

区域交通系统的演化及管理： 模型与仿真

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi:
MoXing Yu FangZhen

刘新民 孙秋霞 著

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

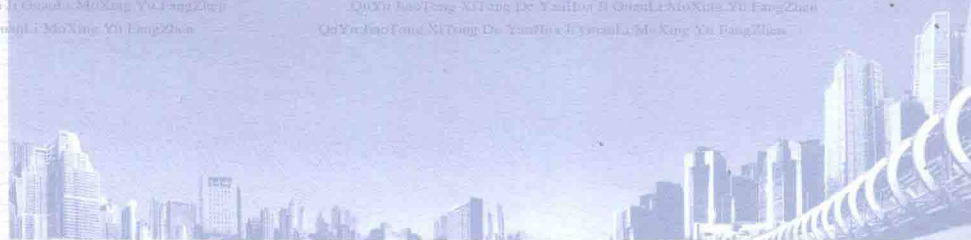
QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi MoXing Yu FangZhen



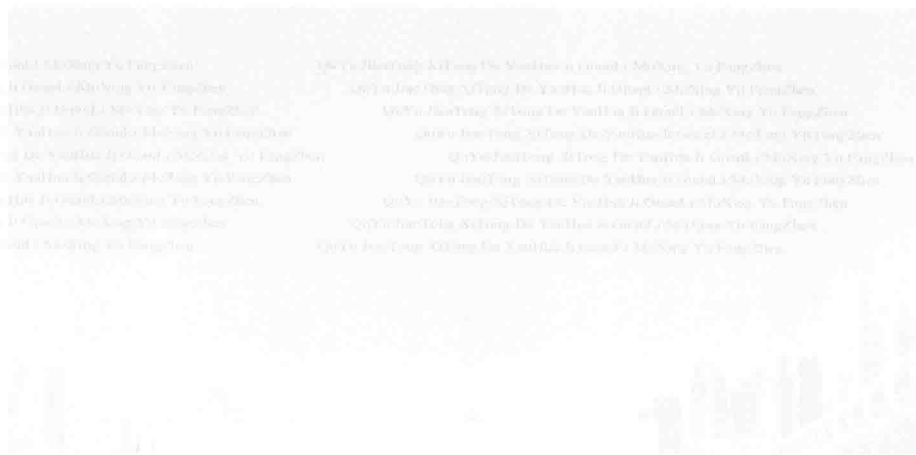
经济科学出版社
Economic Science Press

山东省科技发展计划项目(2013GSF12208)资助出版
山东科技大学学术著作出版基金资助出版

区域交通系统的演化及管理 模型与仿真

QuYu JiaoTong XiTong De YanHua Ji GuanLi:
MoXing Yu FangZhen

刘新民 孙秋霞 著



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

区域交通系统的演化及管理: 模型与仿真 / 刘新民,
孙秋霞著. —北京: 经济科学出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 5141 - 6588 - 3

I. ①区… II. ①刘…②孙… III. ①交通系统 - 系统
仿真 - 研究 IV. ①U491.2 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025673 号

责任编辑: 段 钢

责任校对: 刘欣欣

责任印制: 邱 天

区域交通系统的演化及管理: 模型与仿真

刘新民 孙秋霞 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编辑部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http://jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京财经印刷厂印刷

三河市华玉装订厂装订

710 × 1000 16 开 16.25 印张 290000 字

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 6588 - 3 定价: 48.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn)

前言

区域是一定界线范围内具有一定的优势、特色和功能的地域空间。在区域内部,表现出明显的相似性和连续性的特征,而在区域之间则呈现出明显的差异性,但又是相互联系的。一个区域的影响力界限和范围,在很大程度上取决于区域交通运输的发展程度和水平。区域交通已成为区域内部和区域之间实现信息沟通、人员物资流动的重要纽带,是实现区域专业化协作的途径。深入分析交通运输系统与区域经济相互作用的机理、影响因素,并进一步从理论上分析研究其演化机理与模型,可以促进实现区域资源的整体开发和配置,优化和完善产业结构,进而推动经济有效发展。

