

The background of the entire cover is a complex network diagram. It consists of numerous nodes of varying sizes (some are large dark grey circles, others are smaller white or light grey circles) connected by thin black lines. The connections form a dense, interconnected web, with some nodes acting as hubs with many connections, and others as peripheral nodes with fewer connections. The overall pattern is non-uniform and organic, resembling a molecular structure or a social network.

复杂网络基元研究 方法及应用

Complex Network Building Blocks
Methods and Applications

刘亮 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



上海市教委科研创新项目(15ZS027)

国家自然科学基金项目(71602107)

教育部哲学社会科学研究重大课题(13JZD025)

国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91224003)

复杂网络基元研究 方法及应用

Complex Network Building Blocks
Methods and Applications

刘亮 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以统计物理学和系统生物学基于复杂网络研究的最新实验事实和前沿理念——模体(子图)为基础,建立复杂网络基元研究的若干细节化方法,包括模体组合方法、模体角色辨识方法、异质和加权模体分析方法、模体动态分析方法和模体分布分析方法等,并有效应用于关键交通网络、科学家合作网络、应急组织网络和项目群组织网络等工程、科技和社会网络的基元结构特征、行为机制的定性和定量规律研究中。

本书的研究范围包括关键基础设施规划与保护、科研合作与创新、公共安全与应急管理、项目组织网络及治理等多学科的热点研究课题,可为高等院校相关研究领域的师生提供参考,也可为相应的管理者提供决策参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂网络基元研究方法及应用 / 刘亮著. —上海:

上海交通大学出版社, 2018

ISBN 978-7-313-20206-2

I. ①复… II. ①刘… III. ①公共管理-危机管理-

计算机网络管理-研究-中国 IV. ①D630.8

②TP393.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 217433 号

复杂网络基元研究方法及应用

著 者: 刘 亮

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 刷: 上海景条印刷有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

字 数: 149 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-20206-2/D

定 价: 49.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 8.25

印 次: 2018 年 10 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告 读 者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-59815625

前言

随着科技的发展和社会的进步,越来越多的复杂系统问题,如社会经济、生态环境、工程技术与可持续发展等问题进入人们的视野。研究者在采用传统的理论、方法和技术处理这些问题时遇到诸多困难。其重要原因在于,近现代科学条块分割且日益精细的研究现状模糊了人们对事物的全局性认知。面对复杂的系统问题,研究者开始探索从整体出发的研究方法,试图寻找被打断的“沟通各学科的链条”。在此背景下,复杂性科学通过学科交叉和融合,力图突破自牛顿以来统治科学的线性、简化的思维方式,解答常规学科范畴无法回答的问题。20多年来,复杂性科学的理论与应用都取得了长足发展,被誉为“21 世纪的科学”。20 世纪末,复杂性科学研究领域出现了一朵奇葩——复杂网络理论。它是一门涉及数学、物理学、非线性科学、信息科学和生物科学等众多学科的交叉学科理论。一经诞生,便被作为探索复杂性的新途径,在自然科学与社会科学领域掀起了研究热潮。

对一个复杂系统的研究,往往是从其组织结构开始的,自上而下将其分解成若干个层次的子系统,研究相应的结构特性及组织方式是探索和理解复杂系统的结构、行为和功能的重要内容和有效方法。复杂网络拓扑结构信息是复杂系统模型构建、行为分析和功能辨析的基础。近 20 年来,关于复杂网络全局结构特征与演化规律问题的实证分析和模型仿真取得了令人瞩目的成果。研究表明,具有相似全局结构的网络可能由于其本身功能特性或生成机理的不同,反映出极其不同的局部结构——模体(motif)。模体从局部刻画了给定网络相互连接的特定模式,并自下而上构成不同全局结构的复杂网络,因而被誉为复杂网络“基元”(building blocks)。复杂网络基元研究迅速从生物学、数学渗透到物理学和社会学等众多学科,为复杂系统结构提供了一种新的研究思路和分析方法。系统辨识现代社会合作和工程技术系统日趋大型化、网络化和复杂化的特征,理解其行为和功能,应从系统相互作用的网络的基本结构开始。

本书研究以统计物理学和系统生物学基于复杂网络研究的最新实验事实和前沿理念——模体为基础,建立复杂网络基元研究的若干细节化方法,并有效应用于若干社会合作、工程技术网基元结构和行为机制的定性和定量规律研究中。

