切除时的切换电流 I_2，或起动转矩 T_1 与切换转矩 T_2。

$$I_1 = (1.5 \sim 2.0)I_N \tag{3-83}$$

$$I_2 = (1.1 \sim 1.2)I_N \tag{3-84}$$

或

$$T_1 = (1.5 \sim 2.0)T_N \tag{3-85}$$

$$T_2 = (1.1 \sim 1.2)T_N \tag{3-86}$$

I_2 或 T_2 之值也可选取为

$$I_2 \geqslant (1.2 \sim 1.5)I_L \tag{3-87}$$

或

$$T_2 \geqslant (1.2 \sim 1.5)T_L \tag{3-88}$$

式中 I_L——电动机的负载电流，A；

T_L——电动机的负载转矩，N·m。

在图上横坐标轴上截取 T_1 及 T_2（或 I_1 及 I_2）两点，并分别向上作垂直线。

(3) 绘制分级起动特性图。画人为特性 n_1a，见图3-23，n_1a 交 T_2(或 I_2)的垂直线于 b 点，画水平线 bc 交 T_1(或 I_1)的垂直线于 c 点，作人为特性 n_1c 交 T_2 的垂直线于 d 点，画水平线 de……，最后，当切除末段电阻时所画的水平线与 T_1 的垂直线的交点应正好在固有特性上(即水平线、T_1 的垂直

线与固有特性三者交于一点，在图 3-23 中为 g 点）。如果作图的结果不能保证这一点，必须对选取的 T_1 或 T_2 的数值稍作变动，一般可变动 T_2 的数值，再按上述同样步骤绘制，直到满足 T_1（或 I_1）一致的条件为止。

直流电动机起动电阻级数参见表 3-26。

表 3-26　　直流电动机起动电阻级数表

电动机容量（kW）	接触器继电器控制时起动级数	
	并　　励	复　　励
0.75～2.5	1	1
3.5～7.5	1～2	2
10～20	2～3	2
20～35	2～4	3
35～55	3～4	3
60～95	3～5	4
100～200	4～6	4
220～370	4～7	4

分级起动特性图一经绘出，即可在图上截取相应的线段 hg、ge、ec、ca，量出它们的数值，hg、ge、ec、ca 分别代表在转矩为 T_1 时的转速降 Δn_{hg}、Δn_{ge}、Δn_{ec}、Δn_{ca}，因 R_a 已经求出，利用下式公式即可求出起动电阻 RA_1、RA_2 和 RA_3

$$\left.\begin{aligned} RA_1 &= R_a \frac{\Delta n_{ca}}{\Delta n_{hg}} \\ RA_2 &= R_a \frac{\Delta n_{ec}}{\Delta n_{hg}} \\ RA_3 &= R_a \frac{\Delta n_{ge}}{\Delta n_{hg}} \end{aligned}\right\} \tag{3-89}$$

例 3-26 Z2 型直流电动机的数据如下：$P_N=40kW$，$U_N=220V$，$I_N=211A$，$n_N=1000r/min$，用图解法求 3 级起动时各级起动电阻是多少？

解 (1) 绘制固有特性、计算电枢电阻 R_a

$$R_a=\frac{1}{2}\left(\frac{U_N}{I_N}-\frac{P_N\times10^3}{I_N^2}\right)$$

$$=\frac{1}{2}\left(\frac{220}{211}-\frac{40\times10^3}{211^2}\right)$$

$$=0.5(1.043-0.898)=0.072(\Omega)$$

(2) 求 $C_e\phi_N$

$$C_e\phi_N=\frac{U_N-I_NR_a}{n_N}=\frac{220-211\times0.072}{1000}$$

$$=\frac{220-15.2}{1000}=0.2048$$

(3) 求 n_1

$$n_1=\frac{U_N}{C_e\phi_N}=\frac{220}{0.2048}=1074(r/min)$$

(4) 求 T_N

$$C_t\phi_N=9.55C_e\phi_N=9.55\times0.2048=1.956$$

$$T_N=C_t\phi_NI_N=1.956\times211=412.7(N\cdot m)$$

从上计算知固有特性曲线通过 $T=0$，$n_1=1074r/min$ 与 $T_N=412.7N\cdot m$，$n_N=1000r/min$ 两点，即图 3-23 中的 n_1g 线。

(5) 求各级起动电阻

取 $T_1=2T_N=2\times412.7=825.4(N\cdot m)$

$$T_2=450N\cdot m$$

T_2 系根据作图（作出切除各级电阻的 3 条起动特性线）

反复绘制，使最后一级电阻切除时尖峰转矩恰好为选取的 T_1。

绘出各级起动特性线 n_1a、n_1c、n_1e，量取线段 hg、ge、ec、ca，可知

$$\Delta n_{hg}=155\text{r/min}$$

$$\Delta n_{ge}=140\text{r/min}$$

$$\Delta n_{ec}=280\text{r/min}$$

$$\Delta n_{ca}=500\text{r/min}$$

计算各级起动电阻

$$RA_1=R_a\frac{\Delta n_{ca}}{\Delta n_{hg}}=0.072\times\frac{500}{155}=0.232(\Omega)$$

$$RA_2=R_a\frac{\Delta n_{ec}}{\Delta n_{hg}}=0.072\times\frac{280}{155}=0.13(\Omega)$$

$$RA_3=R_a\frac{\Delta n_{ge}}{\Delta n_{hg}}=0.072\times\frac{140}{155}=0.065(\Omega)$$

2. 用分析法求直流他励电动机起动电阻

用分析法，可以不必先绘制分级起动特性图而直接计算分级电阻的数值。

在图 3-23 中，当从特性 $n_1$ba 转换到特性 $n_1$dc 时，亦即从 b 点转换到 c 点时，由于切除电阻 R_1 进行很快，如忽略电感的影响，可假定 $n_b=n_c$，即电动势 $E_b=E_c$，这样在 b 点有

$$I_2=\frac{U-E_b}{R_1} \tag{3-90}$$

在 c 点有

$$I_1=\frac{U-E_c}{R_2} \tag{3-91}$$

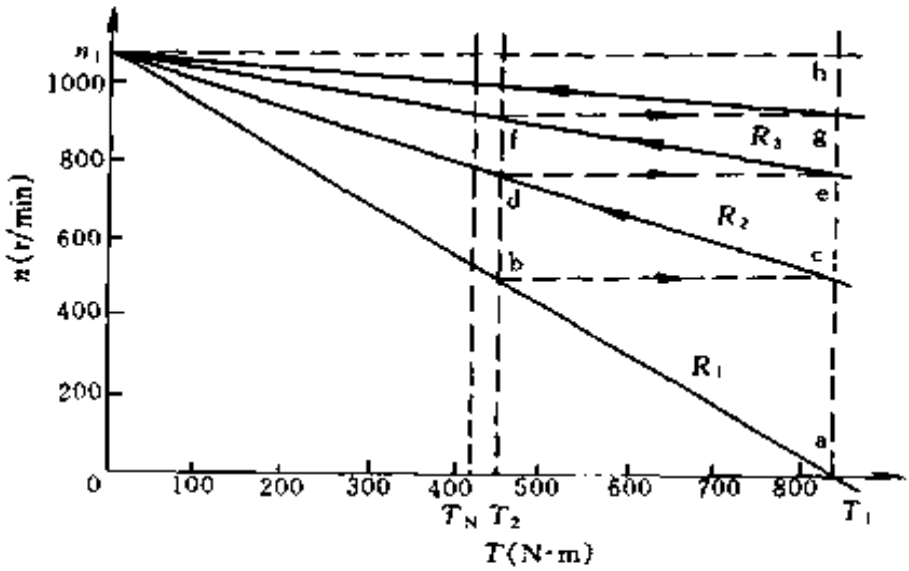


图 3-23　利用图解法求起动电阻

$E_b = E_c$，式（3-90）、（3-91）两式相除得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} \tag{3-92}$$

同样，当从 d 点转换到 e 点时，得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_3} \tag{3-93}$$

当从 f 点转换到 g 点时，得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_3}{R_a} \tag{3-94}$$

令

$$\frac{I_1}{I_2} = \lambda$$

或

$$\frac{T_1}{T_2} = \lambda$$

λ 称为起动电流比，或起动转矩比，则

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2}{R_3} = \frac{R_3}{R_a} = \lambda$$

$$\frac{R_1}{R_a} = \lambda^3$$

如属普遍情况，起动时为 m 级，则有

$$\frac{R_1}{R_a}=\lambda^m$$

$$\lambda=\sqrt[m]{\frac{R_1}{R_a}} \tag{3-95}$$

如给定 λ，需求 m，可将 $\lambda=\sqrt[m]{R_1/R_a}$取对数

$$\lg\lambda=\frac{1}{m}\lg\frac{R_1}{R_a}$$

$$m=\frac{\lg\frac{R_1}{R_a}}{\lg\lambda} \tag{3-96}$$

知道 λ，则有

$$\left.\begin{aligned}R_m&=\lambda R_a\\R_{m-1}&=\lambda R_m\\&\cdots\cdots\\R_2&=\lambda R_3\\R_1&=\lambda R_2\end{aligned}\right\} \tag{3-97}$$

每级的分段电阻值为

$$\left.\begin{aligned}RA_m&=R_m-R_a\\&\cdots\cdots\\RA_2&=R_2-R_3\\RA_1&=R_1-R_2\end{aligned}\right\} \tag{3-98}$$

用分析法计算起动电阻的步骤

（1）由电动机的铭牌数据，算出电枢电阻 R_a。

（2）依电动机容量和工艺要求选定起动级数 m 和最大起动电流 I_1，算出最大起动电阻 R_1（$R_1=U_N/I_1$），由 R_1、R_a算出起动电流比 λ，再由 $I_1/I_2=\lambda$ 确定切换电流

I_2（$I_2=I_1/\lambda$）。

或者选定最大电流 I_1 和切换电流 I_2，算出 λ（$\lambda=I_1/I_2$）和 R_t（$R_1=U_N/I_1$），再由式（3-96）计算 m，如计算出的 m 不是整数，应选取邻近的较大整数，然后用此 m 代入式（3-95）中，修改 λ 和 I_2 值。

（3）由计算出的 λ 值算出在各段起动特性上对应的电枢回路总电阻 R_1、R_2、R_3、…、R_m。

（4）由电枢回路总电阻 R_1、R_2、R_3、…、R_m 算出各段起动电阻 RA_1、RA_2、RA_3、…、RA_m。

例 3-27　上例 Z2 型直流电动机，用分析法求 3 级起动时各级起动电阻是多少？

解　（1）上例中已计算出 $R_a=0.072\Omega$

（2）取最大起动电流 I_1

$$I_1=2I_N=2\times211=422\ (A)$$

（3）计算最大起动电阻 R_1

$$R_1=\frac{U_N}{I_1}=\frac{220}{422}=0.521\ (\Omega)$$

（4）求 λ 和 I_2

已知起动级数 $m=3$

$$\lambda=\sqrt[m]{\frac{R_1}{R_a}}=\sqrt[3]{\frac{0.521}{0.072}}=1.934$$

$$I_2=\frac{I_1}{\lambda}=\frac{422}{1.934}=218(A)$$

（5）计算各级起动特性上对应的总电阻

$$R_3=\lambda R_a=1.934\times0.072=0.1392\ (\Omega)$$

$$R_2=\lambda R_3=1.934\times0.1392=0.2692\ (\Omega)$$

$$R_1=\lambda R_2=1.934\times0.2692=0.5206\ (\Omega)$$

（6）计算各级起动电阻

$$RA_3 = R_3 - R_a = 0.1392 - 0.072 = 0.0672\ (\Omega)$$

$$RA_2 = R_2 - R_3 = 0.2692 - 0.1392 = 0.13\ (\Omega)$$

$$RA_1 = R_1 - R_2 = 0.5206 - 0.2692 = 0.2514\ (\Omega)$$

（二）调速电阻的计算

大量的生产机械（如各种机床、轧钢机、造纸机、纺织机械等）要求在不同情况下，以不同的速度工作，最简单的调速方法，就是在直流电动机电枢电路内串入不同的调速电阻（图 3-24），即可得到一组机械特性曲线（图 3-25）。电枢电路内串入的调速电阻愈大，其转速愈低，用这种调速方法，调速范围不大（在低速时，机械特性变软），是一种有级调速，唯一的优点是控制设备不复杂。

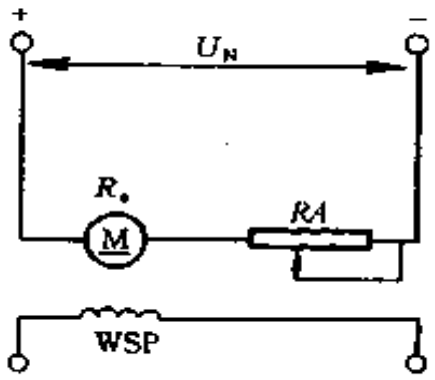


图 3-24　直流他励电动机电枢电路串联电阻调速电路图

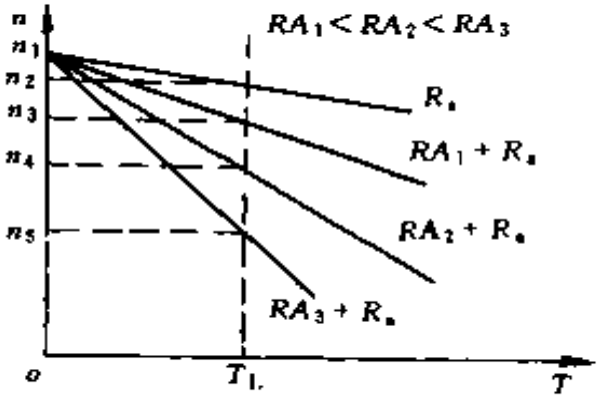


图 3-25　直流他励电动机电枢电路串联电阻调速的机械特性

在不同转速下，串入的调速电阻为

$$RA = (R_N - R_a)\left(1 - \frac{n}{n_N}\right) \tag{3-99}$$

式中　RA——串入的调速电阻，Ω；

R_N——电动机额定电阻，Ω；

R_a——电动机电枢内阻，Ω；

n——电动机新的运行速度，r/min；

n_N——电动机额定转速，r/min。

例 3-28　ZD2 型 100kW 直流他励电动机，已知额定电压 $U_N=220V$，额定电流 $I_N=514A$，额定转速 1200r/min，电枢内阻 $R_a=0.044\Omega$，这台电动机带动恒转矩负载运行，现用串联电阻方法调至 800r/min 及 500r/min 的转速运行，问在电路内各应串入多大电阻？

解　(1) 求额定电阻

$$R_N=\frac{U_N}{I_N}=\frac{220}{514}=0.428\ (\Omega)$$

(2) 在 $n_1=800r/min$ 转速运行时，应串入电阻 RA_1

$$RA_1=(R_N-R_a)\left(1-\frac{n_1}{n_N}\right)$$

$$=(0.428-0.044)\times\left(1-\frac{800}{1200}\right)$$

$$=0.384\times0.333=0.128(\Omega)$$

(3) 在 $n_2=500r/min$ 转速运行时，应串入电阻 RA_2

$$RA_2=(R_N-R_a)\left(1-\frac{n_2}{n_N}\right)$$

$$=(0.428-0.044)\times\left(1-\frac{500}{1200}\right)$$

$$=0.384\times0.5833=0.224(\Omega)$$

（三）能耗制动电阻的计算

将电动机电枢从电源断开后，并联能耗制动电阻 RB，这时电动机依靠生产机械的动能或位能而做功，成为一台向 RB_d 供电的发电机运转（图 3-26），其机械特性如图 3-27 所示，制动电阻 RB_d 值越小，制动越迅速，其制动电阻

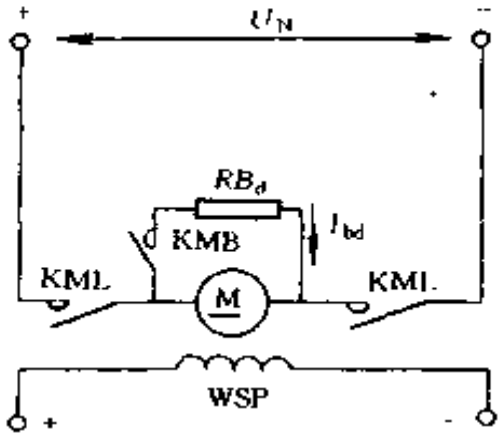


图 3-26 直流他励电动机能耗制动电路图

$$RB_d = \frac{\frac{n}{n_N}(U_N - I_N R_a)}{I_{bd}} - R_a \qquad (3\text{-}100)$$

式中 RB_d——能耗制动电阻，Ω；

n——电动机在实现能耗制动时的新转速，r/min；

n_N——电动机额定转速，r/min；

U_N——电动机电源电压，V；

R_a——电动机电枢总电阻，Ω；

I_{bd}——电动机电枢电路内串 RB_d 后的最大制动电流，A，一般 $I_{bd}<2I_N$。

若在额定运行点（即 $n=n_N$），$I_{bd}=2I_N$ 时实现能耗制动，则可认为

$$RB_d = \frac{U_N}{2I_N} - \frac{3}{2}R_a \qquad (3\text{-}101)$$

必须指出，在一定转速下进行能耗制动时，电枢必须串接电阻 RB_d，否则电枢电流将过大，在高速时甚至接近短路电流的数值。

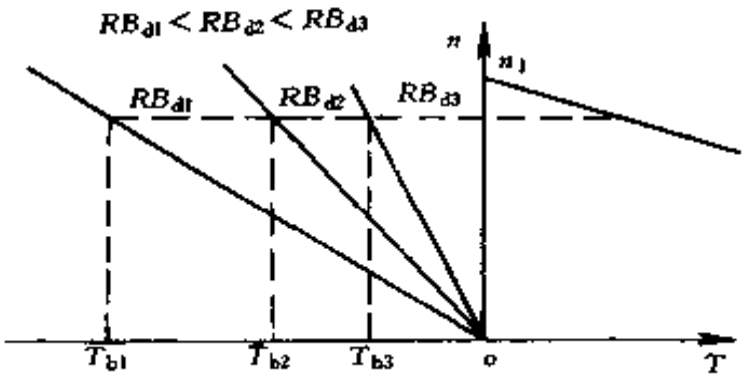


图 3-27　直流他励电动机能耗制动的机械特性

（四）反接制动电阻的计算

在直流电动机运转时，励磁不变，突然将电枢电源反接，由于反接后的电源电压极性和电动机的反电动势极性相同，在电枢回路中产生较大的反向制动电流 I_{bp}（图 3-28），特性如图 3-29 所示，为了限制反接制动电流，在电动机的电枢回路内必须串入反接制动电阻

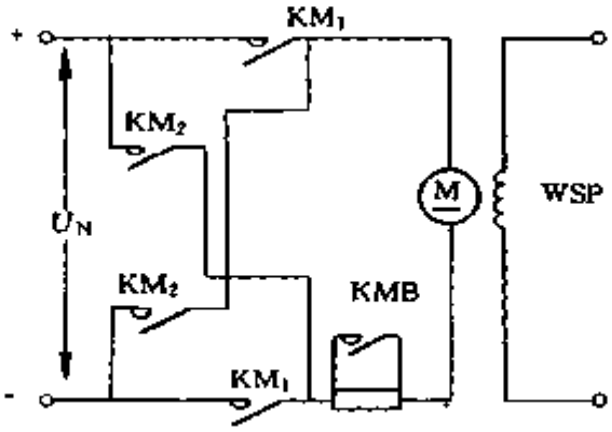


图 3-28　直流他励电动机反接制动电路图

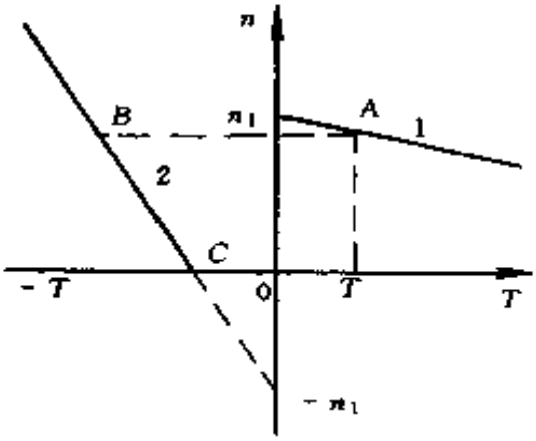


图 3-29　直流他励电动机反接制动的机械特性

$$RB_p = \frac{U_N + \frac{n}{n_N}(U_N - I_N R_a)}{I_{bp}} - R_a \qquad (3\text{-}102)$$

式中　RB_p——反接制动电阻，Ω；

U_N——电动机电源电压，V；

n——电动机在新转速时实现反接制动，r/min；

n_N——电动机额定转速，r/min；

R_a——电动机电枢总电阻，Ω；

I_{bp}——电动机电枢电路内串 RB_p 后的最大制动电流，A，一般 $I_{bp}<2I_N$。

若制动的目的是为了停车，必须在转速到达零以前使反接接触器断开，否则电动机将会反向起动。

若反接制动在额定点运行，即 $n=n_N$，且 $I_{bp}=2I_N$ 时，则反接制动电阻为

$$RB_p=\frac{U_N}{I_N}-\frac{3}{2}R_a \tag{3-103}$$

例 3-29　上例中的电动机进行能耗制动，设初始转速为额定转速，初始电流 $I_{bd}=2I_N$，求电枢电路中必须串联的外加电阻是多少？

解　已知 $U_N=220V$，$I_N=514A$，$R_a=0.044\Omega$，根据式（3-101）得

$$\begin{aligned}RB_d&=\frac{U_N}{2I_N}-\frac{3}{2}R_a\\&=\frac{220}{2\times514}-\frac{3}{2}\times0.044\\&=0.148(\Omega)\end{aligned}$$

三、直流串励电动机起动电阻计算

因为串励电动机机械特性不是直线，计算起动电阻时用图解法较为方便，其步骤如下：

1）根据已知数据作出固有特性，$n=f(I)$ 曲线。

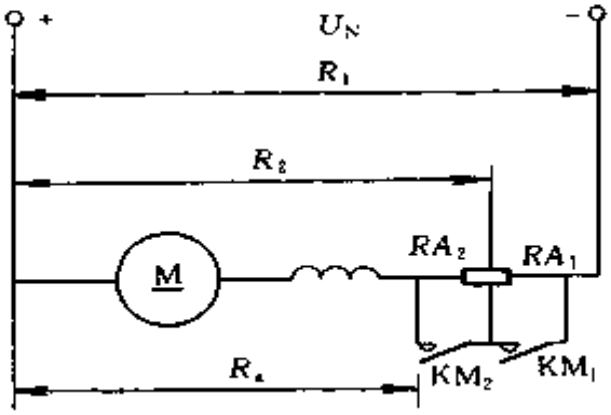


图 3-30　直流串励电动机两级起动电路图

2）确定电枢最大电流 I_1（$2\sim2.5I_N$）和换接电流 I_2（$1.1\sim1.3I_N$）。

图 3-30 为串励电动机两级起动电阻接线图，图 3-31 为它的机械特性。

通过 I_1 点（a 点）作垂线交于固有特性曲线上的 e 点。

通过 I_2 点（g 点）作垂线交于固有特性曲线上的 f 点。

电动机串入全部起动电阻，起动加速到相应于 I_2 的 b 点转速，有

$$n_b = \frac{[U_N - I_2(R_a + R_s)]n_f}{U_N - I_2R_a} \tag{3-104}$$

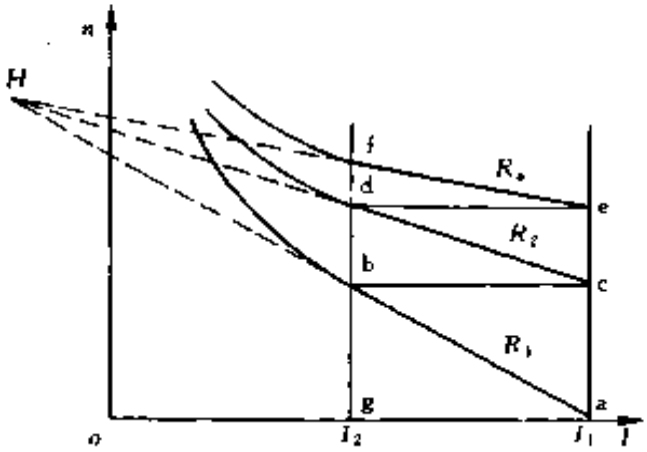


图 3-31　直流串励电动机两级起动的机械特性

（3）根据 n_b 可在 $I = I_2$ 垂线上定出 b 点。连接固有特性上的 ef 两点和电阻为 R_1 人为特性上 ab 两点，延长后相交于 H 点。

（4）通过 b 点作水平线与 ae 垂线相交于 c 点，连接 cH 与 bf 相交于 d 点，cdH 为 R_2 人为特性曲线，过 d 点作水平线，如果与 ac 垂线交在固有特性曲线的 e 点上（设两级起动），则所选电流适合，否则重新选择 I_1 或 I_2 数值，并重新作图，直到适合为止。

用作图法计算起动电阻的基本理论：在同一负载电流下，任意相邻两点的转速差与电枢电路电阻之差成正比。例如在同一电流 I_2 的情况下，相邻 bd 两点转速为

$$n_b = \frac{U_N - I_2R_1}{C_e\Phi_2} = \frac{U_N}{C_e\Phi_2} - \frac{I_2R_1}{C_e\Phi_2}$$

$$n_d = \frac{U_N - I_2R_2}{C_e\Phi_2} = \frac{U_N}{C_e\Phi_2} - \frac{I_2R_2}{C_e\Phi_2}$$

db 两点转速差

$$\Delta n_{db} = n_d - n_b = \frac{I_2R_1}{C_e\Phi_2} - \frac{I_2R_2}{C_e\Phi_2}$$

$$= \frac{I_2}{C_e\Phi_2}(R_1 - R_2) = C_1RA_1 \qquad (3\text{-}105)$$

$$\frac{I_2}{C_e\Phi_2} = C_1 = \text{const}$$

$$R_1 - R_2 = RA_1$$

所以 $$(n_d - n_b) \propto (R_1 - R_2)$$

同理可求得

$$\Delta n_{fd} = C_1(R_2 - R_a) = C_1RA_2$$

如取在同一电流 I_1 的情况下，同样可求得

$$\Delta n_{ca} = \frac{I_1}{C_e\Phi}(R_1 - R_2) = C_2RA_1$$

$$\Delta n_{ec} = C_2RA_2$$

由上述关系可得

$$\frac{\Delta n_{ca}}{\Delta n_{db}} = \frac{\Delta n_{ec}}{\Delta n_{fd}} = \frac{C_2}{C_1} = \text{const} \tag{3-106}$$

由此证明直线 ab、cd、ef 的延长线共同交于 H 点。

利用上述关系式可以从图上求得各级起动电阻。

整个起动电阻

$$R_s = R_1 - R_a = RA_1 + RA_2$$

$$\Delta n_{ea} = \Delta n_{ca} + \Delta n_{ec} = C_2(RA_1 + RA_2) = C_2 R_s$$

$$C_2 = \frac{\Delta n_{ea}}{R_s}$$

$$\Delta n_{ca} = C_2 RA_1, RA_1 = \frac{\Delta n_{ca}}{C_2} = \frac{\Delta n_{ca}}{\Delta n_{ea}} R_s$$

$$\Delta n_{ec} = C_2 RA_2, RA_2 = \frac{\Delta n_{ec}}{C_2} = \frac{\Delta n_{ec}}{\Delta n_{ea}} R_s$$

例 3-30 一台直流串励电动机的额定数据是：$P_N = 17\text{kW}$，$I_N = 92\text{A}$，$U_N = 220\text{V}$，$n_N = 630\text{r/min}$。试点绘其固有特性曲线，并计算起动电阻。起动电阻以 2 段进行，接线图如图 3-30 所示。

解 根据图 3-32 通用特性曲线 1 作电动机的固有特性，如图 3-33 所示。取自通用特性曲线 1 的数据见表 3-27。

表 3-27 **通用曲线 1 数据表**

I^*	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
n^*	1.7	1.35	1.18	1.09	1	0.88	0.8	0.75	0.7	0.68

电动机的电枢内阻按下列经验公式求取

$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)\frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

$$= \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)(1 - \eta_N)\frac{U_N}{I_N} \qquad (3\text{-}107)$$

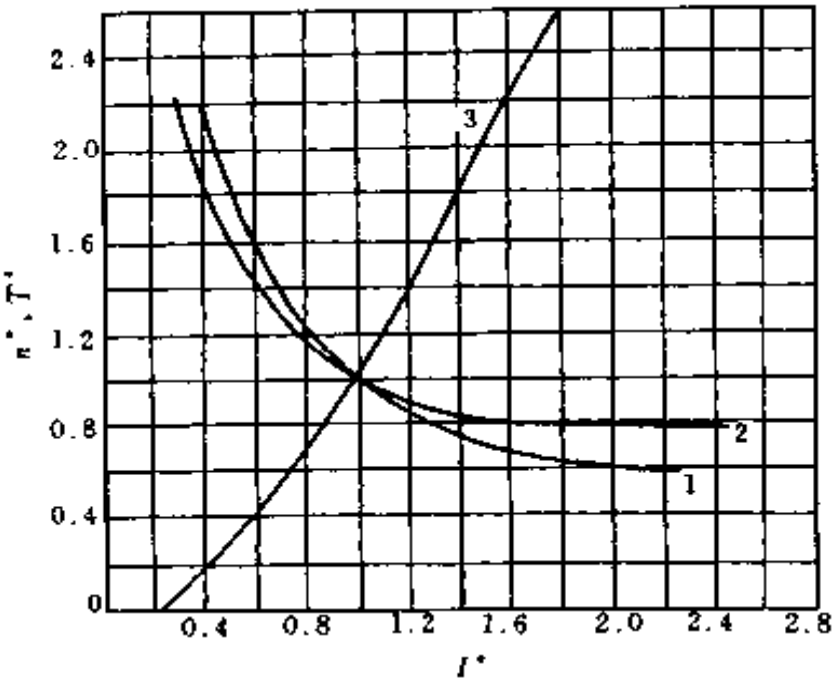


图 3-32　ZZ 系列串励电动机通用特性

1—$n=f(I)$，对应机座号 1～4；2—$n=f(I)$ 对应机座号 5～8；3—$T=f(I)$

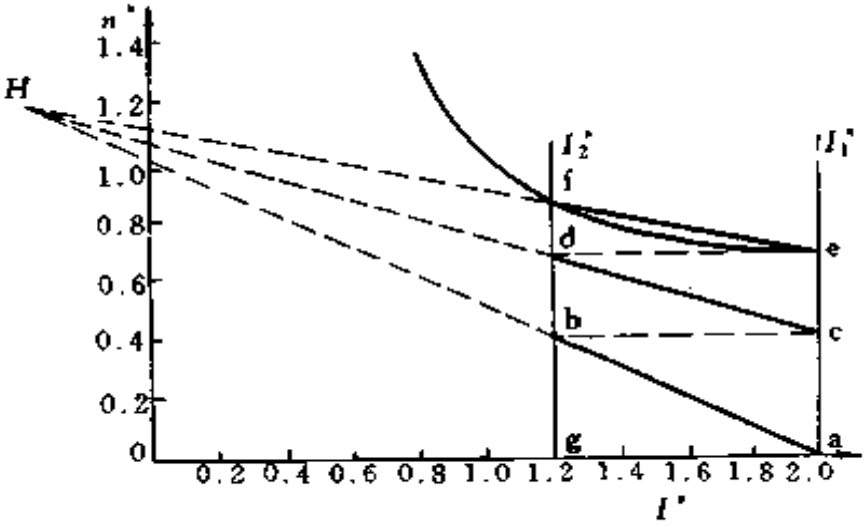


图 3-33　串励电动机起动电阻计算的图解

电动机的额定效率

$$\eta_N = \frac{P_N \times 10^3}{U_N I_N} = \frac{17 \times 10^3}{220 \times 92} = 0.84$$

电动机的电枢内阻

$$R_a = 0.75(1 - \eta_N)\frac{U_N}{I_N}$$

$$= 0.75(1 - 0.84) \times \frac{220}{92} = 0.287(\Omega)$$

取 $I_1 = 2I_N = 2 \times 92 = 184(A)$

$I_2 = 1.2I_N = 1.2 \times 92 = 110.4(A)$

所以 $R_1 = \frac{U_N}{I_1} = \frac{220}{184} = 1.196(\Omega)$

$R_s = R_1 - R_a = 1.196 - 0.287 = 0.909(\Omega)$

从固有特性曲线上查出交于 I_2 点的转速

$$n_f^* = 0.88$$

即 $n_f = 0.88 \times 630 = 554.4$ (r/min)

R_1 人为特性交于 I_2 点的转速

$$n_b = \frac{U_N - I_2 R_1}{U_N - I_2 R_a} n_f = \frac{220 - 110.4 \times 1.196}{220 - 110.4 \times 0.287} \times 554.4$$

$$= 259(r/min)$$

连 ab 和固有特性曲线 ef 交于 H 点，过 b 点作水平线交于 I_1 上（c 点），连 cH 得 R_2 人为特性曲线，并交于 I_2 上（d 点），过 d 点作水平线恰好交于固有特性曲线与 I_1 之交点（e 点），所选电流合适。

作图结果如图 3-33 所示，各级起动电阻为

$$RA_1 = \frac{ca}{ea} R_s = \frac{0.40}{0.68} \times 0.909 = 0.5347 \ (\Omega)$$

$$RA_2=\frac{ec}{ea}R_s=\frac{0.28}{0.68}\times 0.909=0.3743\ (\Omega)$$

起动电阻总值为

$$R_s=RA_1+RA_2=0.5347+0.3743=0.909\ (\Omega)$$

第四节　电工仪表使用中的计算

一、电表量程的扩大

（一）分流器

用磁电系电流表测量电流时，可以直接测量的电流范围，一般在几十 μA 到几十 mA 之间，如果要用它来测量较大电流时，就必须扩大量程。

磁电系电流表是采用分流的方法来扩大量限的。

1. 分流电阻

在一般情况下、当被测电流在 50A 以下时，是用在电流表内部测量机构上并联分流电阻 R_{sc}的方法来实现分流，以达到扩大量限的目的。电路如图 3-34 所示。

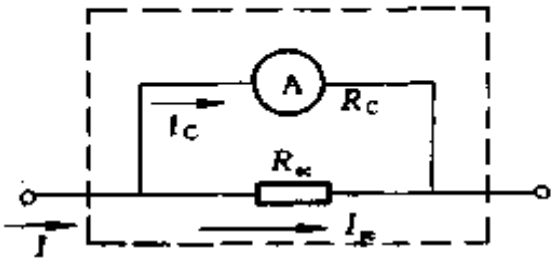


图 3-34　带分流电阻的电路

R_c—测量机构内阻 Ω

因
$$I_cR_c=\frac{R_{sc}R_c}{R_{sc}+R_c}I$$

故
$$I_c=\frac{R_{sc}}{R_{sc}+R_c}I \qquad (3\text{-}108)$$

如 R_{sc}，R_c 为常数，则 I_c 和 I 之间存在一定的比例关系，如果在电流表刻度时，考虑到上述关系，便可直接读出被测电流 I。

决定分流电阻 R_{sc}的方法如下：

设扩大量程的倍数为 n

因 $I = nI_c$ 代入式（3-108）中可得

$$\frac{R_{sc}}{R_{sc}+R_c}=\frac{1}{n}$$

故

$$R_{sc}=\frac{R_c}{n-1} \tag{3-109}$$

这就是说，将磁电系测量机构的量限扩大成 n 倍的电流表时，分流电阻应为磁电系测量机构内阻 R_c 的 $1/(n-1)$。

例 3-31 有一个磁电系测量机构，其满刻度偏转电流 $I_c=500\mu A$，内阻 $R_c=200\Omega$，要把它制成量限为 1A 的电流表，应该并联一个多大的分流电阻？

解 首先确定要扩大量限的倍数

因 $1A=10^6\mu A$

故 $n=10^6/500=2000$

将 $n=2000$ 代入式（3-109）中得分流电阻

$$R_{sc}=\frac{200}{2000-1}=0.1\ (\Omega)$$

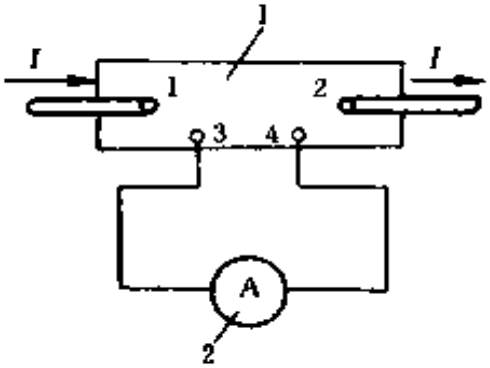


图 3-35 外附分流器电路

1—分流器；2—测量机构

2. 外附分流器

当被测电流在 50A 以上时，由于分流电阻发热严重，影响测量机构的正常工作，而且体积也很大，一般将分流电阻做成单独的装置，称为“外附分流器”，它与电表的连接如图 3-35 所示。

1，2端钮，叫“电流接头”，串接于被测大电流电路中。3，4端钮，叫“电位接头”，磁电系测量机构和它并联。

分流器上一般不标明电阻数值，而是标明“额定电流”和“额定电压”值，额定电压一般都统一规定为75mV或45mV，当测量机构的电压量限（即电流量限与内阻 R_c 的乘积）也等于这一额定电压时，加上分流器之后，它的电流量限就等于分流器的额定电流值。

例3-32 一只100A的直流电流表，注明了需配用100A，75mV的分流器，如果在实际使用时，没有100A，75mV的分流器，只有500A，75mV的分流器，当电流表读数为20A时，问实际电流值是多少？

解 因 500/100=5

故使用了500A，75mV分流器，量程扩大了5倍，故实际电流值为

$$5\times20=100\ (\mathrm{A})$$

例3-33 一只200A的直流电流表，注明了需配用200A，75mV分流器，如果实际使用时，只有200A，45mV分流器可用，当配上这只分流器，电流表读数为100A的时候，问实际电流是多少？

解 当使用200A，45mV分流器时，在分流器满载200A的条件下，分流器压降应为45mV。此电压接到表头为75mV的毫伏计上去，指针应在

$$\frac{45}{75}\times200=120\ (\mathrm{A})$$

现已知电流表读数为100A，分流器压降应为

$$\frac{100}{200}\times75=37.5\ (\mathrm{mV})$$

设实际电流为 I

因 $$200:45=I:37.5$$

故 $$I=\frac{200\times 37.5}{45}=166.7\ (\mathrm{A})$$

（二）附加电阻

1．电路分析

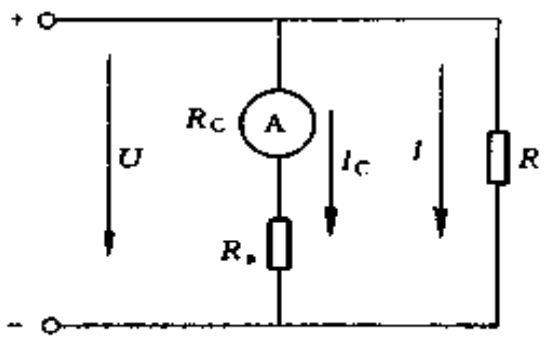


图 3-36　带附加电阻电路

用磁电系电压表测量较高电压时，可以用在测量机构上串联一个电阻 R_a 的办法来达到，R_a 叫附加电阻，如图3-36所示。

有了 R_a，通过测量机构的电流 I_c 为

$$I_c=\frac{U}{I_a+R_c}$$

只要附加电阻 R_a 不变，I_c 与被测点间的电压 U 成正比。决定附加电阻 R_a 的方法如下：

设扩大量程的倍数为 m

因 $$(R_a+R_c)I_c=U=mR_cI_c$$

故 $$R_a=(m-1)R_c \tag{3-110}$$

例 3-34　一个满刻度偏转电流 $I_c=500\mu A$，内阻 $R_c=200\Omega$ 的磁电系测量机构，要制成 30V 量程的电压表，应串联多大的附加电阻？

解　先决定扩大量程倍数 m

因测量机构满刻度偏转时的两端电压为

$$U_c=R_cI_c=200\times 500\times 10^{-6}=0.1\ (\mathrm{V})$$

故扩大倍数为

$$m = 30 \div 0.1 = 300$$

$$R_a = (m-1)R_c = (300-1) \times 200 = 59800(\Omega)$$

2. 电压表盘上“每伏多少欧”表示什么?

