

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-868-06

考虑结伴行为的地铁车站站台人员疏散研究

邹璇¹ 佟年¹ 张术¹ 岳立明¹ 毕海权² 王菁² 朱柏岭²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130012;

2. 西南交通大学 成都 610031)

【摘要】 由于地铁的运营环境特殊, 使得地铁发生火灾时人员的安全疏散困难。结伴出行是行人团体运动中的常见现象, 疏散过程中会存在互相等待的行为, 造成疏散效率降低。使用人员疏散软件 Pathfinder, 结合结伴行为的实地调研结果, 建立了地铁着火列车进入站台疏散的模型, 对考虑结伴行为的地铁疏散进行了研究。研究表明: 在非工作日的结伴出行率更高, 考虑了结伴出行后, 疏散完成时间随结伴率增大而增加, 且青少年与女性群体结伴行为的影响更大, 各出口通过率随结伴率增大而下降, 同时站台内楼梯处的空间利用率降低。

【关键词】 Pathfinder; 地铁疏散; 结伴行为

中图分类号 U231 文献标志码 A

Study on Subway Evacuation Considering Group Behavior

Zou Xuan¹ Tong Nian¹ Zhang Shu¹ Yue Liming¹ Bi Haiquan² Wang Jing² Zhu Bailing²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd, Changchun, 130012;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Because of the special operating environment of subway, it is difficult to evacuate people safely in case of fire. Group travel is a common phenomenon in group movement of pedestrians, and there will be mutual waiting behavior in the evacuation process, resulting in lower evacuation efficiency. In this paper, Pathfinder, an evacuation software, combined with the field investigation results of the companion behavior, is used to establish an evacuation model of the subway train on fire entering the platform, and the subway evacuation considering the companion behavior is studied. The results show that the group travel rate is higher on non-working days. After considering the group travel rate, the evacuation completion time increases with the increase of the group rate, and the influence of the group behavior of teenagers and women is greater. The exit pass rate decreases with the increase of the group rate, and the space utilization rate of the stairs in the platform decreases.

【Keywords】 Pathfinder; Subway evacuation; Group behavior

0 引言

随着地铁的快速发展, 地铁已成为大型城市重要的公共交通方式。由于地铁特殊的运营环境, 当地铁发生火灾时, 人员的安全疏散困难^[1]。在《地铁安全疏散规范》^[2]中第 5.2 条规定: 列车在区间发生火灾等事故时, 在列车完好且未失去动力的情

况下, 应将列车继续行驶至车站, 在车站组织人员疏散。因此, 地铁发生火灾后的疏散研究主要是针对着火列车进入站台后进行的疏散过程。

在地铁日常运营中, 人群结伴出行是行人团体运动的常见现象。人员组成结伴出行的群组会选择相同的疏散路径和疏散出口, 并且疏散过程中会保

作者简介: 邹璇 (1992-), 女, 硕士, 工程师, E-mail: zouxuan@crrecg.cc

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-04-15

持在一定的距离内, 存在等待疏散落后人员的行为, 因此人员结伴形成的群组对整体疏散过程的影响不可忽略。

在疏散人员微观行为研究中, 研究方法主要为现场统计结合仿真模拟计算。张蕊等^[3]基于社会力模型, 以某地铁通道为实例, 分析了不同结伴比例对人员平均疏散速度的影响, 得出疏散速度随着结伴比例增大而减小。陈旭等^[4]根据北京西站实测数据, 分析了人员结伴行为对于人员疏散过程中规模分布、空间组织模式、空间行走距离、节点选择结果和节点选择时间等的影响。霍非舟等^[5]基于元胞自动机理论, 建立了考虑结伴行为的双出口超市疏散模型, 研究结果表明: 在相同的人员密度下, 个体疏散的效率优于结伴疏散。康博鹏^[6]利用 Exodus 和 Smartfire 软件对火场中小群体行为的疏散过程进行了研究, 发现小群体行为会降低疏散的效率, 且小群体行为在一定程度上会影响其他人疏散, 扰乱疏散秩序。Qiu 等^[7]基于 Agent 建立了结伴群体疏散的双层模型, 并参考生物群体的行为特征, 分析了结伴形态和群体内领导行为。韩雁喆^[8]等基于元胞自动机理论, 利用 Netlogo 可编写仿真平台, 建立了城市轨道交通车站站台结伴行人疏散模型, 发现结伴模式下疏散时间随疏散总人数增加以及结伴行人比例的增大而增加。因此, 在考虑结伴行为的前提下, 对地铁疏散过程进行研究, 其研究结果对于指导地铁安全疏散具有重要的意义。

