

复杂动态网络的建模、分析与控制研究综述*

项林英 陈增强 刘忠信 袁著祉

南开大学信息技术科学学院自动化系, 天津 300071

摘要 对信息领域复杂网络的建模、分析与控制方面的研究进展进行了全面的综述, 指出了该领域的研究热点和难点, 明确了其中存在的重点问题, 并指出了今后有意义的研究方向及其可能的解决办法。

关键词 复杂网络 复杂动态网络 复杂网络控制 小世界网络 无标度网络

复杂网络是近年来随着网络理论和计算机技术的飞速发展而出现的一个新的研究方向。它的出现不仅顺应了现代科技的发展趋势, 而且反映了在以信息科学为支柱的新世纪中, 各学科理论及应用交叉、渗透和融合的发展趋势。最引人注目的是, 1998年 Watts 和 Strogatz^[1]以及1999年 Barabási 和 Albert^[2,3]的两个重大发现(真实网络具有“小世界”效应和“无标度”特性), 开创了复杂网络研究的新纪元, 将复杂网络的研究推向了一个全新的领域。目前, 复杂网络正以极大的魅力吸引着世界上众多专家、学者为之奋斗。对复杂网络的研究已经渗透到物理学、化学、信息学、生物学、医学、管理学、社会学以及经济学等不同的领域^[4-11]。对复杂网络的定性特征与定量规律的深入探索、科学理解以及可能的应用, 已成为当前学术界的一个前沿课题^[12]。

复杂网络的研究今天已经初成气候, 并将随着新世纪的步伐而迅速发展。本文主要论述近几年来国内外关于复杂网络的建模、分析与控制方面的研究进展, 并指出了今后有意义的研究方向及其可能的解决办法。本文研究的侧重点在于信息领域的复杂网络, 所涉及的研究内容具有广泛的代表性, 目的在于通过整理和总结这一领域的研究, 激发更多

学者的兴趣, 并为复杂网络理论的完善提供一些有益的参考和思路。

1 复杂网络的建模

建立能够准确反映实际网络系统特性的网络模型是研究复杂网络的基础。因此, 建模问题在复杂网络的研究中具有重要意义。本节首先介绍三种最具代表性、最基本的模型, 接着介绍几类典型的演化模型, 并与基本模型进行比较, 指出了各类演化模型的优点。读者也可从这些网络模型的发展过程推断出复杂网络研究的萌发、孕育、开创、高潮这一发展历程。

1.1 3种基本的网络模型

1.1.1 ER 随机网络模型 用网络的观点描述客观世界起源于1736年, 德国科学家 Euler 解决了著名的哥尼斯堡七桥问题^[13]。网络最初属于图论的研究范围。早期图论研究主要涉及一些可利用简单规则网络研究的问题。这类规则网络(有些学者称其为“大世界”网络)的特点是每个节点的近邻数目都相同(如图1(a)所示)。20世纪50年代末, 匈牙利数学家 Erdős 和 Rényi 突破传统图论, 提出了一种完全随机的网络模型^[14](ER 模型)。它由 N 个节点构

2006-03-07 收稿, 2006-06-02 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 60374037, 60574036)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: 教技司 2005-290)和高校博士学科点专项基金(批准号: 20050055013)资助项目

E-mail: xlyzhjl1980@mail.nankai.edu.cn

成的图中以概率 P 随机连接任意两个节点而成(如图 1(b)所示), 度分布服从 Poisson 分布. 此后的近半个世纪里, ER 模型成为学术界研究网络的基本思路 and 主要数学工具, 并被很多科学家认为是描述真实系统最适宜的网络.

随着计算机技术的飞速发展, 人们对复杂网络的认识发生了巨大的变化. 研究表明, 以前的各种有关网络的理论往往只是从比较抽象的、静态的角度去观察和研究网络, 因而得到的结论与各种现实的网络相差甚远, 应用受到很大的限制. 特别是在 Internet 这个活生生的、不断生长的、规模空前巨大的网络出现之后, 这个矛盾已经非常尖锐地摆在了学术界面前. Internet 的结构和特征, 与传统学术界对于网络的认识之间表现出明显的差别. 单纯应用规则图和随机网络理论对普遍存在的复杂系统不能进行实质性的分析研究.

1.1.2 小世界网络模型 1998 年, Watts 和 Strogatz 提出了一种融合规则网络和随机网络优点的“小世界”网络模型^[1](以下称为 WS 模型), 使我们对于网络中的局部和整体的辩证关系有了新的认识. WS 模型一经提出立即引起了科学界的轰动. 该模型既具有规则网络的高聚集性, 又具有类似随机网络的小的平均路径长度(如图 1(c)所示), 是一种具有良好特性的网络, 更好地反映了真实网络系统.



