



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Electric Machinery and Electric Drives

电机与拖动

刘锦波 张承慧 等 编著

Liu Jinbo Zhang Chenghui

陈伯时 主审

Chen Boshi

清华大学出版社





全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Electric Machinery and Electric Drives

电机与拖动

山东大学 刘锦波 张承慧 等 编著
Liu Jinbo Zhang Chenghui

上海大学 陈伯时 主审
Chen Boshi

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从运动控制系统角度全面论述了电机与拖动的相关内容,主要包括:各类电机(直流电机、变压器、三相异步电机、三相同步电机)的基本运行原理、建模、运行特性的分析与计算;各类电机的起制动、调速原理与方法;各类驱动与控制用微特电机的运行原理与特性分析;各类新型机电一体化电机如正弦永磁同步电动机、永磁无刷直流电动机、开关磁阻电动机、步进电机、超声波电动机等的建模、驱动与特性分析;电力拖动系统方案与电动机的选择等。

本书可作为工业自动化、电气自动化以及机电一体化等专业本科生的专业基础课教材,也可作为相关专业在运动控制领域的入门性教材。对于长期从事运动控制领域的工程技术人员更新知识,并了解本领域的最新成果,本教材也具有重要的参考价值。本书内容通俗易懂、文字简练流畅,各章均安排了内容简介、本章小结、例题、思考题与练习题,并附有 MATLAB 仿真实例,便于自学。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/刘锦波、张承慧等编著. —北京:清华大学出版社,2006.9

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 7-302-13360-3

I. 电… II. ①刘… ②张… III. ①电机—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材
IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 077373 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编: 100084
社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 王一玲

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印 张: 33.25 字 数: 684 千字

版 次: 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13360-3/TM·84

印 数: 1~3000

定 价: 39.00 元

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》 >>>>

为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)



自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以

激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005年10月于教育部



《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指示书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设

基础知识与最新知识有机融合的教材? 如何充分利用现代技术, 适应现代大学生的接受习惯, 改变教材单一形态, 建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”? 等等, 这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版, 对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境, 一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限, 本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处, 还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴俊 院士

2005年10月于清华大学



本书根据全国高等学校自动化专业教学指导委员会制定的教材规划,并按照《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会拟订的《电机与拖动》教材大纲编写而成。

随着电机及其控制理论不断发展,各门学科的渗透,运动控制(或电气传动)领域已发生根本性的变化。许多新思想、新方法在该领域得到应用,许多新原理电机不断涌现。为了能够既保留传统知识的精华,又尽可能反映上述最新进展情况,满足当前工业现场对“电机与拖动”课程的要求,笔者结合多年来的教学体会和科研经验,参考了国内外许多参考文献,并根据本科教学改革的经验以及传统教材所暴露的问题,编写了这本《电机与拖动》教材。

与传统教材相比,本教材在体系结构上作了较大调整,角度独特,内容新颖。主要表现在:(1)将《电机学》与《电力拖动基础》教材有机地融为一体,以节省传统内容的教学时间;(2)重在介绍基本概念、基本运行原理与基本运行特性,并强调实用;(3)为适应当前工业发展的需要,增加了不少电机与系统结合以及新型电机的内容,如变流器供电下直流电机的机械特性、三相鼠笼式异步电动机的软启动、正弦波永磁同步电动机与永磁无刷直流电动机、开关磁阻电机以及超声波电机、步进电机的细分驱动等;(4)增加了有关 MATLAB 的仿真内容,有利于读者借助计算机手段加深对内容的体会和理解;(5)在内容阐述上,服务于系统,并从电力电子变流器供电角度入手对有关电机与拖动的问题进行分析与讨论。除此之外,每一章还单独安排了内容简介、本章小结等内容,以方便自学。

本教材是在原讲义基础上改编而成的,吸取了国内外许多优秀教材的精华。编者对这些优秀教材不可能一一列出,但其中不能不提到的有:顾绳谷编写的《电机及拖动基础》、李发海编写的《电机与拖动基础》、A. E. Fitzgerald 编写的《Electric Machinery》(Six Edition)、B. K. Bose 编写的《Modern Power Electronics and AC Drives》、陈伯时编写的《电力拖动自动控制系统》。编者对上述教材的作者所做出的贡献表示由衷的敬意,并感谢他们为本教材所提供的出色基础。此外,编者也要对本教材其他参考文献的作者表示衷心谢意。

