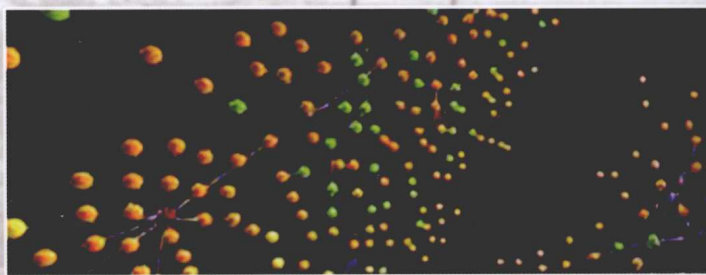
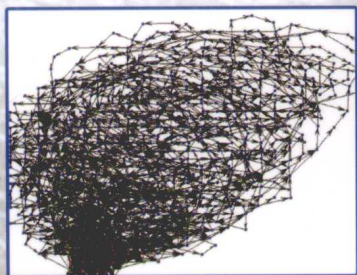



城市交通系统 复杂性

——复杂网络方法及其应用

吴建军 高自友 著
孙会君 赵 晖



 科学出版社
www.sciencep.com

城市交通系统复杂性

——复杂网络方法及其应用

吴建军 高自友 孙会君 赵 晖 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍城市交通系统复杂性和复杂网络理论的基础上,通过融合城市交通系统的一些典型特点,系统地阐述和研究了城市交通网络结构与功能之间的相互关系,提出了若干一般运输网络上的演化模型,从理论到实证建立了面向城市交通系统的复杂网络理论与方法,为研究城市交通系统复杂性提供了一个新的研究方法与视角。本书相关研究内容可为工程技术人员进行网络规划与设计提供理论参考。

本书可作为高等院校交通运输工程及相关专业的研究生教材和高年级本科生选修教材,也可供从事城市交通网络规划与设计及相关研究的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市交通系统复杂性:复杂网络方法及其应用/吴建军等著. —北京:科学出版社,2010.6

ISBN 978-7-03-027494-6

I. ①城… II. ①吴… III. ①市区交通-交通网-研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085510 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:耿 耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张:17 插页:4

印数:1—1 500 字数:324 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131. 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229 010-64034315; 13501151303

前 言

众所周知,城市交通系统是一切城市活动的载体,是整个城市系统赖以存在和发挥效能的物质基础。如何更好地改善这个系统的性能,为更多的出行者提供更好的服务,是国内外交通学者与专家一直探索的目标。城市交通系统本身是由道路子系统(含地铁和城铁)、流量子系统以及管理子系统组成的一个复杂巨系统,由于系统中存在出行者的决策博弈行为,从而使得城市交通系统的运行机理极其复杂,具体表现为:①人-车流以及道路、交叉口、枢纽等交通工程及控制设施众多,且各组分之间联系紧密。②系统中的人-车流具有高度智能性,能够对周围环境变化作出快速反应,具有明显的自组织、自适应和自驱动等能力。③网络中运动的人-车流之间存在强烈的非线性相互作用。④城市交通系统具有强的动态性和随机性,处于不断地发展变化之中。⑤系统的高度开放性又进一步加深了城市交通系统的复杂性。许多学者应用复杂系统的分析方法对城市交通系统复杂性进行了研究,如分形、突变、混沌以及耗散结构理论等。但是,随着城市用地布局的调整、居民出行距离的增加和出行行为的改变,城市交通系统运行中的不确定因素越来越多,城市结构与功能越来越复杂,新情况、新问题不断出现。其中一个不容忽视的重要问题是:城市交通网络上出行者的自主选择(出行者博弈)行为与网络结构、交通设施与管理控制措施等变化之间的相互影响关系是怎样的?

由于许多系统及其构成元素之间的相互作用都可以用网络来描述,实体的网络遍布当今几乎所有的社会经济活动,它们形式上可能是交通网络、通信网络、能源电气输送网络等,深入开展网络科学的研究具有重要的理论与现实意义。自从1998和1999年在*Nature*和*Science*上刊登了小世界效应与无标度特性的科学发现以来,复杂网络学科的迅速兴起掀起了对现实世界普遍特征和规律认识的研究热潮,而且随着学科之间的相互交叉和融合趋势不断加强,也促进了对复杂网络共有特征和性质的揭示,提高了人们对现实世界的科学认识,因此它是

