

第二篇 电器控制篇

- 第六章 电机
- 第七章 常用低压电器
- 第八章 电器控制系统

第6章 电机

- 6.1 电机的分类和选择
- 6.2 三相异步电动机
- 6.3 单相异步电动机
- 6.4 直流电机

实例引入：机床电机

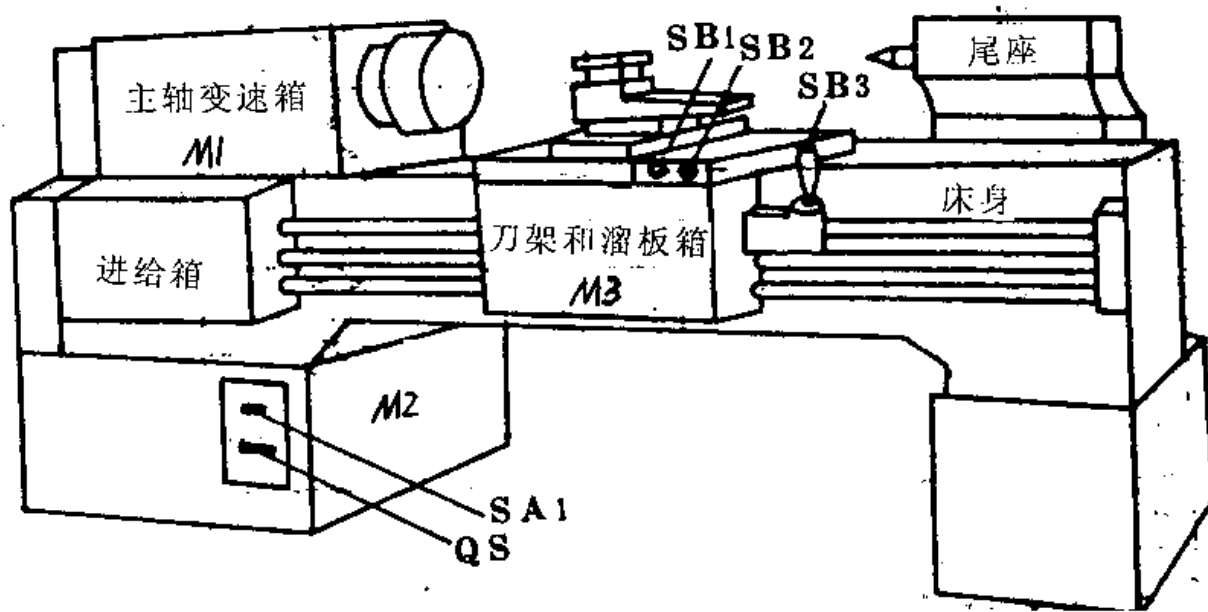


图6.1 CY6140卧式车床外形图

6.1 电机的分类和选择

表6-2 各类电机特点和用途

种类、名称	特点、作用	使用范围
同步发电机	将机械能转换为交流电能。	近代火力、水力发电站几乎都采用三相同步发电机
直流发电机	将机械能转换为直流电能，构造复杂，价格昂贵，工作可靠性差。	可作为蓄电池充电等直流电源。目前有被半导体整流电源逐渐取代的趋势。
三相鼠笼式异步电动机	结构简单，工作可靠，价格低廉，维护方便。起动性能较差，功率因数较低。	广泛用于无特殊调速要求的一般生产机械拖动。如功率不大的通风机、水泵、传送带、机床的辅助运动机构等。
三相线绕式异步电动机	起动性能好，并可在不大的范围内平滑调速。价格贵，维修不便。	只用于某些起重机、卷扬机、锻压机及重型机床的横梁移动等不能采用鼠笼式电动机的场合。
单相异步电动机	结构简单，工作可靠，但起动转矩较小。	常用于功率不大的电动工具（电钻等）和家用电器（如洗衣机、风扇、冰箱等）

表6-2 各类电机特点和用途

单相异步电动机	结构简单，工作可靠，但起动转矩较小。	常用于功率不大的电动工具（电钻等）和家用电器（如洗衣机、风扇、冰箱等）。
同步电动机	当电源频率一定时，转速恒定，不随负载而变。	常用于长期连续工作及保持转速不变的场所，如用来驱动水泵、通风机、压缩机等。
直流电动机	结构复杂，维护不便。调速性能好，起动转矩大。	常用于调速要求较高的生产机械（如龙门刨床、轧钢机等）或需要较大起动转矩的生产机械（如起重机械、电力牵引设备等）。
控制电机	动作灵敏，准确度高，重量轻，体积小，耗电少，运行可靠。	广泛应用于自动控制系统中（如火炮和雷达的自动定位、飞机自动驾驶、炉温自动调节等），主要任务是转换和传递控制信号，能量的转换是次要的。
直线电机	结构简单、散热好，可用于特殊场合，直线速度可不受限制。不需任何转换装置而直接产生推力，简化系统，降低成本，易于维护、控制，运行可靠。	广泛应用于工业、民用、交通、军事、医疗、建筑等方面的各类直线驱动装置或系统中，（如地铁、物料输送系统、复印机、打桩机等）。

表6-1 电机的分类

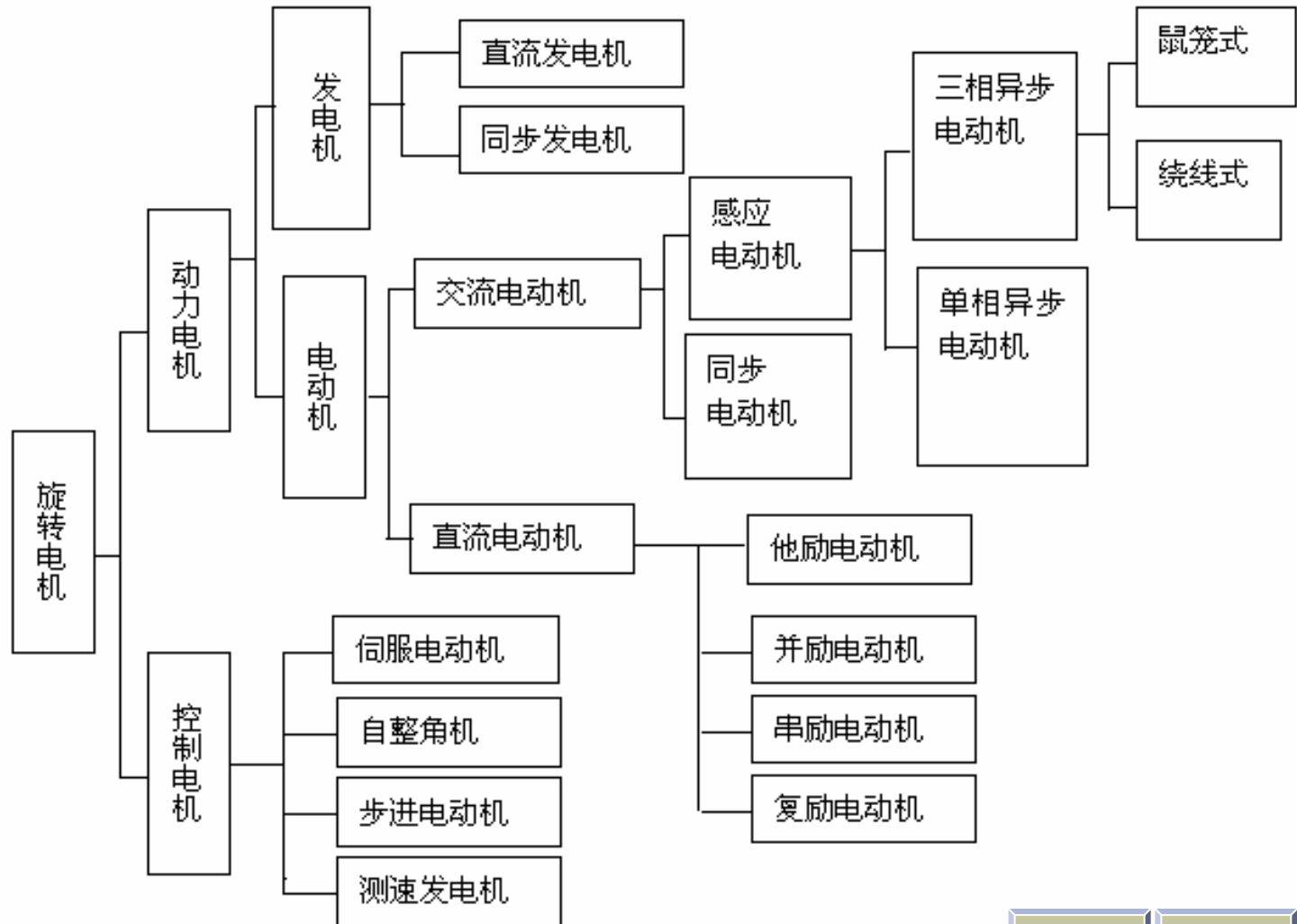
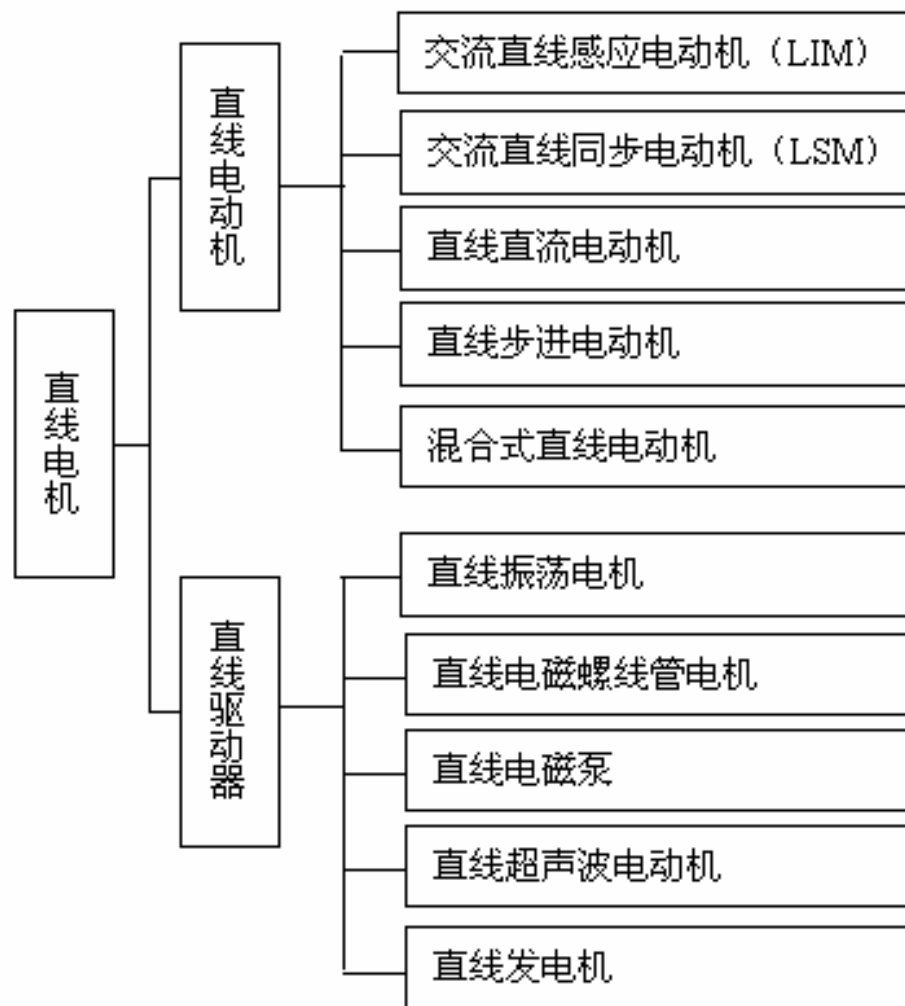


表6-1 电机的分类



选择电动机要从技术和经济两方面考虑，
即要合理选择电动机的容量类型、结构型式和
转速等技术指标，又要兼顾到设备的投资少、
费用低等经济指标。

电动机容量的确定

- 电动机容量的确定是选择电动机的关键。电动机容量也就是指电动机的功率，是由电动机所带负载的功率确定的。对连续运行的电动机，其额定功率应等于或稍大于其负载（恒定负载）所需的功率；对短时运行的电动机，其额定功率可以是其负载所要求的功率的 $1/\lambda$ 。
 λ 为三相异步电动机的过载系数， λ 的取值范围一般为 $1.8 \sim 2.2$ 。

电动机类型的选择

- 电动机类型是根据电动机所带负载的性质来选择的，如表6-3所示。

表6-3 电动机类型选择

负载性质	电动机类型
起动次数不频繁，不需电气调速	鼠笼式异步电动机
要求调速范围较大，起动时负载转矩大	线绕式异步电动机
只要求几种速度，不要求连续调速	多速异步电动机
要求调速范围广而且功率较大	直流电动机
工作速度稳定而且功率大	同步电动机

