



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

国家级精品课程教材

Principles of Automatic Control (Second Edition)

自动控制原理

(第2版)

王建辉 顾树生 主编

Wang Jianhui Gu Shusheng



清华大学出版社



014035878

TP13-43
30-2

普通高等教育“十一五”国家



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

国家级精品课程教材

Principles of Automatic Control (Second Edition)

自动控制原理

(第2版)

王建辉 顾树生 主编
Wang Jianhui Gu Shusheng



TP13-43
30-2



北航

C1723237

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书阐述了经典控制理论的基本概念、原理和自动控制系统的各种分析方法,主要包括线性连续系统与离散系统的时域和频域理论,如系统的动态性能、静态性能、稳定性的分析和各种设计方法的运用等。

本书从基本概念、基本分析方法入手,结合生产和生活中的实例,以时域分析方法为主线,时域分析和频域分析并进,在严谨的数学推导的基础上,利用直观的物理概念,引出系统参数与系统指标之间的内在联系。

本书既可以作为高等学校自动化、仪表、电气传动、计算机、机械、化工、航天航空等相关专业的教材,也可供有关工程技术人员再学习时参考。

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/王建辉,顾树生主编.—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 978-7-302-34743-9

I. ①自… II. ①王… ②顾… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 298457 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

责任印制:刘海龙

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:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm

印 张:29.75

字 数:628千字

版 次:2007年4月第1版

2014年4月第2版

印 次:2014年4月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.50元

产品编号:056553-01

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)

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,例如机器人、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。

吴佑迪 教授

2005年10月于教育部

序

FOREWORD



《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

前言

PREFACE



自动控制技术已经广泛应用于工农业生产、交通运输和国防建设的各个领域。自动控制技术以控制理论为基础,以计算机为手段,解决了一系列高科技难题,诸如宇宙航行、航空航天工程、导弹制导与导弹防御体系等领域的一些高精度控制问题等,在科学技术现代化的发展与创新过程中,正在发挥着越来越重要的作用。

“自动控制原理”是自动化及相关专业的一门技术基础课。由于自动控制技术在各个行业的广泛渗透,其控制理论已逐渐成为高等学校许多学科共同的专业基础,且愈来愈占有重要的位置。

控制理论一般分为以讲述单输入单输出(SISO)系统理论为主的经典控制理论(自动控制原理)和以讲述多输入多输出(MIMO)系统理论为主的所谓“现代控制理论”。实质上,SISO理论既是MIMO理论的特例,又是MIMO理论的基础。这两种理论是互通的,有着极其密切的内在联系。研究所用的主要方法都是以时域和频域为主。在研究MIMO系统时经常采用解耦的方法,把多变量、强耦合的系统分解成若干个独立系统,再用单变量系统的理论进行分析与综合。

由于计算机技术和信息技术的迅速发展,加快了社会信息化的进程,拓宽了自动化专业的发展空间。在以教学创新为目标,以教材建设带动教学改革的思想指导下,本教材在20多年实践的历程中,不断修订。1980年,初版由杨自厚主编、冶金工业出版社出版;1987年出版了修订版;2001年9月由顾树生、王建辉主编,杨自厚主审,出版了第3版(原冶金工业部“九五”规划教材);2005年1月由王建辉、顾树生主编,杨自厚主审,出版了第4版;2007年4月入选全国高等学校自动化专业系列教材,由清华大学出版社出版。

教材的每次修订都是在前修订版的基础上重构和重组,以适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求;教学内容的增减,更适合自主学习——这是今后大学生的主要学习方式,体现了“先进性、创新性、适用性”,体现了自动化类教材要与国际接轨,要面向世界、面向未来、面向经济建设的办学指导思想。

该教材曾获机械工业出版社优秀教材二等奖,辽宁省优秀教学成果二等奖,并被评为辽宁省和东北大学精品教材。目前已累计发行逾

16万册。为东北大学的“自动控制原理”课程成为国家级精品课奠定了坚实的基础。

本书注重更新观念,深化改革,理论联系实际,努力拓宽专业口径,以增强培养人才的适应性;为加强基本理论、工程技能和专业素质教育,在体系结构、内容安排、授课方式等方面均作了大的改动;引入了本科学生能够理解的新方法;改变了主要理论、方法的比例,并尽量使其相互独立,以适应教学、研究及人才培养的需要。

本教材从基本概念、基本分析方法入手,结合生产和生活中的实例,以时域分析方法为主线,时域分析和频域分析并进,利用直观的物理概念,使学生充分理解系统结构、参数与系统指标之间的内在联系,由浅入深地引导学生理解和掌握经典控制理论的精髓。

此次重新出版保留了前五版的数学推导严谨、物理概念清楚等主要特色,加强了基本理论和基本概念的阐述,增加了通用性的内容,除用数学工具分析工程中的实际系统之外,还力求由浅入深、循序渐进和突出重点,同时给学生自学留有充分的空间。这既给分析、设计和调试目前工业中广泛应用的各种控制系统提供了清楚的理论依据,又为学习有关专门文献和现代控制理论打下了良好的基础,也为进一步激发和调动学生的潜能和积极性创造了条件。

