

Transit
Network

Theory and Application of Collaborative
Passenger Flow Control in Urban Rail Transit Network

城市轨道交通路网客流 协同管控理论与应用

豆飞 贾利民 徐会杰 魏运 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

Theory and Application of Collaborative
Passenger Flow Control in Urban Rail Transit Network

城市轨道交通路网客流 协同管控理论与应用

豆飞 贾利民 徐会杰 魏运 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

Theory and Application of Collaborative
Passenger Flow Control in Urban Rail Transit Network

城市轨道交通路网客流 协同管控理论与应用

豆飞 贾利民 徐会杰 魏运 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通路网客流协同管控理论与应用/豆飞等著. —北京:
北京理工大学出版社, 2021. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9335 - 8

I. ①城… II. ①豆… III. ①城市铁路 - 交通网 - 旅客运输 - 运营
管理 - 研究 IV. ①U239. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 252998 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 13

彩 插 / 2

字 数 / 227 千字

版 次 / 2021 年 1 月第 1 版 2021 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 徐艳君

文案编辑 / 徐艳君

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

的，从城市轨道交通路网运营特点和管控需求出发，研究了城市轨道交通大客流特点、分类、成因和传播机理，并据此形成了包括车站级客流管控方法体系、路网级客流主动管控理论体系、路网客流管控方案评估体系等在内的以客流管控为主要措施的城市轨道交通路网运营管理解决方案。

在网络化、数字化和智能化技术大发展的今天，信息技术和数据科技与城市轨道交通全面深度融合为城市轨道交通路网运营管理从响应（被动）式模式向主动式模式的变革提供了技术基础和可能性，同时，也是提升城市轨道交通服务水平、安全水平和综合效能的具有革命意义的发展路径。本书作为沿此路径进行理论和技术探索的初步成果总结，希望能为形成对我国城市轨道交通路网运营管理具有普适意义的新模式和在数字化、网络化、智能化技术条件下进一步提升城市轨道交通路网运营管理水平起到抛砖引玉的作用。

本书在编写过程中得到了北京市地铁运营有限公司、北京市地铁运营有限公司技术创新研究院、北京地铁运营技术研发中心、北京交通大学、北京建筑大学等单位的大力支持。同时，北京交通大学姚向明副教授、北京建筑大学姚德臣副教授参与了部分章节的编写工作，北京地铁运营技术研发中心刘浩然、芦毅、吴倩对本书的撰写提出了许多宝贵建议。对此一并致以衷心的感谢。

本书反映的理论和技術内容必然存在瑕疵，不当之处也请读者不吝赐教。

著 者

目 录

1 绪论	001
1.1 概述	002
1.2 既有研究基础	006
1.2.1 客流管控方案编制方法研究现状	007
1.2.2 缓解拥挤的实践措施	009
1.2.3 客流管控方案效果评价方法研究现状	011
1.3 客流管控方案编制方法	011
1.3.1 经验分析方法	012
1.3.2 数学规划方法	012
1.3.3 仿真方法	013
1.3.4 启发式控制策略	013
1.4 既有研究小结	013
1.5 本书内容结构	014
2 典型城市轨道交通常态客流管控模式	017
2.1 北京城市轨道交通常态客流管控措施	018
2.1.1 客流管控方案分析	018
2.1.2 客流管控组织形式	023
2.1.3 客流管控方案制定	024
2.2 上海城市轨道交通常态客流管控措施	025

