

## 第五章 伺服驱动系统





## 5.3 直流电机

### 直流电机的优点：

- (1) 调速性能好：调速范围广，易于平滑调节。
- (2) 起动、制动转矩大，易于快速起动、停车。
- (3) 易于控制。

### 应用：

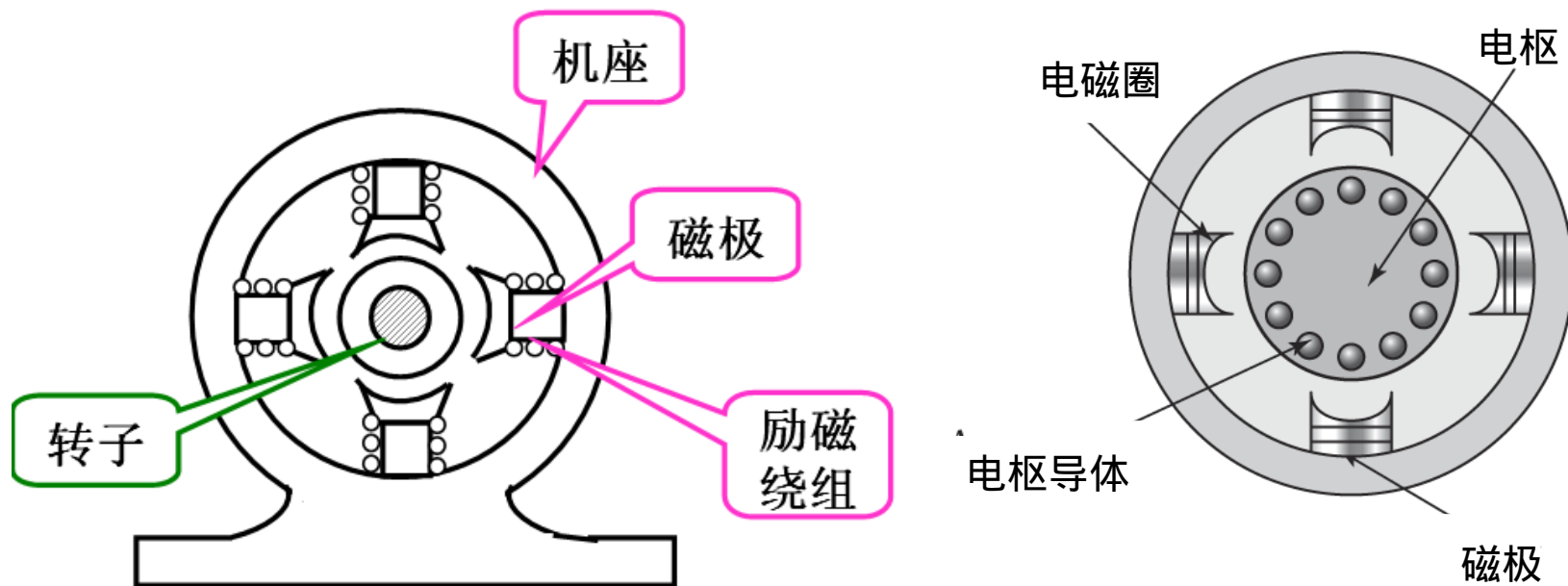
- (1) 轧钢机、电气机车、无轨电车、中大型龙门刨床等调速范围大的大型设备。
- (2) 用蓄电池做电源的地方，如汽车、拖拉机等。
- (3) 家庭：电动缝纫机、电动自行车、电动玩具。





# (1) 直流电机的构成

直流电机由定子、转子和机座等部分构成。



励磁式直流电动机结构





## 1. 转子（又称电枢）

由铁芯、绕组（线圈）、换向器组成。

## 2. 定子

定子的分类：

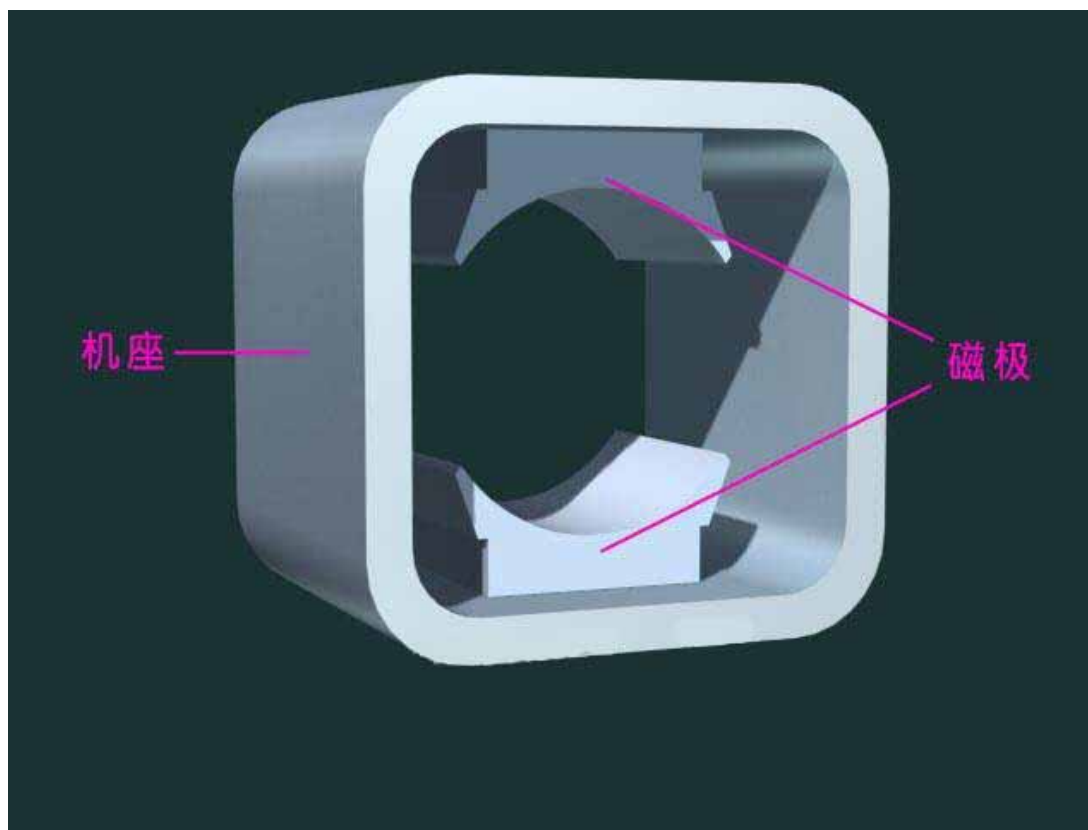
- 永磁式：由永久磁铁做成。
- 励磁式：磁极上绕线圈，然后在线圈中通过直流电，形成电磁铁。

