

# 城市轨道交通虚拟编组系统工程 安全保障方法研究\*

杜 薇<sup>1,2</sup> 唐 涛<sup>3</sup> 李仲华<sup>1,2</sup> 李晓刚<sup>1,2</sup> 薄云览<sup>4</sup>

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京;

2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100068, 北京;

3. 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 100044, 北京;

4. 北京鉴衡认证中心有限公司, 100013, 北京)

**摘 要** [目的] 为了系统识别城市轨道交通虚拟编组系统安全需求, 为该系统安全保障及第三方评估提供技术参考, 需对虚拟编组系统安全保障方法进行研究。[方法] 根据城市轨道交通相关安全标准, 针对虚拟编组系统的技术特点, 提出了 1 套覆盖虚拟编组系统各生命周期的安全保障方法。从虚拟编组系统级、信号/车辆系统级等不同层次进行危害分析及安全需求识别, 对识别出的安全需求按照新增功能安全需求、技术安全需求和操作维护安全需求进行分类管理和验证。以北京地铁 11 号线示范工程为例, 对虚拟编组系统工程安全保障方法进行了验证。[结果及结论] 北京地铁 11 号线示范工程应用虚拟编组系统工程安全保障方法, 基于信号/车辆系统新增的基本功能分析识别基础危害, 通过分层次危害分析制定相应控制措施, 将新技术风险控制在最低合理可行水平。

**关键词** 城市轨道交通; 虚拟编组系统工程; 安全保障方法

**中图分类号** U298

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20240549

## Safety Assurance Methods for Urban Rail Transit Virtual Coupling System Engineering

DU Wei<sup>1,2</sup>, TANG Tao<sup>3</sup>, LI Zhonghua<sup>1,2</sup>, LI Xiaogang<sup>1,2</sup>, BO Yunlan<sup>4</sup>

(1. Beijing Metro Construction Administration Corporation, 100068, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, 100068, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China; 4. China General Certification Center, 100013, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] To systematically identify the safety requirements of urban rail transit virtual coupling systems, and

provide technical references for system safety assurance and the third-party assessment, it is necessary to conduct research on safety assurance methods for virtual coupling systems. [Method] In accordance with relevant rail transit safety standards and considering the technical characteristics of virtual coupling system, a comprehensive safety assurance method covering all life cycle stages of the virtual coupling system is proposed. Hazard analysis and safety requirement identification are carried out on multiple levels, including the virtual coupling system level and the signaling/vehicle system level, classify and verify the identified safe requirements according to newly added functional safety requirements, technical safety requirements, and operation/maintenance safety requirements. Using the demonstration project on Beijing Subway Line 11 as a case study, the safety assurance method for virtual coupling system engineering is verified. [Result & Conclusion] The application of the engineering safety assurance method for the virtual coupling system in the Beijing Subway Line 11 demonstration project enables the analysis and identification of fundamental hazards based on signaling/vehicle system newly added functions. Corresponding control measures are developed through hierarchical hazard analysis, effectively controlling the risks associated with the new technology to the lowest reasonably achievable level.

**Key words** urban rail transit; virtual coupling system engineering; safety assurance method

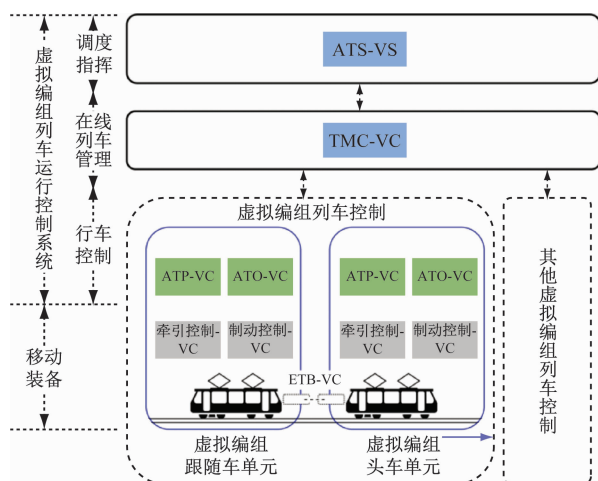
## 1 虚拟编组系统概述

### 1.1 虚拟编组系统结构

虚拟编组系统能够实现车辆等资源灵活利用, 进而实现运能与运量精准匹配和列车按需运行, 被认为是更有效且具有可行性的灵活编组技术解决

\* 国家自然科学基金资助项目(52372310); 北京轨道公司科技创新项目(SCJJ2022003); 工信部科技项目(2022-233-225)

