



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

现代控制理论与工程

高向东 编著

教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

现代控制理论与工程

高向东 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书从工程实用的角度出发,系统地介绍了现代控制理论的基本内容及其实际应用。内容包括:自动控制的基本概念,线性系统理论(包括状态空间描述、状态空间分析和状态空间综合),系统稳定性分析,最优控制理论(包括变分法、极大值原理、动态规划),最优估计理论(基本估计方法和卡尔曼滤波),系统辨识(非参数辨识方法和参数辨识方法、最小二乘法),自适应控制(模型参考自适应、自校正控制和鲁棒控制),智能控制理论,控制理论工程应用实例等。

编者在多年教学实践与科研的基础上通过总结提高编写了此书,很多内容直接取材于编者多年的科研成果,具有通俗易懂、理论联系实际的特点,同时具有工程实用价值。为便于读者学习,除了列举丰富的例题以外,还在各章后选配了适量的练习题。

本书适合作为高等院校本科生、研究生的教材或参考书,也可供对控制理论与应用技术感兴趣的广大科技工作者和工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论与工程/高向东编著. —北京:北京大学出版社, 2016. 2

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25504-9

I. ①现… II. ①高… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 IV. ①0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032021 号

- | | |
|-------|---|
| 书 名 | 现代控制理论与工程
Xiandai Kongzhi Lilun yu Gongcheng |
| 著作责任者 | 高向东 编著 |
| 责任编辑 | 郑 双 |
| 标准书号 | ISBN 978-7-301-25504-9 |
| 出版发行 | 北京大学出版社 |
| 地 址 | 北京市海淀区成府路 205 号 100871 |
| 网 址 | http://www.pup.cn 新浪微博:@北京大学出版社 |
| 电子信箱 | pup_6@163.com |
| 电 话 | 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 |
| 印 刷 者 | 北京富生印刷厂 |
| 经 销 者 | 新华书店 |
| 定 价 | 787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 432 千字
2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月第 1 次印刷
39.00 元 |

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话 010-62756370

前 言

现代控制理论自从 20 世纪 60 年代初开始建立,经过五十多年的发展,已经形成了内容丰富、涉及面宽广的学科。现代控制理念涉及众多的现代控制方法,且又紧密结合工程需求,具有非常广泛的实际应用背景,其理论与实际相结合的程度在其他工科专业的理论与方法体系中实不多见。现代控制理论要求教学中既要清楚阐述现代控制理论的基本概念和方法,建立控制理论的独特思维方式,又要在控制理论与控制工程设计及应用中架桥铺路,给现代控制理论课程的教学带来很大的挑战。本书编著者结合多年的现代控制理论课程的教学实践,并应用近年在该专业领域的科研成果整理教材内容,同时,注重逻辑性、教学可操作性及实际应用性,既便于教师教学,也便于学生学习,并可供广大工程人员和科技工作者参考。

本书主要为自动控制、机械工程及其他相关专业大学高年级本科生、研究生以及对控制理论感兴趣的科技人员而写,从现代控制理论知识点的基本原理和基本方法出发,由浅入深论述,并配有作者近年的大量科研实例。在阐述理论和方法的同时,以及在保证理论严密性的前提下,注重物理意义的解释,尽量减少繁杂的数学推导。同时,本书应用近几年在该专业领域的科研成果来更新教学内容,提高教材水平,拓宽读者视野,紧跟现代控制理论发展的时代前沿,使其既有基本理论深度,又有应用背景,具有系列化、模块化和现代化的特点。

本书有以下特色:学生易于学习掌握,可读性强,富有启发性,教师易于引导和教学。每章由浅入深,顺理成章地引出基础知识和基本定义,启发读者思考,激发读者学习兴趣,随后使读者步步跟进,知识水平逐渐提高。书中配备了各种系统图、特性图、原理图、控制装置实物图等,使读者对各个知识点有更深入的理解。每章详述知识点之后,对知识点有一高度的归纳总结,主次分明,有助于读者在学习过程中有的放矢,提高学习效率。每章都设计了适量的例题,由易到难,涵盖了本章节的重要内容,可以检验读者综合应用各章所学知识解决实际问题的能力,同时查漏补缺,使读者对知识点的掌握更加灵活牢固。

本书重点阐述了现代控制理论及其工程应用,全书共分 10 章。

第 1 章介绍现代控制理论的基本概念,包括开环和闭环控制系统、自动控制系统的类型、对控制系统的要求等。

第 2 章对控制系统的状态空间做了详尽的论述,包括状态空间的概念、系统状态空间描述的特点、系统的时域和频域的状态空间描述等。本章是现代控制技术关于多输入、多输出系统控制的基础,通过多关节机器人的控制实例引出状态空间的基础理论。

第 3 章较大篇幅阐述控制系统状态空间的特性,包括状态转移矩阵及状态方程的求解,线性系统非齐次状态方程的求解,以及系统的能控性和能观测性,为设计有效的控制系统及状态反馈系统奠定理论基础。