电压表盘上“每伏多少欧”是电压表的一个重要参数。它表示电压表中的测量机构在满量限时所允许通过的电流，并且作为计算附加电阻的依据。例如“1kΩ/V”表示测量机构中允许通过的最大电流是

$$I_c = \frac{1}{1000} = 0.001\ (\mathrm{A}) = 1\ (\mathrm{mA})$$

如果要把它的量限扩大到30V，那么电压表的总内阻应该是

$$R_V = 1000 \times 30 = 30000\ (\Omega)$$

如测量机构本身的电阻 $R_c = 50\Omega$，则应串联的附加电阻 $R_a = 30000 - 50 = 29950\ (\Omega)$。

二、有功电度数的计算

能量的测量，可用电度表来实现。测量有功电能，可用有功电能表；测量无功电能，可用无功电能表。这两种电能表中，应用较为普遍的是有功电能表，下面就各种不同的情况，分别介绍有功电度数的计算方法。

1. 电能表不经互感器直接接入线路，可以从电能表直接读得实际电度数

2. 经互感器接入时电度数的计算

(1) 电度表与电流互感器配合使用时，本月实际用电数按下式计算

实际用电度数=(本月读数-上月读数)×变流比 (3-111)

(2) 电度表盘上注有倍率（即表盘上注有“×”号或“乘倍率”10、20、30、40、……）时，本月实际用电度数

按下式计算

实际用电度数＝(本用读数－上月读数)×倍率 (3-112)

(3) 电能表与电压、电流互感器配合使用时，本月实际用电度数按下式计算

实际用电度数＝(本月读数－上月读数)

×变压比×变流比 (3-113)

(4) 电能表盘上注有倍率与电压、电流互感器配合使用时，本月实际用电度数按下式计算

实际用电度数＝(本月读数－上月读数)

×变压比×变流比×倍率 (3-114)

(5) 有的电能表上注明电流比值和电压比值，这是成套表计，如注明变流比为 100/5A，变压比为 10000/100V，就是指电度表所配备的电流互感器应为 100/5A，电压互感器应为 10000/100V，这样成套配用的电度表的指示数就是真实数，就不再乘变流比、变压比了。

(6) 如果电能表盘上所标注的变比与电压、电流互感器的变比不符时，本月实际用电度数按下式计算

$$\text{实际用电度数} = (\text{本月读数} - \text{上月读数}) \times \frac{\text{所配互感器变压比} \times \text{变流比} \times \text{倍率}}{\text{表盘上标注的变压比} \times \text{变流比}} \quad (3\text{-}115)$$

例 3-35 某车间使用的电度表，表盘上注明 5A，380V，当接到变流比为 100/5A 的电流互感器上使用时，上月读数是 1535.6，本月读数是 1645.6，求本月用电度数是多少？

解 用电度数＝$(1645.6-1535.6)\times\frac{100}{5}$

$=110\times20=2200$（度）

例 3-36 某工厂使用的计量总用电量的电度表，表盘

上注明 5A，100V，接到变流比为 100/5A 的电流互感器和变压比为 10000/100V 的电压互感器上使用，上月读数是 325.5，本月读数是 379.9，求本月实际用电度数是多少？

解 实际用电度数 $=(379.9-325.5)\times\frac{100}{5}\times\frac{10000}{100}$

$=54.4\times100\times2=108800$（度）

例 3-37 某变电所用一块三相三线制电度表计量用电量，表盘上注明电压为 100V，电流为 5A，乘倍率 10，实际接到变流比为 200/5A 的电流互感器和变压比为 10000/100V 的电压互感器上使用，上月读数是 355.3，本月读数是 405.3，求本月实际用电度数是多少？

解 实际用电度数 $=(405.3-355.3)$

$\times\frac{10000}{100}\times\frac{200}{5}\times10$

$=50\times100\times40\times10=2\times10^6$（度）

例 3-38 某单位用一块三相三线制电度表计量总用电量，表盘上注明配用电压互感器为 10000/100V，电流互感器为 300/5A，乘倍率 100，实际配用的电压互感器为 6000/100V，电流互感器为 100/5A，上月读数是 253.5，本月读数是 4535.8，求本月实际用电量是多少？

解 实际用电量 $=(4535.8-253.5)$

$$\times\frac{\frac{6000}{100}\times\frac{100}{5}\times100}{\frac{10000}{100}\times\frac{300}{5}}$$

$=4282.3\times20=85646$（度）

三、电气测量指示仪表的误差及准确度

（一）误差的几种表达形式

1. 绝对误差

测量值与被测量的实际值之间的差值称为测量的绝对误差。可用下式表示

$$\Delta = A_x - A_0 \tag{3-116}$$

式中 Δ——绝对误差；

A_x——测量结果（即仪表的指示值）；

A_0——被测量的实际值。

绝对误差的单位与被测量的单位相同。

2．相对误差

绝对误差 Δ 与被测量的实际值 A_0 之间的比值的百分数，叫测量的相对误差，用 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \tag{3-117}$$

在相对误差的实际计算中，有时难于求得被测量的实际值，这时也可以用测量结果 A_x 代替实际值 A_0，而近似求得

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \tag{3-118}$$

由于相对误差给出了测量误差的清晰概念，便于对不同测量结果的测量误差进行比较，所以它是误差计算最常用的一种表示方法。

3．引用误差

绝对误差 Δ 与仪表测量上限 A_m 的比值的百分数，叫引用误差，用 γ_m 表示，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \tag{3-119}$$

（二）仪表准确度

当仪表在规定条件（如位置正常，周围温度为 20℃，

几乎没有外界磁场的影响等）工作时，在它的标度尺的工作部分（指标度尺上仪表指示值误差保证在允许误差以内部分）的全部分度线上，可能出现的最大基本误差的百分数值，称为仪表的准确度等级。

1. 仪表基本误差

通常仪表基本误差有以下四种表示方法

（1）单向标度尺的仪表，以标度尺工作部分上量限（指在标度尺工作部分内仪表所能测量的最大值）的百分数表示。

（2）双向标度尺的仪表，以标度尺工作部分两个上量限绝对值和的百分数表示。

（3）无零位标度尺的仪表，指针式仪表以标度尺工作部分上下量限差的百分数表示，振簧式仪表以指示值的百分数表示。

（4）标度尺特性为对数的、双曲线的或指数为 3 及 3 以上级数的仪表，以标度尺工作部分长度的百分数表示。

上述各种仪表中，单向标度尺的仪表是最常使用的指示仪表，它的准确度是以标度尺工作部分量限的百分数表示的，若以 K 表示它的准确度等级，则有

$$\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \qquad (3\text{-}120)$$

式中 Δ_m——以绝对误差表示的最大基本误差；

A_m——测量上限。

因此可以说，仪表的准确度等级的百分数也就是表示该仪表在规定的正常工作条件下使用时所允许的最大引用误差的数值。

仪表的准确度等级符号都在仪表的标度盘上表示出来。

2. 准确度等级分类

目前我国生产的指示仪表按准确度等级分为 7 级，即 0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0 级。我国旧标准中准确度的最后一级为 4.0 级，所以目前我国产品目录中 5.0 级和 4.0 级都有。此外，由于仪表制造工业的不断发展，已出现准确度为 0.05 级的指示仪表。

各级仪表的基本误差不应超出表 3-28 中所规定的值。

表 3-28　　各级仪表的基本误差

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差（%）	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

3. 应用仪表准确度估计测量误差

设仪表的准确度等级为 K，由式（3-120）可知，仪表在规定条件下进行测量时，测量结果中可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m \tag{3-121}$$

用该仪表测量时，若得到的读数为 A_m，则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{K\% \times A_x}{A_x} \times 100\% \tag{3-122}$$

例 3-39　用两个伏特表测量两个大小不同的电压，一个在测量 200V 时，绝对误差为 2V，另一个在测量 10V 时，绝对误差为 0.5V，问它们的相对误差分别为多少？哪一种表测量的准确度高一些？

解　相对误差为 γ

$$\gamma_1 = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$$

$$=\frac{2}{200}\times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_2 = \frac{0.5}{10}\times 100\% = 5\%$$

200V 的电压表虽然绝对误差比 10V 电压表大，但它的相对误差只 1%，比 10V 电压表的相对误差 5% 小，所以 200V 电压表测量的准确度高一些。

例 3-40 用准确度为 0.5 级、量限为 5A 的电流表，在规定条件下测量某一电流，读数为 2.5A，求测量结果的准确度（即求测量结果的相对误差）为多少？

解 最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = (\pm 0.005)\times 5 = \pm 0.025(A)$$

最大相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{A}\times 100\% = \frac{\pm 0.025}{2.5}\times 100\% = \pm 1\%$$

4. 根据工程实际要求，合理地选择仪表的准确度等级

仪表准确度越高，测量结果越可靠，但不应盲目追求仪表的准确度高，因为准确度越高，价格越贵，维修也较难。

通常准确度为 0.1 至 0.2 级的仪表用作标准表及作精密测量用；0.5 至 1.5 级的仪表用于实验室一般测量；1.0 至 5.0 级的仪表用于一般工业生产。

要充分发挥仪表准确度的作用，还必须根据被测量的大小，合理选用仪表量限，如选择不当，用量限比被测量数值大得多的仪表去测量较小的量时，其测量误差将会很大。现用下例来说明。

例 3-41 用准确度为 1.5 级，量限为 30V 的电压表，测量 20V 的直流电压，问绝对误差和相对误差各为多少？

若采用准确度为0.5级，但量限为150V的电压表，问绝对误差和相对误差又如何？

解 （1）采用量限为30V电压表

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 1.5\% \times 30 = \pm 0.45\ (V)$$

测量20V电压时的相对误差

$$\gamma = \frac{\pm 0.45}{20} = \pm 0.0225 = \pm 2.25\%$$

（2）采用150V、0.5级电压表

$$\Delta_m = \pm K\% \times A_m = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75\ (V)$$

测量20V电压时的相对误差

$$\gamma = \frac{\pm 0.75}{20} = \pm 0.0375 = \pm 3.75\%$$

由计算结果可以看出，用量限为150V的0.5级电压表测量20V直流电压比用量限为30V的1.5级电压表测量误差更大些。如用150V的0.5级表去测量5V电压，则测量的相对误差还要更大些，因为这时

$$\gamma = \frac{\pm 0.75}{5} = \pm 15\%$$

因此，应根据被测量大小选择量程合适的仪表，一般应使被测量大小为仪表测量上限的1/2～2/3以上。

例3-42 用标准表法校验电度表，它们的电度表常数都是每千瓦小时2500r，若被校表转12r（n_c），标准表转11.8r（n_s），被校表准确度要求为2级，问是否符合要求？

解 因电度表的准确度（即基本误差）用相对误差表示，故应求出被校表的相对误差γ。

因
$$\gamma = \frac{n_c - n_s}{n_s} \times 100\% \tag{3-123}$$

所以 $$\gamma=\frac{12-11.8}{11.8}\times 100\%$$

$$\approx 0.017\times 100\% = 1.7\%$$

$\gamma<2\%$，误差未超过规定，符合要求。

例 3-43 若被校表常数为每千瓦小时 2500r，而标准表常数为每千瓦小时 1500r，当被校表转 20r 时，标准表转 11.5r，求被校表误差为多少?

解 首先应将被校表转数折算成和标准表常数相同的转数，设折算后的被校表转数为 n'_c

因 $$n'_c = n_c\times\frac{N_s}{N_c} \tag{3-124}$$

式中 N_s——标准表常数；

N_c——被校表常数。

所以 $$n'_c=20\times\frac{1500}{2500}=12\ (r)$$

被校表误差为

$$\gamma=\frac{12-11.5}{11.5}\times 100\%=0.043\times 100\%=4.3\%$$

若被校表为 2 级，即相对误差为 2%。现 $\gamma=4.3\%$，误差已超过规定，应送交有关方面进行调整。

第四章

电力电子技术计算

第一节　整流电路计算

一、单相整流电路

（一）单相半波电阻负载整流电路

单相半波电阻负载整流电路是由电源 u_1，变压器 T，整流元件 V 和负载 R_L 组成，电路如图 4-1 所示。电源 $u_1=\sqrt{2}U_1\sin\omega t$ 是一个按正弦规律变化的电压，U_1 为电源电压有效值。u_2 是变压器二次电压，也按正弦规律变化，$u_2=\sqrt{2}U_2\sin\omega t$，$U_2$ 为变压器二次电压的有效值。

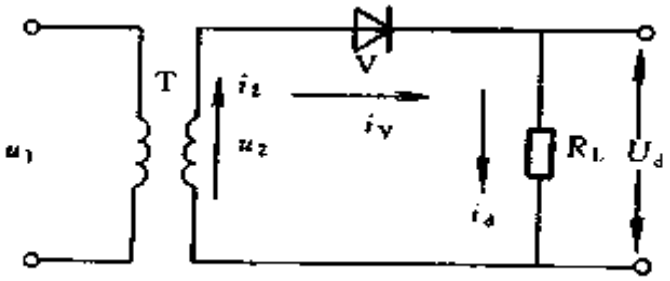


图 4-1　单相半波电阻负载整流电路原理图

1. 单相半波整流电路工作原理

在 0～π 的时间内，变压器二次电压，使二极管 V 受正向电压而导通，负载电压 u_d 与 u_2 几乎一样。在 π～2π 的时间内，二极管 V 受反向电压不导通，负载上无电压，电

源电压全部加在二极管上。由此可见，二极管 V 只在电源电压的正半周导通，负载上得到单方向半波电压，各部分波形如图 4-2 所示。

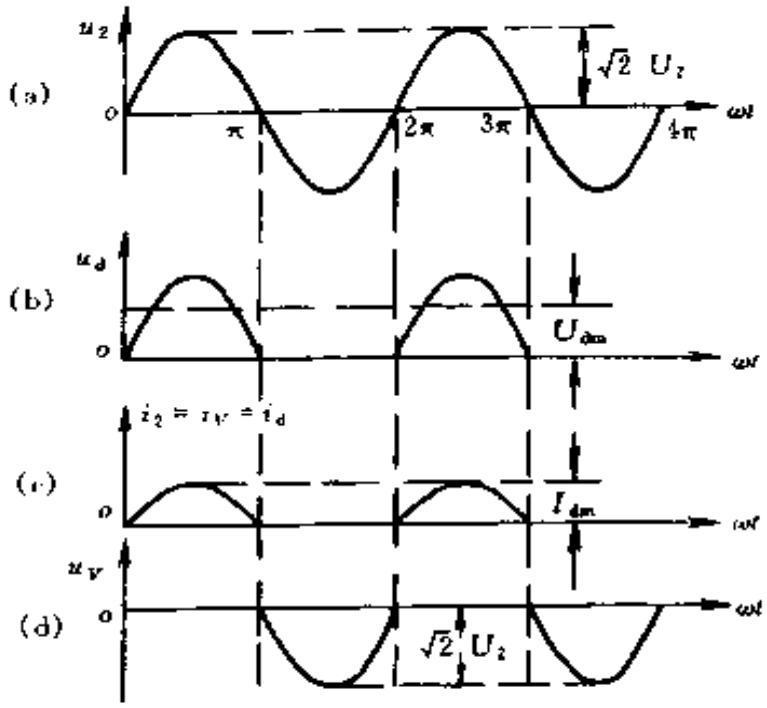


图 4-2　单相半波电阻负载整流电路波形图

(a) $u_2 = f(\omega t)$；(b) $u_d = f(\omega t)$；

(c) $i_2 = f(\omega t)$；(d) $u_V = f(\omega t)$

2. 负载上直流电压和直流电流的计算

(1) 负载上直流电压 U_d 的数值，即半波电压在整个周期内的平均值，利用高等数学知识，对 u_d 曲线在一个周期内求积分可得出

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{2\pi}U_2 = 0.45U_2 \tag{4-1}$$

在图 4-2b 中，虚线表示直流电压 U_d 的大小。

在工程实用上，往往根据负载电压 U_d 的大小来求变压

器二次绕组的电压，因此式（4-1）可写成

$$U_2 = \frac{1}{0.45}U_d = 2.22U_d \tag{4-2}$$

（2）流过负载 R_L 的直流电流为

$$I_d = \frac{U_d}{R_L} = 0.45\frac{U_2}{R_L} \tag{4-3}$$

3. 整流二极管的选择

根据该电路中流过整流二极管平均电流和最高反向工作电压（即加在整流二极管上的反向电压最大值）来选择整流元件。

流过整流二极管的平均电流 I_V 与流过负载的直流电流 I_d 相等，即

$$I_V = I_d = 0.45\frac{U_2}{R_L} \tag{4-4}$$

整流元件承受的最大反向电压 U_{vrm}就是变压器二次电压 u_2 的最大值，即

$$U_{vrm} = \sqrt{2}U_2 \tag{4-5}$$

4. 整流变压器容量的确定

$$U_2 = 2.22U_d$$

$$I_2 = 1.57I_d \tag{4-6}$$

式中　I_2——变压器二次电流有效值。

$$P_2 = U_2I_2 = 2.22 \times 1.57U_dI_d$$

$$= 3.49U_dI_d \tag{4-7}$$

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2}U_2 \tag{4-8}$$

$$I_1 = 1.21\frac{N_2}{N_1}I_d \tag{4-9}$$

$$P_1 = U_1I_1 = \frac{N_1}{N_2} \times 2.22U_d \times 1.21\frac{N_2}{N_1}I_d$$

$$= 2.22 \times 1.21 U_d I_d = 2.69 U_d I_d \tag{4-10}$$

设计容量

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{2.69 + 3.49}{2} U_d I_d$$

$$= 3.09 U_d I_d \tag{4-11}$$

（二）单相全波电阻负载整流电路

单相全波整流电路，实际上就是两个半波整流电路的组合，它是由二次绕组具有中心抽头的电源变压器 T 和两个整流元件 V_1 和 V_2 组成，变压器二次绕组引出的电压 u_{2a}、u_{2b}大小相等，方向相反，即

$$u_{2a} = -u_{2b} = \sqrt{2} U_2 \sin\omega t$$

电路如图 4-3 所示。

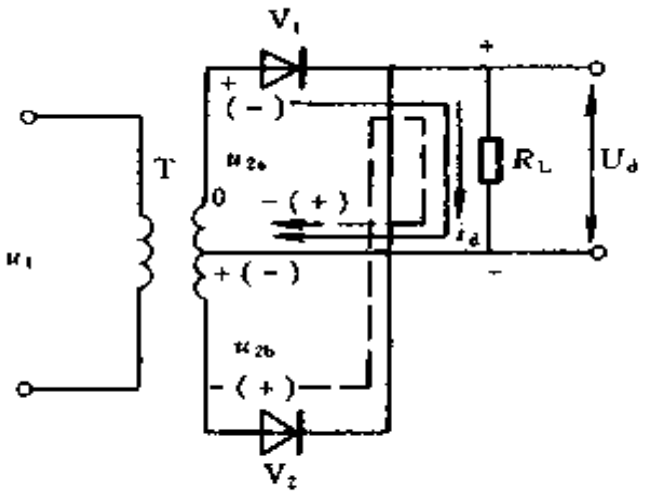


图 4-3　单相全波电阻负载整流电路原理图

1. 工作原理

0～π 时间内，u_{2a}为正，u_{2a}经过 V_1、R_L 和变压器中心抽头 0 构成通电回路。因 V_2 受反向电压截止，没有电流流过，如图中实线所示。π～2π 时间内，u_{2b}为正，u_{2b}经过 V_2、R_L 和变压器中心抽头 0 构成通电回路。V_1 因受反向电

压截止，没有电流流过，如图中虚线所示。由此可见，在正弦交流电的整个周期内，两个二极管轮流导电，负载上均有单向电流流过，故叫全波整流电路，各部分波形如图 4-4 所示。

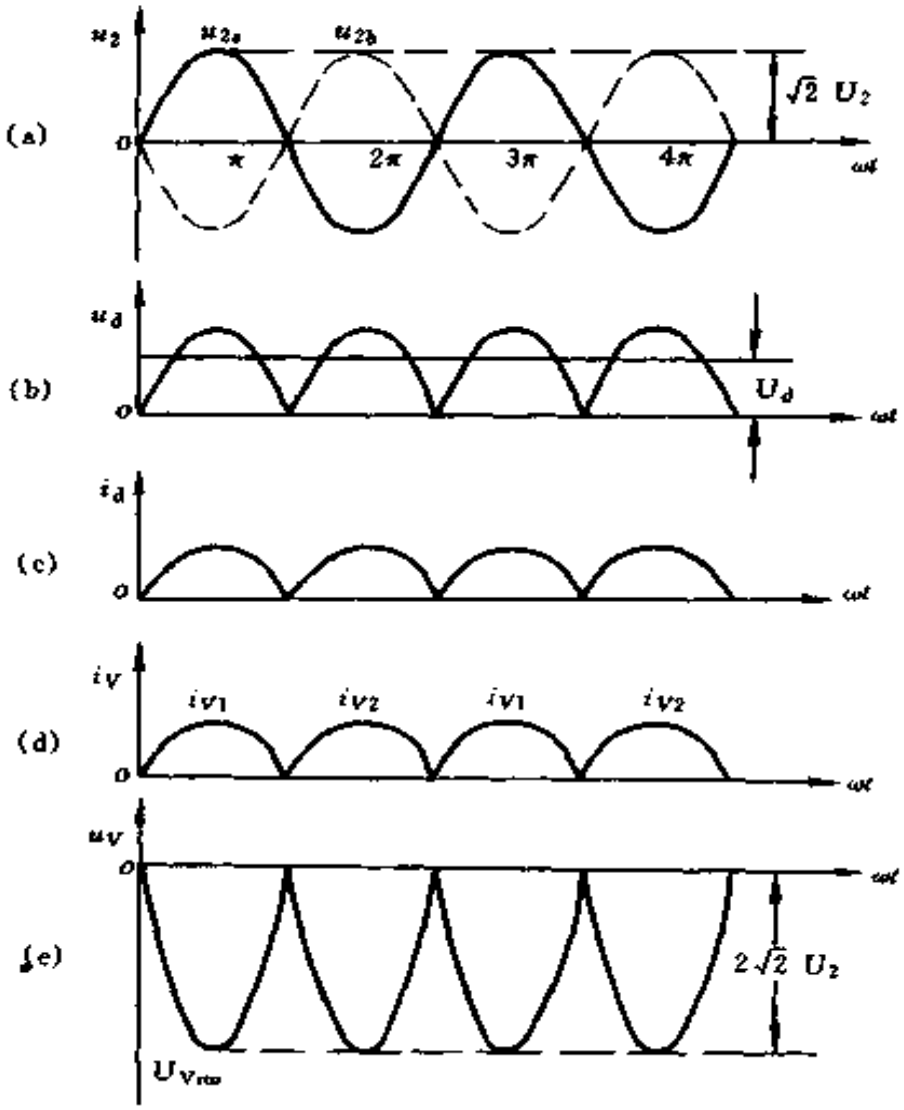


图 4-4　单相全波电阻负载整流电路波形图

(a) $u_2=f(\omega t)$；(b) $u_d=f(\omega t)$；(c) $i_d=f(\omega t)$；

(d) $i_V=f(\omega t)$；(e) $u_V=f(\omega t)$

2．负载上直流电压和直流电流的计算

全波整流电路的直流输出电压和直流电流都比半波整流

电路的直流电压和直流电流大一倍，即

输出平均直流电压

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 = 0.9U_2 \tag{4-12}$$

流过负载的平均直流电流

$$I_d = \frac{U_d}{R_L} = 0.9\frac{U_2}{R_L} \tag{4-13}$$

3. 整流二极管选择

(1) 流过二极管的平均电流。因两只二极管轮流导电，所以流过每个整流元件的平均电流就只有负载电流的一半，即

$$I_v = \frac{1}{2}I_d = 0.45\frac{U_2}{R_L}$$

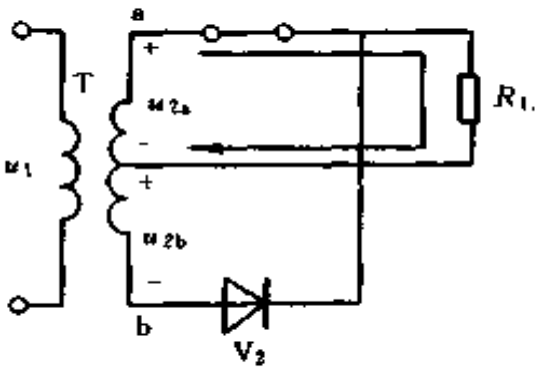


图 4-5 单相全波 u_{2a}为正，u_{2b}为负整流电路原理图

(2) 二极管承受的最大反向电压。0～π时间内，u_{2a}为正，u_{2b}为负，V_1 导通，忽略正向压降，可用一导线来取代，如图 4-5 所示。这时 ab 两端电压全部加到二极管 V_2 上，V_2 承受的最大反向电压为

$$U_{vrm} = 2\sqrt{2}U_2$$

同样在 π～2π 时间内，整流元件 V_2 导通，V_1 承受的最大反向电压为

$$U_{vrm} = 2\sqrt{2}U_2$$

电路如图 4-6 所示。

4. 整流变压器容量确定

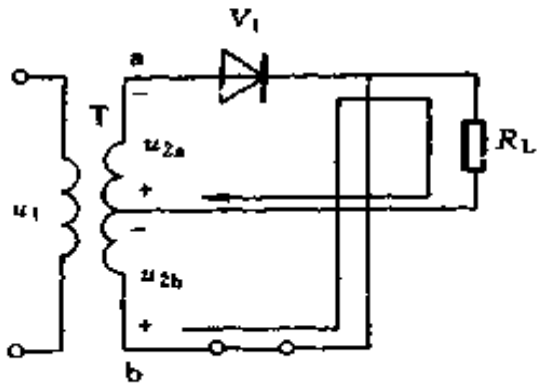


图 4-6 单相全波 u_{2a}为负，u_{2b}为正整流电路原理图

$$U_{2a}=\frac{U_d}{0.9}=1.11U_d \tag{4-14}$$

$$U_{2b}=1.11U_d \tag{4-15}$$

$$I_2=0.785I_d \tag{4-16}$$

$$\begin{aligned}P_2 &= (U_{2a}+U_{2b})\ I_2\\ &=2.22U_d\times0.785I_d\\ &=1.74U_dI_d\end{aligned} \tag{4-17}$$

$$U_1=U_{2a}\frac{N_1}{N_2}+U_{2b}\frac{N_1}{N_2}=2.22U_d\frac{N_1}{N_2} \tag{4-18}$$

$$I_1=0.555\frac{N_2}{N_1}I_d \tag{4-19}$$

$$\begin{aligned}P_1 &= I_1U_1=0.555\frac{N_2}{N_1}I_d\times2.22\frac{N_1}{N_2}U_d\\ &=0.555\times2.22U_dI_d=1.23U_dI_d\end{aligned} \tag{4-20}$$

设计容量

$$\begin{aligned}P &=\frac{P_1+P_2}{2}=\frac{1.23+1.74}{2}U_dI_d\\ &=1.49U_dI_d\end{aligned} \tag{4-21}$$

（三）单相桥式电阻负载整流电路

在单相整流电路中，单相桥式整流电路应用广泛，线路图常有下面 3 种画法，如图 4-7～4-9 所示。

1. 工作原理

0～π 时间内，u_2 正半周（电源极性是上面正，下面负），整流元件 V_1、V_3 导通，V_2、V_4 承受反向电压而截止，电流从变压器二次绕组上端经 V_1、R_L、V_3 回到变压器

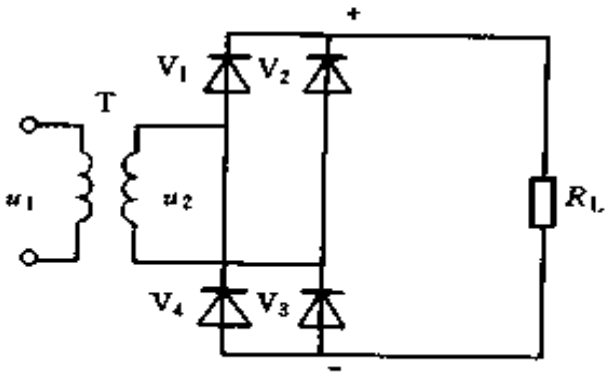


图 4-7　单相桥式电阻负载整流电路原理图（一）

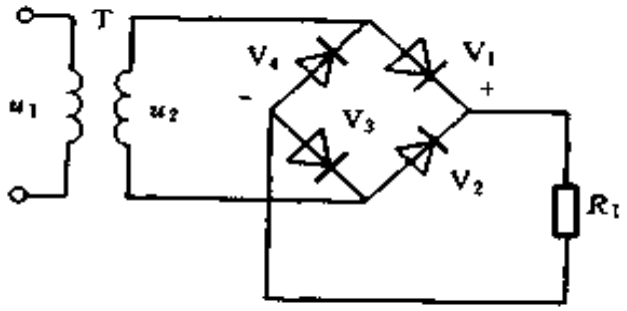


图 4-8　单相桥式电阻负载整流电路原理图（二）

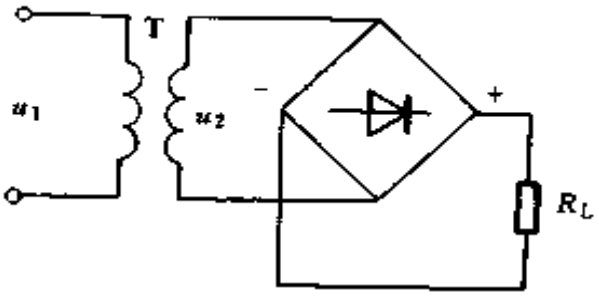


图 4-9　单相桥式电阻负载整流电路原理图（三）

二次绕组下端，负载上得到一个半波整流电压。$\pi \sim 2\pi$ 时间内，u_2 负半周（电源极性上面负下面正），整流元件 V_2、

V_4 导通，V_1、V_3 承受反向电压而截止，电流从变压器二次绕组下端，经 V_2、R_L、V_4 回到变压器二次绕组上端，同样，在负载 R_L 上得到另一个半波整流电压。各部分波形如图 4-10 所示。

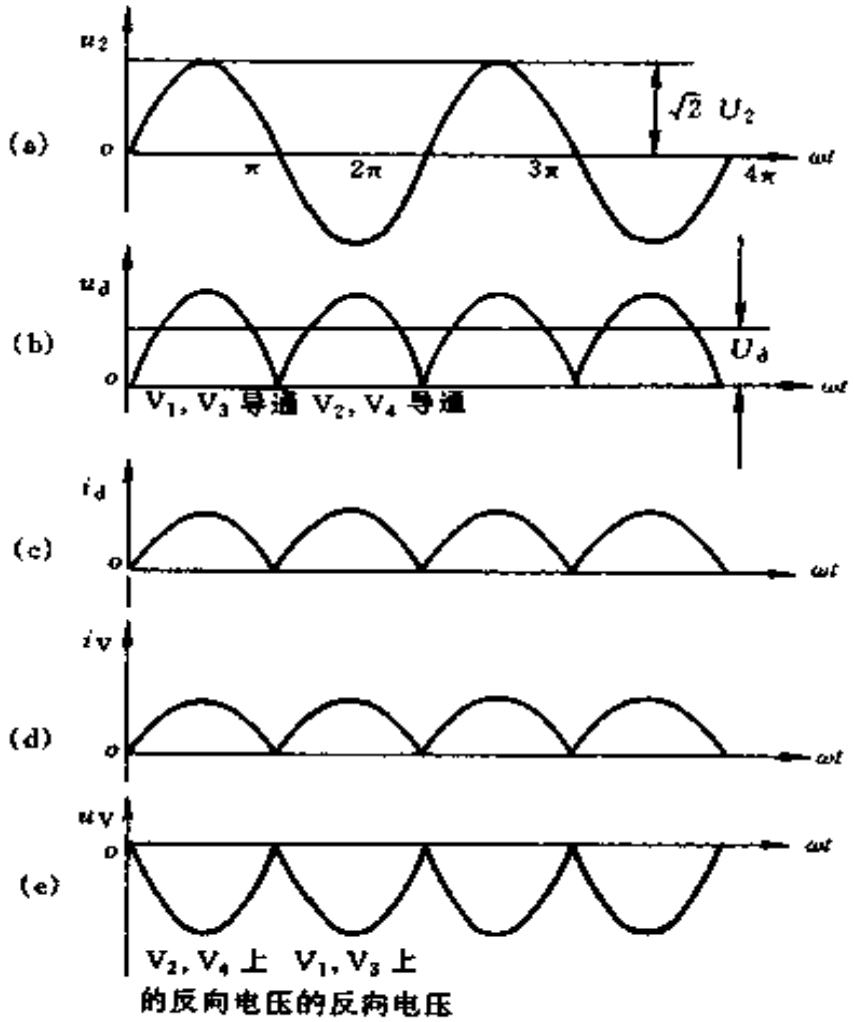


图 4-10　单相桥式全波电阻负载整流电路波形图

(a) $u_2=f(\omega t)$；(b) $u_d=f(\omega t)$；(c) $i_d=f(\omega t)$；(d) $i_v=f(\omega t)$；(e) $u_v=f(\omega t)$

2. 负载上直流电压和直流电流的计算

负载上电压电流波形同全波整流一样，所以计算式也同

全波整流一样。

输出直流平均电压

$$U_d = 0.9U_2$$

流过负载平均电流

$$I_d = 0.9\frac{U_2}{R_L}$$

3. 整流元件的选择

通过整流元件的平均电流与全波整流电路一样

$$I_V = \frac{1}{2}I_d = \frac{0.45U_2}{R_L}$$

整流元件所承受的最大反向电压比全波整流电路中二极管承受的反压小

$$U_{vrm} = \sqrt{2}U_d \tag{4-22}$$

4. 整流变压器的容量确定

$$U_2 = \frac{U_d}{0.9} = 1.11U_d \tag{4-23}$$

$$I_2 = 1.11I_d \tag{4-24}$$

$$P_2 = U_2I_2 = 1.11 \times 1.11U_dI_d = 1.23U_dI_d \tag{4-25}$$

$$U_1 = U_2\frac{N_1}{N_2} = 1.11U_d\frac{N_1}{N_2} \tag{4-26}$$

$$I_1 = 1.11I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-27}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1I_1 = 1.11U_d\frac{N_1}{N_2} \times 1.11I_d\frac{N_2}{N_1} \\ &= 1.11 \times 1.11U_dI_d = 1.23U_dI_d \end{aligned} \tag{4-28}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1.23U_dI_d \tag{4-29}$$

（四）整流变压器容量计算的说明

整流变压器与普通变压器相比，有它的特殊性，大家应该注意。由于整流器的整流作用，整流变压器的各相整流元件，只在一周期内的部分时间轮流导电，所以整流变压器的二次侧电流是非正弦波形，二次侧电流含有直流分量，而一次侧电流不含直流分量，故整流变压器表观功率比直流输出功率要大，而且二次侧表观功率比一次侧的表观功率也大(桥式电路除外)，这是因为一、二次侧通电时间不同所造成。

(五) 电感性负载的情况

关于电感性负载的情况，和电阻性负载不一样，现分别说明如下：

1. 单相半波整流电路

若为电感性负载，需加续流二极管，其各量之间关系如下

$$U_d = 0.45U_2 \tag{4-30}$$

$$U_2 = 2.22U_d \tag{4-31}$$

$$U_1 = U_2\frac{N_1}{N_2} \tag{4-32}$$

$$I_2 = 0.707I_d \tag{4-33}$$

$$I_1 = \frac{1}{2}I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-34}$$

$$P_1 = \frac{1}{2}\times 2.22U_dI_d = 1.11U_dI_d \tag{4-35}$$

$$P_2 = 0.707\times 2.22U_dI_d = 1.57U_dI_d \tag{4-36}$$

$$P = \frac{P_1+P_2}{2} = \frac{1.11+1.57}{2}U_dI_d$$

$$= 1.34U_dI_d \tag{4-37}$$

2. 单相全波整流电路

若为电感性负载，各量之间关系如下

$$U_d = 0.9U_2 \tag{4-38}$$

$$U_{2a} = 1.11U_d \tag{4-39}$$

$$U_{2b} = 1.11U_d \tag{4-40}$$

$$U_1 = U_2\frac{N_1}{N_2} \tag{4-41}$$

$$U_2 = 1.11U_d \tag{4-42}$$

$$I_2 = 0.707I_d \tag{4-43}$$

$$I_1 = I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-44}$$

$$P_1 = 1.11U_dI_d \tag{4-45}$$

$$P_2 = 0.707\times1.11\times2U_dI_d = 1.57U_dI_d \tag{4-46}$$

$$P = \frac{P_1+P_2}{2} = \frac{1.11+1.57}{2}U_dI_d$$

$$= 1.34U_dI_d \tag{4-47}$$

3. 单相桥式全波电感负载

$$U_d = 0.9U_2 \tag{4-48}$$

$$I_V = \frac{1}{2}I_d \tag{4-49}$$

$$U_2 = 1.11U_d \tag{4-50}$$

$$U_1 = U_2\frac{N_1}{N_2} \tag{4-51}$$

$$I_2 = I_d \tag{4-52}$$

$$I_1 = I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-53}$$

$$P_1 = 1.11U_dI_d \tag{4-54}$$

$$P_2 = 1.11U_dI_d \tag{4-55}$$

$$P = \frac{P_1+P_2}{2} = 1.11U_dI_d \tag{4-56}$$

例 4-1 某单相半波整流电路，输入交流电压 $U_2=220V$，负载电阻 $R_L=10\Omega$，求负载电流为多少？并选择整流元件。

解 $$I_d=\frac{0.45U_2}{R_L}=\frac{0.45\times220}{10}=9.9\ (A)$$

二极管承受的最大反向电压

$$U_{vrm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times220=311\ (V)$$

可选额定电流为 20A，最高反向工作电压为 400V 以上整流二极管。

例 4-2 生产中需要一个单相全波整流电路，要求输出为 110V 直流电压和 3A 直流电流，如何选择整流元件？（负载为电阻性）

解 （1）先求变压器二次电压，由 $U_d=0.9U_2$ 得

$$U_2=\frac{U_d}{0.9}=\frac{110}{0.9}=122\ (V)$$

（2）加在整流元件的最大反向电压

$$U_{vrm}=2\sqrt{2}U_2=2\sqrt{2}\times122=345\ (V)$$

（3）通过整流元件的平均电流

$$I_v=\frac{1}{2}I_d=\frac{1}{2}\times3=1.5\ (A)$$

可选额定电流为 3A，最大反向电压 400V 以上的整流二极管。

例 4-3 上例中若采用单相桥式整流电路，选什么整流元件？

解 $$U_{vrm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times122=172.5\ (V)$$

$$I_v=\frac{1}{2}I_d=\frac{1}{2}\times3=1.5\ (A)$$

选额定电流为 3A，最大反向电压 300V 以上的整流二极管。

例 4-4 某异步电动机采用直流能耗制动，用电桥测量出电动机相间电阻 $R=0.32\Omega$，用钳形电流表测出电动机空载线电流 $I_0=9.7A$，制动线路采用单相桥式整流线路，问应选什么样的整流二极管？整流变压器容量为多少？

解 （1）制动时所需直流电流，一般按（3.5～4）倍电动机空载电流选取（如传动装置转速高，惯性大，系数可取大一些）。

取
$$I_d=4I_0$$
$$I_d=4\times9.7=38.8\ (A)$$
$$U_d=I_dR=38.8\times0.32=12.42\ (V)$$

（2）变压器二次电压

$$U_2=1.11U_d=1.11\times12.42=13.79\ (V)$$

变压器二次电流

$$I_2=1.11I_d=1.11\times38.8=43.07\ (A)$$

整流二极管平均电流

$$I_v=\frac{1}{2}I_d=\frac{1}{2}\times38.8=19.4\ (A)$$

整流二极管最大反向电压

$$U_{vm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times13.79=19.5\ (V)$$

所以可选额定电流为 30A，最大反向工作电压 30V 以上整流二极管。

（3）变压器设计容量

$$P=1.23U_dI_d=1.23\times12.42\times38.8=592.7\ (VA)$$

所以整流变压器容量可选 600VA。

例 4-5 磨床用电磁吸盘，若已知电磁吸盘绕组的直流电阻 $R_L=75\Omega$，为了使电磁吸盘能牢靠地吸住工件，通入的直流电流为 1.45A，采用单相桥式整流电路，问应选择什么样的整流元件？整流变压器容量为多少？

解 电磁吸盘绕组两端电压

$$U_L=I_LR_L=1.45\times75=108.8\ (\text{V})$$

变压器二次电压

$$U_2=1.11U_L=1.11\times108.8=120.8\ (\text{V})$$

流过二极管的平均电流

$$I_v=\frac{1}{2}I_L=\frac{1}{2}\times1.45=0.725\ (\text{A})$$

最大反向电压

$$U_{vm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times120.8=170.8\ (\text{V})$$

变压器容量

$$P=1.23U_LI_L=1.23\times108.8\times1.45=194\ (\text{VA})$$

所以可选额定电流为 1A，最大反向电压 200V 以上整流二极管，变压器容量为 200VA。

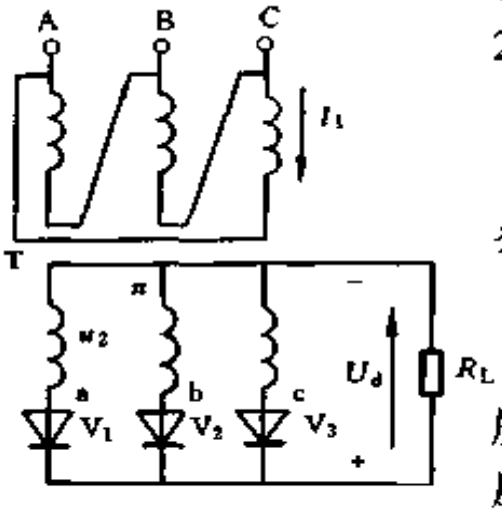


图 4-11 三相半波电阻性负载整流电路原理图

二、三相整流电路

（一）三相半波电阻性负载整流电路

1. 工作原理

三相半波整流电路如图4-11所示，波形如图 4-12 所示。变压器二次绕组的电压是三相对称电压，当时间从 t_1 到 t_2，a 相电压比 b 相、c 相都高，二极管 V_1

导通，负载电压等于 a 相电压，电流从 a 点经 V_1、负载 R_L，回到 n 点。时间从 t_2 到 t_3，b 相电压比 c 相、a 相都高，二极管 V_2 导通，负载电压等于 b 相电压，电流从 b 点经 V_2，负载 R_L，回到 n 点。时间从 t_3 到 t_4，c 相电压比 a 相、b 相都高，二极管 V_3 导通，负载电压等于 c 相电压，电流从 c 点经 V_3、负载 R_L，回到 n 点。由此可见，V_1、V_2 和 V_3 在一个周期内轮流导通，每相的导电时间为 $T/3$（即 $2\pi/3$），以后重复上述过程。输出电压的波形就是二次绕组的相电压在正半周的包络线，其脉动程度比单相整流电路小得多。

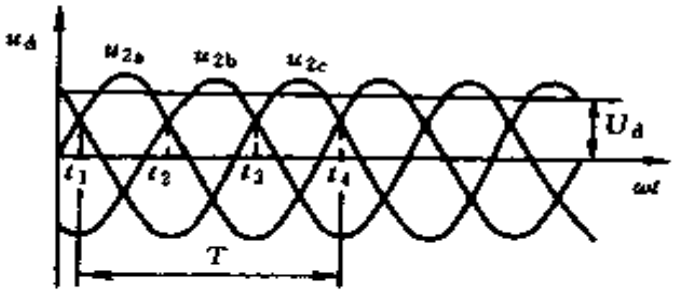


图 4-12　三相半波电阻负载整流电路波形图

这里应注意到，二极管的导通与否，是由加在管子两端电压的正负来决定的，所以任何瞬间只有正向电压最大的某一相的二极管方能导通，而另外两相的二极管，都因承受反向电压而处于截止状态。

2. 负载上直流电压和电流的计算

负载上直流电压

$$U_d = 1.17U_2 \tag{4-57}$$

$$U_2 = \frac{U_d}{1.17} = 0.855U_d \tag{4-58}$$

流过负载的直流电流

$$I_d = \frac{U_d}{R_L} = 1.17\frac{U_2}{R_L} \tag{4-59}$$

3. 整流二极管的选择

流过二极管的整流电流平均值

$$I_v = \frac{1}{3}I_d \tag{4-60}$$

二极管承受的最大反向电压

$$U_{vrm} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_2 = \sqrt{6}U_2 \tag{4-61}$$

$$U_{vrm} = 2.09U_d \tag{4-62}$$

4. 整流变压器容量的确定

每相绕组

$$U_2 = 0.855U_d$$

$$U_1 = U_2\frac{N_1}{N_2} = 0.855U_d\frac{N_1}{N_2} \tag{4-63}$$

$$I_2 = 0.58I_d \tag{4-64}$$

$$I_1 = 0.49I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-65}$$

变压器二次作Y联结，对于电阻性负载，其电流有效值

$$I_p = I_1 = 0.58I_d \tag{4-66}$$

变压器容量

$$P_1 = 0.855 \times 0.58U_dI_d \times 3 = 1.49U_dI_d \tag{4-67}$$

$$P_2 = 0.49 \times 0.855U_dI_d \times 3 = 1.26U_dI_d \tag{4-68}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{1.49 + 1.26}{2}U_dI_d = 1.37U_dI_d \tag{4-69}$$

（二）三相桥式电阻性负载整流电路

三相桥式整流电路，它是两个三相半波整流电路组合而成，电路如图 4-13 所示，波形如图 4-14 所示。

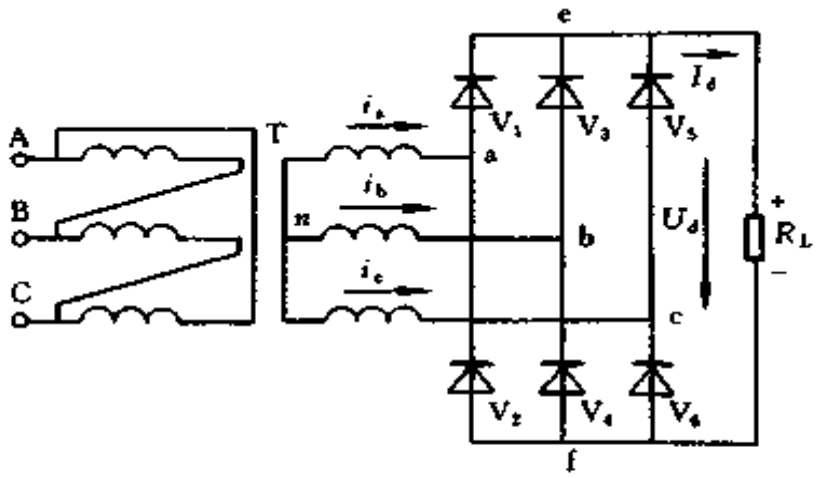
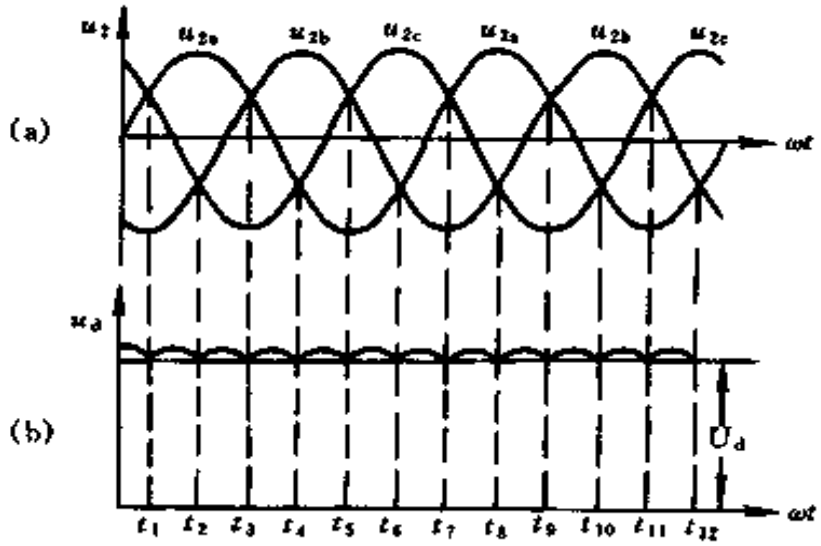


图 4-13　三相桥式电阻性负载整流电路原理图



二极管导电次序

V_5	V_1	V_1	V_3	V_3	V_5	V_5	V_1	V_1	V_3	V_3	V_5
V_4	V_4	V_6	V_6	V_2	V_2	V_4	V_4	V_6	V_6	V_2	V_2

图 4-14　三相桥式电阻负载整流电路波形图

(a) $u_2=f(\omega t)$；(b) $u_d=f(\omega t)$

1. 工作原理

V_1、V_3 和 V_5 组成一组共阴极三相半波整流电路，V_2、V_4 和 V_6 组成一组共阳极三相半波整流电路，为讨论方便，V_1，V_3，V_5 叫奇数组，V_2，V_4，V_6 叫偶数组。在任何瞬时，奇数组和偶数组的二极管必各有一只处于导通状态。

