

任务 1-2 三相异步电动机的运行调速与制动

一、三相异步电动机的运行

三相异步电动机的运行特性主要是指三相异步电动机在运行时，**电动机的功率、转矩、转速相互之间的关系。**

1、电磁转矩

所谓电磁转矩即是电动机由于电磁感应作用，从转子转轴上输出的作用力矩。它是衡量三相异步电动机带负载能力的一个重要指标。

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

C_T : 异步电动机的转矩常数，它与电动机的结构有关；

Φ : 旋转磁场的每极磁通 [量] ，单位为 Wb ；

I_2 : 转子电流的有效值，单位为 A ；

$\cos \varphi_2$: 转子电路的功率因数。

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

K 是与电机结构有关的常数； R_2 是转子电阻； X_{20} 是电动机转速 $n = 0$ 时转子的感抗（此时转子中电流的频率为 f ）。

由上式可知：电磁转矩与定子每相电压 U_1 的平方成正比，电源电压的波动对转矩影响较大。同时，电磁转矩 T 还受到转子电阻 R_2 的影响。

2、空载运行与负载运行

空载运行：

是指在额定电压和额定频率下，三相异步电动机的轴上没有任何机械负载的运行状态。

电动机的转速非常接近旋转磁场的同步转速 n_0 ，即 $n \approx n_0$

负载运行：

当三相异步电动机轴上带有机机械负载以后，电动机处于负载运行状态。

电动机的转速 n 要下降，旋转磁场与转子绕组之间的相对转速增大，转子绕组中的感应电动势和感应电流增大，电动机定子电流 I_1 增大，定子电路的功率因数提高，电网输送给电动机的有功功率也随之增加，电能得到了较好地利用。

3、机械特性

异步电动机的机械特性：

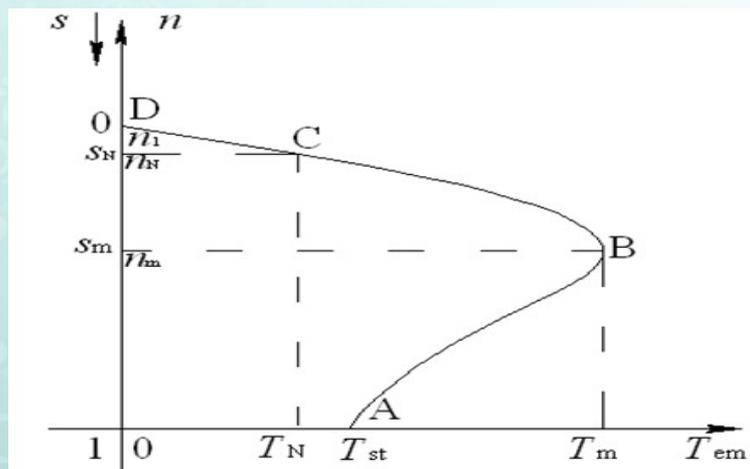
在电源电压 U_1 和转子电阻 R_2 为定值时，三相异步电动机转子转速随着电磁转矩 T 变化的关系曲线。

