

多层超网络探索中的若干问题与思考

方锦清

中国原子能科学研究院核技术应用研究所, 北京 102413

摘要 网络科学已进入更高的超网络科学探索阶段, 近年来探索多层次超网络已成为国内外令人关注的前沿课题之一。本文探讨超网络特点, 列举了2个典型实例, 论述了理论模型及其重要性, 讨论了非线性超网络数理问题的艰巨性, 介绍了多层次超网络的研究路线和进展概况, 提出探索中的问题并进行思考。

关键词 网络科学; 多层超网络; 非线性; 复杂性

从科学史来看, 自从牛顿奠定经典科学300余年来, 科学取得了举世瞩目的辉煌成就, 尤其是20世纪上半叶物理学的两大革命, 诞生了量子力学和相对论, 把人类对大自然的认识提高到空前的高度。从牛顿到爱因斯坦, 科学研究的一大突出特点是确立了“现实世界简单性”的观念, 其核心内容是, 把复杂系统划分为基本单元, 这些基本单元的行为及其相互作用遵从普遍而简单的自然法则; 把研究对象分解为各种简单的要素, 诸如基本粒子、原子、分子(包括生物分子)等, 只要将这些“要素”的基本属性研究清楚似乎亦已大功告成, 这种研究路线确实对近代科学做出了不可磨灭的巨大贡献, 成为科学发展中的一个伟大里程碑。但是, 上述思想越来越显示出极大的局限性, 它只适用于研究“简单系统”, 不适用于由大量基本单元组成及其存在相互作用的复杂系统, 即无法用还原论来复现、解释和预言复杂系统的丰富的(动力学)行为。随着现代科学技术的进步和社会的发展, 上世纪60年代混沌的发现被誉为物理学的第3次革命, 越来越多的事实和科学发现不断冲击着“现实世界简单性”这一根深蒂固的观念, 使人们认识到, 不仅在生物学中存在着极其丰富的复杂性进化, 而且在众多的自然科学, 甚至在社会科学与思维科学中都普遍存在着复杂性现象。人们的兴趣从“简单性”的研究转向“复杂性”的探索^[1], 复杂性科学在20世纪下半叶应运而生, 国际上出现了不同学派及其学说, 例如, 比利时诺贝尔化学奖获得者普利高津(Prigogine Ilya Prigogine)的《耗散结构论》, 德国哈肯的《协同学》, 法国托姆的《突变论》, 美国诺贝尔物理学奖获得者默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)的复杂自适应理论, 德国科学家艾肯的超循环理论(生

物系统信息进化理论), 理论不尽相同, 各有所长, 呈现了百花齐放、百家争鸣的蓬勃发展态势。1963年罗伦兹(Edward Lorenz)发现混沌理论之后, 国际上又掀起了一场新的科学革命, 揭示了在完全不同的学科和领域中一大类复杂性有着惊人的相似性, 发现了一些普适规律, 也掀起混沌应用的热潮^[1-5]。2000年, 当代的爱因斯坦、理论学家和思想家——史蒂芬·霍金(Stephen William Hawking)宣称: “21个世纪将是复杂性的世纪。”

在20世纪与21世纪之交, 国际上网络领域取得突破性进展, 主要表现在两大发现: 1998年美国康奈尔(Cornell)大学瓦茨(Duncan Watts)和斯图加特(Steven Strogatz)提出了小世界网络模型^[2], 发现了小世界特性(small world, SW), 以人名称为WS模型; 1999年美国圣母(Notre Dame)大学巴拉巴西(Albert L Barabasi)与阿尔伯达(Reka Albert)提出了一个无标度网络模型^[3], 发现了网络拓扑具有无标(尺)度(scale-free, SF)特性, 以人名称为BA模型。小世界网络和无标度网络的新发现标志着, 一门崭新的新兴交叉科学——网络科学诞生了^[4-6], 正如无标度理论创建人艾伯特-拉斯洛·巴拉巴西(A-L Barabasi)在2012年一文明确指出^[5]: “作为一个范例, 还原论已经过时了; 作为一个领域, 复杂性研究也疲惫不堪了; 现在网络科学来取而代之了。基于数据的复杂系统的数学模型正在提供一个全新的视角, 迅速发展成为一门崭新的交叉学科: 网络科学。”正是如此, 网络科学以网络化、非线性、复杂性、多样性、交叉性和应用性等特色吸引了广大学者, 以锐不可挡之势从自然科学(物理科学、生命科学、信息科学等)推进到社会科学、工程技术, 甚至人文学科, 广泛交叉, 迅

收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-06-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61174151)

作者简介: 方锦清, 研究员, 研究方向为网络科学和非线性-复杂性科学, 电子邮箱: fjq96@126.com

引用格式: 方锦清. 多层超网络探索中的若干问题与思考[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 34-41; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.14.004

猛发展。网络科学成为21世纪科学研究的最前沿学科之一,也成为人类一种强有力的思想武器和科学方法论,具有广阔应用前景。

1 多层超网络特点

在自然界和人类社会,网络无处不在,无时不在。10余年来,网络科学领域首先关注的是,提出描述现实世界的各种单一网络的拓扑理论模型,进而分析复杂网络的拓扑结构及动力学特性,研究复杂网络系统中各种现象,包括同步、传播、博弈、涌现及其产生机制、演化规律与控制方法,开拓其各种实际应用。国内外学者通过一系列课题的研究,基本确立了单一网络结构的科学网络的理论框架^[6]。

