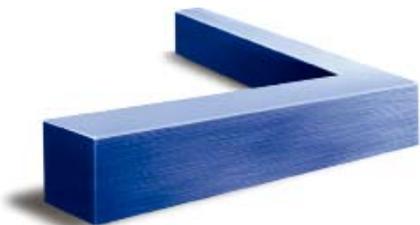


攻坚克难、开疆拓土

——中科院系统控制重点实验室学者侧记

姜天海 中国科学报社

许清 中国科学院数学与系统科学研究院



1962年，这是铭刻在我国系统控制领域史册的一年。这一年，中国第一个专门从事现代控制理论研究的“控制理论研究室”（中国科学院系统控制重点实验室前身，以下简称中科院控制室）在中国科学院数学研究所成立，为我国“两弹一星”等具有高度复杂性和高精度需求的国家尖端控制技术研发做出了不可磨灭的贡献。

此后，中科院控制室在几代学术带头人的共同引领下，迸发出经久不衰的创新活力，呈上一份又一份具有原创性、突破性和关键性的成绩单。

关肇直、宋健、秦化淑、陈翰馥、韩京清、程代展、郭雷……，这些人生经历不同、性格各异的著名学者们，在推动我国控制科学的基础研究和应用发展方面，取得了令人瞩目的成就。

“东方红一号”卫星、飞行器弹性控制、自校正调节器、自抗扰控制器、布尔网络控制……无数次国防和经济等多个领域的重大需求以及基础理论问题研究攻关背后，都镌刻着他们的名字。

半个多世纪的栉风沐雨，砥砺前行，中科院控制室的一代代学者在传承中创新，让该实验室在国际舞台上大放光彩。



1962年中国科学院数学所控制理论研究室成立后，全室人员在关肇直和宋健带领下，一边学习导弹基本原理，一边学习当时新兴起的现代控制理论。图为1962年控制室请山东大学张学铭先生来介绍最优控制原理时，控制理论研究室成员与张学铭先生合影

第一排左起：关肇直、吴新谋（数学所微分方程室）、张学铭（山东大学）、王寿仁（数学所概率统计室）、张素诚（数学所五学科室）

第二排左起：安万福、张鄂棠、唐志强（国防部五院）、何关钰、韩京清、狄昂照

第三排左起：毕大川、秦化淑、陈翰馥、丘淦兴（国防部五院）、陈俊本、华俊荣

第四排左起：张润通（数学所办公室主任）、郑之辅（数学所副所长、党组副书记）、稽兆衡（国防部五院）、金维言

未标注单位的均为中国科学院数学研究所控制理论研究室成员

开拓中国现代控制理论

在中小学读本《中国古今26位著名数学家的故事》中，关于关肇直的故事一直为大家所传颂。不仅因为他是我国现代控制理论的创建者，在泛函分析、数学物理、现代控制理论等领域成绩卓著，更因为他为我国国防建设做出了重大贡献。

关肇直1919年2月13日出生于天津，1941年

燕京大学数学系毕业，后留校任教。1947年赴法留学，在巴黎大学庞加莱研究所，师从一般拓扑学和泛函分析奠基人 M.Frechet 学习泛函分析。1949年新中国诞生，关肇直放弃取得博士学位的机会，毅然回国，为国效力。关肇直曾任中国科学院数学研究所副所长、系统科学研究所所长、中国数学会秘书长、中国自动化学会副理事长、

中国系统工程学会理事长等职务，1981年当选为中国科学院学部委员，1982年11月12日病逝于北京。

从20世纪60年代起，关肇直为我国现代控制理论的发展付出了毕生心血。在著名科学家钱学森的倡议下，他根据国防建设和学科发展的迫切需要，于1962年组建了我国第一个专门从事现代控制理论研究的机构——控制理论研究室，并亲任室主任，宋健任副主任。

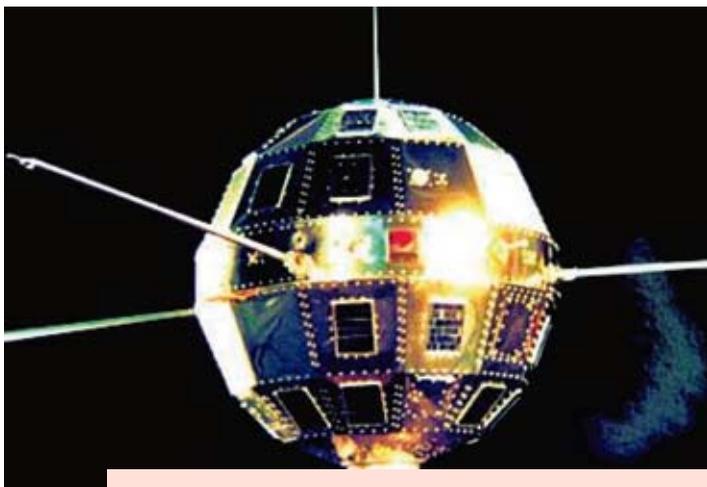
关肇直一贯重视科研工作理论联系实际，他对理论与实践的辩证关系有着深刻的认识。他一方面强调“没有理论，拿什么去联系实际”，重视和鼓励理论研究。例如，当陈景润完成他关于哥德巴赫猜想“1+2”的证明时，已是文化大革命前夕。关肇直顶住当时的极左思潮，坚决支持这项工作发表，说：“这是一项世界冠军，同乒乓球世界冠军一样重要。”在他和吴文俊的共同努力下，才使这项工作及时晓喻天下。另一方面，他也十分重视面向国家急需解决的重大实际问题的研究并身体力行。他在领导控制理论研究室的工作中，不但紧抓控制理论的基础研究，而且亲自带领全室科研人员积极参与了多项国防尖端武器控制系统的设计和研发，取得了若干重要成果。特别是他与我国著名控制科学家宋健等合作研究的弹性振动控制，提出了细长飞行器弹性振动的闭环控制模型，开创了分布参数控制理论的一类新的研究方向。

