

N S E

3

网 络 科 学 与 工 程 丛 书

网络科学导论

Network Science:
An Introduction

■ 汪小帆 李 翔 陈关荣 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

网络科学与工程丛书

N S E

3

WANGLUO KEXUE DAOLUN

网络科学导论

Network Science:
An Introduction

■ 汪小帆 李翔 陈关荣 编著

图书在版编目 (CIP) 数据

网络科学导论 / 汪小帆, 李翔, 陈关荣编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2012. 4
(网络科学与工程丛书 / 陈关荣主编)
ISBN 978-7-04-034494-3

I. ①网… II. ①汪… ②李… ③陈… III. ①计算机
网络-研究 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 056171 号

策划编辑 刘 英 责任编辑 刘 英 封面设计 李卫青 版式设计 余 杨
责任校对 金 辉 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 26
字 数 480 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012 年 4 月第 1 版
印 次 2012 年 4 月第 1 次印刷
定 价 69.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34494-00

“网络科学与工程丛书” 编审委员会

名誉主编：郭 雷院士 金芙蓉院士 李德毅院士

主 编：陈关荣

副 主 编：史定华 汪小帆

委 员：（按汉语拼音字母排序）

陈增强	狄增如	段志生	方锦清
何大韧	胡晓峰	来颖诚	李 翔
刘宗华	陆君安	吕金虎	欧阳颀
汪秉宏	王青云	谢智刚	许晓鸣
张翼成	周昌松		

序

随着以互联网为代表的网络信息技术的迅速发展，人类社会已经迈入了复杂网络时代。人类的生活与生产活动越来越多地依赖于各种复杂网络系统安全可靠和有效的运行。作为一个跨学科的新兴领域，“网络科学与工程”已经逐步形成并获得了迅猛发展。现在，许多发达国家的科学界和工程界都将这个新兴领域提上了国家科技发展规划的议事日程。在中国，复杂系统包括复杂网络作为基础研究也已列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》。

网络科学与工程重点研究自然科学技术和社会政治经济中各种复杂系统微观性态与宏观现象之间的密切联系，特别是其网络结构的形成机理与演化方式、结构模式与动态行为、运动规律与调控策略，以及多关联复杂系统在不同尺度下行为之间的相关性等。网络科学与工程融合了数学、统计物理、计算机科学及各类工程技术科学，探索采用复杂系统自组织演化发展的思想去建立全新的理论和方法，其中的网络拓扑学拓展了人们对复杂系统的认识，而网络动力学则更深入地刻画了复杂系统的本质。网络科学既是数学中经典图论和随机图论的自然延伸，也是系统科学和复杂性科学的创新发展。

为了适应这一高速发展的跨学科领域的迫切需求，中国工业与应用数学学会复杂系统与复杂网络专业委员会偕同高等教育出版社出版了这套“网络科学与工程丛书”。这套丛书将为中国广大的科研教学人员提供一个交流最新研

究成果、介绍重要学科进展和指导年轻学者的平台，以共同推动国内网络科学与工程研究的进一步发展。丛书在内容上将涵盖网络科学的各个方面，特别是网络数学与图论的基础理论，网络拓扑与建模，网络信息检索、搜索算法与数据挖掘，网络动力学（如人类行为、网络传播、同步、控制与博弈），实际网络应用（如社会网络、生物网络、战争与高科技网络、无线传感器网络、通信网络与互联网），以及时间序列网络分析（如脑科学、心电图、音乐和语言）等。

“网络科学与工程丛书”旨在出版一系列高水准的研究专著和教材，使其成为引领复杂网络基础与应用研究的信息和学术资源。我们热切希望通过这套丛书的出版，进一步活跃网络科学与工程的研究气氛，推动该学科领域的普及，并为其深入发展作出贡献。