第 4 章阐述控制系统的稳定性问题,重点介绍了李亚普诺夫关于稳定性的定义以及系



统稳定性的判定方法。这些内容涉及自动控制系统的关键技术，为设计能够正常运行的自动控制系统提供了必不可少的条件。

第5章重点论述最优控制技术，包括最优控制的基本概念，变分法，极大(小)值原理，动态规划。其中，变分法为最优控制的基础，极大值原理则更具实用价值，而动态规划是解决离散系统的多步决策问题的有效方法。

第6章介绍自适应控制系统，包括自适应控制系统的基本概念及类型，模型参考自适应控制，自校正调节器。其中局部参数优化型模型参考自适应控制系统和最小方差控制方法具有较大的实用性。另外本章也介绍了鲁棒控制技术，包括鲁棒控制的基本概念，鲁棒稳定性问题，灵敏度极小化问题等。鲁棒控制对于解决被控对象的不确定性问题有较好的控制效果。

第7章阐述最优估计方法，主要包括最小二乘估计和卡尔曼滤波方法。本章所涉及的技术内容已在很多领域得到了广泛的应用，是现代控制理论非常重要的方法。其能够有效判断被控对象的状态，卡尔曼滤波则对被控对象能够实现状态最优估计和自动跟踪。

第8章为系统辨识方法的介绍，包括数学模型法、脉冲响应法、最小二乘法。系统辨识是建立被控对象模型的重要方法，也是运用模式识别对被控对象的状态进行辨识的基础。在确立被控对象的数学模型后，则可运用各种控制理论实现对目标的精确控制。本章也介绍了模式识别的基本概念及典型的模式识别方法。

第9章论述了智能控制技术，包括模糊控制方法、人工神经网络控制方法、专家系统控制方法。当被控对象的数学模型难以确定时，运用智能控制技术可以得到较好的控制效果。另外，将智能控制技术与经典控制理论方法相结合，取长补短，控制性能指标可以达到最佳。

第10章给出了现代控制理论工程应用实例，可以使读者了解如何将现代控制理论应用到实际的方法，达到理论与实际相结合的学习效果。这些实例绝大部分是作者及作者指导的研究生多年的科研成果，不仅包含了现代控制理论的应用方法，有些还涉及与自动控制技术密切相关的知识，如机器视觉、模式识别等，有利于拓宽读者的知识面。

本书在取材和阐述方式上，力求概念明确、层次分明、理论联系实际和遵循教学顺序。对于初学者，建议从第1章按顺序进行循序渐进地学习，对于已学习过经典控制理论和现代控制理论相关基础知识的读者在对前3章内容进行简单了解之后，也可以挑选其中篇章学习。在教学中可作为32、48学时使用，每章结束做适当的小结和复习。

在本书的撰写过程中，编者参考和引用了“参考文献”目录所列文献资料、互联网资料、国内外学术论文及其他部分资料，也参考和引用了编者所指导的研究生学位论文中的研究成果，在此对他们表示由衷的感谢。本书所涉及的科研成果得到了广东省自然科学基金等项目的资助，在此表示感谢。

在本书的校稿过程中，研究生题园园、游德勇和陈子琴等许多同学做了认真细致的工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请读者不吝赐教和指正。

高向东

2015年1月于广州

目 录

第 1 章 概述	1	3.2 线性系统非齐次状态方程的求解 ...	59
1.1 现代控制理论的基本概念	2	3.2.1 线性系统非齐次状态方程的求解	59
1.1.1 自动控制理论的发展	2	3.2.2 伴随方程	61
1.1.2 现代控制理论的基本概念	5	3.3 系统的脉冲响应	63
1.2 现代控制理论的基本内容	7	3.3.1 脉冲响应	63
1.3 自动控制系统	10	3.3.2 脉冲响应的不变性	65
1.3.1 控制系统的概念	11	3.4 系统的能控性和能观测性	66
1.3.2 开环控制系统与闭环控制系统	12	3.4.1 系统的能控性	66
1.4 自动控制系统的类型	19	3.4.2 系统的能观测性	73
1.5 自动控制系统的标准	23	3.4.3 能控性、能观测性与传递函数的关系	78
1.5.1 对控制系统的要求	23	3.4.4 能控性和能观测性之间的对偶原理	79
1.5.2 典型输入信号	23	3.5 能控标准形和能观测标准形	80
1.5.3 控制系统的性能指标	25	3.5.1 能控标准形的变换	81
本章小结	26	3.5.2 能观测标准形的变换	85
习题	27	3.6 状态反馈与状态观测器	88
3.6.1 系统的状态反馈	88	3.6.2 系统的极点配置	90
3.6.3 状态观测器	93	本章小结	94
第 2 章 线性控制系统的状态空间描述	28	习题	94
2.1 状态空间描述的概念	29	第 4 章 系统的稳定性原理	97
2.1.1 基本概念	29	4.1 李亚普诺夫关于稳定性的定义	99
2.1.2 被控过程的状态空间描述	33	4.2 根据系统矩阵 A 分析线性定常系统的稳定性	102
2.1.3 系统状态空间描述的特点	34	4.3 李亚普诺夫第二法——直接法	103
2.2 系统的时域描述转化为状态空间描述	35	4.3.1 标量函数的正定性、负定性和不定性	103
2.3 系统的频域描述转化为状态空间描述	38	4.3.2 二次型函数的正定性	104
2.4 应用 MATLAB 的系统状态空间描述	42	4.3.3 李亚普诺夫直接法	105
本章小结	45	本章小结	111
习题	46	习题	111
第 3 章 控制系统状态空间的特性	47	第 5 章 最优控制	113
3.1 状态转移矩阵及状态方程的求解	48	5.1 最优控制的基本概念	114
3.1.1 状态转移矩阵	48		
3.1.2 状态转移矩阵的求解	50		
3.1.3 状态转移矩阵的性质	58		



