

北京工业大学211学科建设成果



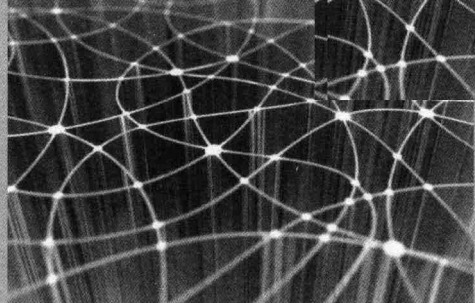
基于复杂社会网络理论的 产业结构研究

邢李志 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

基于复杂社会网络理论的 产业结构研究

邢李志 著



科学出版社
北京

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和社会网络理论,根据投入产出数据构建了一系列加权有向的网络模型,并以此为基础对产业结构优化、产业集群发展、融资风险评估、产业空间布局和区域承载力等问题进行了研究。

本书适合高等院校学生、教师和科研人员阅读,对从事社会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

基于复杂社会网络理论的产业结构研究 / 邢李志著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037482-0

I. ①基… II. ①邢… III. ①产业结构-理论研究 IV. ①F062.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 099704 号

责任编辑:林 剑 / 责任校对:刘亚琦

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>

新科印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 5 月第一次印刷 印张: 17

字数: 351 000

定价: 88.00 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。

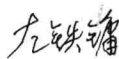
目前，学校有专任教师 1536 人，其中全职两院院士 5 人，博士生导师 220 人，正高级职称 294 人和副高级职称 580 人；专任教师中具有博士学位教师的比例达到 54.6%；有教育部“长江学者”特聘教授 4 人，国家杰出青年基金获得者 6 人，入选中组部“千人计划”1 人，北京市“海聚工程”3 人，教育部新（跨）世纪优秀人才支持计划 15 人。

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



2011 年 6 月

前言

当前，在产业复杂网络的研究中，最常见的研究方式是构建类似于简单物理网络的、无权无向的产业网络。但是，在这类产业网络中节点之间的边代表的仅仅是它们存在某种特定的联系，很少反映联系的强弱。在过去的研究中，投入产出数据能够很好地描述一个国家或地区经济系统中各个产品部门之间的技术经济关系，而且数据都是以矩阵的形式给出，可以直接或经过处理后作为复杂网络的邻接矩阵，从而形成一类有向加权网络。

本书根据投入产出表的直接消耗系数矩阵构建了产业结构网络模型，然后针对网络中的边同时具有方向和权重的特点，改良了 Floyd 最短路径搜索算法，使之能够搜索网络中的两个节点间最快抵达的路径，经过全局路径搜索后得到了代表部门节点最快速、最直接的系数矩阵，从而构建了另一类产业网络模型——产业关联网络模型，以及衍生于该网络的一系列以特定产品部门为核心的子网络——产业集群发展关联网络。此外，参考 Blöchl 等的研究，构建了以投入产出基本流量表为数据基础的产业信息传递网络模型。

针对以上的产业网络模型，已经完成度分布、边权分布、点权分布、集聚系数、介数、流介数等基本的复杂网络分析过程，并且根据改良的路径算法和模糊聚类算法开发出一种新的产品部门聚类分析的研究方式。根据社会网络中间人属性和条件概率算法界定了产品部门的产业中介属性，根据随机游走过程和结构洞理论分析产业金融风险，根据 GLW 模型和 Levy Stable 分布分析了产品部门的演化机制。

本书还根据二分图理论构建了产业环境资源竞争网络模型及其映射得到的排污企业单模式竞争网络模型，目的是分析区域企业对于环境容量的需求关系和它们之间环境外部性产生的竞争关系，通过模型的边权、点权、加权聚集系数、加

权路径等网络指标来表征企业排污对环境容量的消耗程度，以及排污企业之间环境外部性的综合影响、直接影响和间接影响程度。

总而言之，本书尝试将复杂网络丰富的研究手段和社会网络深刻的解释方式相结合，挖掘产业网络中每个节点不同网络指标所蕴含的产业经济学意义，提出产业联动效应、产业集群发展、产业融资风险、区域产业布局和相关政策措施制定等问题的解决方案。

在此书出版之际，非常感谢导师李京文院士和赵立祥教授多年来的细心教导和无微不至的关怀，感谢关峻教授在生活 and 学术上的帮助，也感谢我的家人和朋友一直以来对我的支持。

