

第5章 电动机



三相异步电动机的结构及工作原理

电动机的分类

电动机

交流电动机

异步机

鼠笼式

绕线式

同步机

直流电动机

他励、异励、串励、复励

鼠笼式异步交流电动机授课内容：

基本结构、工作原理、机械特性、控制方法



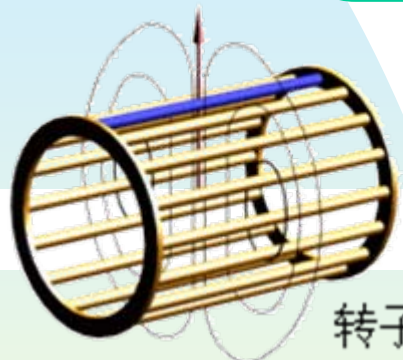
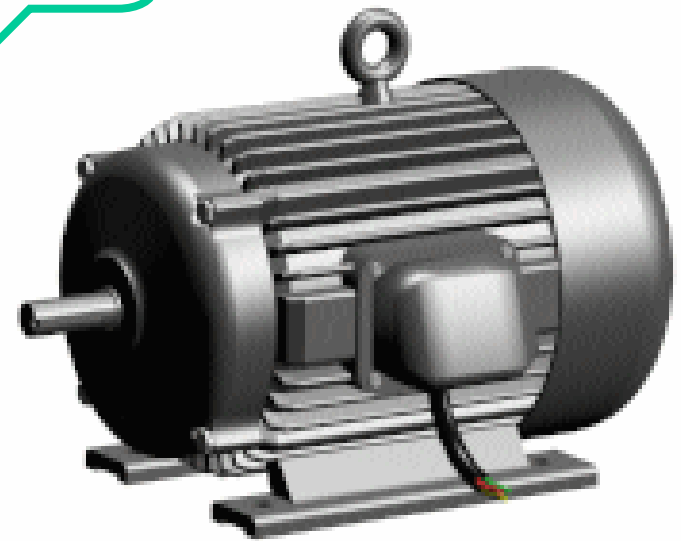
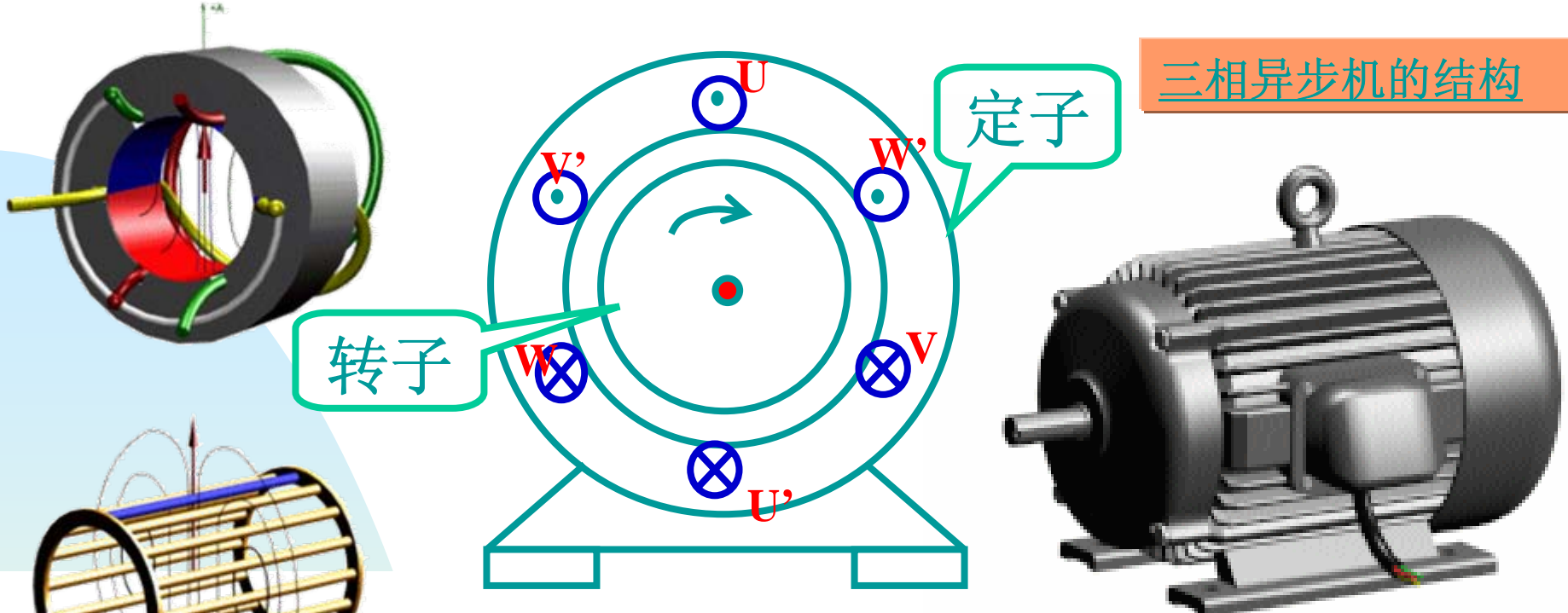
三相异步电动机的结构及转动原理

三相异步电动机的结构

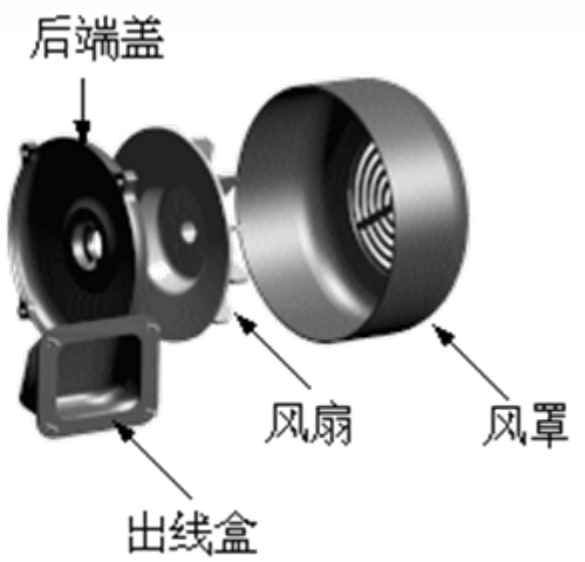
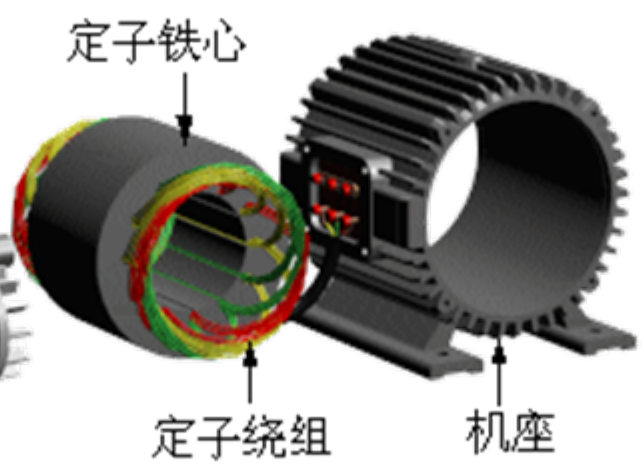
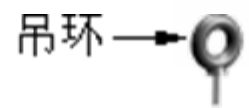
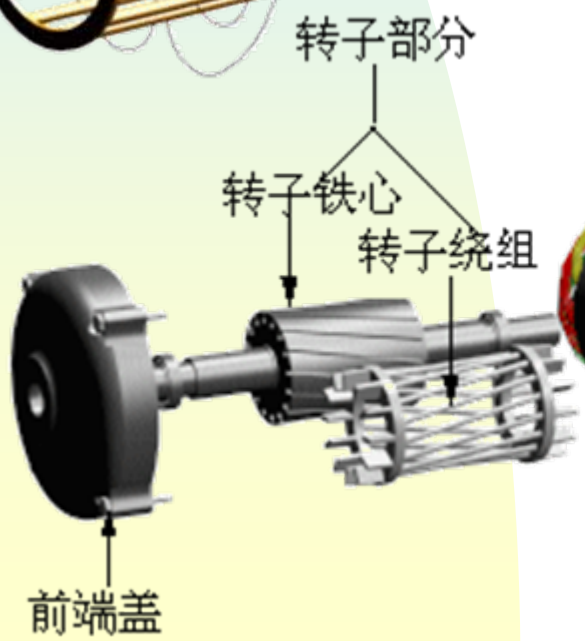
三相异步电动机由定子和转子构成。定子和转子都有铁心和绕组。定子的三相绕组为AX、BY、CZ。转子分为鼠笼式和绕线式两种结构。鼠笼式转子绕组有铜条和铸铝两种形式。绕线式转子绕组的形式与定子绕组基本相同，3个绕组的末端连接在一起构成星形连接，3个始端连接在3个铜集电环上，起动变阻器和调速变阻器通过电刷与集电环和转子绕组相连接。



三相异步机的结构



转子部分



异步电动机零部件拆卸动画

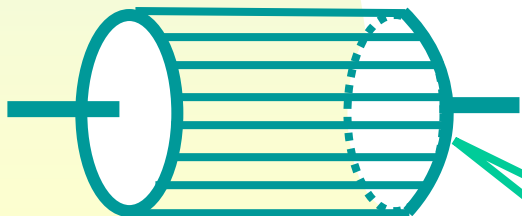


三相异步机的结构

三相定子绕组：产生旋转磁场

转子：在旋转磁场作用下，产生感应电动势或电流。

线绕式
鼠笼式



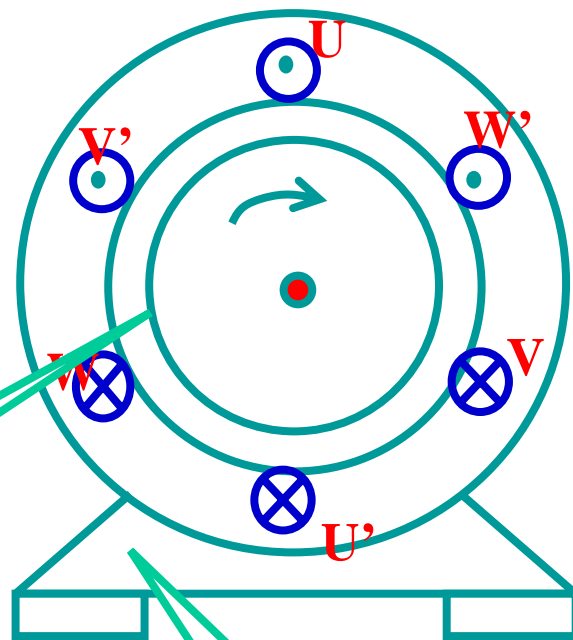
鼠笼转子

定子绕组
(三相)