5.2 最优控制的变分法.....	119	6.4.3 H_{∞} 优化与鲁棒控制	173
5.2.1 泛函与变分法	119	6.4.4 H_{∞} 标准控制的基本问题	175
5.2.2 用变分法求解最优控制 问题	119	本章小结	178
5.3 极大值原理.....	126	习题	178
5.4 具有二次型性能指标的线性调节器 问题.....	132	第7章 最优估计	180
5.4.1 二次型性能指标的最优 控制	132	7.1 概述	181
5.4.2 终点时间有限的线性调节器 问题	133	7.2 最小二乘估计	182
5.4.3 终点状态固定的线性调节器 问题	135	7.3 卡尔曼滤波	185
5.4.4 终点时间无限的线性调节器 问题	136	7.3.1 基本概念	185
5.5 动态规划.....	139	7.3.2 卡尔曼滤波递推算法	186
5.5.1 多步决策问题及最优性 原理	139	本章小结	191
5.5.2 线性连续系统状态空间 表达式的离散化	141	习题	191
5.5.3 离散系统的动态规划法	142	第8章 系统辨识	193
本章小结	148	8.1 概述	194
习题	149	8.1.1 系统辨识的概念	194
第6章 自适应控制系统	151	8.1.2 系统辨识的发展概况	197
6.1 自适应控制系统的基本概念.....	152	8.2 系统辨识的基本方法.....	197
6.1.1 自适应控制系统及类型	152	8.2.1 线性定常单输入单输出离散 系统数学模型	197
6.1.2 自适应控制的理论问题	154	8.2.2 脉冲响应法	198
6.1.3 自适应控制的发展和应用 概况	155	8.2.3 最小二乘法(LS)	199
6.2 模型参考自适应控制.....	156	8.3 模式识别.....	201
6.2.1 局部参数优化型模型参考 自适应控制系统	156	8.3.1 基本概念	201
6.2.2 李亚普诺夫稳定性理论设计 模型参考自适应系统	160	8.3.2 模式识别(分类)代表性 方法	202
6.3 自校正自适应控制.....	164	本章小结	208
6.3.1 预测模型	165	习题	208
6.3.2 最小方差控制	167	第9章 智能控制	209
6.3.3 极点配置自校正控制	169	9.1 智能控制的基本概念.....	210
6.4 鲁棒控制.....	171	9.1.1 专家控制系统	211
6.4.1 基本概念	171	9.1.2 模糊控制	211
6.4.2 H_{∞} 鲁棒控制理论	172	9.1.3 人工神经网络控制系统	212
		9.2 模糊控制系统(Fuzzy Control System)	212
		9.2.1 模糊控制系统的组成	213
		9.2.2 模糊控制器的工作原理	214
		9.3 人工神经网络控制.....	214
		9.3.1 人工神经网络模型	214



9.3.2 神经网络的基本工作 原理	215	10.2.1 机器视觉及铁路车辆 闸瓦	240
9.3.3 学习算法	216	10.2.2 闸瓦在线检测系统	241
9.4 专家系统控制	217	10.2.3 闸瓦的图像识别	243
9.4.1 直接专家系统控制	217	10.2.4 闸瓦图像的分割	246
9.4.2 间接专家系统控制	218	10.2.5 闸瓦测量与分析	248
本章小结	221	10.3 卡尔曼滤波在自动激光焊目标 跟踪控制中的应用	251
习题	221	10.3.1 激光焊接试验系统及焊缝 特征参数提取	252
第 10 章 自动控制技术应用实例	222	10.3.2 卡尔曼滤波焊缝预测跟踪 建模与试验研究	254
10.1 模糊 PID 控制技术在焊缝跟踪中的 应用	223	10.3.3 色噪声卡尔曼滤波焊缝 预测跟踪算法	260
10.1.1 焊缝跟踪技术在工程中的 应用	223	10.4 系统辨识在激光焊接过程飞溅特征 分析中的应用	267
10.1.2 焊缝跟踪控制系统的 结构	225	10.4.1 研究背景	267
10.1.3 焊缝跟踪控制系统的步进 电机驱动装置	229	10.4.2 大功率盘形激光焊接试验 设计	268
10.1.4 自调整 PID 模糊控制器的 设计	231	10.4.3 系统辨识在焊接过程飞溅 特征分析中的应用	270
10.1.5 焊缝跟踪试验及结果 分析	236	本章小结	284
10.2 模式识别在铁路车辆闸瓦检测中的 应用	239	参考文献	285

