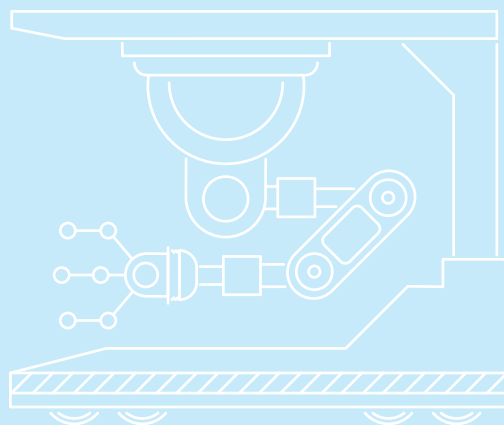


# 项 目

## 直流电机的应用与维护





## 任务一

## 认识直流电机



## 任务分析

直流电机是实现直流电能与机械能之间相互转换的电力机械,按照用途可以分为直流电动机和直流发电机两类。其中将机械能转换成直流电能的电机称为直流发电机,如图 1-1 所示;将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机,如图 1-2 所示。直流电机是工矿、交通、建筑等行业中的常见动力机械,是机电行业人员的重要工作对象之一。电气控制技术人员必须熟悉直流电机的结构、工作原理和性能特点,掌握主要参数的分析计算,并能正确熟练地使用直流电机。



图 1-1 直流发电机



图 1-2 直流电动机



## 任务目标

- 了解直流电机的特点、用途和分类;熟悉直流电机的基本工作原理;
- 认识直流电机的外形和内部结构,熟悉各部件的作用;
- 了解直流电机铭牌中型号和额定值的含义,掌握额定值的简单计算;
- 会进行直流电动机的检测、接线和简单操作。



## 知识链接

## 一、直流电机的特点和用途

## 1. 直流电机的特点

直流电机与交流电机相比,具有优良的调速性能和起动性能。直流电动机具有宽广的调速范围,平滑的无级调速特性,可实现频繁的无级快速起动、制动和反转;过载能力强,能承受频繁的冲击负载;能满足自动化生产系统的各种特殊运行要求。而直流发电机则能提

供无脉动的大功率直流电源,且输出电压可以精确地调节和控制。

但直流电机也有它明显的缺点:一是制造工艺复杂,消耗有色金属较多,生产成本低;二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花,因而可靠性较差,维护比较困难。所以其在一些对调速性能要求不高的领域中已被交流变频调速系统所取代。但是在某些要求调速范围大、调速性好、精密度高、控制性能优异的场所,直流电机的应用目前仍占有较大的比重。

## 2. 直流电机的用途

由于具有良好的起动和调速性能,直流电动机常应用于对起动和调速有较高要求的场合,如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、宾馆高速电梯、龙门刨床、电力机车、内燃机车、地铁列车、城市电车、电动自行车、造纸机、船舶机械、大型精密机床和大型起重机等,如图 1-3 所示。



图 1-3 直流电动机的用途

直流发电机主要用作各种直流电源,如直流电动机电源、化学工业中所需的低电压大电流的直流电源、直流电焊机电源等,如图 1-4 所示。

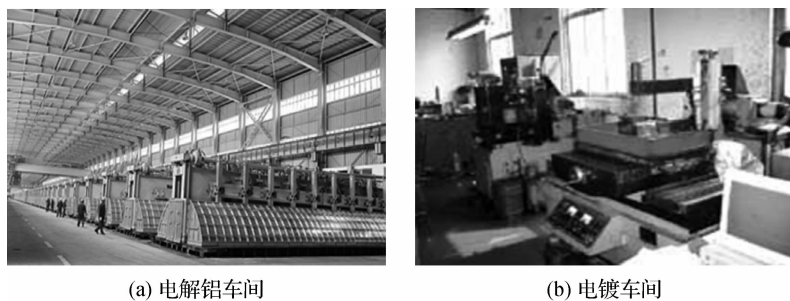
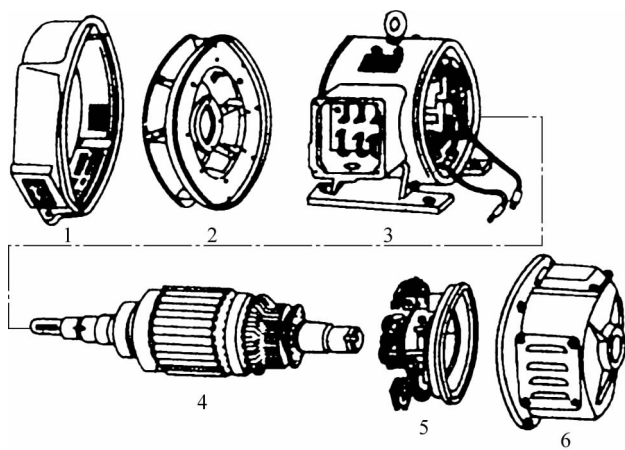


图 1-4 直流发电机的用途

## 二、直流电机的基本结构

直流电机由两个主要部分组成:一是静止部分,称为定子,主要用来产生磁通;二是转动部分,称为转子(通称电枢),是机械能变换为电能(发电机)或电能变换为机械能(电动机)的枢纽。在定子与转子之间有一定的间隙,称为气隙。图 1-5 所示为直流电机的主要部件,图 1-6 所示为直流电机的剖面图。下面简要介绍直流电机主要部件的结构及其作用。



1—前端盖; 2—风扇; 3—定子; 4—转子; 5—电刷及刷架; 6—后端盖。

图 1-5 直流电机的主要部件



动画  
直流电机外形  
结构与解剖

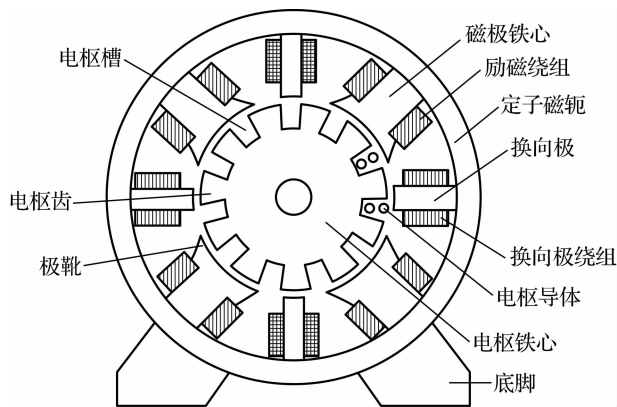


图 1-6 直流电机的剖面图

### 1. 定子部分

#### 1) 主磁极

主磁极由磁极铁心和励磁绕组组成。当励磁绕组中通入直流电流后,铁心中即产生励磁磁通,并在气隙中建立励磁磁场。励磁绕组通常用圆形或矩形绝缘导线制成一个集中的线圈,套在磁极铁心外面。磁极铁心一般用 $1\sim 1.5\text{ mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成,主磁极铁心柱体部分称为极身,靠近气隙一端较宽的部分称为极靴,极身与极靴交界处形成一个突出的肩部,用以支撑住励磁绕组。整个主磁极用螺杆固定在机座上。主磁极总是 N、

S 两极成对出现。用  $p$  表示电机的极对数,图 1-6 中的极对数  $p=2$ ,即有 2 对主磁极,此电机常称为 4 极电机。

#### 2) 换向极

换向极由铁心和换向极绕组组成,当换向极绕组通过直流电流后,它所产生的磁场对电枢磁场产生影响,目的是改善换向,使电刷与换向片之间的火花减小。换向极绕组总是与电枢绕组串联,它的匝数少、导线粗。换向极铁心通常用厚钢板叠制而成,用螺杆安装在相邻两主磁极之间的机座上。直流电机功率很小时,换向极数可以减少为主磁极数的一半,甚至不装换向极。

#### 3) 电刷装置

在直流电机中,为了使电枢绕组和外电路连接起来,必须装设固定的电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座组成。电刷是用石墨等做成的导电块,放在刷握内,用弹簧压指将它压触在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上,用铜绞线将电刷和刷杆连接,刷杆装在刷杆座上,彼此绝缘,刷杆座装在端盖上。

#### 4) 机座

机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等,所以要求它有一定的机械强度;另一方面作为电机磁路的一部分(称为磁轭),因此,又要求它有较好的导磁性能。机座一般用铸钢或钢板焊接制成。

### 2. 转子部分

#### 1) 电枢铁心

电枢铁心是主磁路的一部分,同时要安放电枢绕组。由于电机运行时,电枢与气隙磁场间有相对运动,铁心中也会产生感应电动势而出现涡流和磁滞损耗。为了减少损耗,电枢铁心通常用厚度为 0.5 mm、表面涂绝缘层的圆形硅钢冲片叠压而成。冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽,槽内可安放电枢绕组,有的冲片上还冲有许多圆孔,以形成改善散热的轴向通风孔。

#### 2) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩,实现机电能量转换。绕组通常用漆包线绕制而成,嵌入槽内后,用槽楔压紧;线圈伸出槽外的端接部分用无纬玻璃丝带扎紧。

#### 3) 换向器

换向器的作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流,或是将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔绝缘云母片排列而成的圆柱体,每片换向片的一端有高出的部分,上面铣有线槽,供电枢绕组引出端焊接用。

### 3. 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。它的路径虽然很短,但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻(一般小型电机的气隙为 0.7~5 mm,大型电机为 5~10 mm),对电机性能有很大的影响。

### 三、直流电机的工作原理

#### 1. 直流发电机的工作原理

如图 1-7 所示, N、S 是一对在空间固定不动的磁极(可以是永久磁铁,也可以是电磁铁),  $abcd$  是安装在可以转动的圆柱体上的一个线圈, 线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环(称为换向片)上, 换向片分别与固定不动的电刷(A 和 B)相接。这样, 旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

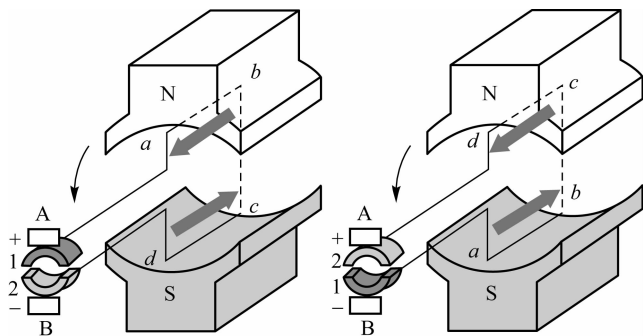


图 1-7 直流发电机的工作原理

当原动机带着电枢沿逆时针方向旋转时, 线圈两个有效边  $ab$  和  $cd$  将切割磁力线而产生感应电动势, 方向按右手定则确定。如图 1-7 所示, 导体  $ab$  中的电动势方向由  $b$  指向  $a$ , 导体  $cd$  中的电动势则由  $d$  指向  $c$ , 从整个线圈来看, 电动势的方向为  $d$  指向  $a$ , 故外电路中的电流自换向片 1 流至电刷 A, 经过负载, 流至电刷 B 和换向片 2, 进入线圈。此时, 电流流出处的电刷 A 为正电位, 用“+”表示, 电流流入线圈处的电刷 B 则为负电位, 用“-”表示, 即电刷 A 为正极, 电刷 B 为负极。

当线圈转过  $90^\circ$  时, 两个线圈的有效边  $ab$ 、 $cd$  位于磁场物理中性面上, 导体的运动方向与磁力线平行, 不切割磁力线, 因此感应电动势为零。虽然两电刷同时与两换向片相接, 把线圈短路, 但线圈中无电动势和电流。

当线圈转过  $180^\circ$  时, 线圈有效边中的电动势方向改变, 在 S 极下为  $a \rightarrow b$ , 在 N 极下为  $c \rightarrow d$ 。由于此时电刷 A 和电刷 B 所接触的换向片已经互换, 因此电刷 A 仍为正极, 电刷 B 仍为负极, 输出电流的方向不变。

由以上分析可得出直流发电机的工作原理: 当原动机带动直流发电机电枢旋转时, 在电枢绕组中产生方向交变的感应电动势, 通过电刷和换向器的作用, 在电刷两端输出方向不变的直流电动势。

#### 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机在机械构造上与直流发电机完全相同, 图 1-8 所示是直流电动机的工作原理图。电枢不用外力驱动, 把电刷 A、B 接到直流电源上, 假定电流从电刷 A 流入线圈, 沿  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  方向, 从电刷 B 流出。载流线圈在磁场中将受到电磁力的作用, 其方向按左手定则确定,  $ab$  边受到向上的力,  $cd$  边受到向下的力, 形成电磁转矩, 结果使电枢沿逆时针方向转动, 如图 1-8(a) 所



