

基于 TCMS 的地铁列车辅助供电系统双母线并网供电控制技术方

杨 博 刘 琪 刘佳薇

(西安中车永电捷通电气有限公司, 710018, 西安)

摘 要 [目的]在目前列车辅助供电系统主流的交叉供电方式及扩展供电方式下,某台 SIV(辅助逆变器)发生故障时,将对列车上用电设备的正常运行造成一定程度的影响。并网供电方式作为新兴的控制技术,具有其优越性,应对并网供电控制技术进行深入研究。[方法]以上海轨道交通 8 号线为例,针对该线第三批次购入列车辅助供电系统响应速度慢、可靠性不高等问题,在第四批次新购入列车的设计上提出了基于 TCMS(列车控制与管理系统)控制的双母线并网供电方案。即:在中间车布置 4 个 TLK(并联接触器),将 4 段单独的中压母线贯通在一起。介绍了该方案下列车辅助供电系统的中压母线结构,分析了 SIV 内部启动阶段和并网启动阶段的动作时序,阐述了并网供电控制逻辑、SIV 启动逻辑和故障保护逻辑。[结果及结论]所提方案的并网时间大为缩短(最短可达 2.5 s)。双母线多 TLK 的中压母线拓扑避免了母线短路导致的系统功能整体失效,提高了列车辅助供电系统的可靠性。基于 TCMS 控制的并网供电技术有望成为今后城市轨道交通列车辅助供电技术的发展方向。

关键词 地铁;列车辅助供电系统;辅助逆变器;双母线并网供电

中图分类号 U270.381

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.043

TCMS-based Dual-bus Grid-connected Power Supply Control Technology Scheme for Metro Train Auxiliary Power Supply System

YANG Bo, LIU Qi, LIU Jiawei

(Xi'an CRRC Yongdian Jietong Electric Co., Ltd., 710018, Xi'an, China)

Abstract [Objective] In the current mainstream of train auxiliary power supply systems, such as cross-supply method and extended supply method, the failure of a single SIV (auxiliary inverter) can impact the normal operation of electrical equipment on the train. As an emerging control technology, the grid-connected power supply has its advantages and requires in-depth research into its control technology. [Method] Taking Shanghai Rail Transit Line 8 as example, issues related to slow

response and low reliability in the auxiliary power supply system for the third batch of purchased train are addressed. For the design of the fourth batch of purchased trains, a dual-bus grid-connected power supply scheme based on TCMS (train control and management system) control is proposed. Specifically, four TLKs (grid-connected contactors) are arranged in the middle car to link four independent medium-voltage buses together. The medium-voltage bus structure of the auxiliary power supply system under this scheme is introduced, the action sequence during the internal start-up stages and grid-connected start-up stages of SIV are analyzed, and the logics of grid-connected power supply control, SIV start-up and fault protection are expounded. [Result & Conclusion] The time required for grid-connected power supply in the proposed scheme is significantly reduced (minimum of 2.5 seconds). The medium-voltage bus topology with dual-bus and multiple TLKs avoids system functionality overall failure due to bus short-circuits, improving the reliability of train auxiliary power supply system. The grid-connected power supply technology based on TCMS control is expected to be a development direction of auxiliary power supply technology for urban rail transit trains in the future.

Key words metro; train auxiliary power supply system; auxiliary inverter; dual-bus grid-connected power supply

地铁列车的辅助供电系统是地铁列车的关键组成部分。列车辅助供电系统将直流架线电压逆变为 AC 380 V 交流电源电压,为空调、充电机、制动空压机等车载设备提供工作电源,以确保列车许多重要功能的实现。其系统可靠性不仅直接影响整车的可用性,也关系到乘客的乘坐舒适性^[1]。本文以上海轨道交通 8 号线新购入的第四批次列车为依托,介绍了基于 TCMS(列车控制与管理系统)的双母线并网供电控制技术方

