

12-30-2023

## Simulation on High-speed Train Carriage Evacuation Considering Passengers Moving to Adjacent Carriages

Zuoan Hu

*School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China, huzuoan@swjtu.edu.cn*

Tian Zeng

*School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*

Yidong Wei

*School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*

Yi Ma

*Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610207, China, yima23\_c@scu.edu.cn*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Simulation on High-speed Train Carriage Evacuation Considering Passengers Moving to Adjacent Carriages

## Abstract

**Abstract:** To study the influence of passengers moving to adjacent carriages on high-speed train carriages' evacuation, a cellular automata model considering export selection is established. Taking the CR400BF second-class carriage as the research object, some analytical indexes such as evacuation efficiency, number of conflicts and the congestion degree are used to study the effect of passengers moving to adjacent carriages on carriage evacuation, and the passenger seat distribution, the number of passengers transferred from adjacent carriages and the opening door modes of adjacent carriages are discussed. The simulation results show that the discretized seat distribution reduces the times of conflicts by approximately 44.7%. Evacuations of passengers moving to adjacent carriages reduce the evacuation efficiency of the carriage. The evacuation time of passengers in the carriage first increases linearly with the increase of the number of moving passengers from adjacent carriages and then tends to be stable. Different door opening modes of adjacent carriages have different effects on evacuation efficiency.

## Keywords

passenger evacuation, cellular automata, simulation study, high-speed train carriage, evacuation index

## Recommended Citation

Hu Zuoan, Zeng Tian, Wei Yidong, et al. Simulation on High-speed Train Carriage Evacuation Considering Passengers Moving to Adjacent Carriages[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2614-2623.

# 考虑旅客跨车厢行为的动车组人员疏散仿真

户佐安<sup>1,2</sup>, 曾添<sup>1</sup>, 魏易东<sup>1</sup>, 马毅<sup>3\*</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 611756; 3. 四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610207)

**摘要:** 为研究旅客跨车厢行为对动车组人员疏散情况的影响, 建立考虑出口选择的元胞自动机模型。以 CR400BF 型动车组二等车为研究对象, 使用疏散效率、冲突次数和过道拥堵程度等指标, 研究旅客跨车厢现象对车厢疏散的作用, 并讨论旅客座位分布、相邻车厢转移旅客数量与车门开启方式等因素对疏散情况的影响。仿真结果表明: 离散的位置分布使冲突次数减少约 44.7%; 旅客跨车厢疏散会降低本车厢旅客疏散效率; 相邻车厢转移旅客数量与本车厢旅客疏散时长呈先线性增大后趋于稳定的关系; 相邻车厢不同车门开启方式对本车厢旅客疏散效率的影响不同。

**关键词:** 旅客疏散; 元胞自动机; 仿真研究; 动车组车厢; 疏散指标

中图分类号: TP391.9; X951 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2614-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0836

**引用格式:** 户佐安, 曾添, 魏易东, 等. 考虑旅客跨车厢行为的动车组人员疏散仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2614-2623.

**Reference format:** Hu Zuoan, Zeng Tian, Wei Yidong, et al. Simulation on High-speed Train Carriage Evacuation Considering Passengers Moving to Adjacent Carriages[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2614-2623.

## Simulation on High-speed Train Carriage Evacuation Considering Passengers Moving to Adjacent Carriages

Hu Zuoan<sup>1,2</sup>, Zeng Tian<sup>1</sup>, Wei Yidong<sup>1</sup>, Ma Yi<sup>3\*</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

**Abstract:** To study the influence of passengers moving to adjacent carriages on high-speed train carriages' evacuation, a cellular automata model considering export selection is established. Taking the CR400BF second-class carriage as the research object, some analytical indexes such as evacuation efficiency, number of conflicts and the congestion degree are used to study the effect of passengers moving to adjacent carriages on carriage evacuation, and the passenger seat distribution, the number of passengers transferred from adjacent carriages and the opening door modes of adjacent carriages are discussed. The simulation results show that the discretized seat distribution reduces the times of conflicts by approximately 44.7%. Evacuations of passengers moving to adjacent carriages reduce the evacuation efficiency of the carriage. The evacuation time of passengers in the carriage first increases linearly with the increase of the number of the number of moving passengers from adjacent carriages and then tends to be stable. Different door opening modes of adjacent carriages have different effects on evacuation efficiency.

**Keywords:** passenger evacuation; cellular automata; simulation study; high-speed train carriage; evacuation index

收稿日期: 2022-07-19 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(71901156)

第一作者: 户佐安(1979-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为交通运输组织优化、交通流。E-mail: huzuoan@swjtu.edu.cn

通讯作者: 马毅(1986-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为应急疏散动力学、交通流。E-mail: yima23\_c@scu.edu.cn

## 0 引言

我国高速铁路发展迅速, 截至 2021 年底, 我国高铁运营总里程已突破 40 000 km, 每日开行客运动车组逾 5 000 列, 日益扩张的高铁网络和大规模的旅客运输给高铁运营和管理带来了挑战。在高铁列车因紧急情况采取制动措施时, 列车不确定的停靠位置、车厢密闭狭窄的内部空间等因素会影响旅客疏散效率, 增加事故发生的风险。因此, 研究动车组车厢旅客疏散问题具有重要的现实意义。

列车车厢旅客疏散问题自 20 世纪 90 年代就引起学者的关注<sup>[1]</sup>, 学者通过开展疏散演练和可控实验获取了旅客的宏观特性。Capote 等<sup>[2]</sup>对高速铁路列车的疏散演练视频进行分析, 统计了乘客的通行时间间隔、步行速率、出口流率等参数。Capote 等<sup>[3]</sup>还以发布语音指令的方式收集乘客的反应时间。Galea 等<sup>[4]</sup>在含有无毒烟雾的铁路车厢内进行了疏散实验, 评估了末端车厢的出口流率。Fridolf 等<sup>[5]</sup>在模拟火车内开展可控实验, 讨论了出口处不同配置对出口流量的影响。李琦等<sup>[6]</sup>以长大铁路隧道为疏散场景, 通过开展实验获得了隧道内列车发生火灾时人员疏散的时间与速度。Yu 等<sup>[7]</sup>按照我国列车尺寸布置疏散场景, 模拟基于列车不同停靠位置的乘客疏散方式, 获取了青年人的疏散时长和平均疏散速率。Huang 等<sup>[8]</sup>基于车厢布局特点, 在教室内开展了座椅过道区域内人员行走的可控实验。

