

# 第5章 直流电机及其拖动控制

本章重点：

1. 直流电动机的工作原理
2. 直流电动机的机械特性
3. 电枢回路串联电阻和降低电枢电压的启动
4. 直流电动机的3种调速方法
5. 直流电动机的几种驱动控制电路

直流电动机由于其性能优越，在电力拖动自动控制系统中仍占有很重要的地位。利用晶闸管整流电源配合直流电动机而组成的调速系统仍在迅速地发展。

## ◆ 直流电动机的优点:

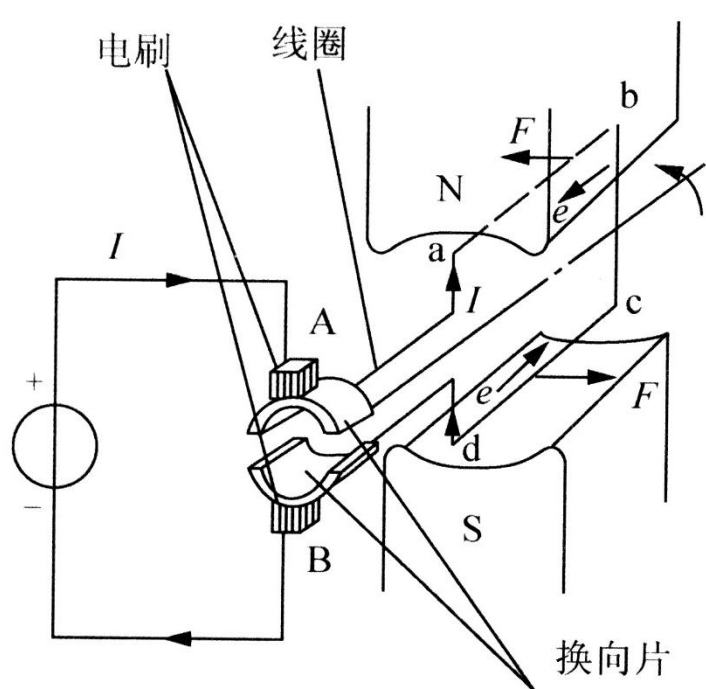
- (1) 调速性能好: 调速范围广, 易于平滑调节。
- (2) 起动、制动转矩大, 易于快速起动、停车。
- (3) 易于控制。

## ◆ 应用:

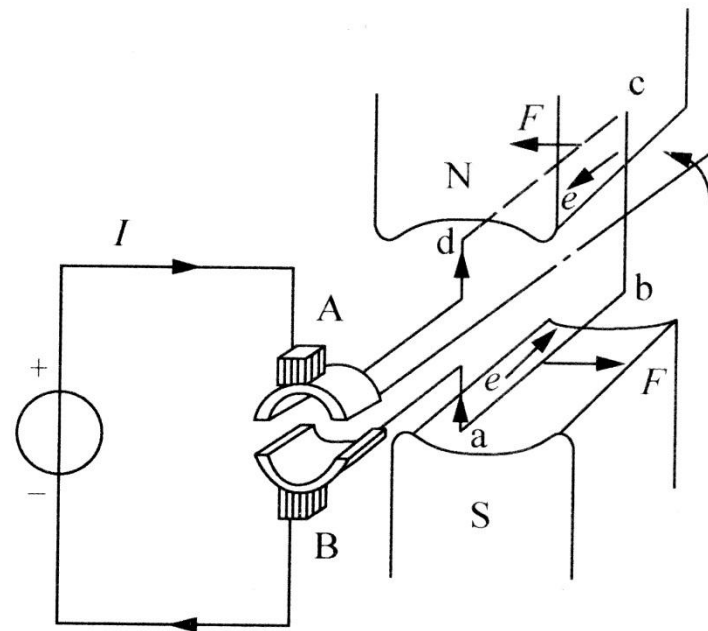
- (1) 轧钢机、电气机车、中大型龙门刨床等调速范围大的大型设备。
- (2) 用蓄电池做电源的地方, 如汽车、拖拉机等。

# 5.1 直流电动机的工作原理及结构

## 1. 直流电动机的工作原理

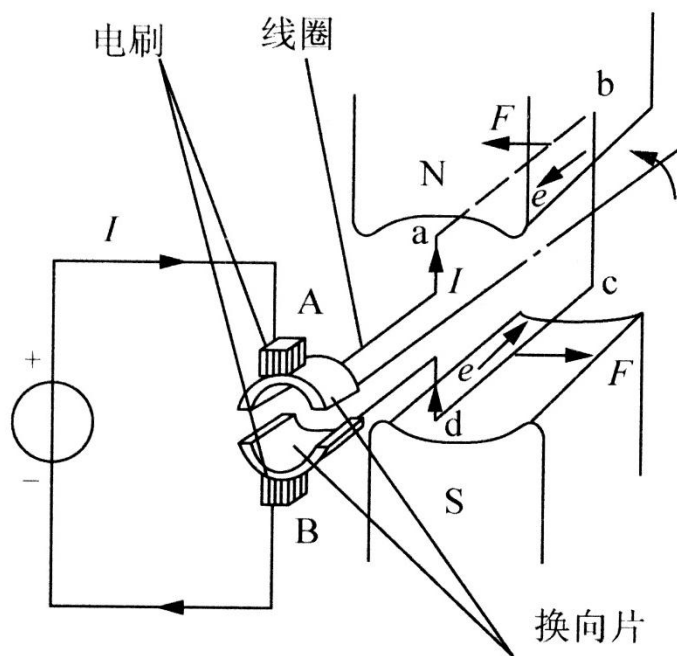


(a)

