

解题关键

$$e_{20} = 2\pi f_1 N_2 \phi = (N_2 / N_1) U_1 \quad n_0 = 60 \quad f_1 / p$$

$$I_2 \cos \phi_2 = \frac{Se_{20} R_2}{R_2^2 + (SX_{20})^2} \quad X_{20} = C_1 f_1 \quad S_M = R_2 / X_{20}$$

$$T = K_t \frac{U_1}{2\pi f_1 N_1} \frac{R_2 S (N_2 / N_1) U_1}{R_2^2 + X_{20}^2 S^2} = \frac{K_C}{f_1} \frac{R_2 U_1^2}{(R_2^2 / S + X_{20}^2 S)}$$

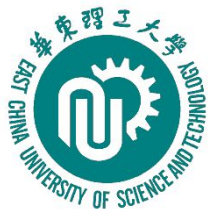
$$T = K_t \phi I_2 \cos \phi_2 = K \frac{SR_2 U_1^2}{R_2^2 + (SX_{20})^2}$$

$$T_{\max} = K_C U_1^2 / 2X_{20} f_1 = K_C U_1^2 / 2C_1 f_1^2$$

$$T_N = 9.55 P_N / n_N$$

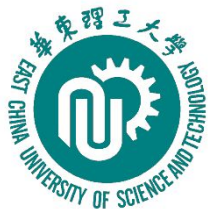
$$T_{ST} = K \frac{R_2 U_1^2}{R_2^2 + X_{20}^2}$$

$$T = 2T_{\max} / (S / S_m + S_m / S)$$



习题讲解

■ 习题集5-3、5-5、5-11、5-12



作业

■ 4.3 4.4 4.5 4.6 4.11 4.12 4.13

习题讲解

■ 习题集5-3

一台三相异步电动机在额定情况下运行，若电源电压突然下降，而负载转矩不变，试分析下述各量有无变化？为什么？

(1) 旋转磁场的转速 n_0

不变。因为 $n_0 = \frac{60f}{p}$ 与电压无关。

(2) 主磁通 Φ ，减小。

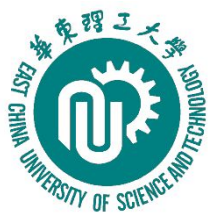
$$U \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi$$

(3) 转子转速 n 下降

因为： $T \propto U^2$ ，而负载转矩 T_L 不变，从而转速下降。

(4) 转子功率因素

$$\cos \Phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}}$$



习题讲解

■ 习题集5-3

一台三相异步电动机在额定情况下运行，若电源电压突然下降，而负载转矩不变，试分析下述各量有无变化？为什么？

(4) 转子功率因素 $\cos \varphi_2$

因为 $S = \frac{n_0 - n}{n_0}$,
$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{20})^2}}$$

S随n的下降而增大，

$\cos \varphi_2$ 随S的增大而减小。

(5) 转子电流 I_2 增加。

因为 $T = K_t \Phi I_2 \cos \varphi_2 = T_L$

当U下降时， Φ 下降。 n 下降时，S增大， $\cos \varphi_2$ 减小。

所以，T增加， I_2 也要增加。

习题讲解

■ 习题集5-5

一台JO₂-32-4三相异步电动机，其技术数据如下。

P _N (kW)	U _N (V)	满载时				I _{st} /I _N	T _{st} /T _N	T _{max} /T _N
		n _N (r/min)	I _N (A)	η _N (%)	cosφ _N			
3	220/380	1430	11.18/6.47	83.5	0.84	7.0	1.8	2.0

$$(1) \quad n_0 = \frac{60f}{p} = 1500 \text{ r/min}$$

$$(2) \quad p=2$$

(3) 电源电压为380V时，应该星形连接。

$$(4) \text{ 满载时额定转差率: } S = \frac{n_0 - n}{n_0} = 0.0467$$

习题讲解

■ 习题集5-5

一台JO₂-32-4三相异步电动机，其技术数据如下。

P _N (kW)	U _N (V)	满载时				I _{st} /I _N	T _{st} /T _N	T _{max} /T _N
		n _N (r/min)	I _N (A)	η _N (%)	cosφ _N			
3	220/380	1430	11.18/6.47	83.5	0.84	7.0	1.8	2.0

(5) 额定转矩 $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 20.04 N \cdot m$

(6) 直接启动转矩 $T_{ST} = 1.8T_N = 36.07 N \cdot m$

(7) 最大转矩 $T_{max} = 2T_N = 40.08 N \cdot m$

(8) 直接启动电流: $I_{ST} = 7I_N = 45.29 A$

习题讲解

■ 习题集5-5

一台JO₂-32-4三相异步电动机，其技术数据如下。

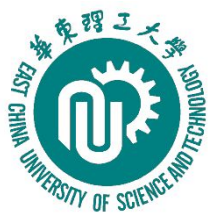
P _N (kW)	U _N (V)	满载时				I _{st} /I _N	T _{st} /T _N	T _{max} /T _N
		η _N (%)	I _N (A)	η _N (%)	cosφ _N			
3	220/380	1430	11.18/6.47	83.5	0.84	7.0	1.8	2.0

(9) 满载输入功率 $P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi = 3.58kW$

视在功率: $S = \sqrt{3}U_1 I_1 = 4.26kVA$

(10) 满载时电动机总损耗:

$$\Delta P = P_1 - P_N = 0.58kW$$



习题讲解

■ 习题集5-11

某起重机吊钩由一台绕线式三相异步电动机拖动，电动机的额定数据为： $P_N = 40kW$ $n_N = 1464r/min$ $\lambda_m = 2.2$ $r_{2,\sigma} = 0.06\Omega$

电动机的负载转矩，提升重物时： $T_L = T_1 = 261N \cdot m$

下放重物时： $T_L = T_2 = 208N \cdot m$

(1) 提升重物时，要求有低速、高速两档，且高速时转速 n_A 为工作在固有机械特性上的转速，低速时转速 $n_B = 0.25n_A$ 电动机工作于转子回路串电阻的特性上。求两档转速及转子回路应串入的电阻值。

(2) 下放重物时，要求有低速、高速两档，且高速时转速 n_C 为工作在负序电源的固有机械特性上的转速，低速时转速 $n_D = -n_B$ 仍然工作于转子回路串电阻的特性上。求两档转速及转子应串入的电阻值。说明电动机运行在何种状态。

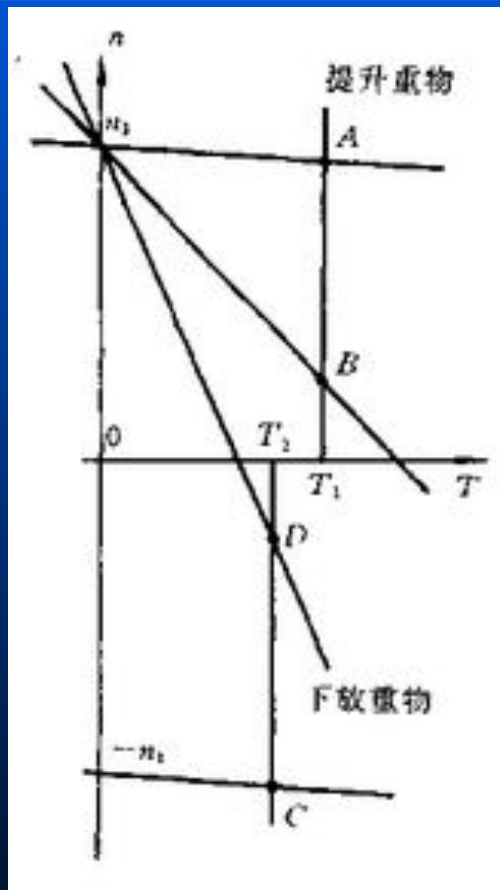
(1) 计算固有机械特性的有关数据

临界转差率:

