



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A

9.3-异步电机的机械特性与调速控制



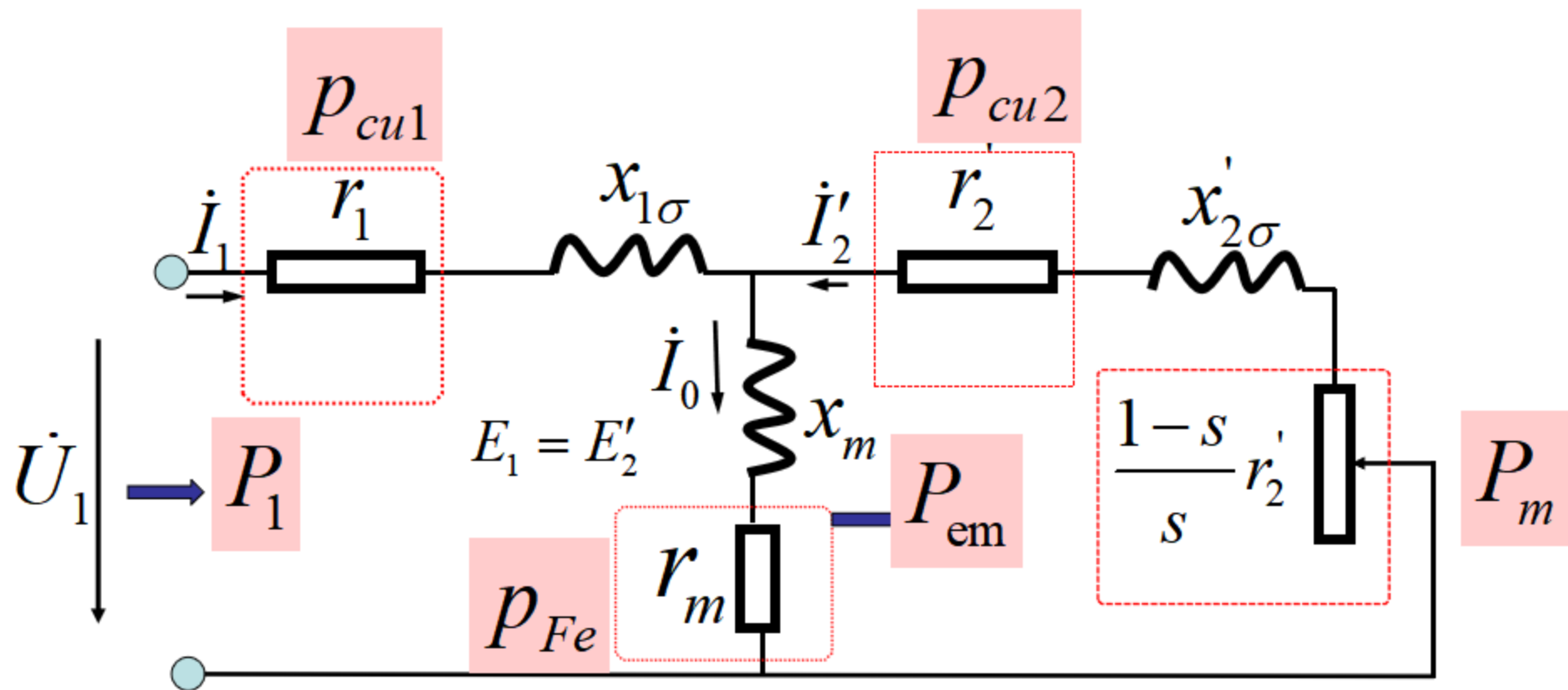
目 录

1. 异步电机的功率传输关系
2. 异步电机的机械特性
3. 异步电动机的调速控制



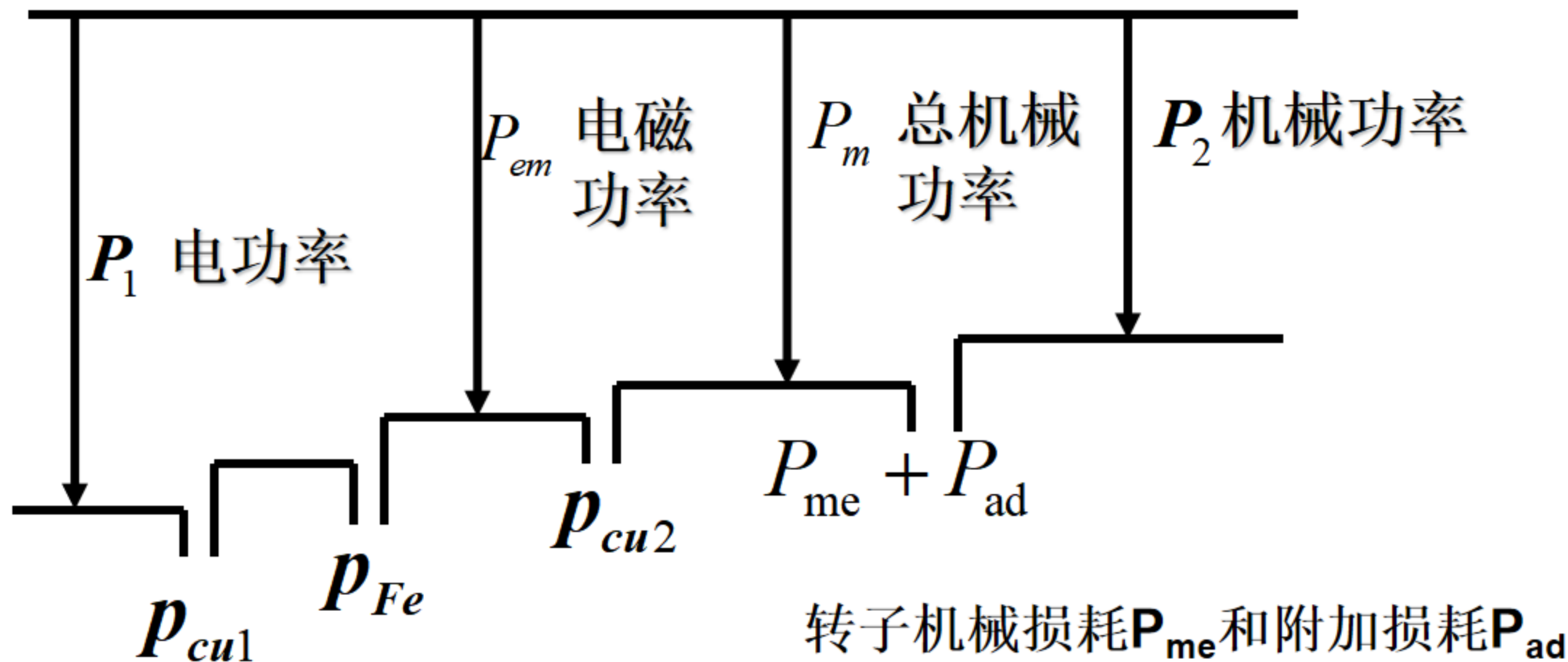
1. 异步电机的功率传输关系

感应电机功率转换过程



1. 异步电机的功率传输关系

感应电机功率流程

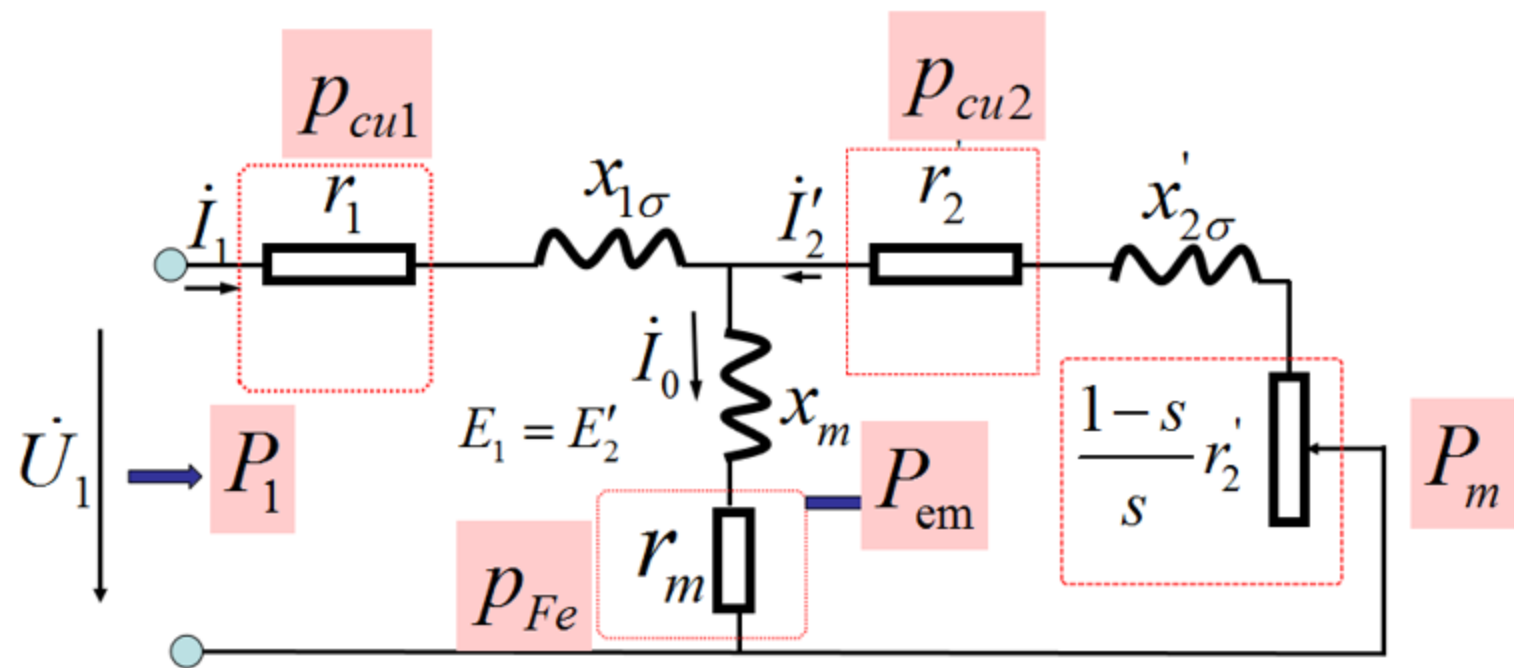


1. 异步电机的功率传输关系

异步电动机的输入功率

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$$

U_1 、 I_1 、 $\cos \phi_1$: 定子一相绕组的电压、电流、功率因数。 m_1 : 定子相数



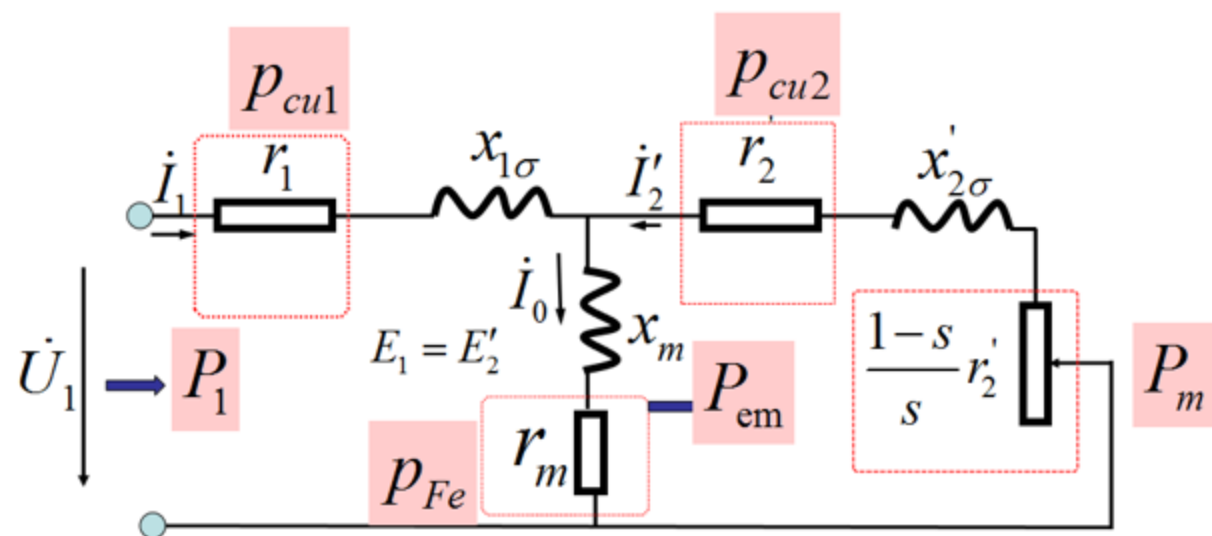
1. 异步电机的功率传输关系

*输入功率 $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$

*电磁功率: 传递到转子的功率。

通过电磁感应借助气隙磁场实现功率传递。由等效电路，输入功率减去 r_1 、 r_m 消耗的功率，就是传递到转子的电磁功率：

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \\ &= P_1 - m_1 I_1^2 r_1 - m_1 I_0^2 r_m \end{aligned}$$



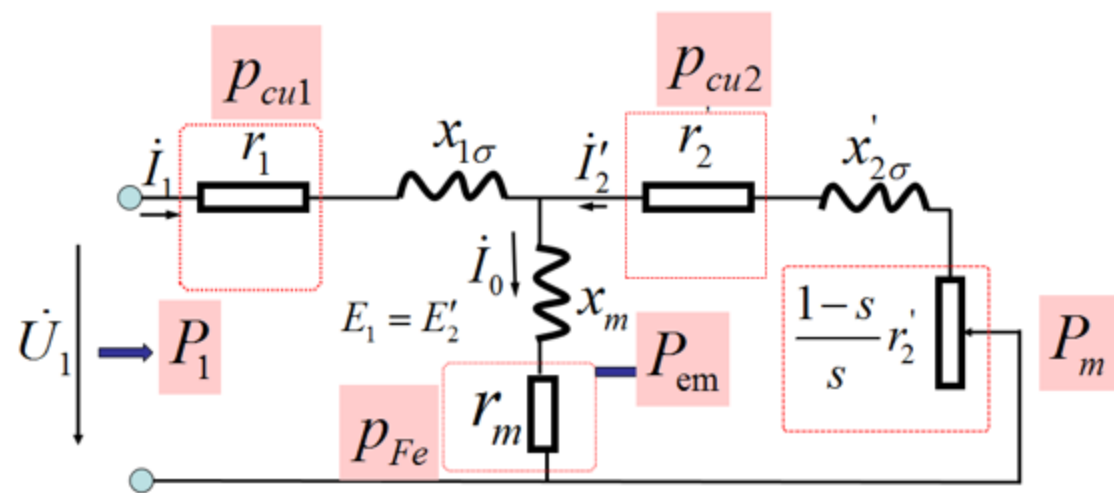
1. 异步电机的功率传输关系

电磁功率

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} = P_1 - m_1 I_1^2 r_1 - m_1 I_0^2 r_m$$

• 转子电阻消耗的功率也是电磁功率。

• 转子电阻 $r_2' + \frac{1-s}{s} r_2' = \frac{1}{s} r_2'$



• 电磁功率 $P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{1}{s} r_2' = m_1 E_2' I_2' \cos \phi_2$



