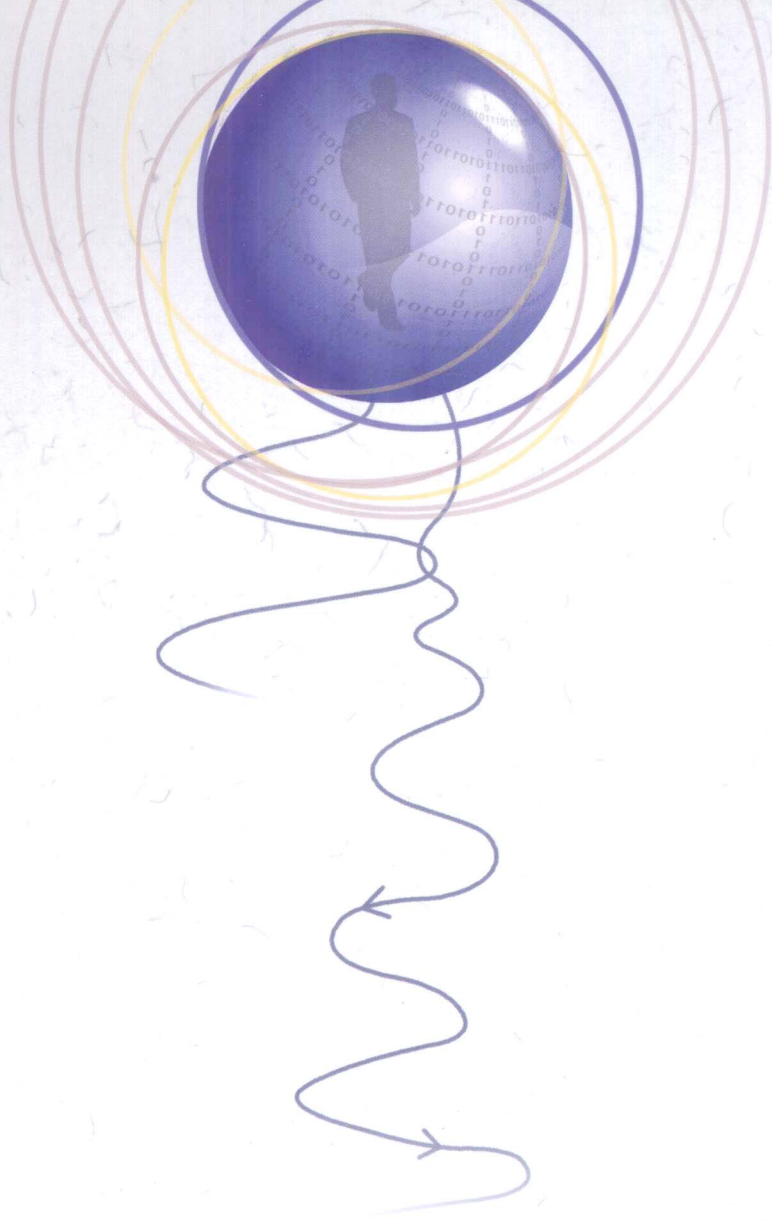




uza Wangluo
Zai Guanli Lingyu De
Yingyong Yanjiu

复杂网络

在管理领域的应用研究

何 铮 张晓军 主编



电子科技大学出版社

013059721

C931.9
03

复杂网络在管理领域 的应用研究

何 铮 张晓军 主编



电子科技大学出版社



北航

C1665739

C931.9
03

157820810

图书在版编目(CIP)数据

复杂网络在管理领域的应用研究 / 何铮, 张晓军主编.

—成都: 电子科技大学出版社, 2013.1

ISBN 978-7-5647-1435-2

I. ①复… II. ①何… ②张… III. ①互联网络—应用—管理学—研究 IV. ①C931.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 315485 号

内 容 提 要

复杂网络作为研究复杂系统的一个新兴工具,以其能较为形象、准确地描述系统主体之间错综复杂的联系,在计算机、生命科学等领域得到了广泛的应用,但在管理学研究中仍处于起步阶段。本书致力于探索复杂网络在管理领域的具体应用。全书共分集群演进和创新扩散上、下两篇。

上篇为集群演进篇,将集群视为一个复杂适应性系统(CAS),其演进过程实质上是集群自组织进程。本书抓住集群最本质的特征——各组织间的密切联系,从网络结构演进角度研究了集群自组织。首先通过案例研究方法对集群自组织过程进行了理论上的定性研究;在此基础上,构建了集群自组织的复杂网络分析框架,探讨了集群自组织的不同演化模型,并结合传统的实证研究方法,运用复杂网络工具,对特定集群的自组织过程进行了定量分析。