由于实证研究的开展受场地布置和成本控制的限制, 紧急情况下的疏散实验难以开展, 而仿真模拟手段因其成本低、自由度高及可控性强等的优点被学者广泛应用。根据模型时空和状态的特点, 人员疏散模型主要包括社会力模型(social force, SF)<sup>[9-12]</sup>和元胞自动机模型(cellular automata, CA)<sup>[13-16]</sup>, 相较于采取连续解析方程的 SF 模型, CA 模型以其高效的计算效率、灵活的可扩展性及简单的实现规则的优点而被广泛应用。不少学者基于 CA 模型并使用疏散人数、疏散时长与流量等宏观特征对旅客疏散问题进行了大量仿真研究。

Chen 等<sup>[17]</sup>建立了一个考虑出口选择的 CA 模型, 实现了车厢内乘客疏散过程的模拟。在列车不同停靠位置下, Alonso 等<sup>[18]</sup>采用宏观指标研究了旅客直接疏散至月台、借助紧急梯疏散至轨道水平 2 种疏散方式对疏散情况的影响。此外, 车厢内部布局也会影响疏散效率。Qiu 等<sup>[19]</sup>讨论了座椅过道宽度、车厢门宽和座椅间距因素对旅客疏散时长的影响。吕伟等<sup>[20]</sup>以 CRH380AL 型列车为研究对象, 讨论了车厢排列布局等因素对乘客疏散时长的影响。

然而, 现有的相关研究基本上关注宏观的疏散时间、疏散人数等参数, 较少结合宏观与微观特征对车厢疏散情况进行更为全面的评估。同时, 在现有的国内外研究中, 旅客位置分布与旅客跨车厢疏散现象对车厢疏散的影响尚不清晰。在相邻车厢车门无法开启而需要转移旅客时, 会出现旅客跨车厢疏散现象。因此, 为探讨旅客跨车厢行为对动车组车厢人员疏散情况的影响, 本文建立一个考虑出口选择的 CA 模型, 以 CR400BF 型动车组二等座车为研究对象, 采用疏散时长、冲突次数和过道拥挤等分析指标, 讨论旅客位置分布、相邻车厢旅客转移数量、相邻车厢车门开启方式等因素对车厢旅客疏散效率的影响, 以为高铁运营安全管理提供参考。

## 1 考虑出口选择的 CA 模型

### 1.1 模型描述

元胞自动机基础模型<sup>[21]</sup>由元胞、邻域、元胞空间和演化规则等构成, 其中, 邻域是元胞的作用空间。本文以动车组二等座车为仿真场景, 从俯视角度看, 车厢平面布局中的设施设备、座椅等呈矩形状, 旅客通常无法进行斜向运动, 故邻域类型选择 Von Neumann 型。在每个时间步内, 旅客可以向邻域中的空闲元胞移动, 也可以选择停留在原地。旅客位置和 Von Neumann 邻域的位置关系如图 1 所示。

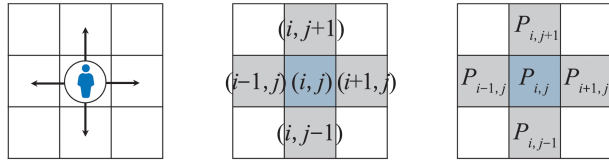


图1 Von Neumann 型 CA 模型  
Fig. 1 CA model of Von Neumann type

在每个时间步内，位于  $(i, j)$  的旅客将依据每个邻域元胞  $(m, k)$  的转移概率  $P_{m,k}$  确定目标位置，其中， $m \in \{i, i+1, i-1\}, k \in \{j, j-1, j+1\}$ 。

$$P_{m,k} = \frac{N_{m,k}}{\sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{k=j-1}^{j+1} N_{m,k}} \quad (1)$$

式中： $P_{m,k}$  为位于  $(i, j)$  的旅客移动到邻域  $(m, k)$  的转移概率； $N_{m,k}$  为位置  $(m, k)$  的势场。

$$N_{m,k} = \exp(k_s S_{m,k} + k_d D_{m,k}) (1 - \mu_{m,k}) \xi_{m,k} \psi_{m,k} \quad (2)$$

式中： $S_{m,k}$  和  $D_{m,k}$  分别为元胞  $(m, k)$  的静态场和动态场； $k_s$  和  $k_d$  为对应的控制系数，其中， $k_s$  表示旅客对车厢环境的熟悉程度， $k_d$  表示跟随其他旅客的趋势； $\psi_{m,k}$  为惯性因子，若  $t+1$  的期望方向与  $t$  时刻一致，则  $\psi_{m,k} = \exp(1.2)$ ，若方向相反，则  $\psi_{m,k} = \exp(-0.8)$ ，否则  $\psi_{m,k} = 1.0$ 。 $\mu_{m,k}$  和  $\xi_{m,k}$  的表示规则按式(3)和(4)确定：

$$\mu_{m,k} = \begin{cases} 1, & \text{邻域 } (m, k) \text{ 被旅客占据} \\ 0, & \text{邻域 } (m, k) \text{ 处于空闲状态} \end{cases} \quad (3)$$

$$\xi_{m,k} = \begin{cases} 1, & \text{邻域 } (m, k) \text{ 未被障碍物占据} \\ 0, & \text{邻域 } (m, k) \text{ 已被障碍物占据} \end{cases} \quad (4)$$

