

# 城市轨道交通列检库新型预制牛腿键槽空心立柱式 检查坑道床<sup>\*</sup>

刘 观<sup>1,2,3</sup> 赵 海<sup>4</sup> 翟贝贝<sup>1,2,3</sup> 张光明<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 2. 北京市轨道结构工程技术研究中心, 100037, 北京;  
3. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室, 100037, 北京; 4. 中铁二局集团有限公司, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 现有城市轨道交通列检库立柱式检查坑道床存在施工效率低、截面尺寸大、预埋件多等不同缺点。对此, 有必要提出一种新型的预制牛腿键槽立柱式检查坑道床。[方法] 介绍了新型预制牛腿键槽立柱式检查坑的预制立柱及现浇道床结构组成及设计, 建立新型预制牛腿键槽立柱式检查坑道床的静力学有限元模型, 计算其应力分布。归纳总结了生产制造预制牛腿键槽立柱的主要步骤及检验要求。通过场地试验验证了预制立柱的受弯性能。与普通立柱式检查坑道床比较, 分析了新型预制牛腿键槽立柱式检查坑道床的优势。[结果及结论] 相较于传统的现浇型矩形截面立柱, 预制牛腿键槽立柱自重降低了 25%; 牛腿构型提高了对各类扣件的适用性并增强了横向稳定性; 键槽增强了立柱与道床的联结性。静力学模型分析和抗弯试验结果表明, 预制立柱结构强度满足设计要求。相比于现浇型立柱式检查坑道床, 新型预制牛腿键槽立柱式检查坑道床外形美观, 质量可靠, 无须维护, 钢筋用量相当, 混凝土用量减少, 单线造价虽增加了约 25 万元/km, 但每个工作面施工速度提升了 75 m/d, 且每个工作面用工数量减少了约 35%。

**关键词** 城市轨道交通; 列检库; 预制立柱; 装配式车辆段中图分类号 U279.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.046

## Prefabricated Corbel Keyway Hollow Column Inspection Pit for Urban Rail Transit Inspection Depot

LIU Guan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Hai<sup>4</sup>, ZHAI Beibei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Guangming<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Track Structure, 100037, Beijing, China; 3. National Engineering Laboratory for Green and Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, 100037, Beijing, China; 4. China Railway Erju Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

<sup>\*</sup>北京市科技计划课题(Z171100002117003)

**Abstract** [Objective] The existing column inspection pit track bed of the urban rail transit train inspection depot has various disadvantages such as low construction efficiency, large cross-sectional size, and large embedded parts number. In this regard, it is necessary to propose a new type of prefabricated corbel keyway column (hereinafter abbreviated as PCKC) inspection tunnel bed. [Method] The structural composition and design of the prefabricated column and cast-in-place track bed of the new PCKC inspection pit is introduced. A static finite element model of the new PCKC inspection pit track bed is established to calculate its stress distribution. The main steps and inspection requirements for manufacturing PCKC are summarized. The bending performance of prefabricated columns is verified through field tests. Compared with ordinary column inspection pit track beds, the advantages of the new PCKC inspection pit track bed are analyzed. [Result & Conclusion] Compared with the traditional cast-in-place rectangular cross-section column, the PCKC reduces by 25% in self-weight; the corbel configuration improves the applicability of various fasteners and enhances the lateral stability; the keyway enhances the connection between the column and the track bed. The static model analysis and anti-bending test results show that the structural strength of the prefabricated column meets the design requirements. Compared with the cast-in-place column inspection track bed, the new PCKC inspection track bed has a beautiful appearance, reliable quality, no maintenance, equivalent steel bar consumption, and reduced concrete consumption. Although the single-line cost increases by about 250 000 yuan/km, the construction speed per working face increases by 75 m/d, reducing the number of workers/per working face by about 35%.