但是随着网络科学与应用研究的纵深发展,人们越来越清楚地认识到,反映现实世界最广泛存在的实际网络几乎都不完全是单一网络,而是广泛存在着“你中有我,我中有你”的网络交集,网络之间相互关联,彼此依存,关系扑朔迷离,错综复杂^[7-8]。因此,大约自2010年以来,文献上出现了这类网络五花八门的名称,诸如“网络的网络”(network of networks, NON)、超网络(supernetwork, or hypernetwork)、多层网络(multiplex networks)、多维网络(multidimensional networks)、相互依存网络(interdependent networks)、部分依存型多层网络(partial terde-pendent networks)、耦合网络(coupled networks)、相互链接或作用网络(interaction link or network, interconnected networks networks)、多关系网络(multi-relational networks)等,众多名称也充分反映了超网络的复杂性和多样性。然而,从理论上它们最突出的特点是,都可以归结(或转化)为多层超网络来描述,因此,本文着重考察多层超网络的探索之路。

更通俗地说,“多层超网络”系指,整体网络系统是多个单层网络构成的集合,每层分别是具有不同功能或属性的单一网络,而层与层间存在相互依存和相互关联的复杂关联。也可以说,它们是多网络的交集,其中网络套着网络,具有下面“诸多”特点之一:多层、多维(重、级)、多属性或多目标等。因为现实世界中大多数复杂网络的节点具有多种功能,并且相互连接并彼此作用,而这多种功能、不同属性或目标不能叠加,因而可以构成多层超网络^[7-15]。图1为一个典型的3层社会网络^[7],3层分别为朋友网络(虚线)、家庭网络(实线)和工作关系网络(双线),这3种单一网络的边连接(关系)具有不同性质,同样一个人作为同一个节点在每一层中扮演不同的角色,因此不能简单地看成单层网络,它们构成了3层网络。

2015年,波卡列提(S Boccaletti)等12位合作者在《Physics Report》上发表长篇综述文章《The structure and dynamics of multiplar net works》^[8],从数学上定义了多层网络,基本上把之前国际上多层网络的主要课题研究进展作了综述,涵盖了国际上大多数不同的名称,包括有向或无向网络、有权

或无权网络。由于数学定义公式复杂,有兴趣者请详看原文或 www.elsevier.com/locate/physrep。

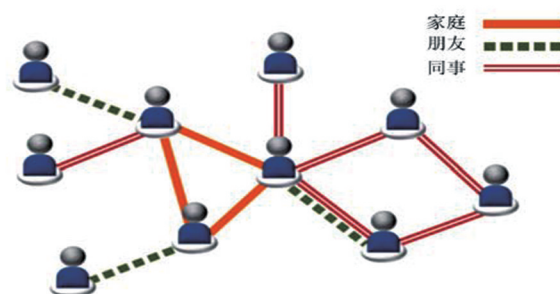


图1 朋友、家庭和工作关系网络^[7]

Fig. 1 Networks of friends, family and work

2 多层超网络的典型实例

实际多层次超网络无处不在,不胜枚举,文献[9]~[18]中已介绍了一些超网络的实例,这里仅仅补充数例,进一步考察多层超网络的特点。

典型实例之一:图2示出互联网与电网、电信网、金融网、社会网构成的5层超网络。

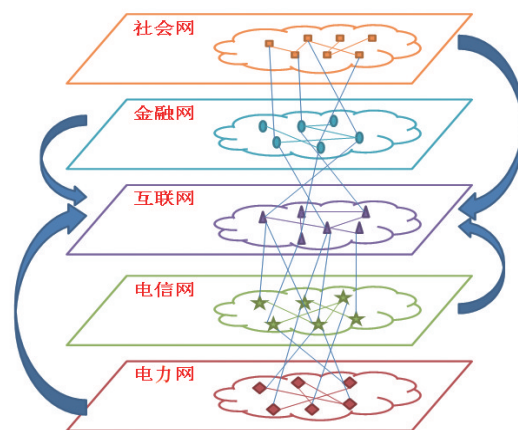


图2 互联网为主的五层超网络:互联网、电网、电信网、金融网、社会网

Fig. 2 Internet based five layer supernetwork
Internet, electrical network, telecom network, financial network and social network

互联网首先以电力网为支撑才能工作,而电力网又通过电信网得到指令进行所需要的操作,电力、电信、金融银行都必须登陆互联网,进行网上互动,交流各种信息,完成各种任务。目前正在发展未来的超级互联网,涉及更多的网络:能源网、建筑网、工业网、广播电视网、金融网、电话网、环境网、电报网、卫星网、微波网等,层次之间关系更加错综复杂。

典型实例之二:大脑网络^[9-10](图3),存在微观尺度(神经元)、中尺度(神经集群)、大尺度(脑区域)3大层次,这3个层

次之间相互嵌套,彼此关联,错综复杂。描述大脑网络有3大类型:结构性网络、功能性网络和效用性网络,三者关系密切而复杂。各国都在致力于揭开大脑的奥秘,“脑科学与类脑网络”已被列入中国发展与改革委员会(发改委)发布《科技创新2030重大项目》中第4个重大项目,可见中国的重视之程度。

