

## 自动控制实践A

控制要素: 主体, 客体, 目标, 手段

测量元件, 执行元件, 功放元件, 校正(补偿)元件

## 磁路及电学常识

$$H = B/\mu; \mu_r = \mu/\mu_0$$

$$\text{磁路} \sim \text{第一} \sim: \sum \phi_i = 0$$

$$\text{第二} \sim: \sum U_{mi} = \sum F_{mk} / \sum H_i L_i = \sum I_k N_k$$

$$\text{磁路欧姆定律: } U_m = \phi R_m = H L = \frac{\phi}{\mu A} \cdot L$$

$$\text{磁阻 } R_m = \frac{L}{\mu A} \text{ 单位 } 1/H$$

高斯定律  $\Rightarrow$  第一; 安培环路(全电流)  $\Rightarrow$  第二

磁路与电路差别:

- ① 磁路无损耗, 直流电路有  $i^2 R$  损耗
- ② 磁路漏磁严重
- ③ B-H 非线性,  $\mu$  非线性
- ④ 线性电路可使用叠加原理, 磁路则不能

$$\text{电磁力与极对数关系 } T = k \sin p\theta$$

漏电保护: 检测各相电流之和是否为0

## 直流电机

优: 转矩大; 调整范围宽; 容易控制

缺点: 寿命有限, 结构复杂

定子: 机壳, 端盖, 磁极铁芯, 绕组, **电刷**

转子: 转子铁心, 转子绕组, **换向器**

定子: 1. 励磁 他励, 并, 复, 串  
2. 励磁

机座: 主磁路一部分; 结构框架

可用无刷电机磁耦合方式代替


环状绕组(利用率低) **鼓形绕组(改善, 多用)**

$B_r, H_c$  较小, 软磁材料, 磁滞回线较窄.


永磁材料主要性能参数: 剩磁  $B_r$ , 矫顽力  $H_c$ , 温度系数, 最大磁能积  $(BH)_{max}$

空载/主极磁场: 电枢电流为0时, 单独作用产生~  
磁通密度  $B_x$  为一平顶波 

若电枢无元件分布, 电枢磁动势呈三角波.  $F_{ax}$

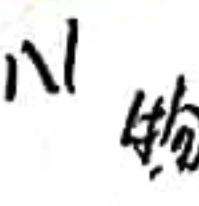
电枢磁动势产生的  $B_{ax}$  为对称的马鞍形 


一般选用永磁材料在极点 经济, 合理

两者逐点叠加, 得到 

几何中性线时, 电枢磁特点:

① 气隙磁场发生畸变 ② 磁极场起去磁作用.

换向: 换向元件电势: 自感  $\sim e_L$ ; 切割  $\sim e_a$  

改善换向的方法: ① 将电刷由几何中性面向 

物理中性面移动, 直至火花最小, 实际角度大于物理~角度

② 几何中性线处装换向磁极, 换向绕组与电枢~串联

③ 选择合适的电刷, 改善电接触

## 直流电机基本方程

$$e = k_e \Omega = C_e \Phi \Omega$$

$$T_{em} = k_t I_a = C_t \Phi I_a$$

采用国际单位,  $k_e = k_t$ .

$$\begin{cases} T_{em} - T_0 - T_L = J \alpha \\ U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_{em} = T_0 + T_L \\ U_a = R_a I_a + E_a \end{cases}$$

功率分配

$$U_a I_a = I_a^2 R_a + E_a I_a$$

$$P_i = P_{cu} + P_{em}$$

$$\Omega T_{em} = \Omega T_0 + \Omega T_L$$

$$P_{em} = P_0 + P_2$$

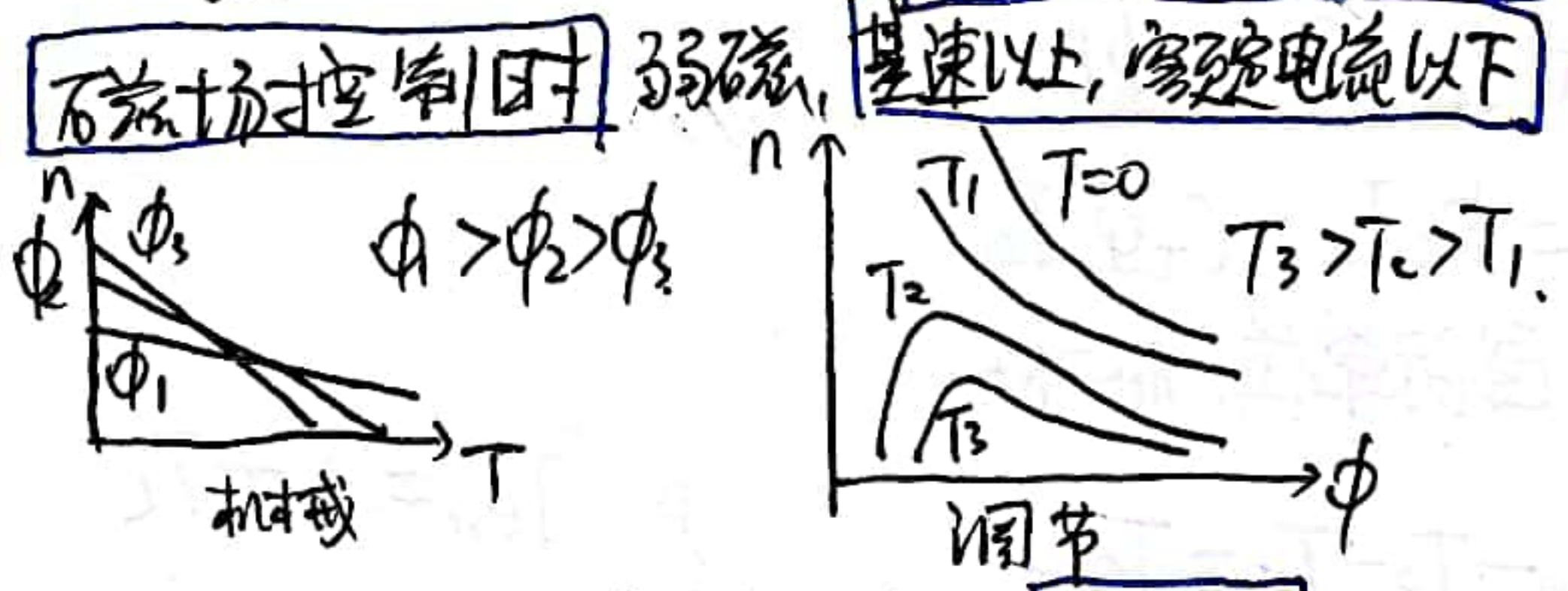
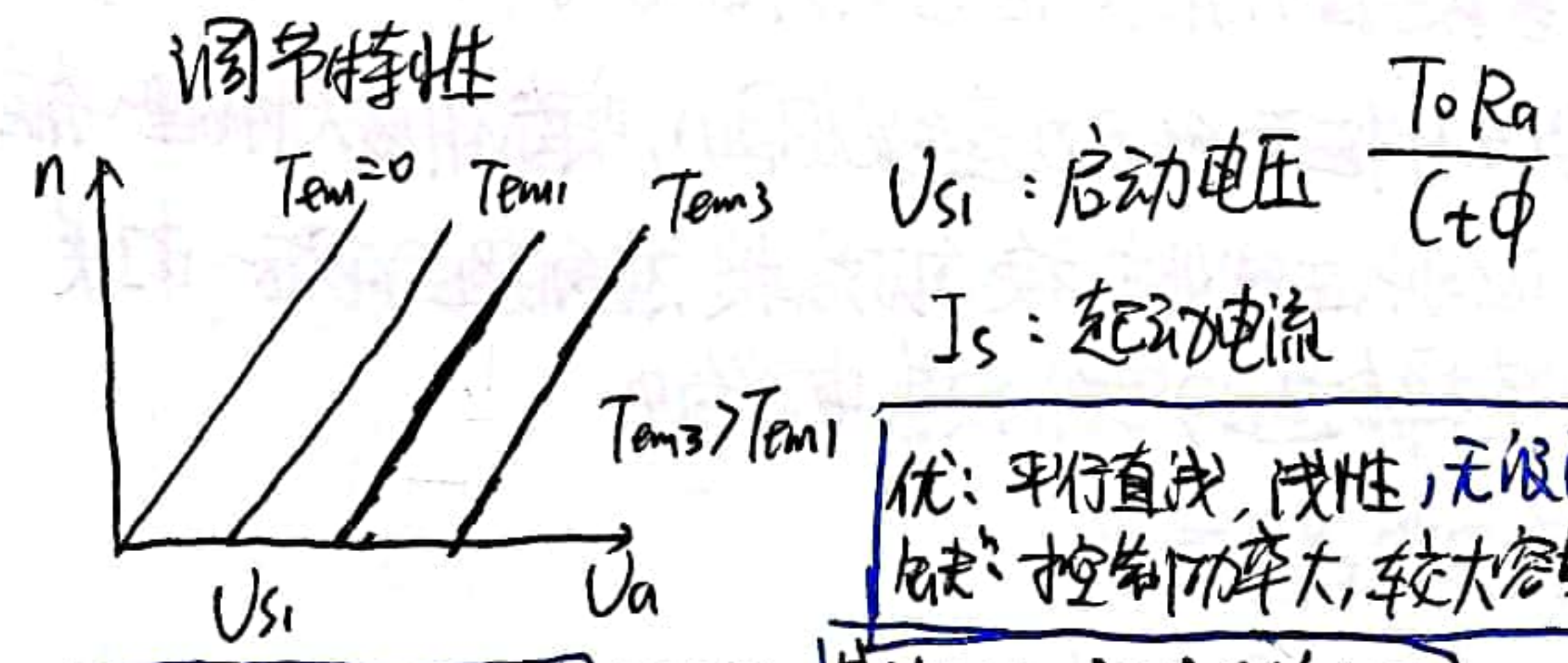
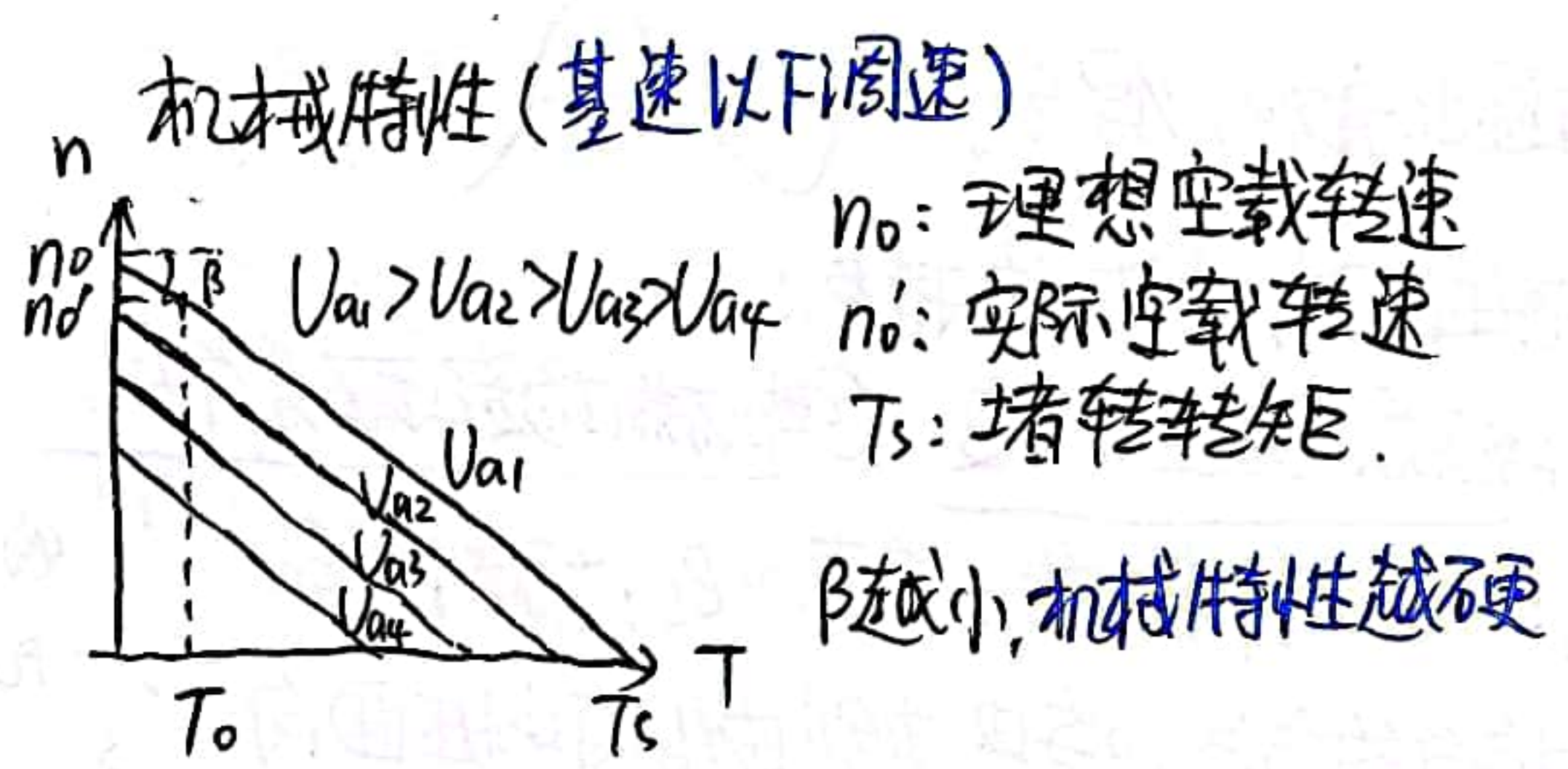
$$\text{感应电势波动 } f_s = \frac{z \cdot n}{60} \quad \text{纹波系数 } \xi = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

铭牌额定功率为输出功率

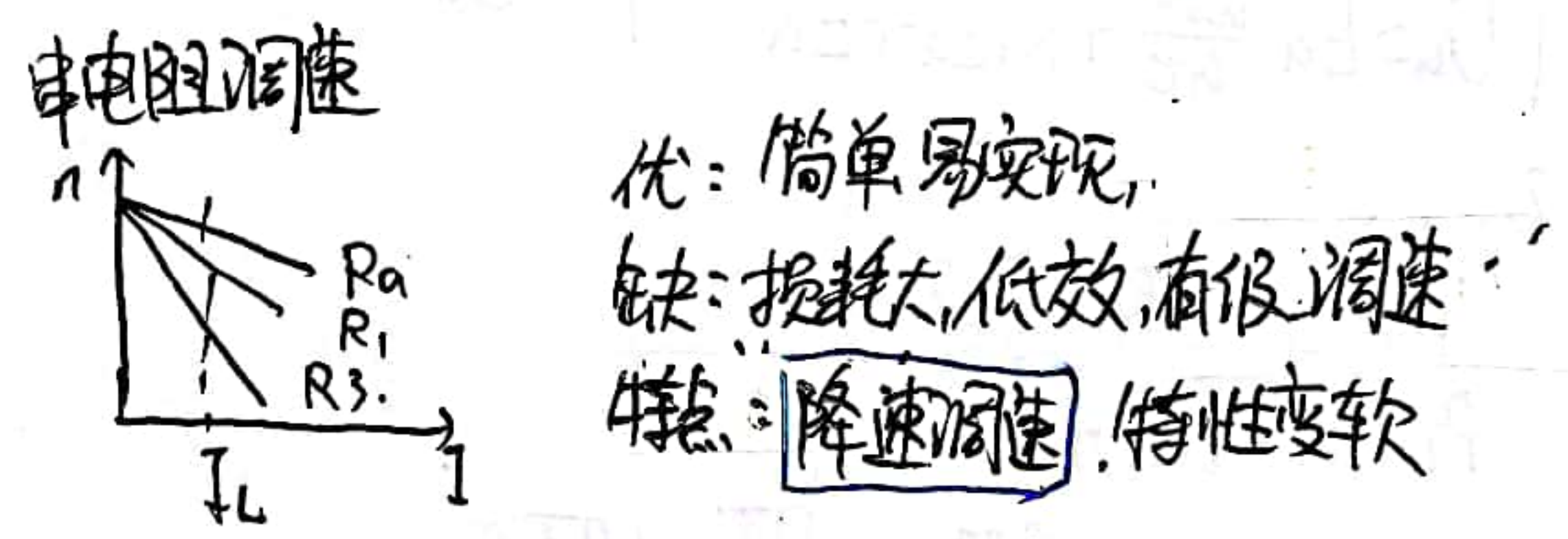


机械特性: 转速与转矩.  
调节特性: 转速与控制量(如电压关系)

