

文章编号:1007-6735(2011)02-0111-06

系统科学视角下的复杂网络研究

狄增如

(北京师范大学 管理学院, 北京 100875; 北京师范大学 复杂性研究中心, 北京 100875)

摘要: 系统科学在科学研究方法论的层面上要求我们从还原论走向系统论,其关注的核心科学问题是复杂系统的涌现性.复杂系统的涌现性通常是指系统通过个体之间的非线性相互作用,可以在宏观层次上出现新的时空结构和功能.通过对各个领域复杂系统宏观涌现行为的研究,抽象出具有普适性的一般规律,是认识系统复杂性的基本途径.而复杂网络作为刻画系统相互作用的基本工具,是构建系统模型、研究系统性质和功能的基础.

关键词: 复杂系统; 涌现性; 复杂性; 复杂网络; 系统学

中图分类号: N 94 **文献标志码:** A

Research of complex networks from the view point of systems science

Di Zeng-ru

(School of Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
Center for Complexity Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: From the view point of systems science, the scientific methodology should go beyond reductionism, to adopt systematic methodology. As the theoretical foundation of systems science, systematology should be developed based on the deep research on the emergent properties of complex systems. Emergent property is an important topic in complexity research. It concerns about the emerging of global spatial-temporal structure and function in complex systems. It is believed that the self-organization of individual agent through nonlinear interaction is crucial to the emergence of global collective behavior at macroscopic level. The basic approach for understanding complexity is to investigate the universal laws that determine the emergent behaviors in variant complex systems. Complex networks, as the basic approach to characterize the interaction among components of the systems, are the basis for modeling the systems and understanding the properties and functions of the system.

Key words: complex systems; emergent property; complexity; complex networks; systematology

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974084, 70771011, 91024005)

作者简介: 狄增如(1962—), 男, 教授. 研究方向: 系统理论、复杂网络. E-mail: zdi@bnu.edu.cn

经过上个世纪一百年的发展,科学技术取得了飞速进步,人类对于自然和生命的奥秘获得了丰富而深刻的认识.这些科学成就的取得在很大程度上有赖于还原论的科学研究方法.还原论是近现代科学研究的基本方法论.当人们希望了解研究对象的性质和规律时,通常采用分析的方法,先将认识对象拆分还原成更基础的部分,了解每部分的结构属性,再试图由部分出发综合推演出整体的属性.这种化复杂为简单的方法,适应并推动了20世纪科学研究的发展,许多对世界产生重大影响的发现都源自于这种基本的方法论.例如,对于物质结构和生命奥秘的认识就经历了这样一个典型的认知过程,从分子到原子再到更细微的基本粒子,从个体、组织器官、细胞到DNA.事实上,除了以上物理和生物所代表的自然科学领域外,还原论已经影响了并正在影响着许多领域的科学研究工作.

随着科学技术的进步,还原论的局限性也逐渐凸现出来,人们越来越深切地意识到,对于系统基本结构单元的性质和规律的了解并不能让我们全面地理解系统的行为.例如,仅仅基于细胞的知识我们不可能理解组织器官的功能,生命整体本身并不只是生命物质的简单组合.进入21世纪以来,对于社会和生命奥秘的探索使人们越来越认识到整体论和系统论的重要性.在这一科学发展趋势下,复杂性研究发展迅速并被认为是新世纪的前沿科学.复杂性研究的对象是复杂系统,它关注系统的演化行为和涌现性质,并致力于挖掘其中所存在的具有共性的基本规律.科学家们普遍认为,整体和系统的世界观和方法论应该真正进入到科学研究当中.

尽管整体的世界观在中国古代哲学和古希腊罗马哲学中都有所体现,但现代系统论的形成一般公认为始于贝塔朗菲的著作《关于一般系统论》^[1].整体论只是强调了世界是动态统一的观点,主张从整体上研究系统随时间的动态行为,而系统论对整体动态行为的认识是建立在了解系统内各部分之间相互作用关系的基础上的,关注整体与部分的关系.从这个意义上说,系统论是还原论和整体论的有机结合和辩证统一^[2].科学方法论从还原论向系统论的变迁是建立系统科学学科体系的基础,我们所面临的问题是:如何在系统论这一基本科学方法论的基础上,结合网络科学的研究进展,深入开展对复杂系统和复杂性的研究,推动和促进系统科学的发展.