**励磁的定义：**磁极上的线圈通以直流电产生磁通，称为励磁。



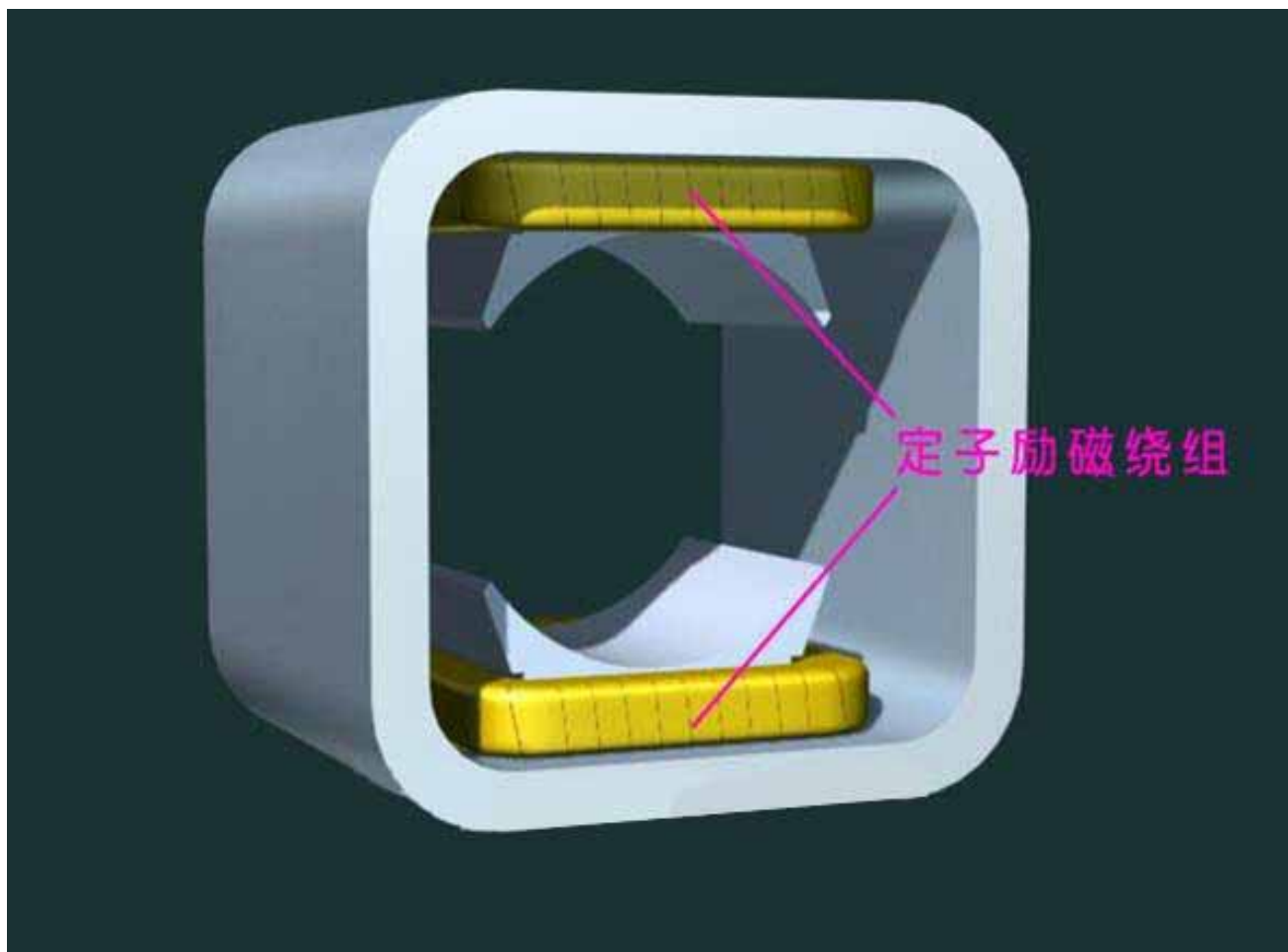


直流电动机模型的定子有一对主磁极，安装在机座上，机座也叫磁轭，是主磁极磁力线的通路。磁极与磁轭都是用导磁良好的钢铁制成。



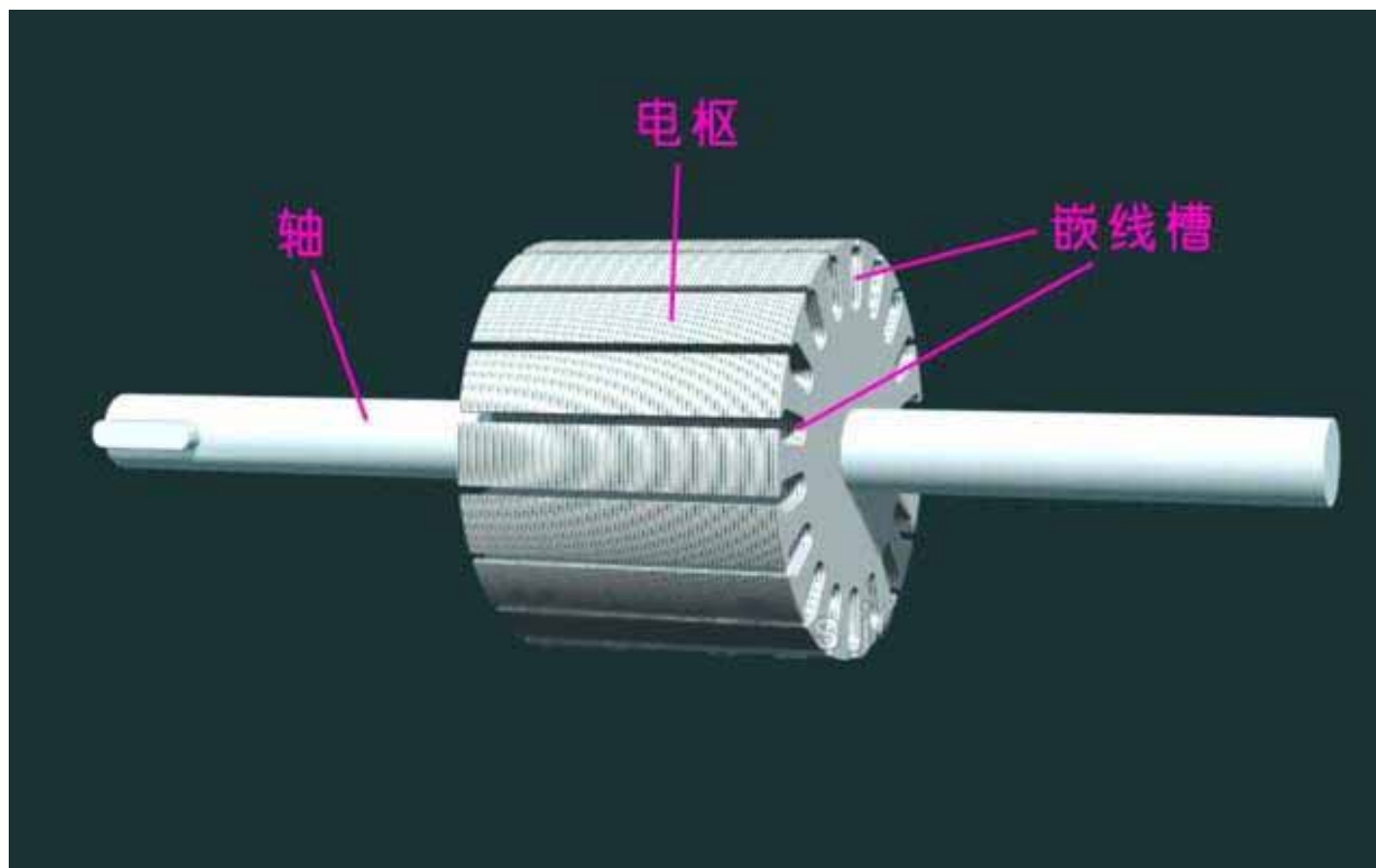


在主磁极上有励磁绕组，绕组通电后就会在两个主磁极间产生主磁场。



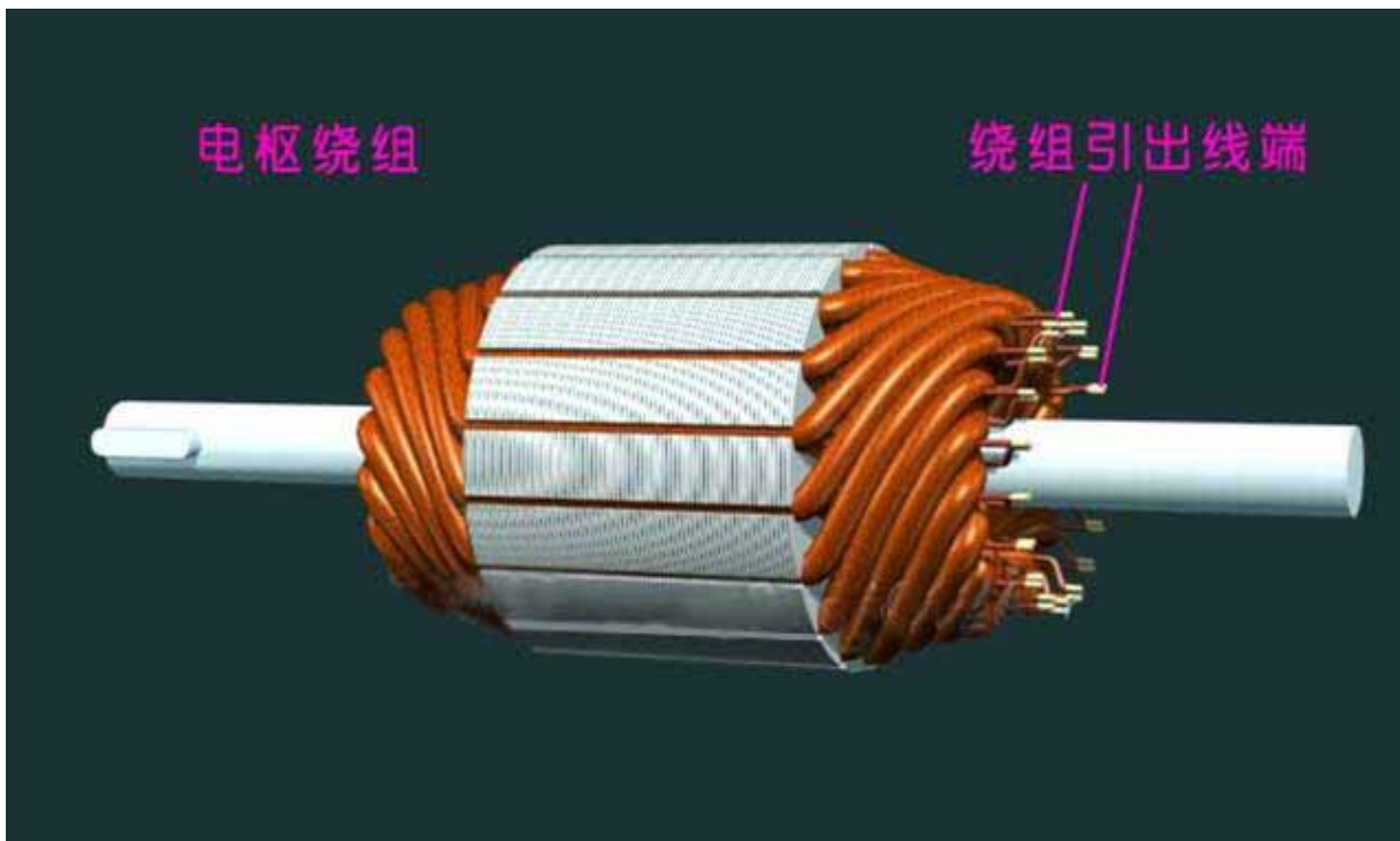


直流电机转子也称为电枢，电枢铁芯由导磁良好的硅钢片叠成，铁芯圆周均匀分布18个槽，用来嵌放电枢绕组。电枢铁芯直径比主磁极间距离略小点。





把绕制好的电枢绕组嵌入电枢槽内，每个绕组都有一对引出线。



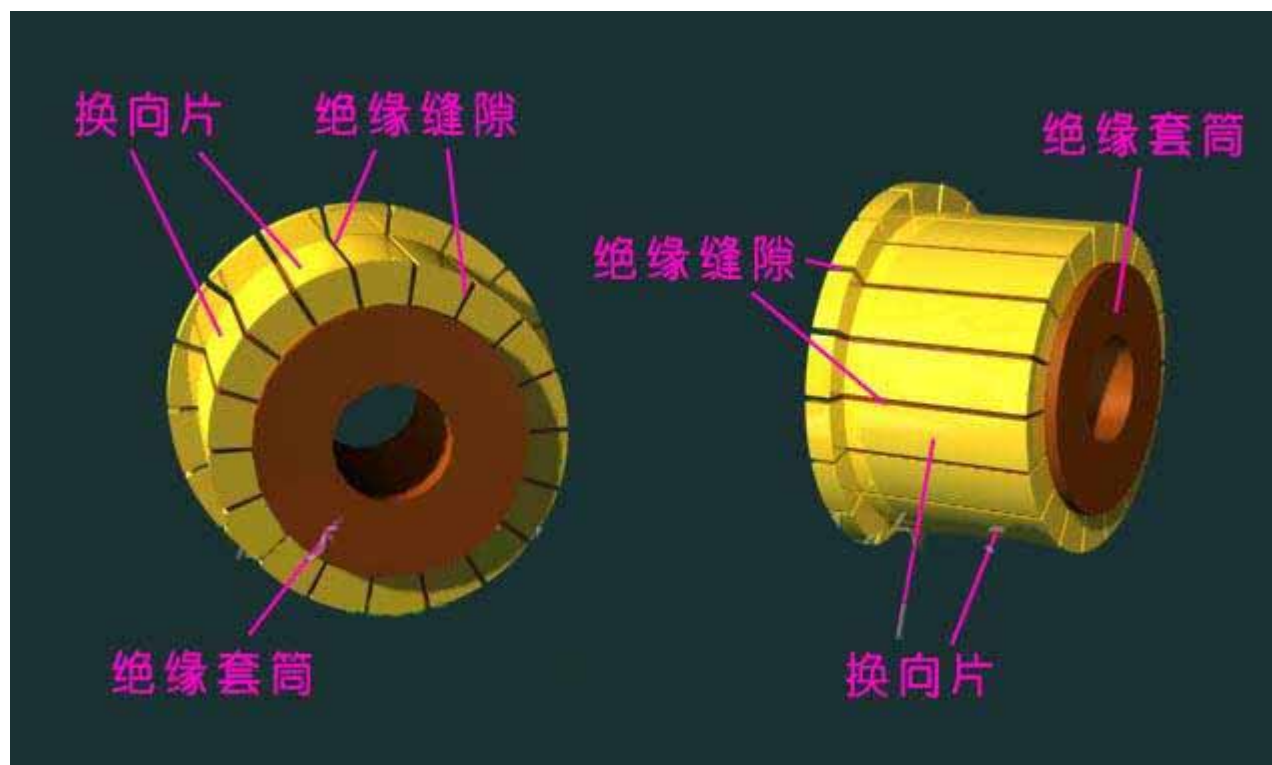




换向器有18个铜制换向片，排成圆筒形，

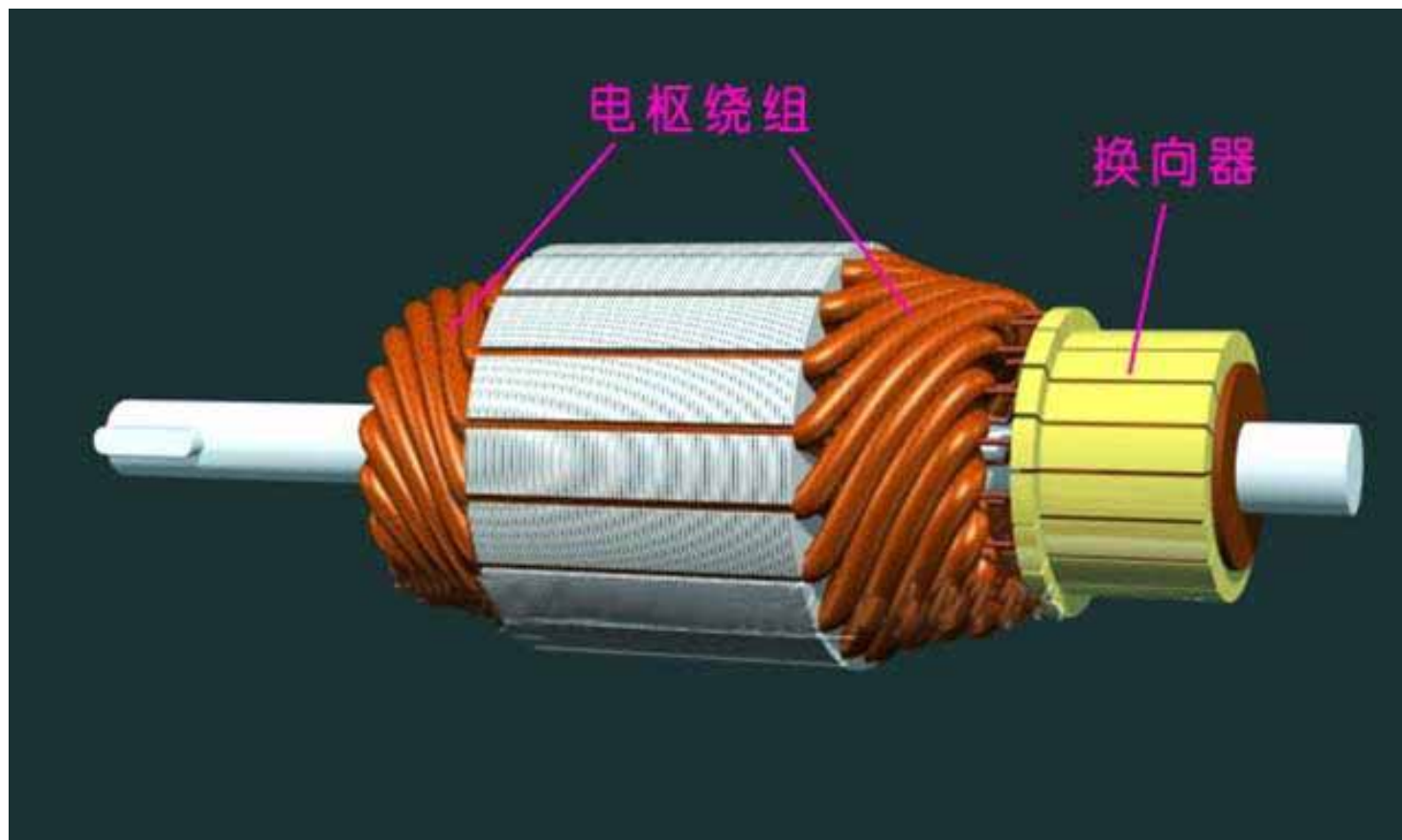
固

定在一个绝缘套筒上，换向片间留有缝隙，相互绝缘。图上用两个角度展示换向器的外观。



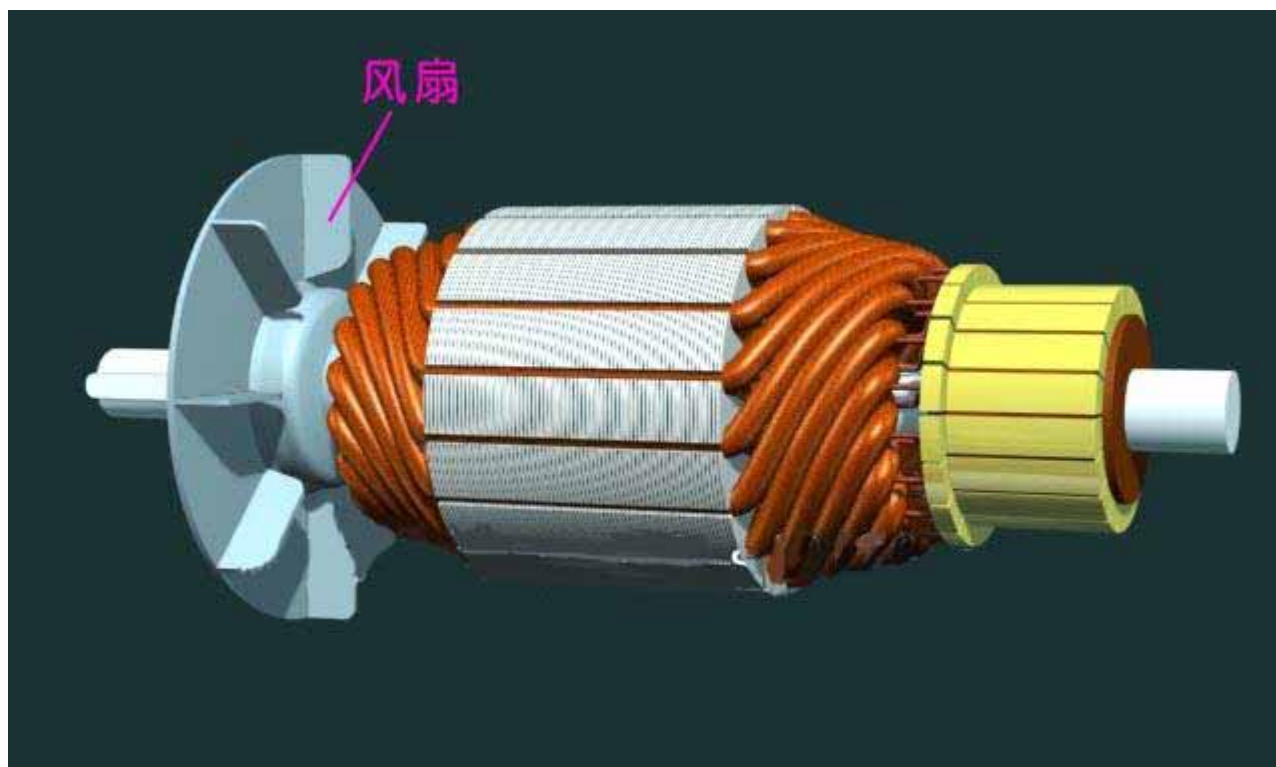


把换向器安装在电枢转轴上，把电枢绕组的引出线按规律焊接在换向片上。





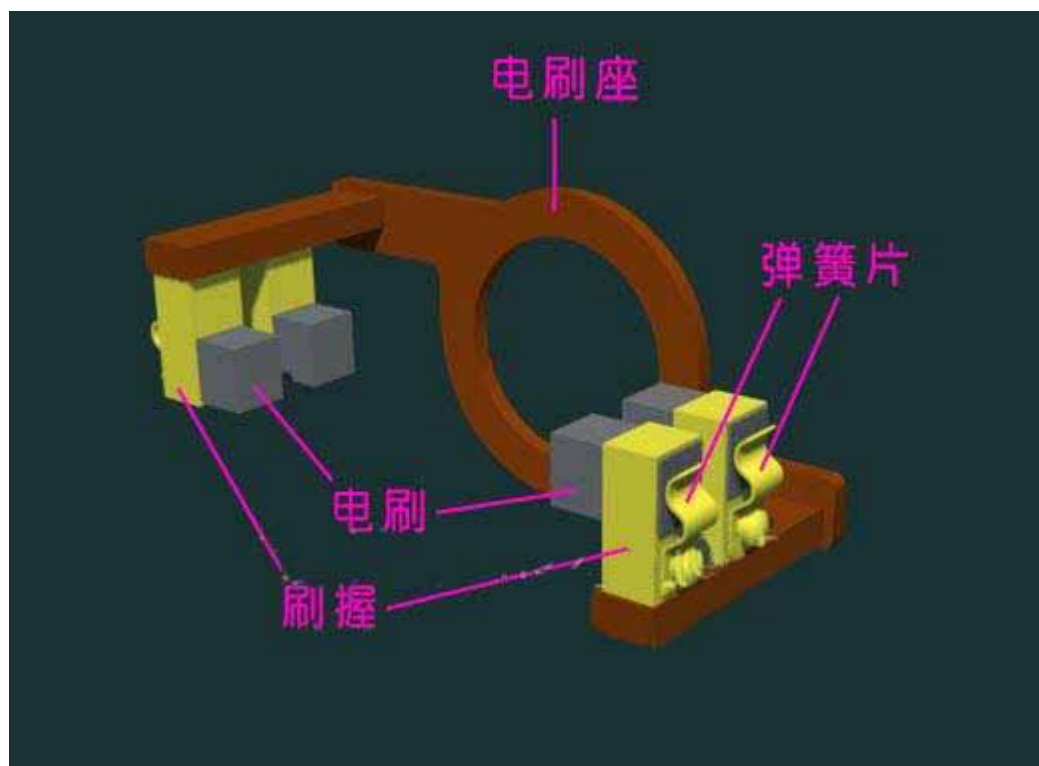
为散去电机发出的热量，还要在电枢转轴上安装风扇。





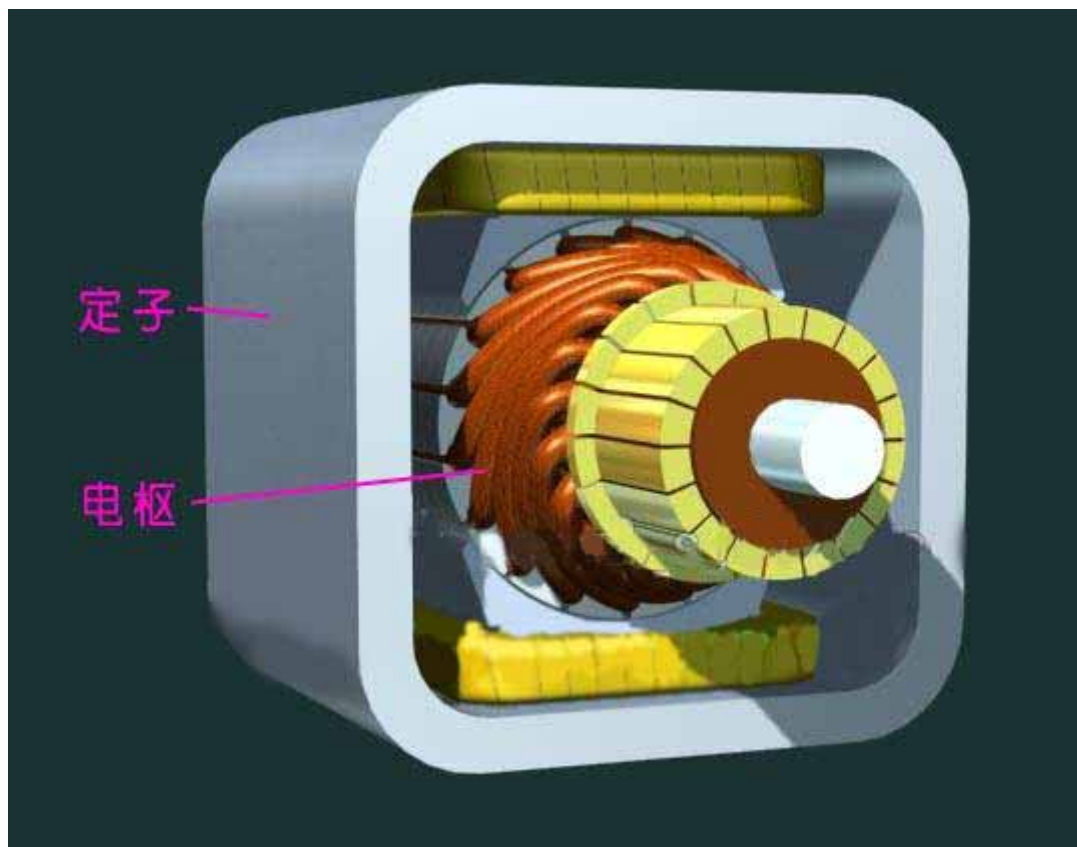
电枢绕组通过电刷供电，电刷的主要成份是石墨，导电良好又润滑。电刷固定在电刷座窝内，由弹簧片压向换向器。

