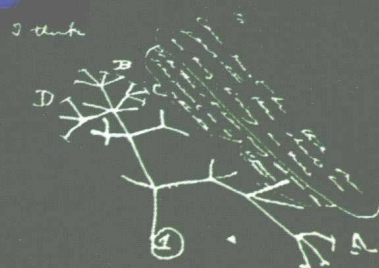
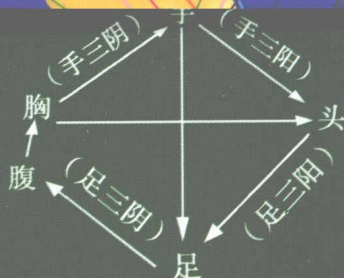
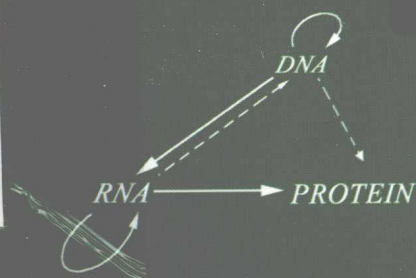


Network Science
Volume III Biological Networks

网络科学

第三卷 生物网络

曾宪钊 编著



军事科学出版社

Network Science
Volume III Biological Networks

网 络 科 学

第三卷 生物网络

曾宪钊 编著

军事科学出版社

图书在版编目(CIP)数据

网络科学(第三卷,生物网络)/曾宪钊编著. - 北京:
军事科学出版社,2010.3

ISBN 978-7-80237-330-3

I. ①网… II. ①曾… III. ①计算机网络-研究
②计算机网络-应用-生物学 IV. ①TP393 ②Q-39
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 037869 号

书 名: 网络科学(第三卷,生物网络)

作 者: 曾宪钊

责任编辑: 朱奎玉

封面设计: 金海燕 何家辉

出版发行: 军事科学出版社(北京市海淀区青龙桥 100091)

标准书号: ISBN 978-7-80237-330-3

经 销 者: 全国新华书店

印 刷 者: 北京鑫海达印刷厂

开 本: 1000 毫米×1400 毫米 B5

印 张: 11.375

字 数: 413 千字

版 次: 2010 年 3 月北京第 1 版

印 次: 2010 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1-2000 册

定 价: 38.00 元

销售热线: (010)62882626 66768547(兼传)

网 址: <http://www.jskxcbs.com>

电子邮箱: jskxcbs@163.com

版权所有·侵权必究 本社图书如有质量问题,请与储运部(010-66767383)联系

前 言

在人类进入 21 世纪之初，网络科学受到世界各国科学、技术、教育、经济及军事等社会各界人士及民众的高度关注。2009 年 7 月 24 日出版的《Science》杂志推出了新专题“复杂系统与网络”，包括 12 篇文章。在其前言“联系”中首先引用了美国黑人民权领袖马丁·路德·金的名言：“我们都无法逃避地处在相互联系的网络中，只要任一事物直接地影响了其中一个人，就会间接地影响其他所有人。”他还写道：“从混沌到复杂性，从我们细胞中的分子运动到全球通信网络，我们都是网络的一部分。本专题将全面介绍目前在各学科领域中科学家们如何‘将网络推向极限’。”（该专题每一篇文章均配有通栏标题“Pushing Networks to the Limit”）

在美国和英国等欧美国家，网络科学的研究正在兴起。2006 年 5 月 16~25 日，国际网络科学学术会议（NetSci 2006）在美国印第安纳大学召开并得到了美国国家科学基金资助；2007 年 5 月 20~25 日，NetSci 2007 在美国纽约科学馆召开，并举办了网络科学图片展览；2008 年 6 月 23~27 日，NetSci 2008 在英国诺里奇生命科学学院召开；2009 年 4 月 24 日，第一届 IEEE 国际网络科学用于通信网络学术会议（NetSciCom 2009）在巴西里约热内卢召开；2009 年 6 月 29 日~7 月 3 日，NetSci 2009 在意大利威尼斯召开，意大利 Sapienza 大学物理系 42 岁的副教授 G. Caldarelli 担任了此次会议的主席，他从事生物学及生态网络研究，建立了网络世界模型并应用于食物网络研究。