金芳蓉（Fan Chung）院士
美国加州大学圣地亚哥分校
2011 年元月

前言

20 世纪 60 年代 Milgram 的小世界实验通过对几百人的抽样调查得出了“六度分离”推断。2011 年底，全球最大的在线社交网站 Facebook 上超过 7 亿活跃用户构成的好友关系网络的实证研究表明，这一用户规模超过全球人口总数 10% 的网络的平均距离居然比 6 还要小。世界就是如此奇妙：它在不断增大的同时却又在不断变小，这就是网络的力量。网络科学就是旨在探究复杂网络的奥秘。

尽管网络科学的历史可以追溯到 18 世纪欧拉对于“七桥问题”的研究，但网络科学作为研究各种复杂网络的共性特征的学科应该说兴起于 20 世纪末。我们非常有幸作为最早进入这一领域的国内学者，亲身参与并亲眼见证了网络科学的成长。2002 年 1 月，我们率先发表了两篇关于具有小世界和无标度拓扑结构的网络同步的文章。在过去的 10 年里，我们既感受到了网络科学蓬勃发展的生机活力，也体验到了人们不断修正不全面或者不恰当甚至是错误认识的曲折艰辛；既感受到了网络科学对于众多不同学科研究人员的吸引力，也体验到了由于学科背景不同而带来的矛盾、冲突与碰撞。这些都体现了网络科学作为一门极富交叉性的新学科在成长过程中的真实风采与魅力，一个越来越明显的趋势是：大家正在以越来越紧密的网络方式从事网络科学研究。

正是由于网络科学的不断发展和日益普及，近年来，众多高校先后针对研究生甚至本科生开设了网络科学相关课程，包括本书三位作者分别在上海交通大学、复旦大学和香

港城市大学开设的课程。国内也相继出版了几本介绍网络科学的著作。其中,我们于2006年春编著的《复杂网络理论及其应用》(清华大学出版社)力求对2006年之前的研究有较好的介绍;同年由郭雷和许晓鸣两位教授主编的《复杂网络》(上海科技教育出版社)则是由国内多位学者分别撰写有关章节组成的综述性文集,反映了当时国内的研究进展。2009年由三位物理学者何大彻、刘宗华和汪秉宏编著的《复杂系统与复杂网络》(高等教育出版社)尽管篇幅不长,但对网络科学中常用的一些方法做了很好的介绍。2011年由毕桥和方锦清研究员编著的《网络科学与统计物理方法》(北京大学出版社)则对作者团队和国内外的一些相关研究成果作了较为详细的介绍。

近年来,国际上许多著名大学,如美国的麻省理工学院、哈佛大学、康奈尔大学、哥伦比亚大学、密歇根大学、东北大学和杜克大学,英国的剑桥大学,德国的汉堡大学,等等,也相继开设了网络科学相关课程,并陆续出版了一些教科书。其中,值得一提的是两本于2010年出版的教材。一本是密歇根大学物理学家 Mark Newman 的《Networks: An Introduction》。该书内容广泛,对于网络的数学理论、物理方法以及算法分析都有较为细致的介绍,适合具有较好数理基础的研究生和科研人员做专业阅读。另一本是康奈尔大学经济学家 David Easley 和计算机科学家 Jon Kleinberg 合著的《Networks, Crowds, and Markets: Reasoning About a Highly Connected World》。该书是两位作者在康奈尔大学面向本科生开设的一门交叉学科课程的教材,较为适合入门阅读。

考虑到国内学者,特别是青年学子的迫切需求,我们近几年一直希望能够撰写一本水平适当的网络科学的教材,并作为不同层次读者学习和研究网络科学的参考书。由于网络科学具有极强的交叉学科特色,同时从事网络科学研究或对此感兴趣的人员来自众多不同的学科,作为教材,本书在素材的选取上着眼于网络科学的基本概念、思想和方法,使得具有高等数学基础的读者都能够看懂。我们希望读者在阅读本书后能够把基本的概念与方法运用于分析具体网络,不会过多地陷入数学和物理推导,而是更为关注网络科学的思维

