

卓越管理论丛

城市轨道交通枢纽运营 效率管理研究

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG SHUNIU YUNYING
XIAOLU GUANLI YANJIU

汪明艳 汪泓 刘志刚 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

我国城市轨道交通建设已进入网络化运营管理阶段。提高城市轨道交通运营效率,才能更好地发挥轨道交通网络系统的整体运营服务能力和保证安全运行。本书完善了我国城市轨道交通运营管理理论体系,并结合上海城市轨道交通运营系统的实际运行状况,从乘客的换乘效率、节假日大型活动的运营保障和运营系统风险防范等方面,提出对城市轨道交通运营效率优化的理论方法与改善措施,以期能够改善城市轨道交通运营系统存在的交通问题,使城市轨道交通运营管理实现可持续发展。本书可供相关研究人员及城市轨道交通管理部门参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通枢纽运营效率管理研究 / 汪明艳,汪泓,刘志钢著. —上海: 上海交通大学出版社, 2017.
ISBN 978-7-313-18022-3

I. ①城… II. ①汪… ②汪… ③刘… III. ①城市铁路—交通运输中心—交通运输管理—研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 209273 号

城市轨道交通枢纽运营效率管理研究

著 者: 汪明艳 汪 泓 刘志钢	
出版发行: 上海交通大学出版社	地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030	电 话: 021-64071208
出 版 人: 谈 毅	
印 制: 上海天地海设计印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 710 mm×1000 mm 1/16	印 张: 10.5
字 数: 178 千字	
版 次: 2017 年 9 月第 1 版	印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-18022-3	
定 价: 45.00 元	

版权所有 侵权必究
告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 021-64366274

前 言

随着我国城市轨道交通运营规模的增长,轨道交通运营线路交汇而成的枢纽成为轨道交通运营系统的关键节点和大量客流的聚集地。而枢纽的换乘站数量和客流量的增加,为枢纽客运组织带来了新的管理压力。所以,本书以提高枢纽客运组织的高效换乘和快速应急处置为研究目标,以轨道交通线网换乘的枢纽及其运营空间的客流为研究对象,分别对枢纽客运组织中的正常运营状态下的枢纽换乘效率、枢纽客运组织中的运营风险、异常运营状态下的枢纽突发大客流应急处置等方面开展讨论和研究。本书主要研究内容如下:

第一,在对国内轨道交通网络化运营现状分析的基础上,分析论述了枢纽客运组织中亟须解决的问题;界定了本书的研究对象和范围;回顾和评述了国内外相关研究成果,确定了研究结构和技术路线。

第二,界定了轨道交通枢纽客运组织运营效率、换乘效率、应急处置等相关概念,并对 DEA 模型、Petri 网和博弈论进行了介绍。

第三,分析了轨道交通枢纽的运营特性,并对影响枢纽客运组织运营效率的大客流特征、枢纽换乘模式及分类、枢纽应急处置特点进行了分析;剖析了枢纽客运组织运营效率的影响机理。

第四,构建了面向服务的运营方和乘客两个角度的换乘效率评价视角,建立并标定了换乘效率的 DEA 模型;并在实证分析的基础上提出了枢纽换

乘的优化配置和管理建议。

第五,在我国城市轨道交通运营事故的统计分析和事故致因理论基础上构建了轨道交通运营突发事件的事故致因模型;利用演化博弈论研究了枢纽运营中的运营方、乘客、员工三方的风险博弈,并提出风险防范策略。

第六,构建了枢纽运营突发事件应急处置能力模型;利用 Petri 网建立枢纽突发大客流应急处置流程,并对该流程的有效性和应急响应时间进行分析;利用动态博弈论对突发大客流的公交应急资源调度进行研究和算例分析;最后提出提升枢纽客运组织应急处置效率的建议。

本书创新点主要体现在以下几方面:

(1) 从运营方的服务能力和乘客感知的服务水平这两个研究视角进行枢纽换乘效率评价,改变了前期学者对二者独立分开研究的局限,完善了换乘效率评价理论。

(2) 构建了轨道交通运营突发事件的事故致因模型,该模型较好地分析了人—设备—环境—管理的致因影响,并将演化博弈应用于轨道交通安全运营策略分析中。

(3) 随机 Petri 网和动态博弈理论在枢纽突发大客流的应急处置中的运用,为枢纽应急处置管理提供了理论和方法支撑。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	研究对象与范围	7
1.3	国内外研究现状	9
1.4	主要内容与研究方法	19
1.5	技术路线与研究结构	21
第 2 章	城市轨道交通枢纽客运组织运营效率相关理论基础	24
2.1	城市轨道交通运营效率的相关概念	24
2.2	城市轨道交通枢纽客运组织的运营效率相关概念界定	28
2.3	DEA 模型介绍	32
2.4	Petri 网概述	36
2.5	博弈论概述	40
2.6	本章小结	43
第 3 章	城市轨道交通枢纽客运组织运营特性分析	44
3.1	城市轨道交通枢纽运营管理特点	44
3.2	城市轨道交通枢纽客运组织运营效率的关键影响因素分析	46
3.3	城市轨道交通枢纽客运组织运营效率机理分析	50
3.4	本章小结	52
第 4 章	城市轨道交通枢纽换乘效率评价研究	53
4.1	面向服务的城市轨道交通枢纽换乘效率研究视角	53
4.2	城市轨道交通枢纽的换乘效率影响因素分析	54

4.3	换乘效率评价指标体系的构建	56
4.4	换乘效率评价模型的选择	62
4.5	基于 DEA 模型的换乘效率评价分析	65
4.6	实证研究	67
4.7	提升轨道交通枢纽的换乘优化策略	81
4.8	本章小结	83
第 5 章	城市轨道交通枢纽客运组织风险及博弈分析	85
5.1	城市轨道交通运营突发事件事故致因模型的构建	85
5.2	城市轨道交通枢纽客运组织的三方演化博弈期望	90
5.3	城市轨道交通枢纽客运组织的三方演化博弈分析	93
5.4	加强枢纽客运安全的风险防范策略	104
5.5	本章小结	106
第 6 章	城市轨道交通枢纽突发大客流应急处置研究	107
6.1	城市轨道交通枢纽突发事件的应急处置能力模型构建	108
6.2	基于 Petri 网的突发事件应急处置流程分析	109
6.3	基于 Petri 网的突发大客流应急处置流程研究	115
6.4	基于动态博弈的公交应急资源调度模型分析	126
6.5	基于动态博弈的突发大客流应急资源调度算例分析	128
6.6	提升枢纽应急处置效率的策略	135
6.7	本章小结	138
第 7 章	研究结论与展望	139
7.1	主要研究结论	139
7.2	主要创新点	142
7.3	研究展望	142
参考文献		144
索引		157
后记		159

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

城市轨道交通系统为城市提供了快捷、环保、舒适、安全的大容量客运交通方式,“十二五”时期在我国“大交通”的发展背景下,我国城市轨道交通进入快速建设的发展时期,国内很多大中城市将建设和发展城市轨道交通运营系统作为城市实施公交优先战略的重点,从而加快完善城市交通路网的建设。2012 年末,我国已有 17 个城市拥有了 64 条建成并已运营的轨道交通线路,总里程达 2 008 km,另有 29 个城市 82 条线路(含续建段)正在建设中,总里程超过 1 900 km。“十二五”期间,城市轨道交通线路将增加至 3 500 km,到 2020 年的规划线路将达到 6 100 km^[1]。

在各个城市快速扩大轨道交通建设规模的同时,城市轨道交通运营管理模式已由单线运营逐渐发展成为网络化运营模式,即形成了多条轨道交通运营线路交叉换乘及轨道交通与其他交通方式换乘一体化的网络运营模式。目前国内大多数的轨道交通枢纽都是 2 线或 3 线运营线路交汇的,在上海已运营的轨道交通线网中,2 线运营线路交汇的枢纽占全部枢纽的比例高达 90%。在一些国际化大都市中,如纽约、伦敦、东京等也有一定数量由 4 条或 4 条以上的轨道交通线路交汇构成的轨道交通枢纽。在日本东京乘坐轨道交通出行的乘客中,90%以上都需要在不同的轨道交通线路间换乘。

随着城市轨道交通运营线网规模的集中扩张和居民出行方式的改变,轨道交通承担的客运负荷不断攀升,换乘客流量也随之迅猛增长。上海目前已初步形成“中心城十字加环、中心城三横六纵、外围区八向辐射”的轨道交通网络运营形态。2012 年上海市轨道交通线网已开通运营 12 条线(不含 22 号线),287 座

