

城市轨道交通车站站台客流集散模型与仿真^{*}高 龙^{1,2} 缪立新¹ 徐忠平² 关志超² 翟华联² 贾利民³

(1. 清华大学深圳研究生院, 518055, 深圳; 2. 深圳市交通运输局, 518040, 深圳;

3. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 100044, 北京//第一作者, 助理研究员)

摘 要 结合车站站台客流类型、客流集散流程和客流集散影响因素, 建立城市轨道交通车站站台客流集散模型。采用 Anylogic 软件建立站台客流集散仿真流程和仿真模型。以北京地铁 4 号线北京南站站为工程背景, 对其站台客流进行了仿真计算。结果表明, 站台客流集散模型能有效刻画高峰时段内站台客流的集散变化规律, 验证了仿真模型的可行性。进一步探讨了高峰时段内基于不同发车间隔和不同上下行时间差的站台客流集散变化规律以及疏散仿真试验。形成了一种可操作的站台客流集散动态分析方法, 可为城市轨道交通运力配置和车站客流组织提供一定参考。

关键词 城市轨道交通; 车站站台; 客流集散模型; 仿真设计; 疏散仿真试验

中图分类号 U239.1:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.12.025

Modeling and Simulation of Passenger Flow Distribution on Urban Rail Transit Station Platform

GAO Long, MIAO Lixin, XU Zhongping, GUAN Zhichao, ZHAI Hualian, JIA Limin

Abstract Based on the types, distribution process and influencing factors of passenger flow distribution on urban rail transit station platform, a platform simulation model is built to simulate the passenger flow distribution process by using Anylogic software. Taking the platform of the South Station on Beijing metro Line 4 as the engineering background, the feasibility of the model is verified by the functional description of the dynamic variation regularities of passenger flow distribution during rush hours. Then, the dynamic variation regularity with different train headway and time lags during rush hours is further studied, and the evacuation simulation is explored to form an operable dynamic analysis method for passenger flow distribution on station platform and provide a certain reference for train capacity allocation and station passenger flow organization.

Key words urban rail transit; station platform; passenger flow distribution model; simulation design; evacuation simulation test

First-author's address Shenzhen Graduate School of Tsinghua University, 518055, Shenzhen, China

目前,城市轨道交通已经成为缓解当前大城市客运交通拥堵的主要方式,车站站台承担着多向客流的集散和换乘功能,是站内最核心和最关键的设施之一。基于交通安全和服务水平,研究高峰时段内车站站台客流集散的动态变化规律,计算不同的发车间隔和上下行时间差情境下的站台最大聚集客流量及重点区域客流密度值,考察站台设施的动态负荷,进而体现系统整体服务水平的高低,可为城市轨道交通运力配置、车站客流组织和风险防范提供有益参考。

多年来,学者们致力于改善或提升城市轨道交通系统的客运服务品质和系统可靠性,聚焦系统客流模型、仿真设计及应用实践等方面开展理论和方法研究^[1]。宏观层面,文献[2]提出了“流-速-密”理论模型,并广泛应用于宏观视角下的旅客流体属性研究;中观层面,提出了格子气模型,并作为核心算法来支撑中观视角下的旅客群体仿真研究;微观层面,在假设旅客寻路时遵循最短路径规则的前提下,文献[4]提出了旅客个体行为模型,该模型主要包括路径选择模型。

随着科技的突飞猛进,排队网络模型^[5]、元胞自动机模型^[6]、磁力模型^[7]及社会力模型^[8-9]等相继问世,大幅度充实了客流仿真研究体系,随之而来,学者们对地铁站内旅客行为的研究亦越来越丰富和深入。例如,随着城市轨道交通客流量的逐渐增长,学者们开始关注站内客流拥挤现象并试图揭示其背后机理,在研究过程中,“客流渠化、瓶颈摆

* 中国博士后科学基金面上资助(2018M641380);国家自然科学基金面上项目(71771130)

