




21世纪高职高专规划教材

(电工电子类)

# 电机与电气控制



周元一 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



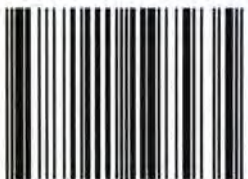
ISBN 7-111-19793-3

策划编辑：余茂祚

封面设计：饶 薇



ISBN 7-111-19793-3



9 787111 197935 >

定价：23.00元

编辑热线 (010)68354423

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037  
联系电话：(010) 68326294 网址：<http://www.cmpbook.com>  
(010) 68993821 E-mail: [online@ccpbooks.com](mailto:online@ccpbooks.com)

**21 世纪高职高专规划教材**  
**(电工电子类)**

# 电机与电气控制

主 编 周元一  
副主编 蒋永明 范次猛  
参 编 赵梅花 张建斌  
刘本山



机械工业出版社

《电机与电气控制》是一门实用性的电类专业必修课程。本书根据高等职业教育特点和教学改革的精神,将传统的《电机原理》、《电力拖动基础》和《常用生产机械电气控制设备》3门课程的内容进行了有机的整合。全书共9章,内容包括直流电机、变压器、交流电动机、常用控制电机、常用低压电器、电动机的基本电气控制电路、常用生产机械的电气控制、电气控制电路设计、实验与实训。各章均有小结、例题和习题,有利于学生巩固理论概念,掌握操作方法。

本书简明实用,图文并茂,方便于自学,可作为高等职业技术学院电气自动化、机电一体化、数控等相关专业的教材,也可作为成人高等教育或工程技术人员的培训教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制/周元一主编. —北京:机械工业出版社, 2006.8

21世纪高职高专规划教材(电工电子类)

ISBN 7-111-19793-3

I. 电… II. 周… III. ①电机学-高等学校:技术学校-教材②电气控制-高等学校:技术学校-教材  
IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第096428号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:余茂祚 版式设计:霍永明 责任校对:魏俊云

封面设计:饶薇 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年9月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·373千字

0 001—4 000册

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68354423

封面防伪标均为盗版

## 21 世纪高职高专规划教材目录（机、电、建筑类）

高等数学（理工科用）	金属切削机床	电路与模拟电子技术	物流运输管理与实务
高等数学学习指导书 （理工科用）	机械制造工艺与夹具	低频电子线路	建筑制图
计算机应用基础	冷冲模设计及制造	电路分析基础	建筑制图习题集
计算机文化基础	塑料模设计及制造	常用电子元器件	建筑力学
应用文写作	模具 CAD/CAM	单片机原理及接口术 术案例教程	建筑材料
经济法概论	汽车构造	多媒体技术及其应用	建筑工程测量
法律基础	汽车电器与电子设备	操作系统	钢筋混凝土结构及 砌体结构
法律基础概论	公路运输与安全	数据结构	房屋建筑学
C 语言程序设计	汽车检测与维修	软件工程	土力学及地基基础
工程制图（机械类用）	汽车营销学	微型计算机维护技术	建筑设备
工程制图习题集（机械类用）	工程制图（非机械类用）	汇编语言程序设计	建筑给排水
计算机辅助绘图—AutoCAD2005 中文版	工程制图习题集（非机械类 用）	VB6.0 程序设计	建筑电气
几何量精度设计与检测	离散数学	VB6.0 程序设计实训教程	建筑施工
工程力学	电路基础	Java 程序设计	建筑工程概预算
金属工艺学	单片机原理与应用	C++ 程序设计	房屋维修与预算
机械设计基础	电机与电气控制	Delphi 程序设计	建筑装修装饰材料
工业产品造型设计	电力拖动与控制	计算机网络技术	建筑装修装饰构造
液压与气压传动	可编程控制器及其应用	网络应用技术	建筑装修装饰设计
电工与电子基础	工厂供电	网络数据库技术	楼宇智能化技术
电工电子技术（非电类专业用）	微机原理与应用	网络操作系统	钢结构
机械制造基础	模拟电子技术	网络安全技术	多层框架结构
数控技术	数字电子技术	网络营销	建筑施工组织
专业英语（机械类用）	数字逻辑电路	网络综合布线	房地产开发与经营
金工实习	办公自动化技术	网络工程实训教程	工程造价案例分析
数控机床及其使用维修	现代检测技术与仪器仪表	计算机图形学实用教程	土木工程实训指导
数控加工工艺及编程	传感器与检测技术	动画设计与制作	土木工程基础实验 教程
机电控制技术	制冷原理与设备	管理信息系统	建设工程监理
计算机辅助设计与制造	制冷与空调装置自动控制技 术	电工与电子实验	建设工程招标与合 同管理
微机原理与接口技术	电视机原理与维修	专业英语（电类用）	同管理
机电一体化系统设计	自动控制原理与系统	物流技术基础	房地产法规与案例 分析
控制工程基础		物流仓储与配送	建设法规与案例分析
机械设备控制技术		物流管理	

