



# 浙江大学电气工程学院

# 电机与拖动

主讲：卢琴芬

2

# 三相感应电动机的启动

---

# 一、感应电动机的固有起动特性

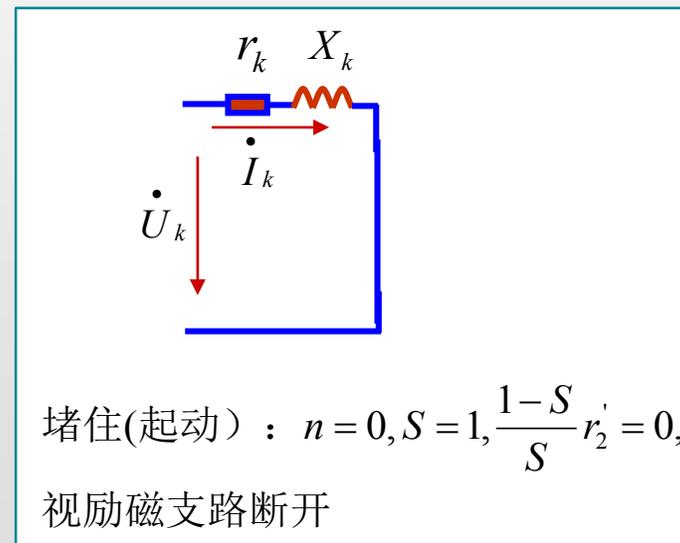
按照额定的接法，定转子回路不串任何阻抗，直接投入额定电压额定频率的电网，使之从静止状态开始转动直至稳定运行。称为**直接起动**。起动性能称为**固有起动特性**。

$$I_{1Q} \approx I'_{2Q} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} = \frac{U_1}{Z_k}$$

$U_1 = U_{N\phi}$  很高,  $Z_k$  很小,  $I_{1Q}$  很大,  
线电流  $I_Q \approx (4 \sim 7)I_N$

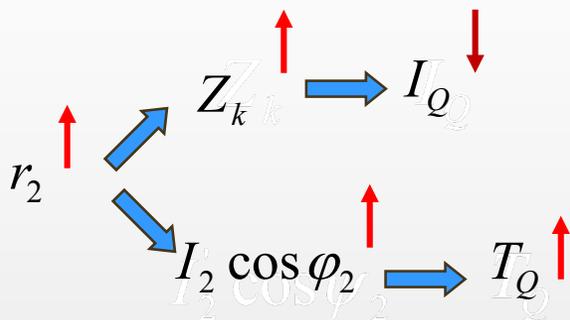
$$T = C_{M1} \Phi_m I_2' \cos \varphi_2$$

尽管  $I_2'$  很大, 但  $\cos \varphi_2$  比额定运行时小,  $\Phi_m$  小,  
 $\therefore T_Q = (0.8 \sim 1.8)T_N$



# 改善感应电动机起动性能的途径

## (1) 增大起动时的转子电阻



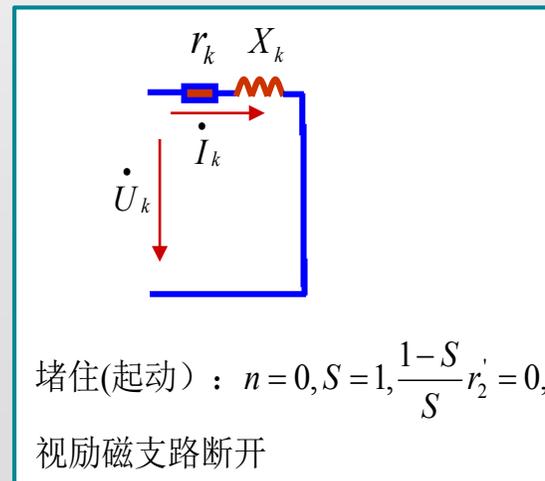
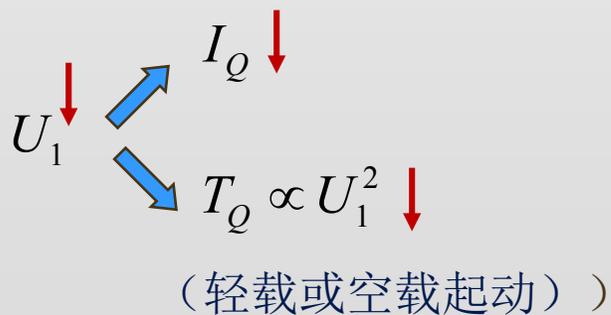
绕线式：转子回路串电阻

