

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 同质竞争系统的拓扑结构与 演化模型研究

黄传峰 著



科学出版社

博士后文库

# 同质竞争系统的拓扑结构与 演化模型研究

黄传峰 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是关于复杂竞争系统的拓扑结构和演化机理的专门著作。首先,应用新兴的复杂网络理论与方法,建立具有广泛应用价值的竞争系统结构化分析框架;其次,根据不同的微观竞争机制,构建并分析各种同质化竞争系统的演化模型及其拓扑结构性质、竞争特征和长期行为,得到许多具有创新意义的结论;最后,从产品竞争和厂商竞争两个层面,深入研究市场竞争系统的结构特征和演化规律,实证检验相关分析方法的有效性和研究结论的科学性。

本书适用于系统科学、管理科学等学科的教学科研人员及学生,也适合大量参与市场、行业、组织、区域及国际竞争的决策者、决策分析及咨询机构等从业人员阅读。本书的诸多发现与结论以及所提出的分析框架,可以帮助社会竞争领域的企业或组织机构的决策者,有助于他们理解和分析所面对的复杂竞争系统的结构和规律,并制定相应的竞争策略,选择恰当的竞争方式。

### 图书在版编目(CIP)数据

同质竞争系统的拓扑结构与演化模型研究/黄传峰著. —北京:科学出版社, 2016.4

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-048037-8

I. ①同… II. ①黄… III. ①管理工程学—研究 IV. ①C93-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 072890 号

责任编辑:赵彦超 胡庆家/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

**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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 4 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2016 年 4 月第一次印刷 印张:14 5/8

字数:273 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任：陈宜瑜

副主任：詹文龙 李 扬

秘书长：邱春雷

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

傅伯杰 付小兵 郭坤宇 胡 滨

贾国柱 刘 伟 卢秉恒 毛大立

权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅

张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

## 《博士后文库》序言

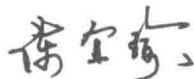
博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过 30 年的发展，截至 2015 年底，博士后科学基金资助总额约 26.5 亿元人民币，资助博士后研究人员 5 万 3 千余人，约占博士后招收人数的 1/3。截至 2014 年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占 72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从 2013 年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

# 前言

没有竞争,就没有五彩缤纷的世界,更没有人类的进步.

——题记

竞争是自然界和社会领域中的基本现象,正是竞争,才导致了自然物种的进化和人类社会的进步,才形成了纷繁复杂、精彩纷呈的美丽世界.虽然竞争系统在现实世界中非常普遍,但是其内部结构和演化机制却鲜为人知.已有的研究主要集中在生态学中种群的内外竞争、经济学中的市场竞争、管理学中的组织竞争力三个方面,使用的研究方法主要是动力学分析、均衡分析(包括博弈分析)和实证分析,但是它们都没有阐释各种复杂竞争系统的内部结构和竞争性质,也没有回答形成机制对于系统结构和演化行为的影响问题.

世纪之交诞生的复杂网络理论已成为学术界研究的一个热点,并开始广泛应用于工程技术、社会、政治、医药、经济、管理等诸多研究领域之中.复杂网络理论不仅解释了众多现实系统中结构的非随机现象,更重要的是为我们认识一个系统对象提供了一个崭新的方法论平台,使我们能够深入到系统内部,从分析系统的形成机制入手,探讨系统的结构、性质与演化规律.

本书运用复杂网络理论所提供的结构化分析方法,从同质竞争系统不同的形成机制着手,分别对完全竞争系统和不完全竞争系统的诸多演化模型进行深入研究,通过建立或构造演化模型来解析或者模拟真实竞争系统的拓扑结构和性质.特别地,演化模型可以捕捉竞争系统形成的动态特性,能够准确获得各种微观机制对系统最终结构的影响,对人们掌握竞争系统的特征及其动力学有着极其重要的意义.本研究发现不同的竞争机制甚至是细小的机制差异都可能会导致竞争系统结构、宏观性态、竞争特征和长期演化行为上极大的差异,即“机制决定结构”,这是对传统系统论的基本观点“结构决定功能”的来源的重要阐释和逻辑前推,并形成了用以解释一般竞争系统规律的完整逻辑链“竞争机制-系统结构-演化行为”.