1. 异步电机的功率传输关系

转轴上的机械功率 P_m :

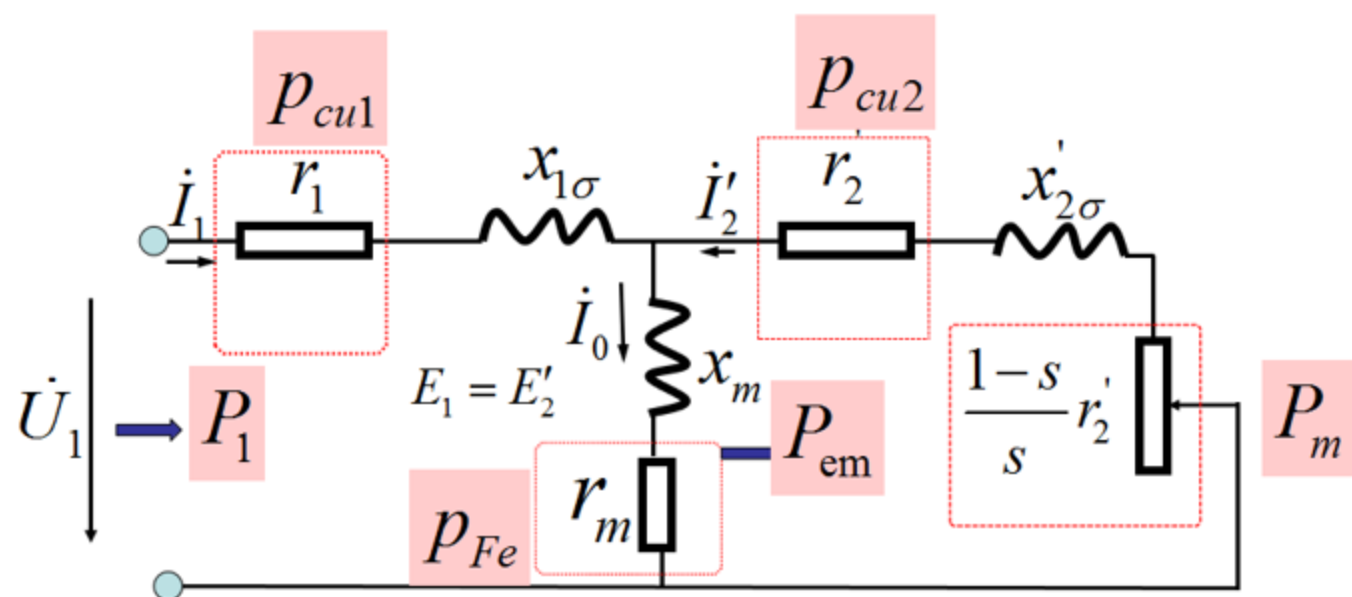
输入给转子的电磁功率减去转子铜损耗 P_{Cu2} 。

由等效电路:

$$P_{Cu2} = m_1 I_2'^2 r_2' = s P_{em}$$

$$P_m = P_{em} - P_{Cu2} = P_{em} - s P_{em}$$

$$P_m = (1 - s) P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{1 - s}{s} r_2'$$

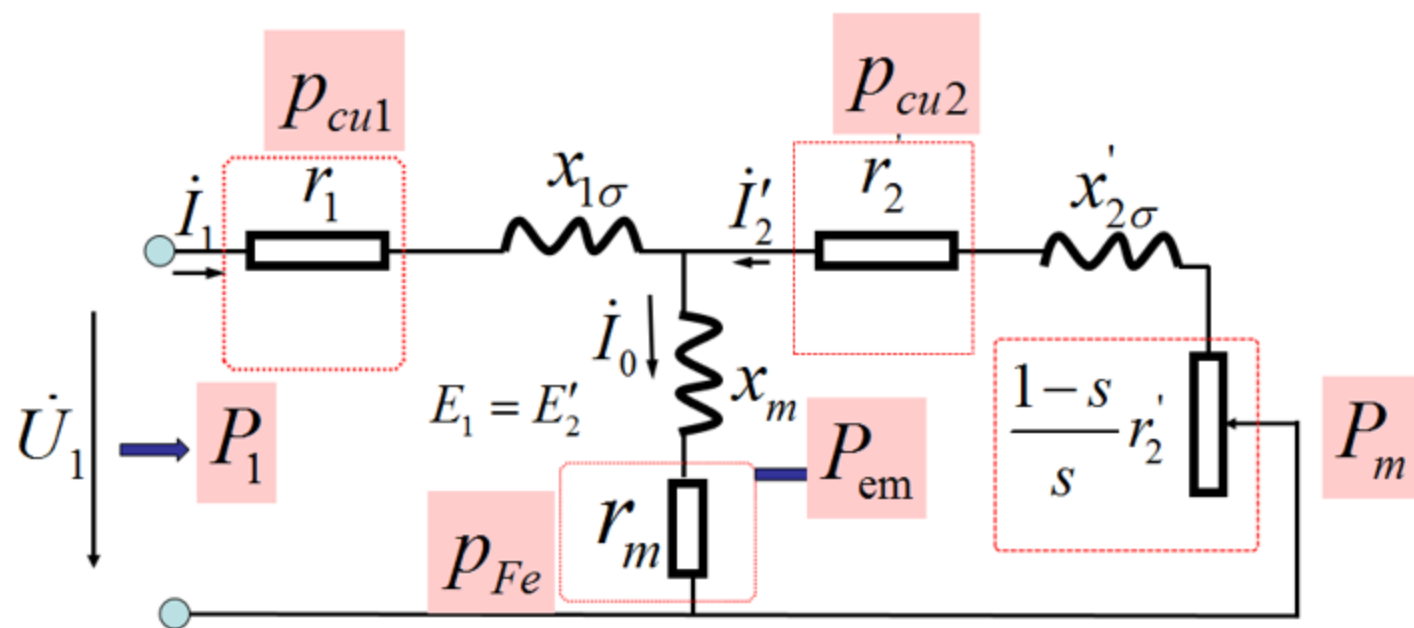


1. 异步电机的功率传输关系

- 输出功率 P_2 :

机械功率减去旋转的机械损耗 P_{me} 和附加损耗 P_{ad} 。

$$P_2 = P_m - P_{me} - P_{ad}$$



1. 异步电机的功率传输关系

转矩方程

$$P_m = P_2 + (P_{me} + P_{ad})$$

$$\frac{P_m}{\omega} = \frac{P_2}{\omega} + \frac{(P_{me} + P_{ad})}{\omega}$$

$$T = T_2 + T_0$$

电磁转矩

负载制动转矩

空载制动转矩

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{(1-s)P_{em}}{\omega} = \frac{(1-s)P_{em}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{em}}{\omega_s}$$

ω 为转子的机械角速度, ω_s 是旋转磁场的同步转速, 且有 $\omega = (1-s)\omega_s$



目 录

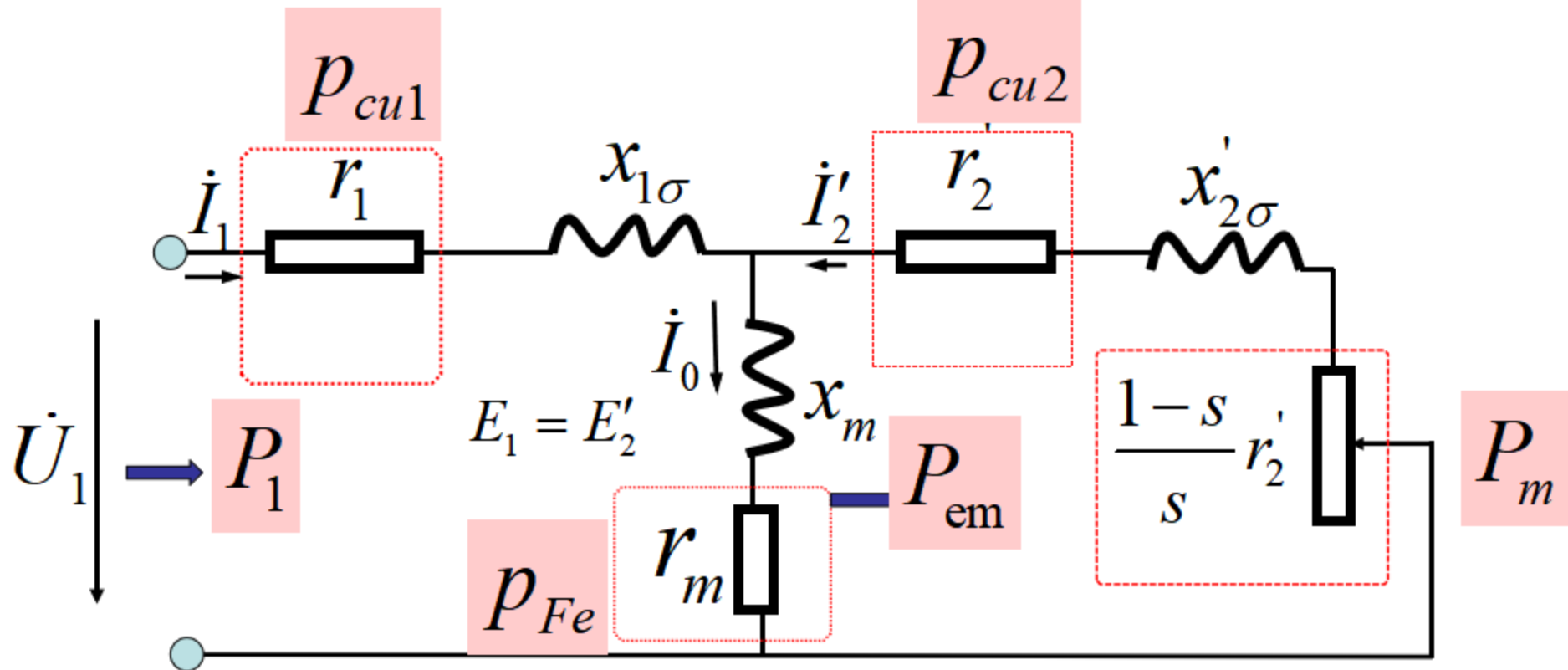
1. 异步电机的功率传输关系
2. 异步电机的机械特性
3. 异步电动机的调速控制



2. 异步电动机的机械特性

电磁力矩 T_{em} :

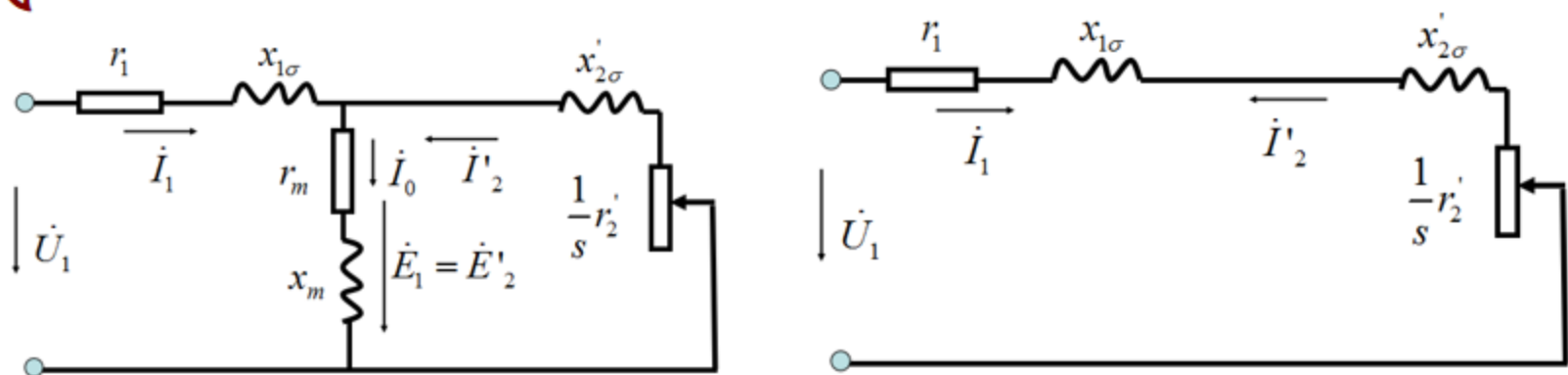
可由功率传输关系分析异步电机的电磁力矩。



2. 异步电动机的机械特性

电磁转矩的参数达式

$$T = \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 / p}$$



$$I_2' = ?$$

由于励磁阻抗比定、转子漏阻抗大很多，如把**激磁阻抗支路**认为开路：

$$I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

当转差率和频率不变时，电磁转矩与电机外加电压的平方成正比。当电压和频率不变时，电磁转矩仅与转差率有关。



2. 异步电动机的机械特性

转矩公式:

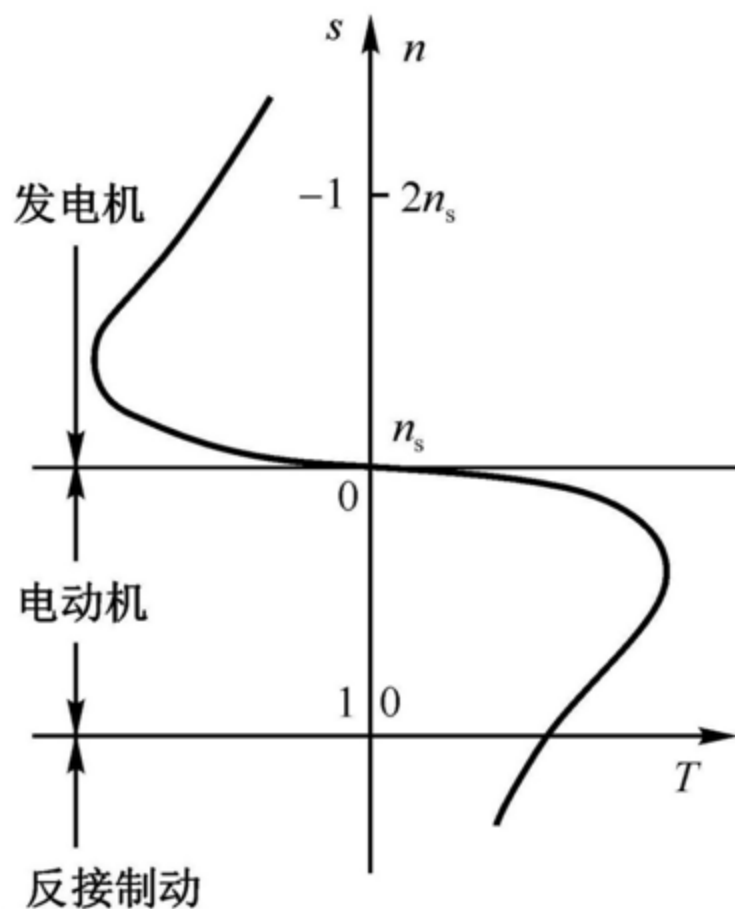
$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

机械特性曲线分**3**部分:

电动机: 转矩与转速同向;

发电机: 转速高于 n_s , 转矩与转速反向;

