



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材
教育部高职高专规划教材

电机及拖动基础

第3版

浙江机电职业技术学院 胡幸鸣 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



www.cmpedu.com

赠电子课件、
习题参考答案等



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材
教育部高职高专规划教材

电机及拖动基础

第3版

主编 胡幸鸣
参编 陈佳新 赵双全 何巨兰
王寅华 朱恩荣
主审 徐 虎



机械工业出版社

本书是教育部高职高专规划教材,“十二五”职业教育国家规划教材,普通高等教育“十五”、“十一五”国家级规划教材,主要介绍直流电机、变压器、三相异步电动机的最新型号、结构特点和工作原理,着重分析他励直流电动机和三相异步电动机的机械特性及其起动、调速和制动的电力拖动原理及相关计算,并介绍三相异步电动机软起动和变频调速、斩波调速等新技术;简要分析单相异步电动机、同步电动机和控制电机的结构、特点和工作原理;简要介绍电动机容量选择的基本知识和方法;对交直流串励电动机、直线电动机、盘式电动机、开关磁阻电动机、锥形异步电动机等实用或新颖的电动机也有所介绍,扩大了教材的信息量;为利于加深理解,各章都有经精心挑选的结合实际和注重应用的例题,为便于复习提高,有关章节末有小结、章末附有思考题与习题。

本书降低了理论难度,突出理论知识的应用和实践能力的培养,适用于高职高专等同类院校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、机电一体化技术、数控设备应用与维护等电类专业。

为方便教学,本书配有免费电子课件、习题参考答案和模拟试卷,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础/胡幸鸣主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2014.9

“十二五”职业教育国家规划教材 普通高等教育
“十一五”国家级规划教材 教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-111-47655-9

I. ①电… II. ①胡… 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. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第186577号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于宁 责任编辑:于宁

封面设计:鞠杨 责任校对:胡艳萍

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年9月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·310千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47655-9

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

策划编辑:(010) 88379758

封面防伪标均为盗版

出版说明



教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

第3版前言



《电机及拖动基础》是教育部高职高专规划教材、“十二五”职业教育国家规划教材，普通高等教育“十五”、“十一五”国家级规划教材。因该教材在第1版的基础上，进行了7方面的修订（见第2版前言），使教材更贴切科学技术的发展和适应社会对高职人才的需求，在降低理论难度的同时，合理取舍内容，案例充实，由浅入深，易学易懂。所以第2版教材自2008年1月出版以来，深受全国广大高职高专院校师生的欢迎，至今已印刷了16次，共计6万6千册。同时，据不完全统计全国有17个出版社的近30本教材编写时参考和引用了本教材的内容，深受同行的认可。

随着自动化技术的发展，产业技术升级，机电装备中的各种电机驱动发生了很大变化，新材料、新工艺的应用促使传统电机的改型换代，应用面也跟随变化。为了高职学生能跟上时代发展的步伐，更好地进行学习，作者对教材第2版进行再修订，出版第3版，并且第3版教材已审定为“十二五”职业教育国家规划教材。本次教材修订的编写团队增加了电机企业资深高工的参与，修订是在保持第1、2版的编写风格上，突出新技术、结合实际、强调应用，着重对以下几方面进行了修改。

1) 对直流电动机、电力变压器、三相异步电动机的铭牌都替换成新型号，对相应的新材料新工艺、节能等系列进行说明，并注重新技术的渗透。

2) 对直流电机的主极磁场作更简要明了的说明，直接纳入到直流电机结构中的主磁极内容中介绍。

3) 对直流电动机的制动、三相异步电动机的制动分析和计算进行了更为有利于降低难度的整合，着重应用。

4) 根据三相异步电动机变频调速技术应用的日趋广泛，增加了变频器知识的介绍内容。

5) 鉴于三相异步电动机是应用最广泛的电动机，增加了三相异步电动机的运行维护和故障分析内容。

6) 删减了深槽式、双笼型异步电动机的内容；整合了其他电动机的内容；整合了三相异步电动机的部份拖动内容。在控制电机中，增加了电主轴技术内容。

7) 电工术语、各类图形符号、文字符号、量和单位及相关电机标准均按最新国家标准进行修订。

对应上述的主要修订框架，编者对全书各章内容的表述、部分插图和表格、例题、各章节的相关小结、章末的思考和习题作了相应的细致修改。相信修订后的第3版教材，能成为既跟上电机领域新技术、新工艺的发展及各类电动机在机电装备中的应用步伐，又更切合高职学生的学习特点，适应教学改革的更优教材。同时与教材配套的电子课件配有许多各类新型号电机外观、结构、使用场合的照片或图片，将进一步促进教与学的开展。

