

新加坡地铁汤申线全自动无人驾驶列车 激活方法及其激活电路

崔 杰 田 庆 韩庆军 张 坤 刘海涛 张伟建

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛)

摘 要 [目的]在全自动无人驾驶(以下简称“全自动驾驶”)列车激活电路调试及运用过程中,会出现列车无法激活的情况,进而影响列车的运营秩序,因此有必要对各种场景下的列车激活方法和激活电路进行分析和试验验证,以选择合适的改进方案解决列车无法激活的问题。[方法]介绍了使用司机室钥匙信号作为列车激活控制条件存在的问题,并对控制电路单点故障对于列车激活功能的影响进行分析,提出满足不同场景下的解决方案。[结果及结论]对于司机室钥匙信号作为列车激活的控制条件存在的问题,采用司机室钥匙和司机控制器建立机械连锁,并基于司机控制器手柄位置设计全自动驾驶模式和人工驾驶模式来控制列车激活的互锁关系,解决列车激活冲突的问题。对于控制电路单点故障无法激活列车的问题,激活控制电路采用双路冗余设计,确保若一路电路故障,另一路电路仍可以保证正常工作,提高了列车控制电路的安全性和可靠性。通过功能试验,验证了列车全自动驾驶和人工驾驶模式激活方法和激活电路的有效性。

关键词 地铁;全自动驾驶;列车激活方法;激活电路

中图分类号 U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.055

Activation Method and Activation Circuit for Singapore MRT Thomson Line FAO Trains

CUI Jie, TIAN Qing, HAN Qingjun, ZHANG Kun, LIU Haitao, ZHANG Weijian

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China)

Abstract [Objective] During the commissioning and operation process of activation circuit for FAO (fully automatic operation) trains, there are situations where the train cannot be activated, thereby affecting the operational order of the trains. Hence, it is necessary to analyze and experimentally verify the activation methods and activation circuits for trains in various scenarios, and select appropriate improvement solutions to address the unactivated train issues. [Method] Problems of using the driver's cabin key signal as control condition for train activation are discussed, and the impact of single-point fault in

control circuits on train activation function is analyzed and solutions for different scenarios are proposed. [Result & Conclusion] To address the issue of using the driver's cabin key signal as the control condition for train activation, a mechanical interlock is established between the driver's cabin key and the driver controller. According to the position of driver controller handle, FAO and manual operation modes are designed to control the interlocking relationship for train activation, thus resolving conflicts in train activation. To address the unactivated train problems due to single-point fault in control circuits, the activation control circuit adopts a dual-redundant design to ensure that even one circuit fails, the other circuit can still function normally, thereby enhancing the safety and reliability of the train control circuit. Through functional testing, the effectiveness of the activation methods and activation circuits for both FAO and manual operation modes is verified.

Key words metro; FAO; train activation method; activation circuit

全自动无人驾驶(以下简称“全自动驾驶”)作为目前城市轨道交通的先进技术,是城市轨道交通的发展目标之一^[1]。列车无人值守的全自动驾驶是指列车上无需司机进行驾驶,并具有自动化等级为GOA4(无人干预列车运行)的列车自动驾驶模式^[2]。全自动驾驶系统通常具备列车自动唤醒、启动和休眠、自动出入停车场、自动清洗、自动行驶、自动起停车、自动开关车门等功能,并具有常规运行、降级运行和灾害工况等多重运行模式^[3]。全自动驾驶的新增功能需求可分为运营安全与列车运行两大类^[4]。结合运营需求,新加坡地铁汤申线全自动驾驶列车既可在ATC(列车自动控制)信号系统控制下进行全自动驾驶,也可在ATC系统支持下进入ATP(列车自动防护)人工驾驶模式和完全人工驾驶模式。因此,如何有效保证全自动驾驶列车的全自动驾驶模式和人工驾驶模式获得列车激活,且两种驾驶模式不会导致列车激活冲突就显得尤