钱学森在1982年“关肇直同志纪念会”上曾指出，关肇直等人的“工作结果已经应用到我们的国防尖端技术设计工作中”。他还进一步指出，关肇直等人的飞行器弹性控制理论研究“实际上，现在已经是导弹运载火箭所不可缺少的一

个设计理论”。

关肇直负责的“我国第一颗人造卫星轨道计算方案的制定”获得了1978年全国科学大会奖；“飞行器弹性控制理论研究”获得了1982年国家自然科学二等奖；作为主要获奖者之一的项目“尖兵一号返回型卫星和东方红一号卫星”获得了1985年国家科技进步特等奖（他主要负责轨道测量和轨道选择），他本人也荣获“科技进步”金质奖章。

关肇直的另一个重大贡献是带出了一支出色的现代控制研究队伍，包括陈翰馥、韩京清、秦化淑、冯德兴、王恩平、陈文德、王朝珠、许可康、贾沛璋、王康宁、毕大川等一批享誉我国控制界的学者。关肇直带领这支队伍一边学习当时新兴起的现代控制理论，一边与导弹和卫星设计制造等实际部门的科研人员一起承担了许多重大



控制室在成立之初的目的很明确，就是要发展现代控制理论，并为我国的国防尖端武器以及人造卫星研制等高技术服务。在关肇直和宋健带领下，研究室几乎所有科研人员都参加到多种型号导弹和人造卫星及反卫星等科研项目中，他们承担的许多国防科研项目都获了奖，其中关肇直作为主要获奖者之一的“尖兵一号返回型卫星及东方红一号卫星”获1985年首届国家科技进步特等奖。

项目，同时携手全国高校和科研机构的科研人员为在中国推广普及现代控制理论和系统科学做了大量工作。关肇直于1982年11月不幸英年早逝后，秦化淑、陈翰馥、韩京清成为控制理论研究室的“接棒人”。

献身系统控制的女杰

秦化淑是当年控制理论研究室成立时最早的八位成员之一。她出身贫寒，但又红又专。1956年以优异成绩毕业于天津南开大学数学系，同年被选拔派到波兰留学。经过5年的刻苦学习，1961年5月荣获波兰克拉科夫雅盖龙大学博士学位，是当年唯一的波兰女博士。她获得博士学位后，立即毅然回到祖国的怀抱，到中国科学院数学研究所进行研究工作。1962年，中科院数学所成立控制理论研究室，她被调入该室任秘书（相当于现在的主任助理），在完成科研业务工作的同时，协助当时的研究室主任关肇直先生开展这个新成立的研究室在科研业务、行政管理和文化生活等诸多方面的工作。

自1962年至上世纪90年代初，她积极献身于导弹与卫星系统的导引与控制的研究。由于一些工作的保密要求，她和她那批同事一样成了共和国建设中的无名英雄。期间她还努力响应“理论联系实际”的号召，热心协调组织或参与工业过程和机器人控制等方面的课题。同时，特别是1990年以后，秦化淑集中精力研究非线性系统控制。特别地，她将分岔概念引入含参数的非线性控制系统，且得到了优美的结果；她还研究仿射非线性系统的结构性和动态输出反馈镇定问题，并与合作者一道证明了一般平面非线性系统的全局和有界区域上的Jacobi猜想。她的研究成果得到



1961年5月，秦化淑荣获波兰克拉科夫雅盖龙大学博士学位，是当年唯一的波兰女博士。

了业内同行的高度关注，由于她的学术影响，秦化淑于1993–1997年与北京大学黄琳教授共同主持了国家自然科学基金重大项目“复杂控制系统理论中的几个关键问题”。

与此同时，秦化淑还积极参与或组织国内学术界的各项社会活动。自1965年被选为中国自动化学会理事并被聘为中国自动化学会控制理论专业委员会（TCCT）委员以来，她多次当选为自动化学会常务理事，并历任中国自动化学会控制理论专业委员会第四至六届副主任，以及第七、八届主任等职务。1979–2002年的20多年中，她积极参与创立、组织及发展由TCCT主办的中国控制会议（1993年以前为“全国控制理论及其应用学术年会”）。开始那些年技术条件很有限，经费又十分困难。她与研究室的王恩平研究员一起尽全力发动和协调各方力量协助“中国控制会议”的各项工作，为推动大会的不断发展做出了极大贡献。为了会议成功举办，他们亲力亲为分管会务，除了筹集经费、安排会议、落实与会者食宿并协调各种复杂关系外，甚至连会议大小日程、

