



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

Electrical Machinery
and Motion Control Systems

电机与运动控制系统 (第2版)

杨 耕 罗应立 编著
Yang Geng, Luo Yingli

陈伯时 主审
Chen Boshi

内 容 简 介

本书是清华大学出版社 2006 年出版的《电机与运动控制系统》的第 2 版,以适应新形势下对电机及控制系统的知识需求。

本书的主要内容有:(1)机电能量转换的基本原理;(2)直流、交流电机基本工作原理、外特性及建模;(3)直流、交流电机传动及其控制系统的原理、分析和设计方法。本书在体现知识的系统性、理论性和实用性的基础上,突出了“少学时、重基础,将电机原理与控制系统融为一体”的特色。

本书可作为大学自动化、电气自动化专业的本科生教材,或相关或相邻专业的研究生教材,也可供工程技术人员参考。

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

电机与运动控制系统/杨耕,罗应立编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2014

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-34477-3

I. ①电… II. ①杨… ②罗… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 270287 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 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:24 插 页:4 字 数:548 千字

版 次:2006 年 2 月第 1 版 2014 年 3 月第 2 版 印 次:2014 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00 元

产品编号:038049-01

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

《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、课程实验指导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



《电机与运动控制系统》第1版于2006年3月出版,主要用于自动化、电气自动化等专业少学时的有关电机原理、电力拖动、运动控制系统的教学,并供相关工程技术人员参考。

如今,我国正在从一个经济大国向经济强国迈进;世界范围内能源和环境问题日益凸显,新能源发电技术与产业日新月异;电机拖动领域也正面临许多新的技术挑战,如车、船、飞机的全电化(electrification)、智能化等;在大学专业教学中,培养知识融合和创新能力的需求与日俱增。为了适应新形势的要求,我们完成了本书的第2版,希望继续体现“少学时,重基础,将电机原理与运动控制系统融为一体”的特色,以满足时代发展对基本教学的要求。对第2版的体系以及内容改动的说明如下。

1. 依然保持第1版的“一个主题、两条主线”体系。一个主题是运动控制系统或电力拖动控制系统,两条主线分别是以电机为核心的能量变换装置原理及外特性和运动控制系统的原理及其设计。与两条主线相关的具体内容详见第1版前言。为了便于由浅入深的学习,内容安排上分两个步骤,先讨论“直流电机及其控制系统”,再阐述“交流电机及其控制系统”。交流部分中,把同步电机原理及其控制单独设立了一章。

2. 在具体内容的选择上,继续坚持“强筋健骨、删繁就简”的原则。例如,简化了对电动机各种运行状况的介绍、精简了与《电力电子技术》课程相关的内容,强化了两自由度控制、空间矢量概念、交流同步电动机原理与控制、工程设计方法等内容,新增了对“传统的电机建模方法和现代的电机建模方法”要点的说明、“带饱和的数字式PI调节器”、对时间相量的定义、多质量块负载和汽车车轮负载特性、永磁同步机的典型转子结构等内容。对于比较深入的内容,如有关交流电动机绕组的知识、空间电压矢量调制方法、变频电源驱动电机的其他问题等,在其标题前标注“*”号。

3. 改进知识点的展开方法,注意分散难点,注意这些知识点与前期课程相关知识的结合、与工程实际问题的结合。例如,对于“空间矢量”的概念和使用方法,有层次地在传统的交流电机建模部分(5.2节)、空间电压矢量调制方法(6.2.3节)以及在第7章的现代交流电机建模的内容中分别介绍;对于异步电动机转子磁链定向控制的思想,则在V/F控制(6.3节)以及7.1节和7.3节逐步深入地讨论。

4. 本书力图在概念介绍、数学推导中做到严谨、简洁(如明确说明了

空间矢量方法适用的条件等),但是,作者认为,教学中的一个重要内容是,使学生掌握相关知识的同时,理解物理概念与数学描述的关系,知识要点之间以及与体系的相互关系;了解重点内容发明时的理论背景以及工程技术背景。因此,本书在重要章节的小结中力图归纳出上述两点内容。也建议在教学过程中省略一些数学推导、适当地深化这些要点。

5. 修改、补充了部分典型例题、习题以及彩色插图等,以便学生深入理解核心内容或难点内容。在第4章~第7章的习题中,强化了综合性习题或仿真习题。我们还充实了参考文献,使之包含近几年出版的与本书内容相关的优秀文献。

6. 考虑到本书的定位和学时数,没有展开关于系统的数字控制技术的阐述,只是介绍了几个典型的知识点,如带饱和环节的数字式PI调节器、由数字控制器有限字长而产生的次谐波以及交流变换器死区的影响等。如果要学习运动控制系统数字控制的系统性知识,请参考近年国内外的其他专著。