本模型有两个主磁极，故有两个电刷组，每个电刷组由两个电刷构成。电刷组固定在电刷座上，构成电刷装置。



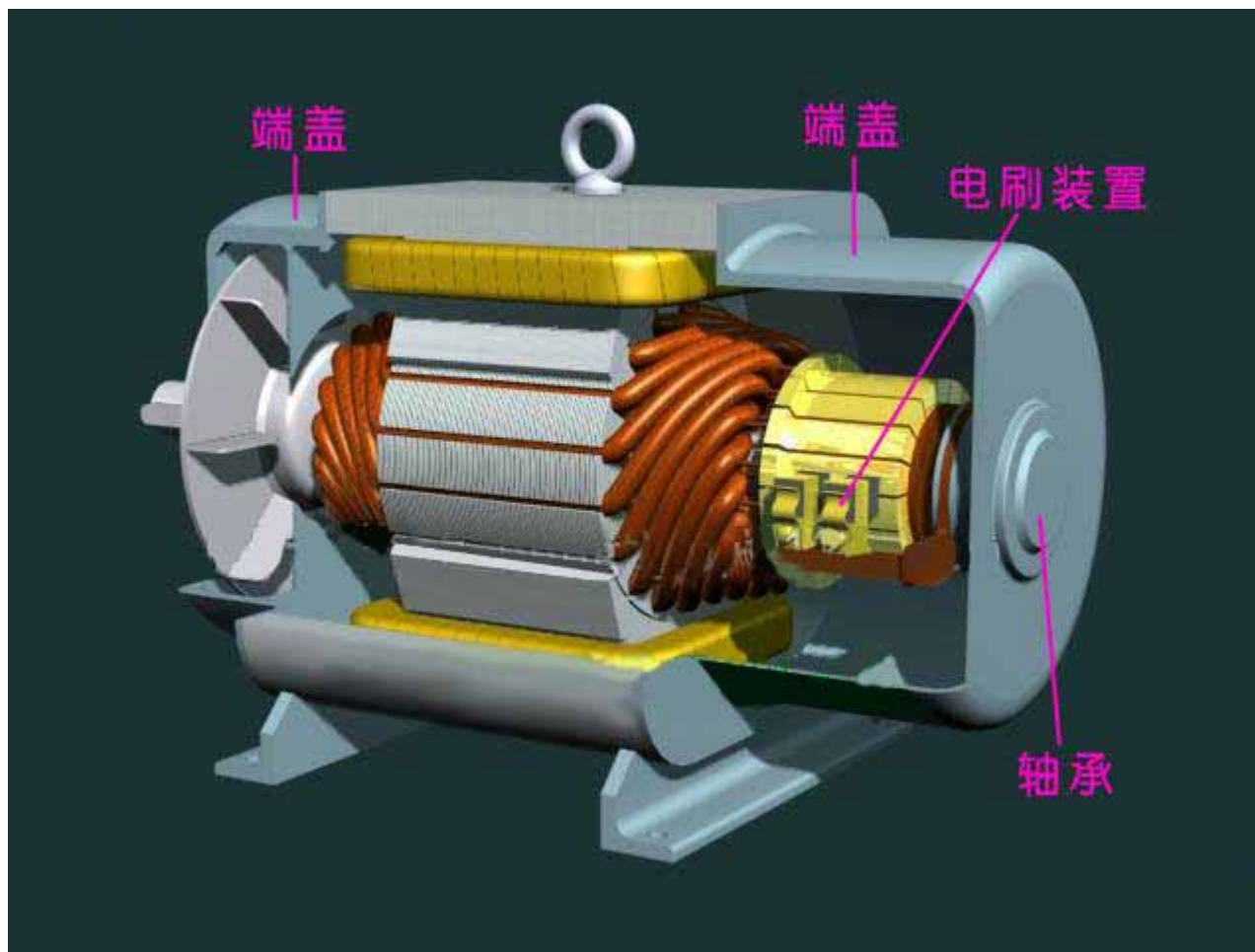


## 把电枢插入定子主磁极间



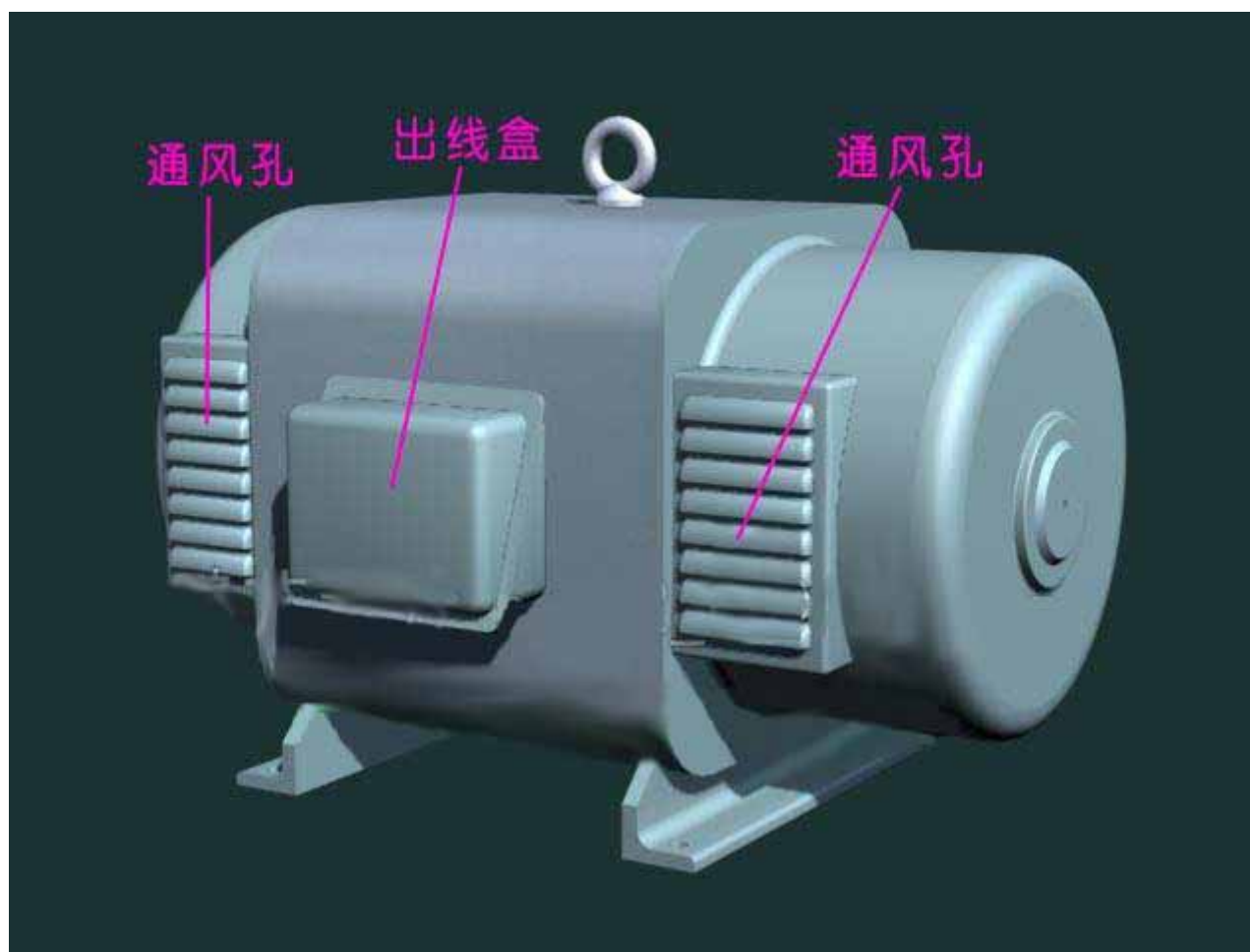


在电机两侧装上端盖（剖面），端盖上有轴承，支持电枢的旋转。电刷装置也固定在端盖上。





在电机端盖上有散热通风孔，在机座上有出线盒。





## (2) 直流电机的额定值

- 直流电机的额定值主要有下列几项：
- (1) **额定功率**：是指电机的输出功率，对发电机系指出线端输出的电功率。对电动机系指转轴上输出的机械功率。单位为W或kW。
- (2) **额定电压**：是指在额定工作条件下，电机出线端的平均电压。对于电动机是指输入额定电压，对于发电机是指输出额定电压。单位为V。
- (3) **额定电流**：是指电机在额定电压下，运行于额定功率时的电流值。单位为A。
- (4) **额定转速**：是指对应于额定电压、额定电流、电机运行于额定功率时所对应的转速。单位为r/min。
- (5) **额定转矩**：是在额定电压、额定负载下，电动机转轴上产生的电磁转矩称为电动机的额定转矩。单位为N.M。





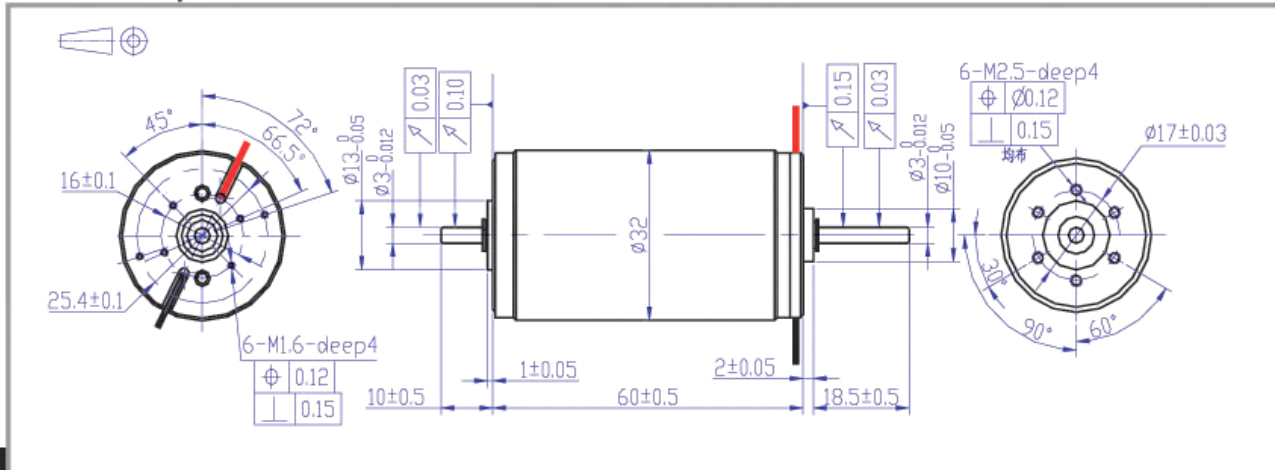


# 系列: 32SYK60...

Φ32mm, 石墨电刷, 5~11W

Φ32mm Graphite Brushes 5~ 11W

proMOTION



Graphite Brushes

## 电机数据 motor data

		9.54W	29.8W	79.4W
型号: 32SYK60. ... G. T. 01		24 .40	24 .75	36. 100

额定电压时的参数: (Values at nominal voltage)

1	额定电压	Nominal voltage	V	24	24	36
2	空载转速	No load speed	rpm	4000	7500	10000
3	空载电流	No load current	A	0.05	0.1	0.1
4	额定转速	Nominal speed	rpm	3100	4850	8600
5	额定转矩	Nominal torque	g.cm	300	600	900
6	额定电流	Nominal current	A	0.6	2.2	3
7	堵转转矩	Stall torque	g.cm	1410	1730	5400
8	起动电流	Starting current	A	2.4	5.7	15.3
9	最大效率	Max. efficiency	%	73	75	84

特性: (Characteristics)

10	电机电阻	Terminal resistance	Ohm	10	4.2	2.35
11	转矩常数	Torque constant	mNm/A	57.8	29.8	79.3
12	速度常数	Speed constant	V/1Krpm	6.05	3.12	3.65
13	最大输出功率	Max.power output at nominal voltage	w	14.4	33	138.5





## 技术说明

- 轴向间隙 0~0.2mm
- 滚珠轴承最大载荷  
轴向(动态) 1.0N  
径向(法兰外5mm) 2.0N  
最大允许安装力(静态) 30N
- 滑动轴承径向间隙
- 滚珠轴承径向间隙 0.025mm
- 环境温度范围: -25~+150℃  
相对湿度范围: <90%(25℃)
- 最高转子温度 150℃
- 重量 160g
- 表中数据均为标称值。

## 组合体系

行星轮减速箱

配置型号:

P32 ;P36

单级速比:

P32:  
1/3. 714 1/4. 8

P36:

1/4. 75 1/6

定轴系齿轮箱

配置型号:

37JB

速比:

1/8 1/10 1/20

1/30 1/43 1/50

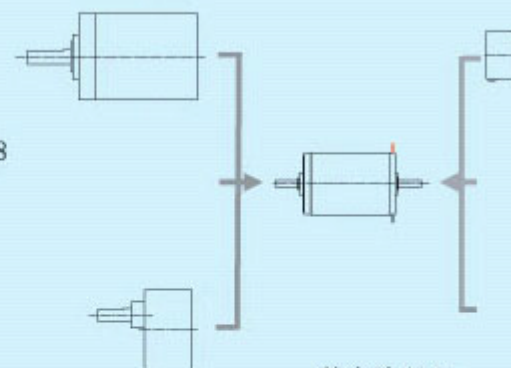
1/63 1/80 1/90

1/102 1/130 1/147

1/186 1/270 1/386

1/560 1/1146 1/1230

1/2460



数字编码器

型号: HKT22

输出波型: 方波

输出相: AB两相

响应频率: 0~30kHz

输出电压: -0.5V~Vcc

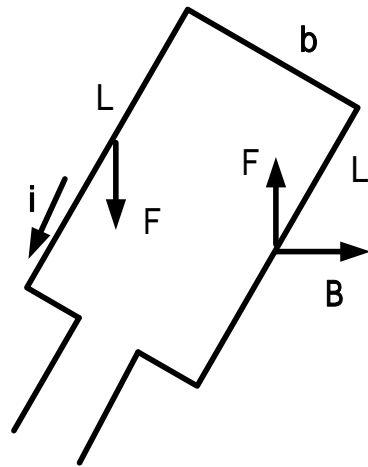
脉冲数: 100、120、  
200、

250、256、300

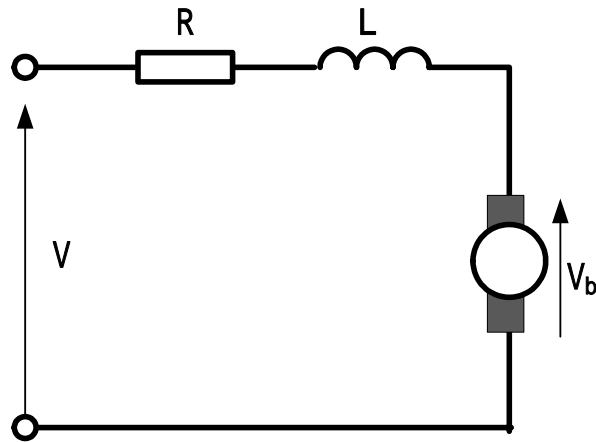




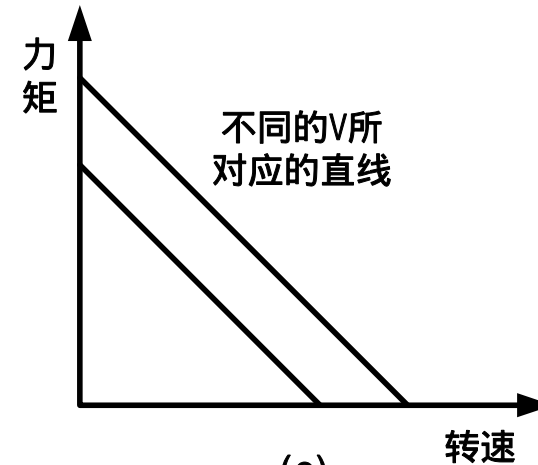
## (3) 直流电机的数学模型



(a)



(b)



(c)

直流电机:

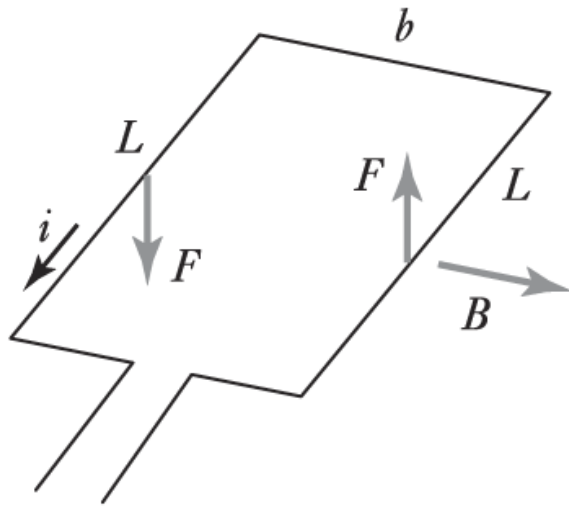
(a) 转子上的力, (b) 等效电路, (c) 力-速度特性曲线





# 数学模型

## 电枢上的力矩



$$T = BbLi = \Phi i$$

是每个电枢绕组的磁通量。

实际上有不止一个电枢绕组，L为导体有效长度，b为极距，B一个主磁极下的平均气隙磁通密度

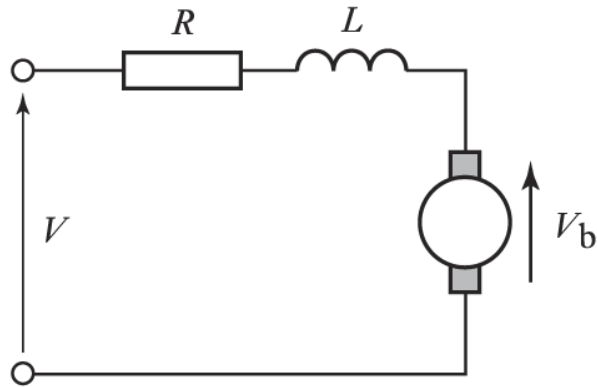
$$T = k_t i \quad i = K_t \dot{\theta}$$

$K_t$  是转矩常数。





# 数学模型



反向电动势  $V_b$

$$V_b = k_v \omega = K_v \omega$$

$K_v$  反向电动势常数

$$i = \frac{V - v_b}{R} = \frac{V - k_v \Phi \omega}{R} = \frac{V - K_v \omega}{R}$$

