



同济大学 1907-2017
Tongji University



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张毅超 关侗红 著

加权网络的 建模与随机扩散

Modeling and Random Diffusion of
Weighted Network



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张毅超 关佶红 著

加权网络的 建模与随机扩散

Modeling and Random Diffusion of
Weighted Network

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书基于加权网络拓扑结构和无权网络上的随机游走,针对加权网络上的随机扩散流的波动以及扩散湮灭动力学进行了深入研究,提出了确定性权重拓扑共演化的加权网络模型。本书可供相关领域的研究生和科学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

加权网络的建模与随机扩散 / 张毅超,关佶红著.
—上海:同济大学出版社,2018.8
(同济博士论丛 / 伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-8019-8
I. ①加… II. ①张… ②关… III. ①计算机网络—
网络模型—研究 IV. ①TP 393.021
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 158263 号

加权网络的建模与随机扩散

张毅超 关佶红 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 郁 峰 胡晗欣
责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 9.25

字 数 185 000

版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8019-8

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阡
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 璠
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦駟
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际,喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行,倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时,我曾以《百年同济,大学对社会的承诺》为题作了演讲,如今看到付梓的“同济博士论丛”,我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果,也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色,向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学,历经 110 年历史风云,承古续今、汇聚东西,秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,发扬自强不息、追求卓越的精神,在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行,谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今,同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才,包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生,薪火相传,将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任,她的社会责任就是融入国家的创新体系之中,成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新,对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首,强调创新是引领发展的第一动力,要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略,以科技创新为核心带动全面创新,以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

在过去的十余年里,复杂网络作为一种描述复杂系统的工具,已经被社会、政治、经济各个领域的研究人员所接受。它将系统中的个体抽象成节点,个体间的关系抽象成边,系统被简化成了一个网络。网络的复杂性是指网络的拓扑结构既不规则也不完全随机,例如小世界网络和无标度网络。由于复杂性是现今各类系统的一个普遍特征,因此,认识和理解复杂性对于人们研究复杂系统来说具有重要的意义。在网络研究的过程中,人们秉承了由简单到复杂、由无权重无方向到有权重无方向、再从有权重无方向到有权重有方向的研究思路。目前,无权重无方向的网络研究已经到达了一定的高度,而有权重无方向的网络研究方兴未艾。

本书基于加权网络拓扑结构和无权网络上的随机游走,针对加权网络上的随机扩散流的波动以及扩散湮灭动力学进行了深入的研究。在此基础上,提出了一个确定性权重拓扑共演化的加权网络模型。本书的主要研究工作及贡献包括以下几个方面。

(1) BBV 模型是一个经典的加权网络模型。目前,这一模型的主要拓扑参数,如度、边权与点权分布,均已成功得解。然而,基于现有的方



法求解 BBV 模型的簇系数仍然是个挑战。本书提出了一种扩展性的平均场方法攻克了这一难题。为人们求解类似加权网络的簇系数提供了一个范例,同时也加深了人们对加权网络的认识。簇系数的解析结果在数据资源相对匮乏的情况下,对于人们预测网络演化与填补缺失数据具有指导意义。

(2) 网络的平均路径长度是表征网络传输能力的重要参数,求解这一参数,对于各个网络模型来说,都是一个难题。本书针对一个确定性负相关递归无标度树状网络模型 (幂指数 $\gamma \in \left(2, 1 + \frac{\ln 3}{\ln 2}\right]$), 提出了一种求解平均路径长度的方法。此外,还提出了一种求解这类网络上随机游走标度效率指数的方法。这两种方法为评估树状网络的传输效率、优化通信网络设计提供了一种有效的工具。同时,对于计算确定性网络上的平均路径长度与随机游走的平均首达时间来说,这两种方法均具有一定的启发性。

(3) 目前,加权网络上流量波动的研究仅停留在数值模拟阶段,因此,人们无法由网络结构对网络中节点与边上流量波动进行预测。无权网络的早期研究结果表明,所有边上的流量与其波动均相等。这一结论与现实情况是不相符的,并具有一定的误导性。本书针对现有模型的不足,提出了一般随机扩散 (GRD) 模型来研究加权网络上流量的波动。在这一模型中,粒子的游走路径不仅取决于节点的连接边数目,而且还取决于每条边的权重大小。在节点与边上,本书各提出了一种求解流量与其波动之间关系的方法。结果发现,在加权网络中,边上流量的波动与边两端节点的度有着密切的联系,因此,GRD 模型为研究交通网络中的流量波动提供了一个更为合适的框架。同时,它为人们合理地划分网络资源、避免网络拥堵、提高网络传输效率提供了理论依据。