邢李志

2013 年 2 月

目 录

总序

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 相关领域研究综述	3
1.3 研究内容与方法	15
2 复杂网络理论基础	18
2.1 基本概念	19
2.2 重要的特征度量	21
2.3 介数中心性理论	30
2.4 经典的复杂网络模型	34
2.5 投入产出理论	40
3 产业结构网络的路径搜索和聚类分析	43
3.1 ISN 网络模型的构建原则	43
3.2 ISN 网络的特征度量分析	44
3.3 ISN 网络路径分析的理论探索	56
3.4 ISN 网络模型强关联关系的聚类分析	61
3.5 本章小结	67
4 产业关联网络的抗毁性分析和中间人属性	68
4.1 产业关联网络模型	68
4.2 产业关联网络的特征度量分析	71
4.3 产业关联网络的介数分析	81
4.4 产业关联网络的稳健性与脆弱性	84
4.5 产业关联网络的中间人属性研究	89

4.6	本章小结	98
5	产业集群网络的关联性分析	100
5.1	产业集群网络模型	100
5.2	以汽车行业为主导产业的 ICDN1-AU 网络模型	102
5.3	以现代服务业为主导产业的 ICDN1 网络模型	108
5.4	以石化行业为主导产业的 ICDN1-PE 网络模型	117
5.5	本章小结	126
6	产业信息传递网络的随机游走分析	127
6.1	产业信息传递网络模型的构建	127
6.2	产业信息传递网络的流介数	131
6.3	产业信息传递网络的随机游走中心性	133
6.4	产业信息传递网络的累计首达介数	141
6.5	本章小结	148
7	产业环境资源竞争网络模型研究	149
7.1	排污企业环境外部性的测度	149
7.2	二分图理论与产业环境资源竞争网络模型的构建	151
7.3	模型的分析方法及其经济含义	154
7.4	广州经济技术开发区的实证分析	155
7.5	本章小结	161
8	结论与展望	162
8.1	本书的主要结论	162
8.2	进一步研究之处	164
	参考文献	166
	附录	172

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究的现实背景

党的十八大明确指出，要推进经济结构战略性调整。这是加快转变经济发展方式的主攻方向，以改善需求结构、优化产业结构、促进区域协调发展、推进城镇化为重点，着力解决制约经济持续健康发展的重大结构性问题。之所以将优化产业结构提升到如此高的战略地位，一是推进经济结构战略性调整是转变经济发展方式的主攻方向；二是可以实现国民经济持续平稳增长；三是有助于实现全面建成小康社会和社会主义现代化建设的目标；四是可以抓住国际经济结构调整升级带来的机遇，有效应对各种挑战。

进入 21 世纪以来，世界政治经济及国际关系变化起伏，经济进一步向集团化、区域化、国际化发展；而且全球一体化的趋势继续深化。全球化的经济结构重组和市场一体化成为城市和区域发展的新动力。区域经济一体化也给传统的区域经济带来了全新的概念。相关研究也转向一定市场经济条件下特定区域内生产力的空间分布及发展规律，探索促进特定区域经济增长的途径和措施，以及如何在发挥各地区优势的基础上实现资源优化配置和提高区域整体经济效益。这种研究的核心就决定和反映了生产力发展状态的产业结构。改革开放以来，区域产业结构的概念被频繁运用于我国的经济规划之中，如深圳经济特区、浦东新区、天津滨海新区、成渝经济区等综合配套改革试验区、北部湾经济区等。相关理论发展和社会实践均建立于将系统方法、理性决策和控制论等引入到区域产业结构的研究中，并使其得到了长足发展。但随着社会的进步和经济实力的增强，区域产业结构的衡量指标不再单纯反映在经济收益上，社会总体经济效益和地区性生态效益也被纳入考量范畴。如此便要求探索适应区域产业结构研究的新理论和新方法。

1.1.2 研究的实践意义

随着社会主义市场经济体制在我国的进一步深化、知识经济和虚拟经济的进一步推动、产能过剩矛盾的进一步激化,以及全球经济一体化在各个层面的表现和所带来的竞争压力,加强区域产业规划、增强产业竞争实力就成为不二之选。在这种大背景下,深化和推动我国区域产业规划的研究工作自然有着与历史上任何时刻均不同的重要意义。加强区域产业结构优化的研究,是对科学发展观的准确把握;通过加强区域产业结构优化的研究,我国才能真正在实践中落实好科学发展观;只有区域产业结构优化理论在实践中不断前进,不断发展,我国才能真正走上具有中国特色的科学发展之路。因此,本书的选题和内容具有很强的现实意义和实施必要。