鼠笼式：高滑差电机（铝合金， $r_2$ 大）

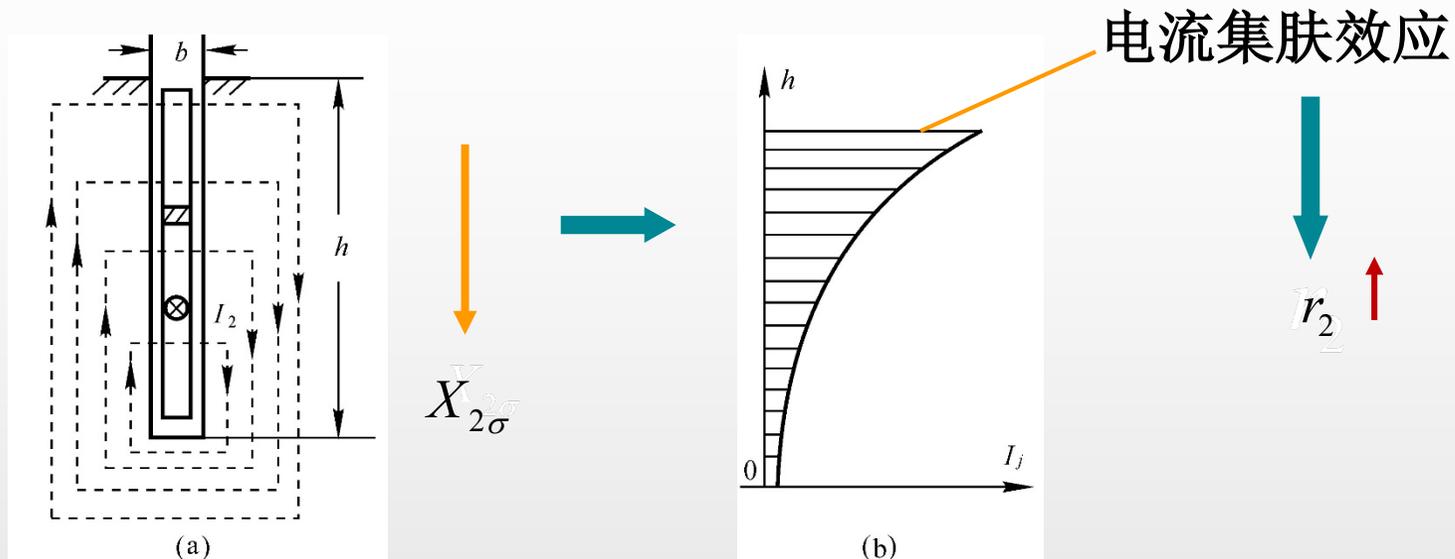
深槽转子

双鼠笼转子

## (2) 降低起动电压（鼠笼式）



## 深槽转子感应电机

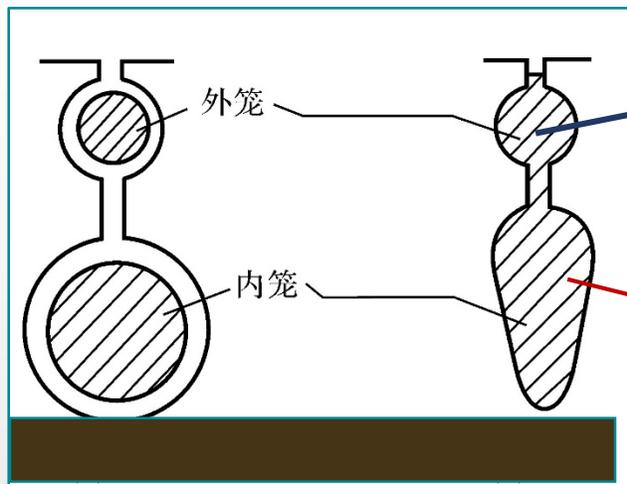


起动时:  $f_2 = f_1 \longrightarrow X_{2\sigma}$  较大, 电流分配取决于漏电抗。

正常运行时:  $f_2$  很低,  $X_{2\sigma}$  变小, 电流分配取决于电阻,  
导条电阻均匀分布。

但槽深, 漏磁通大,  $X_{2\sigma}$  大, 功率因数低。

## 双鼠笼转子感应电机

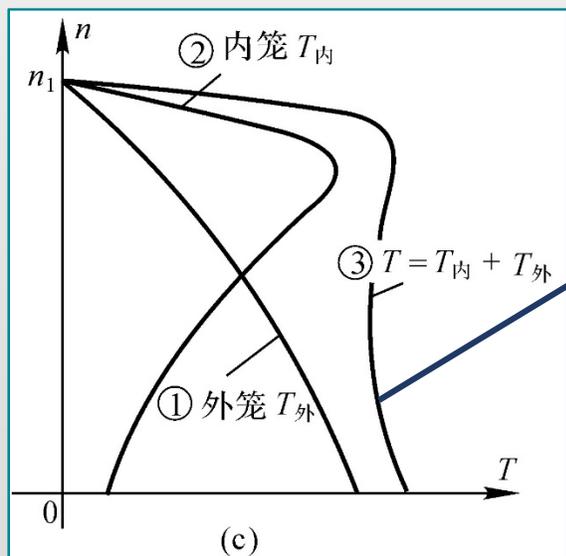


$\rho$  大, 截面小  
漏磁通小

$r_2$  大 (起动笼)  
 $X_{2\sigma}$  小

$\rho$  小, 截面大  
漏磁通大

$r_2$  小 (工作笼)  
 $X_{2\sigma}$  大



整个起动过程中,  $T$  不变, 且几乎为最大。

但  $X_{2\sigma}$  比普通笼型感应电机大, 功率因数及最大电磁转矩偏低。

## 二、笼型感应电动机的起动方法

### 1、直接起动

一般，7.5kW以下的小容量感应电动机，都可以直接起动；  
超过7.5kW的电动机，考虑起动电流对供电系统的影响。

若不超过供电系统的允许值，则可直接起动

$$\frac{I_Q}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{S_H}{4P_N}$$

—— 供电变压器总容量  
—— 电动机额定功率

**起动转矩倍数**  $K_M = T_Q/T_N \approx (0.8 \sim 1.8)$ ,

**起动电流倍数**  $K_I = I_Q/I_N \approx (4 \sim 7)$

直接起动的起动电流在电网中引起的电压降不超过额定电压的(10~15%)，就允许直接起动。