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 261 N \cdot m$$

(2) 提升重物时电动机两档转速及转子回路串入电阻的计算

$$T_N = T_1 = 261 N \cdot m$$



习题讲解

■ 习题集5-11

(2) 提升重物时电动机两档转速及转子回路串入电阻的计算

$$n_A = n_N = 1464 r / \min$$

$$n_B = 0.25n_A = 366 r / \min$$

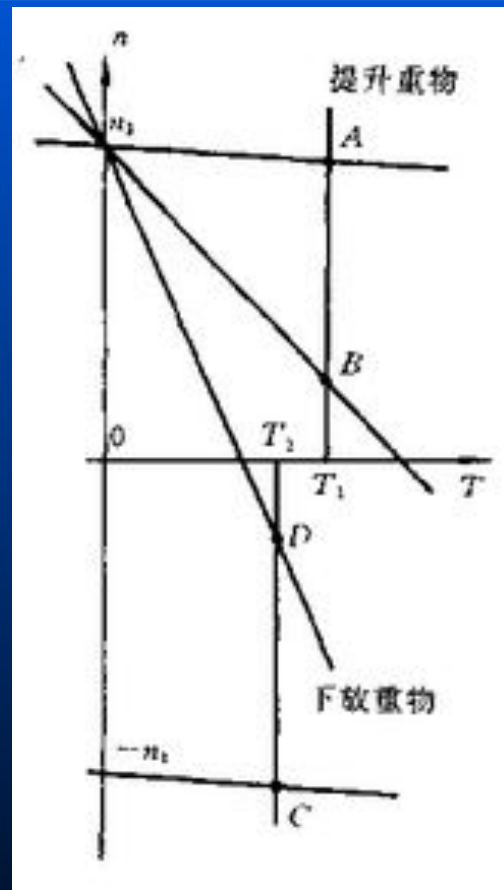
$$S_B = \frac{n_0 - n_B}{n_0} = 0.756$$

$$S_{mB} = S_B (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 3.145$$

$$\frac{S_m}{S_{mB}} = \frac{r_2}{r_2 + R_B}$$

因为 $S_m \propto R_2^*$, 则

低速时每相串入电阻: $R_B = \left(\frac{S_{mB}}{S_m} - 1 \right) r_2 = 1.827 \Omega$



习题讲解

■ 习题集5-11

(3) 下放重物时电动机两档转速及转子回路串入电阻的计算

$$T_2 = 208 N \cdot m = 0.8 T_N$$

在固有特性曲线上运行时,

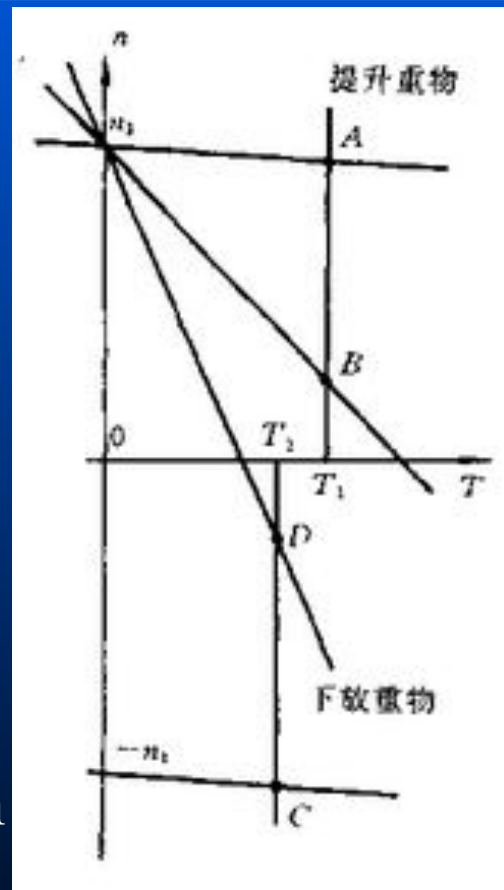
$$0.8 T_N = 2 \lambda_m T_N / \left(\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S} \right)$$

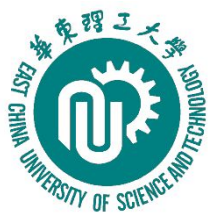
由此可以求得: $S = 0.0188$

相应的转速降: $\Delta n = S n_0 = 28 r / \min$

负相序电源供电, 高速下放重物时,

反向反馈制动转速为: $n_C = -n_0 - \Delta n = -1528 r / \min$





习题讲解

■ 习题集5-11

低速下放时, $n_D = -n_B = -366r / \text{min}$

对应转差率: $S_D = \frac{n_0 - n_D}{n_0} = 1.244$

临界转差率: $S_{mD} = S_D \left[\frac{\lambda_m T_N}{T_2} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_m T_N}{T_2} \right)^2 - 1} \right] = 6.608$

低速下放时串入电阻值为: R_D , 则

$$\frac{S_m}{S_{mD}} = \frac{r_2}{r_2 + R_D} , R_D = 3.905\Omega$$

习题讲解

■ 习题集5-12

某台线绕式异步电动机主要技术数据如下： $P_N = 60kW$,

$$I_{2N} = 166A, U_N = 380V,$$

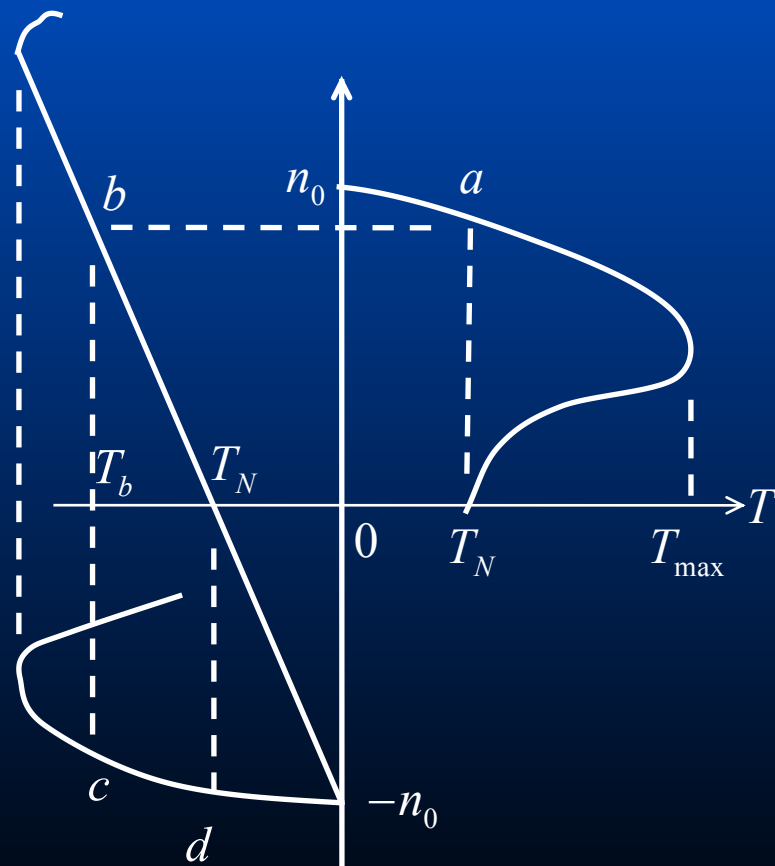
$$n_N = 577r / \min, I_N = 133A$$

$$E_{201} = 253V, \lambda_m = 2.9。$$

电动机原在固有特性上额定工作点进行，现需进行电源反接制动，制动转矩限制在

$0.85T_{\max}$ ，计算转子外串制动电阻值。

$$S_b = 2 - S_a = 2 - S_N = 2 - \frac{n_0 - n_N}{n_0} = 1.96$$



习题讲解

■ 习题集5-12

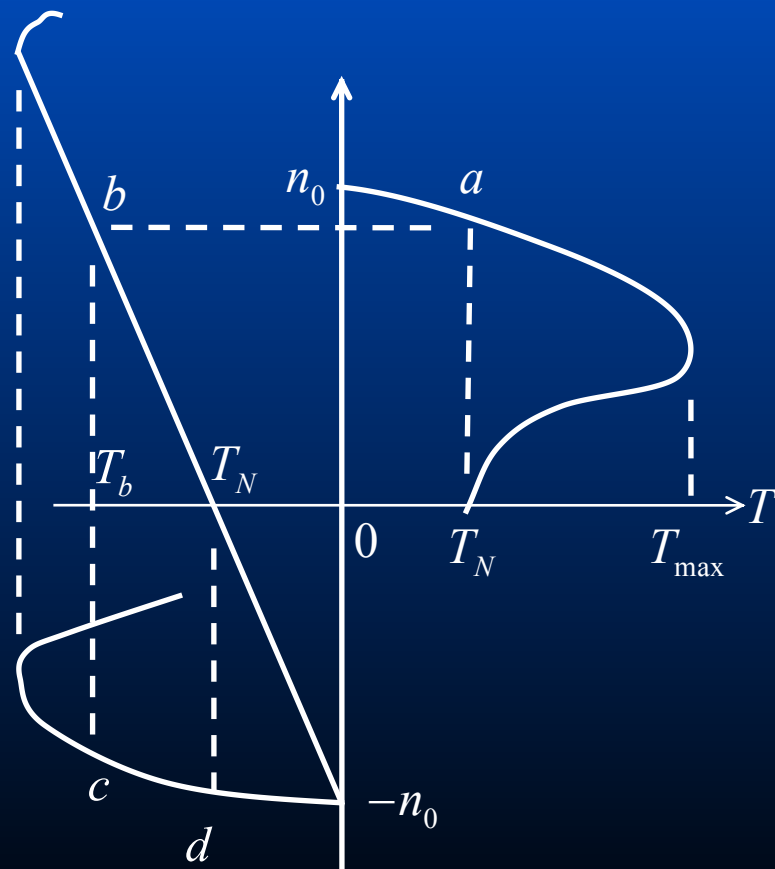
机械特性曲线近似为一条直线，

则 T_b 相同时，
$$\frac{S_c}{S_b} = \frac{r_2}{r_2 + R_b}$$

在线性化反固有特性上可得

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{0.85T_{\max}}{T_N} S_N \\ &= \frac{0.85\lambda_m T_N}{T_N} S_N = 0.0945 \end{aligned}$$