图 1 网络结构示意图

1999 年 Newman 和 Watts 对 WS 模型进行了改进, 建立了 NW 模型^[15]. 它和最初的 WS 模型不同之处在于它不切断规则网络中的原始边, 而是以概率 P 加入新的连接, 从而简化了理论分析. 事实上, 当 P 很小而 N 很大的时候, 这两个模型的理论分析结果是相同的, 现在统称为小世界网络模型. 随着节点数的增加, WS 模型和 NW 模型展示了从“大世界”(平均路径长度线性增长)到“小世界”(平均路径长度对数增长)的变换.

ER 模型和小世界网络模型的共同点是网络连接度分布是指数分布, 网络中节点数目是固定不变的, 是一种静态的网络模型. 后来有人将这类指数分布的模型称为“单标度”网络(single-scale networks).

1.1.3 无标度网络模型 复杂网络研究的另一个重大发现, 是在 WWW 和 Internet 等网络中, 网络连接度分布具有幂律尾部. 为揭示幂律度分布的起源, 印第安纳州圣母大学的物理学教授 Barabási 和 Albert 提出了著名的无标度网络模型^[2](后来被命名为 BA 模型). 他们认为现实世界中大多数的复杂系统是动态演化的, 是开放自组织的, 是规则和随机伴行的. 实际网络中的这种现象来源于两个重要因素, 即增长机制和优先连接机制. BA 模型的定义为:

(1) 在初始状态, 网络有较少的 m_0 个节点, 且没有任何边存在. 在每一个时间步, 加入一个新的节点, 并与网络中 m ($m \leq m_0$, 且为常数) 个节点建立连接;

(2) 新增加的节点与网络中某个节点 i 按照线性优选法则建立连接, 即连接概率 $\prod(k_i)$ 正比于节点 i 的度值 k_i : $\prod(k_i) = k_i / \sum_j k_j$ (可称为“富者更富”法则).

在经过 t 个时间步后, 可以得到一个具有 $N = t + m_0$ 个节点和 mt 条边的网络. 根据以上的规则, 网络就演化为无标度网络, 其度分布为幂律度分布, 具有异质性, 即少数节点大量连接而多数节点少量连接(如图 2 所示). 这类网络中节点和边是连续增长的, 是一种动态的网络模型.

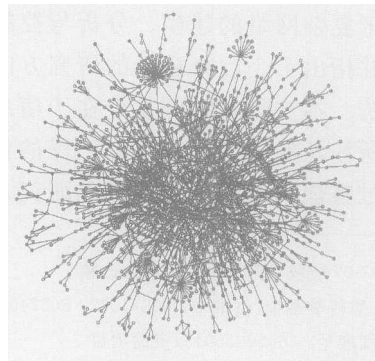


图 2 无标度网络结构示意图

以无标度网络的发现为新启端的复杂网络的研究成果,使得有关真实网络系统中各种宏观性质的微观生成机制和网络的演化规律等一系列问题成为学术界关注的热点,复杂网络的研究也因此变得一下子明朗起来。

1.2 各种演化模型

在过去的几年里,经过激烈的讨论,目前科学界一致公认(仍然很浅显):真实的网络系统大多同时具有3个特征,即小世界、高集团度和无标度。但是,小世界网络模型不能体现无标度特征,而无标度网络模型中平均距离固然较短,集团化程度却很低(聚集系数随着网络规模的增大而趋于零)。为此,研究者们以这些基本模型为框架,引入各种不同的驱动机制如预测、竞争、合作、兼并、老化、初始吸引度、流驱动和双向选择等来生成网络,并且试图调节聚集系数以接近实证结果,同时探讨各种关联效应,对上述的这些基本模型进行改进和完善,以求对真实网络系统进行更加完美的刻画。

1.2.1 广义无标度动态网络模型 为了更好地了解网络的动力学行为, Wang 和 Chen 通过将动力学方程引入到网络中的节点,提出了一个简单的一致连接的复杂动力网络模型——广义无标度动态网络模型^[16]。在该模型中,假定 N 个相同的节点通过线性扩散耦合构成复杂动态网络,而每个节点都是一个 n 维的动态系统。整个动态网络的状态方程可写为

$$\dot{x}_i = f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

其中 $f(\cdot)$ 是描述节点动力学行为的非线性连续可微向量函数, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \mathbb{R}^n$ 是节点 i 的状态变量, $c > 0$ 代表耦合强度。 $\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是由 0-1 组成的形式为 $\Gamma = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 的对角常数矩阵。耦合矩阵 $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 描述的是整个网络的耦合结构。若节点 i 与 j 之间有连接,则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ ($j \neq i$); 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ ($j \neq i$)。如果节点 i 的度 k_i 定义为该节点与其他节点的连接边的数目,则有

$$a_{ii} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N a_{ij} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N a_{ji} = -k_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad \text{假}$$

