

信息时代网络化战争丛书

网络结构与动力学

The Structure and Dynamics of NETWORKS

〔美〕马克·纽曼(MARK NEWMAN)
〔美〕艾伯特-拉斯洛·巴拉巴希(ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI)
〔美〕邓肯·沃茨(DUNCAN J. WATTS)

著

于全 译



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

信息时代网络化战争丛书

网络结构与动力学

The Structure and Dynamics of NETWORKS

〔美〕马克·纽曼(MARK NEWMAN)

〔美〕艾伯特-拉斯洛·巴拉巴希(ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI) 著

〔美〕邓肯·沃茨(DUNCAN J.WATTS)

于全 译

北京邮电大学出版社

· 北 京 ·

The Structure and Dynamics of Networks
Copyright © 2006 by Princeton University Press

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher.

网络结构与动力学

Copyright © 2006 by Princeton University Press

版权所有。未经出版者的书面许可,本书的任何部分不得以任何方式复制或传播,包括以电子的或机械的方式影印或录制。

内 容 简 介

自 20 世纪 90 年代以来,对网络科学的研究受到广泛的关注和重视,网络科学研究所取得的成果已经被广泛地应用于计算机网络、生命科学、社会科学等诸多研究领域。本书从大量的期刊和出版著作中节选了网络科学研究领域的部分经典论文,主要内容包括:网络科学的历史发展,网络的经验统计分析,网络模型,复杂网络理论在领域中的应用等内容。本书最后对网络科学研究领域的发展方向进行了展望。

著作权合同登记号 图字:01-2008-1656

图书在版编目(CIP)数据

网络结构与动力学/(美)纽曼(Newman, M.), (美)巴拉巴希, (美)沃茨(Watts, D. J.)著;于全译. —北京:北京邮电大学出版社, 2008

ISBN 978-7-5635-1629-2

I. 网… II. ①纽…②巴…③沃…④于… III. 计算机网络—研究 IV. TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 041755 号

书 名: 网络结构与动力学
作 者: [美]马克·纽曼(MARK NEWMAN) [美]艾伯特·拉斯洛·巴拉巴希(ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI)
[美]邓肯·沃茨(DUNCAN J. WATTS)
译 者: 于 全
责任编辑: 陈岚岚 李欣一 张珊珊
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)
发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京忠信诚胶印厂
开 本: 889 mm×1 194mm 1/16
印 张: 44
字 数: 881 千字
印 数: 1—2 300 册
版 次: 2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1629-2

定 价: 88.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

序 言

近年来,诸如因特网、万维网,以及各类社会与生物学网络已经成为研究热点。从物理与计算机科学到生物与社会科学,研究人员已经发现大量系统可以用网络来表示,并且通过研究那些网络我们可以更加了解这些系统。例如,对网的研究导致了新的强有力的网络搜索引擎的出现,这些搜索引擎比以前的要有效得多。对社会网络的研究已经使得人们对疾病的蔓延有了新的认识,对控制它们的技术也有了新的认识。对新陈代谢网络的研究让我们了解了生命基本构成要素的知识,并为分析由基因序列产生的大量生物化学数据、微阵列实验,以及其他技术提供了新的工具。

本书中我们节选了部分研究论文,包含了我们认为是这种新的科学分支中最重要的方面。这些论文选自各个领域、多种不同期刊,包含了网络研究的经验的以及理论的各个方面。除论文本身外,还有一些对其内容的注释,用以强调我们认为是每一篇论文中最重要的发现,并提供其他相关文献名供读者参考。

在简短的引言(第1章)之后,本书以收集的早期论文(第2章)开篇,这些论文虽然是在网络研究热潮出现前完成的,但却为后期的研究奠定了重要的基础。第3章选取了各领域中关于对网络的经验性研究的论文,并包含了许多作为理论发展基础的原始经验数据。然后在第4章中(占据本书最大部分的章节)我们

探讨各种网络模型,特别关注了随机图模型、小世界模型,以及无尺度网络模型。第5章讲述了网络思想在现实问题中的应用,如流行病学、网络鲁棒性,以及搜索算法。最后,在第6章中我们给出了一个对当前最新发展以及接下来的几年中该领域发展方向的简短讨论。当然,这里肯定有许多当前我们还不能预知的发展,在进入21世纪之时,我们也真心期盼研究人员能够提出新的思想。

