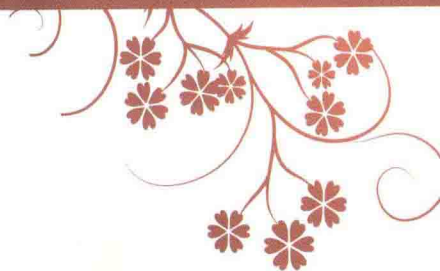


21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



现代控制理论

(第2版)

张莲 胡晓倩 彭滔 余成波 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



现代控制理论

(第2版)

张莲 胡晓倩 彭滔 余成波 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本适应 21 世纪教学需要的阐述现代控制理论基础知识的教材。本书包含了现代控制理论基础的主要理论和方法,全书共分 7 章,着重讲述了状态空间描述的建立、系统定量分析(状态方程的解)、系统的定性分析(能控性,能观性,李雅普诺夫稳定性)、系统的综合(状态反馈与状态观测器设计)以及最优控制的 3 种基本方法(变分法、最小值原理、动态规划法),并在保证理论知识体系结构完整的前提下,融入 MATLAB 在现代控制理论中的应用。全书结构清晰,便于读者从整体上掌握现代控制理论的基本内容。

本书由浅入深,论证与实例配合紧密,富有启发性。全书各章节之间内容紧密衔接,与经典控制理论中有关内容的联系密切,可读性好,便于课堂教学与自学。主要算法给出了对应的应用 MATLAB 求解的方法,使读者通过本书的学习,既能打下扎实的理论基础,又能掌握应用 MATLAB 对控制系统进行分析与设计技能。每章末有一定数量的习题与 MATLAB 实验题,主要用以检验对基本概念的理解和训练对分析以及对设计方法的使用。

本书既可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化等专业本科和非自动化专业研究生教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

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

现代控制理论/张莲等编著. —2 版. —北京:清华大学出版社,2016

(21 世纪高等学校规划教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-44059-8

I. ①现… II. ①张… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 128013 号

责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:杨 艳

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:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:24.75 字 数:601 千字

版 次:2008 年 1 月第 1 版 2016 年 11 月第 2 版 印 次:2016 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00 元

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,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,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投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和教学方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

- (1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。
- (2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。
- (3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。
- (4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。
- (5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。
- (6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。
- (7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。
- (8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

第一版前言

现代控制理论是在自动控制、电气工程、信息工程以及计算机技术学科发展基础上建立起来的一门理论与实践相结合的课程。随着科技的发展,现代控制理论的概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域。学科的交叉发展要求高级工程技术人员必须更多地了解和掌握其他相近学科、专业的知识。因此,对于自动化以及相关专业的本科生和一些非控制类专业的硕士生学习现代控制理论的基础知识以及掌握利用 MATLAB 分析、设计控制系统的方法是时代的要求。

为适应我国高等教育人才培养的要求,改革本课程体系和更新教学内容,已成为一项十分迫切的重要任务。针对现代控制理论基础具有理论性强、内容抽象的特点,本书着重于基本概念和理论的阐述,精选内容,注重应用,并尽量做到深入浅出,理论联系实际,结构清晰,从整体上介绍现代控制理论的基本内容,以适应控制理论教学改革需要和 21 世纪对人才培养的要求。

本书在编写中强调状态空间控制理论与工程实践问题紧密结合,注重对读者分析问题和解决实际问题能力的培养,具有如下特色:①结构清晰,便于读者从整体上掌握现代控制理论的基本方法。本书贯穿了动态系统在状态空间数学模型基础上的“定量分析→定性分析→极点配置→最优反馈控制”这一结构主线;②注重物理概念,避免繁琐的数学推导,论证与实例配合紧密,易于理解,突出现代控制理论的工程应用背景,便于读者运用理论知识解决实际问题;③在阐述现代控制理论的基本方法时注意与经典控制理论基本方法的联系与比较;④在保证理论知识体系结构完整的前提下,融入 MATLAB 在线性系统理论和最优控制中的应用;⑤每章均附有较丰富的例题、习题、上机实验题,便于读者自学,有利于提高读者计算机应用能力和研究能力。