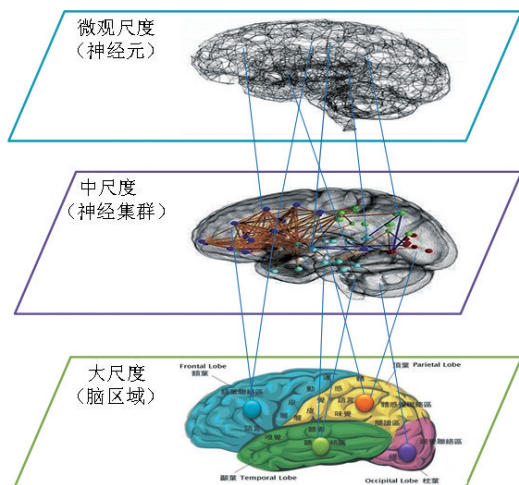


图3 大脑网络的3个层次^[9-10]

Fig. 3 Three levels of the brain network

在社会和国民经济中大量实际网络多层次超网络比比皆是,例如传染病传播网络^[16]。在单一网络上传播动力学忽略了很多影响传播的因素,需要考虑3层传播的相互影响,即疾病传播网、社会网和相互影响,如生物传播中基于人类出行方式(飞机、火车等)而导致疾病的多渠道传播,社会传播中不同交互平台、交互方式(短信、电话等)而导致信息的多路径传播,其中消息的传播会增加疾病的爆发阈值,从而阻碍疾病的传播。多种传播的交互影响构成多层次网络传播才符合实际。又如,国民经济中的基础设施超网络,涉及水电、通信、能源、交通等多种网络交互作用和影响,形成多层次超网络。因此,深入开展超网络研究具有重要的现实意义和应用前景。

3 理论模型的极端重要性

科学发现离不开科学思维,思维是人类发展的产物,表现在创造性提出理论模型。恩格斯在《自然辩证法》中指出:沿着唯物辩证法的认识路线,“在自然科学的创造性思维中,一个重要的环节就是必须善于运用假说这一手段,即研究者要善于运用综合分析和抽象归纳的能力,对研究对象提出一种崭新的模型或理论方案,高度地概括新假说的本质内容,进而推理演绎导出新的结论。”因此,理论模型集中了创造性思维的精华,在科研中发挥着特别重要的关键作用。

在科学史上,典型实例之一是卢瑟福-玻尔原子模型,即

所谓的“行星模型”,是原子理论的核心,它对原子能科学乃至整个近代科技事业产生了深远影响。因为这个模型维妙维肖地描绘了微观世界的本质特点,并具有鲜明的直观性和形象性,因而博得了千百万人的喜爱,几乎成了近代科技事业发展的标志。同样,网络科学中提出了两个著名的理论模型——小世界模型和无标度模型,使得网络科学取得了突破性进展,它们与卢瑟福-玻尔模型有异曲同工之妙。首先,1998年美国康奈尔大学博士生瓦茨与其导师斯特罗迦茨合作,在《Nature》杂志上发表了题为《Collective dynamics of ‘Small-world’ networks》的论文^[2],提出了小世界网络模型,简称WS模型。他们采用一种随机重连边的方法,研究了介于规则网和随机网之间的网络特性,发现了小世界特性:具有小平均路径距离 L 和高群聚系数 C 两个特性。

接着,1999年巴拉巴西(Barabasi)和阿尔伯达(Albert)提出无标度模型,他们的著名论文《Emergence of Scaling in random net works》,经过一段退稿、申辩和同意的曲折历程,终于在美国顶级杂志《Science》杂志上发表^[3]。他们创建了BA(两人名字首字母)模型,发现并阐明了形成无标度特性的2条机制:一是网络增长性,规模随时间不断增加;二是偏好连接度大的节点,即择优链接度大的节点。他们首先从万维网发现网页的连结度分布遵循“幂律函数定律”,即结点度为 k 的度分布概率 $p(k)$ 呈现为幂函数形式: $k^{-\gamma}$,其中 k 为节点的度, γ 为幂函数的幂律指数,证明无标(尺)度网络的幂律特性具有相当普遍性,揭示了大多数复杂网络出现“富者愈富”现象或“马太效应”。

在科学史长河中,任何理论模型总在实践中不断进行检验、补充、发展和完善。对于SW和SF两个模型也不例外,迄今已经揭示SW和SF产生的多种机制。2000年Newman, Moore和Watts改进了WS模型,并用平均场近似对WS小世界模型平均距离进行了解析推导;之后提出加权网络的BBV模型、自适应模型等丰富了拓扑理论模型。科学史表明,理论模型的创新和完善是任何学科突破的关键所在。WS小世界模型和BA无标度模型正是如此,它们已经成为网络科学发展史上第3个里程碑式的重要标志,发挥着引领作用。问题是:它们是否十全十美了?也不尽然。因为自然界和人类社会既不是完全确定性世界,也不是完全随机性世界,而基本事实是确定性和随机性统一的混合网络世界。国内外大多数网络理论模型偏于广义随机性和确定性两种极端情形,因此,从2005年开始,中国原子能院网络小组在许多模型的基础上,逐步改进和完善网络拓扑理论模型,提出了四部曲模型,并发展成为从单一网络到超网络的一种《统一混合网络理论框架》^[11-17, 19-21]。如图4所示,4个环路图表示四部曲模型,它们分别是:1) 和谐混合择优模型(HUHPNM), 2) 大统一混合网络模型(LUHNM), 3) 统一混合变速增长网络模型(LUHNM-VSG), 4) 多层次超网络模型。这个理论框架能够更全面真实地描述现实网络的实际情况。

