

电工学 (电工技术)

教学课件



第7章 交流电动机



中国矿业大学 研制

高等教育出版社

出版

高等教育音像出版社



第7章 交流电动机

- 7.1 三相异步电动机的构造
- 7.2 三相异步电动机的转动原理
- 7.3 三相异步电动机的电路分析
- 7.4 三相异步电动机转矩与机械特性
- 7.5 三相异步电动机的起动
- 7.6 三相异步电动机的调速
- 7.7 三相异步电动机的制动
- 7.8 三相异步电动机铭牌数据
- 7.9 三相异步电动机的选择
- 7.10 同步电动机(略)
- 7.11 单相异步电动机

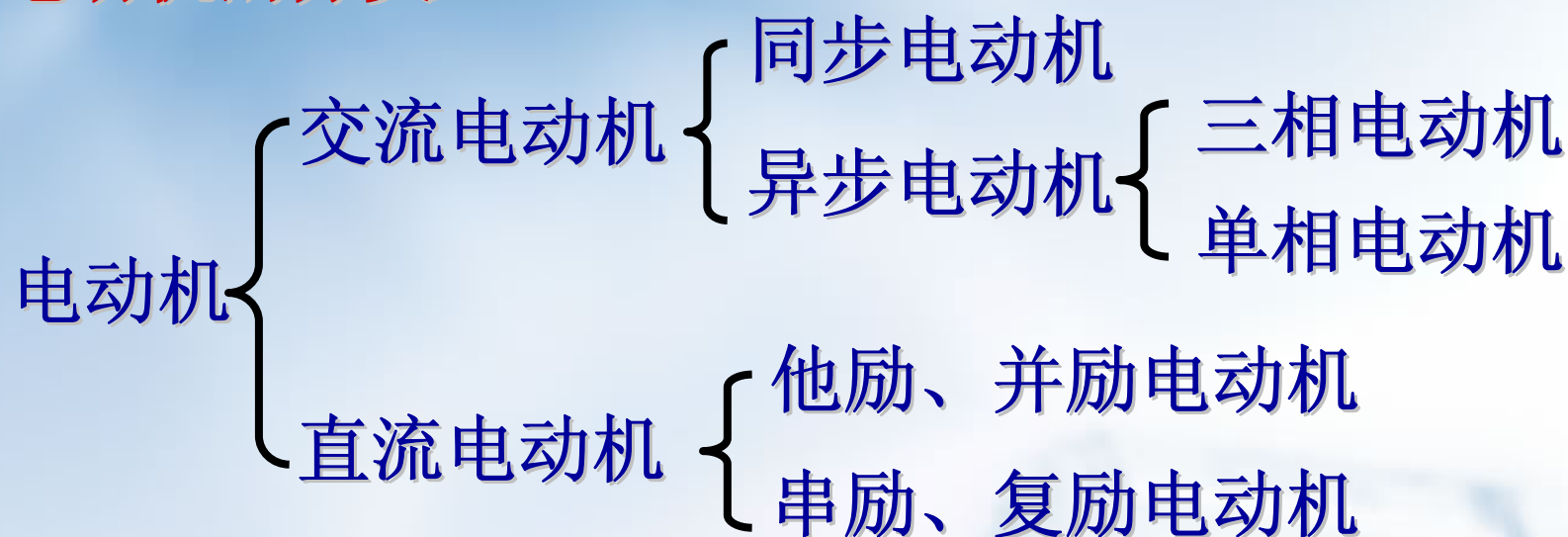
第7章 交流电动机

本章要求：

1. 了解三相交流异步电动机的基本构造和转动原理。
2. 理解三相交流异步电动机的机械特性，掌握起动和反转的基本方法，了解调速和制动的方法。
3. 理解三相交流异步电动机铭牌数据的意义。

第7章 交流电动机

电动机的分类：



笼型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

7.1 三相异步电动机的构造

1. 定子

铁心：由内周有槽的硅钢片叠成。

三相绕组 $\begin{cases} U_1 \text{ --- } U_2 \\ V_1 \text{ --- } V_2 \\ W_1 \text{ --- } W_2 \end{cases}$

机座：铸钢或铸铁

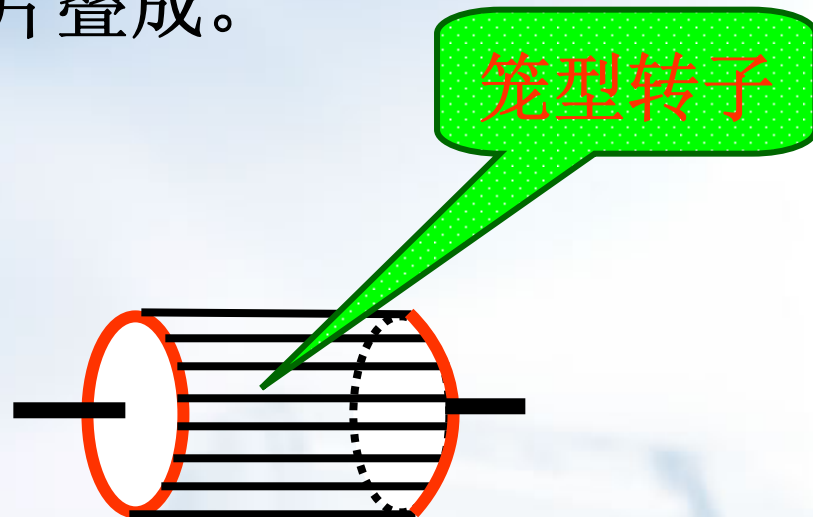


2. 转子 { 笼型 绕线型

铁心：由外周有槽的硅钢片叠成。

(1) 笼型转子

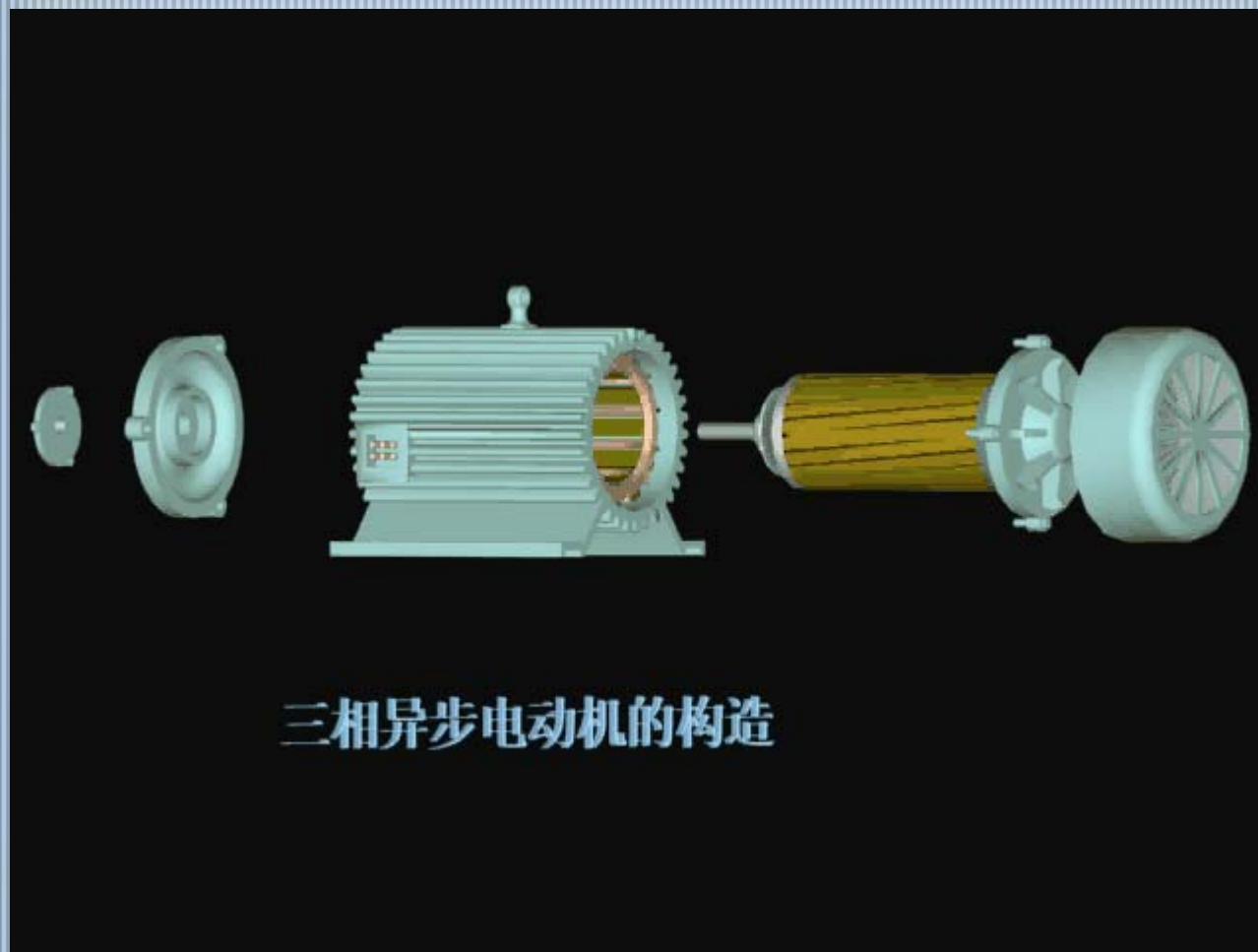
铁芯槽内放铜条，端部用短路环形成一体，或铸铝形成转子绕组。



(2) 绕线型转子

同定子绕组一样，也分为三相，并且接成星形。

转子：在旋转磁场作用下，产生感应电动势或电流。



三相异步电动机的构造

笼型电动机与绕线型电动机的比较：

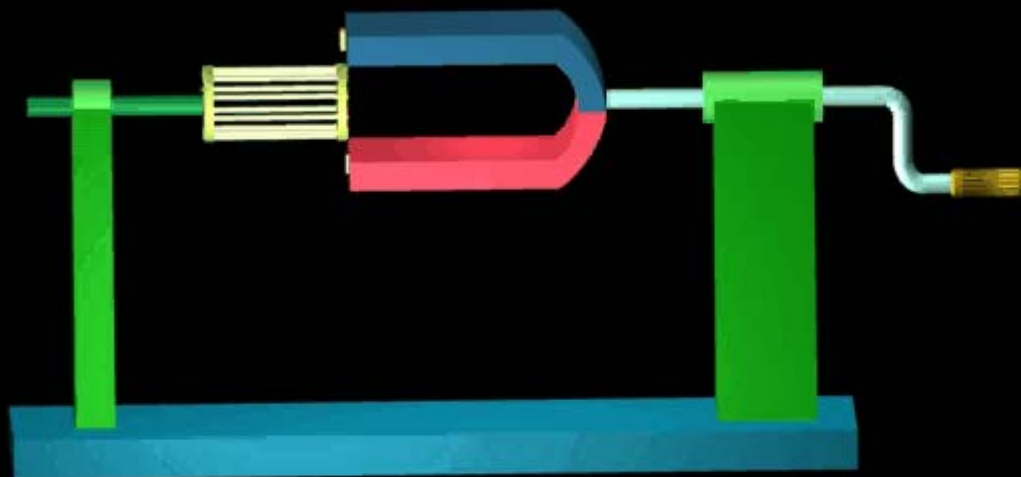
笼型：

结构简单、价格低廉、工作可靠；不能人为改变电动机的机械特性。

绕线型：

结构复杂、价格较贵、维护工作量大；转子外加电阻可人为改变电动机的机械特性。

7.2 三相异步电动机的转动原理

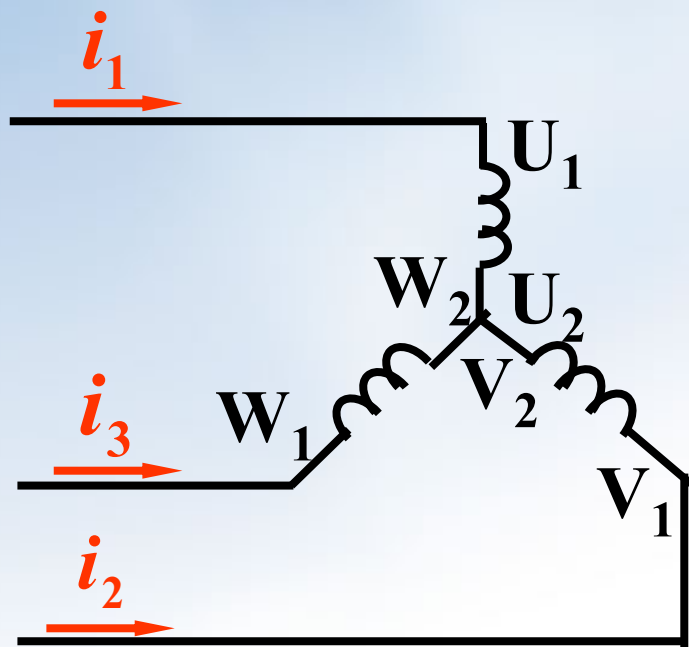


异步电动机转动演示

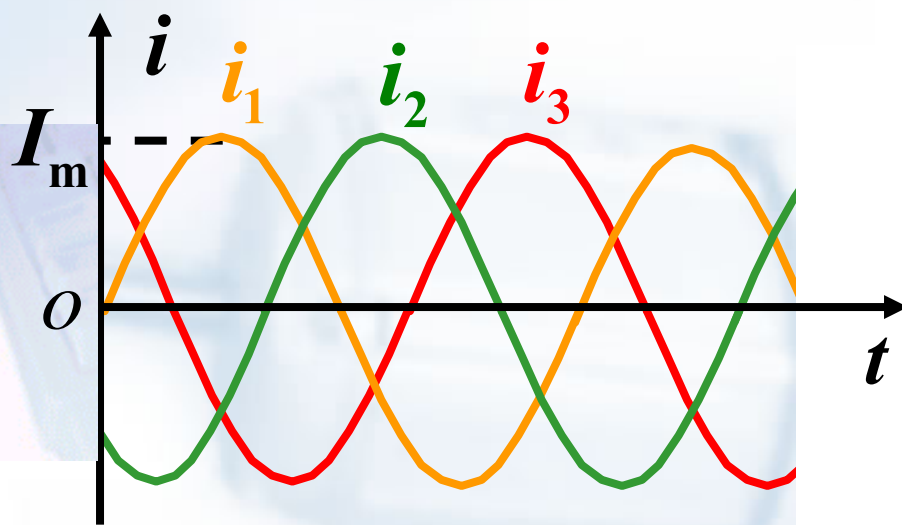
7.2.1 旋转磁场

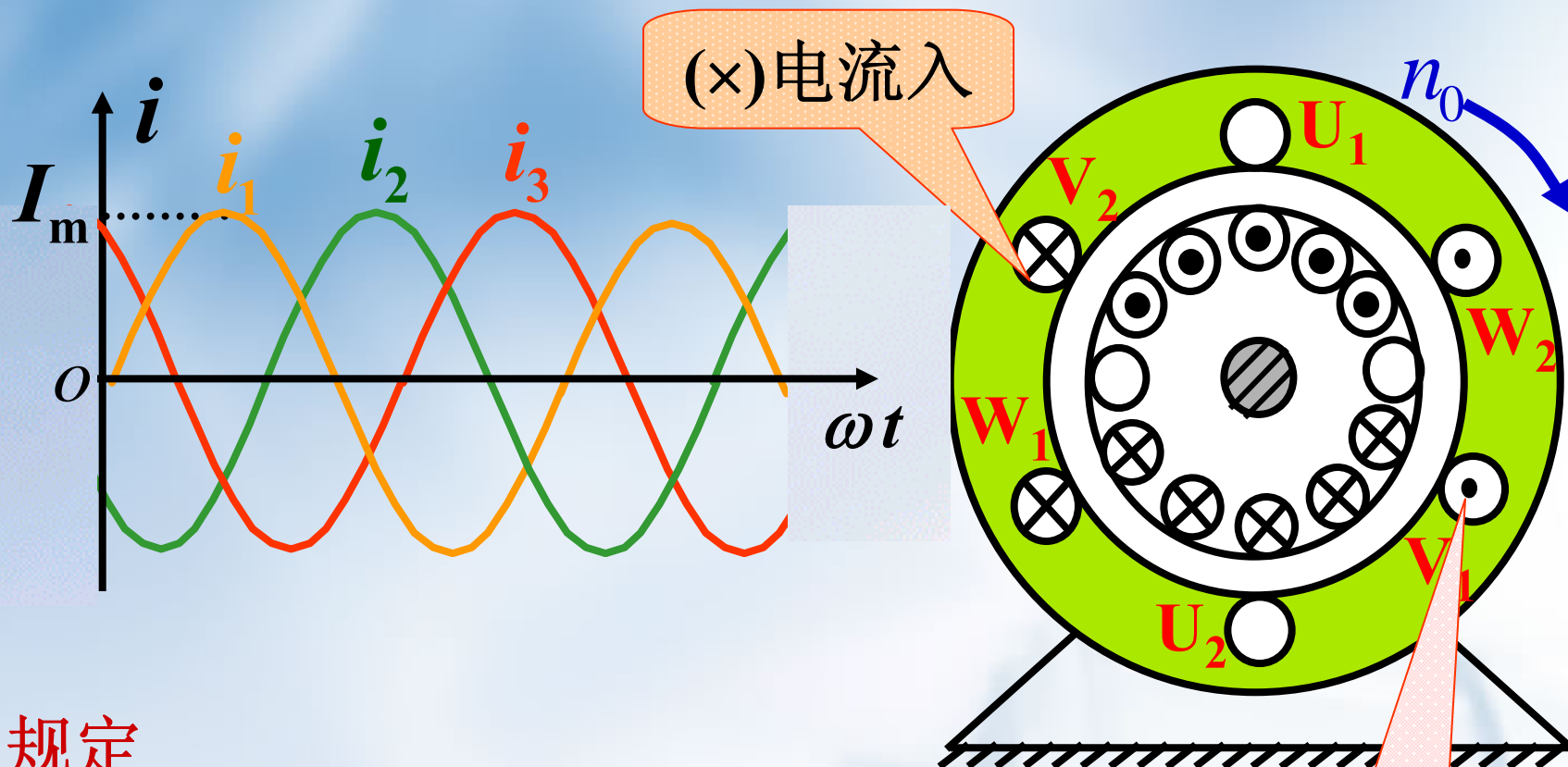
1. 旋转磁场的产生

定子三相绕组通入三相交流电(星形联接)



$$\begin{cases} i_1 = I_m \sin \omega t \\ i_2 = I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_3 = I_m \sin (\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$





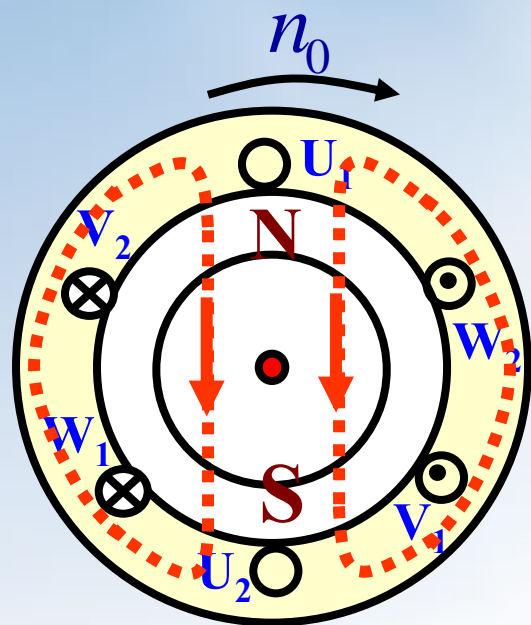
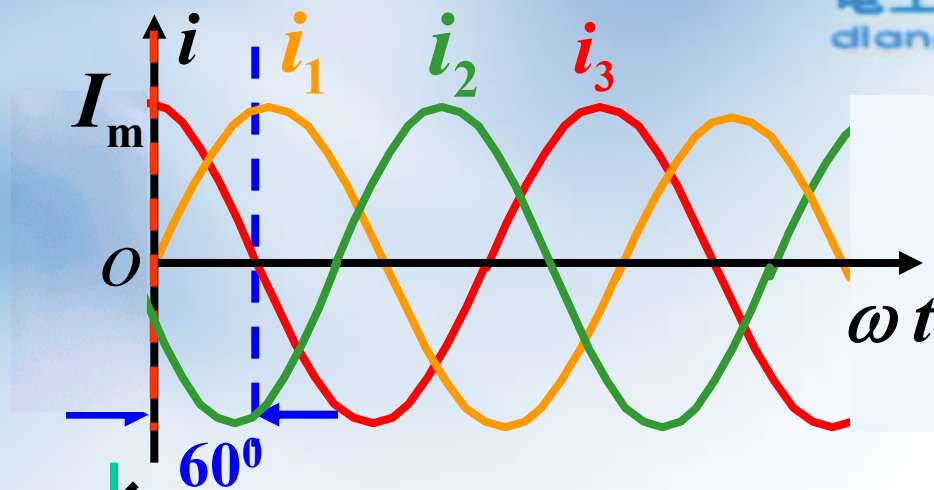
规定

