

智慧交通与交通运输信息化系列丛书



李得伟

张琦

韩宝明

著

城市轨道交通 大客流风险动态控制

Dynamic Control of Passenger
Crowd Risk in Urban Rail Transit:
Theory and Methods

理论与方法



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

智慧交通与交通运输信息化系列丛书

城市轨道交通大客流风险动态控制理论与方法

李得伟 张 琦 韩宝明 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书比较全面和系统地介绍了城市轨道交通大客流风险动态控制理论与方法。全书共五章,主要内容包括:城市轨道交通客流风险基本内容介绍、客流信息采集技术、客流特征分析、实时客流预测理论及方法、客流风险评估与控制等内容。本书是作者多年科研实践的成果,包括理论研究和案例分析,内容逻辑完整。

本书可供城市轨道交通相关部门管理人员以及科研、运营、教学等部门的工程技术人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通大客流风险动态控制理论与方法 / 李得伟, 张琦, 韩宝明著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 12

ISBN 978-7-114-12692-5

I. ①城… II. ①李… ②张… ③韩… III. ①城市铁路—旅客运输—客流—风险管理 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 314438 号

智慧交通与交通运输信息化系列丛书

书 名: 城市轨道交通大客流风险动态控制理论与方法

著 作 者: 李得伟 张 琦 韩宝明

责任编辑: 张征宇 郭红蕊

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.25

字 数: 311 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12692-5

印 数: 0001~2000 册

定 价: 39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

我国城市轨道交通的迅速发展,对改善群众出行条件、解决城市交通拥堵、节约土地资源、促进节能减排、推进产业升级换代、引导城市布局调整、推动城市经济发展具有重要的作用。然而,大城市轨道交通发展面临重要的安全运营挑战,常态化和突发大客流冲击导致的大客流拥挤事故时有发生。由于拥挤踩踏事故的特点决定了城市轨道交通现场救援实时效果差,事前预防几乎是唯一有效的策略。为解决这一问题,本书尝试采用预测控制理论,对城市轨道交通路网上大客流的监测、分析、预测、预警和风险控制提出系统的解决方案。

基于“监测—预测—控制”的闭环控制框架,全书共分五章:第一章为绪论,主要介绍了城市轨道交通大客流风险动态控制的基本概念;第二章系统介绍了城市轨道交通客流监测和安全状态信息采集技术,包括采集内容、采集技术原理及其适用性;第三章通过对已运营的城市轨道交通系统的数据分析,介绍了城市轨道交通客流特征和规律;第四章系统介绍了实时客流预测理论,重点介绍了进站客流预测、动态 OD 矩阵估计、线网客流分布、设备客流分布预测的模型和方法;第五章介绍了城市轨道交通客流风险评估、预警与控制,重点介绍了基于客流密集度指数的客流风险评估理论及客流风险动态控制措施。为了便于读者理解,本书在撰写时采用了大量的案例和实际数据。

本书由北京交通大学李得伟、张琦、韩宝明主撰,全书由李得伟统稿。参加编写的人员还有禹丹丹、尹浩东、周玮腾、郑宣传、卢恺、易晨阳、王玫、王悦欣、许帆、荆敏、何红、杨文静、张琛。在此,对参加编写的人员表示感谢。

本书在出版及相关内容研究过程中,得到北京市科委项目(Z151100001315004)、北京市自然科学基金资助项目(9132015)、北京高等学校青年英才计划(YETP0555)和教育部基本科研业务费(2014JBM058, 2014JBZ008)资助,在此对上述机构表示感谢。

本书参考引用了许多国内外专家、学者发表的有关城市轨道交通的文献,部分城市轨道交通的运营资料及相关文献,在此谨向有关专家及部门致以衷心的感谢。

由于著作者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

著作者

2015年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 城市轨道交通系统概述	1
第二节 大客流风险动态控制的框架	8
第二章 城市轨道交通客流监测与安全状态信息采集	11
第一节 客流监测的作用及系统构成	11
第二节 客流安全状态信息监测与采集的内容	16
第三节 客流监测与安全状态信息采集技术	21
第四节 客流监测与安全状态采集技术的发展趋势	47
第三章 城市轨道交通客流分析	51
第一节 城市轨道交通客流分析概述	51
第二节 网络客流特征分析	59
第三节 线路客流特征分析	69
第四节 车站客流特征分析	81
第五节 设备客流特征分析	90
第六节 特殊运营条件客流特征分析	100
第四章 城市轨道交通实时客流预测	103
第一节 实时客流预测概述	103
第二节 进站客流量预测	110
第三节 客流动态 OD 矩阵预测	134
第四节 线网客流分布预测	139
第五节 车站客流分布预测	156
第五章 城市轨道交通大客流风险动态评估与控制	163
第一节 概述	163
第二节 基于客流密集度指数的客流风险评估与预警	164
第三节 客流风险动态控制	174
参考文献	201