电动机结构型式的选择

- 电动机按其安装方式不同分为卧式和立式两种，普通机床一般采用通用系列的卧式电动机。
- 根据工作环境选择电动机的防护型式。
 - 在正常工作环境，一般采用防护式电动机。
 - 在干燥无尘环境，可采用开启式电动机。
 - 在潮湿、粉尘较多或户外场所，采用封闭式电动机。
 - 在有爆炸危险或有腐蚀性气体的地方，应选用防爆式或防腐式电动机。

电动机转速选择

- 电动机额定转速是根据电动机所带负载的需要而选定的。但是，通常转速不低于 $500\text{r}/\text{min}$ （即每分钟500转），因为功率一定时，电动机转速愈低，其尺寸愈大，价格愈贵，而且效率也较低。

电动机额定电压选择

- 电动机电压等级的选择，要根据电动机类型、功率以及使用地点的电源电压来决定，一般为380V。大功率异步电动机采用3000V和6000V的额定电压。

实训八：三相异步电动机测量及三表使用

- 一、实训目的
- 1.掌握三相异步电动机的基本构造。
- 2.掌握三相异步电动机铭牌数据意义。
- 3.掌握三相异步电动机绝缘电阻测量方法。
- 4.掌握三相异步电动机相电压及线电压测量方法。
- 5.掌握三相异步电动机相电流及零序电流测量方法。
- 6.掌握万用表、摇表、钳表正确使用。

二、原理说明

- 三相异步电动机分成两个基本部分：定子（固定部分）和转子（旋转部分）

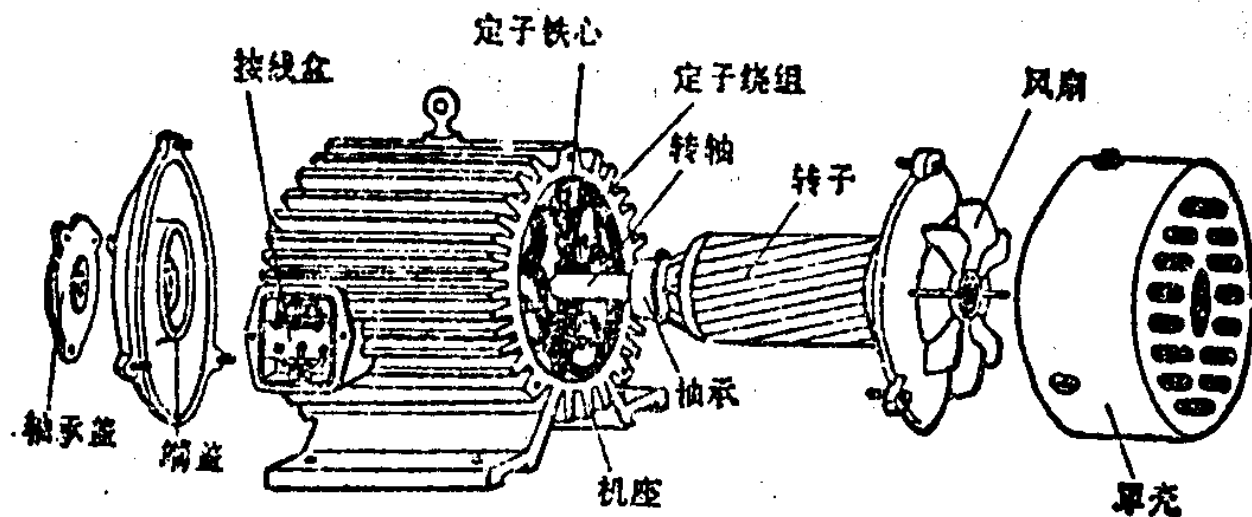
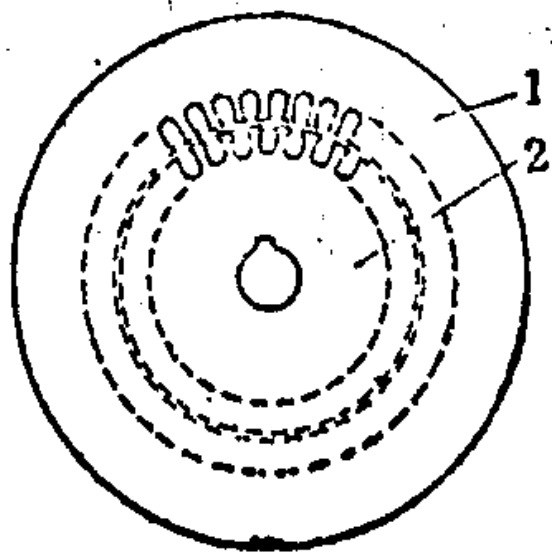


图6.2 三相异步电动机的构造

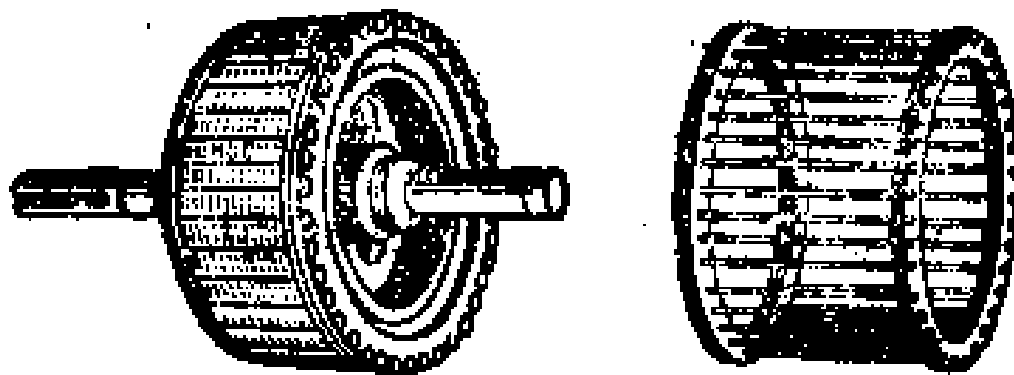
1. 定子



1-定子 2-转子

图6.3 定子和转子的铁芯

2. 转子



(a) 鼠笼式绕组

(b) 转子外形

图6.4 鼠笼式转子

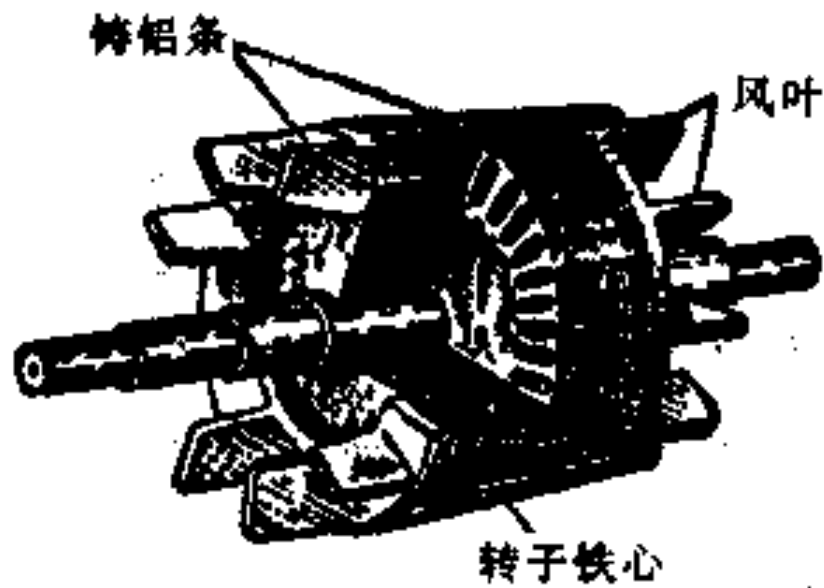


图6.5 铸铝的鼠笼式转子

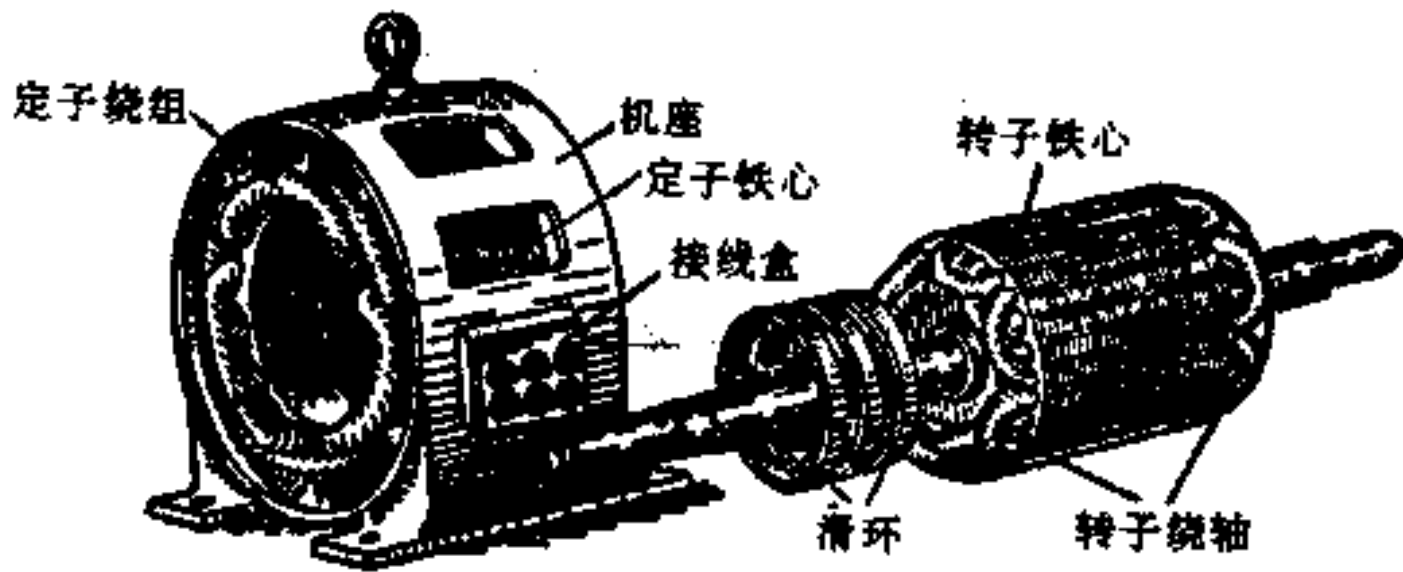


图6.6 线绕式异步电动机的构造

- 要正确使用电动机，必须要看懂铭牌。Y132M-4型电动机的铭牌如下。电动机铭牌数据的意义详见6.2.4节。

三相异步电动机		
型号 Y132M-4	功率 7.5kw	频率 50Hz
电压 380V	电流 15.4A	接法 Δ
转速 1440r/min	绝缘等级 A	工作方式 连续
年 月 编号	XX电机厂	

此外，它的主要技术数据还有：功率因数0.85，效率87%。

三、预习要求

- 1.三相异步电动机定子由____、____及____组成；鼠笼式转子由____和____组成；绕线式转子由____、____和____组成。
- 2.电动机铭牌上所标的电压值是指其在额定运行时上应加的____值。一般规定电动机的电压不应高于或低于额定值的____。
- 3.电动机输入功率 P_1 =____，输出功率 P_2 是指____，效率 η =____。
- 4.电动机是____负载，其功率因数在额定负载时约为____，而在轻载和空载时只有____。
- 5.绝缘等级是按电动机绕组所用的绝缘材料在使用时容许的____来分级的。

四、操作步骤

- 1.识别三相异步电动机基本构造。
- 2.识别三相异步电动机铭牌。
- 3.用摇表测量三相异步电动机绝缘电阻。
- 4.用万用表测量三相异步电动机相电压及线电压。
- 5.用钳表测量三相异步电动机相电流及零序电流。
- 6.将测量结果填入表6-4中。

表6-4 三相异步电动机测量结果

被测物理量	测量结果
绝缘电阻	U-d(地)_____, V-d(地)_____, W-d(地)_____ U-V_____, U-W_____, V-W_____
电压	相电压_____, 线电压_____
电流	相电流_____, 零序电流_____

五、分析思考

- 1.摇表使用注意事项是什么？
- 2.钳表使用注意事项是什么？

6.2 三相异步电动机

世界上75% 的用电设备都是三相交流异步电动机。本节将详细介绍三相异步电动机的原理、转速与转矩的计算以及起动、制动、调速的控制方法。

6.2.1 三相异步电动机工作原理

三相异步电动机转动原理如下：三相交流电通入定子绕组，产生旋转磁场。磁力线切割转子导条使导条两端出现感应电动势，闭合的导条中便有感应电流流过。在感应电流与旋磁场相互作用下，转子导条受到电磁力并形成电磁转矩，从而使转子转动。

