

复杂交通网络 ——结构、过程与机理

莫辉辉 王姣娥 著

COMPLEX TRANSPORT NETWORK:
STRUCTURE, PROCESS & MECHANISM



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

国家自然科学基金青年基金 (41001082)

中科院地理资源所秉维优秀青年人才基金 (2011RC201)

复杂交通网络

——结构、过程与机理

莫辉辉 王姣娥 著

COMPLEX TRANSPORT NETWORK:
STRUCTURE, PROCESS & MECHANISM



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂交通网络——结构、过程与机理/莫辉辉, 王姣娥著. —北京: 经济管理出版社, 2012.6

ISBN 978-7-5096-1982-7

I. ①复… II. ①莫… ②王… III. ①交通网—研究—中国 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 124536 号

组稿编辑: 徐 雪

责任编辑: 魏晨红

责任印制: 杨国强

责任校对: 陈 颖

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 北京银祥印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 16.5

字 数: 301 千字

版 次: 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-1982-7

定 价: 48.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

前言

古往今来，交通事关国计民生，成为人类生存与发展的基础设施之一。“交通为空间发展之首要条件，盖无论政令推行，政情沟通，军事进退，经济开发，物资流通，与夫文化宗教之传播，民族感情之融合，国际关系之亲睦，皆受交通畅阻之影响，故交通发展为一切政治经济文化发展之基础，交通建设亦居诸般建设之首位。”（严耕望，1985）^① 伴生于人类活动而形成的交通网络是人类社会创造的三大网络（交通、能源和信息）之一，为现代人类文明的发展奠定了重要基础。如 15~17 世纪基于航海的“地理大发现”开启了人类认识地球的重要征途，19 世纪初诞生的铁路促进了工业革命由沿海向内陆迅速扩张，20 世纪中叶汽车的普及促使人类对城市与区域空间结构展开巨大革新。进入 21 世纪以来，不同空间层面的交通联系与作用持续增长；交通网络成为链接地方与全球的重要纽带，并将继续塑造人类生存与发展所处的经济与社会空间。

—

自 1978 年实施改革开放战略以来，中国交通发展步入了新时期，各种现代交通方式都得到了全面的发展，交通网络扩展取得了巨大的成就。截至 2010 年底，铁路营业里程达到 9.1 万公里，公路里程 400.8 万公里，内河航道里程 12.4 万公里，民航航线里程 276.5

^① 严耕望. 唐代交通图考（序言）. 台北：中央研究院历史语言研究所，1985.

万公里，油气管道里程 7.85 万公里。其中，高速公路和民航航线里程增长十分迅速；高速公路仅用 20 年时间就实现了从无到有的飞跃，2010 年达到 7.4 万公里；民航航线里程 1978 年为 14.9 万公里，年均增长率达到 9.6%。尽管交通网络增长较快，但网络发展整体仍滞后于经济社会发展的需要，交通供需矛盾仍较严重，成为制约中国国民经济社会平稳发展的“瓶颈”。为应对交通发展滞后的局面，铁道部于 2004 年率先颁布了首个国家中长期发展规划——《中长期铁路网规划》，其后交通部颁布了《国家高速公路网规划》（2004）和《全国沿海港口布局规划》（2006），民航总局也制定了《全国民用机场布局规划》（2008），国家发展和改革委员会出台了《综合交通网发展中长期规划》（2007），为引领中国交通基础设施的快速发展奠定了基础。尽管如此，2008 年受国际金融危机的影响，国家出台了扩大内需的政策，交通基础设施建设成为拉动经济社会发展的重要引擎。为此，《中长期铁路网规划》（2008 年调整）将全国铁路营业里程规划目标由原定的 10 万公里调整至 12 万公里以上。与此同时，区域与城市各交通部门也迅速加大了对基础设施的投资，交通网络步入中国有史以来最为全面和快速的发展时期。