2.2.1	客流管控方案分析	025
2.2.2	客流管控组织形式	026
2.2.3	客流管控方案制定	026
2.3	广州城市轨道交通常态客流管控措施	027
2.3.1	客流管控方案分析	027
2.3.2	客流管控组织形式	028
2.3.3	客流管控方案制定	029
2.4	常态客流管控模式总结分析	029
2.4.1	客流管控依据	029
2.4.2	关注点及客流管控目标	029
2.4.3	客流管控效果	030
2.4.4	客流管控特征	030
2.4.5	客流管控存在的问题	031
2.5	小结	032
3	城市轨道交通大客流分类、成因与传播	035
3.1	城市轨道交通大客流分类及成因	037
3.1.1	基于诱因的大客流分类及特点	037
3.1.2	大客流产生原因	044
3.2	城市轨道交通大客流传播过程与影响因素	046
3.2.1	城市轨道交通大客流在车站与区间传播机理	046
3.2.2	城市轨道交通大客流传播影响因素	047
3.3	小结	048
4	城市轨道交通客流管控基础理论	049
4.1	客流管控内涵	051
4.1.1	客流管控定义	051
4.1.2	客流管控目的	052
4.1.3	客流管控原理	053
4.1.4	客流管控影响因素	053
4.1.5	客流管控措施	055
4.1.6	客流管控分类	058
4.1.7	客流管控方案制定	059
4.1.8	客流管控措施实施原则	060

4.2	客流管控方案制定的影响因素	061
4.2.1	客流需求	061
4.2.2	站台承载能力	061
4.2.3	线路客运输送能力	061
4.2.4	车站设施设备通行能力	062
4.2.5	车站外部交通环境	063
4.2.6	运营管理组织形式	063
4.2.7	相邻车站客流输送压力	063
4.3	小结	064
5	城市轨道交通车站客流管控理论体系	065
5.1	车站设施设备分类及车站客流状态等级划分	067
5.1.1	车站设施设备分类	067
5.1.2	车站客流状态等级划分	068
5.2	车站设施网络客流状态分析	072
5.3	矩阵式客流管控触发判别及相应措施体系	073
5.3.1	矩阵式分级客流管控判别分析	073
5.3.2	矩阵式分级客流管控措施体系	074
5.4	车站客流状态预测模型	075
5.4.1	基于云模型的车站客流状态辨识模型	075
5.4.2	基于马尔科夫状态转移的客流状态预测模型	079
5.5	车站客流管控措施触发判别方法	079
5.6	车站客流管控仿真方法	083
5.6.1	仿真方法验证流程	083
5.6.2	仿真对象车站建模	084
5.6.3	客流管控仿真分析	089
5.7	车站客流状态预测与管控措施仿真评估	101
5.7.1	车站客流状态预测分析	101
5.7.2	车站客流管控措施及仿真评估	104
5.8	小结	110
6	城市轨道交通路网客流主动管控方法	111
6.1	算法概述	112
6.1.1	算法需求	112

6.1.2	算法思想——“溯源”	112
6.2	动态客流分布状态及流量关系	115
6.2.1	可行路径集搜索	115
6.2.2	乘客路径选择	116
6.2.3	路网时空推演	117
6.2.4	流量时空关联关系	118
6.3	运输能力瓶颈区间辨识	119
6.3.1	客运输送能力计算	119
6.3.2	换乘通道通过能力	121
6.3.3	能力瓶颈区间辨识	121
6.4	能力瓶颈区间疏解算法	122
6.4.1	单瓶颈区间疏解策略	122
6.4.2	多瓶颈区间疏解策略	125
6.5	路网协同管控策略生成方法	126
6.5.1	车站客流管控方案	126
6.5.2	路网客流管控方案编制流程	127
6.5.3	客流管控时段长度设置	128
6.6	小结	131
7	城市轨道交通客流管控方案评估体系	133
7.1	路网客流管控方案评估原则	134
7.1.1	客流管控时段的确定	134
7.1.2	管控点的确定	135
7.1.3	客流管控措施的制定	136
7.2	路网客流管控方案的评估与优化	136
7.2.1	客流管控方案评估指标体系构建	136
7.2.2	客流管控方案评估与优化方法	141
7.3	基于客流管控指数的管控方案评估方法	143
7.3.1	客流管控评估需求	143
7.3.2	客流管控指数内涵	144
7.3.3	客流管控指数计算	145
7.3.4	客流管控指数特点	150
7.3.5	基于客流管控指数的管控方案评估方法	151
7.4	客流管控方案评估案例分析	153

