

## 第三章 机器人常用电机及驱动器

### 3.1 步进电机及其驱动器

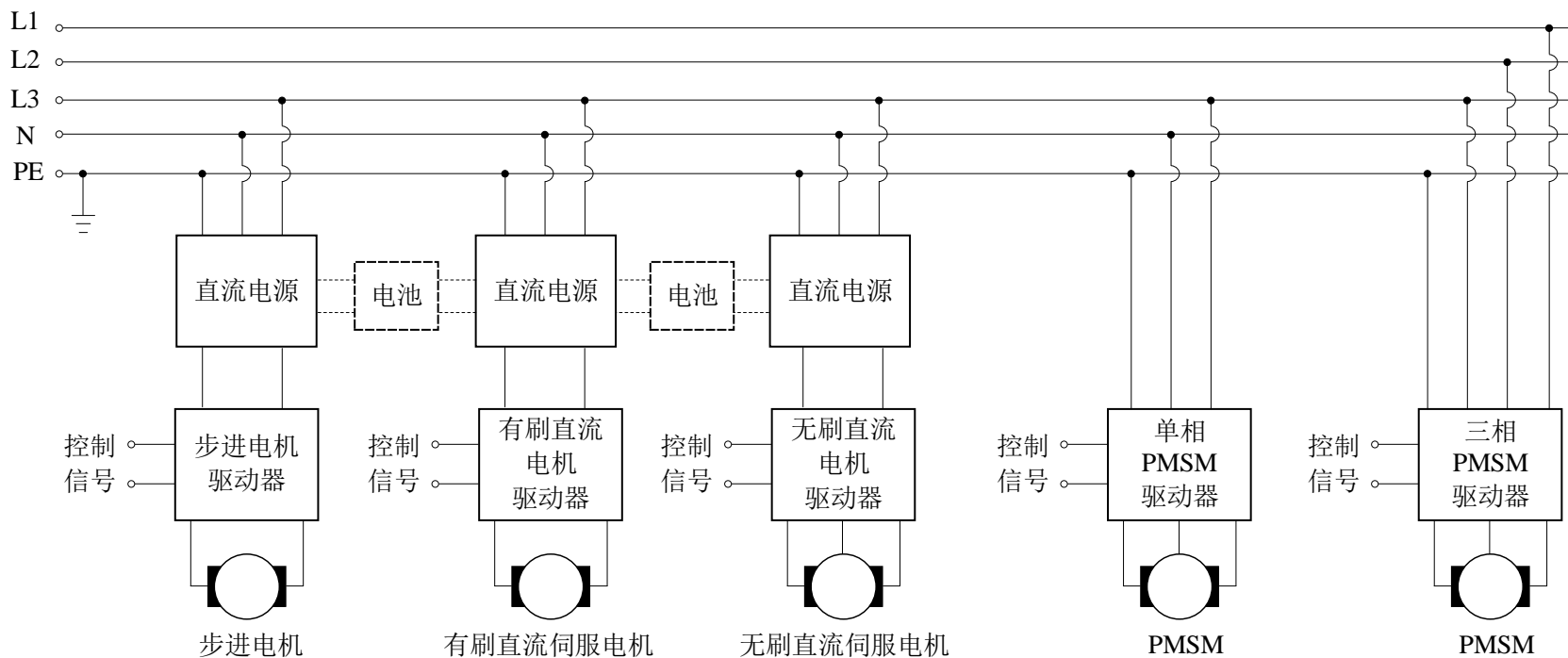
华东理工大学信息科学与工程学院

卿湘运

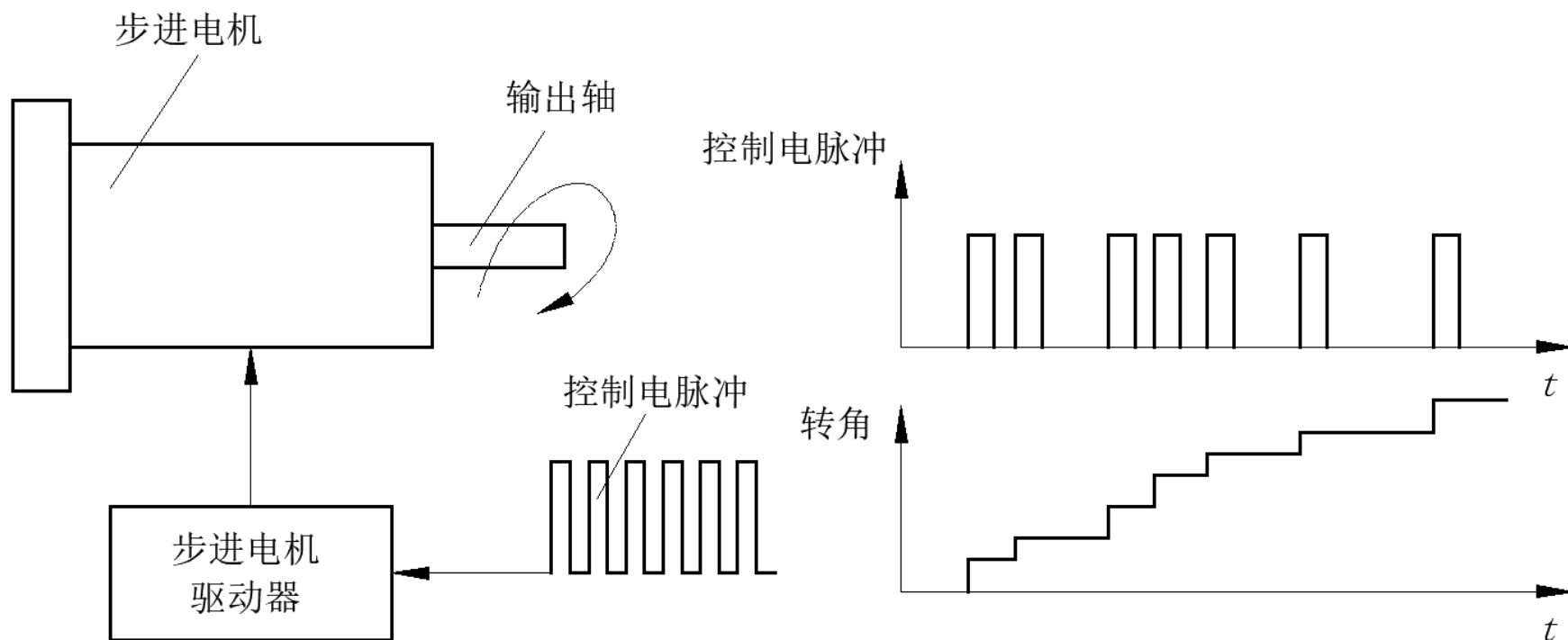
2024年1月

## ● 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

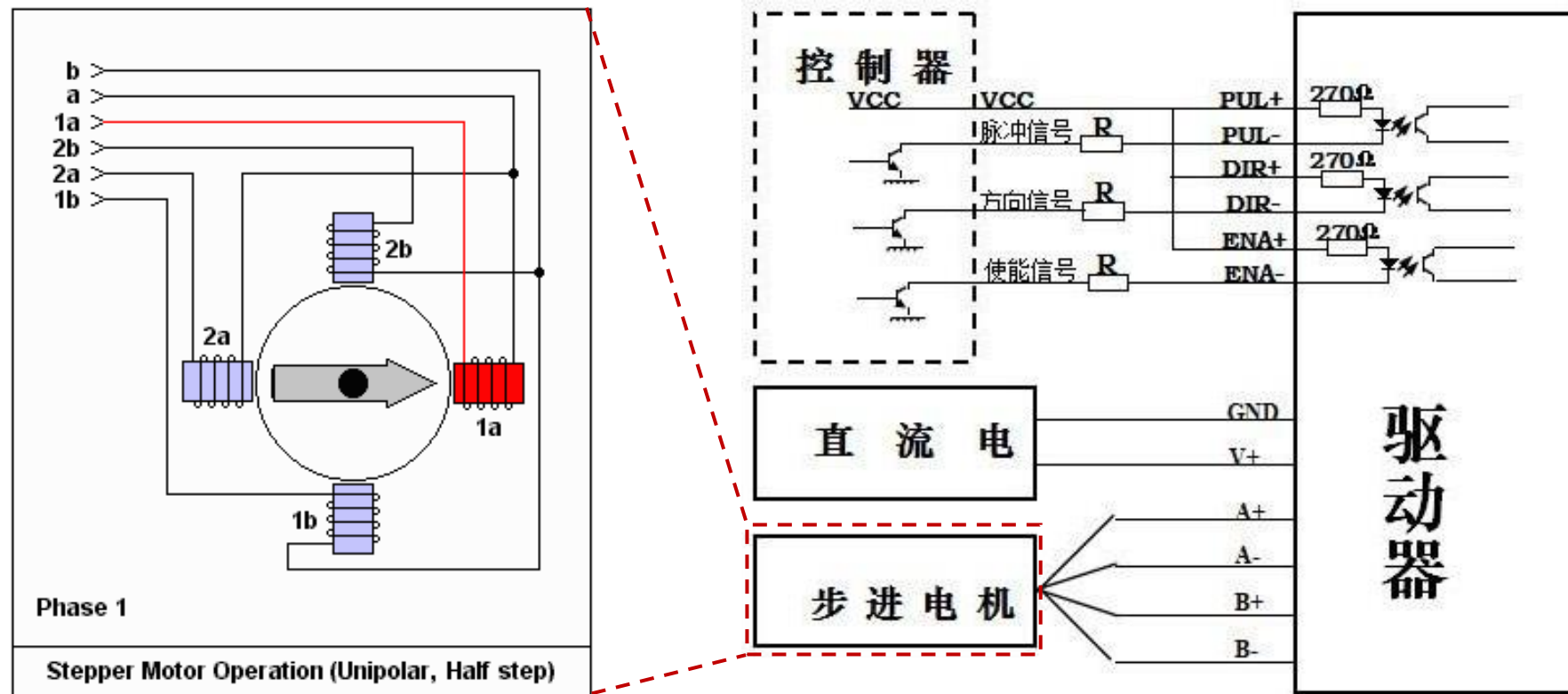


# 步进电机及其驱动器



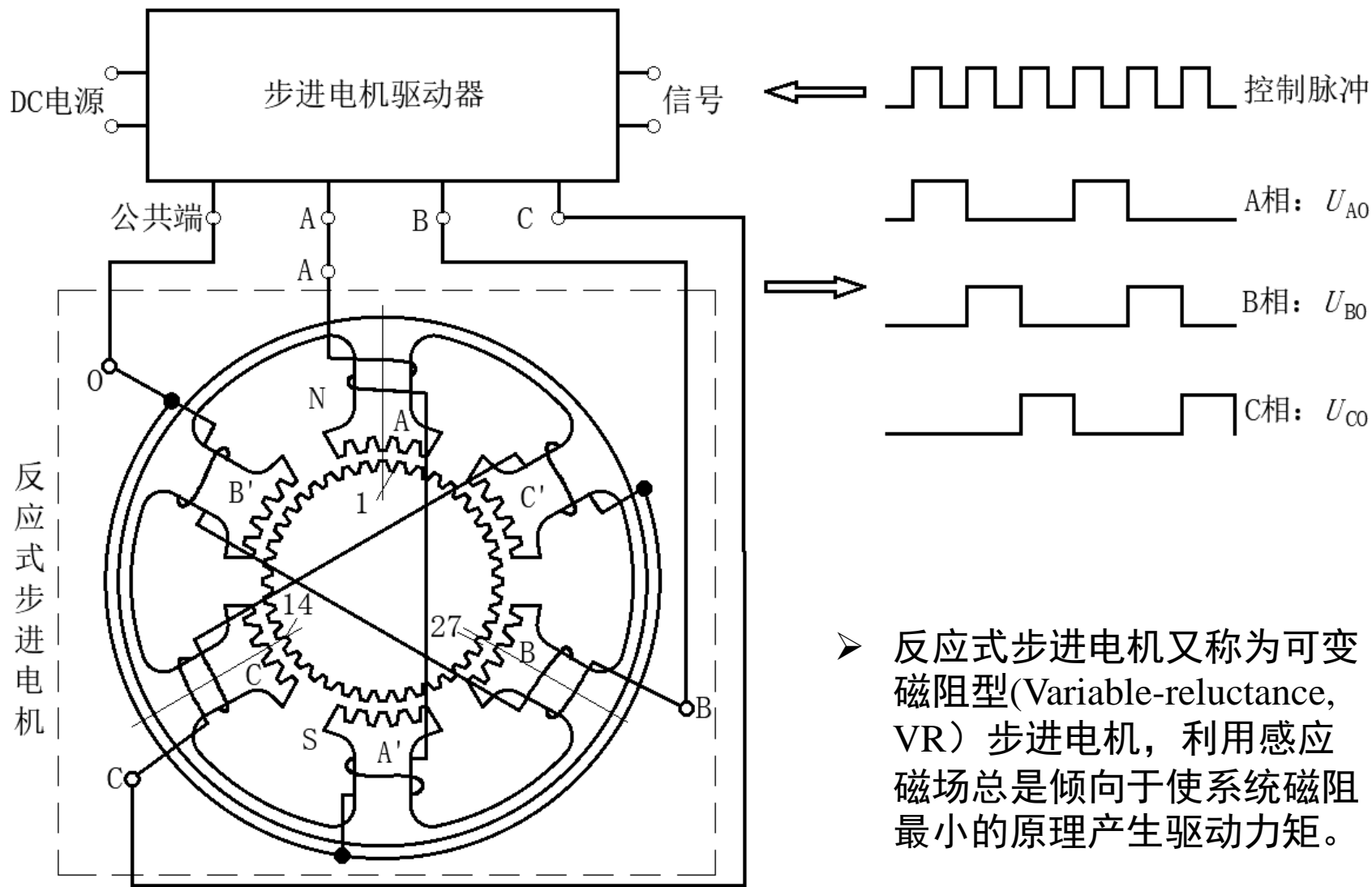
- 步进电机有**旋转式**、直线式和平面式三大类,本课仅讨论旋转式
- 步进电机输出的**角位移与驱动器接收到的控制脉冲数目成正比**
- 步进电机在数控机床、绘图仪、3D打印机和低成本机器人中应用广泛