动、快慢效应、走停波动”等概念^[10]相继产生并得到了较好的学术解释。

在站台旅客研究方面,文献[11]提出了基于元胞自动机和网格的站台旅客上下车微观仿真模型,计算结果揭示了地铁站换乘效能评估应充分考虑客流量、设施属性和列车时刻表等因素。文献[12]通过建立基于智能体的仿真模型来计算旅客候车时间,表明车门数量对旅客候车时间具有直接影响。文献[13]模拟了地铁站台旅客上下车过程,仿真结果揭示了地铁车站客流组织的影响因素主要包括站台客流规模和列车运行参数。

综上所述,多种模型和方法已经被应用于车站内部客流集散研究。但是,针对高峰时段内站台上多向换乘的大客流冲击下的客流集散动态变化的研究相对较少,特别是缺乏在不同发车间隔和上下行时间差的情境下的综合考察。基于此,本研究开展高峰时段内站台客流集散动态变化规律的有益探索,旨在形成一种可操作的城市轨道交通车站站台客流集散动态分析方法。

1 城市轨道交通车站站台客流集散模型

1.1 基本分析和研究界定

1.1.1 客流分类及集散流程

按照城市轨道交通线路数量,城市轨道交通车站可以分为单一线路车站和多线路换乘车站(枢纽站)。站台客流可按照旅客流向、来源及目的来划分,具体可分为进站上车客流、站内换乘上车客流、下车出站客流及站内换乘下车客流。

站台客流集散流程是指客流到达站台和离开站台的全过程,是旅客交通行为与站台设施、列车的交互作用所产生的动态群体效应^[14]。表1为站台客流集散流程。

表 1 城市轨道交通车站站台客流集散流程	
客流名称	集散流程
进站上车客流	进站口—站台—列车
站内换乘上车客流	站内其他线路—站台—列车
下车出站客流	列车—站台—出站口
站内换乘下车客流	列车—站台—站内其他线路

由表1可知,对于站台而言,由于下车出站客流和站内换乘下车客流具有相同的目的属性,即离开本线站台,因此将二者合并为下车客流进行统一研究。

此外,在一次列车发车间隔内,特别是车门开

启后,客流集散过程呈明显的阶段性,具体可分为3个阶段:下车阶段、上/下车混行阶段及上车阶段。

1.1.2 客流集散影响因素

按交互主体的不同,客流集散的影响因素来源于站台、列车和客流3个方面,具体如表2所示。

表 2 城市轨道交通车站站台客流集散影响因素	
交互主体	影响因素
站台	站台有效面积、通道通过能力、楼梯通过能力、自动扶梯通过能力
列车	列车型号、列车编组、发车间隔、停靠时间
客流	平均到达率、平均上车速率、平均离站速率

1.1.3 本研究基本界定和假设

- 本研究提出以下几点基本界定和假设:
- 1) 以一次列车发车间隔时段为研究周期,界定一次列车发车间隔为同向相邻的两列列车离站时刻的时间间隔;
 - 2) 在一个研究周期内,假设站台上的所有排队乘客均能上车,所有下车乘客均能离开站台;
 - 3) 结合国内具有代表性的城市轨道交通车站站台的实际情况,本文选取在站台类型占比中最大的岛式站台进行研究,站内不同轨道线路之间的换乘方式采用非同台换乘。

1.2 客流集散模型

无论对于上行列车还是下行列车,本文研究一个发车间隔时段 Δt 内的客流集散变化规律,界定前列车离站的时刻 t_0 为研究起点,当前列车离站的时刻 $t_0+\Delta t$ 为研究终点。在一个发车间隔时段内,站台上的上车客流和下车客流的集散变化规律均可分为4个阶段,如图1所示。

