

# 复杂系统的一大类典型的自组织形式

## ——网络金字塔研究进展

方锦清

(中国原子能科学研究院网络科学小组 102413)

DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.007

人类社会是复杂性现象的最大王国和百花园。古代世界八大奇观之首的埃及金字塔结构精巧、外形宏伟，其最大最著名的胡夫金字塔的神奇远远超过了人类的想象。它在近 5000 年以前就巍然耸立于开罗以西荒砂遍地的吉萨高原，显示出无比坚固和稳定！至今金字塔神秘的面纱还远未揭开！

实际上，金字塔结构形式广泛存在于人类社会和自然界中，是复杂系统的一大类典型的自组织形式，是长期发展的结果。所谓“自组织”是指一个非平衡系统通过与外界进行物质、能量和信息的交换，系统自行从简单向复杂、从低级向高级、从无序向有序方向转变过程中形成的复杂结构、功能或动力学特征。在 20 世纪 70 年代自组织理论典型代表有耗散结构理论、协同学和突变论。前者的创始人、诺奖得主普利高津有句名言：非平衡是有序之源。

迄今金字塔含义已被广泛延伸，不仅有现实世界的金字塔建筑形式，而且有隐喻各种多层次自组织的金字塔。例如，各国行政组织机构从中央人民政府即国务院到基层的乡镇政府，从国务院各部委行署到市县的职能局办，构成一种统一多层次行政权力自组织金字塔式结构。

国内外在探索复杂网络系统的自组织的奥秘中已发现、提出和构建了许多网络金字塔。例如，食物链网络金字塔、生态或生命系统中的能量金字塔、食品营养金字塔、人类需求金字塔等。美国网络科学的领军人物、物理学家巴拉巴希 (A-L Barabási) 与生命科学家奥特崴 (Zoltán N. Oltvai) 在 2001 年提出了生命复杂性金字塔。2004 年以来中国原子能院网络小组提出了一些网络复杂性金字塔：七大层次的网络模型

复杂性金字塔、四大层次的高科技网络金字塔以及多种多样的广义法里 (Farey) 网络金字塔，从而丰富了对复杂网络奥秘的认识。本文就来领略这些网络金字塔及其复杂性。

### 1. 生态网络能量金字塔

科学家探讨了“生态网络能量金字塔”(图 1)，指生态网络系统中的能量是沿食物链逐级递减的，是一个上尖下大的金字塔形式。究其原因：一是生态网络中消费者从来不可能是完全有效吸收食物，总有些生物保留下来，有些可能不适合食用也会保留下来；二是这些消费者有机体从来不可能把全部吃下的食物都转变成自己的原生质，有些作为粪便排出；吸收的能量中，大部分作为燃料转变为热能而散失。热能不可能再为生产者所利用，即生态系统中能流是单向性的。这样，低的收获率与低的代谢效率使得在生态网络系统中消费者生物种群至多只能转变食物源的 10% ~ 20% 成为自己的原生质，即营养级之间能量转



图 1 生态网络系统中的能量金字塔

移的效率一般为“百分之十递减率”。

同样生命系统能量金字塔从上到下也是按能量逐层减少排列：最终消费者、次级消费者、初级消费者和生产者。

## 2. 人类互联网需求金字塔

互联网和万维网是世界上最大的两个人工网络，大家对它们有什么需求吗？你们通过上网想达到什么目的呢？70多年前，美国社会心理学家和理论家马斯洛（Abraham Harold Maslow, 1908 ~ 1970）提出了人类需求的“马斯洛”金字塔，你们不妨把它与自己的需求比较一下。

他在1943年发表的一篇著名论文《人类动机论》中提出“动机论”又称“需要层次论”，认为人类动机的发展和需要的满足有着密切关系，需要的层次有高低的不同，低层次的需要是生理需要，向上依次是安全、爱与归属、尊重和自我实现的需要。自我实现指创造潜能的充分发挥。追求自我实现是人的最高动机，它的特征是对某一事业的忘我献身，高层次的自我实现具有超越自我的特征，具有很高的社会价值。健全社会的职能在于促进普遍的自我实现。相信“人之初，性本善”，生物进化所赋予人的本性基本上是好的。越是成熟的人越富有创作的能力，邪恶和神经症是环境造成的。

根据马斯洛提出的理论，广大网民对于互联网的不同层次的需要构成了金字塔，如图2所示，从上到下包括五个层次：第5层为最高层，这层次的网民不仅要浏览和享受网络的快乐，且希望自己在网络上应有所作为，能对网络作出自己的贡献，这一层次是很有抱负的网民；第4层次上网民期望个人在网上能获得网友的应有尊重，即在网上保持应有的个人尊严，不被别人凌辱和看不起；第3层是大家在网上都需要现实世界的人间关爱和温暖；第2层次网民需要在网络上获得一种安全感的保证；第1层次上网民要求是起码要满足自己上网享受生理或心理的需要和欲望。不难发觉，对于这些层次的需求大家都有不同程度的愿望，只不过需求的强烈和程度不同罢了。

