

现代控制理论的若干进展及展望

陈翰馥 and 郭雷

Citation: 科学通报 43, 1 (1998); doi: 10.1360/csb1998-43-1-1

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1998-43-1-1>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/43/1>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[当代磁学及其若干新进展](#)

Chinese Science Bulletin 45, 673 (2000);

[网络现代场论的建立与进展](#)

Chinese Science Bulletin 41, 1345 (1996);

[现代统计天气预报的进展](#)

Chinese Science Bulletin 19, 104 (1974);

[中国第四纪花粉现代过程:进展与问题](#)

SCIENTIA SINICA Terrae 45, 1661 (2015);

[中国地区现代人起源问题研究进展](#)

SCIENTIA SINICA Terrae 47, 30 (2018);



现代控制理论的若干进展及展望

陈翰馥 郭雷

(中国科学院系统科学研究所, 北京 100080)

摘要 首先对近年来现代控制理论在非线性系统控制、分布参数系统控制、系统辨识、随机与自适应控制、稳健控制与分析、离散事件动态系统以及智能化控制待方向上的国内外主要进展及研究热点作了简要介绍; 然后对现代控制理论领域的几个主要特点和发展趋势作了概述; 最后, 简述了国内控制理论研究的状况及发展前景。

关键词 非线性系统 分布参数系统 系统辨识 自适应控制 稳健控制 鲁棒控制

控制理论是关于各种系统的一般性控制规律的科学. 它研究如何通过信号反馈来修正动态系统的行为和性能, 以达到预期的控制目的. 实际系统往往含有许多未知的不确定性因素, 为了对它进行有效的控制, 就要对它进行辨识、建模或跟踪, 对量测信号进行包括滤波、预测、状态估计在内的各种科学处理, 然后设计反馈控制规律, 使系统的某些性能达到预期的最优指标^[1].

自动控制的历史可分为下列4个时期^[2]: 1) 早期(~ 1900); 2) 预古典期(1900~ 1940); 3) 古典期(1935~ 1960); 4) 现代时期(1955~). 古典控制理论主要讨论单输入/单输出线性系统, 代表性的理论和方法包括 Routh-Hurwitz 稳定性判据, Nyquist 分析、Bode 图、Ziegler-Nichols 调节律和 Wiener 滤波等. 单复变函数论和平稳过程理论等是古典时期重要的数学工具. 进入现代时期后, 随着研究范围及深度的扩大, 控制理论几乎涉及到所有的数学分支, 以至作为自动控制技术基础的控制理论, 也被认为是应用数学的分支之一. 现代控制理论诞生的标志包括前苏联数学家 Л. С. Понтрягин 的极大值原理, 美国数学家 Bellman 的动态规划和 Kalman 的递推滤波以及能控性、能观测性、反馈镇定等代数理论的出现等.

本文拟对近期国内外控制理论的若干进展与热点, 以及它的特色与趋势进行简要介绍. 由于篇幅和作者的知识面及研究兴趣所限, 难以做到面面俱到, 不周之处望读者谅解.

1 进展与热点

近年来, 控制理论在非线性系统控制、分布参数系统控制、系统辨识、随机与自适应控制、稳健控制与分析、离散事件动态系统、智能化控制等几个主要方向上取得了重要进展. 预计今后若干年内, 这些方向仍将是控制理论发展的中心. 下面分别对它们的主要进展、热点及问题进行简要介绍:

1.1 非线性系统控制

在非线形控制方面, 对仿射非线性系统^[3], 证明了用状态非线性反馈及局部微分同胚把它线性化的充分必要条件, 它是用 Lie 代数、分布等来表达的, 并且在机械臂、直升飞机与电力系统控制等一些实际工程问题中得到应用. 因此, 在工程设计中可以用反馈等价的线性系统来取代非线性模型. 近年来, 借助于几何理论得到了较好的一般非线性系统线性化结果. 但至今有关的实用结果大都是局部的. 如何求有效的全局解, 以及反馈镇定、反馈解耦等, 都是非线性控制系统中引人注目的问题. 和线性系统不同, 对非线性反馈设计目前还缺乏统一理

论. 对一般非线性问题, 没有既稳定又稳健, 又有良好动态响应的设计方法. 对局部反馈镇定, 一个有希望的方法是把非线性几何控制理论和动力系统分析特别是中心流形理论结合起来. 对于解耦问题微分代数是一个有力的工具. 非线性系统的能控性, 在实际中很重要, 对它的研究要发展流形上奇异分布可积性及近似 Frobenius 定理等的新结果, 而对能观性, 则要证明在群作用下, 商流形的结构及微分形式的一些新定理.