# 步进电机原理简介

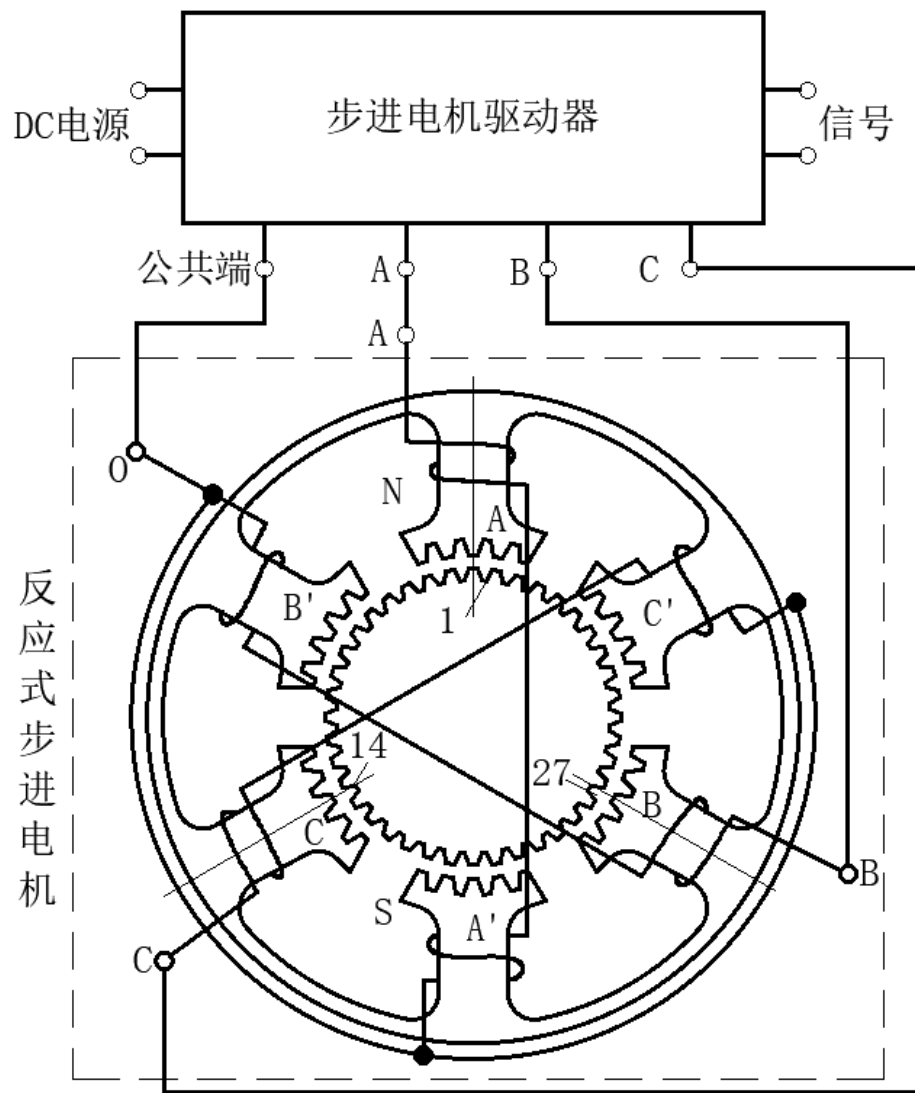


# † 反应式步进电机

## ● 结构



## ● 结构



### ➤ 转子

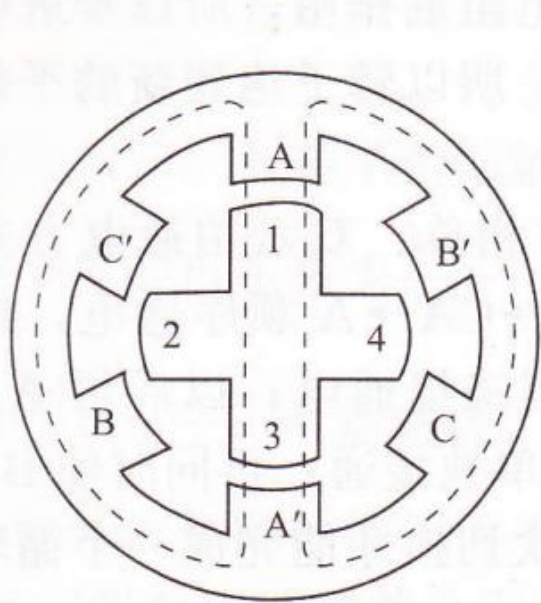
- 软磁材料——硅钢片
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$

### ➤ 定子

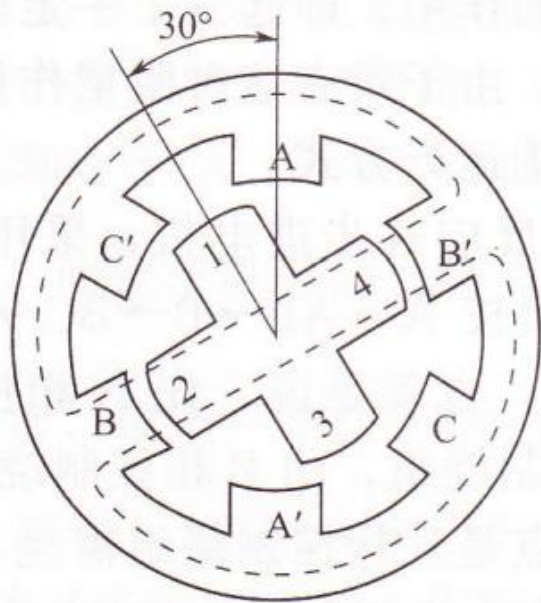
- 最少应有三对绕组
- 软磁材料——硅钢片
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$
- 一对绕组的齿与转子对齐时，另两对分别错开 $1/3$ 、 $2/3$ 齿距
- 一对绕组通电时，对极磁性相反

# † 反应式步进电机

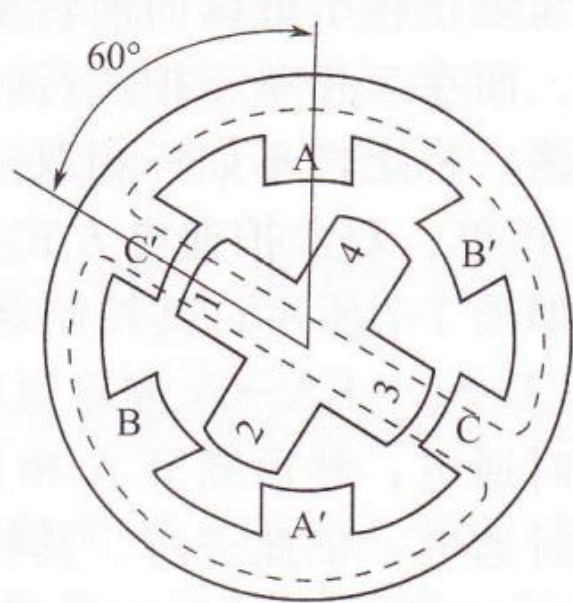
## ● 运行原理 —— “单三拍”



(a) A相通电



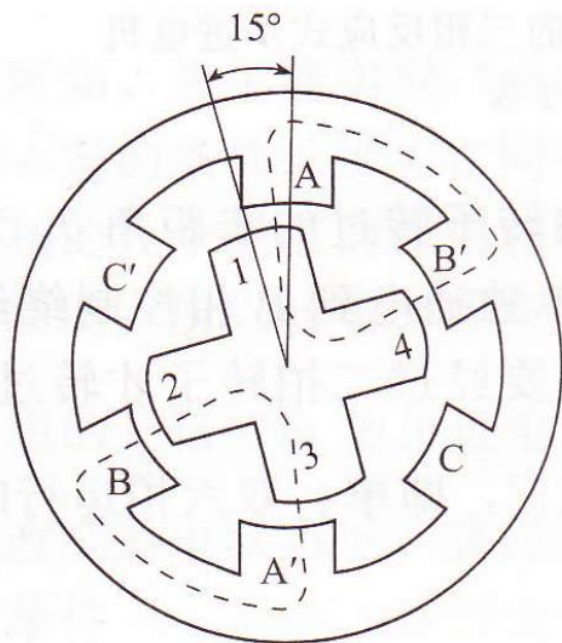
(b) B相通电



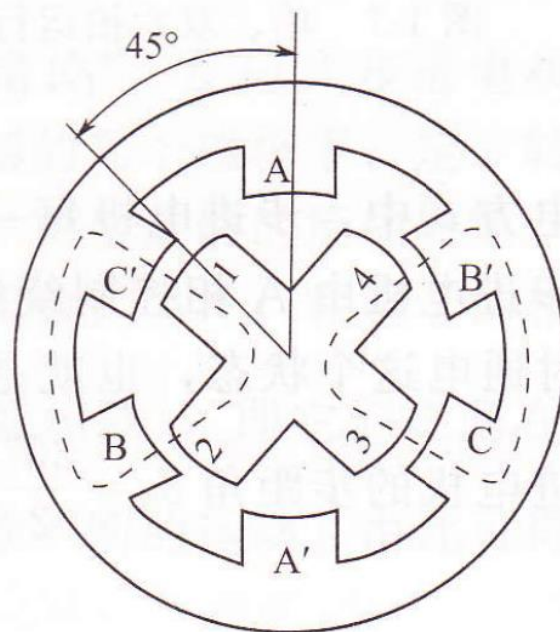
(c) C相通电

- 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：两拍之间断磁，易振荡

## ● 运行原理 —— “双三拍”



(a) AB相导通

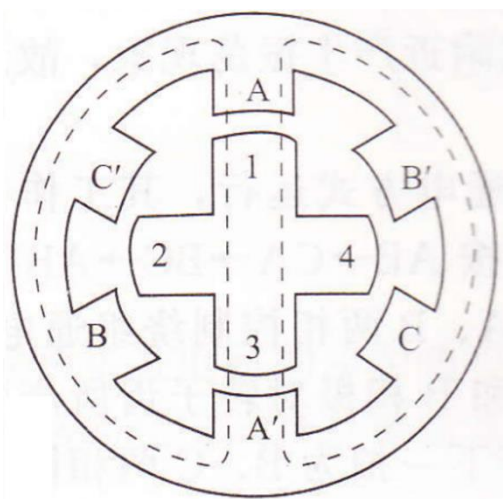


(b) BC相导通

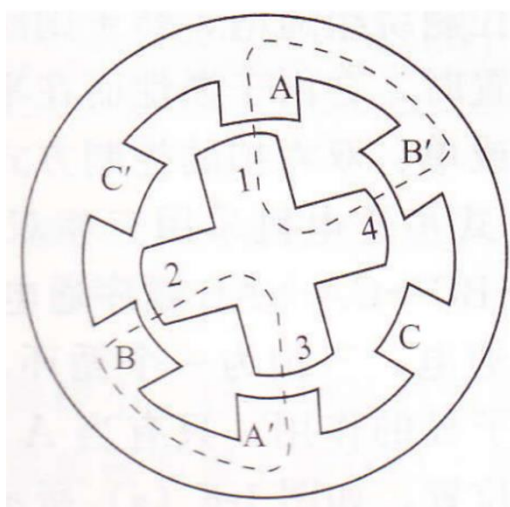
- 绕组导通顺序：AB→BC→CA→AB或AB→AC→CB→AB
- “双三拍” 工况步距角： $\theta_s = \theta_g / 3$
- 优点：总有绕组保持通电，产生电磁阻尼，稳定性好



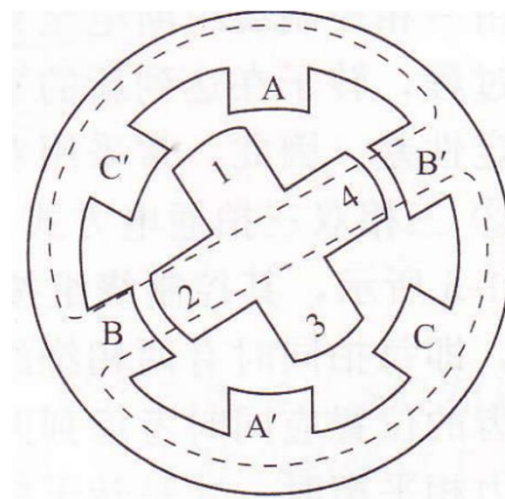
## ● 运行原理 —— “单-双六拍”



