

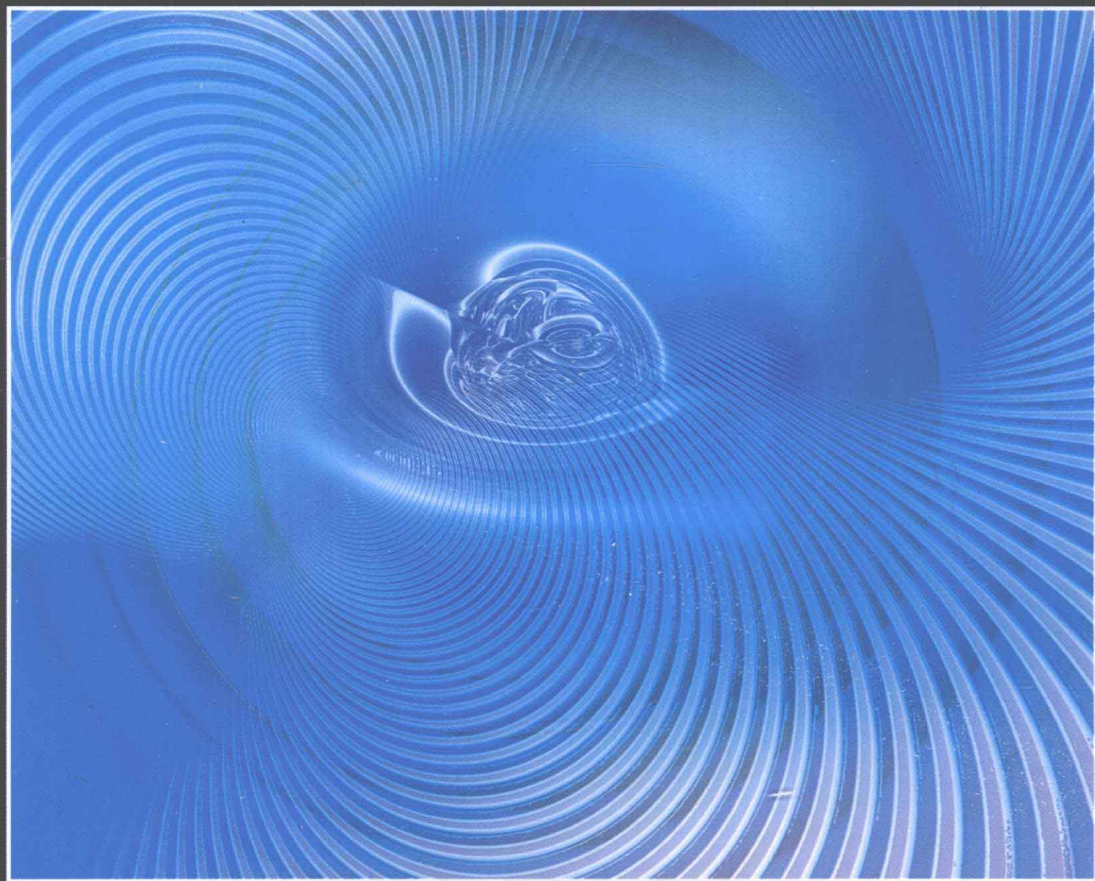


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代控制理论

刘豹 唐万生 主编

第3版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代控制理论

第3版

刘豹 唐万生 主编

陈增强 马寿峰 审



机械工业出版社

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,在本书的第2版的基础上进行了修订,以适合广大高校相关专业需求,反映当前技术发展的主流和趋势。本书第3版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书介绍现代控制系统的基本理论和控制系统分析与设计的主要方法,内容包括线性控制系统、最优控制,由浅入深,有启发性。

状态空间方法不仅是控制理论的基础,而且也是现代网络分析和线性系统理论的基础,自动化专业的学生应该熟悉这种基本方法,能控性和能观性是状态空间分析方法的根本问题,在本书中作了较详细的说明。李雅普诺夫稳定性理论无论对线性还是非线性系统的分析和综合都有用处,这是控制理论中若干再生的古老理论之一,本书对此作了最基本的阐明,对系统的综合,具体讨论了状态反馈和输出反馈控制问题,对于观测器问题也作了简述,本书还介绍了最优控制的三种基本方法,即变分法、极大值原理和动态规划。每章附有习题。使读者通过本书的学习,能打下扎实的理论基础,又掌握控制系统分析与设计的技能。

本书可作为高等学校自动控制或自动化专业本科生或研究生的教材或教学参考书,也可作为经济管理类专业动态经济系统课程的教学参考书,也可供工程技术人员参考。

本书配有免费电子教案,欢迎选用本书作教材的教师登陆 www.cmpedu.com 注册下载

图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论/刘豹,唐万生主编.—3版.—北京:机械工业出版社,2006.7(2011.8重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-03103-1