近年来, 许多研究集中于含有参数或结构不确定性和受有外部干扰的非线性系统的控制和设计. 主要的研究手段, 包括 Lyapunov 函数、微分流形及微分动力学等工具并结合计算机仿真研究. 热点课题包括带有匹配不确定性的仿射非线性系统的 H_∞ 控制; 含参数不确定性非线性系统的“Backstepping”自适应控制; 不确定非线性系统的反馈镇定、调节和跟踪; 非线性奇异系统的结构性质和控制, 特别是以多机器人系统协调与大型电网稳定为背景的受非完整约束非线性系统的控制, 以及有关混沌生成、抑制和同步化及其应用的混沌系统控制等. 在这些方面国内学者做出了一批有价值的工作^[4].

在非线性最优控制问题中最优价值函数满足的 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程大范围解的存在性问题长期未能解决, 国外学者利用“粘性解”的概念, 给出了不可微甚至不连续函数作为其解的确切定义, 并结合非光滑分析、凸集值映射, 深化了极大值原理. 对与非线性 H_∞ 方法相关的 Hamilton-Jacobi-Isaac (HJI) 方程, 国内学者也进行了相应研究. 然而, 如何求解一般的 HJB 或 HJI 方程仍是控制器具体设计中的主要困难.

1.2 分布参数系统控制

分布参数系统是指由偏微分方程、积分方程、泛函微分方程或抽象空间中的微分方程所描述的无穷维动力系统^[5]. 与有穷维系统相比较, 无穷维系统有其自身的特点, 如解的正则性、有穷维逼近等. 我国学者很早就涉及这一研究领域. 例如, 基于振动控制在航天等领域的重要性, 从 70 年代起就开始研究细长体弹性振动系统的建模和振动控制, 在振动系统的谱分析、能控性和反馈镇定等方面取得了许多重要成果. 此外, 在单输入单输出无穷维线性系统的极点配置、无穷维线性系统稳定性的频域判据, 无穷维系统的时间最优控制、一般无穷维系统的极大值原理^[6]、人口系统控制、总和生育率临界值和人口预测等方面的研究, 我国学者都做出了重要贡献.

作为一种趋势预测, 无穷维系统控制研究的重点将从线性模型逐步转向更加复杂的非线性模型. 由于无穷维系统的复杂性, 对于非线性无穷维系统控制问题的深入研究, 需要在概念上有一些重大突破. 对于线性分布参数系统控制仍有许多问题需要解决. 无穷维系统的 H^∞ 方法将会成为一个十分活跃的研究方向. 边界控制是分布参数系统特有的问题, 将更加引起人们的关注. 90 年代法国学者提出的用以解决波方程边界精确能控性的 Hilbert 唯一性方法, 有可能被推广到变系数偏微分方程, 以解决更符合实际的物理系统的边界控制和指数镇定问题, 这在数学上也是一个挑战性问题. 近年来出现的智能 (smart) 材料, 使得有可能直接控制材料的结构阻尼, 这对于分布参数系统的控制将产生重大影响, 并在控制方法上引起重大革新^[4].

1.3 系统辨识

由于实际系统的复杂性, 人们往往很难 (或不可能) 从基本的物理定律出发而直接推导出系统的数学模型, 这就需要利用已量测到的系统输入和输出数据, 来构造对系统内部结构及参

数的估计,并研究估计的可靠性和精度等问题,这就是系统辨识的任务.这一领域始于60年代,但70年代后才出现大量理论研究.到目前为止,比较成熟的理论仍集中于对线性系统的辨识^[7].

在系统辨识的历史上,统计学特别是时间序列分析对它的发展起了重要作用,经典的最小二乘(LS)参数估计法和AIC、BIC定阶准则对系统辨识方法产生了深刻影响.对稳定的开环系统,平稳随机过程理论是进行辨识理论研究的基本工具;对一般非平稳的反馈控制系统,鞅收敛理论对辨识方法的分析则是不可或缺的.为了保证辨识算法的收敛性,通常要求系统的输入/输出数据满足所谓的“持续激励”条件.80年代以来,从理论上严格证明了对线性定常系统,若“持续激励”条件减弱为渐近趋于零的激励或“衰减激励”,就可估计出系统的系数,甚至反馈系统的阶数及系统时滞等^[8].

