



# 哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



## 自动控制实践1-14

### 异步电机的机械特性与调速控制



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 复习

1. 单个整矩绕组产生的磁场
2. 一相绕组产生的磁场
3. 三相绕组合成磁场
4. 多相电机对称绕组产生的磁场
5. 概念理解：相数/极数；电角度/机械角度



## 目 录

### 1.异步电机的运行分析

### 2.异步电机的等效电路

### 3.异步电机的功率传输关系

### 4.异步电机的机械特性

### 5.异步电动机的调速控制



## 1. 异步电机的运行分析

### 1.转差率/滑差/Slip $s$

### 2.理想空载下异步电机运行分析

### 3.堵转下异步电机运行分析

### 4.电动运行下异步电机运行分析



因为电机各相物理量:  $F/\varphi/U/I/E$  有着明确的时间和空间对应关系,因此电机运行分析针对一相而展开。以下标1表示定子,以下标2表示转子。



## 目 录

1.异步电机的运行分析

**2.异步电机的等效电路**

3.异步电机的功率传输关系

4.异步电机的机械特性

5.异步电动机的调速控制



## 2. 异步电机的等效电路

电动运行下异步电机的平衡关系：

1) 磁势平衡方程式

$$F_0 = F_1 + F_2$$

$$I_0 = I_1 + \frac{I_2}{k_i}$$

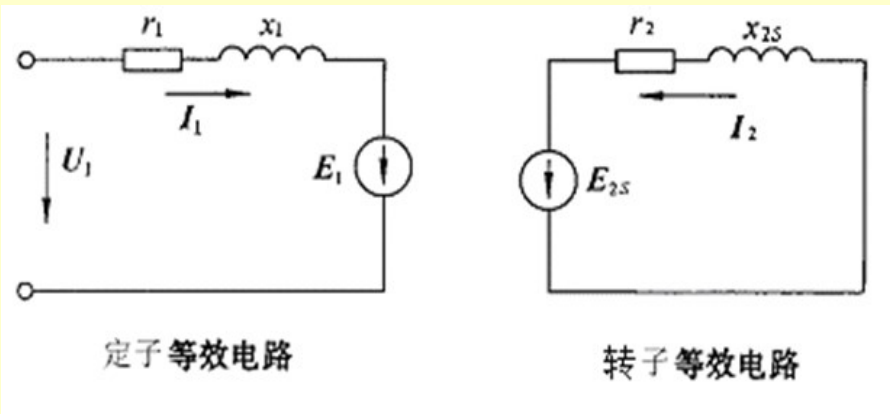
2) 电压平衡方程式

$$U_1 = -E_1 + I_1(r_1 + jx_1)$$

$$E_{2s} = I_2 r_2 + jI_2 x_{2s}$$



## 2. 异步电机的等效电路

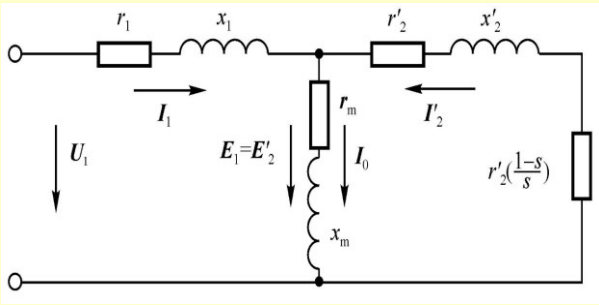


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. 异步电机的等效电路

$$\left. \begin{aligned} I_2' &= \frac{1}{k_i} I_2 \\ E_2' &= k_e E_2 \\ r_2' &= k_e k_i r_2 \\ x_2' &= k_e k_i x_2 \end{aligned} \right\}$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目 录

- 1.异步电机的运行分析
- 2.异步电机的等效电路
- 3.异步电机的功率传输关系
- 4.异步电机的机械特性
- 5.异步电动机的调速控制

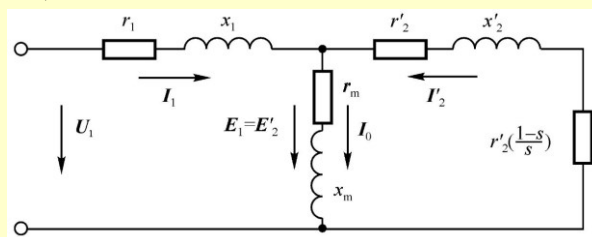


## 4. 异步电机的功率传输关系

异步电动机的输入功率

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$U_1$ 、 $I_1$ 、 $\cos \varphi_1$ : 定子一相绕组的电压、电流、功率因数。 $m_1$ : 定子相数



