



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

Modern Control Theory

现代控制理论

赵光宙 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

现代控制理论

赵光宙 编著
郑大钟 主审



机械工业出版社

本书介绍现代控制理论最基本的知识和方法,内容以线性系统理论基本知识为基础,以系统状态空间描述、线性系统结构特性分析、线性定常系统状态反馈综合为重点,并适当介绍了非线性系统分析及最优控制、最优估计的初步知识。本书力求基本知识结构的完整,注重知识内容与物理概念的结合,并关注理论的工程应用,还融入了 Matlab 及 Simulink 的应用。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

本书较适用于“研究主导型”及“工程研究应用型”自动化类专业本科生,也可供其他相关专业本科生或研究生及相关领域的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/赵光宙编著. —北京:机械工业出版社,2009.9
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-27831-3

I. 现… II. 赵… III. 现代控制理论—高等学校—教材 IV. 0231

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第125316号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:王保家 王琪

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:王洪流 责任印制:杨曦

北京富生印刷厂印刷

2009年12月第1版第1次印刷

184mm×260mm·26印张·643千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27831-3

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪樵生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教育委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这类教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. **适用性**：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. **示范性**：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. **创新性**：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. **权威性**：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富，组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有

力保障。

这套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

这套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈万时 郑大钟

前 言

自动控制理论是自动化科学与自动控制技术的理论基础，而作为第二代自动控制理论的现代控制理论在航天航空、先进武器、先进工业生产控制等领域都起到了重要的作用，已经成为自动化类专业本科生和研究生的必修内容。

本书比较适合注重学科性的高等学校自动化类专业本科生学习，这类专业主要指教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会所完成的《自动化学科专业发展战略研究报告》和《自动化指导性专业规范》对我国自动化专业分类中的“研究主导型”及“工程研究应用型”自动化类专业。这类自动化专业的本科生毕业后大部分会进一步深造或从事科学研究、工程设计等工作。

现代控制理论的内容十分丰富，涉及范围很广，包含了诸多分支，不可能在有限的教学学时及教材篇幅中包罗一切。为适应上述学生毕业后工作或深造的需要，本书重点介绍现代控制理论的一些最基本的内容和方法，即以线性系统理论的基本内容为基础，以系统的状态空间描述、线性系统的结构特性分析、线性定常系统的状态反馈综合为主要内容，适当介绍一些非线性系统分析及最优控制、最优估计的内容，这些内容都是在自动化领域进行科学研究及进一步学习深造的基础。本书也可作为其他相关专业本科生或研究生学习之用，还可供自动化及相关领域的工程技术人员参考。当然，选用本书时，可以根据各学校 and 各个读者的特点及需求，对其中内容进行适当选择。

为适应教学改革及自动化学科专业人才培养的新形势，在本书编写中，作者力求形成以下特点：

1) 尽量保证基本知识结构完整，对重要结论给出适当推导或说明，便于学生对重要内容的科学化理解和系统化掌握。

2) 注重知识内容与物理概念、物理背景的结合，避免因现代控制理论比较强调数学描述及处理而陷入抽象枯燥的数学怪圈。

3) 现代控制理论的应用对象是实际工程问题，因此初学者往往会面临如何将理论付诸实践的难题。所以，本书除了在各章节中注重基本内容的工程背景外，还专门增加了第七章来介绍现代控制理论的实际应用。

4) 鉴于 Matlab 的控制系统工具箱及 Simulink 仿真软件包已经成为控制系统建模、分析、设计的重要工具，本书在每章都引入了适合该章内容的 Matlab 或 Simulink 工具，用于一些例题的解答及应用实例的分析、设计。

5) 本书中每章都提供了思考题、练习题及上机练习题，便于读者加深对基本知识的理解、基本问题的解决，以及对控制系统计算机辅助分析和设计能力的提高。

本书由赵光宙编著，清华大学郑大钟教授主审。郑大钟教授认真地审阅了书稿，提出了

许多建设性的意见，作者在此深表感谢。作者还要感谢裘君博士等在图表绘制等方面所做出的辛勤劳动，也要感谢机械工业出版社在本书出版过程中的支持、帮助。本书在编写过程中，参阅了国内外许多学者的有关教材和著作，在此一并表示感谢。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

由于学识所限，本书在内容选取、知识阐述、文字表达等方面的不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

