

本书由武汉纺织大学学术著作出版基金资助出版

复杂社会网络实证与 多层网络建模

江 健 著



科学出版社

000101

复杂社会网络实证与多层网络建模

江健 著

科学出版社

江 健 著

本书以复杂社会网络实证与多层网络建模为研究对象，探讨了复杂社会网络的实证方法与多层网络建模的理论基础。本书首先介绍了复杂社会网络的定义、分类及特征，然后详细阐述了复杂社会网络的实证方法，包括数据采集、网络构建、网络分析等。接着，本书探讨了多层网络建模的理论基础，包括多层网络的定义、分类及特征，以及多层网络建模的方法。最后，本书总结了复杂社会网络实证与多层网络建模的研究成果，并对未来的研究方向进行了展望。

本书的研究从 20 世纪末开始，如今已经取得了许多重要的研究成果。本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

本书的研究成果对于理解复杂社会网络的本质和规律具有重要的意义，也为复杂社会网络的应用提供了理论支持。

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

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

内 容 简 介

社会网络是与人们日常生活联系最为密切的网络之一,不仅其网络拓扑结构复杂,网络上的动力学行为也是让人难以捉摸其规律。特别是近年来,多层复杂网络越来越受到人们关注。网络模型离真实系统越接近,研究遇到的挑战越大。本书选取几种典型的社会网络为例,如城市交通网络、金融网络、社会文化网络,对这些网络的拓扑结构和普适规律进行探讨,分析社会网络随时间演化过程中,拓扑结构特性和其他物理量展现的不同复杂性行为。对于多层复杂网络,我们更关注网络基本模型和网络结构与功能之间的关系,包括网络结构性质在网络层次聚合过程中的演化行为,以及不同网络层次间的相互作用与网络抗毁性之间的关系。

本书可供自然科学和社会科学领域的相关研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂社会网络实证与多层网络建模/江健著. —北京:科学出版社,2017.6

ISBN 978-7-03-053897-0

I. ①复… II. ①江… III. ①计算机网络-网络拓扑结构-研究
IV. ①TP393.022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 143490 号

责任编辑:高 嵘/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年6月第 一 版 印张:18 插页:1

2017年6月第一次印刷 字数:425 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

20世纪90年代以来,通信技术和计算机技术的飞速发展和广泛应用标志着人类社会进入信息时代的高速发展时期。特别是以因特网为代表的信息技术的迅猛发展更使得人类社会迈进了网络社会。从日常出行的交通网络到人际关系社会网络,从生物蛋白质相互作用网络到计算机调度网络,从国际贸易物流网络到各国政治经济关系网络,人们无时无刻不被无形的网络所包围。网络时代的到来一方面给人们的生活和工作带来了极大的便利,提高了人民的生活质量和社会的生产效率,另一方面也给人们带来了网络时代所特有的一些不便和冲击,如网络诈骗、网络上的谣言传播、互联网的大面积瘫痪等。因此,生活在日益网络化时代的我们需要大大加强对各种人工和自然复杂网络的结构和行为的理解和认识。

复杂网络理论的研究从20世纪末开始,如今已经渗透到生命科学、社会学、物理学、管理学、计算机科学等众多不同的领域。它研究的是各种表面上看上去各不相同的复杂系统之间的普适特征和处理它们的普适方法。对于与人们日常生活紧密关联的复杂社会网络,如人际关系网络、社会经济网络、社会政治文化网络等,准确严谨的理论分析方法目前还没有形成体系,处理方法还不够成熟完善,还尚处于探索阶段。因此,目前实证研究对社会网络研究是一种非常重要且行之有效的研究手段。特别是,大数据时代下一些大规模系统的数据库的建立和海量数据的获得,以及近年来高性能计算机的处理数据能力的大幅度提高,为社会网络的实证研究提供了很大的方便。社会网络实证研究一般包括城市公共交通网络、在线朋友关系网络、社会谣言和传染病的实证研究等。正是这些实证研究,通过对真实数据的处理分析,让数据说话,才让人们了解了这些复杂社会网络的统计特征,为构建符合真实社会网络统计性质的网络模型,以及研究社会网络的形成机制和内在机理提供了可能性。在复杂网络科学的研究中,实证分析研究是一种极为重要的研究方法,为网络系统更深层次的研究奠定了重要基础。