当前最有希望用来认识“复杂系统之所以复杂”的有力工具。作为对复杂系统非常一般的抽象和描述方式,复杂网络突出强调系统结构的拓扑特征,是大量复杂系统的复杂性分析的拓扑基础,因此对它的研究被认为有助于理解复杂系统的复杂性来源及其复杂程度等重要问题。同时,对它的研究揭示并解释了真实网络的统计特征,而且研究结果可以用来指导和解决大量科学的和工程的实际问题。更为重要的是,复杂网络的研究有力地结合了图论、统计、控制论、计算机网络、社会学、经济学等许多过去被条块分割的不同领域,找出了隐含在这些不同学科后面的共同特性,从而提供了多学科、跨领域的科研合作平台,对它的研究结果反过来也推动了上述学科自身的进步。随着研究的深入,目前人们对于复杂网络的探讨已经渗透到包括社会学、生物学、物理学、经济学、计算机机科学以及交通运输等领域中。特别地,2009年7月24日国际顶级杂志 *Science* 刊登了专题为 *Complex Systems and Networks* (《复杂系统与网络》) 专辑,包括复杂网络创始人之一 Barabási 教授在内的国际著名复杂系统与复杂网络专家撰写的相关专题。这足以见得复杂网络这个方向在国际前沿领域研究中的重要性。正是由于国内外学者对复杂网络研究的迅猛发展,才促进了新型学科——网络科学的诞生。

随着复杂网络理论研究的快速发展,它已成为复杂性科学研究的一个重要分支,并为我们研究复杂巨系统的特性提供了一个新的研究方法和视角。城市交通网络是一个典型的点边构成的网络,它由道路物理网络与交通需求网络的结合而形成,其中道路(含城铁、地铁等)可以抽象为连线,道路交叉口抽象为节点,大量的点和边组成了城市交通网络构架。同时,城市交通网络又是集社会网络和技术网络特性于一体的混合型网络,它在简单的貌似一般网络的平面格子上背负着复杂网络相关统计动力学特性,而且城市交通网络结构演化对出行者流量分布与动力学过程等复杂特性具有潜在的巨大影响,因此完全可以用复杂网络的思想对城市交通系统复杂性进行研究。尽管许多文献对交通出行者出行行为以及交通网络拓扑结构复杂性等方面进行了相关的研究,但对城市交通网络结构、基础设施以及管理控制等与出行者博弈行为之间的相互作用研究甚少,而且这些研究并没有考虑真实交通网络中的三大基本特性,即存在路段阻抗函数及交通流的不可去除性、个

体出行者的自主性和选择性以及系统最优的目标与用户均衡之间的协调性。本书正是基于复杂网络研究理论与方法,通过融合城市交通系统的一些典型特点,在网络结构对出行者博弈行为影响方面进行了初步探讨和相关研究,在一定程度上有助于加深对城市交通网络演化的内在机理和运行规律以及城市交通系统复杂性的认识和理解,进而为充分利用现有交通资源,科学地制定城市交通的发展战略规划等提供先进的理论基础。

本书的结构如下:第一章讲述了复杂系统、复杂性科学以及复杂网络之间的关系,并着重介绍了复杂网络的发展历程。第二章介绍了复杂网络的定义、分类及主要统计特征,并对用户均衡模型、用户最优模型以及动态最优模型进行了简介;第三章对城市交通网络复杂性进行了概述,重点讨论了复杂网络上的流量分布特征。接下来的内容在形式上可以分为上下两篇,上篇由第四章到第六章组成,着重研究了一般输运网络上的演化机制与建模,包括一般网络的加权模型、输运网络Hub节点的隐含特征和具有模块结构的输运网络传播动力学。而下篇由第七章到第十一章组成,结合复杂网络与出行者行为科学理论,详细讨论了城市交通网络拓扑结构与出行者行为决策之间的关系,包括基于空间价格的一般输运网络演化特性、城市交通网络承载力、城市交通网络级联失效模型、不同拓扑结构上的城市交通网络用户均衡效率损失、有限资源条件下的能力分配模型及阻塞缓解策略等。最后对北京市公交网络、中国高速公路网络以及山东省高速公路客运网络拓扑特性及其鲁棒性、抗攻击性进行了相关实证分析。