本教材适用于高职高专、成人高校、民办高校、电大等同类院校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、机电一体化技术、供用电技术、数控设备应用与维护等电类专业。

本书由胡幸鸣教授担任主编，制订修订框架，并修订绪论及第四、五章，且负责全书的统稿。陈佳新副教授修订第三章、附录，赵双全教授修订第七章，何巨兰高级讲师修订第一、二章，朱恩荣高工修订第六章，王寅华高工修订第八章。

本教材由徐虎担任主审。感谢提供相关变压器资料的吴正文高工、夏光祥高工。

感谢所有选用此教材的各类学校，欢迎使用本教材的师生提出宝贵意见。

编 者

第2版前言

《电机及拖动基础》(第1版)是教育部高职高专规划教材、普通高等教育“十五”国家级规划教材。因该教材根据高职高专培养应用型、技能型人才的教学模式,理论知识以够用为度,但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性,同时注重教材内容有一定的前瞻性,摒弃了把本科教材浓缩的弊端,定位较准确,内容取舍较合理,并运用案例,用图解、图示等方法降低理论难度,理论联系实际,深入浅出,通俗易懂。自2002年6月出版以来,已累计印刷了8次,得到了全国广大高职高专师生的认可。

随着科学技术的发展,为适应社会对高职高专人才的需求,作者对教材进行再版修订,出版第2版,并且第2版教材已被确立为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。修订是在保持第1版的编写风格上,保留了与同类教材相比的7个特点(见第1版前言),着重在以下几方面进行了修改。

1) 对直流电机的磁场、电磁功率、损耗作了更简要明了的叙述;对拖动系统的稳定运行阐述用“先出稳定运行条件,再根据实例进行分析”的方法。

2) 对变压器的参数测定、运行特性、并联运行等内容各作了必要的删减整合。

3) 对三相异步电动机的空载运行、负载运行分析进一步删繁就简,对起动增加了实用的例题,对制动、调速的分析着重应用,并注重新技术的渗透。

4) 根据生产中电动机的应用情况,增加了对无刷直流电动机、盘式电动机、开关磁阻电动机内容的介绍。

5) 对控制电机中的伺服电动机特性描述、步进电动机的原理等作了更为易懂的修改。

6) 对电动机容量选择中电动机的发热与冷却内容,避开繁杂的公式推导,用简明语言描述;对电动机容量选择方法强调常见工作制的内容。

7) 各类图形符号、文字符号、量和单位及相关电机标准均按最新国家标准进行修订。

对应上述的主要修订框架,编者对全书各章内容的表述、部分插图和表格、各章节的相关小结、章末的思考题和习题作了相应的细致修改。修订过的教材,电机原理部分理论内容和拖动部分传统的方法论述进一步化难为易,加强了应用新材料、新技术的新型电动机的介绍。扩大了学生的知识面,但难度进一步降低,应用性进一步突出,更符合高职高专学生的认知规律。相信修订后的第2版将更加符合教与学的需要。

本教材适用于高职高专、成人高校、民办高校、电大等同类院校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、机电一体化技术等电类专业。

本书由胡幸鸣担任主编,制订修订框架,并修订绪论及第四、五章,陈佳新修订第三、六章和附录,赵双全修订第七、八章,何巨兰修订第一、二章。

本书由徐虎担任主审。感谢提出了中肯建议和宝贵修订意见的陈廷全老师、劳顺康老师、许孔扬老师。

感谢所有选用此教材的各类学校,欢迎使用本教材的师生提出宝贵意见。

编者

第1版前言



本书是教育部高职高专规划教材、普通高等教育“十五”国家级规划教材。随着计算机技术和电力电子技术的发展,当今工业上直流电机的应用远远少于三相异步电动机的应用,因此本书在内容体系上突出三相异步电动机的应用。一改以往直流发电机特性和直流电动机特性并重,直流他励电动机拖动与三相异步电动机拖动并重的状况。同时全书对高深理论内容,利用图解分析,删除繁琐的数学推导;对大量公式,采用推导从简,注重分析物理意义和应用的方法。

为此本书较一般的同类书有如下特点:①对直流电机的电枢绕组,只在直流电机基本结构中的电枢绕组中介绍相关内容;对直流发电机,只介绍其基本工作原理;②对电力拖动系统的运动方程式内容删繁就简,补充运动方程式中的转矩正、负的规定及判断电力拖动系统运动状态的内容;对他励直流电动机的制动和调速采用定性分析用机械特性,定量计算用基本方程式的方法,简化计算;③避开繁杂的变压器参数推导过程,对变压器的空载等效电路先出图再出平衡方程式;④三相异步电动机中旋转磁场用图解法阐述其特点,避开复杂的磁通势公式推导;对交流绕组的感应电动势中的绕组因数以推导从略,从物理意义上进行解释的方法出现;⑤三相异步电动机的拖动中,增加笼型电动机软起动、绕线转子异步电动机的斩波调速等新技术内容;对复杂的制动计算进行简化;⑥三相同步电动机V形曲线的叙述方法从调节功率因素的角度出发,而不需要以三相同步电动机的电动势平衡方程式和相量图等为基础;⑦除了对控制电机的介绍外,对直线电动机、交直流串励电动机、锥型电动机、微型同步电动机等新颖或实用的电动机也有所介绍。