确实，每个人都隐含上述的需求，特别是，青少年在学校受教育是为了什么？当然，首先就是树立远



图2 人类需求互联网“马斯洛”金字塔

大的理想和志向，每人都有一个出彩的中国梦，将来能成为国家栋梁之才，这正是国家和个人的最高层次的需求；同样青少年在学校受教育需要获得安全、关爱和尊重，大家能健康成长。这些需求实际上也体现在我国各行各业里。例如，我国企业界把“马斯洛需求金字塔”推广应用到企业管理方面，金字塔式自下至上是，生理需要，安全需要，社交需要，尊重需要。其中，对于生理需要和安全需要，首先要了解员工目前处于什么需求状态，应该怎么办，需要改善企业的硬环境来给员工一个有家温馨的环境。社交需要：看员工目前的需求和状态，然后考虑怎么办，如多组织各类社团活动，让员工与员工之间沟通感情。尊重需要：看员工目前是什么需求状态，怎么进行人性化管理，完善申诉及建议渠道，如工会和职工代表大会实现员工自治，让员工得到应有的尊重，发挥主人翁的精神。自我实现需要：了解员工目前的实际需求，然后怎么完善员工晋升渠道，人尽其才，发挥他（她）们的才能，为员工设计职业生涯规划，提供广阔的发展空间。这里谷歌公司最懂得员工的“马斯洛”需求。请看我在科学网上的博客：《令人惊叹的超一流办公室！》（<http://blog.sciencenet.cn/blog-266190-774615.html>）。谷歌这么做就是让自己的员工能充分自由发挥自己的想象力与主动性。他们很好地满足人类需要传递正能量和分享人生智慧的马斯洛金字塔。

## 3. 生命网络复杂性金字塔

2002年全球复杂网络研究权威巴拉巴希与生命科

学家奥特崴提出了生命复杂性金字塔，如图 3 所示，左边箭头表示组织的多样性 (organism specification) 从上到下增加了，右边箭头从下到上表示普适性 (Universality) 增强了。具体说，金字塔最底部是第一层次，代表生命系统的细胞功能的传统组织网络：基因、转录组、蛋白质和新陈代谢这些网络，在规则性和结构层次两方面都存在各种层面的非凡集成；当把细胞看为由功能连接而成的复杂网络时，能从网络科学来理解对细胞组织的逻辑的物理机制；从底层向上的第二层次里这些组分形成调控基因识别和新陈代谢网络，接着向上第三层次依次是功能模块的建筑社区，第四层次是那些社区被嵌套而产生一个无尺度的大尺度组织的网络结构。虽然对于一个给定的生物体独立组分都犹如每一块镶嵌的砖块，但是研究发现：

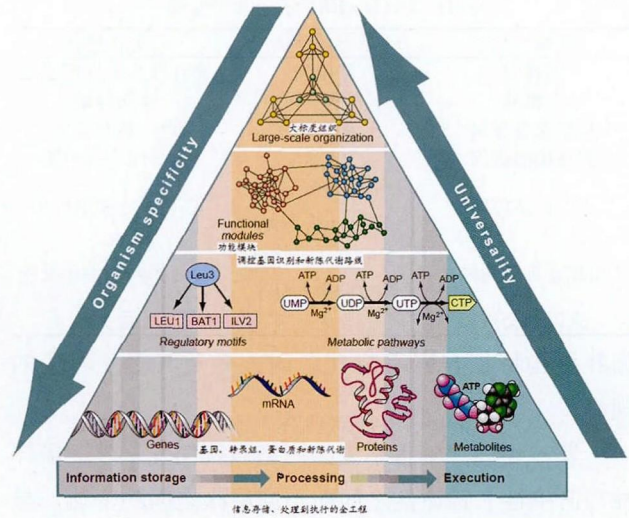


图 3 生命复杂性金字塔

从细胞功能网络的拓扑性质与自然界和社会的网络有着惊人的相似性，能够完成从信息存储、处理到执行的全工程。因此，生命系统复杂性金字塔深刻地揭示了：人类身体内从细胞功能网络到万维网 (WWW) 都存在着一个普遍的自组织原则，那就是说，从分子层次的微观网络到大自然与人类社会的宏观网络世界，它们的组织原则都具有相似性，即普遍性存在着网络图中的节点分布不均匀性，及节点度分布是幂函数  $P=aK^{-b}$  形式， $b$  为幂指数，如图 4 示出单细胞真核细胞网，其中节点不均匀性表现在网络图中稠密与稀疏不同的节点圈子；所谓节点度指的是该节点与周围节点连边的数目。度分布则表示节点度的概率分布函数，它是节点与连边的概率大小函数。节点度在不同的网络中所代表的含义不尽相同，例如，在城市航空交通网中，度分布表示城市之间的航线的多少和重要程度，度越大的城市，其重要性就越大；在社会网络中，度可表示个体的作用力和影响程度，一个节点的度越大，一般表示在整个网络系统组织中的作用和影响就越大，反之亦然。不均匀的度分布通常为幂函数分布，在双对数坐标里为一条直线。表现为

