北京工业大学211学科建设成果

无标度网络及其应用

关 峻 蒋同明 著

科学出版社

本书获教育部高校博士点基金项目（20111103110021）和北京市教育委员会社科计划重点项目（SZ201110005002）的支持。

北京工业大学211学科建设成果

无标度网络及其应用

关 峻 蒋同明 著

安徽大学图书馆
藏书
www.lib.ahu.edu.cn

科学出版社

内 容 简 介

作为北京工业大学211学科建设成果之一，本书立足于复杂网络理论中的无标度网络理论，结合近年的研究成果，向读者提供可参考的资料。本书内容分为三个部分，即上、中、下三篇，共计十七章内容。上篇是本书研究的理论基础，为中篇和下篇的实证研究提供研究依据；中篇基于无标度网络视角，对复杂生态系统具有的网络特征和系统特性加以分析和研究；下篇是从无标度网络角度出发，重点针对科技园区创新网络的形成机理进行剖析，并强调其动态性，最后对中关村软件园创新网络的动态演化过程加以研究。

本书适合高等院校学生、教师和科研人员阅读，对从事复杂网络研究的工作人员具有一定的参考和借鉴价值。

图书在版编目(CIP)数据

无标度网络及其应用 / 关峻，蒋同明著. —北京：科学出版社，2013

ISBN 978-7-03-038018-0

Ⅰ.①无… Ⅱ.①关… ②蒋… Ⅲ.①网络理论-应用-社会统计-研究 Ⅳ.①C91-03

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 136039 号

责任编辑：林 剑 / 责任校对：彭 涛

责任印制：钱玉芬 / 封面设计：耕者设计工作室

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

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本：B5（720×1000）

2013 年 6 月第一次印刷 印张：19 1/2

字数：380 000

定价：98.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

总　　序

“211 工程”是新中国成立以来教育领域唯一的国家重点建设工程，即面向21 世纪重点建设一百所高水平大学，使其成为我国培养高层次人才，解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地，形成我国高等学校重点学科的整体优势，增强和完善国家科技创新体系，跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛，尤其是 1400 多所地方高校约占全国高校总数的90%，已成为我国高等教育实现大众化的重要力量，成为区域经济和社会发展服务的重要生力军。

在北京市委、市政府的高度重视和大力支持下，1996 年 12 月我校通过了“211 工程”部门预审，成为北京市属高校唯一进入国家“211 工程”重点建设的百所大学之一。我校紧紧抓住“211 工程”建设和举办奥运会的重要机遇，实现了两个历史性的转变：一是实现了从单科性大学向以工科为主，理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学的转变；二是实现了从教学型大学向教学研究型大学的转变。“211 工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用，学校在学科建设、人才培养、科学研究、服务北京等方面均取得了显著的成绩，综合实力和办学水平得到了大幅度的提升。

至 2010 年底，我校的学科门类已经覆盖了工学、理学、经济学、管理学、文学、法学、哲学和教育学。现拥有 8 个一级学科博士学位授权点、37 个二级学科博士学位授权点和 15 个博士后科研流动站，15 个一级学科硕士学位授权点和 81 个二级学科硕士学位授权点；拥有 6 种类型硕士研究生专业学位授权资格，工程硕士培养领域 19 个；拥有 3 个国家重点学科、16 个北京市重点学科和 18 个北京市重点建设学科。

目前，学校有专任教师 1536 人，其中全职两院院士 5 人，博士生导师 220 人，正高级职称 294 人和副高级职称 580 人；专任教师中具有博士学位教师的比例达到 54．6%；有教育部“长江学者”特聘教授 4 人，国家杰出青年基金获得者 6 人，入选中组部“千人计划”1 人，北京市“海聚工程”3 人，教育部新（跨）世纪优秀人才支持计划 15 人。