奇数组　阴极连在一起，所以哪一只二极管的阳极电位最高，则这一只二极管就导通。

偶数组　阳极连在一起，哪一只二极管的阴极电位最低，则这只二极管就处于导通状态。

t 从 $t_1 \sim t_2$ 时，a 相电位最高，V_1 导通；b 相电位最低，V_4 导通。电流流通的回路：$n—a—V_1—e—R_L—f—V_4—b—n$。在这一瞬间，其余 4 个二极管都加上反向电压，因而不能导电。

t 从 $t_2 \sim t_3$ 时，a 相电位最高，V_1 导通；c 相电位最低，V_6 导通。电流流通的回路：$n—a—V_1—e—R_L—f—V_6—c—n$。

t 从 $t_2 \sim t_4$ 时，b 相电位最高，V_3 导通；c 相电位最低，V_6 导通。

t 从 $t_4 \sim t_5$ 时，b 相电位最高，V_3 导通；a 相电位最低，V_2 导通。

t 从 $t_5 \sim t_6$ 时，c 相电位最高，V_5 导通；a 相电位最低，V_2 导通。

t 从 $t_6 \sim t_7$ 时，c 相电位最高，V_5 导通；b 相电位最低，V_4 导通。

这样，在负载上得到一个比较平直的直流电压。

2. 负载上直流电压和电流的计算

$$U_d = 2.34U_2 \tag{4-70}$$

$$U_2 = \frac{U_d}{2.34} = 0.43U_d \tag{4-71}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 2.34\frac{U_2}{R} \tag{4-72}$$

3. 整流二极管选择

每只管子的平均电流

$$I_v = \frac{1}{3}I_d = \frac{2.34U_2}{3R} = 0.78\frac{U_2}{R} \tag{4-73}$$

二极管承受的最大反向电压

$$U_{vm} = \sqrt{6}U_2 = 1.05U_d \tag{4-74}$$

4. 整流变压器容量计算

$$I_2 = 0.816I_d \tag{4-75}$$

$$I_1 = 0.816I_d\frac{N_2}{N_1} \tag{4-76}$$

$$U_2 = 0.43U_d \tag{4-77}$$

$$U_1 = 0.43U_d\frac{N_1}{N_2} \tag{4-78}$$

$$P_1 = 0.816\times0.43\times3U_dI_d = 1.05U_dI_d \tag{4-79}$$

$$P_2 = 0.816\times0.43\times3U_dI_d = 1.05U_dI_d \tag{4-80}$$

$$P = \frac{P_1+P_2}{2} = 1.05U_dI_d \tag{4-81}$$

例 4-6 某厂电镀车间需直流电源一台，已知 $U_d=12V$，$I_d=500A$，采用三相半波整流，应选什么样的整流二极管？整流变压器容量为多少？

解（1）选择整流二极管

流过管子平均电流

$$I_v = \frac{1}{3} I_d = \frac{1}{3} \times 500 = 166.7 \text{（A）}$$

加在管子上的最大反向电压

$$U_{vrm} = 2.09 U_d = 2.09 \times 12 = 25.08 \text{（V）}$$

所以可选额定电流为 200A，最大反向工作电压为 50V 的整流二极管。

（2）变压器容量

$P = 1.37 U_d I_d = 1.37 \times 12 \times 500 = 8220$（VA）$\approx 8.5$（kVA）

例 4-7 上例中若采用三相桥式整流电路，应选什么样的整流二极管？整流变压器容量为多少？

解（1）选择整流二极管

$$I_v = \frac{I_d}{3} = \frac{500}{3} = 166.7 \text{（A）}$$

$$U_{vrm} = 1.05 U_d = 1.05 \times 12 = 12.6 \text{（V）}$$

所以可选额定电流为 200A，最大反向工作电压为 30V 的整流二极管。

（2）整流变压器容量

$P = 1.05 U_d I_d = 1.05 \times 12 \times 300 = 3780$（VA）$\approx 4$（kVA）

三、单相可控整流电路

可控整流电路，由晶闸管元件组成。晶闸管元件是一种新型的大功率半导体元件，体积小，效率高，可以控制，动作迅速，无噪声，广泛应用在电气化，自动化技术中。

（一）晶闸管元件的选择

晶闸管元件主要额定参数是正反向重复峰值电压和额定通态平均电流，即通常所说的晶闸管电压与电流值。

1. 电流选择

晶闸管制造厂给出的晶闸管的额定正向平均电流是指半

波电流波形的平均值，但通过晶闸管的电流是含有交流成分的脉动直流电。在这种情况下，使晶闸管发热的是电流的有效值。故选择晶闸管时，先要把平均值换算成有效值（正弦半波正向电流有效值为平均值的1.57倍）。由于电流波形在各种不同主回路中是不一样的，在不同导通角时更不一样，计算繁琐。实际上，由于晶闸管元件的额定电流规格只是有限的几级，因而在选择元件时常用如下经验公式

$$I_F = \frac{K}{1.57 m_K} I_v \tag{4-82}$$

式中 I_F——晶闸管的正向额定电流，A；

K——不同整流电路中流过晶闸管的电流波形系数，数值见表4-1；

m_K——晶闸管并联导通数（对于单相半波电路 $m_K=1$；单相桥式电路 $m_K=2$；三相半波电路 $m_K=3$；三相桥式电路 $m_K=3$）；

I_v——整流元件在全导通时，允许的最大整流电流平均值（即最大负载电流）。

2. 电压选择

一般选择晶闸管元件的额定电压为线路实际承受最大电压的1.5～2倍。

表4-1　　晶闸管电流波形系数表

线路型式	单相半波可控整流；单相全波可控整流；单相半控桥式整流	单相全波可控整流，用一只晶闸管；单相桥式可控整流用一只晶闸管	三相半波可控整流；三相半控桥式整流
电流波形系数 K	1.57	1.11	1.78

（二）单相半波可控整流电路

1. 电阻性负载

电路和波形如图 4-15 所示，图中 α 叫控制角，θ 叫导通角。

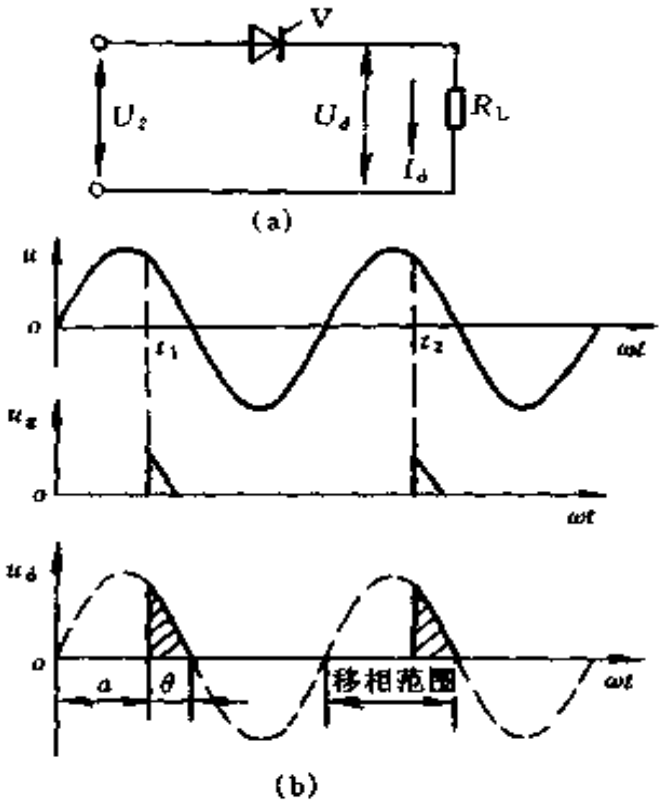


图 4-15　单相半波可控整流
电阻性负载电路
(a) 原理图；(b) 波形图

控制角 α——晶闸管元件承受正向电压起始点到触发脉冲的作用点之间的电角度。

导通角 θ——晶闸管在一周期时间内导通的电角度。

单相半波可控整流电路 α 的移相范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$，而对应的 θ 的变化范围为 $180^\circ \sim 0^\circ$。由图可见

$$\alpha + \theta = 180^\circ$$

根据高等数学知识可得

输出电压平均值

$$U_d = 0.45U_2\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-83}$$

输出电压有效值

$$U = U_2\sqrt{\frac{1}{4\pi}\sin2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}} \tag{4-84}$$

当晶闸管全导通时，$\alpha=0$，相当于二极管整流。输出平均直流电压最大，其值为 $0.45U_2$，有效值为 $U_2/\sqrt{2}$，峰值电压则为$\sqrt{2}U_2$。

不同控制角 α 时，回路电流大小由欧姆定律决定，其平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R_L} = 0.45\frac{U_2}{R_L}\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-85}$$

负载电流有效值为

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{U_2}{R_L}\sqrt{\frac{1}{4\pi}\sin2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}} \tag{4-86}$$

功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI}{U_2I} = \frac{U}{U_2} = \sqrt{\frac{1}{4\pi}\sin2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}} \tag{4-87}$$

不同 α 时其负载直流电压平均值与电源电压之比 U_d/U_2，有效值电流与平均值电流之比 I/I_d 如表 4-2 所示。该关系在图 4-16 中以曲线图形画出。

表 4-2　　U_d/U_2、I/I_d、$\cos\varphi$ 与控制角的关系

控制角 α	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
U_d/U_2	0.45	0.42	0.338	0.225	0.113	0.03	0
I/I_d	1.57	1.66	1.88	2.22	2.78	3.99	—
$\cos\varphi$	0.707	0.698	0.635	0.508	0.302	0.12	0

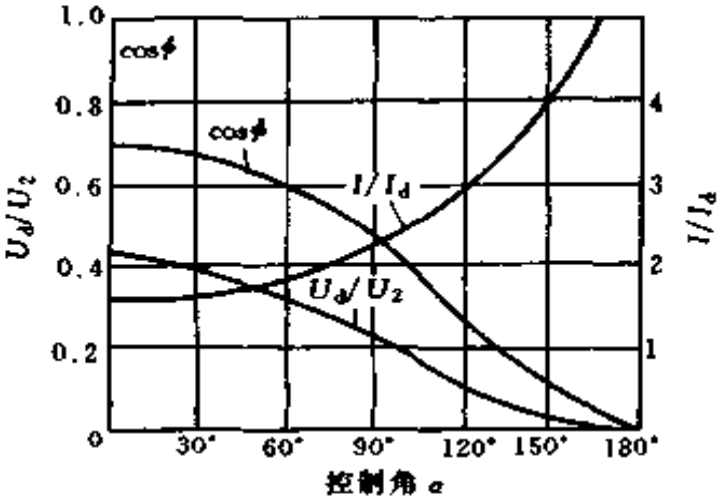


图 4-16　U_d/U_2、I/I_d、$\cos\varphi$
与控制角 α 的关系曲线

例 4-8　有一单相半波可控整流电路，负载电阻 R_L 为 10Ω，交流电源电压为 220V，控制角 $\alpha=60°$，求输出电压平均值 U_d、电流平均值 I_d 和电流有效值 I 各为多少？应选用什么样的整流元件？

解　从表 4-2 中查出当 $\alpha=60°$时，$U_d/U_2=0.338$，$I/I_d=1.88$，因此

$$U_d=0.338U_2=0.338\times220=74.36\ (\text{V})$$

$$I_d=\frac{U_d}{R_L}=\frac{74.36}{10}=7.436\ (\text{A})$$

$$I=1.88I_d=1.88\times7.436=13.98\ (\text{A})$$

晶闸管上承受最大正反向电压与电源电压的峰值相同，即

$$U_{vrm}=\sqrt{2}U=\sqrt{2}\times220=311.1\ (\text{V})$$

晶闸管元件的额定电压

$U_F=(1.5\sim2)\ U_{vrm}=(1.5\sim2)\times311.1$

$$=466.7\sim622.2\ (\mathrm{V})$$

$$I_F=\frac{K}{1.57m_K}I_d=\frac{1.57}{1.57}I_d$$

$$=I_d=7.436\ (\mathrm{A})$$

所以可选额定电流为 10A，正反向重复峰值电压为 500V 以上晶闸管元件。

2．电感性负载与续流二极管

单相半波整流电路用于大电感性负载时，需加续流二极管。无续流二极管，负载上得不到应有的电压和电流，电路和波形如图 4-17 所示，加了续流二极管后，电路和波形如图 4-18 所示。当 $\omega L\gg R$ 时，电流的脉动很小，波形近于一条平线，流过晶闸管与续流二极管电流的平均值为

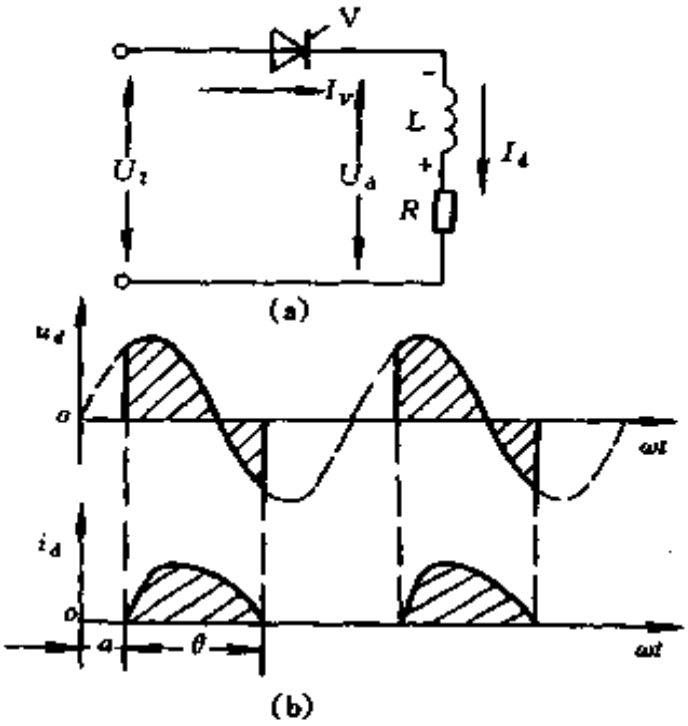


图 4-17　无续流二极管的单相半波可控整流电路

(a) 原理图；(b) 波形图

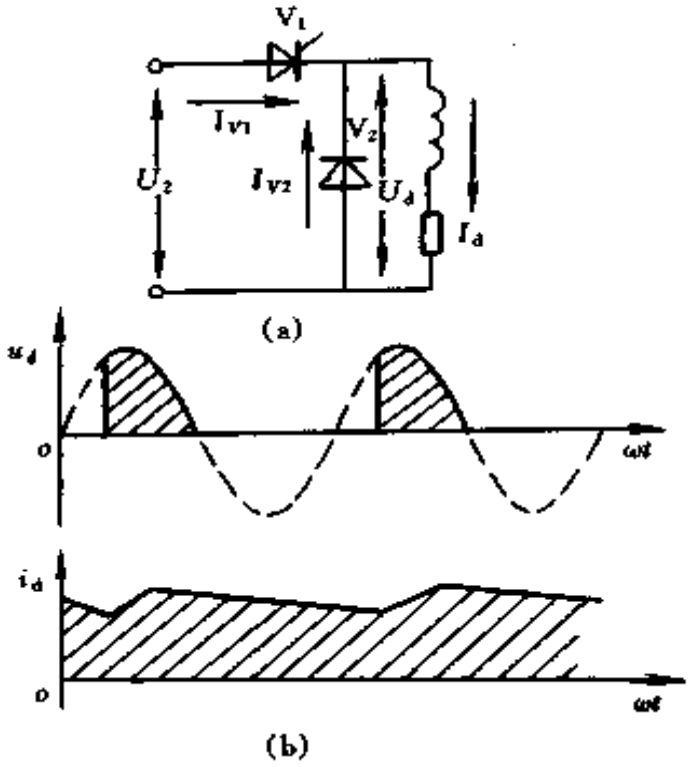


图 4-18　带续流二极管的单相半波可控整流电路

(a) 原理图；(b) 波形图

$$I_{dv1}=\frac{\theta}{360^\circ}I_d \tag{4-88}$$

$$I_{dv2}=\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}I_d \tag{4-89}$$

式中　θ——晶闸管导通角。

电流的有效值为

$$I_{V1}=\sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}}I_d \tag{4-90}$$

$$I_{V2}=\sqrt{\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}}I_d \tag{4-91}$$

例4-9　图4-19是中小型发电机采用单相半波晶闸管

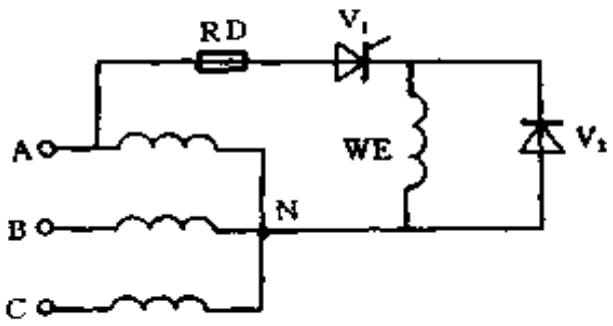


图 4-19　例 4-9 电路

自励恒压励磁的电路图，当发电机满载时，相电压为 220V，要求励磁电压为 45V，已知励磁线圈电阻为 4Ω，电感为 0.2H，试决定晶闸管的导通角，流过晶闸管和续流二极管的电流的平均值和有效值各为多少？

解（1）求晶闸管的导通角 θ

因
$$U_d = 0.45U_2\frac{1+\cos\alpha}{2}$$

所以
$$\cos\alpha = \frac{2U_d}{0.45U_2} - 1 = \frac{2\times 45}{0.45\times 220} - 1 = -0.091$$

查三角函数表得 $\alpha = 95.1°$

故
$$\theta = 180° - \alpha = 180° - 95.1° = 84.9°$$

（2）求 θ 的另一方法

因
$$\frac{U_d}{U_2} = \frac{45}{220} = 0.205$$

由图 3-16 中的曲线查出 $\alpha = 95°$

故
$$\theta = 180° - 95° = 85°$$

（3）负载电流平均值

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{45}{4} = 11.25\ (\mathrm{A})$$

（4）求晶闸管及续流二极管中电流的平均值和有效值

因
$$\omega L = 2\pi fL = 2\pi\times 50\times 0.2 = 62.83\ (\Omega) \gg R$$

负载电流波形近似一条平线，故

$$I_{dv1}=\frac{\theta}{360^\circ Id}=\frac{84.9^\circ}{360^\circ}\times 11.25=2.653\text{A}$$

$$I_{V1}=\sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{84.9^\circ}{360^\circ}}\times 11.25=5.463\text{A}$$

$$I_{dv2}=\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}I_d=\frac{360^\circ-84.9^\circ}{360^\circ}\times 11.25=8.597\ (\text{A})$$

$$I_{V2}=\sqrt{\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{360^\circ-84.9^\circ}{360^\circ}}\times 11.25=9.834\ (\text{A})$$

（三）单相全波可控整流

电路和波形如图 4-20 所示。

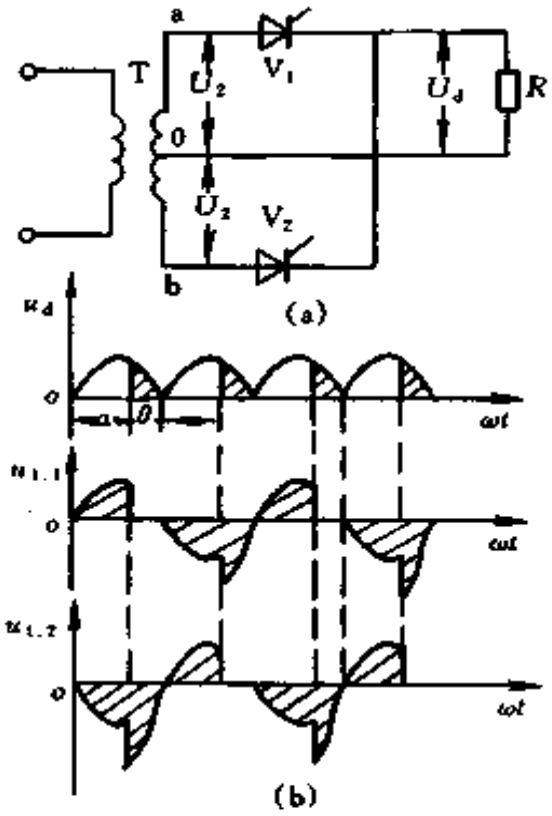


图 4-20　单相全波可控整流

电阻负载电路

（a）原理图；（b）波形图

1．电阻性负载

$$U_d = 0.9U_2\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-92}$$

$$U = U_2\sqrt{\frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{\pi}} \tag{4-93}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} \approx 0.9\frac{U_2}{R}\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-94}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_2}{R}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{\pi}} \tag{4-95}$$

$$\cos\varphi = \frac{UI}{U_2 I} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{\pi}} \tag{4-96}$$

2．电感性负载

$$U_d = 0.9U_2\cos\alpha \tag{4-97}$$

晶闸管可能承受的最大反向电压为

$$U_{vrm} = 2\sqrt{2}U_2 \tag{4-98}$$

如果并联续流二极管，计算公式与电阻性负载相同。

（四）单相桥式可控整流

1．单相半控桥式整流

（1）电阻性负载

$$U_d = 0.9U_2\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-99}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.9\frac{U_2}{R}\frac{1+\cos\alpha}{2} \tag{4-100}$$

$$I = \frac{U_2}{R}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{\pi}} \tag{4-101}$$

晶闸管承受的最大正反向电压

$$U_{vrm} = 2\sqrt{2}U_2 \tag{4-102}$$

（2）电感性负载。一般加接续流二极管。流过晶闸管的平均电流

$$I_V=\frac{\theta}{360^\circ}I_d \tag{4-103}$$

流过续流二极管电流的平均值和有效值

$$I_{VC}=\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}I_d \tag{4-104}$$

$$I_c=\sqrt{\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}}I_d \tag{4-105}$$

（3）串联式半控桥式全波整流。电路和波形如图 4-21 所示。

$$I_V=\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}I_d \tag{4-106}$$

$$I=\sqrt{\frac{360^\circ-\theta}{360^\circ}}I_d \tag{4-107}$$

2. 单相全控桥式整流

电阻性负载与半控桥无区别，计算公式与半控桥相同。

电感性负载

$$U_d=0.9U_2\cos\alpha\ \ (0\leqslant\alpha\leqslant90^\circ) \tag{4-108}$$

与单相全波一样，只是晶闸管元件承受的反向电压为

$$U_{vm}=\sqrt{2}U_2 \tag{4-109}$$

例 4-10 有一电感性负载采用半控桥式有续流二极管的整流电路供电，负载电阻为 5Ω，输入电压 220V，晶闸管控制角 $\alpha=60^\circ$，求流过晶闸管、续流二极管的电流平均值和有效值分别为多少？并选择晶闸管和续流二极管。

解 (1)整流输出电压平均值

$$U_d=0.9U_2\frac{1+\cos\alpha}{2}=0.9\times220\times\frac{1+\cos60^\circ}{2}=148.5\ (V)$$

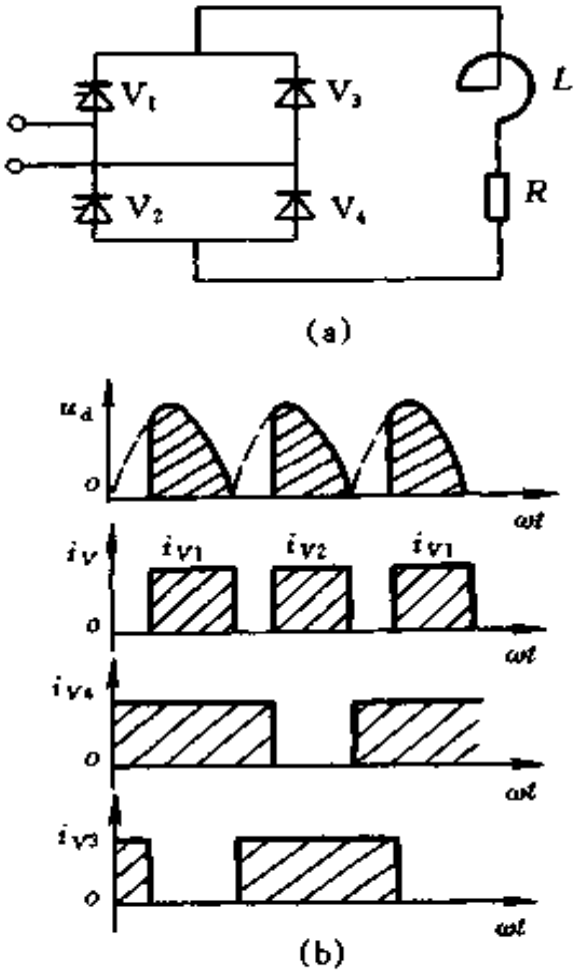


图 4-21　串联式半控桥式全波整流电路

(a) 原理图；(b) 波形图

负载电流平均值

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{148.5}{5} = 29.7\ (A)$$

晶闸管及整流二极管每周期的导通角是

$$\theta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

续流二极管每周期导通角是

$$360^\circ - 2\theta = 360^\circ - 2 \times 120^\circ = 120^\circ$$

所以电流的平均值与有效值分别为

$$I_V=\frac{\theta}{360^\circ}I_d=\frac{120^\circ}{360^\circ}\times 29.7=9.9\ (A)$$

$$I_{VC}=\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}I_d=\frac{180^\circ-120^\circ}{180^\circ}\times 29.7=9.9\ (A)$$

$$I=\sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{120^\circ}{360^\circ}}\times 29.7=17.15\ (A)$$

$$I_C=\sqrt{\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{180^\circ-120^\circ}{180^\circ}}\times 29.7=17.15\ (A)$$

(2) 选择晶闸管与续流二极管　晶闸管承受的最大正反向电压

$$U_{vrm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times 220=311.1\ (V)$$

晶闸管元件的额定电压

$U_F=(1.5\sim 2)\ U_{vrm}=(1.5\sim 2)\times 311.1=466.7\sim 622.2\ (V)$

晶闸管元件的额定电流

$$I_F=\frac{K}{1.57m_K}I_d=\frac{1.57}{1.57\times 2}\times 29.7=14.85\ (A)$$

所以可选 20A，500V 的晶闸管。

续流二极管承受的最大反向电压

$$U_{vrm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times 220=311.1\ (V)$$

续流二极管流过的电流平均值为 9.9A，所以可选 20A，400V 的整流二极管。

例 4-11　某一纯电阻负载需要可调直流电压 $U_d=0\sim 60V$，$I_d=0\sim 10A$，选用单相桥式可控整流电路，若采用电源变压器，求变压器二次绕组的电压和电流为多少？应选择什么样的整流元件？

解　(1)　$U_d=0.9U_2\dfrac{1+\cos\alpha}{2}$

设晶闸管导通角 θ 为 180°时（即控制角 α 为 0°时），U_d

$=60V$，$I_d=10A$，可求出

$$U_2=\frac{2U_d}{0.9\ (1+\cos\alpha)}=\frac{2\times60}{0.9\ (1+\cos0^\circ)}$$

$$=\frac{120}{1.8}=66.7\ (V)$$

(2)
$$I_d=\frac{U_d}{R}$$

所以
$$R=\frac{U_d}{I_d}=\frac{60}{10}=6\ (\Omega)$$

$$I_2=\frac{U_2}{R}=\frac{66.7}{6}=11.1\ (A)$$

(3) 求变压器二次绕组的电压和电流。变压器二次绕组实际电压比上述计算电压在一般情况下大 10% 左右。因为考虑电网电压波动、变压器漏抗压降和整流元件管压降，单相可控整流中晶闸管最大导通角常常到不了 180°（一般在 160°～170°）。所以变压器二次绕组电压 $U_2=75V$ 即能满足要求。

二次绕组电流为 11.1A。

(4) 选择整流元件。晶闸管承受的最大正向、反向电压，二极管承受的最大反向电压均为二次绕组电压的峰值，即

$$U_{vrm}=\sqrt{2}U_2=\sqrt{2}\times75=106\ (V)$$

流过晶闸管和二极管的平均电流都是 $I_d/2$，即 10/2A $=5A$，考虑到在较小的导通角情况下仍要求给出 10A 电流，则流过管子的有效值电流将超出额定值很多，因此要留有一定的余量，可选 10A，200V 的整流元件。

例 4-12 图 4-22 所示电路，供反电动势负载，电抗器足够大，使电流波形接近平线，电源电压为 220V，$\alpha=90^\circ$，

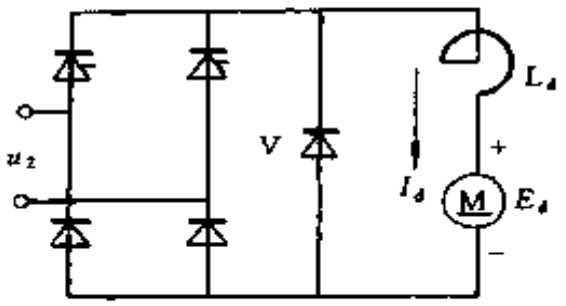


图 4-22　例 4-12 电路

负载电流 50A，问晶闸管、续流二极管的平均电流、电流的有效值各为多少？如若电枢回路电阻为 0.2Ω，问电动机的反电动势为多少？

解（1）流过晶闸管的平均电流

$$I_V=\frac{\theta}{360^\circ}I_d=\frac{180^\circ-\alpha}{360^\circ}I_d=\frac{180^\circ-90^\circ}{360^\circ}\times 50$$
$$=12.5\ (A)$$

流过晶闸管的有效值电流

$$I=\sqrt{\frac{\theta}{360^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{90^\circ}{360^\circ}}\times 50=25\ (A)$$

（2）流过续流二极管的平均电流

$$I_{VC}=\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}I_d=\frac{180^\circ-90^\circ}{180^\circ}\times 50=25\ (A)$$

流过续流二极管的有效值电流

$$I_C=\sqrt{\frac{180^\circ-\theta}{180^\circ}}I_d=\sqrt{\frac{180^\circ-90^\circ}{180^\circ}}\times 50=35.36\ (A)$$

（3）求电动机的反电动势

$$E_d=U_d-I_dR$$

$$U_d=0.9U_2\frac{1+\cos\alpha}{2}=0.9U_2\frac{1+\cos 90^\circ}{2}=0.45U_2$$
$$=0.45\times 220=99\ (V)$$

$$E_d=99-50\times 0.2=89\ (V)$$

第二节　晶体管电路计算

一、数字电路基础

（一）进位制数之间的相互转换

我们平常习惯使用的是十进制数；而在数字系统和计算机中主要采用的是二进制数，也有采用八进制数和十六进制数的。

1．十进制整数转换成二进制整数

表 4-3 列出了一些简单的转换关系，这些关系应该记住。

表 4-3　　十进制与二进制对照表

二进制	十进制	二进制	十进制
0	0	1011	11
1	1	1100	12
10	2	1101	13
11	3	1110	14
100	4	1111	15
101	5	10000	16
110	6	……	……
111	7	100000	32
1000	8	……	……
1001	9	1000000	64
1010	10	……	……

对数值大又非 2^n 的数转换就比较困难了。一般采用“除 2 取余，逆序排列”法，其步骤如下：

（1）将给定的十进制数除以 2，余数便是二进制数的最低位。

（2）将上一步的商再除以 2，余数便是二进制数的次低位。

（3）重复步骤（2），直至商等于 0 为止。各次除得的余数，逆序排列，即可得到相应的二进制数。

例 4-13 将十进制整数19 转换成二进制数。

解

```
2 | 19                 ↑   低位
  2 | 9   ……1           |
    2 | 4   ……1         |
      2 | 2   ……0       |
        2 | 1   ……0     |
            0   ……1     |   高位
```

所以 $(19)_{10}=(10011)_2$

例 4-14 将十进制整数125 转换成二进制数。

解

```
2 | 125                ↑   低位
  2 | 62   ……1          |
    2 | 31   ……0        |
      2 | 15   ……1      |
        2 | 7   ……1     |
          2 | 3   ……1   |
            2 | 1   ……1 |
              0   ……1   |   高位
```

所以 $(125)_{10}=(1111101)_2$

2. 十进制小数转换成二进制小数

十进制纯小数，一般采用基数乘法转换成二进制小数，即所谓“乘 2 取整，顺序排列”法，它的要点是：

（1）将十进制数的小数部分重复用 2 乘，并记下每次乘积的整数部分（1 或 0）。

（2）将整数部分从高位依次排列成一小数，就得所求的二进制数。

例 4-15 将十进制纯小数0.625 转换成二进制小数。

解

$0.625\times2=1.25$ 溢出 1

$0.25\times2=0.50$ 溢出 0

$0.50\times2=1.00$ 溢出 1

所以 $(0.625)_{10}=(0.101)_2$

例 4-16 将十进制纯小数0.52 转换成二进制小数。

解

$0.52\times2=1.04$ 溢出 1

$0.04\times2=0.08$ 溢出 0

$0.08\times2=0.16$ 溢出 0

$0.16\times2=0.32$ 溢出 0

$0.32\times2=0.64$ 溢出 0

$0.64\times2=1.28$ 溢出 1

$0.28\times2=0.56$ 溢出 0

$0.56\times2=1.12$ 溢出 1

所以 $(0.52)_{10}=(0.10000101)_2$

注意：在十进制小数转换成二进制小数时，整个过程可能无限制的进行下去，然而一般考虑到计算机字长的限制，只取机器字长位数的近似值。

3. 十进制混合小数的转换

将整数部分与小数部分分别进行转换，然后把它们加在一起就行了。

例 4-17 将十进制小数6.25 转换成二进制小数。

解 （1）整数部分

$$
\begin{array}{r|l l}
2 & 6 & \\
2 & 3 & \cdots\cdots 0 \\
2 & 1 & \cdots\cdots 1 \\
 & 0 & \cdots\cdots 1
\end{array}
\quad \uparrow
$$

(2) 纯小数部分

$0.25\times2=0.50$　　溢出 0　　↓

$0.50\times2=1.00$　　溢出 1

所以　　$(6.25)_{10}=(110.01)_2$

4. 二进制数转换成十进制数

将二进制数按数位分别乘以…2^{-3}，2^{-2}，2^{-1}，2^0，2^1，2^2，2^3，…再相加，就得到十进制数。

例 4-18　将二进制数101.01 转换成十进制数。

解

$$
\begin{aligned}
(101.01)_2 &= (1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0+0\times2^{-1}+1\times2^{-2})_{10} \\
&= (4+0+1+0+0.25)_{10} \\
&= (5.25)_{10}
\end{aligned}
$$

例 4-19　将二进制数110110.1011 转换成十进制数。

解

$$
\begin{aligned}
(110110.1011)_2 &= (1\times2^5+1\times2^4+0\times2^3+1\times2^2+1\times2^1+0 \\
&\quad \times2^0+1\times2^{-1}+0\times2^{-2}+1\times2^{-3}+1\times2^{-4})_{10} \\
&= (32+16+0+4+2+0+0.5+0+ \\
&\quad 0.125+0.0625)_{10}=(54.6875)_{10}
\end{aligned}
$$

5. 任意两个进位制数的转换

在一般情况下，任意两个进位制数之间的转换方法与十进制和二进制之间的转换方法是一样的。比如，要将十进制数转换成八进制数，如果是整数，只需采取除 8 的方法，如果是小数，则用乘 8 的方法。

例 4-20 将十进制数725.6875 转换成八进制数。

解 (1) 首先用除 8 的方法，将 725 转换成八进制数。

$$
\begin{array}{r|l l}
8 & 725 & \\
8 & 90 & \cdots\cdots 5 \\
8 & 11 & \cdots\cdots 2 \\
8 & 1 & \cdots\cdots 3 \\
 & 0 & \cdots\cdots 1
\end{array}
\quad \uparrow
$$

所以 $(725)_{10} = (1325)_8$

(2) 用乘 8 的方法，将 0.6875 转换成八进制小数。

$0.6875 \times 8 = 5.5000$……溢出 5 ↓

$0.5 \times 8 = 4.0$ ……溢出 4

所以 $(0.6875)_{10} = (0.54)_8$

最后转换结果为

$(725.6875)_{10} = (1325.54)_8$

八进制数转换成十进制数，方法同二进制数转换成十进制数一样，只要将每位的数码乘以该位的位权，然后再加就行了。

例 4-21 将八进制数137.24 转换成十进制数。

解
$$
\begin{aligned}
(137.24)_8 &= (1\times 8^2 + 3\times 8^1 + 7\times 8^0 + 2\times 8^{-1} \\
&\quad + 4\times 8^{-2})_{10} \\
&= (64 + 24 + 7 + 0.25 + 0.0625)_{10} \\
&= (95.3125)_{10}
\end{aligned}
$$

(二) 逻辑代数基础

逻辑代数又叫开关代数，也可叫布尔代数●。它是研究逻辑电路（开关电路）的一种数学方法，这在电子计算机、

● 布尔代数是英国数学家 G. Boole 提出的。

数控机床、自动控制线等设备中广泛应用。

1. 逻辑变量

逻辑代数和普通代数一样，也是用字母表示变量，但是比普通代数简单，它只有两个不同的值，常用“0”和“1”表示。表示方法虽然简单，但它在逻辑电路中有很大的应用价值，这是因为“1”和“0”可以代表开关电路中的两个状态，如接通和断开；电压的高和低；晶体管的导通和截止；信号的有和无等。

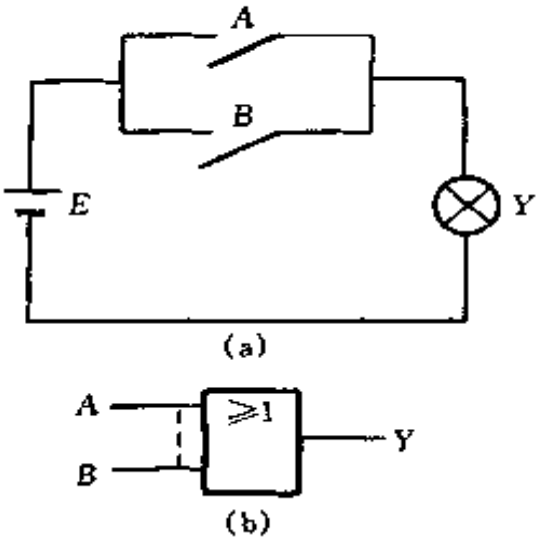


图 4-23 或逻辑关系和符号

(a) 或逻辑关系举例；(b) 或逻辑符号

2. 逻辑运算

在逻辑代数中，有 3 种最基本的运算：或运算、与运算、非运算。

(1) 或运算。图 4-23 (a) 表示一简单或逻辑电路，只要开关 A、B 其中一个接通或两个都接通，则灯亮，而当开关 A、B 均不通时，则灯不亮。或逻辑关系表和真值表见表 4-4、表 4-5。

表 4-4 或逻辑关系表

开关 A	开关 B	灯 Y
断	断	灭
断	通	亮
通	断	亮
通	通	亮

表 4-5 或逻辑真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

由此，可总结出或逻辑关系：在决定事物结果的几个条件中，只要一个或一个以上条件得到满足时，结果就会发

生；否则，结果不会发生。

逻辑变量间的逻辑或关系，也称或运算，逻辑加运算，并用符号“+”表示。曾有用符号 V、U 表示或运算的。A、B 和 Y 的或逻辑关系表达式为

$$Y = A + B \tag{4-110}$$

图 4-23b 为或逻辑符号，$A+B$ 读作 A 或 B。

（2）与运算。图 4-24（a）表示一简单与逻辑电路，如果有一个开关不接通或两个均不接通，指示灯不亮；只有当两个开关全部接通时，指示灯才会亮。

与逻辑关系表明：只有决定事物结果（灯亮）的几个条件（开关 A、B 接通）全都具备时，结果才会发生。

若用逻辑表达式来描述与逻辑，则可写为

$$Y = A \cdot B \tag{4-111}$$

式中小圆点“·”表示 A、B 的与逻辑关系，称作与运算、逻辑乘。小圆点可省略。曾有用符号 ∧、∩、& 表示与运算的。$A \cdot B$ 读作 A 与 B。

图 4-24（b）为与运算符号，与逻辑关系表和真值表见表4-6、表 4-7。

表 4-6　与逻辑关系表

开关 A	开关 B	灯 Y
断	断	灭
断	通	灭
通	断	灭
通	通	亮

表 4-7　与逻辑真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

（3）非运算。由图 4-25（a）所示电路可知，当开关 A 接通时，指示灯 Y 不亮；当开关 A 断开时，指示灯亮。其逻辑关系表和真值表见表 4-8、表 4-9。

非逻辑关系表明：当条件满足时，结果不会发生；而条

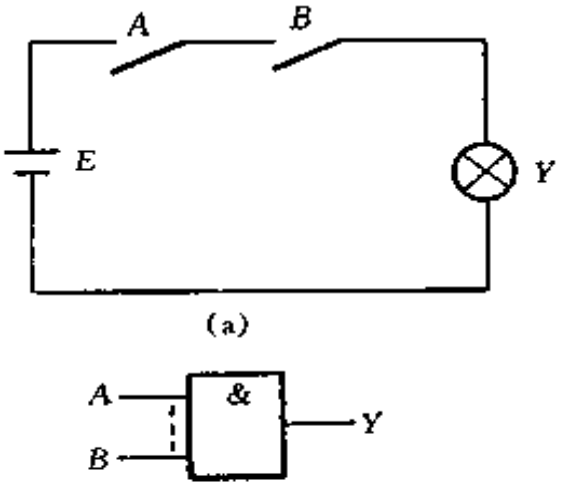


图 4-24　与逻辑关系和符号

(a) 与逻辑关系举例；(b) 与逻辑符号

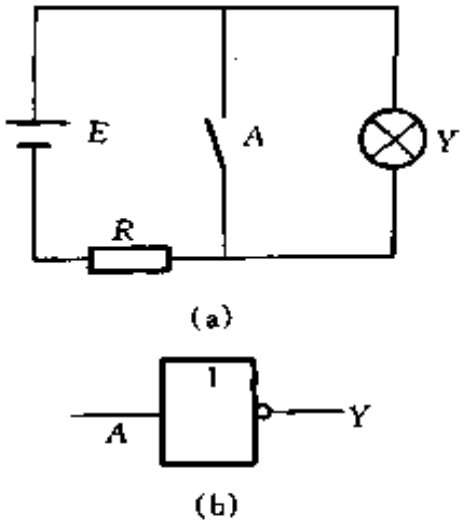


图 4-25　非逻辑关系与符号

(a) 非逻辑关系举例；

(b) 非逻辑符号

件不满足时，结果才会发生。

逻辑非称为非运算，也称作求反运算，通常在变量上方加一短横线表示非运算。其逻辑表达式为

$$Y = \overline{A} \tag{4-112}$$

$\overline{A}$ 读作 A 非。逻辑非的符号如图 4-25b 所示，图中小圆圈表示非运算。

表 4-8　非逻辑关系表

开关 A	灯 Y
断	亮
通	灭

表 4-9　非逻辑真值表

A	Y
0	1
1	0

3. 逻辑函数

如果一组逻辑变量 A，B，C，D，……与另一个逻辑变量 Y 存在着一定的逻辑关系，当 A，B，C，D，……的取值确定以后，Y 值就唯一地被确定了，我们称 Y 是 A，

B，C，D，……的逻辑函数，记作

$$Y = F(A,B,C,D,\cdots) \tag{4-113}$$

逻辑函数关系常用的表示方法有：

（1）真值表。由变量各种可能的取值与相应的函数值列成的表叫真值表。任何一个函数，它的真值表是唯一的。

列真值表时，怎样才能既不重复，又不遗漏地写出各种输入的状态？一般可用下述方法：

1）输入端的不同状态组合数目与输入端个数的关系是：1 个输入端，只有 2 种不同状态；2 个输入端，共有 2^2 种不同状态；3 个输入端共有 2^3 种不同状态；……；n 个输入端，共有 2^n 种不同状态。

2）列表时，输入状态按 n 列，2^n 行画好表格，然后从右到左，在第 1 列中填入 0，1，0，1，……；在第 2 列中填入 0，0，1，1，0，0，1，1，……；在第 3 列中填入 0，0，0，0，1，1，1，1，……；如此类推，填满为止。然后，把每一行中各输入端的状态代入逻辑函数式，计算并记下输出端状态就行了。

例 4-22 写出逻辑函数 $Y = AB + BC$ 的真值表。

解 因现有 A，B，C 3 个变量，故有 2^3 种（即 8 种）不同状态，其真值表如下：

（2）逻辑函数表达式。简称逻辑式，它是由变量按对应的关系用与、或、非等逻辑运算组合起来的表达式。用它表示逻辑函数，形式简洁，书写方便，便于推演、变换，但是它不能直接表示出变量取值与函数间的对应关系，而且同一逻辑函数可以有不同的逻辑函数表达式。

为书写方便，在写逻辑函数表达式时，可按下述规则省去括号或运算符号。

表 4-10　　$Y = AB + BC$ 真值表

A	B	C	AB	BC	$Y = AB + BC$
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
1	1	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0
0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1

1）对一组变量进行非运算时，可不加括号，如$(\overline{A+B})$可写成$\overline{A+B}$。

2）在一表达式中，如既有与运算，又有或运算，则按先与后或的规则省去括号，如$(A\cdot B)+(C\cdot D)$可写成$A\cdot B+C\cdot D$，但$(A+B)\cdot(C+D)$不能写成$A+B\cdot C+D$。