# 21 世纪高职高专规划教材

## 编委会名单

编委会主任 王文斌

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

王建明	王明耀	王胜利	王寅仓	王锡铭
刘义	刘晶磷	刘锡奇	杜建根	李向东
李兴旺	李居参	李麟书	杨国祥	余党军
张建华	茆有柏	秦建华	唐汝元	谈向群
符宁平	蒋国良	薛世山	储克森	

编委会委员 (按姓氏笔画为序, 黑体字为常务编委)

王若明	<b>田建敏</b>	成运花	曲昭仲	朱强
刘莹	刘学应	许展	<b>严安云</b>	李连邨
李学锋	李选芒	<b>李超群</b>	杨飒	杨群祥
杨翠明	吴锐	何志祥	何宝文	余元冠
<b>沈国良</b>	张波	<b>张锋</b>	张福臣	陈月波
<b>陈向平</b>	陈江伟	武友德	林钢	周国良
<b>宗序炎</b>	赵建武	恽达明	<b>俞庆生</b>	晏初宏
倪依纯	徐炳亭	<b>徐铮颖</b>	韩学军	崔平
崔景茂	<b>焦斌</b>			

总策划 余茂祚

# 前 言

本书是21世纪高职高专规范化教材，在编写过程中根据高职教育的特点和要求，结合当前学生的文化基础和教改精神，正确处理教材的知识传授和能力培养两者之间的关系。在原理叙述中以定性分析为主，在应用技术上突出了实用性。

教材在内容的组织上以必须、够用为度，淡化理论、突出应用；内容结构上循序渐进，语言文字精炼，简洁、好教、易学。书中有典型例题，各章附有丰富的思考题和习题，便于学生掌握和巩固所学知识。最后一章还附有相应的实验与实训项目，可供不同专业选用以培养学生的动手能力。本书还有一些实用性的阅读与应用内容，以培养学生的自学能力和掌握一些应用性知识。通过本门课程的学习，使学生具有对工厂常用电气控制设备的运行、维护、安装、调试、设计以及电器选择等能力。书中带※的章节为选学内容。

本书由周元一任主编、蒋永明、范次猛任副主编。编写分工如下：安徽机电职业技术学院周元一编写第3章、第8章的8.4~8.6节、第9章的9.1节、9.2.1~9.2.8节、9.2.13~9.2.15节；安徽水利水电职业技术学院蒋永明编写第5章、第6章；江苏省无锡交通高等职业技术学校范次猛编写第7章并负责全书的光盘制作；洛阳大学赵梅花编写第1章、第4章、附录；太原理工大学长治学院张建斌编写第2章、第8章的8.1~8.3节；安徽机电职业技术学院刘本山编写第9章的9.2.9~9.2.12节。

本教材在编写时，参阅了许多同行专家编著的教材和资料，得到了不少启发和教益，在此向编著者致以诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第1章 直流电机 ..... 1

- 1.1 直流电机的结构和  
工作原理 ..... 1
- 1.2 直流电机的励磁  
方式和铭牌 ..... 5
- 1.3 直流电动机的基本平衡方  
程式和机械特性 ..... 7
- 1.4 直流电动机的起动和反转 ..... 10
- 1.5 直流电动机的调速 ..... 12
- 1.6 直流电动机的制动 ..... 15
- 本章小结 ..... 17
- 思考题与习题 ..... 18

## 第2章 变压器 ..... 19

- 2.1 变压器的基本结构和分类 ..... 19
- 2.2 单相变压器的工作原理 ..... 23
- 2.3 变压器的工作特性 ..... 26
- 2.4 三相变压器 ..... 28
- 2.5 其他常用变压器 ..... 33
- 阅读与应用 变压器的维护检修及  
常见故障分析 ..... 36
- 本章小结 ..... 39
- 思考题与习题 ..... 40

## 第3章 交流电动机 ..... 42

- 3.1 三相异步电动机的结构和  
工作原理 ..... 42
- 3.2 三相异步电动机的  
运行特性 ..... 48
- 3.3 三相异步电动机的起动 ..... 52
- 3.4 三相异步电动机的调速、  
反转和制动 ..... 54
- 3.5\* 电力拖动系统运动  
状态分析 ..... 56
- 3.6 单相异步电动机 ..... 59