定子

转子

机座



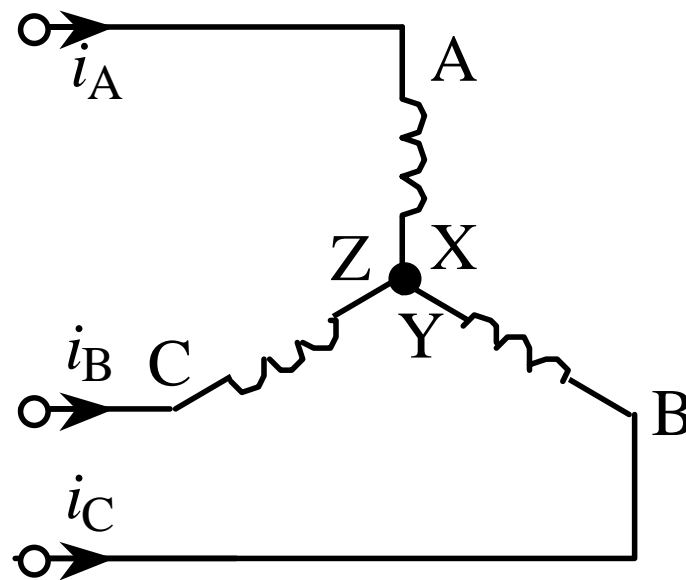
旋转磁场的产生

把三相定子绕组接成星形接到对称三相电源，定子绕组中便有对称三相电流流过。

$$i_A = \sqrt{2}I_p \sin \omega t$$

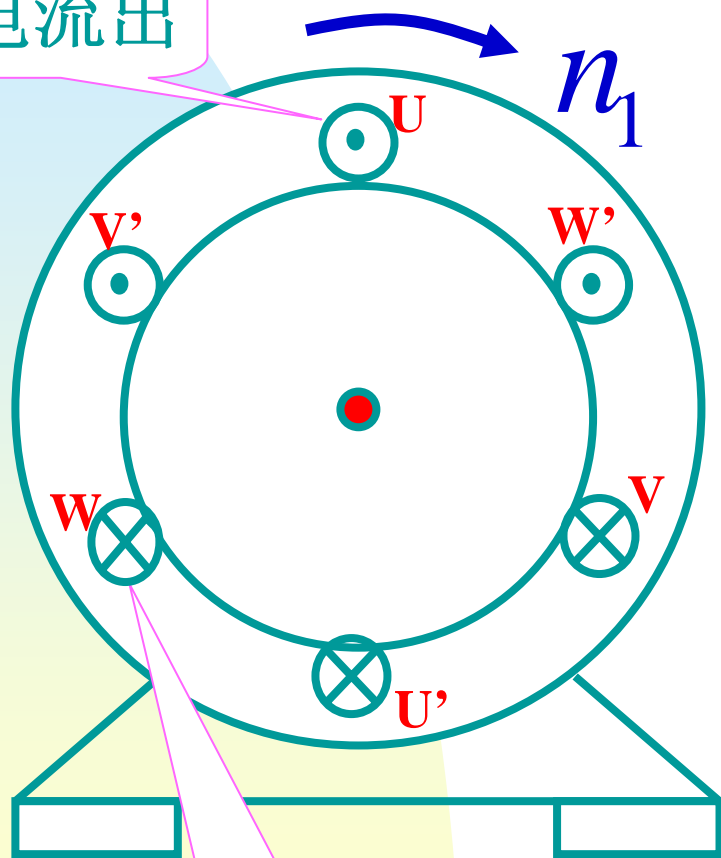
$$i_B = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = \sqrt{2}I_p \sin(\omega t + 120^\circ)$$



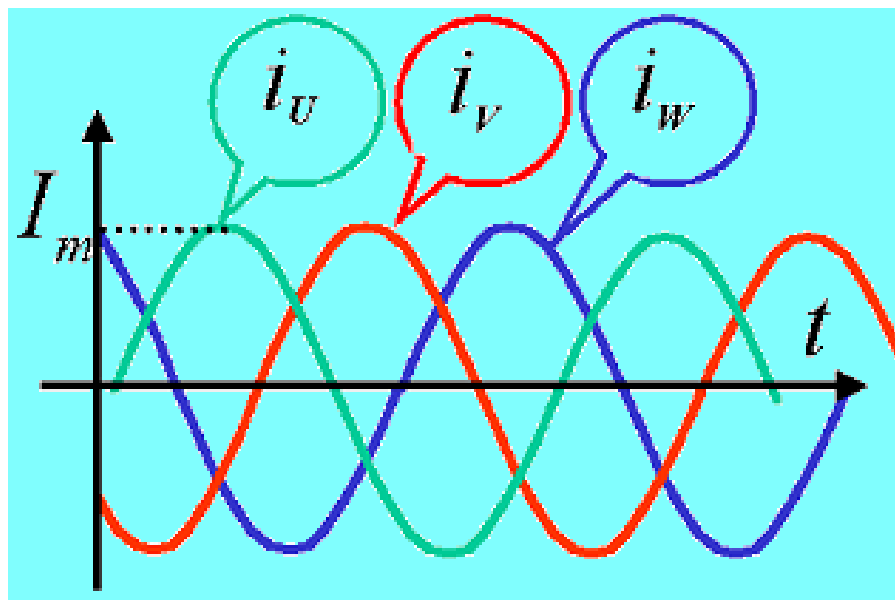
异步机中,旋转磁场代替了旋转磁极

(•) 电流出

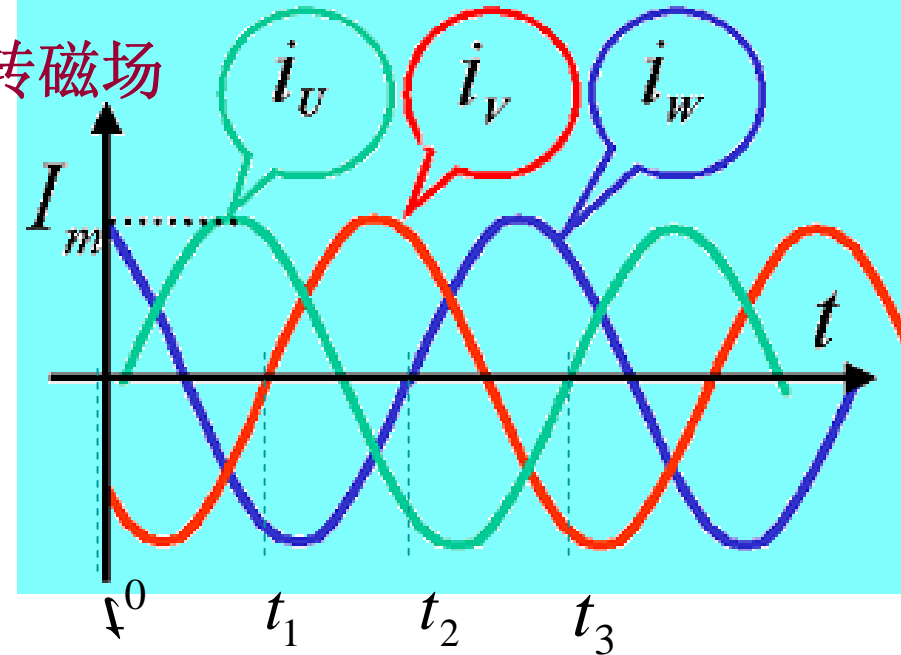
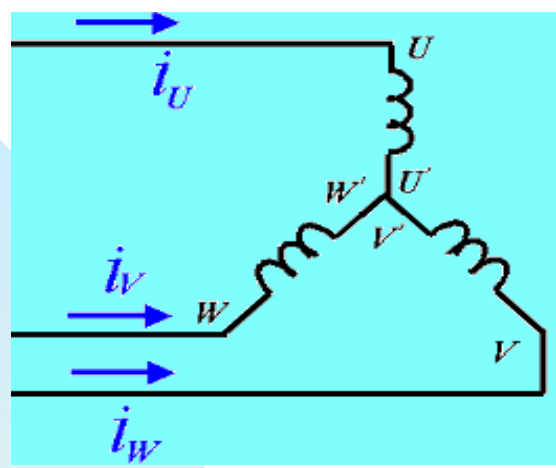


(×) 电流入

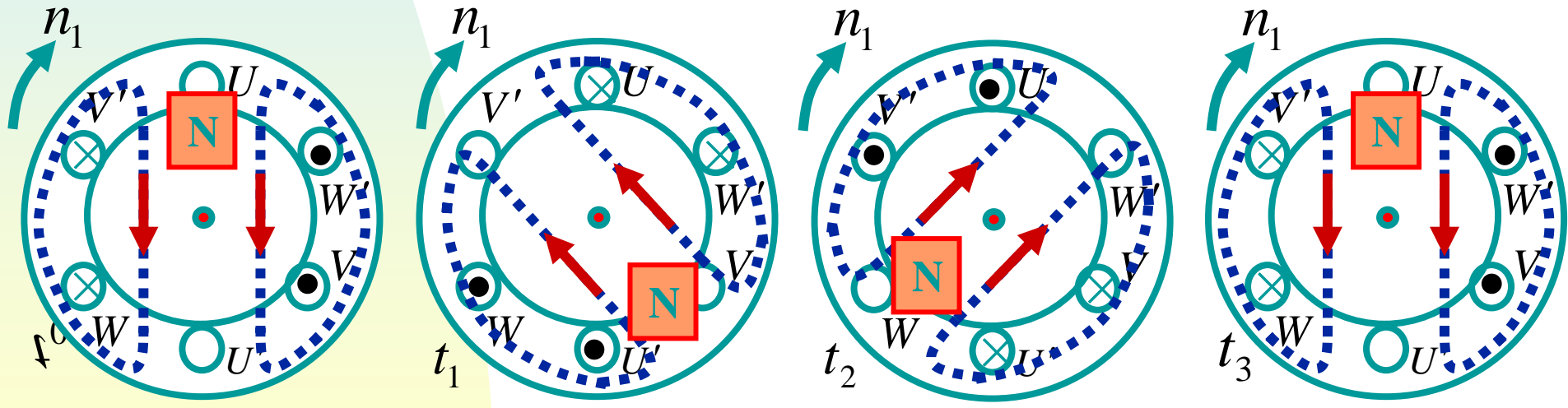
$$\begin{cases} i_U = I_m \sin \omega t \\ i_V = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_W = I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



