

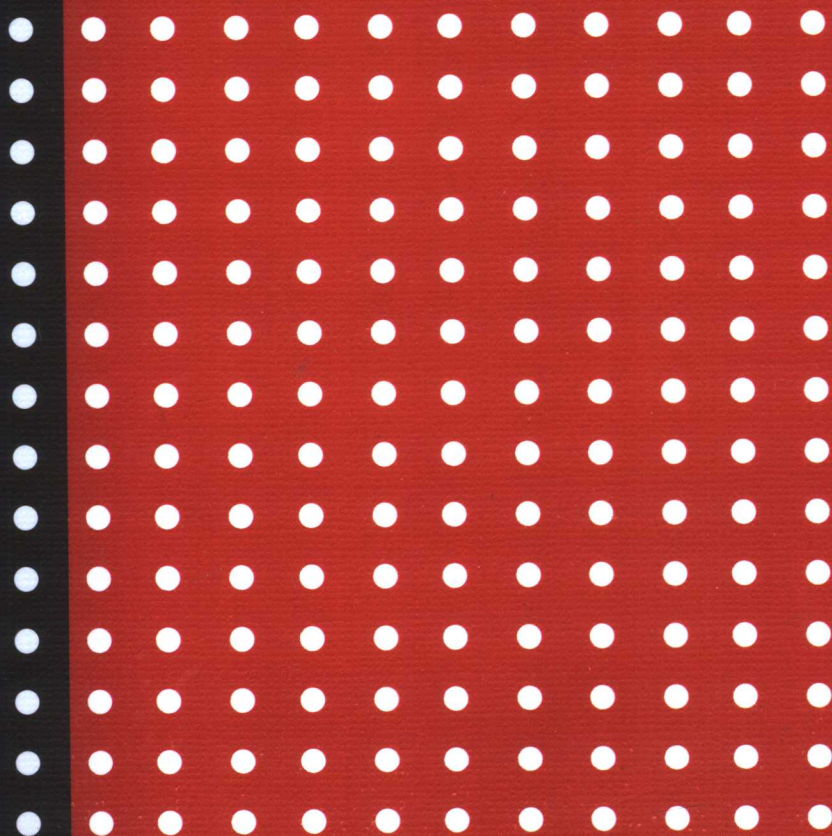


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

现代控制理论

袁德成 樊立萍 主编 李 凌 郭小萍 编著



清华大学出版社

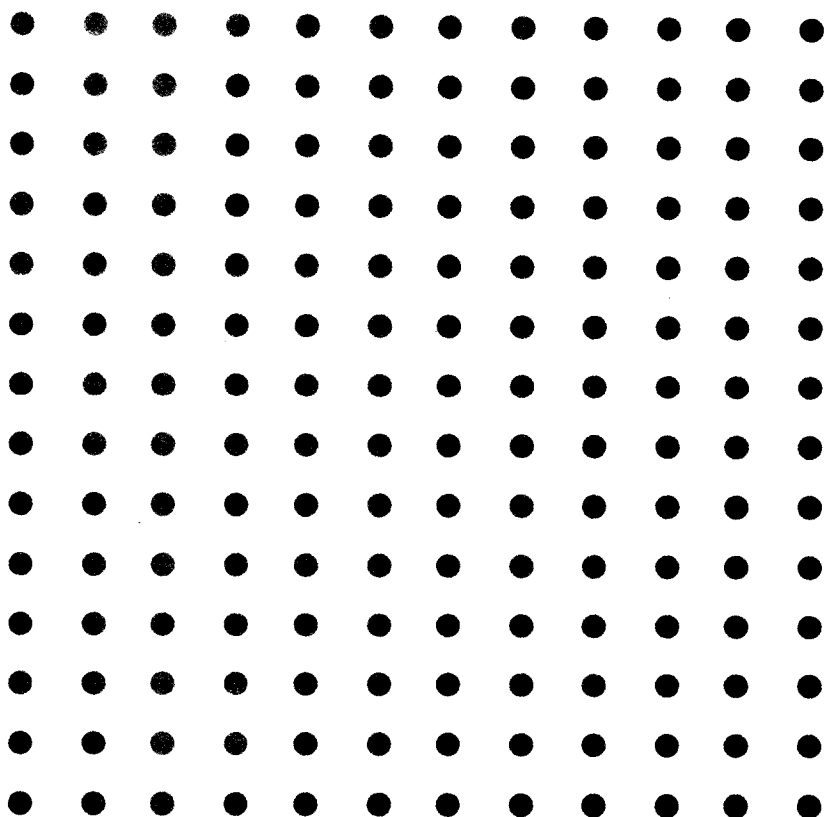


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

现代控制理论

袁德成 樊立萍 主编 李 凌 郭小萍 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书内容包括现代控制理论的基本概念、方法和技术,采用模块化结构,既保证现代控制理论体系的完整性和系统性,又尝试开放、发展、理论与实践相结合的探索。增加了非线性控制系统设计中的结构化方法、混杂控制建模和控制等内容,以求引导学生走创新之路。

