

北京轨道交通互联互通灵活编组的车辆试验验证方案

宋占勋¹ 方少轩² 饶东³ 赵川宇³

(1. 北京城市轨道交通咨询有限公司, 100068, 北京; 2. 中国城市轨道交通协会, 100055, 北京;

3. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京)

摘要 [目的] 为了在互联互通线路条件下实现列车的灵活编组功能, 提出一套系统性的车辆试验验证方案。[方法] 以北京地铁 3 号线、12 号线互联互通、灵活编组为背景, 基于列车的机械接口、电气接口和通信接口设计, 针对列车联挂/解钩、重联运行、互联互通运行 3 个场景, 从兼容性及调度需求出发, 提出一整套试验验证方案, 详细阐述论证了各项关键系统、试验顶点的验证内容及必要性, 并增加了型式试验内容。[结果及结论] 针对车辆联挂/解钩场景, 提出车钩、TCMS(列车控制及管理系统)、车载 PIS(乘客信息系统)的试验验证; 针对重联运行场景, 对牵引、制动两个系统进行了试验验证; 在互联互通运行场景中, 针对车辆轮廓、外部接口相关的供电、信号、通信和站台门等 4 个专业设备进行了兼容性、联动试验验证。

关键词 地铁车辆; 试验验证方案; 互联互通; 灵活编组

中图分类号 U270.6⁺7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.019

Test and Verification Scheme for Interconnected/Intercommunicated Flexible Formation Vehicles in Beijing Rail Transit

SONG Zhanxun¹, FANG Shaoxuan², RAO Dong³, ZHAO Chuanyu³

(1. Beijing Urban Rail Transit Consulting Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 2. China Association of Metros, 100055, Beijing, China; 3. Beijing MTR Construction Administration Co., Ltd., 100068, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to achieve flexible train formation function under the conditions of interconnected lines, a systematic vehicle test and verification scheme is proposed.

[Method] Taken the interconnection and flexible formation of Beijing Metro Line 3 and Line 12 as the background, based on the design of the vehicle's mechanical interface, electrical interface, and communication interface, aiming at three scenarios of vehicle coupling/uncoupling, reconnection operation, and interconnection/intercommunication operation, considering compatibility and scheduling requirements, a complete set of test and verification schemes are proposed, which elaborates

and demonstrates in detail the verification content and necessity of various key systems and test items, and adds type test content. [Result & Conclusion] For the vehicle coupling/uncoupling scenario, a test verification of the coupler, TCMS (train control and management system) and on-board PIS (passenger information system) is proposed; for the reconnection operation scenario, a test verification is carried out on the traction and braking systems; in the interconnection/intercommunication operation scenario, the compatibility and linkage test verifications are carried out on the four equipment professionals of power supply, signal, communication and platform door related to the vehicle contour and external interface.

Key words subway vehicle; test and verification scheme; interconnection/intercommunication; flexible formation

不同层次轨道交通的互联互通是轨道交通发展的一种趋势^[1]。CBTC(基于通信的列车控制)技术实现了信号系统的通信网络化互联互通运营, 有效地解决客流分布不均衡等资源共享率低、资源未得到充分利用的问题^[2-3]。灵活编组在客流高峰时段实现大编组、高密度运营, 在客流非高峰时段实现小编组、高密度运营, 进而平衡运力与服务水平之间的矛盾^[4]。目前, 国内外城市已针对互联互通灵活编组的单项技术方案开展了研究^[5-6], 而系统地研究车辆的各项关键技术实现互联互通灵活编组较少。列车上线载客运营前, 须按照合同要求和 GB/T 14894—2005 进行相关的试验验证。基于互联互通灵活编组的车辆技术, 有必要开展系统性的试验验证, 从而保障功能的实现。本文以北京地铁 3 号线、北京地铁 12 号线(以下分别简称“3 号线”“12 号线”)为例, 针对车辆互联互通灵活编组验证方案开展研究, 以期能为互联互通灵活编组技术的实现提供一种车辆试验验证方案。

1 项目概况

3 号线、12 号线为两条新建的全自动运行线路。

在线路初期规划设计已经按互联互通及灵活编组功能要求完成规划设计,其车辆、信号及通信等专业设备均已在采购设计等前期阶段进行了互联互通及灵活编组的功能设计,并尽量选择了相同的厂家。电动客车以4节编组为基本列车,且两端均为带司机室的半动车;以基本列车为单元,2列基本列车单元通过全自动车钩联挂成1列重联列车,进而实现灵活编组。