方案之一。虚拟编组系统基本架构如图1所示。该系统可在既有信号系统(包括控制中心、车站、轨旁、车载)和车辆系统的基础上,增加支持虚拟编组运行需求的列车控制功能。虚拟编组系统中的列车至少由2列列车组成列车单元,信号系统对虚拟编组列车单元按照1列列车处理,执行安全的进路控制、间隔控制、站台作业等功能。虚拟编组列车单元中的各列列车之间通过虚拟重联方式构成<sup>[1-2]</sup>,具有独立的牵引/制动、通信和运行控制等能力,并支持牵引/制动功能较高精度控制,通过列车单元间的车-车信息交互和协同控制,保持小间距安全稳定运行<sup>[3-4]</sup>。



注:ATS为列车自动监控;TMC为列车管理模块;ATP为列车自动防护;ATO为列车自动运行;VC为虚拟编组;ETB为列车级骨干以太网。

图1 虚拟编组系统基本架构

Fig. 1 Virtual coupling system basic architecture

## 1.2 虚拟编组系统特点

虚拟编组系统在全自动运行系统运行场景的基础上,结合列车编组方式的变化,分为编组建立、编组运行、编组解编三种过程。该系统的核心特点是支持在线灵活、高效的列车编组调整。通过列车重联和解编的动态过程,实现编组配置的实时优化,从而提升运行调整的灵活性。

## 1.3 虚拟编组系统功能

虚拟编组系统包含虚拟编组列车运行控制系统和虚拟编组列车单元两部分。其中,虚拟编组列车运行控制系统的基本功能需求主要包括:

1) 虚拟编组系统跟随列车单元在头车引领下,以撞软墙(基于相对制动距离)的方式防护行车安全,并与头车保持小间距、队形稳定的方式追踪

运行。

2) 虚拟编组列车运行控制系统应能监督该列车的运行状态,在故障或异常等不满足虚拟编组列车持续运行条件时,应在保证行车安全前提下控制虚拟编组列车的自动解编,实现1列虚拟编组列车向2列独立运行的固定编组列车的自动转换。

虚拟编组列车单元的基本功能需求主要包括:

1) 虚拟编组列车单元应能配置高精度牵引与制动功能,提供至虚拟编组列车运行控制系统的牵引/制动性能与实际系统的偏差应在规定范围内。

2) 虚拟编组列车单元应具备紧急制动率配置功能。

## 2 虚拟编组系统工程安全保障方法

### 2.1 虚拟编组系统架构及危害分析方法

在我国城市轨道交通全自动运行系统安全保障工作中,以北京燕房线全自动运行系统为代表的工程项目首次从系统整体和各子系统角度提出了安全保障要求,即在GB/T 21562—2008《轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例》、GB/T 28808—2021《轨道交通 通信、信号和处理系统 控制和防护系统软件》、GB/T 28809—2012《轨道交通 通信、信号和处理系统 信号用安全相关电子系统》等标准的通用生命周期模型基础上,定义了系统层级-各个设备层级-系统层级的全自动运行系统生命周期,在包括需求、设计、生产、制造、安装、调试及运营维护等生命周期阶段进行全过程安全保障<sup>[5]</sup>。虚拟编组系统是在全自动运行系统的基础上增加了虚拟编组功能,因此该系统的安全保障方法是以现行城市轨道交通安全保障体系为基础,针对虚拟编组系统特点采用的适合的分析方法。