本书在对区域交通系统基本特性、交通网络及其演化模型、交通管理等相关理论梳理的基础上,从区域经济与交通关系的统计分析入手,对区域交通可达性与经济联系的空间格局、区域交通与经济协调性的协调性等进行了实证研究;进而分别针对区域内部城市交通系统与区域之间城际交通系统进行演化模型的构建及仿真;然后,考虑交通系统内出行者属性、出行行为、出行方式、出行成本、资源环境等影响因素,对交通系统的宏观特征、拥挤定价等问题进行探讨,并通过算例或实证分析对所构建的评价体系或模型进行了可行性验证;最后,通过设计开发具有模拟和预测功能的高速公路路网网络演化软件,验证了所构建演化模型的有效性。全书共分7章,具体内容如下:

第1章,区域交通网络管理的基础理论。主要是对区域交通系统的基本属性、网络概念、交通网络管理等方面的理论体系进行了梳理,为后续研究奠定基础。

第2章,区域交通系统与经济发展的关系分析。本章首先利用时间序列数据对区域交通运输与经济发展的关系进行统计分析。然后,利用建模和实证相结合的方法,分析了在经济推动下区域交通运输的发展状况,以及多种交通运输方式和不同交通运输结构下区域经济发展方式和空间布局的变化。最后,从系统有序

和无序的视角，建立耦合协调度模型，用系统的观点对区域交通运输与经济协调性进行综合评价研究，并运用预测模型对其发展趋势进行相应分析。

第3章，城市交通系统演化模型的构建及仿真。本章将城市交通系统整体作为研究对象，首先对城市交通网络系统的拥堵评价体系进行构建，然后通过研究城市交通系统的特性及其演化过程，分析其演化机理机制，进而探索区域交通未来发展方向。同时考虑经济、资源环境以及政府调控等因素对交通系统演化的影响，进而探讨交通系统演化机理。最后，在现有研究的基础上，对突发事件下的道路交通应急预案等级评定和应急交通救援疏散模型进行研究。

第4章，城际高速交通系统演化模型的构建及仿真。本章基于高速路网在城际交通路网中的地位与作用，选取其作为城际交通系统路网研究的研究对象，探索路网构建和演化的内在原理和影响机制。基于经典的BBV演化模型，对城际高速公路网络的演化模型进行改进，研究高速公路的加权复杂网络的静态拓扑结构演化。考虑区域内城际间社会经济、资源环境、空间地理以及政府调控等因素对交通系统的影响，研究了多因素驱动下的城际高速公网络的演化模型，并对其进行了仿真分析。

第5章，交通系统中个体出行者博弈模型的构建及仿真。本章从城市交通系统内出行者微观属性、出行行为以及路网结构等角度出发，分别研究了它们对交通系统运行特性、运行管理策略的影响。首先，基于对出行者类型划分及其比例的设计，研究了出行者路径选择行为对交通网络效率的影响。然后，在经典瓶颈模型的基础上，综合考虑出行舒适度、交通公平性、便捷性、出行时间等因素，提出了基于出行者属性差异系数的拥挤收费评价模型。最后，将出行方式、舒适度、收费费率等因素纳入出行成本函数，分别在静态与动态两种收费政策下，进行拥挤收费定价模型的博弈分析。

第6章，交通网络优化与管理的模型与仿真。本章首先考虑了资金、尾气排放和路段阻抗的等诸多因素，建立基于多种车型和多种排放气体的机动车尾气排放模型。并通过双层规划模型及其改进的混合粒子群算法，得到最优交通网络设计方案。然后，在时间维度的基础之上，引入出行者出行方式分布，利用双层规划的方法分别建立固定需求下多时段多出行方式拥挤定价模型，并进行算例模拟和分析。最后，在时间、空间、方式选择三个维度的基础上，结合随机用户这一维度，把传统次优拥挤定价模型推广为多时段、多出行方式、多用户的次优拥挤定价模型。

