

中低速磁浮铁路运营风险及事故灾害应急救援分析

魏庆朝¹ 初智杰² 潘安华¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京;

2. 中国建筑一局(集团)有限公司, 100161, 北京//第一作者, 教授)

摘要 基于中低速磁浮列车的组成和驱动原理,列举了中低速磁浮列车在运行过程中存在的风险及线路敷设方式对应急救援的影响;结合规范,分析了不同救援设施设备和不同应急救援方案,并基于对北京磁浮 S1 线和长沙磁浮快线的实地调研,对两线的救援设施和救援方案进行了对比分析。结果表明:疏散平台是一种高效的应急救援设施,但当站间距较长时应设置逃生楼梯辅助逃生。中低速磁浮列车发生事故后,应优先考虑使用列车自身能力救援;当事故紧急或磁浮列车无法移动时,可通过疏散平台先将乘客沿线路方向疏散,再进行故障列车的救援。对于冰雪灾害时的事故应急处理方案应进一步优化,在保证安全的情况下减少其对线路正常运营的影响。

关键词 中低速磁浮铁路;事故;应急救援;疏散平台;逃生楼梯

中图分类号 U237; X951

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.004

Analysis of Operational Risk and Emergency Rescue of Medium and Low Speed Maglev Railway

WEI Qingchao, CHU Zhijie, PAN Zihua

Abstract Based on the composition and driving principles of medium and low speed maglev trains, the risks existing in the operation of medium and low speed maglev trains and the impact of line laying methods on emergency rescue are listed. Combined with the specifications, different rescue facilities and different emergency rescue schemes are analyzed. Based on the field investigation of Beijing Maglev S1 Line and Changsha Maglev Express, a comparative analysis of the rescue facilities and rescue schemes of the two lines is conducted. Results show that the evacuation platform is an efficient emergency rescue facility, but when the distance between the stations is long, set of escape staircases should be provided to assist the escape. After an accident with a medium and low speed maglev train, train's own ability to rescue should be primarily considered; when the accident is urgent or the maglev train cannot move, passengers can be evacuated along the line direction through the

evacuation platform, and then the failed train can be rescued. The emergency response plan for ice and snow disasters should be further optimized to reduce their impact on the normal operation of the line while ensuring safety.

Key words medium and low speed maglev railway; accident; emergency rescue; evacuation platform; escape staircases

First-author's address School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

中低速磁浮铁路作为一种新型交通运输方式,在牵引、轨道、线路、车辆等方面都有别于其他交通工具,有着独特的工作原理和运行方式^[1]。而这种特殊性,导致磁浮列车在高架桥上突发事故或突遇灾害时,列车救援和乘客疏散工作开展起来较为困难。目前,我国已有长沙磁浮快线和北京磁浮 S1 线两条中低速磁浮铁路开通运营,而清远磁浮旅游专线也于 2020 年投入使用。本文将基于已开通运营的两条线路,对中低速磁浮铁路救援设施、设备和事故灾害应急救援方案进行对比分析和研究。

1 中低速磁浮铁路运营风险分析

1.1 运营风险因素分析

中低速磁浮列车由牵引、悬浮、供电、照明、通信等多个系统组成,任何一个系统发生故障都有可能导致列车正常运行受到影响。磁浮线路和轨道的平顺性也是安全运营的重要保障。另外,极端天气也给列车的正常运行带来了一定的威胁。表 1 对中低速磁浮铁路运营风险进行了分析,给出了存在的风险及其可能带来的后果。

1.2 线路敷设方式及对救援的影响

中低速磁浮铁路的线路敷设方式可分为高架、低置和隧道三种。CJJ/T 262—2017《中低速磁浮交通设计规范》规定,中低速磁浮交通正线宜采用架空、全封闭的敷设方式^[5],即高架线路。特殊区段可采用低置或隧道敷设。不同的敷设方式对事故救