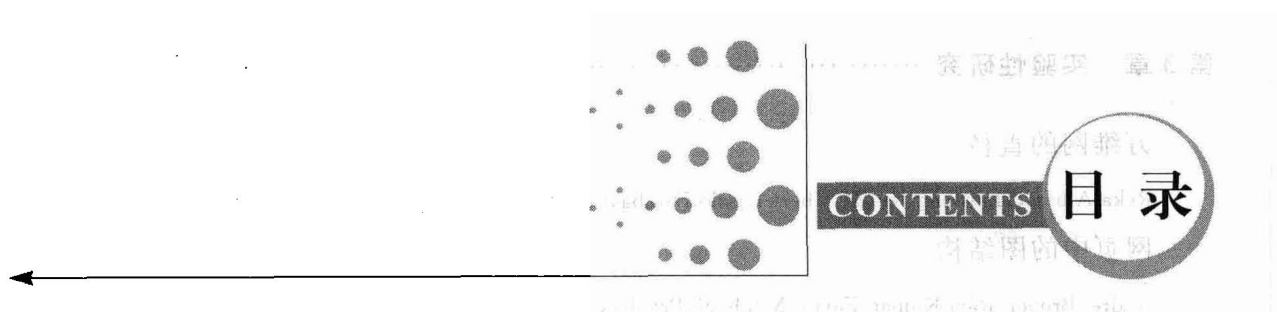
这个领域发展迅速,每天都有新的论文出现,因此对这些论文做一个全面的摘录是不可能的;一些重要的和有价值的论文不可避免地被忽略。虽然如此,我们希望将一些有代表性的论文节选进本书中,为网络相关领域的学生及研究人员提供有用的帮助。

对于本书的创作许多人值得我们感谢。首先,我们必须感谢我们的编辑 Vickie Kearn 以及普林斯顿大学出版社的全体人员,是他们使得本书得以成功出版。还要感谢 Adam Makkai,是他将构成本书首篇的原始匈牙利文论文翻译过来。当然,与许多该领域中博学的同事的交流使我们受益匪浅。他们为本书提供了大量素材,并且我们也很高兴成为这种积极的、令人鼓舞的科学团体的一部分。

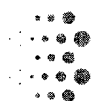
马克·纽曼(Mark Newman)

艾伯特-拉斯洛·巴拉巴希(Albert-László Barabási)

邓肯·沃茨(Duncan J. Watts)



第 1 章 引言	1
1.1 网络研究的简史	1
1.2 网络“新”科学	3
1.3 本书概要	7
第 2 章 历史上的发展	8
链-环	
Frigyes Karinthy	18
随机网络的连通性	
Ray Solomonoff, Anatol Rapoport	21
关于随机图的演化	
P. Erdős, A. Rényi	29
关系和影响力	
Itihel de Sola Pool, Manfred Kochen	68
小世界问题的实验性研究	
Jeffrey Travers, Stanley Milgram	112
科学论文网络	
Derek J. de Solla Price	126



著名的 Paul Erdős 追踪	
Rodrigo de Castro, Jerrold W. Grossman	136
第 3 章 实验性研究	157
万维网的直径	
Réka Albert, Hawoong Jeong, Albert-László Barabási	171
网页中的图结构	
Andrei Broder, Ravi Kumar, Farzin Maghoul, Prabhakar Raghavan, Sridhar Rajagopalan, Raymie Stata, Andrew Tomkins, Janet Wiener	174
关于因特网拓扑结构的幂律关系的研究	
Michalis Faloutsos, Petros Faloutsos, Christos Faloutsos	191
小世界网络的分类	
L. A. N. Amaral, A. Scala, M. Barthélemy, H. E. Stanley	212
新陈代谢网络的大规模组织	
H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z. N. Oltval, A. -L. Barabási	220
新陈代谢中的小世界	
David A. Fell, Andreas Wagner	227
网络的图形: 复杂网络的基本组成要素	
R. Milo, S. Shen-Orr, S. Itzkovitz, N. Kashtan, D. Chklovskii, U. Alon	231
科学协作网的结构	
M. E. J. Newman	237
人类性关系网	
Fredrik Liljeros, Christofer R. Edling, Luís A. Nunes Amaral, H. Eugene Stanley, Yvonne Åberg	248
第 4 章 网络模型	251
4.1 随机图模型	251
具有既定度序列的随机图的临界点	
Michael Molloy, Bruce Reed	260
大规模图的随机图模型	
William Aiello, Fan Chung, Linyuan Lu	278
具有任意度分布的随机图及其应用	
M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, D. J. Watts	298