**Key words** urban rail transit; inspection depot; prefabricated column; prefabricated depot

列检库的检查坑道床有侧壁式检查坑道床和立柱式检查坑道床两种。我国早期的接触轨供电地铁车辆检查坑道床均采用壁式检查坑道床,存在出了检修人员上下检查坑不方便、坑内通风及照明条件较差等问题<sup>[1-2]</sup>。如今现浇立柱式检查坑道床得到了广泛使用<sup>[3-5]</sup>。

现浇立柱式检查坑道床<sup>[6]</sup>施工须预先安装钢轨及扣件等,而后将其精调,最后再支模浇筑立柱。但现浇钢筋混凝土立柱式轨道结构受土建施工误差影响较大,存在施工精度控制难、施工质量差、环境污染大等问题,易出现立柱歪斜、立柱开裂等病害。这是当前场段库内立柱式检查坑道床长期存在的主要问题<sup>[7-8]</sup>。

对此,我国学者进行了相关研究,开发出了预制混凝土立柱<sup>[8-9]</sup>和钢立柱<sup>[10]</sup>,虽解决了现浇立柱外观不佳及施工质量差等问题,但仍存在与基础联结性不强、连接零件较多、预埋件精度要求较高,以及体积过大、需要定期养护等问题。

本文在既有现浇立柱或预制立柱的基础上,提出一种新型的预制牛腿键槽立柱式检查坑道床(以下简称“新型检查坑道床”),并在工程实际中进行实践应用,以进一步丰富库内立柱式检查坑道床的形式。

## 1 结构组成与设计

新型检查坑道床主要由预制立柱结构和现浇道床结构组成。

### 1.1 预制立柱的设计

新型检查坑道床的预制立柱为非预应力钢筋混凝土结构体系,其横断面基本轮廓为正方形,基本结构如图1所示。

检查坑中间水沟沟底标高一般为 $-1.3 \sim -1.4$  m。为保证下部键槽具有一定的锚固力,参照杯口基础设计,立柱锚固部分高度设为1.0倍至1.2倍截面宽度。为进一步适应更大的扣件尺寸,提高对各类扣件的适用性及稳定性,立柱上部采用牛腿结构设计,牛腿部分截面尺寸为 $350\text{ mm}(\text{长}) \times 400\text{ mm}(\text{宽})$ ,下部截面尺寸为 $350\text{ mm}(\text{长}) \times 350\text{ mm}(\text{宽})$ 。为了减轻自重、节省混凝土用量和成本,立柱内部设有直径为 $150\text{ mm}$ 的空腔。立柱下部按照JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》的要求设置键槽,加强了预制立柱与现浇混凝土的联结,提高了其抗拔性能和稳定性。

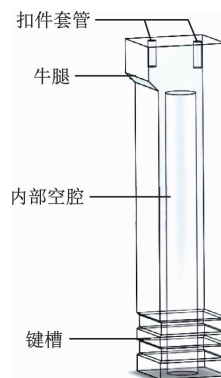


图1 新型检查坑道床预制立柱的基本结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the basic structure for the new type inspection pit track bed prefabricated column

为保证施工质量的同时节省施工人工与机械,建议立柱采用C50自密实混凝土。按照JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》,自密实混凝土的主要技术标准如表1所示。

表1 自密实混凝土的主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of self-compacting concrete

自密实性能	性能指标	技术要求	性能等级
填充性	坍落扩展度/mm	655 ~ 660	SF2
	扩展时间 T500/s	$\geq 2$	VS1
抗离析性	离析率/%	$\leq 20$	SR1
	粗骨料振动离析率/%	$\leq 10$	fm

该种预制牛腿键槽空心立柱避免了各类预埋件的设置,增强了立柱与下部现浇道床的联结,生产和运输均较为便利。

### 1.2 道床与接口设计

新型检查坑道床的典型断面如图2所示。预制立柱的具体长度视工程接口情况而定。若预制立柱的锚固位置为中心水沟标高以下,则考虑锚固深度后的立柱高度可达约2 m。为增强立柱与现浇道床的联结,下部基础结构底板预留了钢筋。道床采用C35等级以上的普通混凝土,每隔7 m左右设置1处伸缩缝。伸缩缝可采用沥青木板制成,并以30 mm厚沥青麻筋封顶。结构变形缝处也须设置伸缩缝。

施工前应对结构基础表面进行凿毛。施工误差要求为:立柱轴线位置横向允许偏差为2 mm,纵向允许偏差为10 mm,垂直度允许偏差为10 mm。立柱顶面标高误差不超过 $\pm 2\text{ mm}$ ,相邻立柱顶面标高误差不超过 $\pm 1\text{ mm}$ 。