1 地铁列车辅助供电系统概述

常见的地铁列车辅助供电方式主要包括交叉供

电、扩展供电和并网供电。其中:交叉供电采用双母线结构,单根母线只为列车一侧设备供电,当其中 1 台 SIV(辅助逆变器)故障时,整车 50%的空调、照明等设备将不能正常运行。扩展供电采用单母线结构,中间串联 1 个接触器,将整段母线一分为二,当其中 1 台 SIV 故障时,控制接触器将闭合,使另外 1 台 SIV 可以为故障侧的设备供电,考虑到 SIV 容量限制,此时列车空调需要减载运行^[2]。因此,无论是交叉供电还是扩展供电方式,当单台 SIV 发生故障时,列车空调等用电设备均需降级运行,这严重影响了整车的可靠性及乘客的乘坐舒适度。

并网供电作为一项新兴技术,近几年在长编组、布置有多台 SIV 的列车上逐渐得以应用。与交叉供电和扩展供电相比,并网供电方式切换简单,当单台 SIV 故障时,列车用电设备无需减载,能最大程度地保证车上用电设备的可用性,优势明显。但是,并网供电技术复杂,对 SIV 的启动策略、同步控制和功率分配等要求均较高,要求各 SIV 不能同时启动,同时要求各 SIV 的输出电压幅值、频率和相位一致,否则将导致 SIV 间出现环流。

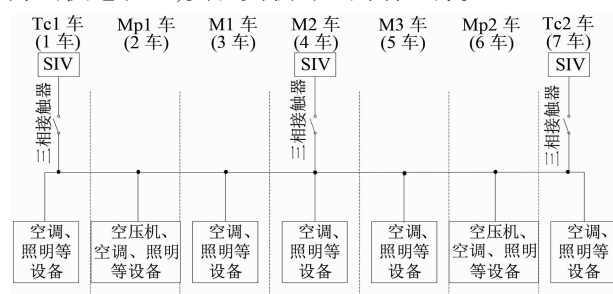
不同于电力行业的高压直流并网供电技术,城市轨道交通列车的交流并网供电除了需要进行幅值比较外,还需进行相位和频率的比较^[3]。为避免多台 SIV 同时并网造成三相不平衡,上海轨道交通 8 号线第三批次购入列车(7 节编组)的辅助供电系统拓扑如图 1 所示。图 1 中,并网供电方式采取了延时启动策略,即:当 SIV 检测到架线电压有电时,Tc1 车的 SIV 先启动,M2 车的 SIV 在 Tc1 车启动 6 s 后再启动,Tc2 车的 SIV 在 Tc1 车启动 12 s 后再启动。因此,总并网时间至少为 12 s,并网时间较长,这在一定程度上影响了列车的起动时间。

上海轨道交通 8 号线第四批次购入的列车在设计上要求并网时间不大于 10 s。为缩短并网启动时间,新购入的第四批次列车采用了基于 TCMS 进行控制的并网供电方案。与传统的并网供电方案相比,基于 TCMS 的并网供电方案可大大缩短并网启动时间(可缩至 2.5 s)。同时由于该方案采用了双母线结构,列车辅助供电系统的冗余性进一步得以提高。

2 列车中压母线拓扑

上海轨道交通 8 号线第四批次购入列车的辅助供电系统拓扑如图 2 所示,整车由 4 台 SIV 构成,这 4 台 SIV 输出的 AC 380 V 电源并网,为整车负载供电。

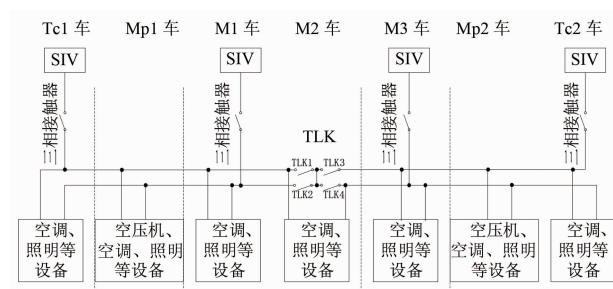
为避免中压母线单点短路导致整车辅助供电系统功能丧失,该型列车辅助供电系统拓扑采用双母线结构,即:在 M2 车布置了 4 个 TLK(并联接触器),将 4 段单独的中压母线贯通在一起。当其中 1 台 SIV 故障时,其他 SIV 会继续对负载供电且负载无需减载。当故障的 SIV 恢复正常时,列车辅助供电系统会比较母线电压的幅值、频率和相位,若幅值、频率和相位跟母线一致,则故障 SIV 可重新插入至中压母线,完成并网供电状态,实现负载的不间断运行。



