

· 成果简介 ·

国家自然科学基金重点项目 “非线性网络的动力学复杂性研究” 的突出进展和创新成果

方锦清

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

[关键词] 非线性网络, 动力学, 复杂性

1 引言

为了确保我国国民经济持续健康发展和全面提升国家自主创新能力,我国制定了第二个《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和《十一五规划》。这两大计划中,把复杂系统、下一代信息网络、信息安全理论等明确定为重大(点)项目和科学前沿的研究课题。

1998—1999年,国际上科学家冲破了长期的传统图论、特别是随机图论的束缚,在复杂网络的研究中取得了突破性进展,其主要里程碑的标志是二项重要的发现:小世界网络^[1,2]和无标度网络^[3,4],掀起了国内外复杂网络的研究热潮,并由此诞生了一门崭新的交叉科学:网络科学^[5-7]。无疑,它与自然科学(数学、物理科学、复杂性科学、非线性科学、计算机与信息科学、生物科学、系统科学等)和社会经济科学等众多学科产生广泛交叉,引起了国内外不同学科对网络科学的高度重视和普遍参与,它不仅将为人们提供认识真实世界的复杂性的全新的科学知识和视角,而且将成为改造客观世界的新的方法论和有力武器。

我们知道,自然界和人类社会中广泛存在着复杂系统,而复杂系统正好可通过各种各样的复杂网络来描述。事实上,复杂网络的研究极大地促进和深化了对复杂系统的研究和发展,它已经成为现今复杂系统和复杂性科学研究中最受关注和最具挑战性的科学前沿课题之一。“网络科学”正是与众多领域广泛交叉的一门新兴科学,它的诞生既适应了现

代网络信息时代和复杂性科学研究的需要,又符合21世纪复杂科学研究的大趋势。

目前,网络科学正在国内外迅猛发展,复杂网络的复杂性及其应用研究越来越吸引着不同领域、学科和工程等众多人员的高度重视和空前参与,无形地结成了最广泛交叉的科学合作网络,以前所未有的广度和深度向前发展。网络科学的一系列新发现及其应用正引发一场世界性网络革命,它与20世纪60年代非线性科学,特别是混沌科学引起的第三次物理学革命相互交融在一起,提供了一种新的科学发展观和方法论,使简单性与复杂性、确定性与随机性、有序性与无序性再次达到了自然和谐的统一,人类的认识产生了一次新的飞跃。网络科学的诞生再次验证了20世纪伟大的思想家、理论物理学家史蒂芬·霍金的预言:“21世纪将是复杂性的世纪”。21世纪八年多来世界科学的发展越来越证实了这个科学预言。

正是在上述国内外背景下,从2005年1月至2008年12月,我们“一院两校”(中国原子能科学研究院(CIAE)与上海交通大学(SJTU)、北京师范大学(BNU))共同组成了国家自然科学基金复杂网络重点项目联合研究组,开展了国家自然科学基金网络重点项目“非线性网络的动力学复杂性研究”(简称“非线性网络”)的研究工作,这是国家自然科学基金委员会批准的第一项复杂网络科学的交叉科学研究重点基金资助项目。4年来,我们“一院二校”团队密切合作,共同努力,现已圆满完成全部研究计划,实现了预定的研究目标。

本文于2009年2月22日收到。

2 项目的突出进展和创新成果

2.1 成果综述

无论在网络科学的理论方面,还是在网络实证和应用研究方面,本项目都取得了创新性和富有特色的丰硕成果^[8,9]。据目前统计,迄今全组已出版了三部专著:方锦清编著的《驾驭强流束晕与探索网络科学》(2008)^[5],汪小帆、李翔与陈关荣编著的《复杂网络理论及其应用》(2006)^[10],李翔编著的《从复杂到有序——神经网络智能控制理论新进展》(2006)^[11]。主编了第2—4届全国复杂动态网络学术论坛论文集^[12-14];此外,还担任了2部全国复杂网络会议文集即“复杂网络”和“复杂网络理论和应用”的副主编;全组已发表SCI论文约120篇,EI论文15篇,ISTP论文13篇,专题综述文章28篇;国内外学术会议大会特邀报告40多次,分会邀请报告共10多次,会议口头报告50多个。根据2008年11月初步查新显示,全组论文被国内外他引总次数已超过188次。