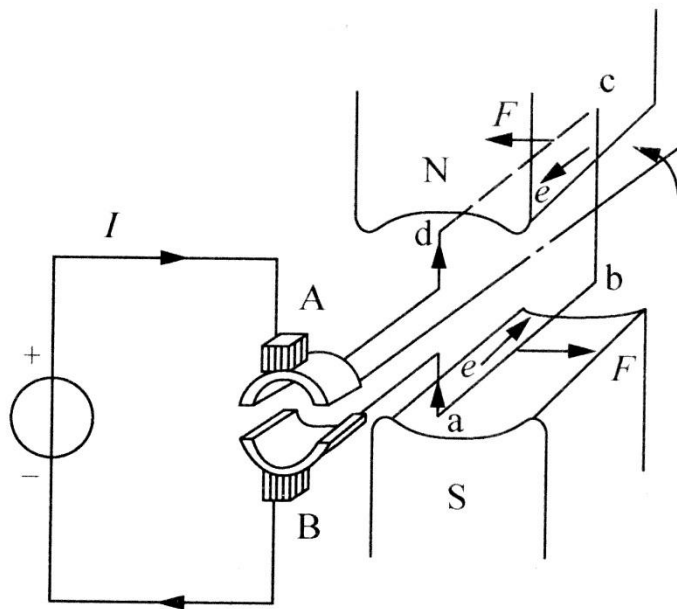


(b)

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。



(a)



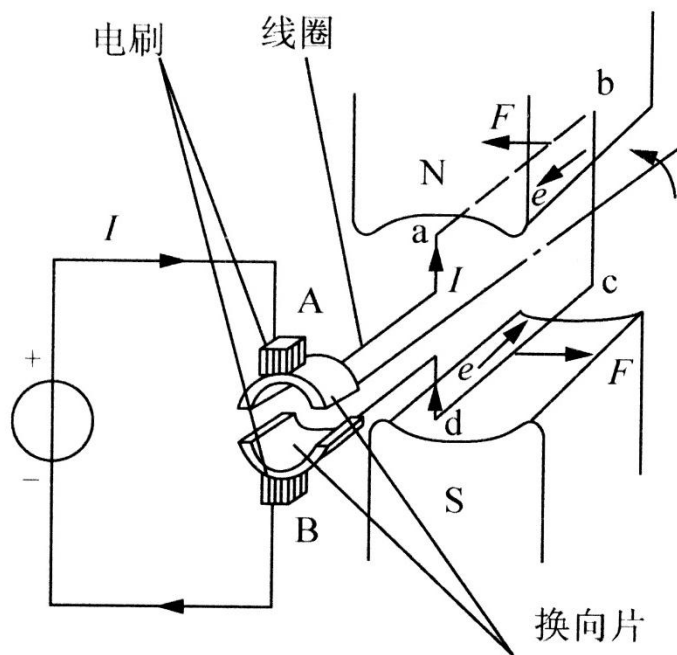
(b)

由左手定则，通电线圈在磁场的作用下，使线圈逆时针旋转。

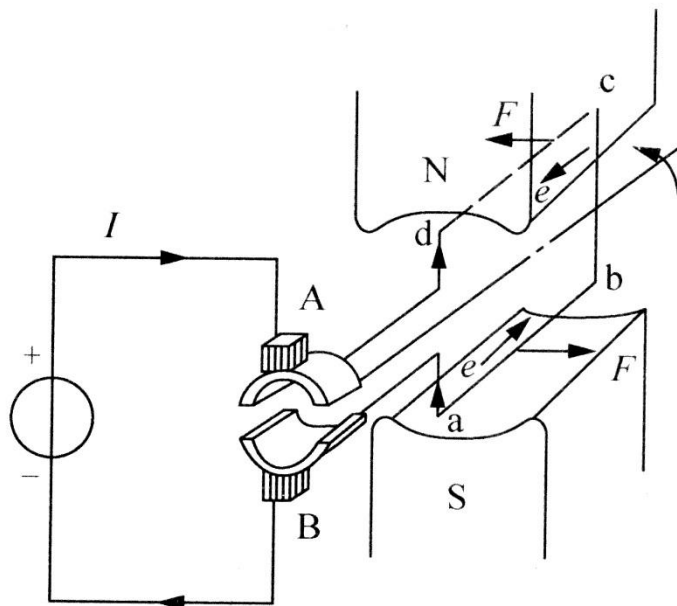
由转矩公式可知：

(1)产生转矩的条件：必须有励磁磁通和电枢电流。

(2)改变电动机旋转的方向：改变电枢电流的方向或者改变磁通的方向。

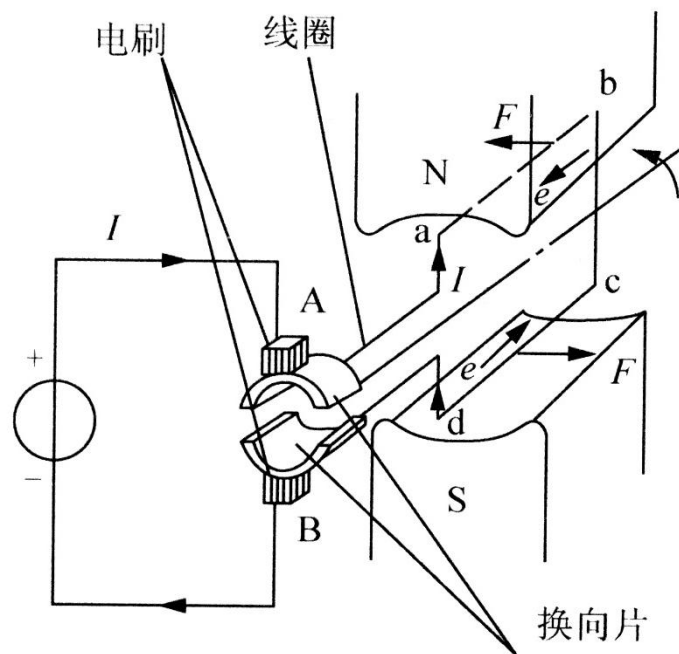


(a)