(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：稳定性好，步距角减小1倍，位置控制精度提高

- 步距角计算公式

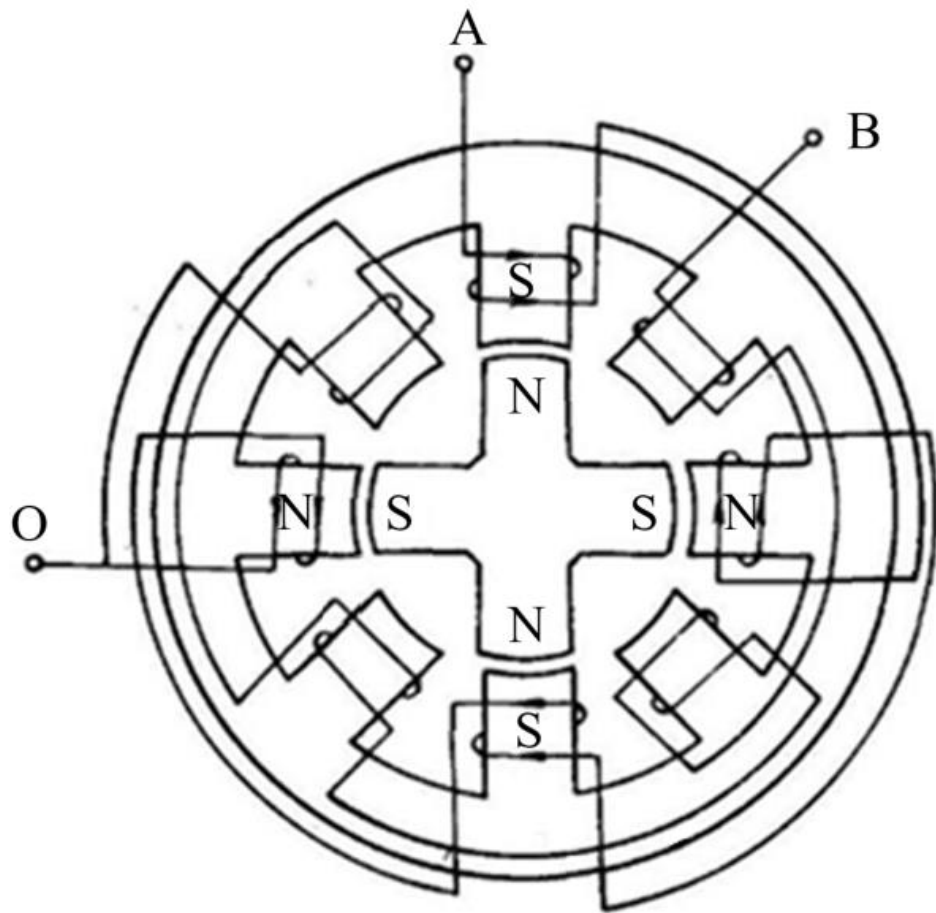
$$\theta_s = \frac{360^\circ}{mZ_r C}$$

- $m$  —— 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。

## ● 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

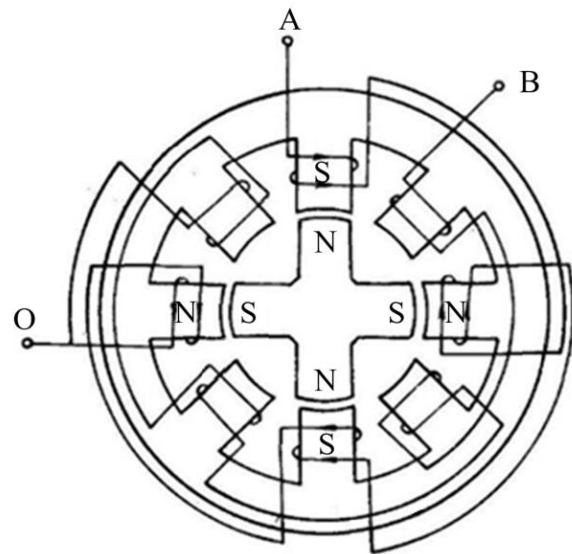
- 采用集中绕组，可采用共极接线
- 软磁材料——硅钢片
- 每组绕组的极数与转子极数相等
- 单绕组通电时，对极磁性相同，非对极磁性相反

## ● 运行原理

- “单四拍”： $A \rightarrow B \rightarrow (-A) \rightarrow (-B) \rightarrow A$
- “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 $C=2$

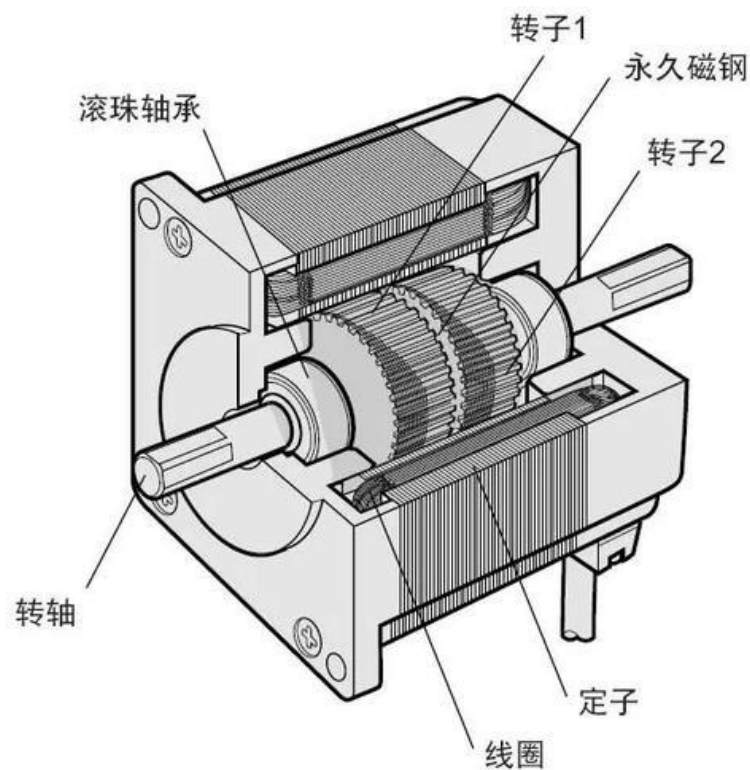
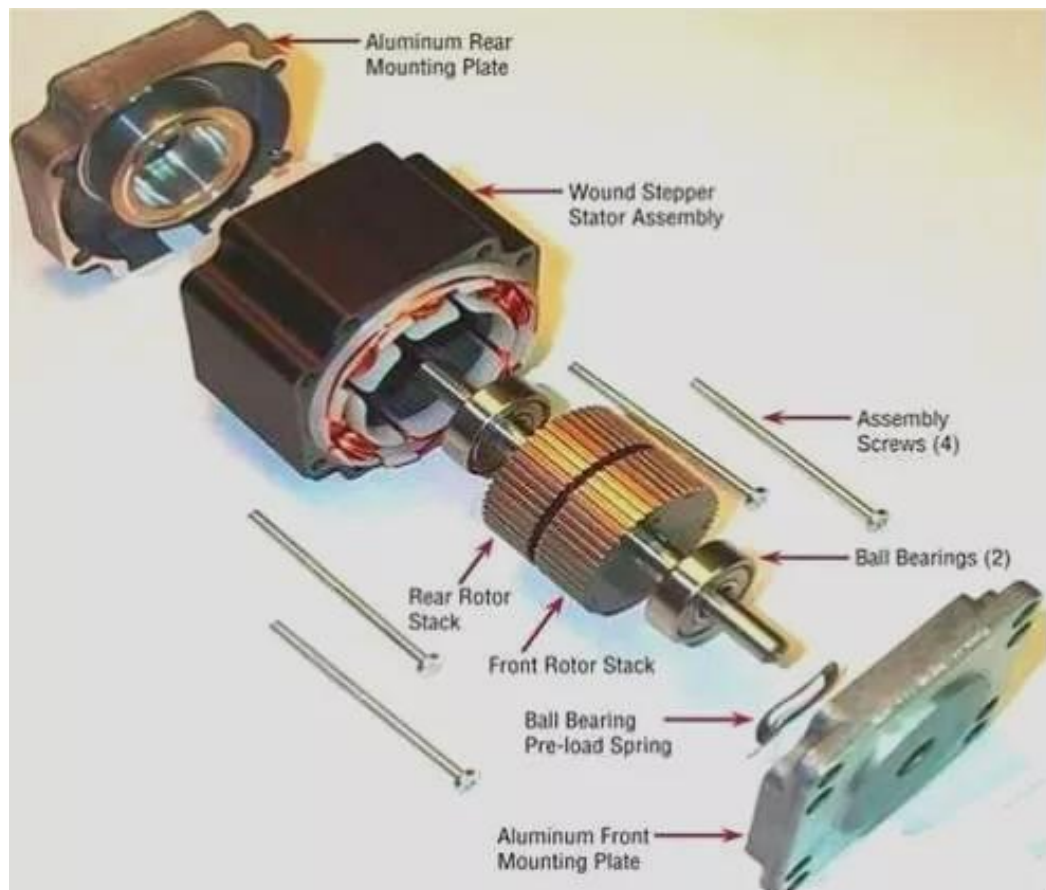


## ● 特点

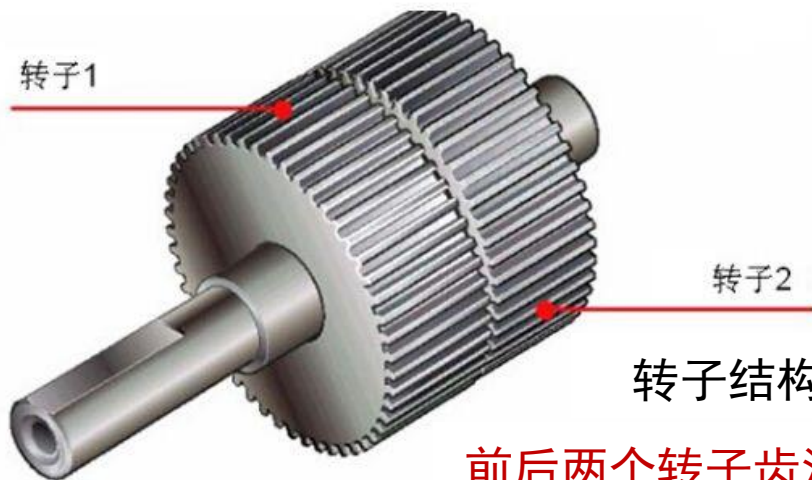
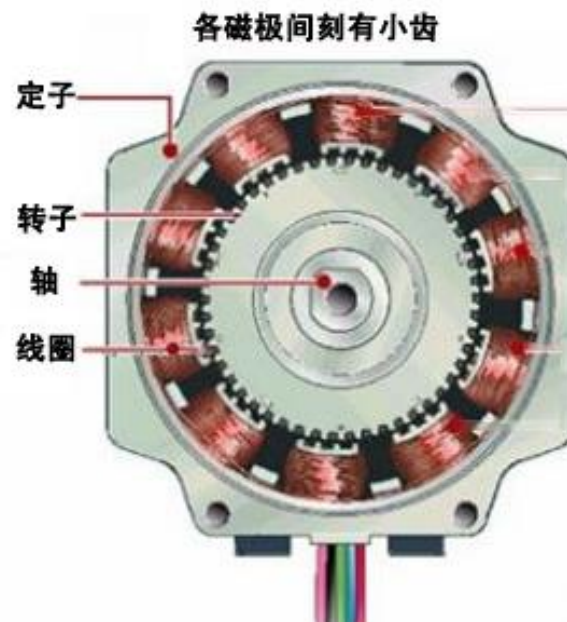
- 控制功率小，输出转矩大；
- 断电时有一定的定位力矩；
- 转子内阻尼大，启动频率低，低频时不易振荡，运行稳定性好；
- 最小相数为2；
- 步距角大，例如最小步距角为 $7.5^\circ$ ，定位分辨率低；
- 要求在线圈上施加正负脉冲电压，驱动器电路相对复杂。

# ✦ 混合式步进电机

## ● 结构



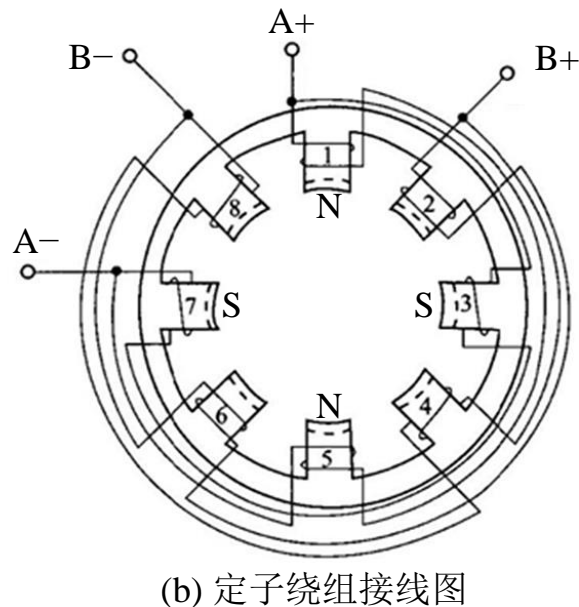
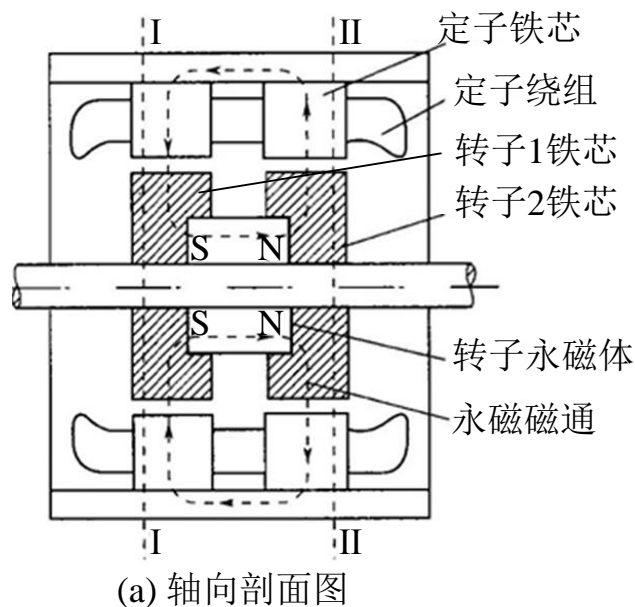
## ● 结构——定子和转子