为重要。目前,在列车激活控制方法中,普遍使用任意端司机控制器(以下简称“司控器”)钥匙作为列车激活的前提条件,但存在钥匙信号无法断开而使得列车无法进入全自动驾驶模式的情况。另外,目前列车激活电路有本端激活和列车激活两种继电器,当列车需要使用他端激活继电器时,只能用本端激活继电器的常闭点代替,若本端激活继电器的常闭点发生粘连,其常闭点无法断开,则会传递错误的信息,给列车控制带来一定的风险。

为了解决上述技术中存在的问题,本文介绍了新加坡地铁汤申线全自动驾驶列车激活及互锁控制方法,以及其激活电路,通过建立司机钥匙和司控器之间的机械连锁关系,依据司控器手柄位置判断列车驾驶模式,以保证全自动驾驶模式和人工驾驶模式的可用性,确保只能采取一种模式激活列车,且先激活的一端为主控端,另一端不能激活。

1 司机室钥匙和司控器连锁关系

新加坡地铁汤申线采用4节编组列车,编组型式为=DM-M-T-DM=,其中:DM车为带司机室的动车;M车为动车;T车为拖车。每个DM车配置司机钥匙和司控器手柄,司机室钥匙有ON和OFF两个位置,司控器手柄有AUTO(全自动模式)位、PM(限制人工保护)位、RMF(人工前向)位、RMR(人工后向)位和OFF(关闭)位共5个位置,驾驶手柄有Pmax(最大牵引)位、Power(牵引)区间位置、Coast(惰行)位置、Brake(制动)区间位置、Bmax(最大制动)位和EM(紧急制动)位。司机室钥匙和司控器整体面板示意图如图1所示。

司机室钥匙和司控器手柄采用机械连锁设计,只有当司机钥匙置于ON位时,司控器手柄才可以在AUTO位、PM位、RMF位、RMR位和OFF位之间转换;只有当司控器手柄置于AUTO位或OFF位时,司机钥匙才可以打到OFF位,司机钥匙才可以拔出。当AUTO位有效时,列车完全由信号系统控制,能够实现全自动驾驶功能。当PM位有效时,列车可以在信号系统的保护下进行人工驾驶,列车运行速度可以达到信号系统所允许的最高速度。当RMF位有效时,列车能够以人工驾驶模式向前运行,列车运行速度不得超过18 km/h。当RMR位有效时,列车能够以人工驾驶模式向后运行,列车运行速度不得超过10 km/h,最大运行距离为6 m,超出6 m后列车将施加紧急制动;新加坡地铁汤申线

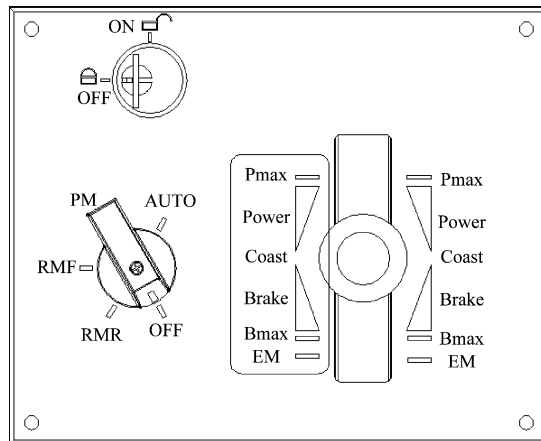


图1 司机室钥匙和司控器整体面板示意图

Fig. 1 Diagram of driver's cab key and driver controller overall panel

全自动驾驶列车设置了RMR模式旁路开关,当RMR模式旁路有效时,列车能够以人工驾驶模式向后运行,运行速度不得超过10 km/h,没有最大运行距离的限制。当OFF位有效时,列车处于未激活状态,任何与列车激活有关的操作均不能执行。

2 列车激活电路及激活控制方法

我国的城市轨道交通列车一般使用司机室钥匙信号作为列车激活的控制条件,而《新加坡地铁汤申线用户需求书》要求以司机室钥匙作为列车唤醒的控制条件,而不能作为列车激活的控制条件,列车激活端应根据列车驾驶模式和相应司控器手柄位置确定。

