

系统控制理论的开拓者 —— 郭雷

张纪峰 中国科学院数学与系统科学研究院



郭雷, 1961 年生于山东, 1982 年毕业于山东大学数学系, 1987 年在中国科学院系统科学研究所获博士学位, 1987—1989 年在澳大利亚国立大学从事博士后研究, 1992 年被中国科学院破格晋升为研究员。曾任中国科学院系统科学研究所所长、中国科学院数学与系统科学研究院院长, 现任中国科学院国家数学与交叉科学中心主任、中国科学院特聘研究员。

1998 年当选美国电子电气工程师协会会士 (IEEE Fellow), 2001 年当选中国科学院院士, 2002 年当选第三世界科学院院士, 2007 年当选瑞典皇家工程科学院

外籍院士, 2007 年他因对控制理论研究的“根本性贡献”(fundamental contributions)而当选国际自动控制联合会 (IFAC) 会士, 2014 年被瑞典皇家理工学院授予荣誉博士学位。2018 年获应用数学学科在国内的最高奖项 —— 第七届苏步青应用数学奖。他于 1999 年和 2014 年先后两次应邀在三年一度的 IFAC 世界大会上作大会报告 (Plenary Lecture), 是迄今在 60 年 IFAC 历史上被邀请作大会报告的唯一中国大陆学者。特别地, 被 IEEE 控制系统学会授予 2019 年 Hendrik W. Bode Lecture Prize (泊德讲座奖), 是历史上获此殊荣的首位华人科学家。他还曾应邀在国际数学家大会 (ICM) 上作 45 分钟报告 (2002), 在世界华人数学家大会上作一小时大会报告 (2010) 等。

郭雷曾经应邀担任多个国际学术大奖的评委会主席或委员, 包括 IEEE 控制系统奖 (IEEE Control Systems Award) 评委、IFAC Manfred Thoma 奖评委会主席、国际工业与应用数学联合会 (ICIAM) 拉格朗日奖评委、国际控制领域两份顶尖学术刊物 *IEEE Trans. on Automatic Control* (*IEEE-TAC*) 和 *Automatica* 的最佳论文奖评委等。此外, 他还曾担任 IFAC 理事会成员 (连任两届)、IFAC 建模辨识与信号处理委员会主席, 并获得 IFAC 颁发的杰出服务奖。特别地, 他曾先后担任首次在发展中国家召开的第 48 届 IEEE 控制与决策大会 (CDC2009) 共同大会主席、第

8 届国际工业与应用数学世界大会 (ICIAM2015) 大会主席, 这两个重大国际学术会议都取得圆满成功。他领导创建了“中国科学院国家数学与交叉科学研究中心”, 创办了“中国系统科学大会”, 并担任“上海系统科学研究院”首任院长等。他还曾任 *SIAM J. Control and Optimization* 等十多份重要学术刊物的主编、副主编或编委等。

此外, 他曾长期在国内多个重要学术组织和国家重大科技计划专家委员会任职, 包括中国工业与应用数学学会两届理事长 (2008—2016) 和副理事长 (2004—2008)、中国数学会和中国自动化学会副理事长、国家科学技术奖励委员会委员、国务院学位委员会委员、数学学科评议组召集人、中国科学院学术委员会副主任、信息科学专家委员会主任等。还曾担任国家重大科学研究计划 (973) 专家顾问组成员、中国航天科技集团重大工程项目专家委员会委员、国家科技部“变革性技术中关键科学问题”重点研究专项指南编制专家等。

除了对系统控制领域做出重大学术贡献外, 其学术成果在信号处理、生物医学、认知科学、经济金融、无线网络、时间序列、机器学习、机械系统与工程系统等其他研究领域也得到大量引用和应用。部分成果被欧美同行专家的大量学术专著和教科书引用, 有的是整节或整章引用。他领衔承担的国家自然科学基金委员会创新研究群体项目“控制科学中若干关键基础问题研究”, 曾连续三期共九年 (2004~2012) 获得择优支持。他领衔承担的某重大应用项目研究也得到应用部门好评, 曾获得国内外一系列重要学术奖励和荣誉。详情参见个人网页: <http://lsc.amss.ac.cn/~lguo/index-c.htm>。

下面按照完成的时间先后顺序, 介绍他的五项主要代表性学术成果。

一、解决自适应控制领域国际著名难题

在自动控制历史上, 由最小方差控制与最小二乘估计相结合而产生的著名的“自校正调节器”, 不但从根本上推动了自适应控制学科的发展, 并且广泛深刻地影响了工业应用。但是, 由于“自校正调节器”涉及相当复杂的非线性随机动力学方程组, 从数学上严格建立其理论基础, 曾是随机适应控制领域“长期未解决的中心问题”。例如, 自校正调节器提出者、瑞典皇家科学院院士 K. J. Åström 在首届国际工业与应用数学世界大会的报告 (1987) 中指出这一领域“在理论上的进展是缓慢而又痛苦的”。美国工程院院士 P. R. Kumar 在 *IEEE-TAC* (Kumar, 1990) 文章中更是明确指出“原始自校正调节器是否真正收敛已经是一个 15 年以上的公开问题”。

