

卓越系列

21世纪高职高专精品规划教材  
国家骨干高等职业院校特色教材

# 电机与

# 电力拖动技术

主 编 王培林 徐瑞霞  
副主编 赵 振 张为宾  
刘红艳



**框 架 设 计** 创新课程体系，优化课程内容，编写形式新颖！

**专业针对性** 强化核心技能，适应工程需求，执行最新标准！

**内 容 实 例** 提供案例分析，重视实操训练，紧贴企业实际！

卓越系列·21世纪高职高专精品规划教材  
国家骨干高等职业院校特色教材

# 电机与电力拖动技术

主 编 王培林 徐瑞霞  
副主编 赵 振 张为宾  
刘红艳

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

## 内 容 摘 要

本教材是高职机电一体化技术及相关专业的一门专业必修课教材。本教材主要介绍机电装备行业企业常用电动机类型及其拖动技术。本教材内容包括四个大的学习项目,分别为直流电动机及控制、交流电动机及拖动系统、交流变频系统、控制电机及其应用。每个项目都有一个实际应用案例作为项目引导,项目内容分为知识储备、任务解决、知识拓展几部分,将理论学习和实践训练等环节结合起来,实现了“学中做、做中学”的一体化教学。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动技术/王培林,徐瑞霞主编. —天津:天津大学出版社,2014. 1

(卓越系列)

21世纪高职高专精品规划教材 国家骨干高等职业院校特色教材

ISBN 978-7-5618-4936-1

I. ①电… II. ①王… ②徐… III. ①电机 - 高等职业教育 - 教材 ②电力传动 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第011596号

出版发行 天津大学出版社  
出版人 杨欢  
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647  
网 址 publish.tju.edu.cn  
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 10.5  
字 数 262千  
版 次 2014年2月第1版  
印 次 2014年2月第1次  
定 价 24.00元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 前 言

随着工业经济的发展和科技的进步,异步电机、各种控制电机及变频技术越来越多地应用在现代机电设备上,如数控机床、自动生产线、机器人、动车等。

对于高职机电一体化技术及相关专业,机电设备常用电机及拖动系统的设计、安装与调试能力是必备的一项基本技能。为了满足新时期对人才的需求,我们根据国家教育部高职高专“电机及电力拖动技术”“电机及电气控制”教学大纲的要求,选定了本教材的项目内容。并根据高职教育的实际情况,注重理论联系实际,力求通俗易懂、深入浅出,突出实际应用环节。

本书所选项目融合了电机学、电力拖动、控制电机及电气控制、变频技术等几门课程的基本教学内容,并根据实际应用情况将其有机结合在一起,既突出了机电一体化专业所需核心内容,提高了教学功效,还能够适应课程改革和学时减少的需求。

本书在内容选取及组织上,具有以下特点。

## 1. 充分调研,适应需求

通过对多家机电装备行业企业和往届毕业生进行多次调研,对教材的内容及组织进行了充分的论证,以知识“必需、够用”为原则,对传统的《电机学》《电力拖动技术》《电气控制技术》及《控制电机》等教材的内容进行整合简化,注重应用能力的培养。

## 2. “模块化、进阶式”优化学习项目

以体现专业岗位的要求和学生掌握知识和能力的发展顺序、以适用“项目导向、任务驱动”的教学模式为原则,组织教材学习项目;以常用机电设备 C650、CK6136 车床和工业机器人为教学项目载体,确定三相异步电动机拖动系统,步进和伺服电机拖动系统,直流电机拖动系统,交流变频系统的设计、安装及调试四个模块化学习项目;按照“任务描述→知识储备→知识拓展→任务解决”的顺序组织项目内容,理实一体。

## 3. 教材体现规范化和延展性

教材融入维修电工职业资格标准及电机拖动技术相关操作规范,体现教材的实用性;并在知识扩展部分引入自动生产线、数控加工中心的拖动系统等新技术,反映行业的发展趋势和需求。

由于编者水平有限且时间仓促,书中错误及疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者  
2013年10月