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} = \frac{U_a - C_e \Phi n}{R_a}$$
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2} \quad \omega = \frac{U_a}{k_e} - \frac{T_{em} R_a}{k_e k_t}$$

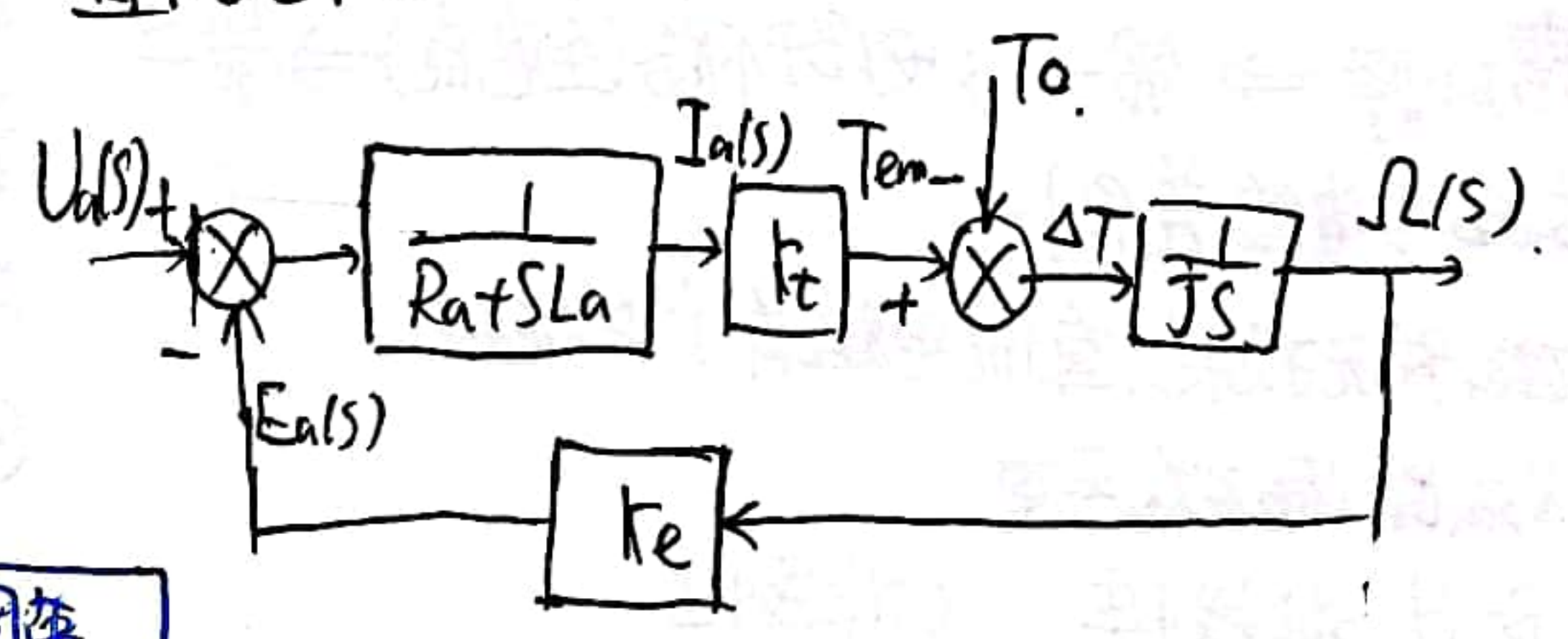


优点: 可控大功率电机, 高效恒功率



直流电动机的工作状态,  
电动机状态,  
机械特性: 1, 3象限  
发电机状态,  
机械特性: 2, 4象限  
能耗制动状态,  
通过原点  
反接制动状态,  
4, 2象限

直流电机控制框图

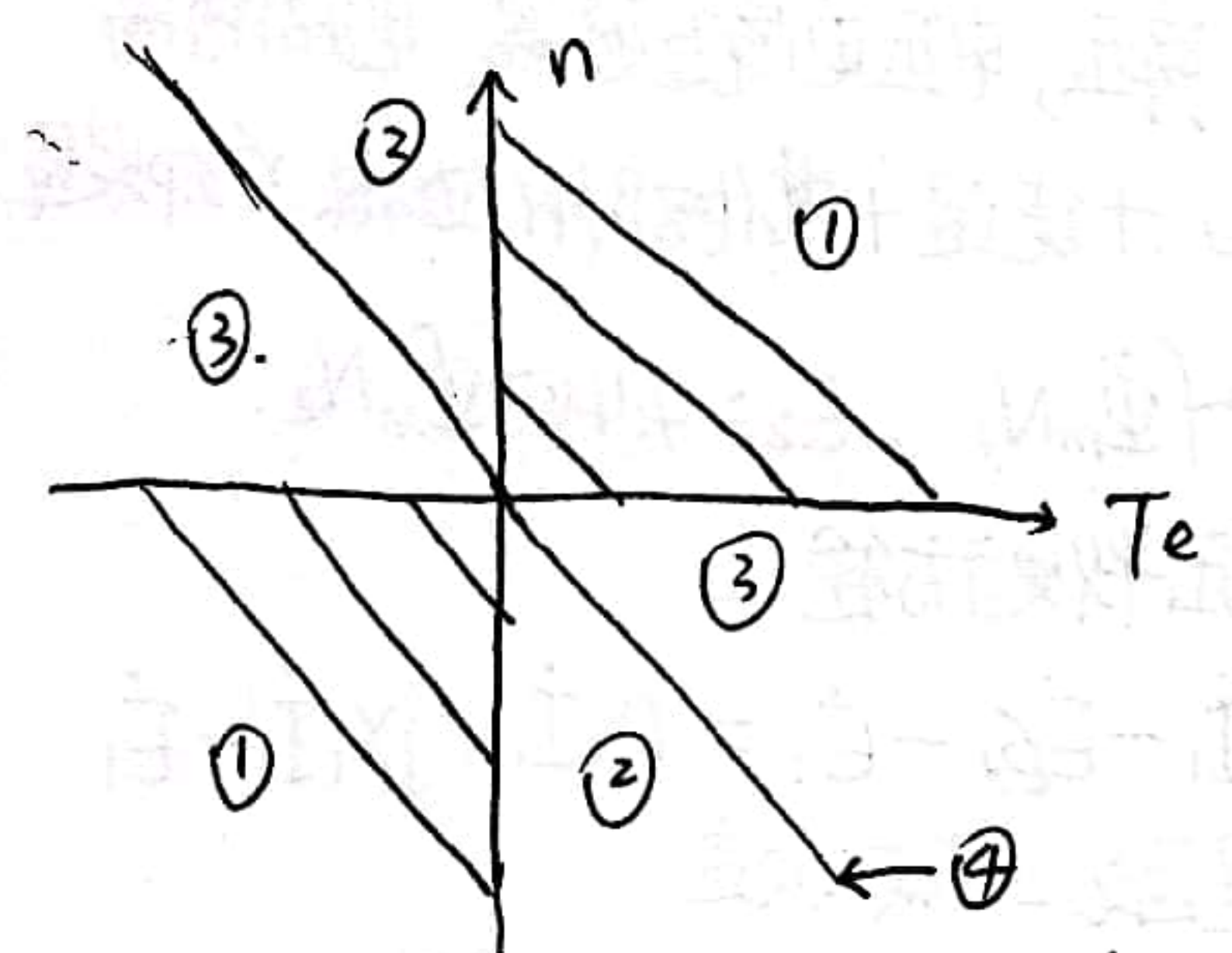


机电时间常数  $T_m = \frac{R_a J}{k_e k_t}$   
电磁时间常数  $T_e = \frac{L_a}{R_a}$



电力变流技术：整流；直流斩波；交交变换；逆变

### 直流电机的调速运行



- ① 电动机状态
- ② 发电状态
- ③ 反接制动
- ④ 能耗制动

### 直流电机的选用

优点：①良好的线性控制特点 ②调速范围广  
③易于无级调速

缺点：电刷换向器结构限制  $P_{max}$ ,  $n_{max}$ , 电机寿命, 安全性, 适用性, 以及电磁兼容性差。

铭牌：①额定功率指输出~ ②额定电压指电枢

两端电压, ③额定电流指(并励包括励磁电流)电枢电流

电机选择  $J = J_m + \frac{1}{i^2} J_L$      $T_f = \frac{1}{i} T_L$

$J_L$  - 负载转动惯量,  $J_m$  - 电机转动惯量

$i$  - 齿轮速比,  $T_L$  - 负载转矩

$i$  为电机传递到负载侧轮速比

电磁式直流伺服电机 仅结构上有些区别, 可电枢控制可磁场~

永磁式直流伺服~ 仅可进行电枢控制, 结构小, 出力大,  $\eta$ 高

直流伺服电机相对于普通直流电机  
惯量小, 反应快, 调速宽, 过载大, 低噪音, 高效率。

### 功率放大线路与电力电子技术概述

- 要求：①能够输出期望的电压、电流  
②失真小, 线性度好 ③安全保护功能  
④功率流向控制 ⑤具有良好的效率

不可控器件：电力二极管

半控型器件：晶闸管

全控型器件：  
IGBT   
MOSFET   
GTO

IGBT MOSFET 工作在开关状态在截止区、非饱和区 切换

过电压保护：①分闸合闸 ②雷击过电压  
③关断过电压

压敏电阻过压抑制, RCD关断过压抑制, 等等

过电流保护：过载, 短路

Snubber电路：关断, 开通缓冲电路

关断缓冲：吸收关断过电压和换相过电压  $\frac{du}{dt}$

开通缓冲：抑制开通时电流过冲和  $\frac{di}{dt}$

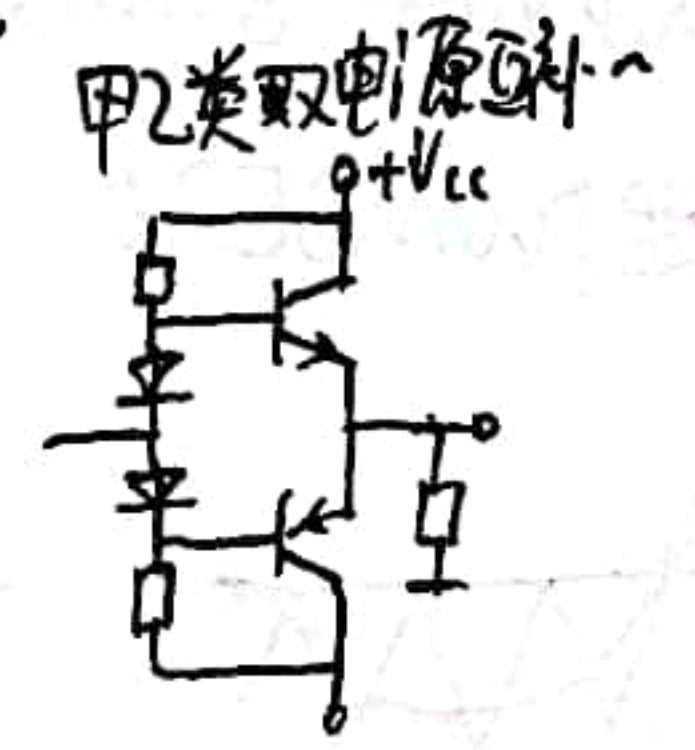
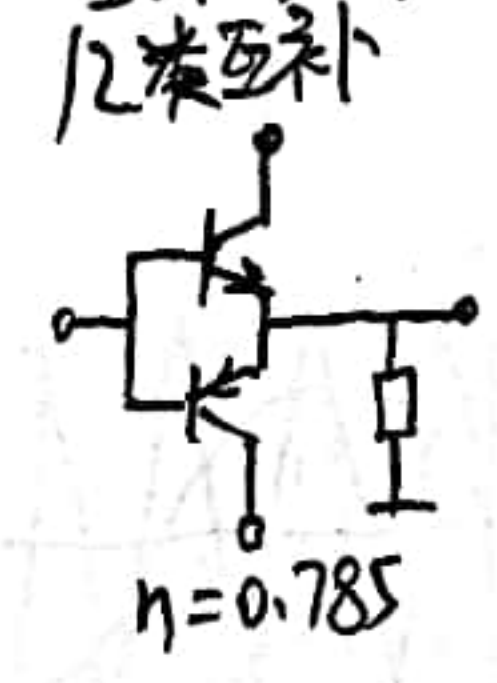
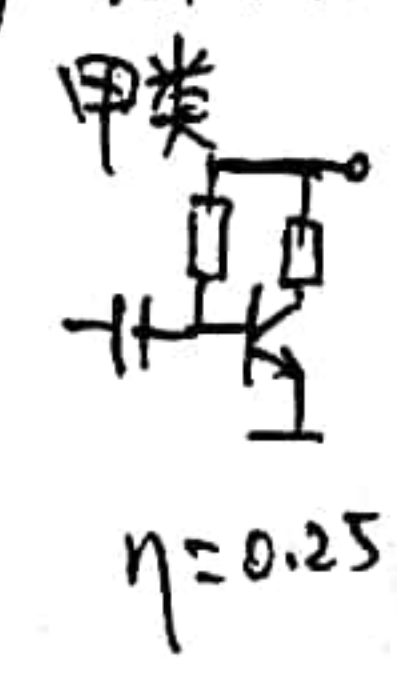
线性功放：  
{ 电磁兼容性好, 简单低成本, 纹波小  
  效率低, 小功率