据统计,联合研究组的论文主要发表在20多种国际期刊上: *Phys. Rev. E*, *Phys. A*, *Phys. Lett. A*, *Eur. Phys. Lett.*, *Advance in Complex Systems*, *Int. J. Modern Phys. B*, *Chin. Sci.*, *Chin. Phys. Lett.*, *Commun. Theor. Phys.*, *Chin. Phys. IEEE Trans. Circuits & Systems* 等。值得一提的是2007年应《物理学进展》主编冯端院士的邀约,团队合作撰写了2篇长篇论著(约20万字):《一门崭新的交叉科学——网络科学》(上)和(下)(《物理学进展》,2007,27(3):239—343;27(4)361—448),涉及网络科学领域12个重要专题;2008年应《力学进展》“复杂网络专刊”^[15]主编陈关荣等邀请撰写了5篇专题综述,占专刊1/3。我组为国内外英文杂志撰写了多篇英文专题综述,这些国内外刊物的专题综述反映了相关课题的新进展和发展方向。论文发表遍及国内许多核心刊物:《中国科学》,《物理学报》,《物理学进展》,《自然科学进展》,《科技导报》,《复杂系统与复杂性科学》,《计算机工程与应用》,《系统工程理论与实践》,《系统工程学报》等。

同时,中国原子能科学研究院与香港城市大学及黑龙江大学联合主办了“第4届亚太地区混沌控制与同步会议暨全国混沌应用研讨会”(哈尔滨,2007.8.24—26);合作者汪小帆和李翔与香港城市大学陈关荣教授在2009年“第一届国际复杂科学会议:理论与应用”(2009.2.23—25,上海)上共同组

织了专题“复杂工程网络研讨会”。项目组从2004年至今连续主办了4届“全国网络科学论坛”,参与组织或协办了4次“全国复杂网络会议”等10多个国内外学术会议及多种交流活动,在国内产生了比较深刻而广泛的影响。

迄今,全组培养约50名硕、博士研究生,1名博士后出站,13名博士生和24名硕士生已完成学位论文毕业,走上工作岗位。

本项目已经取得了丰硕成果,达到了国家自然科学基金委员会重点项目管理办法中关于“重点项目要体现有限目标、有限规模和重点突出的原则”的要求和目的。

2.2 学术活动情况简介

2004—2008年期间,我组在国内连续4年组织和成功举办了第1—4届“全国科学网学术论坛”,第一届在太湖召开,参加人数40多人;第二、第三届在北京召开,第四届在青岛召开,后三届参加人数都超过100人,高峰时达到200多人,总人数超过500人,后三届由中国高等科学技术中心出版了我组主编的三部论坛文集^[12-14],论坛文集总厚度超过1400页,在国内成为网络科学的主要交流平台之一,发挥了良好的促进作用和明显的影响,特别是年轻人普遍反映论坛上的收获丰硕,大大激励了青年人对于网络科学的研究兴趣。整个项目组主要成员分别担任了四届“全国复杂网络会议”的组织职务(如正、副主席或组长、程序委员会和学术委员会委员等),积极推动了我网络科学的发展;全组有6个主要成员多次应邀出访了7个国家(美国、德国、英国、澳大利亚、印度、韩国、新加坡)和3个地区(中国台湾地区、香港特区和澳门特区),参加了十多次国际学术会议,并在国内外会议上应邀作了40多次大会特邀报告和分会邀请报告,以及50多个会议口头报告,本组参加国内外会议共计超过200多次,积极而广泛地进行了国内外的学术交流和合作活动,较大地促进和提升了项目的研究水平。

另一方面,在2005—2008年期间我组也邀请一些国外著名专家来国内访问交流。例如,2005年邀请美籍华人来颖诚(Ying-Cheng Lai)教授和刘佳明(Jiaming Liu)教授参加网络科学论坛和访问,2006年3月邀请美国加州理工学院 Michael Cross 教授来访合作,邀请新加坡国立大学李保文教授来访合作,2008年5月邀请美国乔治亚理工学院丁鄂江教授来访合作,2008年8月邀请美国加州理工学院 Michael Cross 教授来访合作,2005—2008期间还邀

请了 Kapral, Jorgen Kurths, Peter Hanggi, Plaman Ivanov, Hong Qian, Changsong Zhou, Yoneyama, Bambi Hu, Leihan Tang, Jiansheng Wang 等一批国际专家来访。