# 目 录

项目 1 直流电动机及控制 .....	(1)
任务 1 认识直流电动机 .....	(1)
子任务 1 直流电机的工作原理与结构 .....	(2)
子任务 2 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势 .....	(7)
子任务 3 他励直流电动机的运行原理与机械特性 .....	(8)
子任务 4 他励直流电动机的启动和反转 .....	(13)
子任务 5 他励直流电动机的制动 .....	(16)
子任务 6 他励直流电动机的调速 .....	(19)
任务 2 直流电动机的控制 .....	(23)
子任务 1 直流电动机单向旋转启动电路 .....	(23)
子任务 2 直流电动机可逆运转启动电路 .....	(24)
子任务 3 直流电动机单向旋转串电阻启动、能耗制动电路 .....	(24)
子任务 4 直流电动机可逆旋转反接制动电路 .....	(25)
子任务 5 直流电动机调速控制电路 .....	(26)
项目 2 交流电动机及拖动系统 .....	(29)
任务 1 认识三相异步电动机 .....	(30)
子任务 1 认识三相异步电动机结构 .....	(30)
子任务 2 学习三相异步电动机的工作原理 .....	(32)
子任务 3 学习三相异步电动机的铭牌数据和性能参数 .....	(35)
子任务 4 了解三相异步电动机的特性 .....	(37)
任务 2 三相异步电动机启动控制线路设计、安装与调试 .....	(39)
子任务 1 三相异步电动机启动控制线路常用低压电器 .....	(39)
子任务 2 三相异步电动机直接启动控制 .....	(63)
子任务 3 三相异步电动机减压启动控制 .....	(65)
任务 3 三相异步电动机运行控制线路设计 .....	(72)
任务 4 三相异步电动机制动控制线路设计 .....	(78)
任务 5 C650 卧式车床控制系统设计 .....	(82)
项目 3 交流变频系统 .....	(89)
任务 1 认识变频器 .....	(89)
任务 2 交 - 直 - 交变频技术 .....	(95)
任务 3 变频调速系统的选择与操作 .....	(109)

# 项目1 直流电动机及控制

## 项目导读

直流电动机是将直流电能转换成机械能的电机。

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。作为一名电气控制技术人员,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,并能正确熟练地操作使用直流电机。

与交流电机相比,直流电机的优点是调速性能好、启动转矩大、过载能力强,在启动和调速要求较高的场合应用广泛;不足之处是直流电机结构复杂、成本高、运行维护困难。

## 项目知识目标

掌握直流电动机的结构及工作原理。

掌握直流电动机的基本工作特性。

掌握直流电动机的基本控制环节。

## 项目能力目标

能根据要求选择合理的直流电动机。

能根据直流电动机基本工作特性确定直流电动机控制系统设计方案。

## 任务1 认识直流电动机

### 任务目标

了解直流电机基本结构。

了解直流电机基本工作原理。

了解他励直流电动机基本运行特性。

### 任务储备

直流电机是通以直流电流的旋转电机,是电能和机械能相互转换的设备。将机械能转换为直流电能的是直流发电机,将直流电能转换为机械能的是直流电动机。

直流电机具有良好的调速特性和宽广的调速范围,在调速性能和指标要求较高的场合,直流电机得到了广泛的应用。

直流电机的工作原理和直流电机的机械特性是使用直流电机的必备知识;掌握直流电机的调速方法是关键技能点。

要了解和掌握直流电机的工作过程,首先要了解直流发电原理,在此基础上掌握直流电动机工作过程,然后再进一步掌握直流电动机的工作特性以及调速方法。

## 子任务 1 直流电机的工作原理与结构

直流电机是依据导体切割磁感线产生感应电动势和载流导体在磁场中受到电磁力的作用这两条基本原理制造的。因此,从结构上看,任何电机都包括磁路和电路两部分;从原理上讲,任何电机都体现了电和磁的相互作用。

### 1.1.1 直流电机的工作原理

#### 1. 直流发电机的工作原理

两极直流发电机工作原理如图 1-1 所示。

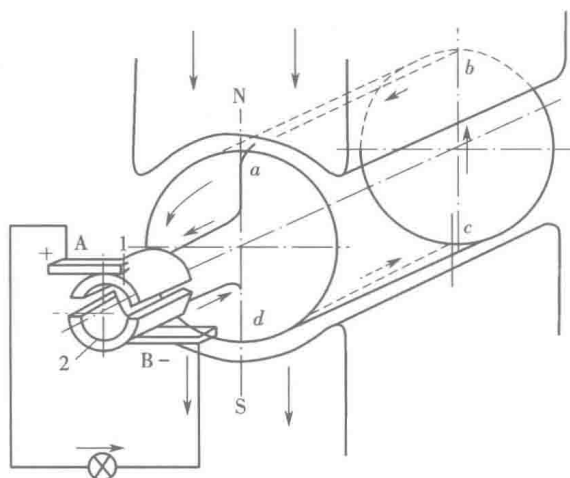


图 1-1 两极直流发电机工作原理

1,2—换向片;A,B—电刷;abcd—线圈;N,S—磁极

图中 N、S 是一对在空间固定不动的磁极,磁极可以由永久磁铁制成,但通常是在磁极铁芯上绕有励磁绕组,在励磁绕组中通入直流电流,即可产生 N、S 极。在 N、S 磁极之间装有由铁磁性物质构成的圆柱体,在圆柱体外表的槽中嵌入线圈 *abcd*,整个圆柱体可在磁极内部旋转,整个旋转部分称为转子或电枢。电枢线圈 *abcd* 的两端分别与固定在轴上相互绝缘的两个半圆铜环 1 和 2 相连接,这两个半圆铜环称为换向片,即构成了简单的换向器。换向器通过静止不动的电刷 A 和 B,将电枢线圈与外电路接通。

