



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

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

国家级精品教材

Electric Machinery and Electric Drives
(Second Edition)

电机与拖动 (第2版)

刘锦波 张承慧 编著

Liu Jinbo Zhang Chenghui

陈伯时 主审

Chen Boshi



清华大学出版社



普通

2015

国家级规划教材



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

国家级精品教材

Electric Machinery and Electric Drives
(Second Edition)

电机与拖动 (第2版)

刘锦波 张承慧 编著

Liu Jinbo Zhang Chenghui

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从运动控制系统和变流器供电角度全面讲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、异步电机、同步电机)的基本运行原理、建模、运行特性的分析与计算,由各类电机组成传动系统的起、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波永磁同步电机、永磁无刷直流电机、开关磁阻电机、步进电机等的建模、驱动与特性分析以及系统组成,电力拖动系统的方案与电机的选择等。

本书内容通俗易懂、深入浅出,强调物理概念,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。

本书可作为自动化、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,并了解本领域内的最新成果,本教材也具有重要的参考价值。

本书附有 MATLAB 仿真实例,便于自学。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/刘锦波,张承慧编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2015

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-38512-7

I. ①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. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 269567 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:36.5 字 数:775千字

版 次:2006年10月第1版 2015年6月第2版 印 次:2015年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.50元

《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)

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

序

FOREWORD >>>

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



本书是普通高等学校“十一五”国家级规划教材,它是由教育部高等学校自动化专业教学指导委员会牵头规划并通过全国招标形式确定的统编教材。教材对各种类型电机及其拖动系统进行了全面介绍。内容涉及传统的有刷直流电机、感应电机、各种类型的同步电机、变磁阻电机(开关磁阻与步进电机)及其拖动控制系统、变压器以及各类控制电机等知识。

教材自2006年9月首次出版以来,以其鲜明的特色深受广大电气传动领域读者的厚爱。该教材于2007年被评选为首批“十一五”国家级精品教材,并于2008年获得山东省高等学校优秀教材一等奖。由于教材注重物理概念和分析方法,删繁就简,强调实用,从系统的角度全面讨论电机与拖动的传统知识和最新内容,因而取得不错的销量。截至2014年1月,本书已重印10次,总销量达27500册。

同第1版一样,本书第2版仍然遵循如下宗旨:(1)从运动控制系统的角度讨论电机与拖动的全部内容,换句话说,应从“电机+电力电子变流器+控制策略”角度出发,而不是从单纯电网供电或电机设计角度讨论各类电机及其拖动的相关内容;(2)按照先定性、后定量再到分析、计算的顺序引入各类电机的运行原理、控制方案及其拖动系统的组成等知识,以符合大多数读者的认知规律;(3)强调物理概念,辅佐以数学描述;(4)侧重电机的外部特性及其控制方法,淡化内部绕组及磁路结构,重在实用;(5)反映电机与拖动(或运动控制)领域的最新知识和理念,以满足当前工程实际的要求。

按照上述原则,《电机与拖动》第2版在保持了第1版基本特色的基础上,借鉴了近30多年国内外的课程改革和自身教学的成果和经验,吸收了近8年来教材使用过程中读者的反馈意见和建议,在不失本课程教学传统的前提下,对全书内容和章节安排作了较大调整。主要体现在如下几个方面:(1)保留了传统教材以基于符号法的正弦相量为分析工具(其基本特征是采用等效电路、相量图等手段)的主线,同时增加了以综合矢量为分析手段的另一条主线内容。这主要基于两点考虑:一是传统的相量分析仅适用于正弦电源供电(主要是电网供电)下交流电机的分析,而对于以电力电子变流器供电下的各类交流电机,由于其绕组外

加电压或电流均为非正弦,上述手段不再有效;二是对包括磁场定向的矢量控制、直接转矩控制、梯形波电势波形的无刷直流电机等在内的最新拖动控制系统的深刻理解需要以综合矢量为基础的新的数学工具。(2)强化了各类电机与电力电子变流器之间的关联性,以突出电机的各种控制变量在供电变流器中是如何具体实现以及变流器的局限性等物理概念。(3)完善了电机在传动领域内的四象限运行(即电机既运行在电动机又可运行在发电机状态)的知识,并充实了供电变流器工作在四象限伏-安特性(即整流、逆变状态)的内容。(4)增加了对包括矢量控制、直接转矩控制等在内的最新知识,并进一步完善了无刷直流、开关磁阻等机电一体化电机的内容。与第1版相比,《电机与拖动》第2版在遵循上述原则上走得更远。可以相信,上述尝试和努力,将使本书内容更加系统、结构更加合理,知识更加完善。