视频

直流电动机的工作原理



动画

直流发电机的工作原理



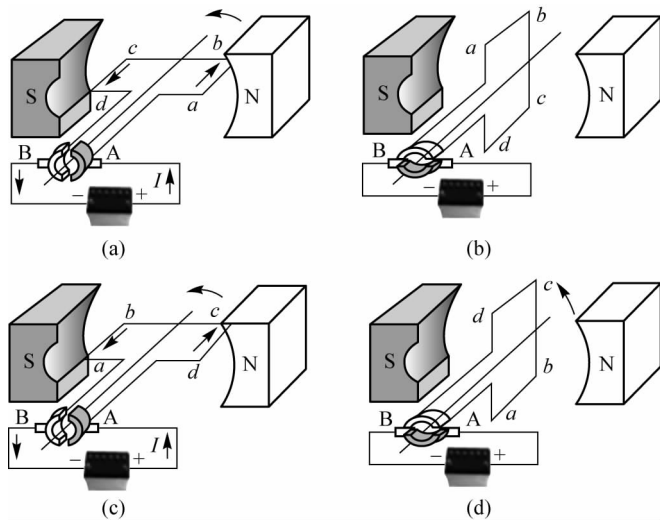
视频

直流电机的结构和工作原理



示。如图 1-8(b)所示,当电枢转过  $90^\circ$ 时,线圈中虽无电流和力矩,但其在惯性的作用下继续旋转。

如图 1-8(c)所示,当电枢转过  $180^\circ$ 时,电流仍然从电刷 A 流入线圈,沿  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$  方向,从电刷 B 流出。与图 1-8(a)比较,通过线圈的电流方向改变,但两个线圈边受电磁力的方向没有改变,即电动机只朝一个方向旋转。若要改变其转向,必须改变电源的极性,使电流从电刷 B 流入,从电刷 A 流出。



动画

直流电动机原理演示

图 1-8 直流电动机的工作原理

由以上分析可得直流电动机的工作原理:当直流电动机接入直流电源时,借助于电刷和换向器的作用,直流电动机电枢绕组中流过方向交变的电流,从而使电枢产生恒定方向的电磁转矩,保证了直流电动机朝一定的方向连续旋转。

综上所述,不论是直流发电机还是直流电动机,换向器可以使正电刷 A 始终与经过 N 极下的导体相连,负电刷 B 始终与经过 S 极下的导体相连,故电刷之间的电压是直流电,而线圈内部的电流则是交变的,所以换向器是直流电机中换向的关键部件。通过换向器和电刷的作用,把直流发电机电枢中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势;把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流,以确保电动机沿恒定方向旋转。

### 3. 直流电机的可逆原理

比较直流发电机与直流电动机的结构和工作原理,可以发现:一台直流电机既可以作为发电机运行,也可以作为电动机运行,只是其输入输出的条件不同。

如果在电刷两端加上直流电源,将电能输入电枢,则从电机轴上输出机械能,驱动生产机械工作,这时直流电机将电能转换为机械能,工作在电动机状态。

如果用原动机驱动直流电机的电枢旋转,从电机轴上输入机械能,则从电刷两端可以引出直流电动势,输出直流电能,这时直流电机将机械能转换为直流电能,工作在发电机状态。

同一台电机,既能做发电机运行,又能做电动机运行的原理,称为电机的可逆原理。

## 四、直流电机的励磁方式

直流电机在进行能量转换时,不论是将机械能转换为电能的发电机,还是将电能转换为

机械能的电动机,都以气隙中的磁场作为媒介。除了采用磁铁制成主磁极的永磁式直流电机之外,直流电机都是通过在励磁绕组中通以励磁电流产生磁场的。励磁绕组获得电流的方式称为励磁方式。根据励磁支路和电枢支路的相互关系,有他励、自励(并励、串励和复励)两种励磁方式。

### 1. 他励方式

他励方式中,电枢绕组和励磁绕组电路相互独立,电枢电压与励磁电压彼此无关,接线图如图 1-9 所示。

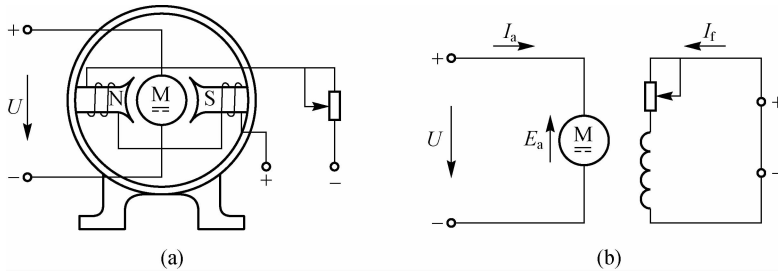


图 1-9 他励电机接线图

### 2. 并励方式

并励方式中,电枢绕组和励磁绕组是并联关系,由同一电源供电,接线图如图 1-10 所示。

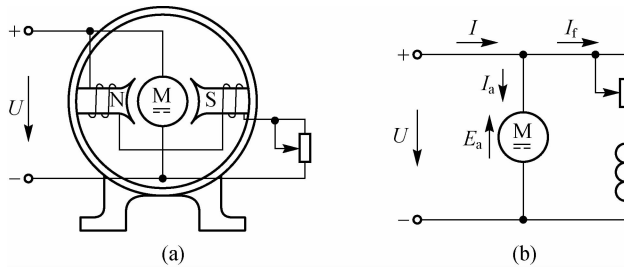


图 1-10 并励电机接线图

#### 1) 串励方式

串励方式中,电枢绕组与励磁绕组是串联关系,接线图如图 1-11 所示。

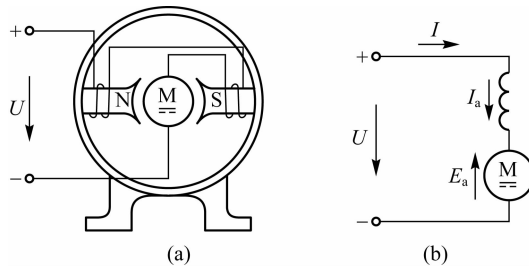


图 1-11 串励电机接线图



### 2)复励方式

复励电机的主磁极上有两部分励磁绕组,其中一部分与电枢绕组并联,另一部分与电枢绕组串联。当两部分励磁绕组产生的磁通方向相同时,称为积复励,反之称为差复励,接线图如图 1-12 所示。

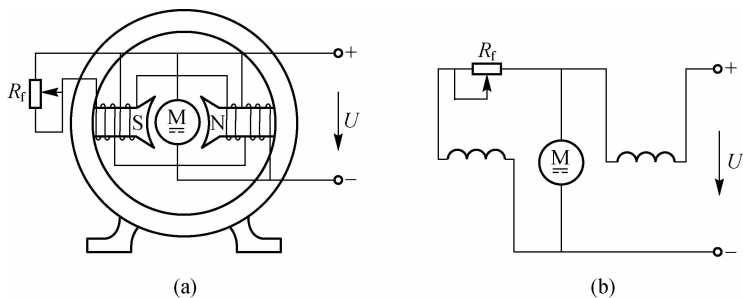


图 1-12 复励电机接线图

## 五、直流电机出线端子的标志

电机每个绕组的出线端子都有明确的标志,用字母标注在接线柱旁或引出导线的金属牌上。直流电机出线端标志如表 1-1 所示。

表 1-1 直流电机出线端标志

绕组名称	出线端标志	绕组名称	出线端标志
电枢绕组	A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	串励绕组	D <sub>1</sub> D <sub>2</sub>
换向极绕组	B <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	并励绕组	E <sub>1</sub> E <sub>2</sub>
补偿绕组	C <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	他励绕组	F <sub>1</sub> F <sub>2</sub>

注:下标“1”是首端,为正极;下标“2”是末端,为负极。

## 六、直流电机的铭牌数据与系列

每一台电机上都有一块铭牌,上面列出一些具体的数据,称为额定值。这是电机制造厂按照国家标准和该电机的特定情况规定的电机额定运行状态时的各种运行数据,也是对用户提出的使用要求。如果电机使用时处于轻载状态(即负载远小于额定值),则电机能持续正常运行,但效率低、不经济。如果电机运行超出额定值,则称为过载,将缩短电机的使用寿命甚至可能损坏。根据负载条件合理选用电机,使其运行数据接近额定值才会既经济合理,又可以使电机可靠地工作,并且具有优良的性能。表 1-2 是一台直流电机的铭牌。

表 1-2 直流电机的铭牌

型号	Z4-112/2-1	励磁方式	并励
功率	5.5 kW	励磁电压	180 V
电压	440 V	效率	81.190%
电流	15 A	定额	连续

续表

转速	3 000 r/min	温升	80 °C
出品号数	× × × ×	出厂日期	2001 年 10 月
× × × × 电 机 厂			

**【例 1-1】**一台直流电动机,额定功率  $P_N=22 \text{ kW}$ ,额定电压  $U_N=110 \text{ V}$ ,额定转速  $n_N=1\ 000 \text{ r/min}$ ,额定效率  $\eta_N=85\%$ ,求其额定电流和额定负载时的输入功率。

**解:** 额定电流  $I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{22 \times 10^3}{110 \times 85\%} \approx 235 \text{ A}$

输入功率  $P_1 = U_N I_N = 110 \times 235 = 25\ 850 \text{ W} = 25.85 \text{ kW}$

**【例 1-2】**一台直流发电机,额定功率  $P_N=11 \text{ kW}$ ,额定电压  $U_N=230 \text{ V}$ ,额定转速  $n_N=2\ 860 \text{ r/min}$ ,额定效率  $\eta_N=85\%$ ,求其额定电流和额定负载时的输入功率。

**解:** 由发电机三个额定值之间的关系  $P_N = U_N I_N$  得

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{11 \times 10^3}{230} \approx 47.82 \text{ A}$$

由额定效率公式  $\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\%$  得

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{11 \times 10^3}{0.85} \text{ W} \approx 12.94 \text{ kW}$$

## 七、直流电机的参数计算

直流电动机在电枢表面均匀分布的绕组中通入直流电流后,与电动机定子磁场相互作用产生电磁力形成电磁转矩,使其转子旋转。

### 1. 电磁转矩

在直流电动机中,电磁转矩是由电枢电流与合成磁场相互作用而产生的电磁力所形成的。根据电磁力定律,作用在电枢绕组中每一根导体上的平均电磁力为

$$f = Bli$$

对于给定的电动机,磁感应强度  $B$  与每极的磁通  $\Phi$  成正比;每根导体中的电流与从电刷流入的电枢电流成正比;导线长度  $l$  在电动机制成后是一个常量。所以直流电动机的电磁转矩  $T$  的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a$$

式中,  $C_T$  为与电动机结构有关的常数,称为转矩系数;  $\Phi$  为每极磁通,  $\text{Wb}$ ;  $I_a$  为电枢电流,  $\text{A}$ 。

由上式可知,直流电动机的电磁转矩与每极磁通和电枢电流的乘积成正比。电磁转矩的方向由左手定则判定。

直流电动机的电磁转矩  $T$  与转速  $n$  及轴上输出功率  $P$  的关系式为

$$T = 9\ 550 \frac{P}{n}$$

### 2. 电枢电动势

当电枢转动时,电枢绕组中的导体在不断切割磁力线,因此每根载流导体中将产生感应电动势,其平均值为  $E = Blv$ ,其方向由右手定则判定,如图 1-13 所示。将此图与图 1-8 对照

可以看出该电动势的方向与电枢电流的方向相反,因而称为反电动势。对于给定的直流电动机,磁感应强度  $B$  与每极磁通  $\Phi$  成正比,导体的运动速度  $v$  与电枢的转速  $n$  成正比,而导体的有效长度和绕组匝数都是常数,因此直流电动机两电刷间总的电枢电动势  $E_a$  的大小为

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中,  $C_e$  为与电动机结构有关的另一常数,称为电动势系数。

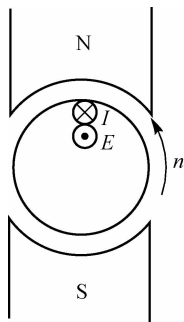


图 1-13 电枢电动势和电流

由此可知,直流电动机在旋转时,电枢电动势  $E_a$  的大小与每极磁通  $\Phi$  和电动机转速  $n$  的乘积成正比,它的方向与电枢电流方向相反,在电路中起着限制电流的作用。