3）与运算符号一般可以省去，如$A\cdot B$可写成AB。

（3）逻辑图。将逻辑函数表达式中各变量间的与、或、非等运算关系用相应的逻辑符号表示出来，就是函数的逻辑图。

式$Y=\overline{A}B+A\overline{B}$的逻辑关系，可用图 4-26 的逻辑图来表示。

逻辑图与数字电路的器件有明显的对应关系，便于制作实际电路。但它不能直接进行逻辑推演和变换。

（4）波形图。反映输入和输出波形变化规律的图形，称为波形图，也称时序图。

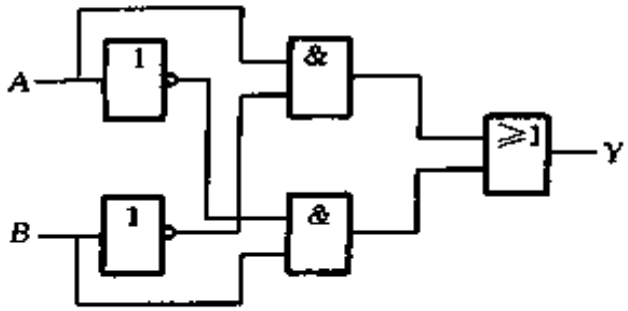


图 4-26　式 $Y=\overline{A}B+A\overline{B}$的逻辑图

图 4-27 是给定 A、B 波形后所画出的上述函数 Y 的波形图。

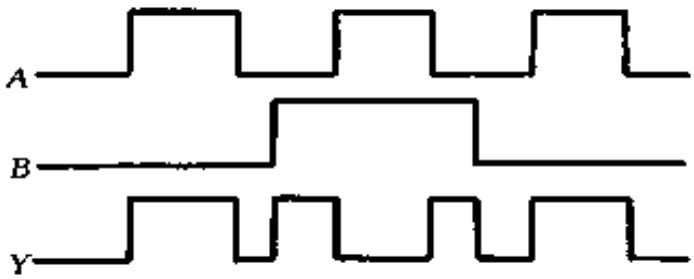


图 4-27　式 $Y=\overline{A}B+A\overline{B}$的波形图

波形图能直接反映变量与时间的关系和函数值变化的规律。与实际电路中的电压波形相对应。

(5) 各种表示方法间的相互转换。同一逻辑函数可以用几种不同的方式来表示，这几种表示方法之间必然可以互相转换。下面举例说明转换方法。

例 4-23　某逻辑函数的真值表如表4-11所示，试将它转换成逻辑表达式，并画出逻辑图。

解　(1) 由真值表转换成逻辑表达式。将真值表中使 $Y=1$ 的各乘积项进行逻辑加，可得

$$Y=\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}+ABC$$

(2) 根据函数表达式，可画出图 4-28 所示的逻辑图。

表 4-11　　某逻辑函数真值表

A	B	C	Y	A	B	C	Y
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	1	1	1

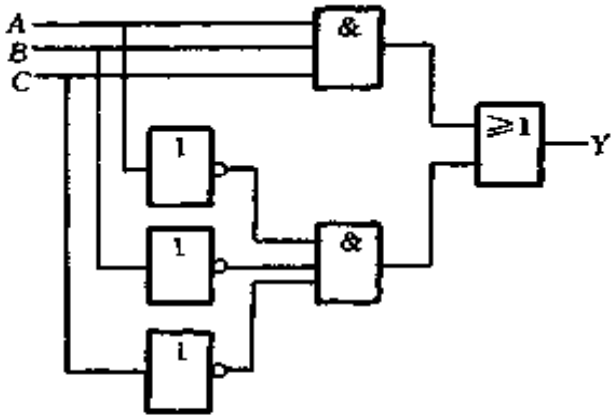


图 4-28　例 4-23 的逻辑图

例 4-24　已知函数的逻辑表达式为 $Y = A + \overline{B}C$，求它对应的真值表，已知输入波形，画出输出波形图。

解　将输入变量 A、B、C 的各种取值逐一代入表中计算，即可得到函数 Y 的真值表，如表 4-12 所示。

表 4-12　　例 4-24 的真值表

A	B	C	Y	A	B	C	Y
0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1	1	1

根据输入 A、B、C 的波形画出输出 Y 的波形如图4-29所示。

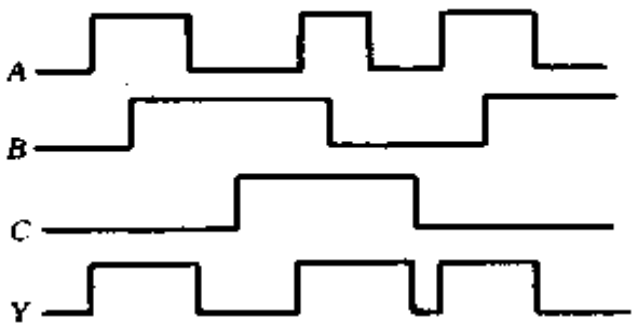


图 4-29　例 4-24 的波形图

例 4-25　已知函数 Y 的逻辑图如图 4-30，写出函数 Y 的逻辑表达式。

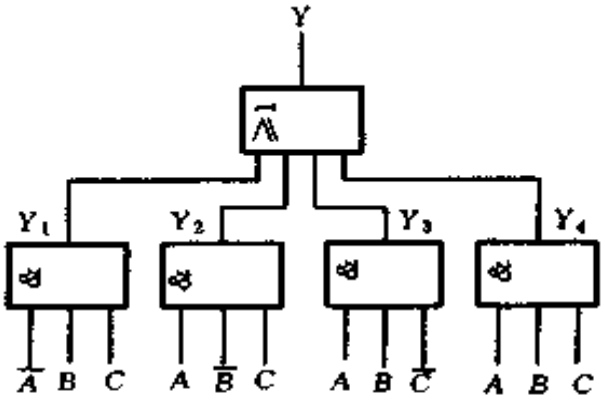


图 4-30　例 4-25 的逻辑图

解　逐级写出输出端函数表达式如下

$Y_1 = \overline{A}BC$

$Y_2 = A\overline{B}C$

$Y_3 = AB\overline{C}$

$Y_4 = ABC$

最后得到函数 Y 的表达式

$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 = \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$

（三）逻辑代数的基本定律和规则

1. 基本定律

逻辑代数中有 10 个基本定律，反映了逻辑运算的基本规律，它是化简逻辑函数，分析和设计逻辑电路的基础，必须熟悉和掌握。逻辑代数常用定律和公式见表 4-13。

表 4-13　　逻辑代数常用定律和公式

名称	公　　式
0-1 律	$A+0=A$　　$A\cdot 0=0$ $A+1=1$　　$A\cdot 1=A$
交换律	$A+B=B+A$　　$AB=BA$
结合律	$A+B+C=A+(B+C)=(A+B)+C$　　$ABC=A(BC)=(AB)C$
分配律	$A+(BC)=(A+B)(A+C)$　　$A(B+C)=AB+AC$
重叠律	$A+A=A$　　$AA=A$
互补律	$A+\overline{A}=1$　　$A\overline{A}=0$
吸收律	$A+AB=A$　　$A(A+B)=A$ $A+\overline{A}B=A+B$　　$A(\overline{A}+B)=AB$
还原律	$\overline{\overline{A}}=A$
反演律（摩根律）	$\overline{A+B}=\overline{A}\,\overline{B}$　　$\overline{AB}=\overline{A}+\overline{B}$
隐含律	$AB+\overline{A}C+BC=AB+\overline{A}C$

表中定律都可用真值表证明。

例 4-26　证明公式$\overline{A+B}=\overline{A}\,\overline{B}$。

解　列出等号两边式子的真值表，见表 4-14。

表 4-14　　$\overline{A+B}$和$\overline{A}\,\overline{B}$真值表

A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$	$\overline{A}\ \overline{B}$	$A+B$	$\overline{A+B}$
0	0	1	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0

由表 4-14 可知$\overline{A+B}=\overline{A}\,\overline{B}$是成立的。

例 4-27 证明公式 $A+BC=(A+B)(A+C)$。

解 列出等号两边式子的真值表，见表 4-15。

表 4-15　　$A+BC$ 和 $(A+B)(A+C)$ 真值表

A	B	C	BC	$A+BC$	$A+B$	$A+C$	$(A+B)(A+C)$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	1	1	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

由表 4-15 可知，$A+BC=(A+B)(A+C)$。

2. 基本规则

(1) 代入规则。任何一个逻辑等式中，如果将等式两边所有出现某一变量 A 的位置都代以一个函数 Y，则等式仍然成立，这个规则称为代入规则。

例 4-28 证明公式$\overline{ABC}=\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}$

解 利用反演律$\overline{AB}=\overline{A}+\overline{B}$，将所有出现 A 的地方都以 $Y=AC$ 代入，则等式仍然成立，得

$$\overline{ACB}=\overline{AC}+\overline{B}$$

即

$$\overline{ABC}=\overline{A}+\overline{C}+\overline{B}=\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}$$

(2) 反演规则。设 Y 为一个逻辑表达式，如果将 Y 中所有的与换成或，或换成与，常量 0 换成 1，1 换成 0，将原变量换成反变量，反变量换成原变量，则所得到的就是 Y 的反函数 $\overline{Y}$。

利用反演规则，可以较容易地求出一个函数的反函数。

例 4-29 求函数 $Y=\overline{A}\,\overline{B}+CD$ 的反函数 $\overline{Y}$

解 利用反演规则，有

$$\overline{Y}=(A+B)(\overline{C}+\overline{D})$$

例 4-30 求函数 $Y=A+\overline{B+\overline{C}+\overline{D+\overline{E}}}$的反函数

解 求该函数的反函数有下列两种情况

(1) 运用反演规则时，除反变量 $\overline{C}$、$\overline{E}$ 按规则换为原变量C、E 外，其它反号（不是一个变量顶上的反号）应保持不动，即

$$\overline{Y}=\overline{A}\,\overline{\overline{B}C\,\overline{\overline{D}E}}$$

(2) 也可以把 $B+\overline{C}+\overline{D+\overline{E}}$看成一个新变量$F$，即 $Y=A+\overline{F}$，运用反演规则得

$$\overline{Y}=\overline{A}F=\overline{A}\ (B+\overline{C}+\overline{D+\overline{E}})$$

在运用反演规则时，要特别注意符号的优先顺序，如对于 $Y=\overline{A}\overline{B}+CD$ 来说，按括号省略规则，应先做 $\overline{A}\,\overline{B}$和$CD$，然后再进行两者的或运算，因此，使用反演规则得到的 $\overline{Y}$，按运算符号的优先次序，应先做 $A+B$ 和$\overline{C}+\overline{D}$，再进行两者的与运算，应写成 $\overline{Y}=(A+B)(\overline{C}+\overline{D})$，而不能写成 $A+B\overline{C}+\overline{D}$。

(3) 对偶规则。设 Y 是一个逻辑表达式，如果将 Y 中所有的与换成或，或换成与，常量 1 换成 0，0 换成 1，而变量保持原样，就可得到一个新的表达式，称为 Y 的对偶式，记作 Y'。

如果两个逻辑函数式相等，则它们的对偶式也相等，这就是对偶规则。利用对偶规则可证明恒等式。

例 4-31 证明等式 $A\overline{B}+\overline{A}B=(\overline{A}+\overline{B})(A+B)$

解 首先求左边的对偶式

$$Y'=(A+\overline{B}\ (\overline{A}+B)=AB+\overline{A}\,\overline{B}$$

右边的对偶式 $Y' = AB + \overline{A}\,\overline{B}$

可见等式两边的对偶式相等，故原式相等。

（四）逻辑函数的代数化简法

一个函数可以有不同的表达式，例如

$Y = AB + \overline{A}C$　　与—或表达式

$= (A + C)(\overline{A} + B)$　　或—与表达式

$= \overline{\overline{AB} \cdot \overline{\overline{A}C}}$　　与非—与非表达式

$= \overline{\overline{A + C} + \overline{\overline{A} + B}}$　　与非—或非表达式

$= \overline{A\,\overline{B} + \overline{A}\,\overline{C}}$　　与—或—非表达式

对于不同类型的表达式，化简的标准是不同的。下面主要讨论与—或表达式的化简方法，因为任何一个表达式都不难展开为一个与—或表达式；从一个最简的与—或表达式可以比较容易地得到与非—与非、与—或—非等其它类型的表达式；只要掌握了与—或表达式的化简方法，由于表达式的对偶性，就不难化简或—与表达式。

什么叫最简的与—或表达式？首先，乘积项个数应该是最少的；其次，在满足上述条件下，要求每一个乘积项中变量最少。

代数化简法常用以下几种方法。

1．并项法

利用公式 $AB + A\overline{B} = A$，将两项合并成一项，并消去一个变量。如

$$Y = \overline{A}BC + \overline{A}\,\overline{B}C = \overline{A}C\ (B + \overline{B}) = \overline{A}C$$

2．吸收法

利用公式 $A + AB = A$ 消去多余的项。如

$$Y = A\overline{B} + A\overline{B}CD\ (E + G) = A\overline{B}$$

3. 消去法

利用公式 $A+\overline{A}B=A+B$ 消去多余因子。如

$$
\begin{aligned}
Y &= AB+\overline{A}C+\overline{B}C=AB+(\overline{A}+\overline{B})C \\
&= AB+\overline{AB}C=AB+C
\end{aligned}
$$

4. 配项法

利用公式 $A+\overline{A}=1$ 作配项用，以便消去更多的项。如

$$
\begin{aligned}
Y &= A\overline{B}+B\overline{C}+\overline{B}C+\overline{A}B \\
&= A\overline{B}+B\overline{C}+(A+\overline{A})\overline{B}C+\overline{A}B(C+\overline{C}) \\
&= A\overline{B}+B\overline{C}+A\overline{B}C+\overline{AB}C+\overline{A}BC+\overline{A}B\overline{C} \\
&= (A\overline{B}+A\overline{B}C)+(B\overline{C}+\overline{A}B\overline{C})+(\overline{AB}C+\overline{A}BC) \\
&= A\overline{B}+B\overline{C}+\overline{A}C
\end{aligned}
$$

实际化简时，可综合利用上述几种方法进行。

例 4-31 将 $Y=\overline{A\overline{C}B}+\overline{A\overline{C}+B}+BC$ 化成最简与或表达式。

解

$$
\begin{aligned}
Y &= \overline{A\overline{C}B}+\overline{A\overline{C}+B}+BC \\
&= \overline{A\overline{C}B}+\overline{A\overline{C}\overline{B}}+BC \\
&= \overline{A\overline{C}}(B+\overline{B})+BC \\
&= \overline{A\overline{C}}+BC \\
&= \overline{A}+C+BC \\
&= \overline{A}+C
\end{aligned}
$$

例 4-32 将 $Y=ABC+AB\overline{C}+A\overline{B}C+\overline{A}BC$ 化成最简与或表达式。

解

$$
\begin{aligned}
Y &= ABC+AB\overline{C}+A\overline{B}C+\overline{A}BC \\
&= AB(C+\overline{C})+A\overline{B}C+\overline{A}BC \\
&= AB+A\overline{B}C+\overline{A}BC \\
&= AB(C+1)+A\overline{B}C+\overline{A}BC \\
&= AB+ABC+A\overline{B}C+\overline{A}BC
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&= AB + AC\ (B + \overline{B}) + \overline{A}BC \\
&= AB + AC + \overline{A}BC \\
&= AB + AC\ (B + 1) + \overline{A}BC \\
&= AB + AC + ABC + \overline{A}BC \\
&= AB + AC + BC\ (A + \overline{A}) \\
&= AB + AC + BC
\end{aligned}
$$

（五）逻辑函数的卡诺图化简

运用卡诺图化简逻辑函数可以比较方便地得到最简的逻辑函数式。

1. 逻辑函数的最小项及其表达式

(1) 最小项及其性质。在 n 个变量的逻辑函数中，如果一个乘积项包含 n 个变量，且每个变量或以原变量或以反变量的形式在该乘积项中仅出现一次，则该乘积项称为 n 变量的最小项。

例如 A、B、C 是 3 个逻辑变量，由这 3 个变量可以构成许多乘积项，根据最小项的定义，只有 8 个乘积项：$\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}$、$\overline{A}\,\overline{B}C$、$\overline{A}B\,\overline{C}$、$\overline{A}BC$、$A\,\overline{B}\,\overline{C}$、$A\,\overline{B}C$、$AB\,\overline{C}$、$ABC$ 是 3 变量 A、B、C 的最小项。可见，3 个变量共有 $2^3 = 8$ 个最小项。对 n 个变量来说，共有 2^n 个最小项。

3 变量所有最小项的真值表见表 4-16。

表 4-16　　3 变量所有最小项的真值表

变量	m_0	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7
ABC	$\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}$	$\overline{A}\,\overline{B}C$	$\overline{A}B\,\overline{C}$	$\overline{A}BC$	$A\,\overline{B}\,\overline{C}$	$A\,\overline{B}C$	$AB\,\overline{C}$	ABC
000	1	0	0	0	0	0	0	0
001	0	1	0	0	0	0	0	0
010	0	0	1	0	0	0	0	0
011	0	0	0	1	0	0	0	0
100	0	0	0	0	1	0	0	0
101	0	0	0	0	0	1	0	0
110	0	0	0	0	0	0	1	0
111	0	0	0	0	0	0	0	1

由表 4-16 可知：

1）对任意一个最小项，只有一组变量取值使它的值为 1，而在变量取其它各组值时，这个最小项的值都为 0。

2）对于变量的任一组取值，任意两个最小项的乘积为 0。

3）对于变量的任一组取值，全体最小项之和为 1。

为叙述方便，通常要对最小项编号，以 $A\overline{B}C$ 为例，因它与变量取值 101 相对应，而 101 相当于十进制数 5，所以把 $A\overline{B}C$ 记作 m_5。按此规则，3 变量的最小项编号如表4-16所示。

（2）逻辑函数的最小项表达式。任何一个逻辑函数都可写成与或表达式。只要在不是最小项的乘积项中乘以（$x+\overline{x}$），补齐所缺的因子，便可得到这个函数的最小项表达式。

例 4-33 将函数 $Y=AB+A\overline{C}$化成最小项表达式。

解 将 AB 和$A\overline{C}$分别乘以（$C+\overline{C}$）、（$B+\overline{B}$）补齐各项乘积项所缺的因子，可得

$$Y=AB+A\overline{C}=AB(C+\overline{C})+A\overline{C}(B+\overline{B})$$
$$=ABC+AB\overline{C}+A\overline{B}\,\overline{C}$$

上式也可写成

$$Y(ABC)=m_4+m_6+m_7=\Sigma m_{(4,6,7)}$$

由真值表可直接写出最小项表达式。对一个逻辑函数来说，真值表和最小项表达式都是唯一的。

2. 用卡诺图表示逻辑函数

（1）最小项的卡诺图

美国贝尔实验室工程师卡诺（Karnaugh）设计了一种方格图，能直观地表示出最小项的逻辑相邻关系，我们把这种方格图称为卡诺图。

图 4-31（a）为 2 变量卡诺图，AB 有 4 个最小项：$\overline{A}\overline{B}$、$\overline{A}B$、$A\overline{B}$、AB，分别记作 m_0、m_1、m_2、m_3。为画图简便，一般将变量标注在图的左上角，用 1、0 表示原变量和反变量。变量的取值与方格图中的最小项编号一一对应，2 变量的简化形式卡诺图如图 4-31（b）所示。

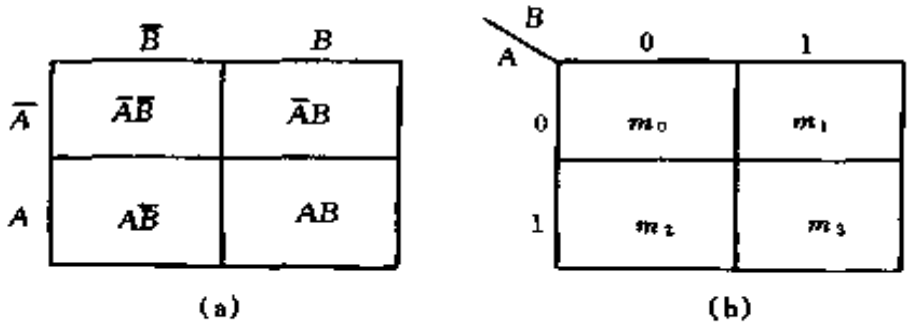


图 4-31　2 变量卡诺图

（a）基本形式；（b）简化形式

图 4-32 为 3 变量卡诺图，图 4-33 为 4 变量卡诺图。图中不仅相邻方格的最小项是逻辑相等项，而且相对的方格也是逻辑相邻项。例如：4 变量的最小项 m_0 与 m_8，m_{12}与 m_{14}等。

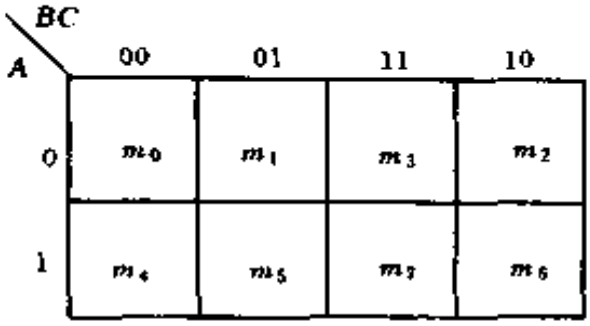


图 4-32　3 变量卡诺图

图 4-34 为 5 变量卡诺图，它由两个 4 变量卡诺图组成，分别对应 $A=0$ 和 $A=1$，它的逻辑相邻项除与 4 变量卡诺

AB \ CD	00	01	11	10
00	m_0	m_1	m_3	m_2
01	m_4	m_5	m_7	m_6
11	m_{12}	m_{13}	m_{15}	m_{14}
10	m_8	m_9	m_{11}	m_{10}

图 4-33　4 变量卡诺图

AB \ CDE	000	001	011	010	110	111	101	100
00	m_0	m_1	m_3	m_2	m_6	m_7	m_5	m_4
01	m_8	m_9	m_{11}	m_{10}	m_{14}	m_{15}	m_{13}	m_{12}
11	m_{24}	m_{25}	m_{27}	m_{26}	m_{30}	m_{31}	m_{29}	m_{28}
10	m_{16}	m_{17}	m_{19}	m_{18}	m_{22}	m_{23}	m_{21}	m_{20}

(a)

A = 0

BC \ DE	00	01	11	10
00	m_0	m_1	m_3	m_2
01	m_4	m_5	m_7	m_6
11	m_{12}	m_{13}	m_{15}	m_{14}
10	m_8	m_9	m_{11}	m_{10}

A = 1

BC \ DE	00	01	11	10
00	m_{16}	m_{17}	m_{19}	m_{18}
01	m_{20}	m_{21}	m_{23}	m_{22}
11	m_{28}	m_{29}	m_{31}	m_{30}
10	m_{24}	m_{25}	m_{27}	m_{26}

(b)

图 4-34　5 变量卡诺图

(a)5 变量卡诺图;(b)5 变量卡诺图由 2 个 4 变量卡诺图组成

图相同外，两图对应位置的最小项也是相邻项，如 m_4 与 m_{20}，m_5 与 m_{21}等。

（2）逻辑函数的卡诺图。只要把函数中包含的最小项在卡诺图中填 1，没有的项填 0（或不填），就得到函数卡诺图。

例 4-34 用卡诺图表示 $Y=AB+C+\overline{A}B\overline{D}$

解 $Y=AB+C+\overline{A}B\overline{D}$是 4 变量的函数，画好 4 变量最小项卡诺图后，可由与或表达式直接填写卡诺图。图4-35表示出直接填写的步骤和最后结果。先填写 AB 项，把 A、B 取 1 的所有方格填 1，如图 4-35（a）所示；再填写 C 项，把 C 取 1 的所有方格填 1，如图 4-35（b）所示；最后填$\overline{A}B\overline{D}$项，把 A 取 0，B 取 1，D 取 0 的方格填 1，如图 4-35（c）所示，最后的结果如图 4-35（d）所示。注意，当两项都包含同一方格时，只填一个 1 就可以了。

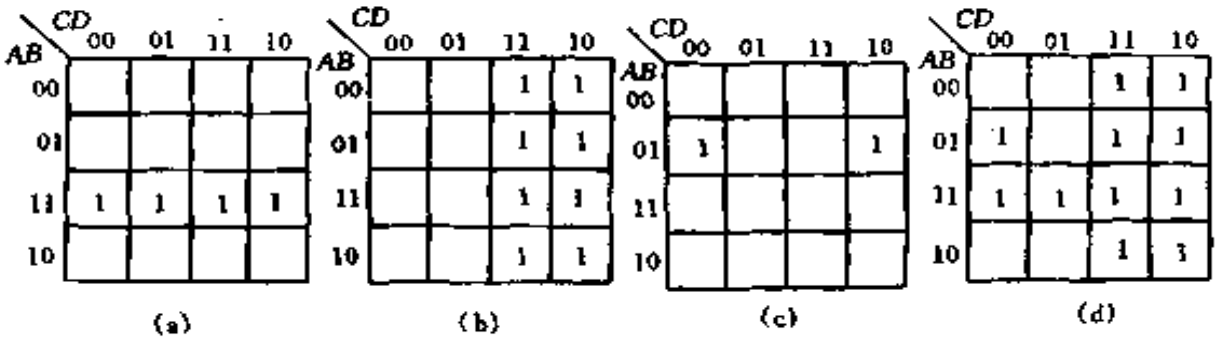


图 4-35 Y 的卡诺图

（a）填 AB 项；（b）填 C 项；（c）填$\overline{A}B\overline{D}$项；（d）结果

3、用卡诺图化简逻辑函数

将逻辑函数用卡诺图表示出来之后，如何将其化简，怎样才能得到最简表达式的第一步是要找出能够合并的那些最小项，即画卡诺圈。画卡诺圈的基本原则和方法如下：

（1）每个包围圈只能圈 2^n 个小方格，而且必须是矩形或正方形。如图 4-36（a）中有 6 个相邻项，应该围两个圈 L_1 和 L_2。

（2）包围圈要尽可能大，即一个包围圈要把它允许包围的最小项一个不漏地全部包围。图 4-36（b）中，L_1、L_2 是最大圈，L_3 就不是最大圈，L_3 应包围 m_1、m_3、m_9、m_{11}4 个最小项。

（3）为了避免出现多余项，应保证一个包围圈中至少应有一个最小项只被圈过一次。图 4-37 中 L_5 是多余圈。

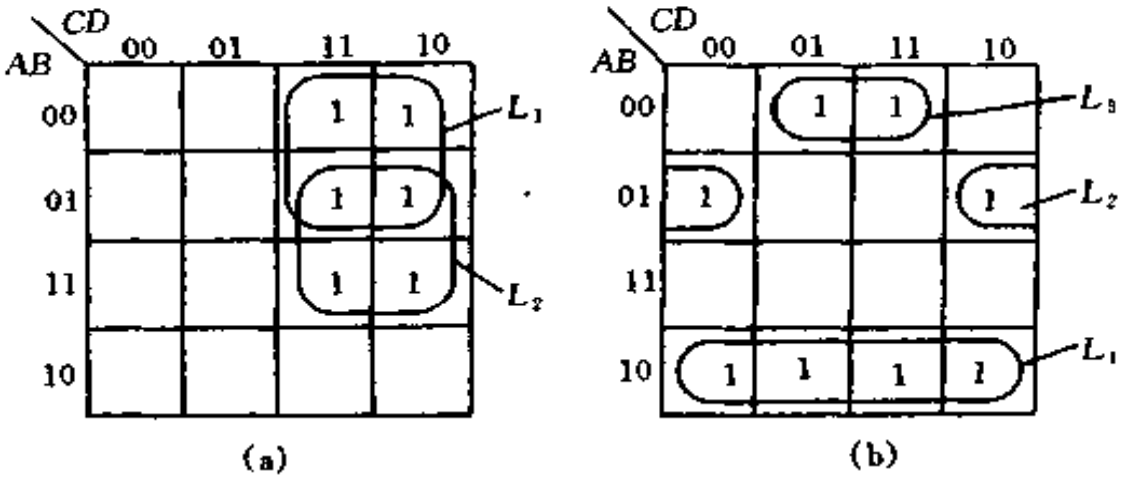


图 4-36　画卡诺圈的基本原则和方法图示

（a）卡诺图中圈 2^n 个小方格；（b）卡诺图中包围圈应是最大圈

（4）为了将函数化为最简并保证函数值不变，应用最少的圈覆盖逻辑函数所有的最小项。图 4-38 中，图（a）的圈法是合理的，图（b）的圈法是不合理的。

画好卡诺圈后，要把每个包围圈中最小项合并成一项，然后相“加”即可得到最简与或式。并项时不是列写出圈中最小项逐项合并，而是消去包围圈中既含原变量又含反变量的那些变量，保留圈中变量取值不变的那些变量在乘积项

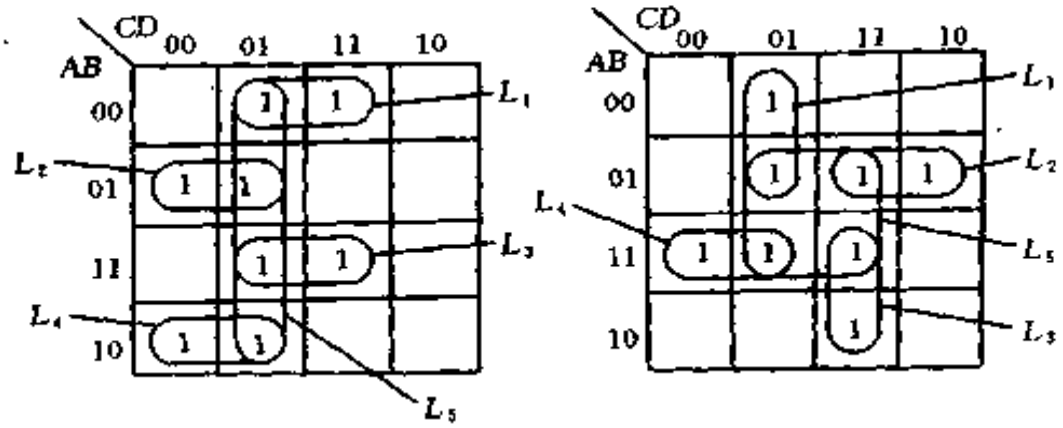


图 4-37　卡诺图中多余圈举例

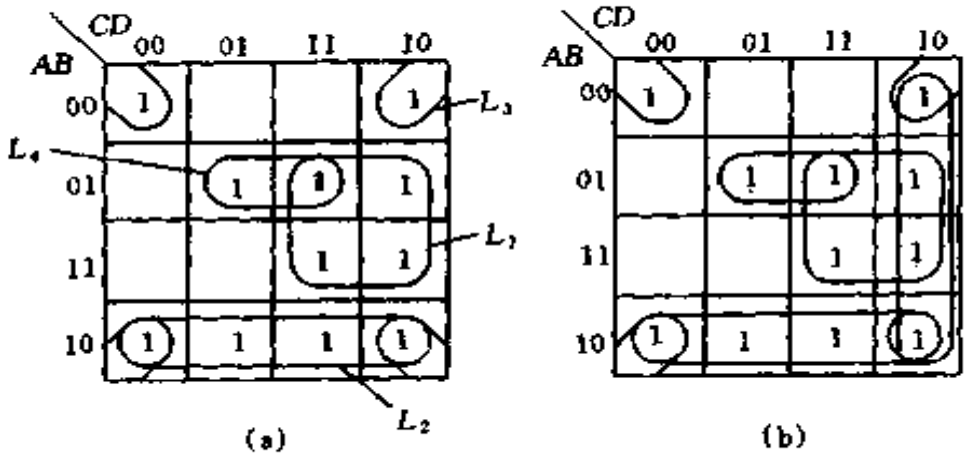


图 4-38　用最少的圈覆盖所有的最小项

(a) 合理；(b) 不合理

中，例如图 4-38a 中

$$L_1 = BC,\ L_2 = A\overline{B},\ L_3 = \overline{B}\ \overline{D},\ L_4 = \overline{A}BD$$

$$Y = BC + A\overline{B} + \overline{B}\ \overline{D} + \overline{A}BD$$

用卡诺图化简逻辑函数比公式法形象、直观，便于掌握。所以，在化简含变量较少（5 变量以下）的逻辑函数时，用卡诺图化简法较为容易。下面，结合例题介绍一些化简技巧。

例 4-35　化简函数 $Y(A,B,C,D)=\Sigma m_{(0,2,6,7,8,10,14,15)}$。

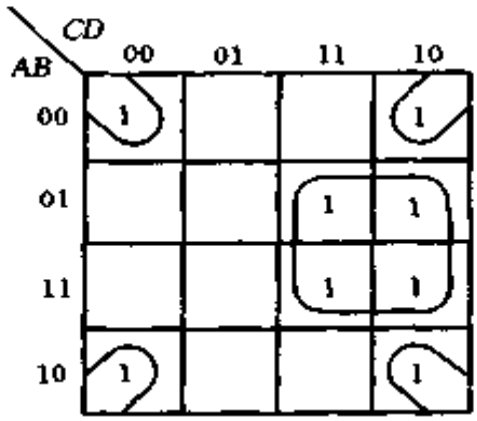


图 4-39　例 4-35 的卡诺图

解　(1) 画出函数的卡诺图，如图 4-39 所示。

(2) 画卡诺圈。

(3) 合并最小项，写出函数的最简与或式如下

$$Y = BC + \overline{B}\,\overline{D}$$

例 4-36　化简函数 $Y(A, B, C, D) = \Sigma m_{(0,2,4,5,7,8,11,12,13)}$。

解　画出卡诺图后，可以按以下步骤圈卡诺图：

(1) 先圈孤立的最小项。

(2) 依次将只有一种圈法的最小项圈出来。

(3) 最后用尽可能大的圈覆盖未被圈过的最小项。化简过程如图 4-40 所示。最简与或式为

$$Y = \overline{C}\,\overline{D} + B\,\overline{C} + \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{D} + \overline{A}BD + A\,\overline{B}CD$$

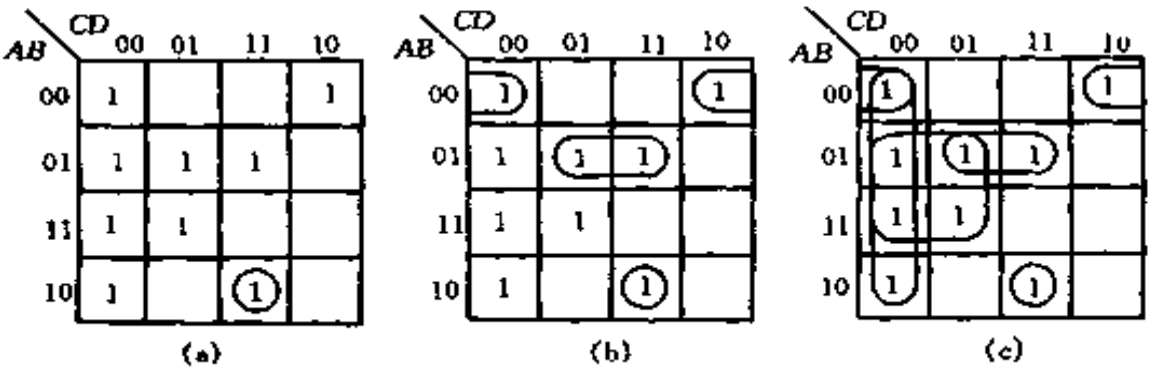


图 4-40　例 4-36 的卡诺图

(a) 圈孤立项；(b) 圈只有一种圈法的项；(c) 用大圈覆盖剩余项

二、交流放大器

(一) 基本电路

图 4-41 是一个由 NPN 型晶体管组成的交流放大电路。

图中各主要元件的作用是：

1. 晶体管 V

NPN 型晶体管是电路中的放大元件，当输入端输入交流电压 U_{in} 后，在输入回路里引起基极交流电流 i_b，经过晶体管的电流放大作用，$i_c=\beta i_b$，从而使较大的集电极电流 i_c受到 U_{in}的控制。

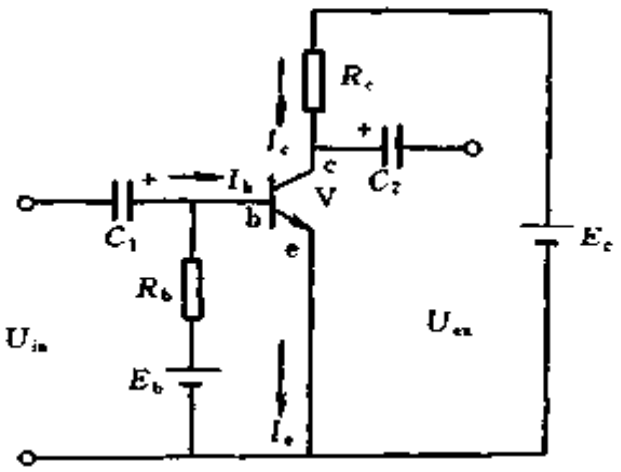


图 4-41　交流放大电路

2. 集电极电阻 R_c

要使放大器输出电压 U_{ex}也受到 U_{in}的控制，或者说要使放大器具有电压放大的功能，还必须把晶体管放大了的集电极电流 i_c转化为输出电压 U_{ex}，所以集电极电阻 R_c是必不可少的，通过它把晶体管的电流放大特性以电压放大的形式表现出来。

3. 集电极电源 E_c

它是整个放大器的能源，此外，集电极电源还保证给晶体管的收集结加上反向电压（即反向偏置），这是晶体管工作在放大状态的必要条件之一。

4. 基极电源 E_b

晶体管工作在放大状态的另一个必要条件是发射结加正向电压（即正向偏置）。图 4-41 中这一条件是靠基极电源 E_b通过基极偏流电阻 R_b来实现的。

5. 基极偏流电阻 R_b

当 E_b一定时，改变 R_b就可改变晶体管基极的直流偏置

电流（简称偏流）I_b，因而使晶体管的直流 I_c和 U_{ce}都相应改变，在没有交流输入信号时（$U_{in}=0$），晶体管的直流工作状态（即 I_b，I_c和 U_{ce}等），就叫做放大器的静态工作点，可见，对于确定放大器的静态工作点来说，R_b是一个关键性的元件。

6. 耦合电容器 C_1 和 C_2

C_1 和 C_2 分别接在放大电路的输入端和输出端，利用电容器对直流电的阻抗很大，对交流电的阻抗很小的特性，一方面隔断放大器的输入端与信号源之间，输出端与负载之间的直流通道，保证放大器的静态工作点不因输入、输出的连接而发生变化；另一方面要保证交流信号可以通畅地经过放大器放大，沟通信号源—放大器—负载三者之间的交流通道。

图 4-41 是由两个电源供电的双电源电路，实际上很不方便。由于 E_b 和 E_c的负极是接在一起的，因此可用 E_c代替 E_b，只需要 R_b适当增加，使 I_b维持不变即可，这样就构成图 4-42 所示的单电源电路（即共发射极电路，简称 CE）。

（二）电路静态工作情况分析

下面以单电源电路为例来说明放大器的静态工作情况，

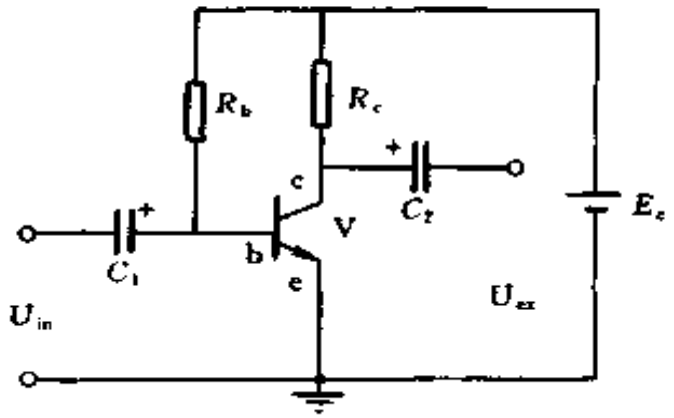


图 4-42　单电源交流放大电路

如图 4-42 所示。

放大器没有信号输入的工作情况，称为静态。在电路参数确定后，静态时晶体管的基极电流 I_b、集电极电流 I_c和集电极电压 U_{ce}都是一些固定的直流数值，称为静态值，因为它们反应到晶体管的特性曲线上是一点，所以又称为放大器的静态工作点。

它们的大小可以分别由下列各式计算

$$I_b=\frac{E_c-U_{be}}{R_b} \tag{4-114}$$

因为考虑到 $E_c \gg U_{be}$（硅管 U_{be}约为 0.6～0.7V，锗管 U_{be}约为 0.2～0.3V），所以上式可以写成

$$I_b \approx \frac{E_c}{R_b} \tag{4-115}$$

根据晶体管的电流放大特性，集电极电流

$$I_c=\beta I_b+I_{ce0} \tag{4-116}$$

$$\beta=\frac{I_c-I_{ce0}}{I_b-0} \tag{4-117}$$

式中　β——晶体管的电流放大系数，即指基极电流从 0 变到 I_b时的 β 值；

I_{ce0}——晶体管集电极和发射极之间的穿透电流。

当 I_{ce0}可以忽略时

$$I_c \approx \beta I_b \tag{4-118}$$

在集电极回路中，由于已知 E_c、R_c和 I_c，所以静态下的管压降 U_{ce}就等于电源电压 E_c减去集电极电流在电阻 R_c上的电压降 I_cR_c，即

$$U_{ce}=E_c-I_cR_c \tag{4-119}$$

利用式(4-114)～(4-118)计算放大器静态值的方

法，称为静态工作点的估算法，该方法具有简单、方便等优点，但是不能直接看出工作点的改变对放大作用的影响，因此工程上又常采用图解法分析放大器，具体步骤如下：

（1）根据有关手册或实验数据，作出晶体管的输出特性曲线，如图 4-43 所示。

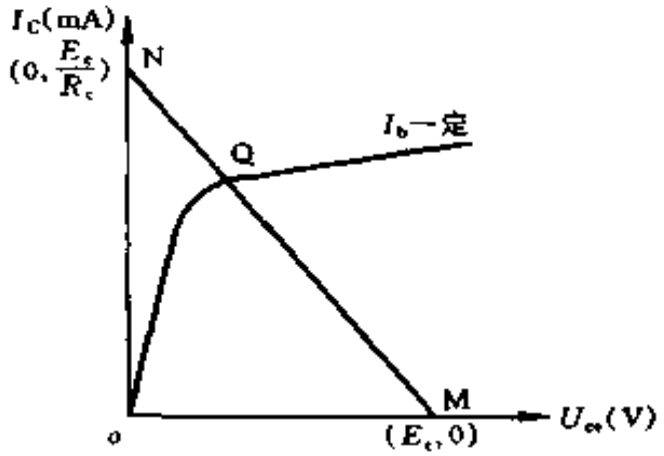


图 4-43　晶体管的输出特性曲线

（2）作直流负载线，根据式 $U_{ce}=E_c-I_cR_c$，在 E_c确定后，它表示一条直线。反应放大器在静态时 U_{ce}与 I_c的关系，称为直流负载线。作图时常用两点确定该直线，即设 $I_c=0$ 时，有 $U_{ce}=E_c$，可在横轴上得到 M 点。设 $U_{ce}=0$ 时，有 $I_c=E_c/R_c$，可在纵轴上得到 N 点，连接 MN，即可得到直流负载线，如图 4-43 所示。显然直流负载线的斜率是

$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{\frac{E_c}{R_c}}{E_c}=\frac{1}{R_c} \tag{4-120}$$

（3）直流负载线与 $I_b\approx E_c/R_b$对应输出特性的交点 Q，即为所求的静态工作点。Q 点的纵坐标就是集电极的静态电

流 I_c，横坐标即为静态时的集电极电压 U_{ce}。

例 4-37 在图 4-42 单管放大电路中，已知 $E_c=6V$，$R_c=2k\Omega$，$R_b=180k\Omega$，晶体管的电流放大系数 $\beta=50$，忽略穿透电流 I_{ce0}，试估算电路的静态工作点。

解 （1）求静态基极电流

根据式（4-115）

$$I_b\approx\frac{E_c}{R_b}=\frac{6}{180\times10^3}$$

$$=0.033\times10^{-3}A=0.033\ (mA)\ =33\ (\mu A)$$

（2）求静态集电极电流

根据式（4-118）

$$I_c\approx\beta I_b=5.0\times0.033=1.65\ (mA)$$

（3）求集电极电压

根据式（4-119）

$$U_{ce}=E_c-I_cR_c=6-1.65\times10^{-3}\times2\times10^3$$

$$=6-3.3=2.7\ (V)$$

（三）放大器的偏置电路

常用的偏置电路如下

1. 固定偏置电路

上面讨论的图 4-42 所示的电路就是固定偏置电路。E_c 通过 R_b供给偏流 I_b，R_b称为偏流电阻。

由式（4-115）可知

$$I_b\approx\frac{E_c}{R_b}$$

这就是说，要选择合适的偏流 I_b，在 E_c一定时，只要选择合适的 R_b就可以了。

因为这种电路，当 R_b选定后，基极偏流 I_b也就固定

了，所以称为固定偏置电路。

例 4-38 电路如图 4-42 所示，已知 $E_c=12V$，$R_c=2k\Omega$，$I_b=60\mu A$，晶体管的 $\beta=50$，问 R_b和 U_{ce}各为多少？

