

城市轨道交通线网规划

——基于客流强度特征和换乘组织的实证研究

钱堃 著



东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

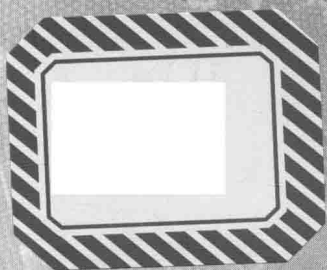
CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG XIANWANG GUIHUA

JITU KELU QIANGDU TEZHENG HE HUANCHENG ZUZHI DE SHIZHENG YANJIU

城市轨道交通线网规划

——基于客流强度特征和换乘组织的实证研究

钱堃 著



东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

• 哈尔滨 •

版权专有 侵权必究

举报电话：0451 - 82113295

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通线网规划：基于客流强度特征和换乘组织的
实证研究 / 钱堃著. —哈尔滨：东北林业大学出版社，2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5674 - 0978 - 1

I. ①城… II. ①钱… III. ①城市铁路—轨道交通—
交通规划—研究—中国 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 015619 号

责任编辑：赵 侠 刘天杰

封面设计：宗彦辉

出版发行：东北林业大学出版社

(哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号 邮编：150040)

印 装：三河市天润建兴印务有限公司

开 本：710 mm × 1 000 mm 1/16

印 张：11.75

字 数：160 千字

版 次：2017 年 9 月第 1 版

印 次：2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价：49.90 元

如发现印装质量问题，请与出版社联系调换。(电话：0451 - 82113296 82191620)



钱 堃 人民交通出版社股份有限公司策划编辑, 2008 年获得长安大学交通工程专业工学学士学位, 2015 年获得北京交通大学交通运输规划与管理工学博士学位, 主要研究方向为城市交通规划与管理, 在《交通运输系统工程与信息》等杂志公开发表论文 10 余篇, 致力于区域与城市综合交通运输与规划的研究, 参与“轨道交通线网规划实施保障研究”“珠江三角洲地区轨道交通一体化问题研究”“新疆维吾尔自治区综合交通运输体系发展规划”“北京市轨道交通网络换乘站衔接研究”“区域综合交通系统运行管理及建模方法”等多项科研项目(课题)研究工作。

本书在论述城市轨道交通网络和线路客流强度内涵及特征的基础上,分析了客流强度的影响因素及其重要度,剖析了不同类型线路客流强度的特征规律。构建了公共交通体系中城市轨道交通竞争力模型,研究了换乘效率改善对城市轨道交通竞争力的影响。进一步地,从轨道交通网络规划和线路车站设计两个层面出发,研究了不同线网形态下换乘便捷性及换乘方式对换乘时间的影响,分析了不同换乘站设计方法及其效率。最后,基于对外交通枢纽各集散方式特点,研究了城市对外交通枢纽中城市轨道交通的竞争力。

本书可作为从事城市轨道交通规划与设计、城市轨道交通运营与管理专业的工作人员研究参考书,也可供高等院校轨道交通与城市交通相关专业高年级本科生及研究生学习参考。

前 言

我国部分城市轨道交通系统已逐步进入网络化运营阶段，城市中心区部分运营线路的客流负荷接近运输能力的极限，而郊区部分线路客流成长相对缓慢，远低于预期。研究不同类型线路的客流强度规律对于指导我国城市轨道交通规划建设和运营组织方案制定有着重要的意义。此外，网络化运营对轨道交通换乘效率与便捷性的要求更高，研究城市轨道交通换乘组织方案并提出优化方法对于提高我国城市轨道交通服务水平和吸引力意义重大。

本书在分析城市轨道交通客流强度影响因素的基础上，研究不同类型线路的客流强度特征规律。首先，基于对城市轨道交通换乘过程的分析，研究换乘时间效率对城市轨道交通吸引力及乘客路径选择行为影响的重要性；其次，从轨道交通线网规划和车站设计两个层面对城市轨道交通换乘组织进行系统研究；最后，分析城市轨道交通在对外交通枢纽集疏运体系中的竞争力，从换乘效率改善和票价调整角度研究提高城市轨道交通竞争力的效果。主要研究内容和结论如下。