$$n = f(T)$$

由于异步电动机还常常用转差率 s 表示转子转动的快慢，因此，机械特性也可以用电磁转矩随转差率 s 变化的关系曲线。

$$T = f(s)$$

(1) 固有机械特性



异步电动机的固有机械特性

启动点 A: 启动瞬间, $n=0$, $s=1$, $T_{em}=T_{st}$,

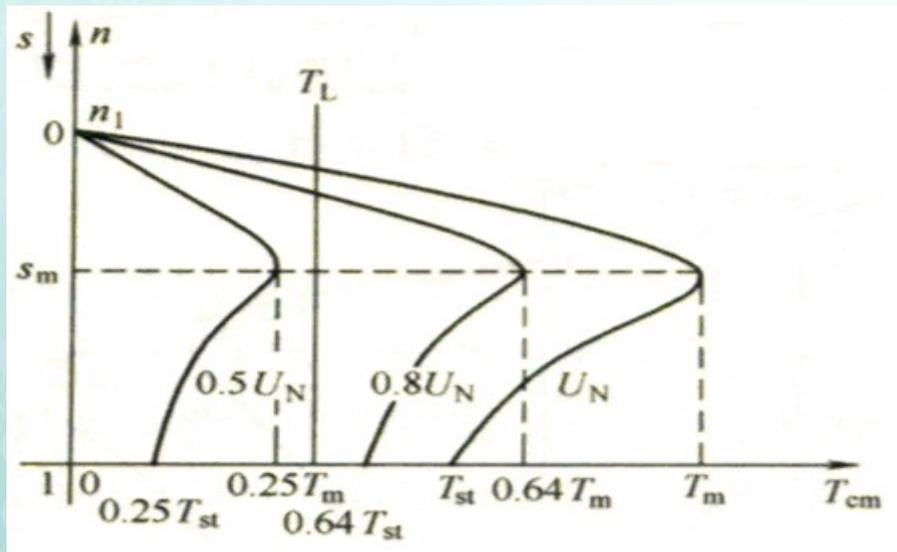
$T_{st}=(4\sim 7)I_N$, 电动机的启动状态又被称为堵转状态。

最大转矩点 B: $s=s_m$, $T_{em}=T_m$ 。B 点是电动机稳定运行的临界点, s_m 因此也叫做临界转差率。

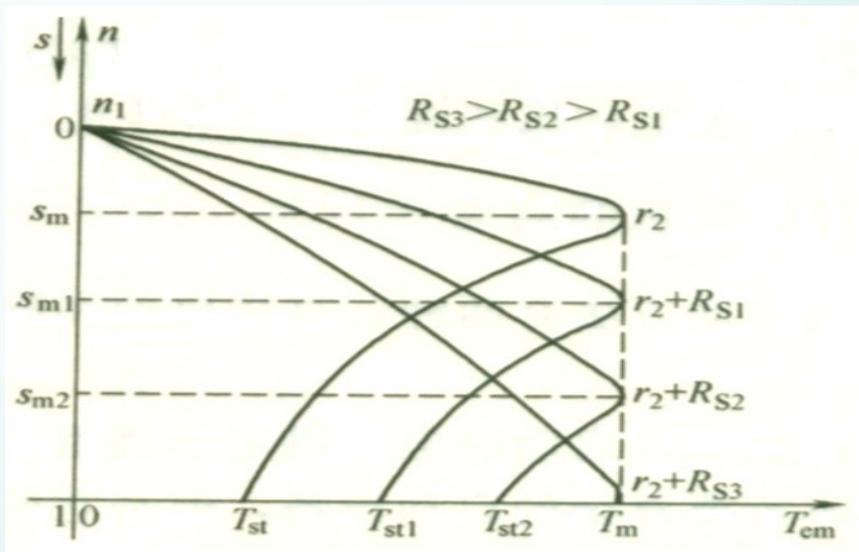
额定运行点 C: $n=n_N$, $s=s_N$, $T_{em}=T_N$, 额定运行时转差率很小, 此时电动机的额定转速略小于同步转速, 这说明固有特性的线性段为硬特性。

同步转速 D 是电动机的理想空载点, 此时, $n=n_1$, $s=0$, $T_{em}=0$, 如果没有外界转矩的作用, 异步电动机本身不可能达到同步转速点。

