

# 基于 NFPA 130:2023《固定轨道交通和客运铁路系统标准》的地铁列车人员疏散模型

刘彦彤 田鑫 孙勇 张术

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

**摘要** [目的] 由于地铁列车空间相对狭小、载客量较大, 其消防和生命安全问题在公共交通行业中备受关注。为了评估美国某城市铁路系统的地铁列车紧急疏散模型, 根据 NFPA (美国防火协会) 编制的 NFPA 130:2023《固定轨道交通和客运铁路系统标准》中, 关于地板结构耐火时间的设计要求, 对比人员必要的疏散时间与可用疏散时间, 验证列车防火设计的合理性。[方法] 利用人员疏散能力模拟软件 Pathfinder 建立人员疏散模型, 分析车内人员逃生至某安全位置的疏散时间, 以及在不同紧急停车条件下不同编组列车的疏散时间。[结果及结论] 两辆联挂列车在满载情况下的站台疏散时间小于 1 min。在隧道内, 4 辆及 6 辆编组列车的人员从列车内疏散至安全通道的时间分别为 12 min 和 17 min。基于上述疏散时间, 考虑制动时间后的总疏散用时仍小于地板结构耐火的 30 min, 证明了地板结构耐火设计的合理性。

**关键词** 地铁列车; 人员疏散; 逃生模型

**中图分类号** U231.96

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.02.003

## Metro Train Passenger Evacuation Model Based on NFPA 130:2023 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems

LIU Yantong, TIAN Xin, SUN Yong, ZHANG Shu  
(National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] Due to the relatively confined space and high passenger capacity of metro trains, fire safety and life protection are attracting significant attentions in the public transportation industry. To evaluate the emergency evacuation model of metro train in a certain American city rail system, the design requirements for floor structure fire resistance time, as specified in the NFPA 130:2023 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems issued by the National Fire Protection Association (NFPA), are adopted. The required evacuation time (RET) of passengers is compared with the

available safe evacuation time (ASET) to verify the feasibility of the train fire protection design. [Method] Using the passenger evacuation capacity simulation software Pathfinder, an evacuation model is established to analyze the time required for passengers to escape from the train to a designated safe location, and the evacuation time from trains of different formations under various emergency stop conditions. [Result & Conclusion] The evacuation time to platform from two coupled trains under full-load conditions is less than 1 minute. In tunnels, the evacuation time for passengers from 4-car and 6-car train formations to the safe passage are 12 to 17 minutes respectively. Based on the aforementioned evacuation time, the total evacuation time including braking remains under the 30-minute threshold for floor structure fire resistance, proving the feasibility of the floor structure fire resistance design.

**Key words** metro train; personnel evacuation; escape model

地铁作为主要的公共交通方式之一, 已在全世界范围获得了广泛应用。大部分情况下, A 型地铁列车每节车辆的车厢内面积小于  $100 \text{ m}^2$ , 人员疏散分析涉及到人员数量, 美国相关标准要求按照列车 AW3 (超常载荷) 状态计算, 即按  $6 \text{ 人/m}^2$  计算, 同时需考虑列车座椅及司机室的布置情况。在 NFPA (美国消防协会) 编制的 NFPA 130:2023《固定轨道交通和客运铁路系统标准》中, 要求列车地板具有一定的耐火性能, 且能在 ASTM (美国材料实验协会) 编制的 ASTM E119:2012 *Standard test methods for fire tests of building construction and materials* 标准下, 满足 30 min 结构耐火性要求, 并以此作为人员可用疏散时间的评估依据。

在地铁系统中, 各种运行工况下的轨道列车人员紧急疏散是一个备受关注的问题, 为验证车辆设计能够有效辅助人员疏散, 业内常采用仿真分析方法开展相关研究<sup>[1-3]</sup>。与利用实际试验模拟人员疏散相比, 基于计算机建模的分析方法更节省计算时

