

500强企业高科技超网络

刘强, 方锦清, 李永

中国原子能科学研究院核技术应用研究所, 北京 102413

摘要 随着复杂网络研究的深入,越来越多的研究发现单一网络不能完全反映现实网络的复杂性和多样性,无法全面刻画和揭示错综复杂的实际网络的全貌及其内在规律。现实世界广泛存在着“网络的网络”或称“超网络”,具有多层次、多维数、多属性、多目标、相互依存、关联和耦合等特点,已成为网络科学今后最富挑战性的前沿课题之一。本文综述了近年来超网络探索概况,介绍了中国原子能科学研究院网络科学小组在多层超网络模型和500强企业高科技超网络研究方面取得的进展。目前超网络研究尚处于起步阶段,还有许多未知的领域需要去探索和研究。

关键词 500强企业;高科技;超网络

人们生活在一个充满各种各样复杂网络的世界中,从Internet(互联网)到WWW(万维网),从大型电力网络到全球交通网络,从生物体中大脑网络到各种新陈代谢网络,从科学家合作网络到各种经济、政治、社会关系网络,复杂网络无处不在、无时不在^[1-4]。近年来,随着复杂网络研究的不断深入,实际网络如何运作以及为何有时又会发生级联故障等,这些问题已经得到深入而细致的分析。最新研究表明,仅仅揭开单一网络如何工作是远远不够的,更加重要的是研究具有交互作用、相互关联和依存的“网络的网络”,也称为超网络^[5-9]。超网络是大量现实世界网络错综复杂的真实表现,其特点体现在:网络嵌套着网络,“你中有我,我中有你”,网络节点本身可能是一个复杂网络,整个网络具有多层次、多维性、多级性、多属性和多目标等特点^[10]。超网络基本上是具有自组织的各类网络的集成,像高科技网络、物联网、军用网等许多网络就是超网络的一些典型实例^[10-12]。目前,超网络的研究已引起研究人员的关注,例如,刘权辉等^[13]综述了多层耦合网络上传播动力学的研究进展,介绍了多层耦合网络上的生物传播、社会传播、生物-社会耦合传播以及面临新的挑战性问题。同样值得重视的是,多重(层)网络上的同步问题: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等,例如,陆君安^[14]理论推导出了两层星形网络的特征值解析表达式,以及同步与层内耦合强度、层间链接边数的关系等结果,更一般的多层次网络的同步及其控制等问题正在继续深入探索。上述这些超网络的研究表明:网络科学研究已经进入更高研究阶段,国内外处于“百花齐放,百家争

鸣”的活跃时期,迫切需要探索超网络普适的理论方法和更多的实证研究,以推动超网络研究更加深入发展。

网络科学领域著名学者Barabási在两部著作《链接——网络新科学》和《爆发》中认为:“一直以来基于单一网络建立的网络科学理论框架,已无法逼真描述现实世界网络的复杂性,大量实际网络多表现相互依存和相互关联的超网络特点,需要探索网络科学新的理论框架”^[15-16]。中国网络科学领域的专家在2014年第10届全国复杂网络学术大会上,提出了目前复杂网络研究面临的10个最主要的挑战课题,将“超网络及其相关控制”等问题列入主攻方向,体现了超网络研究的重要性^[17]。

中国原子能科学研究院网络科学组同样关注到超网络研究的重要性和紧迫性,在国家自然科学基金面上项目中,开展了超网络模型理论及应用研究,构造了基于小世界、无标度和统一混合网络理论的超网络理论模型,研究了随机和择优连边机制对于拓扑特性的影响,并提出了交叉度来表征不同层次网络之间可能的合作与竞争关系,最后推广应用于世界500强企业高科技超网络的构建和分析,取得了理论和实证相符的初步成果^[18-23]。

1 超网络实例

许多实际网络往往表现出相互依存和相互关联的超网络特点,而单一网络研究通常忽略这些特点,图1(a)为典型的单一网络“小世界网络”,仅由连接(线)和节点(点)构成。和单一网络一样,超网络比比皆是,无处不在,无时不在。当

收稿日期:2017-05-11;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:刘强,高级工程师,研究方向为复杂网络,电子信箱:eqiang@foxmail.com;方锦清(通信作者),研究员,研究方向为复杂网络,电子信箱:fjq96@126.com

引用格式: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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.14.005

人们睡觉时,身体的支持系统——肌肉、脑细胞、呼吸道、肺、心脏和血管的网络是各自独立运作的,大约在30 s内,不同的网络统一步调,深睡眠中所有各自为政的活动开始与周围环境建立关联,形成一个超级网络(图1(b)),网络中至少有两种形态的连接,相连(类似单一网络中的连接,用黑色表示)和相依(对某节点来说生死攸关的连接,用橙色表示)^[11,12,24-26]。

