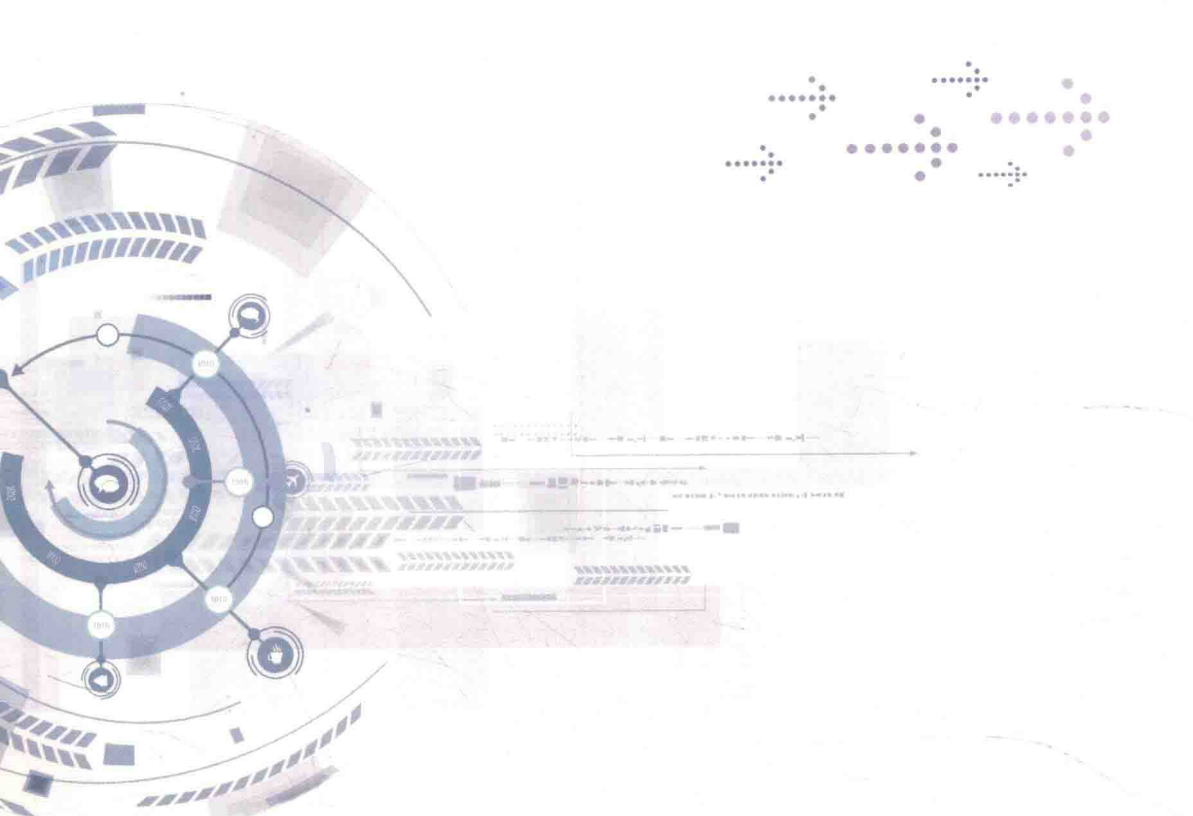




复杂网络上 级联故障建模研究

Modeling Cascading Failures
on Complex Networks

丁琳 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

南华大学资助出版

湖南省管理科学与工程重点学科经费资助出版

复杂网络上级联故障 建模研究

丁 琳 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要从网络科学理论及网络新的不同现实场景的角度出发,紧紧围绕与级联故障发生和传播密切相关的流的动力学过程,对级联故障进行深入分析与理论建模,全书共9章。第1章主要介绍复杂网络、级联故障研究的现状,以及复杂网络上级联故障研究的发展方向;第2章介绍复杂网络的基本概念、较常用的拓扑参量、典型的网络拓扑及其演化模型,以及鲁棒性的基础知识;第3~7章分析了网络的信息条件、负载流传输策略、加权方案、攻击策略、边定向方法等对级联故障行为的影响;第8章以通信网络为背景,分析了路由策略、路由信息、拥塞信息时间延迟、包产生速率等与网络抵制级联故障鲁棒性之间的相关性;第9章总结了本书的主要工作和结论,展望了未来工作。

