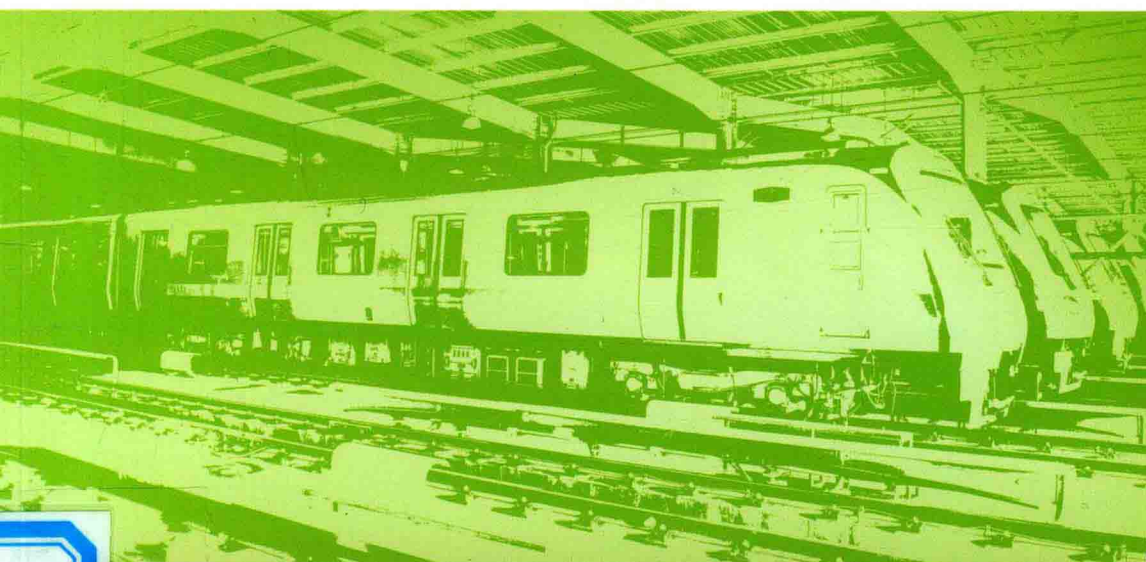


轨道交通 大客流应对与控制

GUIDAO JIAOTONG
DAKELIU YINGDUI YU KONGZHI

代宝乾 汪 彤 宋冰雪 编著



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

Guidao Jiaotong Dakeliu Yingdui yu Kongzhi 轨道交通大客流应对与控制

代宝乾 汪 彤 宋冰雪 编著

常州大学图书馆
藏书章



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

内 容 提 要

本书以网络化运营管理条件下的轨道交通大客流为研究对象,主要介绍了行人监控理论模型、视频客流量统计分析系统、轨道交通车站客流疏导评价、轨道交通大客流预警技术、轨道交通突发事件类型及致因分析、突发事件模拟仿真以及非常态大客流模拟仿真系统等内容。

本书可供交通运输、安全工程等相关、专业的学生作为教材或参考书,同时也可供科研人员参考和感兴趣者自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通大客流应对与控制 / 代宝乾,汪彤,宋冰雪编著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.12
ISBN 978-7-114-14208-6

I. ①轨… II. ①代…②汪…③宋… III. ①城市铁路—旅客运输—客流—管理 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 232812 号

书 名:轨道交通大客流应对与控制

著 作 者:代宝乾 汪 彤 宋冰雪

责任编辑:刘 君

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.ccpress.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:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:9.25

字 数:168 千

版 次:2018 年 1 月 第 1 版

印 次:2018 年 1 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14208-6

定 价:58.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《轨道交通大客流应对与控制》 编委会

代宝乾 汪 彤 宋冰雪

张 晋 周扬凡 谢昱姝

流,介绍了大客流辨识技术、客流数据采集系统、常态大客流疏导评价模型和疏导优化模型,以及大客流预警技术;针对非常态大客流,介绍了轨道交通突发事件的类型及致因分析,并以毒气泄漏场景为例,介绍了非常态大客流模拟仿真系统。

