

控制理论的未来方向 —— 数学展望

(美国“控制理论未来方向”专门研究小组报告, 1988)

主席: Wendell H. Fleming

成员

H. T. Banks

S. Marcus

G. Blankenship

J. E. Marsden

R. Brockett

S. Mitter

J. A. Burns

E. Polak

R. V. Kohn

R. T. Rockafellar

A. Krener

D. Russell

A. J. Laub

E. D. Sontag

J. L. Lions

G. Stein

航空航天部七一〇所系统科学室 译

中国科学院系统科学研究所编印

译者的话

工业与应用数学学会(SIAM)1988年底出版的《控制理论的未来方向:数学展望》一书是美国控制理论未来方向专门研究小组根据两年来对该问题所进行的广泛调查、讨论和深入研究所写的报告。

这份报告把控制理论看作一门包括了数学、工程学及其他科学领域重要研究活动的科学分支,来评价其当前研究状况并分析未来研究方向,其中包括现代科学技术对控制理论提出的研究需求和挑战,可能的研究机会,控制理论各分支目前所研究的问题,所使用的现代方法和主要研究成果的简要介绍,控制理论在科学技术各领域当前和未来的应用,对有关的专业研究队伍、学术机构、资助机构所提出的建议,对知识转移、大学教育和研究生培养、职业状况等方面的看法。这份报告是近年来对控制理论所作的最全面最详尽的综述,对了解该领域的目前状况和未来方向、各种有关应用,对研究工作的选题、大学教育和研究生培养都有重要的帮助。

为了使国内系统科学界对国外控制理论的研究现状有更深入的了解,我们全文翻译了这份报告。但由于控制理论是一门涉及面相当广的交叉学科,很多专业术语至今没有统一标准的中文译法。一些词汇又是最近几年新产生的,特别是由于我们对报告中一些内容的无知,用词不当甚至错译之处在所难免,希望在前沿领域中从事具体研究工作的读者给予指正。

参加翻译工作的同志有周政、欧阳奕菡、王翎、刘行舟、刘毅等。

序 言

控制理论未来方向专门研究小组(以下简称专门小组——译者注)成立于1986年。它的任务是:把控制理论看作一门包括了数学、工程学及其他科学领域重要研究活动的科学分支;来评价其当前研究状况并分析未来研究方向。此外,专门小组还讨论了由现代科学和技术所提出的挑战,以及由计算机技术中的革命性进展和与数学相关领域中的近期进展导致的各种机会。这份报告概括了专门小组的研究结果。报告的主要目的是评价这一特定领域的状况和需求。与此同时,专门小组还希望对数学在现代技术中所起的作用做较为广泛的考察。

