

城市公共客运运营与组织丛书 | 过秀成 主编

Evolution Mechanism and Generation Method
of Urban Rail Transit Network

城市轨道交通网络 演变机理及生成方法

过秀成 孔 哲 著



科学出版社

013023616

U239.5
50

城市公共客运运营与组织丛书

城市轨道交通网络演变机理 及生成方法

过秀成 孔 哲 著



U239.5
50

科学出版社

北 京



北航

C1630580

内 容 简 介

轨道交通网络演变机理及生成方法研究对于完善轨道交通网络规划技术,实现不同发展阶段轨道交通与土地利用动态协调,提升轨道交通设施效能具有重要意义。

本书主要研究轨道交通网络演变机理、轨道交通需求预测和轨道交通网络生成方法,包括轨道交通网络演变的动力学分析、轨道交通网络演变的生命周期判定、轨道交通网络客流预测、轨道乘客路径选择模型研究、轨道交通网络规模匡算与客流走廊分析、网络化建设阶段轨道交通网络生成、网络化运营阶段轨道交通网络生成和轨道交通网络系统可靠性评估,并结合案例进行轨道交通客流需求分析和轨道交通网络方案生成等应用研究。

本书可供交通运输工程领域的教学、科研、管理人员使用,也可供城市规划、交通工程、土木工程等相关工程技术人员,尤其是从事轨道交通的规划、设计、管理的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通网络演变机理及生成方法/过秀成,孔哲著. —北京:科学出版社,2013

(城市公共客运运营与组织丛书)

ISBN 978-7-03-036653-5

I. ①城… II. ①过…②孔… III. ①城市铁路-交通网-交通运输管理-研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 024071 号

责任编辑:顾 艳 / 责任校对:张小霞
责任印制:赵德静 / 封面设计:许 瑞

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 1 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:355 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

伴随大城市产业和服务功能聚集,其城市化和机动化水平不断攀升,为社会经济发展带来了新的契机,也引发了交通拥堵和土地资源浪费等城市问题。轨道交通作为各大城市摆脱城市蔓延发展、提升交通运行效率和实现节能减排降噪的重要方式,也成为构建高品质交通运输系统和落实公交优先战略的关键环节,在国民经济和社会发展中的作用日益明显。

与一般公共交通运输方式相比,轨道交通建设投资巨大、建设周期较长,科学地进行轨道交通网络布局规划,有序推进轨道交通网络建设与扩容是轨道交通网络发挥最优效益的根本前提。经过了近 50 年的轨道交通网络理论研究和实践探索,轨道交通网络规划和建设时序编排已经积累了一定的理论成果和实践经验,但其核心理论和分析技术主要集中于轨道交通网络整体生成研究以及网络生成之后修建时序分析中,侧重于远景年城市空间结构和轨道交通网络耦合关系分析,而不同阶段轨道交通网络与城市空间耦合要求以及轨道交通网络布局与功能演变分析方面的研究长期缺位。城市空间结构和交通服务体系在长期发展中总存在一定的不确定性和不稳定性,阶段性分析环节缺位,可能导致轨道交通网络发展速度超过城市空间结构演变和交通服务体系调整进程,在轨道交通新线开通较长时间内客流规模大幅度低于预期,或在城市空间结构和交通服务体系快速调整中轨道交通建设滞后,在发挥引导城市空间结构调整、优化交通方式结构等方面的功能降低。

城市与交通发展以及交通规划导向均具有阶段性发展特征,不同发展阶段轨道交通建设动力机制、需求规模、网络布局和功能特征呈现与城市空间结构耦合演变的阶段性发展过程,尤其是在城市化和机动化高速推进阶段,轨道交通网络演变此种联系的紧密性和发展阶段的对应性尤为明显。识别轨道交通网络发展的内生动力,遵循轨道交通网络发展规律是实现不同城市社会经济发展阶段轨道交通与土地利用动态协调、提升轨道交通网络设施效能和优化出行方式结构的重要内容。将轨道交通网络演变机理与布局规划相融合已成为轨道交通网络建设有序推进的关键课题。

本书针对轨道交通网络与城市空间结构的耦合关系和城市与交通服务体系发展的阶段性特征,从轨道交通网络演变的视角,构建涵盖轨道交通网络演变机理、轨道交通网络需求分析和轨道交通网络逐阶段规划技术的研究体系。本书共分为 10 章,第 1 章为绪论;第 2、3 章为轨道交通网络演变机理研究,包括轨道交通网络演变的动力学分析和生命周期判定;第 4~6 章为轨道交通网络客流分析技术,包括轨道交通网络客流预测、轨道乘客路径选择模型研究以及轨道交通网络规模匡算与客流走廊分析;第 7、8 章为轨道交通网络生成方法,包括网络化建设阶段和网络化运营阶段的轨道交通网络生成;第 9 章为轨道交通网络系统可靠性评估;第 10 章为无锡城市轨道交通网络生成,结合无锡城市轨道交通线网规划进行了轨道网络生成方法的应用研究。其中,过秀成撰写第 1~5 章、第 9 章,孔哲撰写第 6~8 章、第 10 章。

特别感谢我指导的从事轨道交通研究与项目实践的何明、孔哲、过利超、祝伟、杨洁、吕慎、张媛媛、唐亮、王恺等硕博研究生对本书所贡献的智慧。在研究与撰写过程中我参考了大量国内外文献与书籍,在此谨向原著作者表示崇高的敬意和由衷的感谢!