1 结伴行为

1.1 仿真方法

Pathfinder 疏散仿真软件是由美国 Thunderhead Engineering 公司开发的一个基于 agent 的仿真系统, 该系统的运动环境是一个完整的三维三角网格设计环境, 可以配合建筑物实际层面的建设模式, 给每个人员设定一套独特的参数 (行走速度、肩宽、出口选择等), 并分别仿真出每个人员的独立运动模式。

根据用户手册^[9], 在 Pathfinder 软件内结伴运动由两个概念控制: 连接状态和组领导者。如果一个群体处于“断开连接”状态, 则疏散人员将走向领导者。如果一个群体处于“连接”状态, 则疏散人员将朝着由其行为决定的目标前进。群组内各成员的详细运动过程由以下四个参数控制。

(1) 跟随领导者

通过此参数, 可以手动指定将在整个仿真过程中的疏散群组用作领导者的疏散人员, 如果未设置, 最接近当前疏散路径的成员将成为领导者。

(2) 最大距离

此参数用于确定疏散群组是连接还是断开连接。如果疏散群组的任何成员与任何其他成员的距离超过最大距离, 则该疏散小组被视为已断开连接。更具体地说, 连接组中所有占用者的最小生成树中的最长边必须小于或等于“最大距离”, 疏散小组才能被视为已连接。

(3) 减速时间

当疏散群组断开连接时, 领导者使用此参数。领导者在停下来之前会逐渐降低速度。减速时间确定领导者在停止之前将减速多长时间。

(4) 小组成员的社交距离

疏散群组内成员不强制保持社交距离, 但小组成员将与不在小组中的人员仍保持社交距离。

1.2 结伴比例调研

1.2.1 结伴行为判断依据

通过对地铁站台行人结伴行为运动特性总结^[3], 从以下几点作为判断依据: (1) 成员间距离小, 距离靠近; (2) 成员间存在言语、拉手、勾肩搭背以及帮忙拿包等行为; (3) 成员间存在通过安检和闸机处后互相等待的行为。

1.2.2 结伴行为调研结果

群组组成受地铁运营时间、线路条件等影响, 为得到地铁乘客群组组成数据, 选取成都三个地铁站进行了现场调研, 选取的地铁站台涵盖了普通站台和人流密度较大的换乘站台。由于出行人数和人员结伴模式可能存在差异性, 分别调研了工作日及非工作日。调研时间为早上 08:00-11:00, 包含了上班通勤和其他出行需求。根据结伴行为判断依据, 地铁站行人结伴后群组的组成数据调研结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 工作日调研结果

Table 1 Workday survey results

结伴模式	1 人	2 人	3 人	4 人	总数
数量	6378	508	44	16	6946
人数	6378	1016	132	64	7590
比例/%	91.8	7.3	0.6	0.2	——

表 2 非工作日调研结果

Table 2 Non-workday survey results

结伴模式	1 人	2 人	3 人	4 人	总数
数量	4625	2195	572	314	7706
人数	4625	4390	1716	1256	11987
比例/%	60.0	28.4	7.4	4.0	——

2 地铁疏散模型

2.1 几何模型

2.1.1 地铁列车模型

车辆结构对人员安全疏散过程具有重要影响。车辆结构如图 1 所示,与疏散相关的车辆基本尺寸如表 3 所示。

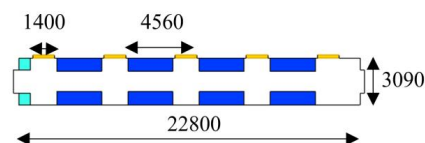
表 3 车辆基本尺寸表

Table 3 Vehicle basic size table

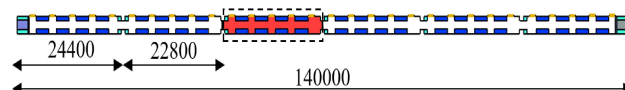
名称	参数
车辆基本长度/mm	头车
	中间车
车体最大宽度/mm	3090
每侧车门数/对	5
客室门间距/mm	4560
车门净宽/mm	1400