各类通知都是开夜车用毛笔书写的。她为推动中国控制会议发展而兢兢业业、任劳任怨、无怨无悔的奉献精神，受到控制界同行的广泛赞誉。另外，她还参与设立了中国控制会议的第一个重要奖项“关肇直奖”的筹措工作。

秦化淑多年来在自动控制等方面的贡献被同行广泛认可。在美国学者发表于《IEEE Control Systems Magazine》的一篇关于女控制科学家的回忆性文章中，她曾是被重点介绍的六位有代表性的女科学家之一，当时中国只有她一位在文章中被介绍。

国际控制舞台展风采

陈翰馥是继关肇直和宋健之后，控制室第三位当选中国科学院院士者，多年来一直是控制室建设和发展的“主心骨”。

1954年，陈翰馥在上海复兴中学毕业后，保送到留苏预备班，并于1961年毕业于列宁格勒（圣彼得堡）大学数学力学系，随后回国成为中科院数学所的一员，1962年进入新成立的控制理论研究室。当时还是青年科研工作者的陈翰馥经常伴随关肇直先生，去企业、科研院所，宣讲现代控制理论，致力于现代控制理论在中国的普及和应用。他参与编写了关肇直先生任主编的《现代控制理论》丛书，时至今日这套书仍是控制理论的经典教材。进入80年代后，在陈翰馥的不断推动下，控制室的一批年轻科研人员崭露头角、迅速成长，为了推动实验室的更大发展，中科院于1994年底批准成立系统控制开放研究实验室（2001年更名为中国科学院系统控制重点实验室），陈翰馥是首任室主任。陈翰馥始终与实验室同呼吸、共命运，推动实验室与国际接轨，他本人也取得了国际公认的学术成就。

“文革”结束后的1978年，在芬兰召开的第

七届国际自动控制联合会（IFAC）世界大会上，陈翰馥作了“关于随机能观性与能控性”的报告，这是该次大会录用的唯一一篇来自中国大陆的论文。改革开放后，陈翰馥开始研究随机系统的辨识与适应控制问题，这在当时乃至现在仍是自动控制理论的重要课题。他关于同时使控制和估计最优的论文，被国外同行专家称为1984–1986年间适应控制领域的“最重要的论文”之一，他得到的辨识算法的收敛条件，被国外专著称为“陈氏条件”。

随机逼近算法是由统计学家H. Robbins和S. Monro于20世纪50年代提出的一类随机递推算法，递推地估计未知函数的零点。对算法的收敛性分析，国外的很多学者从不同角度给出了理论框架，例如经典的概率方法、弱收敛方法、常微分方程（ODE）方法等，但这些方法有的需要对噪声、有的需要对估计序列做过于苛刻的先验假设，如噪声为鞅差列、递推估计序列有界等，在实际中很难事先确定。不同于国外学者的研究框架，陈翰馥创造性地提出了扩展截尾的随机逼近算法和基于收敛子序列的收敛性分析方法，通过引入扩展截尾，适应地选择算法步长，使算法不仅能够处理随机噪声，还能够处理含有系统状态的结构误差，实质性地削弱了算法的收敛条件。基于这个思路，陈翰馥在扩展截尾随机逼近算法的收敛性、收敛速度、渐近正态性、稳定与不稳定极限点、异步随机逼近等方面建立了完整、系统的理论基础。

系统控制领域的许多问题都可归结为参数估计，进而可转化为函数求根问题，这样可用随机逼近方法来解。基于这条思路，陈翰馥和合作者成功地解决了系统控制、信号处理等领域的许多前沿问题，包括多变量线性系统参数和阶次的递推辨识、非线性系统的递推估计、非线性系统的



适应调节、多智能体系统的同步、递推主成分分析、符号滤波等，这套框架已成为递推解决系统控制中许多问题的强有力工具。陈翰馥的这些工作得到了国内外学者的高度评价，美国、法国、澳大利亚都有学者应用他的理论成果与框架从事相关研究。

从陈翰馥1961年回国工作算起，迄今已有54个年头，他身体力行，践行着那个时代知识青年为祖国健康工作50年的诺言。如今，78岁高龄的陈翰馥仍然活跃在科研的第一线，他亲自指导研究生，最新撰写的专著也于2014年在美国CRC Press出版。他培养的学生中涌现出了中科院院士、国家杰出青年基金获得者、美国电子电气工程师协会（IEEE）会士等一批自动控制理论的领军人物。