近年来,系统辨识领域的热点课题主要集中在下列三方面:()鲁棒辨识.传统上,系统辨识理论假定未知系统在给定的模型集内,即只研究方差误差对辨识结果的影响而不研究偏差误差.随着鲁棒控制的发展,建立适用于鲁棒控制的数学模型的要求,推动了鲁棒辨识的研究,很多工作致力于所谓“扰动未知但有界”情形的研究.与鲁棒辨识密切相关的模型证实理论也得到进一步发展;()时变参数估计.与定常参数的估计相比,对时变参数估计研究要困难得多.人们很早就认识到,对时变参数估计要采用有限记忆算法,要对旧数据进行折扣,并且提出了“遗忘因子RLS”等著名算法.然而,直到90年代,有关时变参数估计的理论基础(稳定性、跟踪性能、优化设计等)才得以建立^[9];()非线性系统辨识.传统的方法主要基于Taylor或Volterra级数展开,为了达到一定的逼近精度,往往需要估计大量未知参数,这是该方法的主要缺陷.随着近年来人工神经网络和小波等方法的发展,这些方法在非线性系统辨识方面的应用引起了大量研究.然而,能保证估计算法快速全局收敛的严格理论尚需建立.

1.4 随机与自适应控制

实际系统往往带有随机噪声,所以要研究随机系统.近些年来,在非线性滤波、随机极大值原理、随机最优控制综合等方面仍不断有进展.我国学者对扩散项含有控制输入的一般随机系统的极大值原理,以及由此导出的倒向(或正倒向)随机微分方程的适应解的存在性进行了一系列研究,在国内外产生了影响.然而,在这一领域的主要困难问题上,即如何具体求解Zakai或Kushner非线性滤波方程以及与最优控制相连的随机HJB方程等方面,国际上仍进展极小.

由于问题的复杂性,对许多实际问题来讲,准确地求解上述方程既不可能也无必要.于是,人们基于“分离思想”和“必然等价思想”,来试图寻求便于实际应用并且性能良好的控制算法,由此便发展起了自适应控制的理论和方法.随机自适应控制与状态部分可观的随机最优控制有密切联系,它本质上是在同一个反馈回路中同时进行辨识和控制.因此无论是自适应控制器还是相应的闭环系统都是高度非线性的,这也是理论研究的主要困难之一.尽管如此,这一方向在近20年来一直是控制理论中最活跃的方向之一,许多基本问题(例如,线性随机系统的自适应跟踪、极点配置与LQG控制)现已得到解决,但是,更多的问题还有待解决.

在已解决的问题中,最突出的例子是随机系统的自校正调节器理论的建立^[8,9].自校正调节器的提出可以追溯到现代控制论的奠基人Kalman于1958年的工作.1973年瑞典著名学者Åström和Wittenmark曾试图对随机自校正调节器进行收敛性理论研究^[10],虽然当时并

未成功,但却带动了自适应控制的发展,使自校正调节器成为自适应控制中最基础的控制方法,并在工业过程中得到大量成功的应用. 以自校正调节器为主要对象的基础理论(稳定性、收敛性等)研究的开展,实际上是自适应控制领域从60年代的沉寂走向80年代以来热门的转折点. 然而20年来,对自校正调节器的收敛性分析,一直没有实质性突破. 直到90年代初,对这一著名难题的研究,才有实质性进展,从理论上严格证明了最小二乘自校正调节器的稳定性、最优性和对数律等^[8,9].

另一个较突出的例子是对时变系统适应控制和鲁棒适应控制的研究. 现在已证明,若系统中同时具有未知参数慢漂移、小未建模动态以及任意有界扰动(或无界随机噪声)这三种不确定性,则可以对最小相位系统设计出稳定的自适应控制器使系统的跟踪误差随着系统不确定性的减小而减小.

近年来,对非线性系统自适应控制的研究已逐渐成为热点课题. 人工神经网络方法、滑动模(sliding mode)方法及鲁棒控制方法的结合可以设计出对一大类连续时间非线性系统稳定的自适应控制律. 自适应“后退(backstepping)”法也可以克服传统设计中对“高阶不确定性”遇到的障碍,给出一大类连续时间系统全局稳定的自适应控制律^[11]. 然而,值得指出的是,已有处理连续时间系统的方法,很难直接用于离散时间系统. 事实上,最近证明了,对离散时间非线性系统的自适应控制存在临界可镇定性现象,从而揭示了离散和连续时间自适应非线性控制的本质区别.

这一领域仍存在许多挑战性问题. 如何借助于Bellman动态规划方程,利用“双重控制(Dual Control)”的思想,设计出结构简单而且性能优于“必然等价控制”的自适应控制器是一个有重要意义的课题;对一般指标或非线性随机系统的自适应控制尚未形成一般性理论,特别地,对非线性参数系统和非参数系统的自适应控制还缺乏有效的方法;此外,对定常或时变线性随机系统的自适应控制,仍有一些困难问题有待解决.