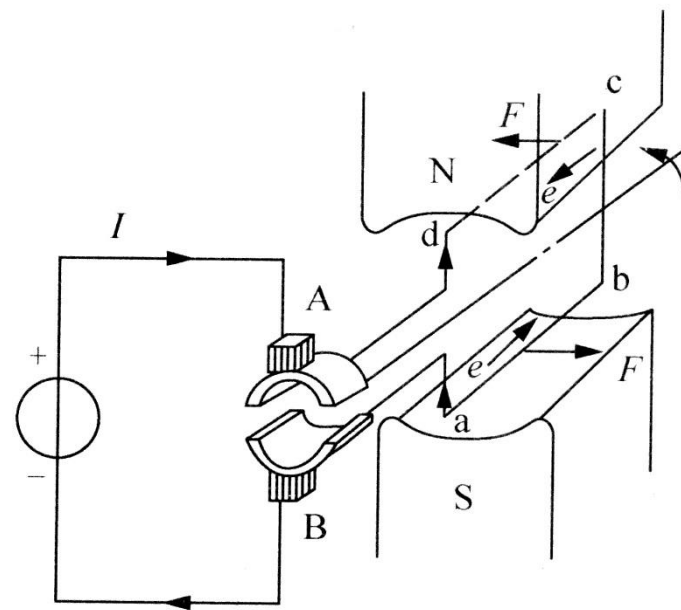


(b)

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。



(a)

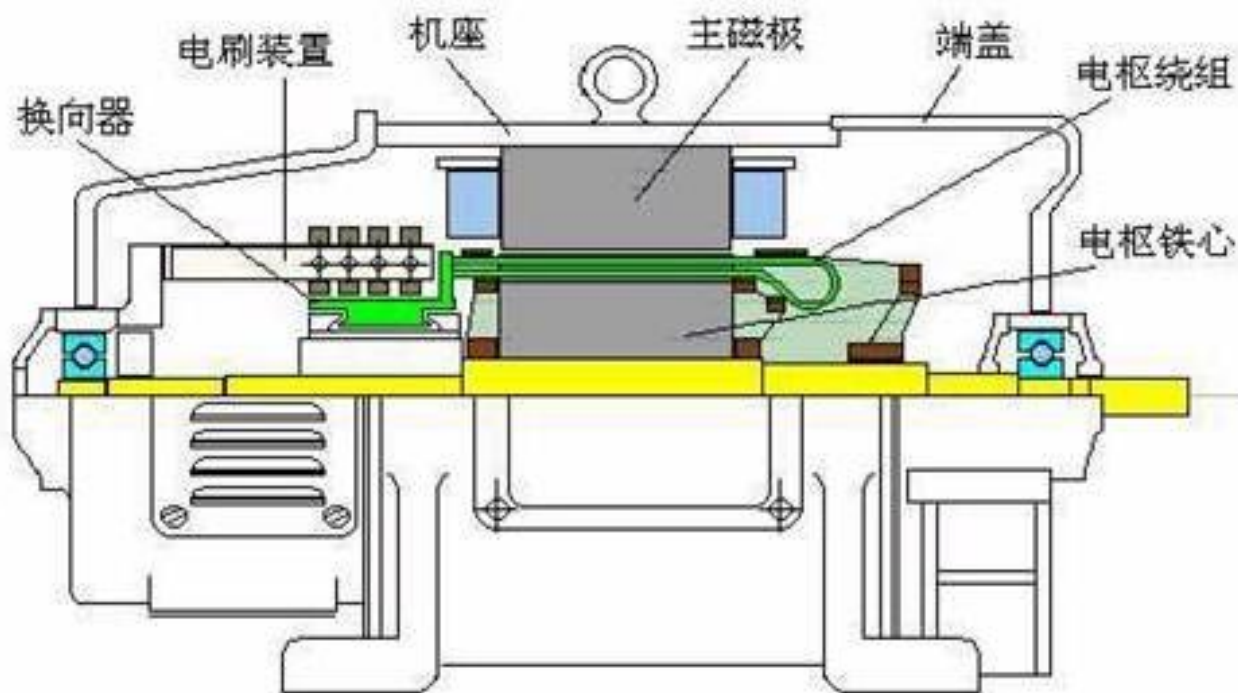


(b)

线圈中的电流是交变的，感应电动势也是交变的，但线圈所受的电磁转矩方向是不变的。

## 2. 直流电动机的基本结构

也由定子和转子组成，定子主要包括机座、主磁极、电刷装置、端盖等；转子为可动部分，主要包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴等。