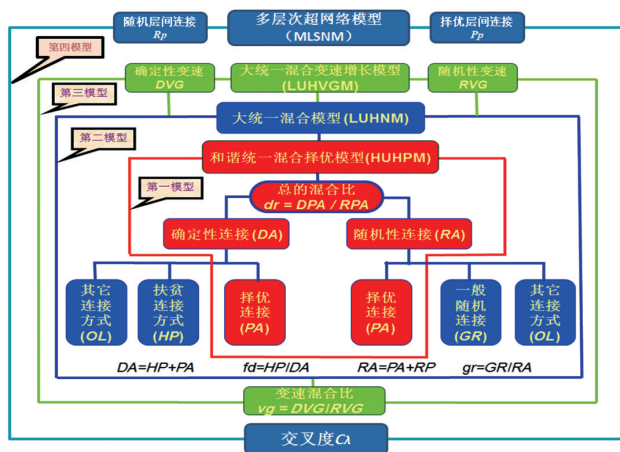


图4 统一混合网络理论框架示意

Fig.4 Schematic diagram of the unified hybrid network theory framework

图4显示,通过从4个层次分别引入5个混合比(dr, fd, gr, α, C_A)作为参数进行细致的调控,把国内外已有复杂网络的主要拓扑理论模型统一起来(表1)。

从表1可见,统一理论框架涵盖了大多数无权网络和有加权网络的演化模型,并可自然构成完整的统一混合网络金字塔,从而能更逼真地反映和全面刻画实际网络的拓扑结构和动力学特性,不仅深化了小世界与无标度的知识,并且已应用于高科技网络、500强高科技企业超网络、强流加速器中的束流传输网络、全球核电站网络及核反应渗流网络等多种科技网络等^[1,4]。

本研究组提出3步多层超网络研究路线图^[12-15](图5)。第1步:基于经典SW和SF模型,分别构造一般多层次超网络模型,不同组合排列有4种类型模型;第2步:基于《统一混合网络理论框架》中三部曲构造多层次超网络模型;第3步:研究构成多层次统一混合超网络金字塔,即之前研究的网络复杂性模型金字塔,但是这时各个层次之间必然发生关联作

表1 国内外主要网络拓扑理论模型与混合比及其特性的关系

Table 1 Relationship between the main network topology theoretical models and the hybrid ratio at home and abroad

序号	模型	dr	gr	fd	V_g (或 α)	C_A	主要特性	统一混合网络 金字塔层次
1	EG规则网络	1/0	0/0	0/0	0/0	0	简单性	9(塔顶)
2	ER随机网络	0/1	1/0	0/0	0/0	0	涌现性等	8
3	WS小世界网络	1/0.1 (a few)	1/0	0/1	0/0	0	小世界特性(SW)	7
4	BA无标度网络	0/1	0/1	0/0	0/0	0	无标度特性(SF)	6
5	加权网络BB, BBP, BBV, 等	0/1	0/1	0/0	0/0	0	SW, SF; 3个幂律	5
6	HUHPM(第1模型)	可调	0/1	0/1	0/0	0	复杂性, SF多样性, SW	4
7	LUHNM(第2模型)	可调	可调	可调	0/0	0	复杂性↑多样性↑	3
8	LUHNM-VSG(第3模型)	可调	可调	可调	可调	0	复杂性多样性↑↑ 简单性↓SF↔SED	2
9	MLSNM(第4模型)	可调	可调	可调	可调	可调	SW, SF; V型和反V型; 拓扑特性	1(超网络)

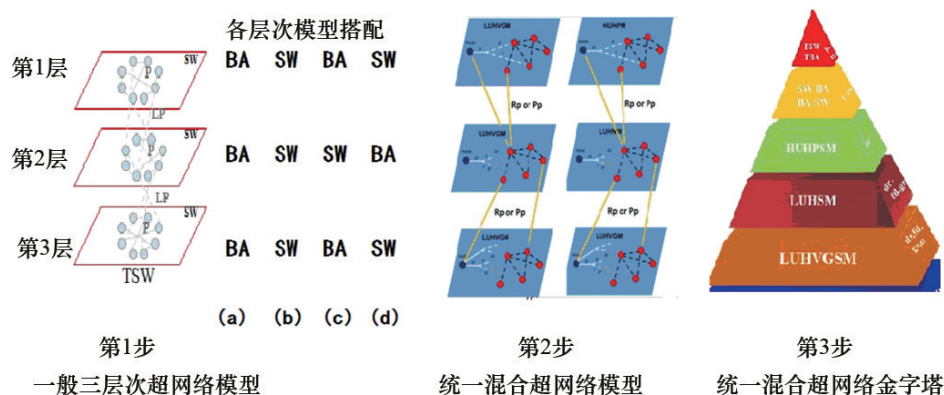
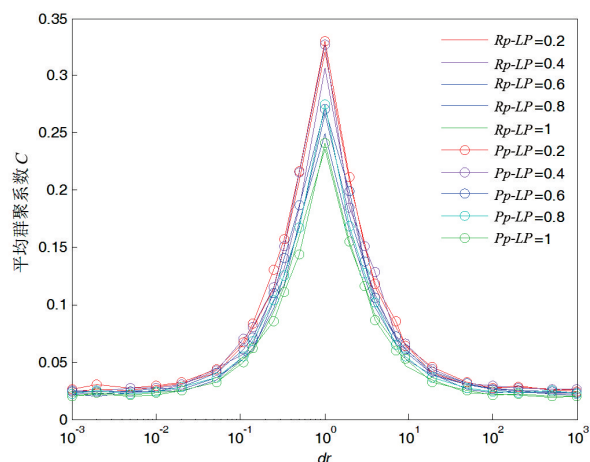