作者建议,对于自动化专业本科64学时的教学,可重点讲述第2章~第6章的核心内容、适当介绍7.1节、7.2节和7.3节的要点。而2.5节、4.6节、6.2.3节、6.3.4节和第7章可以作为本科生毕业设计的参考内容或作为硕士研究生相关课程的部分内容。

本书由清华大学杨耕教授、华北电力大学罗应立教授编著,由上海大学陈伯时教授主审。参加第2版部分工作的还有清华大学自动化系副教授耿华博士、肖帅博士、郑重博士、奚鑫泽博士、李隆基硕士和潘淼硕士等。本书的大部分彩图仍然采用罗应立教授课题组在第1版时完成的工作。

在本书第1版的使用以及第2版的编著过程中,得到了许多国内外同行和读者的帮助。作者借此机会表示最诚挚的感谢。尤其感谢国内的陈伯时教授、黄立培教授、李发海教授、马小亮教授、苏文成教授、王兆安教授、邬伟扬教授、徐文立教授、袁登科教授、张兴教授、陈亚爱教授、窦曰轩教授,以及加拿大的吴斌教授、日本的金东海教授、松濑贡规教授多年来对我的指导和帮助。感谢清华大学出版社王一玲女士团队对我的鞭策以及对原稿的仔细审阅!感谢在清华大学自动化系杨耕课题组以及在罗应立课题组先后工作过的博士后、博士生和硕士生们,感谢他们为本书所做出的各种贡献!

作 者

2014年1月

基于清华大学教学改革的需求,将原自动化专业本科课程“电机与电力拖动”(64学时,内容:直流电机、变压器、交流电机原理、拖动基础)和“运动控制系统”(48学时,内容:直流、交流电机控制系统)重组为新课“电力拖动与运动控制”。本书是为该课程服务的教科书。

本书的主要内容可归纳为一个主题和两条主线。

一个主题:运动控制系统或称电力拖动控制系统。

在前期课程控制理论、计算机技术、数据处理、电力电子等课程的基础上,学习以电动机为被控对象的控制系统,培养学生的系统观念、运动控制系统的基本理论和方法、初步的工程设计能力和研发同类系统的能力。

两条主线:一是能量变换装置原理和外特性,一是运动控制系统原理及其设计。

对于能量变换装置,直流、交流电机等机电能量变换机器是本书讨论的主要内容。主要教学目标是在讲述直流、交流电动机原理的基础上建立适应于不同控制目的电机的模型,讨论其外特性。由于实现电气能量形态变换的电力电子变换装置已由前期课程“电力电子技术”完成,本书仅简单复习所要用到的有关内容。

对于运动控制系统,知识点较多。本书在介绍直流、交流电动机速度控制系统的一般性知识的同时,重点讨论了当今几个具有典型意义的内容:一个是以单输入单输出、线性系统为特征的直流电机转速、电流双闭环系统,另一个是以多输入单输出、非线性系统为特征的交流感应电机控制系统。在编写中试图体现控制理论与工程实践的结合,同时注意建立基本的控制系统分析与综合的概念和方法。

围绕上述两条主线,本书内容分为两大部分:

1. 直流、交流电机等电磁能量变换装置的原理及建模

由于大学工科普通物理、电路原理课程中大多不讲述磁路的内容,所以第2章补充与电机原理有关的机电能量变换的基本内容,藉此为第3、5、7章的内容打下基础。第3、5章的核心内容为电机的工作原理、外特性和静态模型。

本书试图从使用电机的角度安排和讲述上述相关内容。同时,作者为基本原理的讲解制作了大量多媒体动画,以便高效率授课。

2. 直流、交流电机控制系统

第4章从直流控制系统入门,建立控制系统分析与设计的概念和方法。在讲述闭环系统时,注意联系线性控制理论,同时注意结合经典的工程设计概念和方法。

对于交流调速系统,第6章基于感应电机的稳态模型重点叙述了应用最广的恒压频比(V/F)控制方法。第7章则着力于基于动态模型的高动态性能控制方法。7.2节首先建立鼠笼式感应电机多输入多输出的动态模型;7.3节和7.4节着重说明实现转矩控制的两种策略:以解耦为主要特征的转子磁链定向控制和以定子磁链控制为特征的直接转矩控制;在7.5节则重点讲述永磁同步电机的动态模型和转矩、速度控制系统。

对于第4、5、6、7章的核心内容都设计了采用MATLAB仿真的例题或作业,对仿真时应注意的问题做了必要的说明。

在讲述的顺序上,试图通过第3、4章的“直流电机及其控制系统”和第5、6、7章的“交流电机及其控制系统”两个循环,使学生由浅入深地学习本课程的主要内容。

本书按64学时编写。为了满足多种需求,本书包含了比较全面的内容,而在次要章节前标注“*”以便于读者选择。作者建议,对于本科生重点讲述第2、3、4、5、6章的核心内容,而将第2.5节、第4.6节和第7章作为硕士生课或本科生毕业设计的参考内容。