在中国，复杂网络的研究也在兴起。2005 年 4 月 9~10 日，首届中国复杂网络学术会议（CCCN05）在武汉大学召开；CCCN06 于 2006 年 11 月 17~19 日在华中师范大学召开；CCCN07 于 2007 年 12 月 1~3 日在上海理工大学召开；CCCN08 于 2008 年 10 月 10~13 日在北京大学召开；CCCN09 于 2009 年 10 月 15~18 日在青岛大学召开。

美国政府和军方高度重视网络科学及其与生物学和医学的交叉融



合。撰写本书就是考虑到这一重大的社会和军事需求。2005年11月1日,美国科学院国家研究委员会所属“陆军科学技术专业委员会”发表了研究报告《网络科学》,其中特别建议美国政府重视利用生物学和网络科学等多学科来研究各种生物网络和系统生物学,以便了解生物武器造成疾病的机理;还建议在生物武器防御作战中要利用各种社会网络进行跟踪监测、防止疾病传播并治疗疾病。2007年7月20日,该委员会又发表了研究报告《陆军网络科学技术与实验中心的政策》,其中包括未来陆军网络科学技术及实验中心与生物武器防御作战有关的研究任务。2007年,美国西点军校网络科学中心副主任F. I. Moxley在美国《国防》杂志(第9期)撰文介绍了该中心的研究课题,其中也包括生物战、生物恐怖主义威胁分析、监测及防护。2004年,美国陆军负责医学研究的L. Martinez-Lopez少将在美国工程院出版的《Bridge》文集(第3期)中指出,我们必须重视未来的化学和生物武器对士兵的威胁。大多数士兵的伤亡历来不是来自敌人的武器,而是来自疾病(特别是传染病)。例如,在越南战争中,83%的住院军人是疾病患者。据2009年9月26日的《参考消息》报道,美国国防部发言人辛西娅·史密斯说,2009年国防部在医疗卫生研究上的预算超过9.17亿美元,这还不包括各军种的此类费用。例如,陆军在马里兰州的德特里克堡进行的防御生化武器研究,还有海军在秘鲁、印度尼西亚和埃及设立的此类研究实验室。当前,在全世界许多国家出现的甲型H1N1流感疫情警示我们应更加重视利用网络科学与生物学和医学等多学科的交叉融合来研究各种疾病传播网络和生物网络,以便更好地防止疾病传播与治疗疾病。

著名网络科学家A. L. Barabási指出:“网络生物学研究表明生物网络服从网络科学的普遍规律,遵循网络科学提供的一个全新的概念框架,在21世纪可能引起生物学和医学的革命性变化。”撰写本书也是考虑到目前国内还缺少可供系统生物学与网络生物学专业的研究生及科技人员阅读的有关生物网络的书籍。上述研究报告《网络科学》指出,“网络科学是研究利用网络来描述物理、生物和社会现象,建立这些现象预测模型的科学”,并将网络划分为三大类:物理网络、



生物网络和社会网络。在2006年和2008年,本人编著的《网络科学》第一卷和第二卷先后由军事科学出版社出版。第一卷概述了网络科学的研究内容及军事应用;第二卷重点介绍了社会网络,特别是利用动态社会网络分析方法研究打击恐怖组织网络。本书将介绍生物网络及其模型,共有10章。第1章概述了网络科学;第2章介绍了各国重视生物科学及网络科学的研究与应用,以应对生物武器对人类的威胁;第3章介绍了生物学面临的新挑战及其为网络科学带来的重大发展机遇;第4章介绍了系统生物学与网络生物学;第5章介绍了基因调控网络及其模型;第6章介绍了蛋白质相互作用网络及其模型;第7章介绍了信号转导网络及其模型;第8章介绍了代谢网络及其模型;第9章介绍了生态网络及其模型;第10章介绍了基于网络科学的复杂网络理论的生物网络模型。

2007年7月,本人创建了科普网站“网络科学-中国”(http://www.netsci-china.cn),还先后应邀在北京科技大学信息工程学院、军事科学院军事运筹分析研究所、兰州大学管理学院、甘肃省图书馆、北京航空航天大学自动化与电气工程学院和中国科技大学近代物理系理论物理研究所作了专题报告。上述教学与科普实践活动为本书的撰写奠定了坚实基础。