## (1) 主磁极

由励磁绕组建立电机的主磁通，改变励磁电流的大小可以改变磁场的大小，改变励磁电流的方向可以改变磁场的方向，从而改变电机转向。小型直流电机也用永久磁铁为主磁极。

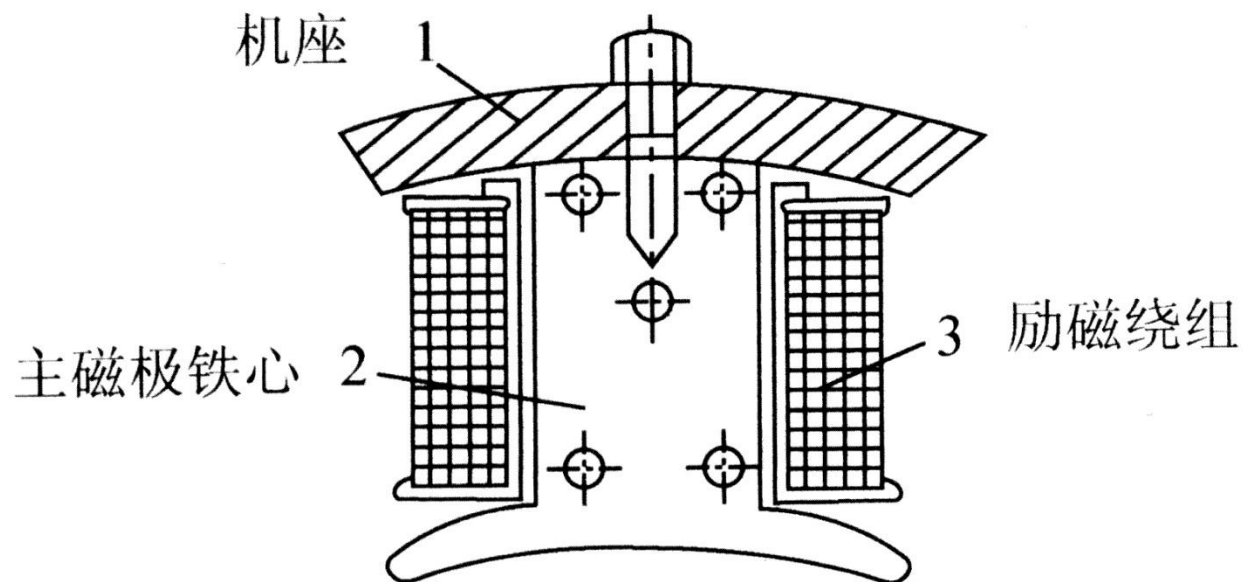


图 5.9 直流电动机的主磁极

## (2) 换向磁极

主磁极边上的小磁极，产生附加磁场，用于改善换向，减少电刷与换向片之间的火花。

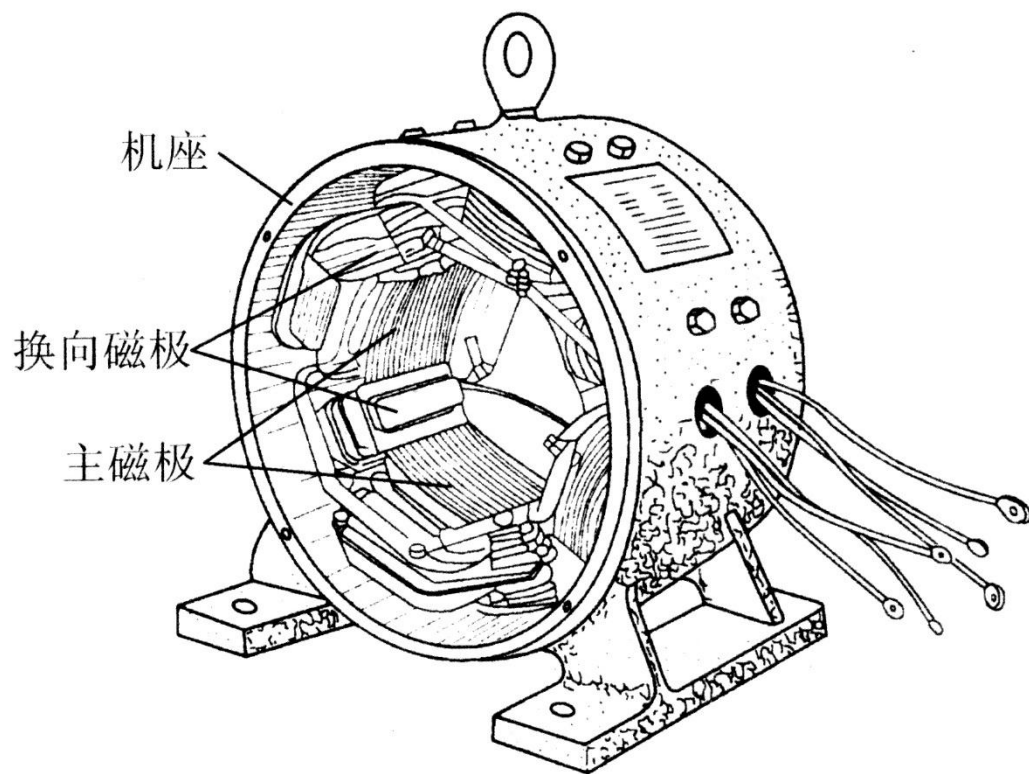


图 5. 10 直流电动机的定子

### (3) 电枢铁心（图中标号为7）

在转子上，为主磁路的一部分，一般用表面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成，以减少磁滞损耗和涡流损耗，表面具有均匀分布的槽来放置电枢绕组。