### 3. 异步电机的功率传输关系

\*输入功率  $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$

\*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：

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 异步电机的功率传输关系

• 电磁功率

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

• 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

$$P_{\text{em}} = m_1 I_2'^2 \frac{1}{s} r_2' = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 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:

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

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

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 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空载损耗 $P_0$ 。

$$P_2 = P_m - P_0$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目 录

- 1.异步电机的运行分析
- 2.异步电机的等效电路
- 3.异步电机的功率传输关系
- 4.异步电机的机械特性**
- 5.异步电动机的调速控制



## 4. 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。





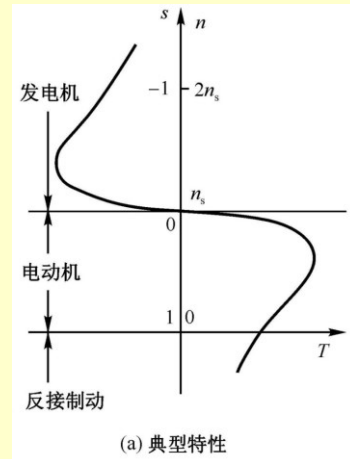
## 4. 异步电动机的机械特性

机械特性：以电压为参变量，电磁转矩  $T$  与转差率  $s$  (转速  $n$ ) 间的关系。

表达式：

$$T = \frac{3pr_2'U_1^2}{2\pi f_1 s [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

电机转速和转矩都以磁场转速为正  
向。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

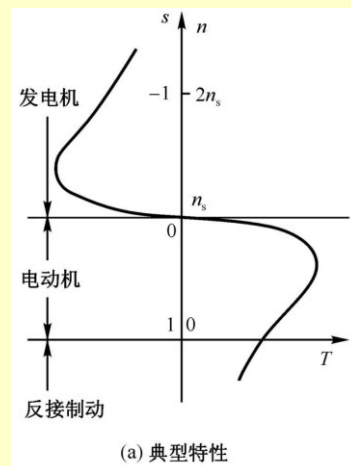
$$T = \frac{3pr_2'U_1^2}{2\pi f_1 s [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

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。

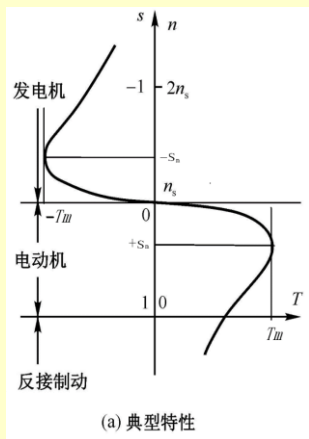


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 4. 异步电动机的机械特性

$T_m$ 与 $s_m$



• 临界转差率 $s_m$

$dT / ds = 0 \Rightarrow s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$

• 最大转矩 $T_m$

$s_m$ 代入 $T = f(s)$  得:

$$T_m = \pm \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_x^2}{2 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}$$



# 4. 异步电动机的机械特性

$T_m$ 与 $s_m$

对参数表达式, 通常  $R_1 \ll (X_1 + X'_2)$

$\Rightarrow s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad T_m \approx \pm \frac{m_1 U_x^2}{2\Omega_1 (X_1 + X'_2)}$

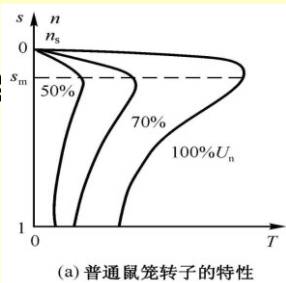
1) 当电机参数及电源频率不变时,

$T_m$ 与 $U_x^2$ 成正比,  $s_m$ 保持不变, 与 $U_x$ 无关

2) 当电源频率及电压不变时,

$s_m$ 与 $T_m$ 近似与 $X_1 + X'_2$ 成反比;

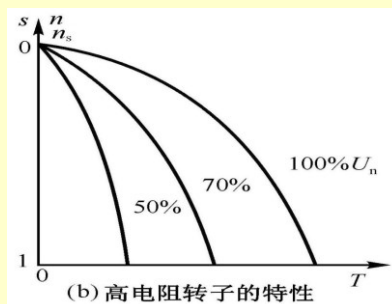
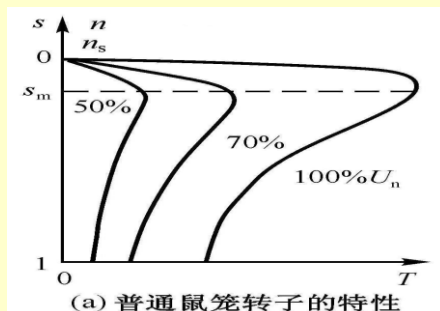
3)  $T_m$ 与 $R'_2$ 无关,  $s_m$ 则与 $R'_2$ 成正比。