虚拟编组系统需要信号系统与车辆系统在控制过程中进行一体化协同控制。在该系统的安全性方面,需要从虚拟编组系统整体考虑,而不仅仅考虑单一系统的安全要求。因此,需运用系统性的安全保障方法来识别、分析和控制风险。针对虚拟编组系统的技术特点,在整体项目的隐患分析-需求分配-系统设计阶段,建立了虚拟编组系统工程危害分析总体技术路线(见图2)。该技术路线分为系统级和信号/车辆系统级两个层次。

1) 虚拟编组系统级危害分析:在全自动运行系统危害的基础上,以虚拟编组系统作为整体,将虚拟编组场景与事故后果建立对应关系,进行虚拟编

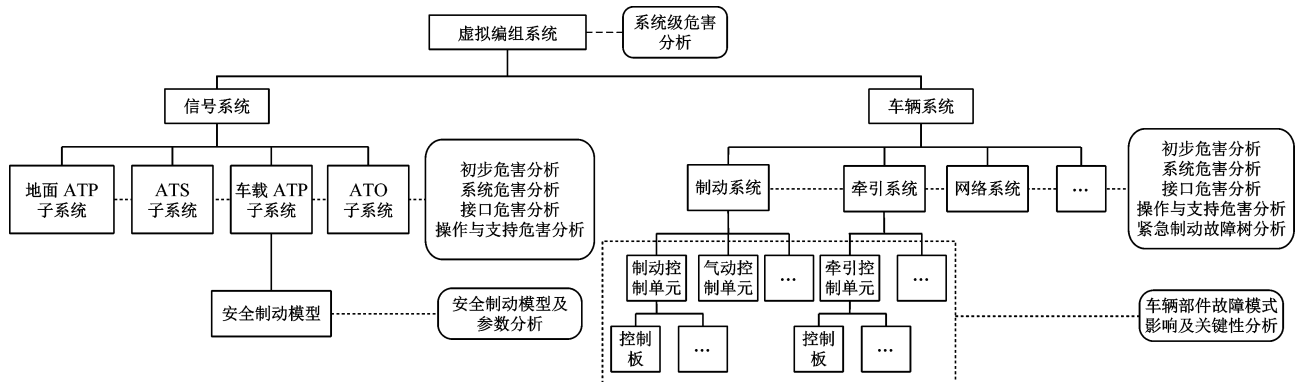


图2 虚拟编组系统工程危害分析总体技术路线

Fig. 2 Overall technical mapping of virtual coupling system engineering hazard analysis

组系统专项危害分析。采用由果导因的方法从功能、性能、接口和维护等方面进行危害和控制措施识别,以作为信号系统、车辆系统安全需求的输入。

2) 信号/车辆系统级危害分析:分别以信号系统、车辆系统作为对象,采用初步危害分析、系统危害分析、操作与支持危害分析、接口危害分析,识别信号系统、车辆系统因新增虚拟编组的安全需求。根据虚拟编组系统的特点,对信号系统开展安全制动模型及参数危害分析。通过分析虚拟编组安全制动模型与传统安全制动模型的差异点,以及模型中各个参数的安全影响,识别安全相关参数,并在工程应用中进行控制。采用故障模式、影响及危害性分析和故障树分析相结合的方法,分析车辆系统的不同故障模式对紧急制动性能的影响,并制定对应的安全控制措施。

## 2.2 虚拟编组系统级危害分析

虚拟编组系统级危害分析是在现有城市轨道交通全自动运行系统级危害分析的基础上,以新增的虚拟编组运营场景为主要研究对象,识别相关危害的产生原因及控制措施。虚拟编组运营场景新增了列车单元静态编组、列车单元动态编组等 11 个运营场景。以此为研究对象,建立城市轨道交通领域常见事故与场景的对应关系,分析导致事故的危害。以事故危害为顶事件,采用自顶而下的分析方式,根据虚拟编组场景文件,利用头脑风暴的方法,通过识别场景与后果、危害的关系,确定虚拟编组场景下的危害致因及缓解措施。

