

# 模块3

## 直流电动机



### 学习目标

- (1) 了解直流电动机的结构、工作原理及励磁方式。
- (2) 理解直流电动机的电枢电动势和电磁转矩。
- (3) 掌握他励直流电动机的机械特性。
- (4) 掌握直流电动机的起动、制动、反转、调速方法及特性分析。

### 课题 3.1 直流电动机的结构和工作原理

直流电动机是将直流电能转变为机械能的电动机,具有良好的起动性能和调速性能,常应用于对起动和调速性能要求较高的场合,例如大型机床、电力机车、轧钢机、船舶机械、造纸机和纺织机等都广泛采用直流电动机作为原动机。

#### 一、直流电动机的结构

直流电动机的外形如图 3-1 所示。



(a) Z2系列直流电动机



(b) Z4系列直流电动机

图 3-1 直流电动机外形

直流电动机由定子和电枢(转子)两大部分组成。常见的中小型直流电动机内部结构如图 3-2 所示。

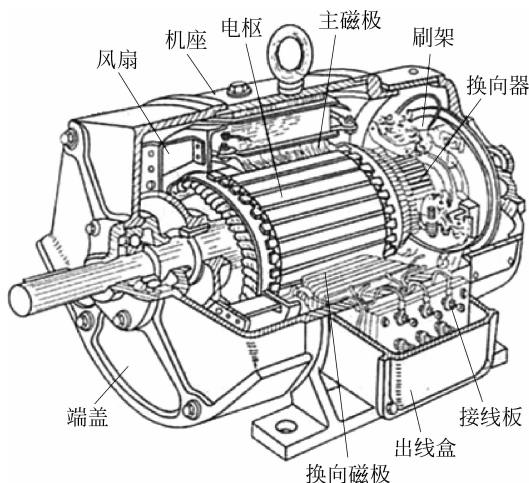


图 3-2 中小型直流电动机的内部结构

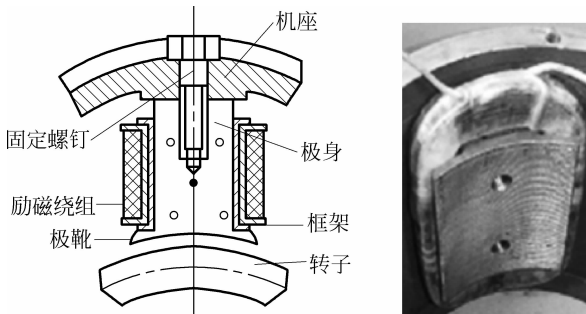
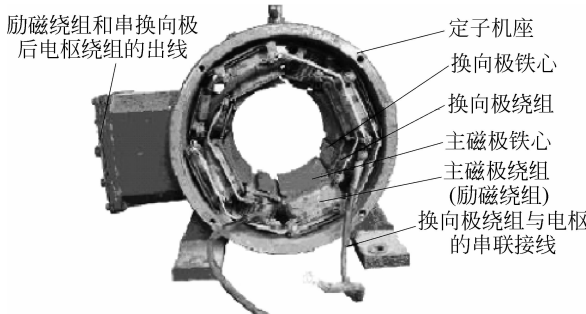
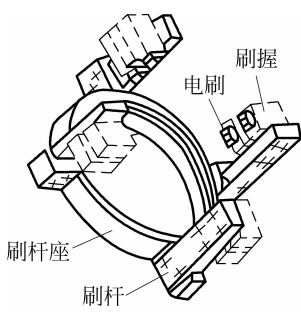
### 1. 直流电动机的定子

直流电动机的定子是用来产生主磁场和作为电动机的机械支撑,由机座、主磁极、换向磁极、电刷装置和端盖等部件组成,各组成部件的作用见表 3-1。

表 3-1 直流电动机定子部件的作用

| 部件名称 | 部件作用                                                                     | 图 例 |
|------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 机座   | 一方面用来固定主磁极、换向磁极、端盖,起到机械支撑作用;另一方面也是磁路的一部分,在相邻磁极之间构成磁通的路径。机座一般为铸钢件或由钢板焊接而成 |     |

