



# 哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



## 自动控制实践A

### 7.2 伺服电机基本原理



# 目 录

- 1、无刷直流电动机
- 2、交流伺服电机概述
- 3、交流伺服电机原理
- 4、直线伺服电机和直驱伺服电机



# 1、无刷直流电机 (BLDCM)

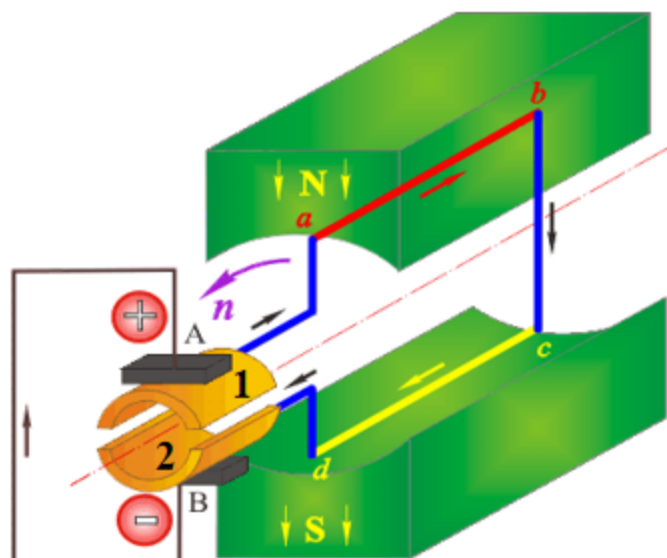
有刷直流电动机

(通电导体在磁场中受安培力作用)

## 工作过程

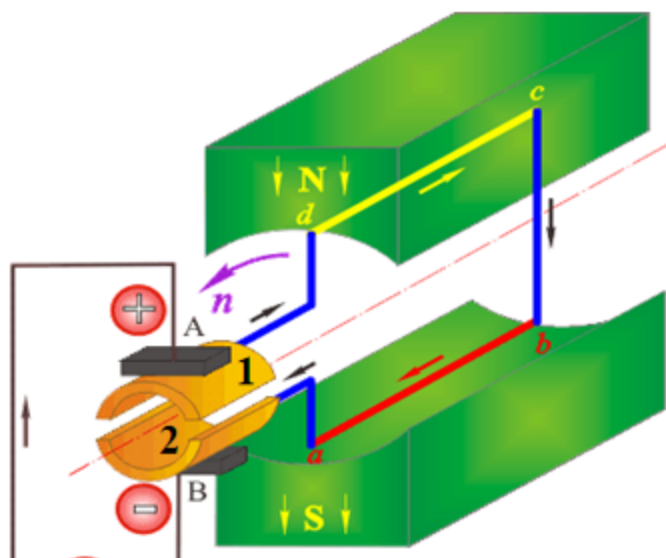
$$F = BIl$$

如图(a)所示,当直流电流从电刷A流入,经换向片1、线圈abcd、换向片2、电刷B流出时,根据左手定则,电枢上的载流导体在主极磁场中将受到电磁力作用,当电磁力形成的逆时针方向的电磁转矩大于阻转矩时,线圈逆时针方向旋转。



(a) 某一起始位置

当电枢转过半周,如图(b)所示,dc处于N极下,ab处于S极下时,电流仍从电刷A流入,经换向片2、线圈dcba、换向片1、最后从电刷B流出;根据左手定则,可判定电磁力所形成的转矩仍使线圈继续沿逆时针方向转动。



(b) 电枢转过半周时

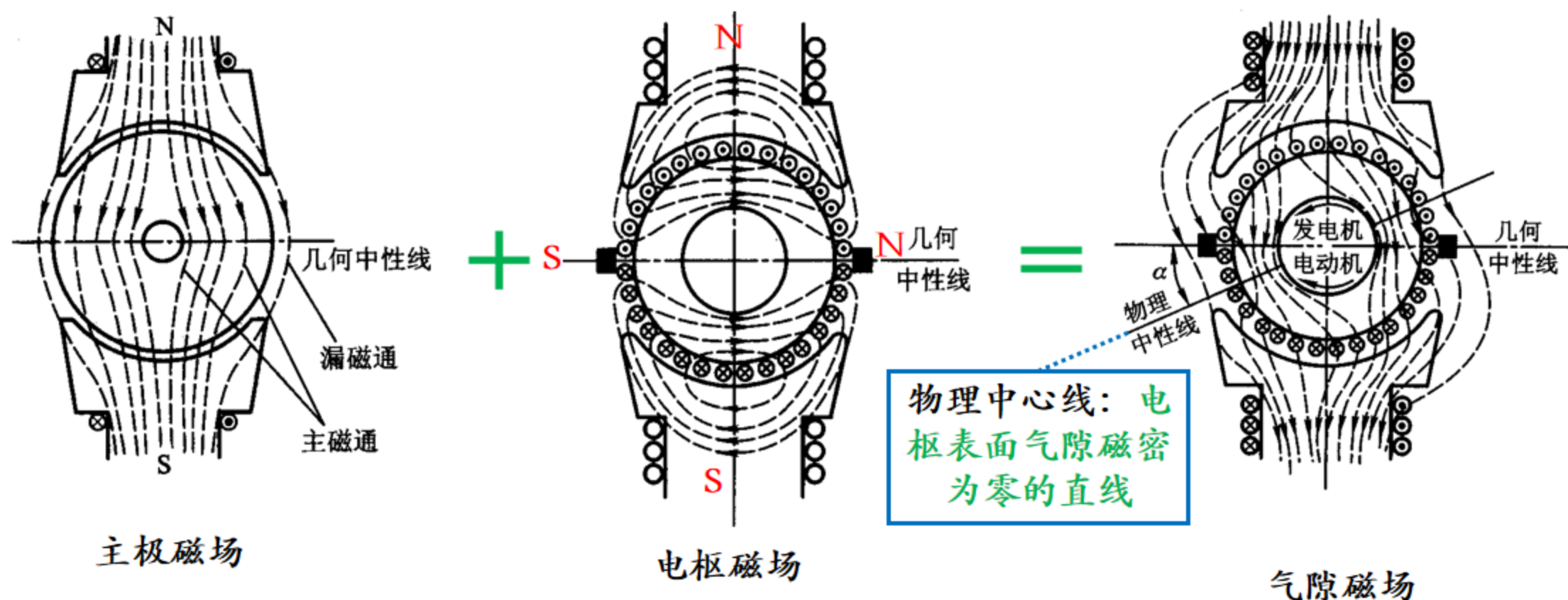


# 1、无刷直流电机 (BLDCM)

有刷直流电动机——从磁场角度考虑

➤ **负载气隙磁场** (电刷位于几何中性线)

直流电机，通过碳刷换向器结构，使得定子和转子磁场保持垂直

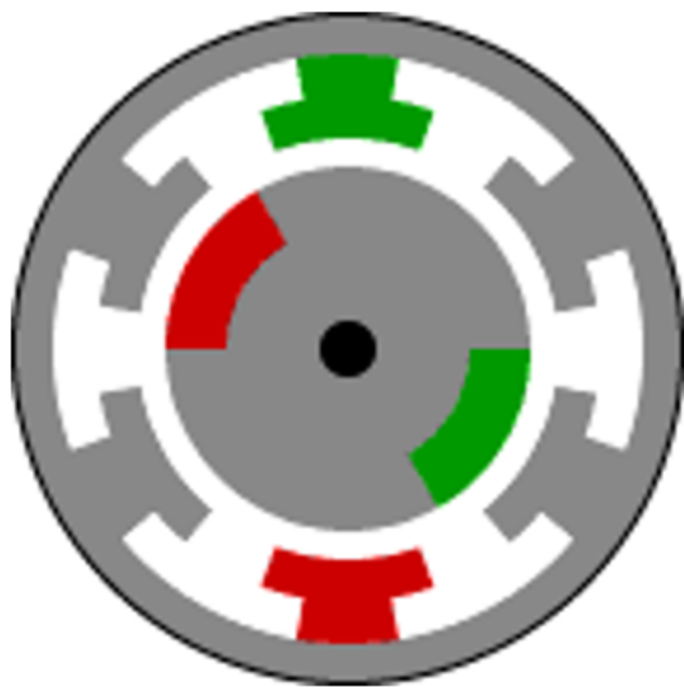
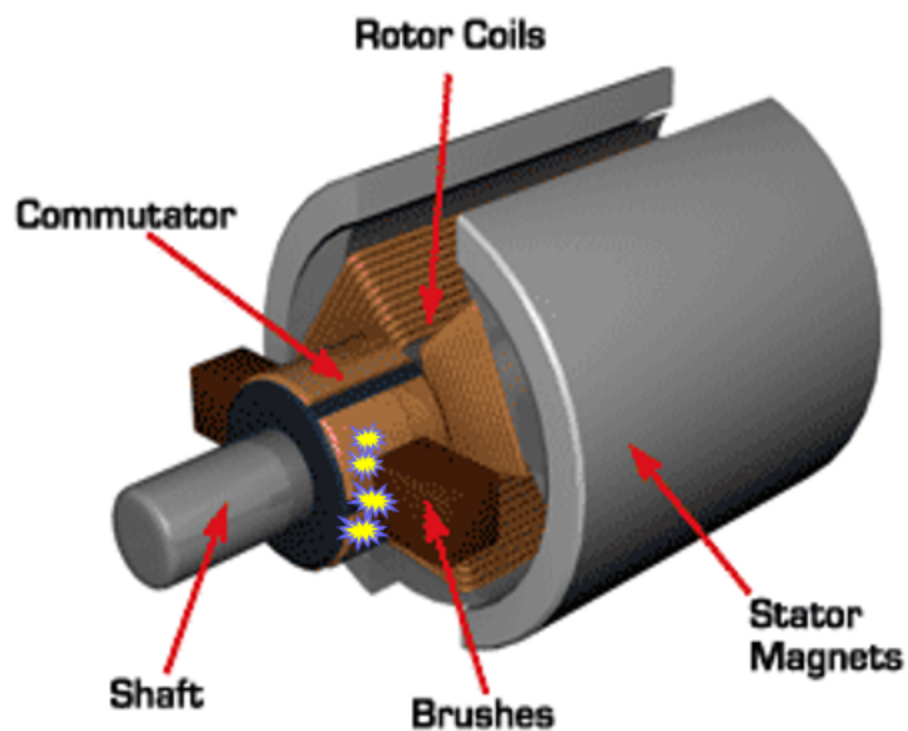


负载时气隙磁场由主磁场和电枢磁场共同决定



# 1、无刷直流电机 (BLDCM)

无刷直流电机用电子开关电路和位置传感器代替电刷和换向器，既具有直流电机的优点，又没有电刷。无刷电机线圈（定子）部分是不转的，转子是永磁体。

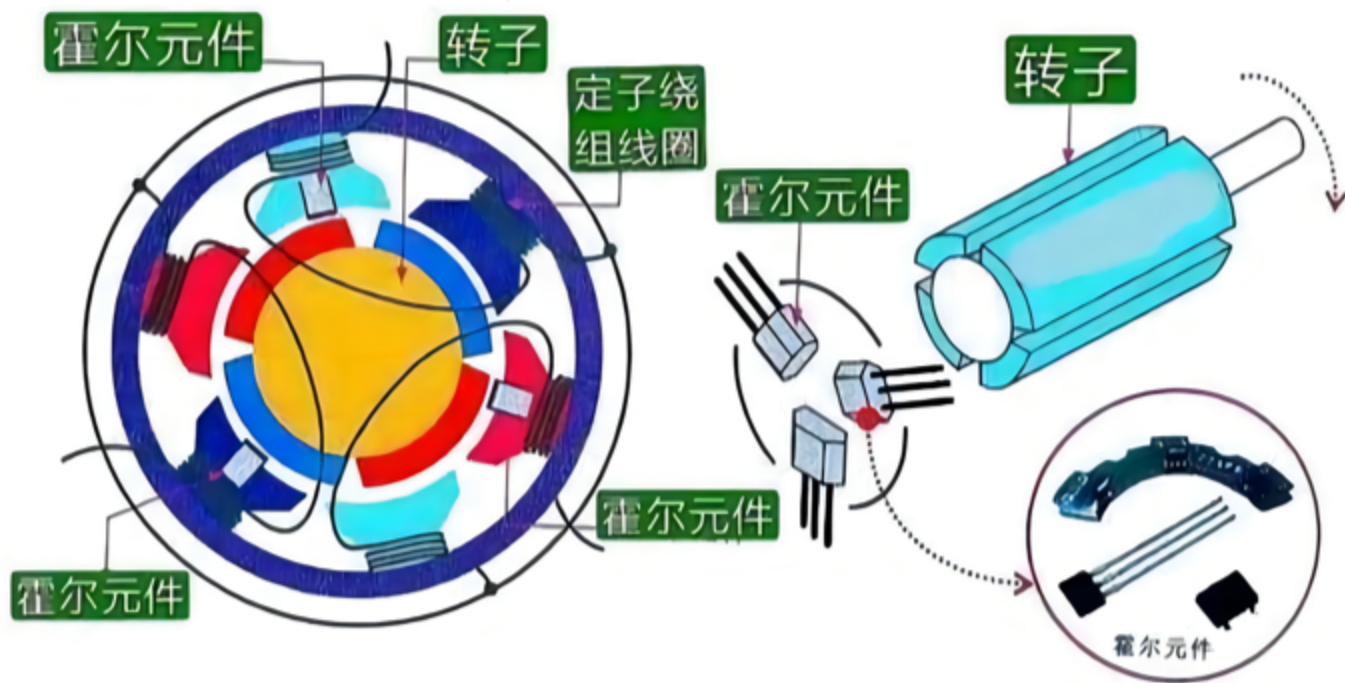


无刷直流电机原理动图

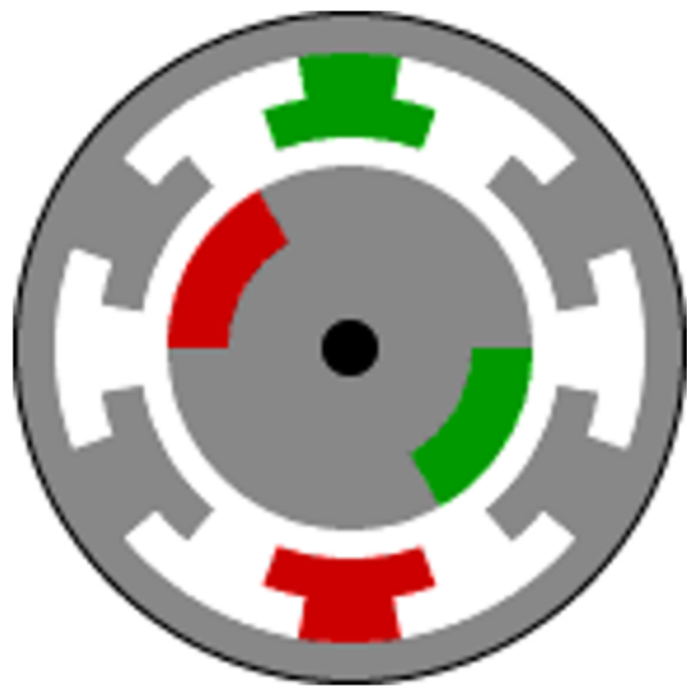


# 1、无刷直流电机 (BLDCM)

无刷直流电机通过安装在电机上的位置传感器，将带有转子位置信号的电信号送控制器以得到转子位置。控制器利用位置传感器的信号计算出转子位置并输出相应的控制信号给功率驱动器，控制开关管状态，使电枢绕组按顺序通电，产生一个超前于转子磁场的旋转磁场，驱使转子向前运动。这就是无刷直流电机的基本运行原理。



无刷直流电机内部结构图



无刷直流电机原理动图



# 1、无刷直流电机 (BLDCM)

无刷直流电机在速率伺服和驱动应用中日益广泛应用，如：计算机的硬盘、光驱的主轴驱动、散热风扇的集成实现；家用电器中空调、冰箱、洗衣机的调速驱动；医疗设备中的泵类驱动、人造心脏等；航天探测器的车轮驱动、空间试验室中的泵类、风扇驱动；动量体应用中的陀螺和飞轮的驱动等等。



无人机用



电动三轮车用



家用电器用

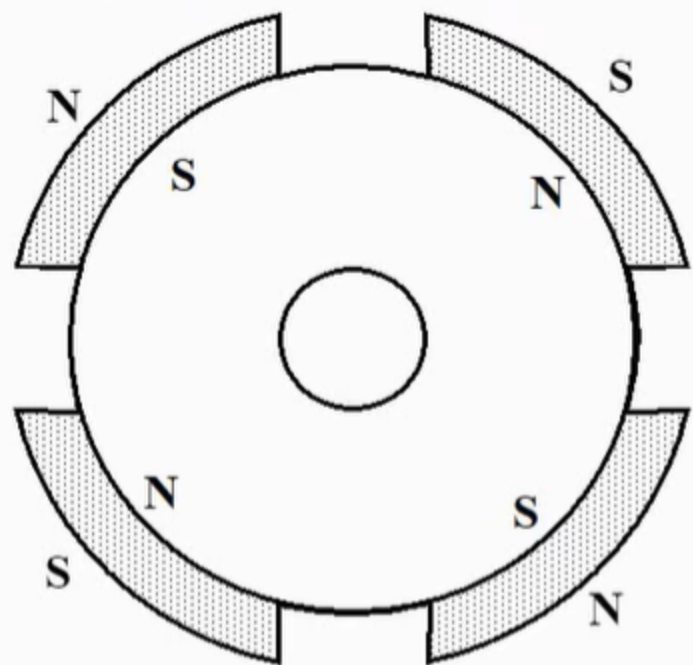


外转子无刷直流电机

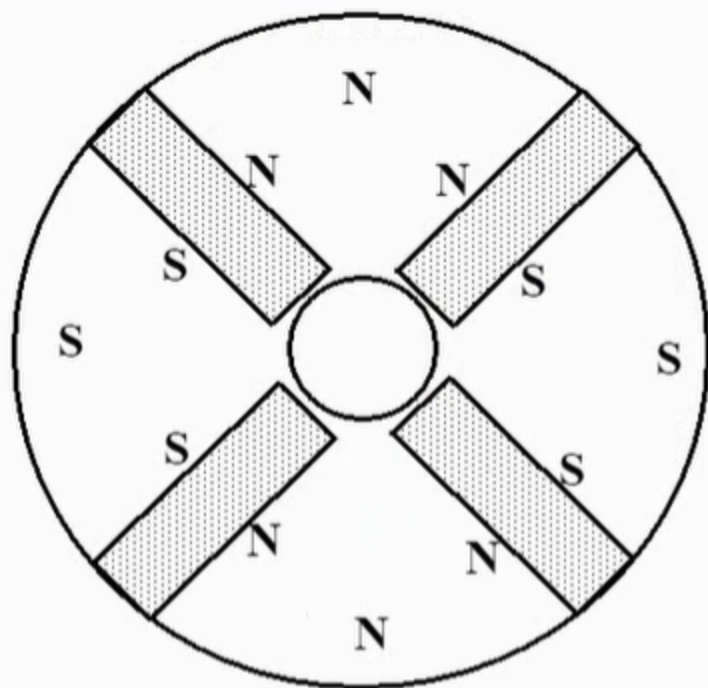


# 1.1 无刷直流电机 (BLDCM) 组成

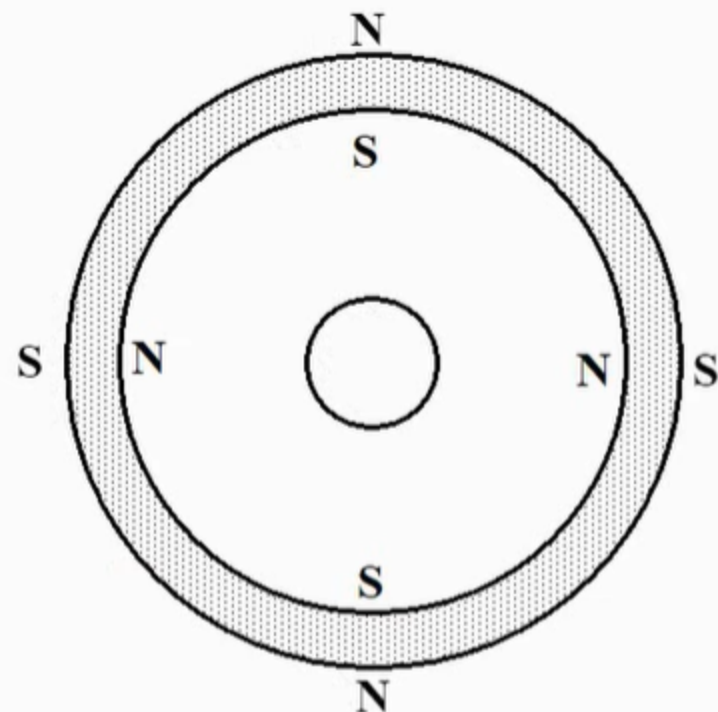
## 内转子结构形式



表面式磁极



嵌入式磁极



环形磁极





## 1.1 无刷直流电机 (BLDCM) 组成

### 无刷直流电动机原理:

电枢静止，磁极旋转，且磁极为永久磁铁。电枢绕组中电流的换向是借助于转子位置传感器和电子开关电路来实现的，所有，无刷直流电动机一般都是由电动机、位置传感器和电子开关线路三部分组成。

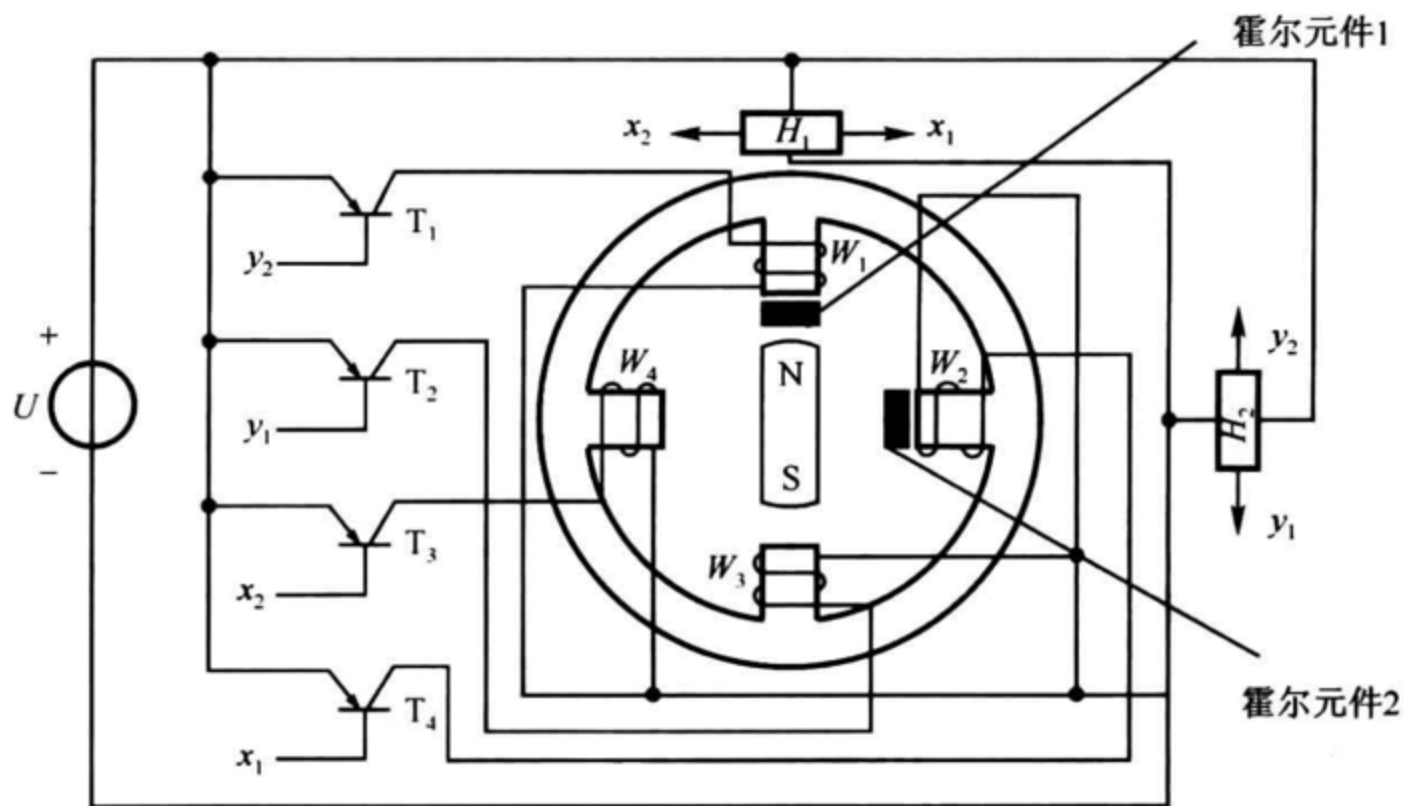
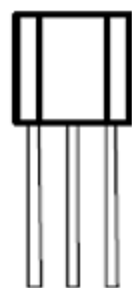
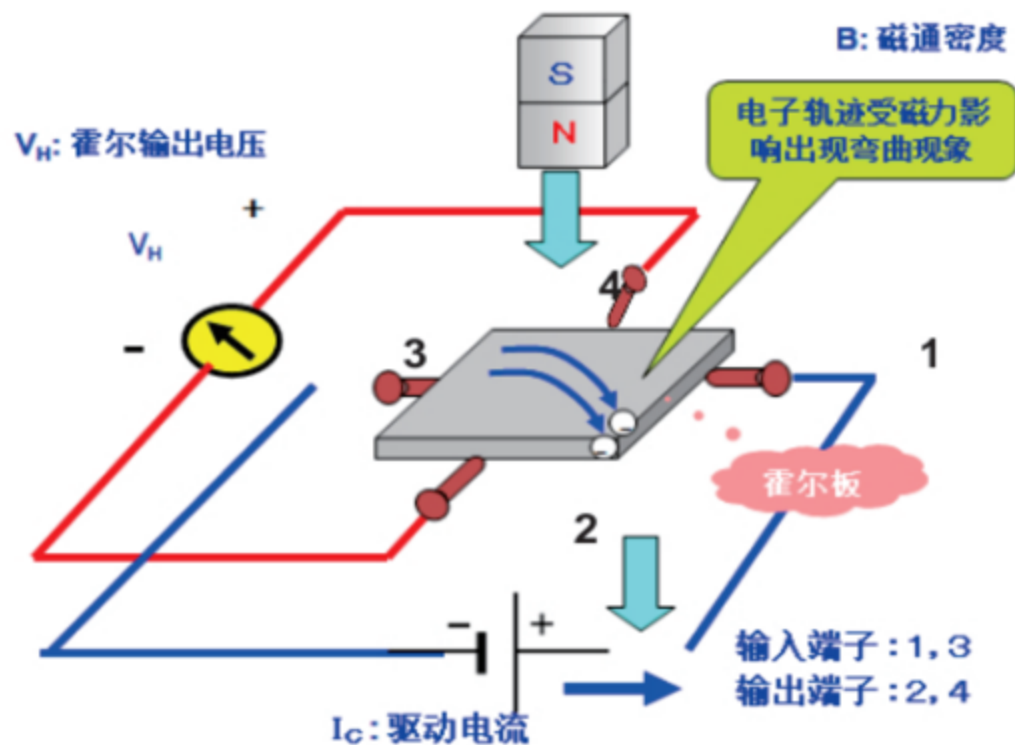


图 6-4 霍尔无刷直流电动机原理图

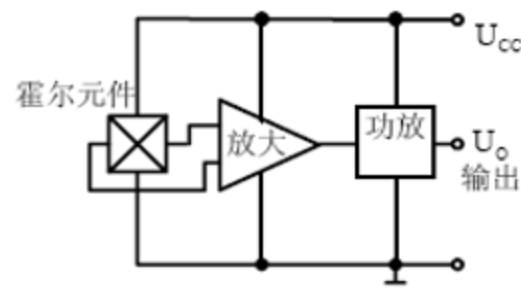


# 1.1 无刷直流电机 (BLDCM) 组成

霍尔位置传感器：实际的霍尔元件传感器是将霍尔元件与放大电路结合起来制成霍尔集成放大电路，输出信号为高电平（5V左右）和低电平（0.3V左右）

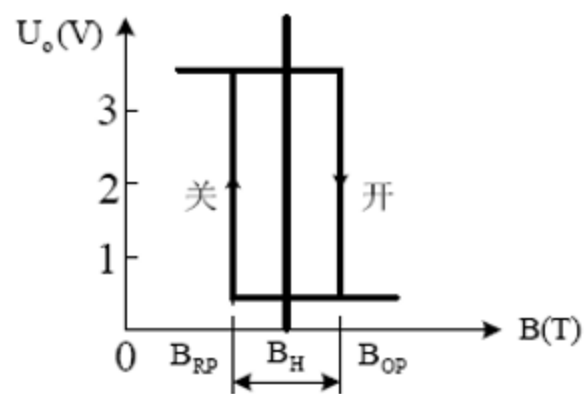


外形



电路原理

霍尔集成电路



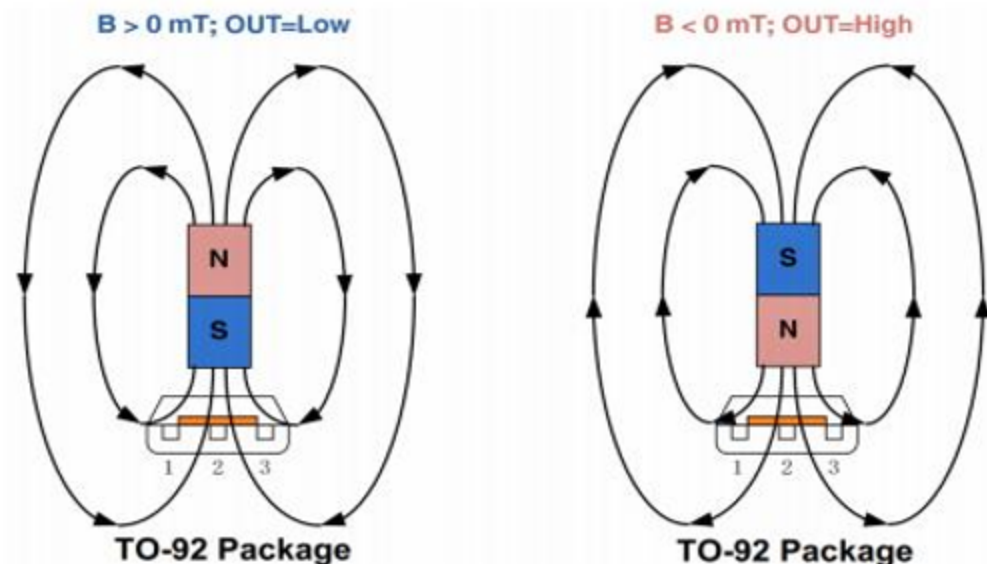
开关特性



## 1.1 无刷直流电机 (BLDCM) 组成

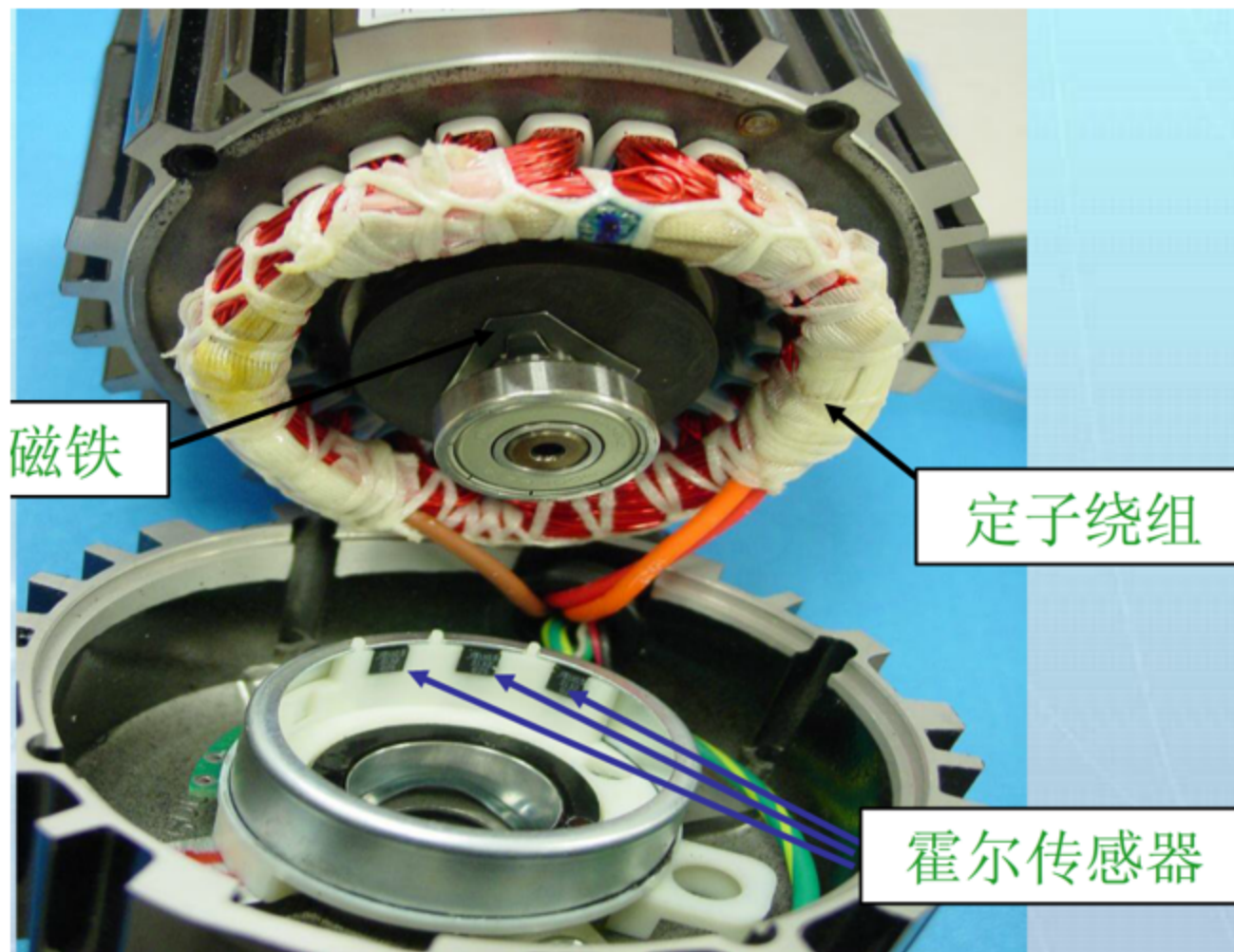
双极霍尔元件：双极霍尔需要两个磁极分别控制高低电平，利用磁场NS极交替来输出信号，常伴有锁存功能。如S极靠近时输出低电平，离开任然持续上一状态，直至N极靠近时输出高电平，当N极离开时持续高电平。

磁场定义：



# 1.1 无刷直流电机 (BLDCM) 组成

## 霍尔位置传感器



## 电机霍尔



12号



10号



## 1.2 无刷直流电机运行原理

### 两极四相电机:

### 功率电子开关

电机转子是2极永磁转子，定子上有4相绕组。定子一相通电形成两个磁极。4相绕组由4个晶体管控制。2个霍尔元件 $H_1, H_2$ 相隔90度电角安装在定子 $W_1, W_2$ 轴线上。