如今社会网络通过实证研究已经取得了丰硕的研究成果,但是这些研究成果大部分都是在单一孤立网络的框架下完成的。然而现实世界中大部分的复杂系统之间都是相互联系、相互依存的。例如,城市公共交通网络中的地铁网络和公交车网络的无缝对接,社交网络中多种人际关系类型的叠加出现,电力网和电信网的相互依存,互联网金融网络与实体金融业的相互作用等。因此,用多层网络或者相互依存网络的框架来研究复杂社会网络更能接近真实情况,更能反映复杂社会系统的内在本质。近年来,复杂网络研究的热点逐渐开始从单一网络转向多层网络。目前,多层复杂网络的研究还处于起步阶段,很多基本的概念和模型都还没有统一,存在较多的分歧和混淆,今后无论在理论模型还是在实际应用方面都还存在很大的发展空间。

江健博士的这本著作对股票市场和外汇市场、城市道路网络和社会文化网络做了大量实证研究,还对多层复杂网络的基本概念和基本模型,以及在航空运输系统的应用做了详细介绍。在书中,作者分别对股票市场的非线性特征和价格波动行为、外汇市场的标度行为和法国勒芒城市道路网络的拓扑结构做了分析。此外,作者还构建了合并-分裂网络模型研究社会文化网络的动力学演化行为,并在多层网络的框架下分析了国内航空运输系统的结构演化过程,得到了一些非常有趣和有价值的结果。

该书的作者于2011年在法国勒芒大学取得物理学博士学位,2012年在韩国亚太理论物理研究中心完成博士后研究,一直致力于复杂系统和统计物理领域的研究,在复杂社会网络的实证研究、复杂网络的抗毁性及多层网络的传播动力学方面做出了很好的工作。我相信该书的出版将会丰富复杂社会网络的实证研究,并对多层复杂网络建模的研究起到积极的推动作用。

武汉大学数学与统计学院教授、博士生导师
中国工业与应用数学学会复杂网络与复杂系统专业委员会副主任
陆君安

2017年1月25日

前言

21 世纪的生活在一个网络无处不在的世界中，从早上起床后问候“早上好”的人际关系网开始，到出门前通过互联网查看天气信息，再通过城市交通网络抵达上班地点开始一天的辛苦工作，最后到晚上临睡前通过社交网络道“晚安”。我们每时每刻都在和网络打交道。自然界的万物通过网络相连，但它们是如何相互联系的呢？这个问题恐怕无人能够解释清楚。复杂网络科学的出现就是要将自然界和人类社会中的复杂系统抽象成简单的网络形式，再利用其他学科领域的方法和工具来研究该系统的组织结构和内在机理。

20 世纪末几位年轻的物理学家，D. J. Watts 和 S. H. Strogatz 在 *Nature* 杂志上发表了网络科学的开创性文章《“小世界”网络的群体动力学行为》，以及 A. L. Barabasi 和 R. Albert 在 *Science* 杂志上发表了另一篇巨作《随机网络中标度的涌现》，就此拉开了复杂网络科学研究的序幕。整个研究的热潮迅速渗透到数学、物理学、计算科学、管理科学、系统科学、社会科学、金融经济学等众多科学领域。相关的学术研究文献也如雨后春笋般地涌现在 *Nature*、*Science*、*PNAS*、*Physics Review Letter* 等国际著名期刊上。至 2016 年 6 月，上述两篇奠基之作被 SCI 收录的论文引用分别高达 29 427 次和 25 425 次。

复杂网络科学经过了十几年的飞速发展，已经取得了相当丰硕的成果。从最开始的对各个真实复杂系统的实证研究，到实证研究结果的网络建模分析，从最初的单层、孤立网络的研究，到如今成为关注热点的多层复杂网络的研究，从最初的物理学领域为起点，到如今涵盖几乎所有学科的研究领域，复杂网络科学研究的风潮可谓火爆之极。如今有人议论说复杂网络研究的风头已经过去，基础研究已经接近尾声，在各个学科领域的实际应用又困难重重。事实正好相反，我们现在正被更多新的挑战所激励和吸引。首先，大数据时代的来临，使我们对一些未知的复杂系统用复杂网络的方法来研究有了可能性。利用大数据对未知系统研究的关键一步就是要进行实证方面的研究。通过实证研究才能让数据“说话”，才能透过数据发现这些系统动力学行为的内在规律。因此，目前如何做到让海量的实际数据“说话”是大数据时代的一个重要挑战。其次，复杂网络科学研究的基础理论或者网络的一些基础拓扑性质源自于数学中的图论。图论从 1736 年诞生以来，就集中关注位于某个平面上的一些基本元素之间的位置关系和这些位置之间的某种联系，以及图上某个量的传播等问题。这种对系统基本元素及其相互作用的描述是静态的，没有能力去描述相互作用的时间演化，更不可能去总结这些相互作用的特征与规律，甚至去预言系统的行为规律。我们要突破传统框架的图论研究，从其他角度去探索研究复杂网络动力学的方法和途径。再次，复杂网络的研究正面临一个从小世界和无标度特性等基础的统计特性研究逐步向更深层次的内在机理研究的突破。这个突破将更关注于网络结构