下篇为创新扩散篇,研究创新在特定网络上的扩散机理。首先构建了基于复杂网络的微观个体决策理论分析框架,给出了一个基于复杂网络的随机阈值模型,并运用该模型研究了新产品在消费者之间以及新技术在企业间两类不同的创新扩散。在新产品扩散中,我们主要研究了正反馈效应、初值敏感性和两个竞争性产品的扩散;而在新技术扩散中,我们重点对扩散的稳定性和脆弱性进行了较为深入的探讨。

本书适用于管理学科的研究生、教师阅读,也可供从事管理学和复杂网络研究的相关人员参考。

复杂网络在管理领域的应用研究

何 铮 张晓军 主编

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 张 鹏 责任编辑: 张 鹏 李燕苓
主 页: www.uestcp.com.cn 电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 河北永清县晔盛亚胶印有限公司
成品尺寸: 170mm×240mm 印张 14 字数 282 千字
版 次: 2013 年 4 月第一版
印 次: 2013 年 4 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1435-2
定 价: 45.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

序 言

电子科技大学的何铮和张晓军两位博士，合作完成了《复杂网络在管理领域的应用研究》一书，邀请我作序。我不禁真有些惊喜和惊恐：喜者，在我的感觉中，写序都是一些大家或高官的专利，与我辈似是天方夜谭。有幸作序，真是有了些成就感，更有些飘飘然，何况，我一直有着好为人师的毛病和虚荣。然而，恐者，飘飘然之后就是惶惶然，因为我对复杂理论、复杂网络认识太晚，感到有些陌生，对它们了解太少。

人们都说，21世纪是网络的世纪。生活在网络时代，对网络也有一些耳熟能详的直觉。真应了“熟读唐诗三百首，不会写诗也会吟”。对于复杂理论和复杂网络，我也就哼上几句吧。

网络本来是一个很古老、很平常的东西，不用说诸如渔网、蜘蛛网等极其平常，路网、水网、河网等，也是古也有之。同时，网络又是一个很现代、很复杂的东西，比如电力网、交通网、通信网、信息网、商务网、互联网等。

网络给人们带来了现代化的自由和便捷。借助发达的交通网，原来需要花费数年、数十年，甚至是穷尽一生的路途。比如唐僧行西天、郑和下西洋、张骞走西域，人们已经可以朝发夕至，甚至早出晚归；依靠发达的信息网、互联网，人们可以同步知道地球另一面发生的事件，可以在网上欣赏悉尼歌剧院里的演出，可以参加在英伦三岛举行的一场文物拍卖等，人们正在畅享网络带给我们的无穷乐趣和收益。

但是，网络也会给人们，特别是给社会管理带来巨大的挑战。比如，网络的连锁、放大效应、外部效应等，人们常说南美洲亚马孙热带雨林中的一只蝴蝶扇动翅膀，就可能引发印度尼西亚的一场飓风。这是一种网络效应，或者是无数种网络效应的综合效应。可以肯定的是，几乎还没有人能够作出令人信服的解释和演绎网络的这种作用机理。许多事件、许多现象，经过网络的作用，产生了不能预见和掌控的恶果。人们看见了，1997年中，泰铢的贬值引发了一场亚洲金融危机；2007年底的美国次贷危机爆发，立刻引起了世界股市的狂跌；2008年1月中旬在中国中南、东南、华南和西南地区曾经引起欢喜的一场雨雪，竟导致了中国的电网、交通网、通信网的一场灾难。

显然，网络对于我们，实在太重要了。我们对于网络的认识实在太肤浅了。正因为如此，对于网络的研究也就太必要了。

但是，对网络的研究是很复杂的。网络，是一个系统。一旦以系统为研究对象，研究就复杂了。对组织、企业、经济、生态、社会等系统，更是一个复杂网络、复

杂系统，对它们的研究，就成为研究中的哥德巴赫猜想了。

复杂系统的研究是一个复杂的系统工程，其复杂性在于：第一，构成复杂系统的个体数量极其庞大；第二，个体间的作用机理十分复杂；第三，个体的行为的类型和特征相当复杂；第四，个体构成系统的结构极度复杂……面对如此的复杂，如果没有科学的理论、方法和工具，纵使是愚公移山，纵使是子子孙孙，也只能是挖山不止，山高不已。