i : “+” → 首端流入，尾端流出。

i : “-” → 尾端流入，首端流出。

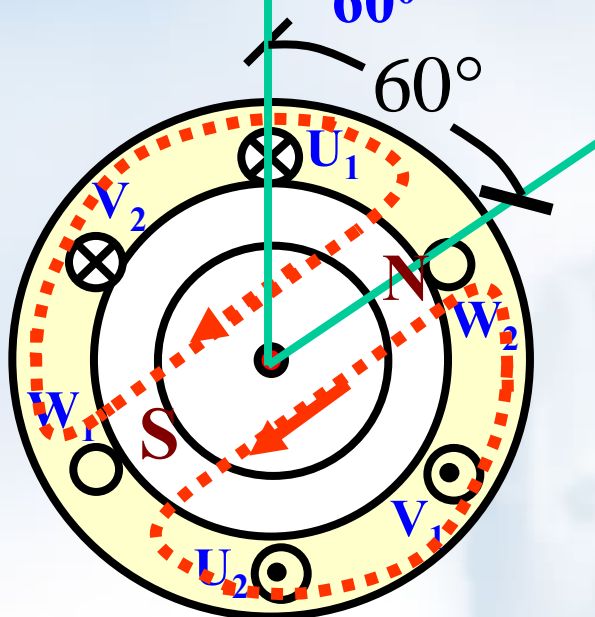
三相电流合成磁场的分布情况

动画



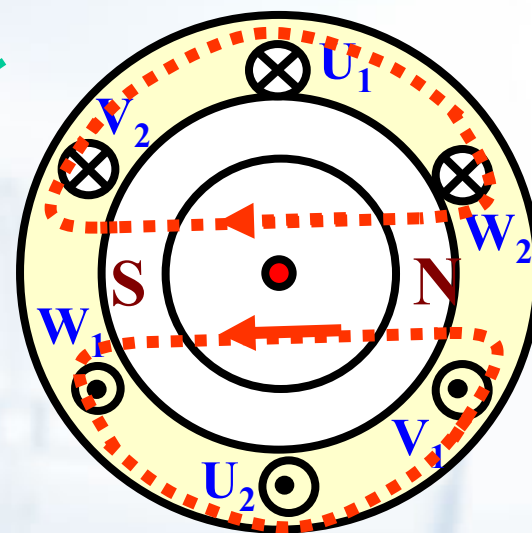
$\omega t = 0$

合成磁场方向向下



$\omega t = 60^\circ$

合成磁场旋转 60°



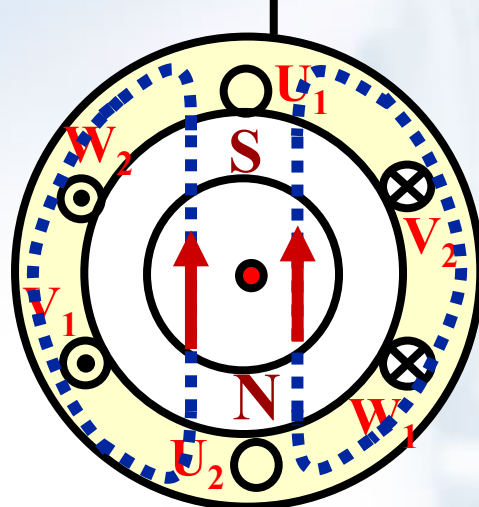
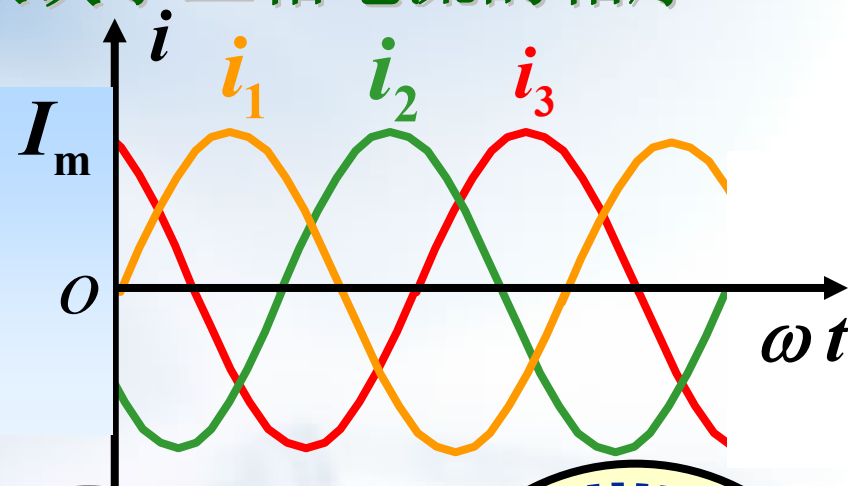
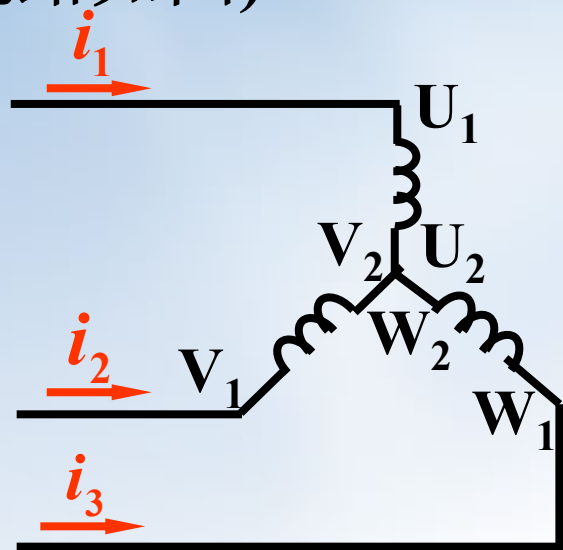
$\omega t = 90^\circ$

合成磁场旋转 90°

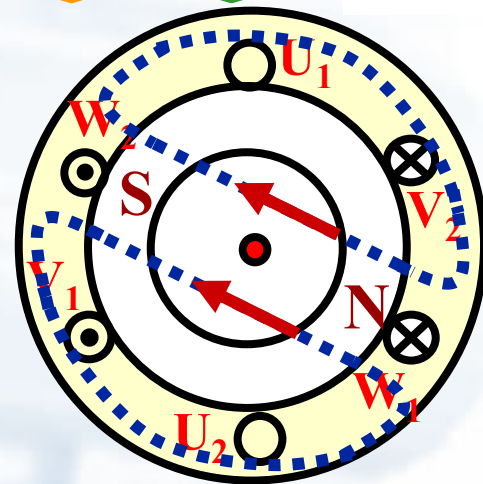
分析可知：三相电流产生的合成磁场是一旋转的磁场
即：一个电流周期，旋转磁场在空间转过 360°

2. 旋转磁场的旋转方向 取决于三相电流的相序

任意调换两根电源进线
(电路如图)



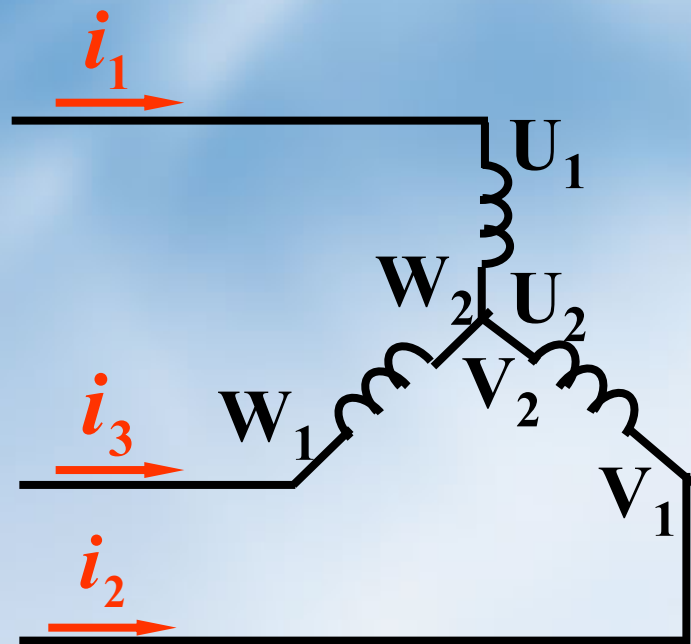
$\omega t = 0$



$\omega t = 60^\circ$

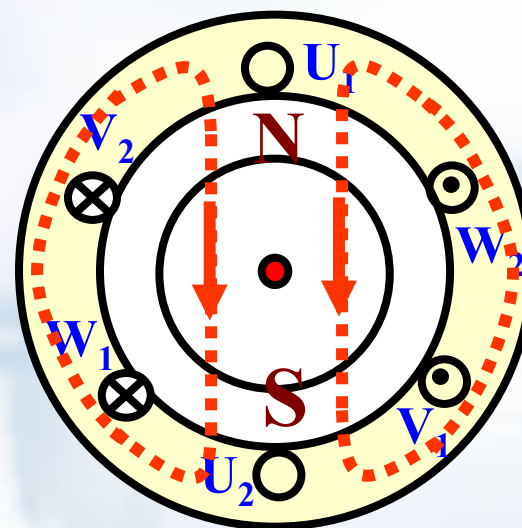
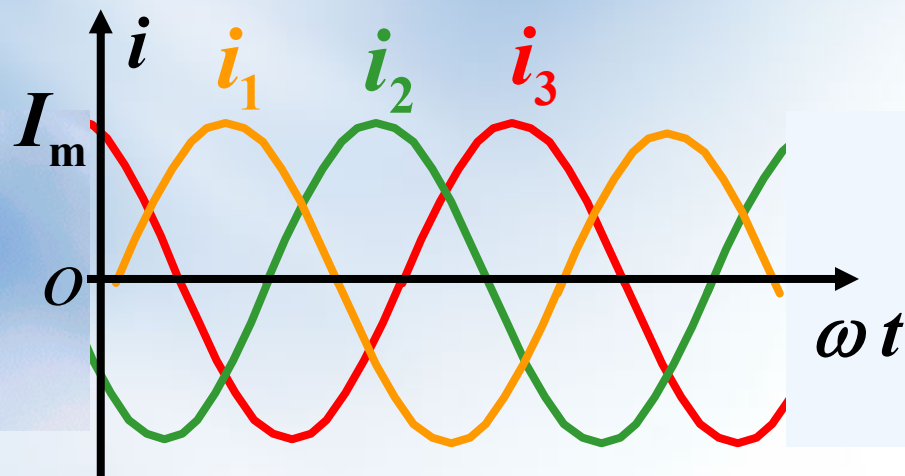
结论：任意调换两根
电源进线，则旋转
磁场反转。

3. 旋转磁场的极对数P



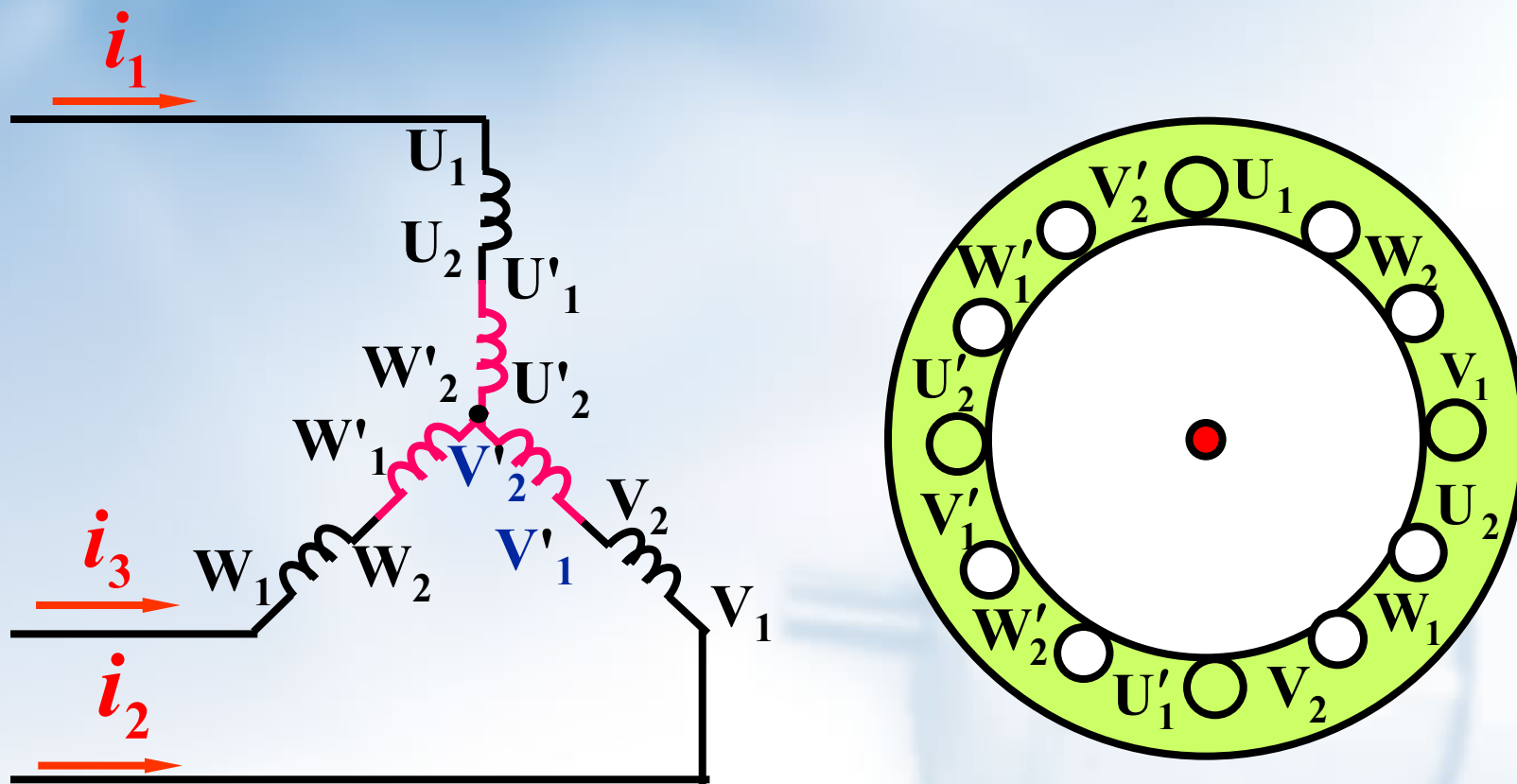
当三相定子绕组按图示排列时，产生一对磁极的旋转磁场，即：

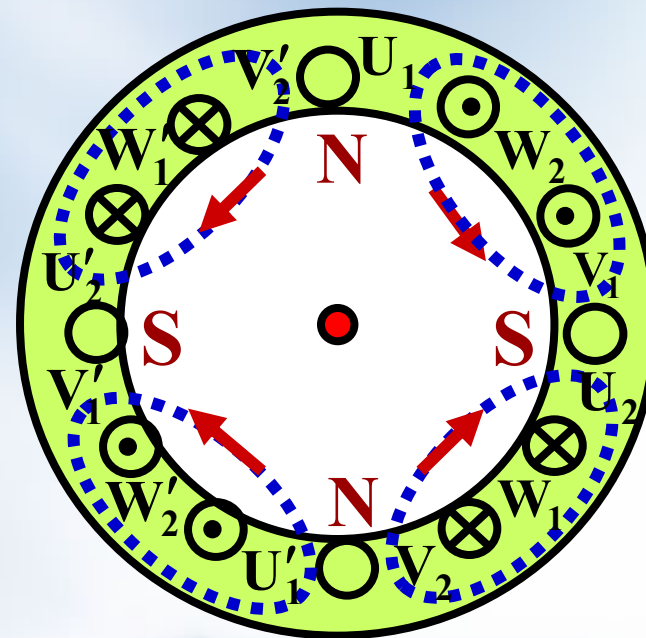
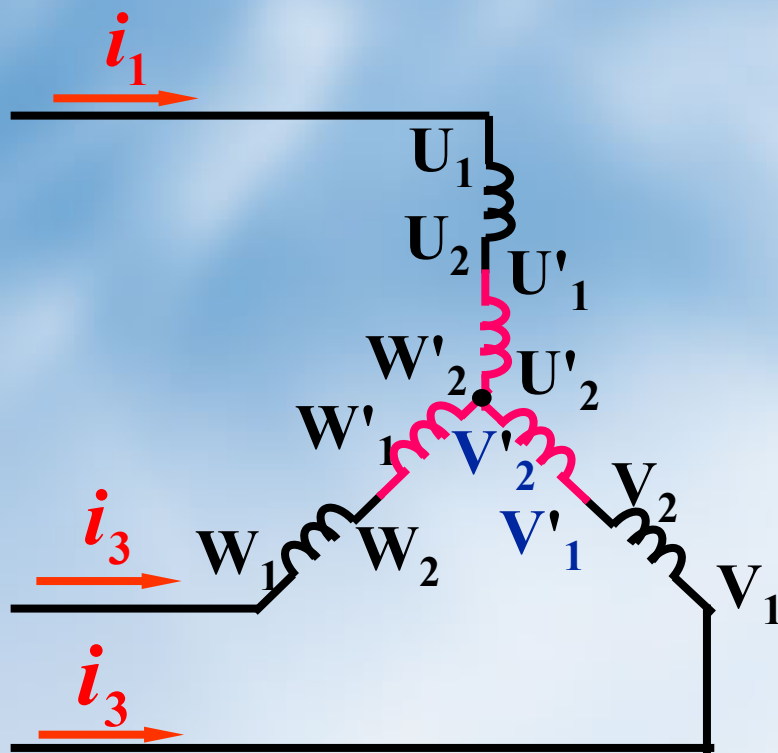
$$p = 1$$



$$\omega t = 0$$

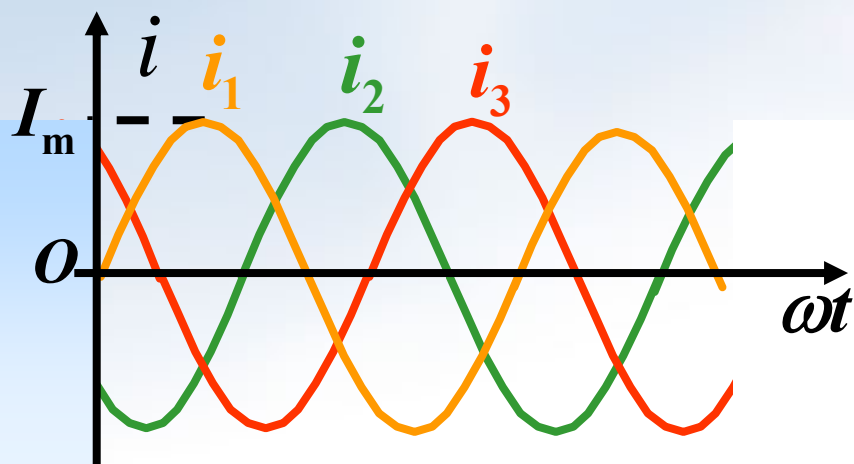
若定子每相绕组由两个线圈串联，绕组的始端之间互差 60° ，将形成两对磁极的旋转磁场。





极对数 $p = 2$

旋转磁场的磁极对数
与三相绕组的排列有关



4. 旋转磁场的转速

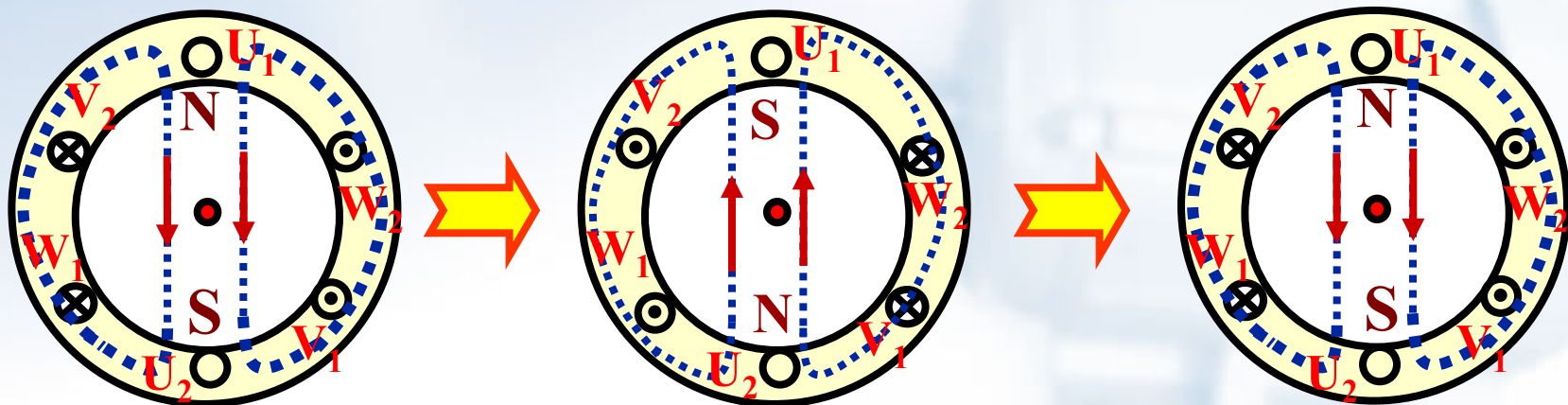
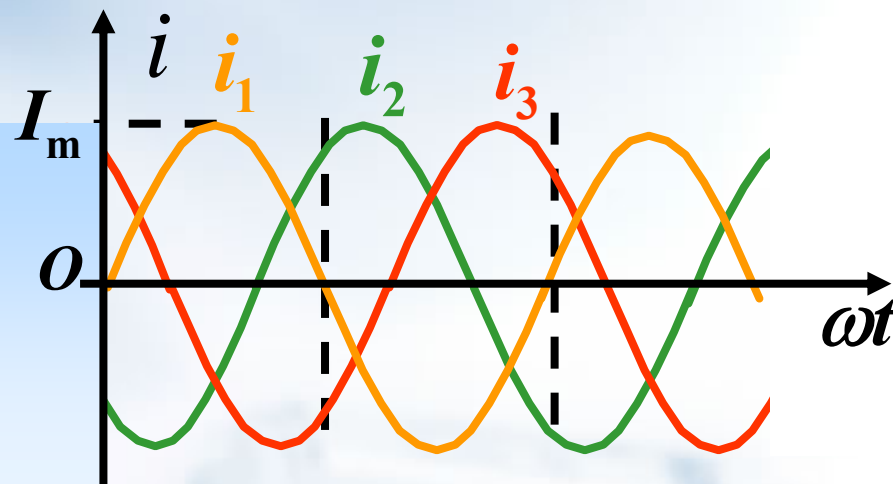
旋转磁场的转速取决于磁场的极对数