- 3.7\* 同步电机简介 ..... 62
- 阅读与应用 三相异步电动机的选择、  
使用和维护 ..... 65
- 本章小结 ..... 66
- 思考题与习题 ..... 67

## 第4章 常用控制电机 ..... 69

- 4.1 伺服电动机 ..... 69
- 4.2 测速发电机 ..... 72
- 4.3 步进电动机 ..... 74
- 本章小结 ..... 77
- 思考题与习题 ..... 78

## 第5章 常用低压电器 ..... 79

- 5.1 常用低压电器的  
基本知识 ..... 79
- 5.2 主令电器与转换开关 ..... 83
- 5.3 电磁式接触器 ..... 86
- 5.4 电磁式继电器 ..... 88
- 5.5 时间继电器 ..... 90
- 5.6 热继电器 ..... 93
- 5.7 速度继电器 ..... 95
- 5.8 熔断器 ..... 97
- 5.9 低压断路器 ..... 98
- 本章小结 ..... 99
- 思考题与习题 ..... 101

## 第6章 电动机的基本 电气控制电路 ..... 102

- 6.1 电气图 ..... 102
- 6.2 三相笼型异步电动机的全  
压起动控制电路 ..... 105
- 6.3 三相笼型异步电动机  
的减压起动控制电路 ..... 113
- 6.4 绕线转子三相异步电动机  
起动控制电路 ..... 119
- 6.5 三相异步电动机电气



制动控制电路 .....	122	本章小结 .....	184
6.6* 三相异步电动机变极		思考题与习题 .....	184
调速控制电路 .....	125	<b>第8章* 电气控制电路设计</b> .....	186
6.7* 直流电动机电气控制电路 ..	127	8.1 电气设计的主要内容 .....	186
本章小结 .....	130	8.2 电力拖动方案的确定 .....	187
思考题与习题 .....	131	8.3 电气控制电路设计	
<b>第7章 常用生产机械</b>		的一般要求 .....	189
<b>的电气控制</b> .....	133	8.4 电气控制电路的设计 .....	192
7.1 卧式车床的电气控制		8.5 常用控制电器的选择 .....	195
及常见故障分析 .....	133	8.6 电气控制系统的工艺	
7.2* 平面磨床的电气控制		设计与安装调试 .....	198
及常见故障分析 .....	136	本章小结 .....	203
7.3 摇臂钻床电气控制电路		思考题与习题 .....	204
及常见故障分析 .....	142	<b>第9章 实验与实训</b> .....	205
7.4 铣床的电气控制及		9.1 概述 .....	205
常见故障分析 .....	149	9.2 实验与实训指导书 .....	206
7.5* 镗床的电气控制电路及常见		<b>附录 常用的电气图形符号</b>	
故障分析 .....	163	和文字符号 .....	232
7.6* 交流桥式起重机的		<b>参考文献</b> .....	234
电气控制 .....	172		

# 第1章 直流电机

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机是可逆的，即一台直流电机既可作为发电机运行，又可作为电动机运行。当用做发电机时，是将机械能转换为电能；当用作电动机时，是将电能转换为机械能。直流发电机和直流电动机在结构上没有差别。

直流电动机和交流电动机相比，具有较好的起动性能和调速性能，因此广泛应用于经常起、制动和对调速性能要求较高的机械设备上，如矿井卷扬机、挖掘机、大型机床、电力机车、船舶推进器、纺织机械及造纸机械等。

本章主要介绍直流电机的结构、工作原理和机械特性，在此基础上进一步分析直流电动机的起动、调速和制动方法。

## 1.1 直流电机的结构和工作原理

### 1.1.1 直流电机的结构

直流电机主要由定子和转子（电枢）两大部分构成。定子和转子之间的间隙称为气隙。定子的主要作用是产生主磁场并作为结构支撑，它主要由主磁极、换向磁极、机座和电刷装置组成。转子的作用是产生感应电动势和电磁转矩，它主要由转子铁心、转子绕组、换向器、转轴和风扇组成。直流电机的径向断面示意图如图 1-1 所示。下面分别介绍各主要部件的结构和作用。

#### 1. 定子

(1) 主磁极：主磁极的作用是产生主磁场，它由主磁极铁心和绕组构成，如图 1-2 所示。主磁极铁心一般采用 1~1.5mm 厚的低碳钢板片击叠压铆接而成。主磁极铁心上绕有励磁绕组。