电枢由原动机拖动,以恒定转速按逆时针方向旋转,当线圈有效边 *ab* 和 *cd* 切割磁感线时,便在其中产生感应电动势,其方向用右手定则确定。如图 1-1 所示瞬间,导体 *ab* 中的电动势由 *b* 指向 *a*。从整个线圈来看,电动势的方向为由 *d* 指向 *a*,故外电路的电流自换向片 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,电流流出线圈处的电刷 A 为正电位,用“+”表示;而电流流入线圈处的电刷 B 则为负电位,用“-”表示。电刷 A 为正极,电刷 B 为负极。

电枢旋转  $180^\circ$  后,导体 *ab* 和 *cd* 以及换向片 1 和 2 的位置同时互换,电刷 A 通过换向片 2 与导体 *cd* 相连接,此时由于导体 *cd* 取代了原来 *ab* 所在的位置,即转到 N 极下,改变原来电流方向,即由 *c* 指向 *d*,所以电刷 A 的极性仍然为正;同时电刷 B 通过换向片 1 与导体 *ab* 相连接,而导体 *ab* 此时转到 S 极下,也改变了原来电流方向,由 *a* 指向 *b*,因此电刷 B 的极

性仍然为负。通过换向器和电刷的作用,及时地改变线圈与外电路的连接,使线圈产生的交变电动势变为电刷两端方向恒定的电动势,保持外电路的电流按一定方向流动。

由电磁感应定律( $E = Blv$ ),线圈感应电动势  $E$  的波形与气隙磁感应强度  $B$  的波形相同,即线圈感应电动势  $E$  随时间变化的规律与气隙磁感应强度  $B$  按梯形波形分布相同,如图 1-2 所示。

因此,通过电刷和换向器的作用,在电刷两端所得到的电动势方向不变,但大小却在零与最大值之间脉动,如图 1-3 所示。

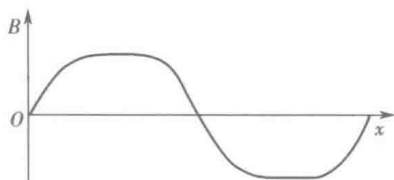


图 1-2 直流发电机气隙磁感应强度  $B$  分布波形

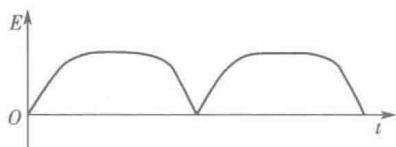


图 1-3 直流发电机电枢两端电动势波形

由于线圈只有一匝,此时的电动势很小,如果在直流发电机电枢上均匀分布很多线圈,此时换向片的数目也相应增多,每个线圈两端总的电动势脉动将显著减小,如图 1-4 所示,同时其电动势值也大为增加。由于直流发电机中线圈、换向片数目很多,因此电刷两端的电动势可以认为是恒定的直流电动势。

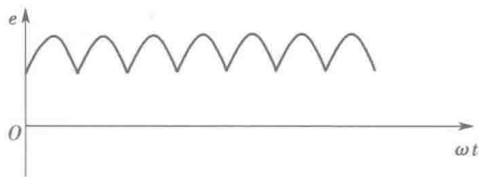


图 1-4 多线圈和多换向片时电刷两端的电动势波形

## 2. 直流电动机的工作原理

如图 1-5 所示为直流电动机工作原理图,其基本结构与发电机完全相同,只是将直流电源接至电刷两端。当电刷 B 接至电源负极时,电流将从电源正极流出,经过电刷 A、换向片 1、线圈  $abcd$ ,到换向片 2 和电刷 B,最后回到电源负极。根据电磁力定律,载流导体在磁场中受到电磁力的作用,其方向由左手定则确定。图 1-5 中导体  $ab$  所受电磁力方向向左,而导体  $cd$  所受电磁力方向向右,这样就产生了一个转矩,在转矩的作用下,电枢便按逆时针方向旋转起来。

当电枢从如图 1-5 所示的位置转过  $90^\circ$  时,线圈磁感应强度为零,因而使电枢旋转的转矩消失,但由于机械惯性,电枢仍能转过一个角度,使电刷 A、B 分别与换向片 2、1 接触,于是线圈中又有电流流过。此时电流从电源正极流出,经过电刷 A、换