开关功放：  
{ 效率高, 数字化控制, 大功率  
  有可能存在电磁兼容性差问题

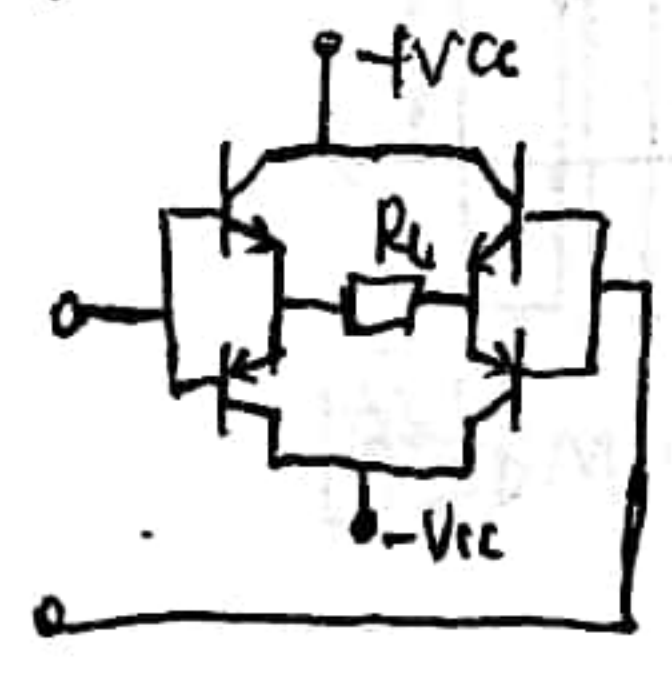
伺服驱动功率环节一般包括：

- ①功率电路 ②前置隔离电路 ③检测检测/保护电路

线性功放：互补推挽OCL



双电源供电BTL



限流保护：防止直通损坏；  
防止过热；



# 脉宽调制技术(PWM)

基本原理: 冲量相等的窄脉冲, 响应效果相同,

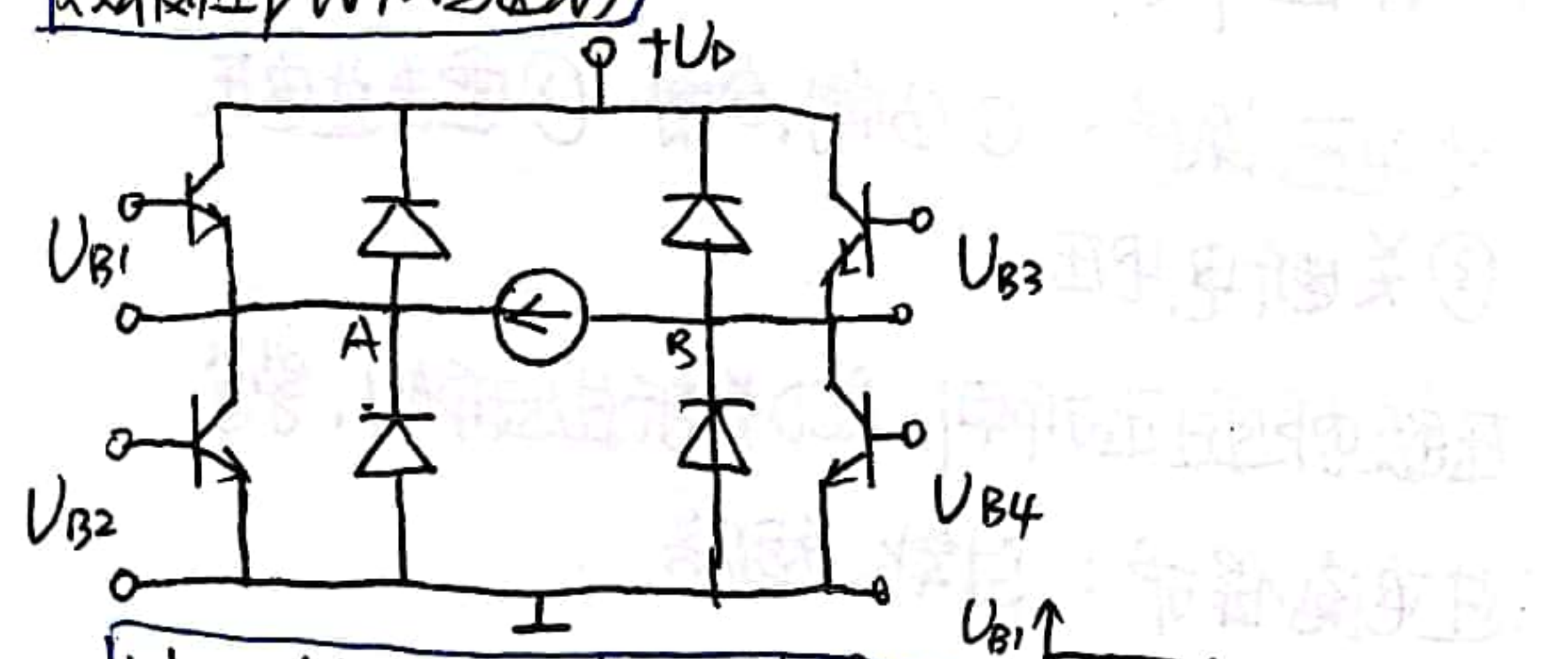
冲量等效原理, 面积等效原理

用三角波信号与给定信号对比, 信号三角波, 输出正幅值

## 开关电路PWM驱动分析

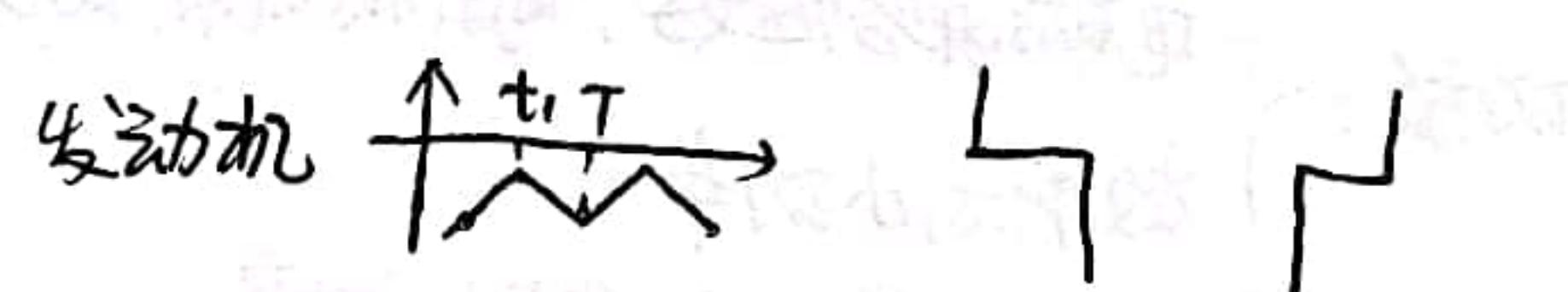
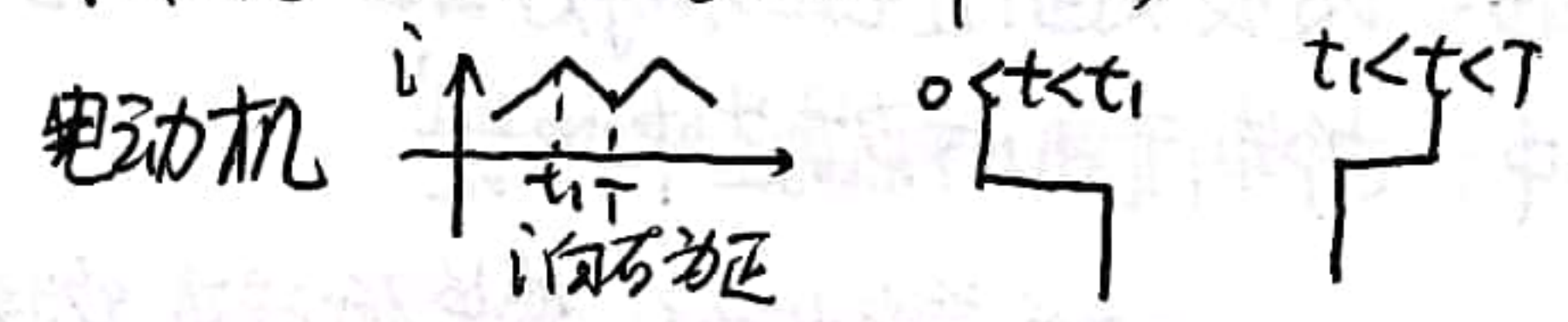
H型桥式电路, 4晶体管+4续流二极管

### 双极性PWM驱动



$$U_{B1} = U_{B4} = -U_{B2} = -U_{B3}$$

$$\text{输出电压 } U_{av} = U_D (2 \frac{t_1}{T} - 1)$$



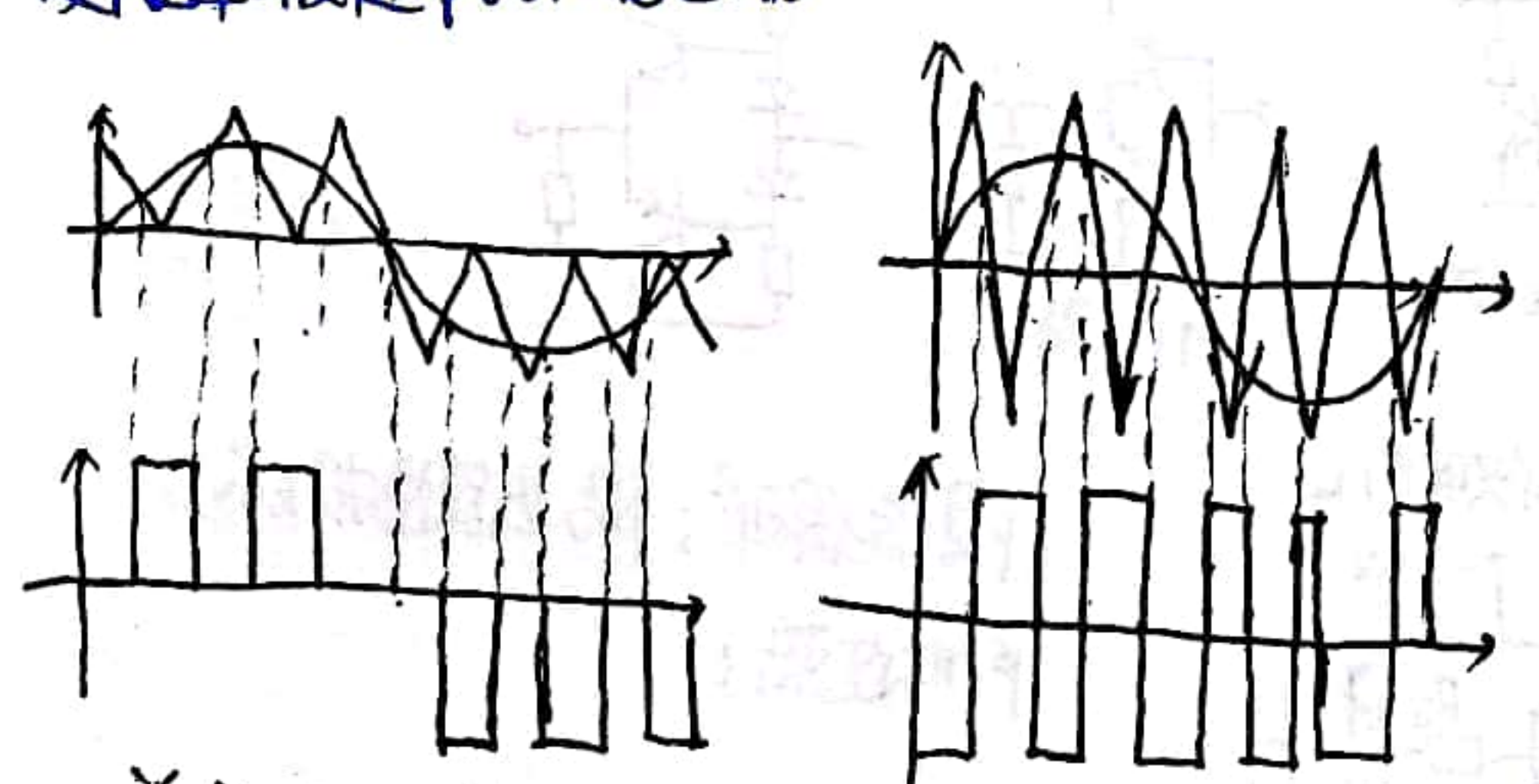
轻载则会出现上述四种状态,

### 单极性PWM驱动

$$U_{B1} = -U_{B2} \quad U_{B3} = -U_T, \quad U_{B4} = U_T$$

好处: 减少晶体管切换的次数, 延长寿命; 电流波动小

### 受限单极性PWM驱动



单极PWM控制

双极性PWM控制

# 变压器

用途: 升压, 降压, 电压电流互感器, 电路隔离

结构: 铁心 + 绕组 + 其他附件 (油箱, 冷却装置, 保护等)

$$E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1, \quad E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$$

一次侧电压平衡方程

$$U_1 = R_1 I_1 - E_1, \quad -E_1 = R_1 I_1 + jX_1 I_1 - E_1$$

$E_1$  为负是因为正方向规定

$$R_1, X_1, I_0 \text{ 小, } U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

二次侧电压平衡方程

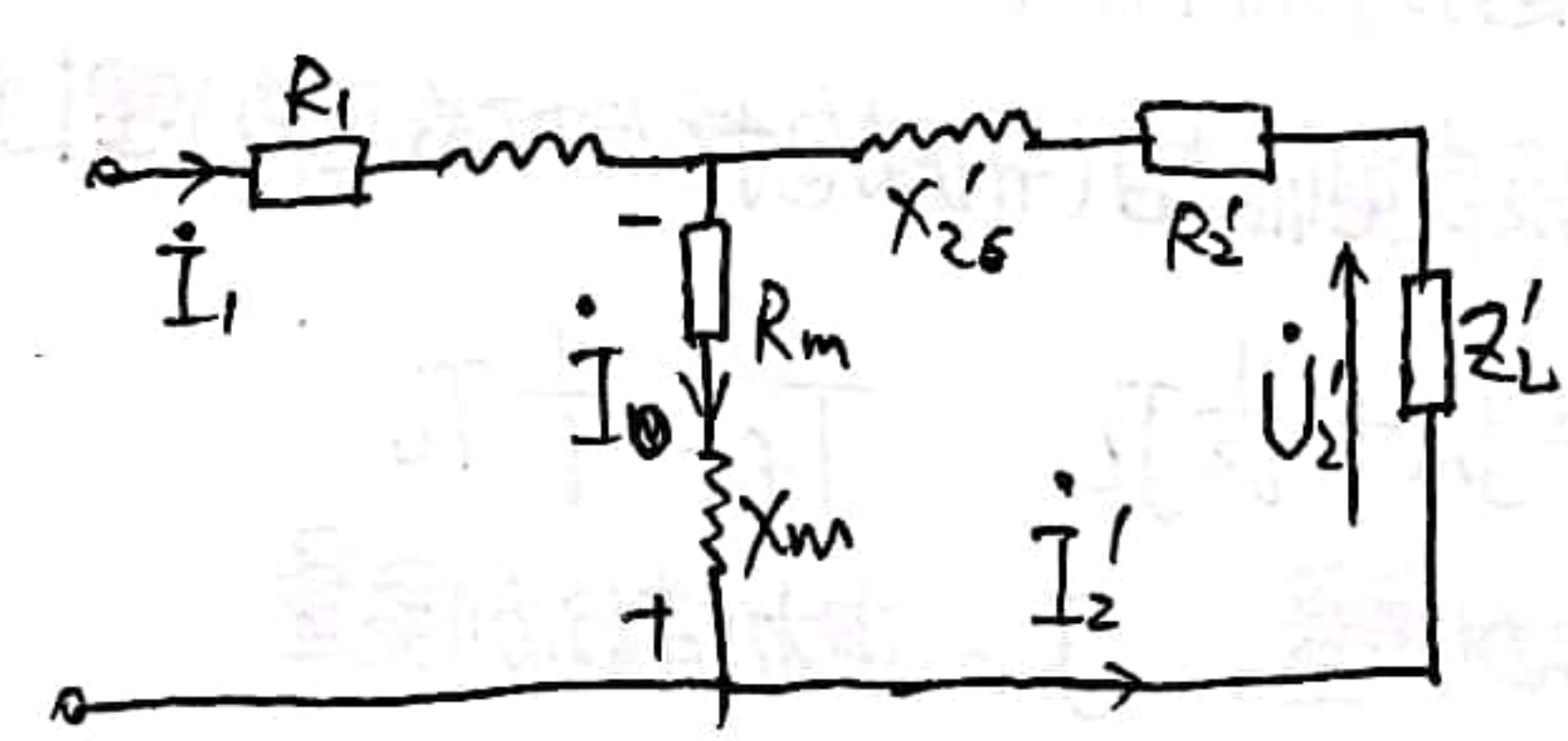
$$E_2 = R_2 I_2 - E_{c2} + U_2 = R_2 I_2 + jX_2 I_2 + U_2$$

$$\text{空载时 } U_2 = U_{20} = E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$$

$$\text{磁势平衡式 } i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

## 变压器等效电路



$$R_2' = K^2 R_2, \quad X_2' = K^2 X_2, \quad Z_L' = K^2 Z_L$$

$$I_2' = \frac{1}{K} I_2, \quad U_2' = K U_2$$

额定电压  $U_{1N}/U_{2N}$  ( $U_{1N}$  电源电压,  $U_{2N}$  二次侧开路电压)

额定电流  $I_{1N}/I_{2N}$ : 额定容量除以额定电压算的线电压

$$\text{额定容量 } S_N = \begin{cases} \text{单相} & = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \\ \text{三相} & = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \end{cases}$$

$$\text{一次侧输入功率 } P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad \text{二次侧输出功率 } P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$\text{容量 } S_N \neq \text{输入功率 } P_1$$

## 自耦变压器

电压互感  $N_1 > N_2$

电流互感  $N_1 < N_2$

二次侧不能短路, 以防过流

二次侧不能开路, 以防过压

二次侧接地, 防止过压

二次侧低压端接地

低压端

利用阻抗匹配实现最大输出功率



## 异步电机概述 (感应电机)

直流电机极对数  $p$ , 极距 (用角度表示)

绕组节距  $\tau$ , (极距 = 节距  $\tau$ ) 保证电势叠加

异步电机  $n$  (线圈转速)  $< n_0$  (磁场转速)

定子绕组 产生旋转磁场

转子绕组 { 线绕式 产生感应电动势或电流  
鼠笼式

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin \omega t \\ i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