2010 年学校的到校科研经费为 6.2 亿元。“十一五”期间，学校承担了国家科技重大专项 28 项，“973 计划”项目 16 项，“863 计划”项目 74 项，国家杰出青年基金 2 项，国家自然科学基金重点项目 8 项、科学仪器专项 2 项、重大国际合作项目 1 项、面上和青年基金项目 347 项，北京市自然科学基金项目 180 项，获国家级奖励 14 项。现有 1 个共建国家工程研究中心，7 个部级或省部共建科研基地，11 个北京市重点实验室和 3 个行业重点实验室。

为了总结和交流北京工业大学“211 工程”建设的科研成果，学校设立了“211 工程”专项资金，用于资助出版系列学术专著。这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北工大未来，我们任重而道远。我坚信，只要我们珍惜“211 工程”建设的重要机遇，构建高层次学科体系，营造优美的大学校园，我校在建设国际知名、有特色、高水平大学的进程中就一定能够为国家，特别是为北京市的经济建设和社会发展作出更大的贡献。

中国工程院院士
北京工业大学原校长 左铁镛
2011 年 6 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

前　言

近年来，学术界对复杂网络的研究方兴未艾，在国际上掀起了一股不小的研究热潮，目前，复杂网络研究已经获得了惊人的发展，不仅各种研究成果层出不穷，而且理论与实践的紧密结合使该学科更加充满生机，其中研究领域不断拓展，包括生命科学领域的各种网络（如细胞网络、蛋白质相互作用网络、蛋白质折叠网络、神经网络、生态网络）、万维网、社会网络（流行性疾病的传播网络、科学家合作网络、语言学网络）等。复杂网络通常具有自组织、自相似、小世界、无标度等部分或全部特性，该学科的研究内容主要包括网络的几何性质、网络的形成机制、网络演化的统计规律、网络上的模型性质及网络的结构稳定性、网络的演化动力学机制等问题。

关于复杂网络的研究，学者们更多的是从实证角度加以分析研究，随着社会经济、科技文化的发展，更复杂的网络不断涌现，而且越来越多的网络呈现出简单网络所不具备的特点，需要更深入地研究。尤其在解决实际问题时，不能简单停留在分析一些网络结构问题，应该结合模型和算法，进一步找出网络的特征，并提出合适的描述、分析、优化和协调的方法。

本书的目的在于利用已有的关于复杂网络理论尤其是无标度网络理论，结合我们的研究成果，向读者提供可参考的资料。本书内容大致分为三个部分，即上篇、中篇、下篇，共计 17 章内容。

上篇是本书研究的理论基础，为中篇和下篇的实证研究提供研究依据，上篇共计 4 章内容。其中第 1 章介绍复杂网络研究背景；第 2 章重点给出了复杂网络基本理论及相关网络类型，并对复杂网络具有的结构特征进行描述；第 3 章重点对无标度网络的定义和结构特征进行分析；第 4 章从系统的角度认识复杂网络的系统特性。

中篇基于无标度网络视角，对复杂生态系统具有的网络特征和系统特性进行分析和研究，共计 7 章内容。其中第 5 章交代了本篇选题背景、意义及理论依据，并对生态系统生态学研究现状进行了述评；第 6 章重点对生态系统要素进行分析，并对生态系统的构成、生态系统的演化过程进行研究；第 7 章对生态系统的复杂特性进行深入剖析；第 8 章重点对复杂生态系统的无标度网络特征进行了

分析；第 9 章构建了复杂生态系统的无标度网络模型；第 10 章结合具体的案件进行研究分析；第 11 章是对中篇部分的研究总结和展望。

下篇是从无标度网络角度出发，重点针对科技园区创新网络的形成机理进行剖析，并强调其动态性，最后对中关村软件园创新网络的动态演化过程加以研究。本篇共计 6 章内容，其中第 12 章交代了本篇的研究背景和研究意义，并对国内外相关研究成果进行了概述；第 13 章构建了科技园区创新网络演化模型，并从微观的角度对科技园区创新网络的无标度网络特征加以分析，同时对网络运行效应进行了概括；第 14 章从宏观的角度对科技园区创新网络的系统特性加以剖析，发现科技园区创新网络是一类典型的复杂适应系统，具有自组织、自学习、自适应的特征，并指出成熟的创新网络表现出明显的涌现现象；第 15 章重点对科技园区创新网络的自组织演化过程加以分析研究，并概括了创新网络演化阶段和演化趋势；第 16 章结合具体的案例对科技园区创新网络动态演化过程加以验证分析；第 17 章为该篇研究的总结与展望。