序	
前言	
绪论	1
一、控制理论的发展回顾	1
二、现代控制理论的主要内容	3
三、Matlab 控制系统工具箱简介	4
四、关于本书	6
思考题	6
第一章 动态系统的状态空间描述	7
第一节 状态空间描述的基本概念	7
一、状态和状态空间	8
二、系统的状态空间表达式	9
三、系统状态空间描述的图示形式	11
四、稳态方程和偏差量方程	12
第二节 状态空间表达式的建立	13
一、从系统的运行机理出发建立状态空间表达式	13
二、由经典控制理论中的系统运动方程式建立状态空间表达式	17
三、由系统结构图建立状态空间表达式	30
第三节 由系统状态空间表达式求系统输入输出描述	32
一、单输入单输出的情况	32
二、多输入多输出的情况	34
三、组合系统	36
第四节 状态空间的线性变换	39
一、状态变量的线性变换	39
二、系统特征结构的不变性	40
三、将系统的一般状态空间描述变换为特征值规范型	41
第五节 离散时间系统的状态空间描述	54
一、离散系统的状态空间表达式	54
二、由差分方程或脉冲传递函数化为状态空间表达式	55
三、由状态空间表达式求脉冲传递函数矩阵	56
第六节 应用 Matlab 的模型处理	57
一、系统模型的表示	57
二、传递函数模型与状态空间模型的相互转换	61
三、线性变换	64
四、组合系统的模型	68
本章要点	70
思考题	71
练习题	71
上机练习题	75
第二章 线性动态系统的运动分析	77
第一节 线性定常系统的运动分析	77
一、线性定常系统齐次状态方程的解	77
二、状态转移矩阵的性质	78
三、状态运动模态	81
四、矩阵指数 e^{At} 的计算方法	85
五、线性定常系统非齐次状态方程的解	89
第二节 线性时变系统的运动分析	92
一、线性时变齐次状态方程的解	92
二、线性时变系统状态转移矩阵的性质	96
三、线性时变非齐次状态方程的解	96
第三节 线性离散系统的运动分析	98
一、离散系统状态方程的解	98
二、线性连续系统的离散化	102
第四节 应用 Matlab 的系统运动分析	106
一、线性定常连续系统的运动分析	106
二、连续系统的离散化	111
三、线性定常离散系统的运动分析	112
本章要点	116
思考题	116
练习题	116
上机练习题	119

第三章 动态系统的稳定性及李雅普诺夫分析方法	121	三、能控性与能观性的对偶关系	168
第一节 稳定性基本概念	121	四、定常系统能观性判据	170
一、外部稳定性与内部稳定性	121	第四节 线性离散系统的能控性与能观性	177
二、李雅普诺夫稳定性基本概念	122	一、能控性	177
第二节 李雅普诺夫稳定性分析方法	125	二、能观性	181
一、李雅普诺夫第一法	125	三、连续系统离散化后的能控性和能观性	182
二、李雅普诺夫第二法	126	第五节 线性定常系统的能控规范型与能观规范型	183
第三节 线性系统的李雅普诺夫稳定性分析方法	131	一、单输入单输出系统	184
一、定常连续系统	131	二、多输入多输出系统	192
二、时变连续系统	134	第六节 线性系统的结构分解	205
三、定常离散系统	135	一、系统能控性、能观性在线性变换下的属性	205
四、时变离散系统	137	二、按能控性分解	206
第四节 非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析方法	138	三、按能观性分解	209
一、克拉索夫斯基法	138	四、系统结构的规范分解	211
二、变量梯度法	141	五、线性系统的结构分解与传递函数矩阵	214
第五节 应用 Matlab 的系统稳定性分析	145	第七节 能控性、能观性与传递函数(矩阵)的关系	215
一、基于李雅普诺夫第一法的稳定性分析	145	一、单输入单输出系统	215
二、基于李雅普诺夫第二法的稳定性分析	146	二、多输入多输出系统	218
本章要点	147	三、能控、能观系统外部稳定性与内部稳定性的等价	221
思考题	148	第八节 应用 Matlab 的系统能控性、能观性分析	221
练习题	148	一、系统能控性、能观性判别	221
上机练习题	150	二、线性系统的结构分解	224
第四章 线性系统的能控性与能观性分析	152	本章要点	226
第一节 系统能控性和能观性的直观示例	152	思考题	227
第二节 连续系统能控性及其判据	154	练习题	227
一、能控性定义	154	上机练习题	231
二、能控性基本判据	155	第五章 线性反馈控制系统的综合	233
三、定常系统能控性判据	157	第一节 状态反馈控制系统	234
四、定常系统的输出能控性	164	一、状态反馈控制系统的构成	234
第三节 连续系统能观性及其判据	165	二、状态反馈控制系统极点任意配置的条件	235
一、能观性定义	166	三、单输入系统极点配置算法	236
二、能观性基本判据	167		