本书是编者以多年的科学研究工作为基础完成的。参加本书编写的有代宝乾(第2、5章)、宋冰雪(第7、8章)、周扬凡(第1、4章)、张晋(第3章)、谢昱姝(第6章)、宋冰雪(统稿);丁辉、汪彤负责了本书的审核工作。第7章、第8章与清华大学合作完成。

本书受到北京市财政平台项目“轨道交通大客流防控与应对”资金支持。书中引用了大量同行的研究成果,编者在此一并表示衷心感谢。

由于水平所限,书中难免有不妥之处,衷心希望读者提出宝贵意见,以便进一步修改完善。

编著者

2017年5月

C 目录

CONTENTS

上篇 常态大客流的应对与控制

1 绪论	3
1.1 城市轨道交通大客流分类	3
1.2 轨道交通客流特征	5
1.3 行人运动及疏散研究现状	9
1.4 城市轨道交通车站大客流疏导措施	29
2 行人监控理论模型研究	33
2.1 行人流动的基本特点	33
2.2 高密度人群流动的物理模型研究	34
2.3 基于人群扰动的人员流动新模型基础研究	42
3 视频客流量统计分析系统	47
3.1 视频客流量统计分析关键技术	47
3.2 客流监控系统使用	50
4 轨道交通车站客流疏导评价	58
4.1 轨道交通车站客流疏导评价指标体系	58
4.2 轨道交通车站评价方法	62
4.3 轨道交通车站客流疏导评价案例分析	63

5 轨道交通大客流预警技术	72
5.1 行人交通时间序列分析及客流预警技术	72
5.2 客流预警系统	76

下篇 非常态大客流的应对与控制

6 轨道交通突发事件类型及成因分析	83
6.1 轨道交通突发事件特点分析	83
6.2 轨道交通突发事件类型	83
6.3 轨道交通突发事件防控	91
6.4 轨道交通主要突发事件案例分析	96
7 突发事件(毒气泄漏)模拟仿真	103
7.1 沙林毒气性质	103
7.2 场景设置及毒气扩散模拟	104
8 非常态大客流模拟仿真系统	114
8.1 系统综述	114
8.2 模型分析	116
8.3 决策支持	122
8.4 应急救援	127
参考文献	132

上篇

▼
常态大客流的
应对与控制

随着社会的不断进步,城市轨道交通越来越便利,随之而来的大客流冲击现象也越来越多,规模越来越大。以北京地铁为例,随着网络化运营格局的形成,日客流量已超过千万。面对如此大规模的客流,轨道交通车站尤其是换乘车站大客流疏导面临着很大的挑战。当在站台、站厅及换乘通道内大客流聚集形成高密度人群时,一旦发生突发事件,客流得不到及时疏导,极易发生拥挤踩踏事故和乘客坠落站台事故。鉴于此,大客流的运动规律和应对措施越来越受到人们的关注,也有越来越多的专家和学者投入到这方面的研究。

1.1 城市轨道交通大客流分类

城市轨道交通车站大客流是指在某一时间段集中到达的,客流量超过车站正常运行能力和服务能力的客流。大客流一般出现在大型文体活动散场时或重要交通枢纽节假日放假前夕。随着客流量的增大,站内服务设施如通道、楼梯、扶梯站台等处变得十分拥挤,乘客行动明显受限。按照客流产生原因,轨道交通车站大客流主要可分为以下四类:

1) 常态化大客流

常态化大客流是指为实现日常的通勤、上学、外出、商业活动等正常的生产、生活活动而产生的持续性大规模客流。常态化大客流的发生时间和发生地点较规律,一般持续时间较长,如距离住宅、办公、商业区较近的车站,在上下班时段客流会大幅上升,而学校附近的车站客流会在上学和放假期间明显增加。常态化大客流车站要提前制订完善的客流组织方案,才能有效应对大客流冲击。截至2014年12月,北京地铁共有19条线路共60余座车站面对常态化大客流冲击,常态化大客流车站平日客流量变化如图1-1所示。

2) 突发性大客流

突发性大客流是指由于体育场馆、影剧院等大型公共场所举办大型活动结束

时所引发的城市轨道交通车站短时间内大规模聚集的客流。它受活动地点、时间、规模等因素影响较大,具有突发性和不确定性的特点,并且通常持续时间短,给活动地点周边车站的运营管理人员带来了极大的压力和挑战。