注:Tc1 车一带司机室的头车;Mp1 车一带受电弓的动车 1; M1 车—动车 1; M2 车—动车 2; M3 车—动车 3;Mp2 车一带受电弓的动车 2;Tc2 车一带司机室的尾车;“1 车”指第 1 节车厢,余类同。

图 1 上海轨道交通 8 号线第三批购入列车的辅助供电系统拓扑

Fig. 1 Auxiliary power supply system topology of the third batch of trains purchased for Shanghai Rail Transit Line 8



注:TLK1、TLK2、TLK3、TLK4—并连接触器编号。

图 2 上海轨道交通 8 号线第四批次购入列车的辅助供电系统拓扑

Fig. 2 Auxiliary power supply system topology of the forth batch of trains purchased for Shanghai Rail Transit Line 8

3 SIV 启动控制

SIV 的启动过程分为内部启动和并网启动 2 个阶段。内部启动阶段完成输出电压的建立,将 DC 1 500 V 逆变为 AC 380 V;并网启动阶段完成三相接触器的闭合,将 SIV 内部建立的 AC 380 V 电压输出到中压母线,从而完成对负载的供电。

当 SIV 控制单元检测到网线电压大于 1 000 V 时,各 SIV 将按图 3 所示的时序完成内部启动。来自架线的 DC 1 500 V 直流电压经 DCL(直流电抗器)、LB1(直流接触器 1)、LB2(直流接触器 2)、电容器充放电电路及支撑电容后,送至 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)进行逆变,然后输出 PWM(脉冲宽度调制)交流电压。通过输出变压器进行电压隔离,降压后输出三相 380 V/50 Hz 的交流电压。最后,经三相交流滤波器得到低谐波含量的三相正弦电压。当 SIV 的 AC 380 V 输出电压正常时,正常工作的 SIV 通过 MVB(多功能车辆总线)向 TCMS 反馈“ACOK(内部正常)”信号,该信号代表 SIV 内部运行正常、具备输出 AC 380 V 电压的能力。

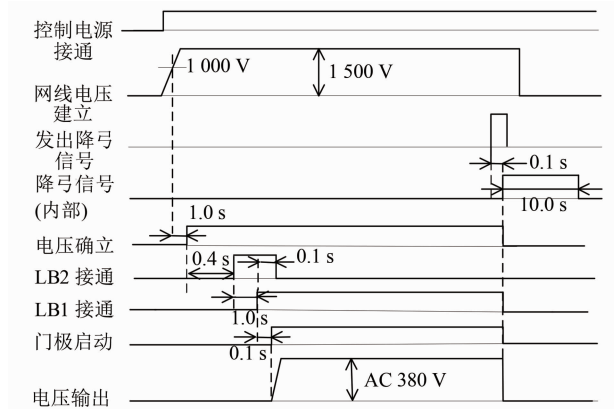


图3 SIV 的内部启动动作时序

Fig. 3 SIV internal start-up action time sequence

当 SIV 内部启动完成后,通过闭合 SIV 内部的 3phMK(三相接触器)进行并网,完成 SIV 对中压母线 AC 380 V 的供电输出。SIV 的并网启动分为 2 种情况:

1) 当中压母线无电(即所有 SIV 皆未闭合 3phMK)时,TCMS 负责发送“并网启动信号”(持续 4 s)给其中 1 台 SIV。收到信号的 SIV 在接收到信号的 0.1 s 后闭合 3phMK 完成并网,并将“并网成功信号”反馈给 TCMS,如图 4 所示。

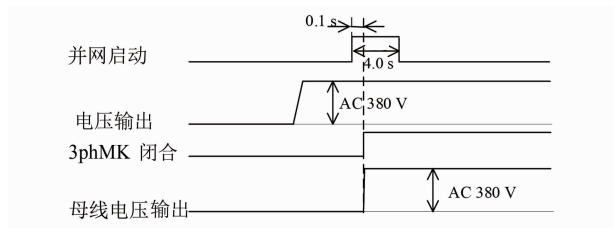


图4 中压母线无电时 SIV 的并网启动动作时序

Fig. 4 SIV grid-connected initiation action time sequence without powered medium-voltage bus