专门小组希望对以下控制及其他领域中的研究者及同行们,就他们所提出的宝贵建议和建设性批评表示感谢。

A. Arapostathis

Z. Artstein

J. P. Aubin

J. Baillicul

J. Ball

J. Baras

A. Bensoussan

V. E. Bener

C. Berenstein

P. Bernhard

J. Blum

J. Brewer

C. Byrnes

J. Chandra

G. Chen

D. Claude

P. Crouch

J. Crowley

J. Demmel

C. Desoer

D. Elliott

R. J. Elliott

E. Emre

A. Friedman

R. Glowinski

J. Hammer

M. Hozewinkel

U. Helmke

W. Helton

R. Hermann

H. Hermes

G. Hewer

O. Hijab

J. B. Hiriart-Urruty

L. R. Hunt

M. Q. Jacobs

B. Jakubczyk

F. C. Johnson

N. Kalouptsidis

I. Karatzas

H. J. C. Kouts

K. Kunisch

H. Kushner

J. Lagnese

I. Lasiecka

A. Leizarowitz

P. L. Lions

L. Ljung

L. Markus

G. McFadden

G. Meyer

W. E. Miller

H. Nijmeijer

L. Pandolfi

A. Perdon

O. Pironneau

S. Pliska

M. Polis

V. M. Popov

J. P. Quadrat

M. Robin

J. Schwartz

S. Sethi

L. Tartar

R. Temam

R. Triggiani

M. Verma

J. T. Wen

D. Watanapongtes

J. Willems

B. Wyman

G. Zames

中英文术语对照

active control	主动控制	expert systems	专家系统
adaptive control	自适应控制	extended state machines	扩展状态机
aggregation	集结	factorization	因子分解
algorithm-independent approach	算法无关的方法	fault-tolerant control system	容错控制系统
bifurcation	分枝	feedback group	反馈群
bilinear systems	双线性系统	feedback linearization	反馈线性化
canonical form	标准形	fiber	纤维
causal operator	因果算子	filtering of signals	信号滤波
center manifold theorem	中心流形定理	finite-state machines	有限状态机
Chern class	陈类	flexible structure	挠性结构, 柔性结构
climate control	温度湿度控制	fluid flow	流体流动
combinatorics	组合数学, 组合优化	Π -by-wire system	遥控自动驾驶仪系统
commutant lifting	换位提升	frequency domain	频(率)域
compensator	补偿器	generalized curves	广义曲线
computational algebra	计算代数	generalized designs	广义设计
computer vision	计算机视觉	generalized semi-Markov chain	广义半马尔科夫链
Computer-Aided Design	计算机辅助设计	H $\rightarrow$ optimization	H $\rightarrow$ 最优化
conceptual optimal control algorithm	概念最优控制算法	heuristic model	启发式模型
condition number	条件数	hybrid systems	混合系统
contour recognition	轮廓识别	hypoellipticity	次椭圆性
control law	控制(规)律	identifiability	可辨识性
control of chaos	混沌控制	identification	辨识
control-affine nonlinear systems	对控制仿射非线性系统	imbedding	嵌入
cost function	目标函数	immersion	浸入
decentralized control	分散控制	imperfection sensitivity	不完全敏感性
decision vector	决策向量	inequality constraints	不等式约束
decoupling	解耦	infinite-dimensional systems	无穷维系统
diffeomorphism	微分同胚	infinity-norm	无穷范数, 无限范数
differential dynamical systems	微分动力系统	integral homology group	积分同调群
differential inclusion	微分包含	intelligent control	智能控制
dilation	开拓	interface	接口
Discret-Event Dynamical Systems	离散事件动态系统	kinematic chain	运动链
distributed parameter systems	分布参数系统	Kronecker indices	Kronecker 指数
disturbance decoupling	干扰解耦	Lie algebra	李代数, Lie 代数
dual pair	对偶对	Lie bracket structure	李括号结构
dynamical systems	动力系统, 动态系统	linear-quadratic regulator	线性二次型调节器
elastic beam equation	弹性梁方程	linear-quadratic-Gaussian regulator	高斯线性二次型调节器
epiconvergence	外收敛		
equivalence	等价, 等价性	local controllability	局部能控性
estimation	估计	local invertibility	局部可逆性
exact controllability	精确能控性	Lyapunov exponents	李亚普诺夫指数
exact linearization	完全线性化	manifold	流形

manipulator 机械手
 Markov diffusion process 马尔科夫扩散过程
 mathematical programming 数学规划
 minimax theorem 极小极大定理
 model reference adaptive control 模型参考自适应控制
 modeling errors 建模误差
 modeling 建模
 motion planning 运动规划
 multi-channel Nyquist criterion 多通道奈奎斯特判据
 non-interacting control 非交互控制
 nonlinear filtering 非线性滤波
 nonrigid manipulator 非刚性机械手
 on-board systems 机载系统
 optimal control algorithm 最优控制算法
 optimal design 最优设计
 optimal statistical decision-making 最优随机决策
 optimality conditions 最优性条件
 optimization 最优化, 优化
 orbits 轨道
 PDE 偏微分方程
 parallel algorithm 并行算法
 parallelism 并行性
 parametrization 参数化
 parametrized family of systems 参数化系统族
 pathology 病态性
 pencils of matrices 矩阵束
 performance index 性能指标
 performance robustness 性能鲁棒性
 perturbation analysis 摄动分析, 扰动分析
 Petri nets Petri 网
 plants 控制对象
 pole-shifting theorem 极点配置定理
 poles and zeros 零极点
 Pontryagin's maximum principle 庞特里亚金极大值原理
 problem condition 问题性态
 projective bundles 射影丛
 real-time computation 实时计算
 realization theory 实现理论
 resource allocation 资源分配
 response shaping problem 响应成形问题
 Riccati equation solver 黎卡提方程求解系统
 robot 机器人
 robotics 机器人学
 robust control 鲁棒控制
 root-locus method 根轨迹法
 scalar input - scalar output linear systems 单输入单输出线性系统
 self-organizing control 自组织控制
 self-tuning 自校正
 semi-infinite optimization 半无限优化
 sensing 检测
 sensor 传感器
 sequential planning 顺序规划
 set-valued mapping 集值映射
 simulation 仿真
 single-loop control systems 单回路控制系统
 singular distribution 奇异分布
 singular perturbation 奇异扰动
 smoothing of signals 信号平滑
 specialized architecture 专用结构
 stability robustness 鲁棒稳定性
 stabilization 稳定化
 stabilizing controller 稳定化控制器
 state transition nets 状态转换网
 stochastic control 随机控制
 stratification 层化
 subdistribution 子分布
 submanifold 子流形
 supremal controllability subspace 最大能控性子空间
 supremal invariant subspace 最大不变子空间
 symbolic computation 符号计算
 system invertibility 系统可逆性
 systolic array 脉动阵列
 team theory 组队理论
 tracking problem 跟踪问题
 transfer matrix 传递矩阵
 truss-like structure 桁架形结构
 uncertainty 不确定性
 VLSI 超大规模集成电路
 value function 目标函数
 variational theory 变分理论
 vector bundle 向量丛
 weighted sensitivity function 加权灵敏度函数
 well-conditioned 良态的
 well-posedness 适定性

内 容 简 介

工业与应用数学学会(SIAM)1988年底出版的《控制理论的未来方向》一书是美国控制理论未来方向专门小组根据二年来对该问题所进行的广泛调查和深入研究所写的报告。该报告把控制理论看作一门包括了数学、工程学及其它科学领域重要研究活动的科学分支,来评价其当前研究状况并分析未来研究方向,其中包括现代科学技术对控制所提出的需求和挑战,可能的研究机会,控制理论各分支目前所研究的问题、所使用的现代方法和主要理论成果介绍,这些理论在各个领域中当前和未来的应用,对有关的专业研究队伍、学术机构、资助机构所提出的建议,对知识转移、大学教育和研究生培养、职业状况等方面的看法。