好在有了复杂理论为我们提供了研究复杂系统的理论，作为一个起源于数学、物理、生物学高度交叉的理论，复杂理论以复杂系统为研究对象，试图揭示复杂系统所特有的规律。更高兴的是有了研究复杂系统的工具——复杂网络。作为研究复杂系统的新兴工具，复杂网络通过关注个体行为之间的关系来研究系统的总体特征，从而在宏观整体趋势和微观个体行为之间架起了一座桥梁。从理论上，复杂网络也不再局限于数学领域，而开始从物理学向生物学、经济学等学科渗透，从而被称为“网络的新科学”。同时，信息技术的突破使得人们可以定量地考察节点数量众多，连接结构复杂的各种实际网络的整体特征。

何铮和张晓军两位博士，他们以复杂网络为研究工具，以集群或技术扩散这样的复杂系统为研究对象，在复杂的海洋中奋力搏击。多年来，他们共同合作，相互研讨、交流，探讨基本理论，构造研究框架，构建研究模型，编制运行软件，进行数值仿真，分析运行结果，挖掘模型与仿真结果的理论与现实价值，从而取得了可以庆贺的阶段性的研究成果。本书就是他们研究的阶段性成果——博士学位论文的集合。

作为两位博士成长的关注者，我目睹了他们艰辛而富有成果的研究过程并参与了其中某些片段的交流，特别是目睹他们博士论文撰写过程及其修改，虽然对复杂理论和复杂网络有了一些雾里看花的认识，但是，从科学和专业的角度上看，对于复杂领域，我仍然只能算是一个门外汉。何况，借用证券市场的语言，对于两位博士，我不是独立董事。因而对于本书的内容、框架、创新与价值的说辞，就可能存在关联交易，或者可能发布误导性信息，受到公开谴责。因此，有关本书的高下优劣就只好留待读者阅看后自己评说。

当然，作序，不说点什么，显然既对不起作者，对不起读者，也对不起自己。

“好”在迄今为止，我已经喋喋不休地说了不少。画蛇添足，再说几句，算是和作者共勉：

第一，管理领域浩瀚如大海，集群与技术扩散仅仅是大海中的两朵浪花，以两者为研究对象就冠上“在管理领域的应用研究”之名，书名太大，有些以偏概全，也就有些欠妥，何况今天都提倡从小事做起，小题大做、小题深做、小题精做。当然，要在一本容量总是有限的小册子中包含海量的管理领域也是不现实。俗话说，一滴水可以见太阳，因此也就相信读者能够通过作者的管窥之作，洞悉复杂网络在

管理领域中的应用奥妙。

第二，全书分为上、下篇，分别研究集群和创新扩散，从内容看，仅仅是一个集合，而不是一种集成，还没有很好地实现内在化、一体化，仅仅是一种基于工具（复杂网络）的相关多元化。但是，纵使有这些瑕疵，但毕竟有了一个开始。谚语云：良好的开始是成功的一半。何况，两位作者已经有了多年的合作，相信他们在今后的研究中，能够在工具相关的基础上，实现内容的相关，比如，下一部著作就可能是基于集群网络的技术扩散研究或者基于集群网络的技术创新研究，我相信着，也企盼着。纵使两位作者的研究“移情别恋”，我也相信，有了这种开始，一定会有新的博士，有新的研究者以此为选题——当然，我可能已经是孤陋寡闻了，说不定有人早就在进行这方面的研究，并且已经取得了令人赞叹的成果。

复杂理论和复杂网络，复杂、深奥，因而也显得有些艰涩和枯燥。作为一种对照，写成了这篇简单而无序的序言——姑且将它作为序言吧。

李仕明

目 录

引 论	1
1. 本书的研究目的及内容简介	1
2. 复杂网络概述	3
3. 复杂网络与社会网的关系	4
4. 复杂网络基本概念	5
上篇 集群演进	
第一章 集群基本问题界定	8
1.1 集群的定义	8
1.2 集群的特点	9
1.3 集群的分类	12
第二章 集群文献综述	14
2.1 集群区位	14
2.2 集聚效应	17
2.2.1 知识信息外溢	17
2.2.2 弹性专精	18
2.2.3 网络结构	19
2.2.4 集群内企业竞争优势	20
2.3 集群演进	21
第三章 集群演进：一个复杂适应性系统的自组织进程	25
3.1 集群：一个复杂适应性系统（CAS）	25
3.1.1 CAS 基本含义	25
3.1.2 CAS 主要特点	26
3.1.3 集群的系统特征	27
3.2 集群自组织的主要特征	28
3.2.1 环境设计	29
3.2.2 正反馈机制	29
3.2.3 边界约束	30
3.2.4 不确定性结果	31
3.3 案例研究：东莞 PC 集群自组织过程	31
3.3.1 环境设计	32
3.3.2 正反馈机制	32