解 （1）求 R_b

因
$$R_b\approx\frac{E_c}{I_b}$$

所以
$$R_b\approx\frac{12}{60\times10^{-6}}=2\times10^5\ (\Omega)\ =200\ (k\Omega)$$

（2）求 U_{ce}

因
$$\beta\approx\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

忽略 I_{ce0}的影响，可以认为直流 I_c和 I_b是从零变到 I_c和 I_b的。

所以
$$\beta=\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}=\frac{I_c-0}{I_b-0}=\frac{I_c}{I_b}$$

根据上式可得 $I_c\approx\beta I_b=50\times0.06=3\ (mA)$

在集电极电路中

$$U_{ce}=E_c-I_cR_c=12-3\times10^{-3}\times2\times10^3=6\ (V)$$

由于以上计算是近似的，也由于晶体管本身参数不一致，故计算后必须在实践中调整。调节 R_b可以改变晶体管的直流工作点，一般在计算好 R_b后用一只固定电阻和一只电位器串联来代替，接固定电阻是为了防止在调整中不小心，电位器变到零值时使偏流过大而烧坏管子，调整好后仍可改接一只固定电阻。

固定偏置电路最大优点是线路简单，但是它存在着严重的缺点，即当晶体管由于环境温度变化或其参数的变动使工作点产生偏移时，不能自动补偿，如图 4-44 所示。

从图4-44(b)中可以看出：当温度升高时，相当于特

性曲线上升，由于固定偏流法基极电流保持不变，将使工作点移到不合适的地方去。从图 4-44（c）可以看出：当管子的 β 变大后，相当于特性曲线上升和间隔变宽，这时工作点也要移到不合适的地方去。

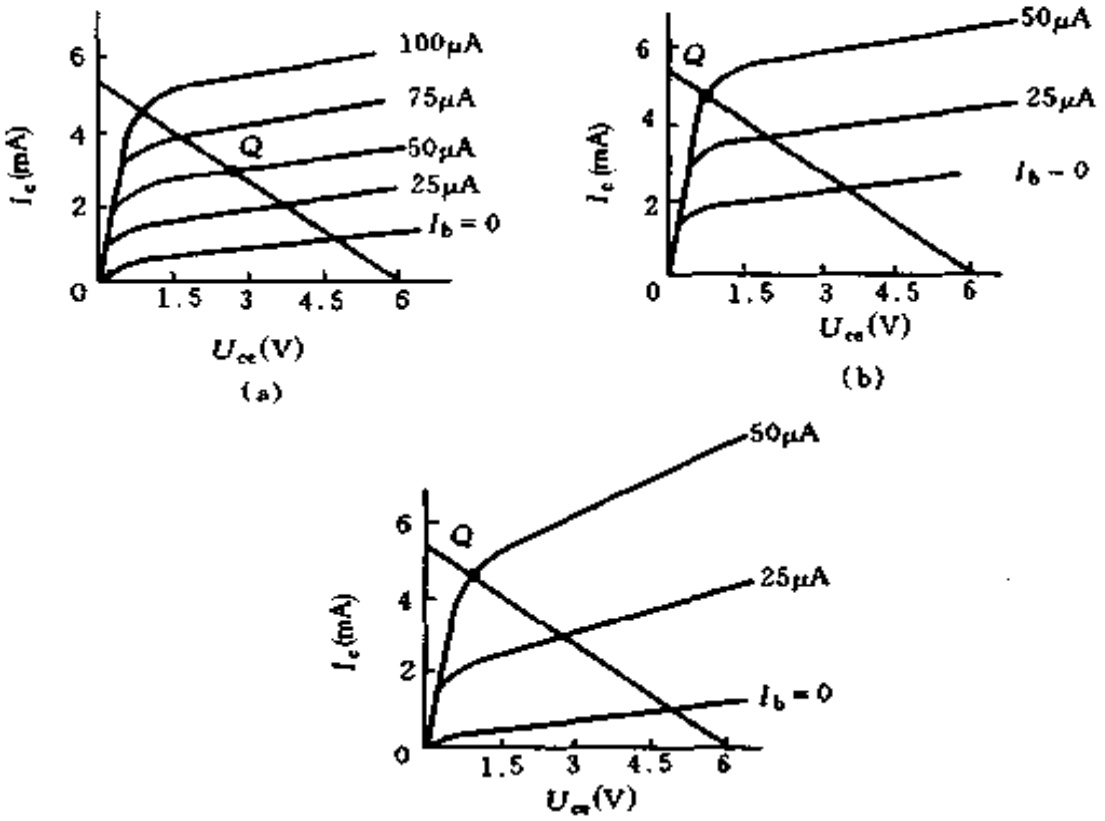


图 4-44　晶体管的输出特性

（a）正常情况；（b）温度升高后（c）β 变大后

2．电压负反馈偏置电路

为了提高工作点的稳定性，减少由于温度变化，更换晶体管或晶体管本身参数变化而引起工作点的偏移，必须采取措施，最常用的是负反馈措施。

所谓反馈是指在输出中取出一部分反送给输入端。所谓负反馈是指反送的信号与输入信号相位相反，对输入信号起减弱作用。

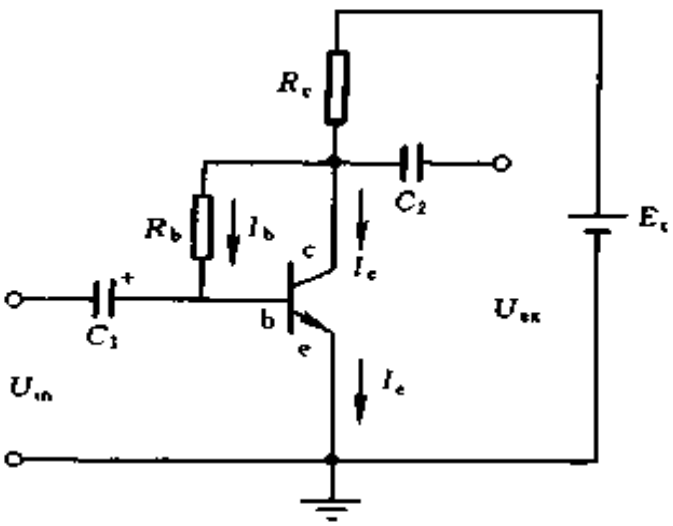


图 4-45　电压负反馈偏置电路

图 4-45 所示电路中，R_b 不接到 $+E_c$，而直接接到晶体管的集电极 c 上，这就构成电压负反馈偏置电路，它可以达到稳定静态工作点的目的，因为这种电路中的基极电流 $I_b=(U_{ce}-U_{be})/R_b\approx U_{ce}/R_b$，而 $U_{ce}=E_c-I_cR_c$，当温度升高时，I_c增大，则 U_{ce}减小，从而 I_b也减小，故 I_c的增加将受到限制。其过程如下：

温度增加 $\longrightarrow I_c\uparrow \longrightarrow I_cR_c\uparrow \longrightarrow U_{ce}\downarrow \longrightarrow I_b\downarrow \longrightarrow I_c\downarrow$

例 4-39　在图4-45所示电压负反馈偏置电路中，已知 $E_c=15\text{V}$，$U_{ce}=6\text{V}$，$I_c=3\text{mA}$，晶体管 $\beta=60$，问 R_b和 R_c各为多少？

解　(1) 求 R_c

因
$$U_{ce}=E_c-I_cR_c$$

所以 $R_c=\dfrac{E_c-U_{ce}}{I_c}=\dfrac{15-6}{3\times10^{-3}}=3\times10^3\ (\Omega)\ =3\ (\text{k}\Omega)$

(2) 求 R_b

根据式 (4-118) 可知

$$I_b\approx\frac{I_c}{\beta}=\frac{3}{60}=0.05\ (\text{mA})$$

又因
$$I_b\approx\frac{U_{ce}}{R_b}$$

所以

$$R_b \approx \frac{U_{ce}}{I_b} = \frac{6}{0.05 \times 10^{-3}} = 120 \times 10^3 \ (\Omega) \ = 120 \ (k\Omega)$$

电压负反馈偏置电路也有一定的局限性，虽然 R_b愈小，稳定性愈好，但电路的工作点 U_{ce}和 I_c一旦决定后，R_b也随着被确定了，所以 R_b的大小，不能单从稳定性来选取。另外，当 R_c较小时，I_c的变化对 U_{ce}的影响不大，尤其是负载为变压器时，反馈作用很小，达不到稳定的目的，于是人们又进行改进，电流负反馈电路就是其中一种方法。

3. 分压式电流负反馈偏置电路

图 4-46 所示为分压式电流负反馈偏置电路。它是目前应用最广泛的一种偏置电路，R_{b1}和 R_{b2}组成分压电路供给

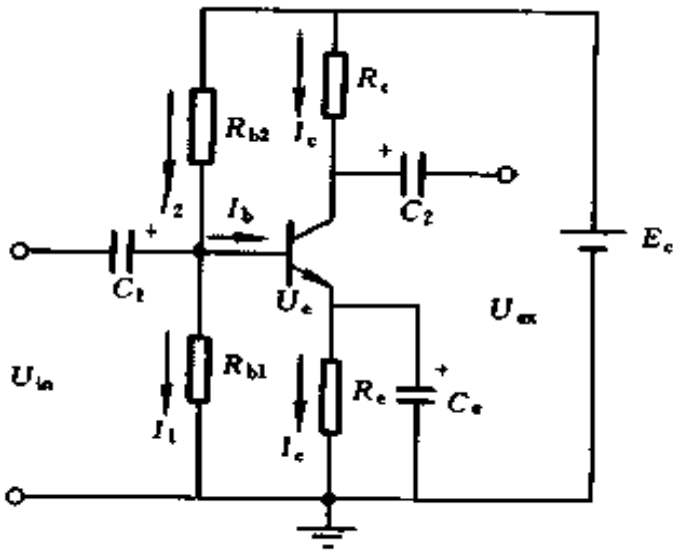


图 4-46　分压式电流负反馈偏置电路

基极偏流，R_e是发射极电阻，起电流负反馈作用。当温度升高使 I_c以及 I_e增加时，R_e两端的电压降 I_eR_e也随之升高，由于 $U_{be} = U_b - I_eR_e$，如能保持 U_b不变，则 I_eR_e升高必使 U_{be}减小，于是基极电流 I_b也随之减小，从而限制了 I_c

的增加，达到稳定工作点的目的。其过程如下：

$$\text{温度升高} \longrightarrow I_c\uparrow \longrightarrow I_e\uparrow \longrightarrow I_eR_e\uparrow \longrightarrow U_{be}\downarrow \longrightarrow I_b\downarrow \longrightarrow I_c\downarrow$$

如　$I_1 \gg I_b$

则可认为

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1}+R_{b2}} \tag{4-121}$$

如　$U_b \gg U_{be}$

则有

$$I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_e} \approx \frac{U_b}{R_e} \tag{4-122}$$

由上式可以看出，只要电路满足 $I_1 \gg I_b$ 和 $U_b \gg U_{be}$ 两个条件，就可以有充分的理由认为 U_b 是固定的，进而 I_e 也是稳定的，与晶体管的参数几乎无关，不仅很少再受温度的影响，而且，当换用 β 不同的管子时，工作点也近似不变。

要使电路稳定，必须满足 $I_1 \gg I_b$ 和 $U_b \gg U_{be}$ 这两个条件。但是 I_1 也不是越大越好，因为 I_1 太大，从电源取用的功率也必然很大，此外，要 I_1 大，就必须减小 R_{b1} 和 R_{b2} 的阻值，在信号源有内阻的情况下，会引起输入信号的无谓损失（因为分流作用，使 I_b 减小），造成放大倍数的下降。同理，U_b 也不是越大越好，U_b 太大，必然使 U_c 增加，当 E_c 为某定值时，管压降 U_{ce} 就要减小，或者为了使 U_{ce} 不致太小，就要减小 R_c，这都将导致放大器工作不正常。

所以，我们在注意到放大器工作点稳定这个主要方面的时候，也不能忽略放大倍数、工作点设置等其它方面的问题。为了兼顾这几个方面的性能，一般选取

$$I_1 \geqslant (5\sim10)\ I_b \qquad \text{（硅管可以更小）} \tag{4-123}$$

$$U_b \geqslant (5\sim10)\ U_{be} = \begin{cases} 3\sim5\text{V（硅管）} \\ 1\sim3\text{V（锗管，取绝对值）} \end{cases} \tag{4-124}$$

还有一点应该指出，反馈电阻 R_e的引入，既然能维持静态的 I_c基本不变，那么对于变化的 i_c也将有同样的作用。为了解决既要稳定直流分量又要不削弱交流分量的矛盾，通常在电阻 R_e上并联一个电容 C_e（大约 100μF 左右），利用电容对直流电与交流电的容抗不同，使其对发射极的交流电流起短路作用，也就是说，让 R_e对交流电流不起负反馈作用，从而使放大器的交流放大倍数不致下降，所以，C_e又称为发射极旁路电容。

例 4-39 在图4-46所示分压式电流负反馈偏置电路中，选定静态工作电流 $I_c=2\text{mA}$，$U_{ce}=5\text{V}$。晶体管 $\beta=50$，$E_c=15\text{V}$，选择电路中各电阻值。

解 （1）求 R_e

对于硅管，取 $U_b=4\text{V}$，$I_e\approx I_c=2\text{mA}$

根据式（4-122）得

$$R_e\approx\frac{U_b}{I_e}=\frac{4}{2\times10^{-3}}=2\times10^3\ (\Omega)\ =2\ (\text{k}\Omega)$$

（2）求 R_c

因 $$I_cR_c=E_c-U_{ce}-U_e\approx E_c-U_{ce}-U_b$$

所以 $$R_c\approx\frac{E_c-U_{ce}-U_b}{I_c}=\frac{15-5-4}{2\times10^{-3}}$$

$$=3\times10^3\ (\Omega)\ =3\ (\text{k}\Omega)$$

（3）求 R_{b1}、R_{b2}

$$I_b=\frac{I_c}{\beta}=\frac{2}{50}=0.04\ (\text{mA})$$

取 $$I_1 = 10I_b = 10 \times 0.04 = 0.4\ (\text{mA})$$

因 $$U_b = I_1 R_{b1}$$

所以 $$R_{b1} = \frac{U_b}{I_1} = \frac{4}{0.4 \times 10^{-3}} = 10 \times 10^3\ (\Omega) = 10\ (\text{k}\Omega)$$

根据式（4-121）

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} = I_1 R_{b1}$$

即 $$R_{b1} + R_{b2} = \frac{E_c}{I_1} = \frac{15}{0.4 \times 10^{-3}} = 37.5 \times 10^3 (\Omega) = 37.5 (\text{k}\Omega)$$

$$R_{b2} = 37.5 - 10 = 27.5\ (\text{k}\Omega)$$

（四）放大器的输入电阻、输出电阻和放大倍数

1．输入电阻

放大器的输入电阻就是从放大器输入端看进去的等效电阻。因此，在求输入电阻时，必须从放大器的交流等效电路入手。下面对前面讨论过的几种电路进行分析。

图 4-42 所示的固定偏置电路，从输入端看进去的交流等效电路可以画成如图 4-47 所示的形式（电容和电源 E_c视为短路）。图中 r_{be}为晶体管基极与发射极之间的等效交流电阻，称为晶体管的输入电阻。输入电阻可用下式进行估算

$$r_{be} = r_b + (\beta + 1)\frac{26}{I_e} \tag{4-125}$$

式中 r_b——晶体管的基区电阻，Ω；

I_e——发射极的静态工作电流，mA。

对于一般小功率晶体管，并运用在低频信号的条件下，它的阻值大约为 300Ω，因此，上式可以改写成

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta)\frac{26}{I_e} \tag{4-126}$$

从图 4-47 可看出，放大器的输入电阻是 R_b与 r_{be}并联

后的等效电阻，即

$$r_{in}=\frac{R_b r_{be}}{R_b+r_{be}} \tag{4-127}$$

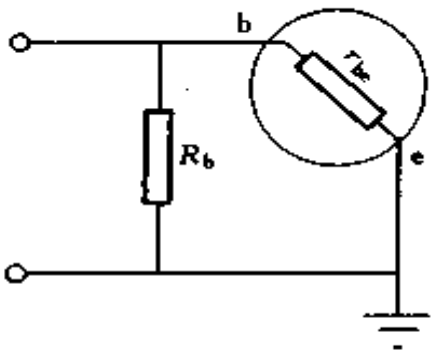


图 4-47　放大器的输入电阻

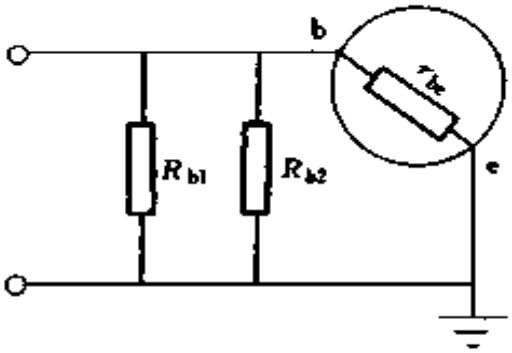


图 4-48　图 4-46 输入端的交流等效电路

对图 4-46 所示的分压式电流负反馈偏置电路，从输入端看进去的交流等效电路，可以画成如图 4-48 所示的形式，图中 R_e被电容 C_e短路，电源 E_c对交流也视为短路，所以 R_{b1}和 R_{b2}并联。设 R_{b1}、R_{b2}的并联电阻值为 R_1，即

$$R_1=\frac{R_{b1}R_{b2}}{R_{b1}+R_{b2}}$$

故

$$r_{in}=\frac{R_1 r_{be}}{R_1+r_{be}} \tag{4-128}$$

2. 输出电阻

放大器的输出电阻就是从放大器的输出端看回去的等效交流电阻。求输出电阻，同样应从输出端的交流等效电路入手。对于图 4-45 所示的固定偏置电路输出端的交流通路

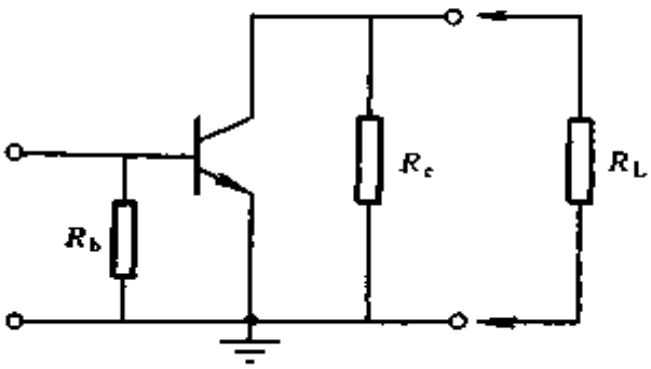


图 4-49　放大器的输出电阻

如图 4-49 所示。因晶体管集电极与发射极间的电阻很大，故放大器的输出电阻仍然是 R_c，即

$$r_{ex} \approx R_c \tag{4-129}$$

对图 4-46 所示分压式电流负反馈偏置电路，输出端的等效交流通路如图 4-50 所示，因此，它的输出电阻也近似等于集电极电阻 R_c。

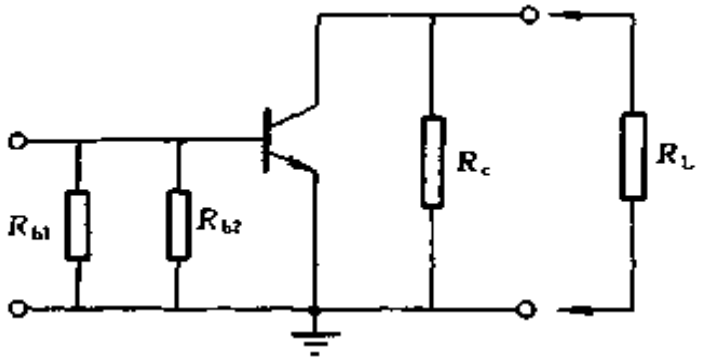


图 4-50　图 4-46 输出端的等效交流电路

3. 放大倍数

放大器的电压放大倍数是指输出信号电压与输入信号电压之比。同理，有电流放大倍数和功率放大倍数，分别用 K_u、K_i、K_p表示。它们的计算公式，在不考虑输出电压与输入电压之间的相位关系时，可分别表示为

$$K_u = \frac{\tilde{U}_{ex}}{\tilde{U}_{in}} = \frac{-\tilde{I}_c R'_L}{\tilde{U}_{in}} = \frac{-\beta \tilde{I}_b R'_L}{\tilde{I}_b r_{be}}$$

$$= -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \tag{4-130}$$

$$K_i = \frac{\tilde{I}_{ex}}{\tilde{I}_{in}} = \frac{\tilde{I}_c}{\tilde{I}_b} = \frac{\beta \tilde{I}_b}{\tilde{I}_b} = \beta \tag{4-131}$$

$$K_p=\frac{\tilde{U}_{ex}\tilde{I}_{ex}}{\tilde{U}_{in}\tilde{I}_{in}}=K_uK_i \tag{4-132}$$

式（4-130）中的负号表示放大电路中输出电压与输入电压反相。R'_L 为放大器输出端的总负载电阻。

例 4-40 在图 4-45 所示固定偏置电路中，假设 $E_c=15V$，$R_c=5k\Omega$，$R_b=500k\Omega$，$\beta=40$。

（1）估算电路的静态工作点；

（2）计算放大器未接负载与接上 3kΩ 负载时的电压放大倍数。

解 （1）估算电路的静态工作点

静态基极电流

$$I_b=\frac{E_c}{R_b}=\frac{15}{500\times10^3}=30\times10^{-6}\ (A)\ =30\ (\mu A)$$

静态集电极电流

$$I_c\approx\beta I_b=40\times30=1200\ (\mu A)\ =1.2\ (mA)$$

集电极电压

$$U_{ce}=E_c-I_cR_c=15-1.2\times5=9\ (V)$$

（2）未接负载时的电压放大倍数

根据式（4-126）可知

$$r_{be}=300+\ (1+\beta)\ \frac{26}{I_e}=300+\ (1+\beta)\ \frac{26}{(1+\beta)\ I_b}$$

$$=\left(300+\frac{26}{30\times10^{-3}}\right)=1167\ (\Omega)$$

故 $$K_u=-\beta\frac{R_c}{r_{be}}=-40\times\frac{5000}{1167}=-171.4\approx-171$$

（3）接上 3kΩ 负载电阻时的电压放大倍数

因 $$R'_L=\frac{R_cR_L}{R_c+R_L}=\frac{5\times3}{5+3}=1.875\ (k\Omega)$$

故 $$K_u=-\beta\frac{R'_L}{r_{be}}=-40\times\frac{1875}{1167}=-64.27\approx-64$$

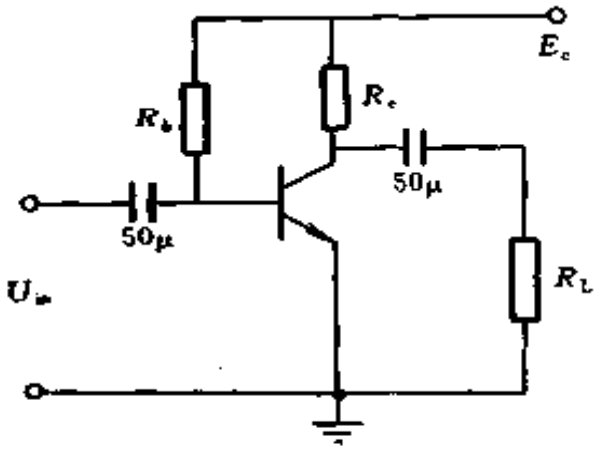


图 4-51 例 4-41 电路图

计算结果表明，放大器带上 3kΩ 负载后，电压放大倍数几乎下降为不带负载的 1/3。因输出电压和输入电压相位相反，故算出的电压放大倍数为负值。

例 4-41 图 4-51 是晶体管单管放大电路，已知 $\beta=40$，输入电阻 $r_{be}=600\Omega$，输入交流信号有效值 $\tilde{U}_{in}=20\text{mV}$，$E_c=+12\text{V}$，$R_L=2\text{k}\Omega$。试计算 R_b、R_c的值应选多大？电路的电压放大倍数是多少？

解 (1) 选取 I_b值

I_b的选择应考虑到不使输入信号因截止而发生失真现象，所以需满足条件 $I_b>I_{bm}$（交流$\tilde{i}_b$的峰值）。

因 $$I_{bm}=\frac{U_{inm}}{r_{be}}=\frac{\sqrt{2}\tilde{U}_{in}}{r_{be}}=\frac{\sqrt{2}\times20\times10^{-3}}{600}$$
$$=47.14\times10^{-6}\text{A}=47.14\ (\mu\text{A})$$

故选 $$I_b=50\times10^{-6}\text{A}=50\ (\mu\text{A})$$

(2) 计算 R_b值

$$R_b\approx\frac{E_c}{I_b}=\frac{12}{50\times10^{-6}}=240000\ (\Omega)\ =240\ (\text{k}\Omega)$$

(3) 选择 R_c值

R_c的选择应保证输出回路不致饱和，为了保证晶体管不饱和，最小的管压降 U_{ce}不应小于 0.5V，即

$$U_{cemin}=E_c-I_cR_c-I_{cm}R'_L>0.5V$$

式中 R'_L为放大器的等效负载电阻

$$R'_L=\frac{R_cR_L}{R_c+R_L}$$

因 $R_c>R'_L$，为了简化计算过程，令

$$E_c-(I_c+I_{cm})R_c>0.5V$$

取 $$E_c-(I_c+I_{cm})R_c=1V$$

式中 I_{cm}——集电极交流电流峰值

$$I_{cm}=\beta I_{bm}=40\times47.14=1886\ (\mu A)=1.886\ (mA)$$

$$R_c=\frac{E_c-1}{I_c+I_{cm}}=\frac{12-1}{40\times50\times10^{-6}+1.886\times10^{-3}}$$

$$=\frac{11}{3.886\times10^{-3}}=2.83\times10^3\ (\Omega)=2.83\ (k\Omega)$$

(4) 计算电压放大倍数

因 $$R'_L=\frac{R_cR_L}{R_c+R_L}=\frac{2.83\times10^3\times2\times10^3}{2.83\times10^3+2\times10^3}=1172\ (\Omega)$$

故 $$K_u=-\frac{\beta R'_L}{r_{be}}=-\frac{40\times1172}{600}=-78$$

三、晶体管的开关特性

脉冲数字电路中的二极管、三极管，大多数工作在开关状态，即在脉冲信号作用下，一会儿通（压降很小，有电流通过，相当开关接通），一会儿不通（没有电流通过，相当开关断开），而且变化的速度非常快，可达每秒一百万次以上。

开关特性就是研究晶体管的截止与导通之间的转化问题，什么条件下才能转化，如何促进其相互转化。

（一）二极管的开关特性

二极管具有单向导电性，在正向电压作用下导通，电阻很小，管压降也很小（硅管约为 0.7V，锗管约为 0.3V），可以看成短路。在反向电压作用下截止，反向电阻很大，可以看成开路。所以二极管可以做为开关，二极管导通时，相当于开关的接通，二极管截止时，相当于开关的断开。二极管在开关电路中主要起箝位、隔离和限幅等作用。

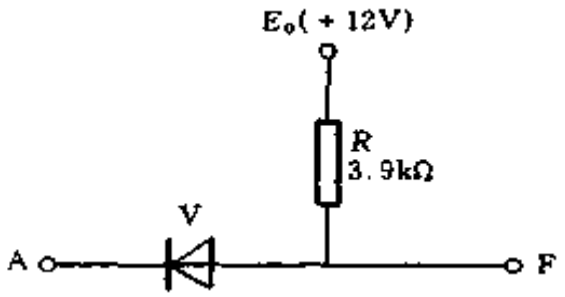


图 4-52 二极管箝位作用

1. 箝位

二极管正向导通时，由于正向压降很小，故阴极与阳极间的电位基本相等，称为二极管的箝位作用，如图 4-52 所示。若 A 点的电位 $U_A=0$，二极管 V 处于正向导通状态，这时 V 的正向内阻相对于 $R=3.9k\Omega$ 来说是很小的，忽略它的影响，可以认为 F 点电位 U_F基本上跟 U_A 相等，即 $U_F\approx U_A=0$，我们说 F 点电位器箝制在 0V。可见箝位就是箝制电位的意思。

2. 隔离

二极管反向截止时，若不考虑很小的反向漏电流，可认为二极管是断开的，称为二极管的隔离作用，如图 4-53 所示。若 A 的电位 $U_A=0$，则 V_A 导通，F 点被箝制在近似于 0V，即 $U_F=0V$。此时，

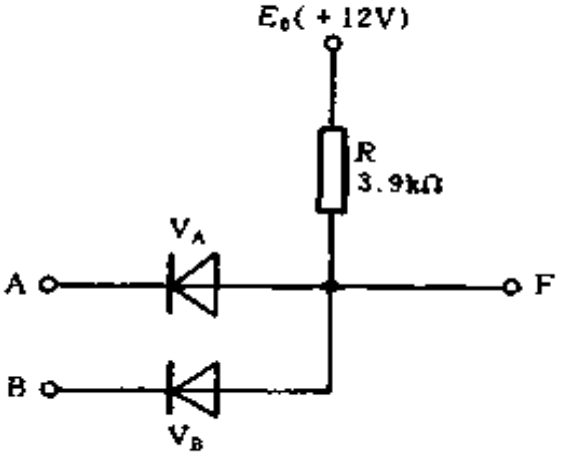


图 4-53 二极管隔离作用

若 B 点电位 $U_B=6V$，V_B截止，B 点电位对 F 点无影响，即 V_B的阴极与阳极被隔离。

3. 限幅

限幅又叫做削波，就是利用二极管将输入波形的一部分削掉，而留下需要的部分。根据削去波形的部位，可分上限幅、下限幅和双向限幅，根据二极管在电路中的位置，又可分串联限幅和并联限幅。

图 4-54 为简单的串联限幅电路，这时二极管和输出端串联，当输入端有一正负相间尖脉冲输入时，由于二极管的单向导电作用，当正脉冲作用时二极管导通，由于二极管的正向电阻 r_v很小，即 $r_v \ll R$，所以 $U_{ex} \approx U_{in}$；当负脉冲输入时，二极管截止，$U_{ex}=0$，可见，这种限幅电路使输入信号的负脉冲被削掉，而只有正脉冲输出，故称为下限幅电路。如要得到上限幅电路，只要把电路中的二极管反接就可以了。

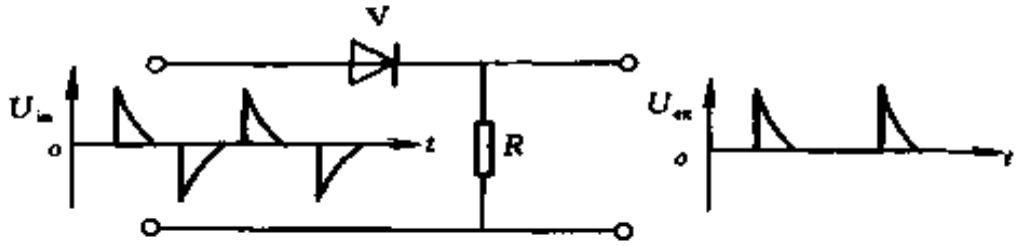


图 4-54　二极管串联限幅电路

图 4-55 为简单的并联限幅电路，这时二极管和输出端并联，当输入负脉冲时，二极管导通，由于 r_v很小，因此输出 $U_{ex} \approx 0$，反之，当输入正脉冲时，二极管截止，因二极管反向电阻 r'_v大，$R \ll r'_v$，故 $U_{ex}=U_{in}$。可见，负尖脉冲被削掉，只有正尖脉冲输出，所以也称下限幅电路。同理，如要得到上限幅电路，只要把电路中的二极管反接即可。

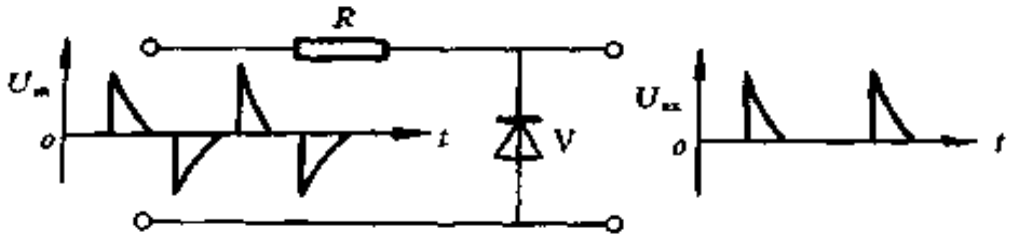


图 4-55　二极管并联限幅电路

（二）晶体管的开关特性

晶体管有放大、饱和与截止 3 种工作状态。晶体管在开关电路中使用时，主要工作在饱和与截止状态。

晶体管的 3 种工作状态的特点及相互转化的条件是：

1．截止状态

条件：$U_b \leqslant U_e$，$U_c > U_b$，两个 p—n 结均为反向偏置。

特点：$I_b \approx 0$，$I_c \approx 0$，$U_c = E_c$。

2．放大状态

条件：发射结加正向电压，$U_b > U_e$（硅管一般 $U_{be} > 0.6V$ 才开始导通，锗管一般 $U_{be} > 0.2V$ 才开始导通）。集电结（又称收集结）反向，$U_c > U_b$。

特点：$\Delta I_c = \beta \Delta I_b$，满足放大规律，$I_c$与 R_c、E_c基本上无关。

3．饱和状态

条件：基极电流足够大，$I_b \geqslant I_{cm}/\beta$（如果 $I_{cm} = E_c/R_c$，则 $I_b > E_c/\beta R_c$）。

特点：发射结、集电结均处于正向，I_b增加，I_c不再增加，$I_c = E_c/R_c$由 R_c、E_c决定。饱和压降 U_{ces}很小（硅管一般为 0.3V 左右，锗管为 0.2V 左右）。

晶体管饱和时的集电极电流称为集电极饱和电流，用

I_{cs}表示。

$$I_{cs} \approx \frac{E_c}{R_c} \tag{4-133}$$

晶体管刚进入饱和时的基极电流，称为临界饱和基极电流，用 I_{bs}表示。

$$I_{bs} = \frac{I_{cs}}{\beta} \approx \frac{E_c}{\beta R_c} \tag{4-134}$$

例 4-42 试分析图 4-56 中各晶体管的工作状态

解 根据对晶体管 3 种工作状态的分析，若 $I_c \approx 0$，则为截止状态；若 $0 < I_c < I_{cs}$，则为放大状态；若 $I_b \geqslant I_{bs}$，则为饱和状态。

(1) 图 4-56 (a) 中

$$I_b = \frac{12}{100} = 0.12 \text{ (mA)}$$

$$I_c = \beta I_b = 50 \times 0.12 = 6 \text{ (mA)}$$

$$I_{cs} = \frac{12}{1} = 12 \text{ (mA)}$$

$I_c < I_{cs}$，为放大状态。

(2) 图 4-56 (b) 中

$$I_b = \frac{6}{47} = 0.1277 \text{ (mA)}$$

$$I_{bs} = \frac{12}{80 \times 1.5} = 0.1 \text{ (mA)}$$

$I_b > I_{bs}$，为饱和状态。

(3) 图 4-56 (c) 中

$I_b = 0$，$I_c = 0$，为截止状态。

(4) 图 4-56 (d) 中

根据式 (4-121) 知

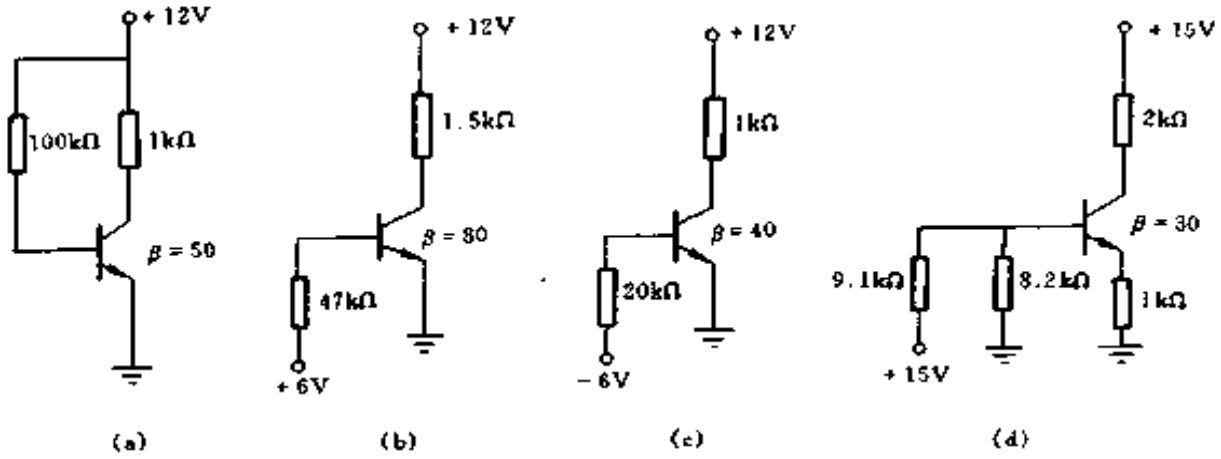


图 4-56　例 4-42　电路图

(a) 放大状态；(b) 饱和状态；(c) 截止状态；(d) 饱和状态

$$U_b \approx 15 \times \frac{8.2}{9.1+8.2} = 7.11\ (\text{V})$$

因
$$I_b + I_c = I_e$$

即
$$I_b + \beta I_b = I_e$$
$$(\beta+1)\ I_b = I_e$$

又因
$$I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_e}$$

故
$$I_b = \frac{U_b - U_{be}}{(\beta+1)\ R_e}$$

取　$U_{be} = 0.7\text{V}$，得

$$I_b = \frac{7.1-0.7}{(30+1)\ \times 1000}$$
$$= 0.2065 \times 10^{-3}\ (\text{A})$$
$$= 0.2065\ (\text{mA})$$

$$I_{bs} = \frac{15}{30\ (1+2)\ \times 1000}$$
$$= 0.1667 \times 10^{-3}\ (\text{A})$$
$$= 0.1667\ (\text{mA})$$

$I_b > I_{bs}$，为饱和状态。

四、门电路

（一）二极管门电路

门电路又称为逻辑门，或称逻辑电路。

正逻辑输入信号将高电平记作“1”，低电平记作“0”。负逻辑则相反。

1．二极管正与门

正与门电路是具有若干个输入端和一个输出端的电路，在输入信号均为高电位（表示“1”信号）时，输出信号才是高电位，只要有一个输入信号是低电位（表示“0”信号），输出信号便是低电位。图 4-57 为与门参考电路。与门逻辑图见图 4-24（b），真值表见表 4-7。

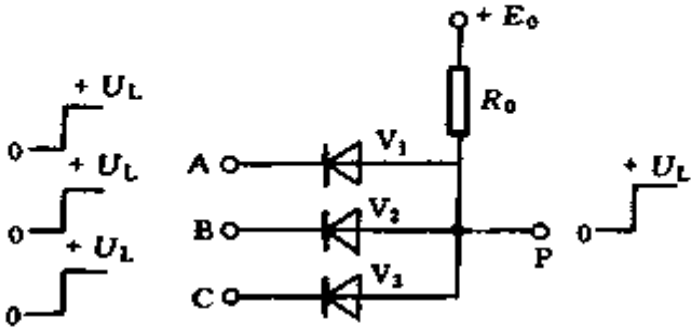


图 4-57　与门参考电路

2．二极管正或门

正或门电路是具有若干个输入端和一个输出端的电路，在输入信号中，只要有一个输入信号为高电位（表示“1”信号），输出信号便是高电位（表示“1”信号），当输入信

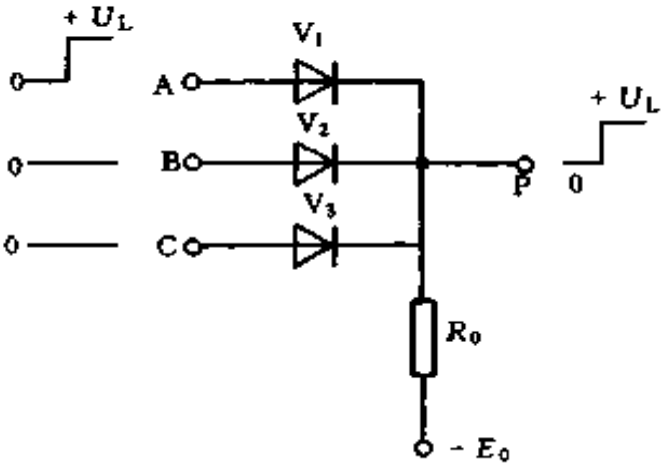


图 4-58　或门参考电路

号全是低电位（表示“0”信号），输出信号才是低电位。图4-58为或门参考电路。或门逻辑图见图4-23（b），真值表见表4-5。

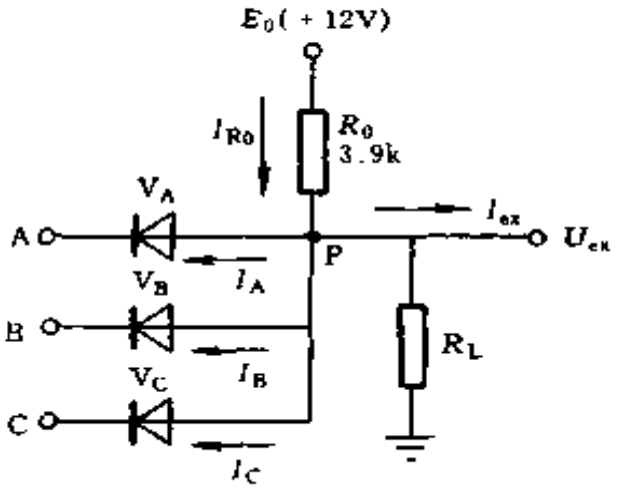


图4-59 带负载的二极管与门

3. 二极管与门中电源 E_0 和电阻 R_0 的选择

E_0 和 R_0 的选择，应能满足对二极管与门的要求，即输入端对前一级的影响要小，输出端带负载的能力要大，图4-59为带负载的二极管与门。

例4-43 已知图4-59中的输入信号为+3V（高电位）或为0V（低电位），负载电流最大值 $I_{exm}>2mA$，经过输入端流入前级的最大电流 $I_{inm}<3.5mA$，试选择电源 E_0 和电阻 R_0 的数值。

解 （1）先看对前一级的影响

当 $U_A=0V$，$U_B=U_C=+3V$ 时，U_p被箝在0V，$I_{ex}\approx0$，V_B、V_C截止，于是电流 I_{R0}全部通过 V_A流入前一级。如果把经过输入端流入前级的最大电流叫 I_{inm}，则 $I_{inm}=E_0/R_0$，I_{inm}越大，对前级影响越大，故 I_{inm}应该小些好，即要求 R_0 大些，E_0 小些好。

（2）再看后面负载的要求

当 $U_A=U_B=U_C=+3V$ 时，$U_p=+3V$，如果用符号 U_g表示输出的高电位，输出电流 $I_{ex}=U_{ex}/R_L=U_g/R_L$。由图4-59知 $I_{R0}=I_{ex}+I_A+I_B+I_C$，$I_{R0}=\dfrac{E_0-U_g}{R_0}$，当

E_0、R_0、U_g选定后，I_{R0}不变。

当 R_L减小，I_{ex}增加时，I_{R0}不变，I_A、I_B、I_C必然减小。当 $I_{ex}=I_{R0}$时，电流全部流入负载。如继续减小 R_L，二极管就会由导通转入截止状态，失去箝位作用，P 点电位就会下降，门电路输出就会发生偏差。故 I_{ex}是有限的，负载电流最大值 $I_{exm}=I_{R0}=\dfrac{E_0-U_g}{R_0}$，如要求 I_{exm}大，就应该 E_0 大，R_0 小。

为兼顾上面两者要求，用 I_{exm}/I_{inm}来衡量门的好坏，也称为门的效率，一般希望 I_{exm}/I_{inm}比值越大越好。

$$\frac{I_{exm}}{I_{inm}}=\frac{\dfrac{E_0-U_g}{R_0}}{\dfrac{E_0}{R_0}}=\frac{E_0-U_g}{E_0}=\frac{\dfrac{E_0}{U_g}-1}{\dfrac{E_0}{U_g}} \tag{4-135}$$

$\dfrac{I_{exm}}{I_{inm}}$随$\dfrac{E_0}{U_g}$变化的曲线如图 4-60 所示。

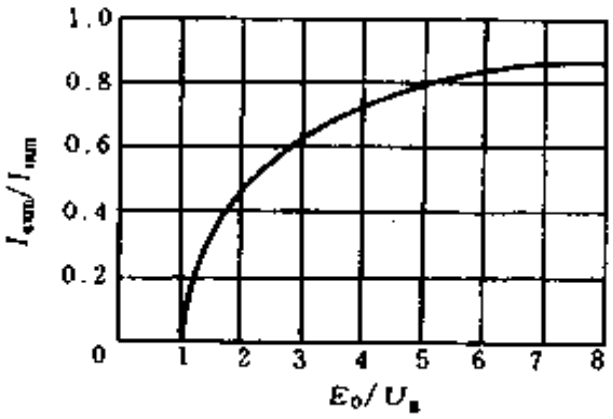


图 4-60 $\dfrac{I_{exm}}{I_{inm}}$随$\dfrac{E_0}{U_g}$变化的曲线

从图 4-60 中可看出，当$\dfrac{E_0}{U_g}>4$后，再增加$\dfrac{E_0}{U_g}$时，比值$\dfrac{I_{exm}}{I_{inm}}$已经变化不大，另一方面$\dfrac{E_0}{U_g}$太大，势必要增加 E_0，使电源功率损耗变大，一般情况下，选$\dfrac{E_0}{U_g}$之比为 4～8。