本书部分内容取自于当前较为成熟以及最新的研究成果,作者对这些成果进行了系统总结,更多的内容主要取自于作者所在研究团队近年来的共同研究成果。在撰写本书时,作者亦查阅了大量的国内外相关文献,力求做到内容新颖,取材丰富。尽管本书在网络结构对出行者博弈行为的影响方面做了部分理论研究工作,但就解决实际交通问题还存在相当差距。此外,由于城市交通系统的结构、状态、特性、行为和功能等都是随着时间的推移而不断发生演变,从理论上深入研究交通出行者博弈行为对交通网络结构演化的反作用,探索城市交通网络结构的演化模型还有待广大研究工作者进行深入研究。

感谢北京航空航天大学的黄海军教授课题组、中国科技大学的汪

秉宏教授和吴清松教授课题组、上海大学戴世强教授课题组以及国家“973”项目“大城市交通拥堵瓶颈的基础科学问题研究”课题组全体成员对本书在学术上的指导和帮助。感谢北京交通大学李克平教授、贾斌副教授、赵小梅副教授、李彦来博士、郑建风博士、李新刚博士、崔迪博士、龙建成博士、李树彬博士、徐尚义硕士等在学术上的有益探讨和支持。

本书有关科研工作的完成得益于国家“973”项目(编号:2006CB705500)、国家自然科学基金重点项目(编号:70631001)、国家自然科学基金面上项目(编号:70801005, 70871009, 70901007)、教育部长江学者与创新团队发展计划(编号:IRT0605)、教育部新世纪优秀人才支持计划(编号:NCET-09-0208)、教育部全国优秀博士论文专项资金(编号:200763)、教育部霍英东青年教师基金(编号:111083)、北京市自然科学基金(编号:8102029)以及北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题(编号:RCS2008ZQ001, RCS2008ZZ001)的资助。此外,本书的出版也得到了北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室以及北京交通大学交通运输学院的大力支持,谨在此一并致谢。

由于作者学识有限及经验不足,有不少相关工作尚未反映在本书中,而且书中难免会有认识不足或疏漏之处,恳请相关专家、学者和同仁不吝指正。

作 者

2010年4月于北京交通大学

轨道交通控制与安全国家重点实验室

目 录

前言

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 复杂系统、复杂性科学与复杂网络..... | 1 |
| 1.1.1 复杂系统 | 1 |
| 1.1.2 复杂性科学 | 1 |
| 1.1.3 复杂网络 | 2 |
| 1.2 复杂网络的发展历程及其特征 | 3 |
| 1.2.1 复杂网络的发展历程 | 3 |
| 1.2.2 复杂加权网络 | 6 |
| 1.2.3 复杂网络的基本特征 | 7 |
| 1.3 研究复杂网络的原因及其研究内容 | 8 |
| 1.3.1 研究复杂网络的原因 | 8 |
| 1.3.2 复杂网络的研究内容 | 9 |
| 1.4 现实中的复杂网络 | 9 |
| 1.4.1 社会网络 | 9 |
| 1.4.2 技术网络..... | 12 |
| 1.4.3 生物网络..... | 13 |
| 1.4.4 生态网络..... | 14 |
| 1.4.5 输运网络..... | 15 |
| 1.4.6 其他 | 15 |
| 1.5 小结..... | 17 |
| 第 2 章 基础理论 | 18 |
| 2.1 图的定义及相关概念..... | 19 |
| 2.1.1 图的定义..... | 19 |
| 2.1.2 节点的度数 | 19 |
| 2.1.3 连通性 | 19 |
| 2.1.4 最大连通分支 | 20 |
| 2.1.5 树、支撑树 | 20 |
| 2.1.6 图的矩阵表示 | 20 |
| 2.1.7 嵌入问题与平面图 | 21 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 2.1.8 染色问题····· | 21 |
| 2.2 复杂网络的定义、分类及其统计特征····· | 22 |
| 2.2.1 复杂网络的定义····· | 22 |
| 2.2.2 复杂网络的分类····· | 22 |
| 2.2.3 复杂网络的统计特征····· | 24 |
| 2.3 典型的网络拓扑结构及其演化模型····· | 31 |
| 2.3.1 规则网络····· | 31 |
| 2.3.2 随机网络····· | 31 |
| 2.3.3 小世界网络····· | 32 |
| 2.3.4 无标度网络····· | 33 |
| 2.4 用户均衡配流模型····· | 36 |
| 2.4.1 均衡的定义····· | 36 |
| 2.4.2 用户均衡配流模型····· | 37 |
| 2.5 系统最优模型····· | 40 |
| 2.6 动态用户最优模型····· | 40 |
| 2.7 小结····· | 43 |
| 第3章 城市交通系统复杂性与复杂网络 ····· | 44 |
| 3.1 城市交通网络的基本特性····· | 44 |
| 3.2 城市交通网络复杂性研究的重要性····· | 45 |
| 3.3 城市交通复杂性与复杂网络····· | 48 |
| 3.4 复杂网络上的动力学过程····· | 49 |
| 3.4.1 网络上的交通流····· | 49 |
| 3.4.2 网络上的病毒传播····· | 50 |
| 3.4.3 级联失效····· | 51 |
| 3.5 城市交通网络复杂性的研究现状····· | 53 |
| 3.5.1 城市交通网络拓扑结构复杂性····· | 54 |
| 3.5.2 道路交通流的复杂性····· | 61 |
| 3.5.3 网络交通流的复杂性····· | 67 |
| 3.6 复杂网络上的流量分布特性····· | 69 |
| 3.6.1 流量分布特性····· | 69 |
| 3.6.2 梯度网络上的拥堵特性····· | 74 |
| 3.6.3 一般网络上交通流的演化····· | 79 |
| 3.7 小结····· | 84 |
| 第4章 一般输运网络的加权演化模型 ····· | 85 |
| 4.1 网络演化建模研究概述····· | 85 |

