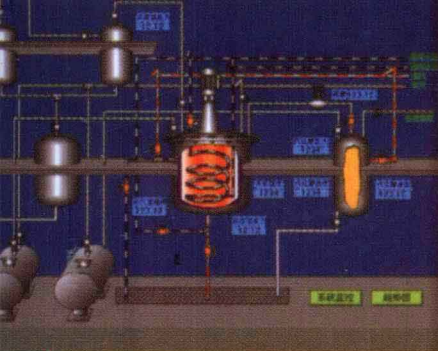




全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Process Control Systems 过程控制系统

黄德先 王京春 金以慧 编著

Huang Dexian Wang Jingchun Jin Yihui

清华大学出版社



国高等学校自动化专业系列教材
学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Process Control Systems

过程控制系统

黄德先

Huang Dexian

清华大学

王京春 编著

Wang Jingchun

金以慧

Jin Yihui

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在清华大学自动化专业多年教学和科研的总结,是在1993年出版的教材《过程控制》(金以慧主编,清华大学出版社)的基础上重新编写而成的。

全书系统地阐述了简单和复杂控制系统的结构、原理、设计、分析与评价,并深入剖析了两个典型生产过程控制的实例,力图从生产过程特点出发,对控制系统进行综合设计和优选。在此基础上还讨论了过程计算机控制系统,进一步介绍了几种先进控制策略,并增加了诸如间歇过程控制、整厂控制、实时最优化、过程监控等学科前沿的内容,力求反映近年来过程控制的新发展。全书从数学和物理的基本概念着手,阐述过程控制问题的本质和特点,并添加了思考题、自学部分以及自己设计实验等内容,为培养自学能力、创新思维等提供了较大的空间。

本书是面向研究型大学本科生的教材,因而更强调理论与实际的结合,培养学生分析问题和解决问题的能力,注重对前沿学科发展的理解和分析。本书可作为高等院校自动控制类和相关专业的教材,并供有关科技人员参考。

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

过程控制系统/黄德先,王京春,金以慧编著. —北京:清华大学出版社,2011.5

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-24291-8

I. ①过… II. ①黄… ②王… ③金… III. ①过程控制—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 252111 号

责任编辑:王一玲

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:41.5 字 数:874 千字

版 次:2011 年 5 月第 1 版 印 次:2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:59.50 元

产品编号:017419-01

《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

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。

吴启迪 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。

吴炯 院士

2005 年 10 月于清华大学

“过程控制系统”是一门与实际生产过程联系十分密切的课程。随着科学技术的飞速前进,过程控制也在日新月异地发展。面对当前全球的能源危机和环境污染问题,在电子技术和计算机网络等强大工具的支持下,它不仅在传统工业的运行和改建中起到了提高质量、节约原材料和能源、减少环境污染等不可替代的重要作用,而且正在成为新建的规模大、参数多、结构复杂的工业生产过程中不可或缺的组成部分,发挥着重要的作用。

“过程控制系统”是清华大学自动化专业几十年来为本科高年级学生开设的一门主干课。本书是在1993年出版的《过程控制》基础上重新编写成的,其中反映了作者及本专业同事们在过程控制领域中的新近科研成果。可以说,这本教材凝聚着我们几十年教学和科研的心血。

本书共分六篇。金以慧编写了本教材的大纲,确定了各个章节的详细范围和內容,还写了本书的绪论以及各篇的小结,最后审核了全书的内容。本书第一篇和第二篇是由王京春博士编写的,这是过程控制最基本的内容,也是当前在工业实践中得到最广泛应用的内容。第三篇先进控制系统共分五章,其中第8、9、12等三章由黄德先教授编写,第10、11章分别由熊智华博士、吕宁博士和陈嵘博士编写,本篇的内容讨论了当前过程控制发展的几个热点。第四篇由王京春博士编写,主要介绍了用于过程控制的计算机和计算机网络等重要工具。第五篇典型装置的控制系統有第16、17两章,分别由黄德先教授和熊智华博士以及吕宁博士编写,本篇详细剖析了精馏塔和发酵过程这两个典型的控制系统,可以作为第一到第四篇的应用实例。第六篇控制系统的设计与实现是由黄德先教授和陈嵘博士编写的,本篇涉及到过程系统的监控以及系统的设计和实现艺术,是以前此类教材中较少涉及但又十分重要的内容。