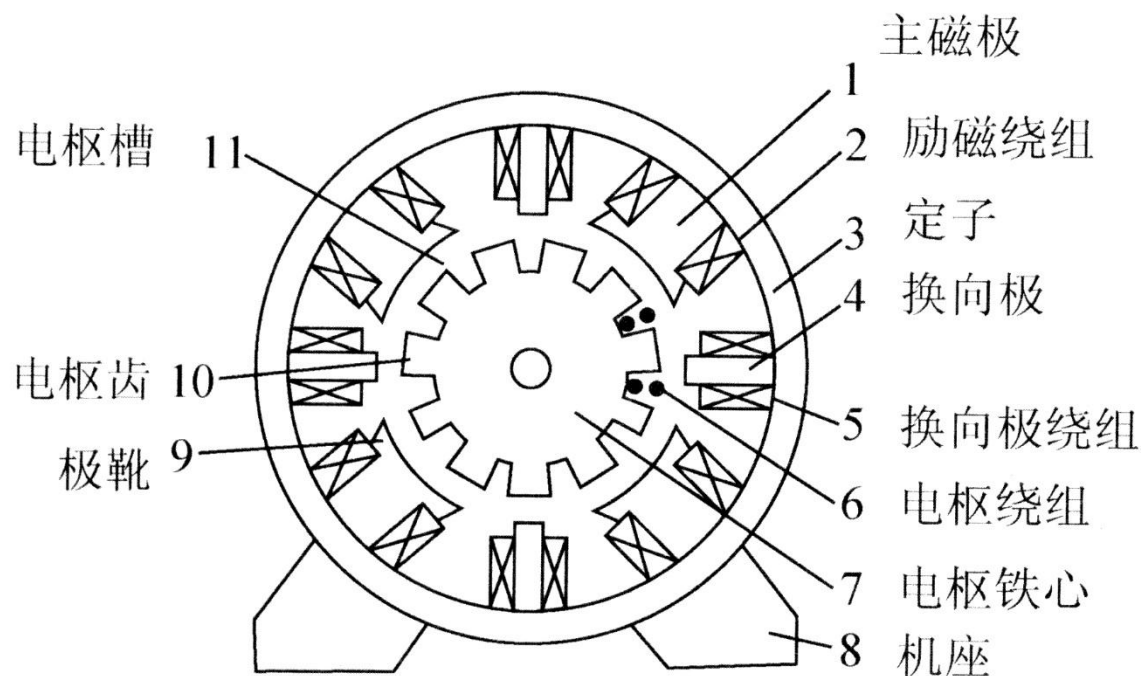


图 5. 11 直流电动机剖面图

#### (4) 电枢绕组（图中标号为6）

均匀放置于铁心的槽内，按一定规律连接的线圈，为电机的主要电路部分，实现电能到机械能的转换。

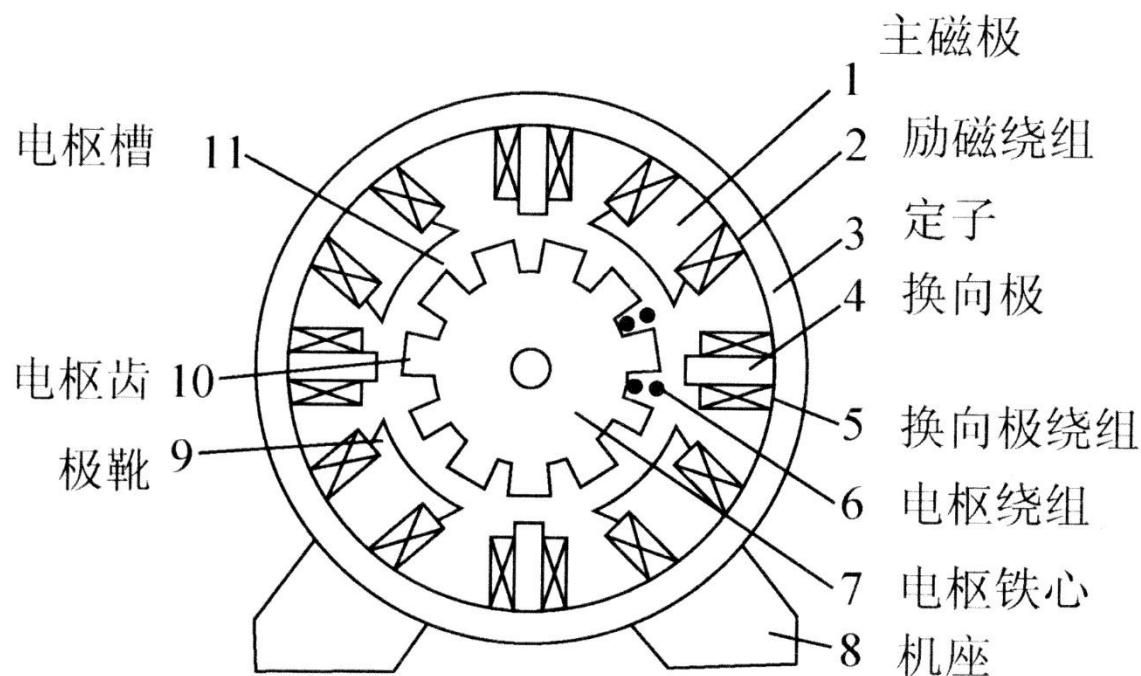


图 5. 11 直流电动机剖面图

## (5) 换向器

由许多换向片组成，换向片之间用云母绝缘。

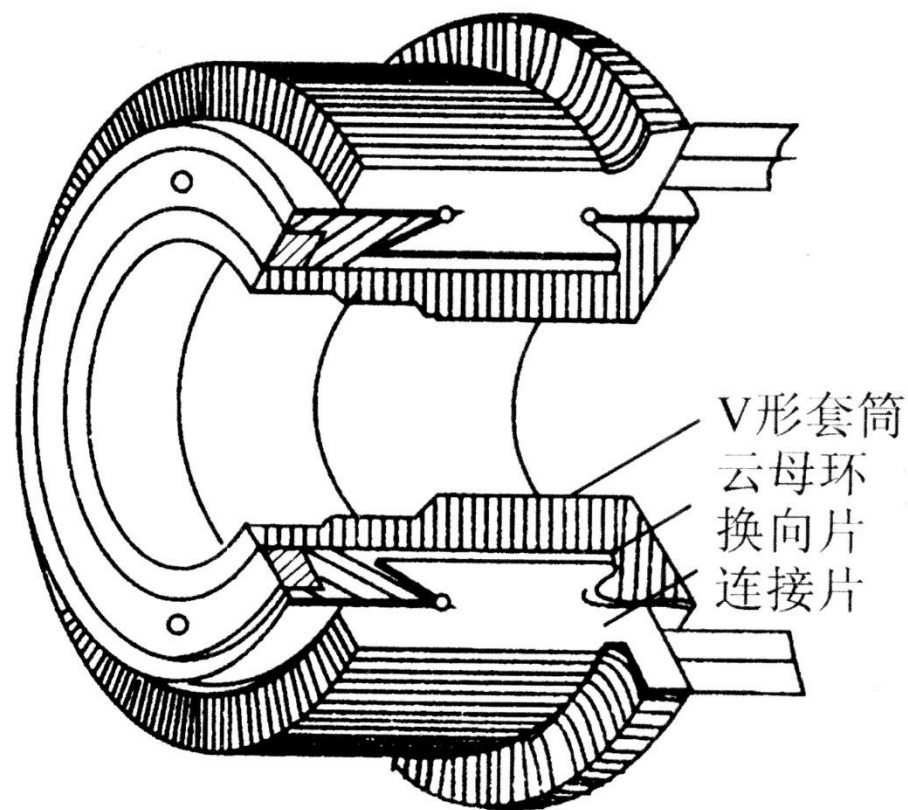


图 5. 12 直流电动机的换向器

### 3. 直流电动机的铭牌数据

铭牌数据即电动机的额定值，是电机制造厂家对电机正常运行时，对有关的电量或机械量所规定的数值。

1) 额定电压  $U_N$

2) 额定励磁电压  $U_{fN}$

3) 额定电流  $I_N$

4) 额定励磁电流  $I_{fN}$

5) 额定转速  $n_N$

6) 额定功率  $P_N$

7) 额定效率  $\eta$   $P_N = \eta U_N I_N$

## 5.2 直流电动机的励磁方式与基本方程式

### 1. 直流电动机的励磁方式

**励磁磁场：**主磁极的励磁磁动势单独建立的磁场，即电机的主磁场。

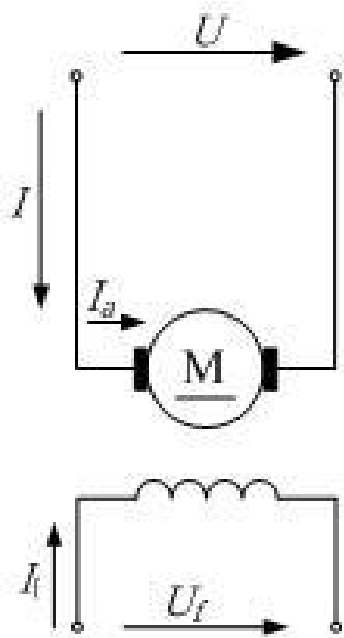
**励磁方式：**是指励磁绕组如何供电、产生励磁磁动势而建立主磁场的问题。

(1) 他励：电枢绕组和励磁绕组无关，分别由不同的直流电源供电