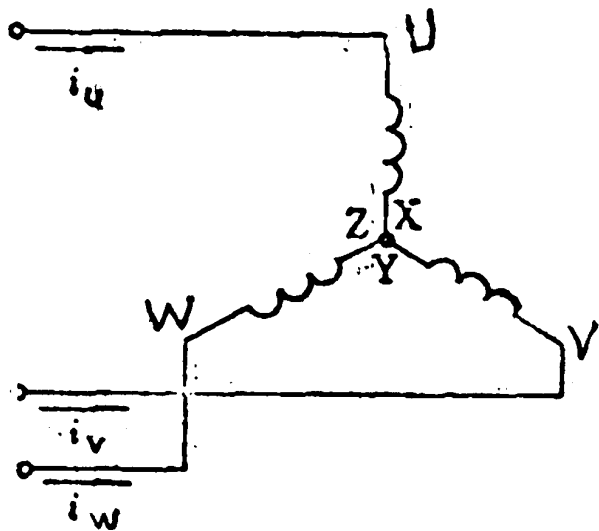
旋转磁场产生

三相异步电动机定子绕组接成星形，如图 6.7 (a) 所示。定子绕组中通入三相对称交流电流，其波形图如图 6.7 (b) 所示。三相对称交流电流的表达式如下：

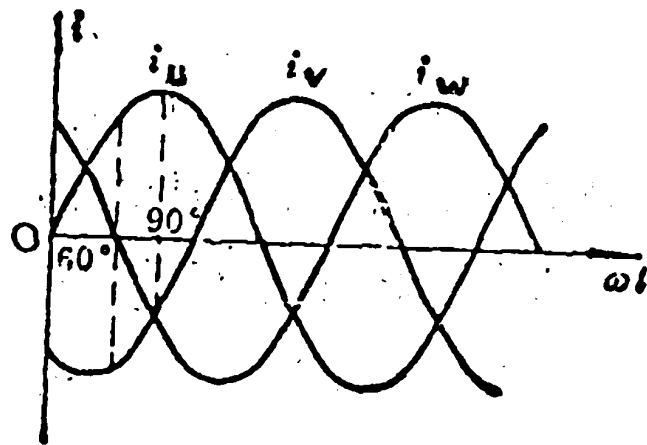
$$i_U = I_m \sin \omega t$$

$$i_V = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (6-1)$$

$$i_W = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$



(a) 三相绕组



(b) 三相对称交流电流波形图

图6.7 三相绕组通入对称电流

从图6.7 (b) 可以看出，三相对称交流电流的相序（即电流出现正幅值的顺序）为U→V→W。不同时刻三相对称交流电流正负方向如表6-5所示。

表6-5 不同时刻电流正负方向

ωt	i_U	i_V	i_W
0°	0	-	+
60°	+	-	0
90°	+	-	-

由表6-5知，不同时刻，三相电流正负不同，也就是三相电流的实际方向不同。在某一时刻，将每相电流所产生的磁场相加，便得出三相电流的合成磁场。不同时刻合成磁场的方向也不同，如图6.8所示。

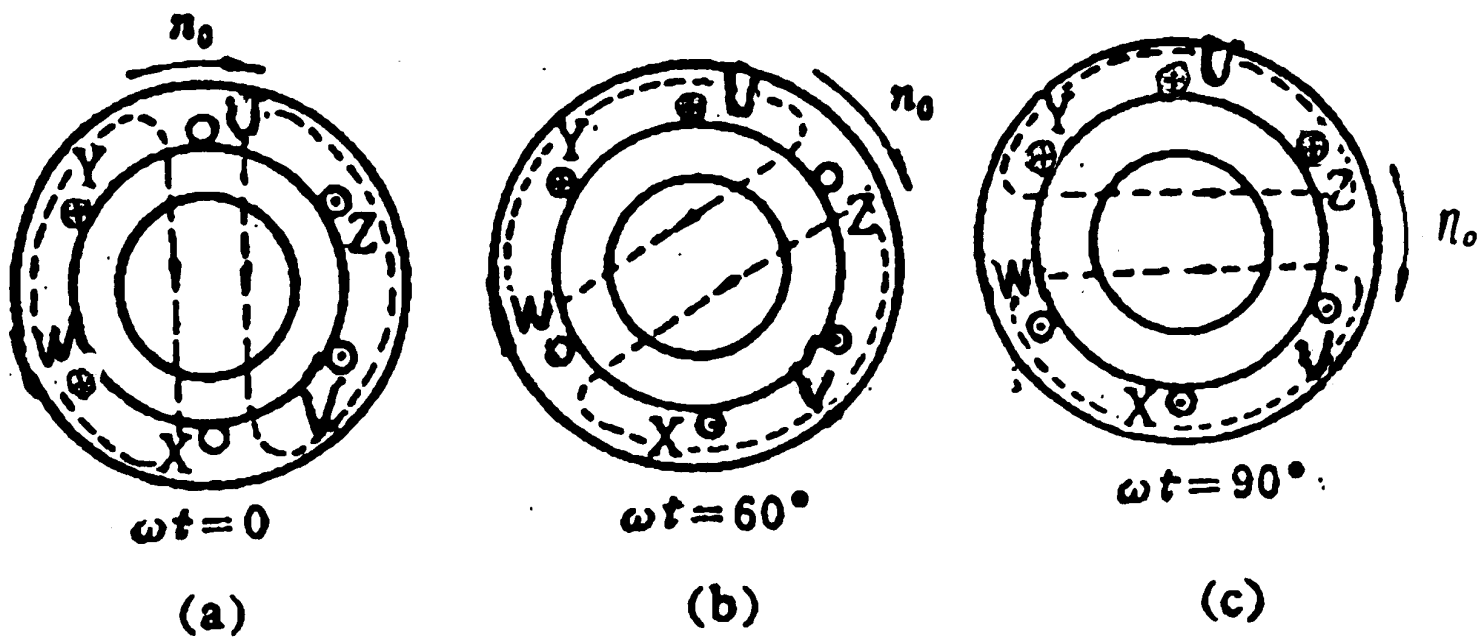


图6.8 三相电流产生的旋转磁场 ($p=1$)

转动原理

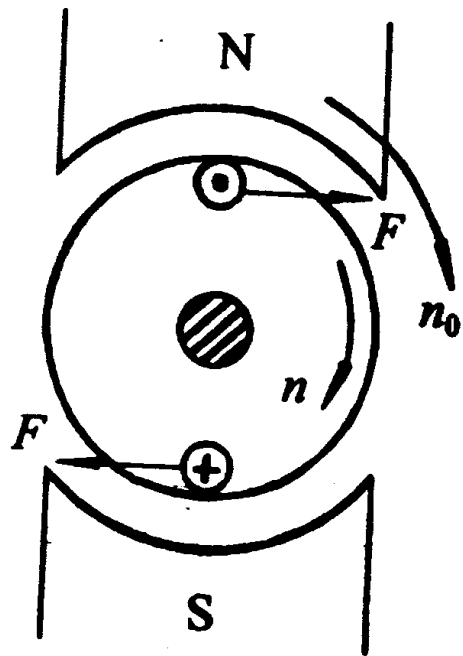


图6.9 转子转动原理示意图

图6.9中，N、S表示由通入定子的三相交流电产生的两极旋转磁场。转子中只表示出分别靠近N极和S极的两根导条（铜或铝）。当旋转磁场向顺时针方向旋转时，其磁力线切割转子导条，导条中就感应出电动势。在电动势的作用下，闭合的导条中就有感应电流。感应电流的方向可以根据右手定则来判断，判断的结果如图6.9所示。在这里应用右手定则时，可假设磁极不动，而转子导条向逆时针方向旋转切割磁力线，这与实际上磁极顺时针方向旋转时磁力线切割转子导条是相当的。

导条中的感应电流与旋转磁场相互作用，使转子导条受到电磁力 F 。电磁力的方向可以由左手定则确定。靠近N极和S极的两根导条产生的电磁力形成电磁转矩，使转子转动起来。

6.2.2 三相异步电动机的转向与转速

电动机正反转

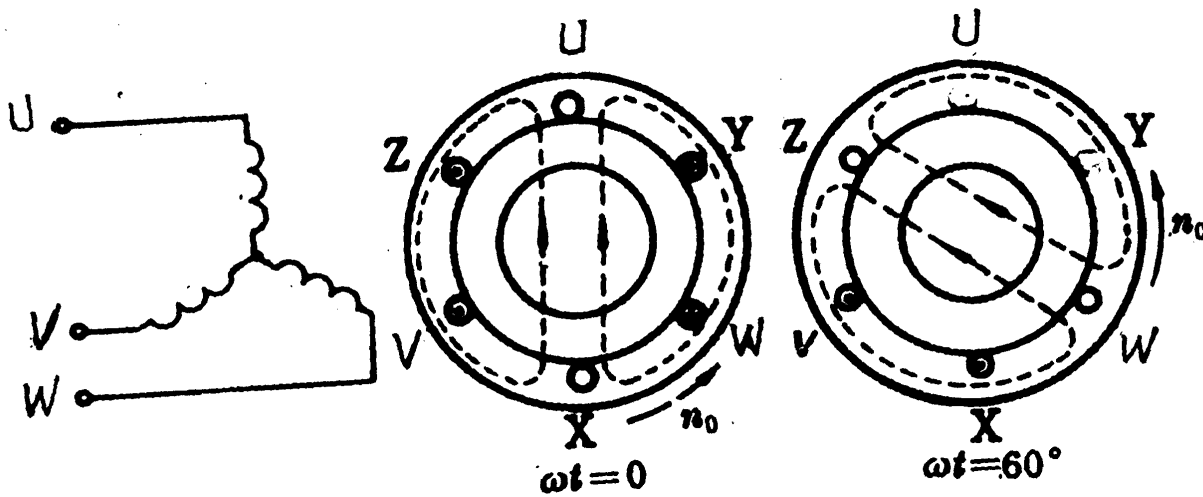


图6.10 旋转磁场的反转

电动机转速

- 三相异步电动机的转速与旋转磁场的转速有关。而旋转磁场的转速决定于磁场的极数。旋转磁场的极数与定子绕组安排有关。

(1) 旋转磁场转速 n_0

当旋转磁场具有 p 对极时，磁场的转速为：

$$n_0 = 60f_1/p \text{ (r/min)} \quad (6-2)$$

表6-6 旋转磁场的转速

p	1	2	3	4	5	6
n_0 (r/min)	3000	1500	1000	750	600	500

(2) 转子转速 n

由图6.9可见，电动机转速 n 与旋转磁场转速 n_0 之间必须要有差别，否则转子与旋转磁场之间就没有相对运动，因而磁力线就不切割转子导体，转子电动势、转子电流以及转矩也就都不存在。这样，转子就不可能继续以 n 的转速转动。这就是异步电动机名称的由来。而旋转磁场转速 n_0 常称为同步转速。

(3) 转差率s

我们用转差率s来表示转子转速n与旋转磁场转速 n_0 相差的程度，即

$$s=(n_0-n)/n_0 \quad (6-3)$$

转差率是异步电动机的一个重要的物理量。转子转速愈接近旋转磁场转速，则转差率愈小。由于三相异步电动机的额定转速与同步转速相近，所以它的转差率很小。通常异步电动机在额定负载时的转差率约为1~9%。

当 $n=0$ 时（起动初始瞬间）， $s=1$ ，这时转差率最大。

[例6-1] 有一台三相异步电动机，其额定转速 $n_N=975\text{r/min}$ ，试求电动机的极数和额定负载时的转差率。电源频率 $f_1=50\text{Hz}$ 。

解：由于电动机的额定转速接近而略小于同步转速，而同步转速对应于不同的极对数有一系列固定的数值（见表6-6）。显然，与电动机额定转速 975r/min 最相近的旋转磁场转速（即同步转速）为 $n_0=1000\text{r/min}$ ，与此相应的磁极对数 $p=3$ 。因此，额定负载时的转差率

为：

$$s_N = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1000 - 975}{1000} \times 100\% = 2.5\%$$

6.2.3 三相异步电动机的转矩与机械特性

1. 定子电路与转子电路

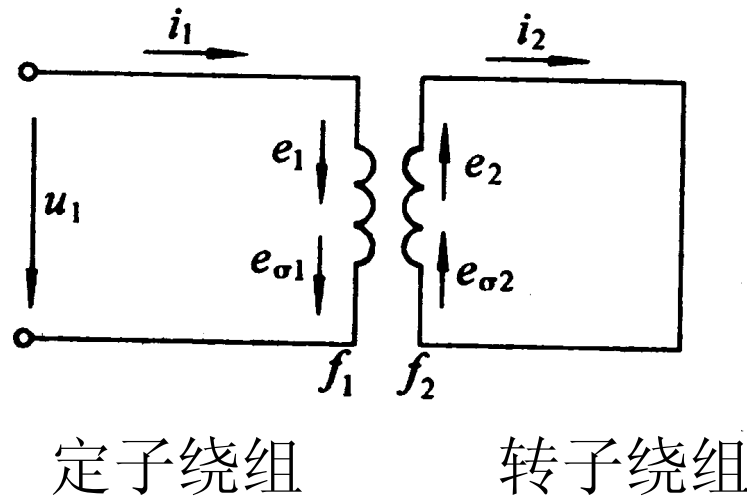


图6.13 三相异步电动机的每相电路图

2. 转矩公式

异步电动机的转矩是由旋转磁场的每极磁通 Φ 与转子电流 I_2 相互作用而产生的。

$$T = K_T \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (6-4)$$

式(6-4)中 K_T 是一常数，它与电动机的结构有关。

由式(6-4)可见，转矩除与每极磁通 Φ 成正比外，还与 $I_2 \cos \varphi_2$ 成正比。由于转子电流 I_2 和功率因数 $\cos \varphi_2$ 与转差率 s 有关，所以转矩 T 也与转差率 s 有关。