I. 现... II. ①刘... ②唐... III. 现代控制理论 IV. 0231

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第061460号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王雅新 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2011年8月第3版第15次印刷

184mm×260mm·20.75印张·485千字

标准书号:ISBN 978-7-111-03103-1

定价:38.00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

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第3版前言

“现代控制理论”课程是大学自动化类专业的主干技术基础课，在控制理论课程中，目前我国大多数学校采用现代控制和经典控制分别设课的方式进行教学。由于现代控制理论中的严格证明和大量的矩阵运算，容易掩盖状态空间方法的工程背景，使学生误认为现代控制理论就是数学问题，与经典控制理论及后续的控制课程关系不大。鉴于此，国内外许多高校已开始进行这方面的探索和研究。国际上许多控制理论教材已将经典和现代有机地结合起来，而我国这方面的教材还较少。基于此，在充分了解国内外控制理论的教学情况及发展趋势，并总结我们过去教学经验的基础上，为使控制理论课的教学适应现代控制技术的发展，我们强调用统一、联系的观点来分析及处理问题，将“现代”与“经典”有机地结合起来。我们突出了现代控制理论的物理概念及工程背景，利用经典控制理论物理概念明确、工程意义强的特点，给现代控制理论赋予较强的物理概念及工程背景，克服原来学习现代控制理论时，容易陷入纯数学推导而不易建立工程概念的难点，使学生觉得本书内容思路清晰，概念清楚，处理问题的方法简洁，并不难学。

本书论述清楚，语气通顺，语句精炼，基本概念和定理、定义等叙述准确、易懂，定理证明严密、规范。

现代控制理论（第2版）这本教材，到2005年已经经过27次印刷，出版了15万册，得到越来越多院校的应用。我们收到了教师和学生的大量来信，提出了许多宝贵意见，对书中的不足之处作了中肯的批评和指正，在此表示衷心的感谢。

作为一门基础课，“现代控制理论”的内容基本上是固定的。这种教材的内容可以有不同的编排，但都着重按教学的规则循序渐进，由浅入深，简繁适度。因而，这次修订，我们仍用第2版的目录，改正了几处错误，添加了一些说明及稳定性部分必要的证明。

第2版是我组稿的，并由当时在第一线讲课的田树苞教授和林俊琦教授主笔，这次修订由现在正讲课的唐万生教授主办，参加协助的还有亢京力博士和张建雄博士。

刘豹

2006年6月

天津

第2版前言

本书由原国家机械工业委员会“工业自动化仪表”专业教学指导委员会于1987年9月北戴河会议上决定编写，是在已出版的第一轮教材《现代控制理论》的基础上修订而成的。原书包括状态空间分析法、最优控制、随机最优控制和系统辨识四大部分，共50多万字。本书仅包括状态空间分析法和最优控制两部分，共20万字。

原书已出版了39810册，在相当多的工科院校中得到应用。在过去5年中，我们收到了教师和学生70多封来信，提出了许多宝贵意见，对原书中在编写、印刷、基本内容等方面存在的问题，作了中肯的批评和详尽的指正，还有的老师，为本书的习题作了详细的解答，在此表示衷心的感谢。

在这次修订中，我们按读者的意见，总结了讲课的经验，对本书作了充分的修正和改编。并尽可能地对一些难理解的部分多作物理意义的阐明和解释。为了用实例说明问题，我们大量地增加了例题和习题。对于最基础的问题，如能控性和能观性、输出反馈问题、最优控制的几种形式等都作了较详细的描述。

原书中这部分内容是已故的卞继仁同志和我编写的，这次修订则由位于讲课第一线的田树芭教授和林俊琦副教授主笔，而我只作了组稿、审稿和重写绪论的工作。本书由哈尔滨工业大学邱化元教授主审。

刘豹
1989年4月 天津

目 录

第3版前言

第2版前言

绪论	1
0.1 控制理论的性质	1
0.2 控制理论的发展	2
0.3 控制理论的应用	4
0.4 控制一个动态系统的几个 基本步骤	6
第1章 控制系统的状态空间表达式	9
1.1 状态变量及状态空间表达式	9
1.2 状态变量及状态空间表达式 的模拟结构图	15
1.3 状态变量及状态空间表达式 的建立(一)	16
1.4 状态变量及状态空间表达式 的建立(二)	22
1.5 状态矢量的线性变换 (坐标变换)	32
1.6 从状态空间表达式求传递函数阵	44
1.7 离散时间系统的状态空间表达式	48
1.8 时变系统和非线性系统的状态 空间表达式	50
习题	54
第2章 控制系统状态空间 表达式的解	58
2.1 线性定常齐次状态方程 的解(自由解)	58
2.2 矩阵指数函数——状态转移矩阵	59
2.3 线性定常系统非齐次方程的解	68
2.4 线性时变系统的解	70
2.5 离散时间系统状态方程的解	77
2.6 连续时间状态空间表达式 的离散化	82