由于作者水平所限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

电子信箱:seuguo@163.com。

过秀成

东南大学交通学院综合楼 328 室

2012 年 6 月 18 日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 国内外城市轨道交通网络建设回顾	2
1.3 相关研究	6
1.4 本书框架	11
第 2 章 轨道交通网络演变的动力学分析	13
2.1 轨道交通的功能特征	13
2.2 轨道交通建设对城市系统和交通系统的作用	15
2.3 轨道交通网络演变动力学模型	25
2.4 交通系统与城市空间结构耦合演变机理	34
2.5 不同城市空间发展阶段轨道交通网络演变的核心驱动力	43
2.6 本章小结	54
第 3 章 轨道交通网络演变的生命周期判定	55
3.1 轨道交通网络演变的生命周期特征	55
3.2 轨道交通网络生长曲线模型	64
3.3 轨道交通网络化程度发展阶段分析	69
3.4 基于轨道交通网络演变阶段特征的生命周期判定方法	75
3.5 基于轨道交通网络生长曲线的生命周期判定方法	80
3.6 本章小结	82
第 4 章 轨道交通网络客流预测	83
4.1 出行行为决策过程	83
4.2 居民轨道出行行为主要影响因素	90
4.3 调查方案设计	96
4.4 轨道交通出行方式离散选择模型	99
4.5 居民轨道交通出行方式选择模型构建	102
4.6 本章小结	113
第 5 章 轨道乘客路径选择模型研究	115
5.1 轨道交通网络拓扑	115
5.2 乘客出行成本分析	116
5.3 路径搜索算法	118

5.4	改进的最优策略模型	122
5.5	本章小结	129
第6章	轨道交通网络规模匡算与客流走廊分析	130
6.1	轨道交通网络规模匡算	130
6.2	城市客流集散点分级模型	139
6.3	城市轨道交通客流走廊甄别	144
6.4	本章小结	150
第7章	网络化建设阶段轨道交通网络生成	152
7.1	轨道交通基本网络形态	152
7.2	初始轨道交通网络生成	160
7.3	轨道交通备选网络方案设计	163
7.4	轨道交通网络布局决策	170
7.5	本章小结	181
第8章	网络化运营阶段轨道交通网络生成	182
8.1	轨道交通复杂网络建模与复杂性分析	182
8.2	新增轨道交通线路方向控制	195
8.3	新增轨道交通线路线位生成	200
8.4	本章小结	208
第9章	轨道交通网络系统可靠性评估	209
9.1	轨道交通网络系统可靠性内涵	209
9.2	轨道交通网络可靠性测度指标	212
9.3	轨道交通复杂网络可靠性分析与评估	215
9.4	本章小结	216
第10章	无锡城市轨道交通网络生成	217
10.1	规划背景	217
10.2	轨道交通客流需求分析	220
10.3	轨道交通网络规模匡算	224
10.4	网络化建设阶段轨道交通网络方案生成	225
10.5	网络化运营阶段轨道交通网络方案生成	231
10.6	本章小结	235
参考文献		236
后记		239

第1章 绪 论

1.1 背 景

城市与交通以及交通规划导向均具有阶段性发展特征,城市从单中心蔓延到形成多中心空间体系的过程中,交通规划导向从服务于小尺度单中心城市空间格局和非机动交通主导的交通服务体系向服务于大尺度多中心城市空间格局和机动化交通主导的交通服务体系转变。

不同发展阶段轨道交通建设动力机制、需求规模、网络布局和功能特征呈现与城市空间结构耦合演变的阶段性发展过程。轨道交通网络发展与城市空间组成复合系统逐步自我调节和相互影响:城市空间规模扩张阶段,城市新区开发和旧城改造形成的客流走廊派生出高运速、大运量的轨道交通建设需求,轨道交通建设引导城市空间拓展方向和提升旧城改造开发强度,影响人口和产业布局;城市空间功能完善发展阶段,城市新区功能完善提升客流集散点分布离散程度和规模能级,需要轨道交通网络扩容提供一定的站点覆盖率,保证城市空间交通可达性要求,轨道交通建设可促进各城市分区功能布局完善,稳定多核心城市空间体系。

轨道交通网络建设主要依据轨道交通网络布局规划,其研究基础是对未来 20~50 年城市空间格局和交通需求的预判,注重远景年城市空间结构和轨道交通网络耦合关系分析;对于不同阶段轨道交通网络与城市空间耦合要求以及轨道交通网络布局与功能演变分析方面有待深入研究。

从国内外城市轨道交通网络发展历程看,轨道交通网络演变虽然受到上位规划和交通政策等影响,但其演变突出特点是与城市空间扩张演变历程紧密联系,与城市化和机动化发展阶段相对应,遵循一定的演化规律。尤其是在城市化和机动化高速推进阶段,轨道交通网络演变此种联系的紧密性和发展阶段的对应性尤为明显。轨道交通网络演变机理及生成方法着重分析轨道网络演变动力机制和网络形成动态过程,以及针对演变机理进行逐阶段轨道交通线路生成。开展本次研究具有重要的理论意义和工程价值,具体表现在以下几个方面。

第一,完善轨道交通网络规划与管理技术理论。研究轨道交通网络演变机理有助于认清轨道交通网络演变的内生动力,把握轨道交通网络发展的规律性特征,为轨道交通规划建设和运营管理提供理论基础,也有助于完善轨道交通网络规划技术。

第二,实现轨道交通网络与土地利用布局的动态协调。轨道交通起步阶段,城市大多处于快速城市化时期,也是城市空间结构性转变的关键时期,城市产业和服务功能聚集,城市化和机动化水平不断攀升,城市空间结构与轨道交通网络耦合发展是摆脱城市空间蔓延发展、优化出行结构和提升交通运行效率的重要方式。将轨道交通演化机理指导下的网络生成作为远景年轨道交通布局规划的前期工作,可以有效地把握轨道交通网络与城市空间复合系统演化的动态过程,更具针对性地指导与各城市空间发展阶段相适应的轨道交通网络建设,从而整合轨道交通与土地利用,提升轨道交通基础设施效能。