本书由王建辉、顾树生主编。全书共分8章:第1章和各章MATLAB部分由徐林执笔,第2章由方晓柯执笔,第3、第4、第8章由王建辉执笔,第5章由顾树生执笔,第6章由王立志执笔,第7章由徐建有执笔。应当指出,本书版本的不断修订,是一个不断完善、不断提高、不断创新的过程。在这个过程中,许多兄弟院校的同行对我们的工作给予了多方面的支持和帮助;同时,还有我们永远不会忘记本书初版和修订版的作者:杨自厚、汪谊臣、吴源达、李宝泽、余平章、侯军等教授对本书的贡献;我们的博士研究生张宇献,硕士研究生吴同刚、赵光鑫、董亮、鲍凤忠、浮洁、李琳、郭银环、郭磊、郭锐、王留福、王立岩等参与了本书的打字、绘图、排版。在此,谨向对我们的编写工作给予积极支持和大力帮助的人们表示诚挚的谢意!

由于时间仓促,加之我们水平有限,错误在所难免,敬请广大读者谅解并予以指正,我们将不胜感激!

编者

2013年10月

主要符号表

符号	符号说明	首次出现页码
$x_r(t)$	系统的输入量	6
$x_c(t)$	系统的输出量	6
$\sigma\%$	最大超调量	12
x_{cm}	输出最大值	12
$x_c(\infty)$	输出稳态值	12
t_r	上升时间	12
t_s	调节时间	13
μ	振荡次数	13
K	弹性系数, 扭簧的弹性系数	18
B, K_f	阻尼器的阻尼系数, 黏性摩擦系数	18
R	电阻	21
L	电感	22
C	电容器	21
J	转动系统的惯性矩, 转动惯量	19
u_d	电动机的电枢电压	22
i_d	电动机电枢回路电流	23
R_d	电动机电枢回路电阻	23
L_d	电动机电枢回路电感	23
e_d	电动机电枢反电势	23
C_e	电动机电势常数	23
n	转速, 前向通路数	23
M	转矩, 流量, 质量	23
GD^2	转动惯量	23
C_m	电动机转矩常数	23
T_d	电动机电磁时间常数	23
T_m	电动机机电时间常数	24
K_s	功率放大装置的电压放大系数	51
K_{sf}	速度反馈系数	51
K_K	开环放大系数	92
θ	电动机转角	24
ω	角速度	24

符号	符号说明	首次出现页码
E_d	整流电压	32
α	控制角	32
E_2	交流电源相电压的有效值	32
E_{d0}	$\alpha=0^\circ$ 时的整流电压	32
$-z_i$	系统的零点	36
$-p_j$	系统的极点	36
K	放大系数	36
T_L	RL 电路的时间常数	37
T_C	RC 电路的时间常数	37
T	时间常数	42
$W(s)$	传递函数	36
$X_c(s)$	输出量的拉氏变换	35
$X_r(s)$	输入量的拉氏变换	35
ω_n	自然振荡角频率	46
ξ	阻尼比	46
τ	时滞	47
Δh_d	厚差信号	47
Δh_c	测厚信号	47
$W_K(s)$	开环传递函数	57
$W_B(s)$	闭环传递函数	60
$W_g(s)$	正向通道传递函数	58
$W_f(s)$	反向通道传递函数	58
$X_d(s)$	扰动量	62
T_k	第 k 条前向通道的传递函数	66
T	系统的总传递函数	66
$\sum L_m$	m 个互不接触回环的传递函数乘积之和	66
Δ	信号流图的特征式	66
Δ_k	第 k 条通路特征式的余因子	66
$1(t)$	单位阶跃函数	87
$\delta(t)$	单位脉冲函数	88
α	电动机的转角与输出轴转角间的比例系数	92
ω_d	阻尼振荡角频率	95
t_m	峰值时间	98
t_f	阻尼振荡的周期时间	99
$W_e(s)$	误差传递函数	118