7.4.1	评估方法验证流程	153
7.4.2	评估案例1	154
7.4.3	评估案例2	167
7.5	小结	177
8	城市轨道交通路网协同管控决策支持系统	179
8.1	系统架构及数据需求	180
8.1.1	系统架构设计	180
8.1.2	基础数据需求	181
8.2	系统功能介绍	185
8.2.1	客流管控方案编制	185
8.2.2	客流管控方案评估	189
8.3	小结	193
	参考文献	194

1 绪 论



| 1.1 概 述 |

随着城市轨道交通的快速建设和发展，我国大部分城市轨道交通已逐步进入网络化规划、建设和运营时代，在网络结构、线路形式、客流需求和行车组织方法等方面呈现出多样化和复杂化特点。城市轨道交通在整个城市交通系统中发挥着至关重要的作用。

城市轨道交通路网规模的扩大引发客流需求不断增长，客流需求与运输能力的矛盾逐步凸显，尤其在早晚高峰时段，客流方向性明显，部分区段长期高负荷运营。当前，我国城市轨道交通处于快速发展时期，北京市轨道交通、上海市轨道交通运营线路总里程均超过 600 km，日均客运量超过千万人次，早晚高峰时段部分线路区间处于超负荷状态且列车满载率超过 120%。城市轨道交通运营企业为保障运营安全，早晚高峰时段部分车站不得不采取客流管控措施。截止到 2019 年 12 月，北京城市轨道交通常态限流车站数量达 67 个，其中 5 号线工作日常态限流车站更是多达 10 个以上。除常态早晚高峰时段外，节假日、集会展览、大型体育赛事等大型活动同样会导致时段性客流量激增，运营部门不得不及时调整运营计划，满足乘客出行需求。

城市轨道交通系统内的客流拥挤成为城市轨道交通常态早晚高峰时段面临的突出问题。如何降低高密度客流条件下运营安全风险，提升站内及列车客运服务水平成为运营管理中亟须解决的现实难题。缓解客流拥挤的途径主要从两

方面开展：一是加大运输能力供给；二是在时间和空间上进行需求管理和调控。由于城市轨道交通新线建设周期长，固定设施设备通过能力限制，运力资源有限，短时期内难以大幅度提高线路客流输送能力，因此，从需求管理角度对路网客流进行协同调控成为当前普遍采取的措施。

城市轨道交通系统客流管控包含两种途径：第一个途径是通过多种客流管控的方式，使线网中的客流匹配于由列车时刻表决定的车流（列车运行计划）；第二种途径是改变车流（列车运行计划），使车流匹配于客流。为了最大限度地减少服务的不确定性，第二种途径除非在客流时空结构发生稳定且重大的变化时才采用，也就是变更列车运行计划（列车时刻表）。一般情况下，更多地采用第一种途径，即客流管控方式，以便在保证基本的服务水平条件下，做到安全性和效率的均衡。第二种途径我们称为战略性管控措施，而第一种途径则是战术性管控措施，更适用于日常的运营管理。常态管控模式就是限流，通过对需求侧的管理，达到战术管控目的。

城市轨道交通系统在需求侧进行客流管理的主要措施为限流，限流的目的是在确定性的运力安排条件下，消除客流的不确定性对运营安全的不利影响。

北京城市轨道交通是国内第一家实行早晚高峰客流管控常态化的运营企业。2011年4月，正式公布1号线和八通线共计17个车站的常态客流管控方案。至今，北京城市轨道交通常态客流管控已实施9年，对运营安全保障发挥了巨大作用。然而，随着路网的不断扩大，客流需求急剧增长，路网客流管控站点也随之剧增。2017年12月，北京城市轨道交通全网高峰常态客流管控车站数达97个，其中北京市地铁运营有限公司（以下简称北京地铁）所辖线路客流管控车站总数为74个，京港地铁客流管控车站总数为23个。如图1-1所示。