3.3.3	边界约束.....	39
3.3.4	不确定性结果.....	40
3.4	案例研究结论.....	41
3.4.1	集群自组织的共同演进框架.....	41
3.4.2	对正反馈机制的进一步探讨.....	42
第四章	集群自组织的复杂网络仿真模拟.....	48
4.1	集群：一个复杂网络.....	48
4.2	集群自组织的复杂网络分析框架.....	49
4.2.1	组织间连接类型.....	50
4.2.2	相关统计指标.....	50
4.3	集群自组织模型.....	52
4.3.1	模型基本假设.....	52
4.3.2	具体模型.....	53
4.4	模型仿真模拟.....	54
4.4.1	仿真结果.....	54
4.4.2	仿真结果的现实解释.....	64
第五章	集群自组织的实证研究.....	67
5.1	研究对象选择.....	67
5.1.1	集群实证研究方法比较.....	67
5.1.2	选择标准.....	68
5.1.3	集群背景.....	69
5.2	实证数据采集.....	73
5.2.1	数据类型选择.....	73
5.2.2	量表设计和数据采集.....	74
5.3	集群自组织过程仿真模拟.....	75
5.3.1	模型选择.....	75
5.3.2	仿真结果.....	76
5.4	实证研究结论.....	80
5.4.1	仿真结果与实际数据对比.....	80
5.4.2	集群自组织过程：统计指标的解释.....	84
5.4.3	核心网研究.....	89
5.5	实证研究对集群治理的启示.....	98
5.5.1	集群网络的主要问题.....	98
5.5.2	集群网络治理.....	101

下篇 创新扩散

第六章	创新扩散简介.....	104
6.1	创新扩散的定义.....	104

6.2	创新扩散的分类	105
6.3	创新扩散的影响因素	106
第七章	创新扩散模型文献综述	107
7.1	宏观总体速度模型	108
7.1.1	Bass 模型之前的创新扩散模型	108
7.1.2	Bass 模型	108
7.1.3	Bass 模型的扩展	114
7.2	微观个体决策模型	120
7.2.1	动力学模型	120
7.2.2	渗流模型	121
7.2.3	元胞自动机模型	121
7.2.4	多 Agent 模型	123
7.2.5	阈值模型	123
第八章	基于复杂网络的创新扩散模型分析框架	126
8.1	复杂网络: 有向加权网	126
8.1.1	有向网络和有向加权网络	126
8.1.2	有向加权网络上的统计指标	128
8.2	基于复杂网络的微观个体决策分析框架	129
8.2.1	技术或产品特征	130
8.2.2	网络结构	134
8.2.3	行为选择	136
8.3	基于复杂网络的随机阈值模型分析框架	137
8.3.1	基本模型	137
8.3.2	模型解释	139
8.4	随机阈值模型的应用	140
第九章	新产品扩散中的随机阈值模型分析	142
9.1	新产品扩散中网络结构分析	143
9.1.1	大众传媒网	143
9.1.2	亲缘网	143
9.2	参数设计	144
9.3	新产品扩散的正反馈效应	146
9.3.1	权重参数对扩散程度的影响分析	146
9.3.2	新产品扩散的正反馈效应	149
9.4	新产品扩散的初值敏感性	151
9.5	模型仿真	152
9.5.1	对初始采用者比例的敏感性分析	153
9.5.2	对初始采用者位置的敏感性分析	155
9.5.3	对消费者初始评价的差异性分析	157

9.6	两个竞争性产品扩散	159
9.6.1	影响因素分析	160
9.6.2	模型参数确定	160
9.6.3	进入时间分析	161
9.6.4	转换成本分析	166
第十章	新技术扩散中的随机阈值模型分析	169
10.1	网络结构	171
10.1.1	销售网络 M	171
10.1.2	企业信息网络	171
10.2	核心参数的影响分析	174
10.2.1	核心参数设计	174
10.2.2	权重参数对专用型技术扩散的影响分析	176
10.2.3	权重参数对通用型技术扩散的影响分析	181
10.3	新技术扩散的稳定性和脆弱性分析	183
10.3.1	复杂网络中稳定性和脆弱性的一般含义	183
10.3.2	新技术扩散中稳定性和脆弱性的具体含义	185
10.3.3	专用型技术扩散: 稳定性和脆弱性	186
10.3.4	通用型技术扩散: 稳定性和脆弱性	190
10.3.5	专用型与通用型技术扩散比较	192
参考文献		197