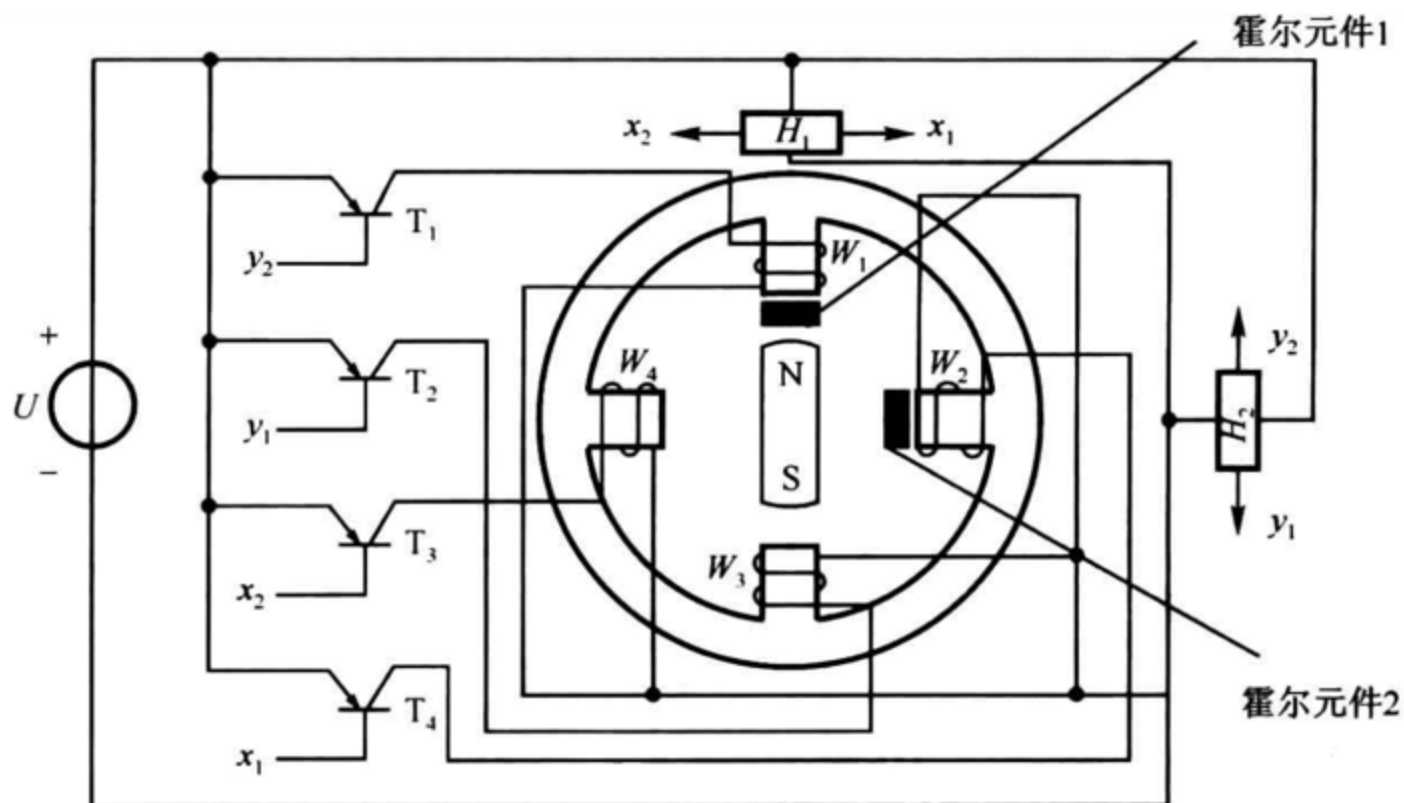


图 6-4 霍尔无刷直流电动机原理图

图中某一相定子绕组通电，某一相的磁极就是 S 级

### 集中非叠式绕组



## 1.2 无刷直流电机运行原理

### 两极四相电机:

取W1轴线绕组轴线为0度，顺时针为正向。在0度附近（ $\pm 45$ 度，电角）转子的N极磁场通过霍尔元件H1，其输出x1使功率晶体管T4导通，绕组W2导通，定子产生水平向右方向的磁场，见图6-5。

表 6-1

转子位置(电角)	$-45^\circ$	$45^\circ$	$135^\circ$	$225^\circ$	$315^\circ$
霍尔元件	$H_1$	$H_2$	$H_1$	$H_2$	
导通管	$T_4$	$T_2$	$T_3$	$T_1$	
导通相	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_1$	
定子磁场轴线	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$	$360^\circ$	
$\theta$	$90^\circ \pm 45^\circ$	$90^\circ \pm 45^\circ$	$90^\circ \pm 45^\circ$	$90^\circ \pm 45^\circ$	

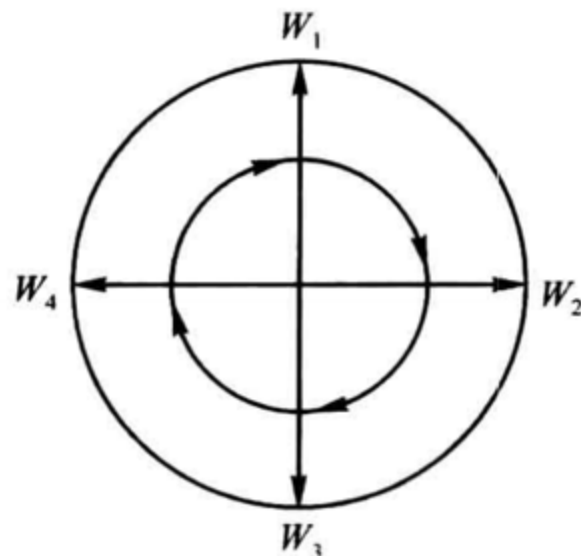


图 6-5 定子磁场



## 1.2 无刷直流电机运行原理

### 两极三相电机:

BLDC属于同步电机的一种，在这里我们将讨论的是应用最为广泛的3相BLDC。两极三相霍尔电机结构件图6-6 (a)，电枢绕组与开关电路见图6-6 (b)。转子是永磁两极，定子是三相绕组(类似于前面讲的交流电机)。3个霍尔元件HA, HB, HC分别位于三相绕组轴线，霍尔元件的作用范围是 $\pm 90^\circ$ 。

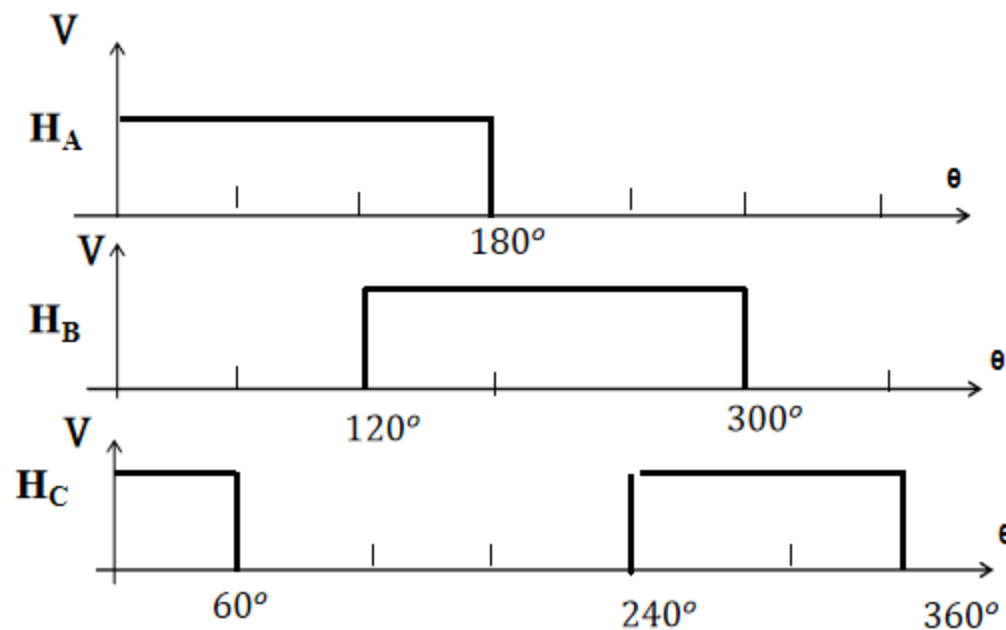
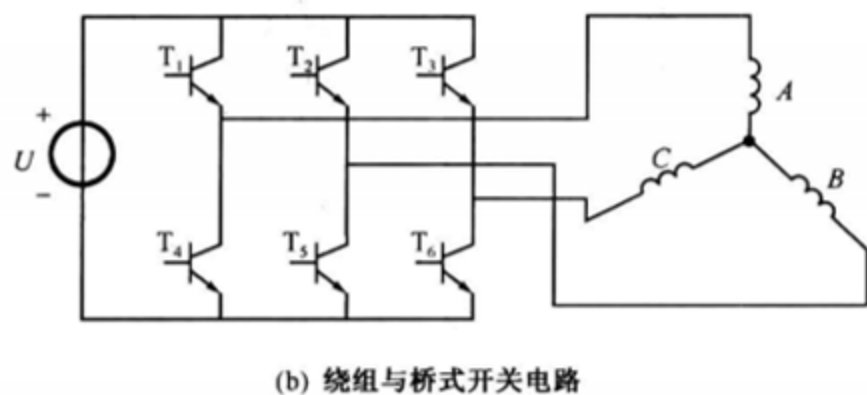
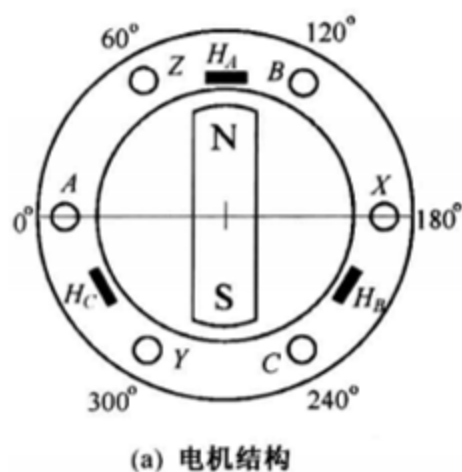
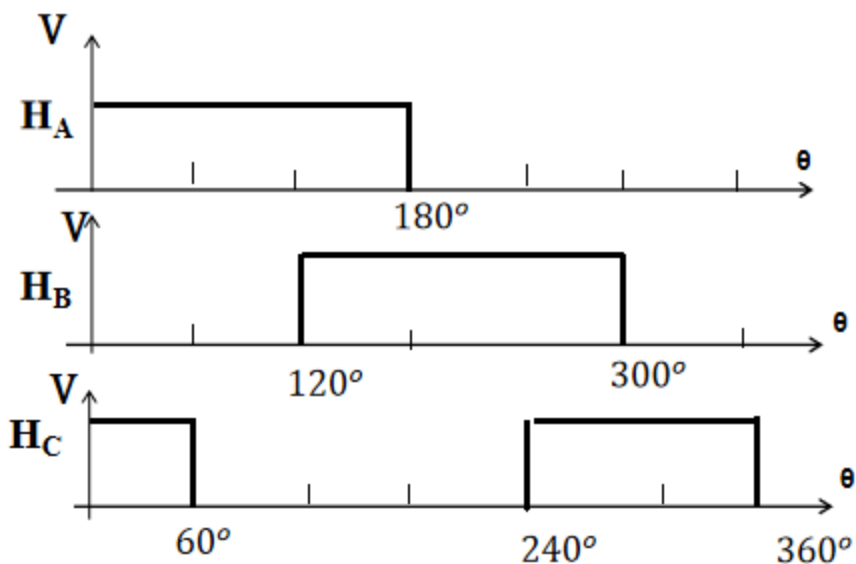


图 6-6 两极三相电机



## 1.2 无刷直流电机运行原理



换向表 (正转)						
顺序	转子磁极角度范围	HA	HB	HC	通路	
1	0-60	1	0	1	T3,T4	C-A
2	60-120	1	0	0	T3,T5	C-B
3	120-180	1	1	0	T1,T5	A-B
4	180-240	0	1	0	T1,T6	A-C
5	240-300	0	1	1	T2,T6	B-C
6	300-360	0	0	1	T2,T4	B-A

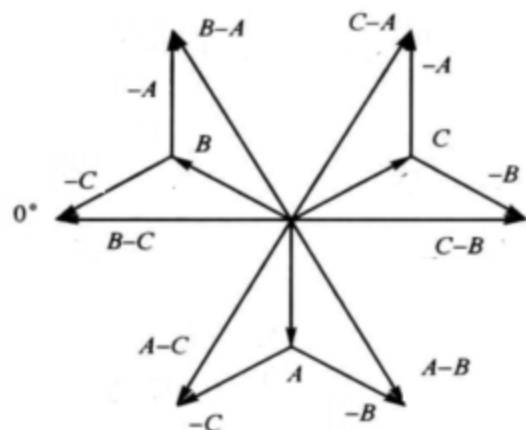


表 6-2

转子位置(电角)	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
导电绕组	C		A		B		
	A	B		C		A	
定子磁场	120°	180°	240°	300°	0°	60°	
$\theta$	90°±30°	90°±30°	90°±30°	90°±30°	90°±30°	90°±30°	





## 1.2 无刷直流电机运行原理

每一次换向都会有一组绕组处于正向通电，第二组反相通电，第三组不通电。转子永磁体的磁场和定子钢片产生的磁场相互作用就产生转矩，理论上，当这两个磁场夹角为90度时会产生最大的转矩，当这两个磁场重合时转矩变为0，为了使转子不停的转动，那么就需要改变定子的磁场，就像转子的磁场一直在追赶定子的磁场一样。

典型的“**六步电流换向**”顺序图展示了定子内绕组的通电次序。



## 1.2 无刷直流电机运行原理

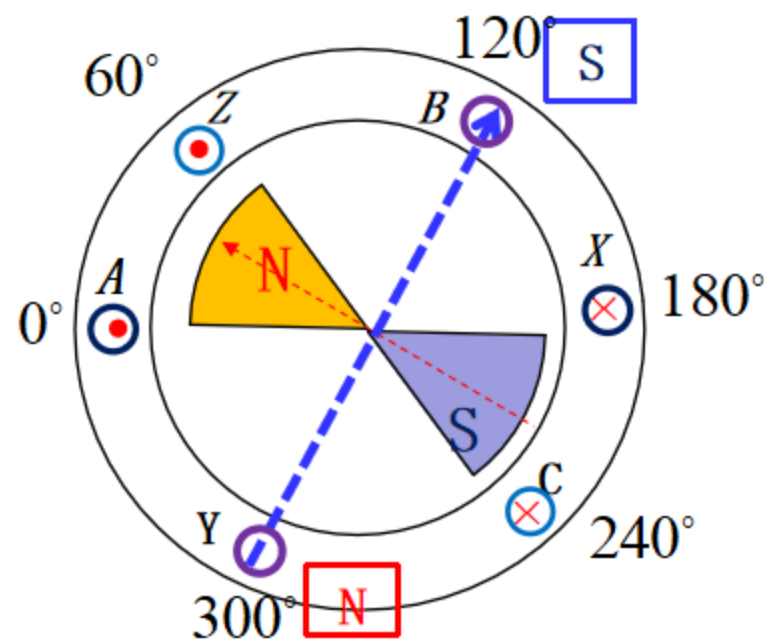
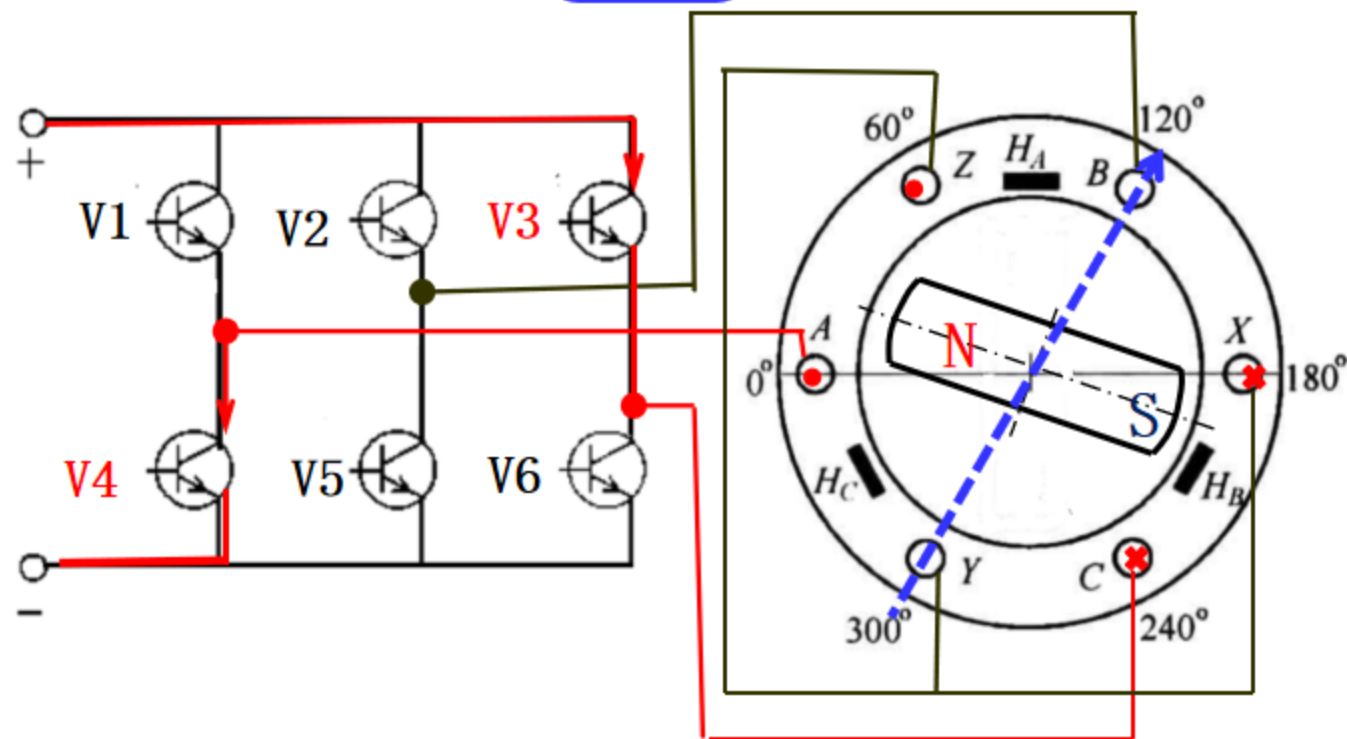
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

CA → CB → AB → AC → BC → BA

V3V4 → V3V5 → V1V5 → V1V6 → V2V6 → V2V4

$(0^\circ \sim 60^\circ) \rightarrow (60^\circ \sim 120^\circ) \rightarrow (120^\circ \sim 180^\circ) \rightarrow (180^\circ \sim 240^\circ) \rightarrow (240^\circ \sim 300^\circ) \rightarrow (300^\circ \sim 360^\circ)$

$120^\circ \dots\dots 180^\circ \dots\dots 240^\circ \dots\dots 300^\circ \dots\dots 0^\circ \dots\dots 60^\circ$



## 1.2 无刷直流电机运行原理

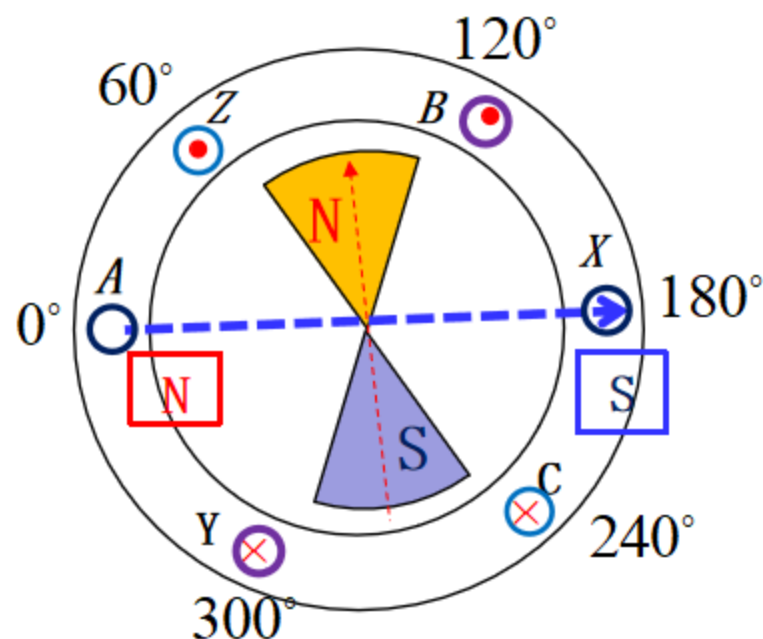
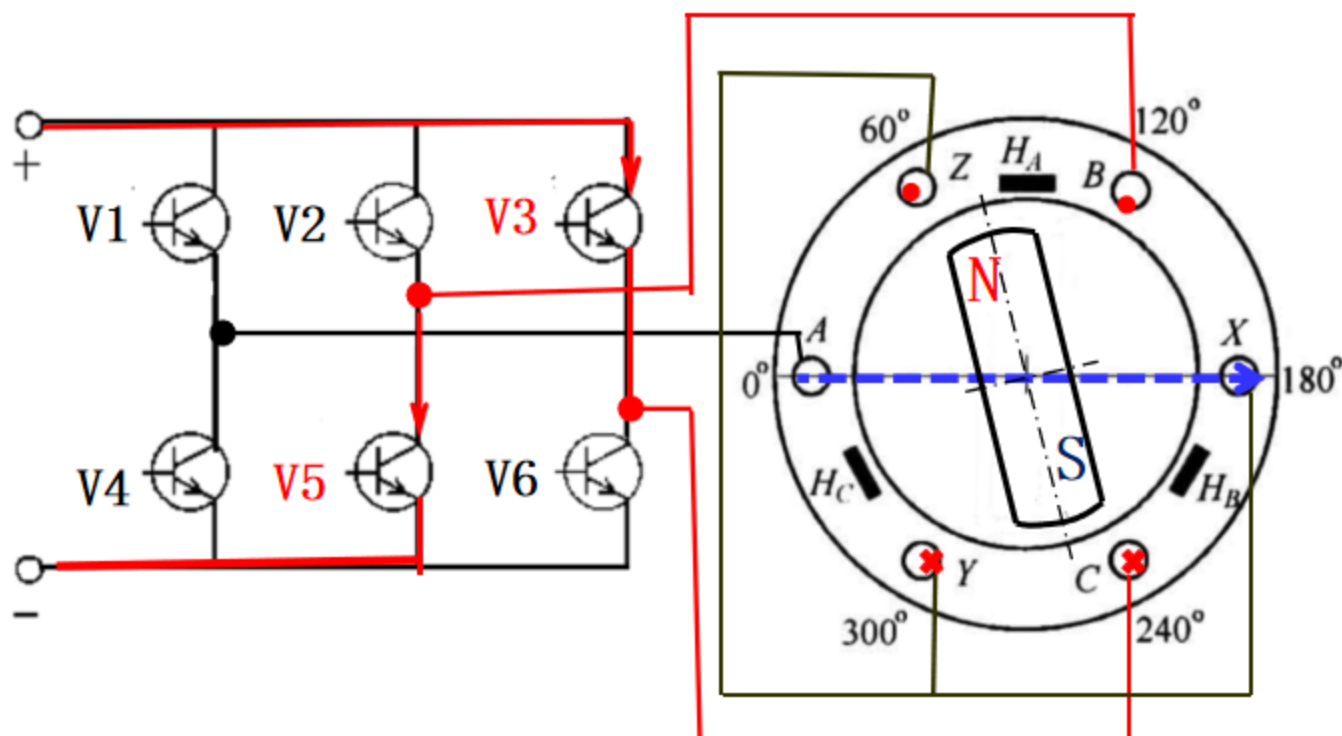
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

CA → CB → AB → AC → BC → BA

V3V4 → V3V5 → V1V5 → V1V6 → V2V6 → V2V4

$(0^\circ \sim 60^\circ) \rightarrow (60^\circ \sim 120^\circ) \rightarrow (120^\circ \sim 180^\circ) \rightarrow (180^\circ \sim 240^\circ) \rightarrow (240^\circ \sim 300^\circ) \rightarrow (300^\circ \sim 360^\circ)$

$120^\circ \dots 180^\circ \dots 240^\circ \dots 300^\circ \dots 0^\circ \dots 60^\circ$



## 1.2 无刷直流电机运行原理

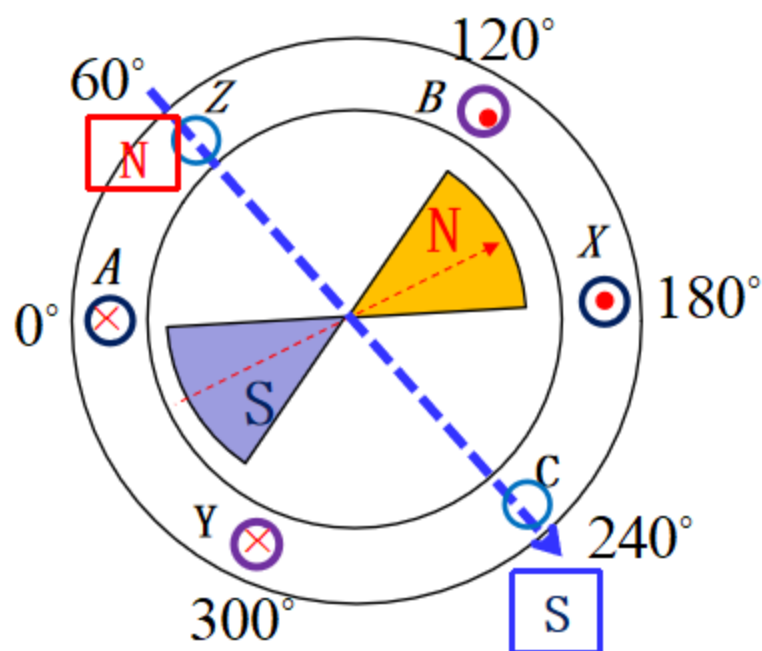
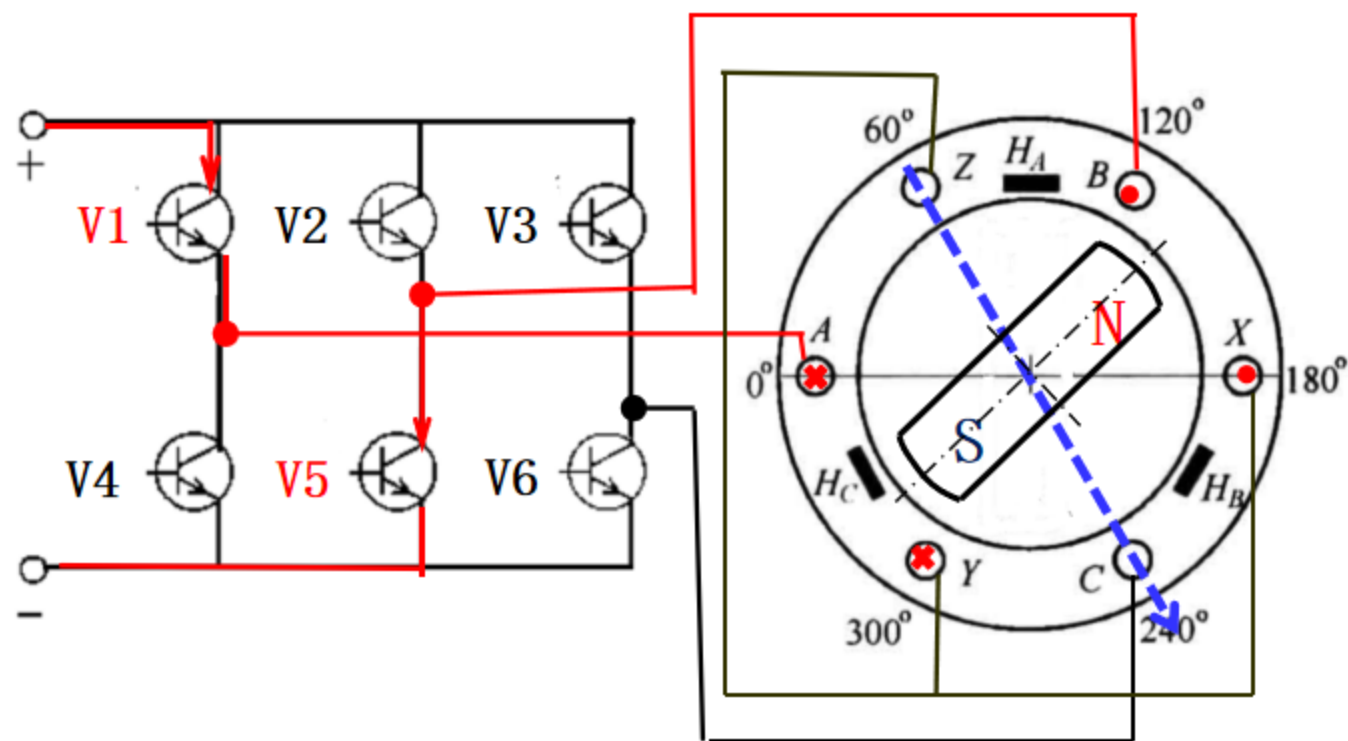
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

CA → CB → AB → AC → BC → BA

V3V4 → V3V5 → V1V5 → V1V6 → V2V6 → V2V4

(0° ~ 60°) → (60° ~ 120°) → (120° ~ 180°) → (180° ~ 240°) → (240° ~ 300°) → (300° ~ 360°)

120° ..... 180° ..... 240° ..... 300° ..... 0° ..... 60°



## 1.2 无刷直流电机运行原理

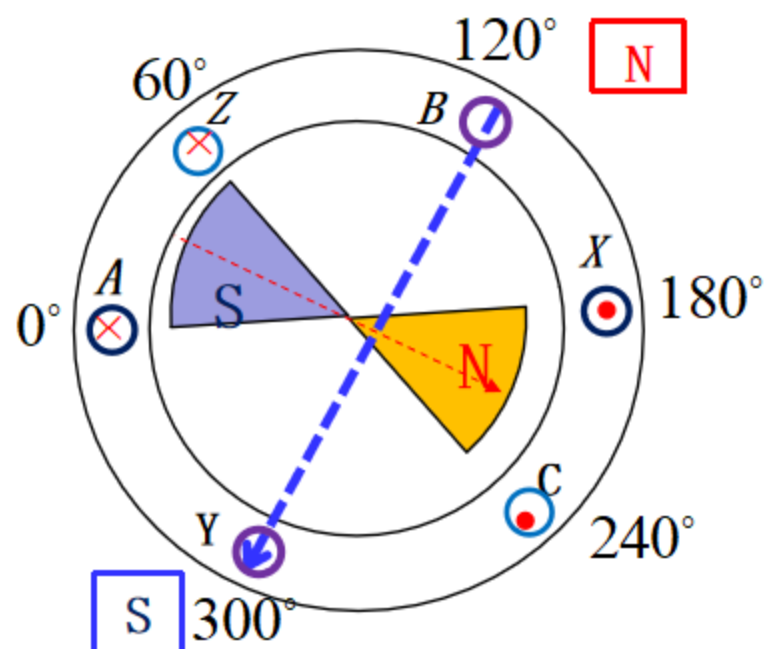
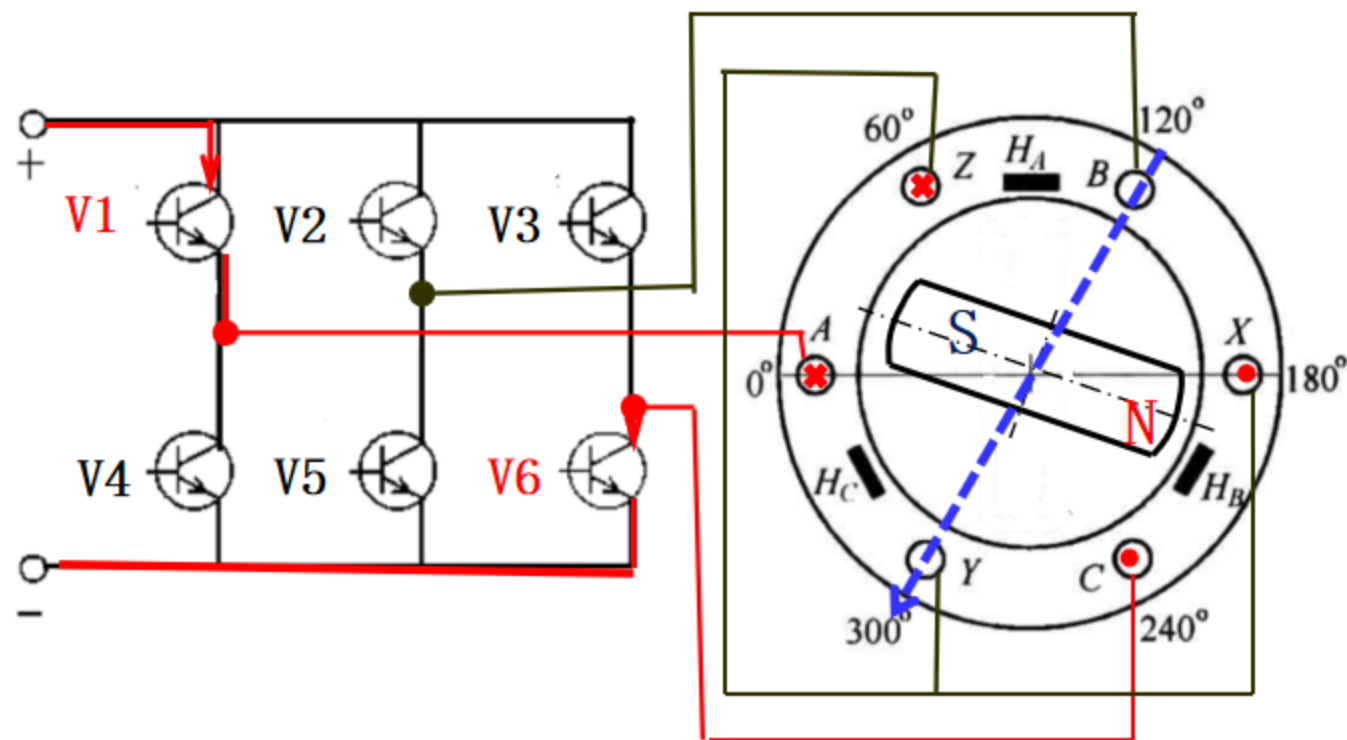
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

$CA \rightarrow CB \rightarrow AB \rightarrow AC \rightarrow BC \rightarrow BA$

$V3V4 \rightarrow V3V5 \rightarrow V1V5 \rightarrow V1V6 \rightarrow V2V6 \rightarrow V2V4$

$(0^\circ \sim 60^\circ) \rightarrow (60^\circ \sim 120^\circ) \rightarrow (120^\circ \sim 180^\circ) \rightarrow (180^\circ \sim 240^\circ) \rightarrow (240^\circ \sim 300^\circ) \rightarrow (300^\circ \sim 360^\circ)$

$120^\circ \dots\dots 180^\circ \dots\dots 240^\circ \dots\dots 300^\circ \dots\dots 0^\circ \dots\dots 60^\circ$



## 1.2 无刷直流电机运行原理

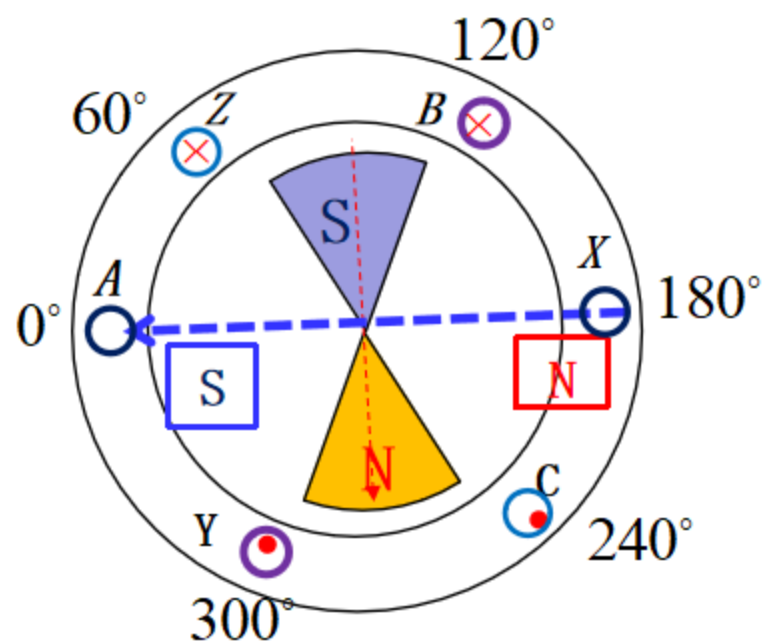
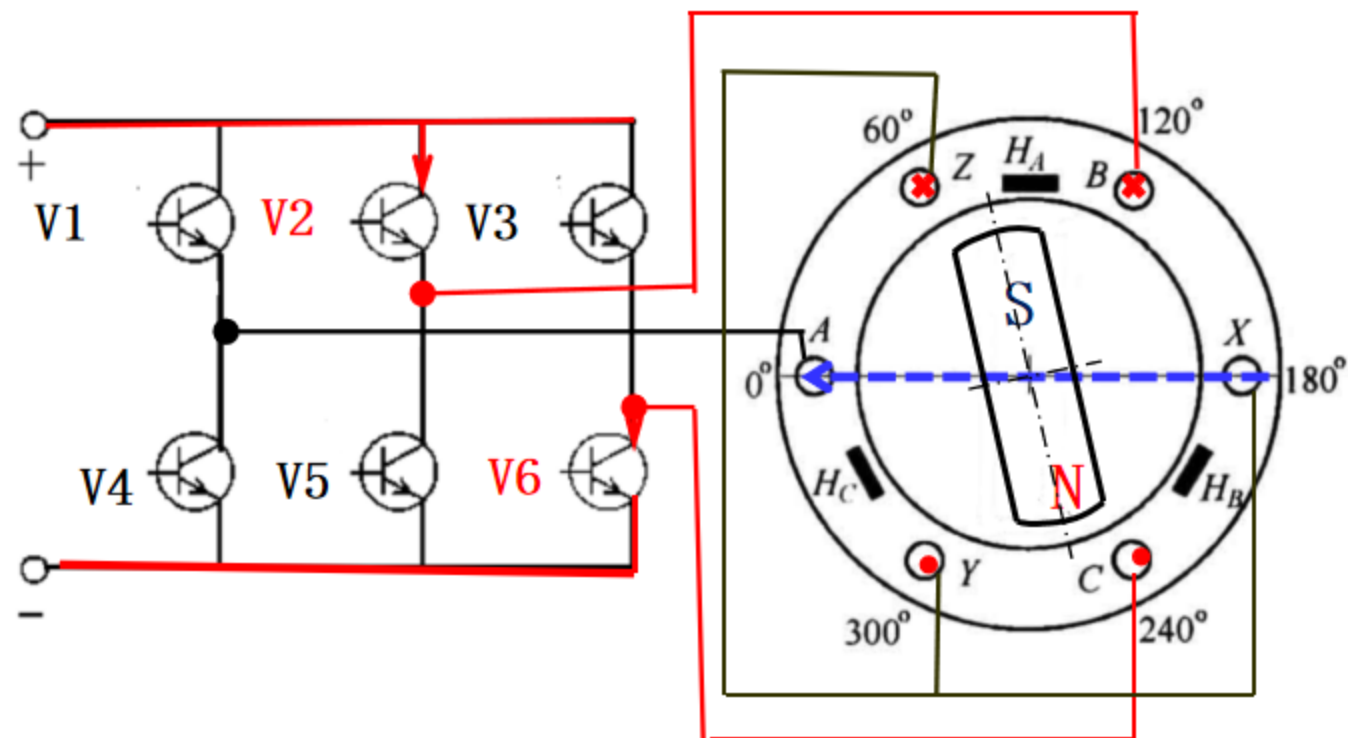
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