$p=1$ 时

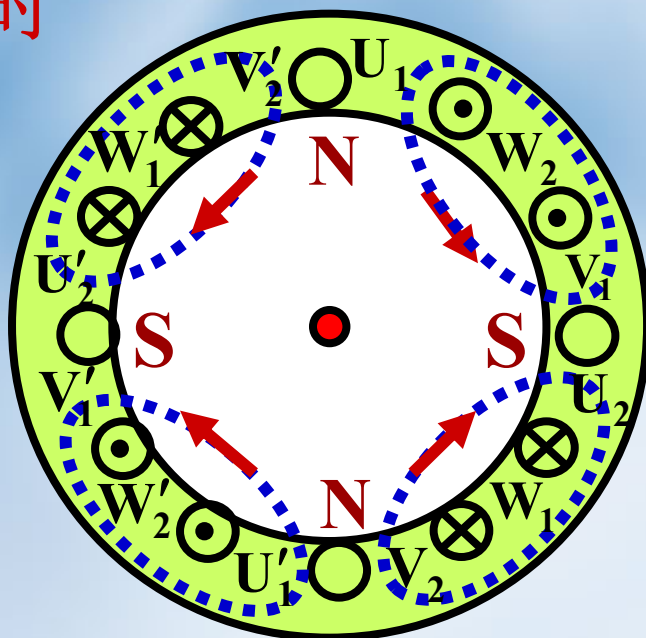
$$n_0 = 60 f_1 \text{ (转/分)}$$

工频: $f_1 = 50 \text{ Hz}$

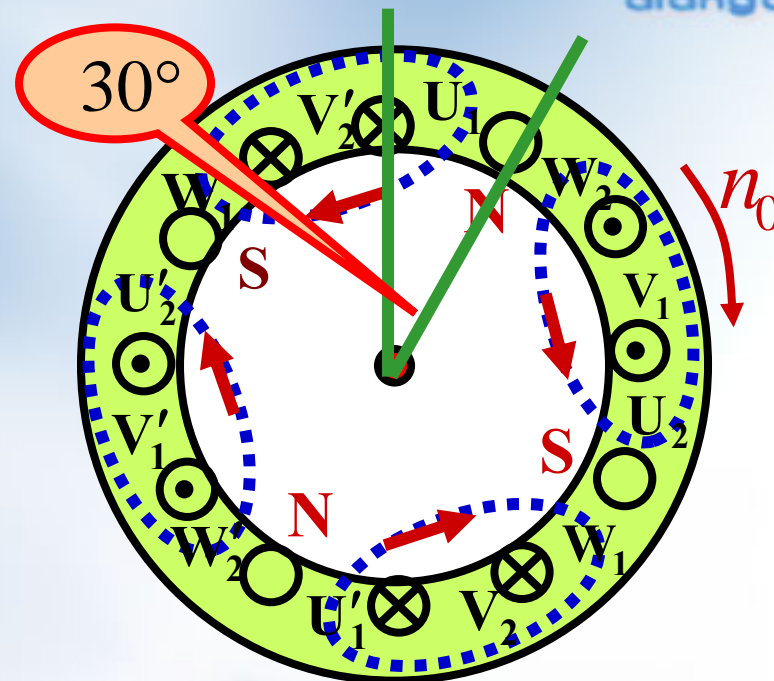
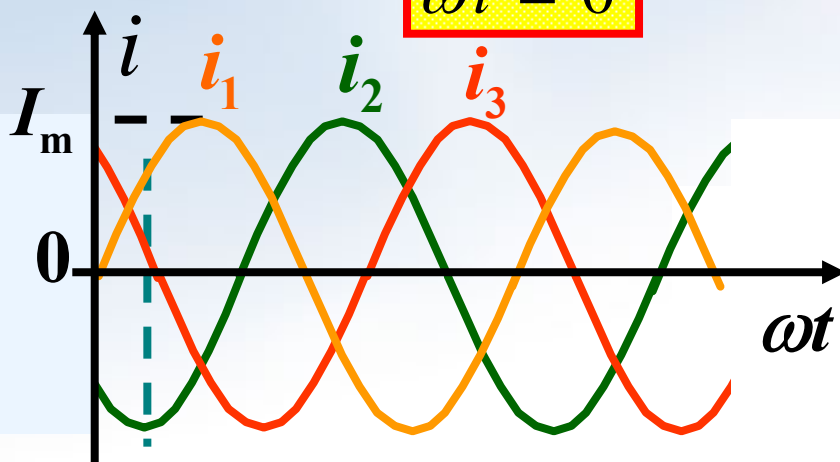
$$n_0 = 3000 \text{ (转/分)}$$



$p=2$ 时



$\omega t = 0$



$\omega t = 60^\circ$

$$n_0 = \frac{60 f_1}{2} = 1500 \text{ (转/分)}$$

旋转磁场转速 n_0 与极对数 p 的关系

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \text{ (转/分)}$$

极对数	每个电流周期 磁场转过的空间角度	同步转速 ($f_1 = 50 \text{ Hz}$)
$p = 1$	360°	3000 (转/分)
$p = 2$	180°	1500 (转/分)
$p = 3$	120°	1000 (转/分)
$p = 4$	90°	750 (转/分)

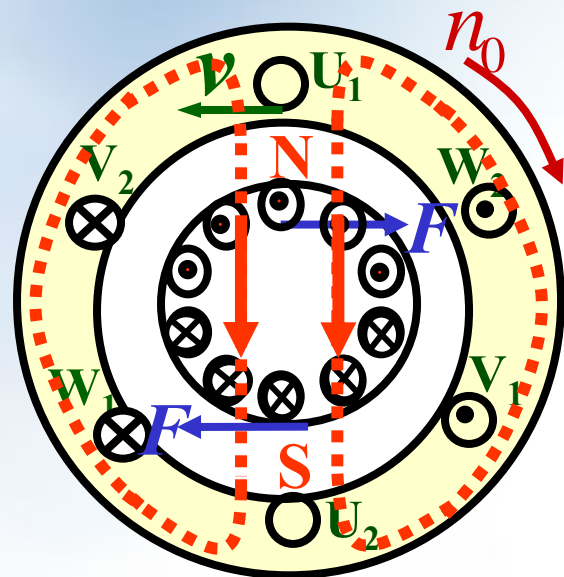
可见: 旋转磁场转速 n_0 与频率 f_1 和极对数 p 有关。

7.2.2 电动机的转动原理

1. 转动原理

定子三相绕组通入三相交流电

→ 旋转磁场 $\left\{ \begin{array}{l} n_0 = \frac{60 f_1}{p} \text{ (转/分)} \\ \text{方向: 顺时针} \end{array} \right.$



→ 切割转子导体 $\xrightarrow[\text{右手定则}]{Blv}$ 感应电动势 E_{20}

→ 感应电流 I_2 } $\xrightarrow[\text{左手定则}]{Bli}$ 电磁力 F

→ 电磁转矩 T → n

7.2.3 转差率

由前面分析可知，电动机转子转动方向与磁场旋转的方向一致，但转子转速 n 不可能达到与旋转磁场的转速相等，即

$$n < n_0 \Rightarrow \text{异步电动机}$$

如果： $n = n_0$

→ 转子与旋转磁场间没有相对运动，磁通不切割转子导条

→ 无转子电动势和转子电流

→ 无转矩

因此，转子转速与旋转磁场转速间必须要有差别。

旋转磁场的同步转速和电动机转子转速之差与旋转磁场的同步转速之比称为**转差率**。

转差率 s

$$s = \left(\frac{n_0 - n}{n_0} \right) \times 100\%$$

转子转速亦可由转差率求得

$$n = (1 - s)n_0$$

异步电动机运行中： $s = (1 \sim 9)\%$

例1：一台三相异步电动机，其额定转速 $n=975 \text{ r/min}$ ，电源频率 $f_1=50 \text{ Hz}$ 。试求电动机的极对数和额定负载下的转差率。

解：根据异步电动机转子转速与旋转磁场同步转速的关系可知： $n_0=1000 \text{ r/min}$ ，即 $p=3$

额定转差率为

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

7.3 三相异步电动机的电路分析

三相异步电动机的电磁关系与变压器类似。

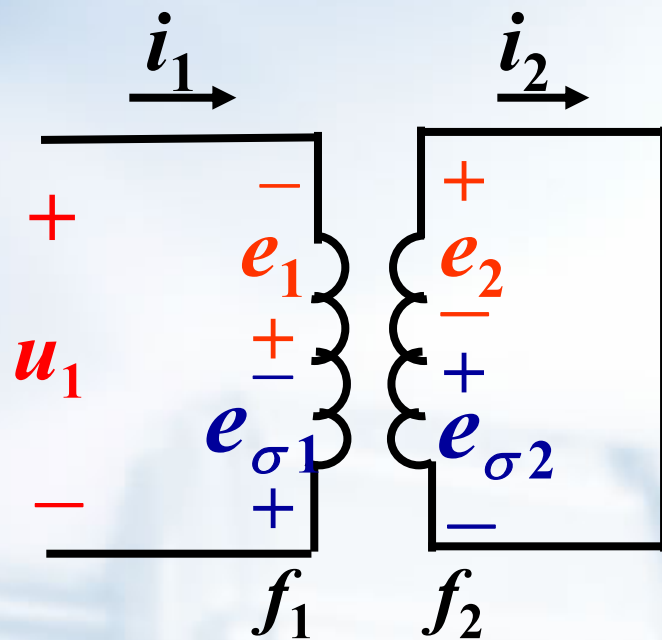
变压器： Φ 变化 $\rightarrow e$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi$$

E_1 、 E_2 频率相同，都等于电源频率。

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$



异步电动机每相电路

7.3.1 定子电路

1. 旋转磁场的磁通 Φ

异步电动机：旋转磁场切割导体 $\rightarrow e$,

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

每极磁通

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4.44 f_1 N_1}$$

$$\Phi \propto U_1$$

2. 定子感应电势的频率 f_1

感应电势的频率与磁场和导体间的相对速度有关
旋转磁场与定子导体间的相对速度为 n_0 ，所以

$$f_1 \approx \frac{pn_0}{60}$$

$$f_1 = \text{电源频率 } f$$

7.3.2 转子电路

1. 转子感应电势频率 f_2

∴ 定子导体与旋转磁场间的相对速度固定，而转子导体与旋转磁场间的相对速度随转子的转速不同而变化

∴ 旋转磁场切割定子导体和转子导体的速度不同

∴ 定子感应电势频率 $f_1 \neq$ 转子感应电势频率 f_2

转子感应电势频率 f_2

$$f_2 = \frac{n_0 - n}{60} p = \frac{n_0 - n}{n_0} \times \frac{n_0 p}{60} = s f_1$$

2. 转子感应电动势 E_2

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 \Phi = 4.44 s f_1 N_2 \Phi$$

当转速 $n = 0 (s=1)$ 时, f_2 最高, 且 E_2 最大, 有

$$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 \Phi$$

转子静止时的
感应电势

$$\text{即 } E_2 = s E_{20}$$

转子转动时的
感应电势

3. 转子感抗 X_2

$$X_2 = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2}$$

当转速 $n = 0 (s=1)$ 时, f_2 最高, 且 X_2 最大, 有

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}$$

$$\text{即 } X_2 = s X_{20}$$

4. 转子电流 I_2

转子绕组的感应电流

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

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

$$\begin{cases} s=0 \rightarrow I_2 = 0 (n=n_0) \\ s=1 \rightarrow I_{2\max} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \end{cases}$$

5. 转子电路的功率因数 $\cos \psi_2$

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

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

$$\begin{cases} s \text{ 很小时 } R_2 \gg sX_{20} \\ \cos \psi_2 \approx 1 \\ s \text{ 较大时 } R_2 \ll sX_{20} \\ \cos \psi_2 \propto \frac{1}{s} \end{cases}$$

I_2 、 $\cos \psi_2$ 随 s 变化曲线

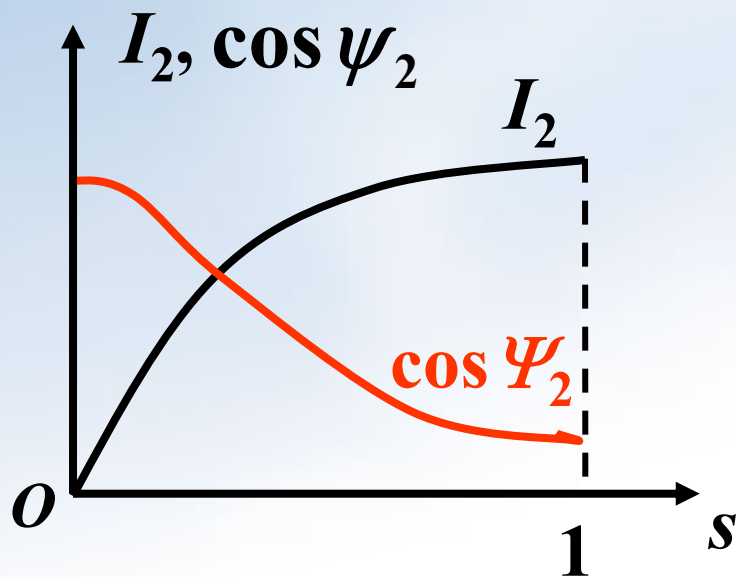
转子绕组的感应电流

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (n \uparrow \rightarrow s \downarrow \rightarrow I_2 \downarrow)$$

转子电路的功率因数

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

$(n \uparrow \rightarrow s \downarrow \rightarrow \cos \psi_2 \uparrow)$



结论：转子转动时，转子电路中的各量均与转差率 s 有关，即与转速 n 有关。

7.4 三相异步电动机转矩与机械特性

7.4.1 转矩公式

转子中各载流导体在旋转磁场的作用下,受到电磁力所形成的转矩之总和。

$$F = B l i$$

$$T \propto \Phi, I_2, \cos \psi_2$$

$$T = K_T \Phi I_2 \cos \psi_2$$

常数, 与电机结构有关

旋转磁场
每极磁通

转子电流

转子电路的
功率因数

$$T = K_T \Phi I_2 \cos \psi_2$$

由前面分析知：

$$\begin{cases} I_2 = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \\ \cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \\ U_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m \end{cases}$$

由此得电磁转矩公式

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

电磁转矩公式

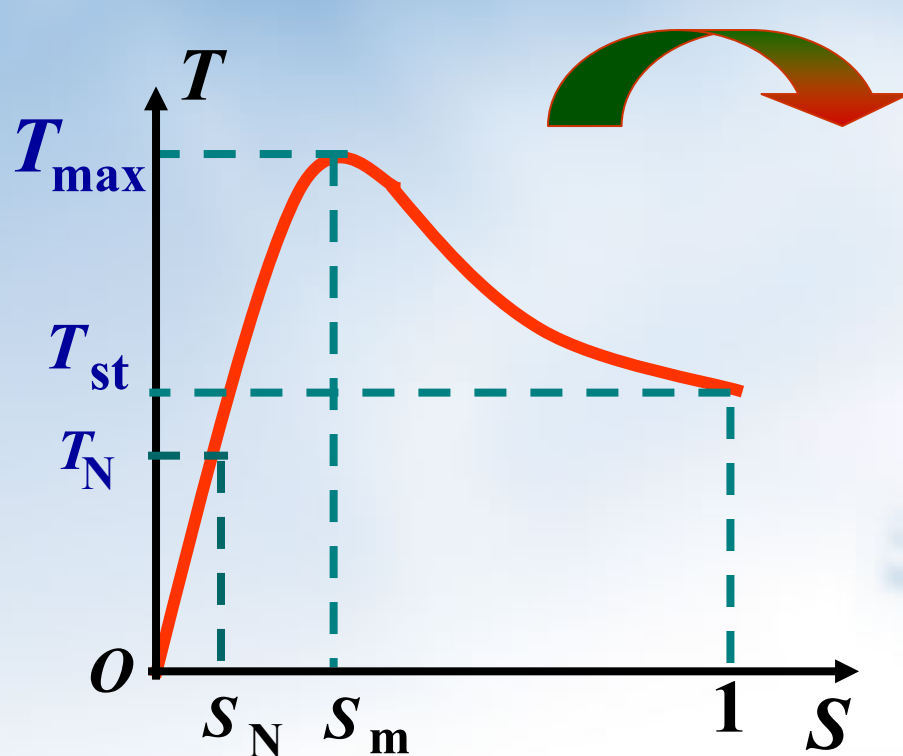
$$T = K \frac{sR_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \cdot U_1^2$$

由公式可知

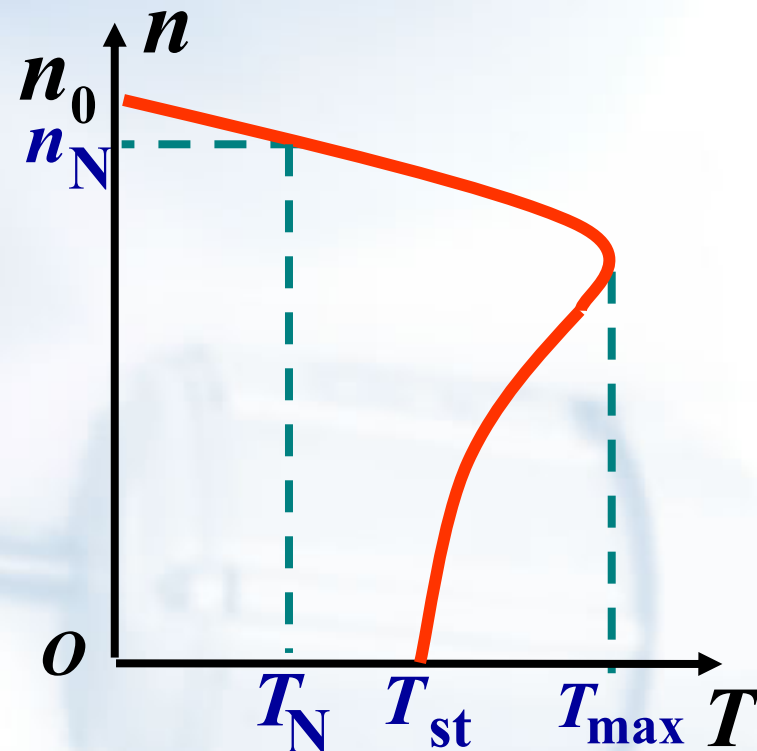
1. T 与定子每相绕组电压 U_1^2 成正比。 $U_1 \downarrow \rightarrow T \downarrow \downarrow$
2. 当电源电压 U_1 一定时， T 是 s 的函数。
3. R_2 的大小对 T 有影响。绕线型异步电动机可外接电阻来改变转子电阻 R_2 ，从而改变转距。

7.4.2 机械特性曲线

根据转矩公式 $T = K \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2}$
得特性曲线:



$T = f(s)$ 曲线



$n = f(T)$ 曲线

三个重要转矩

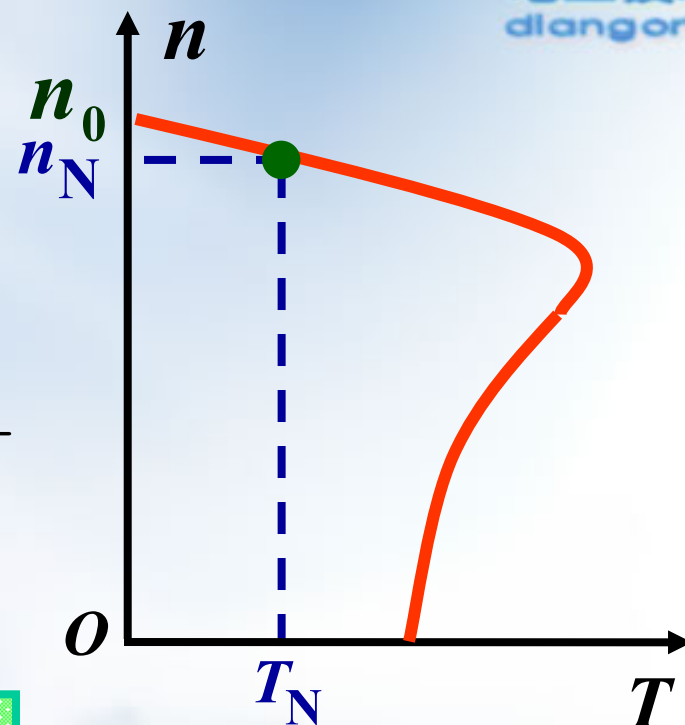
1. 额定转矩 T_N

电动机在额定负载时的转矩。

$$T = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = 9550 \frac{P}{n}$$

额定转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N (\text{千瓦})}{n_N (\text{转/分})}$$



(N · m)

如某普通机床的主轴电机(Y132M-4型)的额定功率为7.5kw, 额定转速为1440r/min, 则额定转矩为

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \frac{7.5}{1440} = 49.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2. 最大转矩 T_{\max}

电机带动最大负载的能力。

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

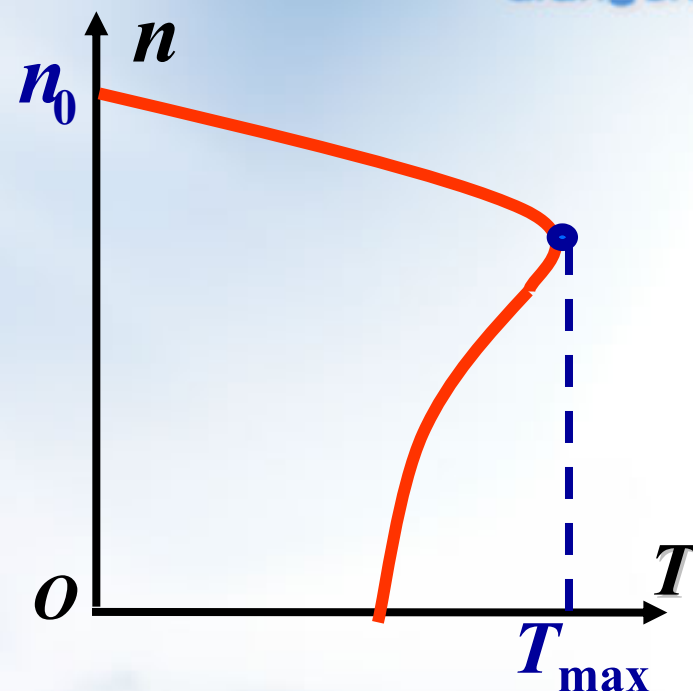
令： $\frac{dT}{dS} = 0$ 求得

$$S = S_m = \frac{R_2}{X_{20}}$$

临界转差率

将 S_m 代入转矩公式，可得

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



转子轴上机械负载转矩 T_2 不能大于 T_{\max} ，否则将造成堵转(停车)。

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

$$(1) T_{\max} \propto U_1^2, U_1 \downarrow \rightarrow T_{\max} \downarrow \downarrow$$