伴随中国经济社会的快速发展，交通需求旺盛，供给不足、空间不匹配等问题显现。尽管铁路、公路等网络建设加快，但网络失连情况比比皆是，致使交通的网络效应受限，并影响运输效率的发挥。与此同时，港口、机场、高速公路等大规模建设导致无序发展的问题凸显，而港站与城市布局不协调等成为资源浪费及影响空间组织效率的突出问题，大型港站、枢纽、干线等的交通拥挤问题也成为交通难题。此外，自然灾害等不良因素对交通网络的影响时有发生。如 2008 年春节前后，中国南部地区普降大雪，致使铁路、公路、民航等运输瘫痪，人们生活一度陷入“混乱”；其后 5 月份的汶川大地震再次对交通网络的可靠性敲响了警钟。交通网络发展的深层次问题日益备受关注。

二

2000年,当代最有影响力的物理学家之一史蒂芬·霍金(Stephen Hawking)曾预言:“我认为,下个世纪将是复杂性(Complexity)的世纪。”^①而美国桑塔费研究所(Santa Fe Institute, SFI)^②的创始人乔治·考温(George Cowan)把这个问题提升为“21世纪的科学”。其后,以“投资美国未来”(Investing in America's future)著称的美国国家科学基金战略规划(National science foundation strategic plan FY 2006~2011)提出:“……在数十年的基础性研究之上,我们正在多学科、多尺度上建立复杂系统的模型……”,并在未来战略计划中将“理解复杂系统”(Understand complex systems)列为优先支持的长期项目。与此同时,中国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006~2020)在面向国家重大战略需求的基础研究中给出了一个重要的科学命题:“重点研究工程、自然和社会经济复杂系统中微观机理与宏观现象之间的关系,复杂系统中结构形成的机理和演变规律、结构与系统行为的关系,复杂系统运动规律,系统突变及其调控等,研究复杂系统不同尺度行为间的相关性,发展复杂系统的理论与方法等……。”可见,国内外科学界将复杂系统及复杂性的研究列为未来科学研究的重要方向之一。

复杂性科学(Science of complexity)是一门新兴的综合学科,是现代系统科学与非线性科学进一步发展、融合的产物,是系统科学的新一轮萌芽(周成虎等,2001)。究其内涵,复杂性科学实质就是研究复杂系统的科学。交通系统是一个典型的地理系统,地理系统具有开放的基本特征;即对于某一特定地理系统而言,它总是不断地与其外部进行能量、物质及信息的交换,以维持其发展的新秩序,

^① Complexity digest 2001—the 3rd Annual Edition. <http://www.comdig.com>.

^② 关于 SFI 的发展简史,参看:王丹红. 打破学科界线 推进知识大融合——记复杂性科学和美国桑塔费研究所. <http://www.ic.cas.cn/html/Dir/2005/09/07/13/33/53.htm>.

否则系统将趋向于形成完全无序的混乱状态(牛文元, 1992)。对复杂系统理论的研究, 一方面, 从哲学的高度改变地理研究的思想观念, 如还原论; 另一方面, 复杂系统的技术方法更为地理学的研究提供了有力的探索工具, 神经网络(Neural Network)、元胞自动机(Cellular Automata)、耗散结构(Dissipative Structure)等理论和方法已被广泛应用于地理系统的研究中, 而新近兴起的复杂网络(Complex Network)理论进一步扩大了复杂性科学的研究力量(Amaral 和 Ottino, 2004), 并成为复杂系统建模(Modeling Complex System^①)的重要工具之一。

自 20 世纪末以来, 物理学家、生物学家、数学家等在 Science、Nature、PNAS、Physics 等系列期刊上发表大量探讨“小世界”网络(Small-world Network, SW 网络)和“无标度”网络(Scale-free Network, SF 网络)^②的文章, 促进了复杂网络理论研究的兴起, 十余年来基于复杂网络理论的研究大量“涌现”(Emerge), 遍及社会、信息、技术、生物等各个领域(Newman, 2003)。尽管研究众多, 从最初的拓扑网络(Topology Network)向权重网络(Weighted Network)或几何网络(Geometry Network)演进, 并将其基于图论的图示描述作为基本手段, 但统计物理学方法被认为是复杂网络理论的建构基础(吴金闪、狄增如, 2004), 大多数研究仍停留在拓扑结构方面(Boccaletti 等, 2006)。国内外研究间或有讨论“空间”因素, 但缺乏以“空间”为主题(如地理学)的相关学科的融合, 既有学术研究不能给予“空间”以理论和实践上的重视, 致使部分缺乏空间认知的研究及描述亟须完善。交通网络属于典型的地理空间网络(Barthélemy, 2011), 其不同的子系统具有不同的地理空间特性, 为复杂网络的空间分析提供了重要的诠释实例, 进而为复杂网络拓展其空间分析领域及解释网络复杂性的内涵提供重要的实证支撑。