全书共分 7 章,阐述现代控制理论的最基本内容,包括控制理论的发展、状态空间的基本概念、状态空间描述的建立和标准型、系统的运动分析、能控性与能观性的概念与判据、系统的结构分解与实现、应用李雅普诺夫法分析系统的稳定性、极点配置、状态反馈和状态观测器以及最优控制理论等。在每章后面分别介绍了 MATLAB 在现代控制理论中的一些应用,如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。

全书由余成波统稿。参加编写的人员有张莲(第 1~3 章),胡晓倩(第 4~6 章),王士彬(第 7 章)。胡柏栋、李泉、秦华锋、谢东坡、龚智、许超明等同志也参加了本书部分章节的编写工作。

本书在编写过程中,参阅了很多专著及文献,同时许多兄弟院校的同行为本书的编写提出了许多宝贵意见并提供了许多帮助,在此,一并表示衷心感谢。

本书可作高等院校自动化、电气工程及其自动化等专业本科和非自动化专业研究生教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

由于编者的水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大的国内同行与读者给予批评与指正。

编者

2007 年 6 月

第二版前言

随着科技的发展,现代控制理论的概念、原理和方法已经广泛地运用于社会生活的方方面面。如何使状态空间控制理论与工程实际问题紧密结合,提高学生分析、解决工程实际问题的能力,为其今后从事先进控制理论和技术的研究提供支持,本书已在第一版的编写过程中做了许多的努力和尝试,形成了注重物理概念、避免繁琐数学推导和与经典控制理论形成参照对比的阐述方法,以及附有丰富例题、习题与 MATLAB 应用实例的特色。

为适应新时期高等教育人才培养工作的需要,以及科学技术发展的新趋势和新特点,按自动化专业培养目标和培养要求,并结合最新教学大纲,本书在第一版的基础上进行了修订,以适合广大高校相关专业需求,反映当前控制技术发展的主流和趋势。

本次再版在保持第一版框架体系、主要内容及基本特色的基础上,主要进行了如下修改和补充:

(1) 修订了第一版中一些数学公式、图表和单位中存在的疏漏,修改了部分内容的阐述方式,力求更加符合理工科学生的认识规律;

(2) 在第 2 章至第 7 章习题中补充了 MATLAB 实验题,有利于读者计算机应用能力和实践能力的提高;

(3) 结合在工程控制系统设计实例,对书中部分例题进行了修改,以展示更符合实际情况的控制任务分析、状态控制模型建立、控制器分析与设计的整个过程。

本书可作高等工科院校自动化本科和非自动化专业研究生教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

本书由 7 章组成,主要由张莲、胡晓倩、彭滔、余成波编写。张攀、陈大孝等同志参加了本书部分内容的编写工作。

本书是在第一版的基础上改写的,并利用了第一版书的部分材料。

全书的错误和缺点由主编和全体编著者共同负责。由于编者的水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请广大的国内同行与读者给予批评与指正。

编者

2016 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论的发展	1
1.2 现代控制理论中的两个重要概念	2
1.2.1 系统的能控性	2
1.2.2 系统的能观性	3
1.3 现代控制理论的主要内容	3
1.4 本书研究的主要内容	4
第 2 章 状态空间描述	7
2.1 状态空间分析法	7
2.1.1 动力学系统	7
2.1.2 例子	8
2.1.3 状态变量和状态向量	10
2.1.4 状态空间与状态空间描述	11
2.1.5 状态空间描述的一般形式	12
2.2 状态结构图	18
2.2.1 状态结构图绘制的基本方法	18
2.2.2 一阶系统的状态结构图	19
2.2.3 三阶单输入单输出系统的状态结构图	19
2.2.4 二输入二输出二阶系统的状态结构图	19
2.3 状态空间描述的建立	20
2.3.1 由系统结构图建立状态空间描述	20
2.3.2 由系统机理建立状态空间描述	24
2.4 状态空间描述的标准形式	27
2.4.1 传递函数中无零点时的实现	28
2.4.2 传递函数有零点时的实现	36
2.5 由状态空间描述求传递函数阵	43
2.5.1 传递函数(阵)	44
2.5.2 组合系统的传递函数阵	45
2.6 状态向量的线性变换	48
2.6.1 状态空间表达式的非唯一性	49
2.6.2 系统特征值的不变性和系统的不变性	51