第一章 绪 论

近年来,随着我国城市化进程的不断加快,生产要素逐渐向大城市高度聚集,导致大城市交通拥堵问题呈现爆发态势。为了解决这一问题,我国各大城市纷纷修建了城市轨道交通系统。

城市轨道交通系统能否在大城市中有效发挥其大运量的优势,根本上取决于其对居民出行的吸引力,取决于它是否能够适应广大城市居民安全、快速、方便、舒适的出行需求。然而,从目前我国主要城市轨道交通系统的运营实际情况来看,现有的城市轨道交通服务水平离这一需求还有很大的差距,并且出现了客流拥挤、旅行速度低、换乘不方便、突发事件下处置效率低等许多新的问题。导致这些问题出现的根本原因是城市轨道交通系统缺乏先进的运营技术。一味地强调新的设备和新的建筑形式,而忽略了运营技术的提升,先进的设备和落后的运营技术之间的矛盾日益加深,必将影响城市轨道交通系统资源效率的发挥,成为目前城市轨道交通系统面临的重要挑战之一。

现代电子技术和信息技术的发展,为构建先进的运营管理技术提供了技术支撑,利用电子技术实时监测运营状态、利用数学模型预测未来的运营状态,并进行针对性的系统预警和控制,已经成为解决这一问题的重要发展方向。本书针对目前城市轨道交通出现的大客流拥挤问题,运用“监测—预测—控制”的闭环控制技术,试图给出一个全新的系统性解决方案。

第一节 城市轨道交通系统概述

城市轨道交通系统是指在城市中的使用车辆在固定导轨上运行并主要服务于城市客运的轮轨交通系统,它具有运量大、能耗低、污染小、安全可靠等优势,特别适应于人口多、道路资源紧缺的大中城市。

一、城市轨道交通系统构成

(一)城市轨道交通系统的分类

根据运能范围、车辆类型及其基本技术特征的不同,城市轨道交通系统可分为地铁、轻轨、单轨、有轨电车、城市铁路、磁浮系统和新交通系统等7种类型。其中,最常见的是地铁和轻轨两种形式。

1. 地铁

地铁是由电气牵引运行的大容量快速轨道交通系统。其运营速度为30~60km/h,车辆最

大速度可达 80 ~ 100km/h, 车站平均站距为 600 ~ 2 000m, 最小发车间隔 1.5 ~ 3min, 最小运行时间间隔可达 75s, 单向运输能力在 3 万人次/h 以上, 最高可达 3 万 ~ 8 万人次/h。地铁通常运行在全封闭的地下隧道内, 或根据城市具体条件, 运行在地面或高架线路上。由于地铁运量大, 因此, 它通常修建于人口稠密的地区。

2. 轻轨

轻轨是指运量或车辆轴重稍小于地铁的轨道交通系统。其运营速度为 30 ~ 45km/h, 单向输送能力为 0.6 万 ~ 3 万人次/h, 适用于人口较密集的新城区、交通集散地、商业中心和区域中心的交通运输。

3. 单轨

单轨系统是指通过单一轨道梁支撑车厢并提供导引作用而运行的城市轨道交通系统。以支撑方式的不同, 单轨一般包括跨座式和悬挂式两种类型。其平均运行速度为 25 ~ 45km/h, 最高运行速度为 80km/h, 单向运输能力为 1 万 ~ 2 万人次/h, 最大爬坡能力可达 80%。由于爬坡能力强, 因此, 单轨系统特别适合于地形条件受限的大城市。

4. 有轨电车

有轨电车是使用电力牵引运行在城市路面线路上的中低运量轨道交通系统, 其最大特点是与道路共享路权, 因此造价低。有轨电车平均速度为 10 ~ 20km/h, 最大速度为 50 ~ 70km/h, 高峰发车间隔可达 2min, 单向运输能力约为 1.5 万人次/h。由于大多数有轨电车系统与道路平交, 极易与路面车辆发生冲突, 引起道路交通事故和交通拥堵, 所以其安全性和准时性较差。

5. 城市铁路

城市铁路是由电气或内燃牵引, 轮轨导向, 车辆编组运行在市区、市郊以及卫星城之间, 以地面专用线路为主的大运量快速轨道交通系统。城市铁路实际是从干线铁路发展而来, 只是城市铁路更多地具有通勤和公交性质的运营特征。按照城市铁路运行区域的不同, 可以分为市区铁路、市郊铁路和机场联络铁路等。