静态场的计算方法采用文献[22]所提出的基于 Dijkstra 算法的改进公式，引入符号  $d_{i,j}^h$  表示元胞  $(i, j)$  和出口  $h$  之间的可行距离，计算步骤如下。

step 1: 建立两层初始矩阵  $f_{i,j}^h, e_{i,j}^h$ ，令  $k=1$ ，初始化元胞的矩阵元素值，确定规则为

$$f_{i,j}^h, e_{i,j}^h = \begin{cases} 0, & (i, j) \text{ 未被障碍物占据} \\ -1, & (i, j) \text{ 已被障碍物占据} \end{cases} \quad (5)$$

step 2: 令出口处满足  $f_{i,j}^h, e_{i,j}^h = 0$  的邻域元素值设为  $f_{i,j}^h, e_{i,j}^h = k$ 。

step 3: 对  $f_{i,j}^h = k$  的元胞  $(i, j)$ ，在其 Von Neumann 型邻域范围内搜索满足  $f_{i,j}^h = 0$  的元胞，令

$f_{i,j}^h = k+1$ ；对  $e_{i,j}^h = k$  的元胞  $(i, j)$ ，在其 Moore 型邻域范围内搜索满足  $e_{i,j}^h = 0$  的元胞，令  $e_{i,j}^h = k+1$ 。

step 4:  $k=k+1$ ，以此类推，直至所有  $f_{i,j}^h, e_{i,j}^h \neq 0$  为止，则继续 step 5；否则，回到 step 3。

step 5: 对矩阵内的所有元胞  $(i, j)$ ，计算可行距离  $d_{i,j}^h = \gamma f_{i,j}^h + (1-\gamma)e_{i,j}^h$ ，其中， $\gamma \in [0, 1]$ 。最后计算所有元胞  $(i, j)$  的静态场  $S = d - d_{i,j}^h$ ，其中， $d = \max_h \{ \max_{(i,j)} (d_{i,j}^h) \}$ 。

旅客在进行出口的选择会受行人流动的影响而跟随其他旅客，形成从众现象。动态场  $D_{i,j}$  表示行人的从众趋势， $d_{i,j}^t$  表示截至  $t$  时刻通过元胞  $(i, j)$  的行人数量。动态场值的计算步骤如下。

step 1: 初始时刻，初始化所有元胞的动态场值， $d_{i,j}^0 = 0, i \in [1, L], j \in [1, W]$ 。

step 2: 在  $t+1$  时刻，行人若离开元胞  $(i, j)$  前往目标位置，则在  $t$  时刻的方向  $o$  上的元胞  $(i, j)$  的动态场值为  $d_{i,j(o)}^{t+1} = d_{i,j(o)}^t + 1$ 。

step 3: 在每个时间步内， $d_{i,j}^t$  以一定的概率扩散和衰减，其具体计算式为

$$d_{i,j(o)}^{t+1} = \alpha \frac{(1-\beta)}{4} \sum d_{(o)}^t + (1-\alpha)(1-\beta)d_{i,j(o)}^t \quad (6)$$

$$\sum d_{(o)}^t = d_{i-1,j(o)}^t + d_{i,j+1(o)}^t + d_{i+1,j(o)}^t + d_{i,j-1(o)}^t \quad (7)$$

式中： $\alpha$  为扩散系数； $\beta$  为衰减系数。最后对动态场值进行无量纲化处理：

$$D_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{\sum_i \sum_j d_{i,j}} \quad (8)$$

### 1.1.1 车门选择规则

旅客在进行车门选择时，会综合考虑座位和出口的相对距离、前往出口的旅客人数 2 种因素。在旅客进入车厢过道前，进行出口决策，选择概率最大的车门作为出口目标，并在每个时间步后更新位置朝目标车门移动。在位置更新过程中，走廊中的旅客会基于走廊两侧旅客数量再次进行车门的選擇。旅客选择出口  $h$  的概率为

$$P_{i,j}^h = \frac{C_{i,j}^h}{\sum_{m=1}^n C_{i,j}^h} \quad (9)$$



$$C_{i,j}^h = \varphi S_{i,j}^h + \eta / Q^h \quad (10)$$

式中:  $C_{i,j}^h$  为位于  $(i,j)$  的旅客选择出口  $h$  的权重值;  $S_{i,j}^h$  为出口  $h$  吸引场中  $(i,j)$  的静态场值;  $Q^h$  为前往出口  $h$  的旅客数量;  $\varphi$  和  $\eta$  为旅客对相对距离和排队人数的感知系数, 取值范围均为  $[0,1]$ 。

### 1.1.2 排斥和摩擦概率

在车厢过道内, 为描述旅客为躲避或相对行人和障碍物运动而出现的排斥和摩擦行为, 引入排斥概率和摩擦概率<sup>[23-24]</sup>:

$$P_r = (1 - e^{-\rho v}) / (1 + e^{-\rho v}) \quad (11)$$

$$P_f = \theta v \quad (12)$$

式中:  $\rho$  和  $\theta$  分别为排斥和摩擦系数, 取值范围为  $[0, 1]$ ;  $v$  为相对速度。

## 1.2 旅客疏散仿真流程

更新流程如图 2 所示, 首先初始化仿真环境, 接着计算静态场与动态场, 采用同步更新方式更新旅客位置, 若出现 2 位及以上旅客竞争同一位置的现象, 视为发生 1 次冲突, 并随机选择 1 名旅客进入该位置, 其余旅客停留在原位置。