## 4. 异步电动机的机械特性

$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad T_m \approx \pm \frac{m_1 U_x^2}{2\Omega_1 (X_1 + X'_2)}$$

### • 两种异步电机的机械特性曲线



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



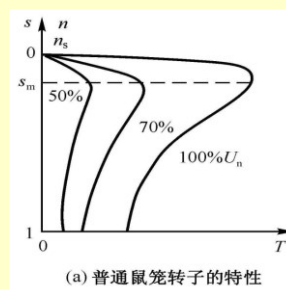
## 4. 异步电动机的机械特性

普通三相异步电动机

$r_2$  小,  $s_m : 0.1 \rightarrow 0.2$

$s_n : 0.01 \rightarrow 0.05$

可看成是恒速电机。



$$0 < s < s_m : \quad T = \frac{3pr'_2 U_1^2}{2\pi f_1 s \frac{(r'_2)^2}{s^2}} = \frac{3pr'_2 U_1^2}{2\pi f_1 (r'_2)^2} s$$

$$\Rightarrow T = ks$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 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。
- 如果  $T_z > T_m$ ，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  $K_T$

$$K_T = T_m / T_N$$

- 一般电动机的  $K_T = 1.8 \sim 3.0$ ，在电机参数表中给出。



## 4. 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， $s=1$  ( $n=0$ ) 代入  $T = f(s)$ ，得

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_0} \frac{U_x^2 R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

- 对绕线式异步电动机可通过转子回路串电阻（加大  $R'_2$ ），可增加电动机的  $T_{ST}$ ；



## 4. 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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

### 转矩的实用表达式

实用表达式 
$$T = \frac{2T_m (1 + s_m R_1 / R_2')}{s / s_m + s_m / s + 2s_m R_1 / R_2'}$$

忽略  $R_1$ ，则 
$$T = \frac{2T_m}{s / s_m + s_m / s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_N = \frac{2T_m}{s_N / s_m + s_m / s_N} \\ T_m = K_T T_N \\ s_m = s_N (K_T + \sqrt{K_T^2 - 1}) \end{array} \right.$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

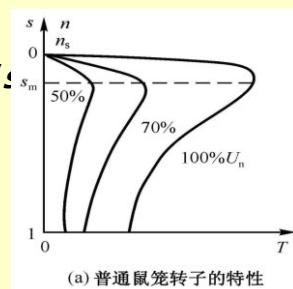
### 转矩的实用表达式

额定负载时

$$T_N = \frac{2T_m}{s_N / s_m + s_m / s_N}$$

额定负载时,  $s$  一般很小, 有  $s/s_m \ll s_m/s_N$ , 则

$$T = \frac{2T_m}{s_m} s$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

### • 降低 $U_1$ 时的人为机械特性

由下式

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

$$T_m = \pm \frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2}{2 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}$$

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$$

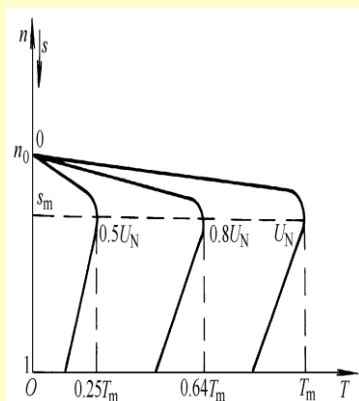
— 当降低  $U_x$  时,  $T_m$ ,  $T_{st}$  与  $U_x^2$  成正比,  $s_m$  与  $U_x$  无关。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

### • 降低 $U_1$ 时的人为机械特性



$$T = \frac{m_1}{\Omega_0} I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \Rightarrow I_{2N}'^2 / s_N = I_{2x}'^2 / s_x$$

对额定负载， $U_x$ 降低后电动机电流将大于额定值，电动机如长时连续运行，最终温升将超过允许值，导致电动机寿命缩短，甚至烧坏。



## 4. 异步电动机的机械特性

### • 转子回路串联对称电阻时的人为机械特性

由

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T_m = \pm \frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2}{2 \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}$$

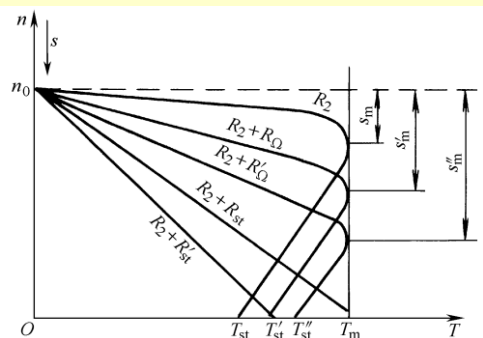
$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

—  $R_2'$  增大时， $n_0$ ， $T_m$  不变， $s_m$  增大， $T_{st}$  一开始增大，当增大到  $T_{st} = T_m$  后  $T_{st}$  开始减小。