与动力学之间的联系,并最终实现工程应用的理想目标。这就迫使人们要不断地挖掘新的理论方法和工具,构建新的模型和框架,跨越不同学科的限制,全面地把握复杂网络研究过程中的发展规律,将理论和真实数据相结合,从而揭示真实系统背后的机制,最终达到应用的目标,为人类社会服务。最后,当前复杂网络科学研究所取得大部分成果都是在研究单一、孤立的网络基础上取得的,实际上,这类网络在现实中是不可能存在的。任何一种网络都是和其他网络相互依赖、相互关联的,不可能独立存在。所以考虑不同类型和连接方式的网络组成的多层复杂网络或者相互依赖网络是我们面临的又一个巨大挑战。这一挑战可以让我们更加真实地去了解不同复杂系统之间的相互作用,以及不同相互作用在各个系统行为中所起到的作用和带来的影响。

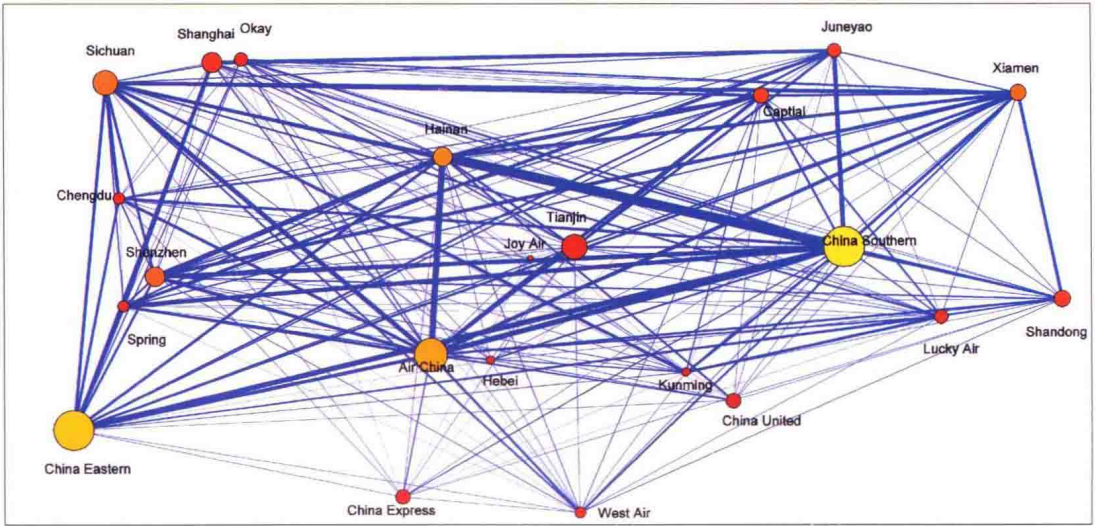
本书从复杂网络中几种典型的网络类型出发,结合运用图论和拓扑学、非线性科学、统计物理学、计算科学等现代科学理论,对城市交通网络、金融网络和社会网络的拓扑结构及普适规律进行了深入研究;对拓扑结构中的特殊性进行了模型分析和概率不确定性分析;探讨了多层复杂网络结构与功能之间的关系,如网络的拓扑结构性在网络聚合过程中的演化,不同网络间的相互作用与网络鲁棒性之间的关系;同时还分析了社会网络随时间演化的过程中,网络拓扑结构特性和其他物理量展现的不同复杂性行为。

本书的出版得到了武汉纺织大学、国家自然科学基金项目“修复机制下的相互依赖网络抗毁性研究”(No. 11405118)、留学人员科技活动择优资助项目(人社厅函〔2014〕240号),以及湖北省教育厅人文社会科学研究项目(16D049)的共同资助。这里要特别感谢武汉大学的陆君安教授为本书做序,以及提出了大量宝贵的修改意见,还要特别感谢武汉纺织大学的刘杰教授,正是在他的鼓励和帮助下作者才完成了此著作,同时还要感谢欧贵兵教授和科学出版社的领导及编辑在本书的出版过程提供的帮助,以及武汉纺织大学其他同事的关心和支持。对于本书航空网络数据的收集要感谢陈宜良、何泽涛、徐光明、张敏、皱炎和谌桃同学的辛勤劳动,特别感谢谌桃同学对部分程序代码的编写。作者还要衷心感谢华中师范大学的恩师蔡勛教授和李炜教授,以及法国勒芒大学的恩师王秋平教授的多年培养,感谢华中师范大学其他老师和众多师兄师弟们的关心和帮助,这里就不一一列举了。最后要特别感谢我的父母及家人的辛勤付出,没有他们的默默支持就没有我今天的一切。