车站,运营里程达到 439 km。随着轨道交通线网交叉的网络化运营出现,我国城市轨道交通枢纽的客运组织管理也呈现了新的发展趋势:

1) 轨道交通线网运营规模的扩大,使路网客流量和换乘客流量持续增长

以上海轨道交通运营系统 2008 年至 2012 年的客流统计情况^[1],如表 1.1 所示的 2008—2012 年轨道交通路网客流及日均换乘客流统计表和图 1.1 的相应增长趋势图所示,2008 年上海轨道交通日均客流 306.79 万人次,2012 年已经达到 621.6 万人次,5 年内增长了 102.61%;而 2008 年日均换乘客流 92.16 万人次,2012 年达到 244.87 万人次,5 年内增长了 165.70%,这些统计数据表明了日均换乘客流的增长率远远超过了路网日均客流量的增长速度,因此随着城市轨道交通线网规模的增长,使轨道交通枢纽的客运组织面临着巨大的客流管理压力。

表 1.1 2008—2012 年度上海轨道交通路网客流及换乘客流情况

	日均路网总客流(万人次)	日均换乘客流(万人次)
2008 年度	306.79	92.16
2009 年度	360.39	116.08
2010 年度	521.07	209.15
2011 年度	576.04	224.15
2012 年度	621.60	244.87
增长率	102.61%	165.70%

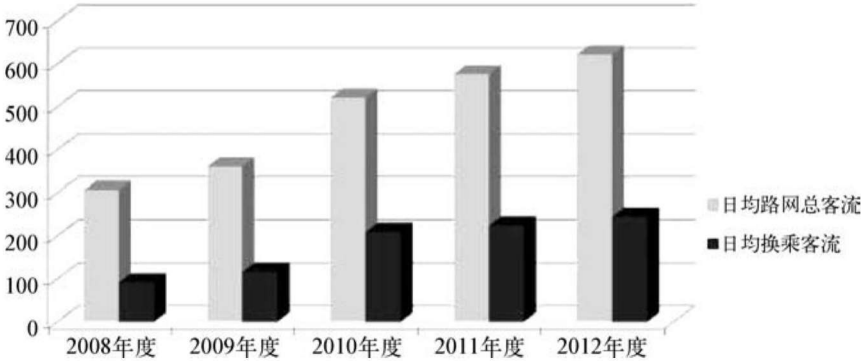


图 1.1 2008—2012 年度上海轨道交通路网客流及换乘客流情况

2) 轨道交通运营规模增长,枢纽成为运营网络的关键节点且枢纽的换乘站数量不断增加

根据《上海市城市轨道交通近期建设规划(2010—2015)》,2015 年上海轨道

交通运营线路已达到 18 条,线路总长超过 780 km,车站数量达到 350 座,网络枢纽车站达到 78 座,日客流量超过 1 000 万乘次,预计到 2020 年,路网线路将达到 22 条,车站数量共计 500 余个,其中换乘站将达到 105 个,其中三线以上的换乘站多达 18 个,上海虹桥机场站将成为五条轨道交通线路和 1 条沪杭磁浮线交汇形成的六线的大型枢纽^[1]。届时上海轨道交通运营系统承担公共交通客运总量的比率将到达 50%,成为市民出行的首要交通工具。

3) 轨道交通分担城市大型活动的客流运输比例逐年上升,枢纽的高密度客流的安全运营成为整个线网安全运输的关键节点

上海作为一个国际化大都市,随着社会经济的发展,城市中以大型文化体育活动、会展、博览会、节假日大型庆典等为代表的大型活动举行次数日趋频繁,规模也不断扩大。2010 年上海世博会入场人数达到 7 000 余万人次,其中公共交通分担的客流比例达到 95%,而其中轨道交通分担的客流比例接近 50%;2012 年 F1 中国大奖赛期间,轨道交通分担了 64%的进散场观赛人数比例。近几年城市大型活动客运运输中轨道交通承担的集散比例逐年上升,观众专线承担的客流比例逐年下降,而这些客流量都需要通过轨道交通枢纽换乘才能到达目的地。

上海作为国内率先进入到城市轨道交通网络化运营的城市之一,上海城市轨道交通运营系统具有典型的网络运营特点^[2]:轨道交通网络化运营的锚固节点就是枢纽,枢纽区域不仅含有多条线路的进出站客流,还有线路之间的换乘客流,因此导致枢纽的客流密度高、交织冲突的特征明显。随着枢纽客流的不断增加,枢纽运营状态会从正常有序状态变成拥挤无序甚至引发事故的异常运营状态,从而导致枢纽局部或者整个运营路网的运营安全受到影响。因此网络化运营中枢纽的高效、安全的客运组织管理会对整个线网实现高效、安全的运营管理起到至关重要的作用。