编写本书的主旨在于帮助读者认识现实生活中的一些复杂网络，希望引起读者对复杂网络研究的兴趣，对生活实践中存在的形形色色的系统从复杂网络的视角进行审视和分析，从而解决复杂网络系统问题，同时丰富复杂网络的理论。

本书是在前人探索和努力的基础上形成的，在写作过程中借鉴了一些国内外文献和研究成果，在此谨向相关专家学者表示衷心的感谢。

由于著者对复杂网络研究也是处于起步阶段，限于著者的水平和见识，书中难免有疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

关　峻　蒋同明

2013 年 3 月 10 日

目　　录

总序
前言

上篇　无标度网络相关理论

1　导论 …… 3
2　网络相关理论 …… 5
　2.1　复杂网络内涵 …… 5
　2.2　相关网络类型 …… 9
　2.3　复杂网络结构特征 …… 11
3　无标度网络 …… 16
　3.1　无标度网络的定义 …… 17
　3.2　无标度网络的结构特征 …… 19
　3.3　无标度网络的动力学行为 …… 23
4　复杂系统 …… 26
　4.1　系统的复杂性 …… 26
　4.2　复杂系统的特征 …… 29
　4.3　复杂适应系统 …… 30
参考文献 …… 31

中篇　基于无标度网络的复杂生态系统研究

5　引论 …… 37
　5.1　生态系统生态学 …… 39
　5.2　国内外研究现状 …… 42
　5.3　研究目标、方法和主要创新点 …… 48
6　生态系统要素分析 …… 50
　6.1　生态系统的结构分析 …… 50

6.2 生态因子特性 …… 56
6.3 生态因子分析 …… 57
6.4 生态系统的主要过程 …… 62
7 复杂生态系统的系统特性 …… 69
7.1 复杂生态系统是远离平衡态的耗散结构 …… 69
7.2 复杂生态系统具有自组织临界性 …… 72
7.3 本章小结 …… 75
8 复杂生态系统的无标度分析 …… 77
8.1 无标度网络是研究复杂生态系统的正确方法 …… 78
8.2 利用无标度网络理论研究复杂生态系统所须做出的改进 …… 81
8.3 本章小结 …… 85
9 复杂生态系统的无标度网络模型 …… 86
9.1 复杂生态系统组成因子网络结构 …… 88
9.2 复杂生态系统无标度网络模型 …… 104
9.3 复杂生态系统无标度网络模型的增长动态性与度分布 …… 111
9.4 本章小结 …… 113
10 关于 L 江水利枢纽工程的实证分析 …… 114
10.1 项目简介 …… 114
10.2 环境现状 …… 115
10.3 构建评估区环境现状网络模型 …… 127
10.4 利用无标度网络理论对评估区生态环境的预测 …… 135
10.5 建设项目对评估区生态环境影响的预测 …… 146
10.6 综合评价与结论 …… 156
10.7 本章小结 …… 158
11 本篇总结与展望 …… 159
11.1 研究总结 …… 159
11.2 研究展望 …… 160
参考文献 …… 161