$$n_N = 577 r / \min$$



习题讲解

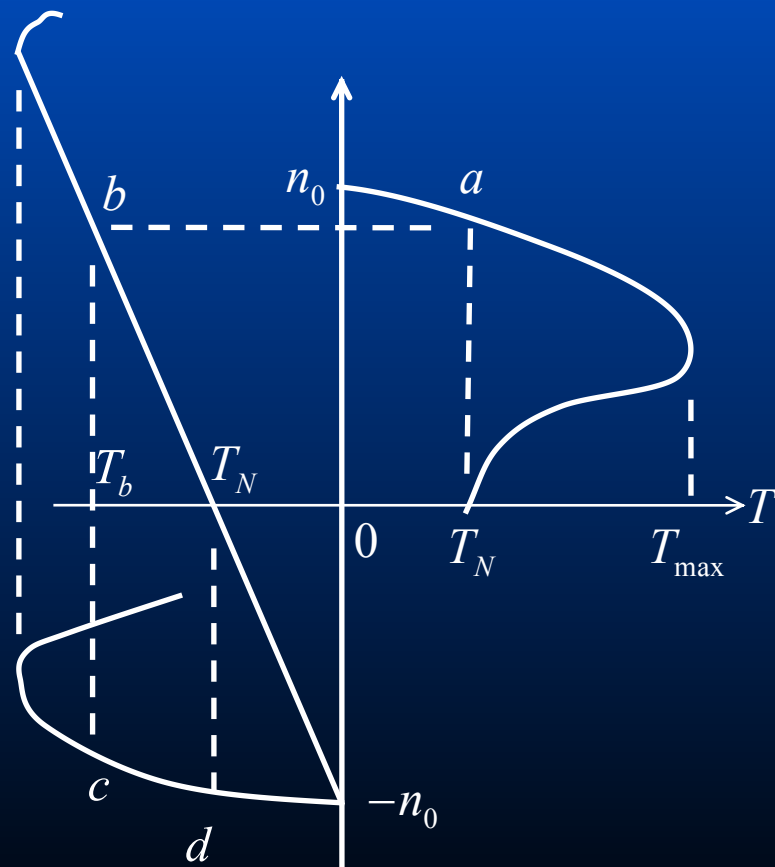
■ 习题集5-12

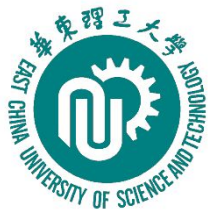
转子绕组本身的电阻 r_2 :

$$r_2 = \frac{E_{2N}}{I_{2N}} = \frac{S_N E_{201}}{\sqrt{3} I_{2N}} = 0.0337 \Omega$$

转子回路串接电阻 R_b 为:

$$R_b = \left(\frac{S_b}{S_c} - 1 \right) r_2 = 0.669 \Omega$$





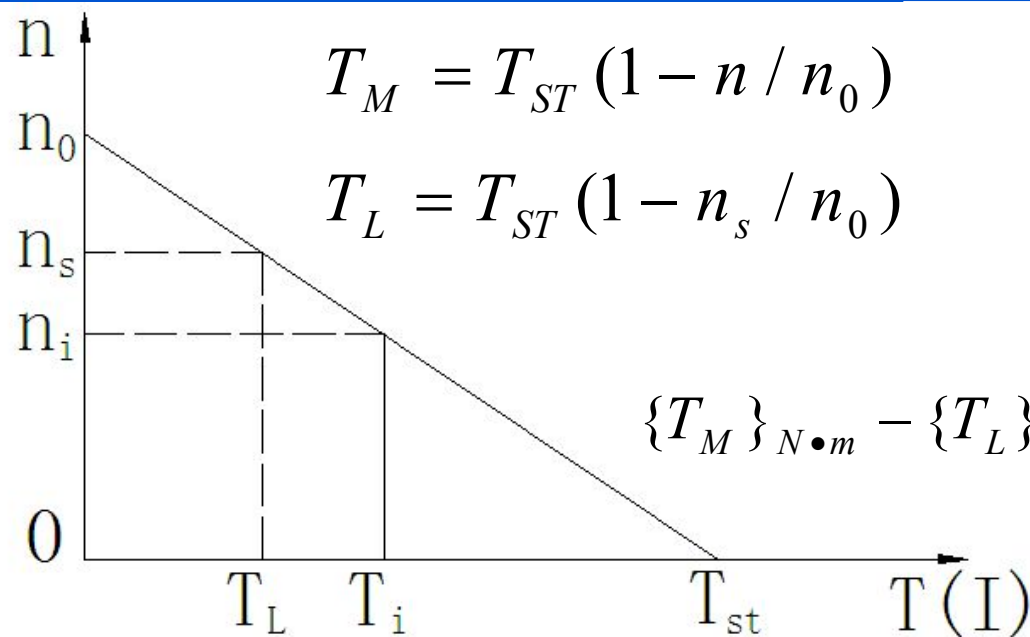
机电传动系统的过渡过程

- 过渡过程：由一个稳态运转状态变化到另一个稳定运转状态的过程。

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/\min}}{d\{t\}_s}$$

- 过渡过程的原因是因为惯性：
 - 1、机械惯性：使转速不能突变；
 - 2、电磁惯性：使电枢电流和励磁磁通不能突变；
 - 3、热惯性：使温度不能突变。

机械惯性下的过渡过程



$$\tau_m = \frac{\{GD^2\}}{375} \frac{n_0}{T_{st}}$$

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s}$$

$$n_s - n = \tau_m \frac{dn}{dt}$$

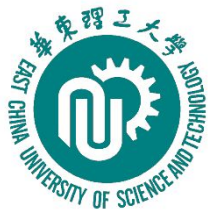
$$n = n_s + (n_i - n_s) e^{-t/\tau_m}$$

$$T_M = T_L + (T_i - T_L) e^{-t/\tau_m}$$

$$I_A = I_L + (I_i - I_L) e^{-t/\tau_m}$$

如过渡开始时参数为

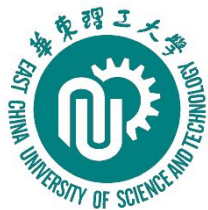
n_i 、 T_i 、 I_i ，则有：



机电时间常数

$$\tau_m = \frac{\{GD^2\}}{375} \frac{n_0}{T_{st}}$$

$$\tau_m = \frac{\{GD^2\}}{375} \frac{R_{ad} + R_a}{KeKt \Phi_N}$$

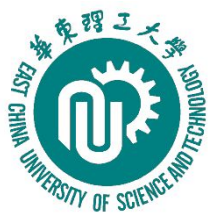


加快过渡过程的方法

$$T_d = T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$$

提高加速度/减速度

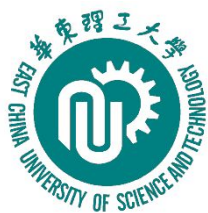
- 1、减少转动惯量：电机同轴运行、转子做成细长轴。
- 2、增加动态转矩：
 - 1) 粗短电枢，惯量虽大，但最大转矩更大；
 - 2) 增加平均启动电流。（增加启动电阻的级数）



第五章 控制电机

电动机成为控制电机的前提是转速可以线性调速。这样，通过配置编码器或其他位移检测装置，即可成为伺服控制电机。

- 步进电动机
- 直流伺服电动机
- 交流伺服电动机
- 无刷直流电动机
- 永磁同步电动机
- 力矩电动机
- 直线电动机



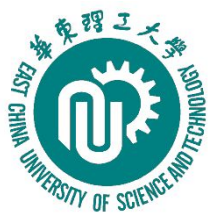
步进电动机的分类

步进电动机转过的角度与输入的电脉冲个数严格地成比例，改变输入其脉冲的频率，就可以平滑连续地调整输出转速。是目前唯一能进行开环控制的执行电器，广泛用于简易经济性数控装置中。

反应式 转子用高导磁系数的材料制造，做成齿型，无线圈，靠定子和转子之间的感应电磁力产生力矩并维持相互间的位置。

永磁式 转子用永久磁钢制成，产生转矩时兼有吸引力和排斥力。在无励磁情况下能保持转矩，每步转角不能做得很小。

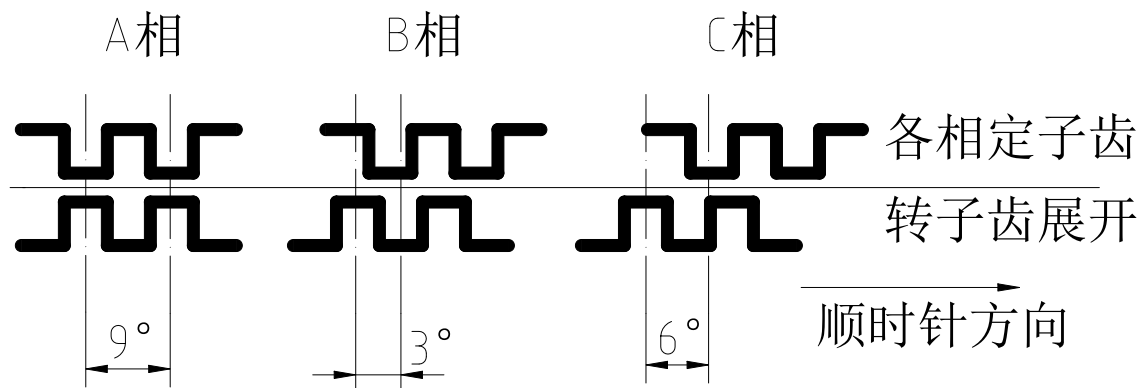
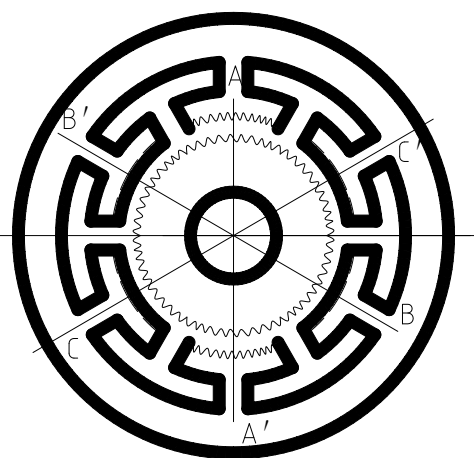
混合式 转子由永久磁钢制成，同时也做成齿状；定子也与反应式定子相似。它具有反应式和永磁式两种方式的优点，但结构复杂。