| | | |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 4.2 | 考虑局部事件的加权网络 | 86 |
| 4.3 | 合并机制演化加权网络 | 92 |
| 4.3.1 | 考虑节点合并和再生机制的加权网络演化模型 | 92 |
| 4.3.2 | 考虑相邻节点合并和再生机制的加权网络演化模型 | 97 |
| 4.4 | 考虑局部演化的交通驱动加权网络模型 | 100 |
| 4.4.1 | 局部演化的交通驱动加权网络模型 | 100 |
| 4.4.2 | 权重局部再分配的加权网络模型 | 105 |
| 4.5 | 小结 | 109 |
| 第 5 章 | 输运网络 Hub 节点的隐含特征 | 110 |
| 5.1 | 网络 Hub 节点隐含特征概述 | 110 |
| 5.2 | 相关定义及网络选取 | 111 |
| 5.3 | Hub 节点的统计特征 | 112 |
| 5.3.1 | Hub 节点的度分布 | 112 |
| 5.3.2 | Hub 节点的聚类特性 | 114 |
| 5.3.3 | Hub 节点的相配性特征 | 116 |
| 5.4 | 小结 | 118 |
| 第 6 章 | 具有模块结构输运网络非对称演化与传播动力学模型 | 120 |
| 6.1 | 具有模块结构输运网络非对称演化模型 | 120 |
| 6.1.1 | 具有模块结构的复杂网络 | 120 |
| 6.1.2 | 非对称演化的群落结构网络模型 | 123 |
| 6.2 | 输运网络上的传播动力学概述 | 129 |
| 6.3 | 具有模块结构的小世界网络 | 130 |
| 6.4 | 具有模块结构的小世界网络上的 SIS 模型 | 133 |
| 6.5 | 具有模块结构的小世界网络上的 SIR 模型 | 138 |
| 6.6 | 小结 | 141 |
| 第 7 章 | 基于空间价格的物流网络演化特性 | 143 |
| 7.1 | 空间价格均衡简介 | 143 |
| 7.2 | 空间价格对物流网络的影响机制 | 144 |
| 7.3 | 模拟结果分析 | 145 |
| 7.3.1 | 四种典型物流网络结构下的价格演化特点 | 145 |
| 7.3.2 | 具有群落结构特性的物流网络价格演化特点 | 148 |
| 7.4 | 小结 | 149 |
| 第 8 章 | 城市交通网络的承载能力及最优拓扑结构研究 | 150 |
| 8.1 | 不同网络拓扑结构下的城市交通网络承载力研究 | 151 |
| 8.1.1 | 城市交通网络拓扑的构造及参数定义 | 151 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 8.1.2 | 拥堵因子的定义 | 152 |
| 8.1.3 | 结果分析 | 152 |
| 8.2 | 弹性需求条件下网络承载能力分析 | 156 |
| 8.2.1 | 弹性需求条件下的网络均衡配流模型 | 157 |
| 8.2.2 | 数值模拟 | 158 |
| 8.3 | 最优城市交通网络的拓扑结构及其特征参量 | 161 |
| 8.3.1 | 城市交通网络拓扑结构与交通拥堵 | 161 |
| 8.3.2 | 最优城市交通网络拓扑 | 162 |
| 8.4 | 小结 | 165 |
| 第9章 | 城市交通网络上的用户均衡效率损失及拥堵缓解策略研究 | 166 |
| 9.1 | 用户均衡效率损失 | 166 |
| 9.2 | 不同网络拓扑上的用户均衡效率损失 | 167 |
| 9.2.1 | 城市交通网络上的个体选择行为 | 167 |
| 9.2.2 | 用户均衡与系统最优 | 168 |
| 9.2.3 | 不同网络拓扑上用户均衡效率损失 | 169 |
| 9.3 | 基于网络的交通瓶颈识别以及拥堵缓解策略 | 174 |
| 9.3.1 | 交通瓶颈及其产生原因 | 174 |
| 9.3.2 | 参数设定 | 176 |
| 9.3.3 | 基于网络的交通瓶颈识别 | 176 |
| 9.3.4 | 缓解交通拥堵策略 | 178 |
| 9.4 | 小结 | 181 |
| 第10章 | 城市交通网络上的级联失效问题研究 | 183 |
| 10.1 | 不同移除方式和交通网络拓扑条件下的级联失效模型 | 184 |
| 10.1.1 | 网络构建及参数设定 | 185 |
| 10.1.2 | 交通流量加载 | 185 |
| 10.1.3 | 模拟分析与讨论 | 186 |
| 10.2 | 不同城市交通网络拓扑上的边-点-边级联失效 | 189 |
| 10.2.1 | 拥堵程度 | 189 |
| 10.2.2 | 最小支撑聚类 | 190 |
| 10.2.3 | 度量参量 | 190 |
| 10.2.4 | 模拟分析与讨论 | 190 |
| 10.3 | 点能力动态更新的城市交通网络级联失效模型 | 193 |
| 10.3.1 | 模型建立 | 193 |
| 10.3.2 | 模拟分析与讨论 | 193 |
| 10.4 | 一般输运网络级联失效的预防策略 | 197 |