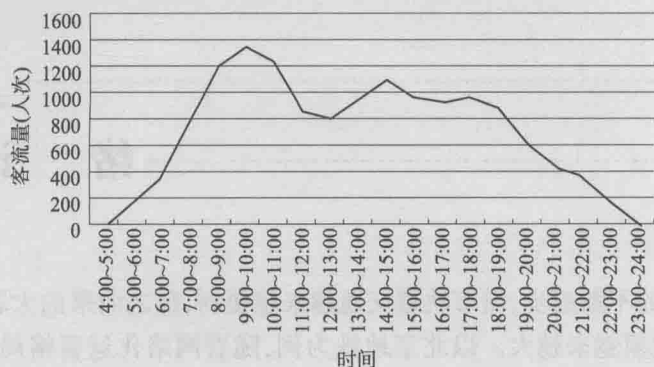


图 1-1 某地铁车站平日客流图

3) 节假日大客流

节假日大客流主要是指国家法定的节假日,如元旦、春节、清明节、劳动节、中秋节和国庆节,以及学生暑期(7~8月份)所造成的较平时明显增加的客流。客流主要由旅游观光、返乡探亲、休闲购物等乘客组成,暑期大客流主要以放暑假的学生及陪同的家长为主。春节前后大批外地劳务人员返乡,必然对铁路客运站和长途汽车站附近的地铁车站造成较大冲击。元旦、清明、端午、中秋等假期较短的节日,游客不会对地铁的客流变化带来较大影响,但市民出行、购物会对商业区附近的车站产生较大客流。节假日轨道交通车站尤其是靠近旅游景区、购物商场的车站客流较平时有大幅度上升,购买单程票和初次乘坐地铁的乘客比例较大。图 1-2 为某地铁车站“五一”期间和平日的全日闸机进站量对比。



图 1-2 某地铁车站“五一”期间和平日的全日闸机进站量对比

4) 其他大客流

其他大客流是指出现酷暑、雨雪、大风等天气时,地面交通受阻,大量乘客改乘轨道交通、进入车站避雨或滞留车站等造成车站客流量明显增加的情形。由于难以提前预估可能改乘地下交通工具的客流量,对车站客流组织带来一定困难。

城市轨道交通大客流组织应根据客流产生原因,采取合理应对措施疏导客流。

1.2 轨道交通客流特征

由于人的行为特点是复杂非线性的,影响人群流动的因素也较多。一般来说影响人群流动的主要因素有人群速度、人群密度、人群流量、场所环境、人员构成等,这些因素之间又存在着关联。

1.2.1 人群速度

人群速度是指人群整体表现出来的速度状态,其不是由个人的速度决定的,而是人群在行走过程中相互影响和制约表现出来的一种平均速度状态。人群速度受到场所环境、天气、出行目的、个人身体及心理状况等多种因素的影响。

在同向客流中,不同特征人的步长和步频是不一样的,其中老幼病残个体的运动速度要明显低于一般个体。北京建筑工程学院的孔维伟等研究学者观测了北京地铁复兴门站和西直门站各年龄段人群在不同路段的平均速度,如表 1-1 所示。

不同观测地点各年龄段人群平均速度分布(单位:m/s) 表 1-1

年龄段	换乘通道	上楼梯	下楼梯	上坡	下坡	站台
中青年男性	1.39	0.75	0.95	1.23	1.66	1.56
中青年女性	1.22	0.66	0.83	1.03	1.50	1.41
儿童	1.31	0.64	1.27	1.43	1.43	1.27
老年人	1.06	0.6	1.41	1.41	1.41	1.15

地铁人群流动模型如下:

(1) 平面换乘通道内的行人步行速度与行人密度流模型为:

$$u = -0.396k + 1.522$$

(2) 楼梯内上楼梯行人步行速度与行人密度关系模型为:

$$u = -0.096k + 0.695$$

(3) 楼梯内下楼梯行人步行速度与行人密度关系模型为:

$$u = -0.126k + 0.779$$

式中: u ——行人步行速度, m/s ;

k ——行人密度, $\text{人}/\text{m}^2$ 。

在人群的行走过程中,每个人都倾向于按照自己认定的最短路线前进,总希望超越比自己慢的人,由此人群内部速度大小的不均一性可能引起碰撞、拥挤等事故,甚至引起打架斗殴或拥挤踩踏事故。

1.2.2 人群密度

人群密度反映一个空间内人群的稠密程度,一般用单位面积上人员的数量来表示。人群密度过大就会造成拥挤,当人群密度达到一定极限时,就会由于拥挤过度导致人群之间相互影响,引发碰撞、跌倒、斗殴等情况,甚至可能造成踩踏事故。

群体移动速度取决于人群密度。人群密度越大,群体的移动速度越小,当人群密度达到一定极限时,群体会因过于拥挤而无法移动。一旦出现人员跌倒人群将有可能来不及反应,进而引发踩踏事故。

目前,国内外对客流采集程度的判别没有统一标准。常采用的客流密度划分标准是美国学者弗洛因(J. J. Fruin)提出的设施服务水平分级指标(表1-2)。根据该指标体系,地铁站内客流的密度至少满足:步行通道上 $0.43 \sim 2.15 \text{ 人}/\text{m}^2$,楼梯上 $1.08 \sim 2.69 \text{ 人}/\text{m}^2$;对应的流量为:步行通道上 $0.44 \sim 0.87 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、楼梯上楼为 $0.33 \sim 0.87 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、楼梯下楼为 $0.44 \sim 0.98 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

设施服务水平分级标准(单位: $\text{人}/\text{m}^2$)

表1-2

服务水平	步行通道	楼梯、自动扶梯	等待区
A	<0.31	<0.54	<0.83
B	$0.31 \sim 0.43$	$0.54 \sim 0.72$	$0.83 \sim 1.08$
C	$0.43 \sim 0.72$	$0.72 \sim 1.08$	$1.08 \sim 1.54$
D	$0.72 \sim 1.08$	$1.08 \sim 1.54$	$1.54 \sim 3.59$
E	$1.08 \sim 2.15$	$1.54 \sim 2.69$	$3.59 \sim 5.38$
F	≥ 2.15	≥ 2.69	≥ 5.38

1.2.3 人体所占空间

人群中个体所占空间可以用人均空间来表示,即人群中平均每个人所占有的面积。当人均空间减小到一定程度时,行人的速度会变慢,不能以正常速度前进。一个人以其正常速度行走所需要的人均空间与其本身所占的面积、前进空间、避让距离有关。

人体尺寸一般是指人在一定的衣着条件下,投影到垂直水平上所形成的形状的面积。人体尺寸与人种、体型、性别及年龄等因素有关。表 1-3 和表 1-4 分别为中国男性和女性的人体水平尺寸。

中国男性人体水平尺寸(单位:mm)

表 1-3

年龄(岁)	身 高		胸 厚		最大肩宽		最大体宽		体 厚	
	P50	P95	P50	P95	P50	P95	P50	P95	P50	P95
4 ~ 6	1113	1237	147	167	286	323	304	349	184	213
7 ~ 10	1320	1462	162	198	326	392	340	429	203	261
11 ~ 12	1466	1620	178	225	362	427	380	464	218	280
13 ~ 15	1638	1765	197	240	402	455	417	496	228	285
16 ~ 17	1706	1809	208	246	426	471	439	509	238	290
18 ~ 25	1686	1789	204	230	427	463	—	—	—	—
26 ~ 35	1683	1776	212	241	432	469	—	—	—	—
36 ~ 60	1667	1761	219	253	433	473	—	—	—	—

中国女性人体水平尺寸(单位:mm)