图 1 所示为根据系列化标准地铁 A 型车编组

及车辆基本尺寸,建立的地铁车辆模型,模型包括车辆内部座椅、扶手、电气柜和车端设备等障碍物。



(a) 单节地铁车辆模型示意图



(b) 地铁列车模型示意图(虚线框内为着火列车)

图 1 地铁列车模型

Fig.1 Subway train model

2.1.2 地铁站台模型

以我国某城市地铁站为例,构建了包含一层站台层和一层站厅层的地铁站台疏散模型。站台层宽度为 11m,长度为 140m,人员可用疏散面积为 1540m²。站台层与站厅层之间,通过两组扶梯以及一条楼梯的连接通道相连接,楼梯从站厅层下降到站台层后,由主枝干楼梯分叉两个方向小楼梯。扶梯宽度为 140cm,楼梯主枝干宽度为 400cm,楼梯分枝干宽度为 190cm。疏散起点为地铁列车,疏散终点为站厅层入口处,从左往右依次编号为出口 1~3。

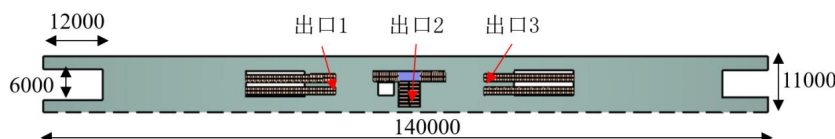


图 2 站台模型

Fig.2 Platform model

2.2 人员特征

2.2.1 疏散人数

假设列车进站前,原站台内的人员已疏散完成,仅考虑着火地铁列车内的疏散人员。在地铁列车采用 6 车编组的情况下,总载客人数为 1790 人。假设着火列车进站前,火灾车厢人员已疏散到非着火车厢(仅考虑一节车厢发生火灾),且疏散人员随机分布在除着火车厢外的其他车厢内。

2.2.2 人员移动速度

人员移动速度参考王驰^[10]在北京地铁二号线的地铁疏散实测数据。不同年龄和性别的人员速度统计结果如表 4 所示。

表 4 不同类型人员的移动速度

Table 4 The moving speed of different types of personnel

人员类别	水平行走速度/(m/s)	楼梯上行速度/(m/s)
中青年男士	1.25	0.90
中青年女士	1.05	0.74
老人及儿童	0.76	0.52

2.2.3 人员肩宽

采用 P5、P50、P95 三个百分位数来设置人体尺寸分布函数。分别采用 GB/T 10000-1988《中国成年人人体尺寸》^[11]和 GB/T 26158-2010《中国未成年人人体尺寸》^[12]中的最大肩宽数据。以第 50 百分位数人体最大肩宽数值为均值,第 5 和 95 百分位数人体最大肩宽数值为最小和最大值,取转换

系数 K 为 1.645, 获得各人员类型的人体尺寸的分布函数, 作为疏散模拟的输入条件。

表 5 各类型人员的人体尺寸(肩宽)分布

Table 5 The body size (shoulder width) distribution of various types of personnel			
人员类型	最小值/cm	最大值/cm	平均值/cm
成年人(男)	39.8	46.9	43.1
成年人(女)	36.3	43.8	39.7
老年人(男)	39.8	46.9	43.1
老年人(女)	36.3	43.8	39.7
青少年(男)	33.1	46.4	38.0
青少年(女)	32.6	44.3	37.2

2.2.4 人员比例

根据王驰^[10]对地铁人员组成的调研结果, 设置地铁列车中人员比例如表 6 所示。

表 6 地铁列车中的人员比例

Table 6 Proportion of personnel in subway trains	
类别	比例/%
成年男性	50
成年女性	40
老年男性	2
老年女性	3
青少年男性	3
青少年女性	2