这份具有相当篇幅的报告是近几年来对控制理论所作的最全面最详尽的综述,对了解该领域目前的研究内容、所用的方法、各种有关的应用,对于研究工作的选题和大学教育都有重要的帮助,同时也是基金项目申请和评审的重要参考资料。

未经允许 不准翻印

1989年5月

目 录

一章 总括	(1)
1.1 结论	(2)
1.2 建议	(3)
1.2.1 致专业研究队伍	(3)
1.2.2 致学术机构	(3)
1.2.3 致资助机构	(4)
二章 概述	(4)
2.1 控制理论的本质	(4)
2.1.1 数学的作用	(6)
2.2 控制理论中的建模问题	(7)
2.3 现代控制理论数学的历史发展	(8)
2.3.1 早期	(9)
2.3.2 几个里程碑	(9)
2.3.3 多样化阶段: 六十年代末到七十年代	(9)
2.3.4 八十年代: 鲁棒控制, 与计算机科学的联系	(10)
2.4 控制理论的当前应用	(11)
2.5 关于知识转移	(14)
2.6 职业状况	(14)
2.7 教育状况及新博士生的培养	(15)
第三章 研究需求和机会	(16)
3.1 现代科学技术中的研究需求	(16)
• 大型空间结构	(16)
• 机器人学	(14)
• 电力系统和计算机网络	(17)
• 燃烧控制	(17)
• 流体流动控制	(17)
• 等离子体的控制	(17)
• 固化控制	(18)
• 钢铁工业	(18)
• 生物医学研究	(18)
• 结构和材料的最优化设计	(18)
• 水文学	(18)
• 石油开采	(19)
• 经济学	(19)
• 制造系统	(19)
• 计算机系统的性能评价	(19)
• 控制系统的计算机辅助设计	(20)

3.2 研究机会	(20)
3.2.1 未来方向: 综述	(20)
3.2.2 具体的研究机会	(21)
• 鲁棒控制和自适应控制	(21)
• 分布参数系统控制	(22)
• 非线性控制	(22)
• 随机控制	(23)
• 分布参数系统的最优设计	(23)
• 用于控制的计算方法	(24)
• 对于偏微分方程控制在计算上的挑战	(24)
• 最优控制和设计算法	(25)
• 符号计算和数值计算的接口	(25)
• 并行算法	(25)
3.2.3 其他研究机会	(26)
• 混沌的控制	(26)
• 控制系统的计算机辅助设计	(26)
• 分散控制	(26)
• 智能控制	(27)
• 离散事件和混合动力系统	(27)
第四章 专题简介	(28)
4.1 确定性有限维非线性系统	(28)
4.1.1 线性系统与非线性系统的等价性	(29)
4.1.2 非线性系统的能控性和能观性	(30)
4.1.3 反馈设计问题	(31)
4.1.4 非线性最优控制	(31)
4.1.5 动力系统问题	(32)
4.2 分布参数系统	(32)
4.2.1 状态空间的选择和正则性问题	(33)
4.2.2 稳定化和精确能控性	(34)
4.2.3 控制和辨识的数值方法	(35)
4.2.4 包含延迟的问题	(35)
4.2.5 鲁棒性和摄动	(36)
4.3 挠性或混合结构的动力学与控制	(36)
4.4 随机控制	(37)
4.4.1 马尔科夫扩散过程和随机控制	(38)
4.4.2 非线性估计	(38)
4.4.3 随机控制中的其他问题	(39)
4.5 线性系统的代数和几何理论	(39)
4.5.1 系统族的极点配置问题	(40)
4.5.2 系统族几何学	(40)

4.5.3 用代数几何方法的输出反馈设计	(41)
4.6 变分问题与最优化	(41)
4.6.1 变分理论	(41)
4.6.2 非光滑分析	(42)
4.6.3 最优设计	(42)
4.7 机器人学	(43)
4.8 鲁棒控制的 H^∞ 优化理论	(44)
4.9 用于控制的计算方法	(47)
4.9.1 数值计算中的基本问题	(47)
4.9.2 专用计算机结构	(48)
4.9.3 软件	(48)
4.9.4 控制问题中的符号计算	(49)
4.10 最优控制算法	(49)
4.10.1 最优控制和数学规划	(50)
4.11 自适应控制	(51)

第一章 总 括

在今日飞速发展的科学和技术中,控制理论领域处在数学、工程学及计算机科学相互作用的前沿。利用这些学科,控制理论将自己强有力的理论结果立足于先进技术之上。作为控制系统工程的一个基础,它成为包括了自动化、计算机及机器人的新产业革命的核心。控制理论的贡献不胜枚举。它对阿波罗登月计划的成功起了关键作用,作为较近的例子,它是象F-16喷气机这样带有遥控自动驾驶仪的现代飞机研制中的关键科学。当代制造业高度依赖于精确的过程及机器控制。利用控制理论设计的系统遍布于我们的技术社会:在现代汽车、大型建筑物中的温度湿度控制系统、录相机及商用飞机自动驾驶仪之中都有这种系统。