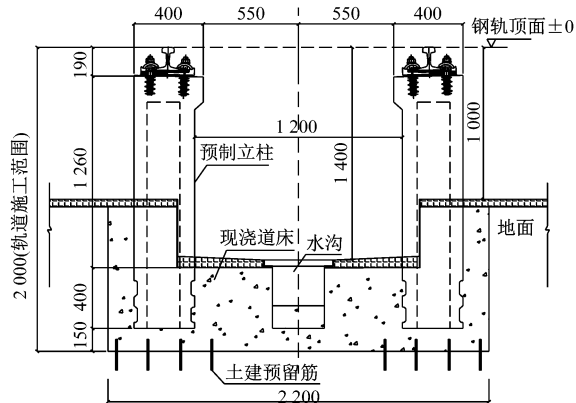


图2 新型检查坑道床的典型断面

Fig. 2 Typical cross section of the new type inspection pit track bed

### 1.3 强度检算

为分析预制立柱在服役过程中的受力状态,根据新型检查坑道床的结构特点和受力特征,建立新型检查坑道床的静力学有限元模型,如图3所示。

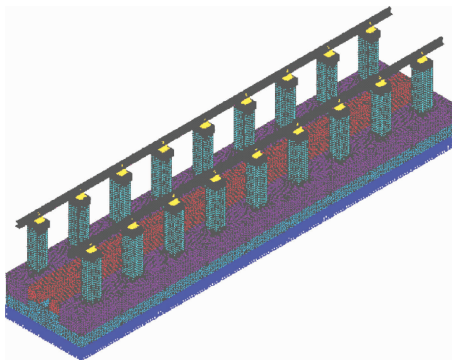


图3 新型检查坑道床静力学有限元模型

Fig. 3 Static finite element model of the new type inspection track bed

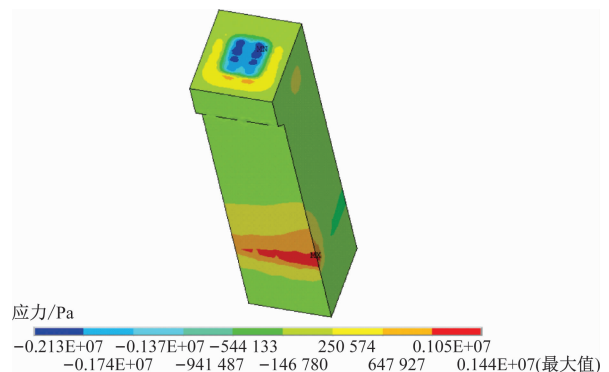
在该模型中,钢轨采用梁单元 BEAM188 模拟;扣件系统用线性弹簧单元 COMBIN14 模拟,同钢轨及预制立柱相连;预制立柱及现浇道床均采用实体单元 SOLID65 模拟。该模型全长 10.8 m,共计 1 214 068 个单元,259 163 个节点。

预制立柱采用 C50 自密实混凝土,弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.2;现浇道床采用 C35 混凝土,弹性模量为  $3.15 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.2;根据设计文件,扣件垂向刚度为 30 kN/mm,纵向刚度为 11 kN/mm,横向刚度参考文献[11]取 40 kN/mm;路基地基系数取为 76 MPa/m<sup>[12]</sup>。

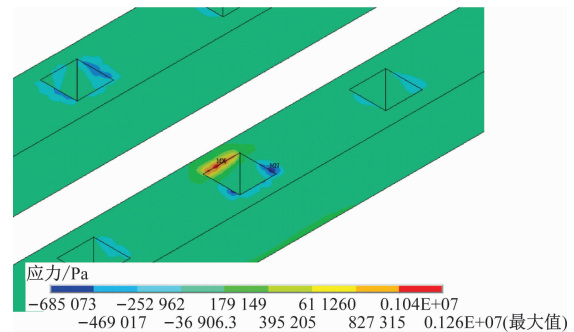
列车竖向荷载取静轮载(轴重为 17 t)的 1.5

倍<sup>[13]</sup>,即双轮的静轮载取 255 kN;纵向荷载考虑制动力,取值为 9.8 MPa<sup>[14]</sup>;文献[15-17]的实测结果表明,列车横向力取值均不超过列车轴重的 0.1 倍,考虑到库内列车运行速度较低,且线路平顺性较好,故本文横向力取双轮静轮载的 0.1 倍,即 17 kN。边界条件为地基弹簧底部全约束和钢轨两端全约束。