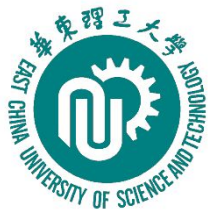
步进电动机的工作原理和运行特性

- 步进电机是一种将电脉冲信号转换成机械角位移的电磁机械装置。每当输入一个电脉冲，电动机就转动一定角度前进一步。脉冲一个一个地输入，电动机便一步一步地转动。又因为它输入的既不是正弦交流电，也不是恒定的直流电，而是电脉冲，又称为脉冲电动机。
- 步进电机由转子和定子两部分组成。转子和定子均由带齿的硅钢片叠成。定子上有绕组分为若干相，每相磁极上有极齿。当某相定子绕组通以直流电压激磁后，便吸引转子，使转子上的齿与该相定子的对齐，令转子转动一定的角度，依次向定子绕组轮流激磁，会使转子连续旋转。

三相反应式（磁阻式）步进电机原理

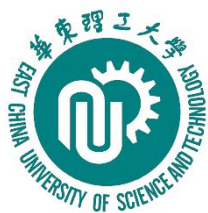


A、B、C三相定子每相两极，每极上有5个齿，与转子一样齿间夹角均为 9° 。如果A相通电则转子齿与A相极齿对齐，这时在B相两极下定子齿与转子齿中心线并不对齐，而是转子齿中心线较定子齿中心线沿反时针方向滞后 $1/3$ 齿距，即 3° 。C相下，转子齿超前 6° 。因此，当通电状态由A相变为B相时，转子顺时针方向转过 3° ，C相通电再转 3° 。



反应式步进电机的特点

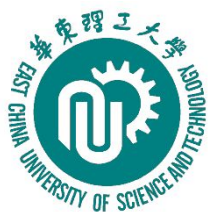
- 控制方便
- 气隙小（30~50微米），定位精度高，转矩大
- 定子、转子均由软磁材料制成、步距角度小
- 励磁电流大，驱动功率大
- 内部阻尼小，有振荡
- 高速时易失步
- 断电后无定位转矩



永磁式步进电机

转子或定子为永久磁钢，绕组轮流通电建立的磁场与永久磁钢的恒定磁场相互作用产生转矩。

- 步距角度大：15、22.5、30度
- 控制功率小
- 阻尼大
- 断电后有一定的定位转矩



混合式步进电机

定子结构与反应式步进电机相同，转子由环形磁钢和两段铁心组成，环形磁钢在转子中部，轴向充磁，两段铁心装在磁钢两端，并开有小齿，两段铁心上的小齿错开半个齿距。

控制功率小、效率高；

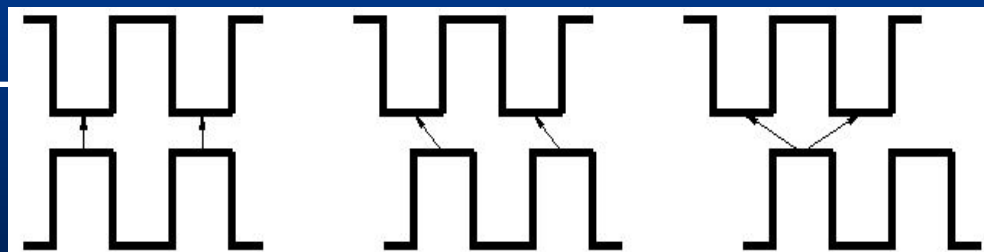
步距角度小；

运行频率高、断电定位；

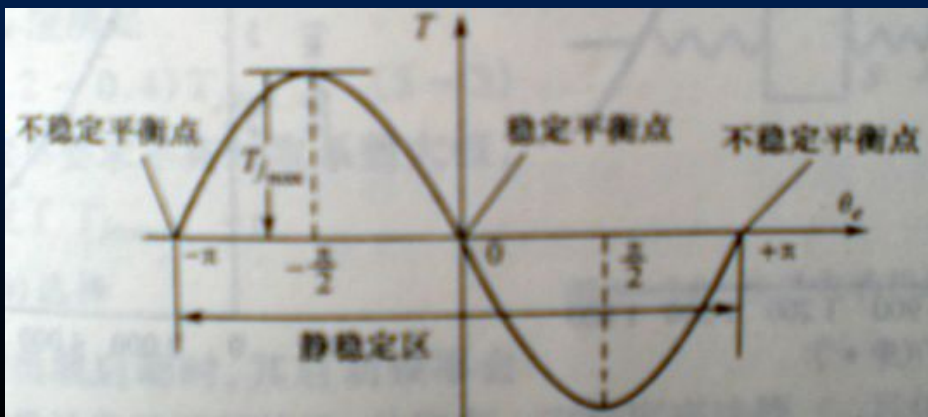
永磁易去磁。

步进电机的主要指标

- 步距角： $\alpha = 360/mzk$ (k为通电系数)
- 最大静态转矩：在小齿错开1/4齿距处。
- 在转子上施加负载转矩后——转子与定子错开一个角度（失调角）——转子输出的电磁转矩T称为静态转矩。

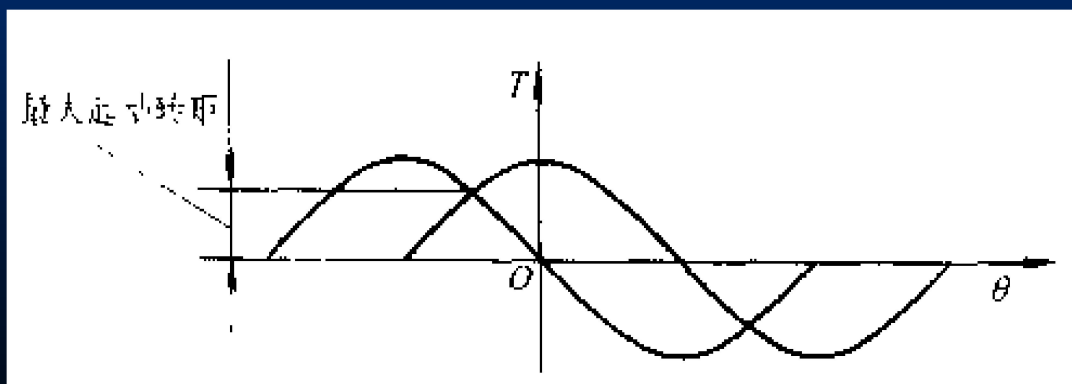


稳定点 最大静态转矩 不稳定点

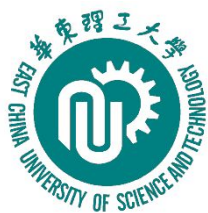


步进电机的主要指标

- 静态矩角特性和最大静转矩
- 步距角及步距误差
- 最大起动转矩
- 最大起动频率
- 连续运行频率



步进电动机最大起动转矩



运行频率与承载能力

- 空载启动频率：空载静止启动不失步的最高频率
- 启动矩频特性：
$$J \varepsilon = T_m - T_l;$$
负载大，加速度小，启动频率下降。
- 空载运行频率：启动后，不失步连续运行的最大频率。
- 运行矩频特性：输出转矩与连续运行频率的关系，运行频率越高，输出转矩下降、承载能力下降。