## 4. 异步电动机的机械特性

- 转子回路串联对称电阻时的人为机械特性

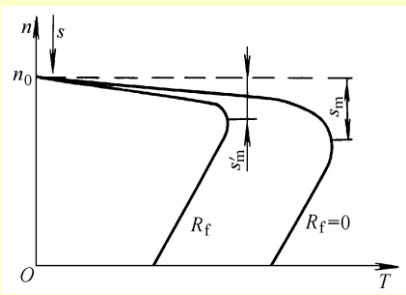
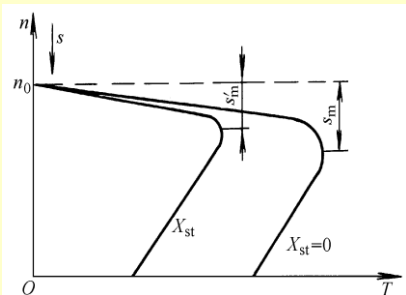


- 可见，对于绕线转子异步电动机，可通过在转子回路串联对称电阻来达到减小起动电流的目的，同时也可用于调速。



## 4. 异步电动机的机械特性

- 定子回路串联对称电抗/电阻时的人为机械特性



$X_1/R_1$ 增大时， $n_0$ 不变， $T_m$ 、 $s_m$ 、 $T_{st}$ 随 $X_1/R_1$ 的增大而减小。



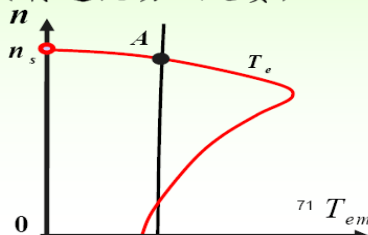


## 4. 异步电动机的机械特性

### 与不同负载的配合特点

恒转矩负载下的稳定与不稳定运行区间

- ☐ 稳定运行：扰动消除后电动机转速恢复到原有的状态
- ☐  $s = s_m$  是临界运行状态，
- ☐  $0 < s < s_m$  时，稳定运行（转速扰动负反馈）
- ☐  $s > s_m$  时，不稳定运行（转速扰动正反馈）



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

### 异步电动机的起动

- ☐ 起动方法
  - ☐ 直接起动
    - 供电系统变压器容量  $\gg$  异步电动机容量
    - 一般规律
      - 非频繁起动，电机容量小于变压器30%
      - 频繁起动，电机容量小于变压器20%
      - 动力照明共用电源，电压降小于5%
  - ☐ 直接起动方法
    - 利用开关或接触器将异步电动机直接投入电网

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 4. 异步电动机的机械特性

### 异步电动机的起动

- 降压启动
  - 定子绕组串电阻或电感起动;
  - 自耦调压起动;
  - 星-三角起动;
  - 转子绕组串电阻起动



## 目 录

- 1.异步电机的运行分析
- 2.异步电机的等效电路
- 3.异步电机的功率传输关系
- 4.异步电机的机械特性
- 5.异步电动机的调速控制**



## 5. 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：

改变极对数  $p$ ，

改变转差率  $s$ ，

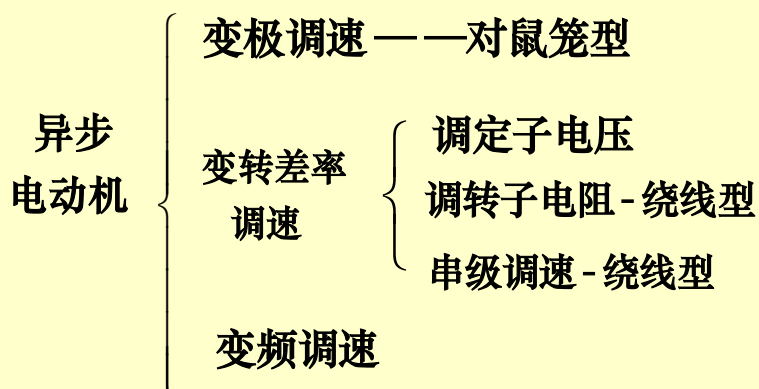
改变电源频率  $f_1$ 。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