供应链是超网络的另一个典型实例,Nagurney等在2002

年提出了第一个供应链网络的超网络模型,该模型将生产网络、销售网络及运输网络的不同要素综合一体,由生产商、零售商和消费市场3层组成。随后针对供应链提出的超网络扩展模型层出不穷(图2(a))^[27-29]。随着美国提出“网络中心战”概念,军事领域内的网络复杂性也逐渐受到了关注,中国军事网络专家胡晓峰等^[30-31]提出了军事领域超网络,分别从军事指挥、军事通信和军事保障等方面提出了多种军事超网络模型(图2(b))。

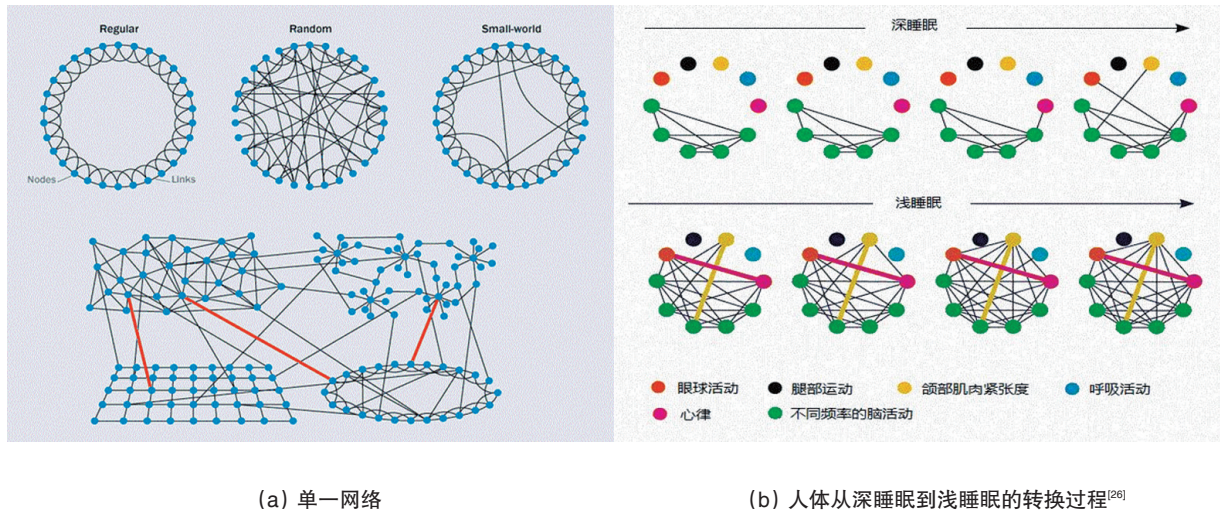


图1 单一网络与超网络的对比

Fig. 1 Comparison of single network and supernet

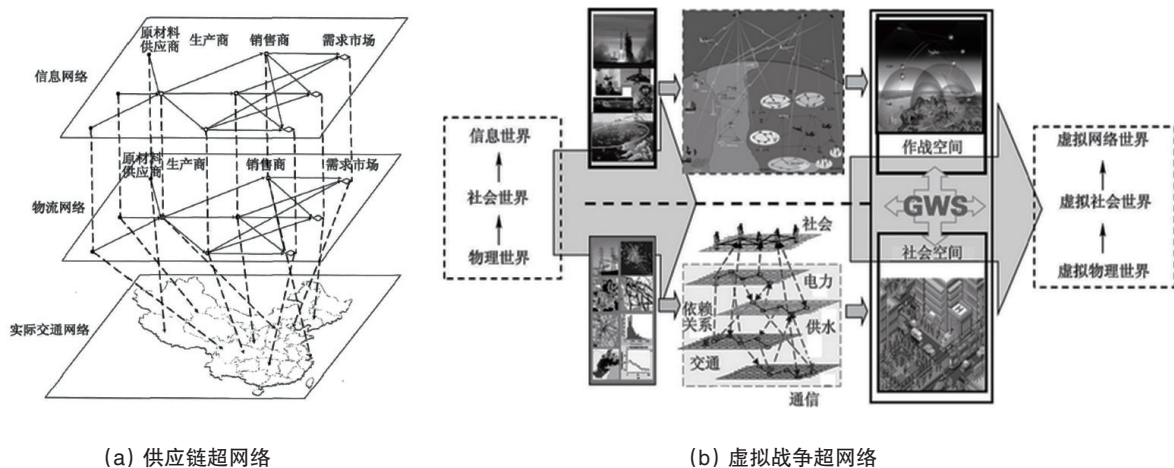


图2 供应链与虚拟战争超网络

Fig. 2 Diagram of supply chain and virtual war

高科技超网络同样是一个典型的多层次超网络。如图3所示^[32],高科技超网络具有4大层次:第1层次是Z-Park——北京中关村科技园,第2层次是中国高科技园区网络,第3层次是中国高技术产业网络,第4层次是世界高科技产业网络。高科技超网络的4大层次各有特色,相互依赖和影响,初