第7章,高速公路路网网络演化软件的设计与开发。为演示第四部分构建区域交通网络演化模型的有效性,设计开发了基于山东省高速公路网网络的演化软件。

全书的集结成稿是山东科技大学校级创新团队——组织治理与系统决策团队集体努力的结果。本研究成果依托于本书作者与团队成员承担的国家自然科学基金资助项目(71371111),山东省科技发展计划项目(2013GGB01101):区域交通网络优化技术与仿真研究,既是前一阶段的研究成果总结,也是进一步研究的开端。全书由山东科技大学组织治理与竞争研究所所长刘新民教授制定研究框架和纲要,主持全书的研究工作,撰写了第1、第2、第4、第5章,并参与了其他各个章节的指导与修订。孙秋霞副教授参与研究并撰写了第3、第6、第7章。在研究过程中,丁黎黎副教授、吴士健副教授、王松副教授、闫春副教授等老师参与了整个著作研究与撰写的讨论,提出了很多宝贵意见;团队中的硕士研究生高一丹、李之鹏、李晓洁、孙峥、李鲁彦、范可心、陈祥辉等做了大量细致入微的工作;另外硕士研究生孙璐、崔宁、赵红梅、鲁晓燕、赵梁、郑润佳等在资料收集、文字录入、格式编排等过程中做了大量工作,在此一并致谢。在本书的写作过程中,作者参考、引用了高自友等学者的大量文献资料,恕不赘述,谨表示衷心的感谢!引用文献虽大多一一注明,但恐仍有疏漏,敬请谅解,因水平有限,若有不当,恭请批评指正。

作 者

2015年10月

目 录

第 1 章 区域交通网络管理的基础理论	1
1.1 区域交通系统	1
1.1.1 交通与运输	1
1.1.2 区域交通系统的基本特性	2
1.2 区域交通系统的网络特性	3
1.2.1 复杂网络及其度量	3
1.2.2 交通网络的复杂网络特性	9
1.3 交通网络的管理	10
1.3.1 交通需求管理	10
1.3.2 拥挤收费原理	11
1.3.3 拥挤收费的类型	13
1.3.4 拥挤收费的定价理论	15
第 2 章 区域交通系统与经济发展的关系分析	19
2.1 区域经济系统与交通	19
2.1.1 区域经济系统的特性	19
2.1.2 交通与经济的极一点一轴理论	20
2.1.3 区域交通运输与经济发展的互动	22
2.2 区域交通运输与经济发展的时间序列分析	23
2.2.1 变量的选取与说明	23
2.2.2 经济与交通关系的相关性分析与检验	24
2.3 区域交通可达性与经济联系的空间格局分析	31
2.3.1 区域交通可达性及其测度	31
2.3.2 区域经济联系的测度	34

2.3.3	交通可达性与经济联系的实证分析	35
2.4	区域交通与经济的协调性评价及其预测分析	43
2.4.1	评价指标体系及数据的预处理	44
2.4.2	系统耦合协调发展评价模型	45
2.4.3	基于混沌理论的系统耦合协调度的预测	47
2.4.4	交通运输与经济发展协调性的实证	48
第3章	城市交通系统演化模型的构建及仿真	52
3.1	城市交通网络拥堵评价研究	52
3.1.1	城市交通网络的拥堵特性分析	53
3.1.2	拥堵评价调查问卷的设计与测试	55
3.1.3	城市交通网络拥堵评价体系的构建	61
3.1.4	算例分析	69
3.2	城市交通系统整体演化模型研究	72
3.2.1	城市交通系统演化机理分析	72
3.2.2	城市交通系统整体演化模型构建及改进	73
3.2.3	基于 Logistic 模型的城市交通系统演化仿真	76
3.2.4	城市交通系统演化预测的仿真分析	81
3.3	一体化视角下的区域交通网络演化模型构建及仿真	82
3.3.1	区域经济一体化视角下的交通网络模型	82
3.3.2	区域交通演化机理分析及模型构建	83
3.3.3	数值实验与仿真分析	87
3.4	突发事件下的城市道路交通应急救援疏散研究	90
3.4.1	突发事件管理理论	91
3.4.2	道路交通应急预案评级指标体系的建立	93
3.4.3	道路交通应急预案等级模糊匹配模型	102
第4章	城际高速交通系统演化模型的构建及仿真	109
4.1	城际交通系统的路网选择	109
4.1.1	高速路网的特点与优势	109
4.1.2	高速公路在城际交通系统中的地位与作用	110