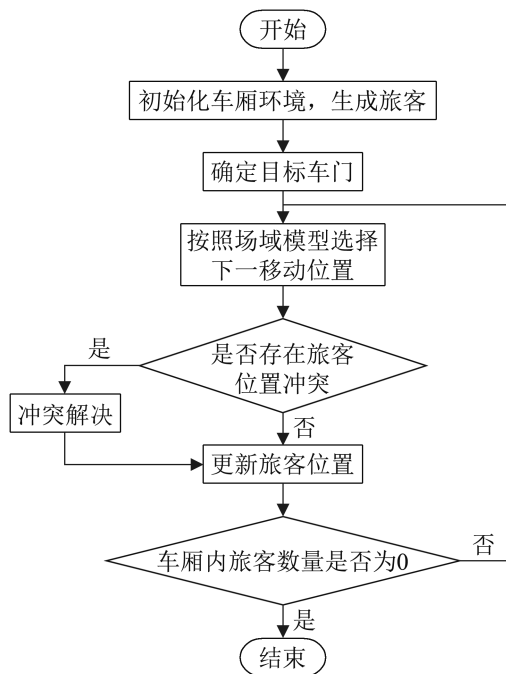


图2 列车车厢旅客疏散仿真流程

Fig. 2 Simulation process of train passenger evacuation

## 2 仿真与结果分析

### 2.1 仿真疏散指标分析

本文研究场景为列车因紧急情况停靠在高铁站站台时的旅客疏散问题, 应用考虑出口选择的元胞自动机模型进行多次仿真, 并选取如下指标分析仿真结果:  $T$  为疏散时长;  $F$  为累计冲突次数;  $N_{in}(t)$  为从仿真起始时刻到  $t$  时刻期间进入走廊的累计旅客数量;  $N_p(t)$  为  $t$  时刻走廊实时的旅客数量;  $l(t)$  为相邻旅客的平均间距。其中, 相邻旅客平均间距  $l(t)$  的计算式为

$$l(t) = \frac{q(t)}{N(t) - 1} \quad (13)$$

式中:  $q(t)$  为  $t$  时刻的队列总长度, 单位为 m。

### 2.2 参数确定与仿真环境场景构建

为简化问题, 本文不考虑行人的异质性、携带行李行为。为保证数据的有效性, 对同一场景仿真 20 次, 取平均值作为仿真结果。除特别标注外, 模型仿真参数取值情况如表 1 所示。旅客速度  $v = 1 \text{ m/s}$ , 运行时间步长  $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ 。

表 1 模型参数取值  
Table 1 Parameter values of model

参数符号	取值	参数符号	取值
$k_s$	5	$\varphi$	0.7
$k_d$	1	$\eta$	0.3
$\gamma$	$\sqrt{2} - 1$	$\rho$	0.2
$\alpha$	0.2	$\theta$	0.2
$\beta$	0.2		

动车组包含商务座车、一等座车、二等座车等, 其中, 二等座车相对其他车种有更多的座位数量, 且其布局更为紧凑, 故选取 CR400BF 型二等座车作为仿真场景, 仿真场景示意如图 3 所示。将车厢内部环境划分为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的矩形。车厢出口一般可同时容纳 2 人拥挤通过, 然而旅客在通过车门时, 会形成一股单列流通过车门<sup>[8,25]</sup>, 故仿真场景中车门宽度定义为 1 个元胞宽度。

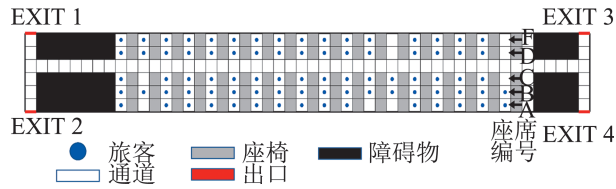


图3 仿真场景  
Fig. 3 Simulation scene

### 2.3 无旅客跨车厢疏散情况分析

#### 2.3.1 车厢内旅客疏散过程的分析

研究中不存在旅客跨车厢疏散现象的疏散情况。在车厢旅客疏散过程中，由于旅客选择出口受座位与出口相对距离的影响，车厢中部旅客的平均疏散时间比车厢两侧旅客长 54.7%，靠过道处(C列与D列)的旅客几乎先于靠车窗处(F列与A列)的旅客完成疏散，具体如表 2 与图 4 所示，其中，图 4 中的座席编号对应的座位详见图 3。

表 2 座位各区域疏散时长情况  
Table 2 Evacuation time of each seat area s

位置	均值	25%值	75%值	最小值
前部	34.00	20.5	48.0	8.0
中部	71.25	64.5	79.5	51.5
后部	30.50	16.5	43.0	6.5

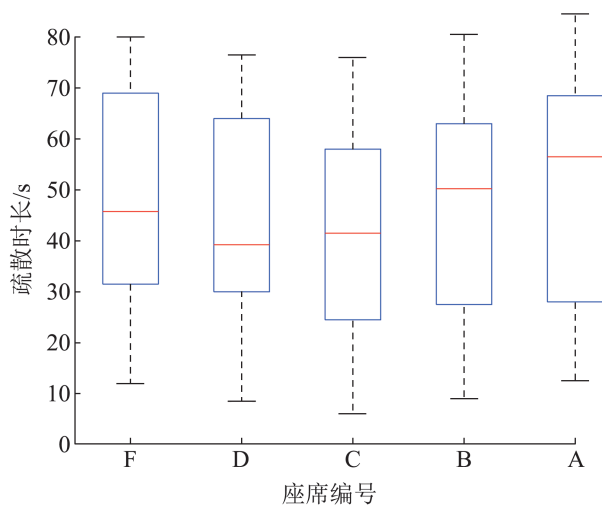


图4 车厢各座位的旅客疏散情况  
Fig. 4 Passenger evacuation of each seat in carriage

如图 5 所示，在列车开启车门后，旅客进入走廊，座椅区域和过道区域实时人数分别迅速下

降和上升。由于首位旅客疏散时长约为 7.7 s，已疏散人数并没有迅速增加。在疏散中期，由于走廊队列的拥挤现象，过道区域实时人数达到最大值，座椅区域实时人数变化率减小，滞留在座椅区域的旅客等待队列空隙出现后进入过道。随着疏散的进行，走廊队列的拥堵程度逐渐缓解，仍滞留在座椅区域的旅客进入走廊，并根据两侧队列长度和相对出口距离选择出口，直至走廊形成稳定的单队列运动，至此车厢内所有旅客完成疏散。