市郊铁路平均速度为 45 ~ 60km/h, 最大速度可达 120km/h, 高峰发车间隔约为 3min, 单向运输能力约为 3 万人次/h。市郊铁路线路的最高速度可以达到 100km/h 以上。高峰小时最小列车间隔可达 1.5 ~ 2min, 旅客候车时间短。

6. 磁浮系统

磁浮系统是一种运用电磁原理, 依靠电磁力来使列车悬浮并走行的轨道交通系统。它是一种没有车轮、采用无接触行进的轨道交通系统。运行速度一般可达 350 ~ 500km/h, 单向运输能力为 1 万 ~ 1.5 万人次/h, 一般情况下, 每公里的造价为 2 亿 ~ 4 亿元, 最小发车间隔为 2.5 ~ 4min。与传统铁路相比, 该交通方式既适宜于长距离超高速运输, 又适合短途市郊的中低速运输。

7. 新交通系统

自动导向的新交通系统 AGT (Automated Guideway Transit) 是小型车辆运行在具有侧向或

中央导轨专用混凝土轨道上的系统,是在高架的专用轨道上装有小型轻量橡胶轮胎的车辆沿导轨运行的中等运量输送系统。自动导向交通,既可单车运行,也可编成列车运行。在欧美国家,自动导向交通的列车编组通常为1~2辆,单向运输能力为0.5万~1万人次/h。

以上几种城市轨道交通方式的技术参数归纳见表1-1-1。

几种城市轨道交通方式的技术参数 表 1-1-1

项目	地铁	轻轨	单轨	有轨电车	城市铁路	磁悬浮列车	AGT
每公里造价(亿元)	4~6	0.5~1.5	1.5~3	0.2~0.6	0.5~1	2~4	—
高峰小时客流量(万人次/h)	3~6	2~3	1~2	0.8~1.5	3	1~1.5	1~2.5
平均运行速度(km/h)	30~60	30~45	25~45	50~70	45~60	350~500	30~40
最小发车间隔(min)	1.5~3	1.5~3	2.5~4	—	1.5~2	2.5~4	2

(二)城市轨道交通系统的构成

城市轨道交通系统可以划分为固定设备、移动设备和控制系统三个部分。

1. 固定设备

城市轨道交通系统中的固定设备,包括车站、线路、车辆段及牵引供电系统。车站是乘客进入和离开城市轨道交通系统的关键节点。城市轨道交通系统车站按运营功能的不同可分为中间站、换乘站和首末站;按车站结构形式可分为地面站、高架站和地下站。线路是列车运行的基础,它包括明线、桥梁、隧道等多种形式。车辆段是对车辆进行停放及维修保养的场所。牵引供电系统为城市轨道交通系统中的列车、车站等提供电能。

2. 移动设备

城市轨道交通系统中的移动设备主要是指运营中的车辆,是运载旅客的工具。城市轨道交通系统通常采用固定车辆编组的动车组。城市轨道交通车辆类型可分为A、B、C三种,见表1-1-2。

轨道交通车辆类型 表 1-1-2

类 型	长度(m)	宽度(m)	代 表 车 型
A	22.8	3	上海地铁1、2、3、4号线列车
B	19	2.8	北京、天津地铁宽体车
C	19	2.8	上海地铁5、6、8号线列车

3. 控制系统

为保证城市轨道交通安全、可靠地运行,城市轨道交通系统中配置有多个控制系统,包括通信信号系统、环控系统、给排水系统等。其中,通信信号系统保证列车高速度、高密度追踪运行,环控系统主要包括地铁通风、空调和采暖等设备,给排水系统主要满足工程生产、生活用水以及排除生产废水、生活污水、隧道结构渗水、事故消防废水及敞开式出入口部分的雨水等。

二、城市轨道交通运输组织

城市轨道交通运输组织,包括行车组织和客运服务两部分内容。

(一)行车组织

行车组织,主要包括运输计划编制、运输调度指挥、车辆段作业组织等内容。

1. 运输计划编制

运输计划包含列车运行计划、车底周转计划及乘务计划三个方面,核心为列车运行计划。列车运行计划的编制主要依托于列车运行图来实现。列车运行图是表示列车在区间运行及在车站到发或通过时刻的技术文件,也是城市轨道交通系统各部门间协同工作的重要技术文件。城市轨道交通列车运行图的编制必须以客流为基础。准确地掌握客流,并根据预测客流确定各时段开行的列车数量及行车间隔,对于提高城市轨道交通的服务水平具有重要意义。在列车运行图确定的基础上,以最小化车底和人员使用为目标,合理地确定车底周转计划和乘务员排班计划,从而实现完成运输任务的前提下,尽可能降低运营成本,提高运输效率。

