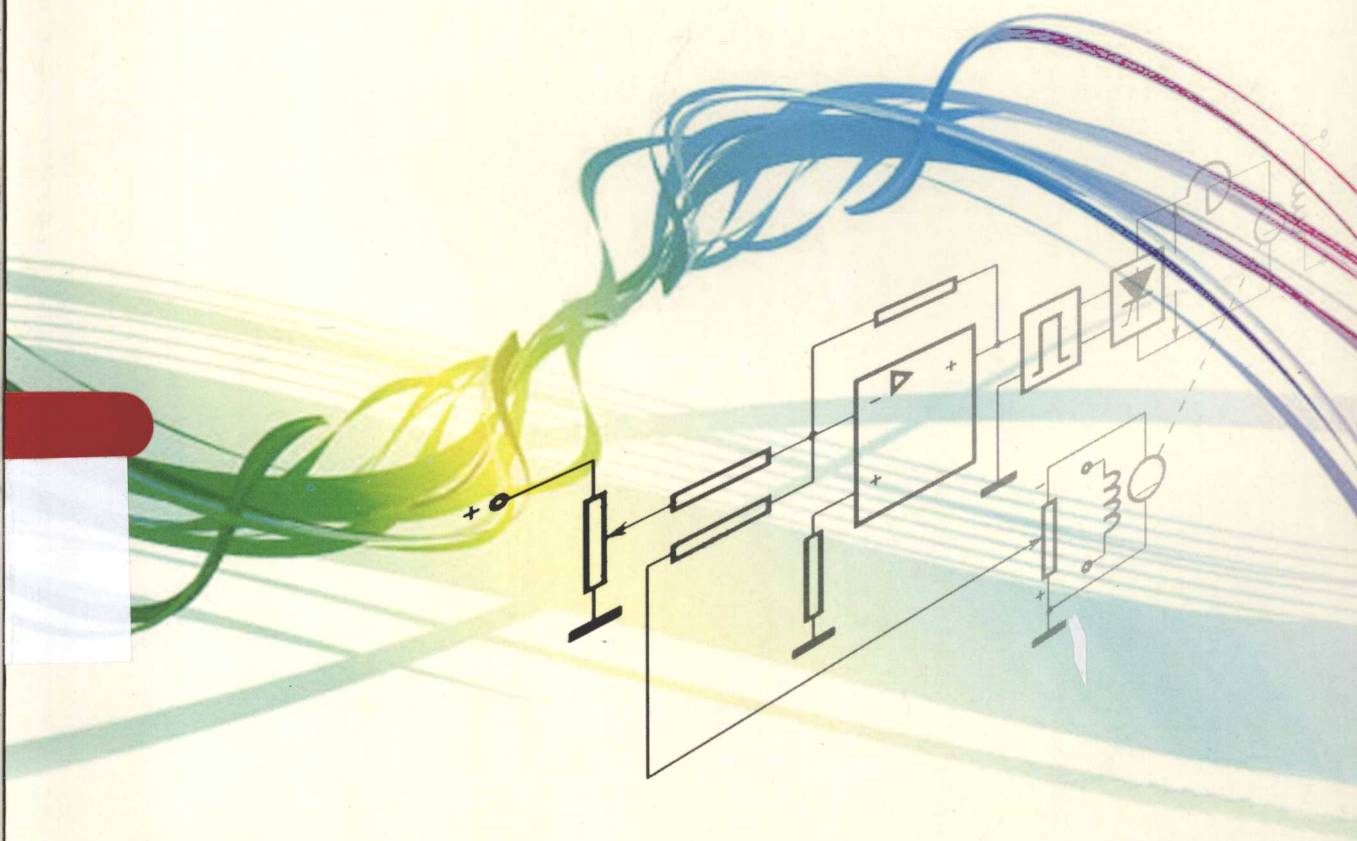


XIANDAI KONGZHI LILUN JI YINGYONG

现代控制理论 及应用

贺良华 主编



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

014031894

0231
92

现代控制理论及应用

XIANDAI KONGZHI LILUN JI YINGYONG

主 编 贺良华
副主编 董浩斌 刘 峰



0231
92



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI



北航

C1720095

内容简介

本书是中国地质大学(武汉)研究生院资助建设的研究生精品教材之一,详细介绍了现代控制理论的基本理论知识及现代控制系统的分析与设计的主要方法。全书共分8章,内容涉及到线性控制系统与最优控制系统。