步研究表明^[33],各个层次都具有小世界和无标度特性,但是幂律指数和特性各有差异,层次之间网络特性可在幂律与指数分布之间依不同参数而转变,本研究组最近将其推进到了多层次超网络及其在世界500强企业超网络的应用研究中。

物联网(the Internet of things)是继计算机、互联网之后



图3 高科技超网络示意

Fig. 3 Diagram of High-Tech supernetwork

世界信息产业发展的第三次浪潮,也就是“物物相连的超网络”(图4)^[18]。当把射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备装备到现实中的各种物体上,所有资料都可以形成数据并上传至网络时,一切真实的物体就可以被赋予“智能”,物与物、人与物之间就可以实现“沟通”和“对话”,物联网超网络也就随之形成。

这些实际超网络表现出的特点是,网络之间存在多重相互作用、网络嵌套着网络、多个决策者、多目标、多层次等,既有竞争又有合作及不确定性等特点,不同类型的超网络既有共性又有特殊性。



图4 物联网示意

Fig. 4 Diagram of the Internet of things

2 超网络探索概况

目前国内外超网络处在探索阶段,早在计算机系统、遗传学等领域,超网络一词被用来泛指节点众多、网络中含有网络的系统,特别是将互联网视为超网络。Nagurney及其他学者处理交织网时,把“高于而又超于现存网络”的网络称为超网络^[34]。王众托和王志平^[35-36]认为,一些网络嵌套着网络、多层、多级、具有多属性和多目标的网络称为超网络。2014

年 Boccaletti 等^[37]给出了一个多层次超网络的数学定义,用于描述社会系统及其他复杂网络系统中的多层次超网络及其相关问题,这篇综述比较全面地反映了国际上超网络研究的主要进展概况。也有人从另外的视角对超网络加以定义,如以下2种定义^[35]。

1) 用超图定义。超图概念是 Berge 于 1970 年提出,这是第 1 次系统地建立了无向超图理论,并应用拟阵来研究超图理论在运筹学方面的应用。

定义: 设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是一个有限集。若 $e_i \neq \Phi$ $\{i = 1, 2, \dots, m\}$, $\bigcup_{i=1}^m e_i = V$, 则称二元关系 $H = \{V, E\}$ 为一个超图。 V 的元素 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 称为超图的顶点, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 是超图的边集合, 集合 $e_i = \{v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_i}\} (i = 1, 2, \dots, m)$ 称为超图的边。

2) 用 Frank 等给出的定义。超网络中的点表示给定集合的网络,而边或弧表示在给定集中的联合移动和联合偏好,超网络唯一地表示了由规则支配的、通过所有联合移动和联合偏好(这些规则支配了弧之间的加、减或替换)所形成的网络。

随着人们逐渐意识到超网络的普遍性和重要性,超网络的研究越来越受到关注和重视,迄今超网络理论模型探索中基本上分为两大方向:一是基于传统网络概念构建的超网络理论模型及其特性研究,二是基于超图构建的超网络模型及其特性探索。本研究属于前者。关于第 2 个方向,在中国已有学者提出和探索了一些理论模型,例如, Wang 等^[38]首先构建了 1 条边 1 个旧节点的超网络模型;胡枫等^[39]构建了 1 条边 2 个旧节点的超网络模型,得到超网络的超度服从幂率分布;Yang 等^[40]基于超边生长和局域世界超边优先连接机制提出了一类局域世界超网络模型;郭进利等^[41-42]把上述模型统一起来,利用 Poisson 过程理论证明了这类超网络模型的幂律涌现和无尺度特性,并把 BA 模型作为特例包括在内。

实际上,探索超网络首先是实际网络的需要,诸如电网级联崩溃效应而引起学者们的重视,主要表现在复杂网络的渗流研究方面。Watts 最早提出了“关于随机网络的全局级联的一个简单模型《A simple model of global cascades on random networks》”^[43],该文成为研究产生网络级联领域的一篇重要文献,其主要思路是把网络中的级联问题归结为一个渗流问题,然后利用生成函数的方法对网络级联一些性质进行理论分析。2010 年 Buldyrev 等^[44]在《Nature》杂志上发表了关于相互依赖网络中级联突变(崩溃或失败)的过程,揭示了网络渗流相变特点;同年 Parshani 等^[45]发现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;2012 年 Gao 等^[46]总结了超网络的主要理论分析框架和主要进展,揭示了超网络级联崩溃过程并解释了超网络中发生的级联突变(崩溃)的物理机制;2015 年 Havlin 等^[47]介绍了由 N 个独立网络构成的相互作用超网络的渗流特性,网络之间存在较强的相互

依赖性耦合时,渗流过渡是不连续的(一阶)相变。

2013年西班牙 Gomez 等^[48]还探讨了超网络是多层网络的扩散动力学,构造了超拉普拉斯矩阵,揭示了完全网络的特征向量、特征值的谱结构和多层关联加速扩散,有助于理解多层网络上发生扩散的物理过程等^[49-51]。