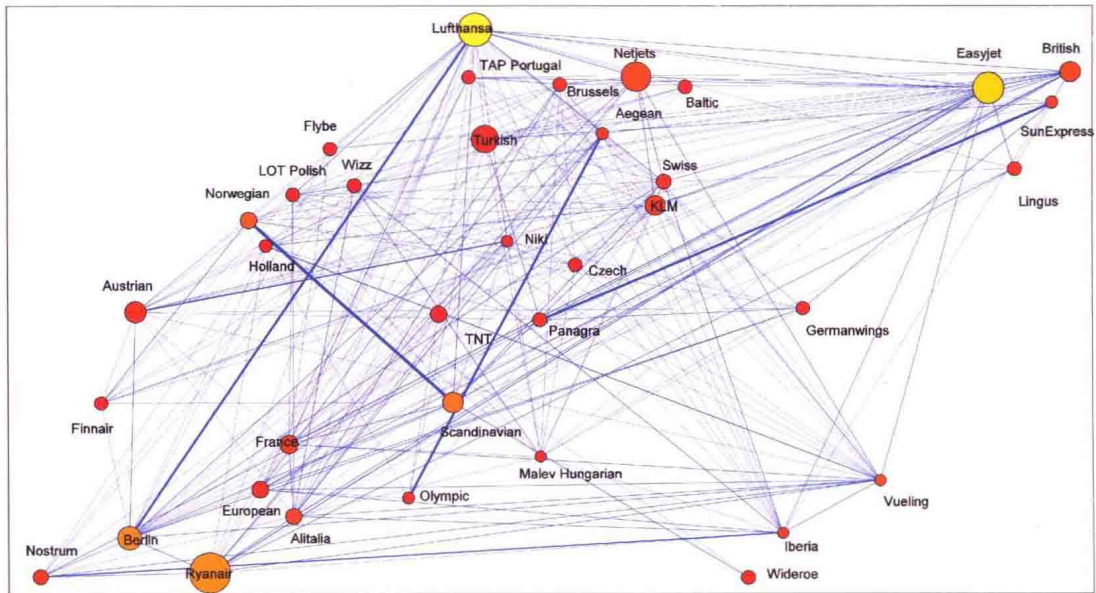
武汉纺织大学非线性科学研究所

江 健

2016 年秋



(a)



(b)

彩图 CATN(a)和 EATN(b)中不同航空公司间的连接情况

目 录

第 1 章 绪论	1
参考文献	4
第 2 章 金融时间序列动力学的实证与模型研究	6
2.1 引言	6
2.2 外汇市场的标度行为	6
2.2.1 相对收益率的关联	7
2.2.2 标度阶乘矩	10
2.2.3 货币影响力强度	12
2.2.4 小结	14
2.3 股票市场的非线性特征	14
2.3.1 金融数据来源	14
2.3.2 非线性特征	15
2.3.3 去趋势涨落分析	18
2.3.4 小结	22
2.4 金融市场的团簇行为	23
2.4.1 团簇模型	24
2.4.2 数值模拟结果	25
2.4.3 小结	30
2.5 中国股票市场的实证研究	31
2.5.1 数据说明	32
2.5.2 关联行为	33
2.5.3 波动动力学行为	38
2.5.4 交易活动中的标度行为	42
2.5.5 小结	49
参考文献	50
第 3 章 复杂城市交通网络动力学的实证与模型研究	58
3.1 引言	58
3.2 城市道路网络的度分布特性	59

3.3	勒芒城市道路网络的实证分析	60
3.4	双幂律分布函数的分析	62
3.5	幂律分布的偏离模型	65
3.6	复杂网络的不确定性分析	73
3.6.1	varentropy 熵	74
3.6.2	varentropy 熵的应用	77
3.6.3	平衡态网络系综	81
3.6.4	小结	82
	参考文献	82
第 4 章	文化网络动力学的实证与模型研究	87
4.1	引言	87
4.2	关于文化的 Axelrod 模型	88
4.3	分久必合合久必分(1)	91
4.3.1	引言	91
4.3.2	模型的定义	92
4.3.3	数值模拟结果	95
4.3.4	小结	102
4.4	分久必合合久必分(2)	103
4.4.1	模型的定义	103
4.4.2	数值模拟结果	106
4.4.3	小结	113
	参考文献	114
第 5 章	多层复杂网络的拓扑、模型与鲁棒性研究	116
5.1	引言	116
5.2	多层网络的定义	117
5.3	多层网络的基本度量	121
5.3.1	节点度	122
5.3.2	聚集系数	123
5.3.3	路径长度	125
5.3.4	中心度	127
5.3.5	度度关联	131
5.3.6	谱分析	131
5.3.7	模块化结构	133
5.4	多层网络的基本模型	134
5.4.1	动态增长多层网络模型	134
5.4.2	静态多层网络系综模型	137

