

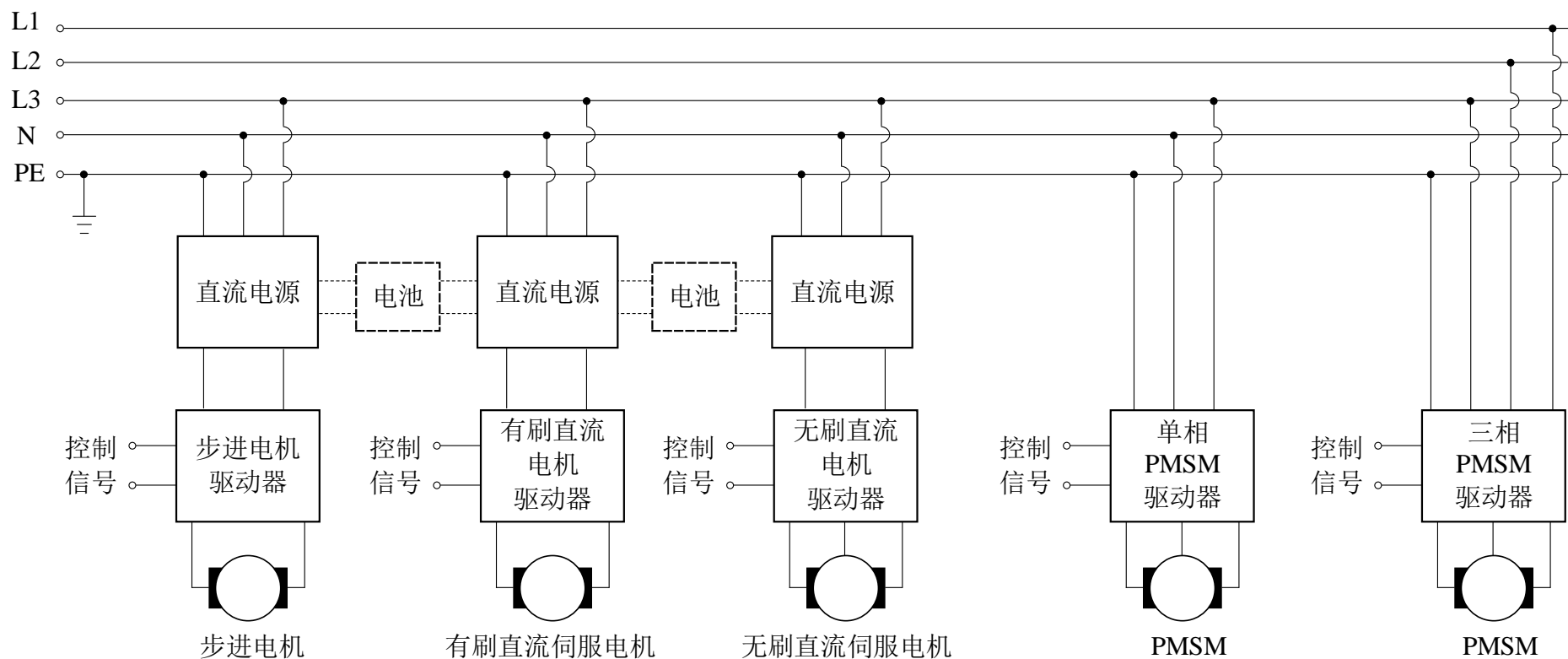
# 机器人驱动电机及驱动器

机器人控制技术

2023-下学期

## ● 电机连接电网的方式

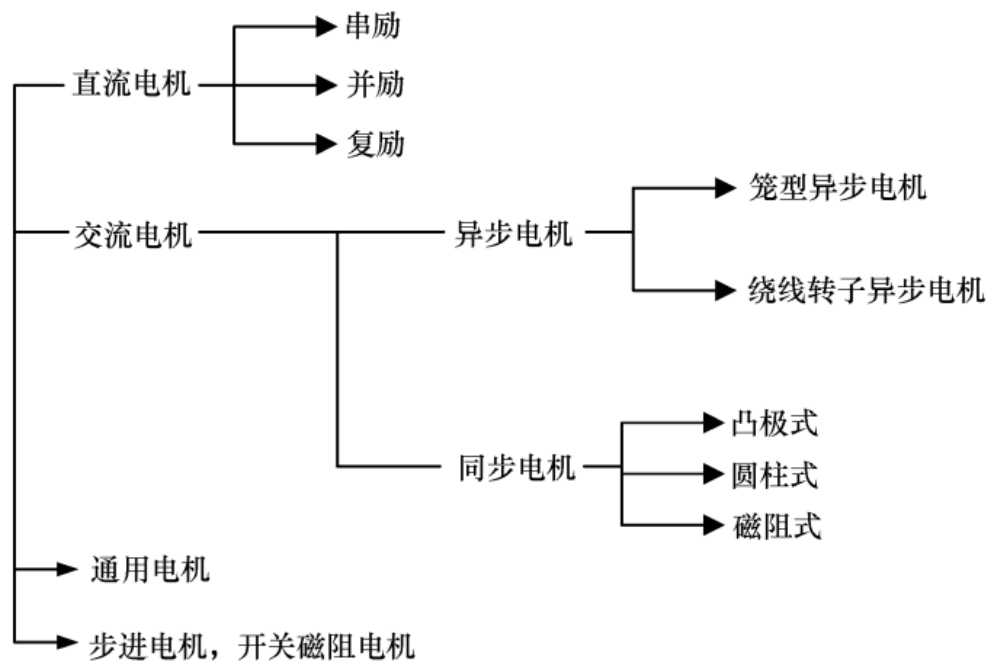
- 步进电机、有刷直流伺服电机、无刷直流伺服电机的驱动器需要直流功率电源，也可以由机载动力电池供电
- 自控式永磁同步电机(PMSM)的驱动器采用交流电源供电，分为单相（220V）和三相（380V）两种



# 引言



## ● 根据电源和运行原理分类：



步进电机及其驱动器

有刷直流永磁伺服电机及其驱动器

无刷永磁伺服电机及其驱动器

- 伺服电机的共同特点：

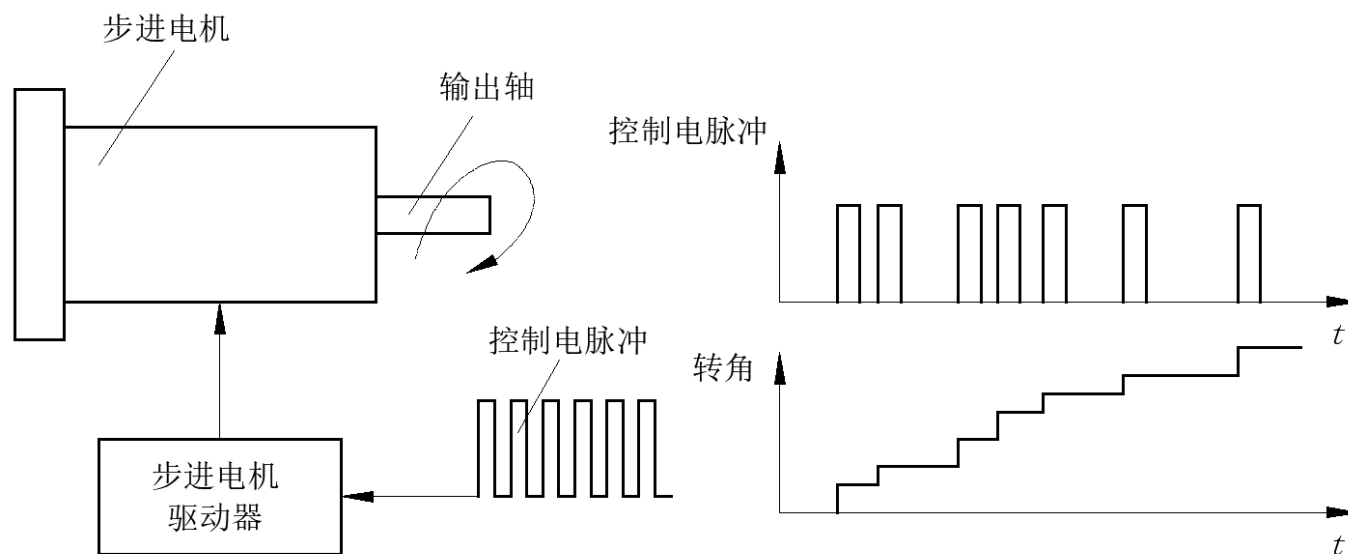
- 采用永磁体励磁、体积小、重量轻、转子惯量小；
- 控制特性好，可用于位置控制和速度控制；
- 伺服电机与驱动器配套使用，还能支持力矩控制。

- 驱动器作用：

- 为控制机器人，要求电机的电枢电压或电流可控；
- 但不同电机所需的电枢电压不同，所以机器人电机必须通过驱动器连接电网，才能获得随控制指令变化，且与电机相匹配的电枢电压/电流；
- 每种电机都有自己的专用驱动器；
- 驱动器需要直流功率电源，被归为直流电机。也可直接由机载动力电池供电。

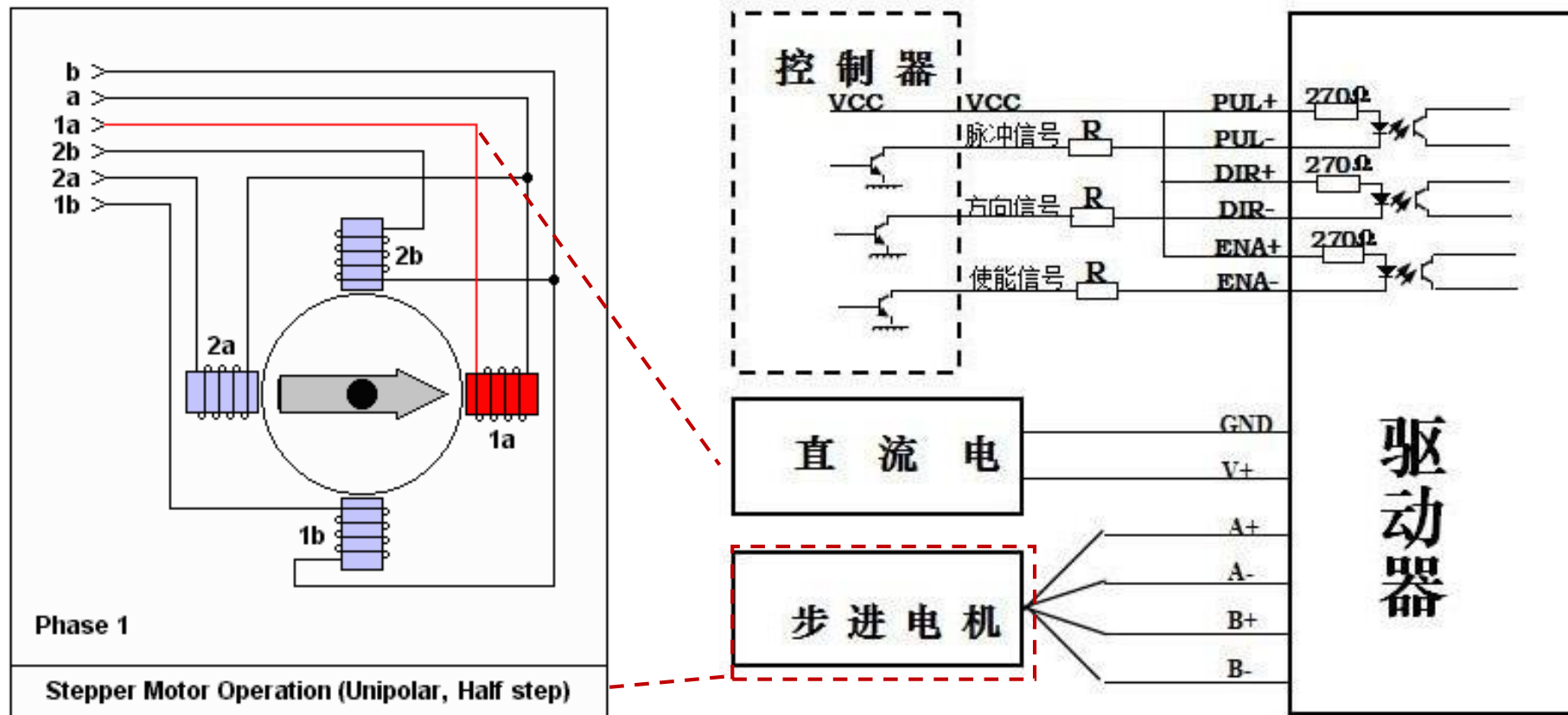


# 步进电机及其驱动器



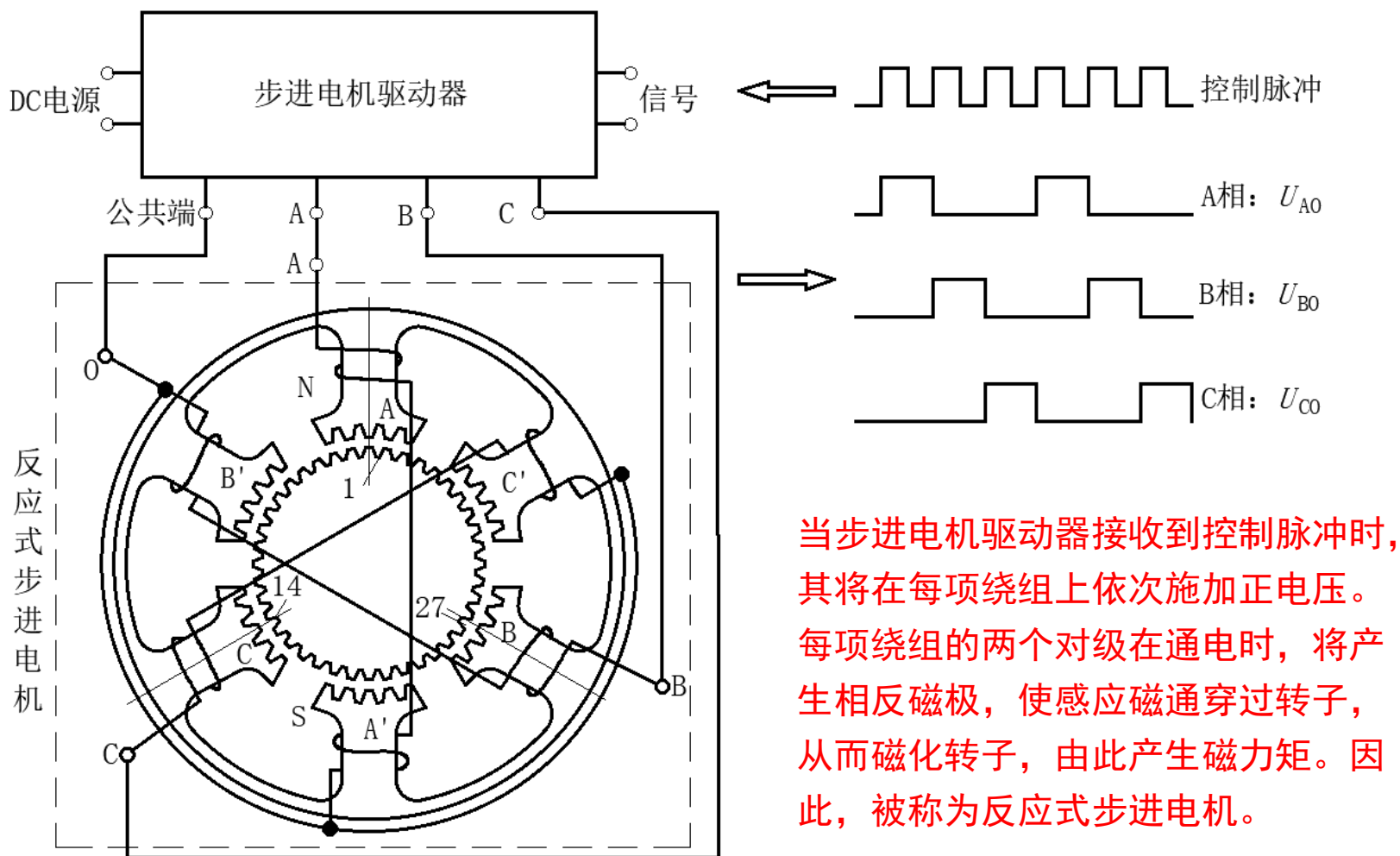
- 步进电机根据输出形式不同，有旋转式、直线式和平面式三大类,本课仅讨论旋转式
- 步进电机输出的角位移与驱动器接收到的控制脉冲数目成正比
- 本身有定位能力，即便工作于开环模式也有较好的位置控制精度
- 通常不续建立其控制模型，而把它作为一个无偏差的位置或速度执行元件来对待
- 不适用于大负载、高动态场合，也不能实现力控制，一般用于低成本机器人
- 步进电机在数控机床、绘图仪、3D打印机和低成本机器人中应用广泛

# 步进电机及其驱动器



# 步进电机及其驱动器

- 反应式步进电机：利用感应磁场总是倾向于使系统磁阻最小的原理产生驱动力矩



## ➤ 转子

- 软磁材料——硅钢片
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$

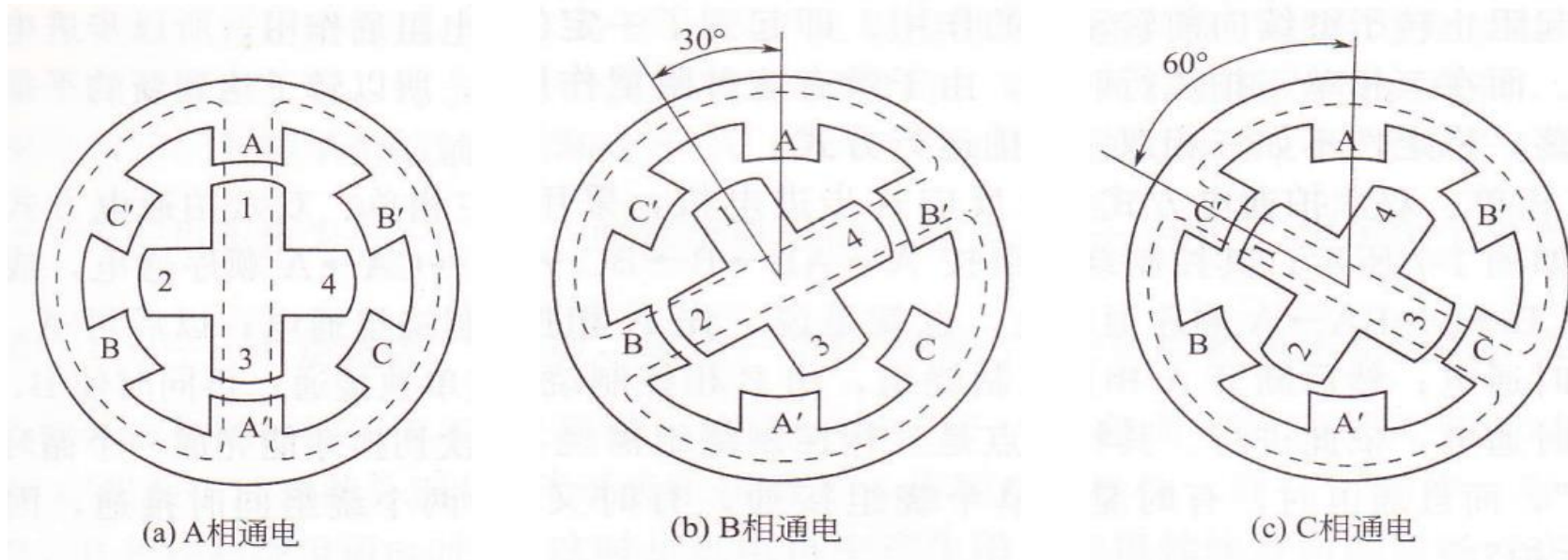
## ➤ 定子

- 最少应有三对绕组
- 软磁材料——硅钢片
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$
- 一对绕组的齿与转子对齐时，另两对分别错开1/3、2/3齿距
- 一对绕组通电时，对极磁性相反



# 步进电机及其驱动器

## ● 反应式步进电机运行原理 —— “单三拍”

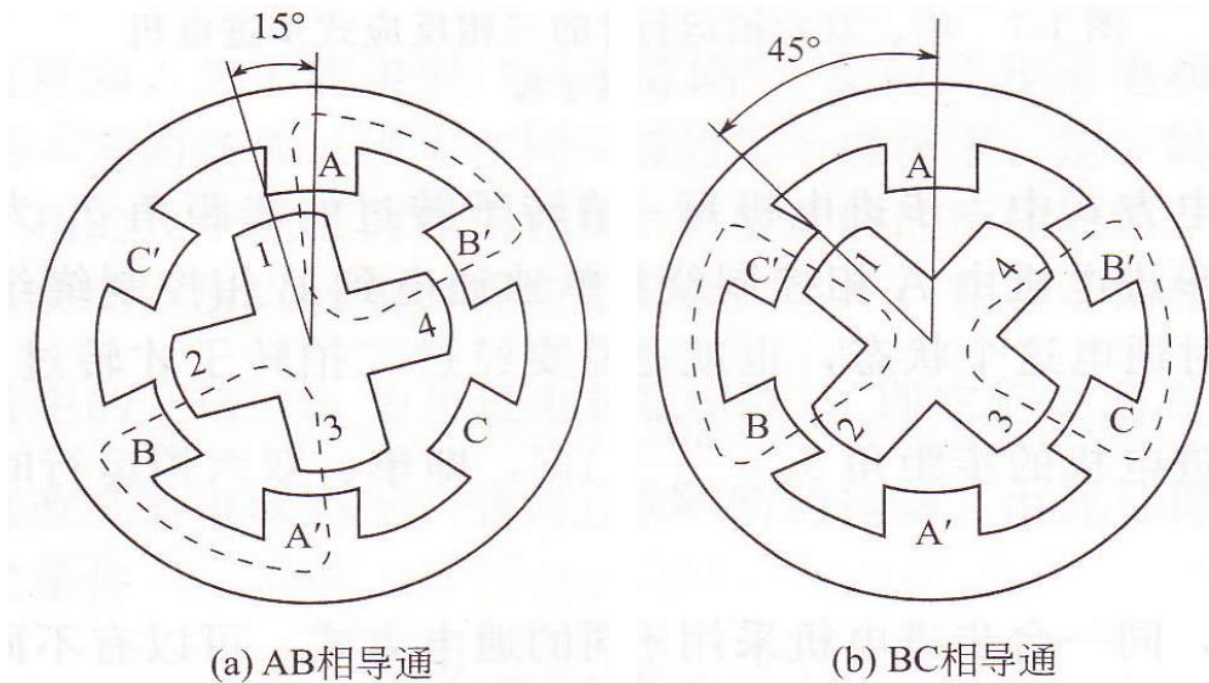


- 绕组导通顺序：A→B→C→A或A→C→B→A
- **步距角 $\theta_s$** ：一拍（一个脉冲）对应的转子转角，也是系统的最小可控转角
- “单三拍” 工况步距角： $\theta_s = \theta_g / 3$
- 问题：在每次切换通电状态的瞬间均会出现断磁现象，这将降低电机的负载能力，增大转子的振荡



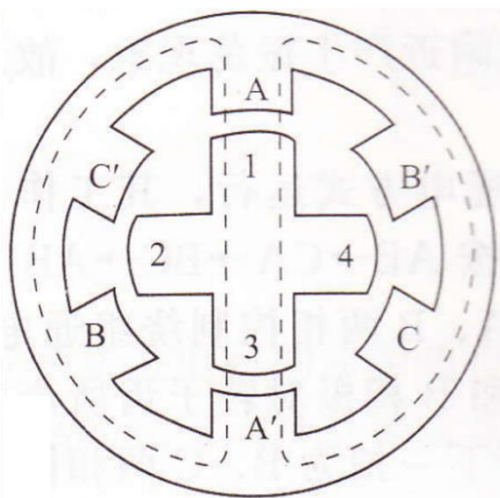
# 步进电机及其驱动器

## ● 运行原理 —— “双三拍”

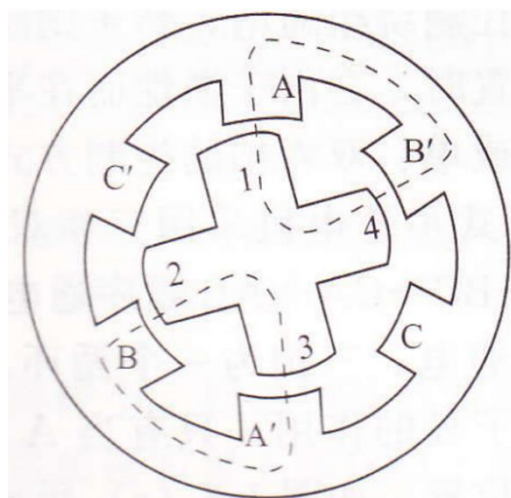


- 绕组导通顺序：AB→BC→CA→AB或AB→AC→CB→AB
- “双三拍” 工况步距角： $\theta_s = \theta_g / 3$
- 优点：每次切换时总有一相绕组保持通电，使得磁场保持连续，对电机具有阻尼作用，电机平稳性好

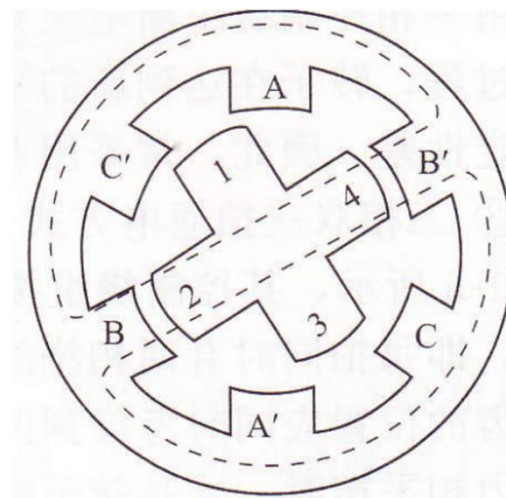
## ● 运行原理 —— “单-双六拍”



(a) A相绕组通电



(b) A、B相绕组同时通电



(c) B相绕组通电

- 绕组导通顺序：A→AB→B→BC→C→CA→A或A→AC→C→CB→B→BA→A
- “单-双六拍” 工况步距角： $\theta_s = \theta_g / 6$
- 优点：也总有一相绕组保持通电，平稳性好，步距角减小1倍，位置控制精度提高