转矩的另一个表示式为：

$$T=K \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (6-5)$$

式(6-5)中K是一个常数。

由式(6-5)可见，转矩T还与定子每相电压 U_1 的平方成比例，所以当电源电压有所变动时，对转矩的影响很大。此外，转矩还受转子电阻 R_2 的影响。

机械特性曲线

- 在一定的电源电压 U_1 和转子电阻 R_2 之下，转矩 T 与转差率 s 的关系曲线 $T=f(s)$ ，如图6.14所示；或转速 n 与转矩 T 的关系曲线 $n=f(T)$ ，如图6.15所示，称为电动机的机械特性曲线。研究机械特性的目的是为了分析电动机的运行性能。在机械特性曲线上，我们要讨论三个转矩。

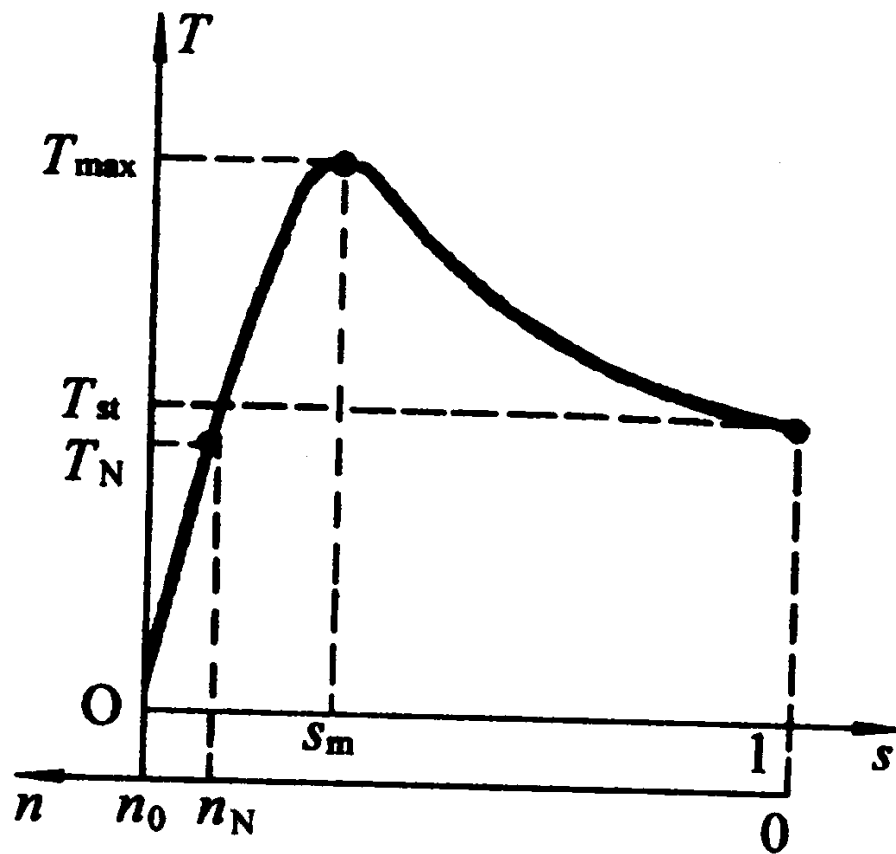


图6.14 三相异步电动机的 $T=f(s)$ 曲线

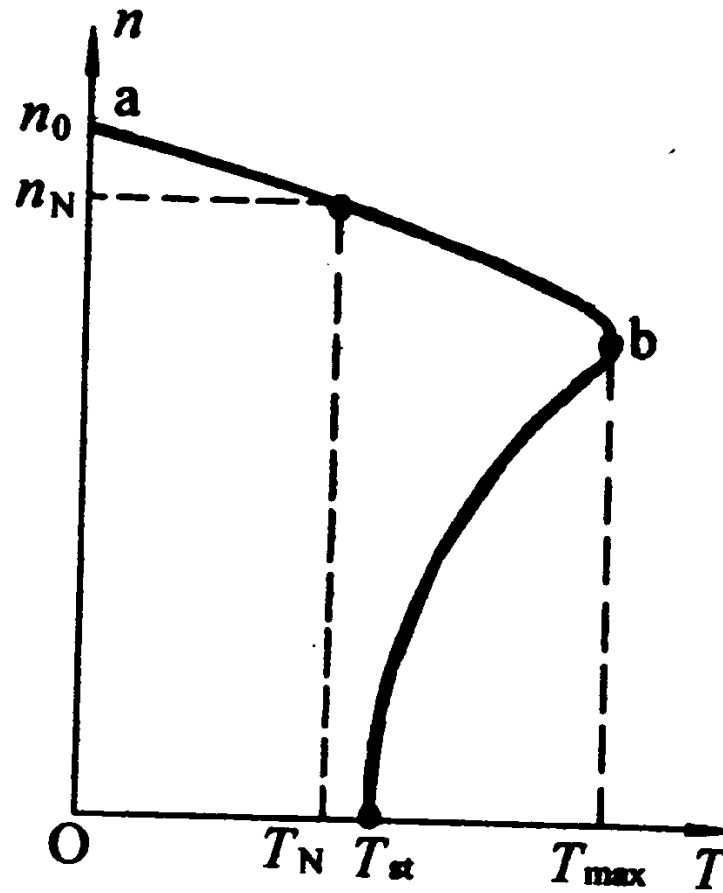


图6.15 三相异步电动机的 $n=f(T)$ 曲线

(1) 额定转矩 T_N

$$T_N = 9550 \frac{P_2}{n}$$

(2) 最大转矩 T_{max}

$$\lambda = \frac{T_{max}}{T_N}$$

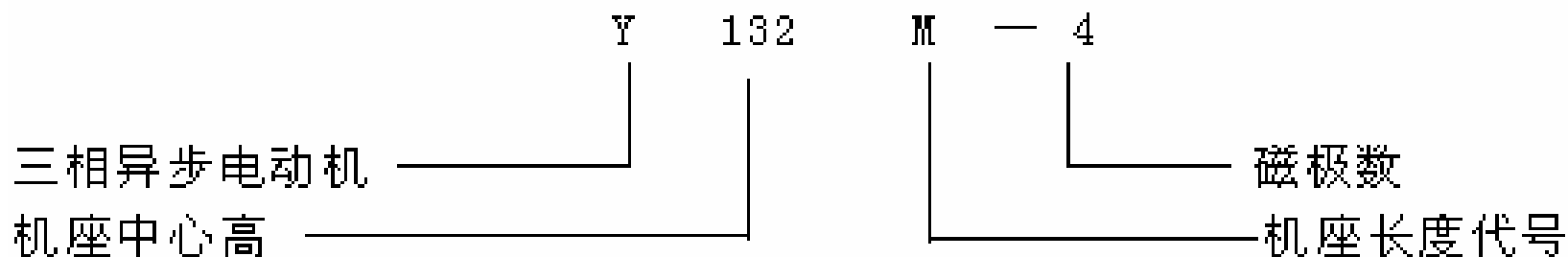
(3) 起动转矩 T_{St}

6.2.4 三相异步电动机的铭牌数据

■ 三相异步电动机铭牌数据的意义如下。

■ 1. 型号

为了适应不同用途和不同工作环境的需要，电动机制成不同的系列，每种系列用各种型号表示。型号说明如下：



- 三相异步电动机机座长度代号表示为：S—短机座；M—中机座；L—长机座。三相异步电动机产品名称代号如表6-7所示。

表6-7 异步电动机产品名称代号

产品名称	新代号	汉字意义	老代号
异步电动机	Y	异	J、JO
线绕式异步电动机	YR	异绕	JR、JRO
防爆型异步电动机	YV	异爆	JV、JVS
高起动转矩异步电动机	YQ	异起	JQ、JQO

表6-7中，小型Y系列鼠笼式异步电动机是取代JO系列的新产品，是封闭自扇冷式。Y系列定子绕组为铜线，此外，还有Y-L系列鼠笼式异步电动机，其定子绕组为铝线。电动机功率取值范围是0.55 ~ 90kW。同样功率的电动机，Y系列比JO系列体积小，重量轻，效率高。

电压

- 铭牌上所标的电压值是指电动机在额定运行时定子绕组上应加的线电压有效值。三相异步电动机的额定电压有380V、3000V及6000V等多种。一般规定电动机的工作电压不应高于或低于额定值的5%。
- 当电压高于额定电压值时，磁通将增大（因 $U_1 \approx 4.44f_1N_1\Phi$ ）。磁通的增大又将引起励磁电流的增大（由于磁饱和，可能增得很大）。这样，可使铁损（与磁通平方成正比）增加，铁芯发热。
- 但常见的是电压低于额定值。这时引起转速下降，电流增加。如果在满载或接近满载的情况下，电流的增加将超过额定电流值，使绕组过热。在低于额定电压下运行时，和电压平方成正比的最大转矩 T_{\max} 会显著地降低，这对电动机运行也不利。

电流

- 铭牌上所标的电流值是指电动机在额定运行时定子绕组的线电流有效值。当电动机空载时，转子转速接近于旋转磁场的转速，两者之间相对转速很小，所以转子电流近似为零，这时定子电流几乎全是建立旋转磁场的励磁电流。当输出功率增大时，转子电流和定子电流都相应增大。

功率与效率

铭牌上所标的功率值是指电动机在额定运行时轴上输出的机械功率值。输出功率与输入功率不等，其差值等于电动机本身的损耗功率，包括铜损（ P_{Cu} ）、铁损（ P_{Fe} ）及机械损耗等。以Y132M-4型电动机为例：

$$\text{输入功率 } P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos\varphi = \sqrt{3} \times 380 \times 15.4 \times 0.85 = 8.6\text{kW}$$

$$\text{输出功率 } P_2 = 7.5\text{kW}$$

$$\text{效率 } \eta = P_2/P_1 = (7.5/8.6) \times 100\% = 87\%$$

一般鼠笼式电动机在额定运行时的效率约为72~93%。在额定功率的75%左右时效率最高。

功率因数

- 因为电动机是感性负载，定子相电流比相电压滞后一个 φ 角， $\cos\varphi$ 就是电动机的功率因数。三相异步电动机的功率因数较低，在额定负载时约为0.7~0.9，而在轻载和空载时更低，空载时只有0.2~0.3。因此，必须正确选择电动机的容量，防止“大马拉小车”，并力求缩短空载的时间。

转速

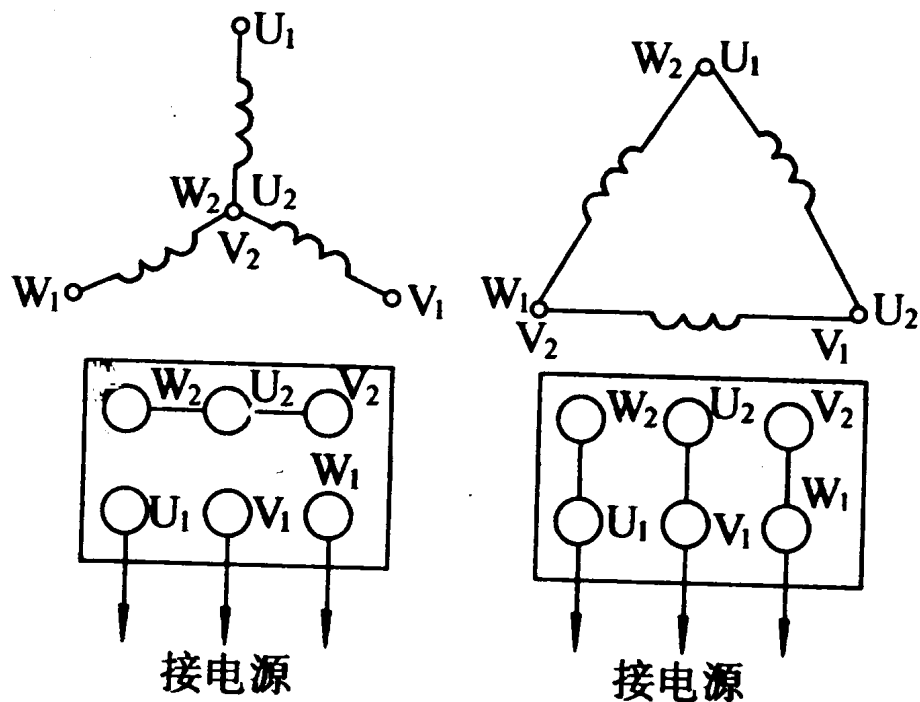
- 由于电动机的负载对转速要求不同，需要生产不同磁极数的异步电动机，因此有不同的转速等级。最常用的是四极电动机，其同步转速 $n_0=1500\text{r/min}$ 。