第1章介绍了控制理论的发展及现代控制理论的主要内容;第2章介绍了现代控制理论的核心基础知识状态空间分析法,以及基于状态空间分析法的系统建模方法;第3章介绍了状态空间模型的数学处理方法即状态空间模型的线性变换;第4章介绍了状态空间中的传递函数矩阵的基本知识;第5章介绍了基于状态空间分析法的系统分析,包括系统动态特性分析、系统可控性与可观性分析、系统稳定性分析;第6章介绍了基于状态空间分析法的控制系统的综合与控制器设计,包括反馈控制器设计、极点配置、系统镇定、系统解耦、状态观测器设计;第7章介绍了最优控制理论的基本知识与应用,包括静态优化问题的求解、动态优化问题求解中的经典变分法、现代变分法等;第8章介绍了现代控制理论在倒立摆控制系统中的应用。

本书可作为高等学校控制科学与工程、仪器科学与工程、机械工程、电气工程等学科的研究生教材,也可作为自动化专业、测控技术与仪器专业、机械、动力、冶金、电气工程及其自动化专业等的本科生教材,还可供从事控制理论与控制工程研究、设计和应用的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论及应用/贺良华主编. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2013.12

ISBN 978-7-5625-3273-6

I. ①现…

II. ①贺…

III. ①现代控制理论

IV. ①0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 235824 号

现代控制理论及应用

贺良华 主编

责任编辑:周 华 张 琰

选题策划:方 菊

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路388号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:384千字

印张:15

版次:2013年12月第1版

印次:2013年12月第1次印刷

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

印数:1—1000册

ISBN 978-7-5625-3273-6

定价:36.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

现代控制理论是控制科学与工程、仪器科学与工程、机械工程、电气工程等相关学科博士生、硕士生与本科生必修的核心专业知识之一。已被广泛地应用在国防、航空航天、工业、农业、科研及管理等行业领域并发挥了极其重要的作用。

现代控制理论是建立在状态空间法基础上的一种控制理论,是控制理论的一个重要组成部分。在现代控制理论中,对控制系统的分析和设计主要是通过对系统的状态变量的描述来进行的,基本的方法是时间域方法。现代控制理论比经典控制理论所能处理的控制问题要广泛得多,包括线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、连续系统和离散系统、单变量系统和多变量系统。它所采用的方法和算法也更适合于在数字计算机上进行。现代控制理论还为设计和构造具有指定的性能指标的最优控制系统提供了可能性。

现代控制理论的内容十分丰富,每一方面的学科内容都自成完整的分支或体系,本书集中介绍了现代控制理论的核心内容即基于状态空间分析法的系统建模、系统分析、系统综合与设计以及最优控制理论的基本知识及应用。

本书以加强基础、突出处理问题的思维方法、培养学生分析问题和解决问题的能力为原则,叙述深入浅出,理论联系实际,富有启发性,尽可能将现代控制理论的基本概念和方法应用于解决实际工程问题。

本书具有如下特点:

(1)内容完善,结构合理,知识具有科学性和先进性。

(2)具有针对性:本书针对相关学科的研究生培养目标的要求及研究生教学与学习方式的特点,结合国内外控制科学与工程学科的最新发展和研究方向,系统地介绍了现代控制理论的基础知识及新成果。

(3)具有实践性:本书内容与应用及工程紧密结合,通过大量研究及应用成果举例,强化了工科学生理论联系实际的能力,能很好地培养学生的创新能力。

(4)具有跨学科性:本书内容在应用举例上兼顾了“控制科学与工程”、“机械工程”等学科,具有跨学科的特点。

(5)立体化教材建设:本书通过立体化建设,能适应多媒体及网络化教学的要求。

本书是作者在多年的教学和科研的基础上编写的,书中的部分内容反映了作者的科研成果。

本书共分8章,第1章由董浩斌同志编写,第2、3、4、5、6、8章由贺良华同志编写,第7章由刘峰同志编写。本书编写大纲由贺良华同志提出,经编写小组成员共同深入细致地研究制定,全书由贺良华同志负责修改和统稿。在本书编写过程中,王洪亮和史永乐同志为本书的文字资料收集整理做了大量工作,许多同行专家提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。同时,本书在编写过程中参考了许多文献资料,在此对所有文献的作者表示崇高的敬意和由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