本书由清华大学杨耕教授、华北电力大学罗应立教授共同构思并主编。上海大学陈伯时教授为本书的结构提出了重要意见。第2章,第3.1、5.1、5.2节由华北电力大学罗应立教授负责编写;第5.3、5.4节由北京交通大学张和生副教授编写。参加这部分编写的还有华北电力大学的刘晓芳教授、王昊、马波、王靖、康锦萍、张新丽等同志。第4章由陈伯时教授指导,由清华大学窦日轩教授与杨耕教授编写。其余各章节由杨耕教授编写。与本书相关的动画模型等由罗应立教授课题组完成,由陈希强、牛印锁制作。清华大学王焕钢博士、耿华博士、于艾和王云飞硕士等为书中的MATLAB内容做了设计和仿真。

上海大学陈伯时教授主审了本书,此外许多老师参加了审稿工作,在此谨致衷心的感谢。本书还参考了大量文献,其中有以下具有代表性的著作,在此对有关作者谨表谢意。

(1) 陈伯时. 电力拖动自动控制系统.(第3版). 北京: 机械工业出版社,2003

(2) Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed.. Springer-Verlag,2001

(3) Bimal K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR Prentice-Hall Inc.,2002

(4) P. C. Sen. Principle of Electric Machines and Power Electronics. John Wiley & Sons, Inc.,1997

(5) 李发海,陈汤铭等. 电机学. 北京: 科学出版社,1995

(6) 汤蕴璆,史乃. 电机学. 北京: 机械工业出版社,1999

为了在大约减少一半学时的条件下,精化原有的知识体系、融入该领域近年的成果,作者在以下几个方面进行了大量的探索:

(1) 试图编著好面向电机应用类专业的机电能量转换装置知识体系:对选择出的内容重新设计,由浅入深,力求避免知识块的无序堆积。

(2) 对于控制系统部分,力图体现与前期课程的结合、与工程实际的结合,注意由浅入深地揭示物理本质。

(3) 为了提高学习效率,设计、制作了大量多媒体动画和综合作业。例如,电机动画课件不但用以描述电机的空间结构,而且试图用以实现从电压、电流到磁场再到输出力矩这一能量转换过程的动画建模;空间电压矢量的动画直观地表述了脉冲电压输出与空间矢量以及基波电压之间的对应关系。

(4) 对于交流电机控制系统中的一些前沿性的内容做了简单的介绍,以便相关人员参考。

我们在第3次印刷时纠正了许多错误,但仍难免有错误与不足之处,殷切期望广大读者批评指正。

作者

2007年6月

第 1 章 绪言	1
1.1 教材背景	1
1.2 教材的目的、内容体系以及学习要点	4
第 2 章 机电能量转换基础	8
2.1 电机中的能量转换与磁路	9
2.1.1 电机中能量转换的两个实例	9
2.1.2 能量转换装置中的磁场与磁路	10
2.2 磁场的建立	10
2.2.1 安培环路定律及其简化形式	11
2.2.2 磁路的欧姆定律	12
2.2.3 铁心的作用和铁心磁路的磁化特性	13
2.3 电磁感应定律与两种电动势	19
2.3.1 电磁感应定律	19
2.3.2 变压器电动势与运动电动势	20
2.4 磁场储能与电感	22
2.4.1 磁场储能与磁共能	22
2.4.2 用电感表示磁场能量	24
2.5 机电能量转换与电磁转矩	26
2.5.1 典型的机电能量转换装置	26
2.5.2 电磁力和电磁转矩	28
2.6 稳态交流磁路和电力变压器分析	31
2.6.1 稳态交流磁路分析	31
2.6.2 电力变压器的建模	34
本章习题	43
第 3 章 直流电机原理和工作特性	46
3.1 直流电机原理	46
3.1.1 直流电机的用途、主要结构和额定值	46
3.1.2 直流电机的基本工作原理	48