2. 运输调度指挥

调度指挥是城市轨道交通系统日常运输工作的核心,其基本任务是确保列车按图运行,对偏离运输计划的列车进行科学调整,确保完成运输生产任务。根据路网客流情况以及列车按图行车情况,进行列车开行优化调整。如某一区间出现列车晚点、突发大客流或临时运营中断,调度中心调度员依据车站实际客流情况,对列车进行调整,满足乘客出行需求。

3. 车辆段作业组织

车辆段作业组织是整个城市轨道交通系统行车组织的重要组成部分之一。主要包括:负责所辖各运行线路内的电动列车运用、检修、整备任务,确保上线运用列车保持状态良好;确保运营列车准点出场、回库,能顺利进行运用列车的调整;配合维修人员完成列车的保养、维修、调试等工作;安排场内调车作业以及正线开行施工列车;协调场内各专业技术工种在规定范围和规定界面的施工作业;协助正线事故救援工作;编排车辆运用计划,按运行图要求配置列车及乘务人员;对车辆乘务人员及站场行车人员的行政管理、技术管理等。

(二)客运服务

客运服务的主要内容,有车站的客流组织以及票务管理工作等。

1. 客流组织

客流组织是客运服务工作的一个关键环节,是为乘客提供安全、快速、便捷、舒适服务的重要保障。城市轨道交通客运组织是通过合理布置客运有关设备、设施以及对客流采取有效的分流或引导措施来组织客流的过程。在节假日旅游高峰期,举办重大活动,风、雨、雪等恶劣天气情况下,往往会发生大客流的情况。此时,车站值班人员需要根据车站关键区域的客流情况,采取不同的客流控制措施。如车站内客流人数达到车站容纳人数的70%时,则需要进行

站外限流。

2. 票务管理

票务管理工作,主要包括制订票制票价、售检票作业管理等。节假日期间,在部分旅游景点站区,由于客流量增大,需要适当增加单程票数量。在部分车站,为控制总进站人数,需对总票额进行控制,实现对客流需求的控制。

三、国内外城市轨道交通发展现状

(一)国外发展现状

国际大都市,如伦敦、纽约和莫斯科等,均形成了完善和发达的城市轨道交通网络,见表 1-1-3。综观这些网络化程度高、运营系统成熟的城市轨道交通系统,都极大地提高了人们出行的便利和效率。如东京实现了郊区至市区 30min 内的通勤时间需求;作为一种快速和大运量的交通系统,城市轨道交通还发挥了其大运量和高运载的优势,承担了巨量的城市出行客流,并已经成为许多大城市解决交通拥堵、净化交通环境的重要手段和举措。

世界轨道交通网络运营状况

表 1-1-3

城 市	运营里程(km)	日均客流量(百万)
伦敦	402	3.23
纽约	373	4.80
首尔	331.5	7.18
莫斯科	327.5	6.82
东京	310.3	8.81
马德里	293	1.54
墨西哥	226.5	4.28
巴黎	214	4.21
华盛顿	188	0.751
新加坡	152.9	2.90

注:首尔地铁仅统计市区范围内的运营里程和日均客流量;运营里程统计年份为 2014 年;日均客流量统计年份为 2013~2015 年。

(二)国内发展现状

截至 2014 年末,我国城市轨道交通运营城市共有 22 个(表 1-1-4),累计运营线路长度 3 137km,其中,地铁 2 365km,占 75%;其他制式 808km,占 25%。受城市经济实力等因素的影响,我国城市间轨道交通的发展不均衡性较大,我国只有部分大城市初步具有轨道交通网络化经营的规模。在运营管理方面,早期是单线路运营时期,客流流动呈现单一方向性,运营管理重点在于解决大客流站点的客流集散问题。目前,北京、上海、广州、深圳等城市轨道交通逐渐呈现网络化发展,运营管理的重点除考虑大客流站点集散外,又增加了网络化特征下的线间协调管理、换乘站点突发客流安全有效组织、设施设备资源共享等新的内容。

在已经运营的 22 个城市中,全年客运量超过 20 亿人次的有 3 市(表 1-1-5):北京 33.97 亿人次,占总计 26%;上海 28.27 亿人次,占总计 22%;广州 22.23 亿人次,占总计 17%,3 市客运量占全国客运总量的 60% 以上。