定网络的连接结构全部都耦合在一起,不存在孤立的簇,则 A 是一个对称不可约矩阵。

在文献[16]的基础上, Lü 等又提出了广义时变动态网络模型^[17-20]。在该模型中,网络的连接结构是时变的,具有不同的耦合强度,内耦合矩阵是非对角矩阵。

1.2.2 局域世界演化模型 BA 模型极其简单地归纳、说明了网络无标度性的出现机制,开创了应用统计分布规律来描述复杂网络性质的先河。如果所有的网络系统都是无标度网络,并且线性优先法则可能是导致无标度性的惟一机制,那么“富者更富”法则将是天下万物演化的惟一普遍法则。然而,无比丰富多彩的世界并非如此。BA 模型是一个伟大的创造,但并非绝对真理。随着研究工作的进一步深入,越来越多的人逐渐认识到 BA 模型所表述的无标度性和线性优先连接机制很可能只是实际网络的一个极端情况,大多数实际网络可能是处于这个极端和另一个极端——随机网络之间。

Li 和 Chen 等研究发现, BA 模型所表述的优先连接机制不是对整个网络都起作用,而只是在每个节点各自的局域世界里被遵守。他们针对确定性和随机性共存的具体机制(假设在网络中,优先连接法则只适用于局域世界内部,而每个节点的局域世界是随机地选取一部分节点构成的)提出了一个非常重要的新思想,首次将“局域世界”的概念引入 BA 模型对其作了推广,提出了一个全新的局域世界演化网络模型^[21]。局域世界模型的建立过程如下:

- (1) 初始状态,网络有 m_0 个节点和 e_0 条边;
- (2) 随机地从网络已有的节点中选择 M 个节点,作为即将新加入网络的节点的“局域世界”;
- (3) 加入一个新节点,使之与上述局域世界中的 m 个节点建立 m 条边的连接;
- (4) 新加入节点与已经存在的节点之间按照以下优先连接法则在其“局域世界”内建立连接:

$$\prod_{\text{Local}}(k_i) = \prod'(i \in \text{Local}) k_i / \sum_j^{\text{Local}} k_j, \quad (2)$$

其中 $\prod'(i \in \text{Local}) = M / (m_0 + t)$ 。这里的局域世界是指在 t 时刻那些被挑选出来的 M ($M \geq m$) 个节

点, 以准备从中优先选取 m 个节点与新加入的节点相连接. 因此, 在每一时刻, 新加入的节点从局域世界中按照优先连接法则选取 m 个节点来连接, 而不是像 BA 模型那样从整个网络中来选择. 这也是局域世界演化模型与 BA 模型的根本区别.

根据以上演化规则, 在 t 时刻, $m \leq M \leq m_0 + t$. 由此得到的局域世界演化模型有两个特殊情形. 当 $M=m$ 时, 新加入的节点与局域世界中的所有节点相连接, 这等价于 BA 无标度网络中只保留增长机制而没有优先连接时的特例 A, 其度分布为指数分布; 而当 $M=m_0+t$ 时, 每个节点的局域世界就是整个网络, 此时网络完全等价于 BA 无标度网络模型. 因此, 当 $m < M < m_0 + t$ 时, 局域世界演化模型的度分布介于指数分布和幂律分布之间, 改善了无标度网络所固有的面对恶意攻击的脆弱性, 增强了网络抵抗恶意攻击的强韧性. 并且, 随着局域世界的扩大, 网络演化越不均匀, 越接近于 BA 模型, 即局域世界的规模决定了网络演化的非均匀性.

越来越多的研究表明, 局域世界是实际网络的一个普遍性质. Li 和 Chen 的工作可谓是一项开创性的工作, 可以说是我们对现实网络认识的又一次飞跃.

1.2.3 多局域世界演化模型 网络的演化过程可以刻画为: 点的生, 点的灭, 边的生, 边的灭. 然则, 何者生, 何者灭, 何时生, 何时灭? Fan 和 Chen 等提出的具有多个局域世界的互联网结构模型^[22]恰如其分地描述了网络的这种动态过程. 网络由多个局域世界网络组成, 局域世界内部的节点高度互联, 而不同的局域世界之间则存在着松散的随机连接. 随着网络规模不断扩大, 新添加的节点在连接时采用局域择优连接, 这使网络节点的度分布满足某种幂律分布. 多局域世界模型可以刻画网络的层次结构, 也可反映互联网的许多统计特性. 与实际互联网的结构数据进行比较, 多局域世界模型比 BA 模型和扩展 BA 模型更能反映互联网的拓扑特性.