3.1.3	直流电机的磁路和电枢绕组	50
3.1.4	电枢电动势与电磁转矩	53
* 3.1.5	关于直流电机更多的基本知识	54
3.2	电动机与拖动负载	58
3.2.1	单轴电力拖动系统以及运动方程	58
3.2.2	常见的负载特性	60
3.2.3	电力拖动系统的稳定运行问题	63
3.3	他励直流电机的稳态方程和外特性	65
3.3.1	他励直流电机的稳态方程	65
3.3.2	他励直流电动机的机械特性	67
3.3.3	他励直流电机的功率关系	71
3.4	他励直流电动机的运行特征	74
3.4.1	他励直流电动机的起动和调速	74
3.4.2	他励直流电动机的典型运行	77
* 3.5	电动机机械特性与负载转矩特性的配合	87
	本章习题	90
第4章	直流电动机调速系统	94
4.1	可控直流电源及其数学模型	94
4.1.1	直流调速系统常用可控直流电源	95
4.1.2	可控直流电源的数学模型	97
4.2	对调速系统的要求和开环系统的问题	100
4.2.1	对调速系统的要求	100
4.2.2	开环调速系统的性能和存在的问题	104
4.3	转速负反馈单闭环直流调速系统	105
4.3.1	单闭环调速系统的组成及静特性	105
4.3.2	单闭环调速系统动态特性的分析和校正	109
4.3.3	单闭环调速系统的限电流保护	116
4.4	转速、电流双闭环调速系统	119
4.4.1	双闭环调速系统的组成及其静特性	119
4.4.2	双闭环调速系统的起动和抗扰性能	124
4.5	一种调速系统动态参数工程设计方法	127
4.5.1	基本思路	127
4.5.2	典型系统及其参数与性能指标的关系	129
4.5.3	非典型系统的典型化	137
4.5.4	工程设计方法在双环调速系统调节器设计中的应用	141
* 4.5.5	具有输出饱和环节的调节器设计	150

4.6	抗负载扰动控制	154
4.6.1	转速微分负反馈控制	155
4.6.2	基于扰动计算器的负载转矩抑制	157
	本章习题	164
第5章	三相交流电机原理	167
5.1	交流电机的基本问题以及基本结构	167
5.1.1	本章的基本问题以及展开方法	167
5.1.2	交流电机的主要类型及基本结构	170
5.2	交流电机的磁动势与电动势	176
5.2.1	电枢电流建立的磁场和磁动势	176
5.2.2	电枢绕组的感应电动势	187
5.2.3	分布绕组的磁动势和电动势	195
5.2.4	三相交流电动机建模方法讨论	201
5.3	异步电动机原理及特性	204
5.3.1	异步电动机的稳态模型	204
5.3.2	异步电动机的功率与转矩	217
5.3.3	异步电动机的机械特性	221
	本章习题	225
第6章	交流异步电动机恒压频比控制	229
6.1	交流调速系统的特点和类型	230
6.1.1	交流、直流调速系统的比较	230
6.1.2	交流调速系统的分类	231
6.2	电压源型 PWM 变频电源及控制方法	235
6.2.1	变频电源主电路的基本结构	235
6.2.2	正弦波脉宽调制	238
6.2.3	空间电压矢量调制	242
6.3	异步电动机恒压频比控制	252
6.3.1	恒压频比控制的基本原理	253
6.3.2	基频以下的电压-频率协调控制	254
6.3.3	基频以上的恒压变频控制	259
6.3.4	系统构成与动静态特性	261
6.4	变频电源供电的一些实际问题	264
6.4.1	与 PWM 变频电源相关的问题	265
6.4.2	谐波引发的电动机转矩波动问题	266
	本章习题	269

第7章 具有转矩闭环的异步电动机调速系统	272
7.1 坐标变换	273
7.1.1 三相静止坐标系——两维正交静止坐标系变换	273
7.1.2 平面上的静止坐标——旋转坐标变换	275
7.2 异步电动机的动态数学模型	279
7.2.1 异步电动机的基本动态模型及其性质	279
7.2.2 两维正交静止坐标系($\alpha\beta$ 坐标系)上的数学模型	284
7.2.3 两维正交旋转坐标系(dq 坐标系)上的数学模型	289
7.3 异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	292
7.3.1 基本原理	293
7.3.2 间接型矢量控制系统	298
* 7.3.3 直接型矢量控制系统	302
7.4 异步电动机的直接转矩控制系统	307
7.4.1 直接转矩控制系统的原理	307
7.4.2 基本型直接转矩控制系统	310
* 7.4.3 DTC 特点分析以及一种新型 DTC	316
本章习题	320
第8章 同步电动机及其调速系统	323
8.1 同步电动机原理和结构	323
8.1.1 同步电动机基本原理回顾	323
8.1.2 同步电动机的典型结构	324
8.2 同步电动机的稳态模型和特性	327
8.2.1 同步电动机的电磁关系	327
8.2.2 同步电动机的功率、转矩和功(矩)角特性	333
8.2.3 同步电动机稳定运行的必要条件	337
8.3 同步电动机的动态模型以及控制方法	339
8.3.1 励磁式同步电动机的动态模型	339
8.3.2 励磁式同步电动机的控制方法	342
8.4 永磁同步电动机调速系统	344
8.4.1 正弦波永磁同步电动机变频调速系统	344
8.4.2 梯形波永磁同步电动机的变频调速系统	347
本章习题	352
附录A 专业术语中英文对照	354
附录B 本书所用符号一览	357
参考文献	361