本书在内容安排上遵循教学的内在规律、循序渐进、启发思维,相对独立的模块化结构,有利于教师组织教学。安排了大量的例题和习题,通过自学和练习,培养学生勤于思考、自主创新意识。本书还介绍了工程仿真与数值计算软件 MATLAB 在现代控制理论分析与设计中的应用,在辅助教学和自学的同时,使学生能够掌握一种仿真工具和编程语言。

本书为高等学校自动控制原理(现代部分)、现代控制理论课程教材,适用于自动化专业、电气工程及其自动化专业以及其他相关领域,例如化工、石油、机械、冶金、信息、电力、医药、轻工等。

本书也可供在工程领域从事科学研究及相关工程技术人员阅读参考。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/袁德成,樊立萍主编;李凌,郭小萍编著. —北京:清华大学出版社,2007.8
(21 世纪高等学校电子信息工程规划教材)

ISBN 978-7-302-15048-0

I. 现… II. ①袁… ②樊… ③李… ④郭… III. 现代控制理论—高等学校—教材
IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 053591 号

责任编辑:魏江江 徐跃进

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:北京密云胶印厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15.5 字 数:372 千字

版 次:2007 年 8 月第 1 版 印 次:2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:22.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:022077-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

本书是为自动化等专业的自动控制原理(现代部分)、研究生的现代控制理论或控制课程编写的,也可以作为其他工程技术人员的参考书。学习这门课程的学生应具备电工、机械和工程数学等方面的基础知识,这门课程的先修课程是与自动控制原理同等水平教材讲授的经典控制理论部分本科生层次的课程。学生可以结合线性时不变系统中的“传递函数极点”等概念来理解“状态变量”等概念。要学好这门课程,具备或复习好诸如微积分、微分方程、矩阵等基础数学理论十分必要。本书涉及线性控制系统、非线性控制系统、混杂控制系统3种系统模型,涵盖了除时变系统、分布参数系统外的绝大多数问题类型。

本书在编写过程中,为方便教学内容组织,采用了模块化结构,共分4大部分。

第一部分由1~4章组成。第1章是关于线性时不变控制系统状态空间描述的基础知识。这一章是区分控制理论“经典”和“现代”部分的主要知识点,虽然主要针对线性时不变控制系统来写,但状态空间建模的思想、形式和方法可以推广到其他任何系统的建模。接下来依次是状态方程的求解、结构特征与稳定性分析、状态反馈及输出控制的综合设计方法。学完这4章,可以说,自动化专业的同学们从令人费解的经典控制“频域”分析设计过渡到了更简明直观的“现代”时域空间设计了。

第二部分是第5章。本章与运筹学中的线性规划、非线性规划等紧密相关联,数学公式虽多,但归纳起来不外乎列写一个包括目标函数和约束条件在内的最优控制问题,以及找一个能解此类最优问题(可能是线性规划(LP)、二次规划(QP)、非线性规划(NP)、半定规划(SP)、整数规划(IP)或混合整数的线性/二次规划(MILP/MIQP)等)的解题器。由于解决任何工程问题最终可能都是在各种限定条件下的折中方案或利益平衡,因此理工科学生如何能归纳出最优问题非常重要。

第三部分由第6章和第7章组成。这两章是经典控制理论中关于非线性控制系统分析内容(主要是描述函数法、相平面法等)的延伸,这里强调的是非线性控制系统的构造型方法。非线性控制系统本身就是一个相对独立、庞大、开放发展的体系,有许多未解决的问题需要探索。

第四部分是第8章。这章属于在现代控制理论教材内容安排上所做的创新型尝试,学习难度较大。期望新一代年轻控制专家能在传承“经典”、学好和把握“现代”、面向未来“混杂”发展的经历中成长。

本书由袁德成、樊立萍主编。绪论、第1章和第2章由袁德成教授编写,第6章和第7章由樊立萍教授编写,第3章和第8章由李凌副教授编写,第4章和第5章由郭小萍副教授编写。