定子通入三相电流，定子内产生旋转磁场

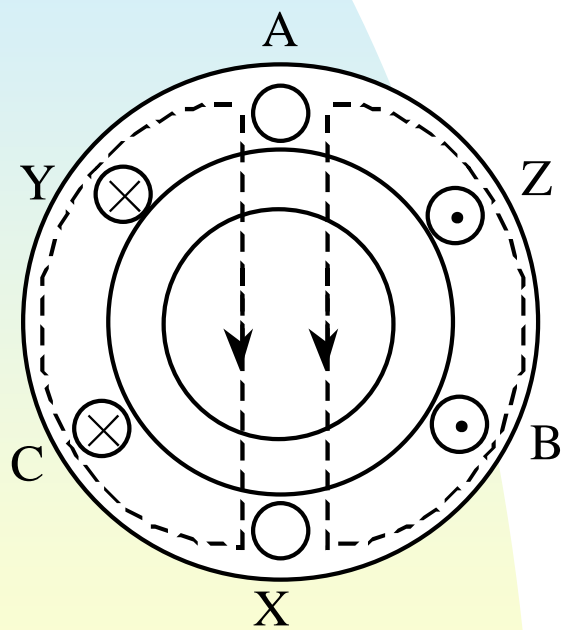
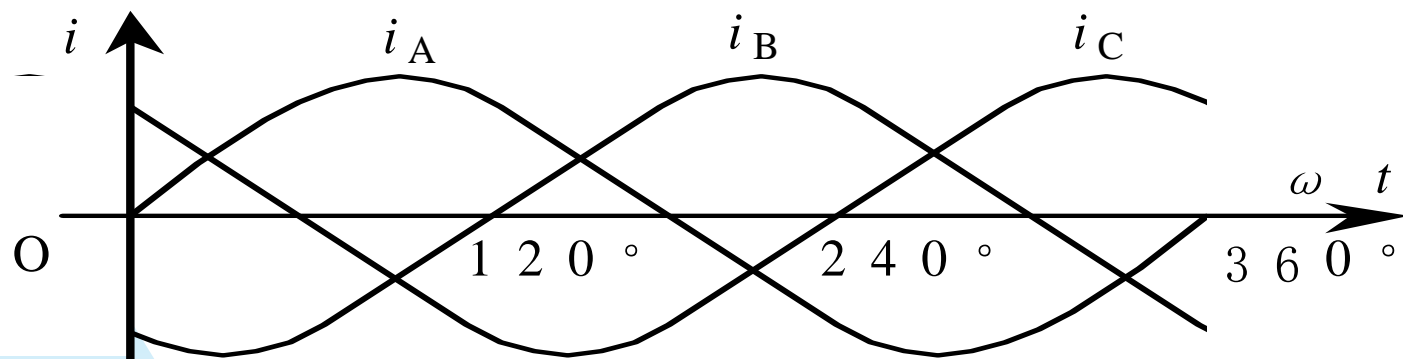


对应电流各时刻的合成磁场方向：

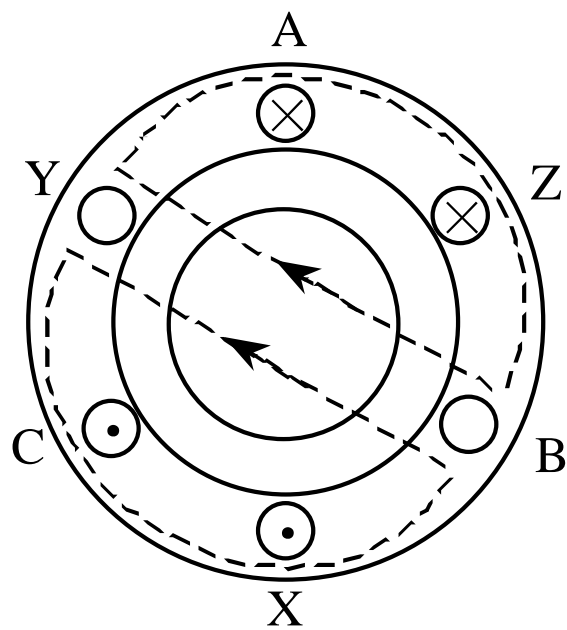


变化一周，磁场旋转360°。

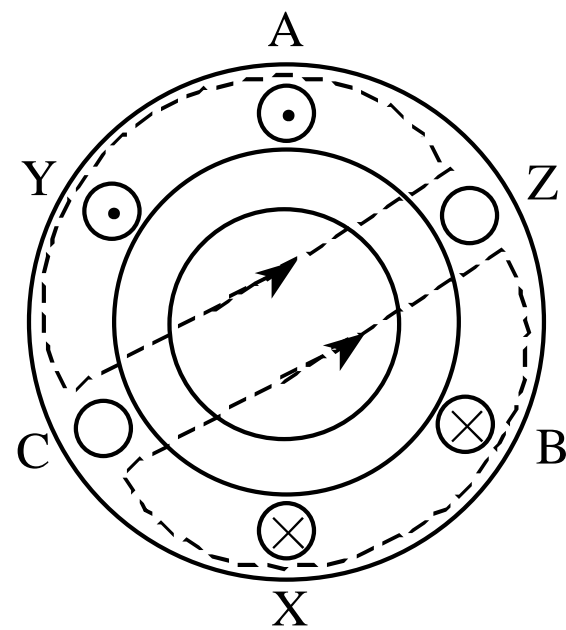




(a) $\omega t = 0^\circ$



(b) $\omega t = 120^\circ$



(c) $\omega t = 240^\circ$



结论

(1) 在对称的三相绕组中通入三相电流，可以产生在空间旋转的合成磁场。

(2) 磁场旋转方向与电流相序一致。电流相序为A-B-C时磁场顺时针方向旋转；电流相序为A-C-B时磁场逆时针方向旋转。

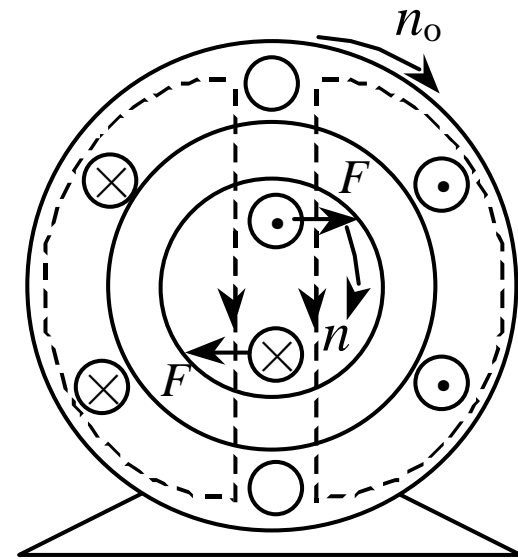
(3) 磁场转速(同步转速)与电流频率有关，改变电流频率可以改变磁场转速。对两极(一对磁极)磁场，电流变化一周，则磁场旋转一周。同步转速 n_0 与磁场磁极对数 p 的关系为：

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \text{ r/min}$$



三相异步电动机的转动原理

静止的转子与旋转磁场之间有相对运动，在转子导体中产生感应电动势，并在形成闭合回路的转子导体中产生感应电流，其方向用右手定则判定。转子电流在旋转磁场中受到磁场力 F 的作用， F 的方向用左手定则判定。电磁力在转轴上形成电磁转矩。电磁转矩的方向与旋转磁场的方向一致。



电动机在正常运转时，其转速 n 总是稍低于同步转速 n_0 ，因而称为异步电动机。又因为产生电磁转矩的电流是电磁感应所产生的，所以也称为感应电动机。

异步电动机同步转速和转子转速的差值与同步转速之比称为转差率，用 s 表示，即：

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

转差率是异步电动机的一个重要参数。异步电动机在额定负载下运行时的转差率约为1%~9%。



例：有一台 4 极感应电动机，电压频率为 50 Hz，转速为 1440 r / min，试求这台感应电动机的转差率。

解：因为磁极对数 $p = 2$ ，所以同步转速为：

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r/min}$$

转差率为：

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1500 - 1440}{1500} \times 100\% = 4\%$$

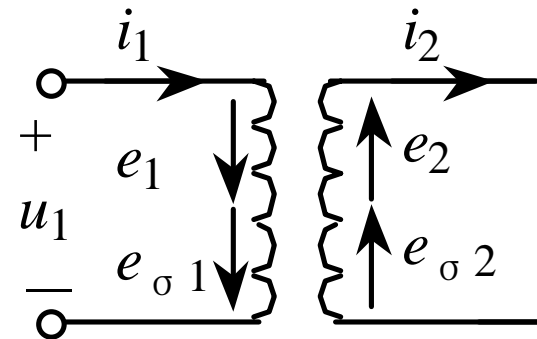


三相异步电动机的电磁转矩和机械特性

三相异步电动机的电路分析

1. 定子电路分析

$$\begin{aligned}u_1 &= i_1 R_1 + (-e_{\sigma 1}) + (-e_1) \\ &= i_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}\end{aligned}$$



$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 + (-\dot{E}_1)$$

忽略 R_1 和 X_1 上的压降，

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

则：

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$$



2. 转子电路分析

$$e_2 = i_2 R_2 + (-e_{\sigma 2}) = i_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + (-\dot{E}_{\sigma 2}) = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2$$

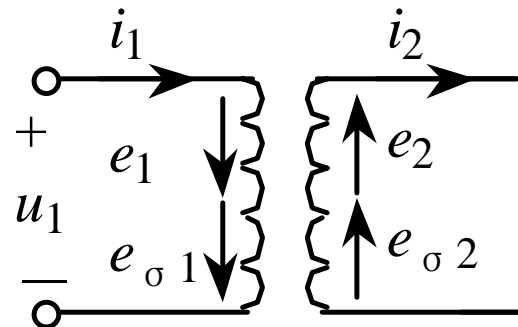
$$\therefore f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot \frac{pn_0}{60} = sf_1$$

$$\therefore E_2 = 4.44 f_2 N_2 \Phi_m = 4.44 sf_1 N_2 \Phi_m = sE_{20}$$

$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 \Phi_m$ 为 $n = 0$ 即 $s = 1$ 时的转子电动势。

$$X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} = sX_{20}$$

$X_{20} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}$ 为 $n = 0$ 即 $s = 1$ 时的转子漏抗。