| | | |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 10.4.1 | 基于节点度的导航策略 | 197 |
| 10.4.2 | 基于节点度的导航策略下的级联失效 | 198 |
| 10.4.3 | 一种基于节点度的新导航策略 | 201 |
| 10.5 | 具有群落结构特征的复杂网络上级联失效行为 | 205 |
| 10.6 | 小结 | 207 |
| 第 11 章 | 有限资源条件下基于路段重要性的能力分配策略 | 209 |
| 11.1 | 基于介数的能力分配模型及其应用 | 210 |
| 11.1.1 | 基于介数的能力分配模型 | 210 |
| 11.1.2 | 数例分析与实际应用 | 211 |
| 11.2 | 有限资源下基于路段重要性的能力分配模型 | 215 |
| 11.2.1 | 路段重要性度量方法 | 216 |
| 11.2.2 | 有限资源条件下的能力分配模型 | 218 |
| 11.3 | 小结 | 221 |
| 第 12 章 | 两种典型的城市交通网络拓扑特性及其鲁棒性研究 | 222 |
| 12.1 | 城市公交网络的拓扑特性及其鲁棒性 | 223 |
| 12.1.1 | 基于线路的公交网络无标度特性 | 224 |
| 12.1.2 | 基于停靠站点的公交网络小世界特性 | 227 |
| 12.1.3 | 北京市公交网络的有效性及鲁棒性 | 229 |
| 12.2 | 中国高速公路网的拓扑特性及其鲁棒性 | 232 |
| 12.2.1 | 中国高速公路网络拓扑特性 | 232 |
| 12.2.2 | 中国高速公路网络统计特征量及其鲁棒性 | 234 |
| 12.3 | 山东省高速客运网络拓扑特性 | 235 |
| 12.3.1 | 高速客运网络拓扑构造 | 235 |
| 12.3.2 | 结果分析 | 235 |
| 12.4 | 小结 | 238 |
| 参考文献 | | 239 |

第 1 章 绪 论

1.1 复杂系统、复杂性科学与复杂网络

1.1.1 复杂系统

复杂系统的研究正在逐渐打破各学科之间壁垒,成为一门大范围跨学科的新兴领域。它几乎存在于自然科学与社会科学的各个领域,相关研究也被认为是 21 世纪科学发展的前沿和热点问题(戴汝为,1998)。复杂系统是与简单系统相对比而言的,一般可指运行在“混沌边缘”的系统,也指介于有序和无序之间的系统的复杂特征结构。有时为了简单起见,可以表述为具有某些特性的系统,这些系统某一方面的特性超出各组成部分特性的叠加(Ziemelis, 2001)。