### 3. 电磁功率

以上分析的电磁转矩和电枢电动势是直流电机的两个重要因素,在直流电机的机电能量转换中起着至关重要的作用。

直流发电机是将机械能转换成电能的电磁装置。当直流发电机在原动机输入的机械功率产生的拖动转矩的作用下逆时针匀速旋转时,发电机电枢绕组的载流导体将受到电磁转矩的作用,而且电磁转矩的方向与拖动转矩的方向相反,是制动转矩。如果这时原动机不继续输入机械功率,则发电机转速将下降,直至为零,也就不能输出电能了。为了使发电机继续输出电能,原动机应不断地向发电机轴上输入机械功率,以产生拖动转矩去克服电磁转矩,保持发电机恒速运转,从而向外输出电功率。由此可知,电磁转矩作为拖动转矩的阻转矩来吸收原动机的机械功率,并通过电磁感应作用将其转换成电功率。原动机为克服电磁转矩所输入的这部分机械功率,可表示为电磁转矩与机械角速度的乘积。由于是电磁转矩,因此克服所消耗的这部分机械功率称为电磁功率,用  $P_{em}$  表示,即

$$P_{em} = T\Omega$$

其中,  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 。

根据电磁转矩表达式  $T = C_T \Phi I_a$  和  $\Omega = 2\pi n/60$  可得

$$P_{em} = T\Omega = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi n I_a = E_a I_a$$

上式表明,机械功率属性的电磁功率全部转换为电功率属性的电磁功率  $E_a I_a$ 。由此可见,发电机中的电磁转矩在机电能量转换过程中起着至关重要的作用,是机电能量转换得以实现的必要因素。有了电磁转矩,才迫使发电机从原动机吸收大部分机械功率,并通过电磁感应作用将其转变为电功率。电磁功率是联系机械能量和电磁能量的桥梁,在电磁能量与

机械能量的工程计算中有着非常重要的意义。

同理,直流电动机在机电能量转换过程中,为了连续转动而输出机械能,电源电压也必须不断向电动机输入电能,将电功率属性的电磁功率  $E_a I_a$  转变为机械功率,反电动势  $E_a$  在此也起着至关重要的作用。

#### 4. 电动势平衡方程式

图 1-14 所示为他励直流电动机的结构示意图和电路图。电枢电动势为反电动势,与电枢电流方向相反;电磁转矩为拖动转矩,与电动机转速的方向一致; $T_L$  为负载转矩; $T_0$  为空载转矩,与电动机转速的方向相反。

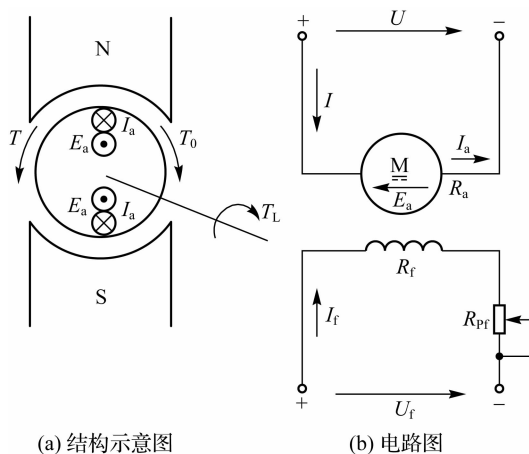


图 1-14 他励直流电动机的结构示意图和电路图

由基尔霍夫定律可知,在电动机电枢电路中存在如下回路电压方程式。

$$U = E_a + I_a R_a$$

式中, $U$  为电枢电压; $I_a$  为电枢电流; $R_a$  为电枢回路内电阻。

#### 5. 功率平衡方程式

电动机在机电能量转换中,同样遵循能量守恒定律,因此它不可能将输入的电功率全部转换成机械功率,在转换过程中总有一部分能量不能被利用,这部分能量称为损耗。直流电动机的损耗按产生的性质可分为机械损耗、铁心损耗、铜耗和附加损耗四种,下面分别讨论各种损耗产生的原因及影响损耗大小的因素。

##### 1) 机械损耗 $P_m$

电动机旋转时,必须克服摩擦阻力,因此产生机械损耗。其中有轴与轴承摩擦损耗,电刷与换向器摩擦损耗,以及转动部分与空气的摩擦损耗等。机械损耗与电动机转速的高低有关。当电动机的转速变化不大时,可认为机械损耗基本不变,即为不变损耗。

##### 2) 铁心损耗 $P_{Fe}$

当直流电动机旋转时,电枢铁心中因磁场反复变化而产生的磁滞损耗和涡流损耗称为铁心损耗。在转速和气隙磁密变化不大时,可认为铁心损耗也是不变的,即为不变损耗。

以上分析了机械损耗  $P_m$  和铁心损耗  $P_{Fe}$ 。这两种损耗在直流电动机已经转起来,但还没有带负载时就有,即空载时就已经存在。因此,这两种损耗合称空载损耗  $P_0$ ,即

$$P_0 = P_m + P_{Fe}$$

两者都是不变损耗。

### 3) 铜耗 $P_{Cu}$

当直流电动机运行时,在电枢回路中有电枢电流流过,把该电流在电枢绕组的电阻上产生的损耗称为铜耗。由于电动机运行时,电枢电流随负载的变化而变化,因此电动机中的铜耗为可变损耗。

### 4) 附加损耗 $P_S$

附加损耗又称杂散损耗,电枢齿槽的存在、电枢反应的影响等都会产生附加损耗。

**注意:**附加损耗很难计算和测定,一般靠经验估算。对有补偿绕组的电机,附加损耗可取为  $0.5\%P_N$ ;而对无补偿绕组的电机,附加损耗可取  $1\%P_N$ 。

综上所述,直流电动机总损耗  $\sum P$  为

$$\sum P = P_m + P_{Fe} + P_{Cu} + P_S$$

当他励直流电动机接上电源时,电枢绕组流过电流,电源向电动机输入的电功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cua}$$

上式表明,输入的电功率有很小一部分被电枢绕组消耗(电枢铜耗),而大部分作为电磁功率转换成机械功率。

从上面的分析可知:当电动机转动时,还要克服各类摩擦引起的机械损耗、电枢铁心损耗及附加损耗,所以电磁功率转变出来的机械功率,一小部分消耗在机械损耗和铁心损耗上,大部分从电动机轴上输出,故电动机输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m - P_S$$

若忽略附加损耗,则输出机械功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \\ &= P_1 - P_{Cua} - P_0 \\ &= P_1 - \sum P \end{aligned}$$

则直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\%$$

一般中小型直流电动机的效率为  $75\% \sim 85\%$ ,大型直流电动机的效率为  $85\% \sim 94\%$ 。他励直流电动机的功率平衡关系可用功率流程图来表示,如图 1-15 所示。

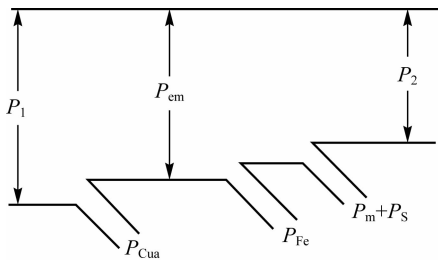


图 1-15 他励直流电动机的功率流程图

### 6. 转矩平衡方程式

经过上述分析可知,要使直流电动机处于稳定运行状态,即转速恒定,就必须使加在电动机轴上的所有转矩保持平衡。而电动机稳定运行时,作用在电动机轴上的转矩有三个:一个是电磁转矩  $T$ ,方向与转速  $n$  相同,为拖动转矩或驱动转矩;一个是电动机空载损耗转矩  $T_0$ ,即电动机空载运行时的阻转矩,方向总与转速  $n$  方向相反,为制动转矩;还有一个是轴上所带生产机械的负载转矩  $T_L$ ,即电动机轴上的输出转矩,也可视为制动转矩。因此可得电动机稳定运行时的转矩平衡关系式为拖动转矩等于总的制动转矩,即

$$T = T_L + T_0$$

由于空载转矩  $T_0$  的数值仅为电动机额定转矩的  $2\% \sim 5\%$ ,因此空载转矩在重载或额定负载下常忽略不计;而电动机轴上输出的机械转矩  $T_2$  与电动机轴上所带的负载转矩  $T_L$  相平衡,即  $T_2 = T_L$ ,则由  $T = T_2 + T_0$  可得电动机输出转矩的常用计算公式为

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60} \approx 9.55 \frac{P_2}{n}$$

在额定情况下,  $P_2 = P_N, T_2 = T_N, n = n_N$ , 则

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$



项目名称	直流电机的应用与维护	生产单位		生产车间	
生产任务名称	认识直流电机	下单人		完成时间	
生产班组		接单人		工号	

生产目标	<p><b>【知识目标】</b></p> <p>(1)学习电机实训的基本要求与安全操作注意事项;</p> <p>(2)认识在直流电机实训中所用的电机、仪表、变阻器等组件;</p> <p>(3)掌握他励电动机的接线、起动、改变旋转方向与调速的方法。</p> <p><b>【能力目标】</b></p> <p>(1)会区别各类电机;</p> <p>(2)能拆装直流电动机;</p> <p>(3)会检测、排除直流电机的常见故障。</p> <p><b>【素养目标】</b></p> <p>(1)团队协作与沟通能力;</p> <p>(2)分析和解决问题能力。</p>

生产任务 (一)	材料单				
	序号	名称	规格	数量	说明



1. 认识工作台

认识电机及电气技术任务装置各面板及使用方法,讲解任务的基本要求、安全操作和注意事项。

2. 用伏安法测电枢的直流电阻

步骤:

(1)按图 1-16 接线,电阻  $R$  用 EM-03 上的  $1\ 800\ \Omega$  变阻器并调至最大。电流表  $A$  选用实训台上挂箱 EM-06 直流、毫安、安培表,量程选用  $5\ \text{A}$ 。

(2)接电枢电源,并调至  $220\ \text{V}$ 。调节  $R$ ,使电流表读数为  $0.2\ \text{A}$ ,测量电枢两端电压  $U$  和电流  $I$ 。将电机分别旋转  $1/3$  周和  $2/3$  周,同样测取  $U$ 、 $I$ 。上述三组数据填入表 1-3 中。

(3)增大  $R$ ,使电流分别为  $0.15\ \text{A}$  和  $0.1\ \text{A}$ ,用同样方法测取 6 组数据,填入表 1-3 中。

取三次测量的平均值作为实际冷态电阻值:

$$R_a = \frac{1}{3} (R_{a1} + R_{a2} + R_{a3})$$

室温为 \_\_\_\_\_  $^{\circ}\text{C}$ 。

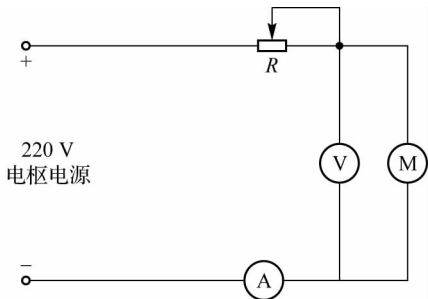


图 1-16

表 1-3

生产任务  
(二)

序号	$U/\text{V}$	$I/\text{A}$	$R(\text{平均})/\Omega$		$R_a/\Omega$
1		0.2	$R_{a11} =$	$R_{a1} =$	
			$R_{a12} =$		
			$R_{a13} =$		
2		0.15	$R_{a21} =$	$R_{a2} =$	
			$R_{a22} =$		
			$R_{a23} =$		
3		0.1	$R_{a31} =$	$R_{a3} =$	
			$R_{a32} =$		
			$R_{a33} =$		

表中,  $R_{a1} = \frac{1}{3} (R_{a11} + R_{a12} + R_{a13})$ ,  $R_{a2} = \frac{1}{3} (R_{a21} + R_{a22} + R_{a23})$ ,  $R_{a3} = \frac{1}{3} (R_{a31} + R_{a32} + R_{a33})$

