

编者按: 为了提高《力学进展》学术水平,更好地发挥《力学进展》对力学研究的促进作用,编委会决定,对于有发展前景的若干力学发展方向,每次围绕一个方向,约请若干国内外知名专家撰写系列综述评论文章,集中一期发表,以便留给读者深刻印象和完整面貌,并提供较详细的重要参考文献,达到强烈吸引研究兴趣,起到科研导向的作用.本期特约北京大学朱照宣教授、北京航空航天大学陆启韶教授和香港城市大学陈关荣教授组编“复杂网络系统动力学”专辑,今后还会不定期地发表其它专辑,敬请读者关注.

序

复杂网络是由具有一定特征和功能的、相互关联和相互影响的基本单元(节点)所构成的复杂集合体.它们一般包含巨大数量的节点和丰富多样的拓扑连接结构,呈现极其丰富的统计特性和动力学演化行为.人们早期是基于图论工具对具有规则拓扑结构的网络开展研究的.到了 20 世纪 50 年代末,才出现随机网络的基本模型和初步理论.近 10 多年来,人们发现了许多具有与规则网络和随机网络不同的统计特征的复杂网络,其中最著名的是小世界网络和无标度网络.许多真实网络系统都表现出小世界效应和无标度特性,从而引起了人们对复杂网络的极大兴趣.

自然界本身就存在大量的复杂网络系统.随着科学技术的飞跃进步和计算能力的迅速提高,人类更加认识到或者创造出越来越多的复杂网络,包括以因特网、万维网为代表的信息技术网络、计算机网络、通讯网络、电力网络、交通网络、金融经济网络、生态网络、生物基因网络、生物神经网络、以至科研合作、商业、政治、国际关系等领域的网络.它们都在时时刻刻、无所不在地深刻影响和支配着现代人类社会的发展进程.长期以来,网络系统分别是通信、电力、交通、计算机、生命等不同领域的各自研究对象.直到 20 世纪末,近代网络科学技术的迅速发展使得人们认识到复杂网络研究的重要性和普遍性,需要对各种人工的和真实的复杂网络系统进行整体的定性和定量研究.今天,复杂网络理论已成为网络科学技术的核心内容,也是当代科学技术的前沿热点课题.

复杂网络科学的主要研究内容包括网络的拓扑结构、形成机制、统计规律、模型性质、稳定性和鲁棒性、功能效率、控制特性、动态行为、时空演化模式等.值得指出的是,真实网络系统往往是动态的,再加上网络节点动力系统的高度非线性和复杂性、网络拓扑结构的大规模性和时变性等,从而产生极其错综复杂的动力学行为、时空演化模式和控制特性.因此复杂动态网络系统的动力学与控制问题应当成为今后的关注焦点,其中非线性动力系统、统计物理和控制论的分析方法与数值计算是重要的研究工具.此外,复杂动态网络研究有十分广泛的应用背景,有很强的学科交叉性,因此除了基本理论研究之外,应当十分重视结合通讯、计算机、电力、交通、生命、金融、社会等领域的系统开展深入具体的研究,以期能为当代科学技术发展做出更大贡献.

谈到网络与力学的关系,初看起来它们之间有很大的距离.但是细想一下,就会知道离散力学系统(例如耦合振子系统、结构振动系统、多刚体系统等)本身就是网络系统;连续介质力学系统在数值计算中经过离散化后,也成为网络系统了.至于复杂网络系统,其实就是单元数量极大且耦合关系极其复杂的离散系统.因此广义地说,复杂网络系统的动态行为和控制特性研究也属于离散系统的动力学与控制的范畴,只是具有更强的非线性、复杂性和海量的节点(即极高的维数),这使得常规的力学研究方

法已不再直接适用了。“小世界网络”的产生过程也可以从一个侧面说明网络与力学的密切关系。当年,美国 Cornell 大学的理论和应用力学系有个读物理出身的研究生 Duncan J. Watts 他通过对自然界昆虫叫声的同步问题的细致观察分析,注意到一些特有的“小世界”现象,想以此作为其博士学位论文的题目,为此征求导师的意见。他的导师是 Steve Strogatz,本人数学出身,专长是非线性动力学,他写的教科书《非线性动力学和混沌》在 2003 年被“Discover”杂志评为了一本“优秀书籍 (best book)”。在得到导师的赞许和支持下, Watts 进行了从理论计算机科学、神经生物学到社会科学的大量的调研分析,发现小世界现象是与网络的复杂结构特征与动态特性密切相关的尚未解决的问题,它们还存在于更为广泛的领域中。经过 3 年的探索和努力,他终于顺利完成了博士学位论文(其标明的学科是“理论和应用力学”),这就是后来 Watts 和 Strogatz 在 Nature 上发表的著名论文“Collective dynamics of “small-world” networks”(Nature, 1998, 393: 440~442)的由来。这篇文章也是“复杂网络动力学”诞生的标志。这个事例表明力学思想和方法论是复杂网络概念形成的重要根源之一;反过来,复杂网络研究的进展又会大大推动力学理论和方法的发展。随着现代技术装备的微型化、智能化和网络化的发展趋势,力学研究领域已经不再局限于传统的机电设备范围,从而迫切 need 加强与信息、材料和生命等学科的交叉渗透和交流合作,而这些都离不开复杂网络的知识和技术。可见复杂网络研究将会在现代力学问题中发挥越来越重要的作用。

早在国际学术界刚出现人工神经网络 (ANN) 不久的时候,《力学进展》就刊登过国内学术界第 1 篇综述文章(张承福,神经网络系统,力学进展,1988,18(2):145~160)。后来(1994 年和 1998 年)又先后发表过关于“人工神经网络”的一些重要文章。它们在当时对我国从事人工神经网络研究的科技工作者起到了借鉴和推广作用,产生了较大的学术影响。随着网络科学技术的深入发展,从 1998 年 Watts-Strogatz 发表关于复杂网络的著名文章算起,国际上关于复杂网络的研究已经开展了 10 年之久,同时国内在这方面的研究也有了相当规模,取得了令人瞩目的成果。此次《力学进展》出版“复杂网络动力学——理论和应用”专辑,目的是在科技界和工程界(特别是与力学、控制、信息、机电等密切相关的学科领域)的有关科研人员 and 高校师生中普及和推广复杂网络动力学的基本知识和方法,以推动其在科学技术中的进一步应用。

本专辑包括复杂网络动力学的理论和应用的各个方面的综述性文章。每篇文章根据其选题内容,较全面系统地反映和评述了相应领域的国内外研究现状,适当介绍了有关的基本知识,展望了今后的发展趋势和应用前景,并提供了较详细的重要参考文献。在写作上注意到表述流畅,力求图文并茂,尽量增强可读性。本专辑共包括 14 篇论文,大致可分为两大部分:第 1 部分是复杂网络的基本理论,介绍复杂网络的建模思想和方法、统计物理背景、图论方法、同步、控制、传播动力学和集群行为等;第 2 部分介绍复杂网络在生物神经系统、软件系统、移动通信系统、博弈问题、科研合作等方面的一些重要应用。

本专辑的出版是在朱照宣教授的积极倡议下进行的,得到《力学进展》编委会的热烈响应,由陆启韶教授和陈关荣教授共同负责选题、组稿和编审工作。在本专辑的编辑过程中,各位作者高度重视和认真撰写,并得到白以龙主编、朱如曾常务副主编、王薇编辑等同事们的大力支持,我们对此谨表深切谢意。最后,我们也恳切地期待广大读者对本专辑的不足和可能错漏之处赐以指教。

朱照宣 陆启韶 陈关荣