表 1 中低速磁浮铁路运营风险分析

| 风险因素 | 可能带来的后果 |
|-------------|--|
| 乘客携带物品燃烧、爆炸 | 列车失火,车体燃烧或破坏 |
| 列车设备过热 | 列车失火,车体燃烧或破坏 |
| 悬浮系统故障 | 列车使用液压支承轮行驶,液压支承轮故障时列车会停驶 ^[2] |
| 牵引系统故障 | 列车停驶,等待救援 |
| 供电系统故障 | 列车启用备用电源,备用电源用尽或故障时列车会停驶 |
| 轨道上有异物 | 列车停驶,待清理轨道后可重新运行 |
| 地震 | 列车停驶,严重时轨道梁被破坏,可能导致列车坠桥 |
| 泥石流 | 列车停驶,待清理轨道后可重新运行,严重时可能导致列车被埋 |
| 供电轨结冰 | 列车停驶,待冰冻融化后可重新运营 ^[3] |
| 线路状态异常 | 列车停驶,等待线路检修、维护后方可重新运行 ^[4] |

援有着重大的影响。

1.2.1 低置线路

低置线路结构,是由支承轨道结构的承轨梁与用来支承承轨梁的路基两部分组成。承轨梁一般采用“凸”型钢筋混凝土结构,分为下部底板和上部梁体两部分。下部底板埋置于路基上,上部梁体支承轨道结构。承轨梁下的路基应按土工结构物设计,确保其满足强度、稳定性和耐久性的要求,并符合环境保护、水土保持等相关规定。路基又可分为路堤和路堑两种形式。图 1 和图 2 分别是典型的低置结构双线路堤、路堑结构横断面图。

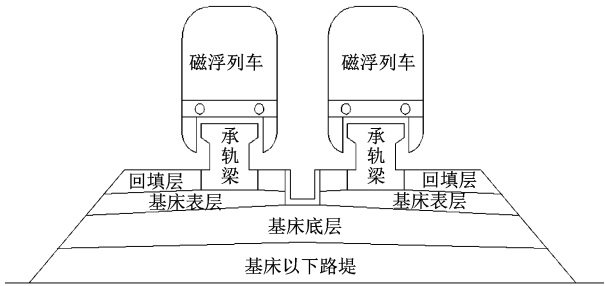


图 1 低置结构双线路堤横断面

对于地质复杂、工后沉降难以控制,或地下水位较高、路基易产生冻害等存在不稳定因素的地段,不宜采用低置线路结构^[5]。

1.2.2 高架线路

高架线路是中低速磁浮最常用的线路敷设方式。采用高架线路既保持了专用道的形式,同时占

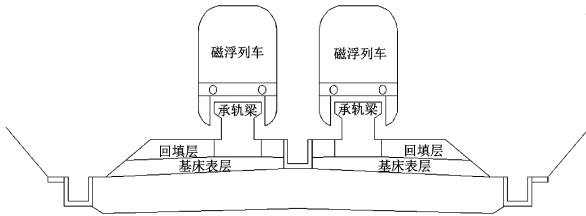


图 2 低置结构双线路堑横断面

地较少,与公路呈立体交叉,对城市交通的干扰也较少,可以充分利用磁浮交通的小半径、大坡度的特点避让既有建筑及桥梁^[6]。

区间一般地段宜采用等跨简支梁式桥跨结构,上部结构应优先采用预应力混凝土结构,亦可采用钢结构和钢-混凝土组合结构。在需要跨越城市干线、铁路、大江大河等大型平面障碍时,优先采用常规跨度,考虑中间设墩布置。当常规跨度不能跨越时,考虑连续梁、拱桥等方案。当跨越道路交叉角度较小时,可考虑采用框架墩。

1.2.3 隧道线路

中低速磁浮铁路在特殊地段,经技术经济比较后,可采用隧道线路。隧道线路需要注意抗震、防水、防火设计,同时要考虑空气动力学效应对列车进洞和出洞造成的影响。北京磁浮 S1 线设有 287 m 长的隧道线路。日本东部丘陵线设有 1.4 km 长的隧道线路^[7]。

1.2.4 敷设方式对救援的影响

线路敷设方式决定了线路的空间位置,对事故和灾害的救援有着直接的影响。

低置线路车厢地板距离地面高度相对高架线路较小,但即使是完全低置线路,从车厢地板降至地面也有 1.8 m 左右,紧急情况下乘客仍需沿线路纵向疏散。同时,这种敷设方式会占用城市地面空间,一定程度上对公路交通产生干扰,同时易受水灾、路基病害的影响,因此使用较为有限,大多作为车辆检修和车站承载结构^[8]。

高架线路虽然有利于保持线路的平顺性,但由于高架桥一般高度较高,在实际运营过程中突发事故或灾害后,乘客的疏散和列车救援只能沿着线路纵向进行,无法向两侧开展,这给乘客疏散和列车救援带来了很大难度。另外,高架线路可能跨越城市繁忙交通干线或河道等复杂自然人文、地质条件,不易于救援设施的施展。