反接制动: 电机转速与磁场转速相反。



(a) 典型特性



2. 异步电动机的机械特性

感应电机的最大电磁转矩

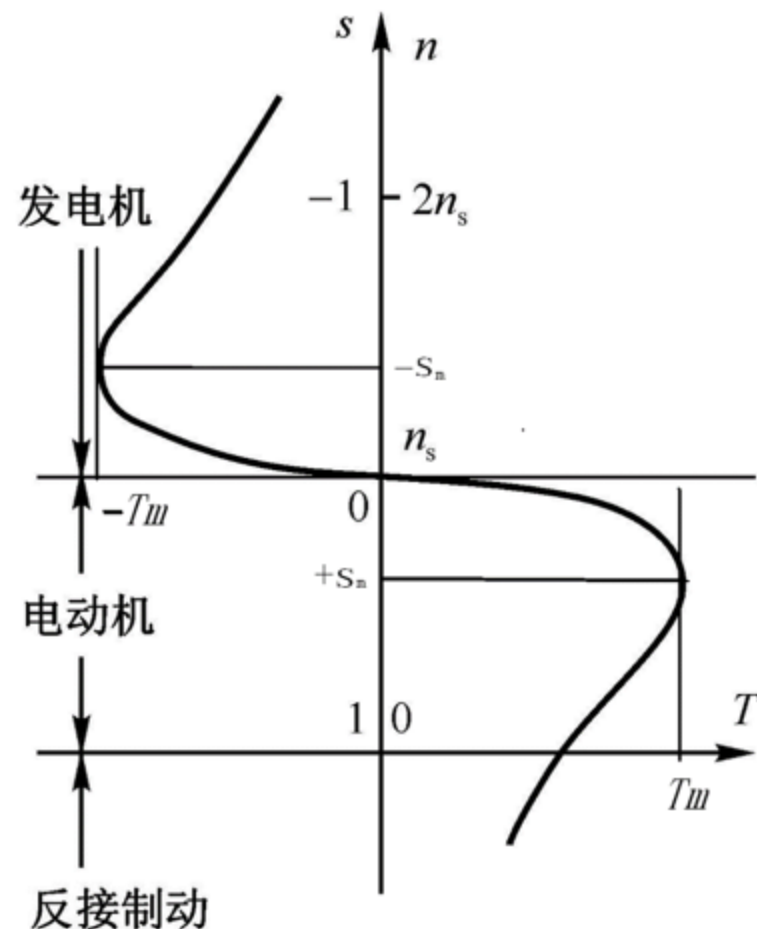
令 $dT/ds = 0$ 得到产生最大转矩时的转差率

临界转差率

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$

最大电磁转矩

$$T_m = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}]}$$



(a) 典型特性



2. 异步电动机的机械特性

最大转矩的特点

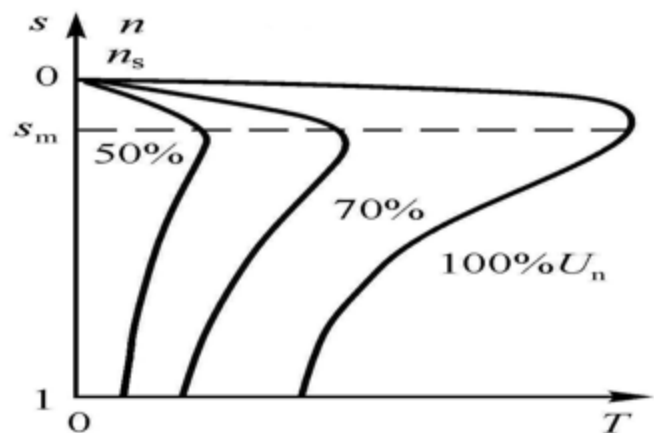
对参数表达式, 通常 $r_1 \ll x_k = (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})$

$$\Rightarrow s_m \approx \frac{r_2'}{x_{1\sigma} + x'_{2\sigma}} \quad T_m \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 x_k}$$

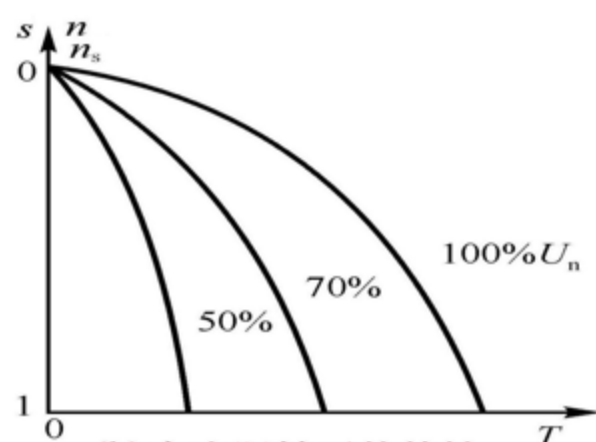
f_1 一定时, T_m 与 U_1^2 成正比; T_m 与 x_k 成反比, T_m 与 r_2 无关;

s_m 与 U_1 无关, s_m 与 x_k 成反比, s_m 与 r_2 成正比;

电压减小时, T_m 随电压平方倍减小, 但 s_m 不变。



(a) 普通鼠笼转子的特性



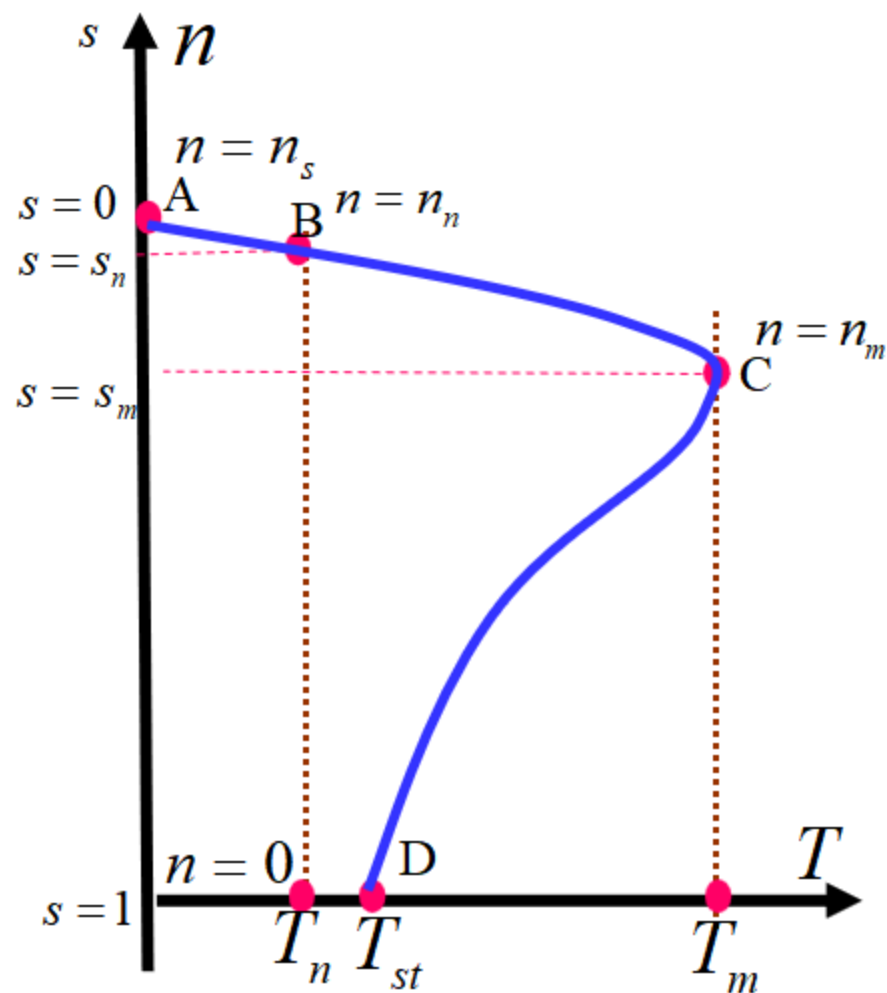
(b) 高电阻转子的特性

U_1 变化对机械特性的影响



2. 异步电动机的机械特性

感应电动机的固有机械特性 $n=f(T)$



四个特殊点

A点：同步点， $n=n_s, s=0, T=0$

B点：额定工作点， $n=n_n, s=s_n, T=T_n$
 $s_n: 0.01\sim 0.05$

AB段运行可以看成恒速电机

C点：最大转矩， $n=n_m, s=s_m, T=T_{max}$
 s_m 的范围： $0.2\sim 0.3$

D点：起动点， $n=0, s=1, T=T_{st}$



2. 异步电动机的机械特性

T_m 与 s_m

• 过载倍数

- T_m 是电动机可能产生的最大转矩；
- T_n 是电动机的额定转矩；
- 如果负载转矩 $T_L > T_m$ ，电动机将停转，为保证电动机不会因短时过载而停转，电动机必须有一定得过载倍数 k_m

$$k_m = \frac{T_m}{T_n}$$

- 一般电动机的 $k_m = 1.6 \sim 2.5$ ，在电机参数表中给出。

工作时必须使 $T_L < T_m$ ，否则电机将堵转！

当 $T_L > T_m \implies n = 0 \implies E_2 \uparrow \implies I_2 \uparrow \implies I_1 \uparrow \implies$ 电机严重过热而烧坏



2. 异步电动机的机械特性

• 起动转矩 T_{st}

- 除 T_m 外，异步电动机还有一个重要的参数：起动转矩。
- 起动时， $n=0$ ， $s=1$ ， $T=T_{st}$ 。

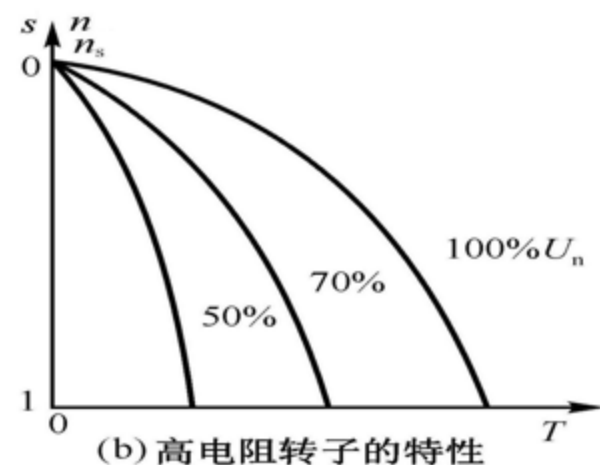
$$T = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

由 $T \approx C \frac{sr_2}{r_2^2 + (sx_{2\sigma})^2} U_1^2$ 和 $x_{2\sigma} \gg r_2$ ，则 $T_{st} \approx C \frac{r_2}{(x_{2\sigma})^2} U_1^2$

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 $r_2 \uparrow \Rightarrow T_{st} \uparrow$

子回路串电阻，可增加 r_2 ，可以使 $T_{st} = T_m$ ，从而提高启动转矩。



高电阻转子电机的转子鼠笼
使用合金铜，提高电阻率

。对绕线式异步电动机可通过转



2. 异步电动机的机械特性

T_{st}

- 对鼠笼式异步电动机，则不可通过转子回路串电阻来增加电动机的 T_{st} ；
- 起动转矩倍数为： $K_{st} = T_{st} / T_n$ ；
- 当 $T_{st} > T_L$ 时，电动机才能起动，在额定负载下，只有 $K_{st} > 1$ 的笼型异步电动机才能额定负载起动。

鼠笼电机

- 起动电流为5~7倍
- 起动转矩为1~2倍

要求：有较大的起动转矩，较小的起动电流。

1. 起动转矩必须大于负载转矩；
2. 起动转矩越大，起动时间越短。

1. 避免母线电压下降大；
2. 减少线路和电机发热；
3. 减小对电网的冲击。



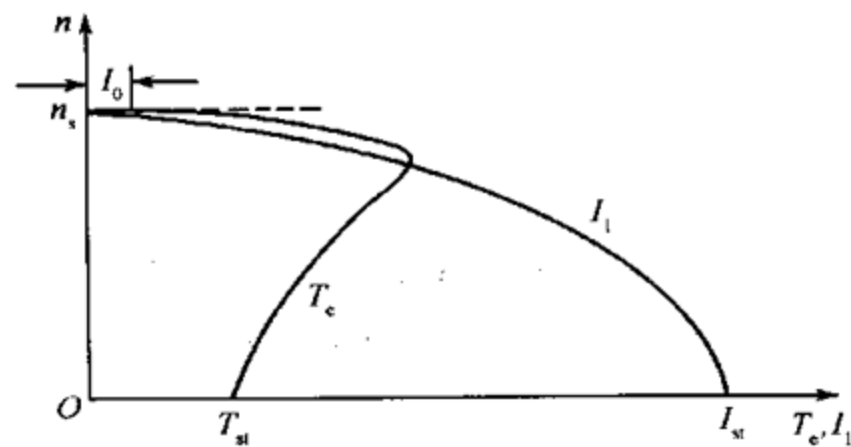
2. 异步电动机的机械特性

笼型感应电机的直接起动

直接起动：将电动机定子绕组直接接在额定电压的电源上起动，也称为**全压起动**。

优点：操作简单，不需要复杂的起动设备。

缺点：起动电流很大（ $k_I=4\sim 7$ ），而起动转矩并不大（ $k_{st}=0.8\sim 1.2$ ）



2. 异步电动机的机械特性

笼型感应电机的降压启动

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$

$$T_{st} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$

启动电流与电源电压成正比，因此降低定子电压，可以限制启动电流；

启动转矩 T_{st} 随电压的平方成正比地下降，因此降压启动只适用于空载或轻载启动。

常用的降压启动方法：

- 1) 定子串电抗器（电阻器）启动
- 2) 星形/三角形换接降压启动
- 3) 自耦变压器降压启动

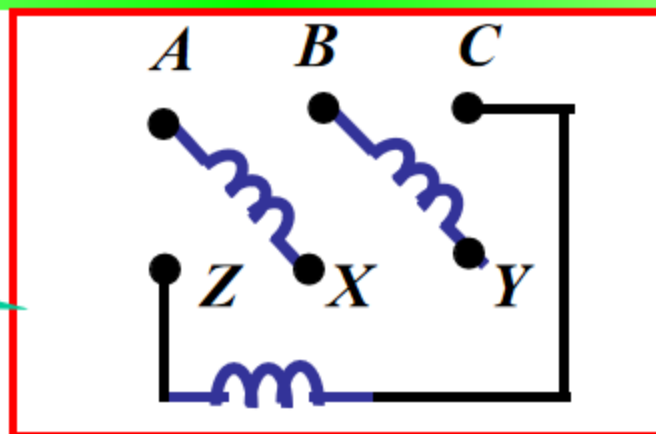


2. 异步电动机的机械特性

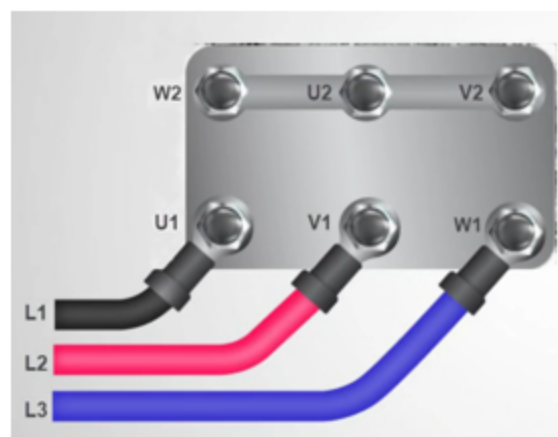
星三角换接启动

联接方式：Y/ Δ 接法

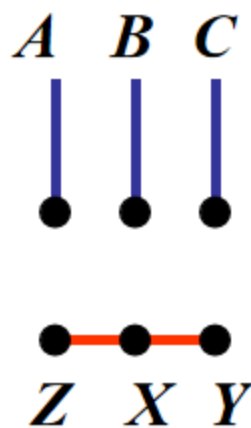
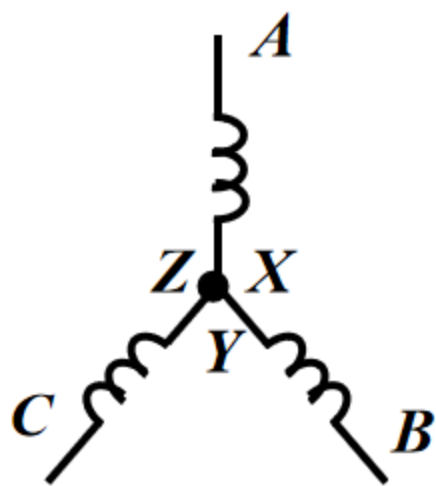
接线盒：