(3) 选$\frac{E_0}{U_g}=4$

因 $U_g=3V$

故 $E_0=4U_g=4\times3=+12$ (V)

(4) 确定 R_0

由 $I_{inm}=\frac{E_0}{R_0}<3.5mA$

得 $R_0>\frac{E_0}{3.5}=\frac{12}{3.5\times10^{-3}}=3429$ (Ω) $=3.429$ (kΩ)

由 $I_{exm}=\frac{E_0-U_g}{R_0}>2mA$

得 $R_0<\frac{E_0-U_g}{2}=\frac{12-3}{2\times10^{-3}}=4500$ (Ω) $=4.5$ (kΩ)

故 $3.429k\Omega<R_0<4.5k\Omega$

取 $R_0=3.9k\Omega$

(二) 非门电路 (反相器)

非门电路，又称晶体管反相器，非门逻辑图见图4-25 (b),真值表见表4-9，图4-61为非门参考电路，它是利用晶体管的开关作用做成的最基本的开关电路。它只有一个输入端和一个输出端。它的逻辑功能是，当输入为高电位时，输出为低电位；当输入为低电位时，输出为高电位。

图4-61中，当输入端为低电位0V时，$-E_b$电源经R_1和R_2分压，使基极电位为负，发射结反向偏置，晶体管截止，如忽略I_{ceo}，则$I_c\approx0$，集电极电位$U_{ce}\approx+E_c$，输出为高电位$+E_c$。当输入为高电位时，输入信号经R_1和R_2分压，使基极电位为正，发射结正向偏置，晶体管饱和导通，集电极电压$U_{ce}\approx0$，输出为低电位。因为该电路的输入端

和输出端的电位是相反的，所以称为反相器。又因它逻辑上具有否定意义，故又称为非门电路。

图 4-61 中的 R_2 及 $-E_b$ 是为了使晶体管可靠截止而采用的，电阻 R_1 上并联的电容 C 称为加速电容，它起着加速驱动，以缩短晶体管导通和截止时间的作用。

非门电路是利用晶体管的开关特性工作的，晶体管不是工作在饱和区，就是工作在截止区，故必须满足饱和、截止条件，这就要求我们对电路参数进行检验。检验的内容是：输入端 A 处于“0”时，晶体管是否截止；输入端 A 处于“1”时，晶体管是否饱和。

例 4-44 在图 4-61 所示电路中，设 $R_c=1.2\text{k}\Omega$，$R_1=5.6\text{k}\Omega$，$R_2=20\text{k}\Omega$，$E_c=+12\text{V}$，$E_b=-6\text{V}$，$\beta=30$，输入矩形脉冲的幅值为 6V，试检验电路元件参数是否满足反相器电路的要求。

解 （1）检验截止条件

当 $U_{in}=0$ 时，晶体管应截止，这时基极与发射极间可视为开路，基极回路的等效电路，见图 4-62（a），故基极电位

$$U_b=-IR_1=-\frac{E_b}{R_1+R_2}R_1$$

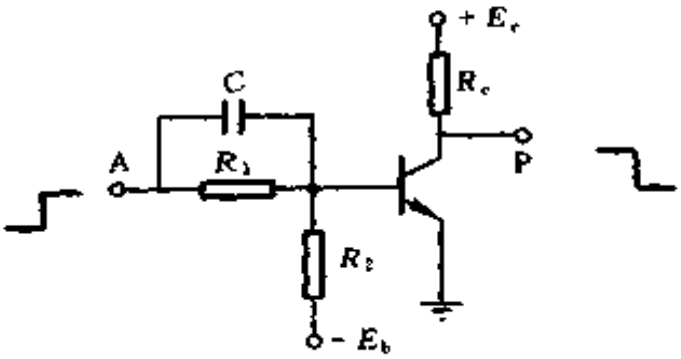


图 4-61 非门参考电路

$$=\frac{-6}{5.6\times10^3+20\times10^3}\times5.6\times10^3=1.313\text{V}$$

（2）检验饱和条件

当 $U_{in}=+6\text{V}$ 时，晶体管应饱和导通，这时基极与发射极间相当于一个正向导通的二极管，对硅管来说基极—发射极饱和压降 $U_{bes}=0.7\text{V}$，基极回路的等效电路，见图4-62（b），由图可知

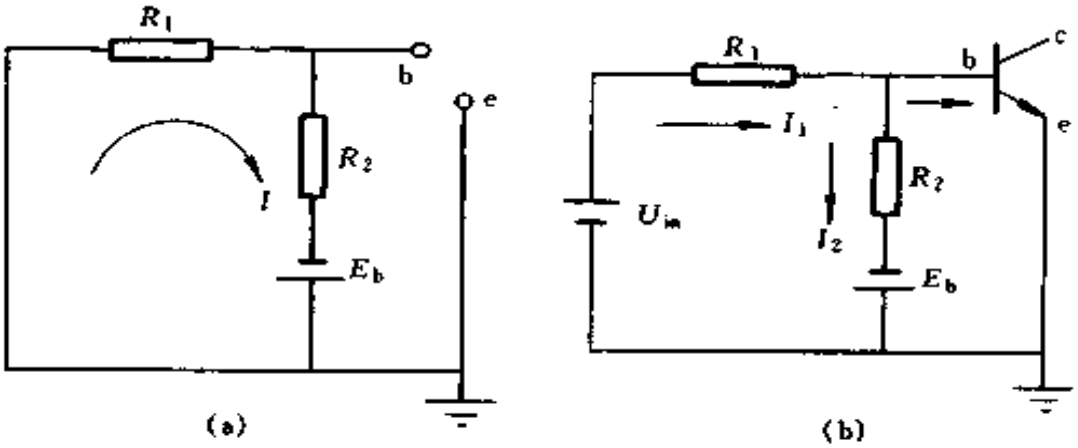


图 4-62　图 4-61 的等效电路

（a）晶体管截止时，基极回路等效电路；

（b）晶体管饱和时，基极回路等效电路

$$I_b=I_1-I_2$$

因　$$I_1=\frac{U_{in}-U_{bes}}{R_1}=\frac{6-0.7}{5.6\times10^3}=0.9464\times10^{-3}\ (\text{A})$$
$$=0.9464\ (\text{mA})$$

$$I_2=\frac{U_{bes}-E_b}{R_2}=\frac{0.7+6}{20\times10^3}=0.335\times10^{-3}\ (\text{A})$$
$$=0.335\ (\text{mA})$$

故　$$I_b=0.9464-0.335=0.6114\ (\text{mA})$$

晶体管饱和导通时

$$I_{cs}\approx\frac{E_c}{R_c}\approx\frac{12}{1.2\times10^3}=10\times10^{-3}\ (\text{A})\ =10\ (\text{mA})$$

$$I_{bs}=\frac{I_{cs}}{\beta}=\frac{10}{30}=0.3333\ (\text{mA})$$

故 $I_b > I_{bs}$

检验结果表明，该电路满足反相器条件。

例 4-45 在图 4-63 中，已知 $R_c = 1k\Omega$，$R_k = 2k\Omega$，$R_b = 12k\Omega$，$E_c = +12V$，$E_b = -12V$，晶体管的 $\beta = 30$，输入矩形脉冲的幅值为 3V，试检验电路元件参数是否满足反相器的逻辑要求。如果不符合要求，应该如何调整？

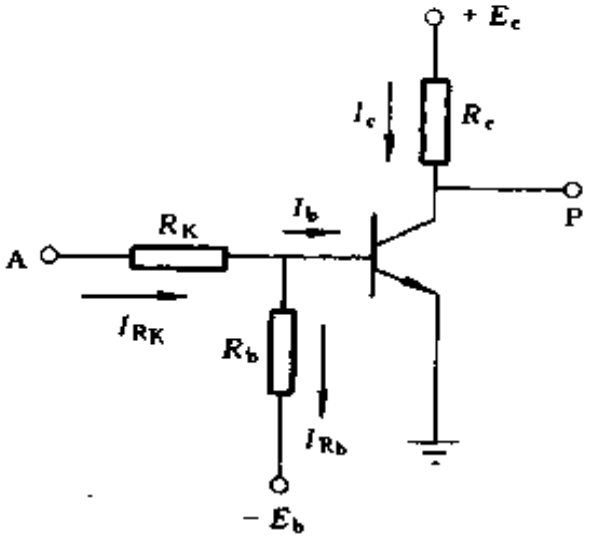


图 4-63 例 4-45 电路

解 (1) 检验截止条件

当输入端 A 为“0”时，$U_A=0$，则

$$U_b = U_A - \frac{U_A - E_b}{R_k + R_b} \times R_k$$

$$= 0 - \frac{0+12}{2+12} \times 2 = -1.714\ (\text{V})$$

满足截止条件。

(2) 检验饱和条件

当输入端 A 为“1”时，即 $U_A = +3V$ 时，晶体管是否饱和导通

$$I_b = I_{R_k} - I_{R_b} = \frac{U_A - U_{bes}}{R_k} - \frac{U_{bes} - E_b}{R_b}$$

$$= \frac{3-0.7}{2\times10^3} - \frac{0.7-(-12)}{12\times10^3}$$

$$=1.15\times10^{-3}-1.058\times10^{-3}$$
$$=0.092\times10^{-3}\ (\mathrm{A})\ =0.092\ (\mathrm{mA})$$

$$I_{cs}\approx\frac{E_c}{R_c}=\frac{12}{1\times10^3}=12\times10^{-3}\ (\mathrm{A})\ =12\ (\mathrm{mA})$$

$$I_{bs}=\frac{I_{cs}}{\beta}=\frac{12}{30}=0.4\ (\mathrm{mA})$$

$I_b<I_{bs}$不足以使晶体管饱和，必须加以调整，可将 R_k减小，R_b增加，如果将 R_k减小为 1.5kΩ，R_b增加为 18kΩ，则

$$I_b=\frac{3-0.7}{1.5\times10^3}-\frac{0.7-(-12)}{18\times10^3}$$
$$=1.533\times10^{-8}-0.7056\times10^{-3}$$
$$=0.8274\times10^{-3}\ (\mathrm{A})\ =0.8274\ (\mathrm{mA})$$

此时，$I_b>I_{bs}$，晶体管饱和导通。

五、简单稳压电路计算

用稳压管（齐纳二极管）可以组成简单的稳压电路，应用在稳压精度要求不高，负载电流变化不大的场合。

（一）使用注意事项

稳压管在使用时应该注意：

（1）使用时不应超过允许耗散功率。

（2）为了起到稳压作用，必须工作在反向电压下。

（3）稳压管稳定电压性能的好坏，常用它的动态电阻来表示

$$r_d=\frac{\Delta U}{\Delta I}\qquad(4\text{-}136)$$

式中 r_d——动态电阻，Ω；

ΔU——电压的变化量，V；

ΔI——电流的变化量，A。

动态电阻越小，表示稳压性能越好。通常我们可以把稳

压管看成一个恒压电源 E_c 和一个动态电阻 r_d 相串联，这样可将图 4-64 中的稳压电路表示成图 4-65 的等效电路。

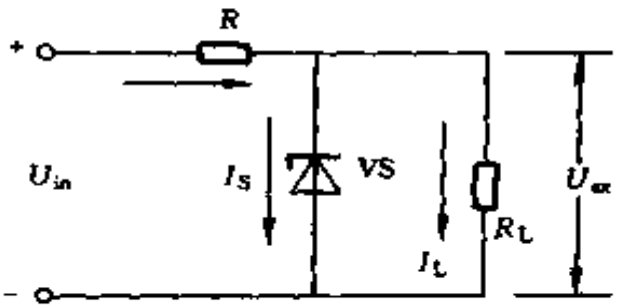


图 4-64 简单稳压电路

R—稳压电阻(限流电阻)；VS—稳压管；R_L—负载电阻

因 E_c 为恒压电源，不论什么情况，电压均不发生变化，故当 U_{in} 发生变化时，U_{ex} 随着变化的量只与 R、r_d 串并联的电阻值有关。

当 $r_d \ll R_L$ 时

r_d，R_L 并联电阻值可认为等于 r_d

故有
$$\Delta U_{ex} \approx \frac{\Delta U_{in}}{R + r_d} r_d \tag{4-137}$$

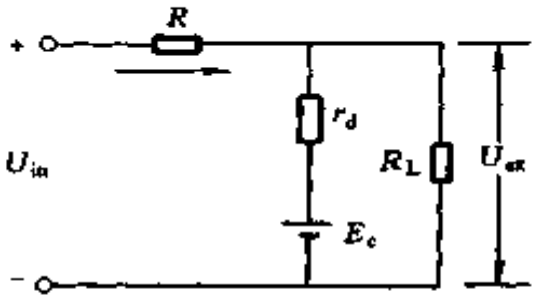


图 4-65 等效电路

当 $R \gg r_d$ 时

$$R + r_d \approx R$$

$$\Delta U_{ex} \approx \frac{r_d}{R} \Delta U_{in} \tag{4-138}$$

即
$$\frac{\Delta U_{ex}}{\Delta U_{in}} \approx \frac{r_d}{R} \tag{4-139}$$

式中 ΔU_{ex}——输出直流电压的变化量；

ΔU_{in}——输入直流电压的变化量。

由式(4-138)可知，要使 U_{ex} 稳定，希望动态电阻 r_d 小，稳压电阻大，输入直流电压变化量 ΔU_{in} 小，而 R 加大，又要保持 I_s 不变，必然会使 U_{in} 加大，相应的 ΔU_{in} 就大，另一方面若加大 R，保持 U_{in} 不变，必然会使 I_s 减小，又使 r_d 加大，故这几个量之间的关系必须全面地考虑。

(4) 选择稳压电路的参数时，还应该考虑到稳定度的要求，稳定度也叫电压调整率，用 S_u表示

$$S_u = \left| \frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}} \right| \times 100\% \tag{4-140}$$

一般要求 $S_u = 0.1\% \sim 1\%$范围内。

(二) 计算方法

一般情况下，稳压电源设计的已知条件是：负载所要求的稳定电压 U_{ex}，输出负载电流 I_L，负载电流的变化范围 ΔI_L，稳定度 S_u等。

根据已知条件，按下列步骤进行计算

1. 确定输入电压 U_{in}

一般可按下式

$$U_{in} = (2 \sim 3) U_{ex} \tag{4-141}$$

2. 选择稳压管Vs

选择稳压管的原则：稳压管的稳定电压 U_s等于负载需要的稳定电压 U_{ex}，稳定电流 I_s约等于负载电流 I_L，或最大稳定电流 I_{sm}等于负载电流 I_L的 2～3 倍，即

$$U_s = U_{ex} \tag{4-142}$$

$$I_s = I_L \tag{4-143}$$

$$I_{sm} = (2 \sim 3) I_L \tag{4-144}$$

3. 决定限流电阻 R

一般应考虑两种情况

(1) 当 U_{in}为最大，而且负载开路，即 $I_L = 0$ 时，流过稳压管上电流最大，电阻 R 要起限流作用，使流过稳压管的电流小于最大允许电流 I_{sm}，以免烧坏稳压管。

由欧姆定律，可得

$$\frac{U_{inm}-U_{ex}}{R}<I_{sm}$$

即

$$R>\frac{U_{inm}-U_{ex}}{I_{sm}} \tag{4-145}$$

(2) 当 U_{in}为最小，而且负载电流最大时，流过稳压管上电流最小，这个电流要大于稳压管的最小稳定电流 I_{smin}，使稳压管起稳压作用。由欧姆定律，可得

$$\frac{U_{inmin}-U_{ex}}{R}-I_L>I_{smin}$$

即

$$R<\frac{U_{in\,min}-U_{ex}}{I_{smin}+I_L} \tag{4-146}$$

4. 校验稳定度

稳定度若不够，可适当加大 R 和 U_{in}，选用动态电阻小的稳压管，或改为两级硅稳压管来稳压，再按上述方法计算。

例 4-46 设计一台并联型稳压电源，要求输出电压 $U_{ex}=12V$，负载电流的变化范围为 0～8mA，当电网电压波动 ±10%时，$S_u<1\%$。

解 (1) 确定输入电压

$U_{in}=(2\sim3)U_{ex}=(2\sim3)\times12=24\sim36V$

取 $U_{in}=32V$，可用 380/36V 变压器经单相桥式整流电路获得。

(2) 决定稳压管型号

$$U_s=U_{ex}=12V$$

$$I_{smax}=(2\sim3)I_L=(2\sim3)\times8=16\sim24(mA)$$

选稳压管 2CW5，$U_s=11.5\sim14V$

$I_{smax}=20mA$，动态电阻 $r_d\leqslant18\Omega$，

$P_{smax}=250mW$，$I_s=5mA$

(3) 确定 R

当电网电压波动±10%时

$$U_{inmax}=(1+10\%)U_{ex}=1.1\times32=35.2(V)$$

$$U_{inmin}=(1-10\%)U_{ex}=0.9\times32=28.8(V)$$

$$\frac{U_{inmax}-U_{ex}}{I_{smax}}<R<\frac{U_{inmin}-U_{ex}}{I_s+I_{Lmax}}$$

$$\frac{35.2-12}{20\times10^{-3}}<R<\frac{28.8-12}{(8+5)\times10^{-3}}$$

$$\frac{23.2}{20\times10^{-3}}<R<\frac{16.8}{13\times10^{-3}}$$

$$1160<R<1292$$

取 $R=1200\Omega=1.2k\Omega$

(4)验算 S_u

当电网电压波动±10%时

$$\Delta U_{in}=32\times20\%=6.4(V)$$

$$\Delta U_{ex}=\Delta U_{in}\frac{r_d}{R}=6.4\times\frac{18}{1200}=0.096(V)=96(mV)$$

所以 $S_u=\left|\frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}}\right|\times100\%=\frac{96}{12000}\times100\%$

$=0.8\%<1\%$

稳定度 S_u满足要求。

例 4-47 硅稳压管稳压电路，已知 $U_{in}=24V$，$U_{ex}=10V$，$I_L=5mA$，试选择硅稳压管和计算限流电阻 R，当 U_{in}变化±10%时，U_{ex}变化的百分数是多少？

解 (1) 选稳压管

$$U_{ex}=U_s=10\text{V},I_L=5\text{mA}$$

查手册可选 2CW3,其参数为

$$U_s=9\sim10.5\text{V},I_s=5\text{mA},$$

$$P_s=280\text{mW},I_{smax}=26\text{mA},$$

$$r_d\leqslant12\Omega$$

(2) 求限流电阻 R

$$\frac{U_{inmax}-U_{ex}}{I_{smax}}<R<\frac{U_{inmin}-U_{ex}}{I_{smin}+I_L}$$

设 U_{in}变化±10%,则

$$U_{inmax}=1.1\times24=26.4(\text{V})$$

$$U_{inmin}=0.9\times24=21.6(\text{V})$$

$$\frac{26.4-10}{26\times10^{-3}}<R<\frac{21.6-10}{(5+5)\times10^{-3}}$$

$$\frac{16.4}{26\times10^{-3}}<R<\frac{11.6}{10\times10^{-3}}$$

$$630<R<1160$$

取 $R=1\text{k}\Omega$

(3) U_{in}变化±10%时,U_{ex}变化的百分数为

$$\Delta U_{ex}\approx\frac{r_d}{R}\Delta U_{in}=\frac{12}{1000}\times10\%=0.12\%$$

例 4-48 硅稳压管稳压电路,要求输出电压 $U_{ex}=12\text{V}$,负载电阻 R_L由开路变到 2kΩ,应选什么样的稳压管,限流电阻 R 为多少?

解 (1)选稳压管

$$U_{ex}=U_s=12V$$

$$I_L=\frac{U_{ex}}{R_L}=\frac{12}{2000}=0.006(A)=6(mA)$$

查手册可选 2CW5 稳压管

$$U_s=11.5\sim14V,I_s=5mA,$$

$$P_s=280mW,r_d\leqslant18\Omega,$$

$$I_{smax}=\frac{280}{12}\approx23(mA)$$

(2)选定输入电压

$$U_{in}=(2\sim3)U_{ex}=(2\sim3)\times12=24\sim36(V)$$

取 $U_{in}=32V$

(3)求限流电阻 R

$$\frac{U_{inmax}-U_{ex}}{I_{smax}}<R<\frac{U_{inmin}-U_{ex}}{I_s+I_{Lmax}}$$

设 U_{in}变化±10%,则

$$U_{inmax}=1.1\times32=35.2(V)$$

$$U_{inmin}=0.9\times32=28.8(V)$$

$$\frac{35.2-12}{23\times10^{-3}}<R<\frac{28.8-12}{(5+6)\times10^{-3}}$$

$$\frac{23.2}{23\times10^{-3}}<R<\frac{16.8}{11\times10^{-3}}$$

$$1008<R<1527$$

取 $R=1500\Omega=1.5k\Omega$

例 4-49 上例中稳定度为多少?

解 $\Delta U_{in}=35.2-28.8=6.4(V)=\pm 3.2(V)$

$$\Delta U_{ex}\approx\Delta U_{in}\frac{r_d}{R}=\pm 3.2\times\frac{18}{1500}$$
$$=\pm 0.0384(V)=\pm 38.4(mV)$$

$$S_u=\left|\frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}}\right|\times 100\%$$
$$=\left|\frac{38.4\times 2}{12000}\right|\times 100\%=0.64\%$$

若 R_L由开路变到 2kΩ,电路相当于是内阻约为 $r_d=18\Omega$ 的恒压源,输出电压的变化为

$$\Delta U_{ex}=E_c\times\frac{r_d}{R_L+r_d}=12\times\frac{18}{2000+18}$$
$$=0.107(V)=107(mV)$$

$$S_u=\left|\frac{\Delta U_{ex}}{U_{ex}}\right|\times 100\%=\left|\frac{107}{12000}\right|\times 100\%=0.89\%$$

例 4-50 图 4-66 为一简单稳压电路,已知 $U_2=18V$,$C=100\mu f$,VS 的稳压值是 5V,I_L在 10~30mA 之间变化,若电网电压不变,试估算使 I_s不小于 5mA 时所需要的 R 值是多少? 选定 R 后,I_s的最大值是多少?

解 (1)桥式整流电容滤波输出电压平均值 U_d,在一般情况下,可按下式计算

$$U_d\approx 1.2U_2$$

现 $U_2=18V$

故 $U_d\approx 1.2\times 18=21.6V$

因 VS 的稳压值为 5V,故 $U_{ex}=5V$

(2) 估算 I_s不小于 5mA 时的 R 值

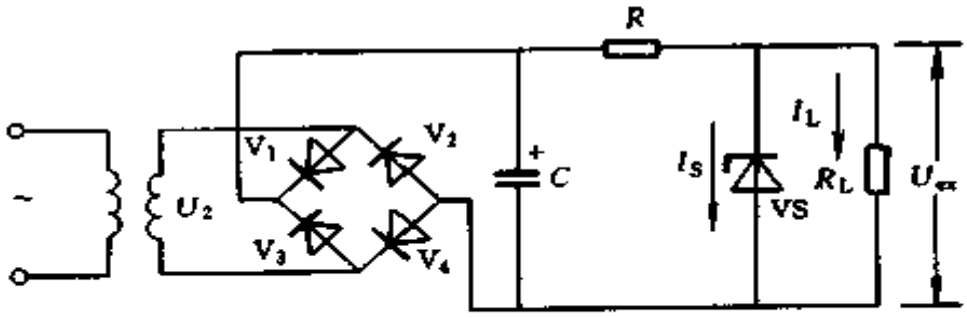


图 4-66　例 4-50 电路

I_L在 10～30mA 之间变化，当负载电流最大时(30mA)，流过稳压管的电流为最小，要使 $I_s=5\text{mA}$，则

$$R<\frac{U_d-U_{ex}}{I_s+I_{Lmax}}=\frac{21.6-5}{(5+30)\times10^{-3}}=474.3(\Omega)$$

取 $R=470\Omega$

(3) 求 I_{smax}

若 R 选定为 470Ω 后，当 I_L为最小时，I_s为最大

$$\begin{aligned}I_{smax}&=\frac{U_d-U_{ex}}{R}-I_{Lmin}\\&=\frac{21.6-5}{470}\times10^3-10\\&=25.32(\text{mA})\end{aligned}$$

第五章

工厂供电计算

第一节　负荷计算

一、按需要系数法确定计算负荷

（一）三相用电设备的负荷计算

1. 长期工作制电动机的计算负荷

$$P_C = P_N \tag{5-1}$$

式中　P_C——计算负荷，kW；

P_N——电动机额定功率，kW。

2. 反复短时工作制设备的计算负荷

（1）起重运输设备。

要统一换算到负载持续率 $JC=25\%$ 时的额定功率。若 $JC\neq25\%$，需要进行换算，其公式为

$$P_C=\sqrt{\frac{JC}{JC_{25}}}P_N=2\sqrt{JC}P_N \tag{5-2}$$

式中　P_C——换算到 $JC=25\%$ 时电动机的额定功率，kW；

JC——与电动机铭牌对应的负载持续率，计算中用小数；

P_N——换算前的电动机铭牌额定功率，kW。

（2）电焊机设备。

要统一换算到 $JC=100\%$ 时的额定功率。若 $JC\neq$

100%，需进行换算，其公式为

$$P_C=\sqrt{\frac{JC}{JC_{100}}}P_N=\sqrt{JC}P_N \qquad (5\text{-}3)$$

式中 P_C——换算到 $JC=100\%$ 时电动机的额定功率，kW；

JC——与电动机铭牌对应的负载持续率，计算中用小数；

P_N——换算前的电动机铭牌额定功率，kW。

（二）成组用电设备的负荷计算

一组设备，不一定同时工作而有所参差，参加工作的设备也未必满载，加之供电线路的损失，用电设备本身效率等因素，计算负荷应表达为下式

$$P_C=\frac{K_S K_L}{\eta_l \eta_p}P_a \qquad (5\text{-}4)$$

式中 K_S——同时使用系数，为在最大负荷时某组工作着的用电设备容量与接于线路中全部用电设备总容量的比值；

K_L——负载系数，表示在最大负荷时，所有工作着的用电设备实际所需的功率与全部被投入用电设备总容量的比值；

η_l——线路效率；

η_p——用电设备在实际功率时的效率；

P_a——接于线路中全部用电设备的总容量，kW。

上式考虑了影响计算负荷的主要因素，并不是全部因素，有些因素如工人操作的熟练程度，材料的供应情况，工具质量等均未考虑在内，事实上也无法考虑，就是前面的所谓影响负荷的主要因素也是很难确定的。所以通常只能通过实测，将所有影响计算负荷的许多因素归并成一个系数，谓

之需要系数 K_n，即

$$P_C = K_n P_a \tag{5-5}$$

需要系数见表 5-1～表 5-3。

表 5-1　　用电设备组的需要系数 K_n值

用电设备组名称	K_n	cosφ	tgφ
单独传动的金属加工机床			
冷加工车间	0.16～0.2	0.5	1.73
热加工车间	0.2～0.25	0.55～0.6	1.52～1.33
压床、锻锤、剪床及其它锻工机械	0.25	0.6	1.33
连续运输机械			
联锁的	0.65	0.75	0.88
非联锁的	0.6	0.75	0.88
轧钢车间反复短时工作制机械	0.3～0.4	0.5～0.6	1.73～1.33
通风机			
生产用	0.75～0.85	0.8～0.85	0.75～0.62
卫生用	0.65～0.7	0.8	0.75
泵、活塞式压缩机、鼓风机、电动发电机组、排风机等	0.75～0.85	0.8	0.75
透平压缩机和透平鼓风机	0.85	0.85	0.62
破碎机、筛选机、碾砂机等	0.75～0.8	0.8	0.75
磨碎机	0.8～0.85	0.8～0.85	0.75～0.62
铸铁车间造型机	0.7	0.75	0.88
搅拌机、凝结器、分级器等	0.75	0.75	0.88
水银整流机组（在变压器一次侧）			
电解车间用	0.9～0.95	0.82～0.9	0.7～0.48
起重机负荷	0.3～0.5	0.87～0.9	0.57～0.48
电气牵引用	0.4～0.5	0.92～0.94	0.43～0.36

续表

用电设备组名称	K_n	$\cos\varphi$	$tg\varphi$
感应电炉（不带功率因数补偿装置）			
高　频	0.8	0.1	10.05
低　频	0.8	0.35	2.67
电阻炉			
自动装料	0.7～0.8	0.98	0.2
非自动装料	0.6～0.7	0.98	0.2
小容量试验设备和试验台			
带电动发电机组	0.15～0.4	0.7	1.02
带试验变压器	0.1～0.25	0.2	4.91
起重机			
锅炉房、修理、金工、装配车间	0.05～0.15	0.5	1.73
铸铁车间、平炉车间	0.15～0.3	0.5	1.73
轧钢车间、脱锭工部等	0.25～0.35	0.5	1.73
电焊机			
点焊和缝焊用	0.35	0.6	1.33
对焊用	0.35	0.7	1.02
电焊变压器			
自动焊接用	0.5	0.4	2.29
单头手动焊接用	0.35	0.35	2.68
多头手动焊接用	0.4	0.35	2.68
焊接用电动发电机组			
单头焊接用	0.35	0.6	1.33
多头焊接用	0.7	0.75	0.8
电弧炼钢炉变压器	0.9	0.87	0.57
煤气电气滤清机组	0.8	0.78	0.8

表 5-2　　车间低压负荷估算指标

车间类别	负荷估算指标		自然平均功率因数	
	K_n	kW/m²	cosφ	tgφ
铸钢车间（不包括电弧炉）	0.3～0.4	0.055～0.06	0.65	1.17
铸铁车间	0.35～0.4	0.06	0.7	1.02
锻压车间（不包括高压水泵）	0.2～0.3	—	0.55～0.65	1.52～1.17
热处理车间	0.4～0.6	—	0.65～0.7	1.17～1.02
焊接车间	0.25～0.3	0.04	0.45～0.5	1.98～1.73
金工车间	0.2～0.3	0.1	0.55～0.65	1.52～1.17
木工车间	0.28～0.35	0.06	0.6	1.33
工具车间	0.3	0.1～0.12	0.65	1.17
修理车间	0.2～0.25	—	0.65	1.17
落锤车间	0.2	—	0.6	1.33
废钢铁处理车间	0.45	—	0.68	1.08
电镀车间	0.4～0.62	—	0.85	0.62
中央实验室	0.4～0.6	—	0.6～0.8	1.33～0.75
充电站	0.6～0.7	—	0.8	0.75
煤气站	0.5～0.7	0.09～0.13	0.65	1.17
氧气站	0.75～0.85	—	0.8	0.75
冷冻站	0.7	—	0.75	0.88
水泵站	0.5～0.65	—	0.8	0.75
锅炉房	0.65～0.75	0.15～0.2	0.8	0.75
压缩空气站	0.7～0.85	0.15～0.2	0.75	0.88

表 5-3　　某些工厂的全厂需要系数及功率因数

工厂类别	需要系数		最大负荷时功率因数	
	变动范围	建议采用	变动范围	建议采用
汽轮机制造厂	0.38～0.49	0.38	—	0.88
锅炉制造厂	0.26～0.33	0.27	0.73～0.75	0.73
柴油机制造厂	0.32～0.34	0.32	0.74～0.84	0.74
重型机械制造厂	0.25～0.47	0.35	—	0.79
机床制造厂	0.13～0.3	0.2	—	—
重型机床制造厂	0.32	0.32	—	0.71
工具制造厂	0.34～0.35	0.34	—	—
仪器仪表制造厂	0.31～0.42	0.37	0.8～0.82	0.81
滚珠轴承制造厂	0.24～0.34	0.28	—	—
量具刃具制造厂	0.26～0.35	0.26	—	—
电机制造厂	0.25～0.38	0.33	—	—
石油机械制造厂	0.45～0.5	0.45	—	0.78
电线电缆制造厂	0.35～0.36	0.35	0.65～0.8	0.73
电气开关制造厂	0.3～0.6	0.35	—	0.75
阀门制造厂	0.38	0.38	—	—
铸管厂	—	0.5	—	0.78
橡胶厂	0.5	0.5	0.72	0.72
通用机器厂	0.34～0.43	0.4	—	—

（三）多组用电设备的负荷计算

多组用电设备（m 组），由于各组的需要系数不相同，各组最大负荷出现的时间也不相同，因此，除了将各组计算负荷需累加以外，还必须乘以一个需要系数的同期系数 K_s。即

$$\sum_{1}^{m} P_c = K_s \sum_{1}^{m} K_n P_a \tag{5-6}$$

$$\sum_{1}^{m} Q_c = K_s \sum_{1}^{m} K_n P_a \mathrm{tg}\varphi \tag{5-7}$$

式中　K_s——需要系数的同期系数，见表 5-4；

Q_c——无功负荷，kvar。

表 5-4　　需要系数法的同期系数 K_s值

应　用　范　围	K_s
1. 确定车间变电所低压母线的最大负荷时，所采用的有功负荷同期系数（无功负荷与此同）	
冷加工车间	0.7～0.8
热加工车间	0.7～0.9
动力站	0.8～1.0
2. 确定配电所母线的最大负荷时，所采用的有功负荷同期系数	
计算负荷小于 5000kW	0.9～1.0
计算负荷为 5000～10000kW	0.85
计算负荷超过 10000kW	0.8

注　当由各车间直接计算全厂最大负荷时，应同时乘以表中两种同期系数。

（四）电力线路功率损耗计算

1. 电力线路的有功功率损耗计算

$$\Delta P_l = 3 I_d^2 R \tag{5-8}$$

$$R = r_0 l \tag{5-9}$$

式中　I_{cl}——线路的计算电流，A；

R——线路每相电阻，Ω；

r_0——线路每公里电阻值，Ω/km；

l——线路长度，km。

2. 电力线路的无功功率损耗计算

$$\Delta Q_1 = 3I_d^2 X \tag{5-10}$$

$$X = x_0 l \tag{5-11}$$

式中 X——线路的每相电抗，Ω；

x_0——线路每公里电抗值，Ω/km，查表 5-5。

l——线路长度，km。

从表 5-5 查 x_0，不仅要根据导线截面，而且要根据线间的几何均距，分为 3 种情况，如图 5-1 所示。

（1）一般情况（任意三角形）

$$a_g = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3} \tag{5-12}$$

（2）等边三角形

$$a_g = a \tag{5-13}$$

（3）水平等距排列

$$a_g = \sqrt[3]{2}a = 1.26a \tag{5-14}$$

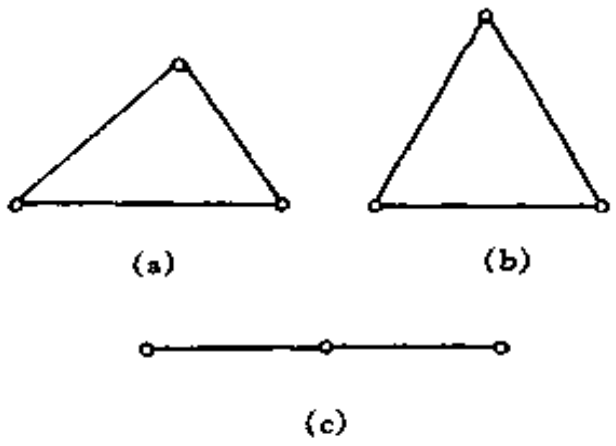


图 5-1 线间距离

（a）一般情况；（b）等边三角形排列；

（c）水平等距排列

表 5-5　　LJ 型铝绞线的主要技术数据

额定截面（mm^2）			16	25	35	50	70	95	120	150	185
外径（mm）			5.10	6.36	7.50	9.00	10.65	12.50	14.00	15.75	17.50
45℃时的直流电阻（Ω/km）			2.14	1.42	0.99	0.69	0.50	0.37	0.29	0.23	0.18
线路电抗（Ω/km）	线间几何均距 600mm		0.358	0.345	0.336	0.325	0.315	0.303	0.297	0.288	0.279
	线间几何均距 800mm		0.377	0.363	0.352	0.341	0.331	0.319	0.313	0.305	0.298
	线间几何均距 1000mm		0.391	0.377	0.366	0.355	0.345	0.334	0.327	0.319	0.311
	线间几何均距 1250mm		0.405	0.391	0.380	0.369	0.359	0.347	0.341	0.333	0.328
	线间几何均距 1500mm		—	0.402	0.391	0.380	0.370	0.358	0.352	0.344	0.339
	线间几何均距 2000mm		—	0.421	0.410	0.398	0.388	0.377	0.371	0.363	0.355
气温 25℃导线允许温度 70℃时允许载流量（A）		户内	80	110	135	170	215	260	310	370	425
		户外	105	135	170	215	265	325	375	440	500

（五）工厂负荷计算

某厂供电系统的形式如图 5-2 所示，其计算步骤从车间末端用电设备开始，逐级向上推算，直至全厂电源进线端。

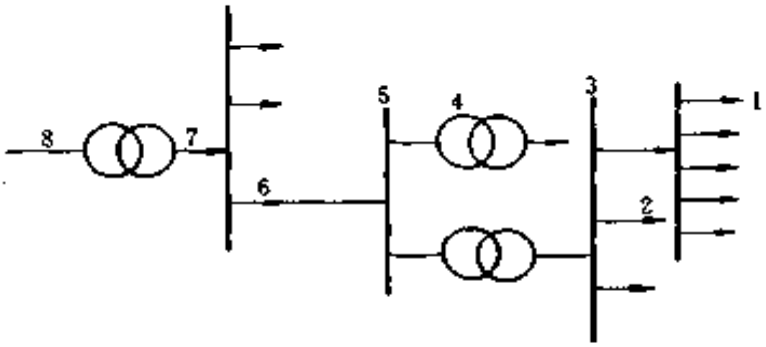


图 5-2 工厂供电系统计算负荷

1.1 处用电设备计算负荷

$$P_{C1}=\Sigma P_{N1} \tag{5-15}$$

2.2 处用电设备组的计算负荷

$$P_{C2}=K_n\Sigma P_{C1} \tag{5-16}$$

$$Q_{C2}=P_{C2}\mathrm{tg}\varphi \tag{5-17}$$

$$S_{C2}=\sqrt{P_{C2}^2+Q_{C2}^2} \tag{5-18}$$

$$I_{C2}=\frac{S_{C2}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-19}$$

式中 P_{C2}——2 处用电设备组的有功计算负荷，kW；

K_n——需要系数；

Q_{C2}——2 处用电设备组的无功计算负荷，kvar；

$\mathrm{tg}\varphi$——与运行功率因数对应的正切值；

S_{C2}——2 处用电设备组表观计算负荷，kVA；

I_{C2}——2 处用电设备组计算电流，A。

3.3 处车间干线（低压母线）的计算负荷

$$P_{C3}=K_S\Sigma P_{C2} \tag{5-20}$$

$$Q_{C3}=K_S\Sigma Q_{C2} \tag{5-21}$$

$$S_{C3}=\sqrt{P_{C3}^2+Q_{C3}^2} \tag{5-22}$$

$$I_{C3}=\frac{S_{C3}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-23}$$

式中 K_S——同期系数。为车间干线时，可取 $K_S=0.9\sim1$；为低压母线时，取 $K_S=0.8\sim0.9$。

4.4 处车间变压器高压侧的计算负荷

$$P_{C4}=P_{C3}+\Delta P_T \tag{5-24}$$

$$\Delta P_T\approx0.02S_{C3} \tag{5-25}$$

式中 ΔP_T——变压器有功损耗，kW。

$$Q_{C4}=Q_{C3}+\Delta Q_T \tag{5-26}$$

$$\Delta Q_T=0.08S_{C3} \tag{5-27}$$

式中 ΔQ_T——变压器无功损耗，kvar。

$$S_{C4}=\sqrt{P_{C4}^2+Q_{C4}^2} \tag{5-28}$$

$$I_{C4}=\frac{S_{C4}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-29}$$

5.5 处车间变电所高压母线上的计算负荷

$$P_{C5}=\Sigma P_{C4} \tag{5-30}$$

$$Q_{C5}=\Sigma Q_{C4} \tag{5-31}$$

$$S_{C5}=\sqrt{P_{C5}^2+Q_{C5}^2} \tag{5-32}$$

$$I_{C5}=\frac{S_{C5}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-33}$$

6.6 处厂总变电所出线上的计算负荷

$$P_{C6}=P_{C5}+\Delta P_1 \tag{5-34}$$

$$Q_{C6}=Q_{C5}+\Delta Q_1 \tag{5-35}$$

$$S_{C6}=\sqrt{P_{C6}^2+Q_{C6}^2} \tag{5-36}$$

$$I_{C6}=\frac{S_{C6}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-37}$$

7.7 处总降压变压器低压侧的计算负荷

$$P_{C7}=K_S\Sigma P_{C6} \tag{5-38}$$

$$Q_{C7}=K_S\Sigma Q_{C6} \tag{5-39}$$

$$S_{C7}=\sqrt{P_{C7}^2+Q_{C7}^2} \tag{5-40}$$

$$I_{C7}=\frac{S_{C7}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-41}$$

8. 全厂总计算负荷

$$P_{C8}=P_{C7}+\Delta P_T \tag{5-42}$$

$$Q_{C8}=Q_{C7}+\Delta Q_T \tag{5-43}$$

$$S_{C8}=\sqrt{P_{C8}^2+Q_{C8}^2} \tag{5-44}$$

$$I_{C8}=\frac{S_{C8}\times 10^3}{\sqrt{3}U_N} \tag{5-45}$$

例 5-1 某机加工车间金工一组拥有电压为 380V 的三相电动机 11kW 2 台，7.5kW6 台，5.5kW 8 台，3kW 15

台，2.2kW 20 台，试求其计算负荷为多少？

解 （1）此金工一组拥有电动机的总功率为

$$\Sigma P_{C1}=\Sigma P_N$$
$$=11\times2+7.5\times6+5.5\times8+3\times15+2.2\times20$$
$$=200\ (\text{kW})$$

查表 5-1 得 $K_n=0.16\sim0.2$，取 $K_n=0.16$。又知 $\cos\varphi=0.5$，$\text{tg}\varphi=1.73$，故得

（2）有功计算负荷

$$P_{C2}=K_n\Sigma P_{C1}=0.16\times200=32\ (\text{kW})$$

（3）无功计算负荷

$$Q_{C2}=P_{C2}\text{tg}\varphi=32\times1.73=55.36\ (\text{kvar})$$

（4）表观计算负荷

$$S_{C2}=\frac{P_{C2}}{\cos\varphi}=\frac{32}{0.5}=64\ (\text{kVA})$$

（5）计算电流

$$I_{C2}=\frac{S_{C2}\times10^3}{\sqrt{3}U_N}=\frac{64\times10^3}{\sqrt{3}\times380}=97.24\ (\text{A})$$

例 5-2 某车间有 3 组用电设备，电压为 380V，各组设备如下：（1）金属加工机床电动机 24 台，其中 11kW 4 台，7.5 kW6 台，5.5kW 4 台，2.2kW 4 台，1.5kW 6 台。（2）生产用通风机 3kW 5 台。（3）起重机用电动机 5 台，其中 22kW 1 台，11kW 1 台，3.7kW 1 台，7.5kW 2 台。求该车间动力干线上的计算负荷是多少？

解 （1）各组设备的计算负荷

1）机床组。查表 5-1，取 $K_n=0.2$，$\cos\varphi=0.5$，$\text{tg}\varphi=1.73$，得

$$P_{C2.1}=K_n\Sigma P_{C1}=K_n\Sigma P_{N1}$$
$$=0.2(11\times4+7.5\times6+2.2\times4+5.5\times4+1.5\times6)$$
$$=25.76\ (\text{kW})$$
$$Q_{C2.1}=P_{C2.1}\text{tg}\varphi=25.76\times1.73=44.56\ (\text{kvar})$$

2）通风机。查表 5-1，取 $K_n=0.8$，$\cos\varphi=0.8$，$\text{tg}\varphi=0.75$，得

$$P_{C2.2}=K_n\Sigma P_{C2}=K_n\Sigma P_{N2}=0.8\ (3\times5)\ =12\ (\text{kW})$$
$$Q_{C2.2}=P_{C2.2}\text{tg}\varphi=12\times0.75=9\ (\text{kvar})$$

3）起重机。查表 5-1，取 $K_n=0.1$，$\cos\varphi=0.5$，$\text{tg}\varphi=1.73$，得

$$P_{C2.3}=K_n\Sigma P_{C3}=K_n\Sigma P_{N3}$$
$$=0.1\ (22+11+7.5\times2+3.7)\ =5.17\ (\text{kW})$$
$$Q_{C2.3}=P_{C2.3}\text{tg}\varphi=5.17\times1.73=8.944\ (\text{kvar})$$