为实现互联互通,3号线与12号线电动客车的机械接口、电气接口和通信接口均一致。两条线路的车辆动拖比均为3:1。4节编组的编组形式为+TMc-Mp-Mp-TMc+,8节编组的编组形式为+TMc-Mp-Mp-TMc+TMc-Mp-Mp-TMc+。其中,+为带电连接器的全自动车钩,-为半永久式牵引杆,TMc为有司机室的半动车(1个转向架为拖架,1个转向架为动架),Mp为无司机室有受电弓的动车。

3号线与12号线电动客车采用了A包、B包的招标采购模式,每条线路分别由2家供应商A、B供货。按供应商的不同,3号线配置的基本列车单元编号为 A_3 、 B_3 ,12号线配置的基本列车单元编号为 A_{12} 、 B_{12} ,在互联互通情况下,重联列车有10种编组组合,如表1所示。可见,3号线与12号线互联互通灵活编组试验具有典型的示范意义。

表1 互联互通情况下重联列车的编组组合

Tab.1 Formation combination of reconnected trains in interconnection/intercommunication scenario

| 厂家与配置情况 | 重联列车的编组组合 |
|----------|--|
| 同厂家同配置 | $A_3 + A_3, B_3 + B_3, A_{12} + A_{12}, B_{12} + B_{12}$ |
| 不同厂家同配置 | $A_3 + B_3, A_{12} + B_{12}$ |
| 不同厂家不同配置 | $A_3 + A_{12}, A_3 + B_{12}, B_3 + A_{12}, B_3 + B_{12}$ |

2 试验验证方案

本文在常规项目试验验证的基础上,结合互联互通灵活编组功能实现的技术需求,针对列车联挂/解编、重联运行、跨线运行的运用场景,研究制定一套系统性的试验验证方案,从而确保互联互通灵活编组功能的实现。

2.1 列车联挂/解编场景

2.1.1 车钩的试验验证

3号线与12号线电动客车分别采用了两个不同厂家的机械车钩和同一厂家的电气车钩。TMc

车前端的机械车钩均为330型车钩。两条线路的机械车钩的接口要求一致,电气车钩的电气接口与通信接口一致。

为了保障列车车钩的联挂可靠性,有必要模拟装车后的边界条件进行地面组合试验验证。对此在车钩装车前制定了车钩兼容性试验和耐久性试验的验证方案。兼容性试验验证包括联挂前检查、手动联挂验证、手动解编验证、自动联挂验证、自动解编验证;耐久性试验验证为车钩联挂、解钩的疲劳寿命测试。

车钩装车后还需要进行不同厂家的车钩联挂、解钩试验,包括最小平面曲线半径、最小竖曲线半径、典型线路等边界条件的试验。车钩装车后需要进行相应的排列组合,完成各车钩之间的联挂、解钩试验,从而保证各车钩之间实现联挂。

2.1.2 TCMS(列车控制与管理系统)的试验验证

由于基本列车有独立的通信网络系统,故2列基本列车联挂为重联列车后,须单独控制各基本列车单元,且基本列车单元间通过2条完全独立且互为冗余的以太网实现列车级数据的传输。TCMS拓扑如图1所示。



图1 TCMS拓扑图

Fig.1 TCMS topology diagram

为了保证重联列车通信畅通,需要对TCMS进行一致性试验、地面联调试验和组网试验。

一致性试验:为了保证TCMS通信的兼容性,需要对相关的物理接口与通信接口进行试验,从而验证车辆各系统与通信网络系统保持兼容。

地面联调试验:TCMS设备装车前,为确保通信网络系统的稳定性和可靠性,须采用仿真技术,对列车联挂状态进行地面联调试验。采用仿真试验平台,按照整车通信网络设备进行配置,模拟司机操作及列车运行环境,与各子系统的接口单元组网,进行地面联调试验。

组网试验:TCMS设备装车后,列车联挂状态下,2个单独动力单元的TCMS将组成1个新的TCMS,需要通过实物试验来验证车辆各子系统在新通信网络体系下的通信质量,进而保证列车正常运行。