- 步距角计算公式

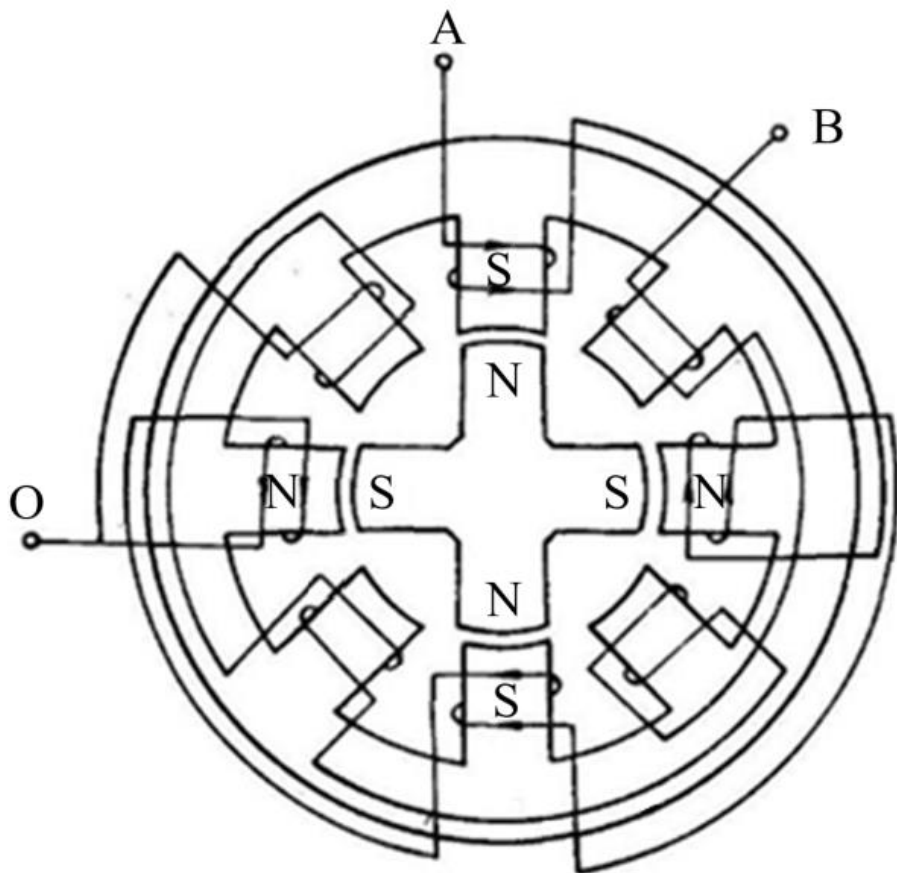
$$\theta_s = \frac{360^\circ}{mZ_r C}$$

- $m$  —— 相数
- $Z_r$  —— 转子齿数
- $C$  —— 工作模式：三拍 $C=1$ ，六拍 $C=2$

- 特点

- 结构简单，成本低；
- 步距角较小，无细分时可做到 $1.5^\circ$ ，定位分辨率较高；
- 最小相数为3；
- 转矩相对较小；
- 阻尼力矩小，容易振荡；
- 停止时的保持转矩小、断电后没有定位转矩。

## ● 永磁式步进电机结构



### ➤ 转子

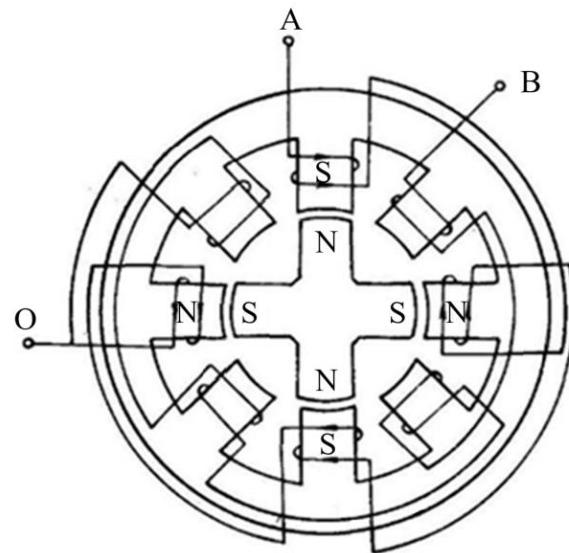
- 永磁材料，沿周向均匀磁化
- 转子极数就是齿数，齿距大

### ➤ 定子

- 采用集中绕组，可采用共极接线
- 软磁材料——硅钢片
- 每组绕组的极数与转子极数相等
- 一对绕组通电时对极磁性相同
- 不同绕组之间极性相反

## ● 运行原理

- “单四拍” :  $A \rightarrow B \rightarrow (-A) \rightarrow (-B) \rightarrow A$  顺时针旋转
- “单四拍” :  $A \rightarrow (-B) \rightarrow (-A) \rightarrow (B) \rightarrow A$  逆时针旋转
- “双四拍”  $AB \rightarrow B(-A) \rightarrow (-A)(-B) \rightarrow (-B)A \rightarrow AB$
- “单-双八拍” :  
 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow B(-A) \rightarrow (-A) \rightarrow (-A)(-B) \rightarrow (-B) \rightarrow (-B)A \rightarrow A$
- 双拍工况绕组不能采用共极接线
- 步距角计算公式:  
$$\theta_s = \frac{360^\circ}{2mp_r C}$$
  - $m$  ——相数
  - $p_r$  ——转子极对数
  - $C$  ——工作模式: 四拍 $C=1$ , 八拍 $C=2$



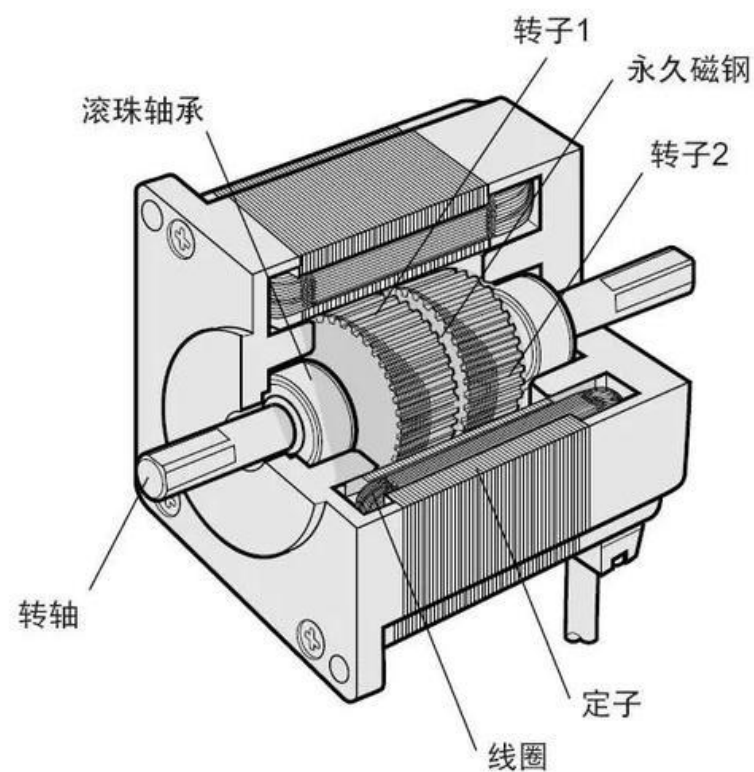
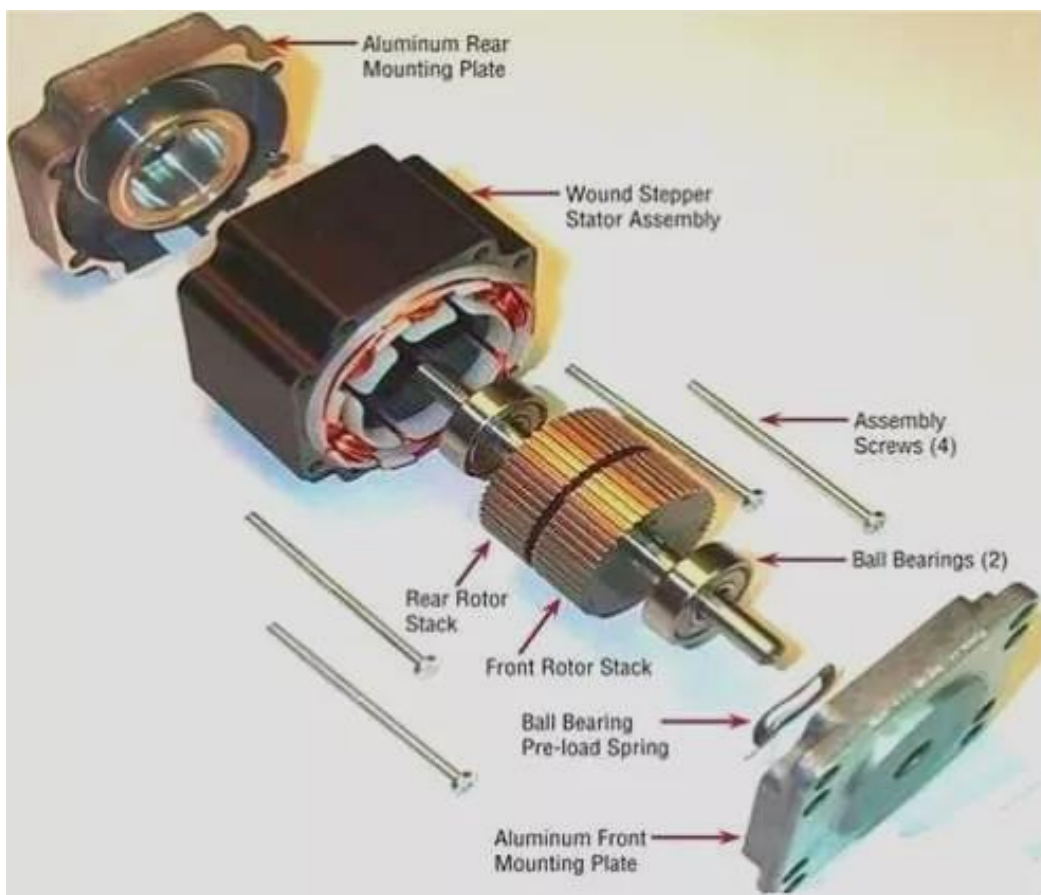
## ● 特点

- 控制功率小，输出转矩大；
- 断电时有一定的定位力矩；
- 转子内阻尼大，启动频率低，低频时不易振荡，运行平稳性好；
- 最小相数为2；
- 步距角大，例如最小步距角为 $7.5^\circ$ ，定位分辨率低；
- 要求在线圈上施加正负脉冲电压，驱动器电路相对复杂。



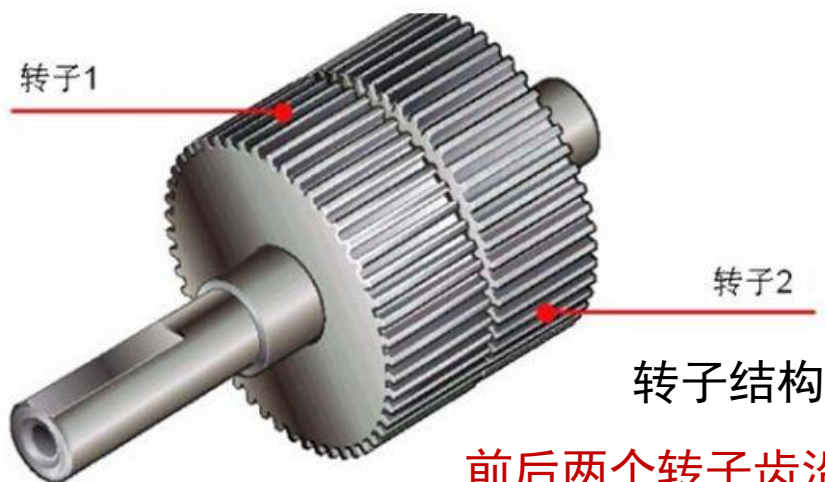
# 步进电机及其驱动器

- 混合式步进电机：综合了前两种步进电机的优点，被广泛应用于数控机床、机器人这类高精度运动控制系统中。



# 步进电机及其驱动器

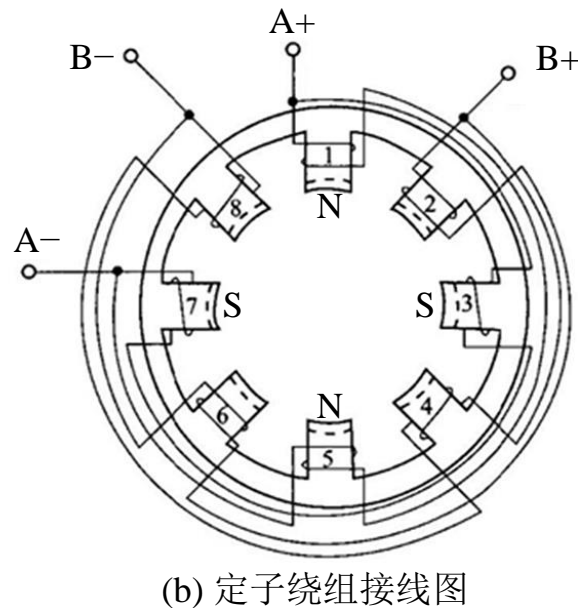
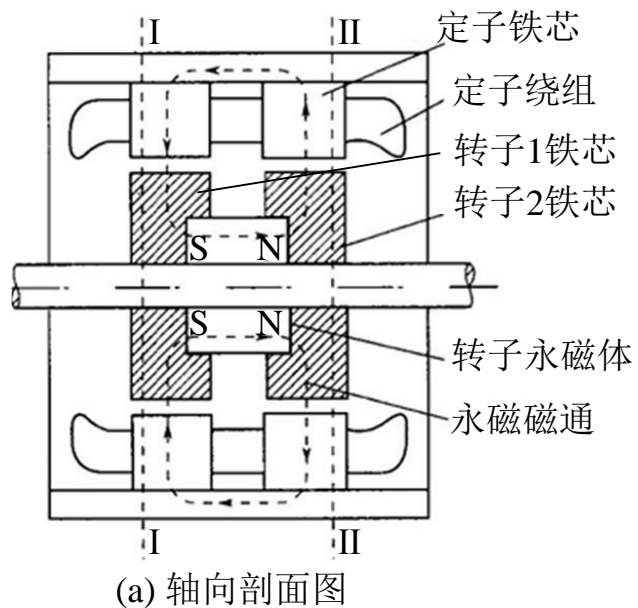
## ● 结构——定子和转子



定子铁心

前后两个转子齿沿圆周错开 $1/2$ 齿距

## ● 结构



### ➤ 转子

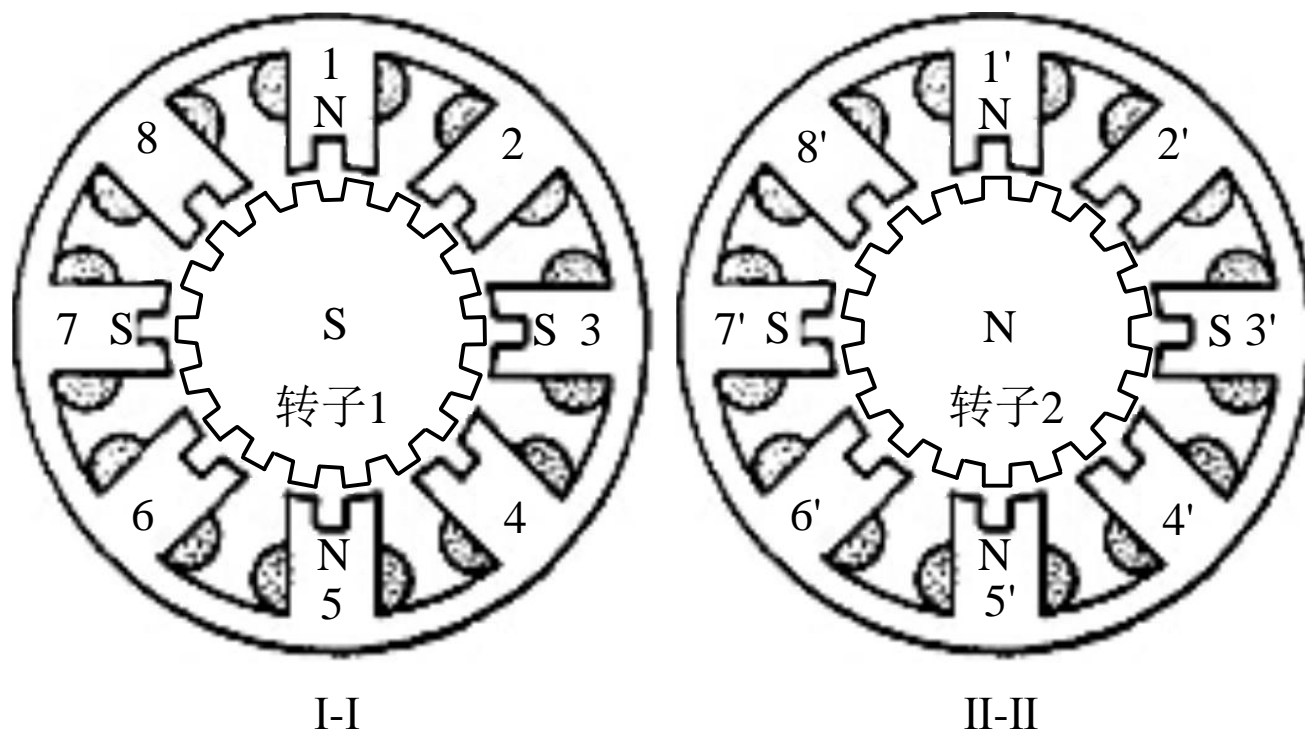
- 软磁材料+永磁体
- 转子分两段，两端磁性相反
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$
- 前后两个转子齿沿圆周错开 $1/2$ 齿距 $\theta_g$

### ➤ 定子

- 软磁材料——硅钢片
- 定子绕组分布与永磁式类似
- 一对绕组通电时，对极磁性相同
- 定子铁芯圆周有小齿，齿距 $\theta_g$
- 当转子齿与A相定子齿对齐时，与B相齿错开 $1/4$ 齿距 $\theta_g$

## ● 工作原理——“单四拍”

- 转子1的S极齿和转子2的N极齿分别与定子1-5和3'-7'极的齿对正，获得最小磁阻；而3-7和1'-5'极齿与转子的槽对正，获得最大磁阻
- 转子齿与B相定子齿错开1/4齿距

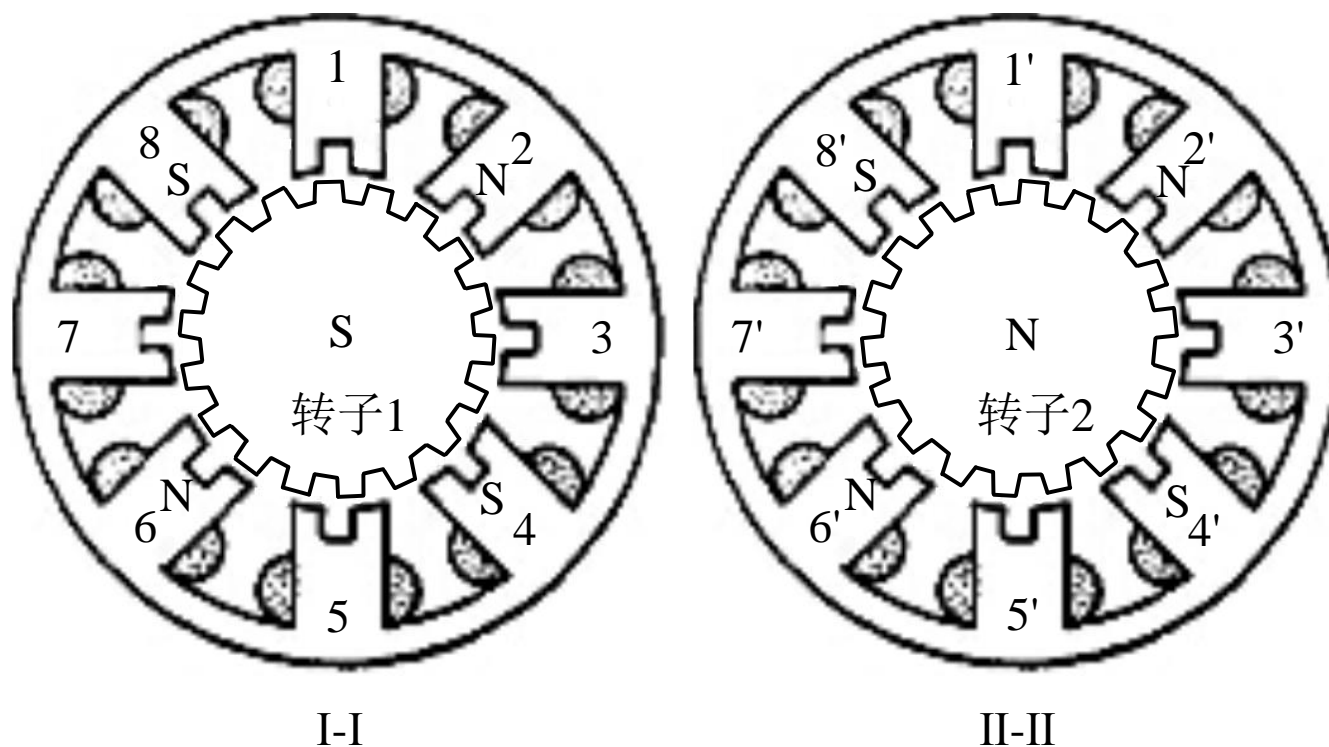


(a) A相通正电压



- 运行原理——“单四拍”  $A \rightarrow B \rightarrow (-A) \rightarrow (-B) \rightarrow A$

- 定子B相通正电压，转子从顺时针旋转1/4齿距
- 两相电机的步距角： $\theta_s = \theta_g / 4$



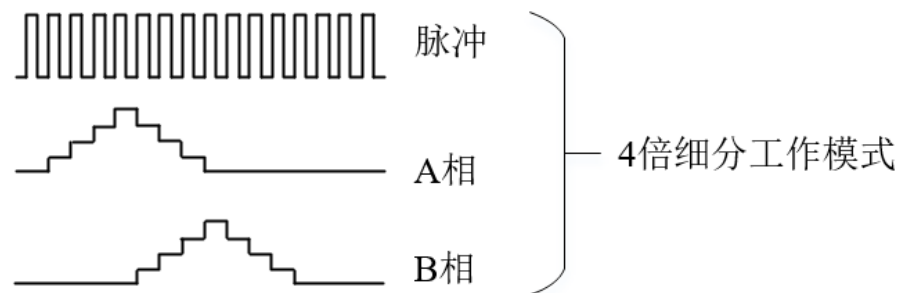
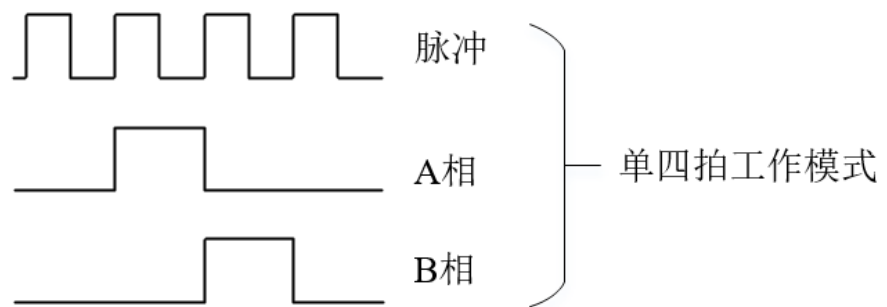
(b) B相通正电压

# 步进电机及驱动器

## ● 运行原理

- “单四拍”：A→B→(-A)→(-B)→A 步距角： $\theta_s = \theta_g / 4$
- “双四拍” AB→B(-A)→(-A)(-B)→(-B)A→AB 步距角： $\theta_s = \theta_g / 4$
- “单-双八拍” A→AB→B→B(-A)→(-A)→(-A)(-B)→(-B)→(-B)A→A 步距角： $\theta_s = \theta_g / 8$

### ➤ 细分



### ➤ 步距角计算公式：

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{2mZ_r C}$$

- $m$  —— 相数
- $Z_r$  —— 转子齿数
- $C$  —— 细分倍数
- 两相电机4拍是基本工况， $C=1$ ，8拍相当于2倍细分， $C=2$