可以这样来描述控制这个概念:它是影响动力学系统的行为以达到预定目标的过程。很多物理系统的控制是根据对输出的同时观测而由输入的作用来实现的,其方式与飞机驾驶员根据仪表读表和视觉观察进行控制差不多完全相同。所谓控制问题就是基于可获得的数据确定实现给定目标所必需的输入。但由于现代系统的复杂性、输出测量的不精确性以及系统动力学的不确定性常常使得这一问题的解决非常困难。现代自动化系统中需要在观察输出的同时来确定输入的过程出现在控制计算机、微处理器或其它电子器件中。其中,选择适当控制作用的是一些数学的规则。

人类行为的许多领域,从技术、医药到经济学,都存在着对系统控制及过程控制的需求。然而现在对具有复杂动力学及测量不确定性的系统的控制规律的认识还不是很清楚,需要进行基础及应用研究以取得更大的进步。控制理论中的基础研究寻求以精确的数学语言来认识控制的基本原理及对于可获得的结果的限制,这种基本认识的需求在本质上对所有基础科学都是共同的。控制理论中的应用研究致力于建立先进自动控制系统的分析和设计方法。包括将控制规律转化为计算机控制算法及软件。当今许多运行良好的系统就是控制理论的数学原理在工程上的成功应用,其中现代计算机技术使之成为可能。

当前的科学及技术环境向控制提出了前所未有的挑战及机会。随着近年发展起来的方法进入一般实际应用,从而使更加复杂的应用成为可能。新的数学进展及计算机技术已经极大地扩展了可以解决的问题范围。最值得注意的是,新产生的应用提出了新的一类控制问题,在很问题中还要求有新的数学结果、甚至基础性的新方法。

上述考虑要求美国在控制,包括由控制应用推动的基础数学研究方面保持较强的研究计划。召集起这个专门小组就是为了评价这种努力,具体目标包括,从数学角度评价控制理论的现状;衡量对控制研究队伍的需求;及找出未来发展的可能方向。

为反映控制研究人员的广泛性,专门小组中包括了大学数学、应用数学和工程学系的教授及与工业和政府有关组织的科学家。全体成员于1986年11月和1987年5月举行过两次会议,此外专门小组还向控制数学领域中活跃的研究内容广泛的150多位专家发函,征求他们的看法和意见。鉴于来自工程技术中的应用是目前发展情况最好的,所以在准备这份报告时决定予以强调;不过其他类型的应用,例如在经济学或生态学中的应用也很活跃,而且重要性很可能会增加。在数学的范围内,专门小组对控制理论范围的解释相当广泛,包括了通过现有研究与控制应用相联系的众多领域。数学控制理论并不被看作孤立的数学分支而存在,而是在数学理论、工程实践和硬件能力之间技术合作关系的一个必不可少的部份。

基于两次会议期间的讨论及调查结果的分析,专门小组得出了一些结果和建议,下面的结果概括了我们关于这一领域当前状况的观点,包括其显著特征和未来趋势。

1.1 结论

专门小组认为,控制理论是一门活跃的和不断扩展中的学科。然而由于起源及研究的适用性都很广,它也面临着特殊的在结构、教育及交流等方面的挑战。当前,控制技术在具有重大科学、技术及经济重要性的广阔应用中使用非常普遍,数学控制理论中的研究活动也表现出巨大活动和多样性,这些都和工程中的实际问题有密切的联系,而当前研究方向也得到先进技术前沿应用的强有力推动。下列结果概括了这一领域的显著特征。

- 控制理论从一开始就是交叉学科领域,除了与工程科学的关系外,它还在金融经济学、渔业资源管理、医学上的修复术设备、医药等广泛领域中有所应用,并且它还在继续扩大对其他科学领域的影响。

- 数学在控制科学的发展中一直而且仍将持续不断地发挥关键作用。在数学向应用的知识转移方面,这一领域业绩堪佳。反过来,由控制问题推动的研究对数学科学的很多领域又产生着重要影响,常常导致深刻而精巧的理论结果的发展。

- 数学与工程学在解决控制问题当中的交互作用是以“蛙跳方式”发展的。工程进展中的理论问题会推进数学的进步,后者接着又提供了对工程问题的新认识并导致新的工程解决方法。在每一发展阶段数学和工程学都紧密地相互关联着便是控制科学的一个特征。

- 控制理论数学具有许多超出传统应用数学的方法。控制理论的工具出自数学的众多分支,如常微、偏微和泛函方程、泛函分析、代数、几何、概率理论、离散数学、数值分析,及计算数学。这一现象可归因于推动控制研究的应用需求广泛而且处在变化之中这一事实。

- 控制领域的进展是通过数学、建模、计算及实验的结合取得的。控制建模中面临的一个基本挑战是要找出复杂物理现象的简洁数学表达,以适应控制设计的分析和计算需要。

展望未来,专门小组感到了很多挑战和机会,包括象空间站和国家空天飞机这类工程的先进技术的进一步发展将极大地依赖于控制系统的性能范围。不过这些性能范围通过基于复杂数学模型及先进科学计算的更为精确的设计可以得到扩大。因此,专门小组得出下列结论。

- 很多基本的理论问题,象非线性多变量系统或线性偏微分方程的控制,尚未得到认识。另外,象机器人、制造及空间技术这些令人兴奋的新应用还在产生大量新的控制问题。现有理论必须得到发展和扩充以迎接这些挑战。