本书的主要内容包括:

第1~3章,在相关研究综述的基础上,建立了一个完整的、具有实际应用价值的研究同质化竞争系统的生成机制、结构性质和演化行为的分析框架,为对我们对竞争系统的研究拓展了新的视角,丰富了研究手段,具有重要的方法论探索意义.

第4~6章,根据不同的精细的微观竞争机制,分别深入研究了完全竞争、不完全竞争和具有可变竞争系数等三类竞争系统模型的拓扑结构、竞争特征和演化规

律,得到了许多重要的研究结论和发现.

第 7 章,构建并提出了一个多产品市场竞争系统及其静态分析框架和动态解释模型,并将其解析结果与实证分析及仿真研究的结果相对照,得到了良好的一致性,说明了对产品竞争系统进行分析 and 解释的相关模型的有效性.

第 8 章,最后总结本书的研究结论,讨论了这一分析框架推广能力和实用化的可行性与可靠性,并对未来的研究工作进行展望.

希望本书能够抛砖引玉,有助于未来对复杂竞争系统拓扑结构和演化机理的深入研究.同时,也期望本书的分析框架和结论,可以帮助参与各级各类社会竞争的企业或组织的决策者及相关决策支持人员,有助于他们理解和分析所面对的复杂竞争系统的结构和规律,并选择相应的竞争策略和恰当的竞争方式.

鉴于作者的学术水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正.

黄传峰

2015 年 9 月

# Abstract

Competition is the basic phenomena in our world, whether in nature or in society. The species' evolution and the human social progress are due to the competition. However, we know a little toward the competitive system's structure and property. The existing researches mostly focus on the species competition in ecology, market competition in economics and organizational competence in management field. Their study means mostly are dynamics analyse, equilibrium analyse (include the game analyse) and demonstration analyse. But, all of them have not explained the competitive system structure and property, and not answered the question that how the system's mechanism influence the system structure and its evolution.

Complex networks have seen much interest from all research circles and have found many potential applications in a variety of fields including engineering technology, society, politics, communications, medicine, neural networks, economics and management. This theory not only could explain the non-stochastic phenomenon in many real-life systems' structure, but also the more important thing is that it could provide us a new methodology platform to study a system object. So we can discuss the systems' structure, character and their evolving law now by studying the systems' evolving mechanism in their interior.

In this book, we start our exploration from the different evolving mechanisms of the Homogenous Competitive System (HCS), go deep into a good many evolving models of competitive system, resolve or simulate these competitive systems' major topological structure and properties through constructing evolving models. Especially, evolving models can not only capture correctly the processes that assembled the competitive systems that we see today, but also help to know how various microscopic processes influence the competitive systems' topology and properties, and it is very important to our understanding to competitive systems' characteristics and their dynamics behavior.

(1) *An analytical frame to the HCS's evolving mechanism, structure property and dynamics behavior is proposed.* Firstly, the HCS is been defined and classified, its inscapes and general characters are discussed, and its mathematics describing is presented. Secondly, HCS's measurement and score system to its individual char-

acteristic, structure characteristic and evolving characteristic are discussed in detail. Finally, a analyzing frame to the HCS is proposed, and its precondition and theoretical hypothesis are pointed out.

(2) *A class of competitive models based on complete competition is proposed and analytical studied.* Because of the universality of competition in competitive systems, the concept of Complete Competitive System (CCS) is proposed, and a class of competitive models is created and analyzed which have the same character—complete competition, and the different mechanism difference. Firstly, Opening Complete Competitive System (OCCS) is proposed which includes Alterable Weight Model of OCCS (AWOCS) and Fixed Weight Model of OCCS (FWOCS) and their arithmetics. Secondly, Closing Complete Competitive System (CCCS) is proposed which includes Independent Increase Model of CCCS (IIMCS), Random Increase Model of CCCS (RIMCS), Preferential Increase Model of CCCS (PIMCS) and Generic Random Model of CCCS (GRMCS) and their arithmetics. Based on these creating arithmetics, the main measurements, such as the degree distribution, cluster coefficient, life, system size, and their relations are exactly analyzed and compared between these models, the long-term actions and stabilization are discussed, too.