调速方法

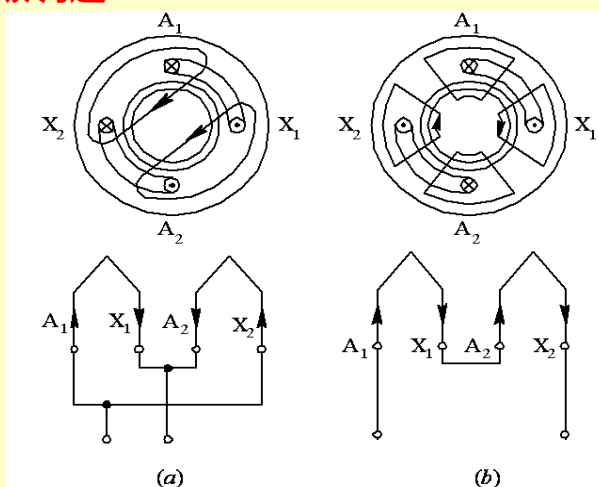


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 5.1 变级调速



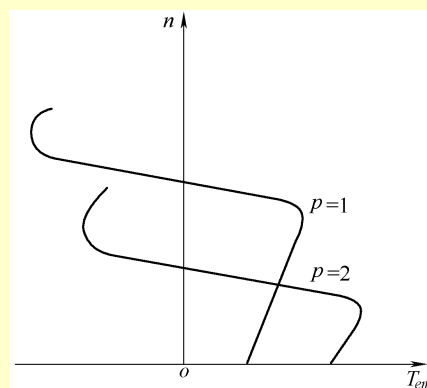
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变级调速机械特性

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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。

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。



## 5. 三相异步电动机的调速

### 5.2 转差率 $s$ 的调速方法

- \* 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  $x_1$ ,
- \* 改变转子回路电阻  $r_2$ , 改变转子回路电抗  $x_2$ 。

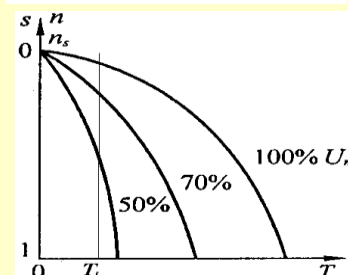
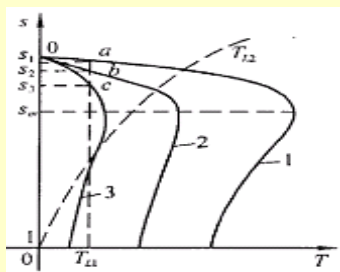
$$T = \frac{3pr_2'U_1^2}{2\pi f_1 s [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$



## 5. 三相异步电动机的调速

### 改变定子电压调速

- 普通异步电机，  
恒转矩负载，稳定运行区很小，  
转速变化太小，**不适用**。  
对通风机类负载，可用。
- 对转子电阻大的电机，  
恒转矩负载，调速范围宽，可用。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

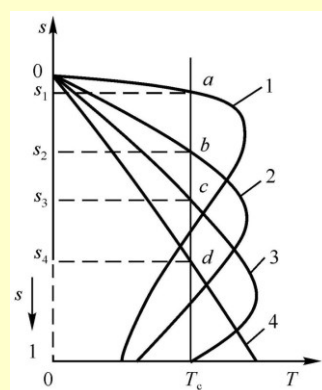
### 转子串接电阻调速

#### 绕线型异步电动机机械特性

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$T_m = \frac{1}{2} \times \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$



转子电阻增加，  
 $T_m$  不变， $s_m$  增加。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

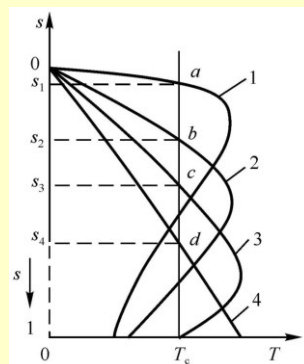
### 转子串接电阻调速

恒转矩负载  $\frac{r_2}{s_1} = \frac{r_2 + r_s}{s} = \text{常值}$

- 转速低，铜耗大，效率低。
- 电阻不连续，调速不平滑。

$$T = \frac{P_{em}}{\omega_s} \text{ 不变} \Rightarrow P_{em} \text{ 不变。}$$

$$n \downarrow \Rightarrow s \uparrow \Rightarrow P_{Cu2} = sP_{em} \uparrow$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