前后两个转子齿沿圆周错开1/2齿距



## ● 结构



### ➤ 转子

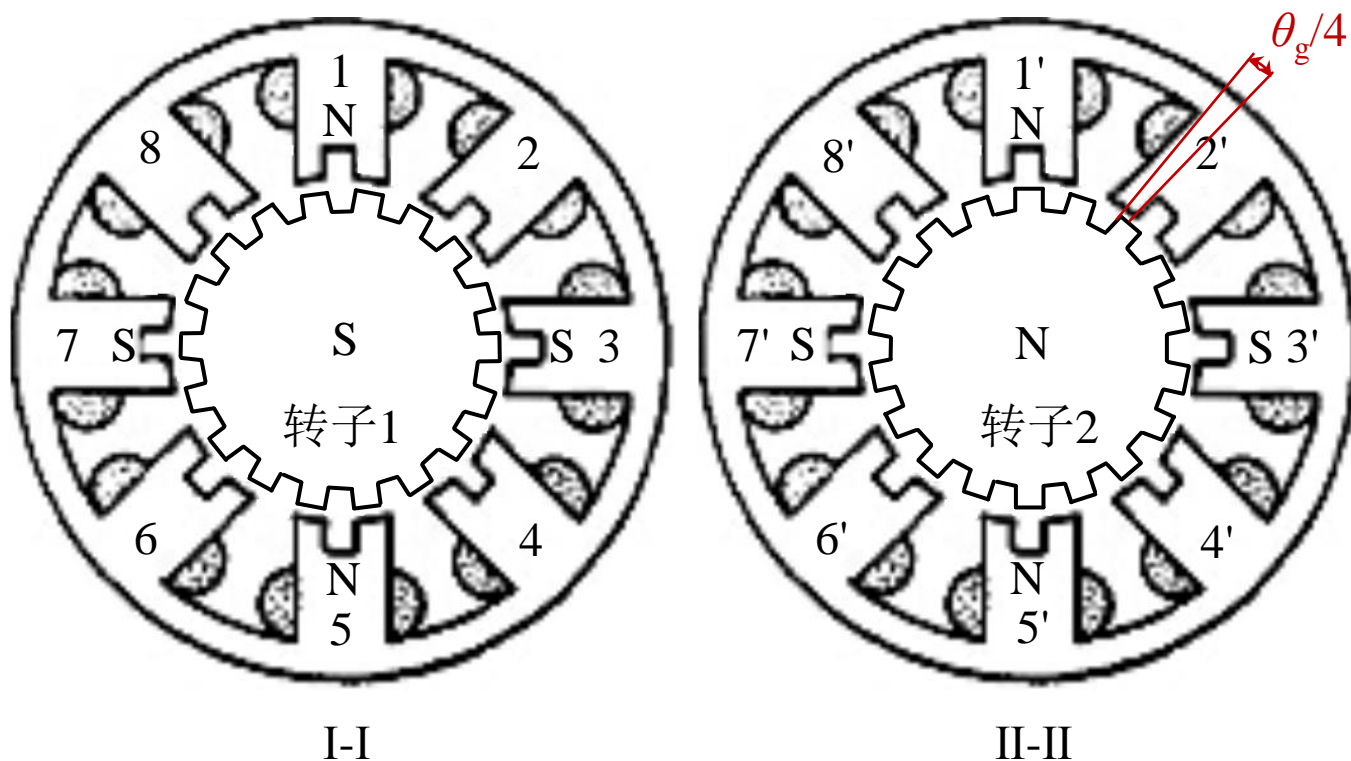
- 软磁材料+永磁体
- 转子分两段，两端磁性相反
- 圆周有小齿，齿距 $\theta_g$
- 前后两个转子齿沿圆周错开 $1/2$ 齿距 $\theta_g$

### ➤ 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”

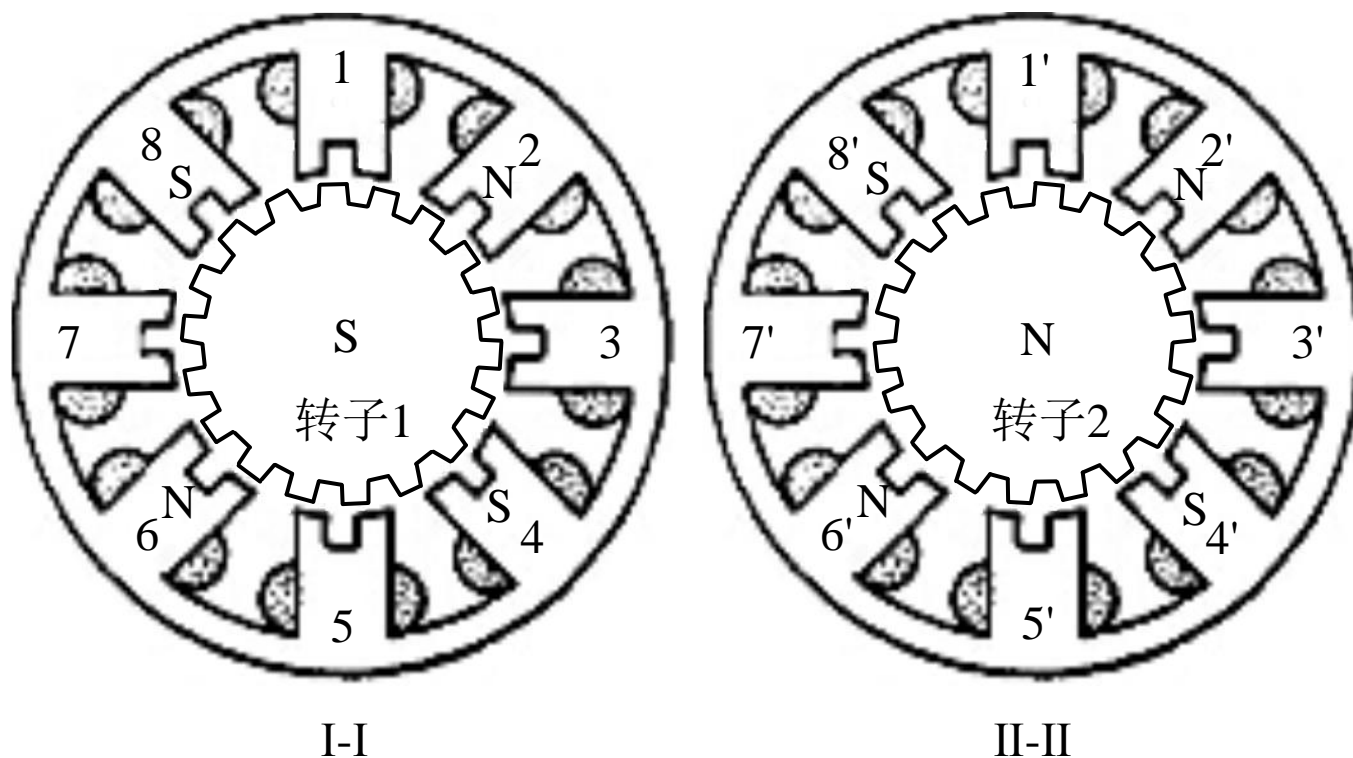
- A相通正电压
- 转子1的S极齿和转子2的N极齿分别与定子1-5和3'-7'极的齿对正，获得最小磁阻；而3-7和1'-5'极齿与转子的槽对正，获得最大磁阻
- 转子齿与B相定子齿错开1/4齿距



(a) A相通正电压

## ● 运行原理 —— “单四拍”

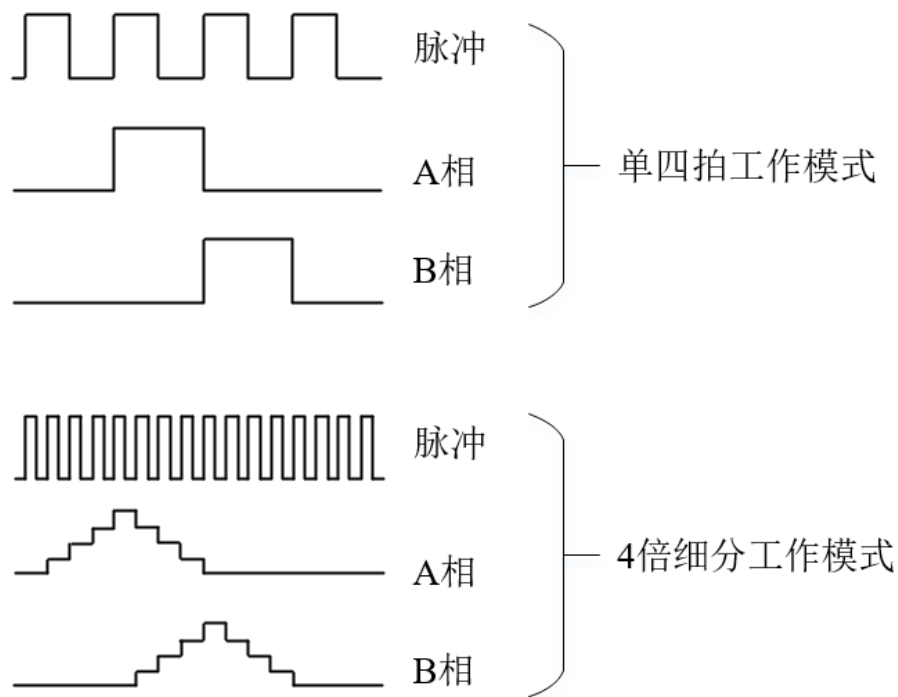
- 定子B相通正电压
- 转子从顺时针旋转1/4齿距
- 两相电机的步距角： $\theta_s = \theta_g / 4$



(b) B相通正电压

## ● 运行原理

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



- 步距角计算公式：

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

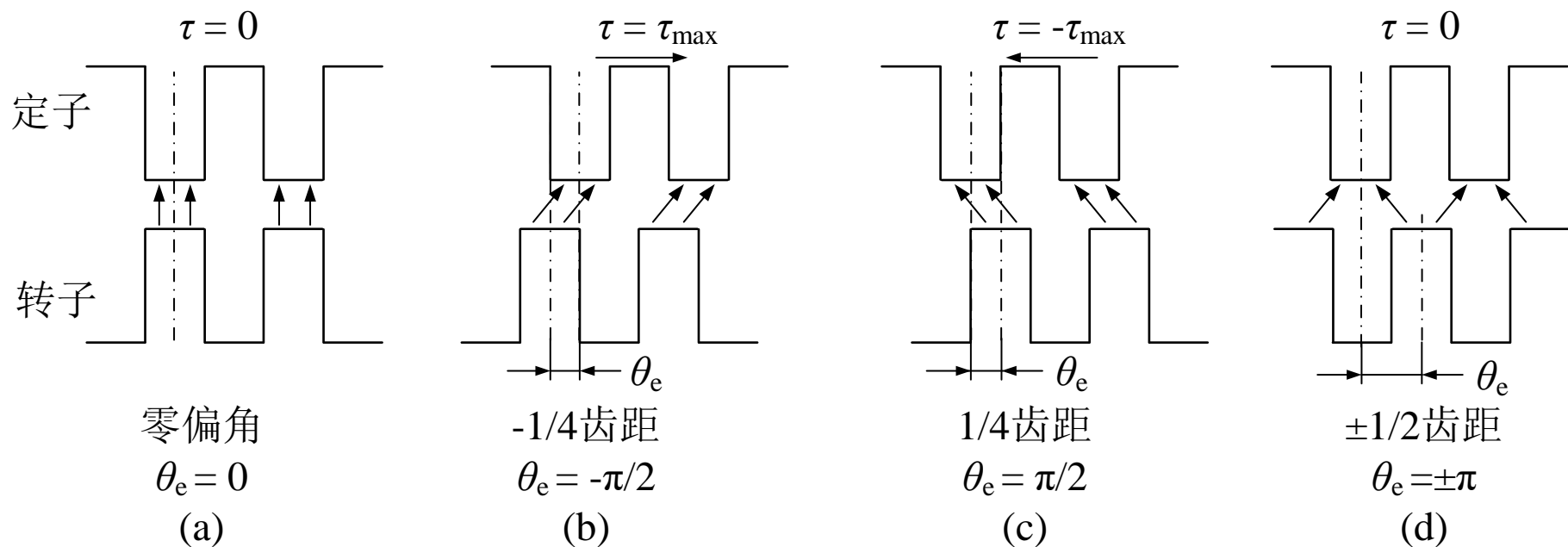
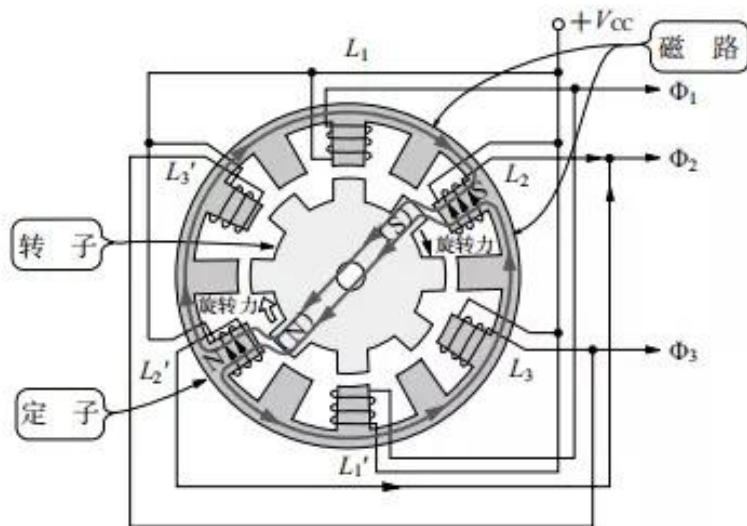
- $m$  —— 相数
- $Z_r$  —— 转子齿数
- $C$  —— 细分倍数
- 两相电机4拍是基本工况， $C=1$ ，8拍相当于2倍细分， $C=2$