(3) *A class of incompetitive models based on incomplete competition is proposed and analytical studied.* Because of the incompleteness of competition in real-life competitive systems, the concept of Incomplete Competitive System (ICS) is proposed, and a class of competitive models is created and analyzed which have the same character—incomplete competition, and the different mechanism difference. Firstly, Fixed Weight Incomplete Competitive System (FWICS) is studied which includes Random Increase Model of FWICS (RIMFS), Degree Preferential Model of FWICS (DPMFS), Competence Preferential Model of FWICS (CPMFS), Competence & Degree Preferential Model of FWICS (CDPMFS) and their arithmetics. Secondly, Alterable Weight Incomplete Competitive System (AWICS) is proposed which includes Random Model of AWICS (RMAS), Competence Preferential Model of AWICS (CPMAS), Reverse Competence Preferential Model of AWICS (RCPMAS) and their arithmetics. Based on these creating arithmetics, using the combinatorics and graph theory, the main measurements, such as the degree distribution, clustering coefficient, life, system size, and their relations are exactly analyzed and compared between these models, the long-term actions and stabilization are discussed, too.

(4) *A random competitive model of variational coefficient is proposed.* To increase the explanation to the real-life competitive system, Variational Coefficient Compet-

itive System (VCCS) based on the random competitive mechanism is studied. We discussed the relation between the variety of the system competitive coefficient and the system measurements thorough. Especially, the differ cases of competitive coefficient is proportioned with the system size are researched in deep. Based on these creating arithmetics, using the analytical method, the main measurement parameters, such as the degree distribution, clustering coefficient, life, system size, and their relations with the power function of system size are exactly analyzed and compared between these models, the long-term actions and stabilization are discussed, too.

(5) *A class of market product competitive system model is conducted and studied based on the demonstration.* Firstly, the characters and statistical properties of a multi-product market are analysed, and thus a Multi-Product Market Competitive System (MPMCS) is presented. Secondly, by a Static Model of MPMCS (SMPMCS), we have analyzed and computed the mainly topological structure and properties, such as product life, price trend, degree distribution, degree correlation, cluster coefficient, diameter, etc. We have also discussed the clique competition and its structure. Finally, based on a dynamical analytical model, using system simulation method, we have emulationally computed the system dynamical actions, summarized the relation between the system pararmeters and system evolution. At the same time, we have compared these theoretical and simulational results with the datum of practical product competitive system, proved the validity of these models and analytical frame.

Accoding to our large numbers of hard work, we have gradually arrived at a logical conclusion that diverse competitive mechanism, even a tiny difference, can lead to an enormous difference between the system structure, macroscopical nature, competition characteristic and long behavior of these system. So, we can say, **competitive mechanism determines system structure, system structure determines system's behavior and function.** This is an integrated logical chain possessing contextual consequence.