交通不仅是人类改造世界和拓宽空间可达性(Accessibility)的基础, 也是人类认识自然规律的重要物质基础条件之一, 因其与人

① Boccaro N. Modeling Complex Systems [M]. Springer-Verlag New York, Inc., 2004.

② 部分学者认为“小世界”网络实际指网络的“小世界”效应, 而“无标度”网络为网络结构的“无标度”属性, 学界尚未给出明确界定, 因此本书并不加以严格区分。

们的生活息息相关，一直是地理、经济、系统科学等学科及交叉学科研究的热点。Hanson (2000) 认为，交通是现代经济、社会、政治以及文化生活的核心。尽管如此，Waters (2006) 指出：自 20 世纪 60 年代以来，及至 20 世纪末，包含地理学在内的相关学科的网络研究是匮乏的，尤其是理论发展滞后。进而 Waters 分析了作为人类社会空间活动的主导科学——地理学与物理学、数学、社会学、计算科学、区域科学等学科之间在网络理论方面的可借鉴性。交通网络的复杂性研究着力从本质上认识交通问题的关联机理，洞悉交通网络的结构特征及演化规律，对切实提高整个交通网络的承载能力、充分利用既有交通资源、提高网络可靠性等大有裨益。同时，在中国面临交通大规模发展的时期，对减少交通建设、管理和控制的盲目性，科学制定交通发展规划，发展先进的交通管理与调控技术等，都有重要的理论价值和实践意义。目前，开展交通网络的复杂性研究已经成为国内外交通规划学、地理学、运筹学等多学科及交叉学科最前沿的课题之一。根据三大国际交通会议（WCTRS、ITSWC 和 TRB）^① 的统计分析，东亚运输研究协会的前沿性研究分会指出，交通网络复杂性的探讨将是一个重要的研究领域（EASTS, 2006）。

三

本书试图从交通地理学的视角探讨交通网络的复杂性。交通地理学是研究交通地域组织及其发展规律的地理科学，其核心是研究交通网络（包括交通线网络、枢纽和站港）的空间分布、结构组合与地域类型及其演变规律；作为上述形成依据的运输联系（表现为客流、货流）的产生和变化规律及其经济地理基础；交通在地域生

^① WCTRS-World Conference on Transport Research Society, TRB-Transportation Research Board, ITSWC- Intelligent Transportation System World Congress.

产综合体形成与发展过程中的地位与作用等(陈航等, 2000)。作为地理系统之一的交通系统, 其发展受到自然、社会、经济等的影响, 是一个远离平衡态的开放系统, 各子系统通过非线性作用达到相互协同, 在宏观上不断形成时间、空间和功能上的有序结构。复杂性研究聚焦于“有序结构”的组织模式及动力学规律, 交通网络的复杂性研究试图从本质上认识其客观规律, 以期为交通网络的发展提供决策依据。区别于当前大多数的研究视角——基于复杂网络理论(方法)的交通网络研究, 本书尝试构建基于地理学空间组织理论的“结构—过程—机理”分析框架, 融入本体论、发生学等视角对交通网络的复杂性进行系统研究。

本书的组织结构安排如下: 全书共分十章, 包含五部分内容。其中, 第一章和第二章为研究基础部分, 第三章至第五章为结构剖析部分, 第六至第八章为过程与模式分析部分, 第九章为建构机理探讨部分, 第十章为未来研究拓展部分。

第一章以历史总结为基础, 综述了本书涉猎范畴内的交通网络分析在网络几何、拓扑结构、空间组织、演化过程、建构机理、组织绩效等领域研究历史与成果。在对网络、复杂性等概念进行剖析的基础上, 引入地理学空间组织理论分析框架, 建构本书的基本逻辑体系。