本书的总体框架体现了高职高专教学改革的特点,突出理论知识的应用和实践能力的培养,以应用为目的,以必须、够用为度,加强实用性。全书与传统教材比较,虽然降低了理论难度,但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性,同时注重教材内容有一定的前瞻性,摒弃了把本科教材浓缩的弊端,力求深入浅出,通俗易懂,便于教学和学生自学。

本书适用于高职高专、成人高校、民办高校、电大等同类院校的电气技术、电气自动化、机电一体化技术、数控技术应用等电类专业。

本书由胡幸鸣担任主编并编写绪论及第四、五章,陈佳新编写第三、六章、附录,赵双全编写第七、八章,何巨兰编写第一、二章。

本书由徐虎担任主审。感谢戴一平为本书提供的三相异步电动机软起动等资料。

欢迎使用本教材的师生提出宝贵意见。

编 者

主要符号表

a ——直流电机电枢绕组并联支路对数；交流电机绕组并联支路数；加速度	I_a ——直流电机电枢电流
B ——磁通密度（磁密）	I_c ——控制电流
B_δ ——气隙磁通密度	I_{2s} ——异步电动机旋转时转子电流
C ——常数；电容量	I_f ——励磁电流
C_e ——电动势常数	I_N ——额定电流
C_T ——转矩常数	I_0 ——空载电流
D 或 d ——直径	I_k ——短路电流
E ——感应电动势（交流为有效值）	I_{st} ——起动电流
E_a ——电枢电动势	i ——电流的瞬时值
E_m ——交流电动势最大值	i_k ——换向电流
E_σ ——漏电动势	i_a ——直流电机电枢支路电流
E_{2s} ——异步电动机旋转时转子电动势	j ——电流密度
E_1 ——异步电动机定子绕组基波电动势；变压器一次绕组电动势	k ——电压比；系数
E_2 ——变压器二次绕组电动势；异步电动机转子绕组静止时的电动势	k_e ——电动势比
e ——电动势瞬时值；合成控制信号	k_i ——电流比
e_a ——换向元件中的电枢反应电动势	k_N ——绕组因数
e_x ——电抗电动势	L ——自感；电感
e_k ——换向极电动势	L_σ ——漏电感
F ——磁通势（或称磁动势）；力	l ——长度；导体有效长度
F_+ ——正序磁通势	M ——电动机
F_- ——负序磁通势	m ——起动级数；相数；质量
F_a ——电枢磁通势	N ——电枢总导体数；匝数；拍数
F_f ——励磁磁通势	n ——转速
F_m ——脉振磁通势幅值	n_0 ——理想空载转速
F_0 ——空载磁通势	n_1 ——同步转速
F_δ ——气隙磁通势	n_N ——额定转速
F_{Fe} ——铁磁材料的磁通势	P ——功率
f ——频率；力；磁通势瞬时值	P_{em} ——电磁功率
f_N ——额定频率	P_L ——负载功率
G ——发电机	P_m ——全（总）机械功率
GD^2 ——飞轮力矩	P_N ——额定功率
H ——磁场强度，扬程	P_1 ——输入功率
h ——高度	P_2 ——输出功率
I ——电流（交流为有效值）	p ——损耗功率；极对数
	p_{Cu} ——铜耗
	p_{Fe} ——铁耗
	p_k ——短路损耗