步进电机的驱动电路

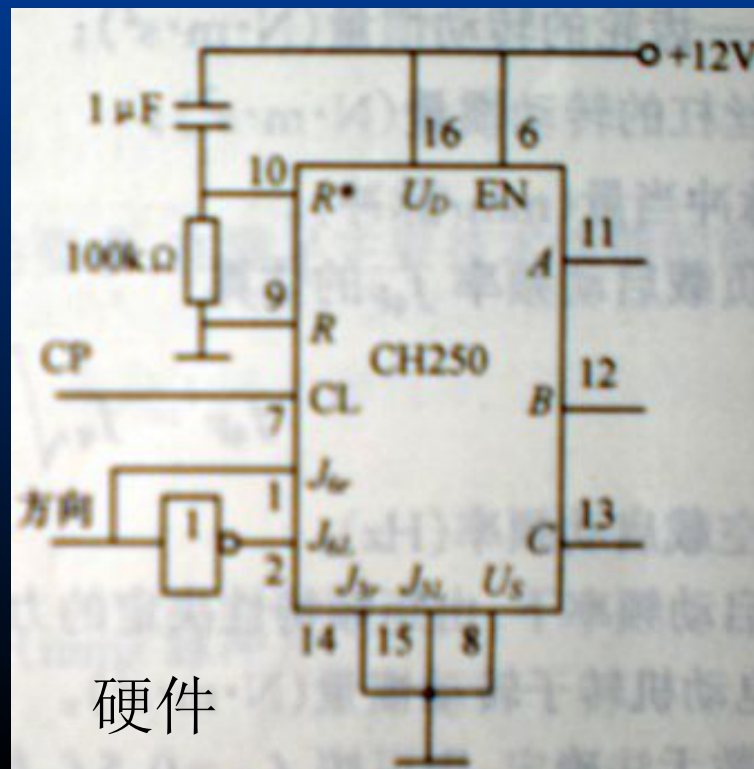
驱动电路由环形分配器和功率放大器组成。

- 环形分配器：接受脉冲，按规律输出通断脉冲给各相励磁绕组。

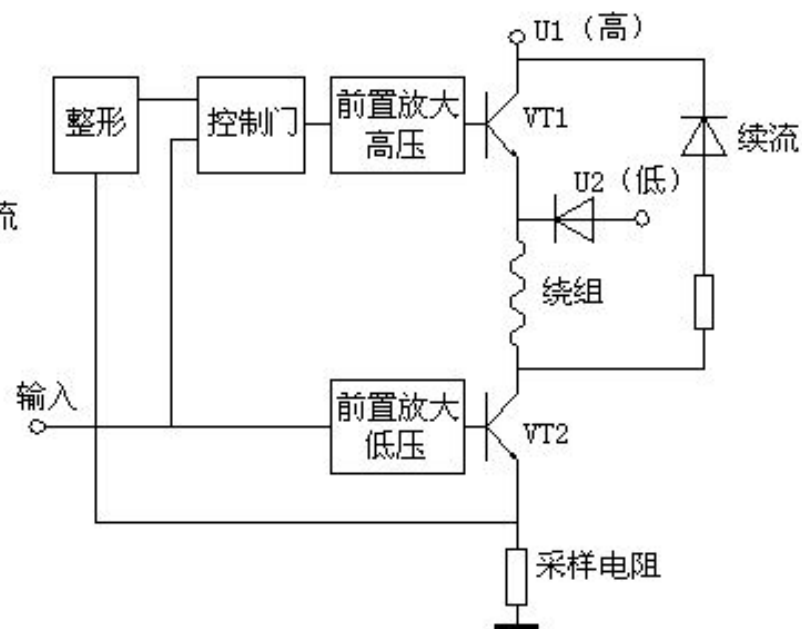
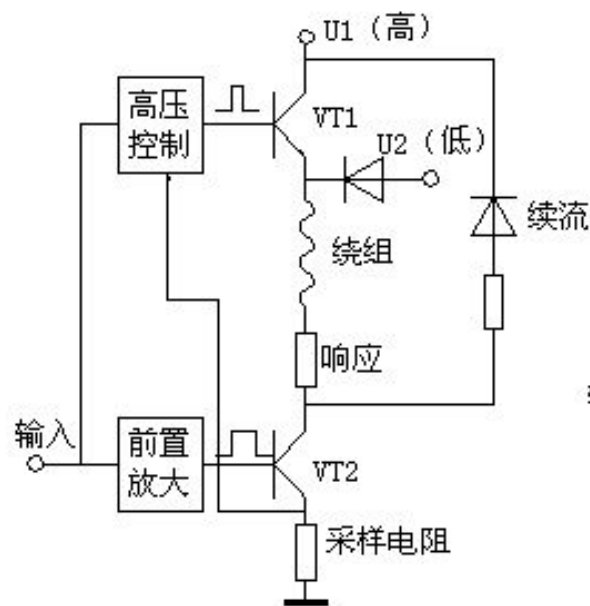
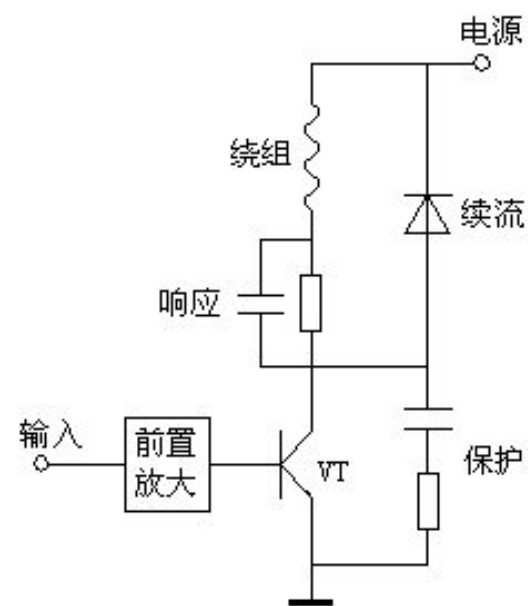
软件方式：

查表法：依次从内存取出通断组合

比较法/移位寄存器法：根据当前的输出状态组合，通过比较或移位的方法确定下次的输出状态组合。



步进电机的功率放大器

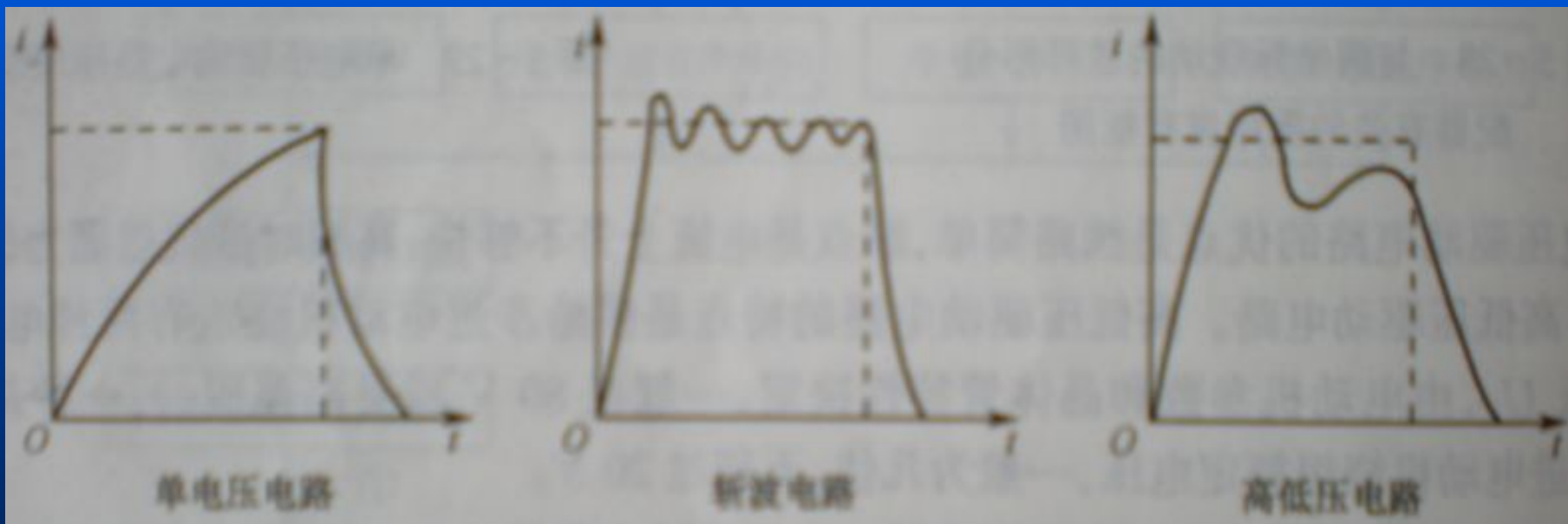


单电压驱动

高低压驱动

恒流斩波驱动

驱动电路的输出电流波形

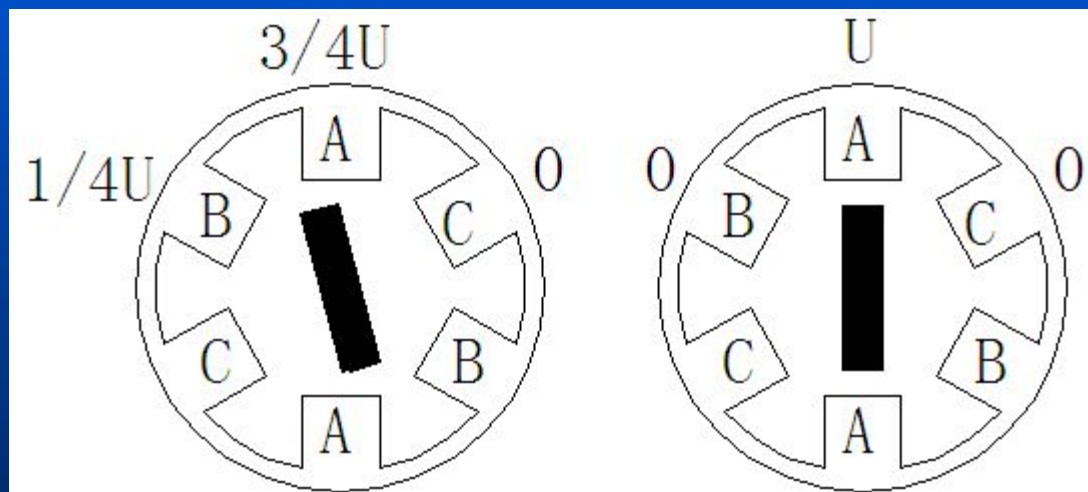


斩波驱动输出转矩恒定，但高频工作时响应不够快；高低压驱动响应快、但过冲、低频工作时振荡、失步。

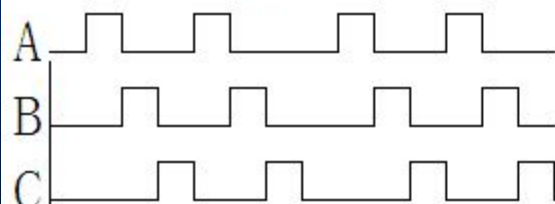
调频调压驱动：综合高低压驱动和斩波驱动的优点，低频时低压驱动、使电流上升变缓，避免过冲，高频时高压驱动，提高电流上升速度，保证带载能力。