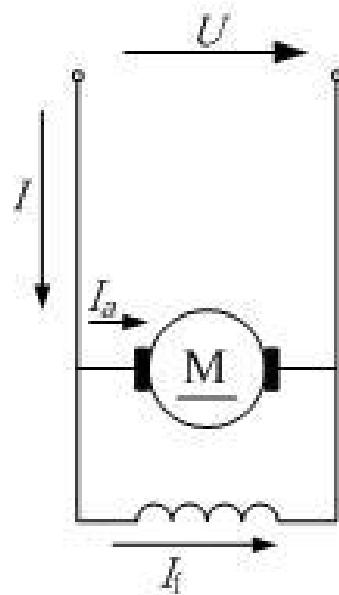
(2) 并励：电枢绕组和励磁绕组并联接到同一直流电源上

(3) 串励：电枢绕组和励磁绕组串联后接到同一直流电源上

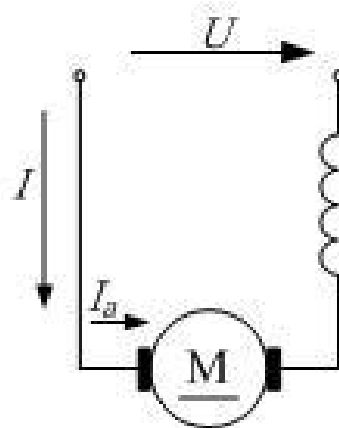
(4) 复励：励磁绕组分为两个部分，一部分与电枢绕组并联后再与另一部分励磁绕组串联接到直流电源上



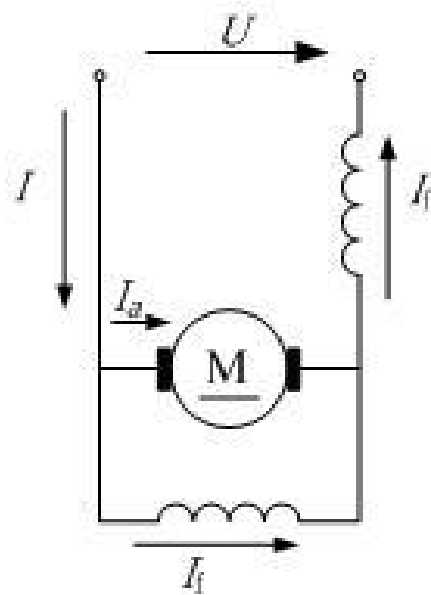
(a) 他励



(b) 并励



(c) 串励



(d) 复励



## 2. 直流电动机的基本方程式

### (1) 电动势平衡方程式

$$U = I_a R_a + E_a$$

反电动势为(单位V):

$$E_a = C_e \Phi n$$

$C_e$  为电动势常数

$\Phi$  为电机每极磁通

$n$  为电机转速r/min

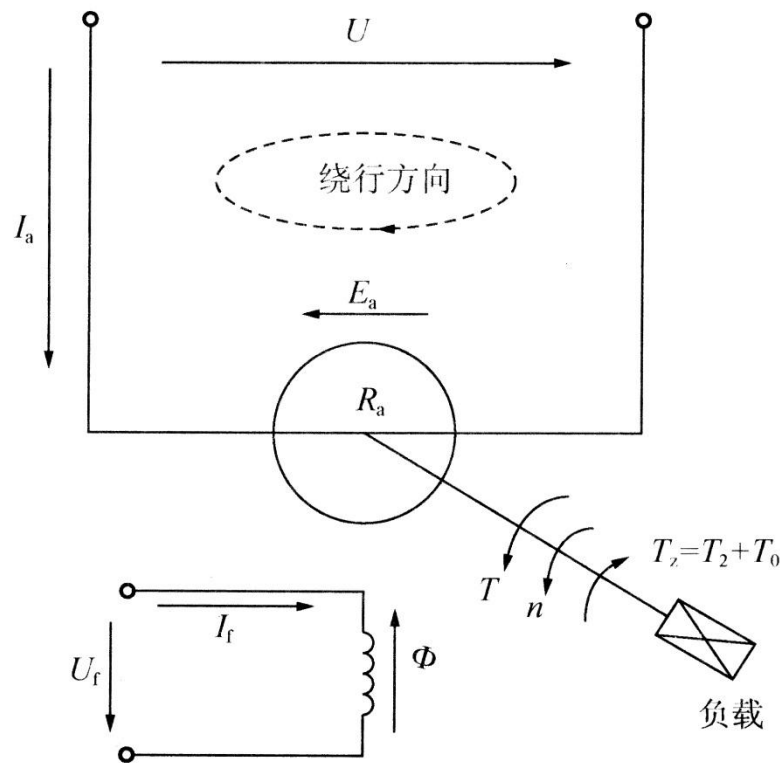


图 5.14 直流电动机原理图

## (2) 转矩平衡方程式

$$T = T_2 + T_0$$

在电动机运行时，电磁转矩  $T$  必须和负载转矩  $T_2$  和空载损耗的阻转矩  $T_0$  相平衡。

电磁转矩（单位为  $\text{N}\cdot\text{m}$ ）：

$$T = C_T \Phi I_a$$

$C_T$  为转矩常数

### (3) 电动势常数和转矩常数之间的关系

输入电机电枢的电功率:

$$P_M = E_a I_a$$

电机输出的功率为:  $T\Omega$

由能量守恒可得:  $E_a I_a = T\Omega$

即: 
$$C_e \Phi n I_a = C_T \Phi I_a \Omega = C_T \Phi I_a \frac{2\pi n}{60}$$

故: 
$$\frac{C_T}{C_e} = \frac{60}{2\pi} \approx 9.55$$

#### (4) 功率平衡方程式

由电动势平衡方程式:  $U = I_a R_a + E_a$

可得:  $UI_a = I_a^2 R_a + E_a I_a$

即:  $P_1 = P_{Cu} + P_M$

由转矩平衡方程式:  $T = T_2 + T_0$

可得:  $T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$

即:  $P_M = P_2 + P_0$

空载损耗为:  $P_0 = P_{Fe} + P_{me} + P_{ad}$

故:  $P_1 = P_{cu} + P_2 + P_{Fe} + P_{me} + P_{ad} = P_2 + \sum P$

则直流电机效率为:  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$

例 5-1 一台直流电动机,  $P_1=16\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=1500\text{r/min}$ ,  $\eta_N=90\%$ , 求额定电流  $I_N$ , 额定输出转矩  $T_{2N}$ , 电动机总损耗  $\sum P$ 。

解: 因为电动机的额定功率为轴上输出的机械功率, 根据公式可计算出

$$P_N = P_1 \times \eta = 16 \times 10^3 \times 90\% = 14.4(\text{kW})$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{14.4 \times 10^3}{220 \times 90\%} = 72.72(\text{A})$$

$$T_{2N} = \frac{P_N \times 60}{2\pi \times n_N} = \frac{14.4 \times 10^3 \times 60}{2 \times 3.14 \times 1500} = 91.72(\text{N} \cdot \text{m})$$

$$\sum P = P_1 - P_2 = 16 - 14.4 = 1.6(\text{kW})$$

## 5.3 他励直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是指，当 $U_a$ 、 $I_f$ 保持不变时，电动机转速 $n$ 与电磁转矩 $T$ 的关系，即：  
 $n=f(T)$

电磁转矩并不是输出转矩，两者相差一个空载损耗转矩，但由于空载损耗转矩很小，常可以忽略不计。

机械特性分固有特性和人为特性。

# 1. 直流电动机的机械特性

(1) 电动势平衡方程式:  $U = I_a R + E_a$

其中:  $R = R_a + R_\Omega$

(2) 感应电动势:  $E_a = C_e \Phi n$

(3) 电动机转速特性方程:  $n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi}$

(4) 电磁转矩:  $T = C_T \Phi I_a$

(5) 机械特性方程式:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

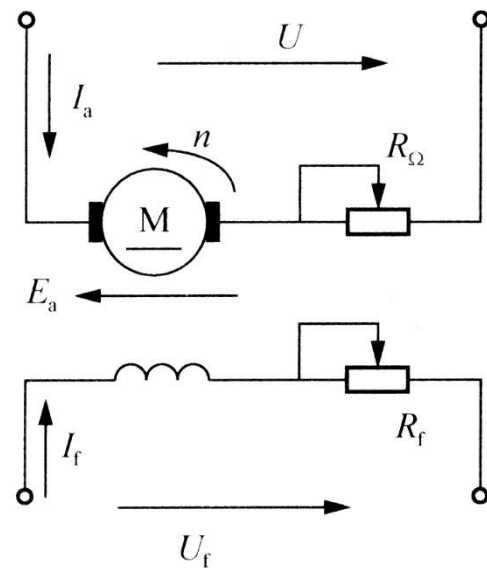


图 5.15 他励直流电动机  
电路原理图

(5)机械特性方程式:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

$n_0$ : 理想空载转速

$\beta$ : 机械特性的斜率。越小表明随着转矩 $T$ 的增大转速下降越平缓, 机械特性越硬



## 2. 固有机机械特性

当他励电动机的电源电压、励磁磁通均为**额定值**，电枢回路没有串接外电阻时的机械特性称为**固有机机械特性**，其方程式为：

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

特点：向下倾斜，电枢回路无外接电阻时机械特性较硬

额定转速变化率（约10%~18%）

$$\Delta n_N = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$$

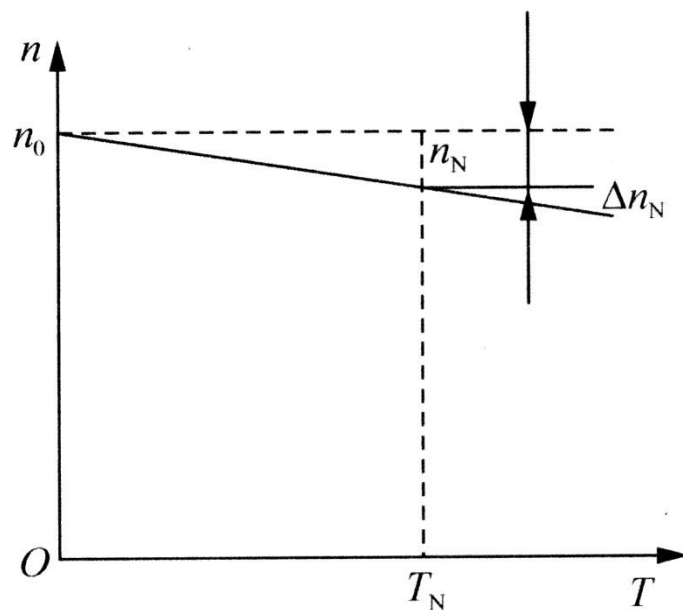


图 5. 16 他励直流电动机  
固有机机械特性曲线

### 3. 人为机械特性

他励直流电动机还可通过改变电枢电压、电枢回路电阻和励磁电流的方法得到相应的人为机械特性，以满足生产机械起动、调速、制动等工作状态下的要求。

## (1) 电枢回路串接电阻的人为机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_\Omega}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