多局域世界模型的建立过程如下:

(1) 初始状态, 网络有 m 个独立的局域世界, 每个局域世界有 m_0 个节点和 e_0 条边;

(2) 每一个时间步进行以下 5 个操作:

(i) 以概率 p , 引入一个新的有 m_0 个节点和 e_0 条边的局域世界;

(ii) 以概率 q , 在已经存在的局域世界中加入一个新节点 j , 与这个局域世界中其他 m_1 个节点建立 m_1 条边的连接. 首先, 随机选择一个局域世界 Ω ; 然后, 以下列优先连接法则连接新节点 j 和局域世界 Ω 中已经存在的节点 i . 该过程重复 m_1 次.

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i + \alpha}{\sum_{i \in \Omega} (k_j + \alpha)}, \quad (3)$$

这里的参数 α 表示节点 i 的吸引度;

(iii) 以概率 r , 在已经随机选取的局域世界 Ω 中加入 m_2 条边的连接. 这 m_2 条边的一端是随机选择的, 另一端以概率(3)选取. 该过程重复 m_2 次;

(iv) 以概率 s , 在已经随机选取的局域世界 Ω 中删除 m_3 条边的连接. 这 m_3 条边的一端是随机选择的, 另一端以下列法则进行选取. 该过程重复 m_3 次.

$$\Pi'(k_i) = \frac{1}{N_\Omega(t) - 1} (1 - \Pi(k_i)), \quad (4)$$

其中 $N_\Omega(t)$ 代表第 Ω 个局域世界中的节点数;

(v) 以概率 u , 在其他已经存在的局域世界之间加入具有 m_4 条边的连接. 首先, 随机选择一个局域世界, 在该局域世界中以法则(3)选择一个节点, 作为新加入边的一端, 另一端在其他局域世界中, 仍以法则(3)选择. 该过程重复 m_4 次.

在该模型中, $0 < q < 1$, $0 \leq p, r, s, u < 1$, $p + q + r + s + u = 1$.

此后, Wang 等改进了 Fan-Chen 提出的多局域世界模型, 通过研究自治系统层次互联网的拓扑结构, 综合了局域世界内的偏好连接, 并考虑节点和连接的随机或优先消亡、节点间非线性优先连接, 新节点所带来的外部连接及网络内新增的内部连接等诸多因素, 建立了互联网的局域世界演化改进模型, 较好地刻画了自主层次互联网的无标度、小世界和局域世界等诸多特性的演化行为.

1.2.4 富标度网络模型 最近, 出现了不同的声

音. 美国加利福尼亚理工学院的5位学者 Li, Alderson, Tanaka, Doyle 和 Willinger 首先对 Internet 中的无标度特性提出了质疑^[23]. 他们提出了无标度网络的新定义和一种新的理论框架, 引进了一个结构测度概念, 采用了非随机连接方法(非统计方法), 自然地产生符合工程实际的无标度网络, 并合理地解析了已有 Internet 等无标度网络的主要特性, 澄清了一些困惑的问题.

2 复杂网络的分析

2.1 鲁棒性和脆弱性

鲁棒又脆弱是复杂网络很重要的特征. 它是指把网络中的一些节点去掉, 看这个网络是否还是一个完整的网络. 互联网的前身是具有几个节点的网络演变而来的. 美国国防部当时在设计这个网络的时候, 一个很重要的因素就是希望这个网络在受到攻击时, 仍然能够保持通信的畅通. 互联网现在发展成为这样巨大的网络, 是否还具有鲁棒性? 美国圣母大学 Barabási 教授及其同事在这方面的研究工作迈出了第一步^[24,25]. 他们研究了指数型均匀分布网络和无标度非均匀分布网络(包括互联网和万维网), 发现这两种网络在网络鲁棒性方面呈现出截然相反的特点. 尽管无标度网络相对均匀分布网络而言, 对随机错误具有很强的免疫力(鲁棒性), 但在遭受恶意攻击时性能急剧下降(脆弱性). 这一个有趣的现象又称为“阿基里斯的脚后跟”(Achilles' Heel). 研究指出, 去掉1%的高连通度的节点, 网络的性能将下降一半; 若去掉4%的节点, 网络将不能保证任意节点的连通性. 也就是说, 在这样的网络中, 如果有人恶意攻击网络中连通度值高的节点, 比如互联网中重要的服务器或网关等, 整个网络很快就会陷入瘫痪状态. 复杂网络的这种幂律分布成了它的致命弱点.

此后, Crucitti 等^[26]研究了通信网络的抗击攻击的能力, 所得结论与上述结果一致.

2.2 稳定性

文献[27]基于平均场理论, 并结合 Lyapunov 稳定性理论, 得到了复杂网络系统全局渐近稳定的充分条件. 所提方法不需要对网络进行线性化(线性化只能得到局部稳定性结论, 具有一定的保守

性), 只需根据网络的耦合矩阵即可判定网络是否稳定, 使用十分方便. 该方法还可推广至网络节点为具有不确定性但有界的非线性函数的情况.