1 系统科学与复杂性研究

1.1 系统科学的学科体系

20世纪末,钱学森院士提出了现代科学技术的九大学科门类体系,由此确立了系统科学体系的框架^[3],使系统科学走上了全面发展的新阶段.在这个体系中,系统科学作为在系统论基础上发展起来的新兴学科,被认为是与数学、自然科学、社会科学等相并列的一个基础学科门类,它是从整体与局部的关系角度来研究客观实际的.在钱学森院士和其他专家学者的共同推动下,国务院学位委员会于1990年增列系统科学为理学门类中的一级学科,推动了系统科学学科建设在全国范围内的发展.

目前,系统科学还没有一个明确的大家普遍接受的定义,但在其研究范畴和研究目标上大家都有基本的共识.中国科学院在《1999 科学发展报告》中指出:系统科学是自然科学与社会科学的基础学科.不同于工程、管理等学科领域对具体工程或管理问题的关注,它关心涉及复杂系统性质和演化规律的基本科学问题,试图通过对生命生态、资源环境及社会经济等具体系统演化过程中关键问题的研究,揭示复杂系统所具有的一般性规律,研究复杂系统宏观层次上的涌现性行为、系统性质和功能的智能控制等科学问题,并促进对具体系统的认识.

简言之,系统科学是探索复杂系统基本规律及其相关应用的新兴交叉学科.按照钱学森院士对现代科学技术体系的划分,任何学科都可分成基础理论、技术基础和实际应用3个层次.对系统科学而言,基础理论层次的内容是系统学或称作系统理论,技术基础层次的内容包括运筹学等理论方法,实际应用层次则是各种各样的系统工程.建立系统学,是发展技术、开展实际应用的基础.系统学目前还未形成完整的理论体系,我们认为,近年来兴起的复杂性研究是构建系统学理论体系的一个很重要的途径.复杂性研究关注复杂系统在时间演化过程中所表现出来的丰富多彩的性质和行为,及其背后存在的具有共性的基本规律,特别是复杂系统的涌现性性质.它涵盖了大脑、免疫系统、细胞、蚁群、互联网、金融市场及人类社会等具体领域,是21世纪基础科学发展的一个重要方向.《Science》杂志在1999年就曾发表专辑阐述了复杂性研究对众多学科的可能影响^[4].由于探索复杂性所形成的理论和分析方法在解决复杂系统问题上的前景和威力,复杂性科学还

被众多科学家誉为“21 世纪的科学”^[5]。

1.2 复杂系统与涌现性

复杂性研究的对象是复杂系统,它不以系统的物质属性进行区别,广泛涉及到生命、生态、气候气象、资源环境、人口和社会经济等领域.复杂系统在目前也还没有一个被大家公认的科学定义.我们认为,系统复杂与否通常由系统中所包含个体的数量(系统的自由度)以及个体之间的相互作用形式两个因素共同决定.简单系统包含少量的个体,个体行为受已知的规律支配,且相互作用是线性的,单摆就是其中典型的例子.需要注意的是,即使对于小自由度的系统,当系统中存在非线性的相互作用时,它也可以表现出混沌等复杂行为.当系统包含大量的个体,但个体之间的关系为线性、简单、机械的相互作用时,可以称之为复杂的系统(complicated system,或称组合系统),理想气体是其中典型的例子.系统虽然包括大量的行为相近的气体分子,但分子之间除了完全弹性碰撞外,不考虑任何其他相互作用.此时,可以通过简单的统计平均的方法来研究系统的行为.另一个例子是波音飞机,它包含了三百多万部件,但每一个部件受已知的、机械的规律支配,具有明确的功能.通常,在外界环境改变时,复杂的系统只能对有限的改变做出响应.典型的复杂系统(complex system)不仅包含大量的个体,而个体之间的相互作用是非线性的.另外,复杂系统的另外一个典型特点是系统中的个体可以具有一定的自适应性或学习能力,例如,组织中的细胞、股市中的股民、城市交通系统中的司机及生态系统中的动植物等,这些个体都可以根据环境或其他相互作用关系的变化而调整自己的行为甚至是行为规律.显然,系统的复杂性并不一定与系统的规模成正比,复杂系统需要具有一定的规模,但不一定规模越大越复杂,非线性的相互作用以及个体的适应性是决定系统复杂性的重要因素.