p_m ——机械损耗	W ——能量（储能）
p_0 ——空载损耗	X ——电抗
p_s ——附加损耗	X_m ——励磁电抗
Q ——无功功率；流量	X_k ——短路电抗
R 或 r ——电阻	γ ——节距
R_a ——电枢回路总电阻	Z ——阻抗
R_{bk} ——制动电阻	Z_L ——负载阻抗
R_f ——励磁回路总电阻	Z_m ——励磁阻抗
R_L ——负载电阻	Z_k ——短路阻抗
R_m ——磁阻； m 级起动总电阻	z ——电机槽数
R_p ——外接电阻	z_r ——转子齿数
R_{pa} ——电枢调节电阻	α ——角度；信号系数；旋转角；槽距角
R_{pf} ——磁场调节电阻	α_e ——有效信号系数
R_{st} ——起动电阻	α_{Fe} ——铁耗角
r_a ——电枢绕组电阻	β ——斜率、负载系数；角度
r_f ——励磁绕组电阻	η ——效率
r_k ——短路电阻	$\eta_{\max}$ ——最大效率
r_m ——励磁电阻	η_N ——额定效率
S ——视在功率	θ ——温度；功率角；失调角
S_N ——额定视在功率；变压器的额定容量	θ_s ——步距角
s ——转差率	λ ——转矩倍数
s_m ——临界转差率	λ_m ——最大转矩倍数（过载能力）
s_N ——额定转差率	μ ——磁导率
T ——电磁转矩；时间常数；周期	v ——转速相对值
T_1 ——原动机转矩；输入转矩	τ ——极距；温升；转矩相对值
T_2 ——输出转矩	τ_N ——额定温升
T_L ——负载转矩	Φ ——磁通
$T_{\max}$ ——最大电磁转矩	Φ_0 ——空载主磁通
T_N ——额定转矩	Φ_1 ——基波磁通
T_0 ——空载转矩	Φ_m ——主磁通最大值
T_{st} ——起动转矩	Φ_σ ——漏磁通
t ——时间；齿距	ϕ ——磁通瞬时值
U ——电压（交流为有效值）	ψ ——磁链
U_ϕ ——相电压	Ω ——机械角速度
u ——电压瞬时值	Ω_1 ——同步角速度
u_k ——阻抗电压、短路电压的相对值	ω ——电角速度；角频率
U_c ——控制电压	φ ——相位角；功率因数角
u_f ——励磁电压	$\Delta U\%$ ——电压变化率
v ——线速度	ΔU_b ——电刷压降

目 录



出版说明	
第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
主要符号表	
绪论	1
第一章 直流电机	3
第一节 直流电机的基本工作原理与结构	3
第二节 电磁转矩和电枢电动势	12
第三节 直流电动机的运行原理	13
第四节 直流电机的换向	17
思考题与习题	20
第二章 直流电动机的电力拖动	22
第一节 电力拖动系统的运动方程式	22
第二节 生产机械的负载转矩特性	25
第三节 他励直流电动机的机械特性	26
第四节 他励直流电动机的起动和反转	30
第五节 他励直流电动机的制动	33
第六节 他励直流电动机的调速	39
*第七节 串励和复励直流电动机	43
思考题与习题	45
第三章 变压器	47
第一节 变压器的基本工作原理和结构	47
第二节 单相变压器的空载运行	53
第三节 单相变压器的负载运行	56
第四节 变压器参数的测定	61
第五节 变压器的运行特性	64
第六节 三相变压器	67
*第七节 其他用途的变压器	75
思考题与习题	77
第四章 三相异步电动机	79
第一节 三相异步电动机的基本工作原理和结构	79
第二节 三相异步电动机的定子绕组和感应电动势	89
第三节 三相异步电动机的空载运行	96
第四节 三相异步电动机的负载运行	98
第五节 三相异步电动机的功率及转矩平衡方程式	104
第六节 三相异步电动机的参数测定与工作特性	106
*第七节 三相异步电动机的运行维护和故障分析	110
思考题与习题	114
第五章 三相异步电动机的电力拖动	116
第一节 三相异步电动机的电磁转矩表达式	116
第二节 三相异步电动机的机械特性	120
第三节 三相异步电动机的起动	123
第四节 三相异步电动机的制动	131
第五节 三相异步电动机的调速	138
思考题与习题	149
第六章 其他用途的电动机	151
第一节 单相异步电动机	151
第二节 三相同步电动机	156
*第三节 其他电动机	159
思考题与习题	167
第七章 控制电机	168
第一节 伺服电动机	168
第二节 测速发电机	175
第三节 步进电动机	179
*第四节 自整角机和旋转变压器简介	182
思考题与习题	186
第八章 电动机容量的选择	187
第一节 电动机容量选择的基本知识	187
第二节 电动机容量选择的基本方法	190
思考题与习题	196
附录 用“时钟表示法”确定三相变压器的联结组	197
参考文献	199

绪 论

一、电机的分类、作用及发展

电能是现代能源中应用最广的二次能源，它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都较为方便经济，而要实现电能的生产、变换和使用等都离不开电机。电机是一种利用电磁感应定律和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。它主要分为发电机、变压器和电动机三大类（各类电机典型图片见教材或配套电子课件）。

