

## 第三章 机器人常用电机及驱动器

### 3.3 无刷永磁伺服电机及其驱动器

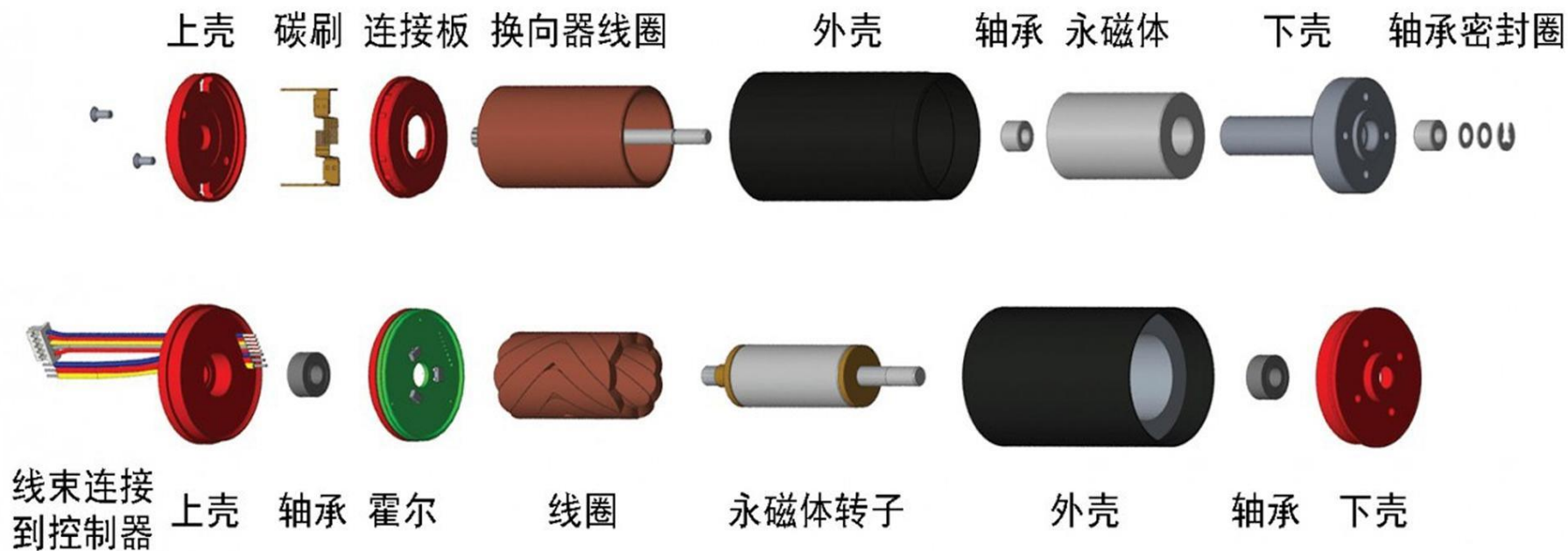
华东理工大学信息科学与工程学院

卿湘运

2024年1月

## ● 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

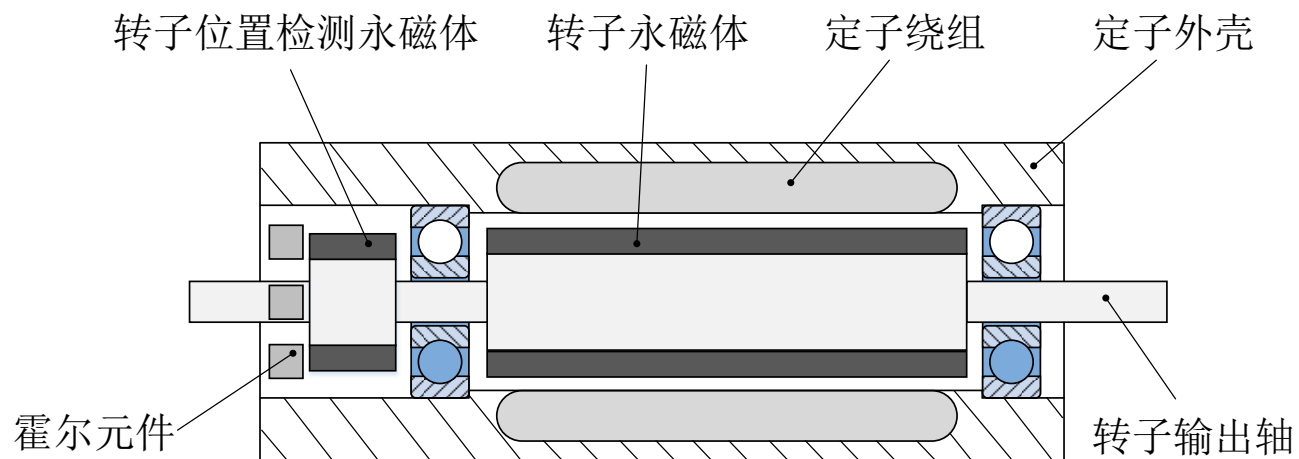
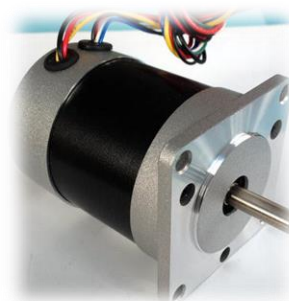