4.2 小世界网络模型	328
“小世界”网络的集体动力行为	
Duncan J. Watts, Steven H. Strogatz	343
小世界网络交叉图的证据	
Marc Barthélemy, Luis A. Nunes Amaral	350
小世界网络模型中的标度和渗透特性	
M. E. J. Newman, D. J. Watts	357
小世界网络模型的属性研究	
A. Barrat, M. Weigt	379
4.3 无尺度网络模型	402
随机网络中尺度的出现	
Albert-László Barabási, Réka Albert	415
基于优先连接的扩张网络结构	
S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes, A. N. Samukhin	422
成长随机网络中的连通性	
P. L. Krapivsky, S. Redner, F. Leyvraz	429
网络进化过程的竞争及多尺度机制	
G. Bianconi, A. -L. Barabási	436
无尺度网络负载分布的通用性行为	
K. -I. Goh, B. Kahng, D. Kim	443
超出半圆定律的“现实世界”图的谱	
Illés J. Farkas, Imre Derényi, Albert-László Barabási, Tamás Vicsek	450
无尺度随机图生成过程的度序列	
Béla Bollobás, Oliver Riordan, Joel Spencer, Gábor Tusnády	473
一种大规模蛋白质组进化模型	
Ricard V. Solé, Romualdo Pastor-Satorras, Eric Smith, Thomas B. Kepler	485
第5章 复杂网络的应用	497
5.1 流行病及谣言的传播	497
5.2 网络的鲁棒性	505
5.3 网络搜索	509



两层混合的流行病学模型	
Frank Ball, Denis Mollison, Gianpaolo Scalia-Tomba	518
局部空间结构对流行病入侵的影响	
M. J. Keeling	554
流行病学模型中的小世界效应	
Marcelo Kuperman, Guillermo Abramson	570
流行病在无尺度网络中的传播	
Romualdo Pastor-Satorras, Alessandro Vespignani	578
一个随机网络全局级联的简单模型	
Duncan J. Watts	586
复杂网络的容错及攻击耐受性研究	
Réka Albert, Hawoong Jeong, Albert-László Barabási	600
Internet 对随机性节点失效的容错力分析	
Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben-Avraham, Shlomo Havlin	608
网络的鲁棒性与脆弱性:随机图中的逾渗理论	
Duncan S. Callaway, M. E. J. Newman, Steven H. Strogatz, Duncan J. Watts	613
超链接环境中的权威源	
Jon M. Kleinberg	620
幂指数网络中的搜索研究	
Lada A. Adamic, Rajan M. Lukose, Amit R. Puniyani, Bernardo A. Huberman	652
第 6 章 展望	667
参考文献	671

网络无处不在。从因特网以及它的近亲万维网到经济网络、疾病传播网络,甚至是恐怖分子网络,网络的影子遍及整个现代文明。

通过网络我们究竟想确切表达什么呢?这里又有什么类型的网络呢?它们的存在又是如何影响事件的发生呢?在过去的几年里,各种不同的科学家小组,包括数学家、物理学家、计算机学家、社会学家、生物学家,已经在积极地探索这些问题,并在对这个新的领域进行研究的过程中建立了网络理论,或者叫“网络科学”(Barabási 2002; Buchana 2002; Watts 2003)。

尽管网络科学仍处在一个快速发展的时期,并且每天都有新的论文出现,一些有名的文献已经开始在这个新的领域积累起来,因此似乎可以通过一种合适的方法对其进行总结,以使得对这个话题不熟悉的学者可以了解它,这就是本书的目的。在本章中,我们首先介绍了网络研究的简史,它是在数学和社会学的研究过程中产生的;然后通过描述一系列与以前不同的特征来将这种“新”的网络科学置于新的背景当中,并解释这些特征重要的原因;在本章的结尾,将给出本书其余部分的概要和轮廓。

1.1 网络研究的简史

对网络的研究在数学及其他自然科学领域有了很长的历史。1736年,伟大的数学家莱昂哈德·欧拉开始对叫做 Königsberg 桥问题的数学之谜产生了兴趣。当时是普鲁士的 Königsberg 市建在 Pregel 河两岸,两块陆地的中间是河流。有七座桥连接着两块陆地,如