间和计算成本,易于获得可靠的分析结果。

本文基于人员疏散能力模拟软件 Pathfinder 建立人员疏散模型,开展人员疏散分析,评估人员疏散效率并验证车辆设计的合理性。

## 1 Pathfinder 软件建模原理

Pathfinder 软件由 3 个模块组成:图形模块、用户界面模块、模拟器模块。在默认情况下,对于每个时间步长,Pathfinder 软件可以评估每个人员的疏散情况,通过设置路径规划、路径生成和路径跟随,使人员到达相应的目的地。路径规划是指寻路者决定向目的地移动的计划过程,考虑到达目的地可能有多个路径,每个路径均有一个路径长度和在该路径上的逃生人员。路径生成是指路径查找器根据用户和其他居住者手动输入的障碍物(如墙壁或家具),从当前人员的位置确定到达目的地所需路径的过程。路径跟踪是指寻路器根据疏散人员的速度、加速度和障碍物或其他人员的躲避情况,确定每个乘员所遵循路径组成部分的过程。

软件操作者可以通过选择路径点来改变路径规划过程,路径点是软件操作者在模型中要求人员必须通过的区域。例如,用户设置使用主入口疏散 50% 的人员,则该主入口即为路径点。在疏散过程中涉及到使用电梯的情况时,用户可以要求使用任何一个特定的电梯,剩下的路径规划由 Pathfinder 软件根据固有模型进行计算获得。

Pathfinder 模拟软件提供了 SFPE(国际消防工程师学会)模式和 Steering 模式下的计算运动选项。SFPE 模式能够实现在《SFPE 消防工程手册》和《SFPE 工程指南:火灾中的人类行为》中提出的,基于流程的出口建模技术。《SFPE 消防工程手册》中指出,SFPE 计算模式采用了流量模型,定义了通过门和走廊的行走速度和流量。在 SFPE 模式下,多个人员可以占据相同的空间。在转向模式下,Pathfinder 软件结合了转向机构和碰撞处理来控制人员遵循所设置的急转弯曲线路径。这些转向机构和碰撞处理允许人员偏离所设定的路径,但同时大体上仍朝着目的地的正确方向前进。为了获得更真实的计算结果,本文采用 Steering 模式进行分析。

Pathfinder 软件能够提供较为实用的建模工具,如 Polygonal、Room、Rectangular Room 等。Pathfinder 软件中对人员特征的描述有肩宽和身高。用户可以根据需求自行设定出口对行人的吸引程度、行人

可以通过的最小宽度、人员最大步行速度等参数。

Steering 模式中,人员路径决策系统计算步骤如下。

步骤 1 计算当前期望速度  $v(D)$  和加速度  $a_{\max}$ ,则有:

$$v(D) = v_{\max} \frac{0.85k}{1.19} \quad (1)$$

$$a_{\max} = \frac{v_{\max}}{t_{\text{ace}}} \quad (2)$$

式中:

$k$ ——疏散速度常数,平面和坡道时取为 1.4,楼梯则按表 1 取值;

$v_{\max}$ ——最大步行速度,由用户设定,单位 m/s;

$t_{\text{ace}}$ ——加速时间,由用户设定,单位 s。

表 1 疏散速度常数取值

踏面高度/m	踏面宽度/m	$k$
0.19	0.24	1.00
0.18	0.27	1.08
0.17	0.30	1.16
0.17	0.33	1.23

步骤 2 计算每个方向的权值  $S_c$ ,最小权值方向即为实际运动方向,则有:

$$S_c = \frac{\theta_i}{2\pi} \quad (3)$$

式中:

$\theta_i$ ——各方向与 Seek 曲线在该点切线的夹角,Seek 曲线已内置于软件内。

Pathfinder 软件中,人员可能选择的运动方向示意图如图 1 所示。

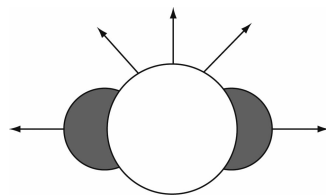


图 1 人员可选择的运动方向示意图

Fig. 1 Diagram of personnel selectable movement directions

步骤 3 计算最小权值方向的期望速度  $v_{\text{des}}$  和加速度  $a_{\text{des}}$ ,则有:

$$v_{\text{des}} = |v_{\text{des}}| d_{\text{des}} \quad (4)$$

$$a_{\text{des}} = \frac{v_{\text{des}} - v_{\text{cur}}}{|v_{\text{des}} - v_{\text{cur}}|} a_{\max} \quad (5)$$