第三,为轨道交通网络建设时序编排提供依据。截至 2011 年,我国已有 10 座城市开通运

营了 29 条城市轨道交通线路,近 30 个城市正在筹建城市轨道交通,“十二五”期间,城市轨道交通总投资金额将超过 7000 亿元。可以预见,在未来的 5~10 年各城市轨道交通网络建设规模和发展速度将显著加强。对于轨道交通新建城市或正处于轨道交通扩容城市均面临近期不同阶段哪些线路先建和建多少线路的问题。认清轨道交通网络发展和城市空间布局演变的内在联系,并以此作为轨道建设时机和时序编排的依据,可有效促使不同城市发展阶段轨道交通建设与城市社会经济发展水平相吻合,既避免轨道交通过度超前发展为城市带来巨大经济负担,又可保证轨道交通建设的及时性,使轨道交通建设有效支持城市社会经济发展。

1.2 国内外城市轨道交通网络建设回顾

1.2.1 发达国家主要城市轨道交通发展历程

城市轨道交通的诞生和发展已有 150 余年的历史。英国、美国、法国、德国、日本、西班牙以及苏联等发达国家的 20 个城市在第二次世界大战前开始了轨道交通建设。轨道交通建设启动较早的欧美发达国家大城市轨道交通线网体系趋于完整、成熟,已基本完成了轨道交通网络的建设(表 1-1)。亚洲除日本的东京与大阪在第二次世界大战前就建有轨道交通外,其余城市整体兴建高潮在 20 世纪 80 年代末以后,比欧美发达国家兴建高潮晚 20 年左右(表 1-2)。国外各城市轨道交通网络发展历程如图 1-1~图 1-6 所示。总结早期开展轨道交通建设城市,总体上可划分为 5 个阶段。

表 1-1 欧美发达国家城市轨道交通建设概况(按开通年份统计)

年代	始建城市个数	1999 年建成里程/km	2005 年建成里程/km	新增里程/km
1950~1960	11	455	545	90
1961~1970	12	799	1166	367
1971~1980	30	1634	1986	352
1981~1990	31	978	1141	163
1991~2000	25	415	699	284
2000~2005	13	—	281	281

表 1-2 亚洲城市轨道交通建设概况(按开通年份统计)

年代	始建城市个数	1999 年建成里程/km	2005 年建成里程/km	新增里程/km
1950~1960	2	78.25	90.8	12.55
1961~1970	1	54	114	60
1971~1980	7	352.2	523.5	171.3
1981~1990	7	231.2	298	66.8
1991~2000	10	284.2	363.2	79
2000~2005	7	—	129.5	129.5

1863~1920 年,城市发展处于城市化与机动化初期,欧美各国较早地意识到轨道交通对城市交通运行的综合效益,先期工业化城市轨道交通网络开始诞生与发展。轨道交通建设源于城市地面交通系统受城市空间限制不能无休止地建设,应对人口在大城市的高度集聚,轨道交通主要布设在中心城范围内的客流走廊上。由于城市化初期人口集聚速度相对缓慢,轨道交通建设速度相对迟缓。国外城市化前期轨道网络布局如图 1-7(a)所示。