20 世纪 90 年代初,郭雷与陈翰馥合作于 1991 年发表在 *IEEE-TAC* 上的论文通过创造新的非线性随机系统分析方法,突破性地证明了自校正调节器的全局稳定性和最优性。在此基础上,他又进一步证明了自校正调节器确实具有最优收敛速度(对数律),并因此获得 1993 年在悉尼举行的 IFAC 世界大会唯一的青年作者奖,评委会评价他“解决了最小二乘自校正调节器的收敛性和收敛速度这个控制理论中长期悬而未决的问题。”随后,美国、瑞典、法国、意大利等著名专家在一系列论文中,公开评价郭雷这项工作是在自适应控制领域“中心问题”(central issue)上的“重大突破”(major breakthrough),是“辉煌成功”(succeeded brilliantly)和“最重要结果”(the most important result)等。在解决自校正调节器收敛性难题之后,郭雷又解决了自适应控制领域另外两个著名难题,即自适应极点配置和自适应二次型最优控制问题,分别发表在 1996 年和 1999 年的 *IEEE-TAC* 上。上述难题的解决改变了国际上随机适应控制领域的研究面貌。

二、奠定自适应滤波算法的理论基础

自适应滤波(或时变参数跟踪,或自适应信号处理)在现代信息处理技术中发挥重要作用。然而,由于这类算法一般涉及数学上非交换、非独立与非平稳随机矩阵的连乘积,即使对结构相对简单但被广泛成功应用的最小均方(LMS)算法,其理论研究也被公认为国际难题。例如,著名 LMS 算法的发明者、美国工程院院士 B. Widrow 等曾在论文(1976)中指出“建立自适应算法的统计理论是非常困难的问题”,而加拿大皇家科学院院士 S. Haykin 在其论文中进一步指出“随机性与非线性反馈相结合,使得详细分析 LMS 算法的收敛性成为困难的数学任务。事实上,这个问题已经吸引人们 25 年以上的研究”。

自 20 世纪 90 年代初开始,郭雷创造性地引进了在一定意义下最弱的“随机激励条件”(被国外学者称为“郭氏激励条件”或“郭氏丰富条件”),首次严格建立了用 Kalman 滤波器(KF)来跟踪线性回归模型中未知时变参数时的稳定性。在此基础上,郭雷又在 1994 年发表于 *SIAM J. Control and Optimization* 的论文中,通过进一步改进随机激励条件,创建了关于随机矩阵连乘积研究的新方法。最终在一般非平稳非独立信号情形下,对实际中广泛应用的三类最基本的自适应滤波算法(LMS, KF, RLS)系统地建立了这几类算法的稳定性理论。随后,郭雷与瑞典皇家科学院院士 L. Ljung 等合作,在发表于 *IEEE-TAC* (1995, 1999) 的三篇文章中,进一步统一建立了关于一般自适应滤波算法的性能分析与优化的基础理论。这一系列成果,从根本上突破了传统理论的局限,使得对反馈系统的应用成为可能,

在国际上得到广泛引用和应用，并成为后来建立分布式适应滤波算法理论的关键基础。

三、开启反馈机制最大能力研究新方向

控制系统中最核心的概念是反馈，它也是对付各种非线性与不确定性因素的必要而又有效的关键手段。然而，反馈机制究竟能够对付多大的非线性不确定性？它的根本局限是什么？这是控制系统中最核心的科学问题之一，但现代控制论发展起来的适应控制和鲁棒控制等相关理论并不能真正给出解答。鉴于此，郭雷于 1997 年在 *IEEE-TAC* 上发表了这方面的第一篇文章，发现并证明了关于非线性不确定系统反馈机制最大能力的第一个“临界值”定理，开启了这一重要研究方向。正如法国 B. Bercu 教授在其文章 (*IEEE-TAC*, 2002) 中指出的，当时“除了 Guo 的重要贡献之外，几乎没有其他理论结果”。郭雷在提出定量研究反馈机制最大能力的一般理论框架之后，先后与研究生合作针对几类最基本的非线性不确定控制系统，发现并建立了关于反馈机制最大能力的若干“临界值”或“不可能性定理”等（其中“4”和“ $\frac{3}{2} + \sqrt{2}$ ”两个“临界值”被国际同行称为“魔数”(magic number)）。