温升与绝缘等级

表6-8 绝缘等级及其最高允许温度

绝缘等级	Y级	A级	E级	B级	F级	H级	C级
最高允许温度 (°C)	90	105	120	130	155	180	180以上

接法



(a) 星形 (Y) 联接 (b) 三角形 (Δ) 联接

图6.16 定子绕组的星形 (Y) 联接和三角形 (Δ) 联接

[例6-2] 有一Y225M-4型三相异步电动机，其额定数据如

下：

功率	转速	电压	效率	功率因数	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	T_{max}/T_N
45kW	1480r/min	380v	92.3%	0.88	7.0	1.9	2.2

- 试求：(1)额定电流 I_N ；(2)额定转差率 s_N ；(3)额定转矩 T_N 、最大转矩 T_{max} 、起动转矩 T_{st} 。

解：（1）4~100kW的电动机通常都是380V、 Δ 联接。

$$I_N = \frac{P_2 \times 10^3}{\sqrt{3}U \cos \varphi \eta} = \frac{45 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.923} = 84.2\text{A}$$

(2)由电机额定转速 $n=1480\text{r/min}$ 可知，电动机是四级的，即 $p=2$ ， $n_0=1500\text{r/min}$ 。所以： $\frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.013$

$$(3) T_N = 9550 \frac{P_2}{n} = 9550 \times \frac{45}{1480} = 290.4\text{N} \cdot \text{m}$$

由额定数据 $T_{\max}/T_N=2.2$ 得：

$$T_{\max} = 2.2 \times T_N = 2.2 \times 290.4 = 638.9\text{N} \cdot \text{m}$$

由额定数据 $T_{\text{st}}/T_N=1.9$ 得：

$$T_{\text{st}} = 1.9 \times T_N = 1.9 \times 290.4 = 551.8\text{N} \cdot \text{m}$$

6.2.5 三相异步电动机的起动

■ 1. 起动性能

■ (1) 起动电流 I_{st}

电动机的起动电流对线路是有影响的。过大的起动电流在短时间内会在电路上造成较大的电压降落，而使负载端电压降低，影响邻近负载的正常工作。

(2) 起动转矩 T_{st}

- 如果起动转矩 T_{st} 过小，就不能在满载下起动，应设法提高。但起动转矩 T_{st} 过大，会使传动机构（譬如齿轮）受到冲击而损坏，所以又应设法减小。
- 异步电动机起动时的主要缺点是起动电流较大。为了减小起动电流（有时也为了提高或减小起动转矩），必须采用适当的起动方法。

2. 起动方法

表6-9 三相异步电动机的起动方法

三相异步电机种类	起动方法	特 点
20kW 以下小型鼠笼式电动机	直接起动	I_{st} 较大，将使线路电压下降。
正常运行时采用 Δ 接法的鼠笼式电动机	星形—三角形 (Y— Δ) 换接 起动	起动时定子电压降低 $1/\sqrt{3}$ ， I_{st} 减小 $1/3$ ， T_{st} 减小 $1/3$ ，只适合空载或轻载起动。
容量较大或正常运行时联成 Y 不能采用 Δ 起动器的鼠笼式电动机	自耦降压起动	使 I_{st} 和 T_{st} 减小。
绕组式电动机	转子串电阻	减小 I_{st} ，增大 T_{st} ，适用于要求起动转矩较大的电动机负载。

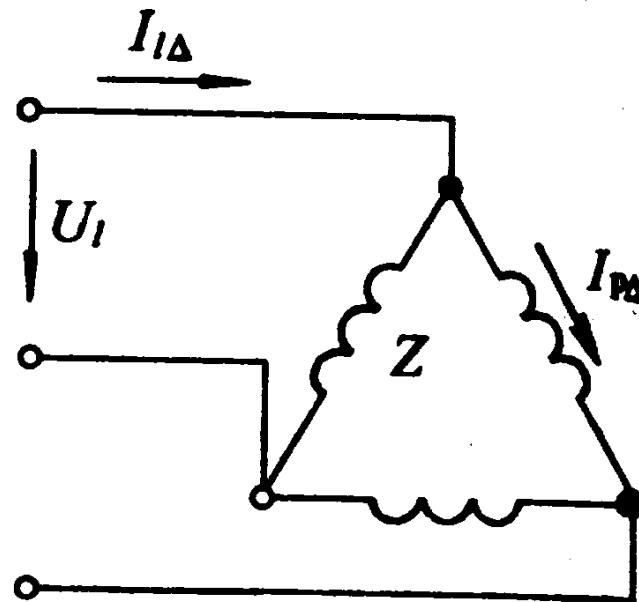
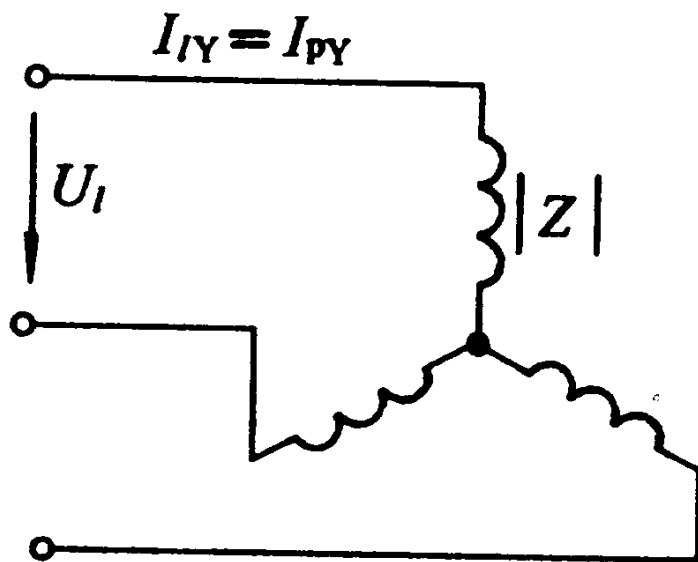


图6.17 比较星形联接和三角形联接时的起动电流

当定子绕组联成星形，即星形—三角形换接起动时，

$$I_{1Y} = I_{pY} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{|Z|}$$

当定子绕组联成三角形，即直接起动时，

$$I_{1\Delta} = \sqrt{3}I_{p\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_1}{|Z|}$$

比较上列两式，可得

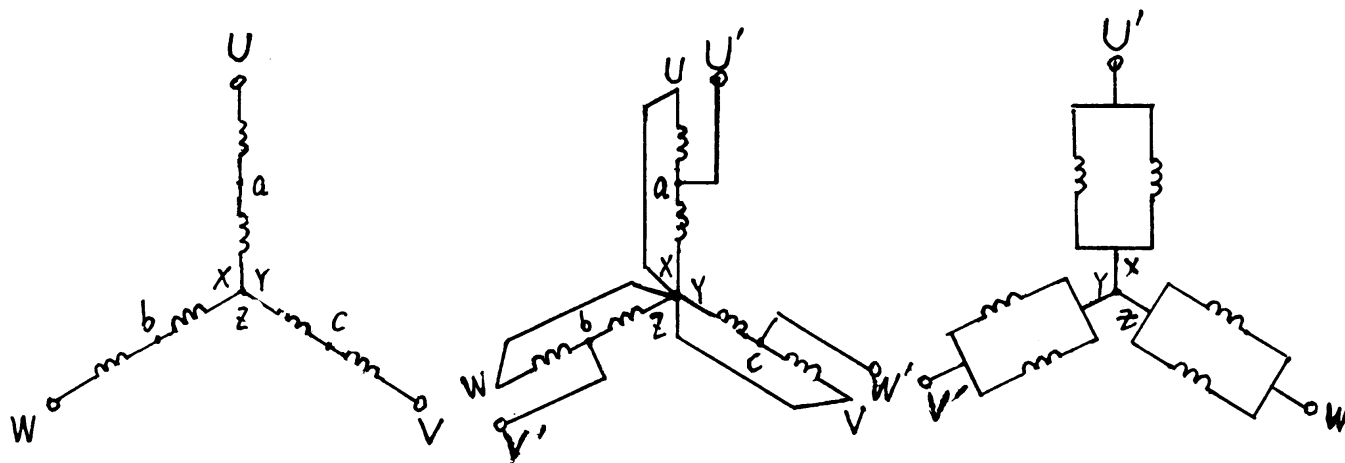
$$\frac{I_{1Y}}{I_{1\Delta}} = \frac{1}{3} \quad (6-8)$$

- 即采用星形—三角形换接起动时的电流为直接起动时的 $1/3$ 。
- 星形—三角形换接起动时，定子每相绕组上的电压降到正常工作电压的 $1/\sqrt{3}$ 。由于转矩和电压的平方成正比，所以起动转矩也减小到直接起动时的 $(1/\sqrt{3})^2=1/3$ 。

6.2.6 三相异步电动机的调速

$$n=(1-s)n_0=(1-s)\frac{60f_1}{p}$$

■ 1. 变极调速



(a) 线圈串联 (b) 线圈变串联为并联 (c) 线圈并联

图6.18 双速电动机中改变定子绕组接法的示意图

2. 变频调速

3. 变转差率调速

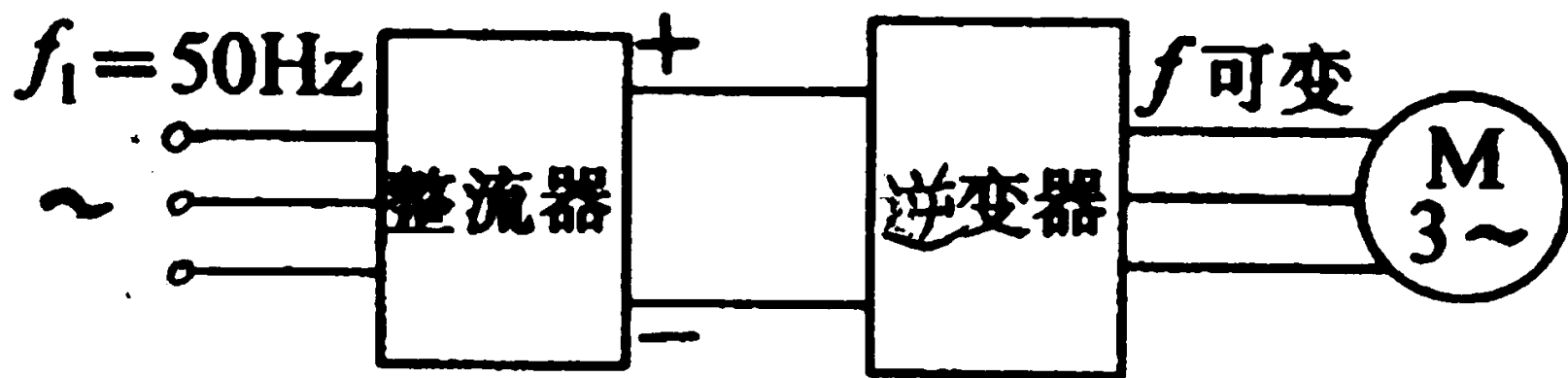


图6.19 变频调速装置示意图

6.2.7 三相异步电动机的制动

■ 1. 能耗制动

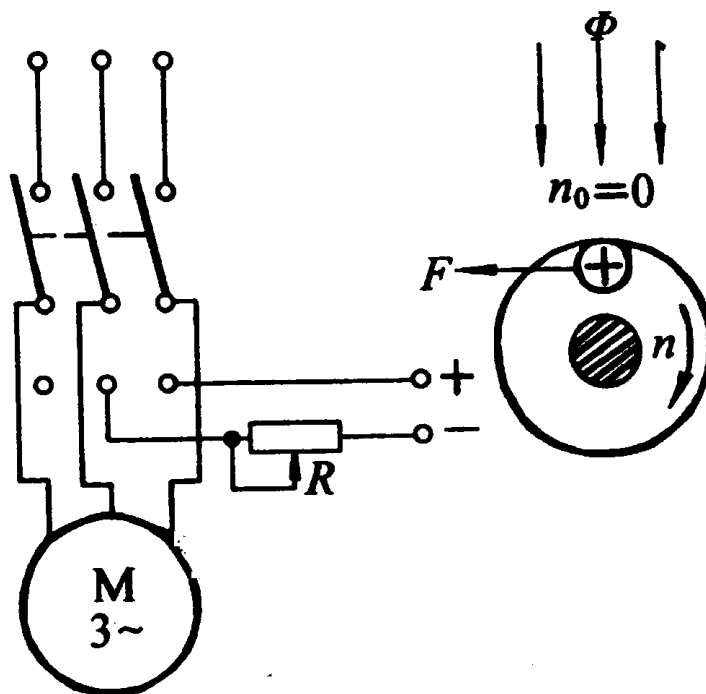


图6.20 能耗制动原理图

2.反接制动

- 反接制动的原理如图6.21所示。将接到电源的三根导线中任意两根的一端对调位置，使旋转磁场反向旋转，产生制动转矩。当转速接近零时，利用某种控制电器将电源自动切断。反接制动比较简单，效果较好，但能量消耗较大。适用于某些中型车床和铣床的主轴制动。