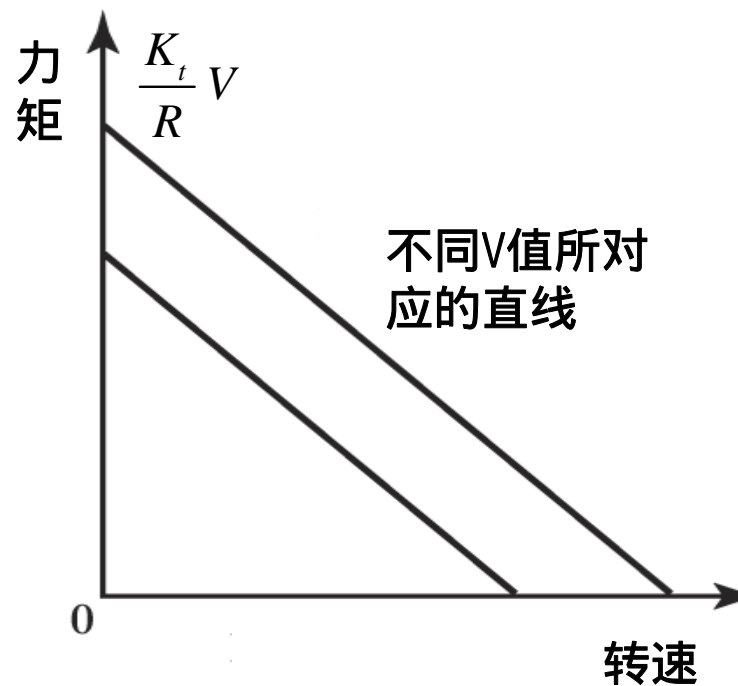
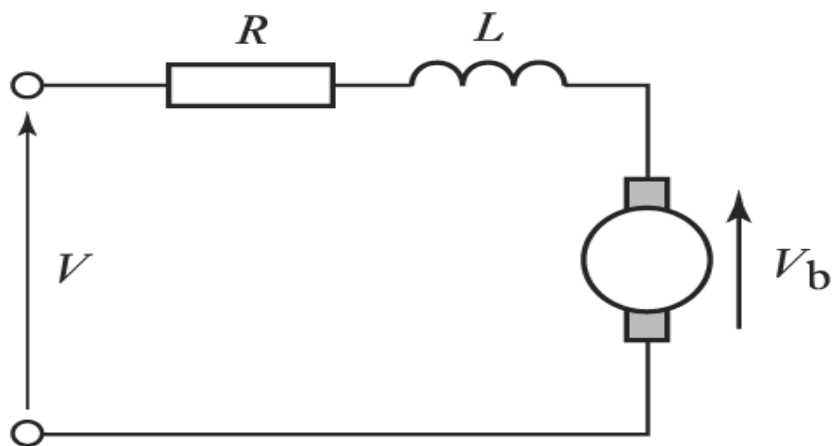
$$T = k_t \Phi i = \frac{k_t \Phi}{R} (V - k_v \Phi \omega) = \frac{K_t}{R} (V - K_v \omega)$$





# 数学模型

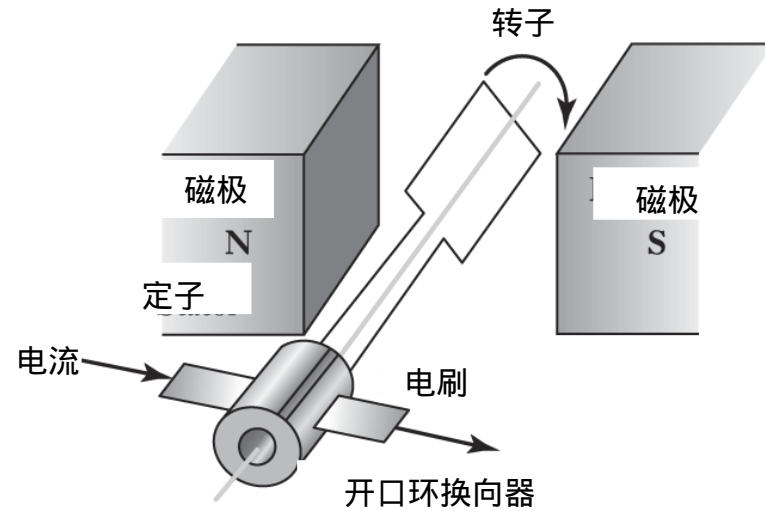
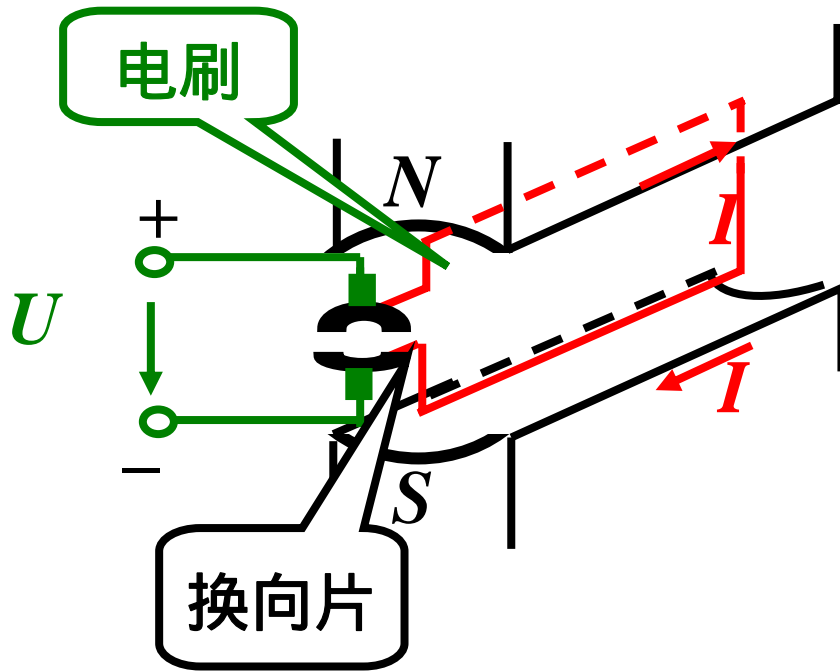
$$T = k_t \Phi i = \frac{k_t \Phi}{R} (V - k_v \Phi \omega) = \frac{K_t}{R} (V - K_v \omega)$$

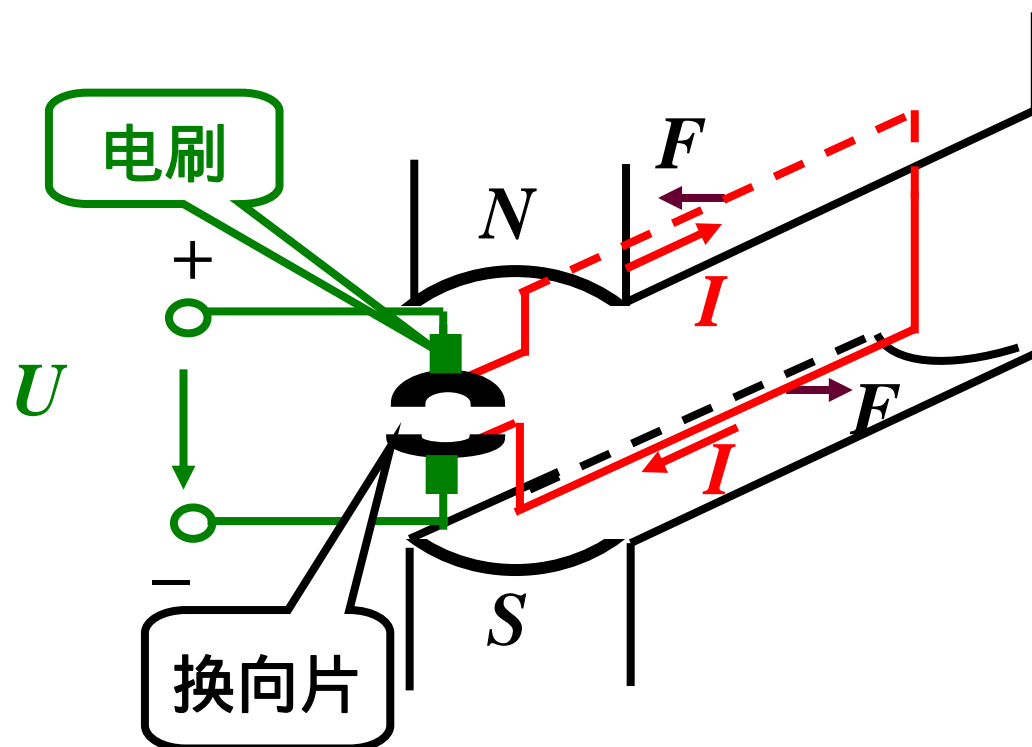




# (4) 有刷直流电机

工作原理



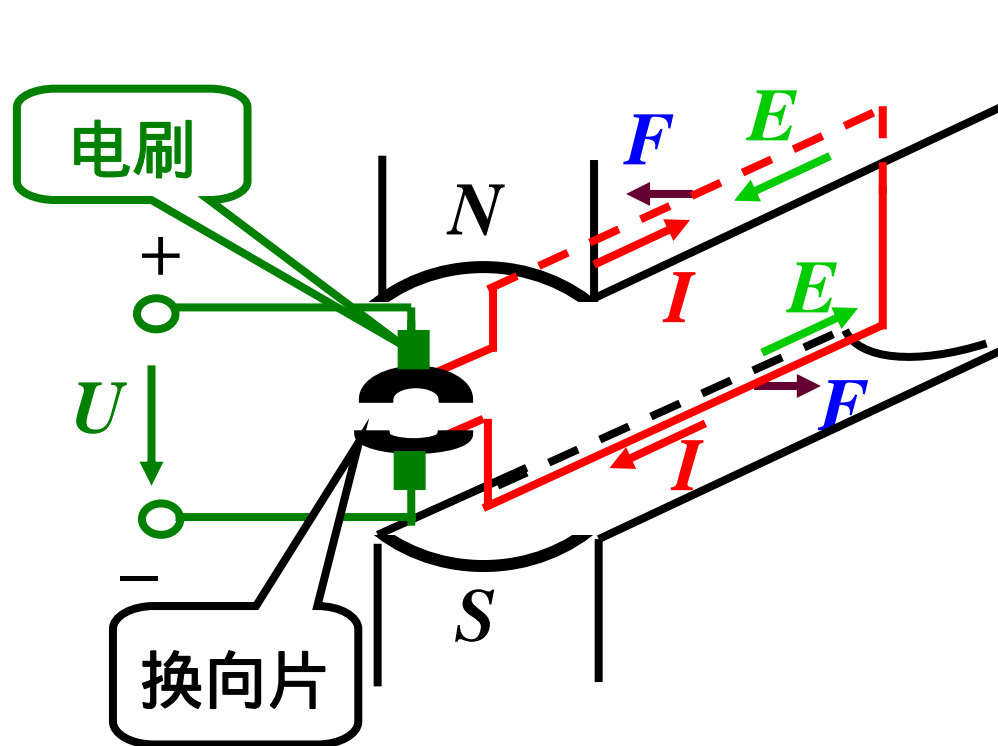


**注意：**换向片和电源固定联接，线圈无论怎样转动，总是上半边的电流向里，下半边的电流向外。电刷压在换向片上。

由左手定则，通电线圈在磁场的作用下，使线圈逆时针旋转。







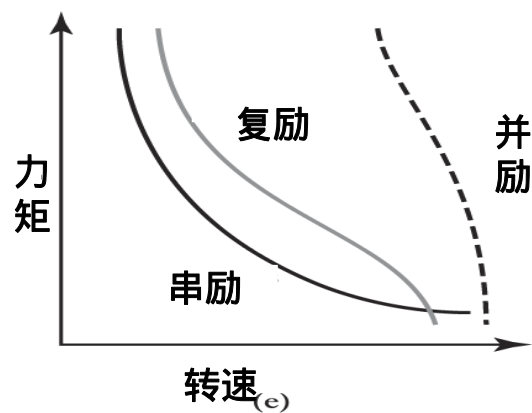
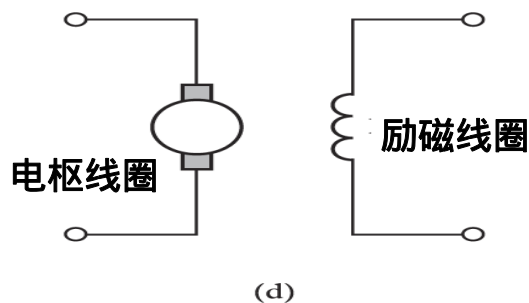
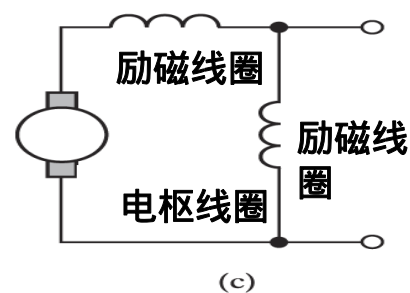
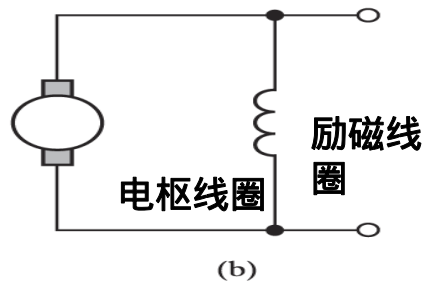
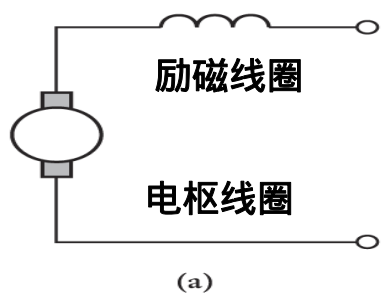
由右手定则，线圈在磁场中旋转，将在线圈中产生感应电动势，感应电动势的方向与电流的方向相反。





## (5) 带励磁线圈的直流电机

根据励磁线圈和转子绕组的联接关系，励磁式的直流电机又可细分为：



(a) 串励电机, (b) 并励电机, (c) 复励电机, (d) 他励电机, (e) 力-转速特性曲线



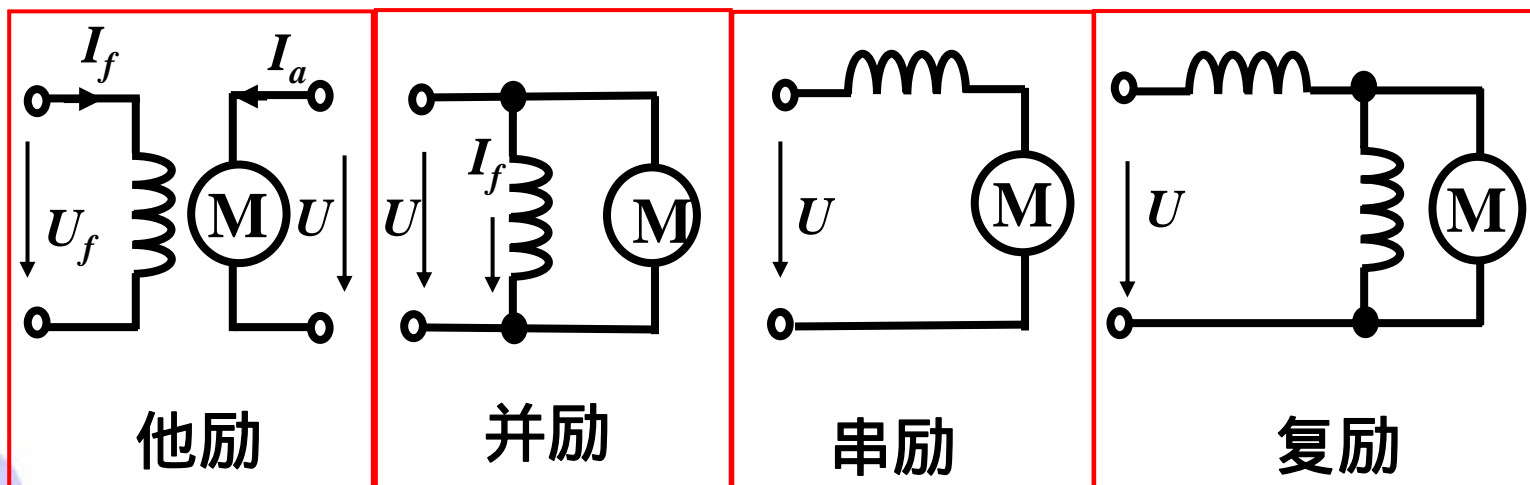


**他励电动机**：励磁线圈与转子电枢的电源分开。

**并励电动机**：励磁线圈与转子电枢并联到同一电源上。

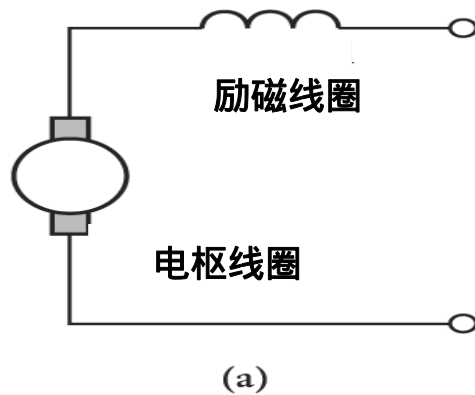
**串励电动机**：励磁线圈与转子电枢串联接到同一电源上。

**复励电动机**：励磁线圈与转子电枢的联接有串有并，接在同一电源上。





# 带励磁线圈的直流电机



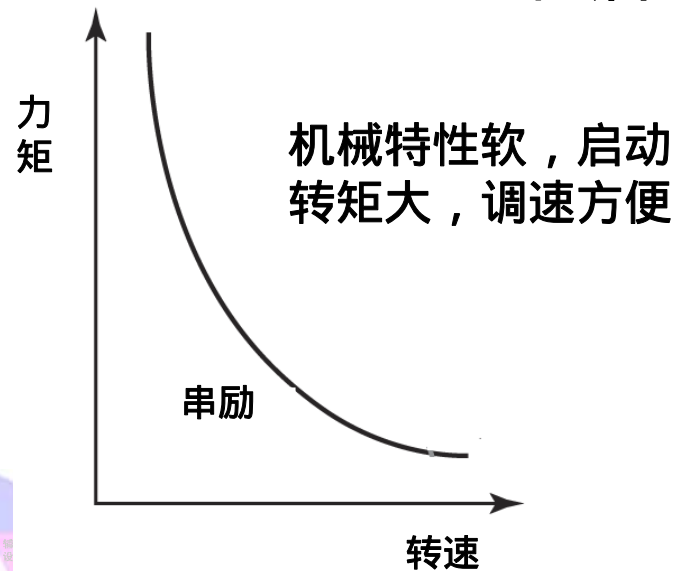
电枢和励磁线圈串联,从而有相同的电流

$$\rightarrow T = k_i \Phi i_a = K i_a$$

$$\omega = 0, i_a = V/R$$

$$T = K i_a = K \left( \frac{V}{R} \right)$$

在启动,

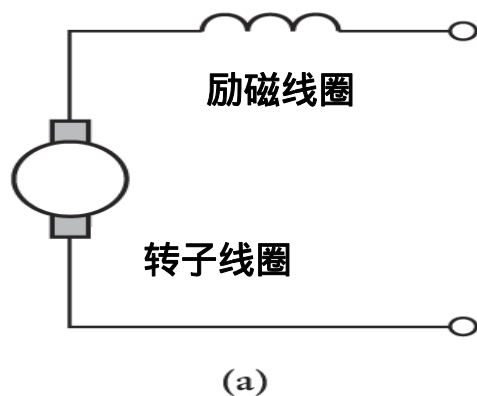


这种电机电阻小, 因此具有高启动转矩、高空载速度。





# 带励磁线圈的直流电机



因为  $Ri$  很小

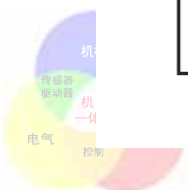
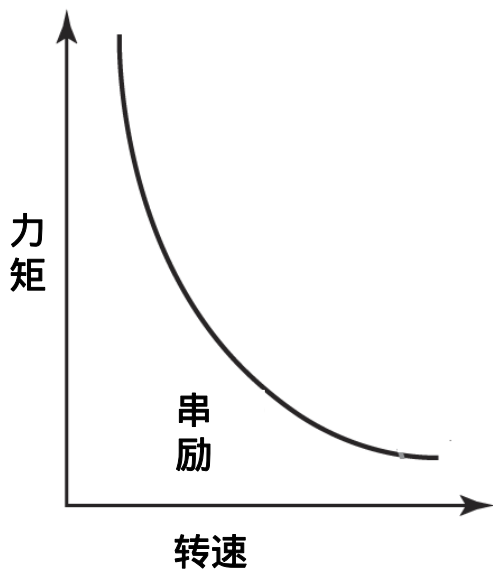
$$V = v_b + Ri \approx v_b$$