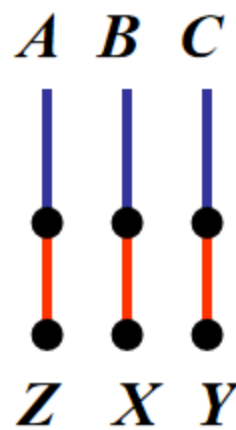
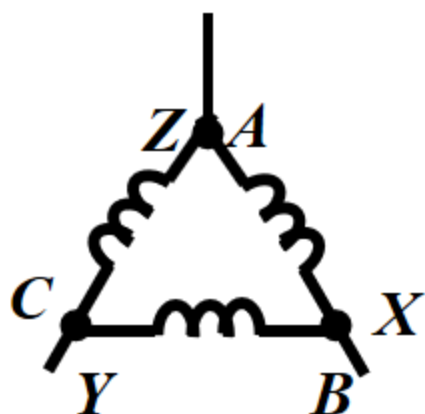
Y接法：



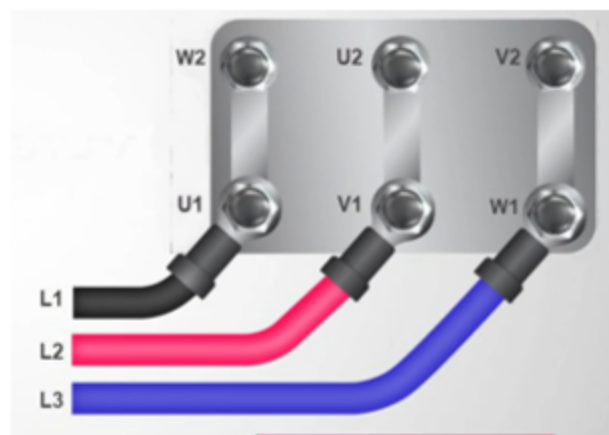
Y接法：



Δ 接法：



Δ 接法：



2. 异步电动机的机械特性

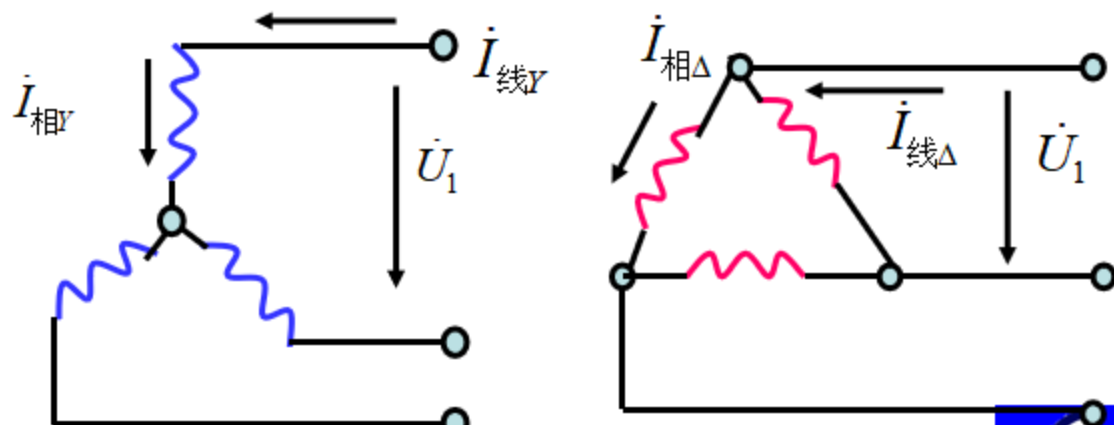
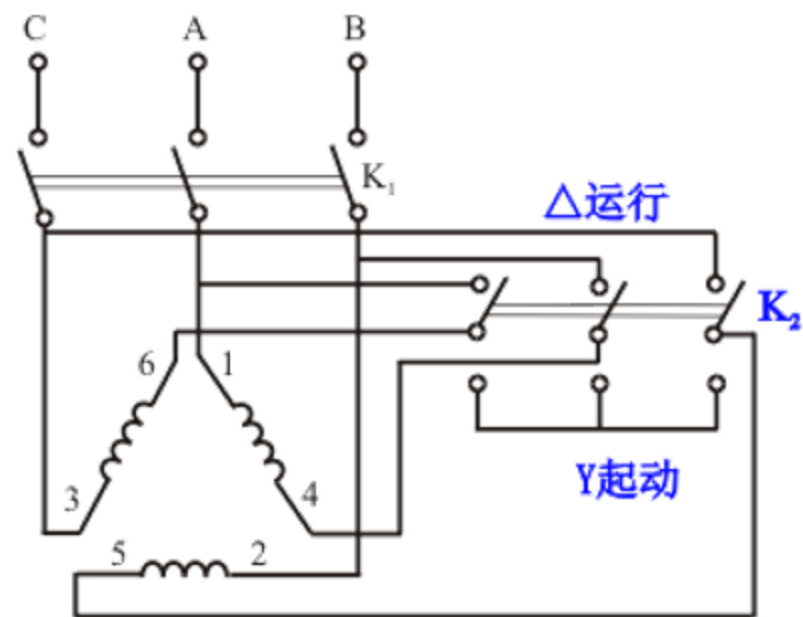
星三角换接起动

方法：起动时将定子绕组接成星形连接，当转速接近于稳定时，再改接成三角形连接。

$$I_{\text{线}Y} = I_{\text{相}Y} \quad U_{\text{线}Y} = \sqrt{3}U_{\text{相}Y} \quad I_{\text{线}\Delta} = \sqrt{3}I_{\text{相}\Delta} \quad U_{\text{线}\Delta} = U_{\text{相}\Delta}$$

$$\frac{I_{stY}}{I_{stD}} = \frac{U_1 / (\sqrt{3}Z)}{\sqrt{3}U_1 / Z} = \frac{1}{3} \quad \frac{T_{stY}}{T_{stD}} = \left(\frac{U_1 / \sqrt{3}}{U_1}\right)^2 = \frac{1}{3}$$

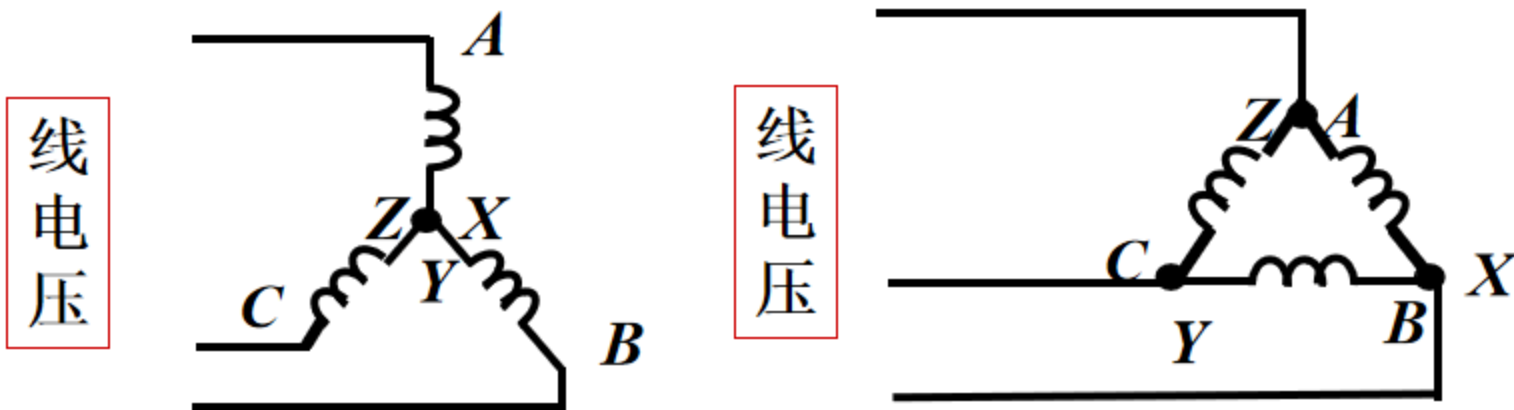
Y- Δ 起动时，起动电流和起动转矩均降为直接起动的**1/3**。适用于空载或轻载起动。



2. 异步电动机的机械特性

星三角换接起动

额定电压：定子绕组在指定接法下应加的线电压。



例：**380/220 Y/Δ**是指：线电压为380V时采用Y接法；
当线电压为220V时采用Δ接法。

说明：一般规定异步电动机的**运行电压**不能高于或低于额定值的 5%。



2. 异步电动机的机械特性

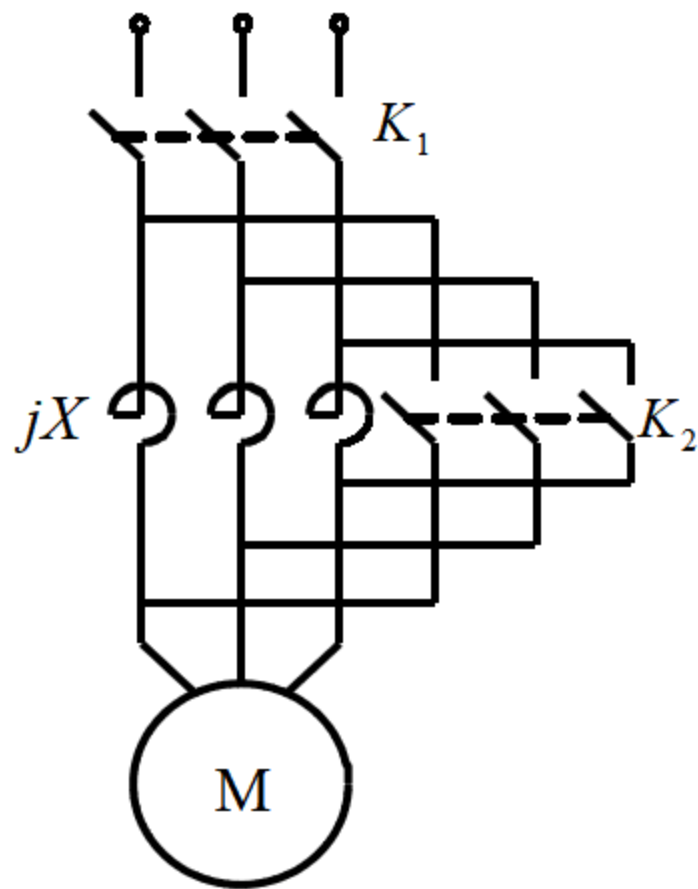
异步电动机的降压启动

定子串电抗器（电阻器）启动

启动时，在定子电路中串接对称电阻或电抗，将降低电动机定子绕组的端电压，从而减小启动电流。

假设串接电阻或电抗后，加在定子绕组上的电压减小到原来的 $1/k$ ，由于启动电流与电压成正比，因此启动电流也减小到原来的 $1/k$ ，而启动转矩与电压平方成正比，故启动转矩将减小到原来的 $1/k^2$ 。只适用于空载或轻载启动。

启动时闭合 K_1 ，启动完毕后闭合 K_2 ，电机进入正常运行。



2. 异步电动机的机械特性

三相绕线型感应电机的起动

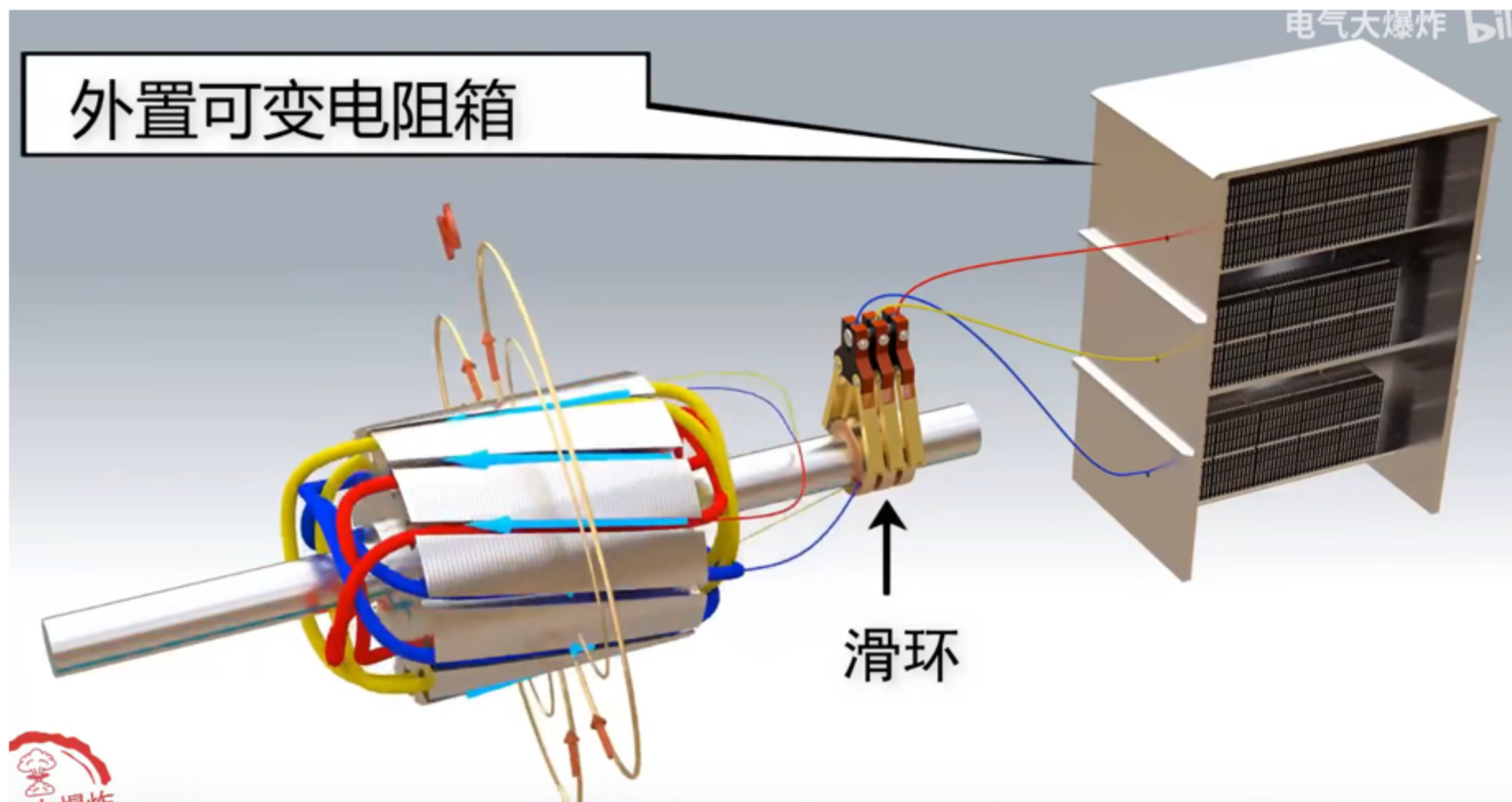
电动机容量较大时，起动电流对电网的冲击较大；如带重载，负载要求电机提供较大的起动转矩；绕线型异步电动机由于转子回路可以连接外电路，就显示出明显的优势。