（2）车间动力干线上的计算负荷。取 $K_S=0.95$，得

$$P_{C3}=K_S\Sigma P_{C2}=0.95\ (25.76+12+5.17)$$
$$=40.78\ (\text{kW})$$
$$Q_{C3}=K_S\Sigma Q_{C2}=0.95\ (44.56+9+8.944)$$
$$=59.38\ (\text{kvar})$$
$$S_{C3}=\sqrt{P_{C3}^2+Q_{C3}^2}=\sqrt{(40.78)^2+\ (59.38)^2}$$
$$=72.03\ (\text{kVA})$$
$$I_{C3}=\frac{S_{C3}\times10^3}{\sqrt{3}U_N}=\frac{72.03\times10^3}{\sqrt{3}\times380}=109.4\ (\text{A})$$

二、按二项式系数法确定计算负荷

求长期工作制用电设备的计算负荷，需要系数法足够准确。但在一组中的电动机容量大小相差很大，短时工作制用

电设备较多的场合下，应用二项式法比较准确。它是用两个系数表征负荷变化规律的方法。

（一）单组用电设备的负荷计算

1. 有功计算负荷

$$P_C = cP_x + bP_N \tag{5-46}$$

式中 c、b——二项式系数，见表 5-6；

P_x——组中 x 台功率最大的用电设备的总额定功率，kW；

P_N——该组所有用电设备的总额定功率，kW。

2. 无功计算负荷

$$Q_C = P_C \mathrm{tg}\varphi \tag{5-47}$$

3. 表观计算负荷

$$S_C = \sqrt{P_C^2 + Q_C^2} \tag{5-48}$$

4. 计算电流

$$I_C = c_1 P_x + b_1 P_N \tag{5-49}$$

式中 c_1、b_1——二项式系数，见表 5-6。

将式（5-46）作简单的变换，即

$$\frac{P_C}{P_N} = K_n = \frac{cP_x}{P_N} + b \tag{5-50}$$

令 P_x等价为 x 台功率为P 的相同的用电设备组成，则式（5-50）为

$$K_n = \frac{cxP}{P_N} + b = \frac{cx}{\frac{P_N}{P}} + b$$

P_N/P 的比值可以看成为所有用电设备的额定功率等价为等功率的大型设备的台数。此一台数称为等效台数 n_e，即

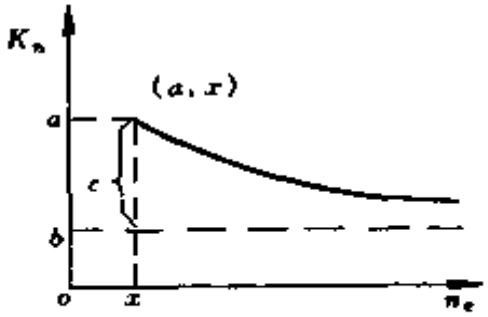


图 5-3 需要系数和设备数量的关系曲线

$$K_n = \frac{cx}{n_e} + b \quad (5\text{-}51)$$

式（5-51）为双曲线方程式，如图 5-3 所示。

且当 $n_e = x$ 时，$K_n = c + b$

$n_e \approx \infty$ 时，$K_n \approx b$

因此，b 可看作用电设备数量很多时的需要系数。

不同工作制的不同类用电设备，规定取用大容量设备的数量 x 不同，金切机床采用 $x=5$；反复短时工作制采用 $x=3$；加热炉 $x=2$；电焊设备 $x=1$ 等。

表 5-6　　二项式中的计算系数

用电设备组名称	x	c	b	c_1	b_1	$\cos\varphi$	$tg\varphi$
单独传动的金属切削机床							
大批和流水作业的冷加工车间	5	0.5	0.14	1.50	0.42	0.50	1.73
大批和流水作业的热加工车间	5	0.5	0.26	1.17	0.61	0.65	1.17
小批和单独生产的冷加工车间	5	0.4	0.14	1.20	0.42	0.50	1.73
生产和卫生用通风机、水泵和电动发电机、天轴、压缩机	5	0.25	0.65	0.48	1.24	0.80	0.75
连续运输机械和铸工车间内的整砂机							
无联锁装置	5	0.40	0.40	0.81	0.81	0.75	0.88
有联锁装置	5	0.20	0.60	0.40	1.22	0.75	0.88
起重机（$JC=25\%$）							
锅炉车间、修理车间、装配车间、机械车间及其它类似的车间	3	0.20	0.06	0.60	0.18	0.50	1.73
铸工车间	3	0.30	0.09	0.90	0.27	0.50	1.73

续表

用电设备组名称	x	c	b	c_1	b_1	$\cos\varphi$	$\mathrm{tg}\varphi$
平炉车间	3	0.30	0.11	0.90	0.33	0.50	1.73
轧钢车间、脱锭、脱模、收整	3	0.30	0.18	0.90	0.54	0.50	1.73
电热设备自动（连续）装料的电阻炉	2	0.30	0.70	0.48	1.12	0.95	0.33
同上，但非自动（定期）装料	1	0.50	0.50	0.80	0.80	0.95	0.33
实验室用的小型电热设备（干燥箱，加热设备）	—	—	0.70	—	—	1.00	—

（二）不同类的用电设备组（m 组）的负荷计算

1．有功计算负荷

$$P_{cm}=(cP_x)_{max}+\sum_{1}^{m}bP_N \tag{5-52}$$

式中 $(cP_x)_{max}$——各用电设备组算式中第 1 项 cP_x 的最大值；

$\sum_{1}^{m}bP_N$——所有用电设备组算式中第 2 项的总和。

式（5-52）第 1 项取各组中的最大一项 $(cP_x)_{max}$，是一方面考虑了最大负荷与平均值有差异，因而必须加这一项，但又考虑了各组出现的最大值未必在同一时间间隔内（30min）同时出现，所以只选择所有各组中最大的一项 $(cP_x)_{max}$。

2．无功计算负荷

$$Q_{cm}=(cP_x)_{max}\mathrm{tg}\varphi_1+\sum_{1}^{m}bP_N\mathrm{tg}\varphi \tag{5-53}$$

式中 $\mathrm{tg}\varphi_1$——与 $(cP_x)_{max}$ 相应的功率因数正切值；

$\mathrm{tg}\varphi$——与各组设备 bP_N 相应的功率因数正切值。

3．表观计算负荷

$$S_{cm}=\sqrt{P_{cm}^2+Q_{cm}^2} \tag{5-54}$$

例 5-3 用二项式系数法解例 5-2。

解 (1) 机床组。查表 5-6 得 $b=0.14$，$c=0.5$，$x=5$ 台，$tg\varphi=1.73$，故

$$c_1P_{x1}=0.5\ (11\times4+7.5)\ =25.75kW$$

$$b_1P_{N1}=0.14\ (11\times4+7.5\times6+5.5\times4+2.2\times4+1.5\times6)=18.03kW$$

(2) 通风机组。查表 5-6 得 $b=0.65$，$c=0.25$，$x=5$ 台，$tg\varphi=0.75$，故

$$c_2P_{x2}=0.25\ (3\times5)\ =3.75kW$$

$$b_2P_{N2}=0.65\ (3\times5)\ =9.75kW$$

(3) 起重机组。查表 5-6 得 $b=0.06$，$c=0.2$，$x=3$ 台，$tg\varphi=1.73$，故

$$c_3P_{x3}=0.2\ (22+11+7.5)\ =8.1kW$$

$$b_3P_{N3}=0.06\ (22+11\times7.5\times2+3.7)\ =3.102kW$$

(4) 有功计算负荷

$$P_{C3}=\ (cP_x)_{max}+\sum_1^3 bP_N=\ (25.75+18.03+9.75+3.102)=56.63kW$$

(5) 无功计算负荷

$$Q_{C3}=\ (cP_x)_{max}tg\varphi_1+\sum_1^3 bP_N tg\varphi$$

$$= (25.75\times1.73+18.03\times1.73+9.75\times0.75$$
$$+3.102\times1.73) = 88.42\ (\text{kvar})$$

(6) 表观计算负荷

$$S_{C3}=\sqrt{P_{C3}^2+Q_{C3}^2}=\sqrt{(56.63)^2+(88.42)^2}$$
$$=105\ (\text{kVA})$$

$$I_{C3}=\frac{S_{C3}\times10^3}{\sqrt{3}U_N}=\frac{105\times10^3}{\sqrt{3}\times380}=159.5\ (\text{A})$$

前面介绍的两种负荷计算方法，需要系数法是当前通用的求计算负荷方法，它的数值来源于大量的测定和统计，缺点是把需要系数 K_n看作与一组设备中设备多少和功率悬殊情况都无关的固定值，这是不严格的。事实上，只有当设备台数足够多，总功率足够大，无特大型用电设备，K_n才能趋向一个稳定的数值。因此，需要系数法适用于求全厂和大型车间变电所的计算负荷。

计算车间干线、支干线的负荷，一般采用二项式系数法，二项式法把计算负荷看作由两个分量组成，一个分量是平均负荷（bP_N），另一个分量是 x 台大型设备参预计算时对平均负荷造成的参差值（cP_x），提出了等效台数的概念，但因决定参差值的最大设备台数是固定的，如对冷加工机床总台数为 50 时，$x=5$；总台数为 8 台时，x 也为 5，这样就可能在计算中得出一些矛盾的结论。一般情况下，由于过分突出 x 台大型设备对电气负荷的影响，使计算结果往往偏大。此外，方法本身所推荐的公式和系数，也仅仅限于机械加工行业，对于其它行业，使用起来就有困难。

除上两法外，还有一种“ABC”法求计算负荷，其特点是：运用概率论的基本原理找出计算负荷与设备容量之间的

关系；利用单元功率的概念和“AB”列表法，将繁杂的功率运算简化为台数的运算，使运算简单准确，适宜于工厂设计使用。具体计算方法，读者可自行参阅有关的工厂供电设计手册和书籍，这里不作详细介绍。

三、单位负荷法

适用于规划及方案设计，利用类似工厂、企业或建筑物的单位负荷指标进行估算，常用的单位负荷指标见表 5-2 和表 5-7。该指标乘以相应的面积即可求得工厂或建筑物的负荷。

表 5-7　　民用建筑用电负荷估算指标（VA/m^2）

分类		指标	
		范围	平均
一般住宅或小家庭公寓		5.91～10.70	7.53
中等家庭公寓		10.76～16.14	13.45
高级家庭公寓		21.52～26.5	25.8
豪华家庭公寓		43.04～64.5	48.4
有集中空调的家庭公寓		—	27.6
商店	无空调	—	43
	有空调	—	194
	餐厅、咖啡馆	—	247
百货商场		14.5～215	161.4
办公室		80.7～107.6	96.8
旅馆		48.4～124	71
中式餐厅		168～269	204
自选市场		129～140	134.5
地滚球场		75.4～86	86.08
电影院		1.61～1.72	1.72

第二节　导线和电缆截面的选择计算

一、按发热条件选择计算

（一）相线截面的选择计算

所选导线的允许载流量大于或等于导线的计算负荷，即

$$I_l \leqslant I_{lc} \tag{5-55}$$

式中　I_l——导线的允许载流量，A；

I_{lc}——导线的计算负荷，A。

（二）中性线截面的选择计算

三相四线制线路中，规定中性线截面大于等于相线截面的50%，且应满足最小截面要求，即

$$A_N \geqslant 0.5A_p \tag{5-56}$$

中性线的最小截面见表5-8。

表 5-8　　中性线的最小截面　　（mm^2）

相导线		标称截面																
		1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
中性线	多芯电缆，穿管敷设	1.5	2.5	4	6	10	16	16	25	25	35	50	70	70	95	120	150	185
	架空线、室内外明线	—	—	4	6	10	16	25	35	35	50	50	70	70	95	120	150	185

例 5-4　有1条380/220V三相四线制明敷设动力线路，采用橡皮绝缘铜芯线，已知线路最大负荷电流为150A，敷设地点的环境温度为40℃，按发热条件选择此橡皮绝缘铜线的芯线截面是多少？

解　查表5-9，知标称截面为50mm^2的橡皮绝缘铜线，在环境温度为35℃时的安全载流量为185A。

查表 5-10，知环境温度为 40℃时的温度修正系数 $K_{t1}=0.91$，得

$$I_1 = 0.91 \times 185 = 168.4(A) > 150(A)$$

故按发热条件，相线截面可选为 $50mm^2$，中性线截面可选为 $35mm^2$。

表 5-9　塑料绝缘电线和橡皮绝缘电线的安全载流量　(A)

标称截面 (mm^2)	塑料绝缘电线								橡皮绝缘电线							
	明线敷设		穿管敷设						明线敷设		穿管敷设					
			2 根		3 根		4 根				2 根		3 根		4 根	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1	18		15		14		13		17		14		13		12	
1.5	22	17	18	13	16	12	15	11	20	15	16	12	15	11	14	10
2	26	20	20	15	17	13	16	12	24	18	18	14	16	12	15	11
2.5	30	23	26	20	25	19	23	17	28	21	24	18	23	17	21	16
3	32	24	29	22	27	20	25	19	30	22	27	20	25	18	23	17
4	40	30	38	29	33	25	30	23	37	28	35	26	30	23	27	21
5	45	34	42	31	37	28	34	25	41	31	39	28	34	26	30	23
6	50	39	44	34	41	31	37	28	46	36	40	31	38	29	34	26
8	63	48	56	43	49	39	43	34	58	44	50	40	45	36	40	31
10	75	55	68	51	56	42	49	37	69	51	63	47	50	39	45	34
16	100	75	80	61	72	55	64	49	92	69	74	56	66	50	59	45
20	110	85	90	70	80	65	74	56	100	78	83	65	74	60	68	52
25	130	100	100	80	90	75	85	65	120	92	92	74	83	69	78	60
35	160	125	125	96	110	84	105	75	148	115	115	88	100	78	97	70
50	200	155	163	125	142	109	120	89	185	143	150	115	130	100	110	82
70	255	200	202	156	182	141	161	125	230	185	186	144	168	130	149	115

续表

标称截面（mm²）	塑料绝缘电线								橡皮绝缘电线							
	明线敷设		穿管敷设						明线敷设		穿管敷设					
			2根		3根		4根				2根		3根		4根	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
95	310	240	243	187	227	175	197	152	290	225	220	170	210	160	180	140
120	—	—	—	—	—	—	—	—	355	270	260	200	220	173	210	165
150	—	—	—	—	—	—	—	—	400	310	290	230	260	207	240	188

注 1. 线芯最高的工作温度；塑料绝缘电线为70℃；橡皮绝缘电线为65℃。

2. 电线周围环境温度为35℃。在实际空气温度高于35℃的地方，导线安全载流量应乘以修正系数 K_{t1}。

表 5-10　　绝缘电线安全载流量的修正系数 K_{t1}

周围空气温度（℃）		35	40	45	50	55
修正系数	塑料绝缘电线	1.00	0.93	0.85	0.76	0.66
	橡皮绝缘电线	1.00	0.91	0.82	0.71	0.58

表 5-11　　通用橡套软电缆的安全载流量　　（A）

主线芯截面（mm²）	YQ、YQW型		YZ、YZW型			YC、YCW型			
	二芯	三芯	二芯	三芯	四芯	单芯	二芯	三芯	四芯
0.3	7	6	—	—	—	—	—	—	—
0.5	11	9	12	10	9	—	—	—	—
0.75	14	12	14	12	11	—	—	—	—
1	—	—	17	14	13	—	—	—	—
1.5	—	—	21	18	18	—	—	—	—
2	—	—	26	22	22	—	—	—	—

续表

主线芯截面 (mm²)	YQ、YQW 型		YZ、YZW 型			YC、YCW 型			
	二芯	三芯	二芯	三芯	四芯	单芯	二芯	三芯	四芯
2.5	—	—	30	25	25	37	30	26	27
4	—	—	41	35	35	47	39	34	34
6	—	—	53	45	45	52	51	43	44
10	—	—	—	—	—	75	74	63	63
16	—	—	—	—	—	112	98	84	84
25	—	—	—	—	—	148	135	115	116
35	—	—	—	—	—	183	167	142	142
50	—	—	—	—	—	226	208	176	176
70	—	—	—	—	—	289	259	224	224
95	—	—	—	—	—	353	318	273	273
120	—	—	—	—	—	415	371	316	316

注 1. 线芯长期容许工作温度为+65℃，周围环境温度为+25℃。

2. 不同环境温度时载流量的修正系数 K_{t2}为

环境温度(℃)	15	20	25	30	35	40
修正系数 K_{t2}	1.12	1.06	1.00	0.94	0.87	0.79

表 5-12 直接敷设在地中的低压绝缘电缆的安全载流量 (A)

标称截面 (mm²)	双芯电缆		三芯电缆		四芯电缆	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.5	13	9	13	9	—	—
2.5	22	16	22	16	22	16
4	35	26	35	26	35	26
6	52	39	52	39	52	39

续表

标称截面 (mm^2)	双芯电缆		三芯电缆		四芯电缆	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝
10	88	66	83	62	74	56
16	123	92	105	79	101	75
25	162	122	140	105	132	99
35	198	148	167	125	154	115
50	237	178	206	155	189	141
70	286	214	250	188	233	174
95	334	250	299	224	272	204
120	382	287	343	257	308	231
150	440	330	382	287	347	260
185	—	—	431	323	396	297
240	—	—	—	—	448	336

注 1. 表中的安全载流量为线芯最高工作温度 80℃，地温 30℃时的数据。在实际地温不是 30℃的地方，电缆的安全载流量应乘以修正系数 K_θ

地温（℃）	10	15	20	25	30	35	40
修正系数 K_θ	1.18	1.14	1.10	1.05	1.0	0.95	0.89

2. 几条电缆平行敷设（电缆外皮间距为 200mm）时，电缆的安全载流量应乘以并列系数 K_p

电缆条数	1	2	3	4	5	6	7	8
并列系数 K_p	1.00	0.92	0.87	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79

二、按容许电压损失选择计算

（一）供电网络的电阻和电抗

1. 电阻

交流电路中，由于集肤效应和近距效应，其电阻是以有

效电阻来计算的，如果采用有色金属导线，在 50Hz 的情况下，集肤效应并不大，导线电阻可用下式计算

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{5-57}$$

式中 ρ——导线材料的电阻率，$\Omega \cdot mm^2/km$；

l——导线长度，km；

A——导线截面，mm^2。

在进行网络计算时，考虑以下因素，要用修正后的电阻率，如表（5-13）所示。

表 5-13　各种导线材料修正后的电阻率和电导率

导线材料	电阻率（$\Omega \cdot mm^2/km$）	电导率（$m/\Omega \cdot mm^2$）
硬铜	18.8	53.2
软铜	18.8	53.2
铝	31.7	31.5

（1）电网中所用导线和电缆多数是由绞线制成，绞线中线股的实际长度要比导线长度大 2%～3%。

（2）进行电力网计算时，所用导线和电缆截面是额定截面，实际截面积略小于额定截面积。

（3）通常所用的电阻率是对应于 20℃ 的情况，当温度改变时，电阻率也要改变。所以计算时，需根据导线工作地点的环境温度和导线中电流密度的大小取一平均温度。

2. 电抗

导线电抗可用下式计算

$$x_1 = 2\pi f(4.6\lg \frac{s_{av}}{r_{se}} + 0.5\mu_r) \times 10^{-4} \tag{5-58}$$

式中 x_1——导线电抗，Ω/km；

s_{av}——三相导线间的几何平均距离，如三相导线间的距离分别为 s_1、s_2 及 s_3，如图 5-4（a）所示，则 $s_{av}=\sqrt[3]{s_1 s_2 s_3}$；如三相导线为水平排列，如图 5-4（b）所示，则 $s_{av}=\sqrt[3]{ss\times 2s}=1.26s$；

r_{se}——导线的外半径，mm；

μ_r——导线材料的相对磁导率，对于有色金属，$\mu_r=1$。

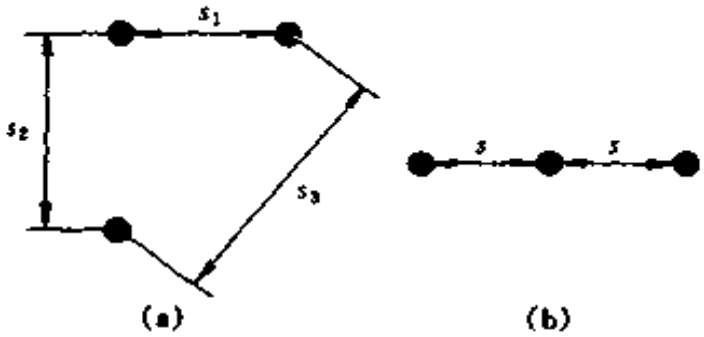


图 5-4　三相交流电路中的线间距离

（a）三角形排列；（b）水平排列

如果　　$f=50\text{Hz}$，$\mu_r=1$

则式（5-58）为

$$x_1=0.1444\lg\frac{s_{av}}{r_{se}}+0.0157 \qquad (5\text{-}59)$$

当导线的排列不对称时，那末三相中各相导线电抗的实际数值是不相等的，因此，即使三相通过对称负荷，各相电压降也不相等，为消除此现象，架空线的各相需要换位如图 5-5 所示。

在三相电缆中由于各相的相间距离很小，所以电抗远比架空线的电抗小。随着电压的升高，绝缘加强，各相距离也相应的增加，所以电缆的电抗随电压的增加而加大。

图 5-5　导线的换位

导线的电阻随着截面的增大而显著降低。应当注意的是电抗，因为从式（5-59）来看，即使 s_{av}/r_{se} 变化很大，但 $\lg\frac{s_{av}}{r_{se}}$ 变化却很小，所以电抗值随导线截面积的变化并不显著，架空线每公里的电抗一般可取 $x_1=0.35\sim0.4\Omega/\text{km}$，而电缆取 $x_1=0.08\Omega/\text{km}$，这两个数据在电压损失的计算中经常会遇到。

从式（5-58）可以得到式（5-59）和式（5-60）

$$x'_1=2\pi f\times4.6\lg\frac{s_{av}}{r_{se}}\times10^{-4}=0.1444\lg\frac{s_{av}}{r_{se}} \tag{5-59}$$

$$x''_1=2\pi f\times0.5\mu_r\times10^{-4}=0.0157\mu_r \tag{5-60}$$

式中　x'_1——由导线外边磁通所致的线路电抗或称为线路外感抗，Ω/km；

x''_1——由导线内部磁通所致的线路电抗或称为线路内感抗，Ω/km。

对有色金属导线敷设的线路，电抗主要由导线外边的磁通所决定，而用钢导线敷设的线路，内电抗占的比例很大，特别是导线较粗、磁导率较大时，其差别更大。

钢的磁导率与磁场强度有关，而磁场强度又与通过钢导线的电流有关，也就是说钢导体的电抗随着导体流过的电流而变化。

对钢导线，集肤效应与磁滞效应的影响很大，它的有效电阻与直流电阻不相等，而且也不是常数，当电流近于零即磁通很小时二者才能相等。

钢线的电阻和电抗也与钢所含的化学成分有关。

钢线的内感抗，由于集肤效应及钢的磁导率随着导线中电流变化的关系很难用解析法求得，因此，钢线的电阻和电抗都是利用精确实验所测得的数据。

（二）电网中的电压损失

在三相交流线路中，当各相负荷平衡时，各相导线中的电流值均相等，电流与电压间的相位也相同，故可计算一相的电压损失，再按一般的方法换算到线电压。

终端有一集中负荷的三相线路如图 5-6（a）所示，则可以终端相电压为基准，作出一相的电压相量图。

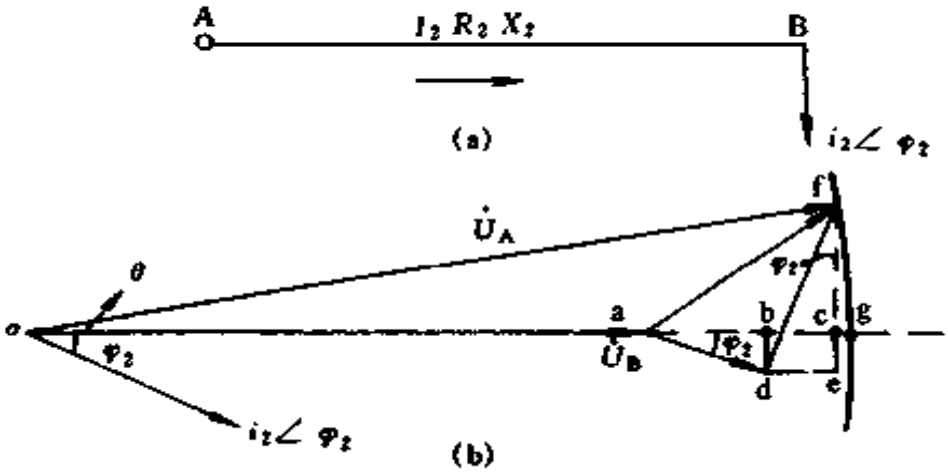


图 5-6　计算线路上的电压损失

（a）线路图；（b）相量图

由相量图可以看出线路始端电压 $\dot{U}_A$ 与终端电压 $\dot{U}_B$ 相量的几何差为 af，称为线路中一相的电压降落。以 o 为圆心，of 为半径，画圆交 oa 延长线于 g，不考虑其相位关系，

只考虑 $\dot{U}_A$ 及 $\dot{U}_B$ 之间的代数差，ag 称为网络的电压损失。对用电设备而言，一般要求保证其电压数值，不考虑电网始端电压 $\dot{U}_A$ 和终端电压 $\dot{U}_B$ 之间的相位关系，研究电压质量只研究电压损失，而不考虑电压降落。

由 f 引 fc 垂直于 ag，由于 θ 角小，$ac \approx ag$，以 ac 代 ag 所引起的误差，一般还达不到 ag 值的 5%，所以从图 5-6 (b)可以得出

$$\Delta U_1 \approx ac = ab + bc = I_2 r_2 \cos\varphi_2 + I_2 x_2 \sin\varphi_2 \tag{5-61}$$

又因 $$I_{a2} = I_2\cos\varphi_2, I_{r2} = I_2\sin\varphi_2$$

$$\Delta U_1 = I_{a2} r_2 + I_{r2} x_2$$

由于在实际运算时，负荷一般均以功率表示，因此

$$\Delta U_1 = \frac{p_2}{U_B} R_2 + \frac{q_2}{U_B} X_2 \tag{5-62}$$

式中 P_2——B 点的有功负荷，kW；

Q_2——B 点的无功负荷，kvar。

把电压损失换算至线电压，并且，考虑到工厂网络的特点，以 AB 段的额定电压 U_N 代替 U_B，则上式为

$$\Delta U = \sqrt{3}\Delta U_1 = \frac{P_2}{U_N} r_2 + \frac{Q_2}{U_N} x_2 \tag{5-63}$$

或 $$\Delta U = \frac{p_2}{U_N} R_2 + \frac{q_2}{U_N} X_2 \tag{5-64}$$

此处 $P_2 \approx p_2$，$Q_2 \approx q_2$ 但 P_2，p_2；Q_2，q_2 代表的概念不同，P_2，Q_2 分别代表线路上通过的有功及无功功率；而 p_2，q_2 则代表负荷需要的有功与无功功率。对于工厂网络，由于线路上的功率损失不大，所以在计算时令 $P_2 = p_2$；Q_2

$=q_2$ 是完全允许的。

式中 P_2，p_2 的单位为 kW；Q_2，q_2 的单位为 kvar；U_N 的单位为 kV；则 ΔU 的单位为 V。

如果干线上引出的负荷支路不是 1 条，如图 5-7 所示。设 P_1，Q_1，P_2，Q_2 为通过各段干线上的负荷；p_1，q_1，p_2，q_2 为支线上引出的负荷，并忽略线路上的功率损耗。则

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= p_1 + p_2; Q_1 = q_1 + q_2 \\ P_2 &= p_2; Q_2 = q_2 \end{aligned}\right\} \tag{5-65}$$

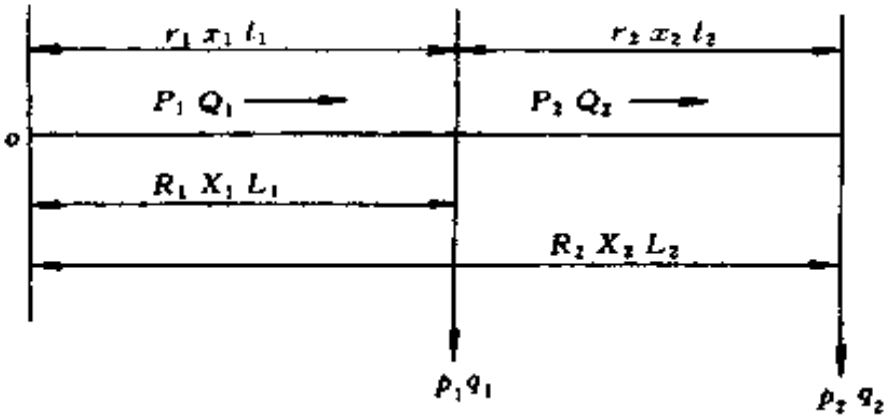


图 5-7　计算电压损失的网络图

线路上各段的电压损失为

$$\Delta U_1 = \frac{P_1}{U_N} r_1 + \frac{Q_1}{U_N} x_1 \tag{5-66}$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_2}{U_N} r_2 + \frac{Q_2}{U_N} x_2 \tag{5-67}$$

$$\begin{aligned} \Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 &= \frac{P_1 r_1}{U_N} + \frac{P_2 r_2}{U_N} + \frac{Q_1 x_1}{U_N} + \frac{Q_2 x_2}{U_N} \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i r_i}{U_N} + \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i x_i}{U_N} \end{aligned} \tag{5-68}$$

电压损失还可用下式计算

$$\Delta U = \frac{P_1 r_1 + P_2 r_2}{U_N} + \frac{Q_1 x_1 + Q_2 x_2}{U_N}$$

$$= \frac{(p_1 + p_2) r_1 + p_2 r_2}{U_N} + \frac{(q_1 + q_2) x_1 + q_2 x_2}{U_N}$$

$$= \frac{p_1 r_1 + p_2 (r_1 + r_2)}{U_N} + \frac{q_1 x_1 + q_2 (x_1 + x_2)}{U_N}$$

$$= \frac{p_1 R_1 + p_2 R_2}{U_N} + \frac{q_1 X_1 + q_2 X_2}{U_N}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i R_i}{U_N} + \sum_{i=1}^{n} \frac{q_1 X_i}{U_N} \tag{5-69}$$

式（5-68）是按照线路上流过的功率及该线段的电阻和电抗计算导线中的电压损失，式（5-69）是按照负荷功率与由负荷所在地到电源的总电阻与总电抗计算导线中的电压损失，显然二者的计算结果是一样的。

电压损失往往是以其对额定电压的百分数表示

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{1000 U_N} \times 100\%$$

$$= \frac{1}{10 U_N^2} \left[\sum_{i=1}^{n} P_i r_i + \sum_{i=1}^{n} Q_i x_i \right] \%$$

$$= \frac{1}{10 U_N^2} \left[\sum_{i=1}^{n} p_i R_i + \sum_{i=1}^{n} q_i X_i \right] \% \tag{5-70}$$

式中　U_N 以 kV 表示；p_i，q_i 分别以 kW 及 kvar 表示。

如果导线的截面相同，则

$$\Delta U = \frac{1}{U_N} \left[r_0 \sum_{i=1}^{n} P_i l_i + x_0 \sum_{i=1}^{n} Q_i l_i \right] \tag{5-71}$$

或

$$\Delta U = \frac{1}{U_N} \left[r_0 \sum_{i=1}^{n} p_i L_i + x_0 \sum_{i=1}^{n} q_i L_i \right] \tag{5-72}$$

或 $$\Delta U\% = \frac{1}{10U_N^2}[r_0\sum_{i=1}^{n}P_i l_i + x_0\sum_{i=1}^{n}Q_i l_i]\% \quad (5\text{-}73)$$

或 $$\Delta U\% = \frac{1}{10U_N^2}[r_0\sum_{i=1}^{n}p_i L_i + x_0\sum_{i=1}^{n}q_i L_i]\% \quad (5\text{-}74)$$

例 5-5 试求电压为 10kV，所有用电设备的 $\cos\varphi = 0.8$ 的三相交流电路中的电压损失，如图 5-8 所示，该线路所用的导线为铜线，其截面为 $35mm^2$，线间的几何平均距离为 1m。

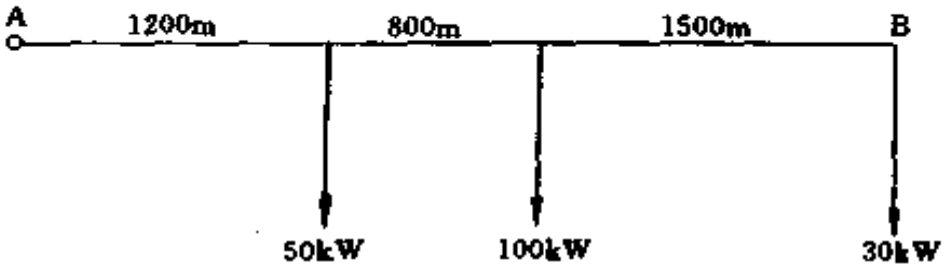


图 5-8 例 5-5 供电系统图

解 $$r_0 = \frac{1}{rA} = \frac{1000}{53\times 35} = 0.539\ (\Omega/km)$$

$$x_0 = 2\pi f\ (4.6\lg\frac{s_{av}}{r_{se}} + 0.5)\ \times 10^{-4}$$

$$= 2\pi\times 50\ (4.6\lg\frac{1000}{3.75} + 0.5)\ \times 10^{-4}$$

$$= 0.3663\ (\Omega/km)$$

网络电压损失由式（5-74）得

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_N^2}[r_0\sum_{i}^{3}p_i L_i + x_0\sum_{i}^{3}q_i L_i]\%$$

$$= \frac{1}{10U_N^2\cos\varphi}[(r_0\cos\varphi + x_0\sin\varphi)\sum_{i}^{3}p_i L_i]\%$$

$$= \frac{1}{10\times 10^2\times 0.8}[0.539\times 0.8 + 0.3663\times 0.6]$$

$$[50 \times 1.2 + 100 \times 2 + 30 \times 3.5]\%$$
$$= 0.297\%$$

例 5-6 求均匀分布负荷的电压损失，线路如图 5-9 所示。

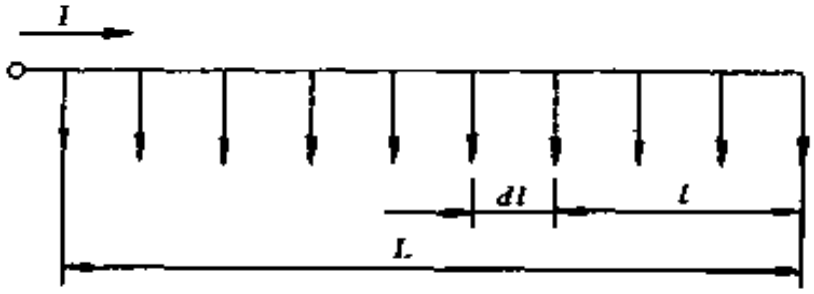


图 5-9 均匀分布负荷

解 设 i 为单位导线长度上的负荷电流，于是

$$d(\Delta U_{dl}) = \sqrt{3} r_0 l i dl$$

$$\Delta U = \int_0^L \sqrt{3} r_0 l i dl = \sqrt{3} r_0 i \int_0^L l dl$$

$$= \sqrt{3} r_0 i \left[\frac{l^2}{2} \right]_0^L$$

$$= \sqrt{3} r_0 i \frac{L^2}{2}$$

因为 $$I = iL$$

所以 $$\Delta U = \sqrt{3} r_0 I \frac{L}{2} = \frac{P r_0}{U_N} \frac{L}{2} \qquad (5\text{-}75)$$

例 5-7 试求图 5-10 末端的电压损失值。

解 根据上例可直接写出

$$\Delta U = \sqrt{3} r_0 I \left(L_0 + \frac{L}{2} \right)$$

式中 I——分布电流的总和。

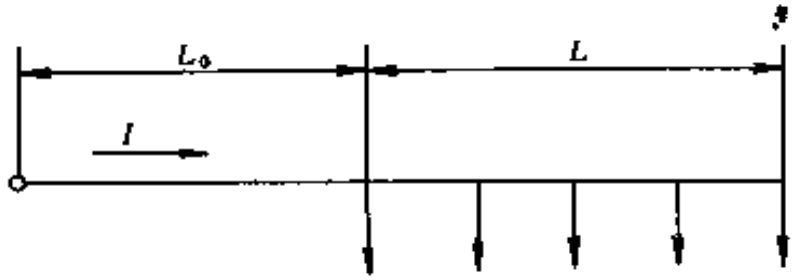


图 5-10　部分均匀分布负荷的供电系统图

（三）按允许电压损失选择导线截面

下面介绍用同一截面犯　择导线截面的计算方法。

设允许电压损失为 ΔU_a，根据式（5-68）可以得出

$$\Delta U_a = \frac{\Sigma P_i r_i + \Sigma Q_i x_i}{U_N} = \Delta U_p + \Delta U_Q \qquad (5\text{-}76)$$

由于电抗 x_0 基本维持在一定值，对架空线 x_0 一般可取 0.35～0.4Ω/km，对电缆可取 0.08Ω/km，当为同一截面时

$$\Delta U_Q = \frac{(0.35 \sim 0.4)\Sigma Q_i l_i}{U_N}$$

$$\Delta U_p = \Delta U_a - \Delta U_Q$$

$$\Delta U_p = \frac{r_0 \Sigma P_i l_i}{U_N} = \frac{1}{\gamma A}\frac{\Sigma P_i l_i}{U_N} \qquad (5\text{-}77)$$

故　$$A = \frac{1}{\gamma \Delta U_p}\frac{\Sigma P_i l_i}{U_N} = \frac{1}{\gamma(\Delta U_a - \Delta U_Q)}\frac{\Sigma P_i l_i}{U_N} \qquad (5\text{-}78)$$

从导线规格表中查出标准截面后再进行校验。

在下列情况下可以不考虑 ΔU_Q

（1）当 Q 很小时；

（2）当导线截面很小，$\Delta U_Q \ll \Delta U_p$，忽略 ΔU_Q 误差不超过 10%时。

当不同类型导线可以忽略 ΔU_Q 的截面，如表 5-14 所示。

表 5-14　　允许忽略 ΔU_Q 的导线截面　　(mm^2)

线路敷设类型		$\cos\varphi=0.7$	$\cos\varphi=0.8$	$\cos\varphi=0.9$
低压架空线	铜	—	6	10
	铝	—	8	16
电缆	铜	25	35	50
	铝	35	50	70
固定于绝缘子上的户内架空线	铜	6	10	16
	铝	10	16	35

例 5-7　负荷及电源的距离如图 5-11 所示，试按同一截面法选择导线截面，设 $\Delta U_a\% = 5\%$，$U_N = 10kV$，采用铝绞线。

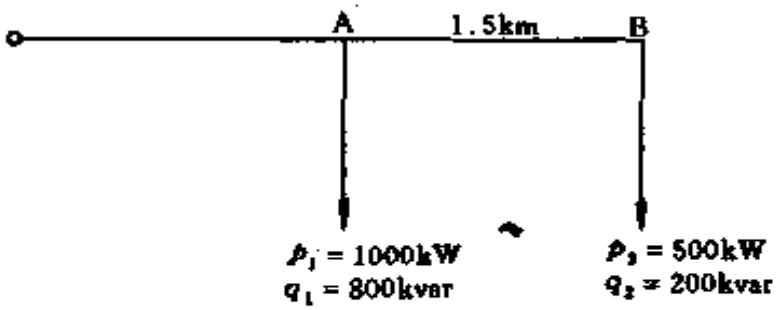


图 5-11　例 5-7 负载图

解　先假设 $x_0 = 0.35\Omega/km$

$$\Delta U_Q\% = \frac{x_0}{10U_N^2}\Sigma q_i L_i\%$$

$$= \frac{0.35}{10\times10^2}(800\times2+200\times3.5)\%$$

$$= 0.805\%$$

$$\Delta U_p\% = \Delta U_a\% - \Delta U_Q\% = (5-0.805)\% = 4.195\%$$

$$\Delta U_P = \Delta U_P\% \times 10000 = 419.5(V)$$

$$A = \frac{1}{\gamma\Delta U_p U_N}\Sigma p_i L_i$$

$$=\frac{1}{0.0315\times419.5\times10}(1000\times2+500\times3.5)$$

$$=28.38(\text{mm}^2)$$

设取线间几何均距为 1000mm，选 $A=35\text{mm}^2$，从表5-17查得 $r_0=0.91\Omega/\text{km}$，$x_0=0.366\Omega/\text{km}$

$$\Delta U\%=\frac{r_0}{10U_N^2}\Sigma p_iL_i+\frac{x_0}{10U_N^2}\Sigma q_iL_i$$

$$=\frac{0.91}{10\times10^2}(1000\times2+500\times3.5)\%$$

$$+\frac{0.366}{10\times10^2}(800\times2+200\times3.5)\%$$

$$=3.4125\%+0.8418\%=4.2543\%<5\%$$

故所选截面能满足电压损失不超过5%的要求。

表 5-15　　户内明敷及穿管的铝、铜芯绝缘导线的有效电阻和感抗值

导线截面 (mm^2)	铝 (Ω/km)			铜 (Ω/km)		
	有效电阻 (50℃)	感抗		有效电阻 (50℃)	感抗	
		明线间距 150mm	穿管		明线间距 150mm	穿管
1.5	—	—	—	13.74	—	0.109
2.5	13.89	0.337	0.102	8.24	0.337	0.102
4	8.68	0.318	0.095	5.15	0.318	0.095
6	5.79	0.309	0.09	3.44	0.309	0.09
10	3.47	0.286	0.073	2.06	0.286	0.073
16	2.17	0.271	0.068	1.288	0.271	0.068
25	1.39	0.257	0.066	0.824	0.257	0.066
35	0.99	0.246	0.064	0.589	0.246	0.064
50	0.69	0.235	0.063	0.412	0.235	0.063
70	0.496	0.224	0.061	0.294	0.224	0.061
95	0.366	0.215	0.06	0.217	0.215	0.06
120	0.289	0.208	0.06	0.172	0.208	0.06
150	0.231	0.201	0.059	0.137	0.201	0.059
185	0.188	0.194	0.059	0.111	0.194	0.059

表 5-16　　硬铜绞线的有效电阻和感抗值

电线牌号	TJ-4	TJ-6	TJ-10	TJ-16	TJ-25	TJ-35	TJ-50	TJ-70	TJ-95	TJ-120	TJ-150	TJ-185	TJ-240	TJ-300
有效电阻（Ω/km）	4.65	3.06	1.84	1.20	0.74	0.54	0.39	0.28	0.2	0.158	0.123	0.103	0.078	0.062
导线的计算直径（mm）	2.2	2.7	3.5	5.1	6.3	7.5	9.0	10.6	12.4	14.0	15.8	17.5	20.2	22.2
电线间的几何均距（mm）	感抗（Ω/km）													
400	0.385	0.371	0.355	0.333	0.319	0.308	0.297	0.283	0.274	—	—	—	—	—
600	0.411	0.397	0.381	0.358	0.346	0.336	0.325	0.309	0.300	0.292	0.287	0.280	—	—
800	0.429	0.415	0.399	0.377	0.333	0.352	0.341	0.327	0.318	0.310	0.305	0.298	—	—
1000	—	0.429	0.413	0.391	0.377	0.366	0.355	0.341	0.332	0.324	0.319	0.313	0.305	0.298
1250	—	0.443	0.427	0.405	0.391	0.380	0.369	0.355	0.346	0.338	0.333	0.327	0.319	0.312
1500	—	—	0.438	0.416	0.402	0.391	0.380	0.366	0.357	0.349	0.344	0.338	0.330	0.323
2000	—	—	0.457	0.435	0.421	0.410	0.398	0.385	0.376	0.368	0.363	0.357	0.349	0.342
2500	—	—	—	0.449	0.435	0.424	0.413	0.399	0.390	0.382	0.377	0.371	0.363	0.356
3000	—	—	—	0.460	0.446	0.435	0.423	0.410	0.401	0.393	0.388	0.382	0.374	0.367
3500	—	—	—	0.470	0.456	0.445	0.433	0.420	0.411	0.403	0.898	0.392	0.384	0.377
4000	—	—	—	0.478	0.464	0.453	0.441	0.428	0.419	0.411	0.406	0.400	0.392	0.385
4500	—	—	—	—	0.471	0.460	0.448	0.435	0.426	0.418	0.413	0.407	0.399	0.392
5000	—	—	—	—	—	0.467	0.456	0.442	0.433	0.425	0.420	0.414	0.406	0.399
5500	—	—	—	—	—	—	0.462	0.443	0.439	0.431	0.426	0.420	0.412	0.405
6000	—	—	—	—	—	—	0.468	0.454	0.445	0.437	0.432	0.426	0.418	0.411