因为  $v_b = k_v \Phi \omega$  和  $\Phi$  与  $i$  成比例

所以  $V$  与  $i\omega$  成比例

$$\Rightarrow V = k_v i \omega$$

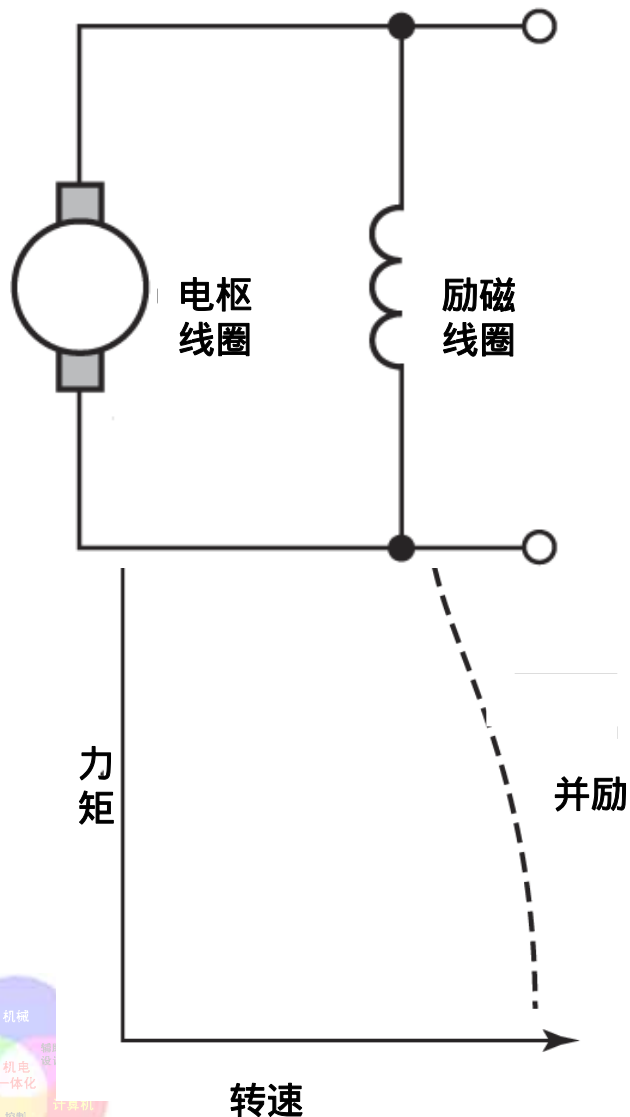
$V$  是常数，所以速度和电流成反比



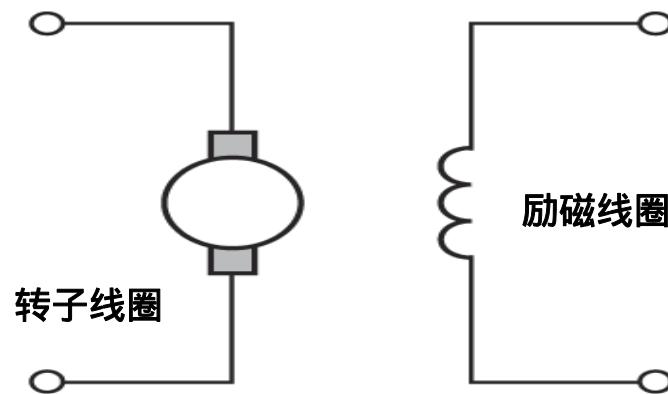


# 带励磁线圈的直流电机

它提供最低的启动转矩和一个低得多的空载速度，具有良好的调速

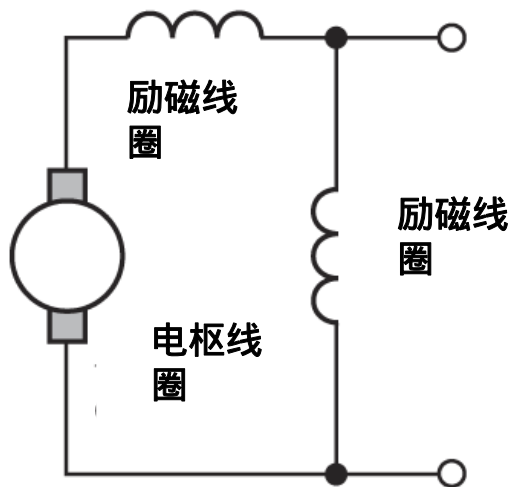


机械特性硬，启动转矩小，调速性能好

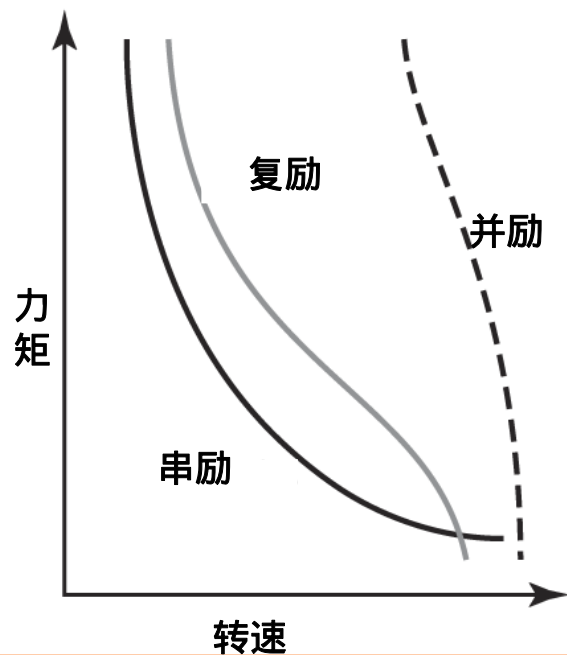
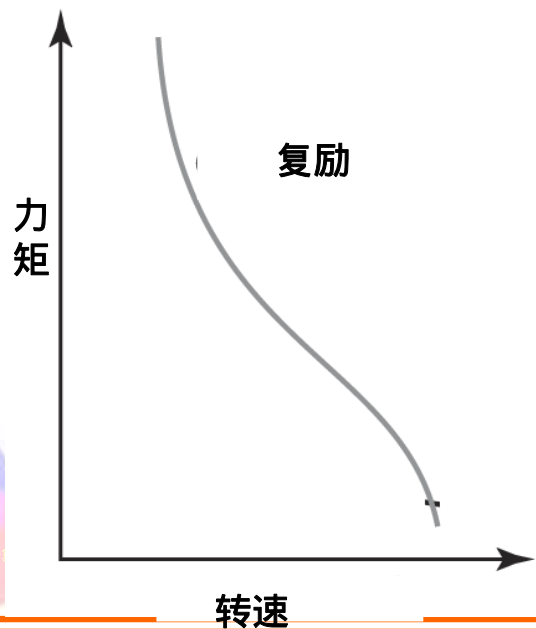




# 带励磁线圈的直流电机



机械特性软硬适中，  
启动转矩大，调速  
方便。





## (6) 直流电动机调速控制

调速方法：改变电枢回路电阻值

电流

改变励磁

电压

改变电枢

混合调速



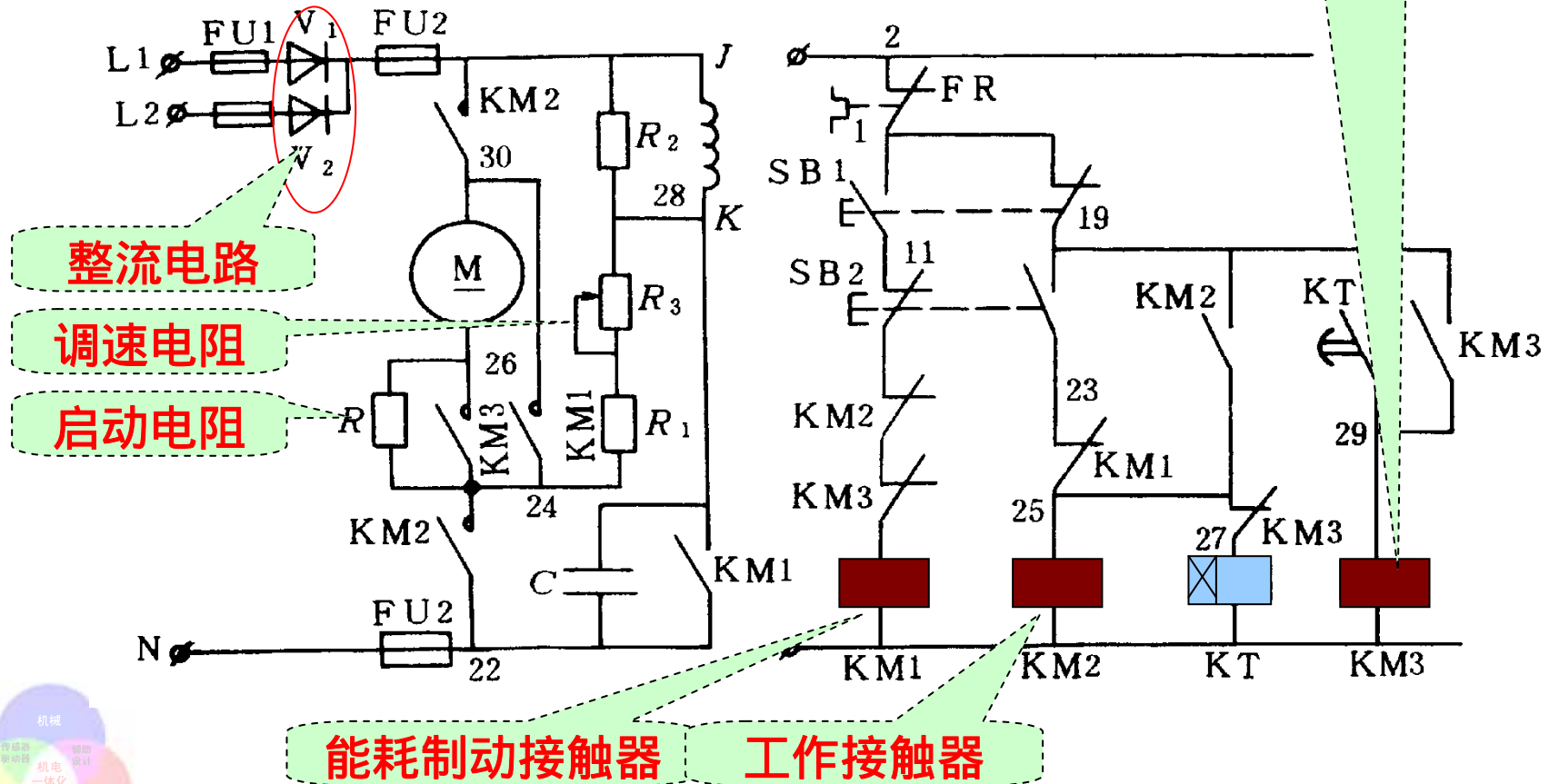




# 直流电动机调速控制

- - 改变励磁电流调速

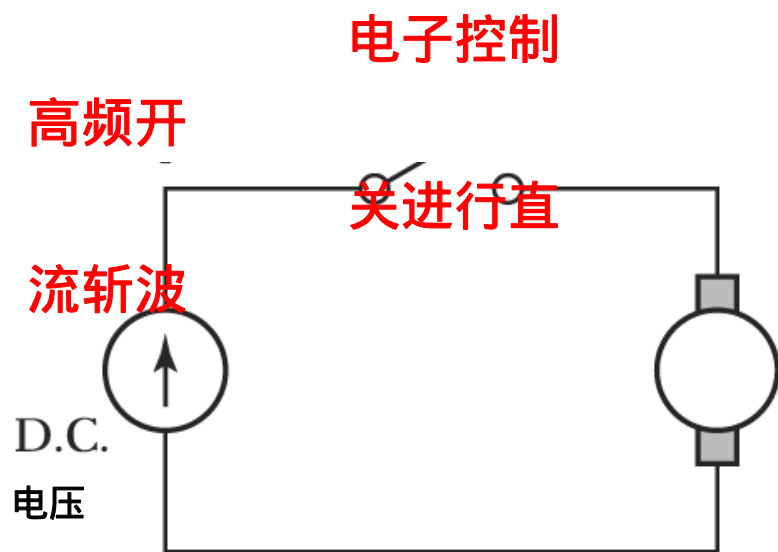
## 电气原理图



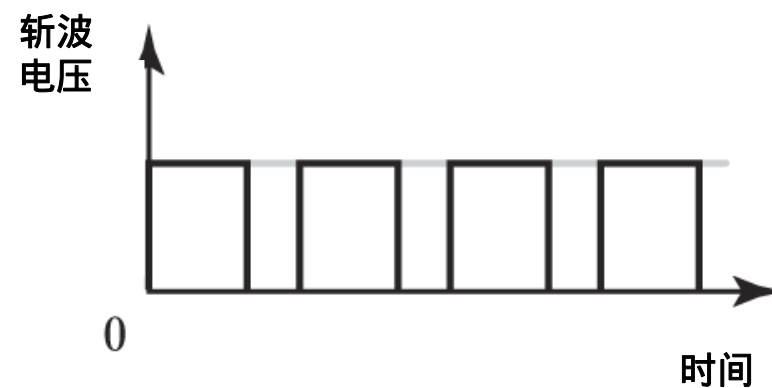
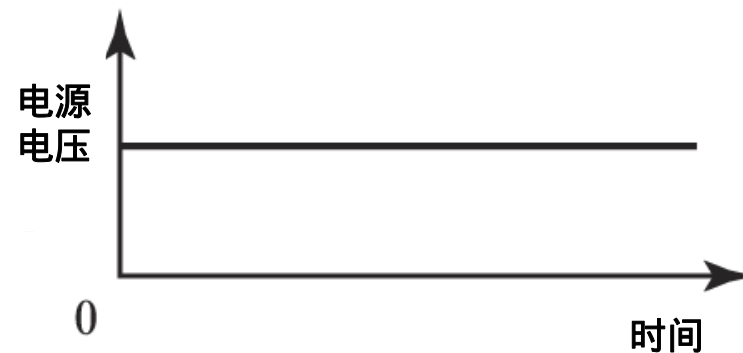
机械  
电气  
计算机  
机电一体化  
控制



# 有刷直流电机的控制



(a) PWM电路原理



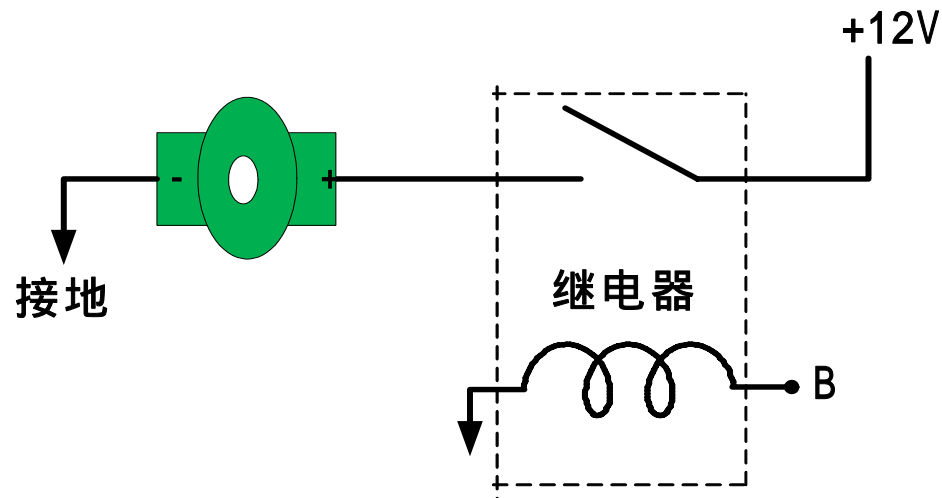
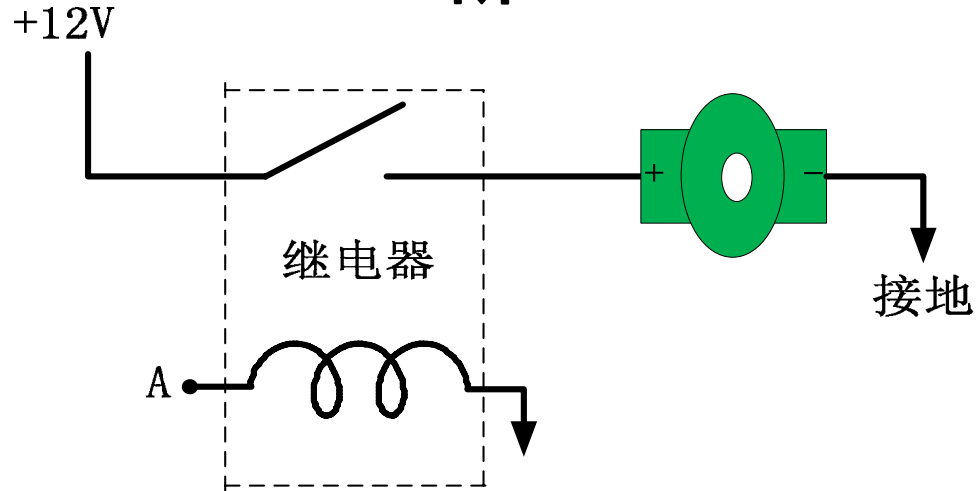
(b) 通过斩波直流电压改变电枢电压