新加坡地铁汤申线列车激活电路不直接采用司机室钥匙信号,而是依据司控器手柄位置和信号系统配合决定列车采用人工激活还是全自动激活。列车激活控制电路图如图2所示。列车激活控制电路主要由DC 110 V电源、控制断路器、本端激活继电器、他端激活继电器、任意端激活继电器、全自动模式继电器、全自动司机室占用继电器、人工司机室占用继电器、司控器手柄、ATC输入/输出端口、二极管等组成。其中:DC 110 V电源由蓄电池输出回路提供;控制断路器用于防止列车激活控制回路过流或短路,本文选用额定电流为3 A的C特性断路器;本端激活继电器可由全自动驾驶模式下的ATC控制激活,也可由人工驾驶模式下的司控器手柄移至PM位、RMF位或RMR位进行激活,将激活本端激活继电器作为本端司机室激活的判断条件,该继电器的触点可串入其他控制电路使用;电路设

置了他端激活继电器和任意端激活继电器,并设置了逻辑保护功能,先激活的一端司机室可以作为激活端,后激活的另一端司机室不能作为激活端,确

保只有一端有效激活;该电路支持两列车联挂运行,联挂后仅有先激活的一端司机室可以作为激活端,其他司机室不能同时作为激活端。

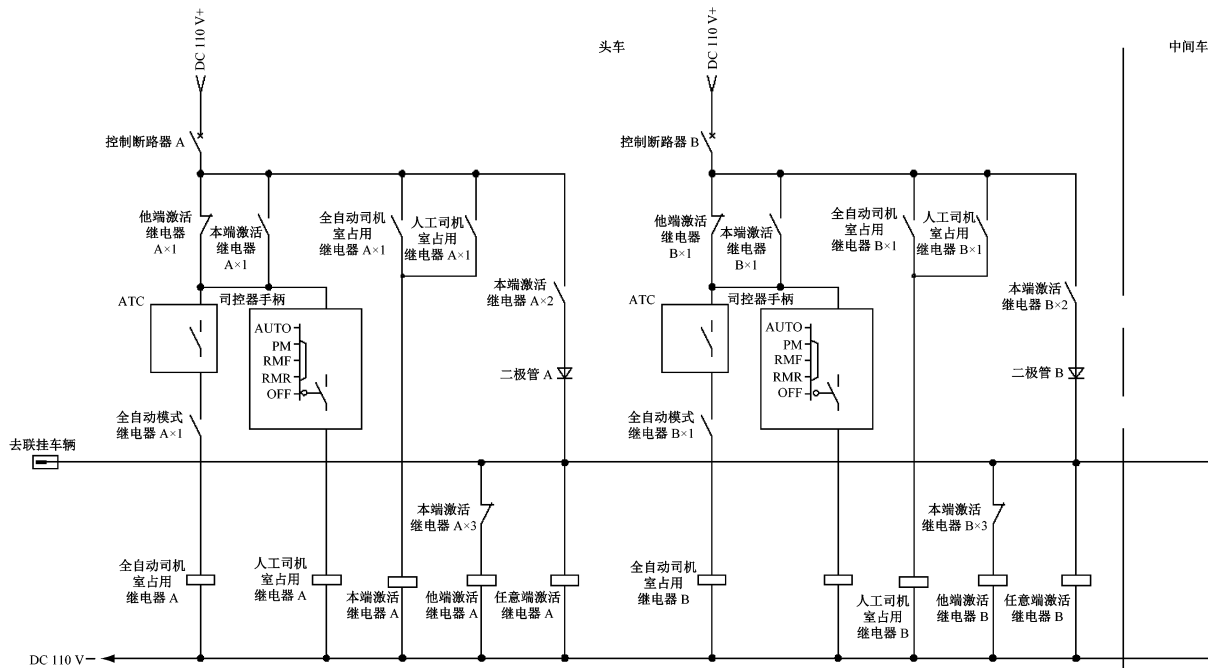


图2 列车激活控制电路图

Fig. 2 Diagram of train activation control circuit

列车激活电路的功能是判断列车头、尾端的哪一端作为激活端,被激活的一端参与关键控制电路(如方向指令、牵引及制动指令、开关门指令等)的控制,未激活的一端不能参与关键控制电路的控制,即在未激活的一端操作相应命令,控制指令不能被有效触发。