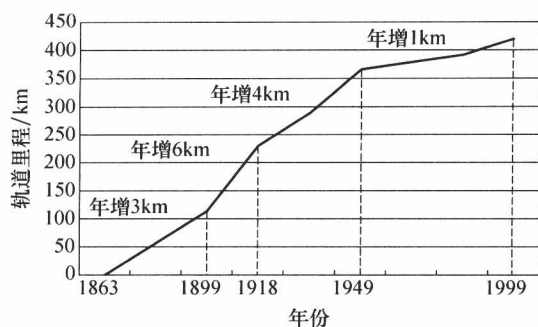


图 1-1 伦敦轨道交通网络发展历程

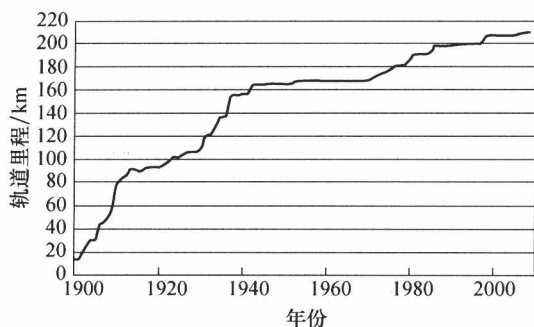


图 1-2 巴黎轨道交通网络发展历程

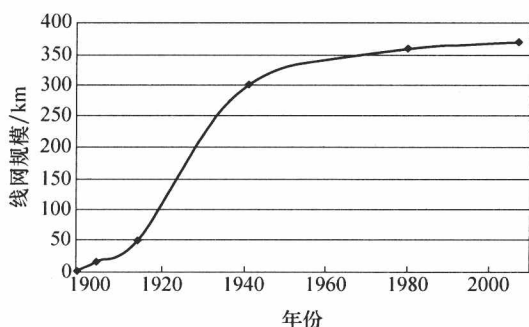


图 1-3 纽约轨道交通网络发展历程

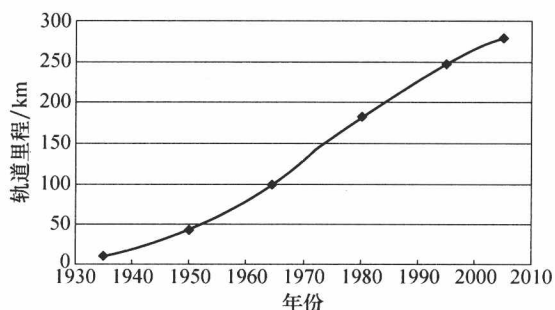


图 1-4 莫斯科轨道交通网络发展历程

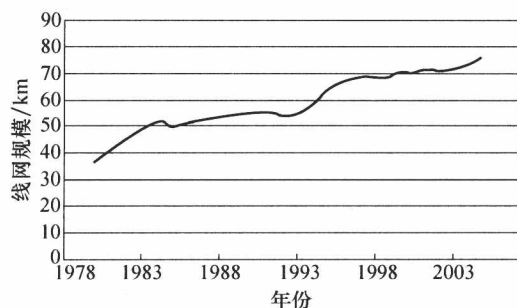


图 1-5 新加坡轨道交通网络发展历程

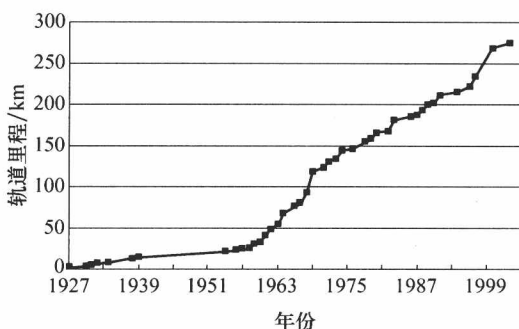


图 1-6 东京轨道交通网络发展历程

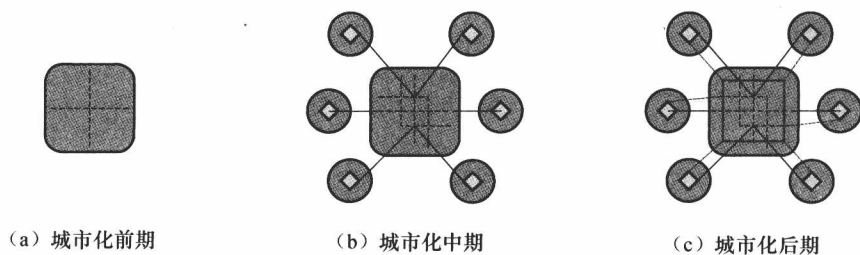


图 1-7 国外城市轨道交通网络布局演变示意

1920~1950年,随着汽车工业的快速发展,城市交通进入了汽车时代,私人小汽车保有量开始增长,同时受到第二次世界大战的影响,仅莫斯科等少数城市在此期间修建了城市地下铁道系统,总体上各城市轨道交通网络发展减缓甚至停止。

1950 年~20 世纪 90 年代中前期,第二次世界大战结束以后,经过短暂的经济恢复后,各国城市区域逐渐扩大,城市人口上升。随着经济发展加快启动,轨道交通的建设在带动城市空间扩展、塑造城市形态方面发挥了巨大作用。

1970 年以后,城市发展位于郊区化时期和机动化中期阶段,欧美发达国家城市中心机动车超饱和、路面交通陷入瘫痪状态,同时石油资源危机爆发,世界各大城市都开始重新审视各自城市交通发展的战略方向,轨道交通建设加强了与城市发展的协调性,为配合新区、新城的建设,适时地延伸轨道交通线路,服务外围地区发展。此阶段,轨道交通主要与城市空间布局演变紧密结合,由于城市化进程的快速推进,城市空间快速扩张,轨道交通建设快速跟进。国外城市化中期轨道网络布局如图 1-7(b)所示。

20 世纪 90 年代后期,城市发展位于城市化和机动化后期,开始对既有轨道交通网络加密,提升公共交通服务质量,优化出行结构。此阶段城市化和机动化的发展速度已经趋于稳定,轨道交通也已经呈现出网络化运营状态,轨道交通网络演变速度一般都会放缓,新增线路通常采用分期建设的形式,部分线路需经历较长时间才完全建成,至此轨道交通网络建设完成,网络规模保持基本稳定。国外城市化后期轨道网络布局如图 1-7(c)所示。

1.2.2 国内典型城市轨道交通网络建设

国外城市在社会、经济、政治、文化和生态等方面与我国城市均存在一定差异,尤其是在城市与城市交通发展理念、城市化和机动化发展进程、城市规模及城镇关系、轨道交通规划建设运营管理体制与产业交通相关政策方面差异显著。在轨道交通网络演变机理及生成方法的相关研究中,需要更多地结合北京、上海、广州等国内城市的轨道交通网络的发展经验(表 1-3~表 1-5)。

表 1-3 北京轨道交通网络发展历程

建设阶段	线路名称	运营时间/年	里程/km	网络功能	网络布局	网络形态
20 世纪 70~90 年代	1 号线一期	1969	30.4	支撑城市空间东西向发展,满足东西向客流出行需求,其中 1 号线一期工程为战备需要而修建	3 条轨道交通正线,覆盖“十字走廊”	
	二期和三期	1971				
	1 号线四期	1973	23.1			
	2 号线	1981				
20 世纪 90 年代~ 21 世纪初期	13 号线	2003	40.5	支撑城市空间向北发展,加强东部通州与旧城联系	7 条轨道交通正线,初步形成“环+放射+方格”网络	
	八通线	2003	19.0			
2004~2009 年	5 号线	2007	27.6	服务“两轴-两带-多中心”的出行需求格局,8 号线一期为奥运专线,服务奥运客流	11 条轨道交通正线,“环+放射+方格”网络形态形成	
	8 号线一期	2008	4.4			
	10 号线	2008	35.6			
	机场线	2008	27.3			
	4 号线	2009	28.1			

表 1-4 上海轨道交通网络发展历程

阶段划分	线路名称	运营时间/年	里程/km	网络功能	网络布局	网络形态
1990~2000 年	1 号线	1993	21.1	缓解东西与南北向客流走廊交通压力,支持浦东和徐家汇两个新区开发	3 条轨道交通正线,覆盖“十字走廊”	
	2 号线	2000	26.7			
	3 号线	2000	23.2			