习惯和研究方式。例如，在介绍网络拓扑性质时，我们在阐述了一个基本概念后会介绍实际网络的特征，并说明如何用合适的图表和指标来刻画这一特征，从而使读者掌握科学分析实际网络拓扑性质的方法；在介绍小世界和无标度网络模型时，我们以 20 世纪末的两个经典工作为例，阐述了网络科学研究的范式；在最后 3 章介绍网络结构与动力学的关系时，我们选介了一些重要的最新研究成果，以让读者感受到网络科学的前沿脉搏。

当然，正是基于这样一本教材的定位以及网络科学极为丰富的研究成果，本书不得不舍去许多重要的内容。例如，本书没有拘泥于数学上的严格论证，对于许多基于统计物理的研究没有给予充分的介绍，没有阐述结构洞和结构平衡等社会网络分析方法，也没有详细介绍在生物网络或者 Internet 等实际网络中的应用。所幸的是，“网络科学与工程丛书”将邀请专家学者就各种专题撰写高水平著作。此外，我们也有意识地使本书与其姊妹篇《Introduction to Complex Networks》（英文版）在内容安排上各有侧重，互为补充。例如，本书对社团检测算法做了较为详细的介绍，而英文版只是在最后一章中简单提及；英文版有单独一章介绍 Internet 拓扑建模，而本书没有安排单独介绍。

本书可作为 3 学分的研究生课程的教材使用。如果是 2 学分的课程，那么可以考虑对于第 4.3 节 ~ 第 4.5 节关于社团结构的内容，以及第 5.5 节关于节点相似性与链路预测的内容等只做简单介绍；对于涉及网络动力学的第 9 章 ~ 第 11 章亦可只选讲其中的部分章节。如果是作为本科生教材，则可根据实际情况对内容做进一步取舍。此外，书中还选编了一批习题供选做，希望能有助于读者更好地理解 and 运用网络科学的概念与方法。本书的配套网站（<http://zhiyuan.sjtu.edu.cn/Course/netsci.htm>）提供了与每一章对应的 PPT 讲义，并且将根据网络科学的进展适时补充新的材料。

过去 10 年与网络科学领域众多学者和学生的讨论、交流与合作使我们受益颇丰。尽管无法一一列举他们的名字，但我们衷心感谢大家的支持与帮助。在本书写作过程中，荣智海博士提供了第 10 章关于网络博弈的初稿，吕琳媛博

士提供了第 5.5 节关于节点相似性与链路预测的初稿，她和周涛博士还就节点重要性以及网络传播提供了很有价值的建议。姚建玲协助撰写了第 7.4 节和第 7.5 节关于小世界网络搜索的内容。王瑛仔细阅读了本书初稿并纠正了不少文字和公式错误，还协助承担了文字格式处理工作。赵九花协助校对了初稿并绘制了大量的插图。王林和唐长兵也对第 8 章和第 9 章的内容提出了很好的建议。

作者们特别感谢高等教育出版社刘英女士对网络科学的持续关注和本书出版的大力支持。她的敬业让我们感动，她的鞭策使我们不敢懈怠，她的专业让本书增色许多。

十分感谢家人们对我们持续忙碌的科研工作的充分理解和大力支持。

作者汪小帆和李翔感谢上海交通大学和复旦大学的支持，感谢国家自然科学基金委多年来通过国家杰出青年基金、国家自然科学基金重点项目和面上项目、国家自然科学基金委与香港研究资助局联合科研资助基金项目、教育部新世纪优秀人才支持计划等的支持，感谢国家重点基础研究发展计划（973 计划）等项目的支持。作者陈关荣感谢香港研究资助局和香港城市大学的多项经费的支持。

作为具有控制科学背景的研究人员，我们深知反馈对于改进系统性能的重要性。因此，热忱欢迎读者们对本书的任何意见和批评及时反馈给我们，以便我们能及时更正并在重印或再版时进一步提高本书质量。