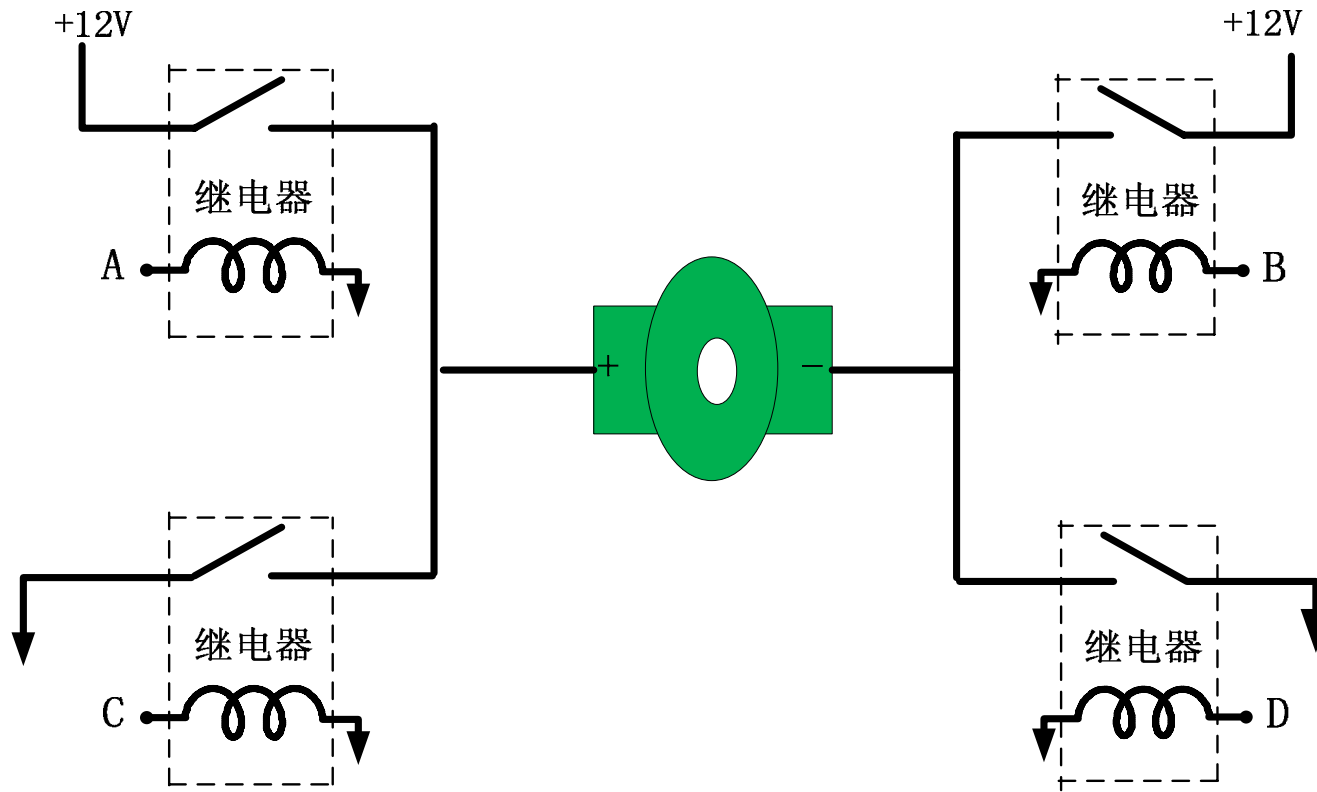
# 控制电机 H-桥

A 功能  
1 正转  
0 停止



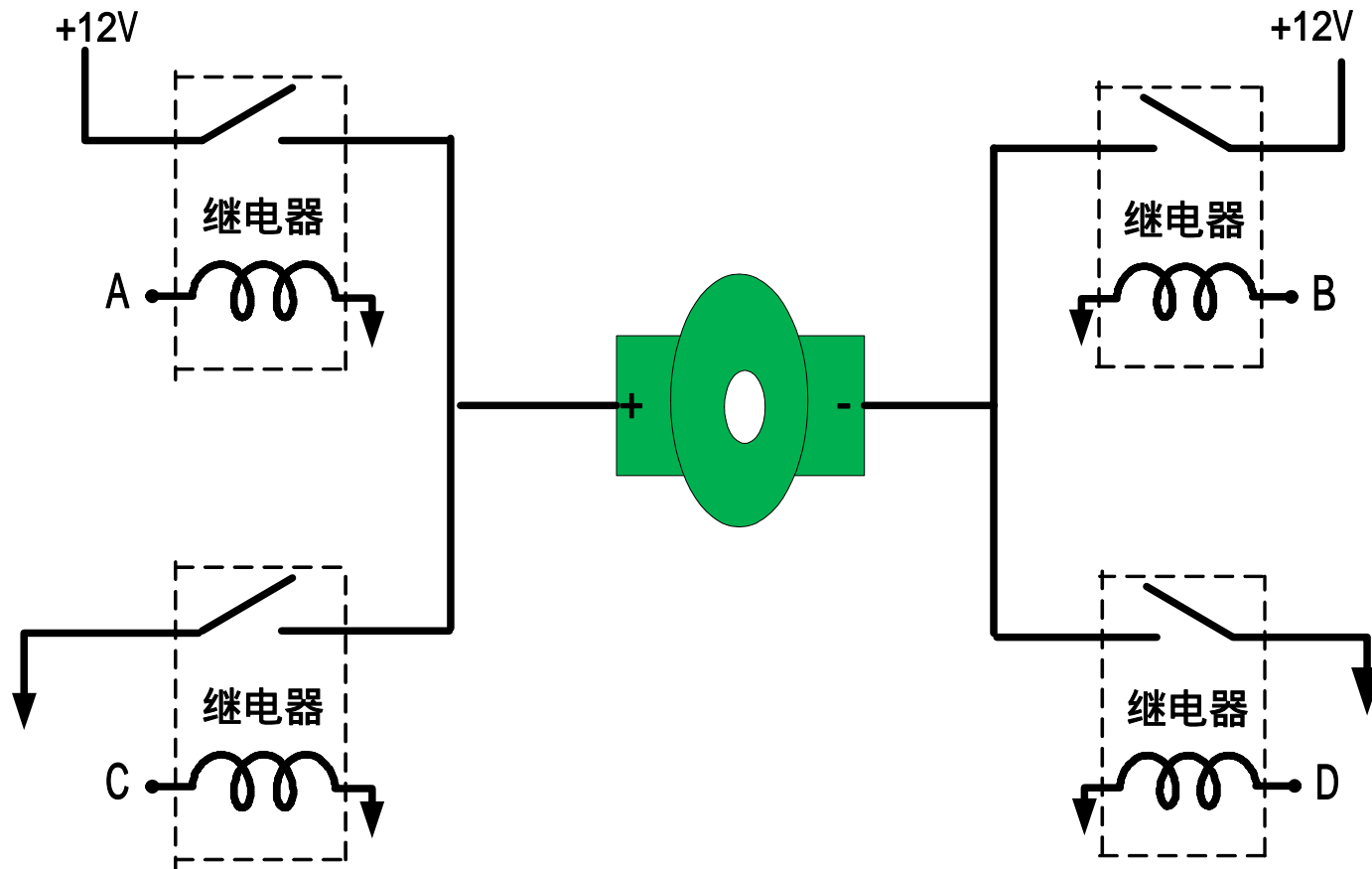
B 功能  
1 反转  
0 停止





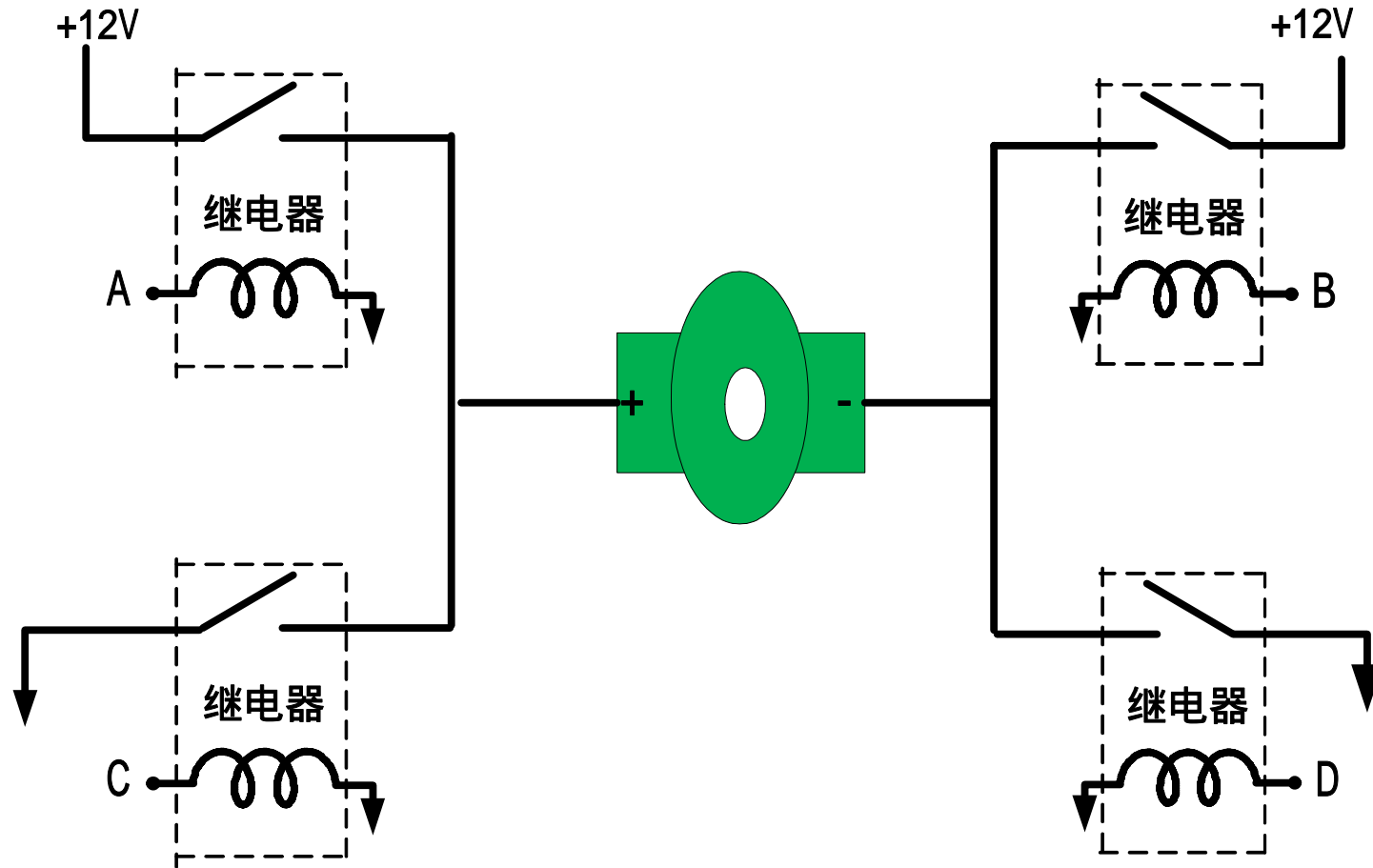
ABCD 功能  
1001 正转  
0110 反转  
1100 抱闸  
0011 抱闸  
1010 熔断测试  
0101 熔断测试