引 论

1. 本书的研究目的及内容简介

随着信息技术的迅速发展,复杂系统逐步成为学术界的研究热点,而作为以复杂系统为研究对象的复杂理论,它起源于数学、物理、生物学等自然学科,并试图揭示复杂系统所特有的规律。其中,复杂网络在众多复杂理论研究方法中以其形象地再现了系统中各主体之间有机联系及其动态变化而越来越受到关注,它在诸如计算机等领域已经得到广泛的应用,但鉴于管理研究的特殊性,特别是数据量的限制,复杂网络在其中的应用研究才刚刚起步,如何运用复杂网络研究管理问题就成为目前学术界面临的新课题。本书正是针对以上问题,从复杂理论角度出发,比较系统地探讨了复杂网络在产业集群和创新扩散两个管理方向的实际应用。

全书共分成上、下两篇,上篇为集群演进篇,包括第一章到第五章;下篇为创新扩散篇,包括第六章到第十章。上篇首先将集群置于复杂适应性系统的框架之内,建立了基于“环境设计、正反馈机制、边界约束和不确定性结果”的集群自组织的一般定性分析框架,随后运用案例研究方法,对东莞PC集群自组织进行了分析并获得了一些经验性支持;然后,论文运用复杂网络研究方法对集群自组织进行了量化研究,构建了相应的分析框架和模型,并采用仿真模拟来研究不同网络连接方式对集群自组织的影响方式和程度;最后,论文以沙溪服装产业集群为样本,结合问卷调查、访谈等方法,运用复杂网络模型对沙溪集群自组织进行了实证研究,获得了有价值的结果,并从政府角度强调了对集群进行网络治理的重要性。其基本框架如图1所示。

下篇在充分考虑不同技术性质以及消费者异质性的基础上,研究了新技术或新产品在特定社会网络系统中的扩散。首先从消费者微观决策层面建立一个包括创新特征、网络结构和行为选择的三维理论分析框架,然后在现有阈值模型的基础上,对其进行了理论扩展,建立了基于复杂网络的随机阈值模型。采用仿真模拟的研究方法,分别研究了随机阈值模型在新产品和新技术扩散中的特性。对于新产品扩散,首先分析了消费者网络结构,在此基础上,主要研究了扩散中的正反馈效应和初值敏感性问题;而对于新技术扩散,首先确定企业信息网的网络结构,进而研究了新技术在企业网之间扩散的稳定性和脆弱性。其基本框架如图2所示。