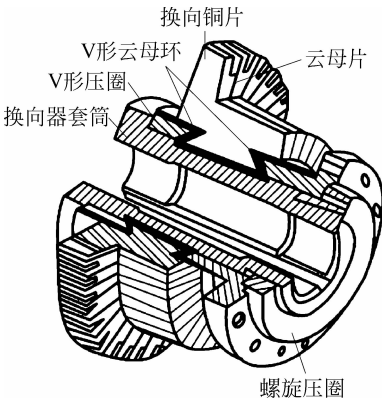
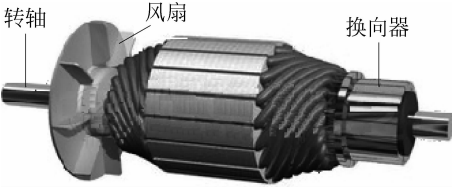
续表

| 部件名称 | 部 件 作 用                                        | 图 例                                                                                  |
|------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 主磁极  | 产生气隙主磁场,由铁心和励磁绕组构成,固定在机座的内圆周上                  |    |
| 换向磁极 | 改善直流电动机的换向,由铁心和换向绕组构成,位于两个主磁极之间的中心线上,用螺杆固定在机座上 |   |
| 电刷装置 | 连接旋转的电枢电路与静止的外电路,由电刷、刷握、刷杆等部分组成                |  |

2. 直流电动机的电枢(转子)

直流电动机的转子作用是产生电磁转矩,从而实现能量转换,由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成,各组成部件的作用见表 3-2。

表 3-2 直流电动机电枢部件的作用

| 部件名称  | 部件作用                                      | 图 例                                                                                                                                  |
|-------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 电枢铁心  | 用来嵌放电枢绕组,是磁路的一部分。一般用 0.5mm 厚的硅钢片冲制叠压而成    |                                                    |
| 电枢绕组  | 产生感应电动势,通过电流后,产生电磁转矩和实现能量转换               | <br>电枢绕组引出线端                                       |
| 换向器   | 实现交、直流的转换,由许多换向片组成圆柱体,换向片之间用云母绝缘          | <br>换向铜片<br>V形云母环<br>V形压圈<br>换向器套筒<br>云母片<br>螺旋压圈 |
| 转轴、风扇 | 转轴用来传递转矩,一般用合金钢锻压加工而成。<br>风扇用来降低运行中电动机的温升 | <br>转轴 风扇 换向器                                    |