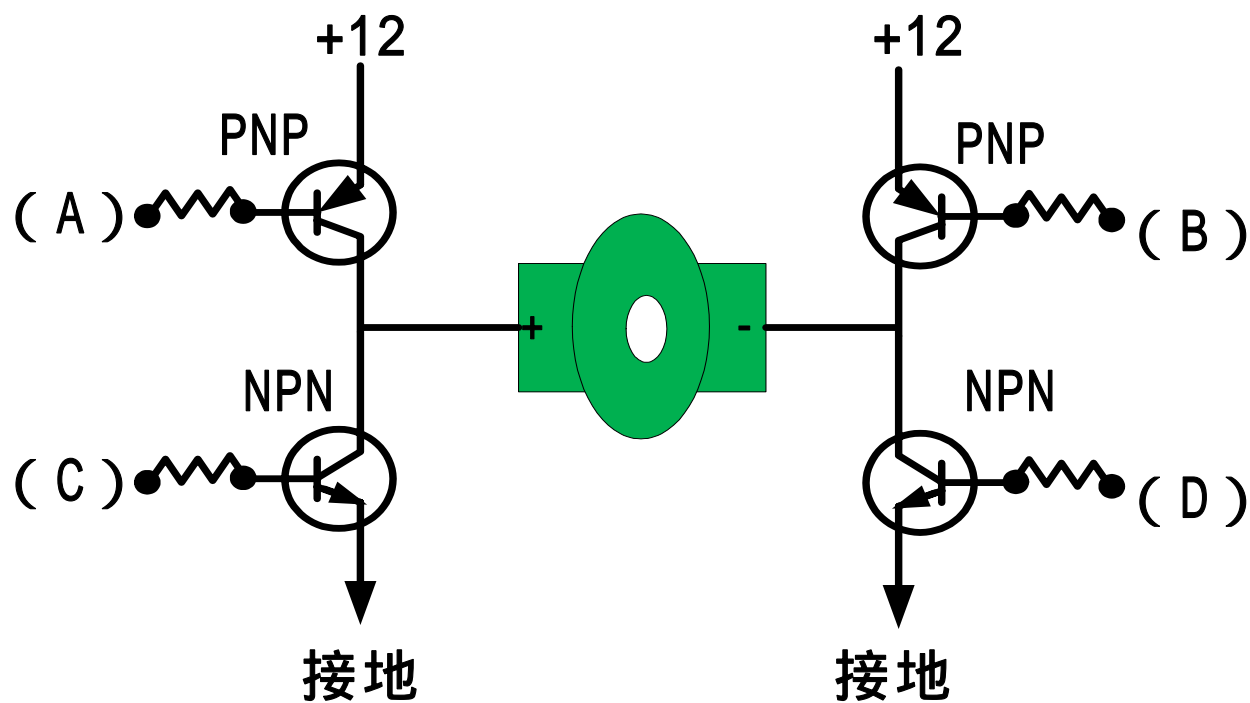
ABCD 功能  
1001 正转





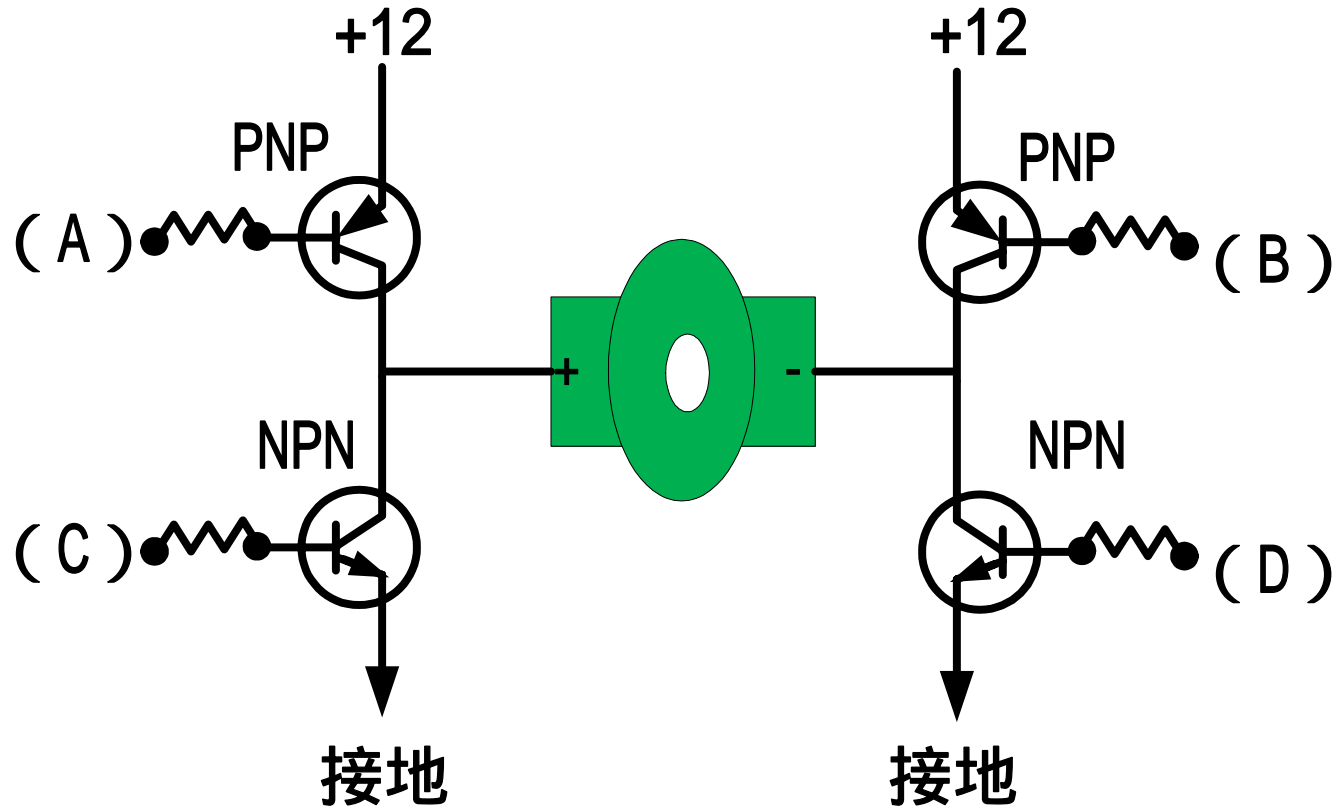
ABCD 功能  
0110 反转





ABCD	功能
1001	正转
0110	反转
1100	抱闸
0011	抱闸
1010	熔断测试
0101	熔断测试

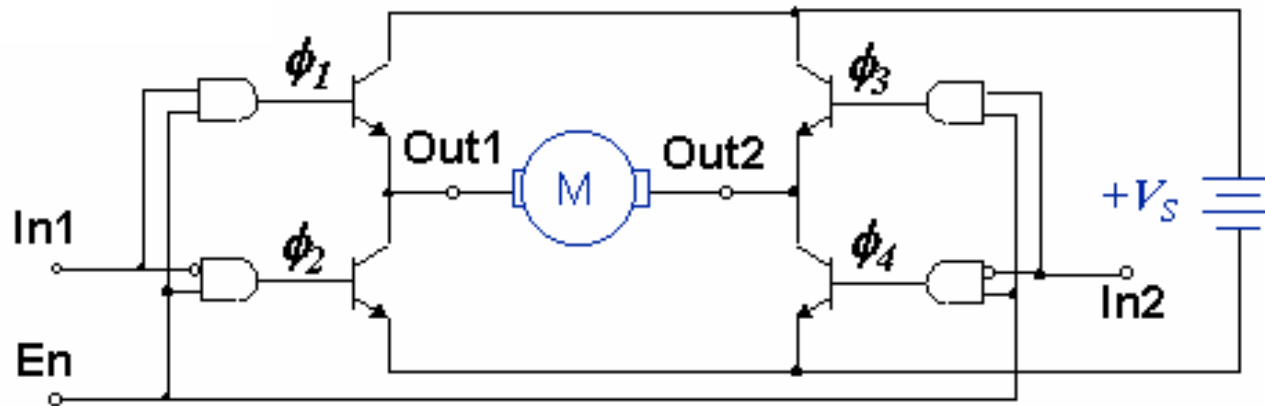






# L298全桥驱动电路

双极晶体管作为大电流开关  
逻辑禁止无效操作  
最大值2A

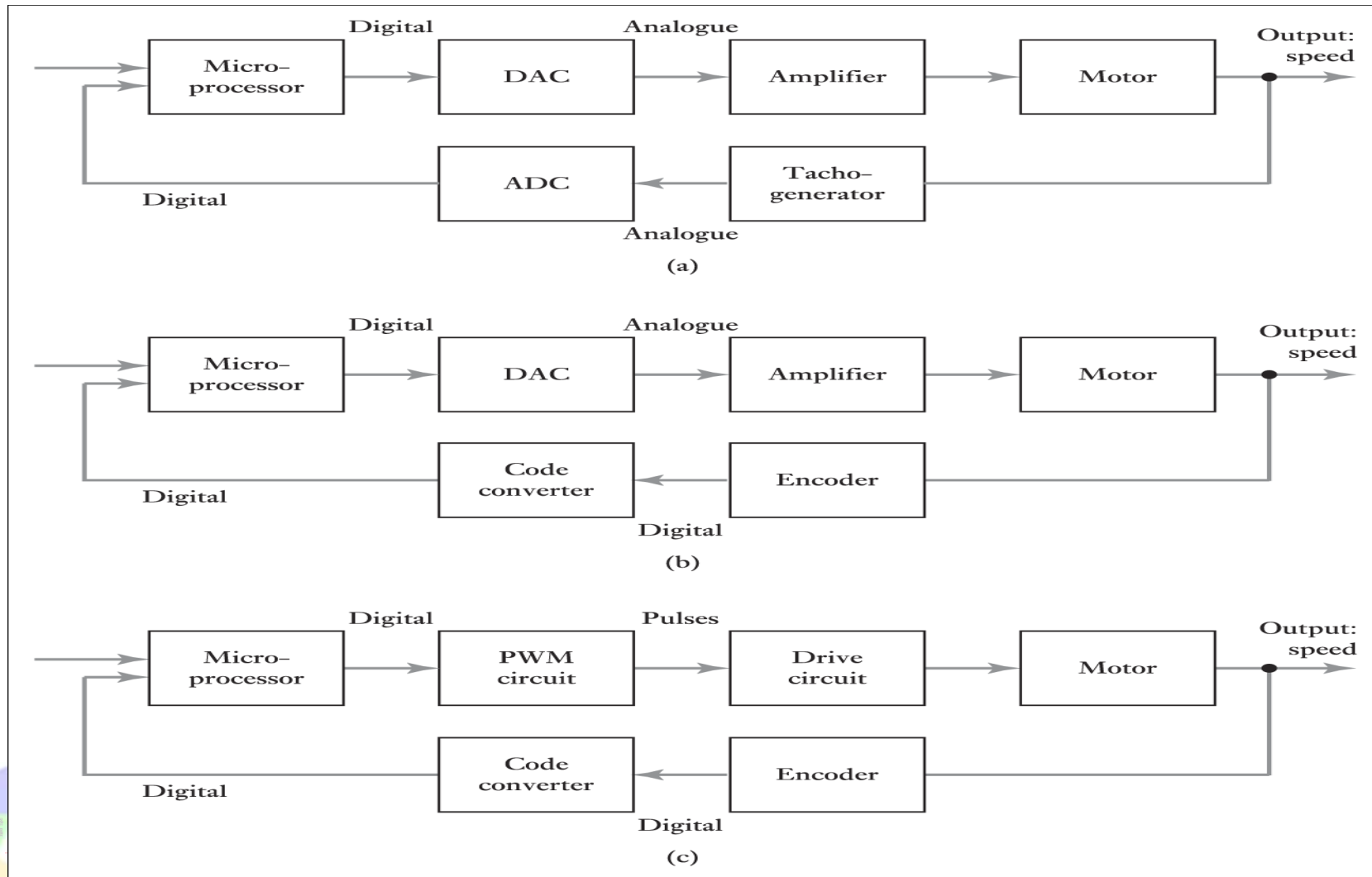


En	In1	In2	电机做什么？
H	H	L	正转
H	L	H	反转
H	L	L	快速制动
H	H	H	快速制动
L	X	X	自由停止





# 速度的反馈控制

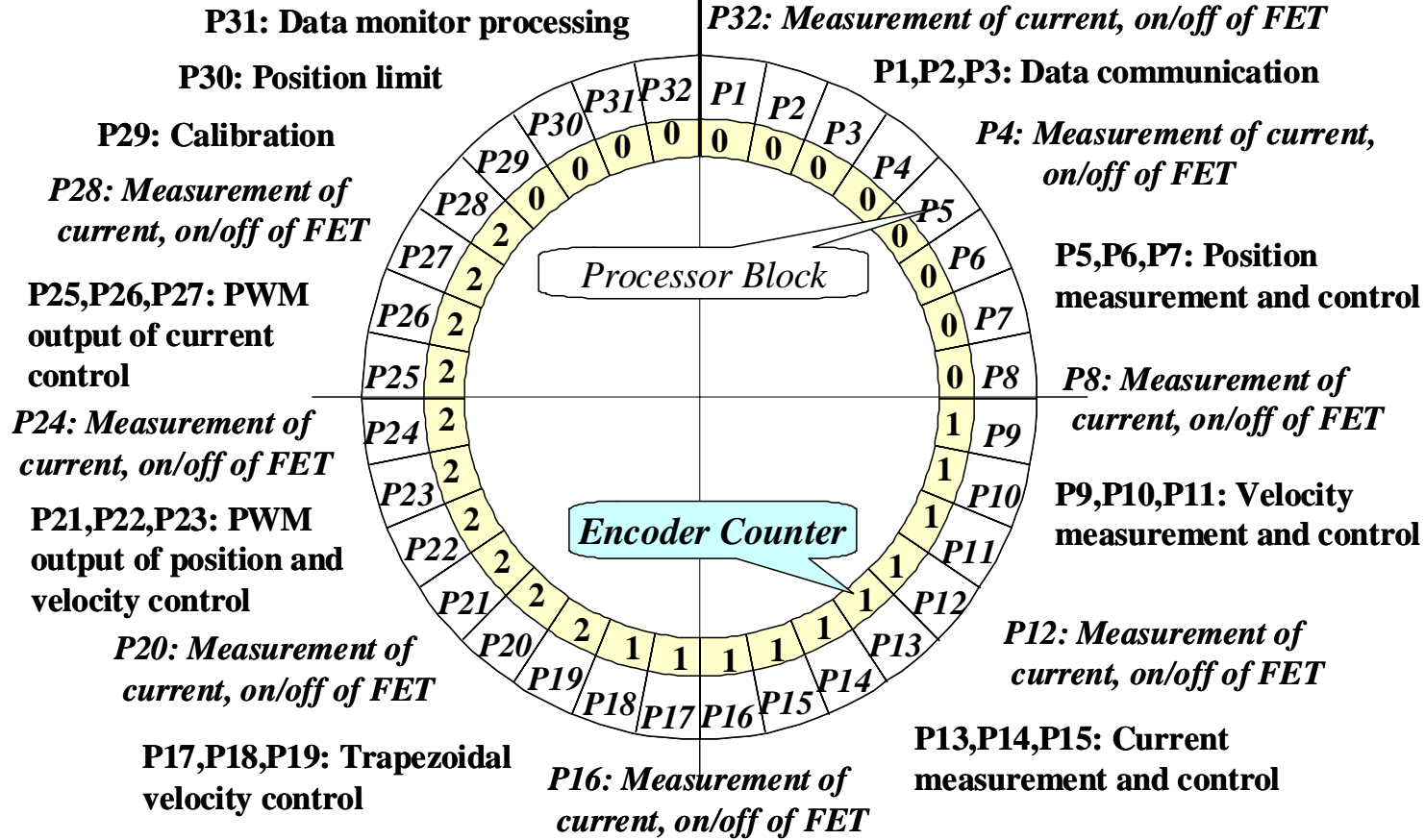






One cycle 400  $\mu$ s  
(2.5 KHz)