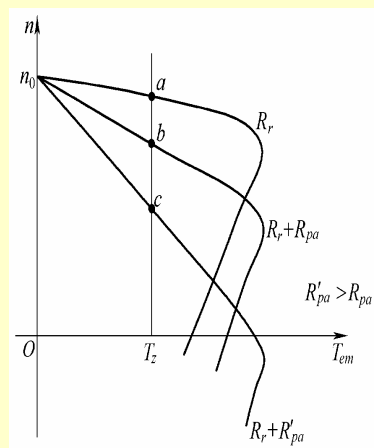
## 5. 三相异步电动机的调速

### 转子串接电阻调速特点

**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。

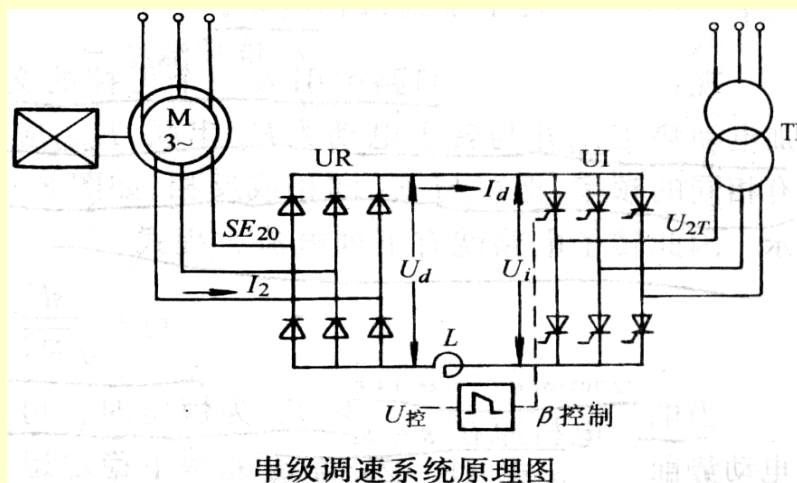


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 绕线转子异步电动机的串级调速



串级调速系统原理图

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 5.3 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。

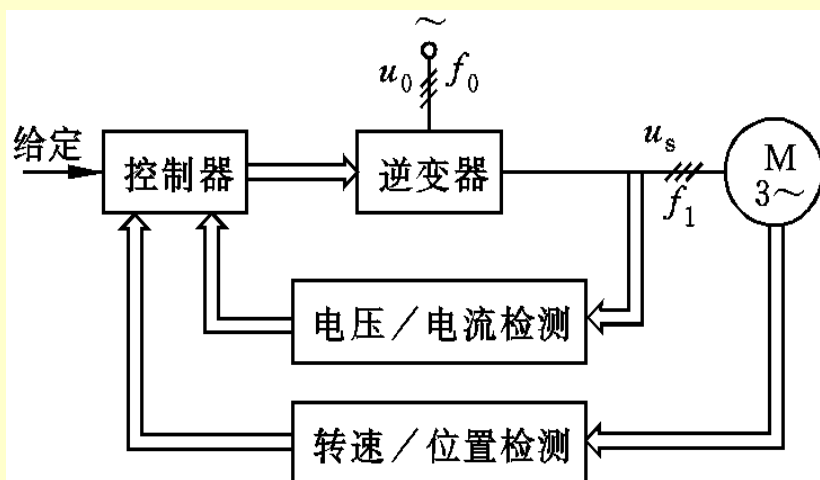
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频调速系统的原理框图



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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)

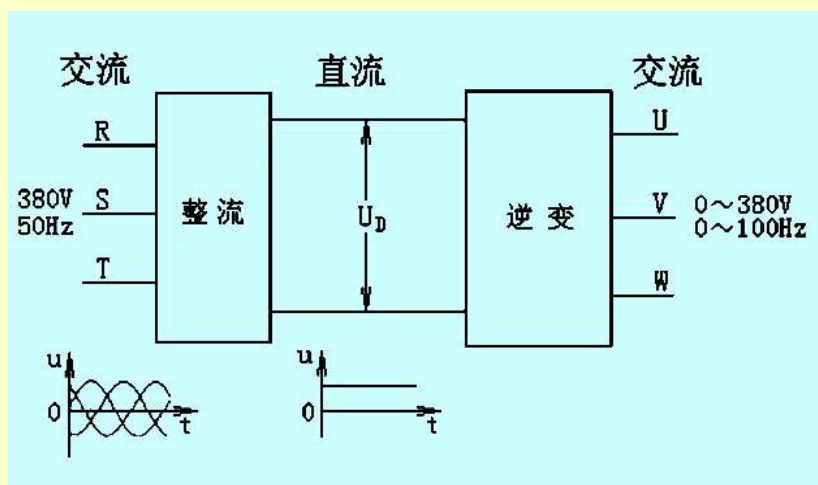
主要适用于: 中小功率、转速较高、负载较平稳的场合, 如: 压缩机、挤压机、给水泵等. 频率调节范围宽,功率因数高.