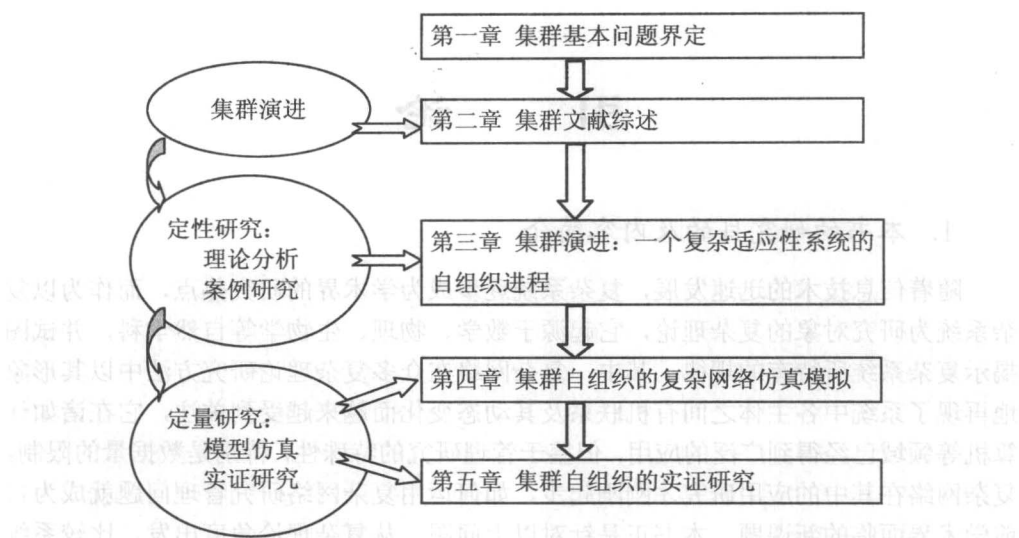


图1 集群演进篇（上篇）的基本框架

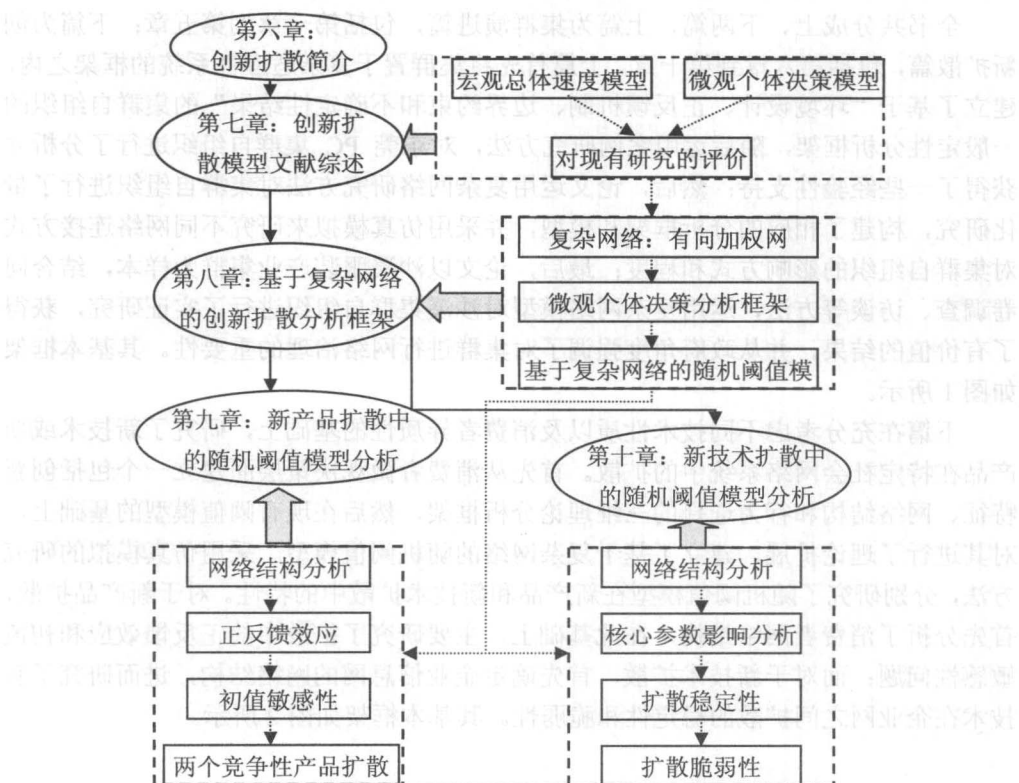


图2 创新扩散篇（下篇）的基本框架

本书上、下两篇的共同之处在于都运用复杂网络工具对管理问题进行了较为系统的研究，无论是集群演进还是创新扩散，都是与网络结构相关的动态发展过程，本书大量使用了计算机仿真来模拟这些进程。从复杂网络角度，上、下两篇的主要区别在于上篇主要关注集群网络的形成及其结构的演进；而下篇则针对特定的网络结构，研究创新在网络上扩散的各种特性。相对于上篇，下篇对网络进行了更接近现实的刻画，采用有向加权网络对其过程进行描述。

2. 复杂网络概述

复杂网络最早源于数学中的图论（Graph Theory）。20 世纪 60 年代由 Erdős 和 Rényi 建立的随机图理论（random graph theory）^[1]，从数学角度开创了复杂网络理论的系统性研究，在其后的 40 年中，随机图理论一直是复杂网络研究的基本理论。

1998 年 6 月美国康奈尔大学理论和应用力学系的博士生 Watts 和其导师 Strogatz 教授在 Nature 杂志上发表了题为“‘小世界’网络的集体动力学”(Collective Dynamics of ‘Small World’ Networks)的文章^[2]，文中根据美国哈佛大学的社会心理学家 Stanley Milgram 做的小世界实验（small world experiment）^[3]，构造出了一个小世界网络，该模型反映了社会关系网络的一种特性：较短的平均路径长度和较高的聚类系数。紧接着，美国 Notre Dame 大学物理系教授 Barabási 及其博士生 Albert 于 1999 年 10 月在 Science 杂志上发表了“随机网络中标度的涌现”（Emergence of Scaling in Random Networks）^[4]。这两篇文献分别揭示了复杂网络的小世界特征和无标度性质，并建立了相应的模型以阐述这些特性的产生机理。这两篇文章的发表标志着复杂网络研究新的开始，具有里程碑意义。表 1 给出了复杂网络研究的简史。