当 U_1 一定时, T_{\max} 为定值

(2) s_m 与 R_2 有关, $R_2 \uparrow \rightarrow s_m \uparrow \rightarrow n \downarrow$ 。绕线型电机改变转子附加电阻 R'_2 可实现调速。

$$\text{过载系数(能力)} \quad \lambda = \frac{T_{\max}}{T_N}$$

一般三相异步电动机的过载系数为

$$\lambda = 1.8 \sim 2.2$$

工作时必须使 $T_2 < T_{\max}$, 否则电机将停转。

$\Rightarrow I_2 \uparrow \Rightarrow I_1 \uparrow \Rightarrow$ 电机严重过热而烧坏。

3. 起动转矩 T_{st}

电动机起动时的转矩。

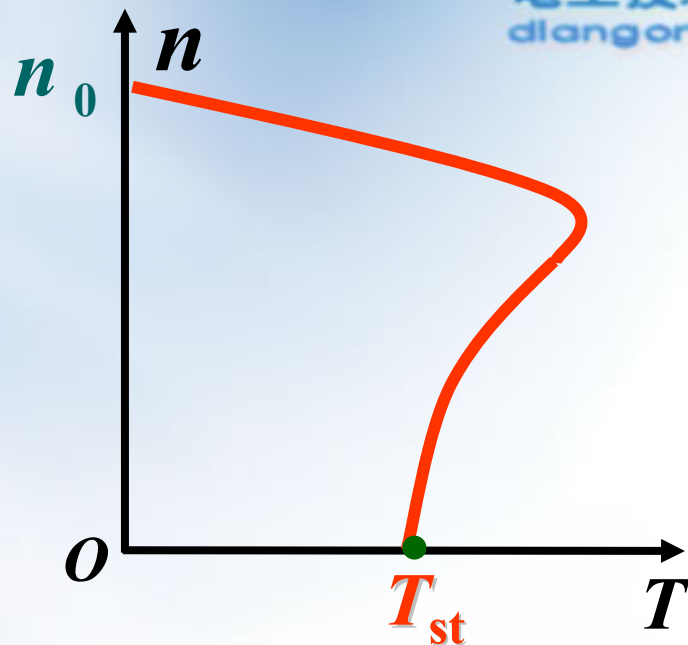
$$T = K \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2}$$

起动时 $n=0$ 时, $s=1$

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

(1) $T_{st} \propto U_1^2$, $U_1 \downarrow \rightarrow T_{st} \downarrow \downarrow$

(2) T_{st} 与 R_2 有关, 适当使 $R_2 \uparrow \rightarrow T_{st} \uparrow$ 。对绕线式型电机改变转子附加电阻 R'_2 , 可使 $T_{st} = T_{max}$ 。



T_{st} 体现了电动机带载起动的能力。

若 $T_{st} > T_2$ 电机能起动, 否则不能起动。

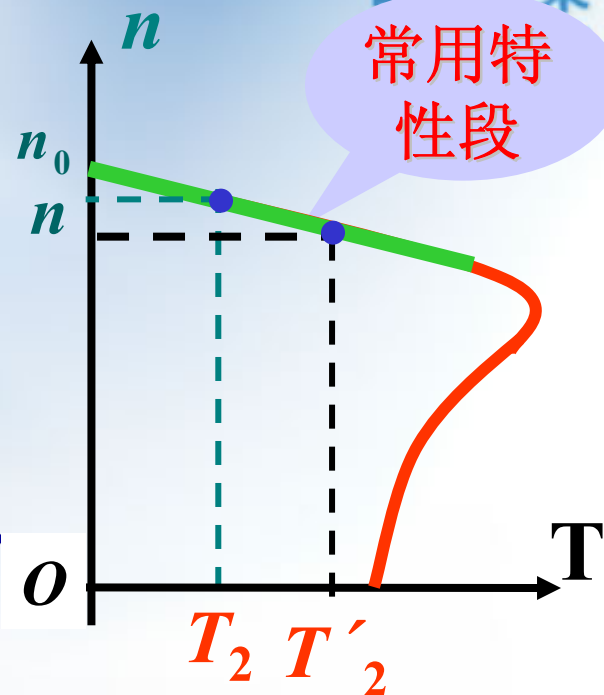
起动能力 $K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$

4. 电动机的运行分析

$$T_2 \uparrow \xrightarrow{T_2 > T} n \downarrow \rightarrow s \uparrow \rightarrow T \uparrow$$

达到新的平衡 $T = T_2 \leftarrow$

此过程中, $n \downarrow$ 、 $s \uparrow \rightarrow E_2, I_2 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow$
 \rightarrow 电源提供的功率自动增加。

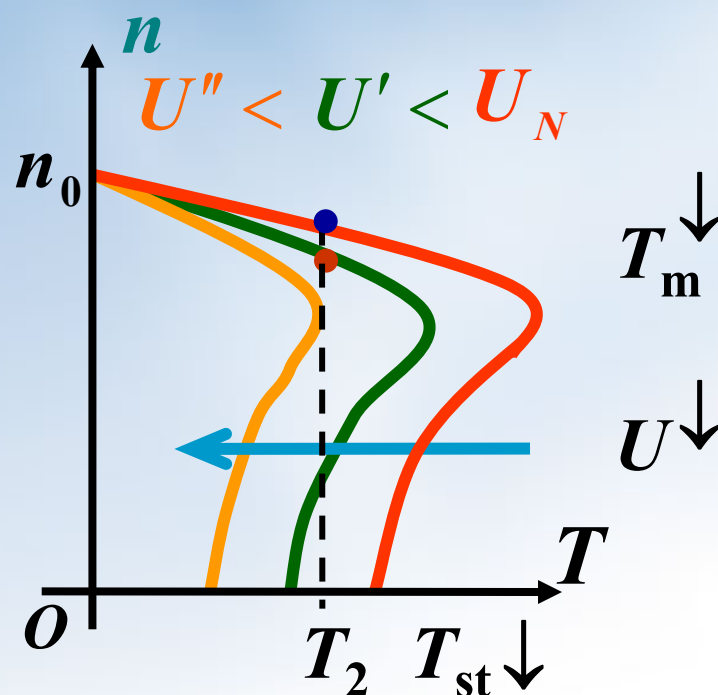


电动机的电磁转矩可以随负载的变化而自动调整, 这种能力称为自适应负载能力。

自适应负载能力是电动机区别于其它动力机械的重要特点 (如: 柴油机当负载增加时, 必须由操作者加大油门, 才能带动新的负载)。

5. U_1 和 R_2 变化对机械特性的影响

(1) U_1 变化对机械特性的影响

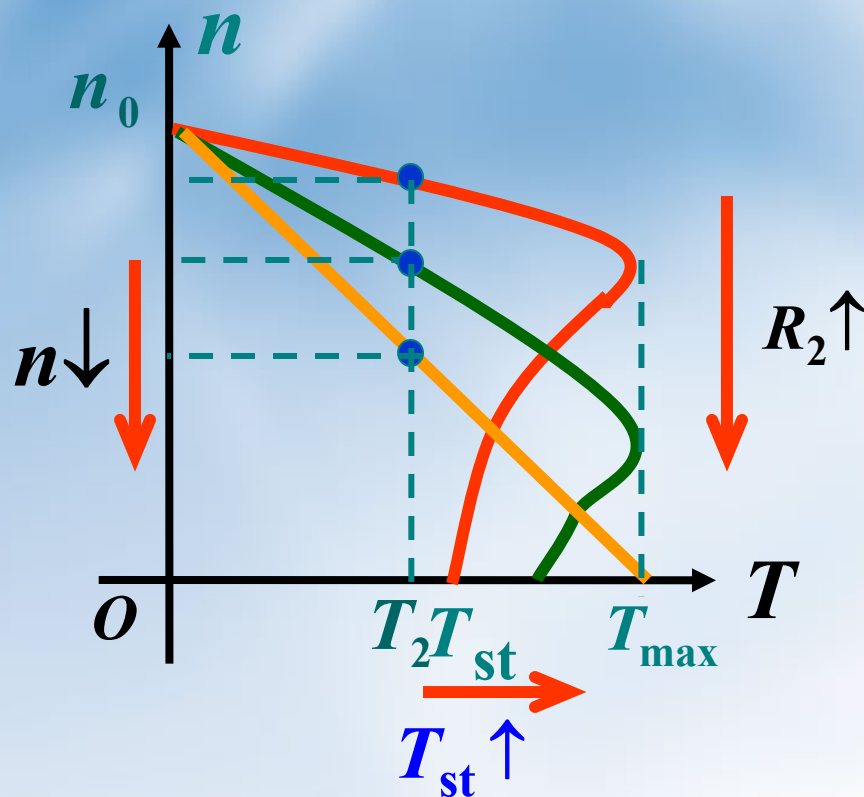


$$s_m = \frac{R_2}{X_{20}}$$

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

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

(2) R_2 变化对机械特性的影响



$$s_m = \frac{R_2}{X_{20}}$$

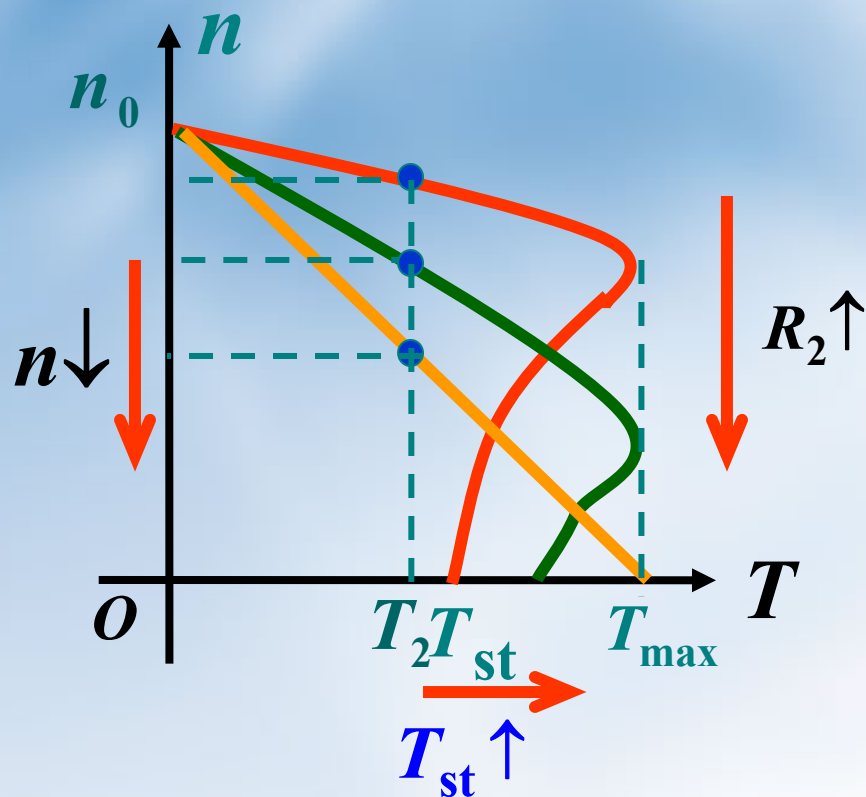
$$T_m = K \frac{U_1^2}{2 X_{20}}$$

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

硬特性：负载变化时，转速变化不大，运行特性好。

软特性：负载增加时转速下降较快，但起动转矩大，起动特性好。 \

(2) R_2 变化对机械特性的影响



不同场合应选用不同的电机。如金属切削，选硬特性电机；重载起动则选软特性电机。

硬特性：负载变化时，转速变化不大，运行特性好。

软特性：负载增加时转速下降较快，但起动转矩大，起动特性好。

7.5 三相异步电动机的起动

7.5.1 起动性能

起动： $n = 0$ ， $s = 1$ ，接通电源。

起动问题： 起动电流大，起动转矩小。

一般中小型笼型电机起动电流为额定电流的5~7倍；电动机的起动转矩为额定转矩的(1.0~2.2)倍。

原因：

起动时， $n = 0$ ，转子导体切割磁力线速度很大，
 → 转子感应电势 ↑ → 转子电流 ↑ → 定子电流 ↑

后果：

{ 频繁起动时造成热量积累，使电机过热
 { 大电流使电网电压降低，影响邻近负载的工作

7.5.2 起动方法

(1) 直接起动

二、三十千瓦以下的异步电动机一般都采用直接起动。

(2) 降压起动: { 星形-三角形(Y- Δ) 换接起动
 { 自耦降压起动
 (适用于笼型电动机)

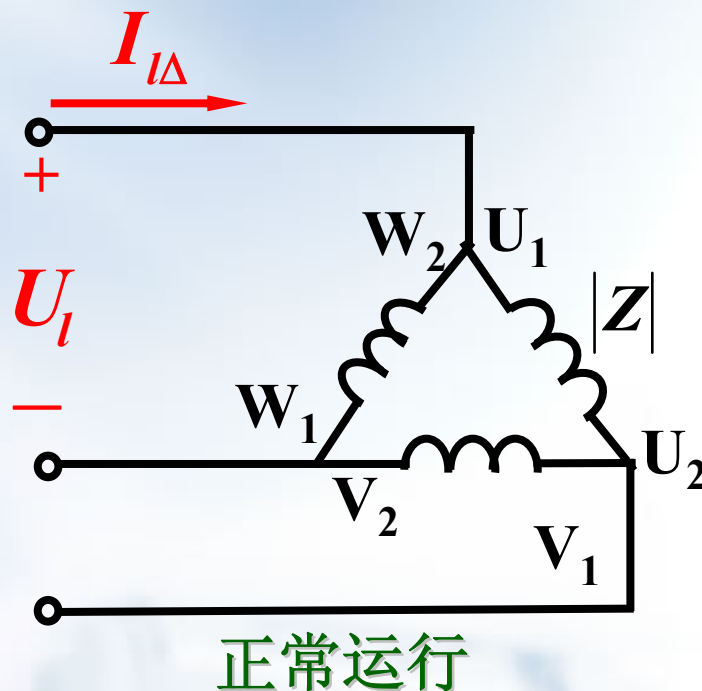
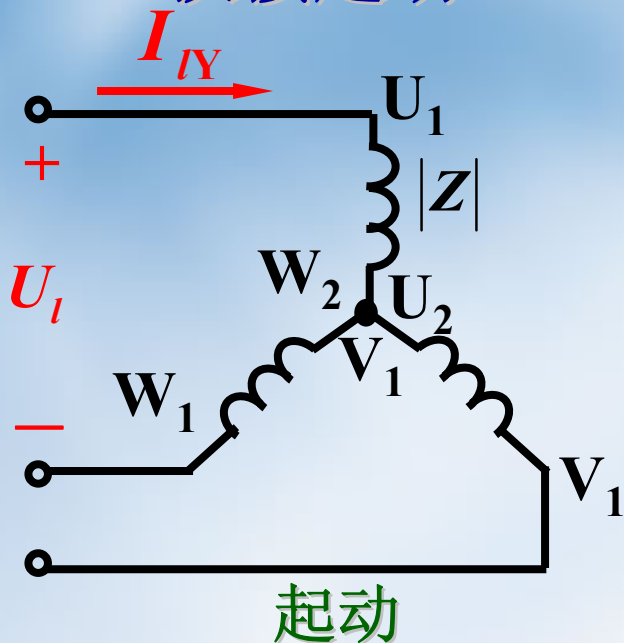
(3) 转子串电阻起动

(适用于绕线型电动机)

以下介绍降压起动和转子串电阻起动。

1. 降压起动

(1) Y-Δ换接起动



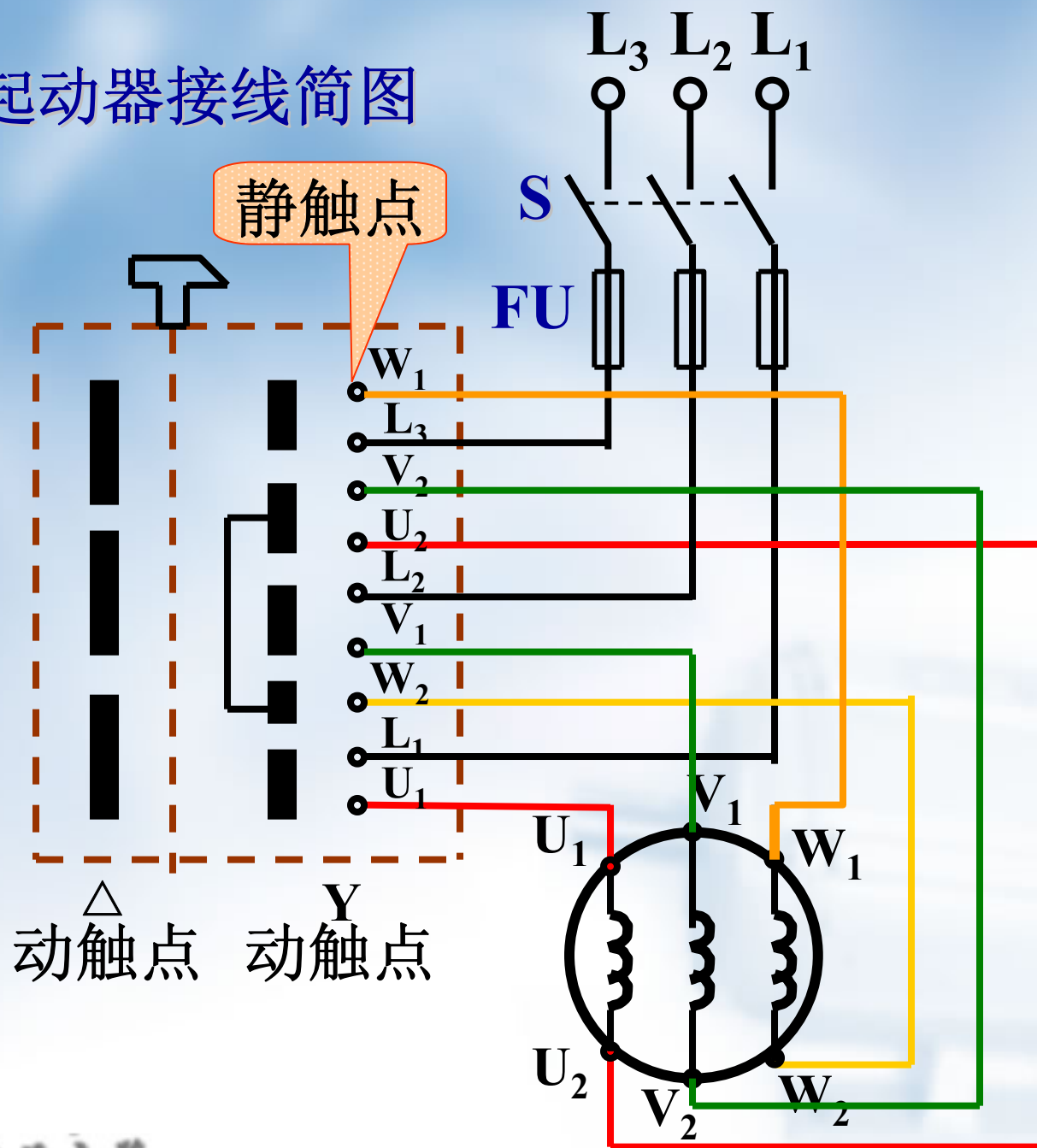
设：电机每相阻抗为 $|Z|$

$$\left. \begin{array}{l} \text{三角形联结时: } I_{l\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_l}{|Z|} \\ \text{星形联结时: } I_{lY} = \frac{U_l}{\sqrt{3} |Z|} \end{array} \right\}$$

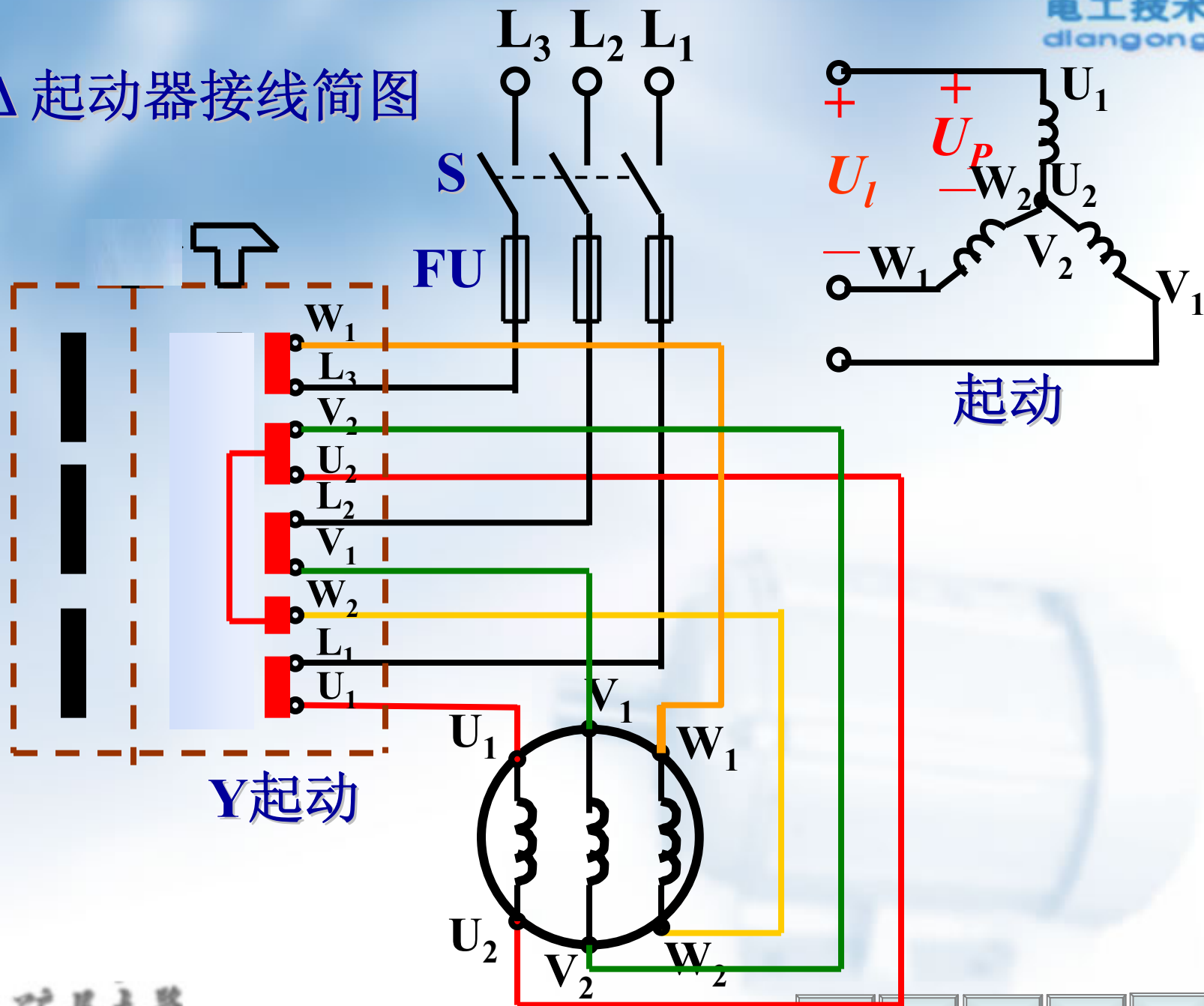
$$\frac{I_{lY}}{I_{l\Delta}} = \frac{1}{3}$$