隧道线路可以减少线路绕避,但却为救援带来了更大的困难。相比于高架线路,隧道内乘客的疏

散和列车救援同样只能沿着线路纵向进行,而且隧道空间相对狭小、封闭,救援设备难以进入,一旦发生火灾,烟气不易疏散,极易造成严重的人员伤亡和财产损失。

结合规范和对不同敷设方式的分析,中低速磁浮铁路应尽可能采用高架敷设的方式,这也为事故救援增加了难度,因此后续将针对高架区间的事故救援进行分析。

2 中低速磁浮铁路救援设施设备分析

尽管中低速磁浮铁路有多种措施和设施保障列车的正常运行,但在遭遇特殊情况和极端天气时,还是有可能发生安全事故。为了保证乘客的生命安全和线路的正常运营,中低速磁浮铁路需要配备救援设施和设备,以便事故发生时及时对乘客进行疏散和救援,同时对事故列车进行处置。救援设施设备可分为固定救援疏散设施和车载救援设备两大类。

2.1 固定救援疏散设施

2.1.1 疏散平台

根据 CJJ/T 262—2017《中低速磁浮交通设计规范》规定,中低速磁浮铁路的高架区间应设置纵向疏散平台^[5]。

对于双线线路,疏散平台一般敷设在两线之间,以方便任意方向列车疏散使用。疏散平台集合了检修、电缆通道以及乘客紧急疏散通道等功能。疏散平台一般由支撑柱、横梁、平台板、栏杆、槽钢、混凝土基础组成,如图3所示。

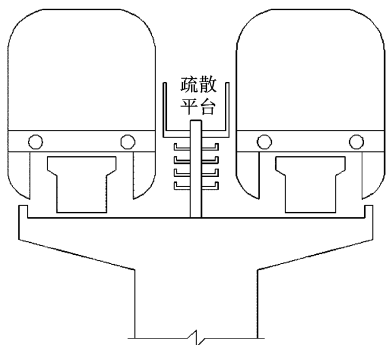


图3 疏散平台横断面图

根据规范,纵向疏散平台宽度应不小于1 000 mm^[5]。但在实际建设中由于限界限制以及轨道梁宽度的有限性,疏散平台宽度往往仅满足最低标准。考虑到疏散时可能会出现拥挤状态,尽管规范

未作要求,但往往在疏散平台两侧增设防护栏杆。护栏为间断式,以适应中低速磁浮列车随机停车的要求;疏散平台两侧栏杆错位交替布置,可满足列车随机停车时乘客的疏散要求,也可满足疏散乘客行走时的安全防护要求^[9]。

日本的 Linimo 磁浮线虽然没有设置疏散平台,但在双线地段通过横向连接两片箱梁形成宽大的桥面,给乘客沿线路方向疏散提供空间,这与疏散平台的本质和意义是相同的^[10]。

2.1.2 逃生楼梯

当在中低速磁浮铁路站间距较大时,乘客在逃离至疏散平台后需要较长时间才能步行至临近车站。此时可每隔一定距离设置一处逃生楼梯。图4和图5是逃生楼梯的纵、横断面图。事故发生后,乘客可直接步行至逃生楼梯所在位置,在工作人员的组织下有序步行至地面。逃生楼梯的设置,可以使乘客无需步行至相近车站,大大减少了逃生所需时间,可最大限度保证乘客的生命安全。

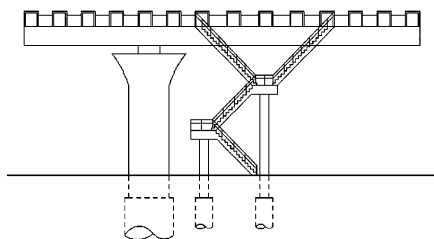


图4 逃生楼梯纵断面图

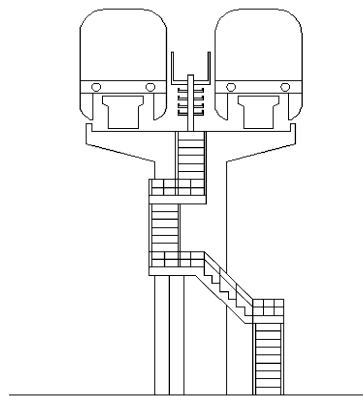


图5 逃生楼梯横断面图

2.2 车载救援设备

车载救援设备包括充气滑梯、救生气垫、逃生软管、伸缩梯等。车载设备可设置在磁浮列车车门附近的设备柜内。当事故发生时,可由工作人员或乘客通过托架固定疏散气垫的位置,再使用气体发生装置为疏散气垫充气,旅客即可通过疏散气垫滑