2014 年全国城市轨道交通运营里程表

表 1-1-4

序号	2014 年末运营里程(km)							
	城市	地铁	轻轨	单轨	现代有轨电车	磁浮交通	市域快轨	合计
1	北京	527					77	604
2	上海	548			9	30	56	643
3	天津	87	52		8			147
4	重庆	113		89				202
5	广州	239			8			247
6	深圳	179						179
7	武汉	61	35					96
8	南京	98			8		81	187
9	沈阳	54			60			114
10	长春		48		8			56
11	大连		104		23			127
12	成都	61					94	155
13	西安	52						52
14	哈尔滨	17						17
15	苏州	58			18			76
16	郑州	26						26
17	昆明	59						59
18	杭州	66						66
19	佛山	21						21
20	长沙	22						22
21	宁波	21						21
22	无锡	56						56
合计		2 365	239	89	142	30	308	3 173

可以看出,随着轨道交通网络的逐渐扩大,客流量也在逐渐攀高,我国百万级以上客流的城市轨道交通运营城市已经达到 7 个,这些城市断面高峰小时运量和客流强度高位运行,客流拥挤问题突出。在实际运营中,因客流拥挤导致的事故时有发生,例如:2001 年 12 月,北京地铁 1 号线 1 名女子被挤下站台被撞身亡;2008 年 2 月,广州地铁 1 号线 1 名女子被挤下站台被撞身亡;2010 年 12 月,深圳地铁国贸站由于电梯逆行诱发踩踏事故,造成 23 名乘客受伤;2011 年 7 月,北京地铁 4 号线动物园站扶梯逆行,进而诱发踩踏事故,造成 1 人死亡 28 人受伤;2014 年 11 月 6 日,北京地铁 5 号线惠新西街南口站 1 名女性乘客由于拥挤在乘车过程中卡在屏蔽门和车门之间,列车启动后掉下站台死亡。北京地铁各运营单位根据客流情况,采取

站内站外限流作为应对大客流冲击的主要措施,进入 2014 年第三季度,北京地铁常态限流车站已达 49 座,大部分车站的限流时间为高峰时段,以此来使站内局部设施客流压力得到一定程度的缓解,进而保证站内运营安全。

城市轨道交通运营城市客运量情况

表 1-1-5

序号	城市	2014 年末 投运里程 (km)	全年客运 总量 (亿人次)	日均客流量 (万人次/日)	每公里日均 客流强度 (万人次/ km 日)	单日最高 客运量 (万人次)	断面高峰 小时流量 (万人次/h)	最小发车 间隔 (s)	日均开行 总列次 (列次/日)
1	北京	604	33.97	953	1.6	1239	5.8	120	
2	上海	643	28.27	784	1.2	1035	5.7	140	6 262
3	广州	247	22.23	610	2.5	841	5.3	132	4 662
4	深圳	179	10.36	284	1.6	395	4	150	2 120
5	南京	187	5.03	147	0.8	205	3.3	140	1 687
6	重庆	202	5.17	142	0.7	246	2.9	162	1 810
7	武汉	96	3.56	108	1.1	158	2.2	230	1 479
8	天津	147	3.01	82	0.6	112	1.3	300	1 129
9	沈阳	114	2.63	72	0.6	104	2.1	300	870
10	长春	56	0.72	20	0.4	29	1	270	660
11	大连	127	0.92	25	0.2	24	1.9	180	403
12	成都	155	2.84	78	0.5	120	2.4	170	740
13	西安	52	1.31	95	1.8	103		312	622
14	哈尔滨	17	0.54	15	0.9	24	1	390	240
15	苏州	76	1.27	35	0.5	71	1.2	300	856
16	郑州	26	0.69	19	0.7	35	1.4	360	220
17	昆明	59	0.49	13	0.2	29	0.9	300	403
18	杭州	66	1.45	42	0.6	83	2.6	210	671
19	佛山	21	0.55	15	0.7	26		315	379
20	长沙	22	0.46	19	0.8	35	1.1	400	248
21	宁波	21	0.14	6	0.3	15	0.5	420	243
22	无锡	56	0.16	15	0.3	26	0.6	475	483
合计		3 173	125.77	3 580					24 834

大客流冲击下安全问题,已经上升到极其重要的位置,城市轨道交通面临的首要问题就是大客流冲击带来的风险。地铁系统客流高度密集、相对封闭、潜在风险高和危险大,环境复杂、客流可控性差、突变性强、疏散条件差的地下车站问题尤为突出。随着新线逐渐增多,换乘车站逐渐增多,换乘车站除了车站本身进出客流风险外,换乘客流造成的冲击影响更大,特别是对于新线换旧线的车站。由于城市规划的变化,客流预测的量值与实际有很大差距,运能匹配

性差,导致设计能力小的线路车站受冲击问题更加突出。如何加强对突发大客流的监控及快速疏散能力,是防止突发事件引起整个城市轨道交通瘫痪乃至演变成社会危机所面临的严峻挑战,是线网运营必须解决的难题。