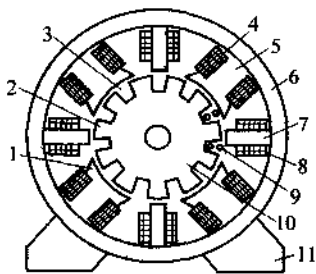


图 1-1 直流电机径向剖面图

- 1—极靴 2—转子齿 3—转子槽
- 4—励磁绕组 5—主磁极 6—磁轭
- 7—换向磁极 8—换向极绕组 9—转子绕组 10—转子铁心 11—机座

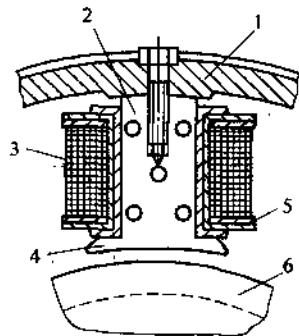


图 1-2 主磁极

- 1—机座 2—极身 3—励磁绕组
- 4—极靴 5—框架 6—转子

(2) 换向磁极：换向磁极的作用是产生附加磁场，用以改善换向，使电动机运行时电刷下不产生有害的火花。它由换向极铁心和换向极绕组两部分构成。

(3) 机座：机座是直流电机的外壳，一方面用来固定主磁极、换向磁极和端盖等，另一方面也是电机磁路的一部分，这部分磁路称为定子磁轭。为保证良好的机械强度和导磁性，机座一般采用铸钢制造或用厚钢板卷制焊接而成。

(4) 电刷装置：电刷装置的作用是用来固定电刷，并使电刷与旋转的换向器保持滑动接触，将转子绕组与外电路接通，使电流经电刷输入转子或从转子输出。电刷装置由电刷、刷握、压紧弹簧以及汇流条等构成，如图 1-3 所示。

## 2. 转子（电枢）

(1) 转子铁心：转子铁心是电机主磁路的一部分。为减少损耗，提高电机的效率，转子铁心用 0.35 ~ 0.5mm 厚涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成，如图 1-4 所示。图 1-4b 是转子铁心的装配图。

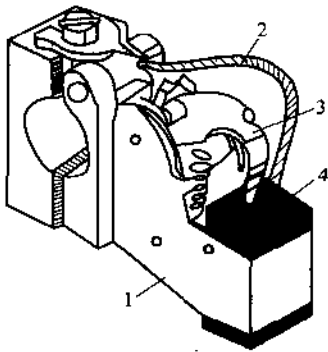


图 1-3 电刷装置

1—刷握 2—汇流条 3—压紧弹簧 4—电刷

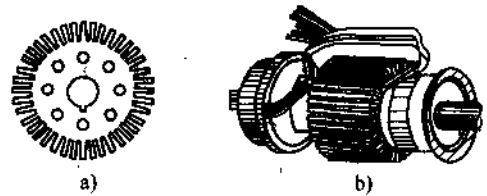


图 1-4 转子结构

a) 转子铁心冲片 b) 转子铁心装配图

(2) 转子绕组：转子绕组是直流电机结构中重要而复杂的部分，感应电动势、电流和电磁转矩的产生，机械能和电能的相互转换都在这里进行。

(3) 换向器：换向器也是直流电机的重要部件，在直流电动机中，它的作用是将电刷两端的直流电转换为绕组内的交流电；在直流发电机中，它将绕组内的交变电动势转换为电刷两端的直流电压。换向器由多个相互绝缘的换向片组成。换向片之间用云母绝缘，换向器结构如图 1-5 所示。

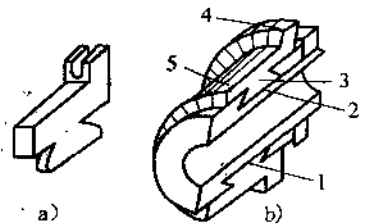


图 1-5 换向器

a) 换向片 b) 金属套筒换向器  
1—云母 2—金属套筒 3—V形槽  
4—片间云母 5—换向片

(4) 转轴：转轴是支撑转子铁心和输出（或输入）机械转矩的部件，它必须具有足够的刚度和强度，以保证负载时气隙均匀及转轴本身不致断裂。转轴一般用圆钢加工而成。

### 1.1.2 直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理 图 1-6 所示为一台两极直流发电机工作原理简图。定子是两个在空间固定的主磁极 N、S。在两个主磁极之间，有一个可以转动的铁质圆柱体就是转子，转子上面固定一个线圈，有效边为 ab、cd。线圈的两个出线端分别接到两个半圆形铜质换向