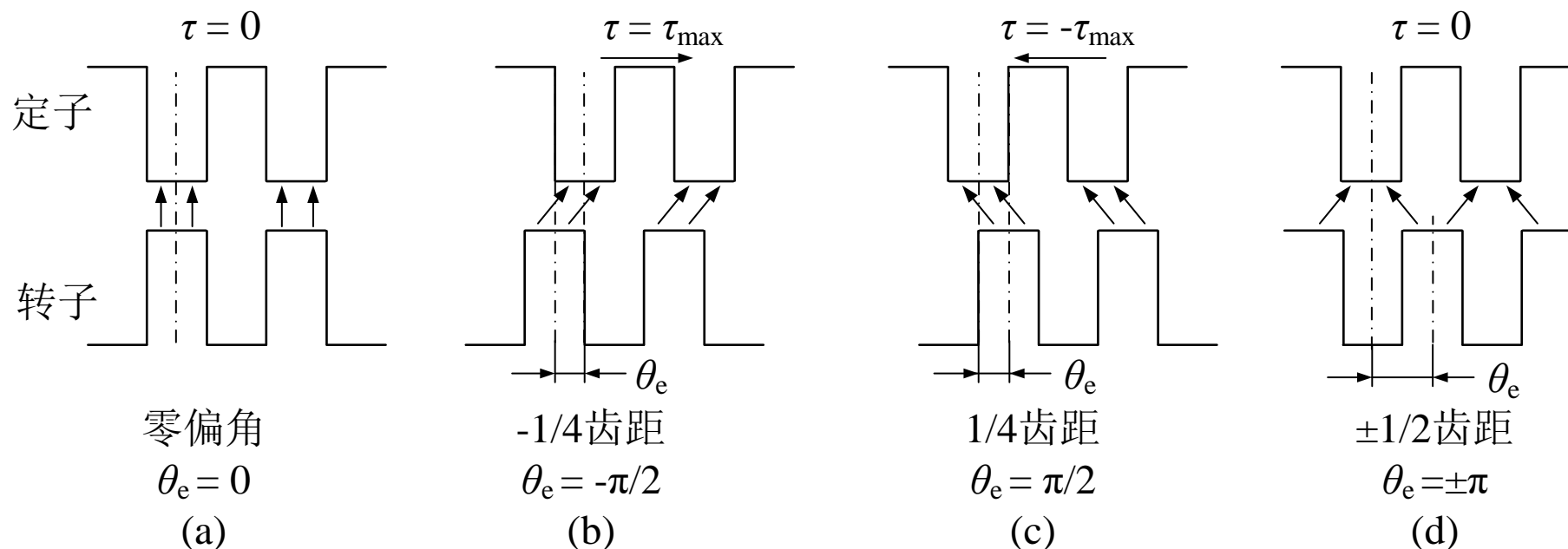
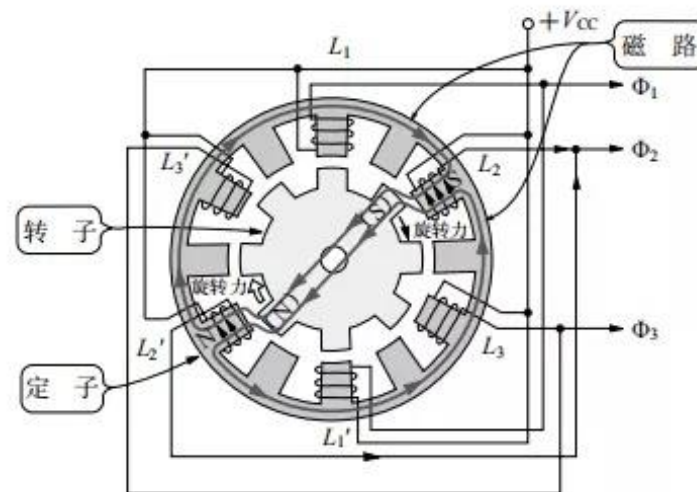


## ● 特点

- 功耗小，输出转矩大；
- 断电时有一定的定位力矩；
- 转子内阻尼大，启动频率低，低频时不易振荡，运行稳定性好；
- 最小相数为2，也有3相和5相型；
- 步距角小，无细分最小步距角小于 $1^\circ$ ，细分步距角可达 $0.02^\circ$ ，定位分辨率高；
- 结构复杂，成本高；
- 需要在线圈上施加正负电压，驱动器复杂。

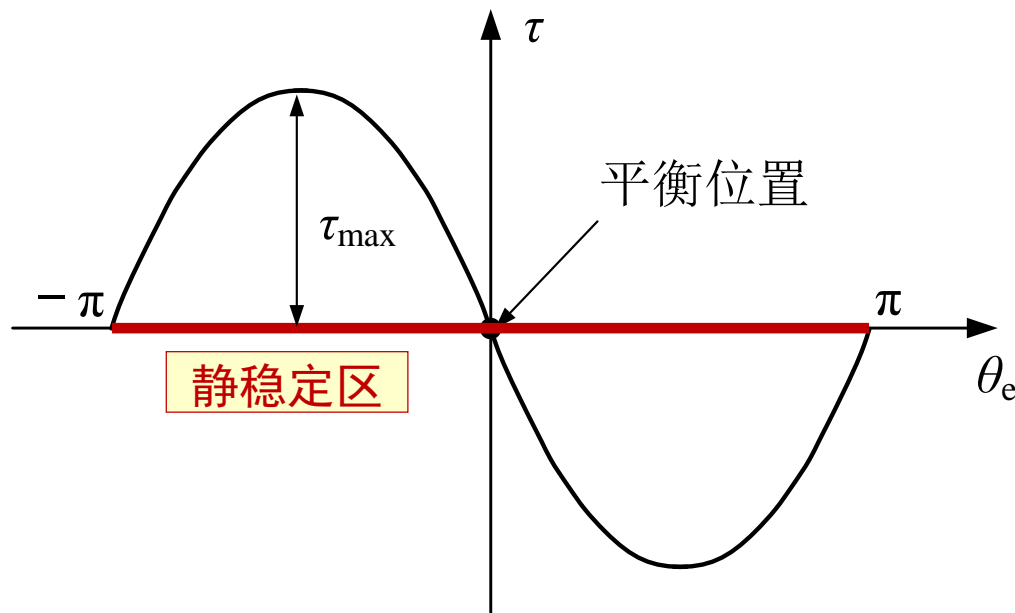
## ● 通电保持状态

- 平衡位置：负载为零时，转子停止在电子磁极对应的角度上。
- 失调角 $\theta_e$ ：转子偏离初始平衡位置的电角度
- 失调角最大值： $2\pi$ ，机械上对应着转子齿距



## ● 通电保持状态

- **静转矩 $\tau$** : 通电保持状态下, 转子偏离平衡位置所受**磁阻转矩**
- **最大静转矩 $\tau_{\max}$** : 也称**最大保持力矩**, 静止时能克服的最大负载力矩
- **静稳定区**: 每相绕组矩角特性曲线对应的 $2\pi$ 电角度范围

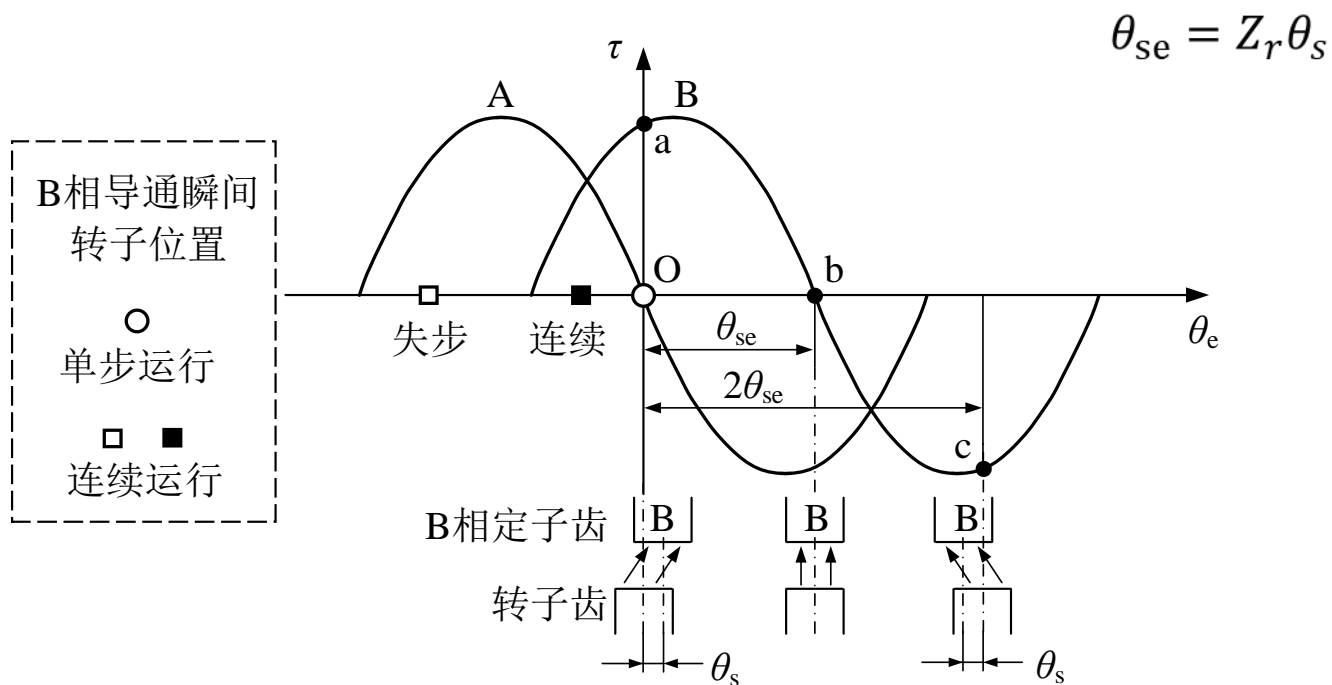


$$\tau = -K_i i^2 \sin \theta_e = -\tau_{\max} \sin \theta_e$$

- $K_i$ : 电机转矩常数
- $i$ : 绕组电流

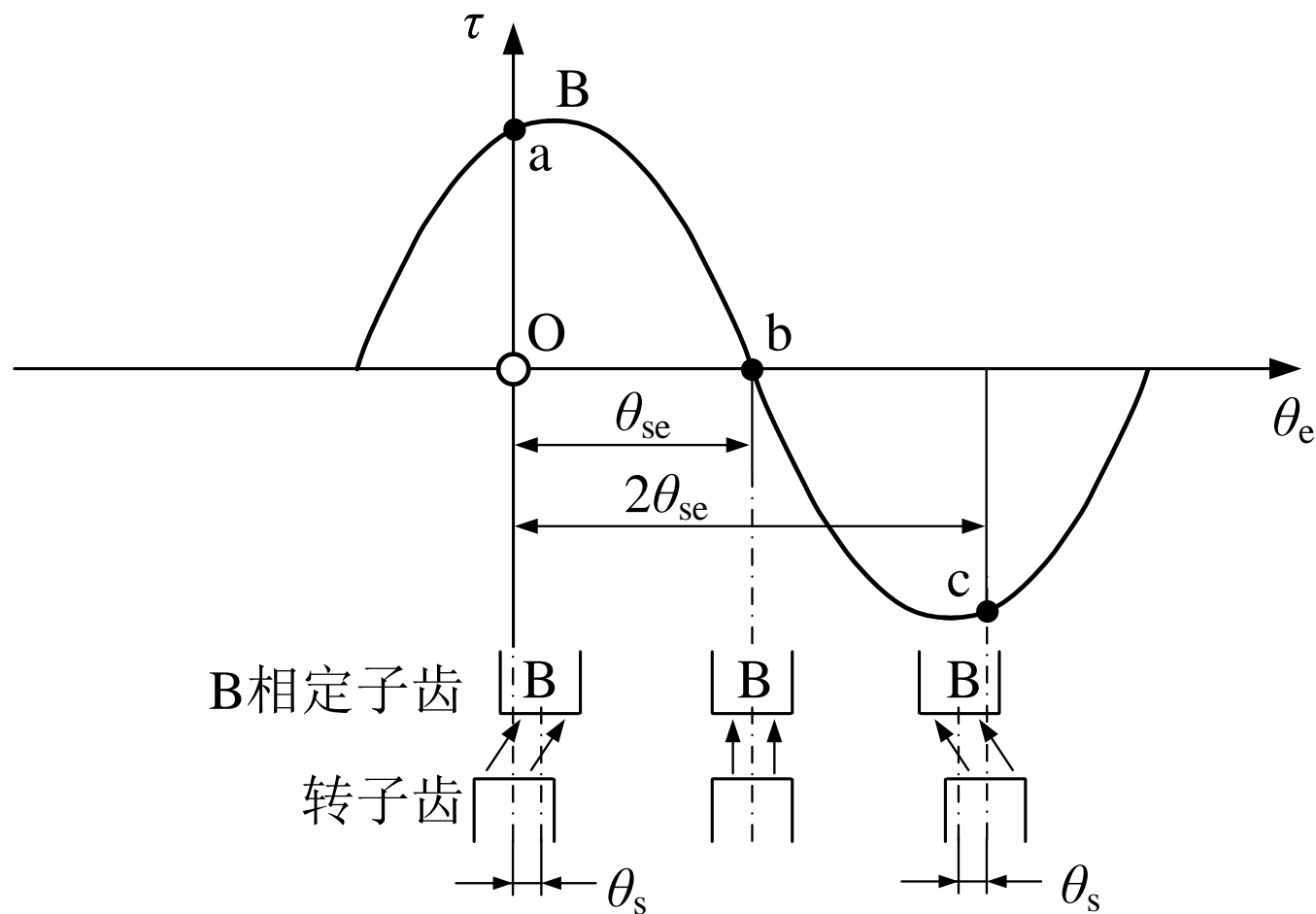
## ● 单步运行状态

- A相通电，保持在平衡位置
- 通电状态切换A→B，B相通电
- 转子位置在a点，位于B相静稳定区
- B相对于A沿横轴移动了一个电步距角 $\theta_{se}$



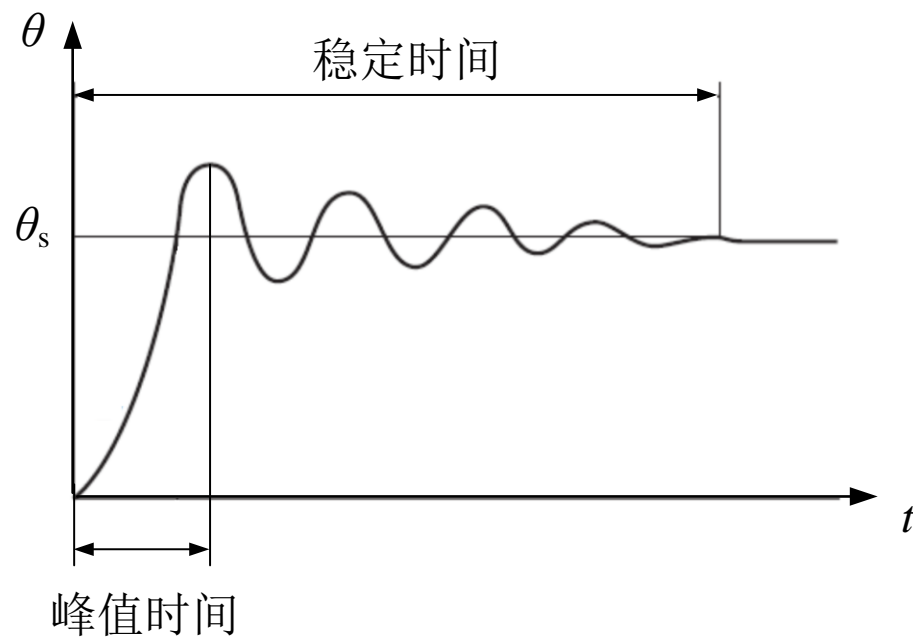
## ● 单步运行状态

- 如果没有阻尼，转子将在a、c两点间振荡



- 单步运行状态

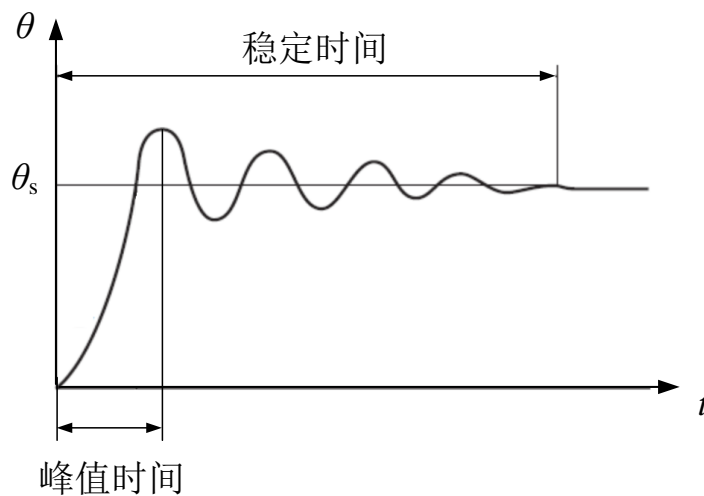
- 真实系统阻尼作用下，电机经过一定时间后停止运动





## ● 连续运行状态 ——低频振荡

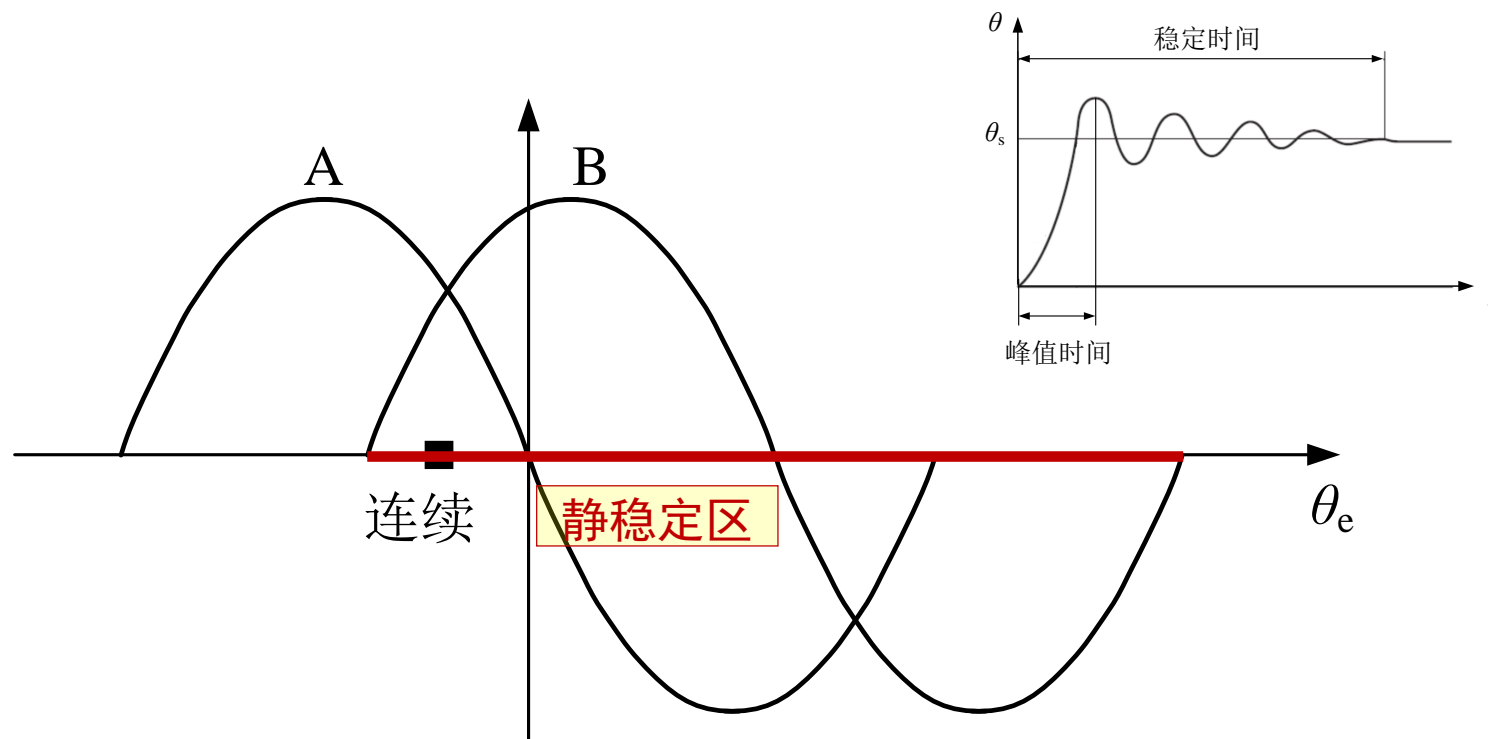
- 脉冲频率很低，使得一拍的持续时间大于稳定时间，转子表现为有明显**停顿**的步进运动，并有**振荡现象**
- 脉冲频率升高，脉冲间隔时间大于峰值时间，转子停顿时间减小，仍有**振荡**，出现**低速步进噪声**
- 如果脉冲频率与转子自振频率接近，将发生低频共振，无法运动——**低频失步**



# 步进电机及驱动器

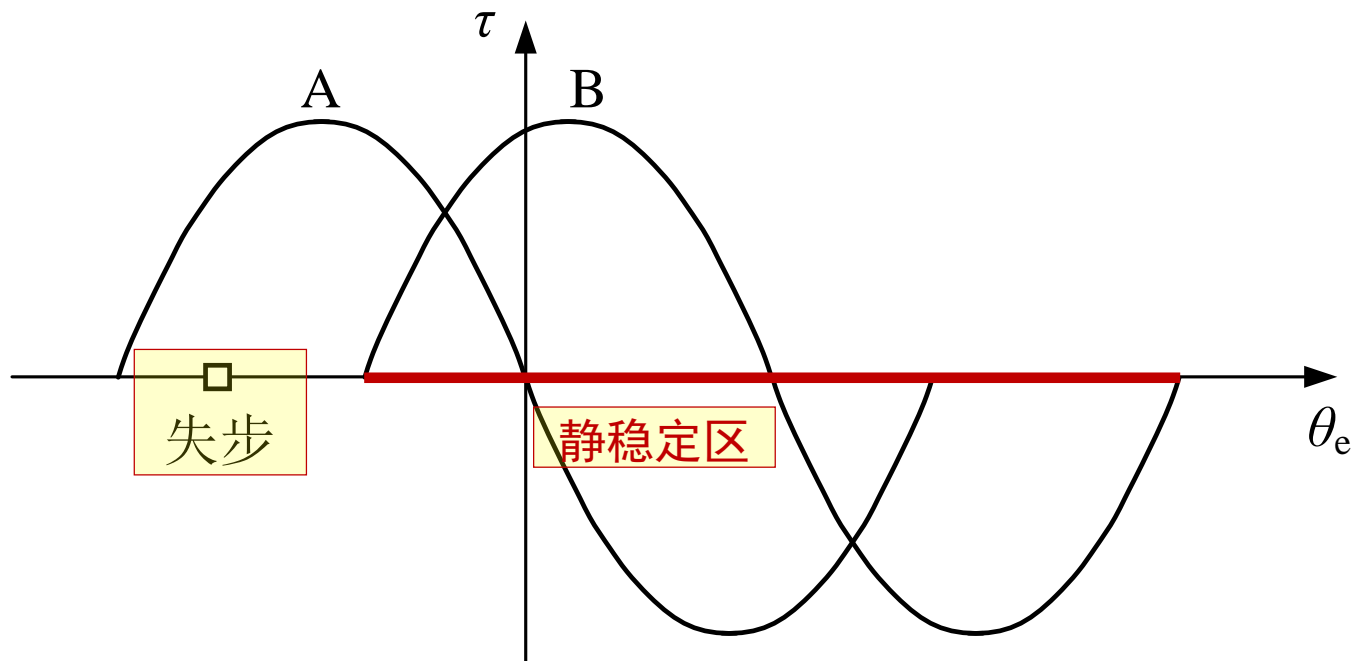
## ● 连续运行状态 —— 平稳运行

- 脉冲频率升高，脉冲间隔时间小于“峰值时间”
- 通电状态切换时，转子进入“连续”位置，电机将无振动连续平稳运行
- 最低连续运行频率——步进电机无振荡连续运转的最低频率，



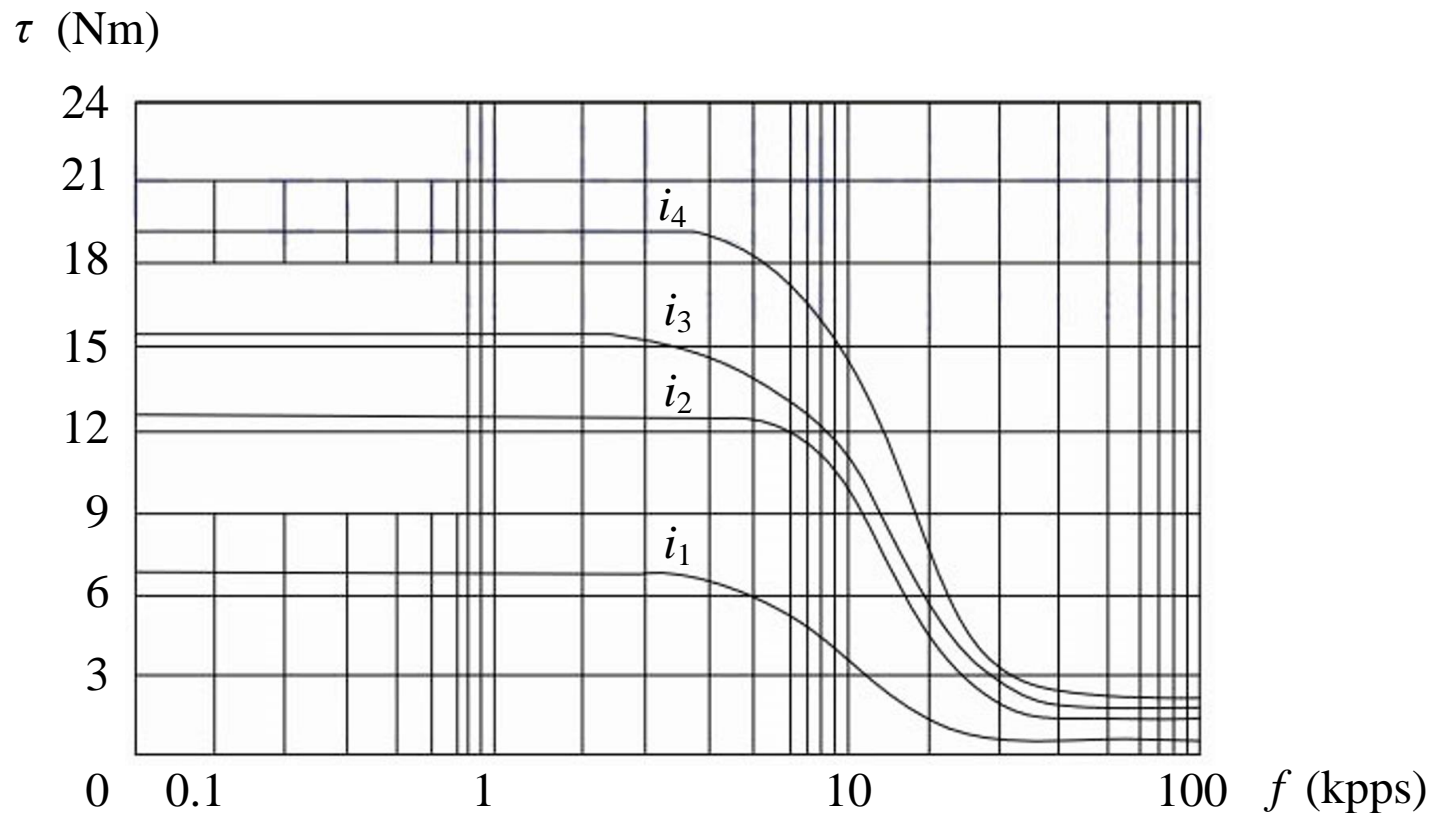
## ● 连续运行状态 —— 高频失步

- 脉冲频率非常高时，B相绕组通电时，转子还没有进入B绕组对应的矩角曲线静稳定区
- 电机出现失步——高频失步
- 最高启动频率——保证转子进入下一个绕组的静稳定区的最大启动频率