(2) 人为机械特性



降低 U_1 后的人为机械特性



转子回路串接对称电阻时的人为机械特性

4、额定转矩

异步电动机长期连续运行时，转轴上所能输出的最大转矩，或者说是电动机在额定负载时的转矩，叫做电动机的额定转矩，用 T_N 表示。

电动机在匀速运行时，电动机的电磁转矩 T 必须与电动机负载所产生的阻转矩 T_c 相平衡。若不考虑空载损耗转矩（主要是机械摩擦和风阻所产生的阻转矩），则可以认为电磁转矩 T 应该与电动机轴上输出的机械负载转矩 T_2 相等。即

$$T \approx T_2 = \frac{60 P_2}{2 \pi n}$$

式中， P_2 是电动机轴上输出的机械功率，单位为W； T 是电动机的电磁转矩，单位是N·m； n 是转速，单位是r/min。功率如果用千瓦为单位时，则上式变为

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

【例 1】 已知某两台三相异步电动机的额定功率均为 55kW，电源频率为 50Hz。其中第一台电动机的磁极数为 2，额定转速为 2960r/min；第二台电动机的磁极数为 6，额定转速为 980 r/min。试求它们的转差率及额定转矩各为多少？

解：已知电动机的额定功率为 $P_{2N1} = P_{2N2} = 55\text{kW}$ ，频率 = 50 Hz

极对数 $p_1 = 1$ 对， $p_2 = 3$ 对，额定转速为 $n_1 = 2960\text{r/min}$ ， $n_2 = 980 \text{ r/min}$ 。

(1) 因为

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

$$n_0 = \frac{60 f}{p}$$

所以

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{n_{01} - n_1}{n_{01}} \times 100\% = \frac{\frac{60f}{p_1} - n_1}{\frac{60f}{p_1}} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{60 \times 50}{1} \text{r/min} - 2960\text{r/min}}{\frac{60 \times 50}{1} \text{r/min}} \times 100\% = 1.3\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_2 &= \frac{n_{02} - n_2}{n_{02}} \times 100\% = \frac{\frac{60f}{p_2} - n_2}{\frac{60f}{p_2}} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{60 \times 50}{3} \text{r/min} - 980\text{r/min}}{\frac{60 \times 50}{3} \text{r/min}} \times 100\% = 2\% \end{aligned}$$

(2) 因为 $T_N = 9550 \frac{P_{2N}}{n}$

所以

$$T_{N1} = 9550 \frac{P_{2N1}}{n_1} = 9550 \frac{55\text{kW}}{2960\text{r/min}} \approx 177.5\text{N} \cdot \text{m}$$

$$T_{N2} = 9550 \frac{P_{2N2}}{n_2} = 9550 \frac{55\text{kW}}{980\text{r/min}} \approx 536.2\text{N} \cdot \text{m}$$

5、最大转矩 T_{max}

从机械特性曲线上看，转矩有一个最大值，它被称为**最大转矩或临界转矩** T_{max} 。对应为最大转矩所对应的转差率称为临界转差率，用 s_m 表示。一旦负载转矩大于电动机的最大转矩，电动机就带不动负载，转速沿特性曲线 bc 段迅速下降到 0，发生**闷车现象**。此时，三相异步电动机的电流会升高 6 ~ 7 倍，电动机严重过热，时间一长就会烧毁电动机。

电动机的额定转矩应该小于最大转矩，而且不能太接近最大转矩，否则电动机稍微一过载就立即闷车。三相异步电动机的短时容许过载能力是用电动机的最大转矩 T_{max} 与额定转矩 T_N 之比来表示，我们称之为**过载系数 λ** ，即

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

一般三相异步电动机的过载系数 $\lambda = 1.8 \sim 2.5$ ，特殊用途（如起重、冶金）的三相异步电动机的过载系数 λ 可以达到 3.3 ~ 3.4 或更大。

【例 2】 有一台三相异步电动机，其额定数据如下： T_N

$U_1 = 380V$, $\eta = 0.9$, $\cos \varphi = 0.5$, $\lambda = 2$, $\lambda_q = 1.2$ 。试求：(1) 额定电流；(2) 转差率；(3) 额定转矩、最大转矩，起动转矩。

(2) 转差率； (3) 额定转矩、最大转矩，起动转矩。

解 (1)
$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3}U_1 \cos \varphi \eta} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.9 \times 0.9} A = 75 A$$