在电力工业中，产生电能的发电机和对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在机械制造、冶金、纺织、石油、煤炭、化工、印刷及其他工业企业中，人们利用电动机把电能转换成机械能，去拖动机床、轧钢机、纺织机、钻探机、电铲机、起重机械、传输带等各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中，需要大量的牵引电动机和船用、航空电机。随着农业机械化的发展，电力排灌、播种、收割等农用机械中，都需要规格不同的电动机。在伺服传动、机器人传动、航天航空和国防科学等领域的自动控制技术中，各种各样的控制电机作为检测、定位、随动、执行和解算元件。在日益走进百姓家庭的小轿车中，其内装备的各类微特电机一般已超过 60 台以上。在医疗仪器、电动工具、家用电器、办公自动化设备和计算机外部设备中，也离不开功能各异的小功率电动机和特种电机。综上所述，电机在工农业生产、交通运输、国防、科技、文教领域以及人们日常生活中，早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一，因此电机在国民经济的各个领域起着重要的作用。

电机工业的发展，同国民经济和科学技术的发展密切相关，它的历史至今尚不到 200 年。从 1831 年法拉第发现电磁感应现象起，到 20 世纪初的具备各种电机基本型式为止，是电机工业的发展初期。电机工业的近代发展时期是在 20 世纪至 21 世纪的今天，在初期阶段的实践基础上，总结了设计、制造和运行经验，对电机理论探讨进一步深化，材料、设计、制造工艺不断改进，经济指标日益提高，运行性能不断改善。

我国的电机工业，从新中国成立以来的 60 多年间，建立了独立自主的完整体系。早在 1965 年我国就研制成功当时世界上第一台 12 万 5 千千瓦双水内冷汽轮发电机，显示了我国电机工业的迅速掘起。近些年来，随着对电机新材料的研究并在电机设计、制造工艺中利用计算机技术，普通电机的性能更好、运行更可靠；而控制电机的高可靠性、高精度、快速响应使控制系统完成各种人工无法完成的快速复杂的精巧运动。目前我国电机行业的学者和工程技术人员，正在对电机的新原理、新结构、新系列、新工艺、新材料、新的运行方式和调速方法，进行更多的探索、研究和试验工作，并取得了可喜的成绩。

二、电力拖动的优点及发展趋势

以电动机为动力，拖动生产机械的拖动方式——电力拖动，具有许多其他拖动方式（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。

电力拖动具有优良的性能，其起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。电动机的类型很多，具有各种不同的运行特性，可以满足各种类型的生产机械的要



求。如城市公共交通中的电车,需要驱动电动机具有起动、制动快速,调速性能好,过载能力强等特点。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便,易于实现最优控制。因此,电力拖动已成为现代工农业生产、交通运输等中最广泛采用的拖动方式。而且随着自动控制理论不断发展,电力电子器件的采用,以及数控技术和计算机技术的发展与采用,电力拖动装置的特性品质的大大提高,极大地提高了劳动生产率和产品质量,提高了生产机械运转的准确性、可靠性、快速性,提高了电力拖动系统的自动化控制,所以电力拖动已成为国民经济中现代工农业等领域电气自动化的基础。

三、本课程的内容、要求

本课程是电气自动化技术、生产过程自动化技术、机电一体化技术等电类专业的一门技术基础课,既有基础性又有专业性。是“电机原理”和“电力拖动基础”两大部分内容的有机结合,通过学习和实践要求达到认识常用电机(直流电机,变压器,异步电动机、同步电动机)的结构,掌握工作原理;掌握直流电动机、三相异步电动机起动、制动、调速的电力拖动基本原理和方法;熟悉伺服电动机等控制电机的原理和应用。掌握电机实验的基本方法和数据处理方法,通过实训熟悉三相异步电动机的嵌线,电动机维护与故障的排除。

四、本课程的特点和学习方法

本课程是运用《电工基础》等基础课的基本理论来分析研究各类电机内部的电磁物理过程,从而得出各类电机的一般规律及其各异的特性。但它与《电工基础》等基础课的性质不同。在《电机及拖动基础》课程中,不仅有理论的分析推导,磁场的抽象叙述,而且还要用基本理论去分析研究比较复杂的又往往带有机、电、磁综合性的工程实际问题。这是学习本课程的特点,也是难点。

因此为了学好本课程,必须熟练运用电磁感应和电磁力定律、电路定律、磁路定律、安培全电流定律、铁磁材料的特点、力学、运动学、机械制图等已学过的知识,理解和掌握各类电机的基本电磁关系和能量转换关系,并运用所学的理论对电机的运行性能、电动机各运转状态等作相关计算。为了提高课堂教学效果,课前应预习,这样一是对相关的已学知识进行回顾和补遗,二是对将要学到的内容浏览一遍,对新的名词术语和相关内容有所了解,便于有的放矢地听课;课后应及时复习和小结及选择适当的思考题和计算题作为课外作业,以巩固理论知识提高理解和运算能力。此外,需进行必要的实验和实训,培养学生的独立工作能力,提高实验、实训操作技能和动手能力。