2.1.3 车载 PIS(乘客信息系统)的试验验证

车载 PIS 拓扑图如图 2 所示。列车通信网络终端设备均采用固定 IP 地址方式。为避免列车重联时 IP 地址冲突或网关映射出错的风险,每列基本列车的设备 IP 地址不同。列车在物理联挂后,前后基本列车的通信网络仍处于隔离状态,仅通过司机室三层交换机来传输数据;待 TCMS 发送列车灵活编组信号后,PIS 主控制器打开司机室交换机重联端口;TCMS 发送激活端、前/后车重联方向、前/后列车号,列车运行方向等指令;PIS 根据指令进行重联操作,并反馈 PIS 重联状态。TCMS 发送解编指令后,前后车的通信网络处于隔离状态,之后前后车的 PIS 分别初始化,恢复单车模式。



图 2 车载 PIS 拓扑图

Fig. 2 Vehicle-mounted PIS topology diagram

车载 PIS 是直接面向乘客的服务性系统。列车重联后,PIS 的动态地图与 LCD(液晶显示屏)应显示一致。PIS 系统的显示、存储和传输通信均需要通过试验验证。编组后列车车载 PIS 需要进行显示信息联动试验、广播联动试验和监视信息联动试验。

显示信息联动试验:动态地图对乘客出行有提示作用,PIS 的 LCD 为乘客提供相关的服务信息。在列车重联后,需要联动动态地图及 LCD 显示功能,并对功能项点进行试验,进而保证显示系统的一致性。

广播联动试验:广播直接面向乘客与司机,起到相互信息畅通的作用。需要对灵活编组后的司机对讲、紧急报警、紧急对讲、自动广播、半自动广播、人工广播、广播自动增益等广播的多个功能项点进行试验,从而保证广播的通信质量。

监视信息联动试验:监视信息是为司机、乘务人员及地面工作人员展现的车辆内部乘客信息。列车重联后,须对前后车监视信息的显示、存储、上传进行联动试验,确保其畅通。

2.2 重联列车运行场景

2.2.1 牵引系统的试验验证

基本列车都有独立的牵引系统。列车重联后,前后基本列车单元的 2 个牵引系统仍独立控制,且相互之间的数据通信通过重联列车的 TCMS 通信

网络实现,内部的数据交换通过内部通信网络实现。

当同一线路列车重联时,2 个相同但独立的牵引系统要合并为 1 个新的牵引系统。在互联互通线路上,不同线路的基本列车重联时,2 个不同且独立的牵引系统要合并为 1 个新的牵引系统。由于不同的牵引系统存在控制逻辑、通信延迟、执行机构的差异,且列车的牵引力控制有较大的变化,故需要进行起动加速度试验、电制动减速度试验和冲击率测试试验,来验证牵引力施加不同步对列车造成的影响。

起动加速度试验:针对 2 列基本列车通信传输及执行机构累计误差导致的起动加速度不同步,对 2 列基本列车的起动时刻及起动加速度的同步性进行试验验证,以避免重联列车发生冲击、空转等情况。