作为改革开放后第一批走向世界的科研工作者，陈翰馥先后到加拿大、美国、日本、澳大利

在控制室成立之初，室领导就认为基础理论研究无所谓国内先进水平，必须开展国际学术交流，做出国际水平的工作。1978年以后，在改革开放时代潮流的推动下，控制室率先冲破国界，迈出破冰之旅，成为控制科学领域开展国际交流的先行者。1979-1981年间应邀来访的国际著名控制专家有W. M. Wonham, T.J. Tarn, K.J. Åström, K. Hirai, S. Maekawa, J. Lions, R.E. Kalman, E.B. Lee, K.S. Narendra, D. Mayne, A. Kermann, T.E. Duncan, T. Kailath, P. Eykhoff, H. Kwakernaak, R. Gorez, M. Sugeno等，这在当时国内控制界是十分突出的。图为1980年4月6-20日，瑞典Lund Institute of Technology的K.J. Åström教授访问控制室，并就Minimum variance control, Linear quadratic Gaussian control, Control of Markov chains, Nonlinear stochastic control, Self-tuning regulators, Application of system identification in the kraft paper machine, in the crushing plant and in the ship steering problem, Minumum covariance self-tuner, Trends of system identification等专题做了10次讲座，并举办了3次讨论会，图中左2-左4分别为K.J. Åström、陈翰馥、关肇直。

亚、法国、荷兰、奥地利、香港等地进行合作研究，他努力推动国内控制理论的发展，鼓励学界同行们努力占领学术制高点的同时，积极争取中国自动控制研究在国际重要学术组织中的发言权和影响力。在他的带动和支持下，“中国控制会议”已发展成为国内外有重要影响力的学术会议，中国自动控制研究已成为国际自动控制研究领域的一支不可忽视的力量。陈翰馥大力提携青年科研人员，无论他多忙，只要去办公室找他，他总会放下手头的工作，耐心倾听、倾力帮忙。1988年，在陈翰馥组织下，国际自动控制联合会（IFAC）系统辨识会议在北京举行。1999年，他担任国际程序委员会主席的国际自动控制联合会（IFAC）世界大会在北京成功召开，中国自动控制研究得到了国际学术届的认可和高度评价。他还曾任IFAC理事会成员（2002~2005）、两届中国自动化学会理事长（1993~2002）、以及中国科学院系统科学研究所所长等职务。

发明自抗扰控制技术

这个实验室第一批成员中还有一位传奇人物，他就是韩京清。

韩京清1958年毕业于吉林大学数学系，被分配到中国科学院数学研究所微分方程研究室，是1962年数学研究所控制理论研究室成立时的首批成员之一，1963年10月被选派到苏联留学，进入著名的莫斯科大学数学力学系，师从著名的B. B. 涅梅茨基教授。韩京清也是我国控制理论与应用早期开拓者之一，在他一生所涉足的多个研究领域，韩京清先生均做出了杰出贡献。这些贡献包括20世纪60年代与宋健合作，发展完善了线性最速控制理论中的“等时区”方法；20世纪70年代中用最优控制理论提出了拦截问题中新的制导概念和方法；20世纪80年代提出了线性系统理论的构造性方法，并在中国率先推动控制系统计算机辅助设计软件的开发和研究，主持了由全国19个院



校和科研院所150多人参加的国家自然科学基金重大项目“中国控制系统计算机辅助设计工程化软件系统(CADCSC)”。

韩京清从20世纪80年代开始勇于以批判的态度反思现代控制理论的发展现状,对现有控制方法提出了一系列触及本质的质疑,并义无反顾地踏上了一条开创实用控制方法的荆棘之路。特别是在他生命的最后十余年里,开创了自抗扰控制的理念和方法,为解决非线性、时变、解耦、自适应、鲁棒、抗扰、辨识、滤波等重要问题提供了迥然不同的思路和崭新的手段。

自抗扰控制技术所体现的原创性思想和方法一开始并不被人重视,甚至曾被人质疑,有时科研经费都难以得到保障,韩京清就自掏腰包为课题组开展研究工作提供必要的支撑。60多岁的韩京清亲自做理论推导,上机计算及赴现场实验测试,为新思想、新方法的推进与推广不懈探索。

如今,国内外围绕运用自抗扰控制思想解决

实际工程问题的应用研究,几乎涉及所有的控制工程领域,如导航制导与飞行控制、机械系统、电力系统、化工过程控制等。实验室的黄一、薛文超等针对我国航天多个类型飞行器研制中遇到的姿态控制难题,提出了基于自抗扰控制的姿态控制方法,目前基于自抗扰控制的姿态控制方法已用于我国航天若干实际型号的飞行控制中。清华大学将其应用于机械加工的精密及超精密运动控制中,上海交通大学智能机器人研究中心将其用于与企业联合开发的一款高性能多用途服务机器人——“纳豆机器人”的运动规划和避障控制中。在美国,自抗扰控制技术经过简化和参数化,先后应用于Parker Hannifin的高分子材料挤压生产线、密歇根州立大学超导回旋加速器国家实验室(NSCL)的超导加速器等。2013年,美国德州仪器公司推出一系列基于自抗扰控制算法的运动控制芯片。近年来,自抗扰技术还以不同的方式出现在一些工控界占主导地位的控制器中,形成了一个国际工控界不可忽视的技术走向。

