



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

国家精品在线开放课程

Automatic Control Theory (Second Edition)

自动控制原理

(第2版)

张爱民 主编
Zhang Aimin

任志刚 王 勇 杜行俭 编著
Ren Zhigang Wang Yong Du Xingjian



清华大学出版社



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

国家精品在线开放课程

Automatic Control Theory (Second Edition)

自动控制原理

(第2版)

张爱民 主编
Zhang Aimin

任志刚 王勇 杜行俭 编著
Ren Zhigang Wang Yong Du Xingjian



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书涵盖了经典控制、现代控制和非线性控制理论的基本内容。从控制理论的基础知识入手,较深入地介绍了控制系统的传递函数、方框图、信号流图以及状态空间模型;详细阐述了用于控制系统稳定性、瞬态性能、稳态性能分析时域法、根轨迹法、频域法和状态空间法,以及相应的系统设计方法;讨论了离散控制系统的模型、性能分析和校正方法;并对非线性控制系统的相平面法和描述函数法进行了简要介绍。此外,在相关章节给出了有关控制系统分析设计的 MATLAB 仿真方法和示例。

全书内容全面、逻辑明确、图文并茂,理论与示例有机结合,适于用作高等学校自动化专业以及机械类、能动类、化工类等自动化相关专业的本科教材,同时可供控制工程技术人员自学参考。

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

自动控制原理 / 张爱民主编;任志刚,王勇,杜行俭编著. —2版. —北京:清华大学出版社, 2019

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-52291-1

I. ①自… II. ①张… ②任… ③王… ④杜… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 028658 号

责任编辑:王一玲 赵 凯

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

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

印装者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:37.5 字 数:753千字

版 次:2006年3月第1版 2019年8月第2版 印 次:2019年8月第1次印刷

定 价:69.00元

产品编号:077499-01

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,组织编写出版了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本科生和研究生,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53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,凝聚着全国近百名教授的心血,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?如何利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材形态单一,建设数字化、电子化等多元形态、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、创造个性的教与学环境,一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限,该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

编者多年来一直从事与自动控制理论及相关的教学与科研工作，并于2006年编写出版了本书。经过十余年在多所高等院校的应用，我们收到了很多有益建议；此外，随着我国社会经济的发展，人才需求也发生了较大变化。有鉴于此，我们在保持原有特色的同时，对本书进行了修订。第二版更加注重培养学生解决工程实际问题的能力，因此进一步强化了对自动控制思想、概念和方法的描述，适当简化了繁杂的数学推导；增加了对阻尼器、齿轮系等机械部件工作原理的描述，以帮助学生建立理论与工程之间的关联，使其能够将理论与实际有机结合，融会贯通；扩充了基于MATLAB的控制系统分析的相关内容，包括MATLAB中控制系统的描述方法以及关键的控制系统的分析函数的说明和示例。此外，每章均增加了大量习题，并根据习题的难易程度和综合性，将其分为基础型和综合型两类，以引导读者合理选择、有效学习；最后，对全书语言进行了润色修改，使其更加严谨、统一。

本书的参考学时为90学时，但可根据专业需要和课时限制，自行组合，加以取舍。对于48学时的课程，可讲授第1、2、3、4、5、7、8章，其内容包括经典控制理论中对线性定常系统的分析和设计。对于64学时的课程，可讲授第1、2、3、4、5、6、7章，其内容由经典控制理论中对线性定常连续系统的分析和设计以及现代控制理论中的状态空间分析法组成。对于72学时的课程，可讲授第1、2、3、4、5、7、8、9章，其内容包括经典控制理论中对线性定常连续、离散和非线性系统的分析和设计方法。

第二版是在第一版的基础上改编而成，第1、2、6章由张爱民编写，第4、7、8章由任志刚编写，第3、9章由王勇编写，第5章由杜行俭编写，全书由张爱民统稿审定。

本书从第一稿至今，在编写和出版过程中，得到了许多老师和出版社编辑的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者
2019年3月

第 1 版前言

PREFACE

本书旨在阐明控制理论中时域和频域分析与设计方法的基本概念和基本原理。全书涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基本内容：控制系统的传递函数、框图、信号流图和状态空间模型；线性控制系统分析的时域法、根轨迹法、频域法以及状态空间法；线性离散系统的稳定性、瞬态和稳态性能分析；非线性控制系统的相平面法和描述函数法。此外，在线性控制系统的设计中除了介绍常用的校正装置外，还引入了工业上常用的比例积分微分控制器（即 PID 控制器）。同时，结合控制系统的分析与设计，在相关章节详细介绍了 MATLAB 的仿真方法，并给出了大量的 MATLAB 仿真例题，以帮助学生加深对基本概念的理解。

