

全国高等学校自动化专业系列教材

# 电机与运动控制系统

清华大学出版社

北 京





# 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,同时兼顾硕士生;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硕士生的学习内容先进、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,并欢迎批评和意见。

《

》

2005 10

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<sup>等</sup>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<sup>等</sup>轻工、建材、医药<sup>等</sup>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<sup>等</sup>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<sup>等</sup>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<sup>要</sup>完成工业化的任务还很重,或<sup>说</sup>我们正处在后工业化的阶段。因此,国家<sup>提出</sup>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。<sup>要</sup>发展自动化学科,人才是基础、是关<sup>键</sup>。高<sup>等</sup>学校是人才培养的基地,或<sup>说</sup>人才培养是高<sup>等</sup>学校的根本。作为高<sup>等</sup>学校的领导和教师始终<sup>要</sup>把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学<sup>系</sup>的领导和教师来说,<sup>要</sup>时刻想着为国家关<sup>键</sup>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、<sup>提高</sup>知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践<sup>等</sup>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<sup>先</sup>士领导的《全国高<sup>等</sup>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<sup>等</sup>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<sup>等</sup>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<sup>节</sup>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。

吴怡迪 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(兼顾硕士生)、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、课程实验指示书等一体化教材配件。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,还特别规划的一组专业实验教程,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》专项课题,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高校参与的联合课题组,对自动化专业课程体系结构进行深入的调研,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~~单一~~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 书

2005年10月于清华大学



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、电力电子学课程的基础上,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开发同类系统的能力。

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~~学~~机电能量变换机器是本书~~学~~理论的主要内容。主要~~学~~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,~~学~~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~~学~~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~~学~~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~~学~~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~~学~~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~~学~~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~~学~~

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。在7.3、7.4一章首先建立感应电机多输入多输出的动态模型,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7.5一章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,而在次要章一节标注“\*”以便于阅读选择。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2.5一章第4.6一章和第7章作为硕士生课或本科生毕业设计的参考内容。

本书由清华大学陈伯时教授、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、5.2一章由华北电力大学罗应立教授负责编写;第5.3、5.4一章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、由清华大学窦日波教授与陈伯时教授编写。其余各章一章由陈伯时教授编写。与本书相关的动画模型一章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文献,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.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,作者在以下几个方面进行了大量的探索:

(1) 试图编写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问题做了简单的介绍,以便相关人员参考。

我们在编写过程中虽然花了不少精力,但书中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

2005年10月

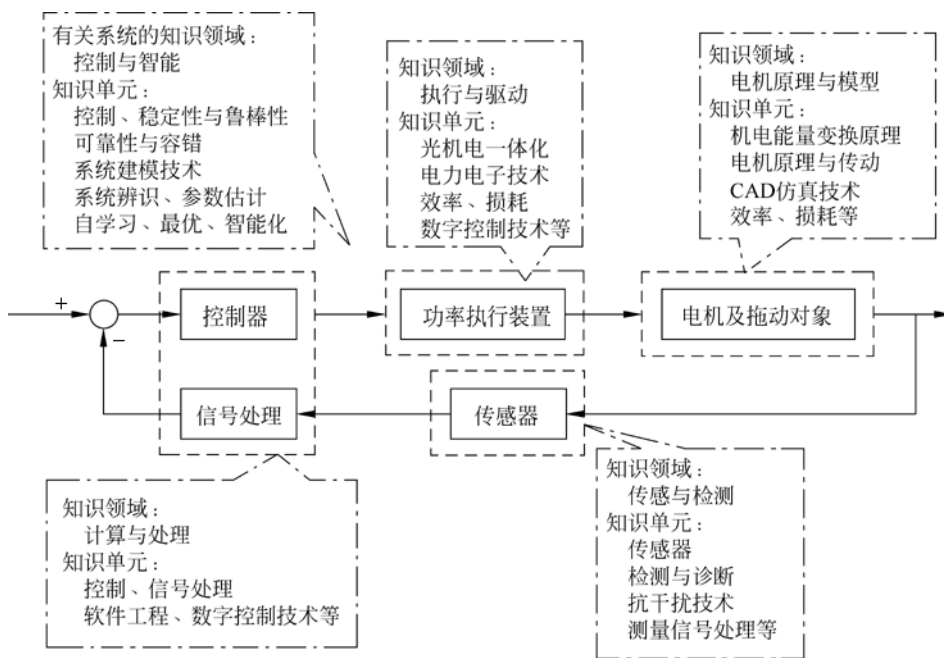
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 .....	1
1.2 .....	4
第 2 章 机电能量转换基础 .....	6
2.1 .....	7
2.1.1 .....	7
2.1.2 .....	8
2.2 .....	8
2.2.1 .....	9
2.2.2 .....	10
2.2.3 .....	11
2.2.4 .....	13
2.3 .....	16
2.3.1 .....	17
2.3.2 .....	18
2.4 .....	20
2.4.1 .....	20
2.4.2 .....	22
2.5 .....	24
2.5.1 .....	24
2.5.2 .....	25
2.6 .....	29
2.6.1 .....	29
2.6.2 .....	32
2.6.3 .....	36
* 2.6.4 .....	40
.....	41