习题	87
----	----

第3章 线性控制系统的能控性

和能观性

3.1 能控性的定义	89
3.2 线性定常系统的能控性判别	91
3.3 线性连续定常系统的能观性	101
3.4 离散时间系统的能控性 与能观性	106
3.5 时变系统的能控性与能观性	110
3.6 能控性与能观性的对偶关系	118
3.7 状态空间表达式的能控标准型 与能观标准型	122
3.8 线性系统的结构分解	132
3.9 传递函数阵的实现问题	143
3.10 传递函数中零极点对消与状态 能控性和能观性之间的关系	151
习题	154

第4章 稳定性与李雅普诺夫方法

4.1 李雅普诺夫关于稳定性的定义	158
4.2 李雅普诺夫第一法	161
4.3 李雅普诺夫第二法	163
4.4 李雅普诺夫方法在线性系统中 的应用	170
4.5 李雅普诺夫方法在非线性系统中 的应用	177
习题	186

第5章 线性定常系统的综合

5.1 线性反馈控制系统的基本结构 及其特性	188
5.2 极点配置问题	193
5.3 系统镇定问题	200
5.4 系统解耦问题	203
5.5 状态观测器	210

5.6 利用状态观测器实现状态反馈的系统.....	220	6.7 用变分法求解连续系统最优控制问题——有约束条件的泛函极值.....	257
习题	227	6.8 极小值原理.....	266
第6章 最优控制	230	6.9 Bang-Bang 控制	273
6.1 概述.....	230	6.10 双积分系统的时间最优控制	275
6.2 研究最优控制的前提条件.....	232	6.11 动态规划法	279
6.3 静态最优优化问题的解.....	234	6.12 线性二次型最优控制问题	293
6.4 离散时间系统的最优控制.....	238	6.13 线性二次型次优控制问题	315
6.5 离散时间系统最优控制的离散化处理.....	241	习题	319
6.6 泛函及其极值——变分法.....	242	参考文献	323

绪 论

0.1 控制理论的性质

控制理论研究如何改进动态系统的性能以达到所需目标，这个广义定义包含了人类活动的许多方面。控制理论试图以定量方式描绘这些问题，并集中于寻求一些精确的数学描述方法。控制理论有两个目标：了解基本控制原理；以数学表达它们，使它们最终能用以计算进入系统的控制输入，或用以设计自动控制系统。更进一步说，控制科学不仅用以处理单个动态系统，还用以处理在观察输出和系统本身带有不确定性条件下的复杂动态系统。

自动控制领域中有两个不同的但又相互联系的主题。

第一个主题是反馈的概念。这时，系统的输入由同时观察到的系统的各种输出确定，输入输出都是时间的函数。反馈概念的精髓是可以得到各种输出和它们的各个所需值的实时比较的度量——各种误差，再由以此测量到的误差来减少误差。这样形成的因果链是输入、动态系统、输出、测量、比较、误差、输入构成的一个环路，因而也构成一个包含原动态系统在内的一个新的动态闭环系统。这种构成的关键问题是新闭环系统的稳定性和动态特性。以上这种简练的描述包含着采用上百个变量以高速度反馈到控制计算机的现代反馈方案的极大的复杂性。

第二个主题是最优控制的概念。这时，控制的目标是使以数字量表示的显示在一段时间上的所需性能和系统实际性能间的差异的性能指标为最小，要寻找一个使性能指标



最小的时间函数的控制。这种问题的解形成了在整个控制时段中一个预先规划好的输入控制。这常称为轨迹最优化问题。

这两个主题在很多地方复杂地交织在一起。对于控制理论的一种说法是在某些条件下最优控制可以构成一个反馈来解决。相反，在另一些条件下已知的反馈系统有相应的最优控制问题，可以用已知的反馈来求解。在线性理论中，我们可以用代数矩阵方程求解变分问题来设计一个反馈系统。这种方法引出了精确的数字算法。控制理论中的其它问题则混合使用这两个主题来求解。

采用反馈的基本原因是要在不确定性存在的条件下达到性能目标。许多情况下，对于系统的了解是不全面的，或者，可用的模型是基于许多简化的假设而使它们变得不确切。系统也可能承受外界干扰，输出的观测常受噪声污染。有效的反馈可以减少这些不确定性的影响，因为它们可以补偿任何原因引起的误差。

反馈概括了很广泛的概念，包括当前系统中的多回路、非线性和自适应反馈，以及将来的智能反馈。广义地说，反馈可以作为描述和理解许多复杂物理系统中发生的循环交互作用的方式。实际上目前研究的非线性动态系统中常见到的复杂交互作用可以解释为内反馈。生命组织和计算机算法中也有内反馈，因而，理解反馈动力学的目标也超出了控制理论的范畴。