式中:

$|v_{des}|$ ——常数,由系统根据人员当前位置的选择路径判断取为0或 $v_{max}$ ;

$d_{des}$ ——最小权值方向向量;

$v_{cur}$ ——当前方向的速度向量。

步骤4 计算下一位置的速度 $v_{nex}$ 和位置 $p_{nex}$ ,则有:

$$v_{nex} = v_{cur} + a_{des} \Delta t \quad (6)$$

$$p_{nex} = p_{cur} + v_{nex} \Delta t \quad (7)$$

式中:

$p_{cur}$ ——当前位置;

$\Delta t$ ——计算时间间隔,由用户设定。

重复上述步骤,直至人员离出口。

## 2 疏散模拟分析

### 2.1 列车条件

列车采用联挂方式运行,每辆车的车长为21 794 mm,宽为3 112 mm。列车每侧有3扇车门,每扇门宽度为1 270 mm。侧向逃生出口布置示意图如图2所示。



注:圆圈为一侧车门位置。

图2 侧向逃生出口布置示意图

Fig. 2 Diagram of side escape exit layout

根据项目要求,每辆车有40个座位,3个轮椅位置,按AW3载客工况计算,每辆车的车厢站立总人数为205人。因此,在疏散模型中考虑三者之和,即248人的满载工况进行分析。

考虑两种情况下的人员疏散情形:①人员在站台处疏散;②人员在隧道内疏散。对于人员在站台处疏散的情况,首先考虑站台符合NFPA 130:2023标准中的设计要求,站台空间足以容纳车内全部人员,具体人员数量需按照NFPA 130:2023标准中第5.3.2.1章节进行计算,涉及到一列车满载人员与站台候车人员的总和。人员在隧道内的疏散情况

需考虑疏散通道的具体尺寸。

该项目中,列车以2辆、4辆或6辆编组方式运行,本文分别对2辆、4辆、6辆编组方式进行了人员疏散建模分析。根据制动系统的制动时间可知,列车可在22 s内完成由最高运行速度113 km/h减速至0的过程。

### 2.2 列车紧急疏散模拟结果

#### 2.2.1 站台疏散

##### 2.2.1.1 场景1——人员通过侧向逃生出口疏散至站台

仅设置侧向出口的人员疏散模型如图3所示。

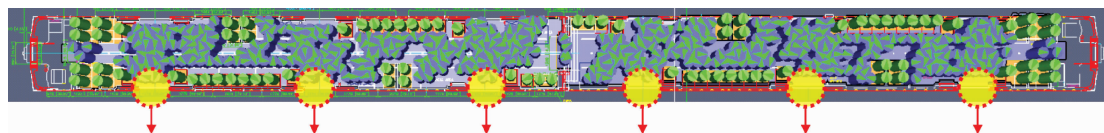


图3 仅设置侧向出口的人员疏散模型

Fig. 3 Passenger evacuation with the only side exit setup

假设车站站台足够大,可以容纳列车上紧急疏散的所有人员,场景1模拟了两辆联挂列车,每辆车厢有3扇车门作为出口的场景。在建模分析中,还考虑了可能站在贯通道区域的人员离开贯通道区域的时间。贯通道区域被铁路系统描述为连接两辆车厢的区域,因其结构原因,贯通道区域较列车其他区域车宽方向窄,在建模时考虑了此处通过人员的速度限制,根据平均人员密度计算4~5名人员

在贯通道区域处的人员疏散模型。

计算结果表明,每辆载客列车人员(248人)可在1 min内通过这3扇侧向门完成疏散。两辆联挂列车的站台疏散模型计算结果如图4所示。

贯通道区域人员疏散模型示意图如图5所示。由贯通道区的计算结果可知,在贯通道区人员离开该区域需要的时间为3~5 s。当疏散时间为0时,贯通道区域有4名人员;当疏散时间为3 s时,贯通