换接任意两相即可改变旋转方向

电流变化周期  $\rightarrow$  旋转磁场转过  $360^\circ$

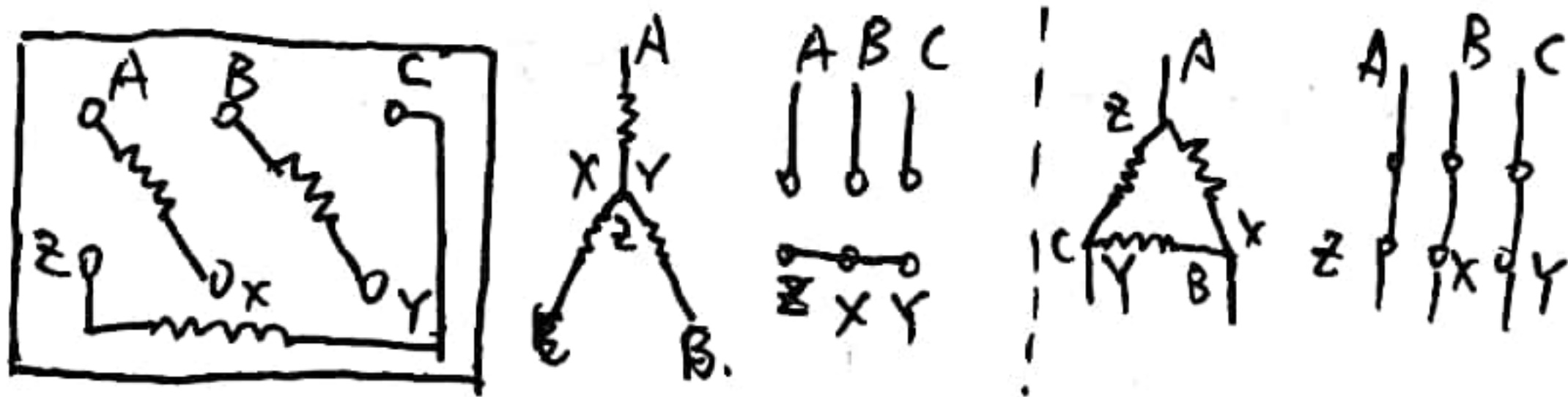
同步转速  $n_0 = 60f$  (转/分),  $f$  - 电源频率

极对数为  $p$   $n_0 = \frac{60f}{p}$  (rpm/min)

极对数为  $p$  下, 每个电流周期, 磁场转过空间角度为  $\frac{360^\circ}{p}$ , 同步转速为  $n_0 = \frac{60f}{p}$

交流绕组的分类 { ① 相数 单相/多相  
② 层数 单层/双层  
③ 绕法 叠绕组/波绕组

联接方式: Y/Δ 接法



铭牌 "380/220 Y/Δ" 指线电压为 380V 采用 Y 接  
为 220V 采用 Δ 接

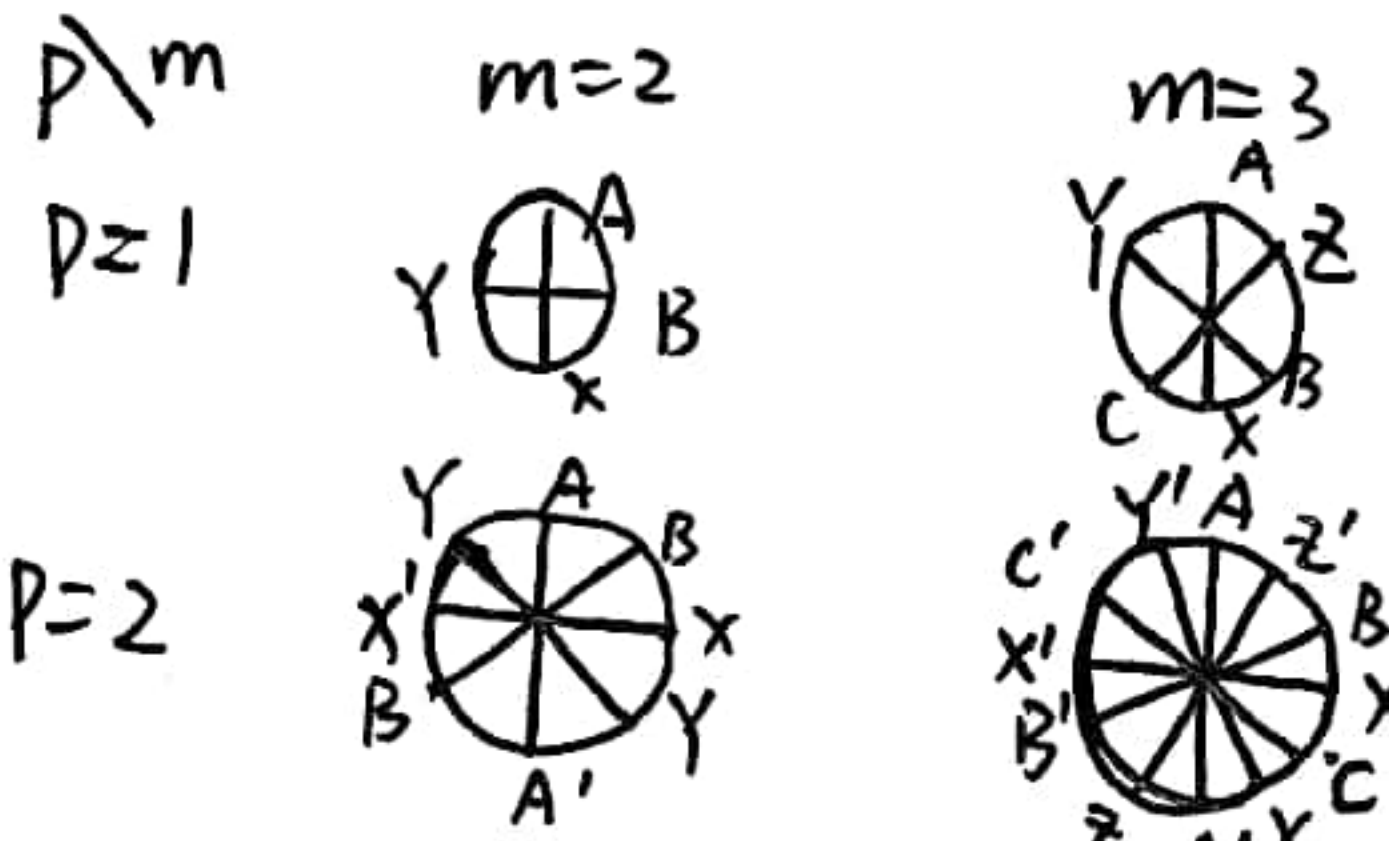
运行电压 (异步电机) 在额定电压  $\pm 5\%$  内

优点: 结构简单, 坚固耐用, 使用寿命长, 易维修

电角度 = 机械角度  $\times p$

一个极距在电角度上等于  $180^\circ$

相数  $m$ , 极对数  $p$ . 绕组间隔  $\frac{360^\circ}{m}$  散放



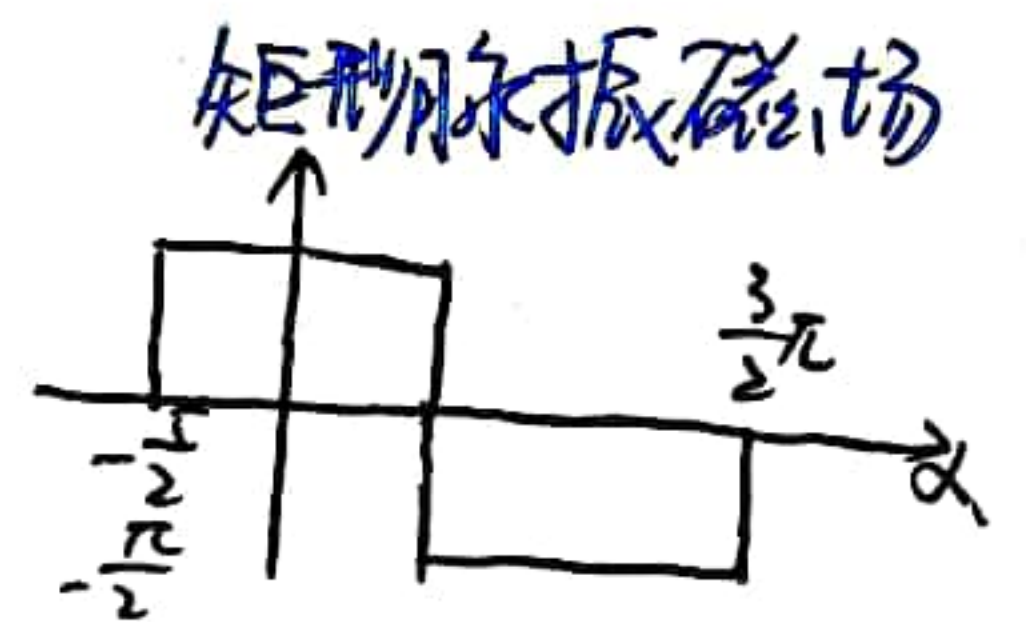
极距 (线圈跨距)  $\tau = \frac{\pi}{p}$

注入相隔  $\frac{360^\circ}{m}$  的电流,

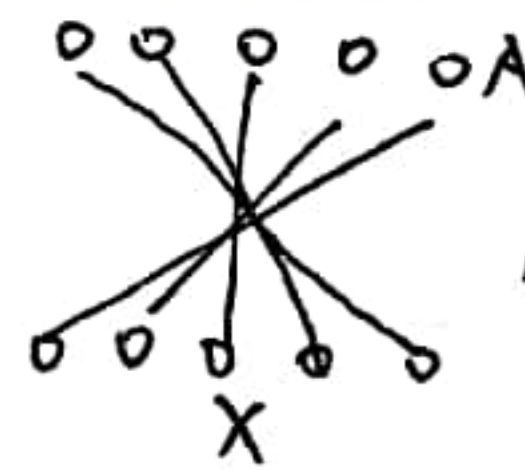
单相整距绕组

$$i_c = \sqrt{2} I_c \sin \omega t$$

$$f_c(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \sin(\omega t) = \frac{1}{2} i_c N_c$$



一相绕组 (1个)



$N$  个平移叠加, 做傅氏分解

$$f_\phi(\alpha, t) = 0.9 \frac{N}{p} I_c \sin \omega t \left( \cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \right) = 0.9 \frac{N}{p} I_c \sin \omega t$$

$N$  - 一相的匝数 (每相串联匝数),  $k_{wv}$  - 绕组系数

$$F_{wv} = k_{qv} \times k_{dyv} \quad (\text{短距系数, 绕组分布系数})$$

三相合成磁势

$$F_\phi = 0.9 \frac{N}{p} I F_{w1}$$

$$f_A(\alpha, t) = F_\phi \sin(\omega t) \cos \alpha$$

$$f_B(\alpha, t) = F_\phi \sin(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha - 120^\circ)$$

$$f_C(\alpha, t) = F_\phi \sin(\omega t + 120^\circ) \cos(\alpha + 120^\circ)$$

$$f_{\text{合成}} = \frac{3}{2} F_\phi \sin(\omega t - \alpha)$$

$\omega t - \alpha = \frac{\pi}{2}$  时, 磁场最大, 保持间距  $\frac{\pi}{2}$

$$\textcircled{1} \frac{d\alpha}{dt} = \omega = 2\pi f = 2\pi f \cdot \frac{60}{p} = 60f \left( \frac{60f}{p} \right) \text{ (rpm/min)}$$

② 任意换两相电流  $\frac{3}{2} \sin(\omega t + \alpha)$ , 换向

③ 当某相电流达最大时, 合成磁势正幅值恰与该相绕组轴重合



## 导体的感应电动势

$$e = Blv = B_l l v \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

$$\text{线圈电动势 } E_{c1} = 4.44 f N_c \Phi_1$$

$$\text{相电动势 } E_{\phi 1} = 4.44 f N k_w \Phi_1$$

## 永磁交流伺服电机

投切电网运行的永磁同步电动机

$$T = k_F F_r \sin \theta$$

起动问题:

1) 起动困难原因: ① 转子惯性 ② 起动时转差率

2) 解决方法: ① 转子装起动鼠笼绕组异步起动 ② 降频起动

主要特点: 输出转矩大, 体积小, 耗电少, 结构简单可靠。

永磁交流伺服电机

- 无刷直流电机 (方波永磁电机)
- 永磁同步电机 (正弦波永磁电机)

定子: 多相对称交流绕组

转子: 永磁体激磁

对定子施加电压

位置传感器

性能: ① 采用永磁激磁, 基本无铜损和铁损,  $m$  小,  $\eta$  高

② 定子生成磁场对转子位置实现闭环控制, 控制特性好

功率因数高: ③  $J$  小,  $T_m$  大, 可承载较大  $\alpha$  和过载能力高。

④ 结构紧凑, 无需维护, 运行可靠。

⑤ 正弦波永磁电机需精密转子位置传感器和量控制驱动器, 成本较高。

## 无刷直流电机 (BLDC)

电动机 + 位置传感器 + 电子换流电路

三相六状态

A	B	C
B	C	A

步距为  $60^\circ$ , 1/6 周期, 每转  $60^\circ$  换流一次, 每个功率管通  $120^\circ$

电压为  $120^\circ$  平顶波

控制与直流电机相同

$$T_{em} = \frac{\sum e_j i_j}{\Omega} = \frac{(e_{a1} i_{a1} + e_{b1} i_{b1} + e_{c1} i_{c1})}{\Omega}$$

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + e$$

$$e = k_e \Omega$$

$$T = k_T i$$

换向过程, 不能实现电流波形为纯方波, 存在换向力矩波动  
力矩波动大

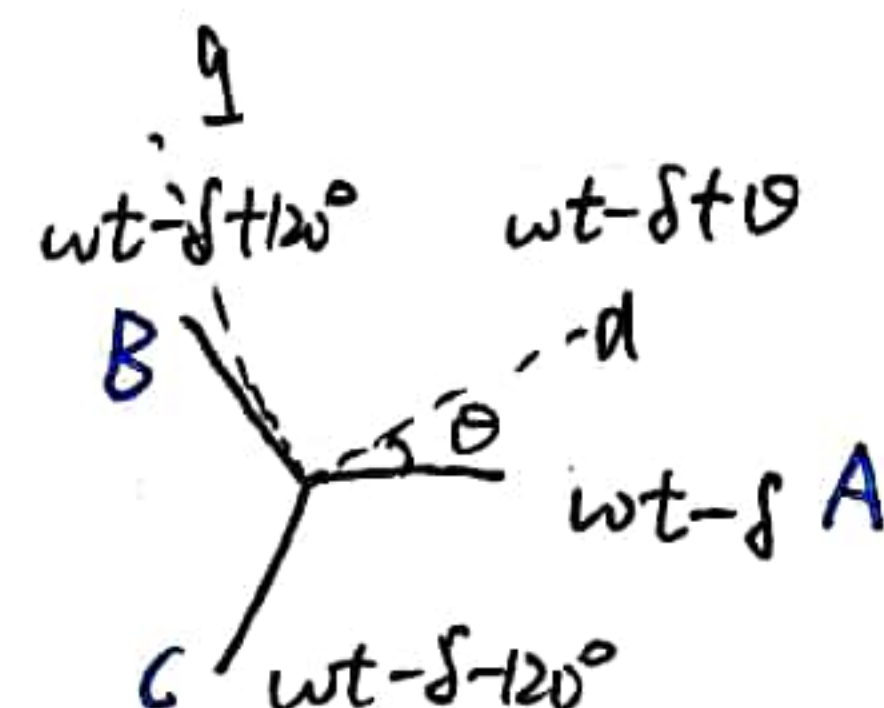
永磁同步伺服电机 PMSM

$$T_{em} = \frac{\sum e_j i_j}{\Omega} = \frac{3}{2} k_e I_m$$

ABC-dq 坐标变换

向 d, q 轴投影

d 轴固定在磁场方向



只需检测出转子 d 轴位置。

控制逆变器使三相定子合成电流矢量位于 q 轴即可

电流负反馈下, 一般只需考虑 q 轴模型。(采用  $i_d = 0$  策略)

无刷直流电机调速伺服电机

永磁同步伺服电机适于精密力矩, 位置伺服

交流电机电机是定子

位置控制

直接转矩控制 预估磁场位置 (控制算法)



# 异步电机 ASM

滑差  $S = \frac{n_s - n}{n_s}$   $n_p = \frac{60f}{p} \Rightarrow f = \frac{n_p p}{60}$

$S > 1$   $n < 0$  反接制动  
 $S = 1$   $n = 0$  堵转  
 $0 < S < 1$   $0 < n < n_s$  电动  
 $S = 0$   $n = n_s$  理想空载  
 $S < 0$   $n > n_s$  再生制动