### 直流无刷空心杯电机爆炸图

# 无刷直流永磁电机基本原理

## ● 无刷直流电机结构原理

### ➤ 内转子结构

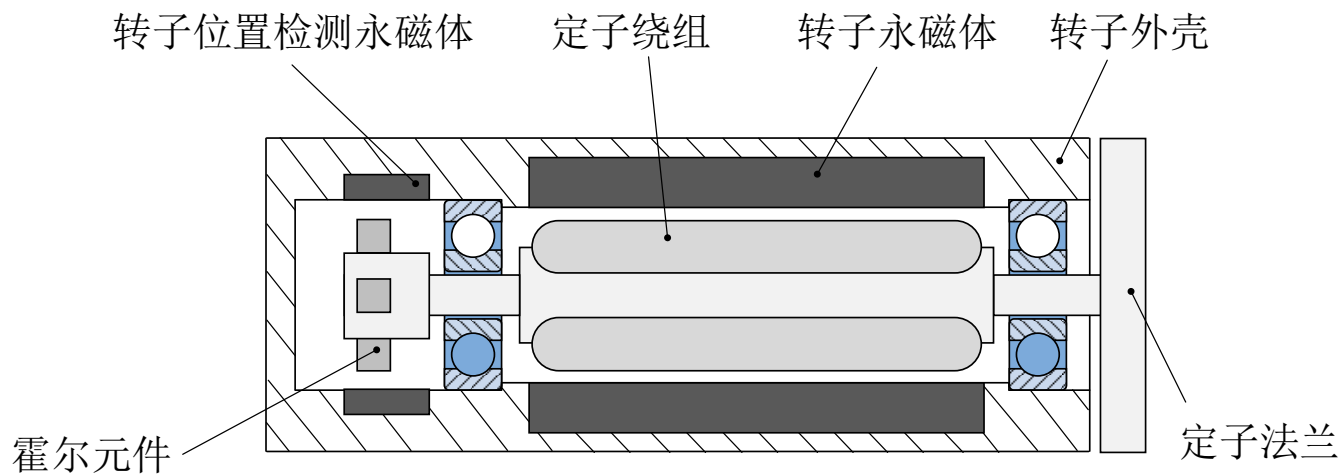




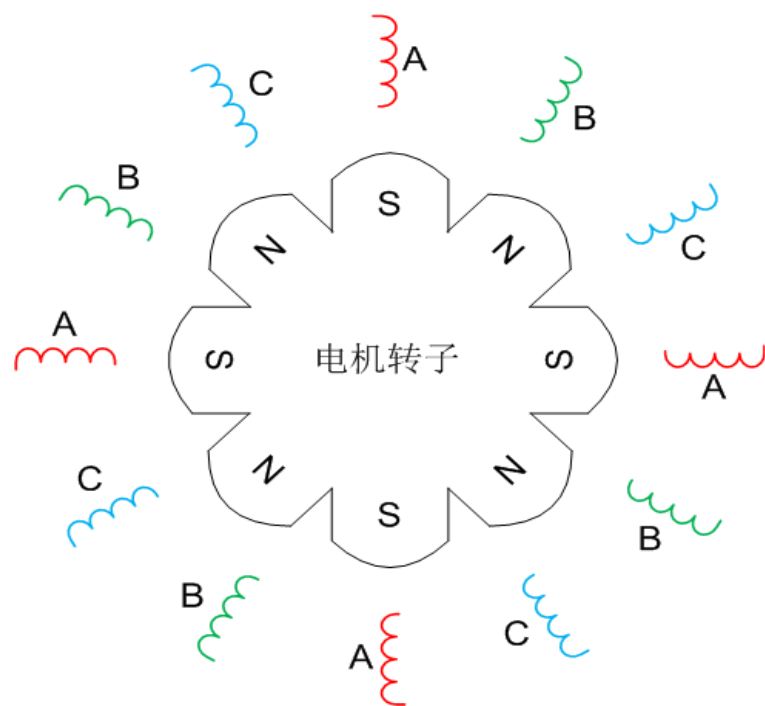
# 无刷直流永磁电机基本原理

## ● 无刷直流电机结构原理

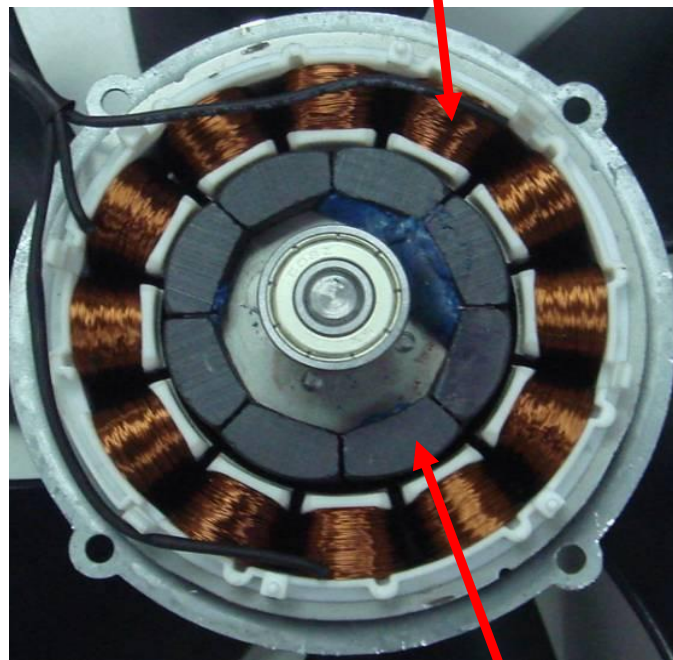
### ➤ 外转子结构



## ● 无刷直流电机电枢和转子磁极



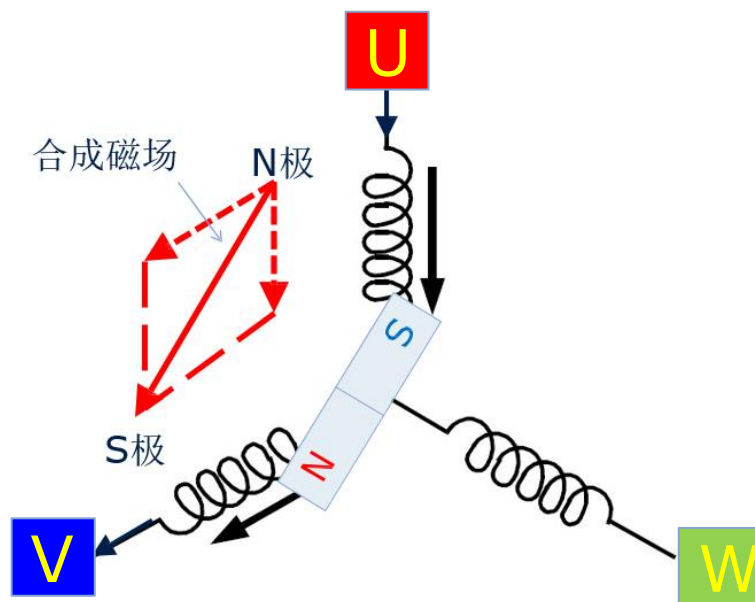
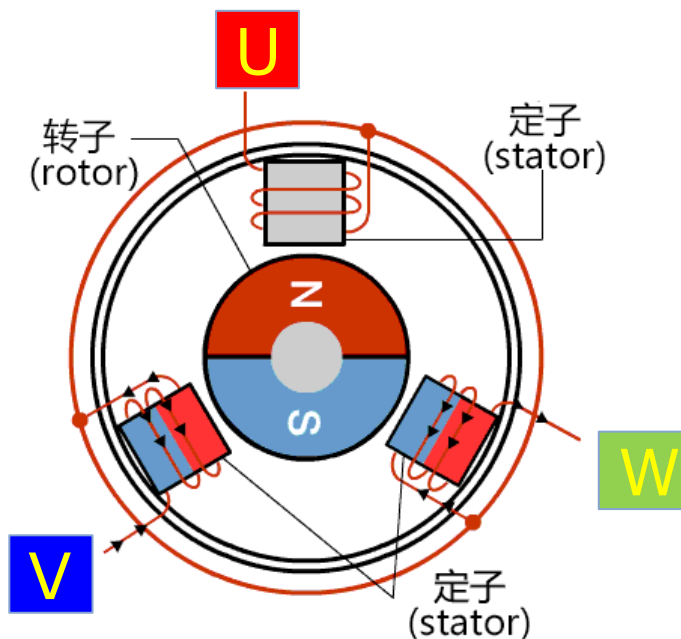
定子为三相绕组，多采用星形接法