复杂系统有许多特征,不同学者对其特征做了不同角度的概括。成思危教授简明扼要地归纳为以下五个方面(成思危,1999):

1) 系统各单元之间的联系广泛而紧密,构成一个网络。每个单元的变化都会受到其他单元变化的影响,并会引起其他单元的变化。

2) 系统具有多层次、多功能的结构,每一层次均成为构筑上一层次的单元,同时也有助于系统的某一功能的实现。

3) 系统在发展过程中能够不断地学习并对其层次结构与功能结构进行重组及完善。

4) 系统是开放的,它与环境有密切的联系,能与环境相互作用,并能不断地向更好地适应环境的方向发展变化。

5) 系统是动态的,它不断处于发展变化中,而且系统本身对未来的发展变化有一定的预测能力。换句话说,系统具有某种程度的智能和自组织能力。

1.1.2 复杂性科学

研究复杂系统的学科被称为复杂性科学。复杂性科学不仅是系统科学的前沿,而且也是整个大科学的前沿,被誉为 21 世纪的科学。因为它不仅仅从科学技术上指明了 21 世纪的发展方向,而且它给我们提供了一种崭新的世界观。这门科学是相对于牛顿时代的简单系统而言的,它所探讨的是复杂系统中各组成部分之间相互作用所表现出的特性。复杂性科学主要研究复杂系统与复杂性,尽管它仍处在萌芽和发展阶段,但已引起了科学界的广泛重视。

成思危在《复杂性科学探索》一书写到:复杂性科学是以还原论、经验论及“纯科学”为基础的经典科学,吸收系统论、理性论和人文精神而发展形成,以研究自然、社会的复杂性和复杂系统为核心的新科学。由于构成复杂系统的组分具有某种程度的智能,使系统既有内部的强耦合度和强交互作用,又具备能与环境相互作用并不断地向更好地适应环境的方向发展的自适应能力;既有内在的随机性又有自组织能力,使得系统具有复杂性(成思危,1999)。

复杂性科学研究的前沿阵地是美国新墨西哥的圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)。在那里不同领域的科学家通过对不同学科之间的深入探讨,试图找出各种不同的系统之间的一些共性,并称之为“Complexity”。基本思路是复杂适应性系统理论与基于多主体的计算机仿真与模拟,复杂性的研究内容则是研究复杂系统如何在一定的规则下产生有组织的行为以及系统的进化所突出出来的行为。近年来,SFI的一些科学家如Holland、Arthur、Kauffman等,拓宽了复杂系统的研究内容,把兴趣逐步转移到对经济复杂自适应系统、混沌边缘、人工生命和系统进化的研究(王兴元,2003;霍兰,2001)。圣菲研究所的作用对传统的经济学、社会学、生物学造成了巨大的影响。在欧洲,复杂性的研究则以普利高津的远离平衡态的自组织理论、艾肯的超循环理论、哈肯的协同学理论为代表。尽管这些理论诞生在20世纪六七十年代,至今仍对复杂性的研究产生不可忽视的影响。以钱学森为首的我国学者则在90年代初期提出了开放的复杂巨系统理论,其基本观点是对于自然界和人类社会中的一些极其复杂的事物,从系统学的观点来看,可以用开放复杂巨系统来描述,解决这类问题的方法是从定性到定量综合集成研讨型体系(许国志等,2000;陈禹,2001)。

1.1.3 复杂网络

复杂系统涉及学科门类众多,其中包括生物、社会、经济、环境、生态、工程等多个领域。尽管各专业的科学家使用了很多方法对复杂系统进行了各方面的研究,如混沌理论、神经网络、元胞自动机、多智能体技术等。但到目前为止,还没有形成一个普适的方法。复杂网络则是近些年兴起的一股研究热潮,它是有希望用来解决“复杂系统之所以复杂”的有力工具。作为对复杂系统非常一般的抽象和描述方式,复杂网络突出强调了系统结构的拓扑特征(章忠志,2006)。因此,复杂网络为研究复杂系统提供了一种新的描述方式,对它的研究一方面加深了我们对复杂系统结构的了解;另一方面,复杂网络的研究成果对探索复杂性又具有非常重要的启发和借鉴意义(史定华,2005)。当然也可以从系统科学的角度来研究网络,这也是网络研究的新视角(车宏安等,2004)。可见,利用网络理论对系统进行研究,是系统科学一种新的研究手段(戴汝为,2002)。