One processor  
12.5  $\mu$ s



## 设计思路





## 控制器和驱动器



基于PIC的控制器

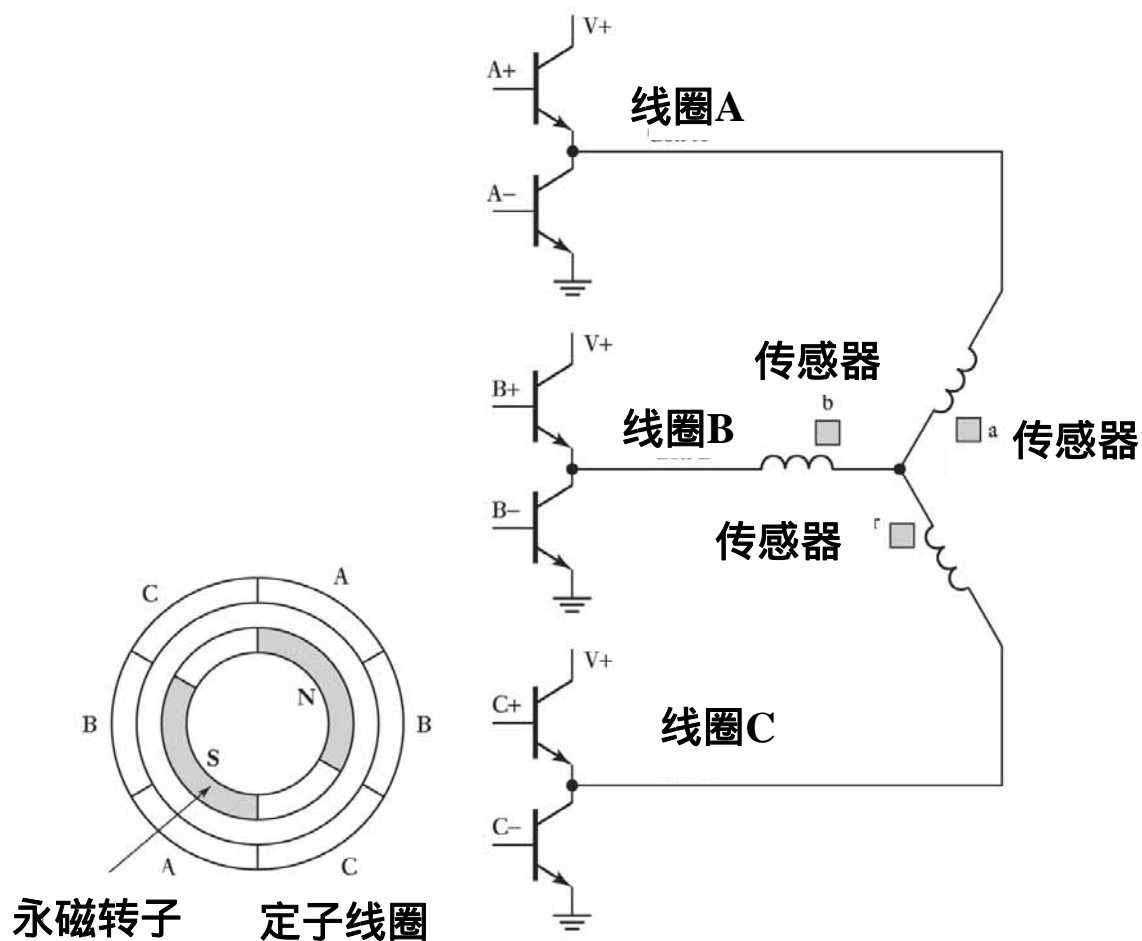


基于FPGA的驱动器





# (7) 无刷永磁电动机



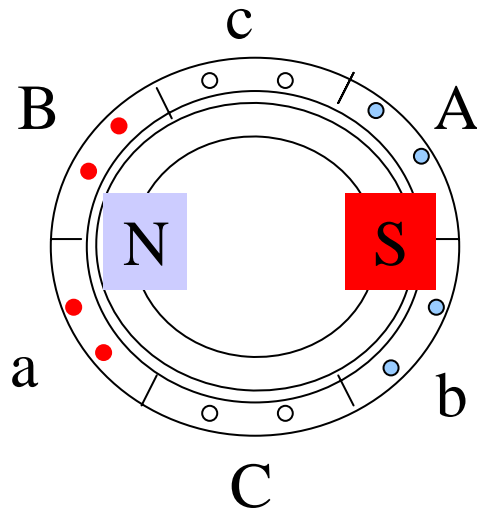
永磁转子 定子线圈

(a) 无刷永磁电机, (b) 晶体管开关

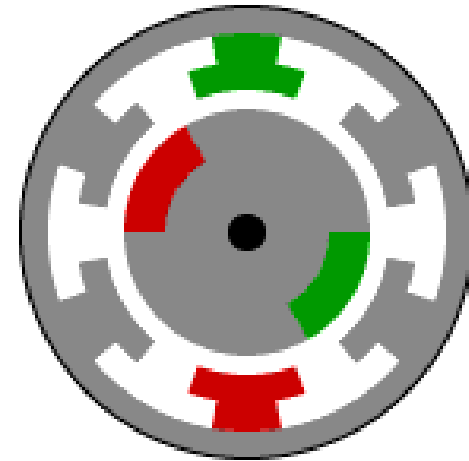




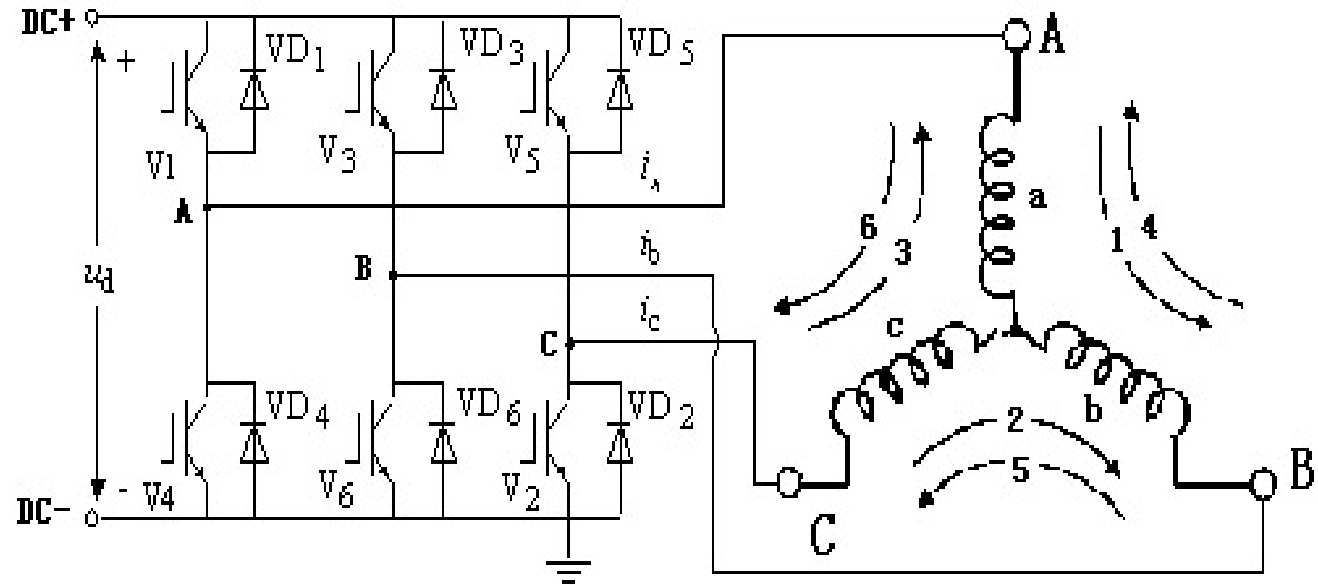
# 三相无刷直流电机结构



## 工作原理

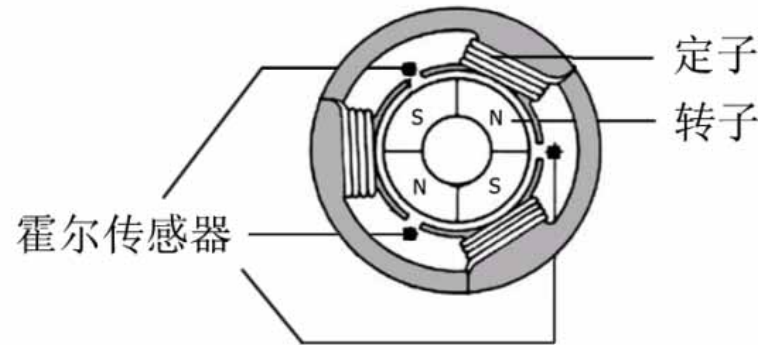


- 不通电
- 正向通电
- 反向通电



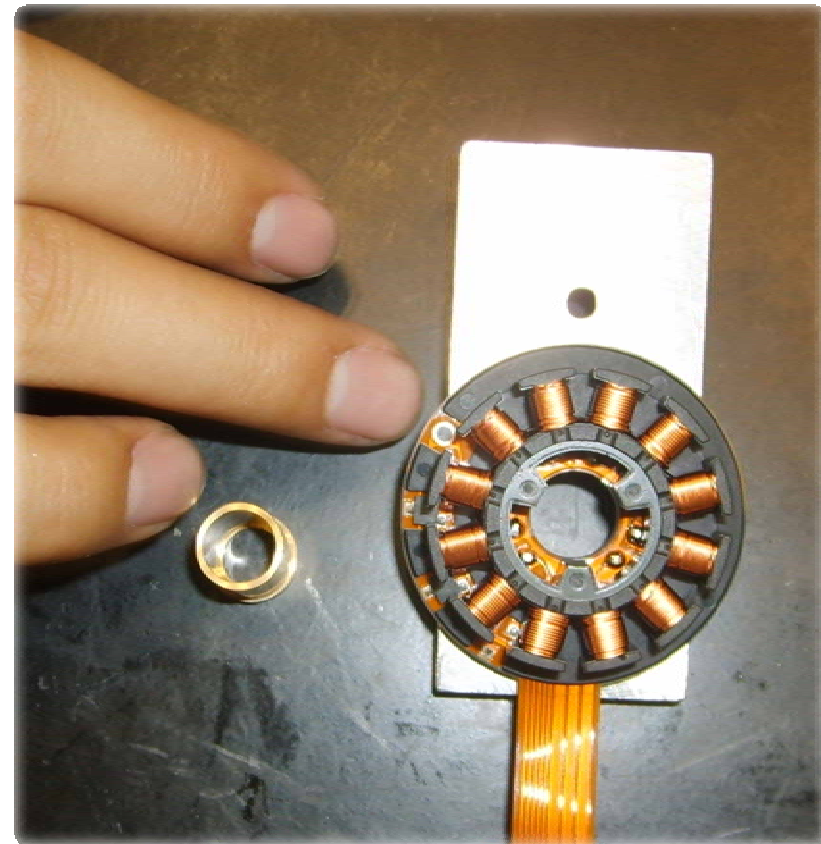


# 无刷电机结构



无刷直流电机从**结构**上来看，与传统的直流电机主要区别在于：

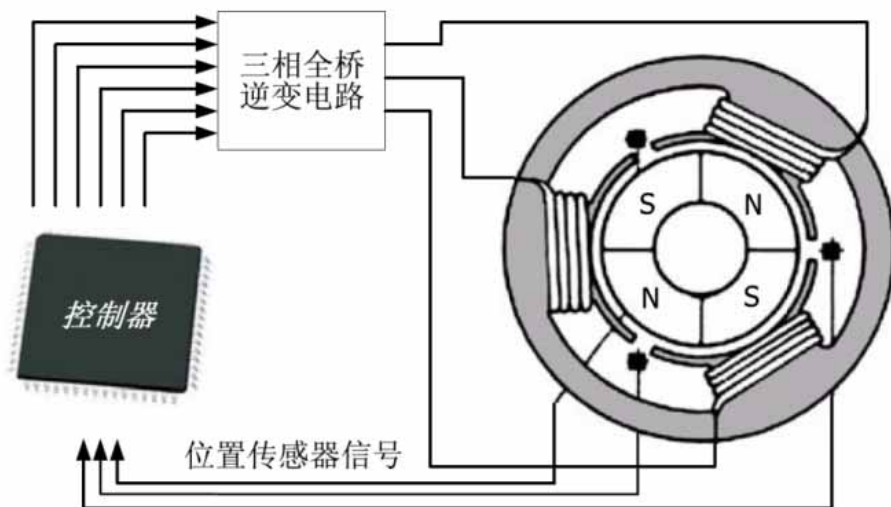
- 无刷电机具有旋转的永磁转子和固定的电磁绕组；
- 有刷电机具有旋转的电枢绕组和固定的永磁定子。







# 无刷电机的结构



无刷直流电机本质上可看作是一台用电子换相装置取代机械换相装置的直流电机。

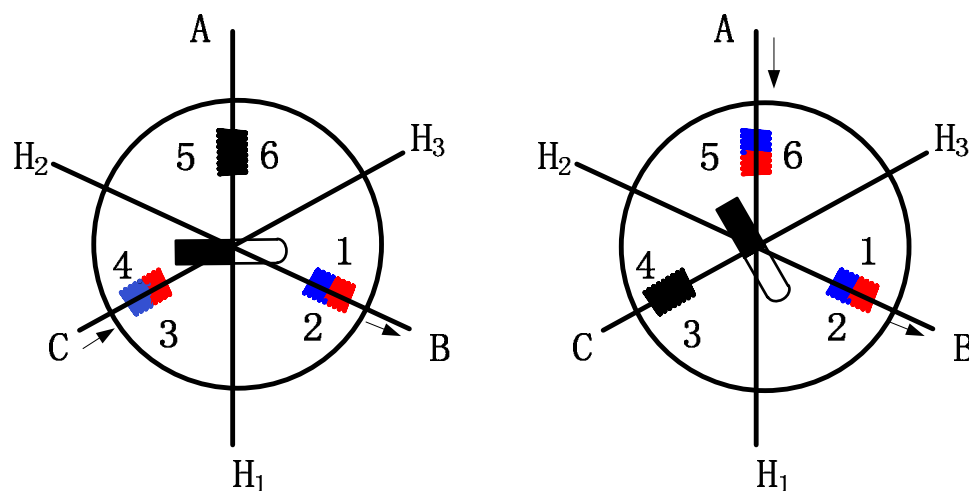
安装在电机上的位置传感器来检测转子在运转过程中的位置。

控制器为电子换相电路提供正确的换相信息，来控制电子换相电路中的功率开关管的开关状态，保证电机各相按正确顺序导通，在空间形成跳跃式的旋转磁场，驱动永磁转子连续不断地旋转。





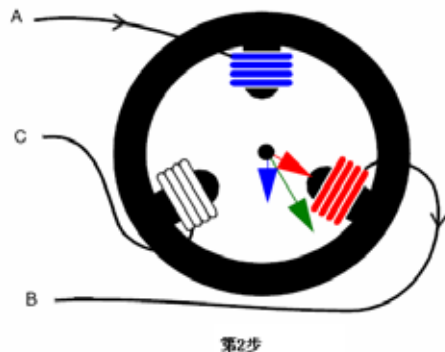
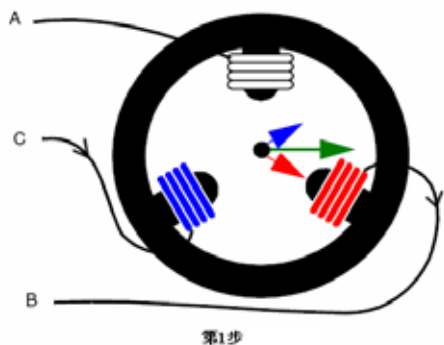
# 无刷电机的换相原理



我们假设在A、B、C三相电流流入为正，电流方向与线圈产生磁场方向相同。

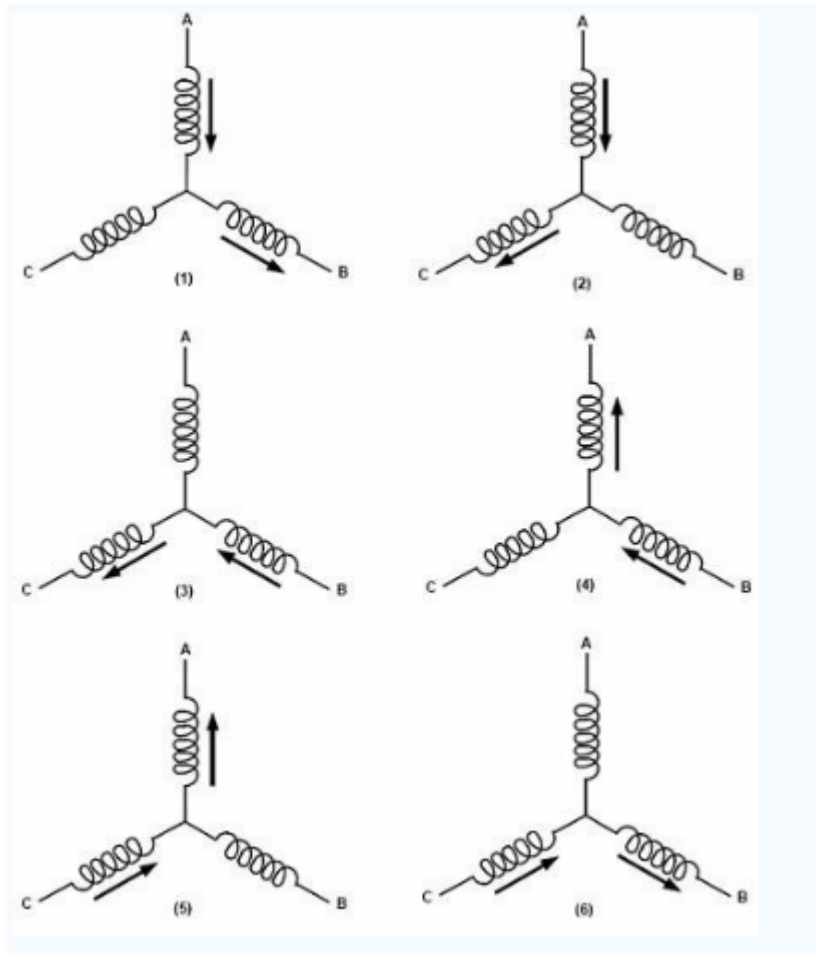
如图中第1步所示，对C相施加正向电压，对B相施加反向电压，A相处于高阻态，C、B两相产生的合磁场方向指向方位1。

在第2步状态，对A相施加正向电压，对B相施加反向电压，C相处于高阻态，A、B两相产生的合磁场方向指向2。磁场偏转产生电磁扭矩，驱动永磁转子旋转。





# 无刷电机的换相原理



如此循环往复，便可以实现无刷直流电机的连续工作。

无刷直流电机正转的换相状态图如图所示。

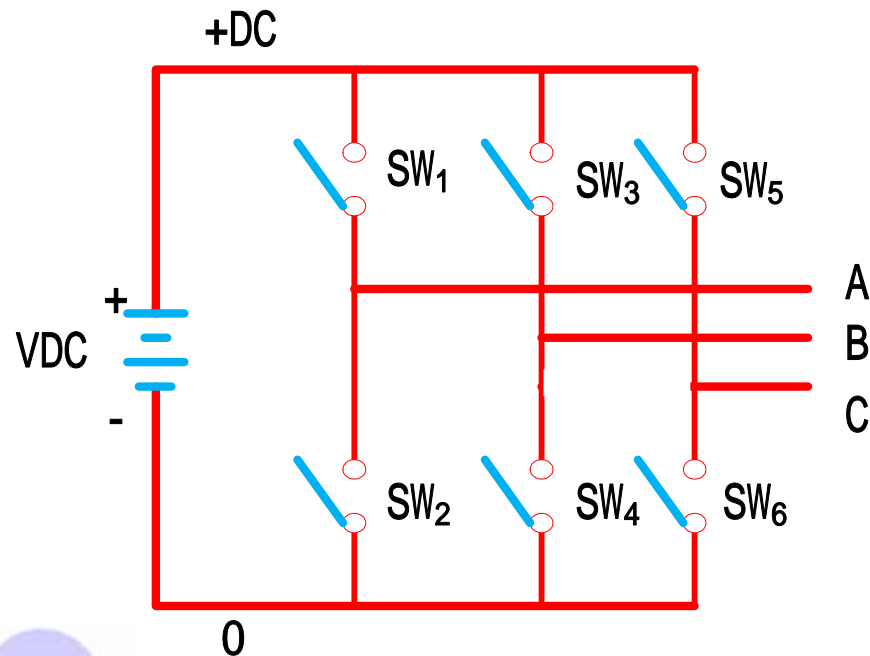
电机反转与之类似。





# 无刷电机驱动电路的基本结构

无刷电机驱动要完成的两个基本功能：换相和调速

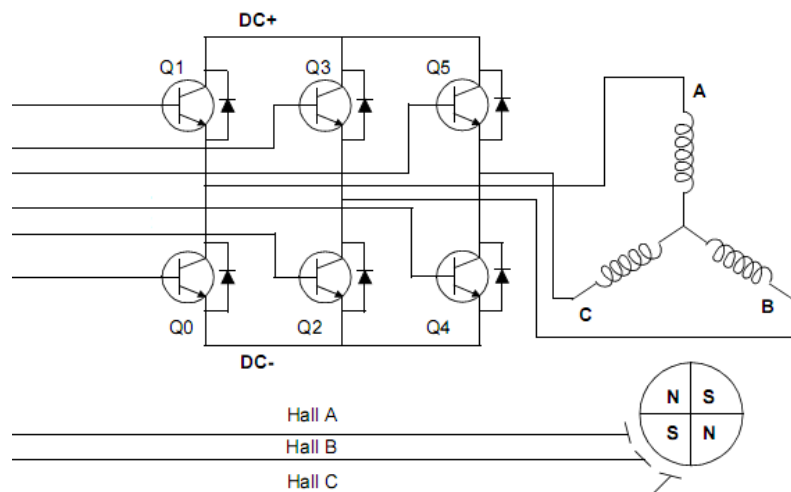


无刷直流电机的电子换相和调速需要逆变器来完成，逆变器用来控制电动机定子上各相绕组通电的顺序和时间。功率开关单元是换相电路的核心。

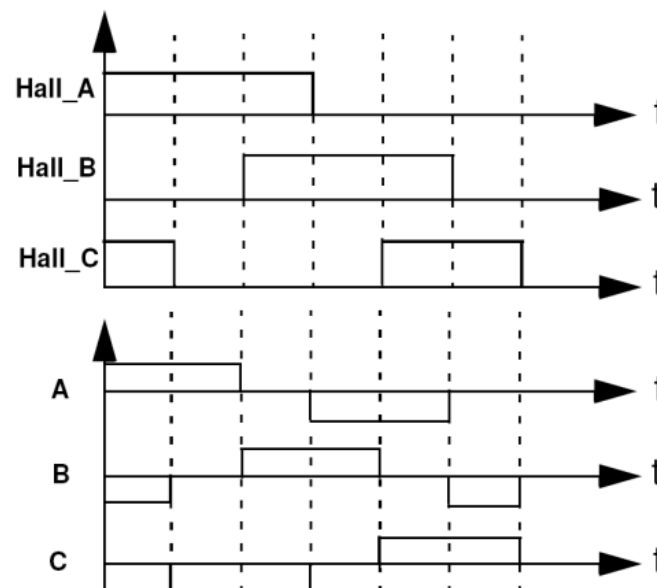




# 无刷电机驱动电路的基本结构



## 霍尔传感器与各相相电压之间的关系

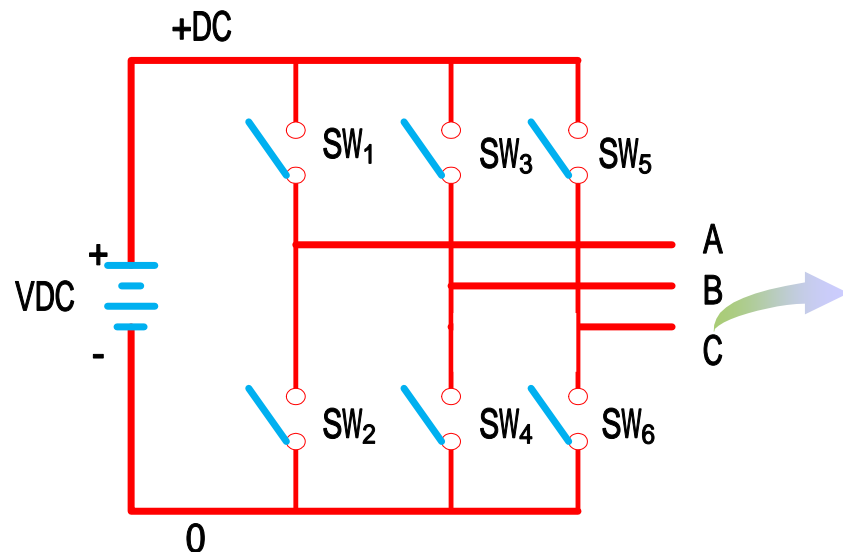


根据无刷直流电机的换相原理可知，电机各相电流要根据当前的转子位置来确定，即各绕组的相电压与位置传感器的输出值有严格的对应关系。

本电机中三个霍尔传感器用于检测转子位置，控制器通过霍尔传感器的信号控制各功率管的通断。



# 无刷电机驱动电路的基本结构



霍尔传感器输出值(CBA)	电流方向	导通的功率管
100	C → B	SW5 ; SW4
101	A → B	SW1 ; SW4
001	A → C	SW1 ; SW6
011	B → C	SW3 ; SW6
010	B → A	SW3 ; SW2
110	C → A	SW5 ; SW2

**无刷直流电动机速度控制，就是将合适的定子绕组与直流电源导通，对导通相进行PWM脉宽调制，进而影响磁场强度，改变转动动力矩，调整速度大小**

## 无刷直流电机单极性PWM调速时序

霍尔传感器(CBA)	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6
1 0 0	0	0	0	PWM	1	0
1 0 1	1	0	0	PWM	0	0
0 0 1	1	0	0	0	0	PWM
0 1 1	0	0	1	0	0	PWM
0 1 0	0	PWM	1	0	0	0
1 1 0	0	PWM	0	0	1	0





# 无刷电机伺服驱动器硬件设计实例