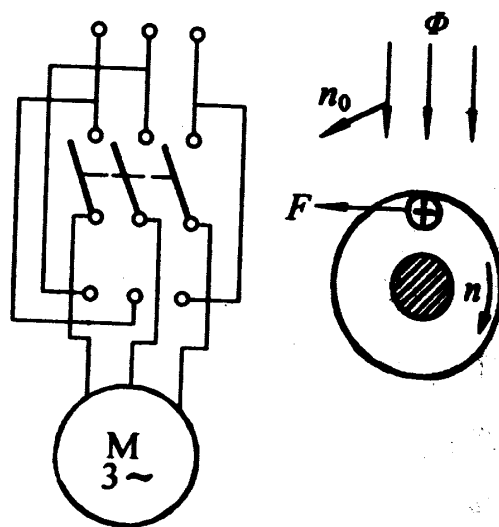


图6.21 反接制动原理图

3.发电反馈制动

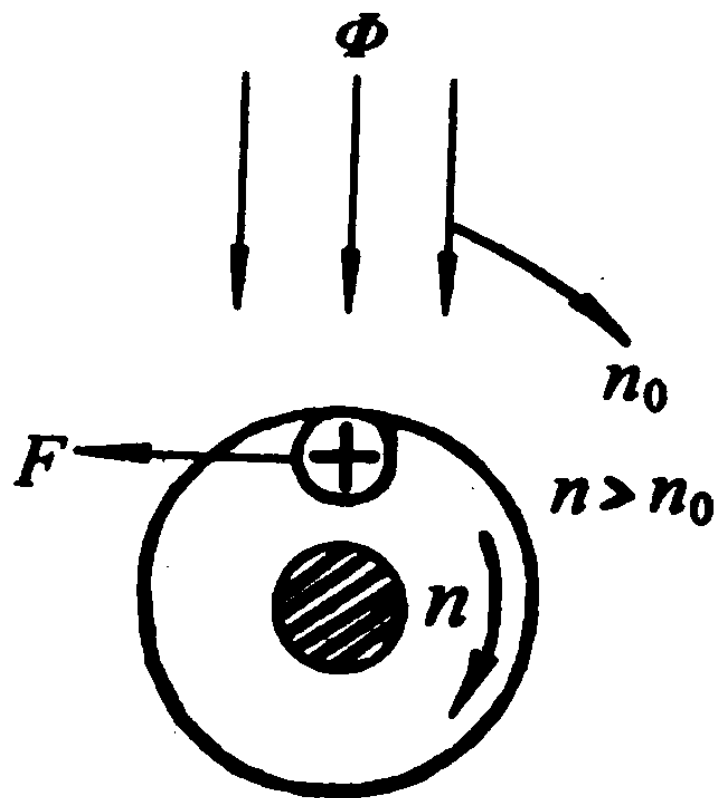


图6.22 发电反馈制动原理图

6.3 单相异步电动机

- 单相异步电动机广泛用于洗衣机、电冰箱、电风扇、排油烟机家用电器，也常用于功率不大的电动工具（如电钻、搅拌器等）。

6.3.1 单相异步电动机的构造和工作原理

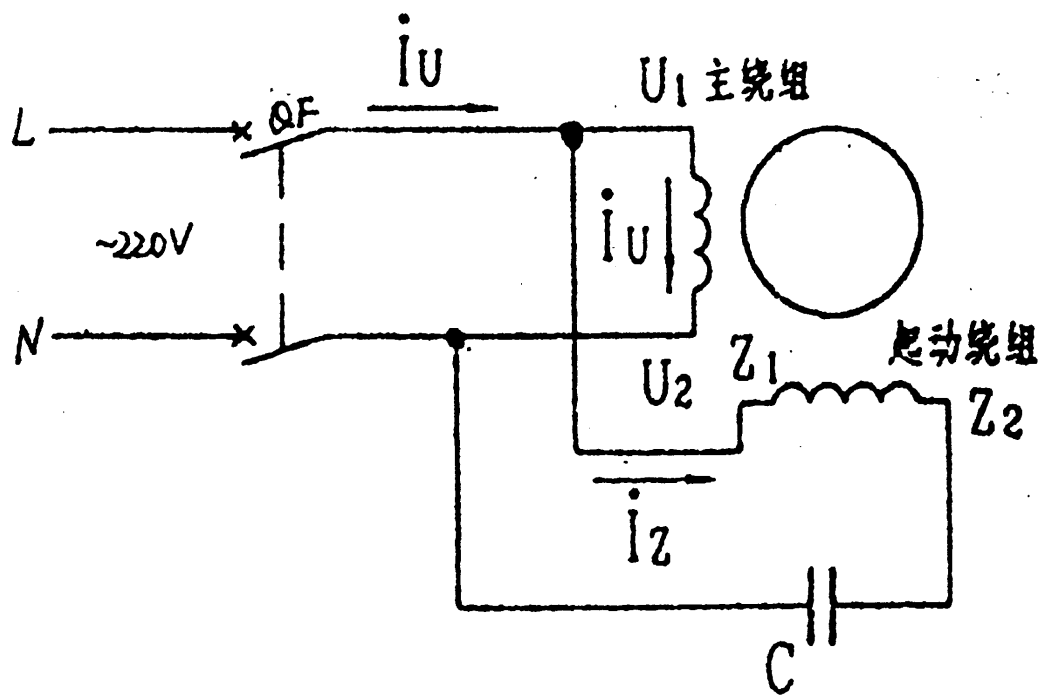


图6.23 单相运行异步电动机原理图

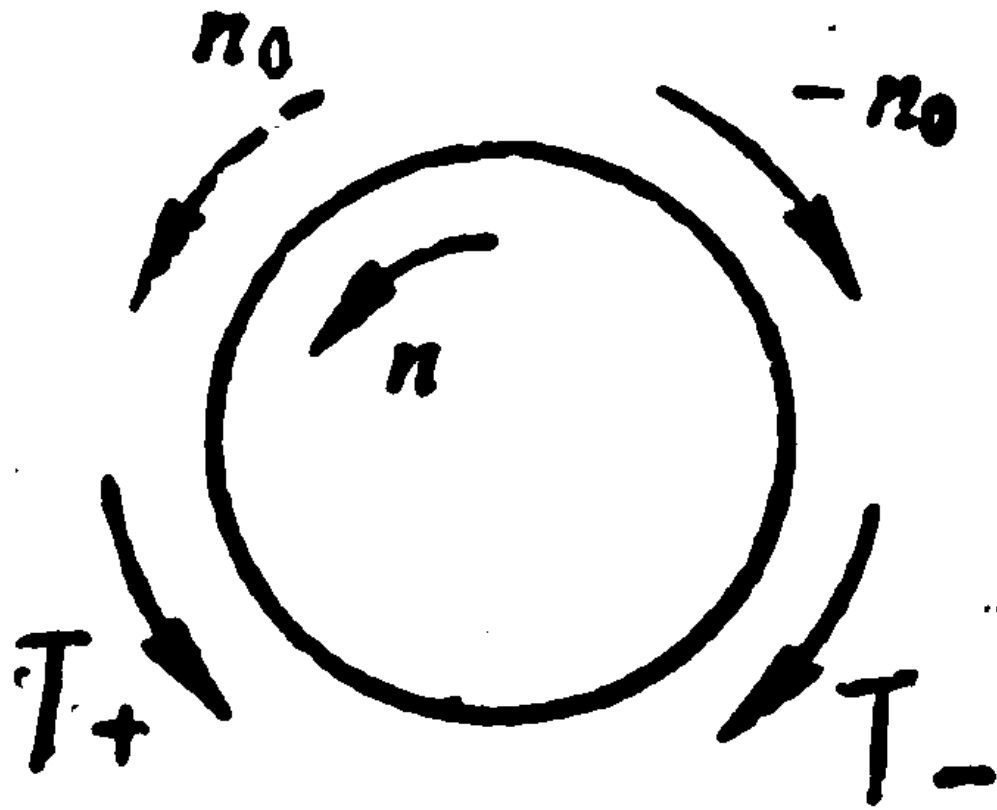
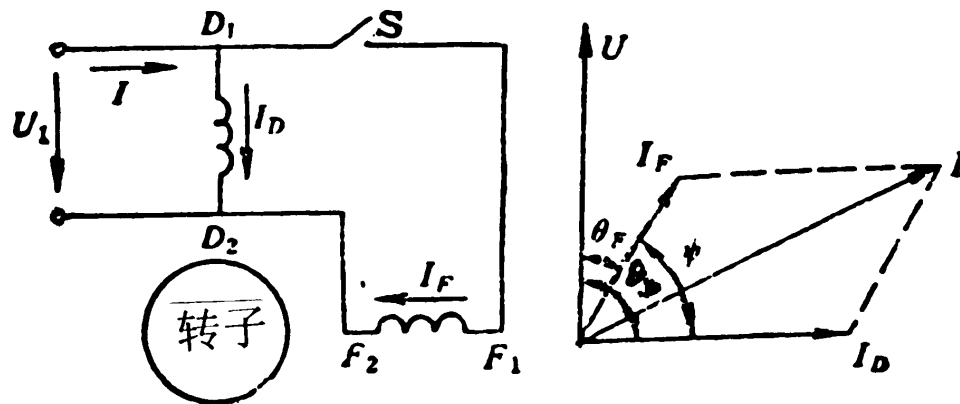


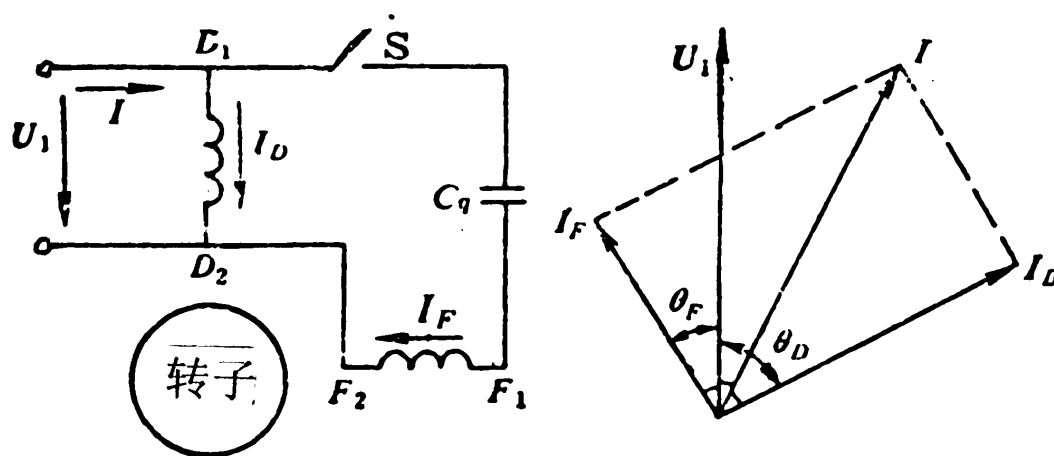
图6.24 单相异步电动机转动原理

6.3.2 单相异步电动机的起动

- 单相异步电动机根据起动方法不同可分为分相式电动机、电容式电动机和罩极式电动机。
- 1.分相式电动机
 - 分相式电动机常用于泵、压缩机、冷冻机、传送机、机床等。分相式电动机的接线原理图如图6.25所示。