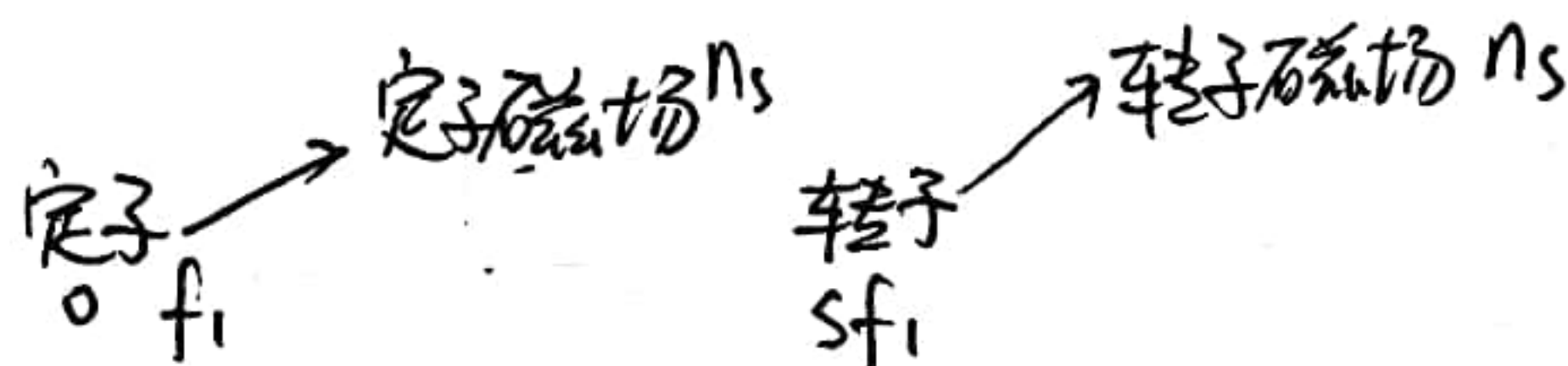
$S_{\text{额}} 0.01 \sim 0.05$

① 转子中  $e/i$ ,  $f_2 = \frac{S n_s p}{60} = \frac{S \cdot \frac{60f_1}{p} p}{60} = S f_1$

② 转子磁场相对于转子

$n_{f_{\text{转-转}}} = \frac{60f_2}{p} = \frac{60Sf_1}{p} = S \cdot n_s$

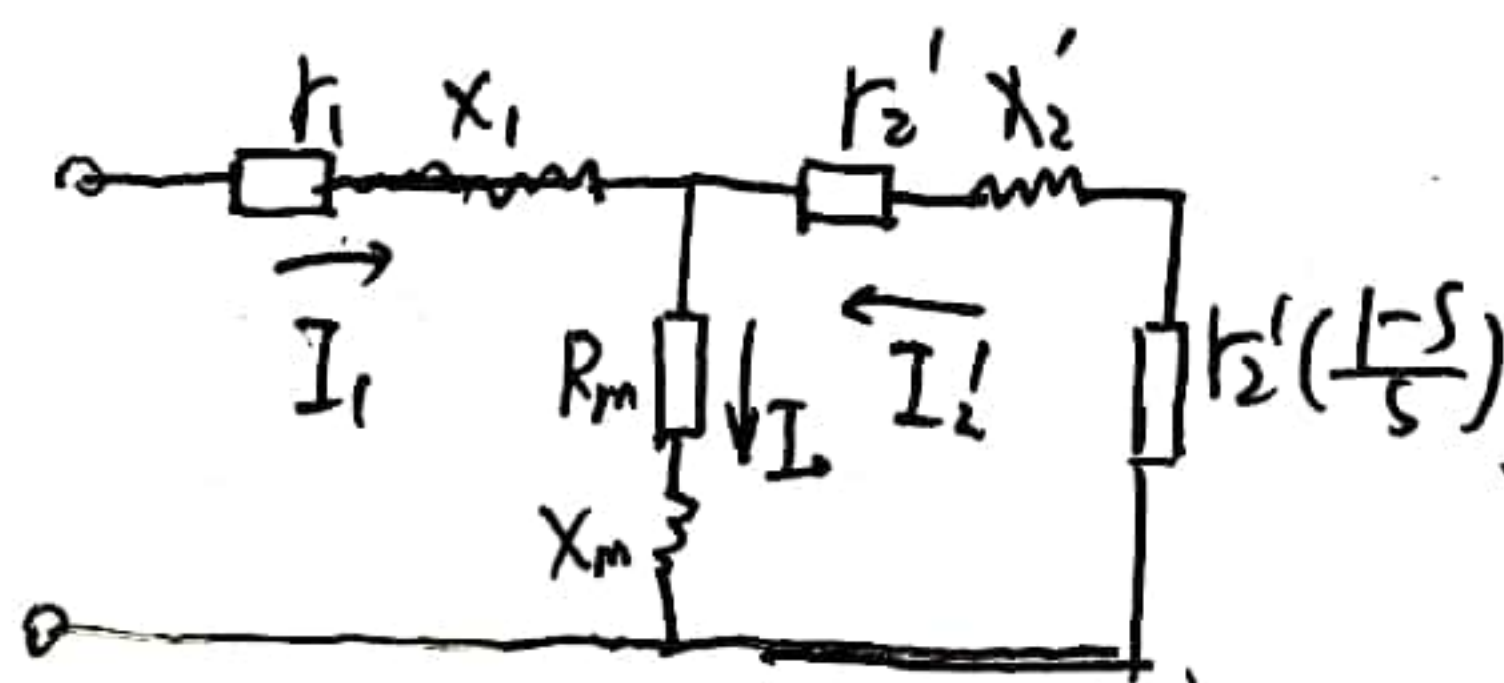
$n_{f_{\text{转-定}}} = n + n_{f_{\text{转-转}}} = (1-S)n_s + S \cdot n_s = n_s$



堵转状态  $E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi k_{w1}$

( $S=1$ )  $E_2 = 4.44 f_2 N_2 \phi k_{w2} = f_1$

$0 < S < 1$  电动时,  $f_1 \neq f_2$  ( $f_2 = S f_1$ )



$k_m$ : 铜损耗

$P_1 = m_1 U I_1 \cos \varphi$ , 定子-相线电压, 电流功率因数.  
 $m_1$  - 定子相数.

$P_{em} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe} = P_1 - m_1 I_1^2 r_1 - m_1 I_0^2 r_m$

电磁功率  $P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{1-S}{S} (r_2' + r_2) = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2$   
 $= m_1 I_2'^2 \frac{1-S}{S} r_2'$

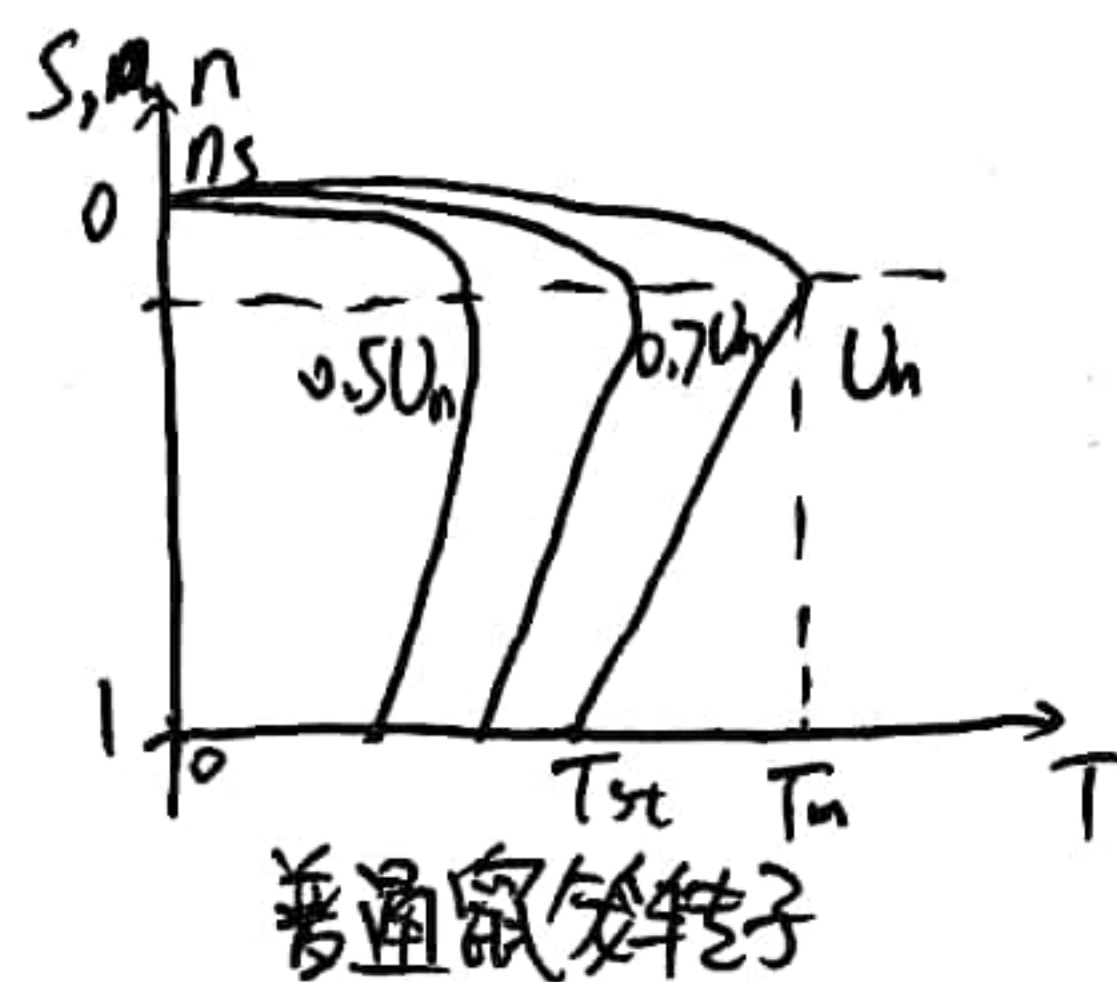
机械功率  $P_m = (1-S) P_{em} = m_1 I_2'^2 \cdot \frac{1-S}{S} r_2'$

输出功率  $P_2 = P_m - P_0$  ( $P_0$  - 空载损耗率)

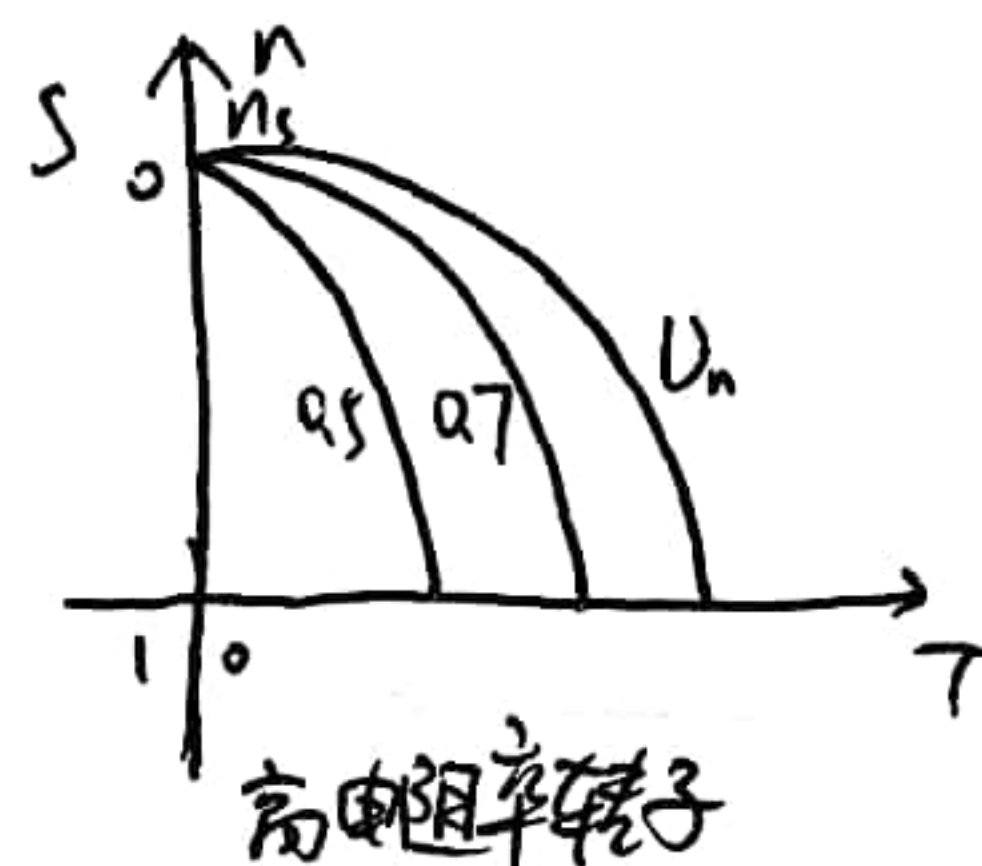
$P_{em} = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2$

$T_{em} = C_t \phi I_2' \cos \varphi_2$

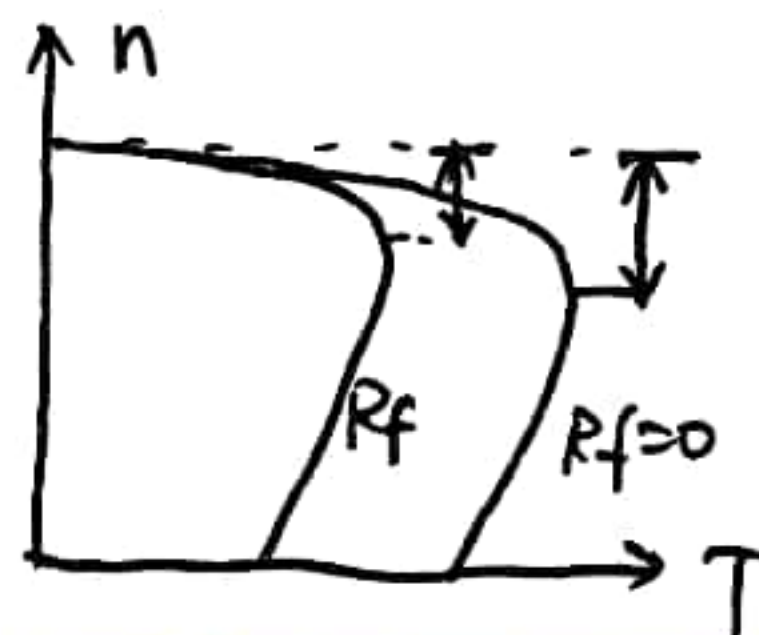
$P_{em} = T_{em} \cdot 2\pi f_1 / p$



$T_{st}$ : 启动转矩,  $T_m$ : 峰值转矩



定子串电阻

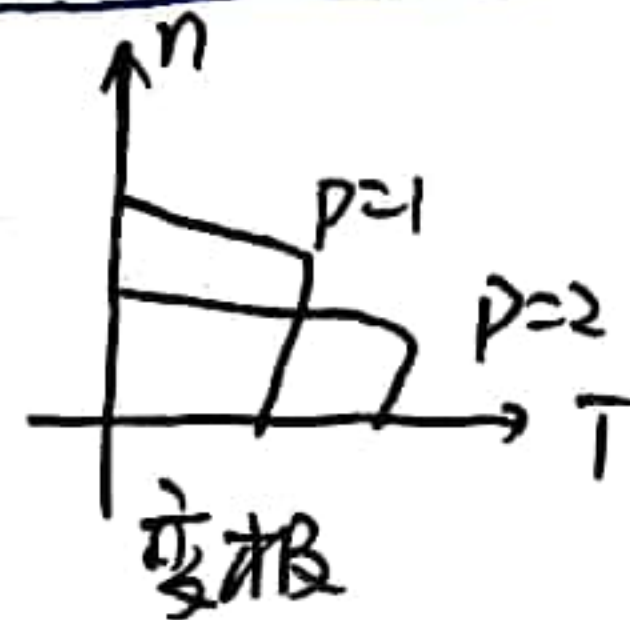


异步电机  $n = n_s(1-S) = \frac{60f_1}{p}(1-S)$   
 $E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi k_{w1}$   
 $E_2 = 4.44 f_2 N_2 \phi k_{w2}$  ( $f_2 = S f_1$ )