2.6.3	状态空间表达式变换为约当标准型	54
2.7	离散系统的状态空间描述	60
2.7.1	状态空间表达式	60
2.7.2	脉冲传递(函数)矩阵	63
2.8	状态空间的 MATLAB 描述	64
2.8.1	数学模型的建立	64
2.8.2	模型间的转换	66
2.8.3	组合系统的传递函数阵	70
2.8.4	线性变换	71
	本章小结	74
	习题	74
	MATLAB 实验	77
第 3 章	线性系统的运动分析	79
3.1	线性定常系统状态方程的齐次解(自由解)	79
3.1.1	幂级数法	79
3.1.2	拉氏变换法	80
3.2	状态转移矩阵	81
3.2.1	状态转移矩阵的含义	81
3.2.2	状态转移矩阵的基本性质	83
3.2.3	几个特殊的矩阵指数函数	85
3.2.4	状态转移矩阵的计算	88
3.2.5	由状态转移矩阵求系统矩阵	94
3.3	线性定常系统非齐次状态方程的解	96
3.3.1	积分法	97
3.3.2	拉氏变换法	97
3.3.3	特定输入下的状态响应	98
3.4	线性时变系统的运动分析	101
3.4.1	线性时变系统齐次状态方程的解	101
3.4.2	状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 的基本性质	102
3.4.3	状态转移矩阵 $\phi(t, t_0)$ 的计算	103
3.4.4	线性时变系统非齐次状态方程的解	106
3.4.5	线性时变系统的输出	107
3.5	线性系统的脉冲响应矩阵	107
3.5.1	线性时变系统的脉冲响应矩阵	107
3.5.2	线性定常系统的脉冲响应矩阵	108
3.5.3	传递矩阵与脉冲响应矩阵的关系	108
3.5.4	利用脉冲响应矩阵计算控制系统的输出	110
3.6	连续系统的离散化	110

3.6.1	问题的提出	110
3.6.2	基本假设	111
3.6.3	线性定常系统的离散化	111
3.6.4	近似离散化	112
3.6.5	线性时变系统的离散化	113
3.7	线性离散系统的运动分析	114
3.7.1	线性定常离散系统方程的解	114
3.7.2	线性时变离散系统状态方程的解	117
3.8	基于 MATLAB 的运动分析	118
3.8.1	基于 MATLAB 的线性定常系统的运动分析	118
3.8.2	基于 MATLAB 的线性离散系统的运动分析	123
	本章小结	126
	习题	126
	MATLAB 实验	128
第 4 章	系统的能控性与能观性	130
4.1	线性定常系统能控性定义及判据	130
4.1.1	能控性基本概念	130
4.1.2	能控性定义	131
4.1.3	能控性判据	133
4.1.4	输出能控性及判据	139
4.2	线性定常系统能观性定义及判据	140
4.2.1	能观测性基本概念	140
4.2.2	能观性定义	141
4.2.3	能观性判据	142
4.3	线性时变系统的能控性与能观性	148
4.3.1	线性时变系统的能控性判据	148
4.3.2	线性时变系统的能观性判据	151
4.4	离散定常系统的能控性与能观性	153
4.4.1	离散定常系统能控性定义及判据	153
4.4.2	离散定常系统能观测性定义及判据	156
4.4.3	连续系统的能控性、能观性与离散系统的能控性、能观性之间的关系	157
4.5	对偶原理	160
4.5.1	线性系统的对偶关系	160
4.5.2	对偶原理	161
4.6	能控标准型与能观标准型	162
4.6.1	单输入系统的能控标准型	162
4.6.2	单输出系统的能观测标准型	165