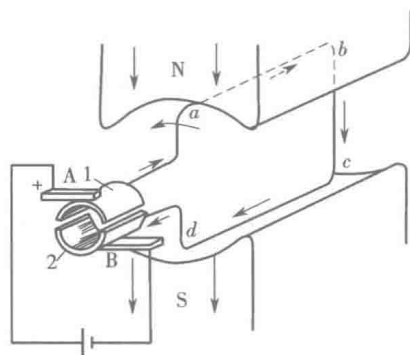


图 1-5 直流电动机工作原理图  
1,2—换向片



向片2、线圈  $abcd$ ,到换向片1和电刷B,最后回到电源负极。此时导体  $ab$  中的电流改变了方向,同时导体  $ab$  已由N极下转到S极下,其所受电磁力方向向右。同时,处于N极下的导体  $cd$  所受电磁力方向向左。因此,在转矩的作用下,电枢继续沿着逆时针方向旋转,这样电枢便一直旋转下去,这就是直流电动机的基本工作原理。

由此可知,直流电机既可作发电机运行,也可作电动机运行,这就是直流电动机的可逆原理。如果原动机拖动电枢旋转,通过电磁感应,便将机械能转换为电能,供给负载,这就是发电机;如果由外部电源给电机供电,由于载流导体在磁场作用下产生电磁力,建立电磁转矩,拖动负载转动,又成为电动机了。

### 1.1.2 直流电机的基本结构

直流电机的结构示意图如图1-6所示,它由定子和转子两个基本部分组成。其中图1-6(a)为结构图,图1-6(b)为轴向截面图。

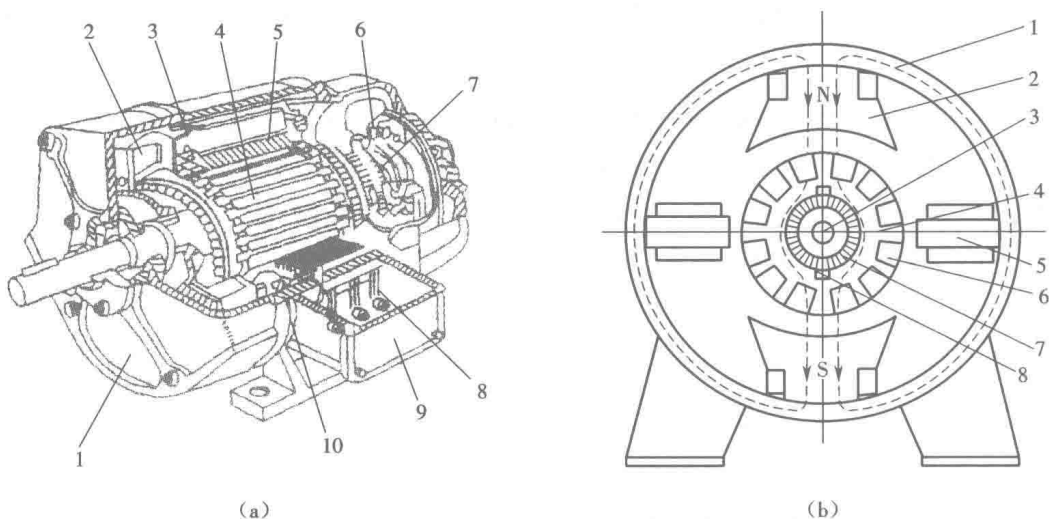


图1-6 直流电机结构示意图

(a)结构图;(b)轴向截面图

(a)1—端盖;2—风扇;3—机座;4—电枢;5—主磁极;6—刷架;7—换向器;

8—接线板;9—出线盒;10—换向器

(b)1—机座;2—主磁极;3—转轴;4—电枢铁芯;5—换向磁极;

6—电枢绕组;7—换向器;8—电刷

## 1. 定子

定子为直流电机的静止部分,其主要由主磁极、换向磁极、机座、端盖与电刷等装置组成。

### (1) 主磁极

主磁极由磁极铁芯和励磁绕组组成,磁极铁芯由1~1.5 mm厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成。当在励磁线圈中通入直流电流后,便产生主磁场。主磁极可以有一对、两对或更多对,它用螺栓固定在机座上。

### (2) 换向磁极

换向磁极是由铁芯和换向磁极绕组组成的,位于两主磁极之间,是比较小的磁极。其作用是产生附加磁场,以改善电机的换向条件,减小电刷与换向片之间的火花。换向磁极绕组总是与电枢绕组串联,其匝数少、导线粗。换向磁极铁芯通常都用厚钢板叠制而成,在小功率的直流电机中也有不装换向磁极的。

### (3) 机座

机座由铸钢或厚钢板制成,用来安装主磁极和换向磁极等部件和保护电机,它既是电机的固定部分,又是电机磁路的一部分。

### (4) 端盖与电刷

在机座的两边各有一个端盖,端盖的中心处装有轴承端盖,其上还固定有电刷架,利用弹簧把电刷压在转子的换向器上。

## 2. 转子

直流电机的转子又称为电枢,其主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

### (1) 电枢铁芯

电枢铁芯通常用0.5 mm厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成,其表面均匀开槽,用来嵌放电枢绕组。电枢铁芯也是直流电机磁路的一部分。