在本书的撰写过程中,作者的老师、中国科学院高庆狮院士,军事科学院军事运筹分析研究所王辉青所长和李辉副所长,军事医学科学院黄祥瑞研究员,兰州大学基础医学院副院长宋焱峰教授、景玉宏博士和物理系的硕士研究生陈昱中,华南农业大学工程学院博士生导师邹湘军教授、博士研究生陈浩磊和硕士研究生陈燕、孙权,北京中医药大学副教授王耘博士、北京大学理论与系统生物学中心及数学科学学院的硕士研究生季东,北京科技大学信息工程学院硕士屈晏弘、耿秀利、赵洪兵等对本书稿提出了许多修改意见。本书作者得到军事科学出版社李泉社长和张晓明副社长、麻光武总编辑和朱奎玉编辑等很多同志的大力帮助,还有许多《网络科学》第一卷和第二卷的读者提供宝贵意见并鼓励作者笔耕不辍。特在此一并表示衷心的感谢。

在过去的五年中,我在宁静的家庭环境中专心撰写了《网络科



学》的三卷书稿,特别要感谢家人们给了我深深的理解、关爱和支持。

在本书出版之际,我谨向曾经求教过的、已故的 M. Kochen 教授(详见本书的附件 2)及其他网络科学研究先行者们表达深切的怀念和敬意。在上述《Science》杂志新专题的一篇论文中, A. L. Barabási 再次引用了 M. Kochen 和 I. Pool 于 1978 年发表的著名论文。我也向在本书中借鉴和引用的所有论著作者们表示衷心的感谢。

在 21 世纪之初,受到巨大社会需求的推动,得益于人类对于网络源远流长的探索及众多现代科学技术的交叉融合,网络科学在经历了许多艰难曲折之后终于迎来了“百家争鸣”、“日新月异”的发展阶段,初步形成了其思想、理论与方法体系,促进了人类对世界万物复杂性问题认识的新飞跃。这使我回想起了伟大科学家 A. 爱因斯坦的名言:“建立一种新理论不是像毁掉一个旧仓库,然后在那里建立起一座摩天大楼。它倒是像攀登高山一样,愈往上爬,就愈能看到新的更宽广的视野,并且愈能显示出我们的出发点与其周围广大地域之间的出乎意料之外的联系。当然,我们的出发点仍在那里,还是可以看得见,不过显得更小了,只能成为我们克服种种艰险爬上高山之巅后所看到的广阔视野中的一个极小的部分而已。”^①

在本书付梓出版时,作者又见到并学习了许多网络科学的新论著,深感自己水平有限,对于本书中的遗漏和错误,恳请读者批评指正。

曾宪钊

2010 年 5 月 1 日于北京

① 引自王通讯等编,《科学家名言》,河北人民出版社,1980,第 72 页。

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 网络与网络科学的定义	(1)
1.2 新世纪对网络科学的迫切需求	(3)
1.2.1 世界经济发展对网络科学的需求	(3)
1.2.2 网络社会崛起对网络科学的需求	(4)
1.2.3 军事指挥控制网络和网络中心战对网络科学的需求	(5)
1.2.3.1 越来越庞大和复杂的军事指挥控制网络	(5)
1.2.3.2 网络中心战和网络中心作战	(6)
1.2.4 应对生物恐怖主义威胁对网络科学的需求	(8)
1.2.5 事关世界各国安危的网络安全对网络科学的需求	(8)
1.3 网络科学发展历史回顾	(9)
1.3.1 网络科学的来源	(9)
1.3.2 规则网络理论	(11)
1.3.3 社会网络图和社会网络分析	(12)
1.3.4 随机网络理论	(13)
1.3.5 从阿帕网、因特网到万维网	(14)
1.3.6 从复杂网络到网络科学研究的新进展	(16)
1.3.6.1 从“六度分离”理论到“小世界网络”	(17)
1.3.6.2 幂律与无标度网络	(21)
1.3.7 网络研究的新发现迫切需要发展网络科学	(22)
1.3.8 美国和欧盟重视网络科学研究	(23)
1.4 在新世纪之交出现的百家争鸣和百花齐放的网络科学研究	(23)
1.4.1 研究网络社会的新理论	(26)
1.4.2 动态社会网络的研究进展	(27)
1.4.3 有关超家族的研究进展	(27)
1.4.4 社会网络倾向于更多连接,而生物和技术网络却相反	(28)
1.4.5 复杂网络子图和环的不同演化机制	(28)