绕线式异步电动机转子回路串电阻起动，只要串入的电阻合适，就既可减少起动电流又可增加起动转矩，因而可同时满足电机容量大、重载起动这两个要求。



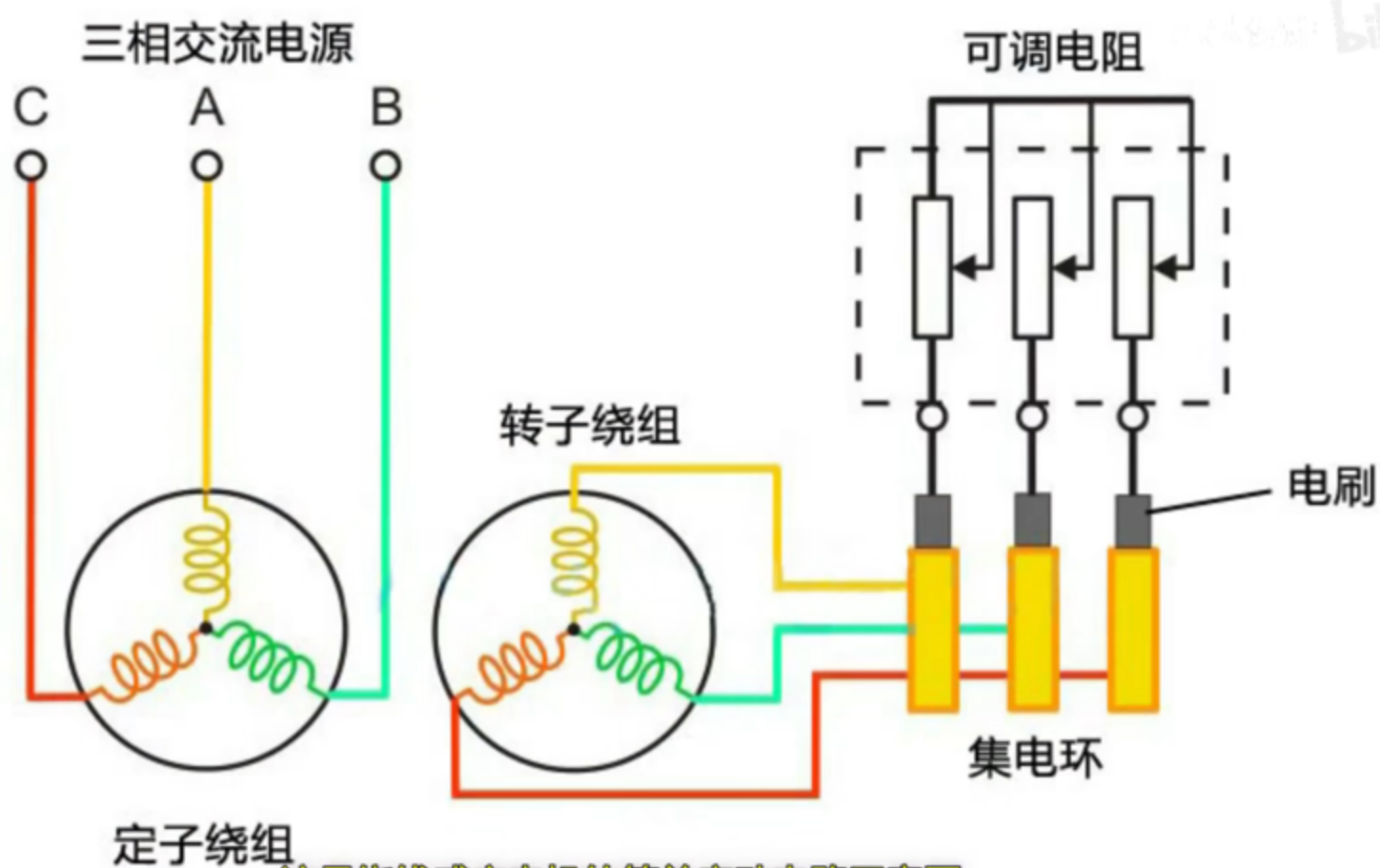
3. 三相异步电动机的调速

绕线式转子串接电阻



3. 三相异步电动机的调速

绕线式转子串接电阻



绕线式转子调速电路图



2. 异步电动机的机械特性

三相绕线型感应电机的起动

起动电流
$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$

转子回路串联电阻, 可以减小起动电流。

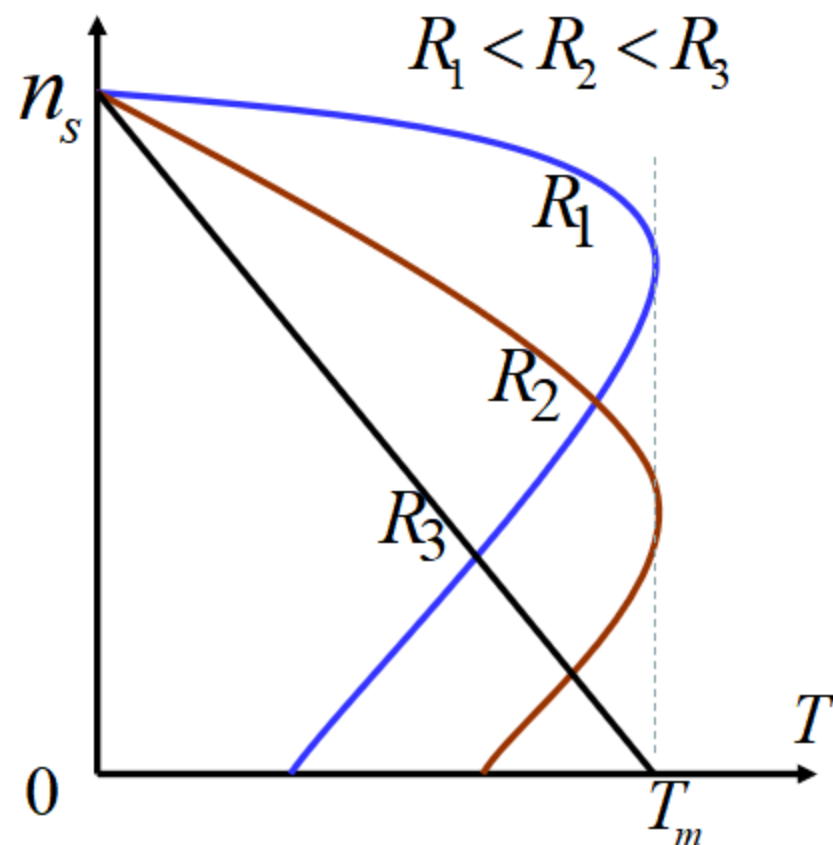
$$T_m \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')} \quad s_m \approx \frac{r_2'}{x_{1\sigma} + x_{2\sigma}'}$$

转子电阻增大时, s_m 增大, T_m 保持不变。

若 $s_m = 1$, 可使起动转矩等于最大转矩。

$$R_{st}' + r_2' = x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' \quad R_{st} = \frac{1}{k_e k_i} (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' - r_2')$$

为了有较大平均起动转矩, 减小电流和转矩冲击, 常采用电阻逐级切除法。



r_2 对机械特性的影响



2. 异步电动机的机械特性

感应电机的工作特性

- 效率和功率因数是两个重要的力能指标。由于额定负载附近，感应电动机具有较高的效率和功率因数，因此，在选用电动机时，应使电机的容量与负载相匹配。
- 如所选的电机功率过大，除设备投资较大外，电机长期轻载运行，效率和功率因数都较低，造成浪费（大马拉小车）。但是如所选的电机的容量小于负载的功率，则电机长期过载运行，铜耗急剧增大，造成电机过分发热而损坏（小马拉大车）。
- 感应电机在拖动运行中变化的负载时，当轻载或空载运行时，应根据负载特点，采用合理的控制手段，达到运行节能的目的。



目 录

1. 异步电机的功率传输关系
2. 异步电机的机械特性
3. 异步电动机的调速控制



3. 三相异步电动机的调速

交流调速系统正在取代直流调速系统。

对于异步电动机的调速来说：

由异步电动机的转速公式

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

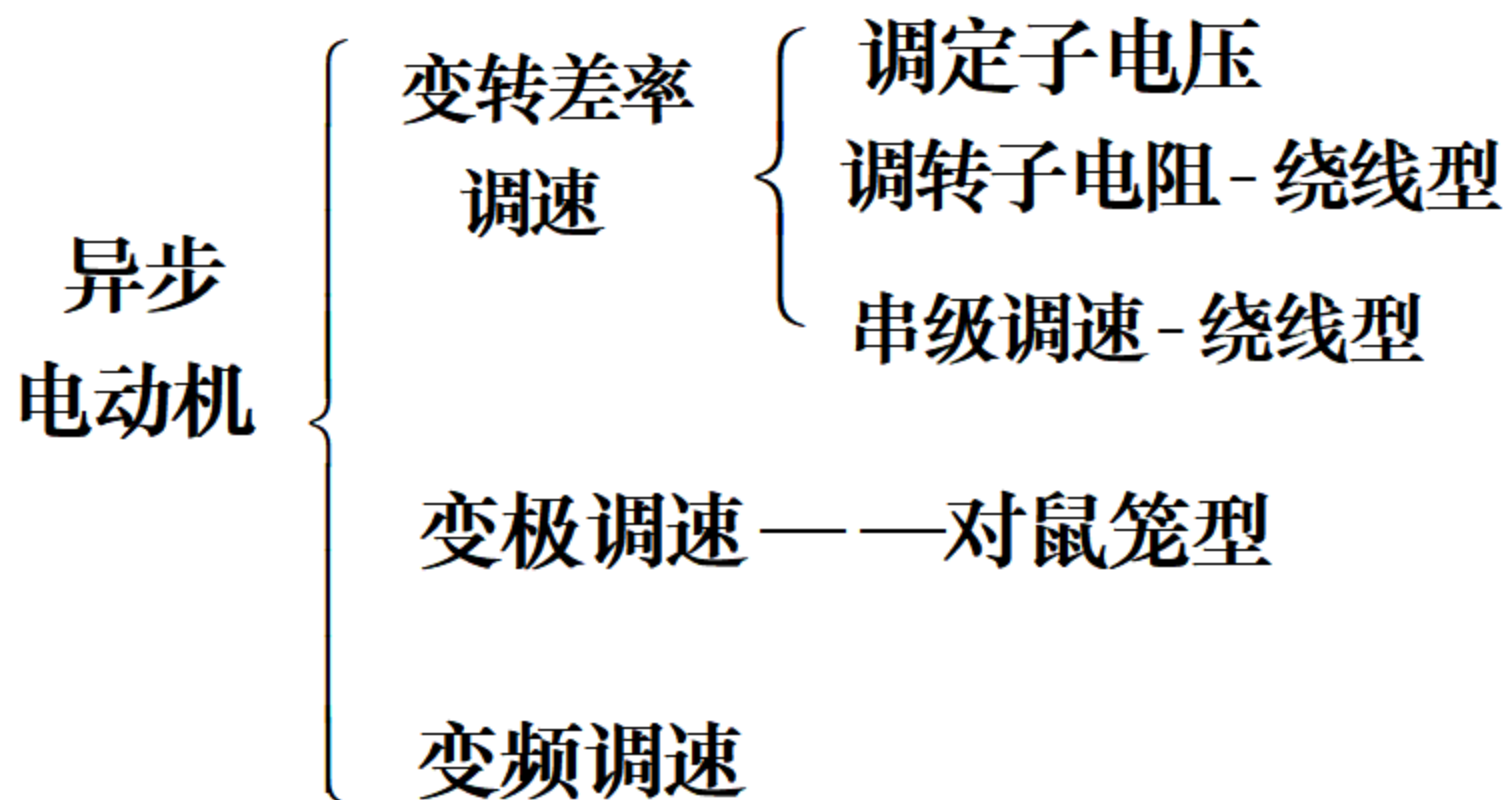
调速方法：

- (1) 变极调速，改变极对数 p
- (2) 变转速差调速，改变转差率 s
- (3) 变频调速，改变电源频率 f_1 。



3. 三相异步电动机的调速

调速方法



3. 三相异步电动机的调速

3.1 转差率 s 调速

- * 改变定子电压 U_1 ,
- * 改变定子回路电阻 r_1 , 改变定子回路电抗 $x_{1\sigma}$
- * 改变转子回路电阻 r_2 , 改变转子回路电抗 $x_{2\sigma}$

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$



3. 三相异步电动机的调速

3.1 转差率 s 调速

改变定子电压调速

1) 若电动机拖动恒转矩负载 T_{L1} ，工作点分别为 a 点、 b 点，对应的转速差分别是 s_1 、 s_2 。降低定子电压时，转速将下降，但降压调速的调速范围很窄。

2) 对风机、泵类负载（负载转矩与转速的平方成正比），如图中的 T_{L2} ，其调速范围较大，但注意过载能力下降很多。此外低速运行时，会出现过电流和功率因数较低的现象。