(2) 由 $n = 1470r/min$, $n \approx n_0$ 可知，电动机是四极的， $p = 2$,

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

$$s = \frac{n_0 - n}{n} \times 100 \% = \frac{1500 - 1470}{1500} \times 100 \% = 0.02$$

(3)
$$T = 9550 \frac{P_2}{n} = 9550 \times \frac{40}{1470} = 259.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = \lambda T_N = 2 \times 259.9 = 519.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_q = \lambda_q T_N = 1.2 \times 259.9 = 311.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

二、三相异步电动机的调速

1、三相异步电动机的调速方法

调速主要是指通过改变电机的参数而不是通过负载变化来调节电机转速。

三相异步电动机的调速依据是：

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

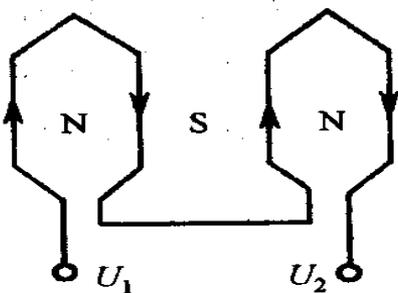
异步电动机的调速方式主要有：

变极调速、变频调速、变转差率调速

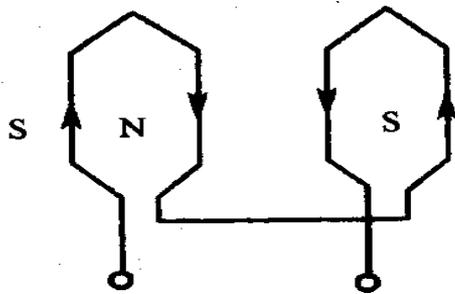
2、变极调速

通过改变三相异步电动机旋转磁场的磁极对数 p 来调节电动机的转速。

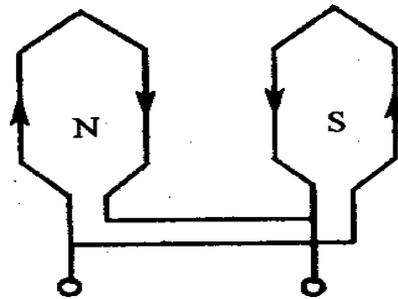
采用变极调速的多速电机普遍通过绕组改接的方法实现变极，如下图所示。当构成 U 相绕组的两个线圈（组）由首尾相接的顺极性串联改接为反极性串联或反极性并联后，磁场的磁极对数 p 减少一半，电动机的同步转速增加一倍，这将使电动机的转速上升；反之，转速下降。



(a) 顺极性串联



(b) 反极性串联



(c) 反极性并联

3、变频调速

改变异步电动机的定子电源频率 f_1 (变频) 可以调节电动机转速。

优点：

调速平滑、调速范围大、准确性及相对稳定性高（尤其低速特性较硬，抗扰动能力强）、可根据负载要求实现恒功率或恒转矩调速等。

缺点：

需要半导体变频设备，技术及操作要求高，运行维护难度大。

从电机本身来看，调速时一般希望**主磁通保持不变**；从拖动负载的角度看，又希望**电机的过载能力不变**。如果主磁通变大，则可能会因为电机磁路过于饱和引起过大的励磁电流而损害电机；若调速过程中，主磁通过小则电磁转矩将下降，电机的设计容量得不到充分利用。

因此：

变频时需按相同比例调整定子电压才能保持主磁通不变，即

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} = \text{常数}$$

4、变转差率调速

方法：在绕线式电机转子电路中外接调速电阻。

(1) 转子串电阻调速

转子串电阻后，机械特性上的最大转矩 T_m 不变而临界转差率 s_m 会增大，临界点会下移并可在小范围内对电机进行调速，转子串电阻的调速范围有限，外串较大电阻时的特性很软，抗负载波动能力差；外接电阻的电能消耗量大，调速效率较低。