感谢清华大学出版社的大力支持以及沈阳化工学院对国家“十一五”规划教材所提供的资助。

编者于沈阳

2006年12月

目 录

绪论	1
0.1 认识控制	1
0.2 成熟的经典控制理论与自动化技术	3
0.3 发展中的现代控制理论	5
0.4 开放的控制理论体系	6
0.5 关于本书构成	7
第 1 章 线性系统的状态空间描述	9
1.1 状态空间描述的基本概念	9
1.2 线性系统的状态空间描述	13
1.2.1 电路系统状态空间描述示例	13
1.2.2 力学系统状态空间描述示例	16
1.2.3 机电系统状态空间描述示例	17
1.2.4 化工过程状态空间描述示例	19
1.3 从微分方程模型推导状态空间表达式	20
1.3.1 由微分方程求状态空间表达式	20
1.3.2 由传递函数求状态空间表达式	22
1.3.3 传递函数矩阵及其最小实现	26
1.3.4 MATLAB 实现	29
1.4 由控制系统的结构图导出状态空间表达式	32
1.5 系统状态方程的线性变换	33
1.5.1 非奇异线性变换	33
1.5.2 系统特征值和特征向量	34
1.5.3 状态方程的几种标准型	35
1.6 离散时间系统的状态空间表达式	41
本章小结	42
习题	43
第 2 章 线性定常系统的状态方程求解	45
2.1 线性定常连续系统齐次状态方程的解	45
2.2 状态转移矩阵的性质	46

2.3	矩阵指数函数的计算	48
2.3.1	直接计算法	48
2.3.2	线性变换法	48
2.3.3	拉氏变换法	52
2.3.4	Caley-Hamilton 定理法	52
2.4	线性定常连续系统非齐次状态方程的解	54
2.4.1	直接法(积分法)	54
2.4.2	拉氏变换法	55
2.4.3	两种方法的关系	55
2.5	线性定常离散系统状态方程的解	57
2.5.1	线性定常连续系统动态方程的离散化	57
2.5.2	递推法(迭代法)	58
2.5.3	z变换法	60
	本章小结	61
	习题	61
第3章	线性系统的可控、可观与稳定性分析	63
3.1	线性定常连续控制系统的可控性	63
3.1.1	可控性定义	63
3.1.2	可控性判据	64
3.2	线性定常连续控制系统的可观性	68
3.2.1	可观性定义	68
3.2.2	可观性判据	68
3.3	可控标准型和可观标准型	72
3.3.1	单输入系统的可控标准型	72
3.3.2	单输出系统的可观标准型	74
3.4	对偶原理	75
3.5	线性定常离散控制系统的可控可观性	77
3.5.1	离散系统可控性	77
3.5.2	离散系统可观性	80
3.6	线性定常控制系统的结构分解	81
3.6.1	按可控性结构分解	81
3.6.2	按可观性结构分解	84
3.6.3	按可控性和可观性结构分解	85
3.7	Lyapunov 稳定性分析方法	86
3.7.1	Lyapunov 意义下的稳定性定义	86
3.7.2	预备知识	88
3.7.3	Lyapunov 稳定性理论	89
3.7.4	线性定常系统的 Lyapunov 稳定性分析	92

本章小结	95
习题	95
第 4 章 线性时不变控制系统的综合与设计	99
4.1 极点配置问题	99
4.1.1 状态反馈与极点配置	99
4.1.2 可配置条件	100
4.1.3 极点配置的算法	101
4.1.4 输出反馈与极点配置	104
4.2 状态观测器设计	105
4.2.1 状态观测器	105
4.2.2 全维状态观测器	106
4.2.3 降维观测器	112
4.3 利用状态观测器构成状态反馈闭环系统	117
本章小结	120
习题	120
第 5 章 最优控制	123
5.1 最优控制问题的基本概念	123
5.1.1 目标函数	123
5.1.2 约束条件	124
5.2 变分法	125
5.2.1 变分法的基本概念	125
5.2.2 变分法在最优控制中的应用	127
5.3 极小值原理	136
5.3.1 极小值原理在连续系统中的应用	136
5.3.2 极小值原理在离散系统中的应用	138
5.4 动态规划法	141
5.4.1 动态规划法在离散系统中的应用	141
5.4.2 动态规划法在连续系统中的应用	144
5.5 线性二次型最优控制问题及 MATLAB 解法	146
5.6 离散系统线性二次型最优控制	151
本章小结	155
习题	156
第 6 章 非线性时不变控制系统分析	158
6.1 引言	158
6.2 非线性系统的特征	159
6.2.1 非线性系统与线性系统的比较	159