0.2 控制理论的发展

理论归根结底是从实践发展而来的，它来之于实践但又反过来指导实践。控制理论的发展又一次说明了这一真理。远在控制理论形成之前，就有蒸汽机的飞轮调速器、鱼雷的航向控制系统、航海罗经的稳定器、放大电路的镇定器等自动化系统和装置。这些都是不自觉地应用了反馈控制概念而构成的自动控制器件和系统的成功的例子。但我们何尝知道在控制理论形成之前的漫长岁月中，由于缺乏理论指导而失败了无数次的实践和尝试呢？20世纪20年代到40年代，马克斯威尔对装有调速器的蒸汽机系统动态特性的分析、马诺斯基对船舶驾驶控制的研究都是控制理论的开拓性工作。奈奎斯特、伯德等人对单回路反馈系统的研究结果显示反馈控制即使在系统情况知之不多的条件下也可以得到较好的性能。20世纪40年代至50年代，维纳对控制理论作出了创造性的贡献。他的控制论概念提供了一个可以把控制问题和通信问题统一考虑的框架。他同时也发展了在有噪声的情况下信号的滤波、预报和平滑的方法，其后又利用了当时刚提出的平稳随机过程最后建立了信息的伯德—香农概念。

20世纪50年代后期到60年代初期是控制理论发展的转折时期。第二次世界大战后华尔德的序贯分析和贝尔曼的动态规划是转折时期的开端。这些理论受到最优统计决策和资源分配中的序贯规划问题研究的激发。它们在概念上的贡献是考虑了一大类以初始状态参数化了的动态优化问题。这个理论的中心问题是建立最优性能的动态规划方程，从它的解就可以确定最优反馈控制规律。与此同时，优化领域中另一个长期被忽视的强调不等式约束的线性和非线性规划也开始得到发展。这个领域的研究人员首先设计了便于计算机计算的数值方法，这种方法后来在控制中变得十分有用。



苏联学者在 20 世纪 50 年代对包含非线性特性、饱和作用和受到限制的控制等因素的系统的最优瞬态的研究表现出很大的兴趣。这些学者的研究讨论导致了庞特里亚金的“极大值原理”。这个原理打开了系统地研究受到状态与控制两方面的约束而使用不连续控制函数的最优轨迹的大道。这些又紧密地和变分法联系，又进一步刺激了与非线性泛函分析相关的更抽象的优化问题的理论的研究。极大值原理的最大贡献可说是 20 世纪 50 年代和 60 年代对于大量轨迹优化数值计算方法的研究的冲力。这种研究最后导致许多空间运载器的成功的设计，其中包括阿波罗计划和宇航飞行计划。

显示控制理论转折时期的另一个里程碑是 20 世纪 50 年代后期卡尔曼（卡尔曼——布西）滤波器的发现。早期滤波器设计的维纳理论受到关于平稳随机过程的假设和要求解积分方程或分解傅氏变换的限制。卡尔曼滤波器则不受这些限制，而且可以在小型计算机上当作序贯算法来实现。它的设计在于求解矩阵黎卡提方程。用对偶理论可以得到以同样方程表达的线性反馈控制。这些思想在世界上有巨大影响，它推动了有关反馈控制和滤波的大量研究工作，导致了控制理论的许多实际应用成果。

最近 25 年线性系统理论的研究非常活跃。自从引入了能控性、能观性、状态实现、线性二次型高斯调节问题的概念之后，这一领域已成为整个控制理论发展的概念基础，而且还成为将成果普遍化到非线性和分布参数系统上去的标准典范和对所有新的控制规范的试验基础。同时，它本身还在继续发展，不断提出新概念、精确的结果和算法。线性系统的几何方法已引出了超不变性、能控性子空间、干扰去耦、非关联控制等重要新概念和对高放大反馈系统的渐近分析方法。与此相关的是线性控制问题的数值分析方面的重要工作。近年来，许多先进线性理论的计算算法已形成商品软件，可以在各种型号计算机（包括个人计算机）上使用。

现在已在非线性常微分方程描述的反馈控制系统的研究中引入了微分几何、李代数、非线性动力学等方法，并得到了很大进展，解决了反馈线性化和非线性去耦问题，也在能控性研究上得到更精确的结果。采用非线性动力学的方法已将反馈镇定作用推广到反馈不能线性化的非线性系统上去。