- 控制理论中的实验研究正变得越来越重要,它的目的在于寻求面向控制的物理过程模型和检验新的控制模式。控制中所要求的实验数据的类型常常与其他科学有很大不同。

- 计算技术的飞速发展正在控制领域产生巨大影响。根据几年前建立起来的理论现在已经生产出市场上可以买到的计算机代码形式的标准化应用工具。计算能力的急剧增长使研究人员们能够探究在过去看来非常不实际的问题。新型计算机结构为辨识和控制用实时算法提供了可能性。此外新的计算机技术还为新的控制方法的发展提供了前所未有的需求和挑战。

着眼控制理论的现状,专门小组注意到一个值得关心的重要问题,如不重视的话,美国可能失去这一研究领域的优越地位。特别地,专门小组发现:

- 控制理论的持久兴盛要求有源源不断的、有才华的青年数学科学家来源,他们要有广阔的数学背景和一些应用方面的训练。在美国目前进入控制领域的这类年轻研究人员看来正而

临不足。这一危险是存在的,即数学与控制之间的联结显著削弱,从而极大地降低研究质量和影响力。

最后,关于更广泛的科学及工程界人员对数学控制理论的认识,专门小组注意到:

- 一般人员对数学控制理论在新技术发展中所起的作用存在误解。非常普遍地,一片计算机芯片(或执行一特定数学算法的其它硬件)被看作是科学突破,而认识不到这芯片的“大脑”实际上是数学算法。例如,就阿波罗任务而言,很多人提出关键科学是舱载数字式飞行计算机,而忽视了存储在内存中的创新的数学算法对这次任务的成功是同等重要的。

1.2 建议

控制问题将继续大量产生复杂的数学问题。除了应用于现代技术所带来的收获外,这些问题的解决还将对数学本身的发展起到影响作用。然而为确保控制科学充分利用现在和将来的机会得到持续发展还需要特别的努力。下述建议是提给专业研究队伍、学术机构及资助机构的,其目的在于加强控制理论研究对美国国内技术及数学科学发展的影响。

1.2.1 致专业研究队伍

- 控制研究队伍必须永远保持对新的应用的密切关注。历史上,最出色的工作是由一项重要应用的需求推动的,今后情况仍将如此。

- 控制科学家应当强化自己利用先进科学计算技术的努力。复杂动力学系统及各种控制原理的大规模计算模拟会导致对基本控制问题的新认识。下一轮的问题将要求控制方法与先进计算概念的结合。

- 为实现控制理论的更高的统一性还应当加强努力。应鼓励控制领域内各种团体之间交换观点,并且要把研究生及年轻研究人员包括进来。各种中心、数学研究所及暑期学校对这项任务非常适合。

- 控制研究队伍应当扩大与数学其它领域(纯数学或应用数学)的相互交叉。大型学术会议(象AMS及SIAM的)应面向广泛的数学领域的听众,与之交流对控制非常重要的有关问题。另一方面,应通过各种手段(包括由IEEE、AIAA、IFAC、ASME及AIChE组织的工程会议)鼓励数学的其他飞速发展的领域中的思想进入控制理论。

1.2.2 致学术机构

- 应当认识到,控制科学是包括了数学、工程学及其他科学领域之间创造性相互作用的交叉学科研究活动。

- 学术部门应当为进行交叉学科研究创造合适的环境,包括建立能反映其多学科研究特征的评价准则。

- 应鼓励大学开办跨系的控制理论方面的专门课程,使诸如数学、电机及航空航天工程领域的学生获得从事控制及其应用工作所必需的交叉学科训练。

- 控制理论的发展应当通过培训数学及工程科学方面新的博士人员中得到帮助。那些在数学系得到博士学位的人应努力掌握控制理论特有的广泛的数学方法,并且还应与工程、计算机科学或其他学科中感兴趣的科学家建立联系。

- 大学应当帮助为控制科学研究人员提供所需的场所、计算工具及实验设备。大学管理当局认识到控制中数学研究对计算及实验不断增长的需求是很关键的。

1.2.3 资助机构

- 控制科学中的特殊机会要求建立新的交叉学科的研究团体和中心。几个大小适中的中心要比一个大型中心好些,这样每个都可起到多少有些不同的功能。这些中心能为实验学家、控制理论家及数学家提供在密切接触和合作中工作的一条途径。在这样的中心经过一段时间培训后出来的学生及博士后人员会在全中国范围内构成下一代控制理论家的核心。

- 在科学和技术的很多领域(例如,机器人、空间结构、计算数学等)中,新的研究计划应当把控制系统的数学及控制方面作为一个整体而包括进来。由于其方法的广泛适应性,控制理论常常是这些技术全面发展中的起动科学。

- 数学控制理论中当前基础广泛的研究项目应当得到保持和加强。要确切地预测哪些领域将取得最重要的进展是不可能的,并且这样做也是不明智的。

- 除了通常的支持领域外,资助机构还应当加强对控制研究的“实验”方面的支持。这里使用的实验这一术语是表示基础研究类型的数值及物理实验室的实验。数值实验所提出的要求从完全的CAD类型的工作站到使用现代超级计算机。资助简单系统的小规模实验室实验能为控制设计提供取得重要进展的巨大机会。

- 应鼓励工程师、数学家及科学家之间的思想交流。学科高度交叉的暑期学校能为工程师学习新的数学工具和数学家学习新的应用及计算工具提供一个机会。与世界上著名机构,象法国的INRIA之间不断增强的国际合作能为将美国与国外专家的当代本领结合起来提供一种手段。

