

# 漫谈广泛交叉的网络科学

○ 方锦清



## 方锦清

1958~1964年在清华大学工程物理系学习，毕业后在中国原子能科学研究院工作至今，现任中国工业与数学学会复杂系统与复杂网络专业委员会副主席，兼任全国复杂网络会议研究生优秀论文评审委员会主任、中国科学技术发展战略研究院理事、香港城市大学《混沌与复杂网络研究中心》讲座研究员和《网络科学与工程丛书》编委等。在国内外发表学术论文200多篇，出版多部专著，从1978年起获国家、省部级科技成果奖12项。

在千禧之交，令人关注的是，复杂网络的研究取得了突破性进展，其重要标志是，1998年发现了小世界现象，1999年发现了无标度特性等一系列网络创新知识，这些发现涉及众多学科和领域，从自然科学到社会科学，从技术科学到工程领域，促进了以互联网为代表的网络信息技术的迅猛发展，人类社会生活、科研和生产等活动都发生了巨大变化，迈入了网络时代，由此诞生了一门广泛交叉的新兴科学——网络科学，引起了国内外的高度重视和普遍关注，现在人们离不开互联网、通信网、交通网和无处不在的各种各样社会经济网络，目前我国网民已经超过4.51亿，在巨变的同时我们面临着网络安全等问题的巨大挑战。在国际网络科学迅猛发展的推动下，我国网络科学从2000年起步，也迈过了第十年征程。为了纪念、总结和推动我国网络科学与工程进一步发展，在张嗣赢院士等的大力支持下，由笔者负责主编，在2010年我国“复杂系统与复杂性

科学”杂志（第2、3期合刊）上专门出版了“网络科学专刊：共话我国网络科学——十年回眸与展望”，这个专刊与2009年美国*Science*（科学）为了纪念国际上网络科学诞生十周年而出版的“复杂系统与复杂网络”专辑遥相呼应。我国中青年学者积极，参加总结我国网络科学的主要进展和成果，提出了今后研究的若干重要课题，展望了发展前景。这里漫谈自己的一些看法。

## “海内存知己，天涯若比邻”梦想变现实

科学史上许多创新都来自年轻的博士生，网络科学也不例外。1998年美国康奈尔（Cornell）大学的博士生Watts及其导师Strogatz在*Nature*杂志上发表了题为《“小世界”网络的群体动力行为》的论文，揭示了小世界现象，并在互联网上通过电子邮件验证了20世纪60年代美国哈佛大学的心理学家Milgram提出的著名的“六度分离假设”。接着，复杂网络的另一个发现是，1999年美国圣母（Notre Dame）大学物理系的Barabasi教授及其博士生Albert在*Science*杂志上发表了题为《随机网络中标度的涌现》论文，提出了一个无标度网络模型，发现了复杂网络的度分布具有幂律分布，即所谓“无标度性质”。国际上这一系列重要发现在全世界引起空前的关注和重视，网络文章铺天盖地，综述和专著不断涌现，从物理学到生物学，从社会科学到技术网络、从工程技术到经济管理等众多领域，正在广泛的领域迅猛发展。

一千多年前，我国唐朝著名诗人王勃在《送杜少府之任蜀州》中的名句：“海内存知己，天涯若比邻”，家喻户晓，已经包含了小世界现象。只是在现代互联网时代，世界变成了地球村，我国千年梦想变成了真正的现实。可以说，中国人从人文和哲学上最早认识到小世界现象，只不过现代科学应用实验作了验证罢了，这是我国人民引为自豪但也是值得深思的事情。

## 网络科学研究的若干特点

简单说，网络科学是专门研究复杂网络的定性和定量规律的一门新兴交叉科学，主要研究复

杂网络的各种拓扑结构及其性质，动力学特性、功能与拓扑之间相互关系，探索网络上各种动力学行为（如时空斑图的涌现、动力学同步及其产生机制等）舆论、病毒和信息的传播、预测、搜索与控制，以及实际工程的网络设计及应用。我认为，其有以下主要研究特点。

首先，网络结构具有复杂性和多样性。网络是由许多节点及其相互连线组成的，节点规模数以万亿，节点本身具有自主性和时空复杂性，各个节点既可相同又可不同，节点之间的相互作用形式错综复杂，体现在节点的权重多样性，网络结构的非均匀性，因此，网络结构拓扑特性是复杂网络首要研究内容。网络整体的复杂性取决于具体研究对象，对于非线性网络的动态演化，出现非线性系统一样丰富多彩的时空动力学行为，如分岔、阵发混沌、时空混沌和各种斑图涌现等（包括完全同步，广义同步，群聚一致性等）。