3 复杂网络的控制

3.1 强制控制

反馈强制控制策略是规则网络中用于控制时空混沌的一种常用方法. 近年来, 该控制策略已经被用于控制大规模的复杂动态网络^[28-32]. 它的最大优点是利用网络中节点之间的耦合作用, 只需对网络中极少部分节点直接施加控制, 就能达到有效控制整个网络的目的. 该控制策略分为两种, 一种是特定强制控制, 另一种是随机强制控制. 前者是指首先选取节点度最大的进行控制, 其次选取节点度次之的进行控制, 即按照单调递减的次序选取节点进行控制, 直至达到控制目标. 后者是指随机地从网络中选取部分节点进行控制.

Wang 和 Chen 首次将该控制策略引入到无标度复杂混沌动态网络中^[28], 利用无标度网络结构的非均匀性, 有针对性地对网络中的少数关键节点施加反馈控制, 有效地将规模庞大的复杂动力网络镇定到平衡点. 在文献[28]中, 网络模型采用文献[16]所提出的广义无标度动态网络. 整个网络的状态方程为

$$\dot{x}_i = f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

目标是使网络(5)到达一个同质稳定状态

$$x_1 = x_2 = \dots = x_N = \bar{x}, \quad f(\bar{x}) = 0. \quad (6)$$

采用强制控制策略, 控制网络中的部分节点 $\delta(0 < \delta \ll 1)$. 假定节点 i_1, i_2, \dots, i_l 是受控节点, 其中 $l = [\delta N]$ 是小于 δN 的最大整数. 受控网络可写为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i_k} &= f(x_{i_k}) + c \sum_{j=1}^N a_{i_k j} \Gamma x_j - cd \Gamma(x_{i_k} - \bar{x}), \\ &k = 1, 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i_k} &= f(x_{i_k}) + c \sum_{j=1}^N a_{i_k j} \Gamma x_j, \\ &k = l+1, l+2, \dots, N, \end{aligned} \quad (7b)$$

(7)式中, 反馈增益 $d > 0$.

采用解耦变换, 将 $n \times N$ 维的系统(7)的稳定性问题转化为 N 个 n 维的线性系统的稳定性问题

$$\dot{v}_k^T = [Df(\bar{x}) + c\lambda_k \Gamma]v_k^T, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

式中 $Df(\bar{x}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是 f 在平衡点 \bar{x} 的 Jacobi 矩阵. 由此可得稳定性条件.

定理 1 假定存在常数 $\rho < 0$, 使得 $[Df(\bar{x}) + \rho \Gamma]$ 是 Hurwitz 矩阵. 受控网络(7)在平衡点 \bar{x} 处局部指数稳定的充分条件是 $c\lambda_1 \leq \rho$. 其中, λ_1 是矩阵 $B = A - D$ 的最大特征根.

此后, Li^[29,32], Fan^[30,31] 等也将这种控制策略应用于复杂网络中. 他们的研究工作的共同点是采用强制控制策略控制网络中的部分节点, 利用网络中节点的传播动力学行为达到控制整个网络的目的. Li 等的研究指出, 由于无标度网络的不均匀性, 采用特定强制控制策略只控制由 3000 个节点组成的网络中 5% 的节点, 即可使 80% 的节点间接地受控; 而采用随机强制控制策略控制 5% 的节点, 只有不到 30% 的节点间接地受控. 要达到相同的控制效果, 采用特定强制控制策略控制度值高的节点比采用随机强制控制策略所用的控制器少, 减少了成本. 在随机网络中, 由于网络的均匀性, 采用这两种控制方法所得的控制效果区别不大. 由于现实网络大多数具有无标度特性, 因此, 保持度值大的节点的稳定性是使整个网络稳定的关键. 网络中节点连接得越紧密, 网络传播速度也越快.

3.2 脉冲控制

基于现实世界中许多复杂动力网络的状态不仅仅是单纯的连续变量或离散变量, 而是两者同时存在与作用这种现象, 姚静^[33]等提出了一种新的拓扑切换复杂动力网络模型. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 讨论了这类混合型复杂动力网络在脉冲控制下的镇定问题.

3.3 鲁棒控制

文献[34]针对不确定性动态网络(网络由 N 个相同节点通过不确定非线性扩散耦合构成, 而每个节点都是一个 n 维的动态系统), 通过设计鲁棒自适应控制器, 基于 Lyapunov 稳定性理论和更新规

律, 探讨了局部和全局鲁棒自适应同步控制问题.