本书着力融合多个学科的知识,对复杂网络上的级联故障问题进行系统深入的建模研究,所取得的研究结果进一步丰富和发展了网络科学理论及对级联故障行为的认识,同时为解决实际网络系统上的级联故障问题提供了新的建模思路和理论依据。

本书可作为研究生及高年级本科生的复杂网络建模分析和故障传播学教材,也可供自然科学、工程技术和社会科学领域的研究人员和学者参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

复杂网络上级联故障建模研究/丁琳著. —北京:电子工业出版社,2018.10

ISBN 978-7-121-34766-5

I. ①复… II. ①丁… III. ①计算机网络—故障诊断—研究 IV. ①TP393.07

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第161841号

策划编辑:戴晨辰

责任编辑:张京 特约编辑:曹尊颖

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

装订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:720×1 000 1/16 印张:10 字数:256千字

版次:2018年10月第1版

印次:2018年10月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: dcc@phei.com.cn。

前 言

级联故障普遍发生在现代社会依赖的许多复杂的网络系统上,如通信网、交通网、电力网、供水网和供气网等。近年来大规模级联故障所导致的各种灾难性事故屡见不鲜,对国民经济和社会发展造成了巨大冲击和极其不利的影响。出于理解和控制这类灾难的需要,复杂网络上的级联故障研究受到了国内外学者的广泛关注。在吸收国内外研究成果的基础上,本书主要以网络科学理论为基础,从网络新的不同现实场景的角度出发,紧紧围绕与级联故障发生和传播密切相关的流的动力学过程,对级联故障进行深入分析与理论建模。通过度量网络抵制级联故障鲁棒性的指标,研究级联故障的动力学特性,为给网络制定合理有效的保护策略提供依据,主要的研究成果如下。

(1) 针对复杂网络遭遇攻击引发的级联故障问题,考虑攻击信息的不完全准确性及边到节点的失效模式,提出了基于灰色信息的级联故障模型。其中信息准确度可以通过参数调节控制,随机攻击和蓄意攻击是本模型的两个特例。研究了两种典型的模型网络上由边攻击而引发的节点级联故障行为,分析了信息参数对不同网络抵制级联故障鲁棒性的影响,并发现了其中的临界现象,揭示了决定网络鲁棒性的两个关键因素:网络的信息条件和动态特性。

(2) 考虑以自然定律所决定的流量模型来建模在现实网络中普遍存在的分布式流,在此基础上,使用更适合实际网络的负载-容量关系,提出了基于分布式流的、带有可调权重参数的级联故障模型。研究了典型加权模型网络和真实网络上由蓄意节点及边攻击而引发的级联故障行为。获得了网络达到抵制节点及边级联故障最强鲁棒性时的不同最优参数值。而且从仿真和实证分析两个角度进一步与以往最短路径流策略进行对比,发现无论是抵制节点的级联故障还是边的级联故障,都不需要网络拓扑全局信息的分布式流策略使得网络表现出更强的鲁棒性,能更显著地降低级联故障动力学发生的可能性。

(3) 为了更好地探讨加权网络抵制级联故障的鲁棒性问题,提出了一种介数相关的节点加权方案,并应用加权流局域重新分配原则构建了带有可

调权重参数的级联故障模型。在不同的加权网络上研究了由小的节点攻击而引发的级联故障行为。数值仿真和理论解析结果给出了所研究的四种典型模型网络达到最强抵制级联故障鲁棒性时的权重参数值。而且与现有的度相关的加权策略对比,介数相关的加权策略使得网络鲁棒性更强,能更有效地降低级联故障发生的可能性和发生故障时的级联规模。该结果的有效性在对四个真实网络的实证研究中得到了验证。

(4) 通过构建随机无标度网络的级联故障模型,探讨了两种不同的边攻击策略对随机无标度网络抵制级联故障鲁棒性的影响。在该模型中,边的初始负载(权重)定义为其端节点介数乘积的幂函数。这里的幂指数可调,并且应用加权流局域重新分配原则择优分配故障边的负载。通过理论分析和数值仿真得到了一些有趣的结论:存在一个负载参数的关键阈值,即当负载参数值大于这个阈值时,攻击高负载的边比攻击低负载的边更易导致大规模级联故障;当负载参数值小于这个阈值时,攻击低负载的边反而更易导致网络的全局崩溃。而且,该阈值与网络的度指数紧密相关。

