

# 永磁电机及其控制原理

## 第三讲永磁无刷直流电机

# 第三讲永磁无刷直流电机PMBLDCM permanent magnet brushless DC motor

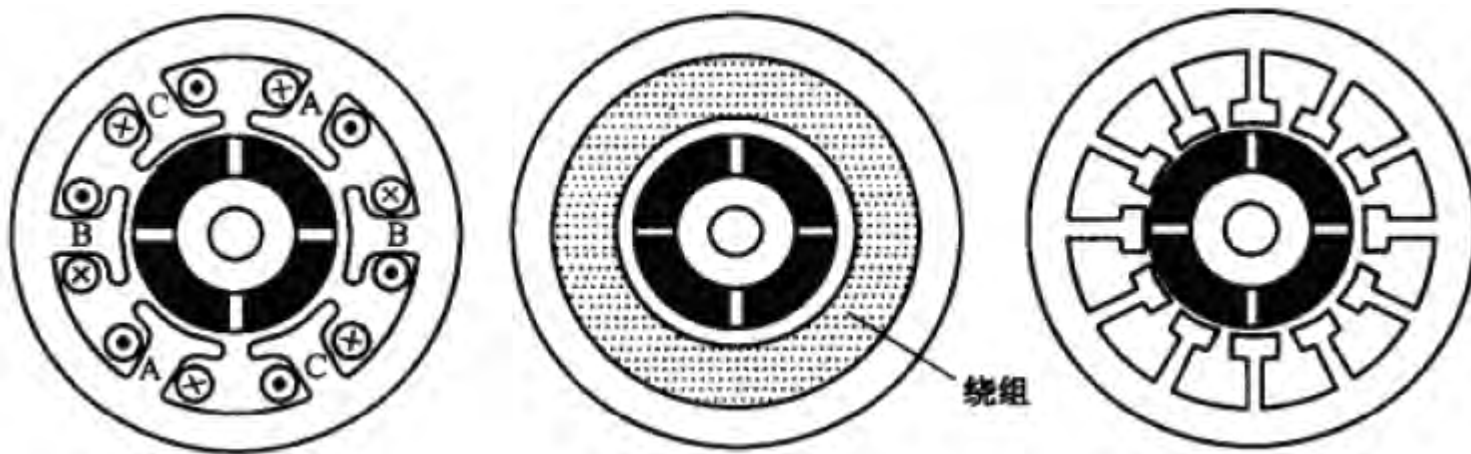
## ● 1.概述

- 永磁有刷直流电机与传统他励直流电机特性类似
- 永磁无刷直流电机用电子换向器取代机械换向器
- 永磁体励磁不可调节
- 结构更加简单、维护方便、起动性能和调速性能优
- 功率密度高，体积小，广泛用于传动系统
- 机电一体化



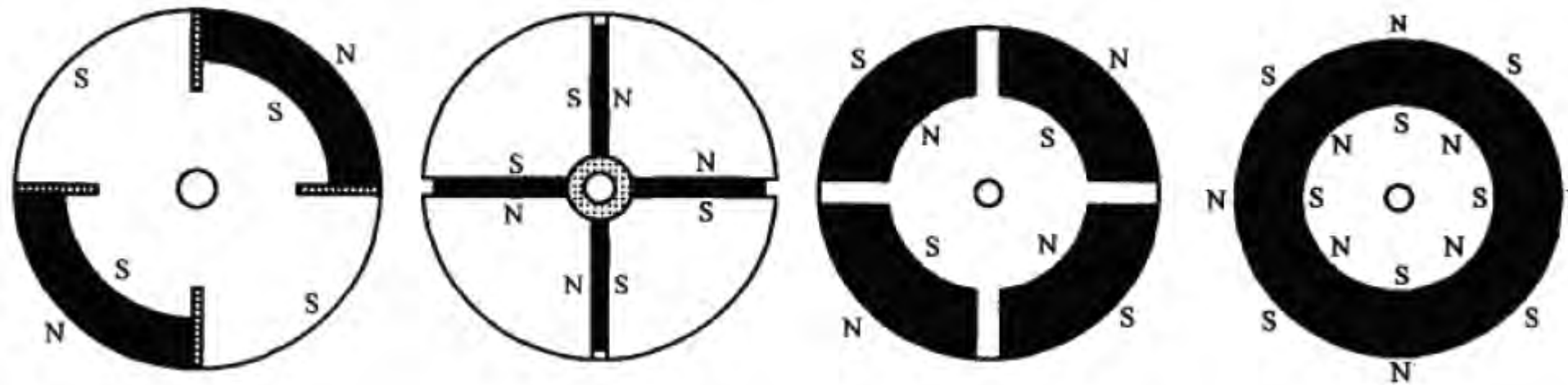
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 1. 电机结构



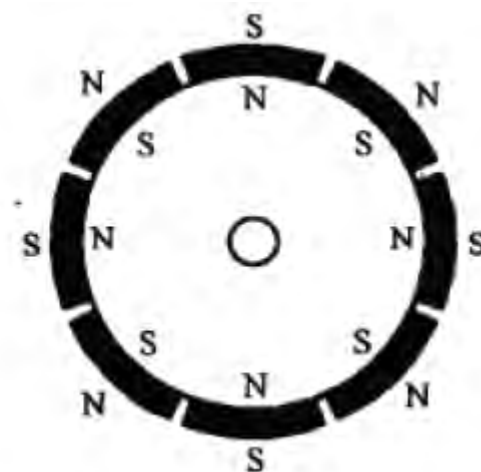
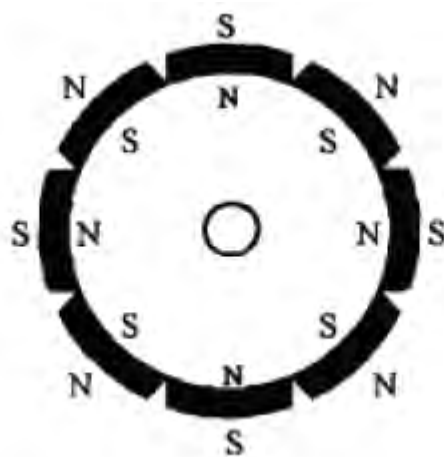
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 2. 转子磁极结构



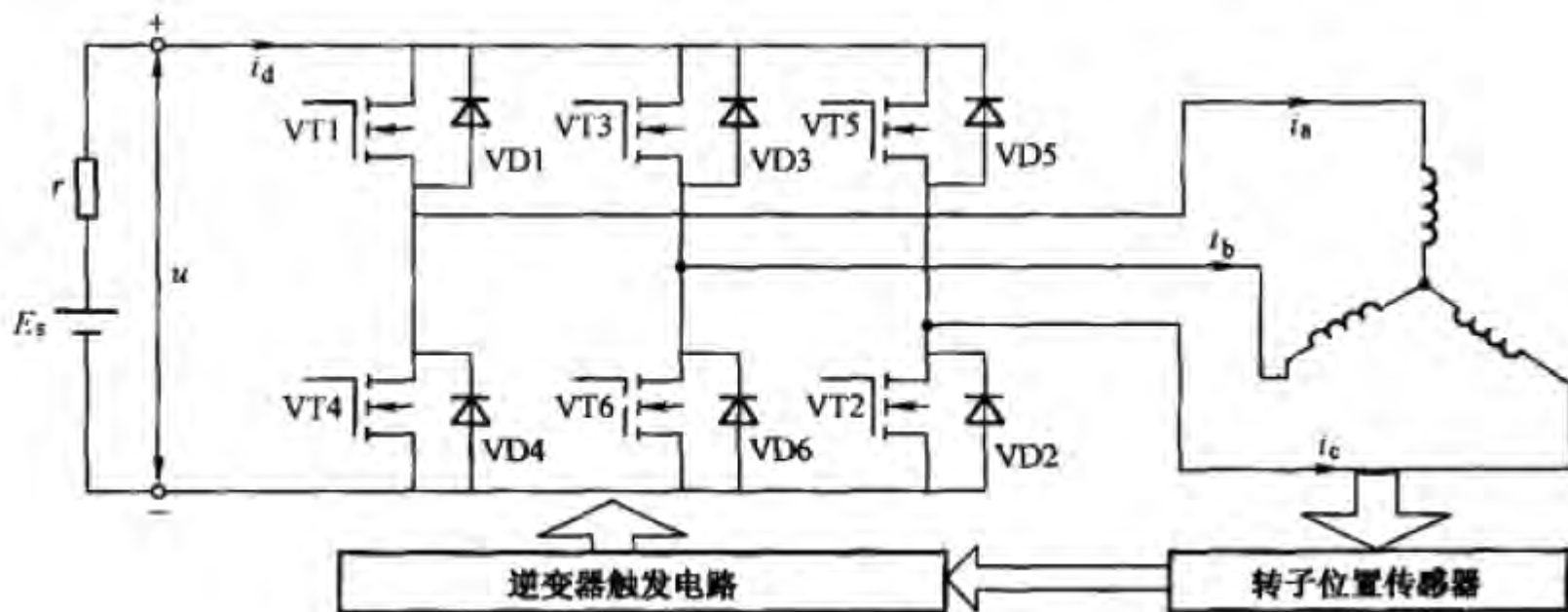
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 2. 转子磁极结构



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 3.工作原理



# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 3.工作原理

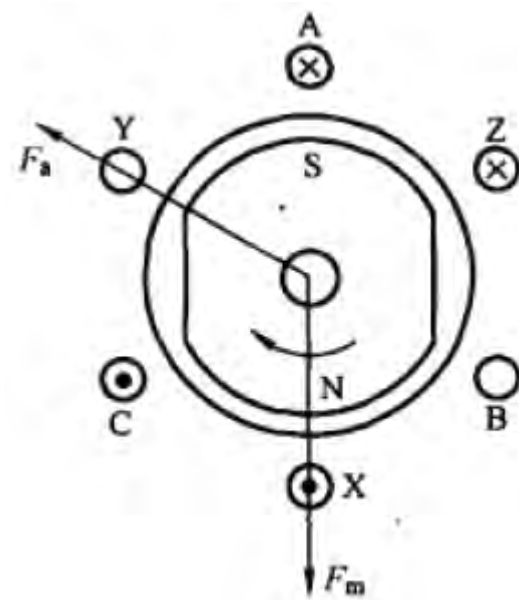
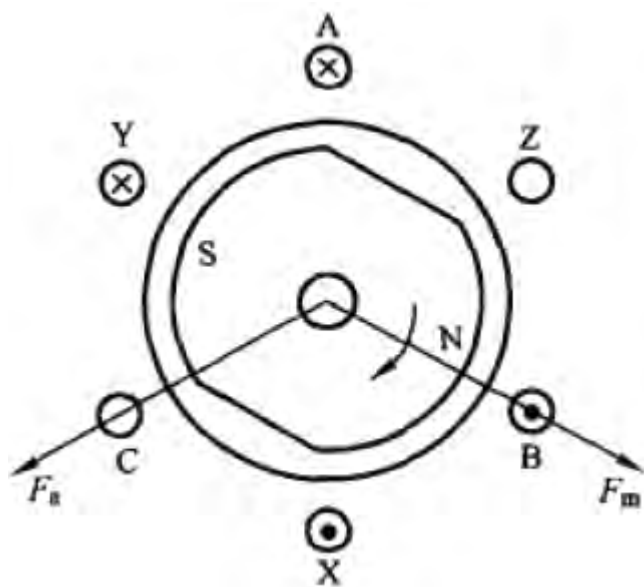
表 7-1

两相导通星形三相六状态导通工作方式下的绕组导通顺序表

电角度	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
导通顺序	a		b		c		
	b	c	a	b	c	a	b
VT1	1	1	0	0	0	0	0
VT2	0	1	1	0	0	0	0
VT3	0	0	1	1	0	0	0
VT4	0	0	0	1	1	0	0
VT5	0	0	0	0	1	1	1
VT6	1	0	0	0	0	0	1

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 3.工作原理





## 第二讲永磁无刷直流电机

### ● 3.工作原理

从运行过程看，定子绕组每隔  $60^\circ$  电角度换向一次，定子合成磁动势位置就改变一次，每相绕组每次导通  $120^\circ$  电角度，且始终保持两相绕组导通，此工作方式称为两相导通的三相六状态运行方式。该方式中，每一状态持续  $60^\circ$  电角度，在此期间定子绕组合成磁动势空间位置固定不动，而永磁磁极连续旋转  $60^\circ$  电角度，定子磁动势为跳跃式旋转磁动势，使定转子磁动势之间的空间夹角周期性变化，导致电磁转矩的波动，这将在后面详细讨论。

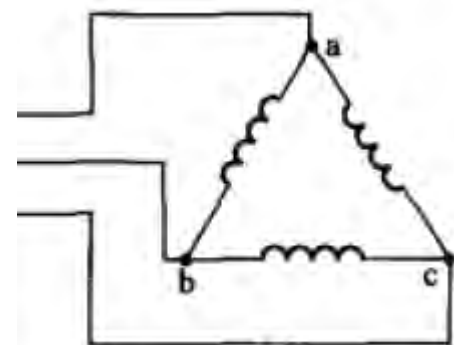
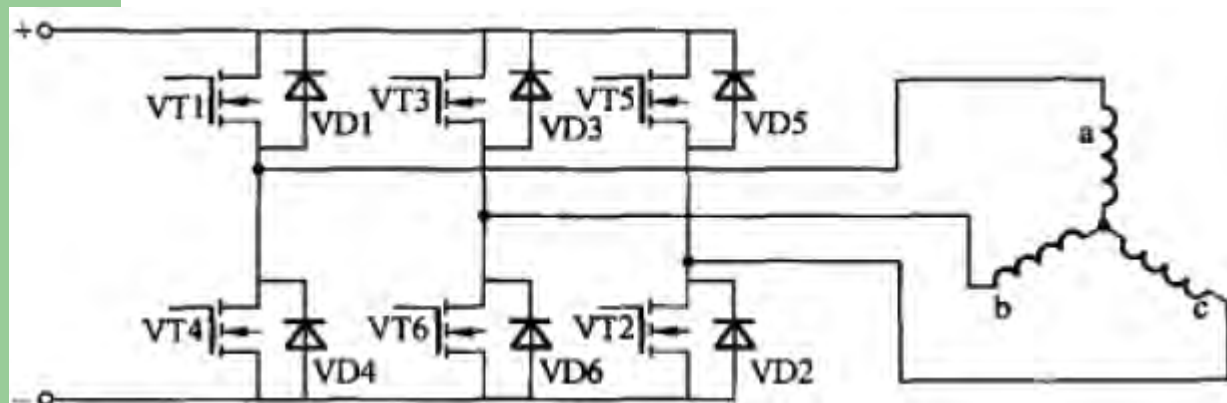
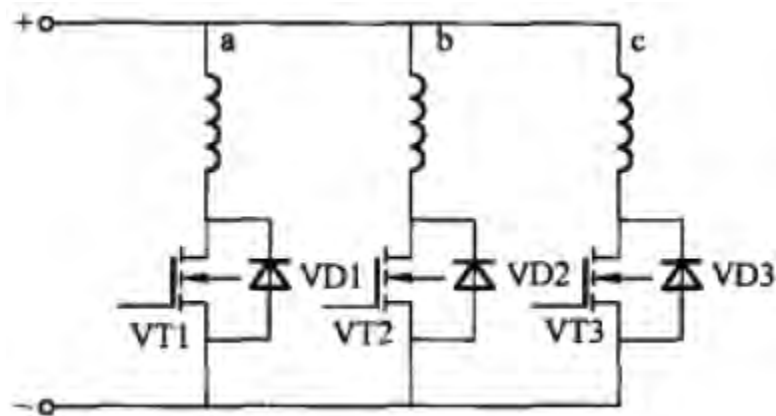
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 3.工作原理