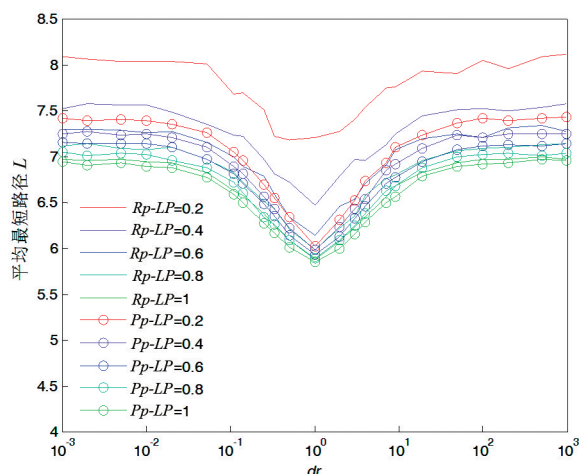
图5 超网络的三步研究路线

Fig. 5 Three research roadmap for super network

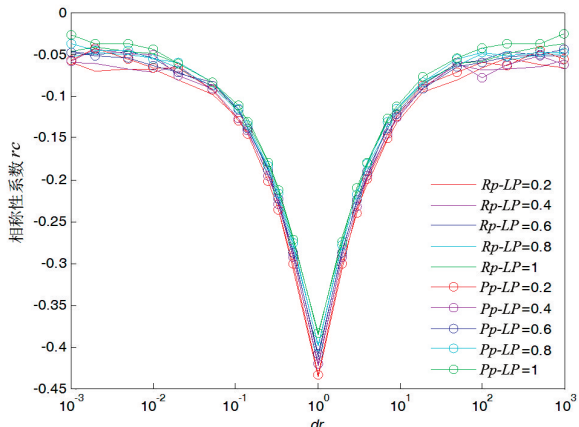
用,彼此影响,作用方式可有多多样性,这样研究内容极其丰富,难度很大。按三步路线图探索超网络,数值模拟计算结果,发现部分拓扑新特性(图6),集聚系数 C 最短路径长度 L 、



(a) 集聚系数 C 与 dr 关系



(b) 平均最短路径长度 L 与 dr 关系



(c) 度度相关(相称性系数) rc 与 dr 关系

注: R_p 为随机连接概率, L_p 为连边概率, P_p 为择优连接概率。

图6 三层超网络拓扑新特性

Fig. 6 Three layer super network topology new characteristic

度度相关(相称性系数) rc 与 dr 关系,出现极小或极大值,即V型或反V型曲线,理论结果与本研究组500强高科技超网络的实证研究结果相一致^[18]。科学发展永无止境,特别是超网络探索的路还很长,更需要今后不断进一步创新和完善。

4 非线性超网络数理问题的艰巨性

庞大网络系统中的节点连接的稀疏性、复杂性和多样性等特点导致其数学物理问题的艰巨性。一个有 N 个节点具有全局耦合结构的网络的连接数目为 N^2 的数量,而实际复杂网络的连接数为 N 的数量。网络连接方式既非完全规则,也非完全随机,实际上是确定性与随机性的混合连接。迄今,从数理上描述复杂网络的各个节点可以是一个非线性动力学(如混沌动力学),节点的方程主要有以下类型:耦合映像格点(CML)、耦合常微分方程、偏微分方程组(CODE)、元细胞自动机等。各个节点之间可以有多种耦合方式,导致非线性网络动力学行为的复杂性、多样性和多变性。网络科学理论的两大主要支柱是数学图论和统计物理学,后者涉及:统计系综理论、平均场理论、场论与量子统计方法、重整化理论、郎之万方程、福克-普朗克方程、主方程等方法,同时网络科学几乎建立在所有现代科学知识的基础之上,尤其是非线性超网络数理理论的艰巨性更是前所未有。

20世纪60年代以来,混沌学引起了物理学的第3次革命,对混沌、超混沌和时空混沌开展了广泛研究,发现随时间、空间和参数的变化,出现各种各样的动力学复杂性,包括分岔和混沌特性,发现了多条通向混沌的道路,例如倍周期分岔通向混沌、准周期分岔通向混沌、阵发混沌道路和吸引子危机导致混沌等。这些非线性动力学复杂性在网络上每个节点都是可能发生。如此庞大节点的非线性网络动力学行为的复杂性,自然无以复加了。不难理解和想象,非线性动力网络中总体混沌的动力学行为是多么丰富多彩和错综复杂,对于单一网络如此,更何况多层次超网络。下面仅举一例就足以说明。