《电机及拖动基础》将为后续课程《自动控制理论》、《交、直流调速系统》、《工厂电气控制设备》等作基础技术准备,为日后工作中对电力拖动设备的技术管理和生产第一线的选配、安装调试、操作、维护与检修电力拖动设备打下良好基础。

第一章

直流电机

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。将机械能转换为电能的是直流发电机，将电能转换为机械能的是直流电动机。

直流电动机具有良好的调速性能、较大的起动转矩和过载能力等很多优点，在起动和调速要求较高的生产机械中，如龙门刨床、轧钢机、电力机车、起重机、造纸及纺织行业等机械中，仍得到广泛的应用。由于电力电子技术的迅速发展，作为直流电源的直流发电机已逐步被晶闸管整流装置所取代，但在电镀、电解行业中仍继续得以应用。

本章主要分析直流电机的基本工作原理、结构和运行特性。

第一节 直流电机的基本工作原理与结构

一、直流电机的基本工作原理

1. 直流发电机的基本工作原理

直流发电机的工作原理是基于电磁感应原理，在磁感应强度为 B_x 的磁场中，一根长度为 l 的导体以匀速 v 作垂直切割磁力线的运动时，则在导体中产生感应电动势，其值的大小按法拉第定律来计算：

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

图 1-1 为直流发电机的工作原理模型。图中 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（导磁材料制成的）上的一个线圈，（整个转动部分称为转子或电枢），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，这两个换向片就构成了最简单的换向器）1 和 2 上，换向片分别与固定不动的电刷 A 和 B 保持滑动接触，这样，旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

当原动机拖着电枢以一定的转速 n 在磁场中逆时针旋转时，根据电磁感应原理，线圈边 ab 和 cd 以线速度 v 切割磁力线产生感应电动势，其方向用右手定则确定。在图中所示的位置，线圈的 ab 边处于 N 极下，产生的感应电动势从 b 指向 a ；线圈的 cd 边处于 S 极下，产生的感应电动势从 d 指向 c 。从整个线圈来看，电动势的方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b$

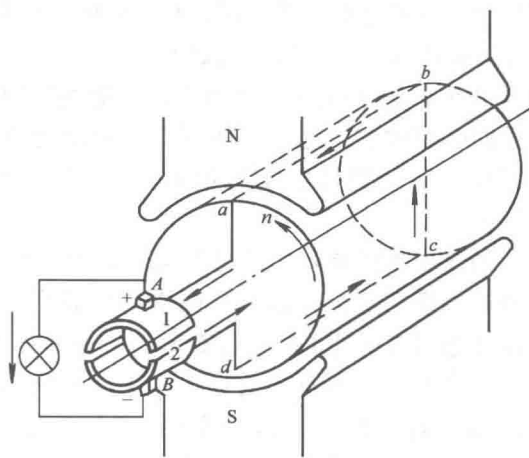


图 1-1 直流发电机的工作原理模型



→ a ；反之，当 ab 边转到S极下， cd 边转到N极下时，每个边的感应电动势方向都要随之改变，于是，整个线圈的感应电动势方向变为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 。所以线圈中的感应电动势是交变的。

那么如何在电刷上得到直流电动势呢？这就要靠换向器的作用了。在图1-1所示瞬间：线圈的 ab 边处于N极下，电动势的方向从 b 向 a 引到电刷A，所以电刷A的极性为正。当线圈转过 180° ，线圈 ab 边与 cd 边互换位置，使 cd 边处于N极下时，于是 cd 边与电刷A接触，其电动势的方向是从 c 向 d 引到电刷A，电刷A的极性仍为正。同理可分析出电刷B的极性为负。进一步观察可以发现，电刷A总是与旋转到N极下的导体接触，所以电刷A总是正极性。而电刷B总是与旋转到S极下的导体接触，所以电刷B总是负极性，故在电刷A、B之间得到的是脉动直流电动势。当电枢上均匀分布的线圈足够多时，就可使脉动程度大为降低，得到平滑的直流电动势。

例1-1 如果图1-1中直流发电机顺时针旋转，电刷两端的电动势极性有何变化？还有什么因素会引起同样的变化？

解 在图1-1所示位置，当直流发电机顺时针旋转时，用右手定则判定线圈中感应电动势的方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，通过换向片与电刷的滑动接触，则电刷B极性为正，电刷A极性为负。所以，直流发电机改变电枢旋转方向可以改变输出电动势的极性。

由右手定则可知，决定感应电动势方向的因素有两个：一是导体运动方向（电枢转向），二是磁场极性。所以，改变磁场的极性也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性改变。