第 3 章 直流电机原理和工作特性 .....	44
3.1 .....	44
3.1.1 .....	44
3.1.2 .....	46
3.1.3 .....	48
3.1.4 .....	51
* 3.1.5 .....	53
3.2 .....	57
3.2.1 .....	58
3.2.2 .....	59
* 3.2.3 .....	61
3.3 .....	62
3.3.1 .....	62
3.3.2 .....	64
3.3.3 .....	68
3.4 .....	71
3.4.1 .....	71
3.4.2 .....	74
3.4.3 .....	78
.....	88
第 4 章 直流电动机调速系统 .....	92
4.1 .....	92
4.1.1 .....	92
4.1.2 .....	95
4.2 .....	98
4.2.1 .....	98
4.2.2 .....	102
4.3 .....	103
4.3.1 .....	103
4.3.2 .....	108
4.3.3 .....	116
4.4 .....	119
4.4.1 .....	119
4.4.2 .....	124

4.5	.....	128
4.5.1	.....	128
4.5.2	.....	129
4.5.3	.....	140
4.5.4	.....	144
* 4.6	.....	161
4.6.1	.....	161
4.6.2	.....	165
	.....	174
<b>第 5 章 交流电机原理</b>	.....	<b>178</b>
5.1	.....	178
5.1.1	.....	178
5.1.2	.....	180
5.1.3	.....	183
5.2	.....	188
5.2.1	.....	188
5.2.2	.....	203
5.3	.....	210
5.3.1	.....	210
5.3.2	.....	224
5.3.3	.....	227
5.4	.....	232
5.4.1	.....	233
5.4.2	、 ( ) .....	237
5.4.3	.....	241
	.....	242
<b>第 6 章 交流调速系统的特点和基于电机稳态模型的恒压频比控制</b>	.....	<b>245</b>
6.1	.....	245
6.1.1	.....	245
6.1.2	.....	247
6.1.3	.....	248
6.2 <b>PWM</b>	.....	252
6.2.1	.....	252
6.2.2    -	—— .....	256

6.3	.....	265
6.3.1	.....	266
6.3.2	- .....	268
6.3.3	.....	273
6.3.4	、 .....	273
	.....	279
<b>第7章 具有转矩闭环的交流电动机速度控制系统</b>	.....	<b>281</b>
7.1	.....	282
7.1.1	- (3/2) .....	282
7.1.2	- (2s/2r) .....	284
*7.1.3	- .....	287
7.2	.....	288
7.2.1	.....	288
7.2.2	.....	288
7.2.3	.....	294
7.2.4	... ..	300
7.3	.....	303
7.3.1	.....	303
7.3.2	—— .....	309
*7.3.3	—— .....	312
7.4	.....	318
7.4.1	.....	318
7.4.2	.....	321
*7.4.3	、 .....	
	DTC .....	327
7.5	.....	331
7.5.1	.....	332
7.5.2	.....	333
7.5.3	.....	336
	.....	344
<b>附录 A 专业术语中英文对照</b>	.....	<b>347</b>
<b>附录 B 本书所用符号一览</b>	.....	<b>352</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>356</b>





1.1.1

( [1-2] )