近年来,对于无标网络结构,当每个节点上的相振子的本征频值取该节点的度值时,发现了一种新的同步化现象——爆炸式同步,其出现是与本征频率和节点度之间的强关联所致。这一发现基于人们对爆炸式渗流的微观机制的理解,爆炸式渗流描绘了一种在随机图网络和无标度网络上的突变式渗流相变。进一步研究发现,爆炸式同步现象不只是强关联条件下能观察到,而且在一大类具弱关联条件的网络上也能观察到。这样,爆炸式同步的条件从强相关推广到了弱相关,进一步丰富了非线性系统中的恒等同步和广义同步的类型。值得一提的是,这个成果是华东师范大学物理系刘宗华团队与英国帝国理工大学、西澳大利亚大学和德国波茨坦气候影响研究所等单位合作完成的,论文2014年发表在《Physical Review Letters》上^[22]。同时发现,复杂网络上能够产生爆炸式同步,在其同步化过程中伴随有磁滞效应,它是由

于系统同步流形的吸引域发生变化而造成的,这从微观角度为网络的构建、参数的选择及动力学的复杂性控制等提供了一种理论框架。

只要细心分析观察,爆炸式同步现象并非罕见,从大规模电网停电事故到阿尔茨海默症的产生,它们都可能属于多层超网络类型的动力学同步,需要进一步开拓研究,必将有更多的新现象发现。

需要强调的是,非线性动力学求解一直是一个突出难题。伟大的物理学家爱因斯坦,早在20世纪就强调指出:“由于物理学的基本方程都是非线性的,所有的数学物理方程都必须从头研究。”全世界科学界都面对前所未有的挑战,其研究任务极其艰巨。各国科学家一直进行不懈探索,千方百计把诸多实际因素考虑进去,以便真实地反映和揭开非线性世界的奥妙。最关键的科学问题是,考虑了多种因素之后,必然导出迄今难以求解、甚至无法求解的各种各样非线性-非平衡方程,包括确定性、随机性及其混合方程(组),这就迫切需要从数理方法上高度创新,进行根本的变革。

长期以来,各国学者往往不得不乞求于各种简化的理论模型,以近似描述自然界和人类社会的概貌,其中必然要提出一些假设条件,省略一些使问题难解的地方,在理论上不得不作近似处理,例如,采取线性化近似、封闭截断、绝热消去、白噪声代替有色噪声等,以此得到数学物理上比较容易求解的各种各样方程(组)。因此,近似求解方法应运而生,诸如,小参数(摄动)法、平均法、绝热消去法、共振法等。这些近似求解方法在一定条件下使某些具体问题取得较好近似结果。但是,实际上对于大多数非线性问题的近似方法,特别是处理强非线性和强随机性问题及其混合问题时,往往会引起发散(所谓小分母)和拓扑不等价等实质性困难,而达不到逼真精确的结果。虽然,迄今非线性科学在各领域广泛展开探索之路,能够得到精确解的问题凤毛麟角,大多数限于定性研究,或者求助于超高级电子计算机进行(随机)数值模拟计算,即使如此,诸如庞大的数以万亿计节点的复杂网络的邻阶矩阵仍难以求解。值得指出的是,计算机随机模拟方法,加上云计算,确实是现代科学的一大进步,是解决大科学计算难题的一种有效方法和途径,特别是借助于现代(超)高速计算机,如“神威·太湖之光”,能够完成许多重要领域的大数据的科学计算任务。即使如此,有多少学者能够分享到这个机会?况且花费了极其大量的机时,有时计算结果并非令人十分满意。因而,人们对于各种各样的特高维非线性数学物理方程组,不论从求解方法,还是从分析方程内涵方面,都需要开拓创新,深入探索。

多少年来,在想方设法创新解决上述难题的基础上,研究者们一直在苦苦思索和探索,提出这样一个问题:在严格分析解、逼近解析解和数值方法之间的结合上能否闯出一条路?概括起来,主要思想和做法有如下几点。

第一步,对强非线性方程,包括确定论和随机性两种情

形,首先找到一种新方法,能够进行有效的逼近解析求解,目的是获得这类方程的高精度的逼近解析表达式,以便从解析关系上窥见、理解和寻求非线性问题的定性与定量规律。

第二步,为了推导所需的高阶逼近解析,不仅理论高度创新,而且方法上简明有效,能够实现求解过程的数学机械化求解,即能够适合于计算机自动推导,以代替繁琐和费时的人工推导,达到所需任意高阶逼近解析解。

第三步,实际上,通常人们只需有限阶逼近解析解,对感兴趣的和重要的一些物理量(特性)进行定性和定量的深入研究,这时不必依赖于超高级计算机,只需完成有限的科学计算任务。

基于上述思路,20世纪美国科学家G Adomian创立了逆算符理论方法(分解法)^[23],但是需要改进,如多重分解法有望推进进一步难题的解决^[24],这个数学运算复杂,不在此讨论。

5 多层次超网络的研究路线和进展概况

在自然界和人类社会中多层网络无处不在,无时不在。怎么来研究多层次网络呢?网络各层次之间既独立又相互依存、关联和影响;这样的网络在不同领域的研究目标不尽相同,尽管它们的表现形式多样化,迄今大致有两种研究路线或做法:一是基于现有网络科学的主流概念和理论探讨“网络的网络”的新拓扑特性和动力学行为等;二是基于超图概念和理论方法去探索超图即超网络的特性。本研究组采用前者进行了一些探索。