## ● 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。

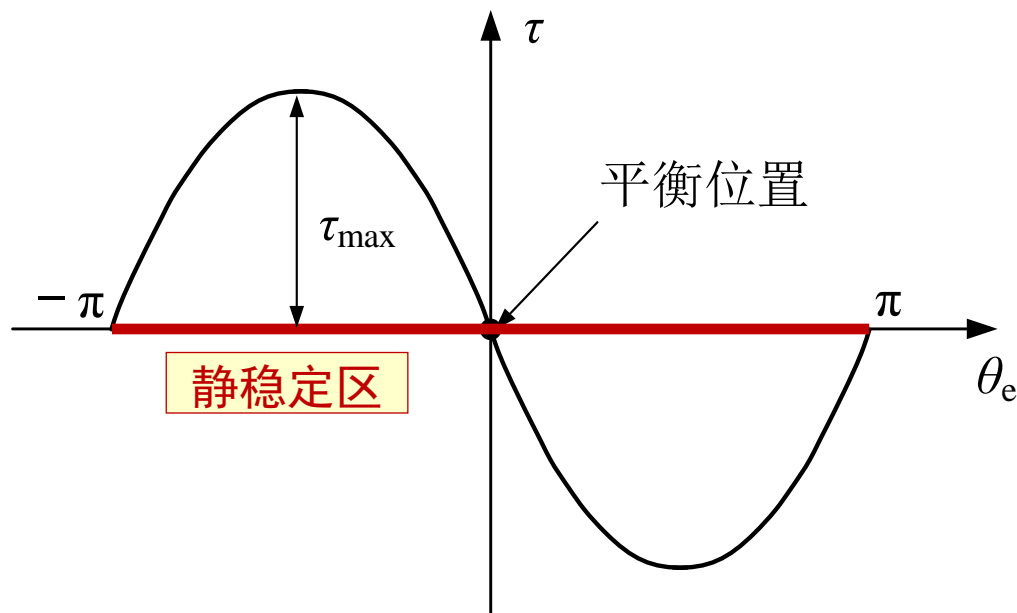
## ● 通电保持状态

- 电角度：定义一个转子齿距对应的电角度为 $2\pi$
- 失调角 $\theta_e$ ：转子偏离初始平衡位置的电角度



## ● 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



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

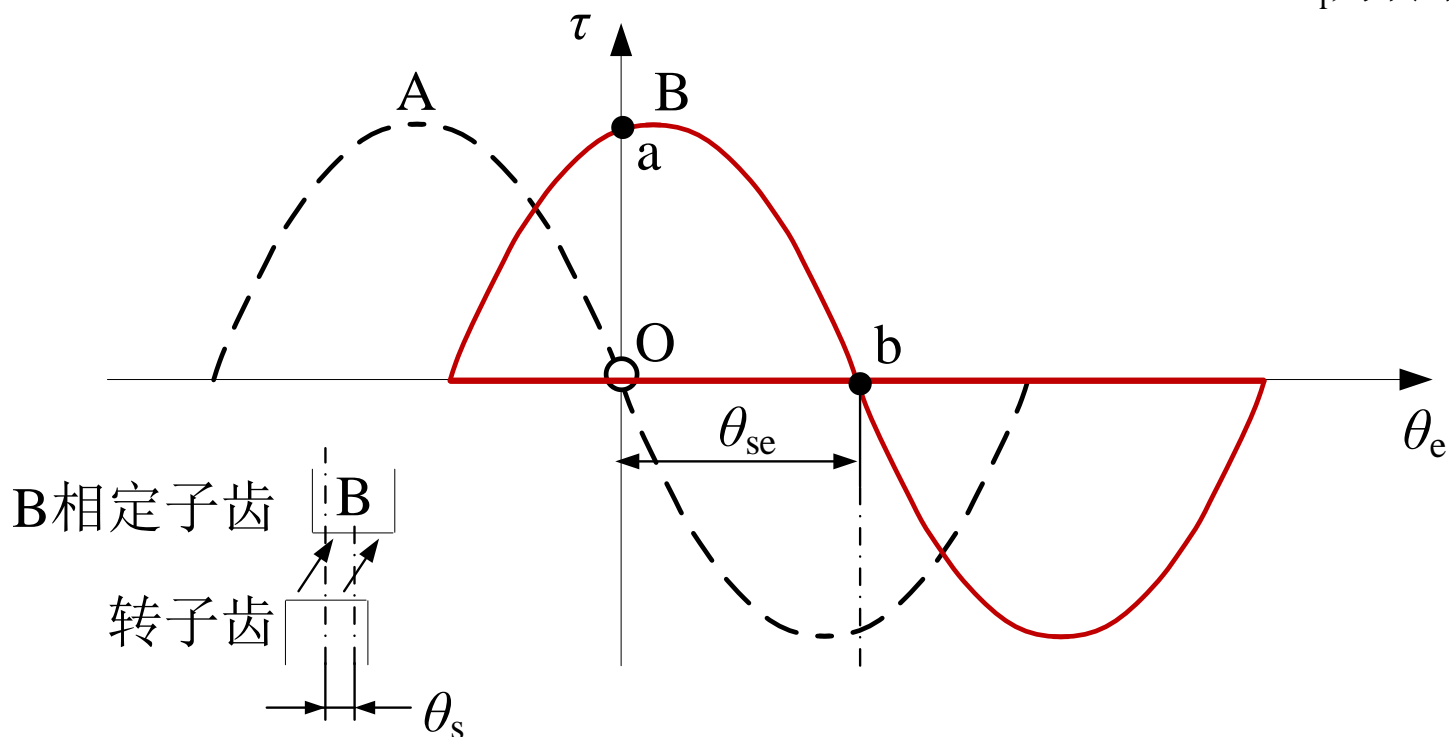
- $K_i$ : 电机转矩常数
- $i$ : 绕组电流

## ● 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 $\theta_{se}$
- B相绕组将对转子施加一个电磁转矩

$$\theta_{se} = Z_r \theta_s$$

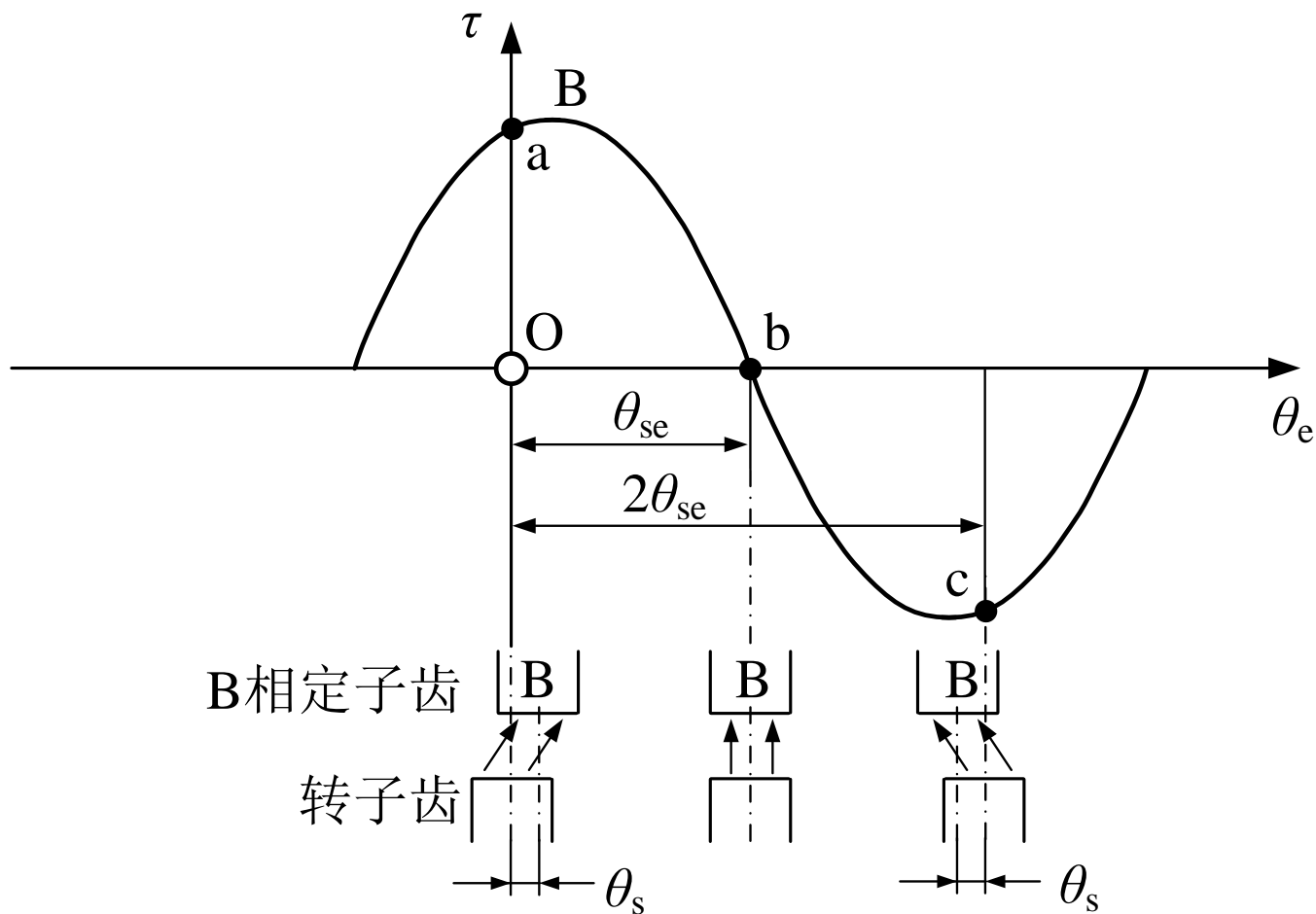
- $Z_r$ 为转子齿数





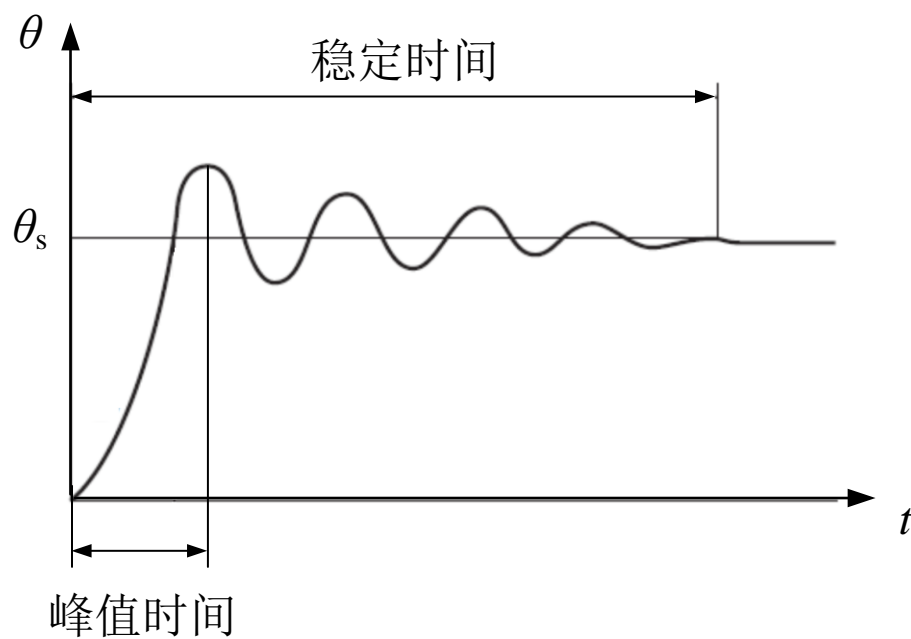