表 1-4

年龄 (岁)	身 高		胸 厚		最大肩宽		最大体宽		体 厚	
	P50	P95	P50	P95	P50	P95	P50	P95	P50	P95
4 ~ 6	1109	1225	141	161	282	316	296	339	177	207
7 ~ 10	1306	1446	154	186	319	374	330	395	192	237
11 ~ 12	1487	1610	173	211	358	414	372	443	212	260
13 ~ 15	1573	1669	189	224	385	433	404	470	229	275
16 ~ 17	1590	1686	196	225	397	436	418	470	238	276
18 ~ 25	1580	1667	191	222	391	424	—	—	—	—
26 ~ 35	1572	1661	198	236	396	435	—	—	—	—
36 ~ 60	1560	1646	208	251	405	449	—	—	—	—

注:1. P50 表示 50% 的原测值小于此值,即原测值的中位数;
2. P95 表示 95% 的原测值小于此值。

当行人携带有行李物品或带着小孩时,其所占用的宽度自然也要增加,行人的空间需求就要包括行李所占的面积,因此,还要考虑行人的负载。《交通工程手册》中以宽度表示行人所占用的空间,其中关于行人携带不同物品占用宽度统计情况如表 1-5 所示。

行人携带不同物品时占用宽度

表 1-5

旅客负重情况	占用宽度(m)
单身不携带物品	0.60 ~ 0.70
单手提物或怀抱轻物	0.70 ~ 0.80
双手携轻物或一手一肩负轻物	0.75 ~ 0.85
背负重物	0.80 ~ 0.90
背负重物与手提重物	0.85 ~ 1.00
成人携小孩或拉杆箱	0.90 ~ 1.00
肩挑重物	1.00 ~ 1.80

1.2.4 人群流量

人群流量是指一定时间内,沿一个方向通过单位长度的人数。人群流量的单位是人/($\text{m} \cdot \text{s}$),它是衡量一个场所通行能力的重要参数,可由人群速度和人群密度或人均空间所得:

$$\text{人群流量} = \text{人群速度} \times \text{人群密度} = \text{人群速度} / \text{人均空间}$$

人群流量在方向分布上是相对平衡的,但在时间分布上则很不均衡,但呈一定规律性。例如,节假日和旅游季节,消费性乘车显著增加;一日内的客流高峰在上、下班时间和上、下学时间。

1.2.5 人群构成

人群的年龄组成、性别组成、文化程度、职业、兴趣爱好、性格、出行目的和心理等方面的差异会对人群速度、人群密度、安全意识等产生影响,见表 1-6。当人群中出现明显不均一性时,有可能发生危险因素。

不同人群构成的出行特征比较

表 1-6

因 素	人 群 速 度	个 人 空 间	安 全 意 识
年 龄	成年人 1.0 ~ 1.3m/s 之间;儿童随机性较大,老年人较慢	成年人 0.9 ~ 2.5m ² /人;儿童要求比较小;老年人要求大	成年人重视交通安全,安全意识较强;儿童喜欢任意穿梭
性 别	男性比女性稍快	男性大于女性	大致相当
出行目的	工作出行速度较快;生活出行速度较慢	—	大致相当
文化程度	—	受教育程度高的人一般要求较高	受教育程度高的人一般注重交通安全

因 素	人 群 速 度	个 人 空 间	安 全 意 识
个人心情	心情闲暇时速度正常, 反之较快	心情闲暇空间需求正 常,紧张时要求较小,烦躁 时要求较大	心情闲暇时注意力容易 分散
生活区域	城市人普遍生活节奏 快;乡村人速度慢	—	城市人安全意识较强于 乡村人

1.3 行人运动及疏散研究现状

对行人运动及疏散的研究主要有以下两种方法:

(1)实验。通过实验的方式,了解行人运动及疏散的整个过程,并从中提炼出某些特性参数进行分析。

(2)建立数学公式或数学模型。早期研究多是通过实验观测归纳提炼出人员运动及疏散的经验公式,而今,随着计算机技术的普及和发展,越来越多的研究人员通过计算机仿真的方式,对行人运动及疏散过程自主编程模拟进行研究。