全书的主要章节安排如下：

第1章阐述了复杂系统和复杂网络研究的背景及意义,并评述国内外相关领域或课题研究的现状,进而提出了本书研究的问题和主要工作。

第2章概括了复杂网络的基本理论及其发展,以及基元研究的基本模体方法、算法和工具,作为本书研究的理论和方法基础。

第3章考虑到复杂网络自下而上的构建过程,建立复杂网络自局部到全局的子图组合分析方法,并应用于关键交通网络的基元结构辨识,以及网络自下而上组合构建规则的分析中。

第4章综合社会网络分析的结构对等和复杂网络研究的基元概念,建立复杂社会网络个体角色的分析方法,并应用于科学家合作网络的基元结构特征和角色行为的辨识中。

第5章建立表征复杂网络中个体差异和关系强弱的异质和加权模体分析方法,并应用于中国和美国国家应急组织合作网络的基元结构比较和优化中。

第6章考虑到复杂网络系统随时间的演化发展过程,基于动态模体方法分析一类项目群组织合作网络基元结构的演进规律,并分析其相应的治理结构、治理机制和治理策略。

第7章考虑到复杂网络基元的分布内涵,探讨上述不同领域的工程技术和 社会合作复杂网络在微观结构上的分布统一性或多样性,即家族特征。

第8章总结了前述研究的主要成果和结论,并展望下一步研究的方向和内容。

本研究的创新之处在于将复杂网络基元研究方法引入并应用到关键基础设施规划与保护、科研合作与创新、公共安全与应急管理、项目网络及治理等众多跨学科研究的热点课题之中,不仅深入探讨和有效分析了相应网络的基元结构特征以及行为机制的定性和定量规律,同时为相关复杂系统问题的研究提供了新方法、新模型和新工具。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 关键交通网络研究	4
1.2.2 科研合作网络研究	5
1.2.3 应急组织网络研究	6
1.2.4 项目组织网络研究	7
1.2.5 复杂网络模体及应用	9
1.3 本书主要工作及章节安排	11
第 2 章 复杂网络理论和基元方法	13
2.1 复杂网络基本理论	13
2.1.1 复杂网络理论及发展	13
2.1.2 复杂网络建模、参数和层次	15
2.2 复杂网络基元方法	19
2.2.1 模体的概念及功能内涵	19
2.2.2 模体发现的算法及工具	20
2.3 小结	24
第 3 章 关键交通网络基元多样性与统一性——模体组合方法及应用	25
3.1 关键交通网络模型和方法	25
3.1.1 关键交通网络模型	25
3.1.2 网络子图组合方法	26
3.2 关键交通网络基元结构多样性	28

3.2.1	子图特性	28
3.2.2	模体特性	30
3.3	关键交通网络构建规则统一性	34
3.3.1	典型子图类型	34
3.3.2	典型子图组合	37
3.4	小结	38
第 4 章	科学家合作网络基元角色辨识——模体角色辨识方法及应用	40
4.1	科学家合作网络模型和方法	40
4.1.1	科学家合作网络模型	40
4.1.2	基于子图结构对等的角色辨识方法	41
4.2	科学家合作网络基元特征	42
4.2.1	模体特性	42
4.2.2	子图相对数量	46
4.3	科学家合作网络角色辨识	47
4.3.1	角色的属性和强度特征	47
4.3.2	个体科学家角色的种类特征	48
4.3.3	基于角色分布的科学家分类	50
4.4	小结	52
第 5 章	国家应急组织网络基元比较构建——异质与加权模体方法及应用	54
5.1	国家应急组织网络模型和方法	54
5.1.1	应急管理组织网络模型	54
5.1.2	异质和加权网络模体分析方法	63
5.2	应急组织网络基元特征分析	64
5.2.1	基本模体特征	64
5.2.2	异质和加权网络模体特征	67
5.3	功能型应急组织网络及基元构建	70
5.4	小结	72
第 6 章	关键项目群组织网络基元治理——模体动态分析及应用	73
6.1	关键项目群组织网络模型和方法	73
6.1.1	项目群组织网络模型	73
6.1.2	模体动态分析方法	75