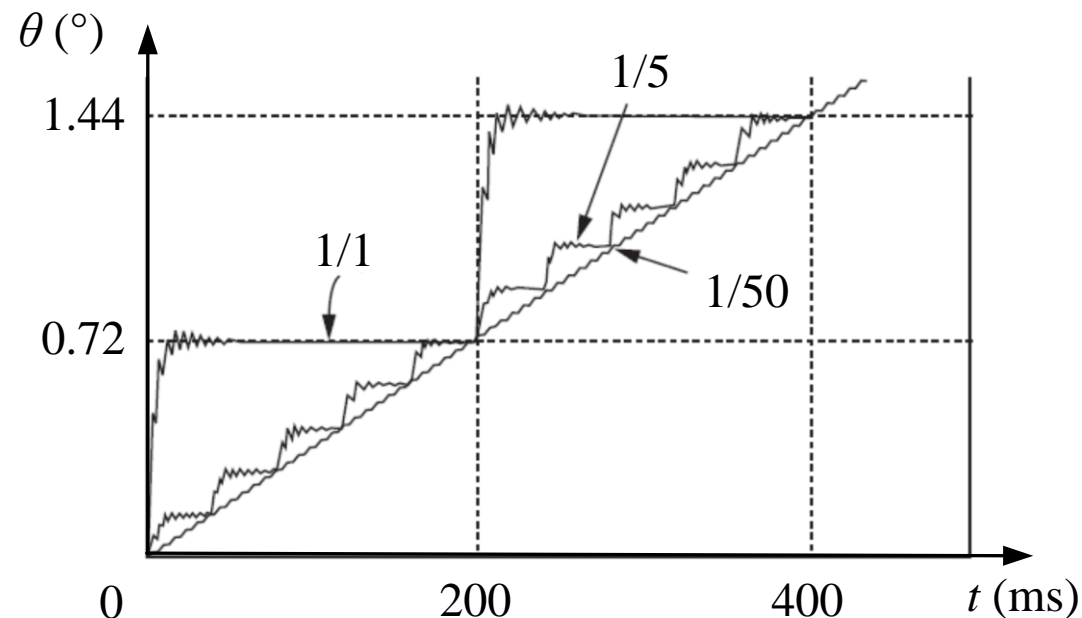
## ● 矩频特性

不同相电  
流  $i$  对应的  
矩频特  
性



- 速度越高，力矩越小
- 高频力矩不能克服负载力矩，也会失步
- 选型时，需要校核指定运行速度下的负载力矩

## ● 细分运行



- 不仅可提升位置分辨率，还能有效减小步进电机低速运行时的振荡
- 低速时脉冲频率高——提高低速运行性能
- 连续工作状态下，转速计算公式

$$n = \frac{60 f \theta_s}{360^\circ} \quad \text{或} \quad n = \frac{60 f}{N Z_r}$$

## ● 主要性能指标

- **最大静转矩 $\tau_{\max}$** ——静止状态下，当某相绕组通额定电流时，可以抵抗的最大负载力矩
- **步距角 $\theta_s$** ——一个控制脉冲作用下转过的角位移
- **静态步距角误差 $\Delta\theta_s$** ——实际步距角与理论步距角之间的差值
- **启动频率 $f_{st}$** ——不失步启动的最高脉冲频率，包括空载启动频率和带载启动频率
- **最高运行频率 $f_{ru}$ 和矩频特性**——保持不失步连续运行的最高频率，特定负载下的最高运行频率，可由步进电机的**矩频特性曲线**确定

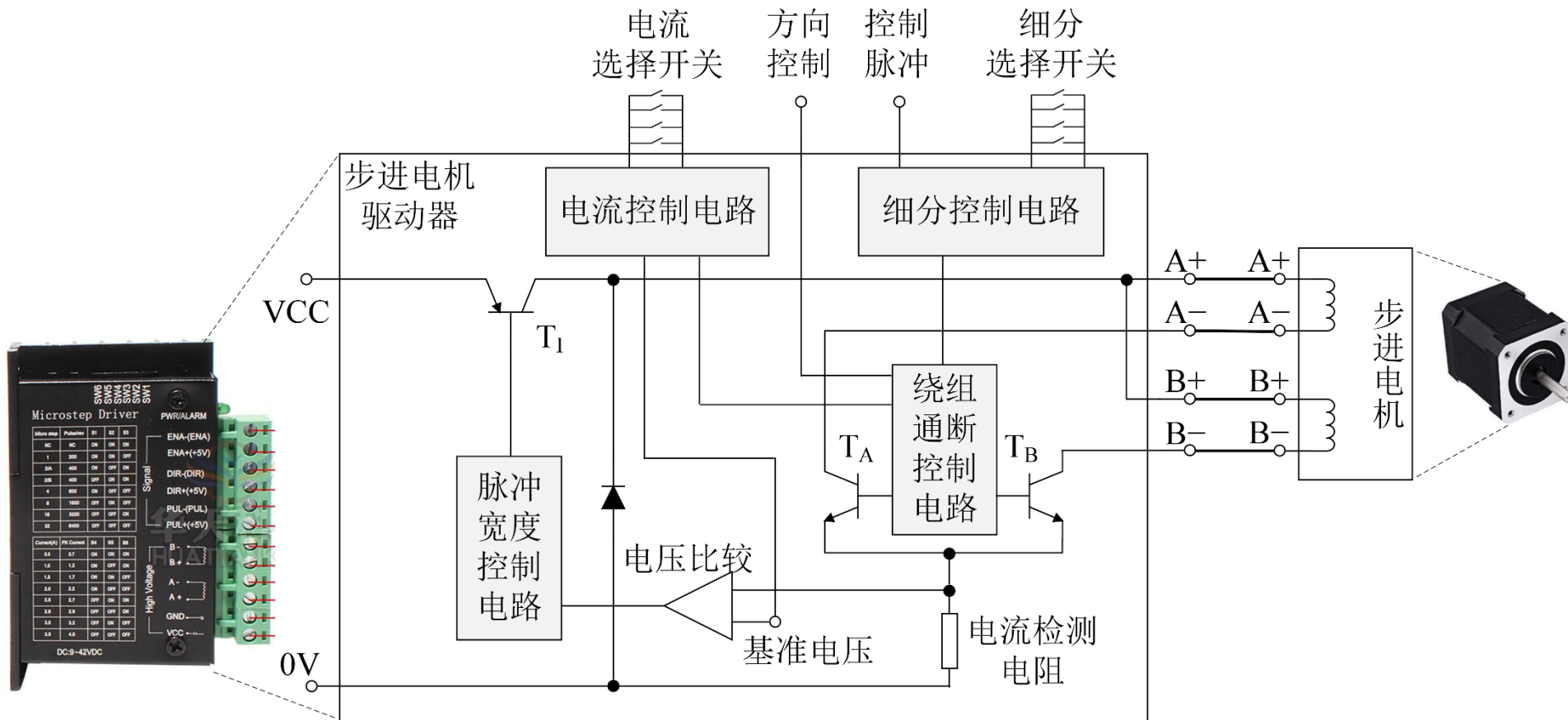


- 步进电机驱动器的功能：

- 绕组通断控制
- 功率放大
- 脉冲细分
- 通电保持等

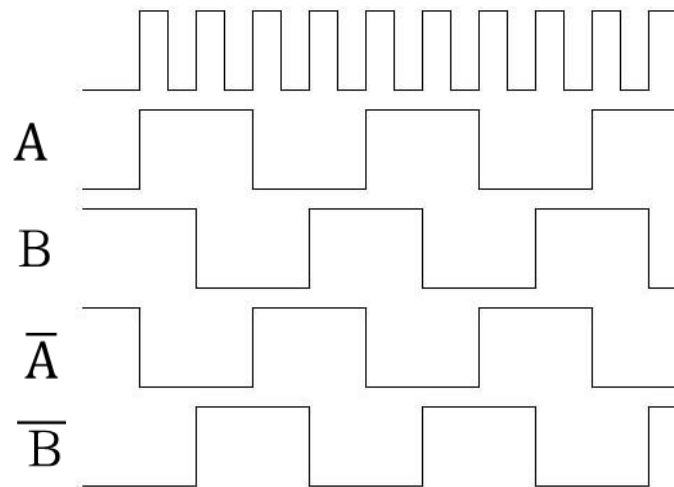
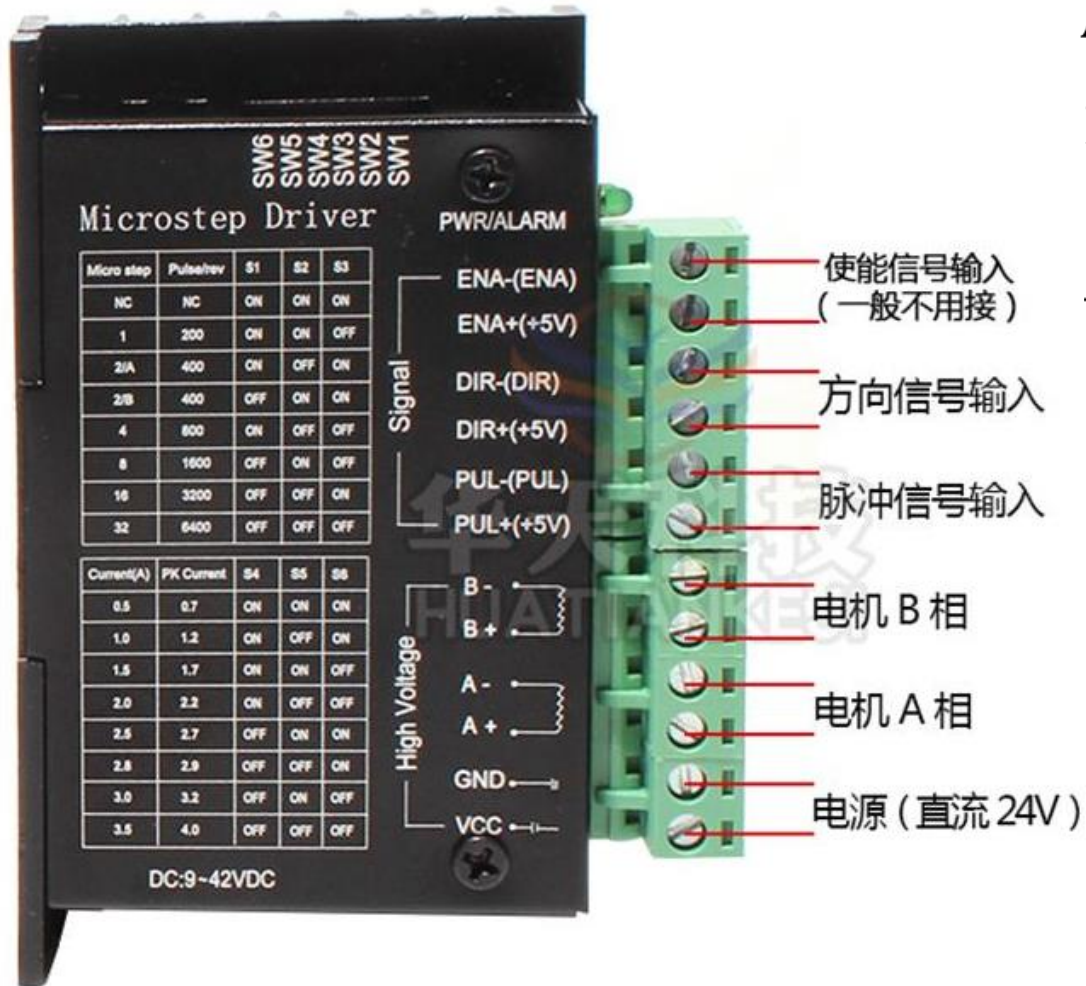
# 步进电机及驱动器

- 恒流型步进电机驱动器原理：能够输出稳定的电枢电流，可以有效提高步进电机在高速运行时的转矩。应用于高端步进电机驱动器。



# 步进电机及驱动器

## ● 引脚及输出波形

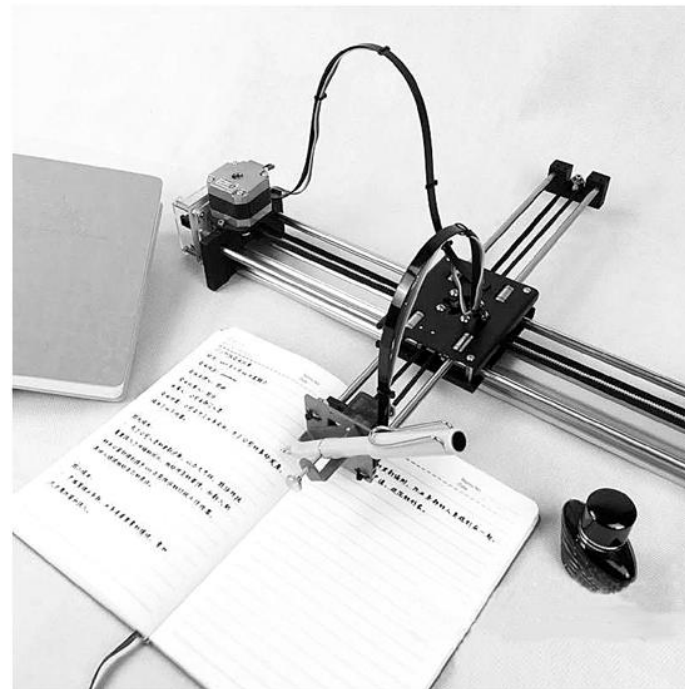


- 差分输入和输出，提高抗干扰能力
- 利用拨码开关调节选定实际步距角
- 根据负载情况，利用拨码开关调节相电流

# 步进电机及驱动器

## ● 适用场合

- 低成本机器人，例如：教学型机器人、各种家用娱乐机器人
- 对位置精度要求一般，例如：旋转精度大于 $1^\circ$
- 负载稳定，例如：X/Y直角坐标绘图仪、3D打印机
- 对加速度要求不高的场合



## ● 步进电机的开环控制

➤ **开环控制方式**——无需反馈元件，仅依靠步进电机自身的定位精度实现控制

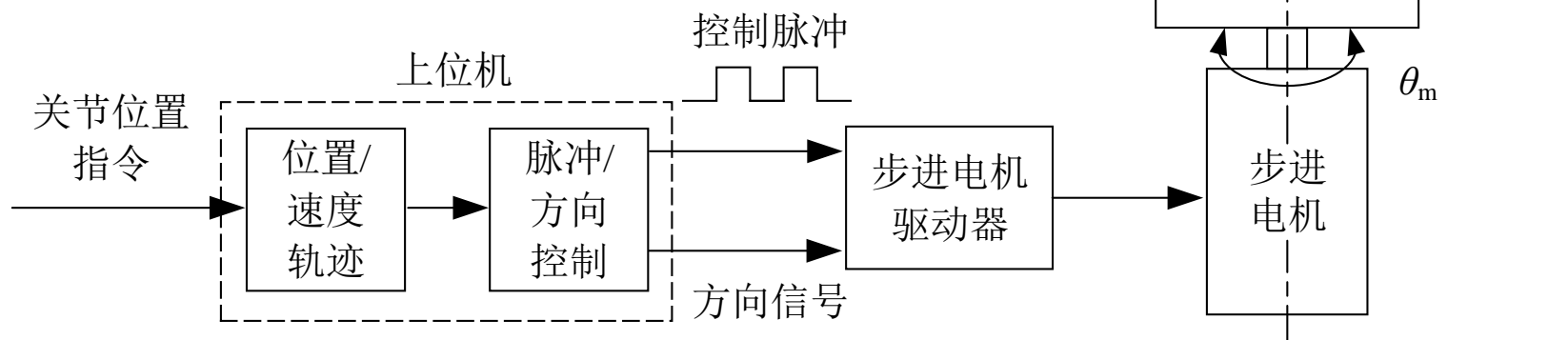
➤ 定位精度取决于

- 步进电机步进精度
- 步距角
- 传动精度

$$\theta_m = N\theta$$

N为减速器传动比。无减速器时，N=1

步进电机转过的角度与脉冲数成正比，运行速度与脉冲频率成正比

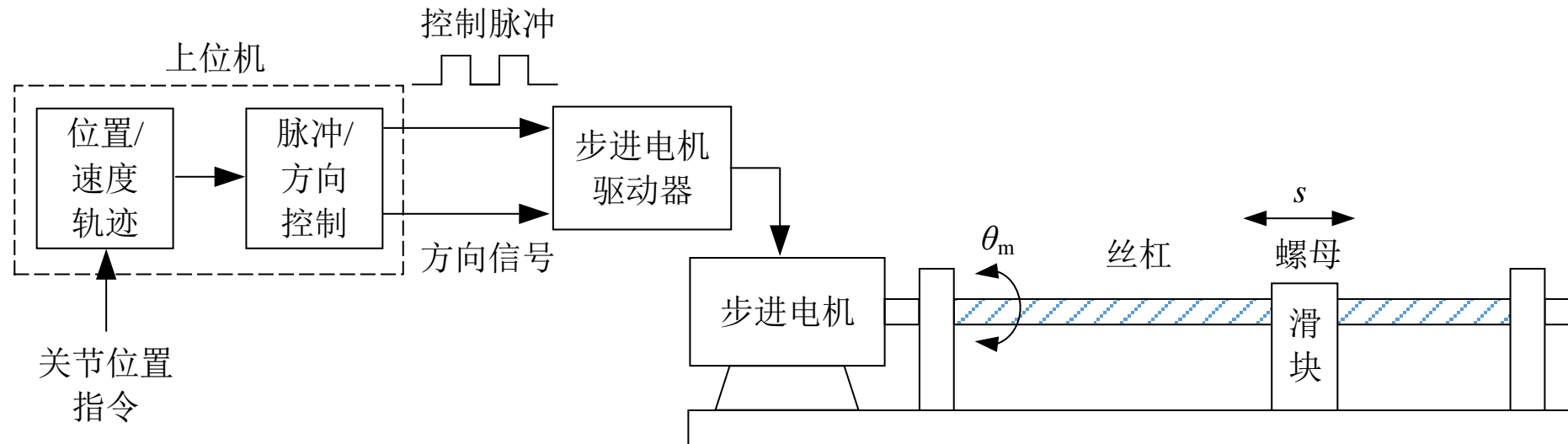


## ● 步进电机的开环控制

### ➤ 步进电机角位移与滑块线位移的传动模型

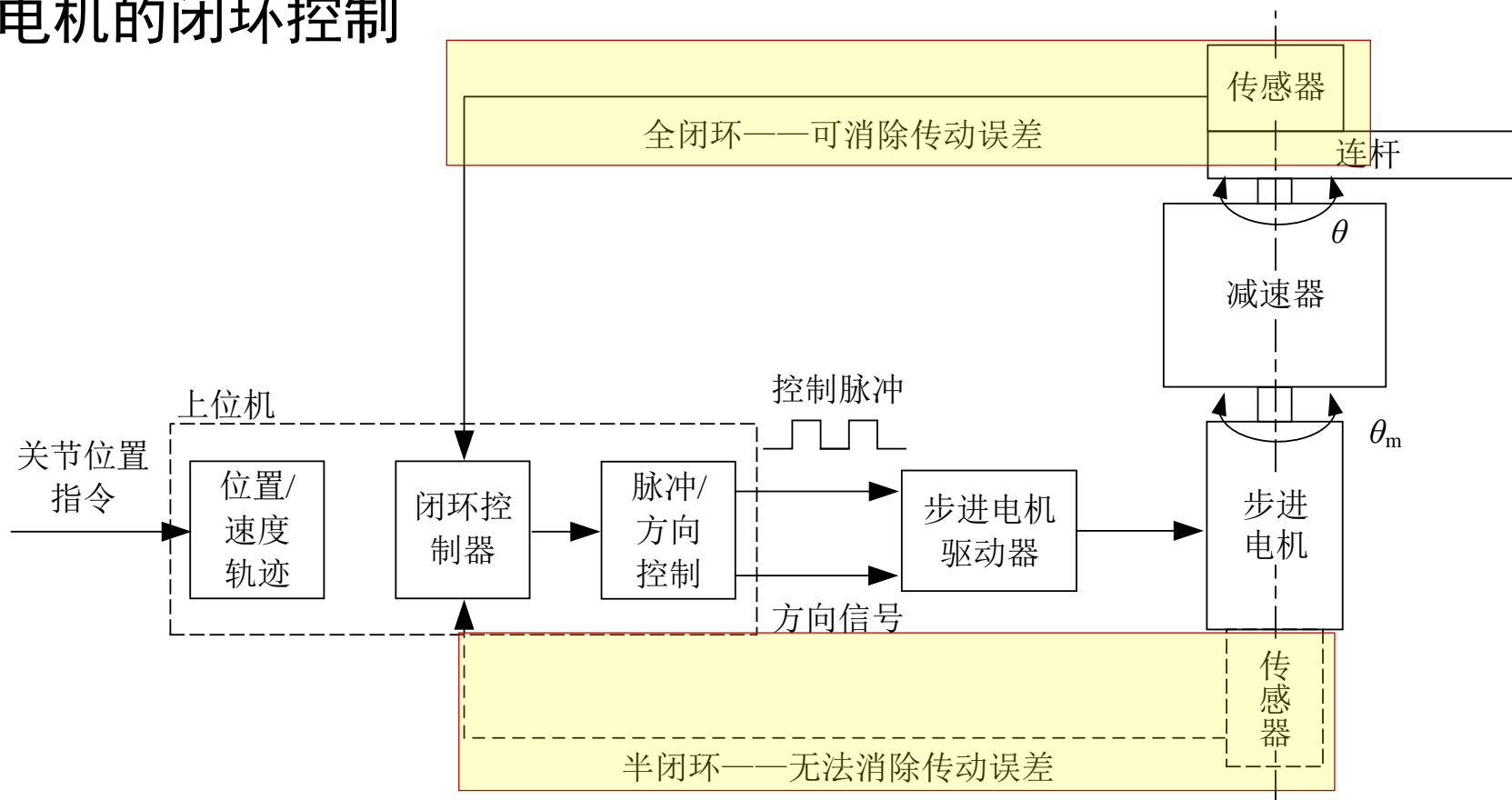
$$\theta_m = \frac{2\pi s}{p}$$

- $s$  —— 滑块线位移
- $p$  —— 丝杠导程
- $\theta_m$  —— 步进电机角位移



# 步进电机及驱动器

## ● 步进电机的闭环控制

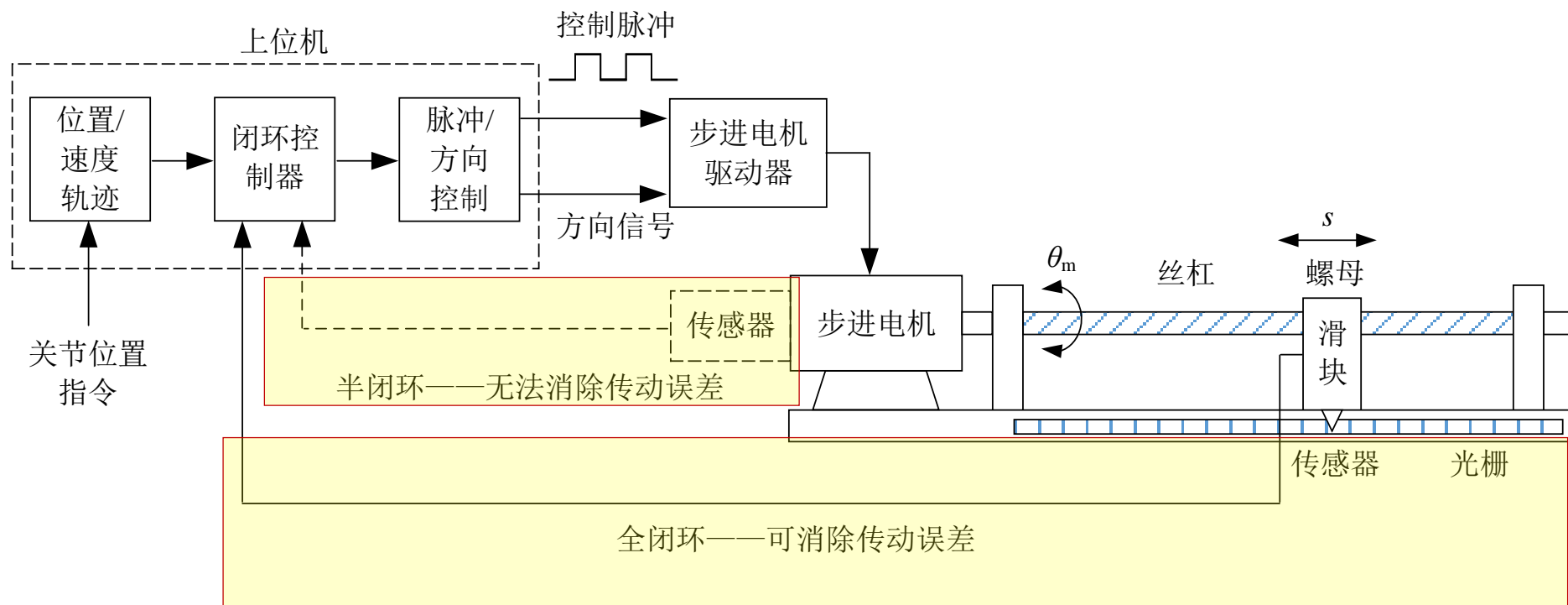


- 上位机闭环控制器仅负责纠正位置偏差
- 半闭环——测量电机转角，仅能补偿失步误差
- 全闭环——测量关节转角，能补偿传动误差和失步误差



# 步进电机及驱动器

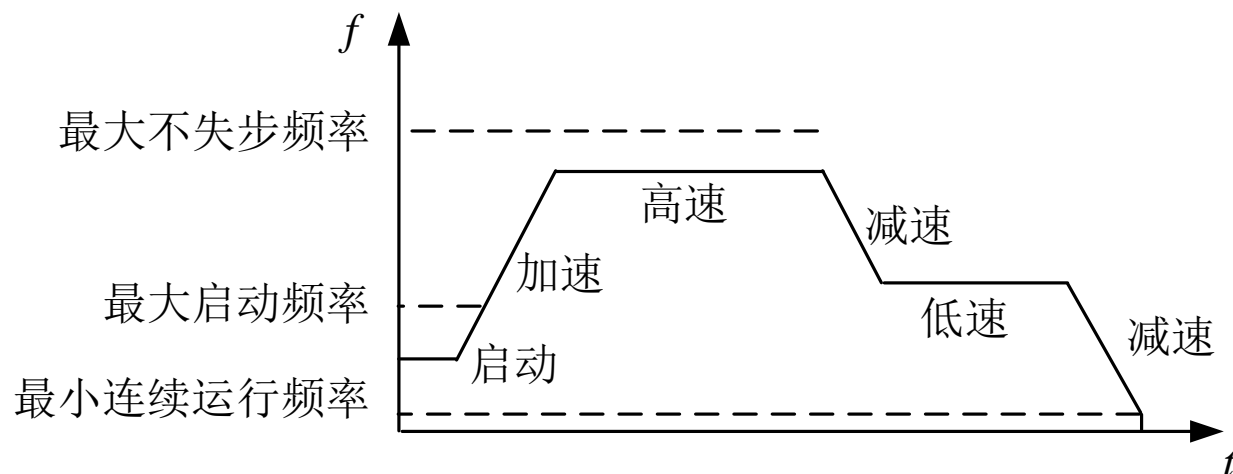
## ● 直线关节——闭环位置控制



- 仅利用驱动电机转角反馈信号构成的闭环系统，称为**半闭环**位置伺服系统
- 在关节上安装位置传感器，根据关节位移信号构成**全闭环**位置伺服系统

## ● 加减速控制

- 启动频率应大于最小连续运行频率，避免低速振动
- 启动频率应小于最大启动频率，避免失步
- 连续运行的最高速度不能超出最大不失步频率
- 需要设计加减速规律，避免失步
- 到达目标位置前减速，确保频率低于最小连续运行频率前到达指定位置
- 注意查看矩频特性曲线，避免高频失步