校核起动转矩： $T_Q = \frac{2T_m}{\frac{S_m}{1} + \frac{1}{S_m}} > T_N$

可以带额定负载直接起动

## 2、降压启动

**启动转矩与启动相电流均随电压下降，适用于空载或轻载的场合。**

### (1) 定子回路串对称三相电抗器启动

启动时经过三相对称电抗 $x_Q$ 串入，当转速接近稳定时，再把电抗切掉。

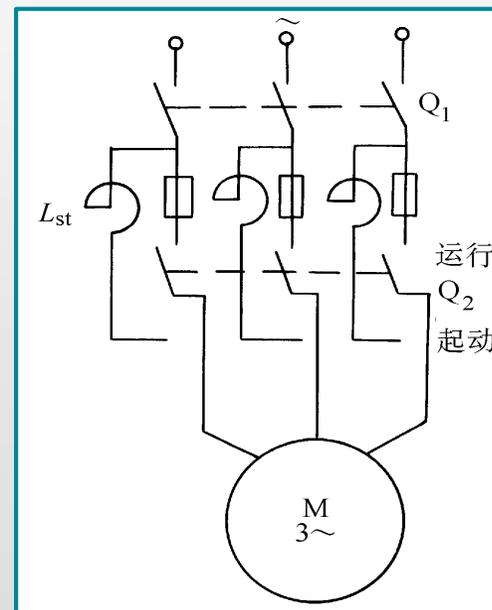
电抗 $x_Q$ 分压，使实际加到定子上的电压比额定电压小。

$$\frac{U_{1Q}}{U'_{1Q}} = a \quad \longrightarrow \quad \frac{I_{1Q}}{I'_{1Q}} = a \quad \longrightarrow \quad \frac{T_Q}{T'_Q} = \left(\frac{I_{1Q}}{I'_{1Q}}\right)^2 = a^2$$

$$I_{1Q} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$$

$$I'_{1Q} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' + x_Q)^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_Q)^2}}$$

$$\frac{I_{1Q}}{I'_{1Q}} = \frac{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_Q)^2}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} \quad \longrightarrow \quad x_Q = \sqrt{(a^2 - 1)r_k^2 + a^2 x_k^2} - x_k$$



## (1) 定子回路串对称三相电抗器启动

启动时经过三相对称电抗 $x_Q$ 串入，当转速接近稳定时，再把电抗切掉。