步进电机的细分驱动电路

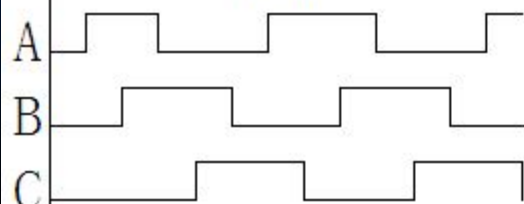
线形功率放大/开关式功率放大两种电路：电压指令+电流反馈。



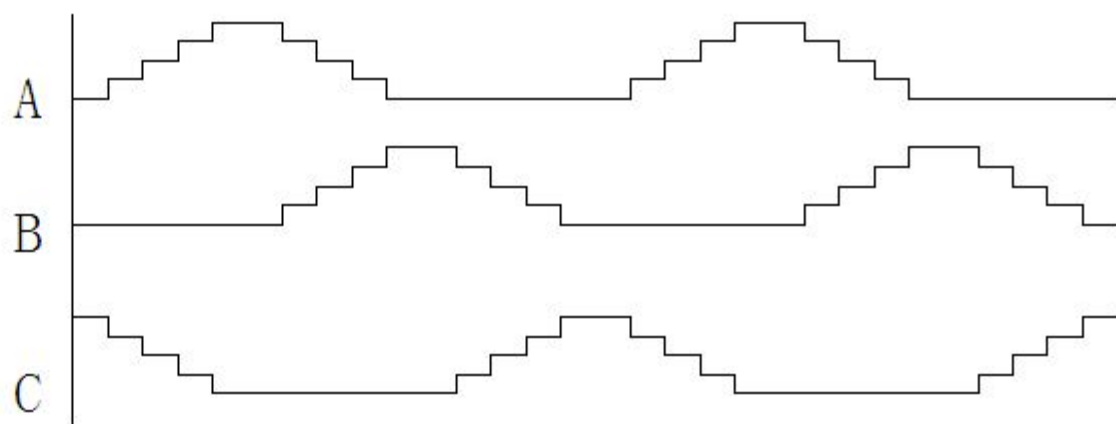
整步

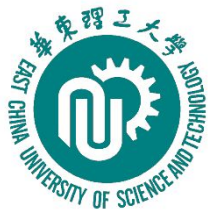


半步



细分





伺服电动机

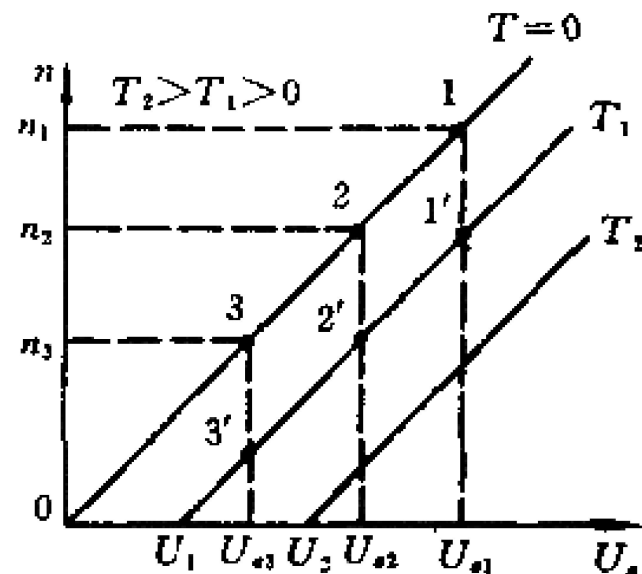
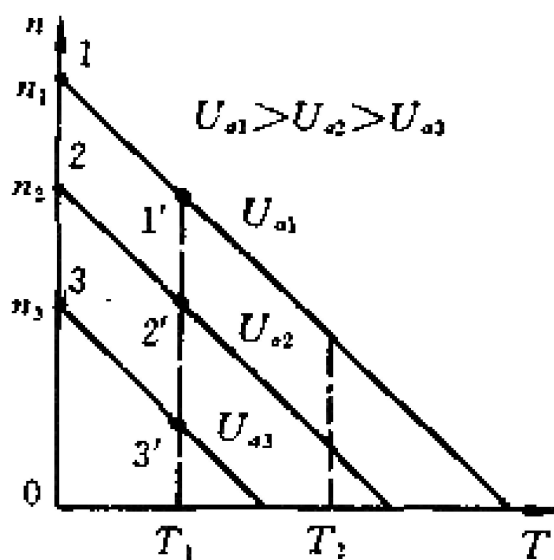
伺服电动机把输入的信号电压变为转轴的角位移或角速度输出，转轴的转向与转速随信号电压的方向和大小而改变，并正能带动一定大小的负载，在自动控制系统中作为执行元件，伺服电动机又称为执行电动机。

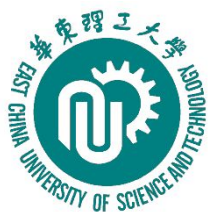
伺服电动机有直流和交流两大类。

直流伺服电动机

直流伺服电动机就是微型的他励直流电动机，其结构与原理都与他励直流电动机相同。按磁极的种类划分为两种：一种是永磁式直流伺服电动机，它的磁极是永久磁铁；另一种是电磁式直流伺服电动机，它的磁极是电磁铁，磁极外面套着他励励磁绕组。

调压调速
具有好的
平滑性。



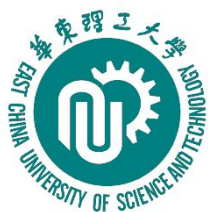


异步交流伺服电动机

交流伺服电动机就是两相异步电动机，它的定子上有空间相差 90° 电角度的两相分布绕组，一相为励磁绕组f，一相为控制绕组c，转子为笼形。为了满足信号电压强时转速高、信号电压弱时转速低这一要求，可以让信号强时电机气隙磁通势接近圆形旋转磁通势，弱时椭圆度大接近脉振磁通势就行。

信号电压消失，与单相交流电机一样，转子会继续运转，即自转现象。

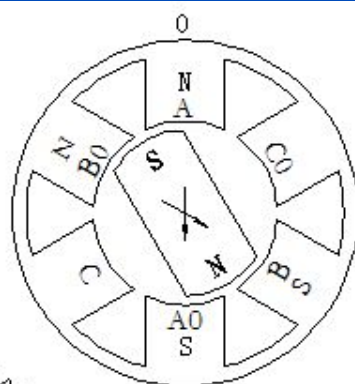
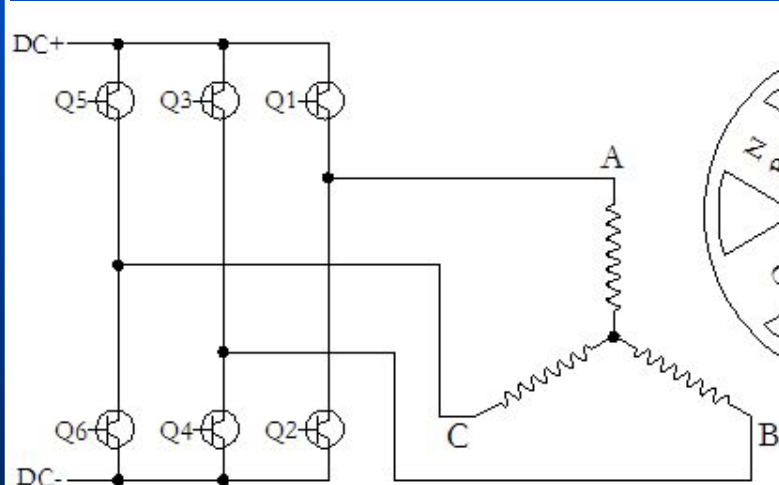
增加转子电阻，使交流伺服电动机单相运行的机械特性出现倒拉制动，消除自转现象。



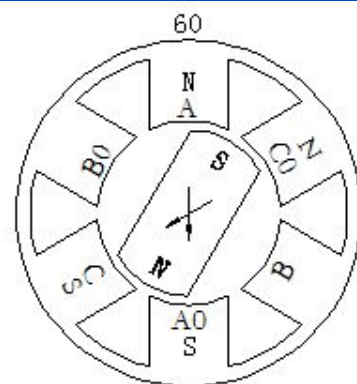
无刷直流电机

- 既是同步电机，又是直流电机。
- 与交流同步电机不同，采用三相交变的矩形电源驱动。
- 与有刷直流电机不同，转子是永磁。
- 数字式控制电机。采用霍尔片感应转子位置，自动切换定子绕组的电流方向，使转子连续运行。