电角度	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°	
导通顺序	A		B		C			
	B	C		A		B		
V <sub>1</sub>	[导通]							
V <sub>2</sub>			[导通]					
V <sub>3</sub>			[导通]					
V <sub>4</sub>				[导通]				
V <sub>5</sub>					[导通]			
V <sub>6</sub>	[导通]					[导通]		

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 4. 逆变器拓扑结构



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 5.位置传感器
  - 霍尔传感器

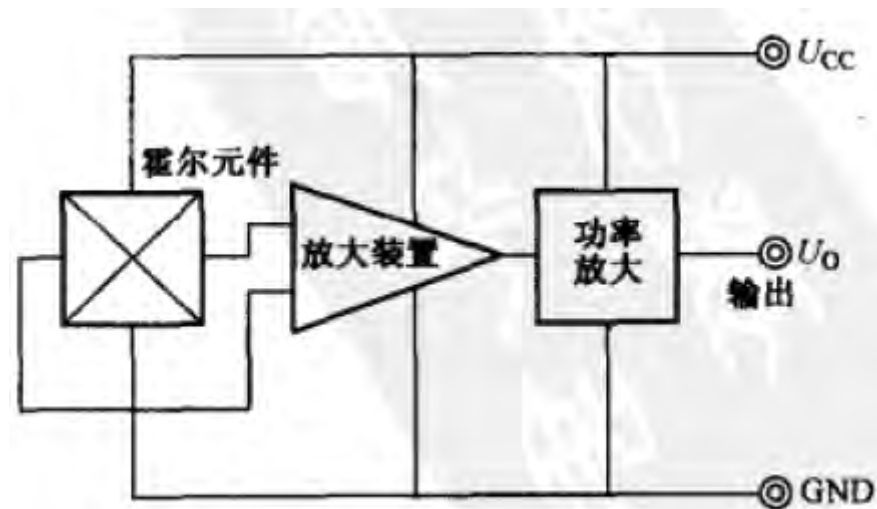
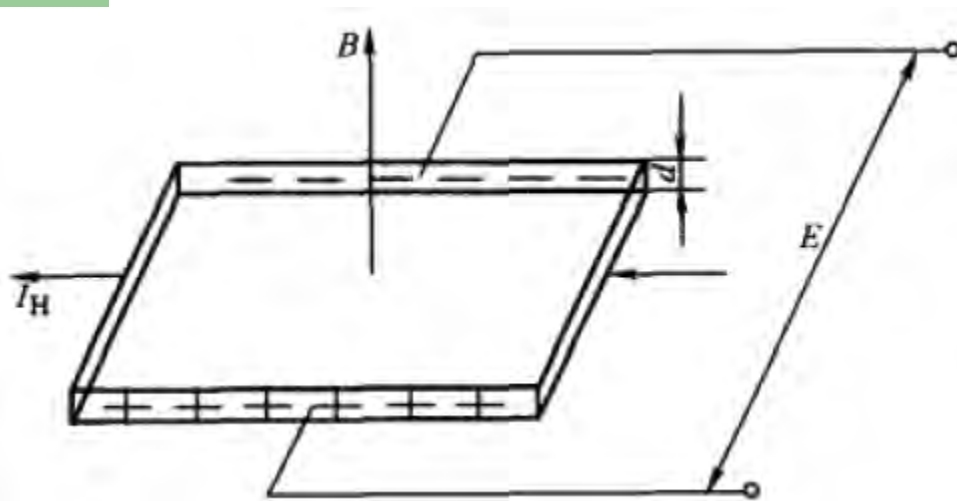
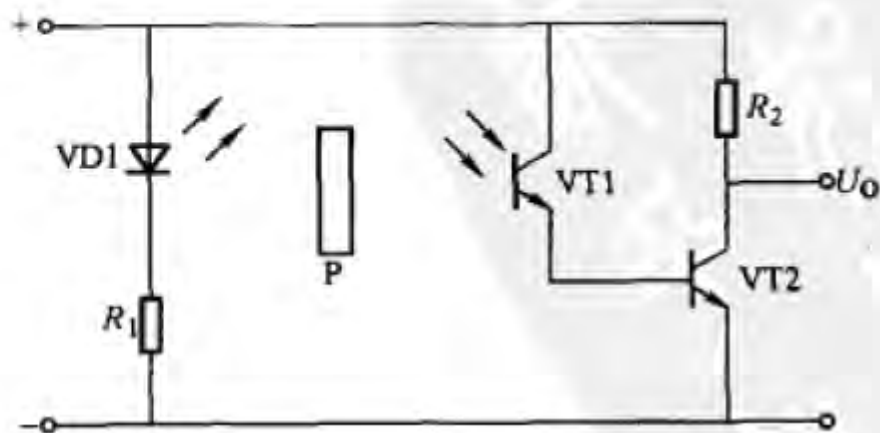
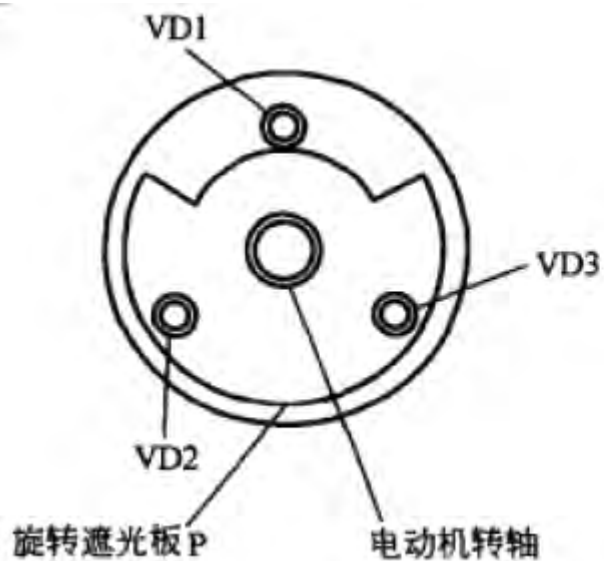


图 7-8 霍尔集成电路内部原理

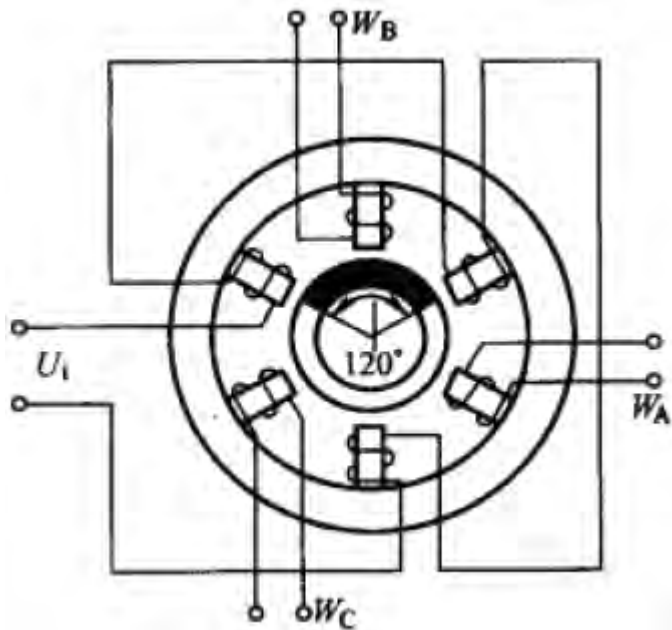
## 第二讲永磁无刷直流电机

- 5.位置传感器
  - 光电传感器



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 5.位置传感器
  - 电磁式位置传感器



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 6. 永磁无刷电机的稳态计算

- 1. 电枢绕组感应电势

单根导体在气隙磁场中感应电势为

$$e = B_{\delta} Lv \quad (\text{V}) \quad (3-1)$$

式中  $B_{\delta}$ ——气隙磁感应强度；

$L$ ——导体的有效长度；

$v$ ——导体相对于磁场的线速度。

$$v = \frac{\pi D}{60} n = 2p\tau \frac{n}{60} \quad (\text{m/s}) \quad (3-2)$$

其中  $n$ ——电机转速(r/min)；

$D$ ——电枢内径；

$\tau$ ——极距；

$p$ ——极对数。

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 6. 永磁无刷电机的稳态计算

设电枢绕组每相串联匝数为  $W_\phi$ , 则每相绕组的感应电势为

$$E_\phi = 2W_\phi e \quad (\text{V}) \quad (3-3)$$

将式(3-2)代入式(3-1)得

$$e = B_s L 2p\tau \frac{n}{60} \quad (\text{V}) \quad (3-4)$$

方波气隙磁感应强度对应的每极磁通为

$$\Phi_s = B_s \alpha_i \tau L \quad (\text{Wb}) \quad (3-5)$$

式中  $\alpha_i$ ——计算极弧系数, 则有

$$e = 2p\Phi_s \frac{n}{60\alpha_i} \quad (\text{V}) \quad (3-6)$$



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 6. 永磁无刷电机的稳态计算

将式(3-6)代入式(3-3)得每相绕组感应电势

$$E_{\phi} = \frac{p}{15\alpha_1} W_{\phi} \Phi_{\delta} n \quad (\text{V}) \quad (3-7)$$

则线电势,即电枢感应电势为

$$E = 2E_{\phi} = \frac{2p}{15\alpha_1} W_{\phi} \Phi_{\delta} n = C_e \Phi_{\delta} n \quad (\text{V}) \quad (3-8)$$

式中  $C_e = \frac{2p}{15\alpha_1} W_{\phi} \Phi_{\delta}$  —— 电势常数。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 6. 永磁无刷电机的稳态计算

### 2. 电枢电流

在每个导通时间内有以下电压平衡方程式

$$U - 2\Delta U = E + 2I_a r_a \quad (3-9)$$

式中  $U$ ——电源电压；

$\Delta U$ ——开关管的饱和管压降；

$I_a$ ——每相绕组电流；

$r_a$ ——每相绕组电阻。

由上式得

$$I_a = \frac{U - 2\Delta U - E}{2r_a} \quad (A) \quad (3-10)$$

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 6. 永磁无刷电机的稳态计算

- 3. 电磁转矩

在任一时刻, 电机的电磁转矩  $T_{em}$  由两相绕组的合成磁场与转子永磁场相互作用而产生, 则

$$T_{em} = \frac{2E_{\phi}I_a}{\Omega} = \frac{EI_a}{\Omega} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3-11)$$

式中  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  为电机的角速度。则有

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{\frac{2p}{15\alpha_1} W_{\phi} \Phi_s n I_a}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{4p}{\pi\alpha_1} W_{\phi} \Phi_s I_a \\ &= C_T \Phi_s I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned} \quad (3-12)$$

式中  $C_T = \frac{4p}{\pi\alpha_1} W_{\phi}$  为转矩常数。

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 6. 永磁无刷电机的稳态计算

- 4. 转速

将式(3-8)代入式(3-9)得

$$n = \frac{U - 2\Delta U - 2I_a r_a}{C_e \Phi_b} \quad (\text{r/min}) \quad (3-13)$$

空载转速为

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_b} = \frac{U - 2\Delta U}{\frac{2P}{15\alpha_i} W_p \Phi_{b0}} \\ &= 7.5\alpha_i \frac{U - 2\Delta U}{p W_p \Phi_{b0}} \quad (\text{r/min}) \quad (3-14) \end{aligned}$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

## • 6. 永磁无刷电机的稳态计算

### 5. 电势系数与转矩系数

电势系数为

$$K_e = \frac{E}{n} = C_e \Phi_s = \frac{2p}{15\alpha_1} W_s \Phi_s \quad (\text{V/rpm}) \quad (3-15)$$

转矩系数为

$$K_T = \frac{T_{em}}{I_s} = C_T \Phi_s = \frac{4p}{\pi\alpha_1} W_s \Phi_s \quad (\text{N} \cdot \text{m/A}) \quad (3-16)$$

当电机转速以角速度  $\Omega$  来表示时,则电势系数为

$$K'_e = \frac{E}{\Omega} = \frac{E}{\frac{2\pi}{60} n} = \frac{60}{2\pi} K_e \quad (\text{V} \cdot \text{s/rad}) \quad (3-17)$$

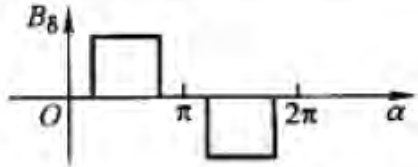
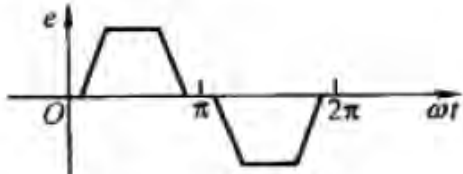
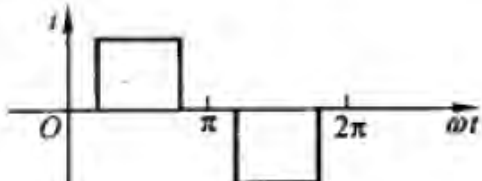
将式(3-15)代入式(3-17),得

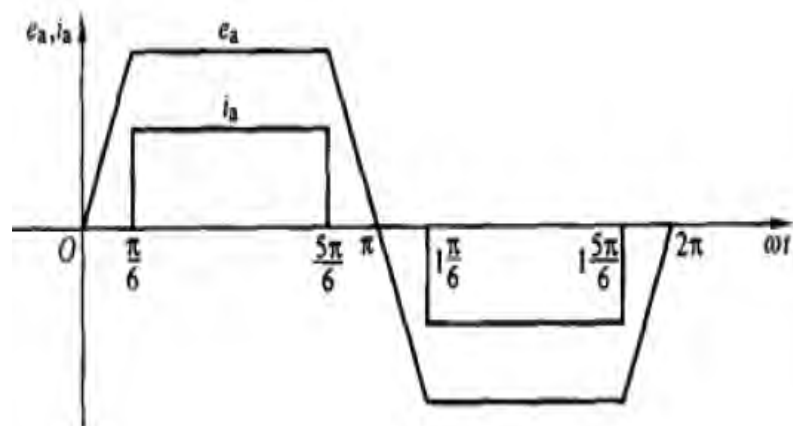
$$K'_e = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{2p}{15\alpha_1} W_s \Phi_s = \frac{4p}{\pi\alpha_1} W_s \Phi_s = K_T \quad (3-18)$$