5.5 相互依赖网络的鲁棒性	141
5.5.1 相互依赖网络鲁棒性研究分类	141
5.5.2 相互依赖网络鲁棒性模型	143
5.5.3 小结	152
5.6 多层复杂网络的应用	153
5.6.1 引言	153
5.6.2 数据收集及处理方法	154
5.6.3 CATN 的结构属性演化	158
5.6.4 Wasserstein 距离	167
5.6.5 相对熵	168
5.6.6 小结	172
参考文献	173
附录 A	186
A1 主要国家货币代码	186
A2 C++ 程序代码: 关联系数	187
A3 C++ 程序代码: DFA 方法	190
A4 C++ 程序代码: 团簇模型	195
A5 C++ 程序代码: 中国股市实证研究	201
A6 MATLAB 程序: 模型一	206
A7 MATLAB 程序: 模型二	220
A8 MATLAB 程序: 模型一的网络生成代码	240
A9 MATLAB 程序: 模型二的网络生成代码	243
A10 MATLAB 程序: 模型一和二的动力学演化代码	248
A11 数据收集程序代码	260

第1章 绪论

复杂系统最吸引人的一个特征是它们所展示的大部分集体行为都不能从它们的组成元素的属性特征得到预测。在过去几十年的时间里,网络科学已经从生物学到社会学再到经济学等不同学科,不断地向人们展示系统内部组成元素之间相互作用的结构在复杂性行为涌现形成过程中起到的作用远胜于系统独立组成单元特殊属性所起的作用^[1-4]。如果有人问:人类社会、因特网和人的大脑三者之间有什么共同点?大部分的回答可能是没什么共同点。但是实际上,它们都是复杂关系系统,所表现的宏观行为都是系统内部组成元素,如代理人、电脑或神经元所组成的相互作用网络所决定的。它们在许多性质和相互作用结构上都有共同点^[5-11]。

经过网络科学十几年的蓬勃发展,随着来自不同学科领域的研究学者对复杂网络理论、方法的认识和理解不断加深,以及近期所谓大数据时代来临所带来的海量有价值的数据,再加上高性能计算机的飞速发展,以下几个研究方向已经逐步成为网络科学研究的重要内容。

1. 多层复杂网络的结构与动力学

以前大部分的网络科学研究都是在单一、孤立的网络上开展的,然而现实世界中任何一个复杂系统没有真正意义上是单独孤立存在的,例如,城市基础设施系统中供电系统和通信系统、水和食物供应系统等^[12-14]。另外,传统复杂网络处理真实系统的方式大部分都集中在将每个系统的组成单元或基本要素对应成网络中的一个节点,每个单元或基本要素之间的相互作用都用一个数字来表示,用来量化对应网络中连边的权重。但是这样将所有网络连边都等价处理的方式具有很大的局限性,不仅不能够全面地体现一些真实情况,还可能带来错误的描述结果。例如,人与人之间的关系可以有多种类型,如朋友关系、同学关系或同事关系等。目前,越来越多的注意力尝试着通过发展一种新的框架来扩展传统的网络科学理论,从而来研究多层网络的结构与动力学。在多层网络中,不同的网络层代表不同类型的相互作用关系。

在多层网络这个新的网络科学理论框架下,以前复杂网络研究的很多经典结论和研究方法可能要发生改变,甚至连一些最基本的拓扑结构的定义在新框架下都要重新定义。因此,多层网络框架下的复杂网络研究未来还面临着很多的挑战。目前国内外许多研究学者都在努力地从各个方面探索这个新的研究方向。例如,多层网络拓扑性质的描述^[15-16]、多层网络的抗毁性或鲁棒性的研究^[17-19]、多层网络的传播动力学行为^[20-22]、多层网络的同步问题研究^[23]、多层网络的基本网络模型及应用等。

2. 城市交通网络的复杂性分析

城市交通网络是现代社会生活的重要组成部分之一,与人们的日常生活息息相关。

同时,它对一个国家或城市的发展也起到至关重要的作用。城市交通主要包括机场、地铁、高速公路、公交车和其他一些形式的公共交通设施。通过对这些交通网络拓扑结构的研究分析可以了解当前城市交通设计方面的缺陷和不足,为防止城市交通拥堵和优化交通路线设计提供理论指导,还可以通过对网络中交通流的传播扩散过程进行分析,了解城市人口流动、经济贸易往来等方面的信息,对疾病预防和增强城市经济发展都起到积极作用。