落至地面。利用充气滑梯等设备救援虽然有疏散速度快的优点,但由于磁浮列车高架桥高度较高,同时这种疏散方式对线下环境有较高要求,因此在选择时需综合考虑。

3 中低速磁浮铁路应急救援方案分析

3.1 应急救援原则及方法

中低速磁浮列车的救援可分为列车救援和乘客疏散两部分。当遇到一般事故时,可先进行列车救援,再进行乘客的疏散。当事故较为严重时,需要首先保证乘客的生命安全,以最快速度将乘客疏散,再进行列车救援。

3.2 列车救援

列车救援可分为利用列车自身能力救援和使用其他列车救援两种方式。

利用列车自身能力救援是指中低速磁浮列车某个系统发生故障后,依靠故障车的自身剩余能力继续行驶至安全的位置,再处理事故并疏散乘客,这是最常见的事故救援方式。

例如,当列车供电系统发生故障,无法从供电轨获取电源时,列车可以依靠安装在车上的备用电源供电来保持悬浮一定时间,待惯性滑行至安全位置后再进行故障排查^[11];当列车悬浮系统发生故障,无法提供需要列车正常行驶所需的悬浮力时,司机会释放列车的液压支承轮,其结构如图 6 所示。故障车辆依靠自身的动力,使用液压支承轮低速运行至目的地^[12]。

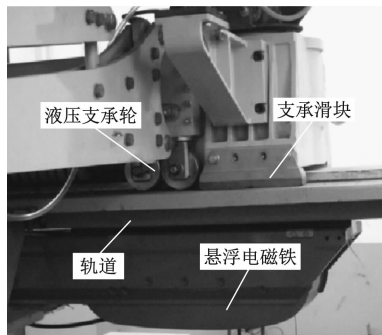


图 6 磁浮列车的液压支承轮

使用其他列车救援是指当故障列车无法利用自身能力救援时,使用其他救援列车与故障列车连挂,牵引故障列车运行到相邻车站。

例如,当列车牵引系统失效时,列车失去动力无法继续行驶,司机可将列车尽可能停放在平直、距地面较近或下方有公路的线路上,实施“紧急制

动”和“停放制动”,同时对乘客进行疏散^[13]。乘客疏散完毕后,再由其他磁浮列车,从前方或后方接近故障列车,与故障列车连接、试拉后,将故障车拖行至相邻车站。如遇特殊情况,需要切断全线电源时,不能采用依靠电磁力驱动的磁浮列车来拖行故障车,此时可以使用内燃动力的工程车去拖行故障车^[13]。

3.3 乘客疏散

乘客疏散方法可分为疏散平台疏散、车载装置疏散、地面消防救援三种方式。

疏散平台疏散是指利用设置在磁浮线路两线间的疏散平台进行疏散。在发生紧急状况下,司机将列车停稳,将疏散平台边车门打开,乘客可轻松下到疏散平台上,沿疏散平台步行至相邻车站或逃生楼梯,转移到安全位置;也可由对向列车来进行接驳,将乘客牵引至相邻车站进行疏散。

车载装置疏散是指乘客在工作人员的指引下,使用随磁浮列车携带的充气滑梯、救生气垫等装置,从高架桥上直接疏散至桥下,这种疏散方式对线下环境要求较高。

地面消防救援是在乘客急需疏散且车门无法打开等特殊情况下,无法使用上述疏散方式,此时需要消防队员使用专业救援设备(如云梯车、抢险车、水罐车、泡沫车、超高压水喷雾切割灭火车和压缩空气泡沫水罐车等)开展救援^[15]。

4 我国既有线路应急救援设施及救援方案分析

4.1 既有线路概述

4.1.1 北京磁浮 S1 线

北京磁浮 S1 线西起石门营站,东至苹果园站,共设 6 座中间站。线路全长 10.2 km,大部分为高架线路,其余为低置线路,另有隧道 1 座,长 278 m。线路设计速度为 100 km/h,其中,石门营至金安桥段已于 2017 年底开通运营。