6.2 项目群组织合作网络基元演进分析	75
6.2.1 网络基元结构特性	75
6.2.2 网络基元演进机理	79
6.3 项目群组织网络基元治理	81
6.3.1 基元治理结构	82
6.3.2 基元治理机制	82
6.3.3 基于基元的整体治理模式	84
6.4 小结	85
第 7 章 工程和社会复杂网络家族分类——模体分布分析及应用	86
7.1 工程和社会复杂网络模型和方法	86
7.1.1 工程和社会复杂网络模型	86
7.1.2 三种家族辨识方法	89
7.2 基于三种方法的两类网络家族辨识	90
7.2.1 科学家合作网络家族辨识	90
7.2.2 关键交通网络家族辨识	95
7.3 三种分类方法之比较	100
7.4 小结	101
第 8 章 结论和讨论	102
8.1 结论	102
8.2 讨论	104
参考文献	106
索引	123
后记	124

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

随着科技的发展和社会的进步,越来越多的复杂系统问题,如社会经济、生态环境、工程技术与可持续发展等问题进入人们的视野。研究者在采用传统的理论、方法和技术处理这些问题时遇到诸多困难。其重要原因在于,近现代科学条块分割、日益精细的研究现状模糊了人们对事物的全局性认知。面对复杂的系统问题,研究者开始探索从整体出发的研究方法,试图寻找被打断的“沟通各学科的链条”。在此背景下,复杂性科学通过学科的交叉和融合,力图突破牛顿以来统治科学的线性、简化的思维方式,解答常规学科范畴无法回答的复杂系统问题。20 多年来,复杂性科学的理论与应用都取得了长足发展,被誉为“21 世纪的科学”^[1]。

揭示、刻画和理解复杂系统的结构和功能及各种普适性质是当前复杂性科学研究面临的重要挑战。作为探索复杂性的一种新途径、新角度和新方法^[2],复杂网络是指具有复杂拓扑结构和动力学行为的大规模网络。它由大量节点通过边的相互连接而构成。网络中的节点表示真实系统中的个体,边表示个体间的相互关系,有边相连的两个节点被看作是相邻的^[3]。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,已成为复杂性科学研究中一个极其重要的挑战性课题。1998 年,Watts 和 Strogatz^[4]在 *Nature* 上发表文章,揭示了复杂网络的小世界特性并建立了一个小世界网络模型。1999 年,Barabasi 和 Albert^[5]在 *Science* 上发表文章,揭示了复杂网络的无标度性质并建立了一个无标度网络模型。随着复杂网络的小世界效应及无标度性的发现,复杂网络研究开始受到从物理学到生物学、从工程技术到管理和社会科学等众多学科研究人员的关注^[6-8]。大量文章发表于 *Nature*、*Science*、*Proceedings of*

the National Academy of Sciences 和 *Physical Review Letters* 等国际一流刊物。2009 年, *Science* 以复杂系统与网络 (complex systems and networks) 为主题发表专刊^[9], 指出从网络各层次结构理解生命、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。复杂网络与复杂性研究之间相辅相成、相互促进。

网络拓扑结构信息是构建系统模型、研究系统性质和功能的基础。复杂网络研究关注系统中个体相互关联的作用的拓扑结构, 是理解复杂系统性质和功能的基础^[2]。近 20 年来, 关于复杂网络全局结构特征与演化规律问题的实证分析和模型仿真取得了令人瞩目的成果。基于复杂网络理论形成的对各学科领域研究对象的拓扑结构, 特别是跨越生物、技术和社会系统的网络共性结构的研究取得极大进展, 已发现诸如生物神经网络、蛋白质网络、无线通信网络、电力网络、科研合作网络、社会关系网络等都属于小世界或无尺度网络, 具有共同的全局结构特征^[4-5], 并具有增长和择优两种基本演化机制^[6]。近期, 统计物理学和系统生物学对复杂网络的研究进一步表明, 具有相似全局结构的网络可能由于其本身的功能特性或生成机理不同, 反映出极其不同的局部结构。2002 年, Milo 等^[10]在 *Science* 上发表文章, 揭示了真实网络所共有的局部结构形式——“模体”(motif), 定义为网络中反复出现的同构子图, 其在真实网络中的出现频率远高于在具有相同节点和连线数的随机网络中的出现频率, 如图 1.1 所示。模体从局部刻画了给定网络相互连接的特定模式, 并自下而上构成不同全局结构的复杂网络, 被誉为真实网络的“基元”(building blocks)。