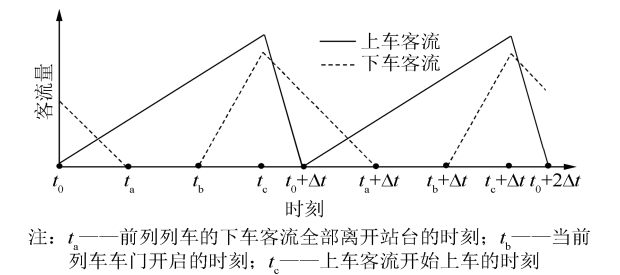


图 1 车站站台上车客流和下车客流集散变化示意图

本文模型中分别采用“+”、“-”(仅用作下标时)代表上行线路和下行线路。现以上行线路为例构建客流集散模型,下行线路客流集散模型的构建方法与之相同。

在一个发车间隔时段内,站台上上行线路的进站上车客流量计算模型如下所示:

$$q_{\text{up},+}(t) = \begin{cases} v_{0,+} \cdot (t_{c,+} - t_{0,+}) & t \in [t_{0,+}, t_{c,+}) \\ -v_{1,+} \cdot (t_{0,+} + \Delta t_+ - t_{c,+}) & t \in [t_{c,+}, t_{0,+} + \Delta t_+] \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$v_{0,+} = \frac{Q_{0,+}}{t_p} \quad (2)$$

$$v_{1,+} = \frac{v_{0,+} \cdot \Delta t_+}{t_{1,+}} \quad (3)$$

式中:

$q_{\text{up},+}(t)$ ——站台上的进站上车客流量;

$t_{c,+}$ ——上行线路上车客流开始上车的时刻;

$t_{0,+}$ ——上行线路前列列车离站的时刻;

$v_{0,+}$ ——上行线路进站上车客流的平均到达率;

$v_{1,+}$ ——上行线路进站上车客流的平均上车速率;

$Q_{0,+}$ ——上行线路 t_p 时段内进站上车客流总量, t_p 为高峰时段, 取 3 600 s;

Δt_+ ——上行线路列车发车间隔;

$t_{1,+}$ ——上行线路乘客上车时间, 即 $t_{1,+} = t_{0,+} + \Delta t_+ - t_{c,+}$

由于 $\Delta t_+ > t_{1,+}$, 故 $v_{1,+} > v_{0,+}$ 。同理, 可构建在一个发车间隔时段内下行线路站台上的进站上车客流量计算模型。在一个发车间隔时段内, 站台上来自 k 线路的站内换乘上车客流量(上行)计算模型如下所示:

$$q_{\text{transfer},k,+}(t) = q_{\text{transfer},k,+}(t_{0,+}) + \int_{t_{k1,+}}^{t_{k2,+}} v_{k,+} dt - \int_{t_{c,+}}^{t_{0,+} + \Delta t_+} v_{2,+} dt, \quad t \in [t_{0,+}, t_{0,+} + \Delta t_+] \quad (4)$$

其中:

$$v_{k,+} = \frac{Q_{k,+}}{t_p \cdot \left(\frac{1}{\Delta t_{k,+}} + \frac{1}{\Delta t_{k,-}} \right) \cdot (t_{\max,k} - t_{\min,k})} \quad (5)$$

$$v_{2,+} = \frac{v_{k,+} \cdot \Delta t_+}{t_{1,+}} \quad (6)$$

式中:

$q_{\text{transfer},k,+}(t)$ —— t 时刻站台上的来自 k 线路的站内换乘上车客流量(上行);

$t_{k1,+}$ ——来自 k 线路的换乘上车客流(上行)开始进入站台的时刻;

$t_{k2,+}$ ——来自 k 线路的换乘上车客流(上行)全部进入站台的时刻;

$v_{k,+}$ ——来自 k 线路的站内换乘上车客流(上行)的平均到达率;

$Q_{k,+}$ —— t_p 时段内来自 k 线路的站内换乘上车客流的总量(上行);

$\Delta t_{k,+}$ —— k 线路列车发车间隔(上行);

$t_{\min,k}, t_{\max,k}$ ——分别为来自 k 线路的换乘乘客的换乘走行时间的最小值和最大值;