3.4 拥塞控制

实际网络经常承受超负荷的流量, 由于网络节点自身容量或者处理速度的限制, 往往导致严重的拥塞产生, 使得网络具有较大的时延并且整体性能急剧下降. 已有研究表明, 实际的通信网络具有无标度特征. 陈振毅等^[35]研究了无标度网络模型中的拥塞现象及其控制方法, 结果表明网络节点的性质和网络的无标度特性均对拥塞现象的产生和控制有显著影响. 通过在具有较大的中介数的中心节点之间增加一些恰当的连接可以最有效地改善拥塞. 这些改善拥塞的方法不需要对网络中的所有中心节点进行, 而只需要对其中最为关键的几个中心节点进行改善, 就可以得到类似改善所有节点的效果. 这对于如何在给定成本的前提下最大限度地改善网络拥塞具有重要意义.

4 今后的发展方向

回顾近几年来复杂网络的繁荣发展, 各种新观点、新思想、新方法层出不穷. 每年各类理论研究和实证成果不断涌现, 真可谓“乱花渐欲迷人眼”. 虽然这些研究工作基本覆盖了复杂网络理论的各个层次, 无论在基础科学还是实际应用上都取得了令人瞩目的成果, 但仍未形成普遍适用的结论和方法. 这些是学科发展处在初期的必然现象, 也是开展“百家争鸣, 百花齐放”的大好时光, 需要不同领域的科学家共同讨论, 从各自的领域出发, 相互探讨, 相互启发和补充, 然后进行综合和提升, 寻找复杂网络的共同特征, 不断地在具体应用中得到验证和完善, 这样才能达到有所创新和发展. 今后开展复杂网络的研究, 可以考虑从以下几个方面入手做一些新的探索.

(1) 复杂网络的建模问题一直是研究者们广泛关注的焦点. 以实证研究为推动力, 重视计算机建模的作用, 应该作为我们研究的指南针. 我们应从实证领域寻找各种复杂系统结构的拓扑特性, 提出基于复杂网络动态特性的复杂网络建模方法, 基于该方法建立具有时变动态特性的复杂网络模型, 提出新的计算复杂网络统计特征量的算法, 进一步揭开真实复杂系统的“庐山真面目”. 另外, 如何从

理论上精确定义和区分网络的类型(分类有利于深入研究和揭示复杂网络的共同特性),探寻网络各种宏观性质的微观生成机制(我们不仅要关注“如何形成”(How)的问题,更重要的是要问“为什么是这样形成”(Why)的问题),以及探索描述复杂网络基本性质的特征量的定量与定性分析方法(不仅是几何描述,还有物理和信息描述),探索构造符合实际要求的复杂网络的方法(从随机方法、确定性方法到混合方法以及相互转变关系),仍是今后有意义且极富挑战性的工作。

(2) 目前有关复杂网络强制控制问题的研究还不多,空白点还很多。复杂网络中各个节点本身可以是各非线性(或时变或存在时延)系统,可以用离散的和连续微分方程描述,具有分岔和混沌等非线性动力学行为。网络节点之间的连接可能是非线性、非对称的;连接强度也不一定相同,比如加权结构的网络。另外,离散复杂混沌网络较连续复杂混沌网络具有新的复杂性,不易控制。针对这些拓扑结构更一般的网络,如何采用更有效的控制策略(比如脉冲控制、鲁棒控制等)达到控制整个网络的目的,是一个重要且亟待解决的问题。目前,笔者正致力于这方面的研究(并已取得了初步成果^[36])。

(3) 对复杂网络稳定性的定性定量刻画,应该是今后研究的一个着眼点(尤其是对控制学家而言)。另外,对网络能控性、能观性的研究,目前的研究可以说是空白。如何将非线性系统、大系统与时滞系统的能控性和能观性理论相结合,提出复杂网络的能控能观性合理性定义和判别条件,是我们下一步的研究方向。

(4) 同步是一种非常普遍而重要的非线性现象。复杂网络的全局、相位、混沌、自适应同步问题已经得到了比较彻底的研究^[8, 16-20, 31, 37-55]。但是,对于广义同步的物理机制及其控制方法等问题,仍是迄今尚未解决的一类难题,也是众多领域中都存在的值得共同研究的复杂性课题。这些研究将在复杂网络研究中占有头等重要的位置。

(5) 鲁棒又脆弱是复杂网络十分重要的特征。如何采用容错控制和可靠性理论对不同结构复杂网络的鲁棒性以及脆弱性的研究;如何建立基于随机过程和模糊数学等不确定性理论的复杂网络连锁故障模型,提出智能诊断方法,也是一个具有广泛应

用价值的课题。

(6) 复杂网络的病毒传播和疾病传播,既有随机特性,又满足非线性动力学特性。因此建立基于非线性随机微分方程的复杂网络疾病传播模型,基于该模型探讨疾病传播防范策略,也是我们下一步的研究方向。