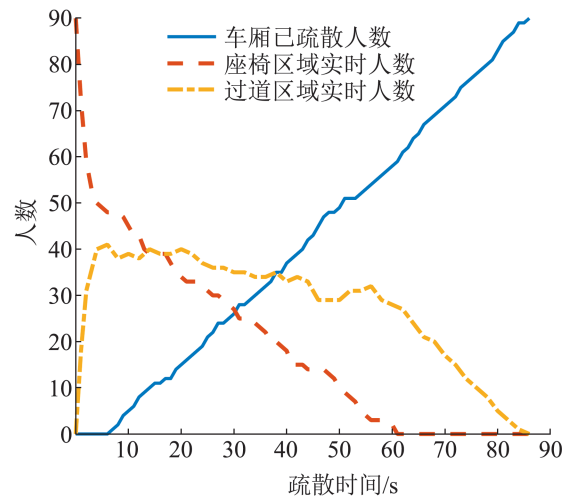


图5 车厢内旅客的疏散过程  
Fig. 5 Simulation of passenger evacuation in carriage

#### 2.3.2 旅客位置分布对疏散过程的影响

为研究旅客位置的不同分布对车厢疏散过程的影响，在车厢旅客人数为 50 人的前提下，设定 4 种疏散场景：场景 A 为前 5 排和后 5 排均坐满旅客；场景 B 为每隔一排坐满旅客；场景 C 为交叉安排旅客就座；场景 D 为每排间隔一个空位安排旅客就座，具体布置如图 6 所示。

仿真结果用疏散时间与冲突次数表示，其中，冲突次数指车厢旅客疏散过程中发生冲突的累计次数。如图 7 所示，从宏观角度看，不同的旅客位置分布对整体疏散时长的影响较小，平均疏散时长为 50.5 s，标准差  $\delta=2.58$ 。在疏散初期，靠过道处的旅客迅速同时进入走廊，冲突次数迅速增

大, 随着疏散的继续, 走廊队列逐渐形成自由稳定的单列流运动, 冲突次数增长率逐渐减小直至趋于 0。由于场景 A 的旅客集中于通道两端, 仿真过程中观察到场景 A 的累积冲突次数达 46 次, 相较于场景 D 高了 44.7%, 其他场景的旅客座位分布均相对场景 A 更为离散, 在疏散过程中存在较多队列空隙。

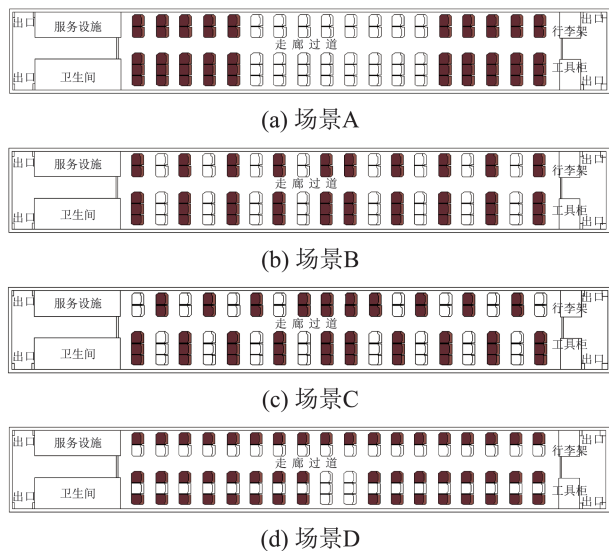


图 6 车厢内不同旅客位置分布场景

Fig. 6 Different passenger location distribution scenarios

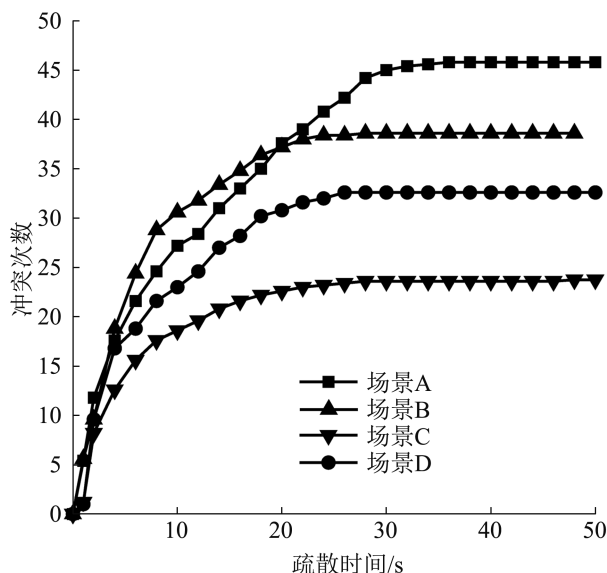


图 7 不同疏散场景的冲突情况

Fig. 7 Number of conflicts in different evacuation scenarios

同时, 采用过道拥挤程度指标  $N_{in}(t)$  与  $N_p(t)$ <sup>[26]</sup> 分析仿真结果, 以从微观角度研究不同位置分布对疏散过程的影响。如图 8 所示, 在疏散初期, 旅客进入走廊通道,  $N_{in}(t)$  和  $N_p(t)$  均迅速增大。随着疏散的进行, 由于过道进入拥挤状态, 仍位于座椅区域的旅客无法立即进入走廊, 只能等待队列出现空隙后进入走廊, 此时  $N_{in}(t)$  的变化率逐渐减小, 直至  $N_{in}(t)$  达到最大值, 而  $N_p(t)$  趋于稳定而逐渐下降, 表明走廊旅客将从一段时期的饱和状态逐渐转为自由流状态, 直至  $N_p(t)$  减小至 0。此外, 与其他 3 种场景相比, 场景 A 的  $N_{in}(t)$  与  $N_p(t)$  的变化趋势更为缓和, 这是由于旅客集中分布于出口两端, 冲突现象出现更为频繁, 降低了疏散效率。