### (2) 电枢绕组

电枢绕组由许多相同的线圈组成,按一定规律嵌放在电枢铁芯的槽内并与换向器连接,其作用是产生感应电动势和电磁转矩。

### (3) 换向器

换向器又称整流子,是直流电动机的特有装置。它由许多楔形铜片组成,片间用云母或者其他垫片绝缘,外表呈圆柱体,装在转轴上。每一换向铜片按一定规律与电枢绕组的线圈连接。在换向器的表面压着电刷,使旋转的电枢绕组与静止的外电路相通,其作用是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,进而产生恒定方向的电磁转矩,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。

## 3. 气隙

气隙是电机磁路的重要组成部分。转子要旋转,定子与转子之间必须要有气隙(一般小型电动机气隙为0.5~5 mm,大型电机气隙为5~10 mm),称为工作气隙。气隙路径虽短,但由于气隙磁阻远大于一般磁阻,对电机性能有很大影响。

### 1.1.3 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁绕组的供电方式称为励磁方式。按直流电机励磁绕组与电枢绕组连接方式的不同,分为他励直流电机、并励直流电机、串励直流电机与复励直流电机四种,如图1-7所示。

其中图1-7(a)为他励直流电机,励磁绕组与电枢绕组分别用两个独立的直流电源供电;图1-7(b)为并励直流电机,励磁绕组与电枢绕组并联,由同一直流电源供电;图1-7(c)为串励直流电机,励磁绕组与电枢绕组串联;图1-7(d)为复励直流电机,既有并励绕组,又有串励绕组。直流电机的并励绕组一般电流较小、导线较细、匝数较多;串励绕组的电流较大、导线较粗、匝数较少,因而不难辨别。

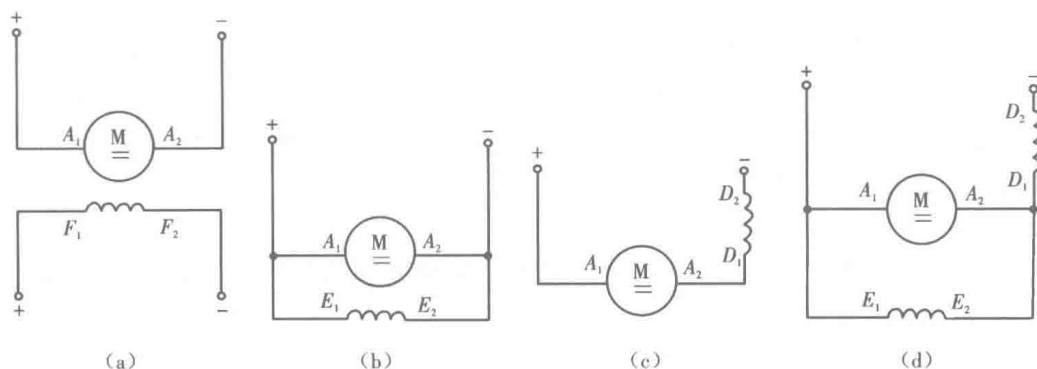


图 1-7 直流电机的励磁方式

(a)他励直流电机;(b)并励直流电机;(c)串励直流电机;(d)复励直流电机

#### 1.1.4 直流电机的铭牌数据和主要系列

##### 1. 直流电机的铭牌数据

每台直流电机的机座上都有一个铭牌,其上标有电机型号和各项额定值,用以表示电机的主要性能和使用条件,表 1-1 为某台直流电动机的铭牌。

表 1-1 某台直流电动机的铭牌表示

型号	Z4-112/2-1	励磁方式	并励
功率/kW	5.5	励磁电压/V	180
电压/V	440	效率/%	81.190
电流/A	15	定额	连续
转速/(r/min)	3 000	温升/°C	80
出品号数	××××	出厂日期	2001 年 10 月
××××电机厂			

##### (1) 电机型号

电机型号表明电机的系列及主要特点。知道了电机的型号,便可从相关手册及资料中查出该电机的有关技术数据。

##### (2) 额定功率 $P_n$

额定功率指电机在额定运行时的输出功率,对发电机是指输出的电功率  $P_n = U_n I_n$ ,对电动机是指输出的机械功率  $P_n = U_n I_n \eta$ 。