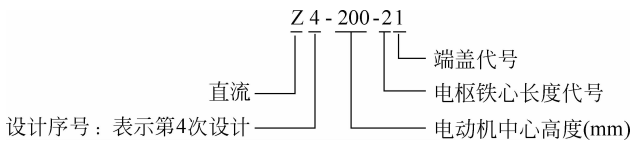
## 二、直流电动机的铭牌

在直流电动机的外壳上有一块铭牌,如图 3-3 所示。它标注了电动机在正常运行时的额定数据,以使用户能正确使用。



图 3-3 直流电动机铭牌

### 1. 型号



### 2. 额定值

直流电动机的额定值见表 3-3。

表 3-3 直流电动机额定值

| 名 称    | 符号       | 单位    | 意 义                                                   |
|--------|----------|-------|-------------------------------------------------------|
| 额定功率   | $P_N$    | W     | 指电动机在额定情况下,长期运行所允许的输出功率。直流电动机额定功率是指转轴上输出的机械功率         |
| 额定电压   | $U_N$    | V     | 指在额定运行情况下,从电刷两端输入给电动机的电源电压                            |
| 额定电流   | $I_N$    | A     | 指长期连续运行时,允许从电源输入的电流                                   |
| 额定转速   | $n_N$    | r/min | 指当直流电动机电压、电流和输出功率均为额定值时转子的转速                          |
| 额定励磁电压 | $U_{LN}$ | V     | 指加在励磁绕组上的额定电压                                         |
| 额定励磁电流 | $I_{LN}$ | A     | 指在额定励磁电压下,通过励磁绕组的额定电流                                 |
| 励磁方式   |          |       | 指直流电动机励磁绕组连接和供电方式                                     |
| 定额     |          |       | 指电动机在额定值下允许的持续运行时间。一般分为连续、短时和断续三种工作方式,分别用 S1、S2、S3 表示 |
| 温升     |          | ℃     | 指电动机在额定运行时,允许的工作温度减去环境温度的数值                           |
| 绝缘等级   |          |       | 指电动机采用的绝缘材料的耐热等级                                      |

## 三、直流电动机的分类

直流电动机按励磁方式可分为他励直流电动机、并励直流电动机、串励直流电动机和复励直流电动机,如图 3-4 所示。直流电动机的励磁方式不同,其性能和应用场合也不同。

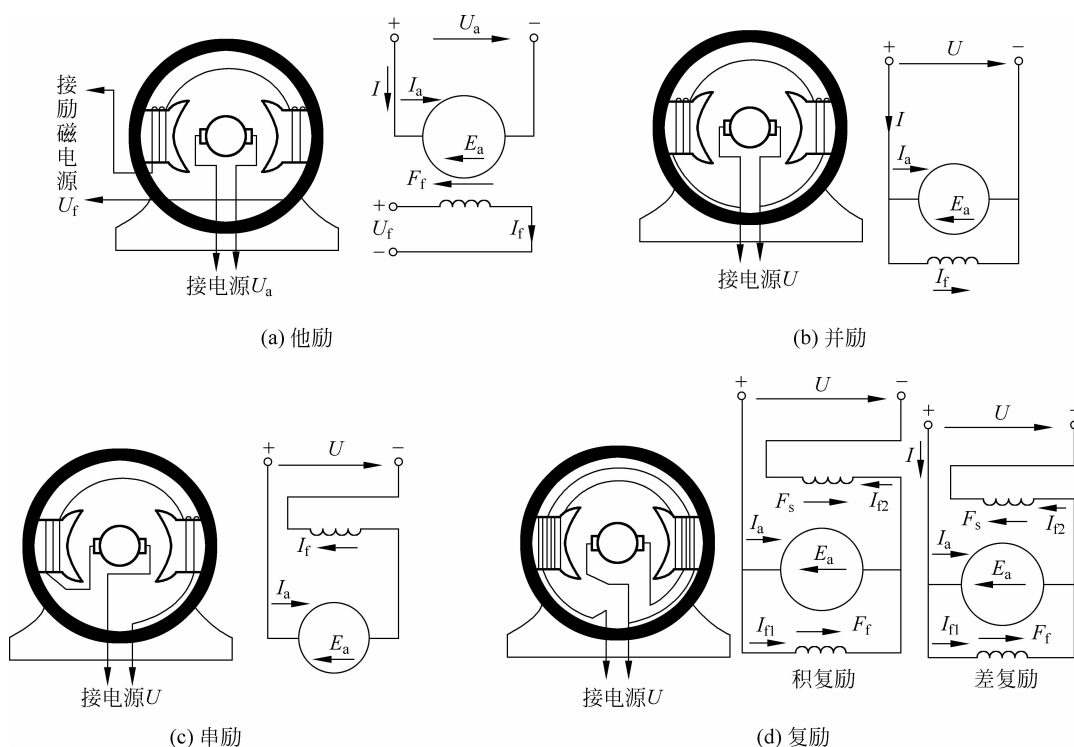


图 3-4 直流电动机工作的励磁方式

#### 四、直流电动机的工作原理

直流电动机工作原理如图 3-5 所示。N 和 S 是一对固定的主磁极，主磁极上绕有励磁绕组，磁极之间有一个可以转动的电枢铁心，其表面固定了电枢线圈  $abcd$ 。电枢线圈的两端分别接到换向器的换向片 1 和换向片 2 上。有两个固定的电刷 A 和 B 通过弹簧压在换向器的换向片 1 和换向片 2 上，以实现外电路与转子电路的滑动连接。