(4) 在无标度网络上,先前的研究表明,扩散湮灭过程中的耗尽层与隔离层是由网络结构中的分形特征导致的。在一类具有相同度序列的加权无标度网络上,本书针对扩散湮灭过程进行了深入的研究。实验结果表明,耗尽层与隔离层本质上是由度的负相关性所产生的,这里的负相关性指的是网络中的边多存在于度相差较大的节点之间。这两种区域对于同种粒子与不同粒子的扩散湮灭动力学过程的影响主要取决于度与边权之间的关系。这一发现扭转了人们对耗尽层与隔离层产生原因的认识,加深了人们对无标度网络上随机扩散过程的理解。同时,这一研究对互联网上的路由、万维网上的信息检索与导航均具有指导意义。

(5) 避免网络拥堵,提高路由效率,始终是网络结构设计的一条重要指标。随着研究的深入,人们认识到产生网络拥堵的主要原因是网络流量波动。针对这一因素,本书在伪分形无标度网络的基础上提出了一个确定性加权无标度小世界网络模型。这一模型在演化过程中,始终可以有效地抑制网络上的流量波动。本书对这一模型的拓扑结构以及权重动力学进行了较全面的讨论,其中包括:边权与点权分布,度相关性,平均簇系数,簇度相关性以及直径。拓扑特征表明,该模型的多项拓扑特征与现实网络相符,这在一定程度上表明它为设计流量波动可控的网络提供了一个良好的范例。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂网络的结构统计特征	2
1.1.1 度分布	3
1.1.2 簇系数	4
1.1.3 平均路径长度	5
1.1.4 度相关性	5
1.2 国内外研究现状	7
1.2.1 网络建模	7
1.2.2 加权网络	10
1.2.3 网络上的随机扩散	12
1.2.4 网络交通流	15
1.3 本书的主要工作及贡献	18
1.4 本书的组织	20

第 2 章	BBV 网络簇系数的解法	22
2.1	研究背景简介	22
2.2	BBV 模型简介	24
2.3	BBV 模型簇系数的解析过程	26
2.4	本章小结	31
第 3 章	负相关无标度网络的平均路径长度与随机游走	33
3.1	研究背景简介	33
3.2	递归无标度树状网	35
3.3	平均路径长度	36
3.4	随机游走	40
3.4.1	标度效率	41
3.4.2	老节点之间游走的首达时间	41
3.4.3	所有节点的平均首达时间	43
3.5	本章小结	45
第 4 章	加权网络上的流量波动	47
4.1	研究背景简介	47
4.2	流量波动的研究概况	49
4.3	加权网络上流量的波动	50
4.3.1	一般随机扩散模型 (GRD 模型)	50
4.3.2	时间窗口的尺寸	51
4.3.3	路径的择优选择	51
4.3.4	平均流量	52
4.3.5	流量波动	52

4.4	加权网络节点流量波动	52
4.4.1	解析过程	52
4.4.2	数值模拟	55
4.5	加权网络上边流量的波动	60
4.5.1	边权	60
4.5.2	点权	61
4.5.3	解析过程	61
4.5.4	数值模拟	63
4.6	本章小结	66
第 5 章	具有相同度序列的加权无标度网络中的扩散湮灭	68
5.1	研究背景简介	68
5.2	加权随机扩散	71
5.3	具有相同度序列的无标度网络模型(IDS-SF 网络)	72
5.4	加权 IDS-SF 网络上的扩散湮灭过程	74
5.4.1	$q=1$ 时的 IDS 无标度网络	76
5.4.2	$q=0$ 时的 IDS-SF 网络	78
5.4.3	$0 < q < 1$ 时的 IDS-SF 网络	82
5.5	本章小结	83
第 6 章	确定性加权无标度小世界网络	85
6.1	确定性网络建模研究概况	85
6.2	确定性加权无标度小世界网络模型(DWSSN 模型)	87
6.3	结构特性	90
6.3.1	边权分布	90
6.3.2	点权分布	92

6.3.3	度分布	95
6.3.4	簇系数	96
6.3.5	直径	98
6.3.6	度相关性	101
6.4	本章小结	102
第7章 结论与展望		103
7.1	结论	103
7.2	展望	106
参考文献		108
后 记		128