第二章从图论和社会网络分析两个视角阐述了网络分析的发展历史, 其后对交通地理网络分析的图论相关概念和分析方法进行了描述, 结合新近发展和广泛应用的复杂网络分析方法, 建立了本书研究方法论的基础。

第三章是交通网络拓扑结构分析的基础。从功能结构一致性的视角出发, 将交通系统的基本网络结构抽象为需求(运输联系或空间相互作用)网络、组织网络、径路网络和设施网络四大类, 并提出了相应的网络建模方法。基于铁路、航空、公交、地铁等网络数据, 综合图论和复杂网络方法对各类网络的结构进行比较分析, 指出网络结构属性对比应基于相同的网络类型。

第四章从网络的视角对交通网络的等级结构进行分析。以中国航空网络为研究对象, 基于网络中心性方法探讨机场体系的等级结构特征。研究表明中国航空网络已初步形成较为明显的等级结构系

统,以“京沪穗”为核心构成稳定的“鼎”型系统,区域空间格局呈现显著的“鞍”型特征。网络中心性为认知节点的等级属性提供了重要的方法。

第五章基于地理“级联—腹地”思想,探讨运输需求网络级联系统的功能区建构。以中国城际铁路货物运输联系为研究对象,运用首位度方法对其地域功能结构进行分析。铁路城际货流形成明显的地域关联体系,其结构具有较强的稳定性;据此从区域组织功能一体化视角确立了中国7大区域铁路运输企业的组织边界,为铁路体制改革提供决策方案。

第六章从历史交通地理学的视角对铁路网的时空演化过程进行了研究。近代中国东北地区面临特殊历史发展背景,运营组织管理权对铁路网的时空扩展具有十分重要的影响。既不同于国外交通地理学界提出的交通网络演化的“殖民拓展”模式,也有别于国内学者提出的中国铁路网发展的“内陆式拓展”模式,研究发现东北铁路网演化表现为“竞争—殖民”四阶段模式:传统运输阶段、干线构筑阶段、腹地竞争阶段、路网一体化阶段。

第七章基于图论和复杂网络方法对中国民用航空网络的拓扑结构及其演化进行了系统剖析。中国民航网络具有异速增长特征,图论指标分析显示航空网络结构总体经历了四个阶段,结合复杂网络指标及GIS空间甄别,归纳总结中国民航网络演化的六阶段模型:分散发展阶段、网络连通阶段、环路联系阶段、核心架构阶段、结构复合阶段及有机疏散阶段。

第八章首先基于经济地理学与区域经济学构建了一个高速公路网演化的四阶段假设模式:双核起步开拓阶段、核心边缘拓展阶段、干线通道构筑阶段及网络一体化阶段。通过时空结构分析,该模型较好地刻画了中国高速公路网的时空演化过程。

第九章对交通网络建构机理进行了初步探讨。基于图论与复杂网络的理论和实证检验,网络增长和择优连接是驱动中国航空网络演化的两个基本机理。早期中国航空网络发展的择优连接受到显著的地理空间制约,非经济因子具有较强的驱动影响。其后,基于空间相互作用模型的检验表明,经济因子成为择优连接的重要驱动力,但行政、旅游、社会等因子对中国航空网络的演化也具有较大的驱

动作用。

第十章是对复杂交通网络拓展研究的感性认知。一方面是从地理学的视角对交通网络复杂性的认知思想进行的初步设想,另一方面是基于本书的不足之处所做的展望性论述。

本书第一章至第六章及第十章由莫辉辉执笔,第七章至第九章由莫辉辉和王姣娥共同撰写,全书统稿由莫辉辉完成。

目 录

第一章 导论	1
第一节 历史范畴	1
第二节 概念辨析	24
第三节 研究框架	28
第二章 网络复杂性基础理论	31
第一节 理论渊源	31
第二节 基本概念与方法	35
第三节 基础模型及比较	46
第四节 本章小结	49
第三章 交通网络的拓扑结构	51
第一节 交通网络分类	51
第二节 交通网络建构方法	57
第三节 交通网络结构比较	64
第四节 本章小结	67
第四章 交通网络的等级结构	69
第一节 中心性理论	70
第二节 中心性的网络分析	73
第三节 机场体系的等级结构	75
第四节 扩展讨论：机场分类	85
第五节 本章小结	86
第五章 交通网络的地域系统	89
第一节 地域系统的网络建构方法	90