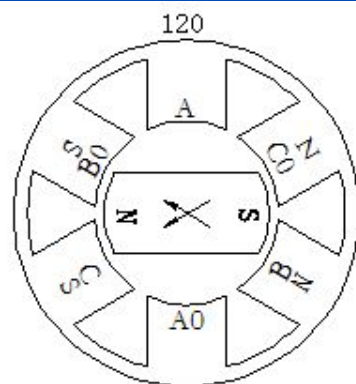
无刷直流电机原理



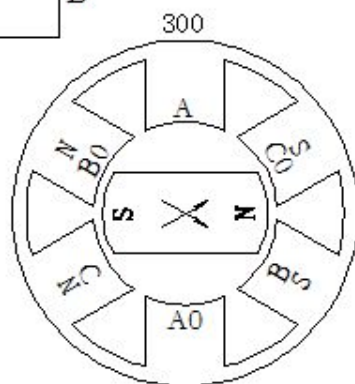
A-A0-B0-B



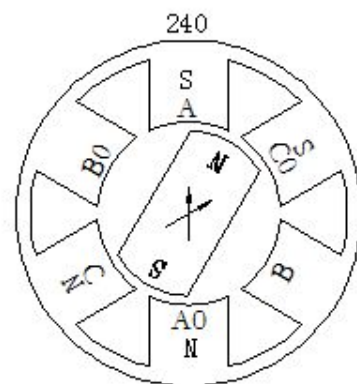
A-A0-C0-C



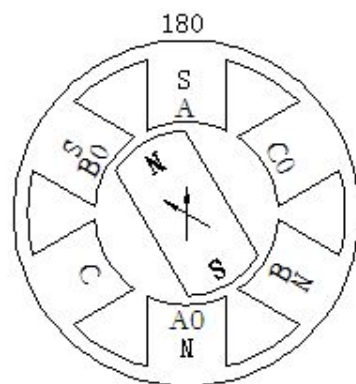
B-B0-C0-C



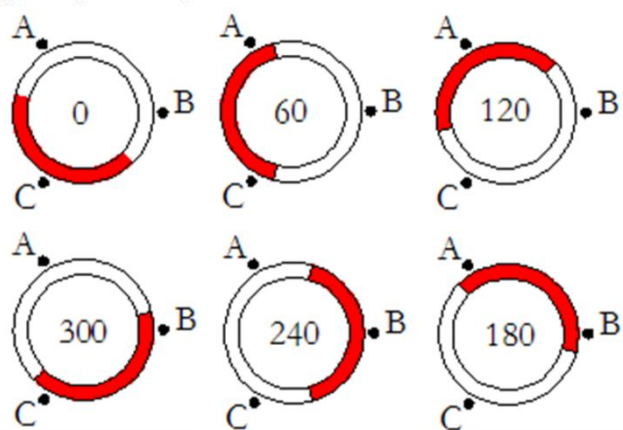
C-C0-B0-B

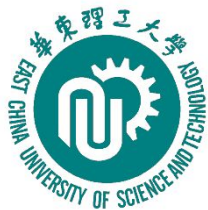


C-C0-A0-A



B-B0-A0-A





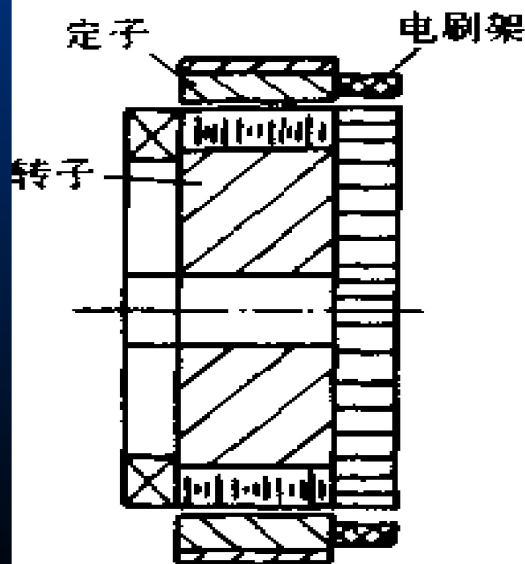
同步交流伺服电动机

定子上通三相正弦 交流电，配速度和位置传感器。

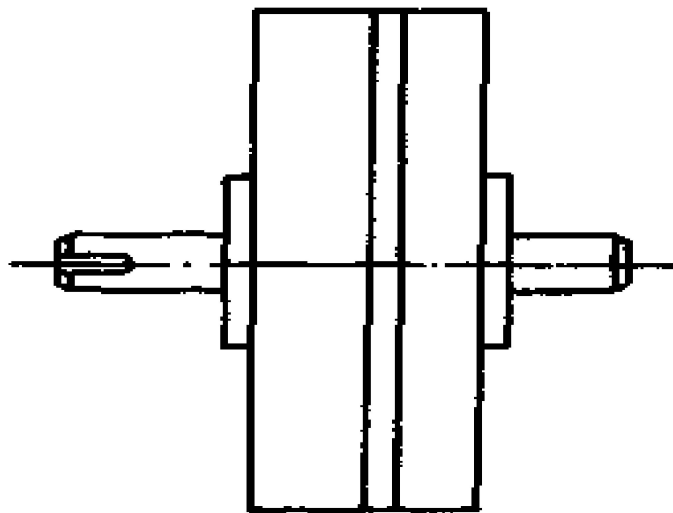
原理与无刷直流电动机相同。可获得平稳的电磁转矩。

力矩电动机

力矩电动机是一种把伺服电动机和驱动电动机结合而发展成的一种电动机，它输出转矩大，转速低，可以直接拖动负载运行，同时它又受控制信号电压的直接控制进行转速调节。



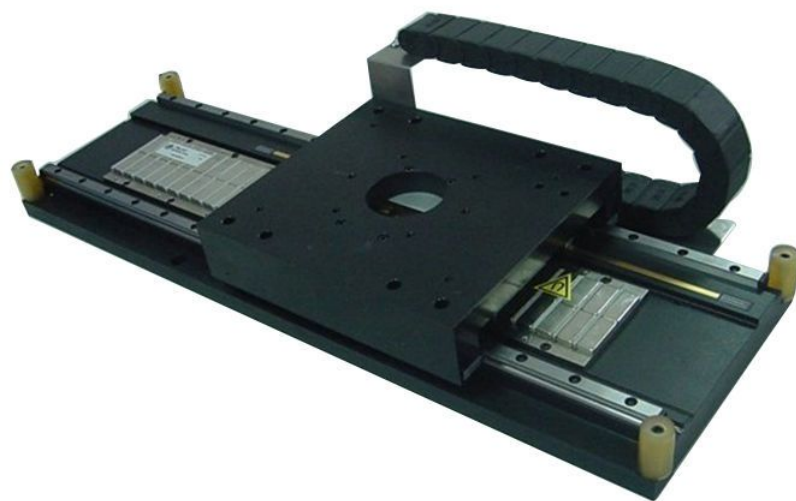
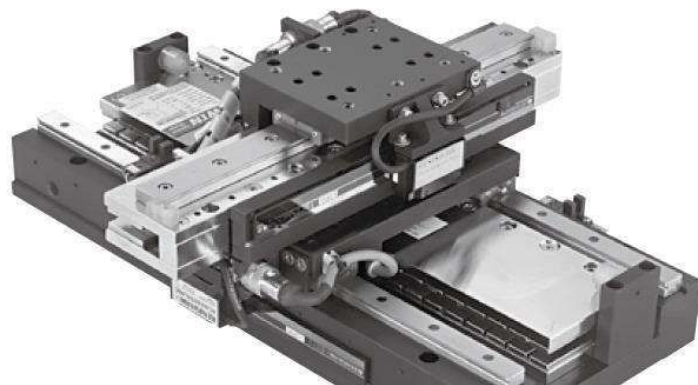
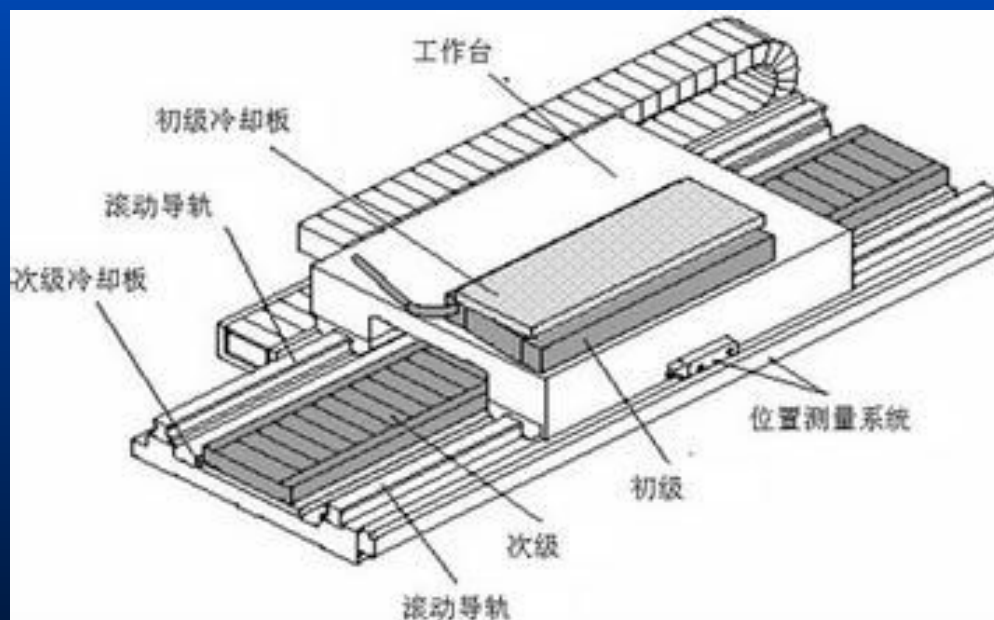
(a)



(b)