度大的节点很少，大部分节点度很小，系统没有平均的特性长度，故在物理意义上称为无尺度特性。许多实际网络具有无尺度特性，如表 1 所示。

#### 4. 网络复杂性金字塔

中国原子能院网络小组提出了网络科学的统一混合理论框架体系，包括三个理论模型可以作为金字塔的三个层次，从而构建了七大层次的网络模型复杂性金字塔，如图 5。发现与图 3 类似的金字塔特点：图 5 中左边箭头从上到下显示网络的复杂性与多样性增加了，而右边箭头从下向上指明网络的简单性与普适性增强了，这种网络模型复杂性金字塔揭示复杂网络的

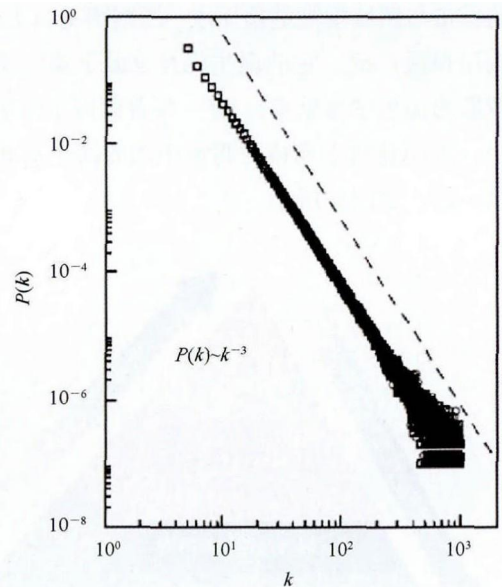
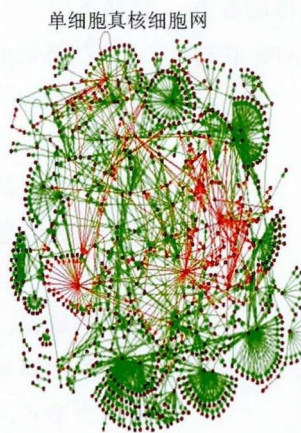


图 4 无尺度网络的节点分布不均匀性和在双对数坐标里度分布为幂函数分布

表 1: 无尺度网络的若干典型实例

网络名称	节点是什么	边怎么链接
因特网	路由器	光纤及其他物理连接
万维网	网页	连接地址
科学家合作网	科学家	合作撰写论文
好莱坞演员网	演员	出演同一部电影
蛋白质调控网	协助调控细胞	蛋白质之间的作用
	活动的蛋白质	
组织新陈代谢网	参与消化食物以	参与相同的生化反应
	释放能量的分子	
人际社会网	人	社会关系

拓扑结构特征与网络特性之间关系及其相互转变的规律。

图 5 更能深刻揭示复杂网络系统的复杂性 - 多样性与简单性 - 普适性之间随不同层次之间的变化, 显示出网络特性之间随不同混合比的相互转变的关系。最顶部三层分别是三大著名经典模型: 18 世纪伟大的瑞士数学家欧拉 (L. Euler, 1707 ~ 1783) 提出的规则图论时期、19 世纪 50 年代匈牙利数学家爱多士 - 雷尼 (Erdős-Rényi, 简称 ER) 随机图时期, 以及提出了小世界 (Small world, 简称 WS) 网络和无尺度 (或称无标度, Scale-Free, 简称 SF) 网络的现代网络科学时期, 它们标志着网络科学发展史上的三个发展里程碑, 深刻地揭示了复杂网络的自组织的普遍规律。

所谓规则图论是指网络图的节点是按照确定性的规则链接而成的, 如中国象棋和国际象棋就是平面格子图, 全国铁路网络和公路网络等交通网络都是固定的城市与路线规则链接而成。规则图论历史也最悠久, 应用得最广泛。它的诞生就是来源于实际需要。在俄罗斯的加里宁格勒市, 有一条普莱格尔河横贯城市当中。上面建筑七座桥, 将河中间的两个岛和河岸联结在一起, 如图 6 所示。



图 5 网络模型复杂性金字塔

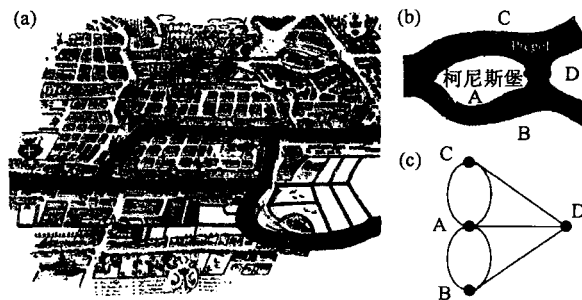


图 6 柯尼斯堡七桥问题 (a) 及其等价图示意图 (b) (c)