$v_{2,+}$ ——来自 k 线路的站内换乘上车客流(上行)的平均上车速率。

同理, 可构建在一个发车间隔时段内站台上的来自 k 线路的站内换乘上车客流量(下行)计算模型。在一个发车间隔时段内, 上行线路站台上的下车客流量计算模型如下所示:

$$q_{\text{down},+}(t) = \begin{cases} -v_{4,+} \cdot (t_{a,+} - t_{0,+}) & t \in [t_{0,+}, t_{a,+}) \\ 0 & t \in (t_{a,+}, t_{b,+}] \\ v_{3,+} \cdot (t_{c,+} - t_{b,+}) & t \in (t_{b,+}, t_{c,+}] \\ -v_{4,+} \cdot (t_{0,+} + \Delta t_+ - t_{c,+}) & t \in (t_{c,+}, t_{0,+} + \Delta t_+] \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$v_{3,+} = \frac{Q_{3,+} \cdot \Delta t_+}{t_p \cdot t_{3,+}} \quad (8)$$

$$v_{4,+} = \frac{Q_{3,+} \cdot \Delta t_+}{t_p \cdot t_{4,+}} \quad (9)$$

式中:

$q_{\text{down},+}(t)$ ——站台上的下车客流量(上行);

$t_{a,+}$ ——上行线路前列列车的下车客流全部离开站台的时刻;

$t_{b,+}$ ——上行线路当前列车车门开启的时刻;

$v_{3,+}$ ——下车客流(上行)的平均到达率;

$v_{4,+}$ ——下车客流(上行)的平均离站速率;

$Q_{3,+}$ —— t_p 时段内下车客流的总量(上行);

$t_{3,+}$ ——乘客下车时间(上行), 即 $t_{3,+} = t_{c,+} - t_{b,+}$;

$t_{4,+}$ ——下车客流全部离开站台的时间(上行), 即 $t_{4,+} = t_{a,+} + \Delta t_+ - t_{b,+}$ 。

由于 $t_{4,+} > t_{3,+}$, 故 $v_{3,+} > v_{4,+}$ 。同理, 可构建在一个发车间隔时段内站台上的进站上车客流量(下行)计算模型。

根据上述研究, 并依据客流叠加原理, 建立站台客流集散模型。即在一个发车间隔内, 站台上的

集散客流量计算模型,如下所示:

$$Q(t) = Q_+(t) + Q_-(t), t \in [t_0, t_0 + \Delta t] \quad (10)$$

$t \in [t_{0,+}, t_{0,+} + \Delta t_+]$ 时

$$Q_+(t) = q_{up,+}(t) + \sum_1^k q_{transfer,k,+}(t) + q_{down,+}(t) \quad (11)$$

$t \in [t_{0,-}, t_{0,-} + \Delta t_-]$ 时

$$Q_-(t) = q_{up,-}(t) + \sum_1^k q_{transfer,k,-}(t) + q_{down,-}(t) \quad (12)$$

式中:

$Q(t)$ —— t 时刻站台上的客流总量;

$Q_+(t)$ —— t 时刻站台上的上行客流总量;

$Q_-(t)$ —— t 时刻站台上的下行客流总量。

2 仿真设计

运用 Anylogic 仿真软件搭建站台客流集散仿真环境,为考察客流集散模型的效果和实例研究提供技术手段。该软件被广泛应用于交通运输领域客流仿真研究^[1,15],是擅于模拟涵盖离散行为、连续行为及混合行为等行为特征的复杂系统^[16]。

本研究需要设计创建的仿真模型包括站台仿真模型、列车仿真模型和客流集散仿真模型。依据站台结构和尺寸、设施布局及运行参数等数据,建立站台仿真模型。依据“轨道库模块”,设定地铁列车型号、编组、发车间隔和停靠时间,建立列车仿真模型;依据“行人库模块”,以社会力模型为核心算法,建立站台客流集散仿真模型,能够较真实地反映旅客交通行为。开发了仿真主程序代码,编辑了基于 JAVA 语言的列车调用函数、旅客调用函数和控制函数等主要内容,设定了统计事件和复发规则。仿真流程如图 2 所示。