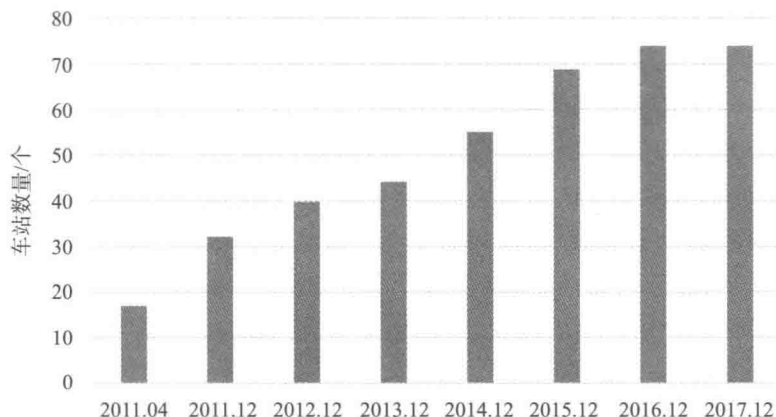


图 1-1 北京地铁常态客流管控车站数量变化

城市轨道交通运营企业科学合理地制定车站客流管控组织方案、引导路网客流出行,对缓解突发大客流拥挤、保障运营安全、提高出行服务水平具有重要意义。目前,城市轨道交通常态客流管控车站以及管控时段缺乏科学化和精细化管理,路网各常态客流管控车站未按照不同日期制定相应的早晚高峰管控时段,并且早高峰管控时段大多在7:00—9:00,晚高峰管控时段大多在17:00—19:00。同时,在城市轨道交通路网客流管控车站精细化管理方面仍缺乏路网客流管控方案的阶段性评估,无法对目前路网各客流管控车站的管控时段和管控强度进行管控效果评估。如何在大规模城市轨道交通网络复杂客流条件下科学编制客流管控方案,成为学术界和运营管理者的关注重点。研究并实现常态客流管控车站的科学化和精细化管理是当前实际运营管理工作的近期目标。

城市轨道交通路网客流管控方案科学与否不仅直接影响运营安全,而且对客运服务水平产生重要影响。如果路网客流管控强度过大,将导致乘客在车站延误时间过长、服务水平下降,甚至可能导致列车运力浪费;如果路网客流管控强度过小,路网客流短时间内激增势必增加运营安全风险。城市轨道交通路网客流管控方案编制是一项复杂的科学问题,其难点在于:

- ①路网客流内在时空分布规律复杂多变,复杂程度随路网规模扩大而增大;
- ②路网各车站空间布局、通过能力、客流组织形式不同,需结合各站具体结构特点制定具体方案;
- ③需从网络系统层面考虑路网协同客流管控方案,局部方案难以达到最优;
- ④全路网客流波动及运力提升引起供需结构的变化,客流管控方案需不断调整与优化才能使得供需达到平衡;
- ⑤路网中相同大客流条件下的客流管控方案可存在多种可行方案,并非唯一。

虽然客流管控技术已成功应用多年,但截至目前尚未形成统一的理论体系、客流管控标准、客流管控方案编制方法,实际中主要依靠管理者经验来制定和实施客流管控措施。其存在的不足有:

- ①决策者大多根据局部线路、局部车站的客流状态制定客流管控方案,缺乏全局性考虑;
- ②既有客流管控方案仅包含客流管控车站及客流管控起止时间,缺乏客流管控强度的量化参考,使得值班站长在实施客流管控措施时缺乏明确指导依据;
- ③总公司与车站层在制定客流管控方案时存在博弈,即使车站客流拥挤得以缓解,车站依然不愿取消客流管控,而总公司难以对每一个车站的客流状态准确把握,导致客流管控方案并未与实际客流的波动变化保持一致;
- ④缺乏科学的计算方法来制定、评估、优化客流管控方案。