转子（永磁体）

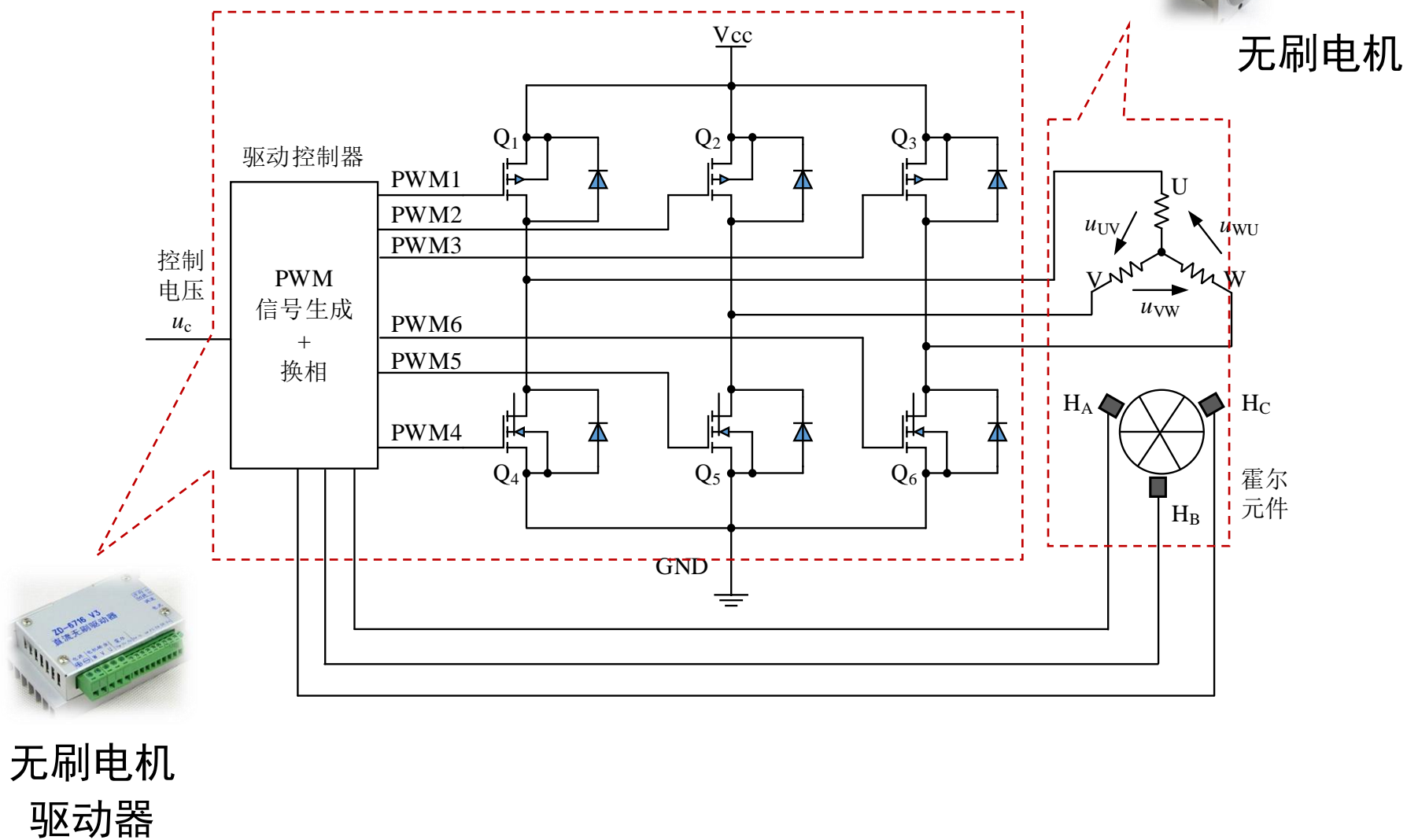
# 无刷直流伺服电机

## ● 无刷直流电机的运转

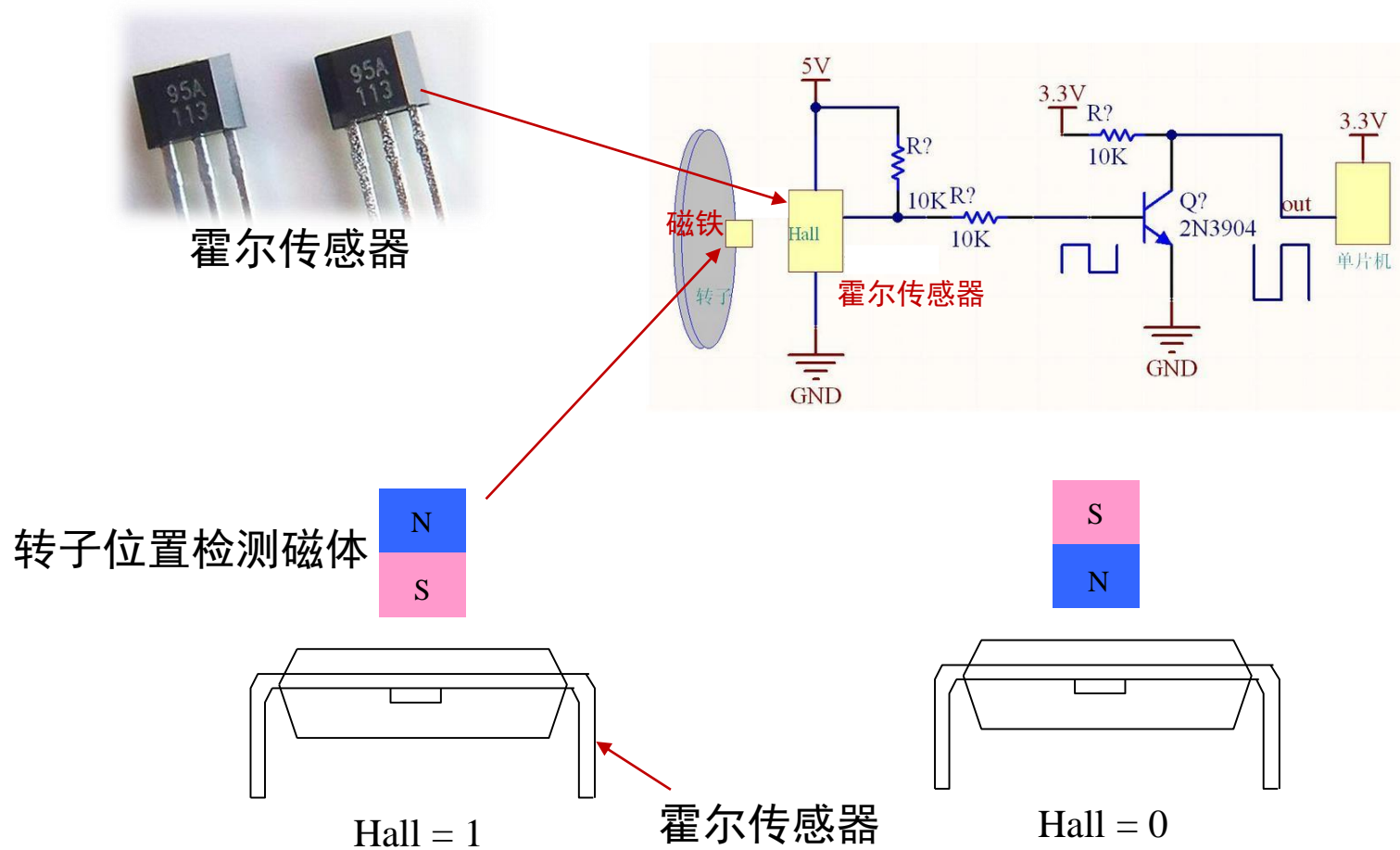


- 利用内置的霍尔传感器检测转子位置
- 换向调速电路根据转子位置改变各线圈两端电压方向，形成随转子位置变动的跳跃旋转磁场
- 定子磁场对转子磁铁产生磁力矩

## ● 无刷直流电机驱动电路



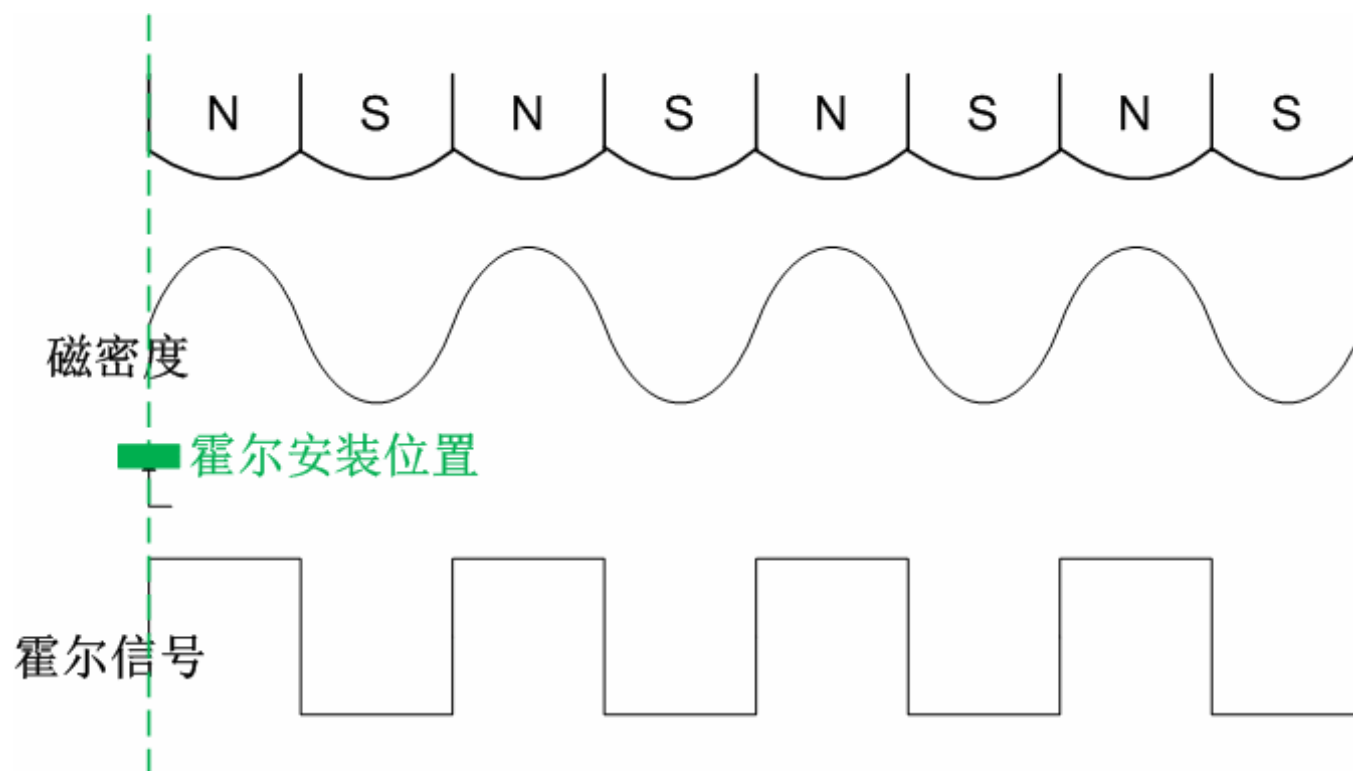
## ● 转子位置检测





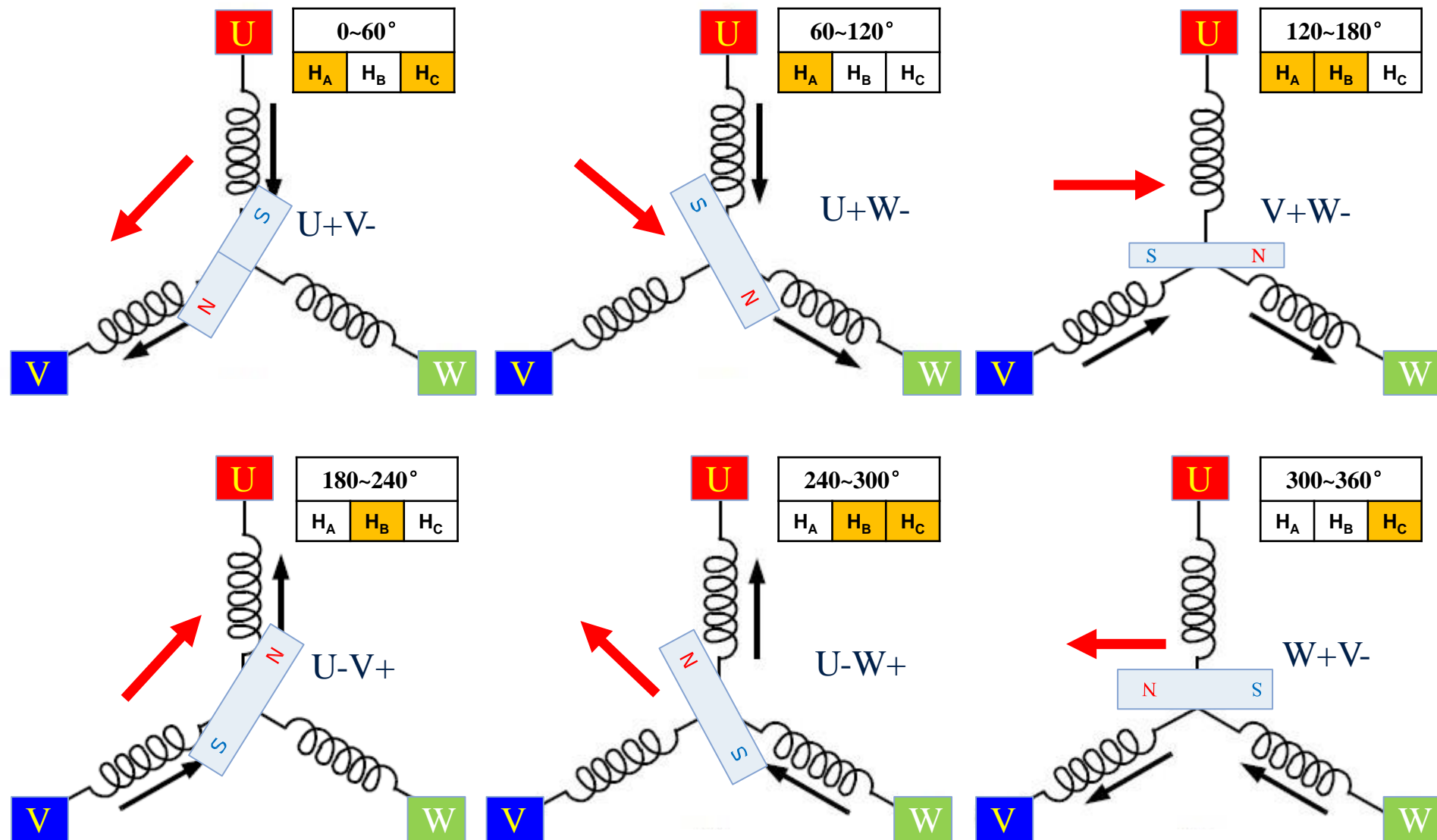
## ● 转子位置检测

➤ 转子旋转时，霍尔信号的变化

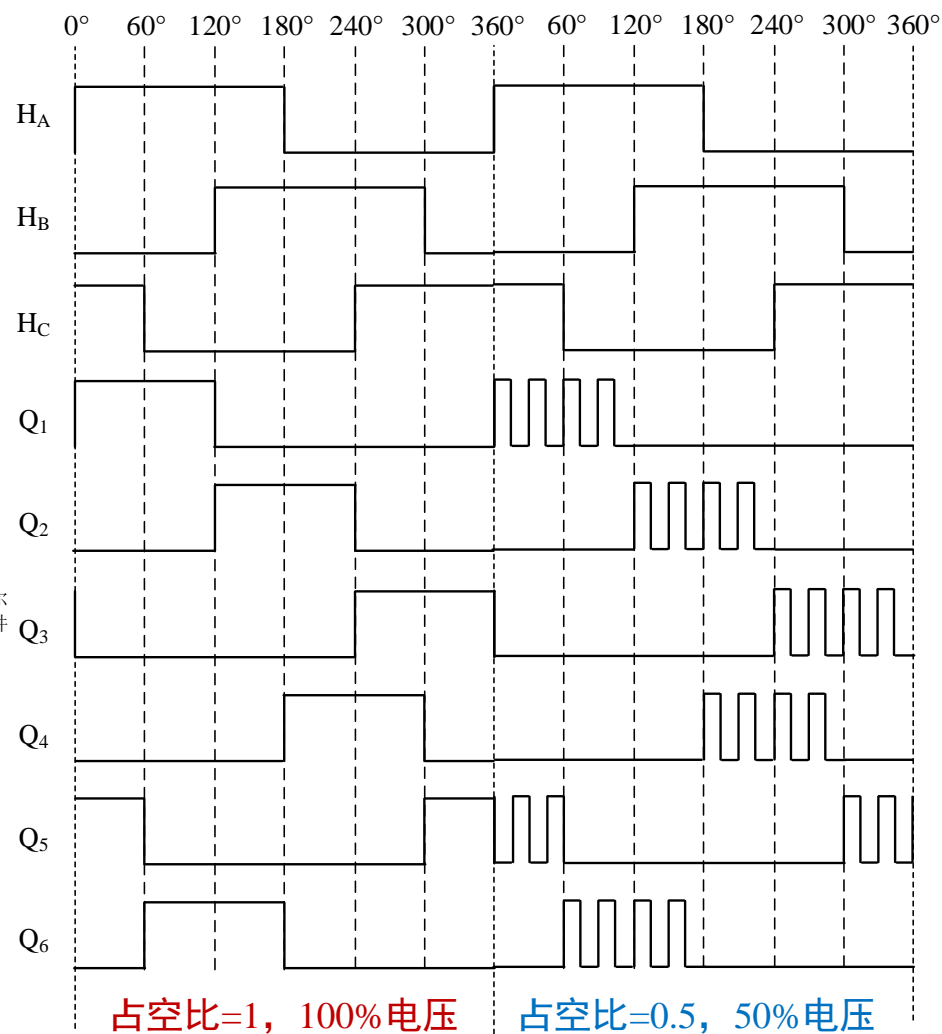
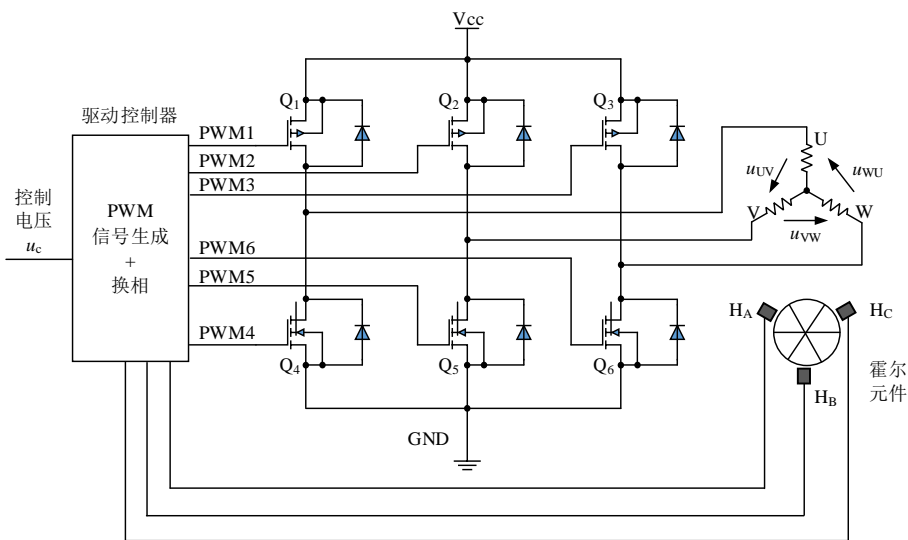