(5) 在许多真实的网络系统中,部分边应该描述为单向边。应用三种方向确定策略,在具有单向边和双向边的不同网络上探讨了级联故障行为。考虑节点权重和边的方向,通过扩展经典的全局介数方法,提出了新的级联故障模型。进而在全局负载分布机制下分析了定向边对网络抵制级联攻击鲁棒性的影响。仿真结果表明,边定向方法不会总导致网络鲁棒性的降低。对于小世界网络,所使用的边定向方法确实使得网络更脆弱。但是,对于无标度网络,边定向方法特别是非随机方向确定策略能显著提高网络鲁棒性。这些结果独立于节点的权重参数。

(6) 以通信网络为背景,考虑网络拥塞全局信息的难以获得性,提出了一种基于局域拥塞信息的、带有可调参数的路由策略。在此基础上,引入含有生灭过程的包跳模型,以及考虑一种过载节点的失效机制,构建了一种级联故障模型。依据新的度量网络抵制级联故障鲁棒性指标,在典型的模型网络上探讨了由蓄意节点攻击而引发的级联故障行为,分析了路由参数、拥塞信息时间延迟、包产生率、网络拓扑等对网络鲁棒性的影响,发现了存在使得网络达到最强鲁棒性的路由参数最优值。此外,将局域路由扩展成全局路由(难实施),研究了拥塞信息有限性与网络鲁棒性之间的相关性,并得到了一些有价值的结论。

本书研究阶段得到了国家自然科学基金（61403183）与湖南省哲学社会科学基金（14YBA340）的支持。由于编著者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者和专家批评指正。

丁 琳
于南华大学

目 录

第 1 章	概述	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究进展	4
1.2.1	复杂网络理论研究进展	4
1.2.2	级联故障研究进展	10
1.3	研究存在的主要问题	16
1.4	主要研究内容和章节安排	17
第 2 章	复杂网络的理论基础	21
2.1	引言	21
2.2	复杂网络的基本概念	21
2.3	复杂网络的结构度量	24
2.3.1	节点的度与度分布	24
2.3.2	簇系数	25
2.3.3	最短路径与平均路径长度	26
2.3.4	介数	27
2.3.5	度相关性	28
2.3.6	模块性	29
2.4	典型的网络拓扑及其演化模型	29
2.4.1	规则网络	30
2.4.2	随机网络	30
2.4.3	小世界网络	31
2.4.4	无标度网络	32
2.5	复杂网络的鲁棒性	34
2.6	本章小结	37
第 3 章	基于灰色信息的复杂网络上级联故障建模研究	38
3.1	引言	38
3.2	模型描述	39

3.3	网络拓扑	41
3.4	模型仿真与分析	42
3.5	本章小结	47
第 4 章	基于分布式流的加权复杂网络上级联故障建模研究	49
4.1	引言	49
4.2	模型描述	50
4.2.1	节点负载和边负载	51
4.2.2	节点(或边)的级联故障过程	52
4.3	模型仿真与分析	53
4.3.1	节点的级联故障	54
4.3.2	边的级联故障	60
4.4	本章小结	63
第 5 章	基于节点介数加权的复杂网络上级联故障建模研究	64
5.1	引言	64
5.2	模型描述	65
5.2.1	加权流局域重新分配原则	65
5.2.2	加权方案	66
5.3	网络拓扑	67
5.4	模型仿真与分析	68
5.4.1	模型中的参数分析	68
5.4.2	与度相关加权方案的对比分析	74
5.5	本章小结	78
第 6 章	边攻击下随机无标度网络抵制级联故障的鲁棒性研究	80
6.1	引言	80
6.2	模型描述	81
6.3	模型分析与仿真	83
6.4	本章小结	89
第 7 章	具有单向边和双向边的复杂网络抵制级联故障的鲁棒性研究	90
7.1	引言	90
7.2	边定向与级联模型描述	91
7.2.1	边定向方法	91
7.2.2	级联模型	92