与此同时,自抗扰控制也吸引了国内外越来越多研究者。在近年的中国控制会议和美国控制会议上都曾举办“自抗扰控制研讨会”,《控制理论与应用》和ISA Transactions杂志分别在2013年及2014年出版自抗扰控方面的专刊。韩国中源大学在2014年成立“自抗扰控制研究中心”,以期促进自抗扰控制技术与新型产业的结合。

大凡与韩京清生命轨迹线相交的人们,无不感受到他对事业的热爱胜过自己的生命,无不感受到一种不朽的人格魅力,一种对真善美义无反顾的追求。正如中科院院士郭雷在纪念韩京清逝世5周年纪念会上所指出的:“韩京清研究员最值得大家学习和铭记的是他的探索精神、独立精神以及奉献精神。他的探索精神不是为探索而探索,而是探索从实际需求中产生的根本性问题。



2013年,美国德州仪器公司推出一系列基于自抗扰控制算法的运动控制芯片

左图:2002年12月,韩京清(右)在装甲兵工程学院进行自抗扰控制的火控系统实验

他的独立也不是刻意去标新立异，而是因为有许多实际问题无法用现有理论解决，才需要独辟蹊径。此外，他从不把发表著名刊物论文或追求多大研究项目作为做学问的目标。他把科研、事业看作跟生命一样重要，甚至高于生命，这源于他的世界观、人生观及价值观，而这也实际上决定了他的探索精神、独立精神和奉献精神！”韩京清用他坎坷、坚毅、求实、创新的一生给后人立下了一座为人为学的精神丰碑！

揭示逻辑控制系统的奥秘

程代展是文化大革命结束之后，关肇直招收的首批硕士研究生。

程代展的求学之路颇为传奇，他1964年从福州一中毕业，高考成绩突出，但却因政治原因使招生人员却步。在陈君实校长和王于畊教育厅长的极力推荐下，由当时福建省委第一书记叶飞亲自给时任教育部部长兼清华校长的蒋南翔打电话协商，才使他得以进入清华焊接专业学习（见，陈丹淮，叶葳葳，《三个新四军女兵的多彩人生》，人民出版社，2011）。文革后，科学的春天让他

有机会考上中国科学院数学所关肇直的首批研究生，从而让他回归了自己从小心仪的数学方向。获硕士学位后，他赴美国 St. Louis 华盛顿大学学习，师从谈自忠教授。1985年，他以所有课程全优（GPA4.0满分）的成绩获博士学位后，回到科学院工作。

他在美主修非线性系统的微分几何理论，当时这是个前沿方向，国内尚未见这方面的系统研究，他回国后成为这一领域的传播者和带头人。由于这方面的工作，他于2006年当选为IEEE会士，2008年当选为IFAC会士，他和学生的相关工作在2008年获国家自然科学二等奖。

钱学森与宋健在《工程控制论》第二版“逻辑控制与有限自动机”一章中提到：“随着科学技术的飞速发展，动力学控制理论已不能完全满足客观实践的需要。……现代控制系统的一个新特点是它必须具有逻辑判断能力。……随着计算技术和理论研究的发展，现已初步形成了一门逻辑控制理论。”虽然钱学森与宋健最早提出了“逻辑控制理论”与“逻辑控制系统”的概念，并给出其基于布尔函数的数学框架，但因缺

2011年在意大利米兰召开的第18届IFAC世界大会授奖仪式上，时任IFAC主席Isidori教授（中）与获得IFAC旗舰杂志Automatica三年一篇的理论/方法最优论文奖(2008-2011)的程代展（左）、齐洪胜（右）合影，这是至今唯一完全由华人完成的获奖论文



少有效的分析综合的工具，所以，如书中所言：“遗憾的是一种统一的理论模型还没有形成。”

国际上对逻辑动态系统的研究主要起源于生物系统，Kauffman 在上世纪六十年代末基于当时生物学的发现提出用布尔网络来刻画基因调控网络，取得很大成功。但直至本世纪初，才有几位生物与物理学家呼吁要建立布尔网络控制理论。布尔网络控制系统的数学模型就是钱学森与宋健提出的逻辑控制系统，由于同样的原因，这方面的进展甚少。

程代展在2008年初首次接触布尔网络时就敏感地觉察到他早年提出的矩阵半张量积及逻辑表达式的半张量积表示可望成为布尔网络研究的一个恰当的数学工具。从此，他和他的学生全身心地投入了逻辑控制系统的研究。他们的研究成果包括逻辑动态系统的拓扑结构，如不动点、极限环的一般计算公式；布尔控制网络能控性、能观性的充要条件；稳定性与镇定的判断与控制设计；干扰解耦；最优控制；系统辨识；以及将其推广到如有限博弈等泛逻辑系统的控制问题中去，这些结果形成了逻辑控制系统的理论基础。