1.4.6 基于优化原理的因特网新模型和 无标度网络模型的对比研究	(28)
1.4.7 人脑与社会网络拓扑结构的相似性	(29)
1.5 网络科学与多学科的交叉融合	(29)
1.5.1 网络科学促进了新交叉科学——网络社会学	(29)
1.5.2 网络科学促进了新交叉科学——网络经济学	(30)
1.5.3 新交叉科学:系统生物学、网络生物学与网络医学	(31)
1.5.3.1 生物科学家提出了系统生物学	(31)
1.5.3.2 网络科学家提出了网络生物学	(31)
1.5.3.3 网络科学家提出了网络医学	(32)
1.5.4 网络科学促进了新交叉科学——万维网科学	(32)
1.5.5 网络科学促进了新交叉科学——网络统计学	(33)
1.5.6 网络科学、技术与实验	(34)
1.6 网络科学研究方法及体系结构框架	(35)
1.7 网络科学的子学科	(37)
1.8 网络的分类方法	(39)
参考文献	(40)
第二章 从生物武器对人类的威胁看生物科学及网络科学的重要性	(45)
2.1 生物武器对人类的威胁	(45)
2.1.1 使用生物武器的历史	(45)
2.1.2 联合国《生物和毒素武器条约》 留下允许研制生物武器的隐患	(46)
2.1.3 一些新病毒可能用作生物武器	(46)
2.1.4 基因武器	(47)
2.2 为有效防范生物武器,各国应采取的对策	(48)
2.3 美国政府重视防御生物武器袭击	(48)
2.3.1 美国克林顿总统召开的“基因工程与生物武器”圆桌会议 ..	(48)
2.3.2 美国总统重视防御生物武器	(49)
2.4 美国科学院研究报告《未来陆军应用生物技术的机遇》 建议重视防范生物武器威胁	(49)
2.5 美国陆军研制的士兵系统包括防范生物武器的设备	(52)
2.6 美国科学院研究报告《网络科学》论防御生物武器袭击	(54)
2.7 美国西点军校网络科学中心重视研究生物战及生物恐怖主义 ..	(55)



参考文献	(56)
第三章 生物学面临的新挑战及其为网络科学带来的重大发展机遇	(57)
3.1 生物学	(57)
3.2 生物科学技术发展历史简介	(57)
3.3 发现生物网络并应用网络图的典型案例	(63)
3.3.1 《黄帝内经》描述人体 12 条经络的网络图	(64)
3.3.2 Darwin 描述物种进化的网络图	(64)
3.3.3 Crick 描述细胞遗传信息流的网络图	(65)
3.4 人类基因组计划的结果使生物科学面临新挑战	(65)
3.4.1 人类基因组计划及相关研究的结果	(65)
3.4.2 世界各国网络科学家与生物科学家联合起来 应对新的挑战	(68)
3.4.3 系统生物学的研究进展	(69)
3.4.3.1 系统生物研究机构创建	(70)
3.4.3.2 系统生物学将挑战以 DNA 双螺旋为基础的分子生物学的 统治地位	(70)
3.4.4 基因网络的研究进展	(71)
3.4.4.1 针对单一靶标的基因疗法的挫折	(71)
3.4.4.2 利用基因网络的概念研究针对多重靶标及 与血液干细胞等疗法相结合的基因疗法	(72)
3.4.4.3 寻找与疾病有关的基因网络	(72)
3.4.5 蛋白质组及人类相互作用组的研究进展	(73)
3.4.6 遗传信息网络的研究进展	(74)
3.4.6.1 第一遗传密码	(74)
3.4.6.2 第二遗传密码的假说	(75)
3.4.6.3 第三遗传密码的假说	(75)
3.4.7 表观遗传网络的研究进展	(75)
3.5 后基因组时代为网络科学带来新机遇	(76)
参考文献	(76)
第四章 系统生物学、网络生物学与网络医学	(79)
4.1 网络科学家获得系统生物学奖	(79)
4.2 “系统”与“网络”的概念	(80)
4.3 系统生物学	(82)