四、多输入系统极点配置算法	241	四、扰动观测器	321
五、关于极点配置的几点说明	250	第二节 引入观测器的状态反馈控制	
六、状态反馈对系统能控性和能观性的		系统	322
影响	251	一、系统的构成	322
第二节 输出反馈控制系统	252	二、系统的特性	323
一、输出反馈控制系统的构成	252	三、状态重构反馈与带补偿器输出反馈的	
二、输出反馈控制系统的极点配置	253	等价	328
三、输出反馈对系统能控性和能观性的		第三节 状态最优估计	329
影响	254	一、状态估计问题的描述	329
第三节 系统镇定问题	255	二、最小二乘估计	330
一、状态反馈镇定	255	三、线性最小方差估计	333
二、输出反馈镇定	257	四、卡尔曼滤波	335
第四节 跟踪控制与扰动抑制问题	259	五、随机线性系统的最优控制	347
一、问题的描述	259	第四节 应用 Matlab 的状态观测及	
二、具有扰动抑制的渐近跟踪控制		状态估计	350
系统	260	一、状态观测器设计	350
三、具有输入变换的跟踪控制	266	二、应用 Matlab 的状态估计	356
第五节 解耦控制问题	268	本章要点	360
一、问题的描述	268	思考题	360
二、串联补偿解耦	269	练习题	360
三、状态反馈动态解耦	271	上机练习题	363
四、状态反馈静态解耦	279	第七章 现代控制理论的应用举例	365
第六节 线性二次型最优控制	282	第一节 现代控制理论实际应用中的	
一、线性二次型最优控制问题	282	一些问题	365
二、最优状态调节器	284	一、系统数学模型的建立	365
三、最优输出调节器	293	二、系统分析	368
四、最优输出跟踪器	296	三、系统综合与设计	368
第七节 应用 Matlab 的线性反馈控制		第二节 单倒立摆控制系统	370
系统综合	301	一、系统的数学模型	370
一、状态反馈极点配置	301	二、系统的结构特性分析	373
二、求解线性二次型最优控制	302	三、状态反馈控制系统设计	373
本章要点	305	四、具有状态观测器的状态反馈控制	
思考题	305	系统设计	375
练习题	306	五、最优状态调节器设计	379
上机练习题	309	第三节 桥式吊车控制系统	381
第六章 状态观测与状态最优估计	311	一、系统的数学模型	382
第一节 状态重构与状态观测器	311	二、系统的结构特性分析	384
一、状态重构问题	311	三、状态反馈跟踪控制系统设计	386
二、全维状态观测器	312	四、具有状态观测器的状态反馈跟踪控制	
三、降维状态观测器	317	系统设计	389

五、具有扰动抑制的渐近跟踪控制		本章要点	401
系统设计	393	思考题	402
六、最优输出跟踪器设计	399	上机练习题	402
七、模型的进一步简化	401	参考文献	403

绪 论

一、控制理论的发展回顾

“自动化”是现代化的显著标志之一，它可以理解为一个设备、一个系统或者一个过程采用一系列特定的技术，在没有人参与或尽量少人参与的情况下实现预期目标的运行过程或运行状态。其中所采用的技术就是自动控制技术，而这一技术的理论基础是自动控制理论。

自动控制系统是指能够实现“自动化”任务的设备，它是工程技术领域的人造系统。通常自动控制系统是一个动态系统，即系统的输出不仅与同一时刻的输入有关，还与该时刻以前的积累有关。自动控制系统一般由控制器和控制对象组成，为了实现自动控制的目的，控制器要遵循一定的控制规律，这就是自动控制理论所研究和阐述的内容。自动控制理论从三个方面对自动控制系统进行研究和阐述：