市民和游人都喜欢沿河穿过 7 座桥散步, 大家提出了一个问题: 能否只有一走遍 7 座桥, 而每座桥只许通过一次, 最后仍回到原来的位置, 这就是最著名的哥尼斯堡城七桥问题。当时没有人能够做到。于是 1736 年, 有人去请教当时世界上数学四杰之一的欧拉。他经过一段思考后, 以深邃的洞察力很快用一种独特的方法, 把图中被河隔开的陆地看成 A、B、C、D 4 个点, 7 座桥表示成 7 条连接 4 个点的线, 巧妙地把问题简化为如图 6 (c) 的 7 桥图, 提出一个欧拉定理: 只有图中每个点连接的边数满足偶数条件才能一笔画完, 能做到一次走过七座桥。但是 7 桥图不满足这个条件, 证明了这样一次走法根本不存在。使大家心服口服, 欧拉成为图论之父。令人特别佩服的是, 欧拉一生坎坷, 他双目失明后, 仍然凭着顽强的斗志, 百折不挠, 他以非凡的方法又发表了 400 多篇论文和多部专著, 几乎占他全部著作的半数以上, 给后人留下极其宝贵的财富。他不愧为图论第一个里程碑的第一人。

网络发展的第二个里程碑是随机图时期, 主要研究网络中的节点按照随机方式排列情形的理论方法。二十世纪五六十年代, 爱多士 (P. Erdős) 与彼得 (R. Peter) 提出的随机图理论为解释网络生成机制提供了一个精致的数学解答, 他们的理论忽略不同网络之间的差异性, 获得了对自然界和人类社会所能提供的最简单的解答: 随机连接节点。他们得出的结论是, 构造网络的简单方法是掷骰子, 由正反面决定是否连接哪两个节点, 产生随机网络。因此, 从根本上讲, 他们的网络图所代表的世界是随机的, 揭开了随机网络世界的奥妙。随机网络模型的特性是, 网络大多数节点具有平均度大小, 像一个钟形分布, 称为泊松分布,

平均度大小集中在钟形的中央。

他们堪称是随机世界的探索者、开拓者和缔造者。和欧拉有点类似，爱多士一生充满传奇，命运坎坷，屡受挫折。被称为世上罕有的“三无”科学家：一无财产、二无妻小、三无固定居所。他是迄今发表论文最多的数学家。他曾和 511 人合作 1475 篇论文。1984 年他获得沃尔夫数学奖，并被誉为 20 世纪的欧拉。

在 20 与 21 两世纪之交，科学家取得了两项重大发现：小世界网络（1998）和无尺度网络（1999），使得网络科学突飞猛进，标志着网络科学进入第三个里程碑——现代网络科学时期。在爱多士去世两年后，1998 年美国康奈尔大学博士生瓦茨（D. Watts）与其导师斯特罗迦茨（S. Strogatz）合作，在《自然》杂志上发表了题为《“小世界”网络的集体动力学》的论文，提出了小世界网络模型，这个小世界网络是介于完全规则网络和完全随机网络之间，实质上是描述从完全规则网络到完全随机网络之间的转变，并引进了二个专业名词——平均最短路径长度  $L$  和群聚系数  $C$  来描述小世界特性。小世界网络同时具有小的  $L$  和高  $C$  两个特点。 $L$  是描述整个网络里统计平均的节点（例如朋友）之间究竟有“多近”，实际上是定量反映他们之间的“亲密的程度”的一种物理量。 $C$  是描述一个团体“抱团”现象，衡量网络的节点集聚成团的程度，考察你的朋友之间相互认识的程度，相互认识的朋友越多，抱团越紧密，群聚系数  $C$  就越大。

无尺度网络已如上所述。巴拉巴希已经出版了二本网络科学的科普佳作：《链接：网络新科学》（2002）和《爆发》（2010）已经成为国内外的网络领域的畅销书。前者标志世纪之交国际上诞生了一门新兴的网络科学，展示了复杂网络如何覆盖空间，后者深刻剖析了复杂网络如何覆盖时间，进一步揭示了社会网络等不同层次的人类行为特点和某些可预测规律。2014 年他才正式出版了第一部专著《网络科学》。这三本书成为网络科学发展的第三个里程碑的标志性的代表作。

网络金字塔形式体现了在复杂网络系统中复杂性与简单性、多样性与普适性、有序与无序之间达到了和谐统一，反映了现实世界网络主要的基本特性。注

意到，金字塔顶部三层里都是无权网络，只是最简单地刻画实际网络的基本特性。而现实世界中大多数实际网络的各个节点度大小和影响是不同的。因此，在无权网络的基础上，必须进一步考虑网络节点的不同权重变化对网络演化特性或系统功能所产生的重要影响。于是，2000 年开始陆续提出金字塔的第四层次，发现几乎现有的有权演化网络的度分布、点强分布和边权分布都分别服从幂律分布，只是三个幂函数的指数不同而已，这就是金字塔第四层次的特色所在，它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。