程代展的这些工作得到国内外学者的高度评价和大量后续研究，意大利、以色列等国都有团队从事半张量积与代数状态空间方法及其应用的研究，逻辑系统的状态空间方法正被许多国内外同行应用到生物学、博弈论、图论、模糊控制、故障检测、信息编码、遥操作等相关领域的研究。

程代展和他的学生齐洪胜关于布尔网络能控能观性的论文，获得 IFAC 颁发的其旗舰杂志 Automatica 三年一篇的理论/方法最优论文奖（2008–2011），这是至今唯一完全由华人完

成的获奖论文，他（与齐洪胜）关于“逻辑系统控制的代数状态空间方法”的工作于 2014 年再次获国家自然科学基金二等奖。

攻坚克难闯新路

如今，在控制室的中青年一代中，有多位活跃在国际学术前沿的杰出人才，包括郭雷、张纪峰、洪奕光、姚鹏飞、郭宝珠、孙振东、吕金虎等国家杰出青年科学基金获得者，郭雷无疑是其中的杰出代表和领军人物。

1982年，郭雷以优异成绩从山东大学数学系毕业，并考入中国科学院系统科学研究所师从陈翰馥先生读研究生，从此，他与这片创新的沃土结下了不解之缘。他长期扎根在国内，以巨大的勇气和激情，不断攻坚克难、开疆拓土，在系统与控制科学若干著名难题研究中，留下了一座座闪光的里程碑。

郭雷的科研生涯始于随机自适应系统。他作为研究生涉足时，该领域正伴随着现代信息技术的发展进入研究高潮。然而，由于自适应系统一般是很复杂的非线性与非平稳随机动态系统，理论研究相当困难，许多基本问题因而成为悬而未决的国际著名难题。20世纪90年代，郭雷在自适应控制的三个最基本问题（自校正调节器、自适应极点配置、自适应二次型控制）、以及自适应滤波的三类最基本算法（最小均方（LMS），递推最小二乘（RLS），卡尔曼滤波（KF））的基础理论研究中，实现了一系列重大突破。

首先，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，曾是随机自适应控制领域“长期未解决的中心问题”。正如自校正调节器提出者、瑞典皇家科学院院士K.J.Aström在首届国际工业与应用数学世界大会的报告（1987年）中所指出的，这一领域“在理论上的进展是缓慢而又痛苦的”。澳大利亚科学院院士G.C.Goodwin和英国皇家学会会员D.Q.Mayne等人在论文（1991年）讲道，即使在理想情况下，建立随机适应控制理论也“令人吃惊地困难”。美国工程院院士P.R.Kumar在其1990年的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”。国际著名统计学家、美国斯坦福大学T.L.Lai教授在1991年的论文中也叹道“这一中心问题仍没有解决”。

就在国际学术界为长期无法解决自校正调节器难题而感叹时，情况在中国悄然发生了重大变化。1990年，郭雷在充分汲取前人智慧的基础上，独辟蹊径，创造了新的非线性随机系统分析方法，从而突破性地、合理完整地证明了自校正调节器的全局稳定性和最优性，发表在1991年的IEEE-TAC上。在此基础上，他又通过建立自校正调节器的对数律，进一步证明了自校正调节器确实具有最优收敛速度，并因此获得1993年在悉尼举行的国际自动控制联合会（IFAC）世界大会唯一的青年作者奖，评奖委员会评价他的工作“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、意大利等国著名专家在论文中给出一系列高度评价，认为这是在自适应控制领域“中心问题”上的“重大突破”，是“辉煌的成功”和“最重要的结果”。

在解决了自校正调节器难题之后，郭雷再次瞄准了非最小相位系统的自适应极点配置和自适应二次型最优控制这两个著名难题。众所周知，

线性系统的极点配置和二次型指标下的最优控制理论是这个领域中两个最基本结果。当控制系统的系数矩阵未知并有随机噪声时，自然成为自适应控制领域两个最基本的科学问题，曾吸引了国际上无数学者的研究。但是，前人工作或假设系统具有稳定性，或需要很强的先验信息，或需要假定估计值具有良好性质等。在自适应情形下，因为被控闭环系统既无先验的稳定性保障，也无必要的激励信息，如何保证在线参数估计值具有能控性和收敛性等良好性质，是解决这两个基本理论问题所面临的共同核心难点，成为自适应控制领域长期未解决的著名难题。

在近十年探索的基础上，郭雷于90年代中期受法国学者的启发，终于取得关键性突破。他通过建立加权最小二乘算法的自收敛性，并引进和利用“随机正则化”和“衰减激励”方法，最终克服了前人工作的各种弊端，合理完整地解决了离散时间线性随机系统自适应极点配置及二次型最优控制问题，全文发表在1996年的IEEE-TAC上。在此基础上，他与美国著名随机控制专家T.E.Duncan教授夫妇合作，在发表于1999年IEEE-TAC的文章中，又解决了连续时间线性随机系统在完全状态信息下的自适应LQG最优控制这一著名难题。此外，郭雷还对含有慢时变和快时变未知参数的线性随机系统，建立了相应的控制理论。特别地，2000年他与研究生薛峰对未知马尔科夫跳变参数的离散时间线性随机系统，给出了全局自适应镇定的充分必要条件（不同于参数已知时的相应条件），揭示了信息不确定性、结构复杂性与反馈镇定性之间的深刻联系。