## ● 单步运行状态

- 如果没有阻尼，转子将在a、c两点间振荡



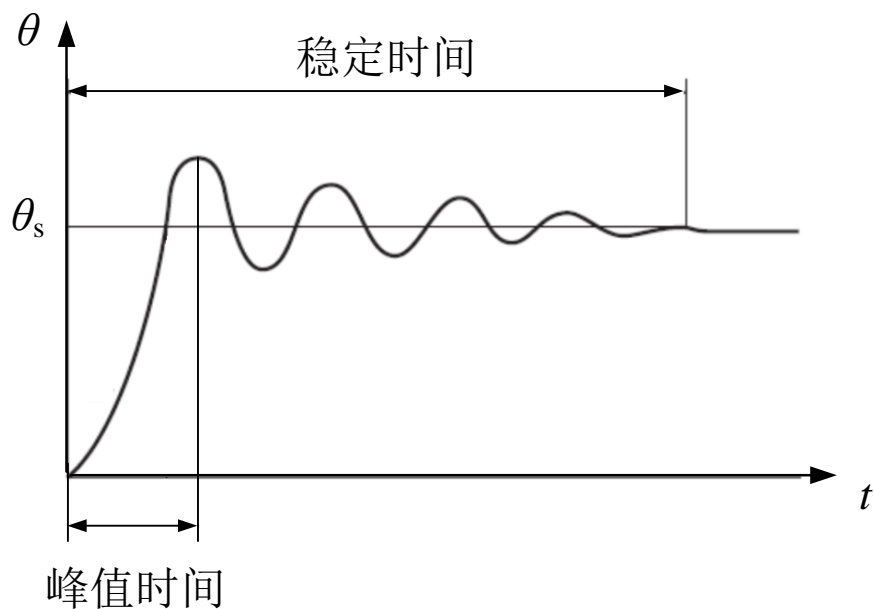
## ● 单步运行状态

- 真实系统的阻尼作用下，电机经过一定时间后停止运动



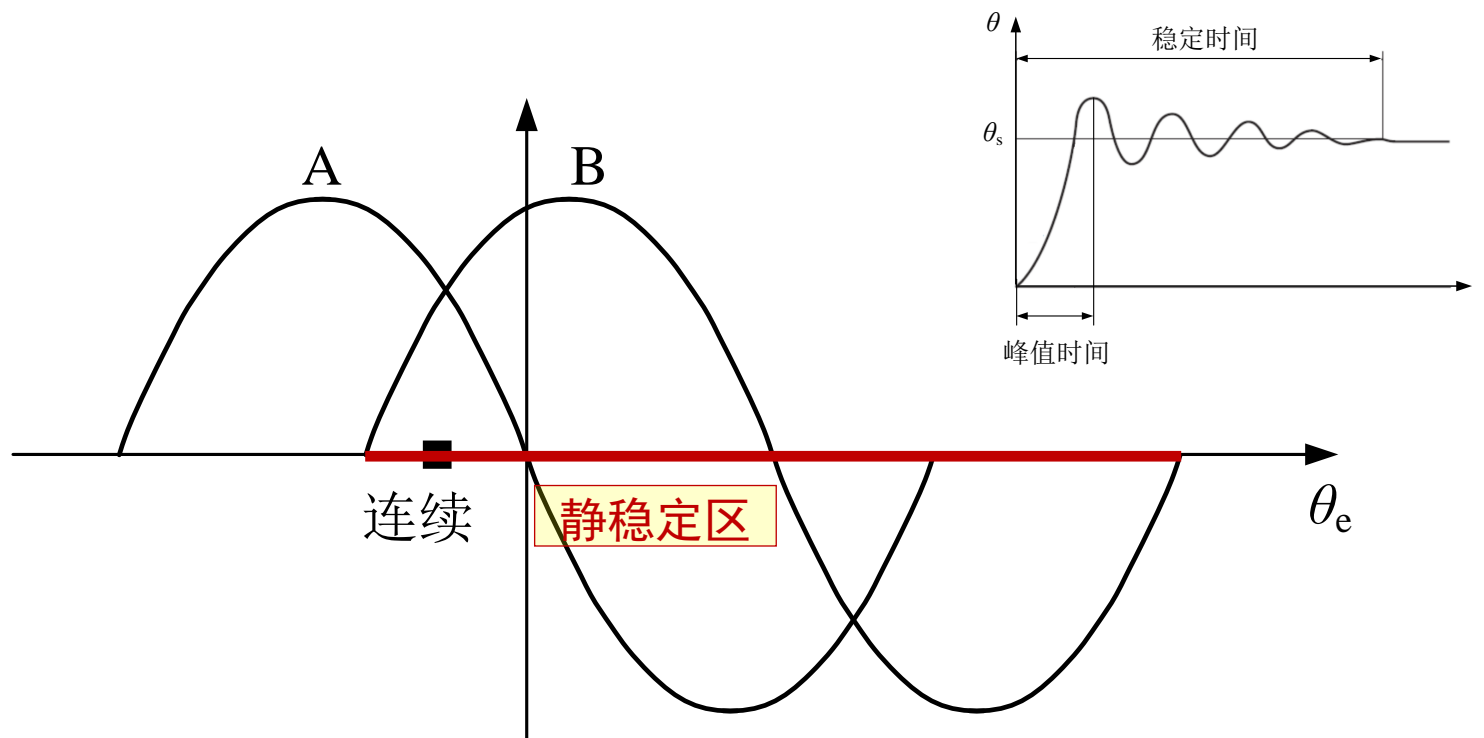
## ● 连续运行状态 —— 低频振荡

- 如果连续脉冲的频率很低，使得一拍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**



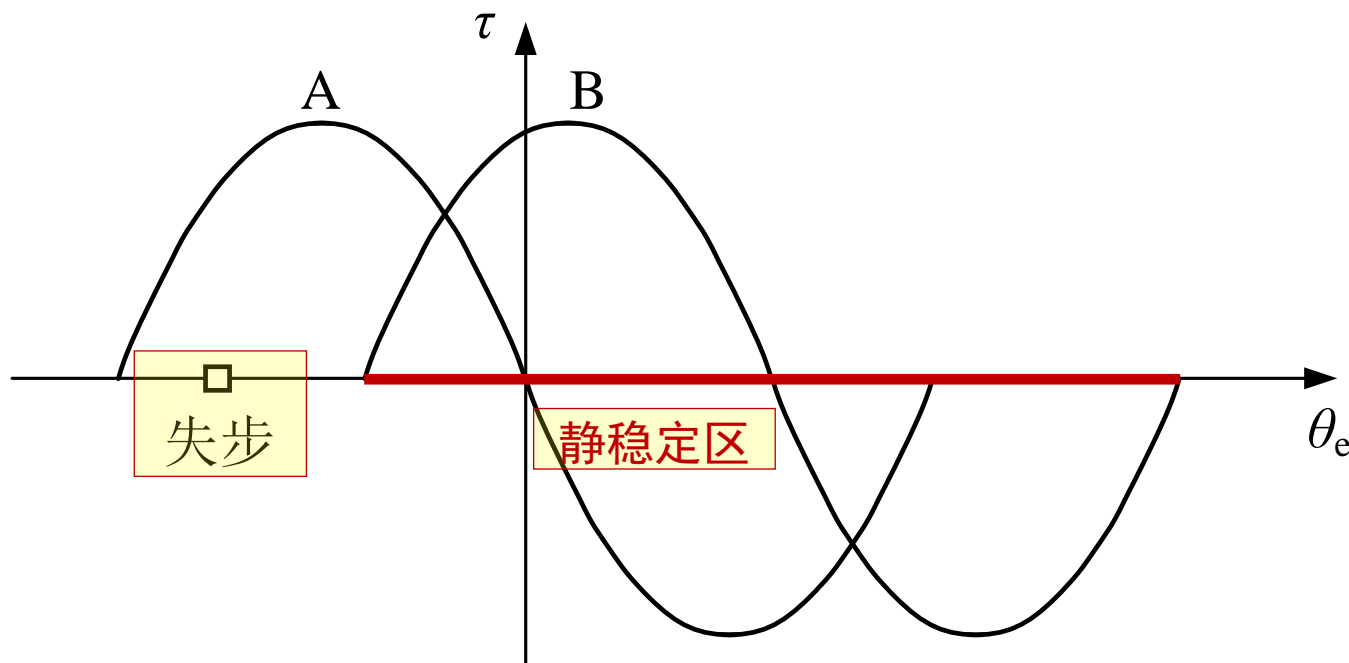
## ● 连续运行状态 —— 平稳运行

- 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，

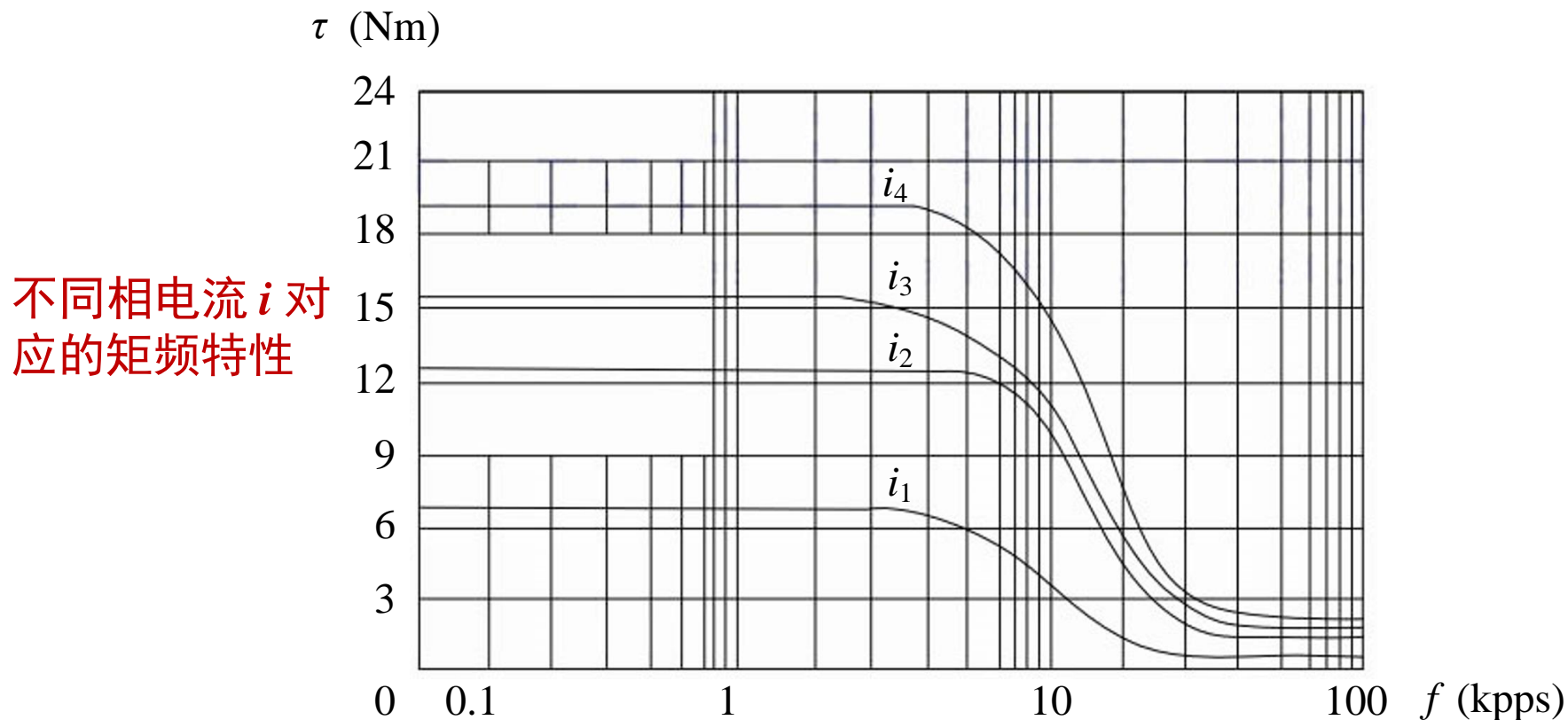


## ● 连续运行状态 —— 高频失步

- 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

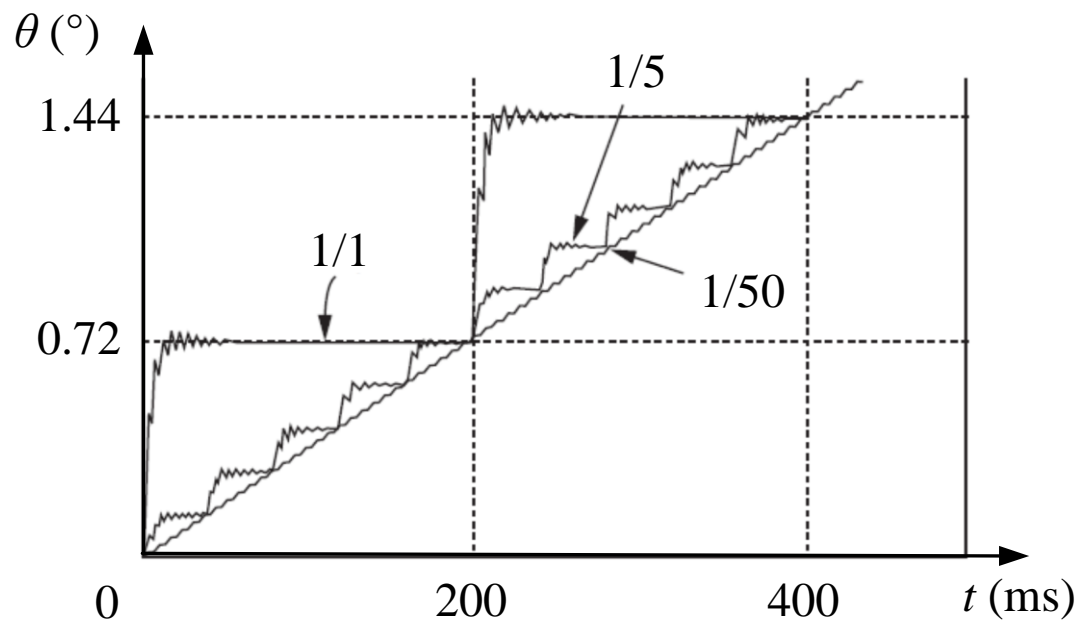


## ● 矩频特性



- 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