## 2.3 信号/车辆系统级危害分析

实现虚拟编组系统功能的主要系统有信号系统和车辆系统。信号系统级危害分析活动从以下 4 个不同维度进行:初步危害分析——根据虚拟编组

系统级危害进行初步危害分析;系统级危害分析——采用危害与可操作性分析方法,对信号系统的各个功能(包括新增虚拟编组功能)进行功能危害分析;接口危害分析——采用故障模式、影响及危害性分析方法,对信号系统的所有接口,包括对信号系统与车辆系统增加的制动挡位配置接口进行分析;操作与支持危害分析——采用危害与可操作性分析方法,对虚拟编组中信号系统在数据准备、生产、储存、运输、安装、测试调试、运行各阶段作业活动进行分析。在识别出的信号系统安全需求中,与全自动运行信号系统相比,主要差异在于安全制动模型和参数的变化。因此,利用危害与可操作性分析方法对信号系统的安全制动模型及参数进行专项危害分析。

车辆系统级危害分析活动中的初步危害分析、系统危害分析、接口危害分析、操作与支持危害分析与信号系统类似。在识别的车辆系统安全需求中,与全自动运行车辆系统相比,新增了两个安全需求:①为保证紧急制动挡位的正确切换,即在列车进入编组模式后前车配置较小紧急制动挡位,后车配置较大紧急制动挡位,以满足编组列车运行中更小的控制间隔;②为车辆提供不同紧急制动率挡位下的上下偏差值,这是对紧急制动性能更高精度的要求。这两个安全需求均与紧急制动有关,因此针对紧急制动进行专项危害分析,采用了自顶而下的故障树分析和自底而上的部件故障模式影响及关键性分析的方法。

## 2.4 安全需求验证

通过以上危害分析,识别出的安全需求根据验证方式的不同分为以下三类:

1) 新增功能的安全需求。如信号系统在验证

编组建立条件满足后,其建立编组的安全功能符合 SIL4(安全完整性等级4级)要求,紧急制动率可配置功能满足 SIL4 要求等。功能安全需求的确认,是在产品层安全证据完成认证的基础上,对应用在特定项目的相关系统进行交叉接受,检查通用产品系统功能以及输出至项目层的限制条件是否符合虚拟编组项目的实际应用情况,并检查安全功能是否完成本项目的测试。

2) 技术安全需求。技术安全需求包括技术设计与实现措施、工程参数的设计要求,以及其与设计规范的符合性等。技术安全需求需要在项目实施过程中进行验证。如安全制动模型紧急制动率

上下偏差,需多次统计分析现场试验数据,并验证其是否满足设计值。

3) 操作与维护安全需求。操作与维护安全需求是将安全应用条件输出至运营维护方,并确认运营维护方已准确全面地掌握操作及维护的相关要求。

以上3个方面的安全需求需要在项目实施中进行验证。验证的证据包括产品层安全证据、室内测试报告、仿真计算报告、型式试验报告、现场测试报告等。图3为虚拟编组系统从危害分析到安全需求验证闭环管理过程。