CA → CB → AB → AC → **BC → BA**

V3V4 → V3V5 → V1V5 → V1V6 → V2V6 → V2V4

(0° ~ 60°) → (60° ~ 120°) → (120° ~ 180°) → (180° ~ 240°) → (240° ~ 300°) → (300° ~ 360°)

120° ..... 180° ..... 240° ..... 300° ..... 0° ..... 60°



## 1.2 无刷直流电机运行原理

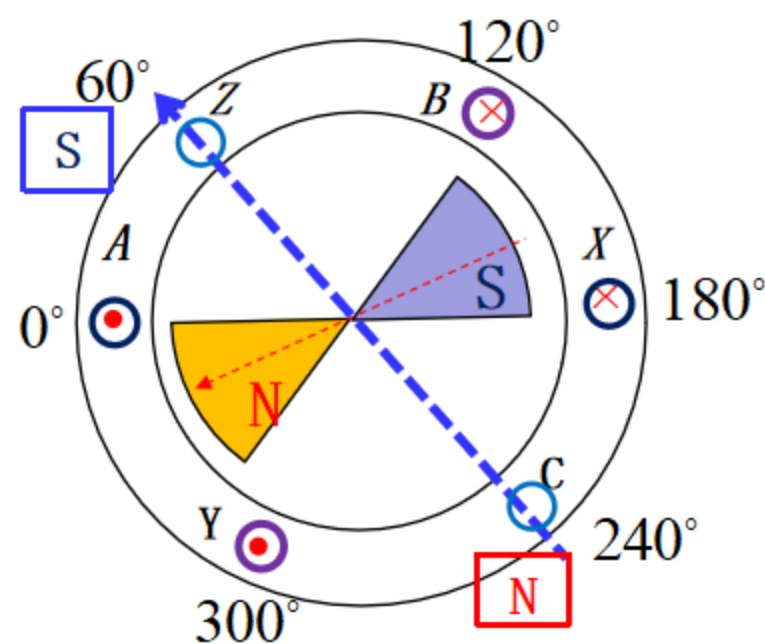
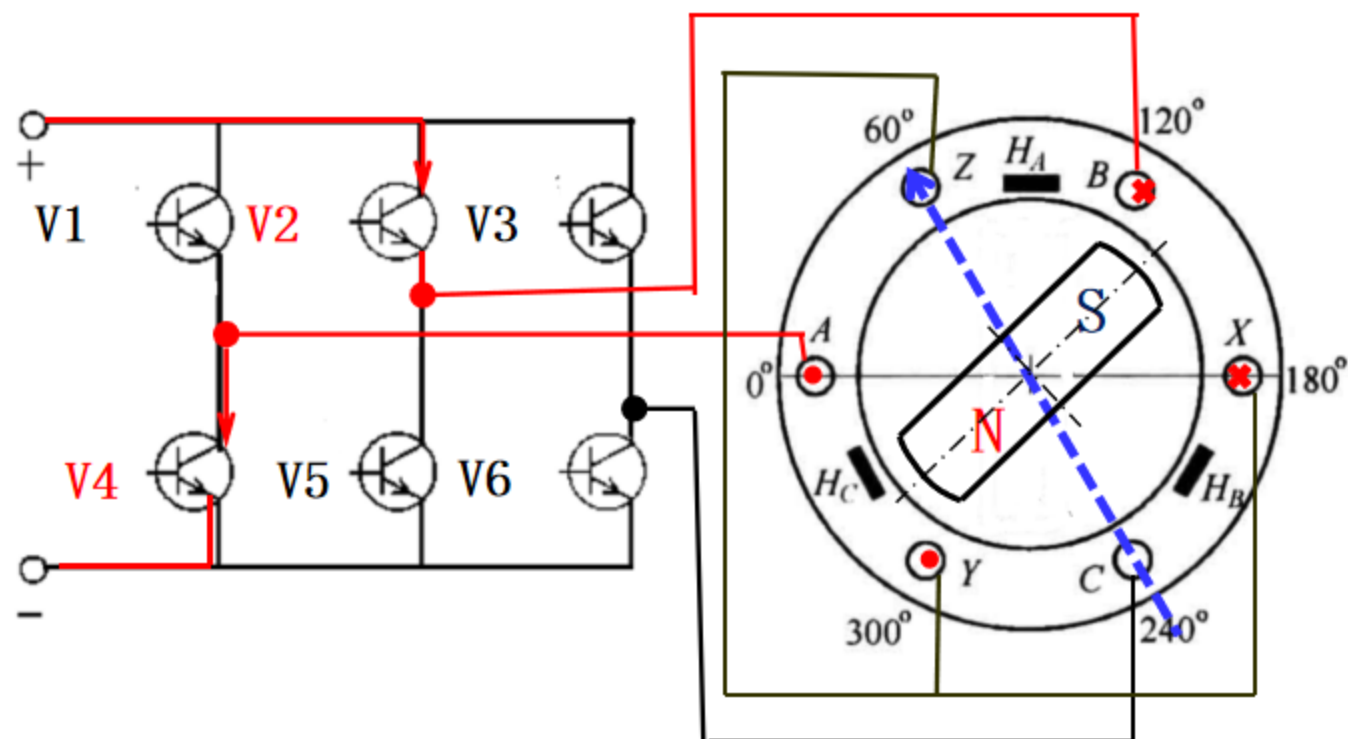
定子绕组导通相  
导通的晶体管号  
转子转过电角度  
定子磁极位置

$CA \rightarrow CB \rightarrow AB \rightarrow AC \rightarrow BC \rightarrow BA$

$V3V4 \rightarrow V3V5 \rightarrow V1V5 \rightarrow V1V6 \rightarrow V2V6 \rightarrow V2V4$

$(0^\circ \sim 60^\circ) \rightarrow (60^\circ \sim 120^\circ) \rightarrow (120^\circ \sim 180^\circ) \rightarrow (180^\circ \sim 240^\circ) \rightarrow (240^\circ \sim 300^\circ) \rightarrow (300^\circ \sim 360^\circ)$

$120^\circ \dots\dots 180^\circ \dots\dots 240^\circ \dots\dots 300^\circ \dots\dots 0^\circ \dots\dots 60^\circ$



## 1.2 无刷直流电机运行原理

### 通电状态与磁状态角：

绕组通电的不同状态的数目记作 $N$ ，设绕组相数为 $m$ ，则有：

$$N = km \quad (k = 1, 2)$$

前面2极4相电机，单向通电， $N=4$ ；2极3相电机双向通电， $N=6$ 。

**导通角**  $\alpha_c$ ：每相绕组导电时，转子所转过的空间角度（电角）

$$\alpha_c = \frac{360^\circ}{m} = \frac{2\pi}{m}$$

**磁状态角**  $\alpha_m$ ：电枢磁势向量（磁场轴线）不变，转子所能转过的角度（电角）

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{N} = \frac{2\pi}{N}$$

**定子与转子磁势夹角**  $\theta$ ：

$$\theta = 90^\circ \pm \frac{1}{2}\alpha_m = 90^\circ \pm \frac{180^\circ}{N}$$





## 1.2 无刷直流电机运行原理

### 转矩波动:

定子与转子磁场间的力矩  $T_{em}$  为:  $T_{em} = K \sin \theta$

2极4相  $N = 4$   $\theta = 90^\circ \pm 45^\circ$

存在较大的转矩波动

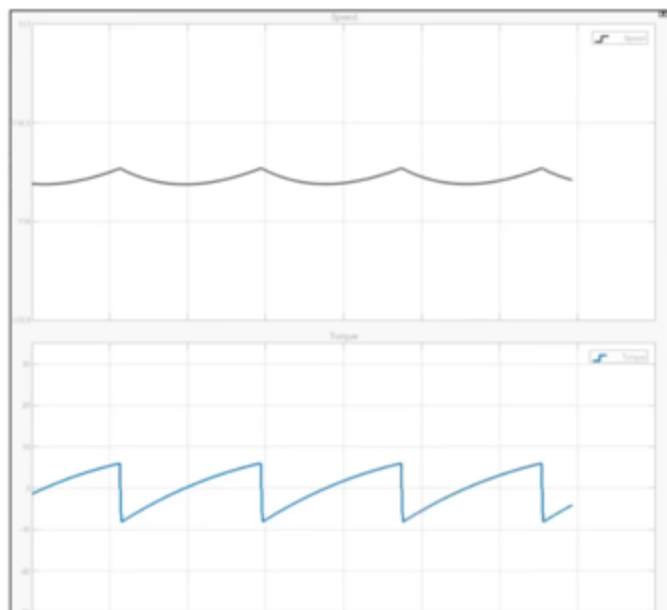
2极3相  $N = 6$   $\theta = 90^\circ \pm 30^\circ$

Rotor magnetic field  
Stator magnetic field



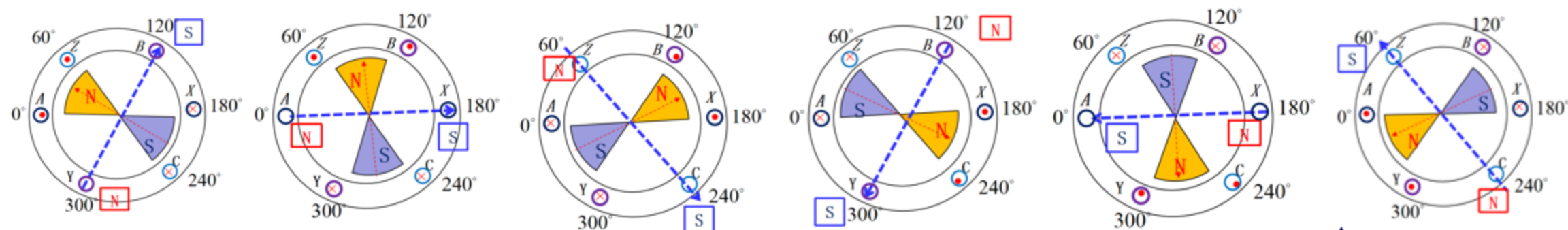
BLDC motor controlled  
with **six-step commutation**

- Speed and torque ripple



## 1.2 无刷直流电机运行原理

- 思考：**
- 1、无刷直流电机的定子磁场是连续变化还是步进变化的？
  - 2、如何减少转矩波动？
  - 3、有刷直流电机如何调速？
  - 4、无刷直流电机如何调速？

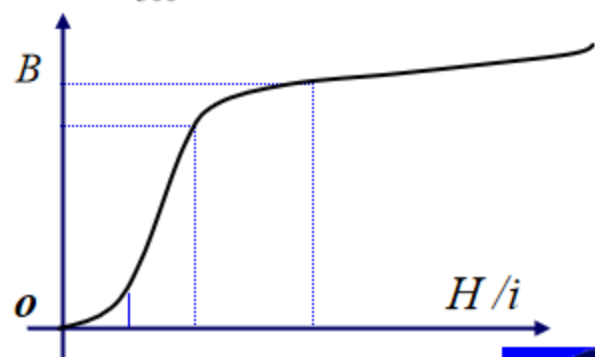


$$T_{em} = K \sin \theta$$

$$\theta = 90^\circ \pm \frac{1}{2} \alpha_m = 90^\circ \pm \frac{180^\circ}{km}$$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \omega$$

$$T = K_t i = J \frac{d\omega}{dt} + T_c$$



## 1.2 无刷直流电机运行原理

	无刷直流电机	有刷直流电机
换向	根据霍尔位置传感器电子换向	采用电刷换向
维护	由于无电刷而较少需要	需要定期维护
寿命	较长	较短
转速/转矩特性	平坦---在负载额定的条件下,可在所有转速下正常工作	中等平坦---转速较高时,电刷摩擦增加,因此减少了有用转矩
效率	高---没有电刷两段的压电	中等
输出效率/体积	高---由于出众的散热特性而缩小了体积。由于BLDC电机绕组放在连接至电机外壳的定子上,因而散热更好	中等/低---电枢产生的热量散发到气隙中,这使气隙中的温度升高,限制了输出功率/体积规范
转子惯量	小,因为转子上有永磁体。这改进了动态响应。	较大的转子惯量限制了动态特性
转速范围	较高---无电刷/换向器施加的机械限制	较低---有电刷的机械限制
产生电子干扰	低	电刷中的电弧会对附近设备产生电磁干扰
制造成本	较高---由于其中有永磁体,制造成本较高	低
控制	复杂且昂贵	简单且便宜
控制要求	要保持电机运转,始终需要控制器。还可使用这一控制器控制转速	固定转速不需要控制器,只需要改变转速时才需要控制器。



## 1.2 无刷直流电机运行原理

	无刷直流电机	交流感应电机
转速/转矩特性	平坦---在负载额定的条件下,可在所有转速下正常工作	非线性---低转速下转矩也低
输出功率/体积	高---由于转子采用永磁体,对于给定的输出功率可以实现较小的体积	中等---由于定子和转子都有绕组,输出功率与体积相比无刷直流电机较低
转子惯量	小---因为采用了永磁体,动态特性较佳。	大---转子惯量限制了动态特性
差频	定子和转子磁场的频率相同	转子运行频率低于定子,差值即为差频,随着电机负载的增加该差频也增加
控制要求	要保持电机运转,始终需要控制器。还可使用这一控制器控制转速	固定转速不需要控制器,只需要改变转速时才需要控制器。



# 目 录

- 1、无刷直流电动机
- 2、交流伺服电机概述**
- 3、交流伺服电机原理
- 4、直线伺服电机和直驱伺服电机



## 2、交流伺服电机概述

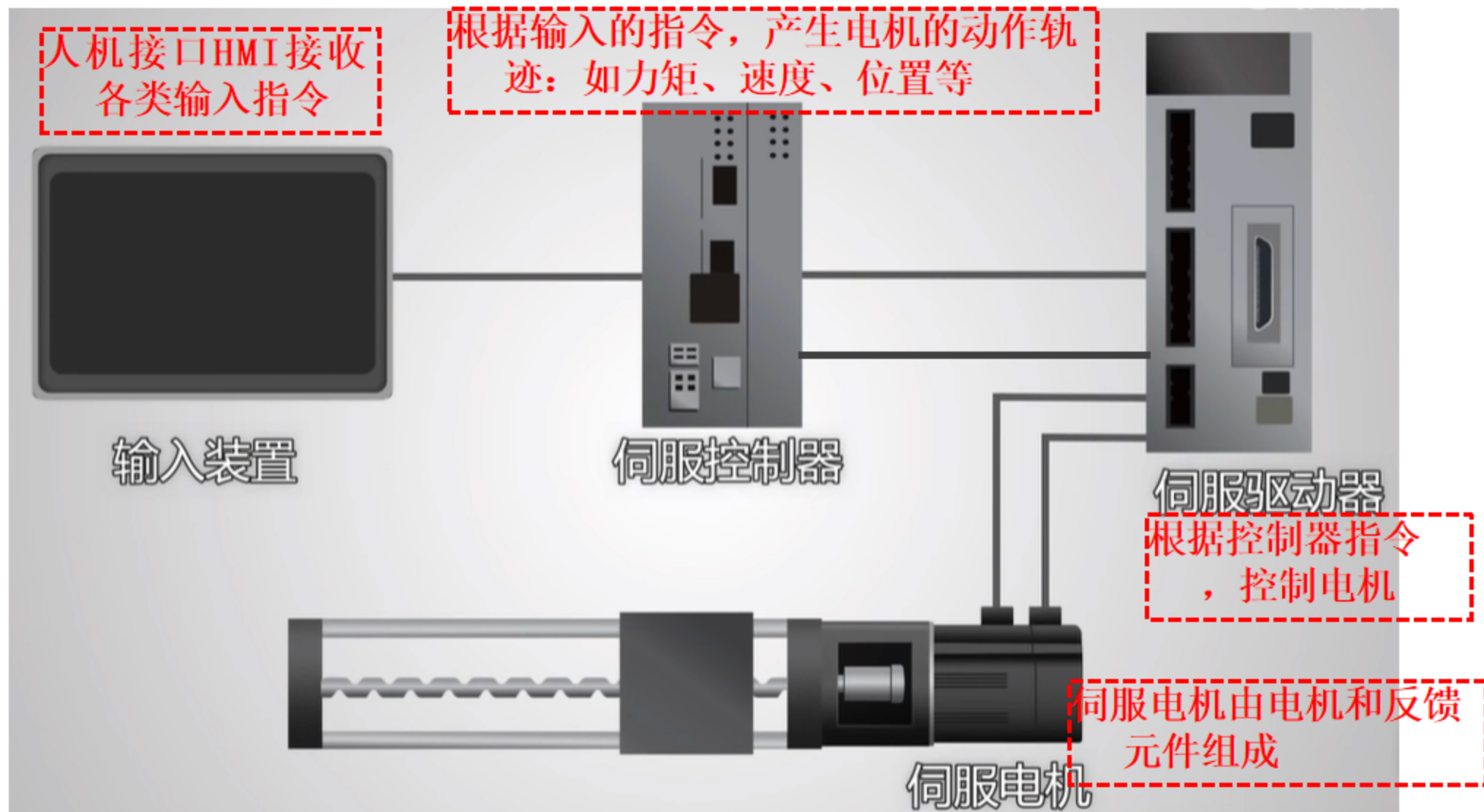
伺服是使物体的位置、方位、状态等输出量能够跟随输入目标（或给定值）的任意变化的自动控制系统。伺服（Servo）一词源于希腊语，是从“努力”的词根“servus”衍生出来的。

伺服电机又称执行电机，在自动控制系统中，用作执行元件，把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电机就是能让电机按照下达的命令而去行动的控制系统。

伺服电机强调精确的位置控制、速度控制、转矩控制。

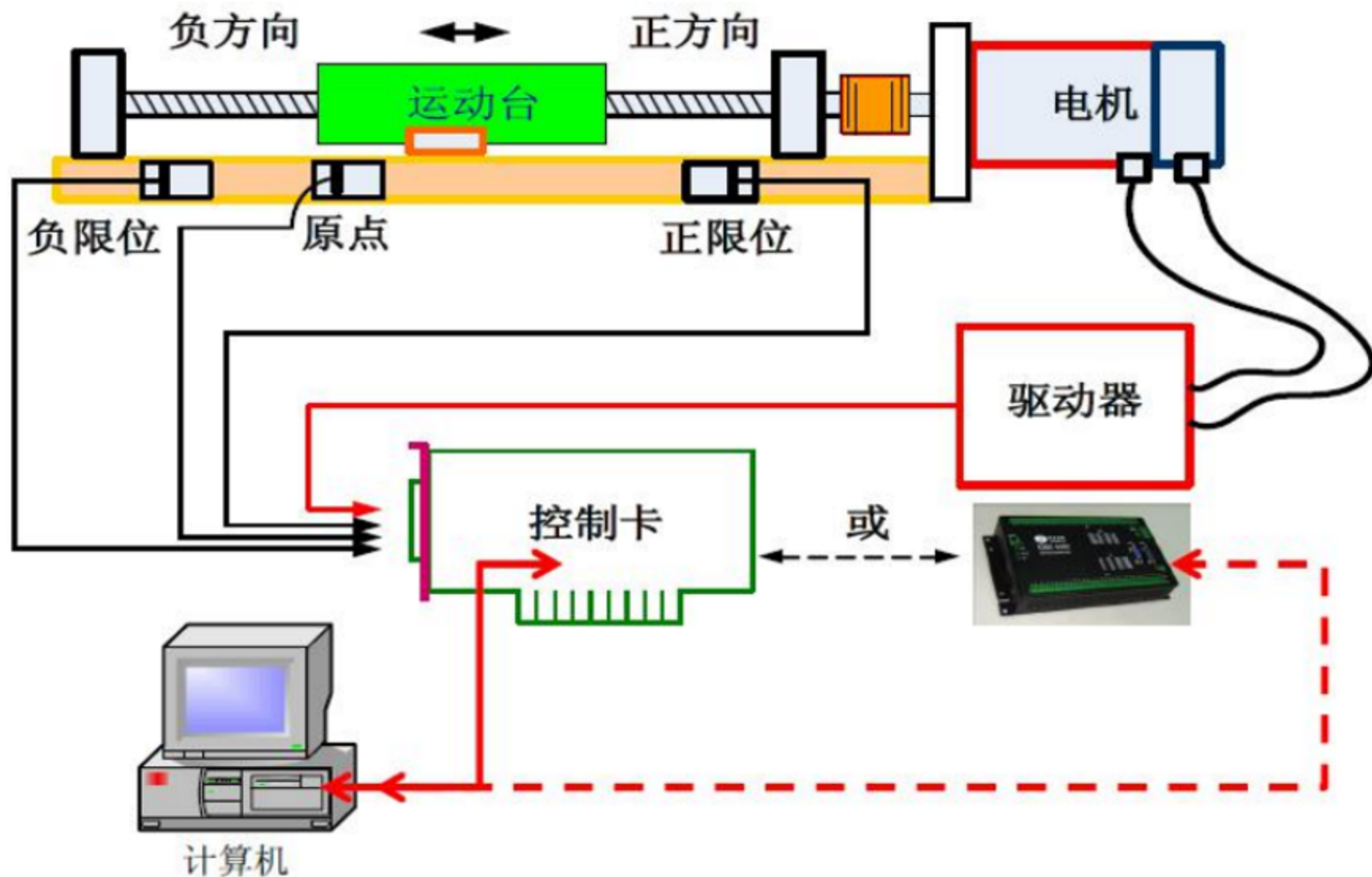


## 2、交流伺服电机概述



## 2、交流伺服电机概述

交流伺服系统运动平台





## 2、交流伺服电机概述

根据不同的驱动波形为前提设计，永磁交流伺服电机分为：

1、以驱动电流为方波为前提设计的电动机 (BLDC)。

2、以驱动电流为正弦波为前提设计的电动机 (PMSM)。

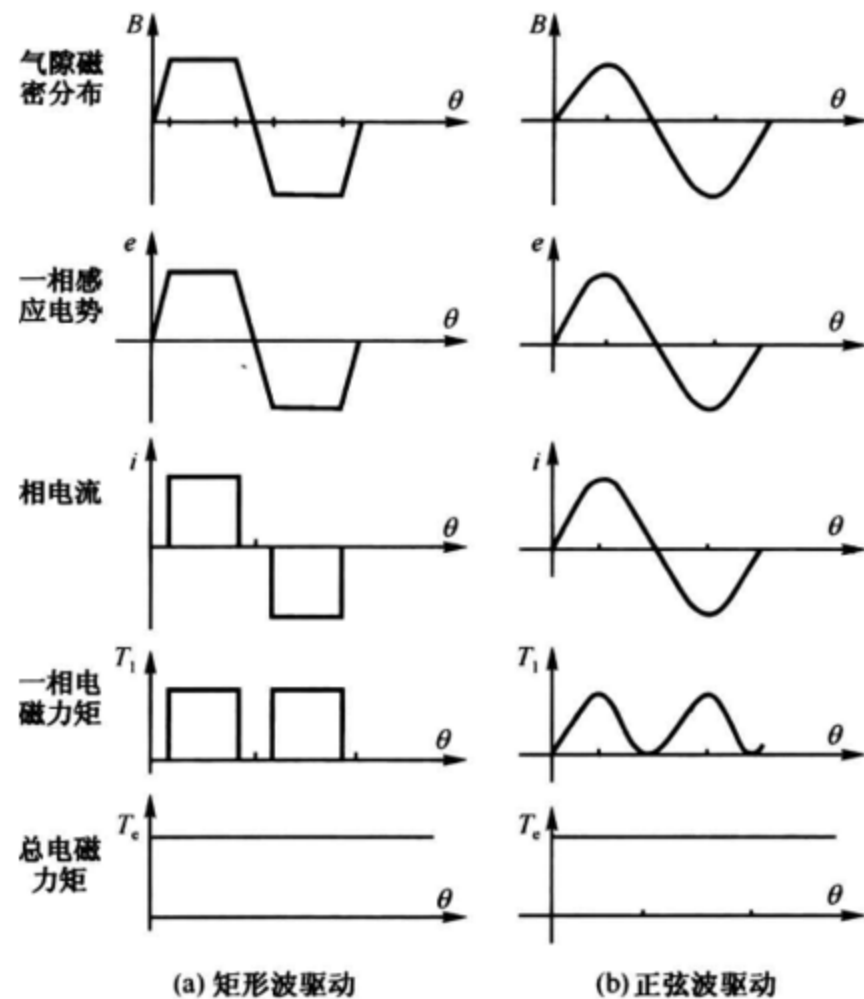
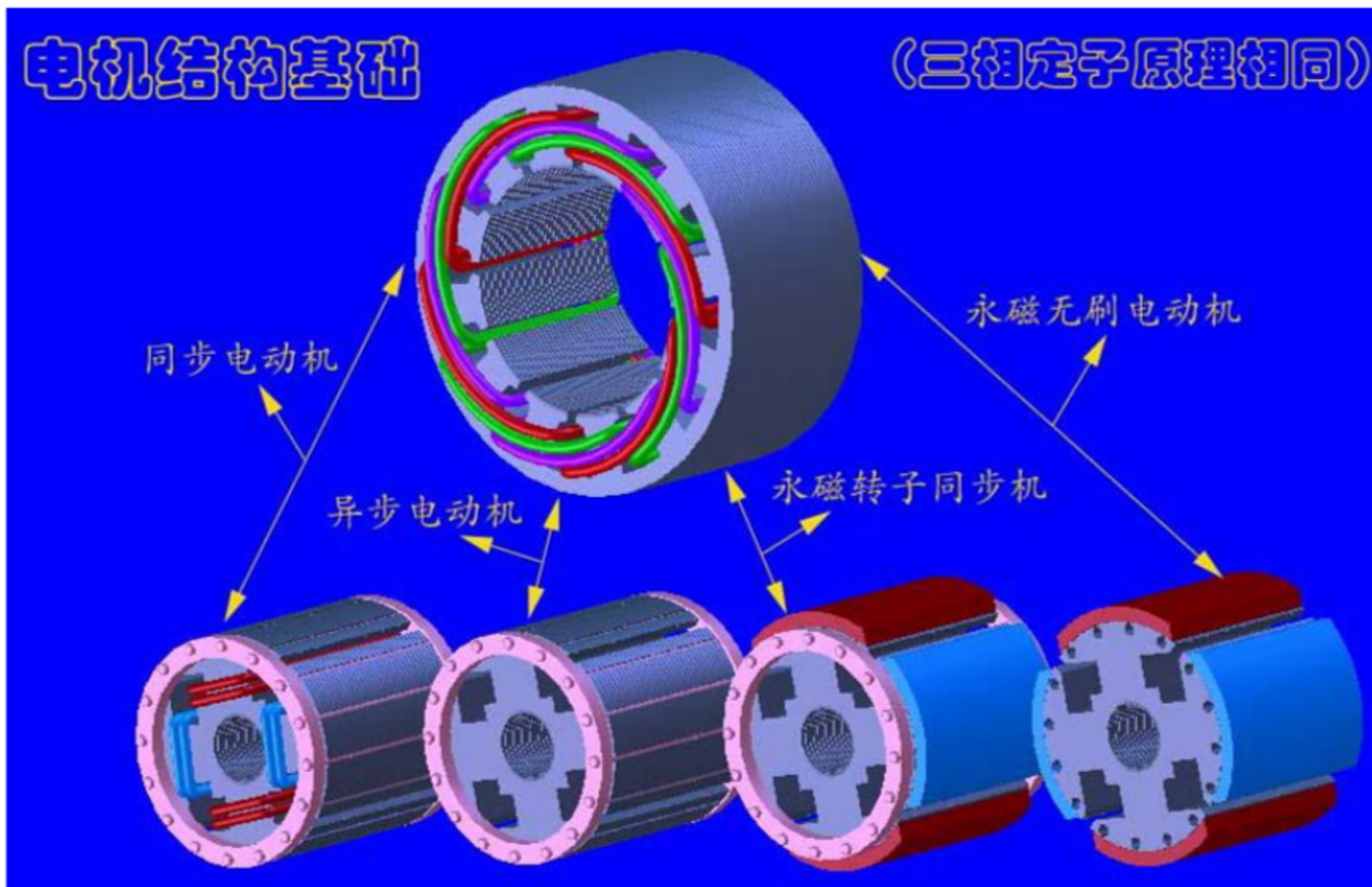


图 6-9 两种驱动模式的波形

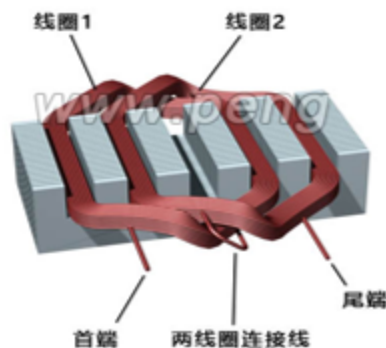


## 2、交流伺服电机概述



## 2、交流伺服电机概述

### 分布式绕组 (PMSM)



#### 优点:

(1) 产生的反电动势具有平滑的正弦特性。这意味着谐波的比例非常低，定子和绕组的叠片中的损耗也是更小。

(2) 高同步性，这意味着转矩波动以及电机的噪声都非常低。

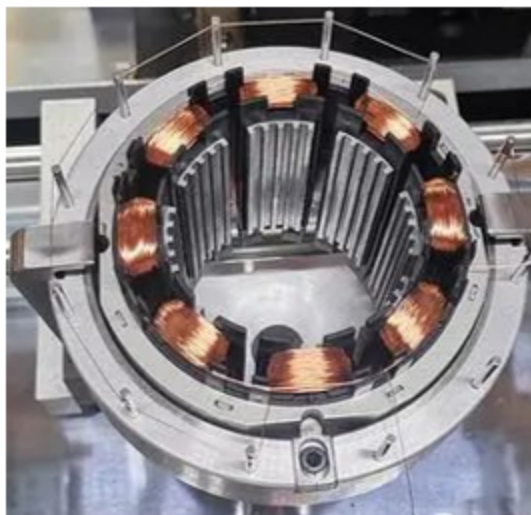
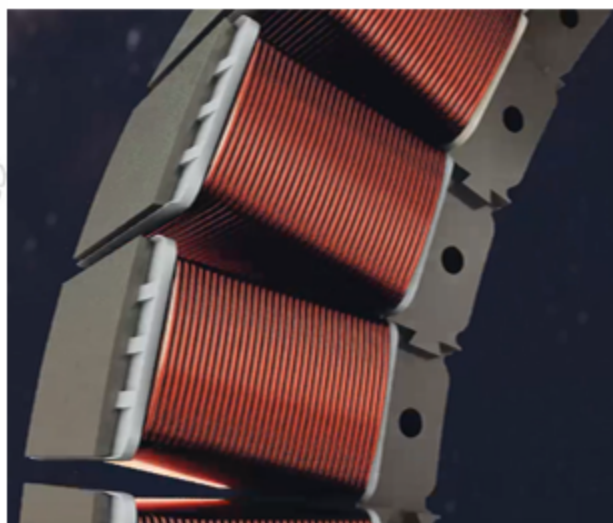
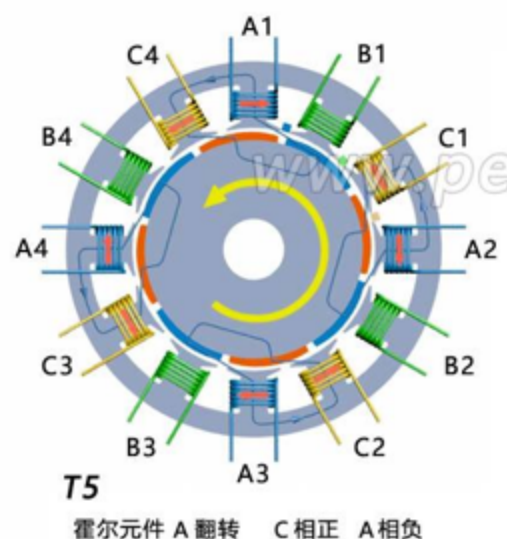
#### 缺点:

绕组制造复杂；在短电机中，由于重叠，分布式绕组中的绕组头的欧姆损耗大。



## 2、交流伺服电机概述

### 集中非叠式绕组 (BLDC, PMSM)



#### 优点:

- (1) 电机的定位转矩小, 工艺性好, 转矩波动小。
- (2) 线圈端部长度小, 端部铜损耗小, 电机用铜量减少, 机械特性较硬, 效率高。
- (3) 定子绕组工艺性好, 机械下线简单, 通用性好
- (4) 槽满率可以比整数槽绕组高。
- (5) 绕组无重叠, 相间绝缘性好。

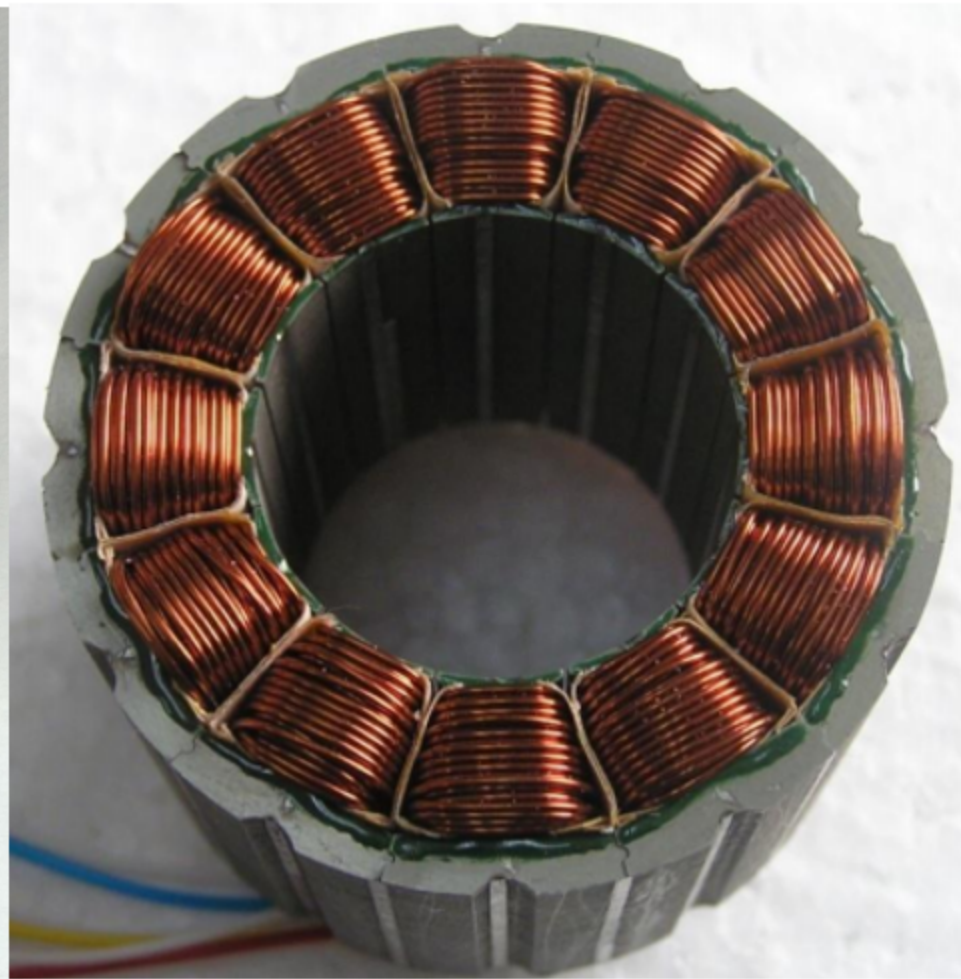
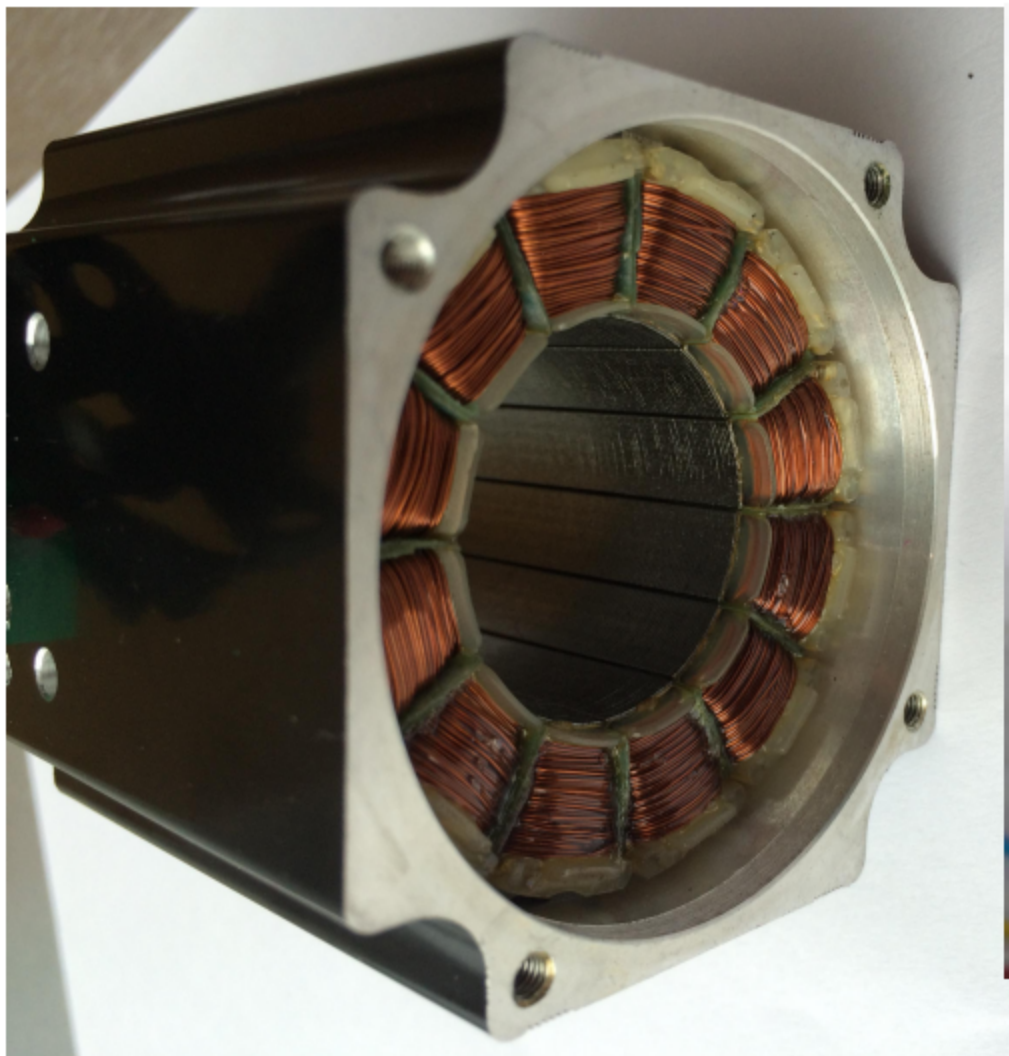
#### 缺点:

集中非叠式绕组的主要缺点是产生谐波, 这可能导致高损耗存在转矩脉动



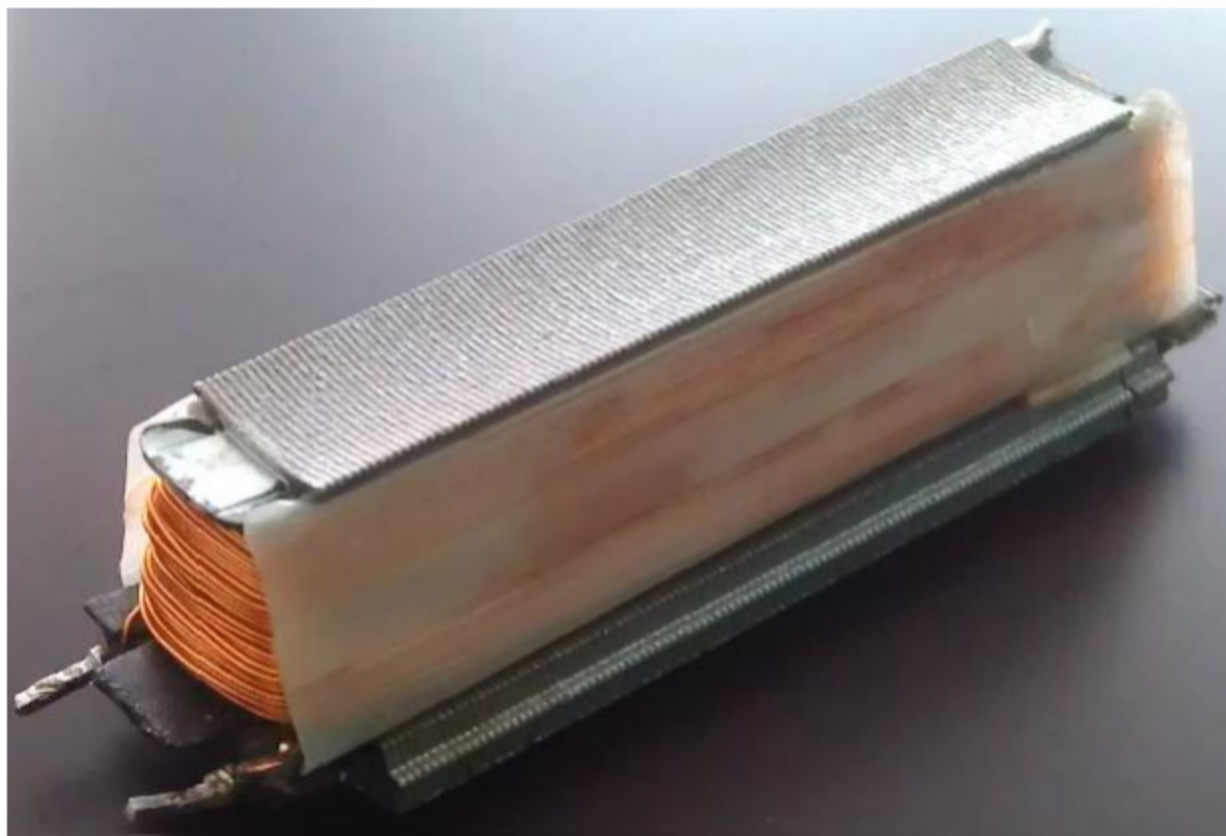
## 2、交流伺服电机概述

交流伺服电机定子

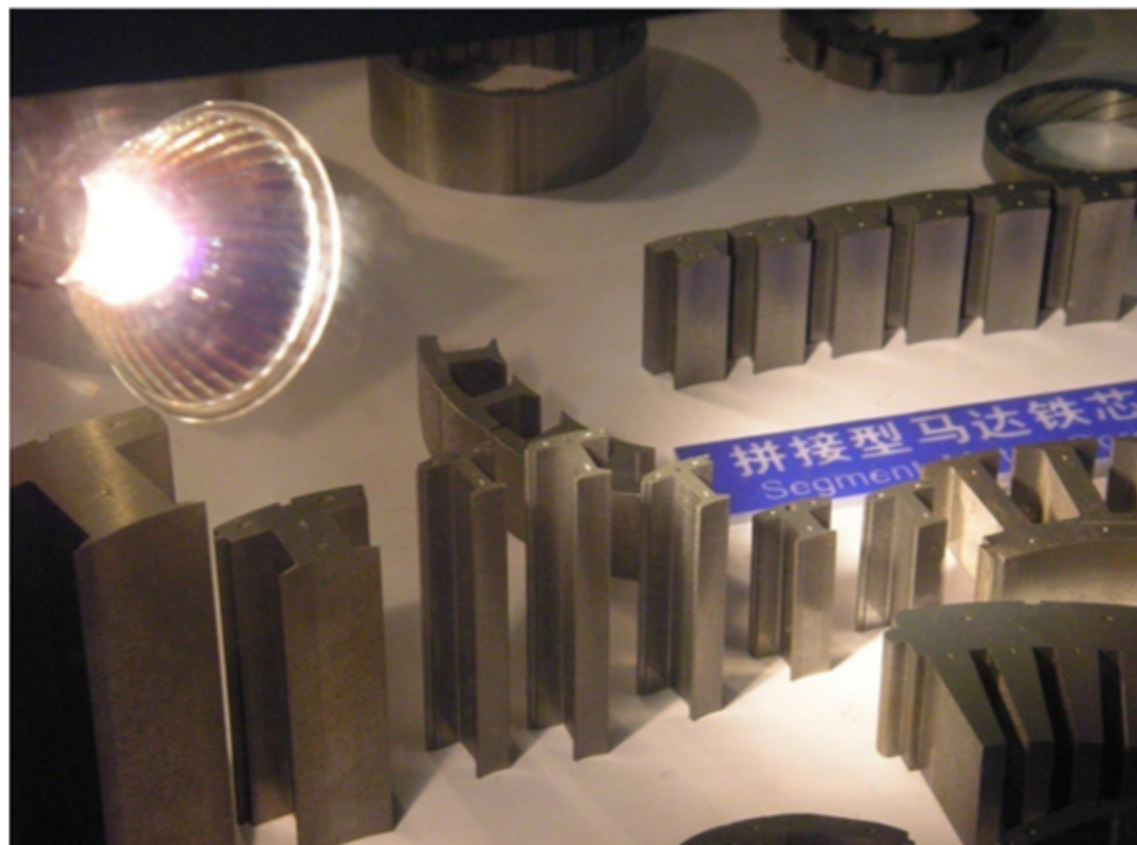


电机定子铁心

## 2、交流伺服电机概述



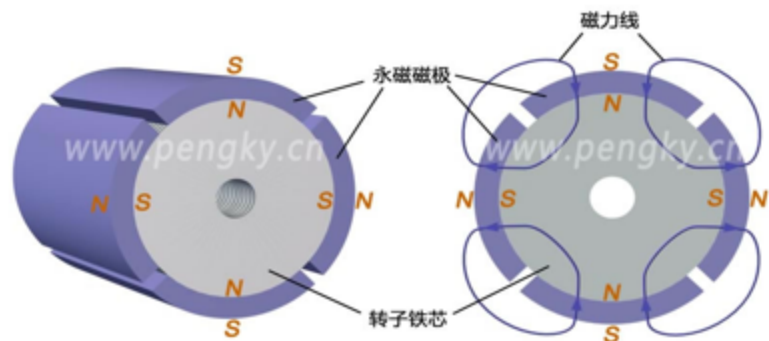
电机定子铁心单元（含绕制好的线圈）



电机定子铁心单元

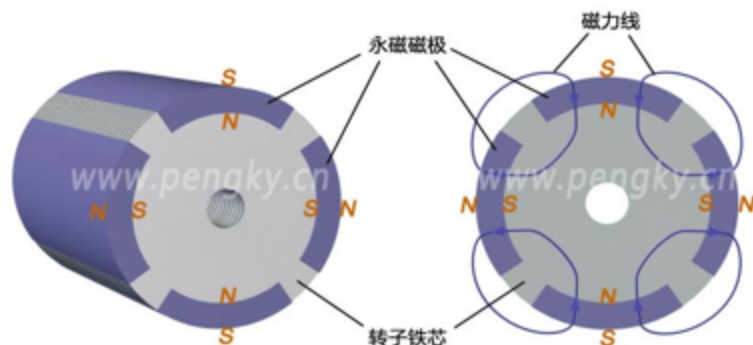
## 2、交流伺服电机概述

### 交流伺服电机永磁转子



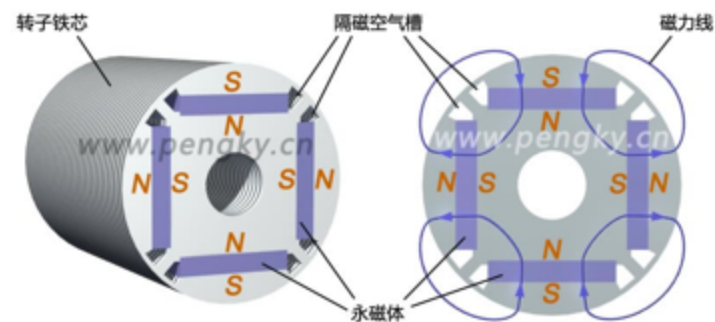
鹏芃科艺 www.pengky.cn

凸级式永磁转子



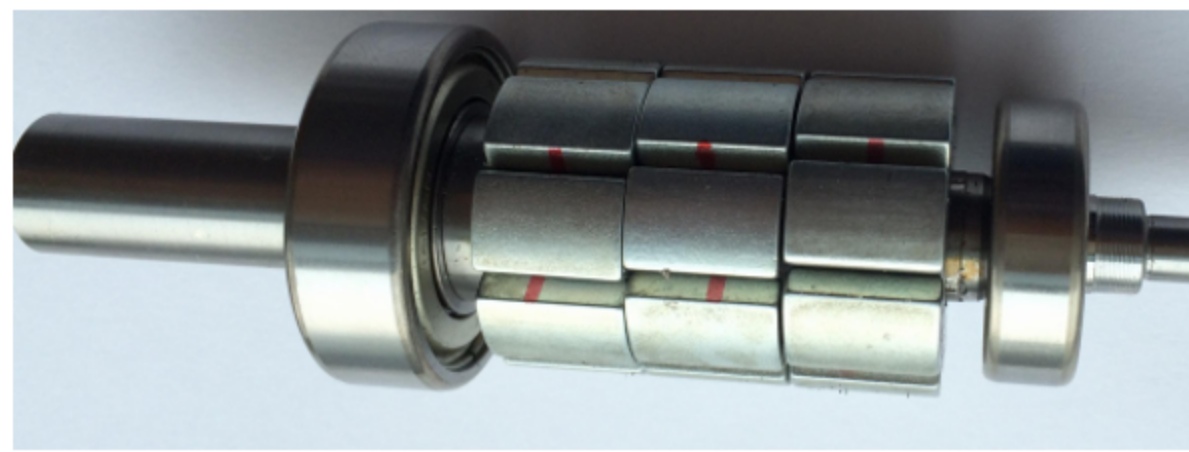
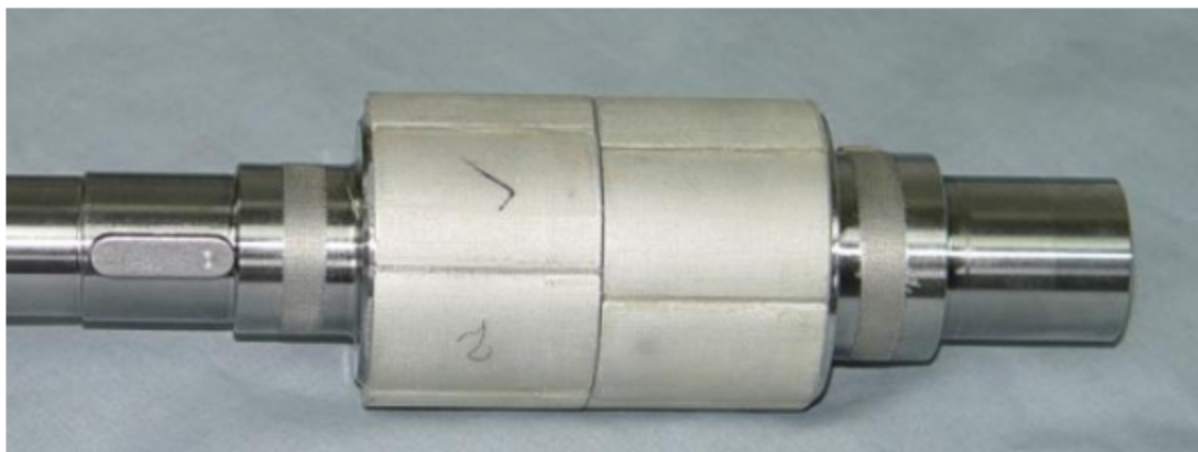
鹏芃科艺 www.pengky.cn

表贴式永磁转子



鹏芃科艺 www.pengky.cn

内嵌式永磁转子



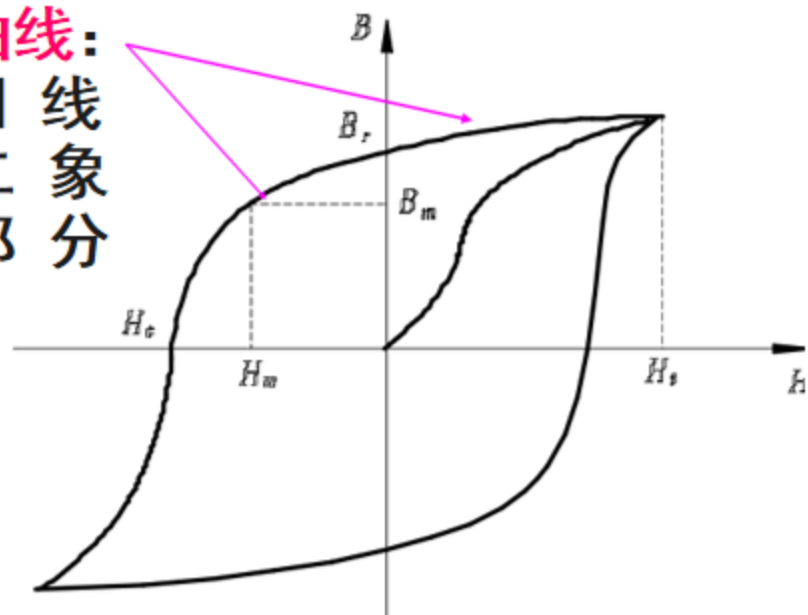
交流伺服电机转子实物

## 2、交流伺服电机概述

### 交流伺服电机永磁转子

#### 永磁材料的主要特性 磁滞回线

退磁曲线：  
磁滞回线  
在第二象限的部分



项目	铝镍钴	铁氧体		钕铁硼	钕铁硼	
		粘结	烧结		粘结	烧结
剩磁 $B_r/T$	1.3	0.27	0.42	1.05	0.75	1.20
矫顽 $H_c/(kA/m)$	60	200	220	780	460	850
最大磁能积 $BH_{max}/(kJ/m^3)$	35	14	32	200	80	260
回复磁导率 $\mu_r$	4.0	1.2	1.2	1.05	1.1	1.1
退磁曲线形状	弯曲	上部直线，下部弯曲		直线	直线，高温时下部弯曲	
剩磁温度系数 $(\%/^{\circ}C)$	-0.02	-0.18	-0.18	-0.03	-0.12	-0.12
最高工作温度/ $^{\circ}C$	550	120	200	300	120	150
居里温度/ $^{\circ}C$	850	450	450	800	300	320
密度 $(g/cm^3)$	7.2	3.7	4.8	8.2	6.0	7.4
抗腐蚀性能	强	强	强	强	好	易氧化
可加工性能	线切割， 表面磨削	压制成型	片砂轮切割， 表面磨削	线切割，表面 磨削	压制成型	可切割加工
相对价格	中	低	低	很高	中	高
适用场合	高温， 稳定性	低价格		高性能，高温， 高温稳定性	高性能，温度不高	





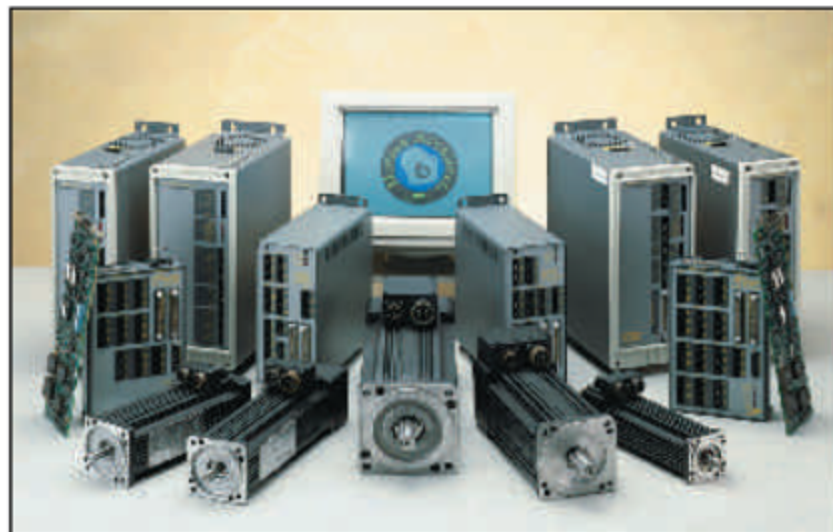
## 2、交流伺服电机概述

- 采用永磁体激磁，基本无铜损和铁损，无滑环和电刷摩擦损耗，容量相同时电机的体积小、重量轻，效率高；
- 定子生成磁场对转子位置实现闭环的磁场定向控制，电流成分可控，控制特性好，功率因数高；
- 转动惯量小，允许转矩大，可获得较高的加速度和过载能力，动态性能好；
- 结构紧凑，无需维护，运行可靠。
- 正弦波形的永磁同步伺服电机系统，需要精密的转子位置传感器和矢量控制驱动器，成本较高。



## 2、交流伺服电机概述

交流伺服电机系统相对直流电机、感应电机、步进电机等伺服驱动系统具有显著的性能优势，在军事、工业、民用领域的应用日益广泛。



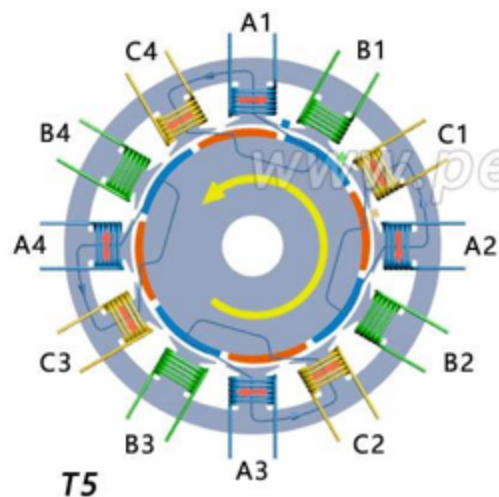
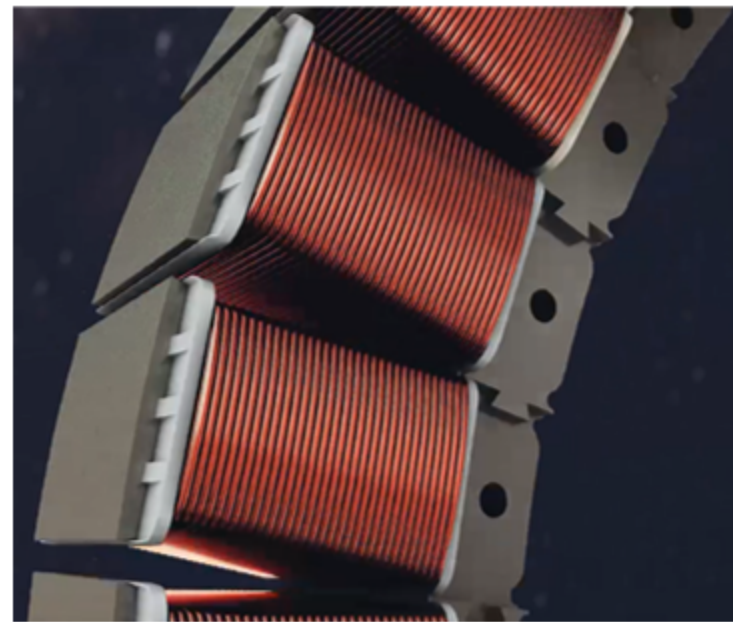
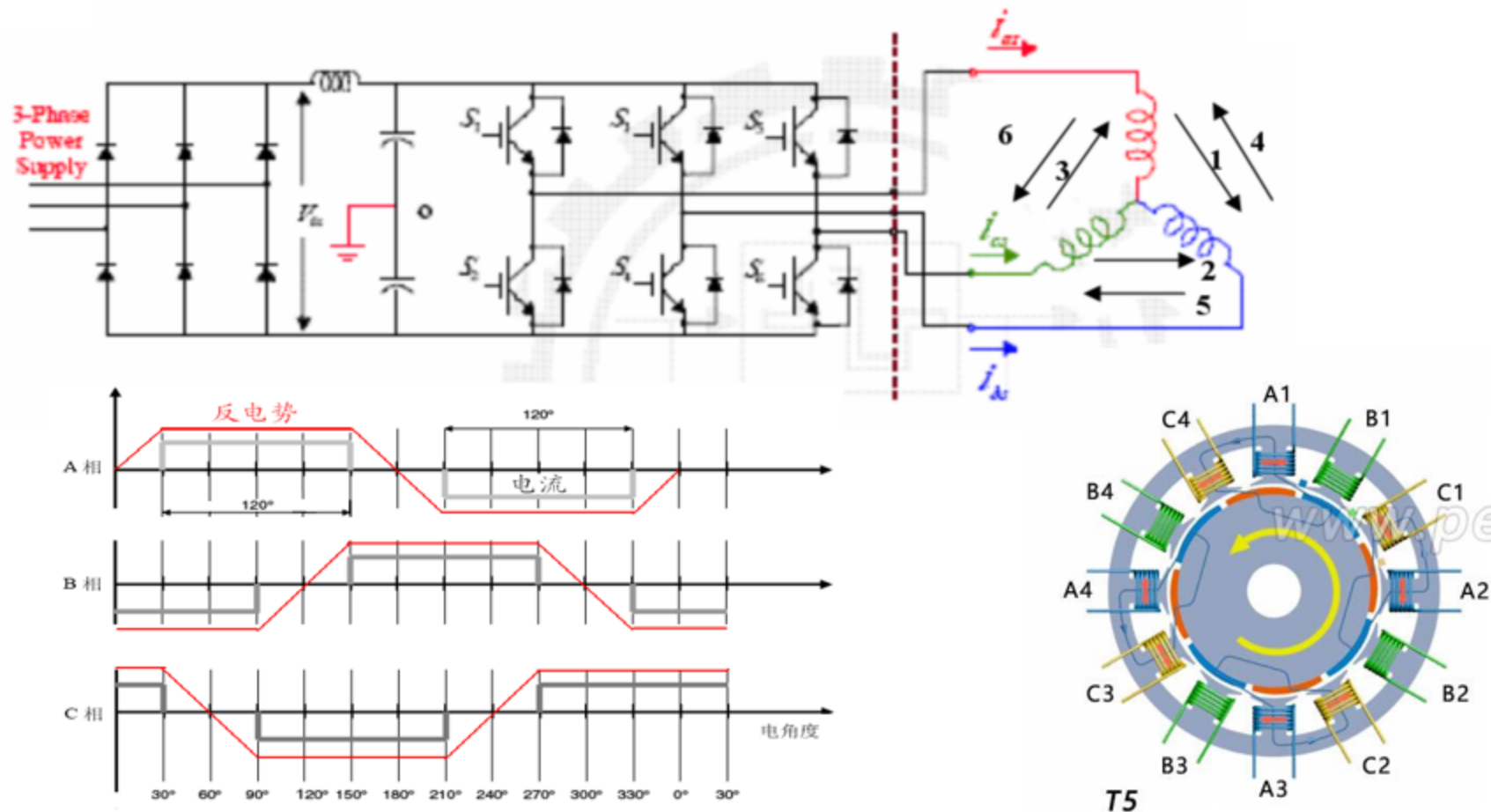
# 目 录

- 1、无刷直流电动机
- 2、交流伺服电机概述
- 3、交流伺服电机原理**
- 4、直线伺服电机和直驱伺服电机



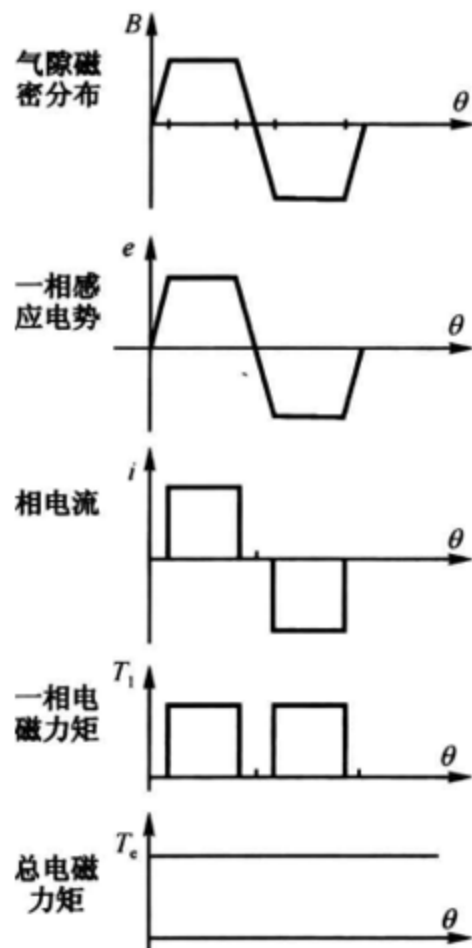
### 3.1 矩形波电流驱动的交流伺服电动机

矩形波电流驱动的交流伺服电机与前面第1节描述的无刷直流电动机类似。只是无刷直流伺服电机永磁转子气隙磁密分布为梯形，绕组多采用整距绕组以获得梯形反电势波形。



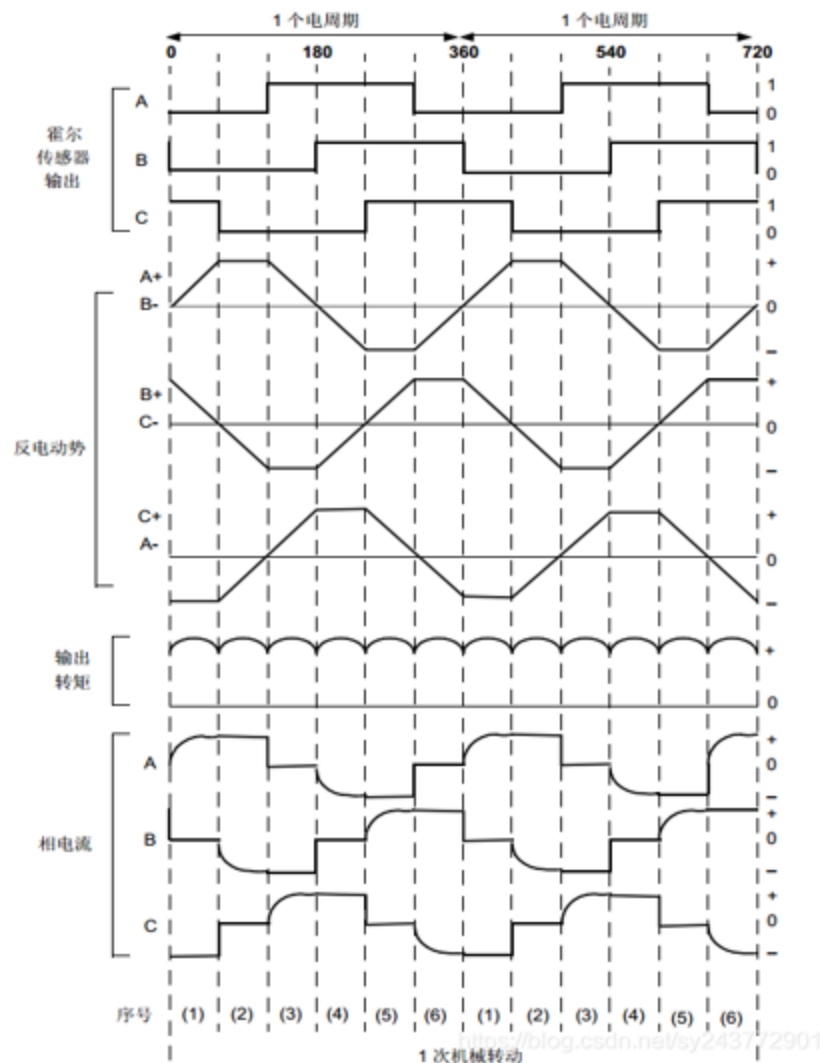
### 3.1 矩形波电流驱动的交流伺服电动机

BLDC是方波驱动，存在转矩脉动。其原因在于：由于电感存在，电流不会突变，因此在换相过程中断开相电流，电流下降的过程和新接入的新相电流上升过程都需要时间，因此相电流不可能是理想的方波，从而会产生非换相相电流脉动，从而引起换相转矩脉动。适合应用于定速或调速的应用，不能用于位置控制。



(a) 矩形波驱动

设计数据



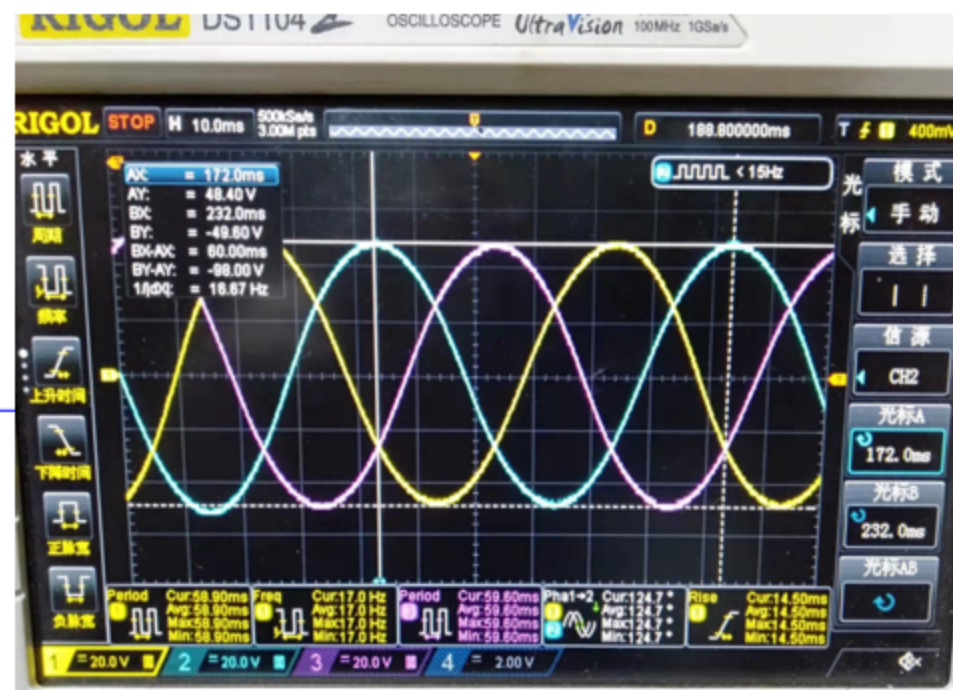
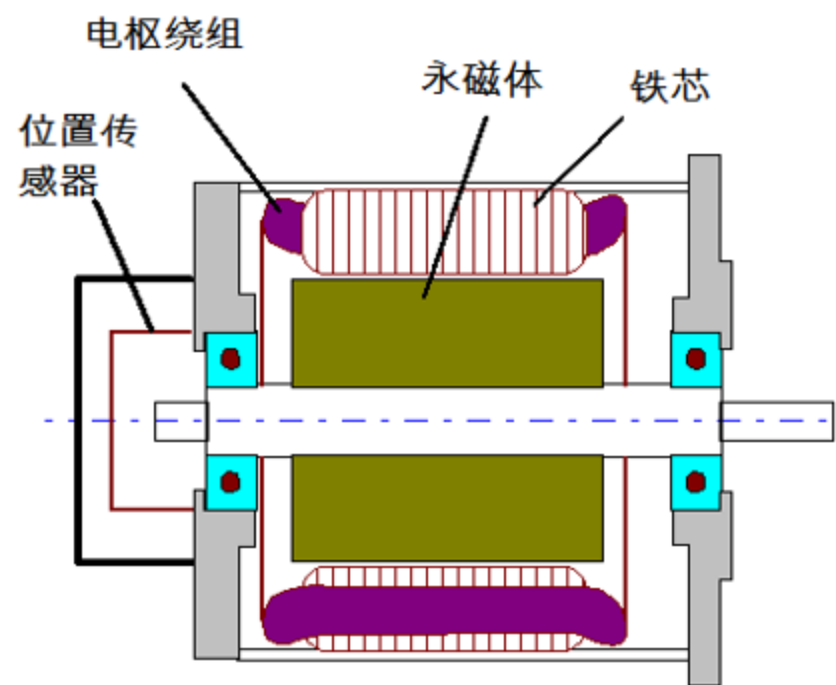
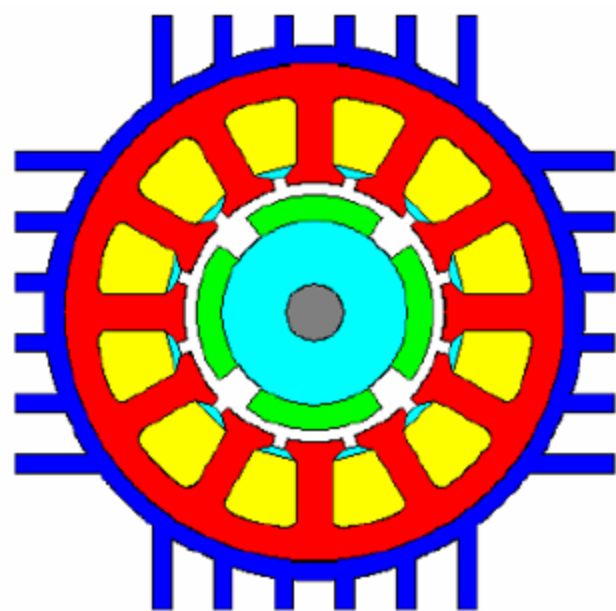
实际数据