贺良华

2013年6月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 控制理论的产生与发展	(1)
1.1.1 控制理论的萌芽阶段	(1)
1.1.2 控制理论的起步阶段	(1)
1.1.3 控制理论的形成阶段——经典控制理论	(2)
1.1.4 控制理论的发展阶段——现代控制理论	(4)
1.2 现代控制理论的主要内容	(5)
1.2.1 线性系统理论	(5)
1.2.2 非线性系统理论	(6)
1.2.3 最优控制理论	(6)
1.2.4 随机控制理论与最优估计	(6)
1.2.5 系统辨识理论	(7)
1.2.6 智能控制	(7)
1.2.7 自适应控制	(7)
1.2.8 鲁棒控制	(8)
1.2.9 模糊控制	(8)
1.2.10 神经网络控制	(8)
1.2.11 实时专家控制	(9)
1.2.12 定性控制	(9)
1.2.13 预测控制	(10)
1.2.14 分布式控制系统	(10)
第 2 章 基于状态空间法的系统建模	(11)
2.1 状态空间法概述	(11)
2.1.1 状态空间的基本概念	(11)
2.1.2 状态空间模型的组成	(13)
2.1.3 状态空间模型的种类	(14)
2.1.4 状态空间模型的系统框图	(15)
2.1.5 状态空间模型的模拟结构图	(15)
2.2 状态空间模型的建模方法	(16)
2.2.1 根据系统模拟结构图建立状态空间模型	(16)
2.2.2 根据系统运行机理建立状态空间模型	(17)
2.2.3 根据系统的输入输出关系建立状态空间模型	(23)
2.3 多输入-多输出系统的实现	(37)

2.4	离散时间系统的状态空间表达式	(39)
2.5	时变系统和非线性系统的状态空间表达式	(43)
2.5.1	线性时变系统	(43)
2.5.2	非线性系统	(44)
	习 题	(45)
第3章	状态空间模型的线性变换	(49)
3.1	状态空间的线性变换	(50)
3.2	系统特征值的不变性及系统的不变量	(50)
3.3	化状态方程为对角线标准型	(51)
3.4	化状态方程为约旦标准型	(53)
3.5	状态空间表达式的可控标准型和可观标准型	(55)
3.5.1	可控标准型	(56)
3.5.2	可观标准型	(59)
	习 题	(61)
第4章	传递函数矩阵	(63)
4.1	传递函数矩阵的定义	(63)
4.2	由状态空间表达式求传递函数矩阵	(63)
	习 题	(70)
第5章	基于状态空间分析法的系统分析	(71)
5.1	系统动态特性分析	(71)
5.1.1	线性定常系统状态方程的解	(71)
5.1.2	线性时变系统状态方程的解	(81)
5.1.3	线性离散系统状态方程的解	(82)
5.1.4	连续时间状态空间表达式的离散化	(83)
5.2	系统可控性与可观性分析	(88)
5.2.1	线性定常连续系统的可控性	(88)
5.2.2	线性定常连续系统的可观性	(92)
5.2.3	离散时间系统的可控性与可观性	(93)
5.2.4	时变系统的可控性与可观性	(94)
5.2.5	可控性与可观性的对偶关系	(95)
5.3	系统稳定性分析	(97)
5.3.1	李雅普诺夫稳定性的定义	(98)
5.3.2	李雅普诺夫稳定性的基本定理	(102)
5.3.3	李雅普诺夫方法在线性系统中的应用	(107)
5.3.4	李雅普诺夫方法在非线性系统中的应用	(110)
	习 题	(117)
第6章	系统综合与设计	(121)
6.1	反馈控制器设计	(121)

6.1.1	状态反馈	(121)
6.1.2	输出反馈	(124)
6.1.3	从输出到状态矢量导数的反馈	(125)
6.1.4	反馈控制闭环系统的可控性与可观性	(126)
6.2	极点配置	(128)
6.2.1	采用状态反馈进行极点配置的条件	(128)
6.2.2	采用输出反馈到 $\dot{x}$ 进行极点配置的条件	(137)
6.2.3	采用输出反馈进行极点配置的条件	(137)
6.3	系统镇定	(138)
6.4	系统解耦	(138)
6.4.1	补偿器解耦	(139)
6.4.2	状态反馈解耦	(140)
6.5	状态观测器设计	(143)
6.5.1	全维观测器设计	(144)
6.5.2	设计观测器的爱克曼(Ackermann)公式	(146)
习 题		(148)
第7章	最优控制理论与应用	(151)
7.1	概述	(151)
7.2	静态优化问题的求解	(153)
7.2.1	无约束普通函数的静态优化问题	(154)
7.2.2	有等式约束普通函数的静态优化问题	(154)
7.3	经典变分法及其在最优控制中的应用	(157)
7.3.1	变分法基础	(157)
7.3.2	欧拉方程与横截条件	(161)
7.4	现代变分法及其在最优控制中的应用	(171)
7.4.1	极小值原理及其应用	(171)
7.4.2	时间最优控制	(186)
7.4.3	线性二次型最优控制	(190)
7.4.4	动态规划	(204)
习 题		(215)
第8章	现代控制理论在倒立摆系统中的应用	(217)
8.1	倒立摆系统简介	(217)
8.1.1	倒立摆系统分类	(217)
8.1.2	单级倒立摆系统的体系结构	(217)
8.2	单级倒立摆系统的数学模型	(218)
8.3	倒立摆系统特性分析	(221)
8.4	倒立摆系统状态反馈控制器设计与仿真	(222)
8.4.1	状态反馈控制策略的实现	(222)
8.4.2	状态反馈控制策略的仿真分析	(222)