6.2.2	非线性系统的固有特征	159
6.2.3	非线性系统的主要研究方法	159
6.3	李雅普诺夫稳定性分析	162
6.3.1	非线性系统与平衡点	163
6.3.2	稳定性概念	163
6.3.3	李雅普诺夫线性化方法	164
6.3.4	李雅普诺夫直接方法	165
6.3.5	基于李雅普诺夫直接方法的系统分析	167
6.3.6	非自治系统的李雅普诺夫分析	169
6.4	输入输出稳定性	170
6.4.1	L_p 稳定性	170
6.4.2	状态模型的 L_p 稳定性	171
6.5	输入-状态稳定性	172
6.5.1	定义及稳定条件	172
6.5.2	输入-状态稳定性与 L_∞ 稳定的关系	173
6.6	控制李雅普诺夫函数	174
6.6.1	逆李雅普诺夫定理	174
6.6.2	控制李雅普诺夫函数	174
6.7	非线性系统的可控性与可观性	175
6.7.1	局部可控性	175
6.7.2	局部可观性	177
6.8	无源性概念	178
6.9	小增益定理	181
	本章小结	182
	习题	182
第 7 章	非线性时不变控制系统设计	184
7.1	反馈线性化	184
7.1.1	反馈线性化的直观概念	184
7.1.2	反馈线性化的条件	188
7.1.3	反馈线性化的局限性	189
7.2	滑模控制	189
7.2.1	引例	189
7.2.2	控制器设计	192
7.2.3	稳定性	194
7.3	反步设计法	196
7.3.1	基于反步法的控制器设计	196
7.3.2	自适应反步设计法	198
7.3.3	基于观测器的反步设计法	200

本章小结	201
习题	202
第 8 章 混杂控制系统	205
8.1 混杂系统概论	205
8.1.1 混杂系统的基本概念及特点	206
8.1.2 混杂系统模型分类	207
8.1.3 混杂系统的基本结构	208
8.1.4 混杂系统示例	210
8.2 混杂系统模型	211
8.2.1 混杂自动机模型	211
8.2.2 分段仿射切换模型	212
8.2.3 混合逻辑动态模型	213
8.2.4 其他主要的混杂系统模型	218
8.2.5 混杂系统模型的等价性	219
8.3 混杂系统优化控制与稳定性分析	220
8.3.1 混杂系统的稳定性定义	222
8.3.2 基于混合逻辑动态的模型预测控制	223
8.3.3 基于 MLD 模型预测控制的稳定性分析	226
8.3.4 仿真示例	227
8.3.5 切换系统模型的稳定性分析	229
本章小结	230
习题	231
参考文献	232

绪 论

0.1 认识控制

我们知道太阳能、地热和潮汐向地球上的四大生态圈(包括生物、水、大气和岩土)提供了其运动所需的能量。人类发挥本身智慧的优势和文化的传承,通过利用和消耗不可再生资源 and 可再生资源,建立了庞大的经济技术系统。这些成就支撑着地球物质文明的发展,也影响了我们生存的环境。面对未知和不断变化的世界,人类发明了无数的理论和工具,不断拓展和强化了自身认识世界、改造世界、创造世界的能力和办法,控制论就是其中之一。它是一种思想、一种方法、一种工具、一门学科,尤其是在 20 世纪人类所取得的巨大技术成就中,控制科学与技术的作用非常显著。钱学森先生曾经从生产力,特别是技术革命的进程分析了控制论的产生和发展,他强调:“我们可以毫不含糊地说,从科学理论的角度来看,20 世纪上半叶的三大伟绩是相对论、量子论和控制论,也许可以称它们为三项科学革命,是人类认识客观世界的三大飞跃”。

“控制论”作为一种思想,它在科学体系中的地位与研究物质结构和能量转换的传统科学不同,控制论研究系统的信息变换和控制过程。尽管一般系统具有物质、能量和信息 3 个要素,但控制论只把物质和能量看作系统工作的必要前提,并不追究系统是用什么物质构造的,能量是如何转换的,而是着眼于信息方面,研究系统的行为方式。也有把控制论视为一种“机器理论”的观点,但它所关注的不是物件而是动作方式,即揭示它们在行为方式方面的一般规律。正像控制论创始人维纳所言,控制论研究的是系统的控制和通信规律,重点是这些系统在信息方面的联系。它研究的对象是包括人在内的生物系统和各种非生物系统(如工程系统、军事系统、通信系统、经济系统、环境系统等),这些所谓系统,是由相互制约的各个部件组成的具有一定功能的整体。

控制论的核心思想是反馈。反馈的原理非常简单,即通过测量过程的当前输出,把它与设计者要求的过程设定值相比较,当这两者存在偏差时,控制器按照预先设计好的控制策略,计算并发出控制信号,驱动过程的输出向期望值运动。原理如此简明,却具备了一个显著的优点,即反馈可以提高系统适应不确定变化(干扰)的能力。来自内部的、环境的各种扰动无时无刻不在影响过程的进程,偏离期望轨迹的情况必然发生。手动或开环控制对此掌控力有限,反馈则可以通过感测过程实际状态和期望状态之间的差异,按照人预先设计好的控制策略,采取正确的校正作用,不断地调整系统,维持或驱动其在既定目标上运行。如果这个系统是闭环稳定的,则在理论上这个期望的目标一定能够实现。