20 世纪 60 年代后期和 70 年代早期，将线性二次型理论推广到无穷维系统（即以偏微分方程、泛函微分方程、积分微分方程和在巴拿赫空间的一般微分方程描述的系统）的工作得到很大进展。这一类研究工作是沿着好几条路分别进行的。有人试图得到能为一大类无穷维系统应用的一般的算子形式；而另一些人则从一些特殊方程开始做起，如用波动方程或时延微分方程，企图在进行更普遍的形式的研究之前能从具体问题的结构中得到一些启发。经过一段时间的研究已弄清不可能找到一种解求所有无穷维问题的普遍形式，而只能是具体问题具体求解，由此引出了诸如解的常规性、各种无穷维的近似方案的有效性、变分形式等细节研究。目前研究的是以线性偏微分方程或相对简单的时延方程描述的只能在空间的边界上加以观察和控制的系统。至于对非线性无穷维系统的控制问题的研究，只有在出现了概念上的突破后才谈得到。

偏微分方程的另一方面工作是用包含连续时间和空间变量的动态规划方法推导出来的最优化方程。这一方程也叫哈密尔顿——雅可比——贝尔曼方程，已成为先驱分析家的激励的源泉。这些分析家已提出了“粘性解的概念”。如果他们的方法最终能解决哈密



尔顿——雅可比——贝尔曼方程的求解，那么就会有另一种设计非线性反馈控制的工具。

凸分析为控制理论和变分法提供了新方法，也为它们通向数学规划和运筹学的数值分析架起了桥梁。在 20 世纪 70 年代早期，凸分析就扩展到“非光滑分析”中去，形成了解决长期未解决的最优控制问题的一个新基础。20 世纪 60 年代发展起来的变分不等式理论在自由边界问题的研究中显示了功效。

非线性滤波的研究，继续扩展了卡尔曼滤波器，并向它注入了许多新思想。最优控制问题的随机形式在 20 世纪 70 年代和 80 年代吸引了许多学者的兴趣。这一领域是当前最活跃的领域之一。在应用方面，随机控制理论的概念框架已开始对大规模交互关联的动力系统的控制起了影响。

代数在发展更有效的线性控制理论上有多方面的建树。环和模的概念的引入精确地重构了早期获得的有关能控性和能观性的结论。像多项式环上因子分解那样的代数计算方法近来变得很重要。代数几何方法在多变系统奈奎斯特稳定准则和系统辨识中参数化问题的求解方面起了重要作用。

20 世纪 70 年代末 80 年代初，反馈控制的设计问题经历了一个重新修正的过程。在基于微分方程的状态空间方法普及了多年之后，基于输入输出或频率分析的设计方法又重新抬头。这种方法显得和健壮控制研究有较完善的配合，因为它允许对所有镇定控制器参数化，并可以从中选择其性能在所有频率范围内都一致符合要求的一个控制器。鲁棒控制中的 H_∞ 方法采用了插入理论和复值函数理论（即所谓 H_∞ 空间），其理论深度和实用重要性使此理论成为 20 世纪 80 年代重要成果之一。

随着人工智能的发展和引入了新的计算机结构，控制理论和计算机科学的联系愈来愈密切。近来已有一些专家系统可以自动寻求最优随机控制和滤波问题的理论解和数值解。在控制框架上将符号运算和数值运算相结合的研究工作正在开展。智能控制的概念也在发展，其目标之一是将当前的控制理论与尚未成形的人工智能成功地合成一体。离散事件系统理论架起了一座通向扩展了的状态机器理论的桥梁，在将来可能为评价计算机系统的性能提供一个建模工具。

0.3 控制理论的应用

控制理论中各种方法对现代技术的发展有很大影响。基于经典理论的单回路控制系统，以及最近出现的第一代自适应控制器，已在许多工业生产中得到应用，这些控制器也充满于我们的日常生活设施中。控制系统之所以能得到如此普遍的应用，不但要归功于现代仪表化（完备的传感器和执行机构）与便宜的电子硬件，还由于控制理论有处理其模型和输出信号所具有的不确定性动态系统的能力。

在控制理论中已完善的各种方法愈来愈得到普遍应用的同时，先进的理论概念的应用却仍集中在像空间工程那样的高技术方面。当然，由于计算机技术的飞速发展和世界性的激烈的工业竞争，这种情况将会改变。新的计算机技术提供了实现更精巧的控制算法的工具，而要在工业界竞争中保持领先地位的愿望促进了更精细的、高效的和可靠的控制。此外，愈来愈多的具有较强的数学背景的工程技术人员也是造成这种情况改变的



因素。

一般来说,新理论新概念的发现和建立与它们成功地在实际控制问题中得到应用之间都有一定的时延。在有些情况下,今天的应用往往基于10年或20年前所创造的理论概念。但是,在今天也有一些较新的理论成果已得到应用。下面举一些应用的例子。