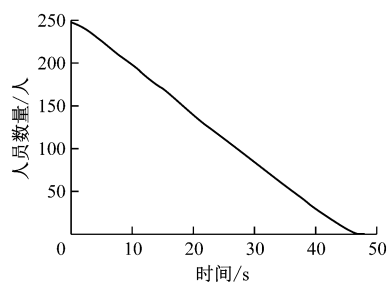
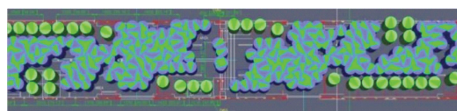
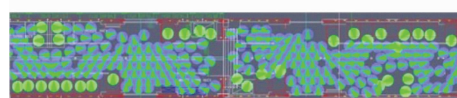


图4 两辆联挂列车的站台疏散模型计算结果

Fig.4 Calculation results of platform evacuation models for two coupled trains



a) 仿真开始时的人员流动情况



b) 仿真开始第3 s时的人员流动情况

图5 贯通道区域人员疏散模型示意图

Fig.5 Diagram of passage area personnel evacuation model

道区域无人员。

#### 2.2.1.2 场景2——人员通过侧向门及紧急出口疏散至站台

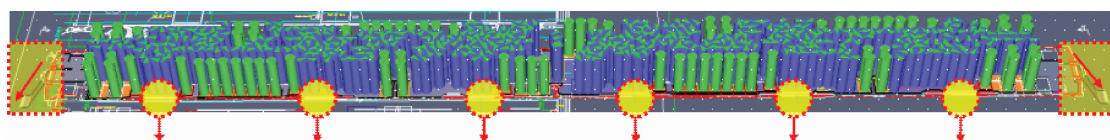


图7 修正后的侧向及端门人员疏散模型

Fig.7 Passenger evacuation model of side and end-door personnel after modification

模拟结果表明,列车两端疏散门的加入并没有对人员整体逃生时间产生很大的影响,场景2的疏散时间较场景1减少了2 s。由此可知,由于端门的位置,以及人员需要经过逃生梯撤离列车等因素,影响了人员逃生时间,所以两端疏散门的引入对疏散效果的改善是非常有限的。

#### 2.2.2 隧道内疏散

根据2.2.1节的结论,由于端门的引入对逃生时间的影响较小,场景3和4主要模拟人员在隧道内使用侧向门向隧道侧向逃生通道疏散的场景,从而获得人员在隧道内逃生所需的时间。

##### 2.2.2.1 场景3——4辆编组列车人员疏散至逃生通道

根据列车结构、车门布置、隧道环境、侧向逃生

在紧急情况下,开启司机室紧急门,根据铁路系统要求,需设置逃生梯用于人员的紧急疏散。逃生梯宽度为0.76 m,长度为1.50 m。列车端部的紧急逃生梯模型示意图如图6所示。

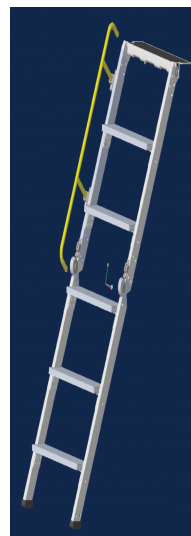


图6 列车端部的紧急逃生梯模型示意图

Fig.6 Diagram of train end escape ladder model

在场景1的基础上,两辆联挂列车的两端增加端门逃生出口,修正后的侧向及端门人员逃生模型如图7所示。

通道宽度等参数信息,在Pathfinder软件中模拟4辆编组列车人员疏散至逃生通道的场景,通过模拟计算得到人员疏散时间为12 min。4辆编组列车人员疏散模型计算结果如图8所示。

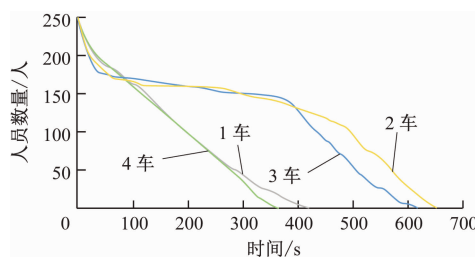


图8 4辆编组列车人员疏散模型计算结果

Fig.8 Calculation results of personnel evacuation model for four formation trains