4.3.1 系统生物学概述	(82)
4.3.2 基本的研究内容	(83)
4.3.3 基本的研究工作流程	(84)
4.3.4 基本的研究方法	(86)
4.3.4.1 自顶向下的研究方法	(86)
4.3.4.2 自底向上的研究方法	(86)
4.3.4.3 综合方法	(86)
4.3.4.4 干涉方法	(87)
4.3.5 高精度的综合测量和实验技术	(87)
4.4 网络生物学	(88)
4.4.1 生命复杂性的金字塔	(88)
4.4.2 网络生物学概述	(90)
4.4.3 生物学中的网络:发现、分析和建模	(91)
4.5 网络医学	(92)
4.5.1 复杂网络与网络医学之间的关系	(92)
4.5.2 信号转导网络和人类疾病之间的关系	(94)
4.5.3 蛋白质交互网络和人类疾病之间的关系	(96)
4.5.4 构建人类的疾病基因网络	(97)
4.5.5 为研制新药构建靶标网络	(97)
参考文献	(98)
第五章 基因调控网络及其模型	(102)
5.1 概述	(103)
5.1.1 基因调控网络	(103)
5.1.2 基因表达及其多层次调控	(104)
5.1.3 基因调控网络的控制节点	(105)
5.1.4 基因调控网络的基本结构和功能	(105)
5.1.5 细菌基因调控网络的全局性定量分析	(108)
5.2 基因调控网络模型	(109)
5.2.1 建立基因调控网络模型的基本问题	(109)
5.2.2 选择适当层次的基因调控网络模型	(109)
5.2.3 基因调控网络模型的种类	(110)
5.2.4 今后基因调控网络模型应重点研究的问题	(110)
5.3 基于有向图的基因调控网络模型	(110)



5.4 基于常微分方程的基因调控网络模型	(110)
5.5 基于随机网络的基因调控网络模型	(115)
5.6 基于布尔网络的基因调控网络模型	(118)
5.6.1 布尔网络模型	(118)
5.6.2 布尔网络模型的动力学机制	(120)
5.6.3 布尔网络模型用于研究大型基因调控网络	(123)
5.7 基于连续网络的基因调控网络模型	(124)
5.8 基于人工神经网络的基因调控网络模型	(124)
5.8.1 利用人工神经网络模拟 GRN	(125)
5.8.2 GRN 的人工神经网络模型	(126)
5.8.3 利用人工神经网络模型得到的结果	(127)
5.8.3.1 利用正反馈和负反馈的基因调控	(127)
5.8.3.2 并联的网络	(129)
5.8.3.3 串联的网络:转录和翻译控制的基因表达	(129)
5.8.3.4 利用实验数据重建网络结构	(131)
5.8.4 基因调控网络的人工神经网络模型与 其他常用模型的对比	(132)
参考文献	(136)
第六章 蛋白质相互作用网络及其模型	(142)
6.1 蛋白质概述	(142)
6.2 蛋白质的研究进展	(143)
6.3 蛋白质组学的研究进展	(145)
6.4 蛋白质相互作用网络的研究进展	(146)
6.5 利用蛋白质相互作用网络预测全局的蛋白质功能	(150)
6.5.1 原有的判定蛋白质功能的“多数规则”方法简介	(151)
6.5.2 基于全局优化原理的蛋白质功能预测新方法	(151)
6.5.3 利用模拟退火算法实现网络全局优化 并预测蛋白质的功能	(156)
6.6 估算人类蛋白质相互作用网络的规模	(157)
6.6.1 估算相互作用网络的规模	(158)
6.6.2 其他的网络节点抽样方法	(161)
6.6.2.1 独立而非均匀取样	(161)
6.6.2.2 非独立取样	(161)