∴ 降压起动时的电流
为直接起动时的 $\frac{1}{3}$

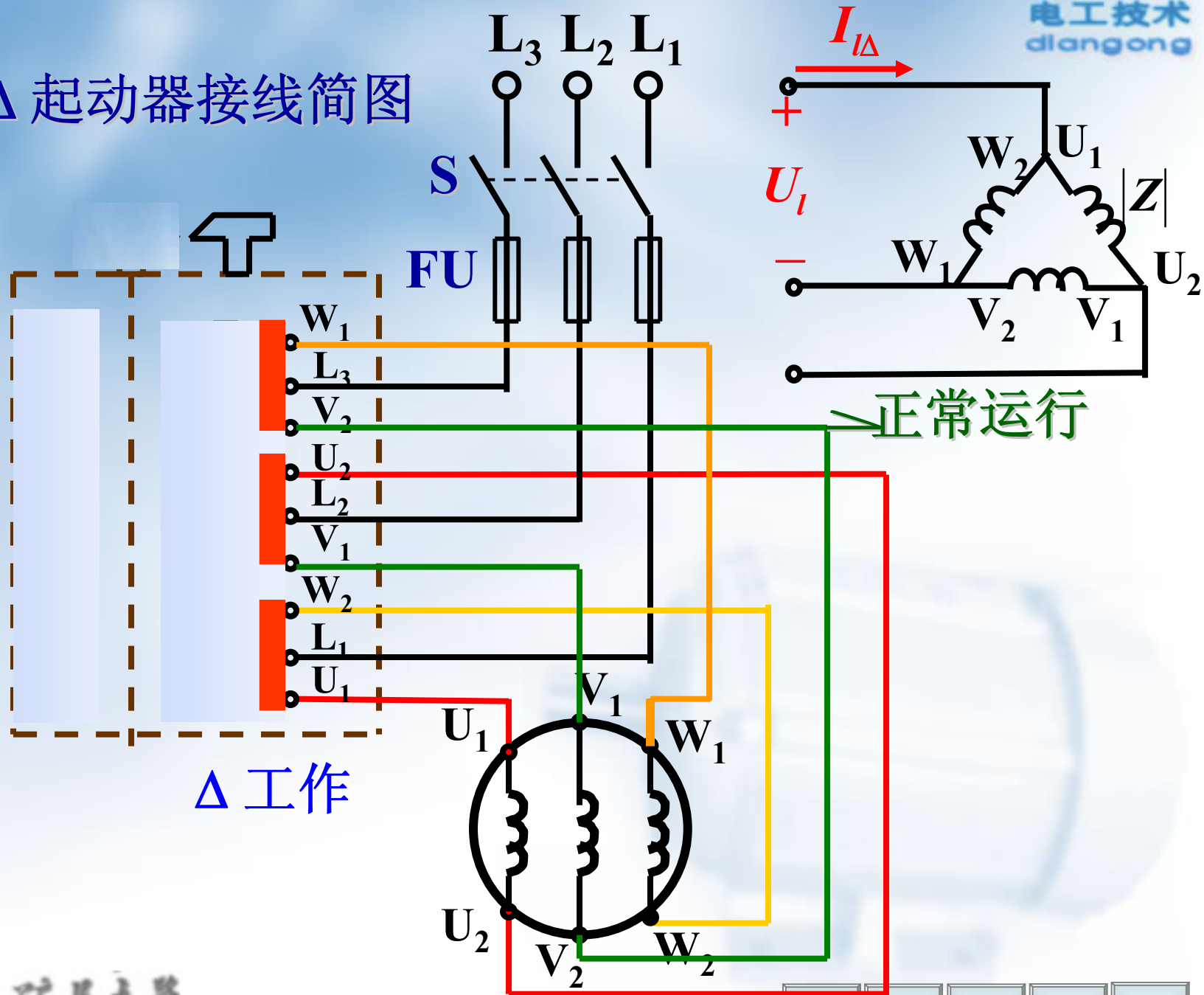
Y-Δ 起动器接线简图



Y-Δ 起动器接线简图

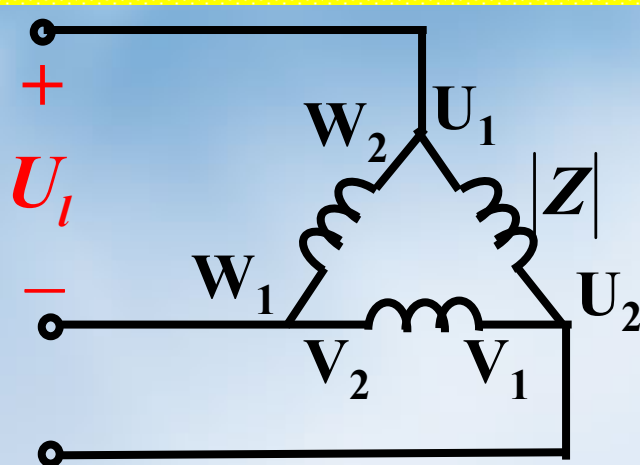


Y-Δ 起动器接线简图



Y-Δ换接起动应注意的问题

(a) 仅适用于正常运行为三角形联结的电机。



正常运行



起动

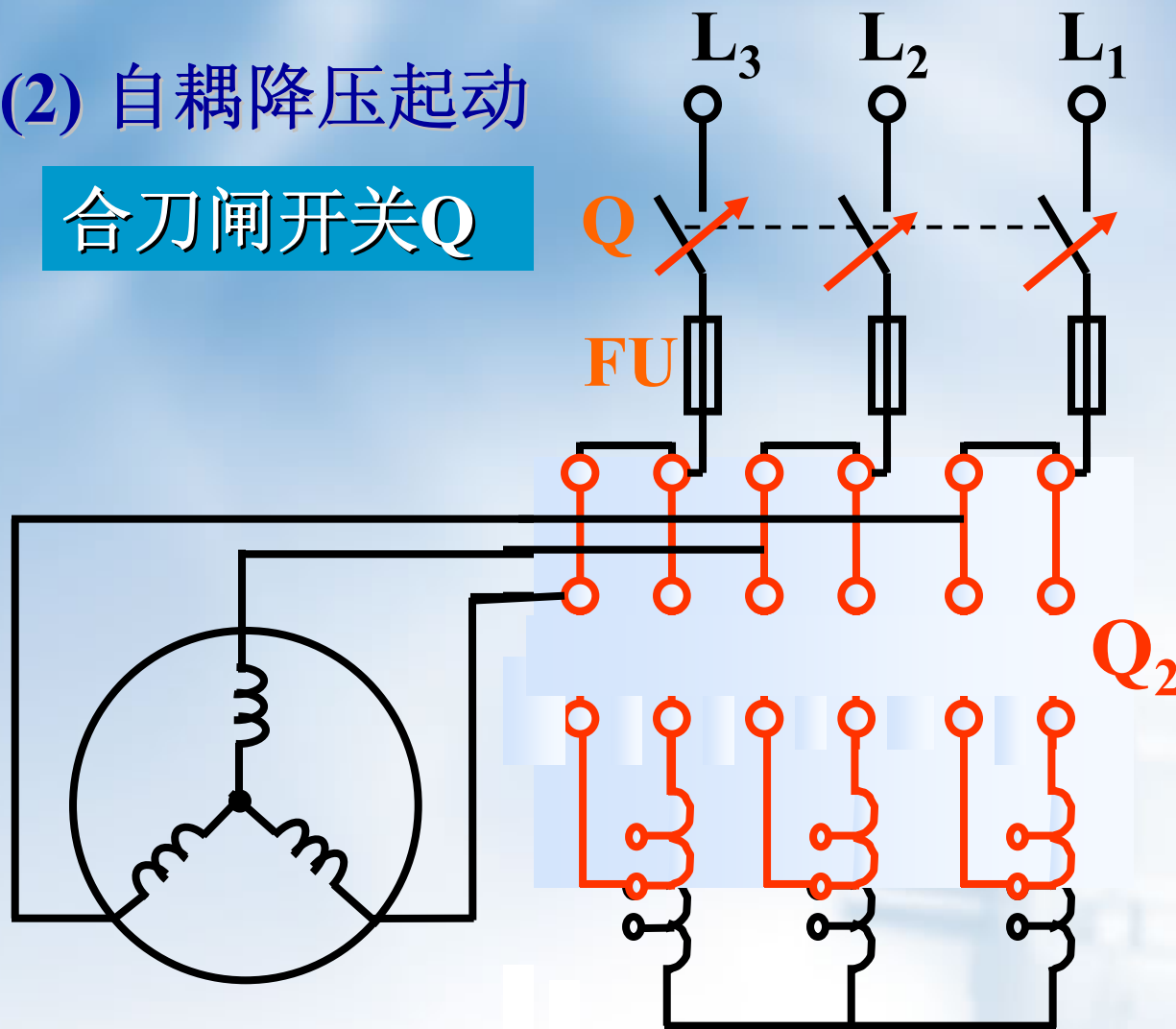
(b) Y-Δ 起动 $I_{st} \downarrow \rightarrow T_{st} \downarrow$ ($T_{st} \propto U^2$)

$$U_P = \frac{1}{\sqrt{3}} U_l \Rightarrow T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta}$$

Y-Δ 换接起动适合于空载或轻载起动的场合

(2) 自耦降压起动

合刀闸开关Q

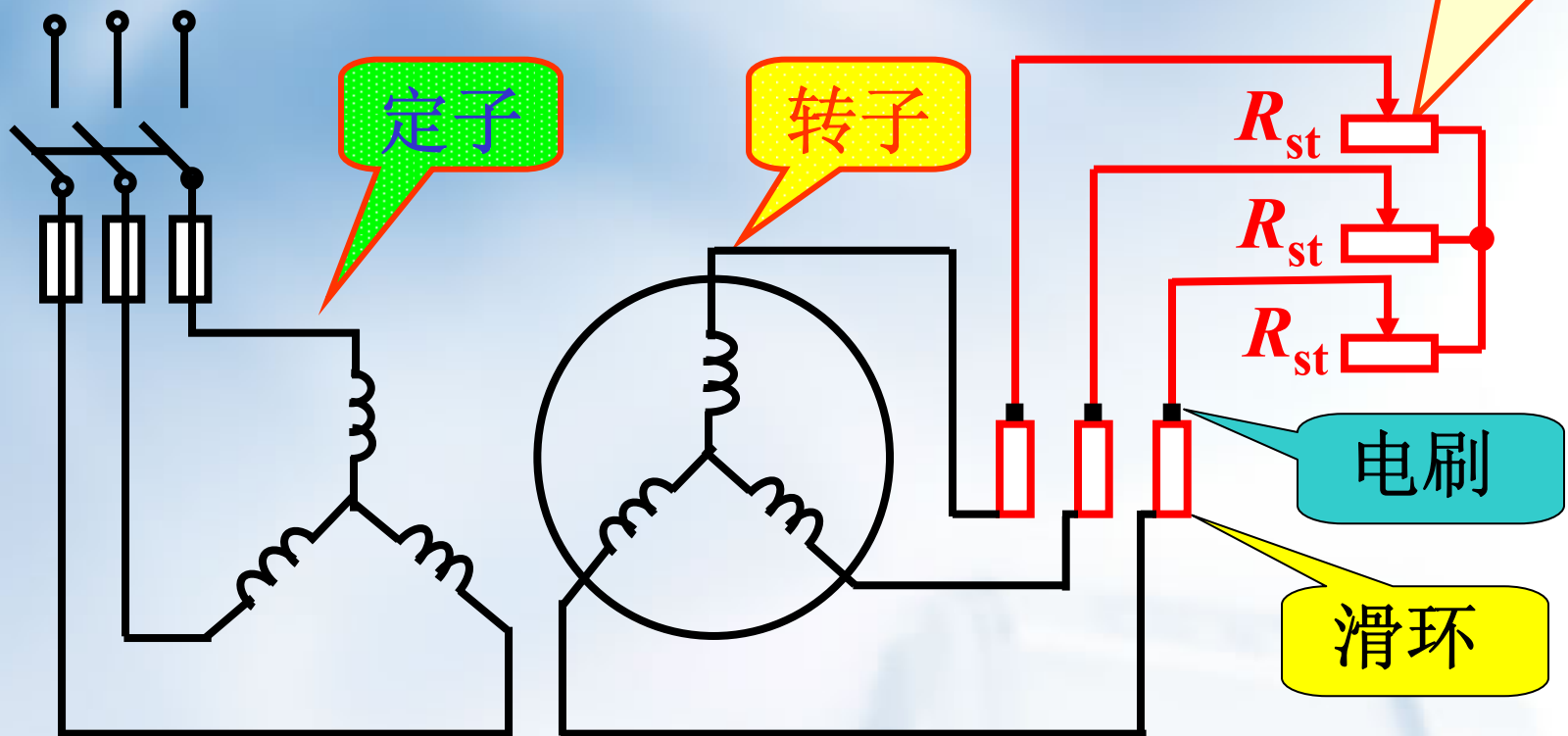


Q_2 上合:
切除自耦变
压器, 全压
工作。

Q_2 下合:
接入自耦变
压器, 降压
起动。

自耦降压起动适合于容量较大的或正常运行时联成 Y 形不能采用 Y- Δ 起动的笼型异步电动机。

2. 绕线型电动机转子电路串电阻起动



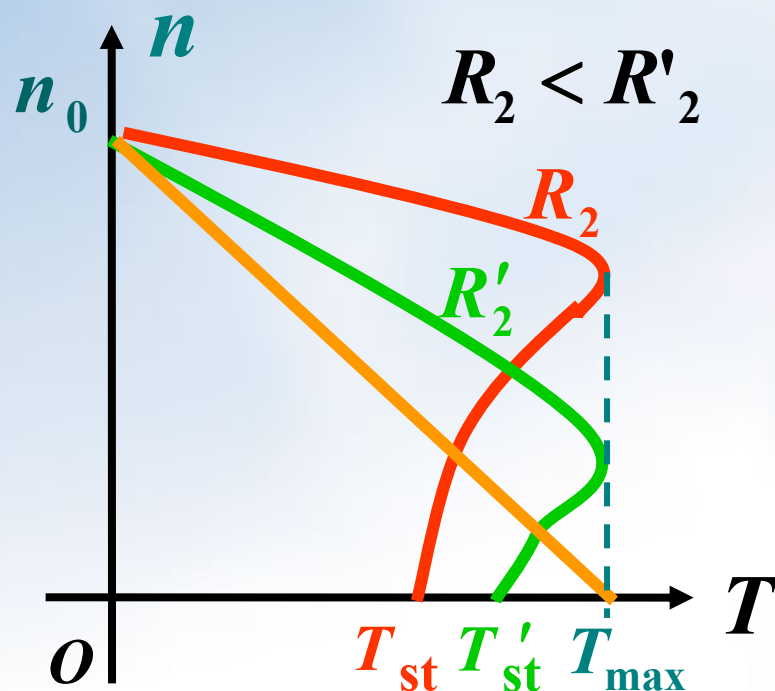
起动时将适当的 R 串入转子电路中，起动后将 R 短路。

$$I_{2st} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R'^2 + (X_{20})^2}} \Rightarrow R' \uparrow \Rightarrow I_2 \downarrow \Rightarrow I_1 \downarrow$$

转子电路串电阻起动的特点

若 R_2 选得适当，转子电路串电阻起动既可以降低起动电流，又可以增加起动转矩。

常用于要求起动转矩较大的生产机械上。

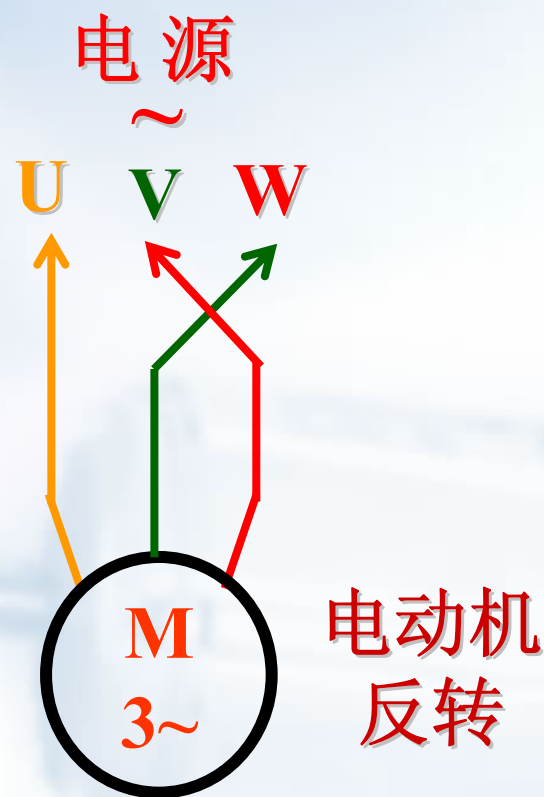
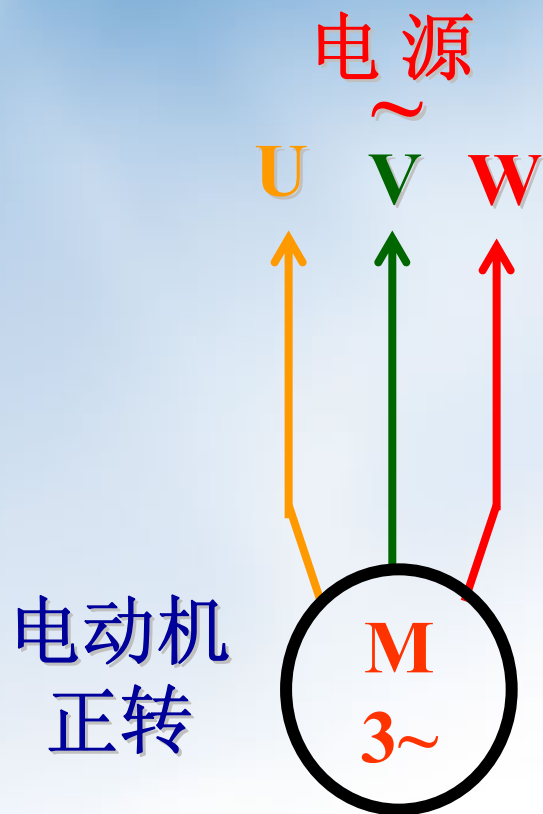


$$T_{st} = K \frac{R_2 U_1^2}{R_2^2 + X_{20}^2}$$

$$R_2 \uparrow \Rightarrow T_{st} \uparrow$$

三相异步电动机的正、反转

方法：任意调换电源的两根进线，电动机反转。



例1: 一台Y225M-4型的三相异步电动机，定子绕组 Δ 型联结，其额定数据为： $P_{2N}=45\text{kW}$ ， $n_N=1480\text{r/min}$ ， $U_N=380\text{V}$ ， $\eta_N=92.3\%$ ， $\cos\varphi_N=0.88$ ， $I_{st}/I_N=7.0$ ， $T_{st}/T_N=1.9$ ， $T_{\max}/T_N=2.2$ ，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} 、和起动转矩 T_N 。

解：(1)
$$I_N = \frac{P_{2N} \times 10^3}{\sqrt{3} U_N \cos\varphi_N \eta_N}$$
$$= \frac{45 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88 \times 0.923} = 84.2 \text{ A}$$

(2) 由 $n_N=1480\text{r/min}$, 可知 $p=2$ (四极电动机)

$$n_0 = 1500 \text{ r / min}$$

$$s_N = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.013$$

$$(3) T_N = 9550 \frac{P_{2N}}{n_N} = 9550 \times \frac{45}{1480} = 290.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{T_{\max}}{T_N} \right) T_N = 2.2 \times 290.4 = 638.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\text{st}} = \left(\frac{T_{\text{st}}}{T_N} \right) T_N = 1.9 \times 290.4 = 551.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

例2: 在上例中(1)如果负载转矩为 $510.2\text{N}\cdot\text{m}$, 试问在 $U=U_N$ 和 $U'=0.9U_N$ 两种情况下电动机能否起动? (2) 采用Y- Δ 换接起动时, 求起动电流和起动转矩。 又当负载转矩为起动转矩的80%和50%时, 电动机能否起动?