- 提升位置分辨率
- 低速时脉冲频率高——提高低速运行性能
- 转速计算公式

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

- $n$ ——电机转速
- $f$ ——脉冲频率
- $Z_r$ ——转子齿数
- $N$ ——拍数  $= 2mC$

## ● 主要性能指标

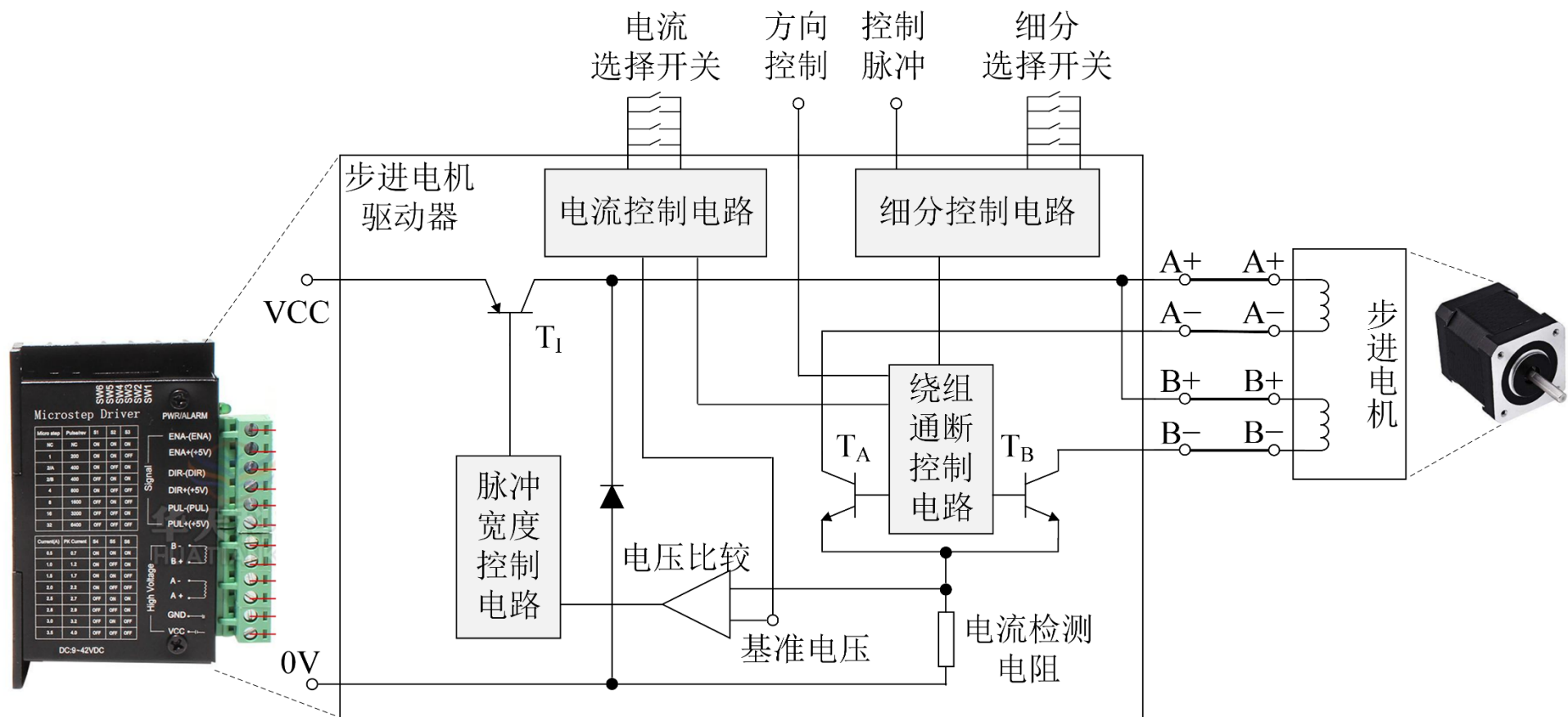
- **最大静转矩 $\tau_{\max}$** ——静止状态下，当某相绕组通额定电流时，可以抵抗的最大负载力矩
- **步距角 $\theta_s$** ——一个控制脉冲作用下转过的角位移
- **静态步距角误差 $\Delta\theta_s$** ——实际步距角与理论步距角之间的差值
- **启动频率 $f_{st}$** ——不失步启动的最高脉冲频率，包括空载启动频率和带载启动频率
- **最高运行频率 $f_{ru}$ 和矩频特性**——保持不失步连续运行的最高频率，特定负载下的最高运行频率，可由步进电机的**矩频特性曲线**确定





# 步进电机驱动器

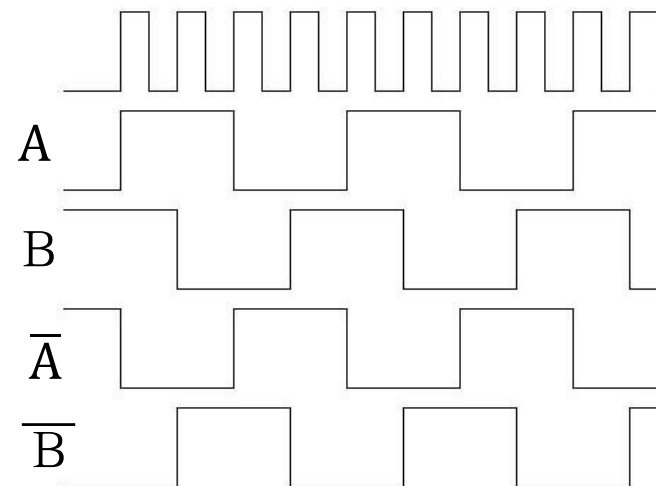
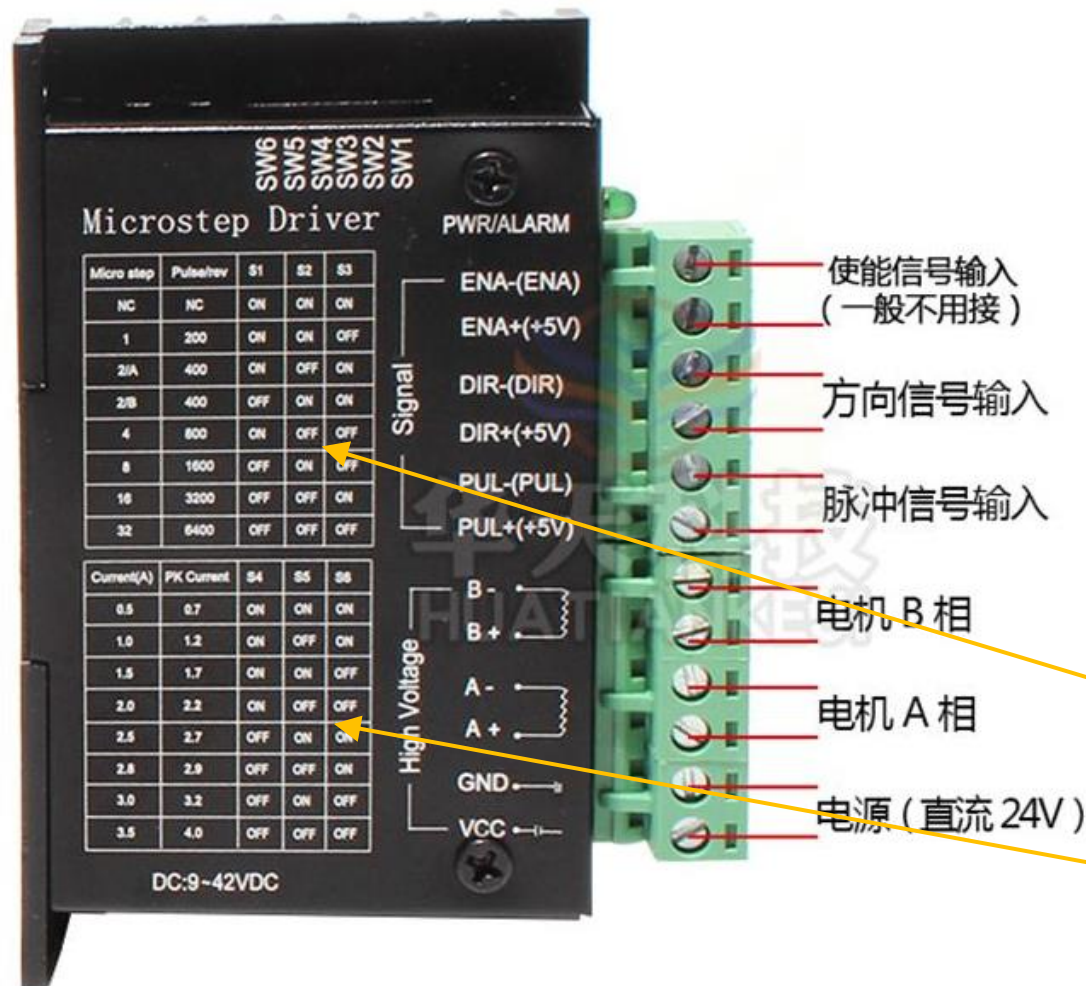
## ● 恒流型步进电机驱动器原理