# 无刷直流伺服电机

- 一个周期内的绕组通电状态 —— 产生跳跃的旋转磁场



## ● 换相和调速



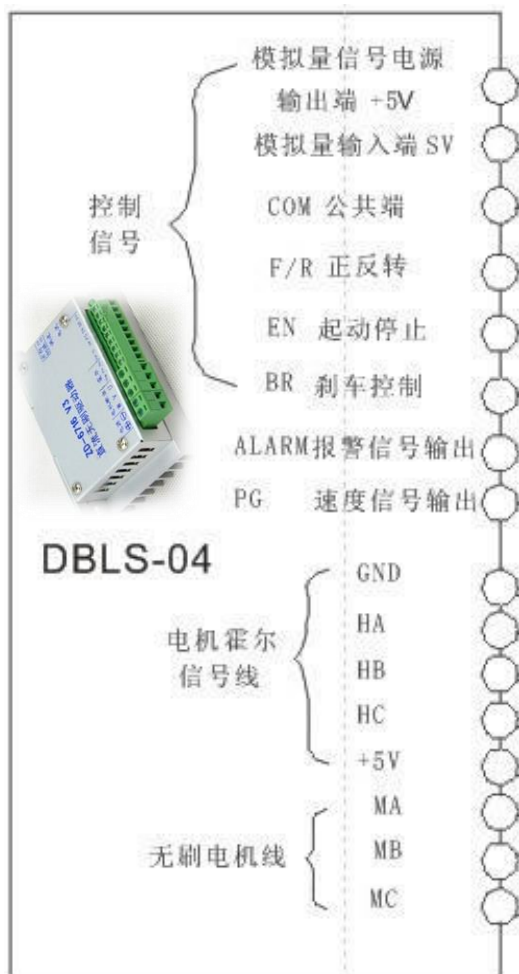
- 根据霍尔元件反馈信号，确定线圈导通顺序，实现换相，使定子磁场随转子跳跃旋转
- 根据输入PWM（脉宽调制）信号改变导通绕组的平均电压——速度模式

## ● 换相和调速电路特点

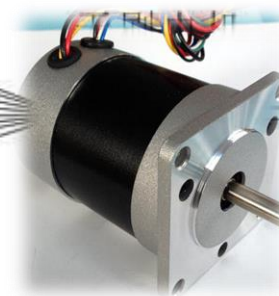
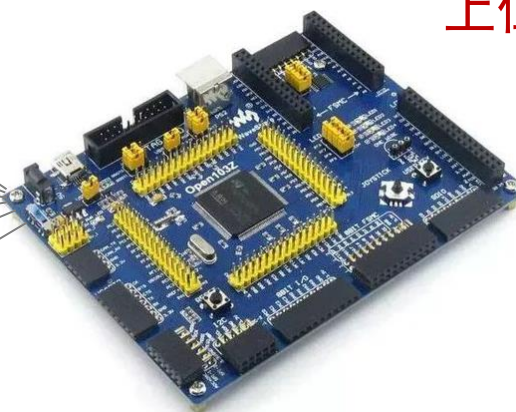
- 驱动器由直流电源驱动；
- 采用霍尔元件检测转子所在的角度区间，根据霍尔元件状态控制绕组导通；
- 当控制电压恒定时，处于导通状态的绕组电压波形为宽度不变的方波，其宽度与控制电压大小呈正比；
- 在一定角度范围内，绕组导通状态不变，磁场不随转子的旋转而变动，在霍尔元件状态变换瞬间，绕组导通状态变化，磁场方向出现跳变；
- 绕组磁场不能与转子磁场保持实时正交，电磁力矩有脉动现象，所以其驱动力矩小于有刷电机。

## ● 驱动器的引脚和信号

无刷电机驱动器



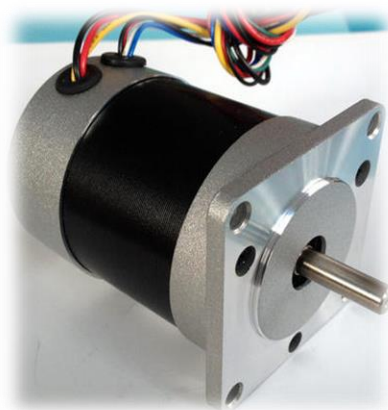
上位机



无刷电机

## ● 优点

- 启动转矩大，转子惯量小，响应迅速，启停、转向、加减速控制特性好；
- 转速对控制信号变化灵敏，调速性好；
- 无换相火花，适合防爆场合；
- 无电刷换向器，免维护，寿命长。