第一，分析了城市轨道交通网络和线路的客流强度特征规律。在论述城市轨道交通客流强度基本内涵的基础上，分析了客流强度的影响因素并提出各因素重要度水平计算方法。分析结果表明，换乘站比例、人口规模和线网密度对网络客流强度影响显著，换乘便捷性指数和核心区比例对线路客流强度影响显著。剖析了不同线路客流强度的



特征规律,指出不同类型线路在空间分布上具有明显不均衡性,全线位于中心城区的线路客流强度最高,跨越外围区—核心区—外围区的市区直径线次之,跨越外围区—核心区的市区半径线客流强度较低,郊区线的客流强度最低。

第二,研究了换乘效率改善对城市轨道交通吸引力和乘客行为的影响。构建了城市轨道交通在城市公共交通体系中的竞争力模型。模型分析表明城市轨道交通的吸引力随着换乘效率的改善而增加,且换乘步行时间及环境对城市轨道交通网络吸引力有很大的影响。基于不同换乘效率下乘客对换乘时间的感知差异,建立了考虑换乘效率的路径广义费用模型,研究了换乘效率对乘客路径选择行为的影响。分析表明,考虑换乘效率的路径广义费用模型更能刻画乘客的选择行为,计算结果更接近真实情况。

第三,从轨道交通线网规划层面出发,研究了不同线网形态下的换乘便捷性和出行时间效率。分析了线网换乘便捷性的内涵,提出了便捷性评价指标的计算方法,并研究了不同线网形态下的换乘便捷性。结果表明,相同线网规模下,换乘便捷性指数从大到小的线网形态依次是放射+环线型、网格+环线型、放射型、网格型。假设居民出行在空间上分布均匀,研究了不同线网形态下的出行时间效率。结果表明,出行效率从高到低依次为放射+环线型、放射型、网格+环线型、网格型。

第四,研究了不同换乘方式下的换乘时间变化规律,对两线换乘和三线换乘情形下典型换乘方式的换乘时间进行了分析。研究发现,两线换乘站中“一”字形布置形式的平均换乘时间比“T”形大;三线换乘站中三角形布置形式的平均换乘时间最大,“大”字形次之,“一”字形最小。结合典型城市的轨道交通网络和换乘枢纽设计方案,对不同线网形态和换乘方式对换乘便捷性和换乘效率的影响进行了实证分析。



第五,研究了城市轨道交通在对外交通枢纽的竞争力。通过对枢纽集疏运体系中不同交通方式的特点比较,提出了城市轨道交通在机场枢纽和铁路枢纽中的竞争力模型,并根据调查数据对模型相关参数进行了标定。结合典型机场和铁路车站进行了城市轨道交通运营组织优化的案例研究,从换乘改善和票价调整的角度研究了提高城市轨道交通竞争力的措施及效果。

本书是在北京交通大学城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室、人民交通出版社股份有限公司的支持下完成的。研究过程中得到了国家基础研究计划项目“大城市综合交通系统的基础理论与实证研究”(2012CB725406)和国家自然科学基金重点项目“区域综合交通系统运行管理及建模方法”(71131001)的资助,得到了北京交通大学毛保华教授、孙全欣教授的悉心指导,得到了北京交通大学城市轨道交通系柏赞副教授、李明高博士、戒亚萍博士、唐继孟博士、陈垚博士的热心帮助,得到了人民交通出版社股份有限公司各位领导和同事的关怀和鼓励。作者在此谨表衷心感谢。



目 录

1 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 研究对象及研究目的	4
1.3 国内外研究现状分析	7
1.4 研究的主要内容与框架	16
2 城市轨道交通客流强度影响因素与特征研究	19
2.1 客流强度的内涵及其影响因素	19
2.2 基于灰色关联度的影响因素重要度分析	27
2.3 客流强度特征分析	48
2.4 本章小结	59
3 换乘效率对城市轨道交通吸引力和乘客行为的影响	62
3.1 城市轨道交通的换乘过程分析	62
3.2 换乘效率对轨道交通竞争力的影响分析	67