可见,电势系数  $K'_e$  与转矩系数  $K_T$  相等。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 7. 永磁无刷直流电动机主要波形

	方波永磁无刷直流电动机
气隙磁密分布	 <p>A square wave plot of air gap flux density <math>B_g</math> versus angle <math>\alpha</math>. The waveform is positive from <math>0</math> to <math>\pi</math> and negative from <math>\pi</math> to <math>2\pi</math>.</p>
相电动势波形	 <p>A trapezoidal plot of phase back EMF <math>e</math> versus <math>\omega t</math>. The waveform is positive from <math>0</math> to <math>\pi</math> and negative from <math>\pi</math> to <math>2\pi</math>.</p>
相电流波形	 <p>A square wave plot of phase current <math>i</math> versus <math>\omega t</math>. The waveform is positive from <math>0</math> to <math>\pi</math> and negative from <math>\pi</math> to <math>2\pi</math>.</p>



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 8.电机的暂态数学模型

- 由于稀土永磁无刷直流电动机的气隙磁场、反电势以及电流是非正弦的，因此不能采用直、交轴坐标变换的分析方法。通常，直接利用电动机本身的相变量来建立数学模型。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 8. 电机的暂态数学模型

- 假设不计磁路饱和，不计涡流和磁滞，三相对称，则其电压方程为：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

定子、  
相电  
压

定子  
相电  
压

两相  
绕组  
互感

相绕  
组自  
感

微分  
算子

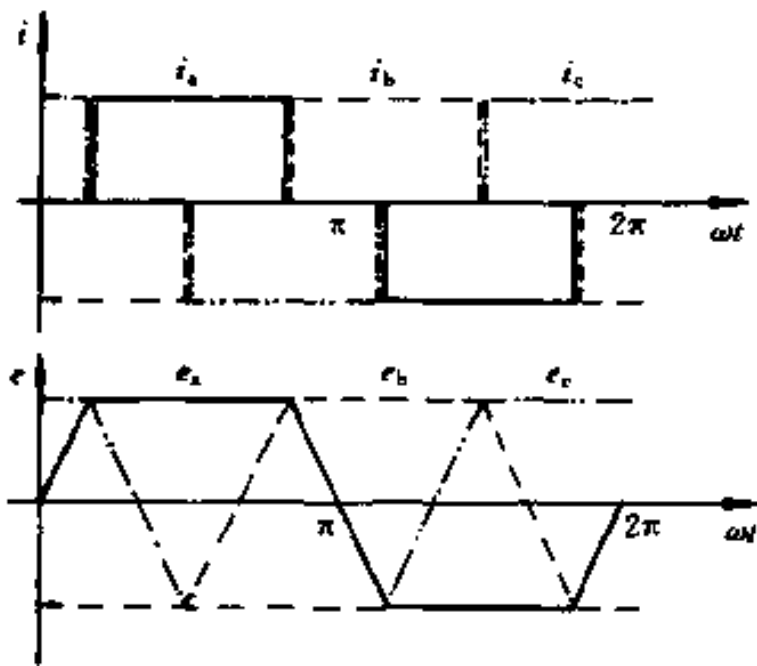
相感  
应电  
势



## 第二讲永磁无刷直流电机

### ● 8. 电机的暂态数学模型

- 上述模型中，电流为三相对称方波、电势为梯形波。
- 对于表面式电机，转子磁阻不随转子位置变化，因此自感和互感为常数



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 8. 电机的暂态数学模型

- 当三相绕组Y接，且没有中线，则：

$i_a + i_b + i_c = 0$ , 并且:  $Mi_b + Mi_c = -Mi_a$  代入模型, 有:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

电磁转矩为:  $T = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)$

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 8.电机的暂态数学模型

电磁功率为： $P_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)$

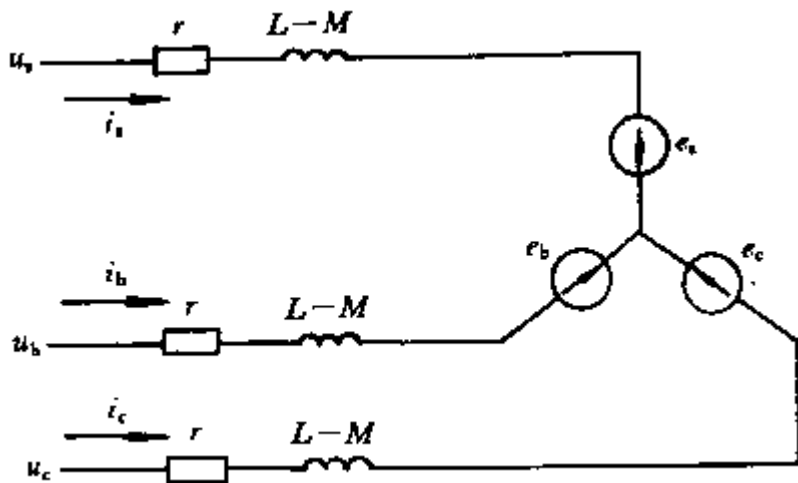
转子运动方程为： $T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 8. 电机的暂态数学模型

- 根据电压方程可以建立等效电路模型:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$



# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 8. 电机的暂态数学模型

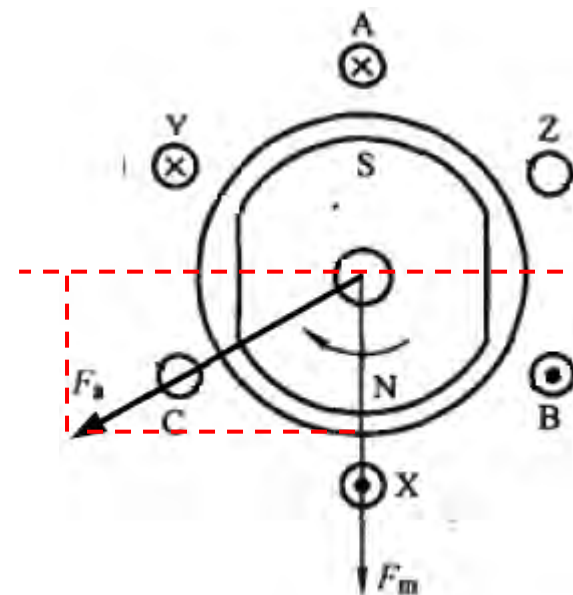
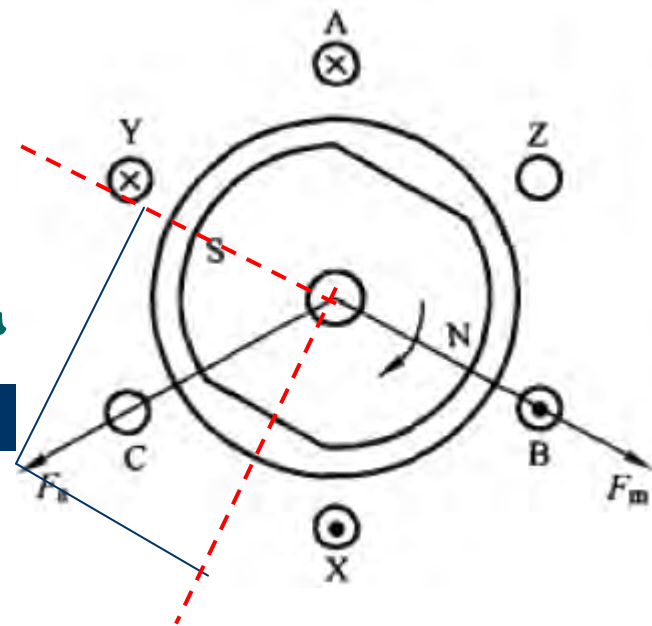
– 根据电压方程还常写成状态方程的形式：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$
$$p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} \end{bmatrix} * \left\{ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\}$$

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 9. 永磁无刷电机的电枢反应
  - A、B相通电时产生电枢磁场 $F_a$
  - 转子磁场 $F_m$ 在60度范围内不换相
  - $F_a$ 分解为d、q轴磁场
  - 当转子磁场在B方向时去磁最大
  - 当转子磁场在X方向时助磁最大
  - 当转子磁场在BX中间位置时无去助磁

因此在一个60度的磁状态内，电枢磁场从最大去磁逐渐减小到30度处的不去磁不助磁，然后逐渐增大到最大助磁状态后，换相、进入新的一个磁状态



## 第二讲永磁无刷直流电机

### ● 9. 永磁无刷电机的电枢反应

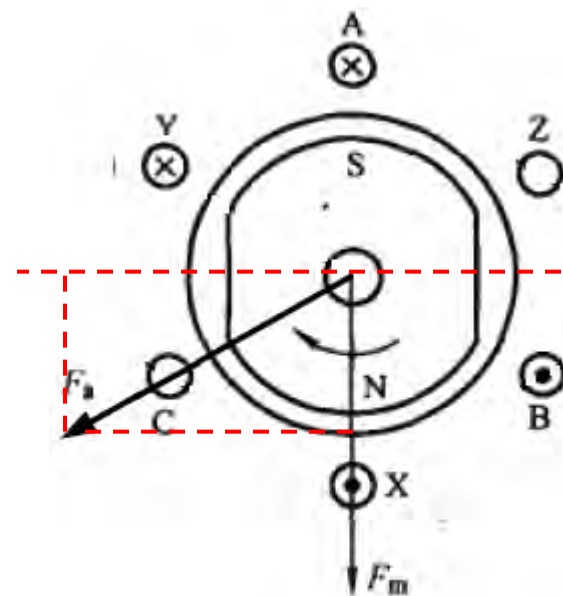
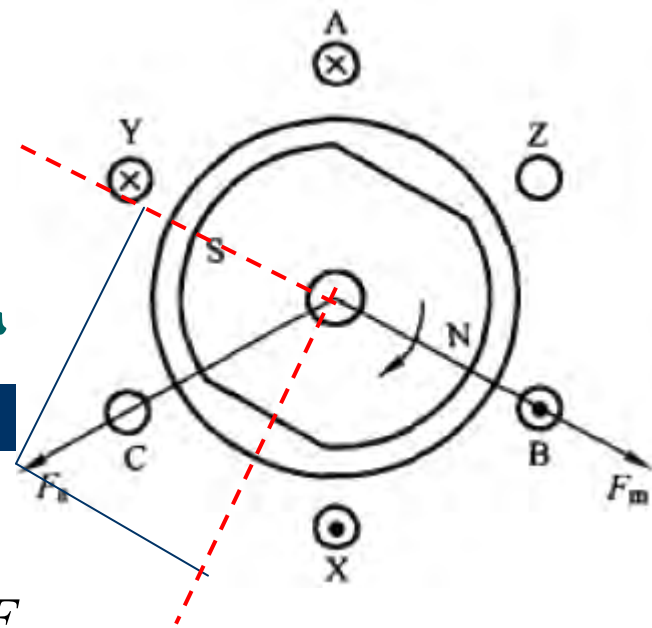
助磁或去磁的最大值：
$$F_{ad} = F_a \sin 30^\circ = 0.5F_a$$

$$F_a = I_a N k_w$$

q轴电枢反应使得主磁场波形畸变：

对于径向充磁的转子，由于q轴磁阻大，q轴磁场引起的畸变较小

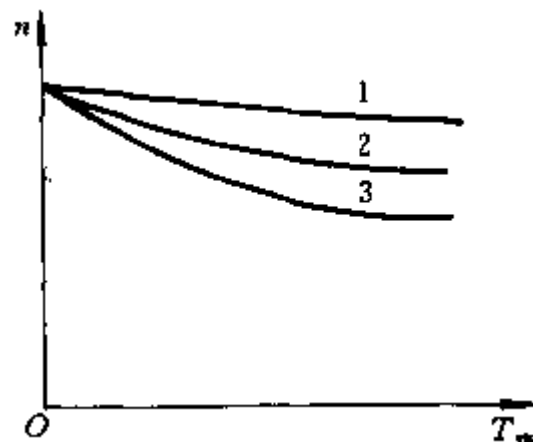
对于切向充磁的转子，由于q轴磁阻小，q轴磁场引起的畸变较大，使得永磁体前极尖助磁，后极尖去磁



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 10. 永磁无刷电机的运行特性
  - 由于无刷永磁直流电机的稳态计算与直流机类似，所以其运行特性也与直流机类似
- 10.1 机械特性：

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2r_a}{C_e \Phi_\delta} I_a$$
$$= \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2r_a}{C_e C_T \Phi_\delta^2} T_{em}$$

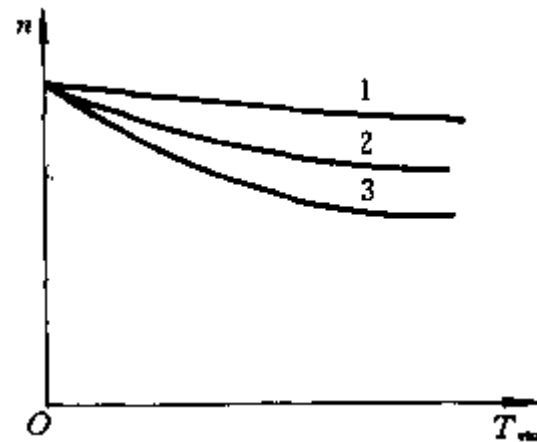




# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 10.1 机械特性：

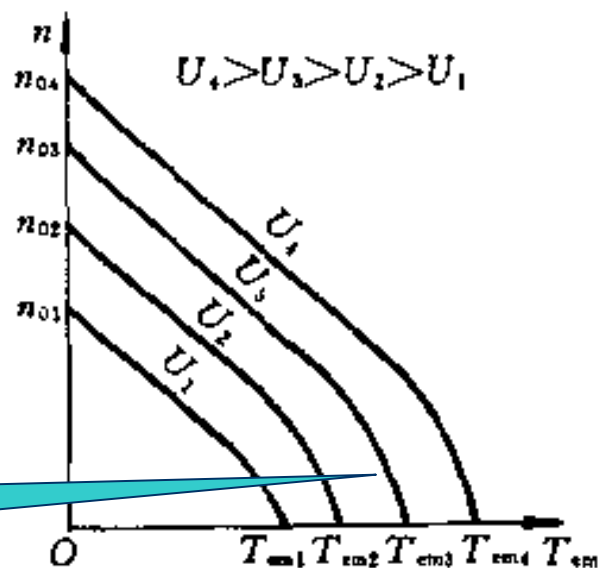
- 有刷直流电动机参与换向的绕组元件相对较少，只考虑电阻的影响，忽略电感的作用。
- 无刷直流电动机，参与换向的绕组为一相绕组，而不是单个线圈，电感较大。当稀土永磁无刷直流电动机采用不同的转子结构时，电感和电阻对机械特性的影响并不相同：
  - 当转子采用径向式结构，电机电感较小，电阻作用较大，电机具有硬的机械特性。1
  - 当转子采用切向式结构，电机电感较大，机械特性较软。3
  - 一般介于两者之间2