随着研究人员对超网络研究的关注和重视,国外针对超网络成立了专门研究机构。如美国麻省理工学院等在2003年组建了超网络计算与可视化实验室(Supernetworks Laboratory for Computation and Visualization)。马萨诸塞大学成立了超网络虚拟中心,由 Anna Nagurney 教授任中心主任,主要开展供应链、互联网等经济领域超网络的决策、优化和博弈论,供应链管理,从运输到电力网络的关键基础设施,金融网络,知识和社会网络,能源、环境、可持续性,风险管理,超网络的脆弱性、弹性和性能指标等超网络研究。中国上海理工大学也成立了超网络研究中心(CSuRe)。

3 多层超网络模型研究

2006年本研究组首先提出了由三部曲模型组成的统一混合网络理论框架(unified hybrid network theory framework),揭示了复杂网络模型的复杂性—多样性与简单性—普适性之间相互转变的错综复杂关系^[52-54]。进而提出了多种类型的网络金字塔,包括网络模型复杂性金字塔、多种广义 Farey 树网络金字塔和高科技网络金字塔等。网络金字塔揭示了一大类超网络的多层次表现形式和若干特点,提供了探索超网络的一条新途径,这些成果^[55-56]已应邀入选2013年由美国 Wiley 出版社出版的专著《网络复杂性研究进展》。

本研究组在完成网络科学的第一个国家自然科学基金重点项目研究之后,开始关注国内外超网络研究进展,2012—2015年承担了国家自然科学基金面上项目“探索一大类‘网络的网络’的理论建模及其分析方法”,开展了超网络理论模型和相关应用研究^[18,19,56-59]。根据现实世界超网络的特征,首先基于 WS 小世界模型和 BA 无标度模型,分别构建了4种3层超网络的演化模型,构建的方法如下:3层均为 BA 模型(TBA)、3层均为 SW 模型(TSW)、第1层和第3层为 BA 模型,中间第2层为 SW 模型(BA-SW)、第1层和第3层为 SW 模型,中间第2层为 BA 模型(SW-BA)(图5)^[18]。为了从不同角度来分析上下层之间的边的连接(关联)对超网络的影响,模型考虑了两种类型的连边模式,即随机和择优。随机的方式是赋给上下层对应节点一个随机数,如果随机数大于连边概率,那么上下层对应节点相互连接,否则不连接;择优的方式是根据上下层对应节点的度大小进行排序,度越大则连边的概率越大。

本研究组提出的统一混合网络理论模型分别引入4个混合比,得到了比较丰富的拓扑特性,能够应用于许多实际网络的研究分析,因此开展基于统一混合网络理论框架的多层次超网络模型研究具有一定的理论价值和现实意义。在

统一混合网络理论框架的基础上,分别构建了和谐统一混合择优超网络模型(简称 HUHPSM,模型由3层 HUHPM 组成)、大统一混合超网络模型(简称 LUHSM,模型由3层 LUHNM 组成)和大统一混合变速增长模型(简称 LUHVGM,模型由3层 LUHVGM 组成)(图6^[58])。