1. 系统的模型 系统是一个广义的概念，它无处不在、无时不有，大到宇宙、小到一个原子都可以看做系统。系统物理形态的多样性要求在研究具体系统时能抛开它的物理属性，而用一种抽象化的表示，即称为系统模型的形式表示出来。通常，可以把一个动态系统所处的状态分为运动和静止两种，运动状态是指系统中变化的量尚处于变化过程的状态，而静止状态是指系统中的变量已达到某一定值并不再变化的状态。各种系统的动态和静态都会满足一定的规律，如果这些规律可以用数学方程式的形式表示出来，就得到系统的数学模型。从形式化的角度来看，系统的数学模型只描述了系统中各个变量之间的相互关系，而完全不再理会它们的物理特征，如一个机械—力学系统和一个电网络系统可以用同一个数学方程式描述。自动控制系统中较受关注的是系统的动态，所以描述系统动态的动态方程是控制理论研究的主要对象。

2. 系统的分析 已知一个自动控制系统的结构组成，即给出了表示系统运动规律的数学模型，研究这个自动控制系统具有什么样的特性，是自动控制理论所研究的第二方面的问题，即系统的分析。

3. 控制系统的综合 已知对控制系统性能指标的要求，确定控制系统应具有怎样的结构组成才能满足该要求，这是系统分析的逆命题。因为自动控制系统中被控对象、测量环节等都是确定的，可变的只有控制环节，所以控制系统所应具有的结构组成只能落实到控制环节中实现。这时也可以理解为控制器应采用什么样的控制规律去满足控制系统的性能指标要求。这就是控制器的设计问题，它是自动控制系统设计的基础。这里要说明的是，自动控制理论所关注的是控制器应具有什么样的形式（主要指应具有什么样的数学描述），而不关心它的具体物理实现，例如采用什么样的电路，由哪些元器件组成，这些元器件如何布排等，所以称之为“综合”比“设计”更合适。

尽管自动控制技术的应用可以追溯到公元前我国古代指南车的发明和工业革命时期瓦特蒸汽机中离心式调速器的使用等方面，但是自动控制理论作为一门系统的技术科学的建立和完善还是 20 世纪中期的事情。1922 年，迈纳斯基（N. Minorsky）研制出了船舶操纵自动控

制器，并在发表的论文《关于船舶自动操舵的稳定性》中讨论了从描述系统的微分方程中确定系统稳定性的问题；1932年，奈奎斯特（H. Nyquist）提出了根据对稳态正弦输入信号的开环响应确定闭环系统稳定性的判据；1940年，博德（H. Bode）进一步提出了更适合工程应用的频域响应对数坐标系描述方法。这些工作和成果奠定了控制系统频率法分析和综合的基础。1948年，伊万思（W. R. Evans）提出并完善了表明系统某些参数变化与闭环系统动态特性关系的根轨迹法。这样，以频率法和根轨迹法为基本特征的自动控制理论（后来通常把这部分内容称之为经典控制理论）得以建立。它在（复）频域方便地、工程化地分析和综合自动控制系统，特别是很好地解决了反馈控制系统的稳定性问题，适应了当时对自动化的需求。所以，它在第二次世界大战期间的武器和通信系统及以后的工业生产设备中得到了广泛的应用，而且至今仍大量地应用在一些相对简单的控制系统分析和设计中。