7.3	模型仿真与分析	94
7.3.1	BA 网络的结果	95
7.3.2	WS 网络的结果	99
7.4	本章小结	103
第 8 章	基于局域拥塞信息路由的复杂网络上级联故障建模研究	105
8.1	引言	105
8.2	复杂网络上的路由策略介绍	106
8.2.1	基于全局静态信息的路由策略	107
8.2.2	基于局域静态信息的路由策略	109
8.3	模型描述	110
8.3.1	基于局域拥塞信息路由的流动力学	110
8.3.2	级联故障过程	112
8.4	模型仿真与分析	115
8.4.1	模型中参数的分析	115
8.4.2	与全局拥塞信息路由的对比分析	123
8.5	本章小结	126
第 9 章	总结与展望	127
9.1	本书的主要工作和结论	127
9.2	对未来工作的研究展望	130
参考文献		131

第1章 概述

1.1 研究背景与意义

大千世界中广泛存在着各种精彩纷呈的复杂系统,这些系统有的是经过漫长的岁月自然地演化和发展形成的,有的是由勤劳智慧的人类建造的。随着人类认识能力的提高,人们发现这些真实的复杂系统可以抽象为网络。所谓网络,简单来说,是由若干节点和节点之间的连线(边)组成的,其中节点代表的是系统中的个体,而边则表示的是个体间的相互作用关系^[1-3]。例如,如果把生物体内的神经细胞看作节点,那么这些节点通过神经纤维的连接构成神经网络;如果把社会团体中的个人看作节点,把人与人之间的朋友关系看作边,那么就形成了一个社会关系网络;如果把路由器或自治系统看作节点,把通信介质如光缆等看作边,那么就构成了因特网(Internet);类似的还有万维网(WWW)、电力网络、交通网络、金融网络等。

毋庸置疑,现实世界中的网络系统给人类的日常生活和生产带来了极大的便利,人类的生活质量与生产效率得到了大大提高,网络系统自身的功能也随之越来越强大,但与此同时,它们的复杂程度也随之增加,确保这些网络系统安全和可靠运行的难度也越来越大^[4-6]。网络系统中的节点与其他节点或与外界环境之间都存在着信息、能量或物质的交换,在开放的交换过程中,不可避免地受到系统内部和外部的干扰。其中某些突发的微小扰动都可能是致命的,某个或少数几个节点可能会因此而故障,由于节点之间的耦合关系,故障的节点可能引发系统内故障的级联反应,使得故障在整个系统中传播,最终导致系统功能的丧失,即系统崩溃的灾难性后果。

故障的这种传播或蔓延现象普遍发生在各种基础设施网络系统中^[1-9],如通信网、交通网、电力网、供水网、供气网等。在这些网络中,输运着与人类生活密切相关的大量的流,这些流可以是信息、能量或物质,网络

组分(节点或边)因此而承受着负载,且网络组分对负载的承受能力是有限的。这样,一个微小的扰动,即一个或少数几个网络组分出现的故障,会导致流在网络上重新分配,进而可能使得其他某些网络组分因为过载而故障,这些组分的故障又可能导致其他组分的“接连故障”,产生级联反应,并可能最终导致网络相当一部分甚至全部崩溃。这种现象就称为级联故障(Cascading Failures),有时也称为“雪崩”。