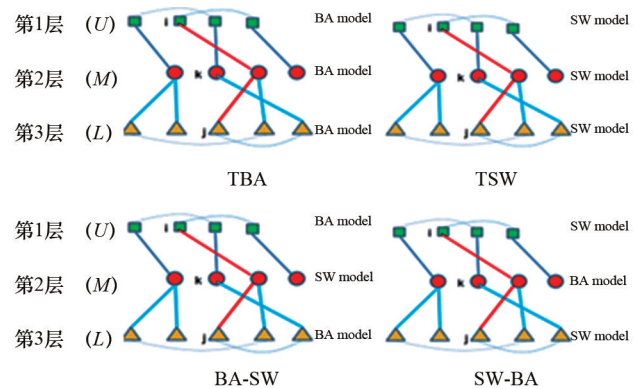


图5 多层超网络示意

Fig. 5 Diagram of multilayer supernetwork

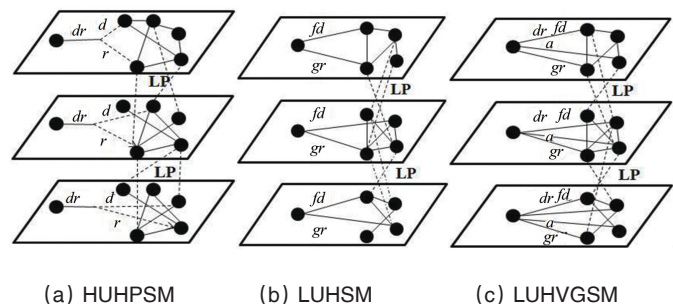


图6 统一混合超网络理论模型示意

Fig. 6 Diagram of unified hybrid supernetwork theory model

基于传统的网络科学理论,本研究组分析了以上超网络模型在不同连接模式下的若干网络特性,发现了一些新现象和新特点,例如揭示了超网络中存在极值现象、V-型曲线、Λ-型曲线和多峰现象^[56-59]。对于超网络模型而言,由于传统的网络特性的计算忽视了不同层次之间的边属性的差异,采用一视同仁的方式进行分析,显然对于超网络而言是不够全面的,因此提出了“交叉度”的概念对超网络模型的一些性质进行进一步分析。对于3层超网络存在着5种不同类型的边,分别是,第1层内的边 U ,第2层内的边 M ,第3层内的边 L ,第1层与第2层之间的边 UM ,第2层与第3层之间的边 ML 。当考虑多层超网络的“最短路径长度”时,两个节点 i, j 之间的最短路径长度中的第1层边、第1层和第2层的连边、第2层边、第2层和第3层的连边、第3层边的数目分别为 U_{ij} 、 UM_{ij} 、 M_{ij} 、 ML_{ij} 、 L_{ij} , N 表示网络中的节点总数,则“交叉度”定义为

$$C_{\lambda} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{UM_{ij} + ML_{ij}}{U_{ij} + L_{ij} + M_{ij} + UM_{ij} + ML_{ij}} \quad (1)$$

多层超网络模型交叉度的计算结果发现,相比于传统的复杂网络特性,交叉度更能反映超网络中合作-竞争关系和新特点。本研究组还研究了随网络节点“去点率”的增加不同网络特性的变化趋势,通过比较不同网络特性变化特点,初步发现利用交叉度能够反映超网络鲁棒性演化趋势。

4 500强企业超网络实证研究

进一步,将以上思想和研究结果应用于实证分析当中。在之前的工作中,已经研究过单个层次的500强企业网络模型,并分析了它们的网络特性^[60]。为系统地研究中国和世界500强企业之间的合作关系,搜集了2010—2012年相关数据,构建了500强企业超网络模型(图7^[19])。500强企业超网络模型的第1层为中国500强企业,第2层为企业所属的行业或领域,第3层为世界500强企业,在第1层和第3层中的企业首先根据地域的关系进行连边,相同地域则连边,否则不连。第1层和第2层及第2层和第3层之间根据企业是否属于某个行业连边,企业属于相同行业的则连边,否则不连。初步构造了一个500强企业超网络模型,500强企业超网络模型的度分布与之前所研究的高科技网络度分布特性类似,均为多幂律分布。

500强企业之间除了地域之间的规则连接以外,在第1层

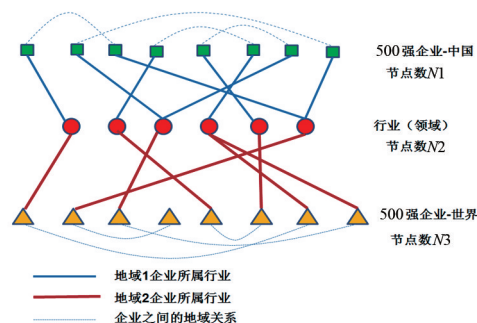


图7 500强企业超网络模型

Fig. 7 China's top 500 enterprise High-Tech supernetwork model

和第3层企业节点引入随机连接或择优连接。随机连接以概率 P 为阈值,根据随机数的大小确定对应的第1层和第3层企业节点之间是否连边。择优连接首先根据500强企业的营业收入,进行归一化计算得到各个企业的连接概率,将连接概率与阈值 P 相比较,连接概率大于阈值择连边,否则不连边,据此计算了500强企业随机超网络模型和择优超网络模型的网络特性和交叉度(图8^[19])。