本书在写作上注意深入浅出,讲清基本概念,同时力求反映近年来过程控制的最新研究成果与发展,着重于启发和培养学生从实际中提炼出问题,应用已掌握的理论知识来加以解决的能力。通过课堂讨论、实验以及大习题等教学环节提供给学生以更多的思考和探索的空间。

由于内容较多,在讲授本课程时,可以按篇来组合,例如第三篇可以作为“先进控制”专题课单独讲授,第四篇可以单独构成“过程计算机控制系统”专题课,这要视前期课程的安排来选择、组合。

本书在编写过程中,一直得到清华大学自动化系过程控制工程研究所领导和同仁们的关心和支持,也得到本研究所创始人方崇智教授的支持和指导,在此表示诚挚的感谢。由于作者水平有限,缺点和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

金以慧

2010年8月于清华园

主要符号表

α	比例系数,比值系数,传热系数
δ	比例带
δ_{cr}	临界比例带
$\delta(t)$	脉冲函数
ε	飞升速度,误差
η	效率
θ	温度
Λ	相对增益矩阵
λ	相对增益,导热系数
ψ	衰减率
μ	阀门开度,执行器的输出,调节量
ζ	阻尼比
$\xi(t)$	随机噪声
ρ	密度,液相密度
τ	迟延时间,时滞时间
τ_d	纯迟延时间
τ_c	容积迟延时间
φ	角度
$\varphi(\omega)$	相频特性
ω	角频率
ω_{cr}	临界频率
ω_d	系统工作频率(阻尼自然频率)
ω_n	系统自然频率(无阻尼自然频率)
Δ	增量,不灵敏区
A, B, C, D	状态空间模型的系数矩阵
c_p	比热容
C	电容,热容
CV	被控变量,被控量
D	调节器的微分作用,系统干扰
DV	干扰变量,干扰量
E	偏差矩阵

$e(t)$	偏差
f	频率
G	传递函数矩阵
$G(j\omega), G(s), G(z)$	频率特性, 传递函数, 脉冲传递函数
$G_p(s), G_r(s)$	对象和执行器的传递函数
$G_c(s), G_m(s), G_d(s)$	控制器, 测量传感器和干扰通道传递函数
$g(k), g(t)$	离散、连续脉冲响应
H	变送器输出传递矩阵
h	液相热焓
H	汽相热焓
I	单位矩阵
I	调节器积分作用, 积分准则指标
K	系统或对象的静态增益
K_C	控制器比例增益
K_I	控制器积分增益
K_D	控制器微分增益
K_v	控制阀静态增益
K_m	传感器静态增益
K	采样序号
MV	操作量, 操作变量, 控制量
$M(\omega)$	幅频特性
m_p	最大超调量
N_v	过程变量的总数
N_E	独立方程数
N_F	自由度
N_{FC}	控制自由度
P	控制器比例作用
R	阻力, 调节阀可调范围, 理想气体常数
$R(s), r(t)$	设定值
R_{xx}	x 的自相关函数
R_{xy}	x 与 y 的互相关函数
T	温度, 时间常数
T_a	飞升时间
T_I	控制器的积分时间
T_D	控制器的微分时间
T_d	系统工作周期
T_{cr}	临界周期

t_p	拐点时间,峰值时间
t_s	调节时间
T_s	采样周期
$\mathbf{u}$	控制向量
u	控制器输出,控制量,控制变量
$U(s)$	输入变量的拉氏变换
$w(t)$	过程输出侧白噪声
$W(j\omega), W(s), W(z)$	系统开环频率特性,开环传递函数,开环脉冲传递函数
$W_c(j\omega), W_c(s), W_c(z)$	系统闭环频率特性,闭环传递函数,闭环脉冲传递函数
$\mathbf{X}$	状态向量
x	状态变量
$\mathbf{Y}$	输出向量
$y(t)$	输出量,被控量
$y_m(t)$	输出量或被控量的测量信号
$y(t_p)$	最大动态偏差
$Y(s)$	输出变量的拉氏变换