解: (1) 在 $U=U_N$ 时

$$T_{\text{st}} = 551.8\text{N}\cdot\text{m} > 510.2 \text{ N}\cdot\text{m} \quad \text{能起动}$$

在 $U' = 0.9U_N$ 时

$$T_{\text{st}} = 0.9^2 \times 551.8 = 447 \text{ N}\cdot\text{m} < 510.2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$(2) I_{\text{st}\Delta} = 7I_N = 7 \times 84.2 = 589.4 \text{ A} \quad \text{不能起动}$$

$$I_{\text{stY}} = \frac{1}{3} I_{\text{st}\Delta} = \frac{1}{3} \times 598.4 = 196.5 \text{ A}$$

$$(3) T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st\Delta} = \frac{1}{3} \times 551.8 = 183.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

在80%额定负载时

$$\frac{T_{stY}}{T_N \times 80\%} = \frac{183.9}{290.4 \times 80\%} = \frac{183.9}{232.3} < 1 \quad \text{不能起动}$$

在50%额定负载时

$$\frac{T_{stY}}{T_N \times 50\%} = \frac{183.9}{290.4 \times 50\%} = \frac{183.9}{145.2} > 1 \quad \text{可以起动}$$

例3: 对例1中的电动机采用自耦变压器降压启动, 启动时加到电动机上的电压为额定电压的64%, 求这时的线路启动电流 I_{st}'' 和电动机的启动转矩 T_{st}' 。

解: 设电动机的启动电压为 U' , 电动机的启动电流为 I_{st}'

$$I_{st}' = \frac{U'}{|Z|} = \frac{0.64U_N}{|Z|} = 0.64I_{st}$$

依据变压器的一次、二次侧电压电流关系, 可求得线路启动电流 I_{st}'' 。

$$\frac{I''_{\text{st}}}{I'_{\text{st}}} = \frac{U'}{U_{\text{N}}} = 0.64$$

$$\begin{aligned} I''_{\text{st}} &= 0.64 I'_{\text{st}} = 0.64 \times 0.64 I_{\text{st}} = 0.64^2 I_{\text{st}} \\ &= 0.64^2 \times 589.4 = 241.4 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{又} \because T \propto U^2 \quad \therefore \frac{T'_{\text{st}}}{T_{\text{st}}} = \left(\frac{U'}{U_{\text{N}}} \right)^2 = 0.64^2$$

$$\begin{aligned} \therefore T'_{\text{st}} &= 0.64^2 T_{\text{st}} = 0.64^2 \times 551.8 \\ &= 226 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

结论：采用自耦降压法起动时，若加到电动机上的电压与额定电压之比为 x ，则线路 起动电流 I_{st}'' 为

$$I_{st}'' = x^2 I_{st}$$

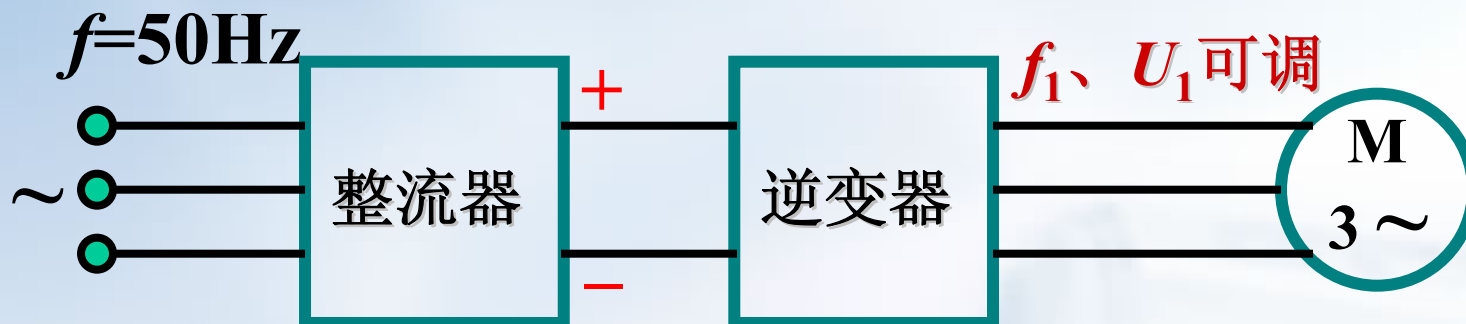
电动机的起动转矩 T_{st}' 为

$$T_{st}' = x^2 T_{st}$$

7.6 三相异步电动机的调速

$$n = (1 - s)n_0 = (1 - s)\frac{60 f_1}{p} \rightarrow \text{三种电气调速方法}$$

7.6.1 变频调速 (无级调速)

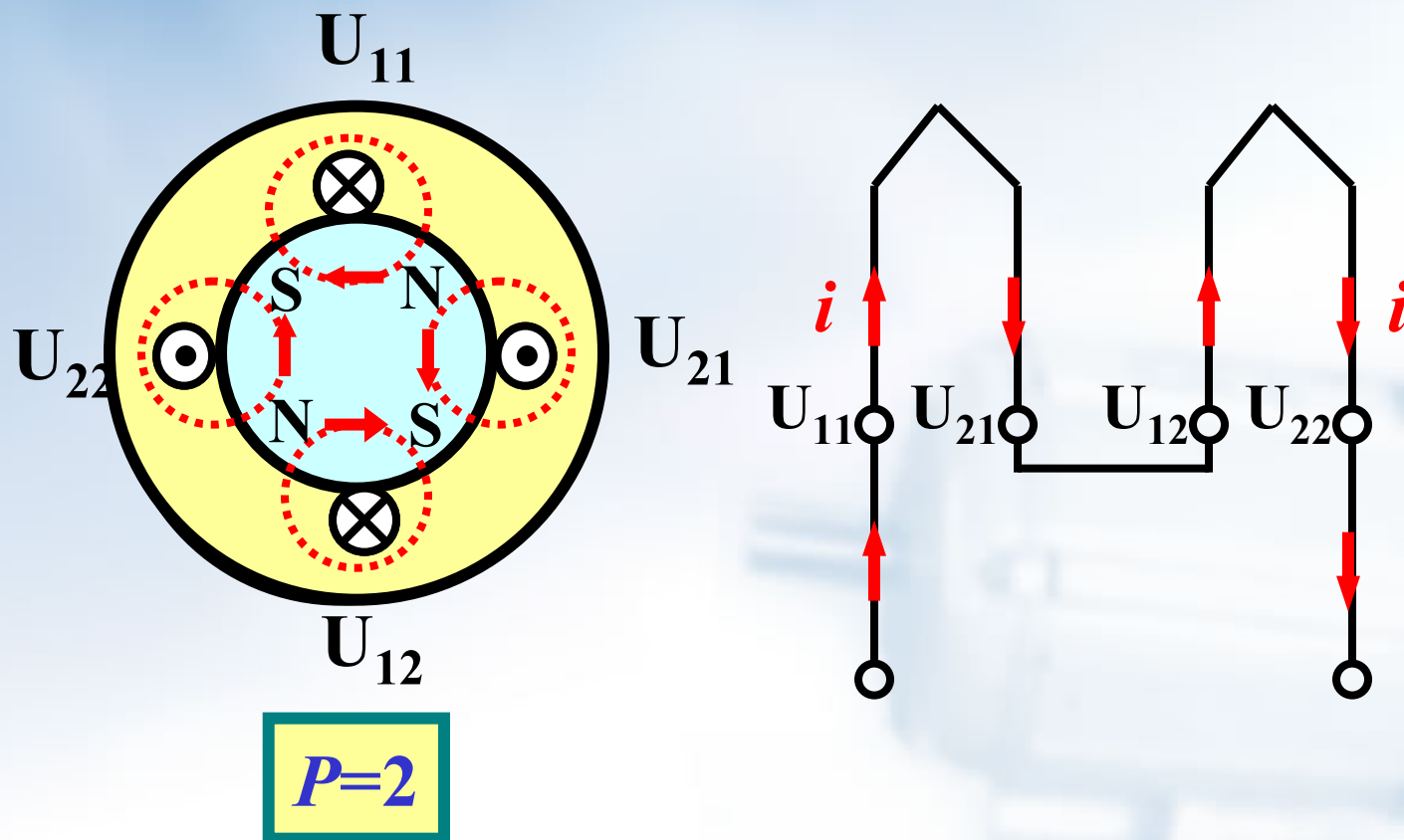


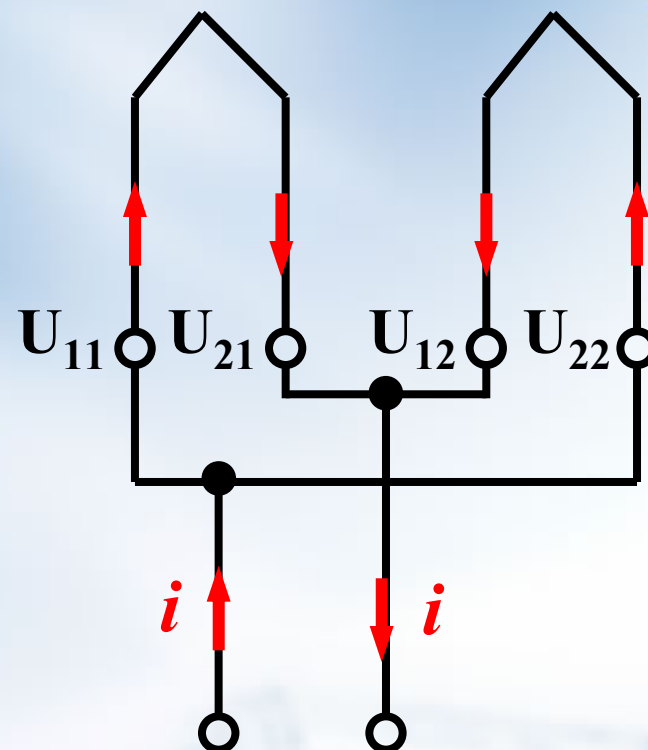
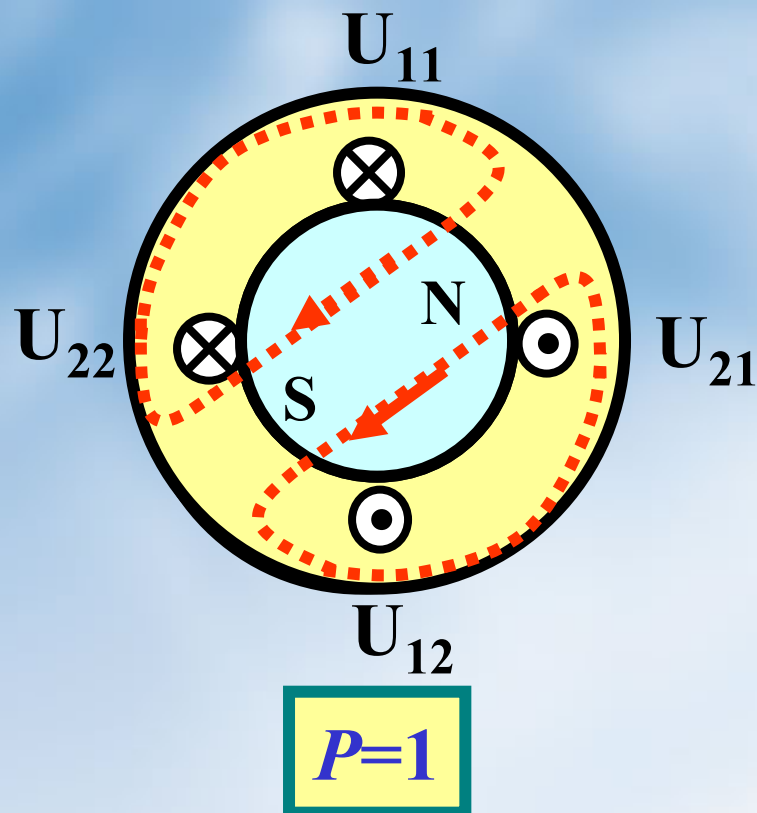
变频调速方法 { 恒转矩调速 ($f_1 < f_{1N}$)
恒功率调速 ($f_1 > f_{1N}$)

频率调节范围: **0.5~几百赫兹**

变频调速方法可实现无级平滑调速,调速性能优异,因而正获得越来越广泛的应用。

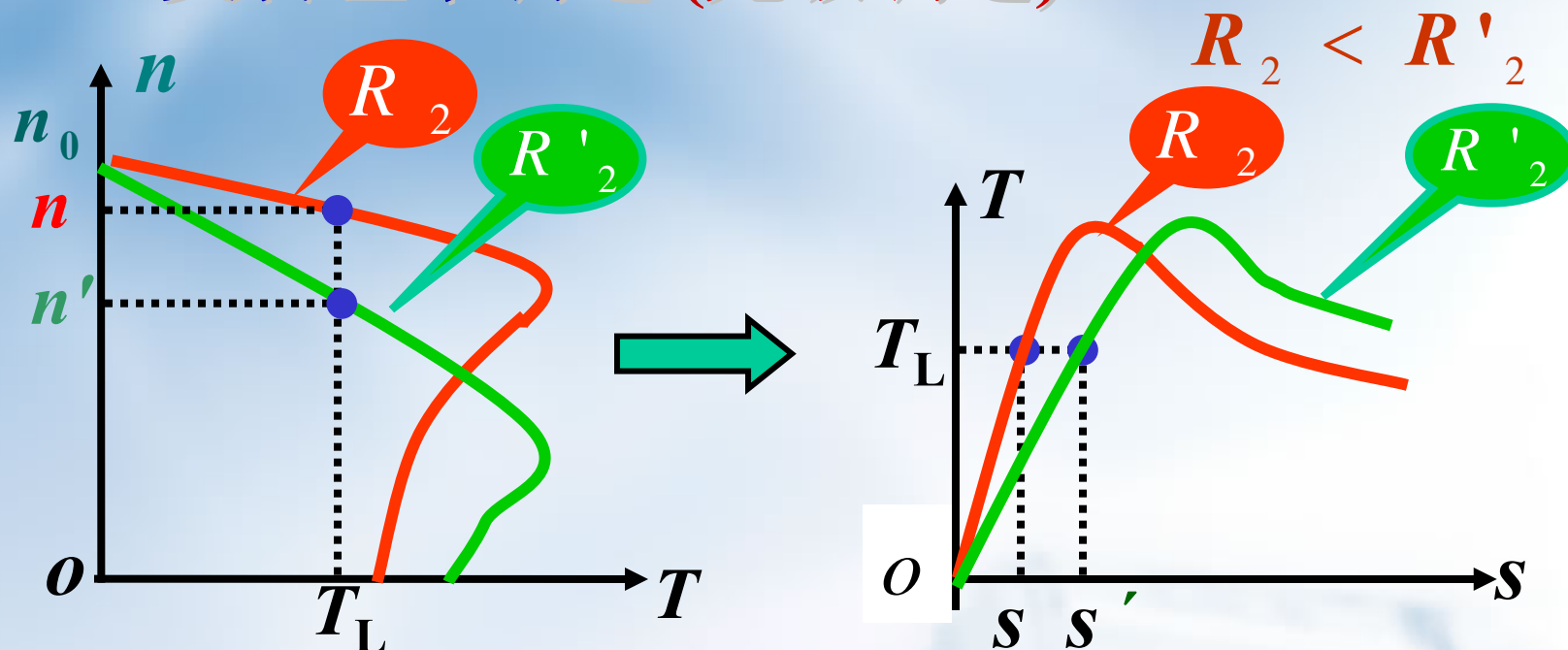
7.6.2 变极调速 (有级调速)





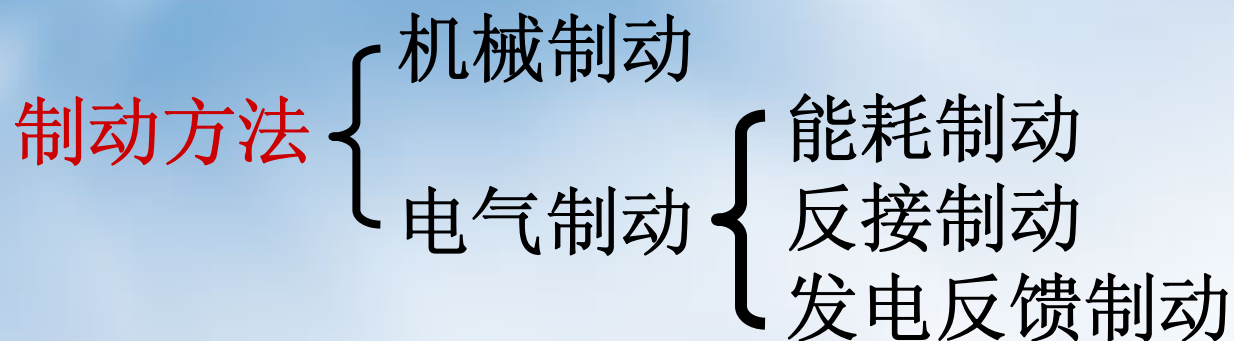
采用变极调速方法的电动机称作双速电机，由于调速时其转速呈跳跃性变化，因而只用在调速性能要求不高的场合，如铣床、刨床、磨床等机床上。

7.6.3 变转差率调速 (无级调速)



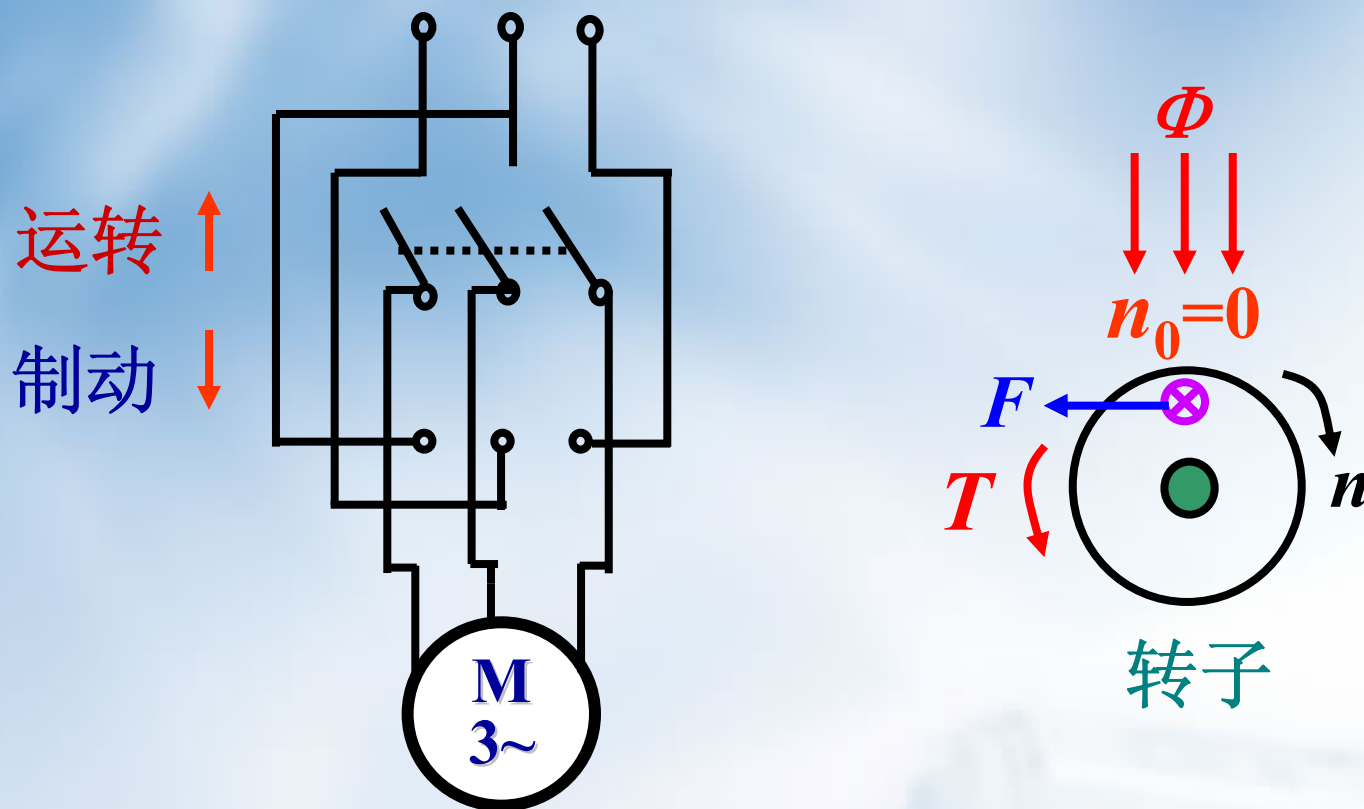
变转差率调速是绕线型电动机特有的一种调速方法。其优点是调速平滑、设备简单投资少，缺点是能耗较大。这种调速方式广泛应用于各种提升、起重设备中。