1.5 稳健控制与分析

在所有控制问题中,系统的数学模型可能与实际系统有差异,这时希望控制系统对外界干扰和不确定性有较小的灵敏性,这就导致稳健问题研究^[12]. 这类问题的特点是不确定性不再被看成是微小的,本质上属于系统在大范围摄动下的控制理论. 80年代出现的 H^∞ 设计方法,要求控制器使频率响应函数的 H^∞ 模达到极小. 这种方法成功地应用了经典函数论和算子理论使稳健控制有了可靠的理论基础. 在 H^∞ 模约束下,已解决了多变量定常系统的干扰控制问题. H^∞ 方法既保留了状态空间方法在计算上的若干优点,同时又有频率法的直观性,对工程技术人员很有吸引力,但仍有许多理论问题要解决. 如何有效利用后验信息来降低系统的不确定性,并进而形成基于复杂性的适应控制一般理论是基本的未解决问题. 在稳健分析领域中,前苏联学者关于多项式稳定性有限顶点检验的•а к иппи定理,引发了一系列判别系数在一定范围内变化的多项式的稳定性或严正实性研究. 还在这一研究的早期阶段,我国学者就参与了“棱边定理”的发现与证明,并给出了边界定理等一批有价值的结果^[4]. 近年来,在不确定性参数为线性、多线性及非线性映射关系下系统的严格正实性(包括稳定性、Popov判据)和系统控制问题方面,都进行了深入研究. 稳健控制的热点问题,一个是利用凸规划将问题归结为线性矩阵不等式(LMI)的研究,另一个是用积分二次不等式约束(IQC)来讨论稳健性.

1.6 离散事件动态系统

控制理论通常研究由微分或差分方程所描述的系统. 但有些实际系统, 例如柔性制造系统、计算机通信系统、交通系统等, 系统的状态在离散事件发生的瞬时改变, 而不能用通常的动态方程来描述. 这类系统一般称为离散事件动态系统(DEDs)^[13], 对它的研究始于80年代初. 目前已有多种处理离散事件系统的方法和模型, 例如有限状态马氏链、Petri网、排队网络、自动机理论、扰动分析法、极大代数法等. 但至今没有一个模型象微分方程对连续变量动态系统那样简明且便于计算. 离散事件系统的研究虽已取得很大进展, 但还需要有能形式地表达离散事件系统的理论体系, 要能找出算法, 决定模型是否能较好地模拟实际系统. 离散事件动态系统目前已成为一个较成熟的方向. 80年代中以来, 特别是在国家“863”计划CIMS主题的推动下, 国内对DEDs的研究形成了一支相当规模的队伍, 并取得了很大进展, 受到国内外重视. 例如^[4], 参数摄动下DEDs的渐近性能估计和鲁棒性, DEDs的周期配置, Petri网并发机制下的性能研究等. 目前, 作为DEDs研究的自然延伸, 对混合动态系统(HDS)的研究正在成为这个领域的一个新的生长点.

1.7 智能化控制

现代工程技术、生态环境等领域要处理十分复杂的系统, 有时难以建立确切的数学模型. 常规的数学方法不能完全满足要求, 这就要求系统有一定的智能. 要研究对系统特征的描述和提取, 符号和环境的识别, 知识库和推理机的开发, 要研究在线学习和修正的功能, 开发和研究有效的学习算法和优化算法, 使系统对实际环境或过程有一定的组织、决策、规划和优化的能力, 能模拟人的某些智能和经验来引导求解过程. 这就是智能化控制研究的内容, 近年来受到较大重视. 目前, 国内外学者已逐渐认识到把人的“心智”与机器的“智能”两者结合起来, 研制人机一体化的智能化控制系统, 可能是一条切实可行之路.

2 特点与趋势

纵观控制理论的发展史, 可以看出这一领域有下列4个主要特点及趋势:

(1) 控制理论的迅速发展, 不断受到高科技需求的有力推动^[1]. 航天、航空、航海、工业过程、社会经济等领域向控制理论提出了许多挑战性问题, 例如Apollo登月舱沿着最优轨线飞行的导航; 在月球上的软着陆; 机动性能高、开环不稳定新式战斗机的设计; 对抛物面天线、雷达阵、太阳能接收器、空间望远镜等大型空间结构的高精度瞄准及镇定; 对机器人的稳健控制及多臂协作控制; 对电力系统这一类包括随机不确定因素的系统的控制; 对轧钢的温度控制等生产过程的控制, 都对控制理论提出了新课题, 并且在这些系统中, 控制理论也确实起了关键作用.