片上，两个换向片构成的圆柱体就是一个最简单的换向器。它固定在转轴上，随轴一起转动。为了使线圈与外电路接通，换向器与空间固定的电刷 A 和 B 相接触。

当发电机的转子由原动机拖动逆时针恒速旋转时，根据电磁感应定律，线圈的 ab、cd 边将切割磁力线而感应电动势，感应电动势的方向可用右手定则确定。如图 1-6 所示瞬时，线圈 ab 边处于 N 极下，其电动势方向为  $b \rightarrow a$ ，并通过换向片引到电刷 A，因此 A 刷的极性为正，线圈 cd 边处于 S 极下，电动势的方向为由  $d \rightarrow c$ ，所以电刷 B 的极性为负。当转子逆时针转过  $180^\circ$  后，线圈 cd 边电动势的方向变为由  $c \rightarrow d$ ，ab 边电动势的方向变为由  $a \rightarrow b$ 。虽然两个线圈边电动势的方向都发生改变，但由于 cd 边通过换向片变为与电刷 A 接触，电刷 A 仍为正极性。同理可分析出电刷 B 仍为负极性。随着转子连续旋转，线圈的每个有效边交替切割 N 极和 S 极磁力线而感应出交变电动势，但由于进入到 N 极下的线圈边总是和电刷 A 相接触，进入到 S 极下的线圈边总是和电刷 B 相接触，因此电刷 A 始终是正极性，电刷 B 始终是负极性，所以在电刷 A、B 之间引出的是方向不变的直流动势。

2. 直流电动机工作原理 把图 1-6 所示直流发电机的原动机撤掉，使电刷 A、B 两端接于直流电源，如图 1-7 所示。该直流电机就会运行在电动工作状态，并且把输入的直流电能转换为机械能输出。

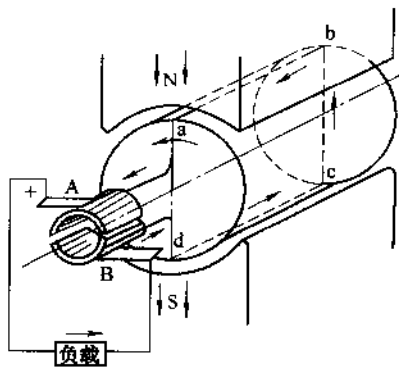


图 1-6 直流发电机工作原理图

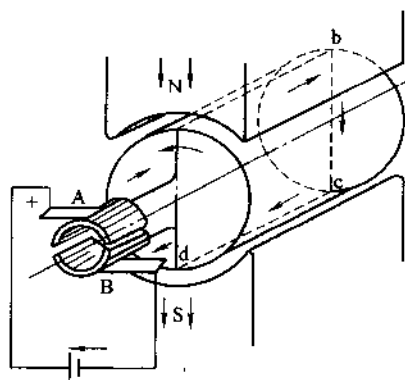


图 1-7 直流电动机工作原理图

由图 1-7 可以看出，当电刷 A 接直流电源的正极，电刷 B 接负极时，电流将从电刷 A 通过换向片流入线圈 abcd，并从电刷 B 流出。N 极下线圈有效边的电流方向是由  $a \rightarrow b$ ；S 极下线圈边电流方向是由  $c \rightarrow d$ 。根据电磁力定律，线圈的 ab 边和 cd 边将分别受到电磁力的作用，电磁力的方向可按左手定则确定。在图示瞬时，线圈 ab 边的受力方向为自右向左，cd 边的受力方向为自左向右，两个电磁力对转轴形成逆时针方向作用的力矩，即电磁转矩。在电磁转矩的作用下，转子将沿逆时针方向转动。当转子转过  $180^\circ$  时，线圈的 ab 边转到 S 极下，cd 边转到 N 极下，此时线圈两个有效边的电流方向将变为由  $d \rightarrow c$  和由  $b \rightarrow a$ 。按左手定则可确定，此时进入 N 极下的 cd 边所受电磁力的方向为自右向左，进入 S 极下的 ab 边所受电磁力的方向为自左向右，因此电磁转矩的作用方向仍为逆时针。由此可看出，由于电刷 A 总是通过换向片和进入 N 极下的线圈边相连接；电刷 B 总是通过换向片和进入 S 极下的线圈边相连接，在电刷两端所接电源极性不变时，电流总是通过电刷 A 流入 N 极下的线圈边，

再沿S极下的线圈边经电刷B流向电源。因此电磁力和电磁转矩的方向能始终保持不变，从而使电动机沿逆时针方向连续旋转。

3. 直流电动机的可逆性 通过上述对直流发电机和直流电动机工作原理的分析可看出，同一台直流电机既可作发电机运行，也可作电动机运行。当用原动机拖动转子旋转，即输入机械功率时，在电刷两端就会输出直流电能，此时电机作发电机运行；当在电刷两端接直流电源即输入直流电能时，电机将通过转子拖动生产机械旋转从而输出机械能，电机又作电动机运行。以上所述就是直流电机可逆运转的原理。