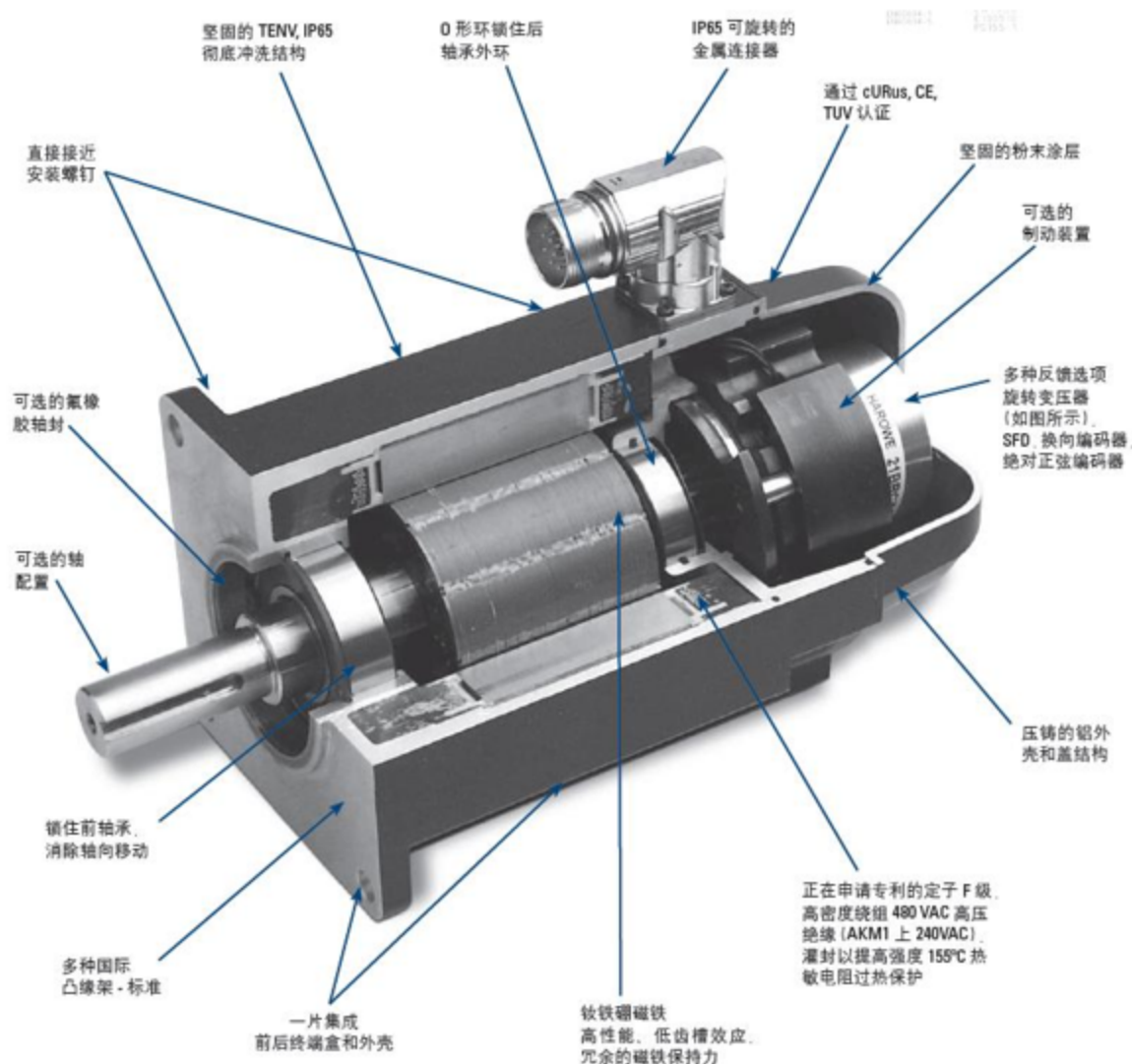
## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

正弦波电流驱动的交流伺服电动机永磁转子气隙磁密分布为正弦，绕组会采用分布、短距、分数槽等措施，以保证反电势正弦性的良好。

PM AC Servomotors



## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机



### 永磁交流伺服电机工作原理

电机内部的转子是**永磁体**，驱动器控制电机的**U/V/W三相绕组**通电形成电磁场，转子在此磁场的作用下转动，同时电机自带的**编码器**反馈信号给驱动器，驱动器根据反馈值与目标值进行比较，调整转子转动的角度。伺服电机的精度决定于编码器的精度（线数）。

永磁交流伺服系统一般采用**电流、速度和位置**三闭环结构，**电流控制**作为内环是交流伺服控制中的一个重要环节，它是提高伺服系统控制精度和响应速度，改善控制性能的关键。可以用于位置、速度和力矩控制的场合。



## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

### 永磁同步交流电机的工作原理

- ❖ 定子转组产生旋转磁场的机理与感应电机是相同的。
- ❖ 其不同点是转子为永磁体且 $n$ 与 $n_s$ 相同（同步）。

$$n = n_s = \frac{60 f}{p} (\text{rpm})$$

- ❖ 两个磁场相互作用产生转矩。
- ❖ 定子绕组产生的旋转磁场可看作一对旋转磁极吸引转子的磁极随其一起旋转。



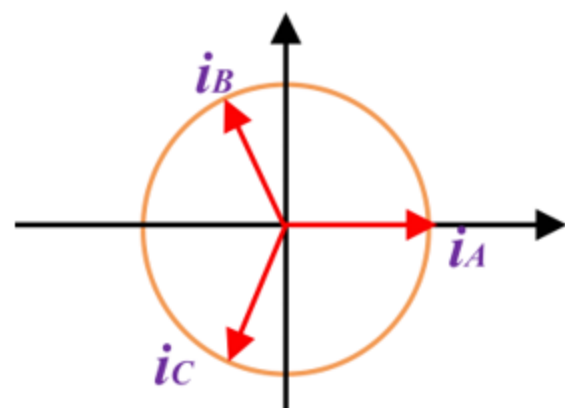
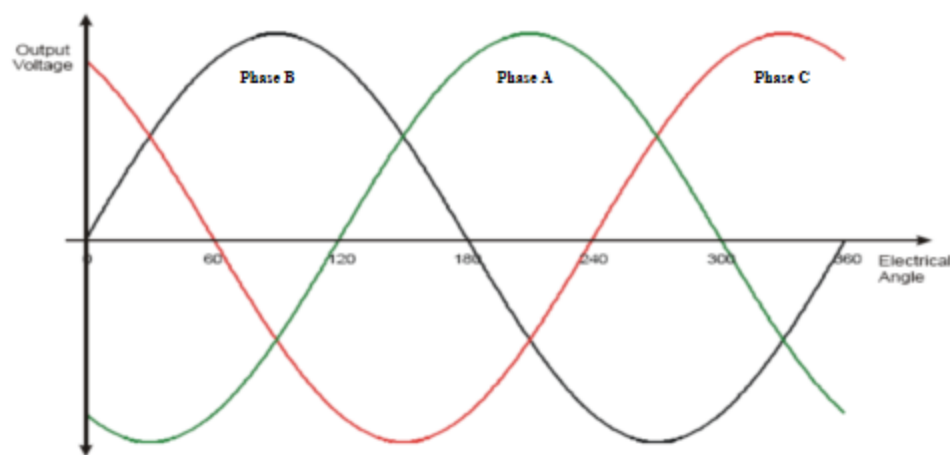


## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

- ❖ 永磁同步电机的定子中装有三相对称绕组A, B, C, 它们在空间彼此相差120度, 绕组中通以如下三相对称电流:

$$\begin{cases} i_A = I \sin \theta \\ i_B = I \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ i_C = I \sin(\theta + \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

$$i_A + i_B + i_C = 0$$



- ❖ 即每个绕组中电流的幅值和相位都是随时间变化的, 且彼此在相位(与时间有关)上相差120度。



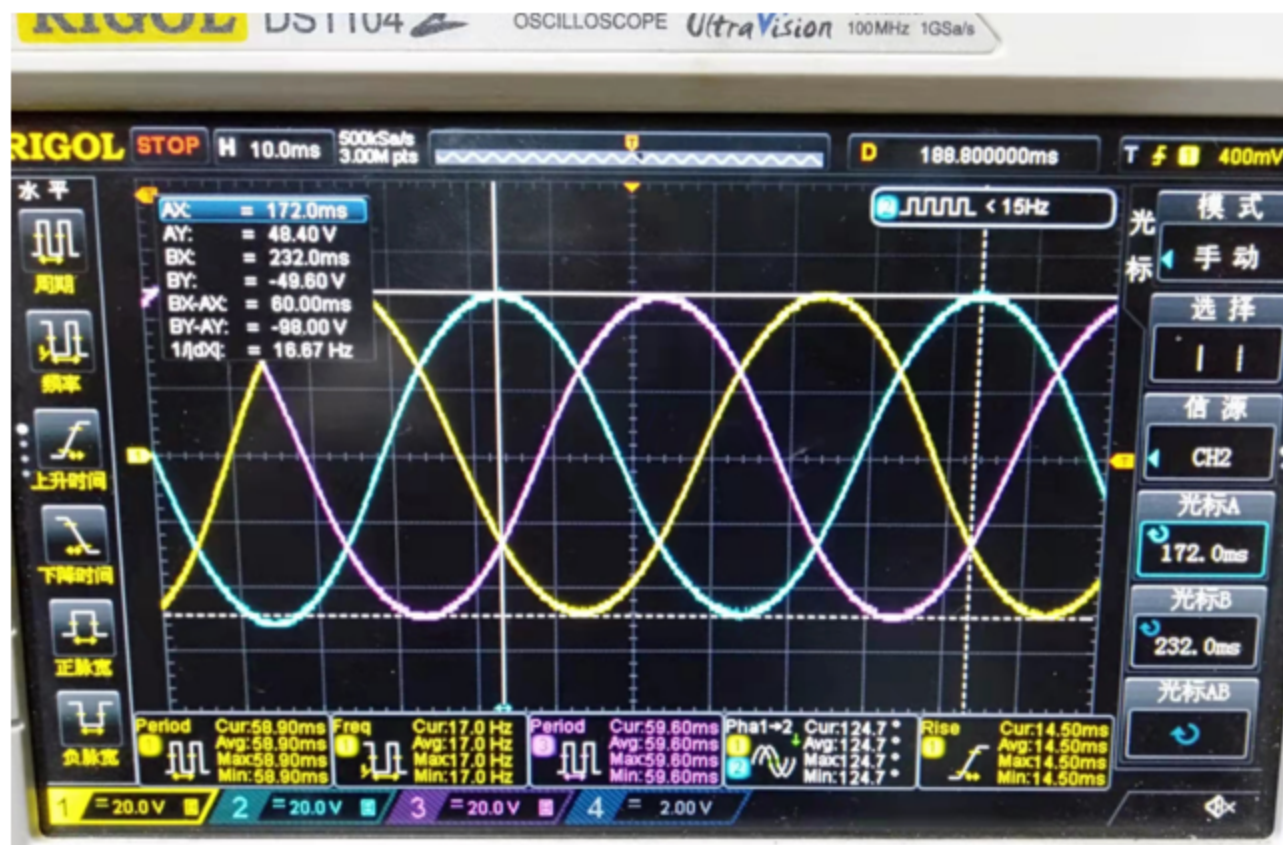
## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

反电动势:

$$\begin{cases} e_A = E \sin \theta \\ e_B = E \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ e_C = E \sin(\theta + \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

电磁力矩:

$$T_e = \frac{P}{\omega} = \frac{(e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C)}{\omega} = \frac{3EI}{2\omega} = K_t I$$



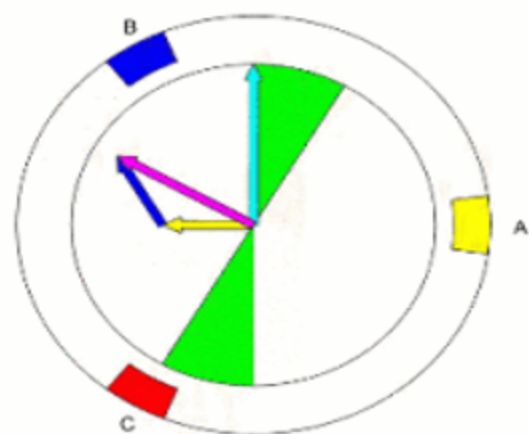
某一型号电机的反电动势

其中,  $K_t$  为力矩系数



## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

BLDC Six-Sector Commutation  
Two Pole-Pair



Commutates every 30 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotation

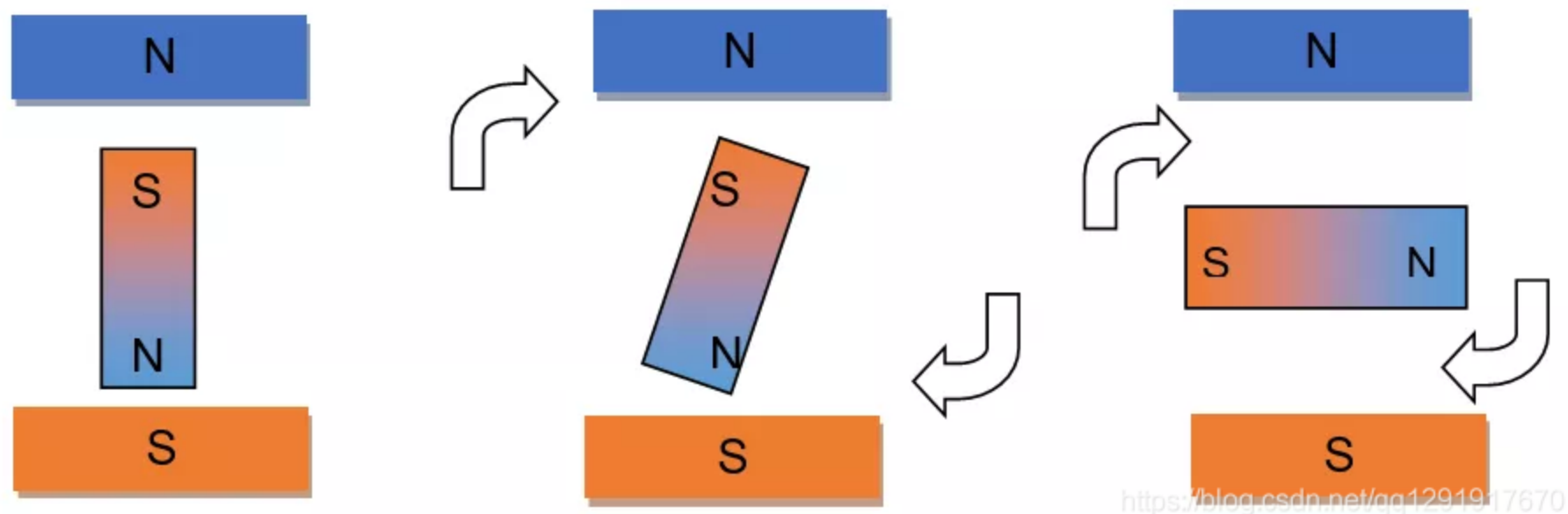


**BLDC控制：**浅蓝色箭头代表转子的磁场矢量方向，可以看到浅蓝色箭头在 BLDC是在不停旋转，并且这个旋转会产生力矩（torque）带动机械负载的运动。BLDC通常通过检测转子角度位置，来依次给定子换向，控制 BLDC 的最经济的方法是 6 步换向法，BLDC的转子旋转是一顿一顿的，这样的换向，造成了输出力矩有波动。



## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

如果我们的目标是“相同的电流输入，达到最大的输出力矩”。假设下图中上下端是定子，中间的是转子。让我们人为改变定子磁场矢量和转子磁场矢量的夹角，当夹角为 0 度的时候，没有输出任何力矩，因为磁性的N、S极互相吸引。再让我们旋转转子，改变一下夹角，会觉得力矩增大。当定子和转子磁场向量成 90 度的时候，产生的力矩最大。这是我们所想达到的效果——最大化电流的利用效率，我们称之为：MTPA(Maximum Torque Per Amp)。



## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

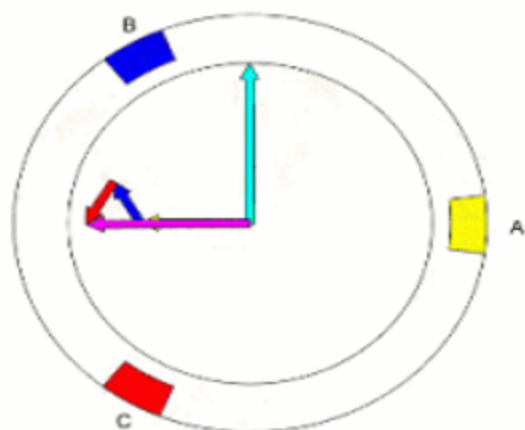
BLDC Six-Sector Commutation  
Two Pole-Pair



Commutates every 30 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotation

PMSM Field-Oriented Control  
Two Pole-Pairs



Current vector leads rotor magnetic reference by 90 mechanical degrees

One mechanical rotation sees two electrical rotations

■ Sector  
→ Rotor Magnetic Reference  
→ Current Vector

**PMSM电机控制：**浅蓝色箭头代表转子的磁场矢量方向，可以看到浅蓝色箭头在 BLDC 和 PMSM 都是在不停旋转，并且这个旋转会产生力矩（torque）带动机械负载的运动。PMSM 的转子旋转是非常连续平滑，通过检测转子角度位置，控制定子电流，使定子绕组产生的磁场与转子的磁场垂直，就可以使得转子保持连续、平滑的转动。

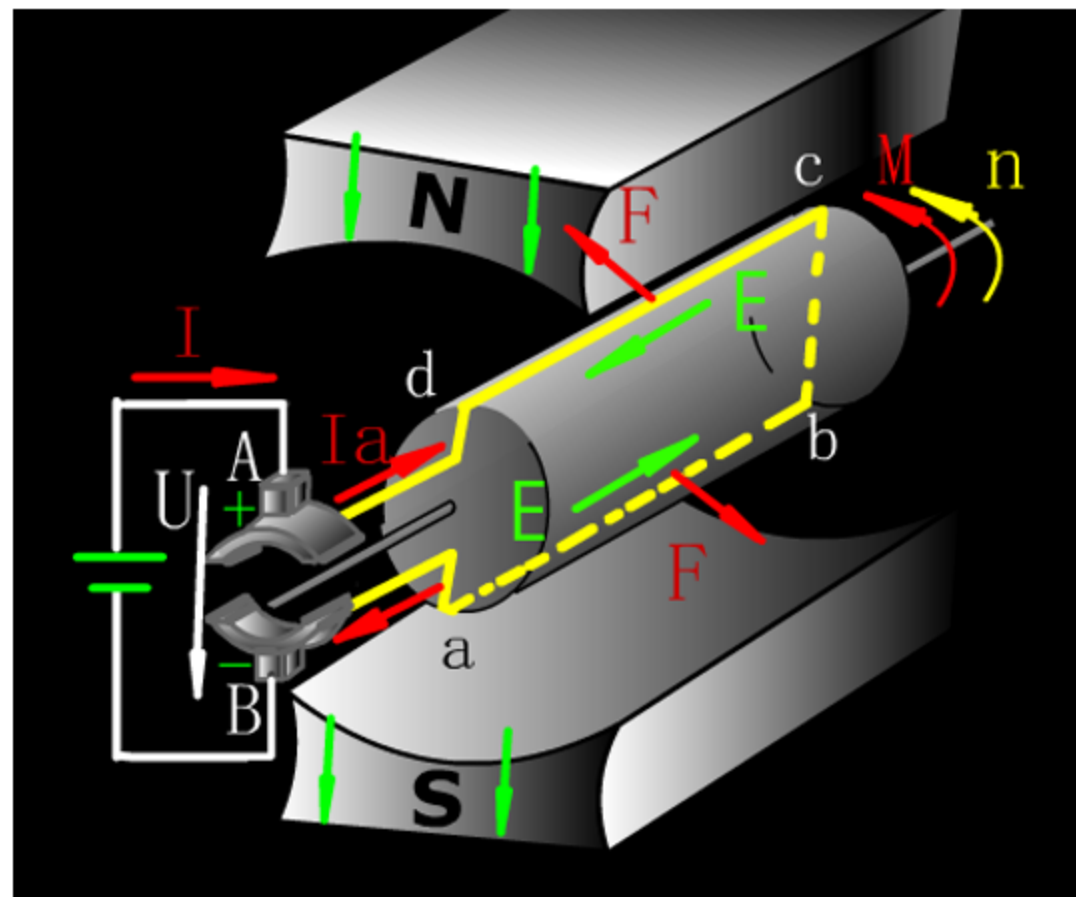


## 3.2 正弦波电流驱动的交流伺服电动机

**问题的提出：**我们以控制电流为目的，以电压为调整控制的手段，两者都是正弦量；此外，电机绕组的自感和互感均为转角的正弦函数，使得动态控制更为复杂。有没有可简化问题的方法？

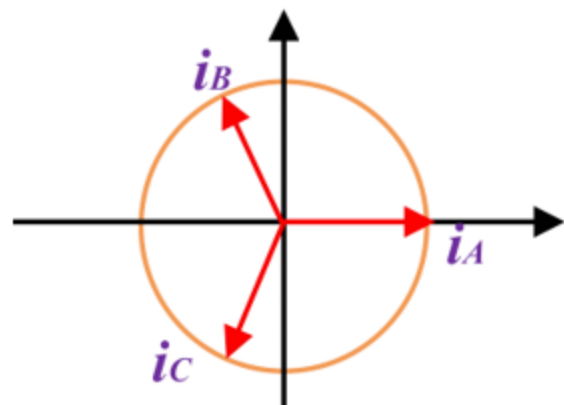
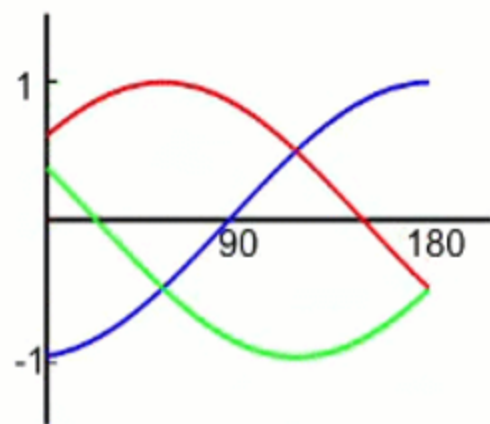
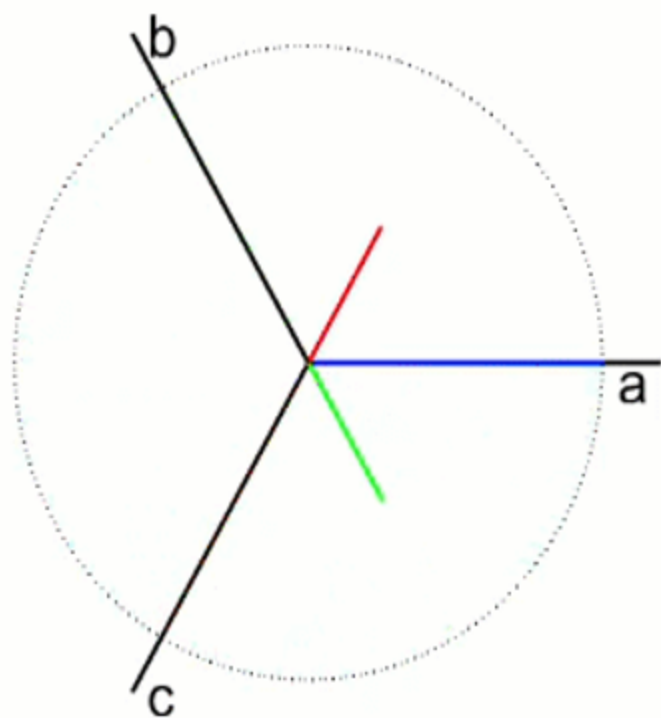
**解决思路：**参考控制特性简单的直流电机，如果能将交流电机的物理模型等效地变换成类似直流电机的模式，分析和控制就可以大大简化。

**具体实现：**矢量控制（Field-Oriented Control **FOC**）通过坐标变换将交流电机内部复杂耦合的非线性变量变换为相对坐标系为静止的直流变量（电流、磁链、电压等），实现近似解耦控制。



### 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

下图右侧是 ABC 三相交流电的示意图。三种颜色代表三相交流电 ABC。它们的相位差为 120 度，我们可以把它们表示为上图左侧的矢量形式（静止的 abc 矢量坐标系）。它们合成的总矢量是淡蓝色。



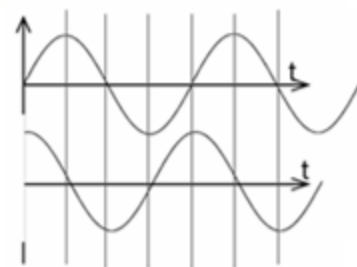
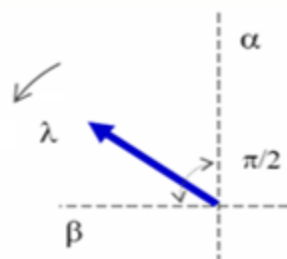
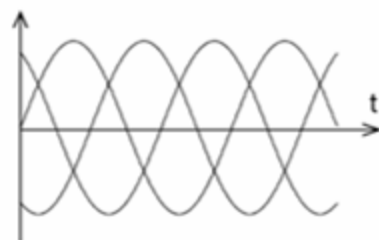
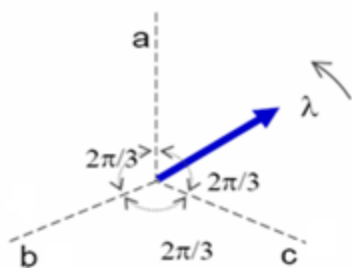
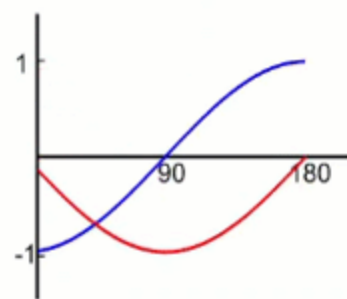
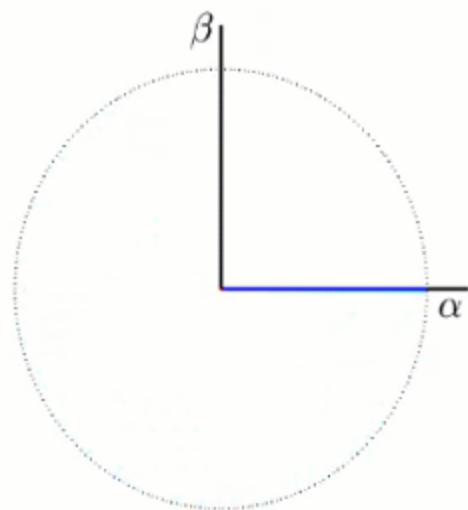
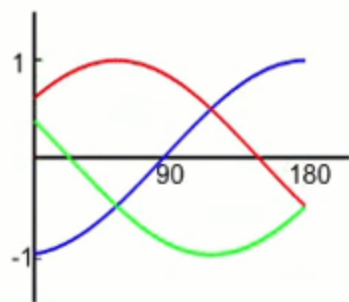
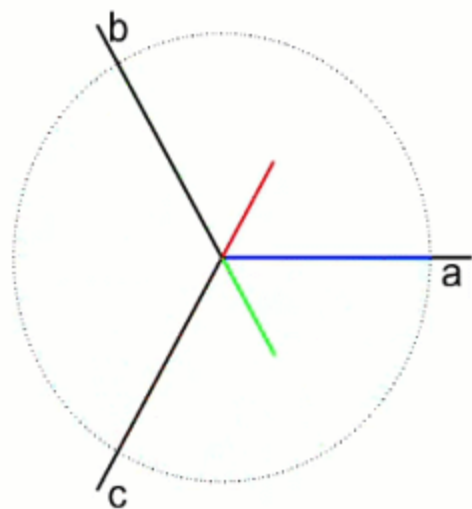
$$\begin{cases} i_A = I \sin \theta \\ i_B = I \sin(\theta + \frac{2}{3} \pi) \\ i_C = I \sin(\theta + \frac{4}{3} \pi) \end{cases}$$



### 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

为了研究方便，我们将静止的 abc 坐标系变为静止的  $\alpha\beta$  坐标系，这一步也叫 **Clarke** 变换：

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(120^\circ) & \cos(-120^\circ) \\ 0 & \sin(120^\circ) & \sin(-120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

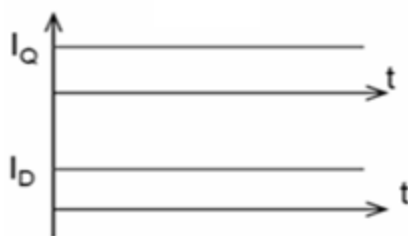
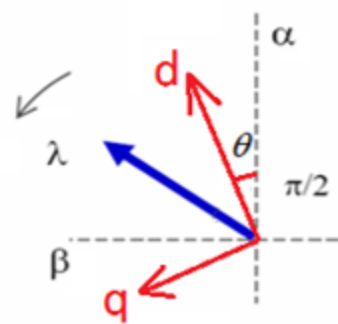
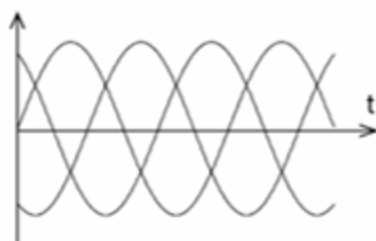
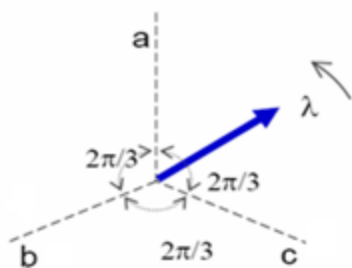
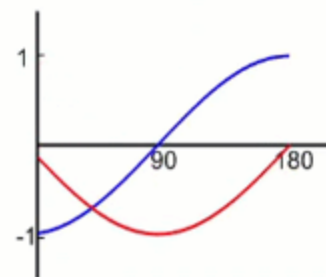
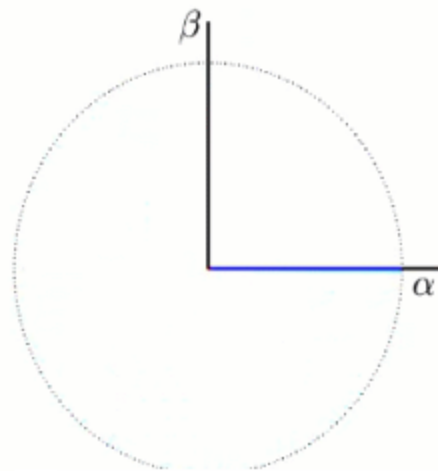
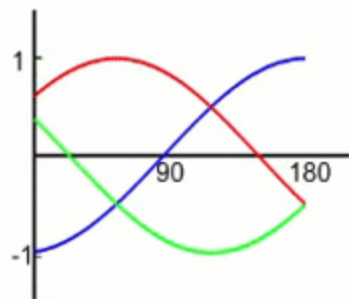
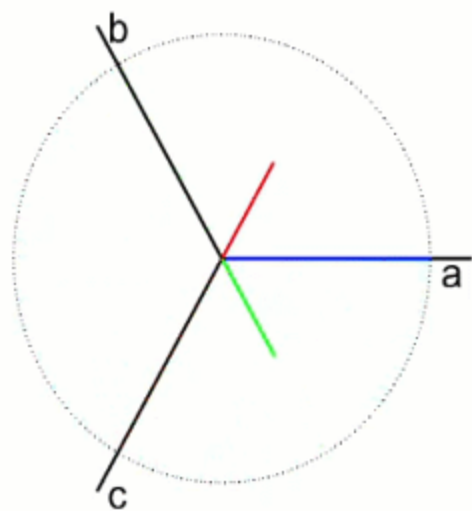




### 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

接着，我们将静止的  $\alpha\beta$  坐标系变为旋转的  $dq$  坐标系，这一步也叫 **Park** 变换：

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

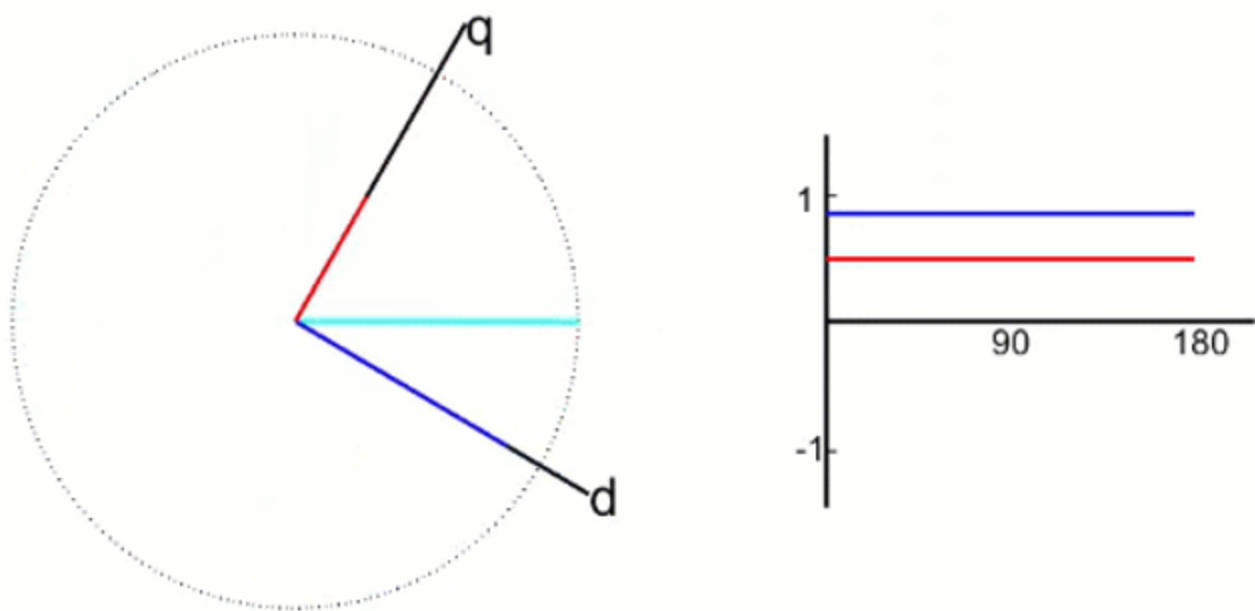


### 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

在经历 Clarke-Park 变换后，三相交流电变成了“直流电”： $I_d$ （深蓝）和  $I_q$ （红色），它们实际上是电流矢量在 dq 坐标系的投影。d 表示 direct（直接），q 代表了 quadrature（正交）。

通过上面的介绍，我们可以把 ABC 三相交流电形成的磁场，看着一个矢量。FOC 最重要的原则就是使这个电流矢量和永磁体转子转动形成的磁场矢量保持垂直。由于转子是在不停的转动，FOC 的任务就是：

1. 不停的观测转子的角度
2. 将电流矢量的角度保持和转子磁场矢量垂直（MTPA）



### 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

永磁同步电机的矢量控制，只要能准确地检测出转子 d 轴的空间位置，控制逆变器使三相定子的合成电流（或磁动势）矢量位于 q 轴上就可以了。为了使得电流效率最高（MTPA），我们只要使  $I_d = 0$ ，即所有的电流都作用于正交 - 产生力矩。这样大大简化了控制。

矢量控制下的永磁同步电机，定子电流与转子永磁磁通互相独立，控制系统简单，转矩恒定性好，脉动小，可以获得很宽的调速范围。

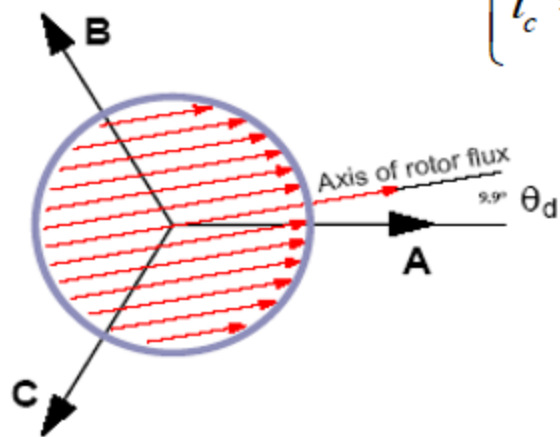
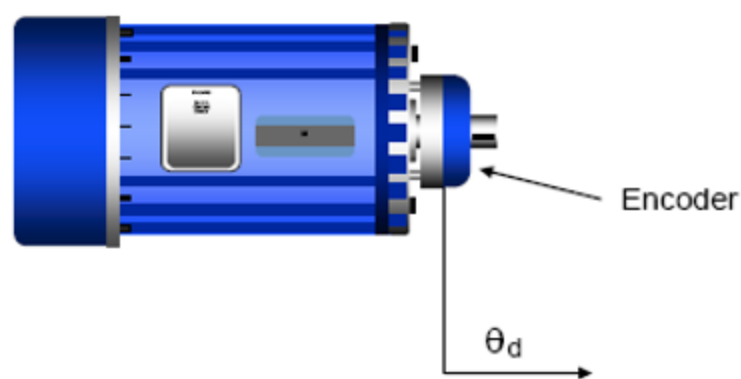


## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

矢量控制— 必须配置位置检测元件

### Field Orientation...As Easy as 1 2 3

1. Measure the angle of the rotor, and thus the angle of the rotor flux,  $\theta_d$



$$\begin{cases} i_a = I_m \sin \omega t \\ i_b = I_m \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + \frac{4}{3} \pi) \end{cases}$$

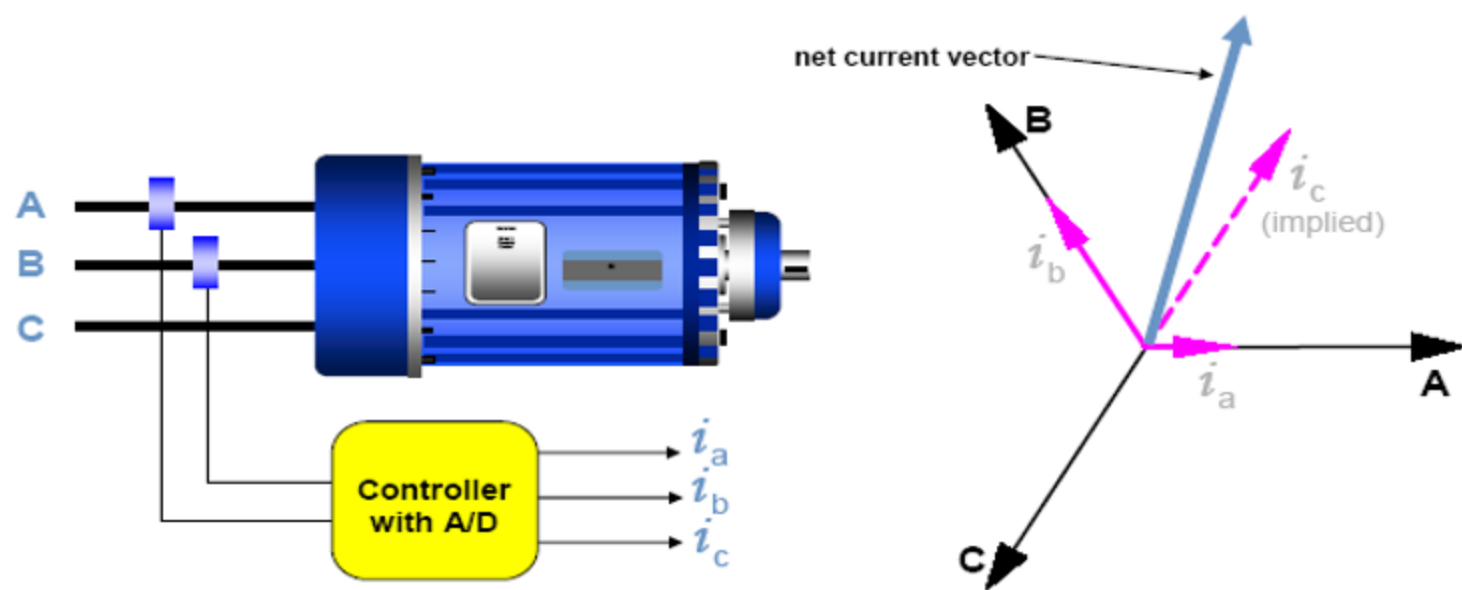


## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制— 电流的检测

2. Measure  $i_a$  and  $i_b$ . From Kirkoff's current law, calculate  $i_c$ .

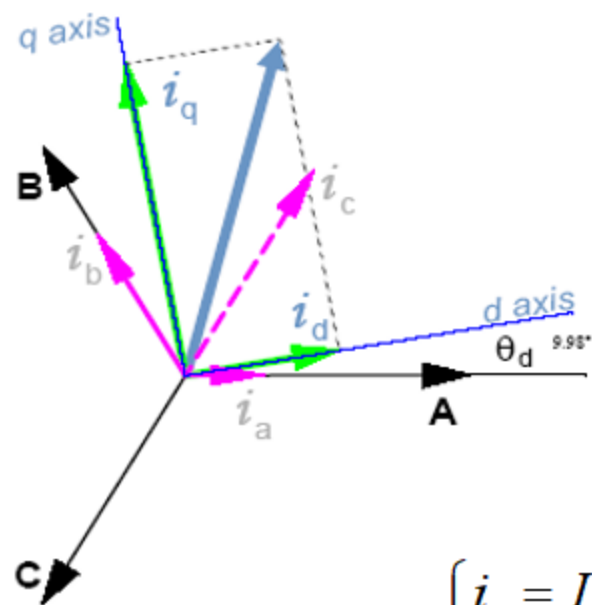
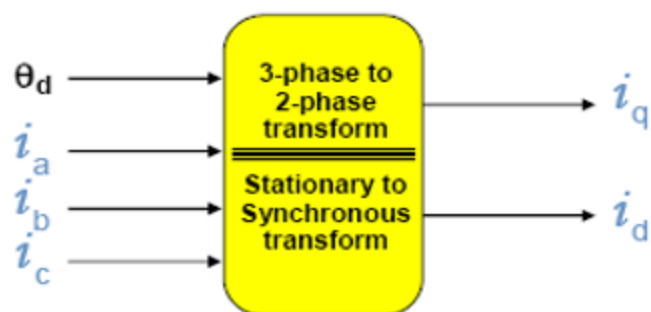
A, B, and C axes are “fixed” with respect to the motor housing. This reference frame is also called the “stationary frame” or “stator frame”.



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制—电流ABC-dq坐标的变换

3. Resolve the stator currents into two orthogonal components with respect to the magnetic axis. This is accomplished by performing a “3-phase to 2-phase” transform, followed by a “stationary to synchronous” transform.



$$\begin{cases} i_q = I_m \cos(\omega t - \theta_d + \theta_0) \\ i_d = I_m \sin(\omega t - \theta_d + \theta_0) \end{cases}$$

$$i_d = \cos(\theta_d)i_a + \cos(\theta_d - 120^\circ)i_b + \cos(\theta_d + 120^\circ)i_c$$

$$i_q = -\sin(\theta_d)i_a - \sin(\theta_d - 120^\circ)i_b - \sin(\theta_d + 120^\circ)i_c$$

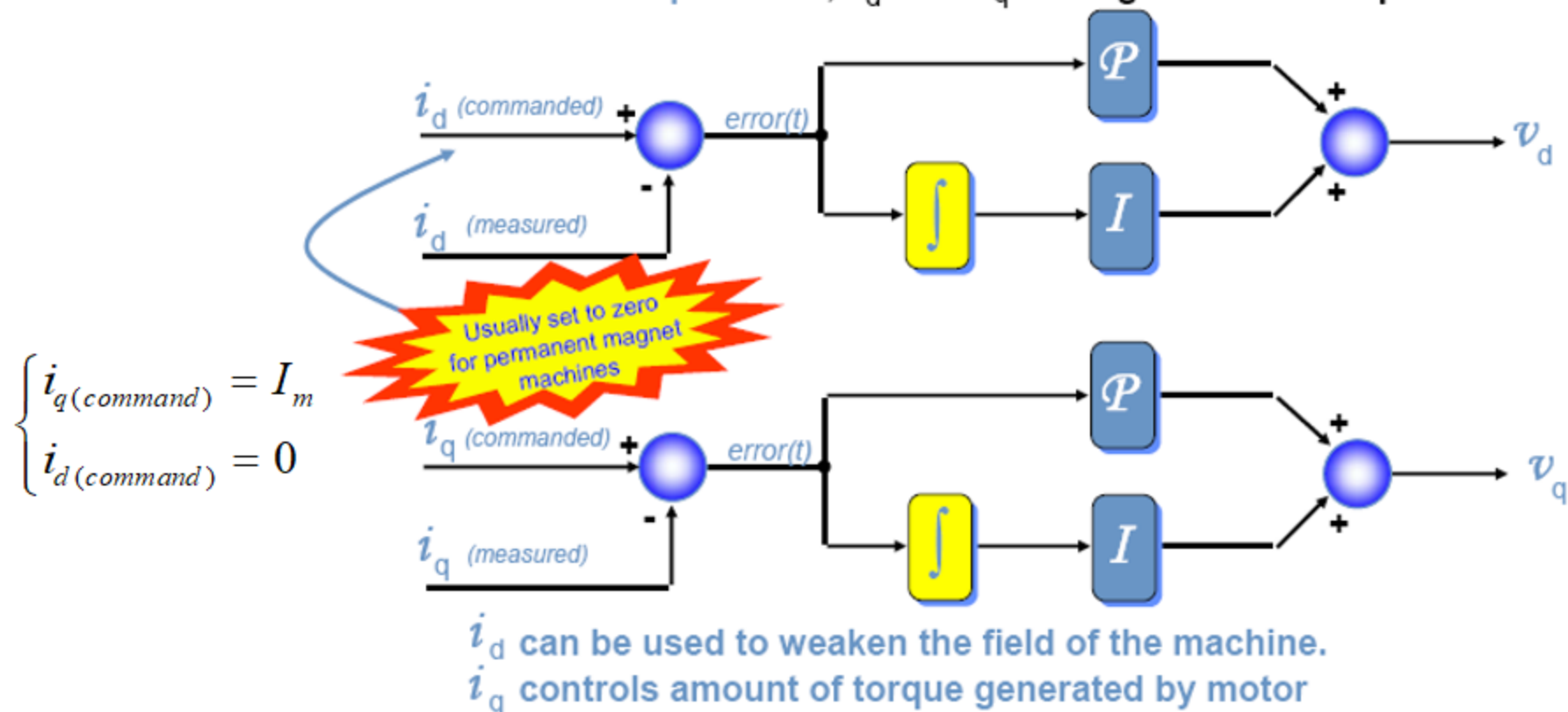
The flux reference frame (d axis) rotates with respect to the motor housing. It is called the “rotating axis”, “synchronous axis”, or “field axis”.



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制—电流调节器的控制

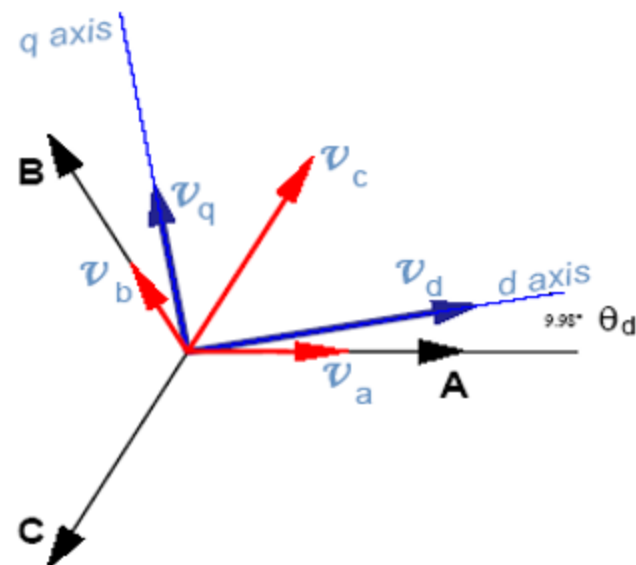
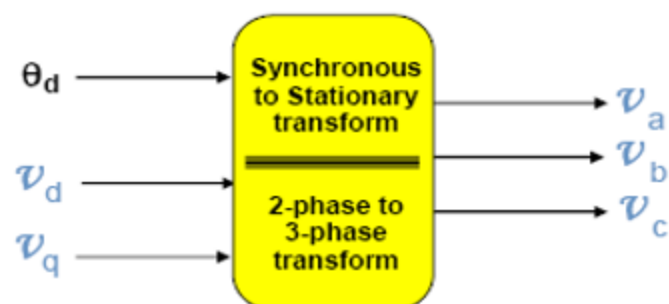
4. Regulate  $i_d$  and  $i_q$  independently. Since the regulation is performed in the rotating frame, motor AC frequency is not seen by the control loops. Thus,  $i_d$  and  $i_q$  are regulated as DC quantities!



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制—控制电压dq-ABC坐标逆变换

5. Reflect  $v_d$  and  $v_q$  onto the stationary three phase axis. This is accomplished by performing a “synchronous to stationary” transform, followed by a “2-phase to 3-phase” transform.



$$v_a = \cos(\theta_d)v_d - \sin(\theta_d)v_q$$

$$v_b = \cos(\theta_d - 120^\circ)v_d - \sin(\theta_d - 120^\circ)v_q$$

$$v_c = \cos(\theta_d + 120^\circ)v_d - \sin(\theta_d + 120^\circ)v_q$$

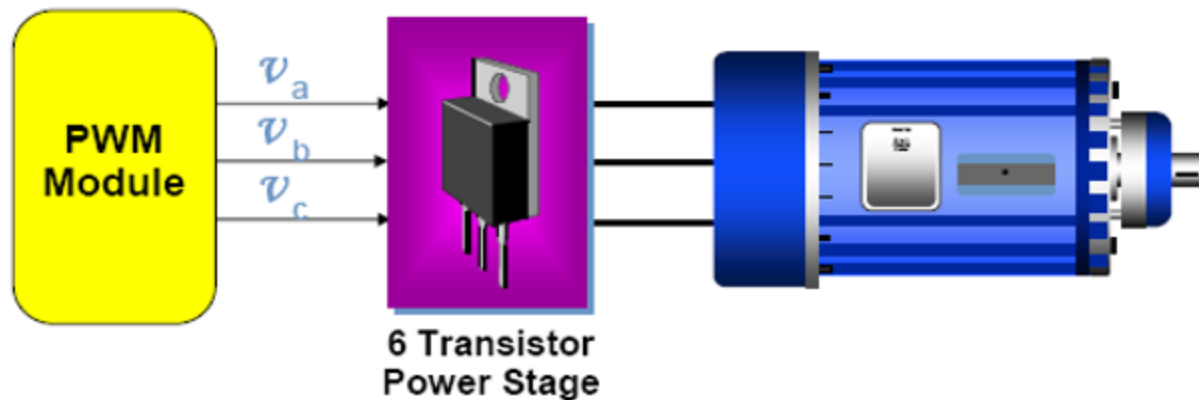




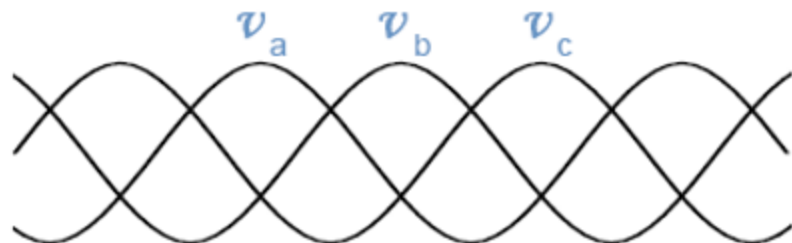
## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制—ABC坐标下控制电压的放大

6. Apply  $v_a$ ,  $v_b$ , and  $v_c$  to the three motor phases.

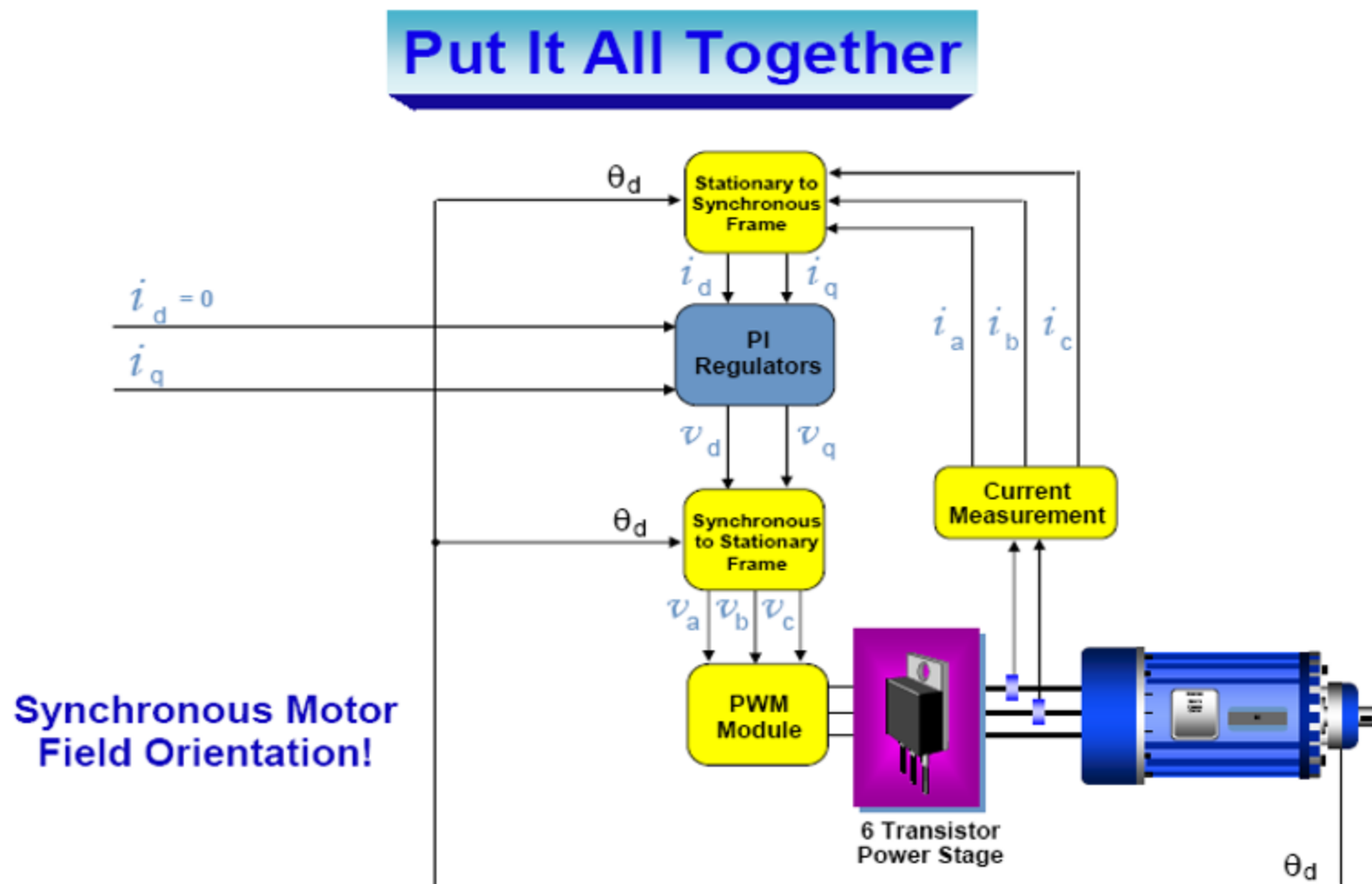


Over time, under steady-state conditions, the three voltages will be sine waves phase shifted by  $120^\circ$ .



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

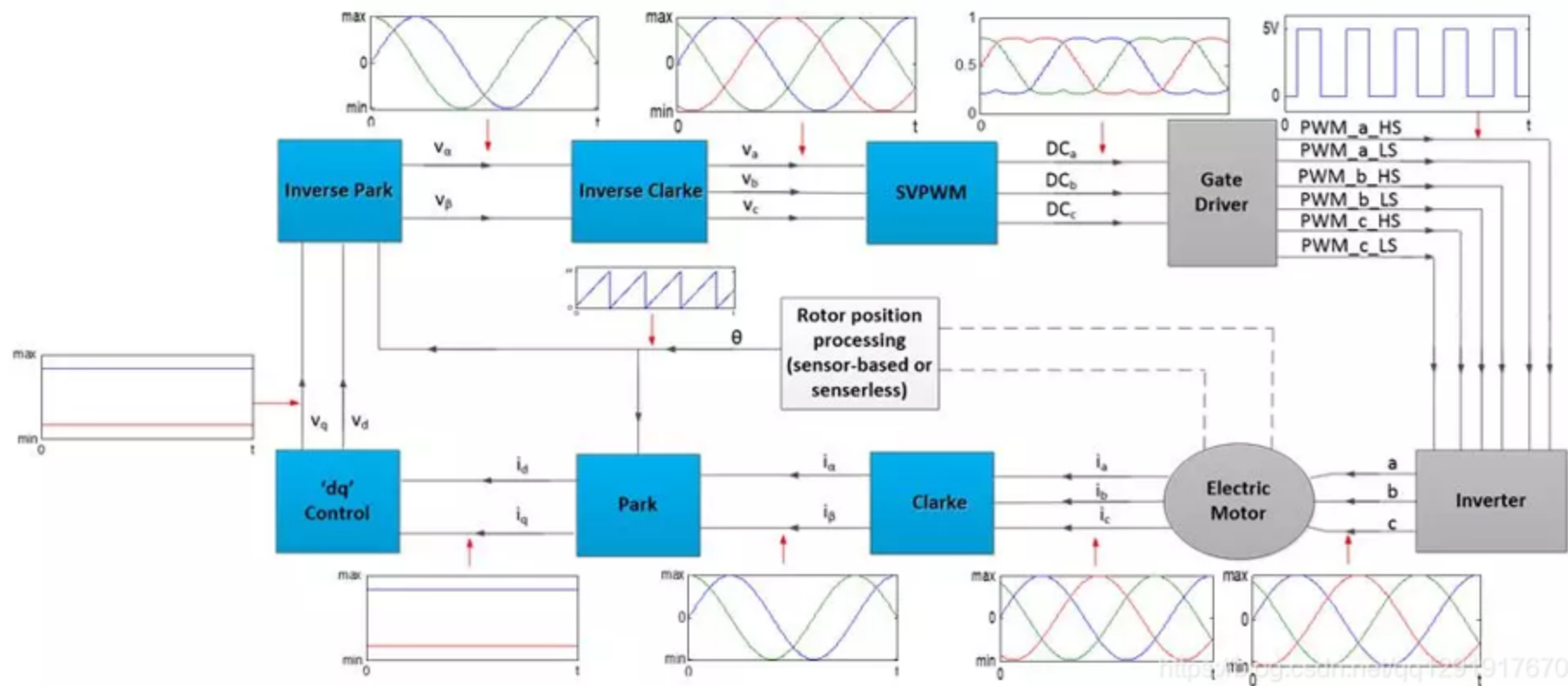
### 矢量控制—完整的实现结构图



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 详细流程:

我们通过控制  $I_d$ 、 $I_q$  去产生相应的  $V_d$ 、 $V_q$ ，经过反 Park/Clarke 变换和 SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 调制电压信号，经过门驱动 (Gate Driver) 和逆变器 (Inverter) 产生三相电压  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$ ，最后将  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  输入到 PMSM，完成了 FOC。



上图是 FOC 的控制信号示意图，其中蓝色的模块是软件实现模块，灰色的为硬件部分。



## 3.3 正弦波电流驱动的交流伺服电动机矢量控制

### 矢量控制小结:

我们经常听到，电流环的控制周期为 100us（10KHz）。通常来说，上面的蓝色部分一般在 DSP 或者 MCU 的 ISR（interrupt service routine，中断服务程序）中实现。即每隔 100us，DSP 或者 MCU 就有专门的 ISR 函数做如下处理动作：

1. 测量出转子的角度 ( $\theta$ )，得出所需的  $I_d$ 、 $I_q$  电流。将所需要的  $I_q$  电流向量和该角度保持垂直。在 MTPA 情况下，所需  $I_d$  设为 0。
2. 测量出实际相电流 ( $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ )，通过 Clarke/Park 变换产生实际  $I_d$ 、 $I_q$  电流。
3. 利用上述的所需电流和实际电流信号差，通过 PI 控制器，得出  $V_d$ 、 $V_q$ 。
4. 经过反 Park/Clarke 变换、SVPWM 产生占空比，交给逆变器生成  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  驱动电机。



## 3.4 BLDC和PMSM的比较

这两种电机的不同点在于：

- 1、无刷直流电动机BLDC是方波电流驱动，而永磁同步电机PMSM是正弦波电流驱动。其不同之处主要由这一点造成。电动机气隙磁通密度分布设计和绕组设计不同，一个是针对正弦波驱动，一个是对方波驱动；永磁同步电机追求正弦磁通，其绕组为分布式绕组，而无刷直流电机相对简单为整距集中绕组，所以无刷直流电机造价相对便宜一些。
- 2、永磁同步电机PMSM在电气和机械方面更加安静，转矩基本没有脉动，而BLDC是方波驱动，存在转矩脉动。其原因在于：由于电感存在，电流不会突变，因此在换相过程中断开相电流，电流下降的过程和新接入的新相电流上升过程都需要时间，因此相电流不可能是理想的方波，从而会产生非换相相电流脉动，从而引起换相转矩脉动。
- 3、因为驱动电流不同，气隙磁场波形、反电动势波形、转矩波形均不相同。理想情况下：磁通密度分布、相反电动势、相电流和电磁转矩波形。电流为理想方波，实际是不存在的。



## 3.4 BLDC和PMSM的比较

BLDC电机	PMSM电机
固定定子线圈和活动转子永磁体	固定定子线圈和活动转子永磁体
电源电压呈梯形	电源电压呈正弦形式
反电动势呈梯形	反电动势呈正弦形式
每过固定 <b>磁状态角</b> ，定子磁链位置会换向	定子磁链位置连续变化
铁损较高	铁损较低
控制算法相对简单	控制算法复杂

- 永磁交流伺服电机分为无刷直流电机 (BLDCM) 和永磁同步电机 (PMSM) 两种，BLDCM适于速度伺服领域，PMSM适于位置、速度和力矩伺服运动领域。
- BLDCM的驱动采用调压方式，PMSM驱动控制目前以矢量控制为主流。永磁交流电机系统的控制特性与直流伺服电机系统一致，应用中可采用直流电机模型进行分析和设计。
- 永磁交流电机系统已成为精密伺服驱动的首选。



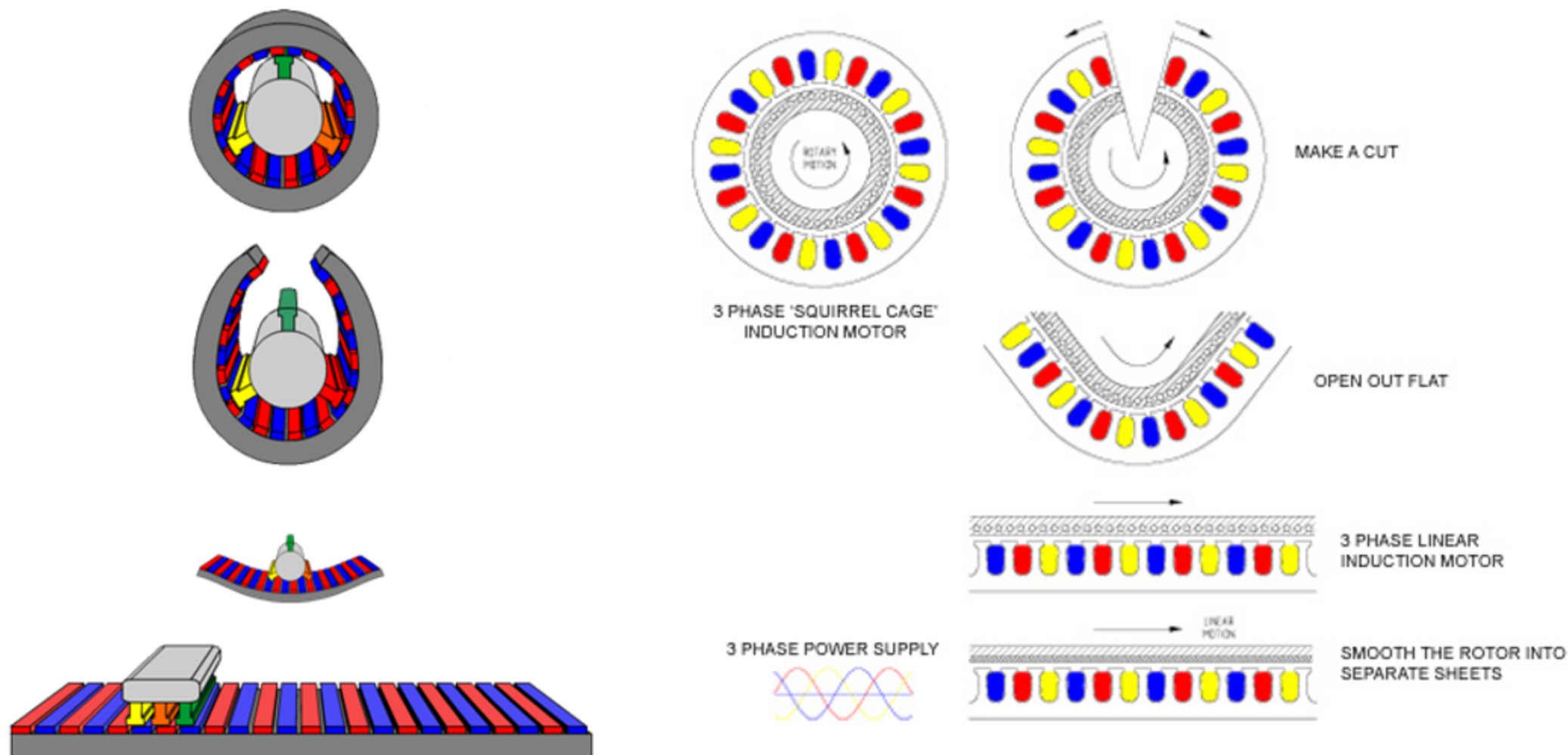
# 目 录

- 1、无刷直流电动机
- 2、交流伺服电机概述
- 3、交流伺服电机原理
- 4、直线伺服电机和直驱伺服电机



## 4.1 直线电机

直线电机从结构上来说，就是将旋转电机的定子和转子沿轴向剖开，然后将转子和定子展开



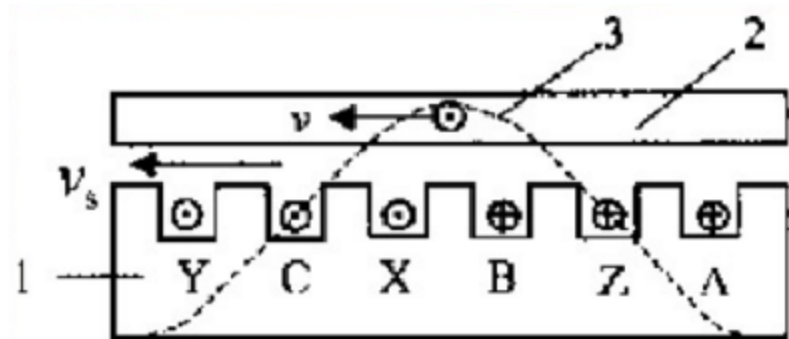


## 4.1 直线电机

直线电机从结构上来说，就是将旋转电机的定子和转子沿轴向剖开，然后将转子和定子展开

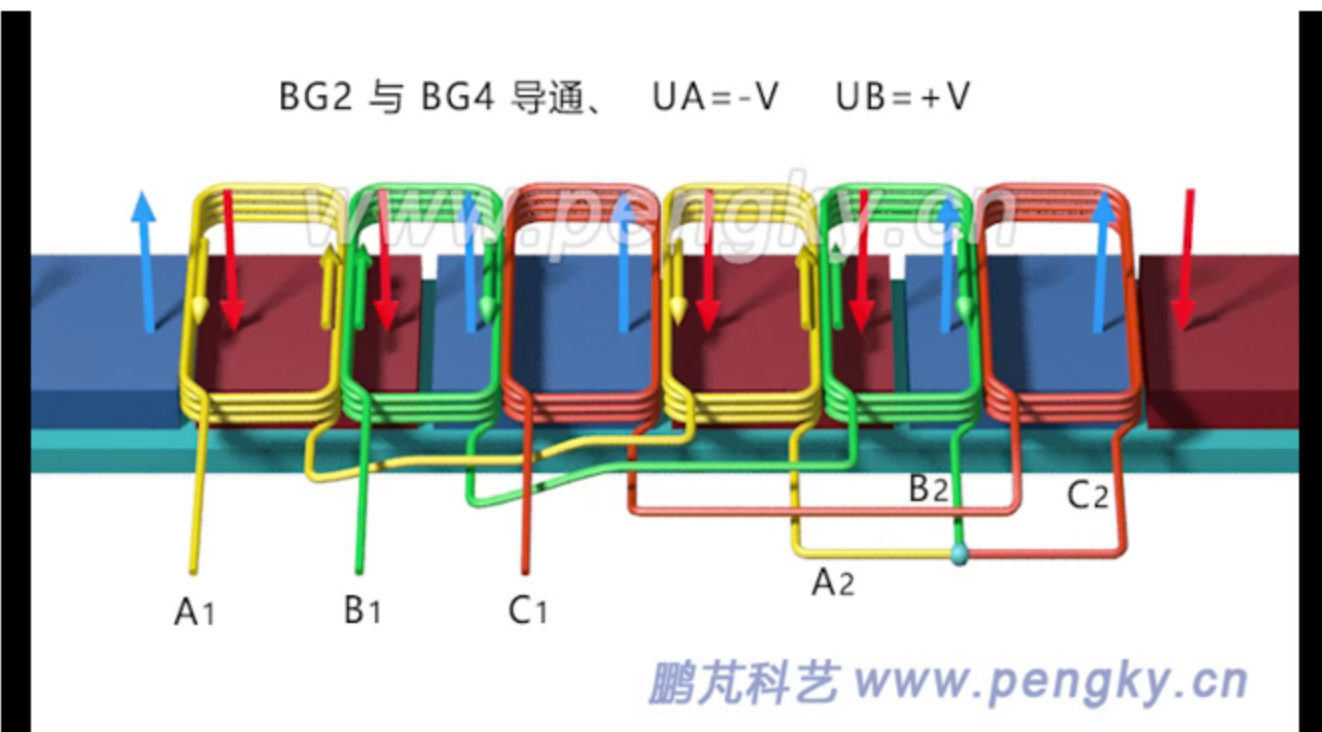
### ►工作原理:

与旋转电机非常相似，在直线电机中通入三相电流后，产生在直线方向呈正弦波的磁场，只是这个磁场不再是旋转的，而是沿直线方向平移的，该磁场与定子磁场相互作用，驱动动子沿直线运动。