## ● 缺点

- 控制复杂；
- 感应电动势为梯形波，旋转磁场跳跃，不连续；
- 电流波动大、力矩脉动大，力矩模式下性能不好；
- 有高频干扰。



## ● 适用场合

- 要求长时间免维护运行；
- 适用于小驱动功率，例如500瓦以内；
- 工作于速度模式，需要直流供电的机器人，例如驱动移动机器人的车轮。





# 自控式永磁同步电机——交流伺服电机

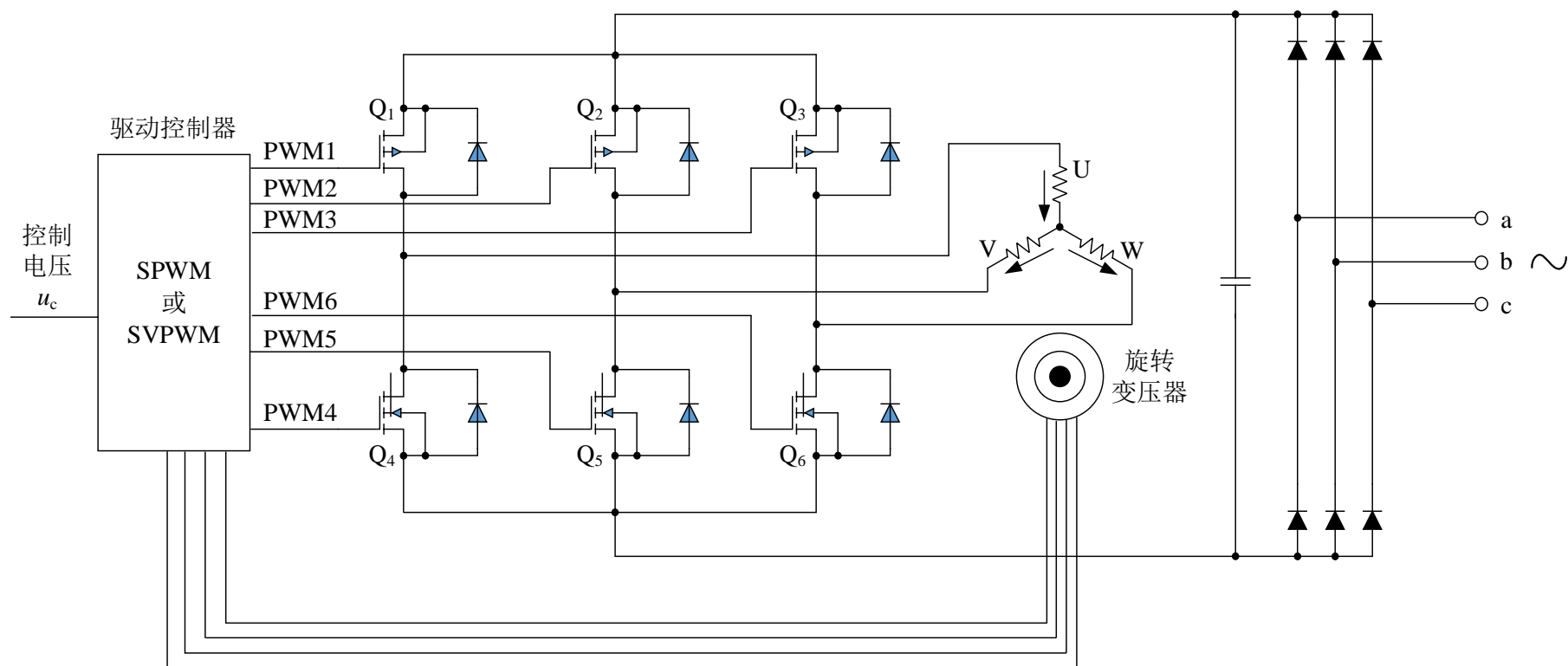
## ● 组成



- 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

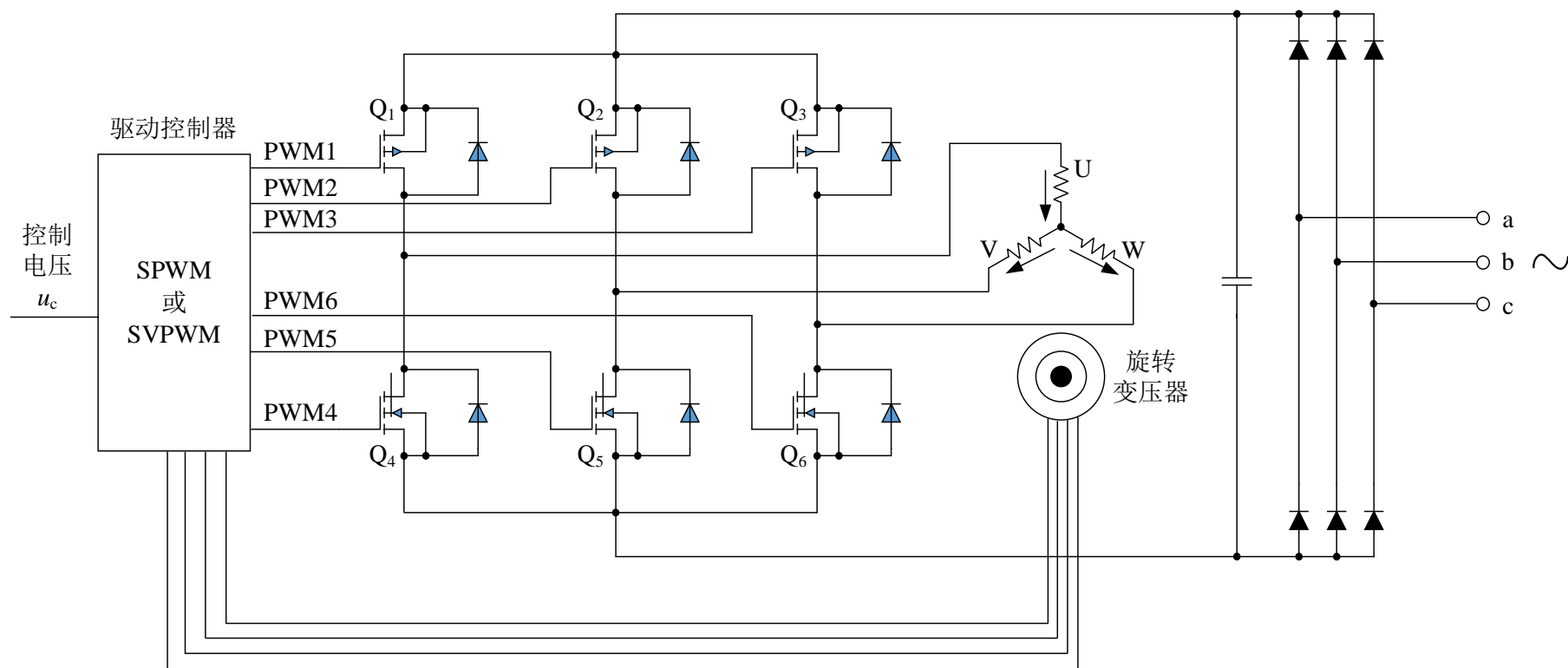


## ● 驱动原理



- 交流供电，输出更大的功率
- 旋转变压器或高精度编码器测量转子的转角连续位置
- 产生连续变化的旋转磁场

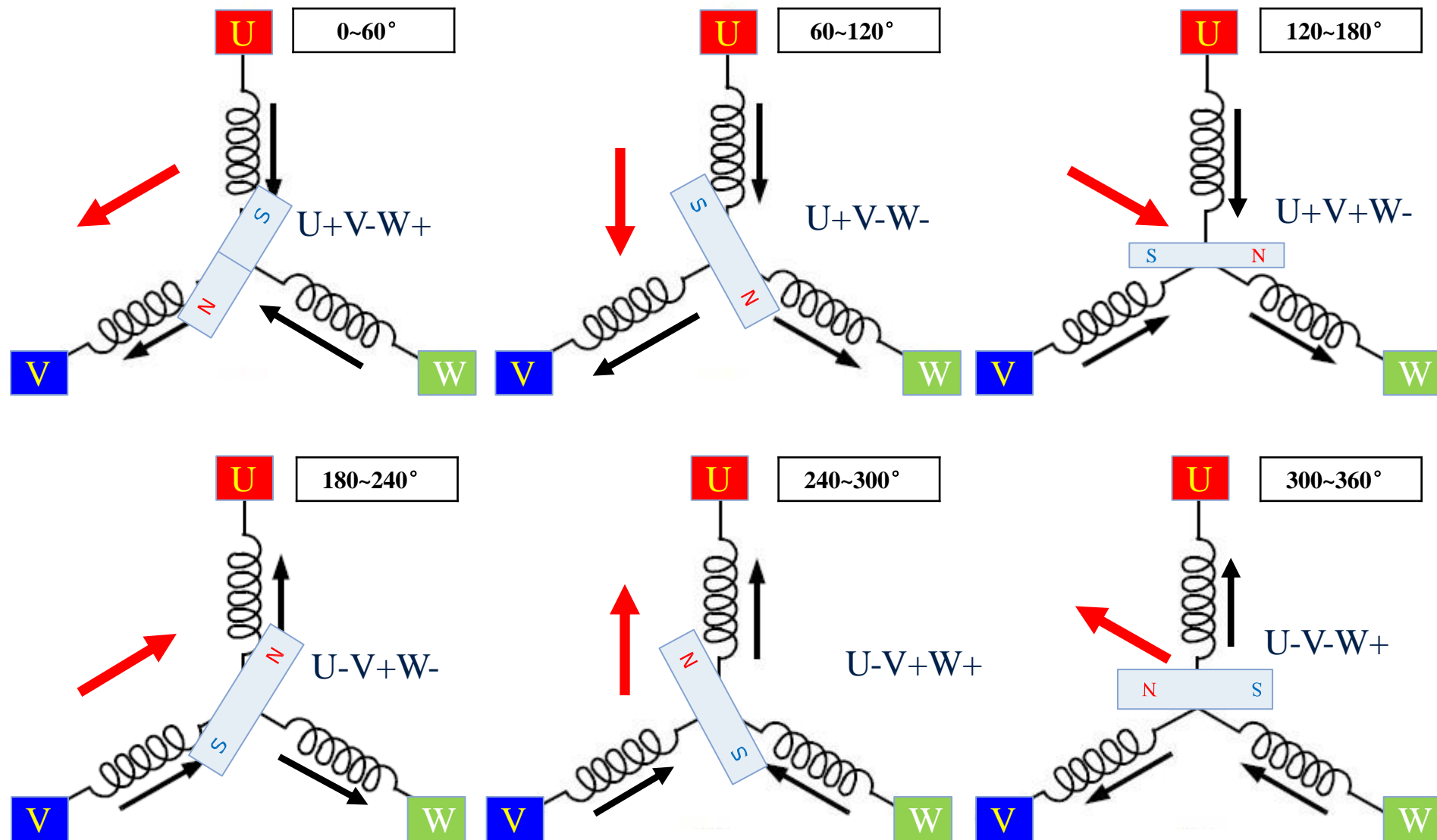
## ● 驱动原理



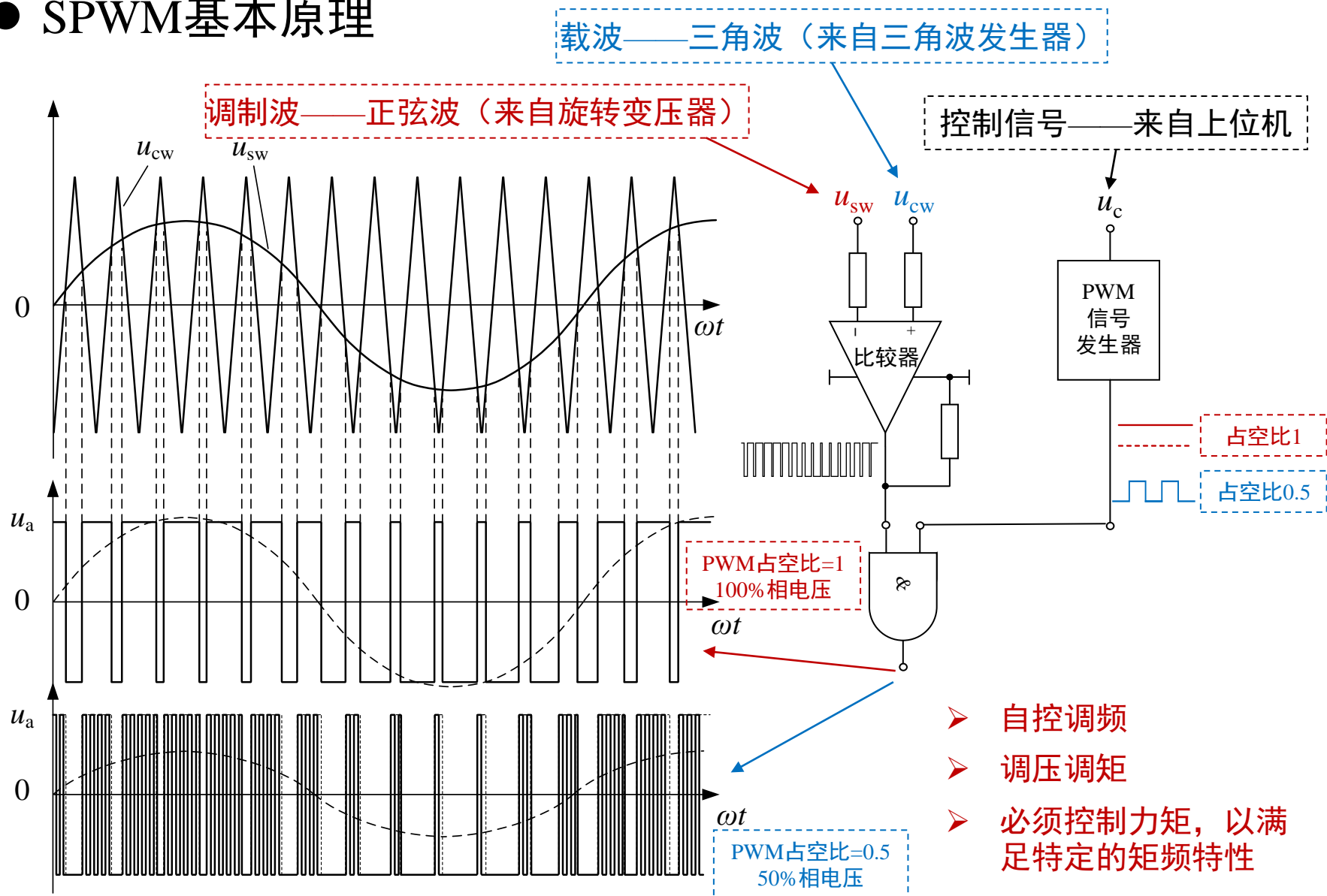
### ➤ 相电压调制方法

- 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)