续表

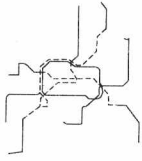
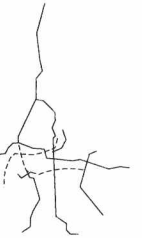
阶段划分	线路名称	运营时间/年	里程/km	网络功能	网络布局	网络形态
2001~2006 年	5 号线	2003	17	服务于闵行新区、虹桥新区和浦东新区开发为主,缓解城市客流走廊交通压力	7 条轨道交通正线,初步形成“环+放射+方格”网络形态	
	1 号线北延	2004	16.5			
	4 号线	2005	22			
	3 号线北延	2006	14			
	2 号线西延	2006	9.5			
	6 号线	2006	33.1			
	9 号线一期	2007	31.3			
2007~2011 年	8 号线一期	2007	26.2	进一步密切浦东与浦西的轨道交通联系,提升浦西内部轨道交通网络密度,11 号市域线的建设引导城区向大都市区发展	11 条轨道交通正线,“环+放射+方格”网络形态形成	
	7 号线	2008	33.5			
	2 号线东延	2009	29.2			
	10 号线	2009	28.8			
	9 号线 2 期	2009	28.8			
	13 号线	2010	5.3			
	8 号线二期	2010	9.5			
	11 号线	2011	46			

表 1-5 广州轨道交通网络发展历程

阶段划分	线路名称	运营时间/年	里程/km	网络功能	网络布局	网络形态
1999~2003 年	1 号线	1999	18.5	以缓解交通拥堵为主,连接城市中心、天河副中心以及广州站和广州东站	3 条正线,“十字型”布局覆盖主走廊	
	2 号线一期	2003	8.5			
	8 号线一期	2003	9.6			
2003~2010 年	3 号线一期	2005	6.12	轨道交通线路从中心区延伸至花都分区、番禺分区、东部分区、南沙分区、从化分区、增城分区,引导“一主六副”多组团型城市空间结构发展	7 条轨道交通正线,形成“放射式”网络形态	
	8 号线二期	2005	1.8			
	4 号线一期	2005	14.1			
	3 号线二期	2006	22.83			
	3 号线支线	2006	7.4			
	4 号线二期	2006	22.3			
	4 号线三期	2007	4.9			
	5 号线	2009	31.9			
	2 号线二期	2010	9.3			
	2 号线三期	2010	14.0			
	3 号线三期	2010	34.0			
	4 号线四期	2010	5.4			
	8 号线三期	2010	3.46			

与国外轨道交通建设起步较早的城市相比,虽然国内城市轨道交通网络演变也呈现出从建设初期对客流主走廊的全覆盖,到形成基本骨架网络形态,再到在基本形态基础上进一步完善和加密的发展,体现出类似的生命周期特征,但也具有一定的差异性。

上海、广州等特大城市轨道交通建设起步发展稍晚,东京等同类发达国家特大城市通常在城市人口 400 万左右即快速建设轨道交通,上海轨道交通起步建设阶段人口已经超过 1300 万人。北京虽然起步较早,但初期发展缓慢,1965 始建至 2001 年仅建成 42km。大多城市轨道交通建设初期也是城市化和机动化快速推进时期,轨道交通线路承担功能往往要同时兼顾支撑客流走廊交通需求与引导新区开发,轨道交通网络的演变更更多的是伴随城市空间布局 and 整

体需求格局演变而逐步发展的。相对于城市化和机动化发展水平,轨道交通起步较晚的城市,如杭州、南京等,轨道交通以服务客流走廊为主,兼顾新区开发的引导,而相对城市化和机动化发展水平起步较早的城市,如苏州、无锡等,轨道交通以服务客流走廊和引导新区开发并重,并更加侧重服务新区开发。

轨道交通网络演变速度远超国外大多数经济发达国家,各个阶段轨道交通网络演变速度的差异性并不显著。其原因在于:城市化和机动化进程推动更为迅速,轨道交通成为优化城市空间布局 and 应对机动化进程的核心推动力,伴随城市空间结构的发展、人口规模的膨胀和私家车保有量提升而导致大面积的交通拥堵问题和生态问题,轨道交通网络规模迅速扩张;国内城市的经济发展更加迅猛,在轨道交通投融资方面,国外企业集资占据相当部分比例,部分政府采用对轨道交通投资者进行补助的方式,推动轨道交通建设,而国内更多地采用以政府为主导的直接投融资模式,对于保障轨道交通公益性具有良好的带动作用。

轨道交通网络建设规模超过大多数国外经济发达城市。2011 年,上海轨道交通网络里程已经居于世界首位;根据深圳、南京和杭州等特大城市的轨道交通网络布局规划,远期建设规模也远超国外大多数城市。原因在于国内城市人口增速快、密度大、空间形态以团状居多,需要更高的线网密度来支撑城市空间结构和人口发展,以应对交通拥堵。

1.3 相关研究

1.3.1 轨道交通网络演变机理相关研究

西方部分城市由工业化和城市化所引发的城市及社会问题日益严重,为控制人口密度,新城大面积开发,产业与人口开始疏解,城市空间扩张相关理论也随之发展,见表 1-6。在早期的城市空间扩张理论中,即涉及交通网络演变机理的相关研究,分析轨道交通、公路、城市道路和地面公交等交通网络整体与城市空间格局的互动关系,结论为城市空间扩张和交通需求驱动交通网络演变,并且城市空间结构与交通网络存在相互作用、相互反馈和协同演化的关系。

表 1-6 城市空间扩张经典理论(段进,2006)