第1章

概 述



本章教学要求

知识要点	掌握程度	相关知识	工程应用方向
控制理论的发展史	了解	现代控制理论的定义、发展及特点	机电控制, 智能制造系统
自动控制系统的分类	掌握	各种类型的控制系统及特点	数控技术及数字化装备, 高速高效加工及应用
自动控制系统的性能要求	熟悉	自动控制系统性能及要求	数字化设计与仿真, 机器人技术



引 例

案例一

空间技术的发展迫切要求建立新的自动控制原理, 以解决宇宙火箭和人造卫星用最少燃料或最短时间准确到达预定轨道等控制问题。这类控制问题十分复杂, 采用经典控制理论难以解决。而现代控制理论中的庞特里亚金极大值原理和动态规划可以解决空间技术中的复杂控制问题。图 1.1 所示为宇宙火箭探测器。



图 1.1 宇宙火箭探测器

案例二

现代数控机床引进自适应控制技术,根据加工零部件切削条件的变化,自动调节工作参数,使加工过程中能保持最佳工作状态,从而得到较高的加工精度和较小的表面粗糙度,同时也能提高刀具的使用寿命和设备的生产效率,并具有自诊断和自修复功能。在整个工作状态下,可进行故障报警,提示发生故障的原因,还可以自动使故障模块脱机而接通备用模块,确保无人化工作环境的要求。图 1.2 所示为数控机床。



图 1.2 数控机床

1.1 现代控制理论的基本概念

自动控制理论与社会生产及科学技术密切相关,在近代得到了极为迅速的发展。它不仅成功地应用在工业、农业、科学技术、军事、生物、医学、社会经济及人类生活等诸多领域,而且在这个过程中自动控制理论也发展成为一门内涵极为丰富的新兴学科。纵观自动控制理论的发展,自动控制理论学科一般可以划分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论 3 个阶段。在详细论述现代控制理论之前,首先简要回顾一下自动控制理论的发展。

1.1.1 自动控制理论的发展

1. 经典控制理论

具有反馈功能的闭环控制在控制理论中占有很重要的地位。1932 年在贝尔实验室工作的奈奎斯特(H. Nyquist)建立了著名的奈奎斯特判据,即根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则,也称为奈奎斯特频率法,其被认为是经典控制理论和控制学科发展的开端。奈奎斯特频率法的重要贡献在于,它可以利用物理上能够测量的开环系统频率特性,来判别闭环系统的稳定性、静态误差和过渡过程某些品质指标等一系列问题。频率法不用直接



求解系统的微分方程，只需根据开环系统的频率特性，就能够判别系统的稳定性，并估算出系统的品质指标。因此出现了至今仍然在工业上广泛应用的比例积分微分 PID (Proportion Integration Differentiation) 调节器，比例、积分、微分功能的不同组合，可以让大多数系统获得相当满意的控制性能指标。由于奈奎斯特频率法的优点，使其应用在机械、电气、化工和冶金等许多工业领域，极大地推动了人类社会经济的发展，它的理论本身也在实际应用中得到了很大的发展和充实。从提出频率法开始到 20 世纪 60 年代，形成了所谓的经典控制理论即单变量控制理论。经典控制理论的研究对象是具有单输入、单输出的单变量系统，而且多数是线性定常系统。其使用的数学工具是微分方程和拉氏变换等，研究方法有传递函数法、频率响应分析法、直观简便的图解法(根轨迹法)和描述函数法。主要代表人物有科学家奈奎斯特、美国科学家伯德(H. W. Bode)及埃文斯(W. R. Evans)。1945 年，美国数学家维纳(N. Wiener)把反馈控制的概念推广到生物系统和机器系统。1948 年，维纳出版了著名的《控制论》(Cybernetics)一书，为自动控制理论奠定了基础。第二次世界大战后工业迅速发展，被控对象越来越复杂，当时又遇到新的控制问题，即非线性系统、时滞系统、脉冲及采样系统、时变系统、分布参数系统和随机信号输入系统的控制问题等，促使经典控制理论在 20 世纪 50 年代又有新的发展。众多科学家在总结了以往的实践并在反馈理论、频率响应理论同时加以发展的基础上，形成了较为完整的自动控制系统设计的频率法理论。至此，自动控制理论发展的第一阶段基本完成。这种建立在频率法和根轨迹法基础上的理论，通常也被称为经典控制理论。经典控制理论中还有一部分重要内容就是脉冲控制理论。