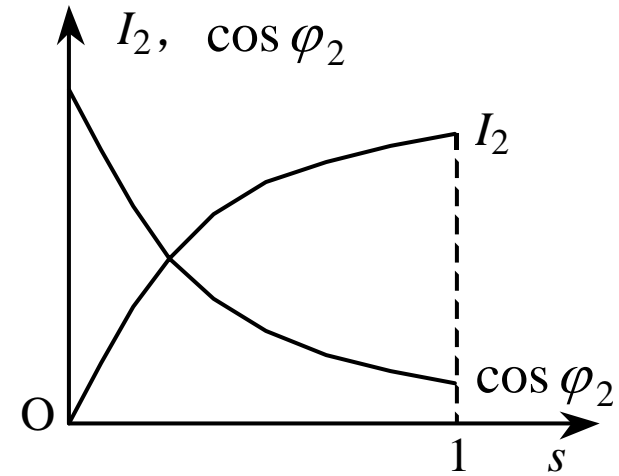
转子每相电流：

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

转子的功率因数为：

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

可见异步电动机的转子电流和功率因数也都与转差率 s 有关，如图所示。



三相异步电动机的电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩 T 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，故电磁转矩与转子电流的有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 及定子旋转磁场的每极磁通 Φ 成正比，即：

$$T = K_T \Phi I_2 \cos \varphi_2$$

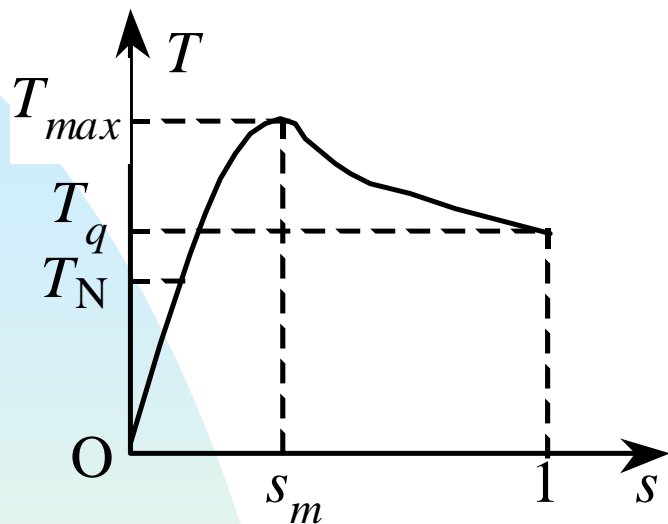
式中 K_T 是一个与电动机结构有关的常数。将 I_2 、 $\cos \varphi_2$ 的表达式及 Φ 与 U_1 的关系式代入上式，得三相异步电动机电磁转矩公式的另一个表示式：

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

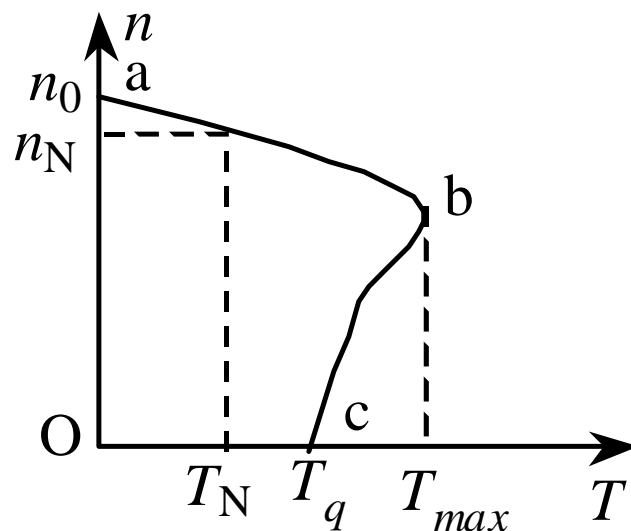
式中 K 是一常数。可见电磁转矩 T 也与转差率 s 有关，并且与定子每相电压 U_1 的平方成正比，电源电压对转矩影响较大。同时，电磁转矩 T 还受到转子电阻 R_2 的影响。



三相异步电动机的机械特性



(a) $T=f(s)$ 曲线



(b) $n=f(T)$ 曲线

1. 起动转矩

电动机刚起动 ($n=0$, $s=1$) 时的转矩称为起动转矩。

$$T_q = K \frac{R_2 U_1^2}{R_2^2 + X_{20}^2}$$



2. 额定转矩

电动机在额定负载下工作时的电磁转矩称为额定转矩，忽略空载损耗转矩，则额定转矩等于机械负载转矩。

$$T_N = T_2 = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

式中 P_N 是电动机的额定功率，单位为kW； n_N 是电动机的额定转速，单位是r/min。



例：有两台功率都为 $P_N = 7.5 \text{ kW}$ 的三相异步电动机，一台 $U_N = 380 \text{ V}$ 、 $n_N = 962 \text{ r/min}$ ，另一台 $U_N = 380 \text{ V}$ 、 $n_N = 1450 \text{ r/min}$ ，求两台电动机的额定转矩。

解：第一台：

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{7.5}{962} = 74.45 \text{ N} \cdot \text{m}$$

第二台：

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{7.5}{1450} = 49.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$