由图8可知,500强企业超网络的平均群聚系数、平均最

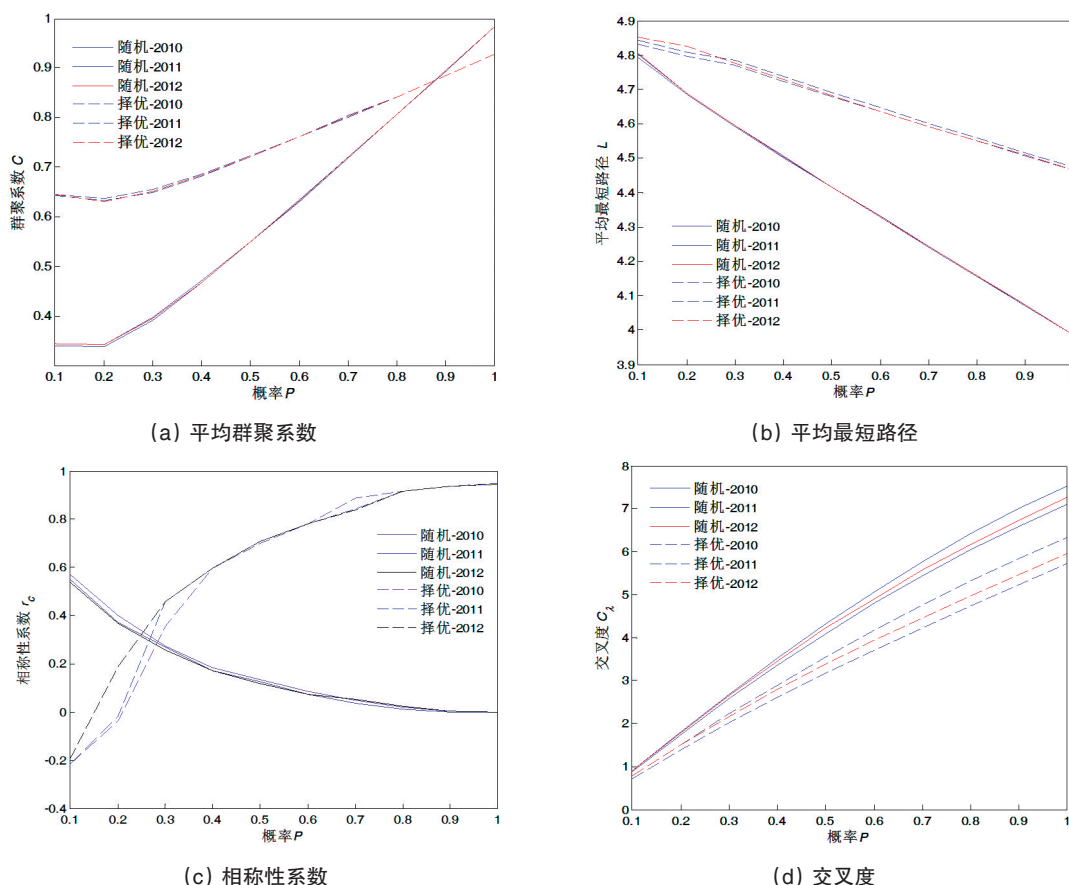


图8 2010—2012年500强企业超网络特性

Fig. 8 Characteristics of China's top 500 enterprise High-Tech supernetwork

短路径和相称性系数随阈值 P 的变化情况有一定的规律,但是并不相同,对于两种连接概率下,平均群聚系数 C 都是随阈值 P 增加而增加;平均最短路径 L 都是随阈值 P 增加而减小;相称性系数 r_c 随阈值 P 增加则刚好相反。可见采用原来的拓扑特征量会使超网络出现截然相反的变化,难以准确衡量500强企业之间的合作与竞争关系。但是,交叉度则能很清晰地看到,随机连接和择优连接两种情形下交叉度随阈值 P 增加而增加,说明交叉度能够反映出500强企业之间的合作涌现情况,并且结论与理论模型研究相一致。

5 总结

基于单一网络建立的网络科学理论框架已无法用于准确描述实际网络,而超网络更加符合实际网络的复杂性和特殊性,已成为网络科学研究的新热点和难点。首先简介了超网络的概念、典型实例和探索概况;进而介绍了本研究组基于经典的小世界网络和无标度网络模型以及统一混合网络理论构建的几种三层超网络演化模型,并以500强企业超网络实证模型为典型实例,揭示了超网络的交叉度新特性和拓扑特征的变化规律,包括本研究组研究揭示的极值现象、V型曲线、Λ型曲线和多峰现象等。从理论模型研究出发,提出了多种类型多层超网络理论模型,为从理论上进一步深入分析和完善多层次的超网络演化模型及其应用研究打下一定的基础。超网络是一门各个领域广泛交叉的新兴学科,有一系列未知的课题值得深入探索,需要凝聚众多领域研究人员的智慧,驱动创新,不懈努力,共同推进中国网络科学向前发展。

参考文献 (References)