2) 当中压母线有电压时,SIV 的并网启动动作时序如图 5 所示,即:至少有 1 台 SIV 并网成功,其他 SIV 自动同步交流母线电压,完成并网。3phMK 闭合后,SIV 将“并网成功信号”反馈给 TCMS。

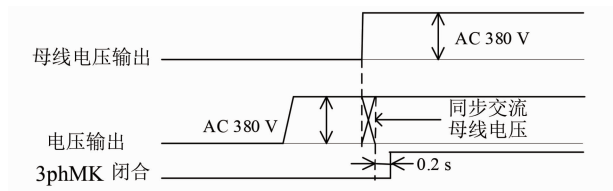


图5 中压母线有电时 SIV 的并网启动动作时序

Fig. 5 SIV grid-connected initiation action time sequence with powered medium-voltage bus

综上所述,当中压母线无电压时,TCMS 负责控制 SIV 的启动时序,给 4 台 SIV 中的任意 1 台 SIV 发送“并网指令信号”;如果中压母线有电压,则代表至少有 1 台 SIV 已并网成功,其他 SIV 可自动同步交流母线电压,完成并网。

4 并网控制

4.1 并网指令发送

TCMS 发送并网指令前,需闭合中压母线的 TLK,将 4 段独立的母线贯通起来。TLK 的闭合条件为 4 台 SIV 的 3phMK 均为断开状态,即 AC 380 V 中压母线无电压。并网指令发送逻辑如图 6 所示,TCMS 循环读取 Tc1 车、Tc2 车、M1 车、M3 车内 SIV 的状态,判断哪节车厢的 SIV 发送了“ACOK”信号,然后给对应的 SIV 发送“并网指令”。若 TCMS 收到该 SIV 反馈的“并网成功”信号,则结束并网控制,其他 3 台 SIV 根据母线相位自动完成并网;若 TCMS 未收到该 SIV 反馈的“并网成功”信号,则 TCMS 继续判断其他 SIV 是否发送了“ACOK”信号。

4.2 故障保护

影响并网状态的故障主要分为 2 种:TLK 故障和 SIV 短路故障。应根据不同的故障情况,控制 SIV 在并网供电和隔离运行 2 种模式间切换。

若并网运行过程中发生 TLK 异常断开,则判定发生了“TLK 阻滞”故障,此时对应的 SIV 仅负担 1/4 母线负载,其余 SIV 继续并网运行;若 SIV 启动时就发生 TLK 故障,则进入隔离运行模式。

列车辅助供电系统短路故障分 2 种情况:一种为 SIV 内部短路,另一种为 SIV 外部短路^[4]。TCMS 检测到 SIV 反馈的“INVOC(逆变器过电流)”信号时:

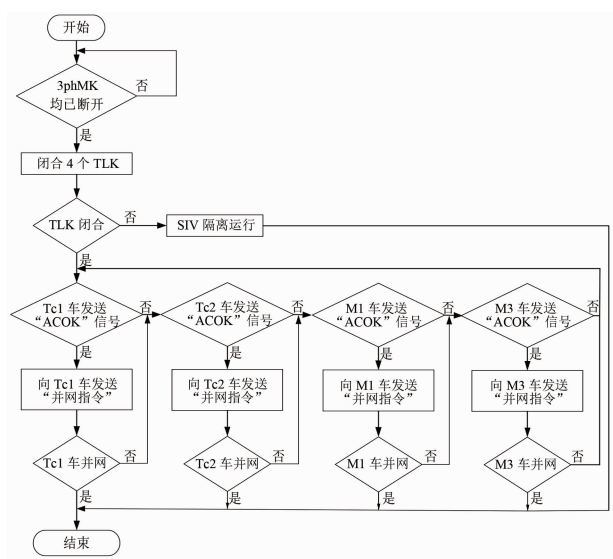


图6 TCMS 并网指令发送逻辑

Fig. 6 Delivery logic of TCMS grid-connected instruction

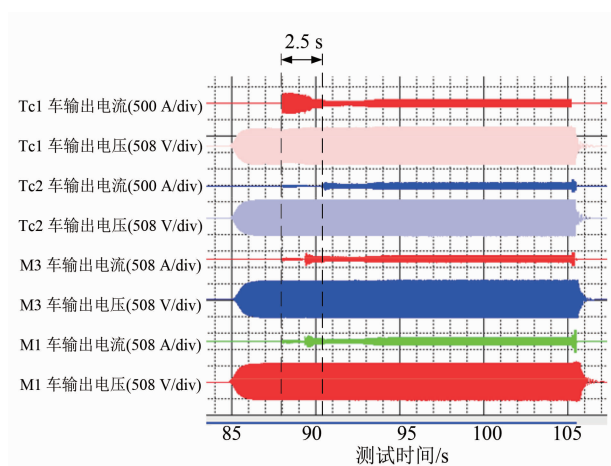
1) 当有 1~3 台 SIV 发生“INVOCED”时,负载母线上还有未发生故障的 SIV 可正常输出电压,故障的 SIV 将自动重启并网。如其中某台 SIV 继续发生“INVOCED”,令该 SIV 再次自动重启,若该 SIV 第三次发生“INVOCED”,则判断为内部短路,该 SIV 不再启动。

2) 当 4 台 SIV 同时发生“INVOCED”时,表明发生了 SIV 外部短路。TCMS 控制 TLK 断开,并向所有 SIV 发送隔离运行指令。SIV 将自动重启,待接收到隔离运行指令后,闭合 3phMK,母线恢复供电。

SIV 并网启动后,当 TCMS 收到 3 个及以上 SIV 反馈“并网成功信号”时,整车空调的压缩机将正常启动;当 TCMS 收到 2 台 SIV 反馈“并网成功信号”时,TCMS 将向空调发出压缩机运行数量减半的指令;当 TCMS 收到 1 台 SIV 反馈“并网成功信号”时,TCMS 将向空调发出压缩机切除指令,此时列车空调仅具有通风功能。

5 测试结果

使用电流钳和电压表对并网供电启动过程中 4 台 SIV 的输出电压和输出电流进行监测,其测试结果如图 7 所示。由图 7 可知:从单台 SIV 开始输出电流到 4 台 SIV 输出电流达到稳态值,所需时间为 2.5 s,此时各 SIV 的输出电流均已收敛,这表明所有 SIV 均已成功完成并网。与上海轨道交通 8 号线第三批购入列车的辅助供电系统相比,第四批次新购入列车的辅助供电系统并网时间大幅缩短,启



注:div 的含义是“格”。

图7 SIV 并网供电测试结果截图

Fig. 7 Screenshot of SIV grid-connected power supply test results

动效率大为提高。

6 结语

上海轨道交通 8 号线第四批次新购入列车采用了基于 TCMS 控制的并网供电技术,该车型已安全运营 2 年有余,设备稳定、运行良好,并网时间最快可达 2.5 s。这既加快了列车的起动时间,也为车载设备提供了安全、可靠的电源。为避免母线短路导致列车辅助供电系统整体失效,该车型采用了双母线结构,并使用 4 个 TLK 贯通中压母线,这样可进一步提高列车辅助供电系统的冗余性,在并网响应速度及系统可靠性等方面较传统的扩展供电和交叉供电方式也有一定程度的改善。基于 TCMS 控制的并网供电技术有望成为今后城市轨道交通列车辅助供电技术的发展方向。

参考文献

- [1] 王树宾. 轨道列车辅助变流器供电方式分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 44.
WANG Shubin. Analysis on power supply mode of rail vehicle auxiliary convert[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 44.
- [2] 杨毅. 地铁车辆辅助供电系统论述[J]. 中国设备工程, 2020(7): 101.
YANG Yi. Discussion on auxiliary power supply system of metro vehicles[J]. China Plant Engineering, 2020(7): 101.
- [3] 顾诚博. 轨道列车辅助逆变器并网供电技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
GU Chengbo. Grid-connected technologies of auxiliary inverters for rail vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