符号	符号说明	首次出现页码
e_{ss}	稳态误差	118
K_p	位置稳态误差系数	122
K_v	速度稳态误差系数	122
K_a	加速度稳态误差系数	123
k_0	动态位置误差系数	124
k_1	动态速度误差系数	124
k_2	动态加速度误差系数	125
$W_c(s)$	补偿校正装置传递函数	127
σ_1	稳定裕度	117
N	开环传递函数中串联的积分环节的阶次(系统的无差阶数)	121
K_g	根轨迹放大系数	144
n	开环有限极点数	147
m	开环有限零点数	147
N_z	实轴上根轨迹右侧的开环有限零点数	147
N_p	实轴上根轨迹右侧的开环有限极点数	147
α_i	开环有限零点到 s 的矢量幅角	145
β_j	开环有限极点到 s 的矢量幅角	145
φ	根轨迹渐近线倾角	150
$-\sigma_k$	根轨迹渐近线交点	151
β_{sc}	根轨迹出射角	153
α_{sr}	根轨迹入射角	153
$e^{-\tau}$	时滞环节的传递函数	162
$W_{eq}(s)$	等效开环传递函数	169
θ	阻尼角	95
$A(\omega)$	幅频特性	196
$L(\omega)$	频率特性幅值的对数值	205
Z	复数阻抗	196
ω	角频率(简称频率)	196
$\varphi(\omega)$	相频特性	196
$P(\omega)$	频率特性的实部(实频特性)	204
$Q(\omega)$	频率特性的虚部(虚频特性)	204
ω_p	谐振频率	217
M_p	谐振峰值	217

符号	符号说明	首次出现页码
$F(s)$	辅助函数	230
$D_B(s)$	闭环特征方程式	148
N	矢量 $F(s)$ 相角变化圈数	233
$\gamma_{\max}(\omega_c)$	最大相位裕度	246
$\gamma(\omega_c)$	相位裕度	239
GM	增益裕度或称幅值裕度	240
BW	频带宽	249
$M(\omega)$	闭环频率特性的幅值	250
$\theta(\omega)$	闭环频率特性的相角	250
ω_j	相位截止频率	240
ω_c	穿越频率	225
$W_c(s)$	校正环节传递函数	270
$W_o(s)$	被控对象传递函数	269
$H(s)$	反馈传递函数	270
τ	微分时间常数	276
ω_b	带宽频率	295
$\varphi_{\max}$	最大相角位移	277
T_i	积分时间常数	281
T_d	微分时间常数	282
$W_n(s)$	为补偿扰动 $N(s)$ 的影响引入的前馈装置的传递函数	271
$W_{bc}(s)$	输入补偿的前馈校正装置传递函数	271
$W_r(s)$	设定值滤波控制器的传递函数	310
K_i	积分增益系数	281
γ_i	积分校正装置交接频率比	282
γ_d	微分校正装置交接频率比	276
K_p	比例环节放大倍数	288
Δ	不灵敏区(死区)	329
M_1	静摩擦力矩	334
M_2	动摩擦力矩	334
M_m	电磁力矩	334
M_f	折算至电动机轴上的摩擦力矩	334
T_c	干摩擦力矩	374
T_η	黏性摩擦力矩	374
T_f	负载力矩	374

符号	符号说明	首次出现页码
η	阻尼系数	374
N	描述函数	338
K_0	非线性特性的尺度系数	350
$f^*(t)$	采样函数	385
$u^*(t)$	离散模拟控制信号	384
$e^*(t)$	离散模拟偏差信号	384
$e^*(k)$	第 k 个采样时刻的偏差信号	384
$u^*(k)$	第 k 个采样时刻的控制信号	384
$x_r(k)$	第 k 个采样时刻的输入信号	397
$x_c(k)$	第 k 个采样时刻的输出信号	397
$x_r^*(t)$	离散模拟输入信号	401
$x_c^*(t)$	离散模拟输出信号	401
$\delta_T(t)$	单位理想脉冲序列	385
ω_s	采样频率	386
$\omega_{\max}$	最大采样频率	387
$W_{h0}(s)$	零阶保持器的传递函数	388
$F(j\omega)$	连续函数的频谱	386
$F^*(j\omega)$	采样函数的频谱	386
$W(z)$	脉冲传递函数	395
$X_c(z)$	输出脉冲序列的 z 变换	395
$X_r(z)$	输入脉冲序列的 z 变换	395
T	采样周期	385

目录

CONTENTS >>>

第 1 章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 开环控制系统与闭环控制系统	1
1.2 闭环控制系统的组成和基本环节	4
1.3 自动控制系统的类型	6
1.3.1 线性系统和非线性系统	6
1.3.2 连续系统和离散系统	8
1.3.3 恒值系统、随动系统和程序控制系统	9
1.4 自动控制系统的性能指标	9
1.4.1 稳定性	9
1.4.2 稳态性能指标	10
1.4.3 暂态性能指标	10
小结	13
思考题与习题	14
第 2 章 自动控制系统的数学模型	17
2.1 微分方程式的编写	17
2.1.1 机械系统	18
2.1.2 电气系统	21
2.1.3 液压系统	24
2.1.4 热工系统	29
2.2 非线性数学模型的线性化	31
2.3 传递函数	35
2.3.1 传递函数的定义	35
2.3.2 典型环节的传递函数及暂态特性	41
2.4 系统动态结构图	49
2.5 系统传递函数和结构图的等效变换	52
2.5.1 典型连接的等效传递函数	53
2.5.2 相加点及分支点的变位运算	55
2.5.3 系统开环传递函数	57
2.5.4 系统闭环传递函数	60