在上述荷载作用下,经有限元计算可得预制立柱和现浇道床的拉应力,结果如图4所示。



a) 预制立柱结构应力分布图



b) 现浇基础结构应力分布图

图4 预制立柱及现浇道床的结构应力分布图

Fig. 4 Structural stress distribution diagram of prefabricated columns and cast-in-place track bed

据图4b)可知,新型检查坑道床的应力最大值出现在立柱与现浇混凝土道床交界处,预制立柱最大拉应力为 1.44 MPa,现浇道床最大拉应力为 1.26 MPa。二者均未超过限值,表明该预制牛腿空心立柱强度满足要求。

经分析,在横向力的作用下,立柱出现了向外侧倾斜的趋势,而现浇道床会约束立柱向外侧倾斜,进而导致立柱与现浇混凝土道床交界处出现了拉应力最大值,纵向力的作用导致拉应力最大值点仅出现在预制立柱纵向的单侧。

## 2 预制立柱的生产及试验

### 2.1 生产制造

生产制造预制立柱的主要步骤为:

1) 钢筋骨架安装:在清理干净并涂刷脱模剂的立柱底模平台上进行钢筋绑扎。

2) 底膜和芯模安装:钢筋绑扎完成后,安装已涂刷好脱模剂的侧模,在模型底部设置定位螺栓和芯棒固定,保证芯棒位置的正确。

3) 混凝土浇筑。

4) 养护:对混凝土表面进行两次收面,混凝土浇筑后可在初凝前由收面工人转动芯棒使其松动,可减少芯棒和混凝土的粘接,减少脱模阻力,利于拔出芯棒。

5) 脱模、成品检测及出场:待立柱达到混凝土强度 75% 后,进行脱模,脱模后用湿润的土工布覆盖进行养护,养护时长不少于 7 d;待达到 28 d 龄期且检验合格后使用。

预制立柱生产时,应进行型式检验和出厂检验,外观质量要求和生产精度要求分别如表 2 及表 3 所示,其中 B 项检验项目单项超偏率应不大于 10%,且最大偏差值应不大于允许偏差值的 150%;C 项检验项目总超偏率应不大于 10%,且最大偏差值应不大于允许偏差值的 150%。

表 2 外观质量要求表

Tab.2 Appearance quality requirements

检验项目	允许偏差值/mm	每批检验数	检验类别
承轨部位表面缺陷(气孔、粘皮、麻面等)	长度 $\leq 15$ , 深度 $\leq 2$	全检	B 项
承轨部位以外表面缺陷(气孔、麻面、干灰等)	长度 $\leq 30$ , 深度及高度 $\leq 10$	全检	C 项
破损和掉角	不允许	全检	C 项
肉眼可见的裂纹	不允许	全检	C 项
预埋套管内的混凝土淤块	不允许	全检	C 项
内表面露筋或混凝土塌落	不允许	全检	C 项

### 2.2 场地受弯试验

在实际服役过程中,预制立柱受施工精度、列车横向力等影响,可能处于受弯的工作状态。为明确立柱的抗弯性能,须开展预制立柱的抗弯破坏试验。根据弯矩等效原理,试验时可将其受力简化为简支梁受力,如图 5 所示,对应试验实景图见图 6。

立柱抗弯试验步骤如下:

表 3 生产精度要求表

Tab.3 Production accuracy requirements table

检验项目	允许偏差值/mm	每批检验根数/根	检验类别
承轨面平面度	$\leq 0.5$	10	B 项
长度	$\pm 5$	10	C 项
各截面宽度	$\pm 5$	10	B 项
表面平整度	5/2 000	10	C 项
侧向弯曲	柱长/750	10	C 项
空心直径	(0, -20)	10	C 项
预埋套管间距	$\pm 1$	10	B 项
预埋套管歪斜偏差	$\pm 2$	10	B 项
预埋套管下沉量	1	10	C 项
承轨面坡度	$< 1/300$	10	B 项

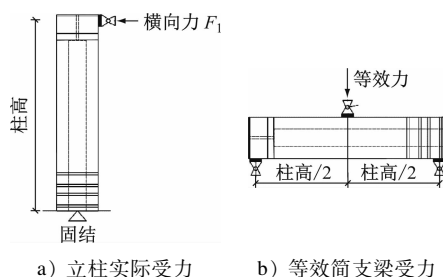


图 5 预制立柱抗弯试验的荷载示意图

Fig.5 Load diagram of prefabricated column bending test

1) 随机挑选生产合格的 2 根预制立柱进行预制立柱破坏试验。

2) 试件就位后,均匀加载,加载速度不大于 1 kN/s,加载至检验荷载的 30% ~ 40% 时,对试验状态及支距尺寸进行检查,确认正确后继续加载。

3) 加载至检验荷载后,稳定 3 min,并在整个加载过程中用照明放大镜观测。一旦出现裂缝即确认为开裂,要求裂缝数量 $\leq 1$ 处,且裂缝宽度 $\leq 0.2$  mm。



