

复杂动力网络的研究

——新世纪科学技术前沿的战略性课题之一

陈关荣

近年来在复杂动力网络的研究中有两项比较重要的发现：小世界网络模型和无尺度网络模型。前者指貌似庞大的网络其实是个小世界，即网络中大多数节点间有较短的连结（路径）；后者指复杂网络的连接度分布具有某种幂指数形式。研究表明，现实世界中许许多多的复杂网络都是小世界或无尺度类型的网络：从生物体中的大脑结构到各种新陈代谢网络、从 Internet 到 WWW、从大型电力网络到全球交通网络、从科研合作网络到各种政治、经济、社会关系网络等等，数不胜数。因此，复杂动力网络的研究引起了不同学科的广泛重视和关注。今天，复杂动力网络的研究正从数学和工程技术科学渗透到社会科学、物理学、以及医学、生物学等众多不同的学科。对网络复杂性的定量计算与定性特征的科学理解以及对网络拓扑结构如何影响其动力学行为的研究已成为一项极其重要而且富有挑战性的科研课题。

复杂网络的数学理论研究开始于 1960 年前后，当时著名的数学家 Erdos 和 Renyi 提出了现在被称为 ER 随机图模型的奠基性的数学理论。此后将近 40 年里 ER 随机图论一直是研究复杂网络的基本模型。但是近年来，有两项开创性的工作掀起了一股研究复杂网络的热潮。首先是 1998 年 Watts 和 Strogatz 在《Nature》杂志上发表文章，引入了小世界网络模型，以描述从完全规则网络到完全随机网络的转变。小世界网络既具有与规则网络类似的聚类特性，又具有与随机网络类似的较小平均路径长度的特征。然后是 1999 年 Barabasi 和 Albert 在《Science》上发表文章，指出许多现实世界中的复杂网络的连接度分布具有某种幂指数的形式。由于幂律分布没有明显的特征长度，该类网络称为无尺度网络。之后人们相继提出并研究了多种网络模型及其性质，特别是网络的拓扑结构与网络动力学行为之间的关系，复杂网络特别是混沌网络的同步问题，以及复杂动力网络对于随机性的“故障”、“错误”和“攻击”的“鲁棒性”与“脆弱性”的关系，等等。

近几年来，复杂动力网络研究之所以受到了不同学科的广泛关注并取得了比较重大的进展，其主要原因在于：1) 随着大型和快速计算能力的日益提高，世界上已逐渐建立起了一些有关大型复杂网络的拓扑结构的数据库，进而激发起了人们从理论、仿真和实际数据验证 3 方面研究复杂网络的浓厚兴趣。2) 学科之间的相互交叉和融合趋势在不断加强，使得人们有能力在对各种不同类型网络的数据分析的基础上，揭示复杂动力网络的一些共有的特征和性质。3) 人们认识到传统的分解方法试图把对复杂动力网络的研究分割为对各个孤立单元（独立的

动力系统)的研究尽管取得了很大的成功,但却存在明显的局部分析的局限性。以分割法和组合论相结合为特色的复杂性科学的兴起促使人们开始用复杂性理论去研究复杂动力网络的拓扑结构、产生机理、以及动力学行为。4)大量的数据和观察表明,复杂网络与非线性动力学理论分不开。以 Internet 为例,网络拥塞控制系统事实上会因控制不当而产生复杂的分岔和混沌行为。这使得结构上复杂的网络变得行为上也复杂,从而对研究工作具有更大的挑战性。

绝大多数的复杂动力网络具有如下几个特征:1)网络行为的统计性:网络节点数可有成千上万,甚至上亿,从而大规模性的网络行为一般都具有统计特性;2)网络连接的稀疏性:一个有 N 个节点的具有全局耦合结构的网络的节点连接数目为 $O(N^2)$,而实际存在的大型网络的连接数目通常为 $O(N)$;3)连接结构的复杂性:大多数现实世界的大型网络的连接结构既非完全规则也非完全随机;4)网络的时空复杂性:复杂动力网络的演化通常都具有空间和时间的复杂性,能够展示丰富多彩的复杂行为(如分岔和混沌);5)网络节点(动力系统)之间的同步运动(包括混沌同步)。

值得注意的是,上述网络特性的时空复杂性和同步运动及其物理机制问题,是研究复杂动力网络的一个重要的关键。长期以来,同步一直是科学技术中的一个重要的基本概念。对同步的研究最早起源于钟摆的发明者惠更斯。历史上为了弄清各种同步的机理,科学家们经历了漫长的探索道路。今天,人们已经认识到,耦合振子之间的同步运动是解释许多自然界中的协调现象的基础。目前,关于大型复杂动力网络各种同步现象的研究工作已经开展起来,方兴未艾。

总而言之,近年来复杂动力网络研究工作的迅猛发展表明:非线性、连接性、以及复杂性问题的研究已经使人类对自然界的认识产生了新的飞跃,并已取得了重要的进展。如何把复杂网络理论、动力系统理论和现代控制理论 3 种科学理论有机地结合起来,深入地研究复杂动力网络的分析与控制方法,是十分重要的。例如,在动力系统理论与控制理论相结合的基础上,如果能够再进一步从理论上分析 Internet 拥塞控制系统的稳定性与振荡行为,揭示其中的分岔与混沌现象的产生机理,就有希望能利用分岔和混沌控制的一些特殊方法提出更为有效的网络拥塞控制方案。

人们预言 21 世纪是复杂性的世纪,复杂性研究将在新世纪获得重大的突破,并将展示美好的应用前景。而复杂动力网络的研究涉及到广泛的交叉学科,也是复杂性理论研究的一部分,它将是新世纪科学的研究的前沿课题之一。