3.3	换乘效率对乘客路径选择行为的影响	74
3.4	本章小结	85
4	城市轨道交通网络换乘组织研究	87
4.1	线网形态对换乘便捷性和出行效率的影响分析	87
4.2	车站换乘方式对乘客换乘时间效率的影响	98
4.3	实证研究	113
4.4	本章小结	126
5	城市轨道交通与城市对外客运枢纽的衔接研究	128
5.1	城市大型对外客运枢纽集疏运交通方式结构	128
5.2	城市轨道交通在航空枢纽集疏运体系中的竞争力分析 ...	139
5.3	城市轨道交通在铁路枢纽集疏运体系中的竞争力分析 ...	149
5.4	本章小结	157
6	结论与展望	159
6.1	内容总结	159
6.2	研究的创新点	162
6.3	未来展望	164
	参考文献	165
	附录	177

1 绪 论

1.1 引 言

我国城市化与机动化水平不断攀升，为社会经济发展带来了契机，也引发了交通拥堵和空气质量下降等城市问题。2013 年，全国城市化水平达到 53.7%，汽车保有量达到 1.37 亿辆，汽车占全部机动车比率达到 54.9%，比 10 年前提高了 29.9%。全国有 31 个城市的汽车数量超过 100 万辆，其中北京、上海、广州、天津、成都、深圳、苏州、杭州 8 个城市汽车数量超过 200 万辆，北京市汽车超过 500 万辆。城市轨道交通作为提升城市交通运行效率和实现节能减排的重要方式，是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。

我国第一条城市轨道交通线路北京地铁一期工程 1965 年 7 月 1 日动工。不过，在 2000 年之前，我国大陆地区仅有北京、天津、上海、广州拥有城市轨道交通运营线路。进入 21 世纪之后，随着国家经济发展水平的提高和城市化进程的加快，我国城市轨道交通进入快速发展时期，建设速度显著加快。据中国城市轨道交通协会统计，到



2013 年年底,我国内地已有 19 个城市开通了 87 条(包括上海磁浮线及成都市域快轨成灌线)城市轨道交通线路,运营总里程达到 2 539 km;其中上海、北京的网络规模超过 400 km,广州超过 200 km,深圳、重庆、天津、成都、沈阳超过 100 km(表 1-1)^[1]。

表 1-1 2013 年年底我国城市轨道交通运营里程及运量水平

城市名称	运营里程 /km	客运量 /(亿人次/年)	城市名称	运营里程 /km	客运量 /(亿人次/年)
北京	465.0	32.1	武汉	72.7	2.2
上海	577.3	25.0	苏州	51.3	0.4
广州	246.4	19.9	长春	48.3	0.5
深圳	178.3	9.1	杭州	48.0	1.2
重庆	169.9	3.1	西安	45.9	0.5
天津	138.8	2.4	昆明	40.1	0.1
成都	115.2	2.4	郑州	26.2	n. a.
沈阳	115.1	0.7	哈尔滨	17.5	n. a.
大连	86.6	0.4	佛山	14.8	n. a.
南京	81.6	4.5	合计	2 539.0	104.6

注:客运量为 2013 年地铁客运量数据,其中大连轨道交通客运量为 2012 年数据。

资料来源:文献^[2]。

与此同时,还有 17 座城市已获准修建城市轨道交通。城市轨道交通在城市综合交通体系中的骨干地位以及对城市发展的战略支撑作用逐步显现。

与一般公共交通运输方式相比,轨道交通投资大、建设周期长。科学地进行轨道交通网络布局和建设规模规划,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。作为城市轨



道交通规划的关键参数,线路客流强度是指轨道交通线路单位运营长度上平均每日的载客量,在一定程度上体现了运营效率。由于途经区域的差异,不同线路客流强度存在一定差异,这直接影响着线路与车站建设规模及设备选型,并进一步影响整个网络的运输能力和运营组织方式选择。