### 2.2.2.2 场景4——6辆编组列车人员疏散至逃生通道

6辆编组列车人员疏散模型计算结果如图9所示。模拟结果显示,人员从6辆车厢全部疏散至逃生通道的时间小于17 min。

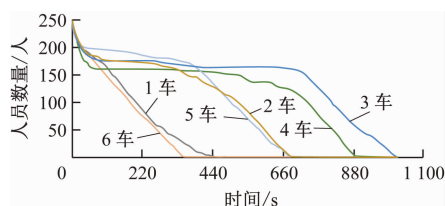


图9 6辆编组列车人员疏散模型计算结果

Fig. 9 Calculation results of personnel evacuation model for six formation trains

## 3 结语

本文对美国地铁系统中不同疏散环境下的轨道列车人员疏散情况进行了仿真分析。研究结果表明,两辆联挂列车在满载情况下,站台疏散时间小于1 min,司机室紧急端门是否开启对人员疏散没有较大的影响。在此基础上,本文建立了4辆及6辆编组列车在隧道内的人员疏散模型,人员从列车疏散至安全通道的时间分别为12 min和17 min。根据NFPA 130:2023标准要求,人员安全疏散时间

包含两倍的列车制动时间和人员最大疏散时间,即6辆编组列车在隧道内疏散时间17 min与制动时间22 s的两倍之和约为17.73 min,疏散总时间满足NFPA 130:2023标准中最小火灾暴露时间小于20 min的要求。

## 参考文献

- [1] 姜学鹏,张帆,陈欣格. 地铁隧道火灾人员疏散可靠度研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(1): 9.  
JIANG Xuepeng, ZHANG Fan, CHEN Xingge. Reliability research of human evacuation in subway tunnel fire[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(1): 9.
- [2] 张昊. 地铁区间隧道火灾烟气控制及人员疏散研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.  
ZHANG Hao. Study on smoke control and evacuation of subway tunnel fire[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [3] ABD-EL RAHIM H H A, ENIEB M, ABDELMOAMEN KHALIL A, et al. Twin tunnel configuration for Greater Cairo Metro Line No. 4[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 68: 66.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 通信作者:刘彦彤,高级工程师,liuyantong87217@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 北京地铁线网运营总里程达到879 km

2024年12月15日,北京地铁3号线一期(东四十条站—东坝北站)、12号线(四季青桥站—东坝北站)、昌平线南延一期剩余段(西土城站—蓟门桥站及朱房北站)等3条(段)新线开通试运营,新增运营里程约43 km。至此,北京地铁运营线路达到29条,运营总里程达到879 km,车站达到522座(其中换乘站98座)。据北京交通部门介绍,目前北京地铁运营总里程已达全国第一。为这3条(段)新线接驳的道路公交线路总条数达207条(其中微循环线路9条),以50 m公交换乘为标准设置道路公交站点,并按“一站一策”推进车站周边道路公交站点新增或挪移,实现地铁新线站点50m内道路公交接驳率100%。

北京交通部门表示,这3条(段)线路可实现与多条南北向线路的连通,补充中心城区东西向轨道交通廊道,同时也为马甸、安贞、东坝等居住区增添了更便利的公共交通选择,城市轨道交通的骨干作用进一步凸显,这对于完善城市轨道交通网络、缓解中心城区交通压力、服务沿线重点功能区建设具有重要意义,也有利于优化城市交通结构、带动城市发展。

此外,1号线、八通线、房山线和9号线实施贯通和跨线运营改造,在四惠站、郭公庄站,乘客不用再进行换乘;6号线高峰时段开行大站快车,通州区居民出行更加快捷;克服夜间检修以及运营人员加班加点等各方面困难,4号线、7号线等多条途经火车站的线路在周末、节假日期间常态化延时运营,保障乘客出行。

(摘编自20241215《新京报》)