3. 画出他励直流电动机起动的接线图,并标出电路在实训时的电阻值

4. 调节他励直流电动机的转速

改变串入电动机电枢回路的调节电阻  $R_1$  和励磁回路的调节电阻  $R_f$ ,写出转速的变化情况。

5. 改变电动机的转向

在断电情况下,将电枢(或他励绕组)的两端接线对调后,再按他励电动机的起动步骤起动电动机,并观察电动机的转向及转速表指针偏转的方向。

检查评价	序号	考核内容	考核要求	成绩
	1	技能训练的准备	预习技能训练的内容	
	2	仪器、仪表的使用	正确使用万用表、转速表、实验台等设备	
	3	观察和记录直流电动机等设备的技术数据	记录结果正确,观察速度快	
	4	直流电动机的接线	电路绘制正确、简洁,接线速度快,通电运行一次成功	
	5	直流电动机的反转与调速	正确使用调节电阻改变转速;正确改变接线使电动机反转	
	6	合计		
	7	否定项	发生重大责任事故、严重违反安全操作直接视为不合格	

初审		终审		总成绩	
----	--	----	--	-----	--



## 任务二 直流电动机的调速



### 任务分析

直流电动机的最大优点是具有线性的机械特性,调速性能优异,因此其广泛应用于对调速性能要求较高的电气自动化系统中。要了解、分析和掌握直流电动机的调速方法,首先要掌握直流电动机的机械特性,了解生产机械的负载特性。直流电动机有三种不同的人为机械特性,所对应的就是三种不同性能的调速方法,分别应用于不同的场合。因此,熟悉机械特性是基础,掌握调速方法是目的。知道了各种调速方法的性能特点后,就可以根据实际生产机械负载的工艺要求选择一种最合适的调速方法,发挥直流电动机的最大效益。



### 任务目标

- 熟悉他励直流电动机机械特性方程的表达式;
- 掌握他励直流电动机机械特性的特点;
- 了解生产机械的负载特性;
- 了解直流电动机稳定运行条件;
- 熟悉他励直流电动机调速的目的;
- 理解他励直流电动机调速指标的含义;

- ▶重点掌握直流电动机的三种调速方法；
- ▶学会直流电动机调速方法的操作。



## 知识链接

直流电动机的机械特性是指在稳定运行情况下,电动机的转速与电磁转矩之间的关系,即  $n=f(T)$ 。机械特性是电动机的主要特性,是分析电动机起动、调速、制动等问题的重要工具。下面以他励直流电动机为例讨论机械特性。

### 一、他励直流电动机的机械特性

#### 1. 机械特性的一般表达式

他励直流电动机的电动势平衡方程为  $U=E_a+I_aR$ 。因为  $E_a=C_e\Phi n$ ,所以  $n=\frac{E_a}{C_e\Phi}$ 。根据  $T=C_T\Phi I_a$ ,得  $I_a=T/C_T\Phi$ ,可得机械特性方程为

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_eC_T\Phi^2}T$$

当  $U$ 、 $R$ 、 $\Phi$  的数值不变时( $C_e$ 、 $C_T$  是由电动机结构决定的常数),转速  $n$  与电磁转矩  $T$  为线性关系。他励直流电动机的机械特性曲线如图 1-17 所示。

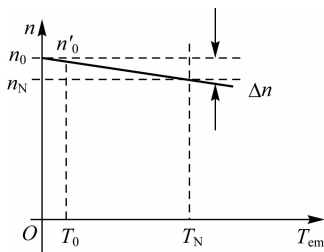


图 1-17 他励直流电动机的机械特性曲线

电动机的机械特性分为固有机械特性和人为机械特性。

#### 2. 他励直流电动机的固有机械特性

电枢加额定电压、气隙每极磁通量为额定值、电枢回路不串联电阻时(即  $U=U_N$ ,  $\Phi=\Phi_N$ ,  $R=0$ )的机械特性称为固有机械特性(自然特性),其特性方程为

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

由于电枢绕组的电阻  $R_a$  阻值很小,因此  $\Delta n$  很小,固有机械特性为硬特性。

#### 3. 他励直流电动机的人为机械特性

改变电压、电阻、磁通当中一个或几个就得到人为机械特性。他励直流电动机的人为机械特性有三种:电枢回路串电阻、改变电源电压、改变磁通。

1) 电枢回路串电阻的人为机械特性

保持  $U=U_N$ 、 $\Phi=\Phi_N$  不变, 只在电枢回路中串入电阻  $R_{pa}$  的人为机械特性, 称为电枢回路串电阻的人为机械特性, 特性方程为

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

与固有机械特性相比, 电枢回路串电阻的人为机械特性的特点为: 理想空载转速  $n_0$  不变, 与固有机械特性相同; 由于电枢回路串入电阻, 斜率变大, 机械特性变软。图 1-18 所示是不同  $R_{pa}$  时的一组人为机械特性。观察特性曲线可知, 改变电阻  $R_{pa}$ , 可使电动机的转速发生变化, 因此电枢回路串电阻的方法可以用于调速。

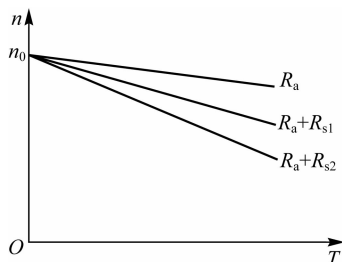


图 1-18 他励直流电动机电枢回路串电阻的人为机械特性

2) 改变电源电压的人为机械特性

当  $\Phi=\Phi_N$ , 电枢回路不串接电阻, 即  $R_{pa}=0$ , 改变电源电压的人为机械特性方程为

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

由于受到绝缘强度的限制, 电源电压只能从电动机额定电压  $U_N$  向下调节。

与固有机械特性相比, 改变电源电压的人为机械特性的特点为理想空载转速  $n_0$  正比于电压  $U$ ,  $U$  下降时,  $n_0$  成正比减小; 特性曲线斜率  $\beta$  不变。图 1-19 所示为改变电源电压的一组人为机械特性曲线, 它是一组平行直线。因此, 改变电源电压也可用于调速,  $U$  越低, 转速越低。

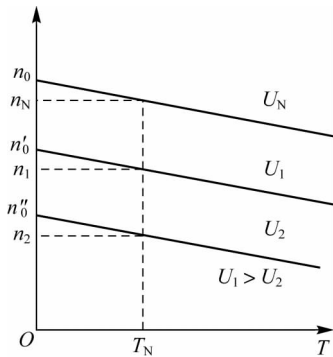


图 1-19 他励直流电动机改变电源电压的人为机械特性

3) 改变磁通的人为机械特性

保持电动机的电枢电压  $U=U_N$ , 电枢回路不串电阻(即  $R_{pa}=0$ )时, 改变磁通的人为机械特性方程式为

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

由于电机设计时,  $\Phi_N$  处于磁化曲线的膝部, 接近饱和段, 因此, 磁通只可从  $\Phi_N$  向下调节, 也就是调节励磁回路串接的可变电阻  $R_{pf}$  使其增大, 从而减小励磁电流  $I_f$ , 减小磁通  $\Phi$ 。

与固有机械特性相比, 改变磁通的人为机械特性的特点是: 理想空载转速与磁通成反比, 减弱磁通  $\Phi$ ,  $n_0$  升高; 斜率  $\beta$  与磁通的平方成反比, 减弱磁通使斜率增大。

图 1-20 所示为一组减弱磁通的人为机械特性曲线。随着减弱  $\Phi$ ,  $n_0$  升高, 曲线斜率变大。若用于调速, 则  $\Phi$  越小, 转速越高。

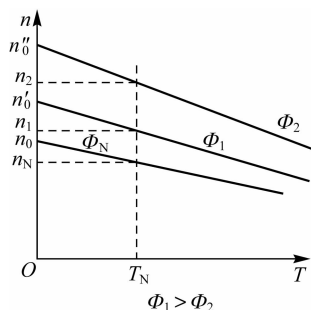


图 1-20 他励直流电动机减弱磁通的人为机械特性

## 二、生产机械的负载转矩特性

不同生产机械的负载转矩随转速的变化而变化的规律不同, 对此用负载转矩特性来表征, 即生产机械的转速与负载转矩之间的关系。各种生产机械的负载转矩特性大致可分为以下三类。

### 1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载就是负载转矩的大小为一恒定值, 与转速的大小无关, 它包括反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

#### 1) 反抗性恒转矩负载

反抗性恒转矩负载的特点是: 负载转矩的大小不变, 而负载转矩的方向始终与生产运动的方向相反, 总是阻碍电动机运转; 当电动机的旋转方向改变时, 负载转矩的作用方向也随之改变, 永远是阻力矩; 特性曲线总在第一或第三象限, 如图 1-21 所示。具有这类特性的生产机械常见的有轧钢机、机床的平移机构和皮带运输机等。

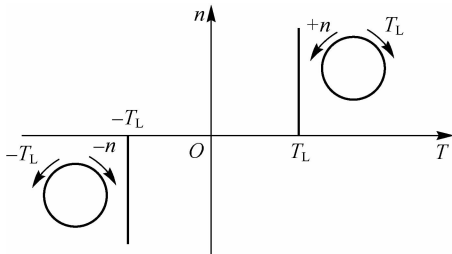


图 1-21 反抗性恒转矩负载的特性曲线

### 2) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载的特点是:负载转矩由重力作用产生,不论生产机械运动的方向是否发生改变,负载转矩的大小和方向始终不变。这种负载转矩特性曲线始终在第一或第四象限,如图 1-22 所示。例如,起重设备提升重物时,负载转矩为阻力矩,无论是提升重物还是下放重物,负载转矩的方向不变,但转速方向发生改变。

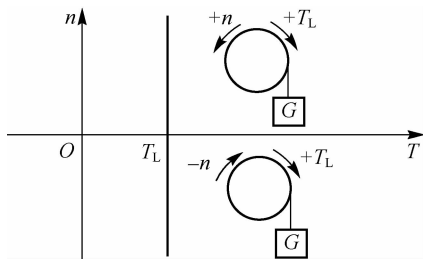


图 1-22 位能性恒转矩负载的特性曲线

### 2. 恒功率负载特性

恒功率负载的特点是:当转速变化时,负载从电动机吸收的功率为恒定值,此时的负载功率值为

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi}{60} T_L n = \text{常数}$$

可见,负载转矩与转速成反比。在实际中,一些机床切削加工,粗加工时,切削量大,切削阻力大,负载转矩大,用低速切削;精加工时,切削量小,切削阻力小,负载转矩小,用较高的速度切削。

恒功率负载的特性曲线如图 1-23 所示。

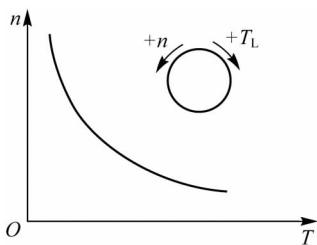


图 1-23 恒功率负载的特性曲线

### 3. 通风机型负载特性

通风机型负载的特点是:负载转矩的大小与转速的平方成正比,即

$$T_L = Kn^2$$

式中,  $K$  为比例常数。

常见的通风机型负载有鼓风机、水泵、液压泵和油泵等,负载特性曲线如图 1-24 所示。



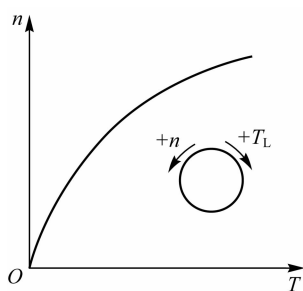


图 1-24 通风机型负载的特性曲线

以上是三类典型的负载特性,而实际生产机械的负载特性常为几种类型负载的综合。例如,起重设备提升重物时,电动机除受到位能性负载转矩外,还要克服系统机械摩擦所造成的反抗性负载转矩,所以电动机轴上的负载转矩应是上述两种负载转矩之和。

### 三、电力拖动系统的稳定运行

电力拖动系统是指由电动机拖动生产机械,并且通过传动机构带动生产机械完成一定工艺要求的系统。在电力拖动系统中,电动机作为原动机,生产机械作为负载,把电动机带动生产机械运转的方式称为电力拖动。电力拖动系统一般由电动机、生产机械的工作机构、传动机构、控制设备及电源五部分组成,如图 1-25 所示。