航天飞船装备着包括两部不同的数字自动驾驶仪的精密控制系统,其中一部驾驶仪专用以控制飞船在轨道上的上升和下降动作,另一部则控制飞船在轨道上的正常飞行。控制和数控处理功能由五部相同的IBMAP-101计算机完成。轨道飞行控制系统用状态估计和开关控制等各种现代控制原理构成控制规律。例如,反应控制系统依靠在每个转轴上的相平面中预先规划好的切换曲线来控制推进器的正负点火指令。这一设计需要广泛研究飞行体和变动负载间所有可能的不利的动态反应。作为预防故障的手段,要设计能对转动率的极值、推进器的冲力强度给予限制的装备。除此之外,还备有一个更新试验驾驶仪,它具有一个用以选择发动机喷射器的与线性规划算法相结合的三维相空间控制规律。这个自动驾驶仪经飞行试验证明,它对飞船动态变化有很强的适应性。

一种新的治疗脑水肿和恶性脑瘤的方法是同时使用加压素和皮质酮两种药。由于人体系统调节这些激素的高度非线性特性,服用这些药的相对速率是非常重要的。法国研究人员把这一问题当作是一个 2×2 非线性多变量控制问题,并基于李代数方法采用了非线性去耦和反馈线性化手段,成功地解决了给药速率控制问题。

许多先进的控制技术都是针对某个确定的需要而研究得到的成果,但也有一些却是先进理论发展的意外收获。后者的一个例子是NASA爱密斯实验室研制成的Feitenins直升机自动驾驶仪控制系统。这种直升飞机的飞行动力学由12个非线性常微分方程描绘。NASA研究了一段时间没有很好地解决问题。到20世纪80年代早期几何控制理论数学家们建立了非线性反馈存在的充分和必要条件,由此形成了一个与典范型线性能控系统微分同胚的闭环系统,NASA研究人员利用这一发展,以一定精度实现了直升飞机系统满足线性化反馈的条件,因而可以用一个恰当的非线性控制规律进行控制,得到成功。

电力生产常受到许多不确定性现象的影响,如电力负荷的不确定性和电厂的可能停歇。在水电生产中,有效水量决定于降雨量的波动。法国计算机科学与自动化研究所INRIA研究了许多电力生产管理控制问题,其中有一项是新喀利多尼亚的具有八个热电厂和一个水坝的发电系统。研究目标是选择一套可行的生产方案(相当于反馈控制)以可能的最小代价去满足电力需求。模型辨识工作包括一个随机微分方程的漂移和扩散系数的估计。最优反馈的控制是用数字求解微分方程和动态规划中不等式而得到的。大型电厂的控制困难在于维数。而从上述研究可以得到一个概念性的框架使工程师们可以入手解决电力生产控制问题。

目前许多轻型高飞行性能的飞机的最主要的部件是数字飞行控制系统。F-16和削掠翼X-29飞机中的机械联动机构已被数字计算机和电线代替,所以,又称“以线飞行”系统。为了增强飞行性能,这些飞机被设计得静态(开环)不稳定。数字式的线飞行系统可以被设计得能改变飞机的飞行特性,控制系统全时间工作以镇定飞机,并支持驾驶系统发出的各种指令。这种设计由于采用了快到足以反映流体动力学的波动和镇定一个不稳定动态系统的数字控制系统而得到实现。用控制理论去设计这些飞机的确是一个重大



的成功。很明显，将来“超性能”飞机的出现将取决于快速健壮控制器的设计研究的进展。

在设计中的夏威夷的 Keck 观察站的 10cm 望远镜由 36 块六角形镜片组成，每片镜面由其后面的一部执行机构推动。各执行机构由一台计算机控制，采用反馈算法使其对目标聚焦。望远镜的整体框架由许多相互联结的梁和柱构成，它们承受风力而抖动。控制器必须在框架和镜子抖动的条件下很好地聚焦。控制系统是采用高维有限元法逼近显示主要振动模态的结构动力学方法来设计的。

建筑工程界现在流行对结构进行主动控制，世界上几座最高建筑物的设计中采用了主动阻尼系统。结构工程师们的理论研究说明：一个设计完善的主动控制和谐调整质量阻尼系统可以减少建筑物承受强风时的动态移动。

工业应用自动控制的范围更广，举不胜举，为简化起见，可以用两个例子说明。

控制概念得到主要应用的一个领域是石油化工生产过程。化工厂中每一个生产单元都包括有几百个控制器，最常见的是单回路比例—积分—微分调节器，近年来也逐渐采用新型控制器，如延迟补偿器、状态估计器、不相关多变量控制器。许多自动化仪表厂家已供应自校正调节器和适应控制器。

钢铁行业中热轧厂是最早成功地采用计算机控制的工厂。高产量、高质量的生产要求，使它们早在 1961 年就采用计算机自动化，从那时起，热轧厂控制技术发展很快，已达到多层次、多变量的适应控制。