下篇 基于无标度网络的科技园区创新网络运行机理研究

12 引论 …… 171
12.1 研究背景及意义 …… 171
12.2 国内外研究综述 …… 177

12.3　研究思路与方法 …… 185
12.4　本章小结 …… 188
13　科技园区创新网络理论模型 …… 189
13.1　科技创新网络内涵 …… 189
13.2　科技园区创新网络理论模型 …… 192
13.3　科技园区创新网络的无标度网络特征分析 …… 201
13.4　科技园区创新网络运行效应分析 …… 207
13.5　本章小结 …… 215
14　科技园区创新网络的系统特性分析 …… 216
14.1　科技园区创新网络的复杂性分析 …… 216
14.2　科技园区创新网络的自组织演化机理分析 …… 220
14.3　科技园区创新网络涌现性分析 …… 226
14.4　本章小结 …… 229
15　科技园区创新网络动态演化过程分析 …… 230
15.1　科技园区创新网络的动态演化指标 …… 230
15.2　科技园区创新网络演化阶段分析 …… 235
15.3　科技园区创新网络复制动态演化博弈分析 …… 239
15.4　科技园区创新网络动态演化仿真 …… 244
15.5　本章小结 …… 250
16　实证研究：中关村软件园创新网络动态演化研究 …… 251
16.1　数据调查和研究方法 …… 251
16.2　中关村软件园创新网络动态演化分析 …… 257
16.3　中关村软件园创新网络存在的问题及优化建议 …… 286
16.4　本章小结 …… 288
17　本篇结论与展望 …… 290
17.1　研究结论 …… 290
17.2　研究展望 …… 291
参考文献 …… 292

上　篇

无标度网络相关理论

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1 导　　论

20 世纪 60 年代，匈牙利数学家 Erdös 和 Rényi 研究并建立的随机图理论（random graph theory）是公认的复杂网络理论的开创性研究。在 20 世纪的后 40 年中，随机图理论一直是研究复杂网络的基本理论。从 20 世纪末开始，复杂网络研究逐渐渗透到数学、物理、生命科学和社会科学等众多领域，对复杂网络的定量和定性特征的科学理解，已成为网络时代研究的重点课题。在 20 世纪末期及 21 世纪初期，Watts、Barabási 及 Kleinberg 等在 *Nature* 和 *Science* 上先后发表了关于网络的影响深远的文章。其中，Watts 等提出的小世界网络模型指出少量的随机捷径会改变网络的拓扑结构，进而涌现出小世界效应（Watts and Strogatz，1998）；Barabási 等提出的无标度网络模型，揭示了复杂网络自组织演化过程中增长和择优机制存在普遍性，并结合实例证明了无标度网络度分布的幂率特性（Barabási and Albert，1999）；Kleinberg 提出的可导航网络模型解释了如何在网络中利用局部信息寻找最短路径（Kleinberg，2000）。研究表明，复杂网络是由相互关联的节点组成，通常用来描述各种各样的、真实的复杂系统（Strogatz，2001）。复杂网络（complex network）被认为是具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络。复杂网络被誉为“网络中的新科学”（Watts and Strogatz，1998；Strogatz，2001），复杂网络研究历史及代表人物，见表 1-1。

表 1-1　复杂网络研究简史

年份	人物	研究问题
1959	Erdös 和 Rényi	随机图理论
1967	Milgram	小世界实验
1973	Granovetter	弱连接的强度
1998	Watts 和 Strogatz	小世界模型
1999	Barabási 和 Albert	无标度网络

近年来的研究发现，许多现实系统都可以用一个复杂网络来描述。复杂网状

结构一直被用来描述各种各样的有着高技术及高智能系统，如蛋白质、DNA、互联网等（Mendes，2003）。还原论的研究方法在这方面占据着主导地位。人们试图采用自下而上的方法将完整的系统剖析为数个小的次级组成部分，然后通过描述这些部分间的相互关联再现系统的全貌，并取得了巨大的成就。分析工作的成功与否取决于组成部分间相互关联的简化度；其前提要求组成部分间的关联性很明确，且相互作用的强度由物理距离唯一确定（Frauenfelder，2004）。这种方法对描述物理距离不相关的系统，即两部件之间的相互作用不明确的系统无能为力。然而，自然界中绝大多数系统都是这种具有非常规网络的拓扑结构和不明确性的复杂系统。在很多情况下，如果不纠缠于复杂系统的组成部分和其间关系等细节，从较为宏观和整体的角度上考虑的话，复杂系统则更多地呈现为其组成部分和其间关系的集合体，或换句话说，复杂系统就是一种网络（章忠志，2005；Albert，2002；Dorogortsev，2002；Schuster，2002）。