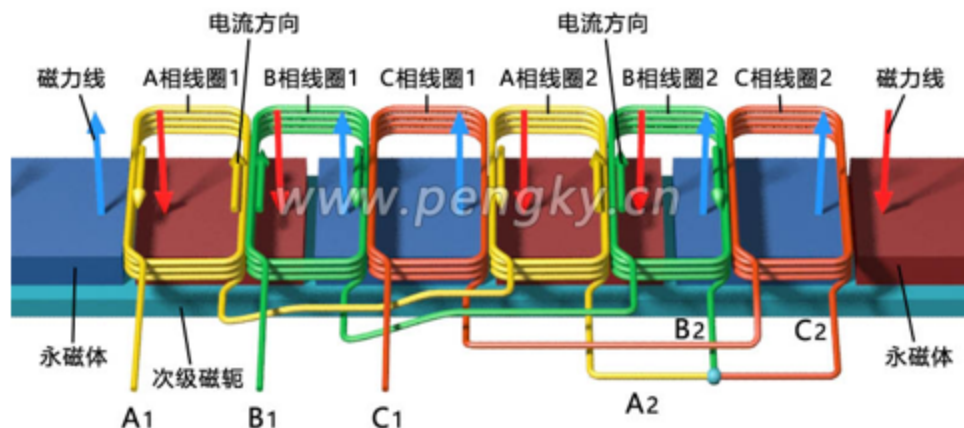


# 4.1 直线电机

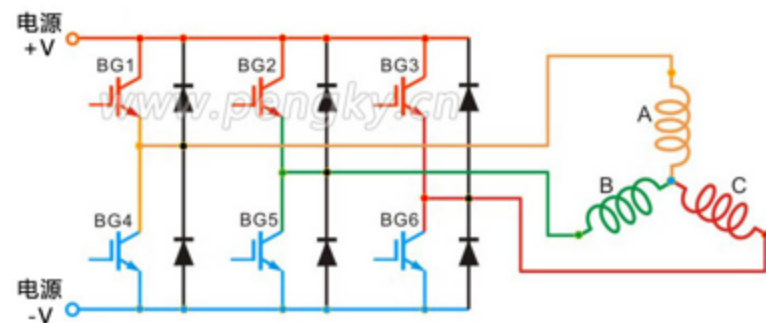
## 分数槽集中绕组永磁直线电机原理



## 分数槽集中绕组永磁直线电机原理



鹏芃科技 [www.pengky.cn](http://www.pengky.cn)  
分数槽集中绕组永磁直线电机原理图

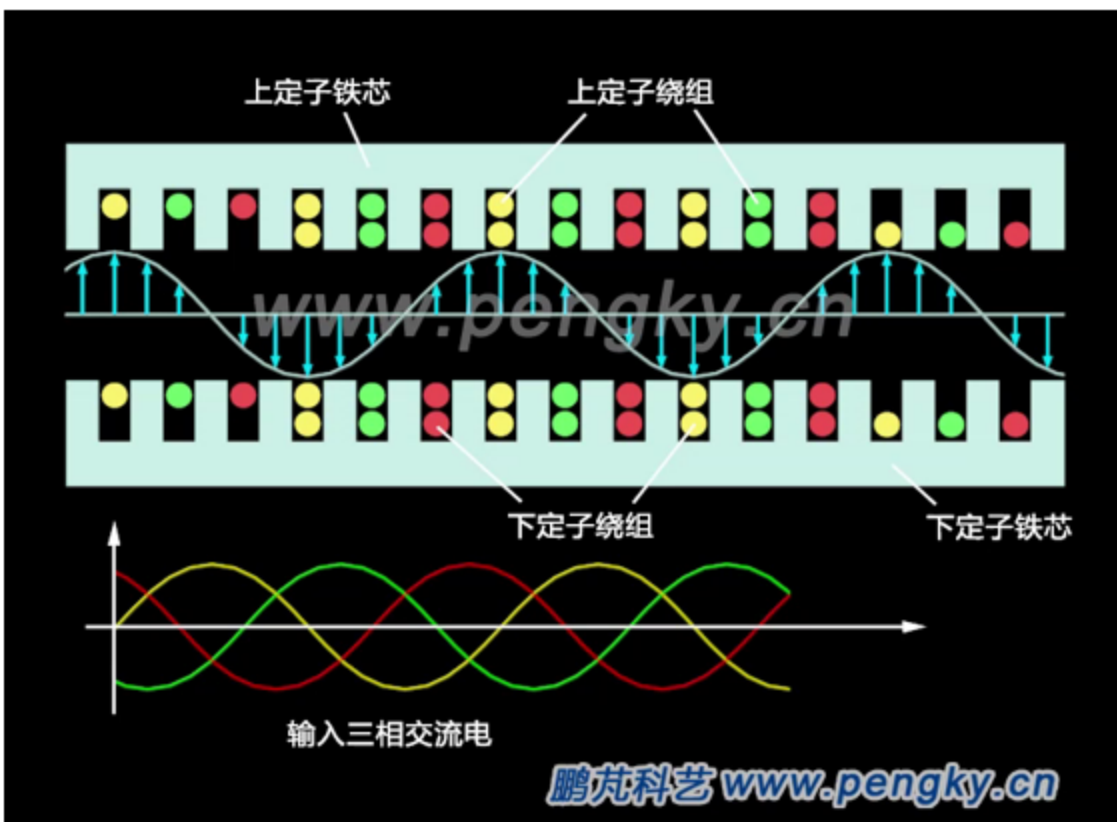


永磁电机三相驱动电路图

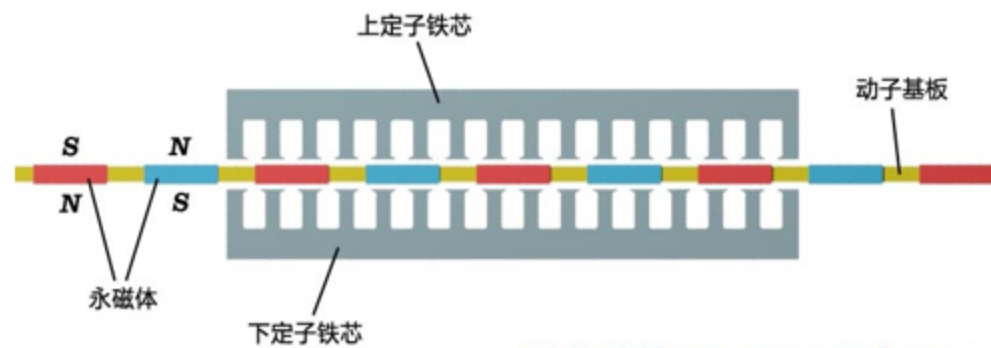


# 4.1 直线电机

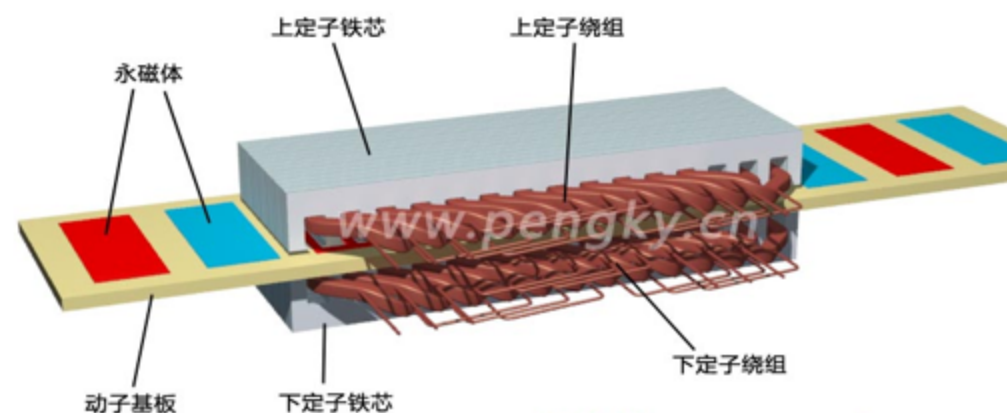
## 双边平板型直线同步电动机



双边平板型直线电动机的行波磁场



双边平板型直线同步电动机的次级



鹏苑科技 www.pengky.cn

双边平板型直线同步电动机的结构



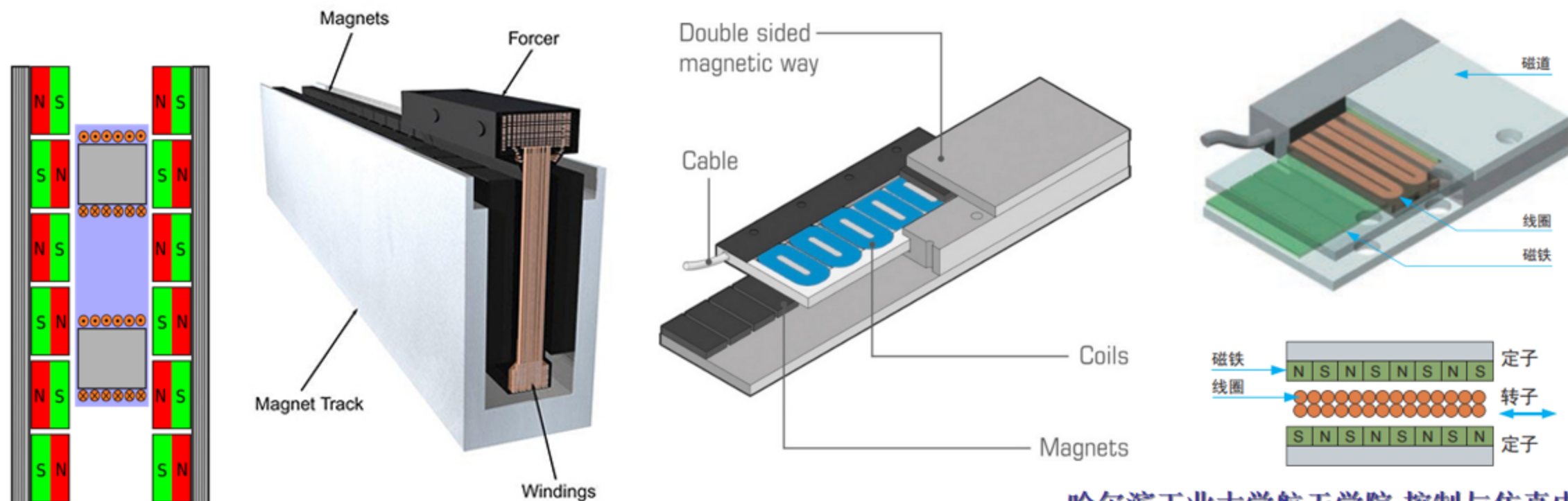
## 4.1 直线电机

### 无铁芯直线电机:

**特点:** 无吸引力, 适用于要求小推力、高精度的领域, 可实现低噪音化和导轨的长寿命化。

**构造:** 转子(动子)无铁芯, 采用由树脂固定正确定位线圈的构造。

定子将板状磁铁正确定位并固定在板上, 采用2块板相对的构造。



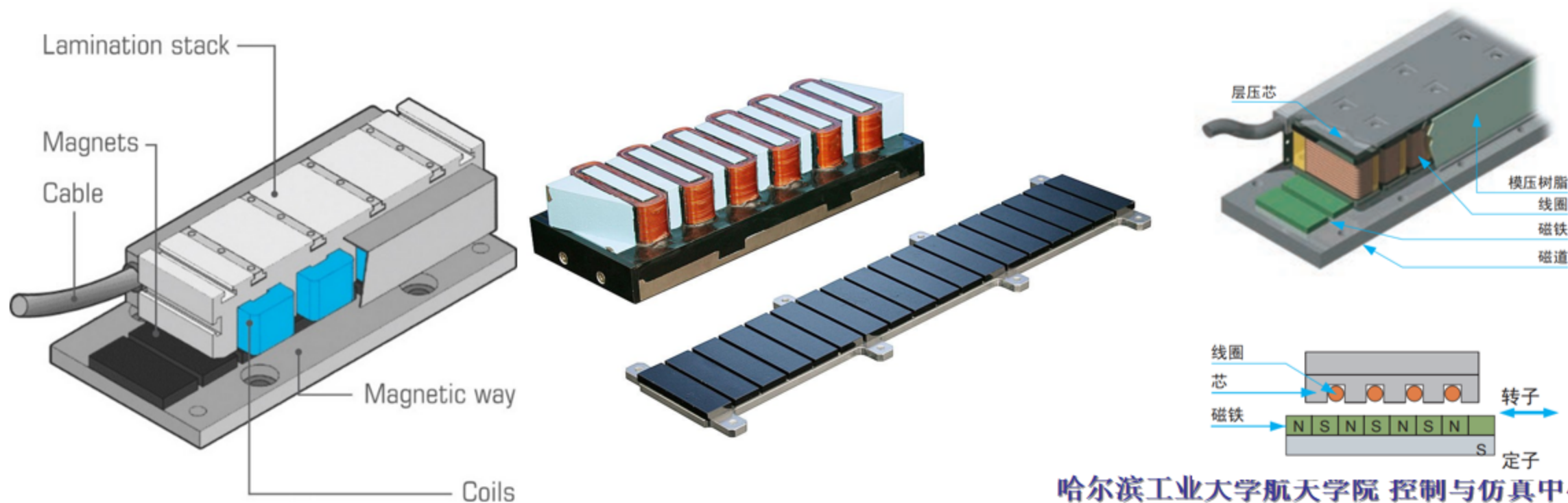
## 4.1 直线电机

### 有铁芯直线电机（平板式）：

**特点：**采用扁平构造，安装空间小，在转子（动子）与定子之间的磁吸力作用下，可实现导轨的高刚性化。

**构造：**转子（动子）在芯子上开有槽，在该层压芯上安装事先卷好的线圈，并用树脂固定整体。

定子采用相对于芯子将板状磁铁正确定位并固定在单侧板上的构造。



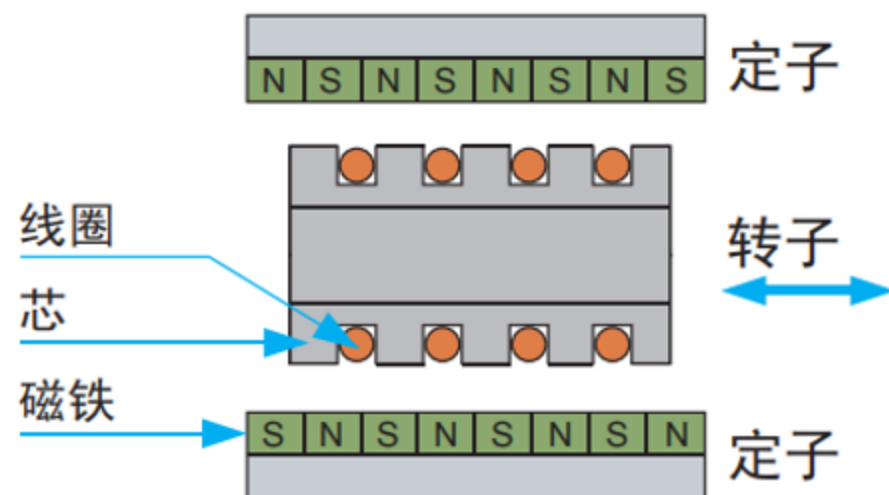
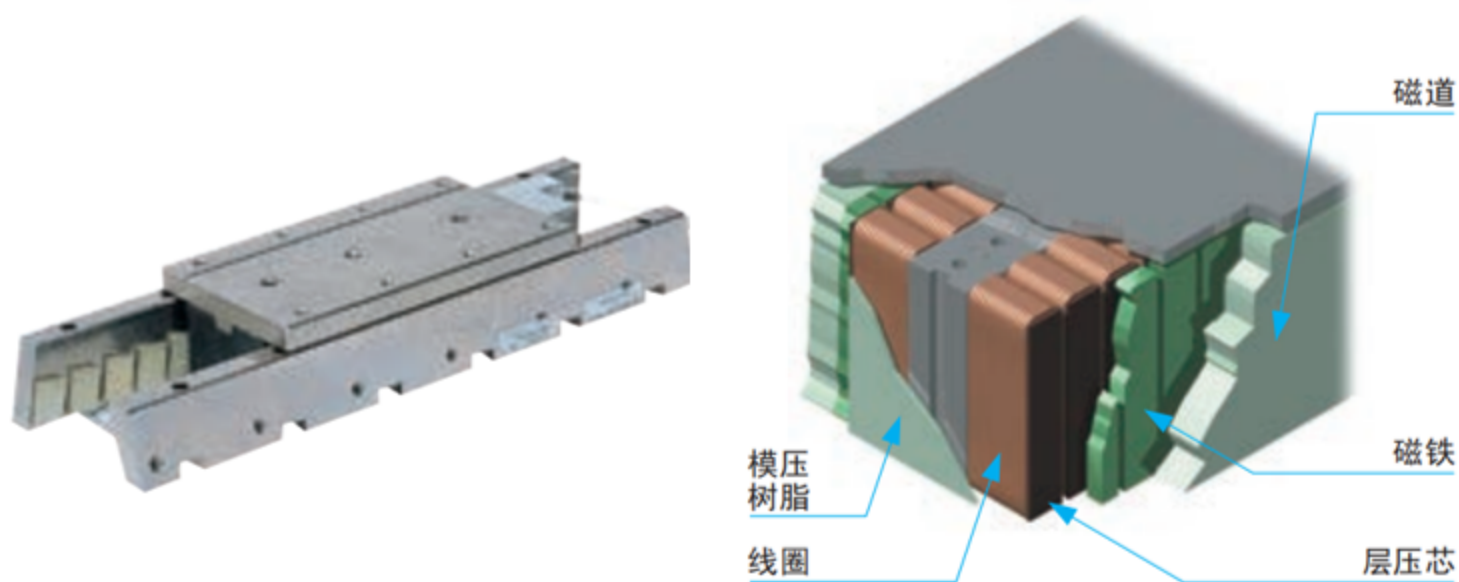
## 4.1 直线电机

### 有铁芯直线电机（T型）：

**特点：**采用独特的电机构造，磁吸力会相互抵消，可减小对导轨及机械强度的担忧。

**构造：**转子（动子）在芯子上开有槽，在该层压芯上安装事先卷好的线圈，并用树脂固定整体。

定子采用相对于芯子将板状磁铁正确定位并固定在两侧板上的构造。



# 4.1 直线电机

## 直线驱动方式VS传统方式

直线伺服驱动利用高速、高加减速、对应长行程、匀速、稳定性、洁净、静音、免维护等特点，可显著提高机械的功能和性能。

### ◎ 多头机械

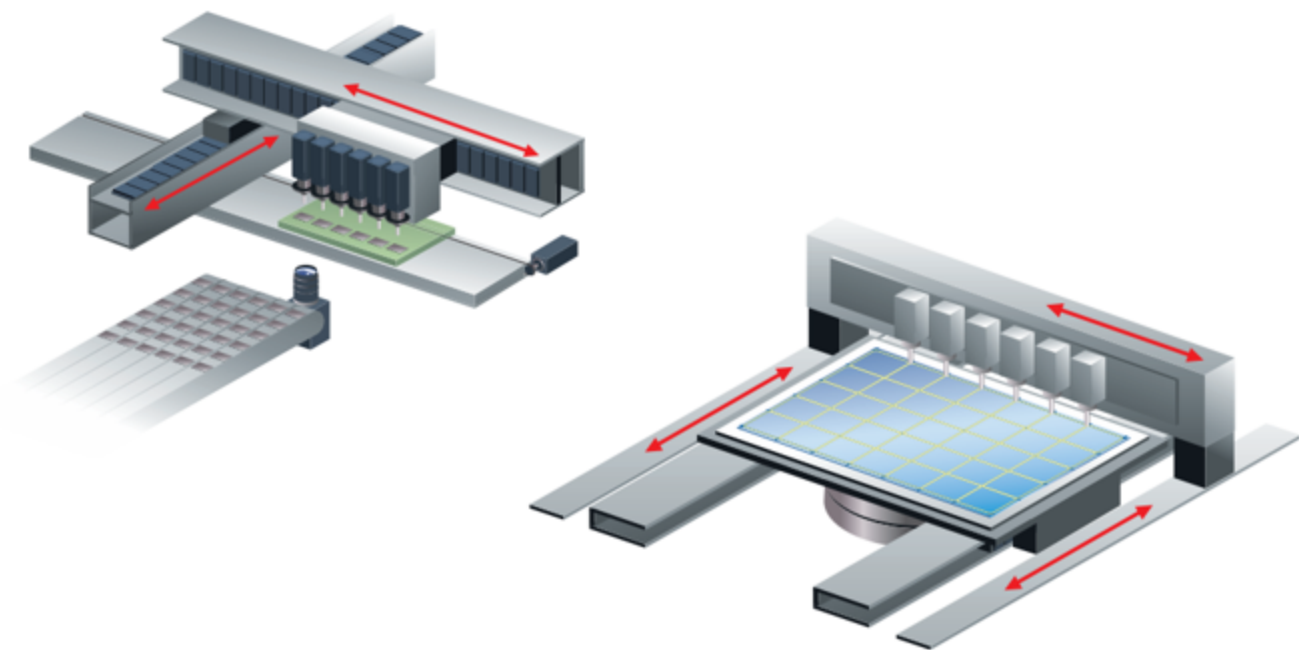
液晶·有机EL制造设备  
(点胶机、检查设备、维修设备等)

### ◎ 滑台驱动 (XY $\theta$ )

液晶·有机EL制造设备(G5.5以上、长行程用)、  
半导体制造设备(探针等)

### ◎ 龙门机械

电子部件制造设备(高速贴片机等)



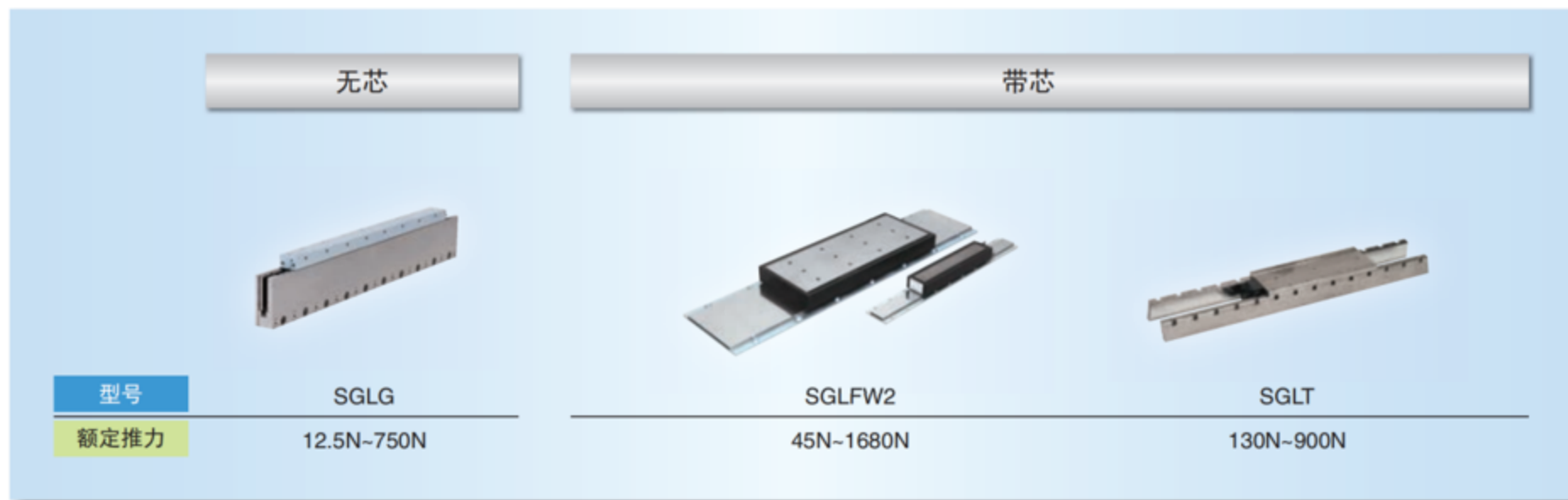
## 4.1 直线电机

### 直线驱动方式VS传统方式

直线伺服驱动利用高速、高加减速、对应长行程、匀速、稳定性、洁净、静音、免维护等特点，可显著提高机械的功能和性能。

伺服电机

直线伺服电机

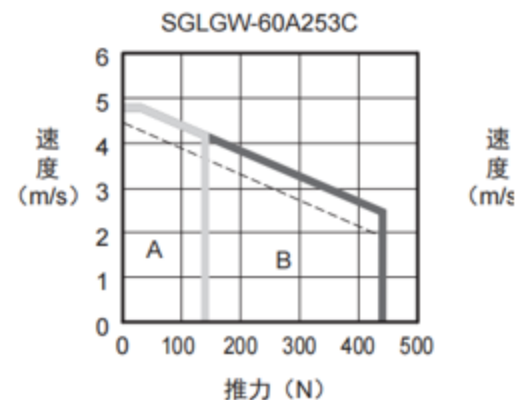
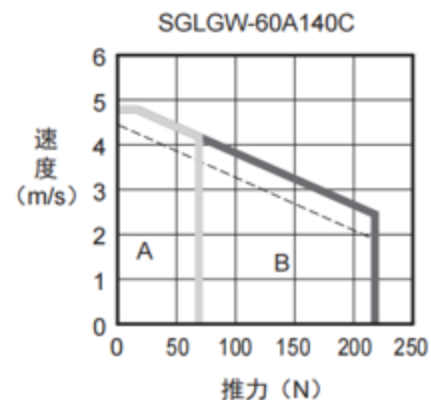
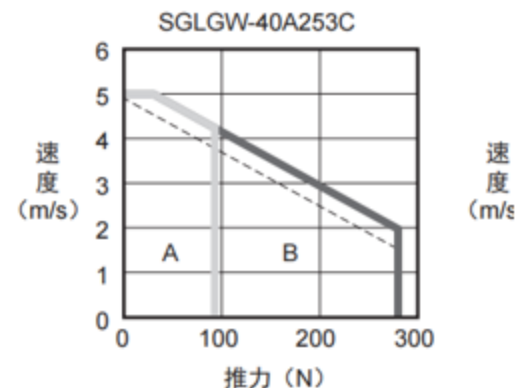
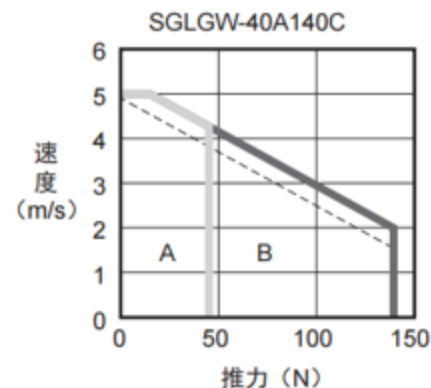




# 4.1 直线电机

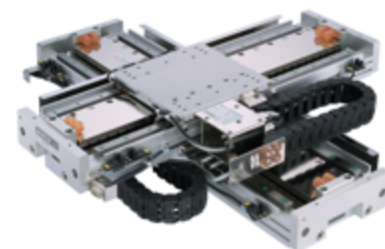
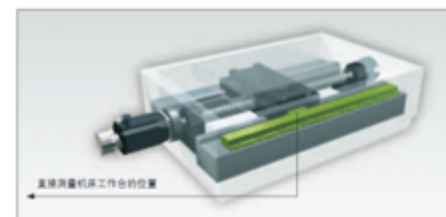
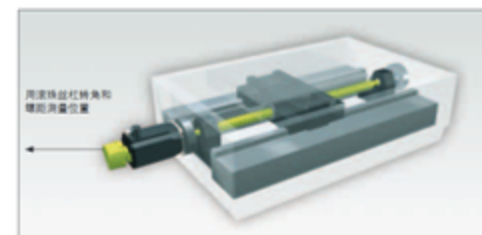
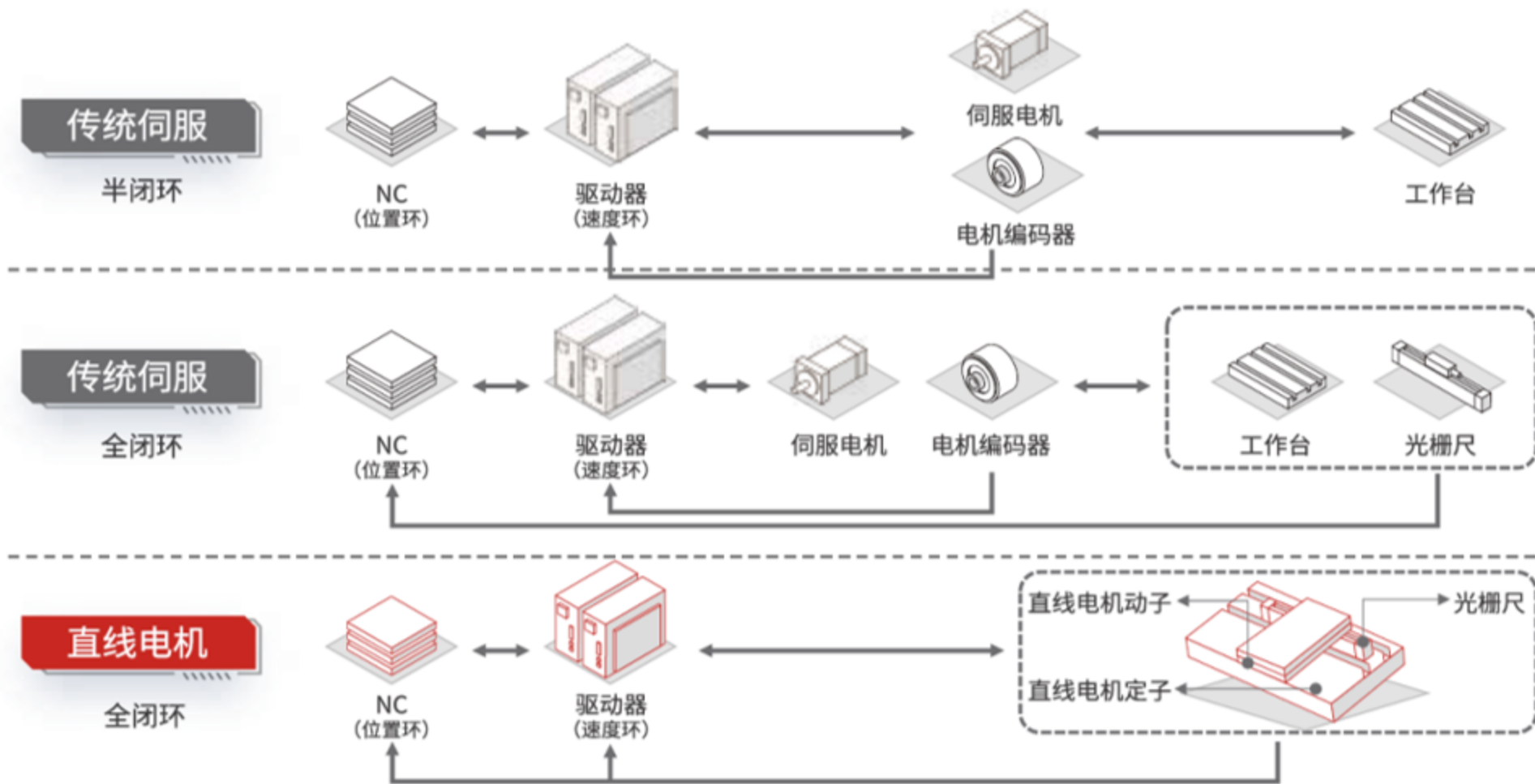
额定值：与高推力型定子组合时

直线伺服电机动子 型号 SGLGW-		40A			60A		
		140C	253C	365C	140C	253C	365C
额定速度 (速度控制时的标准速度) *1	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最大速度 *1	m/s	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
额定推力 *1、*2	N	57	114	171	85	170	255
最大推力 *1	N	230	460	690	360	720	1080
额定电流 *1	Arms	0.80	1.6	2.4	1.2	2.2	3.3
最大电流 *1	Arms	3.2	6.5	9.7	5.0	10.0	14.9
动子重量	kg	0.34	0.60	0.87	0.42	0.76	1.1
推力参数	N/Arms	76.0	76.0	76.0	77.4	77.4	77.4
感应电压参数	Vrms/ (m/s) / 相	25.3	25.3	25.3	25.8	25.8	25.8
电机参数	$N/\sqrt{W}$	9.62	13.6	16.7	12.9	18.2	22.3
电气时间参数	ms	0.43	0.43	0.43	0.45	0.45	0.45
机械时间参数	ms	3.7	3.2	3.1	2.5	2.3	2.2
热电阻 (带散热片)	K/W	1.67	0.87	0.58	1.56	0.77	0.51
热电阻 (无散热片)	K/W	3.02	1.80	1.23	2.59	1.48	1.15
磁吸引力	N	0	0	0	0	0	0
容许最大可搬运重量	kg	12	24	58	18	61	91
容许最大可搬运重量 (外置再生、带DB电阻时)	kg	12	24	58	18	61	91



# 4.1 直线电机

## 直线驱动方式VS传统方式



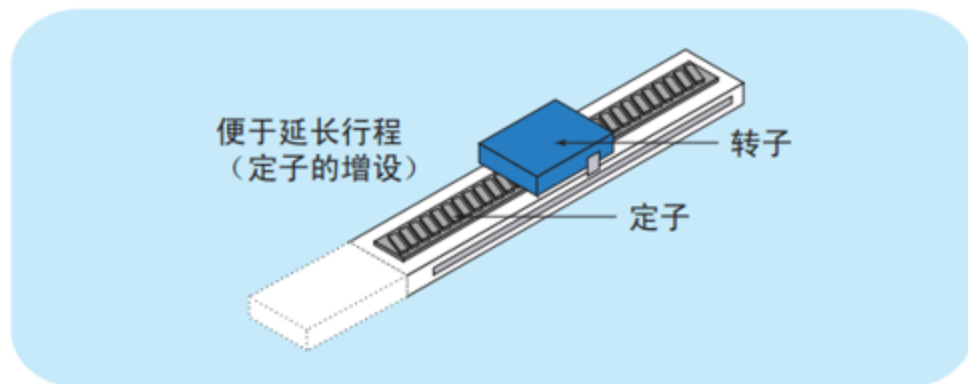
# 4.1 直线电机

## 直线驱动方式VS传统方式

### 优点 1

- 高速
- 高精度

### 线性驱动



#### 速度

直接驱动负载，因此无速度限制因素，易于实现最快5m/s的高速化

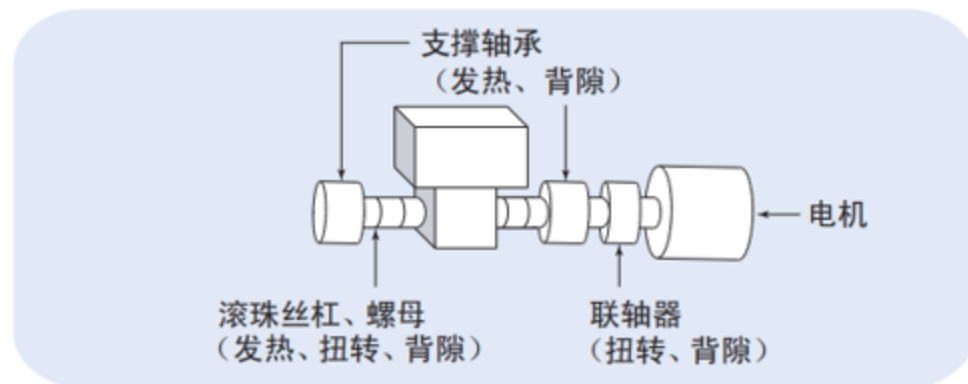
#### 定位精度

通过全闭环直接驱动负载，可通过传感器分辨率进行超微粒定位

#### 行程

可通过连接定子实现长行程

### 滚珠丝杠驱动



#### 速度

高速时共振、发热

#### 定位精度

在扭转、背隙的作用下，目标位置与实际位置易差生误差

#### 行程

需使用与行程一致的滚珠丝杠

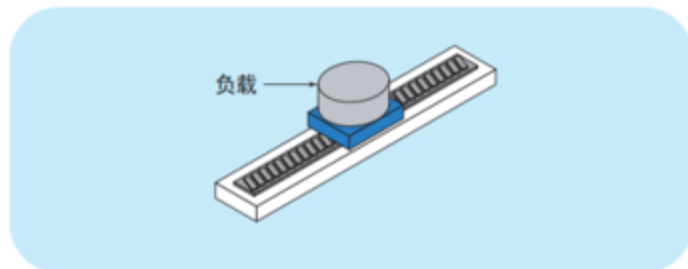


# 4.1 直线电机

## 直线驱动方式VS传统方式

### 优点 2

- 高加速度
- 简单构造

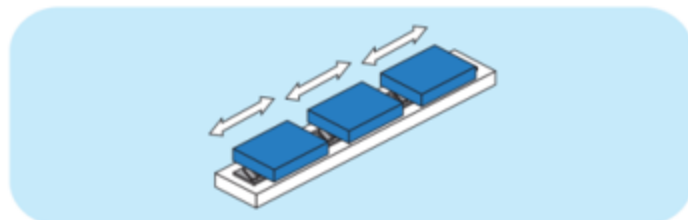


**加速度**

$$\text{加速度} = \frac{\text{推力}}{M+m} \quad \left( \begin{array}{l} M = \text{负载质量} \\ m = \text{电机转子重量} \end{array} \right)$$

仅使负载轻量化，加速度大幅提升

**发热** 对周边的热传导极小，可确保高定位精度

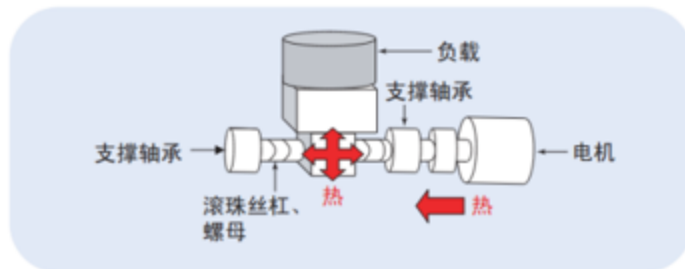


**扩展性** 可在一个定子上安装多个转子

↓

- 简单构成
- 可在同个轴上进行多种动作

## 滚珠丝杠驱动

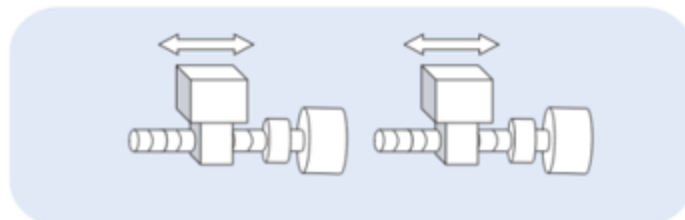


**加速度**

$$\text{加速度} = \frac{\text{转矩}}{J_L+J_B+J_C+J_M} \quad \left( \begin{array}{l} J_L = \text{负载惯量} \\ J_B = \text{滚珠丝杠惯量} \\ J_C = \text{联轴器惯量} \\ J_M = \text{电机惯量} \end{array} \right)$$