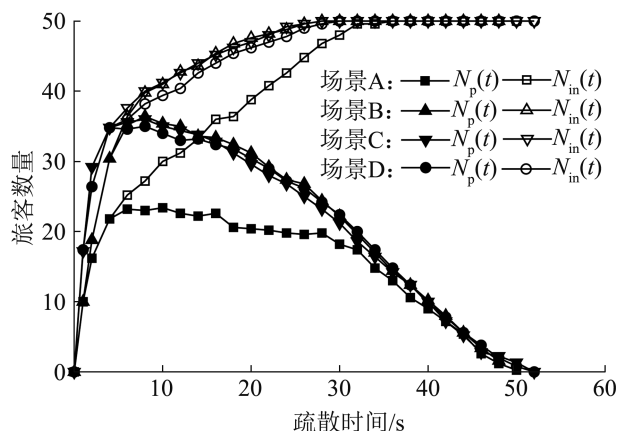


图 8 不同疏散场景中  $N_{in}(t)$  和  $N_p(t)$  的变化过程

Fig. 8 Process of cumulative number of  $N_{in}(t)$  and  $N_p(t)$  in different evacuation scenarios

因此, 动车组车厢运营管理部门可基于此仿真结果改进售票模式, 在安排旅客就座时, 应尽量离散性地分布座位, 以在紧急情况发生时确保旅客完成安全疏散。

## 2.4 有旅客跨车厢疏散情况分析

### 2.4.1 车厢旅客疏散情况分析

相邻车厢因停靠位置等原因导致车门无法开启时, 需要将相邻车厢旅客转移至正常开启车门的本车厢完成疏散。为研究旅客跨车厢疏散现象



对疏散过程的影响,以两节二等座车厢为研究对象,假设相邻车厢车门均无法开启,以相邻车厢与本车厢旅客的疏散时长、整体冲突次数与本车厢的过道拥挤程度为分析指标,其中,过道拥挤程度采用相邻旅客的平均间距 $l(t)$ <sup>[26]</sup>来分析,其指标含义详见2.2节。

如表3和图9所示,与无旅客跨车厢疏散情况相比,旅客跨车厢疏散情况(相邻车厢转移旅客数量为15人)的存在使本车厢旅客疏散总时间增加7.9%、冲突次数增加30.4%。如图9所示,在疏散初期, $l(t)$ 均减小至最小值,走廊队列迅速进入拥堵状态。随着疏散的进行, $l(t)$ 逐渐增大,走廊从拥挤状态逐渐地转为自由流状态,当存在旅客跨车厢疏散情况时,相邻车厢旅客转移至本车厢,因此,本车厢拥堵时间更长且拥堵程度更为严重。

表3 车厢旅客疏散时长情况  
Table 3 Evacuation time of passengers in carriages of high-speed railway trains

有无旅客跨车厢疏散	位置	$t_{total}$	$t_{first}$	$t_{ave}$
无	本车厢	85.65	6.95	46.04
	相邻车厢	92.95	6.60	52.33
有	本车厢	52.10	10.55	32.13
	相邻车厢	52.10	10.55	32.13

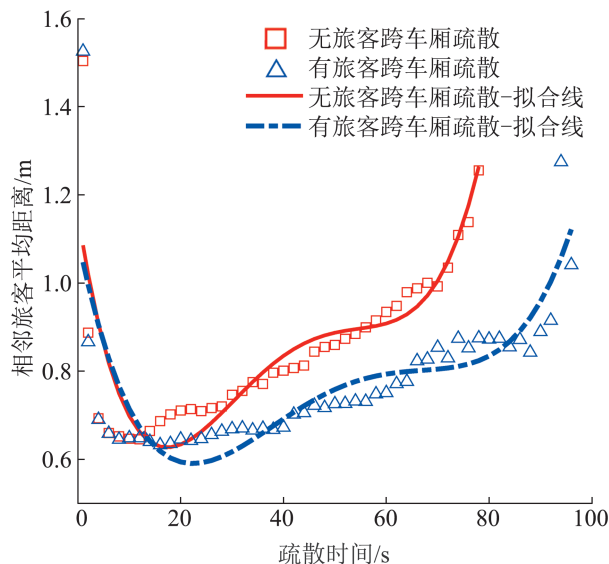


图9 本车厢过道拥挤程度与疏散时间的关系  
Fig. 9 Relationship between degree of congestion in seat aisles in this carriage and evacuation time

#### 2.4.2 相邻车厢转移旅客数量对疏散过程的影响

以相邻车厢转移旅客数量为自变量,当自变量为0、15、30、45、60、75、90人时,以冲突次数与疏散时长为指标分析车厢整体疏散情况。

如图10所示,冲突次数和相邻车厢转移旅客人数关系的相关系数 $R^2=0.97$ , $F=192.74$ , $p=0.000\ 03<0.05$ ,呈线性相关。当相邻车厢转移旅客人数小于45人时,相邻车厢转移旅客人数与本车厢旅客疏散时长的相关系数 $R^2=0.99$ , $F=217.25$ , $p=0.004\ 6<0.05$ ,可见相邻车厢转移旅客人数对本车厢旅客疏散情况影响显著;在相邻车厢转移旅客人数为45人时,本车厢疏散时长增加25.5%,冲突次数增加50.1%;当相邻车厢转移旅客人数大于45人时,本车厢旅客疏散时长趋于稳定,先于相邻车厢旅客完成疏散,相邻车厢旅客的疏散时长增大。

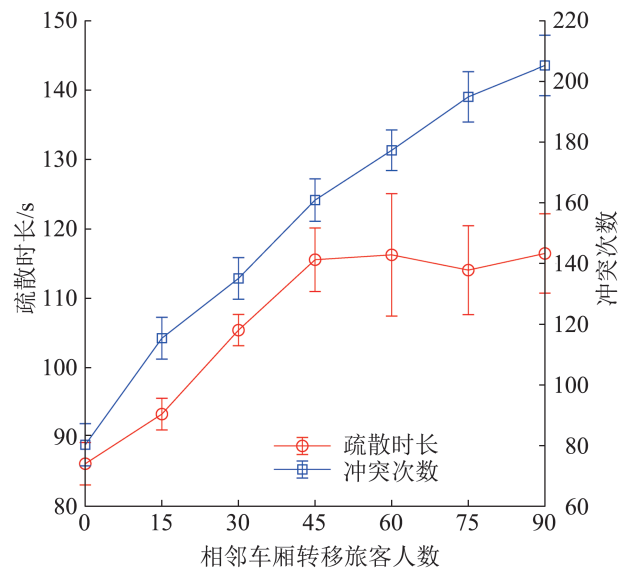


图10 相邻车厢转移旅客数量对疏散情况的影响  
Fig. 10 Influence of number of passengers transferred from adjacent carriages on evacuation situation