4.7	系统的结构分解	166
4.7.1	基本概念	167
4.7.2	按能控性分解	167
4.7.3	按能观测性分解	170
4.7.4	标准分解	172
4.8	传递函数阵的实现	176
4.8.1	实现的基本概念	176
4.8.2	多输入多输出系统的能控性与能观性实现	177
4.8.3	最小实现	178
4.9	传递函数与能控性和能观性之间的关系	181
4.9.1	单输入单输出系统能控性、能观性与传递函数之间的关系	181
4.9.2	多输入多输出系统的能控性、能观性与传递函数阵之间的关系	184
4.10	利用 MATLAB 分析能控性与能观性	185
4.10.1	常用函数	185
4.10.2	控制实例	186
	本章小结	192
	习题	193
	MATLAB 实验	196
第 5 章	控制系统的稳定性	198
5.1	外部稳定性与内部稳定性	198
5.1.1	外部稳定性	199
5.1.2	内部稳定性	199
5.2	Lyapunov 定义下的稳定性	200
5.2.1	系统的平衡状态	200
5.2.2	状态矢量范数	202
5.2.3	李雅普诺夫意义下的稳定性定义	202
5.2.4	外部稳定性与内部稳定性之间的关系	207
5.3	李雅普诺夫判稳第一法	207
5.3.1	线性定常系统的稳定性分析	208
5.3.2	线性时变系统的稳定性分析	209
5.3.3	非线性系统的稳定性分析	210
5.4	李雅普诺夫判稳第二法	211
5.4.1	李雅普诺夫第二法的基本思想	212
5.4.2	标量函数 $V(x)$ 的符号性质(Sign)	213
5.4.3	二次型标量函数的符号性质	213
5.4.4	李雅普诺夫第二法的稳定性判据	214
5.5	李雅普诺夫法在线性系统中的应用	219
5.5.1	李雅普诺夫矩阵方程	219

5.5.2	李雅普诺夫矩阵方程在线性定常系统稳定性判别中的应用	220
5.5.3	基于李雅普诺夫第二法的线性时变系统的稳定性分析	222
5.5.4	线性定常离散系统的稳定性	223
5.5.5	用李雅普诺夫函数估算系统响应的快速性	224
5.6	李雅普诺夫第二法在非线性系统中的应用	226
5.6.1	克拉索夫斯基法	226
5.6.2	阿塞尔曼法	229
5.7	基于 Lyapunov 第二法的参数最优问题	231
5.7.1	线性二次型最优控制问题	231
5.7.2	参数最优问题的 Lyapunov 第二法的解法	232
5.8	基于李雅普诺夫第二法的模型参考控制系统	234
5.8.1	模型参考控制系统	234
5.8.2	控制器的设计	234
5.9	基于 MATLAB 的稳定性分析	237
5.9.1	稳定性分析的常用函数	237
5.9.2	基于 MATLAB 的稳定性分析实例	237
	本章小结	240
	习题	241
	MATLAB 实验	242
第 6 章	系统的综合	243
6.1	基本概念	243
6.1.1	引言	243
6.1.2	性能指标的类型	244
6.1.3	线性反馈系统的基本结构	244
6.2	极点配置与状态反馈	246
6.2.1	期望极点对系统动态性能的影响	246
6.2.2	状态反馈与极点配置	247
6.2.3	单变量系统极点配置定理	248
6.2.4	状态反馈下闭环系统的镇定问题	255
6.3	输出反馈	257
6.3.1	输出反馈至矩阵 B 后端	257
6.3.2	输出反馈至矩阵 B 前端	259
6.3.3	状态反馈与输出反馈的比较	259
6.4	状态重构与状态观测器	260
6.4.1	开环状态观测器	260
6.4.2	闭环全维状态观测器	261
6.4.3	配置状态观测器反馈增益矩阵 G 的方法	263
6.4.4	降维状态观测器	266

6.5	带状态观测器的状态反馈系统	271
6.5.1	系统的结构与数学模型	271
6.5.2	闭环系统的基本特性	272
6.5.3	具有降阶观测器的观测—状态反馈控制系统	275
6.6	解耦控制系统	278
6.6.1	系统解耦基本原理	278
6.6.2	用前馈补偿器实现解耦	279
6.6.3	用串联补偿器实现解耦控制	280
6.6.4	用输入变换和状态反馈实现解耦控制	281
6.6.5	解耦系统的综合控制	285
6.7	稳态精度与渐近跟踪	290
6.7.1	稳态精度与跟踪问题	290
6.7.2	内模原理	291
6.7.3	无静差跟踪控制系统的设计	293
6.7.4	倒立摆的无静差(I型)位置跟踪系统设计	294
6.8	基于 MATLAB 的系统综合	300
6.8.1	常用函数指令	300
6.8.2	应用举例	300
	本章小结	310
	习题	310
	MATLAB 实验	313
第 7 章	最优控制	315
7.1	基本概念	315
7.2	变分法在最优控制中的应用	317
7.2.1	泛函与变分法的基本概念	317
7.2.2	泛函极值	319
7.2.3	横截条件	320
7.2.4	条件极值	325
7.3	极小值原理	330
7.3.1	连续系统的极小值原理	331
7.3.2	离散系统的极小值原理	335
7.4	动态规划	338
7.4.1	最优性原理	341
7.4.2	离散系统的动态规划	341
7.4.3	连续系统的动态规划	343
7.4.4	变分法、极小值原理与动态规划	345
7.5	线性二次型最优控制	348
7.5.1	线性二次型问题	349