# 目 录

《博士后文库》序言

前言

Abstract

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 研究背景与科学依据 .....               | 1  |
| 1.1.1 复杂网络的研究热潮 .....             | 1  |
| 1.1.2 网络与系统结构 .....               | 2  |
| 1.1.3 复杂网络的研究内容、方法与其方法论视角 .....   | 5  |
| 1.2 研究的动机、目的与意义 .....             | 6  |
| 1.3 研究方法 with 实证数据说明 .....        | 8  |
| 1.4 本书的主要工作 .....                 | 9  |
| 第 2 章 竞争及其研究 .....                | 13 |
| 2.1 竞争 .....                      | 13 |
| 2.2 竞争研究方法 .....                  | 15 |
| 2.3 生态学中的种群竞争动力学理论 .....          | 16 |
| 2.3.1 Malthus 无竞争增长模型 .....       | 16 |
| 2.3.2 Logistic 同种竞争模型 .....       | 17 |
| 2.3.3 Lotka-Volterra 异种竞争模型 ..... | 18 |
| 2.4 经济学中的市场竞争理论与方法 .....          | 19 |
| 2.4.1 市场竞争理论 .....                | 20 |
| 2.4.2 市场竞争的研究方法 —— 一般均衡理论 .....   | 21 |
| 2.5 社会领域中的竞争理论 —— 博弈理论 .....      | 23 |
| 2.5.1 博弈论的研究进展 .....              | 23 |
| 2.5.2 博弈论的主要内容与研究方法 .....         | 25 |
| 2.6 管理科学中的竞争理论 .....              | 26 |
| 2.6.1 竞争力理论 .....                 | 26 |
| 2.6.2 动态竞争理论 .....                | 28 |
| 2.7 传统竞争研究中存在的主要问题 .....          | 29 |
| 第 3 章 同质竞争系统及其分析框架 .....          | 32 |
| 3.1 竞争系统及其要素 .....                | 32 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.2   | 竞争系统的拓扑结构及其分类           | 34  |
| 3.3   | 微观个体的特征度量               | 35  |
| 3.4   | 宏观系统的结构与性质度量            | 36  |
| 3.5   | 系统演化行为刻画                | 38  |
| 3.6   | 竞争系统的分析框架               | 39  |
| 3.7   | 本书的研究假设                 | 40  |
| 3.8   | 小结                      | 41  |
| 第 4 章 | 完全竞争系统                  | 43  |
| 4.1   | 开放的完全竞争系统               | 43  |
| 4.1.1 | 无权变模型                   | 43  |
| 4.1.2 | 权变模型                    | 48  |
| 4.2   | 封闭的完全竞争系统               | 56  |
| 4.2.1 | 独立增长模型                  | 56  |
| 4.2.2 | 随机增长模型                  | 59  |
| 4.2.3 | 择优增长模型                  | 62  |
| 4.2.4 | 一般随机演化模型                | 69  |
| 4.3   | 小结                      | 73  |
| 第 5 章 | 不完全竞争系统                 | 74  |
| 5.1   | 无权变的不完全竞争系统             | 74  |
| 5.1.1 | 随机增长模型                  | 74  |
| 5.1.2 | 度择优模型                   | 79  |
| 5.1.3 | 竞争力择优模型                 | 81  |
| 5.1.4 | 竞争力与度共同择优模型             | 84  |
| 5.2   | 权变的不完全竞争系统              | 85  |
| 5.2.1 | 随机模型                    | 85  |
| 5.2.2 | 竞争力择优模型                 | 96  |
| 5.2.3 | 逆竞争力择优模型                | 106 |
| 5.3   | 小结                      | 114 |
| 第 6 章 | 变系数竞争系统                 | 115 |
| 6.1   | 不完全竞争模型                 | 116 |
| 6.2   | 完全竞争模型                  | 119 |
| 6.3   | 一般情形                    | 123 |
| 6.4   | 小结                      | 128 |
| 第 7 章 | 理论应用与实证: 产品竞争系统的结构与演化分析 | 129 |
| 7.1   | 多产品可竞争市场及其一般统计特性        | 129 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.1.1 多产品可竞争市场 .....             | 129 |
| 7.1.2 多产品可竞争市场中的价格分布及统计特征 .....  | 132 |
| 7.1.3 产品的品质及消费者关注度的分布与统计特征 ..... | 138 |
| 7.1.4 市场产品集团结构及其特征 .....         | 141 |
| 7.2 产品竞争系统的静态分析 .....            | 145 |
| 7.2.1 产品竞争系统 .....               | 145 |
| 7.2.2 产品竞争系统的静态模型 .....          | 147 |
| 7.2.3 产品竞争力与竞争强度的分布形态 .....      | 149 |
| 7.2.4 产品竞争系统的集合规模 .....          | 152 |
| 7.2.5 产品竞争网络节点度的分布 .....         | 154 |
| 7.2.6 节点度的相关性 .....              | 159 |
| 7.2.7 平均最短距离 .....               | 162 |
| 7.2.8 群聚系数 .....                 | 166 |
| 7.2.9 核心竞争集团与市场垄断 .....          | 168 |
| 7.2.10 产品竞争集团的分类结构与市场细分 .....    | 171 |
| 7.2.11 厂商-产品竞争系统 .....           | 173 |
| 7.3 产品竞争系统的动态演化模型 .....          | 177 |
| 7.3.1 产品竞争力的演化 .....             | 178 |
| 7.3.2 产品寿命的演化 .....              | 182 |
| 7.3.3 市场规模的演化 .....              | 183 |
| 7.3.4 产品价格的演化 .....              | 187 |
| 7.3.5 产品品质的演化 .....              | 190 |
| 7.4 小结 .....                     | 192 |
| 第 8 章 结论与展望 .....                | 194 |
| 8.1 本书的主要结论 .....                | 194 |
| 8.2 本书的主要创新点 .....               | 195 |
| 8.3 本研究的管理学意义 .....              | 199 |
| 8.4 未来的研究展望 .....                | 200 |
| 相关的学术成果 .....                    | 203 |
| 附录 产品竞争系统的拓扑结构图例 .....           | 205 |
| 参考文献 .....                       | 208 |
| 致谢 .....                         | 215 |
| 编后记 .....                        | 217 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与科学依据