本教材适用对象为工业自动化、电气自动化以及机电一体化等专业的本科生,也可作为相关专业“运动控制”课程的基础性教材。对于长期从事运动控制领域的工程技术人员更新知识,并了解本领域的最新成果,本教材也具有重要的参考价值。

本教材由刘锦波教授担任主编,负责教材的体系结构和统编工作。其中,第4章和第7章由张承慧教授编写;第13章由刘玫教授编写;其余各章内容均由刘锦波教授编写。

本教材承蒙上海大学的陈伯时教授担任主审,并自始至终给予本教材以极大的关注。陈教授热情的指导、严谨的学风以及渊博的知识,使编者受益匪浅,相信也会使本教材增辉不少。浙江大学的陈永校教授、山东大学的胡颂尧教授也对本教材提出了许多宝贵的意见和建议。对此,编者向他们以及对本教材给予过关怀和帮助的其他同仁们表示衷心感谢。

此外,编者还要感谢的是《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会为编者提供了这次宝贵的机会,特别要感谢的是清华大学自动化系萧德云教授以及清华大学出版社王一玲编辑,他们为本教材付出了辛勤劳动。

本教材得到了清华大学出版社出版基金、教育部留学归国人员启动基金(2003.406)和山东省中青年科学家基金(03BS093)的资助。

编教材难,编一本好教材更难。本教材从下笔、修改到最终定稿历时一年半多的时间,编者深知个中的滋味。尽管如此,本教材还是力图将有关内容及最新成果以最简洁、通俗的方式呈现给广大读者。由于编者水平有限,书中难免存在不少错误和不当之处,恳请广大读者批评指正。电子邮件请寄:mejibo@sdu.edu.cn。

作 者

2006年2月

《全国高等学校自动化专业系列教材》丛书书目

教材类型	编号	教材名称	主编/主审	主编单位	备注
本科生教材					
控制理论与工程	Auto-2-(1+2)-V01	自动控制原理(研究型)	吴麒、王诗宓	清华大学	
	Auto-2-1-V01	自动控制原理(研究型)	王建辉、顾树生/杨自厚	东北大学	
	Auto-2-1-V02	自动控制原理(应用型)	张爱民/黄永宣	西安交通大学	
	Auto-2-2-V01	现代控制理论(研究型)	张嗣瀛、高立群	东北大学	
	Auto-2-2-V02	现代控制理论(应用型)	谢克明、李国勇/郑大钟	太原理工大学	
	Auto-2-3-V01	控制理论 CAI 教程	吴晓蓓、徐志良/施颂椒	南京理工大学	
	Auto-2-4-V01	控制系统计算机辅助设计	薛定宇/张晓华	东北大学	
	Auto-2-5-V01	工程控制基础	田作华、陈学中/施颂椒	上海交通大学	
	Auto-2-6-V01	控制系统设计	王广雄、何朕/陈新海	哈尔滨工业大学	
	Auto-2-8-V01	控制系统分析与设计	廖晓钟、刘向东/胡佑德	北京理工大学	
	Auto-2-9-V01	控制论导引	万百五、韩崇昭、蔡远利	西安交通大学	
	Auto-2-10-V01	控制数学问题的 MATLAB 求解	薛定宇、陈阳泉/张庆灵	东北大学	
控制系统与技术	Auto-3-1-V01	计算机控制系统(面向过程控制)	王锦标/徐用懋	清华大学	
	Auto-3-1-V02	计算机控制系统(面向自动控制)	高金源、夏洁/张宇河	北京航空航天大学	
	Auto-3-2-V01	电力电子技术基础	洪乃刚/陈坚	安徽工业大学	
	Auto-3-3-V01	电机与运动控制系统	杨耕、罗应立/陈伯时	清华大学、华北电力大学	
	Auto-3-4-V01	电机与拖动	刘锦波、张承慧/陈伯时	山东大学	
	Auto-3-5-V01	运动控制系统	阮毅、陈维钧/陈伯时	上海大学	
	Auto-3-6-V01	运动体控制系统	史震、姚绪梁/谈振藩	哈尔滨工程大学	
	Auto-3-7-V01	过程控制系统(研究型)	金以慧、王京春、黄德先	清华大学	
	Auto-3-7-V02	过程控制系统(应用型)	郑辑光、韩九强/韩崇昭	西安交通大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	吴重光、夏涛/吕崇德	北京化工大学	
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	张晓华/薛定宇	哈尔滨工业大学	
	Auto-3-9-V01	传感器与检测技术	王俊杰/王家桢	清华大学	
	Auto-3-9-V02	传感器与检测技术	周杏鹏、孙永荣/韩九强	东南大学	
	Auto-3-10-V01	嵌入式控制系统	孙鹤旭、林涛/袁著祉	河北工业大学	
	Auto-3-13-V01	现代测控技术与系统	韩九强、张新曼/田作华	西安交通大学	
	Auto-3-14-V01	建筑智能化系统	章云、许锦标/胥布工	广东工业大学	
Auto-3-15-V01	智能交通系统概论	张毅、姚丹亚/史其信	清华大学		
Auto-3-16-V01	智能现代物流技术	柴跃廷、申金升/吴耀华	清华大学		