根据系统负载惯量、位移距离、运行时间、传动模型和步进电机性能指标，为控制器设计脉冲频率规划程序。

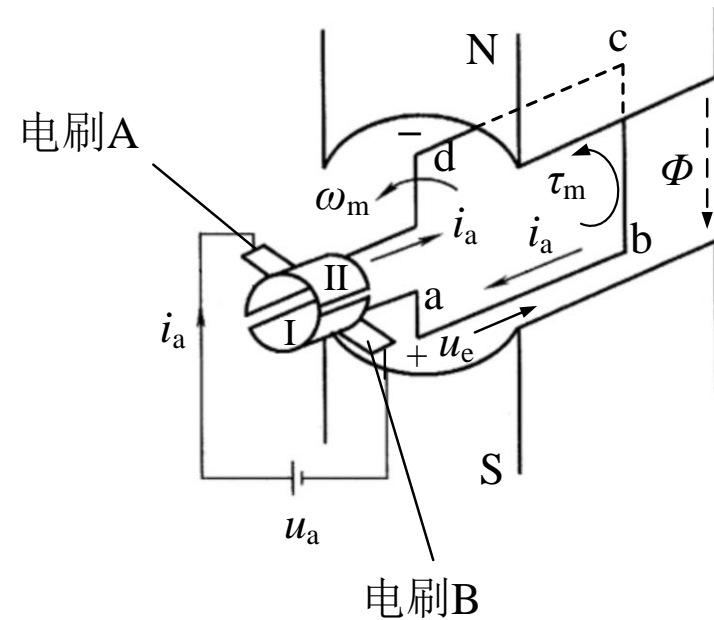
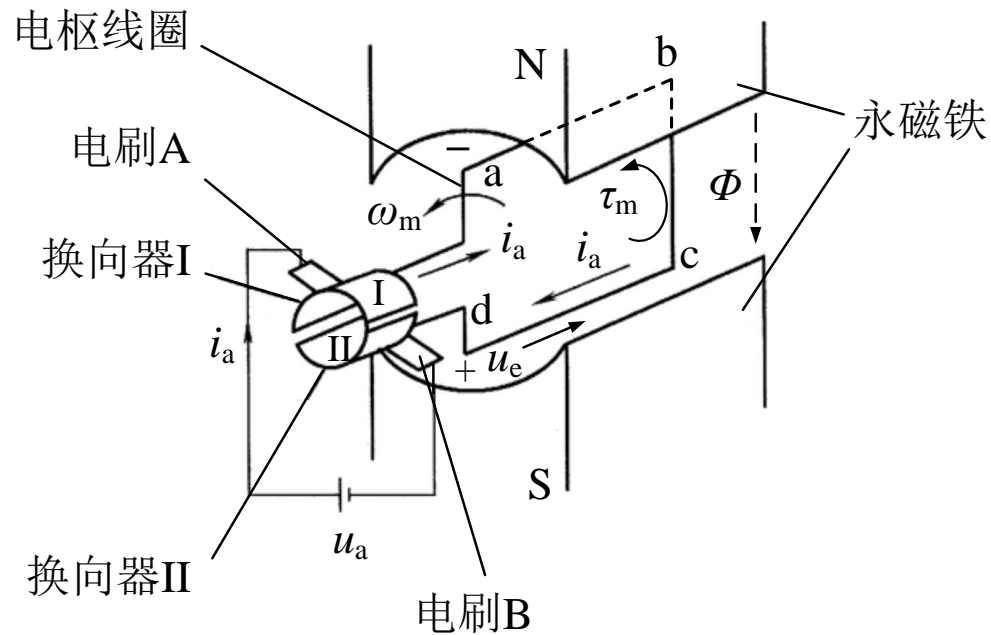
## ● 步进电机的局限性

- 力矩可控性不好，快速启停或负载力矩大幅度变化时，容易出现失步
- 仅限于关节负载稳定、速度变化小的机器人
- 运动精度取决于步距角，多数步进精度为 $1.8^\circ$ ，不适用于更高精度场合。



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

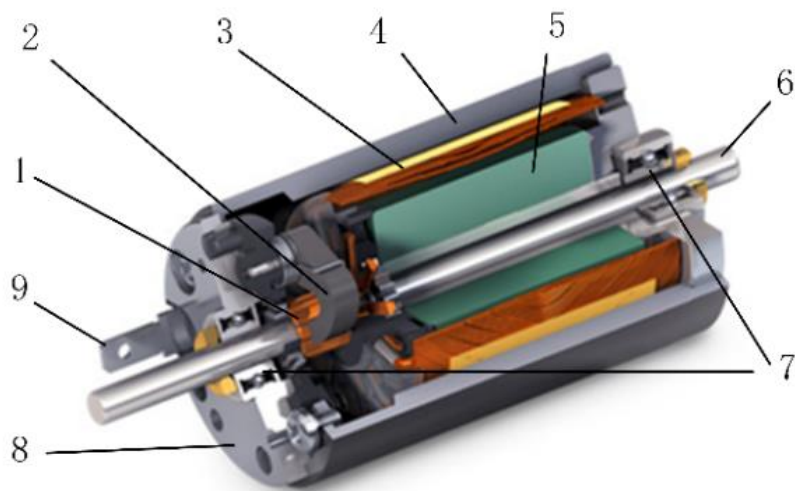
- 有刷直流永磁伺服电机：结构简单、调速特性好、容易驱动，便于实现速度和力矩控制，易于建模。
- 基本原理：直流供电，利用电刷和换向器实现线圈电流换向的电机。



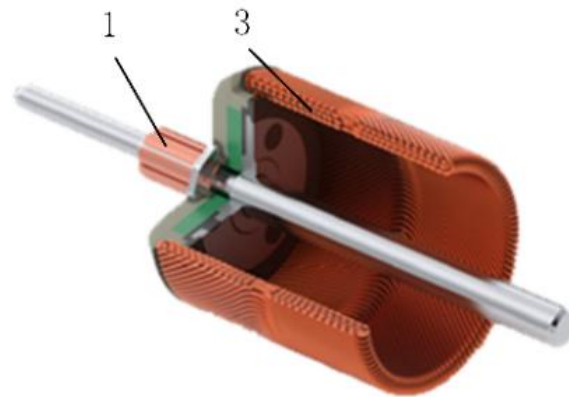
# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 电机结构

- 空心杯转子：转子惯量小、响应速度快、力矩-质量比大，多用于对控制性能要求高的场合
- 原理：转子线圈通电，定子永磁励磁，电刷和换向器实现线圈电流换向



空心杯有刷直流电机剖视图

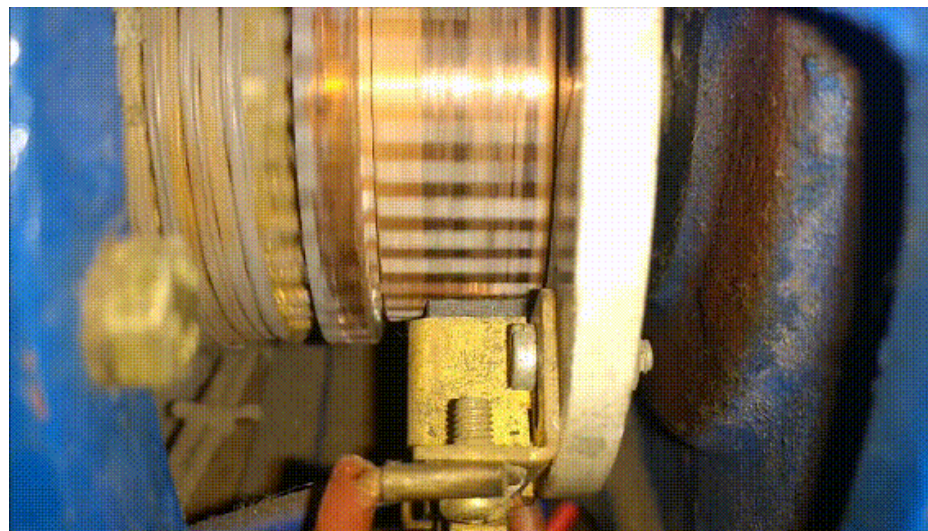
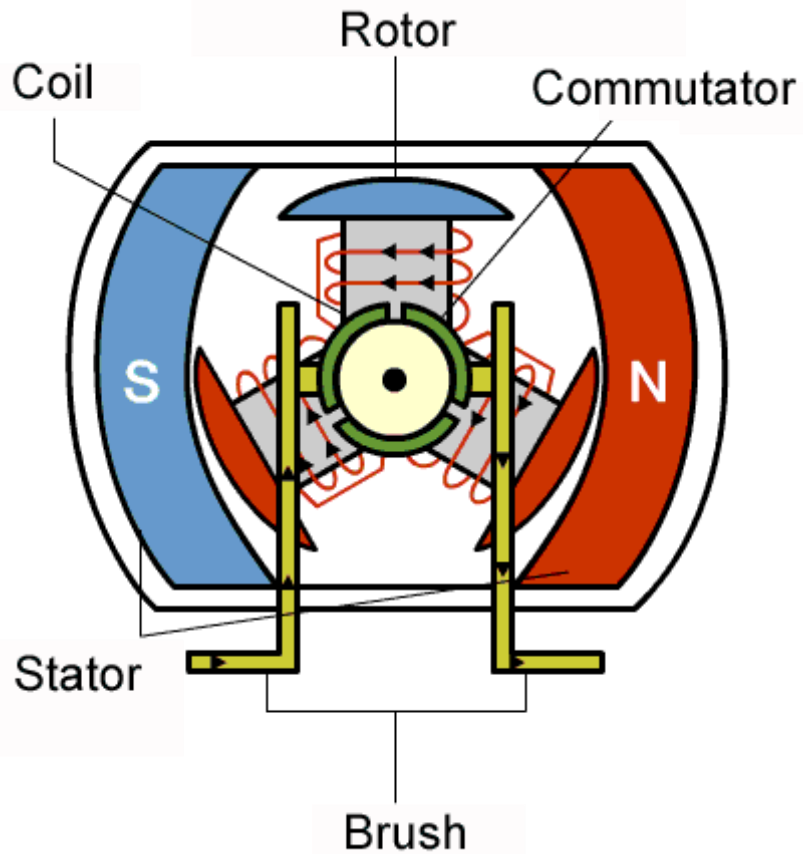


空心杯转子

1. 换向器 2. 电刷 3. 空心杯电枢 4. 外定子 5. 内定子  
6. 转轴 7. 轴承 8. 端盖 9. 接头

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 换向器和电刷



- 机械换向，控制电路简单
- 电刷易磨损，需保养

## ● 空心杯转子电机



(a) 空心杯转子



(b) 铁芯转子

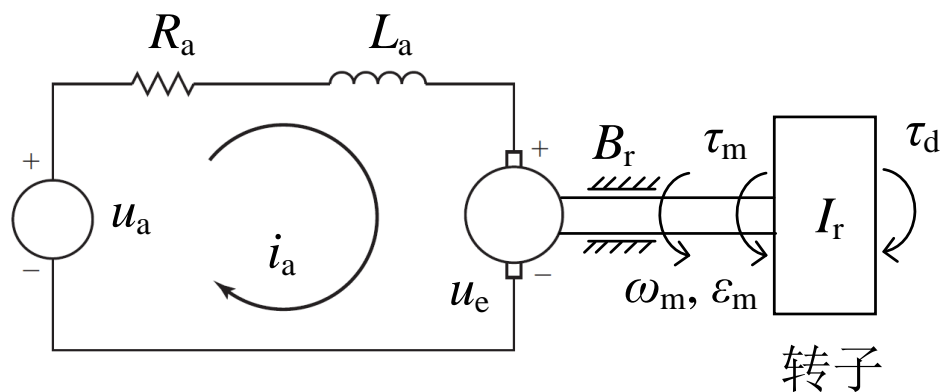
### ➤ 优点

- 极低的惯量：转子无铁芯，且绕组为薄壁细长结构；
- 灵敏度高：空心杯转子绕组的散热条件好，定子永磁铁体积大，气隙磁通密度大，所以力矩大。大力矩小惯量，导致时间常数很小、灵敏度高、快速性好；
- 力矩波动小，低速转动平稳，噪声很小：绕组分布均匀，不存在齿槽效应；
- 换向性能好，寿命长，电磁辐射小：无铁芯，换向元件电感很小，几乎不产生火花
- 损耗小，效率高：转子中没有磁滞和涡流造成的铁芯损耗。



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 直流伺服电机模型



### 特征参数

$R_a$ : 电枢电阻

$L_e$ : 电枢电感

$I_r$ : 转子惯量

$B_r$ : 转子阻尼

$K_e$ : 感应电动势常数

$K_a$ : 转矩常数

### 电学变量

$u_a$ : 电枢电压

$u_e$ : 感应电动势

$i_a$ : 电枢电流

### 力学变量

$\omega_m$ : 角速度

$\epsilon_m$ : 角加速度

$\tau_m$ : 电磁转矩

$\tau_d$ : 负载转矩

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 静态特性——电机转子处于受力平衡状态时的运行特性

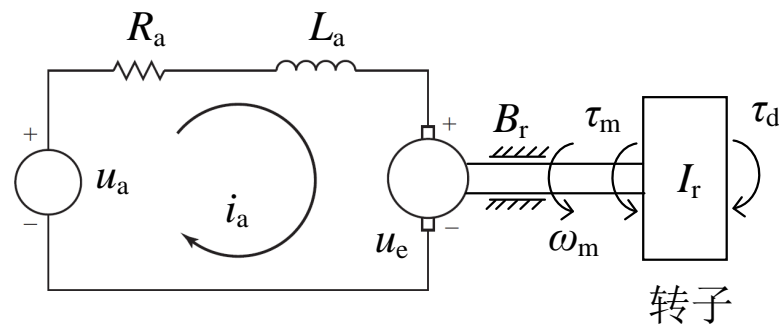
### ➤ 静态模型

电学模型:  $u_a = R_a i_a + u_e$

力学模型:  $\tau_m = B_r \omega_m + \tau_d$

电磁转矩:  $\tau_m = K_a i_a$

感应电动势:  $u_e = K_e \omega_m$



### 转速模型

$$\omega_m = \frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r} u_a - \frac{R_a}{K_e K_a + R_a B_r} \tau_d$$

简化



$$\omega_m = \omega_0 - k \tau_d$$

空载转速

$$\omega_0 = \frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r} u_a$$

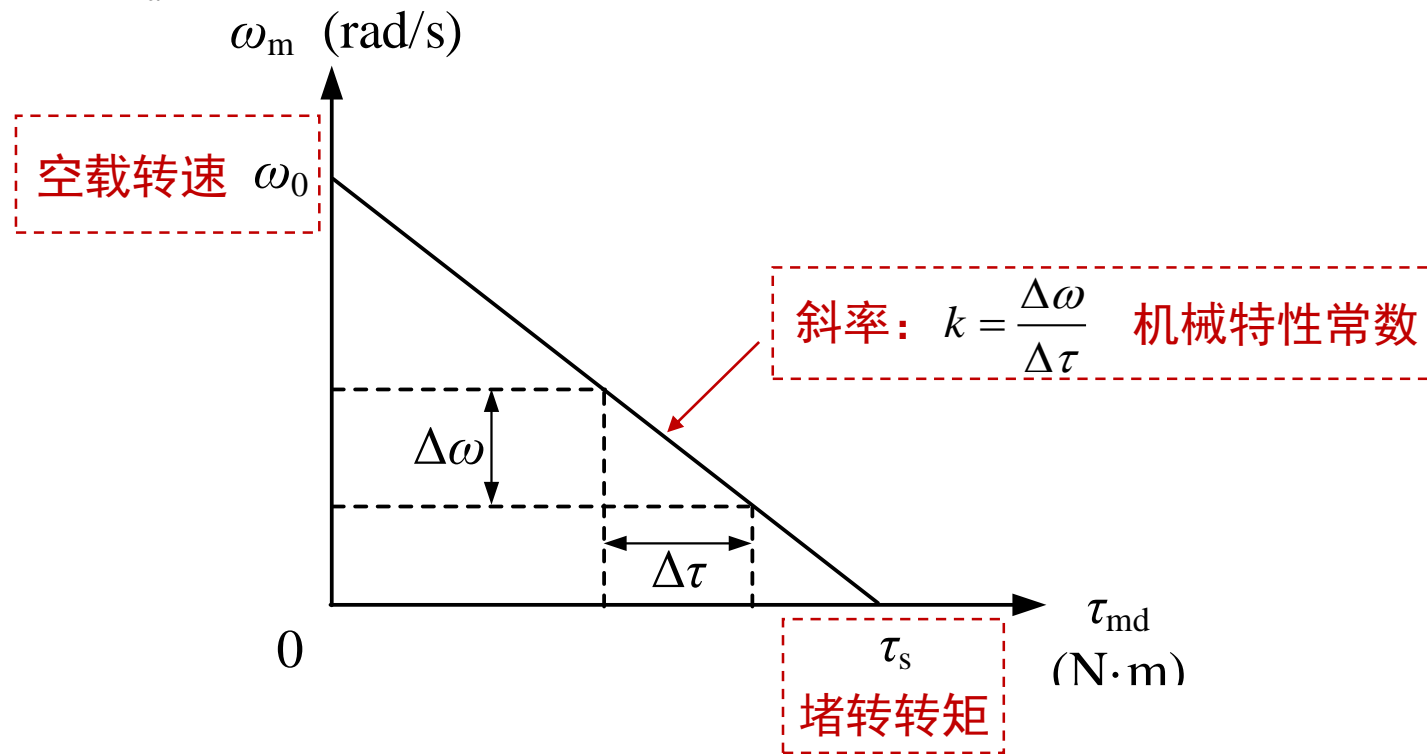
机械特性常数

$$k = \frac{R_a}{K_e K_a + R_a B_r}$$

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 静态特性——**机械特性**：电枢电压恒定时，电机转速与负载之间的关系。反映了负载波动时，电机转速的稳定性。

➤ 电枢电压  $u_a$  恒定



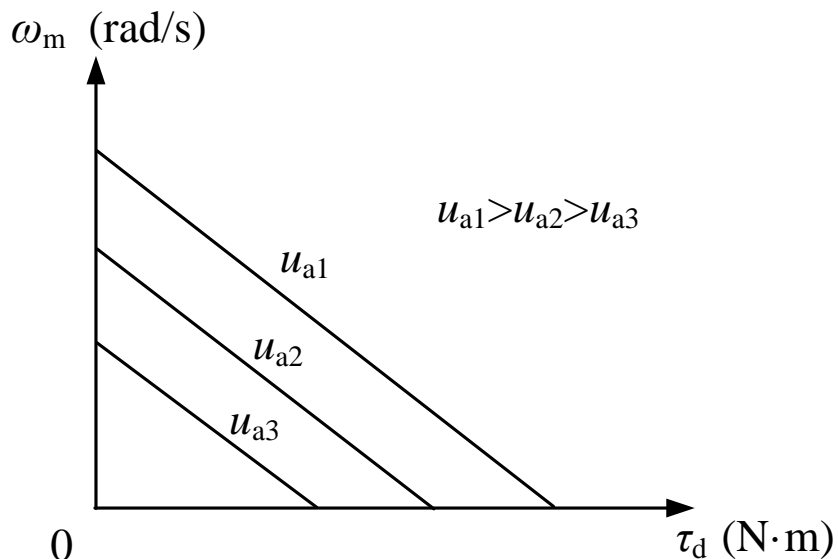
# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 机械特性

### ➤ 不同电枢电压下的机械特性

- 斜率不变：不同的电枢电压下，电机的空载转速不同，堵转转矩不同，但机械特性常数相同
- 电枢电压升高，空载转速和堵转力矩都变大
- 为避免大的感应电动势，电机设计时要求 $K_e$ 小、而 $K_a$ 尽量大

$$\omega_m = \frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r} u_a - \frac{R_a}{K_e K_a + R_a B_r} \tau_d$$



### ➤ 电枢电压为额定值时的重要指标

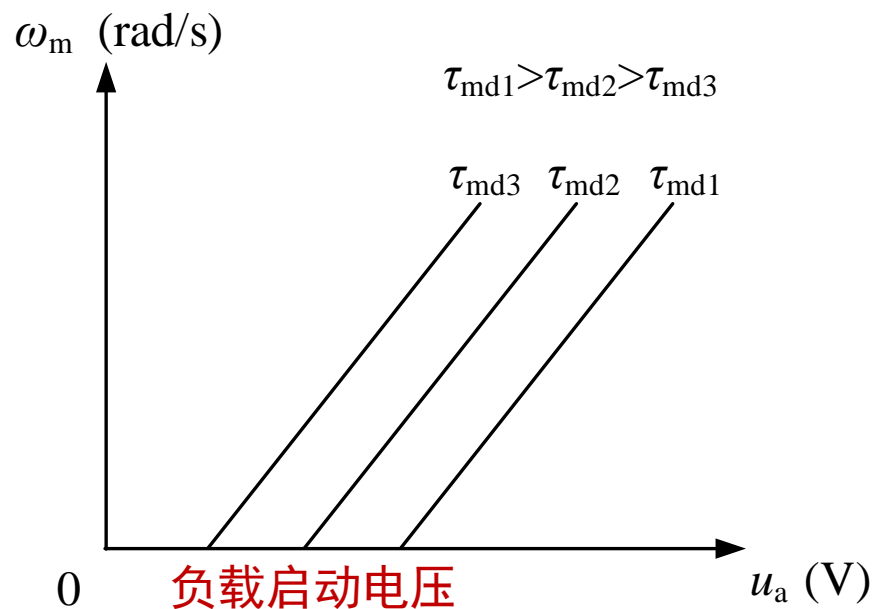
- 额定堵转转矩  $\tau_s = u_{ar} \cdot K_a / R_a$
- 额定堵转电流  $i_{as} = u_{ar} / R_a$
- 额定空载转速  $\omega_m = u_{ar} / K_e$
- 额定转矩  $\tau_r$   
——额定电压下能长时间输出的最高转矩
- 额定转速  $\omega_{mr}$   
——额定电压和额定转矩下的转速

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 调节特性

——电机负载不变的情况下，电枢电压与转速的关系。反映了电机转速对电枢电压变化的响应能力。

### ➤ 不同负载时的调节特性



- 斜率:  $\frac{K_a}{K_e K_a + R_a B_r}$

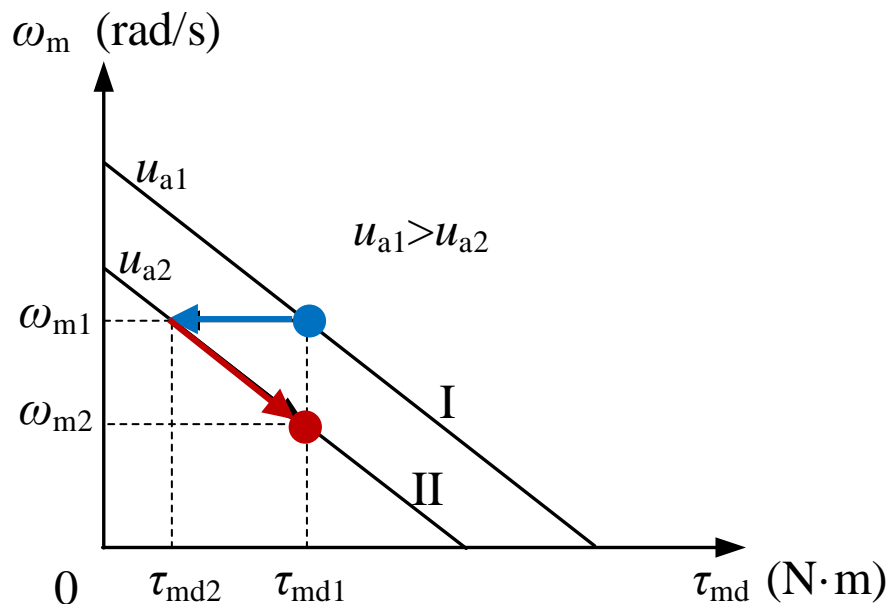
- 忽略阻尼时  $B_r$ , 斜率为  $\frac{1}{K_e}$  转速电压系数