但是，经典控制理论也存在着明显的不足之处：

1) 它描述系统的数学模型是由高阶线性常微分方程演变而来的传递函数，所以仅适合于单变量的（一个输入一个输出）、线性的、定常的系统。

2) 它的输入—输出的系统描述方式不关心系统内部的运行及变量的变化，本质上忽略了系统结构的内在特性。

3) 在系统综合中所采用的工程性方法，对设计者的经验有一定的依赖性，不具有最优的控制性能。

20世纪五、六十年代，航空航天技术蓬勃兴起，多变量系统（多输入、多输出）、非线性系统、变参数系统等一些复杂系统的优化控制，随机干扰的处理等问题摆在控制科学家的面前，而这一时期，现代数学的发展为这些复杂系统的定量化研究奠定了数学基础，数字电子计算机的出现和飞速发展又为这些复杂系统的分析和控制提供了有力工具。于是，控制理论又进入一个蓬勃发展的时期，并在1960年前后取得了重大突破和创新。在此期间，庞德里亚金（L. S. Pontryagin）于1956年提出的极大值原理和贝尔曼（R. Bellman）于1957年提出的动态规划法为系统的最优控制提供了基本原理和方法；特别是之后的卡尔曼（R. E. Kalman）系统地引入了状态空间描述法，并提出了关于系统的能控性、能观性概念和新的滤波理论，他于1960年发表的著名论文《控制系统的一般理论》及随后与布西（R. S. Bucy）合作发表的论文《线性过滤和预测问题的新结果》，标志着控制理论进入了一个崭新的历史阶段，即建立了现代控制理论的新体系。现代控制理论以能揭示系统内部状态特性的状态空间描述方法替代了传统的输入—输出外部描述方法，将系统的分析和综合直接在时间域内进行。原则上，它可同时适合于单输入单输出和多输入单输出系统、线性和非线性系统、定常和时变系统及连续和离散系统，并通过系统内部稳定性、能控性、能观性的分析，真正揭示了系统的内部基本特性。它通过以状态反馈为主要特征的系统综合，实现在一定意义下的系统优化控制。因此，现代控制理论的基本特点在于用“系统内部研究”代替了经典控制理论的“系统外部研究”，从而较大程度上克服了工程性的影响，使系统的研究建立在严格的理论基础。

20世纪70年代，在状态空间方法蓬勃发展的同时，以罗森布劳克（H. H. Rosenbrock）为代表的学者致力于将频域方法推广到多变量系统，提出了一整套关于多输入多输出系统频域分析和综合的方法和技术。这种多变量频域方法的主要研究对象是线性定常多变量系统，可以视为现代控制理论在频域的推广。

现代控制理论在航空、航天、制导和军事武器等控制领域中取得了巨大成功，在工业生产过程控制中也得到了一定的应用，但是它的致命弱点是系统分析和控制规律的确定都严格地建立在系统精确的数学模型基础之上，并且由此设计出来的控制器往往过于复杂。这一时期以来，自动化科学与技术也面临着来源于全球经济发展给自动化领域提出新需求的极大挑战。大规模工业自动化的要求，使自动化系统从局部自动化走向综合自动化，自动控制问题不再局限于一个明确的被控量，而延伸至一个设备、一个工段、一个车间甚至一个工厂的全盘自动化，这时，自动化科学和技术所面对的是一个复杂的系统，其复杂性表现为系统结构的复杂性（包括系统模型的不确定性、强烈的非线性、变量过多、维数太大等），系统任务的复杂性（除稳定性、平稳性、快速性、精确性等控制性能指标外，还有高产量、低消耗等指标，同时还要求系统能有监控、预警等功能，并能够完成协调、调度等任务），以及系统运行环境的复杂性（考虑外部环境对开放的控制系统的制约和影响）。面对以上问题，20世纪70年代开始，控制理论向着“广度”和“深度”两个方面发展和开拓，前者形成了所谓的“大系统理论”，后者则产生了至今尚处于形成和发展之中的“智能控制技术”。

大系统理论所针对的对象是规模庞大、结构复杂的大系统、巨系统，例如大型钢铁企业的自动化、大电网的调度及管理自动化等。大系统理论的基础是现代控制理论，为了解决大系统、巨系统的“维数灾难”（变量数量的庞大），将一个包含巨大维数的系统分解为只包含有限维数的多个子系统，每个子系统仍然按现代控制理论进行分析和综合，各个子系统之间由一个“协调控制器”进行协调控制，以达到整体系统优化控制的目的。大系统理论应用控制和信息的观点，研究各种大系统的结构方案及总体设计中的分解方法和协调等问题。

智能控制技术针对的是难以建立精确、有效的数学模型，从而无法应用经典控制理论或现代控制理论进行分析、综合的复杂对象。对于这些对象，一些有经验的专家或熟练工人能给出有效的控制，他们不去推导对象的数学模型和推算控制算法，而是凭借他们对系统状态的观察和所掌握的经验进行推理。智能控制以人工智能技术为基础，模仿人类智能活动在控制、信息处理中的行为过程，使人的经验知识与思维方式参与其中，从而对系统实现有效的控制。智能控制一经出现就表现出了强大的生命力，从20世纪80年代以来，智能控制从理论、方法、技术直至应用等方面都得到了广泛的研究，逐渐形成了一些理论和方法，并被许多人认为可能是继经典控制理论、现代控制理论之后，控制理论发展的又一个里程碑。但是智能控制是一门新兴的、尚不成熟的理论和技术，现有的成果大多是从各有关学科出发，与其他学科相互交叉、渗透和融合的结果。也就是说，智能控制还未形成系统化的理论体系，它还只是由一些相对独立的理论、方法和技术所构成，其中模糊逻辑控制、人工神经网络控制、专家控制是比较成熟并且应用最广的三个分支。

