

· 成果简介 ·

探秘网络金字塔的复杂性^{*}

方锦清

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

[关键词] 网络金字塔, 复杂性, 应用前景

自然界、人类社会和科技领域中广泛存在着丰富多彩的金字塔结构, 极富魅力, 广受关注。例如, 埃及金字塔, 政府行政金字塔、生态金字塔、人类需求(马斯洛)金字塔等。值得关注的是, 为了描述复杂网络的不同层次的复杂性与多样性, 2001 年 N. Oltvai Zoltán 与 A. L. Barabási 提出了生命复杂性金字塔^[1]。在国家自然科学基金多个项目的资助之下, 随后, 我们 CIAE 网络小组提出统一混合理论框架和模型三部曲^[2-4], 并由此提出了多种类型的网络复杂性金字塔: 网络模型复杂性金字塔^[5-7]、高科技网络金字塔^[9]和广义 Farey 树组织的网络金字塔^[9-13]。这些成果引起了国内外的关注和兴趣。2012 年 1 月 12 日, 美国、英国和澳大利亚 3 国专家发来邀请函, Abbe Mowshowitz (CUNY, USA), Emmert-Streib (Queens, UK) 和 habil. Matthias Dehmer (UMIT, Australia) 准备主编专著《网络复杂性研究进展 (Advance in Network Complexity)》^[14], 特邀我们为该书撰写主题篇章: “3 种类型的网络复杂性金字塔”, 详细介绍和评论了我们的金字塔研究成果。该书 2013 年由美国 WILEY 出版社出版。这是继美国 2010 年邀请我们为美国第一本《网络科学——理论与应用》(2009, WILEY) 专著在美国信息杂志上发表书评后再次引起国外的高度关注、重视、赞同和肯定, 反映了我们成果在国内外产生的影响和作用。本文简报我们网络复杂性金字塔的主要成果。

1 网络模型复杂性金字塔

首先, 我们提出的一种统一混合网络理论体系^[2-5], 构建了 7 层的网络模型复杂性金字塔^[6-8], 从塔顶部向下依次为第 7、6、5 三层分别是 3 大经典

模型: Euler 图论, ER 随机图, WS 小世界网络和 BA 无尺度网络, 标志着网络科学史的 3 个发展里程碑, 揭示了不同层次的基本规律。第 4 层次是有关演化网络模型, 其度分布、点强分布和边权分布都服从幂律分布, 揭示了多个幂律分布规律及其形成的物理机制的多样性和复杂性。第 3 层、第 2 层和第 1 层次分别由我们提出了统一混合网络理论体系的 3 部曲模型构成。第 3 层次是统一混合双择优网络模型中第 1 部曲, 网络性质完全取决于一个确定性连接数与随机性连接数的总混合比 dr , 双择优引起网络特性的转变, 适用于任何无权的和有利的网络模型。金字塔第 2 层次是统一混合网络体系的第 2 部曲, 考虑了弱连接(扶贫连接)与总确定性连接的混合比(fd), 及一般随机连接与总随机连接的混合比(gr), 体现了实际网络存在的多种连接方式。金字塔第 1 层次是统一混合网络体现的第 3 部曲, 即变速增长网络(UHNM-VSG), 具有变速特点, 引入一个确定性与随机性变速混合比(vg); 这样更接近实际网络, 更适合实际应用。

因此, 通过比较金字塔不同层次的特性与各个混合比之间关系, 揭示和反映了复杂网络金字塔不同层次金字塔特点和规律是: 从上到下演化网络复杂性多样性增加了, 反之, 从下到上简单性与普适性增强了。网络金字塔最底层是现实世界网络, 是网络模型的基础、源泉和依据, 理论必将随着研究的深入进一步拓广和完善。

显然, 网络金字塔有助于理解和进一步挖掘网络的多样性-复杂性及其相互转变关系。网络层次的奥秘和变化规律都隐藏在混合比的巧妙组合之中, 可以应用于解释社会和经济网络出现的某些现象。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(60874087, 61174151 和 70431002).
本文于 2013 年 1 月 10 日收到.

2 高科技网络金字塔

CIAE 网络小组依据我国高科技的统计数据, 结合统一混合网络体系, 构建研究了四大层次的高科技网络金字塔^[9], 揭示了我国高新科技网络的某些机制、特征和规律。

高科技网络金字塔第一层次是 Z-Park, 即 1988 年 5 月建立的中国第一个北京中关村科学园 (Z-Park), 被誉为“中国硅谷”, 是全国高科技网络园区的核心, 在我国发挥了开路先锋和示范作用, 在全国形成了 53 个科技园网络, 还在发展中。Z-Park 网络有 5 个基本特点: (1) 网络规模随时间-空间在迅速增长; (2) 网络的各节点(公司)之间既存在合作又竞争复杂关系; (3) 园区网络经历生长、融合、扩大、收缩、分裂和死亡的不断演化; (4) 网络遵守确定性和随机性混合多种连接方式; (5) 整个网络不断变速增长。Z-park 的增长速度处于世界一流园区领先水平。高科技金字塔 4 大层次共同特点就是小世界效应和无标度特性, 只是幂律指数不同而已, 应用无标度网络的双刃剑, 可以调控, 有利于促进我国高科技产业的快速稳健发展。