随着计算机技术的进步，脉冲控制理论也迅速得到了发展。科学家奈奎斯特和香农在脉冲控制理论方面做出了重要贡献。奈奎斯特首先证明如果将正弦信号从它的采样值复现，每周期至少必须进行两次采样，也即所谓的香农采样定理、奈奎斯特采样定理。线性脉冲控制理论以线性差分方程为基础，随着拉氏变换在微分方程中的应用，其在差分方程中也开始加以推广应用。利用连续系统拉氏变换同离散系统拉氏变换的对应关系，奥尔登伯格(R. C. Oldenbourg)和萨托里厄斯(H. Sartorius)于 1944 年提出了脉冲系统的稳定判据，即线性差分方程的所有特征根须位于单位圆内。在变换理论的研究方面，霍尔维兹(W. Hurewicz)于 1947 年首先引进了一个用于对离散序列进行处理的变换。在此基础上，崔普金(Tsytkin)等人于 1949 年前后提出和定义了 Z 变换方法，大大简化了运算步骤并在此基础上发展了脉冲控制系统理论。由于 Z 变换只能反映脉冲系统在采样点的运动规律，崔普金、巴克尔(R. H. Barker)和朱利(E. I. Jury)又分别于 1950 年前后提出了修正 Z 变换(modified Z-transform)的方法。

经典控制理论以拉氏变换为数学工具，以单输入-单输出的线性定常系统为主要研究对象，将描述系统的微分方程或差分方程变换到复数域中，从而得到系统的传递函数，并以此为基础在频率域中对系统进行分析和设计，确定控制器的结构和参数。一般通过采用反馈控制，将输出的量测值与期望值进行比较，构成所谓的闭环控制系统。经典控制理论具有明显的局限性，难以有效地应用于时变系统和多变量系统，也难以揭示系统更为深刻

的本质特性。这是由于经典控制理论的特点所决定：经典控制理论只限于研究线性定常系统，即使对最简单的非线性系统也无法处理；经典控制理论只限于分析和设计单变量系统，采用系统的输入和输出描述方式，即只注重系统的输入和输出形式，而从本质上忽略了系统结构的内在特性。事实上，大多数工程对象都是多输入多输出系统，例如焊接机器人、搬运机器人、锅炉温度控制系统等，尽管人们做了很多尝试，但是用经典控制理论都没有得到满意的控制结果。经典控制理论采用试探法设计系统，即根据经验选用简单的、工程上易于实现的控制器，然后对系统进行综合，直至得到满意的控制结果为止。虽然这种设计方法具有简单、实用等诸多优点，但是控制效果并非最佳。

2. 现代控制理论

现代控制理论研究的对象是多输入多输出系统，涉及控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高为一门新的科学。现代控制理论研究并解决了很多实际工程中所遇到的控制问题，也促使非线性系统、自适应控制、最优控制、鲁棒控制、辨识与估计理论、卡尔曼滤波等发展为成果丰富的独立学科分支。在 20 世纪 50 年代航空航天技术的推动和计算机技术飞速发展的支持下，现代控制理论在 1960 年前后有了重大的突破和创新。在此期间，贝尔曼 (R. Bellman) 提出了寻求最优控制的动态规划法。庞特里亚金 (Pontryagin) 证明了极大值原理，使得最优控制理论得到极大的发展。卡尔曼 (R. E. Kalman) 将状态空间法引入到系统与控制理论中，并提出了能控性、能观测性的概念以及新的滤波理论。以上诸多成果构成了现代控制理论发展的起点和基础。

现代控制理论以线性代数和微分方程为主要数学工具，以状态空间法为基础，分析与设计自动控制系统。状态空间法本质上是一种时域的方法，它不仅描述了系统的外部现象和特性，而且也描述和揭示了系统的内部状态和性能。它对系统进行分析和综合的目标是揭示系统的内在规律，并在此基础上实现系统的最优化。与经典控制理论相比，现代控制理论的研究对象要广泛得多。它涉及的控制对象既可以是单变量、线性、定常、连续，也可以是多变量、非线性、时变、离散。对于现代控制理论而言，控制对象结构由简单的单回路模式向多回路模式转变，即从单输入单输出转变为多输入多输出，它可以处理极为复杂的工业生产过程的优化和控制问题。现代控制理论的数学研究工具也发生了转变，积分变换法向矩阵理论和几何方法转变，由频率法转向系统状态空间的研究。由机理数学建模方法向统计数学建模方法转变，并开始运用参数估计和系统辨识的统计建模方法。

3. 智能控制理论

智能控制理论是一个较为广义的范畴，是模拟人类智能的一种控制方法，其涉及的研究领域也十分广泛。经过 20 世纪 80 年代的孕育发展，特别是近几年的研究和实践，人们已认识到采用智能控制是解决复杂系统控制问题的有效途径。当前已有很多智能控制方法在工程中得到了应用。从国内外研究成果来看，科技人员越来越多地研究现代控制理论向



智能化发展的技术,例如附有智能的自适应控制、鲁棒控制,智能反馈控制,学习控制和循环控制,故障诊断及容错控制,生产调度管理控制,机器人自组织协调控制,以及控制系统的智能化设计等。另外,用智能方法解决实际控制问题的研究也越来越多,如决策论,带有专家系统的过程监控、预警及调度系统,人工神经网络控制系统,模糊逻辑控制系统,模式识别与特征提取等。当前在许多专业化学科与工程中,针对被控对象的复杂性,综合应用各种智能控制策略,力求达到最佳的控制效果。