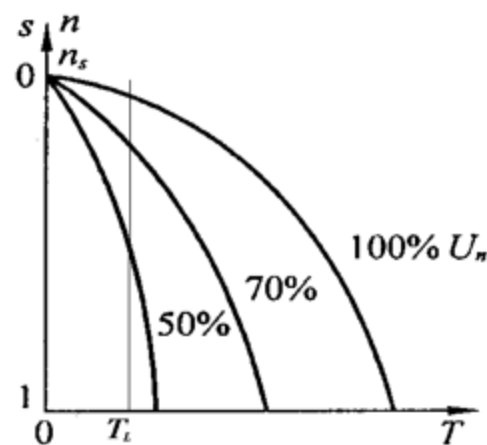


图3-23 b 高电阻转子特性（恒转矩负载）

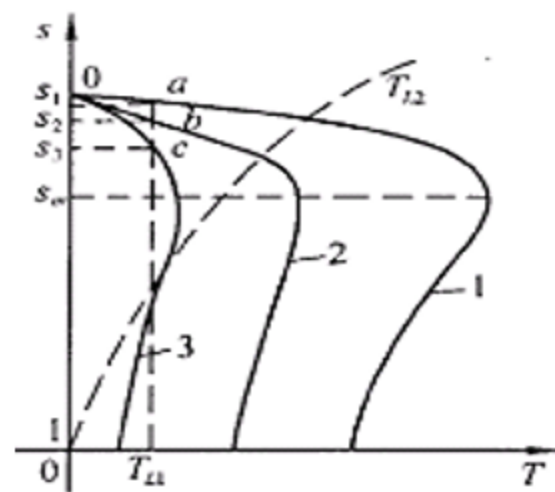
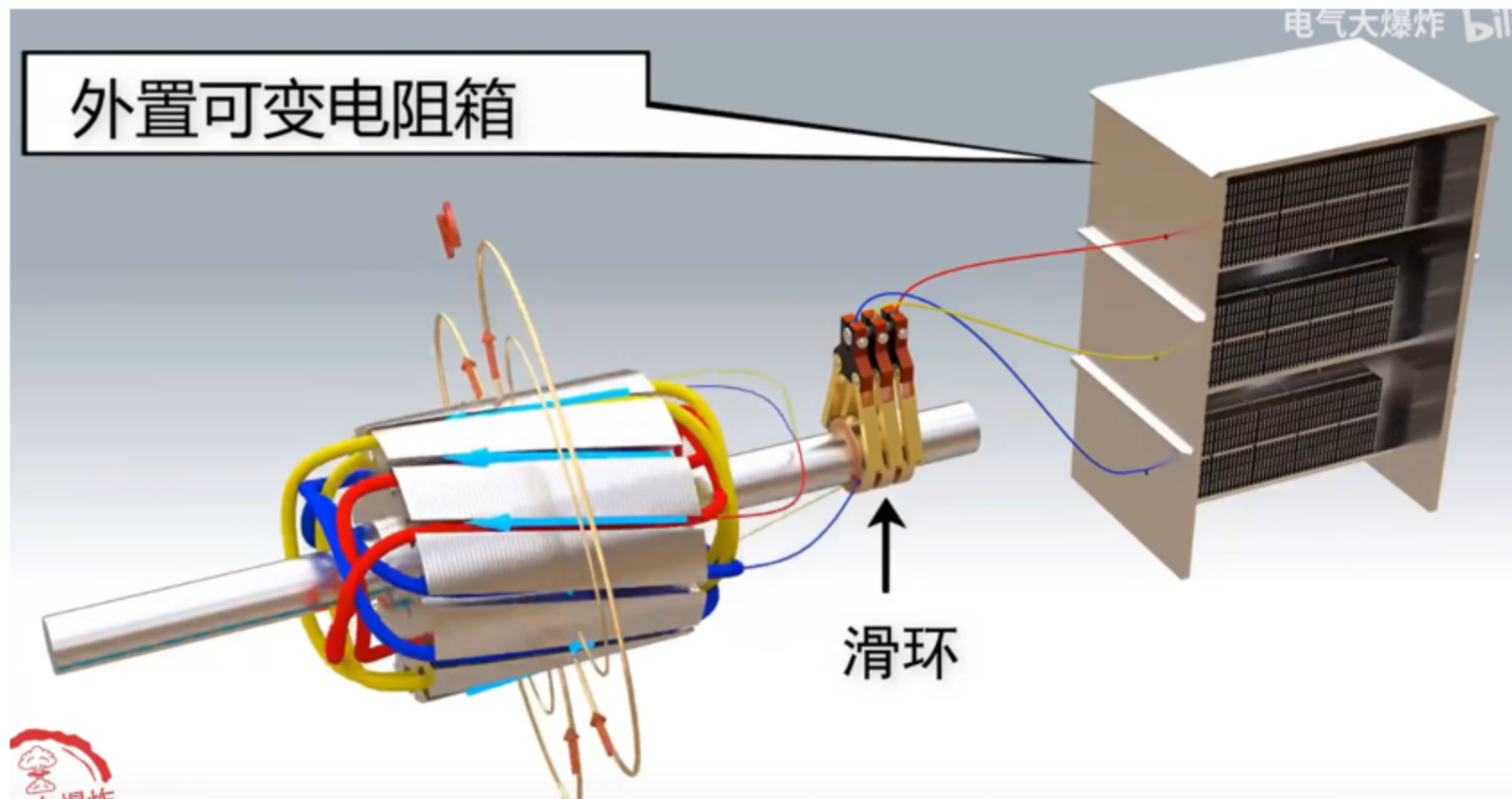


图3-30 改变定子端电压调速（泵类负载）



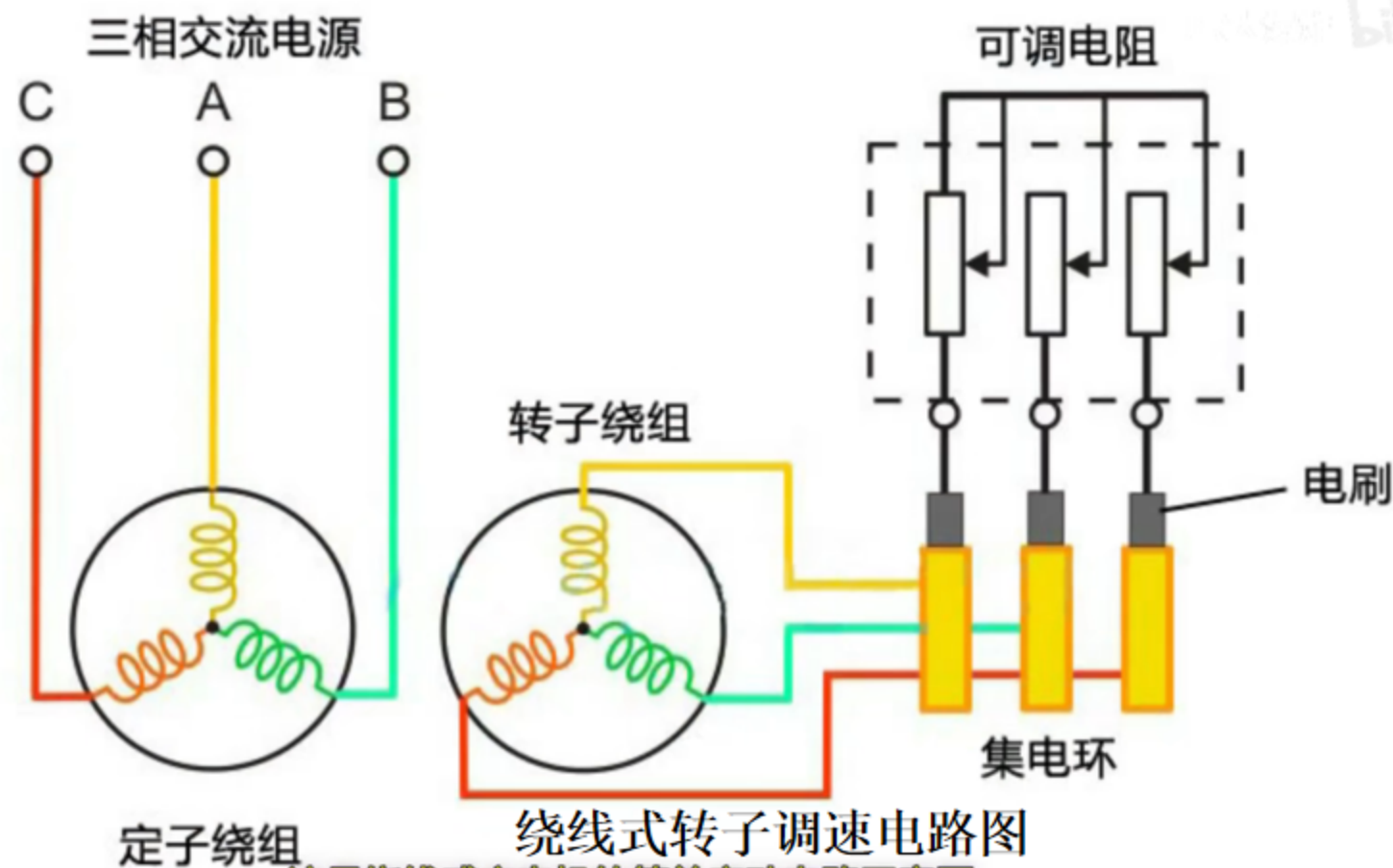
3. 三相异步电动机的调速

3.2 绕线式转子串接电阻调速



3. 三相异步电动机的调速

3.2 绕线式转子串接电阻调速

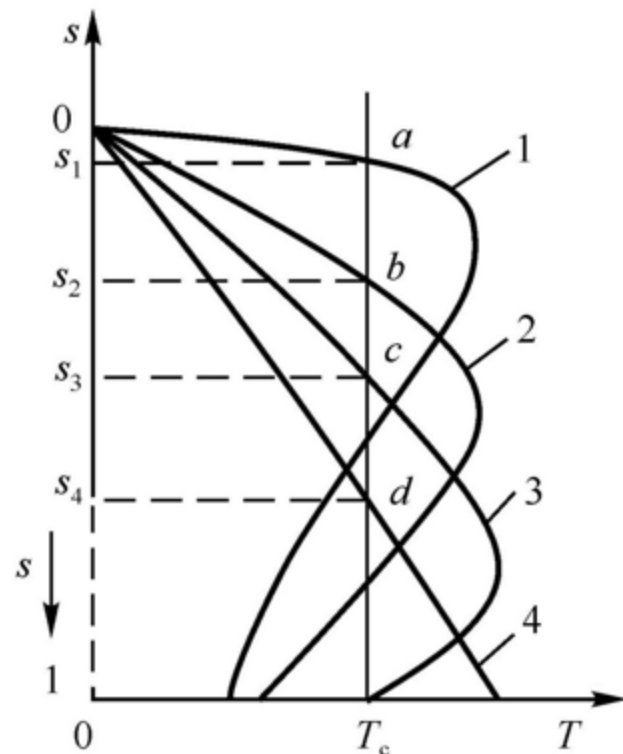


3. 三相异步电动机的调速

3.2 绕线式转子串接电阻调速

绕线型异步电动机机械特性

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]}$$
$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}}$$
$$T_m = \frac{1}{2} \times \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}]}$$



转子电阻增加，
 T_m 不变， s_m 增加。



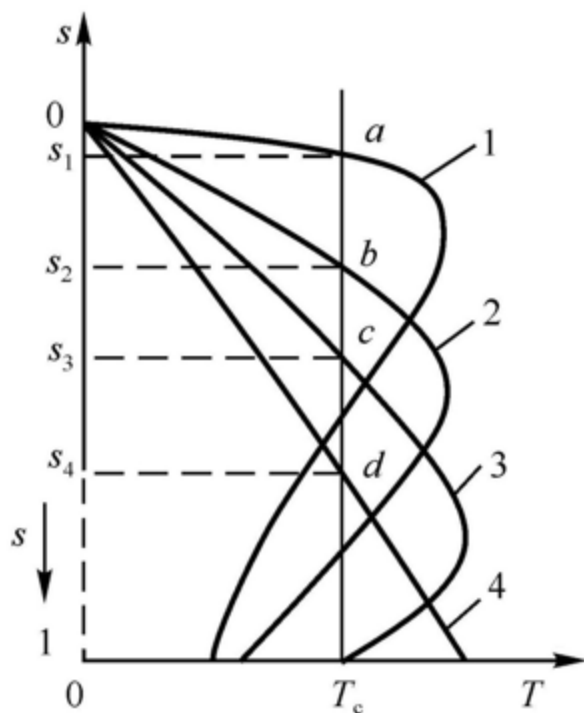
3. 三相异步电动机的调速

3.2 绕线式转子串接电阻调速

恒转矩负载 $\frac{T_2}{S_1} = \frac{r_2 + r_s}{s} = \text{常值}$

- 转速低，铜耗大，效率低。
- 电阻不连续，调速不平滑。

$$T = \frac{P_{em}}{\omega_s} \text{ 不变} \Rightarrow P_{em} \text{ 不变。}$$
$$n \downarrow \Rightarrow s \uparrow \Rightarrow P_{Cu2} = sP_{em} \uparrow$$