4.2	高速公路静态拓扑网络的演化与仿真	111
4.2.1	BBV 演化模型	111
4.2.2	高速公路的复杂加权演化改进模型	112
4.2.3	改进模型的特性分析	118
4.2.4	网络演化的数值分析和仿真	121
4.3	多因素驱动下的高速公路网络演化模型	133
4.3.1	高速公路网络演化多因素分析	133
4.3.2	多因素驱动下区域间高速公路网络演化模型构建	135
4.3.3	数值仿真和分析	137
第5章	交通系统中个体出行者博弈模型的构建及仿真	142
5.1	城市交通与个体出行	142
5.2	基于出行者路径选择行为的交通网络效率研究	143
5.2.1	城市交通网络设计及其效率的度量	144
5.2.2	出行者类型及其比例设计	145
5.2.3	仿真实验与分析	147
5.3	基于出行者属性差异的拥挤收费策略研究	151
5.3.1	基于出行者属性差异的出行成本分析	151
5.3.2	拥挤收费政策下的模型分析	153
5.3.3	算例分析	155
5.4	基于成本函数的定价博弈模型及算例分析	158
5.4.1	多出行方式下拥挤收费政策的博弈分析	158
5.4.2	动态收费下的均衡及定价模型	169
5.4.3	引入舒适度的拥挤定价博弈分析	173
第6章	交通网络优化与管理的模型与仿真	181
6.1	政府政策规制下的交通网络优化模型及其设计	182
6.1.1	交通网络优化方法选择	182
6.1.2	考虑排放量的交通网络模型	186
6.1.3	基于交通网络排放量的双层规划模型及其求解	192
6.1.4	算例分析	195

6.2	基于出行者需求管理的次优拥挤定价模型	198
6.2.1	次优拥挤定价基本模型	198
6.2.2	固定需求下交通管理优化的次优拥挤定价模型	199
6.2.3	多时段多出行方式拥挤定价模型	202
6.2.4	算例分析	203
6.3	弹性需求下交通管理优化的次优拥挤定价模型	205
6.3.1	影响交通的因素分析	205
6.3.2	交通需求函数	209
6.3.3	多用户、多时段、多出行方式次优拥挤定价模型	211
6.3.4	算例分析	214
第7章	高速公路网网络演化软件的设计与开发	217
7.1	软件简介	217
7.1.1	软件名称	217
7.1.2	主要功能简介	217
7.1.3	技术特点	218
7.2	系统设计结构与总体规划	218
7.2.1	系统设计结构	218
7.2.2	系统总体规划	218
7.3	软件开发环境和系统配置	220
7.3.1	软件开发环境	220
7.3.2	系统配置参数	220
7.4	软件使用说明	220
7.4.1	初始界面	220
7.4.2	预测界面	223
附录	城市交通拥堵成因调查问卷	231
参考文献		235

第 1 章

区域交通网络管理的基础理论

1.1 区域交通系统

1.1.1 交通与运输

交通古义为交错相通，往来通达，如广袤田野上相互交错的阡陌小路。在现代社会中，交通被定义为运输和邮电事业的总称，其中，运输通常指人和物品等借助火车、汽车、飞机等交通工具的载运从起始位置至终点的有目的的空间位移活动，具体表现出时间和空间效应的特性。随着时代的演进，交通运输已成为现代经济社会发展的基本需求和重要先决条件，是经济的基础性设施和纽带，在实现经济活动的宏观调控与资源有效配置中起到关键性作用，是城市和经济布局、社会分工和规模经济等形成的重要因素，在国际贸易合作、人员交流往来等过程中也发挥着重要的作用。