近几年复杂网络的研究逐渐受到普遍关注。继著名期刊*Chaos*、*New Journal*

of Physics、Physics D 等出版了复杂网络增刊后,2009年7月24日国际顶级学术杂志 Science 刊登了专题为《复杂系统与网络》(Complex Systems and Networks) 专辑,包括复杂网络创始人之一 Barabási 教授在内的国际著名复杂系统与复杂网络专家做的相关专题,共包括1篇序言,4篇新闻,6篇展望和1篇评述。这足以证明复杂网络这个方向在国际前沿领域研究中的重要性。专辑导言以 Connections 开篇并引用马丁·路德·金的名言——我们被困在无法逃避的相互关系网络中,任何事情,如果直接地影响了一个人,就会间接地影响所有人,表明作为社会的每个人都是网络的一部分,丰富的研究成果显示了科学家正如何在各学科领域间将网络分析推向极限^①。

1.2 复杂网络的发展历程及其特征

1.2.1 复杂网络的发展历程

复杂网络是一种用来描述自然和社会科学以及工程技术中相互关联的理论。自20世纪80年代末起,在人们理解和发现复杂性规律中得到了广泛的应用,成为国际上许多学科最为前沿的研究热点问题之一。作为研究复杂性科学和复杂系统的有力工具,它可以用来揭示复杂系统中的诸多普遍规律,是理解复杂系统“复杂性”非常重要的理论方法。复杂网络理论为研究现实世界复杂性提供了全新的视角,它通过借助图论和统计物理的一些方法,可以用来捕捉并描述系统的演化机制、演化规律(结构)和整体行为(功能),这正是复杂网络研究蓬勃发展的主要原因之一。随着人们对复杂系统研究的广泛深入,从复杂网络角度对现实世界进行研究波及到多个学科和领域。正如 Albert 和 Barabási(2002)在其文章中指出:“自然界中存在的各种复杂系统都可以通过形形色色的网络加以描述,如生物网络、社会网络、计算机网络、神经网络、电力网络以及交通运输网络等。”

网络无处不在,它可以看作是具有一定特征和功能的基本个体的集合,而个体间是相互关联和相互影响的。现实网络系统的复杂性主要体现在三个方面(方锦清等,2004):首先,网络的结构非常复杂,对网络节点间的连接复杂性,至今仍没有很清晰的概念;其次,现实网络是不断演化的,网络节点不断地增加,节点之间的连接在不断地增长,而且连接之间存在着多样性;第三,网络的动力学过程具有复杂性,每个节点本身可以是非线性系统,具有分岔和混沌等非线性动力学行为而且在不停地变化。

复杂网络已经成为研究复杂系统的最为重要、最富挑战性的课题之一。而且

^① <http://www.sciencenet.cn/htmlnews/2009/7/221811.shtml>

其研究已经渗透到各个领域,如社会网络中的科研合作网、性关系网、公司董事网、科研引用网、语言网,技术网络中的计算机网络、信息网络中的万维网,生物网络中的新陈代谢网、神经网络和蛋白质网络,以及输运网络中的电力网络、电话网络、城市交通网络等。而在这些网络的表示中,一个典型的网络是由许多节点与连接两个节点之间的一些边组成的,其中节点用来代表真实系统中不同的个体,而边则用来表示个体间的关系,往往是两个节点之间具有某种特定的关系则连一条边,反之则不连边,有边相连的两个节点在网络中被看作是相邻的。

数学家和物理学家在考虑网络的时候,往往只关心节点之间有没有边相连,至于节点到底在什么位置,边是弯曲还是平直,有没有相交等都是他们不在意的。在这里,我们把网络不依赖于节点的具体位置和边的具体形态就能表现出来的性质叫做网络的拓扑性质,相应的结构叫做网络的拓扑结构。那么,什么样的拓扑结构比较适合用来描述真实的系统呢?两百多年来,对这个问题的研究经历了三个阶段。在最初的一百多年里,科学家们认为真实系统各因素之间的关系可以用一些规则的结构表示,例如二维平面上的欧几里得格网,它看起来像是格子体恤衫上的花纹;又或者最近邻环网,它总是会让你想到一群手牵着手围着篝火跳圆圈舞的姑娘。1736年欧拉对七桥问题的抽象和论证思想开创了数学中的一个分支——图论的研究,这也是最早对网络的研究。到了20世纪50年代末,数学家们想出了一种新的构造网络的方法,在这种方法下,两个节点之间连边与否不再是确定的事情,而是根据一个概率决定,这就是著名的Erdős和Rényi(1960)建立的ER随机网络基本模型。它在接下来的40年里一直被很多科学家认为是描述真实系统最适宜的网络(周涛等,2005)。