除了自适应控制，郭雷在自适应估计与滤波领域也做出了突破性和基础性贡献。研究生期间，他就做出一系列国际领先水平的成果并展示了突出的创造才华。例如，在随机梯度算法收敛

性研究中他首次突破了传统“持续激励”条件的局限，并成功用于最优适应控制系统的设计；提出了关于反馈控制系统阶数的估计方法，被英国学者在论文中评价为这方面的“第一篇文献”。他与导师合作发表的一系列成果得到国际同行广泛引用，包括被俄罗斯学者作为当时“最强的结果”在专著中大篇幅整章引用。1987年博士毕业后，应国际自动控制联合会前主席、澳大利亚科学院院士B.D.O.Anderson的邀请，郭雷赴澳大利亚国立大学做两年博士后研究。这期间，他与多位著名控制学家和统计学家开展了卓有成效的合作。特别地，他与黄大卫教授和国际著名时间序列分析专家、澳大利亚科学院院士E.J.Hannan合作，通过对概率论中双指标鞅的深入研究，建立了关于无穷阶非平稳线性随机系统参数估计、以及非平稳ARMAX模型中系数与阶数同时估计的一般数学理论，发表在国际顶尖统计学刊物上，迄今仍是这方面国际上最好的结果。

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，它与（关于定常参数的）自适应估计相比，最显著的不同是算法的自适应增益不能无限小（否则无法跟踪不断变化的参数或信号）。进一步，在理论研究上，由于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，即使对看起来相对简单但有广泛成功应用的LMS算法，其理论研究也被公认为国际难题。著名LMS算法的发明者、美国工程院院士B.Widrow等人曾在1976年的论文中指出“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1999年论文中进一步指出“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，这个问题已经吸引了人们25年以上的研究”。正因为如此，长期以来在

自适应滤波理论研究中，除极少数情况（如美国著名随机系统专家H.J.Kushner教授等研究自适应增益趋于零时的弱收敛性）之外，绝大多数学者都需要假设独立性和平稳性条件。然而，正如法国科学院院士O.Macchi在其1995年专著中所指出的“输入序列的独立性假设是不切实际的（不正确的）”，澳大利亚科学院院士B.D.O.Anderson在其2001年的文章中也指出“当自适应增益不趋于零时，对跟踪算法行为的分析是非常困难的”。

郭雷在澳大利亚期间经过一年多艰苦探索，于1990年在IEEE-TAC发表了他在这方面的第一篇原创性论文“利用Kalman滤波估计时变参数：稳定性与收敛性”。该文利用条件数学期望工具，创造性地引进了在一定意义下最弱的“随机激励条件”，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控制与优化》的论文中，通过进一步完善随机激励条件，并创建关于随机矩阵连乘积研究的新方法，最终针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），在一般非平稳非独立信号情形下，系统地建立了这几类算法的稳定性理论。与此同时，国际著名系统辨识专家、瑞典皇家科学院院士L.Ljung邀请郭雷进一步合作研究性能分析问题，他们与法国巴黎六大概率论室的P.Priouret教授一起，首先建立了著名遗忘因子最小二乘（RLS）算法的理论基础，证明了遗忘因子的“最优”选取原则。随后，郭雷与L.Ljung进一步合作，在1995年至1997年期间发表于IEEE-TAC的三篇文章中，统一建立了关于一般自适应滤波算法（包括LMS, RLS, KF）性能分析、逼近与优化的基础理论。这一系列成果，从根本上突破了传统理论的局

限, 并使其对反馈系统的应用成为可能, 得到国际上不同领域学者的广泛引用和应用, 并为后来分布式适应滤波算法的理论研究奠定了基础。

伴随着上述一系列国际难题的突破, 随机适应系统领域的研究面貌发生了根本性改变, 郭雷这个被国际著名同行誉为“随机与适应控制领域的领头研究者”, 也成为国内外学术界的一颗新星。29岁时, 他被聘为国际控制数学领域著名学术刊物美国《SIAM控制与优化》的编委, 成为该刊创刊30年来的第一位华人编委; 30岁时, 被中国科学院破格晋升为研究员。1993年当选中国十大杰出青年; 1994年成为首届国家杰出青年科学基金的获得者; 1998年, 37岁的郭雷当选为IEEE会士(Fellow), 成为当时国际控制系统领域(CSS)最年轻的IEEE会士之一; 1999年, 在北京召开的第14届IFAC世界大会上, 郭雷作为五位大会邀请报告人之一, 做了题为“自动控制在中国的某些近期发展”的大会报告。同年, 获得国家有关部门授予中国青年的最高荣誉“中国青年五四奖章”。