各种运输方式在技术性能和经济特性上各有优缺点。现代化的交通运输方式主要包含五种：铁路、公路、航空、水路和管道运输。铁路运输运行速度较快，运行安全，运输经济可靠，能耗小，成本较低，且运输能力强，运输过程受自然环境和条件的影响限制较小，具有连续性强的特性，但铁路建设周期相对较长、投入大；公路运输具有灵活性强、可迅速实现中短途运输需求且投资较小的优点，但相比于铁路和水路运输等方式，其运输能力较小，运输成本高；航空运输具有运行速度快的显著优势，但飞机造价高，技术复杂，存在远距离有效而近距离难以有效覆盖等缺点。

交通运输对我国的发展具有重要的社会、政治和经济意义。改革开放以来，

我国各种运输方式均得到了较快的发展,其中,我国公路发展迅速,高速公路里程达3万多公里,跃居世界第二位。同时,随着市场化程度的不断提高,不同运输方式间的市场竞争也逐渐显现,不同区域间、不同运输方式的发展很不均衡,如铁路和水运发展相对缓慢,衔接不同运输方式的综合运输枢纽建设滞后,存在盲目竞争等现象。近几年来,随着我国经济的中高速增长,交通运输事业也进一步发展,公路运输积极保持良好的发展势头,同时,随着高速铁路的技术突破,铁路的运输份额有所增加,竞争能力得到不断提升。当前,在全面建设小康社会的新形势下,按照绿色经济、循环经济、生态经济和知识经济的发展新方向,要想满足经济社会可持续发展的战略要求,持续保证各区域和各个经济部门的正常运营,就必须进一步调整交通运输发展模式,逐渐形成多种运输方式相互协调、分工合作的综合运输体系,提高发展水平。尤其是近期要摆脱以往对公路交通的过度依赖,优先发展铁路交通,并促进两者向逐步协调的方向发展。

1.1.2 区域交通系统的基本特性

区域的最早定义是指采用某种手段或者方式实现内部的连通。例如,在政治学上,区域被看成是国家管理的行政单元,主要是按行政权力覆盖面来划分;社会学把区域看成是人类社会区域,此区域具有相同的语言,相同的信仰以及相似的民族特征;全俄经济区划分委员会最早从经济学角度界定区域为:所谓区域应该是国家的一个特殊的地区,此地区的经济尽可能完整,因为自然特色、历史的文化积累和居民及其生产能力的结合,所以称为国民经济总链中的一个环节。而目前影响较大的一种定义则是由美国区域经济学家胡佛(E. M. Hoover)于1970年提出的:区域作为一个应用性整体,它是基于描述分析、管理、制定政策或者计划等目的加以考虑的整体,它的划分标准是按照内部相同的功能或性质一体化原理来进行的。一般来说,区域指的是具有一定的优势、特色和功能,以及一定界线范围的地域空间。在区域内部,其特征表现出明显的相似性和连续性,而在区域之间则有明显的差异性,但又是相互联系的。地球表面上的任何一部分,小至一个小乡村,大至一个国家乃至几个国家均可称为区域。例如,在我国可以经济和地理特征为依据进行区域的划分,按照由西高东低的地貌特征,形成了东中西三大阶梯区划。其中,东西差异明显,东部地区较西部地区发达。

在区域发展过程中,其影响力的界限和范围在很大程度上取决于区域交通运

输的发展程度和水平。所谓经济区域,“是人们的经济活动形成的,具有丰富资源和便利交通条件的核心区的某一城市中心场地,通过道路交通不断向周围扩张贸易范围,在以它为中心及其他向外辐射的周围各级市场所组成的市场网络的长期结合下形成的。”因此,经济区域与行政区域既有交叉重合关系,也有跨区域的重构关系,区域交通已成为区域内部和区域间实现信息沟通、人员流动等的重要纽带,是实现区域专业化协作的途径。而交通运输对区域经济的发展的促进作用主要表现在两方面:一是有助于发挥地域区位优势,推动生产力布局向合理化方向发展;二是可以进一步发挥区域主导产业优势,带动周边地区和相关产业的交流与发展,使区域整体的资源开发和配置、产业结构等更加完善,进而使经济发展水平得到提高。