由于第四层次所有有权网络模型都存在不足：忽视了确定性连接的机制，没有反映现实世界实际网络都普遍存在的随机性与确定性两种混合连接。因此，我们提出了网络的统一混合理论框架，如图 7 所示。从图 7 可见：它包含了三个理论模型，即存在三个基本层次关系。理论框架第一模型是“和谐统一的混合择优模型”（简称 HUHPM），示于图 5 中最内环，HUHPM 模型作为第 5 层次，定义了一个总混合比  $dr$ ：

$$dr = \frac{d}{r} = \frac{\text{总确定性择优时间步数}(DA)}{\text{总随机性择优时间步数}(RA)} \quad (1)$$

这里  $DA$  为总确定性连接数； $RA$  为总随机性连接数， $dr \in [0, +\infty]$ 。网络生长所需的规模大小和网络性质完全取决于总混合比  $dr$ 。它较好地描述了从规则（确定性）到随机网络之间的转变特性，把许多典型的无

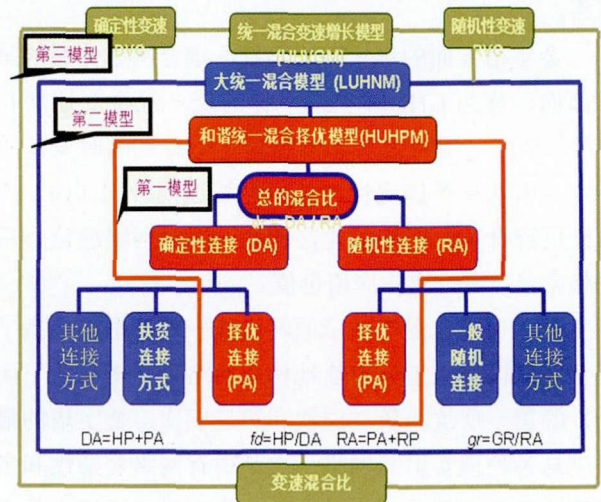


图 7 统一混合网络理论框架示意图

权的、有权的和其他网络模型等大多数模型包括在内。但是它的不足是：只考虑一种“择优”方式，而没有考虑其他的可能节点连接方式，这与实际又有差距。现实网络中，随机性和确定性两大类连接都存在多种混合方式，如，既可“择优”，又能“扶贫”（弱链接），还可搞“折中”、“平衡”、“特殊”等其他多种混合方式。因此，我们提出了图 7 中间一环模型作为金字塔（从下向上）第二层次，其特点是：分别引入了二个第二层次的混合比：一是随机混合比：

$$gr = \frac{g}{r} = \frac{\text{一般随机连接(GPA)的时步}g}{\text{总随机性连接(RA)的时步}r}, \quad (2)$$

二是确定性混合比：

$$fd = \frac{f}{d} = \frac{\text{确定性扶贫连接(HPA)的时步}f}{\text{总确定性连接(DA)的时步}d}, \quad (3)$$

这里， $fd \in [0,1]$ ， $gr \in [0,1]$ ， $DPA$  和  $RPA$  分别为确定性择优连接数和随机性择优连接数，它们的关系为： $DA=HPA+DPA$ ； $RA=GRA+RPA$ 。这样形成了具有多个混合比的大统一混合网络模型构成第二层次。事实上，根据实际需要，可根据具体问题增加适当的混合比类型。例如，减速与加速比  $Vg$ ，对称与不对称比，等等。这样我们利用四种混合比表示的连接方式进行匹配组合，显示了网络特性的多样性和复杂性。金字塔第二层次是统一混合网络模型（LUHNM），因此，第二层次考虑了第三层次缺乏的弱连接（或称扶贫连接）与总确定性连接之混合比（ $fd$ ），以及一般随机连接与总随机连接之混合比（ $gr$ ）。这两种连接更接近实际网络。

金字塔下面的第一层次是统一混合网络体系的第三部曲，称为 UHNM-VSG，称为统一混合变速增长网络，又进一步考虑实际网络演化中存在随时变速的特点，引入一个确定性与随机性变速混合比（ $vg$ ）；这样更符合实际网络演化，使统一混合网络理论体系更趋完善，更有实际应用价值。

从上可见：图 7 所示的网络统一理论框架包括了三个理论模型，正好自然地构成网络金字塔（从下向上）的第一层次、第二层次和第三层次。金字塔的最底层是各种现实世界网络，它是所有网络复杂性和多样性的源泉和理论研究出发点。真实世界网络无处不在，多种多样，丰富多彩，例如，抗震救灾网、因特网、

万维网、交通网、电力网、通信网、生物网、社会网络，等等。网络的实证研究将不断为网络理论模型的深入研究提供雄厚的基础和可靠的依据。图 5 这类网络模型复杂性金字塔与生命复杂性金字塔是类似的，也是一脉相承的，它们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。尤其是，不同层次的奥秘和变化规律都隐藏在不同混合比的巧妙组合之中。只要通过调节统一混合体系中的四个混合比  $dr$ ， $fd$ ， $gr$ ， $vg$  就能灵活地选择网络增长方式，对随机性和确定性两大类不同连接方式及连接数目进行比较深入的研究，期望能够得到更符合实际网络的拓扑和动力学特性。复杂网络模型金字塔反映了现实世界网络的实际研究进展，并且可以进一步拓广和应用。例如它可以应用于解释许多丰富多彩的实际网络，例如社会经济网络、高科技网络，创业型经济网络、区域创新网络等，可以通过调控混合比来实现高端技术向低端技术扩散，探索从东部地区向西部地区发展的自主创新 and 走共同富裕之路，寻求微观增长机制和宏观调控的合理做法。