2009 年一些国际会议继续邀请我们作为会议大会报告人和会议国际程序委员会委员等职。例如,欧洲科学与工程协会(WSEAS)2009 年由西班牙拉拉古纳(la laguna)大学主办 The 8th WSEAS International Conference on Non-Linear Analysis, Non-Linear Systems and Chaos (Nolasc'09, La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain, July 1—3, 2009)特邀作者作大会报告(参看网站 <http://www.wseas.us/conferences/2009/lalaguna/nolasc/>)。2009 将在英国伦敦玛利皇后学院召开 The 2nd IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems Chaos09, 22nd-24th June 2009), 主办方伦敦大学邀请作者作为会议程序技术委员会委员(www.qmul.ac.uk); 在美国召开的 The 7th ICCAS(International Conference on Communication, Circuits and Systems)主办方中国香港城市大学来函邀请作者作为大会技术委员会委员(参看网站 <http://icccas09.uestc.edu.cn>), 我组主要成员也有类似邀请情况。这说明我们在国外的影响还在继续。

总之,从各方面反映来看,联合研究组的主要成员在国内外学术界和学术会议中已经占有一席之地,产生了相当深刻而广泛的影响,扩大了项目组以及国内该领域学术的交流,提高了整个项目的研究水平。

2.3 创新性研究成果

本重点项目作为网络科学研究的一个重要阶段,其计划任务已圆满完成,研究目标已经达到了。整个项目的研究成果深刻地揭示了非线性网络的动力学复杂性的基本特征,不同类型网络拓扑结构特征与网络的动态特性之间关系的若干定量规律,动态网络的群聚、传输、同步、传播和博弈等一系列过程及其控制,以及相关应用问题。整个项目研究取得了突出进展和重要成果,其创新性和特色表现在 12 个方面:

(1) 提出和建立了网络科学的统一混合理论框架(体系),包括三部曲模型:统一混合择优模型、大统一混合模型和大统一混合变速增长模型;构建、描述和总结了 7 大层次的复杂网络模型复杂性金字塔,深刻揭示了复杂网络中拓扑结构和动力学的复

杂性-简单性与多样性-普适性之间的相互转变关系。

(2) 提出了一类复杂网络的新家族——广义 Farey 树组织的一维和二维网络及三维金字塔,推导出拓扑特征量(度分布、平均路径距离或直径、相称性系数等)表达式,再次揭示复杂网络的若干共性和特殊性及其相互转变特点。

(3) 发现非局域连接导致规则网络的对称性破缺,不同的连接方式会导致不同的部分同步时空斑图,从理论上导出部分同步判据;研究了具有时间上开关闪烁的非局域链接对网络部分同步的影响和群结构的时空动力学网络,发现群同步现象并非在线性耦合的所有非线性时空网络上发生,用部分同步理论研究了社区网络与属性连接网络的不同的同步区域。

(4) 深入研究复杂网络的动力学同步与控制问题,提出了一些提高同步能力的模型、方法和途径,包括同步最优模型、同步优先连接模型、加权局域世界模型、各类权重的效应、叶子节点的影响、双择优连接方式、与网络特征量的关系等。

(5) 提出了适合于任何复杂混沌网络的多目标分区控制方法,即利用全局耦合与分区(子网络)误差反馈牵引控制相结合方法,现实不同子网络(社区)的不同目标(对象)的控制目的;同时,对于与核能系统相关的束流输运网络,提出了若干束晕混沌控制方法,从理论上开辟了具有小世界和无标度拓扑的束流输运网络的束晕-混沌和 Lorenz 混沌网络的同步与控制的新途径。

(6) 提出了有向网络的牵制控制策略,设计了具有领导者和切换拓扑结构的蜂拥控制算法;提出了能显著提高同步化能力的自适应群集模型。

(7) 分析不同网络结构上拥塞产生的原因及其控制策略;研究了网络拓扑性质与博弈行为之间的关系。发现在复杂网络上演化少数者博弈(EMG)模型中,不同参数配置下网络系统动态依赖于底层网络结构。当收益函数对称时,星型网络上的稳态概率分布由 EMG 模型中的自组织分离变为中庸人群的峰化,而 SW 网络和 SF 网络则不变,且取得了最优资源配置。在修正 EMG 的随机 Kauffman 网络中,当网络的平均连接度等于 2 时,整个系统取得了最佳的合作效果,比较其他 EMG 模型,整体性能有了显著的提高,对于多选择博弈模型中,同样增强了系统的协调性。

(8) 以控制小世界网络上的病毒传播为例,分

析了重连概率、线性和非线性反馈控制增益、以及反馈时延对网络传播动力学的影响;揭示了震荡现象与小世界拓扑结构之间的内在联系。同时研究了无标度网络上的传播特性,在两种网络上都发现存在传播的临界值。

(9) 实证与理论研究相结合,揭示了加权网络及其演化特点和若干规律,结合经济科学家合作网,深刻揭示了权重的多种作用和非凡意义;提出了调整权重和边匹配关系的方法,打乱边与权重的匹配关系后网络的平均最短距离和群聚系数均会显著降低。在拓扑结构不变下,仅仅通过权重随机化可以获得小世界效应等。