经典理论	主要结论
同心圆理论	城市以不同功能用地围绕单一核心,有规则地向外扩展形成同心圆结构,城市布局由中央商务区和居住区组成城区,通勤区组成郊区
轴向同心圆理论	在同心圆理论的基础上,提出轨道交通、公路、快速路等交通运输轴线对城市空间形态具有一定影响,城市空间形态沿运输轴线呈椭圆状发展
有机疏散理论	城市是一个有机整体,应按照机体的功能要求,分散城市的人口和就业岗位。此种分散是逐步离散的,新城不是脱离中心而是有机地进行分离运动,就业、娱乐和居住单元均应保持有机的联系。此种城市有机分解的过程,产生了城市道路、公路和轨道交通等交通网络发展诉求
多核心理论	城市是由若干不连续的地域所组成,分别围绕不同的核心形成和发展。中央商务区建设推动了道路和公共交通网络的集聚,批发和轻工业区位于市中心外围,工业区与中心区间经济联系是城市中心区对外交通网络演变的主要推力
三地带学说	城市空间演变是分阶段进行的,从中央地带向中间地带和从中间地带向郊区地带的两阶段演变过程,第一阶段城市增长产生了道路、地面公交、轨道交通等城市交通网络的生长需求;第二阶段城市增长产生了铁路和公路等区域交通网络的生长需求
区域学说	建立了“城市-区域”概念,认为城市空间演变与社会、文化和环境的变迁紧密结合,工业集聚和经济规模的不断扩大是城市向外扩张的主要动力,由城市组合成巨大的城市集聚区或组合城市,城市集聚区间社会经济联系是城市道路网络、地面公交网络和轨道交通网络生长的主要动力

同心圆理论是城市扩张理论体系的基础,但未考虑到交通运输线对城市空间的影响,轴向同心圆理论则较早提出城市空间和交通运输线耦合演变的结论。在同心圆和轴向同心圆理论基础上,《城市:它的发展、衰败和未来》一书提出了有机疏散理论,将城市人口和产业布局、多核心城市空间社会经济联系、用地开发以及城市空间扩张与交通运输关联逐步融入到经典城市空间扩张理论体系中(张捷,赵民,2005)。针对大城市过分拥挤造成城市卫生问题、防灾问题和社会问题,多核心理论、三地带学说和区域学说等理论相继提出,进一步考虑城市空间发展和交通运输网络发展的阶段性以及不同类型交通网络演化和城市空间结构的互动关系,城市空间扩张理论逐步发展完善(顾朝林等,2000)。

伴随新城开发和交通基础设施建设趋于成熟,交通网络演变机理研究向定量化分析转换,见表 1-7。相关研究起步于交通网络拓扑结构特征分析,并将复杂网络理论、分形理论、自组织理论以及相关的数理统计模型应用在交通网络生长动态分析中,构建交通网络演变模型和分析交通网络演变的驱动力。在交通网络拓扑结构分析中,轨道交通网络、区域交通网络、城市交通网络以及几种交通网络组成的复合网络被先后证明具有小世界和无标度的复杂网络特征。

表 1-7 轨道交通网络生长特征分析主要研究成果

研究对象	主要结论
交通网络 拓扑结构	轨道交通网络具有小世界和无标度等复杂性特征
	区域运输网络和城市交通网络组成的复合网络具有小世界和无标度特征
	复合区域运输网络和复合城市交通网络具有小世界和无标度等复杂性特征
	航空、铁路、地面公交、道路和慢行等交通网络分别具有小世界和无标度复杂性特征
	道路网络和公交网络具有分形相似性特征
交通网络 演变模型	加权网络模型,分析地面公共交通与轨道交通复合公交网络演化
	适应度演化模型,分析区域综合运输网络演化
	原始吸引模型,分析道路网络演化
	幂律增长模型,分析城市交通复合网络演化
	非线性择优模型,分析航空网络演化
	局域世界演化网络模型,分析地面公共交通网络演化
	随机分配网络演化模型,分析区域综合运输网络演化
	分形模型,分析道路网络演化
交通网络 演变关联 因素	Logistic 生长曲线模型,分别分析轨道交通网络和地面公交网络的演化
	轨道交通与城市空间结构以及人口分布之间的动态互馈作用,与社会经济系统间的作用,以及交通系统本身协调供需平衡过程主导着轨道交通网络演变
	城市地理形态、用地布局、公交客流 OD 分布主导着轨道交通网络演变
	造价、运营效益和社会效益是轨道交通网络演变的主要因素
	交通系统的自组织机制主导着城市复合交通网络的演变,并且规划者的主观能动性对此演变特征具有一定的影响
	人口增长、城市空间范围扩大、就业岗位数的增加是城市交通网络演变的主要驱动力
	城市空间结构的演变与城市交通复合网络存在着持续的相互作用关系,城市空间结构演化对城市交通需求是各类交通网络演变主要驱动力,城市空间规模扩张决定公共交通逐步向轨道交通演变,人口与就业分布特征决定轨道交通建设需求
	道路网络演变主要取决于交通供需平衡状态,与自身和周边道路网节点、平行路段交通运行条件以及地理特征均有较大关联,受制于道路建设工程花费、土地利用条件以及政策环境

研究对象	主要结论
轨道交通网络演变特征	按照网络形态演变特征,轨道交通网络演变划分为网前阶段、骨架网阶段和成熟网络阶段
	按照网络建设速度演变特征,轨道交通网络演变划分为初始发展阶段、集中建设阶段、再发展阶段和成熟稳定阶段
	按照轨道交通网络在公共交通系统中承担功能特征,轨道交通网络演变划分为辅助功能阶段、骨干功能阶段和主导功能阶段
	按照单线的功能特征,轨道交通网络演变划分为骨架线阶段、填充线阶段和辅助线阶段