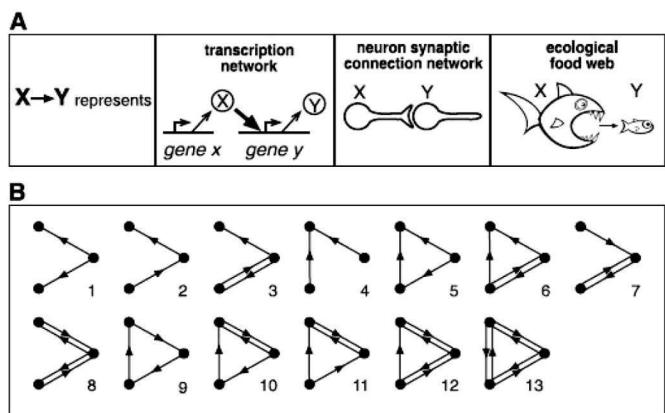


图 1.1 生命网络中的模体示例及 3 节点子图形式^[10]

模体从微观上刻画了真实网络相互作用的适应性模式, 并自下而上构成网

络全局。不同规模的子图(模体)分布,对刻画网络组织方式具有重要意义。2004年,Milo等^[11]在 *Science* 上发表文章进一步提出超家族(superfamily)概念,通过比较真实网络与其相应随机网络中的子图分布特征,以定义网络所属的家族类别,并指出横跨生物、技术和社会系统的众多复杂网络仅具有少数几种子图分布特征,因而属于少数几个家族类别,并具有相应的行为特征,如图1.2所示。

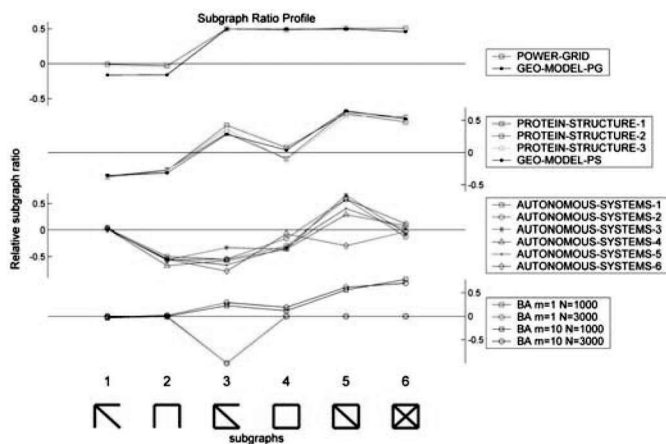


图 1.2 基于 4 节点子图分布的多领域复杂网络超家族^[11]

总体而言,复杂网络研究以各类复杂系统为对象,力图概括其结构的时空规律性。将复杂系统分解成若干个层次的子系统,研究相应层次的结构特性及组织方式是探索和理解复杂系统的行为和功能的重要内容和有效方法。尤其是复杂网络基元(子图或模体)研究已从系统生物学、统计物理学渗透到工程科学和社会科学等学科,为工程技术系统和社会合作系统结构提供了一种新的研究思路和分析方法。

科学理解不同规模和类型的工程技术和社会合作复杂网络基元,是探索复杂网络系统行为和功能的重要手段。研究拟针对关键交通基础设施工程系统、国家应急组织网络系统、项目群组织网络系统、科研合作网络系统等工程技术和 社会合作复杂网络展开,将社会 and 工程系统内的各种要素及其关联性抽象表达为一个网络,在复杂网络模体基本理论和方法的基础上,建立若干细节化分析方法并应用于相应的网络基元结构和行为机制的定性特征与定量规律研究中。

本书从系统学的高度研究工程、科技和社会网络的局部构造和基本规律,拓展了复杂网络模体研究和应用的领域,丰富和发展了复杂网络模体的分析方法,

对解释系统状态和过程特性具有重要的科学意义。综合应用相关成果,有助于更好地认识工程技术和企业合作复杂系统的基本结构及其构建规律,以更好地认识和利用网络结构及行为特征,从而促进网络规划、设计、建设和控制的发展。

1.2 国内外研究现状

文献资料检索和分析显示,学者关于复杂网络拓扑结构的建模和统计进行了大量研究,就关键交通网络、科研合作网络、应急组织网络以及项目群组织网络的研究已广泛展开。复杂网络模体研究多集中于生物网络,如食物网、代谢网络、蛋白相互作用网络,亟待扩展至工程技术和企业合作网络的分析中。