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频调速系统电路框图

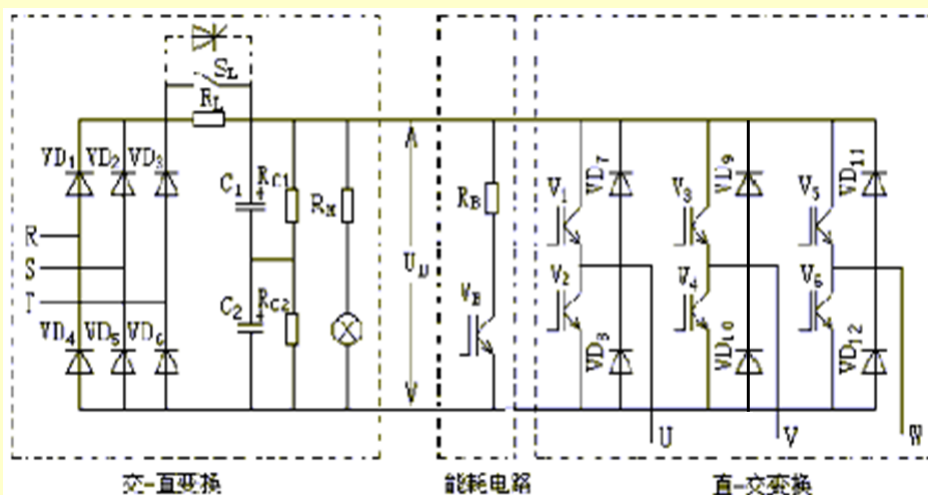


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 通用变频器的主电路



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频器基本分类

#### 按变频器的控制方法分

- 1) 压频比恒定控制
- 2) 矢量控制
- 3) 直接转矩控制



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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



## 5. 三相异步电动机的调速

### 1. 恒压频比控制

◆反映在电机内、外部电量关系上，有

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 k_{w1} \Phi_m$$

式中  $E_1$ —电机每相反电势， $f_1$ —供电频率，  
 $w_1$ —定子每相串联匝数， $k_{w1}$ —基波绕组系数

◆电机确定后，结构参数确定（不变），则有

$$\Phi_m \propto \frac{E_1}{f_1}$$

说明：●变频运行时，必须同时调节  $E_1$ 、 $f_1$ ，才能确保  $\Phi_m$  符合要求

●控制要求是：基频以下恒磁通，基频以上弱磁



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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

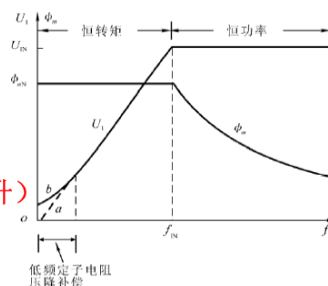
■维持  $\Phi_m = C \rightarrow$  要求  $E_1/f_1 = C \rightarrow E_1$  随  $f_1$  线性变化，但  $E_1$  为电机内部量，只能通过端电压  $U_1$  间接控制



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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  $b$ 。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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  $f_1 \uparrow \rightarrow T \downarrow$

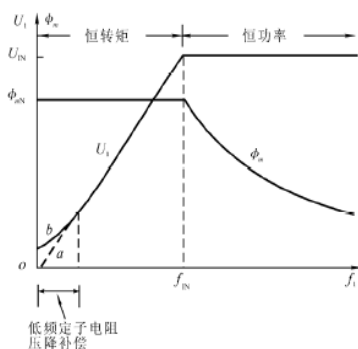
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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）



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 2. 矢量控制(VC)与直接转矩控制(DTC)

### 3. 软启动器(Soft starter)

软起动器是一种集软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电机控制装置。它的主要构成是串接于电源与被控电机之间的三相反并联闸管及其电子控制电路。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频器容量的计算

对于连续恒载运转机械所需的变频器，其容量可用下式近似计算：

$$S_{CN} \geq \frac{kP_N}{\eta \cos \varphi}$$

$$I_{CN} \geq kI_N$$

异步电动机变频改造中要注意 PWM驱动的影响



## 5. 三相异步电动机的调速

### 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。



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频调速应用举例

柳州露塘糖厂年度榨季的日榨量达2700吨,生产用电和燃料消耗是全厂节能降耗的重点,该厂引进交流变频调速技术,在锅炉给水泵上安装变频调速装置,取得了满意的节能效果,同时也大大延长了电机及水泵的维修期,经济效益十分显著。



## 5. 三相异步电动机的调速

- 一台75kW水泵没装变频调速器前,工作电流在132A-150A之间,实际每天用电量1200 - 1400kWh;
- 使用变频调速器后,工作电流在40-80A之间, 实际每天用电量800-900kWh,每天可节电400-500kWh,按每个榨季150天计算,每台给水泵一个榨季可节电65500kWh,三台75kW给水泵一个榨季共节电196500kWh。
- 电费价格0.70元/kWh计,每榨季节省电费金额13.8万。