7.7 三相异步电动机的制动



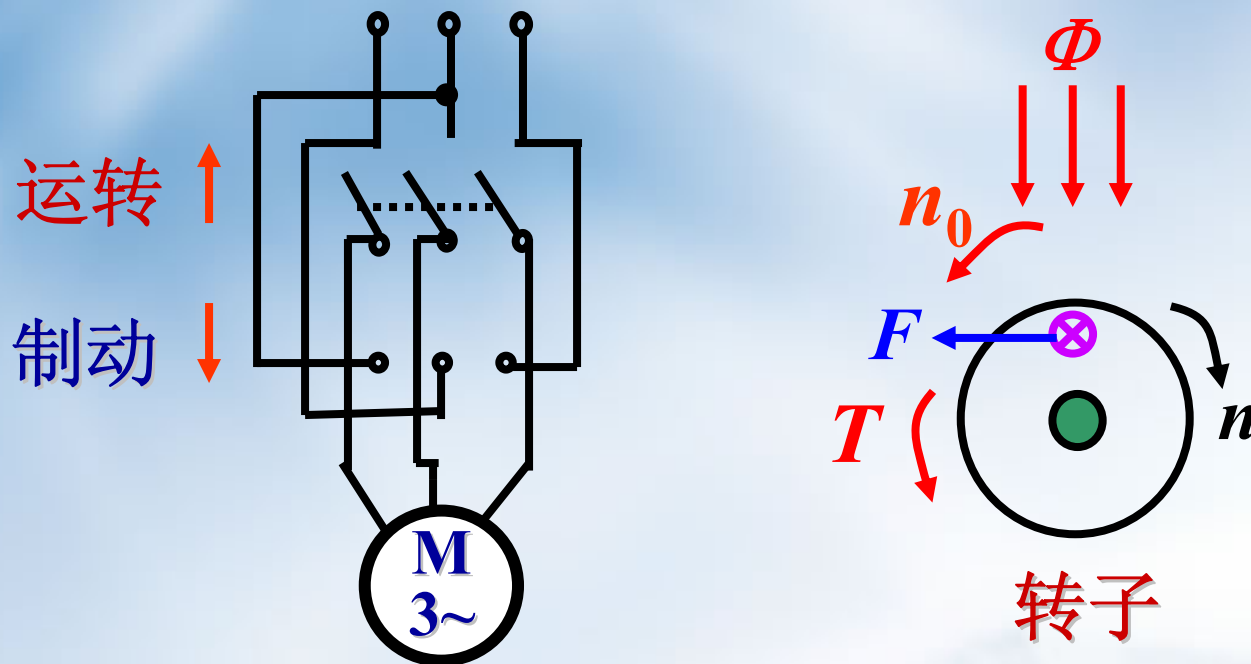
7.7.1 能耗制动

在断开三相电源的同时，给电动机其中两相绕组通入直流电流，直流电流形成的固定磁场与旋转的转子作用，产生了与转子旋转方向相反的转距（制动转距），使转子迅速停止转动。



7.7.2 反接制动

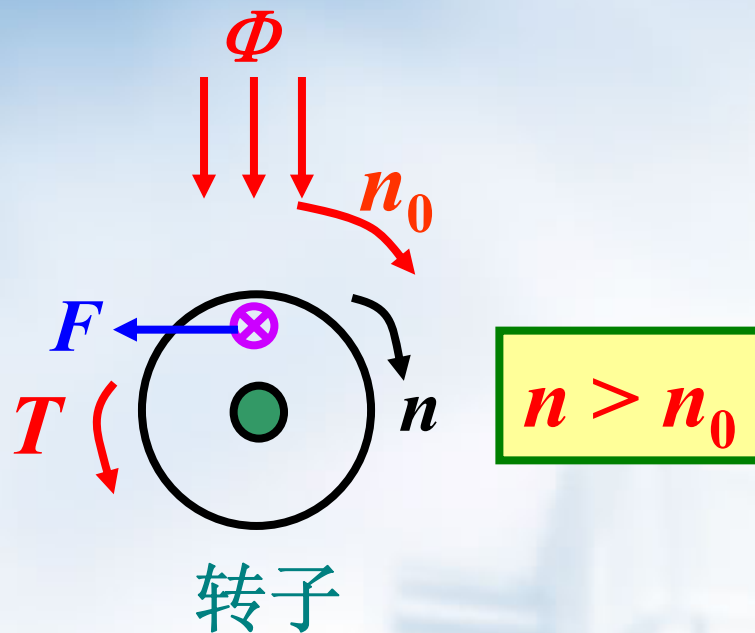
停车时，将接入电动机的三相电源线中的任意两相对调，使电动机定子产生一个与转子转动方向相反的旋转磁场，从而获得所需的制动转矩，使转子迅速停止转动。



7.7.3 发电反馈制动

当电动机转子的转速大于旋转磁场的转速时，旋转磁场产生的电磁转矩作用方向发生变化，由驱动转矩变为制动转矩。电动机进入制动状态，

同时将外力作用于转子的能量转换成电能回送给电网。



7.8 三相异步电动机铭牌数据

1. 型号

用以表明电动机的系列、几何尺寸和极数。

例如： Y 132 M—4



教材表8.8.1中列出了各种电动机的系列代号。

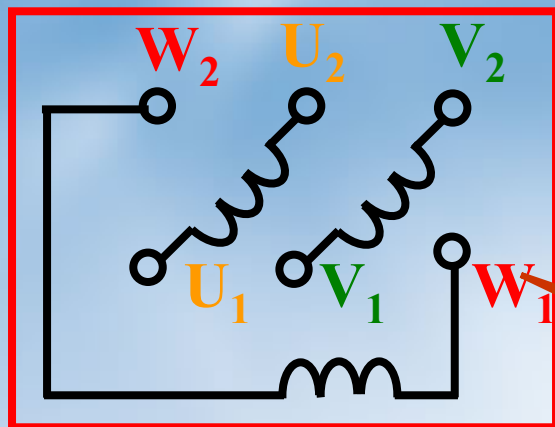
异步电动机产品名称代号

产品名称	新代号	汉字意义	老代号
异步电动机	Y	异	J、JO
绕线型异步电动机	YR	异绕	JR、JRO
防爆型异步电动机	YB	异爆	JB、JBO
高起动转矩异步电动机	YQ	异起	JQ、JQO

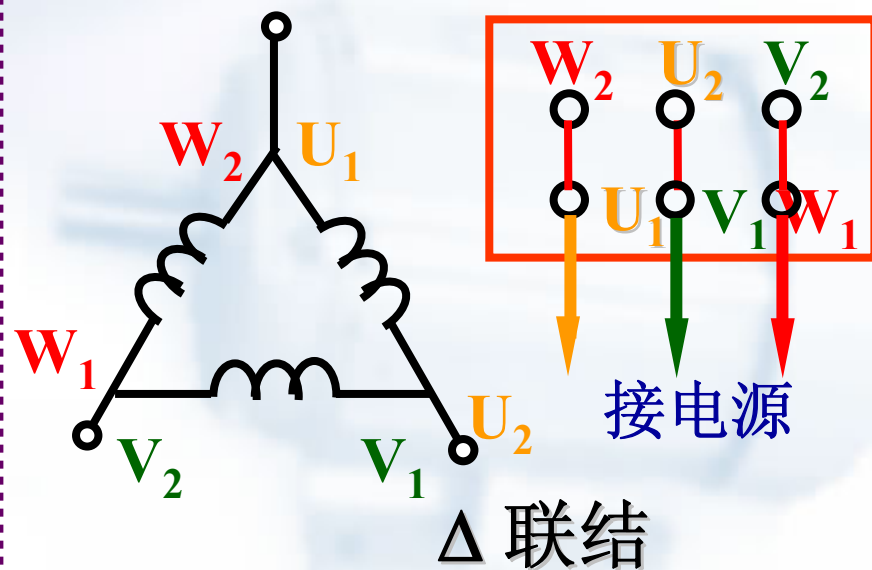
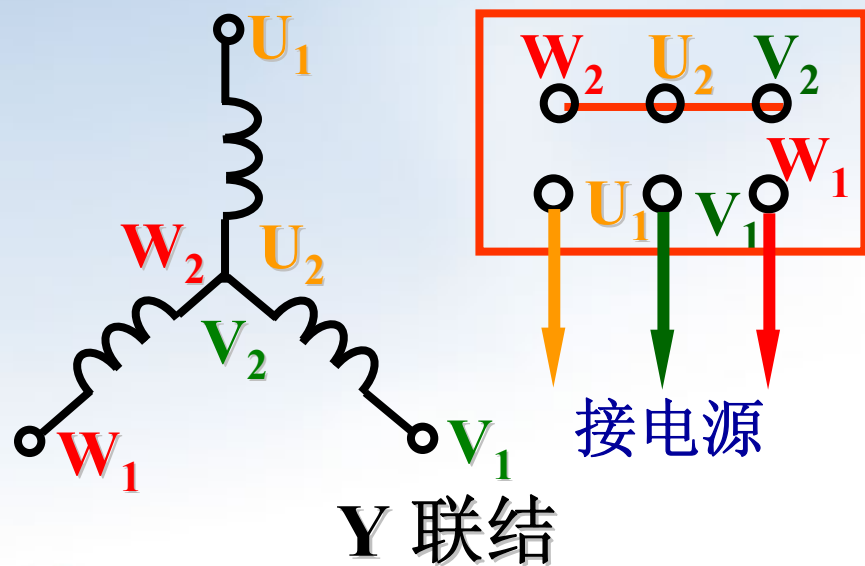
2. 接法

定子三相绕组的联接方法。通常

$\left\{ \begin{array}{l} \text{电机容量} < 3\text{kW} \rightarrow \text{Y联结} \\ \text{电机容量} > 4\text{kW} \rightarrow \Delta \text{联结} \end{array} \right.$



接线盒



3. 电压

电动机在额定运行时定子绕组上应加的线电压值。

例如：380/220V、Y/ Δ 是指线电压为 380V 时采用 Y 联结；线电压为 220V 时采用 Δ 联结。

说明：一般规定，电动机的运行电压不能高于或低于额定值的 5%。因为在电动机满载或接近满载情况下运行时，电压过高或过低都会使电动机的电流大于额定值，从而使电动机过热。三相异步电动机的额定电压有 380V，3000V，及 6000V 等多种。

4. 电流

电动机在额定运行时定子绕组的**线电流值**。

例如：Y / Δ 6.73 / 11.64 A 表示星形联结下电机的线电流为 6.73A；三角形联结下线电流为 11.64A。两种接法下相电流均为 6.73A

5. 功率与效率

额定功率是指电机在额定运行时轴上输出的机械功率 P_2 ，它不等于从电源吸取的电功率 P_1 。

$$P_1 = \sqrt{3}U_N I_N \cos \varphi$$

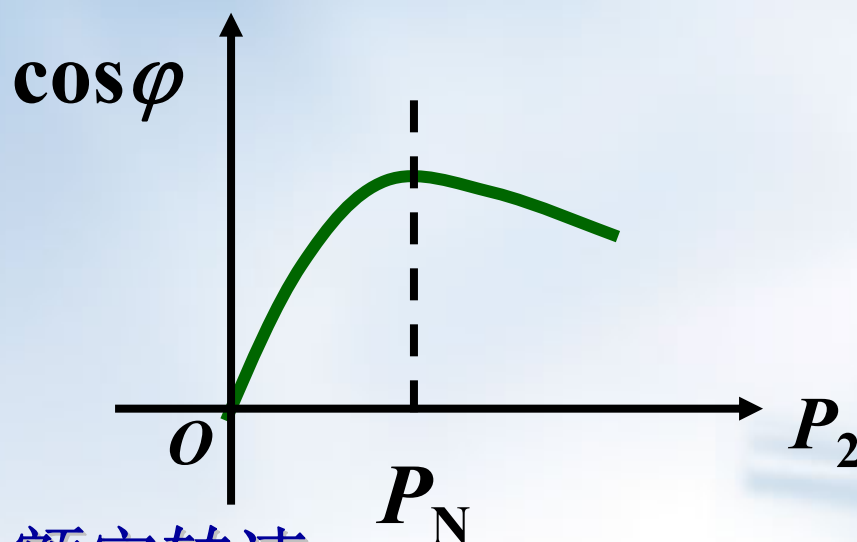
$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

鼠笼电机

$$\eta = 72 \sim 93 \%$$

6. 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 $0.7 \sim 0.9$ 。空载时功率因数很低，只有 $0.2 \sim 0.3$ 。额定负载时，功率因数最高。



注意：实用中应选择容量合适的电机，防止出现“大马拉小车”的现象。

7. 额定转速

电机在额定电压、额定负载下运行时的转速。

$$\text{额定转差率 } s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0}$$

如： $n_N = 1440$ 转/分

$$s_N = 0.04$$

8. 绝缘等级

指电机绝缘材料能够承受的极限温度等级，分为A、E、B、F、H五级，A级最低(105°C)，H级最高(180°C)。

7.9 三相异步电动机的选择

7.9.1 功率的选择

功率选得过大不经济，功率选得过小电动机容易因过载而损坏。

1. 对于连续运行的电动机，所选功率应等于或略大于生产机械的功率。
2. 对于短时工作的电动机，允许在运行中有短暂的过载，故所选功率可等于或略小于生产机械的功率。

7.9.2 种类和型式的选择

1. 种类的选择

一般应用场合应尽可能选用笼型电动机。只有在需要调速、不能采用笼型电动机的场合才选用绕线型电动机。

2. 结构型式的选择

根据工作环境的条件选择不同的结构型式，如开启式、防护式、封闭式电动机。

7.9.3 电压和转速的选择

根据电动机的类型、功率以及使用地点的电源电压来决定。

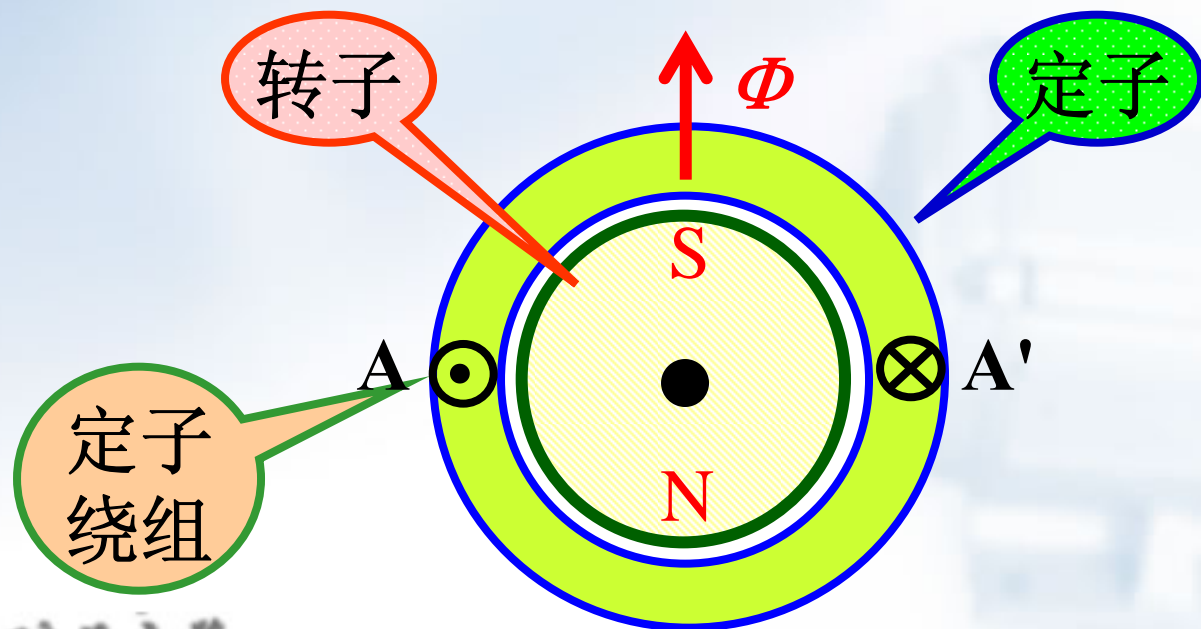
Y系列笼型电动机的额定电压只有380V一个等级。大功率电动机才采用3000V和6000V。

7.11 单相异步电动机

7.11.1 单相异步电动机的工作原理

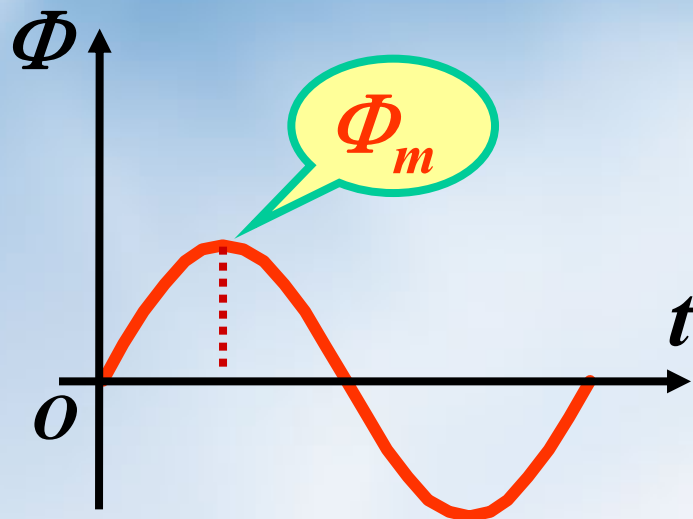
单相异步电动机主要应用于电动工具、洗衣机、电冰箱、空调、电风扇等小功率电器中。单相异步电动机的定子中放置单相绕组, 转子一般用笼型。