3 各种广义 Farey 组织的网络金字塔

基于广义 Farey 特性, 我们提出一大类广义 Farey 组织的金字塔 (GFOPN)^[10-14], 形成复杂网络金字塔新家族, 揭示了它们的基本特性。构造 3 种确定性加权的广义 Farey 组织的金字塔, 记为 WG-FOPN1-3, 把广义金字塔的节点序值与统一混合网络模型^[5]中的 3 个混合比对应起来, 巧妙地架起了理论与实际联系的桥梁, 考虑了层面内、层面与层面之间的随机与优先连接机制等, 特别是, 从而能反映和刻画了有关实际网络金字塔结构的特点及其特性。这大类的加权广义 Farey 组织的网络金字塔的分布无论是累计度分布、点强分布或是边权分布较为复杂, 出现多标度特性(如双重分布的特点), 这些分布之间可以随广义 Farey 序列值即对应于混合比变化出现拓扑特性的广延指数分布、指数分布、幂律分布之间的相互转换。显示了加权广义 Farey 组织的网络金字塔网络的复杂性、多样性和多标度性。我们研究了多种形式确定性无权和加权广义 Farey

组织的金字塔, 不仅提供了新一大类的网络复杂性金字塔的新结构和新特性, 而且为进一步认识和理解自然界和人类社会中实际网络的复杂性、多样性及其转变提供了新途径、新方法和新视角。

上述研究成果丰富了网络理论和实证研究, 打开了探索“网络的网络 (NON)”复杂性的一条新途径, 网络金字塔不仅揭示了一类 NON 的特点和一种表现形式, 而且具有应用潜力, 如在纳米微观世界里已发现纳米网络金字塔。

参 考 文 献

- [1] N Oltvai Zoltán and A L. Barabási Life's Complexity Pyramid, Science Vol. 298, 25 October, 2002.
- [2] Fang J Q, Bi Q and Li Y. Toward a harmonious unifying hybrid model for any evolving complex networks. *Advances in Complex Systems*, 2007, 10(2): 117—141.
- [3] Fang J Q, Bi Q, Li Y et al. A harmonious unifying preferential network model and its universal properties for complex dynamical network. *Science in China Series G*, 2007, 3(2): 230—249.
- [4] 方锦清, 李永. 网络科学中统一混合理论模型的若干研究进展, 2008, 力学进展, 38(6): 663—678.
- [5] Fang J Q. Network Complexity Pyramid with five levels. *Int J Systems, Control and Communications*, 2009, 1(4): 453—477.
- [6] Fang J Q, Li Y. One Kind of Network Complexity Pyramid with Universality and Diversity Complex 2009 Edited by J. ZHOU, Part I, LNICST 4. Shanghai, China; Springer, 2009: 78—89.
- [7] Fang J Q, Li Y. Transition Features from Simplicity-Universality to Complexity-Diversification Under the UHNTF, *Communication in Theoretical Physics*, 2009, 53(2): 389—398.
- [8] 方锦清等. 试论四大层次的高科技网络的若干特点和思考, 复杂网络理论与应用, 主编陈关荣等, 1—43 页, 上海: 上海系统科学出版社, 2008.
- [9] Fang J Q, Li Y. Generalized Farey Tree Network with Small-World [M]//Complex 2009 Edited by J. ZHOU, Part II, LNICST 5. Shanghai, China; Springer, 2009: 1678—1689.
- [10] Li Y, Fang J Q, Liu Q. Generalized Farey organized tree and its pyramid from unweighted to weighted networks. *Jrl Syst Sci Complexity*, 2010, 23(4): 681—700.
- [11] Li Y, Fang J Q, Liu Q. From unweighted to weighted generalized Farey three and the pyramid network. *J Syst Sci Complex*, 2010(23): 681—700.
- [12] 李永, 方锦清, 刘强. 多种确定性广义 Farey 组织的网络金字塔. *物理学报*, 2010, 59(05): 2991—10.
- [13] 刘强, 方锦清, 李永. 多种形式的加权广义 Farey 组织的网络金字塔的 1 复杂性. *物理学报*, 2010, 59(6): 3704—11
- [14] Fang J Q, Li Y, Liu Q. Three types of network complexity pyramid, “Advances in Network Complexity”, Edited by Abbe Mowshowitz (CUNY, USA), p63—98, Emmert-Streib (Queens, UK) and habil. Matthias Dehmer (UMIT, Australia), USA: Wiley-VCH, 2013.

EXPLORING COMPLEXITY FOR TYPES OF NETWORK PYRAMID

Fang Jinqing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Key words network pyramid, complexity