3 地铁疏散结果及分析

3.1 剩余未疏散人员数量曲线

图 3 所示为有无结伴的情况下剩余未疏散人员数量曲线。无结伴情况下, 全部人员在 300.5s 时完成了疏散, 结伴情况下, 工作日和非工作日全部人员分别在 310.5s 和 347.5s 时完成疏散。相比于无结伴的情况, 工作日结伴疏散完成时间延长了 3.3%, 非工作日结伴疏散完成时间延长了 15.7%, 非工作日出行的结伴率更高, 疏散完成时间更长。三种工况下疏散 20s 后, 均开始出现有人员完成疏散。50s 后, 三种工况下待疏散人数均稳步下降, 其中工作日结伴与无结伴的疏散速率较为接近, 结伴率更高的非工作日结伴出行疏散效率最低, 随着疏散的进行, 疏散效率与无结伴的情况下差距逐渐增大, 最终滞后 47.0s 完成疏散。

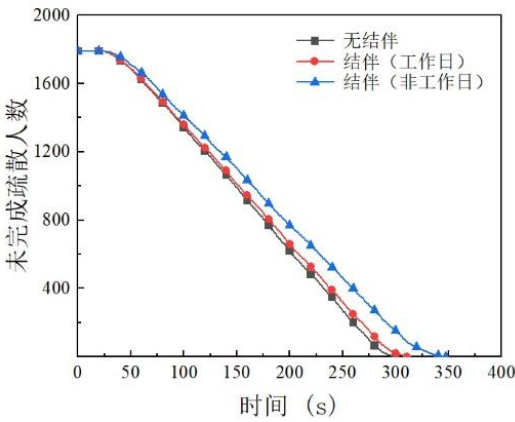


图 3 剩余未疏散人员数量曲线

Fig.3 The curve of the number of remaining non-evacuated personnel

3.2 各类别人员的疏散时间

各类别人员的疏散时间计算结果如图 4 所示。考虑了结伴出行后, 各类别人员疏散完成时间均出现了不同程度的增加。各类别人员的疏散完成时间随结伴比例增加而增加。工作日结伴的情况下, 青少年组整体疏散时间增加了 6.7%, 成年组增加了 3.4%, 老年组增加了 6.6%; 非工作日结伴情况下, 青少年组整体疏散时间增加了 18.7%, 成年组增加了 15.5%, 老年组增加了 14.3%; 结伴出行对青年人疏散完成时间的增加影响更大。工作日与非工作日两种结伴情况下, 女性疏散完成时间分别增加了 6.4%和 17.4%, 男性疏散完成时间分别增加了 4.7%和 15.0%, 结伴出行对女性疏散完成时间增加影响更大。

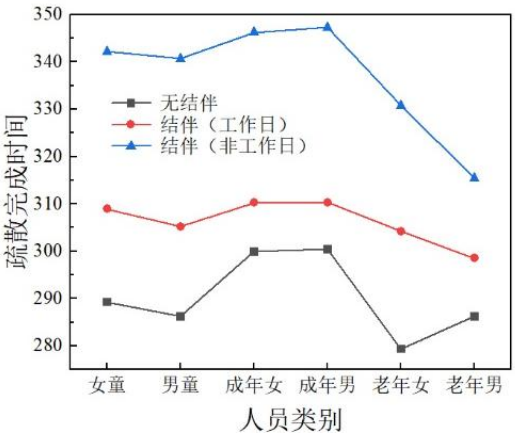


图 4 各类别人员的疏散时间

Fig.4 Evacuation time of all categories of personnel

3.3 出口通过率

出口通过率计算结果如图 5 所示。考虑结伴行

为后,各出口通过率均出现了不同程度的下降,随着结伴率的提升,各出口通过率进一步下降。其中出口1通过率从2.09pers/s下降到2.02pers/s和1.84pers/s,疏散效率降低了3.3%和12.0%,出口2通过率从2.53pers/s下降到2.38pers/s和2.16pers/s,疏散效率降低了5.9%和14.6%,出口3通过率从2.09pers/s下降到1.95pers/s和1.86pers/s,疏散效率降低了6.7%和11%,出口通过率总和从6.71pers/s下降到6.35pers/s和5.75pers/s,疏散效率降低了5.4%和14.3%。