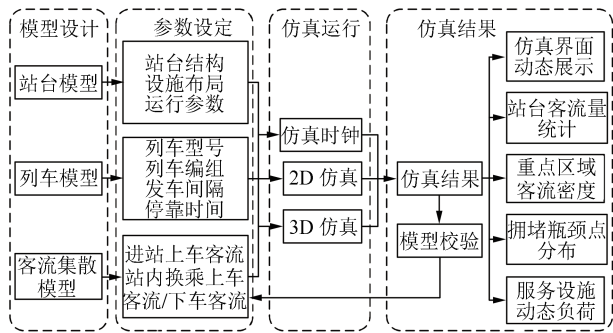


图 2 站台仿真流程设计图

3 实例分析

3.1 实例场景与数据收集

为了使实例场景能够更加契合本研究,课题组通过多方调研比较,最终选取北京地铁 4 号线北京南站站台作为实例场景。北京南站站是一座典型的城市轨道交通枢纽站,位于北京南站综合客运枢纽的地下层,地下一层为地铁换乘大厅,地下二层为 4 号线站台层,地下三层为 14 号线站台层。

课题组开展了为期 7 d 的调研,每天的调研时段分为早高峰时段(07:30—08:30)、午高峰时段(12:30—13:30)及晚高峰时段(18:30—19:30)。经数据分析和处理,得出站台设施参数、列车运行参数及站台双向客流集散模型参数。

3.2 仿真计算与结果分析

3.2.1 模型性能试验

通过运行仿真模型,得到北京南站站台客流量统计误差分析结果(见表 3)及客流密度和服务水平分级结果(见表 4)。

表 3 北京南站站台客流量统计与误差分析

高峰时段	客流量仿真计算结果/人次		客流量实际统计结果/人次		各高峰时段平均误差/%
	最大值	最小值	最大值	最小值	
07:30—08:30	487	396	473	379	2.33
12:30—13:30	238	167	245	171	
18:30—19:30	605	468	612	467	

表 4 北京南站站台客流量密度与服务水平分级

高峰时段	客流密度仿真计算结果/人次		客流密度实际统计结果/人次		服务水平等级
	最大值	最小值	最大值	最小值	
07:30—08:30	0.30	0.25	0.30	0.24	A
12:30—13:30	0.15	0.10	0.15	0.11	
18:30—19:30	0.38	0.29	0.38	0.29	

通过上述分析,可得出以下结论:

1) 站台客流量仿真计算结果和实际统计结果间的平均误差为 2.33%,说明客流集散模型与仿真设计是合理的,仿真场景较符合于真实场景;

2) 晚高峰时段站台最大客流量和平均客流量均高于早高峰时段和午高峰时段的对应值,午高峰时段的对应值最低;

3) 站台平均客流密度小于 0.40 人次/ m^2 ,参照既有研究中形成的城市轨道交通车站设施服务水平等级划分标准^[17],站台服务水平等级为 A 级,即“自由站立或穿越排队区,不会干扰他人”。

3.2.2 不同发车间隔及不同上下行时间差情境下的试验

通过调整列车发车间隔和上下行时间差,考察高峰时段内站台客流集散动态变化规律,得出高峰时段内站台最大客流量统计结果,如表 5 所示。

表 5 不同发车间隔和不同上下行时间差时站台最大客流量

高峰时段	发车间隔/ s	不同上下行列车时间差时站台的 最大客流量/人次				
		0 s 时	15 s 时	30 s 时	45 s 时	60 s 时
07:30—08:30	90	506	456	427	455	463
	120	588	540	493	560	573
	150	701	599	578	620	642
	180	773	678	642	712	767
	210	963	801	763	798	908
12:30—13:30	90	266	251	187	239	223
	120	348	300	212	320	333
	150	408	306	194	327	349
	180	480	385	349	419	474
	210	670	508	470	505	615
18:30—19:30	90	625	574	548	575	587
	120	708	660	621	680	693
	150	826	715	693	743	760
	180	893	798	762	832	887
	210	1 086	920	880	925	1 032