0.4 控制一个动态系统的几个基本步骤

简单地说，控制一个动态系统有下列四个基本步骤：

建模 基于物理规律建立数学模型；

系统辨识 基于输入输出实测数据建立数学模型；

信号处理 用滤波、预报、状态估计等方法处理输出；

综合控制输入 用各种控制规律综合输入。

1. 建模

为一个系统选择一个数学模型是控制工程中最重要的工作。当系统是不完全清楚的时候，为此系统建立一个数学模型是特别困难的。有些情况，可以写出一个系统的精确的动力学数学公式，但是它可能是如此复杂以致无法在它基础上设计一套控制规律。所幸的是对于不完全清楚的模型还能较好地处理，因为从无数实践中我们已经学到，一个复杂的系统可以在十分简化的模型上用反馈控制得到成功。因而，控制工程中的模型问题和物理学中的模型问题是完全不同的。在控制理论中，问题的关键是寻找一个健壮的在数学上精练的模型，它在有效数据基础上可以用系统辨识方法求得。

应当认识到：在控制系统设计中如果无法找到简单的数学模型，控制理论就不能得到成功的应用。这种特点一方面使控制得到了实际应用，而另一方面却使无控制领域内部引起了争议，许多控制的数学方法是否是确实有用的？而且，还使控制领域以外的许多科学家对控制的研究性质发生了误解。这种争议可以追溯到两个极端。



一种极端是认为在控制中模型的不完善无关紧要，因为反馈可以减少包括模型误差在内的不确定性的作用。而真正需要的是一个强有力的反馈的设计方法，用以构成一个健壮的、适应的有容许误差能力的控制系统。因而，牺牲了模型而把重点放在控制器上。这种观点使得为一大类通用模型设计控制器的先进理论产生了，从而形成了一种看法，认为控制理论用不到去关心像用偏微分方程构成的那种精致的模型。所以有些控制专家认为：重要的是健壮的控制理论，而不是好的模型。

另一个极端则十分重视从物理规则推演出来的精确的模型，而控制设计是容易的，至少在得到模型后是计算上可以实现的。对模型所强调的看法对于像物理学家和流体动力学家那些科学家们来说，是能接受并有吸引力的。模型是精确的假设并用以支持许多基于这种模型所作的抽象的数学控制规律的研究工作。这一极端观点完全忽视了模型的不确定性问题及其对控制设计的影响。它使人相信设计一个控制系统的唯一通路是首先要有一个十分精确的微观模型，这种想法代表了一种对控制研究的完全误解。

事实上，走一个极端而不考虑到另一方面是不恰当的。控制界必须认识到控制技术新应用的成功完全靠新模型和这些模型对新理论的发展，同时也依靠反馈设计技术的不断创新。尽管上述两种极端是控制界固有的，它始终在一定程度上存在着，而重要的突破性的成果恰恰是结合两方面的长处而得到的。在某些特殊应用场合，可能某一种观点更实际，例如在过程控制中常常用基于线性模型的健壮控制器设计，而在先进的空间应用中，则模型精确性更重要。

2. 系统辨识

系统辨识可以定义为用在一个动态系统上观察到的输入与输出数据来确定它的模型的过程。如果模型结构已给定，只是其参数尚未知道，则系统辨识就变成参数估计。辨识是控制理论中不可分割的重要组成部分，它属于应用数学中的求逆问题。进行系统辨识常需作下列实验，发生输入信号和记录输出信号。有许多统计方法和计算技术可用以处理数据和得到模型。当前系统辨识方面的研究集中在下列诸基本问题上：辨识问题的可解性和问题提出的恰当性、对各类模型的参数估计方法。

3. 信号处理

信号处理是控制理论外面的独立的一门学科，但这两学科之间有许多重叠之处，而控制界曾对信号处理作出了重要贡献，特别是在滤波和平滑的领域。这一领域是研究如何从被噪声污染的观察信号中重构原信息的问题。它们有广泛的应用场合，如通信、从卫星追索数据、语言处理、图像再现等。如果没有这种计算机化了的图像再现能力，那么从水手号和先锋号等航天飞船探测器传送回来的外层行星图像就毫无用处。

4. 控制的综合

控制的综合就是为控制系统生成控制规律，它与模型、辨识、信号处理、所用综合方法有关。这些过程的复杂性导致了各种控制研究课题，主要有：

鲁棒控制理论——研究能使闭环系统保持良好的性能而不受模型与信号中不确定性影响的反馈作用。例如，一个健壮的反馈不但可以镇定所设计的系统，而且在系统参数变化时，也能镇定它。