复杂系统这一概念可广泛应用于自然和社会各领域.一般来说,复杂系统往往是由大量具有非线性相互作用的个体组成,其突出表现是:在没有中心控制和全局信息的情况下,仅仅通过个体之间的局域相互作用,系统就可以在一定的条件下展现出宏观的时空或功能结构,在新的层次上涌现出具有整体性和全局性的性质和功能,这就是所谓复杂系统的涌现性.复杂系统所涌现出来的宏观全局行为,不管其复杂与否,都表现为在个体的微观层次上不可能出现的、系统的整体行为.在这里应该强调的是,非线性

的相互作用对于系统宏观行为的出现至关重要,它使得系统的整体行为不能通过个体行为的简单叠加而获得.复杂系统在空间上经常包含不同的尺度,其结构也往往具有多种层次,不同尺度和层次所面临的问题各不相同,不同尺度和层次之间的关系复杂多样,非线性因素的存在使得大尺度上的问题不能简单地通过小尺度的叠加而获得解答,高层次上涌现出来的性质也不能直接从低层次性质得到解释,因此,复杂系统研究不能采取还原论的研究方法,而必须在了解个体行为及其相互作用机制的基础上,从整体的视角、利用系统论的研究方法来进行探讨.

1.3 复杂网络与复杂性研究

对于复杂系统的整体涌现性行为,必须针对具体系统应用动力学手段进行研究和探讨,这就需要刻画个体的动力学行为和个体之间的相互作用关系.前面已经提到,个体之间的非线性相互作用是决定系统复杂性的重要因素,所以,刻画系统中的相互作用关系对研究宏观行为意义重大.在已有的关于复杂系统的研究中,存在两种对相互作用关系的简化处理.a.全局相互作用.系统中任意一对个体之间都以同样的概率及机制发生相互作用.在这种情况下,在理论上可以用平均场的方法研究系统的涌现行为.b.规则的相互作用结构.例如,把个体置于一维链或二维晶格之上,此时可以用反应扩散方程等方法讨论系统的行为.在以上两种相互作用关系的近似中,个体都是平权的,个体之间的相互作用关系没有差别.显然,这一简化与许多实际系统,特别是生物和社会经济系统相去甚远.近年来倍受关注的复杂网络研究表明,大量复杂系统个体之间的相互作用关系需要用网络结构来描述,而这些网络结构存在着许多特殊的性质,例如,小世界性质、幂律度分布、不同的匹配关系及社团结构等^[6].当人们知道相互作用结构对系统宏观行为具有重要影响时,复杂网络研究就成为理解复杂系统宏观行为的基础.

大量包含多个体和多个体相互作用的复杂系统都可以抽象成为复杂网络,其中,每个个体对应于网络的节点,个体之间的联系或相互作用对应于连结节点的边.可见,复杂网络是对复杂系统相互作用结构的本质抽象.虽然每个系统中的网络都有自身的特殊性质,都有与其紧密联系在一起的独特背景,有自身的演化机制,但是,把实际系统抽象为节点和边之后就可以用统一、一致的网络分析方法去研究系统的性质,从而可以加深对系统共性的了解.总的来

说,复杂系统的涌现性现象是具有整体性和全局性的行为,不能通过分析的方法去研究,必须考虑个体之间的关联和相互作用,从这个意义上讲,理解复杂系统的行为应该从理解系统相互作用的网络结构开始.所以,尽管复杂网络本身已经成为科学研究的一个重要领域,但它的重要意义和价值仍在于它是探讨复杂系统的基础,是理解复杂系统性质和功能的基础.2009年,《Science》杂志以复杂系统与网络(complex systems and networks)为主题,发表一集专刊^[7],其中,Barabási教授的一段话很有启发意义,他指出,由于底层结构对于系统行为有着重大的影响,除非探讨网络结构,否则没有办法去理解复杂系统.

2 复杂网络研究的现状与发展

近年来,复杂性研究方兴未艾,已成为国际上科学研究的前沿和热点,许多著名的大学纷纷设立相关的院系及研究机构,研究者来自各个领域,包括物理学家、生态学家、经济学家、各类工程师、昆虫学家、计算机科学家、语言学家、社会学家和政治学家.一场关于复杂性研究的科学竞争已经在世界范围内展开.由于相互作用的网络结构是理解复杂系统性质和功能的基础,与具体系统性质相关的网络科学问题,应该是今后探索复杂性的一个重要方向.