我们的研究成果被特邀入选由三国（美国、英国和澳大利亚）专家主编的专著《网络复杂性研究进展》（2013，WILEY）。还可参考我们的专著《网络科学与统计物理方法》（2011，北京大学出版社）和《漫游网络世界》（2014，中国原子能出版社）。

## 5. 高科技网络金字塔

高新技术是对人类社会的发展进步具有重大影响的科学技术，它能大大带动各行业新技术的发展。1986 年 3 月，王大珩、王淦昌、杨嘉墀、陈芳允四位老科学家（图 8）联合向中共中央写了一封信，题为《关于跟踪世界战略性高科技发展的建议》。这封信得到了当时中央领导邓小平同志的高度重视，中共中央、国务院批准了《高技术研究发展计划（863 计划）纲要》。从此，中国高技术研究发展进入了一个新阶段。由于计划的提出与邓小平同志的批示都是在 1986 年 3 月进行的，因此该计划被称为“863 计划”。迄今 863 计划取得了举世瞩目的成绩。为此，1991 年邓小平为“863”计划实施 5 周年挥毫题词：“发展高科技，实现产业化”。近 30 年来，我国高科技发展



图8 “863”计划四位倡导人：左起陈芳允、王淦昌、杨嘉墀、王大珩

迅速，取得了举世瞩目的成就。

我院网络小组依据国家统计局发布关于高科技的实际数据，结合我们提出的统一的混合网络理论进行了分析，构建和研究了四大层次的高新科技网络，如图9所示。构建高科技网络金字塔的具体做法是，利用网络科学理论方法，把高科技企业(公司)作为节点，公司之间联系为连边，应用各个经济指标(例如销售收入、利润、产值等指标)来共同衡量和反映它们之间关系和影响的程度，从而构建和揭示了具有四大层次高新科技网络金字塔。最高第一层次是中关村科技园区(Z-Park)；第二层次是由50多个科技园构成的全国高科技园区网络；第三层次是全国高技术产业网络(包含全国各地涉及高科技产业)；第四层次应该是世界高新科技企业网络，以世界五百强企业网络为代表。从图9可见：从上到下，最顶层次是Z-Park，它是1988年5月经国务院批准正式建立的，是我国最大规模的“科学城”。近30年来Z-Park成绩斐然，已形成以软件、集成电路、计算机、网络和通信等为代表的具有中国特色的重点高新技术产业网(群体)，它的经济增长速度在世界一流园区中已处于领先地位，在我国发挥了开路先锋和示范的作用，Z-Park已经成为“中国硅谷”。在它的巨大影响下，全国已经形成50多个高科技园。

世界上很多国家都有像美国那样的“硅谷”。“中国硅谷”就是中关村科技园区，它已经成为我国高科技的策源地和辐射中心，成为金字塔的最高层，对于我国高科技网络的发展具有重大的现实和长远意义。

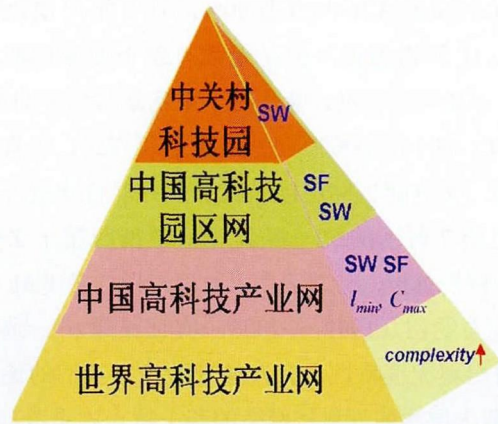


图9 我国高科技网络金字塔

作为第一层次的中关村科技园网络是怎么构成的呢？做法是：以每个公司为节点，以公司之间的业务联系为连线，构建了“中关村高科技(公司)网络”。已经探讨了中国高科技网络四个层次的若干特点和拓扑特性。对于Z-Park发展阶段随时间大致划分为三代：第一代网络(1980~1989)；第二代网络(1990~1998)和第三代网络(1999~2006)。高科技金字塔的四层次具有相似性，这里仅以第一层次的Z-Park网络为例，介绍Z-Park网络五个特点和拓扑特性。