- 资助机构应当鼓励和支持以控制为内容的结合了数学、科学计算及工程学的教育项目。这些项目应包括数值的和实验室的实验,重点放在验证工程系统的数学理论上,以证实理论结果的有用性及局限性,并显示数学建模的作用。

第二章 概 述

2.1 控制理论的本质

控制科学是关于修正动力学系统的行为以实现预期目标的科学。这个很宽的定义容纳了在人类活动的众多领域中所遇到的极为广泛的问题。控制理论寻求以定量方式描述这些问题,重点放在可以给出精确描述的问题上。它有两个目标:认识控制的基本原理;以最终能用计算机系统的控制输入、或设计自动控制系统的方式从数学上刻画这些原理。控制科学要处理的越来越不是单个的动力学系统,而是在观测到的输出中及系统动力学本身存在不确定性的情况下多个动力学系统复杂的相互联系。

这门学科的历史起因有好几个,其中两组相关但又不同的想法构成了这一领域的中心主题。

第一个中心主题涉及反馈的思想。反馈是一种基于对输出的同时观测来确定系统输入的控制方法,其中输入和输出都是随时间演化的。反馈思想的关键在于可获得输出与其预期值的实时比较,以得出误差的一种量度,然后以此量度确定输入,后者将减小误差。这种因果关系链:输入、动力学、输出、测量、比较、误差、输入 构成了一个环路,于是便产生了一个包含了原有系统在内的新的动力学系统。这里的关键问题是新“闭环”系统的稳定性及动力学行

为。在上述简单描述的背后实际上是极为复杂的现代反馈方法,其中采用了数百个变量,以高速输入来控制计算机。反馈的概念包含了丰富的数学论题,并可以溯源到李亚普诺夫稳定性理论和奈奎斯特复变数方法。它还在产生新的富于吸引力的研究问题,而与此同时技术的发展提供了实施各种反馈方案的新手段。将在本章后面介绍的带遥控自动驾驶仪的 F-16 喷气机就是反馈概念技术成就的一个顶点。

第二个中心主题涉及最优控制思想。在这种情况下,控制的目标可以表述为对一个性能指标的最小化(或最大化),其中性能指标是刻划一段时间上系统的预期行为和实际行为之差的数学量。人们要寻找的是作为时间的函数使性能指标最小的控制,在解答了此问题后人们可以预先设计在整个时间区间上的控制输入。这通常称为轨道最优化问题。数学上,这一主题的根源是变分法。一个相关的思想是几何物体形状的最优化及更广义的结构最优设计。控制理论通过引入开关和快速振荡函数的新思想使变分法重获生机并得到改造,它还导致了近代非光滑分析及关于轨道最优化的新计算技术的产生。航天飞机的上升轨道就是在三维空间中利用这些技术得到的,它是与这一主题有关的在高技术中成功应用的出色例子。

上述两个主题以几种方式相互关联。控制理论中的基本观点之一是,在某些条件下一个最优控制问题可以通过构造一个反馈来求解。反之,在某些情形下一个给定的反馈系统具有相应的最优控制问题,而给定的反馈则是该问题的解。在线性理论中,人们可以利用一代数矩阵方程设计一个反馈系统来求解一变分问题。这种方法可以得到精巧而有力的数值算法。控制理论中出现的其他问题都是由这两个主题以各种方式组合而得到的方法来求解的。

在有不不确定性存在的情况下实现性能目标是采用反馈的基本原因。在很多情形下,对系统的了解只是部份的,或者模型是在许多简化假设下得到的从而很不精确,系统还可能受到外部扰动,象飞机周围的空气湍流,此外输出测量常因噪声而变得不可靠。有效的反馈能减小不确定性的影响,因为它趋向于补偿所有误差而不管起因如何。

反馈这一术语容纳了相当广的概念,包括现有系统中复杂的多回路、非线性、自适应反馈,以及未来的“智能”反馈。在更为广阔的场合下,反馈可以是描述和认识发生在复杂物理系统中的循环相互作用的一条途径。事实上,当前关于非线性动力学系统的研究所处理的是经常被解释为内反馈的复杂相互作用。活的生物体及计算机算法中也有内反馈环。因此说对反馈动力学的认识已经超出了控制理论的范围。

控制一个动力学系统包含几个基本过程:

- 基于物理定律建立系统的模型;
- 基于实验数据进行系统辨识;
- 通过滤波、预测、状态评估等进行输出信号处理;
- 综合控制输入并作用于系统(主动控制)。

尽管有明显的相似性,控制中的建模问题与其他学科是不同的,这个问题还要在后续章节中深入讨论。

系统辨识可以定义为利用观测到的输入输出数据确定动力学系统模型的过程。当模型给定且只有参数未知时,系统辨识简化为参数估计。作为控制理论的整体和重要部份,辨识是和应用数学中的逆问题相联系的。完成系统辨识经常要求通过实验来产生输入信号并记录系统的输出。在处理数据并得到系统模型方面有很多统计和计算方法。在辨识领域中的研究重点目前是在象辨识问题的可解性和适定性这样的基本问题,以及各种不同类型模型的参数估计方法上。