4. 直流电机的转子电动势 转子绕组切割磁力线而产生的感应电动势简称为转子电动势。根据电磁感应定律，转子绕组中，每根导体的感应电动势为

$$e = BLv \quad (1-1)$$

式中  $B$ ——电磁感应强度 (T)，与每极磁通  $\Phi$  成正比；

$L$ ——每根有效导体的长度 (m)，取决于电机的结构，是个定值；

$v$ ——转子运动的线速度 (m/s)。

直流电机的转子绕组由许多导体按一定规律连接，每并联支路所有导体的感应电动势都是叠加的，即转子电动势等于并联支路中每根导体中的感应电动势。导体运动的线速度  $v$  与转子绕组的转速  $n$  成正比。根据转子绕组的结构、绕制规律和电磁感应的有关知识可以写出转子电动势的表达式为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-2)$$

式中  $C_e$ ——转子电动势系数，与电动机的结构有关；

$\Phi$ ——每极磁通；

$n$ ——电动机的转速。

由式 (1-2) 可以看出，转子电动势与每极磁通  $\Phi$  和转速  $n$  成正比，对于直流电动机，转子电动势的方向与转子电流方向相反，所以转子电动势也称为反电动势，它总是阻碍转子电流的变化。

5. 直流电机的电磁转矩 直流电动机的电磁转矩  $T_e$  是由转子绕组通入直流电后，在主磁场的作用下使得转子绕组的导体受到力  $F$  的作用而形成的。根据电磁力定律，转子绕组通入直流电后，每根有效导体受到的电磁力可以表示为

$$F = BIL \quad (1-3)$$

式中  $I$ ——每根导体中的电流，与转子电流  $I_a$  成正比。

直流电动机受到的电磁转矩  $T_e$  是由所有有效的导体所受电磁力共同产生的，正比于电磁力  $F$ ，根据电磁感应的有关知识推导出电磁转矩的表达式为

$$T_e = C_m \Phi I_a \quad (1-4)$$

式中  $C_m$ ——电磁转矩系数，与电动机结构有关；

$\Phi$ ——每极磁通 (Wb)；

$I_a$ ——转子电流 (A)；

$T_e$ ——电磁转矩 (N·m)。

由式 (1-4) 可以看出，电磁转矩  $T_e$  与每极磁通  $\Phi$  和转子电流  $I_a$  成正比，其方向取决于  $\Phi$  和  $I_a$  的方向。

对于同一台电动机，电动势系数  $C_e$  和电磁转矩系数  $C_m$  之间的关系为

$$C_m = 9.55 C_e$$

直流电动机的额定转矩  $T_N$  的计算公式为

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-5)$$

其中  $T_N$ ——额定转矩 (N·m);  
 $P_N$ ——额定功率 (W);  
 $n_N$ ——额定转速 (r/min)。

## 1.2 直流电机的励磁方式和铭牌

### 1.2.1 直流电机的励磁方式

主磁极励磁绕组中通入直流电流产生的磁场称为主磁场。励磁绕组的供电方式称为励磁方式。根据励磁方式的不同，直流电机分为他励和自励两类。他励直流电机的励磁绕组与转子绕组之间无电的联系，由独立电源给励磁绕组供电，如图 1-8a 所示。自励直流电机的励磁电流由自身供给，根据励磁绕组与转子绕组的连接关系，又可以分为并励、串励和复励三种。并励直流电机的励磁绕组与转子绕组并联，励磁绕组上所加的电压就是转子电路两端的电压，如图 1-8b 所示。对并励直流电动机  $I = I_a + I_f$ ，并励直流发电机  $I_a = I + I_f$ 。串励直流电机的励磁绕组与转子绕组串联，如图 1-8c 所示。这种直流电动机的励磁电流就是转子电流，即  $I_f = I_a$ 。复励直流电机的主磁极上装有两个励磁绕组，一个与转子绕组并联，称为并励绕组，另一个与转子绕组串联，称为串励绕组。这两个励磁绕组若产生的磁动势方向相同称为积复励，否则称为差复励，连接方式如图 1-8d 所示。