对于全自动驾驶列车,无论是设备配置亦或是控制、逻辑功能均采用了冗余备份方案^[5]。新加坡地铁汤申线激活电路采用完全冗余控制方案,从前端 DC 110 V 电源供电,经中间的断路器、司控器触点、ATC 输出等设备,至最终的激活继电器均完全采用备份方案,分为 A 路和 B 路,以保证列车激活控制电路的冗余性。在新加坡地铁汤申线的列车关键控制回路(如方向指令、牵引及制动控制电路、车门控制电路等)中,但凡涉及行车安全的电路均需采集列车激活信号,且这些关键控制回路均采用冗余备份方案,完全相同的电路结构,采用不同元器件或信号系统 I/O(输入/输出)点,将控制电路分为 A 路和 B 路,确保若一路电路故障,另一路电路仍可以保证正常工作,增加了列车控制电路的安全性和可靠性。

2.1 单列车激活控制

对于单列车,本端激活继电器可由信号系统全自动控制激活,也可由人工控制激活。单列车激活控制流程示意图如图 3 所示。当列车满足 DC 110 V 电源上电且控制断路器闭合的前提条件,初始状态时,头、尾车的司机室均未激活,若满足全自动控制条件,即将两端司机室司控器手柄均置于 AUTO 位(两端司机室全自动模式继电器得电),且一端 ATC 信号系统发出激活指令,该端的全自动司机室占用继电器得电,进而本端激活继电器得电;或是满足人工控制条件,即将一端司控器手柄置于 PM 位、RMF 位或 RMR 位(另一端司控器手柄置于 AUTO 位或 OFF 位),该端的人工司机室占用继电器得电,进而本端激活继电器得电。

以头车激活为例,头车的本端激活继电器得电,可通过列车线使尾车的他端激活继电器得电(头车的他端激活继电器不得电),头车可通过他端激活继电器常闭触点(闭合状态)和本端激活继电器常开触点(闭合状态)保持头车本端激活继电器得电;此时,尾车他端激活继电器常闭触点和本端激活继电器常开触点均为打开状态,尾车的本端激

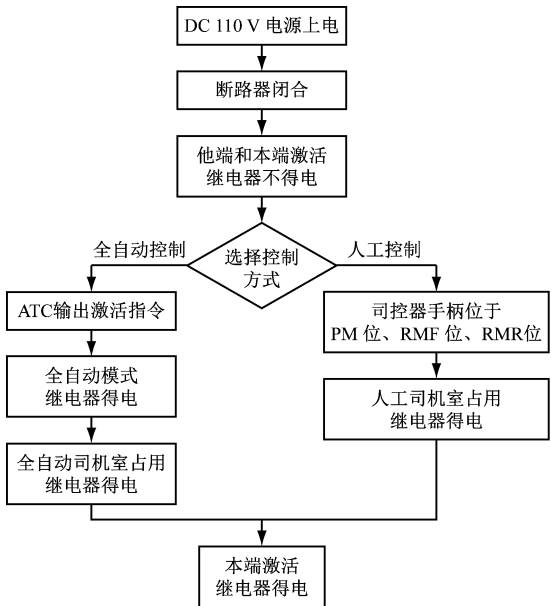


图 3 单列车激活控制流程示意图

Fig. 3 Diagram of single-train activation control process

活继电器不得电,尾车无法同时激活。

2.2 两列车联挂运行激活控制

对于两列联挂列车,当列车所有头、尾车均未激活时,若通过全自动控制激活或人工控制激活将任一列车的本端激活继电器激活,可通过列车线使其他 3 个司机室端的他端激活继电器得电,从而其他司机室本端继电器无法激活,保证了先获得激活