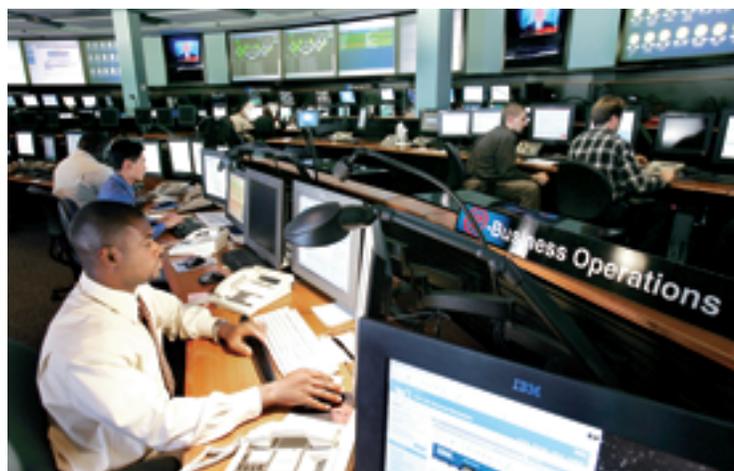
第二，复杂网络具有多层次性。从微观、宏观、中观（介观）到宇观，又从粒子、分子、生理、生态到社会，不同层次，内涵深刻。因此，揭开网络不同层次的规律将有助人类更深刻地认识客观和自身的规律。为了刻画复杂网络的性质，迄今已经提出了许多基本概念、特征量和度量方法，用于表示复杂网络的拓扑结构特性和动力学性质。主要特征量包括：节点度分布、强度分布和边权分布，平均路径长度，平均群聚系数，介数及其分布、度-度关联性（相称性系数）、群聚度关联性和模块性等。但是还需要创新刻画非常复杂网络的特性，例如“网络的网络”、网络链路预测、物联网（如供应链网）等。“网络的网络”也称为超网络，即网络里嵌套着网络、网络节点不具有同质性、具有多层次、多级、多目标等错综复杂的相互作用，今后探索超网络是网络科学重要的前沿课题之一。

第三，网络科学的研究具有基础性、前瞻性、交叉性和应用性。作为复杂系统和复杂性科学的一般描述方式，它与其他交叉科学的研究提供了新的视角、观点和方法。例如，网络科学的研究方法为生态学、生物多样性和生命网络提供了一个新方法，不仅要描述物种间相互作用，而且强调它们整体相互依赖性。这是一个极具挑战性的课题，为了应对生态系统的整体变化，要将物种“对成对”的相互作用扩展到研究系统的“整体关联”。因此，应用网络科学发展观，可

以统一地描述不同领域的众多复杂系统，并进行整体性和综合性研究，进而揭示复杂网络的“庐山真面目”。

第四，图论和统计物理是网络科学的两大理论支柱。从理论方法上不仅应用图论的语言和方法作为基本工具，而且需要现代统计物理方法、非线性-复杂性科学等现代数学理论方法进行研究。无标度网络的发现者Albert和物理学家Barabasi在美国著名的*Review of Modern Physics*（《现代物理评论》）上发表了题为“复杂网络的统计力学”的长篇综述，既系统地评述了复杂网络的拓扑特性及动力学的统计力学重要进展，又比较全面介绍了统计物理的主要理论方法的应用，主要包括：主方程、福克-普朗克方程，平均场理论方法，自组织理论，临界和相变理论，熵理论以及渗流理论等。2004年Park和Newman进一步把统计系综推广应用于复杂网络的平衡态研究联系，勾画了一种基本理论框架和基本路线图，但是目前缺乏适用于复杂网络的非平衡统计理论方法。

迄今，统计物理中的平均场方法在复杂网络科学中被普遍应用，平均场方法不仅适用于从连续相变和临界现象的研究，而且成为研究复杂网络的有力武器，例如被应用于求解网络理论模型中的度分布等拓扑特性，首先，Watts-Strogatz（WS）小世界模型和Barabasi-Albert（BA）无标度模型中，理论上都是以平均场解析为基础的。2000年Newman, Moore 和Watts 使用平均场近似对WS小世界模型平均距离的解析推导。



IBM系统控制中心，安全专家在监测互联网上的攻击和潜在的威胁，以保障遍布全球34个国家的500强企业及各国政府的计算机系统安全

图片来源：CFP

1999年Barabasi, Albert和Jeong使用平均场近似推导BA无标度模型的度分布。这两文都归结为一个自组织稳定临界微分方程来求解,然后应用平均场方程估计了相关量演化规律的几率。