电抗 $x_Q$ 分压，使实际加到定子上的电压比额定电压小。

$$x_Q = \sqrt{(a^2 - 1)r_k^2 + a^2 x_k^2} - x_k$$

$$r_k, x_k \left\{ \begin{array}{l} \text{估算} \Rightarrow \\ \text{实验测得} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Y \text{接法: } Z_k = U_1 / I_{1Q} = \frac{(U_N / \sqrt{3})}{K_I I_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} K_I I_N} \\ \Delta \text{接法: } Z_k = U_1 / I_{1Q} = \frac{U_N}{K_I I_N / \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3} U_N}{K_I I_N} \end{array} \right.$$

$$\text{一般 } \cos \varphi_k = \frac{r_k}{Z_k} \approx 0.25 \sim 0.4 \quad r_k \approx (0.25 \sim 0.4) Z_k \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

## (2) 自耦变压器降压启动

又称为启动补偿器启动，启动自耦变压器接入启动电路中，原边接到额定电压的电网上，副边接电动机的定子绕组。启动待转速稳定时，将自耦变压器切除。

由  $I_{1Q} \propto U_1, T_Q \propto U_1^2$  得

$$I_{1Q} / I_{1Q2} = U_1 / U_2 = k \Rightarrow I_{1Q2} = \frac{I_{1Q}}{k}$$

$$\frac{T_Q}{T'_Q} = \left( \frac{U_1}{U_1'} \right)^2 = k^2 \quad \text{启动转矩倍数}$$