客运组织服务是运营管理中直接面对乘客的服务工作,是乘客对运营服务质量最直接的感受,贯穿从乘客进入轨道交通系统一直到安全离开该系统的全过程。因此,正常运营状态下枢纽的换乘效率对城市轨道交通网络化运营效率和线网运营的快捷、舒适和安全服务质量会产生直接影响。同时随着城市轨道交通枢纽类型的增多、服务区域的不断扩大、客流换乘比例的加大,枢纽在面对节假日、大型活动及运营事故突发等紧急情况时,会导致枢纽区域的客流拥堵、踩踏等事故,因此加强枢纽突发客流应急处置研究也成为枢纽客运组织管理中的重要问题之一。

基于以上轨道交通网络化运营现状和客运组织管理中亟须解决的实际问题,本书研究的应用背景以“现代城市交通运行管理”学科平台、上海市科委“城市轨道交通智能应急调度指挥系统设计与开发”项目为依托,从提高城市轨道交通枢纽客运组织运营管理中的“换乘服务质量和应急处置能力”的角度出发,以城市轨道交通枢纽客运管理在正常运营状态下的换乘效率和在异常运营状态下的突发大客流应急处置的实际问题开展理论和应用研究,进一步完善城市轨道交通枢纽的客运组织的运营管理理论。

1.1.2 问题提出

城市轨道交通系统作为社会中的公共产品,其系统具有的准公共产品的服务特性体现在交通属性上的表征是能够承担乘客出行并实现大客运量转移的“高效、安全”的客运组织服务。城市轨道交通所具有的交通效益是以提供便捷、舒适、安全服务质量的运营服务特征所表现^[3]。而城市轨道交通系统所具有的社会和经济效益也是在交通效益的基础上发展而来的。因此枢纽客运组织的运营效率成为影响整个运营线网实现高效、安全运营服务的关键点。

目前,我国北京、上海、广州三个城市的轨道交通骨干网络已经形成,我国城市轨道交通运营模式已由“线路型”向“网络化”转变。枢纽是城市轨道交通实现线路换乘的运营空间和运营线网交叉的节点。城市轨道交通线网规模的扩大导致了枢纽数量的不断增长和大客运量的增加。在城市轨道交通既定的线网规模条件下,枢纽空间的高密度客流的客运组织成为制约城市轨道交通线网总体运营效率的主要瓶颈。因此轨道交通枢纽客运组织的运营效率在运营网络中的重要性日益凸显。

1) 轨道交通枢纽客运组织管理面临着高密度客流的管理压力

(1) 从图 1.1 的统计数据可以看出,枢纽换乘客流的增长率大于路网的客流量增长,这表明枢纽的换乘管理面临较大的客运压力。轨道交通枢纽换乘效率直接反映了枢纽的客运服务质量,也对轨道交通系统整体运营效率产生重要影响。

随着城市轨道交通线网规模的不断扩张及枢纽客流的快速增长,枢纽作为实现轨道交通功能转换的关键节点,如何对枢纽的换乘效率进行有效评价,并发现制约其换乘服务提升的关键影响因素已成为轨道交通网络化运营管理亟须解决的问题。

城市轨道交通枢纽换乘效率不仅直接影响到上百万乘客的出行便捷和出行

安全,同时也是城市轨道交通规划设计和管理水平高低的重要体现。从我国轨道交通枢纽的实际建设和运营状况来看,运营方对已建成的各枢纽换乘效率现状并没有进行较大规模的实际运营评价和分析。由于城市轨道交通投入和建设规模较大,对已建成并投入运营的枢纽换乘效率评价分析,发现制约换乘效率提升的关键瓶颈及解决途径,对于提高轨道交通网络化运营效率具有紧迫的现实意义。

城市轨道交通运营系统的交通效益是通过客流组织来体现的,因此城市轨道交通枢纽的换乘效率需要以提升换乘服务质量为目标。服务质量是运营方供给的资源、管理体现的服务能力在乘客感知的服务水平中的一种体现。但是目前国内关于城市轨道交通枢纽的换乘效率评价研究,主要是基于乘客感知的服务水平开展换乘效率的分析评价。目前从运营方和乘客两个研究角度对轨道交通枢纽换乘效率开展评价的理论研究较少。