适应控制——研究如何在控制过程中自动调整控制规律。这种控制主要被应用于系



统会随时间改变，而这种改变却在不能事先预知的情况下。一个自适应反馈控制规律是在系统自动辨识的基础上自动调整的。

多变量控制——研究具有相关解的多输入多输出系统的控制问题。反馈的作用应当包括对关联的去耦以形成不关联控制。

非线性控制理论——研究非线性动态系统的控制问题。当前许多研究集中在把微分几何作为主要研究方法。

随机控制——应用于系统或其摄动能以概率表达的地方。随机输出信号的滤波和预报是随机控制的自然组成内容。

分布参数控制——应用于系统内部变量的空间分布对控制目标来说是极为重要的情况。例如，对弹性板材震动的控制，对热传导、对内部有延迟的系统的控制以及对流体流动的控制等等。

其它控制——由于计算机技术的不断发展，其它许多控制问题也日趋重要了，例如自学习与自组织系统、递阶控制系统、智能控制系统和离散事件控制系统等等。

第 1 章

控制系统的状态空间表达式

经典控制理论中，对一个线性定常系统，可用常微分方程或传递函数加以描述，可将某个单变量作为输出，直接和输入联系起来。实际上系统除了输出量这个变量之外，还包含有其它相互独立的变量，而微分方程或传递函数对这些内部的中间变量是不便描述的，因而不能包含系统的所有信息。显然，从能否完全揭示系统的全部运动状态来说，用微分方程或传递函数来描述一个线性定常系统有其不足之处。

在用状态空间法分析系统时，系统的动态特性是用由状态变量构成的一阶微分方程组来描述的。它能反映系统的全部独立变量的变化，从而能同时确定系统的全部内部运动状态，而且还可以方便地处理初始条件。这样，在设计控制系统时，不再只局限于输入量、输出量、误差量，为提高系统性能提供了有力的工具。加之可利用计算机进行分析设计及实时控制，因而可以应用于非线性系统、时变系统、多输入—多输出系统以及随机过程等。

1.1 状态变量及状态空间表达式

1.1.1 状态变量

足以完全表征系统运动状态的最小个数的一组变量为状态变量。一个用 n 阶微分方程描述的系统，就有 n 个独立变量，当这 n 个独立变量的时间响应都求得时，系统的运动状态也就被揭示无遗了。因此，可以说该系统的状态变量就是 n 阶系统的 n 个独立变量。



同一个系统，究竟选取哪些变量作为独立变量，这不是唯一的，重要的是这些变量应该是相互独立的，且其个数应等于微分方程的阶数；又由于微分方程的阶数唯一地取决于系统中独立储能元件的个数，因此状态变量的个数就应等于系统独立储能元件的个数。

众所周知， n 阶微分方程式要有唯一确定的解，必须知道 n 个独立的初始条件。很明显，这 n 个独立的初始条件就是一组状态变量在初始时刻 t_0 的值。

综上所述，状态变量是既足以完全确定系统运动状态而个数又是最小的一组变量，当其在 $t=t_0$ 时刻的值已知时，则在给定 $t \geq t_0$ 时刻的输入作用下，便能完全确定系统在任何 $t \geq t_0$ 时刻的行为。

1.1.2 状态矢量

如果 n 个状态变量用 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 表示，并把这些状态变量看作是矢量 $\mathbf{x}(t)$ 的分量，则 $\mathbf{x}(t)$ 就称为状态矢量，记作：

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad \text{或} \quad \mathbf{x}^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$$

1.1.3 状态空间

以状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 为坐标轴所构成的 n 维空间，称为状态空间。在特定时刻 t ，状态矢量 $\mathbf{x}(t)$ 在状态空间中是一点。已知初始时刻 t_0 的状态 $\mathbf{x}(t_0)$ ，就得到状态空间中的一个初始点。随着时间的推移， $\mathbf{x}(t)$ 将在状态空间中描绘出一条轨迹，称为状态轨线。状态矢量的状态空间表示将矢量的代数表示和几何概念联系起来。

1.1.4 状态方程

由系统的状态变量构成的一阶微分方程组称为系统的状态方程。

用图 1.1 所示的 R - L - C 网络，说明如何用状态变量描述这一系统。

此系统有两个独立储能元件即电容 C 和电感 L ，所以应有两个状态变量。状态变量的选取，原则上是任意的，但考虑到电容的储能与其两端的电压 u_C 和电感的储能与流经它的电流 i 均直接相关，故通常就以 u_C 和 i 作为此系统的两个状态变量。

根据电学原理，容易写出两个含有状态变量的一阶微分方程组：

$$C \frac{du_C}{dt} = i$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_C = u$$

亦即

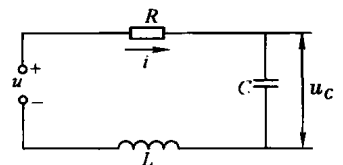


图 1.1 R - L - C 电路