# 步进电机驱动器

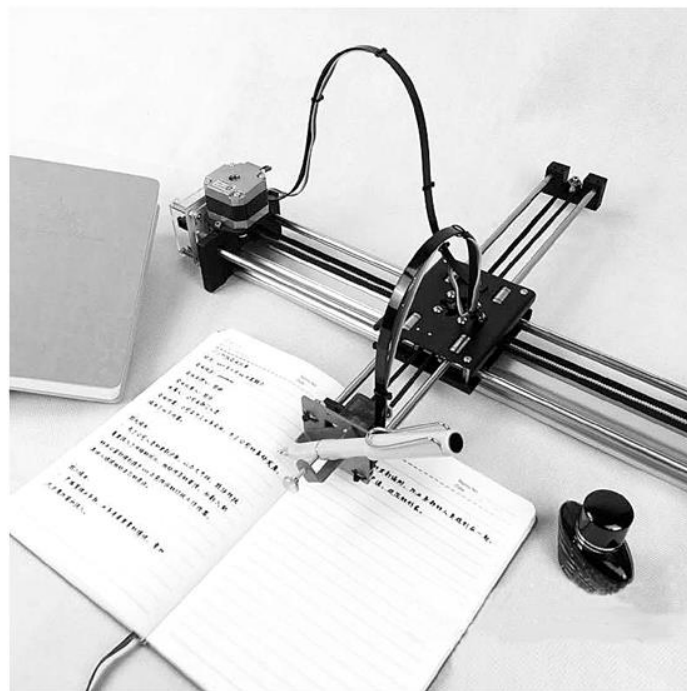
## ● 引脚及输出波形



- 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

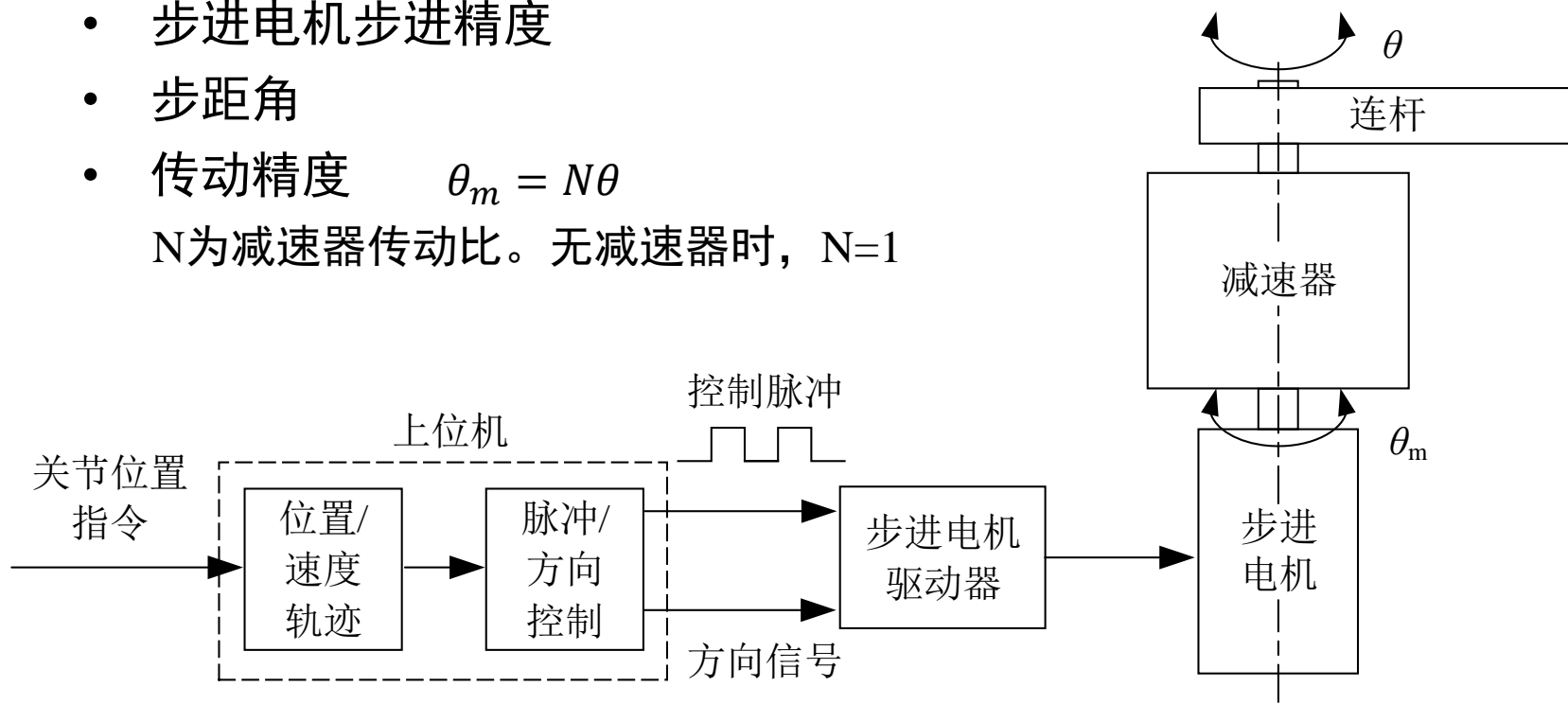
## ● 适用场合

- 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

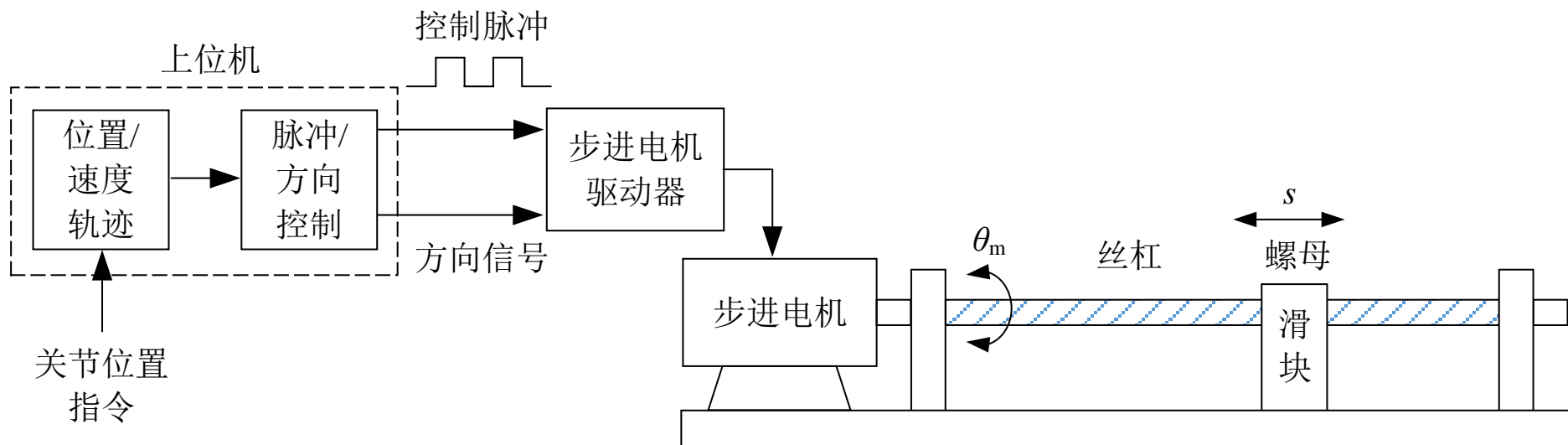


## ● 步进电机的开环控制

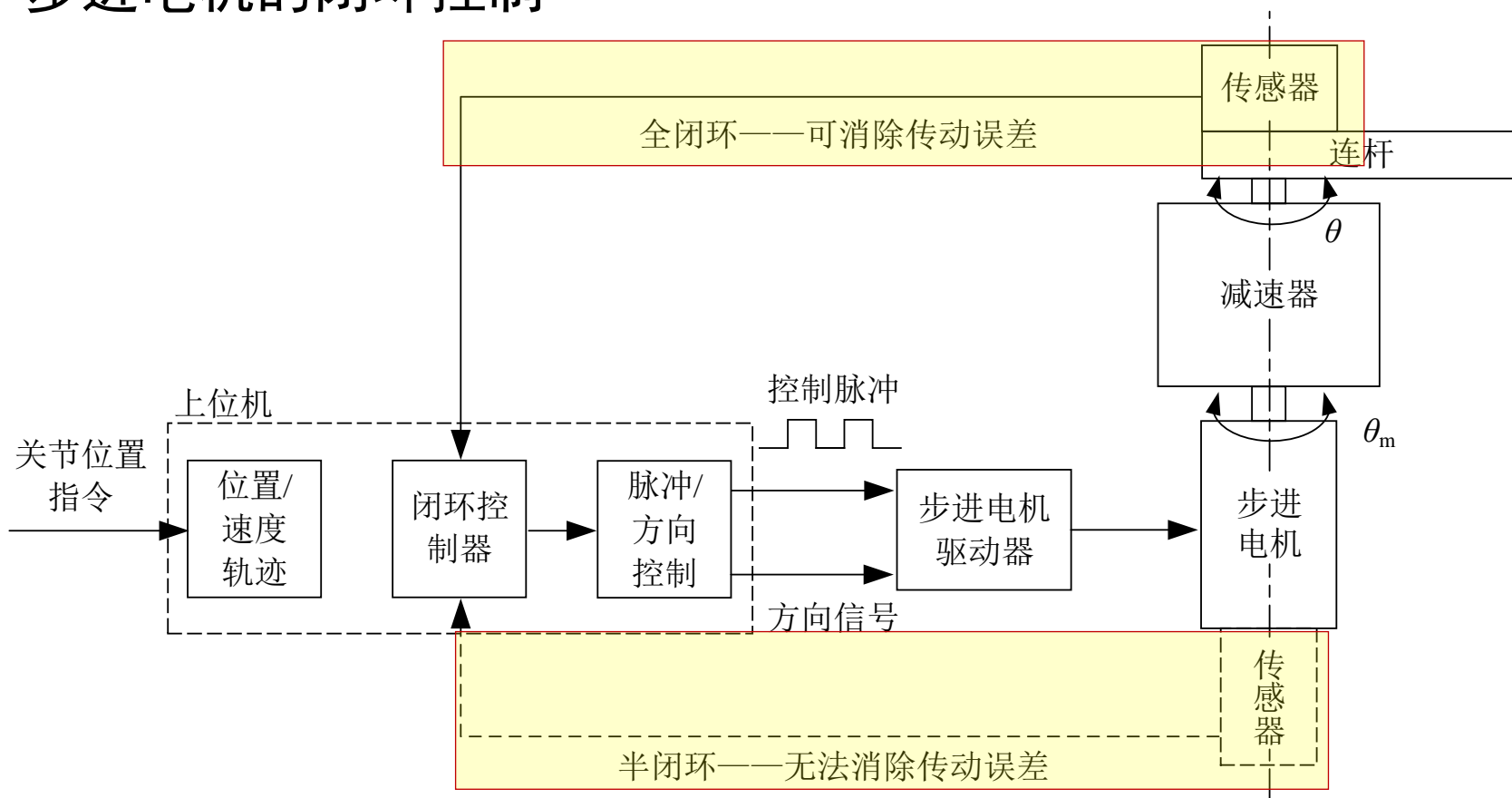
### ➤ 步进电机角位移与滑块线位移的传动模型

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

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

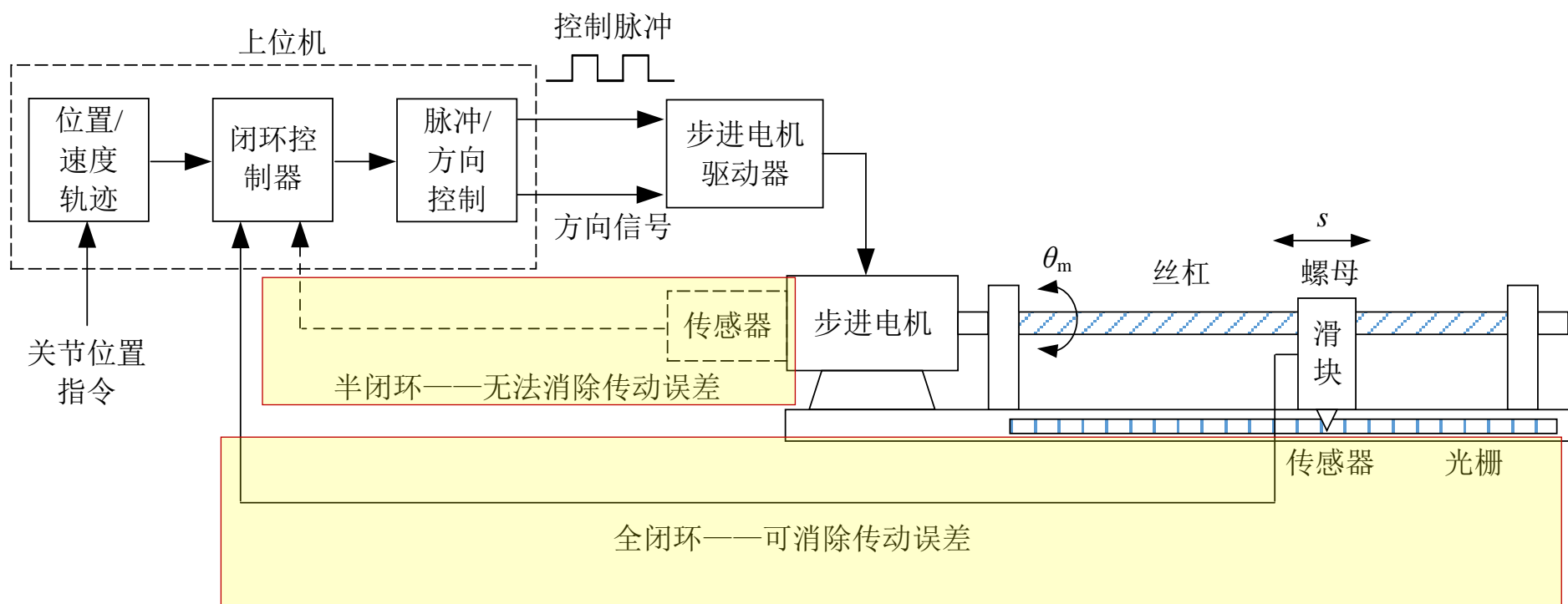


## ● 步进电机的闭环控制



- 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

## ● 直线关节 —— 闭环位置控制

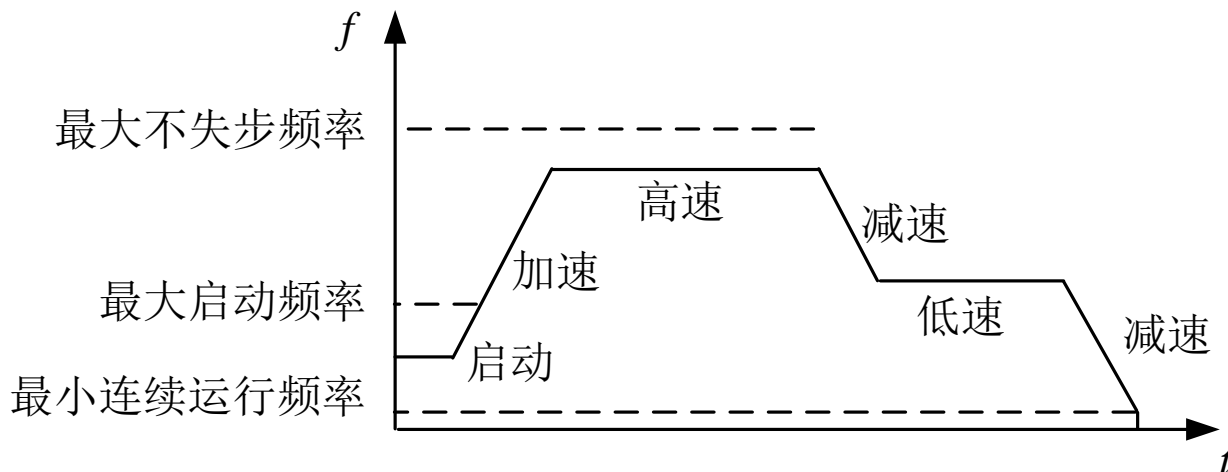


- 仅利用驱动电机转角反馈信号构成的闭环系统，称为**半闭环**位置伺服系统
- 在关节上安装位置传感器，根据关节位移信号构成**全闭环**位置伺服系统



## ● 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





## ● 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。



## 作业

- 1、简述步进电机实现开环位置保持功能的原理及注意事项。
- 2、在校核步进电机的转矩时，除了需要考虑被拖动对象所受的负载转矩，是否需要考虑负载的动力学特性？为什么？
- 3、步进电机的输出力矩是否可控？为什么？