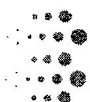
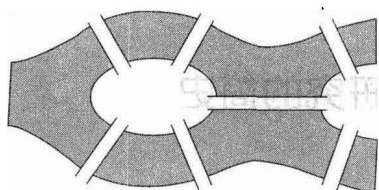


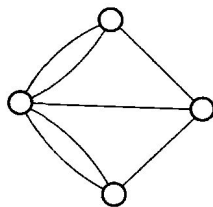
图 1.1 所示(现如今要比过去的多)。当时有一个广为人知的难题:“是否存在一条单一的路径能穿过每一座桥且每座桥只穿过一次呢?”传说中 Königsberg 的人民在欧拉证明这是一个不可能的问题之前曾花费了很长时间来试图找到这样一条路径。欧拉的证据(现在对我们来说或许是微不足道的,但在 1736 年却是很难理解的)是利用一个图——由点(也叫做顶点或节点)以及线(也叫做边或连接)构成——的数学对象,该数学对象剔除了原问题中的细节,仅反映节点间的连通性。图中的 4 个顶点代表了 4 块陆地,7 条连接 4 个顶点的边代表 Königsberg 桥(如图 1.2 所示)。这样,七桥问题就可以用数学语言改述为:在这个网络中是否存在欧拉路径。欧拉路径就是一条经过每一条边一次的路径。欧拉证明这是不存在的,其证据是明显的:既然任何一条这样的路径都要进入及离开它所经过的每一个顶点(除了第一个和最后一个),那么网络中具有奇数边的顶点至多有两个。在图论的语言中我们说,在这里最多有两个具有奇数度的顶点,顶点的度就是连接到它上面的边的数目。既然 Königsberg 图的 4 个顶点都具有奇数的度,七桥问题必然无解。网络中欧拉路径的存在问题,以及相关的汉密尔顿函数路径问题(到达每个顶点仅一次的路径),仍然是数学家们非常感兴趣的问题,也始终都有新的结果发现。



图 1.1 18 世纪的 Königsberg 市,七座桥被明显标出



(a) 七桥问题中的河和桥的样式的简绘图



(b) 相应的网络顶点和边

图 1.2 七桥问题

许多人认为,在现代高度发展的图论离散数学领域中,欧拉的证明是第一法则,在过去的3个世纪里,它已经变成描述网络特征的基本数学语言(Harary 1995; West 1996)。网络的最简单的形式就是一系列离散的要素(顶点),以及一系列连接这些要素的线路(边),特别是在成对样式中。这些要素和线路可以是任何事情——人和友情(Rapoport 和 Horvath 1961)、计算机和通信线路(Faloutsos 等 1999)、化学物及反应(Jeong 等 2000; Wagner 和 Fell 2001)、科学论文和引用(Price 1965; Redner 1998)——这导致一些人怀疑如此广泛的定义如何能把这么多领域的研究内容都描述成特定的基本问题呢?但是也正是因为其定义的广泛性才使得图论的应用如此广泛。通过剔除问题的细节,图论能够清晰地描述重要的拓扑特征,而这在保留所有细节的情况下是不可能实现的。因此,图论的应用已经超越了其原始的纯数学领域,特别是过去的几十年里,它已经被应用到工程学(Ahuja 等 1993)、作战研究(Nagurnet 1993),以及计算机科学(Lynch 1996)。图论在社会学领域的应用更为广泛,得到了该领域研究人员的普遍认同和欢迎。

从19世纪50年代开始,为响应人们对量化方法在社会学和人类学中的兴趣的不断增加,社会学家们开始运用图论这种数学语言分析诠释人种学研究中采集的数据(Wasserman 和 Faust 1994; Degenne 和 Forse 1999; Scott 2000)。大部分社会网络分析的术语——元素聚合度、路径长度、阀、连接组件等——要么是直接取自图论,要么是从它演变而来,用以描述社会网络中的状态、影响、协作、社会角色,以及身份等问题。因此,除了作为一种描述抽象模型的语言,图论也成为一种分析经验数据的实用工具。同样也是从19世纪50年代开始,数学家们开始将图看成是各种影响——特别是信息和疾病——传播的媒介(Solomonoff和Rapoport 1951; Erdos 和 Rényi 1960)。因此,网络系统的结构特性,特别是其连通性,可以与行为特性(如传染病的预期传播范围或者全球信息传送的可行性)联系在一起。与这种研究趋势相关的是图被看成是随机目标而不是确定目标的思想(Erdos 和 Rényi 1960; Rapoport 1963),因此图的特性也可以根据概率分布(近年来高度发展的一种方法)来考虑。