智能控制理论及系统具有以下几个显著特点。

(1) 在分析和设计智能控制系统时,重点不在于传统控制器的分析和设计,而是在于智能控制机的模型设计。事实上,一些复杂系统当前根本无法用精确的数学模型进行描述,智能控制理论重点研究非数学模型的描述、符号和环境的识别、知识库和推理机的设计与开发。

(2) 智能控制的核心是高层控制,其任务在于对实际环境或过程进行组织、决策和规划,实现广义问题的求解。同时,智能控制又是一门边缘交叉学科,即人工智能、自动控制和运筹学等学科的交叉。

(3) 智能控制是一个新兴的研究和应用领域,发展前景广阔。随着人们对自身大脑机理的认识以及计算机技术的飞速发展,智能控制理论将不断得到完善,并在实际中发挥更重要的作用。

1.1.2 现代控制理论的基本概念

现代控制理论是一个广义的范畴,它是对近代自动控制理论与技术的概括。随着科学技术的飞速发展及多学科的相互渗透和交叉,现代控制理论的概念和覆盖面实际上也在不断拓宽。纵观社会发展的历史,人类的生产、工作以至生活等活动方式都经历了手动、机械化、电气化的过程,由低级向高级发展,而自动化则是其发展的更高形式。自动控制是推动一个国家现代化的重要技术手段,又是衡量一个国家现代化水平的重要标志。著名的科学家卡尔曼(R. E. Kalman)于1960年发表了《控制系统理论》等论文,引入状态空间法对控制系统进行分析,提出了能控性、能观测性、最佳调节器和卡尔曼滤波等重要概念,奠定了现代控制理论的基础。目前,现代控制理论体系已比较完善,但其在理论充实和应用方面仍一直处于十分活跃的发展状态。在不断揭示控制本质规律和相关数学理论的同时,现代控制理论也解决了宇宙航行、导弹制导、交通运输、工业生产和污染治理控制等领域的实际问题。它在电气、机械、化工、冶金、煤炭等工程领域以及在生物医学、企业管理和社会科学等领域也都得到了广泛应用,并取得了令人瞩目的成就。可以说,现代控制理论已渗透到各学科领域,解决了大量的复杂控制问题,倍受人们关注。

与经典控制理论相比,现代控制理论主要用来解决多输入多输出系统的问题,并且被控对象可以是线性或非线性系统、定常或时变系统。现代控制理论是基于时域的状态空间分析方法,主要实现系统最优控制的研究,使控制性能指标达到最优。现代控制理论(Modern Control Theory)的名称是在1960年召开的美国自动化大会上正式提出来的。在



自动控制领域内，对于现代控制理论比较公认的定义为：“现代控制理论是以庞德里亚金的极大值原理(最优控制问题存在的必要条件)、贝尔曼的动态规划和卡尔曼的滤波理论为基础，揭示了一些复杂对象控制的理论结果”。

经典控制理论主要用来解决单输入单输出问题，所涉及的系统大多是线性定常系统。如果将瓦特 1788 年前后发明的离心调速器作为最早的工业自动控制装置，那么到 20 世纪 60 年代形成完整和独立的经典控制理论，则经过了一百多年。瓦特的这项发明开创了近代自动调节装置应用的先河，对第一次工业革命及后来的自动控制理论的发展有着重要影响。这种以频域方法为基础的经典控制理论在解决一般的工业控制问题方面十分有效，它的广泛应用给人类带来了巨大的经济和社会效益，同时也导致了自动控制技术的诞生和发展。经典控制理论最大的成果之一是比例、积分、微分 PID 控制规律的产生，对于无时间延迟的单回路控制系统非常有效，在当前工业过程控制中仍被广泛应用。随着社会的进步、技术的发展以及被控对象复杂程度的提高，经典控制理论面临严重的挑战。特别是 20 世纪 60 年代兴起的航天技术，对控制提出了更加苛刻的条件。一方面，被控对象更加复杂，出现了非线性时变系统的控制问题，多输入多输出系统的分析和综合问题，系统本身或周围环境不确定因素的自适应控制问题，抗噪声干扰问题，以及使某种目标函数达到最优化的最优控制问题等。另一方面，对于上述复杂控制问题，应用经典控制理论很难解决。在这种背景下，现代控制理论应运而生。另外，计算机技术和现代数学的进步也为现代控制理论的发展提供了有力的支持。庞德里亚金的极大值原理、贝尔曼的动态规划和卡尔曼滤波的理论成果，奠定了现代控制理论的基础。