区域经济是一个结构复杂的有机系统,大到部门,小到企业;从生产到流通、服务等企业的集合都可以称为产业。产业是区域经济社会发展的主体,也是区域生产力布局中的重要内容。只有产业不断发展与更替才有区域产业体系的不断演化,才有产业结构的变动与提升;只有产业不断适应布局要求,才能使优势要素(特别市资源要素)得到合理的配置,才能取得良好的经济效益、社会效益和生态效益。从这个意义上来说,产业结构规划布局就是区域经济发展的谋划过程,必须综合复杂系统理论和宏观经济数量分析来进行统筹规划。随着科学技术的发展和产业分类的完善,产业间的联系也越来越复杂和密切,这就需要通过研究产业间投入产出关联的数量关系来研究区域产业系统的内在特性。

1.1.3 研究的理论意义

复杂性科学是21世纪最重要的新兴科学之一,近年来在自然、工程、社会和经济等领域蓬勃发展,得到各个领域专家学者的广泛关注。有关复杂网络的理论研究和应用研究在物理、计算机和社会学领域掀起了研究热潮并取得了巨大成功。通过在Web of Science文摘索引数据库,本书对1998年以来的复杂网络研究文献进行了统计,也证实复杂网络已经成为近十几年来复杂性研究的前沿方向(图1-1)。

复杂网络理论的出现也为系统、客观地再现区域经济结构提供了一个新的路径。复杂网络理论所具备的结构复杂、网络进化、连接多样性、动力学复杂性及多重复杂性融合的特点均可映射至区域产业结构的各特性上。现有复杂网络理论

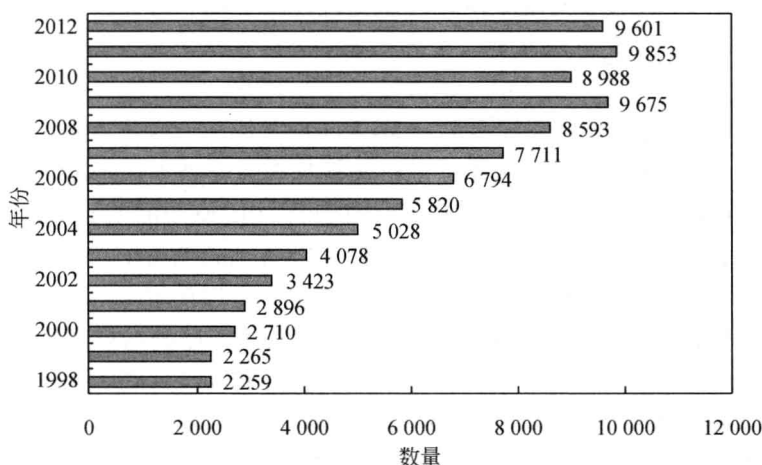


图 1-1 以“Complex networks”为主题的 SCI 论文统计

的相关研究多围绕生命科学、万维网、社会网络、传播网络、科学家合作网络、人类关系网络、语言学网络等展开。针对经济学的复杂网络理论研究也多局限于较为微观和中观尺度的企业间或产业链方面，尚未有利用复杂网络理论勾勒产业结构并探讨其演化机理的研究。利用复杂网络理论刻画区域产业拓扑结构，可以更好地反映产业结构各层次及各部分之间的相互依存、相互制约的关系，也可以确定产业结构的优化和控制节点。所以，采用复杂网络理论研究产业结构具有极大的理论和现实意义。

1.2 相关领域研究综述

1.2.1 复杂网络理论的研究现状

复杂系统作为一门独立的学科出现于 20 世纪 90 年代，而复杂网络作为研究复杂系统的有效工具和方法始于 90 年代末期。众所周知，复杂系统是由相互作用的众多子系统组成，如果将子系统抽象成节点，把子系统之间的相互作用关系抽象成连接节点的边，则复杂系统可以抽象成一个复杂网络。最早将复杂系统看成是一个网络进行研究的是社会学家，社会学家通过研究人群关系网络，分析了个体对整个系统的贡献，强调网络中个体节点的作用。因此研究一个复杂网络，不仅要考虑其微观的网络结构及网络特征，而且要分析其作为一个整体即从宏观