目前这方面的研究主要集中在实证研究和网络模型两个方面。实证研究主要包括对航空网络、地铁网络、高速公路网络、公交车网络及城市公路网络等的网络拓扑结构数据,以及航班延误信息、客流量分布、交通站点换乘信息等实际数据的分析。网络模型主要是试图通过某些网络规则的制定来解释这些交通网络在实证分析中表现出来的一般规律和结构特征背后的潜在机制,然后进一步预测和控制这些网络的动力学过程,达到为人类社会服务的目的。这部分的研究内容主要可以参考一些著作和综述性文章^[24-29]。

3. 金融系统的复杂网络建模

在过去十几年间,复杂网络理论已经大量应用到金融市场的分析当中。作为最为复杂的复杂系统之一的金融系统是由许多相互作用的基本单元构成的,了解这些基本单元发生相互作用的结构和该结构如何随时间的演化,是掌握金融系统的集体行为、确定系统临界状态出现,以及在不同的外界环境和内在因素共同作用下减少系统风险的必经之路。系统的集体行为包括同步行为或非随机化具有强关联结构中的自组织行为、大的震荡起伏和幂律分布等。对这些行为的定量分析大部分集中在对系统行为时间序列的分析上。分析方法除了与传统非线性动力学有关的分形维数、李雅普诺夫指数和递推属性,复杂网络理论也越来越受到人们关注。一般情况下,网络节点可以表示各种金融公司或机构、股票、货币等,这些公司、股票和货币之间的关系则用网络中节点间的连边来表示。通过对金融产品价格波动序列的分析,了解它们之间的关联特性,从而形成各个产品之间的关联矩阵。通过某种阈值处理后就能得到该金融市场的网络连接矩阵,然后运用复杂网络相关的特征量就可以了解该金融市场的各种行为和性质^[30]。另外,将金融产品的时间序列转化成对应的复杂网络的方法有很多,其中包括转移网络、环形网络、关联网络、可视化图、 k 级最近邻网络和递推网络等^[31]。

4. 社会动力学的复杂网络研究

社会动力学所关注的是人类社会在发展过程中所涌现的各种社会现象、行为及规律。社会现象的基本组成单元是人类个体,并且每个个体只和有限个其他个体发生相互作用,这些有限个个体的数目相比人类社会人类的总数是可以忽略不计的。尽管如此,人类社会还是通过整体规律来刻画其主要特征。在这个过程中存在许多从无序到有序的转变过程,类似于某种通用语言和文化的自发形成或者某个具体问题达成共识。社会动力学的主要研究热点包括舆论与疾病的传播、文化和语言动力学、社会群体行为等。传统的社会动力学研究大多集中在心理学和社会学等人文学科。它所面临的困境在于大部分的工作都是基于小规模的问卷调查或者实验室生成的虚拟数据,很难得到大规模社会活动和行为的数据,并且其结论大多是定性的描述和总结,缺乏定量的理论分析。其研究成果虽

然能够在某些程度上反映一些基本的社会规律,但是还不能全面地表现出人类个体在相互作用过程中的各种行为特征。

社会动力学发展到今天已经将人文社会科学和许多自然科学交叉在一起,包括生物学、医学、信息技术学和计算机科学等。网络科学的研究也是一个跨学科的研究,与社会学的观点有很多相似之处。这是由于许多重要的网络拓扑结构都是来自于人类个体的自组织行为。目前在复杂网络的框架下用统计物理的方法来研究社会动力学越来越受到人们重视^[32-33]。人们关注的是社会个体间的相互作用是如何使复杂的社会系统在初始无序状态下逐渐变为有序的。进一步可以合理地假设如果人类社会没有个体间的相互作用,社会的异质性将占主导地位。每个个体会对某个社会问题发出自己独有的声音,从而会表现出独特的文化特色。尽管如此,相同的社会舆论、社会文化及语言又确实存在,这是个不争的事实。统计物理方法关注社会动力学的重点是要去弄清楚社会有序状态是如何实现的。其中一个关键因素在于个体间的相互作用往往让人们变得更加相似,长时间不断地相互作用又会导致高度的社会同质化。这种现象在本质上是动态的。

针对以上这些网络科学领域的研究热点,作者经过多年的大量研究取得了一些微不足道的研究进展。本书在其他章节的内容大致安排如下:

第2章主要介绍几种典型金融市场如股票市场和外汇市场的实证研究结果以及金融市场中团簇行为的网络建模分析。首先分析全球主要外汇市场的标度行为;然后对全球主要股票市场的非线性特征进行分析,其中包括非高斯性、自关联性和异方差性等特征的分析,还利用去趋势涨落方法分析股票市场的价格波动行为;接着针对金融市场中的团簇行为进行无标度网络的建模分析;最后对中国股票市场在2006~2007年期间的疯狂表现进行实证研究分析,其中主要包括股票价格波动的弛豫动力学行为分析和股票交易活动中的标度行为分析等。

第3章主要介绍城市道路网络的相关内容,主要围绕法国勒芒城市道路网络的度分布特性展开。首先通过实证分析给出度分布的函数表达式;接着对表达式中的双幂律分布形式进行理论分析,解释表达式中各个参数的具体含义,再结合实际情况中大量度分布偏离幂律分布形式的现象,构建网络模型解释现象背后的隐藏机制;最后在重新定义一种信息熵的基础上,分析幂律分布的熵的行为,再结合熵的统计力学定义,给出复杂网络中类似于“能量”和“温度”的热力学量,并做简要说明。

第4章主要介绍社会动力学中有关文化的起源和时间演化的内容。在复杂网络的框架下尝试通过构建网络模型来探索与舆论传播动力学相类似的文化传播动力学中的核心问题,即什么是推动文化领域形成的背后机制。首先介绍文化传播动力学中的经典Axelrod模型,然后结合中国著名谚语“分久必合,合久必分”的哲学思想,通过构建合并-分裂网络模型研究网络模型中不同特征量的时间演化情况。

第5章将主要介绍多层网络的基本概念及定义,多层网络的分类和一些基本模型,多层网络的动力学行为以及在航空运输系统中的应用。由于目前有关多层网络的研究还处于初级阶段,发展极为迅速,还没有统一的行业术语名称及定义标准。介绍该领域常用的几个基本名称、概念及计算量的定义,具体包括对多层网络、相互作用网络、相互依赖网络等不同网络的定义解释,多层网络节点度、连边、中心度、聚集系数、最短路径等基本拓扑

结构计算量的定义。还介绍多层网络的两类基本模型,即动态增长多层网络模型和静态多层网络系综模型。在网络动力学方面,主要介绍相互依赖网络的抗毁性行为,包括相互依赖无标度网络和相互依赖随机网络在随机攻击模式及不同的依赖强度和依赖关系下系统的逾渗行为。最后将多层网络理论应用到航空运输系统,通过构建多层航空网络,分析其结构演化过程。

参考文献

- [1] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 47-97.
- [2] Newman M E J. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 2003, 45(2): 167-256.
- [3] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 2006, 424(4-5): 175-308.
- [4] Newman M E J. *Networks: an Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2010.
- [5] Battiston F, Nicosia V, Latora V. The new challenges of multiplex networks: measures and models. arXiv:1606.0922v1, 2016.
- [6] Strogatz S H. Exploring complex networks. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.
- [7] Arenas A, Guilera A D, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks. *Physics Reports*, 2008, 469(3): 93-153.
- [8] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Reviews on Neuroscience*, 2009, 10(3): 186-198.
- [9] Castellano C, Fortunato S, Loreto V. Statistical physics of social dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(2): 591-646.
- [10] Barthelemy M. Spatial networks. *Physics Reports*, 2011, 499(1-3): 1-101.
- [11] De Vico Fallani F, Richiardi J, Chavez M, et al. Graph analysis of functional brain networks: practical issues in translational neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2014, 369(1653): 20130521.
- [12] 辜娇, 郭龙, 江健, 等. 多层网络和含时网络的相关问题研究. *复杂系统与复杂性科学*, 2016, 13(1): 58-63.
- [13] 张欣. 多层复杂网络理论研究进展概念理论和数据. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 12(2): 103-107.
- [14] Rosato V, Issacharoff L, Tiriticco F, et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models. *International journal of critical infrastructures*, 2008, 4(1/2): 63-79.
- [15] Gao J, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Networks Formed from Interdependent Networks. *Nat. Phys*, 2012, 8: 40-48.
- [16] Cozzo E, Kivela M, Domenico M D, et al. Clustering coefficient in multiplex networks. arXiv:1307.6780v1, 2013.
- [17] Parshani R, Buldyrev S V, Havlin S. Critical effect of dependency groups on the function of networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 108(3): 1007-1010.
- [18] 刘润然, 贾春晓, 章剑林, 等. 相依网络在不同攻击策略下的鲁棒性. *上海理工大学学报*, 2012, 34