汪小帆，上海交通大学自动化系复杂网络与控制研究室
李 翔，复旦大学电子工程系自适应网络与控制研究室
陈关荣，香港城市大学混沌与复杂网络学术研究中心

2012 年春

目 录

第1章 引论	1
1.1 引言	2
1.2 网络时代的网络研究	3
1.2.1 Internet	3
1.2.2 WWW	6
1.2.3 电力与交通网络	7
1.2.4 生物网络	8
1.2.5 经济与金融网络	10
1.2.6 社会网络	13
1.2.7 科研和教育的网络化	18
1.3 网络时代的网络科学	21
1.3.1 为什么需要网络科学	21
1.3.2 网络科学的研究内容	23
1.4 本书内容简介	27
参考文献	30
第2章 网络与图	35
2.1 引言	36
2.2 网络的图表示	37
2.2.1 图的定义	37
2.2.2 图的类型	38
2.2.3 简单图	43
2.3 图的计算机表示	44

2.3.1 邻接矩阵	44
2.3.2 邻接表与三元组	46
2.4 共引与文献耦合	47
2.4.1 共引网络	48
2.4.2 文献耦合网络	49
2.5 路径与连通性	51
2.5.1 路径	51
2.5.2 连通性	52
2.5.3 路径与连通性的邻接矩阵表示	53
2.5.4 割集与 Menger 定理	54
2.5.5 有向图的连通性	55
2.6 生成树与最小生成树	56
2.6.1 树	56
2.6.2 广度优先搜索算法	57
2.6.3 最小生成树	59
2.7 二分图与匹配问题	64
2.7.1 二分图的定义	64
2.7.2 二分图的实际例子	65
2.7.3 二分图到单分图的投影	66
2.7.4 二分图的匹配	69
2.8 稳定匹配	70
2.8.1 稳定匹配的定义	70
2.8.2 稳定匹配的求解	72
2.8.3 稳定匹配的公平性	74
2.8.4 完全匹配存在的条件	75
习题	76
参考文献	78
第 3 章 网络基本拓扑性质	81
3.1 引言	82
3.2 复杂网络的连通性	83
3.2.1 无向网络中的巨片	83
3.2.2 有向网络中的蝴蝶结结构	85
3.3 节点的度与网络稀疏性	87

3.3.1 度与平均度	87
3.3.2 出度与入度	88
3.3.3 网络稀疏性与稠密化	89
3.4 平均路径长度与直径	91
3.4.1 无权无向网络情形	91
3.4.2 加权有向网络情形	94
3.5 聚类系数	96
3.5.1 无权无向网络情形	96
3.5.2 加权网络情形	100
3.6 度分布	104
3.6.1 度分布的概念	104
3.6.2 从钟形曲线到长尾分布	105
3.7 幂律分布	108
3.7.1 幂律度分布及其检验	108
3.7.2 幂律分布的性质	112
习题	115
参考文献	117
 第4章 度相关性与社团结构	 119
4.1 引言	120
4.2 度相关性与同配性	120
4.2.1 高阶度分布的引入	120
4.2.2 联合概率分布	121
4.2.3 余平均度	124
4.2.4 同配系数	126
4.2.5 实际网络的同配性质	126
4.2.6 同配概念的一般化	128
4.3 社团结构与模块度	131
4.3.1 社团结构的描述	131
4.3.2 模块度	131
4.3.3 加权和有向网络的模块度	133
4.4 基于模块度的社团检测算法	134
4.4.1 CNM 算法	134
4.4.2 层次化社团检测	136

4.4.3 多片网络社团检测	138
4.4.4 空间网络社团检测	140
4.5 其他社团检测算法	141
4.5.1 模块度的局限性	141
4.5.2 派系过滤算法	142
4.5.3 连边社团检测算法	144
4.5.4 社团检测算法的评价标准	149
习题	152
参考文献	153
第 5 章 节点重要性与相似性	157
5.1 引言	158
5.2 无向网络节点重要性指标	158
5.2.1 度中心性	158
5.2.2 介数中心性	159
5.2.3 接近中心性	161
5.2.4 k -壳与 k -核	162
5.2.5 特征向量中心性	165
5.3 权威值和枢纽值: HITS 算法	166
5.3.1 引言	166
5.3.2 HITS 算法描述	167
5.3.3 HITS 算法的收敛性	168
5.4 PR 值: PageRank 算法	171
5.4.1 基本算法	171
5.4.2 PageRank 算法	174
5.4.3 排序鲁棒性与网络结构	177
5.5 节点相似性与链路预测	178
5.5.1 问题描述与评价标准	178
5.5.2 基于局部信息的节点相似性指标	181
5.5.3 基于全局信息的节点相似性指标	183
5.5.4 基于随机游走的相似性指标	185
习题	187
参考文献	189