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律的。若磁场 B_x 与导体互相垂直，且导体中通以电流 i ，则作用于载流导体上的电磁力 f 为

$$f = B_x li \quad (1-2)$$

图1-2是直流电动机的工作原理模型。电刷A、B两端加直流电压 U ，在图示的位置，电流从电源的正极流出，经过电刷A与换向片1而流入电动机线圈，电流方向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ，然后再经过换向片2与电刷B流回电源的负极。根据电磁力定律，线圈边 ab 与 cd 在磁场中分别受到电磁力的作用，其方向可用左手定则确定，如图中所示。此电磁力形成的电磁转矩，使电动机逆时针方向旋转。当线圈边 ab 转到S极面下、 cd 转到N极面下时，流经线圈的电流方向必须改变，这样导体所受的电磁力方向才能不变，从而保持电动机沿着一个固定的方向旋转。

如何才能使导体中的电流方向改变呢？这个任务将由换向器来完成。从图中可以看出，原来电刷A通过换向片1与经过N极面下的导体 ab 相连，现在电刷A通过换向片2与经过N极面下的导体 cd 相连；原来电刷B通过换向片2与经过S极面下的导体 cd 相连，现在电刷B通过换向片1与经过S极面下的导体 ab 相连。线圈中的电流方

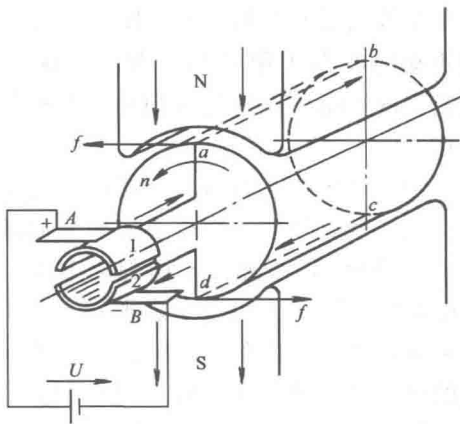


图1-2 直流电动机的工作原理模型



向改为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ，用左手定则判断电磁力和电磁转矩的方向未变，电枢仍逆时针方向旋转。

综上所述可知，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 极面下的导体相连，负电刷 B 始终与经过 S 极面下的导体相连，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，把直流发电机线圈中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流动势；把直流电动机电刷间的直流电流逆变成线圈内的交变电流，以确保电动机沿恒定方向旋转。

例 1-2 电动机拖动的生产设备常常需要作正转和反转的运动，例如龙门刨床工作台的往复运动，电力机车的前行和倒退，这就要求电动机能正转和反转。图 1-2 的直流电动机怎样才能顺时针旋转呢？

解 对图 1-2 而言，电动机顺时针旋转需获得一个顺时针方向的电磁转矩，由左手定则可知：电磁力的方向取决于磁场极性和导体中电流的方向，所以直流电动机获得反转的方法有两个：一是改变磁场极性；二是改变电源电压的极性使流过导体的电流方向改变。

注意：二者只能改变其一，否则，直流电动机的转向不变。

3. 电机的可逆原理

观察图 1-1 和图 1-2 可以发现，直流发电机和电动机工作原理模型的结构完全相同，那么电机内部有无相同之处呢？

(1) 直流发电机 当发电机带负载以后，例如图 1-1 中电刷两端接一灯泡，就有电流流过负载，同时也流过线圈，其方向与感应电动势方向相同。根据电磁力定律，载流导体 ab 和 cd 在磁场中会受力的作用，形成的电磁转矩方向为顺时针，与转速方向相反。这意味着，电磁转矩阻碍发电机旋转，是制动转矩。

为此，原动机必须用足够大的拖动转矩来克服电磁转矩的制动作用，以维持发电机的稳定运行。此时发电机从原动机吸取机械能，转换成电能向负载输出。

(2) 直流电动机 从图 1-2 中可知，当电动机旋转起来后，导体 ab 和 cd 切割磁力线，产生感应电动势，用右手定则判断出其方向与电流方向相反。这意味着，此电枢电动势是一反电动势，它阻碍电流流入电动机。

所以，直流电动机要正常工作，就必须施加直流电源以克服反电动势的阻碍作用，把电流灌入电动机。此时电动机从直流电源吸取电能，转换成机械能输出。

综上所述，无论发电机还是电动机，由于电磁的相互作用，电枢电动势和电磁转矩是同时存在的。从原理上说发电机和电动机两者并无本质差别，只是外界条件不同而已。一台电机，既可作为发电机运行，又可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。可逆原理同样也适用于交流电机。

二、直流电机的基本结构

由上述直流电机的工作原理可以知道，直流电机的结构由两个主要部分组成：①静止部分（称为定子），主要用来产生磁通；②转动部分（称为转子，通称电枢），是机械能变为电能（发电机）、或电能变为机械能（电动机）的枢纽。在定转子之间，有一定的间隙称为气隙。