大规模的级联故障一旦发生,破坏力和影响力往往是极强的。近年来,由级联故障所导致的各种灾难性事件屡见不鲜。2003年8月14日,美国俄亥俄州某市的3条超高压输电线的故障,引起北美的俄亥俄、密歇根、底特律等8个州及加拿大的多伦多、渥太华2个省发生大停电事故^[4]。此次长达29小时的停电损失负荷量61 800 MW,导致约5 000万名居民陷入黑暗,经济损失约300亿美元。2006年12月26日发生在南海台湾附近的地震致使亚太1号海缆、亚太2号海缆、中美海缆、亚欧海缆等几条国际海底通信光缆发生断裂,这一事故造成整个亚太地区的Internet几近瘫痪,多个国家和地区的通信业务也大量中断,且严重影响到金融、商贸等业务活动,经济损失惨重^[9]。2008年1月25日,在我国南方地区遭遇长时间、大范围冰雪天气后,湖南郴州一架输电塔倒塌,一条高压线压在了其下的铁路网上而造成配电所跳闸断电,行驶至湖南耒阳的N582次列车失去电力,从而拉开了连锁反应的序幕,导致了湖南地区电网崩溃、交通瘫痪、人员滞留等,电网崩溃和交通瘫痪又使得一些地区供水停止、食物紧张、燃料告急^[10]……由这些类型的灾难性事件可见,由于网络系统中个体之间甚至系统之间耦合关系的存在,初始扰动所产生的影响往往被放大,并且这种放大的趋势还在增强。这类灾难对人类社会造成了巨大冲击和极其不利的影响,引起全世界的普遍关注。

级联故障通常发生在通信网、电网、交通网、供水网、供气网等基础设施网络系统上,众所周知,这些系统是承载人类社会活动的基本构建,是社会经济繁荣、有序和高速发展的基本支撑条件,同时这些系统又都是典型的复杂系统,它们的复杂性体现在多个方面。首先,从系统的规模来看,它们都包含了众多的节点和错综复杂的边,这些节点和边的数量是随时间不断演化的。其次,从系统的相互作用来看,这些系统的各节点之间都存在着信息、能量或物质的复杂交互。最后,它们都是受环境影响的开放系

统,运行时必然要受到系统内外部的干扰,使得系统的运行规律,尤其是级联故障现象的产生和演变过程变得极其复杂^[9]。对于这样一类系统,应用当前主流的还原论(认识整体必先认识局部)的方法来研究是不行的,需要从整体和宏观的角度去探索整个系统的演化规律,为解决级联故障问题提供理论依据^[11]。

近年来蓬勃发展的复杂网络方法为人们探索系统的复杂性提供了一种重要方法,作为研究复杂性科学和复杂系统的有力工具,复杂网络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),它已成为当今复杂系统与复杂性科学研究中最受关注和最具挑战性的科学前沿课题之一^[1-4]。

而复杂网络兴起的直接原因应归于两篇具有开创意义的文章,它们的发表被看作复杂网络研究新纪元开始的标志。一篇是1998年6月美国的Cornell University(康奈尔大学)的Watts和Strogatz在*Nature*上发表的题为*Collective Dynamics of 'Small-World' Networks*(《“小世界”网络的集体动力学》)的文章,其中第一作者Watts当时是理论和应用力学系的在读博士生,第二作者Strogatz是Watts的导师,是非线性动力学领域的大师级科学家^[12];另一篇是1999年10月美国的University of Notre Dame(圣母大学)的Albert和Barabási在*Science*上发表的题为*Emergence of Scaling in Random Networks*(《随机网络中标度的涌现》)的文章,其中第一作者Albert当时是物理系的在读博士生,第二作者Barabási是Albert的导师,Barabási被称为“网络科学之父”^[13]。这两项工作分别揭示了真实的复杂网络的小世界效应和无标度特性,并构建了吻合相应特性的网络模型,即WS小世界网络模型^[12]和BA无标度网络模型^[13]。

自从小世界效应和无标度特性被发现后,复杂网络在理论和应用方面都得到了迅猛的发展。因为几乎所有的复杂系统都可以通过各种各样的复杂网络来描述,复杂网络可谓无处不在,遍及人类社会和自然界,因此对复杂网络的探讨也渗透到数学、物理学、社会学、生物学、经济学、交通运输、计算机学及系统学等众多不同的领域,成为一门广泛交叉的新兴学科。长期以来学者们在研究各种复杂网络的基础上,一直致力于探索什么样的网络拓扑结构能更好地描述真实系统,以及网络拓扑结构对发生在其上的动力学行为的影响,最终的目的是通过研究的结果来了解和解释在这些网

络之上的系统运作方式,进而预测和控制系统的行为^[1-3,14]。特别是学科之间相互交叉和融合趋势的不断加强推动了对复杂网络共性的揭示,对复杂网络的结构、功能和动力学行为的科学理解及应用已成为网络时代科学研究中一个极其重要的挑战性课题,甚至被称为“网络的新科学”^[4]。