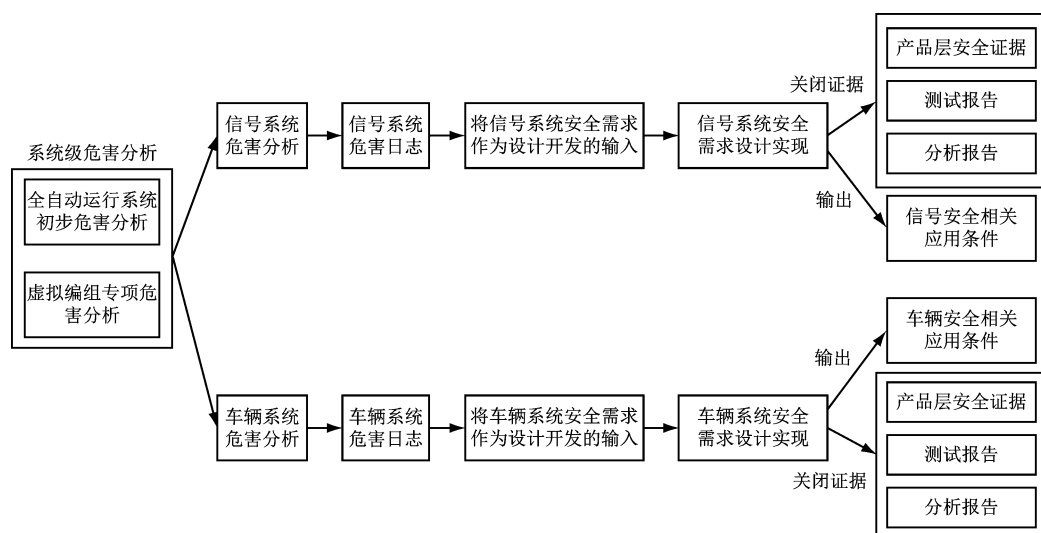


图3 虚拟编组系统从危害分析到安全需求验证闭环管理过程

Fig. 3 Close-loop management process of virtual coupling system from hazard analysis to safety requirements verification

### 3 虚拟编组系统工程安全保障方法应用案例

应用虚拟编组系统工程安全保障方法对北京地铁11号线虚拟编组系统示范工程实施过程进行安全保障。以本文第1.3节中虚拟编组系统较传统信号/车辆系统新增的基本功能为例,分析了系统级、信号/车辆系统级不同层次的危害及其对应的安全需求。

首先开展虚拟编组系统级危害分析。以虚拟编组建立场景为例,信号系统和车辆系统均需检查虚拟编组建立的条件:信号系统首先需满足全自动运行模式的条件,然后检查车车通信、列车前后关系、车辆制动状态等编组前提条件,并完成跟随车安全制动模型的切换;车辆系统则根据信号系统发起的紧急制动挡位切换请求完成挡位切换,并向信

号系统反馈挡位切换成功的标志。对信号/车辆系统在编组建立过程中的功能进行分析,若编组建立的条件不满足而建立编组,或车辆系统错误地将信息反馈至制动状态,均会造成列车相撞事故发生。因此,信号系统虚拟编组功能需满足 SIL4 要求,车辆系统紧急制动挡位配置功能需满足 SIL4 功能,车辆系统紧急制动性能需保证在预期范围内。除识别出信号/车辆系统新增功能的安全需求外,还识别出与试验验证有关的技术安全需求,如车辆的紧急制动减速度、最大常用制动减速度试验,以及与外部运行环境有关的操作维护安全需求,如要求运营维护方在黏着不良的轨道条件(如湿滑、油污、落叶等)下不能以虚拟编组模式运行。

在信号系统级危害分析中,虚拟编组功能中安全制动模型的切换是信号系统主要新增的安全功

能,即在进入编组模式前,将绝对距离制动模型切换为相对距离制动模型。通过对虚拟编组安全制动模型与 IEEE 1474. 1—2004 *IEEE Standard for Communications-Based Train Control Performance and Functional Requirements* 中的安全制动模型差异进行对比分析,检查不同的安全制动模型所依据的安全原理差异。不同安全制动模型的差异为 ATP 系统新增的安全功能,因此要求 ATP 系统的安全制动曲线计算功能完成 SIL4 产品认证。对安全制动模型所应用的所有参数进行安全分析。安全制动模型所使用的参数主要包括产品层参数和工程特定项目参数,共识别出 14 个安全相关参数。对于产品层参数,如 ATP 反应时间,由产品层的安全保障活动进行安全管理;对于工程特定项目参数,如车辆紧急制动性能,其在预期范围内可进一步细化,即由车辆系统提供不同紧急制动率挡位下的上下偏差,作为信号系统安全制动模型的输入参数。该参数取值由车辆系统提供,并通过分析及试验验证等安全管理流程确认后,作为技术参数输出至信号系统。