### 1.1.1 复杂网络的研究热潮

进入 21 世纪, 系统问题, 特别是复杂系统及相应的复杂性科学问题变得日益突出. 复杂性问题是现代科学的重大问题之一, 复杂性研究是 21 世纪科学研究的前沿和富有挑战性的重大课题, 复杂性范式也是人类思维的一个新范式: 简单系统会展现复杂行为; 复杂系统受简单规则驱动<sup>①</sup>.

20 世纪的一项重大的科学成果就是以混沌理论为代表的系统复杂性科学的出现与迅速发展, 它揭示了一个简单系统会展现出一系列复杂行为: 蝴蝶效应、分形结构、混沌现象. 例如, 物种的繁衍可用简单的 Logistic 方程:  $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$  (即中学生都熟悉的抛物线方程) 来描述, 但它有着极其丰富的内涵 (郝柏林, 1993). 系统复杂性科学也一再证明了在自然与社会系统中非线性是常态, 而线性行为则是特例, 如白云的形状、湍流的形成、动物行为、人类的思想等. 许多可以用差分、微分和迭代过程描述的简单系统, 由于非线性而表现出复杂的行为和许多不可预测的结果, 这是复杂性范式中人类最先认识的一个重要方面.

世纪之交另一项重大的科研发现就是观察到复杂系统可以受简单规则的驱动: 1999 年, Albert 和 Barabási 等在研究万维网的网页链接时, 发现它是一个无标度网络 (scale-free networks), 即其连接度分布具有幂律形式, 少数网页拥有大量的链接, 而绝大多数网页只有少量的网页与之相连; 他们还发现万维网具有“小世界” (small world) 效应, 即在网络中任选两个网页, 从一个网页平均点击 19 次就可以找到另一个网页 (Albert and Barabási, 1999; Barabási and Albert, 1999). 而这一网络可以通过简单的规则演化而生成, 这些规则可以概括为: 随机性、适应性和遗传性, 即隐含着某些达尔文的进化原理. 这是人类认识上的又一次重要进步, 它大大地丰富了复杂性范式的内容 (史定华, 2005).

此后, 在他们的开创性的研究基础上, 众多科学家对大量的现实世界中各种复杂的网络, 从技术网络 (Faloutsos et al., 1999; Albert et al., 2004; Guimerà and Amaral, 2004) 到疾病传播网络 (Pastor-Satorras and Vespignani, 2002; Meyers et al.,

<sup>①</sup> 史定华. 2004. 网络 —— 探索复杂性的新途径//祁国宁, 徐福缘, 王恒山, 车宏安主编. 复杂网络 —— 系统结构研究文集, 第 3 辑: 97~102.

2005), 从生物网络 (Jeong et al., 2000; Jeong et al., 2001; Roopnarine, 2006) 到社会网络 (Porter et al., 2005; Schneider and Hirtreiter, 2005), 从协作网络 (Newman, 2001; Verspagen and Duysters, 2004) 到竞争网络 (Bianconi and Barabási, 2001; Wang and Zhang, 2004; Berger et al., 2005), 从新陈代谢网络 (Jeong et al., 2000)、蛋白质网络 (Jeong et al., 2001) 到人际关系网络 (Liljeros et al., 2001; Battiston and Catanzaro, 2004; Caldarella and Catanzaro, 2004), 都进行了大量的实证的研究、建模分析和理论证明, 也都得到了相似的结论, 即这些复杂的网络都可以由简单的规则来生成, 并且具有与传统的规则网络和随机网络不同的拓扑结构和动力学行为特征, 这些网络我们统称为**复杂网络**(complex networks). 这些结论不仅促使我们对各自学科中许多原来以为是简单而必然的事实重新思考; 而且为我们分析和考察本领域内的复杂系统提供了一个全新的视野和一整套新的基于系统结构分析的方法 (陈禹, 2005; 史定华, 2005).