人类社会的日益网络化使得人们对各种关乎国计民生的复杂网络的功能越来越依赖,对这些网络的安全性和可靠性的关注程度也越来越高。尽管做出了很多的努力,但大规模的级联故障仍然在网络上时有发生,且故障规模及造成的损害还可能不断增加。找到更有效的预防和控制级联故障的方法,从而更有效地保护网络是至关重要且十分迫切的。对复杂网络上级联故障的建模就成为人们深入研究级联故障的发生机理、级联故障的预防与控制的有效手段。借鉴以往的模型研究工作,本书在着重分析级联故障实际影响因素的基础上,从新的角度对复杂网络上的级联故障进行建模研究。通过本研究,有助于深入了解级联故障在传播过程中的动态行为和动力学特性,进而给出对网络更合理、有效的保护措施和方法。这对于复杂网络理论的进一步丰富与发展,以及防止大规模的级联故障在网络上的迅速蔓延,提高网络的鲁棒性和安全性,以最大可能地减轻级联故障所导致的各种灾难,具有非常重要的理论意义和应用价值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 复杂网络理论研究进展

自从具有里程碑意义的两篇重要论文(1998年的小世界网络^[12]和1999年的无标度网络^[13])的发表,复杂网络受到了国内外众多学者的关注,掀起了复杂网络研究的热潮。复杂网络研究方法的实质是抓住了复杂系统的抽象本质,即几乎任何复杂系统都可以抽象为网络。因此许多领域的研究人员都以复杂网络为新的视角和方法来探索系统的复杂特性。从1998年开始,很多有关复杂网络的优秀文章都发表在国际一流刊物上,如 *Nature*、*Science*、*Physical Review Letters*、*ACM*;此外,2007年7月,管理科学领域国际最著名的学术期刊 *Management Science* 刊出了复杂系统与复杂网络专辑;2009年9月,国际顶级学术期刊 *Science* 还专门推出了复杂系统与网

络专辑;2010年12月,国内的系统科学学报也推出了混沌和复杂网络理论与应用专辑等。这些都从一定程度上反映了复杂网络已成为当前国内外学术界的前沿研究课题和热门科学。复杂网络有利于人们对不同学科之间的共同规律进行探索,也必将为人类提供全新的认识真实世界的科学知识,并成为人类改造客观世界的有力武器^[15]。

结构和功能是复杂网络研究的两个核心问题,其中网络结构方面主要涉及实证和建模方面的研究,而网络功能则可以通过其上的动力学行为的特性来反映^[1-3]。因此,下面就从实证和建模研究,以及动力学行为研究这两个方面进行研究进展的介绍。

1. 实证和建模研究

实证研究是复杂网络研究中最初始、最基础的一步,其研究结果是促进复杂网络研究快速发展的动力源泉。事实上,也正是通过实证研究才激发了小世界网络和无标度网络的提出。为了揭示其他新的共有特征和性质,进而推动更加符合实际的网络模型的构建,有待于对现实网络进行更为广泛、深入的实证研究。

国内外学者对各类实际网络进行了大量的实证研究,如 Internet (拓扑结构图如图 1.1 所示)^[16,17]、WWW^[18,19]、航空网^[20-22]、公路网^[23,24]、电力网络^[25]、新陈代谢网络^[26]、蛋白质相互作用网络^[27]、食物网络^[28]、物流和供应链网络^[29]、性接触网络^[30]、友谊网络^[31]和合作网络^[32]等。研究发现,这些网络的拓扑结构大多具有一些共同的特性,如大的簇系数和小的平均路径长短,且网络的节点度分布具有幂律分布(即无标度特性^[14])。

近年来越来越多的实证数据表明,通过单纯的拓扑网络来描述实际网络是远远不够的。纯拓扑网络会丢失实际网络的边和节点上的很重要的物理信息,即边和节点的强度(也就是权重)。以 Internet 为例,流经某条边和某特定路由器的信息量可以描述这条边和这个路由器在信息传输过程中的重要性,而这种重要性无法通过拓扑网络进行描述。因此研究能够反映更多物理信息的超越单纯拓扑结构的网络势在必行,加权网络成为研究人员的首选。对于加权网络,除了拓扑特性,还有与权重相关的统计特性需要关注,尤其是拓扑特性与权重的关联性,这为细致和全面地理解相应系统的组织结构提供了一个新方法。人们在分析实证数据的基础上发现了许多有趣现象:大多加权网络,不仅度分布具有幂律分布的特性,其边权和节