“控制论”作为一种方法,它特别强调基于建模和仿真的研究方法,即把实验观测与理论分析结合起来。研究一个自动控制系统时,第一步都是从建立系统的数学模型开始。成功的数学模型能更深刻、集中和准确地定量反映受控系统的本质特征。借助于数学模型,工程

设计者能清楚地看到控制变量与系统状态之间的关系,以及如何改变控制变量才能使系统的参数达到预期的状态,并且保持系统稳定可靠地运行。数学模型还能帮助人们与外界的有害干扰作斗争,指出排除这种干扰所必须采取的措施。根据具体受控过程的特点,可以用代数方程式、微分方程式、积分方程式、逻辑代数式、概率论和模糊数学等数学工具去建立数学模型。对复杂的系统常常需要用到由几种数学工具结合起来的混合模型去实现对工程系统的完全描述。

模型可以是基于质量和能量守恒定律的机理模型。但当遇到复杂的实际系统时,往往不能从基本的物理、化学和生物学定律直接推导出准确的数学模型,而必须利用系统的输入和输出数据做“反演”,由此形成了系统辨识理论。这与哲学中所谓“黑箱”方法完全一致,属于刺激-反应模式。想一想我们的大脑,控制论可以把它看作是特大黑箱,即不能打开的一个特大系统,一旦打开便失去应有的功能。虽然人们已知道人脑有 10^{11} 个神经元,但这些神经元如何组成错综复杂的神经网络,它们的活动如何产生丰富多彩的意识现象,特别是思维的机制如何,依然很不清楚。在这种情况下,若用仿生学方法从结构上仿制出拥有如此众多神经元的“人工脑”,显然是难以实现的,而采用黑箱方法却可以从功能上模拟人脑。现在以电子计算机为支持手段的人工智能,基本上还是这种功能模拟。如果我们能从结构和功能两个方面模拟人脑,则将会进一步放大人的智力。

一旦建立了一个过程的模型,控制设计本质上就是信息的变换和处理。由于许多系统的结构参数无法事先确定,也可能许多状态变量无法直接测量且系统中常有随机噪声的干扰或干扰随时间不断变化,更具挑战性的是当系统具有更大不确定性和复杂性时,为了得到具体的控制策略,不仅需要动态全局优化的数学理论和方法,要想使这种策略得以成功实施,还必须借助于先进的计算手段进行反复模拟和调整。在系统设计和制造过程中,不能在尚未建成的工程系统上进行实验,或者由于代价太高而不宜进行这种实验。用简单的装置和不同的物理过程去模拟真实系统的受控运行过程称为仿真技术。早期曾以物理仿真为主,即用不同性质但易于实现、易于观察的物理过程去模仿真实的过程。随着数字计算机运算速度和存储容量的提高,数字计算机已成为仿真技术的主要手段。只要编制相应的软件就可以模拟各种不同性质的物理过程。仿真技术是在工程控制论中发展起来的强有力的实验技术,使设计师们能在极短时间内,用很小的代价在实验室内进行任何庞大工程系统的实验。

“控制论”作为一种工具,是实现自动控制的基础,而自动控制又是将人类从繁重的(甚至危险的)体力劳动中解放出来,提高劳动生产率和产品质量的关键技术。自动控制有很强的应用背景,需求广泛,小到日常家用电器、汽车等,大到航天、航空、制造系统等,还有各种大型的、更为复杂的系统都需要控制。对于一个具体的实际系统,由于其内部非线性机理的复杂性和外部环境的不确定性,使得人们仅凭自己的感觉或经验无法达到高精度的控制要求,而必须依靠强有力的理论指导。这种理论又必须能给出最优(或满意)的控制策略使系统达到定量的精确(或理想)指标。这就决定了控制理论与数学方法的必然联系。控制并不局限于某个系统,具有普适性,任何领域都可拿来使用。研究自动控制,不像研究计算机、新材料等,可以提出具体的量化指标,可以得到便于展示的成果。