1.2 网络“新”科学

那么还要补充什么呢?如果图论是一种应用如此广泛的通用语言,又是如此完美有效,那么新网络科学还有发展空间么?我们认为过去几年中得到快速发展的网络科学与先前关于网络的研究主要有三个不同点:①通过关注真实世界网络的特性,它是与经验以及理论问题联系在一起的;②它认为网络不是静态的,而是根据动态的规则随时间的不同



而发展变化的;③其最终的目的不仅是将网络理解为拓扑结构,而且是一种分布式动态系统所依托的框架。正如我们将在第3章中看到的,所有这些主题的要素都是在当前的网络研究热潮出现前已经形成的,但是将它们综合起来研究却是新的尝试。

真实世界网络建模

旧网络科学与新网络科学之间的第一个区别是,除社会网络分析外,传统的网络理论还没有充分探讨自然网络的结构。图论中的很多内容是纯数学问题,主要关注人工构建的组合特性。纯图论是优美的并且是难懂的,但它并不仅仅是专门与真实世界中的网络相关的。正如其名字所暗示的,应用图论主要是关注真实世界中的网络问题,但是它的方法却是适用于设计和工程学的。相反,作为本书主题的最近的著作主要聚焦于自然网络,它们以非计划、离散的方式发展变化。社会网络和生物学网络就是这样一种网络,同样还有信息网络(如引用网络和万维网)。但是实际的分类包含的还要广,包括服务于单个或并列的目的(运输、电力传送、通信)的网络(如运输网络、电网,以及物理的因特网),它们都是由多个不同的机构或政府通过长期的努力建立的。社会网络主要是依靠经验的,但是在本质上它是易于描述而不是易于构建的。由于具有几种特定随机图模型的可能例外(Holland 和Leinhardt 1981;Strauss 1986;Anderson 等 1999),社会科学中的网络分析在很大程度上避免了建模,而更倾向于描述从收集到的数据中观察得到的网络特性。

与传统的图论及网络分析不同,本书中引用的著作既采用了理论的也采用了经验的观点。为开发一种能够说明真实世界网络结构特征的新的图形理论模型,我们必须首先能够说明那些特征是什么,因此经验数据也是必要的。但是如果正确理解任何特别的经验发现的意义,还需要大量理论模型。就如在传统科学(在这里理论和实验是相互激励的)中一样,网络科学是建立在经验发现和建模的双重基础之上的。

科学有效性这一明显需求在这个领域中的迅速出现乍看起来令人惊奇,但是考虑到获得高质量、大规模网络数据在当时是很困难的,这又是可以理解的。在过去50年的大部分时间里,网络数据的收集局限于在社会网络分析领域,在这个领域通过测量手段来收集的数据不仅对管理员来说是繁重的,还要受到目标不准确或主观因素的影响。事实证明,人们并不擅长记住谁是他们的朋友,因为“朋友”的定义一开始就是相当不明确的。

例如,综合社会调查要求回答者说出6个他们与之讨论“重要事情”的个人的名字。这种假定认为:与他们讨论重要事情的人往往都是对他们很重要的人。因此这类问题——所谓的“姓名发生器”——是一种可行的确定社会关系的方法。然而,Bearman 和 Parigi 在2004年做的一项调查表明,当人们被问及这类他们讨论的“重要事情”时,他们答

出的是我们可以想象得到的任何话题,其中包括许多我们大多数人一点也不感兴趣的事情。更加不可思议的是,某些话题是与家庭成员讨论的,某些话题是与好友谈的,某些话题是与同事谈的,甚至还有一些是与完全陌生的人谈的。因此,仅通过考虑由综合社会调查中的问题得到的名字来推断回答者的社会关系网络是相当不充分的。Bearman 和 Parigi 同时也发现,大约有 20% 的回答者一个名字也未提及。人们可能会认为这些人是“社会隔离者”——没有可以说话的人——然而这些“隔离者”中却有 40% 的人结婚了!可能这些发现揭示了当前社会生活中的重要的行为样式——或许许多人,甚至是已经结婚的人,真的没有一个可以说话的人,或者没有任何需要讨论重要的事情。但是很显然,鉴于不同的调查方法和工具对数据有不同的诠释,参与调查的人在应答或研究人员在工作中都可能出现一些问题,因此基于这些调查而得出的对社会网络的推断都应辩证地看待。