## 第二讲永磁无刷直流电机

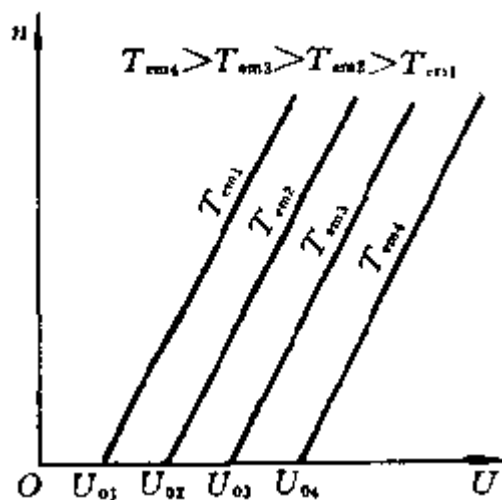
- 10.1 机械特性:
- 不同供电电压下，径向式结构的永磁无刷电机的机械特性曲线簇

下弯是由于电流大、管压降增大

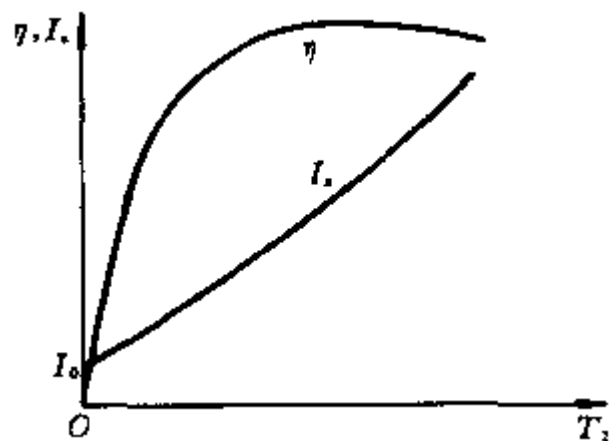


# 第二讲永磁无刷直流电机

- 10.2 调节特性



## 10.2 工作特性



从机械特性和调节特性可以看出，稀土永磁无刷直流电动机具有和一般有刷直流电动机一样好的控制性能，可以通过改变电源电压实现无级调速。

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11. 永磁无刷直流电机转矩脉动
  - 转矩脉动是无刷电机在低速运行时的一项十分重要的性能指标，通常高性能伺服系统的低速转矩脉动应小于3%。
  - 造成转矩脉动的原因有：
    - 电磁因素引起的转矩脉动
    - 电流换向引起的转矩脉动
    - 齿槽引起的转矩脉动
    - 电枢反应影响
    - 机械工艺引起的转矩脉动

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

电磁转矩脉动是由于定子电流和转子磁场相互作用而产生的转矩脉动。它与气隙磁通密度的分布和电流的波形以及绕组的形式有直接的关系，为了便于分析，假定：

- (1)忽略齿槽、换向过程和电枢反应等影响；
- (2)电枢绕组在定子内表面均匀连续分布；
- (3)电机为二相导通星形三相六状态工作，气隙磁场方波。

由于电机在每一个磁状态(60度电角度)内的电磁作用是相同的，故以下仅分析一个磁状态的转矩变化情况。

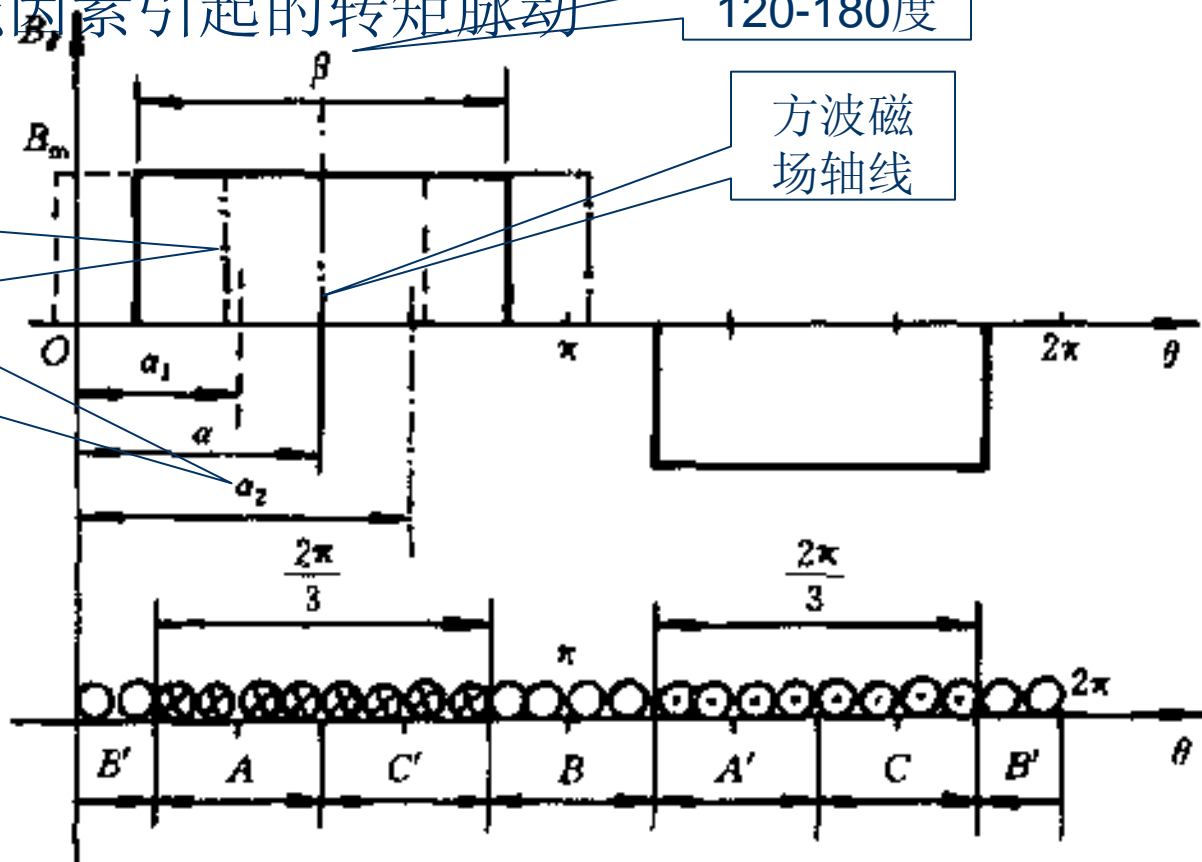
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

方波宽：  
120-180度

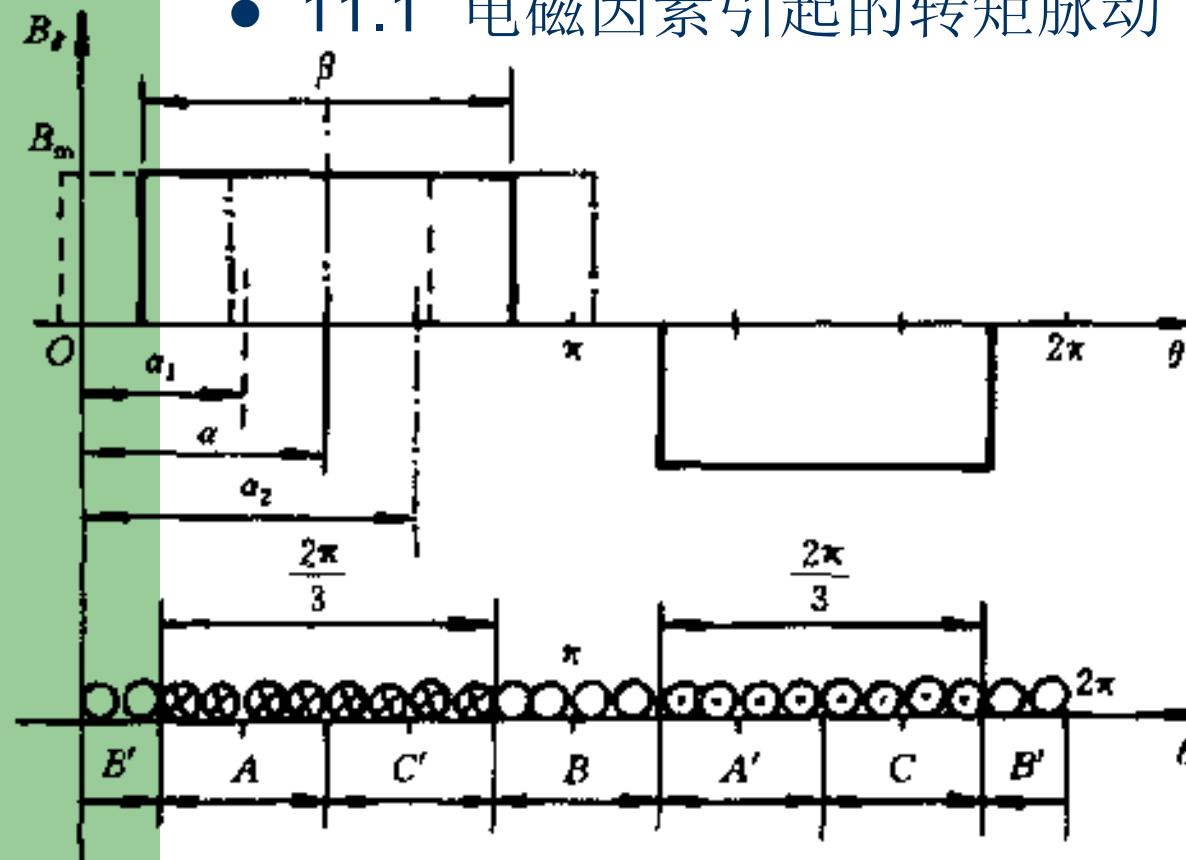
方波磁  
场轴线

方波磁场轴  
线变化范围  
一个磁状态  
60度



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动



当 $a=90$ 度时气隙磁场轴线与通电绕组A、C空间轴线重合，定转子磁场正交，产生最大电磁转矩。

当 $a=60$ 或 $120$ 度时气隙磁场，A、C相合成磁场，对转子磁场产生最大直轴去磁或增磁电枢反应、此时电磁转矩为最小值。

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

现在我们来分析计算当气隙磁感应强度轴线在该磁状态中任一位置时( $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$  内)的电磁转矩。根据单个导体在磁场中受力的基本公式  $F = BII$ , 可以得到对于某一磁场位置  $\alpha$  时的电磁转矩表达式为

$$T(\theta, \beta) = \int_{\alpha - \frac{\beta}{2}}^{\alpha + \frac{\beta}{2}} KB_m I(\theta) d\theta \quad (3 - 29)$$

式中  $K$ ——转矩常数;

$B_m$ ——气隙磁感应强度幅值;



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

$I(\theta)$ ——通电导体在电枢内表面的分布电流，

$$I(\theta) = \begin{cases} 0 & 0 < \theta < \frac{\pi}{6} \\ I_m & \frac{\pi}{6} < \theta < \frac{5\pi}{6} \\ 0 & \frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{7\pi}{6} \\ -I_m & \frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6} \\ 0 & \frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (3-30)$$

根据一个磁状态内气隙磁场与定子通电导体的相对位置，可以分为三种情形：

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

$$\textcircled{1} \quad \alpha - \frac{\beta}{2} < \frac{\pi}{6} \quad \alpha + \frac{\beta}{2} < \frac{5\pi}{6}$$

此情形为磁状态的初始阶段，气隙磁场只与部分通电导体相互作用而产生电磁转矩。由式(3-29)可得此时的电磁转矩为

$$T_1(\alpha, \beta) = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\beta}{2}} KB_m I(\theta) d\theta = KB_m I_m \left( \alpha + \frac{\beta}{2} - \frac{\pi}{6} \right) \quad (3-31)$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

$$\textcircled{2} \quad \alpha - \frac{\beta}{2} < \frac{\pi}{6} \quad \alpha + \frac{\beta}{2} > \frac{5\pi}{6}$$

此区间为磁状态的中间阶段,气隙磁场可以与所有的通电导体相互作用而产生电磁转矩。由式(3-29)可得

$$T_2(\alpha, \beta) = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} KB_m I(\theta) d\theta = \frac{2\pi}{3} KB_m I_m \quad (3-32)$$

$$\textcircled{3} \quad \alpha - \frac{\beta}{2} > \frac{\pi}{6} \quad \alpha + \frac{\beta}{2} > \frac{5\pi}{6}$$

此情形为磁状态的尾部阶段,气隙磁场又不能与所有的通电导体相互作用而产生电磁转矩,则有

$$T_3(\alpha, \beta) = \int_{\alpha - \frac{\beta}{2}}^{\frac{5\pi}{6}} KB_m I(\theta) d\theta = KB_m I_m \left( \frac{5\pi}{6} - \alpha + \frac{\beta}{2} \right) \quad (3-33)$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

有了以上任一  $\alpha$  时的电磁转矩表达式, 下面就可以进行电磁转矩脉动的分析。首先定义电磁转矩脉动为

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{av}}} \times 100\% \quad (3 - 34)$$

式中  $T_{\max}$  ——磁状态中电磁转矩的最大值;

$T_{\min}$  ——磁状态中电磁转矩的最小值;

$T_{\text{av}}$  ——磁状态中电磁转矩的平均值。

$$T_{\text{av}} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} T(\alpha) d\alpha \quad (3 - 35)$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

由式(3-32)可知

$$T_{\max} = \frac{2\pi}{3}KB_mI_m \quad (3-36)$$

由式(3-31)或式(3-33)可知,当 $\alpha$ 为 $\alpha_1 = \frac{\pi}{3}$ 时或为 $\alpha_2 = \frac{2\pi}{3}$ 时,电磁转矩达到最小值,即

$$T_{\min} = \left(\frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{6}\right)KB_mI_m \quad (3-37)$$

$T_{av}$ 可以由式(3-35)求得

$$T_{av} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} (T_1 + T_2 + T_3) d\alpha \quad (3-38)$$

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

根据情形①,有

$$\alpha < \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2} \text{ 和 } \alpha < \frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}, \text{ 对于 } \frac{2\pi}{3} < \beta < \pi, \text{ 有 } \frac{5\pi}{6} -$$

$$\frac{\beta}{2} < \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}, \text{ 因而作为积分区间有 } \frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}$$