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [2] Barabási A L, Albert R, Jeong H. Mean-field theory of scale-free random networks[J]. Physica A, 1999, 272(1/2): 173-187.
- [3] Newman M E J. Models of the small world[J]. Journal of Statistical Physics, 2000, 101(3): 819-841.
- [4] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [5] Fang J Q, Bi Q, Li Y, et al. Sensitivity of exponents of three-power-laws to hybrid ratio in weighted HUHPM[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(1): 279-282.
- [6] Fang J Q, Bi Q, Li Y. 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.
- [7] 刘强, 方锦清, 毕桥, 等. 多种形式的加权广义 Farey 组织网络金字塔的复杂性[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 3704-3714.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Bi Qiao, et al. Complexity of multi-architecture type of deterministic weighted generalized Farey organized network pyramid[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 3704-3714.
- [8] 田立新, 贺莹环, 黄益. 一种新型二分网络类局域世界演化模型[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 558-564.
Tian Lixin, He Yinghuan, Huang Yi. A novel local-world-like evolving bipartite network model[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 558-564.
- [9] Li X, Chen G R. A local-world evolving network model[J]. Physica A, 2003, 328: 274-286.
- [10] 方锦清. 大数据浪潮冲击下网络科学与工程面临的挑战与机遇[J]. 自然杂志, 2013, 35(5): 345-354.
Fang Jinqing. Network science and engineering faced with a new challenge and developing opportunity under the wave impact of big data [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(5): 345-354.
- [11] 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, 2013, 34(6): 344-354.
Fang Jinqing. Exploring progress on brain network (I): Research characteristic, methods and three major types[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 34(6): 344-354.
- [12] 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.
- [13] 刘权辉, 王伟, 唐明. 多层耦合网络传播综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1): 48-57.
Liu Quanhui, Wang Wei, Tang Ming. The review of spreading dynamics on multilayer coupled network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1): 48-57.
- [14] 陆君安. 多重网络的同步和牵引控制[C]//2016 复杂网络前沿课题论坛. 上海: 上海大学, 2016.
Lu Junan. The synchronization and pinning control of multilayer network[C]//2016 complex network frontier issues forum. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [15] Barabási A L. Bursts[M]. New York: Penguin Group Inc, 2010.
- [16] Barabási A L. Linked: The new science of networks[M]. Massachusetts: Perseus Publishing, 2002.
- [17] 周涛, 张子柯, 陈关荣, 等. 复杂网络研究的机遇与挑战[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 1-5.
Zhou Tao, Zhang Zike, Chen Guanrong, et al. The opportunities and challenges of complex networks research[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(1): 1-5.
- [18] 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. Some characteristics of three-layer supernetwork evolution model[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 64-71.
- [19] Liu Q, Fang J Q, Li Y. Three layered supernetwork evolution model and the application for China-World's top 500 enterprises supernetwork[J]. International Journal of Modern Physics C, 2014, 25(4): 1440003.
- [20] 方锦清. 探秘网络金字塔的复杂性[J]. 中国科学基金, 2013, 27(5): 278-279.
Fang Jinqing. The complexity exploring of network pyramid[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2013, 27(5): 278-279.
- [21] Fang J Q, Li Y, Liu Q. Three types of network complexity pyramid[M]. Dehmer M, Mowshowitz A, Frank E S, USA: Wiley-VCH, 2013: 63-98.
- [22] Fang J Q. Network complexity pyramid with five levels[J]. International

- al Journal of Systems, Control and Communications, 2009, 1(4): 453-477.
- [23] Li Y, Fang J Q, Liu Q. From unweighted to weighted generalized farey organized tree and the pyramid networks[J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2010, 23(4): 681-700.
- [24] 方锦清. 从网络科学观思考大脑网络的描述方式及其特点与可能的应用[C]//第367次香山科学会议. 北京: 中国科学院香山会议处, 2010.
Fang Jinqing. Thinking of the characteristics and possible application of brain network from the perspective of network science[C]//Xiangshan-Science Conference. Beijing: Xiangshan Conference Hall of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [25] 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: 157-172.
Fang Jinqing. Science and technology, spray and dream essays: Emerging science cross set[M]. Beijing: Rtomic Energy Press, 2016: 157-172.
- [26] Elizabeth Q. When networks of network[J]. Science News, 2012, 182(6): 8.
- [27] Nagurney A, Dong J, Zhang D A. Supply chain network equilibrium model[J]. Transportation Research E, 2002, (38): 281-303.
- [28] 宣金钊, 张纪会, 张海滨. 电力供应链的超网络模型与均衡分析研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2011, 8(1): 20-26.
Xuan Jinzhao, Zhang Jihui, Zhang Haibin. Super network model and equilibrium analysis of electric power supply chain[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2011, 8(1): 20-26.
- [29] 董琼, 马军. 供应链超网络均衡模型[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(3): 238-247.
Dong Qiong, Ma Jun. Recent development on supply chain super network modeling[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(3): 238-247.
- [30] 胡晓峰, 李志强, 贺筱媛, 等. 复杂网络: 战争复杂系统建模仿真新途径[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(2): 1-7.
Hu Xiaofeng, Li Zhiqiang, He Xiaoyuan, et al. Complex networks: The new method of war complex system modeling and simulation[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(2): 1-7.
- [31] 雷延军, 李向阳. 军事供应链“超网络”结构模型研究[J]. 物流科技, 2006, 29(136): 60-62.
Lei Yanjun, Li Xiangyang. Research on "super network" structure of military supply chain[J]. Logistics Science Technology, 2006, 29(136): 60-62.
- [32] 方锦清. 试论四大层次的高科技网络的若干特点和思考[C]//第三届全国复杂网络学术会议论文集. 上海: 上海系统科学出版社, 2008: 1-43.
Fang Jinqing. Some characteristics and thinking of four levels of high-tech network[C]//Proceedings of the 3rd National Complex Network Conference. Shanghai: Shanghai System Science Press, 2008: 1-43.
- [33] 方锦清, 李永, 刘强. 高科技网络和国防相关网络的若干研究概况[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(2/3): 42-45.
Fang Jinqing, Li Yong, Liu Qiang. Outline of general situations of High-Tech networks and national defense networks[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(2/3): 42-45.
- [34] Nagurney A. Supply chain network economics: Dynamics of prices, flows and profits[M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2006.
- [35] 王众托, 王志平. 超网络初探[J]. 管理学报, 2008, 5(1): 1-16.
Wang Zhongtuo, Wang Zhiping. Elementary study of supernetworks[J]. Chinese Journal of Management, 2008, 5(1): 1-16.
- [36] 王志平, 王众托. 超网络理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Zhiping, Wang Zhongtuo. The theory and application of hyper-network[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [37] Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. Physics Reports, 2014, 544(1): 1-122.
- [38] Wang J W, Rong L L, Deng Q H, et al. Evolving hypernetwork model [J]. European Physical Journal B, 2010, 77: 493-498.
- [39] 胡枫, 赵海兴, 马秀娟. 一种超网络演化模型构建及特性分析[J]. 中国科学, 2013, 43(1): 16-22.
Hu Feng, Zhao Haixing, Ma Xiujian. An evolving hypernetwork model and its properties[J]. Science China, 2013, 43(1): 16-22.
- [40] Yang G Y, Liu J G. A local-world evolving hypernetwork model[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 018901.
- [41] 郭进利, 祝昕昀. 超网络中标度律的涌现[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 090207.
Guo Jinli, Zhu Xinyun. Emergence of scaling in hypernetworks[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 090207.
- [42] 郭进利. 非均匀超网络中标度律的涌现—富者愈富导致幂律分布吗?[J]. 物理学报, 2014, 63(20): 208901.
Guo Jinli. Emergence of scaling in non-uniform hypernetworks: Does "the rich get richer" lead to a power-law distribution?[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(20): 208901.
- [43] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(9): 5766-5771.
- [44] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464: 1025-1028.
- [45] Parshiani R, Buldyrev S V, Havlin S. Interdependent networks: Reducing the coupling strength leads to a change from a first to second order percolation transition[J]. Physics Review Letter, 2010, 105: 048701.
- [46] Gao J, Buldyrev S V, Stanley E H, et al. Network formed from interdependent networks[J]. Nature Physics, 2012, 8: 40-48.
- [47] Havlin S, Stanley H E, Bashan A, et al. Percolation of interdependent network of networks[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2015, 72: 4-19.
- [48] Gomez S, Diaz-guilera A, Gomez-Gardenes J, et al. Diffusion dynamics on multiplex networks[J]. Physics Review Lettet, 2013, 110: 028701.
- [49] Ginestra B, Dorogovtsev S N. Multiple percolation transitions in a configuration model of network of networks[J]. Physical Review E, 2014, 89(6): 062814.
- [50] Gao J X, Buldyrev S V, Shlomo H, et al. From a single network to a network of networks[J]. Physics Review Letter, 2014, 1(3): 346-356.
- [51] Havlin S, Kenett D Y, Bashan A, et al. Vulnerability of network of networks[J]. European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(11): 2087-2106.
- [52] Fang J Q, Li Y. Transition features from simplicity-universality to complexity-diversification under UHNTF[J]. Communication Theory Physics, 2010, 53(2): 389-398.
- [53] Fang J Q, Li Y. Advances in unified hybrid theoretical model of network science[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(6): 663-678.
- [54] Fang J Q, Bi Q, Li Y, et al. Towards a harmonious unifying hybrid model for any evolving complex networks[J]. Advances in Complex Systems, 2007, 10(2): 117-141.