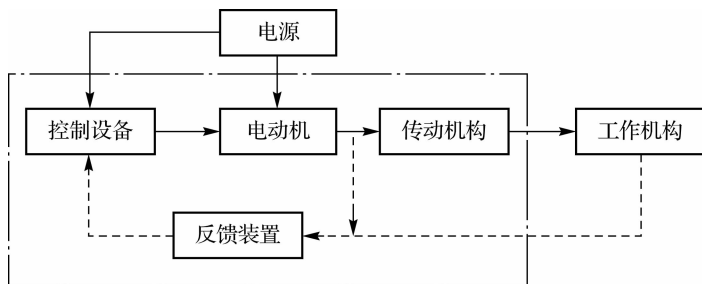


图 1-25 电力拖动系统的组成

电源为电动机和控制设备提供电能;电动机作为原动机,通过传动机构带动生产机械完成某一生产任务;控制设备是由各种控制电气元件、可编程控制器组成的,用以控制电动机的工作状态,从而实现对电动机的自动控制。常见的电力拖动系统有洗衣机、水泵、机床、电梯等。

稳定运行是指电力拖动系统在某种外界因素的扰动下,离开原来的平衡状态,当外界因素消失后,仍能恢复到原来的平衡状态,或在新的条件下达到新的平衡状态。此处的“扰动”一般指负载的微小变化或电网电压的波动。电动机在电力拖动系统中运行时,会使系统出现稳定运行和不稳定运行两种情况。

电力拖动系统是由电动机和生产机械负载构成的,为了分析方便,常把电动机的机械特性曲线和负载转矩特性曲线画在同一个坐标系中,如图 1-26 所示。当系统以转速  $n_A$  恒速

运行时,电动机的电磁转矩  $T$  与负载转矩  $T_L$  相等,称为静态或平衡状态。可见,只要两条特性曲线有交点,就是平衡状态,而平衡是否稳定则取决于两种特性是否配合。

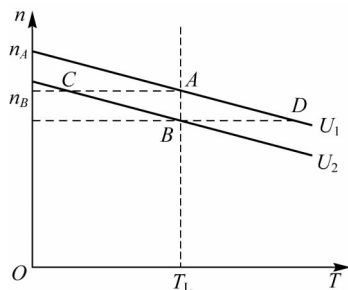


图 1-26 电源电压波动时的稳定运行

图 1-27 所示为他励直流电动机存在较强电枢反应时,其机械特性与恒转矩负载配合的情况。当电枢电流较大,即电磁转矩较大时,由于电枢反应的去磁作用较强,转速随转矩的增加而升高,机械特性上翘。此时,若电网电压从  $U_1$  波动至  $U_2$ ,瞬时转速  $n_A$  不能突变,电磁转矩突变为  $T_B$ ,则有  $T_B > T_L$ ,使系统加速。

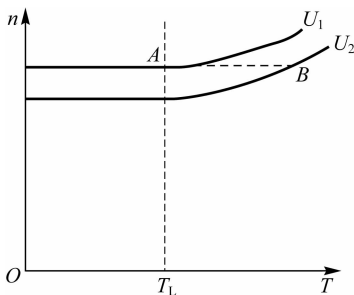


图 1-27 电力拖动系统的不稳定运行

当系统的转速增加到太高时,电枢电流太大,换向困难,电动机过热,机械强度不够,会使电动机毁坏,可见,A 点不是稳定运行点。

从上面对于是否稳定运行的分析可以看出,在电力拖动系统中,电动机的机械特性与负载转矩特性有交点,即  $T = T_L$ ,仅仅是系统稳定运行的必要条件。系统要稳定运行,还需要两种特性配合恰当。电力拖动系统稳定运行的充分必要条件是在  $T = T_L$  处,有

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

对恒转矩负载,因为  $dT_L/dn = 0$ ,所以平衡稳定的充分必要条件是在  $T = T_L$  处,有

$$\frac{dT}{dn} < 0$$

由以上分析可以得到:下斜的机械特性与恒转矩负载配合,系统能够稳定运行;上翘的机械特性与恒转矩负载配合,系统不能稳定运行。

## 四、他励直流电动机的调速

在工业生产中,有大量的生产机械为了满足生产工艺要求,需要改变工作速度。例如,金属切削机床,由于工件的材料和精度的要求不同,工作速度也就不同;又如轧钢机,因轧制不同品种和不同厚度的钢材,要采取不同的最佳速度。这种人为地改变电动机速度以满足生产工艺要求的操作过程称为调速。

调速可用机械方法、电气方法或机械电气相结合的方法,本节只讨论电气调速。电气调速是人为地改变电动机的参数,使电力拖动系统运行于不同的人为机械特性上,从而在相同的负载下得到不同的运行速度。这不同于负载变化使电动机在同一条特性上发生的转速变化。

根据机械特性方程式

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

人为改变电枢电压  $U$ 、电枢回路总电阻  $R$  和主磁通  $\Phi$  都可以改变转速  $n$ 。所以,调速的方法有电枢回路串电阻调速、降压调速和弱磁调速三种。

### 1. 调速指标

#### 1) 调速范围

调速范围是指电动机在额定负载时所能达到的最高转速与最低转速之比,用  $D$  表示,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

由上式可知,要扩大调速范围  $D$ ,必须提高  $n_{\max}$  和降低  $n_{\min}$ ,但  $n_{\max}$  受到电动机的机械强度和换向条件的限制, $n_{\min}$  受到相对稳定性的限制。

#### 2) 调速的相对稳定性

相对稳定性是指负载转矩变化时,转速随之变化的程度,工程上常用静差率  $\delta\%$  来表示相对稳定性。静差率表示电动机在某一机械特性上运行时,由理想空载到额定负载所出现的转速降与理想空载转速之比,用百分数表示为

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

显然,在相同的  $n_0$  情况下,电动机的机械特性越硬,静差率越小,相对稳定性就越好。

#### 3) 调速的平滑性

调速的平滑性是指两个相邻调速级的转速之比,用  $\varphi$  表示。

$$\varphi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

$\varphi$  值越接近 1,调速平滑性越好。在一定的调速范围内,调速的级数越多,则调速的平滑性越好。不同的生产机械对调速的平滑性要求不同。

#### 4) 调速的经济性

调速的经济性包括调速设备的初投资、调速时电能的损耗、运行时的维修费用。

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

## 2. 电枢回路串电阻调速

他励直流电动机电枢串接电阻调速的机械特性如图 1-28 所示。从图中可以看出,串入的电阻越大,曲线的斜率越大,机械特性越软。

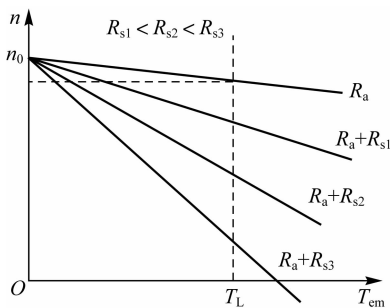


图 1-28 他励直流电动机电枢串电阻调速的机械特性

设电枢未串接电阻  $R_{pa}$  时,电动机稳定运行在固有机械特性的  $a$  点上,电阻  $R_{pa}$  接入电枢电路瞬间,因转速不能突变,工作点从  $a$  点换入人为机械特性的  $b$  点,这时,电枢电流减小,电磁转矩减小,  $T < T_L$ ,电动机减速,电枢电动势减小,电流  $I_a$  回升,  $T$  增大,直到  $T = T_L$ ,电动机在低速的  $c$  点稳定运行。

电枢回路串电阻调速的特点如下:

(1)串入电阻后转速只能降低,由于机械特性变软,静差率变大,特别是低速运行时,负载稍有变动,电动机转速波动大,因此调速范围受到限制。

(2)调速平滑性不高。

(3)由于电枢电流大,调速电阻消耗的能量较多,不够经济。

(4)调速方法简单,设备投资少。

这种调速方法适用于小容量电动机的调速,如起重设备和运输牵引装置。

**注意:**调速电阻不能用起动变阻器代替,因为起动变阻器是短时使用的,而调速变阻器是连续工作的。

**【例 1-3】**一台直流他励电动机,其额定数据为  $P_N = 100 \text{ kW}$ ,  $I_N = 511 \text{ A}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ,电枢电路总电阻  $R_a = 0.04 \Omega$ ,电动机拖动额定恒转矩负载运行。现用电枢回路串电阻的方法将转速调至  $600 \text{ r/min}$ ,应在电枢电路内串多大电阻?

**解:**由电压平衡方程式可知

$$U_N = E_a + I_a (R_a + R_{pa})$$

因为调速前后的负载转矩为额定负载不变,磁通大小也不变,所以上式中的电枢电流  $I_a$  在调速前后保持恒定,即  $I_a = I_N$ ,所以

$$U_N = E_{aN} + I_N (R_a + R_{pa})$$

根据给出的已知数据,求调速前的电枢电动势  $E_{aN}$ 。

$$\begin{aligned}
 E_{aN} &= U_N - I_N R_a \\
 &= 220 - 511 \times 0.04 \\
 &\approx 199.6 \text{ V}
 \end{aligned}$$

串电阻后,负载没变,所以磁通大小不变,调速后的电枢电动势为  $E_a$ 。

$$\begin{aligned}
 E_a &= \frac{n}{n_N} \cdot E_{aN} \\
 &= \frac{600}{1500} \times 199.6 \\
 &\approx 79.8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

代入电压平衡方程式,可得

$$\begin{aligned}
 R_{pa} &= \frac{U_N - E_a}{I_N} - R_a \\
 &= \frac{220 - 79.8}{511} - 0.04 \\
 &\approx 0.23 \Omega
 \end{aligned}$$

在电枢电路中须串入  $0.23 \Omega$  的电阻,比电枢电阻大得多,转速从  $1500 \text{ r/min}$  降到  $600 \text{ r/min}$ 。

### 3. 降压调速

降压调速的机械特性曲线如图 1-29 所示。

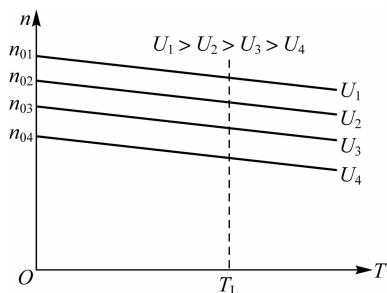


图 1-29 他励直流电动机降压调速的机械特性曲线

设电动机稳定运行在  $a$  点,突然将电枢电压从  $U_1$  降至  $U_2$ ,因机械惯性,转速不能突变,电动机由  $a$  点过渡到  $b$  点,此时  $T < T_L$ ,电动机立即减速,  $n \downarrow \rightarrow E_a \downarrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow T \uparrow$ ,直到  $c$  点  $T = T_L$ ,电动机以较低的转速稳定运行。在降压幅度较大时,如从  $U_1$  突降到  $U_3$ ,电动机由  $a$  点过渡到  $d$  点,此时成为回馈制动。当电动机减速至  $e$  点时,  $E_a = U$ ,电动机重新进入电动状态继续减速直至  $f$  点,  $T = T_L$ ,电动机以更低的转速稳定运行。

降压调速的特点如下:

- (1) 无论是高速还是低速,机械特性硬度不变,调速性能稳定,故调速范围广。
- (2) 电源电压能平滑调节,故调速平滑性好,可实现无级调速。
- (3) 降压调速是通过减小输入功率来降低转速的,低速时,损耗减小,调速经济性好。
- (4) 调压电源设备较复杂。

降压调速的性能好,目前被广泛用于自动控制系统中,如轧钢机、龙门刨床等。

**【例 1-4】**例 1-3 中的电动机,现在用调节电枢电压的方法调速,将电枢电压降低至额定电压的 50%,即  $U'=0.5U_N=110\text{ V}$  时,求电动机的稳定转速。

**解:**由电压平衡方程式,可知

$$\begin{aligned} U &= E_a + I_a R_a \\ &= E_a + I_N R_a \end{aligned}$$

调速后的电动势为

$$\begin{aligned} E_a &= U - I_N R_a \\ &= 110 - 511 \times 0.04 \\ &\approx 89.6\text{ V} \end{aligned}$$

根据

$$\begin{aligned} E_{aN} &= C_e \Phi n_N \\ E_a &= C_e \Phi n \end{aligned}$$

得

$$\frac{E_{aN}}{E_a} = \frac{n_N}{n}$$

则降低电压后的稳定转速为

$$\begin{aligned} n &= \frac{E_a}{E_{aN}} \cdot n_N \\ &= \frac{89.6}{199.6} \times 1\ 500 \\ &\approx 673\text{ r/min} \end{aligned}$$