表 1 复杂网络研究简史

时间（年）	人物	事件
1736	Euler	七桥问题
1959	Erdős 和 Rényi	随机图理论
1967	Stanley Milgram	小世界试验
1973	Granovetter	弱连接的强度
1998	Watts 和 Strogatz	小世界模型
1999	Barabási 和 Albert	无标度模型

资料来源：汪小帆等（2006）

从 Watts（1998）给出的“小世界模型”到如今近 10 年的时间，有关复杂网络

的研究得到非常迅速的发展, 其研究领域也从最初的统计物理学快速扩展到其他领域如生物学、计算机科学等, 取得许多突破性进展。复杂网络的研究内容也从最初的研究网络结构及其统计特性, 到如今研究复杂网络上的传播动力学、复杂网络上的社团结构、复杂网络上的相继故障、复杂网络中的搜索、同步、控制等内容, 其文献也呈现极快的增长趋势^[5]。究其原因, 主要得益于三个方面: (1) 信息技术特别是计算机和 Internet 网络技术的快速发展, 这些技术的突破使得人们可以定量地考察节点数量众多, 连接结构复杂的各种实际网络的整体特征; (2) 多学科的融合, 复杂网络也不再局限于统计物理和数学领域, 而开始向生物学、经济学等学科渗透; (3) 以还原论和整体论相结合为主要特色的复杂系统科学的兴起。

3. 复杂网络与社会网的关系

社会网是用网络形式来描述社会系统中各成员之间的相互关系。网络上节点可以是个人, 也可以是各类组织。社会网分析强调人际关系、关系内涵以及社会网结构对社会现象的解释。这一方法是 20 世纪 60 年代以来社会学家 Harison White 等人借助于数学中的图论所演绎出来的一套数学分析方法, 通过对网络结构的测度, 社会网理论得出许多重要的结论, 如 White (1970) 的“机会链”理论 (opportunity chains), 解释了内部劳动力市场的升迁现象^[6]; Rogers (1995) 的二级传播理论, 用非正式关系解释了传染病流传和信息流通问题^[7]; Granovetter (1973) 的“弱连带的优势”理论 (The Strength of Weak Ties) 研究了劳动力市场上找工作过程中不同联系的作用问题^[8]; Burt (1992) 提出的“结构洞”理论 (Structural Holes) 讨论了组织内部权力的运作和升迁问题^[9]; Krackhardt (1992) 的强连带优势理论, 分析了情感网络中的非正式关系对多种行为的影响。社会网理论主要是为社会学过去研究的微观个体行为和宏观群体行为之间构建一座桥梁, 其研究重点是在一个社会网络中的个人如何透过关系, 在动态的互动过程中, 通过影响个体行为, 改变相互关系, 从而影响整体结构。网络中的每个人的行为既是自主的, 也是嵌入到网络中的, 受到社会结构的制约^[10]。

社会网与复杂网络的研究都起源于数学的图论, 并借用图论的研究方法和理论。但它们之间仍然存在着一定的差别, 主要表现在社会网研究的思路 and 角度源于社会学^[11], 而复杂网络研究角度更多的是从物理和生物等自然学科出发, 大量借鉴这些领域的概念如动力学方程、同步耦合、牵制控制和研究方法如计算机仿真实验等。一方面, 在研究对象上, 复杂网络还针对一些非社会网络如电网、交通网、Internet、计算机病毒传播等大型网络; 另一方面, 目前也有趋势将复杂网络研究延伸到社会学领域, 同时, 社会网研究也逐步借用除数学之外其他自然科学的研究手段和方法, 从这个意义上讲, 社会网与复杂网络研究呈现出很强的关联性, 并具有很大的交集。本文之所以采用复杂网络的概念, 主要的原因在于虽然我们所研究的网络是一个节点规模十分庞大、结构复杂的社会网络, 但在社会网理论中还很少研究如此规模的

网络, 只有借鉴复杂网络相关思路进行研究, 另一个原因在于我们是从复杂系统和复杂理论角度去分析管理问题, 因此也就很自然地采用复杂理论中的复杂网络研究工具去对集群演进和技术扩散进行定量研究。