的一端为激活端,后获得激活的其他端不能作为激活端。联挂列车激活控制流程示意图如图 4 所示。

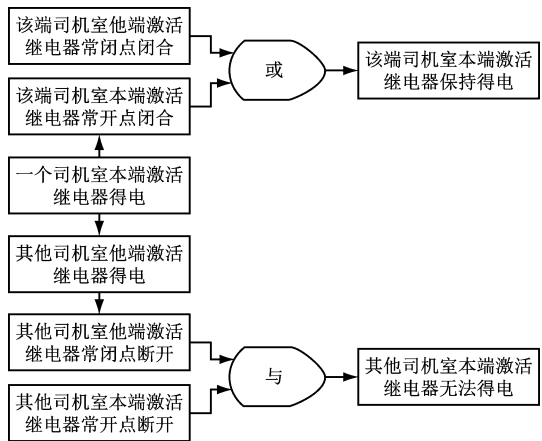


图 4 联挂列车激活控制流程示意图

Fig. 4 Diagram of activation control process for coupled trains

2.3 信号系统激活控制

除了上述激活电路外,新加坡地铁汤申线列车两端的司控器手柄位置信息均会传送给信号系统,信号系统对两端司控器手柄位置信号进行判断,以确定列车驾驶模式。当两端的列车驾驶模式发生冲突或未定义列车驾驶模式时,信号系统将会默认列车驾驶模式无效,进一步保证列车的控制安全。列车驾驶模式对应关系如表 1 所示。

表 1 列车驾驶模式对应关系

Tab. 1 Corresponding relationship for train driving modes

序号	先激活的本端信号	他端信号(AUTO 位)对应模式	他端信号(PM 位)对应模式	他端信号(RMF 位)对应模式	他端信号(RMR 位)对应模式	他端信号(OFF 位)对应模式	他端信号(未定义)对应模式
1	AUTO	AUTO	PM	RMF	RMR	无效	无效
2	PM	PM	无效	无效	无效	PM	PM
3	RMF	RMF	无效	无效	无效	RMF	RMF
4	RMR	RMR	无效	无效	无效	RMR	RMR
5	OFF	无效	PM	RMF	RMR	OFF	无效
6	未定义	无效	PM	RMF	RMR	无效	无效

3 列车激活功能试验

为验证新加坡地铁汤申线的列车激活功能,对列车进行功能试验。由于信号系统是独立于列车外的关键子系统,列车主机厂无操作信号系统的权限,在全自动模式功能试验中,采用信号系统测试工装设备模拟信号系统接收和发送指令,以验证列车电路设计是否符合用户需求。

信号系统测试工装设备照片如图 5 所示。工装右下区域设置两个断路器,用于防止试验工装过电流和短路;工装左下区域设置测试点,用于试验时的临时改造测试;工装中部区域设置 4 个旋钮,用来模拟多信号输出;其他区域设置指示灯和两个位置开关,指示灯用来模拟显示信号的输入状态,两个位置开关用来模拟信号的输出指令。



图5 信号系统测试工装设备照片

Fig. 5 Photo of signaling system testing equipment

3.1 单列车功能试验

1) 钥匙和司控器手柄连锁试验。两端司机室分别将钥匙打至 ON 位,验证司控器手柄可以在 AUTO 位、PM 位、RMF 位、RMR 位和 OFF 位间转换,钥匙打至 OFF 位,司控器手柄不能转换位置;只有当司控器手柄位于 AUTO 位或 OFF 位时,司机钥匙才可以拔出。

2) 人工驾驶列车激活电路试验。在列车一端将钥匙打至 ON 位,司控器手柄分别移至 5 个不同位置,当其在 PM 位、RMF 位、RMR 位时,确认本端和他端 A 路及 B 路激活继电器的状态是否正确,TCMS(列车控制与管理系统)屏幕显示是否正常。验证完上述试验后,将司控器手柄打至 OFF 位,换另外一端重复上述操作。