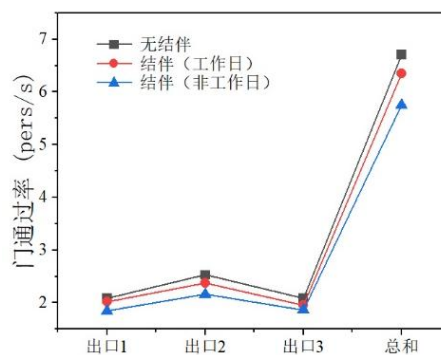


图5 出口通过率

Fig.5 Export pass rate

3.4 人员密度分布

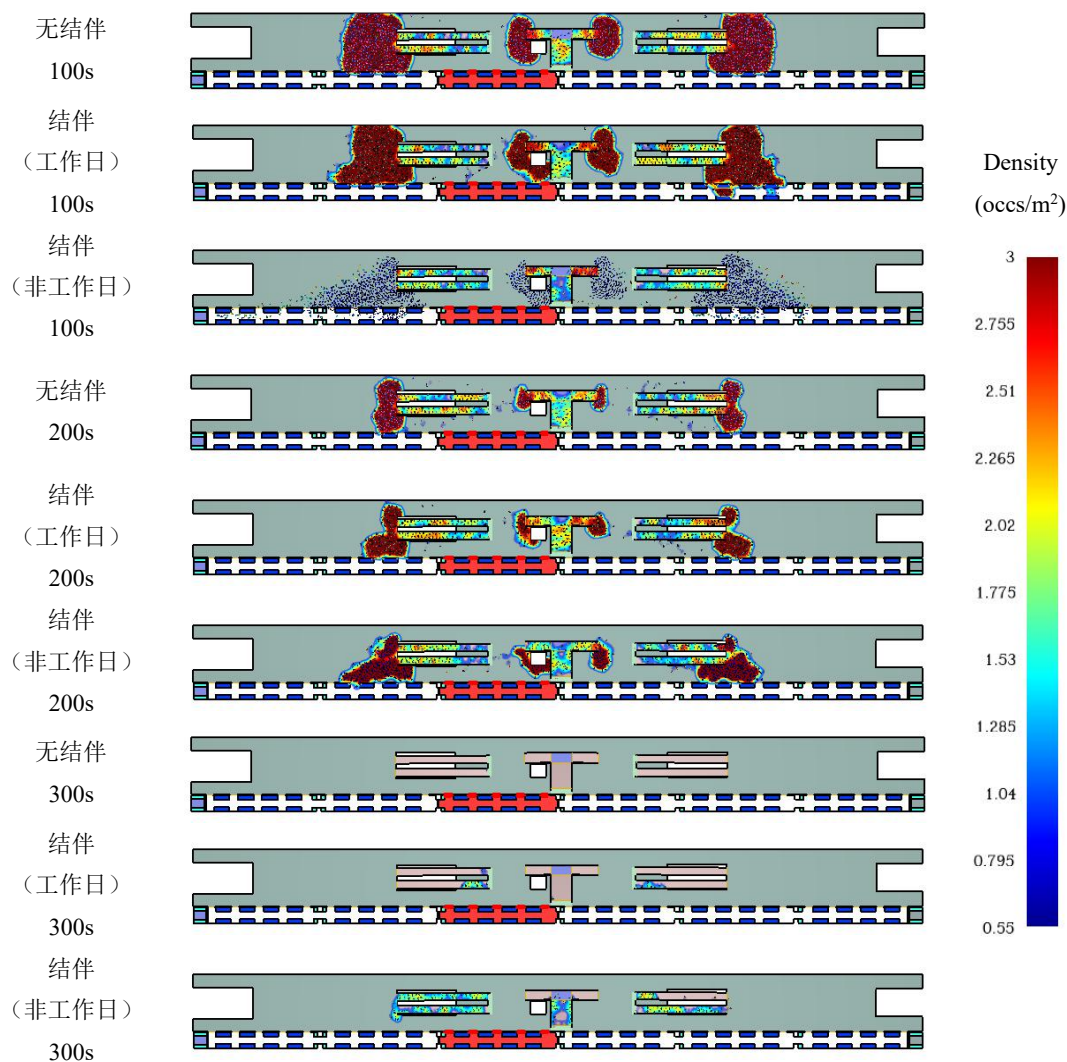


图6 人员密度分布图

Fig.6 Personnel density distribution map

图6所示为各工况下的人员密度分布计算结果。100s时,无结伴的工况下人员已全部离开地铁列车进入站台层,人员在各楼梯入口处发生拥挤;