4.1.2 长沙磁浮快线

长沙磁浮快线于 2016 年开通,是中国首条中低速磁浮铁路。长沙磁浮快线连接长沙火车南站和长沙黄花国际机场,设计速度为 100 km/h。线路全长 18.5 km,最小曲线半径为 50 m,除小部分区段为低置区间外,剩下均为高架敷设。初期设车站 3 座,未来将在现有线路基础上向东延长 4.3 km,其中高架线路约 0.2 km,地下线路约 4.1 km,增设 T2 站、

T3 站 2 座车站,预计 2020 年 11 月开工建设。

4.2 救援设施对比分析

在救援设施方面,尽管北京磁浮 S1 线和长沙磁浮快线轨道梁形式不同(北京磁浮 S1 线为双线箱梁,长沙磁浮快线为并置单线箱梁),但两者均按规范敷设了疏散平台,且疏散平台均位于双线之间,分别如图 7 和图 8 所示。



图 7 北京磁浮 S1 线疏散平台



图 8 长沙磁浮快线疏散平台(仰视图)

疏散平台宽度为 1.0 m,设置间断扶手栏杆,乘客在车门开启后,可解开扶手处的铁链逃离至疏散平台。栏杆造型采用“门”式(也称倒“U”式)造型,每组宽度约为 500 mm,间距约为 500 mm。尽管两线的疏散平台位置与尺寸都较为相似,但对于疏散平台上乘客的疏散方式却有一定区别。

北京磁浮 S1 线疏散平台分段设置,平台端部设于车站尽头,并在端部设置较宽开口。事故发生时,乘客沿疏散平台步行至相邻的车站,此时车站站内会设置一辆空车,将车门与疏散平台端部开口相连,如图 9 所示。当乘客行至端部时,可通过空车从疏散平台过渡至站台,并进行后续疏散。

与北京磁浮 S1 线不同,长沙磁浮快线并非让乘客步行至车站逃生,而是在沿线设置了逃生楼梯,如图 10 所示,乘客沿疏散平台步行至下桥点后经由逃生楼梯下桥逃生。



图 9 北京磁浮 S1 线疏散方式——站内空车连接疏散平台端部与站台



图 10 长沙磁浮快线疏散方式——逃生楼梯

这种区别是由于两线的站间距不同。北京磁浮 S1 线为市内通勤线路,平均站间距仅为 1.7 km;而长沙磁浮快线为市郊线路,平均站间距为 9.25 km,是北京磁浮的 5 倍以上。若仅将疏散平台终点设为车站,乘客步行所需时间将大大增加,考虑到疏散平台的有限宽度及逃生过程的不确定性,会对疏散效果带来极大的影响。长沙磁浮快线逃生楼梯的平均间距仅为 1.52 km,乘客可在逃至疏散平台后选择最近的逃生楼梯下桥,可大幅减少逃生所需时间,提高了逃生效率。

4.3 救援方案对比分析

由于两线所采用的磁浮列车运行、通信等设施设备采用同一标准,因此在救援方案的制定上基本相同,下面针对具体类型事故给出救援方案。

4.3.1 供电故障

当供电系统失效后,列车将首先启动紧急制动并开启车载悬浮电源,可维持悬浮约 2 min。若供电系统在 2 min 内恢复正常使用,则列车可继续受电运行;若供电系统在停电后 2 min 内未恢复正常,则列车耗尽悬浮电源能量后,将采用落车制动保护,并启用应急电源。应急电源可维持列车照明、通风、通信等基本功能。待供电恢复后恢复受电、

悬浮和正常运行;若供电系统在停电后 45 min 仍未恢复供电,此时应使用其他磁浮列车或使用救援工程车将故障列车拖入车站。

4.3.2 列车火灾

对于磁浮列车火灾,根据列车所在位置不同其应急救援方案也有一定区别。

当磁浮列车于车站起火时,应由值班站长和列车司机迅速组织应急救援,安排乘客由列车车门疏散至站台,随后有序疏散至地面。

当磁浮列车于区间起火时,事故列车司机应迅速报告,由控制中心封闭区间,列车内工作人员应在第一时间进行灭火和排烟,并组织火源车厢乘客疏散至相邻车厢。当火情轻微可控时,磁浮列车应快速行驶至临近车站后组织乘客疏散;当火情重大或发生爆炸事故时,根据所处区间长短和实际情况选择疏散方式。若选择立即停车疏散,则应迅速将乘客疏散至疏散平台,远离事故区域。随后根据区间长短不同,组织乘客通过疏散平台沿线路疏散至相邻车站或逃生楼梯逃生^[16]。