应当指出，现代控制理论的出现并非对经典控制理论的否定，相反是对其促进和发展。事实上，经典控制理论与现代控制理论在实际工程控制中，往往有互补作用，取长补短，发挥了各自的优势，使控制效果达到了最优。同时各自的理论在实践当中不断充实和发展。多输入多输出非线性时变复杂问题促使了经典控制理论向现代控制理论发展，而当前更加复杂化的受控对象以及对控制要求更加苛刻的问题，也使现代控制理论面临新的挑战，并由此催生了智能控制理论与技术的突起与发展。显然，这并未使现代控制理论失去其理论和应用价值，相反，工程实际需求的不断提高正在为现代控制理论的发展提供了进一步开拓的背景。自 20 世纪 60 年代以来控制理论得到了迅速发展，在很多工程实际控制过程中，现代控制理论解决了多输入多输出的系统问题，取代了用经典控制理论解决单输入单输出的系统问题。应用状态空间法揭示了系统的内在规律，实现控制系统在一定意义下的最佳化。当前工业领域的被控对象大多属于多输入多输出系统，例如工业机器人、数控机床、锻压控制系统、液压控制系统等，其控制问题特别适于用现代控制理论来解决。如何将现代控制理论与实际工程控制问题有机结合则是复杂控制系统的发展方向，也是一个国家制造业飞速发展的需要。

现代控制理论通常用于解决复杂的被控对象问题，经过几十年的发展，它不仅在航空航天技术上取得了惊人成就，而且在其他众多工程领域及非工程领域的应用都得到了巨大的成功。例如中国用于发射嫦娥一号绕月卫星的长征三号甲火箭，就应用了现代控制理论

中的自适应控制系统,可以在火箭分离前对有效载荷进行大姿态定向调整,并提供可调整的卫星起旋速率,对周围环境具有很强的抗干扰和适应性能力。而汽车制造过程中的激光焊接、轧钢过程的滚轮控制及石油化工提炼等过程很多都应用了最优控制技术。显然,随着控制理论与计算机技术的不断发展,现代控制理论内容将会不断得到进一步的提升,并在工程上得到更广泛的应用,创造更大的经济和社会效益。

事实上,经典控制理论、现代控制理论、智能控制理论的内容相互渗透,从某种意义上讲,它们之间没有严格的界限。特别是随着科学技术的发展以及各领域学科的不断渗透交叉,现代控制理论所涉及的研究范围越来越广,现代控制理论与智能控制理论的内容也相互覆盖,形成了多控制理论融合的新的控制方法。

1.2 现代控制理论的基本内容

现代控制理论已在工程各领域得到了成功应用,其理论涵盖面也非常广泛,主要内容包括以下几个方面。

1. 线性系统理论(Linear System Theory)

线性系统理论主要包括系统的数学模型、运动分析、稳定性分析、能控性与能观测性、状态反馈与观测器等问题。线性系统理论是现代控制理论的基础,也是现代控制理论中理论最完善以及应用最广泛的部分。线性系统理论和方法需要建立在系统的数学模型之上,但是与经典控制理论不同,线性系统理论采用的数学模型是系统状态方程。系统状态方程不但描述了系统的输入和输出关系,而且描述了系统内部状态变量随时间变化的关系。它研究线性系统在输入控制作用下系统状态运动过程的规律以及改变这些规律的可能性与措施,建立和揭示控制系统的结构性质、动态行为和性能之间的关系。一般而言,可以将线性系统理论归纳为线性系统定量分析理论、线性系统定性分析理论和线性系统综合理论。线性系统定量分析理论着重于建立并求解系统的状态方程组,分析系统的响应和性能。线性系统定性分析理论着重于对系统基本结构特性的研究,并对系统的能控性、能观测性和稳定性进行分析。线性系统综合理论则研究使系统的控制性能达到期望指标、实现最优化以及建立控制器的计算方法,从而解决和实现工程用控制器的理论问题。

2. 最优控制(Optimum Control)

最优控制是指在给定的约束条件和评价函数(目标函数)前提下,寻求使系统性能指标最优的控制规律。其中,庞德里亚金极大值原理和贝尔曼的动态规划是最重要的两种方法。最优控制理论是设计最优控制系统的理论基础,也是现代控制理论的核心内容之一。它主要研究被控系统在给定性能指标时,实现最优的控制规律和方法。目前,最优控制理论已应用于众多工程领域,如多台电动机协调运转的最优控制、窑炉燃烧过程最优控制、

焊接机器人的最优路径控制及城市道路的最优控制等。在解决最优控制问题中,除了庞特里亚金的极大值原理和贝尔曼的动态规划两种重要方法外,用“广义”梯度描述的优化方法以及动态规划的哈密顿—雅克比—贝尔曼方程求解的新方法正在形成,并用于非线性系统的优化控制。最优控制的应用不仅在一般的工程技术领域,而且也深入到工业设计、生产管理、经济管理、资源规划和生态保护等领域。各个领域所遇到的优化问题,只要能够看做是一个多步决策过程的最优化问题,一般都能将其转化并用离散型动态规划或最大值原理来求解。

3. 系统辨识(System Identification)

对于大多数控制问题而言,在制定有效的控制算法前首先要建立被控对象的数学模型,这样才能够有的放矢。但很多被控对象比较复杂,往往不能通过解析的方法直接建立其数学模型,而需要通过试验或进行数据分析来估计出被控对象的数学模型及参数,这个过程即为系统辨识问题。