(2) 轨道交通运营中的大客流风险、客伤风险成为枢纽安全运营的主要风险源。

根据《上海轨道交通网络运营生产简报(2009—2013年)》以及历年发生的安全事故进行统计分析,影响上海轨道交通安全运营的主要风险包括:大客流风险、设施设备故障风险、客伤风险、火灾风险、列车相撞或脱轨风险、外部入侵风险、公共安全风险以及自然灾害风险等。而大客流风险的危险源主要来自枢纽。轨交枢纽不仅有单线运营站点的进站和出站的客流,还汇集了各相交线路之间的换乘客流,是人流密集的集聚点。随着城市轨道交通建设规模、运营线路的不断增加,城市轨道交通系统发生事故的风险也愈来愈大。因此如何从高效的应急处置的角度建立科学合理的应急处置流程预案和有效疏散乘客的应急资源调度成为城市轨道交通枢纽客运组织管理中提高灾害防御和应急处置能力的重要问题。

随着城市轨道交通“网络化效应”凸显,多条线路高峰时段客流量远大于运力的增量,高密度客流站点主要集中分布在枢纽。因此由于突发事件导致枢纽在异常运营状态下应对大客流应急处置问题更加凸显。加强枢纽的风险防控分析,制定合理有效的大客流应急处置流程预案,实现枢纽区域大客流应急疏散的资源调度成为轨道交通枢纽紧迫的应急保障问题之一。

但是目前国内外城市轨道交通系统安全防护措施只能参考和借鉴铁路及其他行业的安全保障做法,仅在项目设计、制造、施工、开通、试运营几个关键节点,参照各类技术规范、标准来审核系统的安全性。近年来,学者和运营方也开始重

视轨道交通突发事件的应急管理,但是国内城市轨道交通的灾害事故应急救援机制仍不完善。随着轨道交通网络化的发展,关于枢纽的大客流突发事件的应急处置还缺乏关于应急处置流程预案、枢纽的大客流疏散的理论研究。

2) 本书试图解决的问题

本书以提高轨道交通枢纽的换乘服务质量和应急处置能力、高效、安全的枢纽客运组织运营效率为研究目标,试图解决的问题包括:

(1) 影响轨道交通枢纽客运组织运营效率的主要因素有哪些? 如何对枢纽客运组织运营效率影响机理进行分析?

(2) 影响换乘效率的因素如何确定? 已运营的轨道交通枢纽的换乘效率水平如何? 提升换乘优化的策略是什么?

(3) 如何构建轨道交通运营管理中的事故致因模型,对枢纽客运组织管理中的人为因素风险防控的分析?

(4) 如何建立有效的针对枢纽突发大客流的应急处置流程并实现有效的应急资源调度?

在本书后续的研究中,为了使问题表述更为方便和清晰,会以上海轨道交通运营系统为例进行问题描述。上海轨道交通运营系统具有网络规模性、客流集聚性及管理主体多元性的特征,这些因素都导致客运的管理难度增加,从而使得提升轨道交通换乘效率和枢纽应急处置能力的重要性也格外迫切。但是这不影响本书所用的研究方法和研究结论在国内其他城市轨道交通系统的适用性。

1.1.3 研究意义

本书以提高城市轨道交通枢纽客运组织的“换乘服务质量、应急处置能力”为目标,在轨道交通枢纽正常运营和异常运营状态下,分别从提升换乘效率和加强突发客流应急处置能力对城市轨道交通枢纽客运组织运营效率开展研究。本书的研究在理论和应用上都具有较强的意义。

1) 理论意义

(1) 推动了面向服务质量的枢纽换乘效率理论的进一步深入研究。城市轨道交通的运营生产是以为乘客提供出行服务为目的,客运服务是轨道交通运营管理过程的最直接和最终体现。本书基于效率理论和服务质量理论,结合城市轨道交通运营管理现状,从公用服务的角度剖析影响轨道交通运营效率的机理,并在此基础上,进一步提出轨道交通枢纽客运组织的运营效率内涵。基于服务质量理论,从乘客、运营方两个评价主体分析枢纽的换乘效率的影响因素,建立