(7) 在复杂网络理论不断发展的同时,必须加强对其的应用研究。我们应尽快将现有的理论研究成果应用于实际工程,真正解决一些实际问题,并从中发现新问题,找到推动理论研究深入进行的启发思路,进一步完善复杂网络理论。

总之,复杂网络研究的深入将为我们认识真实网络提供全新的视角和参照。对复杂网络的研究,我们应持的态度是:采用定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辨相结合的研究方法。

5 结束语

复杂网络是当今学术界的一个令人瞩目的新热点,其应用范围之广、影响层面之深已经引起越来越多的关注和重视。本文对信息领域复杂网络的建模、分析与控制等方面的研究进展进行了全面的综述,总结归纳了该领域的研究热点和难点,明确了其中存在的重点问题,并指出了今后有意义的研究方向及其可能的解决办法。虽然复杂网络的研究困难巨大,但其应用前景十分广阔,只要我们付出更多的时间和精力,进行多兵种联合作战,定能为复杂网络开辟另一片新天地!

参 考 文 献

- 1 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393: 440-442
- 2 Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 289: 509-512
- 3 Barabási A L, Albert R, Jeong H. Mean-field theory for scale-free random networks. *Phys A*, 1999, 272: 173-187
- 4 Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 47-97
- 5 Newman M E J. Models of the Small World: A View. *arXiv.org: cond-mat/cond-mat/0001118*. 2000, 2: 1-9
- 6 Newman M E J. The structure and function of complex networks. *Siam Review*, 2003, 45(2): 167-256
- 7 Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Evolution of networks. *Adv*

- Phys, 2002, 51(4): 1079—1187
- 8 Wang X F, Chen G. Complex networks: Small-world, scale-free and beyond. *IEEE Trans Circuits Syst*, 2003, 3: 6—20
 - 9 Strogatz S H. Exploring complex networks. *Nature*, 2001, 410: 268—276
 - 10 方锦清. 迅速发展的复杂网络研究与面临的挑战. *自然杂志*, 2005, 27(5): 269—273, 290
 - 11 Jeong H. Complex scale-free networks. *Physica A*, 2003, 321: 226—237
 - 12 方锦清, 汪小帆, 刘曾荣. 略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究. *科技导报*, 2004, 2: 9—12, 64
 - 13 Béla Bollobás. *Modern Graph Theory*. New York: Springer Verlag, 1998, 16—17
 - 14 Erdős P, Rényi A. On random graphs. *Publications Mathematica*, 1959, 6: 290—297
 - 15 Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model. *Physics Letters A*, 1999, 263: 341—346
 - 16 Wang X F, Chen G. Synchronization in scale-free dynamical networks: Robustness and fragility. *IEEE Trans Circ Sys*, 2002, 49: 54—62
 - 17 Lü J, X Yu, Chen G. Chaos synchronization of general complex dynamical networks. *Physica A*, 2004, 334: 281—302
 - 18 Lü J, Yu X, Chen G, et al. Characterizing the synchronizability of small-world dynamical networks. *IEEE Trans Circ Sys-I*, 2004, 51(4): 787—796
 - 19 Lü J, Chen G. A time-varying complex dynamical network: Model and its controlled synchronization criteria. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(6): 841—846
 - 20 Lü J, Leung H, Chen G. Complex dynamical network: Modelling, synchronization and control. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems (Series B): Applications & Algorithms*, 2004, 11: 70—77
 - 21 Li X, Chen G. A local-world evolving network model. *Phys A*, 2003, 328: 274—286
 - 22 Chen G, Fan Z P, Li X. Modelling the complex Internet topology. In: *Complex Dynamics in Communication Network*, Springer Verlag, 2005, 213—235
 - 23 Li L, Alderson D, Tanaka R, et al. Towards a Theory of Scale-Free Graphs: Definition, Properties, and Implications. Technical Report CIT-CDS-04-006, Engineering & Applied Sciences Division California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2004, 1—32
 - 24 Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 2000, 406: 378—382
 - 25 Albert R, Jeong H, Barabási A L. Attack and error tolerance in complex networks. *Nature*, 2000, 406: 387—482
 - 26 Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A*, 2004, 340: 388—394
 - 27 Li Z, Chen G. Global synchronization and asymptotic stability of complex dynamical networks. *IEEE Trans on Circ Sys- II*, 2006, 53(1): 28—33
 - 28 Wang X F, Chen G. Pinning control of scale-free dynamical networks. *Phys A*, 2002, 310: 521—531
 - 29 Li X, Wang X F, Chen G. Pinning a complex dynamical network to its equilibrium. *IEEE Trans Circ Sys-I*, 2004, 51(10): 2074—2087
 - 30 Fan Z P, Chen G. Pinning control of scale-free complex networks. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Kobe, Japan, 2005, 1: 284—287
 - 31 Chen G, Fan Z P. Modelling, control and synchronization of complex networks. *Proceedings of 2005 Chinese Control and Decision Conference, Guangzhou*, 2005, 22—31
 - 32 Li X. Sync in complex dynamical networks: Stability, evolution, control, and application (Invited paper). *Int J of Computational cognition*, 2005, 3(4): 16—26
 - 33 姚静, 关治洪. 拓扑切换网络的脉冲控制. *复杂系统与复杂性科学*, 2005, 2(2): 24—29
 - 34 Li Z, Chen G. Robust adaptive synchronization of uncertain dynamical networks. *Physics Letters A*, 2004, 324: 166—178
 - 35 陈振毅, 汪小帆. 无尺度网络中的拥塞及其控制. *系统工程学报*, 2005, 20(2): 132—138
 - 36 Chen Z Q, Xiang L Y, Liu Z X, et al. Pinning control of model-based complex dynamical networks-discrete time case. *Proceedings of WCICA 2006, Dalian, June, 21—23, 2006*, 11—15
 - 37 Wang X F, Chen G. Synchronization in small-world dynamical networks. *Int J Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(1): 1871—1892
 - 38 Wang X F. Complex networks: Topology, dynamics and synchronization. *Int J Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(5): 885—916
 - 39 Wang X F, Chen G. Synchronization in complex dynamical networks. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2003, 16(3): 1—14
 - 40 Li C G, Chen G. Phase synchronization in small-world networks chaotic oscillators. *Physica A*, 2004, 341: 73—79
 - 41 Li C G, Chen G. Synchronization in general complex networks with coupling delays. *Physica A*, 2004, 343: 263—278
 - 42 Li X, Chen G. Synchronization and desynchronization of complex dynamical networks: An engineering viewpoint. *IEEE Trans on Circ and Sys-I: Fundamental Theory and Application*, 2003, 50(11): 1381—1390
 - 43 Yang J Z, Zhang M. Chaos synchronization in complex networks. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(9): 2183—2185
 - 44 吕金虎. 复杂动力网络的数学模型与同步准则. *系统工程理论与实践*, 2004, 4(6): 17—22