的视角研究其系统特性，对复杂网络的研究包含以下几个内容。

1.2.1.1 基本模型

20 世纪 60 年代，匈牙利数学家 Erdős 和 Rényi 提出，在每个时间步，在由 N 个节点构成的一维图中以确定概率 p 随机选择其中的两个节点连接一条边，如此演化形成一个 ER 随机图模型（简称 ER 模型）。ER 模型的节点度服从泊松分布，它具有较小的平均路径和较小的簇系数（Erdős and Rényi, 1960）。ER 模型提出后，从 20 世纪 50 年代末期到 20 世纪 90 年代末期的近 40 年里，无明确设计原则的大规模网络主要用这种简单而易于被多数人接受的随机图的拓扑结构来描述，即认为大规模网络的形成过程中节点间的连接是完全随机的。直到 20 世纪 80 年代末期，由于计算机数据处理和运算能力的飞速发展，科学家们发现大量的现实网络不是完全随机的网络，而是具有其他统计特征的网络。

1998 年，Watts 和 Strogatz 发表了一篇开创性的论文，提出了网络科学著名的 WS 小世界模型（简称 WS 模型）。他们研究了网络模型如何实现在规则拓扑结构和随机拓扑结构之间的转换，发现规则网络可以通过“重连接”增加网络的混乱度。经过重连的网络既可以像规则网络一样有很高的聚合度，同时又可以向随机网络一样有很低的特征路径长度。他们命名具有这种效应的网络为小世界网络，并且证明了在小世界网络具有更高的信号传输速度、更强的计算能力及更好的同步能力，而且病毒传播也更加容易。但是，ER 模型和 WS 模型的度分布与许多现实网络都不相符，用它们来描述这些现实网络具有很大的局限性。

1999 年，Barabási 和 Albert 通过对电影演员合作网、万维网和美国细目电力传输网等大型随机网络的研究发现，许多复杂网络具有大规模的高度自组织特性，即多数复杂网络的节点度服从 Pareto 分布，并把具有幂律度分布的网络称为无标度网络，即 Barabási-Albert 网络模型（简称 BA 模型），它是第一个随机的无标度网络模型。Barabási 认为，增长和择优连接是许多复杂系统的共同特征，包括商业网络、社会网络（描述个人或组织）和传输网络，也是无标度网络形成的两种必不可少的机制。

1.2.1.2 实证研究

复杂网络最开始的研究是通过分析现实世界中网络统计数据得出它们的共性，由此才诞生了小世界网络和无标度网络，而且进一步推动了学者们构建更加符合实际网络特性的网络模型。国内外研究学者针对各类实际网络进行了大量的实证研究，如电影演员合作网络、万维网、论文引用网络、飞机航线网、物流和

供应链网络等。从目前的研究成果来看，多数实际网络普遍存在一些共同的拓扑特性：大都具有较短的平均距离和高的聚集性，而且部分网络具有幂函数律的节点度分布，即具有无标度网络的特性（李春光，2004）。

为了进一步反映连接网络节点的边的更多物理信息，考虑不同节点之间作用的强度，即边的权值，大量文献研究了加权网络（weighted networks）的统计分析。事实上，许多网络的节点间相互作用的强度是不同的，也就是说它们都是复杂加权网络，如社会关系网中，相识边权重代表两个人的相识程度；演员合作网中，合作边权重代表演员间的合作熟悉程度；电力网中，高压传输站点间的连边权重代表其距离的远近；万维网中，超级连接的边权重代表超级连接强度等。加权网络的描述方法为研究网络拓扑结构和权重的共演化提供了便捷的途径。而且近年来越来越多的含有权重的网络实证的获得使得研究权重网络的演化成为可能。通过对实证数据的分析，人们发现了很多有趣的现象，包括连接度（degree）、点权（strength）和边权（weight）分布的无标度特性，以及度和权重的非线性关系等。

1999 年，Barabási 和 Albert 通过网络机器人查找网络文档 URL 并建立数据库的方式，发现网页的链入和链出的概率都遵循 Boltzmann-Gibbs 分布定律，不仅和传统的随机图论所预测的柏松分布相去甚远，也不符合在随机网络模型中找到的有界分布。他们的研究发现，那个时期互联网的平均路径为 19，而且预言，即使互联网的规模增大 10 倍时，平均路径也只会改变很少（Albert et al., 1999）。