区域交通系统主要有开放性、通达性、深入性和复杂性四个特性。开放性主要表现在以区域交通运输系统为运输载体,实现区域内的人和物、资金和信息流的交换。通达性是由于交通系统中各个组成部分间是相互连接、畅通的,那么以系统中的任何一个点为起点,经过由一种或多种不同的运输方式组合所搭建的运送通道,都可以到达其他点。同样,这种连通性也存在于不同区域间交通运输网络中以及国际间的经济交流,表现出深入的特点。交通运输系统的开放性也是其另一个特性——复杂性产生的重要原因。一个大的区域及其周围会有很多小区域或子区域的存在,它们之间以及它们与母系统间都产生很密切的联系和影响。例如,一个区域的交通运输系统与其相邻的区域的经济系统、经济系统的各个子系统联系密切。同时,由各具优缺点的铁路、公路、航空等多种交通运输方式整合而成的区域交通网络系统,其复杂性也是必然存在的。

1.2 区域交通系统的网络特性

1.2.1 复杂网络及其度量

1. 复杂网络

复杂网络(Complex Network)是由大量节点和复杂连接拓扑结构构成的网络模型。关于复杂网络的概念尚没有统一的定义,但复杂网络是现实的复杂系统拓扑网络的抽象现象,因此,复杂网络演化要比规则网络和随机网络更复杂。

2010 年, 钱学森对其进行定义: 具有小世界、自组织、无标度、吸引子、自相似中部分或全部性质的网络统称为复杂网络。更为详细的定义为: 复杂网络是由一系列的节点和连接节点的边构成的网络, 此网络具有一定的数学特性 (如无标度特性、小世界特性和自相似特性等), 并按照一定的规律生长, 网络节点和边本身具有实际的意义, 可由相应的统计指标来反映。其中无权网络 (Out-weighted Network) 是每条边性质都相同或者权重相同; 加权网络 (Weighted Network) 是指网络中每条边有其对应的权值。每个网络中都包含许多节点, 这些节点类型可能相同, 也可能不同。例如, 在高速公路网络中, 节点城市自身的属性以及每条高速公路属性都不一样。

现实世界中复杂网络具有以下基本特征:

(1) 网络行为具有统计特征: 巨大的网络节点有十分庞大的数目, 其行为都应该具有统计性。

(2) 网络连接具有稀缺性: 全局耦合结构网络节点数为 N , 节点连接数为 $O(N^2)$, 但在实际网络中连接数仅为 $O(N)$ 。

(3) 连接结构具有复杂性: 大多数现实网络既不是完全随机网络, 也不属于完全规则网络。

2. 基本网络模型

网络模型是复杂网络的研究基础。如何研究现实网络拓扑特性, 构建复杂网络模型是最先要考虑的内容。复杂网络首先从研究基本规则的网络结构开始, 然后发展到随机网络, 再到小世界网络、无标度网络结构。

(1) 规则网络。

规则网络中主要的研究集中于全局耦合网络、最近邻耦合网络和星型网络等网络类型 (见图 1.1), 其共同特点为: 每一个节点只和它近处的邻居节点相连。其中, 最近邻耦合网络中的每个节点都与它周围 k 个节点相连, 且对于较大的 k 值, 此类型网络的平均路径长度约为 $L \approx \frac{N}{2k}$, 聚类系数为: $C = \frac{3(k-2)}{4(k-1)}$ 。星型网络中则有且仅有一个中心点, 其余 $N-1$ 个节点都仅与此中心点相连, 它们彼此之间均不相连, 这种类型网络的平均路径长度为 $L = 2 - \frac{2(N-1)}{N(N-1)}$, 聚类系数为 $C = 0$ 。全局耦合网络 (即全连通网络) 中的任意两节点之间均有边直接相连, 在节点数均为 N 的网络中, 此类网络具有最小的平均路径长度 $L = 1$ 和最大的聚类系数 $C = 1$ 。