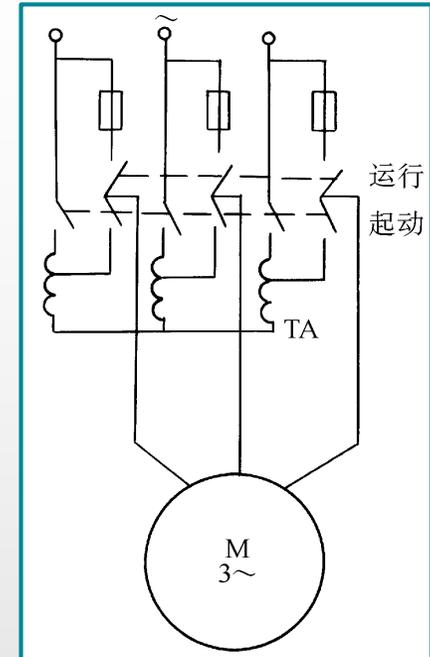
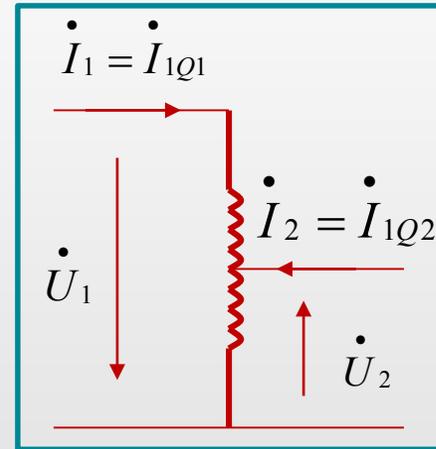
$$I_{1Q} / I_{1Q1} = k I_{1Q} / I_{1Q2} = k^2 \quad \text{启动电流倍数}$$

对电网而言，此种方式启动电流与启动转矩降低倍数相同。

因此可以带较大的负载启动。改变变比  $k$ ，可满足不同的要求。

QJ2: 55%, 64%, 73%

QJ3: 40%, 60%, 80%

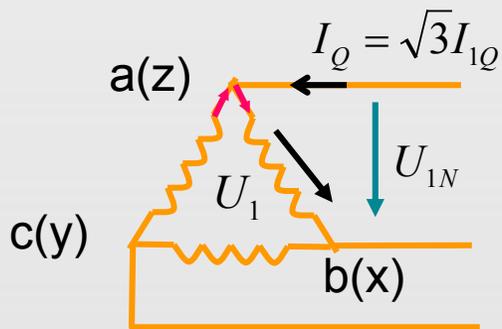


$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

## 2、星-三角(Y-Δ)起动

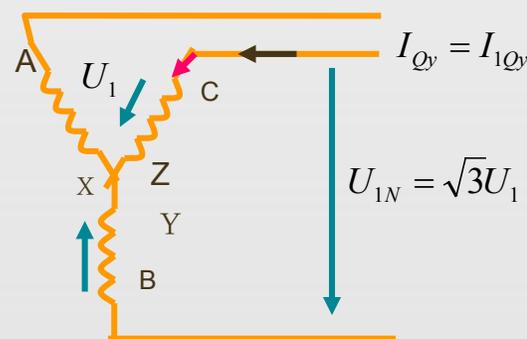
定子每相绕组的首末端都引出机外，正常运行时采用Δ接法的三相笼型感应电动机，可以采用此种方法。



$$I_{1Q} = I_Q / \sqrt{3}$$

$$T_Q$$

**直接起动**



$$\frac{I_{1Qy}}{I_{1Q}} = \frac{U'}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Rightarrow I_{1Qy} = I_{1Q} / \sqrt{3}$$

$$T'_Q = \left( \frac{U'}{U_1} \right)^2 T_Q = \frac{1}{3}$$

**Y接起动**

对电源而言，Y接法降压起动与Δ接法直接起动的线电流之比：

$$I_{Qy} / I_Q = I_{1Qy} / I_Q = \frac{I_{1Q}}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{3} I_{1Q}} = \frac{1}{3}$$

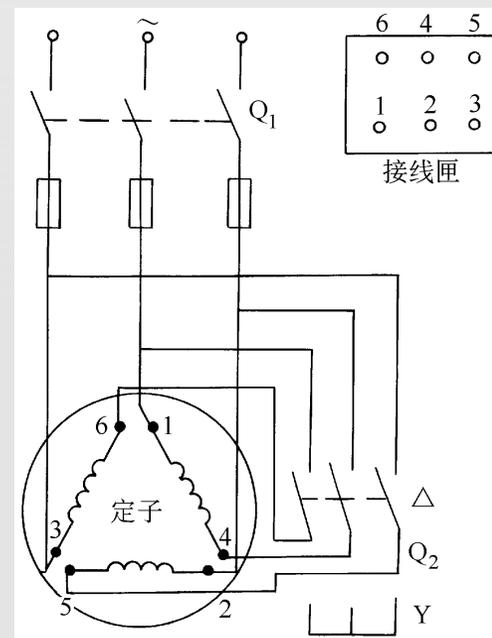
Y- $\Delta$ 起动的起动电流与起动转矩降低倍数相同，到降为固有起动特性的1/3，相当于采用自耦变压器起动时抽头电压为  $1/\sqrt{3} = 0.5777$