- 45 李常平, 孙伟刚. 关于时延复杂动力网络的同步注记. 第24届中国控制会议, 中国广州, 2005年7月16—18日. 广州: 华南理工大学出版社, 2005, 202—205
- 46 Sun W G, Li C P, Fan Z P. Synchronization in delayed discrete-time complex networks. *arXiv: nlin. CD/0508002*, 2005, 1: 1—7
- 47 Wu C W, Chua L O. Synchronization in an array of linearly coupled dynamical systems. *IEEE Trans CAS-I*, 1995, 42: 430—447
- 48 Li C P, Sun W G, Xu D L. Synchronization of complex dynamical networks with nonlinear inner-coupling function and time-delays. *Progress of Theoretical Physics*, 2005, 114(4): 749—761
- 49 Liu B, Liu X Z, Chen G, et al. Robust impulsive synchronization of uncertain dynamical networks. *IEEE Trans on Circ Sys-I*, 2005, 52(7): 1431—1441
- 50 Fan J, Li X, Wang X F. On synchronous preference of complex dynamical networks. *Physica A*, 2005, 355: 657—666
- 51 Li X. Uniform synchronous criticality of diversely random complex network. *Physica A*, 2006, 360: 629—636
- 52 Barahona M, Pecora L M. Synchronization in small-world systems. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(5): 054101
- 53 Belykh I V, Belykh V N, Hasler M. Blinking model and synchronization in small-world networks with a time-varying coupling. *Physica D*, 2004, 195: 188—206
- 54 Hong H, Choi M Y, Kim B J. Synchronization on small-world networks. *Phys Rev E*, 2002, 65: 026139
- 55 Zhou J, Lu J, Lü J. Adaptive synchronization of an uncertain complex dynamical network. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51: 1—5

2006年度自然科学基金批准面上、重点等项目情况

2006年9月14日, 国家自然科学基金委员会召开了2006年第8次委务会. 会议研究批准2006年度自然科学基金资助面上、重点等项目情况如下:

1. 面上项目 10270 项, 资助经费 268575 万元;
2. 重点项目 272 项, 资助经费 43569 万元;
3. 联合资助基金项目 98 项, 资助经费 3597 万元;
4. 重大国际(地区)合作研究项目 20 项, 资助经费 1906 万元;
5. 科学仪器基础研究基金项目 19 项, 资助经费 1930 万元;
6. 优秀学术期刊项目 31 个, 资助经费 700 万元;
7. 科普项目 8 项, 资助经费 200 万元.

(供稿: 计划局)