#### 4. 弱磁调速

弱磁调速的机械特性曲线如图 1-30 所示。

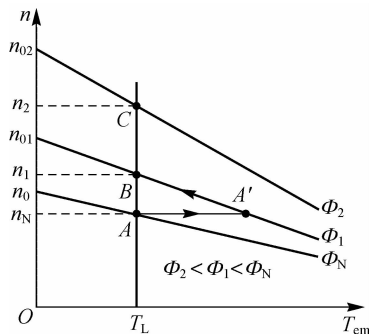


图 1-30 他励直流电动机弱磁调速的机械特性曲线

设电动机在 A 点稳定运行,当突然将磁通从  $\Phi_1$  降至  $\Phi_2$  时,转速来不及变化,则电动机运行由 A 点过渡至 B 点,在 B 点  $T > T_L$ ,电动机立即加速,  $n \uparrow \rightarrow E_a \uparrow \rightarrow I_a \downarrow \rightarrow T \downarrow$ ,直到 C 点  $T = T_L$ ,电动机以新的较高的工作速度稳定运行。



弱磁调速的特点如下:

(1)弱磁调速机械特性较软,受电动机换向条件和机械强度的限制,转速调高幅度不大,调速范围  $D=1\sim 2$ 。

(2)调速平滑,可以实现无级调速。

(3)在功率较小的励磁回路中调节,能量损耗小。

(4)控制方便,控制设备投资少。

弱磁调速平滑性好,调速设备投资少,电能损耗小,一般与降压调速配合使用,适用于与恒功率负载配合。

**【例 1-5】**例 1-3 中的电动机,用弱磁的方法调速,磁通减小 10%时,求调速瞬间的电枢电流和调速后的稳定电枢电流和转速。

**解:**(1)调速瞬间有

$$\begin{aligned} C_e \Phi_N &= \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \\ &= \frac{220 - 511 \times 0.04}{1\,500} \\ &\approx 0.133 \end{aligned}$$

因为瞬间转速不变,即  $n=1\,500$  r/min,磁通降为额定时的 90%,即  $C_e \Phi = 90\% C_e \Phi_N$ ,则

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{U_N - 90\% C_e \Phi_N n_N}{R_a} \\ &= \frac{220 - 90\% \times 0.133 \times 1\,500}{0.04} \\ &= 1\,011.25 \text{ A} \\ \frac{I_a}{I_N} &= \frac{1\,011.25}{511} \approx 2 \end{aligned}$$

可见,磁通减小 10%的瞬间,电枢电流增大 1 倍,同时电磁转矩也增大,电动机加速。

(2)因为调速前后的负载转矩不变,故调速前后的电磁转矩也不变,即

$$C_T \Phi_N I_{aN} = 90\% C_T \Phi_N I_a$$

则

$$I_a = \frac{I_{aN}}{0.9} = \frac{511}{0.9} \approx 567.8 \text{ A}$$

调速后的稳定转速为

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_N - I_a R_a}{C_e \Phi} \\ &= \frac{220 - 567.8 \times 0.04}{0.9 \times 0.133} \\ &\approx 1\,648 \text{ r/min} \end{aligned}$$

从以上计算可知,弱磁调速后电动机的转速提高,电枢电流比调速前大。若调速前是在额定状态运行,则调速后电枢电流会大于额定电流,变成过载运行,电动机不允许长期过载运行。



## 任务三

## 直流电动机的起动、反转和制动



## 任务分析

使用电动机时,首先碰到的问题是怎样使它起动起来。要使电动机起动的过程达到最优,主要应考虑以下几个方面的问题:起动电流的大小;起动转矩的大小;起动设备是否简单。电动机驱动的生产机械,常常需要改变运动方向,如起重机、刨床、轧钢机等,这就需要电动机能快速地实现正反转运行。某些生产机械除了需要电动机提供驱动力矩外,还要电动机在必要时提供制动力矩,以便限制转速或快速停车。例如,电车下坡和刹车时,起重机下放重物时,机床反向运动开始时,都需要电动机进行制动。因此,掌握直流电动机起动、反转和制动的方法,对电气技术人员是很重要的。



## 任务目标

- 了解直流电动机起动时存在的问题;
- 掌握直流电动机常用的起动方法;
- 掌握直流电动机的反转方法;
- 熟悉直流电动机的制动方法;
- 学会直流电动机常用起动、反转和制动方法的操作。



## 知识链接

## 一、他励直流电动机的起动

电动机要工作时,转子总是从静止状态开始转动,转速逐渐上升,最后达到稳定运行状态的,由静止状态到稳定运行状态的过程称为起动。电动机在起动过程中,电枢电流、电磁转矩、转速都随时间变化,起动是一个过渡过程。开始起动的一瞬间,转速等于零,这时的电枢电流称为起动电流,用  $I_{st}$  表示;对应的电磁转矩称为起动转矩,用  $T_{st}$  表示。

## 1. 生产机械对直流电动机的起动的要求

生产机械对直流电动机的起动有下列要求:

- (1) 起动转矩足够大,这样电动机才能顺利起动。
- (2) 起动电流不可太大。
- (3) 起动设备操作方便,起动时间短,运行可靠,成本低廉。

## 2. 起动条件

- (1)  $I_{st} \leq (2 \sim 2.5) I_N$ , 换向最大电流为  $(2 \sim 2.5) I_N$ 。
- (2)  $T_{st} \geq (1.1 \sim 1.2) T_N$ 。

### 3. 起动方法

#### 1) 全压起动

全压起动是将直流电动机的电枢上直接加上额定电压的起动方式。起动瞬间电动机转速  $n=0$ , 电枢绕组感应电动势  $E_a=C_e\Phi n=0$ , 由电动势平衡方程  $U=E_a+I_aR_a$  可知:

起动电流  $I_{st}$  为

$$I_{st}=\frac{U_N}{R_a}$$

起动转矩  $T_{st}$  为

$$T_{st}=C_T\Phi_N I_{st}$$

**【例 1-6】**一台 Z2-61 型他励直流电动机,  $P_N=10\text{ kW}$ ,  $U_N=220\text{ V}$ ,  $n_N=1\ 500\text{ r/min}$ ,  $I_N=53.8\text{ A}$ ,  $R_a=0.286\ \Omega$ , 求全压起动时的起动电流及在额定磁通下起动的起动转矩。

**解:** (1) 全压起动时的起动电流为

$$I_{st}=\frac{U_N}{R_a}=\frac{220}{0.286}\approx 769.2\text{ A}$$

$$\frac{I_{st}}{I_N}=\frac{769.2}{53.8}\approx 14.3$$

起动电流是额定电流的 14.3 倍。

(2) 求起动转矩。

$$T=T_N=9.55\frac{P_N}{n_N}=9.55\times\frac{10\times 10^3}{1\ 500}\approx 63.7\text{ N}\cdot\text{m}$$

忽略空载转矩  $T_0$ 。

$$T_{st}=\frac{I_{st}}{I_N}T=\frac{769.2}{53.8}\times 63.7\approx 910.74\text{ N}\cdot\text{m}$$

从例 1-6 可以看出, 由于电枢电阻阻值很小, 额定电压下直接起动的起动电流很大, 通常可达额定电流的 10~20 倍, 起动转矩也很大。过大的起动电流引起电网电压下降, 影响其他用电设备的正常工作, 同时电动机自身的换向器产生剧烈的火花。过大的起动转矩可能会使轴上受到不允许的机械冲击, 所以全压起动只限于容量很小的直流电动机。

对于常规的他励电动机, 为了限制起动电流, 可以采用减压起动和电枢回路串电阻的起动方法。起动前, 应将励磁回路的可变电阻调至零, 使励磁电流最大, 以保证励磁磁通为最大值, 这样在电枢电流不太大时能产生足够大的起动转矩。

#### 2) 减压起动

减压起动是起动前将施加在电动机电枢两端的电源电压降低, 以减小起动电流。为了获得足够的起动转矩 ( $T_{st}>T_L$ ), 起动时电流通常限制在  $(1.5\sim 2)I_N$  内, 则起动电压应为

$$U_{st}=I_{st}R_a=(1.5\sim 2)I_N R_a$$

随着转速的上升, 电动势也逐渐增大, 起动转矩减小。为使保持在范围, 即保证有足够大的起动转矩, 起动过程中电路电压  $U$  必须不断升高。直到电压升至额定电压, 电动机进入稳定运行状态, 起动过程结束。随着电力电子技术的发展, 目前多用晶闸管整流装置自动控制起动电压。

#### 3) 电枢回路串电阻起动

电枢回路串电阻起动时, 电源电压为额定值且恒定不变, 在电枢回路中串接一起动电

阻,以达到限制起动电流的目的。

**【例 1-7】**例 1-6 中的电动机若限制起动电流不超过 100 A。

(1)采用减压起动,求起动电压。

(2)采用电枢回路串电阻起动,则起动开始时应串入多大电阻?

**解:**(1)起动电压为

$$U_{st} = I_{st} R_a = 100 \times 0.286 = 28.6 \text{ V}$$

(2)起动电阻为

$$R_{st} = \frac{U_N}{I_{st}} - R_a = \frac{220}{100} - 0.286 = 1.914 \text{ } \Omega$$

串入一个不到 2  $\Omega$  的电阻,就可将电流从 769.2 A 降至 100 A,限流效果十分明显。

## 二、他励直流电动机的反转

任务一曾讨论到要使电动机反转,必须改变电磁转矩的方向,而电磁转矩的方向由磁通方向和电枢电流的方向决定。所以,只要将磁通和电枢电流任意一个参数改变方向,电磁转矩即改变方向。在自动控制系统中,通常直流电动机的反转实施方法有以下两种。

### 1. 改变励磁电流方向

保持电枢两端电压极性不变,将励磁绕组反接,使励磁电流反向,磁通即改变方向。

### 2. 改变电枢电压极性

保持励磁绕组两端的电压极性不变,将电枢绕组反接,电枢电流即改变方向。

由于他励直流电动机的励磁绕组匝数多,电感大,励磁电流从正向额定值变到负向额定值的时间长,反向过程缓慢,而且在励磁绕组反接断开瞬间,绕组中将产生很大的自感电动势,可能造成绝缘击穿,所以实际应用中大多采用改变电枢电压极性的方法来实现电动机的反转。但在电动机容量很大、对反转速度要求不高的场合,因励磁电路的电流和功率小,为了减小控制电器的容量,可采用改变励磁电流方向的方法实现电动机的反转。

## 三、他励直流电动机的制动

许多生产机械,为了提高生产率和产品质量,保证人身、设备安全,要求电动机能迅速、准确地停车或迅速反向;有些设备要求限制电动机的转速在一定的数值以内,如起重机下放重物、电车下坡等。他励直流电动机的电气制动是使电动机产生一个与旋转方向相反的电磁转矩,阻碍电动机转动。在制动过程中,要求电动机制动迅速、平滑、可靠、能量损耗少。

常用的电气制动有能耗制动、反接制动和回馈制动三种,下面分别进行分析讨论。

### 1. 能耗制动

能耗制动是指把正处于运行状态的他励直流电动机的电枢从电网上切除,并接到一个外加的制动电阻上构成闭合回路。能耗制动图如图 1-31 所示。

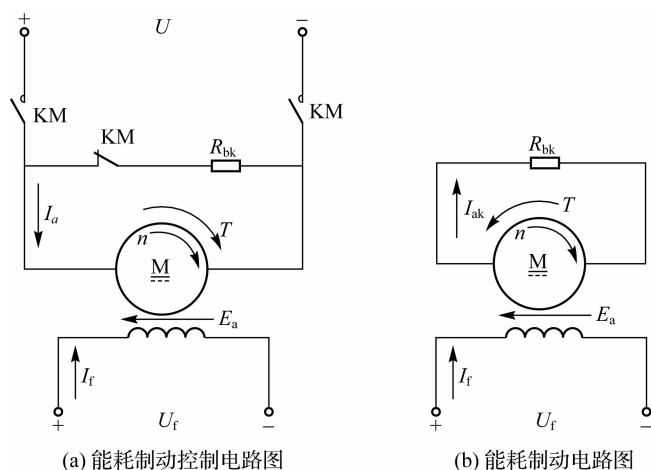


图 1-31 能耗制动图

制动时,接触器 KM 线圈断电释放,其常开触点断开,切断电枢电源;常闭触点闭合,电枢接入制动电阻,电动机进入制动状态。电动机制动开始瞬间,由于惯性作用,转速仍保持原电动状态时的方向和大小,电枢电动势也保持原电动状态时的大小和方向,但由于此时电枢电压  $U=0$ ,因此电枢电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{bk}} = -\frac{E_a}{R_a + R_{bk}}$$