1.3.1 行人运动及疏散的实验研究

1)基本图观测实验

早期的行人运动及疏散实验主要是采取观测和统计分析的方式,获得对人员流动状态定量描述的基本图,即速度—密度关系图和流量—密度关系图。

1937年苏联艺术科学院建筑研究所(VAKH)首次开展了行人观测实验,发现行人运动速度与行人密度成反比;1946~1948年苏联火灾防治科研中心(VNIPO)测量了不同年龄段、不同季节行人所占空间大小,提出行人密度的概念,通过大量场所的实验观测,获得了行人流特征的定量表达;1958年英国交通科学家 Hankin 和 Wright 通过对伦敦地铁通道内行人流的观测,建立了单方向行人流的基本图;此后,德国交通学家 D. Oeding (1963年)、苏联学者 Predtechenskii (1966年)、英国学者 Older (1968年)、美国密苏里州大学 F. Navin 和 R. Wheeler (1969年)分别对多方向行人流、群体行人流、购物行人流、学生行人流进行了观测,通过回归分析建立了速度—密度基本图。

近年来,图像处理技术的进步有助于研究人员获取更加精细的观测数据。2002年,东北大学研究人员张培红等在东北大学校园观测了人员流动状况,归纳得到了平直通道、弯道、楼梯等设施对人员速度的衰减关系;2005年,德国 Jülich 研究中心的 A. Seyfried 等开展了单列行人流的观测实验,建立了行人运动的基本图;

2009年中国科技大学的刘轩等借鉴同样的实验步骤,利用数字图像处理技术对行人运动特征进行了分析;2004年,日本静岡大学 M. Isobe 等在2m宽、12m长的通道中开展了对向流观测实验,在人群密度为0~0.5时进行了8组实验,获得了速度—密度基本图;2006年,德国杜伊斯堡—艾森大学 T. Kretz 等在2m宽的走廊内开展了对向流观测实验,通过对视频数据的人工统计分析,获得了对向行人流速度、流量等相关参数;2008年,重庆大学的研究人员王延钊等对地下空间环境中的行人运动特征进行了观测,获得了在平直通道、通道拐角、楼梯等处行人运动速度—密度基本图;同年武汉大学研究人员方正等在春运期间对火车站出站口旅客运动情况进行了实地观测,获得了出站口旅客速度—密度的基本图。

实验发现,不同国家观测获得的行人运动基本图具有大致相同的变化趋势,但具体数值之间存在差异,差异的原因可能是由于不同文化背景的行人在运动过程中希望与他人保持不同的距离,且部分运动特征,如迈步频率等也对行人流的动力学特征具有直接影响。

2) 不同建筑结构的可控实验

众多研究者针对建筑结构的特性开展了一系列实验研究。

(1) 针对建筑出口:美国学者 J. J. Fruin、以色列学者 A. Polus 和英国学者 B. D. Hankin 等通过观测,分别给出了建筑出口流量系数的取值范围。

(2) 对于瓶颈处:德国杜伊斯堡—艾森大学 T. Kretz 等通过正常状态下瓶颈处行人疏散实验的开展,研究了瓶颈宽度对疏散结果的影响;荷兰代尔夫特理工大学 W. Daamen 等根据实验观测数据,研究了狭窄瓶颈处人员的疏散特性,获得了饱和状态下行人通过瓶颈的微观数据及瓶颈上游空间利用情况特性,分析了瓶颈内部及瓶颈上游处速度—密度基本图,并根据行人跟踪数据,分析了楼层变化及楼层间连接方式变化对路径选取的影响。

(3) 针对道路转角:英国兰卡斯特大学 G. Keith Still 对道路转角与人群疏散效率的关系进行了定性研究;匈牙利 Dirk Helbing 等通过分析走廊宽度局部增大对行人通行效率的影响,提出了走廊边界变化角度与行人通行效率的关系曲线。对于楼梯:日本早稻田大学 T. Watanabe 等观测分析了进入楼梯内的人群在楼梯口的行为特征,发现行人总是根据其自身和前方行人来调整其的运动方向及速度。

3) 特殊环境的可控实验

在早期研究中,日本的 T. Jin 等(1990年)分析了烟气对人员情绪的影响;1997年, T. Jin 通过在刺激性烟气中开展的人员疏散实验,研究了烟气浓度对人员视距、行走速度及心理特征的影响。

1998年,美国学者 G. Jensen 提出烟气能减少能见度,并说明在烟气中影响能见度的关键因素不是亮度而是可视距离。