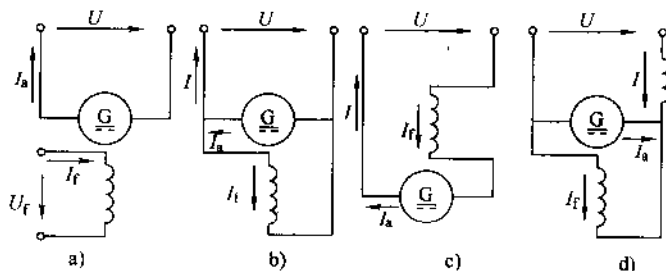


图 1-8 直流电机的励磁方式

a) 他励 b) 并励 c) 串励 d) 积复励 e) 差复励

励磁绕组所消耗的功率虽然仅占直流电机额定功率的 1% ~ 3%，但是直流电机的性能随着励磁方式的不同将产生很大差别。一般自动控制系统所用的直流电动机主要是他励直流电动机。这主要是因为当改变他励直流电动机的转子电压进行调速控制时，不影响其磁场，使其具有良好的控制特性。

### 1.2.2 直流电机的铭牌

为了保证电机安全而有效地运行，电机制造厂都对它所生产的电机工作条件加以规定。电机按制造工厂规定条件工作的情况，叫额定工作情况。表征电机额定工作情况的各种数据

叫做额定值。这些数据都列在电机的铭牌上，是使用和选择电机的依据，因此使用前一定要做详细了解。某直流电动机的铭牌数据见表 1-1。

表 1-1 直流电动机的铭牌

直流电动机			
型号	Z3-95	产品编号	7009
结构类型		励磁方式	他励
功率	30kW	励磁电压	220V
电压	220V	工作方式	连续
电流	160.5A	绝缘等级	定子 B 转子 B
转速	750r/min	重量	685kg
标准编号	JB1104-68	出厂日期	年 月

(1) 型号：型号可表明每一种产品的性能、用途和结构特点。国产直流电机型号采用汉语拼音大写字母和阿拉伯数字的组合来表示。其中汉语拼音大写字母表示电机的结构特点和用途等，阿拉伯数字则表示电机的尺寸及规格。如型号 Z3—95 的含义为：Z 表示直流电动机，3 表示第三次改型设计；第一个数字 9 表示机座号，第二个数字 5 表示铁心长度。

(2) 额定功率  $P_N$ ：指电机在额定运行状态时的输出功率，对发电机是指出线端输出的电功率，等于额定电压与额定电流的乘积，即  $P_N = U_N I_N$ ；对电动机是指其轴上输出的机械功率，等于额定电压与额定电流之积再乘以机械效率，即  $P_N = \eta_N U_N I_N$ 。额定功率单位为 W 或 kW。其中， $\eta_N$  为额定效率。

(3) 额定电压  $U_N$ ：是指额定运行状况下，直流发电机的输出电压或直流电动机的输入电压，单位为 V。

(4) 额定电流  $I_N$ ：是指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，单位为 A。

(5) 额定转速  $n_N$ ：是指电机在额定电压和额定负载时的旋转速度，单位为 r/min。

例 1 一台直流发电机的额定数据如下： $P_N = 200\text{kW}$ ， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $\eta_N = 90\%$ ，求该发电机的额定电流和输入功率各为多少？

解

$$P_N = U_N I_N$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{200 \times 10^3}{230} \text{A} = 869.6 \text{A}$$

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{200}{0.9} \text{kW} = 222.2 \text{kW}$$

例 2 一台直流电动机额定数据如下： $P_N = 160\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， $\eta_N = 90\%$ ，求额定电流和输入功率各为多少？

解

$$P_N = \eta_N U_N I_N$$

$$I_N = \frac{P_N}{\eta_N U_N} = \frac{160 \times 10^3}{0.9 \times 220} \text{A} = 808 \text{A}$$

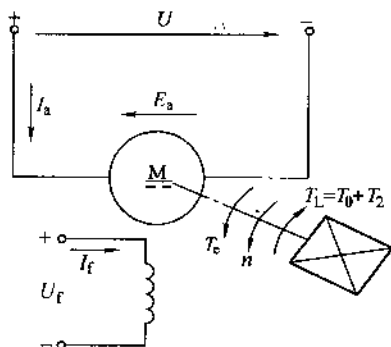
$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} \text{kW} = 177.8 \text{kW}$$

## 1.3 直流电动机的基本平衡方程式和机械特性

### 1.3.1 直流电动机的基本平衡方程式

直流电动机的励磁方式不同，平衡方程式也有所差别。他励直流电动机的平衡方程式如下：

1. 电动势、转矩平衡方程式 在介绍直流电动机稳态运行时的基本平衡方程式之前，按电动机的运行惯例规定好正方向，图 1-9 所示为他励直流电动机的运行原理图。图中  $U$  为直流电动机的转子电压， $I_a$  是转子电流， $E_a$  为转子绕组的感应电动势， $R_a$  是转子内电阻， $T_e$  为电磁转矩， $T_c$  为电动机的阻转矩， $T_L$  为机械负载转矩， $T_0$  为电动机的空载转矩， $n$  是电动机转子的转速。