书中内容按照控制理论的逐步发展过程组织编排，由浅入深，图文并茂。在加强基本概念、基本理论和基本方法的基础上，注重理论的物理背景及物理概念的建立，强调控制理论的工程意识和工程实用性。通过导弹航向控制系统和倒立摆控制系统的分析和设计举例在相关章节中的引入，使各章节内容得到了有机的联系，从而使学生思考问题和解决问题的能力得到系统的培养。

本书的参考学时为 90 学时，但可根据专业需要和课时限制，自行组合并加以取舍。对于 48 学时的课程，可讲授第 1、2、3、4、5、7 章，其内容只包括经典控制理论中对线性定常连续系统的分析和设计。对于 64 学时的课程，可讲授第 1、2、3、4、5、6、7 章，其内容由经典控制理论中对线性定常连续系统的分析和设计以及现代控制理论中的状态空间分析法组成。对于 72 学时的课程，可讲授第 1、2、3、4、5、7、8、9 章，其内容有经典控制理论中对线性定常连续、离散和非线性系统的分析和设计方法。

本书是在编者教学讲义的基础上编写而成的，第 1、2、6、7 章由张爱民编写，第 3、4 章由葛思擘编写，第 5 章由杜行俭编写，第 8、9 章由王勇编写，全书由张爱民统稿审定，由西安交通大学黄永宣教授

主审。在编写过程中,还得到了韩九强教授和教研室其他许多老师的关心及支持,在此,一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者
2005年10月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制的基本概念	1
1.3 自动控制系统的基本形式	3
1.3.1 开环控制系统	3
1.3.2 闭环控制系统	4
1.3.3 闭环控制系统的组成	5
1.3.4 闭环控制系统的特点	7
1.4 自动控制系统分类	10
1.4.1 按输入信号特征分类	10
1.4.2 按系统中传递的信号分类	14
1.4.3 按系统特性分类	15
1.4.4 按系统参数分类	16
1.5 对自动控制系统的基本要求	17
1.6 自动控制原理的研究内容及本书的结构体系	18
习题	20
第 2 章 控制系统的数学模型	22
2.1 引言	22
2.2 微分方程	23
2.2.1 机械系统	23
2.2.2 电路系统	26
2.2.3 机电系统	28
2.3 传递函数	33
2.3.1 传递函数定义	33
2.3.2 典型环节传递函数	36
2.3.3 举例说明建立传递函数的方法	39
2.4 方块图	44

2.4.1	方块图的组成和绘制	44
2.4.2	方块图简化	47
2.4.3	闭环系统的传递函数	52
2.5	信号流图	54
2.5.1	信号流图的组成和建立	54
2.5.2	梅森增益公式	56
2.6	状态空间模型	60
2.6.1	基本概念	60
2.6.2	状态空间表达式的建立	64
2.6.3	传递函数与状态空间表达式之间的关系	80
2.6.4	组合系统的状态空间表达式	81
	习题	87
第3章	线性系统的时域分析法	103
3.1	引言	103
3.1.1	典型输入信号及其拉普拉斯变换	103
3.1.2	瞬态响应和稳态响应	106
3.1.3	瞬态性能指标和稳态性能指标	107
3.2	典型一阶系统的瞬态性能	109
3.2.1	一阶系统的数学模型	109
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	109
3.2.3	一阶系统的单位阶跃响应	110
3.2.4	一阶系统的单位斜坡响应	111
3.2.5	一阶系统的单位加速度响应	112
3.2.6	一阶系统的瞬态性能指标	113
3.2.7	减小一阶系统时间常数的措施	114
3.3	典型二阶系统的瞬态性能	115
3.3.1	典型二阶系统的数学模型	115
3.3.2	典型二阶系统的单位阶跃响应	116
3.3.3	典型二阶系统的瞬态性能指标	121
3.3.4	二阶系统瞬态性能的改善	130
3.4	高阶系统的时域分析	137
3.4.1	三阶系统的瞬态响应	137
3.4.2	高阶系统的瞬态响应	139
3.4.3	主导极点	141
3.5	线性控制系统的稳定性分析	143