优点：方法简单，投资少，可结合绕线式电机的启动、制动状态使用，因而它在很多起重及运输设备中仍有一定的应用。

(2) 转子电路引入附加电势调速

由于转子电流 I_2 与转差率 s 、转子参数及转子感应电动势 E_2 有关，因此如果在转子电路中引入外接的电动势，则会改变转子电流，进而通过电磁转矩的改变影响电机的转速，这就是转子电路引入附加电势调速。

三、三相异步电动机的启动、反转和制动

1、三相异步电动机的启动

异步电动机接入三相电源后，如果电磁转矩 T 大于负载转矩 T_c ，电动机就可以从静止状态过渡到稳定运转状态，这个过程叫做启动。

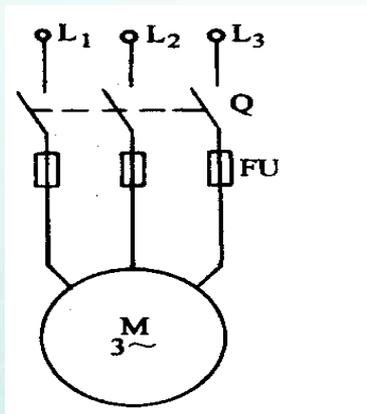
电动机的启动电流很大，一般约为额定电流的 $5 \sim 7$ 倍。

三相异步电动机的启动方法与电动机转子的结构有关。异步电动机的转子有笼型和绕线型两种结构形式，这两种结构的电动机启动方法有所不同。

(1) 笼型转子异步电动机的启动方法

直接启动

利用刀开关或接触器将电动机定子绕组直接接到额定工作电压上的启动方式，故又叫全压启动，这是异步电动机最简单最常用的启动方式，一般电动机容量在 14kW 以下，并且小于供电变压器容量的 20% 时，可采用这种启动方式。



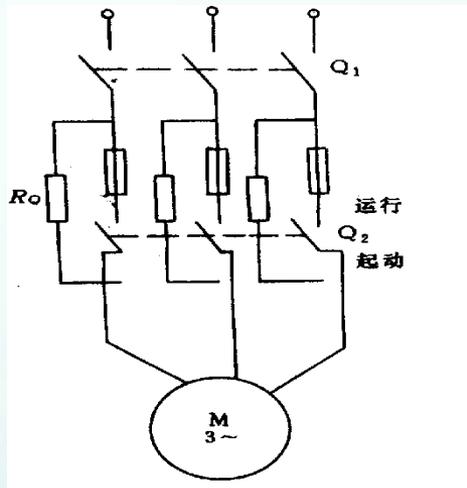
简单全压启动线路图

降压启动

在启动时降低加在电动机定子绕组上的电压，待电动机转速升高到接近额定值时，再将电源恢复到额定值，转入正常运行的方法。由于降压启动同时也减小了电动机的启动转矩，所以这种方法只适用于对启动转矩要求不高的生产机械。

定子电路串接电阻启动

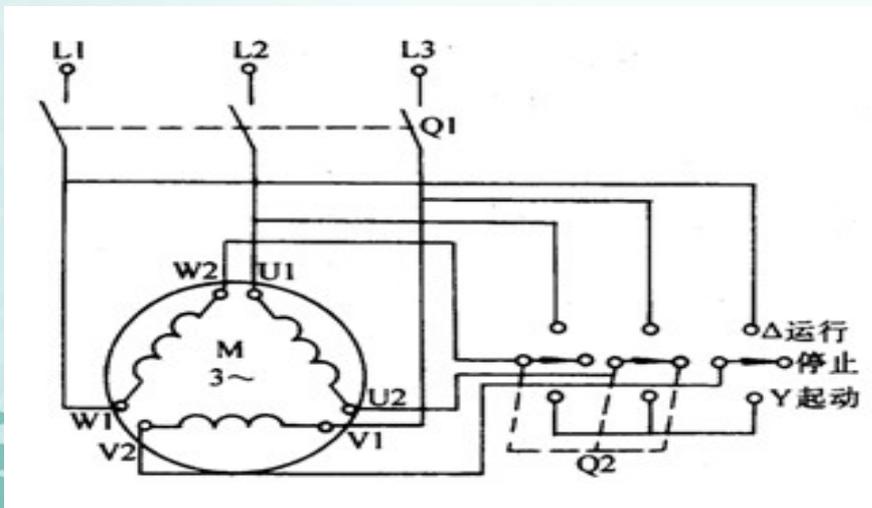
启动时，先合上电源隔离开关 Q_1 ，将 Q_2 扳向“启动”位置，电动机即串入电阻 R_Q 启动。待转速接近稳定值时，将 Q_2 扳向“运行”位置， R_Q 被切除，使电动机恢复正常工作情况。