在当前背景下，有必要对客流管控问题展开深入研究。研究的总体目标包括：

①构建一套科学的常态客流管控方案编制算法，为客流管控方案编制提供计算方法；

②建立实用化的量化指标对管控效果予以评估，为客流管控方案的阶段性调整提供辅助决策；

③以理论研究成果为基础，开发实用化的客流管控方案优化系统，实现客流管控方案编制与客流管控方案评估自动化。

本书针对客流管控方案分为两个不同阶段：一是客流管控方案实施前的编制阶段，以客流分布状态为基础，从路网总体层面出发构建协同客流管控方案，细化客流管控方案（包含客流管控车站、时间及强度），从而更好地指导客流管控方案的实施；二是客流管控方案实施后的评价阶段，对已实施客流管控方案进行量化评估，通过该评估能够准确捕捉各车站客流与能力间的协调匹配关系和变化趋势，为后续客流管控方案的阶段性调整提供趋势性指导意见。

本书的研究意义体现在以下几方面：

①实现客流管控方案的科学化编制。既有方案的编制以人工经验为主，客流管控车站以及客流管控起止时间的确定通常由车站管理人员提报，其更多考虑本站客流拥挤情况，难以兼顾车站间协同。本书所提出的客流管控方案编制算法则从路网层面出发，更多考虑车站间协同控制。

②实现客流组织的精细化管理。目前，北京地铁常态化客流管控车站的选取以及客流管控时间的确定由于缺乏科学化决策依据，早高峰客流管控时间大多在7:00—9:00；晚高峰客流管控时间为17:00—19:00，较为粗略，通过本研究能够编制精细化的客流管控方案，同时也能提供管控强度信息，为车站客流管控措施的实施提供决策依据。

③避免信息不对称导致的上下级间博弈过程。车站为保障客运安全，总是希望增大客流管控强度，而总公司为提高服务水平，则希望降低管控强度。由于信息的不对称及缺乏量化决策依据，总公司在制定客流管控方案时总是难以准确判定车站是否处于拥挤危险状态，导致上下层级间处于博弈过程。

④实现客流组织的全过程管理。长期以来，对于客流管控方案实施后的效果缺乏评估指标、依据及方法，难以衡量方案的优劣，本研究提出了客流管控指数这一评估指标，从而可定期对每一方案进行效果评估，可为后续阶段客流管控方案调整提供趋势性指导依据，实现了客流管控事前及事后的全过程管理。

⑤有利于提升客运服务水平，保障运营安全。从运营管理视角来看，实现客流管控的科学化管理有助于提升城市轨道交通的客运服务水平，使之逐步由

粗放式管理向精细化管理迈进。

| 1.2 既有研究基础 |

城市轨道交通作为城市建设的重要基础设施，拥有大运量、准时、高效等特点，为乘客提供了快捷方便的客运条件，成为大、中型城市通勤乘客主要的出行方式之一。城市轨道交通网络规模的扩大引发客流需求不断增长，客流需求与运输能力的矛盾逐步凸显，尤其在早晚高峰时段，客流方向性明显，部分区段长期高负荷运营。目前，城市轨道交通客流管控方案的编制方法及过程引起了广大学者的密切关注，形成了一些城市轨道交通客流管控理论研究成果，在此对既有研究成果进行梳理，进而为本书的研究内容提供借鉴。

在城市轨道交通运输能力以及设备资源有限的条件下，一旦城市轨道交通车站发生突发大客流事件，车站工作人员需根据车站各个设施设备客流状态情况及时采取相应级别的客流管控方案，才能确保车站内部的安全运营。但是现阶段对站内客流状态判别仅停留在定性讨论层面，缺乏科学的定量分析和量化标准，加之每个车站在结构和规模上都存在差异，在客流状态判断的基础上进行客流管控缺少参考依据，各车站仅仅根据车站运营管理人员的主观经验进行判断和执行，导致效果并不理想。