WS小世界模型和BA无标度模型的改进模型在科学界产生了深刻影响,1999年Newman和Watts讨论了WS小世界模型上信息或流行病传播的逾渗相变及其临界性质;2000年Dorogovtsev和Mendes建议在BA无标度模型中增加对节点活性随年龄衰减的考虑。2001年他们建议在BA无标度模型中考虑节点数目加速增加的情况。这3篇论文都导出了平均场解析解。在BA无标度模型基础,笔者与同事应用平均场理论方法,从拓扑结构上提出随机性和确定性统一混合的理论模型,通过混和比把目前几种典型的理论模型包括在内,使理论研究更接近和符合实际网络情形。

### 关注网络科学的两面性和双刃剑

网络科学为复杂系统的研究提供了一个重要的理论平台和有力武器。有助于人类应对重大国防、社会经济等多方面的挑战。1998年以来美国国防提出和加紧实施“网络中心战”,涉及到新军事革命的大多数理论,都离不开网络科学的理论方法。按照网络中心战的理论集成后的作战体系包括了情报侦察网络、指挥控制网络和交战网络等多层次网络。

然而,网络科学的研究成果与任何事物一样具有两面性,它既可以造福人类,又可以祸害人类。我们必须密切关注和高度认真应对。历史的经验教训必须注意!当年,曼哈顿工程是一项人类伟大的创举,它开创了科学、军事和工业三位一体的“大科学”典范,它是一个具有领导统一、组织严密、分工明确、高效协调的复杂网络,保证了原子弹的成功研制。但是它同时也是一个生命、死亡和战争的疯狂竞赛。曼哈顿工程揭开了原子能的神奇之谜,也第一次把最具破坏力的武器——原子弹赋予了人类。

美国的“网络中心战”正在步曼哈顿工程后尘。有些文章已揭开了美国网络分析的黑暗面,揭露了美国军方利用网络分析犯下的罪行,例如美国“国家安全局对从E-mail和电话通话中获得的海量信息数据库进行挖掘”。美国西北大学网络科学家Brian Uzzi指出:“所有强有力的(网络分析)方法都伴随一个黑暗面的增长。它们的

力量最终会被不负责任地使用。我认为在这里最让我恐惧的事情是,一个以发现新见解著称的方法被错误地使用了。”事实说明网络科学的分析方法被美国军方不恰当地应用于“反恐”方面,并被错误扩大化到无辜的广大普通民众生活中。这就是目前网络科学应用中的一个黑暗面。

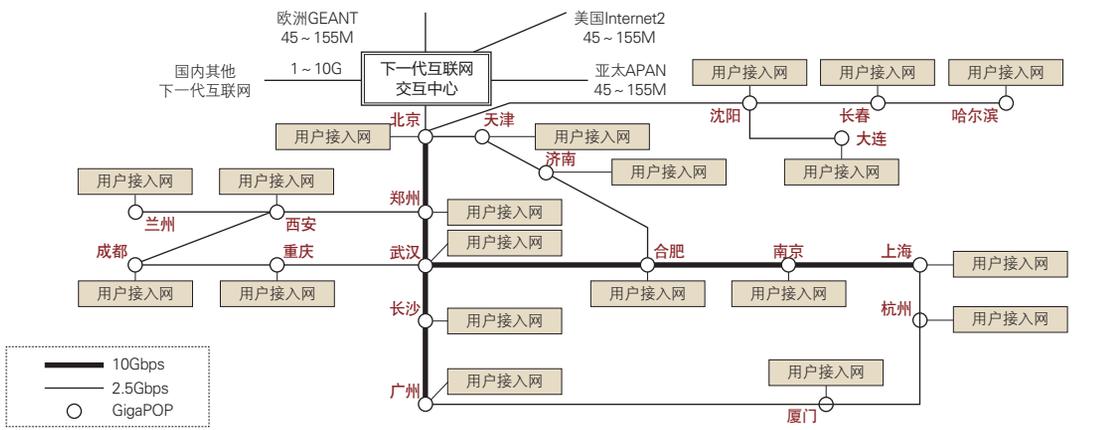
美国网络分析的反面教训应该引起全世界的网络工作者的警惕和重视。更令人担心的是,未来“网络中心战”可能产生比原子弹更大的“爆炸”威力和更严重后果。美国国防部空前重视“网络中心战”,并把它看成比美国“原子弹工程”和“阿波罗登月”两大计划还重要的国家创新任务。在美国总统奥巴马提议下,2009年美国国防部很快成立了网络司令部。其实,美国不论是政府军方,还是民间团体,都比任何国家更重视和加紧科学网络与工程应用的研究。对于“反恐”网络分析,特别是“网络中心战”,不应被各国军方不负责任地扩大化。任何负责的国家国防部门都要认真研究应对这种可能发生的方法、策略和措施等长远之计。对此,今后全世界的网络工作者应该引起高度的警惕和关切,绝不能让历史的悲剧重演!