定子串电阻降压启动

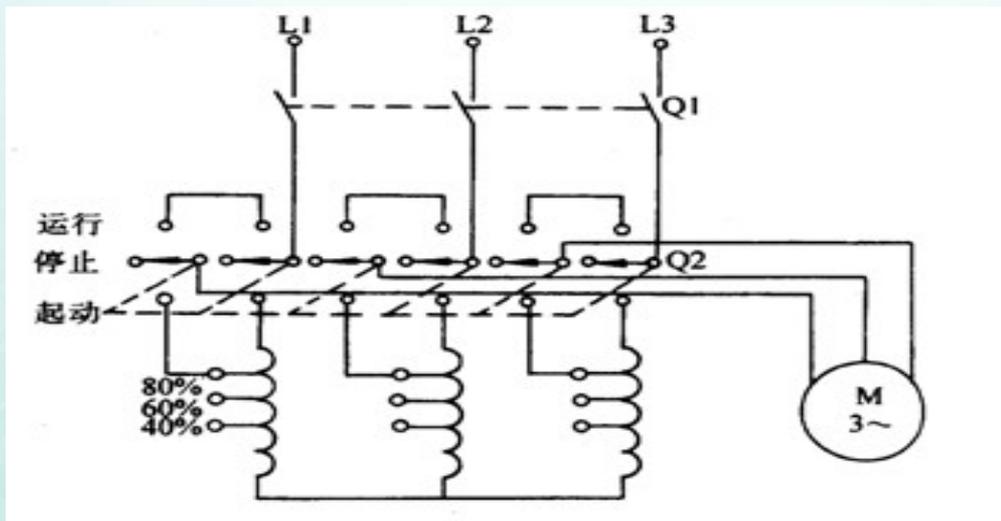
星形 - 三角形降压启动

电动机在正常工作时其定子绕组是联结成三角形的，启动时可以将定子绕组联结成星形，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联结。星形 - 三角形换接启动可以使电动机的启动电流降低到全压启动时的 $1/3$ 。



自耦变压器降压启动

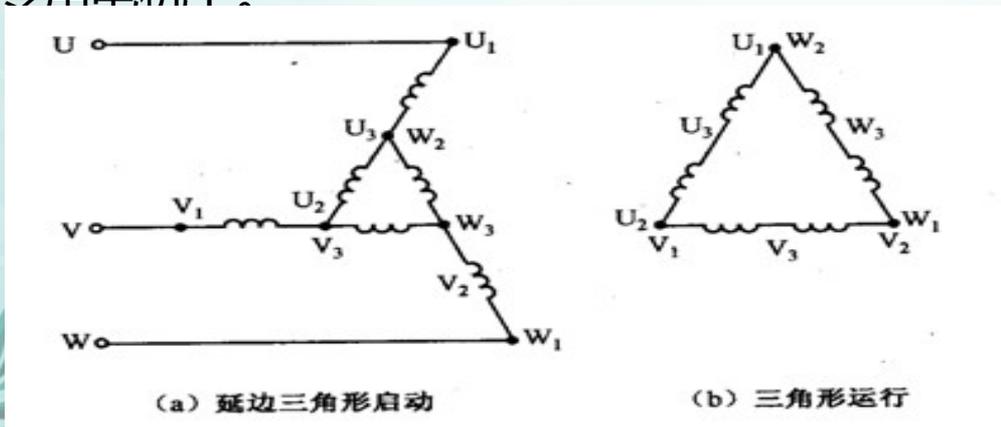
自耦变压器降压启动是利用自耦变压器将电网电压降低后再加到电动机定子绕组上，待转速接近稳定值时，再将电动机直接接到电网上。自耦变压器备有 40%、60%、80% 等多种抽头，使用时可根据电动机启动转矩的要求具体选择。