8.5 倒立摆系统 LQR 设计与仿真	(225)
8.5.1 LQR 最优控制策略的实现	(225)
8.5.2 LQR 最优控制策略的仿真分析	(226)
8.6 极点配置法与 LQR 法对比分析	(228)
参考文献	(230)

第1章 绪论

1.1 控制理论的产生与发展

控制科学与工程主要涉及控制理论、实现控制理论的技术手段、被控对象及系统。控制理论及相关的控制在人类社会的进步及科学技术的发展过程中起到了重要的推动作用。控制理论研究的主要是如何使被控对象和系统的动态性能达到所期望的目标,而广义的被控对象和系统则包括了人类活动的诸多方面。

控制理论可分为经典控制理论(也称为自动控制理论)和现代控制理论两大部分,它的产生和发展大致可分为以下几个阶段。

1.1.1 控制理论的萌芽阶段

人类利用控制技术的历史可以追溯到几千年前。在人类早期的生产活动中,古代劳动人民从生产实践中积累了丰富的经验,发明了计里鼓车、候风地动仪等许多原始的自动装置,以满足生产、生活和作战的需要。

如,我国西汉时期、古埃及和古巴比伦出现的自动计时漏壶(1400B. C. —1100B. C.);秦昭王时李冰主持修筑都江堰体现的系统观念和实(300B. C.);两千年前我国发明的指南车;公元1世纪古埃及和希腊的发明家创造的教堂庙门自动开启、铜祭司自动洒圣水、投币式圣水箱等自动装置;公元1086—1089年,我国发明的水运仪象台,苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台。

这些闪烁智慧火花的发明无疑是古代体现自动控制思想的杰作。

1.1.2 控制理论的起步阶段

随着科学技术与工业生产的发展,到17、18世纪,在欧洲的一些国家相继出现了多种自动装置,自动控制技术逐渐应用到近代工业中。其中比较典型的有如下几种。

1642年法国物理学家B. 帕斯卡(Pascal)发明了加法器。

1657年荷兰机械师C. 惠更斯(Huygens)发明了钟表。

1681年法国物理学家、发明家丹尼斯·巴本(D. Papin)发明了用做安全调节装置的锅炉压力调节器。

1745年英国机械师E. 李(Lee)发明了带有风向控制的风磨。

1765俄国机械师И. И. 波尔祖诺夫(Ползунов)发明了使蒸汽锅炉水位保持恒定的浮子

式阀门水位调节器。

1765—1790 年,英国人瓦特(J. Watt)运用科学理论进行了一系列发明,最终创造了现代意义上的蒸汽机。瓦特在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器(图 1-1),解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。该离心调速器被应用到实际工业生产中,加速了第一次工业革命的步伐。但离心调速器在工作过程会导致蒸汽机的转速时高时低,后来人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

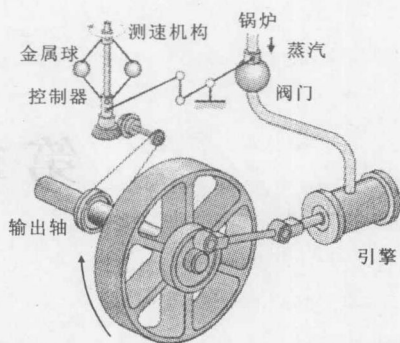


图 1-1 用于蒸汽机上的飞球离心调速器

1.1.3 控制理论的形成阶段——经典控制理论

在生产实践中出现的系统控制问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。

1868 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表文章“On Governors”,通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特蒸汽机速度控制系统中出现的剧烈振荡的不稳定问题,提出了简单的稳定性代数判据,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。