1.3.2 轨道交通需求预测相关研究

轨道交通需求预测主要以四阶段交通需求预测为核心内容。20 世纪 50 年代,随着西方国家私人小汽车的发展和郊区化的扩张,需要新建大规模的道路网络来支撑这种发展趋势。交通需求预测的根本目的是作为分析确定新建道路网络的布局形态和规模的依据。

1962 年,美国芝加哥市交通规划研究中提出“生成—分布—方式划分—网络配流”的预测方法,“四阶段交通预测模型”形成。该模型将每个人的出行按交通小区进行统计分析,从而得到以交通小区为单位的集计模型。“四阶段法”由于其清晰的思路和模型结构、相对简单的数据收集和处理一直沿用至今。轨道交通需求预测相关研究主要沿袭较为成熟的“四阶段客流预测方法”,即出行生成预测、出行分布预测、出行方式划分预测和网络配流的研究思路。

出行生成预测用于分析总出行产生量和吸引量,重点确定每一小区内的出行产生量和到达量。早期的出行生成预测方法主要包括交叉分类法与回归分析法,此后出行生成预测相关研究按照出行目的、出行群体属性和出行方式进行细分,预测方法更加趋于细化。

出行分布预测用于分析规划年各小区之间的出行交换量,以增长系数法和重力模型法最为典型,前者假定未来分布量与现状分布量具有相同的分布形式,通过计算增长系数预测未来分布量;后者通过分析现状交通小区内部交通量、小区之间交通量与小区本身属性和小区之间阻抗等变量间的统计关系,运用统计回归得到的模型预测规划年的出行分布关系。

出行方式划分预测是应用于不同交通方式的交通流量分析。美国在 20 世纪 60 年代后期发展起来的直接需求模型是将出行生成、出行分布与方式选择组合的模型,可直接预测两点间交通方式的客流量,主要以集计模型为主,操作相对简单,但预测精度较粗。非集计模型广泛应用于 20 世纪 80 年代,相对于集计模型,调查数据可不通过统计处理直接构造模型,能使调查所得的个人数据得到充分利用,要求样本容量少,但是 Logit 模型的非相关选择方案相互独立特性(IIA 特性)使其在应用中受到某些制约,为克服此缺陷,如 NL、GNL、PCL 模型等改进的 Logit 模型相继提出,但形式较为复杂。

网络配流在发展初期采用全有全无分配法,后来建立的增量分配法、连续平均法、容量限制配流模型均以此为基础。网络配流模型的核心均为路径效用函数,相对于机动车配流而言,轨道交通客流分配路径效用函数更为复杂,一般包括起讫点和轨道站台间的步行时间、站台等候时间、上下车时间、换乘时间、公交票价、不同公交方式行驶车速和发车频率等。

1.3.3 轨道交通网络生成方法相关研究

城市轨道交通网络生成相关研究起步于 20 世纪 60~80 年代。轨道交通网络规模需求较低,城市主要采用规划一条线路、建设一条线路的轨道交通建设方式,相关模型目标函数的核心指标一般为轨道交通线路覆盖人口,采用近似算法估算模型结果,主要应用于固定需求条件

下的单条轨道交通线路生成或小规模轨道交通网络设计。

20 世纪 90 年代至今,轨道交通逐线规划建设导致在城市化和机动化的快速发展下,后期轨道交通线路建设缺少足够的交通空间,轨道交通线路的线位选择严重受限,降低了轨道交通网络综合效益的发挥。轨道交通网络建设转向先进行整体网络生成,为远期扩容预留足够的建设空间,而后进行轨道交通网络建设时序的编排,从而逐线生成轨道交通网络。轨道交通网络生成以构建相关数学规划模型为主,将轨道交通客流分配结果与轨道交通网络优化相结合,更多地引入启发式算法求解模型,并应用于较大规模的城市轨道交通网络设计;部分研究根据城市空间结构、功能分区以及客流集散点的“面-线-点”分析(刘迁,2002),对城市客流走廊加以甄别,进行轨道交通网络多方案生成,通过设计评估指标体系进行方案比选。轨道交通网络生成模型主要研究成果见表 1-8。轨道交通网络修建时序以建设项目成本效益分析、情境分析以及敏感性分析等方法为主,其主要研究成果见表 1-9。