《500强企业高科技超网络》^[18]简单介绍了探索超网络部分进展,这里作进一步补充,介绍国内外总体探索概况。

1) 提出一些静态的和动态的超网络模型和超图模型,探索超网络的拓扑特性,已证明超网络或超图都能够涌现出无标度特性和小世界特性。理论模型探索一直是非常重要的课题。

2) 探索若干典型多层网络的代数结构及其特征值谱、多层网络的全局完全同步、层内同步和层间同步,譬如求解两层星形网络通过层间1条、2条和多条边连接的多层网络的特征值解析表达式;分析其同步能力;一般2层网络的层间不同连接方式、连接密度和连接强度对全局同步的影响,多层次网络的动力学同步还包括:具有交替层次的多层网络的同步;具有共存层次的多层网络的同步;交替层为星形网络情形,以及由小世界网络、无标度网络和随机网络分别构建的多层超网络的同步,研究了同步与层内耦合强度、层间链接边数之间的复杂关系;把特殊情形推广到更一般多层次网络的同步特性等。这些探索工作仍然非常活跃。

3) 揭示了相互依赖多层网络中的级联突变(崩溃)效应,提出相互依赖网络渗流的理论方法,发现了网络渗流相变特点,在相互依赖网络中减少耦合强度导致从一级相变到二级相变的过程,发现了多层网络级联崩溃过程的一种新的物理机制——爆炸性同步,有广泛意义。

4) 探讨了多层网络的扩散动力学,构造了超拉普拉斯矩阵,利用微扰分析方法进行了解析求解,揭示了完全网络的特征向量和特征值的谱结构,发现多层网络中的扩散速率快于单层网络,有助于理解多层网络上发生扩散的物理过程及其可能应用。

5) 应用单一网络的统一混合网络理论框架,分别构建了统一混合3层超网络模型及其多层次超网络金字塔,并应用于实际超网络(如500强高科技超网络)中,分别研究了层间链接分别为择优和随机2种连接方式,揭示和验证了超网络的拓扑新特性,如最小路径长度、集聚系数和度相关(相称性)系数随着总混合比变化出现了V型和反V型曲线等极值现象。

6) 探讨多层耦合传播网络,包括网上社会传播、生物传播,以及生物-社会耦合传播,能更深入理解流行病传播的动力学过程及其机理,可有效控制疾病传播,减少对于人类的危害。

7) 初步应用统计力学的系综理论方法去探索多层超网络的统计特性,这方面课题有待深入。

8) 探讨多层网络的演化博弈问题。

9) 探讨多层网络空间的安全问题。

10) 开展多层超网络的应用与工程研究,范围遍及社会网络、技术网络、经济网络、基础设施网络、生物网络、气候网络、生态网络等。超网络的应用前景广阔。

6 问题与思考

超网络科学探索正处在大数据时代,多层超网络是最令人关注的网络科学前沿领域之一,任重道远,有不少问题值得思考^[1, 4, 6-8, 10-17, 24]。这里略提几个,供参考。

1) 如何深入开展多层次超网络科学的总体理论体系创新?其中非线性多层超网络时空动态演化理论是一大难题。目前国内外相关研究比较缺乏和薄弱,需要加大投入,以进一步推进超网络研究进程。这既需要凝聚各方创新智慧,又需要国内外开展实质性合作研究。

2) 面对大数据时代,究竟有哪些重大网络工程项目需要研究?令人高兴的是,2017年6月23日中国发改委发布《科技创新2030重大项目》共有387个,其中至少有3个网络重大项目:第4项“脑科学与类脑网络”,第5项“国家网络空间安全”,第10项“天体一体化信息网络”,这些都与超网络直接密切相关。由此可见中国对于网络重大科学工程的高度关注和重视,其中网络空间安全的攻防技术(数字导弹,包括离线攻击和无线注入进攻技术等)将为网络信息战或中心战提供理论依据、技术支撑和安全保障。无疑,开展这些网络重大项目研究对于中国具有头等现实应用价值和长远战略意义。

3) 如何把多层次超网络探索与大数据科学的研究相结合?“大数据”被列入是2030科技创新387个重大工程项目的

第11项,多层次超网络数据极其巨大,必须充分利用大数据挖掘技术和新知识。例如,研究从微观到中观直至宏观超网络系统的统计物理特性、超网络与大数据稀疏建模的理论问题和超高维网络数据的本质特征的提取问题等,这里一个相关问题是必须大力克服大数据的各种壁垒,即对于科研和重大项目需要开放共享大数据,开展大力协作,才能推进中国网络科学的基础与应用研究工作,攀登新高峰。

4) 多层次超网络还有哪些课题需要深入研究?显然,在单一网络科学的研究成果的基础上,课题层出不穷,诸如超网络的动力学同步(一致性)问题、传播问题、博弈问题,以及控制理论方法等,这些研究将为超网络的广泛应用提供可靠的理论依据和雄厚的技术基础。期待发现更多超网络新现象和新规律。

5) 与国计民生密切相关的下一代互联网(如超级互联网)、超移动互联网、智能电网、物联网等也都是重大超网络工程的应用范围,国内外势必掀起一波波技术革命浪潮。中国应加强实施这些应用研究,大大提高驾驭网络规律的能力,以更好地造福人类。