$\Rightarrow k = \sqrt{3}$

适用于空载或轻载起动，是笼型感应电动机的基本起动方法之一。

另外：对能够采用Y- $\Delta$ 接法的电动机，长期空载或轻载时，可改成Y接法，从而提高功率因数，节约能源

因此：大于4kW以上的三相笼型感应电动机，都采用380V额定电压，6个出线端都引出机外，正常为 $\Delta$ 接法。



# 各种起动方法的比较

	起动电压相对值 (电动机相电压)	起动电流相对值 (电网供给线电流)	起动转矩相对值
直接起动	1	1	1
Y- $\Delta$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
自耦变压器	$\frac{1}{k_a}$ $\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{k_a^2}$ $\frac{1}{3}$	$\frac{1}{k_a^2}$ $\frac{1}{3}$
串电抗	$\frac{1}{k}$ $\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{k}$ $\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{k^2}$ $\frac{1}{3}$

三种起动方法得到相同起动转矩的情况下，利用电抗器起动时电网提供的起动电流较大。

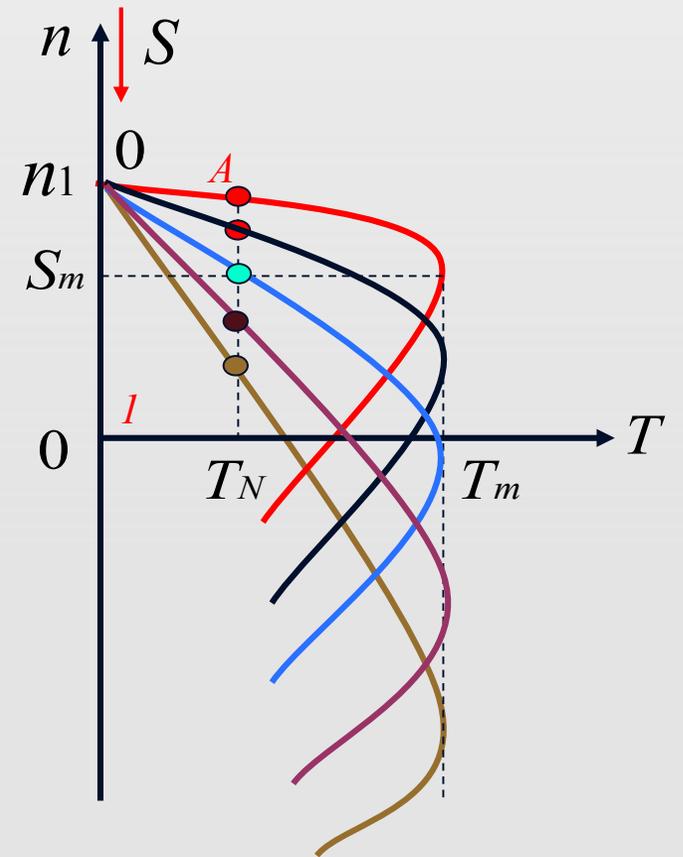
### 三、绕线式感应电动机的起动方法

绕线式感应电动机能够既减小电流，又增大转矩，适用于重载起动

#### 1. 绕线式感应电动机转子回路串对称电阻起动

$$I_{1Q} \approx I'_{2Q} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' + R_\Omega')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_k + R_\Omega')^2 + x_k'^2}}$$