在20世纪六七十年代,人们做了许多有趣的小世界实验。小世界效应是复杂网络最有传奇性的性质。简单地说,小世界现象指的是,尽管许多网络具有相当大的规模(节点之多,跨度之远),如果把节点间的距离定义为连接它们最少沿途的边数(相隔的边数),则其任何两个节点之间却存在相对很短的“快捷距离”。美国哈佛大学社会心理学家米尔格兰(Stanley Milgram)在1967年做过一项有趣的实验,据说他从内布拉斯加州(Nebraska)的奥马哈(Omaha)随机选了300人,然后请他们每个人尝试寄一封信给波士顿(Boston)的一位证券业务员。寄信的规则很简单,就是任何收信者只能把信寄给自己熟识的人。可想而知,这些人会直接认识这位业务员的机会极低,所以需要几经转手才有办法送达目的地。问题是平均要转寄几次?直觉告诉我们,从茫茫人海中找到一条相继认识的链索,把最初的寄信人跟目标的业务员连结起来,若非全然不可能,也应该会费尽周折。然而出人意料的是,大约只需六次转寄便完成任务。一般称为“小世界”(small-world)的模式由此诞生。这说明,若将个人作为节点,人的相识关系作为连接,则构成的网络是小世界的。令人惊奇的是,已经发现许多网络具有小世界特性,比如好莱坞演员之间及

同在一部电影中任明星的关系构成的网络中,演员之间间隔平均为 3,细胞中的化学物质及化学反应关系构成的网络中,节点之间的典型间隔为 3。另外,Erdős 和 Rényi 已经证明,经典的随机网络其任何两个节点的典型距离为网络节点数之对数数量级,所以也具有小世界的特点(汪小帆等,2006)。

网络复杂性更有意义的研究是在最近几年,由于计算机数据处理和运算能力的飞速发展,科学家们发现大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络。这样的网络结构中最重要,也是奠基性的工作有两个,它们分别是:①1998 年 Watts 和 Strogatz(1998)在 *Nature* 杂志上发表文章,引入了小世界网络(small-world)模型,以描述从完全规则网络到完全随机网络的转变;②1999 年 Barabási 和 Albert(1999)在 *Science* 上发表文章,指出许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式,即 $P(k) \sim k^{-\lambda}$,其中 k 为点的度(degree), λ 为幂指数一般分布在 2~3 之间。由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络又被称为无标度(scale-free)网络。这两篇文章分别揭示了复杂网络的小世界特征和无标度性质,并建立了相应的演化模型以阐述这些特性产生的内在机理,进而在从物理学到生物学乃至社会学在内的众多学科掀起了研究复杂网络的热潮。这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络(complex networks),对于它们的研究标志着第三阶段的到来。简言之,复杂网络的发展历程可以由图 1.1 表示。

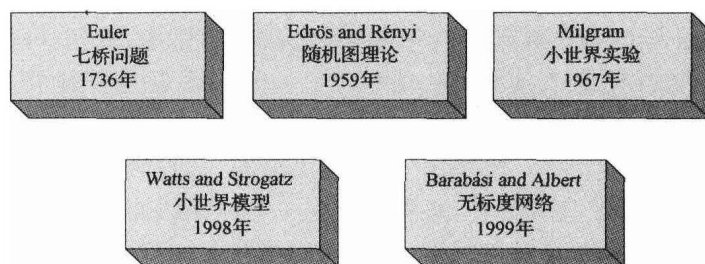


图 1.1 复杂网络发展历程

国内外学者对复杂网络研究的迅猛发展,从而诞生了网络科学。网络科学是专门研究复杂网络的各种网络拓扑性质和动力学特性的定性定量规律,以及网络控制与应用的一门新的交叉科学。探索网络科学及其应用已经成为当前国内外的前沿研究课题之一,具有广泛的应用前景(方锦清,2006)。最近,Barabási 教授正是由于在复杂网络领域的先驱性贡献,而荣获了 2006 年度美国 John von Neumann(约翰冯·纽曼)计算机学会为与计算机相关的杰出科学技术成就而颁发的计算金奖(方锦清和李永,2008)。该奖从 1976 年设立迄今才颁发给 3 位杰出科学家,可见这个奖对于复杂网络的新发现与计算机有多么密切的关系和极端的重要