在车辆系统级危害分析中,系统级危害分析分配至车辆系统的安全功能要求保证紧急制动挡位的正确切换,在列车进入编组模式后前车配置较小紧急制动挡位,后车配置较大紧急制动挡位,以满足编组运行中前后车之间更小的间隔控制。在常规车辆制动安全要求的基础上,新增了紧急制动率可配置的安全功能,完成了车辆紧急制动安全指标向制动子系统的分配,对制动系统紧急制动可配置功能完成了产品级认证。车辆系统应提供各紧急制动率挡位的允许偏差范围,该参数作为紧急制动性能的核心指标。在常规项目中,车辆制动性能可以保证 GEBR(紧急制动率)作为车辆整车制动性能的安全目标,即只要求车辆保证最小的 GEBR;但在虚拟编组模式下,头车还需保证最大的 GEBR。在紧急制动故障树分析中,以车辆紧急制动性能超出预期范围作为顶事件,采用故障树分析方法分析了车辆电气部分、机械部分故障或性能偏差等致因点带来的后果,并制定相关控制措施,包括正常紧急制动性能的试验要求,以及超出紧急制动性能预期范围的诊断机制,使得车辆能够及时反馈至信号系统以退出编组模式。

上述案例对虚拟编组系统与全自动运行系统新增功能分析识别出的安全需求,包括安全制动模型及参数、紧急制动可配置功能、紧急制动性能要

求,从系统级、信号/车辆系统级不同层次进行了危害分析,识别出新增的安全功能、技术安全需求以及操作维护安全需求,并从项目生命周期各个阶段进行了全面的安全保障。

## 4 结语

本文采用适合于虚拟编组系统技术特点的危害分析方法,从系统、设备的不同层级,全面有效地识别虚拟编组危害并控制了安全风险,形成了 1 套覆盖全生命周期的危害分析、安全需求识别及验证的安全保障管理体系。针对虚拟编组系统中信号-车辆系统的新增安全功能,通过故障树分析和故障模式、影响及危害性分析方法,提供典型安全案例的完整分析示例。该方法可为虚拟编组系统的工程应用安全保障和第三方安全评估提供参考。

## 参考文献

- [1] 唐涛,罗啸林,刘宏杰,等. 城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 31. TANG Tao, LUO Xiaolin, LIU Hongjie, et al. Research review of the protection and operation technology for virtually coupled train sets in metros[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(10): 31.
- [2] 杨中平,游婷,束天成,等. 列车虚拟编组技术的研究现状及发展[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 14. YANG Zhongping, YOU Ting, SHU Tiancheng, et al. Research status and development of virtual coupling technology[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 14.
- [3] 刘宏杰,唐涛,张艳兵,等. 城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 28. LIU Hongjie, TANG Tao, ZHANG Yanbing, et al. Discussion on the key performance indicators and technologies of virtual coupling in metros[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 28.
- [4] 陈凯. 基于车车通信的虚拟重联技术研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 22. CHEN Kai. Research of virtual coupling technology based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 22.
- [5] 杜薇,王道敏,徐鼎. 燕房线全自动运行系统安全保障管理实践[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(2): 30. DU Wei, WANG Daomin, XU Ding. Safety assurance management practice of fully automatic operation system for Yanfang Line[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(2): 30.
- [6] 段博韬. 基于灵活编组模式的城市轨道交通列车通过能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 118. DUAN Botao. Analysis of urban rail transit train passing capacity based on flexible formation mode[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 118.
- [7] 王立军,张帅,魏凡超. 灵活编组技术在城市轨道交通全自动运行系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 111.