(a) 电阻分相式单相异步电动机接线和相量图



(b) 电容分相式单相异步电动机接线和相量图

图6.25 分相式单相异步电动机接线原理图

- 2.电容式电动机
- 3.罩极式电动机

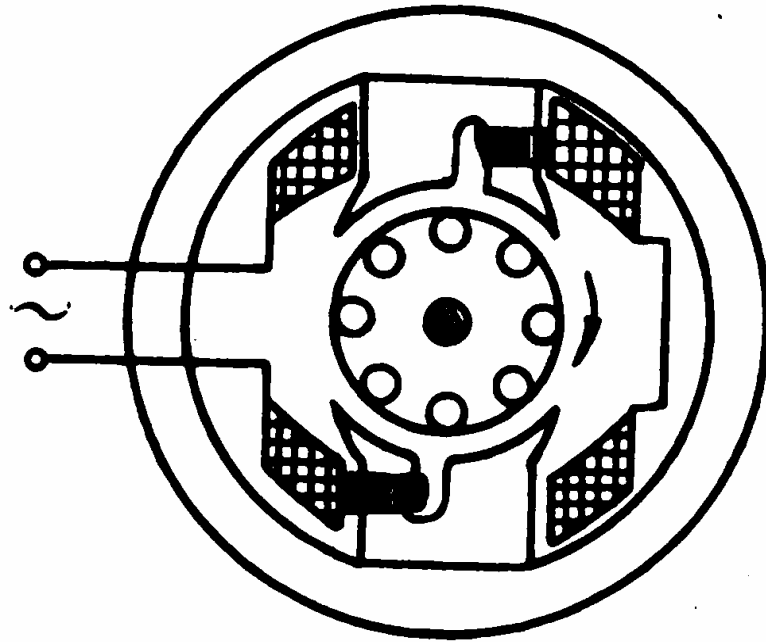


图6.26 罩极式单相异步电动机的结构示意图

6.3.3 单相异步电动机的正反转和调速

- 单相异步电动机的转动方向，决定于主绕组和副绕组的相序，调换这两个绕组中任一绕组的端头，即可改变电动机的转向。
- 单相异步电动机的调速方法有电抗器调速、绕组抽头调速、自耦变压器调和可控硅装置调速。目前以绕组抽头调速方法使用比较普遍。

6.4 直流电机

■ 6.4.1 直流电机的构造

直流电机主要由磁极、电枢和换向器组成，如图6.27所示。

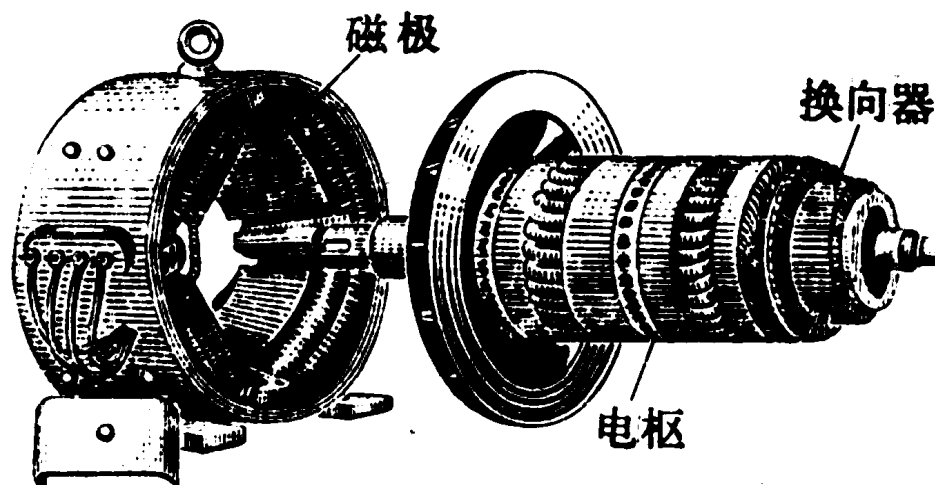


图6.27 直流电机的组成示意图

1.磁极

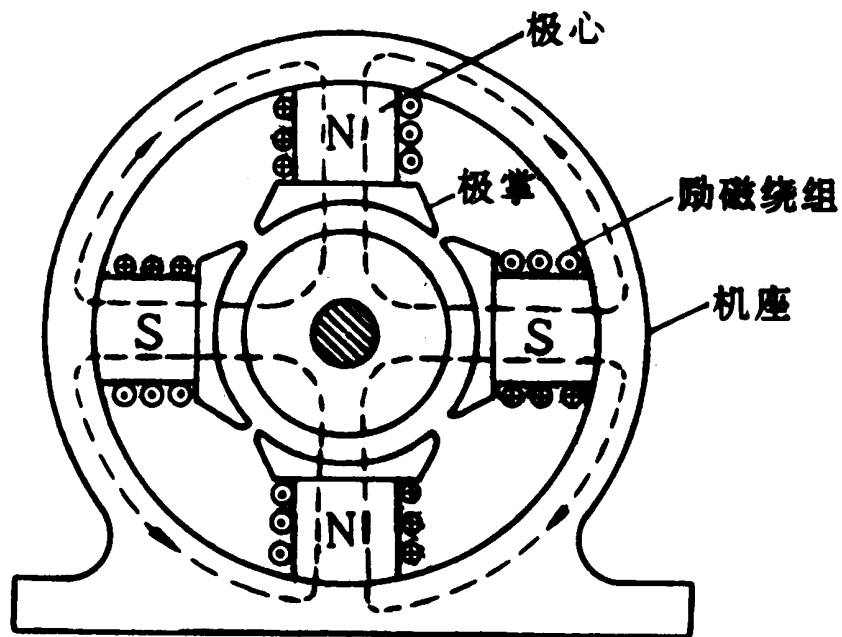
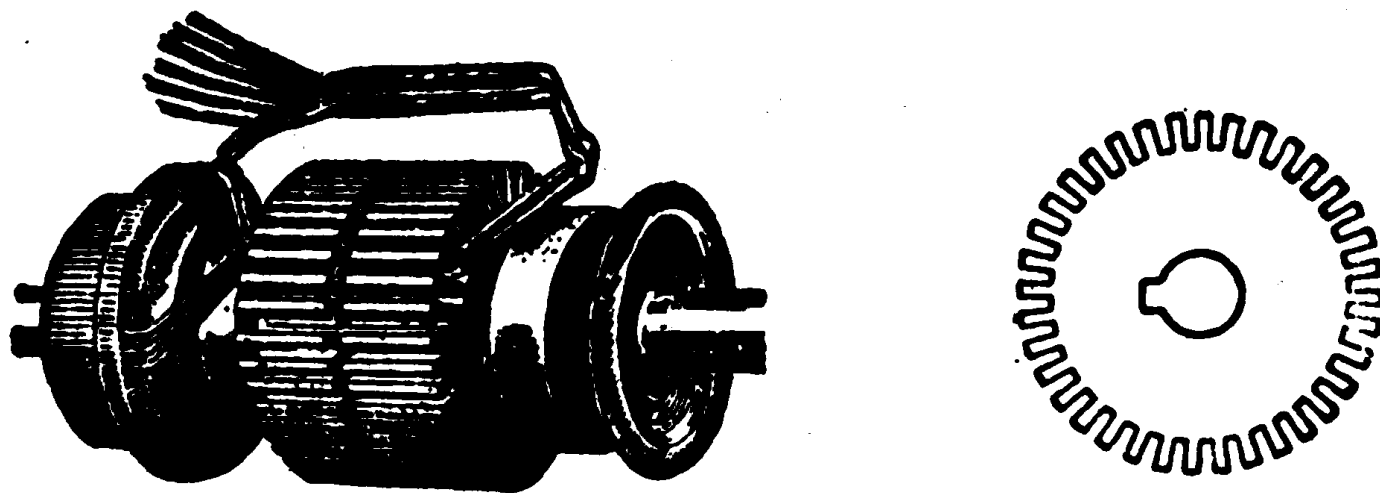


图6.28 直流电机的磁极及磁路

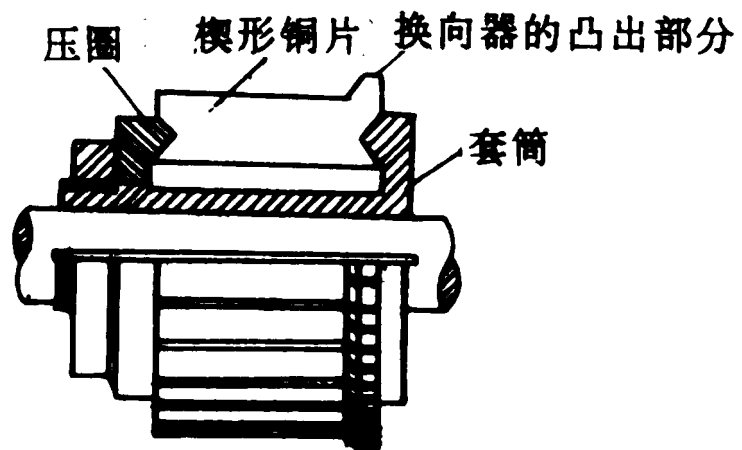
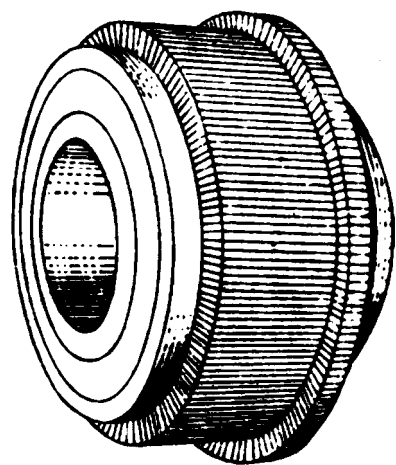
2. 电枢



(a) 电枢 (b) 电枢铁芯片

图6.29 直流电机的电枢和电枢铁芯片示意图

3. 换向器



(a) 外形 (b) 剖面图

图6.30 直流电机换向器示意图

6.4.2 直流电机的基本工作原理

■ 直流发电机

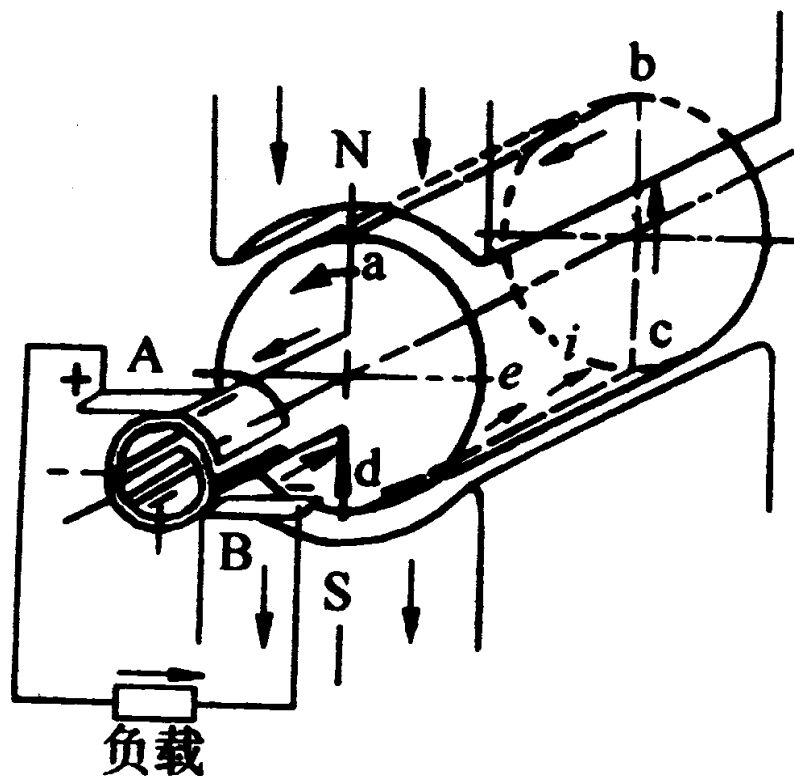


图6.31 直流发电机工作原理图

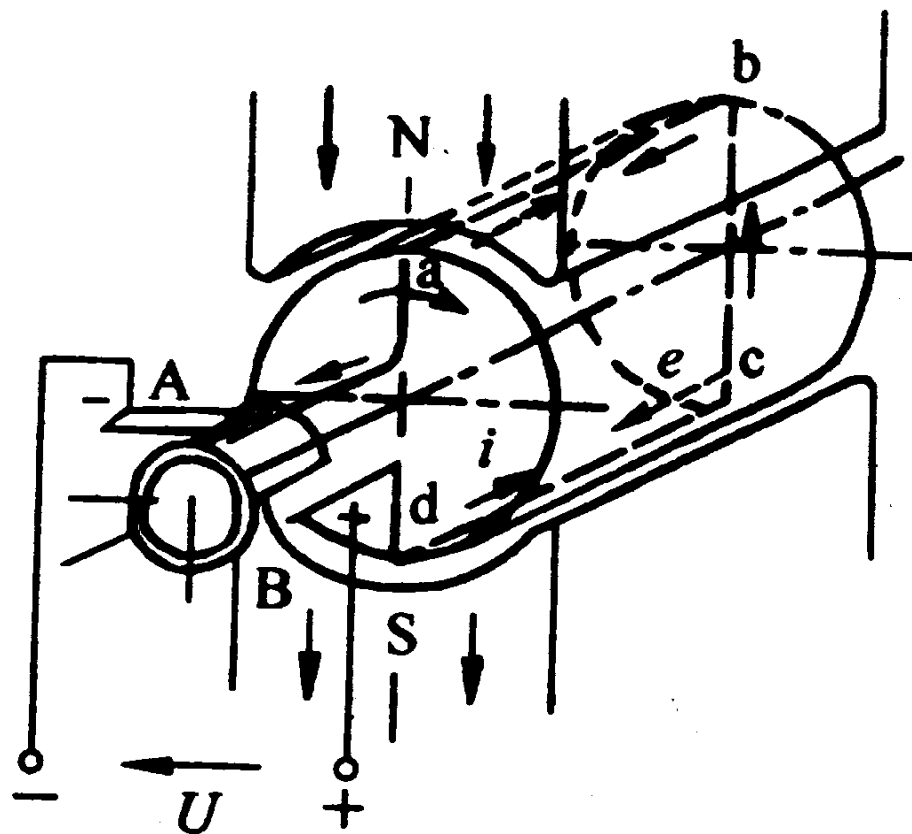


图6.32 直流电动机工作原理图

直流电动机

- 直流电机作电动机运行时，将直流电源接在两电刷之间而使电流通入电枢线圈。电流方向应该是：N极下的有效边中的电流总是一个方向，而S极下的有效边中的电流总是另一个方向。这样才能使两个边上受到的电磁力的方向一致，电枢因而转动。因此当线圈的有效边从N（S）极下转到S（N）极下时，其中电流的方向必须同时改变，以使电磁力的方向不变，而这也必须通过换向器才得以实现。