4. 复杂网络基本概念

复杂网络最基本的理论是数学中的图论, 在此我们首先对复杂网络中所涉及的最基本概念加以介绍^[12]。

网络

所谓网络是指由 G 元素 (称为顶点或节点) 的一个非空集合以及一组这些元素的无序对 (称之为边) 组成。图 G 的节点集合称为点集, 记作 $V(G)$; 这组边称为 G 的边集, 记作 $E(G)$ 。一个网络通常用 $G=(V,E)$ 表示。如图 3 所示给出了一个网络结构示意图。

$V(G)$ 中的节点数目称为图 G 的阶(n), $E(G)$ 中边的数目称为图的规模(M)。图可以用来表示所有类型的网络, 其中, 节点可以代表各种类型的网络元素, 例如人、企业、动物、团体、城市等; 而边可以代表相连元素之间的各种关系, 例如友谊、商业联盟、生产流程等。在本文中, 网络节点表示消费者或企业, 节点间的连线表示相邻节点间存在某种联系, 如亲戚、朋友、信息往来、产品配套等。

在网络定义的基础上, 可以进一步将所涉及的一些术语加以解释:

- (1) 无向: 图 G 中任意一条边都没有方向性, 隐含所有的连接都是对称的, 此时称图 G 为无向图。
- (2) 加权: 每条边都赋予相应的权重, 称图 G 为加权图, 否则称为无权网络。

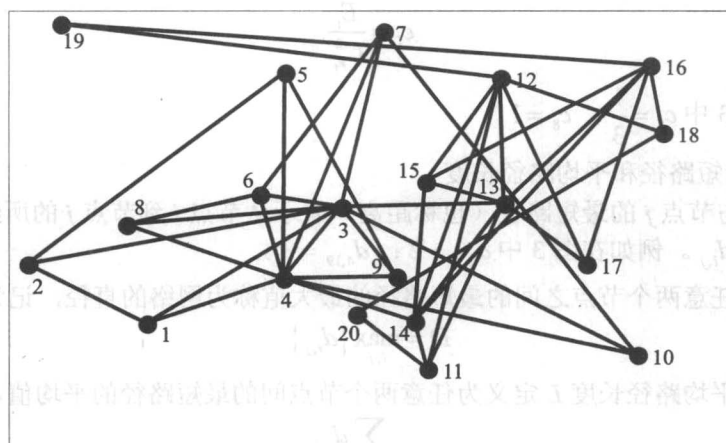


图 3 网络示意图

- (3) 简单图: 图 G 中任意两点之间最多存在一条边, 且不存在以同一节点为起点和终点的边。

(4) 连通性: 图 G 中任意节点都可以通过有限个边到达其他任何节点。

(5) 邻接矩阵 $M(G)$: 用以描述所有节点间的联系情况, 其元素 $M_{i,j}$ 取 0 或 1, $M_{i,j}=1$ 表示节点 i 和 j 之间存在一条边, 否则 $M_{i,j}=0$ 。

统计指标

在网络 G 中通常涉及三组基本统计指标: 度和度分布、聚类系数以及最短路径和平均路径长度。

(1) 度和度分布

一个节点 i 的度表示与该节点直接相连的边数, 通常记为 k_i ; 如图 3 中节点 6 的度 $k_6=4$; 节点 14 的度 $k_{14}=6$;

网络中所有节点的度的平均值称为网络的平均度, 记为 $\langle k \rangle$;

$$\langle k \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N}$$

其中, N 为节点数量;

度分布 $P(k)$ 表示随机取一个节点, 其度为 k 的概率;

$$P(k) = \frac{N_k}{N}$$

其中, N_k 表示度为 k 的节点数量。

(2) 聚类系数

节点 i 的聚类系数表示与节点 i 直接相连的所有节点所构成的子网中的现有边数 E_i 与最大可能边数之比, 记为 c_i

$$c_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2}$$

如在图 3 中 $c_5 = \frac{1}{3}$; $c_8 = 1$ 。

(3) 最短路径和平均路径长度

节点 i 与节点 j 的最短路径 (也称距离) 表示从节点 i 到节点 j 的所经过的最少边数, 记为 $d_{i,j}$ 。例如在图 3 中 $d_{2,9}=2$; $d_{4,19}=3$ 。

网络中任意两个节点之间的最短路径的最大值称为网络的直径, 记为 D ,

$$D = \max_{i,j} \{d_{i,j}\}$$

网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点间的最短路径的平均值,

$$L = \frac{\sum_{i,j} d_{i,j}}{N(N-1)}$$

以上三个基本指标在复杂网路中得到了最广泛的应用, 对于其他指标, 我们会根据需要在文中分别加以介绍。