第二节 大客流风险动态控制的框架

大规模客流对轨道交通的运营带来极大的挑战,严重影响轨道交通系统的运输效率和运输安全。因此,如何有效地组织客流,在大规模客流到达之前提前做出预警和响应,进行客流预警,并采取科学有效的措施尤为重要。

一、大客流风险动态控制的基本概念

城市轨道交通大客流风险是指由于大规模客流的冲击,导致城市轨道交通客流需求和能力之间、城市轨道交通系统各个设备和能力之间出现失衡,从而出现的运营安全的不确定性。这种不确定性产生的结果,轻则乘客滞留在站台、列车晚点,重则出现人员被挤下站台、人员踩踏等重大事故,对城市轨道交通的安全运营产生不利的影响。城市轨道交通大客流风险控制理论见图 1-2-1。

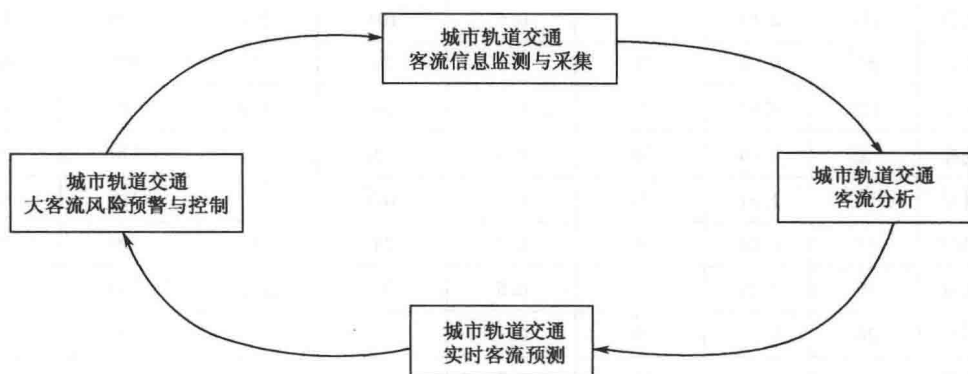


图 1-2-1 城市轨道交通大客流风险动态控制理论

城市轨道交通大客流风险控制是指通过各种手段,采取各种措施,处理可能的大客流风险,降低客流风险事故发生的可能性,从而把可能的损失控制在一定的范围内,以避免在风险事件发生时带来的难以承担的损失。与事故发生后的应急处置相比,大客流风险控制主要属于事前控制,如果措施得当,将极大地提高城市轨道交通运营的安全水平。

按照控制策略的实时性不同,城市轨道交通大客流风险控制,包括静态控制和动态控制两类。前者通过在城市轨道交通建设、设计阶段进行适当工程处理,防止可能发生的事故,如增大站台候车区面积、增加屏蔽门、增加进出站通道宽度等措施;后者通过在城市轨道交通运营阶段增加动态运输组织,防止可能发生的事故,如动态限流、列车运行调整、公交应急调度等措施。静态控制的优点是能够通过硬件手段从根源上防止事故发生,其缺点是成本高且无法应对日常客流波动和突发事件导致的风险。因此,动态风险控制将是城市轨道交通大客流风险控制的重要发展趋势。

二、城市轨道交通大客流风险动态控制流程

城市轨道交通大客流风险动态控制,以“预测控制”为理论指导。主要流程是通过先进的客流实时监测系统检测城市轨道交通运营和客流风险控制的基本参数,在此基础上,利用大数据挖掘的历史客流规律和动态的客流监测信息,对未来短时的列车运行状态、客流演变状态进行高精度预测,根据预测结果,对内进行分级预警和风险控制策略的执行,对外进行信息发布和救援请求。主要特征是“数据驱动”、“预测控制”、“闭环反馈”和“滚动优化”。城市轨道交通大客流风险动态控制,主要包括城市轨道交通客流信息监测与采集、客流分析、实时客流预测、大客流风险预警与控制四个环节。

(一)城市轨道交通客流信息监测和采集

准确获取城市轨道交通的客流状态是进行客流风险评估、辨识和控制的基础。一方面,实时监测和获取城市轨道交通客流信息能够为客流实时拥挤状态发布提供基础数据,另一方面,实时客流状态信息也是短时客流预测的重要输入参数。通过分析长期积累的客流状态数据,从中发现客流增长和变化的基本规律,还有助于构建准确的客流预测模型。