##### (3) 额定电压 $U_n$

额定电压指额定运行状况下,直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压。

##### (4) 额定电流 $I_n$

额定电流指额定电压和额定负载时允许电机长期输入(电动机)或输出(发电机)的电流。

##### (5) 额定转速 $n_n$

额定转速指电动机在额定电压和额定负载时的旋转速度。

### (6) 电动机额定效率 $\eta_n$

电动机额定效率指直流电动机额定输出功率  $P_n$  与电动机输入功率  $UI$  比值的百分数。此外,铭牌上还会标有励磁方式、额定励磁电压、额定励磁电流和绝缘等级等参数。

## 2. 直流电机的主要系列

由于直流电机应用广泛,型号很多。直流电动机主要系列如下:

Z4 系列——一般用途的小型直流电动机;

ZT 系列——广调速直流电动机;

ZJ 系列——精密机床用直流电动机;

ZTD 系列——电梯用直流电动机;

ZZJ 系列——起重冶金用直流电动机;

ZD2、ZF2 系列——中型直流电动机;

ZQ 系列——直流牵引电动机;

ZH 系列——船用直流电动机;

ZA 系列——防爆安全型直流电动机;

ZLJ 系列——力矩直流电动机。

## 子任务2 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势

直流电动机是一种在电枢绕组中通入直流电流后,与电动机磁场相互作用产生电磁力,形成电磁转矩使其转子旋转的电动机。而电枢转动时,电枢绕组导体不断切割磁感线,在电枢绕组中产生感应电动势。

### 1.2.1 电磁转矩

由电磁力公式可知,每根载流导体在电磁场中所受电磁力平均值  $F = BIl$ 。对于给定的电动机,磁感应强度与每个磁极的磁通成正比,导体电流与电枢电流成正比,而导体在磁极磁场中的有效长度  $l$  及转子半径等都是固定的,仅取决于电动机的结构,因此直流电动机的电磁转矩的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-1)$$

式中  $C_T$ ——与电动机结构有关的常数;

$\Phi$ ——每极磁通(Wb);

$I_a$ ——电枢电流(A);

$T$ ——电磁转矩(N·m)。

由式(1-1)可知,直流电动机的电磁转矩  $T$  与每极磁通  $\Phi$  和电枢电流  $I_a$  的乘积成正比。电磁转矩的方向由左手定则确定。

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

$$T = 9\,550 \frac{P}{n} \quad (1-2)$$

式中  $P$ ——电动机轴上输出功率(kW);

$n$ ——电动机转速(r/min);

$T$ ——电动机电磁转矩(N·m)。

### 1.2.2 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感线,因此每根载流导体中将产生感应

电动势,其大小平均值为  $E = Blv$ ,其方向由右手定则确定,如图 1-8 所示。

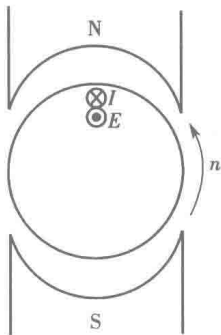


图 1-8 电枢电动势和电流方向

将图 1-8 与图 1-5 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,对于给定的电流电动机,磁感应强度与每极磁通成正比,导体的运动速度与电枢的转速  $n$  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的大小为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-3)$$

式中  $C_e$ ——与电动机结构有关的另一常数;

$\Phi$ ——每极磁通(Wb);

$n$ ——电动机转速(r/min);

$E_a$ ——电枢电动势(V)。

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。

### 子任务 3 他励直流电动机的运行原理与机械特性

图 1-9 所示为一台他励直流电动机结构示意图和电路图,电枢电动势  $E_a$  为反电动势,与电枢电流  $I_a$  方向相反;电磁转矩  $T$  为拖动转矩,方向与电动机转速  $n$  的方向一致; $T_L$  为负载转矩; $T_0$  为空载转矩,方向与  $n$  方向相反。

#### 1.3.1 直流电动机的基本方程式

直流电动机的基本方程式是指直流电动机稳定运行时电路系统的电动势平衡方程式、机械系统的转矩平衡方程式和能量转换过程中的功率平衡方程式。这些方程式反映了直流电动机内部的电磁过程,也表达了电动机内外的机电能量转换,说明了直流电动机的运行原理。

##### 1. 电动势平衡方程式

由基尔霍夫定律可知,在电动机电枢电路中存在如下的回路电压方程式:

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-4)$$

式中  $U$ ——电枢电压(V);

$I_a$ ——电枢电流(A);