本书第2版各章节的调整和增减的具体内容如下:(1)第1章增加了有关永磁体组成磁路的分析方法一节,以满足目前各类永磁电机日益应用增多的需要。(2)删去了第1版第3章中目前工程应用较少的直流电力拖动系统四象限运行中的实例分析。(3)删去了第1版第4章(变流器供电下直流电机的机械特性),将有关内容精炼并归并到第3章(直流电机的电力拖动)中,以确保第2版全书的体系结构一致。(4)在第2版第5章(三相异步电机的建模与特性分析)中增加了三相交流电机的综合矢量与坐标变换的内容;在第2版第6章(三相异步电机的电力拖动)中增加了变频调速的供电变流器及其调制方案一节,内容涉及三相桥式逆变器及其SPWM以及SVPWM调制技术,由此得到三相交流电机定子电压综合矢量的具体实现方案;同时,在第2版第6章中还增加了基于综合矢量控制的高性能交流调速系统方案一节,内容涉及基于定子电流综合矢量的调速系统——转子磁链定向的矢量控制以及基于定子磁链综合矢量的调速系统——直接转矩控制的基本思想、物理概念以及系统组成。以上内容组成了全书以综合矢量为分析手段的主线。(5)将第1版第9章中的变流器供电同步电机的制动内容调整至第2版第6章,使体系结构更加合理。(6)重新修改完善了第1版第10章中有关三相永磁同步电机的内容,尤其是永磁无刷直流电机的有关内容;增加了目前在电动车领域内使用较多的正弦波分数槽集中绕组和梯形波分数槽集中绕组的内容以及有关永磁无刷直流电机正、反转与四象限运行的知识。(7)全面调整修改了开关磁阻电机的有关内容并增加了开关磁阻电机的能量转换与定子磁链—电流图的知识。(8)删去了目前工程实际中应用较少的超声波电机知识。此外,对第1版中许多解释不够的内容也进行了全面修订。

本书可作为自动化、电气自动化、机电一体化以及现代车辆等相关专业的本科生教材,也可作为相关专业“运动控制系统”课程的入门性教材。对于长期从事运动控制领域产品开发的工程技术人员更新知识,并了解本领域内的最新成果,本书也具有重要的参考价值。

本教材第2版由刘锦波教授担任主编,负责教材体系结构及全部内容的修订;原书第1版中的第4章以及第7章由张承慧教授编写,这些内容部分被浓缩在第2版中的3.8节以及第6章中;其中,第6章6.2.2节中的第3、第4部分、6.2.4节、6.4节属于新增章节,均由刘锦波教授编写,以保持教材第2版的前后风格一致。

本教材承蒙上海大学陈伯时教授担任主审,(英国)谢菲尔德大学的诸自强教授、清华大学的杨耕教授、天津大学的夏长亮教授、浙江大学的沈建新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的感谢。

此外,编者仍然要感谢的是《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的机会,特别要感谢的是清华大学出版社的王一玲编辑及其团队,他们为本书的编辑和出版做了大量而细致的工作。

本教材第2版从下笔修订到最终完稿耗时仅1年的时间,编者深知个中的滋味并由此对书籍充满了敬畏。但一想到有成千上万的读者因本教材成长并喜欢上运动控制领域,编者就倍感欣慰。运动控制领域的成果日新月异,编者力求以最简洁、通俗的方式对其进行归纳总结。但由于时间仓促,编者水平有限,书中难免存在不少错误和不妥之处,恳请广大读者一如既往的批评指正。来函请寄电子邮件:mej jinbo@sdu.edu.cn。