1892 年,俄国学者李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)发表题为“运动稳定性一般问题”的著名文献,创立了常微分方程运动稳定性理论,建立了关于系统运动稳定性研究的一般理论,但该理论起初并未在控制领域受到足够的重视和应用。李雅普诺夫稳定性理论主要指李雅普诺夫第二方法,又称李雅普诺夫直接法,运用这一方法可以不必求解系统的运动方程而直接判定稳定性。因此,李雅普诺夫稳定性理论能同时适用于分析线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统的稳定性,是更为一般的稳定性分析方法,可用于任意阶的系统。在现代控制理论中,李雅普诺夫第二方法是研究稳定性的主要方法,既是研究控制系统理论问题的一种基本工具,又是分析具体控制系统稳定性的一种常用方法。

此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家胡尔维茨(A. Hurwitz)把麦克斯韦的思想扩展到高阶微分方程描述的更复杂的系统中,分别在 1877 年和 1895 年各自提出了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则,即两个著名的稳定性判据——劳斯判据和胡尔维茨判据。

1927 年,美国的布莱克(H. S. Black)提出了放大器的负反馈方法。

这些方法基本上满足了 20 世纪初期控制工程师的需要,奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

第二次世界大战对控制系统的准确跟踪与补偿能力提出了要求,反馈控制方法被广泛用于设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

1932 年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)提出了频域内研究系统的频率响应法,建立了以频率特性为基础的稳定性判据,为具有高质量的动态品质和静态准确度的军用控制系统提供了所需的分析工具。

随后,伯德(H. W. Bode)和尼科尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。

1948年,伊万斯(W. R. Evans)提出了复数域内研究系统的根轨迹方法,为控制系统的设计与分析提供了另一种图形化的工具。

1947年,控制论的奠基人美国数学家韦纳(N. Wiener)把控制论引起的自动化同第二次产业革命联系起来,并于1948年出版了《控制论——关于在动物和机器中控制与通讯的科学》,书中论述了控制理论的一般方法,推广了反馈的概念,为控制理论这门学科奠定了基础。

我国著名科学家钱学森将控制理论应用于工程实践,并于1954年出版了《工程控制论》。

到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了包括以微分方程为基础的时域分析法、以传递函数为基础的复域分析法和以频率特性为基础的频域分析法在内的相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。在工业、农业、交通运输及国防建设的各个领域都广泛采用了自动化控制技术。

经典控制理论主要用于解决反馈控制系统中控制器的分析与设计的问题(图1-2)。



图1-2 反馈控制系统的简化原理框图

自动控制系统的数学模型是描述系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式。它是分析和设计控制系统的基础。

经典控制理论主要研究线性定常系统。所谓线性控制系统是指系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的控制系统。如果描述该线性系统的微分方程的系数是常数,则称为线性定常系统。

在经典控制理论中,以微分方程为数学模型的系统分析方法由于要求解微分方程,对高阶系统很不方便,因而可采用建立在传递函数基础上的根轨迹法和频率法,但后两者本质上是在微分方程基础上建立的。

线性定常系统的传递函数是在零初始条件下系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比,是描述系统的复域模型。

传递函数只描述了系统的输入、输出之间的关系,没有内部变量的表示。

从经典控制理论的数学方法上可以看出,无论是时域分析法、复域分析法还是频域分析法,其描述系统的数学模型都是“单输入变量和单输出变量”之间的关系,因而经典控制论主要研究“单输入单输出”(Single - Input/Single - Output, SISO)线性定常控制系统的分析与设计。

经典控制理论只适用于SISO线性定常系统,推广到多输入多输出(Multi - Input/Multi - Output, MIMO)线性定常系统非常困难,对时变系统 and 非线性系统更无能为力。

用经典控制理论设计控制系统一般根据幅值裕度、相位裕度、超调量、调节时间等指标来

进行设计和分析,这些指标并不直观。

经典控制理论在系统设计和分析时无法考虑系统的初始条件,难以达到高精度的位置、速度等控制系统设计的要求。

经典控制理论在进行控制系统设计和综合时,需要丰富的经验进行试凑以及大量的手工计算。

1.1.4 控制理论的发展阶段——现代控制理论

20 世纪 50 年代中期,科学技术及生产力的发展,特别是空间技术的发展,迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制,最小时间控制等)。