3. 最大转矩

对应于最大转矩的转差率 s_m 可由

$\frac{dT}{ds} = 0$ 求得，为 $s_m = \frac{R_2}{X_{20}}$ 。最大转矩为：

$$T_{\max} = K \frac{U_1^2}{2X_{20}}$$

过载系数：

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

一般三相异步电动机的 $\lambda = 1.8 \sim 2.2$ 。



三相异步电动机的运行 与控制

三相异步电动机的起动

1. 直接起动

直接起动是利用闸刀开关或接触器将电动机直接接到额定电压上的起动方式，又叫全压起动。

优点：起动简单。

缺点：起动电流较大，将使线路电压下降，影响负载正常工作。

适用范围：电动机容量在10kW以下，并且小于供电变压器容量的20%。



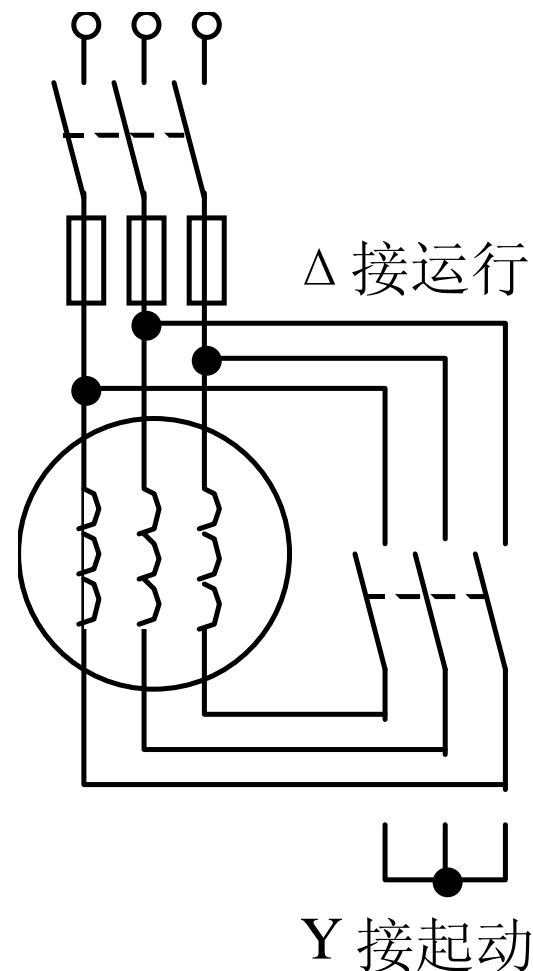
2. 降压启动

Y- Δ 换接启动：在启动时将定子绕组连接成星形，通电后电动机运转，当转速升高到接近额定转速时再换接成三角形。

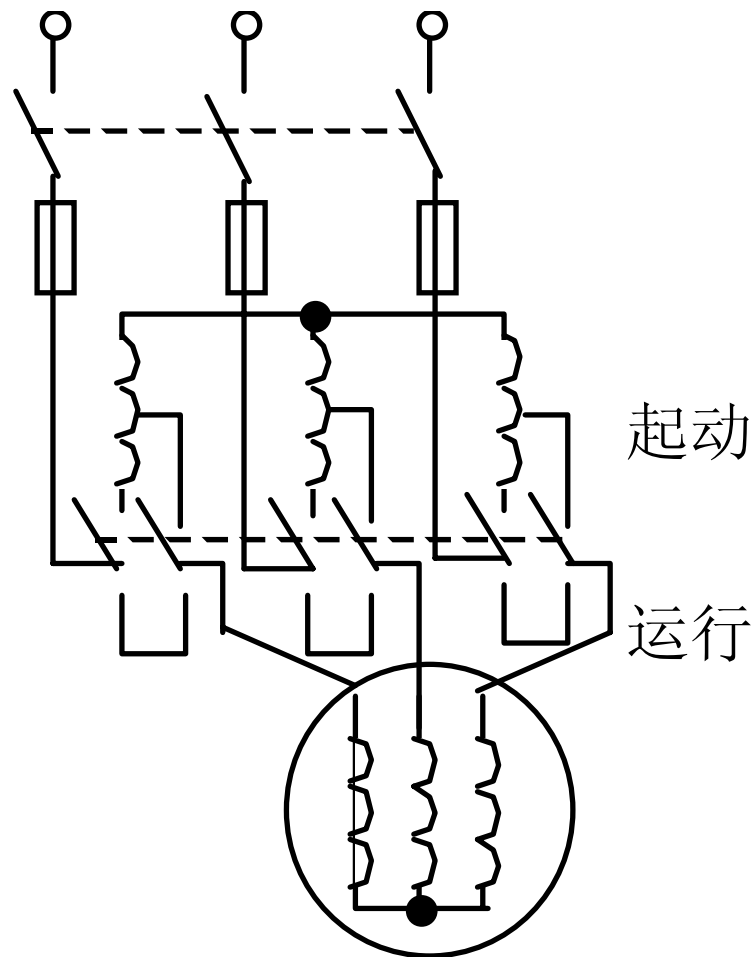
适用范围：正常运行时定子绕组是三角形连接，且每相绕组都有两个引出端子的电动机。

优点：启动电流为全压启动时的 $1/3$ 。

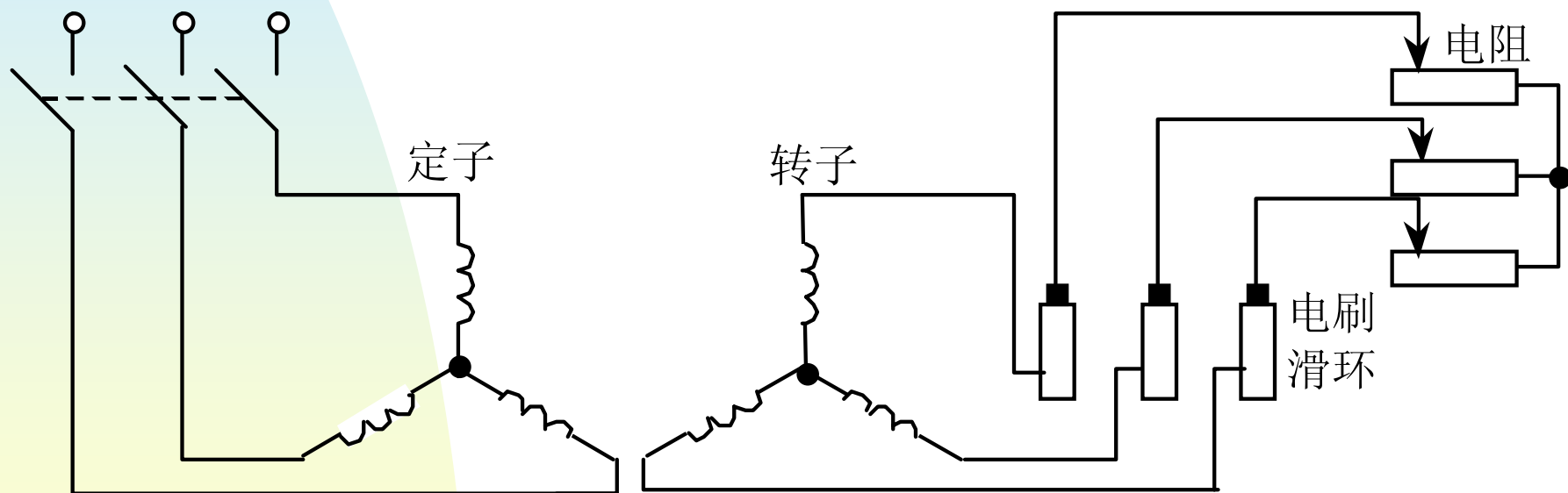
缺点：启动转矩均为全压启动时的 $1/3$ 。



自耦降压启动：利用三相自耦变压器将电动机在启动过程中的端电压降低，以达到减小启动电流的目的。自耦变压器备有40%、60%、80%等多种抽头，使用时要根据电动机启动转矩的要求具体选择。



绕线式异步电动机转子绕组串入附加电阻后，既可以降低起动电流，又可以增大起动转矩。



三相异步电动机的调速

三相异步电动机的转速：

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

1. 变极调速

通过改变电动机的定子绕组所形成的磁极对数 p 来调速。因磁极对数只能是按1、2、3、...、的规律变化，所以用这种方法调速，电动机的转速不能连续、平滑地进行调节。



2. 变频调速

通过变频器把频率为**50Hz**工频的三相交流电源变换成为频率和电压均可调节的三相交流电源，然后供给三相异步电动机，从而使电动机的速度得到调节。变频调速属于无级调速，具有机械特性曲线较硬的特点。

3. 变转差率调速

通过改变转子绕组中串接调速电阻的大小来调整转差率实现平滑调速的，又称为变阻调速。调速电阻的接法与起动电阻相同。这种方法只适用于绕线式异步电动机。



三相异步电动机的反转

因为三相异步电动机的转动方向是由旋转磁场的方向决定的，而旋转磁场的转向取决于定子绕组中通入三相电流的相序。因此，要改变三相异步电动机的转动方向非常容易，只要将电动机三相供电电源中的任意两相对调，这时接到电动机定子绕组的电流相序被改变，旋转磁场的方向也被改变，电动机就实现了反转。

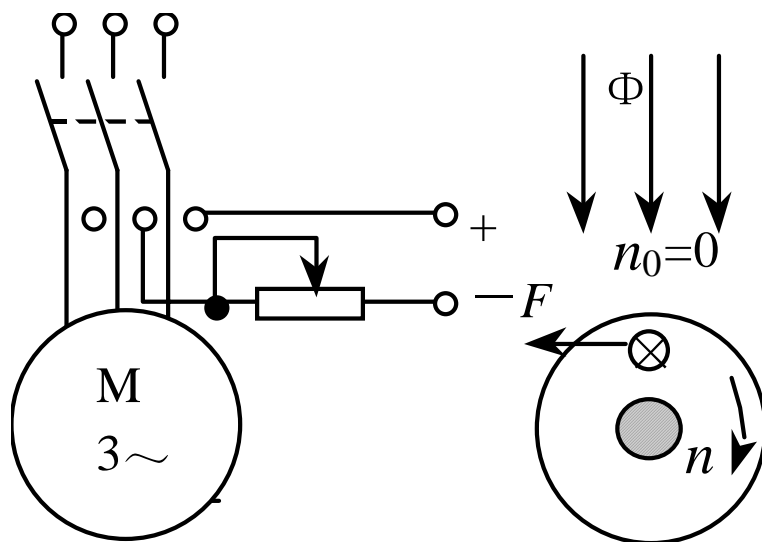


三相异步电动机的制动

1. 能耗制动

电动机定子绕组切断三相电源后迅速接通直流电源。感应电流与直流电产生的固定磁场相互作用，产生的电磁转矩方向与电动机转子转动方向相反，起到制动作用。

特点：是制动准确、平稳，但需要额外的直流电源。



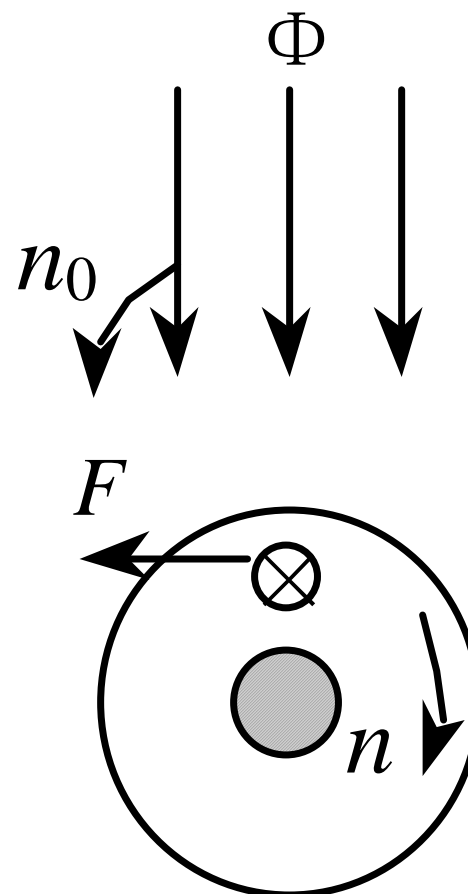
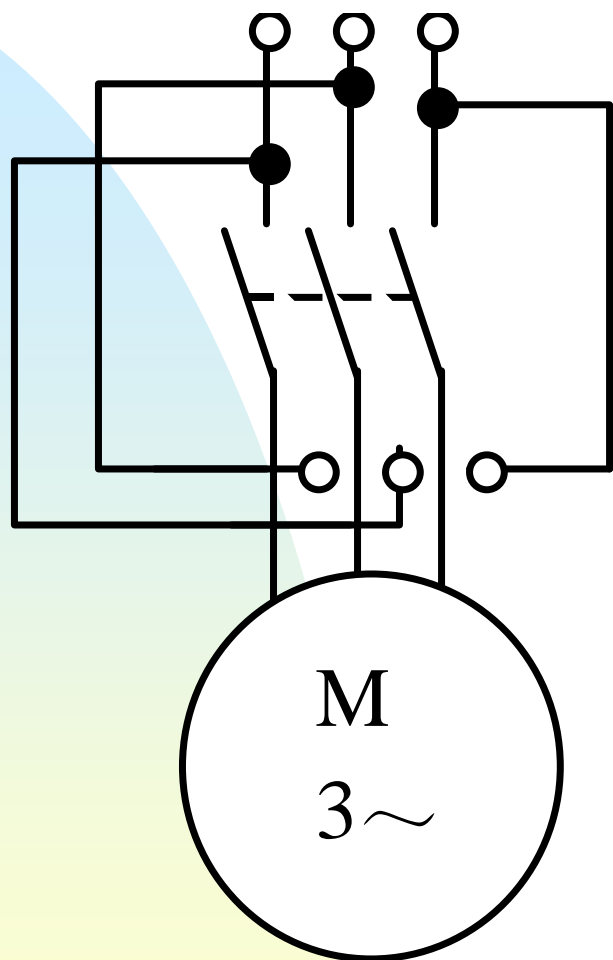
2. 反接制动

电动机停车时将三相电源中的任意两相对调，使电动机产生的旋转磁场改变方向，电磁转矩方向也随之改变，成为制动转矩。

注意：当电动机转速接近为零时，要及时断开电源防止电动机反转。

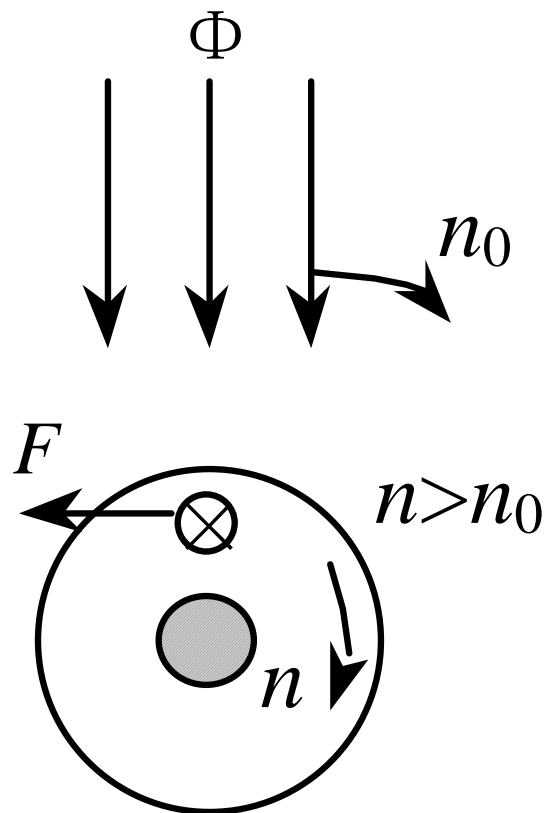
特点：简单，制动效果好，但由于反接时旋转磁场与转子间的相对运动加快，因而电流较大。对于功率较大的电动机制动时必须在定子电路（鼠笼式）或转子电路（绕线式）中接入电阻，用以限制电流。





3. 发电反馈制动

电动机转速超过旋转磁场的转速时，电磁转矩的方向与转子的运动方向相反，从而限制转子的转速，起到了制动作用。因为当转子转速大于旋转磁场的转速时，有电能从电动机的定子返回给电源，实际上这时电动机已经转入发电机运行，所以这种制动称为发电反馈制动。