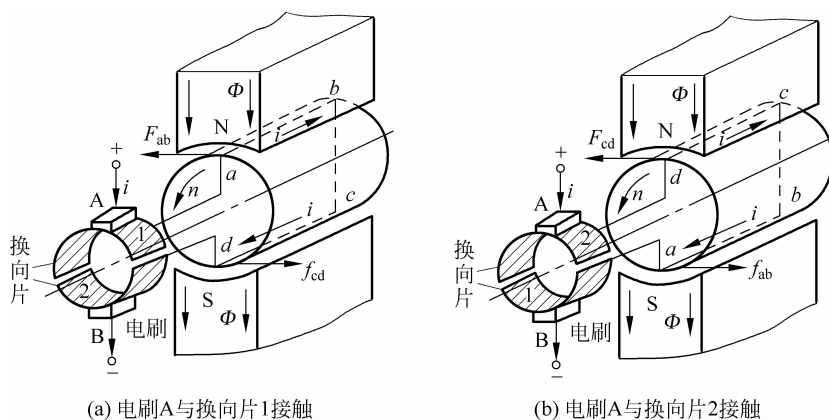


图 3-5 直流电动机工作原理

在直流电源加到电刷 A 和 B 上之后,就会有电流流过线圈,其方向为  $abcd$ ,如图 3-5(a) 所示。因导体  $ab$  和  $cd$  分别处在主磁极 N 和 S 下面,由左手定则可知,电枢导体将产生一个逆时针方向的电磁转矩,驱动转子按逆时针方向旋转。当电枢转过  $180^\circ$  后,导体  $ab$  转到 S 极下, $cd$  转到 N 极下,由于电流仍然从电刷 A 流进,所以线圈中电流的方向为  $dcb a$ ,如图 3-5(b) 所示,由左手定则可知,电磁转矩的方向仍为逆时针。

由上面的分析可知,直流电动机借助电刷和换向器的作用,把电刷间的直流电转变为电枢绕组内的交流电,保持电磁转矩的方向不变,确保直流电动机朝着一定的方向连续旋转。

## 课题 3.2 直流电动机的机械性能

当直流电动机的电源电压  $U$ 、励磁电流  $I_f$ 、电枢回路总电阻  $R$  都等于常数时,转速  $n$  与转矩  $T$  之间的关系称为直流电动机机械特性。

### 一、直流电动机的电枢电动势

直流电动机运行时,电枢绕组元件在气隙磁场中运动,会切割磁力线产生感应电动势  $E_a$ ,称为电枢电动势。 $E_a$  的表达式为

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中, $C_e$  为电动势常数,该常数仅与电动机结构有关; $\Phi$  为气隙主磁通, Wb;  $n$  为电枢转速, r/min。

当直流电动机制造好以后, $C_e$  不再变化。因此,直流电动机的电枢电动势  $E_a$  仅与气隙主磁通和电枢转速有关,改变磁通和转速均可改变电枢电动势的大小。直流电动机的电枢电动势小于外加电源电压。

### 二、直流电动机的电磁转矩

根据电磁力定律,当电枢绕组中有电枢电流流过时,在磁场内将受到电磁力的作用,形成的转矩称为电磁转矩。电磁转矩的大小与气隙主磁通  $\Phi$  和电枢电流  $I_a$  成正比,计算公式为

$$T = C_T \Phi I_a (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中, $C_T$  为转矩常数,该常数仅与电动机结构有关; $\Phi$  为气隙主磁通, Wb;  $I_a$  为电枢电流, A。