作 者

2015年4月



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: mejinbo@sdu.edu.cn。

作 者

2006年2月

目录

CONTENTS >>>

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	8
第1章 电磁学的基本知识与基本定律	9
1.1 电路的基本定律	10
1.1.1 基尔霍夫电流定律	10
1.1.2 基尔霍夫电压定律	10
1.2 磁场的基本知识	10
1.2.1 磁感应强度	10
1.2.2 磁通	11
1.2.3 磁场强度	11
1.3 电磁学的基本定律	11
1.3.1 电生磁的基本定律——安培环路定理	11
1.3.2 磁生电的基本定律——法拉第电磁感应定律	12
1.3.3 毕-萨电磁力定律	13
1.3.4 磁路的欧姆定律与线圈电感的表达式	13
1.4 常用磁性材料及其特性	16
1.4.1 磁滞回线与磁化曲线	17
1.4.2 软磁材料与硬磁材料	18
1.4.3 铁磁材料中的铁耗	19
1.4.4 永久磁铁的去磁曲线与各种永磁材料的特点*	19
1.4.5 永久磁铁组成磁路的分析方法*	21
本章小结	23
思考题	23
练习题	24

第2章 直流电机的建模与特性分析	26
2.1 直流电机的基本运行原理与结构	27
2.1.1 直流电机的基本运行原理	27
2.1.2 直流电机的结构	29
2.2 直流电机的额定数据	30
2.3 直流电机的电枢绕组——电路构成	31
2.3.1 对直流电枢绕组的要求	31
2.3.2 直流电机的简单绕组	31
2.3.3 直流电枢绕组的基本型式	32
2.4 直流电机的各种励磁方式与磁场	36
2.4.1 直流电机的各种励磁方式	36
2.4.2 直流电机的空载主磁场	37
2.4.3 直流电机负载后的电枢反应磁场	40
2.4.4 直流电机负载后的气隙磁场	43
2.5 直流电机的感应电势、电磁转矩与电磁功率	44
2.5.1 正、负电刷之间感应电势的计算	44
2.5.2 电磁转矩的计算	45
2.5.3 直流电机的电磁功率	46
2.6 直流电机的电磁关系、基本方程式和功率流程图	46
2.6.1 他励直流电机的基本电磁关系	47
2.6.2 直流电机的基本方程式与等效电路	47
2.6.3 直流电机的功率流程图	51
2.7 直流发电机的运行特性及自励建压过程	53
2.7.1 直流发电机的运行特性	53
2.7.2 并励和复励直流发电机空载电压的建立	56
2.8 他励直流电动机的运行特性	57
2.8.1 他励直流电动机的工作特性	57
2.8.2 他励直流电动机的机械特性	60
2.8.3 他励直流电动机的人为机械特性	61
2.9 串励直流电动机的机械特性	66
2.9.1 串励直流电动机的固有机械特性	66
2.9.2 串励直流电动机的人为机械特性	67
2.10 复励直流电动机的机械特性	68
2.11 直流电机的换向	69
本章小结	72
思考题	75

练习题	76
第3章 直流电机的电力拖动	79
3.1 电力拖动系统的动力学方程式	80
3.1.1 单轴电力拖动系统的动力学方程式	80
3.1.2 多轴电力拖动系统的等效	81
3.2 各类生产机械的负载转矩特性	86
3.3 电力拖动系统的稳定运行条件	88
3.3.1 稳态运行点与稳定运行的概念	88
3.3.2 电力拖动系统的稳定运行条件	90
3.4 直流电力拖动系统动态过程的一般分析与计算	91
3.4.1 直流电动机电力拖动系统的动态数学模型	91
3.4.2 直流电力拖动系统动态过程的一般分析计算	93
3.5 直流电动机的起动	98
3.6 直流电动机的调速	100
3.6.1 调速系统的性能指标	100
3.6.2 他励直流电动机常用的调速方法	102
3.6.3 调速方式与负载类型的配合	105
3.7 他励直流电动机的制动	108
3.7.1 能耗制动	109
3.7.2 反接制动	112
3.7.3 回馈制动	116
3.8 直流电机的供电电源与各种类型的直流电力拖动系统	121
3.8.1 直流发电机-直流电动机组成的电力拖动系统	121
3.8.2 相控变流器-直流电机组成的电力拖动系统*	122
3.8.3 直流斩波器-直流电机组成的电力拖动系统*	124
3.9 直流电力拖动系统的四象限运行	127
3.9.1 他励直流电机四象限运行时的机械特性及其工作状态	127
3.9.2 各类直流电力拖动系统四象限运行时的工作状态*	128
3.9.3 直流电力拖动系统四象限运行时转矩与转速的能力曲线及 安全运行区	133
本章小结	134
思考题	136
练习题	138
第4章 变压器的建模与特性分析	140
4.1 变压器的基本工作原理与结构	141