$R_a$ ——电枢回路中总电阻( $\Omega$ )。

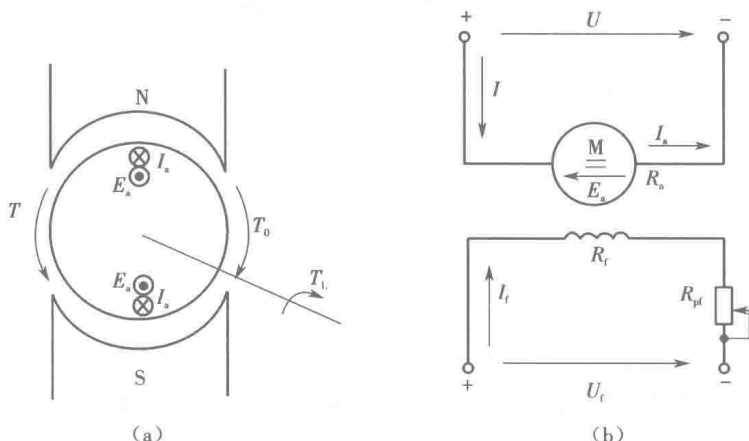


图 1-9 他励直流电动机结构示意图和电路图

(a)结构示意图;(b)电路图

## 2. 功率平衡方程式

直流电动机输入的电功率是不可能全部转换成机械功率的,因为在转换的过程中存在着各种损耗。按其性质可分为机械损耗  $P_m$ 、铁芯损耗  $P_{Fe}$ 、铜损耗  $P_{Cu}$  和附加损耗  $P_s$  四种。

### (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。其中有轴与轴承的摩擦损耗以及转动部分与空气的摩擦损耗等。

### (2) 铁芯损耗 $P_{Fe}$

当直流电动机旋转时,电枢铁芯因其中磁场反复变化而产生的磁滞损耗和涡流损耗统称为铁芯损耗。

上述机械损耗  $P_m$  和铁芯损耗  $P_{Fe}$  在直流电动机转起来尚未带负载时就存在,故上述两种损耗之和称为空载损耗  $P_0$ ,即

$$P_0 = P_m + P_{Fe} \quad (1-5)$$

由于机械损耗  $P_m$  与铁芯损耗  $P_{Fe}$  都会产生与旋转方向相反的制动转矩,该转矩将抵消一部分拖动转矩,因此这个制动转矩称为空载转矩。

### (3) 铜损耗 $P_{Cu}$

当直流电动机运行时,在电枢回路和励磁回路中都有电流经过,因此在绕组电阻上产生的损耗称为铜损耗。

### (4) 附加损耗 $P_s$

附加损耗又称杂散损耗,其值很难计算和测定,一般取  $(0.5\% \sim 1\%)P_n$  ( $P_n$  为电动机的额定功率)。

由此可知,直流电动机总损耗

$$\sum P = P_m + P_{Fe} + P_{Cu} + P_s \quad (1-6)$$

当他励直流电动机接上电源时,电枢绕组流过电流  $I_a$ ,电网向电动机输入的电功率

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cua} \quad (1-7)$$

输入的电功率  $P_1$  一部分被电枢绕组消耗(电枢铜损)  $P_{Cua}$ ,一部分转换成机械功率  $P_{em}$ 。

从上述分析可知,电动机旋转后,还要克服各类摩擦引起的机械损耗  $P_m$  和电枢铁芯损

耗  $P_{Fe}$  以及附加损耗  $P_s$ , 而大部分从电动机轴上输出, 故电动机输出的机械功率

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m - P_s \quad (1-8)$$

若忽略附加损耗, 则输出机械功率

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \quad (1-9)$$

$$= P_1 - P_{Cua} - P_0$$

$$= P_1 - \sum P \quad (1-10)$$

则直流电动机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\% \quad (1-11)$$

一般中小型直流电动机的效率为 75% ~ 85%, 大型直流电动机的效率为 85% ~ 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 1-10 所示。

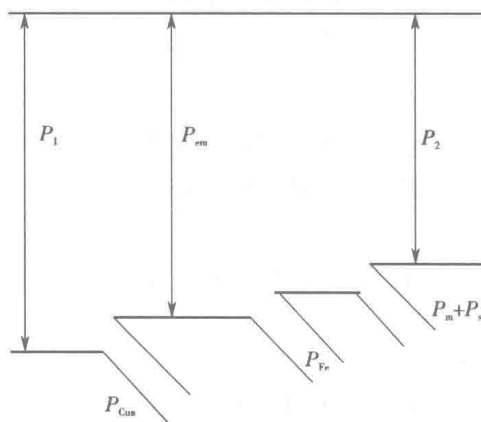


图 1-10 他励直流电动机功率流程图

### 3. 转矩平衡方程式

将式(1-9)等号两边同除以电动机的机械角速度  $\Omega$ , 可得转矩平衡方程式:

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_0}{\Omega} \quad (1-12)$$

即

$$T_2 = T - T_0$$

或

$$T = T_2 + T_0$$

式中  $T$ ——电动机电磁转矩( $N \cdot m$ );

$T_2$ ——电动机轴上输出的机械转矩(负载转矩)( $N \cdot m$ );