3.5.1	线性控制系统的稳定性	143
3.5.2	线性控制系统稳定性的充分必要条件	144
3.5.3	代数稳定性判据	145
3.6	线性控制系统的稳态性能分析	156
3.6.1	控制系统的误差和稳态误差	156
3.6.2	稳态误差分析	160
3.7	利用 MATLAB 对控制系统进行时域分析	178
3.7.1	用 MATLAB 对系统时域性能进行分析	179
3.7.2	控制系统的时域响应	184
	习题	193
第 4 章 线性系统的根轨迹分析法		203
4.1	引言	203
4.1.1	根轨迹	204
4.1.2	根轨迹的幅值和相角条件	207
4.1.3	利用试探法确定根轨迹上的点	209
4.2	绘制根轨迹的基本规则	210
4.2.1	180°等相角根轨迹的绘制规则	210
4.2.2	0°等相角根轨迹的绘制规则	225
4.2.3	参量根轨迹	226
4.2.4	关于 180°和 0°等相角根轨迹的几个问题	228
4.3	控制系统根轨迹绘制示例	229
4.4	基于根轨迹法的系统性能分析	239
4.4.1	增加开环零、极点对根轨迹的影响	239
4.4.2	条件稳定系统分析	242
4.4.3	利用根轨迹估算系统的性能	244
4.4.4	利用根轨迹计算系统的参数	246
4.5	利用 MATLAB 分析根轨迹	249
	习题	255
第 5 章 线性系统的频域分析法		262
5.1	引言	262
5.2	频率特性的基本概念	262
5.2.1	定义	262
5.2.2	频率特性的表示方法	265
5.3	对数坐标图	265
5.3.1	对数坐标图及其特点	265

5.3.2	典型环节的对数坐标图	267
5.3.3	系统的对数频率特性的绘制	275
5.3.4	非最小相位系统对数坐标图	278
5.3.5	对数幅相图	285
5.4	极坐标图	286
5.4.1	典型环节的极坐标图	286
5.4.2	开环系统极坐标图的绘制	291
5.4.3	非最小相位系统的极坐标图	293
5.4.4	增加零、极点对极坐标图的影响	296
5.5	奈奎斯特稳定判据	301
5.5.1	辐角原理	301
5.5.2	奈奎斯特稳定判据	304
5.5.3	开环系统含有积分环节时奈奎斯特稳定判据的应用	308
5.5.4	奈奎斯特稳定判据在伯德图中的应用	313
5.5.5	对具有纯延迟的系统的稳定性分析	313
5.6	稳定裕度	316
5.7	闭环系统的频率特性	323
5.7.1	用向量法绘制闭环频率特性	324
5.7.2	等幅值轨迹(等 M 圆)和等相角轨迹(等 N 圆)	325
5.7.3	尼科尔斯图	330
5.7.4	非单位反馈系统的闭环频率特性	332
5.8	闭环系统性能分析	333
5.8.1	利用频率特性分析系统的稳态性能	333
5.8.2	频域性能指标与时域性能指标之间的关系	335
5.9	利用 MATLAB 进行系统的频域分析	344
5.9.1	利用 MATLAB 绘制伯德图(对数坐标图)	344
5.9.2	利用 MATLAB 绘制奈奎斯特图(极坐标图)	346
5.9.3	利用 MATLAB 绘制尼科尔斯图(对数幅相特性图)	349
5.9.4	利用 MATLAB 绘制具有延迟环节的系统的频率特性	350
5.9.5	利用 MATLAB 求系统的稳定裕度	353
5.9.6	利用 MATLAB 求闭环频率特性的谐振峰值、谐振频率和带宽	354
	习题	355
第 6 章	线性控制系统的状态空间分析	364
6.1	引言	364

6.2	线性定常系统的线性变换	364
6.2.1	状态变量模型的非唯一性	364
6.2.2	状态空间表达式的约当标准型	366
6.3	线性定常系统的时间响应和状态转移矩阵	374
6.3.1	齐次状态方程的解	374
6.3.2	非齐次状态方程的解	378
6.3.3	状态转移矩阵的计算	379
6.4	系统的能控性和能观测性	389
6.4.1	线性定常连续系统的能控性	390
6.4.2	线性定常连续系统的能观测性	398
6.4.3	能控性、能观测性与传递函数的关系	404
6.4.4	对偶原理	405
6.5	状态反馈与极点配置	407
6.5.1	状态反馈	407
6.5.2	状态反馈后闭环系统的能控性和能观测性	408
6.5.3	极点配置	409
6.6	状态估计与状态观测器	416
6.6.1	观测器的结构形式	417
6.6.2	观测器存在的条件	418
6.6.3	全维观测器的设计方法	419
6.6.4	降维观测器的设计	420
6.6.5	由观测器构成的闭环系统的基本特性	427
6.7	利用 MATLAB 进行状态空间分析	429
6.7.1	利用 MATLAB 进行数学模型转换	429
6.7.2	利用 MATLAB 构造组合系统的状态空间表达式	434
6.7.3	利用 MATLAB 计算矩阵指数和时间响应	436
6.7.4	利用 MATLAB 分析系统的能控性和能观测性	438
6.7.5	利用 MATLAB 设计状态反馈和状态观测器	439
	习题	442
第 7 章 线性系统的设计方法		451
7.1	引言	451
7.2	校正装置及其特性	453
7.2.1	超前校正装置的特性	453
7.2.2	滞后校正装置的特性	455
7.2.3	滞后-超前校正装置的特性	457