由表 5 可知,当列车发车间隔为 90 s 且上下行列车时间差为 30 s 时,3 个高峰时段内的站台最大客流量均出现了最小值,分别为 427 人次(07:30—08:30)、187 人次(12:30—13:30)、548 人次(18:30—19:30)。上述结果表明,较之其他情境,此情境下的站台服务水平和安全等级为最高。

3.2.3 疏散仿真试验

假定位于 4 号线北京南站站台中部体积为 0.4 m³ 的纤维状物体着火,火源强度为 7.5 MW;同时 4 号线上行方向 1 列 6 节编组 B 型列车停靠。以表 4 中实际统计的 3 个时段内的站台客流量最大值,以及 3 个高峰时段列车平均满载率(分别为 1.0、0.6、1.1)为依据,设定站内紧急情境、旅客疏散原则和疏散路径等内容,模拟紧急疏散过程,计算旅客紧急疏散时间。

运行仿真程序,当所有旅客皆撤离至换乘大厅出口外时,单次仿真模拟结束,此时记录仿真时长,计算得到 3 个高峰时段旅客紧急疏散时间,分别为 482 s(07:30—08:30)、336 s(12:30—13:30)、497 s(18:30—19:30)。

通过分析可知,早、晚高峰时段内的站内旅客紧急疏散时间均超过 6 min;午高峰时段内的站内

旅客紧急疏散时间满足理论要求。究其原因,是由于 4 号线北京南站站衔接高铁北京南站,其吞吐量明显大于单一线路地铁站,地铁站内单位小时旅客聚集人数较高,并呈现明显的“潮汐”现象;同时,站内组队旅客比例和负重旅客比例均大于单一线路地铁站,因此,在紧急疏散时,该站站内旅客所花费平均疏散时间较长。

4 结语

本研究形成了一种可操作的城市轨道交通车站站台客流集散动态分析方法,可为城市轨道交通运力配置、车站客流组织和风险防范提供有益参考。由于本研究的基本界定和假设,以及作者的研究能力均存在一定的局限性,在下一步研究中,将重点考虑站台排队乘客一次候车无法全部上车的情况,即列车能力和站台能力的受限条件;同时,充分考虑能够体现旅客随机性和客流分布均衡性的参数,并对暑期、春运等多情景下的客流状态进行描述,通过持续改进模型,使之更贴合实际。

参考文献

[1] 高龙.城市轨道交通枢纽集散服务网络建模与仿真研究[D].北京:北京交通大学,2017.

[2] FRUIN J J. Designing for pedestrians: A level of service concept[D].Washington D.C.: Polytechnic Institute of Brooklyn,1971.

[3] MURAMATSU M, IRIE T. Jamming transition in pedestrian counter flow[J].Physica A,1999(3): 487.

[4] GIPPS P G, MARKSJO B. A micro-simulation model for pedestrian flows[J].Mathematics and Computers in Simulation, 1985(2): 95.

[5] LOVAS G G. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow[J].Transportation Research Part B,1994(3): 429.

[6] BLUE V J, ADLER J L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways[J].Transportation Research Part B,2001,35: 293.

[7] OKAZAKI S. A study of pedestrian movement in architectural space, part 1: pedestrian movement by the application on of magnetic models[J].Transactions of the Architectural Institute of Japan,1979(3): 111.

[8] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J].Physical Review E,1995,51: 4282.

[9] HELBING D. Collective phenomena and states in traffic and self-driven many-particle systems[J].Computational Materials Science,2004,30: 180.