续表

教材类型	编号	教材名称	主编/主审	主编单位	备注
本科生教材					
信号处理与分析	Auto-5-1-V01	信号与系统	王文渊/阎平凡	清华大学	
	Auto-5-2-V01	信号分析与处理	徐科军/胡广书	合肥工业大学	
	Auto-5-3-V01	数字信号处理	郑南宁/马远良	西安交通大学	
计算机与网络	Auto-6-1-V01	单片机原理与接口技术	杨天怡、黄勤	重庆大学	
	Auto-6-2-V01	计算机网络	张曾科、阳宪惠/吴秋峰	清华大学	
	Auto-6-4-V01	嵌入式系统设计	慕春棣/汤志忠	清华大学	
	Auto-6-5-V01	数字多媒体基础与应用	戴琼海、丁贵广/林闯	清华大学	
软件基础与工程	Auto-7-1-V01	软件工程基础	金尊和/肖创柏	杭州电子科技大学	
	Auto-7-2-V01	应用软件系统分析与设计	周纯杰、何顶新/卢炎生	华中科技大学	
实验课程	Auto-8-1-V01	自动控制原理实验教程	程鹏、孙丹/王诗宓	北京航空航天大学	
	Auto-8-3-V01	运动控制实验教程	蒯慧、杨玉珍/杨耕	北京工业大学	
	Auto-8-4-V01	过程控制实验教程	李国勇、何小刚/谢克明	太原理工大学	
	Auto-8-5-V01	检测技术实验教程	周杏鹏、仇国富/韩九强	东南大学	
研究生教材					
	Auto(*)-1-1-V01	系统与控制中的近代数学基础	程代展/冯德兴	中科院系统所	
	Auto(*)-2-1-V01	最优控制	钟宜生/秦化淑	清华大学	
	Auto(*)-2-2-V01	智能控制基础	韦巍、何衍/王耀南	浙江大学	
	Auto(*)-2-3-V01	线性系统理论	郑大钟	清华大学	
	Auto(*)-2-4-V01	非线性系统理论	方勇纯/袁著祉	南开大学	
	Auto(*)-2-6-V01	模式识别	张长水/边肇祺	清华大学	
	Auto(*)-2-7-V01	系统辨识理论及应用	萧德云/方崇智	清华大学	
	Auto(*)-2-8-V01	自适应控制理论及应用	柴天佑、岳恒/吴宏鑫	东北大学	
	Auto(*)-3-1-V01	多源信息融合理论与应用	潘泉、程咏梅/韩崇昭	西北工业大学	
	Auto(*)-4-1-V01	供应链协调及动态分析	李平、杨春节/桂卫华	浙江大学	

教师反馈表

感谢您购买本书！清华大学出版社计算机与信息分社专心致力于为广大院校电子信息类及相关专业师生提供优质的教学用书及辅助教学资源。

我们十分重视对广大教师的服务，如果您确认将本书作为指定教材，请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址，我们将免费向您提供有关本书的其他教学资源。

您需要教辅的教材：			
您的姓名：			
院系：			
院/校：			
您所教的课程名称：			
学生人数/所在年级：	_____人/ 1 2 3 4 硕士 博士		
学时/学期	_____学时/_____学期		
您目前采用的教材：	作者：_____		
	书名：_____		
	出版社：_____		
您准备何时用此书授课：			
通信地址：			
邮政编码：		联系电话	
E-mail：			
您对本书的意见/建议：	系主任签字 盖章		