第二节 铁路城际货流的地域系统	91
第三节 基于地域系统的铁路公司模式	97
第四节 本章小结	103
第六章 铁路网络的演化过程与模式	105
第一节 近代东北铁路网的建设历程	106
第二节 近代东北铁路网的演化模式	116
第三节 本章小结	119
第七章 航空网络的演化过程与模式	121
第一节 中国民用航空网的发展历程	121
第二节 航空网络演化的理论模式	137
第三节 中国民用航空网的演化模式	142
第四节 本章小结	151
第八章 高速公路网的演化过程与模式	153
第一节 高速公路网演化的理论模式	153
第二节 中国高速公路网的演化过程	160
第三节 本章小结	172
第九章 交通网络的建构机理	175
第一节 中国民航运输业的发展历程	175
第二节 航空网络演化机理的理论分析	181
第三节 中国民航网络建构机理探讨	189
第四节 本章小结	208
第十章 复杂交通网络：未来的思考	211
第一节 认知思想	211
第二节 未来研究	213
附 录	217
参考文献	229
后 记	247

第一章 导论

交通伴生于人类的各种经济社会活动，是人类生存与发展的基础条件。在现代交通诞生之前，交通网络本身就是地理学的重要范畴——地图的建构内容（如标志），而 15~17 世纪“地理大发现”时代的航运业酝酿了现代的世界地图。与此同时，多数关于交通网络的建设与发展都与政治、军事、商业等密不可分（陈航等，2000；张文忠，2000），如“秦驰道”、“罗马大道”等，而关注交通网络的位置与布局使其成为几何学研究的重要内容，如线路的长度、曲直及区位关系等（Bunge, 1962；Haggett, 1965）。随着经济社会的发展，交通在区域和城市发展中扮演着越来越重要的角色，与人类生活息息相关，成为人类生活不可或缺的基础条件之一。交通网络是一种重要的人文地理空间组织形式，不仅具有物质性的地表建构，还蕴涵空间关联组织关系。因数据可获得性与描述直观性，交通网络已成为众多学科的研究范畴，不仅成为现代交通地理学、交通工程学等学科的实践对象，也成为图论、几何学、组合数学等诸多基础学科的重要理论演绎案例。

第一节 历史范畴

交通系统是由需求、服务的环境及支持位移的网络所构建的复杂关系集（Rodrigue 等，2006）。交通地理学首要的、最持久的特征就是对运输现象本身的研究，系统研究聚焦于网络和节点的模式，以及考虑这些模式如何影响运动，进而对塑形土地利用和聚落模式的影响。网络研究已成为交通地理学强调其严格科学研究的首要范式（Black, 2003）。它试图描述和解释交通网络的地理模式，即在描述分析的过程中，主要运用图论及相关技术，其解释的重点则是网络形式以及与其他地理现象间的空间联系（Johnston 等，1994）。

从地理学的视角出发,对地理事物的空间分布规律可采用三种分析方法,即分布型分析、网络分析和地域趋势面分析(张超、杨秉赓,2006)。分布型分析对地理事物的点、线、面状分布进行计量分析,如线网密度。网络分析既可以采用几何^①的分析方法,也可以采用拓扑(图论)方法以及网络优化的方法进行研究(Haggett 和 Chorley, 1969; Kitchin 和 Thrift, 2009)。网络分析的结构参数(或序参数)可对不同网络进行定量对比分析(如区域、类型、时间截面),进而为探讨地理网络的一般时空规律和机理提供了重要的手段。地域趋势面分析则是运用适当的数学方法计算出一个空间曲面,并以这个空间曲面去拟合地理要素分布的空间形态,展示其空间分布规律;这种空间曲面被称为趋势面(杨吾扬等,1996)。综合地理空间分布及网络分析的方法论,本书着重关注交通网络的几何、拓扑结构、空间组织、演化过程、建构机理及组织绩效等方面的内容。