定子绕组中通入单相交流电后, 形成脉动磁场, 若不采取措施, 将无法获得所需的起动转矩。



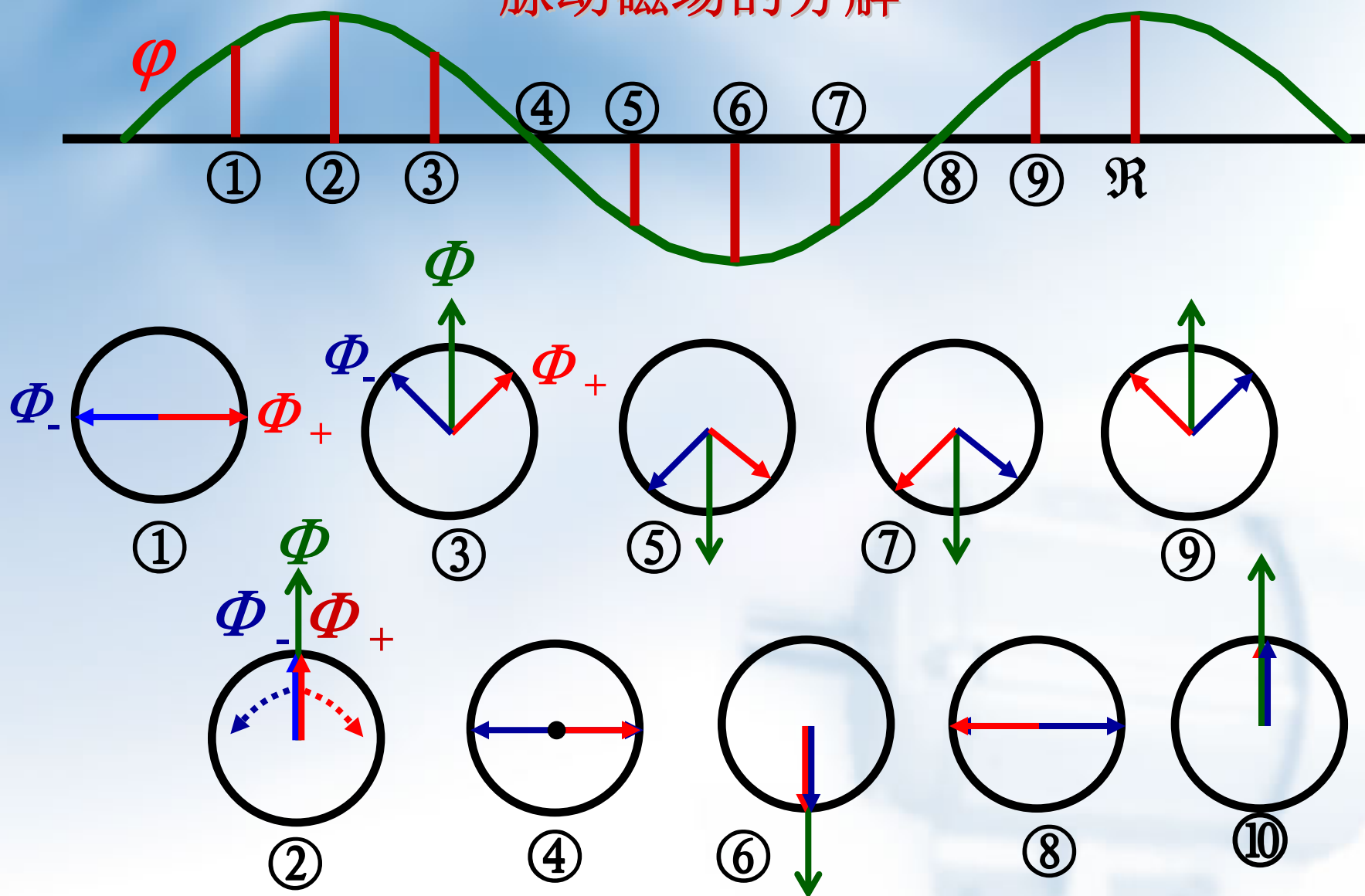
定子绕组产生的脉动磁场 Φ ，可用正、反两个旋转磁场合成来等效。即

$$\Phi = \Phi_+ + \Phi_-$$

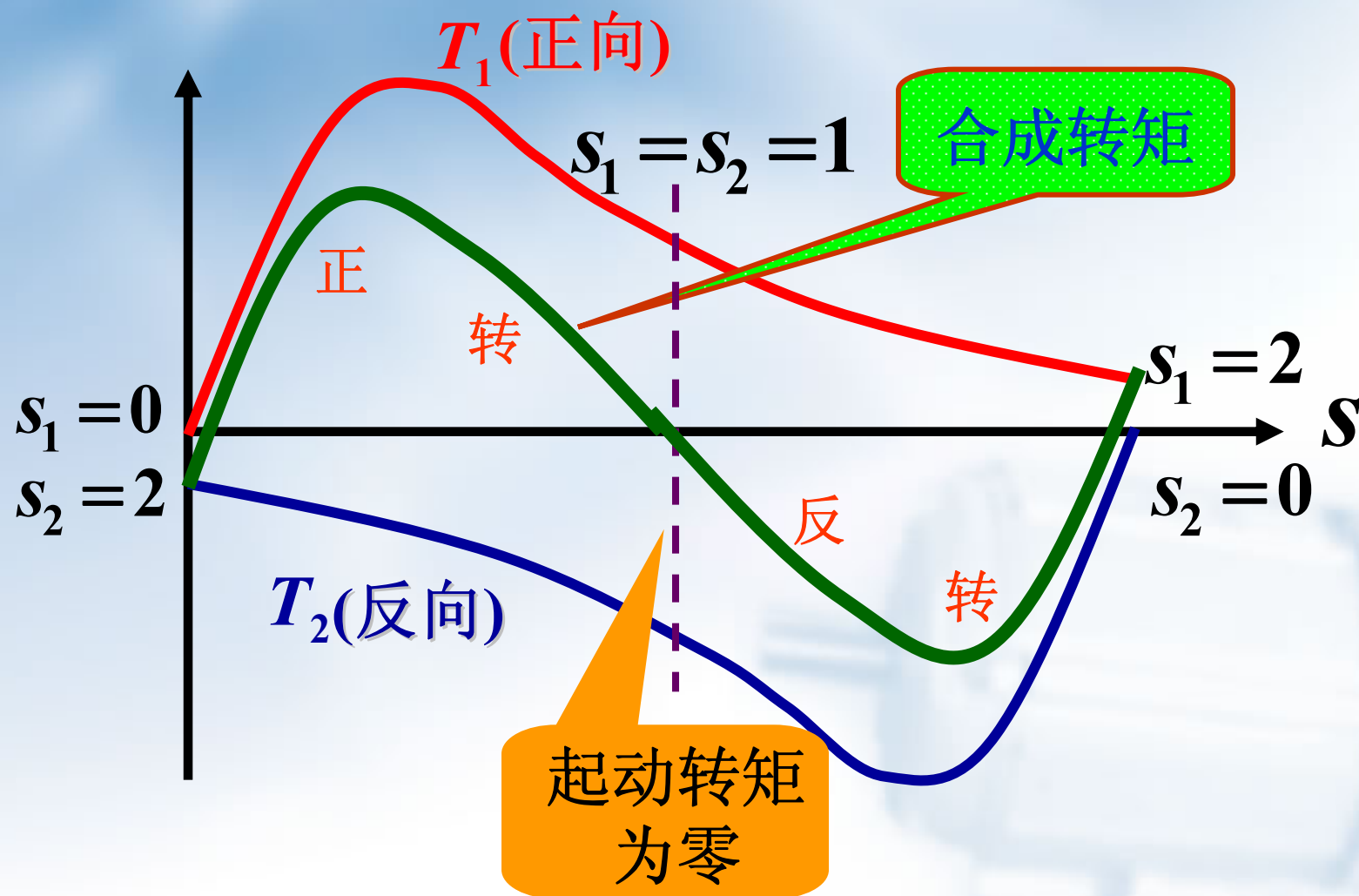


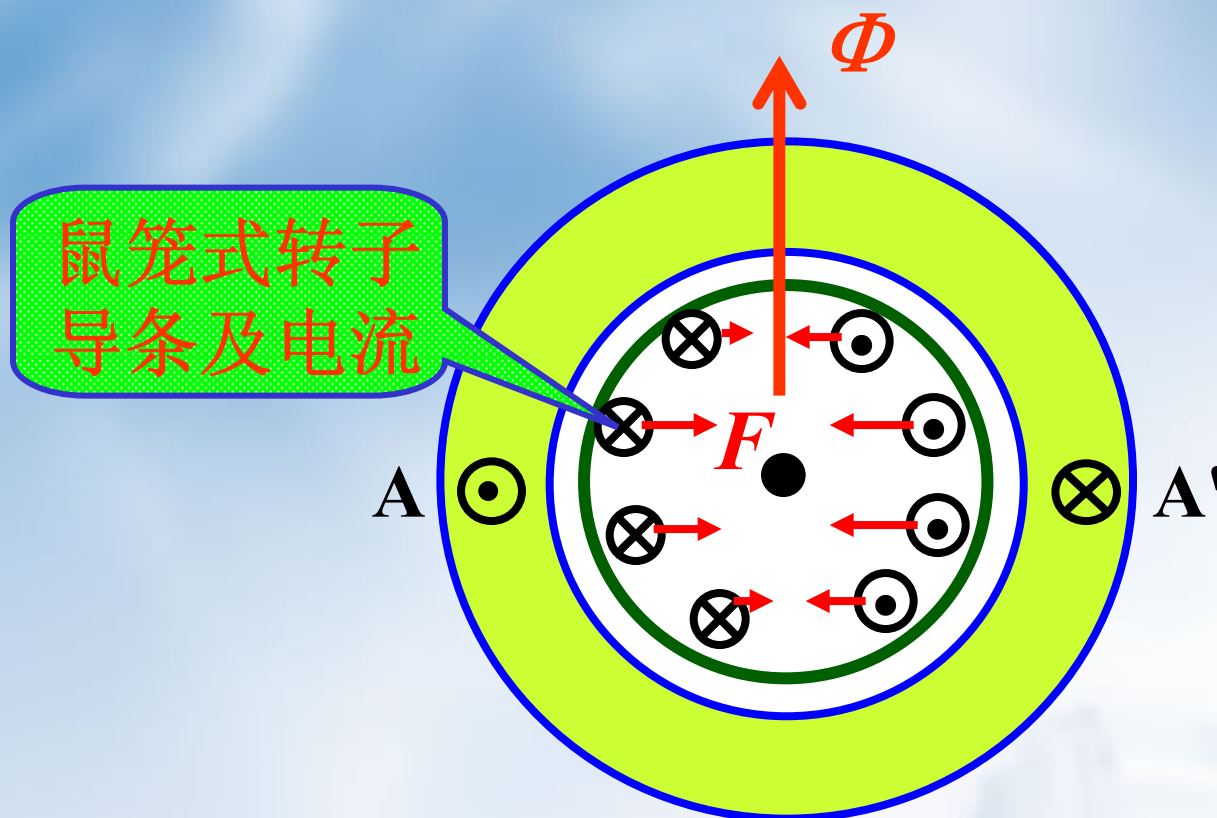
$$|\Phi_-| = |\Phi_+| = \frac{1}{2} \Phi_m$$

脉动磁场的分解



正反向旋转磁场的合成转矩特性



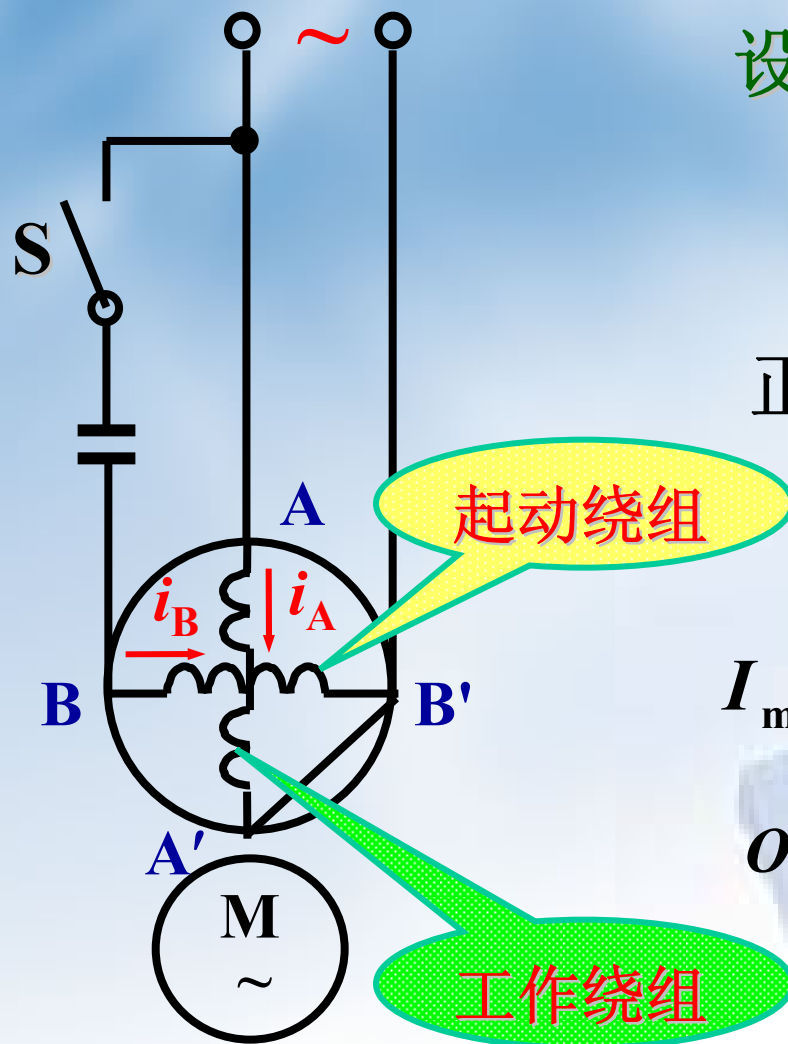


当定子绕组产生的合成磁场增加时，根据右手螺旋定则和左手定则，可知转子导条左、右受力大小相等方向相反，所以没有起动转矩。

为了获得所需的起动转矩，单相异步电动机的定子进行了特殊设计。常用的单相异步电动机有电容分相式异步电动机和罩极式异步电动机。他们都采用笼型转子，但定子结构不同。

7.11.2 电容分相式异步电动机

电容分相式异步电动机的定子中放置有两个绕组，一个是工作绕组 $A-A'$ ，另一个是起动绕组 $B-B'$ ，两个绕组在空间相隔 90° 。起动时， $B-B'$ 绕组经电容接电源，两个绕组的电流相位相差近 90° ，即可获得所需的旋转磁场。



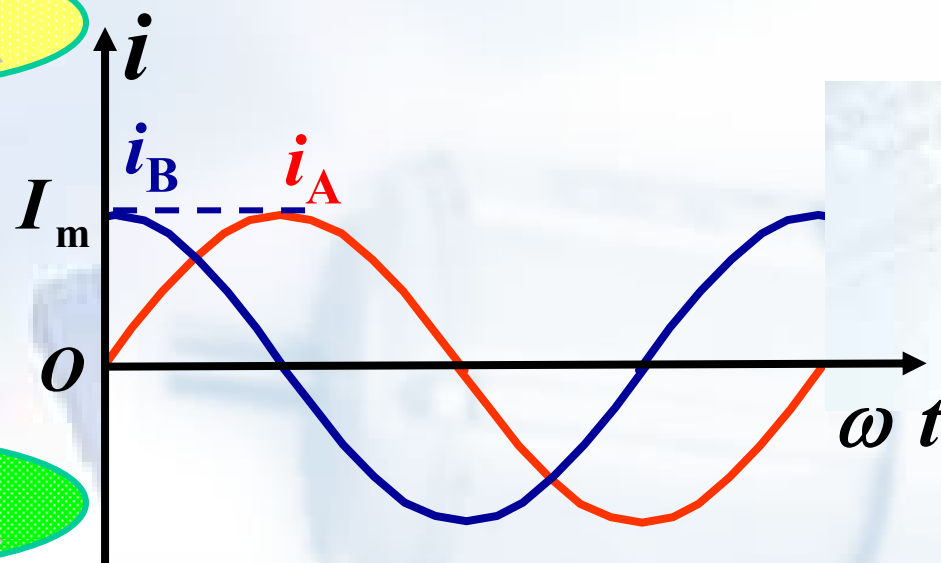
电容分相式异步电动机

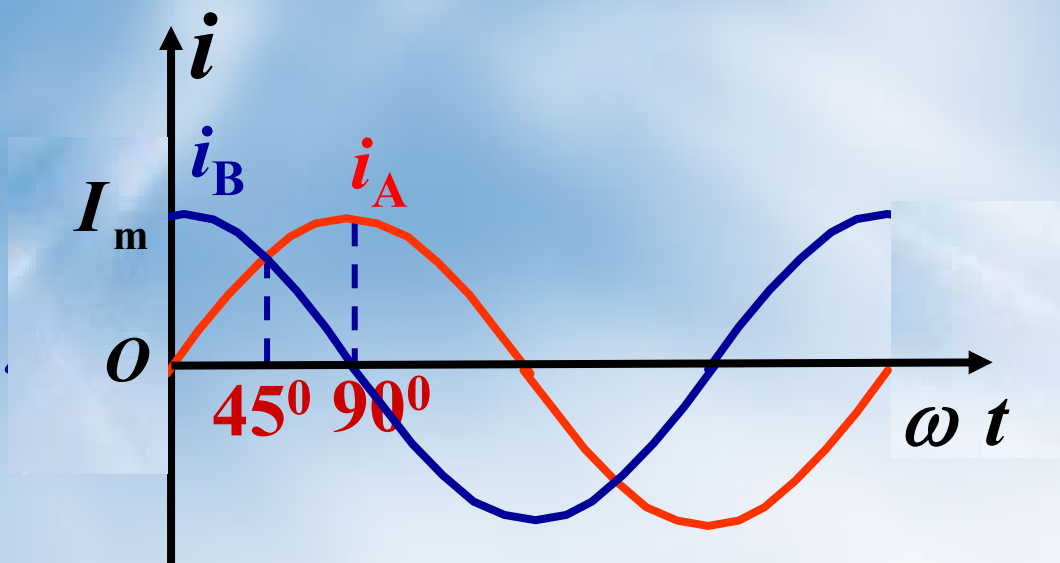
设两相电流为

$$i_A = I_{Am} \sin \omega t$$

$$i_B = I_{Bm} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

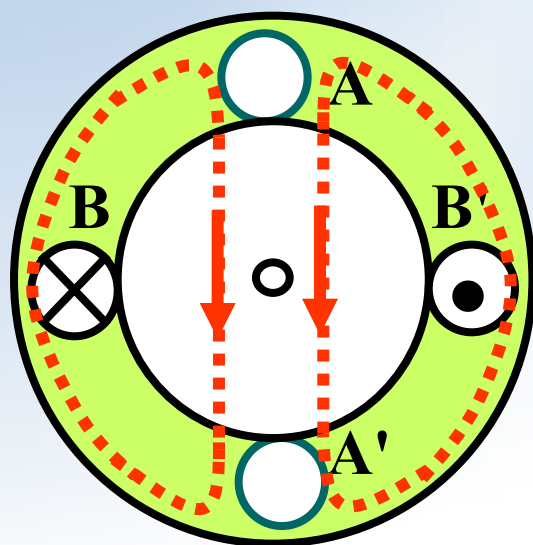
正弦波形如图所示。



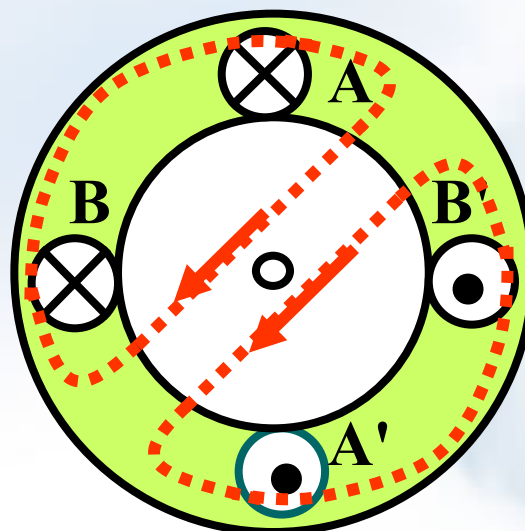


动画

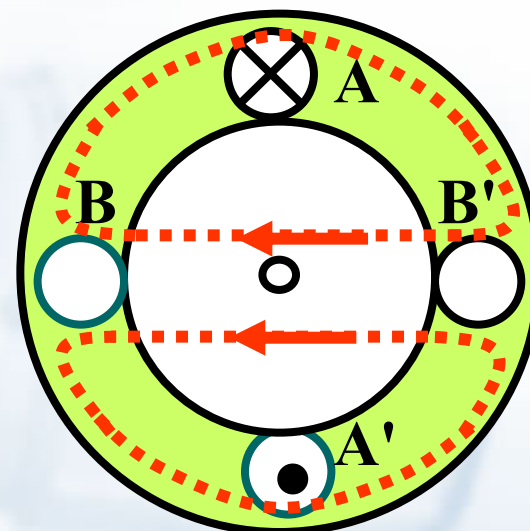
$\omega t = 0^\circ$



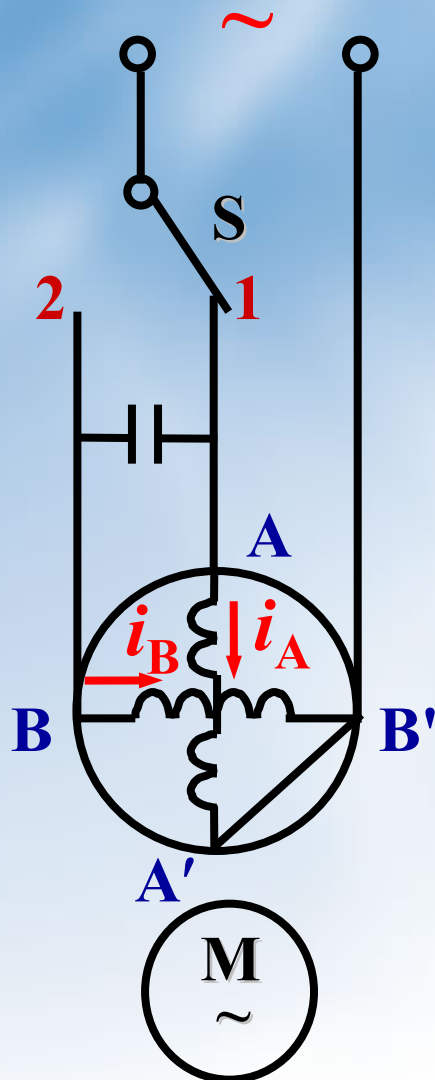
$\omega t = 45^\circ$



$\omega t = 90^\circ$



两相旋转磁场



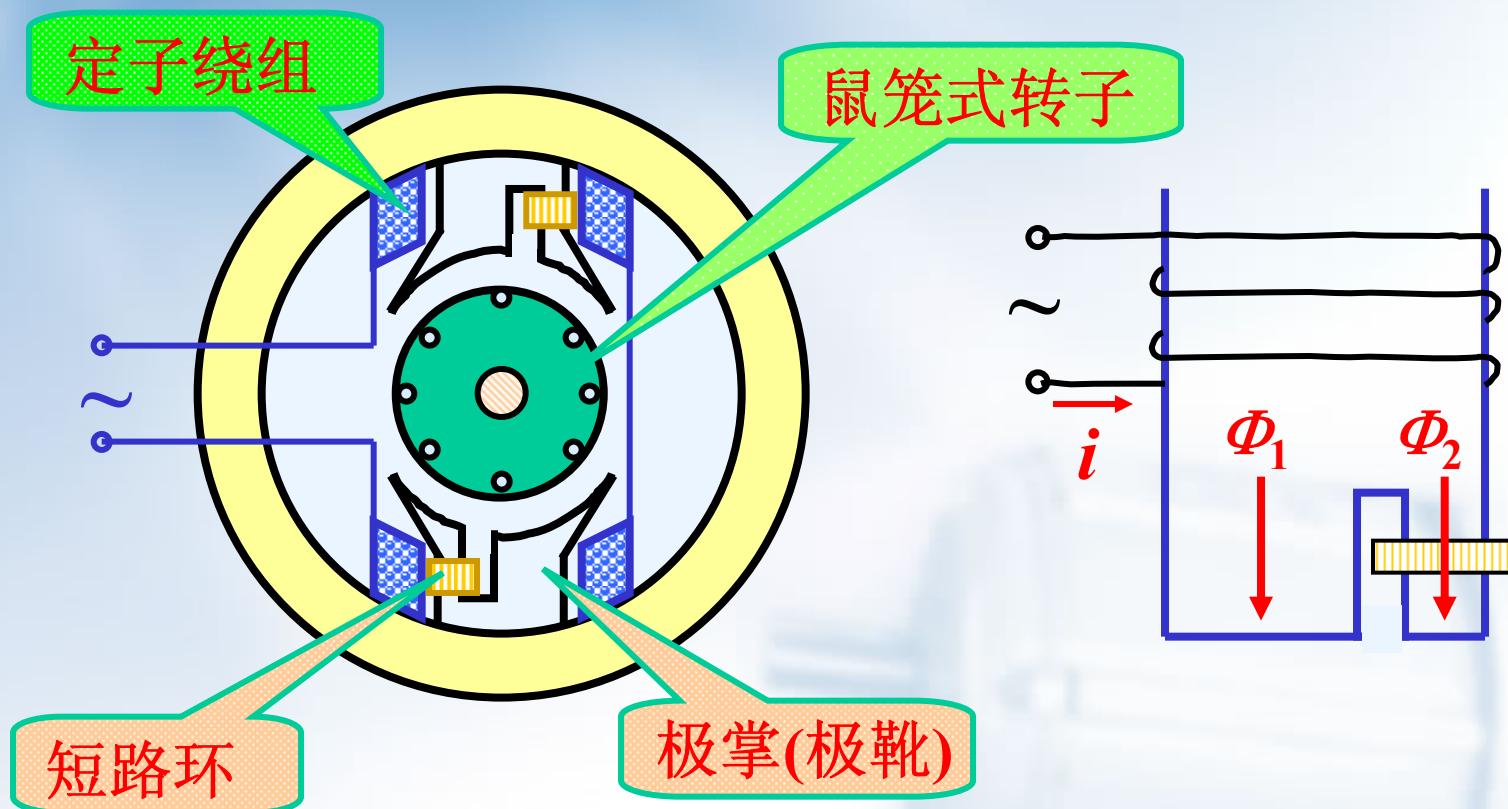
实现正反转的电路

电动机转子转动起来后，利用离心力将开关S断开(S是离心开关)，使起动绕组B-B'断电。

改变电容C的串联位置，可使单相异步电动机反转。

将开关S合在位置1，电容C与B绕组串联，电流 i_B 较 i_A 超前近 90° ；当将S切换到位置2，电容C与A绕组串联，电流 i_A 较 i_B 超前近 90° 。这样就改变了旋转磁场的转向，从而实现电动机的反转。

7.11.2 罩极式单相异步电机



当电流 i 流过定子绕组时，产生了一部分磁通 Φ_1 ，同时产生的另一部分磁通与短路环作用生成了磁通 Φ_2 。由于短路环中感应电流的阻碍作用，使得 Φ_2 在相位上滞后 Φ_1 ，从而在电动机定子极掌上形成一个向短路环方向移动的磁场，使转子获得所需的起动转矩。

罩极式单相异步电动机起动转矩较小，转向不能改变，常用于电风扇、吹风机中；电容分相式单相异步电动机的起动转矩大，转向可改变，故常用于洗衣机等电器中。

7.11.3 三相异步电动机的单相运行

三相异步电动机在运行过程中，若其中一相与电源断开，就成为单相电动机运行。此时电动机仍将继续转动。若此时还带动额定负载，则势必超过额定电流，时间一长，会使电动机烧坏。这种情况往往不易察觉，在使用电动机时必须注意。如果三相异步电动机在起动前就断了一线，则不能起动，此时只能听到嗡嗡声，这时电流很大，时间长了，也会使电动机烧坏。

例：三相异步电动机在一定的负载转矩下运行时，如电源电压降低，电动机的转矩、电流及转速有无变化？

解：电动机电磁转矩 $T \propto U_1^2$ ，当电源电压下降低时，电磁转矩减小，使转速下降，转差率增加，转子电流和定子电流

都会增大。稳定时电磁转矩等于机械负载转矩，但转矩降低了，定、转子电流却增大了。过程如下：

$U_1 \downarrow \rightarrow T(\propto U_1^2) \downarrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow T \uparrow$
使 $T = T_C$ 。