(下转第 232 页)

转程度,并使列车尽快恢复至正常运行状态。

3 融合 ATO 系统的优势分析

1) 融合 ATO 系统计算的控制指令可直接发送给牵引系统和制动系统执行,不再需要其他系统进行转发,从而减少了通信链路,缩短了控制周期,提高了控制精度。

2) 融合 ATO 系统可实时获取牵引系统和制动系统反馈的状态和能力等信息,并用于优化 ATO 目标速度曲线和跟踪控制策略,使得计算的控制指令与车辆实际控制能力更为匹配,提升了 ATO 系统的控车能力和乘客的乘坐舒适性。

3) 融合 ATO 系统取消了与传统 ATO 系统相关的非安全输入信号、非安全输出信号的采集电路和传输电路,减少了与车辆系统重复设置的硬线电路,降低了列车电路的复杂度,进一步提升了列车电路的可靠性。

4) 融合 ATO 系统优化了既有 ATO 系统功能,重新分配了 ATO 系统与牵引系统/制动系统的功能界限,能够最大程度发挥车辆系统和信号系统的特性和优势。此外,融合 ATO 系统增强了 ATO 系统与牵引/制动系统间的配合度,优化了定点停车效果,降低了列车能耗,提升了整体控车效果。

4 结语

ATO 系统最本质的功能是代替司机的大部分操作,使列车行驶实现自动化,而实现列车自动运行控制的核心在于能够实时计算列车目标速度,跟踪目标速度所需的牵引/制动指令及级位大小,并将控制指令输出给车辆。车辆执行机构响应控制指令并做出相应的控制动作。ATO 系统相当于列车走行控制的“大脑”,而车辆的牵引和制动系统负责执行命令,即相当于“四肢”,二者之间的协同、紧密配合是实现列车自动运行的关键。

基于此,本文提出了基于车辆融合的 ATO 系统的新架构,该新架构主要在系统架构、信息传输、车

辆接口、系统功能等方面进行了融合与优化。与传统的 ATO 系统架构相比,融合 ATO 系统最大优势在于不再需要 ATP 进行中转,可以减少“大脑”与“四肢”之间通信链路,缩短通信延时。融合 ATO 系统的第二个优势是使得 ATO 系统与车辆牵引/制动系统之间的传输数据更加丰富、透明,增强了 ATO 系统与牵引系统和制动系统之间的配合度。此外,融合 ATO 系统使得信号系统和车辆系统之间的分工更加清晰,信号系统负责实现与行车安全相关的防护功能,车辆系统负责实现控车功能,这可以充分整合信号系统和车辆系统资源,发挥各自的特性和优势,提高整体控车效果。

参考文献

- [1] 夏庭锴,崔科. 城市轨道交通下一代 CBTC 系统发展展望[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 43.
XIA Tingkai, CUI Ke. Prospect for the development of CBTC system in the next generation[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 43.
- [2] 徐启禄. 基于车车通信的 CBTC 系统关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 110.
XU Qilu. Key technology research on CBTC system based on vehicle-vehicle communication[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 110.
- [3] 汪小勇. 城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77.
WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9): 77.
- [4] 姜坚华,崔科. 城市轨道交通列车运行控制系统的发展方向[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 6.
JIANG Jianhua, CUI Ke. Development trend of urban rail transit train control system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 6.

· 收稿日期:2021-11-02 修回日期:2021-12-21 出版日期:2024-04-10
Received:2021-11-02 Revised:2021-12-21 Published:2024-04-10
· 通信作者:王玉冰,工程师,wangyubing.ss@crrecg.cc
· ©《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

(上接第 228 页)

- [4] 李海新,胡禹峰,屈海洋,等. 深圳地铁 11 号线车辆辅助交流供电系统控制研究与设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(5): 20.

LI Haixin, HU Yufeng, QU Haiyang, et al. Auxiliary AC power supply control design of Shenzhen Metro Line 11 vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(5): 20.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10
· 通信作者:杨博,高级工程师,lyyangbo@outlook.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