$T_0$ ——空载转矩( $N \cdot m$ )。

由于空载转矩仅为电动机额定转矩的 2% ~ 5%, 所以在重载或额定负载下常忽略不计, 则负载转矩近似与电磁转矩相等。

#### 1.3.2 他励直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是在稳定运行情况下, 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, 是分析电动机启动、调速、制动的重要工具。

##### 1. 他励直流电动机的机械特性方程式

由他励直流电动机电动势平衡方程式

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

式中  $R_{pa}$ ——电枢回路串联电阻( $\Omega$ )。

又由  $E_a = C_e \Phi n$ , 可得

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi}$$

再由  $T = C_T \Phi I_a$ , 得  $I_a = T / (C_T \Phi)$ , 最终可得机械特性方程式

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{TR}{C_e C_T \Phi^2} \quad (1-13)$$

式中  $C_e, C_T$ ——由电动机结构决定的常数。

当  $U, R$  数值不变时, 转速  $n$  与电磁转矩  $T$  为线性关系, 其机械特性曲线如图 1-11 所示。由图可知, 式(1-13)还可以写成:

$$n = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n \quad (1-14)$$

式中  $n_0$ ——电磁转矩  $T=0$  时的转速, 称为理想空载转速,  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$  (r/min), 电动机实际上空载运行时, 由于  $T = T_0 \neq 0$ , 所以实际空载转速  $n'_0$  略小于理想空载转速  $n_0$ ;

$\beta$ ——机械特性斜率,  $\beta = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2}$ , 在同一  $n_0$  下,  $\beta$  值较小时, 转速随电磁转矩的变化较小, 称此特性为硬特性,  $\beta$  值越大, 表明直线倾斜越厉害, 称此特性为软特性;

$\Delta n$ ——转速降,  $\Delta n = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T$  (r/min)。

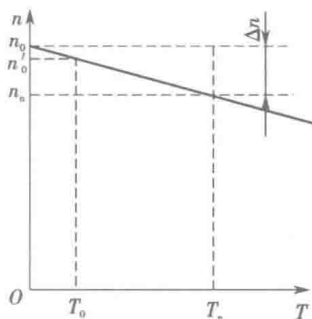


图 1-11 他励直流电动机机械特性曲线

当电动机负载变化时, 如增大, 则电动机转速下降, 电动机的电磁转矩也随之增大, 直至新的稳定工作点, 此时转速降为  $\Delta n$ , 且斜率  $\beta$  越大, 转速下降越快。

## 2. 他励直流电动机的固有机械特性

当他励直流电动机的电源电压、磁通为额定值, 电枢回路未附加电阻时的机械特性称为固有机械特性, 其特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_n} - \frac{R}{C_e C_T \Phi_n^2} T \quad (1-15)$$

由于电枢绕组的电阻  $R_a$  阻值很小, 而  $\Phi_n$  值大, 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

人为地改变电动机气隙磁通  $\Phi$ 、电源电压  $U$  和电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  等参数,获得的机械特性为人为机械特性。

(1) 电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  时的人为机械特性

电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  时的人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_n}{C_e \Phi_n} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_n^2} T \quad (1-16)$$

与固有机械特性相比,电枢回路串联电阻  $R_{pa}$  时的人为机械特性的特点为:

- 1) 理想空载转速  $n_0$  保持不变;
- 2) 机械特性的斜率  $\beta$  随  $R_{pa}$  的增大而增大,特性曲线变软。

图 1-12 为不同  $R_{pa}$  时的一组人为机械特性曲线,从图中可以看出改变电阻  $R_{pa}$  的大小,可以使电动机的转速发生变化,因此电枢回路串联电阻可用于调速。

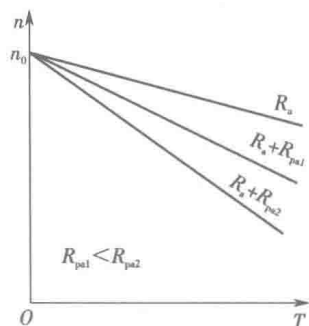


图 1-12 他励直流电动机电枢回路串联电阻的人为机械特性

(2) 改变电源电压时的人为机械特性

当  $\Phi = \Phi_n$ , 电枢回路不串联电阻(即  $R_{pa} = 0$ )时,改变电源电压的人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_n} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_n^2} T \quad (1-17)$$

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:

- 1) 理想空载转速  $n_0$  正比于电压  $U$ ,  $U$  下降时,  $n_0$  成正比例减小;
- 2) 特性曲线斜率  $\beta$  不变。

图 1-13 为调节电源电压的一组人为机械特性,它是一组平行直线。因此,降低电源电压也可用于调速,  $U$  越低,转速越低。

(3) 改变磁通时的人为机械特性

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

$$n = \frac{U_n}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-18)$$

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  $\Phi_n$  往下调