1.2.1 关键交通网络研究

关键交通系统是由大量站点和线路交互作用构成的,是对经济社会可持续发展具有关键支持功能的网络。作为工程全局规划的参考内容,学者基于复杂网络对关键交通网络,如道路网、公交网、铁路网和航空网等的拓扑特性研究已广泛展开。国外学者 Crucitti 等^[12]将所研究的城市分为自组织型和规划型两种,然后采用中心性指标对其道路网络进行分析,结果表明其具有和非空间网络几乎一致的无标度性。Porta 等^[13]引入了全局有效性和局部有效性的概念,探讨了城市道路网络中心的度量和计算问题。Reggiani 等^[14]对德国汉莎航空公司网络的结构进行了剖析,认为航空网络具有复杂网络小世界特性或无标度特征。Bagler^[15]将印度航空网络与世界航空网络进行比对,定性描述其不同于发达国家的航空网络的演变过程。Brockmann 等^[16]基于有效距离将复杂时空网络简化为简单的同质流传播网络,并运用到 H1N1 和 SARS 传染病病源的发现上。Harold 等^[17]对新加坡公交系统赋权复杂网络的网络拓扑结构及动力学特性进行了分析。

国内学者高自友等^[18-20]从城市交通系统的角度出发,探索城市交通网络的时空复杂性及其演化机理,揭示交通流的演化过程,以缓解和预防交通拥堵。通过对复杂网络理论在城市交通系统中几个典型应用的归类分析,并结合出行者博弈、网络结构以及城市交通系统所具有的特征,提出今后关于城市交通系统复杂性问题的几个研究主题。刘宏鲲、周涛^[21]研究了中国城市航空网络的拓朴性质,论证了中国城市航空网络是一个具有短的平均路径长度和大的簇系数,且其度分布服从双段幂律分布的小世界网络。Lu 等^[22]对城市公交网络进行综述研究,构建了基于复杂网络的城市公交网络整体分析框架。Xu 等^[23]研究了网络拓扑结构与客流量、航行距离和单程费用之间的关系,并初步探讨了传统轴辐射

网络结构与点对点网络结构之间的关系。于海宁等^[24]列举了诸多将交通网络抽象为复杂网络的方法,对交通网络的主要特征参数进行了讨论。莫辉辉等^[25]综合分析复杂网络理论在航空、轨道交通(地铁和铁路)、城市交通(公交和道路)中的应用情况,提出未来交通运输网络复杂性研究的主要内容。刘铭等^[26]分析和研究了城市交通复杂网络的特性,对解决城市交通相关问题和合理规划城市布局具有十分重要的实际意义。徐凤等^[27]从交通运输网络的拓扑性质研究、交通运输网络的可靠性与结构优化研究两个板块,对铁路网络、航空网络和城市轨道交通网络三种网络在国内外的主要研究成果与进展进行了梳理与总结,为综合了解交通运输网络领域的研究提供了较为全面的视角。李英等^[28]对上海的公共汽车交通网络进行复杂性分析,在指标统计的基础上,测试网络在随机失效和有选择性攻击的情况下的抗毁性。金凤君等^[29]总结了20世纪中国铁路的空间拓展规律。

总体而言,针对关键交通网络全局结构的研究已取得一定成果,结果表明交通网络具有小世界特性,且地理网具有度指数分布特征,服务网具有度幂律分布特征,已有研究有效扩展了对复杂交通网络全局拓扑结构的认知。

1.2.2 科研合作网络研究

科研合作即跨专业、跨地域和跨组织的众多科研主体(个体或团队)致力于实现同一科研目标或任务的协作活动^[30]。复杂网络已广泛运用于科研主体相互作用网络的结构建模和行为分析中。将个体科学家视为节点,将科学家间的论文合著关系视为边,基于复杂网络构建科学家合作网络模型并研究其结构特征,成为目前理解科学家间合作机制的重要手段和研究热点。