实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术及应用数学如泛函分析、线性代数等工程数学的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于计算机求解的状态空间模型成为主要的数学模型形式。

1956 年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)提出了离散多阶段决策的最优性原理,创立了动态规划,并于 1964 年用离散多阶段决策的动态规划法解决了连续动态系统的最优控制问题。

1956 年,苏联科学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)提出极大值原理。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。由于极大值与极小值只是符号之差,许多著作中也称为极小值原理。

1959 年,美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)和布西等人提出了著名的卡尔曼滤波器,创建了卡尔曼滤波理论;1960 年卡尔曼发表了论文《控制系统的一般理论》,在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法,并提出了可控性和可观性的新概念。他将经典动力学中的状态与状态变量的概念系统地应用于控制系统的研究,状态空间法的引入促成了现代控制理论的建立。

到 1960 年初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

庞特里亚金的极大值原理、贝尔曼的动态规划理论以及卡尔曼的滤波理论具有重要意义,被视为现代控制理论阶段的三大标志。

进入 20 世纪 60 年代,英国控制理论学者罗森布罗克(H. H. Rosenbrock)、欧文斯(D. H. Owens)和麦克法伦(G. J. MacFarlane)研究了用于计算机辅助控制系统设计的现代频域法理论,将经典控制理论传递函数的概念推广到多变量系统,并探讨了传递函数矩阵与状态方程之间的等价转换关系,为进一步建立统一的线性系统理论奠定了基础。

20 世纪 70 年代,瑞典控制理论学者奥斯特隆姆(K. J. Astrom)和法国控制理论学者朗道(L. D. Landau)在自适应控制理论和应用方面作出了贡献。

与此同时,关于系统辨识、最优控制、离散时间系统和自适应控制的发展大大丰富了现代控制理论的内容。

现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观性、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。

与经典控制理论相比较,现代控制理论有如下优点。

(1)以状态空间分析法为标志,不仅适用于 SISO 线性定常系统,而且易于推广到 MIMO 系统、时变系统和非线性系统等,为复杂的多变量、多参数系统问题的求解提供了强有力的工具。

用状态空间分析法描述系统时,将系统的所有输入、输出信号(如果有多个)作为动态方程的变量,同时也将系统动态过程中的中间信息作为变量,组成一组一阶微分方程组,因此能同时确定系统每时每刻的全部运动信息。而且由于是一阶微分方程,可以很容易地处理初始条件,加之计算机的利用,不仅可以用来求解除线性定常系统问题,还可以求解非线性、时变、多输入-多输出系统、随机过程等问题。更重要的是,由于状态空间法能同时确定系统每时每刻的全部运动信息,因而为复杂系统的精确控制提供了条件,像载人航天飞行控制的发射与返回控制,若没有状态空间法是难以实施的。

(2)利用时域法容易给出时间上的清晰性能指标,如最快、最小能量等,易于理解接受和优化设计。

(3)易于考虑系统的初始条件,使得所设计的控制系统有更高的精度和更佳的性能品质指标。

(4)易于用计算机进行系统分析计算和实现计算机控制。

经典控制理论与现代控制理论并不是截然对立的,两者相辅相成、互为补充。

在进行控制系统设计和实现时,要根据具体的要求、目标和环境条件,选择适宜的控制理论和方法,也可以将经典控制理论和现代控制理论两者结合起来。

1.2 现代控制理论的主要内容

研究和解决控制领域的问题,无外乎涉及四大方面:研究纯控制理论、研究实现控制理论的技术和方法、研究被控对象、研究控制器与被控对象构成的整个系统。每一方面的研究成果都形成了卓有成效的分支或体系,极大地丰富了现代控制理论的内容。

现代控制理论自形成以来,科学家们不断提出了新的控制理论、控制技术和方法,以满足解决生产实际中不断出现的新的复杂问题的需要。它所包含的学科内容十分广泛,主要有如下内容。

1.2.1 线性系统理论

线性系统是最为常见的系统,因此成为现代控制理论中最为基本和比较成熟的一个分支,着重于研究线性系统中状态的控制和观测问题,其基本的分析和综合方法是状态空间法,用以建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的关系。其主要内容有系统结构描述、性能分析、系统综合等。按所采用的数学工具,线性系统理论通常分成三个学派:基于几何概念和方法的几何理论,代表人物是旺纳姆(W. M. Wonham);基于抽象代数方法的代数理论,代表人物是卡尔曼(R. E. Kalman);基于复变量方法的频域理论,代表人物是罗森布罗克(H. H. Rosenbrock)。