根据情形②,有

$$\frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2} < \alpha < \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}$$

根据情形③,有

$$\frac{2\pi}{3} > \alpha > \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2} \text{ 或 } \frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}, \text{ 同样对于 } \frac{2\pi}{3} < \beta < \pi,$$

$$\text{有 } \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2} > \frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}, \text{ 故有 } \frac{2\pi}{3} > \alpha > \frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}, \text{ 则}$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

## • 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

由式(3-38)有

$$T_{av} = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}} T_1 d\alpha + \int_{\frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}}^{\frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}} T_2 d\alpha + \int_{\frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}}^{\frac{2\pi}{3}} T_3 d\alpha \right] = \frac{15\pi^2}{2 \times 36} - \frac{\beta^2}{8} - \frac{\pi}{12}\beta \quad (3-40)$$

$$= \frac{3}{\pi} KB_m I_m (T_{av1} + T_{av1} + T_{av2}) \quad (3-39)$$

$$T_{av2} = \int_{\frac{5\pi}{6} - \frac{\beta}{2}}^{\frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}} \frac{2\pi}{3} d\alpha = \frac{2\pi}{3} \left( \beta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3-41)$$

$$T_{av3} = \int_{\frac{\pi}{6} + \frac{\beta}{2}}^{\frac{2\pi}{3}} \left( \frac{5\pi}{6} - \alpha + \frac{\beta}{2} \right) d\alpha = \frac{15\pi^2}{2 \times 36} - \frac{\beta^2}{8} - \frac{\pi}{12}\beta \quad (3-42)$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

由式(3-40)、式(3-41)和式(3-42)可得平均电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_{av} &= \frac{3}{\pi} K B_m I_m \left( \frac{15\pi^2}{2 \times 36} - \frac{\beta^2}{8} - \frac{\pi}{12} \beta + \frac{2\pi}{3} \beta - \right. \\ &\quad \left. \frac{4\pi^2}{9} + \frac{15\pi^2}{2 \times 36} - \frac{\beta^2}{8} - \frac{\pi\beta}{12} \right) \\ &= -\frac{3}{\pi} K B_m I_m \left( \frac{\beta^2}{4} - \frac{\pi\beta}{2} + \frac{\pi^2}{36} \right) \end{aligned} \quad (3-43)$$

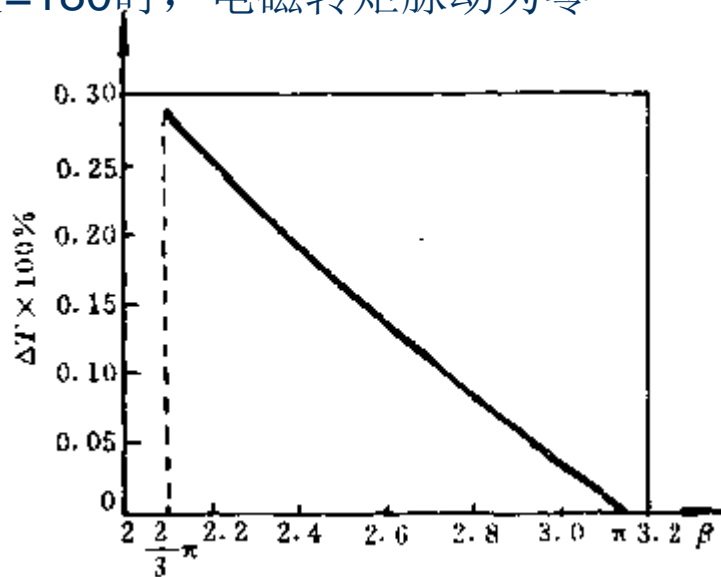


# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

则由式(3-34)可得

反应了电磁转矩波动与方波磁密宽度的关系，随宽度增加，转矩脉动单调下降。  
当宽度=120°时，转矩脉动最大，达到30%；  
当宽度=180°时，电磁转矩脉动为零



$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{av}}} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{2\pi}{3}KB_m I_m - (\frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{6})KB_m I_m}{-\frac{3}{\pi}KB_m I_m (\frac{\beta^2}{4} - \frac{\pi\beta}{2} + \frac{\pi^2}{36})} \\ &= \frac{\beta - \pi}{\frac{3}{\pi} (\frac{\beta^2}{2} - \pi\beta + \frac{\pi^2}{16})} \quad (3-44)\end{aligned}$$

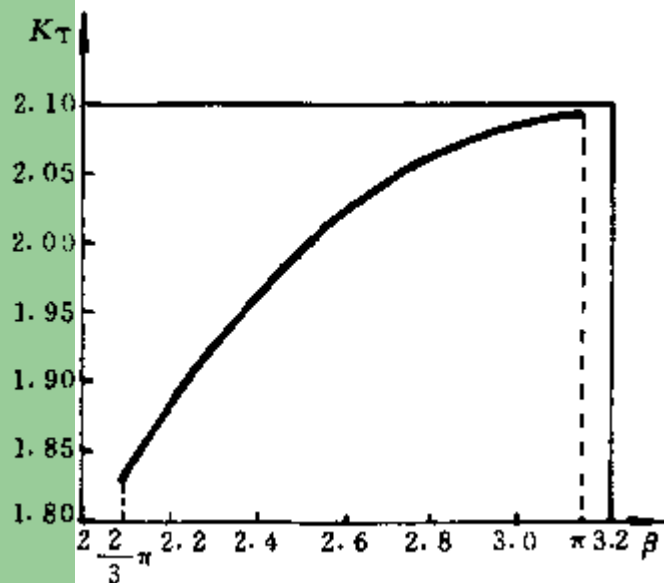
# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

另外,从式(3-43)可以得到转矩系数  $K_T$  的表达式

$$\begin{aligned} K_T &= \frac{T_{av}}{I_m} = -\frac{3}{\pi} \left[ \frac{\pi^2}{36} + \frac{\beta^2}{4} - \frac{\pi\beta}{2} \right] KB_m \\ &= K'_T KB_m \end{aligned} \quad (3-45)$$

由于  $KB_m$  为常数,因而  $K'_T = -\frac{3}{\pi} \left[ \frac{\pi^2}{36} + \frac{\beta^2}{4} - \frac{\pi\beta}{2} \right]$  与气隙磁感应强度波形宽度  $\beta$  的关系也就反应了  $K_T$  与  $\beta$  的变化关系,如图 3-21 所示。可见当  $\frac{2\pi}{3} \leq \beta \leq \pi$  时,  $K_T$  随  $\beta$  的增加而单调上升,当  $\beta = \pi$  时,  $K_T$  达到最大值。



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.1 电磁因素引起的转矩脉动

由上述分析可见,对于二相导通星形三相六状态的方波电动机来说,当极弧宽度增加时,电磁转矩增加,转矩脉动减小;当极弧宽度达到  $\pi$  时,电机出力最大,而转矩脉动为零。

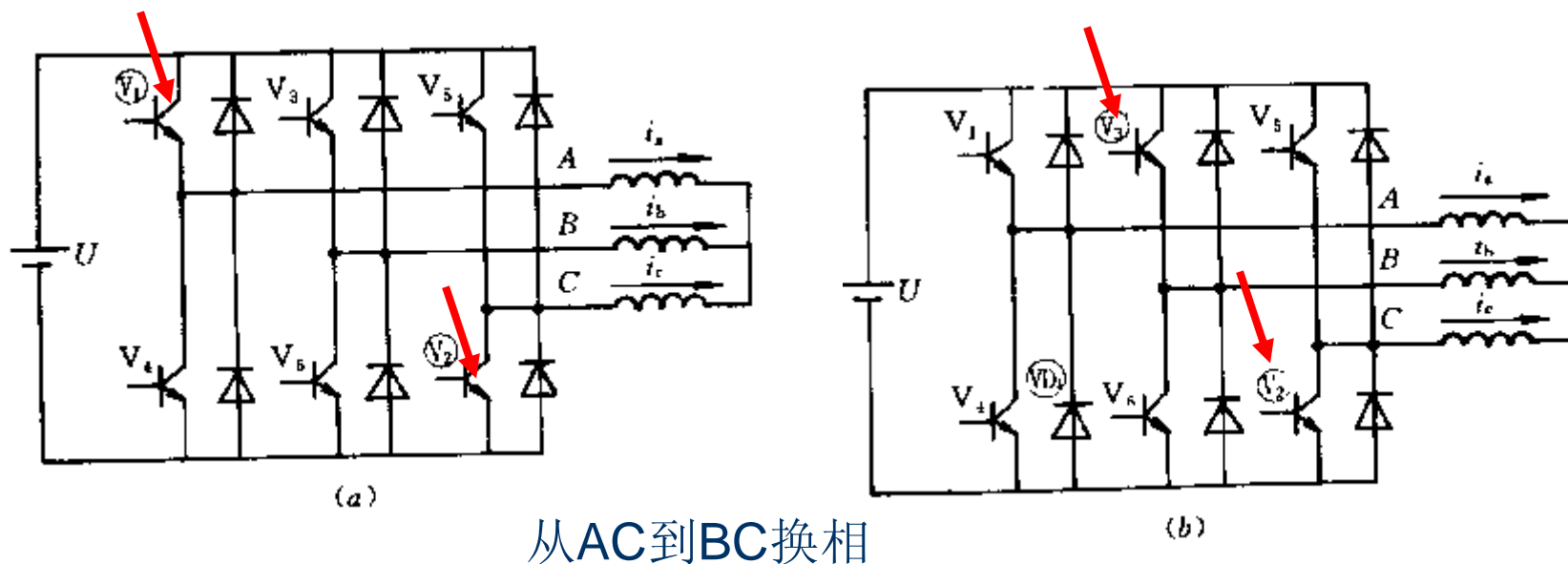
对于实际的电机,虽然极弧宽度不可能完全达到  $180^\circ$  电角度,但可以尽量提高极弧系数,使其设计得接近于 1。另外,以上分析是假定导体在电枢表面均匀分布,实际电机也不可能做到这一点,因而具体分析时需要做一定的修正。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

无刷直流电动机每经过一个磁状态，定子绕组中的电流就要进行一次换向。每一次换向，电机中的电流从一相转移到另一相，并对电磁转矩产生一定影响。这种相电流换向也是引起转矩脉动的主要原因之一。

下面分析两相导通星形三相六状态方波无刷直流电动机的换向转矩脉动机理。



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

用动态方程来分析换相过程对转矩的影响：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

忽略电阻影响，设定： $L_M = L - M$ ，则  $e_a = e_b = e_c = E_b$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

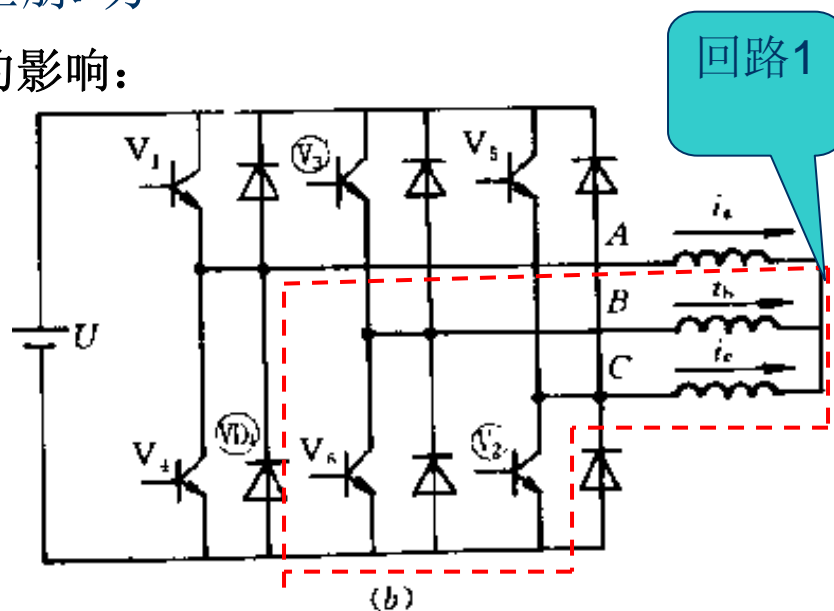
## ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

用动态方程来分析换相过程对转矩的影响：

对于回路1：

$$0 = e_a + L_M \frac{di_a}{dt} - (-e_c) - L_M \frac{di_c}{dt}$$

$$= 2E_\Phi + L_M \frac{di_a}{dt} - L_M \frac{di_c}{dt}$$



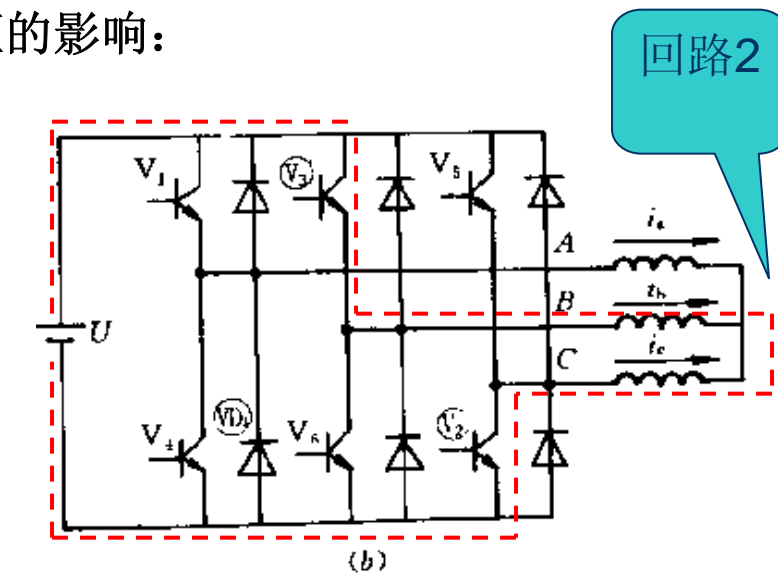
(3 - 48)

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

用动态方程来分析换相过程对转矩的影响：

$$\begin{aligned}
 U &= u_b - u_c \\
 &= e_b + L_M \frac{di_b}{dt} - (-e_c) - L_M \frac{di_c}{dt} \\
 &= 2E_\phi + L_M \frac{di_b}{dt} - L_M \frac{di_c}{dt}
 \end{aligned}$$



(3 - 49)

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

用动态方程来分析换相过程对转矩的影响：

已知星形绕组中  $i_a + i_b + i_c = 0$ ，则有

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \quad (3-50)$$

将式(3-50)分别代入式(3-48)和式(3-49)中得

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 2E_\Phi + 2L_M \frac{di_a}{dt} + L_M \frac{di_b}{dt} \end{array} \right. \quad (3-51)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U = 2E_\Phi + L_M \frac{di_a}{dt} + 2L_M \frac{di_b}{dt} \end{array} \right. \quad (3-52)$$



## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

联立式(3-50)、式(3-51)和式(3-52)得换向过程中各相电流变化的公式表达式

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_a}{dt} = -\frac{U + 2E_\phi}{3L_M} \quad (3-53) \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{2(U - E_\phi)}{3L_M} \quad (3-54) \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{U - 4E_\phi}{3L_M} \quad (3-55) \end{array} \right.$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

求解该组微分方程, 并设初值和终值为换向前后各相电流的值, 得

$$\left. \begin{array}{l} A (0, I) \\ B (0, 0) \end{array} \right\} \begin{cases} i_a = I - \frac{U + 2E_\Phi}{3L_M} t & (3-56) \\ i_b = \frac{2(U - E_\Phi)}{3L_M} t & (3-57) \\ i_c = -I - \frac{U - 4E_\Phi}{3L_M} t & (3-58) \end{cases}$$

式中  $I$ ——各相电流的稳态值。

## 第二讲永磁无刷直流电机

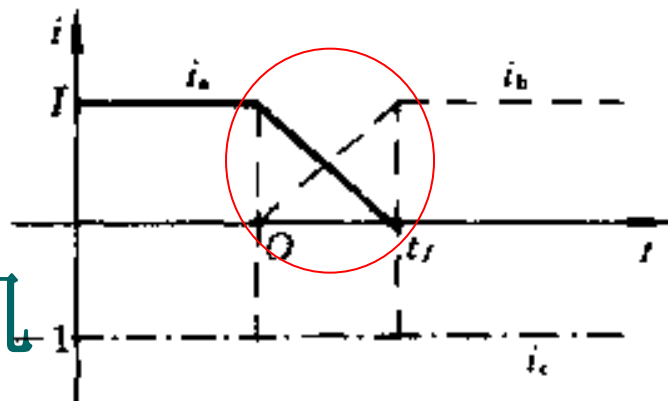


图 3-23 换向情形(1)

### ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

根据  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的变化率的不同,将换向过程分为以下三种情况:

①  $i_a$  与  $i_b$  的变化率相等。即  $i_a$  降为零的同时,  $i_b$  达到稳态值  $I$ , 如图 3-23 所示。

令  $i_a(t_1) = 0$ , 由式(3-56)可得换向时间  $t_1$  为

$$t_1 = \frac{3L_M I}{U + 2E_\phi} \quad (3-59)$$

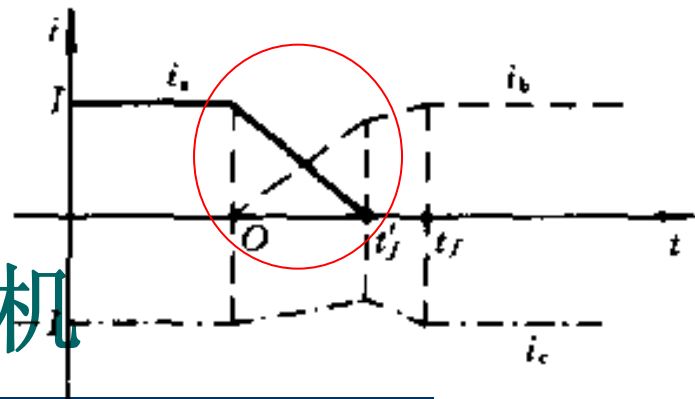
此时,  $i_b(t_1) = I$ , 由式(3-57)得

$$t_1 = \frac{3L_M I}{2(U - E_\phi)} \quad (3-60)$$

联立式(3-59)和式(3-60)得

$$U = 4E_\phi \quad (3-61)$$

## 第二讲永磁无刷直流电机



### ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

②  $i_a$  降为零时,  $i_b$  还未达到稳态值  $I$ , 如图 3-24 所示。

令  $i_a(t'_t) = 0$ , 由式(3-56)可得  $i_a$  降为零的时间  $t'_t$  为

$$t'_t = \frac{3L_M I}{U + 2E_\Phi} \quad (3-62)$$

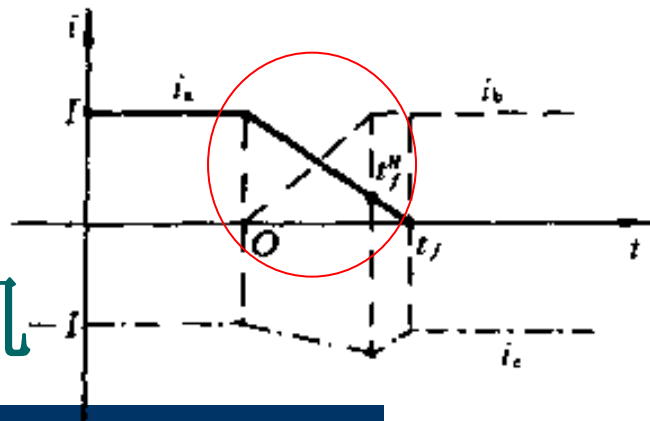
由式(3-57)得  $i_b$  为

$$i_b(t'_t) = \frac{2(U - E_\Phi)}{U + 2E_\Phi} I \quad (3-63)$$

此时,  $i_b(t'_t) < I$ , 则由式(3-63)得

$$U < 4E_\Phi \quad (3-64)$$

## 第二讲永磁无刷直流电机



### ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

③  $i_b$  达到稳态值  $I$  时,  $i_a$  仍未降为零, 如图 3-25 所示。

令  $i_b(t''_1) = I$ , 由式(3-57)可求得  $i_b$  达到稳态值时的时间为

$$t''_1 = \frac{3L_M I}{2(U - E_\Phi)} \quad (3-65)$$

将此式代入式(3-56)得

$$i_a(t''_1) = \frac{U - 4E_\Phi}{2(U - E_\Phi)} I \quad (3-66)$$

已知此时  $i_a(t''_1) > 0$ , 由式(3-66)得

$$U > 4E_\Phi \quad (3-67)$$

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

下面针对以上三种情况,分析换向过程中电磁转矩的变化。根据式(3-23),得换向期间电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{1}{\omega} (E_{\phi} i_a + E_{\phi} i_b - E_{\phi} i_c) \quad (3-68)$$

因为  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 则

$$T_{em} = -\frac{2E_{\phi}}{\omega} i_c \quad (3-69)$$

可见,换向期间电磁转矩与非换向相绕组中的电流成正比。将式(3-58)代入该式,得

$$T_{em} = \frac{2E_{\phi}}{\omega} \left( I + \frac{U - 4E_{\phi}}{3L_M} t \right) \quad (3-70)$$

C相反向通电,  $e_c$  为负值

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

可见,换向期间电磁转矩与非换向相绕组中的电流成正比。将式(3-58)代入该式,得

$$T_{\text{em}} = \frac{2E_{\Phi}}{\omega} \left( I + \frac{U - 4E_{\Phi}}{3L_M} t \right) \quad (3-70)$$

对于情形①:  $U = 4E_{\Phi}$ , 则  $T$  保持恒定;

对于情形②:  $U < 4E_{\Phi}$ , 则  $T$  减少;

对于情形③:  $U > 4E_{\Phi}$ , 则  $T$  增加。

从上述结果中可以看出,换向期间电磁转矩随不同的换向状态而变化。转矩脉动的幅值可以从下面计算中得到:

已知非换向时,即每个导通状态内,电机的电磁转矩为

$$T_{\text{em}} = \frac{2E_{\Phi} I}{\omega} \quad (3-71)$$

(3-69)

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

当  $U < 4E_{\phi}$  时, 将式(3-62)代入式(3-70)得

$$T_{em}(t'_1) = \frac{2E_{\phi}I}{\omega} \left( 1 + \frac{U - 4E_{\phi}}{U + 2E_{\phi}} \right) \quad (3-72)$$

该式除以式(3-71), 可以求得换向转矩脉动  $\Delta T$  为

$$\Delta T = \frac{U - 4E_{\phi}}{U + 2E_{\phi}} \quad (3-73)$$

当  $U > 4E_{\phi}$  时, 将式(3-65)代入式(3-70)得

$$T_{em}(t''_1) = \frac{2E_{\phi}I}{\omega} \left( 1 + \frac{U - 4E_{\phi}}{2(U - E_{\phi})} \right) \quad (3-74)$$

同样

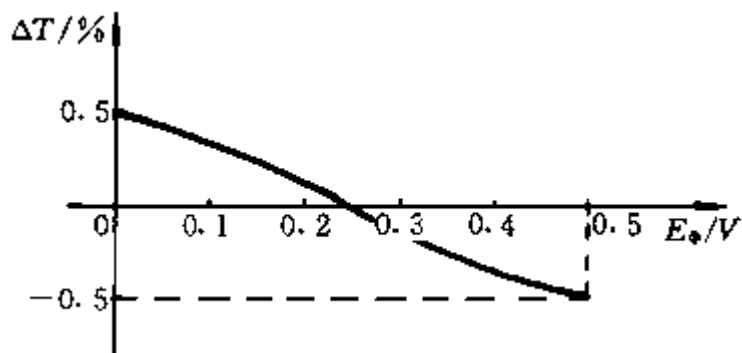
$$\Delta T = \frac{U - 4E_{\phi}}{2(U - E_{\phi})} \quad (3-75)$$



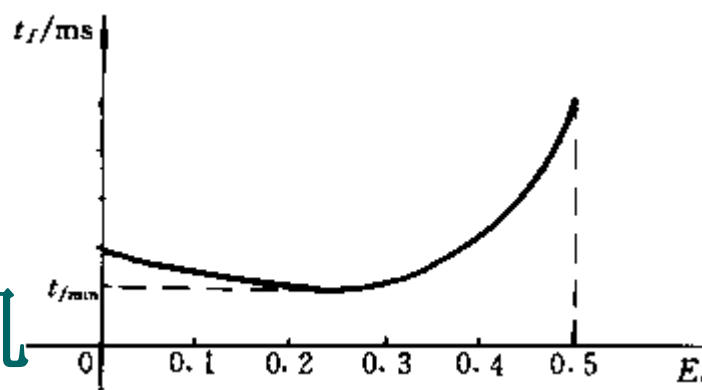
## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.2 电流换向引起的转矩脉动

从式(3-73)和式(3-75)可见,换向转矩脉动决定于绕组反电势,也就是电机的转速,而与电枢稳态电流无关。当转速很低或堵转时, $E_{\phi} \approx 0$ ,由式(3-75), $\Delta T = 50\%$ ;当转速很高时, $U \approx 2E_{\phi}$ ,由式(3-73), $\Delta T = -50\%$ ;当转速满足 $U = 4E_{\phi}$ 时, $\Delta T = 0$ ,如图



## 第二讲永磁无刷直流电机



### ● 11.2 电流换向引起的转矩脉动

另外,在换向情形②和③,可以分别计算出其完整的换向时间:

当  $U < 4E_\phi$  时

$$t_1 = \frac{L_M I}{U - 2E_\phi} \quad (3-76)$$

当  $U > 4E_\phi$  时

$$t_1 = \frac{3L_M I}{U + 2E_\phi} \quad (3-77)$$

在低速时,随着转速的上升,由式(3-77)知换向时间有所下降;在高速时,换向时间随着转速的升高而快速增加;在  $U = 4E_\phi$  时,换向时间最短,如图 3-27 所示。

# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.3 齿槽效应引起的转矩脉动

齿槽引起的转矩脉动,是由于定子齿槽的存在,使得在一个磁状态内,极下磁阻发生变化而引起的,也称为磁阻转矩波动。减少齿槽转矩脉动最普通的方法是定子斜槽或转于斜极,另外增大气隙、采用分数槽也有助于减少齿槽转矩脉动。消除齿槽效应的最好的方法是采用无槽电机。

以上几种方法在电机设计时应综合考虑,因为它们大都会影响到电机电磁转矩的大小。如斜槽斜极对方波电动机气隙磁感应强度平顶宽度有影响,从而又影响到电磁转矩脉动,故斜槽斜极的距离选择要统筹兼顾。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 11.4 电枢反应引起的转矩脉动

电枢反应对转矩脉动的影响主要反应在以下两个方面：一是电枢反应使气隙磁场发生畸变，改变了转子永磁体在空载时的方波气隙磁感应强度分布波形，使气隙磁场的前极尖部分被加强，后极尖部分被削弱。该畸变的磁场与定子通电相绕组相互作用，使电磁转矩随定、转子相对位置的变化而脉动。二是在任一磁状态内，相对静止的电枢反应磁场与连续旋转的转子主极磁场相互作用而产生的电磁转矩因转子位置的不同而发生变化。第二方面的影响在本节电磁转矩脉动的分析中已经讨论过。

为减小电枢反应对因气隙磁场畸变而产生的转矩脉动影响，电机应选择瓦形或环形永磁体径向励磁结构，适当增大气隙，另外也可设计磁路使电机在空载时达到足够饱和。

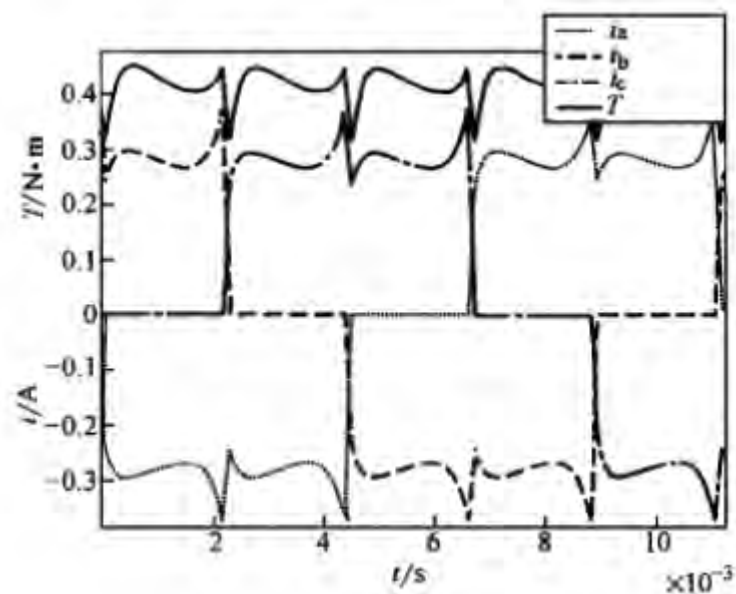
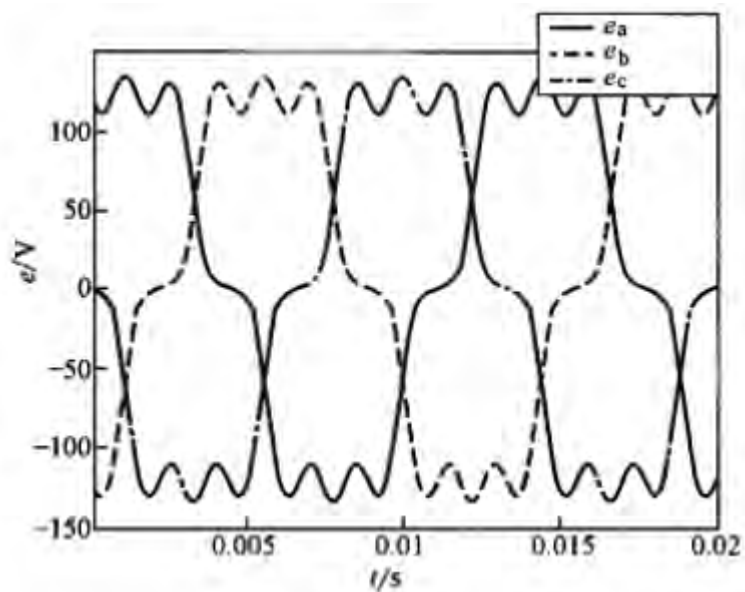
# 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.5 机械加工和工艺引起的转矩脉动