这项研究对定量理解人类和机器中普遍存在的反馈行为的最大能力，以及智能反馈设计中的根本局限具有重要意义，被同行认为是“过去 10 年控制系统领域最有意义和最重要的研究方向之一”。国际著名控制科学家、澳大利亚“两院”院士 G. C. Goodwin 等在 2003 年发表于 *IEEE-AC* 上的论文中明确指出“我们的研究遵循了 Xie-Guo 所提出的一般非线性问题的研究框架”；俄罗斯科学院的 V. F. Sokolov 教授在 *Automatica* (2016) 的论文中，公开评价郭雷与谢亮亮在这方面的论文是“开创性的”(pioneering paper)，并且将有关刻画反馈机制最大能力的“临界值”命名为“谢-郭常数”(Xie-Guo constant)。2002 年在北京召开的国际数学家大会(ICM)上，郭雷应邀作了题为“探索反馈机制的能力与极限”的 45 分钟报告。2014 年在南非开普敦召开的第 19 届 IFAC 世界大会上，郭雷应邀就“反馈机制能够对付多大的不确定性”作了大会报告。这是他第二次应邀在 IFAC 世界大会上作大会报告，在国际上也极为少见。

四、建立多主体非平衡动态系统的同步理论

微观层面上具有局部相互作用的多自主体系统如何导致宏观层面上“自组织”的集体行为，这是复杂系统科学研究的一项基本任务。系统学家、控制学家、物

理学家、化学家、生物学家、计算机学家和数学家等曾从不同侧面进行过大量研究。2003 年美国工程院院士 S. Morse 教授等在假设系统的运动状态具有“联合连通性”条件下,对一类多自主体系统首次进行了初步理论分析,引起广泛关注。然而,多个体之间复杂非线性局部相互作用,使得如何克服“联合连通性”假设成为公认的理论难题。美国科学院院士 S. Smale(费尔兹奖得主)与合作者在 2007 年发表于 *IEEE-TAC* 上的论文中,将局部相互作用修改为整体相互作用,但这样却改变了“局部相互作用”的本质特征。

2007 年,郭雷与唐共国针对一类最基本的具有局部相互作用的非线性非平衡多自主体系统,通过引进随机框架并深入分析随机几何图的谱隙性质以及随机非线性动态性质,首次克服了“联合连通性”这个瓶颈性难点,严格建立了这类大群体系统的同步理论。2012 年他与陈鸽、刘志新在 *SIAM J. Control and Optimization* 上发表的论文,进一步给出了群体同步的最小相互作用半径。该文因为“卓越的质量和对整个 SIAM 领域潜在的重要性”,而被美国工业与应用数学会 (SIAM) 的旗舰刊物 *SIAM Review* 评选为“SIGEST 论文”,于 2014 年在该刊上再次刊登,并在 2015 年 SIAM 的颁奖会上受到表彰。这是中国大陆学者首次获此殊荣,也是 *SIAM Review* 这个国际应用数学顶级刊物自 1959 年创刊以来,大陆学者独立发表的第一篇论文。

五、建立著名 PID 控制器的理论基础并给出具体设计方法

具有百余年历史的著名“比例-积分-微分”(PID)控制器,由于其结构简单、不依赖被控对象具体数学模型且鲁棒性强等突出优点,是迄今为止实际工程技术系统中应用最为广泛的控制器,例如,95% 以上的过程控制回路都是基于 PID 控制。此外, PID 控制器的影响已经远远超出自动控制领域自身,涉及科学技术领域中各种各样需要进行反馈调控的系统或对象。然而,长期以来在实际应用中, PID 控制器中三个关键参数的选择,一直都是基于局部线性化的模型或主要依赖设计者的个人经验或实验。因此,对于真正的非线性不确定性实际被控对象,近百年来在控制理论上一直缺乏严格的稳定性保证,也没有关于 PID 参数设计的具体理论指导。这是长期以来国际控制界没有解决的重大科学问题。

2017 年郭雷与赵成在这方面首次取得突破,他们针对由牛顿第二定律所描述的一般二阶非线性不确定系统,首次定量地给出了使得闭环系统全局稳定时, PID 控制器参数应当属于的三维无界开流形,建立了 PID 控制器的理论基础并给出了参数的设计方法。这一理论和方法不仅为工程技术中广泛应用的 PID 控制器提供

了理论基础，而且还为改进现有实际工程控制系统的性能以及设计新型控制系统，提供了必要的理论基础和具体的设计指导。这项最新成果，得到国内外同行的广泛认可和许多实际部门的高度重视。2017 年郭雷应邀在第 43 届 IEEE 工业电子学会年会上，曾就上述最新进展作大会报告，并于 2019 年在 SIAM 控制理论及应用国际会议上作大会报告。