绪论	1
0.1 生产过程自动化的发展概况和趋势	1
0.2 过程控制的任务和要求	7
0.3 控制系统的组成、分类与性能指标	11
0.4 本书的结构与教学安排	15
思考题与习题	16
参考文献	18

第一篇 简单控制系统

第 1 章 生产过程的数学模型	21
1.1 被控对象的动态特性	21
1.1.1 基本概念	21
1.1.2 若干简单被控对象的动态特性	23
1.1.3 工业过程自由度分析	31
1.1.4 工业过程动态特性的特点	32
1.2 过程数学模型及其建立方法	36
1.2.1 过程数学模型的表达形式与对模型的要求	36
1.2.2 建立过程数学模型的基本方法	38
1.2.3 常用的辨识建模方法	39
1.3 小结	49
第 2 章 常规控制及其过程分析	50
2.1 基本概念	50
2.2 比例控制(P 控制)与积分控制(I 控制)	52
2.2.1 比例控制、积分控制的动作规律	52
2.2.2 比例控制和积分控制的特点	53
2.2.3 比例带和积分速度对控制过程的影响	55
2.3 比例积分控制(PI 控制)与比例积分微分控制(PID 控制)	58

2.3.1	比例积分控制	58
2.3.2	积分饱和现象与抗积分饱和	60
2.3.3	比例微分控制	65
2.3.4	比例积分微分控制规律及特点	69
2.4	小结	71
第3章	控制系统的整定	72
3.1	控制系统整定的基本要求	72
3.1.1	单项性能指标	73
3.1.2	误差积分性能指标	73
3.2	衰减频率特性法	75
3.2.1	稳定度判据	75
3.2.2	频率特性法整定控制器参数	78
3.3	工程整定法	85
3.3.1	特性参数法	85
3.3.2	稳定边界法	86
3.3.3	衰减曲线法	87
3.3.4	其他整定方法	93
3.4	控制器参数的自整定	94
3.4.1	极限环法	95
3.4.2	模式识别法	97
3.4.3	鲁棒 PID 参数整定法	99
3.5	小结	103
第4章	控制系统中的仪器仪表	104
4.1	检测变送仪表	104
4.1.1	传感器	105
4.1.2	变送器	109
4.2	执行器——气动调节阀	111
4.2.1	气动执行机构	112
4.2.2	调节阀与阀门定位器	113
4.2.3	调节阀的流量系数与流量特性	114
4.2.4	气动调节阀选型	125
4.3	安全栅	128
4.3.1	危险区域的分类	128
4.3.2	防爆仪表的分类、分级和分组	130
4.3.3	防爆安全栅	131

4.4 小结	134
第一篇小结	136
思考题与习题	136
参考文献	147

第二篇 复杂控制系统

第5章 串级控制系统与比值控制系统	151
5.1 串级控制系统的概念	151
5.2 串级控制系统的分析	156
5.3 串级控制系统设计中的几个问题	162
5.3.1 副回路的设计	163
5.3.2 主、副回路工作频率的选择	164
5.3.3 防止控制器积分饱和的措施	166
5.4 控制器的选型和整定方法	167
5.4.1 逐步逼近法	168
5.4.2 两步整定法	168
5.5 比值控制系统	169
5.5.1 比值系数的计算	170
5.5.2 比值系统中的非线性特性	172
5.5.3 比值控制系统的整定	173
5.5.4 常见比值控制系统	174
5.6 小结	175
第6章 基于补偿原理的控制系统	177
6.1 概述	177
6.2 前馈控制	179
6.2.1 基本概念	179
6.2.2 静态前馈控制	180
6.2.3 动态前馈控制	183
6.2.4 前馈-反馈控制系统	190
6.3 大迟延控制	193
6.3.1 概述	193
6.3.2 采用补偿原理克服大迟延的影响	194
6.3.3 史密斯预估器的几种改进方案	199
6.4 非线性增益补偿	204