除了以上几种主要原因外,机械加工和材料的不一致也是引起转矩脉动的重要原因之一。如工艺误差造成的单边磁拉力、摩擦转矩不均匀、转子位置传感器的定位不准确、绕组各相电阻电感参数不对称、各永磁体磁性能不一致等等。因此,提高工艺加工水平也是减少转矩脉动的重要方法。

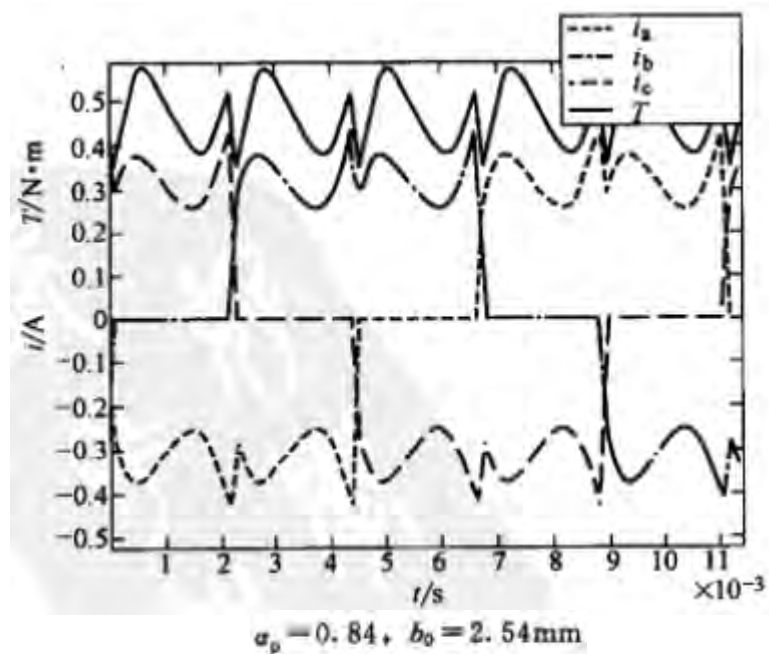
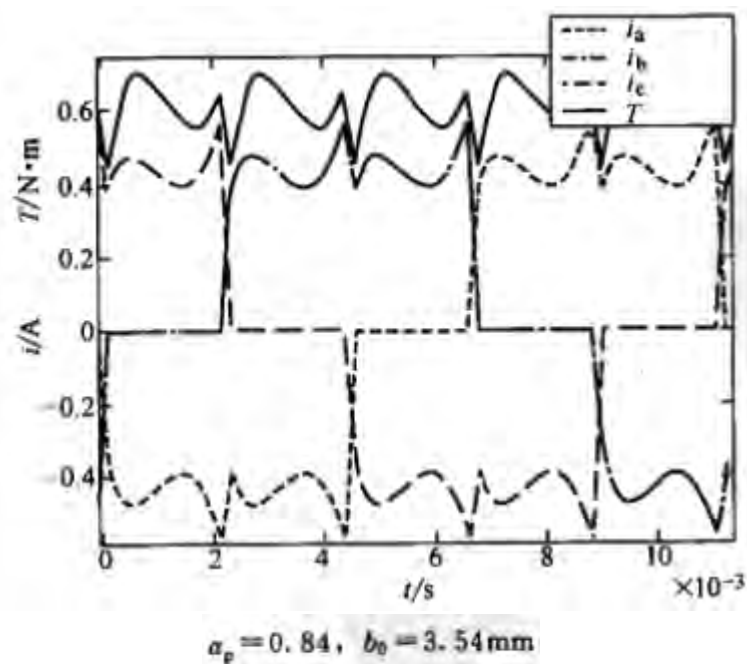
## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.6 无刷直流电机转矩脉动规律示例：一般波形



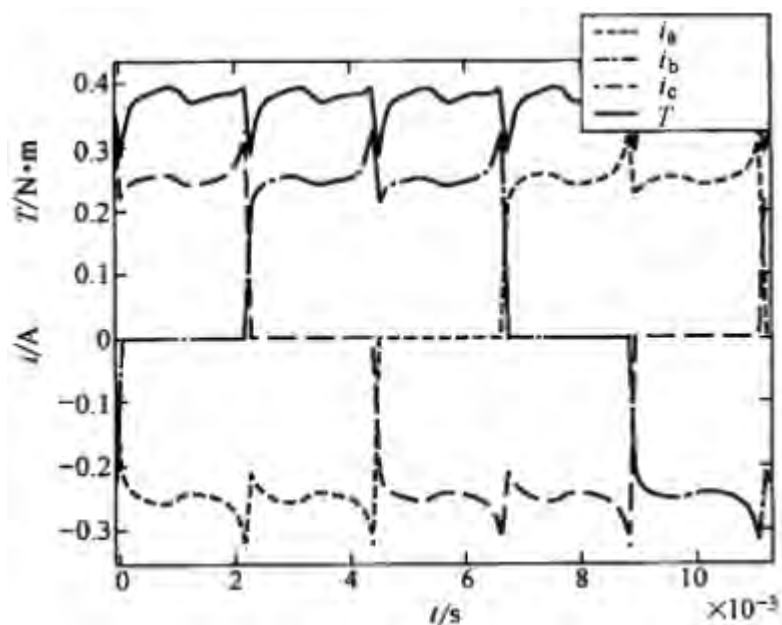
## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.6 无刷直流电机转矩脉动规律示例：槽口极弧系数

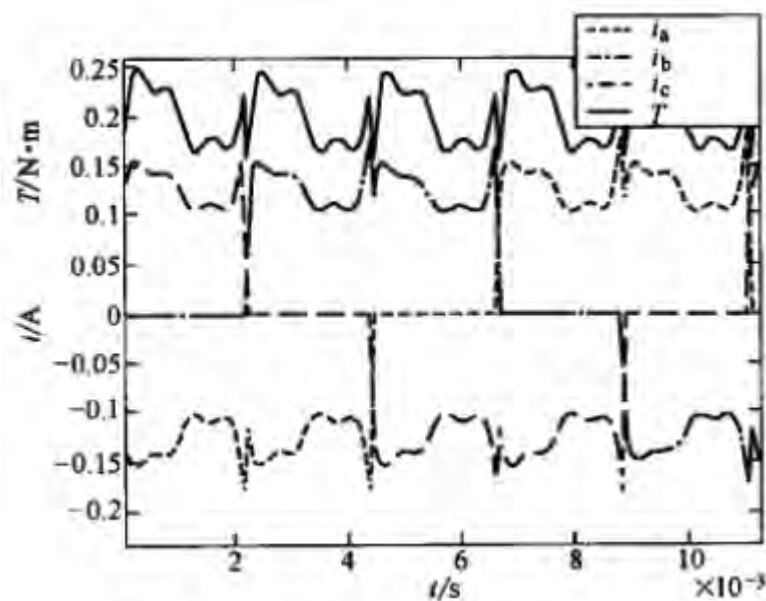


## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.6 无刷直流电机转矩脉动规律示例：槽口极弧系数



$$\alpha_p = 1, b_0 = 3.54\text{mm}$$

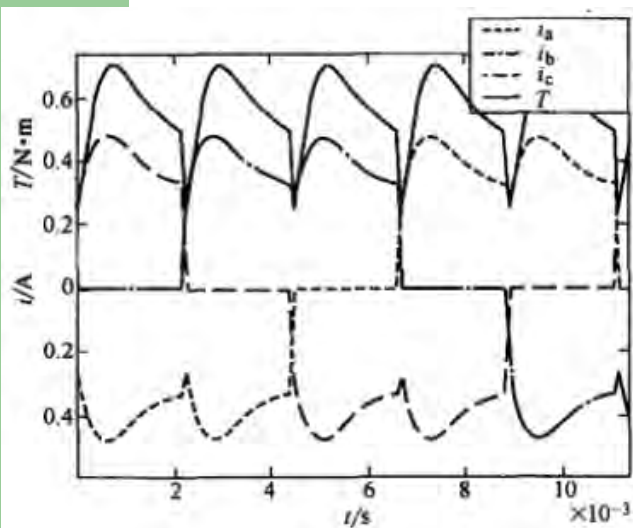


$$\alpha_p = 1, b_0 = 2.54\text{mm}$$

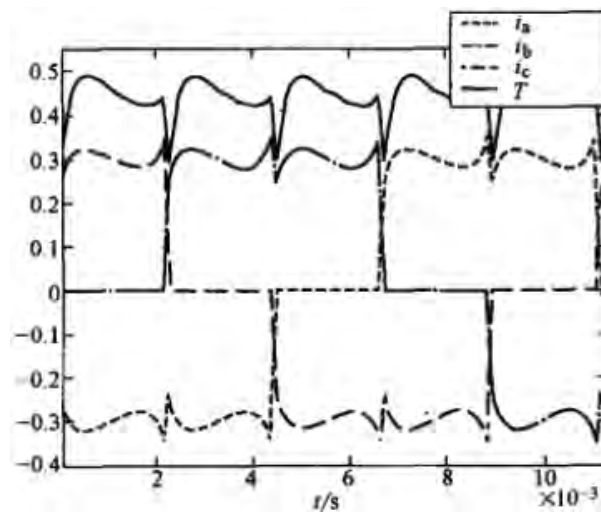


## 第二讲永磁无刷直流电机

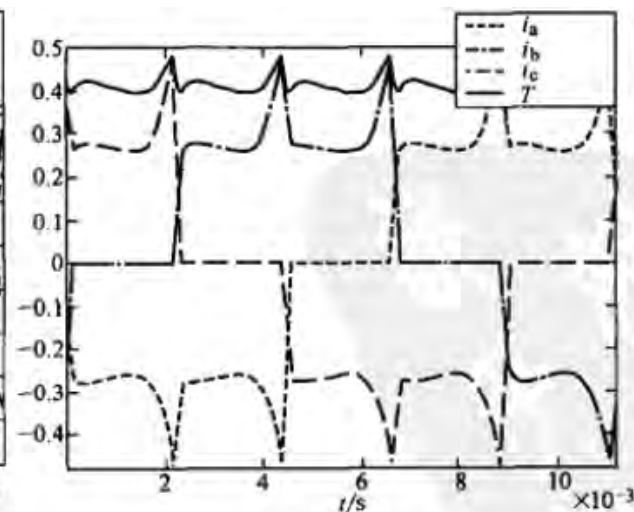
- 11.6 无刷直流电机转矩脉动规律示例：换相角的影响



$\beta=10^\circ$  (超前)



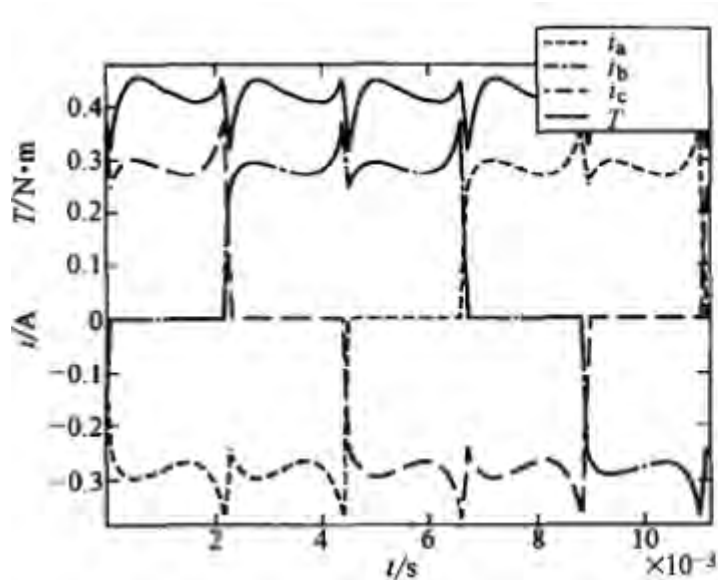
$\beta=0^\circ$



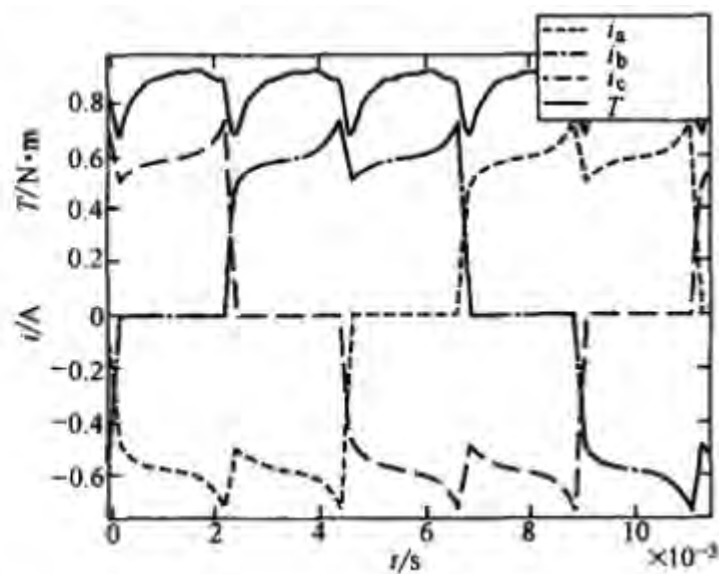
$\beta=-5^\circ$  (滞后)