第 6 章 随机网络模型	193
6.1 引言	194
6.2 从规则网络说起	196
6.2.1 常见规则网络	196
6.2.2 基本拓扑性质	198
6.3 随机图	199
6.3.1 模型描述	199
6.3.2 拓扑性质	202
6.3.3 巨片的涌现与相变	205
6.3.4 随机图与实际网络的比较	209
6.4 广义随机图	211
6.4.1 配置模型	211
6.4.2 配置模型的理论分析	214
6.5 随机重连与零模型	216
6.5.1 零模型	216
6.5.2 随机重连	218
6.6 基于零模型的拓扑性质分析	220
6.6.1 比较判据	220
6.6.2 度相关性分析	221
6.6.3 模体分析	223
6.6.4 同配性质分析	226
习题	228
参考文献	229
第 7 章 小世界网络模型	231
7.1 引言	232
7.2 小世界网络模型	233
7.2.1 WS 小世界模型	233
7.2.2 仿真分析	235
7.2.3 实际验证	236
7.2.4 动力学分析	236
7.2.5 NW 小世界模型	238
7.3 拓扑性质分析	239
7.3.1 聚类系数	239

7.3.2 平均路径长度	242
7.3.3 度分布	243
7.4 Kleinberg 模型与可搜索性	245
7.4.1 Kleinberg 模型	245
7.4.2 最优网络结构	248
7.4.3 Kleinberg 模型的理论分析	250
7.4.4 在线网络实验验证	256
7.5 层次树结构网络模型与可搜索性	259
7.5.1 模型描述	259
7.5.2 E-mail 网络验证	262
习题	266
参考文献	267
第 8 章 无标度网络模型	269
8.1 引言	270
8.2 BA 无标度网络模型	272
8.2.1 模型描述	272
8.2.2 幂律度分布	273
8.3 Price 模型	276
8.3.1 模型描述	276
8.3.2 幂指数可调的入度分布	278
8.3.3 幂指数可调的无向无标度网络	280
8.3.4 优先连接机制的计算机实现	281
8.3.5 节点复制模型	283
8.4 无标度网络模型的推广	285
8.4.1 适应度模型	286
8.4.2 局域世界演化网络模型	290
8.5 鲁棒性与脆弱性	293
习题	297
参考文献	298
第 9 章 网络传播	301
9.1 引言	302
9.2 经典的传染病模型	306

9.2.1 SI 模型	306
9.2.2 SIR 模型	307
9.2.3 SIS 模型	308
9.3 几类网络的传播临界值分析	309
9.3.1 均匀网络的传播临界值	309
9.3.2 非均匀网络的传播临界值	310
9.4 复杂网络的免疫策略	314
9.4.1 随机免疫	314
9.4.2 目标免疫	314
9.4.3 熟人免疫	315
9.5 节点传播影响力分析	316
9.6 行为传播的实证研究	321
习题	323
参考文献	324
 第 10 章 网络博弈	 327
10.1 引言	328
10.2 博弈模型	330
10.2.1 囚徒困境博弈	330
10.2.2 其他两人两策略博弈	333
10.2.3 两人两策略博弈分类	336
10.3 规则网络上的演化博弈	338
10.3.1 规则网络上的囚徒困境博弈	338
10.3.2 规则网络上的雪堆博弈	342
10.4 小世界网络上的演化博弈	345
10.5 无标度网络上的演化博弈	348
10.5.1 度不相关无标度网络上的演化博弈	348
10.5.2 度相关无标度网络上的演化博弈	353
习题	357
参考文献	359
 第 11 章 网络同步与控制	 363
11.1 引言	364
11.2 网络同步判据	365