2.1 复杂网络研究的基本内容

1998年,Watts和Strogatz提出小世界网络模型,指出少量的随机捷径会改变网络的拓扑结构,从而涌现出小世界的效应^[8];随后,Barabási提出了无标度网络概念,解释了增长和择优机制在复杂网络自组织演化过程中的普遍性和幂律的重要性^[9];而Kleinberg则从网络的可导航性入手,解释了如何利用局部信息去寻找网络中的最短路径^[10].在这些开创性的工作基础上,经过众多科研工作者前瞻性工作的推动,复杂网络已经成为科学研究特别是复杂性研究的一个重要领域.

大量包含多个体和多个体相互作用的系统都可以进行网络抽象,其中,每一个个体对应于网络的顶点,个体之间的联系或相互作用对应于连结顶点的边.复杂网络描述中最简洁的是只包含点和边的二元无权网络,它给出了顶点之间的相互作用存在与否的定性描述,而这种定性描述反映了相互作用最主要的信息.网络描述方法已被广泛应用于实际系统的研究,例如,神经元网络、食物链网络、Internet

网络、WWW网络以及人与人之间交往的社会网络等,研究结果加深了对这些具体系统的理解,并且提出了一系列新的概念和分析方法.总体上说,复杂网络研究包括以下主要内容:a.如何定量刻画复杂网络?通过实证分析,了解实际网络结构的特点,并建立相应概念刻画网络结构特征,同时,拓展网络描述的维度,例如,研究加权网络、关心网络的空间结构性,研究超网络等;b.网络是如何发展成现在这种结构的?建立网络演化模型,理解网络结构的产生和涌现;c.网络特定结构的后果是什么?探讨网络结构与功能的关系,从系统科学的角度看,这是网络科学的核心议题,与理解系统性质紧密联系在一起.所谓系统功能往往与网络所实现的动力学行为和过程相关,如新陈代谢网络上的物质流、食物链网络上的能量流、Internet网络上的信息传播及社会网络上的舆论形成等,所以,研究网络上的各种动力学过程是探讨结构与功能之间关系的主要途径;d.在以上知识和理解的基础上,利用网络结构控制和优化系统功能.

由于近十年来网络科学与工程研究的纵深发展,复杂网络与复杂性研究之间相辅相成、相互促进的发展态势已经逐渐形成.在2009年《Science》杂志发表的主题为复杂系统与网络的专辑中^[7],学者们回顾和展望了复杂网络研究的进展,在未来可能的发展方向中,解开生命之网、分析社会生态系统、经济网络、技术社会系统的行为都被列为复杂网络研究发展的方向;而在世界各国确定的复杂性研究路线图中,复杂网络作为探索复杂性的重要工具,也被提高到很重要的位置.从网络结构的层面,理解生命、生态、社会及经济等复杂系统的性质,应该是未来复杂性研究的重要方向.

2.2 系统科学与复杂网络研究的相互促进

发展系统科学已经成为世界科学技术发展的大趋势,而针对复杂系统涌现性的复杂性研究,是建立系统学、并进而发展系统科学的技术基础和工程应用的重要途径.目前,国际国内进行复杂性研究的工作都是针对具体系统进行的,寻找复杂系统的一般规律可以说还任重道远.我们认为,这是建立和完善系统科学学科的一个必不可少的阶段.首先,由于复杂系统的特征如不可逆性、涌现性、敏感性和路径依赖等表现出了很强的普适性,我们相信其中一定存在着普适的、制约不同系统演化的基本规律,这是建立系统学的基础;其次,通过从理论到理论的途径很难直接产生理论成果,普适的规律一定是通过

对各种各样的具体系统的深入研究而获得的,这就要求我们一定要走进,准确把握相关系统的概念,深入细致地了解系统的性质;第三,在准确把握概念和性质的基础上,对具体系统的研究不能落入已有思想和方法的樊篱,要注意应用系统方法论研究相应的复杂性问题;第四,在获得具体系统的成果后还一定要注意挖掘规律的普遍性,注意通过对具体系统的研究提炼具有普适性的规律,通过对不同系统的研究促进对复杂性本身的认识,从而对建立系统学做出贡献。