- [55] 方锦清. 多种类型的网络金字塔的研究进展[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2013, 10(2): 69–76.
Fang Jinqing. Advances in network pyramid[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2013, 10(2): 69–76.
- [56] 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.
- [57] 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 discussions on the exploration of multilayer super-network models and challenges[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1): 40–47.
- [58] 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. Multilayer supernetwork model based on the unifying hybrid network theory framework[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(1): 84–90.
- [59] 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): 33–41.
Fang Jinqing. Some problems and Thinking on the exploration of multilayer super network[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(14): 33–41.
- [60] 刘强, 方锦清, 李永. 世界五百强企业网络的若干特点[C]//第三届全国复杂网络学术会议文集. 上海: 上海系统科学出版社, 2008: 252–265.
Liu Qiang, Fang Jinqing, Li Yong. Some characteristics of world top 500 enterprise network[C]//Proceedings of the 3rd National Complex Network Conference. Shanghai: Shanghai System Science Press, 2008: 252–265.

China's Top 500 Enterprise high-tech supernetwork

LIU Qiang, FANG Jinqing, LI Yong

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

Abstract With the progress of the complex network research, it is found that the single network can not fully reflect the complexity and the diversity of the real network, and can not be used to depict and reveal the whole picture and the inherent law of the actual complex network. In the real world, there exist “networks of networks” or “supernetworks”, with multi-levels and multi-dimensions, multi-attributes, multi-objects, interdependence, correlation and coupling characteristics, which become one of the most challenging frontier topics in the network science. This paper briefly reviews some research progresses of the supernetwork in recent years, with some results made by the network science group of China Institute of Atomic Energy in the research of multilayer supernetwork models and the top 500 enterprise High-Tech supernetwork. At present, the supernetwork research is just in its start step, and there are many unknown areas for us to explore.

Keywords China's Top 500 Enterprises; high-tech; supernetwork

(责任编辑 傅雪)