考虑了结伴后,出现了人员滞留在地铁列车的现象,非工作日结伴工况下,存在大量人员未通过地铁车门与站台屏蔽门进入站台层的现象。200s时,

无结伴的工况下,人员分布在楼梯入口两侧,而结伴工况下由于人员受到维系结伴行为最大间距的影响,人员路径选择一致,人员集中于靠近地铁列车侧的楼梯处,未充分利用地铁站台的疏散空间。300s时,无结伴工况下大多数人员已完成疏散,但结伴情况下,仍有少量人员未通过楼梯完成疏散。

4 结论

本文使用人员疏散仿真软件 Pathfinder,根据地铁列车与地铁站台结构建立了地铁疏散模型。结合调研得到的结伴行为统计结果,对考虑结伴行为的地铁疏散过程进行了研究,可以得到以下的主要结论:

(1) 考虑了结伴行为后,全部人员完成疏散的时间更长,工作日和非工作日考虑结伴行为后疏散完成时间分别增加了 3.3%和 15.7%。随着结伴比例的增加,疏散完成时间增加。

(2) 考虑了结伴行为后,各年龄段中青年组所受到的影响最大,而性别中女性受到的影响更大。

(3) 考虑了结伴行为后,各出口的疏散效率均出现了下降,相比无结伴行为,工作日结伴与非工作日结伴总疏散效率分别下降了 5.4%和 14.3%。

(4) 人员结伴疏散后,为维系结伴行为而保持结伴小组内人员距离,造成了楼梯入口处的空间利用率下降,人员集中于靠近地铁列车侧的站台空间。

基于以上研究,为减小结伴行为对火灾下紧急疏散效率的影响,应设置工作人员进行疏散引导,阻止结伴人员通过地铁车门和楼梯入口时的等待行为,减少结伴人员对其他疏散人员的影响,同时应引导人员充分利用楼梯入口处两侧空间,为进入楼梯做好准备,以提高疏散效率,降低火灾风险。

参考文献:

- [1] 张毓斌.地铁深埋车站疏散与防排烟问题研究[J].制冷与空调,2015,29(1):22-25,33.
- [2] GB/T 33668-2017,地铁安全疏散规范[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [3] 张蕊,杨静,杨晨威,等.考虑结伴行为的地铁通道行人仿真建模研究[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(5):163-168.
- [4] 陈旭.轨道交通枢纽客流集散仿真建模及应用[D].北京:北京交通大学,2018.
- [5] 霍非舟,李盈,马亚萍,等.考虑结伴行为的双出口超市元胞自动机模型[J].中国安全生产科学技术,2022,18(1):95-100.
- [6] 康博鹏.基于小群体行为仿真的高校综合教学楼火灾疏散设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [7] QIU F, HU X. Modeling group structures in pedestrian crowd simulation[J]. Simulation Modeling Practice & Theory, 2010,18(2):190-205.
- [8] 韩雁喆.考虑结伴行为的地铁车站站台行人疏散建模与仿真研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [9] Thunderhead Engineering. Pathfinder User Manual[EB/OL]. <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2024-2.pdf>.
- [10] 王驰.某地铁站火灾情况下人员安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [11] GB/T 10000-1988,中国成年人人体尺寸[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [12] GB/T 26158-2010,中国未成年人人体尺寸[S].北京:中国标准出版社,2011.

(上接第 853 页)

- [4] 李效禹,李钢,徐乐,等.多能互补热水系统供暖效果测试与分析[J].住宅产业,2018,(5):56-60.
- [5] Li J, Duan W, Chen Y, et al. Thermal performance of pin fin heat sinks with phase change material for electronic devices thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2024,250:123456.
- [6] Deng R, Wang Z, Zhu J, et al. Experiment study on heat storage and heat dissipation coupling characteristics of active phase change radiators[J]. Journal of Energy Storage, 2024,80:110251.
- [7] 刘贝,陈洁,苏达,等.相变散热器的结构优化设计[J].机械设计,2020,37(S1):270-273.
- [8] Li J, Duan W, Chen Y, et al. Thermal performance of pin fin heat sinks with phase change material for electronic devices thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2024,250:123456.
- [9] Deng R, Wang Z, Zhu J, et al. Experiment study on heat storage and heat dissipation coupling characteristics of active phase change radiators[J]. Journal of Energy Storage, 2024,80:110251.