事实上,国际国内探索复杂性的研究路线基本上都是以首先解决具体系统中的科学问题为切入点的。结合2006年欧洲制定的复杂系统研究路线图,以下主题领域值得大家关注^[11]。a. 自然系统中的涌现:集体行为和远离平衡态的涨落,包括复杂物质的自组织和时空动力学,多层次和多尺度系统的建模,多尺度动力系统中瞬态现象的分析、不同的涌现形式和形态的稳定性的描述和定位、亚稳态材料和玻璃态动力学等。b. 理解生命,包括计算生物学和系统生物学、认识大脑,从分子、细胞、生理及生态等各个层次全面地理解生命的奥秘,具体问题如重建细胞成分的多尺度时空动力学,整合新陈代谢、分子动力学和基因网络动力学,研究多细胞生物体的多尺度动力学,个体生理机能及其与环境的交互关系,模拟生物多样性、功能性和生态动力学之间的关系,揭示进化机制等。c. 社会与环境系统,包括计算社会学及经济学,具体问题有理解个体认知和群体行为,基于网络重建的集体智力过程,经济与金融网络以及危机的产生与扩散,环境、生态与社会经济的耦合演化,理解认知与创新的关系、模拟创新及其规律等。d. 网络与技术系统,特别是与信息技术与Internet发展相关联的科学问题,包括基于网络的信息挖掘与信息扩散,网络分布式计算方法,WWW网络与虚拟社会,基于网络重建的集体智力过程等。e. 人工复杂系统。模拟和仿真是研究复杂系统的重要工具,是分析、模拟和调节自然的、社会的复杂系统的途径,同时,也成为复杂性研究的重要对象。具体对象和问题包括:软件系统,人工智能和模拟神经的机器人技术,从社会性昆虫中受到启发的群体优化,进化机器人,免疫或受社会启发的计算机安全技术等。

在这些具体问题的研究中,由于网络结构对于系统的性质和功能有重要影响,网络分析方法可以用来探索实际系统性质中的一些重要问题:a. 找出网络中关键的结构和连接。b. 了解网络中重要的动

力学过程。例如,要搞清楚金融危机扩散的过程就要了解网络中节点和连边的动力学过程以及级联传播的影响。c. 复杂网络的计算机模型具有预测的功能。例如,经济金融网络中某些政策的改变可能导致网络规模和结构的变化,并进而影响系统性质。d. 网络结构与动力学分析是优化复杂网络系统设计和控制的基础。例如,可以弱化金融网络中的级联效应、优化电力网中输运能力的分配等。同时,社会网络和经济金融网络以及其他类型网络的耦合相互作用也是至关重要的。

要实现探索复杂性与复杂网络研究的有机结合,达到理解、设计和控制网络系统的目标,复杂网络研究需要从以下4个方面深入展开:重建网络;理解网络结构;理解网络动力学;判断、设计和控制。这4个研究主题的具体研究细节包括:a. 重建网络。网络的拓扑结构是研究网络行为的前提。但许多实际系统中的网络规模很大并且很复杂,往往人们不能直接测量其网络结构。因此,如何从个体单元行为重构复杂网络结构成为了近年来的研究焦点,受到越来越多的关注。重构或推断复杂网络结构作为复杂网络研究的“反问题”,比研究网络结构对动力学的影响更具挑战性,而在生物、信息及社会经济等各领域内的研究还处于探索阶段。b. 理解网络结构。人们已经建立了许多在顶点层次和全局层次刻画网络结构的概念和方法,但是,网络结构的层次性迫切要求我们能够在介观或中观层次刻画网络结构的特点,需要发展将网络结构分解成不同层次的分析方法,例如,评价大网络特征谱的可扩展方法,发展寻找网络社团结构和核心骨架结构的方法。c. 理解网络动力学。讨论的网络结构是研究网络动力学的基础,而网络动力学是研究系统功能的重要手段,目的是在变化的条件下(稳态时和网络演化时)理解网络的行为。网络结构是如何与网络动力学耦合到一起的?如何测量和探讨随着网络增长的行为变化?突变行为也是复杂网络动态的特点之一,研究稳态条件和理解相变非常必要,而捕捉产生这些变化的非线性相互关系应成为网络建模的重要组成部分。d. 判断、设计和控制。网络建模和模拟的最终目标是发展理解和控制网络系统、改善系统功能,这个目标的实现依赖于上述3个方面的研究。其中,一个研究线路是把修改网络操作的动力学也引进系统演化行为中,系统可以在线学习并修改网络,以控制和改进系统的性质和功能。