(10) 对比研究了 WGN、Potts 和 WEO 算法划分社团结构的精确性和准确性;利用 WEO 算法对实际网络划分,发现加权网络、无权网络以及反权网络之间社团结构有显著差别,权重与边的匹配方式对社团结构划分有重要的影响。

(11) 发现高科技企业网的四个层次及其特性,不仅具有小世界效应,而且累积度分布可以在幂律分布与广延指数分布之间转变;同时,实证研究了大规模在线社交网络、电子邮件网络和科研合作网络等社会网络的若干特点。

(12) 探索和提出了复杂网络的一种非平衡统计方法,把宏观网络推进到微观网络,研究了三个网络模型:量子信息网络、纳米相干网络和量子强关联网络。

这些研究成果独具创新性和特色,具有很高的理论价值和重要的实际意义。

以上统一混合理论体系和其他课题的研究成果得到了肯定和好评。有些成果开始获得了若干国内的科技奖励,例如,2008 年“复杂动态网络同步与控制问题研究”课题获得“上海市自然科学奖一等奖”,2008 年获得中央办公厅“国家密码科技进步奖二等奖”,《一门崭新的交叉科学:网络科学》一文在 2008 年获得第六届中国科协期刊优秀学术论文奖二等奖。另外,2006 年获得国防科学工业委员会颁发的“国防科技报告优秀论文奖”;2007 年和 2008 年分别获得中国原子能科学研究院科学技术成果奖二等奖;获得国内会议“青年优秀论文奖”、“期刊优秀论文奖一等奖”、“五四青年优秀论文奖二等奖”,等等。

3 研究展望与建议

3.1 挑战性课题

网络科学的理论及其应用的研究仍然面临着许

多挑战性的课题和任务,这正是网络科学这一广泛交叉的科学领域深入开展研究的迫切需求和继续发展的强大推动力。我们认为,今后网络科学值得进一步研究的重大课题将涉及以下 3 大方面。

(1) 国家及国防所急需的相关课题的理论基础和应用基础的研究课题。网络科学的研究具有基础性、前瞻性、交叉性和应用性,不仅对国家有着极为现实的迫切意义,而且具有长远的重大的国防战略利益。21 世纪是互联网和信息时代,下一代的互联网的发展必然进一步带动整个国家国民经济和国防事业各个领域的飞速发展,这已经成为 21 世纪全球经济和军事的主要推动力之一。我国下一代互联网虽然获得重大进展,但是仍然有许多重要课题需要继续加大研究力度,其研究内容宜包括:非线性动态网络的自适应信息传输及其控制理论,多维可扩展的互联网体系结构模型及其新特性,互联网安全体系结构、安全监控和检测理论与方法,互联网的流通突发行为的基础理论,互联网服务模型及其管理理论,互联网综合实验和验证理论等。另外,还需要关注新类型的光互联网和量子互联网探索。我国只有攻克更高更新的网络科学的高峰,才能在 21 世纪激烈的国际竞争和国家安全事务中立于不败之地,才能加快我国国防和国民经济的现代化进程。

(2) 密切关注军民两用的复杂网络安全课题的研究。提出的主要问题包括:如何应对复杂网络上的灾变发生及其级联效应问题?怎么确保网络的可靠安全运行?计算机病毒如何在互联网和万维网等复杂网络上传播和流行或它们发生的机制是什么?如何有效地监控并消除包括传染病在内病毒在社会网络等中的传播和流行?面对黑客的攻击应该采取哪些有效的监控措施和对策?如何设计具有高抗攻击力和强鲁棒性的一些重要的网络系统(包括军事网络、能源网络和社会经济网络等)等等。这些关系军民两用的一系列课题都直接密切关系到国家和社会的迫切利益,关系到大量实际网络的工程设计、防护和开发应用。国内外虽然都在开展相关研究工作,但是目前还远远不能适应和解决实际遇到的问题,因此,这些课题的深入研究任重而道远。我们建议国家继续加大投入资金和人力,切实抓紧开展这些课题的研究,以便尽快地和更好地服务于国家和社会。

(3) 开展若干大型的重大网络的实证和应用研究工作。这方面涉及的大规模复杂网络系统有基于网络作战中心(NCW)的复杂军事网络、全球核科技

领域相关网络、能源网络、国民经济网络、全球金融网络、通信网、高科技网络等,并且这些网络都涉及复杂网络上信息传输、安全通讯及网络上级联动力学及其灾变的监测预警、控制方法和应对策略。