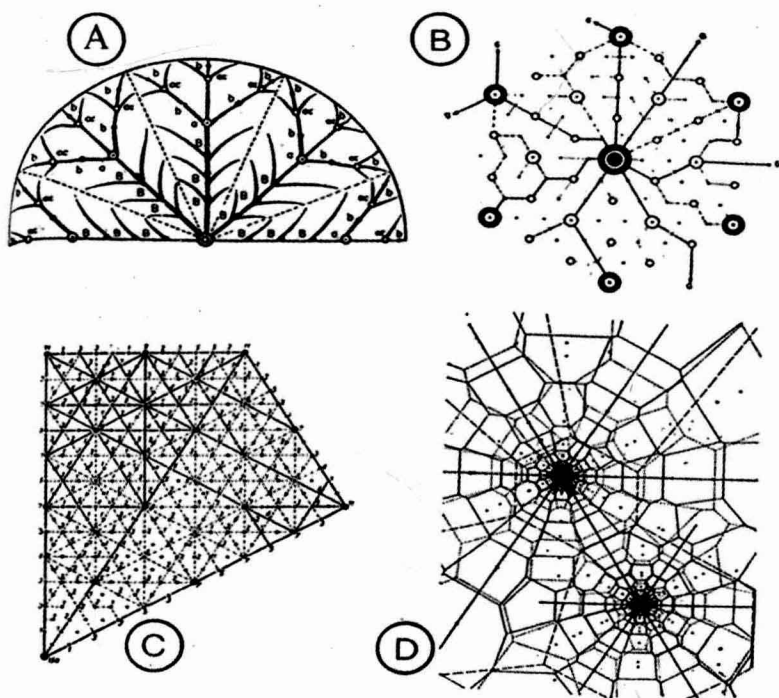
一、网络几何

在地理(尤其是地图)、城市规划等分析中,交通网络的定性描述及局部定量分析由来已久,网络几何(Network Geometry)为其提供了直观的和系统的分析方法。早在19世纪中叶,现代交通地理学鼻祖Kohl^②就研究了资源的地区分布与交通网络形状间的关系,并认为城市在运输网络影响下形成圆形的最佳形态。其后,交通网络分析与聚落(城镇)的空间组织及内部结构的研究就紧密相连,交通网络成为构建城镇体系及内部空间关联网络的重要内容。20世纪初及至中叶,Kohl、Christaller、Lösch、Isard等先后从理论上分析了居民地系统与运输体系的网络几何关系,这些分析大都是建立在近似规则(对称)网络(Regular Network)的假设之上(Haggett 和 Chorley, 1969)(如图1-1所示)。

在城市内部空间结构的研究方面,交通系统与城市格局也存在网络几何形式的经典模式(如图1-2所示),即①小汽车主导模式。该模式的都市空间布局没有真正的市中心,道路网呈方格形态。②限制市中心模式。该模式的都市空间结构维持一个市中心的重要作用,但限制市中心的规模向外扩展,鼓励郊区中心的发展;道路网呈圈层放射形态。③强中心模式。该模式的都市空间布

① 在数学中,具有“几何 $\supset$ 拓扑 $\supset$ 图论”的关系,本书中的几何系指对具有细致地理形态的线网(如河流弯曲形态)的研究,而拓扑多数情况下系指将实际数据进行网络化的处理手段。正如Harvey(1969)对数学、几何以及概率的分析一样,因此本书研究的基本理论和分析方法都是建立在图论的理论基础之上。有关网络的几何分析参见Bunge(1962)、Haggett 和 Chorley(1969)等。

② Johann Georg Kohl. Transport and the Settlements of the People in Their Dependence on the Shape of the Earth's surface (1841, 1850). 参见Haggett 和 Chorley(1969)、Hurst(1974)。