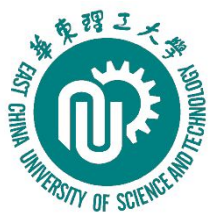
直线伺服电机

- 直线电机：旋转电机+丝杆螺母或同步带一体化
- 线性电机：固定磁轨（绕组）+滑块绕组+直线编码器

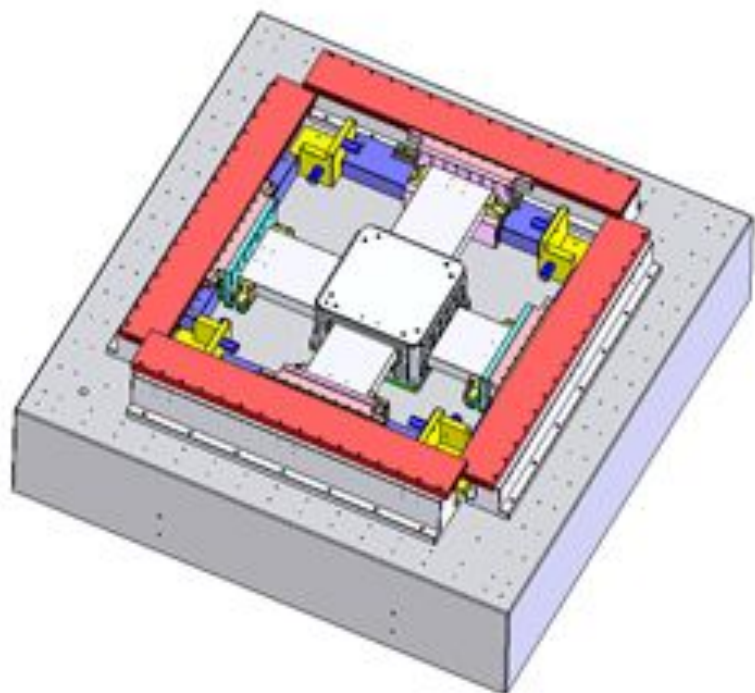


特点：简单、高速、高效率、高精度、低速稳定

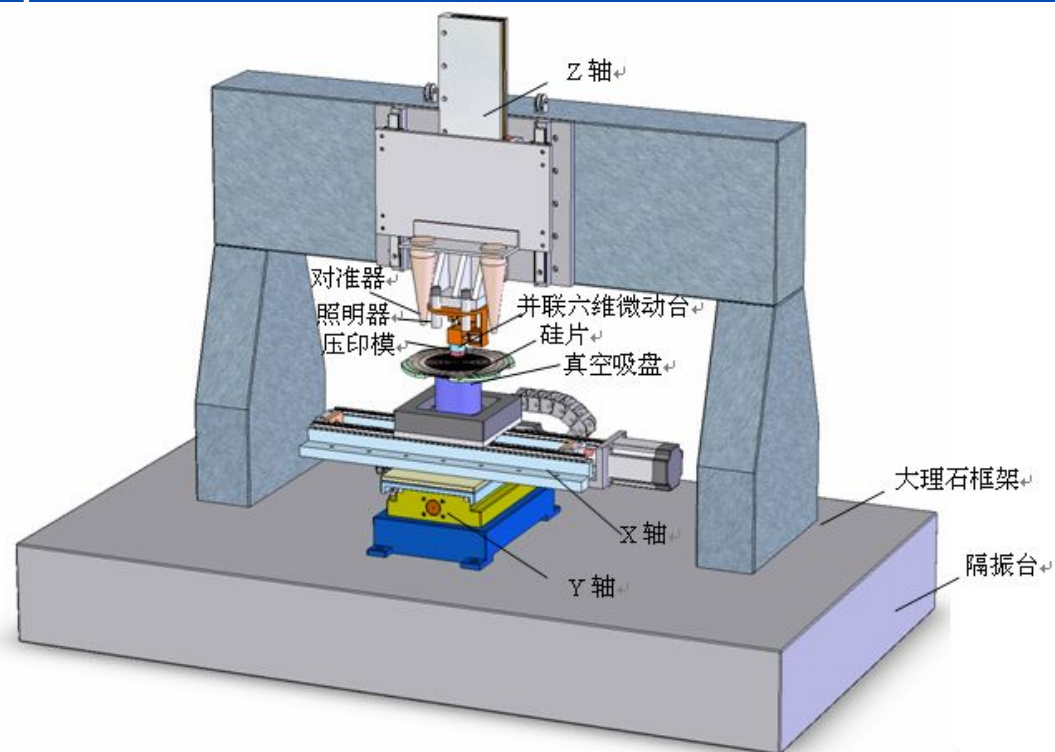
应用：扫描、电梯、磁悬浮

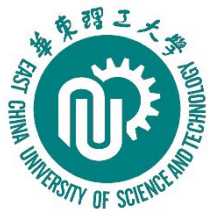


直线伺服电机



直线伺服电机





习题

■ 5.4 5.13 5.17

电动机的选择

1、电动机容量选择的原则

1) 温升：针对连续工作电机

2) 过载：针对短时工作电机

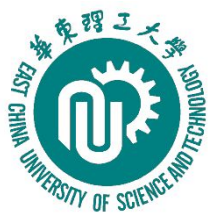
$$T_{L\max} \leq \lambda T_N \quad \lambda = 0.8 \lambda_m = 0.8 T_{\max} / T_N$$

$$I_{L\max} \leq \lambda I_N$$

3) 启动：

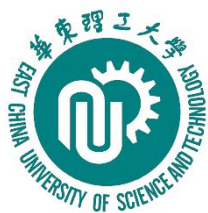
$$T_L \leq \lambda_{ST} T_N$$

$$\lambda_{ST} = T_{ST} / T_N$$



电动机的发热与冷却

- 铜耗、铁耗、机械损耗——发热
- 温升过程等效于一阶系统对阶跃信号的响应过程。时间常数很大。
- 发热——损坏绕组的绝缘
E、B、F、H四级允许的最高工作温度为120°C、130°C、155°C、180°C。
- 选择电动机功率时，必须确保温升不超过绝缘材料所允许的最高温度。



不同工作制下电动机容量的选择

■ 连续工作制电动机容量的选择

1、对于恒定负载：电动机功率>负载功率

2、对于变动负载：

1) 按温升特性折算： **温升与电流的平方值成正比

对于直流电动机：转矩与电流正比

等效转矩

$$T_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2 t_i}{t}}$$

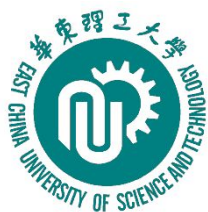
对于交流电动机，忽略转速变化，功率与电流正比

等效功率

$$P_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t}}$$

2) 电动机功率>等效功率

3) 校验过载能力和启动转矩



短时工作制电动机容量的选择

■ 选用短时制电动机

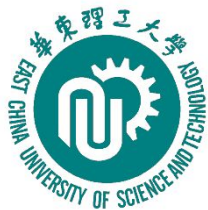
- 1、短时工作制电动机标准10、30、60、90min。即该电机在额定功率运行时间不能超出该时间。
- 2、实际工作时间 t_p 与标准时间 t_s 不同，负载的功率可折算为：

$$P_s^2 t_s = P_p^2 t_p$$

■ 选用连续制电动机

连续制电动机用于短时拖动，从温升角度看，可以过载运行。过载倍数与 t_p / T_h （温升时间常数）有关。

。



重复短时工作制电动机容量的选择

■ 暂载率：

$$\varepsilon = \frac{\text{工作时间}}{\text{工作时间} + \text{停车时间}} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \times 100\%$$

重复周期小于10min时

1、选用重复短时工作制的电动机

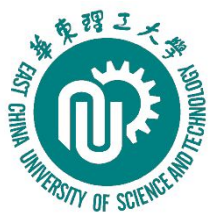
标准暂载率15%、25%、40%、60%

$$\text{电动机的功率: } P_{sN} \geq P_s = P \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sN}}}$$

重复周期小于2min时，须考虑启动、制动的影响，容量选大些。

2、选用连续工作制的电动机

$$\text{电动机的功率: } P_{sN} \geq P_s = P \sqrt{\frac{\varepsilon}{100\%}}$$



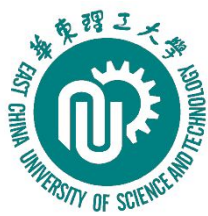
电动机容量的选择

- 统计——经验公式
- 类比同类型设备
- 晶闸管供电对电动机的影响

对于直流电机，广泛采用晶闸管整流电源，较直流发电机组的效率high。

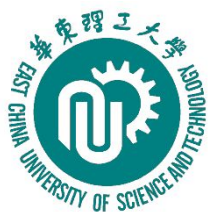
晶闸管整流电源有脉动分量，使铜耗和铁耗增加，效率降低。

电动机的适当降低使用。



电动机类型的选择

- 鼠笼式异步电动机：优先选用
- 绕线式异步电动机：需调速、常起停
- 多速异步电动机：多级调速
- 同步电动机：恒速
- 直流串励、复励电动机：恒功率调速
- 中等功率：380VAC
供电电压等于电动机的相电压，可Y/ Δ 启动
100KW以上：3KV、6KV
- 直流电机110VDC、220VDC、440VDC



电动机转速与结构形式的选择

- 速度匹配、直接驱动
- 配减速器，间接驱动
- 惯量匹配：($J_m = J_L$). ——最佳传动比

配减速器：在传动链中增加了一部分转动惯量，但降低了执行机构的转动惯量。那么，配多大的减速器？

$$Ip = \sqrt{J_L / (J_M \eta)}$$

- 开启式：散热，用于干燥、清洁场合
- 防护式：通风、防水、防尘
- 封闭式：自冷、强迫通风、密闭式
- 防爆式：封闭结构+隔爆结构