现在承载控制研究成果的各种软硬件产品琳琅满目,为人们的生活、工作和工业生产提供了各种各样的工具。例如,仿真工具软件 MATLAB、求解各类线性规划、非线性规划问

题的解题器、精巧的智能化家电产品等,在工业界,功能齐备的数字化仪表、可编程控制器(PLC)、集散控制装置(DCS)等,控制工业充满魅力。

“控制论”作为一门学科,它研究的是人们实现有目的行为的一般原理和方法,在这个意义上,控制科学对于人们认识自然、改造自然具有普遍的意义,工程控制论固然是其中最重要也最富有成果的分支,但随着人类社会不断发展和进步,控制科学也在广泛的非工程领域得到应用,如人口控制论、经济控制论、生物控制论等都是控制论原理在这些领域的具体发展。按照我国的学科分类体系,控制科学与工程是一门通用的技术学科,并没有明确的行业背景,但在各行各业均起着重要的作用,而且其基础理论研究、技术发展、应用开发各层次有着完全不同的特色和评价体系。

控制工程是控制论一般原理在工程系统中的具体体现,这种工程系统包括各类传统和先进的制造系统、电力系统、核工程系统、航天航空航海系统等,控制在这些工程系统中占有重要的地位,甚至还促成了相应专业领域内独立的工程控制学科的形成。由于控制原理和方法所具有的普遍意义,今天的工程控制系统已广泛地延伸到社会经济的各个分支,如各类农业、建筑、物流、环境工程。控制工程作为控制科学原理的具体实现,必须从工程系统的角度进行技术的集成,因此必然涉及各行各业的技术和工艺背景。从宏观上讲,控制系统只是整个工程系统中的一部分,但要实现工程系统既定的目标,如保证工艺条件、优化资源、提高产量、降低能耗、抗御干扰等,它是关键的部分。从微观上讲,控制系统的实现不仅需要有良好的控制思想和方法,而且要与传感技术、执行机构紧密结合,否则就只能是纸上谈兵。因此,控制工程从来就不是控制学科的专利,它应该也必须在与各工程领域的结合和各种相关技术的集成中得到发展。

总之,“控制”这一概念本身反映了人们对征服自然与外在世界的渴望,控制理论与技术也就自然而然地在人们认识自然与改造自然的历史中发展起来。控制科学与技术提供了硬件、软件(信息)及嵌入式(专用的软硬件)系统的设计原理和方法,使这些系统可以自动地适应环境的变化以保持期望的性能。20世纪50年代以来,随着数学等基础理论研究的不断深入,特别是检测技术和计算技术的显著改善,控制理论的研究及相关技术与产业已经取得了巨大进展。当今控制系统几乎在所有工程领域都起着不可或缺的重要作用,例如,装备制造与材料加工业、电力电子、通信与网络、交通运输、计算机以及许多诸如航天航空、火炮、导弹制导等。可以预期,随着嵌入式处理器、传感器和网络硬件设备越来越多且价格日渐低廉,控制原理和方法的应用机遇将快速增长,将大大影响人们生活的每一方面,不但包括各种生活必需品的制造,而且也包括生存环境的美化。

0.2 成熟的经典控制理论与自动化技术

人类使用自动装置的历史可以追溯到古代,中国古代的指南车和铜壶滴漏以及古罗马人家庭水管系统的简单水位调节装置都是自动控制系统的萌芽。此后一直到18世纪工业革命开始之前仅偶尔出现一些自动装置,如中国的水运仪象台、欧洲古老的钟表机构和水力及风力磨房的速度调节装置等。在1788年英国机械师瓦特制造蒸汽离心调速器之后的一个半世纪中,人们开始大量采用各种自动调节装置来解决生产和军事中的简单控制问题,同

时还开始研究调节器的稳定性等理论问题,但尚未形成统一的理论。1868年,英国科学家麦克斯韦首先解释了瓦特速度控制系统中出现的不稳定现象,指出振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程根的分布形态有密切关系,开辟了用数学方法研究控制系统中运动现象的途径。英国数学家劳思和德国数学家赫尔维茨推进了麦克斯韦的工作,分别在1875年和1895年独立建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。

20世纪40年代是自动化技术和理论形成的关键时期,许多科学家为了解决军事上提出的火炮控制、鱼雷导航、飞机导航等技术问题,逐步形成了以分析和设计单变量控制系统为主要内容的经典控制理论与方法。机械、电气和电子技术的发展为生产自动化提供了技术手段。1946年,美国福特公司的机械工程师哈德首先提出用自动化一词来描述生产过程的自动操作。1947年建立第一个生产自动化研究部门。1952年迪博尔德第一本以自动化命名的《自动化》一书出版,他认为“自动化是分析、组织和控制生产过程的手段”。实际上,自动化是将自动控制用于生产过程的结果。20世纪50年代以后,自动控制作为提高生产率的一种重要手段开始推广应用。它在机械制造中的应用形成了机械制造自动化;在石油、化工、冶金等连续生产过程中应用,对大规模的生产设备进行控制和管理,形成了过程自动化。电子计算机的推广和应用,使自动控制与信息处理相结合,出现了业务管理自动化。