(1) Z-Park网络规模随时间-空间在不断增长：建园以来，不论是公司数量和人员总数，还是园区面积都在不断扩大。在空间上，Z-Park已从北京海淀区扩大到丰台园、昌平园、电子城科技园、亦庄科技园、德胜科技园、雍和园科技园、大兴科技园，形成一区七园的格局。入园企业数稳步增长，出现了二次创业高潮。第一次是1992年邓小平“南方讲话”后，园区连续两年每年新增高新技术企业1000余家。第二次高潮是自1999年国务院批复正式建立Z-Park后，园区连续两年新认定高新技术企业数量比上年增长1倍。截止2004年底，园区中企业达到13957家，雇员总人数55.7万人，2007年园区从业人员达到100多万人。2013年扩大到189.9万人。

(2) 整个网络节点(公司)之间既存在合作又有竞争，公司之间的相互作用方式和强度各不同，相当复杂。

(3) 整个园区网络在不断演化：既有生又有灭，包括：生长、融合、扩大、收缩、分裂和死亡；它们

中间有 77% 在 3 年内消逝 90%，在 5 年内消逝，有 99% 在 10 年内消逝。但是无数有志企业家仍然前赴后继，不断开拓发展。能坚持下来就是对园区的贡献。

(4) 整个网络按照两种混合增长方式：既有确定性连接，又有随机性连接，属于多种混合连接方式。我们把图 7 所示的统一混合理论模型应用于 Z-Park 网络的特性分析，计算表明：理论结果与 Z-Park 第三代风云人物网（1999 ~ 2006）实证结果相一致，这个网络出现无度特性。有兴趣者请参考我们的论文：《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》陈关荣等主编，第 1 ~ 43 页，上海系统科学出版社，2008）。

(5) 整个网络不断变速增长：每年净增企业数目  $m$  随年份各不相同。增长速度不一样，实际有两个增长高峰，分别对应于二次创业高峰时间：中关村科技园批准后和邓小平南方考察后，形成双高增长形式。在 2002 ~ 2005 近 3 年每年平均新入园企业以二千多家递增速度发展。Z-Park 的增长速度处于世界一流园区领先水平。在产业结构、企业发展、研发规模等方面最接近美国硅谷。

总之，Z-Park 是一个典型的混合变速增长演化网络，研究得到以下特点和拓扑特性：

第一，Z-Park 第一代风云人物（1980 ~ 1989）网络。网络节点的重要性用它与其他节点连接的多少来计算，称为节点度分布。Z-Park 的度分布介于指数分布和幂函数分布之间，说明这个阶段中关村园区发展还是处于转型阶段，企业之间差别并不悬殊，没有特别突出的雄厚的大型企业，绝大多数企业处于旗鼓相当的状态。

第二，Z-Park 第二代风云人物（1990 ~ 1998）网络。网络的度分布已经从指数分布向幂函数分布转变，出现一个小波峰，对应于“二次创业”高峰，产生了一些有影响的大企业，如联想、方正、长城、同方和紫光等。因此，第二代 Z-Park 网络的度分布出现不均匀性，开始向幂函数（尺度）特性转变。

第三，Z-Park 第三代风云人物网络（1999 ~ 2006）及其企业网络。度分布基本上属于幂函数分布，这说明中关村科技园形成相当大的规模，“海归”纷纷回

国创业，为园区注入了极大的活力，成为 Z-Park 的支柱，发展得比较成熟了，出现了新的大节点（公司）在网络中起着重要中心节点的作用。证明了 Z-Park 具有无尺度特性和小世界基本特性，即最短路径长度在 4 ~ 6，群聚系数在 0.10 ~ 0.16。

第四，Z-Park 网络拓扑特性，从理论上与图 5 中提出的“统一混合网络模型”的计算结果基本一致。

总之，Z-Park 整个处于较高的发展阶段，相对比较成熟，经济增长速度已经位于全球高新园区之最，发展速度处于世界一流园区领先水平，具有“中国硅谷”之美誉，最接近美国硅谷，但仍还有一定的差距，需要继续改革开放，开拓前进。

## 6. 广义 Farey 树及其网络金字塔

如何进一步发现和构建接近于实际复杂系统的网络金字塔模型是一个挑战性课题。为此，我们应用数论中刻画非线性问题的法里（Farey）序列及其广义法里序列首次在国内外提出构建和研究了新类型的网络金字塔。特色是巧妙结合统一混合网络理论框架中多个混合比作为控制参数，与广义法里序列架起了联系的桥梁，从而探索了从无权广义法里组织的网络到加权广义法里组织的复杂网络。

这里简介法里树的基本知识。一般法里树指的是包含在 0/1 和 1/1 之间的所有有理数的一个树状的结构。法里序列中相邻的法里有理数称为法里邻居。把 0/1 和 1/1 作为  $t=0$  时的起始一对邻居，下面每一步 ( $t$ ) 中如果应用两个法里邻居  $a/b$  和  $a'/b'$ ，它们生成一个法里树后代的法里数满足加法：

$$a/b \oplus a'/b' = (a+a')/(b+b')。$$

如此不断生成一般法里树，如图 10 经过 4 步演化生成的一般法里树。法里树序列具有一系列基本性质。如令  $p/q, p'/q', p''/q''$  为法里序列的三个邻居，则有下列关系： $qp' - pq' = 1$ ， $\frac{p'}{q'} = \frac{p+p'}{q+q'}$ ；如果  $p/q < p'/q'$ ，则相邻两个序列的差为  $p/q - p'/q' = 1/qq'$ 。