6.6.3 不确定性数据对估算相互作用组规模的影响	(162)
6.6.4 估算相互作用网络规模的结果	(165)
6.6.5 讨论	(166)
参考文献	(167)
第七章 信号转导网络及其模型	(174)
7.1 信号转导网络概述	(174)
7.2 信号转导网络的研究进展	(176)
7.3 Helikar 建立的信号转导网络决策的布尔模型	(179)
7.3.1 信号转导网络决策模型简介	(179)
7.3.2 研究结果与讨论	(180)
7.3.3 资料和方法	(188)
7.3.3.1 信号转导的布尔模型	(188)
7.3.3.2 仿真方法	(189)
7.3.3.3 增加输入的噪声	(189)
7.3.3.4 主成分分析	(189)
7.4 植物信号转导网络模型	(190)
7.4.1 研究简介	(190)
7.4.2 研究结果	(192)
7.4.2.1 在研究中使用的数据	(192)
7.4.2.2 构建 ABA 信号转导网络依据的规则	(193)
7.4.2.3 构建 ABA 信号转导网络依据的生物学知识	(197)
7.4.2.4 建立 ABA 信号转导网络的动态模型	(199)
7.4.2.5 去除网络节点导致对 ABA 响应的不同敏感性分类 ...	(205)
7.4.2.6 利用实验评估模型的预测结果	(208)
7.4.3 结论	(210)
参考文献	(210)
第八章 代谢网络及其模型	(216)
8.1 代谢网络概述	(216)
8.2 对于代谢的早期研究	(216)
8.3 从 20 世纪以来生物化学对于代谢机制的探索	(217)
8.5 研究代谢网络常用的数据库	(220)
8.6 代谢网络分析方法	(221)
8.6.1 代谢网络分析方法的研究进展	(221)



8.6.2 基本概念和术语	(221)
8.6.2.1 代谢网络的节点、边及流	(221)
8.6.2.2 流平衡方程与化学计量矩阵	(222)
8.6.2.3 流分布与权向量	(223)
8.6.2.4 零空间与基向量集合	(223)
8.6.2.5 凸分析与凸锥体	(224)
8.6.3 代谢网络的路径分析	(225)
8.6.3.1 基本模式	(225)
8.6.3.2 极端路径	(225)
8.6.3.3 基本模式与极端路径的比较	(226)
8.6.4 代谢网络的流平衡分析	(228)
8.6.4.1 采用连接输出的流平衡分析	(228)
8.6.4.2 流分布的优化	(229)
8.7 基于自私-大脑理论的人体代谢网络模型	(230)
8.7.1 人体代谢网络模型研究进展	(230)
8.7.2 利用自私-大脑理论建立代谢机制的长期模型	(232)
8.7.3 对于长期模型的分析	(234)
8.7.4 长期模型使用的数据和脚本	(235)
8.7.5 结论	(237)
参考文献	(238)
第九章 生态网络及其模型	(244)
9.1 世间万物,生命之网	(244)
9.2 生态学、生态系统与环境保护研究进展概述	(245)
9.2.1 中国古代哲学家的“天人合一”思想	(245)
9.2.2 生态学概述	(246)
9.2.3 从20世纪以来生态系统研究和环境保护的迅速发展	(246)
9.3 生态系统的结构、功能、食物链与食物网络简介	(250)
9.4 食物网络模型的研究进展	(252)
9.5 描述食物网络中种群竞争的 Lotka - Volterra 模型	(254)
9.6 用于食物网络的网络世界模型	(255)
9.7 对网络世界模型的新改进	(256)
9.7.1 新模型的特点	(257)
9.7.2 使用变异和复杂化两种物种形成机制的效果	(262)