三相异步电动机的选择 与使用

三相异步电动机的铭牌

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 B	工作方式 连续
年 月 日	编 号	××电机厂	

型号:

三相异步电动机 Y 132 M—4 磁极数 (4 极)
机座中心高度 (132mm) 机座长度代号 (中机座)



功率：电动机在铭牌规定条件下正常工作时转轴上输出的机械功率，称为额定功率或容量。

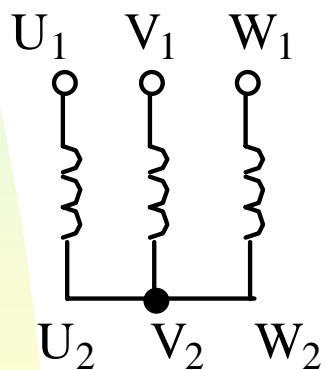
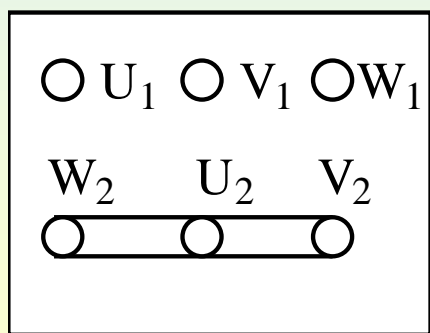
电压：电动机的额定线电压。

电流：电动机在额定状态下运行时的线电流。

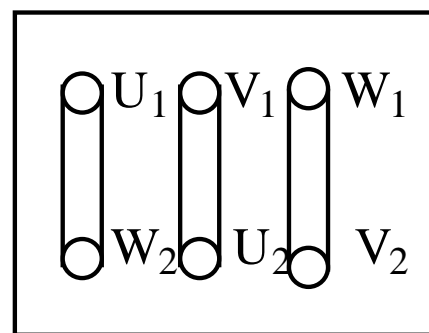
频率：电动机所接交流电源的频率。。

转速：额定转速。

接线方法：



(a) 星型连接



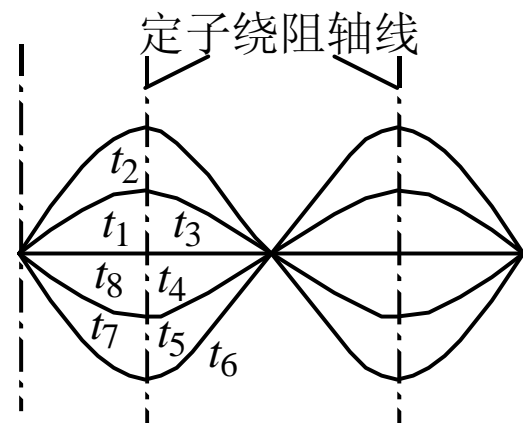
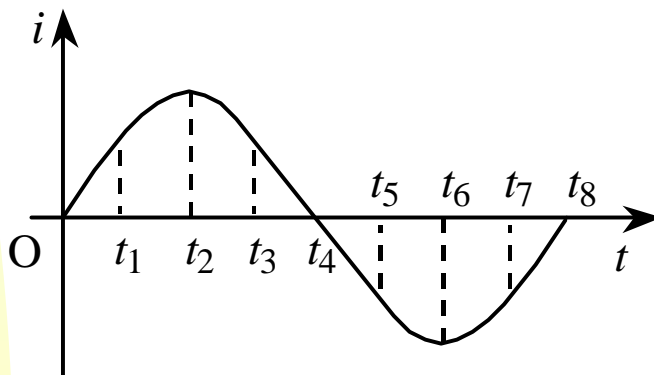
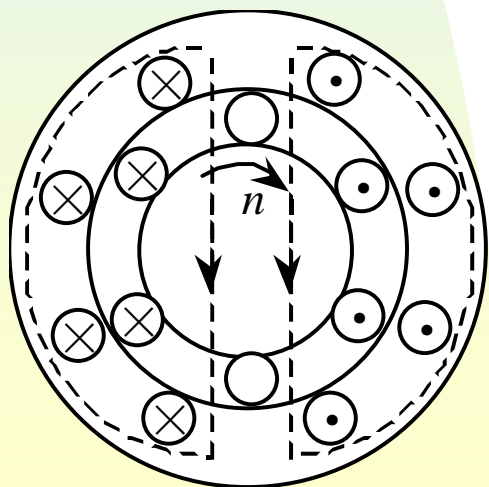
(b) 三角形连接



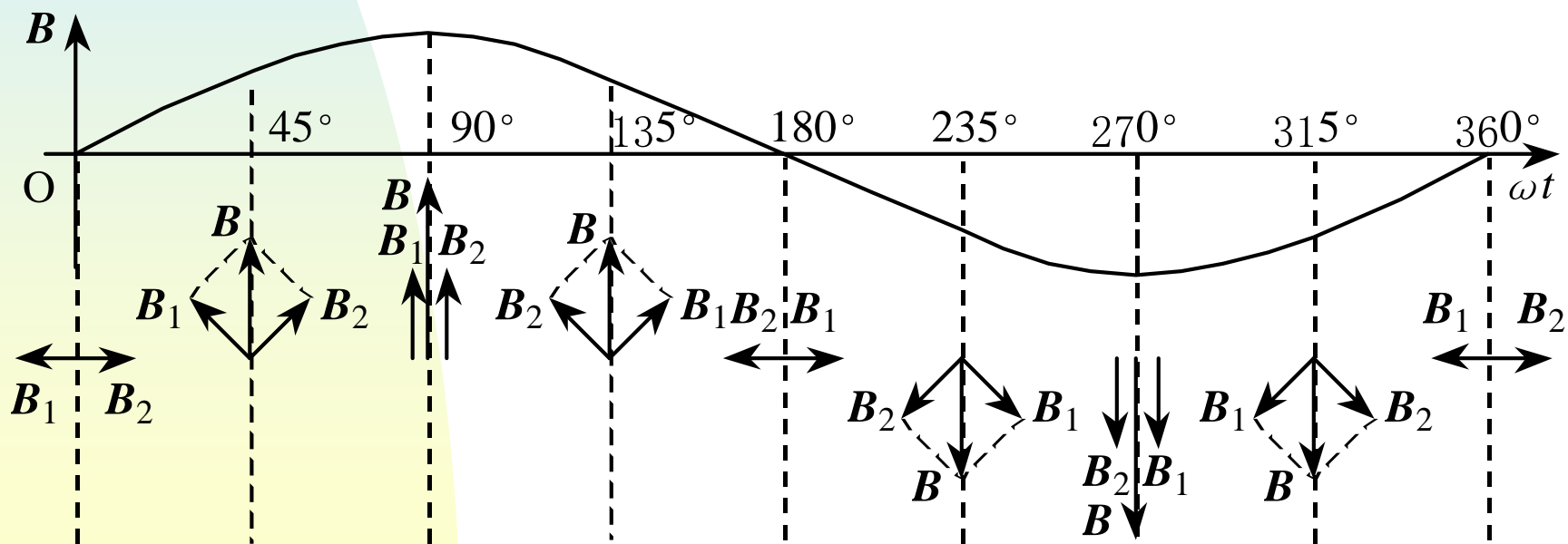
单相异步电动机

单相异步电动机的工作原理与特性

在单相异步电动机的定子绕组通入单相交流电，电动机内产生一个大小及方向随时间沿定子绕组轴线方向变化的磁场，称为脉动磁场。

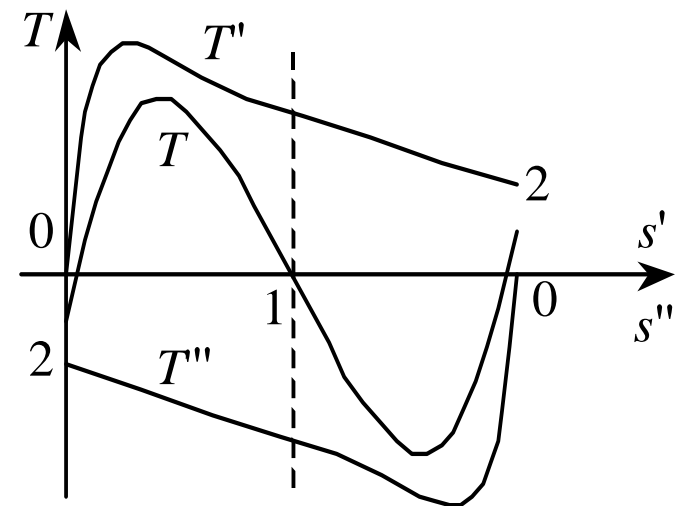


脉动磁场可以分解为两个大小一样、转速相等、方向相反的旋转磁场 B_1 、 B_2 。顺时针方向转动的旋转磁场 B_1 对转子产生顺时针方向的电磁转矩；逆时针方向转动的旋转磁场 B_2 对转子产生逆时针方向的电磁转矩。由于在任何时刻这两个电磁转矩都大小相等、方向相反，所以电动机的转子是不会转动的，也就是说单相异步电动机的起动转矩为零。



但一旦让单相异步电动机转动起来，由于顺时针旋转磁场 B_1 和逆时针旋转磁场 B_2 产生的合成电磁转矩不再为零，在这个合成转矩的作用下，即使不需要其它的外在因素，单相异步电动机仍将沿着原来的运动方向继续运转。

由于单相异步电动机总有一个反向的制动转矩存在，所以其效率和负载能力都不及三相异步电动机。



单相异步电动机的机械特性



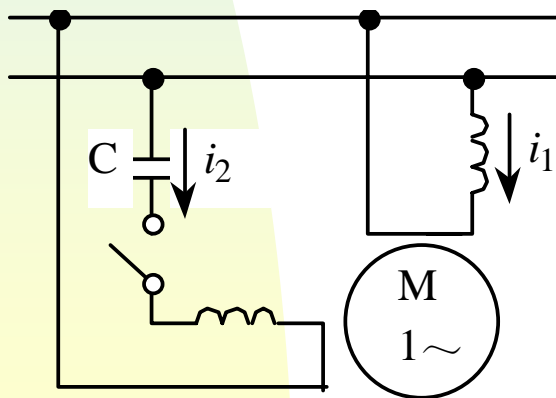
单相异步电动机的起动

1. 分相法

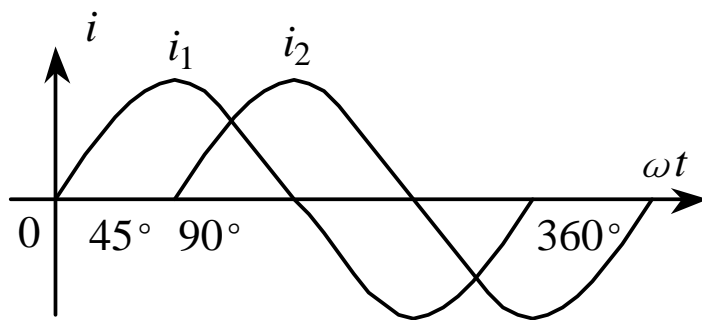
电容分相式异步电动机的定子有两个绕组：一个是工作绕组（主绕组）；另一个是起动绕组（副绕组），两个绕组在空间互成 90° 。起动绕组与电容 C 串联，使起动绕组电流 i_2 和工作绕组电流 i_1 产生 90° 相位差，即：