1.2.2 非线性系统理论

非线性控制理论是复杂控制理论中一个重要的基本问题,也是一个难点课题,它的发展几乎与线性系统平行。非线性系统的发展,数学工具是一个相当困难的问题,泰勒级数展开对有些情况是不能适用的。古典理论中的“相平面”法只适用于二阶系统,适用于含有一个非线性元件的高阶系统的“描述函数”法也是一种近似方法。由于非线性系统的研究缺乏系统的、一般性的理论及方法,于是综合方法得到较大的发展,主要有以下几种:

(1)李雅普诺夫方法:它是迄今为止最完善、最一般的非线性方法,但是由于它的一般性,在用来分析稳定性或用来镇定综合时都欠缺构造性。

(2)变结构控制:由于其滑动模态具有对干扰与摄动的不变性,到 20 世纪 80 年代受到重视,是一种实用的非线性控制的综合方法。

(3)微分几何法:微分几何法在过去的 20 多年中一直是非线性控制系统研究的主流,它对非线性系统的结构分析、分解以及与结构有关的控制设计带来极大方便。用微分几何法研究非线性系统是现代数学发展的必然产物,但这种方法也有它的缺点,体现在它的复杂性、无层次性、准线性控制以及空间测度被破坏等。因此,又有学者提出引入新的、更深刻的数学工具去开拓新的方向,如微分动力学、微分拓扑与代数拓扑、代数几何等。

1.2.3 最优控制理论

最优控制理论是研究和解决从所有可能的控制方案中寻找最优解的一门学科,是设计最优控制系统的理论基础,主要研究受控系统在给定的初始条件、约束条件、指定性能指标的情况下,寻求使性能指标达到最优值的控制规律及其综合方法。在最优控制理论中,经典的变分法是求解无约束问题的基本方法,但由于实际的控制量总是有限制条件的,因此用于求解和综合有控制约束的最优控制系统问题的主要方法还有现代变分法,如极大值原理和动态规划。最优控制理论的研究范围正在不断扩大,诸如大系统的最优控制、分布参数系统的最优控制等。

1.2.4 随机控制理论与最优估计

随机控制理论的目标是解决随机控制系统的分析和综合问题。维纳滤波理论和卡尔曼-布什滤波理论是随机控制理论的基础之一。随机控制理论的一个主要组成部分是随机最优控制,这类随机控制问题的求解有赖于动态规划的概念和方法。

实际应用中的工程系统、农业系统以及经济系统等本身都含有一些未知的或不确定的因素,外部环境上还不可避免地存在各种扰动、噪声和误差。随机系统理论将各种未知的、不确定的、不能建模的内外扰动和误差,用不能直接测量的随机变量及过程以概率统计的方法加以描述,并用随机代数方程、随机微分方程、随机差分方程为系统动态模型来描述系统的特性与本质。

最优估计研究的是如何根据系统的输入输出信息,估计或构造出随机动态系统中不能直接测量的状态信息。在状态反馈控制器的设计中,对不可观测的状态信息的最优估计是实现闭环控制系统精确控制不可或缺的重要环节。

1.2.5 系统辨识理论

无论是经典控制理论还是现代控制理论,被控对象的数学建模都是实现控制的重要环节,离开了准确的数学模型,是不可能实现对被控对象的控制的。建模的方法主要有理论建模和实验建模。理论建模主要用于结构参数及边界条件明确的系统,实验建模则用于结构参数及边界条件不完全明确的系统。

系统辨识是一种实验建模的理论和方法,是利用系统在试验或实际运行过程中测量到的输入输出数据,运用数学方法构造出描述系统动态特性的数学模型,并估计其参数的理论和方法。在实际过程中,系统辨识包括结构辨识和参数估计两方面。

1.2.6 智能控制

智能控制理论是人工智能、控制论、运筹学和系统学等学科的交叉。智能控制是人工智能和自动控制的结合物,无需人的干预就能够独立地驱动智能机器实现自动控制。实现智能控制的关键在于对任务和模型的描述、符号和环境的识别以及知识库和推理机的设计。智能控制用于生产过程,让计算机系统模仿专家或熟练操作人员的经验,建立起以知识为基础的广义模型,采用符号信息处理、启发式程序设计、知识表示和自学习、推理与决策等智能化技术,对外界环境和系统过程进行理解、判断、预测和规划,使被控对象按一定要求达到预定的目的。