#### 2.4.3 相邻车厢车门开启方式对疏散过程的影响

假设本车厢与相邻车厢旅客人数满载(90人),以本车厢与相邻车厢的疏散时长、过道拥挤程度 $l(t)$ 为研究指标,设置仿真场景:C1场景为相邻车

厢出口均无法开启; C2场景为相邻车厢仅开启一出口, 并分析相邻车厢单出口关闭与出口均关闭的情况对疏散情况的影响。

仿真结果如图11与12所示, 各场景编号上方的数字表示旅客平均疏散时间, 如C1本车厢场景的旅客平均疏散时间为54.48 s。在C1场景中, 相邻车厢旅客全部前往本车厢疏散, 导致相邻车厢旅客的疏散时间相较于本车厢旅客滞后54.54%。在C2场景中, 由于相邻车厢单车门的开启, 相邻车厢的旅客可以从相邻车厢疏散或跨车厢至本车厢, 相邻车厢旅客疏散时间相较于本车厢旅客疏散时间滞后44.13%。此外, 相较于相邻车厢只能开启单车门的情形, 当相邻车厢两车门均无法开启时, 本车厢旅客平均疏散时长增加了12.44%,  $k(t)$ 拥挤时间增加了16.32%, 该结论指出了车厢门全开启的重要性。

因此, 在列车因停靠位置等原因导致部分车厢车门无法开启时, 可采取人工开启车门或破窗增加疏散出口的措施, 以尽可能减少旅客跨车厢疏散现象对本车厢旅客疏散效率的影响。

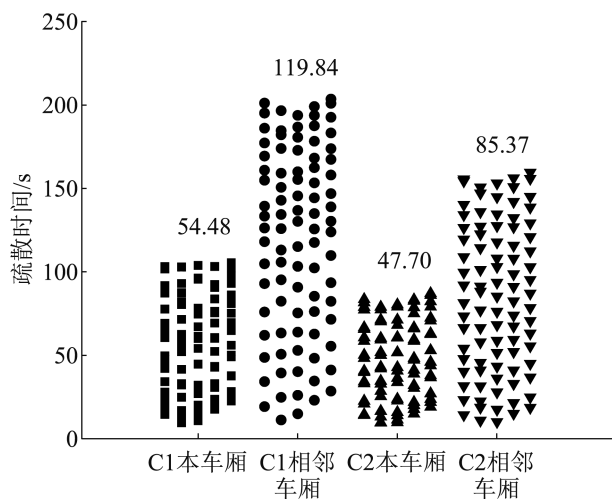


图11 相邻车厢车门开启方式对疏散时长的影响  
Fig. 11 Influence of number of opening-doors of adjacent carriages on carriage evacuation time

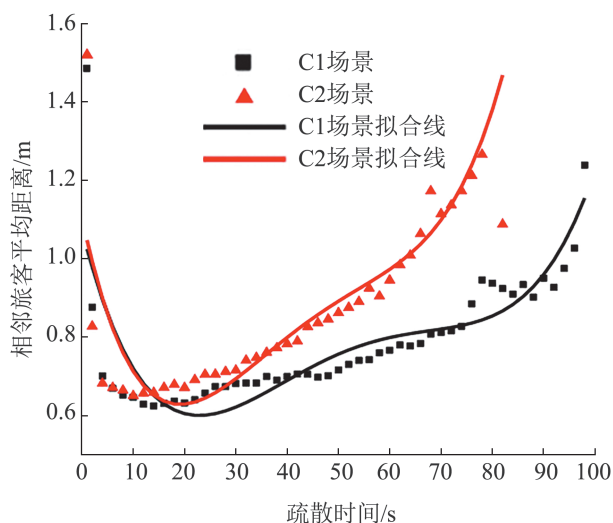


图12 相邻车厢车门开启方式对本车厢拥挤程度的影响  
Fig. 12 Influence of number of opening-doors of adjacent carriages on congestion degree of this carriage

### 3 结论

本文建立基于元胞自动机的动车组车厢旅客疏散模型, 采用疏散时长、冲突次数与拥堵程度指标分析车厢疏散情况, 得出以下的结论:

(1) 在安排旅客就座时, 相较于集中就座所引起的冲突次数, 采取交叉离散分布座位的方式减少了约44.7%, 为动车组车厢售票模式提供了改善的依据。

(2) 旅客跨车厢现象的存在会增加车厢旅客疏散时长与加重走道的拥挤程度。

(3) 相邻车厢转移旅客数量小于45人时, 对车厢疏散情况的影响显著; 在相邻车厢转移旅客数量大于45人时, 本车厢旅客疏散时长趋于稳定, 先于相邻车厢旅客完成疏散。因此, 在本车厢满载时, 控制相邻车厢转移旅客数量不超过车厢额定人数的一半。

(4) 相较于相邻车厢仅开启单车门的情形, 相邻车厢车门均无法开启的情形会使本车厢旅客平均疏散时长增加12.44%。车厢门全开启的方式有利于提高旅客疏散效率。

本文为动车组车厢的疏散研究提供了参考,

对我国动车组车厢疏散管理有一定的借鉴作用。本文的研究场景为列车因紧急情况停靠在站台时的旅客疏散问题,然而,列车因紧急情况停靠在非站台时的疏散问题也值得研究,未来的研究将继续改进模型以描述旅客无序疏散行为,研究高速列车疏散方案等因素对车厢疏散效率的影响。