- 一个周期内的绕组通电状态 —— 产生连续旋转磁场



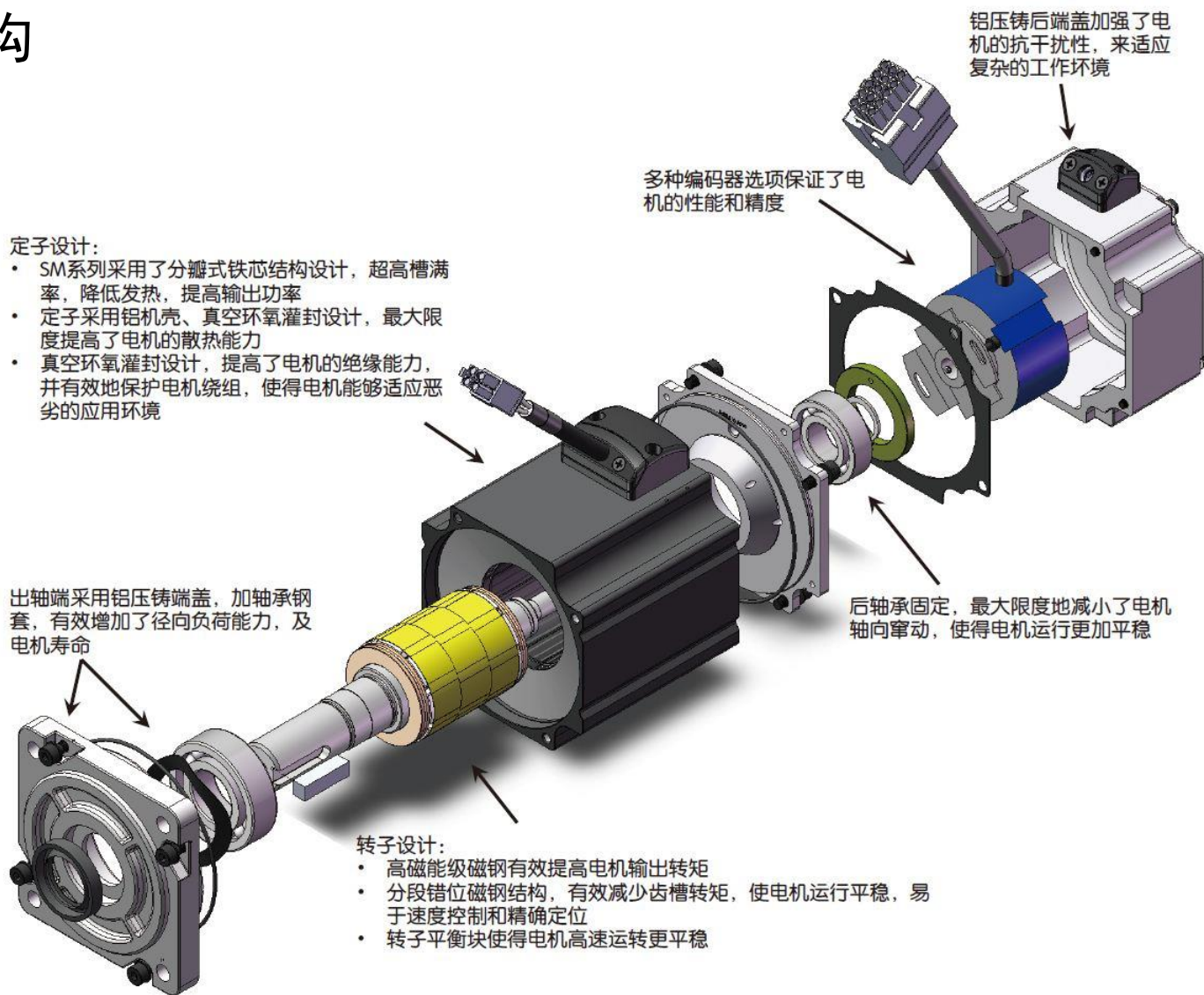
## ● SPWM基本原理



## ● SPWM调速交流伺服电机特点

- 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，绕组磁场与转子磁场接近正交；
- 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。

## ● 结构



## ● 优点

- 启动转矩大，转子惯量小，响应迅速，启停、转向、加减速控制特性好；
- 转速对控制信号变化灵敏，调速性好；
- 调速范围宽，线性度好；
- 无换相火花，适合防爆场合；
- 无电刷换向器，免维护，寿命长；
- 电枢正弦波驱动，波动小，驱动功率大；
- 有直驱力矩电机类型，可实现更高的系统精度。



## ● 缺点

- 控制复杂；
- 价格高；
- 逆变器有高频干扰。

## ● 适用场合

- 普通型与行星减速器配合使用；
- 对调速特性要求高，对价格不敏感；
- 要求长时间免维护运行；
- 对控制精度要求高、力矩大、动态响应高，可用直驱型；
- 适用于中等驱动功率，例如3000瓦以内；
- 驱动器交流供电，适用于工业机器人，不适用于移动机器人。



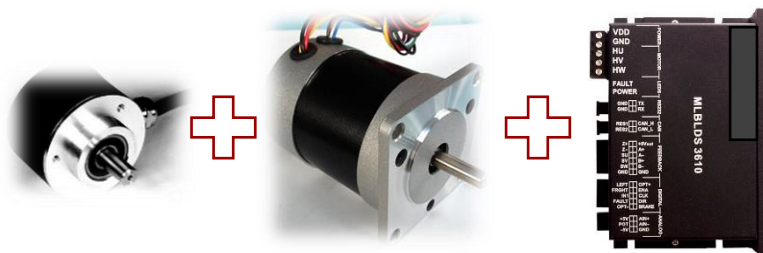


# ✦ 电机驱动器——直流电机伺服驱动器

## ● 典型方案



编码器 有刷直流电机 伺服驱动器



编码器 无刷直流电机 伺服驱动器

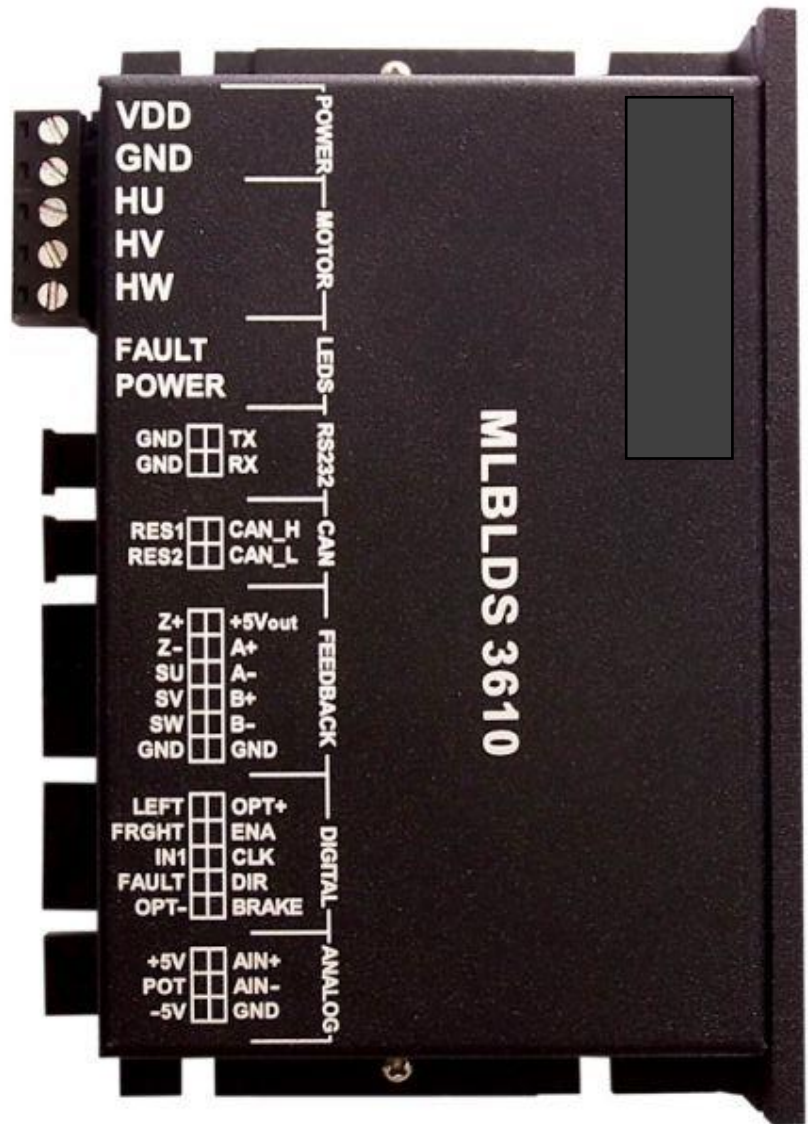
### ➤ 伺服驱动器功能：

1. 内置PID算法，可接编码器/霍尔传感器信号，构成闭环速度和位置控制系统，部分伺服驱动器还能实现电流控制；
2. 内置PWM驱动电路，可输出电机驱动信号（内置驱动器）；
3. 可由外部控制器通过**模拟量信号**、**脉冲信号**、I/O端口直接控制；
4. 高级的总线型伺服驱动器利用RS232、CAN、Ethercat等总线与上位机远程通讯，接受控制指令、返回信息。