对于直流电动机,电磁转矩是驱动转矩,只有克服直流电动机的负载转矩和机械转矩,才能实现稳态运行,其转矩平衡方程为

$$T = T_2 + T_0$$

式中, $T_2$  为直流电动机轴上输出的机械转矩,为制动性质; $T_0$  为空载时机械转矩,为制动性质。

### 三、直流电动机的机械特性

由于直流电动机的励磁方式不同,其机械特性也不同。

#### 1. 他励(并励)直流电动机的机械特性

他励(并励)直流电动机的机械特性曲线如图 3-6 所示,是一条稍向右下倾斜的直线。

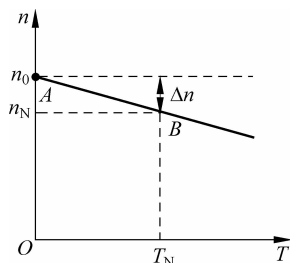


图 3-6 他励(并励)直流电动机的机械特性曲线

他励(并励)直流电动机具有硬的机械特性。当负载增大时转速略有下降,但变化不大,具有恒转矩特性。通常适用于负载变化时要求转速比较稳定的场合,经常用于金属切削机床、造纸机械等要求恒速的场合。

#### 2. 串励直流电动机的机械特性

串励直流电动机的机械特性曲线如图 3-7 所示。

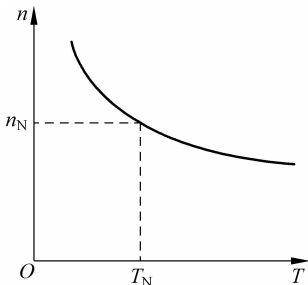


图 3-7 串励直流电动机的机械特性曲线

串励直流电动机具有软的机械特性。在轻负载时,电动机转速很快;负载转矩增加时,其转速较慢。另外,具有起动转矩大,过载能力强等特点。通常适用于负载变化较大,且不可能空转的场合。例如电钻、电动机车、地铁电动车组、城市电车、挖掘机、铲车、起重机等。

## 课题 3.3 直流电动机的运行

### 一、直流电动机的起动

直流电动机由静止状态加速达到稳定运行状态的过程,称为起动过程。电动机接通



电源起动瞬间,起动电流可达额定电流的  $10\sim 20$  倍,因此,直流电动机一般不允许直接起动。为了限制起动电流,直流电动机通常采用电枢回路串电阻起动和降压起动。

### 1. 电枢串电阻起动

电枢串电阻起动就是在电枢回路串入可变的起动电阻,将直流电动机接入额定电压进行起动。当电动机起动后,随着转速的升高,反电动势增大,电枢电流减小,再逐步减小起动电阻阻值,直到电动机稳定运行,起动电阻全部切除。

电枢串电阻起动,方法简单、成本低,但电阻上的能量浪费多。对于小型直流电动机一般采用串电阻起动,容量稍大但不需要经常起动的直流电动机也可采用电枢串电阻起动。

### 2. 降压起动

降压起动就是在直流电动机起动时降低电枢电压。在直流电动机起动的瞬间,电枢绕组只加一个较低的直流电压,使起动电流减小。随着转速的不断增加,反电动势也逐渐增大,此时适当增加电枢电压,直到额定电压运行,起动完毕。

降压起动,起动过程平滑、电能浪费少,但设备成本高、控制系统复杂。容量大且经常起动的直流电动机宜采用降压起动。

采用降压起动时,并励电动机的励磁电压必须是额定值,以保证磁通有额定值。降压起动只能在电动机有专用电源时才能采用。目前,经常采用晶闸管可控整流电路作为直流电动机的可调电压电源。

## 二、直流电动机的反转

通过改变电磁转矩的方向,可实现直流电动机的反转。直流电动机的电磁转矩是由主磁通和电枢电流相互作用而产生的,要改变电磁转矩的方向,只要改变主磁通的方向或电枢电流的方向即可。如果同时改变主磁通方向和电枢电流的方向,则电磁转矩方向不变。因此,改变直流电动机转向的方法:一是将励磁绕组反接,改变励磁电流的方向;二是将电枢绕组反接,改变电枢电流的方向。