在控制理论方面,1932年美国物理学家奈奎斯特运用复变函数理论的方法建立了根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则。这种方法比当时流行的基于微分方程的分析方法有更大的实用性,也更便于设计反馈控制系统。奈奎斯特的的工作奠定了频率响应法的基础。随后,波德和尼科尔斯等在20世纪30年代末和20世纪40年代进一步将频率响应法加以发展,使之更为成熟,经典控制理论遂开始形成。1948年,美国科学家埃文斯提出了根轨迹的分析方法,用于研究系统参数(如增益)对反馈控制系统的稳定性和运动特性的影响,并于1950年进一步应用于反馈控制系统的设计,构成了经典控制理论的另一核心方法即根轨迹法。20世纪40年代末和20世纪50年代初,频率响应法和根轨迹法被推广用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统,标志着经典控制理论已经成熟。经典控制理论在理论上和应用上所获得的广泛成就,促使人们试图把这些原理推广到像生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统,其中美国数学家维纳在1948年出版的《控制论》最为重要和影响最大。

以上的经典控制理论,研究对象是单输入、单输出的自动控制系统,主要是线性定常系统。经典控制理论的特点是以输入输出特性(主要是传递函数)为系统数学模型,采用频率响应法和根轨迹法这些图解分析方法,分析系统性能和设计控制装置。经典控制理论的数学基础是拉普拉斯变换,占主导地位的分析和综合方法是频率域方法。经典控制理论主要研究系统运动的稳定性、时间域和频率域中系统的运动特性、控制系统的设计原理和校正方法。经典控制理论包括线性控制理论、采样控制理论、非线性控制理论3个部分。早期,这种控制理论常被称为自动调节原理,随着以状态空间法为基础和以最优控制理论为特征的形成(在1960年前后),开始广为使用现在的名称。自动化技术的发展历史是一部人类以自己的聪明才智延伸和扩展器官功能的历史,自动化是现代科学技术和现代工业的结晶,它的发展充分体现了科学技术的综合作用。

0.3 发展中的现代控制理论

现代控制理论是在 20 世纪 50 年代中期迅速兴起的空间技术推动下发展起来的。空间技术的发展迫切要求建立新的控制原理,以解决诸如把宇宙火箭和人造卫星用最少燃料或最短时间准确地发射到预定轨道一类的控制问题。这类控制问题十分复杂,采用经典控制理论难以解决。1958 年,苏联科学家庞特里亚金提出了极大值原理的综合控制系统的新方法。在这之前,美国学者贝尔曼于 1954 年创立了动态规划,并在 1956 年应用于控制过程。他们的研究成果解决了空间技术中出现的复杂控制问题,并开拓了控制理论中最优控制理论这一新的领域。1960、1961 年,美国学者卡尔曼和布什建立了卡尔曼-布什滤波理论,因而有可能有效地考虑控制问题中所存在的随机噪声的影响,把控制理论的研究范围扩大,包括了更为复杂的控制问题。几乎在同一时期内,贝尔曼、卡尔曼等人把状态空间法系统地引入控制理论中。状态空间法对揭示和认识控制系统的许多重要特性具有关键的作用,其中能控性和能观测性尤为重要,成为控制理论两个最基本的概念。到 20 世纪 60 年代初,一套以状态空间法、极大值原理、动态规划、卡尔曼-布什滤波为基础的设计和控制系统新的原理和方法已经确立,这标志着现代控制理论的形成。现代控制理论提供了满足发射第一颗人造卫星的控制手段,保证了其后的若干空间计划(例如导弹的制导、航天器的控制)的实施。控制工作者从过去那种只依据传递函数来考虑控制系统的输入输出关系,过渡到用状态空间法来考虑系统内部结构,是控制工作者对控制系统规律认识的一个飞跃。

20 世纪 60 年代中期以后,现代控制理论在自动化中的应用,特别是在航空航天领域的应用,产生一些新的控制方法和结构,如自适应和随机控制、系统辨识、微分对策、分布参数系统等。与此同时,模式识别和人工智能也发展起来,出现了智能机器人和专家系统。现代控制理论和电子计算机在工业生产中的应用,使生产过程控制和管理向综合最优化发展。