我们的联系地址：

清华大学出版社 学研大厦 A602, A604 室

邮编：100084

Tel: 010-62770175-4409, 3208

Fax: 010-62770278

E-mail: liuli@tup.tsinghua.edu.cn; hanbh@tup.tsinghua.edu.cn



绪论	1
0.1 电机与电力拖动技术的发展概况	1
0.2 电机学与电力拖动系统的一般分析方法	3
0.3 课程的性质与任务	4
0.4 本教材的结构、各章节内容与教学安排	5
0.5 本课程的学习方法	7
第1章 电磁学的基本知识与基本定律	8
1.1 电路的基本定律	9
1.1.1 基尔霍夫电流定律	9
1.1.2 基尔霍夫电压定律	9
1.2 磁场的基本知识	9
1.2.1 磁感应强度	9
1.2.2 磁通 Φ	10
1.2.3 磁场强度 H	10
1.3 电磁学的基本定律	10
1.3.1 电生磁的基本定律——安培环路定理	10
1.3.2 磁生电的基本定律——法拉第电磁感应定律	11
1.3.3 毕-萨电磁力定律	12
1.3.4 磁路的欧姆定律与线圈电感的表达式	12
1.4 常用磁性材料及其特性	15
1.4.1 磁滞回线与磁化曲线	16
1.4.2 软磁材料与硬磁材料	17
1.4.3 铁磁材料中的铁耗	18
1.4.4 永久磁铁的去磁曲线与各种永磁材料的特点	18
本章小结	20
思考题	20
练习题	21

第 2 章 直流电机的建模与特性分析	23
2.1 直流电机的基本运行原理与结构	24
2.1.1 直流电机的基本运行原理	24
2.1.2 直流电机的结构	26
2.2 直流电机的额定数据	27
2.3 直流电机的电枢绕组——电路构成	28
2.3.1 对直流电枢绕组的要求	28
2.3.2 直流电机的简单绕组	28
2.3.3 直流电枢绕组的基本型式	29
2.4 直流电机的各种励磁方式与磁场	33
2.4.1 直流电机的各种励磁方式	33
2.4.2 直流电机的空载主磁场	34
2.4.3 直流电机负载后的电枢反应磁场	37
2.4.4 直流电机负载后的气隙磁场	39
2.5 直流电机的感应电势、电磁转矩与电磁功率	40
2.5.1 正、负电刷间感应电势的计算	41
2.5.2 电磁转矩的计算	42
2.5.3 直流电机的电磁功率	43
2.6 直流电机的电磁关系、基本方程式和功率流程图	43
2.6.1 他励直流电机的基本电磁关系	43
2.6.2 直流电机的基本方程式与等效电路	44
2.6.3 直流电机的功率流程图	47
2.7 直流发电机的运行特性及自励建压过程	49
2.7.1 直流发电机的运行特性	50
2.7.2 并励和复励直流发电机空载电压的建立	52
2.8 他励直流电动机的运行特性	53
2.8.1 他励直流电动机的工作特性	54
2.8.2 他励直流电动机的机械特性	56
2.8.3 他励直流电动机的人工机械特性	57
2.9 串励直流电动机的机械特性	63
2.9.1 串励直流电动机的固有机械特性	63
2.9.2 串励直流电动机的人工机械特性	64
2.10 复励直流电动机的机械特性	65
2.11 直流电机的换向	66
本章小结	68
思考题	71

练习题	71
第3章 直流电机的电力拖动	74
3.1 电力拖动系统的动力学方程式	75
3.1.1 单轴电力拖动系统的动力学方程式	75
3.1.2 多轴电力拖动系统的等效	76
3.2 各类生产机械的负载转矩特性	81
3.3 电力拖动系统的稳定运行条件	83
3.3.1 稳态运行点与稳定运行的概念	83
3.3.2 电力拖动系统的稳定运行条件	85
3.4 直流电力拖动系统动态过程的一般分析与计算*	86
3.4.1 直流电动机电力拖动系统的动态数学模型	86
3.4.2 直流电力拖动系统动态过程的一般分析计算	88
3.5 直流电动机的起动	93
3.6 直流电动机的调速	95
3.6.1 调速系统的性能指标	95
3.6.2 他励直流电动机常用的调速方法	97
3.6.3 调速方式与负载类型的配合	101
3.7 他励直流电动机的制动	103
3.7.1 能耗制动	104
3.7.2 反接制动	107
3.7.3 回馈制动	111
3.8 直流电机的四象限运行与实例分析	116
3.8.1 直流电机的四象限运行	116
3.8.2 实例分析*	118
本章小结	122
思考题	124
练习题	126
第4章 变流器供电下直流电机的机械特性*	128
4.1 相控方式下直流电机的机械特性	129
4.1.1 整流状态下直流电机的机械特性	129
4.1.2 逆变状态下直流电机的机械特性	132
4.1.3 相控变流器供电下直流电机的四象限运行分析	134
4.2 斩控方式下直流电机的机械特性	135

注：*号为选学内容