如果有外力阻止电机转动，当电枢电压产生的电磁转矩不足以克服外阻力时，电机将堵转。只有当电磁转矩超过负载转矩时，电机才会转动，并最终稳定在与电枢电压对应的转速上。

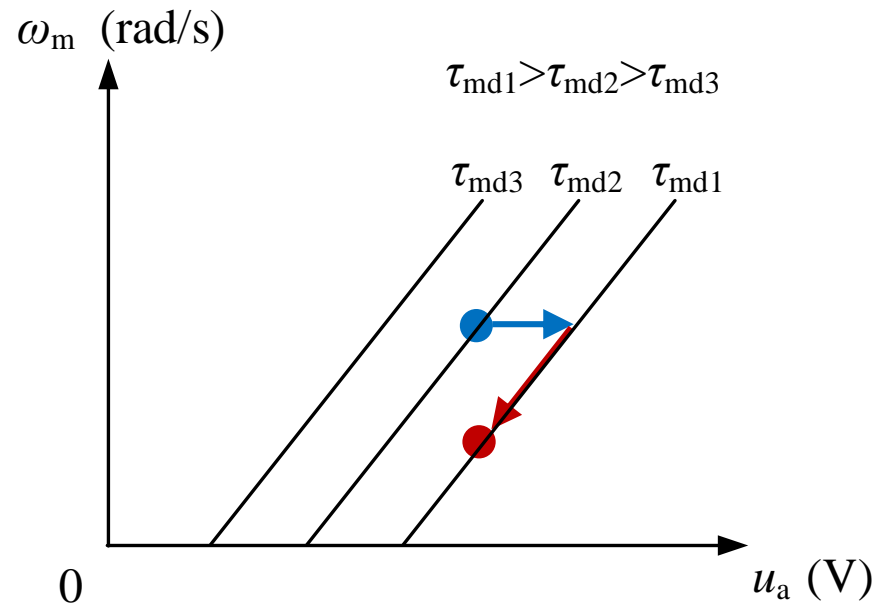
# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 动态特性 —— 电枢电压波动或负载变化时，电机的电流、转速和转矩的变化过程

## ➤ 降压调速的机械特征曲线



## ➤ 负载增大的调速过程



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 动态特性 —— 直流伺服电机是自稳定系统，不会因电压和负载的波动而失稳

电学模型:  $u_a = L_a \dot{i}_a + R_a i_a + u_e$

动力学模型:  $\tau_m = I_r \dot{\omega}_m + B_r \omega_m + \tau_{md}$

电磁转矩:  $\tau_m = K_a i_a$

感应电动势:  $u_e = K_e \omega_m$

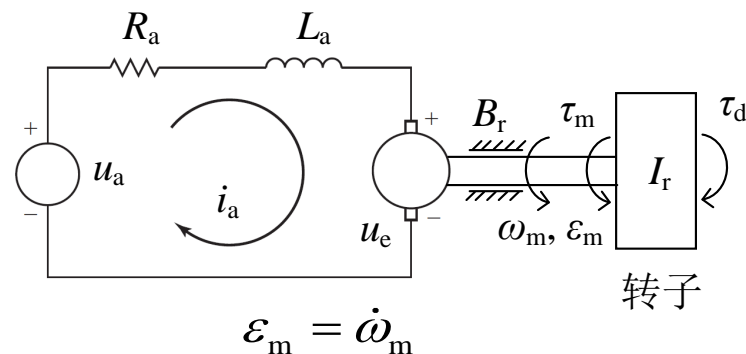
↓ 拉氏变换

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} [U_a(s) - U_e(s)]$$

$$\tau_m(s) = K_a I_a(s)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{B_r + I_r s} [\tau_m(s) - \tau_{md}(s)]$$

$$U_e(s) = K_e \Omega_m(s)$$



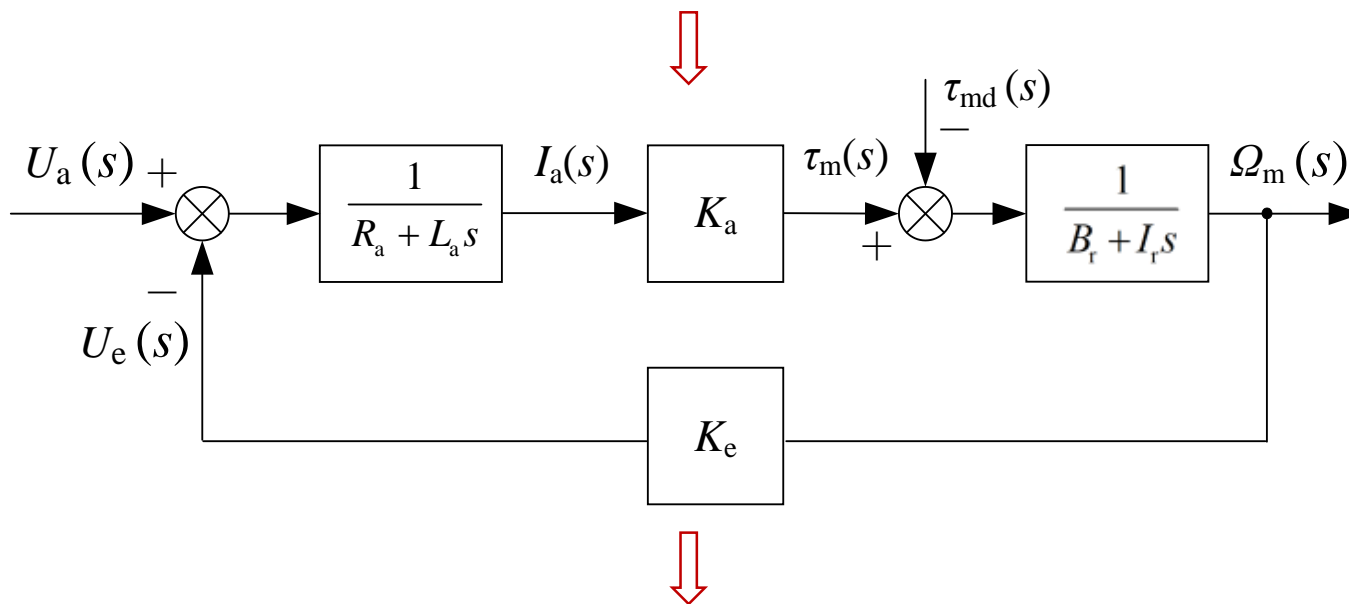


# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 动态特性——转速与电枢电压和负载力矩

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} [U_a(s) - U_e(s)] \quad \tau_m(s) = K_a I_a(s)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{B_r + I_r s} [\tau_m(s) - \tau_{md}(s)] \quad U_e(s) = K_e \Omega_m(s)$$



$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(R_a + L_a s)(B_r + I_r s) + K_a K_e} [K_a U_a(s) - (R_a + L_a s) \tau_{md}(s)]$$

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 动态特性

### ➤ 某真实电机性能参数

项目	符号	取值	单位
额定电压	$u_r$	24	V
额定转速	$\omega_r$	258	rad/s
额定转矩	$\tau_r$	$8.82 \times 10^{-2}$	N·m
额定电流	$I_r$	1.09	A
电枢电阻	$R_a$	2.49	$\Omega$
电枢电感	$L_a$	$6.10 \times 10^{-4}$	H
转矩常数	$K_a$	$8.22 \times 10^{-2}$	(N·m)/A
感应电动势常数	$K_e$	$8.24 \times 10^{-2}$	V/(rad/s)
转子惯量	$I_r$	$1.19 \times 10^{-5}$	Kg·m <sup>2</sup>
转子阻尼	$B_r$	$4.10 \times 10^{-4}$	(N·m)/(rad/s)

- 伺服电机电感很小，可忽略
- 拖动负载时，转子阻尼影响很小，可忽略

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 动态特性——转速与电枢电压和负载力矩

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{(R_a + L_a s)(B_r + I_r s) + K_a K_e} [K_a U_a(s) - (R_a + L_a s)\tau_{md}(s)]$$

令  $L_a=0, B_r=0$  ↓

$$\Omega_m(s) = \frac{1}{R_a I_r s + K_a K_e} [K_a U_a(s) - R_a \tau_{md}(s)]$$

↓

$$\Omega_m(s) = \frac{1/K_e}{T_m s + 1} [U_a(s) - \frac{R_a}{K_a} \tau_{md}(s)]$$

$$T_m = \frac{R_a I_r}{K_a K_e} \quad \text{电机的机电时间常数}$$

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

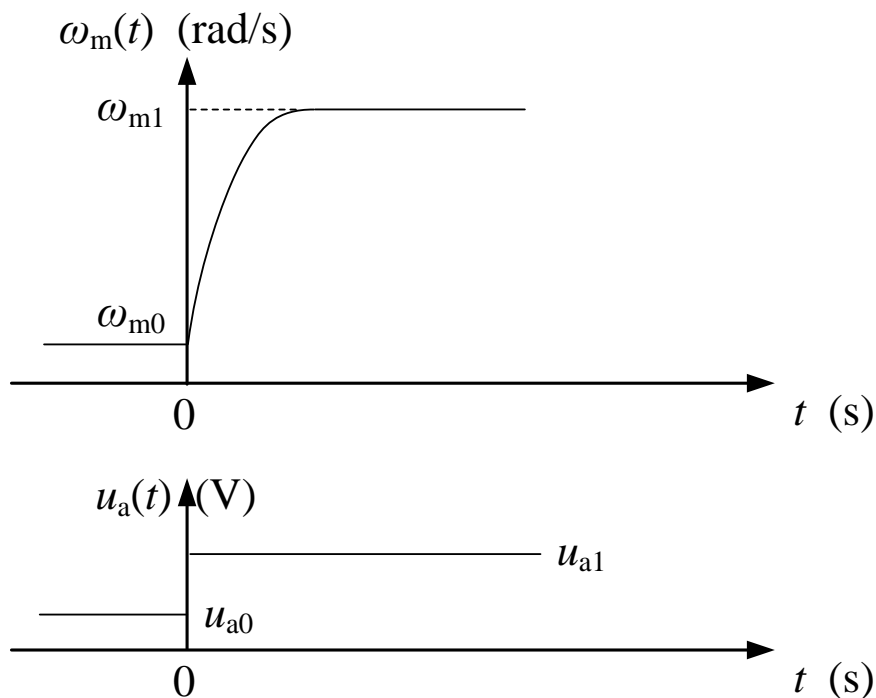
## ● 动态特性

➤ 时域表达式——电枢电压阶跃变化

$$\omega_m(t) = \frac{1}{K_e} \left( u_{a1} - \frac{R_a}{K_a} \tau_{md} - \Delta u_a e^{-\frac{t}{T_m}} \right)$$

拉氏变换

$T_m$  —— 上升时间       $\Delta u_a = u_{a1} - u_{a0}$  —— 电压阶跃值



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 动态特性

### ➤ 空载零速启动模型

$$\omega_m(t) = \frac{u_a}{K_e} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}})$$

$$T_m = \frac{R_a I_r}{K_a K_e}$$

- $t = \infty$  时:  $\omega_{\max} = \frac{u_a}{K_e}$

——空载稳定转速

- $t = T_m$  时:  $\omega_m = 63\% \omega_{\max}$

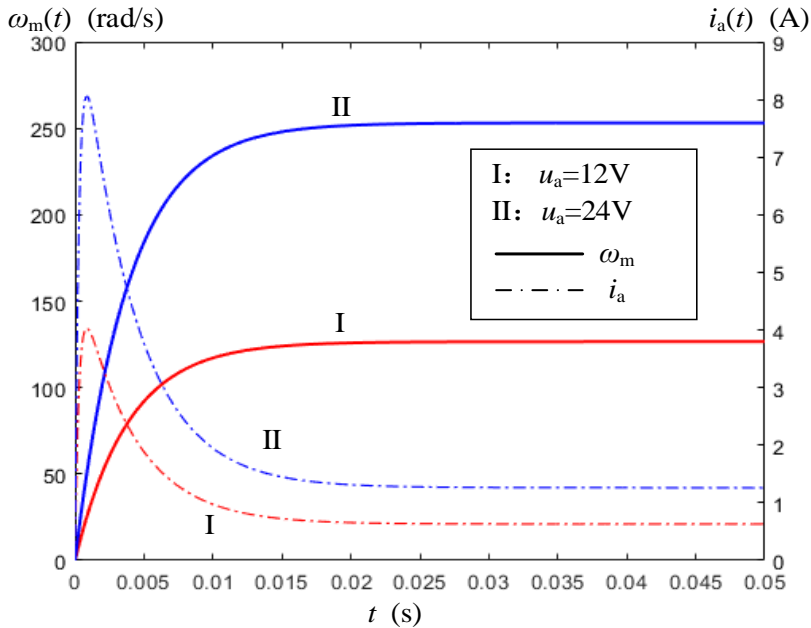
——上升时间

- $t = 3T_m$  时:  $\omega_m = 95\% \omega_{\max}$

——空载稳定时间

- 电枢电压  $u_a = 12V$  或  $u_a = 24V$

项目	符号	取值	单位
额定电压	$u_r$	24	V
额定转速	$\omega_r$	258	rad/s
额定转矩	$\tau_r$	$8.82 \times 10^{-2}$	N·m
额定电流	$I_r$	1.09	A
电枢电阻	$R_a$	2.49	$\Omega$
电枢电感	$L_a$	$6.10 \times 10^{-4}$	H
转矩常数	$K_a$	$8.22 \times 10^{-2}$	(N·m)/A
感应电动势常数	$K_e$	$8.24 \times 10^{-2}$	V/(rad/s)
转子惯量	$I_r$	$1.19 \times 10^{-5}$	Kg·m <sup>2</sup>
转子阻尼	$B_r$	$3.10 \times 10^{-4}$	(N·m)/(rad/s)



要获得小的时间常数，必须尽量减小电机转子惯量和电枢电阻，而尽量增大磁场磁通。

有刷直流伺服电机具有很好的快速启动能力。

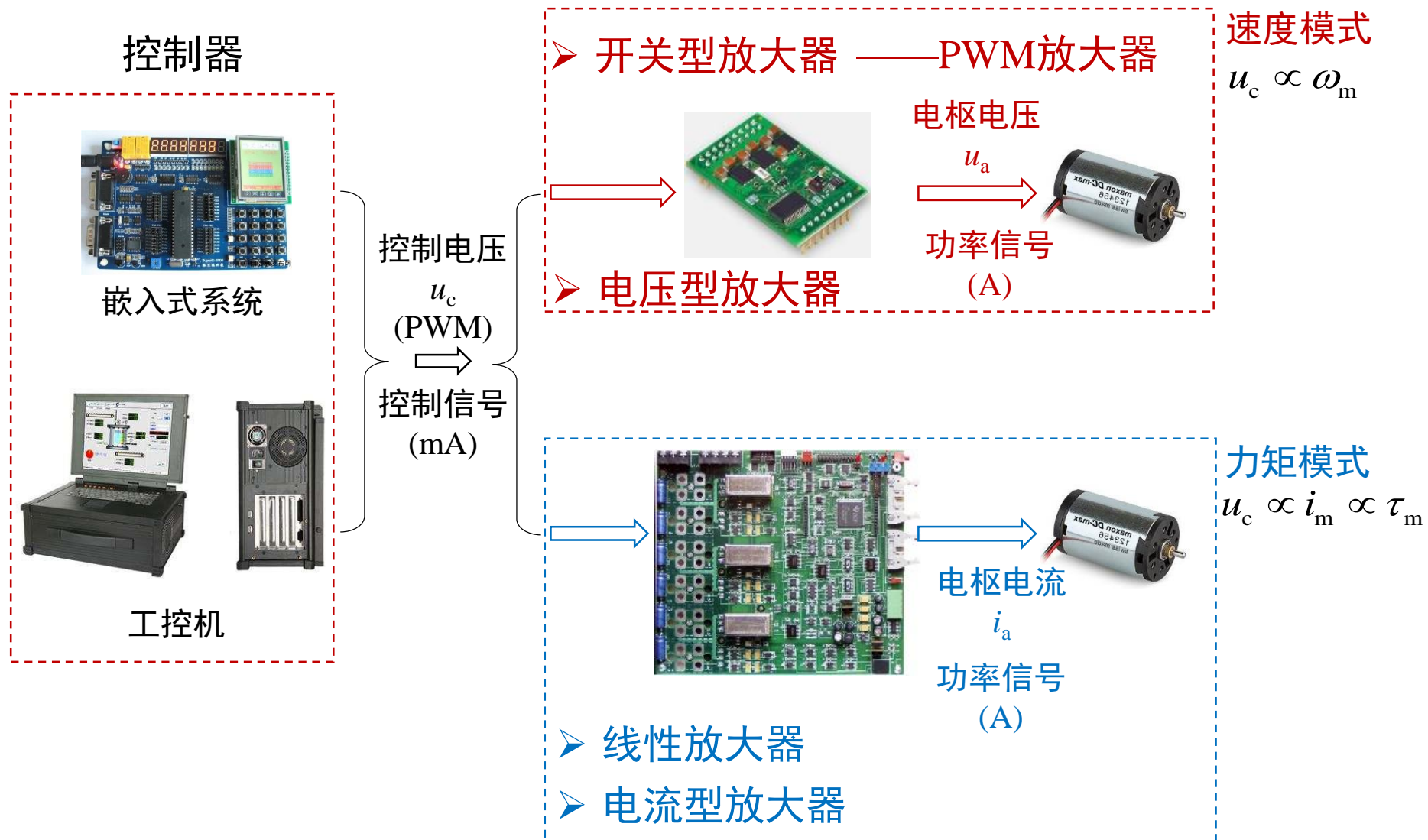
# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 主要性能参数

项目	名称	常用单位	定义和说明
1	额定电压	V	电机最佳工作状态下的电枢电压
2	额定转矩	mN·m	额定电压下，电机能够持续运转，并连续输出的最高转矩
3	额定转速	rpm	额定电压和额定转矩下的电机转速
4	额定电流	mA	额定电压和额定转矩下的电枢电流
5	堵转转矩	mN·m	额定电压下，电机堵转时的转矩，也是电机的最大转矩，电机不能长时间工作在此状态。
6	堵转电流	mA	额定电压下，电机堵转时的电枢电流
7	空载转速	rpm	负载为零时，额定电压下的电机最高转速，越大越好
8	空载电流	mA	负载为零时，额定电压下的电枢电流，越小越好
9	最大效率	W	额定电压下的最大效率
10	电枢电阻	$\Omega$	伺服电机的电枢电阻通常小于 $5\Omega$
11	电枢电感	mH	伺服电机的电枢电感通常小于 $0.1\text{mH}$
12	转矩常数	mN·m/A	重要参数，可据此计算电机在任意电压下的堵转力矩
13	转速常数	rpm/V	重要参数，是感应电动势常数的倒数，可以据此计算任意转速下的电机感应电动势
14	转速/转矩斜率	rpm/mN·m	电压不变时，转速随负载力矩变化的程度
15	机电时间常数	ms	反应了电机的动态特性，越小越好，伺服电机的机电时间常数通常不大于10ms
16	转子惯量	$\text{g}\cdot\text{cm}^2$	越小越好

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

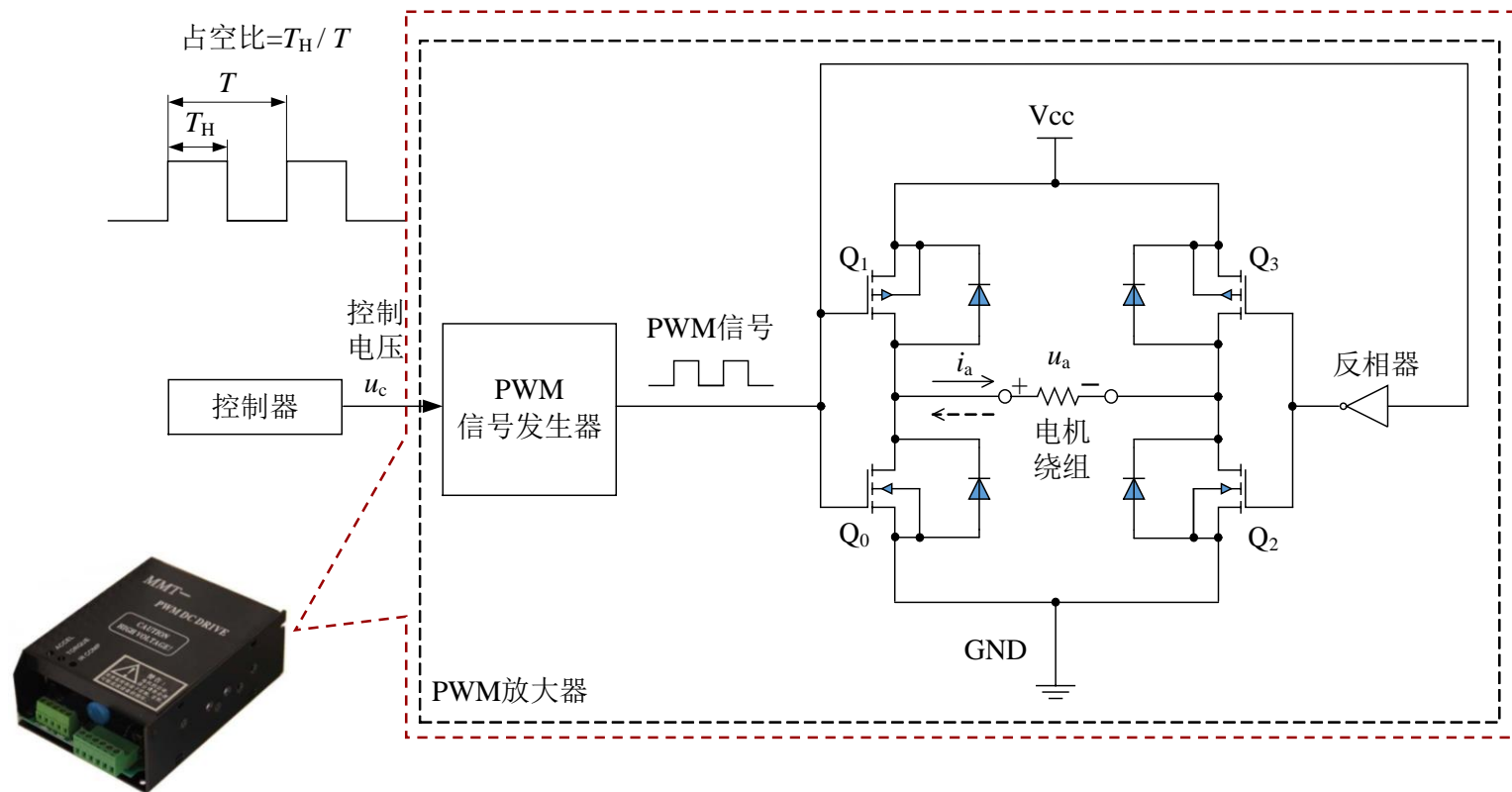
## ● 驱动器类型





# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 电压型放大器——PWM放大器



### PWM放大器

- PWM——Pulse Width Modulation脉冲宽度调制，简称脉宽调制
- 根据输入PWM信号的占空比 ( $T_H/T$ ) (和方向信号) 改变电机线圈两端电压大小和方向
- 电枢电压与控制电压成正比

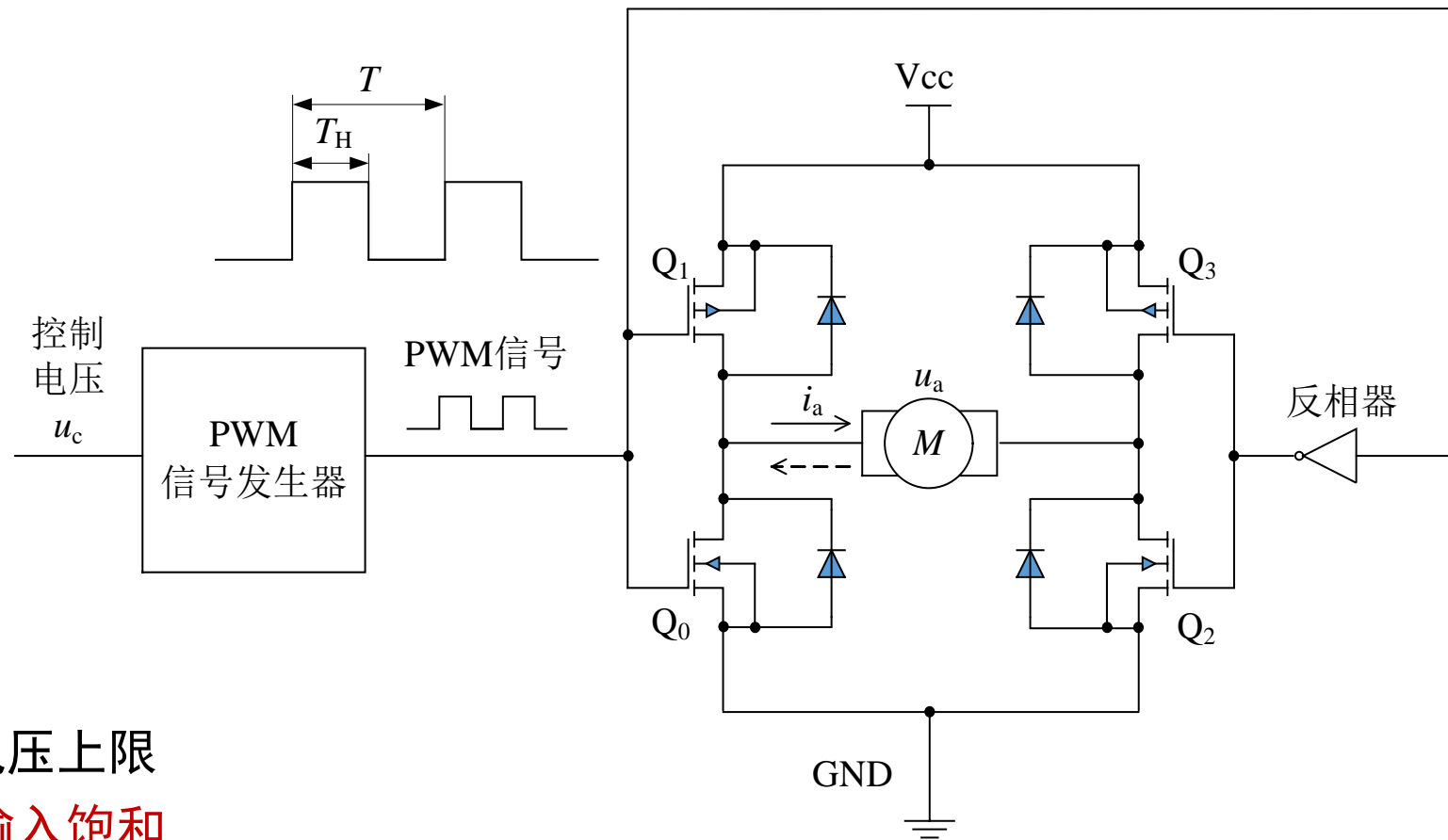
# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 电压型放大器——PWM放大器