国外学者 Newman^[31-33]系统比较了生物医药、物理和计算机三个领域的科学家合作网络,揭示了网络的小直径和高聚类特征,认为其呈现小世界特征,且度分布具有幂律特征。Barabási 等^[34]考察了数学和神经科学领域的科学家合作网络的度分布、平均距离和集聚系数随时间变化的规律,发现网络度分布呈无标度特性,网络演化由优先连接机制控制。Kretschmer^[35]的研究证明了高产科学家在合作网络中的分布与所处网络子集的规模正相关。Yasmin 等^[36]构建了包括众多著名学者的合作网络,基于集聚特征划分了学者合作类型。Almendral 等^[37]分析了欧洲框架内的机构间合作网络,发现了加速增长的无标度现象,表明新合作不断得到鼓励。Newman 等^[38-39]对圣塔菲研究所的科学家论文合著网络进行了模块结构划分,发现模块内具有相同或相似的研究主题;对物理学研究人员的论文合著网络模块进行划分,得到600多个模块,其中4个大的模块涵盖77%的网络节点,并反映了天体物理、高能物理、凝聚态物理等物理

学子领域。Shibata 等^[40-41]用频繁出现的关键词表示模块主题,监测了能源、光学、再生医学等多个领域引文网络的时变模块社团结构,最终总结了某学科领域的知识结构和新兴子领域监测的模块结构方法。

国内学者刘杰等^[42]研究发现了《物理学报》和 *Chinese Physics* 中混沌科学论文的作者合作网络的无尺度特性。付允等^[43]研究了《科研管理》2004—2008 年作者合作网络的小团体、集聚程度和中心性特征。王贤文等^[44]分析了中国 357 家主要科研机构的论文合作网络,发现了少数高水平科研机构在整个网络的显著中心效应,地域和学科相近是影响科研机构论文合作的两大因素。张利华等^[45]以《管理评论》2004—2008 年作者合作关系为样本,发现了我国管理科学合作网络呈无标度特征。谢彩霞^[46]以 1990—2004 年 SCI 数据库收录的国际纳米科技论文为数据源,对该领域科学家个人、国家地区以及学科领域之间的科学合作网络特征进行了系统研究。闫相斌等^[47]研究发现我国管理科学领域的机构学术合作网络的小世界和无标度特性。张鹏等^[48]和冯祝斌等^[49]分别发现经济物理学科学家合著网络和我国图书情报学研究机构合作网络的模块地域性特点。陈伟等^[50]分析我国“985”高校间合著和引文网络的模块特征,结果均显示模块内部科研合著关系对科研创新传播的影响显著。杨洪勇等^[51]将大量反复出现的小规模完全子图作为网络模体,通过分析模体的涌现,来研究模体嵌入到科研合作网络中所表现出的复杂网络特性。缪莉莉等^[52]将网络中频繁出现的少数(3~7)科研个体组成的多样化子图定义为科研合作模体,基于模体搜索算法和评判标准辨析了若干学科领域大型科学家合作网络的基元特征,包括子图(模体)形式、子图分布和子图组合特征,表明不同领域科学家合作网络的(反)模体的共性特征。

上述研究针对数学、物理、生物和社会科学等不同学科领域的科学家合作网络,揭示了相应网络的小世界和无标度特性,网络全局度分布、平均距离和集聚系数随时间变化的规律,以及个体科学家的中心性特征等。也有学者就科学家合作网络的局部结构——模块和模体结构特性与形成机理进行研究,有效拓展了对科学家合作机制的认知。

1.2.3 应急组织网络研究

应急响应和处置越来越依赖于组织间的合作响应^[53-55]。协调与合作是多个个体为实现同一目标而采取的信息和资源交换手段^[56]。合作网络已广泛应用于应急管理中^[57]。Yanay 等^[58]提出个体信息沟通和协作可以极大地提高应急救援团队的效能,保证应急活动的及时有序,分析表明团队包含多层次和多样性的个体,协调和合作产生于不同层次以及同层次的个体之间。Kapucu^[59-60]基

于“9·11”事件构建的应急组织网络,讨论如何界定关键行动者,分析了实际和计划网络的区别,并应用社会网络中心性指标评价了网络组织中的个体位置和能力特征;从组织间网络和复杂适应系统的视角评测了 FRP、NRP 和 NRF 的组织网络结构异同及其对组织功能和关系的影响。Abbasi^[61] 分析了应急过程中组织间关系的变迁,讨论了组织位置和角色与网络动态变化的关系。Moore 等^[62] 应用社会网络分析研究了莫桑比克洪水救援中 65 个非政府组织的合作网络结构,研究表明具有高中心性指标的组织具有较强的协调能力,并且其援救收益也较高。Hossain 等^[63-64] 探讨了极端事件中的应急组织关系,主要结论为个体组织协调能力与其所处的网络位置和连通性正相关。DeAnne^[65] 等分析了卡特里娜飓风中社会网络的角色和作用,研究发现稠密式网络(特征为网络由众多个体之间的稠密连接组成)和分散式网络(特征为网络通过个体熟人间的弱连接形成)均有助于灾害中的物资调拨、信息沟通和情感支持。