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 11.6 无刷直流电机转矩脉动规律示例：电流初值影响



$i_{01} = 0.3 \text{ A}$

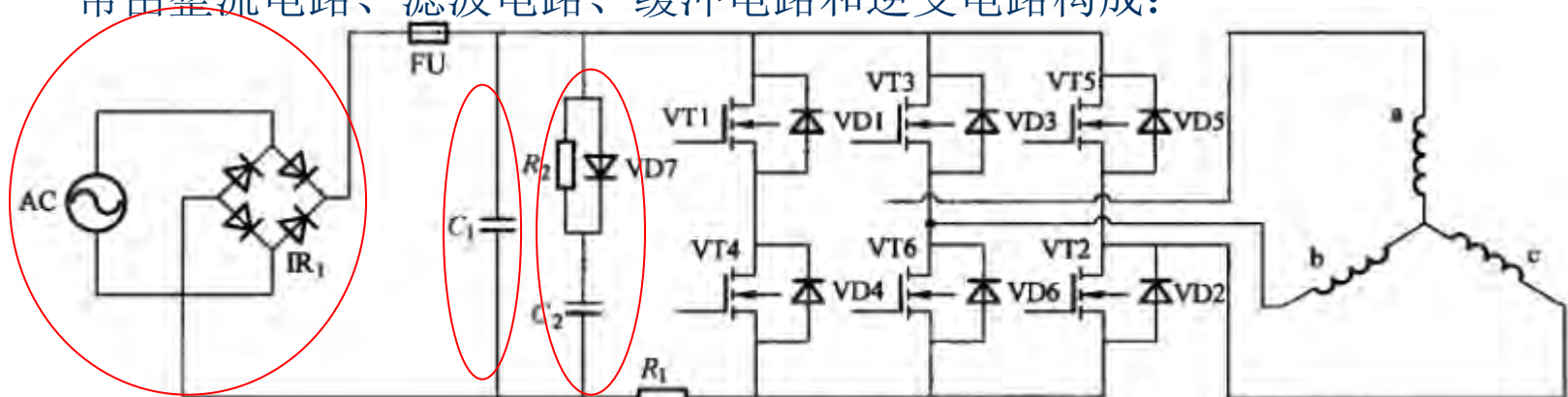


$i_{01} = 0.6 \text{ A}$

## 第二讲永磁无刷直流电机

### ● 12 永磁无刷电机的控制器—开关主电路

对于单相交流电源供电、电机采用三相电枢绕组时，其典型开关主电路通常由整流电路、滤波电路、缓冲电路和逆变电路构成：



整流桥  $IR_1$  和滤波电容  $C_1$  将交流输入电压转换为直流电压，形成低内阻直流电压源，电容  $C_1$  与绕组这一感性负载交换无功功率，保证电机系统输入端具有较高的功率因数。缓冲吸收电路由无感电容  $C_2$ 、快速恢复二极管  $VD_7$  和电阻  $R_2$  构成，主要作用是吸收逆变开关动作时在绕组电感上产生的尖峰电压，保护逆变开关。对于小功率逆变电路，可以只在电源母线上连接一个吸收电路；对于大功率的逆变电路，需要在每一开关旁边连接一个吸收电路，并且吸收电路要尽可能靠近开关。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—开关主电路

逆变电路由功率开关 VT1~VT6 和续流二极管 VD1~VD6 构成，它是逆变电路的核心部分，常用的功率开关为功率场效应晶体管 MOSFET、绝缘栅晶体管 IGBT 和智能功率模块 (IPM)。功率场效应晶体管 MOSFET 具有驱动功率小、开关频率高、导通电阻具有负温度系数的优点，非常适合于低电压、大电流的驱动场合。绝缘栅晶体管 IGBT 的优点在于驱动输入阻抗高、开关损耗小、饱和压降低、通断速度快、热稳定性能好、耐高压且能承受大电流、驱动电路简单，其对应的 IGBT 功率模块品种多样，应用日益广泛。由 IGBT 单元构成的功率模块也得到了迅速发展，智能功率模块不仅包括功率开关单元和驱动电路，还具有保护和报警功能，简化了电路结构，缩短了开发周期。IGBT、IPM 适用于变频器、直流调速系统、DC-DC 变换器以及有源电力滤波器等，目前，富士、三菱、西门子均有多种规格的 IPM 智能功率模块。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

驱动电路的作用是将控制电路输出的脉冲信号进行功率放大，以驱动 MOSFET 或 IGBT，对驱动电路的基本要求如下：

- (1) 提供适当的正向和反向输出电压，使功率开关管可靠地开通和关断。
- (2) 提供足够大的瞬态功率或瞬时电流，使功率开关管能迅速导通。
- (3) 尽可能小的输入输出延迟时间。
- (4) 足够高的输入输出电气隔离性能，使信号电路与驱动电路绝缘。
- (5) 具有灵敏的过电流保护能力。

驱动电路有多种形式，按照驱动电路的组成不同可分为由分立元件组成的驱动电路和集成驱动电路；按照驱动方式不同可分为直接驱动和隔离驱动。

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

集成驱动电路型号	适用的功率晶体管	驱动形式
M5721BL	GTR	单路驱动
M57904L	GTR	三路驱动
UAA4002	GTR、MOSFET	单路驱动
M57918L	MOSFET	单路驱动
M57924L	MOSFET	双路驱动
M57919L	MOSFET	三路驱动
EXB850、EXB851	IGBT	单路驱动,标准型
EXB840、EXB841	IGBT	单路驱动,高速型
IR2130	MOSFET、IGBT、MCT	六路驱动



# 第二讲永磁无刷直流电机

- 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

IR公司推出的IR21xx系列集成芯片是MOS、IGBT功率器件专用栅极驱动芯片，通过自举电路工作原理，使其既能驱动桥式电路中低压侧的功率器件，又能驱动高压侧的功率元件，因而在电机控制、伺服驱动、UPS电源等方面得到广泛应用。这些器件集成了特有的负电压免疫电路，提高了系统耐用性和可靠性，有些器件不仅有过流、过温检测输入等功能，还具有欠压锁定保护、集成死区时间保护、击穿保护、关断输入、错误诊断输出等功能。

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

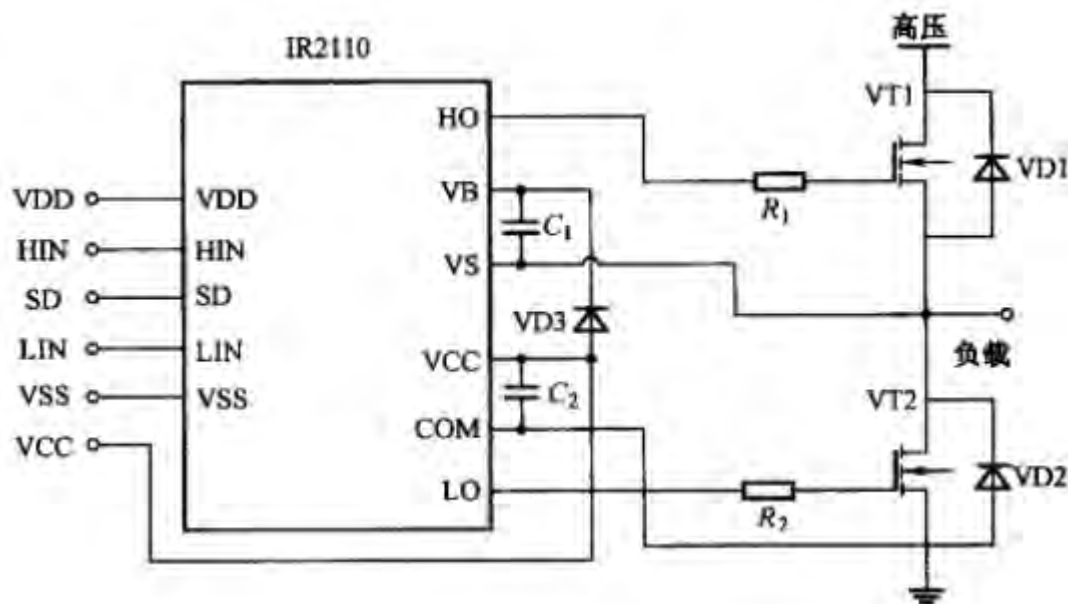
图 7-42 为美国 IR 公司生产的桥式驱动集成电路芯片 IR2110，它兼有光耦隔离和电磁隔离的优点，体积小，速度快，是中小功率变换装置中驱动器件的首选。IR2110 是一种双通道、栅极驱动、可驱动高压高速功率器件的单片式集成驱动模块，在芯片中采用了高度集成的电平转换技术，大大简化了逻辑电路对功率器件的控制要求，同时提高了驱动电路的可靠性。上桥采用外部自举电容上电，使得驱动电源数目较其他 IC 驱动电路大大减少。对于三相桥式逆变器，采用 3 片 IR2110 驱动 3 个桥臂，仅需一路 10~20V 电源，大大缩小了变压器体积，减少了电源数目，降低了成本，提高了系统可靠性。



## 第二讲永磁无刷直流电机

### ● 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

IR2110 由低压侧驱动电路、高压侧驱动电路、电平转换电路以及输入逻辑电路等部分组成，输入逻辑电路与 TTL/CMOS 电平兼容。当下桥导通、上桥关闭时，LO 输出高电平，VT2 导通，HO 与 VS 导通，VT1 关断，VCC 经 VD3、 $C_1$ 、VT2 给  $C_1$  充电；当上桥导通、下桥关闭时，LO 输出低电平，VT2 关断，HO 与 VB 导通， $C_1$  经 VB、HO、 $R_1$  放电，VT1 导通。



# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

IR2130是600V以下高压集成驱动器件，它具有六路输入信号和六路输出信号，且只需一个供电电源即可驱动三相桥式逆变电路的6个功率开关器件，一片IR2130可替代3片IR2110,使整个驱动电路更加简单可靠。

IR2130芯片具有以下一些特点：

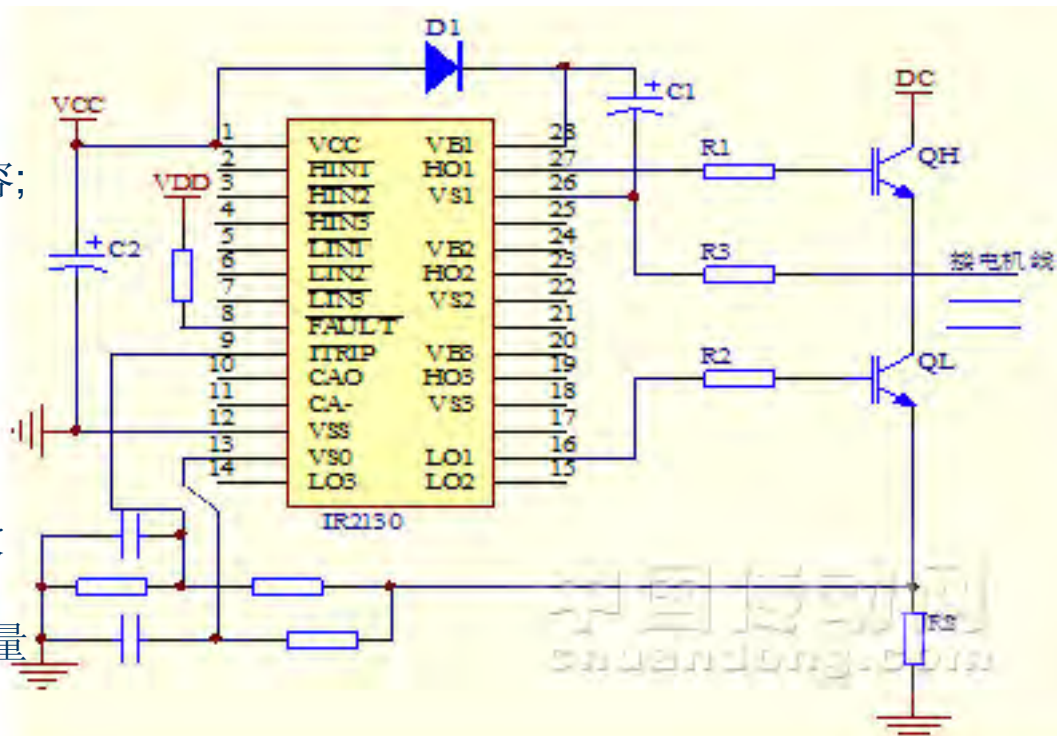
- (1) 可直接驱动高达600V电压的高压系统，输出端具有dV/dt抑制功能；
- (2) 最大正向峰值驱动电流为250mA，反向峰值驱动电流为500mA；
- (3) 具有电流放大和过电流保护功能，同时关断六路输出；
- (4) 自动产生成上、下侧驱动所必需的死区时间（2.5 $\mu$ s）；
- (5) 具有欠压锁定功能并能及时关断六路输出；
- (6) 2.5V逻辑信号输入兼容。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—驱动器

C1自举电容，为上桥臂功率管驱动存储能量，开关频率大于5kHz时，容值应不小于0.1 $\mu$ F，选低漏电流的瓷片电容；D1为自举二极管，其作用是防止上桥臂导通时的直流电压母线电压加到IR2130的电源上而使器件损坏，因此D1应有足够的反向耐压，为了满足主电路功率管开关频率的要求，D1还应选超快速恢复型二极管。

R1和R2是IGBT的栅极限流电阻，一般可采用十几到几十欧。对IGBT的动态特性将产生极大的影响，不同电流容量的IGBT器件的栅极限流电阻有不同的取值，功率越大的管子栅极电阻应越小。



# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—控制电路

控制电路是无刷直流电动机正常运行并实现各种调速伺服功能的指挥中心，它主要完成以下功能：

(1)对转子位置传感器输出的信号、PWM调制信号、正反转转、停车信号进行逻辑综合，以给驱动电路提供各开关管的斩波信号和选通信号，实现电机的正反转及停车控制。

(2)产生PWM调制信号，使电机的电压随给定速度信号而自动变化，实现电机开环调速。

(3)对电动机进行速度闭环调节和电流闭环调节有较好的动态相静态性能。

(4)实现短路、过流相欠压等故障保护功能等。

# 第二讲永磁无刷直流电机

## ● 12 永磁无刷电机的控制器—控制电路

控制电路的形式多种多样，归纳起来主要有以下几种型式：

- 1.分立元件全模拟电路
- 2.专用集成控制电路
- 3.数模混合控制电路；
- 4.全数字控制电路。

分立元件全模拟控制电路在以往的无刷直流电动机中大量应用，由于模拟电路中不可避免地存在参数飘移和不一致问题，以及线路复杂、调试不便等因素，因而使电机的可靠性相性能受到影响。

随着无刷直流电动机性能要求越来越高，其控制器由以硬件模拟电子器件，转向数字电路、微处理器、数字信号处理器(DSP)，实现半数字化的数模混合控制电路和全数字化的控制电路。控制规律由硬件实现转向以软件实现。对于高性能的稀土永磁无刷直流伺服系统,由于微机和DSP的应用，在控制上由通常所采用的PI(比例积分)或PID(比例积分微分)控制规律，开始转向应用现代控制理论，同时引进模糊控制、神经网络等智能控制理论，发展智能化的稀土永磁无刷直流电动机，从而实现复杂的控制算法和故障诊断。

## 第二讲永磁无刷直流电机

- 课外习题：
- 1. 分析三相永磁无刷电机主电路全桥控制和半桥控制的工作原理和优缺点
- 2. 论述永磁无刷电机驱动系统的构成及其功能，并举例说明
- 3. 论述永磁无刷电机转矩脉动的内在原因