图 1-3 是直流电动机的内部结构图，图 1-4 是直流电机径向剖面示意图，图 1-5 是直流电机的主要部件图。下面简要介绍直流电机主要部件结构及其作用。

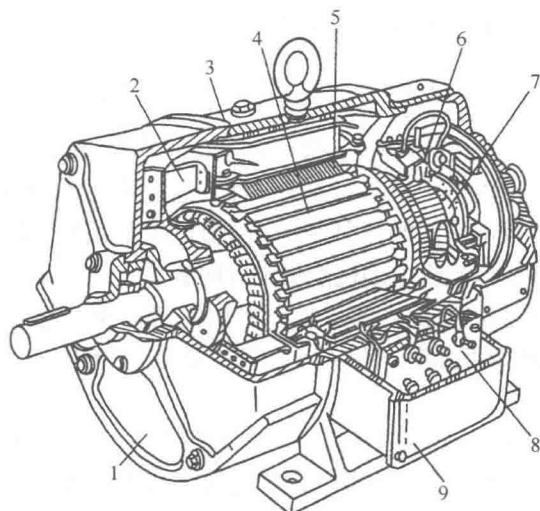


图 1-3 直流电动机的内部结构图

1—端盖 2—风扇 3—机座 4—电枢 5—主磁极
6—电刷架 7—换向器 8—接线板 9—出线盒

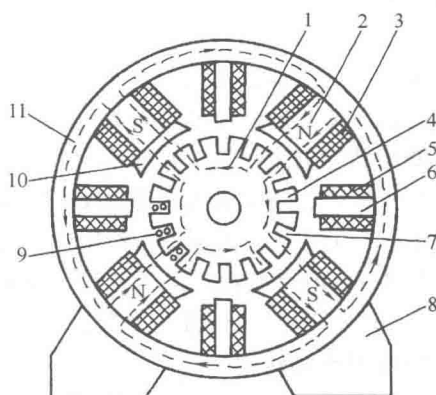


图 1-4 直流电机的径向剖面示意图

1—电枢铁心 2—主磁极 3—励磁绕组
4—电枢齿 5—换向极绕组 6—换向极铁心
7—电枢槽 8—底座 9—电枢绕组
10—极掌(极靴) 11—磁轭(机座)

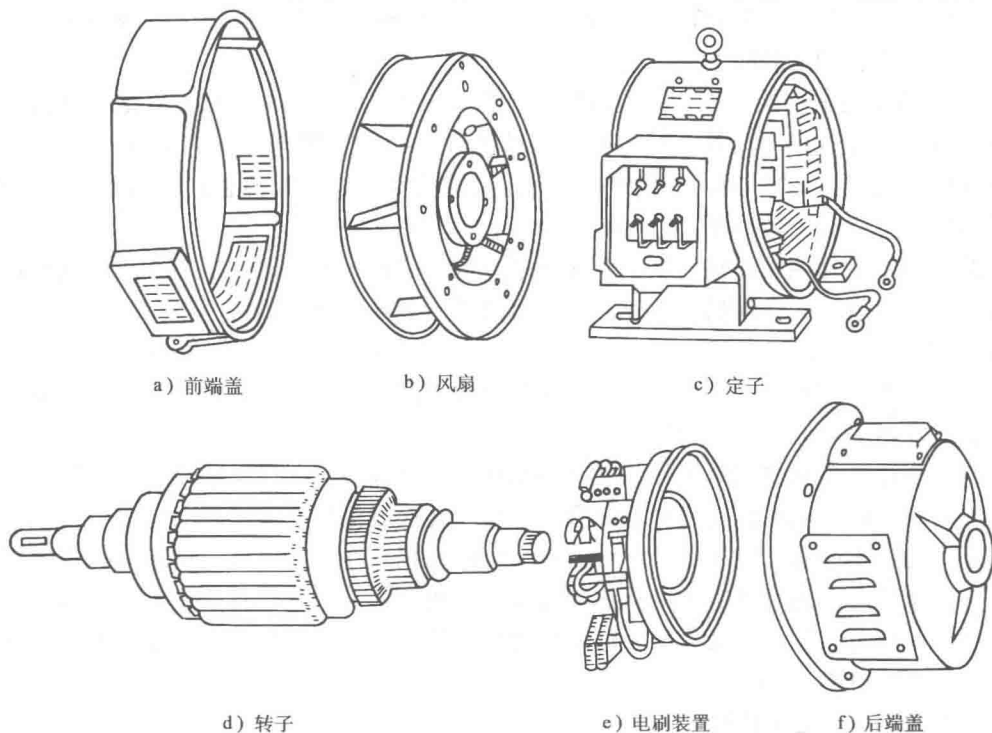


图 1-5 直流电机主要部件图

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的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 1~1.5mm 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，极靴与极身