信号处理不属于控制理论,但这两个领域之间有很大的共同之处,而且控制研究人员对信号处理的贡献是非常大的,特别是在滤波和平滑方面。这些术语都是关于从混有噪声的观测数据中重构信号的。一些应用包括通讯、卫星数据跟踪、语言处理及图像重建。如果没有这种计算机化的图像重建能力,从“水手”和“先驱者”探测器发回的地球外行星的照片则几乎什么用也没有。

控制的综合不仅依赖于控制的目标及实现途径,还依赖于模型、辨识和信号处理。这些过程的复杂性便产生了能引起极大兴趣的控制中的当前研究专题:

- 鲁棒控制的目的在于找到保证闭环系统特性不受模型及信号不确定性影响的反馈。例如,不仅希望鲁棒控制能稳定系统,而且期望它能控制一族参数化的系统。

- 自适应控制涉及的是在控制过程中控制规律的自动调整。随时间变化或初始情况不太清楚的系统是自适应控制的主要应用对象。自适应反馈律经常根据自动的系统辨识来实现自调节。

- 多变量控制是处理具有交叉耦合的多输入和多输出系统的一种方法。此时反馈的目标可能还要增加解耦这一任务,以实现非交互控制。

- 非线性控制理论涉及到内在非线性动力学系统控制中产生的基本问题。这一领域当前的很多研究集中在几何方法上。

- 随机控制适用于系统或其扰动能以概率方式建模的情形。随机输出信号的滤波和预测是随机控制中固有的内容。

- 分布参数控制处理系统内变量的空间分布对控制目标至关重要的情况。这方面的例子有:弹性板及梁振动的控制、热传导的控制、具有内部延迟的系统的控制,及流体流动系统的控制。

由于计算机技术的不断进展,控制理论中的其它几个问题也变得越来越重要,包括学习和自组织系统、分层递阶控制系统、智能控制系统、及离散事件控制系统。

2.1.1 数学的作用

在控制理论中,数学起着双重作用。首先,控制问题必须以能反映内在物理内容的精确数学语言来表达。此过程中,要求创造性想象力的关键步骤是在对恰当的数学结构的辨识上,此结构必须在内容上足够丰富以充分描述问题,同时在数学上又足够简单以能够处理。这种结构的辨识比较困难,因为它既要求对物理问题的知识,又要求能提供新表达的数学领域的知识。数学的第二个作用是,在控制问题得到精确表述后,施展数学方法的效力去求得控制问题的解。此时,常常会遇到艰深的数学问题,而解决这些问题又要求有新的数学手段。

出现艰深问题的原因是控制问题不同于数学其他领域所遇到问题,例如,常微和偏微分方程中问题的经典表述涉及有关方程解的问题,而控制理论对问题的表述则是与修改方程以获得具有预期性质的解有关。而且,没有理由事先认定控制输入应当是时间的连续函数,或者控制系统中的非线性应当是光滑的。因此大部分现成的从各种连续性^①及正则性假设得到的数学结果根本不适用于控制问题。在新的更一般的假设下解这些问题会导致新的数学结果。

控制理论的一个惊人特征是所采用的数学工具的广泛性,包括了复变函数理论、线性及抽象代数、常微及偏微分方程、变分方法、随机过程、泛函分析、算子理论、微分几何、李代数、代数几何、离散数学、最优化及数值分析。通过第四章的专题简述将对这些数学工具在各种控制

问题中所起的作用有所了解,这种作用不同于传统应用数学。事实上,控制理论已经在纯数学和工程之间建立起了很多未料想到的直接联系。在发掘新的数学成果及相互联系过程之中,控制论不仅对解决应用问题作出了贡献,而且对数学本身也产生了影响。对此,第四章的专题简介将示例予以说明。以下作为导引简列其要:

- 变分问题:有关庞特里亚金极大值原理延伸的工作已导出许多抽象而优美的变分原理,这些原理在其他数学研究之中的应用正在不断增加。

- 线性系统:矩阵黎卡提方程。线性多变量系统的几何理论和其他有关课题的工作,已经对两点边值问题、线性代数和算子理论产生了很大影响,而且还开始影响到数值线性代数中的研究工作。

- 非光滑分析:起初是与非光滑最优化控制问题相关联而发展起来的这一领域,现已成为分析理论与数学规划新方法的越来越重要的来源。例如,用此方法已经得到了哈密尔顿系统关于周期解的新结果。

- 偏微分方程控制:边界控制和双曲系统的精确能控性问题已导致弱条件下有关解的新的正则性结果。这些结果在传统的场合似乎是不会出现的。

- 随机控制:在一阶与二阶非线性偏微分方程粘滞解理论中,解的最优随机控制表示法已起到重要作用。随机控制对马尔科夫随机过程的大偏差理论也产生了影响。

- 鲁棒性控制:有关(哈代)H-无穷空间的新的表述方式已引出有趣的新问题并使算子理论与复函数论得到发展。

- 非线性控制:能控性的研究已产生了流形上奇异分布可积性的新成果。另一方面,系统的李括号结构与变分问题之间大量的相互作用已被发现。

2.2 控制理论中的建模问题

对于给定的系统,数学模型的选择对于该系统的控制来说无疑是极其重要的。但是,当系统因内在原因而不能被完整地认识时,会出现特殊的困难。这时,可能无法写出准确的动态规律,或即使可写出,其所得方程也可能会过于复杂而使得基于这些方程的控制设计无法实现。所幸的是,“非完备”的数学模型的使用未必会成为整个问题的障碍。一个已为人们所掌握而且无论怎样强调也不为过的可贵的经验是,复杂系统常可基于相当简单的模型,通过反馈而得以控制。因此,尽管有很多类似之处,控制理论中的建模问题可能有时与物理学中的建模问题颇为不同。控制论中,问题集中在寻求鲁棒性的、数学上尽可能简便的模型,这些模型可以通过某种系统辨识过程从可获得的数据构造出来。控制理论建模问题中,诸如充分参数化问题、可辨识性问题以及对于变换群表示的不变性问题则是极为重要的。