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin \omega t$$

$$i_2 = \sqrt{2}I_2 \sin(\omega t + 90^\circ)$$



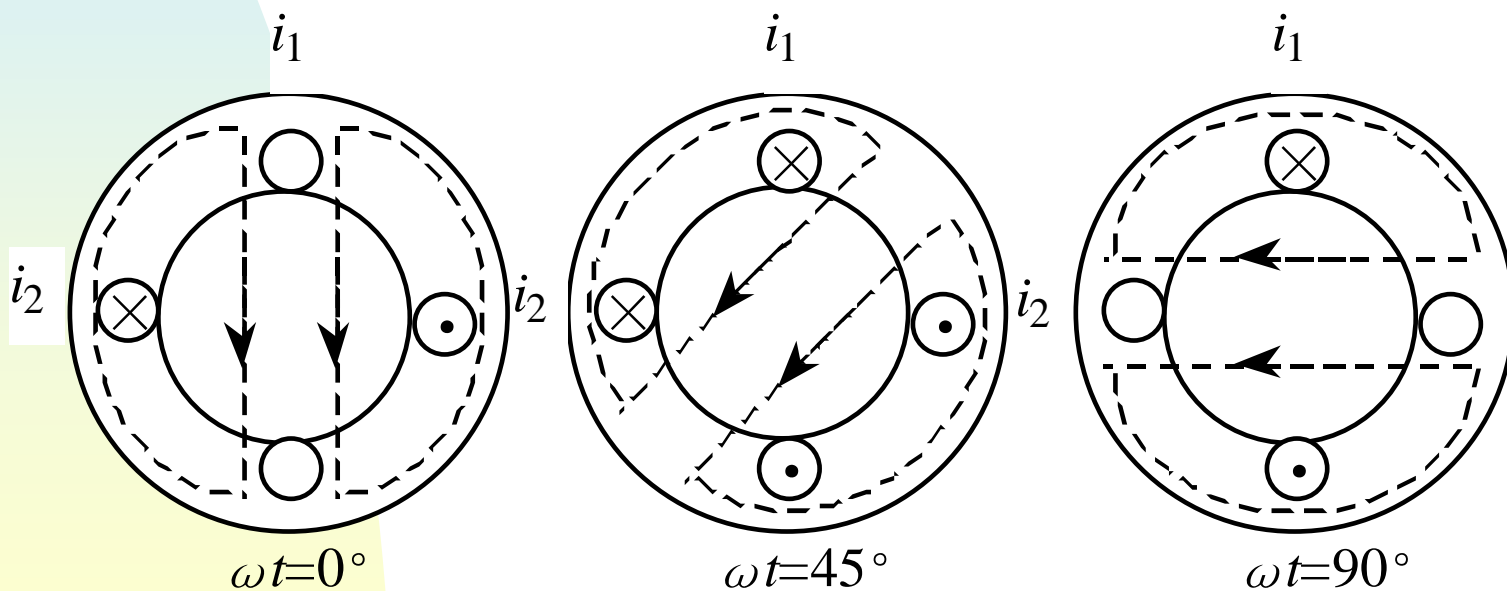
(a) 电路图



(b) 波形图



下图所示分别为 $\omega t=0^\circ$ 、 45° 、 90° 时合成磁场的方向，由图可见该磁场随着时间的增长顺时针方向旋转。这样一来，单相异步电动机就可以在该旋转磁场的作用下起动了。



2. 罩极法

罩极法是在单相异步电动机定子磁极的极面上约 $1/3$ 处套装了一个铜环（短路环），套有短路环的磁极部分叫做罩极。当定子绕组通入电流产生脉动磁场后，有一部分磁通穿过铜环，使铜环内产生感应电动势和感应电流。根据楞次定律，铜环中的感应电流所产生的磁场，阻止铜环部分磁通的变化，结果使得没套铜环的那部分磁极中的磁通与套有铜环的这部分磁极内的磁通有了相位差，罩极外的磁通超前罩极内的磁通一个相位角。随着定子绕组中电流变化率的改变，单相异步电动机定子磁场的方向也就不断发生变化，在电动机内形成了一个旋转磁场。在这个旋转磁场的作用下，电动机的转子就能够启动起来了。



直流电动机

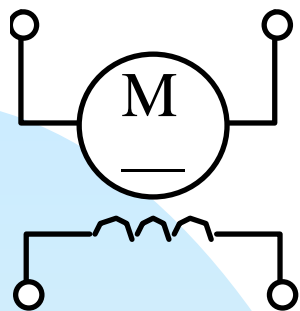
直流电动机的结构及分类

三相异步电动机也由定子和转子构成。

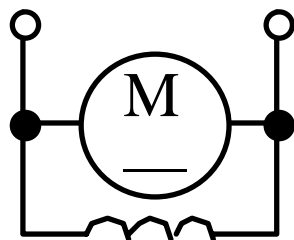
定子的主要作用是产生磁场，包括主磁极、换向磁极、机座和电刷等。主磁极由铁心和励磁线圈组成，用于产生一个恒定的主磁场。换向磁极安装在两个相邻的主磁极之间，用来减小电枢绕组换向时产生的火花。电刷装置的作用是通过与换向器之间的滑动接触，把直流电压、直流电流引入或引出电枢绕组。

转子由电枢铁心、电枢绕组和换向器等组成。电枢铁心上冲有槽孔，槽内放电枢绕组，电枢铁心也是直流电动机磁路的组成部分。电枢绕组的一端装有换向器，换向器由许多铜质换向片组成一个圆柱体，换向片之间用云母绝缘。换向器是直流电动机的重要构造特征，换向器通过与电刷的摩擦接触，将两个电刷之间固定极性的直流电流变换成为绕组内部的交流电流，以便形成固定方向的电磁转矩。

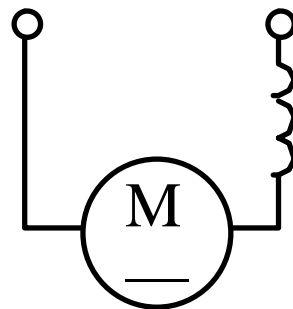




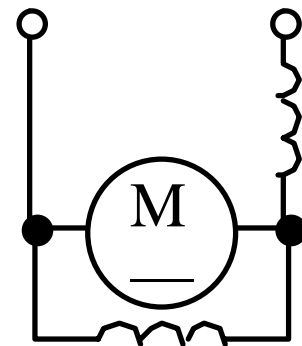
(a) 他励式



(b) 并励式



(c) 串励式



(d) 复励式

他励式电动机构造比较复杂，一般用于对调速范围要求很宽的重型机床等设备中。

并励式电动机在外加电压一定的情况下，励磁电流产生的磁通将保持恒定不变。起动转矩大，负载变动时转速比较稳定，转速调节方便，调速范围大。

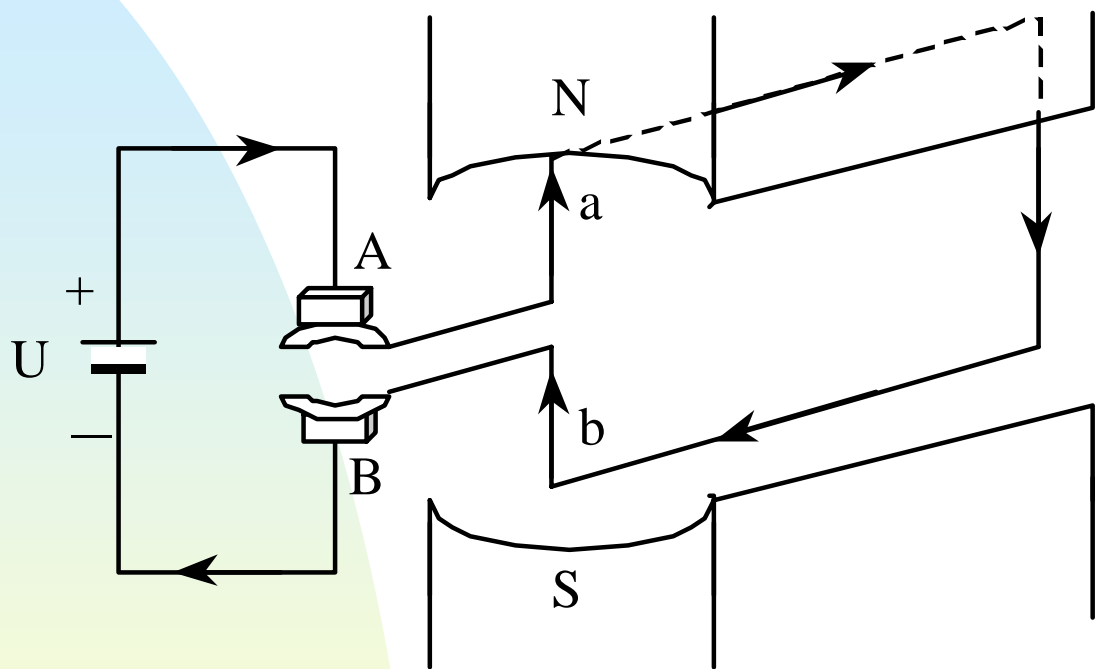
串励式电动机的转速随转矩的增加，呈显著下降的软特性，特别适用于起重设备。

积复励电动机的电磁转矩变化速度较快，负载变化时能够有效克服电枢电流的冲击，比并励式电动机的性能优越，主要用于负载力矩有突然变化的场合。差复励电动机具有负载变化时转速几乎不变的特性，常用于要求转速稳定的机械中。