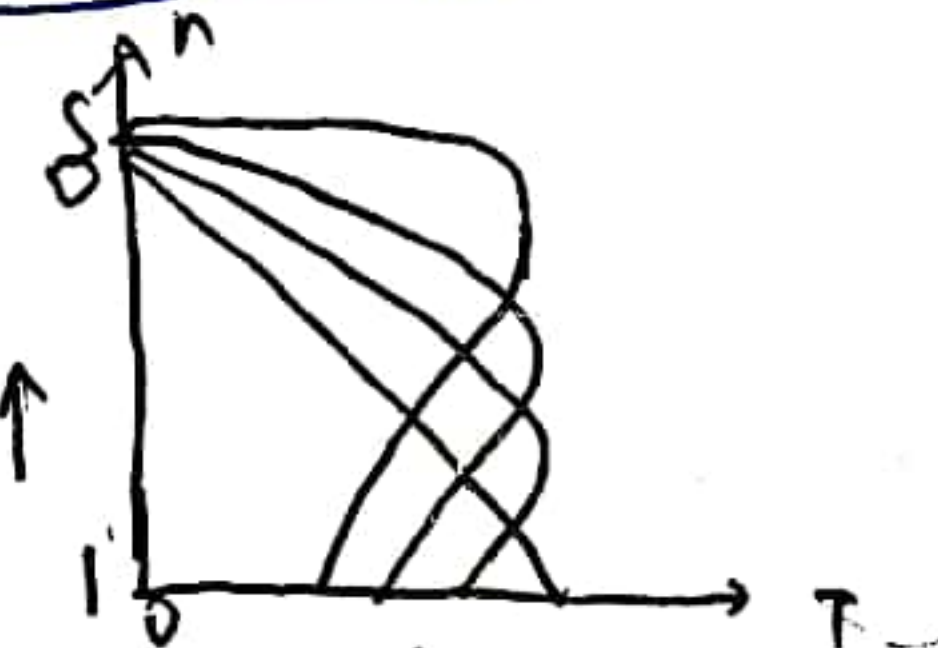
调速方法:

① 改变极数  $p$ ; 改变转差率  $S$ ; 改变电源频率  $f_1$

变极调速 - 对鼠笼型  
 变转差率  $\left\{ \begin{array}{l} \text{调定子电压} \\ \text{调转子电阻 - 绕线型} \end{array} \right.$   
 变频调速 - 串级调速 - 绕线型



转子串电阻  
 $R \uparrow, T_m \text{ 不变 } S_m \uparrow$



变频: ① 恒压频比 ② 矢量 ③ 直接转矩

恒压频比

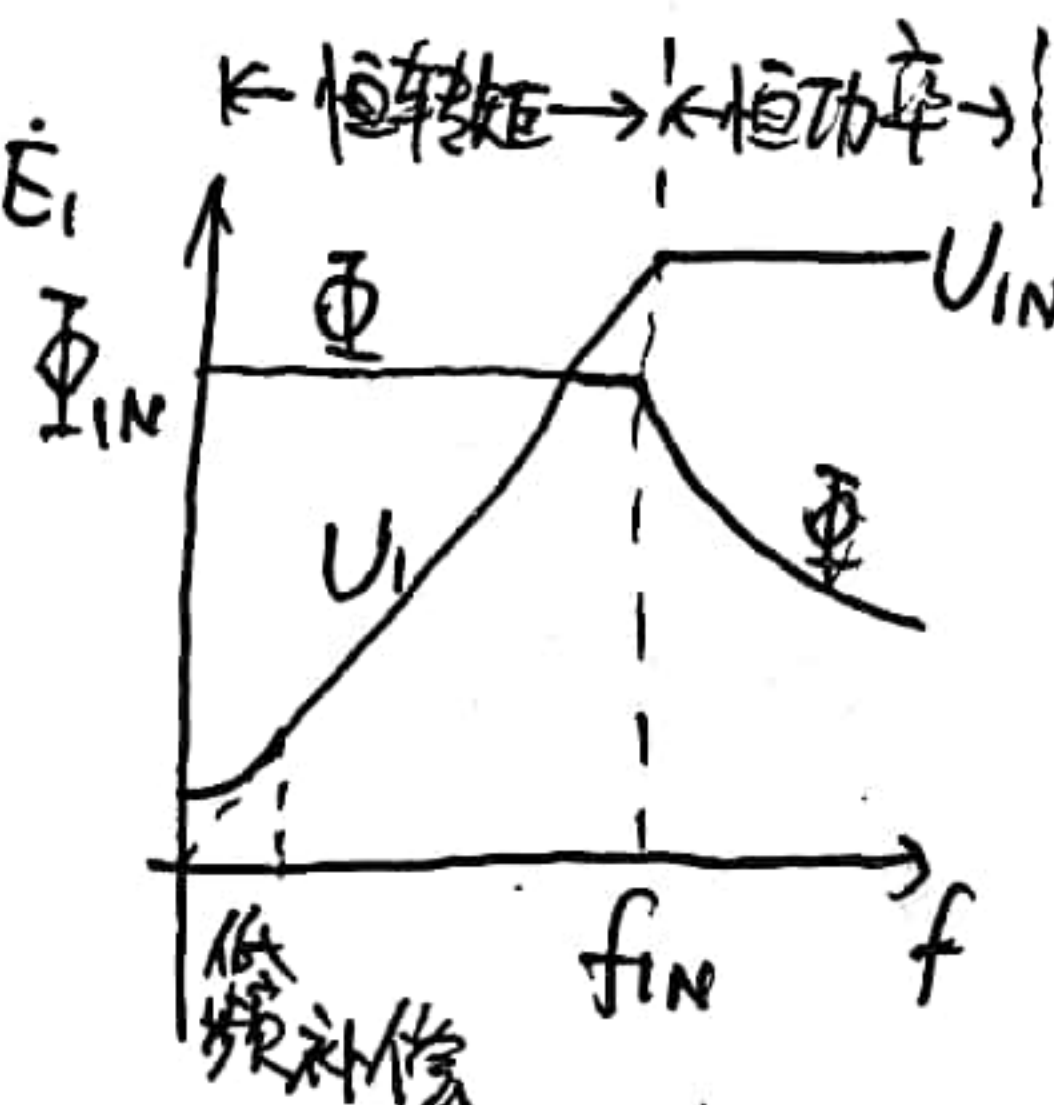
①  $E_1$  大  $\rightarrow U_1 = E_1 + I_1 r_1 \approx E_1$

$\frac{E_1}{f_1} = C, \Rightarrow \frac{U_1}{f_1} = C$

② 有低时, 补偿

③ 基频以上, 维持  $U = U_{1N}$

$f \uparrow \Rightarrow \phi \downarrow$  (弱磁)



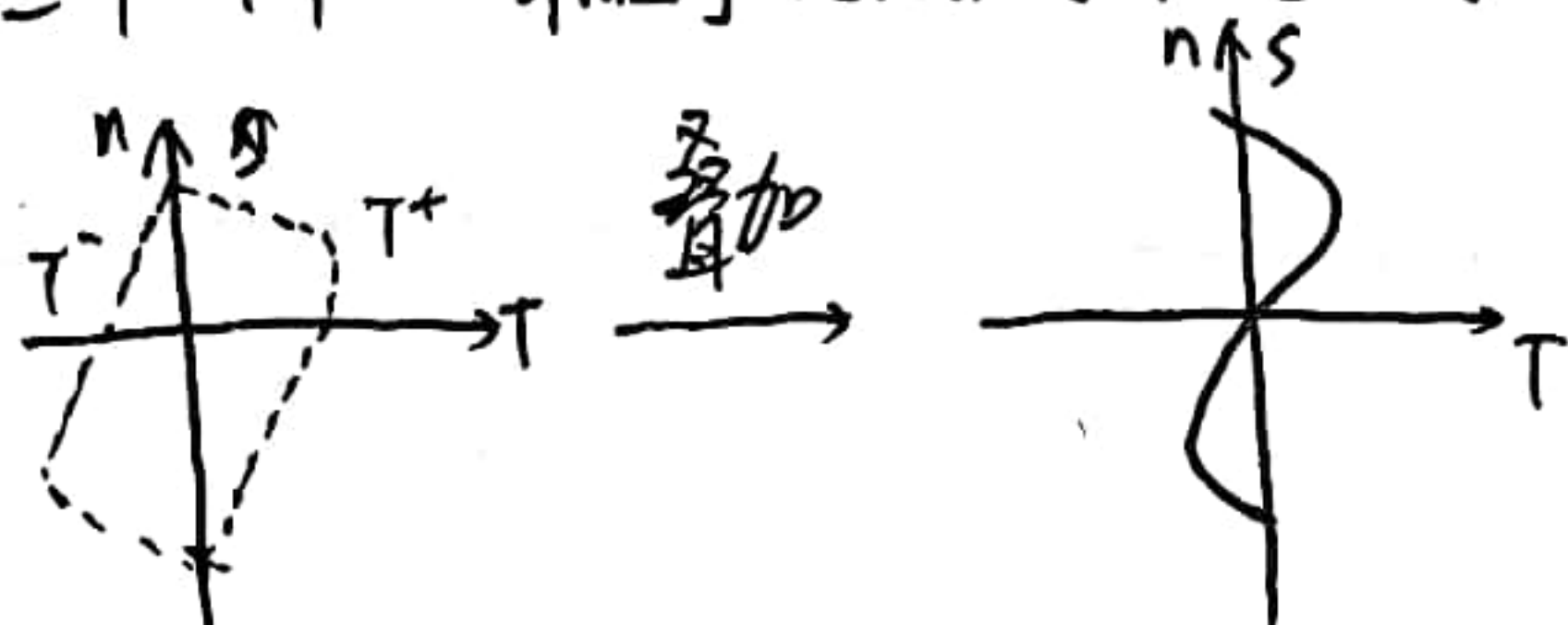


## 单相异步电机

定子单相绕组, 产生正弦脉动磁场

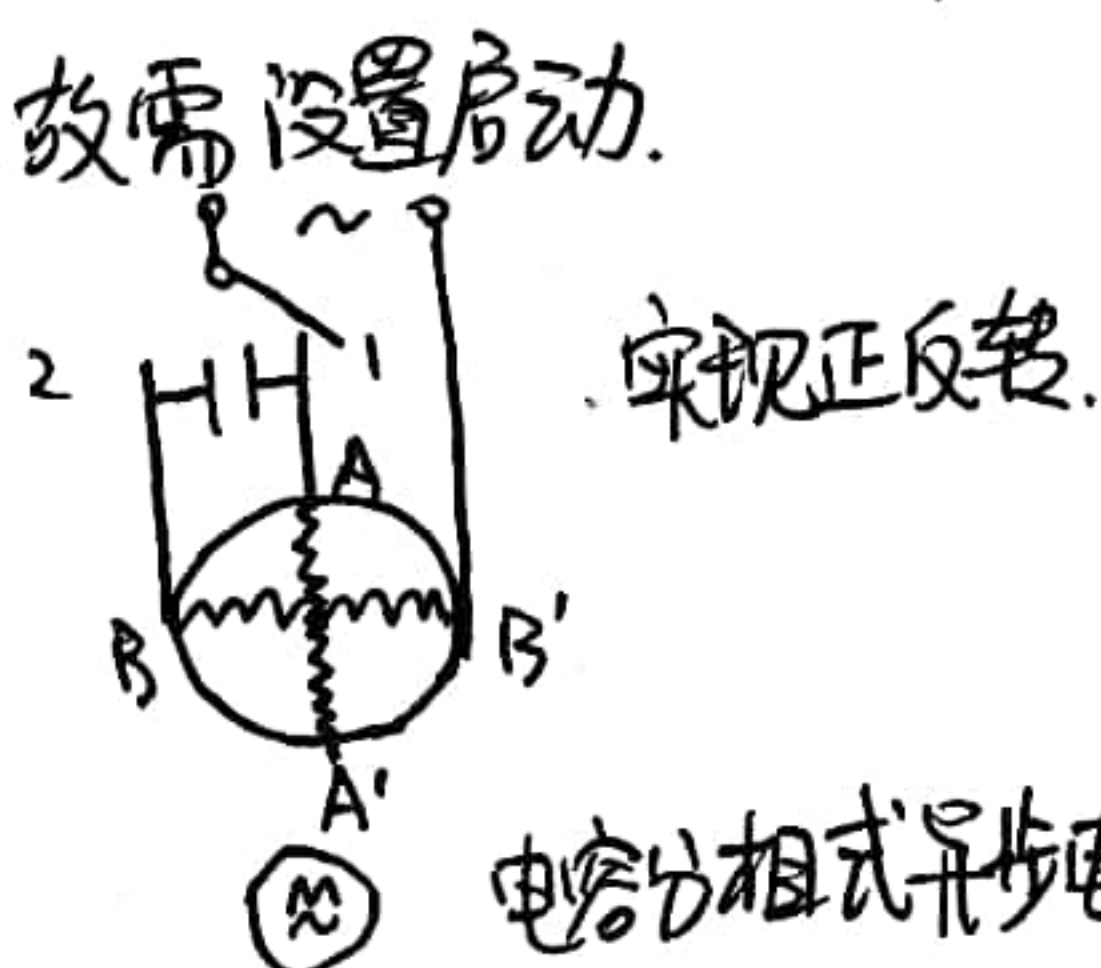
$$f_{\phi_1} = F_m \cos \alpha \sin \omega t = \frac{1}{2} F_m \sin(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$T = T^+ + T^-$  相当于转速相等转速相反旋转磁动势



无启动转矩, 故需设置启动。

辅助绕组



(2) 电容分相式异步电动机

罩极式单相异步电机, (利用短路环和极掌)

## 三相异步电机单相运行

① 运行中, 一相与电源断开, 继续运行,

若带动额定负载, 超过额定电流, 时间长了会烧毁。

② 启动前, 进相浅; 不能启动嗡嗡声,  $I$  很大, ↓

$$P_1 = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi, P_2 = \eta P_1$$

## 步进电机 (Step Motor)

转子上外凸多齿, 定子上均匀分布个磁极



三相电机 (4齿)	单三拍	A → B → C → A	30°
	双三拍	AB → BC → CA → AB	30°
	单双六拍	A → AB → B → BC → C → CA → A	15°

磁通最小路径

错齿是步进电机根本原因

$$\text{转子齿数 } Z \quad \text{步距角 } \frac{360^\circ}{Z_r} \quad \text{步距角 } \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

$N$  为拍数

原理: 将脉冲信号转成电位移/角位移的电机

优点: ① 脉冲控制, 数字化控制

脉冲 ↔ 位移, 脉冲频率 ↔ 转速

② 无电刷/换向器, 结构简单, 坚固耐用, 免维护。

③ 无累积定位误差

④ 原理简单, 构成低成本开环位置/速度/伺服

缺点: ① 固定步长

② 效率低

③ 专用驱动电路 ④  $P$  小,

⑤ 响应速度低 ⑥ 精度不高, ⑦ 有振荡

分类 { 反应式/磁阻式  
永磁式  
混合式

① 磁阻: 定子: 铁心; 转子: 铁心, 轴

规定: 绕组  $m$  相,  $p = m$

相邻极下, 定、转子齿错开转子齿距  $1/m$

$$\frac{Z_r}{2p} = k \pm \frac{1}{m} \quad Z_r = 2pk \pm 2$$

可用多段式, 减小增量

② 永磁式: 定子: 铁心; 转子: 永磁体。

特点: 步距角大; 效率高; 断电自锁; 启动频率低

③ 混合式: 定子: 铁心; 转子: 齿槽 + 永磁体 + 齿槽

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{步距角 } \theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N} \\ \text{转速 } n = \frac{60f}{Z_r N} \end{array} \right.$$

$$N = k \cdot m \quad \left\{ \begin{array}{l} m: \text{相数} \\ k = \begin{cases} 1 & \text{单拍制} \\ 2 & \text{双拍制} \end{cases} \end{array} \right.$$