点权的分布同样具有这样的特性，以及节点的权和度之间具有幂函数这种非线性关系等。

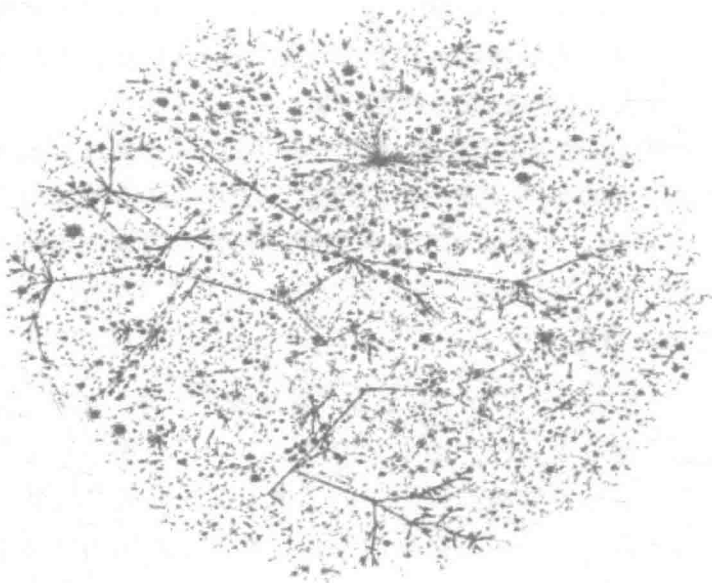


图 1.1 Internet 自治系统 (Autonomous System, AS) 层面上的拓扑结构图
(图片取自文献[2])

例如, Newman^[33,34]对科学家合作网的权重、最短路径及介数的分布特性进行了探讨。之后, Barrat^[35]等以科学家合作网和全球航空网为例, 并将簇系数和邻居节点的平均度也推广到加权网络中, 对该网络的统计特性进行了详细讨论。结果表明, 真实网络中节点的权重和度一样, 同样具有很强的不均匀性, 且它们的权和度之间具有非线性关系等。Macdonald 等对美国航空网络和 E. Coli 新陈代谢网络的实证工作表明, 这两种网络的流量(权重)和拓扑结构之间同样具有非线性关系^[36]。此外, 还有很多关于社会网络、交通网络、神经网络和通信网络等类似的实证工作^[37,38]。这些研究结果都表明, 真实的加权网络具有“富者更富 (rich get richer)”的特性, 也就是大度的节点往往会承受比度更大的权重。这些实证成果为加权网络的建模研究提供了可靠的理论依据。

除了权重, 现实中的许多网络还具有方向性。例如, 一个简单的社会关系网络, 甲认识乙, 但乙并不认识甲, 与乙也认识甲相比, 后者比前者的关系更稳固。这样一层简单的社会关系, 如果只用无向网络来分析, 只能

得到一层关系。而如果把这层关系抽象成有向网络,则可以很直观地区别这两者关系的稳固程度。研究者们通过对现实中的万维网、引文网及食物链网等有向网络的研究,发现它们具有共同的特征(如表 1.1 所示,列举了现实世界中有向网络的统计数据^[2]),并在此基础上发现了有向网络自身的特点。

在实证研究的基础上,结合研究人员对现实网络演化机理的理解和解释,构建网络模型以捕获所认识的共性,再现实际的复杂网络,这就是建模研究^[10,14]。建模研究为复杂网络上动力学行为的研究提供了一个基础和平台,为复杂网络的分析、控制和优化设计提供了有力支持。