①A: Kohl, 1850; ②B: Christaller, 1933; ③C: Lösch, 1954; ④D: Isard, 1960

图 1-1 交通网络与居民点的关联几何形态

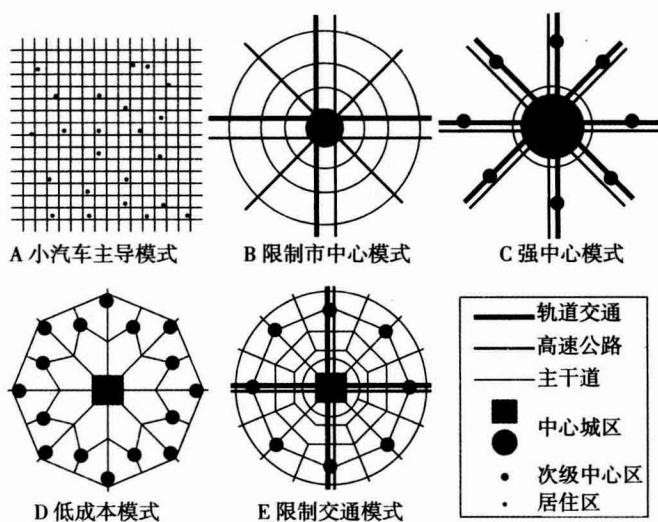


图 1-2 交通网络与城市布局结构模式

局通常都有一个强大的市中心，市中心有高密度的居住和商业，市中心发达的道路系统为公共交通提供了条件；道路网骨架呈星型形态。^④低成本模式。该模式不主张以大量交通建设来解决交通问题，而是通过对现有城市交通的调整和对城市空间布局的引导，达到城市交通与城市空间演化的协调；道路网呈现蛛网形态。^⑤限制交通模式。在城市内建立不同等级的次中心，通过混合开发，使工作、购物、休闲等活动大多集中在相应区域内，以减少交通出行；路网是蛛网状与星型的复合形态（汤姆逊，1982）。

从区域环境与交通网的关系出发，交通网络模式可以分为放射网络、扇形网络、轴带网络、过境网络、环状与一字形网络等（陈才，1991）。杨吾扬和梁进社（1997）认为区域与城市道路网的格局多种多样，但最常见的形式为具有一个中心的环形和放射道路并用的区域或城市交通网。刘灿齐（2001）认为城市结构形态中的交通网络结构可定性描述为网格状、环状放射状、自由形态、混合形态等。Rodrigue 等（2006）系统探讨了交通网络的几何形态，如线型、网状和随机型。李海峰和王炜（2006）在研究全球轨道交通网络形态时提出四种网络几何形态：放射形、环+放射形、方格形和遍布整个城市网络形态。从运营组织角度出发，部分学者对航空网、水运航线网等还提出了点对点式、串联式、轴辐（Hub-and-spoke）^①式、混合式等形式。

1967年数学家曼德布罗特（Mandelbrot）在“Science”上发表的“英国海岸线有多长？”^②一文中提出分形的数学分析理念，并于1975年使用“Fractal”一词来描述“系统的组成部分以某种方式与整体相似的几何形态”，其后分形理论在地理、数学、物理学等方面得到了广泛的应用（徐建华，2002；秦耀辰等，2003），并成为地铁、公路、铁路等交通网络空间几何结构特征重要的描述方法。在考察法国巴黎市郊区的铁路网络时，Benguigui 和 Daoud（1991）发现其具有枝状分形结构，该研究对其后学界有关交通网络的分形研究具有重大影响。杨东援等（1996）运用分形理论研究了公路网络的覆盖形态，并提出以分形数作为覆盖度评价指标；刘继生等（1999）在城镇体系空间结构及区域交通网络分形维数的相关研究中提出了长度一半径维数、分枝维数和空间关联维数分形参数；孙壮志（2007）对城市轨道交通网络形态的分析表明：北京的覆盖维数为1.2120、墨西哥的覆盖维数为1.7152、莫斯科的覆盖维数为1.2916，网络具有由中心向四周逐渐减弱的趋势。分形是一种特殊的几何特征，它从“空间填充”（Space-filling）的视角为交通网络空间复杂性量化

① 有学者称轴辐为：中枢、轮辐、枢纽辐射、中枢辐射、中轴辐式、集中星型、轮轴—辐条等。

② 地理学家 Richardson 较早研究了海岸线的分形几何特征，参见：Mandelbrot B. B. How Long is the Coast of Britain? Statistical Self-similarity and Fractional Dimension [J]. Science, 1967 156: 636-638.