6.4.3 直流电动机的转向与转速

- 由图6.32可知，改变电枢电流方向，可以使直流电动机反转。直流电动机转动时，电枢绕组切割磁力线，产生感应电动势。此电动势的方向与电动机端电压 U 的方向相反，称反电动势 E ，如图6.33所示。

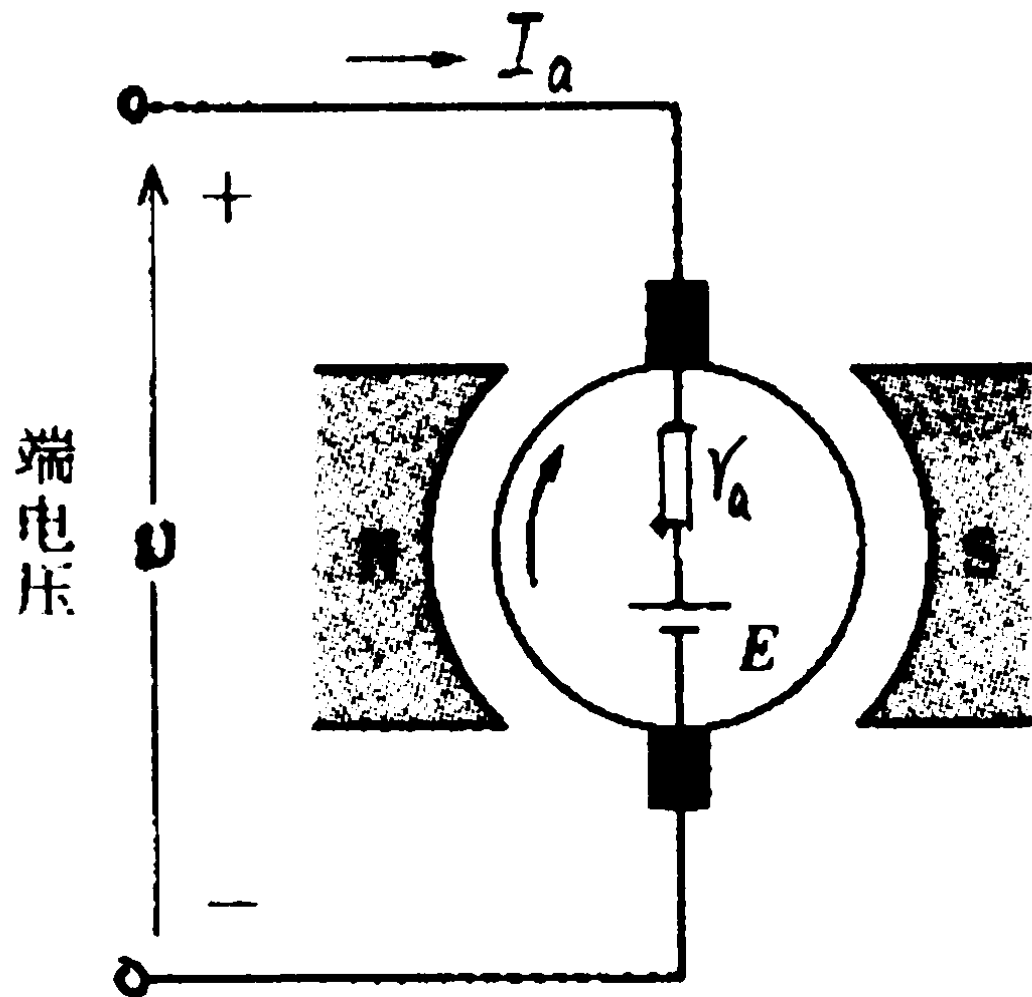


图6. 33 直流电动机端电压与反电动势

图6.33中的反电动势E为：

$$E=k\Phi n \quad (6-12)$$

式(6-12)中，k为常数， Φ 为磁通，n为直流电动机转速。

由图6.33可得：

$$U=E+I_a r_a \quad (6-13)$$

式(6-13)中， r_a 为电枢绕组电阻， I_a 为电枢电流。

由式(6-12)和式(6-13)得

$$n = \frac{U - I_a r_a}{k\Phi} \quad (6-14)$$

由式(6-14)可知，直流电动机转速与反电动势E成正比，而与磁通 Φ 成反比。

6.4.4 直流电动机的转矩与机械特性

直流电动机转矩 T 与磁极发出的磁通 Φ 及电枢电流 I_a 成比例，即：

$$T=K\Phi I_a \quad (6-15)$$

直流电动机的机械特性包括转速特性和转矩特性。转速（转矩）特性是指加在电动机端子上的电压不变时，负荷电流和转速（转矩）的关系。

- 直流电动机按励磁方式分为并励电动机、串励电动机、复励电动机和他励电动机四种。下面将分别讨论前三种直流电动机的转速特性和转矩特性。

并励电动机

并励电动机的接线图与特性曲线如图6.34所示。由图6.34可见，并励电动机的转速基本不变，为恒速电动机。由于磁通不变，并励电动机转矩与负荷电流成比例。并励电动机与三相异步电动机特性相似，一般很少使用。

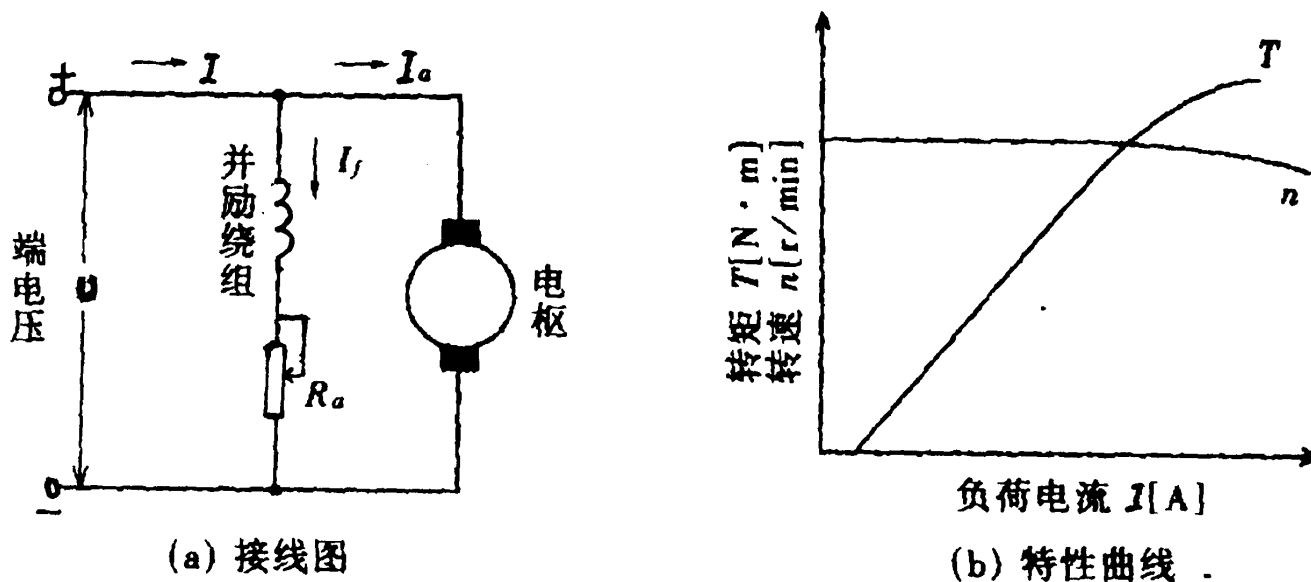


图6.34 并励电动机的接线图与特性曲线

2. 串励电动机

串励电动机的接线图与特性曲线如图6.35所示。由于串励电动机磁通与负荷电流成正比，其转速大体上与电流成反比。空载时无约束速度，很危险。当 I 较小时，串励电动机转矩与 I^2 成正比； I 较大时，串励电动机转矩则与 I 成正比。串励电动机常用于电车、电动机、起重机、卷扬机等。

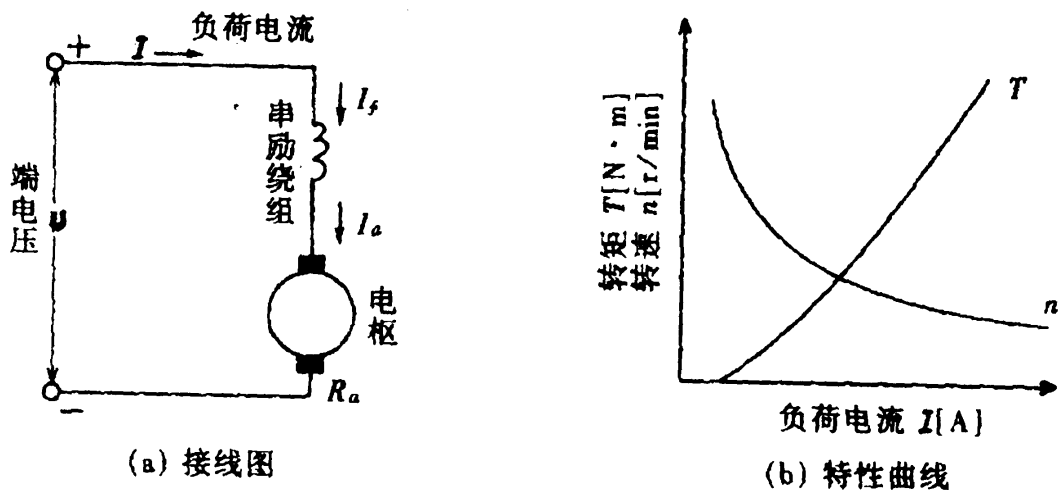
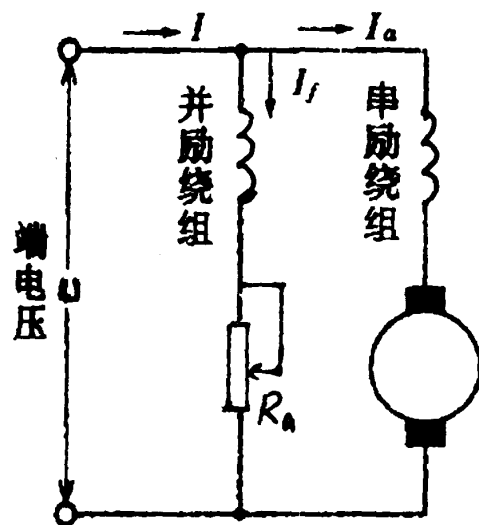


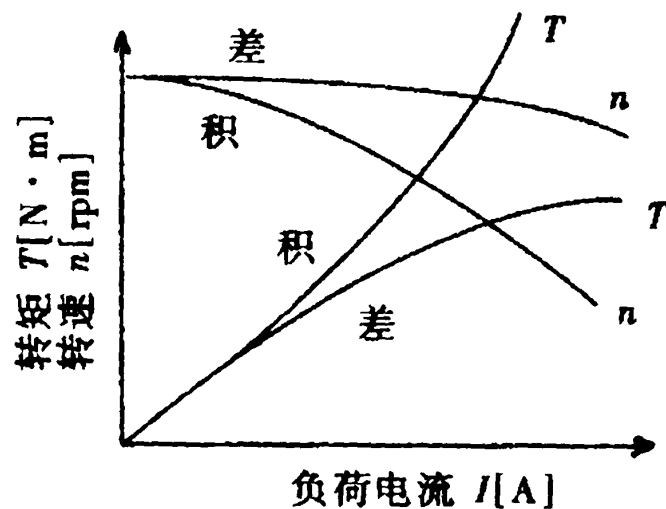
图6.35 串励电动机的接线图与特性曲线

3. 复励电动机

复励电动机的接线图与特性曲线如图6.36所示。因为复励电动机有并励绕组，即使空载也不会有危险的转速。复励电动机起动转矩大，适用于负荷转矩不变的情况如起重机等。



(a) 接线图



(b) 特性曲线

图6.36 复励电动机的接线图与特性曲线