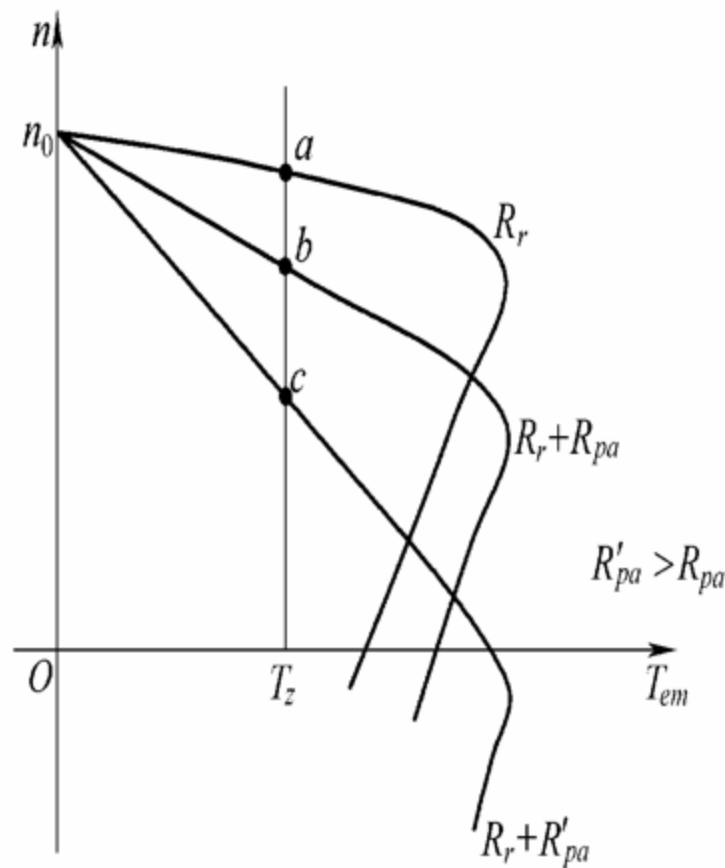
3. 三相异步电动机的调速

3.2 绕线式转子串接电阻调速

优点: 方法简单, 设备投资不高, 工作可靠。

缺点: 调速范围不大, 机械特性较软, 调速能耗较大, 有级调速。

应用: 在对调速性能要求不高的地方, 如运输、起重机械等。



3. 三相异步电动机的调速

3.3 变极调速

同步转速与极对数成反比，改变极对数，可以改变电机同步转速，从而达到调速的目的。

定子绕组采用特殊的绕法，通过改变绕组的外部接线改变极数。

由于极数只能跃变，只能实现有级调速。

转子采用鼠笼式转子，自动与定子磁场极对数相等。

双绕组变极

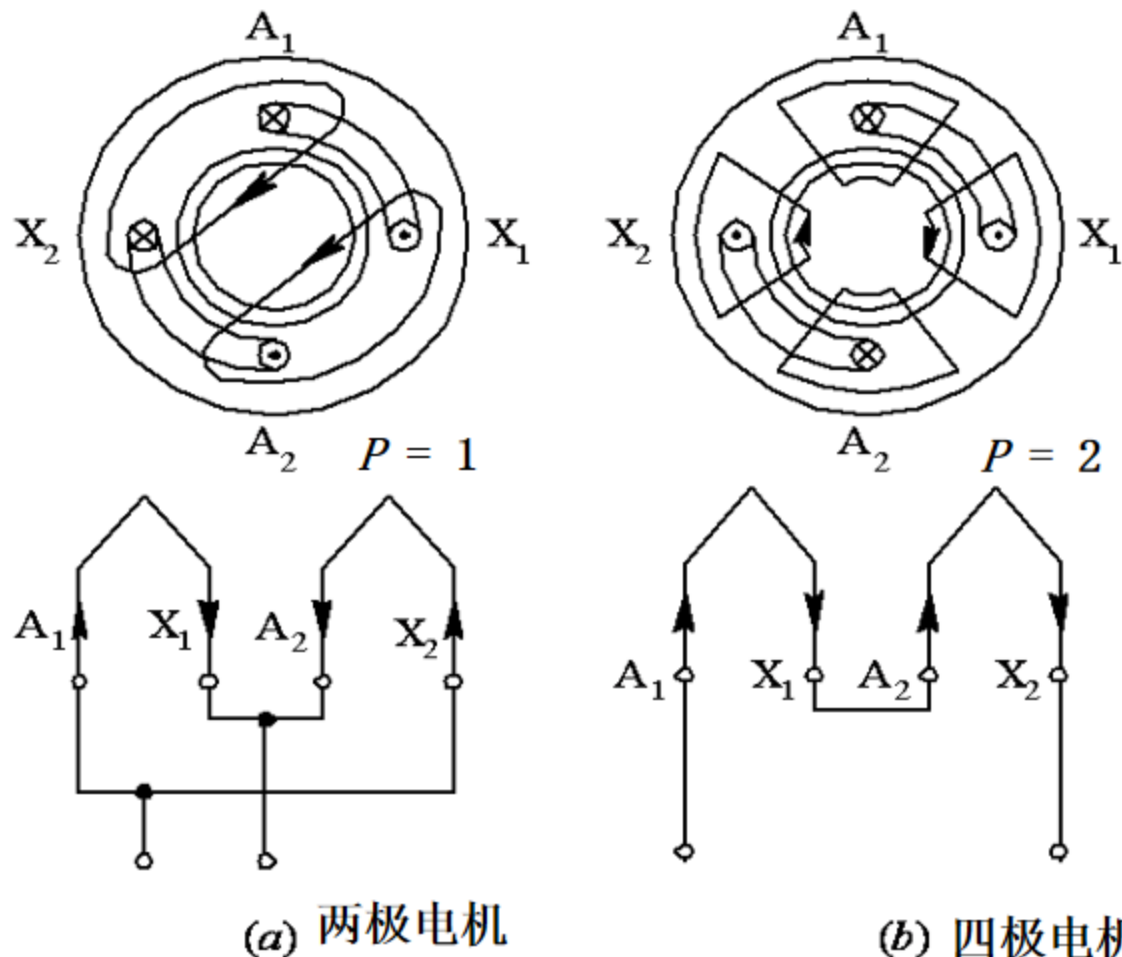
单绕组变极



3. 三相异步电动机的调速

3.3 变极调速

通过改变一套绕组的连接方式而得到不同极对数的磁动势。

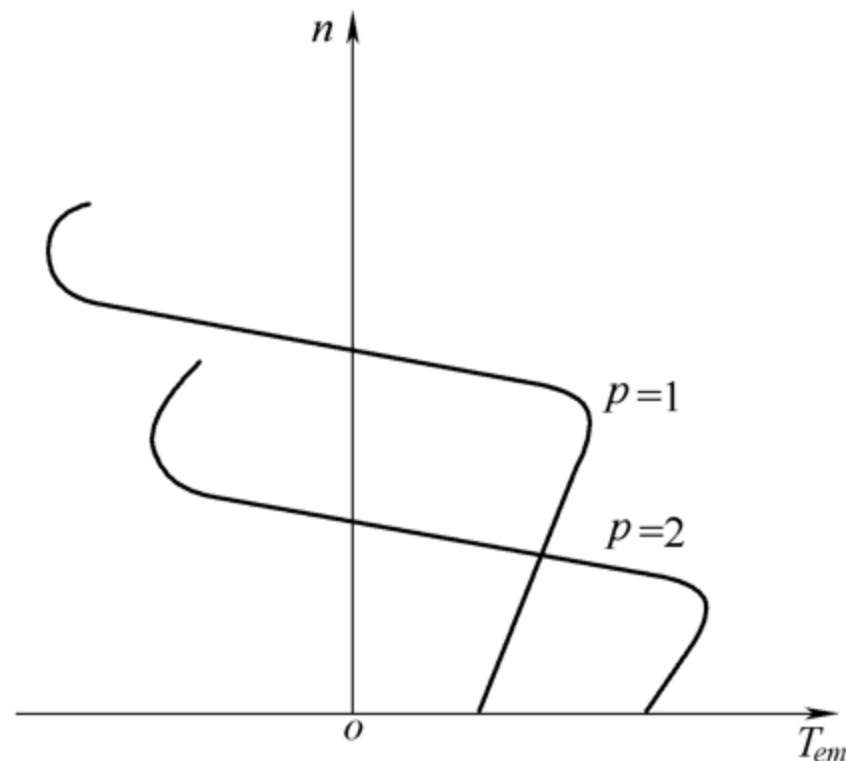


3. 三相异步电动机的调速

3.3 变极调速

变极调速机械特性

由机械特性知，变极调速时电动机的转速几乎是成倍的变化，因此调速的平滑性差，但是稳定性较好，特别是低速起动转矩大。



变级调速机械特性



3. 三相异步电动机的调速

3.3 变极调速

变极调速特点

- 1、具有较硬的机械特性，稳定性良好；
- 2、无转差损耗，效率高；
- 3、接线简单、控制方便、价格低；
- 4、有级调速，级差较大，不能获得平滑调速。
- 5、**仅适用于转子没有固定极对数的鼠笼感应电机。**

适用：不需要无级调速的生产机械，如若干机床、升降机、起重设备等。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频就是把从恒压恒频（CVCF）的交流电转换成变压变频（VVVF）的交流电。

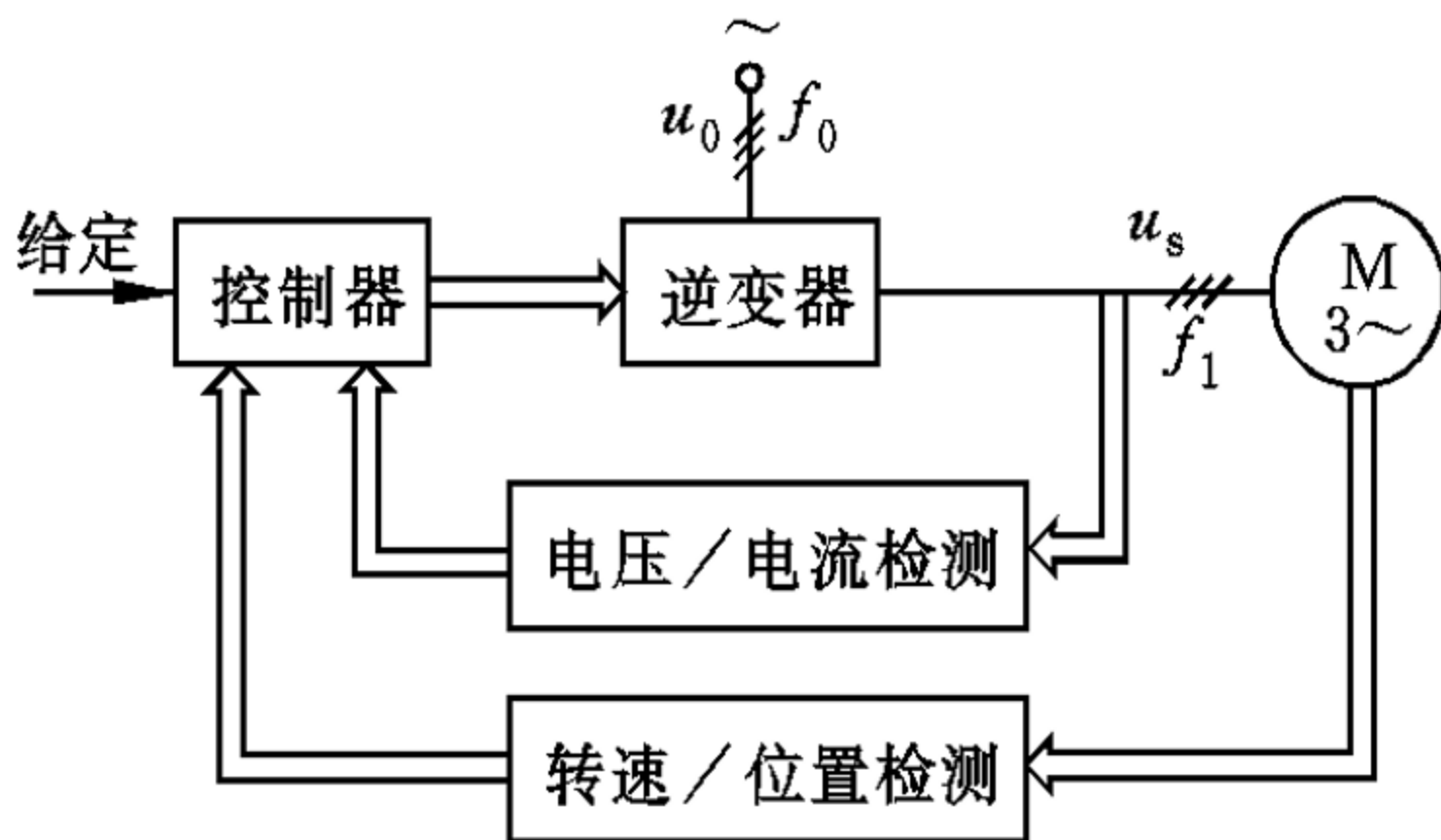
变频调速能够应用在大部分的电机拖动场合，由于它能提供精确的速度控制，因此可以方便地控制机械传动的上升、下降和变速运行。变频应用可以大大地提高工艺的高效性（变速不依赖于机械部分），同时可以比原来的定速运行电机更加节能。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频调速系统的原理框图



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频器基本分类

1) 交-交变频器（直接变频器）

用于大容量, 低速调速系统, 不需减速齿轮箱. 如: 轧钢机, 球磨机, 水泥回转窑等.

2) 交-直-交变频器（间接变频器）

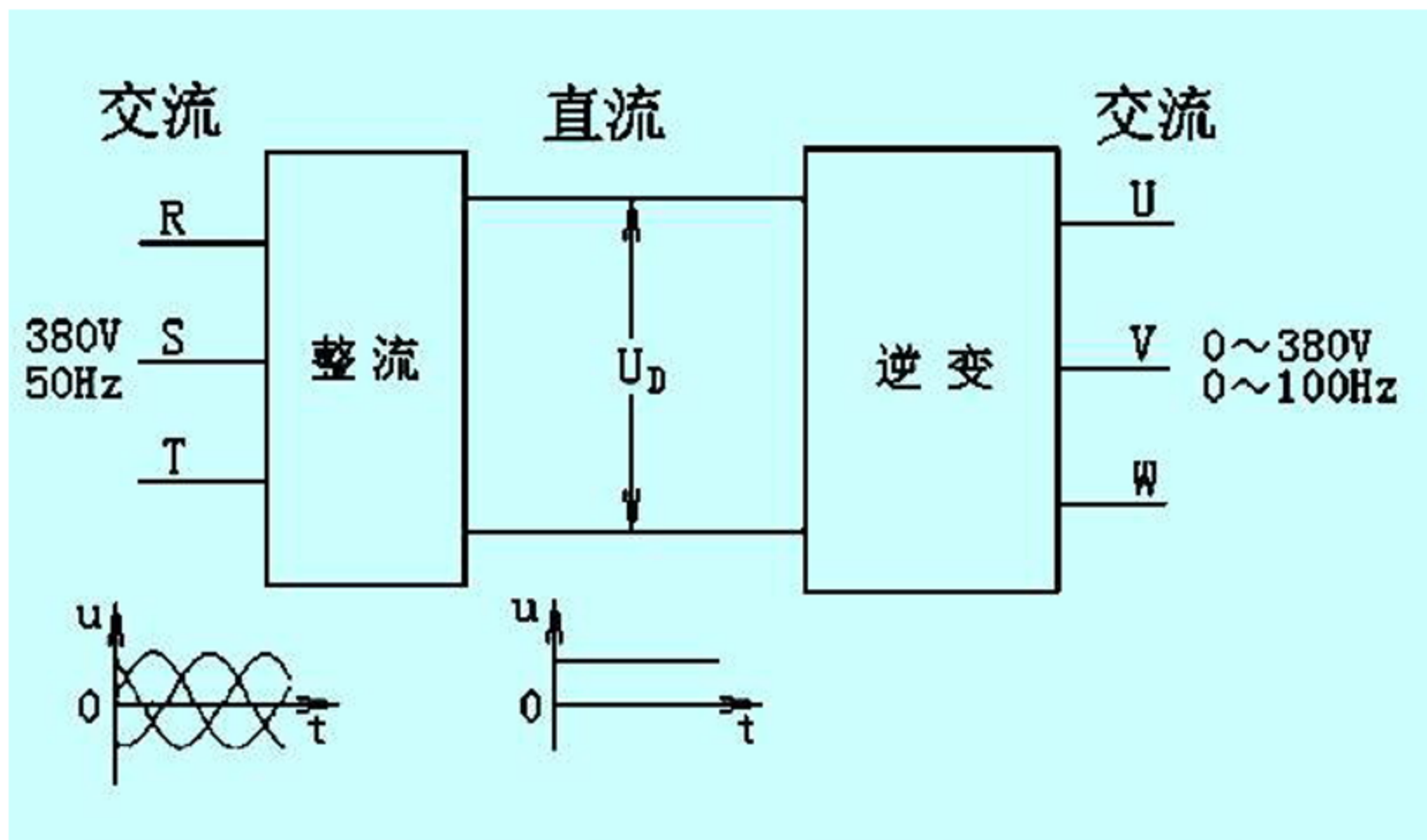
主要适用于: 中小功率、转速较高、负载较平稳的场合, 如: 压缩机、挤压机、给水泵等。频率调节范围宽, 功率因数高。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频调速系统电路框图



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频器基本分类

按变频器的控制方法分为

- 1) 压频比恒定控制
- 2) 矢量控制



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频器基本分类

项目	通用变频器	高性能矢量控制变频器
控制算法	V/F控制+转矩提升 同步机异步机控制算法基本相同	开环矢量控制（无速度传感器矢量控制） 闭环矢量控制（有速度传感器矢量控制） 异步机和同步机需要不同的控制算法
调速范围	<1:40	1:100（开环矢量），1:1000（闭环矢量）
启动转矩	无要求	180% 0.5Hz（开环矢量）， 200% 0速（闭环矢量）
稳速精度	与转差有关（2-3%）	0.5%（开环矢量），0.05%（闭环矢量）
转矩控制	无	有
控制算法	简单	复杂
电机参数	不依赖电机参数，支持同时驱动不同类型不同功率的电机	电机参数对控制性能的影响较大，一般只能驱动一台电机