9.7.3 对分竞争和不利用功能特性来描述物种的方法	(265)
9.7.3.1 对分法竞争的效果	(266)
9.7.3.2 不利用功能特性来描述物种	(269)
9.7.3.3 新模型运行的结果数据	(270)
9.7.4 原有模型的动力学机制	(272)
9.7.4.1 种群的动力学机制	(272)
9.7.4.2 捕食策略	(272)
9.7.4.3 增加新物种	(273)
9.7.5 讨论与总结	(273)
9.8 担任 NetSci 2009 主席的 Caldarelli 促进了生态学和生物学与 网络科学的交叉	(275)
参考文献	(276)
第十章 基于网络科学与复杂网络理论的生物网络模型	(280)
10.1 利用网络科学与复杂网络理论研究生物网络的进展	(280)
10.2 生物网络的无标度模型	(281)
10.2.1 Barabási - Albert 模型	(281)
10.2.2 在研究生物网络中采用无标度网络模型的优越性	(283)
10.2.3 一些生物网络具有无标度网络特性	(284)
10.3 基于有向无标度网络的 Kauffman 模型的布尔动力学机制	(284)
10.4 代谢网络的无标度模型	(285)
10.5 蛋白质网络的无标度模型及其他种类模型	(287)
10.5.1 蛋白质相互作用网络的无标度网络特性	(287)
10.5.2 蛋白质形态演化网络的其他种类模型	(287)
10.6 人类基因协同表达网络的无标度特性	(288)
10.7 生物网络的小世界网络模型	(289)
10.7.1 Watts - Strogatz 模型	(289)
10.7.2 许多生物网络具有小世界网络特性	(290)
10.8 代谢网络的小世界网络、模块与分层网络模型	(291)
10.8.1 代谢网络的小世界网络模型	(291)
10.8.2 代谢网络的模块与分层网络模型	(292)
10.8.3 分层网络与随机网络和无标度网络模型的对比	(292)
10.9 疾病传播网络兼具小世界和无标度网络特性	(294)
10.9.1 疾病传播模型研究进展概述	(295)



10.9.2 疾病传播网络的小世界网络模型	(295)
10.9.3 疾病传播网络的无标度网络模型	(296)
10.9.4 疾病传播无标度网络的控制策略优化	(297)
10.10 食物网络兼具小世界和无标度网络特性	(298)
10.11 基于复杂系统自组织临界性理论的生态网络演化模型	(299)
10.12 基于网络科学与复杂网络理论的生物网络研究方向	(302)
10.12.1 利用网络科学与复杂网络理论研究生物网络的 普适性规律	(302)
10.12.2 利用网络科学与复杂网络理论研究生物网络的 特殊性规律	(304)
10.12.3 在欧洲物理学家提出的网络科学重点研究课题中与 生物网络有关的内容	(304)
10.12.4 网络科学家 Barabási 谈网络生物学研究	(306)
10.12.4.1 网络生物学:生物网络服从网络科学的普遍规律	(306)
10.12.4.2 “在生物网络中的子图、模体和模体集群”	(306)
10.12.4.3 有关网络生物学未来研究方向的 5 条意见	(308)
参考文献	(309)
附件 1: 名词术语中英文对照表	(315)
附件 2: 邀请网络科学的先行者 ——美国教授科钦来军事科学院讲学纪事	(330)

图 目 录

图 1.1	黄帝	(10)
图 1.2	(a) 中华医学经典《黄帝内经》的《灵枢》部分; (b) 清朝乾隆针灸铜人	(10)
图 1.3	王惟一	(11)
图 1.4	Leonhard Euler	(12)
图 1.5	(a) 哥尼斯堡;(b) 七桥问题网络图	(12)
图 1.6	Jacob Levy Moreno	(13)
图 1.7	Paul Erdős	(13)
图 1.8	Larry Roberts	(14)
图 1.9	Vinton Cerf	(15)
图 1.10	Tim Berners - Lee	(16)
图 1.11	刘韵洁	(16)
图 1.12	Stanley Milgram	(17)
图 1.13	Ithiel de Sola Pool	(17)
图 1.14	Manfred Kochen	(18)
图 1.15	Manfred Kochen 于 1989 年 1 月 1 日出版他主编的 《小世界》一书	(19)
图 1.16	Duncan J. Watts	(19)
图 1.17	Jon Kleinberg	(20)
图 1.18	2008 年 2 月 11 日, 美国康内尔大学网站报道: Kleinberg 当选为美国工程院院士	(20)
图 1.19	Michalis Faloutsos	(21)
图 1.20	Albert - László Barabási	(22)
图 1.21	美国科学院国家研究委员会 2005 年 11 月 1 日发表的研究报告 《网络科学》	(24)
图 1.22	1998 年至 2004 年有关复杂网络的论文数量增长情况	(26)