20 世纪 70 年代中期,自动化的应用开始面向大规模、复杂系统,如大型电力系统、交通运输系统、钢铁联合企业、国民经济系统等,这不仅要求对现有系统进行最优控制和管理,而且还要对未来系统进行最优规划和设计,运用现代控制理论方法已不能取得应有的成效,于是出现了大系统理论与方法。20 世纪 80 年代初,随着计算机网络的迅速发展,管理自动化取得较大进步,出现了管理信息系统、办公自动化、决策支持系统等。与此同时,人类开始综合利用传感技术、通信技术、计算机、系统控制和人工智能等新技术和新方法来解决所面临的工厂自动化、办公自动化、医疗自动化、农业自动化以及各种复杂的社会经济问题。研制出柔性制造系统、决策支持系统、智能机器人和专家系统等高级自动化系统。

现代控制理论的出现丰富了自动控制理论的内容,也扩大了所能处理控制问题的范围。其特点归纳如下:

(1) 研究对象一般是多变量线性系统,而经典理论主要以单输入单输出系统为研究对象。因此,现代线性系统理论具有大得多的适用范围。

(2) 除输入变量和输出变量外,还着重考虑描述系统内部状态的状态变量,而经典理论只考虑系统的外部性能(输入与输出的关系)。因此,现代线性系统理论所考虑的问题更为全面和更为深刻。

(3) 在分析和综合方法方面以时域方法为主,辅以频域方法,而经典理论主要采用频域方法。因此,现代线性系统理论能充分利用这两种方法,而时域方法对动态描述更为直观。

(4) 使用更多的数学工具,除经典理论中使用的拉普拉斯变换外,现代线性系统理论大量使用线性代数、矩阵理论和微分方程理论,对某些问题还使用泛函分析、群论、环论、范畴论和复变函数论等较高深的数学工具。因此,现代线性系统理论能探讨更一般更复杂的问题。

0.4 开放的控制理论体系

在 20 世纪 60 年代,控制工程界原本期望把当时精确的状态空间理论与先进的计算机技术相结合,用于实际工业过程的控制。但运行的结果却令人失望,除当时计算机硬件制造的可靠性因素外,基于控制设计的模型与实际的过程特性之间存在失配可能是失利的主要原因之一。深入的调查和反思,促成了到如今 30 多年控制理论与应用的辉煌。现代控制把反馈看作是处理不确定性的工具。20 世纪 70 年代提出的自校正或自适应控制方法,它可检测被控对象特性的变化或不确定性变化,不断校正控制器的结构或参数,保持系统正常运行,这属于适应性反馈机制。20 世纪 80 年代形成的鲁棒控制理论,则是在控制设计时就把握不确定性的最大边界作为设计条件和指标,事先评价系统稳定的鲁棒性和性能指标的鲁棒性问题,这属于鲁棒反馈机制。这两种新型的反馈思想,不仅缩小了控制理论研究与应用之间的差距,也为研发新的控制算法提出了要求,即只有具有良好稳定鲁棒性和性能指标鲁棒性的先进控制策略才有可能得到应用,才有进一步深入探索的必要。

对于更加复杂难以处理的问题,人们可以用试探的方法,根据系统响应的好坏进行学习,逐渐搜索到可行或最优的方案。这就是所谓的学习控制和自学习控制系统。近年来非线性科学蓬勃发展,展现了包括混沌、分形分维结构等在内的复杂行为。相应地,它们的控制问题目前仍限于混沌的产生或抑制,以及通过混沌的加密和解调等来实现保密通信。同时借助微分几何理论,关于非线性控制系统综合的研究也取得了长足进展。

尽管控制理论研究了许多复杂控制问题的解决办法,实际中仍然有许多困难的控制问题难以解决。例如,高维搜索问题,某些超高精度、超高难度的控制问题,还缺乏有效的求解方法。目前多采用模仿人或生物体的搜索技巧来解决,并称为“人工智能”或“智能控制”的方法。其中包括模糊控制、神经网络、遗传、进化、蚁群等大规模并行搜索算法等。这些属于“启发式”的方法虽然不能保证每次都顺利成功,但对解决实际问题已基本够用。自动化领域对模仿人类或生物的智能体行为一直寄以厚望,目前计算机技术进步很快,已经推动了人们思维方式的改变,这类智能化的方法也已被广泛接受。

除了计算、通信和传感技术的价格日益低廉和应用日益广泛之外,相应的基于信息的系统越来越重要,使得控制从低水平的决策系统向高水平的控制系统发展。例如,提高飞行系统的自主性,将局部反馈回路集成到企业的计划表及资源分配系统中等。将控制学科的优势扩展到这些非传统的系统,为提高效率、产量、安全性和可靠性提供了巨大的机遇。

控制是国防系统的关键技术,并且在打击恐怖主义及反对不平等威胁的斗争中越来越重要。控制使人们能够利用自主或半自主系统实施困难和危险的任务,也可以利用先进成