## 5. 三相异步电动机的调速

### 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。



## 5. 三相异步电动机的调速

使用变频空调可以达到以下效果：

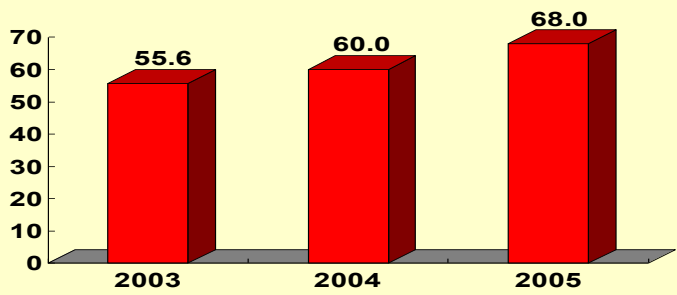
- (1)在轻负载时，压缩机在较低转速下工作，整体效率有所提高，因而节能。
- (2)由于使用了变频技术，压缩机的开停次数减少，制冷系统的压力变化损耗减少。
- (3)室内温度不再是一个波动值而是在设定值上下一个极小范围内变化。人的舒适度得到了改善。
- (4)减少了电动机的启动电流，可以增加压缩机的使用寿命。



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频调速的应用趋势

中国市场竞争情况 - 市场需求 (亿元)



- 剔除690V以上高电压等级产品
- 剔除交直交以外型式变频器 (如: 交 - 交、电流型)

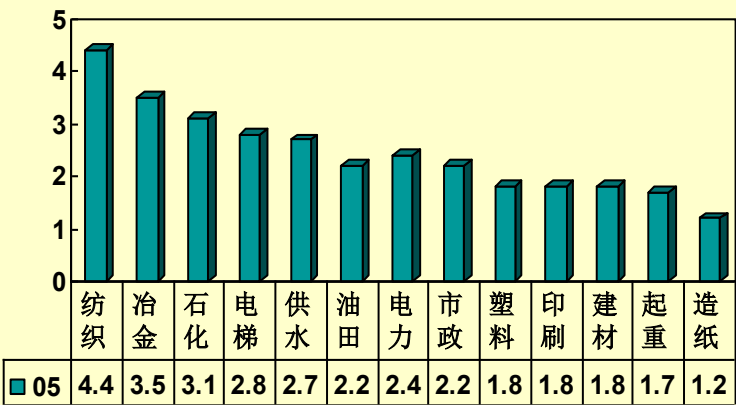
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

### 变频调速的应用趋势

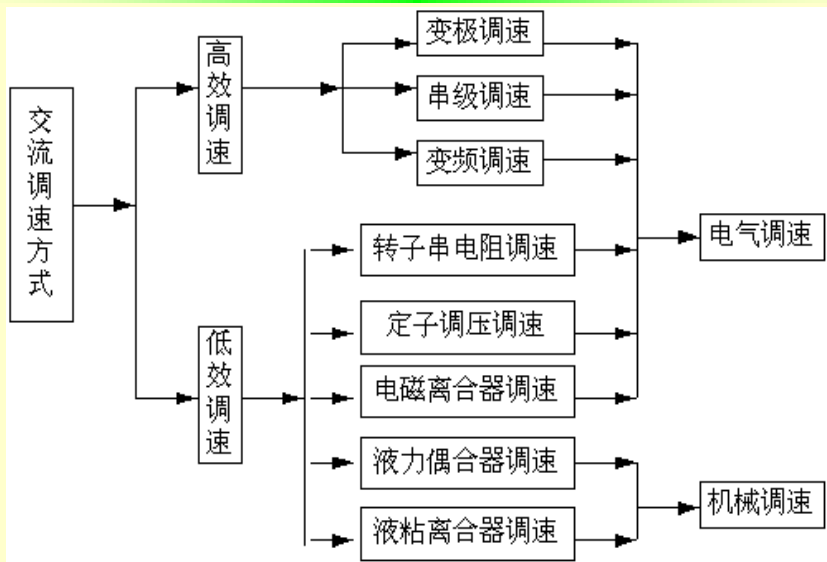
中国市场竞争情况 - 重点行业需求 (单位: 亿元)



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 5. 三相异步电动机的调速

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液粘离合器	变极	串级	变频
调速方法	改变转子串电阻	改变定子输入调压	改变离合器励磁电流	改变耦合器工作腔充油量	改变离合器摩擦片间隙	改变定子极对数	改变逆变器的逆变角	改变定子输入频率和电压
调速性质	有级	无级	无级	无级	无级	有级	无级	无级
调速范围	50~100 %	80~100 %	10~80 %	30~97 %	20~100 %	2, 3, 4, 档转速	50~100 %	5~100 %
响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	快
电网干扰	无	大	无	无	无	无	较大	有
节电效果	中	中	中	中	中	高	高	高
初始投资	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
适用范围	绕线型异步机	绕线型异步机 笼型异步机	笼型异步机	笼型异步机 同步电机	笼型异步机 同步电机	笼型异步机	绕线型异步机	异步电机、同步电机

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 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。