总之,处在更高发展阶段的超网络科学,面临的挑战前所未有,必须跨越单一网络科学的传统研究模式和理论体系,创新超网络科学理论与应用的一系列重要课题,任重道远,前景广阔。

致谢:感谢本研究组刘强和李永的合作研究并为本文作图。

参考文献(References)

- [1] 方锦清. 科技浪花与追梦随笔——新兴科学交叉集[M]. 北京:中国原子能出版社, 2016.
Fang Jinqing. Science and technology spray and dream-chaser— emerging science cross-sets[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2016.
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [3] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [4] 毕桥, 方锦清. 网络科学与统计物理方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
Bi Qiao, Fang Jinqing. Network science and the method of statistical Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [5] Barabási A L, The network take over[J]. Nature Physics, 2012, 8(8): 14-16.
- [6] Barabási A L. Network Science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [7] D'Agostino G, Scala A. Networks of Networks: The last frontier of complexity[M]. Springer International Publishing, 2014.
- [8] Boccaletti S, Bianconi G, Criado, et al. The structure and dynamics of multiplur networks[J]. Physics Report, 2014, 544(1): 1-122.
- [9] 方锦清. 大脑网络的探索进程(一)——研究特点、方法与三大类型[J]. 自然杂志, 2012, 34(6): 344-349.
Fang Jinqing. Exploring progress on brain networks (I): Research characteristics, method and three major types[J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(6): 344-349.

- [10] 方锦清. 大脑网络的探索进程(二)——进展、思考和挑战[J]. 自然杂志, 2013, 35(2): 135–143.
Fang Jinqing. Exploring progress on brain networks(II): Progress, thinking and challenges[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(2): 135–143.
- [11] 方锦清. 从单一网络向《网络的网络》的转变进程——略论多层次超网络模型的探索与挑战[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1): 40–47.
Fang Jinqing. From a single network to "network of networks" development process: Some discussion on the exploration of the multilayer supernetwork model and challenges[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1): 40–47.
- [12] 刘强, 方锦清, 李永. 三层超网络演化模型特性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(2): 64–71.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. Research on the characteristics of three layer hyper network evolution model[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 64–71.
- [13] 刘强, 方锦清, 李永. 基于统一混合网络理论框架的多层次超网络模型研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1): 84–90.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. Research on hierarchical hyper network model based on unified hybrid network theory framework[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1): 84–90.
- [14] Liu Q, Fang J Q, Li Y. Three-layered supernetwork evolution model and the application for China-Worlds top 500 enterprises supernetwork[J]. International Journal of Modern Physics C, 2014, 25(5): 1440003.
- [15] Liu Q, Fang J Q, Li Y. Some characteristics of supernetworks based on unified hybrid network theory framework[J]. International Journal of Modern Physics C, 2017, 28(5): 1750057.
- [16] Fang J Q, Liu Q H, Tang M, et al. Network science faces the challenge and opportunity: Exploring "network of networks" and its unified theoretical framework[J]. Journal of Applied Analysis and Computation, 2016, 6(1): 12–29.
- [17] Liu Qiang, Fang Jinqing, Li yong. Exploring some characteristics of unified hybrid supernetwork theory model[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Science), 2016, 45(3): 329–336.
- [18] 刘强, 方锦清, 李永. 500强企业高科技超网络[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 42–49.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. China's top 500 enterprises high-tech supernetwork[J]. Science and Technology Review, 2017, 35(14): 42–49.
- [19] Fang J Q, Bi Q, Li Y. Toward a harmonious unifying hybrid model for any evolving complex networks[J]. Advances in Complex Systems, 2007, 10(2): 117–141.
- [20] Fang J Q, Li Y, Bi Q. From a harmonious unifying hybrid preferential model toward a large unifying hybrid network model[J]. International Journal of Modern Physics B, 2007, 21(30): 5121–5142.
- [21] Bi Q, Fang J Q. Entropy and HUHPM approach for complex networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 383 (2): 753–762.
- [22] Zou Y, Pereira T, Small M, et al. Basin of attraction determines hysteresis in explosive synchronization[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(11): 114102.
- [23] 方锦清. 逆算符理论方法及其在非线形系统中应用[J]. 物理学进展, 1993, 13(4): 441–560.
Fang Jinqing. Inverse operator theory method and its application in nonlinear physics[J]. Progress in Physics, 1993, 3(4): 441–560.
- [24] 方锦清. 一种统一研究非线性系统的逆算符理论——分解法及其应用[M]. 北京: 中国科学出版社, 2017. 待出版
Fang Jinqing. A unified inverse operator theory for nonlinear systems—Decomposition method and its application[M]. Beijing: China Science Press, 2017. to be published.

Some problems and thinking on the exploration of multilayer super network

FANG Jinqing

Department of Nuclear Technology Application, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Abstract The network science has entered the new stage—the super network science. The exploration of the supernetwork becomes one of the frontier issues both at home and abroad in recent years. This paper briefly discusses the characteristics of the supernetwork, with 2 typical examples, focusing on the importance of the theoretical model. The difficulty of nonlinear hyper-network mathematical problems is highlighted. The research route and the progress of multi-level hyper networks are reviewed. At the end of the paper, we put forward some questions, as the food for thought.

Keywords network science; multilayer supernetwork; nonlinearity; complexity

(编辑 王志敏)