复杂网络通常具有一些相同的特征，如网络平均路径较小、聚类系数较大、节点度分度服从幂律分布等，这些特性是复杂网络为完成某些特定功能而逐渐演化的结果。能够用复杂网络来描述的系统既有人工系统也有自然系统，复杂网络其实是大量真实复杂系统的拓扑抽象，研究复杂系统的切入点往往是研究系统的拓扑结构特性。复杂网络研究的主要内容可以归纳为四点：一是发现，找出用来刻画网络结构的统计性质，选择可以度量这些性质的合适方法。二是建模，建立合适的网络模型用来理解并分析统计性质的意义和产生机理。三是分析，基于单个节点的特性和整个网络的结果性质来分析和预测网络行为。四是控制，提出改善已有网络性能和设计新的网络的有效方法，特别是如何改进网络稳定性问题等。由此可见，通过研究复杂网络，可以揭示隐藏在自然界、社会界、生物界等存在的大量的复杂系统的共同规律，进而揭示复杂系统的宏观及微观特征，这对于调节复杂网络上的动力学行为具有重要的现实意义。

2 网络相关理论

2.1 复杂网络内涵

图论研究最初集中在规则图上，用规则图研究分析系统的网络结构范围很有限。无明确设计原理的大规模网络被描述为随机图，这是最简单也是被多数人认识的复杂网络。1959 年，数学家 Erdös 和 Rényi 首先提出了 ER 随机网络模型（Erdös and Kényi，1959），通过在网络节间随机布置连接，模拟通信和生命科学中的网络，从而奠定了随机网络理论的基础。在实际研究工作中，人们逐渐发现不同复杂系统所模拟的现实网络，如细胞、蛋白质和互联网等却不遵循随机网络的基本特性，而在其系统内体现出一定的组织原则。随机网络模型却不能将这些原则在其拓扑结构的任何层次中代码化，即随机图不能完全反映某些复杂系统网络的拓扑结构。同时随机网络理论属于静态的分析手法，不足以应对普遍存在的动态的演化系统。

在过去几年中，科学的进步使得复杂网络研究所处的环境也发生了巨大的变化。计算机的大规模运用使构造网络拓扑结构的大型数据库的数据采集成为可能。计算机的计算能力迅速增强，成为探索含有数百万个节点的复杂网络的有力工具。以前不可能涉及或阐明的一些问题吸引了越来越多的探索者，他们之间的合作促使整个研究工作逐步跨越了学科的障碍，超越还原主义者的研究方法，揭示复杂网络的一般特性成为整个科学界的统一呼声。在这种发展趋势和外部环境的推动下，涌现出了许多新概念和新方法，其中有三种概念在复杂网络理论中占有重要地位。

2.1.1 小世界理论

小世界（small world）理论认为在大多数网络中，尽管其规模通常很大，但任意两个节点（vertex）间永远存在一条最短的路径。两节点间的距离定义为连接它们的最短路径的边数。小世界最为通用的表现形式就是由社会心理学家

Stanley Milgram（1967）提出的“六度分离”（six degrees of separation）概念，他断定在美国大多数人之间相互认识的途径的典型长度为 6（Kochen，1989）。1998 年，Watts 和 Strogatz 根据 Stanley Milgram 的假设提出了小世界理论（Watts，1998）。他们统计了电影明星网、电力网、Celegans 蠕虫的神经网中节点的平均距离，发现这些网络中节点之间的平均距离都很小，存在小世界现象。小世界特性似乎表征了大多数复杂网络的特性。小世界现象的存在，对于研究现实世界中疾病传播、通信网络改造及计算机网络中病毒传播都具有深刻的启示意义。小世界理论的独特之处在于对于规则网络，任意两个节点之间的平均距离长（通过多少节点联系在一起），但成簇率高；对于随机网络，任意两个节点之间的平均距离短，但成簇率低；而对于小世界网络，节点之间平均距离小，接近随机网络，而成簇率依旧相当高，接近规则网络。值得注意的是随机图中任意两节点间的标准距离可按系统中的节点数的对数换算，因此随机图也具有小世界特性。实际生活中的社会、生态和经济等网络都是小世界网络。在这样的系统中，信息具有很快的传递速度。