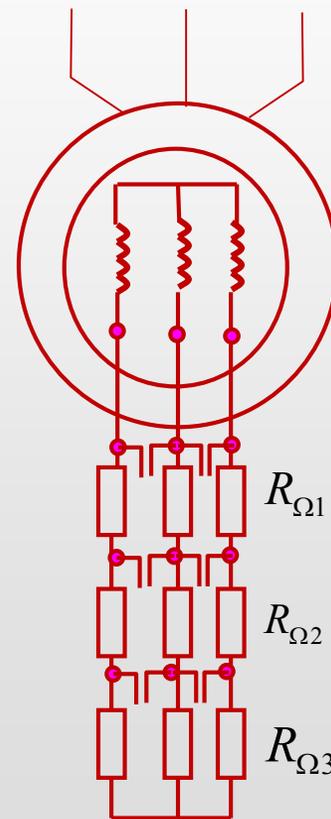
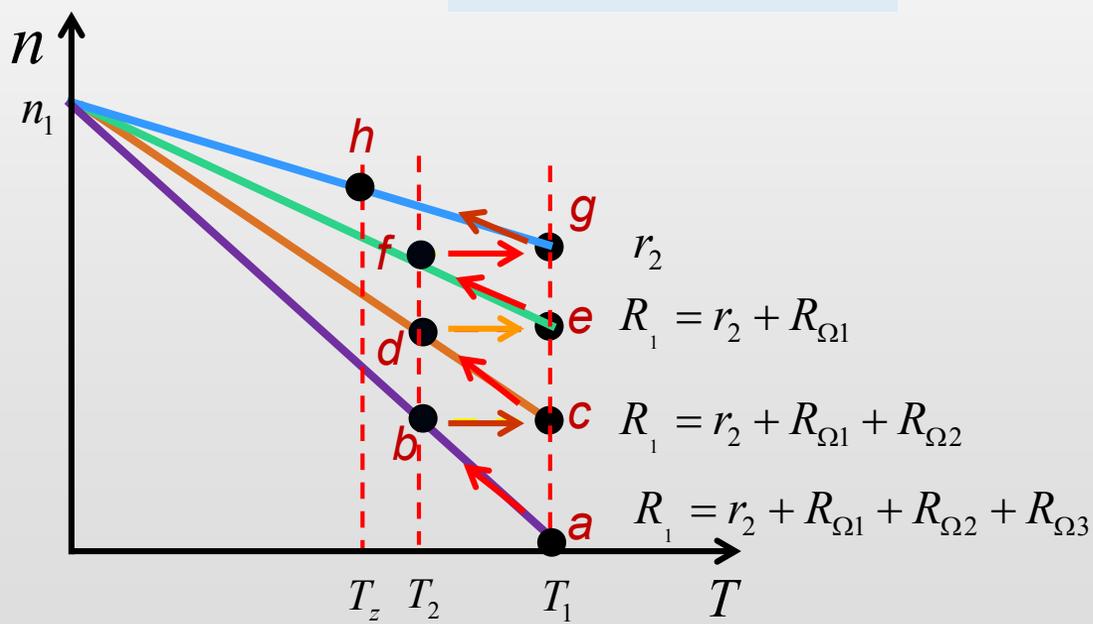
- ①  $R_\Omega$  足够大,  $I_{1Q}$  限制在规定的范围内.
- ②  $S'_m < 1$ ,  $T_Q$  随  $R_\Omega$  的增加而增加,  
 $S'_m > 1$  时,  $T_Q$  随  $R_\Omega$  的增加而减小
- ③ 当  $S'_m = 1$  时,  $T_Q = T_m$ , 适合重载起动  
 $R_\Omega$  足够大,  $S'_m > 1$ ,  $T_Q < T_m$ , 减小起动时的冲击



$R_\Omega$ 逐级切除(短接),采用直线段近似表示

$$r_2 = \frac{E_{2S\phi}}{I_{2N\phi}} = \frac{S_N E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2N}}$$

$$R_m = \frac{E_{2N}}{\sqrt{3} I_{2Q}}$$





浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