- WANG Lijun, ZHANG Shuai, WEI Fanchao. Application of flexible train marshalling technology in urban rail transit FAO system [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 111.
- [8] 张庆刚, 张士臣, 刘鸿宇, 等. 灵活编组的城市轨道交通列车运行模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 229.
- ZHANG Qinggang, ZHANG Shichen, LIU Hongyu, et al. Operation mode of urban rail transit train with flexible formation[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(7): 229.
- [9] 李兆岭, 严业智. 城市轨道交通信号系统灵活编组关键技术研究[J]. 城轨交通, 2021, 18(12): 72.
- LI Zhaoling, YAN Yezhi. Key technologies of flexible marshalling in signaling system for urban rail transit[J]. Urban Rail Transit, 2021, 18(12): 72.
- [10] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 1.
- SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 1.
- [11] 钱华, 吕浩炯. 列车相对制动安全间隔模型的参数敏感度分析[J]. 控制与信息技术, 2024(3): 21.
- QIAN Hua, LYU Haojing. Parametric sensitivity analysis of safe train interval model based on relative braking distance[J]. Control and Information Technology, 2024(3): 21.
- [12] 杨卫峰, 雷成健, 韩琛, 等. 城市轨道交通列车虚拟联挂技术研究[J]. 控制与信息技术, 2024(4): 108.
- YANG Weifeng, LEI Chengjian, HAN Chen, et al. Research on the virtual coupling technology for urban rail transit trains [J]. Control and Information Technology, 2024(4): 108.
- [13] 袁希文, 何川, 黄强, 等. 智轨电车虚拟联挂系统架构与控制技术研究[J]. 控制与信息技术, 2024(3): 12.
- YUAN Xiwen, HE Chuan, HUANG Qiang, et al. Research on the architecture and control technology of virtual coupling system for autonomous-rail rapid trams [J]. Control and Information Technology, 2024(3): 12.
- [14] 陈凯. 基于车车通信的虚拟重联技术研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 22.
- CHEN Kai. Research of virtual coupling technology based on vehicle-to-vehicle communication [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 22.
- [15] 宋志丹, 徐效宁, 李辉, 等. 面向虚拟编组的列控技术研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 155.
- SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-orientated train control technique [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(6): 155.
- [16] 刘宏伟. 伴随智能化轨道交通的独立安全评估研究[J]. 智能城市, 2022, 8(2): 66.
- LIU Hongwei. Research on independent safety assessment with intelligent rail transit [J]. Intelligent City, 2022, 8(2): 66.
- [17] 孟庆元. SIL 分析技术在轨道交通车辆产品中的应用研究[J]. 智慧轨道交通, 2024(4): 27.
- MENG Qingyuan. Study on the application of the SIL analysis technology in rail transit vehicle products [J]. Intelligent Rail Transit, 2024(4): 27.
- [18] 王子煜. 轨道交通全自动驾驶车辆独立安全评估实施方案[J]. 黑龙江交通科技, 2024(1): 148.
- WANG Ziyu. Independent safety assessment implementation scheme for fully automatic driving vehicles of rail transit [J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2024(1): 148.
- 收稿日期: 2024-05-11 修回日期: 2024-07-05 出版日期: 2025-06-10  
Received: 2024-05-11 Revised: 2024-07-05 Published: 2025-06-10  
• 通信作者: 杜薇, 工程师, duwei0426@126.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 217 页)

- [7] 谭奇峰. 预留上盖物业开发条件的市域铁路地下车辆基地结构设计[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 73.
- TAN Qifeng. Structural design of city railway underground depot with reserved conditions for overlying property development [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 73.
- [8] 董光辉. 带有上盖物业的地铁车辆基地试车线不同轨道结构对邻近建筑物振动影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 67.
- DONG Guanghui. Vibration influence of different track structures on adjacent buildings for the test line of metro vehicle base with cover property [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 67.
- [9] 刘堂辉, 涂勤明, 罗信伟, 等. 地铁车辆段天车运行引发上盖物业振动试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 127.
- LIU Tanghui, TU Qinning, LUO Xinwei, et al. Experimental study on vibration of metro depot overhead property induced by bridge crane running [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 127.
- [10] 房烁. 已部分运营共址停车场整体上盖开发方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 238.
- FANG Shuo. Overall overhead property development scheme of partially operating co-site parking lot [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 238.
- [11] 马宁. 基于一体化设计理念的深圳大运综合交通枢纽地面附属建筑整合策略[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 111.
- MA Ning. Integration strategy of ground auxiliary buildings in Shenzhen Dayun comprehensive transportation hub based on integrated design concept [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 111.
- [12] 徐祖威. 上盖物业开发的城市轨道交通段场与接轨车站布置方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 104.
- XU Zuwei. Layout plan of depot upper-property development and urban rail transit connection station [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 104.
- 收稿日期: 2024-09-13 修回日期: 2025-02-25 出版日期: 2025-06-10  
Received: 2024-09-13 Revised: 2025-02-25 Published: 2025-06-10  
• 通信作者: 蒋志华, 正高级工程师, 602416597@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