电制动减速度试验:与起动加速度试验类似,需要验证基本列车单元电制动是否同步,以避免重联列车发生冲击、滑行等情况。

冲击率测试试验:列车重联后,切除其中一列基本列车单元的牵引力,测试另一列基本列车单元起动时的冲击率,进而验证对列车重联后仅一列基本列车起动时对冲击率的影响。

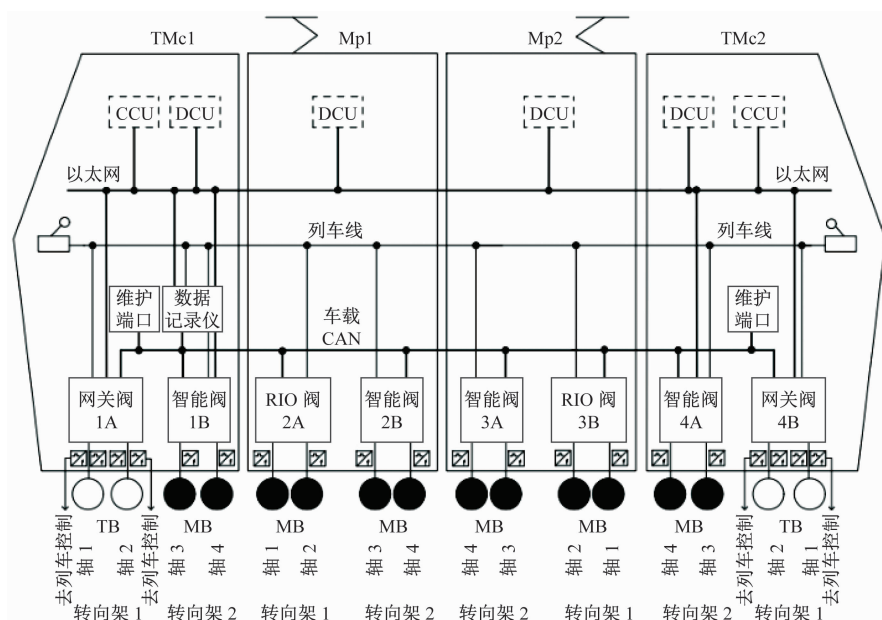
2.2.2 制动系统的试验验证

基本列车都有独立的制动控制单元。列车重联后,制动力仍按照基本列车单独分配。基本列车单元内制动系统控制模式为架控,制动力按照动力单元 CAN(控制器局域网)分配制动力,空气制动力与电制动力在单元内匹配,如图 3 所示。基本列车单元间的制动信息传输通过整车 TCMS 通信网络实现,并在基本列车单元内单独控制制动力。

在互联互通线路的列车重联时,须通过常用制动减速度试验和制动响应时间试验来验证基本列车单元的制动力同步性及一致性。

常用制动减速度试验:常用制动在列车的运行过程中使用频次较多,常用制动的稳定性与乘客舒适性直接相关,需要对重联列车的常用制动性能舒适性、防滑性能、冲击率及 ATO(列车自动运行)系统的控车精准停车等进行试验验证,进而保证重联列车的制动稳定性。

制动响应时间试验:基本列车单元的制动响应时间不同步可能会造成重联列车冲击。为了减少基本列车单元间的冲击力,可通过调整控制方案保证基本列车的制动响应时间一致。



注:TB—拖车转向架;MB—动车转向架;DCU—牵引控制单元;RIO—远程输入输出阀;CCU—中央控制单元。

图3 制动系统拓扑图

Fig. 3 Braking system topology diagram

紧急制动涉及安全,应该重点考虑。紧急制动环路为硬线设计,故应单独进行紧急制动性能试验。

2.2.3 互联互通运行的试验验证

不同线路互联互通的基本条件为:车辆外部轮廓一致,限界条件也相同。为满足互联互通的兼容性,供电、信号、通信、站台门等外部接口设备应一致,并进行相关的兼容试验。此外,还须搭建共用的调度系统。

信号兼容试验的验证内容为:车辆向信号系统发送的牵引、制动及车门等子系统不同状态信号或故障信号的兼容性;验证信号系统向车辆发送的唤醒、牵引、制动、车门开闭等不同指令状态的有效性。

通信兼容试验:该试验主要验证通信系统在两条线路的数据传输兼容性及车载电台的通信效果。

站台门联动试验:该试验用于验证车辆与站台门联动功能的有效性。

2.3 型式试验验证

依据车辆采购合同中的型式试验清单和 GB/T 14894—2005 的规定,列车在组装完成后投入使用前应进行相应的型式试验。本文提出增加4项型式试验,分别为故障运行能力试验、救援坡道起动试验、通过最小曲线半径试验和同步性响应时间试验。

故障运行能力试验:重组列车中一个基本列车单元出现故障时,相当于4节编组列车救援4节编组列车。对此,采用故障运行能力试验对重联列车

的自救援能力进行验证。

救援坡道起动试验:为了防止重联列车在坡道上发生溜车事件,需要通过救援坡道起动试验对坡道的起动功能进行验证。

通过最小曲线半径试验:该试验可验证重联列车在最小平面曲线半径及最小竖曲线半径条件下的通过能力。

同步性响应时间试验:重联列车的同步性会直接影响列车的各项性能,有必要进行同步性响应时间试验,对列车各部件的响应时间进行验证。

3 结语

若要在互联互通线路条件下实现列车的灵活编组,就要充分验证列车机械接口、电气接口和通信接口的性能。通过对车辆运用场景的分析,针对车辆联挂/解钩、重联运行、跨线运行等3个场景进行试验验证。在车辆联挂/解钩场景下,针对车钩、TCMS、车载 PIS 进行试验验证;在重联运行场景下,进行牵引系统、制动系统的试验验证;在跨线运行场景下,验证车辆限界,并对车辆同信号、通信、站台门等系统的联动进行验证。在3个场景验证的基础上,基于车辆型式试验清单和 GB/T 14894—2005 的规定,增加了部分型式试验,进而形成一套完整的系统性试验验证方案。

(下转第109页)