3) 全自动驾驶列车激活电路试验。列车两端将钥匙均打至 ON 位,两端司控器手柄均移至 AUTO 位,在列车一端分别操作信号系统测试工装上的 FAM1(全自动模式 1)、ATCON1(ATC1 置于 ON 位)和 FAM2(全自动模式 2)、ATCON2(ATC2 置于 ON 位)开关,确认本端和他端 A 路及 B 路激活继电器的状态是否正确,TCMS 屏幕显示是否正常。验证完上述试验后,将信号系统测试工装上的开关复位,换另外一端重复上述操作。

4) 两端同时激活试验。使用人工控制激活和全自动控制激活方法分别在两端司机室先后进行操作,确认先投入激活一端 A 路和 B 路的本端激活继电器得电,后激活另一端的本端激活继电器失电。

以人工 PM(有保护的人工驾驶)驾驶模式为例,DM1 车司控器手柄置于 PM 位,DM2 车司控器手柄置于 OFF 位,从 TCMS 屏幕上可以看出 DM1 车显示司机图标,代表 DM1 端为激活端,方向图标为 DM1 车前向方向,维护界面 DM1 车的激活继电器 CORa 和 CORb 状态均为 1,DM2 车的激活继电器

器状态均为 0,与列车激活设计一致。单列车试验 TCMS 界面软件截图如图 6 所示。

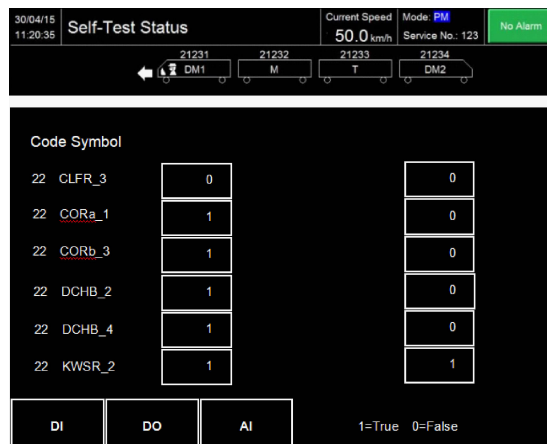


图6 单列车试验 TCMS 界面软件截图

Fig. 6 Software screenshot of single-train testing TCMS (train control and management system) interface

3.2 两列车联挂功能试验

新加坡地铁汤申线并没有全自动联挂驾驶运行场景,联挂工况仅适用于人工驾驶模式下的列车救援,因此联挂列车激活功能测试只测试人工激活的情况。驾驶第一列车的 DM1 车(如 21231 车)在 RMF 模式下,以列车运行速度为 3 km/h 驶向第二列车的 DM2 车(如 21244 车,该列车的司控器手柄均位于 OFF 位)。当两列车联挂完成后,在第一列车的 TCMS 屏幕上确认 DM1 车为激活端,运行方向向前;第二列车无激活端,第二列车方向指向 DM1 车前进方向,与列车激活设计一致。将该列车的司控器手柄置于 OFF 位,操作其他任意端司控器手柄,使操作端激活,在 TCMS 屏幕上确认操作端为激活端。验证完上述试验后,将司控器手柄打至 OFF 位,换另外两端重复上述操作。两列车联挂试验 TCMS 界面软件截图如图 7 所示。



a) 联挂(操作)车辆 TCMS 界面示意图



b) 被联挂车辆 TCMS 界面示意图

图7 两列车联挂试验 TCMS 界面软件截图

Fig. 7 Software screenshot of two trains coupling test TCMS interface

3.3 信号系统逻辑试验

信号系统调试正常后,取消信号系统测试工装

设备,接入车载信号系统设备,在列车两端按照表1的逻辑分别操作列车两端的司控器手柄,验证信号系统逻辑判断是否符合设计需求,并在TCMS屏幕上正确显示列车的当前模式。

4 结语

新加坡地铁汤申线列车通过建立司机钥匙与司控器手柄间的安全互锁关系,采用司控器手柄位置判断列车驾驶模式的方法,避免了全自动驾驶模式和人工驾驶模式导致列车激活冲突的问题。此外,列车激活电路采用双路冗余设计,即使一路发生故障,另一路仍可正常工作,不会因单点故障导致列车无法激活正常功能。