国内学者薛澜^[66] 提出的关于应急管理系统变迁的阶段分析,把中国应急管理视为一个由政府和其他各类社会组织构成的应对突发事件的整合网络,是一个包含法律法规、体制机构、机制与规则、能力与技术、环境与文化的系统。应急组织网络化合作是一个抽象概念,行政命令关系的强弱和类型决定了个体组织在应急中的位置和作用。杜军等^[67-68] 辨析了珠三角城市群的应急组织,从主体结构、组织结构和权力运行三个维度探索应急组织构建的新范式;构建了应急网络组织治理包含的混合层、激励层、协商层、交易层、规约层、技术层、自治层在内的七层次协调机制。韩传峰团队^[69-70] 应用社会网络分析方法(Social Network Analysis, SNA),研究了 2008 年桂林冰雪灾害期间跨组织合作网络结构的演化机理,剖析了 2008 年汶川地震应急组织系统的命令传递、信息沟通和资源流动网络的交互关系。马奔等^[71] 运用社会网络分析方法,从结构特征和管理模式两个维度,研究了天津港“8·12”事故应急组织网络的协同应对绩效。平健等^[72] 依据汶川地震的实际救援数据,借助 Netlogo 平台对政府应急管理组织的微观合作关系进行仿真,得出了政府应急组织合作网络的演化趋势。刘亮等^[73-75] 构建了国家应急组织合作网络,基于网络中心性和复杂网络模体方法探讨了个体组织中心性和网络基本结构特征。

总体而言,应急组织网络研究多专注于典型事件应急社会网络结构特征,网络位置对外部资源获取的作用,以及网络中关键应急个体识别等。随着跨组织研究对象从二元关系到组织集合,再到组织网络的发展,组织合作网络研究不仅关注其整体结构特征,而且逐渐聚焦于微观交互关系。

1.2.4 项目群组织网络研究

组织间网络关系结构是理解组织行为的根本途径,也是决定组织功效的关

键因素^[76]。研究者借鉴组织网络思想,将目标多元的工程项目组织合作系统视为一个复杂的社会网络,进而基于社会网络方法(SNA)探讨其关系结构。国外学者 Pryke^[77-78]将项目组织内部关系网络分为信息网络、合同网络和激励网络,指出 SNA 提供了一种新的项目联合管理量化模型和方法。Chinowsky 等^[79-80]从领导、学习和发展等维度分析项目网络组织关系,认为组织网络可以通过学习创新和环境创建达到更高的绩效水平。Loosemore^[81]应用 SNA 研究了英国建筑业在危机条件下,建设项目中个体沟通关系网络。Liaoquat^[82]利用文本挖掘技术收集了两家施工企业内部涉及协调的个人电子邮件往来数据,借助 SNA 对其沟通网络进行定量分析,得出中心度、中间度和个体声望是影响协调关系最显著的指标。Park 等^[83]收集韩国建筑企业组织合作参与海外建设项目的 389 个案例,基于 SNA 研究组织合作模式及对项目表现的影响,探讨了项目在高风险条件下合作网络的演化趋势。近期,Pryke 等^[84]论述了社会网络理论和 SNA 作为探索建筑项目管理中重大问题的概念和方法论视角的有用性。Lee 等^[85]定性分析了 1998—2017 年期间发表的 65 篇论文,确定 9 个复杂项目管理知识领域的 38 个 SNA 指标和概念,并描述了 SNA 的未来研究方向和潜在应用领域。