城市轨道交通客流信息监测的核心是通过 AFC(自动售检票)系统、监控系统(包括视频监控、激光、红外监控等类型)等与客流有关的设备,依托数据挖掘技术和模式识别技术,融合多元异构数据,实时获得城市轨道交通系统关键位置如站台、通道、出入口、列车内等设施设备处的客流量、客流密度、乘客走行速度、乘客运动轨迹等数据,为城市轨道交通实时状态发布、客流预测、客流预警和控制提供基础数据支持。本书第二章将重点介绍目前城市轨道交通系统可采用的客流监测技术及监测的关键客流参数。

(二)城市轨道交通客流分析

城市轨道交通客流分析是指采用科学的数据分析与处理技术,从大量的历史监测客流数据中挖掘客流规律、发现客流的时空分布特征、客流演变趋势以及影响客流变化特征的乘客出行行为规律的过程。城市轨道交通客流分析的主要目的是为高精度的实时客流预测提供科学依据和数据支撑。本书第三章首先将城市轨道交通的运营分为常态和非常态两种场景,针对不同场景,从城市轨道交通网络、线路、车站、设备四个层面,分析了城市轨道交通客流成长的一般规律和客流时空分布特征,挖掘相关客流规律,为实时预测模型提供一定理论依据和规律支撑。

(三)城市轨道交通实时客流预测

城市轨道交通实时客流预测是指在对大量历史规律和动态监测数据进行融合分析的基础上,通过构建模型,对未来时段的客流发展、演变态势和分布状态进行正确估计的过程。客流预测结果是直接用于大客流风险评估的依据,因此,实时客流预测的准确性,是进行准确客流预警和客流控制的基础。城市轨道交通实时客流预测基于先进的客流状态监测手段,融合多元的城市轨道交通客流信息,捕捉识别城市轨道交通系统的状态特征,推演客流状态的变化规律,实现城市轨道交通客流分布状态的实时预报,为城市轨道交通运营动态管理、动态风险预

警、客流风险控制和出行信息服务提供关键的技术和数据支撑。本书第四章主要介绍城市轨道交通实时客流预测方法、预测流程,按照客流生成预测、OD 动态矩阵预测、基于仿真的客流分配三个阶段,介绍了如何通过有限的和已知的进站客流数据,预测未来 30s 到 15min 路网上某个设备、某个车站、某列车、某条线路、某个换乘方向的客流参数。此外,还介绍了数据故障如何修复、数据缺失如何处理、预测精度如何评价、预测参数如何自适应等问题,确保实时客流预测的工程可实施性。

(四)城市轨道交通大客流风险预警与控制

城市轨道交通大客流风险预警与控制是指以实时客流预测的结果作为依据,进行客流风险识别,进而进行客流风险预警和风险动态控制的方法。大客流风险预警主要是面向政府、地铁运营部门、公众等不同角色的人群,针对性地提供简单、易判别的信息,引导不同角色人群进行科学合理决策。大客流风险控制则提供了一套完整的模型,通过模型计算,提供不同预警级别下的动态控制策略,供地铁运输部门进行响应。城市轨道交通大客流风险预警与控制,既是整个闭环控制流程的结束,也是下一轮控制的起点。本书第五章介绍了城市轨道交通大客流风险预警等级划分,从设备、车站、线路、网络四个层面,应用密集度指数进行大客流风险评估和分级预警的基本方法。在此基础上,采取多样化客流组织、灵活的行车调度、公交辅助接驳三种手段进行风险控制的具体步骤,从而实现城市轨道交通客流风险的有效控制,保证城市轨道交通的安全高效运营。

第二章 城市轨道交通客流监测 与安全状态信息采集

第一节 客流监测的作用及系统构成

获取全面、准确、实时的交通运行状态数据是分析掌握交通运行规律,优化交通系统的基础。城市轨道交通作为大运量的城市客运系统,如何准确获取客流安全状态信息是其运营管理中的关键、基础问题。通过客流监测和信息采集技术,可以实现不同拥挤状态下城市轨道交通系统内客流的定位、识别和跟踪,获得客流量、客流速度、客流密度、轨迹等信息,在此基础上分析与判断客流运动规律,可以为城市轨道交通大客流风险监测和预警提供数据支持。

一、客流监测的作用

客流安全状态信息是城市轨道交通管理的重要基础信息,它反映了城市轨道交通系统内客流运动的安全状态。通过全面、丰富、实时的客流安全状态信息,对运输企业内部,可以实时监测城市轨道交通的运营状态,准确把握城市轨道交通的实时客流分布情况,预测未来的客流变化态势,提高城市轨道交通运营管理决策的实时性、高效性和经济性,提升城市轨道交通运营管理的智能化水平,提高城市轨道交通的运营安全、效率及服务水平。对城市中的出行者,通过利用多种信息手段将实时获取的路网客流拥挤和延误信息及时发布,用于客流诱导,辅助乘客选择合理的出行路径、减少出行时间、提高出行舒适度,同时能够起到均衡路网客流压力、缓解客流拥堵的作用。对于政府决策部门,准确掌握客流信息是实现关键节点及区域的客流风险预警的基础,有利于提高城市轨道交通乃至整个城市交通的安全运营水平。掌握突发事件条件下的客流状态,有利于提高应急决策指挥的科学性,从而提升城市轨道交通应急指挥水平。