7.5.2 状态调节器	350
7.5.3 输出调节器	353
7.5.4 输出跟踪问题	354
7.6 实用最优控制系统	355
7.6.1 电机拖动控制	355
7.6.2 人造地球卫星姿态控制	358
7.6.3 二级倒立摆控制	360
7.7 运用 MATLAB 求解最优控制问题举例	363
本章小结	366
习题	367
MATLAB 实验	369
附录 A 常用符号表	370
附录 B 向量空间与矩阵理论的基本知识	371
附录 C MATLAB 软件中常用控制指令说明	376
参考文献	379

1.1 控制理论的发展

控制理论始于技术,它是从解决生产实践问题开始的。人类利用控制技术的历史可以追溯到几千年前,但是把控制技术在工程中的一些规律加以总结提高,进而以此去指导和推进工程,形成所谓的控制理论,并作为一门独立的学科而存在和发展,则是从 20 世纪中叶开始的。美国数学家维纳(N. Wiener)于 1948 年出版的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,标志着控制论作为科学的一门重要分支正式诞生,具有重要的影响。我国著名科学家钱学森在 1954 年出版的《工程控制论》又进一步推动了控制论与工程技术的密切结合。随着科学技术的发展,控制理论显得越来越重要。它不仅在现代工程技术领域中获得广泛的应用,而且在经济学、生物学和医学领域中也受到了极大的重视。根据发展的不同阶段,控制理论可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论以传递函数为基础,研究单输入—单输出的自动控制系统的分析和设计问题,主要研究方法有时域分析法、频率特性法、根轨迹法。通常采用反馈控制,构成所谓的闭环控制系统。经典控制理论的研究对象、数学方法和计算手段与当时社会需要和技术水平密切相关,它不仅推动了当时自动化技术的发展和普及,而且在今天许多工程和技术领域中仍有广泛应用。

但是经典控制理论存在着局限性,主要体现在以下几个方面:

(1) 只适用于单输入单输出线性定常系统,对于时变系统、复杂非线性系统和多输入多输出系统则无能为力;

(2) 其设计方法基本上是基于图线试探(根轨迹、频率法设计)的工程近似方法,只能根据幅值裕度、相位裕度、超调量、调整时间等性能指标来确定校正装置,很大程度上依赖于设计者的经验,对于同一个系统,同一个要求,可以设计出若干性能和质量不同的系统,而无法确定某种意义下的最优性能;

(3) 无法考虑系统的初始条件,只能分析零初始条件的系统,且不利于使用计算机分析和控制;

(4) 只能揭示系统输入—输出间的外部特性,难以完全揭示系统内部的动态特性。

从 20 世纪 50 年代末开始,科学技术的突飞猛进,特别是核能技术、空间技术和各种高速飞行器的发展,被控对象对速度和精度的要求更高,从而出现了更加复杂的多输入—多输出系统、非线性系统和时变系统。而且对系统的控制性能要求也更高,很多情况下要求系统

的某些性能是最优的,对环境的变化要有一定的适应能力等。这些新的控制要求用经典控制理论是无法解决的。

科学技术的发展不仅需要迅速地发展控制理论,同时也给控制理论的发展准备了两个重要的条件——现代数学和数字计算机。现代数学,例如泛函分析、线性代数等,为现代控制理论提供了多种多样的分析工具;与此同时,计算机在技术上有了重大突破,高速、高精度的数字计算机相继出现,为现代控制理论的发展提供了强有力的工具,使控制理论的研究和应用成为可能。在这种背景下,建立在状态概念基础上的现代控制理论应运而生了。庞特里亚金(Понтрягин)极小值原理、贝尔曼(Bellman)动态规划理论以及卡尔曼(Kalman)滤波理论具有重要意义,被视为现代控制理论的阶段的三大标志。