即使仅使负载轻量化，加速度的提升率仍较低

**发热** 各部位产生的热会使得滚珠丝杠膨胀，从而使定位精度产生偏差



**扩展性** 需在同个轴上进行多种动作时，需使用多个进给单元

↓

- 成本大幅提高
- 一根滚珠丝杠只可进行一个动作



# 4.1 直线电机

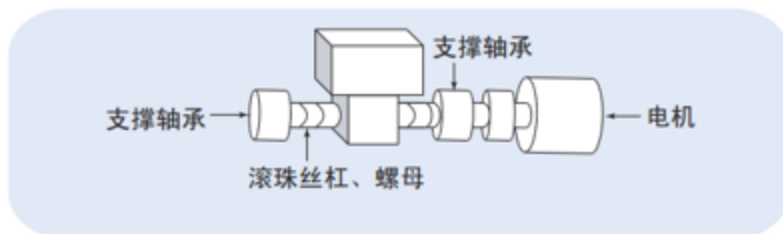
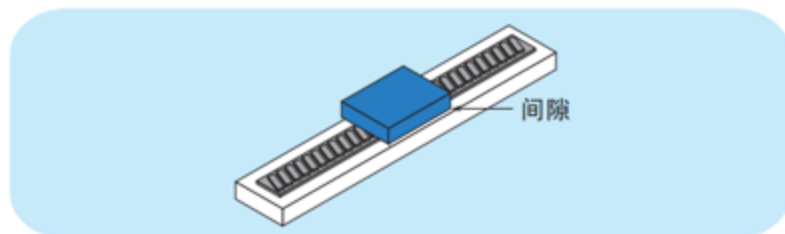
## 直线驱动方式VS传统方式

线性驱动

滚珠丝杠驱动

优点 3

- 使用简便



噪音	使用直线伺服的工作台上机械接触部分少， 噪音极小
维护	使用直线伺服的工作台上机械接触部分少， 免维护
洁净的环境	无旋转部，不会有润滑油飞散， 可轻松实现洁净的作业环境

噪音	高速时易产生较大的噪音
维护	机械接触部分多，需对润滑、 磨损进行定期维护
洁净的环境	接触部旋转时填充的润滑油四处飞散，极 难实现洁净的作业环境



## 4.2 直接驱动电机

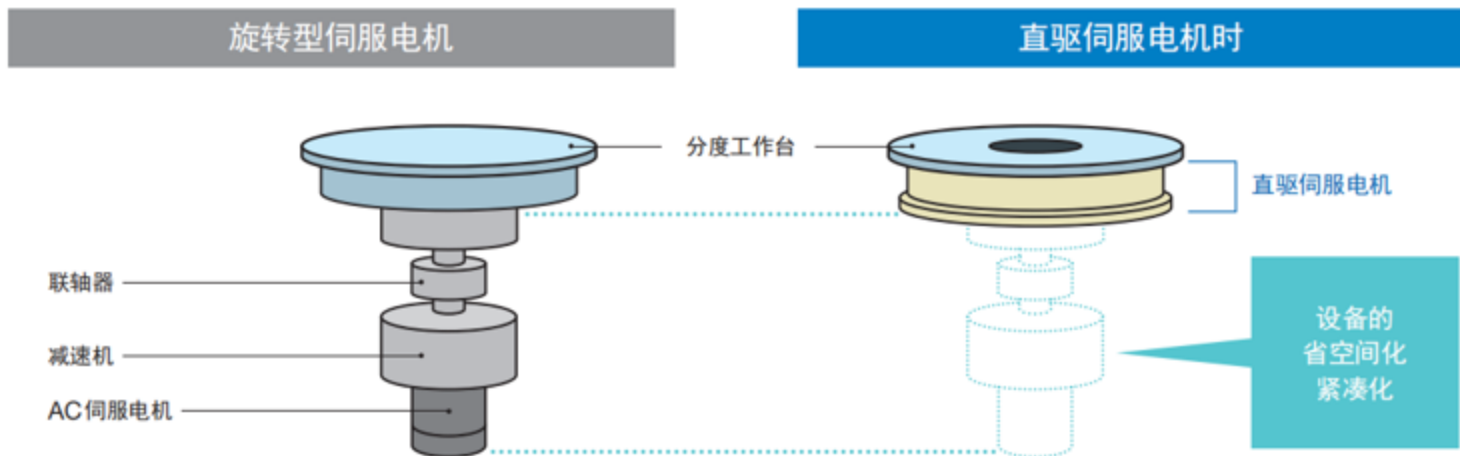
1. 采用直接驱动方式，无需减速或传动机构，所以所需的安装位置很小，可简化系统结构；
2. 集成了高解析度的编码器，易于实现高精度全闭环控制
3. 中空轴的设计允许电缆，软管等方便地穿过电机，便于接线
4. 没有传动间隙和运动的滞后；具有抗磨损、免维护、极高动态性能和控制精度、低速高扭矩等特性。（由于它的高扭矩特性，也称之为力矩电机或扭矩电机）

广泛应用于印刷设备，液晶、半导体设备的取放装置及各种专用机械的旋转台等领域。



## 4.2 直接驱动电机

〈分度工作台示例〉



### 问题点

- 松动及背隙导致定位精度降低
- 产生噪音
- 需进行磨损、润滑维护

### 改善点

- 通过与负载直接连接提高定位精度
- 低噪音
- 采用中空构造，便于接线、配管
- 部件数量少，减少了设计工时和维护成本
- 不会因减速机降低效率，可实现设备的节能
- 无齿轮、无需润滑油，更洁净
- 动作角度、分割数只需变更指令值，操作简便



## 4.2 直接驱动电机

无芯内转子:

特点  
应用



无芯内转子

小容量: SGM7E/SGMCS型<sup>1)</sup>

最适于需要速度波动少、  
平滑动作的用途

内转子构造

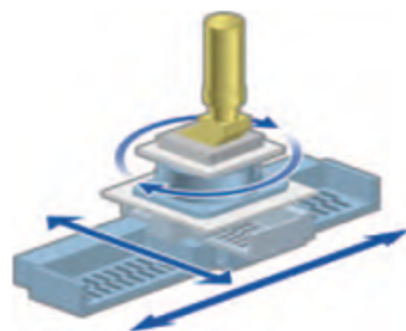
电机的内侧旋转



- ◎ 搭载24/20位编码器
- ◎ 通过基于无芯方式的低齿槽实现无速度波动的平滑动作

构造

- ◎ 旋转体 (CMP装置、清洗机)
- ◎ 印刷辊





## 4.2 直接驱动电机

带芯内转子:

特点  
特点



带芯内转子

小容量: SGM7F/SGMCS型<sup>2</sup>  
中容量: SGM7F/SGMCS型<sup>2</sup>

适用于需要体积小巧、  
效率高的用途

构造

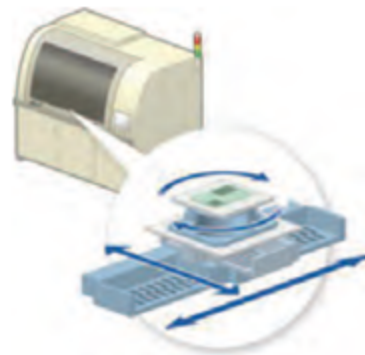
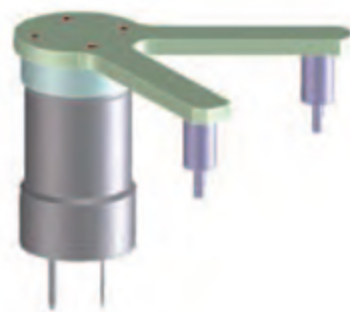
内转子构造

电机的内侧旋转



- ◎ 搭载24/22/20位编码器
- ◎ 采用小直径转子, 结构紧凑
- ◎ 实现高速、高频度定位
- ◎ 低惯量 ◎ 发热低

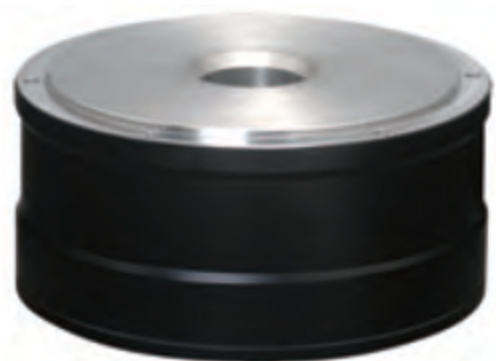
- ◎ 分度器
- ◎ 分选机/接合器



## 4.2 直接驱动电机

带芯外转子:

特点



带芯外转子

小、中容量: SGM7D型

适用于需要高转矩、高精度、高刚性的用途

外转子构造\*3

电机的外侧旋转



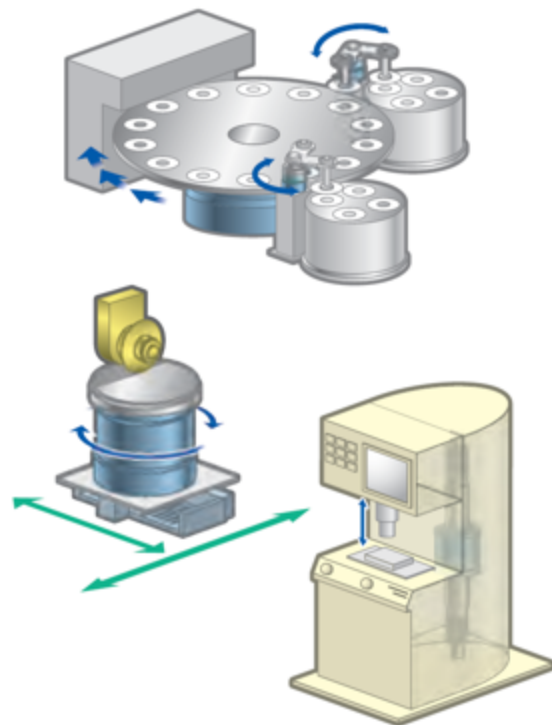
与原横河电机DYNASERV兼容

- ◎ 搭载24位编码器
- ◎ 容许惯量比高, 可搭载大负载
- ◎ 大口径中空孔可节省布线空间
- ◎ 高刚性

\*3: 采用在定子铁芯之间夹入高磁力永久磁铁的磁力偏置方式

构造

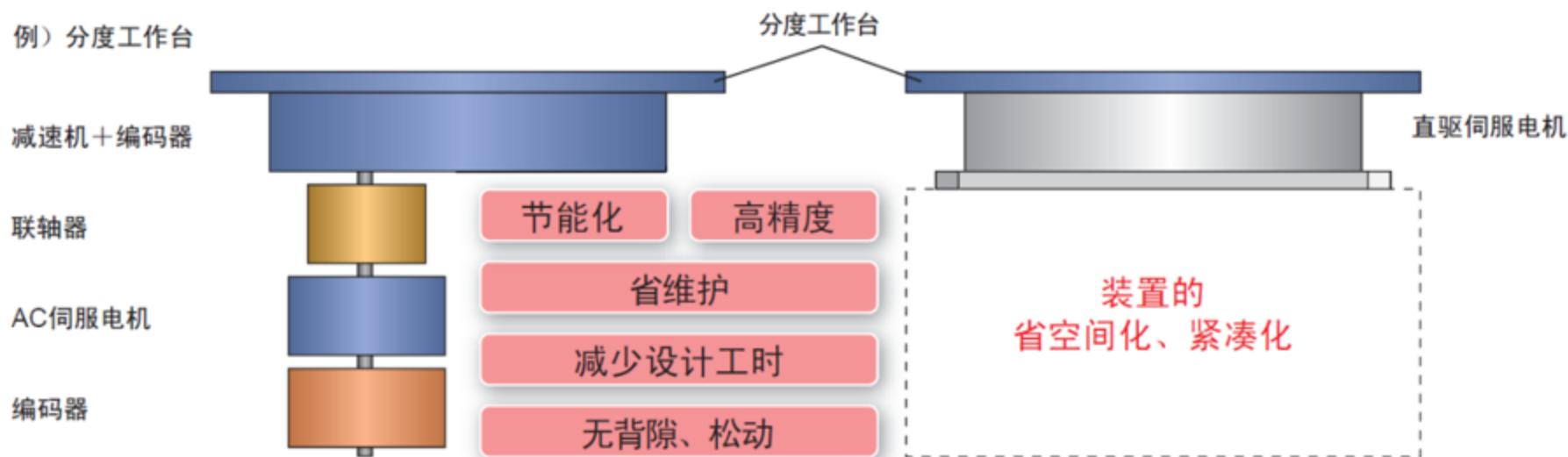
- ◎ 转台 (可承受大负载)
- ◎ 半导体用装置
- ◎ 机床



## 4.2 直接驱动电机

### 直驱伺服电机的主要特点

负载直接施加于伺服电机，因此伺服电机的精度即为装置的精度，从而显著提高装置的精度。  
并且，不会因减速机等降低效率，可实现装置的节能化。  
可实现装置的紧凑化，有助于减少设计工时和维护成本。  
只需变更指令值，即可轻松设定所需的动作角度、分割数。



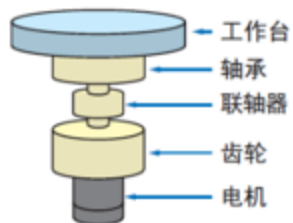
# 4.2 直接驱动电机

## 以往的AC伺服电机

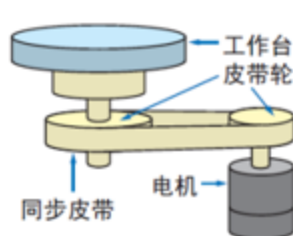
### 〈问题点〉

- 松动及背隙导致定位精度降低
- 产生噪音
- 需进行磨损、润滑维护

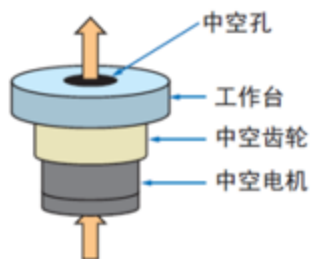
### ■ 带齿轮电机



### ■ 电机+同步皮带



### ■ 中空电机+中空齿轮

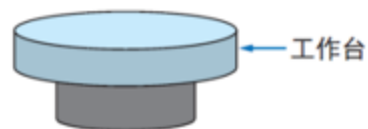


## 直驱伺服电机

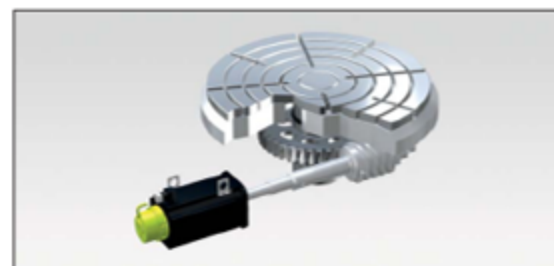
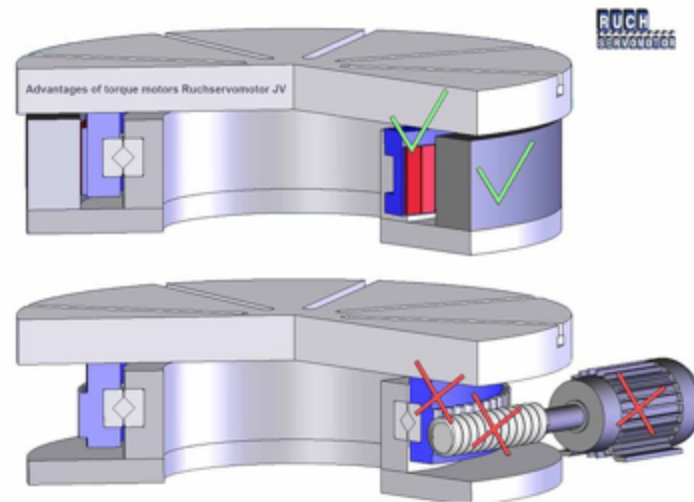
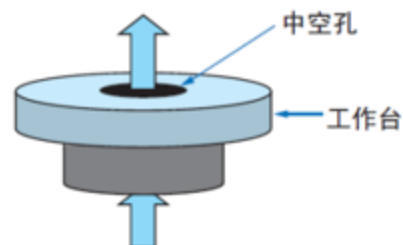
### 〈改善点〉

- 通过与负载直接连接提高定位精度
- 低噪音
- 洁净化（无齿轮→无需润滑油）
- 零件数量减少
- 采用中空构造，便于接线、配管

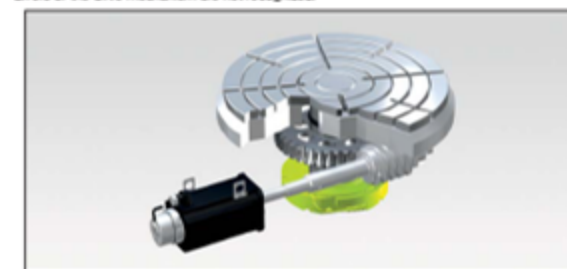
### ■ 直驱伺服电机



### ■ 直驱伺服电机（大口径中空孔）



Semi-closed loop: Position measurement by rotary encoder on the feed motor. Errors of the drive mechanism are not recognized.



Closed Loop: Position measurement by an angle encoder on the machine axis.



## 4.2 直接驱动电机

### 直驱伺服电机



#### ■ 无芯内转子(SGM7E)

电机外径 (mm)	额定转矩 (N·m)	最大转矩 (N·m)
135 ~ 290	2 ~ 35	6 ~ 105

适用于需要速度波动少、平滑动作的用途

- 搭载24位编码器
- 通过基于无芯方式的低齿槽实现无速度波动的平滑动作



#### ■ 带芯内转子(SGM7F)

100 ~ 360	2 ~ 200	6 ~ 600
-----------	---------	---------

适用于需要体积小、效率高的用途

- 搭载24位编码器
- 采用小直径转子，结构紧凑
- 实现高速、高频度定位
- 低惯量
- 发热低



#### ■ 带芯外转子(SGM7D)

107 ~ 264	1.3 ~ 240	4 ~ 400
-----------	-----------	---------

适用于需要高转矩、高刚性的用途

与原横河电机DYNASERV兼容

- 搭载24位编码器
- 容许负载转动惯量比高，可搭载大负载
- 大口径中空孔可用于节省布线空间
- 高刚性



## 4.2 直接驱动电机

### 伺服电机

#### 直驱伺服电机

带芯外转子



型号 SGM7D

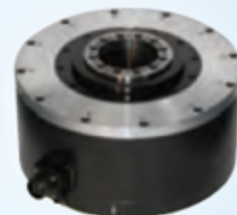
额定转矩 1.30N·m~240N·m

带芯内转子



SGM7F/SGMCV (小容量)

2.00N·m~35.0N·m



SGM7F/SGMCS (中容量)

45.0N·m~200N·m

无芯内转子



SGM7E/SGMCS (小容量)

2.00N·m~35.0N·m

## 4.2 直接驱动电机

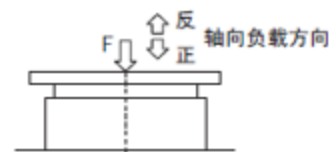
电压		200 V											
型号 SGM7D-		30F	58F	90F	1AF	01G	05G	08G	18G	24G	34G	45G	03H
额定输出	W	188	364	565	691	16	63	101	226	302	320	565	38
额定转矩 <sup>*1</sup>	N·m	30.0	58.0	90.0	110	1.30	5.00	8.00	18.0	24.0	34.0	45.0	3.00
反复额定转矩 <sup>*2</sup>	N·m	—	—	—	—	—	—	—	—	27.0	40.0	52.0	—
瞬时最大转矩	N·m	50.0	100	150	200	4.00	6.00	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	4.00
失速转矩	N·m	30.0	58.0	90.0	110	1.30	5.00	8.00	18.0	24.0	34.0	45.0	3.00
额定电流	Arms	5.70	6.40	5.90	5.00	1.70	1.60	3.40	3.40	3.10	3.30	4.80	1.10
瞬时最大电流	Arms	14.1			4.2	3.5	10.6			3.5			
额定转速	min <sup>-1</sup>	60			120			90	120	120			
最高转速	min <sup>-1</sup>	72			150			144			150		
转矩参数	N·m/ Arms	6.25	12.5	17.8	24.5	1.09	3.84	2.82	5.76	8.57	11.2	10.2	3.01
转子转动惯量	×10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup>	960	1190	1420	1670	55.0	75.0	120	150	190	230	270	25.0
额定功率变化率	kW/s	9.38	28.3	57.0	72.5	0.307	3.33	5.33	21.6	30.3	50.3	75.0	3.60
额定角加速度	rad/s <sup>2</sup>	313	487	634	659	236	667	667	1200	1260	1480	1670	1200
散热片尺寸	mm	550×550×30 (铝制)											350×3 50×20 (铁制)
容许负载转动惯量 (转子转动惯量的倍率)	倍	200 500 <sup>*4</sup>	150 400 <sup>*4</sup>	150 350 <sup>*4</sup>	130 300 <sup>*4</sup>	130	300	400 1000 <sup>*4</sup>	350 900 <sup>*4</sup>	300 750 <sup>*4</sup>	250 650 <sup>*4</sup>	200 450 <sup>*4</sup>	600
	外置再生电阻、 外置 DB 电阻 <sup>*3</sup>	倍	2500	3500	4000	5000	130	300	2000	3000	4000	4000	600
容许负载 <sup>*5</sup>	容许 轴向负载	正	N			4×10 <sup>4</sup>		50	200	3×10 <sup>4</sup>			50
		反	N			2×10 <sup>4</sup>		50	200	1×10 <sup>4</sup>			50
	容许力矩负载	N·m		400			—	50	200			—	
刚性	轴向 位移刚性	正	mm/N			2×10 <sup>-6</sup>		—	2.5×10 <sup>-6</sup>			—	
		反	mm/N			3×10 <sup>-6</sup>		—	3×10 <sup>-6</sup>			—	
	力矩位移刚性	rad/N·m		4×10 <sup>-7</sup>			—	1×10 <sup>-6</sup>			—		

伺服电机运行时承受的轴向负载、力矩负载的典型示例如下图所示。进行机械设计时，请避免超过表中数值。

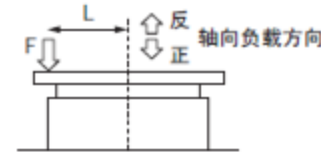
容许负载值为单向的静载荷。

设计时的容许负载值，根据负载种类不同，分别为乘以下述安全系数的值。

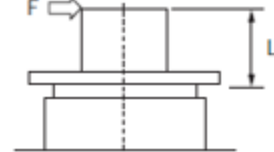
- 无冲击的平滑运行 1/3
- 轻度重复负载 1/5
- 冲击负载 1/10



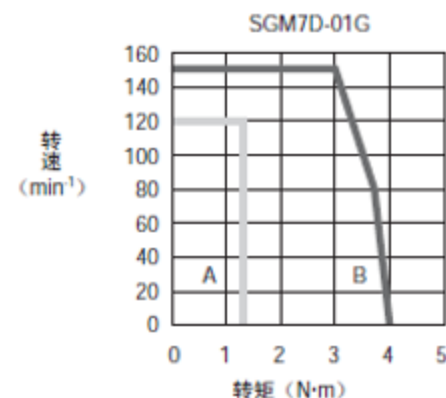
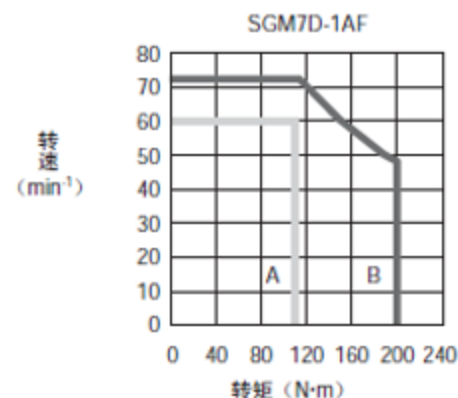
假设F为外力  
轴向负载 = F + 负载的质量  
力矩负载 = 0



假设F为外力  
轴向负载 = F + 负载的质量  
力矩负载 = F × L



假设F为外力  
轴向负载 = 负载的质量  
力矩负载 = F × L



# 几种电机的对比

	缺点	优点
直流有刷	可靠性差，效率低，噪音大，维护复杂	不需要控制，成本低
直流无刷	方波控制震动明显； 必须被控制器才能运行。	可靠性、效率、噪音、维护等方面有了很大改善 直流供电
步进电机	难以运转到较高的转速（600-1200rpm）； 一般都会会有一个共振点； 直接高频率启动可能会堵转或者失步。	不需要编码器即可实现精度要求不高的定位，结构简单且控制成本低
伺服电机	控制比较复杂； 价格比较高；	正弦波控制运行平稳，噪音小，配合高精度的反馈装置可以实现精确的定位。
直线电机	控制比较复杂； 价格比较高；	没有传动环节，高精度，高响应。





# 无刷直流电机和交流伺服电机小结

## 1、掌握无刷直流电机工作原理

两极三相电机的六步电流换向方法

## 2、掌握磁场定向控制

磁场定向控制原理，Clark变换，Park变换

## 3、了解直驱电机和直线电机

基本原理，优缺点



# 无刷直流电机和交流伺服电机小结

- 思考：**
- 1、PMSM 电机的反电动势波形是什么？是如何实现的？
  - 2、如何理解PMSM电机通过矢量控制将其控制转化成为了直流电机控制问题？
  - 3、PMSM电机如何调速？
  - 4、PMSM电机如何通过电流控制实现位置控制？

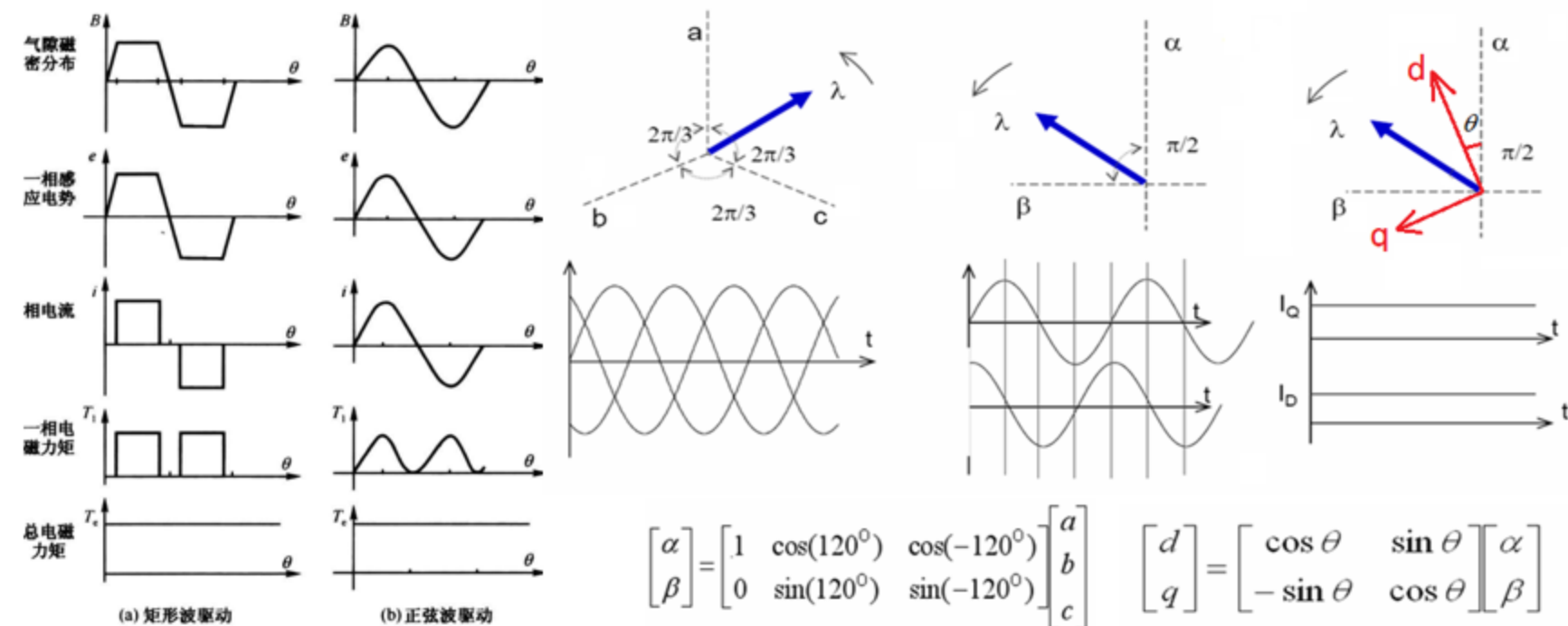
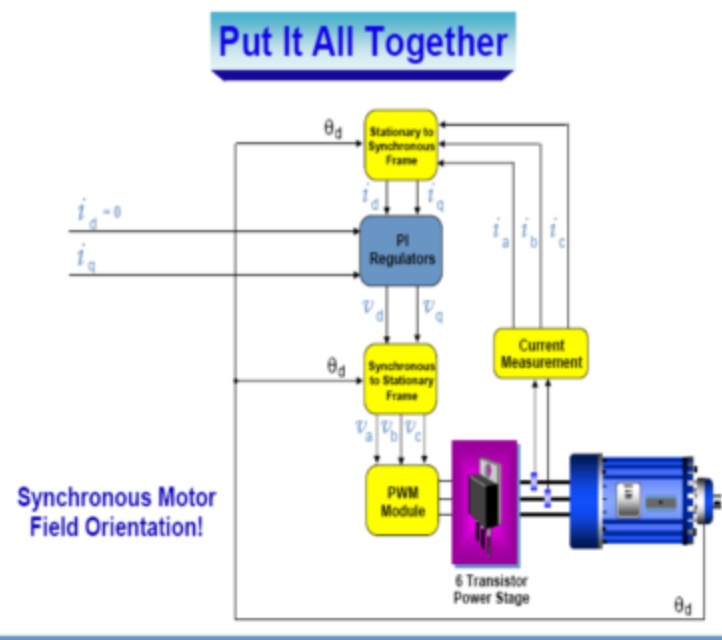


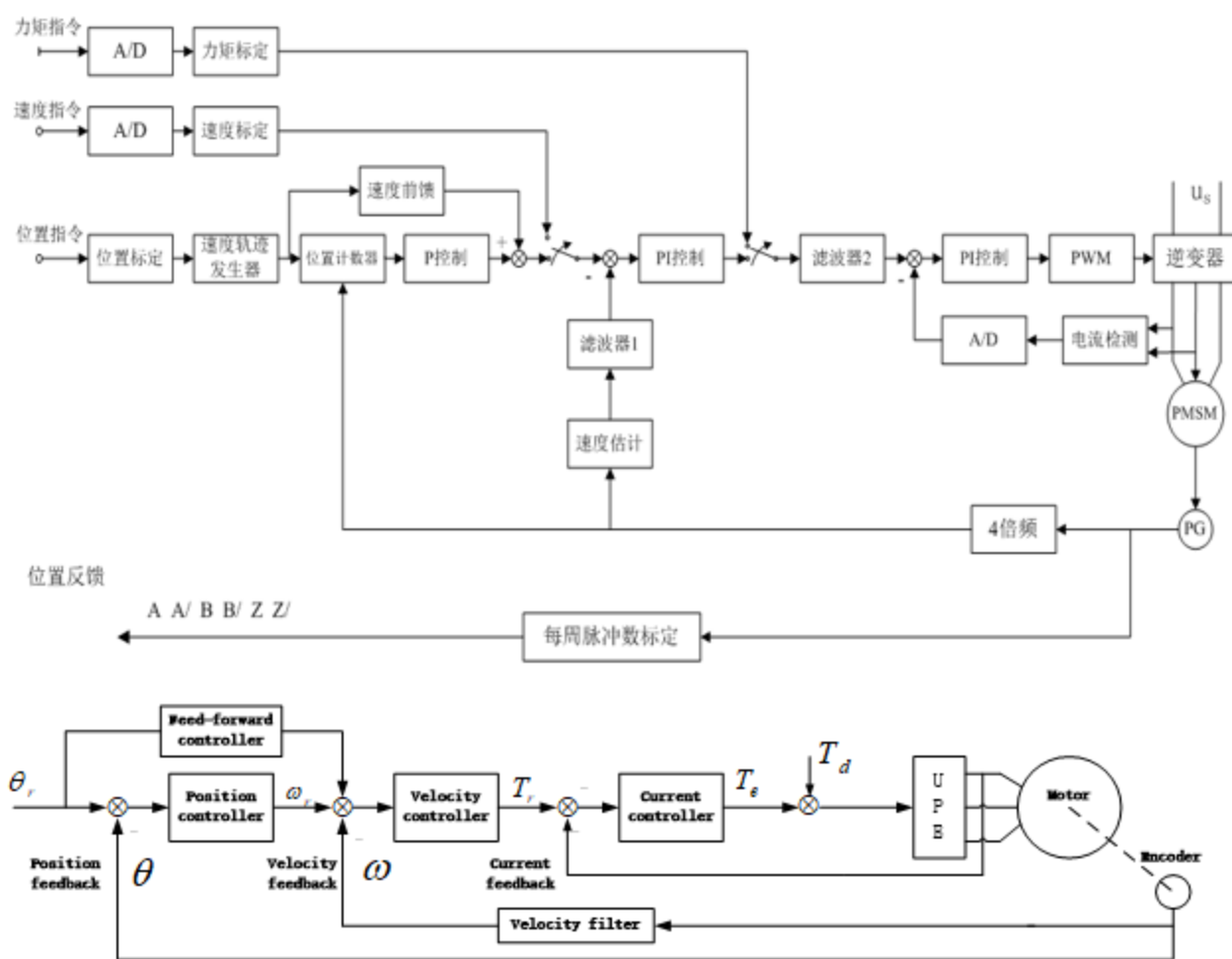
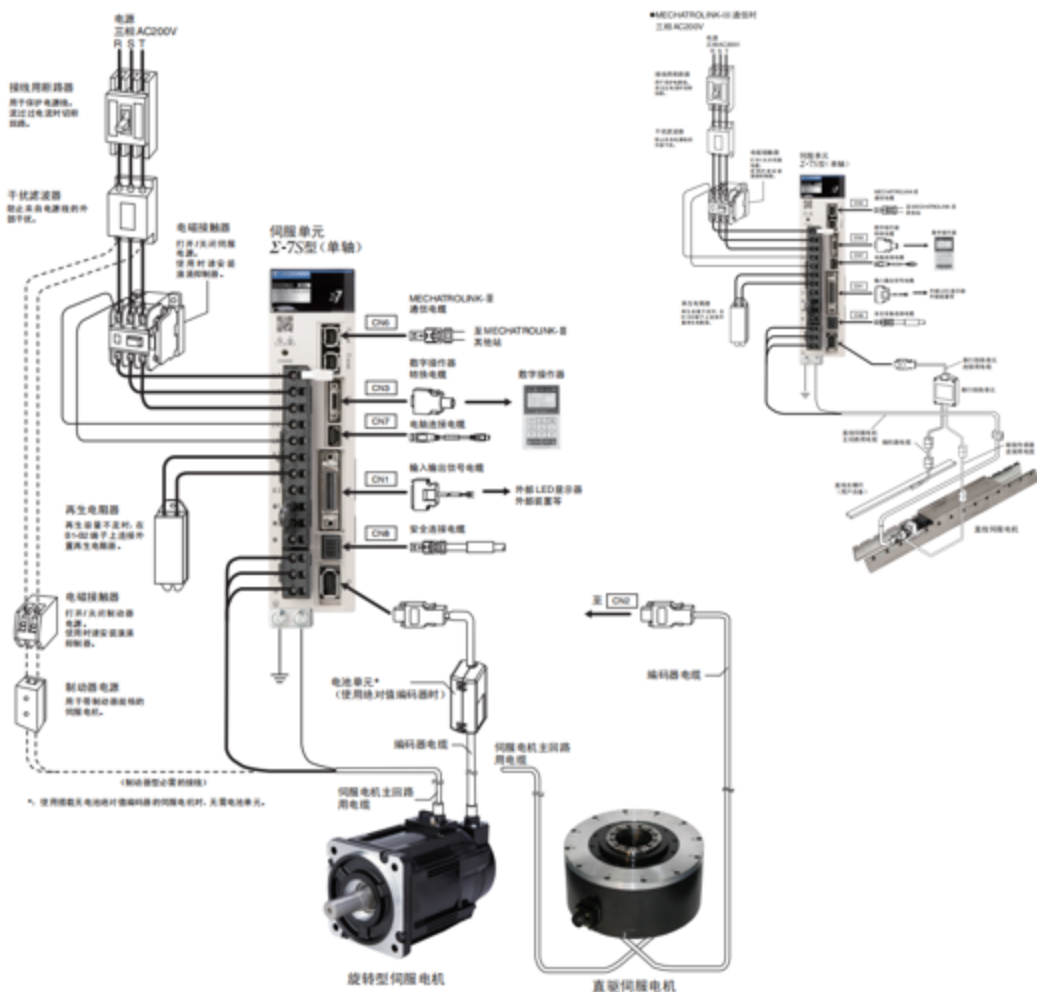
图 6-9 两种驱动模式的波形



# 无刷直流电机和交流伺服电机小结

思考

4、PMSM电机如何通过电流控制实现位置控制？



## 无刷直流电机伺服电机自测题

填空题：

- 1) 理想无刷直流电机的反电势波形一般是梯形波，理想的驱动电流波形是方/矩形波；而永磁同步电机的反电势波形一般是正弦波，相应理想的驱动电流波形是正弦波。上述两种电动机，一般需要配装有较高分辨率和精度的转子位置传感器的是正弦波驱动的电机。
- 2) 无刷直流电动机由电机本体，位置传感器和电子控制与开关电路组成。
- 3) 伺服电动机在工业现场可以实现位置，速度和力矩控制。



# 致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

特别参考：部分伺服电机资料来自于 安川电机（中国）官网

<https://www.yaskawa.com.cn/>