2000 年，Jeong 等系统地比较和分析了 43 个组织新陈代谢网络。他们发现尽管这些网络的个体组成和路径有很大差异，但是都有同样的拓扑规模属性。为了研究新陈代谢网络表现出对小错误的容忍特性，他们仿真了大肠杆菌基因的新陈代谢网络：去掉所有的中心，网络直径就会快速增加；当去掉一个随机中心，剩下节点直径的平均距离并没有受到影响。从而证明了无标度网络表现出对随机错误的抵抗性（Jeong et al., 2000）。

2001 年，Newman 借助 Erdős 数^①的手段证实科学协作网具有小世界效应（一对科学家的典型距离为 6）和无标度特性（因时限原因不完全遵守 Pareto 分布），而且还研究了这种网络的度分布、平均路径、网络直径、集聚系数、中心节点等特征（Newman, 2001）。

① Erdős 数衡量了一个数学家在文献学方面与 Erdős 的近似度。Erdős 的 Erdős 数为 0，与 Erdős 合作发表论文的人的 Erdős 数为 1，与 Erdős 的某个合作者合作发表论文的人的 Erdős 数为 2，以此类推。

2001 年, Liljeros 等通过研究人类性关系网的无标度特性, 证明流行病增长和传播的速度在无标度网络中更快, 同时该网络的中心节点受损会很大程度上影响整个网络。结果表明把有大量性伙伴的个体作为安全性教育运动的战略对象, 可能是阻止性传染疾病传播的最有效的方法 (Liljeros et al., 2001)。

2003 年, 李春光和陈关荣在分析了科学家合作网的连边强度基础上, 发现该网络的权重分布服从 Pareto 分布, 进一步预测大多数的加权网络的权重分布都具有类似的形式 (Li and Chen, 2003)。

2003 年和 2004 年, Latora 和 Marchinri 分别基于有效性和费用的概念, 得到了能够有效进行信息传输的所谓“经济的小世界网络” (economic small worlds), 并对神经网络、社会网络、通信网络和运输网络进行了实证研究 (Latora and Marchinri, 2003; 2004)。

2004 年, Barrat 等以全球机场网络和科学家合作网络为例, 详细分析了加权网络的统计特性, 并将集聚系数和邻近节点平均度扩展到加权网络中。他们的工作表明, 真实网络中权重同样存在很强的异质性, 并且节点权重和度之间存在非线性的关联 (Barrat et al., 2004)。

2005 年, Macdonald 等做了类似的实证工作, 并发现在美国航空网络及大肠杆菌新陈代谢网络中同样存在流量和拓扑结构的非线性关系。这些结果表明真实权重网络中存在马太效应, 即连接度大的点通常会承受比连接度更大的权重。这些实证数据为权重网络的建模工作提供了可靠的依据 (Macdonald et al., 2005)。

1.2.1.3 病毒传播

1997 年, Ball 等 (1997) 研究了在具有两层混合的种群中进行个体移除的流行病 (SIR 流行病模型) 传播情况。两层混合网 (two levels of mixing) 分为全局和局部, 并为这种过程开发了“大圆模型 (great circle model)”。可以说, 他们开创了复杂网络上病毒传播研究的先河。

2001 年, Kuperman 和 Abramson 研究了流行病在小世界网络中的传播行为, 他们发现当表征捷径密度的参数 p 变化的时候, SIRS 模型会显示出两种明显不同的行为: 当 p 值比较小的时候, 低级别的局部感染会持续一段时间; 当值比较大的时候, 模型中被感染个体数目明显带有类似周期性的振荡 (Kuperman and Abramson, 2001)。

2001 年, Pastor-Satorras 和 Vespignani 对互联网中的病毒传播进行了实证分析, 进一步建立了复杂网络上的病毒传播模型 (简称 SIS 模型), 并通过计算机数值模拟和平均场理论分析了无标度网络上病毒传播的特性。他们的工作揭示了

一个非常重要的事实：一个无标度网络上病毒传播的有效传染概率阈值为零 (Pastor-Satorras and Vespignani, 2001)。

2002 年, Eguíluz 和 Klemm 进一步研究了具有高簇系数和相配混合性的无标度网络上 SIS 病毒传播的阈值, 发现簇系数和相配混合性能够一定程度地抑制无标度网络上病毒的传播 (Eguíluz and Klemm, 2002)。

2004 年, Barthélemy 等在 Pastor-Satorras 研究的基础上进一步研究了病毒的传播行为, 发现无标度网络上的病毒传播存在分层特性 (hierarchical spread) (Barthélemy et al., 2004)。