发生短路时,部分间距大的牵引所区间需要依靠双边联跳保护实现全范围保护。因此,直流系统保护配置方案维持与整流方式保护配置方案相同。

6 双向变流器方案的技术优势

双向变流器采用了 IGBT 模块和 PWM(脉宽调制)技术,通过 PWM 控制传输能量的大小和方向,既能实现整流又能完成逆变。该方案兼具牵引整流机组与中压能馈逆变功能,此外还具备稳定电压、提升供电质量及控制功率因数等多项优势,是城市轨道交通牵引供电技术的发展趋势和方向。该方案的优点在于:

1) 牵引回馈变压器采用高压无移相绕组,使得线圈结构更简单。线圈作为变压器的核心部件,结构越简单,相应的可靠性也会越高。借鉴牵引整流变压器的制造经验,完全可以保证牵引回馈变压器在生产制造中的品质。

2) 双向变流器具有牵引供电及再生能量回馈的能力,同时亦具备承受直流系统短路电流的能力,能够完全取代传统牵引整流机组+能量回馈装置。

3) 对于新建线路,与传统牵引整流机组+能量回馈装置比较,该方案能够有效减少设备房使用面积;对于未设置能量回馈设备用房又需增加能量回馈功能的既有线路,便于进行改造工作。

4) 该方案具有持续稳定直流牵引网网压作用,能够有效降低网损,改善列车运行环境;同时完全

取消了车载制动电阻的设置,减轻了车辆重量,一定程度上有利于列车节能。

7 结语

目前,我国各城市均在大力发展城市轨道交通建设,双向变流器牵引供电技术的研究与应用,从本质上可以改变原有牵引供电方式。因此,研发出具有完全自主知识产权的新一代牵引供电设备,实现全功率的列车牵引和制动能量自然双向变流,可以显著提升列车直流供电质量,并达到节能目的。双向变流器牵引供电技术在宁波轨道交通线路的科学研究、创新示范应用以及相关技术标准的不断完善,将为我国城市轨道交通新型牵引供电系统的应用和推广提供可靠的技术储备和保障。

参考文献

- [1] 张刚,刘志刚,牟富强.双向变流器在城轨牵引供电系统中的运用[J].都市轨道交通,2014(4): 109.
- [2] 陈德胜,刘志刚,张钢.能馈式牵引供电装置在轨道交通领域的应用[J].都市轨道交通,2014(1): 111.
- [3] 许爱国,谢少军,姚远.基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J].电工技术学报,2010(3): 121.
- [4] 余龙,张刚.双向变流器在城市轨道交通中的应用浅析[J].电气化铁道,2012(6): 42.
- [5] 夏景辉,郑宁,左广杰.地铁车辆逆变型再生制动能量回馈方案与装置的研究[J].城市轨道交通研究,2013(6): 42.
- [6] 陈勇,刘承志,郑宁.基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J].电气化铁道,2011(3): 36.

(收稿日期:2018-02-09)

(上接第 109 页)

- [10] DUIVE D C, DAAMEN W. State-of-the-art crowd motion simulation models [J]. Transportation Research Part C, 2013 (3): 193.
- [11] ZHANG Q, HAN B M, LI D W. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations[J].Transportation Research Part C,2008(5): 635.
- [12] SCHELENZ T, SUESCUN A, WIKSTROM L. Application of agent based simulation for evaluating a bus layout design from passengers' perspective [J]. Transportation Research Part C, 2014(2): 222.
- [13] SERIANI S, FERNANDEZ R. Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations[J].Transportation Re-

search Part C,2015,53: 76.

- [14] LI D W. Modeling and simulation of microscopic pedestrian flow in MTR hubs [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2007.
- [15] ZHAO N, AN S.Collaborative management of complex major construction projects: anylogic-based simulation modeling [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2016(10): 1.
- [16] 佟松贞.基于物料搬运系统认知自动化水平的制造柔性研究 [D].北京:清华大学,2013.
- [17] 贾洪飞.综合交通客运枢纽仿真建模关键理论与方法[M].北京:科学出版社,2011.

(收稿日期:2019-05-21)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704