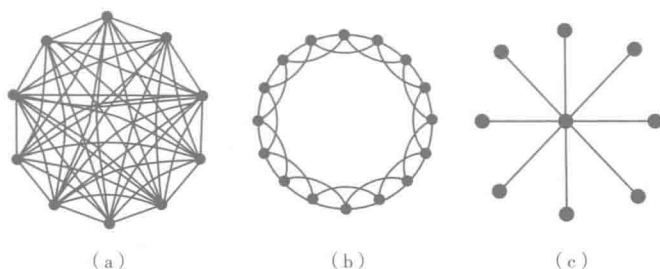


图 1.1 三种常见的规则网络：(a) 全局耦合网络；(b) 最近邻耦合网络；(c) 星型

(2) 随机网络。

在 Erdos - Renyi 提出的随机网络模型 (ER 网络) 中, 在一个平面上定义有大量节点 ($N > 1$), 以一定的概率 p 连接每对节点的网络。其特性是网络存在 $pN(N-1)/2$ 条边, 度的算术平均值为 $\langle k \rangle = p(N-1) \approx pN$ 。对应的平均路径长度为 $L \sim \ln N / \ln \langle k \rangle$ 。因此节点数 N 的增加对 $\ln N$ 的影响很小, 这使得具有大规模节点数目的随机网络模型的平均路径长度较小。

然而由于随机网络模型的局限性, 它不能表示现实网络模型。此后小世界网络和无标度网络模型的提出, 加速了复杂网络在现实网络中的应用浪潮。

(3) 小世界网络。

1998 年, Watts 和 Strogatz 提出了小世界网络模型 (WS 模型), 其特点是集聚系数较大且平均路径长度较小。

小世界网络是由规则网络和随机化网络构建的, 即在最近邻耦合网络的基础上以一定的概率 p 对其边进行随机重连。当 $p = 0$ 时, 网络为规则网络; 当 $p = 1$ 时, 网络为随机网络; 当 $p \in (0, 1)$ 时, 网络为小世界网络。

(4) 无标度网络。

无标度网络 (亦称为 BA 无标度网络) 是节点度分布为幂律分布的复杂网络, 如科学引文网络、新陈代谢网络、Internet 以及交通网络等都属于无标度网络。BA 网络考虑了实际网络的增长特性和优先连接特性, 对幂律分布的产生机理也能够充分验证。BA 无标度网络模型的算法如下所述:

- ① 起始: 给定一个网络, 使此网络有 m_0 个节点。
- ② 增长: 将一个带有 m 条边的新节点在每个时间步加入网络中, 并将新节点与按照步骤③中的概率选择 m 个节点相连, 其中 $m < m_0$ 。

③ 择优连接：选择旧节点 i 与新节点相连，择优概率为： $\prod_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ ，其中 k_i 是旧节点 i 的度。

经过 t 个时间步后，生成的 $t + m_0$ 个节点和 mt 条边的网络就是无标度网络。BA 无标度网络的聚类系数为 $C = \frac{m^2}{4} \frac{(m+2)^2}{(m-1)} \left[\ln\left(\frac{m+1}{m}\right) - \frac{1}{m+1} \right] \frac{[\ln(t)^2]}{t}$ ，平均路径长度为 $L \propto \frac{\log N}{\log \log N}$ 。可见，BA 无标度网络的平均度 $\langle k \rangle$ 不随 N 变化，而且平均路径长度 L 与 $\log N$ 成正比，说明此无标度网络还具有小世界特性。

将常见网络模型的参数及模型分类进行汇总，分别见表 1.1 和图 1.2。

表 1.1

基本网络模型的参数

网络参数 网络类型	聚类系数	度分布	平均距离
规则网络	大	δ 函数	大
随机网络	小	泊松分布	小
WS 小世界网络	大	指数分布	小
BA 无标度网络	小	幂律分布	小
许多真实网络	大	近似幂律分布	小

3. 复杂网络的统计特征

复杂网络特征是指各指标的统计分布，如度和度分布、最短路径长度、网络直径、聚类系数、平均最短路径长度等静态指标。

(1) 度和度分布

度是衡量网络特性的基本参数之一，度分布是对节点连接情况的统计。其中，节点度 i 定义为与此节点连接的节点数目，即：

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (1.1)$$

其中， a_{ij} 为相邻矩阵 $A = (a_{ij}) \in R^{N \times N}$ 的元素，如果节点之间有连线，则 $a_{ij} = 1$ ，反之 $a_{ij} = 0$ 。无向网络中有 N 个节点、 L 条边，则平均度定义为各节点度的