评价指标体系和可行性评价模型,并进行实证评价研究。该研究扩展了城市轨道交通枢纽的换乘效率评价视角,进一步推进了我国城市轨道交通运营效率理论研究的发展。

(2) 完善了枢纽突发事件的应急管理理论研究。本书基于事故致因理论,从宏观层面上构建轨道交通突发事件的事故致因模型。并针对轨道交通枢纽的客运服务过程所涉及的乘客、现场员工、运营方(这里的运营方特指运营管理控制人员)在面对风险防控管理中的利益冲突,探索利用演化博弈论建立三方的风险博弈分析,分析各利益群体之间的关系,揭示利益相关方决策的动因,为制定更有效的风险防控策略提供科学依据。

基于事故致因理论和突发事件应急管理理论,构建枢纽的突发事件的应急处置能力模型,围绕枢纽的应急处置能力模型,对直接影响应急处置效率的应急处置流程和应急资源调度进行研究,完善了轨道交通突发事件的应急处置理论。本书尝试用随机 Petri 网建立轨道交通突发大客流应急处置流程预案,并对模型的合理性进行验证;通过将影响应急流程效率的时间指标作为性能分析参数,求解突发大客流应急流程的响应分析,以提高系统的应急处置能力。利用动态博弈模型建立突发大客流疏散的应急资源调度模型。

2) 实际意义

在实际应用层面,本书选择国内具有网络化运营特征的上海城市轨道交通运营系统开展相关实证研究,研究结果可以指导和服务我国其他城市轨道交通枢纽的换乘优化和客运应急保障的管理需要,为城市轨道交通运营枢纽的换乘服务质量的提升和应急处置能力的提高提供理论和方法支持。

1.2 研究对象与范围

根据上述提出的研究问题,本节对研究对象和研究范围进行界定,并对相关的基本概念进行严格的定义。在下文后续的研究讨论中,都是围绕研究对象和研究范围界定的内容进行探讨研究。

1) 研究对象

(1) 本书研究的“换乘”。广义的交通“换乘”是指乘客在多种交通方式或者多条交通线路中选择从一条线路转换到另一条线路,或从一种交通工具转换到另一种交通工具。广义的枢纽换乘是指轨道交通与其他交通方式之间或轨道交

通线网中的各运营线路之间的多种换乘,包括轨道交通与其他公共交通工具或者私人交通方式的换乘,以及轨道交通网络中的各运营线路之间的换乘^[2],如图 1.2 所示。

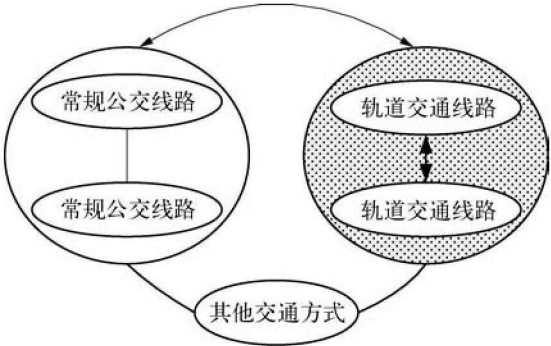


图 1.2 交通枢纽内全部换乘行为

本书研究的“换乘”是指城市轨道交通运营线路交织的运营空间中的轨道交通各换乘站之间的换乘,如图 1.2 阴影部分所示。

(2) 本书研究的“枢纽”。本书研究中的“城市轨道交通枢纽”是指城市轨道交通线网架构中各条运营线路的交叉点,能为乘客提供换乘功能的轨道交通车站空间。选取换乘客流量最大、仅涉及轨道交通线路之间的枢纽作为研究对象,包括地铁、轻轨、郊区快速铁路之间相互衔接的客运枢纽。

城市轨道交通枢纽的换乘实质是枢纽中各换乘站之间的换乘,每一个换乘站换乘效率的高低将直接影响到其吸引客流的范围和其客运周转量的大小。

(3) 本书研究的“客运组织”。城市轨道交通是个开放、动态的复杂系统,涉及的管理因素有很多。轨道交通枢纽客运组织的运营管理会受到枢纽换乘站服务设施配置和布局、枢纽的运营管理、客流在枢纽空间的出行方向、乘客行为、列车运营计划等因素的影响。