在城市轨道交通系统中，乘客在车站内部的行为特征除自身属性外，还会受到包括车站建筑结构及设施设备布设、乘客个体间的相互影响和管理者的引导指挥等因素的影响，从而形成与其他场合不同的行为状态特征。在城市轨道交通车站行人仿真和设施设备的服务水平研究方面，Cheung C. Y 和 Lam W. H. K. 等通过大量的调查研究，以车站乘客为研究载体，分析了行人流量与地铁行人设施之间的关系，标定了基于不同行人设施下的行程时间函数，对步行设施的服务水平划分等级。Jodie Y. S. L. 等研究了香港地铁站高峰时段的行人行为，并得到了乘客 OD（起点和终点）矩阵和乘客在 9 类行人设施上的走行时间函数，并建立了基于时间走行的行人仿真模型。王久亮通过对车站设施设备客流密度、客流步行速度、流量之间的关系进行分析，确定了设施设备的服务水平分级方案。

在交通领域的交通状态辨识研究方面，根据交通状态具有模糊性和随机性的特点，应用云模型理论进行状态识别。李悦等在充分分析交通流特性的基础上，提出了交通状态划分原则、依据、评价指标，构建了基于云模型的模糊综

合评价方法,进行快速路交通状态评判。万佳在交通数据预处理的过程中引入了基于云模型的故障数据识别与修复的方法,划分了5个等级的交通运行状态,并构建了基于云模型的道路交通拥堵自动判别算法,通过与经典算法对比,验证了新算法的准确性和高效性。周继彪、张文等将云模型引入地铁换乘枢纽行人拥挤度自动辨识中,拓展了云模型在轨道交通领域中的应用。

1.2.1 客流管控方案编制方法研究现状

限流问题是伴随我国城市轨道交通快速发展而产生的阶段性产物,目前该问题的研究集中在国内学者,而国外无论是城市轨道交通运营实践还是理论研究均较少涉及。利用CNKI、维普、万方数据库进行检索,检索词为“城市轨道交通+客流管控/限流”“地铁+客流管控/限流”,共检索到直接相关文献21篇,发现近年来城市轨道交通客流管控理论方面形成了一些研究成果,表1-1对相关文献所针对的主要问题及特点进行了介绍。

表1-1 国内客流管控研究现状分析

研究人员	研究内容	年份
冯树民,陈勇, 辛梦薇	以对突发大客流形成的内在机理研究为基础,建立以乘客平均延误最小和各区间满载率之和最大为目标的协调限流控制优化模型,利用所求解的限流率为客流管控措施提供量化依据	2018
周云娣	以南京地铁1号线南京站为例,分析车站客流组织的主要影响因素,随后对南京地铁采取的车站级、线路级和线网级等控制措施进行探讨	2018
曾璐,刘军, 秦勇,王莉	基于系统可控判定理论,将客流分布转化为系统状态方程,提出城市轨道交通客流网可控性判定方法,建立基于驱动节点匹配的路网限流车站优化方法,并以北京城市轨道交通客流网络进行实证分析	2018
潘寒川,刘志钢, 邹承良,陈颖斌	通过分析轨道交通客流特征及其拥堵传播规律,基于受影响乘客数最少的目标构建路网协调客流管控优化模型并采用遗传算法求解	2018
鲁工圆,马骊, 王坤,邓念	基于网络拓扑与客流需求定义建立了以旅客周转量最大为目标的线路客流管控整数线性规划模型,并使用优化软件GAMS24.3进行了快速求解	2017
江志彬,朱冰沁, 周明	从限流的定义及作用分析出发,提出了限流方案的制定原则、实施条件、实施方法和评价指标,并对上海轨道交通网络的限流方案与实践效果进行了总结与评价	2017
蒋琦玮,蔡适, 陈维亚,宋晓东	通过监测轨道交通车站空间分区的实时断面客流量和流向,以能力匹配和资源节约为目标建立多目标整数规划模型。考虑实时决策与控制措施施行的时间差异,提出通过控制策略的时间序列来判断控制措施的实施时机的方法。最后以深圳某地铁站进行实例分析	2017