综合社会调查的例子是具有指导意义的,因为它代表了与传统的、基于调查的网络数据收集相关的不确定性。如果一个人连他们最亲近的朋友都不能确定,他人又如何能指望从他那里得到关于更加微妙关系的可信信息呢?与这一障碍相适应,如果测量工具变得更加精制及专业的话,那么随着被调查人口数量的增加,研究人员分析和理解这些原始结果数据的工作将更为困难。一个较好的方法将是直接记录目标的活动和相互作用,因此避免了回忆问题并且让我们能够用固定的标准来定义关系。然而,在准确的记录技术出现之前,这样直接观察的方法对管理员来说甚至比调查更加费力。

由于编辑数据的任务相当繁重,社会网络数据收集所涉及的人数很少多于一百人,并且从来没有超过一千。其他(非社会)的网络没有遇到同样的困难(在过去的 10 年中很少有这样经验性的例子),或许是因为其他基于网络的学科与社会学相比缺少经验焦点的缘故。高质量、大规模网络数据缺乏的结果是延迟了本书中大部分著作所关心的这类统计模型的发展。正如我们将看到的,这类模型应用到大型网络中是非常成功且有益的,但是当应用到小型网络时,却可能不起作用或得不出正确的结果。例如,人们已经开始研究恐怖分子之间的联系网络,如 Krebs(2002),但是他们缺乏统计建模的对象,因为在本质上对这类网络的兴趣问题是没有统计学规律的,在整个网络中应该更加关注于个人或小组。传统的社会网络分析工具——聚合指数、结构测量,以及社会资本的衡量——在这种例子中会更加有用。

然而,近些年来,网络数据集的有效性有了显著提高,数据集经常包含数千有时甚至是上百万顶点——这是电子数据库甚至是地位更加重要的因特网的实用性不断增强的结果。因特网不仅将注意力集中在网络或网络系统研究,而且它还推动了社会和其他网络数据收集的新方法的出现,同时避免传统社会人际交往中的许多困难。例如,科学协作网

络现在能够通过像 Medline 以及科学引用指数(Newman 2001a; Barabási 等 2002)这样的电子数据库来进行实时的记录,而且更加有发展前景的数据源,如电子邮件日志(Ebel 等 2002; Guimera 等 2003; Tyler 等 2003)和即时消息服务(Smith 2002; Holme 等 2004)都有待于进一步开发。由于要比传统社会网络分析的数据集大得多,这些网络更应该通过物理学家和数学家所熟悉的统计学技巧来进行研究。如本书第 3 章的论文所展示的,实际网络、从引用网络和万维网到生物化学反应网络,都有图论理想模型尚未解决的问题——如局部聚集和偏斜度分布,这也推动了建模方法的发展,其中一部分在第 4 章中作了介绍。

网络结构是发展变化的

鉴于过去图论和社会网络分析都倾向于将网络结构看成是静态的,本书的第二个与以往不同的特性就是收录的著作已经认识到网络是动态的(Barabási 和 Albert 1999; Watts 1999)。许多网络都是顶点或边在增加或减少的动态过程的产物。例如,一个关于友情的社会网络随着个人与他人关系的建立和解除而不断变化。一个有许多熟人的人,由于其与别人联系紧密或被人所熟知,他将比那些与别人联系不紧密的人更容易交到新朋友。个人交友所遇到的也很有可能是那些大家都熟知的人。人们的这种联系影响着网络的形态,并且网络的形态也影响着人与人之间的关系。社会网络结构因此以一种(历史上)依赖的方式发展变化,在这种方式中参与者的角色和他们所遵循的行为方式不能被忽略。

类似的情况也适用于其他类型的网络:局部水平上的过程处理既限制了网络结构同时也受到网络结构的限制。网络新科学(第 4 章中的多篇论文都将提及)的一个基本目标就是理解全局范围内(比如说,将网络的连通性看成是一个整体)的结构是如何依赖于运作在局部水平(例如,规则支配着新顶点的外观和连接)上的动态过程的。