截至 2013 年年底,世界大城市轨道交通客流强度在 3.0 万人次/ $(\text{km} \cdot \text{日})$ 的线路不到 20 条,占全球城市轨道交通线路的比例低于 3.0% ,这些线路基本上位于城市核心区^[3]。我国各大城市尽管有较好的人口规模基础,但并非多数线路都具有发展到 3.0 万人次/ $(\text{km} \cdot \text{日})$ 及其以上客流强度的环境潜力^[4]。对多数大城市来说,轨道交通成网并进入运营成熟期后客流强度达到 2.0 万人次/ $(\text{km} \cdot \text{日})$ 及其以上的线路数量一般难以超过全网的 40% 。因此,有必要研究不同类型城市轨道交通线路的客流强度规律,进而避免新线建设规模过大导致运能浪费或建设规模过小、不满足实际运营的需要^[5,6]。

作为公共交通系统网的重要组成部分,城市轨道交通对城市内部发挥着快速骨干线路的作用,承担城市内部干线运输任务。从整个城市循环角度来看,城市轨道交通又是对外交通良好的接续运输手段,是机场、高速铁路在城市的有力集疏运工具。伦敦希斯罗机场后方有皮卡迪利(Piccadilly)地铁线,该线全长 71 km ,跨越整个伦敦城区,与其余 11 条的地铁线中的 9 条相交,形成了良好的换乘关系。东京成田机场的轨道交通线路全长 51.4 km ,连接 9 条城际铁路线与高速铁路线。

我国不少城市的轨道交通网络已经或即将进入网络化运营阶段。网络化运营条件下,城市轨道交通换乘站的效率和服务水平对城市轨道交通网络运营效率和线网整体服务水平有着重要的影响。目前,国内多个大城市轨道交通线网的陆续形成,客流网络化特征已经逐步显



现,乘客在轨道交通网络中的出行时空分布特征及出行路径选择行为均发生了较大变化。以北京为例,2007年地铁5号线投入运营前的里程为114 km,5号线运营后客流增势迅猛,到2010年的短短三年,客运量几乎增长了1倍。后面开通的10号线、4号线的情形也如此,几乎完全颠覆了此前几条线路客流增长的基本规律^[7]。

为提高我国城市轨道交通线网的网络化运营水平,充分发挥城市轨道交通的作用,有必要深入分析换乘设施布局对提高轨道交通网络吸引力和乘客路径选择行为的影响,为科学合理地做好城市轨道交通网络的合理规划、优化城市轨道交通换乘组织方案提供依据。

1.2 研究对象及研究目的

1.2.1 研究对象

本书以城市轨道交通客流演变规律与换乘组织的相关问题为对象开展研究,主要内容包括以下几方面。

(1) 城市轨道交通网络及线路客流强度的规律研究

拟从网络与线路两个层面分析城市轨道交通建设与发展的机理,分析不同城市轨道交通系统功能与网络规模的关系,剖析轨道交通线路客流量演变与整个网络化建设进程、城市土地利用之间的互动关系。

本书将根据城市轨道交通线路在城市中的具体区位,在论述城市



轨道交通线路客流强度基本内涵与基本特征的基础上,分析客流强度的影响因素及其重要度水平,剖析不同线路客流强度的演变规律,并以国内外典型城市轨道交通为案例,从实证角度分析提炼不同类型网络与线路的客流强度特征。

(2) 城市轨道交通换乘效率及其对乘客出行行为的影响

拟结合实例提出城市轨道交通系统换乘效率的评价方法,分析网络换乘效率变化对轨道交通市场竞争力或公交吸引力的影响,并建立相应的评估模型,研究换乘对乘客路径选择行为的作用。

本书将根据公共交通运行的特点,构建城市轨道交通在城市公共交通体系中的竞争力模型,研究换乘效率改善对城市轨道交通吸引力的影响;分析轨道交通换乘时间效率对乘客行为的影响,比较乘客对换乘时间不同组成部分的感知差异,研究换乘次数、步行时间、候车时间对出行者路径选择的影响。