3 结束语

明确的系统科学学科体系,使系统科学在我国具备了独特的发展基础和优势,同时,探索复杂性也已经成为我国科技发展的重要领域.2004年,中国科学院在基础研究中长期规划中,确定复杂系统研究为14个重点领域之一.国务院2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》多次论述了系统科学和交叉学科,明确指出“复杂系统、灾变形成及其预测控制”是面向国家重大战略需求的基础研究,要求“重点研究工程、自然和社会经济复杂系统中微观机理与宏观现象之间的关系,复杂系统中结构形成的机理和演变规律、结构与系统行为的关系,复杂系统运动规律,系统突变及其调控等,研究复杂系统不同尺度行为间的相关性,发展复杂系统的理论与方法等.”可见,系统科学和复杂性研究以及交叉学科对我国中长期科学发展的重要意义已经逐渐被大家所认识接受.

探索复杂性与网络研究相结合,关注网络结构对于系统性质与功能的影响,是推进复杂性研究的重要途径.这需要将理论探索与具体领域的研究紧密结合起来,一方面利用系统科学的思想、方法和工具研究经济、资源环境、生物及计算机系统等领域中的相关问题;另一方面注意从具体问题中提炼具有共性的规律性的东西,研究系统宏观层次上的涌现性行为以及对系统性质和功能的智能控制,发展系统科学的基本概念和理论.

参考文献:

- [1] 贝塔朗菲.一般系统论:基础、发展和应用[M].林康义,魏宏森,译.北京:清华大学出版社,1987.
- [2] 北京大学现代科学与哲学研究中心.复杂性新探[M].北京:人民出版社,2007.
- [3] 钱学森.创建系统学(新世纪版)[M].上海:上海交通大学出版社,2007.
- [4] GALLAGHER R, APPENZELLER T. Special issue on complex systems [J]. Science, 1999, 284 (5411): 79-109.
- [5] 戴汝为.复杂巨系统学——一门21世纪的科学[J].自然杂志,1996,19(4):187-192.
- [6] 郭雷,许晓鸣.复杂网络[M].上海:上海科技教育出版社,2006.
- [7] JASNY B R, ZAHN L M, MARSHALL E. Special issue on complex systems and networks [J]. Science, 2009, 325(5939):405-432.
- [8] WATTS D, STROGATZ S. Collective dynamics of small world networks [J]. Nature, 1998, 393 (6684): 440-442.
- [9] ALBERT R, BARABÁSI A L. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286 (5439): 509-512.
- [10] KLEINBERG J. Navigation in a small world [J]. Nature, 2000, 406(6798):845-847.
- [11] 上海系统工程学会.系统科学与系统工程学科发展报告[M].上海:上海系统科学出版社,2009.

作者介绍

狄增如 1983年获北京师范大学物理学专业理学学士学位,1997年获北京师范大学系统理论专业理学博士学位.现为北京师范大学管理学院系统科学系教授、北京师范大学复杂性研究中心主任.曾赴比利时布鲁塞尔自由大学索尔维(Solvay)国际物理化学研究所、美国加州大学洛杉矶分校医学院进行合作科研,利用自组织理论和非线性动力学研究社会经济和生物系统中的演化行为.现任北京师范大学学位委员会委员、国务院学位委员会系统科学学科评议组召集人、教育部高等教育自学考试教学指导委员会专业委员会公共课组副组长、中国系统工程学会常务理事、中国“双法”学会复杂系统研究会常务理事.

主要从事非平衡系统理论、复杂性研究及相关理论在社会经济和生物系统中的应用研究工作.在收益递增与经济增长的双稳态,社会分工产生机制的数理描述,产业结构动力学,复杂网络的结构、演化和功能等方面取得了一些研究成果.在加权网络、复杂网络中的社团结构、空间网络等方面的成果产生了一定的学术影响.目前关注的研究领域为复杂性研究,特别是复杂系统个体之间局域的相互作用与宏观层次上复杂行为的关系.具体的研究方向包括复杂网络、Multi-Agent系统的集体行为、经济和生物系统中组织和结构的涌现等.

现为《上海理工大学学报》副主编,Journal of Economic Organization and Behavior, Journal of Systems Science and Complexity等学术杂志编委.