现代控制理论是以矩阵理论等作为数学工具,采用状态空间法,在时域内对系统进行分析与设计的控制理论;它是研究系统各状态的运动规律,并按照所要求的各种指标最优为目的来改变系统的运动规律。与经典控制理论相比,现代控制理论具有许多突出的优点:

- (1) 研究对象可以是多输入—多输出、线性或非线性、定常或时变、集中参数或分布参数系统;
- (2) 现代控制理论采用的分析方法是时域的,时域分析法对于控制过程来说是直接的;
- (3) 现代控制理论设计系统的方法是基于确定一个控制规律或最优控制策略。采用这种控制方法可以使得某个性能指标为极小;
- (4) 在现代控制理论的综合步骤中能够考虑任意初始条件;
- (5) 现代控制理论能提供一系列的解析方法,设计者只需要从事分析研究,所有的数值计算都可借助于计算机完成。

从 20 世纪 60 年代以后,现代控制理论还在继续发展,并形成了几个分支学科:线性系统理论、最优控制理论、自适应控制、动态系统辨识和大系统理论等。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,虽然二者在数学工具、理论基础和研究方法上有着本质的区别,但对动态系统进行分析研究时,两种理论可以互相补充、相辅相成。当今,频率法在吸收新的理论后,已发展成为现代频率法,并已成为现代控制理论的一个重要组成部分。

1.2 现代控制理论中的两个重要概念

能控性(Controllability)和能观测性(Observability)可以深刻揭示系统的内部结构关系,是卡尔曼于 20 世纪 60 年代初首先提出的,是现代控制理论的两个最重要的概念,它是系统定性分析的主要内容,也是系统综合时的结构条件和理论基础。

1.2.1 系统的能控性

假设图 1.1 所示系统,有一组输入函数(控制函数) $u(t)$ 作用在动态系统上,其相应状态变量是 $x(t)$,通过量测系统可得到这些状态的某些组合为 $y(t)$ 。其方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1.1)$$

若存在输入 $u(t)$, 能在有限时间 $[t_0, t_f]$ 内, 使系统由任意初始状态 $x(t_0)$ 变为所希望的指定状态 $x(t_f)$, 则称此状态是能控的。若系统所有状态都是能控的, 则称系统是完全能控的, 简称系统能控, 即可以完全通过输入来控制系统的每一个状态。

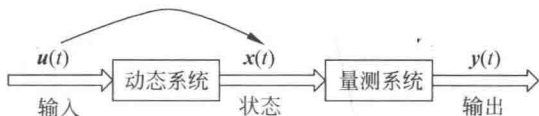


图 1.1 系统能控性说明

1.2.2 系统的能观性

假设图 1.2 所示系统, 有一组输入函数(控制函数) $u(t)$ 作用在动态系统上, 其相应状态变量是 $x(t)$, 通过量测系统可得到这些状态的某些组合为 $y(t)$ 。其方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1.2)$$

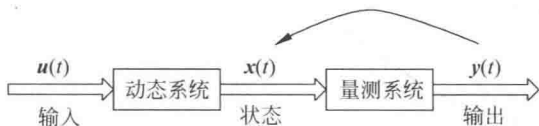


图 1.2 系统能观性说明

如果对于任意给定的输入 $u(t)$, 使得根据有限时间 $[t_0, t_f]$ 内测得的系统的输出 $y(t)$ 能唯一地确定系统在初始时刻的状态 $x(t_0)$, 则称状态 $x(t_0)$ 是能观测的。若系统的每一状态都是能观测的, 则称系统是状态完全能观测的, 简称系统能观, 即能够通过输出量在有限时间内的测量, 去识别系统的状态。

1.3 现代控制理论的主要内容

现代控制理论是对系统的状态进行分析和综合及建模的理论, 其内容是极其广泛和丰富的。但其基本内容可以概括为以下几个方面。

1. 线性系统理论

线性系统理论是现代控制理论中理论最完善、技术较成熟、应用最广泛的部分。它揭示了系统的内在规律, 是从能控性、能观性两个基本概念出发, 研究系统的极点配置、状态观测器设计和抗干扰的一般理论。

2. 最优控制

最优控制问题是在给定的限制条件和给定性能指标(即评价函数或目标函数)下, 寻求使系统性能指标达到最佳值(最大或最小)的控制规律问题。其前提是系统是能控和能观