系统辨识也即数学建模问题,就是建立系统的数学模型,使其能正确反映系统的输入与输出之间的基本关系。它是对系统进行分析和控制的前提,直接决定着控制的成功与否。所谓“知己知彼,百战不殆”,在设计一个控制器的过程中,系统的被控对象就相当于“彼”,控制器就相当于“己”。由于系统比较复杂,不能通过解析的方法直接建模,需要在系统输入、输出的试验数据或运行数据的基础上,从某类给定的模型中,确定一个与被控系统本质特征等价的模型。如果确定了模型的结构,则仅需确定模型的参数,这称为参数估计问题。如果模型的结构和参数需要同时确定,这就是系统辨识问题。系统辨识已经在自适应控制、优化控制、预测控制和故障诊断等得到了应用。现代控制理论中的建模核心问题是所建立的模型必须能够正确反映系统输入和输出之间的关系。在实际工程应用当中,建模过程一般是先用机理分析的方法得到模型结构,再对模型的参数和其他缺乏先验知识的部分进行实测辨识。由于研究对象越来越复杂,许多问题已难以用定量模型来描述,因而出现了很多新的建模方法,例如具有不同宏、微观层次及混沌等复杂动态行为的非线性系统,离散事件动态系统,由经验规则、专家知识和模糊关系建立的知识库等定性模型。对于涉及社会和经济等复杂因素的人类活动系统,则必须采用定性定量相结合的建模思想。系统辨识理论不但广泛用于工业、农业和交通等工程控制系统中,而且还应用于经济学、社会学、生物医学和生态学等诸多领域。

系统模式识别技术与系统辨识有着千丝万缕的联系,模式识别是通过对系统输入、输出信号的分析 and 处理,从而对系统的模型或状态进行分类。它同样可以实现设备的故障诊断,也可以通过输出信号的分析判断被控对象当前的类别和状态。

4. 最优估计(Optimal Estimation)

当系统有随机干扰时,可通过对系统数学模型输入和输出数据的测量,利用统计方法对系统的状态进行估计(滤波),使系统受噪声干扰的影响最低,为达到最优控制创造前提



条件。其中,卡尔曼滤波是最具代表性的系统状态估计方法,在很多领域得到了广泛应用。另外,维纳滤波理论在现代控制理论中也有十分重要的地位,其主要强调了统计方法的意义。维纳滤波指的是当系统受到环境噪声或负载干扰时,其不确定性可以用概率和统计的方法进行描述和处理。在系统数学模型已经建立的基础上,对含有噪声的系统输入和输出量进行量测,通过统计数学方法对量测数据分析,获得有用信号的最优估计。与维纳滤波理论强调对平稳随机过程系统按照均方意义的最优滤波不同,卡尔曼滤波理论采用状态空间法设计最优滤波器,且适用于非稳定过程,已在工业、军事等很多领域中得到广泛应用,成为现代控制理论的重要内容。

5. 自适应控制(Adaptive Control)

自适应控制指的是控制系统能够适应内部参数变化和外部环境的变化,自动调整控制作用,减小干扰影响,使系统在被控对象动态特性变化(不确定性)的情况下达到一定意义下的最优或满足对这一类系统的控制要求。关于自适应控制系统的分析与设计的理论,则称为自适应控制理论。自适应控制研究的问题主要包括:认识被控对象的动态特性(辨识),构造能够适应系统动态特性的控制器,设计可以实现这种控制器的算法。目前,自适应控制理论正朝着自学习、自组织及智能控制等方向发展,并已在过程控制、化工、冶金和电力系统自动化、船舶驾驶、机器人控制等领域得到了成功的应用。应当看到,与经典控制理论一样,精确的数学模型是现代控制理论分析、综合和设计的基础。随着被控对象的复杂性、不确定性,以及环境的复杂性、控制任务的多目标和时变性,传统的基于精确数学模型的控制理论也受到了很大的局限。自适应控制理论也必然与智能控制理论日益融合,以适应复杂被控对象的控制要求。可以预料,自适应控制将会更加广泛地应用到制造业和人类生活的各个方面。

另外一种适合于不确定被控对象的控制方法为鲁棒控制(Robust Control),这类控制问题是针对系统中存在一定范围的不确定,设计所谓的鲁棒控制器,使得闭环控制系统在保持稳定的同时,达到一定的动态性能,具有较高的抗干扰能力,满足控制要求。

6. 人工神经网络控制(Artificial Neural Network Control)

人工神经网络控制系统利用大量的处理单元(称为神经元),广泛连接组成复杂网络,模拟人类大脑神经网络结构和行为。它属于智能控制技术的范畴,对于解决非线性系统控制和复杂系统的模式识别具有较好的效果。目前人工神经网络控制系统广泛应用于模式识别、设备故障诊断、图像目标识别、工业和民用产品的智能控制等。

7. 模糊控制(Fuzzy Control)

对复杂的系统建立一种语言分析的数学模型,以模糊数学为基础,适用于难以获取被控对象精确数学模型的场合。模糊控制技术已在工业和民用领域得到广泛的应用。特别是