自耦变压器降压启动

延边三角形降压启动

这种电机的每相绕组都带有中心抽头，抽头比例可按启动要求在制造电机前确定。启动时的接法如下图（a）所示，部分绕组作 Δ 连接，其余绕组向外延伸，所以称为延边三角形启动。启动中降压比例取决于抽头比例，绕组延伸部分越多则降压比越大。启动结束后，将电机的三相中心抽头断开并便绕组依次首尾相接以 Δ 接法运行，如下图（b）所示。延边三角形降压启动主要用于专用电机上。



延边三角形降压启动

2、三相异步电动机的反转

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。

3、三相异步电动机的制动

当异步电动机的电磁转矩 T 与转速 n 的方向相反时，电磁转矩将成为电动机旋转的阻力矩，电动机就处在制动状态。制动的目的主要是利用电磁转矩的制动作用使电动机迅速停车（刹车）或者稳定工作在某些有特殊要求的状态。

三相异步电动机的电气制动方式包括：

反接制动

回馈制动

能耗制动

(1) 反接制动

当异步电动机的旋转磁场方向与转动方向相反时，电动机进入反接制动状态。这时，

$$s = [n_0 - (-n)] / n_0 > 1$$

根据电机的功率平衡关系可知，电机仍从电源吸取电功率，同时电机又从转轴获得机械功率。这些功率全部以转子铜耗形式被消耗于转子绕组中，能量损耗大，如果不采取措施将可能导致电机温升过高造成损害。反接制动包括：

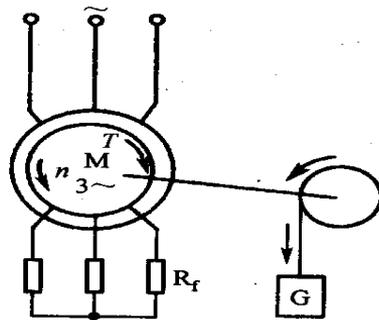
倒拉反转制动

电源反接制动

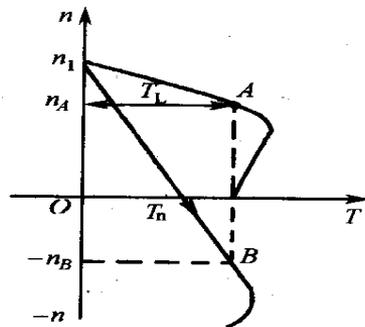
倒拉反转制动

假设制动前绕线式电机拖动负载处于正向电动状态 ($T > 0$ $n > 0$) 运行于机械特性上的 A 点。

制动时，转子外接大阻值的制动电阻导致机械特性的临界点大幅度下移。由于新特性对应于 A 点转速的转矩很小，因此必然不能维持在 A 点存在的平衡。电机在惯性作用下以转速 n 切换至新特性上运行并开始减速。直到转速降至 n 后才能与负载平衡，电机运行于 B 点。这时 $n < 0$ ，电机反转且转速值较低，但特性软，运行稳定性偏差。