# ✦ 电机驱动器——直流电机伺服驱动器引脚

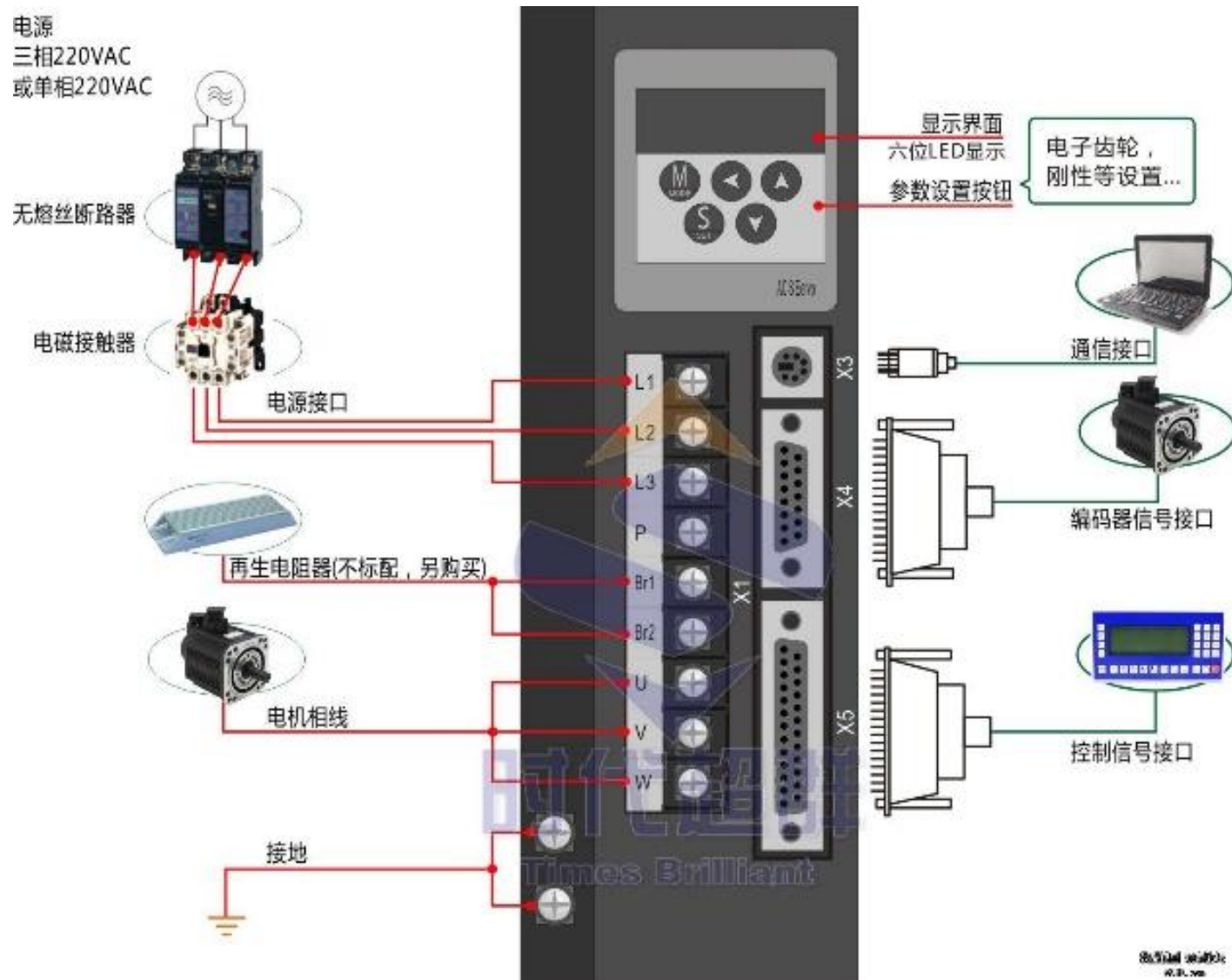


有刷电机伺服驱动器

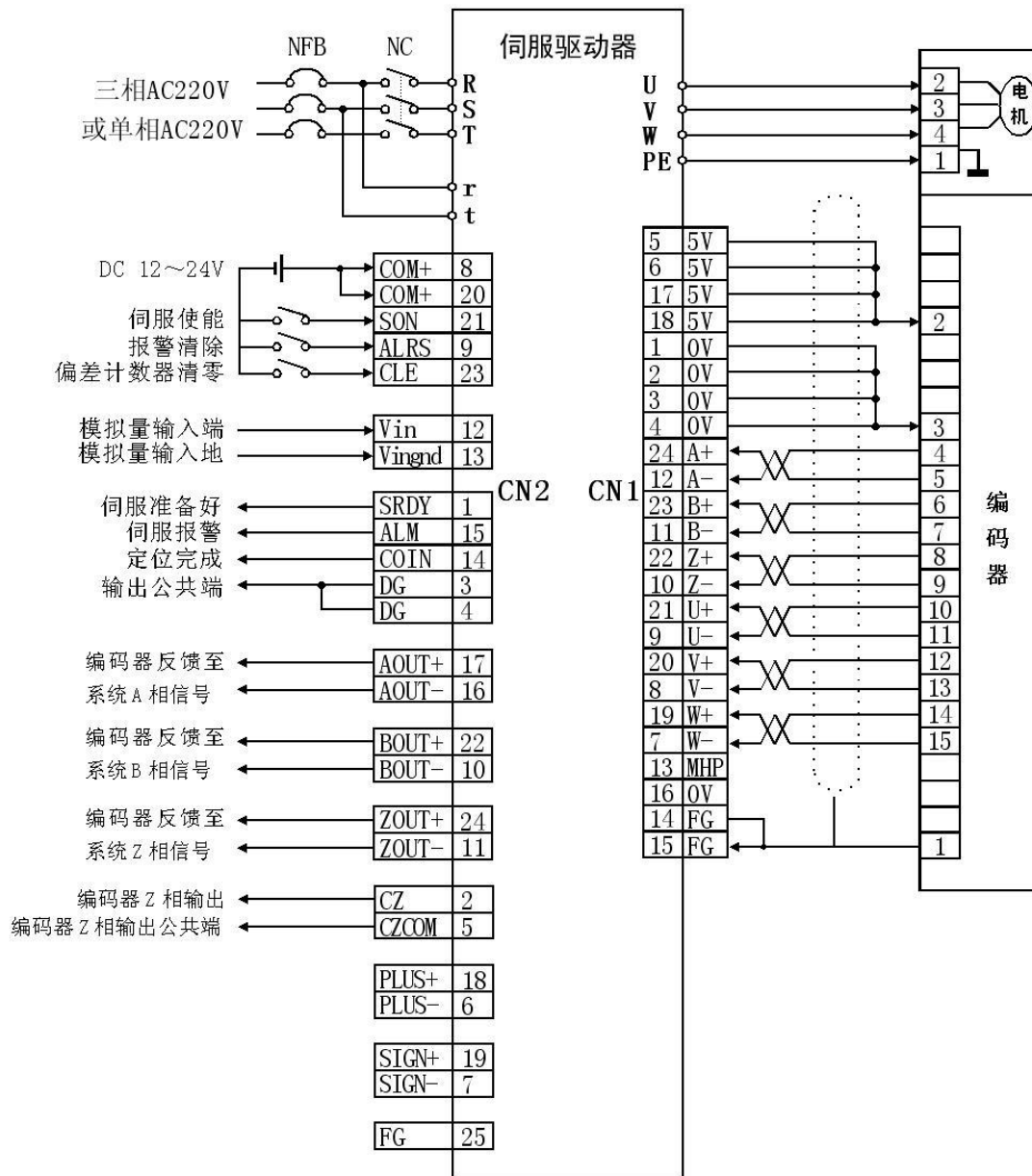


无刷电机伺服驱动器

## ● 驱动器面板和接线



## ● 引脚



# 伺服电机的位置控制

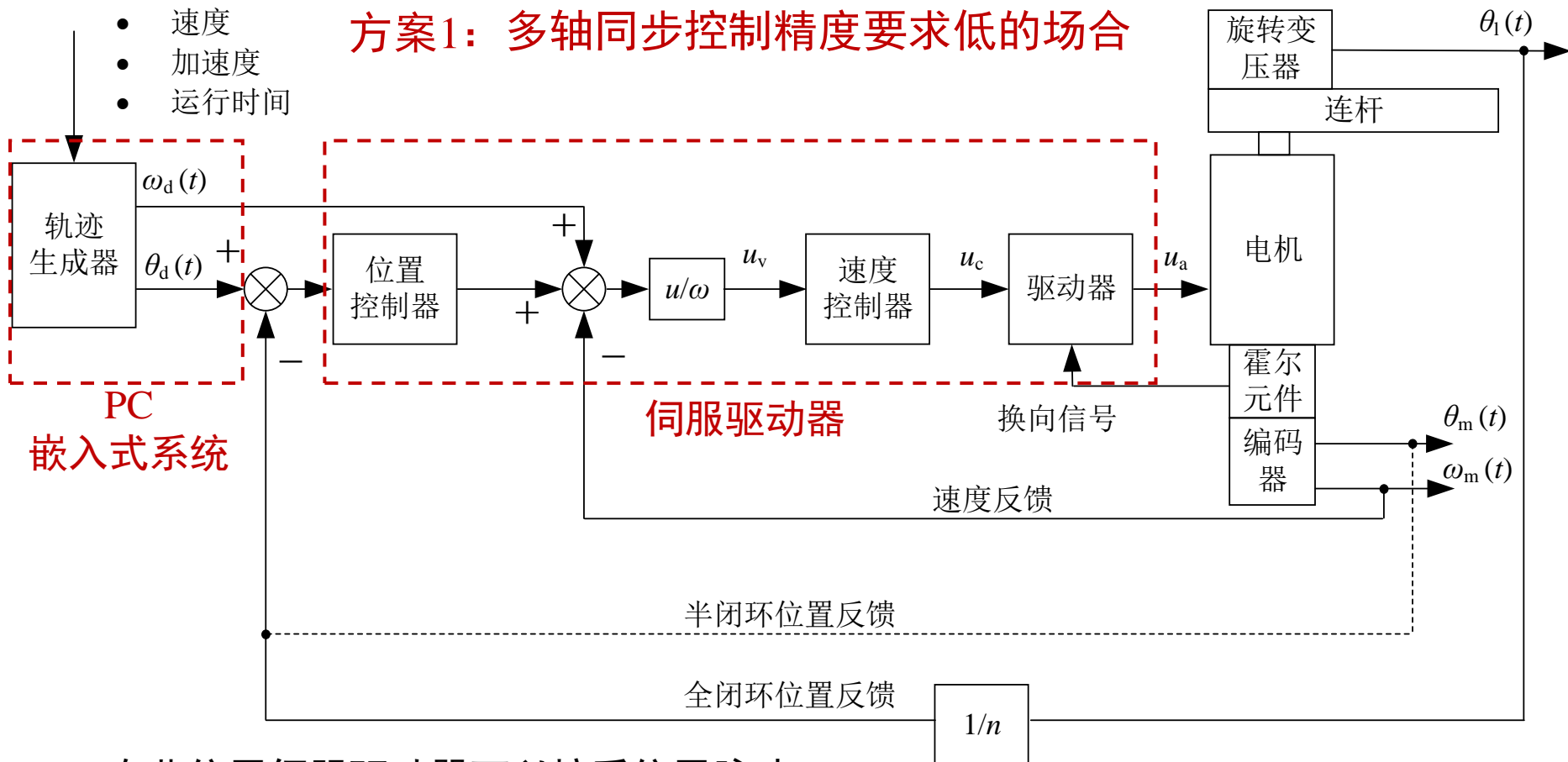
## ● 基于位置-速度双闭环的位置伺服控制原理

——以无刷电机为例

规划器指令：

- 位置
- 速度
- 加速度
- 运行时间

方案1：多轴同步控制精度要求低的场合



- 有些位置伺服驱动器可以接受位置脉冲
- 对上位机而言，类似一个步进电机系统

$n$ : 减速器传动比

# 伺服电机的位置控制

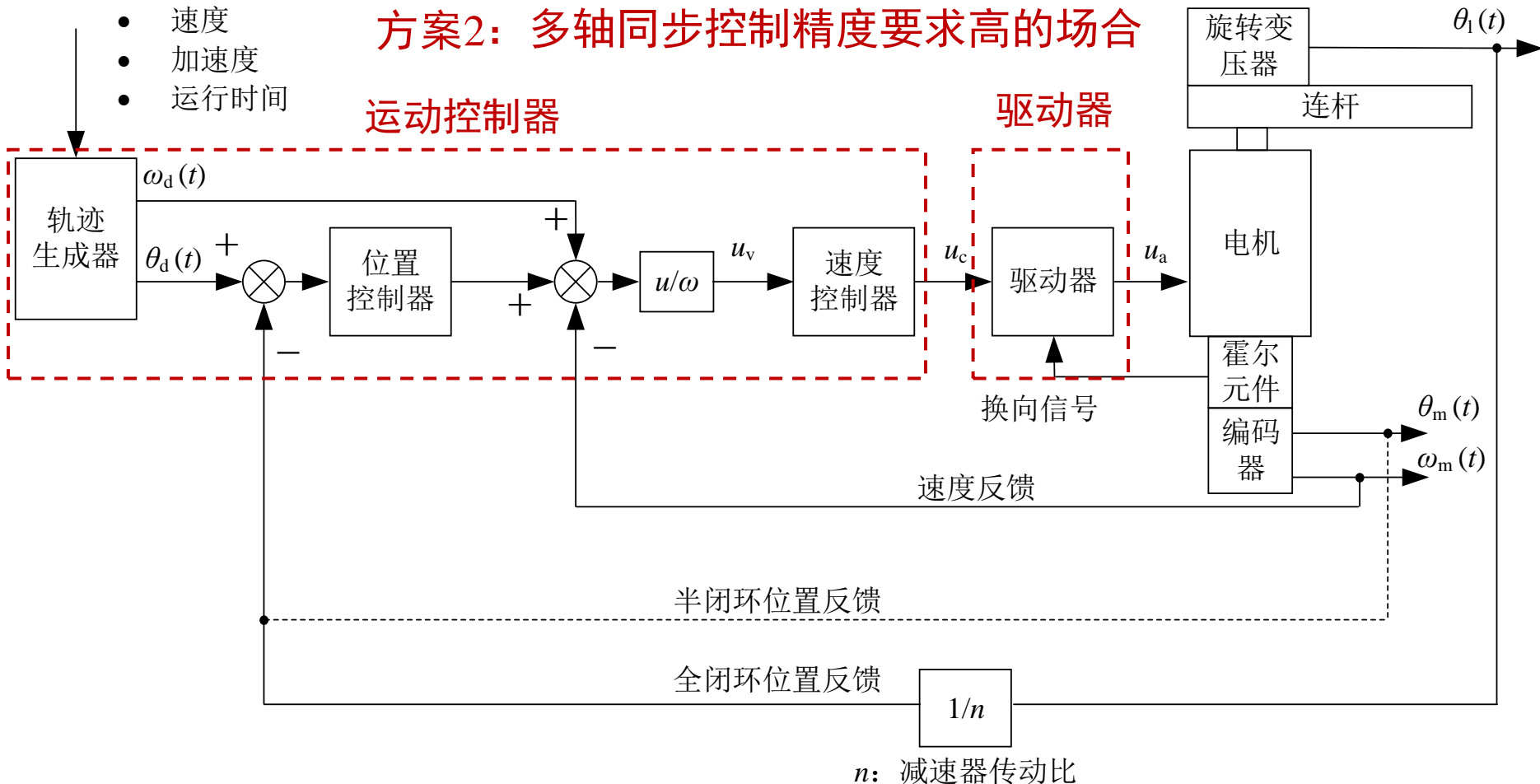
## ● 基于位置-速度双闭环的位置伺服控制原理

——以无刷电机为例

规划器指令：

- 位置
- 速度
- 加速度
- 运行时间

方案2：多轴同步控制精度要求高的场合



# 伺服电机的位置控制

## ● 基于位置-速度双闭环的位置伺服控制原理

——以无刷电机为例

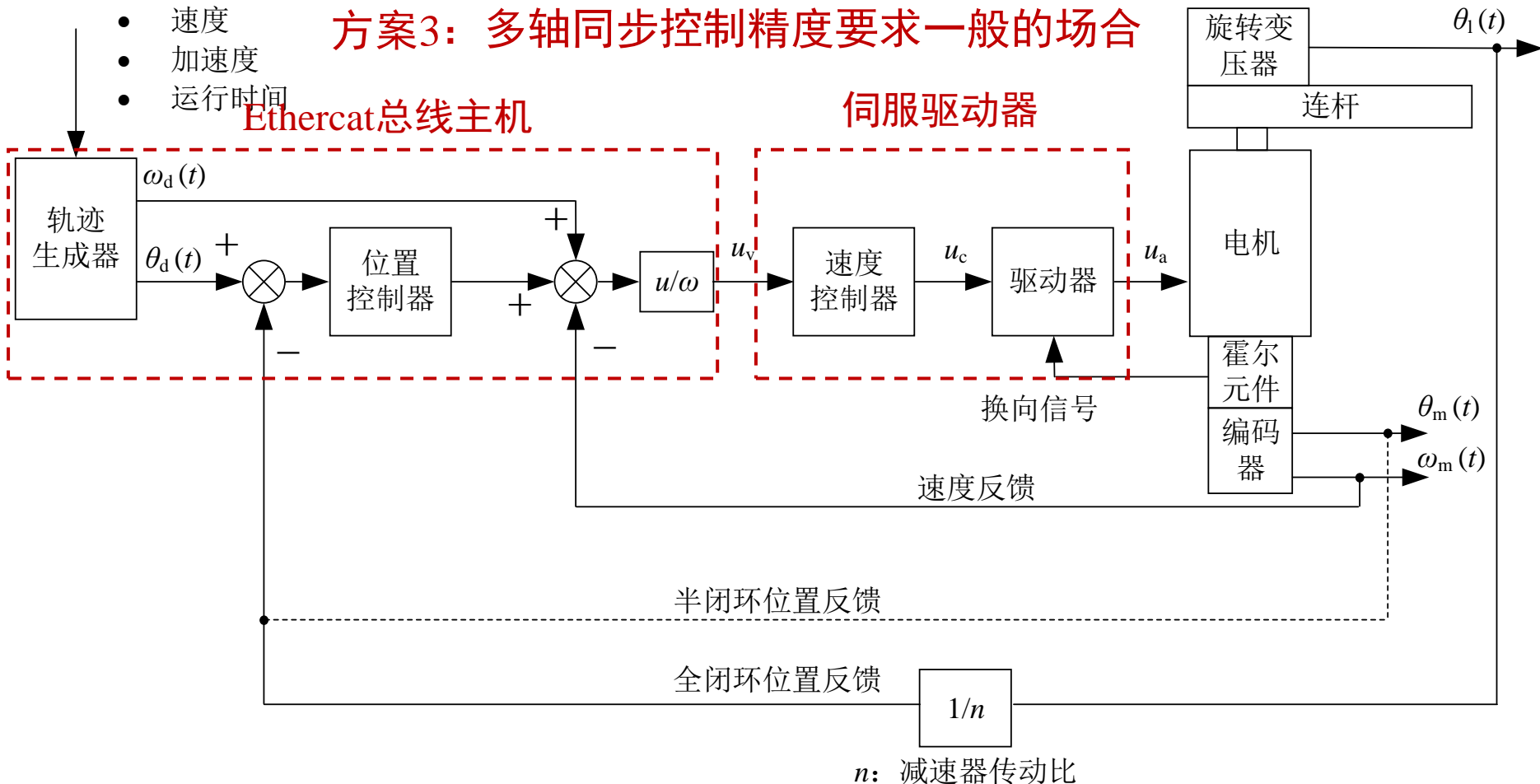
规划器指令：

- 位置
- 速度
- 加速度
- 运行时间

方案3：多轴同步控制精度要求一般的场合

Ethercat总线主机

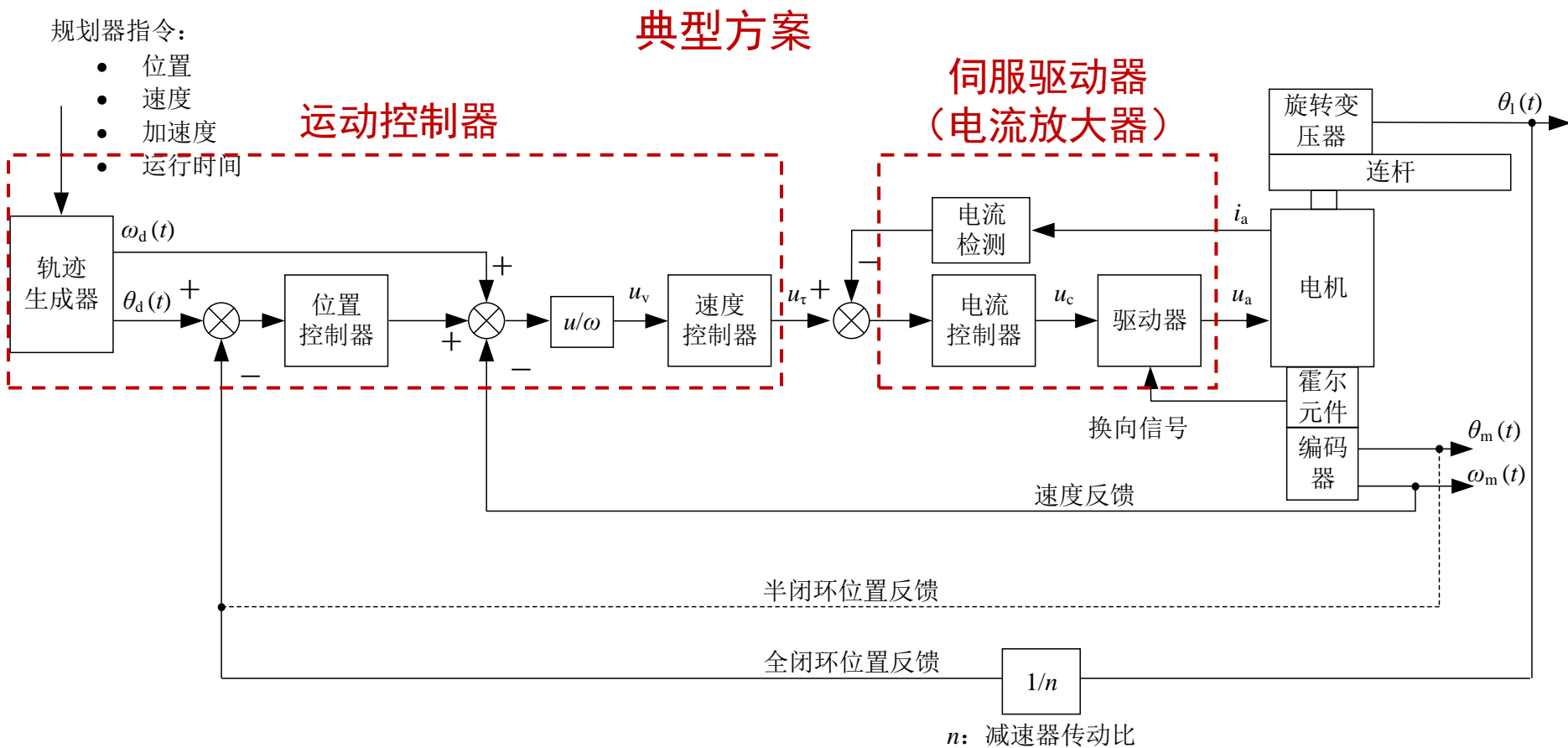
伺服驱动器





# 伺服电机的位置控制



## ● 基于位置-速度-电流三闭环的位置伺服控制原理 ——以无刷电机为例





- 适用于高动态性能的多轴联动系统