表 5-17　　硬铝绞线的有效电阻和感抗值

电线牌号	LJ-16	LJ-25	LJ-35	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120	LJ-150	LJ-185
有效电阻（Ω/km）	1.96	1.27	0.91	0.63	0.45	0.33	0.27	0.21	0.17
计算直径（mm）	5.1	6.3	7.5	9.0	10.6	12.4	14.0	15.8	17.4
线间几何均距(mm)	感抗（Ω/km）								
400	0.333	0.319	0.308	0.297	0.287	0.276	0.269	0.261	0.255
600	0.358	0.345	0.336	0.325	0.315	0.303	0.297	0.288	0.279
800	0.377	0.363	0.352	0.341	0.331	0.319	0.313	0.305	0.298
1000	0.391	0.377	0.366	0.355	0.345	0.334	0.327	0.319	0.311
1250	0.405	0.390	0.380	0.369	0.359	0.347	0.341	0.333	0.323
1500	0.415	0.402	0.391	0.380	0.370	0.358	0.352	0.344	0.339
2000	—	0.421	0.410	0.398	0.388	0.377	0.371	0.363	0.355

表 5-18　　钢芯铝绞线的有效电阻和感抗值

电线型号	LGJ-16	LGJ-25	LGJ-35	LGJ-50	LGJ-70	LGJ-95	LGJ-120	LGJ-150	LGJ-180
有效电阻（Ω/km）	2.04	1.38	0.85	0.65	0.46	0.33	0.27	0.21	0.17
计算直径（mm）	5.4	6.6	8.4	9.9	11.7	13.7	15.2	17.0	19.0
线间几何均距(mm)	感抗（Ω/km）								
1000	0.386	0.374	0.359	0.348	0.338	0.328	0.321	0.314	0.307
1500	0.412	0.399	0.384	0.374	0.363	0.353	0.347	0.340	0.333
2000	0.430	0.417	0.402	0.392	0.381	0.371	0.365	0.358	0.351
2500	0.444	0.431	0.416	0.406	0.395	0.385	0.379	0.372	0.365
3000	0.455	0.443	0.427	0.417	0.407	0.397	0.390	0.383	0.376
3500	0.466	0.453	0.438	0.429	0.418	0.406	0.400	0.394	0.386

表 5-19　　矩形母线的电阻和感抗值

母线尺寸（mm）	阻抗（mΩ/m）					
	电　阻		感抗（铜及铝）			
			相间几何均距 s_{av}（mm）			
	铜	铝	100	150	200	300
25×3	0.268	0.475	0.179	0.200	0.235	0.244
30×3	0.223	0.394	0.163	0.189	0.206	0.235
30×4	0.167	0.296	0.163	0.189	0.206	0.235
40×4	0.125	0.222	0.145	0.170	0.189	0.214
40×5	0.100	0.177	0.145	0.170	0.189	0.214
50×5	0.08	0.142	0.137	0.1565	0.18	0.200
50×6	0.067	0.118	0.137	0.1565	0.18	0.200
60×6	0.0558	0.099	0.1195	0.145	0.163	0.189
60×8	0.0418	0.074	0.1195	0.145	0.163	0.189
80×8	0.0313	0.055	0.102	0.126	0.145	0.170
80×10	0.025	0.0445	0.102	0.126	0.145	0.170
100×10	0.020	0.0355	0.09	0.1127	0.133	0.157
2（60×8）	0.020	0.037	0.12	0.145	0.163	0.189
2（80×8）	0.0157	0.0277	—	0.126	0.145	0.170
2（80×10）	0.0125	0.0222	—	0.126	0.145	0.170
2（100×10）	0.01	0.0178	—	—	0.133	0.157

三、按经济电流密度选择计算

对于全年平均负荷较大，距离较长的线路，应按经济电流密度选择截面。其公式为

$$A = \frac{I_c}{J_e} \tag{5-79}$$

式中　A——经济截面，mm^2；

I_c——线路的计算电流，A；

J_e——经济电流密度，A/mm^2，见表 5-20。

表 5-20　　经济电流密度　　（A/mm^2）

导线材料	最大负荷利用小时（h）		
	3000 以下	3000～5000	5000 以上
裸铝线	1.65	1.15	0.90
裸铜线	3.00	2.25	1.75
铜芯电缆	2.50	2.25	2.0
铝芯电缆	1.92	1.73	1.54
钢线	0.45	0.40	0.35

按经济电流密度要求，不同导线截面各电压等级经济输送容量见表 5-21。

表 5-21　　铝绞线、钢芯铝绞线经济输送容量　　（MVA）

导线截面积（mm^2）	最大负荷利用小时（h）											
	3000 以下				3000～5000				5000 以上			
	电流（A）	电压（kV）			电流（A）	电压（kV）			电流（A）	电压（kV）		
		0.38	10	35		0.38	10	35		0.38	10	35
16	26.4	0.017	0.456	—	18.4	0.012	0.318	—	13.5	0.009	0.249	—
25	41.3	0.028	0.715	—	28.8	0.019	0.496	—	22.8	0.015	0.388	—
35	57.7	0.038	1.000	3.500	40.2	0.026	0.695	2.43	31.5	0.021	0.544	1.915
50	82.5	0.054	1.430	5.000	57.5	0.038	0.995	3.48	45	0.030	0.778	2.720
70	115.5	—	2.000	6.950	80.5	—	1.395	4.86	63	—	1.09	3.670
95	157	—	2.700	9.480	109.3	—	1.890	6.60	85.4	—	1.48	5.160
120	198	—	3.430	11.900	138	—	2.390	8.35	108	—	1.87	6.530
150	247.5	—	—	14.900	172.5	—	—	10.40	134	—	—	8.140

选择导线截面时，还应注意其机械强度，架空裸导线允许最小截面积见表 5-22；绝缘导线线芯最小截面见表 5-23。

表 5-22　　架空裸导线允许最小截面积　　(mm^2)

导线材料	0.38kV	10kV		35kV
		居民区	非居民区	
铝及铝合金线	16	35	25	35
钢芯铝绞线	16	25	16	35
铜　线	直径 3.2mm	16	16	—

表 5-23　　绝缘导线线芯的最小截面

用　　途	线芯最小截面积 (mm^2)		
	铜芯软线	铜　　线	铝　　线
照明用灯头引下线			
民用建筑，屋内	0.4	0.5	1.5
工业建筑，屋内	0.5	0.8	2.5
屋外	1.0	1.0	2.5
移动式用电设备			
生活用	0.2		
生产用	1.0		
架设在绝缘支持件上的绝缘导线，其支持点间距为			
1m 以下，屋内		1.0	1.5
屋外		1.5	2.5
2m 及以下，屋内		1.0	2.5
屋外		1.5	2.5
6m 及以下		2.5	4.0
12m 及以下		2.5	6.0
穿管敷设的绝缘导线	1.0	1.0	2.5

注　用链吊或管吊的屋内照明灯具，其灯头引下线为铜芯软线时，可适当减少截面。

例 5-8 某 380/220V 三相四线制线路，如图 5-12 所示，线路采用橡皮绝缘铜线明敷，环境温度为 30℃，允许电压损失为 3%，试选择导线截面。

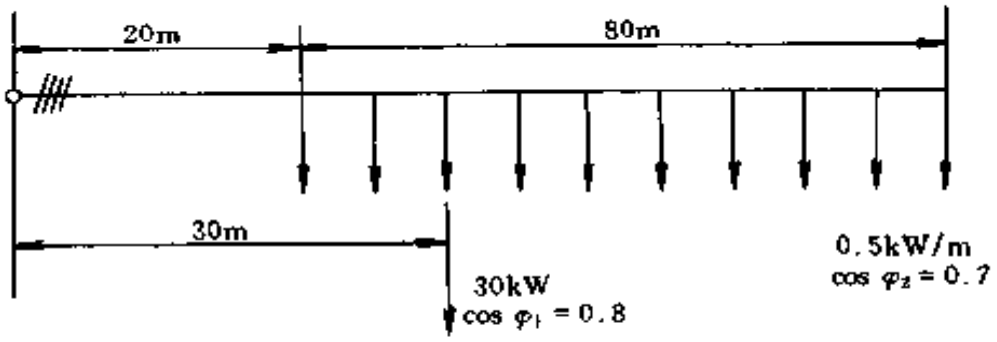


图 5-12 例 5-8 负载图

解 (1) 按发热条件选择，先求线路中最大负荷电流，由于 $\cos\varphi_1=0.8$ 时，$\mathrm{tg}\varphi_1=0.75$；$\cos\varphi_2=0.7$ 时，$\mathrm{tg}\varphi_2=1$，因此

$$P_1 = 30\text{kW 时}$$

$$Q_1 = P_1\mathrm{tg}\varphi_1 = 30\times0.75 = 22.5(\text{kvar})$$

$$P_2 = 0.5\times80 = 40(\text{kW})\text{ 时}$$

$$Q_2 = P_2\mathrm{tg}\varphi_2 = 40\times1 = 40(\text{kvar})$$

线路总负荷

$$P = P_1 + P_2 = 30 + 40 = 70(\text{kW})$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 22.5 + 40 = 62.5(\text{kvar})$$

$$S = \sqrt{P^2+Q^2} = \sqrt{70^2+62.5^2} = 93.84(\text{kVA})$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_i} = \frac{93.84\times10^3}{\sqrt{3}\times380} = 142.6(\text{A})$$

按此负荷电流查表 5-9，当 $A=35\text{mm}^2$，在周围环境温度为 35℃ 时，$I_1=148\text{A}>142.6\text{A}$。因此按发热条件可选

35mm² 绝缘铜导线 3 根作相线，另选 25mm² 绝缘铜导线 1 根作中性线。

（2）校验电压损失。按 $A=35\text{mm}^2$，查表 5-15 得明敷铜芯线的 $r_0=0.589\Omega/\text{km}$，$x_0=0.246\Omega/\text{km}$。因此线路的电压损失为

$$\Delta U_1=\frac{(P_1L_1+P_2L_2)r_0+(Q_1L_1+Q_2L_2)x_0}{U_1}$$

$$=\frac{[(30\times0.03+40\times0.06)\times0.589+(22.5\times0.03+40\times0.06)\times0.246]\times10^3}{380}$$

$$=7.106(\text{V})$$

$$\Delta U_1\%=\frac{\Delta U_1}{U_1}\times100\%=\frac{7.106}{380}\times100\%=1.87\%<3\%$$

故满足电压损失要求。

例 5-9 有 1 条 LJ 型铝绞线架设的 10kV 架空线，计算负荷为 1200kW，$\cos\varphi=0.85$，年最大负荷利用小时 $T_{max}=2800\text{h}$，试选择其经济截面，并校验其发热条件和机械强度。

解 （1）选择经济截面

$$I_c=\frac{P_c}{\sqrt{3}U_N\cos\varphi}=\frac{1200}{\sqrt{3}\times10\times0.85}=81.5(\text{A})$$

由表 5-20 查得 $J_e=1.65\text{A/mm}^2$

因此经济截面

$$A=\frac{I_c}{J_e}=\frac{81.5}{1.65}=49.39(\text{mm}^2)$$

选标准截面 50mm²，即选 LJ-50 型铝绞线。

（2）校验发热条件。查表 5-5，得 LJ-50 型铝绞线的允许载流量为 215A>81.5A，故满足发热要求。

（3）校验机械强度。查表 5-22，得 $A_{min}=35\text{mm}^2<A=50\text{mm}^2$，故能满足机械强度要求。

第三节　其他方面的计算

一、提高功率因数计算

（一）减少线路功率损耗，提高输电效率

供配电线路中的功率损耗为

$$\Delta P_l = 3(I_p^2 + I_Q^2)R \times 10^{-3} \tag{5-80}$$

式中　ΔP_l——线路中功率损耗，kW；

I_p——线路中有功电流分量，A；

I_Q——线路中无功电流分量，A。

当线路输送的有功功率一定时，功率损耗与线路负荷的功率因数成反比，即

$$\Delta P_l = 3\frac{P^2R}{U^2}\frac{1}{\cos^2\varphi} \times 10^{-3} \tag{5-81}$$

从式中可以看出，当线路功率因数较低，即线路中无功电流分量较大时，在有功功率 P 一定的情况下，线路损耗也较大。提高功率因数与降低线路损耗的关系见表 5-24。

表 5-24　　功率因数与线路损耗关系

功率因数由右列数值提高到0.95	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	—
损耗减少（%）	60	53	46	38	29	20	10	—
功率因数由右列数值提高到1.0	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95
损耗减少（%）	64	58	51	44	36	28	19	10

改善功率因数后可提高设备出力的百分值见表 5-25。

表 5-25　改善功率因数后可提高设备出力的百分值　（%）

改善前的功率因数 $\cos\varphi_1$	改善后的功率因数 $\cos\varphi_2$															
	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
0.62	11.5	14.0	16.4	18.7	20.9	23.1	25.2	27.3	29.3	31.3	33.4	35.5	37.7	40.1	43.0	48.9
0.64	8.6	12.0	13.6	16.0	18.2	20.4	22.6	24.7	36.7	28.8	30.8	32.9	35.1	37.5	40.3	46.1
0.66	5.7	8.4	10.9	13.3	15.6	17.8	20.0	22.1	24.2	26.2	28.3	30.4	32.6	34.9	37.7	43.3
0.68	2.9	5.6	8.1	10.6	12.9	15.2	17.4	19.5	21.6	23.7	25.8	27.9	30.0	32.4	33.5	40.4
0.70	0	2.8	5.4	7.9	10.3	12.6	14.9	17.0	19.1	21.2	23.3	25.4	27.5	29.8	32.5	37.6
0.72		0	2.7	5.3	7.7	10.0	12.3	14.5	16.7	18.7	20.8	22.9	25.0	27.3	29.9	34.8
0.74			0	2.6	5.1	7.5	9.8	12.0	14.2	16.3	18.4	20.5	22.6	24.8	27.4	32.0
0.76				0	2.6	5.0	7.4	9.6	11.8	13.9	16.0	18.1	20.2	22.4	24.8	29.2
0.78					0	2.5	4.9	7.2	9.4	11.5	13.6	15.7	17.8	20.0	22.4	26.4
0.80						0	2.4	4.8	7.0	9.2	11.3	13.4	15.5	17.6	19.9	23.7
0.82							0	2.4	4.7	6.9	9.0	11.1	13.2	15.3	17.5	21.1
0.84								0	2.3	4.6	6.7	8.8	10.9	13.0	15.2	18.5
0.86									0	2.3	4.5	6.6	8.6	10.7	12.9	15.9
0.88										0	2.2	4.4	6.4	8.5	10.6	13.4
0.90											0	2.2	4.3	6.3	8.4	11.0
0.92												0	2.1	4.2	6.2	8.6
0.94													0	2.1	4.1	6.4
0.96														0	2.9	4.2
0.98															0	2.0

例 5-10　某厂有功负荷为 200kW，采用无功补偿措施后，功率因数由原来的 $\cos\varphi_1=0.62$ 提高到 $\cos\varphi_2=0.96$，问实际设备出力可达到多少？

解 查表 5-25，当功率因数从 0.62 提高到 0.96，可以提高设备出力的百分数为 40.1%。

故该厂可提高设备出力为

$$200\times40.1\%=80.2\text{kW}$$

亦即全厂实际设备出力可达到 280.2kW。

（二）电容器电流和补偿容量的计算

1. 并联电容器电流的计算

（1）按电容器的铭牌数据计算电容电流

单相并联电容器

$$I_{CN}=\frac{Q_{CN}}{U_{CN}} \tag{5-82}$$

三相并联电容器

$$I_{CN}=\frac{Q_{CN}}{\sqrt{3}U_{CN}} \tag{5-83}$$

式中 I_{CN}——并联电容器的额定电流，A；

Q_{CN}——并联电容器的额定容量，kvar；

U_{CN}——并联电容器的额定电压，V。

（2）按并联电容器实际运行数据计算电容器的电流

单相并联电容器

$$I_C=0.314CU_p \tag{5-84}$$

三相并联电容器

$$I_C=\frac{0.314CU_p}{\sqrt{3}} \tag{5-85}$$

式中 I_C——电容器的计算电流，A；

C——电容器的电容值，μF；

U_p——电力网的额定电压，kV。

2. 并联电容器补偿容量的计算

（1）单台电动机个别补偿容量的计算

$$Q_o = \sqrt{3} I_o U_m \tag{5-86}$$

式中 Q_o——电动机空载无功功率，kvar；

I_o——电动机空载电流，A；

U_m——电动机额定电压，V。

对于机械负荷惯性较大的电动机，如水泵等，其补偿容量

$$Q_c = (1.3 \sim 1.5) Q_o \tag{5-87}$$

式中 Q_c——计算补偿容量，kvar。

对于机械惯性较小的电动机，如风机等

$$Q_c = (0.9 \sim 1) Q_o \tag{5-88}$$

（2）车间、工厂集中补偿无功容量的计算。具体补偿容量的确定可用公式计算，也可通过查表决定。

1）计算法。所需补偿电容器的容量可按下式确定

$$Q_c = P_p \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \tag{5-89}$$

或

$$Q_c = P_p (\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi_2) = P_p q_c \tag{5-90}$$

式中 Q_c——补偿电容量容量，kvar；

P_p——年内最大负荷月份的平均有功负荷，kW；

$\cos\varphi_1$——补偿前的功率因数；

$\cos\varphi_2$——补偿后的功率因数；

$\mathrm{tg}\varphi_1$——补偿前功率因数角的正切值；

$\mathrm{tg}\varphi_2$——补偿后功率因数角的正切值；

q_c——补偿率。

2）查表法。按照本单位的自然功率因数，实际平均有

表 5-26　　每千瓦有功功率所需无功容量速见表　　(kvar/kW)

补偿前功率因数 $\cos\varphi_1$	补偿后功率因数 $\cos\varphi_2$											
	0.8	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
0.40	1.54	1.60	1.65	1.67	1.70	1.75	1.87	1.87	1.93	2.00	2.09	2.29
0.42	1.41	1.47	1.52	1.54	1.57	1.62	1.68	1.74	1.80	1.87	1.96	2.16
0.44	1.29	1.34	1.39	1.41	1.44	1.50	1.55	1.61	1.68	1.75	1.84	2.04
0.46	1.18	1.23	1.28	1.31	1.34	1.39	1.44	1.50	1.57	1.64	1.73	1.93
0.48	1.08	1.12	1.18	1.21	1.23	1.29	1.34	1.40	1.46	1.54	1.62	1.83
0.50	0.98	1.04	1.09	1.11	1.14	1.19	1.25	1.31	1.37	1.44	1.52	1.73
0.52	0.89	0.94	1.00	1.02	1.05	1.10	1.16	1.21	1.28	1.35	1.44	1.64
0.54	0.81	0.86	0.91	0.94	0.97	1.02	1.07	1.13	1.20	1.27	1.36	1.56
0.56	0.73	0.78	0.83	0.86	0.89	0.94	0.99	1.05	1.12	1.19	1.23	1.48
0.58	0.66	0.71	0.76	0.79	0.81	0.87	0.92	0.98	1.04	1.12	1.20	1.41
0.60	0.58	0.64	0.69	0.71	0.74	0.79	0.85	0.91	0.97	1.04	1.13	1.33
0.62	0.52	0.57	0.62	0.65	0.67	0.73	0.78	0.84	0.90	0.98	1.06	1.27
0.64	0.45	0.50	0.56	0.58	0.61	0.66	0.72	0.77	0.84	0.91	1.00	1.20

续表

补偿前功率因数 $\cos\varphi_1$	补偿后功率因数 $\cos\varphi_2$											
	0.8	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
0.66	0.39	0.44	0.49	0.52	0.55	0.60	0.65	0.71	0.78	0.85	0.94	1.14
0.68	0.33	0.38	0.43	0.46	0.48	0.54	0.59	0.65	0.71	0.79	0.88	1.08
0.70	0.27	0.32	0.38	0.40	0.43	0.48	0.54	0.59	0.66	0.73	0.82	1.02
0.72	0.21	0.27	0.32	0.34	0.37	0.42	0.48	0.54	0.60	0.67	0.76	0.96
0.74	0.16	0.21	0.26	0.29	0.31	0.37	0.42	0.48	0.54	0.62	0.71	0.91
0.76	0.10	0.16	0.21	0.23	0.26	0.31	0.37	0.43	0.49	0.56	0.65	0.85
0.78	0.05	0.11	0.16	0.18	0.21	0.26	0.32	0.38	0.44	0.51	0.60	0.80
0.80	—	0.05	0.10	0.13	0.16	0.21	0.27	0.32	0.39	0.46	0.55	0.73
0.82	—	—	0.05	0.08	0.10	0.16	0.21	0.27	0.34	0.41	0.49	0.70
0.84	—	—	—	0.03	0.05	0.11	0.16	0.22	0.28	0.35	0.44	0.65
0.85	—	—	—	—	0.03	0.08	0.14	0.19	0.26	0.33	0.42	0.62
0.86	—	—	—	—	—	0.05	0.11	0.17	0.23	0.30	0.39	0.59
0.88	—	—	—	—	—	—	0.06	0.11	0.18	0.25	0.34	0.54
0.90	—	—	—	—	—	—	—	0.06	0.12	0.19	0.28	0.49

功负荷（或计算负荷）和预计要达到的功率因数目标值查表。该表中已列出每千瓦有功功率所需要补偿电容器的容量值，对照本单位的实际负荷就可计算出需要的补偿容量。

每千瓦有功功率所需无功容量速见表见表 5-26。

3. 选择补偿电容器容量时的注意点

（1）当电容器实际运行电压不等于额定电压时，应按下式进行换算

$$Q'_N = Q_N\left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \tag{5-91}$$

式中 Q'_N——电容器在实际运行电压时的容量，kvar；

Q_N——电容器的额定容量，kvar；

U——电容器的实际运行电压，kV；

U_N——电容器的额定电压，kV。

（2）对于单相补偿电容器，由于必须在三相制系统中对称地装设，因此实际工作中选择的电容器容量，应为每只电容器额定容量的 $3n$ 倍（n 为自然数），且要略大于由计算或查表所得的无功补偿容量。

例 5-11 某用户接于 380V、50Hz 的低压电网中，其最高负荷月的平均有功功率为 450kW，自然功率因数 $\cos\varphi_1 = 0.70$，现将功率因数提高到月平均功率因数为 0.9，试计算

（1）采用集中补偿时，应安装并联电容器的容量？

（2）应选用并联电容器的型号和台数？

（3）选用三相电容器时，并联电容器的总电流为多少安？

解 （1）查表 5-26，当功率因数由 0.70 提高到 0.9，每千瓦有功负荷应安装并联补偿电容器的容量为 0.54kvar，应补偿的无功容量

$$Q_c = 450 \times 0.54 = 243(\text{kvar})$$

(2) 并联补偿电容器的台数

$$n = \frac{Q_c}{Q} \tag{5-92}$$

式中 n——计算并联电容器台数；

Q_c——并联电容器计算总容量，kvar；

Q——电容器单台容量，kvar。

在低压电力网中，可选用单相电容器和三相电容器，通常多选用三相电容器，常选用的低压并联电容器为BW0.4-12-3型。此外，还有BW0.4-13-3和BW0.4-14-3型。上述电容器也有单相的，如BW0.4-12-1型。如在380V电网中，可将电容器作△联结。

电容器如果选用BW0.4-12-3型，应选用台数

$$n = \frac{243}{12} = 20.25(\text{台})$$

可选台数 $n=20$ 台

(3) 电容器电流计算

1) 若选用三相并联电容器，电容器总电流为

$$I_{cN} = \frac{Q_c}{\sqrt{3}U_N}$$

已选定BW0.4-12-3型电容器20台，电容器总容量为

$$Q_c = 20 \times 12 = 240(\text{kvar})$$

故

$$I_{cN} = \frac{240}{\sqrt{3} \times 0.4} = 346.4(\text{A})$$

2) 若选用BW0.4-12-1型并联电容器时，应进行合理

分组，接近计算的补偿容量时：选用 18 台时为 216kvar 和 21 台时为 252kvar。选用补偿容量时，尽量考虑欠补偿，所以确定选用 18 台总容量为 216kvar。

并联电容器组的线电流为

$$I_{cl} = \frac{216}{\sqrt{3} \times 0.4} = 311.8(A)$$

并联电容器组的相电流为

$$I_{cp} = \frac{311.8}{\sqrt{3}} = 180(A)$$

在实际运行中，低压电网的额定电压为 380V，所以实际电流与计算出的电流稍有偏差。

例 5-12 某水泵电动机，$P_N = 30kW$，$U_N = 380V$，$I_N = 60A$，$I_0 = 24.6A$，△联结，需安装补偿电容器，试计算补偿电容器的容量。

解 水泵电动机的空载功率为

$$Q_o = \sqrt{3} I_0 U_N = \sqrt{3} \times 24.6 \times 0.38$$
$$= 16.19(kvar)$$

补偿电容器的容量为

$$Q_c = (1.3 \sim 1.5) Q_0 = (1.3 \sim 1.5) \times 16.19$$
$$= 21.05 \sim 24.29(kvar)$$

故该水泵电动机可选用 BW0.4-12-3 型并联电容器 2 台，即选用 24kvar 的补偿容量。

二、接地和防雷计算

（一）人工接地体工频接地电阻计算

1. 简易计算公式

工频接地电阻简易计算公式见表 5-27。

表 5-27　　工频接地电阻简易计算公式

接地体型式	适应条件	计算公式	
垂直式	长约 3m	$R_g \approx 0.3\rho$	(5-93)
单根水平式	长约 60m	$R_g \approx 0.03\rho$	(5-94)
n 根水平放射式	$n \leqslant 12$，每根长约 60m	$R_g \approx \frac{0.062\rho}{n+1.2}$	(5-95)
钢筋混凝土杆	1 个拉线盘	$R_g \approx 0.28\rho$	(5-96)
作自然接地体	单杆	$R_g \approx 0.3\rho$	(5-97)
	双杆	$R_g \approx 0.2\rho$	(5-98)
	拉线单双杆	$R_g \approx 0.1\rho$	(5-99)
复合式（接地网）	公式适合于面积大于 $100m^2$ 的闭合接地网	$R_g \approx 0.5\rho/\sqrt{A}$ $R_g \approx 0.28\rho/r$	(5-100) (5-101)

注　ρ——土壤电阻率，Ω·m；见表 5-28；

n——水平放射式接地体根数；

A——接地网面积，m^2；

r——与接地网面积 A 等值的圆型接地网半径，m。

2. 具体计算步骤

(1) 按单相接地电容电流及有关规定算出接地电阻值 R_g。

(2) 在装设接地体的区域内初步安排接地体的布置，初步确定接地体和连接导线的尺寸。

(3) 计算单根接地体的接地电阻 R_{g1}。

(4) 用逐步渐近法，计算接地体的数量 n

$$n = \frac{R_{g1}}{\eta R_g} \tag{5-102}$$

式中　η——利用系数，见表 5-29～表 5-31。

表 5-28　　土壤电阻率参考表

土壤名称	电阻率近似值 (Ω·m)	土壤名称	电阻率近似值 (Ω·m)
陶粘土	10	砂质粘土、可耕地	100
泥炭、泥炭岩、沼泽地	20	黄土	200
捣碎的木炭	40	含砂粘土、砂土	300
黑土、田园土、陶土	50	多石土壤	400
粘土	60	砂、砂砾	1000

表 5-29　　当管子成排敷设时扁钢的利用系数 η

管子间的距离与管子长度之比 s/l	每排管子根数									
	2	3	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0.87	0.80	0.77	0.74	0.67	0.62	0.42	0.31	0.21	0.20
2	0.92	0.88	0.89	0.86	0.79	0.75	0.56	0.46	0.36	0.34
3	0.95	0.97	0.92	0.90	0.85	0.82	0.68	0.58	0.49	0.47

表 5-30　　敷设成环形时（未列入连接扁钢的影响）的垂直管形接地体利用系数表

管子间的距离与管子长度之比 s/l	管子根数 n	利用系数 η	管子间的距离与管子长度之比 s/l	管子根数 n	利用系数 η
1	4	0.66～0.72	1	20	0.44～0.50
2	4	0.72～0.80	2	20	0.61～0.66
3	4	0.80～0.84	3	20	0.68～0.73
1	6	0.58～0.65	1	30	0.41～0.47
2	6	0.71～0.75	2	30	0.58～0.63
3	6	0.78～0.82	3	30	0.66～0.71
1	10	0.52～0.58	1	40	0.38～0.44
2	10	0.66～0.71	2	40	0.56～0.61
3	10	0.74～0.78	3	40	0.64～0.69

表 5-31　敷设成一排时（未列入连接扁钢的影响）的垂直管形接地体利用系数表

管子间的距离与管子长度之比 s/l	管子根数 n	利用系数 η	管子间的距离与管子长度之比 s/l	管子根数 n	利用系数 η
1	2	0.84~0.87	1	10	0.56~0.62
2	2	0.90~0.92	2	10	0.72~0.77
3	2	0.93~0.95	3	10	0.79~0.83
1	3	0.76~0.80	1	15	0.51~0.56
2	3	0.85~0.88	2	15	0.66~0.73
3	3	0.90~0.92	3	15	0.76~0.80
1	5	0.67~0.72	1	20	0.47~0.50
2	5	0.79~0.83	2	20	0.60~0.70
3	5	0.85~0.88	3	20	0.74~0.79

例 5-13　某车间变电所接地装设地点的土质为黄土，主变压器容量为 400kVA、电压为 10/0.4kV，联结组标号为 Y，yn0。试确定此变电所公共接地装置垂直接地钢管的尺寸和数量。已知 10kV 侧有电的联系的电缆线路长 20km，架空线路长 200km。

解　(1) 按下列经验公式计算单相接地电容电流

$$I_g = \frac{U_1(l_b + 35l_c)}{350} \tag{5-103}$$

式中　U_1——线路的额定线电压，kV；

l_b——同一电压 U_1 的具有电的联系的架空线路总长度，km；

l_c——同一电压 U_1 的具有电的联系的电缆线路总长度，km。

代入已知数据，得

$$I_g = \frac{10 \times (200 + 35 \times 20)}{350} = 25.71(A)$$

(2) 计算接地电阻。从表 5-32 可算出此变电所公共接地装置的接地电阻为

$$R_g \leqslant \frac{120}{I_g} = \frac{120}{25.71} = 4.667(\Omega)$$

同时 $R_g \leqslant 4\Omega$，因此总的接地电阻应满足 $R_g \leqslant 4\Omega$。

(3) 确定钢管尺寸和数量。现初步考虑围绕变电所建筑物四周，距离变电所墙面 2～3m，打入一组 ϕ50mm，长 2.5m 的钢管接地体，每隔 5m 打入一根钢管，钢管间用 40×4 的扁钢焊接起来。

按表 5-27，可知单根钢管的接地电阻为

$$R_{g1} \approx 0.3\rho$$

从表 5-28 查出土壤电阻率 $\rho = 200\Omega \cdot m$

故 $$R_{g1} = 0.3 \times 200 = 60(\Omega)$$

又根据 $R_{g1}/R_g = 60/4 = 15$（根）

初选 20 根 ϕ50mm，长 2.5m 的钢管作接地体。

以 $n = 20$ 和管子间距与管子长度之比，即 $s/l = 5/2.5 = 2$，查表 5-30，得利用系数 $\eta = 0.61 \sim 0.66$，取 $\eta = 0.63$ 代入下式得接地体的数量为

$$n = \frac{R_{g1}}{\eta R_g} = \frac{60}{0.63 \times 4} = 23.8 \approx 24(根)$$

表 5-32　　部分电气装置要求的接地电阻值

序号	电气装置名称	接地的电气装置特点	接地电阻（Ω）
1	1kV 以上大接地电流系统	仅用于该系统的接地装置	$R_g \leqslant \frac{2000}{I_{sc}}$ 当 $I_{sc} > 4000A$ 时 $R_g \leqslant 0.5$
2	1kV 以上小接地电流系统	仅用于该系统的接地装置	$R_g \leqslant \frac{250}{I_g}$ 且 $R_g \leqslant 10$
3		与 1kV 以下系统共用的接地装置	$R_g \leqslant \frac{120}{I_g}$ 且 $R_g \leqslant 10$
4	1kV 以下系统	与总容量在 100kVA 以上的发电机或变压器相连的接地装置	$R_g \leqslant 4$
5		上述（序号 4）装置的重复接地	$R_g \leqslant 10$
6	1kV 以下系统	与总容量在 100kVA 及以下的发电机或变压器相连的接地装置	$R_g \leqslant 10$
7		上述（序号 6）装置的重复接地	$R_g \leqslant 30$
8	引入线上装有 25A 以下的熔断器的小容量线路电气设备	任何供电系统	$R_g \leqslant 10$
9		高低压电气设备联合接地	$R_g \leqslant 4$
10		电流互感器、电压互感器二次侧接地	$R_g \leqslant 10$
11		电弧炉的接地	$R_g \leqslant 4$
12		工业电子设备的接地	$R_g \leqslant 10$

续表

序号	电气装置名称	接地的电气装置特点	接地电阻（Ω）
13	建筑物	第 1 类防雷建筑物（防直击雷）	$R_{ig}\leqslant 10$
14		第 1 类防雷建筑物（防感应雷）	$R_{ig}\leqslant 10$
15		第 2 类防雷建筑物（防直击雷、感应雷共用）	$R_{ig}\leqslant 10$
16		第 3 类防雷建筑物（防直击雷）	$R_{ig}\leqslant 30$
17		其他建筑物防雷电波沿低压架空线侵入	$R_{ig}\leqslant 30$
18	防雷设备	保护变电所的独立避雷针	$R_g\leqslant 10$
19		杆上避雷器或保护间隙（在电气上与旋转电机无联系者）	$R_g\leqslant 10$
20		杆上避雷器或保护间隙（在电气上与旋转电机有联系者）	$R_g\leqslant 5$

注　R_g——工频接地电阻；R_{ig}——冲击接地电阻；

I_{sc}——流经接地装置的单相短路电流；

I_g——单相接地电容电流。

（二）防雷设备计算

1. 避雷针

（1）单支避雷针的保护范围计算。单支避雷针的保护范围如图 5-13 所示，可视为折线圆锥形。设避雷针高为 h，以避雷针顶点为轴，向下成 45°斜线构成 $h/2$ 高的圆锥形上半部。从 $h/2$ 处作大于 45°斜线与距针脚 $1.5h$ 地面处相交，构成圆锥形下半部。因此，其整体成折线圆锥形。地面上的保护半径 r 按下式确定：

$$r = 1.5h \tag{5-104}$$

式中　r——保护半径；

h——避雷针高度。

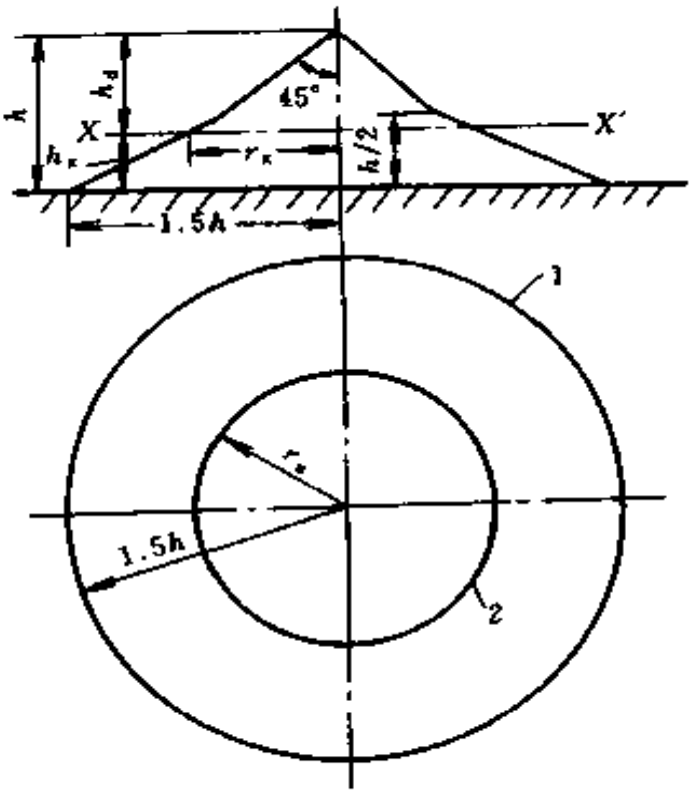


图 5-13　单支避雷针的保护范围

h—避雷针的高度；h_x—被保护物的高度；h_a——避雷针的有效高度；

$h_a = h - h_x$；r_x—避雷针在 h_x 高度的水平面上的保护半径

1—在地面上的保护范围；2—在 XX′平面上的保护范围

当被保护物高度 h_x 水平面的保护半径为：

$$h_x \geqslant \frac{h}{2} \text{ 时}, r_x = (h - h_x)p = h_a p \tag{5-105}$$

$$h_x < \frac{h}{2} \text{ 时}, r_x = (1.5h - 2h_x)p \tag{5-106}$$

式中　h_x——被保护物高度，m；

r_x——在 h_x 水平面上的保护半径，m；

h_a——避雷针有效高度，m；

p——高度影响系数，当 $h \leqslant 30$m 时，$p = 1$；$h > 30$m时 $p = 5.5/\sqrt{h}$。

(2) 两支等高避雷针的保护范围计算

1) 两针外侧保护范围，可按单支避雷针的保护范围确定。

2) 两针之间的保护范围，按连接两针的顶点 1、2 及中

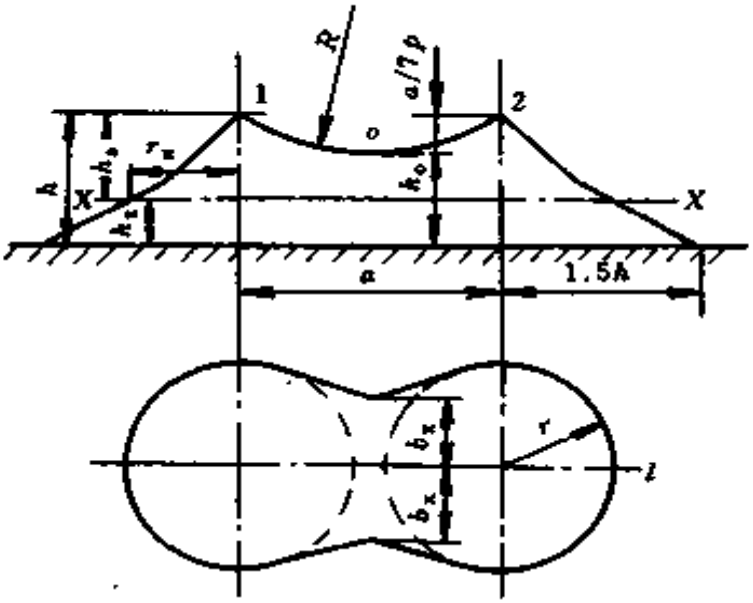


图 5-14 两根等高避雷针的保护范围

点 o 的圆弧确定（图 5-14）并按下式计算：

$$h_o = h - \frac{a}{7p} \tag{5-107}$$

式中 h_o——两针间保护范围上部边缘最低点的高度，m；

a——两避雷针间的距离，m。

两针之间 h_x 水平面上保护范围的一侧最小宽度

$$b_x = 1.5(h_o - h_x)$$

当 $a = 7hp$ 时，$h_o = 0$，即两针之间不能构成联合保护

网。两针之间距离与针高之比 a/h 不宜大于 5。

2. 避雷线

避雷线和避雷针的作用一样，同样是引导雷电流通过引下线和接地装置泄入大地，以保护变、配电所的建筑和设备。

避雷线的保护范围是与避雷线的数量、高度、相互位置等因素有关。

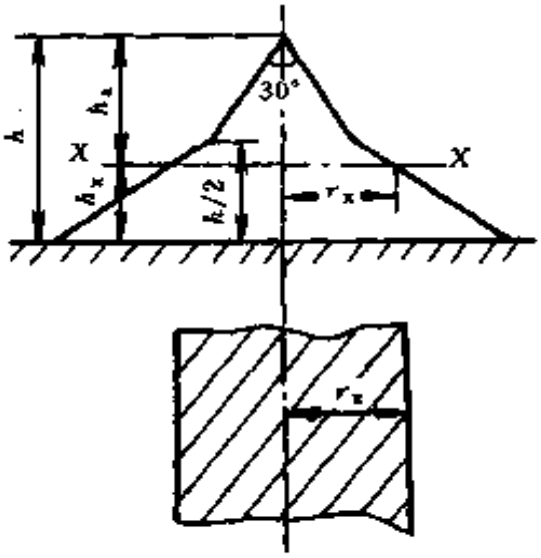


图 5-15　单根避雷线的保护范围

（1）单根避雷线的保护范围如图 5-15 所示。

图中，h 为避雷线最大弧垂点的高度，m；h_x 为被保护物（建筑、设备）的高度，m。

（2）两根等高平行避雷线的保护范围如图 5-16 所示。

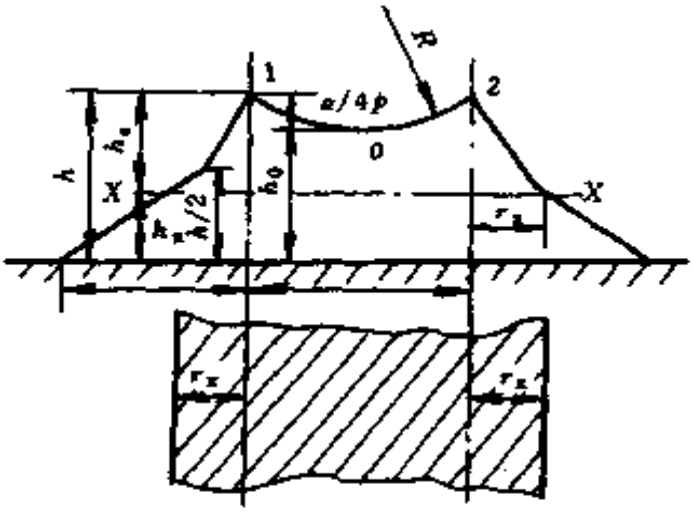


图 5-16　两根平行避雷线的保护范围

1）两根避雷线外侧保护范围可按单根避雷线保护范围计算确定。

2）两根避雷线内侧保护范围可由通过避雷线顶点及中点的圆弧确定。零点在避雷线中间，高度为

$$h_0 = h - \frac{a}{5p} \tag{5-108}$$

式中 h_0——两根避雷线间保护范围边缘最低点的高度；

h——避雷线高度；

a——两根避雷线间的距离。

3）两根避雷线端部保护范围可按两支等效避雷针确定。等效避雷针的高度，可近似取避雷线悬点高度的80%。

应用避雷线保护架空线路，通常仅用于35kV以上的输电线路，由于3～10kV的配电线路本身耐雷水平很低，一般不装架空避雷线。对于郊区农村矿野变、配电所的室外配电装置、建筑物和储存可燃、易爆危险品的仓库，除可采用避雷针保护外，必要时也可采用避雷线组成保护网来进行直击雷的防护。3～10kV的一般变、配电室，由于大多位于建筑群内，因此，不设置避雷针（线）保护。

参考文献

1 周孔章编. 电路原理. 北京：高等教育出版社，1983

2 朱承高主编. 电工及电子技术手册. 北京：高等教育出版社，1990

3 《实用电工计算手册》编写组编. 实用电工计算手册. 上海：科学技术出版社，1993

4 上海铁道学院电信系编. 电工原理习题集. 北京：人民铁道出版社，1978

5 上海市卢湾区业余工业专科学校编. 电路数学. 上海：上海教育出版社，1978

6 赵家礼，张庆达等编著. 变压器故障诊断与修理. 北京：机械工业出版社，1998

7 赵家礼主编. 电动机修理手册. 第2版. 北京：机械工业出版社，1992

8 赵家礼等编著. 电机故障诊断修理手册. 北京：机械工业出版社，2000

9 牛新国编. 电工技术常用公式与数据手册. 北京：金盾出版社，1993

10 清华大学电子工程系工业自动化系编. 晶体管脉冲数字电路. 北京：科学出版社，1973

11 清华大学电子工程系工业自动化系编. 晶体管电路. 北京：科学出版社，1973

12 郑铭芳等编. 低压电器选用维修手册. 北京：机械工业出版社，1989

13 郭仲礼主编. 高压电工实用技术. 北京：机械工业出版社，1992

14 周茂祥主编. 低压电器设计手册. 北京：机械工业出版社，1992

15 王文超编著. 电热电器的设计制造与使用维修. 北京：机械工业出版社，1987
16 孙建三主编. 数字电子技术. 北京：机械工业出版社，1999
17 苏文成主编. 工厂供电. 北京：机械工业出版社，1983
18 陈世坤主编. 电机设计. 北京：机械工业出版社，1982
19 海定广. 孙兴旺编. 电力拖动基础. 第 2 版. 北京：机械工业出版社，1999
20 濮绍文，濮少文编著. 三相鼠笼式单绕组多速电动机. 上海：上海人民出版社，1976

责任编辑：王　晶

CHANGYONG DIANGONG JISUAN

ISBN 7-5083-0724-0

9 787508 307244 >

ISBN 7-5083-0724-0/TM·322

定价：30.00 元

CEPP

CHINA ELECTRIC POWER PRESS