(a) 制动示意

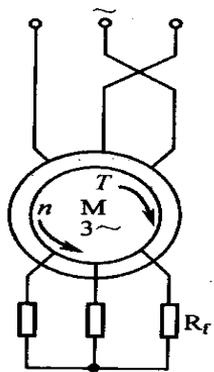


(b) 机械特性

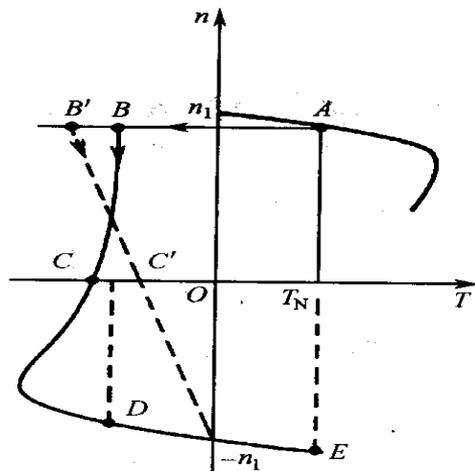
电源反接制动

针对电动运行的电机，将三相电源的任意两相对调构成反相序电源，则旋转磁场也反向，电机进入电源反接制动状态。

电源反接后，电机因惯性作用由反向机械特性上的 A 点同转速切换至 B 点。在反向电磁转矩作用下，电机沿反向机械特性迅速减速。



(a) 制动示意

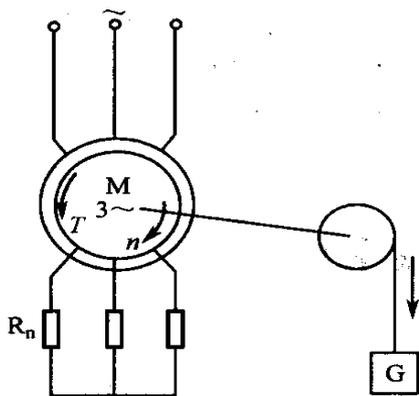


(b) 机械特性

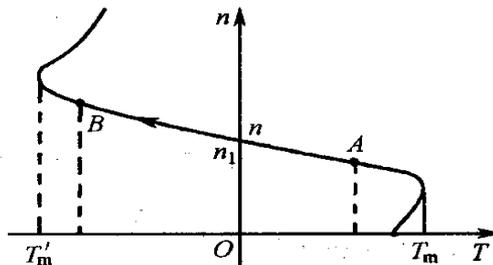
(2) 回馈制动

回馈制动常用于起重设备高速下放位能性负载场合，其特点是电机转向与旋转磁场方向相同但转速却大于同步转速。

在回馈制动方式下，电机自转轴输入机械功率，相当于被“负载”拖动，扣除少部分功率消耗于转子外，其余机械功率以电能形式回送给电网，电机处于发电状态。



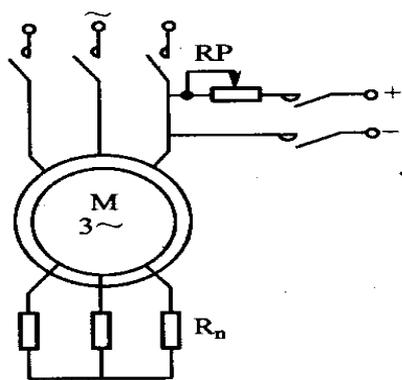
(a) 制动示意



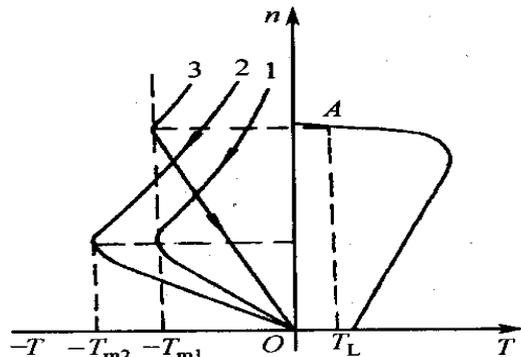
(b) 机械特性

(3) 能耗制动

能耗制动的方法是将电动状态的电机交流电源切换为直流电源并采取适当的限流措施。直流励磁产生静止的磁场，转子在惯性作用下沿原方向切割该磁场，相当于磁场相对于转子反向旋转产生反向的电磁转矩，当电机转速为零时，转子与旋转磁场相对静止，相当于异步电机的同步状态。



(a) 制动示意



(b) 机械特性

异步电动机能耗制动