随着信息科学、生命科学等新兴科学技术的发展以及对复杂系统分析与控制需求的提高，控制理论不断面临着新的挑战，当然这种挑战也给控制理论的创新和发展带来了无穷的动力。

二、现代控制理论的主要内容

现代控制理论是关于控制系统状态的分析 and 综合的理论，它从系统建模、系统分析、系统优化控制，一直到系统对随机干扰的扼制，所包含的内容非常全面、丰富。概括起来，它主要由以下几个分支组成。

1. 线性多变量系统理论 这是现代控制理论中最基础、最成熟、应用最广泛的分支。其内容包括系统的状态空间描述方法, 动态系统在状态空间的定量分析(即研究系统状态、系统输出在不同输入信号下的动态响应)和定性分析(主要有内部稳定性分析和系统的能控性、能观性分析), 以状态反馈为主要手段、以系统极点配置为主要目的的系统基本综合方法等。它通过系统的能控性、能观性两个概念的引入, 充分揭示了系统的内部结构特性。李雅普诺夫稳定性理论虽然早在 1892 年就已提出, 但由于在现代控制理论出现以前控制界关注的对象主要是线性定常系统, 而对于这类系统应用劳斯判据、奈奎斯特判据等更为方便、有效, 只有在研究对象扩大到多变量的、非线性的、时变的等系统时, 具有普适性的李雅普诺夫稳定性理论才展示出了显著的优势, 并在最优控制、自适应控制及滤波器的设计中得到有效的应用, 所以通常也将该理论作为现代控制理论的一个重要组成部分。

2. 最优控制理论 这是现代控制理论的核心内容, 优化控制正是现代控制所追求的目标。所谓最优控制指的是在一系列限制条件下, 寻求使系统性能在一定意义下为最优的控制规律。所以, 最优控制实质上就是在给定系统的约束条件和性能指标评价函数情况下的系统综合问题。其中, 庞德里亚金的“极大值原理”和贝尔曼的“动态规划法”是解决这一问题的两种最重要的方法, 它们以不同的形式给出了问题的解决方案。

3. 最优估计理论 最优估计理论也称最优滤波理论。在被控系统遭受随机因素的作用或者状态量的测量受到随机噪声污染的情况下, 往往得不到系统全部状态的精确信息, 使得以系统状态为基础的控制规律难以实现。最优估计理论研究的是从被随机噪声污染的观测数据中确定系统状态量的方法。针对随机噪声, 要获得按某种判别规则为最优的状态信息, 通常采用统计的方法。卡尔曼滤波是用状态空间法设计的按均方差最小为判别规则的滤波算法, 它采用的递推算法利用前一时刻的状态估计值和新的观测值来获得状态估计值, 这样不仅提高了估计的实时性, 也使它能跟踪信号统计特性的非平稳变化, 适用于非平稳过程。卡尔曼滤波及其扩展算法是最优估计理论中最主要的方法。

4. 系统辨识 通过分析系统动态过程的物理机理可以建立系统的数学模型, 但是当系统较复杂或系统的物理机理不甚明确时, 这种解析法建模不再适用, 而应采用实验研究的方法即系统辨识方法。系统辨识方法是根据系统的输入输出试验数据, 在一定的准则下, 建立一个与所研究系统本质特性等价的数学模型, 包括模型的结构和参数。如果系统模型的结构是明确的, 仅需确定其参数, 则为参数估计问题。

除了上述内容外, 在这些分支基础上拓展起来的如自适应控制、鲁棒控制、分布参数系统控制、随机系统控制、非线性系统控制等也都可以列入现代控制理论的框架范围。

三、Matlab 控制系统工具箱简介

Matlab (Matrix Laboratory, 矩阵实验室) 是 Math Works 公司于 20 世纪 80 年代推出的高性能数值计算软件。经过二十多年的不断开发和扩充, 该软件的版本已经升级到 Matlab7. x, 由最初的主要用于求解线性方程和特征值问题, 发展为包含有几十个工具箱、功能非常强大的实时工程计算软件, 被广泛地用于各个领域。下面罗列一些该软件包含的工具箱: 宇航、生物信息、通信、系统控制、曲线拟合、数据库、经济计量、滤波器设计、财政金融、模糊逻辑、优化、并行计算、偏微分方程、模型预测控制、神经网络、射频、鲁棒控制、信号处理、矩阵不等式、电力系统仿真、参数估计、统计、符号数学、系统辨识、非线性控制设