网络是一个动态的系统

本书所记述的研究工作的最后一个与以往不同的特征就是:传统的网络方法都往往忽视或简化网络系统的结构特性与其行为的关系。相反,最近许多关于网络的著述都采用了一种动态系统的观点,将图中的顶点看成是离散的动态实体,有自己的行为规则,将边看成是实体间的耦合。这样一个相互作用的个体网络,或者一个病毒正在扩散的计算机网络,不仅具有了拓扑特性,同时也有了动态特性。例如,相互作用着的个体可能相互影响其选择以达到一个集体的意志(如投票选举),同时,计算机病毒能不能蔓延也取决于



计算机连接的样式。将会出现什么结果,出现的频繁程度如何,以及会带来什么后果,都是只能通过综合考虑结构和动态以及两者关系来解决的问题。

然而,这种类型的问题并不容易处理,动态问题是网络研究的前沿问题,而网络研究本身依然有着很多未解决问题。已经部分解决是在 5.1 节中讨论的传染动态学的问题。不管我们是对疾病的传播感兴趣还是对技术变革的扩散感兴趣,它都是网络中经常发生的传染问题。不仅是物理的,还有社会的联系都能显著影响一种既定疾病或信息传送的可能性,同样也影响它将产生的效果。在传统的数学流行病学中,以及对信息扩散的研究中,人们通常假定所有成员之间的相互作用都是相同的。显然,一旦我们将网络的结构考虑进去,这种假定就需要修改。如 5.1 节中所示的论文,通过特定网络结构传播的传染病会对整个人群产生显著影响。

1.3 本书概要

与上面介绍的主题相对应,本书被分成许多部分,每部分都有一个简要的介绍,指出该部分的主题及在本书中的作用。第 2 章通过收录部分我们认为对当前研究做出历史贡献的论文拉开本书序幕。尽管当前关于网络的著述采用了一种与传统网络研究完全不同的方法,对第 2 章进行详细的阅读将揭示许多基本的主题,这些都是数学家和社会科学家几年甚至是几十年前就已经预期的。尽管已过多年,某些贡献看起来仍非常熟悉,而且并不过时,很少有最近的论文能完全取代以前的研究结果。幂律分布、具有局部聚类的随机网络、远程捷径的思想,以及小世界现象都在新的网络科学用数学物理学语言重新组成之前被很好地探索和分析过。

第 3 章重要介绍了新网络科学的经验性研究,第 4 章列出了部分已经激起人们很大兴趣和积极性的基础建模思想。通过探索一些第 3 章和第 4 章介绍的思想的试验性的应用,第 5 章将读者带到网络科学的前沿,研究网络结构和系统动态的关系。从疾病的传播和网络的强健性到探索算法,第 5 章是一个很少有人理解却发展很快的前沿主题的文集。最后,第 6 章提供了一个对我们把什么看成是未来研究最感兴趣的方向的简短讨论。我们希望读者能够有勇气从本书的论文中将某些思想剔出,然后加上他或她自己的思想,并作用于这个令人兴奋的、快速发展的领域。

历史上的发展

网络研究在数学及科学领域已经有很长的历史了,至少可以一直追溯到第1章中讨论的1736年莱昂哈德·欧拉对 Königsberg 七桥问题的解决。在这一章中我们选择了早期一系列关于各类网络的文章。我们所感兴趣的是那些来自数学图论的论文及关于社会网络的著述。例如,我们所知的关于随机图的经典网络模型,也是在4.1节中我们要详细讨论的,在19世纪50年代初到60年代末被 Paul Erdős 及 Alfred Rényi 在一系列的论文中重新发现和分析之前,是被俄国数学家和生物学家 Anatol Rapoport 在19世纪50年代初首先描述的。也是在同一个时期,社会科学家和数学家, Ithiel de Sola Pool 及 Manfred Kochen, 在一个早期的关于网络的预印本中共同给出了一个关于“小世界”的完美和有影响力的讨论。

因此,本书主要介绍物理学和应用数学领域对网络的研究,有许多至关重要的、至少在某种程度上激励了我们所熟知的工作的思想或许七十年前就已经出现了。本章中引用的文章对某些关于这些话题的原始著述作了总结,并且为后面章节出现的素材做好了准备。

Karinthy(1929)

本章中引用的第一篇出版物事实上根本不算是科技论文,而是翻译的一个故事,一篇虚构的小说,它最初在1929年发表于匈牙利。当然,这不是科学出版物的通常的开篇方法,但是,读者将看到的,这个发表于70年前的简短故事,描述了一个关于网络结构的、在过去几十年驱动这个领域研究的基本真理,也就是今天人们所知道的“小世界”或“六度分离”的概念。