3.2 建议

为了大力推动和加快网络科学在我国重大科研、国防和国民经济中的研究与实际应用,特提出如下的建议:

(1) 国家自然科学基金委员会和国家科技部等有关部门应不失时机地组织该领域国家重大项目和“973”项目的研究;以扩大网络科学及其应用的成果。

(2) 今后项目和各课题负责人应当尽量避免担任沉重的行政职务。这样,一方面可以确保课题负责人在科研一线的工作时间,能够集中精力专注于课题的原创性研究,并带领课题组,特别是指导年轻人,勇攀科学高峰;另一方面这样可以有效地利用国家科研经费和资源,并尽量避免项目被少数人所垄断。

(3) 网络科学作为最广泛交叉的新兴科学,需要有关部门进一步加强组织和引导,与国内各领域学者一道,结成最广泛的科学家合作网络,继续发扬拼搏精神,开拓创新,乘胜前进,竭尽全力推进我国网络科学与技术研究向纵深发展,赶超国际先进水平。

我们坚信:我国网络科学已有了非常良好的开端,目前具有扎实的研究基础,只要加强领导,政策好,方向对,调动和发挥广大科研人员的主动性和创新精神,我国就一定能够在21世纪对网络科学与技术的重大发展做出较大的贡献。

致谢 我们“一院二校”网络科学联合小组十分感谢国家自然科学基金委员会给予的重点项目资助和支持(批准号:70431002)。同时,本人对于本项目的课题负责人汪小帆和郑志刚,主要成员李翔、狄增如、樊瑛、梁勇,先后参与协作研究人员毕桥、刘增荣、罗晓曙、赵耿等,还有参与研究并完成学位论文毕业的38名博士生和硕士生,对于团队的所有合作者们

的竭诚合作和做出的贡献,在这里表示衷心的感谢。

同时,我们还要诚挚感谢国内许多同行专家和朋友们,以各种不同方式给予我组的支持、协助和交流,特别是以下教授:陈关荣、汪秉宏、蔡勖、何大韧、陆君安、刘宗华、王恒山、车宏安、邢修三、闵乐泉,以及冯端、李德毅、张嗣瀛、郭雷和马志明等院士,以及许多年轻的博士们,对本项目课题的关注和支持,在此一并表示真诚的感谢,并继续欢迎大家提出宝贵的意见和建议。

参 考 文 献

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Nature, 1998, 393: 440—442.
- [2] Watts D J. Six Degrees: The Science of a Connected Age, New York: W W Norton & Company, 2003.
- [3] Barabási A L, Albert R. Science, 1999, 286: 509—512.
- [4] Barabási A L. The new Science of Networks. Cambridge: Perseus, 2002.
- [5] 方锦清编著. 驾驭强流束晕与探索网络科学. 北京:原子能出版社, 2008.
- [6] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚等. 一门崭新的交叉科学——网络科学(上). 物理学进展, 2007, 27(3): 239—343.
- [7] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚等. 一门崭新的交叉科学——网络科学(下). 物理学进展, 2007, 27(4): 361—448.
- [8] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 网络科学的理论模型及其应用课题研究的若干进展. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4): 1—20.
- [9] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 非线性网络的动力学复杂性研究. 物理学进展, 2009, 29(1): 1—74.
- [10] 汪小帆, 李翔, 陈关荣编著. 复杂网络理论及其应用. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [11] 李翔编著. 从复杂到有序——神经网络智能控制理论新进展, 上海:上海交通大学出版社, 2006.
- [12] 方锦清主编. 第二届全国复杂动态网络学术论坛论文集. CCAST-WL Workshop Series, 170, 北京:中国高等科学技术中心, 2005, 10: 16—19.
- [13] 郑志刚主编. 第三届全国复杂动态网络学术论坛论文集. CCAST-WL Workshop Series, 180, 北京:中国高等科学技术中心, 2006, 12: 11—13.
- [14] 方锦清主编. 第四届全国网络科学学术论坛论文集. CCA-ST-WL Workshop Series, 191, 北京:中国高等科学技术中心, 2008, 7: 28—30(青岛).
- [15] “复杂网络动力学——理论与应用”专集. 力学进展, 2008, 36: 653—834.

THE KEY PROJECT OF NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA: HIGHLIGHTING THE ADVANCES AND CREATIVE ACHIEVEMENTS IN THE “RESEARCH ON DYNAMICAL COMPLEXITY OF NONLINEAR NETWORK”

Fang Jinqing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Key words nonlinear networks, dynamics, complexity