- (3):235-239.
- [19] 李国颖,成泊松,张鹏,等. 相互依存网络鲁棒性研究综述. 电子科技大学学报,2013,42(1):23-28.
- [20] 刘权辉,王伟,唐明. 多层耦合网络传播综述. 复杂系统与复杂性科学,2016,13(1):48-57.
- [21] 李睿琪,唐明,许伯铭. 多关系网络上的流行病传播动力学研究. 物理学报,2013,62(16):168903.
- [22] 方锦清,唐明. 面临 NON 前沿课题的挑战与网络传播的若干研究进展. 第 11 届中国网络科学论坛大会报告,上海:上海大学,2015.
- [23] 陈艳,杜园,吴薇,等. 节点状态不同的两个耦合网络的同步. 应用数学与计算数学学报,2009,23(2):72-78.
- [24] Rocha L E C. Dynamics of Air Transport Networks; A Review from a Complex Systems Perspective. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>[2016].
- [25] 何大韧,刘宗华,汪秉宏. 复杂系统与复杂网络. 北京:高等教育出版社,2009.
- [26] Luciano da F costa, Osvaldo N, Oliveira Jr, Gonzalo Travieso, et al. Rocha, Analyzing and modeling real-world phenomena with complex networks; a survey of applications. Advances in Physics,2011,60(3):329-412.
- [27] Barthélemy M. Spatial networks. Physics Reports,2011,499(1-3):1-101.
- [28] 韩定定,钱江海,马余刚. 实证研究复杂网络的拓扑与动力学行为. 北京:北京大学出版社,2012.
- [29] 刘宏鲲,周涛. 航空网络综述. 自然科学进展,2008,18(6):601-608.
- [30] 蔡世民,洪磊,傅忠谦,等. 基于复杂网络的金融市场网络结构实证研究. 复杂系统与复杂性科学,2011,8(3):29-33.
- [31] Donner R V, Zou Y, Donges J F, et al. Recurrence networks: a novel paradigm for nonlinear time series analysis. New Journal of Physics,2010,12(3):33025.
- [32] Borgatti S P, Mehra A, Brass D J, et al. Network Analysis in the Social Sciences. Science,2009,323(5916):892-895.
- [33] Castellano C, Fortunato F, Loreto V. Statistical physics of social dynamics. Reviews of Modern Physics,2009,81(2):591-646.

第2章 金融时间序列动力学的实证与模型研究

2.1 引言

作为复杂系统中最为复杂的系统之一的金融系统,与人们生活息息相关。复杂性科学自诞生以来,就把它作为重要的研究方向之一。金融系统中参与者众多,虽然每个参与者的细节不一样,但本质都是相同的。他们的局部运动相对简单,即参与市场交易的每个个体都是根据市场供求关系来决定自身的交易行为,但是他们之间相互作用产生的市场整体运动可以体现许多不同的动力学特征,其中就包括市场的大幅度振荡或市场的整体崩溃。这些行为都说明金融系统是一个典型的复杂系统,每个参与者有相互影响、相互学习和相互模仿的行为发生,通过他们之间的相互作用共同推进整个金融市场的演化和发展。此外,金融系统更是一个复杂巨系统,源于它与其他复杂系统具有某些相同或者相似的性质。应用处理复杂系统的方法和理论对金融系统进行分析 and 研究,从而导致金融物理学(econophysics)的诞生^[1-2]。

目前金融物理学的研究,主要分为三个方面:

(1) 采用不同的研究方法和手段,对经济领域的各种经济数据进行收集和分析。经济领域的原始数据是以交易价格、股票收益、外汇波动等参量随不同时间间隔而形成的时间序列。这些表面上看似起伏无常、毫无规律可循的序列,实际上反映了金融系统内部的结构与运行机制在一定外部环境影响下产生的自然规律。

(2) 从实证分析出发,找出不同参数之间的依赖关系,寻找金融系统的某些经验或半经验公式及其唯像的描述方法。

(3) 通过将金融系统中的已知信息和物理学、数学、计算机科学等其他学科的相关系统进行类比,构建金融系统的数学物理模型,寻找和发现系统微观结构、作用机制以及宏观参数和动力学方面的关系。

鉴于金融物理学的研究内容十分广泛,本章从不同角度对金融市场做理论和数据的实证分析,并且从复杂网络的角度出发,构建金融系统的网络模型,从而发现金融系统的整体行为演化和其中的内在运行机制。

2.2 外汇市场的标度行为

在过去几十年间,大量学者已经将统计物理中的方法和模型应用到经济学领域^[3-6]。目前这个趋势已经被经济网络的巨大诱惑力所强化。特别是,在对金融市场的分析中已经发现了一些与具有大量相互作用个体的物理系统中相类似的普适性特征^[7-11]。例如,金融收益率(市场金融价格的对数差值)的分布已经被发现是非高斯型的具有“胖尾”的分布^[12-13]。一些已有的模型已经展示了金融收益率的“胖尾”分布,并发现变化的温度能够