## 步进电机的分析

静特性

用电角度表示步距角  $\theta_{ce} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$

$$\text{步距角 } \theta_e = \frac{\theta_{ce}}{N} = \frac{360^\circ}{N}$$

以定转子对齐为零点

失调角  $\Delta\theta_e = \theta_e - \theta_{e0}$  实际角度为  $\theta_e$ , 理想位置  $\theta_{e0}$

$$\Delta\theta_e \quad 0 \sim \frac{\pi}{2} \sim \pi \sim \frac{3}{2}\pi \sim 2\pi$$

$$T \quad 0 \quad - \quad - \quad - \quad 0 \quad + \quad + \quad + \quad 0$$

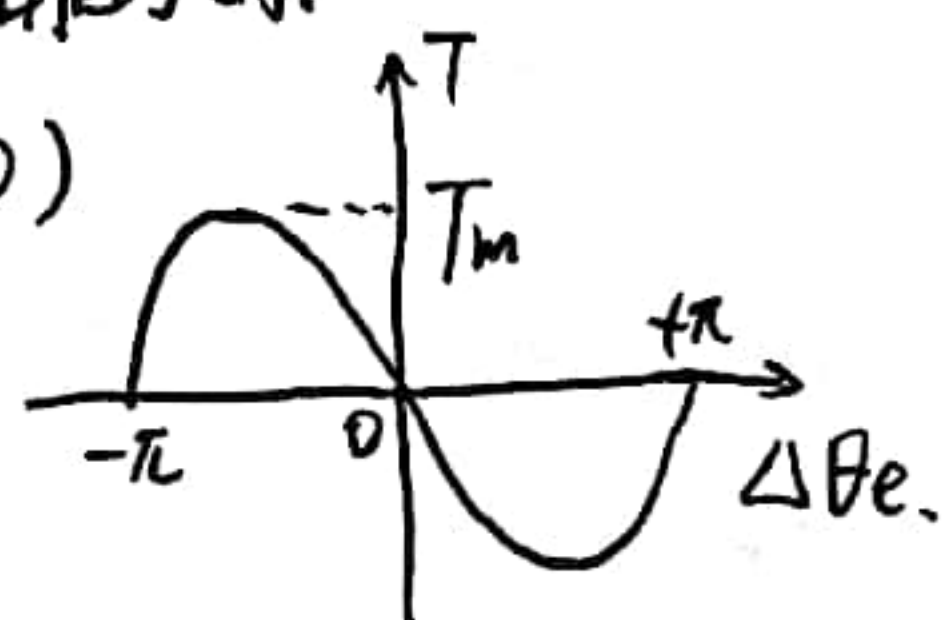


矩角特性~静转矩与失同步角的关系

$$T = -T_m \sin \Delta\theta_e \quad (\theta_{e0} = 0)$$

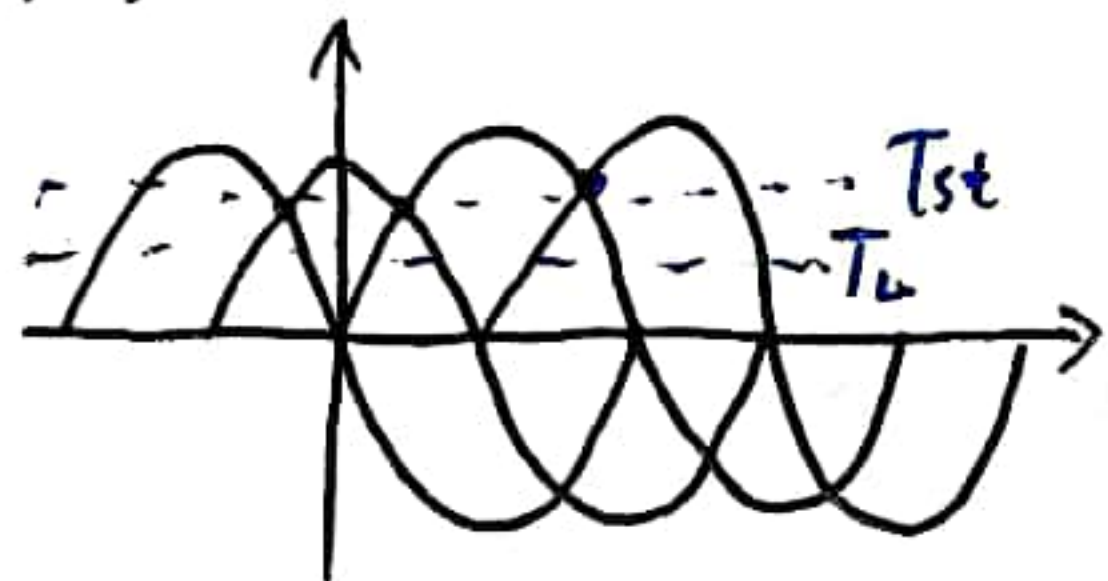
$$\theta_{e0} = 0, 2\pi, \dots$$

静稳定区域  $-\pi < \theta_e < \pi$



单相通电时矩角特性

4相电机, 平衡位置  $0, \theta_{be}, 2\theta_{be}, 3\theta_{be}$ .



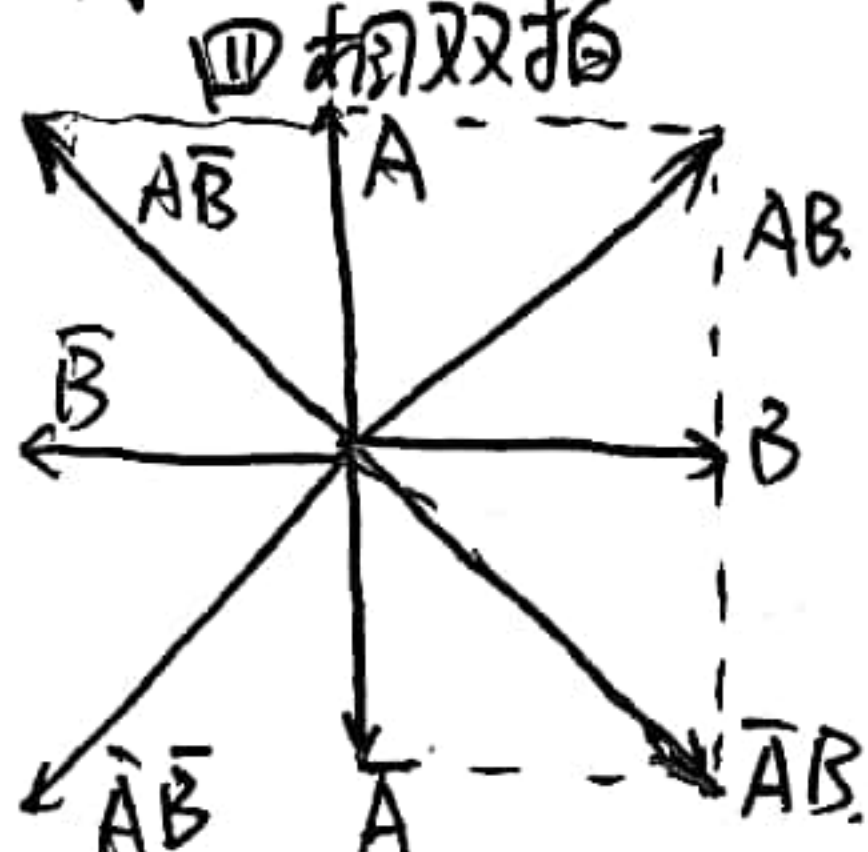
$$A: T = -T_m \sin \theta_e$$

$$B: T = -T_m \sin(\theta_e - \theta_{be})$$

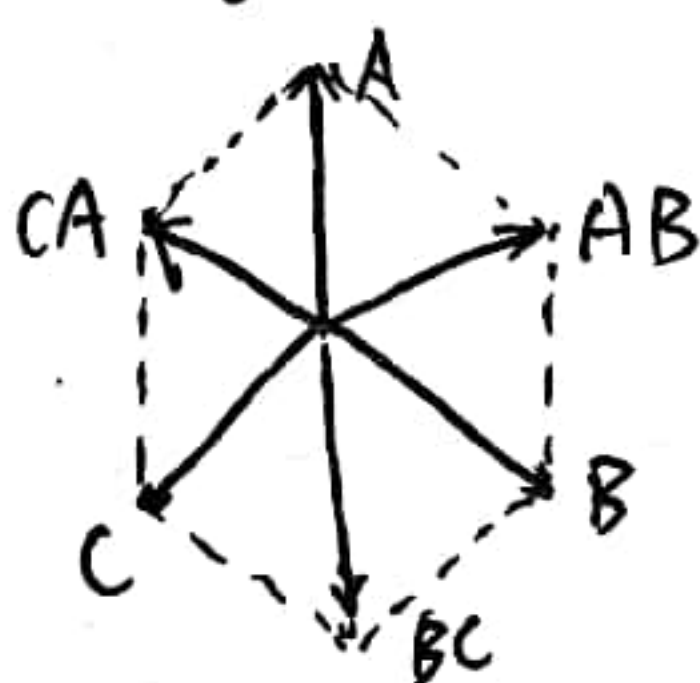
$$C: T = -T_m \sin(\theta_e - 2\theta_{be})$$

$$D: T = -T_m \sin(\theta_e - 3\theta_{be})$$

多相通电



三相双拍



采用双拍提高分辨率

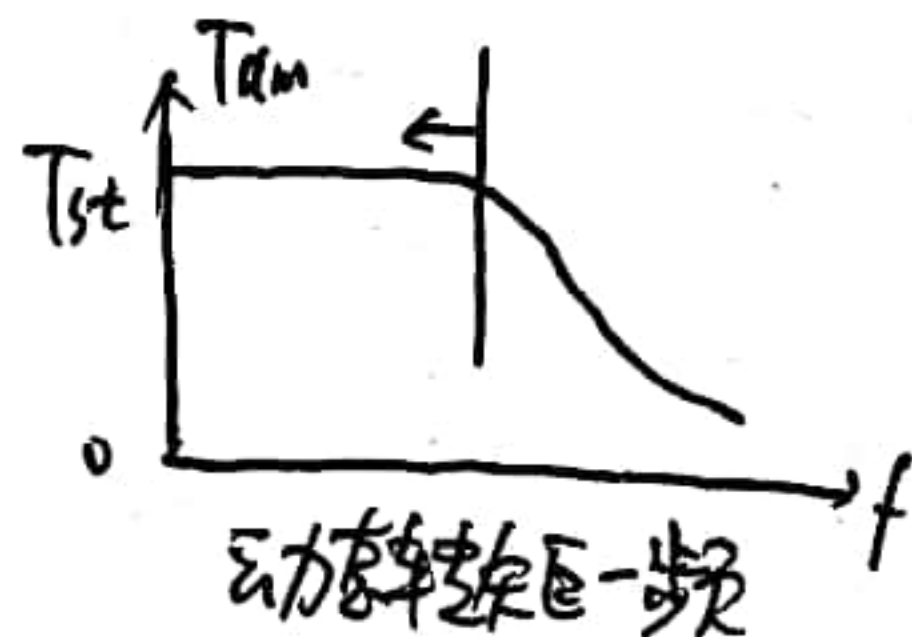
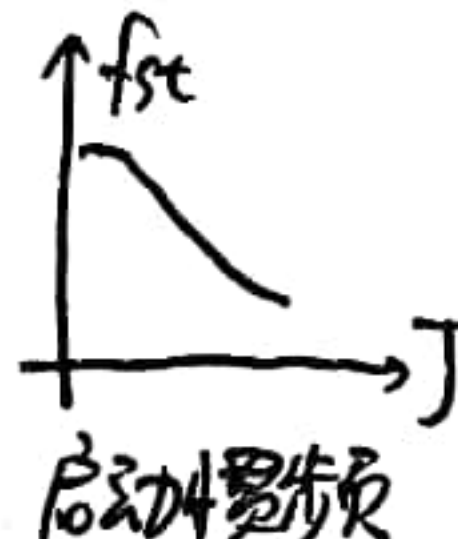
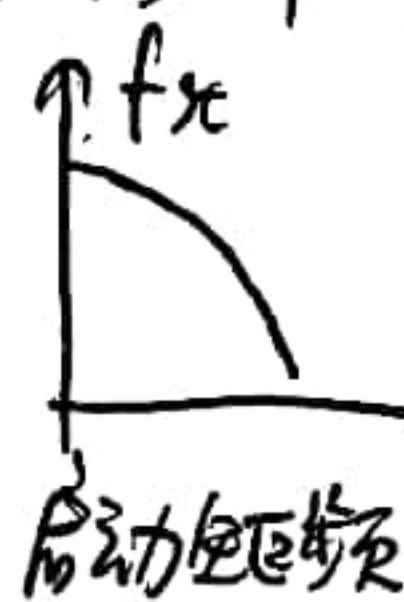
$$T_{m(2)} = T_m \quad \text{三相} \quad T_{m(2)} = 1.414 T_m \quad \text{二相/四相}$$

快步:  $\begin{cases} ① \text{步数} < \text{脉冲数} & \text{加速} \\ ② \text{步数} > \text{脉冲数} & \text{减速} \end{cases}$

不失步条件  $T_L < T_{st}$  (工业  $T_{st} \approx 3 T_L$ )

连续运行条件

启动频率: 不失步启动和停止的最高频率



存在低频共振, 运行频率优化

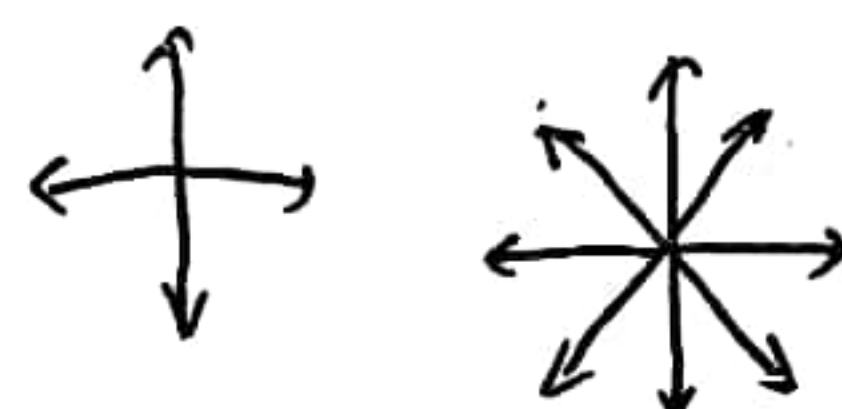


步进电机的驱动

脉冲分配器+功率放大电路

现多采用细分驱动 (改变相电流大小, 改变合成磁场的夹角)

$A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow \dots$  控制电流



整驱动 半驱动 更细分 (提高输出转矩)

消除低频振荡

超过16倍细分不能进一步改善驱动性能 (分辨率限制)

细分驱动后, 步距角变为  $\frac{\theta_0}{j}$  (j为细分数)

步进电机系统应用

工作温度: 80-90度

保持转矩 (静转矩) > 定位转矩 (永磁, 克服定位)

开关磁阻电机

磁阻电机, 转子位置 Sensor, 功率变换器, 控制器

相对大步距角, 带转子位置反馈的步进电机



# 测量元件

测量元件的作用: 检测被控量, 并转换成系统希望的另一种容易处理和使用的量。

为什么需要:

- ① 模型结构不确切 (假设, 降阶, 近似)
  - ② 模型参数不准确性 ③ 外部扰动
- 抑制各种不准确性, 保证性能 必须应用测量元件实现负反馈闭环控制。

物理 → 电量

测量元件: 敏感元件 → 转换元件 → 信号调理转换电路 → 输出

感受      转成电量      放大、运算

- 分类: ① 根据测量性质: 位移, 速度, 加速度, 温度等
- ② 工作原理: 电磁式, 电阻式, 电容式, 应变式等:
- ③ 实现方式: 物性型传感器: 依靠本身物理性质如: 热电阻、应变片。
- 结构型传感器: 依靠结构参数: 电容式, 电感式传感器
- ④ 根据输出形式: 非电量、电量...