国内学者丁荣贵等^[86]基于 SNA 构建项目治理的社会网络模型,探讨网络嵌入方式、节点位置、中心势、联合性等在项目治理中的意义。乐云等^[87-88]分析了所构建的建设项目组织社会网络模型中的网络密度、中心度、接近中心度、中间度、位置和角色,表明业主和政府在网络中的中心地位。通过密度和中心度指标观测重大基础设施类 PPP 项目利益相关方的关系网络的动态变化特征。李永奎等^[89-91]建立了复杂项目组织社会网络模型,研究组织社会网络和组织总控的关系,利用中心性和中心势将权力进行衡量和比较,并以世博会工程建设项目组织为实证分析对象。张合军等^[92]按照业务和监管关系建立工程项目参与组织的社会网络,找出了社会网络中影响项目绩效的关键组织和个体。刘兴智等^[93]基于社会网络方法对项目治理关系的风险进行研究,引用不同方法度量网络可靠性,讨论利益相关方在不同网络结构特性下采取的不同响应策略。孙华等^[94-95]采用结构相似性聚类方法,对项目利益相关者在网络中的角色进行划分,并通过实例证明网络结构对角色划分的影响及其在角色分析中的优势。杨婧等^[96]以广州—珠海城际轨道交通工程项目为例,构建了该项目的相互作用网络,并对其组织节点面临随机失效和故意攻击等情况进行风险分析。成于思等^[97]在项目工作流分解的基础之上,提取组织单元关系,分析关系网络的中心性和结构洞指标,总结出重要的组织单位及角色。王雪青等^[98]利用社会网络分析的方法探究了承包商在社会网络中的地位及与其他相关方的关系。马恩涛等^[99]利用中心性指标对 PPP 模式下各项目参与方在关系网络中的权力和地位

进行量化。李清等^[100]探讨了某大型水务企业项目群内,业主与八大承包商的组织关系网络。杨琳^[101]借助 SNA 构建复杂工程项目组织结构网络模型并分析其特性,找到项目组织关键指标的量化途径。刘亮等^[102-104]基于复杂全局参数和社会网络中心性指标,探讨了中国国家优质工程项目群承包商组织网络的宏观尺度结构参数,如度、平均路径和集聚系数的变化趋势,以及工程项目群承包商组织网络中个体组织的中心性特征,发现该网络的小世界和无尺度特性。同时给出了基于复杂网络脆弱性理论的承包商整体网络脆弱性分析方法。

上述关于宏观尺度和个体尺度上的工程项目群组织网络结构和演化规律分析成果,揭示了组织网络的无标度和小世界等全局特征,并基于个体中心性参数识别,分析了个体组织在网络中的位置及对组织绩效的影响,但对组织网络局域关系结构和相应角色研究的关注不够。此外,由于时间限制和样本问题,现有组织网络研究大多仍针对某时刻截取的网络快照或多个时间段数据构成的网络合成快照,较少考虑随时间演化的网络动态信息。

1.2.5 复杂网络模体及应用

在模体定义方面,Milo 等^[105]首先提出了网络模体的概念,定义其为实际网络中出现的可能性比随机网络的期望值要高的一种子图形式,进而提出一种衡量模体重要性 Z 评分方法。Chen 等^[106]定义网络模体为重复出现的、独特的子图。重复出现指其在真实网络中出现的次数不少于 t_f ;独特指其在真实网络中出现的次数至少比它在 n 个随机网络的中出现的次数 t_u 要多,其中 t_f 、 t_u 和 n 是给定参数。Schreiber 等^[107]基于子图间重叠的三种情况提出了确定子图出现次数的三种标示,即 F1、F2 和 F3,分别对应顶点与边可以任意重叠,顶点可以重叠而边不重叠,以及顶点与边均不重叠三种情况,并提出一个通用的算法框架 FPF 计算三种标示下的子图频次。Huang 和 Cheng 等^[108-110]提出了桥模体和砖模体概念,桥模体是只由弱连接构成,并且与其他模体既不交互又不重叠的模体;砖模体是只由强连接构成,并且在全拓扑结构中起重要作用的模体。相应算法将任意两个节点间链接的超几何系数定义为两个节点链接的权重值,依据此权重值判断链接的强弱,将所有链接分为强链接和弱链接两种,然后依据其 Z 值和 SP 值识别出桥模体和砖模体。Berg 等^[111]认为若生物网络进化是一个随机过程,网络模体就不一定由同构的子图构成,因此提出了概率网络模体的概念,定义其为一组相似而不一定同构的子图,由概率矩阵表示;同时,建立了一个概率模体出现次数的统计模型,从该模型得到得分函数,并根据该得分函数计算模体的统计意义。

在模体算法和模型方面,Wernicke 等^[112]提出了利用 ESU 算法进行模体检