(2) 控制理论的发展依赖于数学, 同时又推动数学的发展. 现代数学中常微、偏微和泛函方程, 代数、几何、函数论、概率统计、变分法、离散数学、数值计算等分支是控制理论研究的重要工具. 例如, 鞅论是建立随机自适应系统理论的关键基础; Lie代数是刻画非线性系统能控性的重要工具; 泛函分析是研究无穷维系统的基本手段等等. 另一方面, 控制理论的研究又对数学的许多领域产生重要影响. 例如^[14], 极大值原理的深化就导致许多抽象变分原理; 和非光滑最优控制理论联在一起发展起来的非光滑分析, 在分析和数学规划中起着重要作用; 边界控制及双曲方程的精确能控性导致较弱条件下有关解的正则性的新结果; 解的最优随机控制表示法在粘性解理论中有重要作用; 对Riccati方程和线性多变量系统的研究推动了两点边值

问题及算子理论的发展;随机控制对马氏过程大偏差理论以及金融数学的重要影响;稳健控制对算子理论及复变函数提出了有意义的新问题;对非线性控制的研究导致流形上奇异分布可积性的新结果,并发现了系统 Lie 括号结构与变分问题之间的相互作用等等,都是控制理论对数学本身发展的有力促进.

(3) 控制理论与其他领域广泛交叉(渗透)的特色将继续保持. 控制理论的应用范围已从单纯技术领域,渗透到社会、经济、人口、环境和生命科学等领域的控制问题中,并将继续大大拓广. 例如,控制理论对人们普遍关注的能源环境问题也能做出重要贡献. 从节省能源与减少污染到新能源开发(如人工受控热核聚变),再到合理调控自然环境,协调人类与自然关系等都存在对控制理论的需求. 此外,随着生命科学的发展及对生物生理学和内部非线性作用的认识的提高,控制理论方法将有助于提高对生物体内部自适应反馈调节规律的认识,并且将给出对各种激素、药物与放射性疗法的更好的设计,并促进新型医疗器械的研制.

(4) 复杂系统控制理论问题将越来越引起人们的重视. 复杂系统的主要特征可归纳为:动力学模型的不确定性;测量信息的粗糙性和不完整性;动态行为或扰动的随机性;离散层次和连续层次的混杂性;系统动力学的高度非线性;状态变量的高维性和分布性;子系统及层次多样性和各子系统间的强耦合性. 复杂系统控制在规模上、复杂性及灵活性上将大大突破传统的自动控制在概念和方法上的局限性. 它要求控制系统对被控对象的动力学模型要有“学习”和“识别”能力,对环境和扰动的变化要有“适应”和“稳健”能力,等等.

3 结束语

控制论与相对论、量子论一起,常常被认为是 20 世纪上半叶科学发展的三大飞跃. 经过半个世纪的发展,控制理论的应用已使人类大大突破了自身能力的极限,成为人类认识和改造自然过程中的一个不可或缺的基本手段. 随着 21 世纪的来临,控制理论的发展将使人们以更科学的方式来处理人民生活、社会经济、生态环境、工业生产以及高科技领域出现的复杂系统控制问题,在更加广泛的方面造福于人类.

我国是国际自动控制联合会(IFAC)的创始国和成员国之一,也是国际上较早开展现代控制理论研究的国家之一. 经过近 40 年的发展,国内已经形成一支具有相当规模和实力的控制理论研究队伍,分布于中国科学院和工业部门的有关研究所以及许多高等学校中,特别是清华大学、北京大学、复旦大学、南开大学、北京航空航天大学、山东大学、东南大学、东北大学和华东师范大学等. 改革开放以来,特别是近年来,我国控制理论队伍的学术水平和国际地位不断提高,在重要国际学术刊物上发表的论文数目逐年增多,并且在某些方向上的研究成果已达到国际领先水平,在国际上产生了很大影响.

但是应该看到,目前我国控制理论研究在整体上和影响上与欧美等发达国家相比还有很大差距. 然而,我们相信,通过我国学者的不懈努力,在不久的将来,一定能够在控制科学领域做出与我们这样一个具有 12 亿人口的大国地位相称的贡献. 九五期间国家攀登计划项目《复杂系统控制的基础理论研究》的实施,以及 1999 年第 14 届 IFAC 世界大会在北京的召开,必将进一步促进这一目标的早日实现.