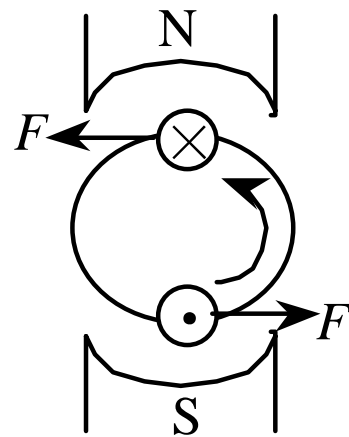


直流电动机的工作原理和机械特性

1. 直流电动机的转动原理



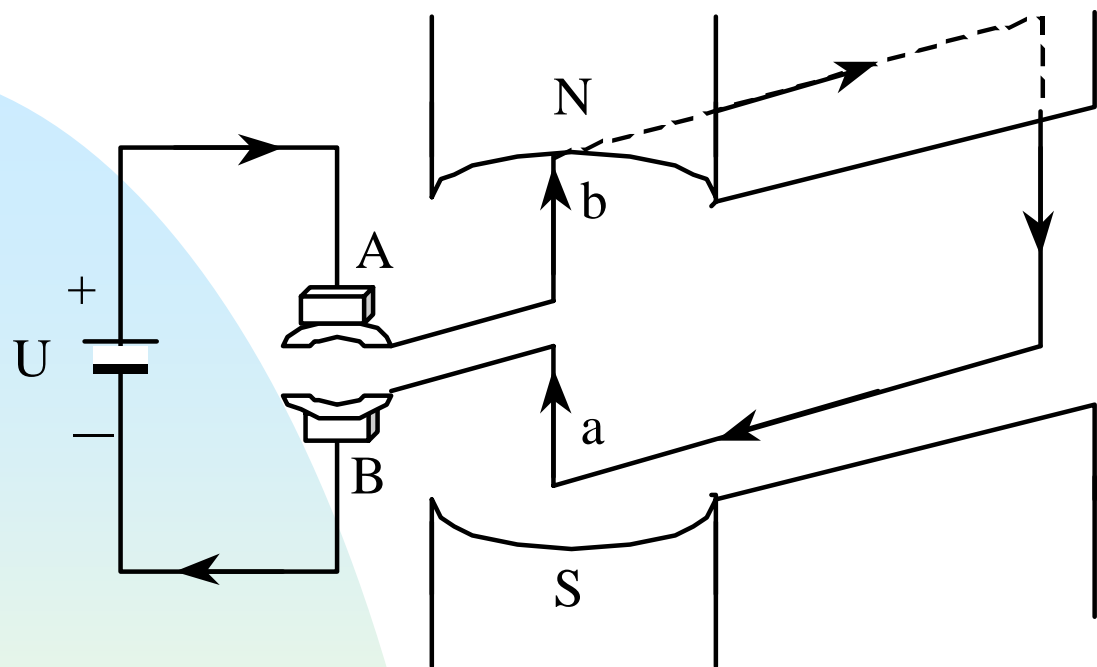
(a) 直流电动机原理图



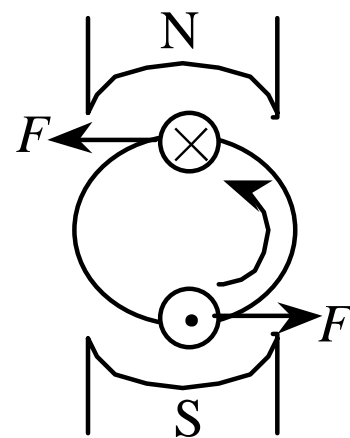
(b) 线圈受力方向

接通直流电压 U 时，直流电流为从 a 边流入， b 边流出，由于 a 边处于 N 极之下， b 边处于 S 极之下，则线圈受到电磁力而形成一個逆时针方向的电磁转矩 T ，使电枢绕组绕轴线方向逆时针转动。





(a) 直流电动机原理图



(b) 线圈受力方向

当电枢转动半周后，a边处于S极之下，而b边处于N极之下。由于采用了电刷和换向器装置，此时电枢中的直流电流方向变为从b边流入，从a边流出。电枢仍受到一个逆时针方向的电磁转矩 T 的作用，继续绕轴线方向逆时针转动。

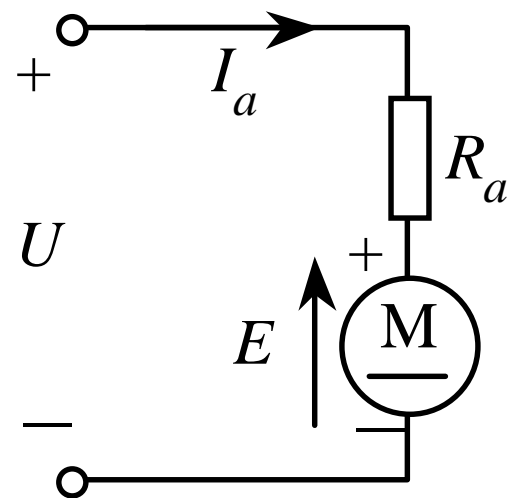


2. 电磁转矩与电压平衡方程

$$T = C_m \Phi I_a$$

$$E = C_e \Phi n$$

$$U = E + I_a R_a$$

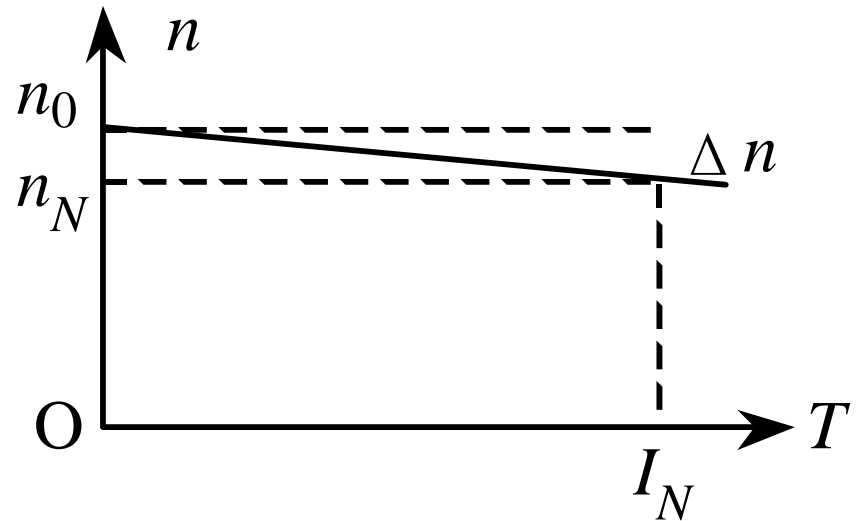


直流电动机电枢等效电路



3. 机械特性

$$\begin{aligned}n &= \frac{E}{C_e \Phi} \\&= \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \\&= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \\&= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T \\&= n_0 - \Delta n\end{aligned}$$



直流电动机具有硬的机械特性。



例：一直流电动机额定电压 $U = 110 \text{ V}$ ，电枢电流 $I_a = 10 \text{ A}$ ，电枢电阻 $R_a = 0.5 \text{ } \Omega$ ，求起动瞬间的电流及正常运转时的反电动势。

解：直接起动时的起动电流：

$$I_{st} = \frac{U}{R_a} = \frac{110}{0.5} = 220 \text{ A}$$

正常运转时的反电动势：

$$E = U - I_a R_a = 110 - 10 \times 0.5 = 105 \text{ V}$$



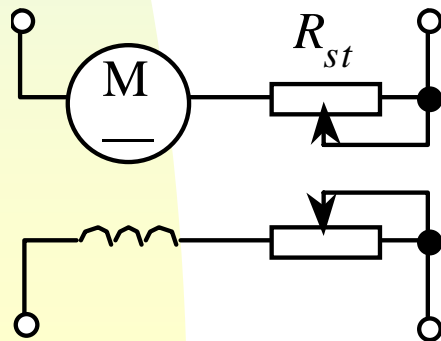
直流电动机的使用

1. 直流电动机的起动

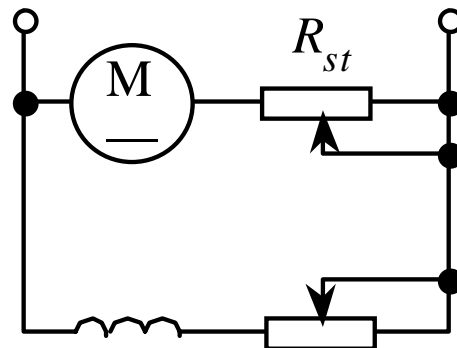
直流电动机直接起动时的起动电流很大，达到额定电流的10~20倍，因此必须限制起动电流。限制起动电流的方法就是起动时在电枢电路中串接起动电阻 R_{st} 。起动电阻的值：

$$R_{st} = \frac{U}{I_{st}} - R_a$$

一般规定起动电流不应超过额定电流的1.5~2.5倍。起动时将起动电阻调至最大，待起动后，随着电动机转速的上升将起动电阻逐渐减小。



(a) 他励式



(b) 并励式



2. 直流电动机的调速

根据直流电动机的转速公式 $n = (U - I_a R_a) / C_e \Phi$ ，可知直流电动机的调速方法有3种：改变磁通 Φ 调速、改变电枢电压 U 调速和电枢串联电阻调速。

改变磁通调速的优点是调速平滑，可做到无级调速；调速经济，控制方便；机械特性较硬，稳定性较好。但由于电动机在额定状态运行时磁路已接近饱和，所以通常只是减小磁通将转速往上调，调速范围较小。

改变电枢电压调速的优点是不改变电动机机械特性的硬度，稳定性好；控制灵活、方便，可实现无级调速；调速范围较宽，可达到6~10。但电枢绕组需要一个单独的可调直流电源，设备较复杂。

电枢串联电阻调速方法简单、方便，但调速范围有限，机械特性变软，且电动机的损耗增大太多，因此只适用于调速范围要求不大的中、小容量直流电动机的调速场合。



3. 直流电动机的制动

直流电动机的制动也有能耗制动、反接制动和发电反馈制动3种。

能耗制动是在停机时将电枢绕组接线端从电源上断开后立即与一个制动电阻短接，由于惯性，短接后电动机仍保持原方向旋转，电枢绕组中的感应电动势仍存在并保持原方向，但因为没有外加电压，电枢绕组中的电流和电磁转矩的方向改变了，即电磁转矩的方向与转子的旋转方向相反，起到了制动作用。

反接制动是在停机时将电枢绕组接线端从电源上断开后立即与一个相反极性的电源相接，电动机的电磁转矩立即变为制动转矩，使电动机迅速减速至停转。

发电反馈制动是在电动机转速超过理想空载转速时，电枢绕组内的感应电动势将高于外加电压，使电机变为发电状态运行，电枢电流改变方向，电磁转矩成为制动转矩，限制电机转速过分升高。