世纪之交, 学术界纷纷展望未来, 郭雷也瞄向了更困难、更基本的控制科学问题。控制系统中最核心的概念是反馈, 它是对付复杂非线性不确定性系统的必要而又有效的关键手段, 在实际中普遍采用基于计算机和通信的采样反馈机制。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? 毫无疑问, 这是控制系统中最核心的科学问题之一, 但包括适应控制和鲁棒控制在内的现有控制理论并不能真正解答。

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性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, 几乎没有其它理论结果”。欧洲学者甚至专门撰文将相关控制问题命名为“公开问题(Open Problem)”。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, 先后与谢亮亮、薛峰、李婵颖等年轻人对几类基本的非线性不确定控制系统, 取得了一系列重大突破, 发现并建立了若干关于反馈机制最大能力的“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”。2002年在北京召开的四年一度的国际数学家大会上, 郭雷做了题为“探索反馈机制的能力与极限”的45分钟邀请报告。2014年在南非开普敦召开的第19届IFAC世界大会上, 他就“反馈机制能够对付多大的不确定性”作了大会邀请报告, 获得广泛赞誉。这是时隔15年之后, 他第二次被邀请在IFAC世界大会上作大会报告, 这在国际上也是凤毛麟角的。

进入新世纪, 复杂系统科学问题在众多领域日益凸显, 国际上许多著名科学家都认为, 21世纪将是复杂性科学的世纪。近年来, 郭雷一直在积极探索并努力推动系统学基本的问题研究, 包括多自主体复杂系统从微观到宏观的涌现与调控理论。他通过引进随机框架, 指导唐共国等年轻人对一类最基本的、具有局部相互作用的非线性非平衡多自主体系统展开研究, 通过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, 克服了“连通性假设”这个关键难点, 首次完整建立了高密度情形下这类典型群体系统的同步理



2002年在北京召开的四年一度的国际数学家大会上，郭雷应邀作题为“探索反馈机制的能力与极限”的45分钟报告



2014年在开普敦召开的第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”作大会报告，这是他继1999年之后第二次在IFAC世界大会上作大会报告。

论，并为相关非平衡大群体系统的研究开启了新路。特别地，他后来与陈鹤、刘志新于2012年在美国《SIAM控制与优化》杂志发表的论文“群体同步的最小相互作用半径”，因为其“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”，被推荐在该刊上再次刊登，并在2015年SIAM的颁奖会上受到表彰。这是大陆学者首次获此殊荣。

2001年，郭雷当选为中国科学院院士，成为当时中国最年轻的院士之一；2002年，他作为“领头的控制理论专家”当选为第三世界科学院院士；2007年，他因对随机系统的适应控制、估计理论和反馈机制最大能力等方面所做出的“根本性贡献”当选IFAC会士；2007年，他当选为瑞典皇家工程科学院外籍院士；2012年被选为IEEE控制系统学会杰出演讲人；2013年被香港中文大学授予荣誉教授，2014年被瑞典皇家理工学院授

予荣誉博士学位。

此外，郭雷还被推荐担任学术界若干重要职务，并被IFAC授予杰出服务奖。他曾任IFAC理事会成员，IFAC建模辨识与信号处理委员会主席，多种国际学术刊物编委，以及重要国际奖励评委，包括IEEE控制系统最高奖的评委，IFAC奖励委员会委员，国际顶尖控制刊物IEEE-TAC和Automatica的最佳论文奖评委等。特别地，他曾任首次在中国召开的“IEEE控制与决策大会”（CDC'2009）共同主席、以及四年一度的“国际工业与应用数学世界大会”（ICIAM'2015）主席，两次重大国际会议都取得圆满成功。他还曾任或现任国务院学位委员会委员，国家科学技术奖励委员会委员，国家973计划专家顾问组成员，中国科学院学术委员会副主任，中国工业与应用数学会理事长，中国科学院数学与系统科学研究院院长，国家数学与交叉科学中心主任等。2004–2012年，他担任首席科学家的国家自然科

学基金委创新研究群体，连续三期共九年获得基金委择优支持，一批杰出成果相继诞生并获得国内外重要奖励。

如今，继续在科研一线从事系统与控制理论研究的郭雷，还带领或支持年轻人开展博弈控制、量子控制和航天控制等方面相关科学问题研究。结合对复杂性科学的探索，他还参与以法律法规为“控制器”的社会复杂系统的调控问题研究，努力拓宽系统与控制科学的研究范围，使其更好地服务于人类文明进步。

忆往昔，成绩斐然。经过从关肇直到郭雷几代系统控制学家的努力，控制室从无到有，不断发展，他们的科研成果在国家重大科技问题的解决中做出了重要的贡献，同时，在国际舞台上，实现了从逐渐崭露头角到具有重要地位和影响的跨越。

展未来，再创辉煌。在张纪峰所长和洪奕光主任的带领下，控制室必将在未来做出新的更大的贡献，并与国内外同行齐心协力，推动我国控制科学迈向新的发展阶段。

注：原文发表于《科学新闻》2015年6月刊，收录此刊时有补充修改。