自 1999 年以来, 每年都有越来越多的讨论复杂网络的相关问题的学术论文发表在 *Nature*、*Science*、《物理评论快讯》等国际权威刊物上, 截止到 2006 年 6 月, 仅 SCI 收录的关于复杂网络的研究论文数量就已经超过 2273 篇 (陈关荣, 2006), 而且正在向几乎所有的科学领域和学科分支迅速渗透, 这些研究奠定了一个全新的研究领域——复杂网络的理论基础. 今天, 复杂网络的研究已经成为国际学术研究的热点和前沿问题之一; 不仅如此, 随着社会的网络化, 在今后很多年里, 网络化也将是许多研究领域发展的一个主流方向, 因此, 复杂网络的相关研究显得越来越重要.

### 1.1.2 网络与系统结构

所谓网络是由节点和连线组成, 这里节点和连线是广义的, 其中节点表示系统的元素, 两节点的连线表示元素之间的相互作用. 尽管定义极其简单, 但是网络的结构却能够高度复杂. 例如, 图 1.1 展示了美国中学生之间的友谊关系, 节点代表学生, 节点间的连边表明两者存在友谊 (Moody, 2001). 显然, 该网络主要依据文化程度 (初中与高中)、种族 (黑人、白人等) 的不同出现了 4 个高密度的友谊关系群落, 反映了美国中学生社会交往的现实状态.

因此, 不需要确定其节点位置和连边的形态, 网络的结构就能够反映对应的现实系统的某些特征或性质. 所以, 我们把网络不依赖于节点的具体位置和边的具体形态就能表现出来的性质叫做对应系统的拓扑性质, 相应的网络结构也称为对应系统的**拓扑结构**(topological structure). 这样, 就可以运用数学中图论和网络分析的理论、方法和工具进行系统结构的拓扑特性研究.

目前, 可以用来描述自然界和社会领域中真实系统的网络拓扑结构, 分为规则网络、随机网络和复杂网络三类, 分别介绍如下.

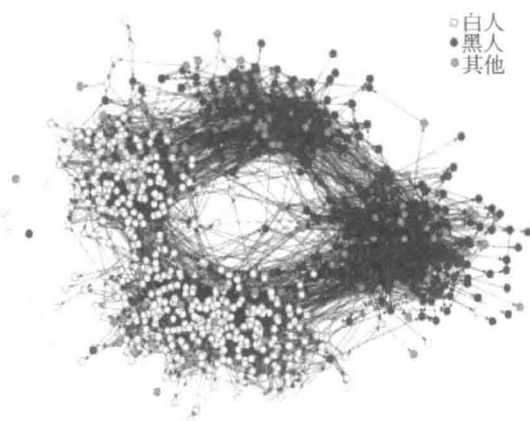


图 1.1 美国中学生友谊网络的拓扑结构 (Moody, 2001)

**规则网络**(regular network) 中, 任意节点的邻居节点数量都相同, 也即每个节点的连边数量 (称为节点的度, degree) 都相等. 它们反映了某些真实系统各元素之间的关系可以用一些规则的结构表示, 例如, 最近邻环网 (图 1.2(a)) 上, 每个节点的邻居个数都是 4 个, 即在环上的一级和二级邻居, 类似的规则结构还有还有二维平面上的欧几里得网格、三维空间中的网格等.

与规则网络不同, **随机网络**(random network) 中任意节点的邻居数量 (度) 则是不定的, 但每个节点的度都在一个平均值附近 (图 1.2(c)). 随机网络的形成是由于其任意两个节点之间是否存在连边由某种网络生长机制所决定的概率确定. 可以看出, 规则网络是秩序的代表, 而随机网络则是混乱的体现, 它们正是某种网络生长机制的两个极端.