电枢电流为负值,其方向与原电动状态时的电枢电流相反,称为制动电流,由此产生的电磁转矩也与转速方向相反,称为制动转矩。

在制动过程中,电动机把拖动系统的动能转变为电能并消耗在电枢回路的电阻上,故称为能耗制动。

## 2. 反接制动

反接制动有电枢反接制动和倒拉反接制动两种方式。

### 1) 电枢反接制动

电枢反接制动是将电枢反接在电源上,同时电枢回路要串接制动电阻,控制电路如图 1-32 所示。

电枢电源反接瞬间,转速  $n$  因惯性不能突变,电枢电动势  $E_a$  亦不变,但电枢电压反向,此时电枢电流  $I_a$  为

$$I_a = \frac{-U_N - E_a}{R_a + R_{bk}} = -\frac{U_N + E_a}{R_a + R_{bk}}$$

上式表明制动时电枢电流反向,那么电磁转矩也反向,与转速方向相反,起制动作用,电动机处于制动状态。在电磁转矩  $T$  与负载转矩  $T_L$  的共同作用下,电动机转速迅速下降。

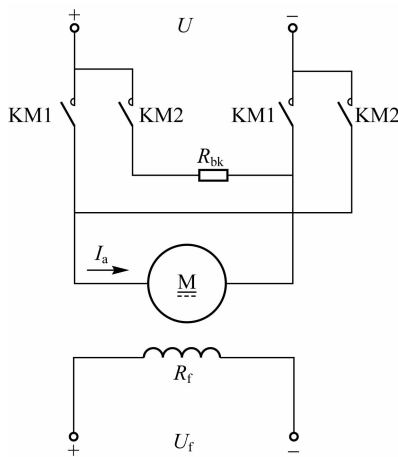


图 1-32 电枢反接制动控制电路

### 2) 倒拉反接制动

这种制动方法一般应用于提升重物转为下放重物的情况下,控制电路与机械特性如图 1-33 所示。

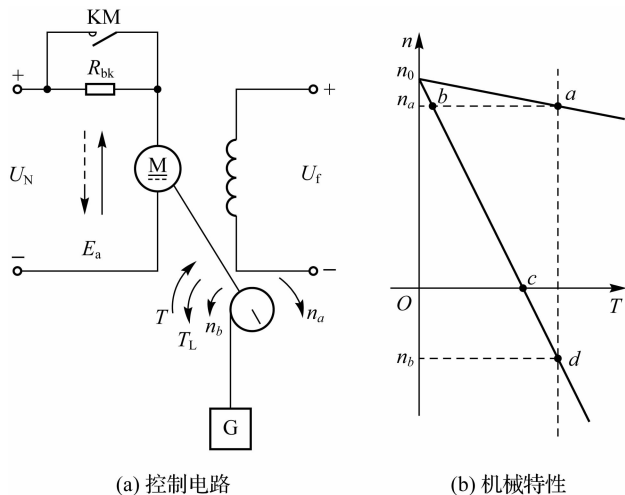


图 1-33 倒拉反接制动控制电路与机械特性

电动机提升重物时,接触器 KM 常开触点闭合,电动机运行在固有机械特性的  $a$  点(电动状态),如图 1-33(b)所示。下放重物时,将 KM 触点打开,电枢电路内串接较大电阻,这时电动机转速不能突变,工作点从  $a$  点转入对应的人为机械特性  $b$  点上。由于  $T < T_L$ ,电动机减速沿曲线下降至  $c$  点。在  $c$  点,  $n=0$ ,此时仍有  $T < T_L$ ,在负载重物的作用下,电动机被倒拉而反转,重物下放。由于  $n$  反向(负值),  $E_a$  也反向(负值),电枢电流为

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_{pa}}$$

电枢电流是正值,所以电磁转矩保持原方向,与转速方向相反,电动机运行在制动状态。此运行状态是由于位能负载转矩拖动电动机反转而形成的,所以称为倒拉反接制动。

电动机过  $c$  点后,仍有  $T < T_L$ ,电动机反向加速,使  $E_a$  增大,  $I_a$  与  $T$  也相应增大,直到  $d$  点,  $T = T_L$ ,电动机以  $d$  点的速度匀速下放重物。

### 3. 回馈制动

由于位能负载转矩的影响使电力机车下坡或起重装置下放重物时,电动机加速至转速高于理想空载转速,电枢电动势大于电枢电压,电枢电流的方向与电动机运行状态相反,因而电磁转矩  $T$  也与电动机运行状态相反,即  $T$  与  $n$  反向,是制动转矩。此时,电动机向电源回馈电能,运行于回馈制动状态。





## 任务四 直流电动机的使用、维护与检修



### 任务分析

经常性的维护和监视工作,是保证直流电动机正常运行的重要条件。除经常保持电动机清洁、不积尘土和油垢外,必须注意监视电动机运行中的换向火花、转速、电流、温升等的变化是否正常。因为直流电动机的故障都会反映在换向恶化和运行性能的异常变化上,做好直流电动机的维护与检修工作,对提高生产效率、预防事故的发生具有非常重要的意义。



### 任务目标

- ▶ 了解直流电动机起动前的准备工作和起动、运行时应注意的事项;
- ▶ 熟悉直流电动机的定期检修内容和注意事项;
- ▶ 了解直流电动机日常保养的相关知识;
- ▶ 了解直流电动机的常见故障及处理方法。



### 知识链接

## 一、直流电动机的使用

### 1. 直流电动机的起动准备

直流电动机在安装后投入运行前或长期搁置而重新投入运行前,需做下列起动准备工作。

(1)用压缩空气吹净附着于电动机内部的灰尘,新电动机应去掉在风窗处的包装纸。检查轴承润滑脂是否洁净、适量,润滑脂占轴承室的 2/3 为宜。

(2)用柔软、干燥而无绒毛的布擦拭换向器表面,并检查其是否光洁,如有油污,可蘸少许汽油擦拭干净。

(3)检查电刷压力是否正常均匀,电刷间压力差不应超过 10%,刷握的固定是否可靠,电刷在刷握内是否太紧或太松,电刷与换向器的接触是否良好。

(4)检查刷杆座上是否标有电刷位置的记号。

(5)用手转动电枢,检查是否阻塞或在转动时是否有撞击或摩擦声。

(6)检查接地装置是否良好。

(7)用 500 V 兆欧表测量绕组对机壳的绝缘电阻,如小于 1 MΩ 则必须进行干燥处理。

(8)检查电动机引出线与励磁电阻、起动器等连接是否正确,接触是否良好。

### 2. 直流电动机的起动

(1)检查线路情况,起动器的弹簧是否灵活,接触是否良好。

(2)在恒压电源供电时,需用起动机启动。闭合电源开关,在电动机负载下转动起动机,在每个触点上停留约 2 s,直至最后一点,转动臂被电磁铁吸住为止。

(3)电动机在单独的可调电源供电时,先将励磁绕组通电,并将电源电压降低至最小,然后闭合电枢回路接触器,逐渐升高电压,达到额定值或所需转速。

(4)电动机与生产机械用联轴器分别连接,输入小于额定电枢电压的 10%,确定电机与生产机械转速方向是否一致,一致时表示接线正确。

(5)电动机换向器端装有测速发电机时,电动机启动后,应检查测速发电机的输出特性,该极性与控制屏极性应一致。

(6)电动机启动完毕后,应观察换向器上是否有火花,火花等级是否超标。

### 3. 直流电动机的调速

可采用恒功率弱磁向上调速,或调节励磁电阻,直至转速达到所需要的值,但转速不得超过技术条件所允许的最高转速。恒转矩负载可以采用降压或电枢回路串电阻向下调速。

### 4. 直流电动机停机

(1)如为变速电动机,先将转速降到最低值。

(2)去掉电动机负载后切断电源开关。

(3)切断励磁回路,励磁绕组不允许在停车后长期通额定电流。

## 二、直流电动机的维护

直流电动机在使用过程中定期进行检查时应注意下列事项:

### 1. 电动机的清洁

电动机周围应保持干燥,其内外部均不应放置其他物件。电动机的清洁工作每月不得少于一次,清洁时应用压缩空气吹净内部的灰尘,特别是换向器、线圈连接线和引线部分。

### 2. 换向器的保养

(1)换向器应是正圆柱形且具有光洁的表面,不应有机械损伤和烧焦的痕迹。

(2)换向器在负载下经长期无火花运转后,在表面产生一层褐色有光泽的坚硬薄膜,这是正常现象,它能减少换向器的磨损,这层薄膜必须加以保护,不能用砂纸磨掉。

(3)换向器表面出现粗糙、烧焦等现象时可用 0 号砂纸在旋转着的换向器表面进行细致研磨。换向器表面出现过于粗糙不平、不圆或有部分凹进现象时应将换向器进行车削,车削速度不大于 1.5 m/s,车削深度及每转进刀量均不大于 0.1 mm,车削时换向器不应有轴向位移。

(4)换向器表面磨损很多时,或经车削后,发现云母片有凸出现象,应用铣刀将云母片铣成 1~1.5 mm 的凹槽。

(5)换向器车削或云母片下刻时,须防止铜屑、灰尘侵入电枢内部。因而要将电枢线圈端部及接头片覆盖。加工完毕后用压缩空气做清洁处理。

### 3. 电刷的使用

(1)电刷与换向器的工作面应有良好的接触,电刷压力正常。电刷在刷握内应能滑动自如。电刷磨损或损坏时,应以牌号及尺寸与原来相同的电刷更换,并且用 0 号砂纸进行研

磨,砂纸向电刷,背面紧贴换向器,研磨时随换向器做来回移动。

(2)电刷研磨后用压缩空气做清洁处理,再使电动机做空载运转,然后以轻负载运转 1 h,使电刷在换向器上得到良好的接触面。

#### 4. 轴承的保养

(1)轴承在运转时温度太高,或发出有害杂音时,说明可能损坏或有外物侵入,应拆下轴承清洗检查。当发现钢珠或滑圈有裂纹损坏或轴承经清洗后使用情况仍未改变时,必须更换新轴承。轴承工作 2 000~2 500 h 后应更换新的润滑脂,但每年不得少于一次。

(2)轴承在运转时须防止灰尘及潮气侵入,严禁对轴承内圈或外圈的任何冲击。

#### 5. 绝缘电阻

(1)应经常检查电动机的绝缘电阻。如果绝缘电阻小于 1 M $\Omega$ ,应仔细清除绝缘表面的污物和灰尘,并用汽油、甲苯或四氯化碳清除,待其干燥后再涂绝缘漆。

(2)必要时可采用热空气干燥法,用通风机将热空气送入电动机进行干燥,开始时绝缘电阻降低,然后升高,最后趋于稳定。

#### 6. 通风系统

应经常检查定子温升,判断通风系统是否正常,风量是否足够。如果温升超过允许值,应立即停车检查通风系统。

### 三、直流电动机的保养

(1)电动机未使用时应放置在通风干燥的仓库中,下面垫干燥的木板更佳;电动机应远离有腐蚀性的物质,电动机的轴伸端应涂防锈油。

(2)从仓库中取出电动机后,应用吹风机吹去表面的灰尘和杂物。

(3)若是新电动机,要先打开风扇盖,撕去粘在风扇盖内的防尘纸,揭去包在换向器刷架上的覆盖纸。

(4)检查换向器表面是否有油污等,如果有,可用棉纱蘸酒精擦净。

(5)仔细检查每个电刷在刷握中松紧是否合适,刷握是否有松动,检查刷握与换向器表面之间的距离是否合适。

(6)检查电刷的受压大小是否合适,不合适应逐一调整。

(7)用手转动电动机轴,检查电枢转动是否灵活,有无异常响声。

(8)用 500 V 兆欧表摇测每个绕组对地的绝缘电阻值;摇测各绕组之间的绝缘电阻值;若低于 0.5 M $\Omega$ ,则应放入烘箱烘干。

### 四、直流电动机的常见故障及其检修方法

直流电动机的常见故障及其检修方法如表 1-4 至表 1-7 所示。



表 1-4 直流电动机不能起动故障的原因及其检修方法

故障现象	故障原因	检修方法
直流电动机不能起动	电网停电	用万用表或电笔检查,待来电后使用
	熔断器熔断	更换熔断器
	电源线在电动机接线端上接错	按图纸重新接线
	负载太大,起动不了	减小机械负载
	起动电压太低	通常应在 50 V 时起动
	电刷位置不对	重新校正电刷中性线位置
	定子与转子间有异物卡住	清除异物
	轴承严重损坏,卡死	更换轴承
	主磁极或换向极固定螺钉未拧紧,致使卡住电枢	拆开电动机重新紧固
	电刷提起后未放下	将电刷安放在刷握中
换向器表面污垢太多	清除污垢	