根据图 1-9，可写出直流电动机稳态运行时的电动势平衡方程式和转矩平衡方程式

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-6) \quad \text{图 1-9 他励直流电动机运行原理图}$$

$$T_e = T_L = T_L + T_0 \quad (1-7)$$

2. 功率平衡方程式 根据式 (1-6) 和式 (1-7)，可以得到功率平衡方程式。将式 (1-6) 乘以转子电流  $I_a$  得

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$\text{则} \quad P_1 = P_m + p_{\text{cua}} \quad (1-8)$$

式中  $P_1 = UI_a$ ——从电网输入的电功率；

$P_m = E_a I_a$ ——电磁功率；

$p_{\text{cua}} = I_a^2 R_a$ ——转子回路的总铜耗。

将转矩平衡方程式 (1-7) 两边同乘以角速度  $\omega$ ，得

$$T_e \omega = T_L \omega + T_0 \omega$$

$$\text{则} \quad P_m = P_2 + p_0 \quad (1-9)$$

式中  $P_m = T_e \omega$ ——电磁功率；

$P_2 = T_L \omega$ ——输出的机械功率；

$P_0 = T_0 \omega = p_j + p_{\text{Fe}}$ ——空载损耗功率（包括机械摩擦和铁损耗）。

若考虑少量的附加损耗  $p_{\text{ad}}$ ，可得功率平衡方程式为

$$P_1 = P_2 + p_{\text{cua}} + p_j + p_{\text{Fe}} + p_{\text{ad}} = P_2 + \sum p \quad (1-10)$$

式中，总损耗  $\sum p = p_{\text{cua}} + p_j + p_{\text{Fe}} + p_{\text{ad}}$

直流电动机的效率  $\eta$  为输出功率  $P_2$  和输入功率  $P_1$  之比，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} \quad (1-11)$$

他励直流电动机的功率流程如图 1-10 所示。

### 1.3.2 直流电动机的机械特性

电动机的机械特性主要是描述电动机的转速  $n$  与其电磁转矩  $T_e$  之间的关系，通常用  $n$



$= f(T_e)$  曲线表示。机械特性是描述电动机运行性能的主要特性，是分析直流电动机起动、调速和制动原理的一个重要依据。直流电动机的励磁方式不同，其机械特性有很大差别，在直流拖动中，他励直流电动机应用比较广泛，因此我们着重对他励直流电动机的机械特性进行比较全面的分析。

1. 他励电动机的机械特性 他励直流电动机的原理图如图 1-11 所示。运用前面推出的几个基本平衡方程式和有关公式，即可导出机械特性方程式。

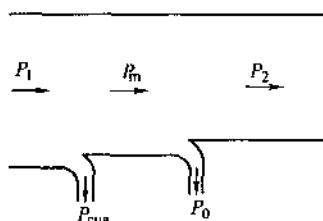


图 1-10 他励直流电动机的功率流程图

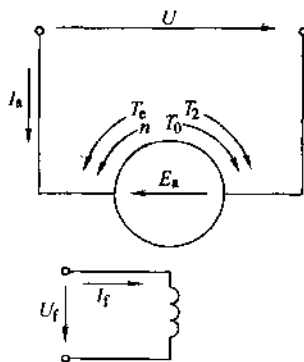


图 1-11 他励直流电动机的原理图

将式  $E_a = C_e \Phi n$  代入  $U = E_a + I_a R_a$ ，得出转速特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a \quad (1-12)$$

由式  $T_e = C_m \Phi I_a$  得

$$I_a = \frac{T_e}{C_m \Phi} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 得机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} T_e \quad (1-14)$$

假定电源电压  $U$ 、磁通  $\Phi$ 、转子回路电阻  $R$  都为常数，则式 (1-14) 可写为

$$n = n_0 - \beta T_e \quad (1-15)$$

其中， $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ ， $\beta = \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$ 。

式中  $n_0$ ——电动机的理想空载转速，即在理想空载 ( $T_e = 0$ ) 时电动机的转速；

$\beta$ ——机械特性的斜率，当改变转子回路的附加电阻或磁通时，就改变了特性曲线的斜率。

2. 他励直流电动机的固有机械特性 在  $U = U_N$ ， $\Phi = \Phi_N$  和  $R_{ad} = 0$  的条件下，电动机的机械特性称为固有机械特性。根据固有特性的定义，可得固有特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_m \Phi_N^2} T_e = n_0 - \beta T_e \quad (1-16)$$