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

1、恒压频比控制

从基频向下的变频调速

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m$$

希望 $\Phi_m = \text{const}$ Φ_m 增大: 引起磁路过于饱和, 使激磁电流急剧增加。

因此降低电源频率 f_1 时, 必须同时降低电源电压 U_1 。保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 。

$$T_m \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})} = \frac{m_1 p U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma})} \Rightarrow T_{\max} \propto \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2$$

当 $U_1/f_1 = C$, 最大转矩不变, 电机过载能力也不变, 额定转矩不变, 属于恒转矩调速。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速 恒压频比控制

1、基频以下 ($f_1 \leq f_{1N}$)

■ 设额定运行点为 f_{1N} 、 U_{1N}

■ 为保持良好运行性能，要求维持磁路工作点 $\Phi_m = C$

——恒磁通。否则

● 磁路过饱和 → 激磁铜损过大、铁损增加

● 磁路欠饱和 → 出力小，材料未充分利用

■ 维持 $\Phi_m = C \rightarrow$ 要求 $E_1/f_1 = C \rightarrow E_1$ 随 f_1 线性变化，但 E_1 为电机内部量，只能通过端电压 U_1 间接控制



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速 恒压频比控制

① f_1 较高时: E_1 大 $\rightarrow \dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma} \approx -\dot{E}_1$ ($\dot{I}_1 Z_{1\sigma}$ 忽略)

则 $E_1 / f_1 = C \rightarrow U_1 / f_1 = C$ (恒压频比控制) \rightarrow 图中直线 a

② f_1 很低时 ($f_1 < 5\text{Hz}$): E_1 小 $\rightarrow iZ_{1\sigma}$ 不能忽略, 且

$Z_{1\sigma} = R_1 + j\omega_1 L_1 \approx R_1 \rightarrow$ 定子电阻压降 $R_1 I_1$ 比重大

$\rightarrow \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 不成立 \rightarrow

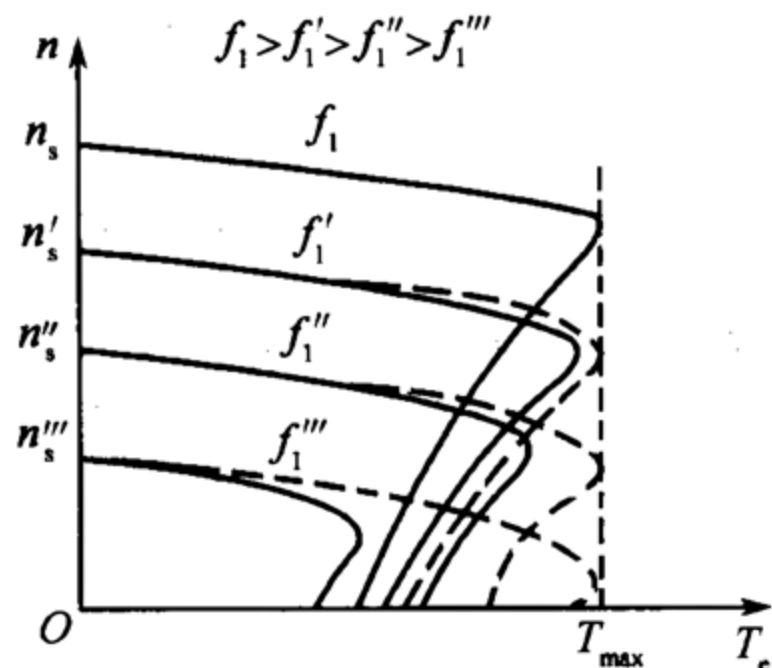
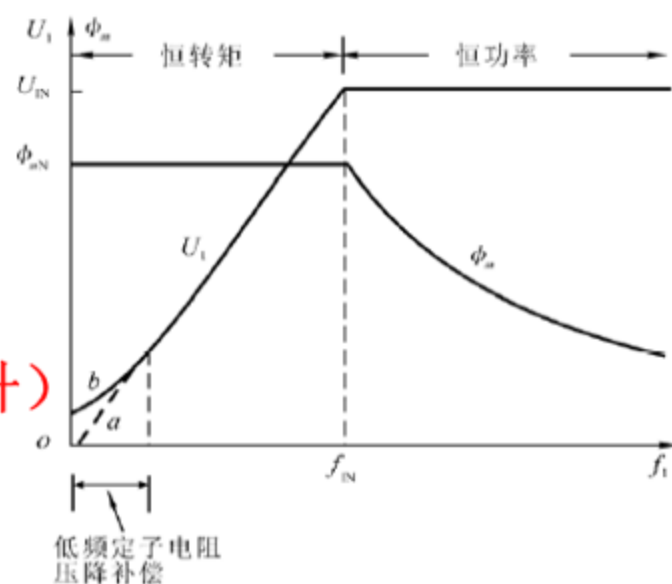
只有适当抬高 U_1 以

克服 $R_1 I_1$, 使

$E_1 / f_1 \propto \Phi_m = C$ 成立

——低频补偿 (低频电压提升)

\rightarrow 图中曲线 b 。



不同频率的机械特性曲线彼此平行, 最大转矩不变。

实际上, 频率低时, 定子电阻影响逐步显现, 最大转矩会减小。

实线为 $U_1/f=C$, 虚线为理想 $E_1/f=c$
图中不同频率的同步转速 n_s 不同的原因是什么?



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速 恒压频比控制

2、基频以上 ($f_1 \geq f_{1N}$)

■ $f_1 \geq f_{1N}$ 后不能再作 $U_1/f_1=C$ 控制, 否则 $U_1 \geq U_{1N} \rightarrow$ 对电力电子器件及电机绝缘耐压造成危害 \rightarrow 只能**维持** $U_1 = U_{1N}$ 不变

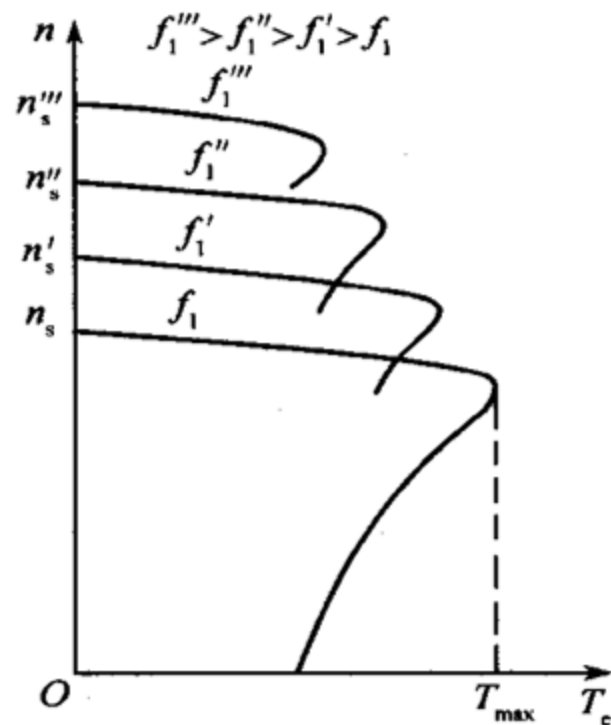
■ $f_1 \geq f_{1N}$ 高频下, $U_{1N} \approx E_1 \propto f_1 \Phi_m = C$, 则有

$$\Phi_m \propto \frac{U_{1N}}{f_1} \propto \frac{1}{f_1}$$

即 $f_1 \uparrow \rightarrow \Phi_m \downarrow$ (弱磁)

■ 电磁转矩 $T \propto \Phi_m \propto \frac{1}{f_1} \propto \frac{1}{\omega_1}$

即 $f_1 \uparrow \rightarrow T \downarrow$



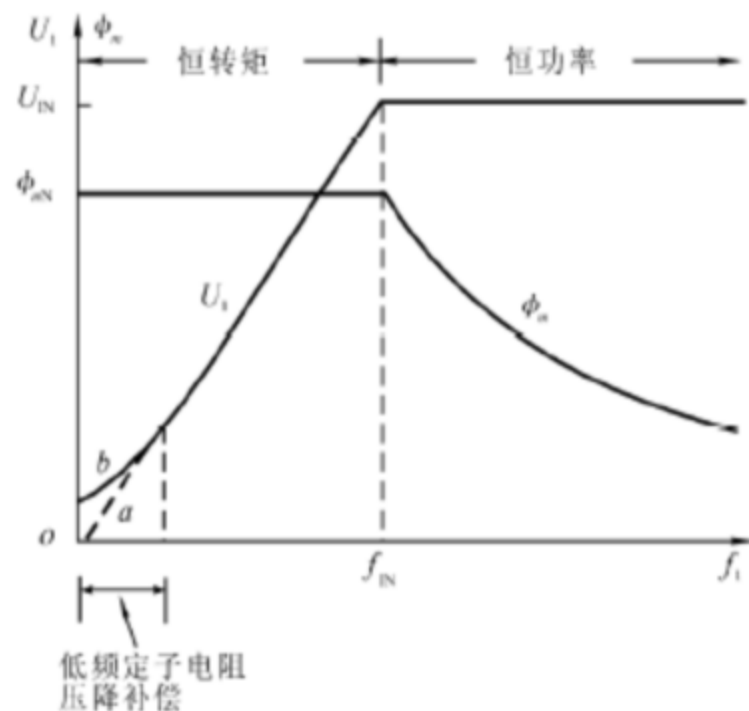
当频率 f_1 增大时, **磁通 Φ_m 将减小**, 因此从基频向上的变频调速是一种**恒压弱磁**的调速方式。这种情况与直流电动机(恒压)弱磁调速很相似。**最大转矩将随频率上升而减小。近似为恒功率调速。**



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速 恒压频比控制

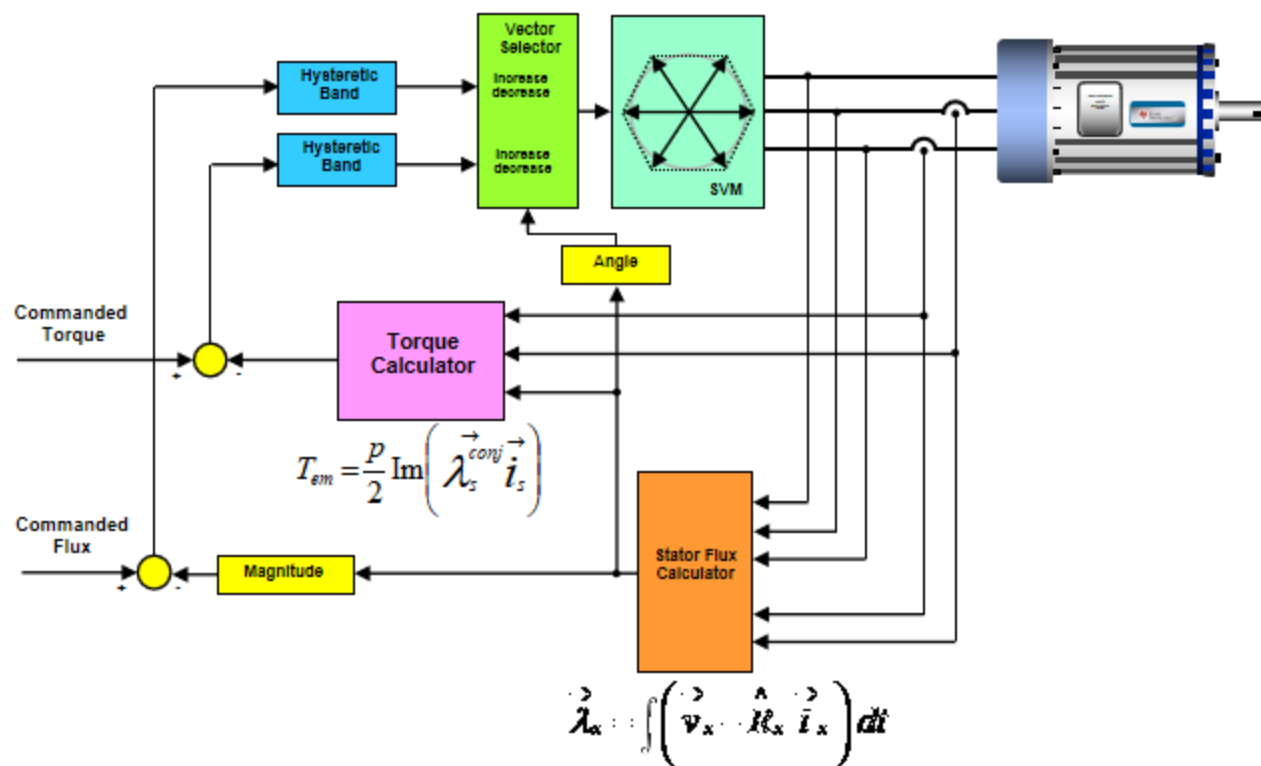
◇ $U_1 = f(f_1)$ 关系成为变频调速系统电压/频率协调控制的依据（纽带）



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

2、矢量控制 (VC) 与直接转矩控制 (DTC)



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频调速的优点

- (1) 控制电机的启动电流，降低电力线路电压波动，启动时需要的功率更低
- (2) 获得可控的加、减速功能和较好的力矩控制特性，获得良好的调速特性
- (3) 显著提高运行效率，节能明显；
- (4) 减少机械传动部件，实现直接驱动。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

变频调速应用举例

传统的空调器，采用ON/OFF控制方式，室内温度和湿度控制波动较大，影响舒适感。压缩机在启动时有很大冲击电流，需要配置比连续运行时更大的电源容量。

变频空调器，根据被控房间温度与预设温度值比较的偏差，控制变频器的频率输出，连续改变制冷压缩机的转速，以更好的精度、更高的效率、更低的噪声、更长的寿命实现房间温度调节。



3. 三相异步电动机的调速

3.4 变频调速

使用变频空调可以达到以下效果：

- (1) 在轻负载时，压缩机在较低转速下工作，整体效率有所提高，因而节能。
- (2) 由于使用了变频技术，压缩机的开停次数减少，制冷系统的压力变化损耗减少。
- (3) 室内温度不再是一个波动值而是在设定值上下一个极小范围内变化。人的舒适度得到了改善。
- (4) 减少了电动机的启动电流，可以增加压缩机的使用寿命。



小结

- **重点掌握**异步电机启动是电流和转矩情况；
- 掌握异步电机额定运行特性；
- 理解感应电机的几种调速方法的基本原理，重点为恒压比变频调速；
- 结合电路知识，重新**掌握**三相异步电机星形连接和三角形连接中相电流，相电压，线电流，线电压；



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

本节PPT“**2. 异步电机的等效电路 3. 异步电机的功率传输关系**”，参考刘慧娟教授在机械工业出版社网站上提供的第四章课件。

[1] 刘慧娟主编，电机学[M]，北京：机械工业出版社，2021.