(3) 城市轨道交通线网形态及换乘组织方法

在上述研究的基础上,从城市轨道交通线网规划和车站设计两个层面出发,研究不同网络形态和车站换乘方式下的乘客换乘便捷性和换乘时间效率。结合典型城市的轨道交通网络和换乘枢纽设计方案,对不同线网形态和换乘组织方式的效果进行实证分析。

本书将从实证角度出发,结合典型城市的线网形态,分析不同类型网络对乘客出行换乘便捷性的影响。从通勤乘客的心理感受出发,分析换乘过程及其涉及的各要素对整个出行的影响机理,并建立相关模型。具体研究不同类型换乘站设计方案下乘客流线组织的效率及其对服务水平的影响,并结合实际案例提出合理化的换乘站设计方案。

(4) 城市轨道交通与城市对外交通枢纽的衔接研究

作为公交一体化的重要内容,对外交通与城市交通衔接的改善具



有重要现实意义。通过研究国内外典型有城市轨道交通的对外交通枢纽的集疏运体系交通方式构成,分析对外交通枢纽集疏运方式的结构现状。比较对外交通枢纽集疏运体系中不同交通方式的特点,建立城市轨道交通对改善对外交通枢纽竞争力的评估模型,并从票价调整和换乘改善角度,分析提高轨道交通竞争力的潜力,最后结合典型铁路车站和机场枢纽进行案例分析。

本书将以实例为基础,分析并评估部分对外交通枢纽的交通设计方案,最终提出可提高对外交通枢纽服务水平的方案。

1.2.2 研究目的

本书的研究具有以下几方面的理论和现实意义:

首先,分析不同类型的城市轨道交通网络与线路的客流强度,可以掌握城市轨道交通系统与城市发展的互动关系,有助于科学合理的规划城市轨道交通线路建设规模、经济合理地制定城市轨道交通运营组织方案,完善轨道交通线网的规划技术与方法。

其次,研究城市轨道交通网络的换乘效率,剖析城市轨道交通换乘效率对出行者交通方式选择的影响,分析评价轨道交通线网内不同路径以及轨道交通与其他公共交通方式的竞争力,研究适合不同类型网络的换乘站设计方案,不仅有助于深化分析轨道交通出行选择行为,改善城市轨道交通的运行服务水平,还可以为提高轨道交通方式竞争力提供理论依据。

最后,研究城市轨道交通与对外交通枢纽的衔接,探讨机场和铁路车站的轨道交通运营组织,可以为提高轨道交通在城市对外交通枢纽集疏散体系中的竞争力、缓解机场或铁路枢纽附近的城市交通拥堵提供理论依据。



1.3 国内外研究现状分析

自伦敦 1863 年建成第一条地铁线路以来,国外城市如伦敦、纽约、巴黎、东京等在 20 世纪 60 年代前后就已基本完成城市轨道交通线网的建设,这些城市的轨道交通线网已经进入网络结构与客流规模均相对稳定的发展阶段。我国的城市轨道交通建设以 1965 年动工、1969 年开通的北京地铁 1 号线为起点,虽然也经过了 40 余年的发展,但限于经济发展水平,真正的有规模的建设阶段实际上应是从 20 世纪 80 年代才开始的。20 世纪 90 年代以来,尤其是 2003 年 9 月国务院办公厅发布关于加强城市快速轨道交通建设管理的通知(国办发〔2003〕81 号)以后,我国各大城市进入了城市轨道交通的快速发展期。

总体上看,我国对于城市轨道交通发展的研究虽然成果不少,但多层次的综合性研究较少,对于城市轨道交通客流强度、网络换乘方案规划设计、对外交通枢纽衔接方面的实证还需要进一步深入研究。

1.3.1 既有研究进展

目前国内外关于轨道交通客流演变规律和换乘组织实践相关问题的研究,可以从以下四个方面来进行分析和评述。

(1) 城市轨道交通客流强度及其机理的研究

城市轨道交通客流演变规律的研究大致可以分为两个部分:客流