特别重要的是应认识到,假如不能在控制设计中应用简单的数学模型,则控制论的许多最为成功的应用也就是不可能的了。一方面,这一特征已成为控制理论这一领域的“可贵之处”,即数学模型的应用使得控制得以实现。另一方面,这一特征又导致了这一领域里各种各样的数学方法与控制的关系的许许多多的争论,并引起了其他领域的科学家对控制理论研究的本质的误解。在这一领域中,对有关各种不同方法相互关系的认识上的分歧,可归结为两类基本思想的存在。极而言之,这两类基本思想可描绘如下。

一种极端的观点坚持认为,就控制的意义来说,模型的非完备性实际上是无所谓的,因为反馈减小了包括模型误差在内的不确定性的影响。因此,精确的模型对控制来说是不必要的。所需要的是强有力的反馈设计方法论,以此应当能产生鲁棒性的、自适应的、容错的控制系

统。于是这里强调的是控制器而不是模型。在这种观点下产生了有关一类普通模型控制器设计的许多先进理论,这种观点还会使人们认为控制理论无需处理如象偏微分方程式那样复杂的模型。于是一些控制理论专家感到需要的是更加鲁棒的控制理论,而不是更好的模型。

另一种极端的观点则十分强调要应用从物理定律导出的精确的模型,而认为一旦建立起来模型,控制的设计应是简单或至少在计算上是可实现的。由于强调的是模型,这种方法对于象物理学,流体力学这些领域的学者是可以接受而且具有吸引力的。模型精确性的这一假设也用来评价有关这些模型的一些控制规律的许多的抽象数学的研究工作。在其极端形式下,这种观点忽视了模型的非确定性及其对控制设计的影响的全部问题。它会引导人们认为设计控制系统的唯一途径是先要获得非常精确的微观模型,这样的认识是对控制论研究工作本质的根本误解。

事实上,固执以上两者之一而舍弃另一种的走极端的观点都是有害的。控制界必须认识到,成功地解决新的应用问题要靠新的模型和有关这些模型的新理论的发展,而且在眼下要靠反馈设计技术的不断进步。虽然以上两种对立的观点是这一领域中固有的,并将总会在某种程度上表现出来,但重要的突破则几乎都是来自结合两者精华所作的研究。在某一具体特定应用项目上,其中的某一种观点可能更为实际,例如在过程控制中,基于简单的线性模型的鲁棒性控制器的设计方案,往往即可解决问题,而对于先进的航空航天应用项目的一般设计方案来说,对模型精度的要求则是很严格的。

这一学科的另一常会引起混乱的特点是:缺乏用以控制的“标准形”模型。例如,不存在象流体力学中 $N-S$ 方程那样的类比物。甚至在个别应用领域,通常所使用的供仿真用的模型,可能并不适于控制。就仿真角度而言,那些不成为问题或影响不大的问题,例如执行机构或传感器数目及其定位,或者实时计算的限制问题,对于一个系统的实际控制来说可能是极为重要的。控制理论所应用的模型的多样化正是这一理论强有力的一种表现,它使得这一学科具有广度和多样性。

实验正在变得日益重要。从控制来看,实验的两个主要目的是模型的建立或验证和闭环性能仿真。所应着重指出的是,适合开环仿真的模型未必适合控制的研究。因而控制理论工作者所需要的实验类型可能与“标准”实验不同。这里有一障碍就是所要控制的某些系统的重要性问题,或者说发生错误的代价问题,如在空间站或核电站这些情形就是这样。实际应用项目常常没有供进行真正的数学考查的那种实验的余地。于是,抓住那些为检验有关简单系统的某些想法而设计进行的小规模实验的时机,对理论进步可能是大有裨益的。

2.3 现代控制理论数学的历史发展

2.3.1 早期

虽然控制理论的起源至少可追溯到上个世纪,但这个学科作为真正的一个应用数学分支还是相当年青的。早期的工作包括 1868 年麦克斯韦尔关于带有节制器的蒸气机系统的稳定性分析,以及 1920 年米诺尔斯基有关船舶驾驶方面的工作。奈奎斯特(Nyquist),伯德(Bode)和其他人在单回路反馈放大器方面的经典成果证明,既使在对有关系统知之甚少的情況下,反馈控制仍可以保证达到相当满意的性能。

四十年代和五十年代,诺伯特·维纳对控制理论作出了开创性的贡献。他有关“控制论”(“Cybernetics”)的思想提供了一个框架,按这一框架,控制与信息问题可以纳入统一的形态来考虑。维纳还发展了在噪声存在的情况下对信号进行滤波,预测和平滑化的一种方法。进