表 1.1 现实世界中有向网络的统计数据

网 络		类型	N	M	$\langle k \rangle$	L	r	C
社会 领域	电子邮件	有向	59 912	86 300	1.14	4.95	1.5/2.0	0.16
	电子邮件地址	有向	16 881	57 029	3.38	5.22	--	0.13
信息 领域	WWW (nd.edu)	有向	269 504	1 497 135	5.55	11.3	2.1/2.4	0.29
	WWW (Altavista)	有向	203 549 046	2.13×10^9	10.5	16.2	2.1/2.7	
	论文引用网络	有向	783 339	67 16 198	8.57		3.0/--	
	罗氏字典	有向	1 022	5 103	4.99	4.87	--	0.15
技术 领域	软件包	有向	1 439	1 723	1.2	2.42	1.6/1.4	0.08
	软件类	有向	1 377	2 213	1.61	1.51		0.01
生物 领域	海洋食物网	有向	135	598	4.43	2.05	--	0.23
	淡水食物网	有向	92	997	10.8	1.9	--	0.09
	神经网络	有向	307	2 359	7.68	3.97	--	0.28

注:表中 N 为网络节点数、 M 为边数、 k 为平均度数、 L 为平均最短路径长度、 C 为平均聚类系数、 r 为幂指数,若服从幂律分布,则给出的是出度指数和入度指数,否则为 "--"。

依据网络是否有权重和方向,建模研究可以分为无权无向网络建模研究、加权网络建模研究和有向网络建模研究^[39,40]。首先简单介绍无权无向网络的建模工作。Krapivsky 等^[41]从数值仿真和理论分析两个角度就非线性择优连接对网络的动力学特性和拓扑结构的影响做了研究。这两种方法的研究结果表明,非线性择优连接机制改变了网络的无标度特性,而当择优连接的概率和节点的度之间具有近似线性关系时,将会产生无标度网络,并且其幂指数在 $[2, \infty)$ 之间是可以任意调节的。Dorogovtsev 等分别研究了节

点初始吸引度^[42]和加速增长^[43]对无标度特性的影响,发现这两个因素并不会改变网络的无标度特性,而只会对幂指数的大小产生影响。Albert 等^[44]就内部边的添加和删除等局域事件的发生对网络演化的影响做了探讨,发现了从无标度网络到随机网络的相变区域。Holme 和 Kim 等^[45]引入“三角形形成”机制,构建了簇系数可调的无标度网络模型。通过调节“三角形形成”的概率可以生成具有不同簇系数的无标度网络。李翔等^[46]提出了一个局域世界演化模型,其中,新加入的节点在被随机选择的一个局域网络中依据择优连接机制选择节点来连接,这样可以产生从指数分布到幂律分布过渡的网络。

上述介绍的模型均是无权无向网络的模型,在建模中都假定了每个节点或每条边都是完全相同的。而加权网络和有向网络的建模则分别引入权重和方向来刻画节点或边的差异性,这使得真实网络的结构和功能能够得到更准确的反映。

对于加权网络建模,如 Barrat、Barthélemy 和 Vespignani 等^[47]抓住了加权网络中权重演化的基本机制,提出了一个经典的权重网络演化模型(简称 BBV 模型),此模型可以拟合实际网络中的权重和度的幂律分布。但在该模型中,节点的权重和度之间是线性相关的,与实证研究中得出的两者之间非线性相关的关系不相符。考虑网络上的流动力学特性,王文旭等提出了一个加权网络演化模型,该模型不仅可以刻画实际网络中权重和度的幂律分布特性,还能拟合出权重和度之间的非线性相关关系,以及较大的簇系数和度-度负相关等特性^[48]。随后王文旭等又提出了双向选择加权网络模型^[49]和双向吸引加权网络模型^[50]。而在有向网络建模方面,如 Tadić 等模拟生成一个出弧动态变化的 WWW 网络模型^[51]。Schwartz 等运用渗流理论研究了有向无标度网络模型中出度和入度的相关性^[52]。Ramezanpour 等在一个小世界网络模型中研究了有向短程与长程传播的影响^[53]。总的来说,目前关于无权无向网络的建模研究成果要比加权有向网络的研究多很多。事实上,在实际的复杂网络中,权值和方向的动态演化过程与拓扑演化一样复杂,且近年来越来越多网络实证数据的获得使得探讨加权有向网络的演化成为可能。因此加权有向网络的模型研究正在被越来越多的研究者所关注。