计、系统测试、虚拟现实、小波等，其涉及的学科及领域之宽可见一斑。此外，由于它的良好的可扩展性，任何人都可以将自己的工作成果生成 Matlab 工具箱，所以还有成百上千个各式各样的 Matlab 工具箱放在 Internet 上，供大家使用。Matlab 之所以能得到如此大的发展和应用，在于它具有一系列重要的特性，其中最主要的特点有：

1. 强大的计算功能 Matlab 不仅能方便地进行向量、矩阵、复数、微积分运算，还能进行求解代数方程、常微分方程，插值与拟合，更有特色的是还具有符号计算功能。

2. 高的编程效率 Matlab 的基本运算要素是矩阵，数组的操作如同单个数据操作一样简单方便，给运算编程工作带来方便。此外，Matlab 提供了丰富的库函数供直接调用，也极大地提高了编程效率。

3. 友好的用户界面 Matlab 把程序的编辑、编译、连接、执行、调试等多个步骤融为一体，并具有良好的交互功能。它的语法规则贴近人的思维方式，用 Matlab 编写程序，犹如在一张演算纸上书写解题过程，使用十分方便。

此外，Matlab 提供的 help 浏览器使用户可以查找和查看 Matlab 大家族里所有函数的功能和用法，还可以查询函数的路径及子目录的函数集合，从而以最快的速度给出任何帮助信息。

4. 方便的图形功能 Matlab 包含了一系列绘图函数，适用于线性、对数、极坐标等不同的坐标系。它还提供了具有各种高级功能的图形函数，可实现二维及三维图形的绘制、平面或空间图形的填充、图形的缩放等功能。

5. 强大的扩充能力 Matlab 除内部函数外，所有的基本函数和工具箱库函数都是可读、可改的源文件，用户可以对它们按需要进行修改，也可以自行建立新的库函数。这些被修改或新建的函数可以和 Matlab 提供的库函数一样保存、调用，还可以根据需要构成新的工具箱。

此外，通过建立 Mex 文件形式，Matlab 还可以方便地调用其他语言（如 Basic、Fortran、C 语言等）编写的子程序，实现混合编程。

6. 方便的智能化使用 Matlab 可以自动选择最佳的绘图坐标、按计算精度自动选择数值积分的步长、自动检测并提示程序错误等，这些智能化的功能极大地方便了用户的使用。

总之，Matlab 易学易用，不要求使用者具有很高的数学及程序语言知识，也不需要使用者详细了解具体算法及编程技巧。这些优点使 Matlab 成为当今科学计算、工程设计、辅助教学的有力工具。

控制系统工具箱（Control System Toolbox）是 Matlab 的重要组成部分，是 Matlab 诸多工具箱中最早开发的工具箱之一，它集成了在 Matlab 环境下对线性定常连续系统和离散系统的建模、分析、综合、设计及仿真等功能，包含了经典控制理论和现代控制理论中关于线性系统的大部分内容，它与其他相关的工具箱（如系统辨识、非线性控制设计、模型预测控制、模糊逻辑、鲁棒控制、神经网络等）一起已经成为控制理论研究及工程应用不可或缺的有力工具。本书主要应用其中解决现代控制理论建模、分析、综合等问题的一部分内容，作为辅助教学的一种手段。

Simulink 是 Matlab 提供的交互式仿真工具，用于在 Matlab 环境下对动态系统的建模、分析和仿真，适用于线性、非线性、连续、离散等多种系统。它提供了非常友好的图形用户界面（Graphical User Interface, GUI），只需用鼠标拖动方式就能快速地建立起系统的框图模型，就像在纸上绘图一样简单。Simulink 的仿真过程是交互的，可以很容易地随时修改图形和参数，并立即看到仿真结果。它能充分利用 Matlab 丰富的资源，并与 Matlab、C 语言程