占空比  
Duty Ratio

$$\frac{T_H}{T} \propto u_c$$

上位机



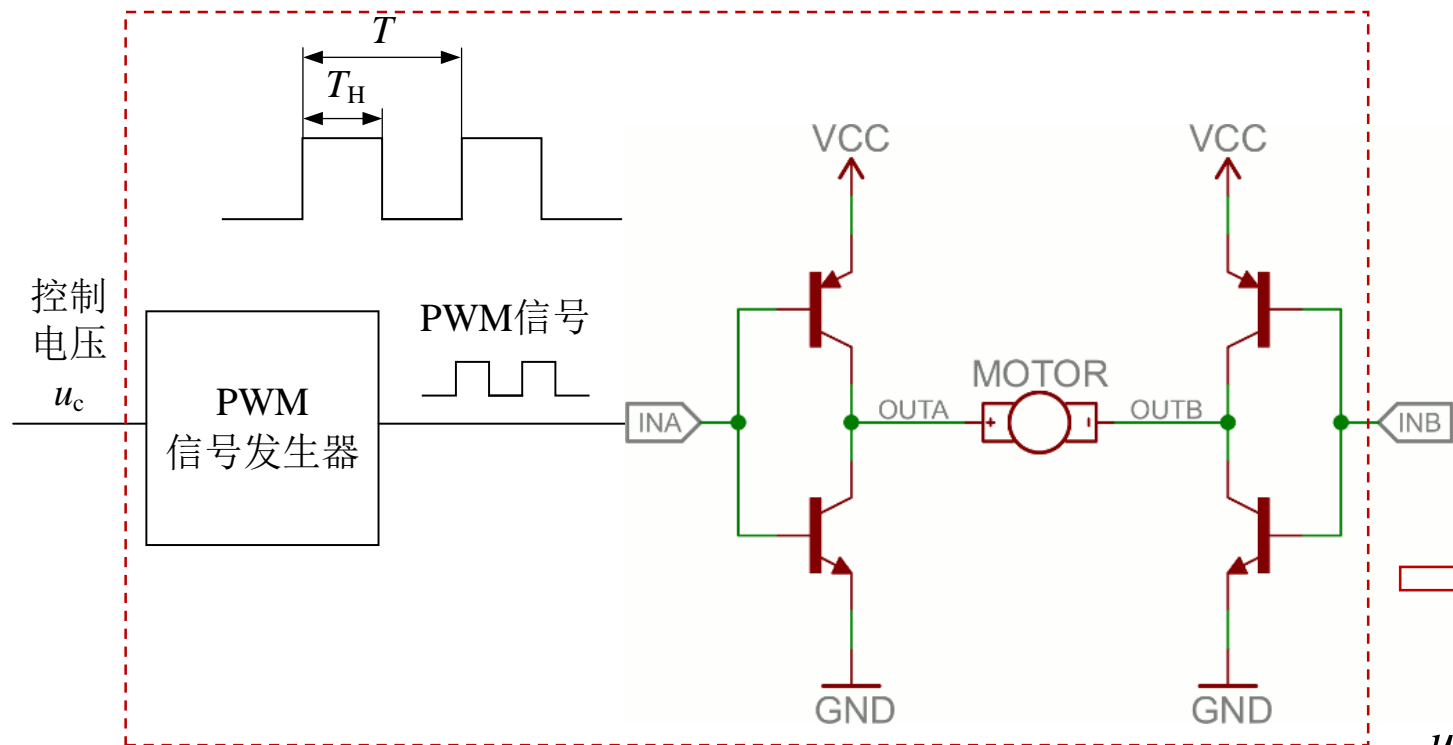
$$u_c \in [-U_A, +U_A]$$

$U_A$ ：驱动器输入电压上限

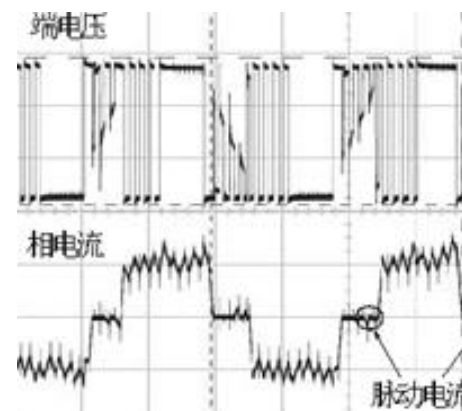
$|u_c| > U_A$ ：驱动器输入饱和

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

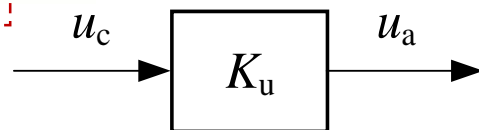
## ● 电压型放大器——PWM放大器



电枢电压和电流波形



- $u_c = +U_A \rightarrow TH/T = 1 \rightarrow u_a = +V_{cc}$
- $u_c = -U_A \rightarrow TH/T = 0 \rightarrow u_a = -V_{cc}$
- $u_c = 0 \rightarrow TH/T = 0.5 \rightarrow u_a = 0$
- $u_c = +0.5U_A \rightarrow TH/T = 0.75 \rightarrow u_a = +0.5V_{cc}$



$$u_a = K_u u_c$$

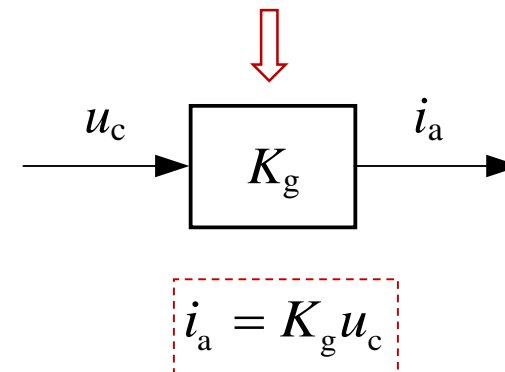
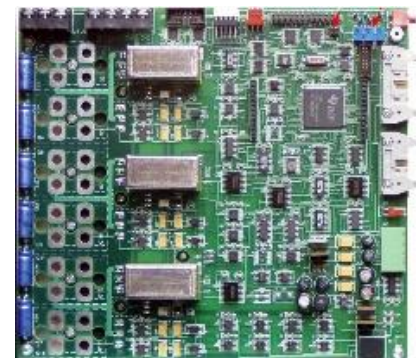
$K_u = V_{cc}/U_A$  : 电压增益

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

电流型放大器根据电流变换原理不同，可分为线性放大器和PWM电流闭环控制放大器两类。



- 电流型放大器——线性放大器

- 采用晶体管作为功率放大器件
- 晶体管始终工作在线性放大区
- 把基极控制电压 $u_c$ 等比例地变换为集电极输出的电枢电流 $i_a$



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 线性放大器与PWM放大器的对比

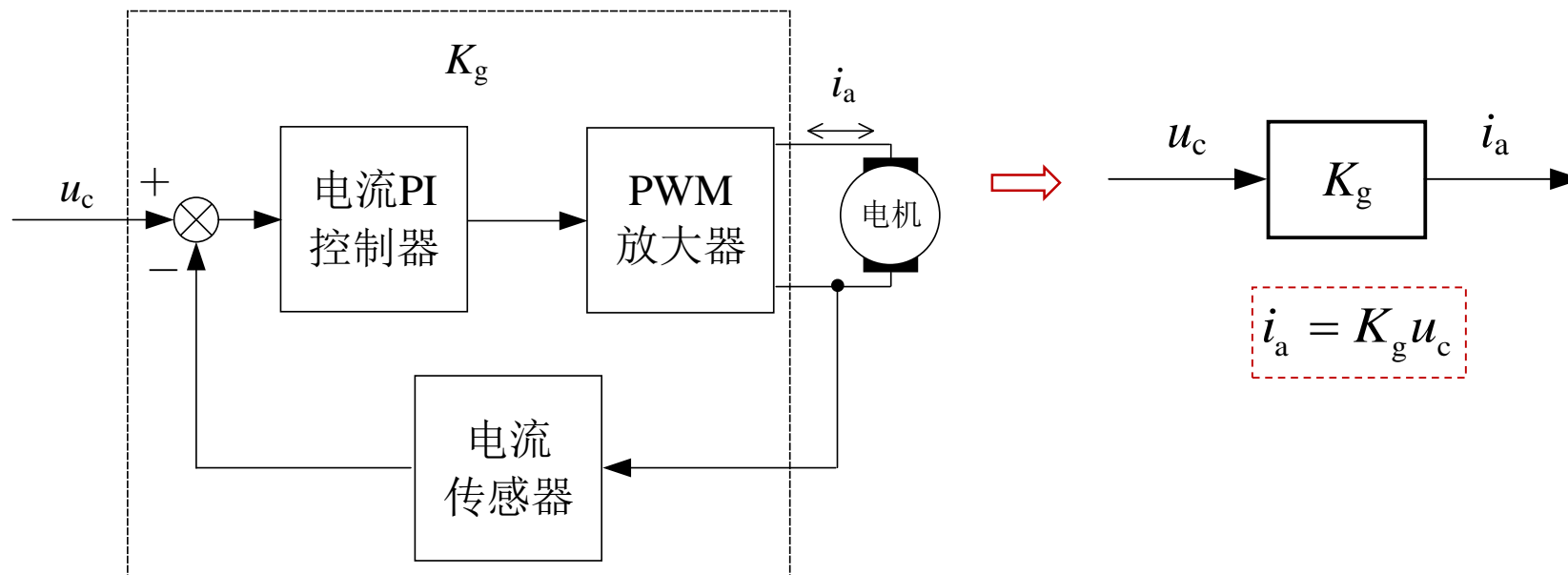
项目		线性放大器	PWM放大器
功率器件工作状态		线性放大状态	导通-截止状态
优点		线路简单，电磁干扰小，电流波动小，调速范围宽	调速范围宽，效率高
缺点		发热严重、效率低、体积大	电磁干扰大，输出电流波动大
适用场合		适用于小功率电机，力矩控制精度要求高，或对电磁干扰敏感的场所	适用功率范围大，对电磁干扰不敏感，可以采用速度控制的场合
实例	照片		
	最大连续输出功率（W）	200	250
	最大连续输出电流（A）	5	5
	尺寸（mm <sup>3</sup> ）	203×190×37	43×28×13
	质量（g）	900	9

# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 电流型放大器——PWM电流闭环放大器

- PWM放大器+电流PI控制器
- 电流传感器检测电机电枢电流，转换成负反馈电压信号与控制电压进行比较
- 减小电流波动，实现把控制电压 $u_c$ 等比例地变换为电枢电流 $i_a$
- 体积小、功耗低
- 有电磁噪声、电流波动比线性放大器大
- 商用伺服驱动器中常用，减小电机力矩波动，提高速度控制的快速性

PWM电流闭环放大器



# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 成套的直流电机系统

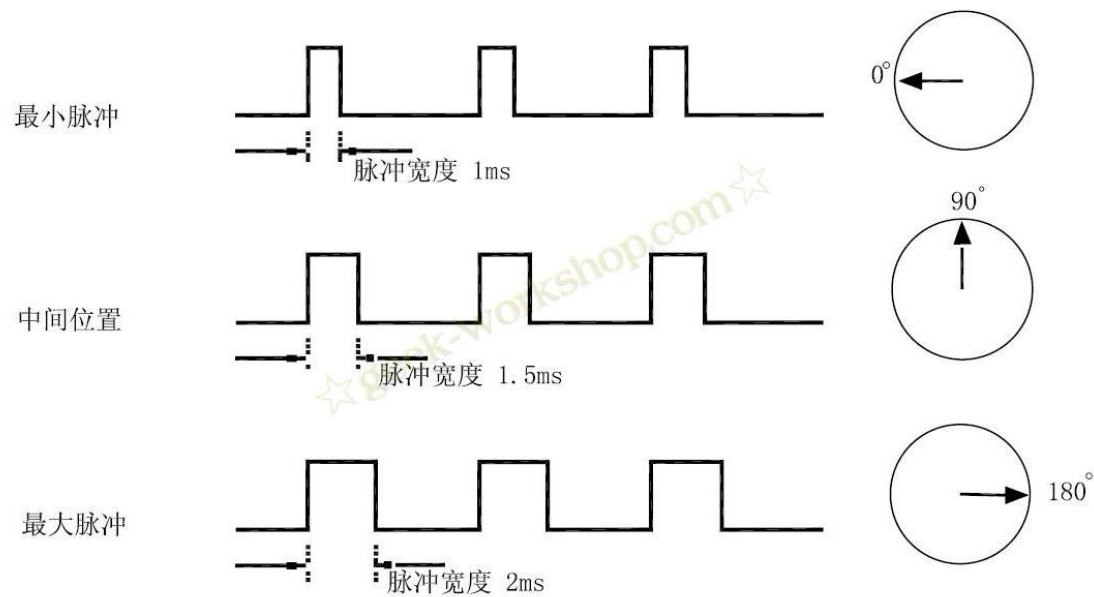




# 有刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 延伸——舵机（Servo Motor）

- 内部封装了电机、减速器、旋转电阻、控制电路
- 可由PWM信号直接控制输出轴转角或速度
- 可用于小型机器人，航模

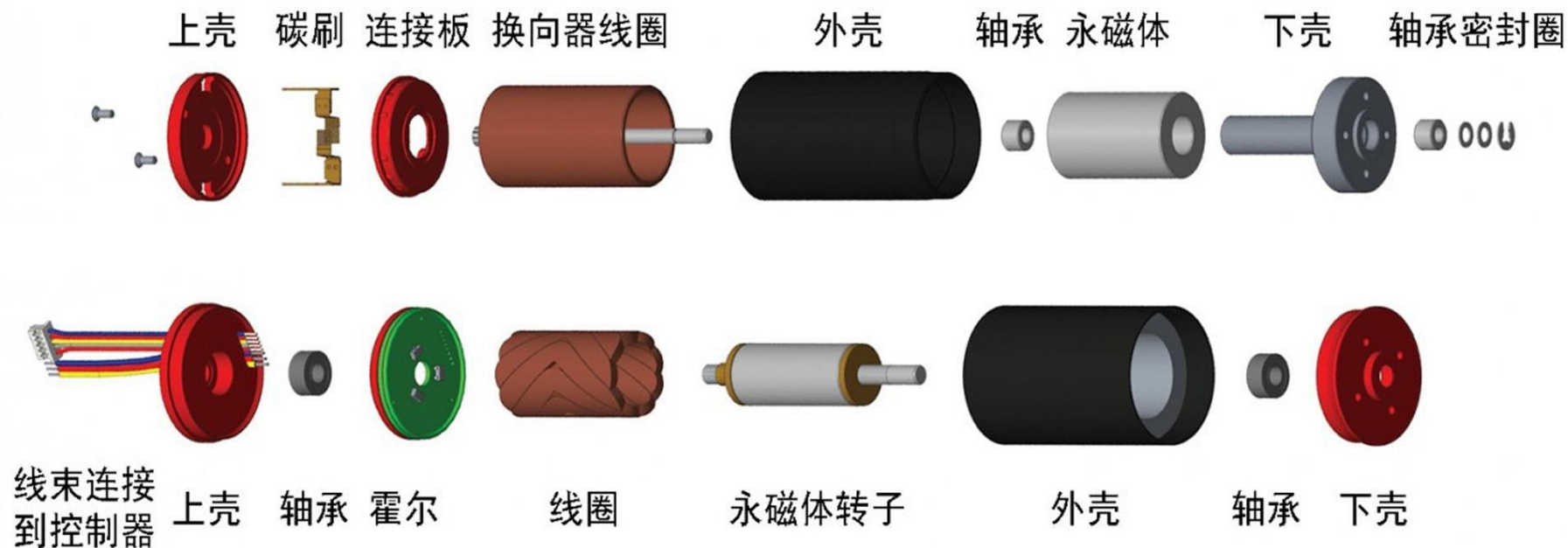




# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 无刷电机与有刷电机结构对比

## 直流有刷空心杯电机爆炸图

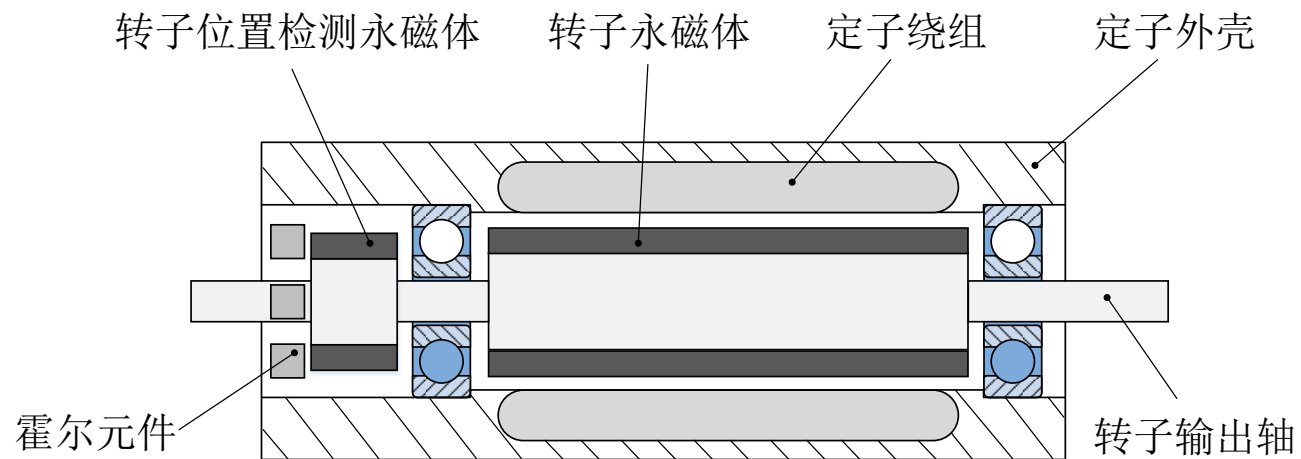
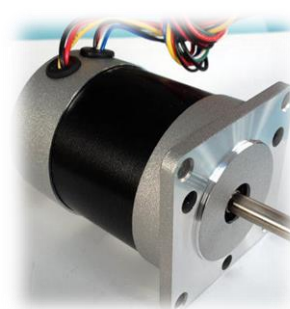


## 直流无刷空心杯电机爆炸图

# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 无刷直流电机结构原理

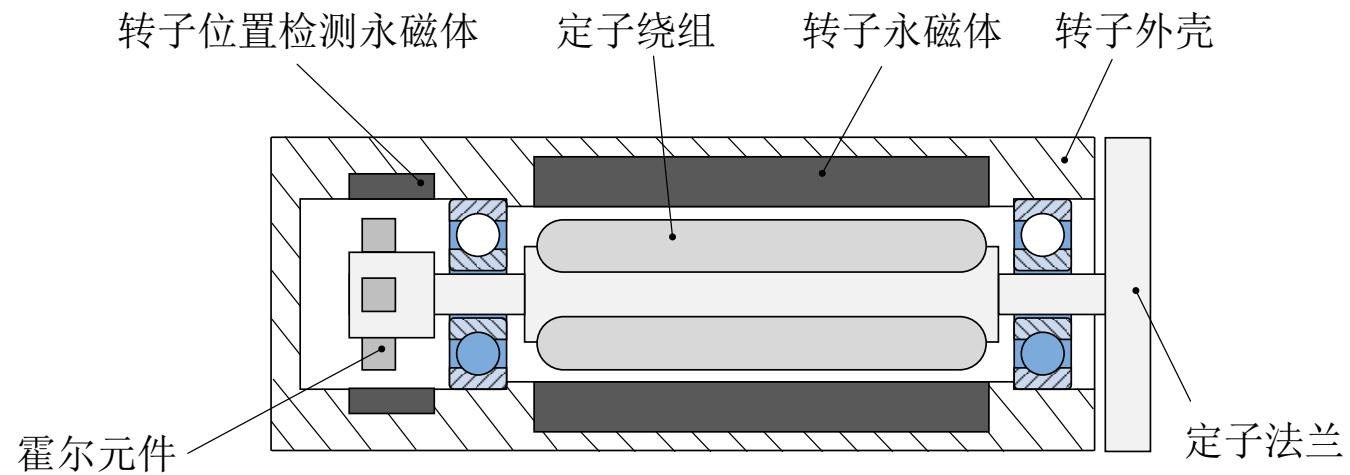
- 内转子结构



# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

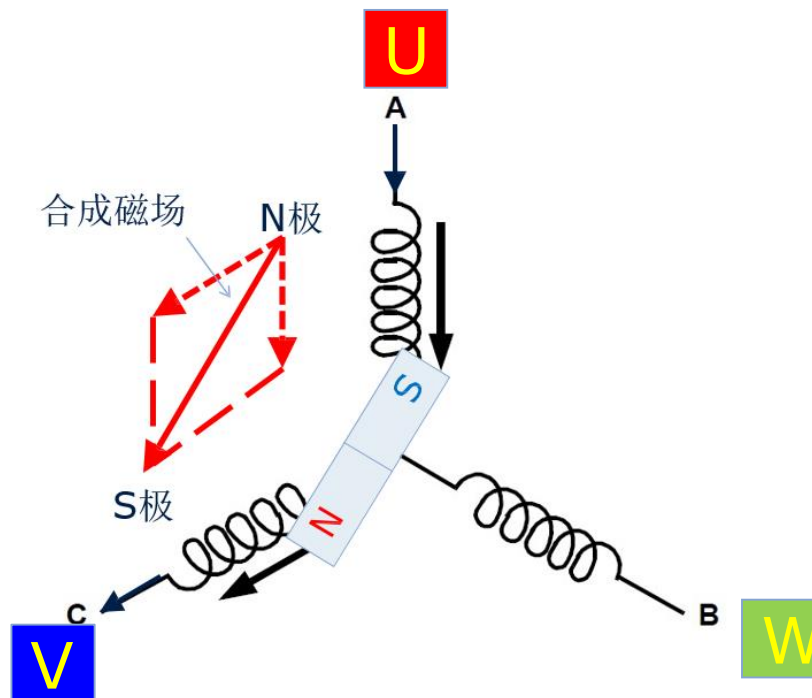
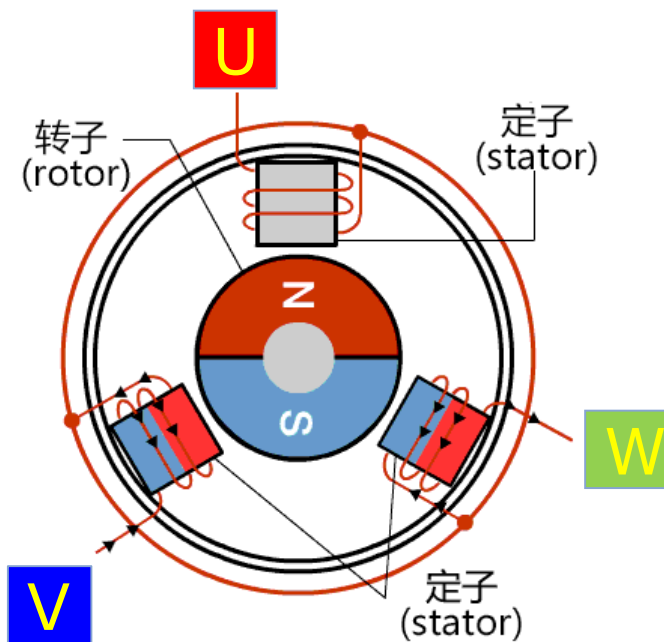
- 无刷直流电机结构原理

- 外转子结构



# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 无刷直流电机的运转

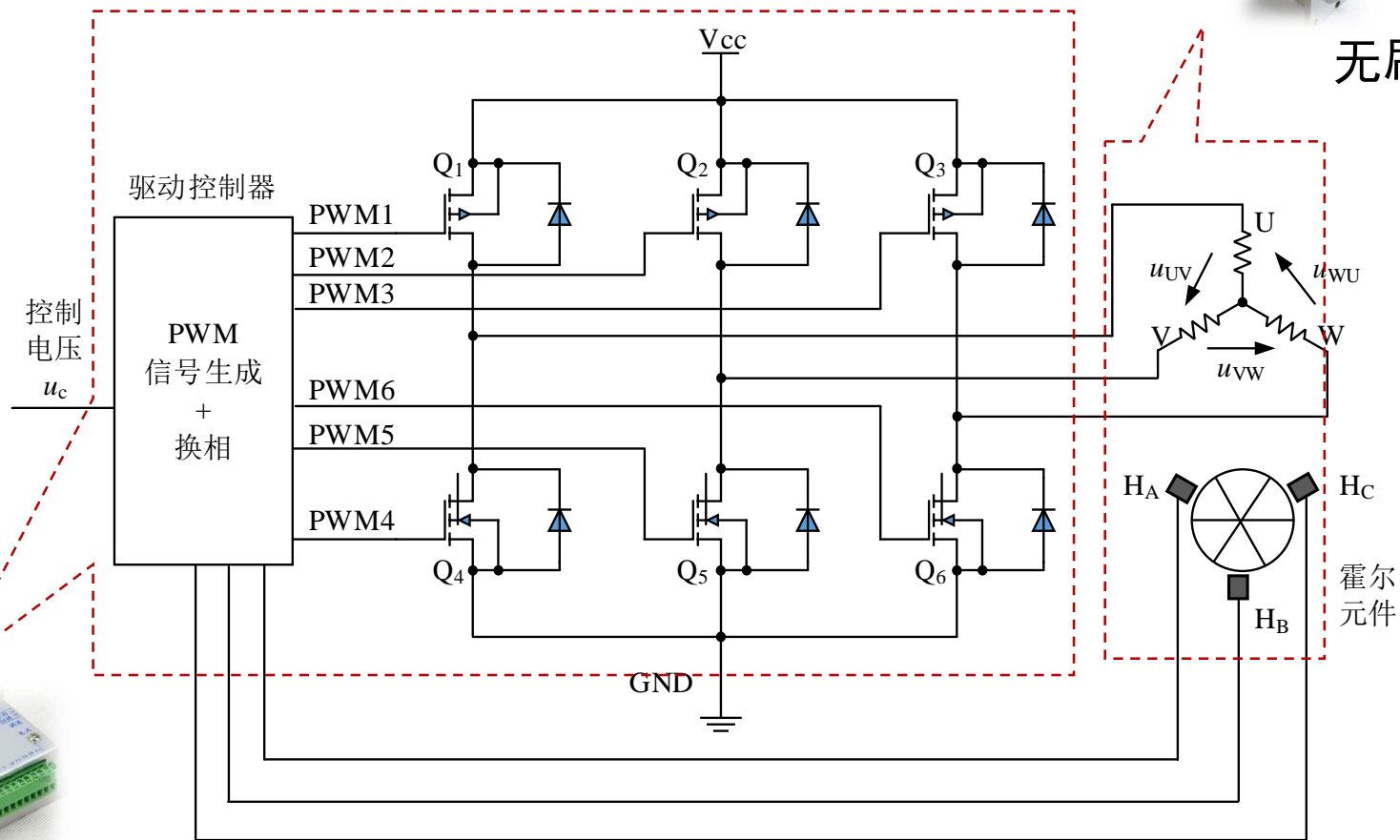


- 利用内置的3个霍尔元件检测转子位置
- 换相驱动电路（功率放大、正反转驱动和调速）根据转子位置改变各线圈两端电压方向，形成随转子位置变动的跳跃旋转磁场
- 定子磁场对转子磁铁产生磁力矩

# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 三相无刷直流电机驱动电路

无刷电机  
驱动器

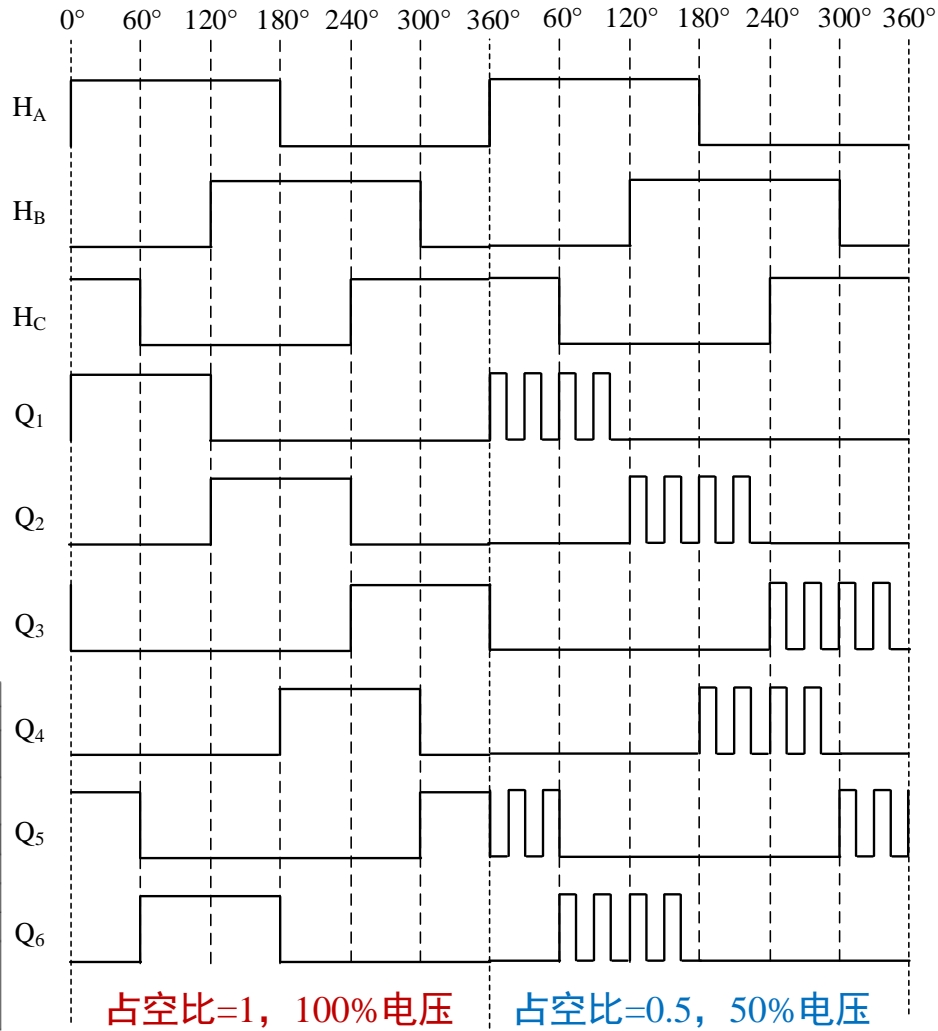
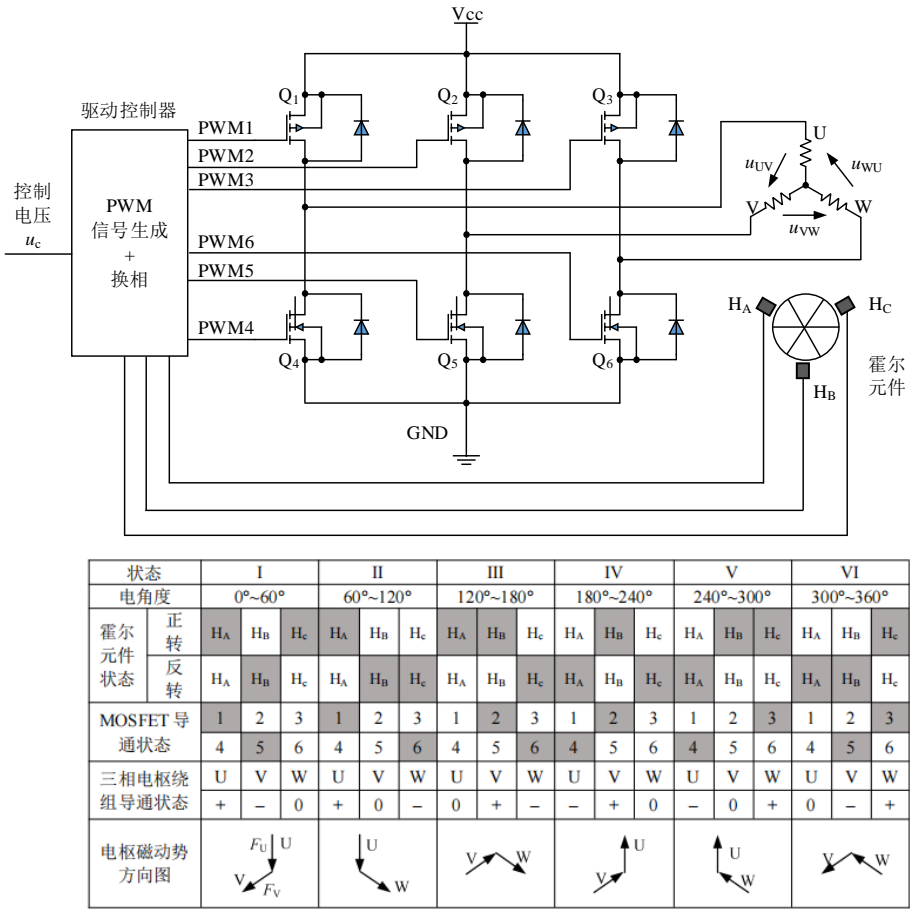


无刷电机

霍尔  
元件

# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

## ● 换相和调速



- 根据霍尔器件信号状态，确定线圈导通顺序，实现换相，形成与转子同步旋转的磁场，拖动转子连续运转
- 根据输入PWM（脉宽调制）信号改变电枢电压 $u_a$ ——速度模式

# 无刷直流永磁伺服电机及驱动器

- 无刷直流电机及其驱动特点

- 驱动器由直流电源驱动；
- 采用霍尔元件检测转子所在的角度区间，根据霍尔元件状态控制绕组导通；
- 当控制电压恒定时，处于导通状态的绕组电压波形为宽度不变的方波，其宽度与控制电压大小呈正比；
- 在一定角度范围内，绕组导通状态不变，磁场不随转子的旋转而变动，在霍尔元件状态变换瞬间，绕组导通状态变化，磁场方向出现跳变；
- 绕组磁场不能与转子磁场保持实时正交，电磁力矩有脉动现象，所以其驱动力矩小于有刷电机。

# 自控式永磁同步电动机

## ● 组成

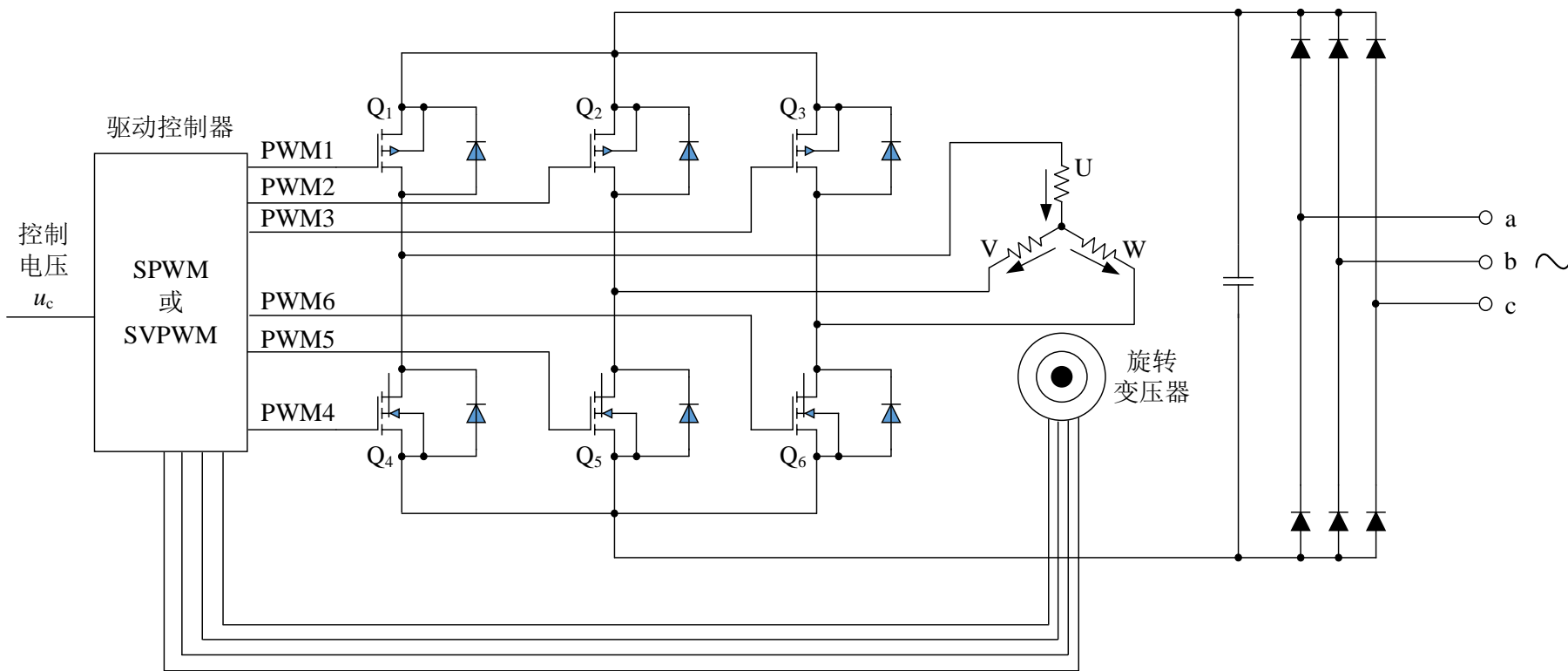


- 专业名称为**自控式永磁同步电动机**  
——Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)
- 转子为永磁体
- 定子为三相绕组，通常采用星形接法
- 与内转子无刷直流永磁电机相似
- 转子位置检测元件为旋转变压器或高分辨率编码器



# 自控式永磁同步电动机


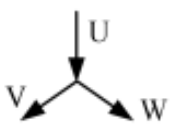
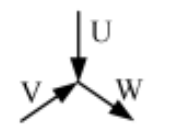



## ● 驱动电路原理



- 两相或三相交流供电，输出更大的功率
- 整流器把交流电转换成直流电，桥式逆变电路把直流电压变换成电机绕组上的交变电压

# 自控式永磁同步电动机

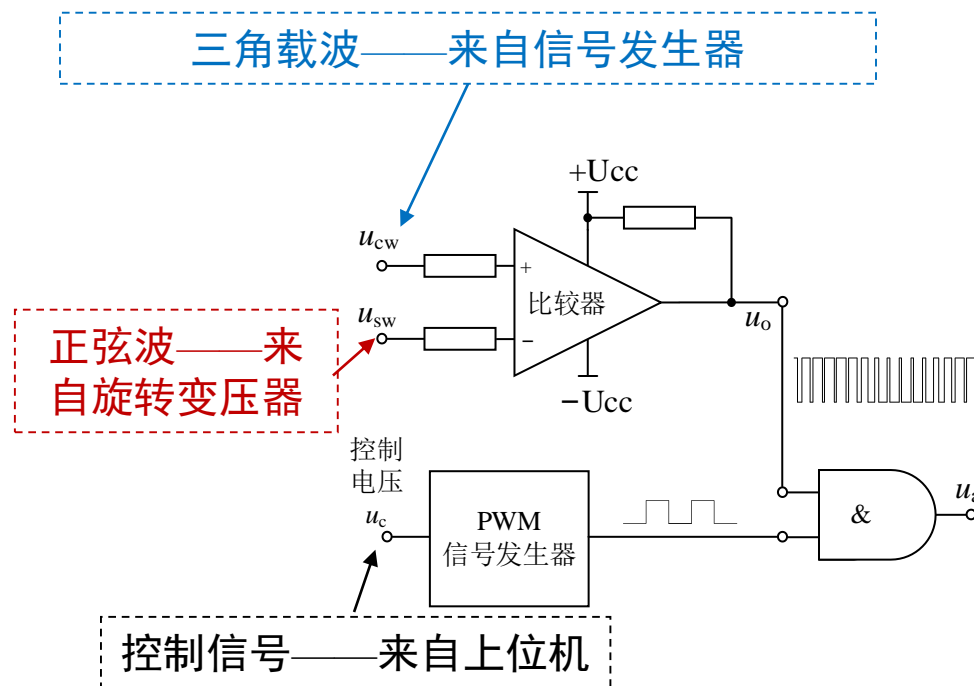
## ● PMSM运行状态

状态	I			II			III			IV			V			VI		
电角度	0°~60°			60°~120°			120°~180°			180°~240°			240°~300°			300°~360°		
MOSFET 导通状态	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
三相电枢 绕组导通 状态	U	V	W	U	V	W	U	V	W	U	V	W	U	V	W	U	V	W
	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
电枢磁动 势方向图																		

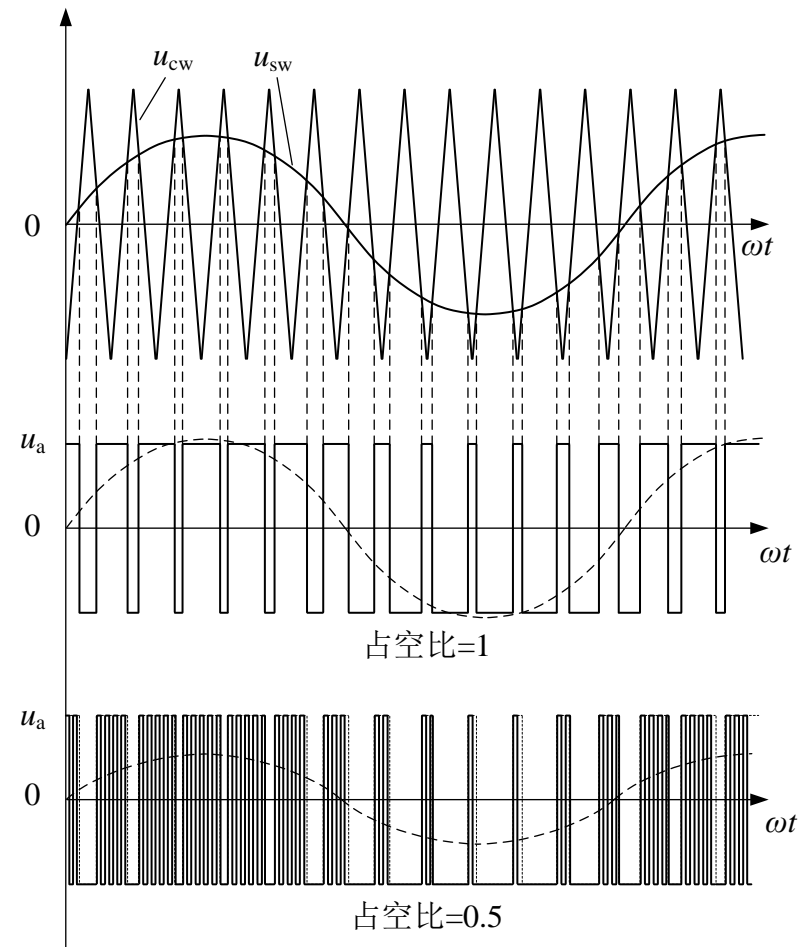
- 每个状态下，PMSM的三相绕组均导通，导通方向随转子位置变化
- 产生均匀变化的圆形旋转磁场
- 相电压调制方法
  - 正弦波脉宽调制（Sinusoidal Pulse Width Modulation - **SPWM**）
  - 空间电压矢量调制（Space Voltage Vector PWM - SVPWM）

# 自控式永磁同步电动机

## ● PMSM单项绕组的正弦脉宽调制波形



- 自控调频
- 调压调矩
- 力矩与转速必须满足特定的矩频特性



脉冲波

# 自控式永磁同步电动机

- 采用SPWM驱动的PMSM特点

- 驱动器电源电压为交流电，可获得更大的输出功率；
- 采用旋转变压器或高精度编码器检测转子位置，生成与转子位置相关的调制正弦波；
- 以最大速度运行时，绕组电压波形为宽度按正弦规律变化的方波，生成连续的圆形旋转磁场；
- 利用PWM信号对绕组做进一步通断控制，可调节绕组平均电压，进而控制电机电流和力矩；
- 驱动电路中有电流闭环控制环节，力矩波动小，电机工作在力矩模式。

# 三种伺服电机比较



三种伺服电机的特点和适用场合

项目	有刷直流永磁伺服电机 (空心杯转子)	无刷直流永磁伺服电机	PMSM
换相原理	电刷和换向器机械换相	霍尔元件和换相电路配合实现电子换相	旋转变压器、换相电路或算法实现电子换相
换相和驱动控制	简单。PWM全桥开关控制调压电路，特殊场合可以没有驱动电路。驱动器有电压型和电流型两种。	较复杂。有专门设计的换相驱动电路，由换相电路和PWM全桥开关控制调压电路构成。驱动器有电压型和电流型两种。	复杂。必须有专门的调压、调频电路或控制器。驱动器内置电流/力矩控制器，可简化成电流型驱动器。
效率	中等。电刷压降带来额外损耗	高	高
驱动器电源	直流	直流	交流
维护	需要定时更换电刷	很少	很少
寿命	短	长	长
转子惯量	小	小	小

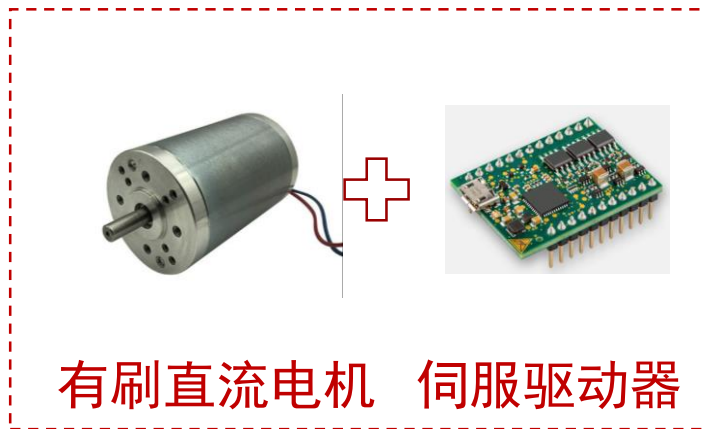
# 三种伺服电机比较



项目	有刷直流永磁伺服电机 (空心杯转子)	无刷直流永磁伺服电机	PMSM
速度范围	中等，受限于电刷的机械限制	大	大
力矩波动	小	较大。由跳跃的旋转磁场导致	小
价格	较高。空心杯转子制作工艺复杂，但是驱动电路简单	中等。永磁铁心转子制作容易，转子位置检测仅需3个霍尔元件，驱动电路简单	高。需要内置旋转变压器或高精度编码器检测转子位置，换相和驱动控制复杂
适用功率	100W以下	300W以下	300W以上
适用机器人	小型短时工作的关节型机器人，对电机的要求：小功率，速度和位置控制精度高、负载波动大、动态性能要求高、有力控制要求	移动机器人或直角坐标机器人，对电机的要求：尽量免维护、中小功率、速度和位置控制精度较高、负载稳定、无力控制要求	工业机器人，对电机要求：易于维护或免维护、中等功率、速度和位置控制精度高、负载波动大、动态性能要求高、有力控制要求

# 三种伺服电机比较

## ● 典型伺服驱动器

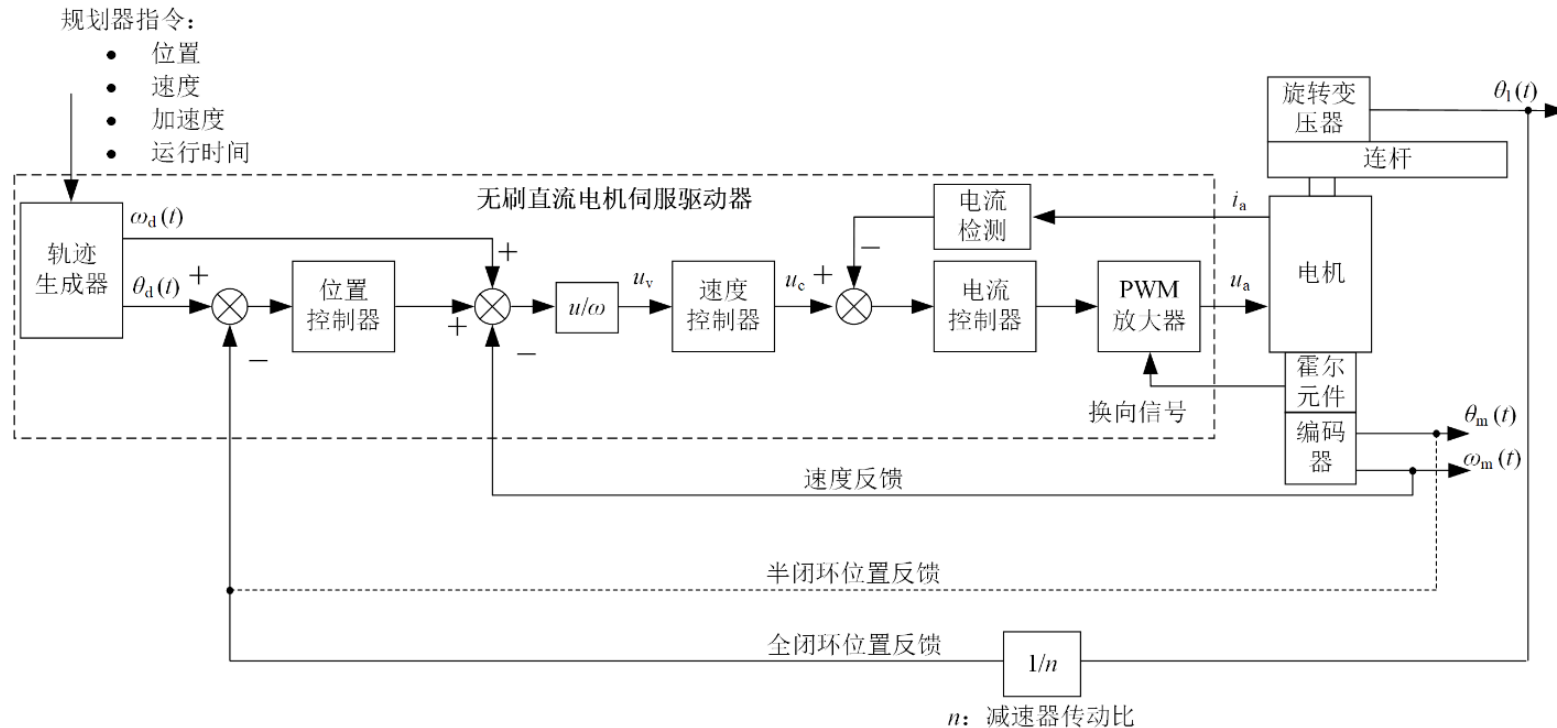


### ➤ 伺服驱动器功能：

1. 常规功率放大、换相和调频功能；
2. 位置-速度-电流闭环控制、电机位置指令更新、电机轨迹生成和插补；
3. 简单逻辑控制以及联网通讯；
4. 在关节动态耦合不强、运动学模型简单、轨迹精度要求不高的机器人中，可用伺服驱动器与PC或通用嵌入式控制器组成运动控制系统，省略运动控制器。

# 三种伺服电机比较

## ● 某无刷直流电机伺服驱动器原理



- 伺服驱动器工作模式：三环位置控制模式；速度控制模式；力矩模式
- 常规工业机器人，可采用PC+运动控制器+力矩模式伺服驱动器的方案，电流闭环由伺服驱动器完成，位置和速度闭环控制由运动控制器实现



# 总结



- 混合式步进电机具有精度高、成本低、具有保持力矩、便于计算机控制的优点，具有**定位**功能，常用于低成本机器人系统。
- 有刷直流永磁伺服电机、无刷直流永磁伺服电机和自控式永磁同步电机为常用伺服电机，具有**配套的驱动器**，构成统一的被控对象。
- 电压型放大器可简化为一个**电压增益**环节。电流型放大器可简化为一个**跨导增益**环节。
- 空心杯型电机是机器人常用有刷直流永磁伺服电机，具有**惯量小、力矩波动小、力矩大、调速性能好**的优点。有刷电机的静态特性可以用**机械特性和调速特性**来描述，动态特性则利用**微分方程**描述。
- 无刷直流永磁伺服电机与自控式永磁同步电机都采用了固定电枢和永磁转子的结构，利用电子换相获得旋转磁场。无刷直流永磁伺服电机采用**霍尔元件**实现控制，力矩控制特性一般。自控式永磁同步电机采用**旋转变压器或高分辨率编码器**实现了接近圆形的连续旋转磁场，力矩控制特性好。

**The End!**