### 参考文献:

- [1] Keenan M T, Pittman K G, Stephens P J, et al. Passenger Detrainment and Tunnel Evacuation-theory, Modelling and Experience[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1994, 208(2): 115-122.
- [2] Capote J A, Alvear D, Abreu O, et al. Analysis of Evacuation Procedures in High Speed Trains Fires[J]. Fire Safety Journal, 2012, 49: 35-46.
- [3] Capote J A, Alvear D, Abreu O, et al. A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains[J]. Fire Technology, 2012, 48(4): 911-925.
- [4] Galea E R, Gwynne S. Estimating the Flow Rate Capacity of an Overturned Rail Carriage End Exit in the Presence of Smoke[J]. Fire and Materials, 2000, 24(6): 291-302.
- [5] Fridolf K, Nilsson D, Håkan Frantzich. The Flow Rate of People During Train Evacuation in Rail Tunnels: Effects of Different Train Exit Configurations[J]. Safety Science, 2014, 62: 515-529.
- [6] 李琦,王明年,于丽.长大铁路隧道火灾模式下人员疏散试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(6):78-84.  
Li Qi, Wang Mingnian, Yu Li. Experimental Study on Evacuation Under Fire Mode in Long and Large Railway Tunnel[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 78-84.
- [7] Yu Li, Deng Tao, Wang Mingnian, et al. Passengers' Evacuation from a Fire Train in Railway Tunnel[J]. International Journal of Rail Transportation, 2019, 7(3): 159-172.
- [8] Huang Shenshi, Lu Shouxiang, Lo S, et al. Experimental Study on Occupant Evacuation in Narrow Seat Aisle[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 502: 506-517.
- [9] Chen Xu, Treiber M, Kanagaraj V, et al. Social Force Models for Pedestrian Traffic-state of the Art[J]. Transport Reviews, 2018, 38(5): 625-653.
- [10] 隋杰,龙圣杰.生化恐怖袭击下行人应急引导疏散仿真研究[J].系统仿真学报,2017,29(4):767-774,783.  
Sui Jie, Long Shengjie. Research on Simulation of Emergency Evacuation Guidance Under Biochemical Terror Attacks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 767-774, 783.
- [11] 李昌华,杨晶,李智杰.一种应用于人群仿真的改进社会力模型[J].系统仿真学报,2021,33(3):521-528.  
Li Changhua, Yang Jing, Li Zhijie. An Improved Social Force Model for Crowd Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 521-528.
- [12] 郭海湘,曾杨,陈卫明.基于社会力模型的多出口室内应急疏散仿真研究[J].系统仿真学报,2021,33(3):721-731.  
Guo Haixiang, Zeng Yang, Chen Weiming. Research on Indoor Emergency Evacuation Simulation of Multi-exit Based on Social Force Model[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 721-731.
- [13] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-dimensional Cellular Automaton[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 295(3/4): 507-525.
- [14] Tang Tieqiao, Shao Yixiao, Chen Liang, et al. Modeling Passengers' Boarding Behavior at the Platform of High Speed Railway Station[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017: 4073583.
- [15] Tang Tieqiao, Shao Yixiao, Chen Liang, et al. Exploring Boarding Strategies for High-speed Railway[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019: 4319254.
- [16] 宋英华,张宇,霍非舟,等.考虑避让行为的人员疏散元胞自动机模型研究[J].系统仿真学报,2020,32(6):975-981.  
Song Yinghua, Zhang Yu, Huo Feizhou, et al. Study on Evacuation Cellular Automaton Model Considering Avoidance Behavior[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(6): 975-981.
- [17] Chen Changkun, Sun Yunfeng, Li Zhi. Simulation of Evacuation Processes Using Cellular Automaton Model for Carriage Passenger Dynamic[C]//2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 580-583.
- [18] Alonso V, Abreu O V, Cuesta A, et al. A New Approach for Modelling Passenger Trains Evacuation Procedures[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 160: 284-293.
- [19] Qiu Hanzhao, Fang Weining. Effect of High-speed Train Interior Space on Passenger Evacuation Using Simulation Methods[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 528: 121322.
- [20] 吕伟,秦霜霜,穆治国,等.CRH380AL型高铁列车应急

- 疏散及影响因素模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 164-170.
- Lü Wei, Qin Shuangshuang, Mu Zhiguo, et al. Simulation Study on Evacuation of CRH380AL High-speed Train and Its Influencing Factors[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 164-170.
- [21] 郭谨一, 刘爽, 陈绍宽, 等. 行人运动仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2237-2242.
- Guo Jinyi, Liu Shuang, Chen Shaokuan, et al. Review of Pedestrian Movement Simulation Studies[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2237-2242.
- [22] Li Chuanyao, Yang Ruiyu, Chen Liang, et al. A Boarding Model for Heterogeneous Passengers on the Platform of High-speed Railway Station[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021, 106: 102188.
- [23] 江雨燕, 刘军. 基于元胞自动机的普通超市火灾疏散模型的构建[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(11): 3330-3333.
- Jiang Yuyan, Liu Jun. Construction of Fire Evacuation Model for Ordinary Supermarket Based on Cellular Automata[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(11): 3330-3333.
- [24] 萨木哈尔·波拉提, 邹馨捷, 郝明, 等. 基于元胞自动机的人员疏散模型探讨[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5): 122-127.
- Samuhaer-Bolati, Zou Xinjie, Hao Ming, et al. Discussion on the Evacuation Model of Personnel Based on Cellular Automata[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(5): 122-127.
- [25] Capote J A, Alvear D, Abreu O, et al. An Evacuation Model for High Speed Trains[M]//Peacock R D, Kuligowski E D, Averill J D. Pedestrian and Evacuation Dynamics. Boston, MA: Springer US, 2011: 421-431.
- [26] 黄申石. 高速列车座椅过道区域内的人员运动特征与疏散行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- Huang Shenshi. Study of Pedestrian Movement Characteristics and Evacuation Behaviors in Seat Aisle Area of High-speed Train[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.