### 网络科学的若干热点课题和挑战

首先,探索网络科学的前沿热点课题。需要深入理解在复杂网络中发生的动力学过程及其物理机制问题,特别是涉及到深刻理解具有多层次的实际复杂网络,所谓“网络的网络”或“超网络”的行为特性及其物理机制等问题。这对不同领域都具有巨大的挑战性。例如,“物联网”是当前关注的课题之一,它实际上是通过传感器网络以互联网为基本构架而把交通网、电力网、物流网等多种性质不同的复杂网络组成的“网络的网络”,或称超网络,其中供应链网络就涉及交通网、信息网、金融网、能量网、人际网和知识网等。超网络的特点是,它们之间存在多重相互作用、多个决策者和多目标、既有竞争又有合作以及不确定性等特点。目前国内外对“网络的网络”的研究比较少,缺乏其数理研究方法、有力分析工具和完善的数据,因此研究难度相当大。迄今绝大多数网络研究主要集中在单一的复杂网络研究,对“网络的网络”的探究不论从理论方法,还是从实证研究两大方面,都亟待开展。

复杂网络的核心问题之一是寻找复杂网络的

## 中国教育和科研计算机网下一代IPv6主干网CERNET2



图片信息来自中国教育和科研计算机网

动力学过程存在的一些共同特征和普适规律，迄今缺乏公认的复杂网络的统一理论体系和有力的工具。与网络拓扑结构的普遍性相比，动力学、功能与拓扑的结合是复杂网络系统统一的理论体系的关键和难点所在。

第二，完善实际数据是网络科学取得突破的基础。事实上，在过去的十年里由于大型可靠的网络数据库的出现，促进了网络理论的发展。但是仍然存在数据瓶颈问题，包括行业保密壁垒问题。今后如果能够捕获发生在网络系统中的动力学过程的详细数据，特别是国内要打破数据瓶颈，不以保密等为借口，真正提供更多更完善的各类实际网络的数据库。只要国内外都做到了，接着的问题就是依靠全球科学家的高度想象力、原创性、无限的思维能力和智慧了，可望发现更普遍、更深层次的复杂网络的内在规律。

第三，从网络科学观统一考察和重新认识传统学科。正如Barabasis所说：“今天，对网络系统的认识已经成为一系列传统学科的共同目标：细胞生物学家使用网络来研究信号传导和代谢过程，并命名在这一领域的一些应用；计算机科学家正在绘制互联网和万维网的结构；流行病学家追踪病毒传播的传输网络；脑研究者正在致力于研究连接体——一种神经水平的大脑连接图。虽然复杂系统的许多研究热潮来了又走，但是有一件事日益清晰：对于复杂系统而言，组元之间内在的相互连接是如此的重要——这正是现在我们关注网络的原因。”

第四，网络科学的探索面向整个人类社会

和自然界。我们要认识的复杂系统，既不限于细胞，也不限于因特网，而是整个人类社会和自然界，揭开各种各样网络的“庐山真面目”。

第五，网络科学的一个当务之急是：开展重大网络工程的技术创新研究，包括下一代互联网理论与应用研究；开展国家及国防急需的重大工程与应用课题的研究，特别是关系军民两用的重大网络安全问题。特别要密切关注美国和发达国家紧锣密鼓开展中的“网络中心战”。必须从一个新的高度来深刻理解和解决整个世界和人类社会面临一系列问题。

第六，探索网络科学与艺术的和谐统一。诺贝尔奖得主李政道教授指出：“科学与艺术是相通的。”为了更深刻地描述真实的自然界和人类社会，实际上世界上正在遵循着“科学求真，真中涵美；艺术审美，美不离真”之路在探索。歌德说过：“我们必须把科学当作艺术，然后才能从科学得到完整的知识。”由此可见，科学与艺术的和谐统一是必然的发展趋势。网络科学毫不例外，一张张美妙的复杂网络图就是一张张珍贵的艺术品。如何利用艺术的想象对复杂网络图进行再创造，促进科学家与艺术家进行共同的艺术创作，力求网络科学能够达到科学与艺术的和谐统一，这也是我们努力探索的目标之一。

显然，今后面临的任務既是严峻的挑战，又是空前的机遇。我国将继续发扬大胆创新、勇于攀登网络科学高峰的精神，继续深入开展网络科学与工程的理论与应用研究，为人类的和平、进步和繁荣作出更大的贡献。