通过列车的功能试验,验证了列车激活电路可以由信号系统全自动控制激活,也可由人工控制激活,且只有一种模式有效。列车激活只能在司机室一端激活,先收到激活指令的司机室为激活端,后收到激活指令的司机室不能作为激活端。本文介绍的新加坡地铁汤申线列车激活方法及其激活电路已通过LTA(新加坡陆路交通管理局)的运营考核,可以在我国全自动驾驶列车上推广应用。

参考文献

- [1] 翟国锐,刘宏伟,师秀霞.下一代地铁车辆全自动无人驾驶信号系统关键技术[J].都市快轨交通,2017,30(3):78.

(上接第321页)

参考文献

- [1] 李新君,张耿.基于Simpack的磁浮列车用空气弹簧动力学建模与仿真分析[J].自动化与仪表,2023,38(6):105.
LI Xinjun, ZHANG Geng. Dynamic modeling and simulation analysis of air spring for maglev train based on Simpack[J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(6): 105.
- [2] 刘少义,许恒波,郑宝奎,等.磁浮车用SRIIR160B—2型空气弹簧的计算分析及试验研究[J].铁道车辆,2015,53(4):8.
LIU Shaoyi, XU Hengbo, ZHENG Baokui, et al. Calculation, analysis, testing and research on the SRIIR160B—2 air springs for maglev cars[J]. Rolling Stock, 2015, 53(4): 8.
- [3] 罗英昆,赵春发,梁鑫,等.小半径竖曲线上磁浮车辆空气弹簧动态响应分析[J].振动与冲击,2020,39(17):99.
LUO Yingkun, ZHAO Chunfa, LIANG Xin, et al. Dynamic responses of air-spring suspension of a maglev vehicle negotiating a small-radius vertical curved track[J]. Journal of Vibration and

SHI Xiuxia. Key technologies for unattended train operation signaling system for new generation metro vehicles[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(3): 78.

- [2] 郑伟.全自动无人驾驶模式下系统功能与场景分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(11):107.
ZHENG Wei. Analysis of the function and scene of train operation in full unattended mode[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(11): 107.
- [3] 张艳兵,王道敏,肖衍.城市轨道交通全自动驾驶的发展与思考[J].铁道运输与经济,2015,37(9):70.
ZHANG Yanbing, WANG Daomin, XIAO Yan. Development and thoughts on full-automatic operation of urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(9): 70.
- [4] 刘鹏翔.城市轨道交通全自动驾驶运营安全分析与列车运行模拟仿真[D].北京:北京交通大学,2017.
LIU Peng'ao. Operational safety analysis and train running simulation of fully automated operation urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [5] 张海涛,梁汝军.地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J].城市轨道交通研究,2015,18(5):33.
ZHANG Haitao, LIANG Rujun. Introduction to the unattended train operation system on metro train[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 33.

· 收稿日期:2022-02-18 修回日期:2022-12-12 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-18 Revised:2022-12-12 Published:2024-07-10
· 通信作者:崔杰,高级工程师, jackcj2005@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

Shock, 2020, 39(17): 99.

- [4] 谢钦.新型中低速磁浮车辆空气弹簧应用研究[D].成都:西南交通大学,2017.
XIE Qin. The application research of airsprings for new generation low-speed maglev[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 石军,刘少义,许恒波,等.中低速磁浮列车用新型空气弹簧的研制[J].铁道车辆,2012,50(7):18.
SHI Jun, LIU Shaoyi, XU Hengbo, et al. Development of new type air springs for magnetic levitation trains with middle-low speed[J]. Rolling Stock, 2012, 50(7): 18.

· 收稿日期:2022-01-25 修回日期:2022-02-17 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-25 Revised:2022-02-17 Published:2024-07-10
· 通信作者:刘恒坤,副研究员, m13974984481_1@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