对于他励和并励电动机,由于励磁绕组的匝数多、电感大,反向磁通的建立过程缓慢,所以一般采用变电枢电流方向的办法来改变电动机的转向。

对于串励电动机,通过改变励磁电流的方向或电枢电流的方向,来改变电磁转矩的方向,从而实现电动机的反转。

## 三、直流电动机的调速

调速是指在机械负载不变的情况下,根据实际需要人为地改变电动机转速。

当转矩不变时,直流电动机的调速方法有改变电枢电阻、改变主磁通、改变电枢电压三种。

### 1. 改变电枢电阻调速

改变电枢电阻调速就是在直流电动机的电枢回路中串联一只调速变阻器来实现调速。改变电枢电阻调速属于恒转矩调速,转速只能由额定转速往下调。改变电枢电阻调速的机械特性曲线如图 3-8 所示, $n_1$  小于额定转速  $n_N$ 。

改变电枢电阻调速的特点：调速设备简单、投资少、操作方便；只能分级调速，调速平滑性差；低速时，机械特性很软，转速受负载影响大；运行时调速电阻上电能损耗大，经济性能差。

改变电枢电阻调速主要应用在调速范围不大、调速的相对稳定性要求不高、断续工作的生产机械上。

## 2. 改变主磁通调速

改变主磁通调速就是通过改变励磁电流的大小来实现调速。改变主磁通调速属于恒功率调速，转速只能由额定转速往上调。改变主磁通调速的机械特性曲线如图 3-9 所示， $n_1$  大于额定转速  $n_N$ 。

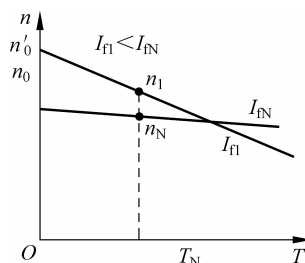
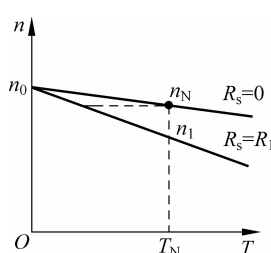


图 3-8 改变电枢电阻调速机械特性曲线 图 3-9 改变主磁通调速机械特性曲线

改变主磁通调速的特点：调速在励磁回路中进行，由于励磁电流较小，因而功率较小，设备容量较小，损耗小，调速的经济性好；能无级调速，平滑性好；调速时最高转速受电动机本身的换向条件和机械强度的限制，不能太高，所以调速范围较窄。

改变主磁通调速主要应用在恒功率负载的生产机械上。

## 3. 改变电枢电压调速

改变电枢电压调速就是通过改变直流电源来改变电枢电压实现调速。改变电枢电压调速属于恒转矩调速，电动机电枢电压只能由额定值往下调，则转速只能由额定转速往下调。改变电枢电压调速的机械特性曲线如图 3-10 所示， $n_1$  小于额定转速  $n_N$ 。

改变电枢电压调速的特点：机械特性的斜率不变，所以调速的稳定性好；电压可以连续变化，调速的平滑性好，可实现无级调速，调速范围大；调速所用设备多、投资大。

改变电枢电压调速主要应用在调速性能（调速范围、调速的平滑性和稳定性）要求比较高的生产机械上。

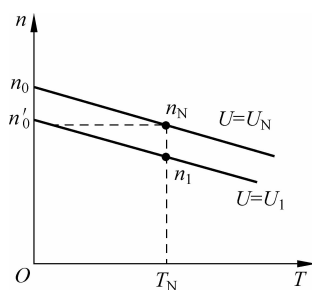


图 3-10 改变电枢电压调速机械特性曲线

## 四、直流电动机的制动

制动就是指为了尽快地使电动机停转，或者从高速运行降低到低速运行，都需要在电动机轴上施加一个与转向相反的制动转矩。直流电动机的制动可以分为机械制动和电气制动。电气制动又分为能耗制动、反接制动和回馈制动。