本书主要针对城市轨道交通枢纽客运组织的“高效、安全”的交通属性,即从枢纽客运组织管理中的换乘效率和突发大客流的应急处置角度开展枢纽客运组织的运营效率相关研究,这两个研究角度也分别与城市轨道交通客运管理的正常运营和异常运营两种运营服务状态相对应。

2) 研究范围界定

针对上述研究对象的界定,本书研究范围以提高轨道交通枢纽客运的高效、安全的运营效率为目标,针对轨道交通枢纽客运服务中的两种运营服务状态开

展。本书的主要研究内容包括:①在正常运营状态下对轨道交通枢纽换乘效率的影响因素进行分析和对各枢纽(换乘站)进行换乘效率评价;②对轨道交通运营事故的风险致因进行分析;③在异常运营状态下对如何加强枢纽的突发大客流应急处置能力进行相关研究。

1.3 国内外研究现状

针对本书的主要研究内容,对国内外相关研究成果从两个方面来分别进行阐述:一方面是关于城市轨道交通枢纽的换乘效率研究现状分析,另一方面是枢纽的突发事件应急处置的研究现状分析。

1.3.1 城市轨道交通枢纽的换乘效率研究现状

关于城市交通枢纽,国内外学者主要是针对空港、铁路客运枢纽、轨道交通枢纽展开了研究,并取得了诸多研究成果。国内外学者在城市轨道交通换乘领域的相关研究集中在以下四个主要方向。

(1) 第一个研究方向以城市轨道交通线网形态和枢纽规划设计为研究对象,关注线网、枢纽的规划设计及轨道交通与其他交通方式的换乘衔接研究。学者的研究重点关注意于轨道交通线网的规划选择和设计^[4,5],轨道交通网络枢纽换乘形式的选择和换乘线网的规划决策优选模型研究^[6,7],车站换乘设施设计、换乘方向和枢纽分类对轨道交通线网运营产生的影响^[8,9]。学者也关注于枢纽区域的轨道交通与其他交通方式的换乘协调研究^[10,11]。Michael等(2004)通过对美国轻轨和其他交通方式的换乘研究,构建了多种运输方式的客流需求和分配预测模型^[12]。Spring(2010)构建了考虑连接换乘接驳服务的枢纽站换乘衔接等待时间模型^[13]。

(2) 第二个研究方向以轨道交通线网节点的枢纽空间的乘客或者换乘空间设施为研究对象,开展关于换乘服务水平和换乘效率的相关研究。学者通过分析影响换乘站内各线换乘效率的因素,重点讨论了换乘站的布局和设备设施对换乘服务水平产生的影响^[14-16]。根据乘客在换乘站的行走速度、拥挤程度、感知的安全和舒适性等因素,定义了乘客在行走中感知的服务水平^[17],并提出轨道交通服务水平应按照等级来划分,并提出了划分等级数学模型^[18]。学者通过定性和定量的方法建立换乘站换乘效率评价体系,选择相关评价模型进行换乘

效率研究^[19,20]。

(3) 第三个研究方向以线网的列车运营方案为研究对象,开展枢纽的列车运营优化研究。Assis 等(2004)、Castelli 等(2004)、Meyer(1965)通过对换乘空间的客流特征进行分析,以减少乘客换乘时间为目标分别提出了列车调度调整方案、分时段列车时刻表的优化方法^[21-23]。王修志等(2009),孙焰等(2004)对换乘客流在各条线路上的分布不均衡特征进行了分析,对列车交路选择和编组核心的行车优化方案进行了研究^[24,25]。Zhang 等(2009)基于系统的网络复杂性,以线网运营中的枢纽站为交叉的节点,从对整体运营线网的通达性,求解网络列车运能换乘时间最短的衔接模型^[26]。Mignone(2010)建立了数学模型求解线网运营中不同时段의快慢列车的协调运营方案^[27]。马超云(2010)利用遗传算法构建了以换乘等待的最短时间为目标的换乘协调模型,以对列车时刻表进行优化设计^[28]。