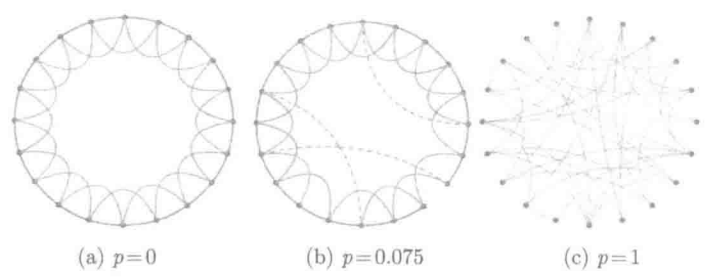


图 1.2 规则网络、小世界网络和随机网络 (Watts and Strogatz, 1998)

事实上, 如果将规则网络的每个连边以某个概率  $p$  重连, 即固定一端节点, 而修改其另一端节点, 则规则网络和随机网络正是这一机制在  $p = 0$  和  $p = 1$  的特例  $p$  且当  $0 < p \ll 1$  时, 该网络同时具有大的群聚系数 (clustering coefficient, 节点间的聚集程度) 和短的平均路径 (average path length, 节点间的平均路径长度), 这有

别于规则网络的高群聚系数和高平均路径,也有别于随机网络的低群聚系数和短平均路径,被称为**小世界网络**(small-world network; Watts and Strogatz, 1998),许多现实的系统都具有这种小世界现象,如人类的社会关系网络等。

早期,人们一直认为规则网络是系统的结构形态。然而,随着 Erdős 和 Rényi (1960) 提出了随机网络模型,在此后的近 40 年里,人们都认为用随机网络来描述现实系统的拓扑结构更为恰当 (Bollobás, 1985)。直到 1998 年小世界现象 (Watts and Strogatz, 1998) 和 1999 年无标度现象 (Albert and Barabási, 1999; Barabási and Albert, 1999) 先后被发现,科学家们发现大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络。这种网络虽然有类似的短平均路径,但是其度分布 (degree distribution) 却不是如随机网络和小世界网络那样的对称的泊松分布 (Poisson distribution),而是带有重尾形态的幂律分布 (power law),即其在双对数坐标下呈一直线 (图 1.3)。这样的一些度分布没有特征标度的网络被称为**无标度网络**。更广义地,所有可以由简单的规则来生成,并且具有与传统的规则网络和随机网络不同的拓扑结构和动力学行为特征的网络,学术领域都统称为**复杂网络**。事实上,这些网络的复杂性来自于现实系统的结构复杂性、连接复杂性、演化复杂性、时空复杂性等各个方面 (Strogatz, 2001)。

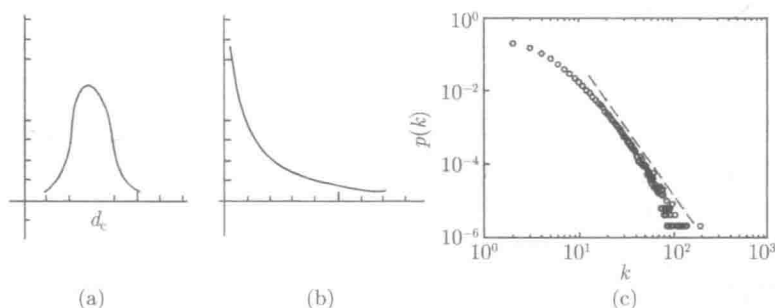


图 1.3 随机网络及无标度网络的度分布

(a) 随机网络的泊松分布; (b) 无标度网络的幂律分布; (c) 双对数坐标下的幂律分布

因此,复杂网络就是具有复杂拓扑结构和动力行为的大规模网络,它是由大量的节点通过边的相互连接而构成的图。复杂网络的节点可以是任意具有特定动力和信息内涵的系统的基本单位,而边则表示这些基本单位之间的关系或联系。大量的实证研究发现,现实世界中的众多复杂系统的拓扑结构都是复杂网络,例如,因特网 (Faloutsos et al., 1999; Broida and Claffy, 2001; Chen et al., 2002), 万维网 (Adamic, 1999; Albert and Barabási, 1999; Huberman, 2001), 食物链网络 (Jordano et al., 2003; Roopnarine, 2006.), 流行病传播网络 (Pastor-Satorras and Vespignani, 2002; Keeling and Eames, 2005; Meyers et al., 2005), 生物网络 (Jeong et al., 2000;