表 1-8 轨道交通网络生成模型主要研究成果

年 代	方法概述
20 世纪 60~80 年代	以乘客行程时间最小为目标,建立固定轨道交通线路条件下的站点最优间距模型(Vuchic, Newell, 1968)
	以建设成本最小为目标,参照管线定位方法建立了轨道交通线路选择模型(Dicesare, 1970)
	以最短轨道交通线路长度覆盖轨道交通客流最大化为目标,构建了轨道交通线路选择的 MCSP 模型(Current et al., 1985)
	以最小轨道交通规模条件下的线路可达性最优为目标,构建了轨道交通线路选择的 MSPP 模型(Current et al., 1989)
	以轨道交通网络建设成本、接驳公交成本总和与轨道交通客流量之比最小化为目标,构建了轨道交通网络生成模型,应用于小规模网络生成(Schabas, 1988)
	以建设线路长度最短及总出行时间最小为目标,以建设成本为约束条件,构建了轨道交通网络生成模型,应用于小规模网络生成(Current et al., 1989)
	以线路周边居住及工作人口最多为最优目标,以建设成本为约束条件,构建了轨道交通网络设计模型,应用于小规模网络生成(Wirasinghe, Vandebona, 1987)
20 世纪 90 年代至今	以建设成本及乘客出行成本最小为目标,以出行时间为约束条件,构建了轨道交通网络生成模型,采用 K-最短路算法求解(Bruno et al., 1998)
	以线路覆盖人口最大化为目标,以不同影响范围的轨道吸引人口为约束,构建了轨道交通网络生成模型,采用启发式算法求解(Laporte et al., 2002)
	在城市轨道交通网络拓扑结构特征分析的基础上,对不同类型的城市轨道交通网络加以分类,采用图号索引法对轨道网络拓扑结构进行评估(Laporte et al., 1994)
	引入了竞争交通方式概念,建立了基于 Logit 的交通方式划分模型计算轨道交通方式 OD,根据不同城市轨道交通网络结构的基本类型,建立了轨道交通运输效率评估模型(Laporte et al., 1997)
	通过站点区域人口普查以及道路与轨道网间距分析,计算站点覆盖人口,建立了轨道交通可达性评估模型(Laporte et al., 2002)
	比较了以轨道交通客流最大为目标的轨道交通网络生成模型的适用条件,当站距上限大于 1250m 时,贪婪算法最优;当站距上限为 750m 或 1000m 时,插入式算法最优(Laporte et al., 2006)
	基于出行生成模型选择重要吸引源点作为核心站点,基于核心站点生成核心轨道网络,在核心网络生成的基础上,以提高线路覆盖率为目标,增加第二层次的轨道站点,生成城市轨道交通网络(Laporte et al., 2006)
	以轨道交通网络客流最大为目标,以资金和站点数量为约束,构建了轨道交通网络生成模型,采用启发式算法求解(Marin, Garcia-Ródenasbs, 2009)
	以出行需求最大和平均出行时间最小为目标,以网络规模、资金和出行行为特征为约束,采用启发式算法求解(Marin, Jaramillo, 2009)
	以流量可靠性最优为目标,以弧流量约束和弧需求约束,构建了轨道交通网络生成模型,采用启发式算法求解(Marin, Mesa, Perea, 2009)

表 1-9 轨道交通网络建设时序主要研究成果

方 法	方法概述
准则法	将拟建轨道交通线路建设项目所有的投入和产出划分为贸易品和非贸易品,算出其影子价格,以为城市社会经济提供净总消费效益为主要目标,把其他目标作为附加指标,综合衡量对城市社会经济所作贡献的大小,并以这些指标作为取舍的准则
“L-M法”	将轨道交通项目所有的投入和产出划分为贸易品和非贸易品,并制定出各种转换系数,再用转换系数折算成边界价格,在“L-M法”中边界价格即为影子价格
“S-T法”	基本观点和方法与“L-M法”一致,差异在于“S-T法”通过给每个目标加权的办法把所有的指标数值归纳成一个最终的、单一的数值,把复杂的多目标项目决策变成简单的单目标决策
情境分析法	通过情境分析对未来城市与交通发展环境进行情景假设,分析不同情况下交通需求特征,研究最可能出现的一组情景假设,以此来判定轨道交通建设时序
敏感性分析法	对轨道交通建设时序不同组合评价中所用的重要变量进行灵敏度分析,判断由于重要输入参数的改变而产生的变化,根据不同的评价结果来优选轨道交通建设时序方案

1.3.4 既有研究综述

从 20 世纪 60 年代至今,轨道交通网络规划已经形成了系列研究成果,有效地指导各城市轨道交通网络规划建设。既有研究从自组织效应和他组织效应两个方面相对全面地总结了交通网络演变的驱动力,可为轨道交通网络驱动力研究提供参考;在城市空间结构和轨道交通网络互动关系的指导下,利用数学规划法和客流分析法等多种思想,提出系列轨道交通网络生成方法,其关于轨道交通网络与城市空间耦合演变的处理方法对轨道交通网络生成模型构建有一定的借鉴意义;伴随网络生长理论和自组织理论发展成熟,在对运输网络和道路基础设施网络等交通网络的复杂性分析和小世界与无标度效应论证的基础上,部分学者对于交通网络生长模拟进行了较为深入的研究,可为轨道交通网络演变模型的构建提供方法论上的指导,其针对轨道交通网络的复杂性和耗散结构特征分析也可作为生命周期划分中轨道交通网络拓扑结构分析的研究基础。为更具针对性地在快速城市化机动化背景下的城市空间结构演变特征指导下分析大城市轨道交通网络演变机理,并从演变机理的角度来研究网络生成方法,既有研究在以下方面应加以深化研究。

轨道交通大规模建设阶段也是城市化快速推进时期,轨道交通网络的演变经常是伴随城市空间和整体需求格局演变而逐步发展的,各条轨道交通线路布局和建设顺序编排根据城市发展方向而定。轨道交通与城市空间耦合演变分析不仅是轨道交通网络演变驱动力分析的核心环节,还是轨道交通网络动态分析的重要基础。相关研究从自组织效应和他组织效应两个方面相对全面地总结了交通网络演变的驱动力,研究对象更多集中于包括高快速路系统、轨道交通系统、地面公交系统等多种交通网络整体和城市空间生长的耦合关系分析。在城市空间结构演变中,公交客流走廊的形成、公交客流走廊交通方式升级机理等轨道交通网络演变驱动力分析的关键问题将在本书中进一步明确。

不同城市化和机动化发展阶段,轨道交通网络演变的驱动力有所差异,在轨道交通网络发展前期,客流走廊交通流量出行需求和城市空间扩张引导需求推动轨道交通网络发展,在轨道交通网络发展后期,通过自身规模效应优化出行结构驱动轨道交通网络扩容。相关研究从轨道交通网络形态和承担功能演变等角度,划分了轨道交通网络演变的生命周期,本书进一步将不同城市化和机动化发展阶段轨道交通网络驱动力分析纳入到生命周期判定中,完善轨道交通网络规模和功能从量变到质变的生命周期阈值指标体系。