- sis of piston wind impact factor in tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(1): 41.
- [3] 赵小龙, 陈长坤, 陈杰, 等. 阻塞比对地铁隧道烟气流速及温度分布的影响分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(2): 177.
- ZHAO Xiaolong, CHEN Changkun, CHEN Jie, et al. Analysis on the influence of blocking ratio on smoke flow speed and temperature distribution of subway tunnel [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(2): 177.
- [4] 郝娜. 地铁隧道通风系统活塞风井布置探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 141.
- HAO Na. Comparative analysis about the arrangement of piston air shaft in subway [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(8): 141.
- [5] 王峰, 雷波. 地铁隧道通风系统节能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 172.
- WANG Feng, LEI Bo. Energy-saving research on ventilation system of tunnel in subway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 172.
- [6] 王春旺, 李晓峰. 轨排风机排热效果实测研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 119.
- WANG Chunwang, LI Xiaofeng. Experimental study on the heat extraction effect of tunnel exhaust fans [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 119.
- [7] 朱培根, 韦炜致, 孔维同. 列车运行速度对安全门地铁站台热环境的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(11): 47.
- ZHU Peigen, WEI Weizhi, KONG Weitong. Research on thermal environment of metro station with safety gate by train traction [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(11): 47.
- [8] 彭博, 吴喜平, 郑懿. 采用屏蔽门系统的地铁区间活塞风效应分析[J]. 城市公用事业, 2010(1): 13.
- PENG Bo, WU Xiping, ZHENG Yi. Analysis of effect of piston-wind of metro running tunnel by platform screen door system [J]. Public Utilities, 2010(1): 13.
- [9] 王丽慧, 施逸, 宋洁, 等. 地铁活塞风井及迂回风道速度场特性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(3): 22.
- WANG Lihui, SHI Kui, SONG Jie, et al. Speed fields characteristics research on the piston air shaft and the bypass duct in subway [J]. Fluid Machinery, 2010, 38(3): 22.
- [10] 唐莎, 雷波. 屏蔽门系统地铁隧道空气温度分布特性研究[J]. 制冷与空调(四川), 2018, 32(1): 82.
- TANG Sha, LEI Bo. Study on the air temperature distribution in the underground tunnels of the metro with platform screen doors system [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2018, 32(1): 82.
- [11] 田婷婷, 高伟, 王方敏, 等. 地铁轨行区迂回隧道对通风和热环境的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 183.
- TIAN Tingting, GAO Wei, Wang Fangmin, et al. Study on the influence of by-pass tunnel in subway track area on ventilation and thermal environment [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 183.
- 收稿日期:2023-02-23 修回日期:2023-04-03 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-23 Revised:2023-04-03 Published:2025-04-10
• 通信作者:高伟,高级工程师,350733487@qq.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

(上接第 103 页)

参考文献

- [1] 兰亚京, 郑猛, 申伟铭. 北京区域快线互联互通规划研究[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(6): 60.
- LAN Yajing, ZHENG Meng, SHEN Weiming. Study on the interconnectivity of Beijing regional express railway at the planning stage [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 60.
- [2] 李中浩. 城市轨道交通 CBTC 互联互通发展趋势及建议[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 12.
- LI Zhonghao. Development trend of urban rail transit CBTC interconnection/intercommunication and some suggestions [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 12.
- [3] 陈琦, 张冲, 陈静梅. 城市轨道交通 CBTC 信号系统互联互通接口与调试[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(4): 117.
- CHEN Qi, ZHANG Chong, CHEN Jingmei. Interconnection interface and debugging of a CBTC signal system for urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(4): 117.
- [4] 王冬海, 黄柒光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊 2): 102.
- WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 102.
- [5] 刘国帅. 郑州地铁 CBTC 互联互通研究[J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2020, 32(1): 9.
- LIU Guoshuai. Research on the CBTC interconnection of Zhengzhou metro [J]. Journal of Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, 2020, 32(1): 9.
- [6] 赵川宇, 张荣华. 基于列车灵活编组的车载 PIS 重联网络技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(10): 18.
- ZHAO Chuanyu, ZHANG Ronghua. Research on interconnection network technology of on-board PIS system based on flexible train formation [J]. Modern Urban Transit, 2022(10): 18.
- 收稿日期:2023-03-27 修回日期:2024-10-24 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-27 Revised:2024-10-24 Published:2025-04-10
• 通信作者:宋占勋,高级工程师,songzhanxun@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