特点:

(1) 随着串接电阻的加大, 机械特性曲线的斜率增加, 特性变软。

(2) 在相同负载下, 串接电阻增加, 转速下降。

(3) 理想空载转速不变。

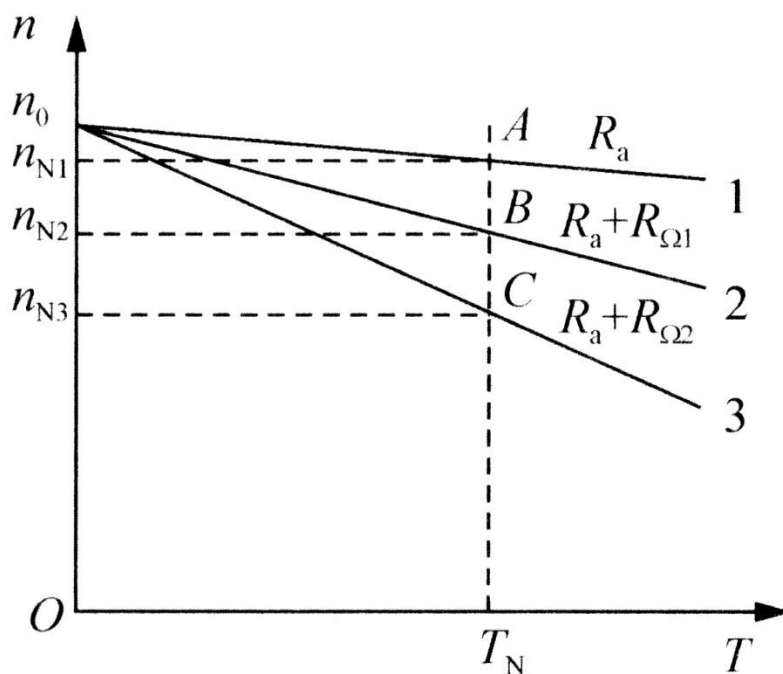


图 5.17 电枢回路串电阻  
人为机械特性曲线

## (2) 降低电枢电压的人为机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

特点:

(1) 斜率与固有特性斜率相同，是一簇与固有特性平行的直线。

(2) 相同负载下，随着电压的下降，转速降低。

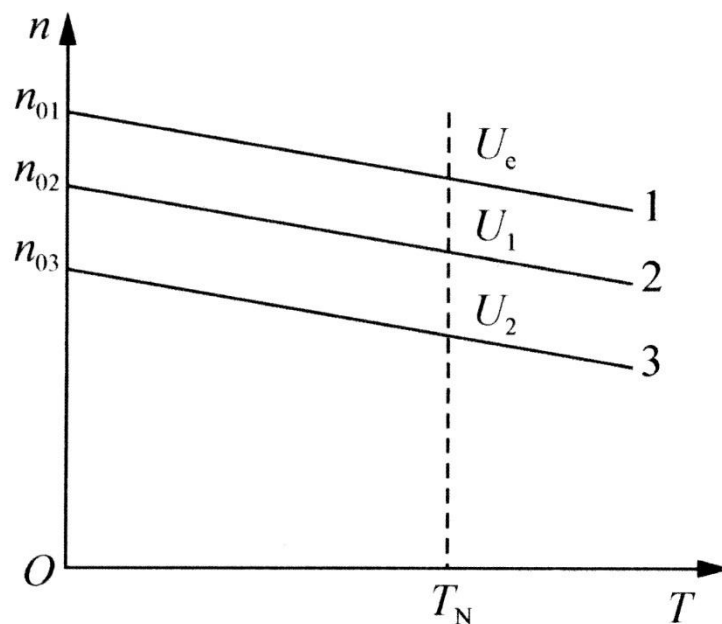


图 5. 18 降低电枢电压的人为机械特性曲线

### (3) 降低励磁电流的人为机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

特点:

(1) 斜率与随着励磁电流的降低而增大。

(2) 理想空载转速随着励磁电流的降低而增大。

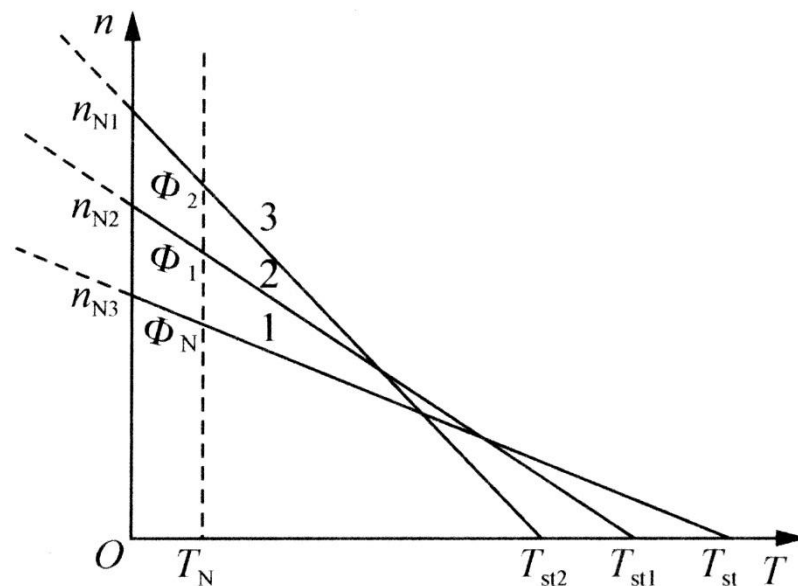


图 5.19 降低励磁电流的人为机械特性曲线