- 有利于实现力控制



# ✦ 总结——电机与驱动器

类型	工作模式		驱动器控制信号
 步进电机及驱动器	位置模式：电机角位移正比于脉冲数		脉冲信号
 直流有刷/无刷电机 及驱动器	电压放大型 驱动器	速度开环模式：驱动器仅起到功率放大作用，电机转速与驱动器控制信号电压成正比，但是会随负载变化波动	模拟信号
	电流放大型 驱动器	电流（力矩）闭环模式：驱动器执行电流闭环，电机输出力矩与驱动器控制信号电压成正比，速度开环，负载变化时，速度会剧变	模拟信号

# ✦ 总结——电机与伺服驱动器

类型	工作模式	驱动器控制信号
 直流有刷/无刷电机 及伺服驱动器	电流（力矩）闭环模式：驱动器执行电流闭环，电机输出力矩与驱动器控制信号电压成正比，速度开环，负载变化时，速度会剧变	模拟信号
	速度闭环模式：驱动器执行速度和电流闭环，电机输出转速与驱动器控制信号电压成正比，速度不随负载变化波动	模拟信号
 交流伺服电机 及伺服驱动器	位置闭环模式：驱动器执行位置、速度和电流闭环，电机角位移正比于脉冲数，速度正比于脉冲频率，类似于步进电机	脉冲信号
	智能伺服模式：驱动器通过总线（RS232/485、CAN、Ethercat等）接受指令，执行位置轨迹生成、位置、速度和电流闭环	总线信号

# 课后作业

## 作业

- 1、简述无刷直流永磁电机基本原理。
- 2、简述无刷直流电机三相星形桥式驱动电路原理。
- 3、无刷直流电机及其驱动的特点是什么？通过什么技术解决了有刷电机电刷和换向器带来的问题？
- 4、什么是SPWM和SVPWM调制技术？
- 5、采用SPWM技术驱动的PMSM的特点是什么？
- 6、简述三种伺服电机的使用场合和原因。