4.3.3 冰冻灾害

一般遇到轨道积雪,可在磁浮列车前端设置扫雪器进行清理。但遇到强降雪导致供电轨被冰层覆盖,将对磁浮列车正常运行造成影响,此时选择停运线路是较为稳妥的措施,待对供电轨进行除冰、检修合格后方可重新开通运营。

2018 和 2019 年年初,我国南方两次遭遇冰雪天气,湖南省气象局分别启动了低温雨雪冰冻Ⅲ级应急响应和Ⅳ级应急响应。受冻雨天气影响,为确保运输安全,长沙磁浮快线分别于 2018 年 1 月 26—31 日、2019 年 1 月 2—3 日临时停运^[17]。而目前,北京磁浮 S1 线尚未因冰冻等自然灾害而停运。因此对于冰冻灾害,其应急处理方案值得进一步研究。

5 结语

中低速磁浮交通的线路敷设方式可分为高架、低置、隧道三种,一般以高架线路为主。不同的敷设方式及线下环境会对中低速磁浮事故救援有较大影响。中低速磁浮线路的救援设施可分为疏散平台、逃生楼梯和车载救援设备三种。疏散平台作为一种高效的救援设施,集合了多种功能,极大地提高了救援的效率和安全性,具有设置的必要性。当站间距较大时,需间隔一定距离设置逃生楼梯,便

于乘客逃生。磁浮列车具有一定的自救能力。在列车发生事故后,确定事故原因,优先考虑使用列车自身能力救援。当事故比较紧急或磁浮列车无法移动时,可通过疏散平台先将乘客沿线路方向疏散,再进行故障列车的救援。北京磁浮 S1 线和长沙磁浮快线均设有疏散平台,但经由疏散平台的疏散方式略有不同。对于站间距较长的线路,应参考长沙磁浮快线设置逃生楼梯。对于冰冻灾害的应急处理方案应开展进一步研究,以减少因冰冻灾害导致磁浮线路停运的情况。

参考文献

- [1] 曹刚,曾科,李艳.城市磁悬浮轨道交通系统安全问题研究[J].中国安全科学学报,2006(11):10.
- [2] 席卿浩,武震啸,李艳,等.中低速磁浮交通应急响应预案研究[J].西部交通科技,2018(1):169.
- [3] 丁信华.对磁浮工程技术的一些思考[J].城市轨道交通研究,2015(5):10.
- [4] 李艳,马卫华.中低速磁浮交通典型故障状态研究[J].中国科技纵横,2018(1):83.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中低速磁浮交通设计规范:CJJ/T 262—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [6] 曾国保.中低速磁浮交通的适应性及工程化发展方向[J].铁道工程学报,2016(10):111.
- [7] 魏庆朝.磁悬浮铁路系统与技术[M].北京:中国科学技术出版社,2003:186.
- [8] 胡承泽.中低速磁悬浮低置路基结构设计研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [9] 中国铁路设计集团有限公司.一种适用于中低速磁浮的区间应急疏散平台:CN201720159173.7[P].2017-11-28.
- [10] 刘卫东.日本 Linimo 磁浮线的技术特点和运行情况[J].城市轨道交通研究,2014(4):133.
- [11] 杨新斌.中低速磁浮技术在中国城市轨道交通中的应用[J].铁道车辆,2015(4):30.
- [12] 简炼.中低速磁浮交通运行的安全性及可靠性分析[J].都市快轨交通,2013(6):24.
- [13] 李经纬.某中低速磁浮线路救援方案研究[J].城市建设理论研究(电子版),2014(34):2791.
- [14] 殷勤.中低速磁悬浮线路维护工程车的可行性分析及建议[J].铁道标准设计,2018(1):151.
- [15] 陈永胜.磁浮列车灾害事故处置对策[J].防灾科技学院学报,2010(3):6.
- [16] 魏庆朝,闫瑞,潘姿华,等.我国中低速磁浮铁路应急管理体系构建研究[J].铁道运输与经济,2019(9):74.
- [17] 陈淦璋.长沙磁浮快线临时停运[N].湖南日报,2018-01-27(9).

(收稿日期:2020-03-25)