2005 年, Newman 探讨了复杂网络上两种相互关联的病毒的传播, 发现系统中存在不同的动力学相 (Newman, 2005)。

2006 年, Gross 等研究了自适应网络 (adaptive network) 上的病毒传播行为, 发现了病毒传播中存在一级相变、迟滞现象、振荡及网络结构相配性的涌现。该工作表明, 病毒传播与网络结构的相互作用对网络结构的演化和病毒传播的动力学同时起到至关重要的作用 (Gross et al., 2006)。

1.2.1.4 稳健性

任何无标度网络都可以承受相当比例的节点损失仍能继续工作, 这种稳健性源自其自身的拓扑结构特点。无标度网络中存在高度联通的中心节点, 它们使得网络能够连成一体。如果故障对任何节点来说是以相同概率发生的, 那么故障更有可能发生在度较小、数量较多的非中心节点上, 但是这些节点对网络的整体所起的作用是有限的, 网络不会因为一定数量的故障而崩溃。如果故障发生在少数中心节点上, 按照等级分布的中心节点还会有其他的来维持网络的整体性。总而言之, 无标度网络的稳健性根源在于其结构的不均衡性。

2000 年, Havlin 等研究了网络对随机性节点失效的稳健性, 并使用幂指数度分布为 $P(k) = k^{-\alpha}$ 的无标度网络进行了测试。他们的研究发现大多数实际网络都是无标度的且次数幂小于等于 3, 这种网络无论多少节点被删除, 大组件都不会从网络中消失 (Cohen et al., 2000)。

1.2.1.5 脆弱性

但是, 面对攻击的脆弱性也是无标度网络与生俱来的特性之一。删除无标度网络中连通性最强的一些中心节点后, 网络很快就分裂成相互无法连通的分散组件。

2000 年, Albert 等将去除节点所能给网络带来的攻击效果定义为网络弹性。

他们的研究发现万维网、因特网、社会网络和细胞网络具有极高的网络弹性，肯定了无标度网络具有强大的稳健性这一客观事实，即这些网络中节点的通信能够不受一些节点高失效率的影响。但是，这些网络面对攻击又特别脆弱，这种攻击指的是选择并移走那些确保网络连通性的中心节点（Albert et al., 2000）。Callaway 等发现对于具幂指数 Pareto 分布的图，大组件的大小在度最高的顶点被删除之后会迅速缩小。对于指数为 2.7 的 Boltzmann-Gibbs 分布，大约 1% 的具有最高度的顶点需要被删除从而完全地破坏其大组件，等价于在具有相同拓扑的通信网络中摧毁那些最长的通信路径（Callaway, 2000）。

上述研究一方面对确定产业结构中的核心产业及确立相关保护和支持政策，另一方面对寻找制约产业结构升级的关键点及制定相关政策有较好的指导意义。

1.2.2 产业复杂网络的研究现状

复杂网络是具有海量节点和复杂连接拓扑结构的网络模型，自然界存在着大量的复杂系统，从社会、交通以至于产业关联系统，这些系统能够用各种各样的“网络”加以定量描述。产业复杂网络指的是产业通过错综复杂的相互关联形成的网络。将产业视为节点，产业之间的各种关系转化为边，通过产业之间的相互作用就可以构建各种产业复杂网络。对于产业复杂网络的研究，主要是通过特征指标来刻画网络的特征，其特性主要由基本特征、静态结构特征和动力学特征组成。复杂网络基本特征主要由平均路径（average path length）、集聚系数（clustering coefficient）、度（degree）与度分布（degree distribution）这三个基本概念来刻画；复杂网络的静态结构特征则主要由中心性（centrality）、介数（betweenness）、核数（k-core）、层级结构（hierarchy）、社团结构（community）、度相关性（degree correlations）、簇度相关性（clustering-degree correlations）来刻画；而复杂网络动力学特征则重点考察网络的可靠性（reliability）、稳健性（robustness）、传播性（epidemic）和同步性（synchronization）。通过分析其特征刻画网络的拓扑结构，并据此来解释真实产业系统的形成机制、演化规律和动力学过程，进而将理论结果映射到具体的区域产业规划过程之中。

时至今日，对于复杂网络的研究已经覆盖了大多数实际网络领域，其中有些研究与产业经济息息相关，并初步形成了一个较为成熟的研究框架，体现了复杂网络的研究范式和研究方法，为揭示产业组织的特点和演变规律提供了新的工具。本书将到目前为止产业网络的重要研究成果分为三类，分别是产业结构网络、产业竞争网络和产业合作网络。这三类网络的节点代表的是产业或者企业，