广义法里树网络的构造算法如下：第一代由三个节点 (0/1, 1/0, 1/1) 两组组成三组：(0/1, 1/0)、(1/0, 1/1) 和 (1/1, 0/1)，然后从每组节点分别构造出三分支法里树；下一代的节点值为上层相邻两个



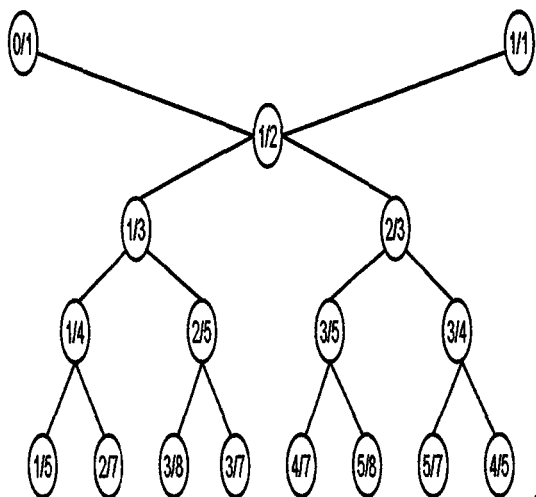


图 10 经 4 步 ( $t=4$ ) 生成的法里树网络结构示意图

顶点的分子和分母分别相加，即按照公式相加；同时下一代的顶点分别和上层相邻两个顶点相连接。如此类推，不断生长下去，便得到三支扩展的法里树网络，这里从略。

进而，我们分别构造了三种类型的广义法里组织的无权和加权网络金字塔，它们的主要特点是，三类金字塔的每层形状分别为单环六边形、每层多环六边形、多环六边形保留最外环上下层连接，分别理论推导和数值计算了三类无权和加权网络金字塔的节点度分布、点强分布、边权分布和小世界特性。从而发现一大类金字塔具有非线性复杂系统的自组织的若干特性，诸如自相似性、多周期性、多标度性和分维等，揭示了网络金字塔结构是复杂系统自组织的一种重要形式。它不仅提供了新一类网络理论模型，而且为深入认识和了解自然界与人类社会网络的复杂性提供了新途径、新方法和新视角。鉴于广义法里组织的网络复杂性金字塔结构的复杂性和数学难度大，在此从略。读者有兴趣请参考在《物理学报》上我们的两篇论文：《多种形式的加权广义 Farey 组织的网络金字塔的复杂性》(2010, 59 (6): 3705-3714) 和《多种确定性广义 Farey (法里) 组织的网络金字塔》(2010, 59 (5): 2991-3000.)；2013 年美国出版的专著《网络复杂性的研究进展》，以及《中国科学基金》杂志在 2013 年第 5 期在成果栏的专门报道。

总之，网络金字塔是复杂系统的一大类典型的自组织形式，广泛存在于自然界和人类社会中。本文提供的思想方法不仅为一般的多层次网络，而且为更具挑战性的复杂“网络的网络”或超网络的探索打下一定的理论基础。例如，我们已把网络金字塔的思想方法拓广到具有多层次超网络（金字塔）及其中国-世界 500 强企业的多层次超网络应用研究中。由于在纳米微观世界里已经发现纳米网络金字塔结构等，它预示着进一步深入探索网络金字塔特性及理论方法将有实际应用潜力。

致谢：对合作者李永和刘强及国家自然科学基金资助项目 (Nos.70431002、703768、61174151、10247005、10647001) 一并特表感谢。

DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.008

### 封面照片说明

32 万亿像素数码相机您听说过吗？告诉您目前正在有一帮科学家在忙活这事呢。这是为一台名叫 LSST (大型综合巡天望远镜) 打造的相机，其体积大小与小型汽车相似，重约 3 吨。其传感器是由 189 块 CCD 传感器拼成的一块超大 CCD，能够分辨出 600 多千米外的汽车前灯，这使得它具有超凡的分辨力。这台相机未来将会被安置到智利的 Cerro Pachon 山上，用来拍摄太空中的影像，这将是世界上最大的数码相机。科学家们十分期待它有出色的表现，能够带来具有震撼性的照片。

DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.009 (李之 / 供稿)

### 封底照片说明

这是美国宇航局的科学家正在计划建造的核动力飞船“哥白尼号”，它的主要动力将来自核裂变装置。科学家们希望使用新型核动力飞船能够完成 4000 万英里的火星之旅，同时，缩短在空间飞行的时间，减少宇航员长时间暴露在辐射环境中而受到的伤害。“哥白尼号”的显著优势在于它的质量只有化学能源飞船质量的一半，这使得其航行到火星的时间从原来的 250 天降低到了 100 天。

(李之 / 供稿)