(一)运行状态监测及控制

城市轨道交通智能化和信息化是城市轨道交通发展的必然趋势,是实现客流风险控制的主要前提,提高运营安全的重要保障。作为实时把握城市轨道交通运行状况的一种重要手段,城市轨道交通运行状况监测一直是实现城市轨道交通智能化与信息化的核心和难点之一。

通过车站的客流监测设备,如改进的自动售检票系统(Automatic Fare Collection, AFC)、激光检测装置、视频图像监测设备等,采集重点车站(包括大客流冲击严重的车站、重点换乘站)的出入口、站台、换乘通道的客流流量、密度以及实时视频图像,进一步计算出站点进出站客流量、换乘站点换乘客流量、车站实时聚集人数,评估设施设备的客流压力;通过列车上的客流监测设备采集列车的车载人数,计算列车满载率和断面满载率,评估列车内的客流拥挤水平。在

此基础上,利用自动化分析设备进行大客流的监测报警,及时发现重点监控车站运行状态的异常情况,必要时进行限流、列车通过不停站甚至封站等的运输组织策略调整。

(二)客流诱导

客流信息检测的数据也可用于服务公众,获得的数据指标可以直接引导广大社会公众参与轨道交通出行。

随着城市轨道交通运营线路数量的增加,网络结构日趋复杂,乘客对出行路径的选择将趋于多样化,若不对客流进行诱导,将会导致过多的客流聚集在起终点站间距离最短或换乘次数最少的路径上,易造成客流拥挤、出行延误等问题,通过客流诱导可以解决这一问题。根据采集的客流信息,监测城市轨道交通运行状态,并结合管理部门指令发布各种通告和客流信息,有效地对乘客进行诱导,从而合理地控制和均衡客流分布,提高运行效率,保障运行安全。

基于采集到的路网乘客进出站数据、站台和换乘通道客流量等信息,可以通过智能分析和生成城市轨道交通客流拥挤的分布状态,通过交通广播、乘客信息系统(Passenger Information System, PIS)、互联网、移动通信终端、短信平台、乘客查询系统等方式进行发布,实现乘客不需进入车站就可以了解客流状态。此外,通过发布高峰时段客流情况和其他运输方式,如地面公交协调联动的动态信息等,形成出行提示信息,乘客可以选择更合理的乘车路线和交通工具,进而引导客流避开拥挤区域,达到平稳客流、减轻拥挤区域客流压力的目的。

突发事件下,及时向乘客发布事件的详细信息与应急处置措施,有助于乘客了解实时的事态发展,能够安抚乘客的慌乱情绪,同时能够阻止其他乘客盲目进入受到突发事件影响的线路或车站,提高突发事情下的疏散效率、快速恢复路网的正常运营秩序。

(三)客流状态预警及应急响应

城市轨道交通系统是人员高度密集场所,其安全性是政府职能部门关注的重点。在信息资源有限的条件下,传统的安全管理主要通过“人员盯控”的方式进行,这种管理方式不但效率低下而且成本高昂,所有的安全预警和应急处置均依赖于人的经验,一旦发生恶性踩踏事故,后果极难控制。客流检测技术的应用,能够彻底改变这种事后经验控制的方法,取而代之的是预测型控制方法。其原理是利用先进的电子技术和信息技术,实时采集客流的关键技术指标,通过分析指标并进行发展态势预测,在事故还没发生时,及时监测、辨识和估计潜在的异常运营状态,及时上报各级责任人员,并通过图形、声音等多媒体信息方式呈现和报警(预报);根据不同的预警级别,在事故发生后,实时呈现和上报事故随时间演化的指标(确报),并提供科学的应急处置建议,最终达到减少人员伤亡、财产损失和环境破坏,尽快恢复正常运营状态的目的。

二、客流监测系统构成

城市轨道交通客流监测与安全状态信息采集系统从体系架构上可以分为“感、传、知、用”四个层次。感:感知层、传感层,是整个系统的数据来源,通过在城市轨道交通的站厅、站台、换乘通道、出入口各主要人流密集区域部署射频识别(RFID)、红外感应器等多种专用传感器,实