它的主要特点如下。

(1)同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程。

(2)智能控制的核心在高层控制,即组织级,它的主要任务在于对实际环境或过程进行组织。

(3)系统获取的信息不仅是数学信息,更重要的是文字符号、图像、图形、声音等各种信息。

智能控制正处于发展过程中,还存在许多有待研究的问题:①探讨新的智能控制理论;②采用语音控制;③提高系统的学习能力和自主能力;④利用现有的非线性技术分析闭环系统的特性;⑤智能控制的实现问题。

1.2.7 自适应控制

自适应控制系统通过不断地测量系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐了解和掌握对象,然后根据所得的信息按一定的设计方法,作出决策去更新控制器的结构和参数以适应环境的变化,达到所要求的控制性能指标。

自适应控制系统应具有如下三个基本功能。

(1)辨识对象的结构和参数,以便精确地建立被控对象的数学模型。

(2)给出一种控制律以使被控系统达到期望的性能指标。

(3)自动修正控制器的参数。因此自适应控制系统主要用于过程模型结构未知或过程模型结构已知但参数未知且随机的系统。

自适应控制系统的类型主要有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统、自寻最优控制系统和学习控制系统等。最近,基于神经网络的非线性系统自适应控制又得到重视,提出了一些新的方法。

1.2.8 鲁棒控制

过程控制中面临的一个重要问题就是模型不确定性,鲁棒控制主要解决模型的不确定性问题,但在处理方法上与自适应控制有所不同。自适应控制的基本思想是进行模型参数的辨识,进而设计控制器,控制器参数的调整依赖于模型参数的更新,不能预先把可能出现的不确定性考虑进去。而鲁棒控制在设计控制器时尽量利用不确定性信息来设计一个控制器,使得不确定参数出现时仍能满足性能指标要求。鲁棒控制的目的是寻求一种反馈控制规律,使闭环系统的特征(如稳态性能和动态性能)不受建模误差和不可测扰动等不确定性因素的明显影响。

鲁棒控制认为系统的不确定性可用模型集来描述,系统的模型并不唯一,可以是模型集里的任一元素,但所设计的控制器必须使模型集里的元素都能满足要求。鲁棒控制的一个主要问题就是鲁棒稳定性,目前常用的有如下三种方法。

(1)代数法:当被研究的系统用状态矩阵或特征多项式描述时,一般采用代数方法,其中心问题是讨论多项式或矩阵簇的稳定性问题。

(2)李雅普诺夫方法:当不确定性以状态空间模式出现时是一种有利工具。

(3)频域法:从传递函数出发研究问题,有代表性的是 H_∞ 控制,它用作鲁棒性分析的有效性体现在外部扰动不再假设为固定的,而只要求能量有界即可。这种方法已被用于工程设计中,如 H_∞ 最优灵敏度控制器设计。

1.2.9 模糊控制

模糊控制借助模糊数学模拟人的思维方法,将技术人员的经验加以总结,运用语言变量和模糊逻辑理论进行推理和决策,对复杂对象进行控制。模糊控制既不是指被控过程是模糊的,也不意味控制器是不确定的,它是表示知识和概念上的模糊性,它完成的工作是完全确定的。1974年英国工程师 E. H. Mamdani 首次把 Fuzzy 集合理论用于锅炉和蒸汽机的控制以来,开辟了 Fuzzy 控制的新领域,特别是对于大时滞、非线性等难以建立精确数学模型的复杂系统,通过计算机实现模糊控制往往能取得很好的结果。

模糊控制的类型有如下几种。

(1)基本模糊控制器:一旦模糊控制表确定之后,控制规则就固定不变了。

(2)自适应模糊控制器:在运行中自动修改、完善和调整规则,使被控过程的控制效果不断提高,达到预期的效果。

(3)智能模糊控制器:它把人、人工智能和神经网络三者联系起来,实现综合信息处理,使系统既具有灵活的推理机制、启发性知识与产生式规则表示,又具有多种层次、多种类型的控制规律选择。

模糊控制的特点是不需要精确的数学模型,鲁棒性强,控制效果好,容易克服非线性因素的影响,控制方法易于掌握。

模糊控制有待进一步研究的问题:模糊控制系统的功能、稳定性、最优化问题的评价;非线性复杂系统的模糊建模、模糊规则的建立和模糊推理算法的研究;找出可遵循的一般设计原则。

1.2.10 神经网络控制

神经网络是由所谓神经元的简单单元按并行结构经过可调的连接权构成的网络。神经网络