表 1-5 直流电动机过热故障的原因及其检修方法

故障现象	故障原因	检修方法
直流电动机过热	电动机过载	减小机械负载或解决引起过载的机械故障
	电枢绕组短路	用前面所述的方法找到故障点,并处理
	新做的绕组中有部分线圈接反	按正确的图纸重新接线
	换向极接反	拆开电动机,用前面所述的方法找到故障点,重新接线
	换向片有短路	用前面所述的方法找到故障点,并处理
	定子与转子铁心相摩擦	拆开电动机,检查定子磁极固定螺钉是否松动,定子磁极下垫片是否比原来多,重新紧固或调整
	电动机的气隙有大有小	调整定子磁极下的垫片,使气隙均匀
	风道堵塞	清理风道
	风扇装反	重装风扇
	电动机长时间低压、低速运行	应适当提高电压,以接近额定转速为佳
	电动机轴承损坏	更换同型号的轴承
	联轴器安装不当或皮带太紧	重新调整

表 1-6 直流电动机火花故障的原因及其检修方法

故障现象	故障原因	检修方法
直流电动机电刷下有火花	电刷与换向器接触不良	重新研磨电刷
	电刷上的弹簧太松或太紧	适当调整弹簧压力,压力应保持在 1.5~2.5 N/cm,通常凭手感来调整

续表

故障现象	故障原因	检修方法
直流电动机 电刷下有火花	刷握松动	紧固刷握螺钉,刷握要与换向器垂直
	电刷与刷握尺寸相配	若电刷在刷握中过紧,可用0号砂纸砂去少许,使电刷能在刷握中自由滑动;若过松则更换与刷握相配的新电刷
	电刷太短,上面的弹簧已压不住电刷	当电刷磨损2/3时或电刷低于刷握时,应及时更换同型号的电刷
	电刷表面有油污粘住电刷粉	用棉纱蘸酒精擦净
	电刷偏离中性线位置	按前述方法重新调整刷架,使电刷处于中性线位置
	换向片有灼痕,表面高低不平	轻微时,用00号细砂纸按前面所述的方法砂换向器,若严重则须用车床车去一层,并按前述方法处理
	换向器片间云母未刻净或云母凸出	用刻刀按要求下刻云母
	电动机长期过载	应将机械负载减小到额定值以下
	换向极接错	按前面所述的方法检查处理,尽量局部修复,否则重绕
	换向极线圈短路	按前面所述的方法查找、修复或做短接处理
	电枢绕组有线圈断路	按前面所述的方法查找修复
	电枢绕组有短路	按前面所述的方法查找修复
	换向器片间短路	换向器云母槽中有烧黑现象,按前面所述的方法修复
	电枢绕组与换向片脱焊	按正确的接线重接
	重绕的电枢绕组有线圈接反	按正确的接线重接
电源电压过高	电源电压应降到额定电压值以内	

表 1-7 直流电动机其他常见故障的原因及其检修方法

故障现象	故障原因	检修方法
电动机漏电	电刷粉末太多	用吹风机清除电刷粉末或用棉花蘸酒精擦除
	电线头碰壳	接牢电线接头并做好绝缘
	电动机长期不用而受潮	进行干燥处理
	使用年份久或长期过热,电动机绝缘老化	拆除绝缘老化的绕组或更换新电动机
电动机振动大	电枢转轴变形	重新校正或更换整个电枢
	地脚螺栓松动	紧固地脚螺栓
	风扇叶装错或变形	重新安装或校正
	联轴器未装好	重新校正联轴器
电动机接线柱发热	电源线或绕组引出线未接牢	重新接牢
电动机响声很大	风扇叶变形碰壳	校正风扇叶
	轴承缺油或损坏	拆开电动机,将轴承清洗加油,或更换同型号的轴承
	电动机定子与转子相摩擦	轴承损坏则更换轴承,或调整定子磁极下的垫片



### 一、填空题

1. 直流电机具有\_\_\_\_\_性,既可做发电机运行,又可做电动机运行。做发电机运行时,将\_\_\_\_\_变成\_\_\_\_\_输出;做电动机运行时,则将\_\_\_\_\_变成\_\_\_\_\_输出。
2. 直流发电机电磁转矩的方向和电枢旋转方向\_\_\_\_\_,直流电动机电磁转矩的方向和电枢旋转方向\_\_\_\_\_。
3. 对直流电动机的电磁转矩  $T=C_T\Phi I_a$  公式中各物理量的含义,  $C_T$  表示转矩常数,  $\Phi$  表示\_\_\_\_\_,  $I_a$  表示\_\_\_\_\_。
4. 他励直流电动机的固有机械特性是指在电枢电压、励磁磁通为额定值,且电枢回路不串电阻的条件下,\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_的关系。
5. 直流电动机的调速方法有\_\_\_\_\_调速、\_\_\_\_\_调速和\_\_\_\_\_调速。
6. 直流电动机的转子通称为\_\_\_\_\_,是电动机的\_\_\_\_\_部分。直流电动机的换向器又称为\_\_\_\_\_。
7. 直流电动机的换向极安装在\_\_\_\_\_,其作用是\_\_\_\_\_。
8. 直流电动机中常见的制动状态有\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_,\_\_\_\_\_三种。

### 二、选择题

1. 直流电动机起动时电枢回路串入电阻是为了( )。
  - A. 增加起动转矩
  - B. 限制起动电流
  - C. 增加主磁通
  - D. 缩短起动时间
2. 在直流电机中,电枢的作用是( )。
  - A. 将交流电变为直流电
  - B. 实现直流电能和机械能之间的转换
  - C. 在气隙中产生主磁通
  - D. 将直流电流变为交流电流
3. 保持电枢电压不变,减小他励直流电动机的励磁电流,则该直流电动机( )。
  - A. 理想空载转速升高,机械特性变软
  - B. 理想空载转速升高,机械特性变硬
  - C. 理想空载转速降低,机械特性变软
  - D. 理想空载转速降低,机械特性变硬
4. 直流电机工作在电动机状态稳定运行时,电磁转矩的大小由( )决定。
  - A. 电压的大小
  - B. 电枢电阻的大小
  - C. 负载转矩和空载转矩的大小
  - D. 磁场的大小
5. 直流电动机中,电动势的方向与电枢电流方向( );直流发电机中,电动势的方向与电枢电流的方向( )。( )
  - A. 相同,相同
  - B. 相同,相反
  - C. 相反,相同
  - D. 相反,相反
6. 直流电机的磁极和电枢的铁心选材应是( )。
  - A. 电枢用硅钢片,磁极用整块铸钢



- B. 电枢用整块铸钢,磁极用钢板冲片叠成  
 C. 电枢用硅钢片,磁极用钢板冲片叠成  
 D. 因是直流,无铁损,故两者均可用整块铸钢
7. 直流电动机的几种人为机械特性中,哪种的硬度不变? ( )  
 A. 电枢回路串电阻的人为机械特性  
 B. 改变电枢电压的人为机械特性  
 C. 减弱磁通的人为机械特性  
 D. 以上三种都不是
8. 一台直流电动机起动时,励磁回路应该( )。  
 A. 与电枢回路同时接入  
 B. 比电枢回路后接入  
 C. 比电枢回路先接入  
 D. 无先后次序
9. 直流电动机的调速方法中,适合恒转矩负载并且低速时稳定性较好的是( )。  
 A. 弱磁调速  
 B. 降压调速  
 C. 串电阻调速  
 D. 变频调速
10. 直流电动机在串电阻调速过程中,若负载转矩保持不变,则( )保持不变。  
 A. 输入功率  
 B. 输出功率  
 C. 电磁功率  
 D. 电机的效率

### 三、判断题

1. 直流电动机的人为机械特性都比固有机械特性软。 ( )
2. 一台接在直流电源上的并励电动机,把励磁绕组的两个端头对调后,电动机就会反转。 ( )
3. 直流电机中,换向极的作用是改善换向,所以只要装置换向极都能起到改善换向的作用。 ( )
4. 换向器是直流电机特有的装置。 ( )
5. 直流电动机的额定功率指转轴上吸收的机械功率。 ( )
6. 直流电机的电刷因磨损而需更换时应选用与原电刷相同的电刷。 ( )
7. 直流电动机串多级电阻起动,在起动过程中,每消除一级起动电阻时,电枢电流都将突变。 ( )
8. 直流电动机的电磁转矩在电动状态时是驱动性质的转矩,当增大电磁转矩时,电动机的转速将上升。 ( )
9. 他励直流电动机降压或串电阻调速时,最大静差率数值越大,调速范围越大。 ( )
10. 直流电动机反接制动时,当电动机转速接近零时,应立即切断电源,以防止电动机反转。 ( )

### 四、简答题

1. 直流电机的基本结构由哪些部件所组成?
2. 直流电机中电刷和换向器的作用是什么?
3. 直流电动机的励磁方式有哪几种? 试画电路图说明。
4. 简述直流电动机的工作原理。
5. 如何确定换向极的极性? 换向极绕组为什么要与电枢绕组相串联?
6. 直流电动机电枢电动势为何称为反电动势?
7. 直流电动机起动前,电枢回路调节电阻  $R_{pa}$  和励磁回路调节电阻  $R_{pf}$  的阻值应分别调到什么位置?





8. 直流电动机在轻载或额定负载时,增大电枢回路调节电阻  $R_{pa}$  的阻值,电动机的转速如何变化? 增大励磁回路调节电阻  $R_{pf}$  的阻值,转速又如何变化?
9. 直流电动机停机时,应该先切断电枢电源,还是先断开励磁电源?
10. 他励直流电动机实现反转的方法有哪两种? 实际应用中大多采用哪种方法?
11. 何谓直流电动机的机械特性? 写出他励直流电动机的机械特性方程式。
12. 何谓直流电动机的固有机械特性与人为机械特性?
13. 他励直流电动机的机械特性  $n=f(T)$  为什么是略微下降的? 是否会出现上翘现象? 为什么? 上翘的机械特性对电动机的运行有何影响?
14. 改变磁通调速的机械特性为什么在固有机械特性上方? 改变电枢电压调速的机械特性为什么在固有机械特性下方?
15. 直流电动机一般为什么不允许采用全压起动?
16. 他励直流电动机有哪几种调速方法? 各有什么特点? 电枢回路串电阻调速和弱磁调速分别属于哪种调速方式?
17. 试分析他励直流电动机电枢回路串电阻起动的物理过程。
18. 他励直流电动机电气制动有哪几种?
19. 何谓能耗制动? 其特点是什么?
20. 试分析电枢反接制动工作原理。
21. 何谓回馈制动? 其出现在何种情况下?

## 五、计算题

1. 一台直流电动机的额定数据为:额定功率  $P_N=17\text{ kW}$ ,额定电压  $U_N=220\text{ V}$ ,额定转速  $n_N=1\ 500\text{ r/min}$ ,额定效率  $\eta_N=83\%$ ,求它的额定电流及额定负载时的输入功率。
2. 一台直流发电机的额定数据为:额定功率  $P_N=10\text{ kW}$ ,额定电压  $U_N=230\text{ V}$ ,额定转速  $n_N=2\ 850\text{ r/min}$ ,额定效率  $\eta_N=85\%$ ,求它的额定电流及额定负载时的输入功率。
3. 一台他励直流电动机,铭牌数据如下: $P_N=60\text{ kW}$ , $U_N=220\text{ V}$ , $I_N=305\text{ A}$ , $n_N=1\ 000\text{ r/min}$ 。试求其固有机械特性和  $R_{pa}=0.5\ \Omega$  时的人为机械特性。
4. 一台并励直流发电机,铭牌数据如下: $P_N=23\text{ kW}$ , $U_N=230\text{ V}$ , $n_N=1\ 500\text{ r/min}$ ,励磁回路电阻  $R_f=57.5\ \Omega$ ,电枢电阻  $R_a=0.1\ \Omega$ ,不计电枢反应磁路饱和。现将这台发电机改为并励直流电动机运行,把电枢两端和励磁绕组两端都接到  $220\text{ V}$  的直流电源上,运行时维持电枢电流为原额定值。求转速、电磁功率和电磁转矩。