## 特性

变换函数  $y=f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_nx^n$

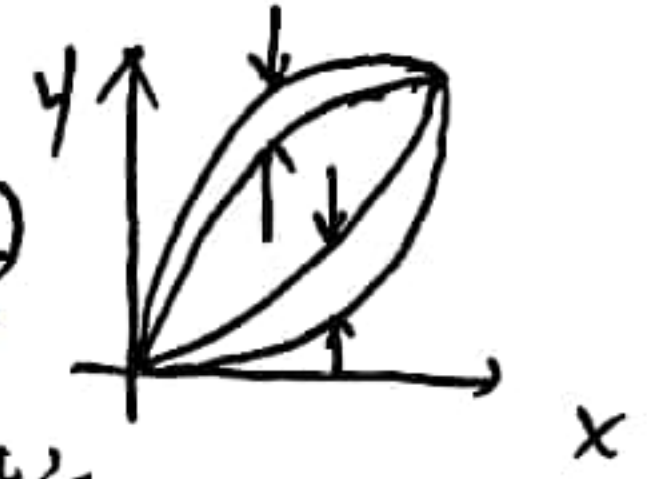
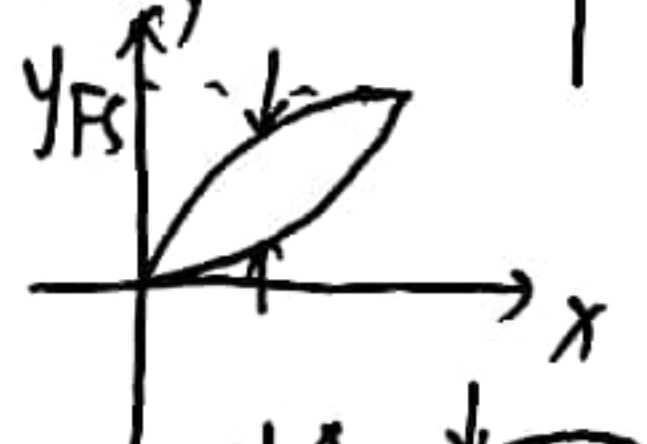
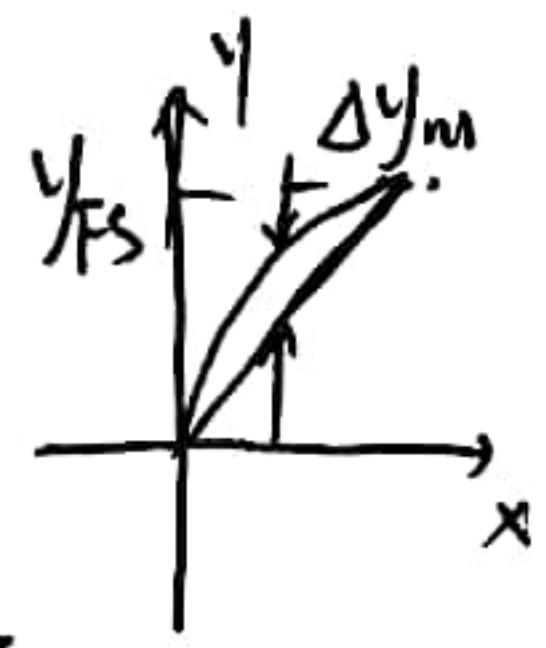
理想静态特性  $y=kx$

灵敏度  $k=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{dy}{dx}$

线性度或非线性误差  $\epsilon_L=\frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$

滞环误差  $\epsilon_h=\frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$

重复性误差  $\epsilon_r=\frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$  (精度)



① 精确度 ② 精度好 ③ 精度差

静态误差 精度

分辨率/分辨率力: 分辨率满量程最小量程

稳定性: 漂移

动态特性:  $\sigma\%$ ,  $T_s$ ,  $T_p$ , 带宽, 频率响应范围, 临界频率等。

## 旋转变压器和感应同步器

角位置测量/电磁感应(基于变压器)/结构型/模拟型

V mA 输入      V 输出      旋变

V 1-5A 输入      mV 输出      感应

旋转变压器 (抗干扰能力强)



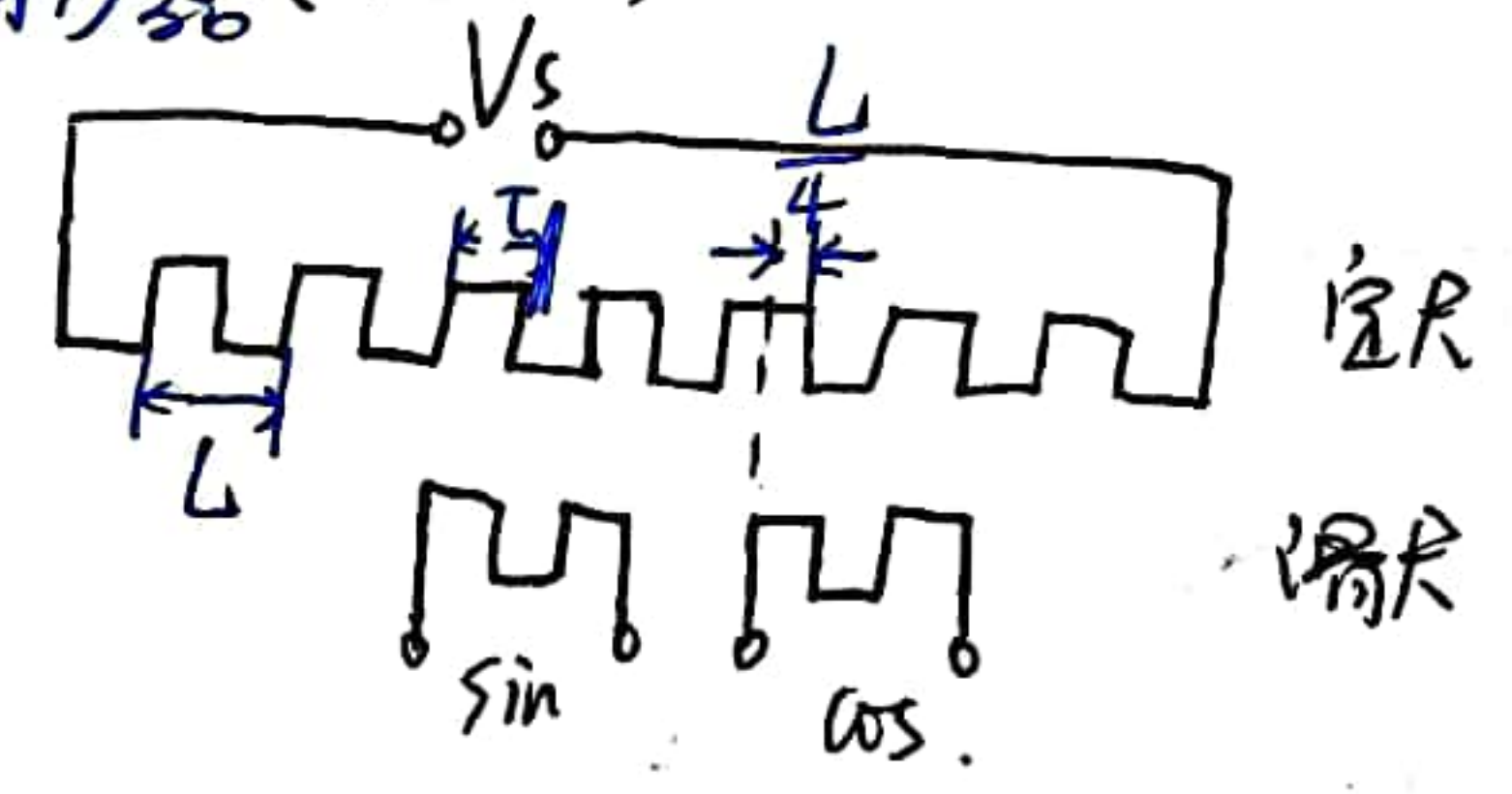
原方绕组端电压  $U_e = U_m \sin wt$

副方

$U_A = U_{Am} \sin \theta \sin wt$

$U_B = U_{Bm} \cos \theta \sin wt$

感应同步器 (精度高)



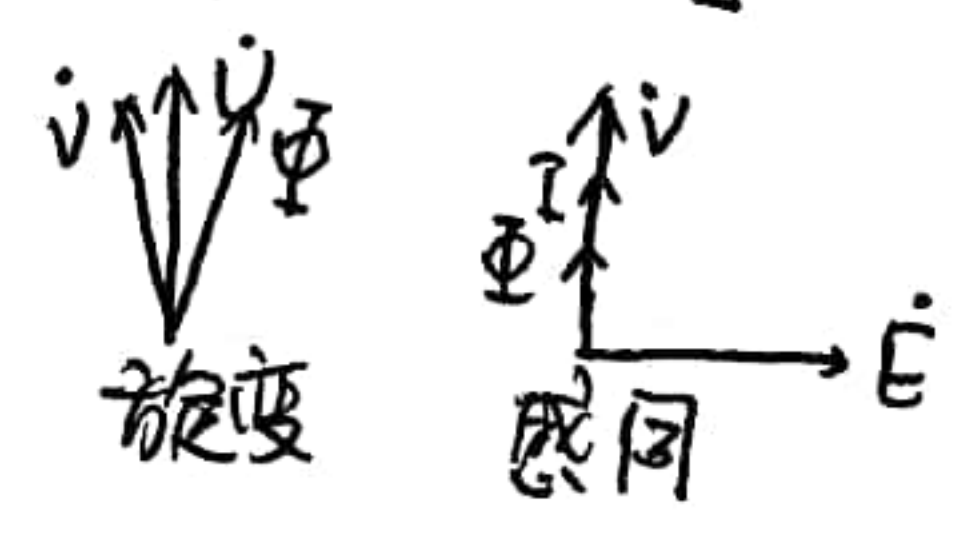
$$U = \sqrt{2} U \sin wt = U_m \sin wt$$

$$\begin{cases} e_s = \sqrt{2} E_m \sin \frac{2\pi}{L} x \cos wt \\ e_c = \sqrt{2} E_m \cos \frac{2\pi}{L} x \cos wt \end{cases}$$

$$p = \frac{N}{2} = \frac{360^\circ}{N} \quad (N: \text{Y 型每片数 } 2N)$$

直线  $\theta_e = \frac{2\pi}{L} x = \frac{\pi}{L} x \text{ (rad)}$

旋转  $\theta_e = \frac{2\pi}{L} \theta = \frac{N}{2} \theta = \frac{\pi}{L} \theta = p \theta \text{ (rad)}$



N 对极 (2N 个极) 节距  $L = \frac{360^\circ}{N}$



## 旋变/感应信号处理

### (1) 鉴相型处理

#### ① 两相激励磁式 (感应同步器) (简便) \*

$$\begin{cases} U_s = U_m \sin \omega t \\ U_c = -U_m \cos \omega t \end{cases}$$

#### 单相绕组感应电势

$$\begin{cases} e_{2s} = k U_m \sin \theta_e \cos \omega t \\ e_{2c} = k U_m \cos \theta_e \sin \omega t \end{cases} \quad \text{叠加}$$

$$e_2 = k U_m \sin(\omega t + \theta_e)$$

#### ② 单相激励磁式

$$\text{单相绕组 } u = -U_m \cos \omega t$$

$$\begin{cases} e_s = k U_m \sin \theta_e \sin \omega t \\ e_c = k U_m \cos \theta_e \sin \omega t \end{cases} \quad \text{移相 } 90^\circ \quad e_s'$$

$$e_2 = e_s' + e_c = k U_m \sin(\omega t + \theta_e)$$

### (2) 鉴幅型处理

#### ① 两相激励磁式 (耗能)

$$U_s = U_m \cos \theta_1 \sin \omega t$$

$$U_c = U_m \sin \theta_1 \sin \omega t \quad (\theta_1 \text{ 为指定})$$

$$\begin{aligned} e_2 &= e_{2s} + e_{2c} = k U_m \cos \theta_1 \sin \theta_e \cos \omega t \\ &\quad - k U_m \sin \theta_1 \cos \theta_e \cos \omega t \\ &= k U_m \sin(\theta_e - \theta_1) \cos \omega t \end{aligned}$$

#### ② 单相激励磁式 \*

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} e_s &= k U_m \sin \theta_e \cos \omega t & e_s' &= k U_m \sin \theta_e \cos \theta_1 \cos \omega t \\ e_c &= k U_m \cos \theta_e \cos \omega t & e_c' &= k U_m \cos \theta_e \sin \theta_1 \cos \omega t \end{aligned}$$

$$e_2 = e_s' + e_c' = k U_m \sin(\theta_e - \theta_1) \cos \omega t$$

- 鉴相 - 两相输入单向输出
- 鉴幅 - 单相输入两相输出

## 鉴相处理

用  $e_2$  与  $k U_m \sin(\omega t)$  比较



$$\Delta t = \frac{\theta_e}{\omega} = N t_n \Rightarrow \theta_e = \omega N t_n$$

$$\text{分辨率 } \Delta \theta = \frac{t_n}{T} L = \frac{f}{f_n} L \quad (t_n \text{ 指一个脉冲对应角度})$$

激励电压频率和脉冲源频率为  $f(T)$  和  $f_n$

旋变: 优点: ① 构造简单, 成本较低 ② 无接触测量

③ 对环境要求低 ④ 绝对位置信号输出

缺点: 精度相对较低

感应: 优点: ① 具有很高精度和分辨率

② 抗干扰性强 ③ 寿命长, 维护简单

④ 可用于长距离位移测量 ⑤ 成本低

缺点: 输出信号弱 ② 安装式, 安装精度高

③ 必须经过寻零操作

粗精双通道测量

旋变 感应

## 光电编码器与光栅

① 增量式光电编码器

同样地, 相距  $(k+4)L$ ,  $T=L$

判断正反转 (A+B+零位)

A↑B↓ 正转; A↑B↑ 反转

消磁寻零

角度各不相同

$$\Delta \theta = \frac{360^\circ}{\text{每转脉冲数}} \xrightarrow{\text{4倍分频}} \frac{\Delta \theta}{4}$$

优点: ① 精度高 ② 简单, 成本低

③ 测角+测速

缺点: ① 开机需寻零 ② 产生累积误差

③ 需要计数器, 速度受限

每循环清零



## 绝对式光电编码器

多少位多少道

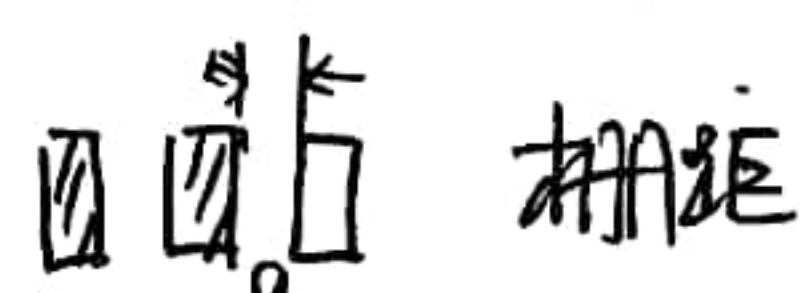
$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2N}$$

需考虑误码, 码盘零点, 应用零点 (设定初始位置)

特殊编码减少码道

## 光栅

检测线位移, 角位移, (本质线位移)



通过莫尔条纹放大,  $W = \frac{a}{\sin\theta} = \frac{a}{\theta}$  栅距

与光电编码器类似

优点: 精度高; 构造简单, 成本较低; 位移测量速

缺点: 寻零, 有累计误差, 计数器, 使用环境苛刻

## 转速测量

利用位置传感器测速

每转产生脉冲数  $P$ ,  $T$  内测得脉冲  $m$

$$n = 60 \frac{m}{P \cdot T} \quad (r/min)$$

### 一、M法 (定时测角)

$$n = 60 \frac{m_1}{P T_1} \quad (r/min) \quad \text{分辨率} Q = \frac{60}{P T_1} \quad \text{无关}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{Q}{n} = \frac{1}{m_1} \quad \text{转速} \uparrow, \text{相对误差越小}$$

适用于高转速

### 二、T法 (定角测时)

用频率为  $f_c$  时钟向计数器发脉冲,  $T$  时间

内测到时钟脉冲个数为  $m_2$ ,  $T = m_2 / f_c$ ,

$T$  时间转过  $1/P$  转, ( $T$  为传感器相邻两脉冲间隔)

$$\text{转速为 } n = 60 \frac{1}{P \cdot m_2 / f_c} = 60 \frac{f_c}{m_2 P} \quad (r/min)$$

$$Q = \frac{60 f_c}{m_2 P} - \frac{60 f_c}{(m_2 + 1) P} = \frac{60 f_c}{m_2 (m_2 + 1) P} = \frac{n^2 P}{60 f_c T n P}$$

$n$  越小,  $Q$  越小, 即转速越低, 分辨率越高

### 三、M/T法

测  $m_1$  个传感器脉冲, 走过的时钟脉冲  $m_2$ ,  
时钟频率为  $f_c$ , 每转脉冲数为  $P$

$$T = \frac{m_2}{f_c}, \quad n = 60 \frac{f_c m_1}{m_2 P} \quad (r/min)$$

$$Q = \frac{60 f_c m_1}{P} \left( \frac{1}{m_2 - 1} - \frac{1}{m_2} \right) = \frac{60 f_c m_1}{P m_2 (m_2 - 1)}$$

$$= \frac{n}{m_2 - 1}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{Q}{n} = \frac{1}{m_2 - 1} \quad \text{相对误差与转速无关}$$

高速低速都能保证一定精度

异步(感应)	低速差, 功率因数低, 成本低.
永磁同步电机	动静伺服性能好, 成本高.
无刷直流电机	中高速伺服, 成本较低
步进电机	功率小, 开环, 成本低.