(4) 第四个研究方向以枢纽的客流为研究对象,对枢纽客流的组织优化开展研究。较早对换车站内的客流组织进行研究的 Chein(1995)建立了包括候车、换乘时间在內的乘客广义费用函数,并利用广义费用最小值对站内客流优化开展研究^[29]。学者 Gipps 等(1985),Lam(2000),李之红(2011)都对换乘设施对客流的行为影响开展研究,通过建立客流的仿真模型,研究乘客的个人行为特征,如步行行为特征及枢纽的布局设计对客流行走及换乘方式产生的影响^[30-32]。张建勋等(2007),贾洪飞等(2009)分别研究了枢纽运行空间的导向标识设计和设施设计对在轨道交通换乘出行的乘客的心理和行为的影响^[33,34]。Kavicka 等(2000)根据换乘设施带给乘客的心理、生理的影响研究枢纽的客流应急疏散模型^[35]。李得伟(2013)对大型铁路客运站的设施利用程度对乘客集散的影响进行研究,从乘客在站内行走过程的路径选择、节点选择和决策感知三个方面分别运用最小支撑子图求解路径选择、基于多项 LOGIT 模型的节点选择模型和构建乘客复杂行为决策感知表达式进行了研究,通过仿真分析得出可以通过改善站内设施和设备的利用降低客流量对运营服务水平的影响^[36]。

通过对国内外相关文献的分析,与本书研究范围相关的研究文献应属于上文归纳的第二个研究方向,即关于轨道交通枢纽的换乘服务水平和换乘效率的相关研究,本书将进一步对该研究方向的相关文献进行梳理分析。

(1) 基于乘客感知的服务水平的换乘效率研究现状。国内外学者及交通管理机构基于面向服务的研究角度,以乘客在换乘中感知的心理、行为的服务水平

为目标,开展了枢纽换乘效率的相关研究。美国交通研究机构分别于2000年和2003年(第二版)出版了《道路交通服务质量手册》,针对道路交通提出了换乘设施带给交通出行中的乘客感知的服务水平的概念,并对服务水平进行了界定^[37,38]。Landis等(2001)从行人感知的安全性和舒适性角度建立了服务水平评价的数学模型,对行人服务质量进行评价^[39]。以提高乘客服务水平为目标,学者Afarzadeh M.(2000)等^[14]通过对乘客感知的服务水平和交通运营方提供的换乘设施对换乘效率的影响进行了研究,提出了换乘站的换乘服务水平的概念,并从换乘设施、运营总成本和乘客期望值对乘客的最优换乘服务进行研究。Jodie Y S. Lee等(2001)^[40]建立了香港地铁换乘站高峰运营期间乘客在九类行人设施上的走行时间函数,仿真站内乘客行走的过程,研究结果认为车站位置、规划和车站的设施对提高服务水平有一定作用。Avishai Ceder(2004)^[41]提出实现对客流的有效疏导和客流组织是实现合理换乘的关键,并提出站内的设施布局、乘客的路径流线选择对枢纽的换乘效率会产生重要影响。

(2) 枢纽设施对换乘效率产生的影响研究现状。枢纽的内部设施也会对换乘效率产生影响。Bates(2001)等提出枢纽换乘客流量的变化与换乘设施之间有着较重要的相关性,对枢纽站的接驳设施的功能、配置提出了分类^[42]。Jodie Y S. Lee和William H. K. Lam(2003)根据换乘站内的楼梯设计和照明对乘客的偏好和行为产生的影响,提出站内设施是影响换乘服务质量的最关键因素^[43]。吴先宇等(2011)对轨道交通枢纽的设施布局和设施类型按照乘客在枢纽的活动区域进行分类,然后从枢纽集散性、乘客的个性化、乘客群体性、设施功能性、设施应用性和设施可靠性六个方面建立了枢纽设施布局的评价指标体系,建立仿真与评价系统,为城市轨道交通枢纽设计方案提供了技术评估^[44]。董玉香(2013)对北京西直门轨道交通枢纽从客流量、站内设施布局和标识设置等对枢纽换乘效率的影响进行分析,提出枢纽换乘设施和不同的换乘模式对换乘服务水平会产生重要影响^[45]。

(3) 枢纽的换乘效率评价指标体系和评价模型研究。在换乘效率的评价研究中,Muller和Furth(2009)从乘客在枢纽换乘中感知的候车时间角度^[46],王志臣(2008)从乘客感知的换乘时间、换乘距离角度建立换乘效率评价指标体系^[47]。学者也从枢纽的设施角度建立评价指标,王波等(2007)从城市轨道交通枢纽换乘站设施对整体服务水平和运营效率影响的角度,从枢纽设施能力适应性、换乘安全性和换乘便捷性三个方面建立了枢纽换乘站换乘设施的评价体系,并对评价进行了定量计算^[48]。王建聪(2006)通过分析枢纽换乘的通畅性、运行