平均值，即 $\langle k \rangle = \frac{\sum_i k_i}{N} = \frac{2L}{N}$ 。

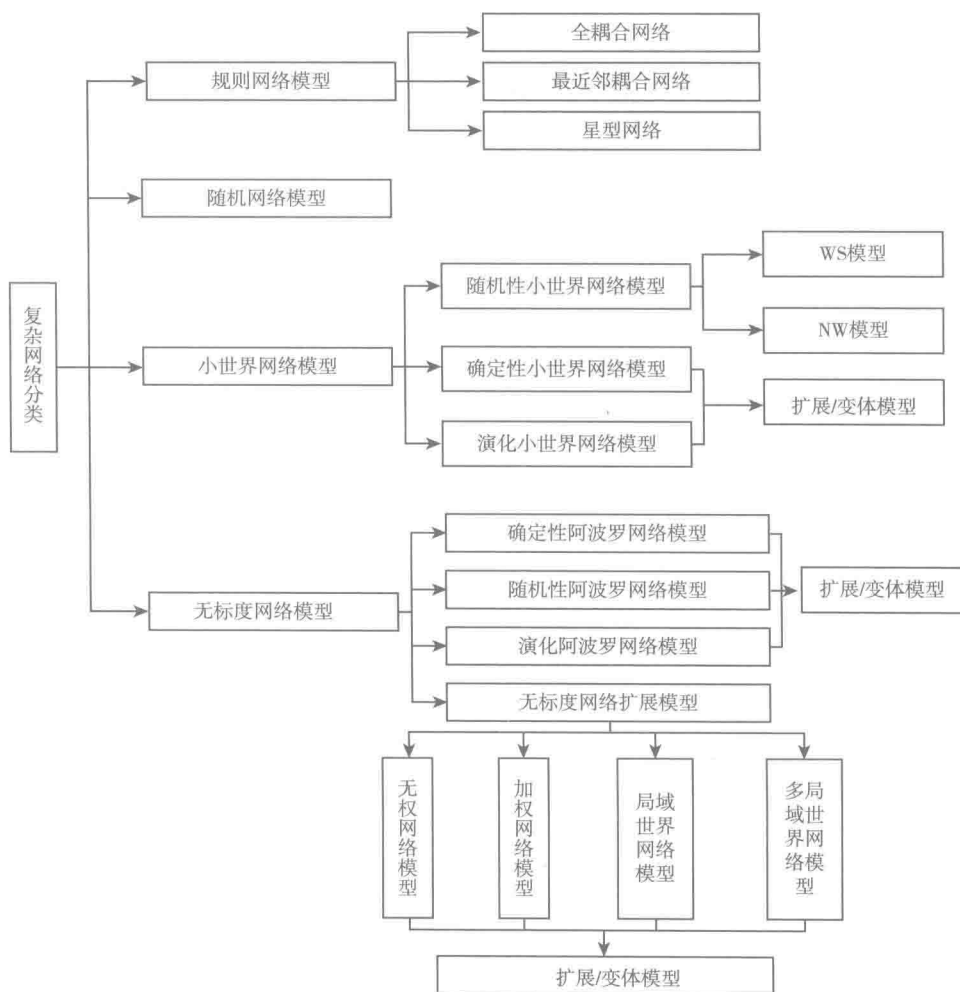


图 1.2 复杂网络的分类

由此可见，度表示节点的重要程度，度越大重要程度就相对越大，反之亦然。而度分布则可以验证网络是否是无标度网络，即节点的度分布函数为：

$$p(k > k') = \sum_{k'=k}^{\infty} p(k') \quad (1.2)$$

其中，度分布 $P(k)$ 是随机均匀的选择网络中的某个节点，节点度数恰好为 k 的概率。经过大量的试验研究结果证明，大多数现实网络节点的度分布服从幂律分布 (Power-law Distribution)，即分布函数为 $P(k) \sim k^{-\tau}$ 的形式。