2.1.2 集群

集群（clustering）反映的是网络集团化的程度，即测度连接在一起的集团各自的近邻之中有多少是共同的近邻。小集团形态是社会网络的一个共同特征。事实上，人类社会和自然界都可以被区分为一个个具有相似特质的小集群。其表现形式为各种正式的和非正式的团体，其中的每个成员与其他成员间都存在特定的关联。这种内在的群聚倾向可以用群系数（clustering coefficient）来量化（Watts，1998）。研究表明在多种不同类型的系统中，都存在相当明显的集群现象，其中包括美国电力网和线虫的神经网络等。在大多数情况下，实际网络的群系数远大于可与之相比的随机网络。在实际网络观测中，同一集群内部的节点间的连接密度大，而不同集群的节点间的连接密度小。

从表面上看，由高度相互连结的节点组成的孤立集群，似乎与无尺度网络的拓扑结构不相容。因为在无尺度网络中，有一些集散节点会与所有的节点相连结，它们的影响是遍及整个系统的。但是，如果紧密连结的小型节点集群彼此相连，形成较大而松散的大集团，那这样的网络就可以既是高度集群的又是无尺度的。

2.1.3 度分布

度指的是网络中节点与节点的关系（用网络中的边表达）的数量，度的相关性指顶点之间关系的联系紧密性。在现实网络中不是所有节点都有相同的边数（节点度）。节点的度用分布函数 $p(k)$ 表示，也是一个任意选择的节点正好有 k 条边的概率，$\{p(k)\}$ 则表明网络的度分布（degree distribution）。网络中某些节点具有为数众多的连结，而网络中又不存在代表性的节点。介数（betweenness）是一个重要的全局几何量。某一节点的介数含义为网络中所有的最短路径之中，经过该节点的数量。它反映了该节点（即网络中有关联的个体）的影响力。无标度网络的特征主要集中反映了集聚的集中性。

在随机图中，节点间的连接为随机分布的，使得大多数节点的度大致相同，接近网络的平均度 $\langle k \rangle$。随机图的度分布是泊松（Poisson）分布，峰值在 $p(\langle k \rangle)$。而实际探索却揭示出许多大型网络的度分布并不服从于泊松分布。其中尤其引人注目的是某些复杂网络如包括万维网（Barabasi，1999）、互联网（Albert et al.，1999）和新陈代谢网的度分布具有一条幂律尾部。Barabási 和 Albert 于 1999 年将这类网络称为无标度网（Barabási and Albert，1999）。

无标度网络的重要特性表现为大部分节点只有少数几个连结，而某些节点却拥有与其他节点的大量连结。这些具有大量连结的节点称为“集散节点”，其所拥有的连结可能高达数百、数千甚至数百万。这一特性似乎能说明这类网络是无标度的。而无标度网络的重要性在于其可预期的行为特性，如对意外故障具有惊人的承受力，但面对协同式攻击时则很脆弱。

这些发现极大地改变了我们对复杂外部世界的认识。集散节点的存在，让我们认识到了以前的网络理论尚未涉及的问题：各种复杂系统具有相同的严格结构，都受制于某些基本的法则，这些法则似乎可同等地适用于细胞、计算机、自然界、语言和社会。更进一步，认识这些法则，为我们认识和了解周围的复杂世界提供了一种全新的工具。

此外，必须明确一个基本观点：复杂网络是由不同层次的关系网络作为不同层次的节点所组成的一个高层次的关系网络，网络中各节点之间依据一定的规则相互作用并因此而维系着系统整体的存在。现实生活中的任何事物都可以被理解为不同层次的复杂网络（Newoman et al.，2001）。可见复杂系统的网络特征由两个基本要素组成：节点 v 和关联方式 e，若将 V 视为 v 的集合，E 视为 e 的集合，且 E 中的每一条边 e（关联方式）都有 V 的一对点 (i, j) 与之对应，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com