图 6 预制立柱抗弯试验实景图

Fig.6 Actual scene of prefabricated column bending test

4) 继续加载,直至裂缝宽度 $\geq 0.2\text{ mm}$ ,记录荷载。

预制立柱抗弯试验结果表明,预制立柱的破坏弯矩约为 $80\text{ kNm}$ ,等效的横向力 $F_1$ 为 $47\text{ kN}$ ,满足承载力要求。

### 3 新型检查坑道床的优势

#### 3.1 施工优势

新型检查坑道床可采用架轨法进行施工,施工现场见图7。



图7 新型检查坑道床架轨法施工现场

Fig.7 Construction site of the new type inspection pit track bed with underlaying track method

其施工方式有别于普通现浇型立柱式检查坑。主要步骤为:施工准备→定位框架安装→道床钢筋绑扎→立柱安装→钢轨扣件立柱拼装→精调→模板安装→混凝土浇筑→养护脱模。施工前,应同土建、动力照明、信号、给排水等专业确认各专业预埋管的位置和接口要求。

相较于现浇型立柱,预制立柱施工时与土建专业的专业接口明确,现场混凝土浇筑量较小。据施工单位测算,新型检查坑道床每个工作面的施工速度约为 $75\text{ m/d}$ 。与现浇型立柱式检查坑道床相比,新型检查坑道床每个工作面的用工数量减少约 $35\%$ 。

#### 3.2 运营期优势

线路开通运营后,新型检查坑道床质量可靠,外形美观,无须额外维护和保养。完工后的新型检查坑道床如图8所示。

#### 3.3 经济性对比

与现浇型立柱道床相比,新型检查坑道床的钢筋用量相当,混凝土用量减少。综合考虑钢筋、混凝土、模具等费用的摊销,单线新型检查坑道床的



图8 完工后的新型检查坑道床

Fig.8 New type of inspection pit track bed after completion

造价比现浇型立柱式检查坑道床造价仅提高约 $25\text{ 万元/km}$ 。综合来看,新型检查坑道床具有良好的经济性及应用价值。

### 4 结语

近年来装配式车辆段逐步在我国城市轨道交通兴起,而预制立柱检查坑是其中重要一环。新型检查坑道床采用预制立柱具有外形美观、质量可靠的优点。本文结合理论计算及现场试验,从生产、施工、运营阶段验证了新型检查坑道床的受力性能、适用性及经济性。本研究进一步丰富了库内线立柱式检查坑的形式。

未来若能配套研究相关施工设备,有望实现插秧式施工,推动智能化装配建造的发展。

### 参考文献

- [1] 肖俊. 浅谈夏南车辆段列检库检查坑优化设计[J]. 铁道勘测与设计, 2009(2): 17.  
XIAO Jun. Brief talk on optimized design for inspection pit of train inspection depot in Xianan Depot [J]. Railway Survey and Design, 2009(2): 17.
- [2] 杨莉. 地铁车辆段停车列检库工艺设计探讨[J]. 铁道标准设计, 2006, 50(4): 83.  
YANG Li. Discussion on the craft design of parking and train examination shop in metro depot [J]. Railway Standard Design, 2006, 50(4): 83.
- [3] 许陇朋. 车辆段柱式检查坑施工工艺与控制分析[C]//浙江省土木建筑学会. 第26届华东六省一市土木建筑工程建造技术交流论文集(上册). 杭州:浙江省土木建筑学会, 2020:181.  
XU Longpeng. Construction technology and control analysis of column inspection pit in depot [C]// Zhejiang Provinces Civil Engineering & Architecture Society. Proceedings of the 26th East China Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference in Six Provinces and One City (Volume I). Hangzhou: Zhejiang Provinces Civil Engineering & Architecture Society,

- 2020;181.
- [4] 高莉萍. 北京地铁八通线土桥车辆段停车列检库工艺设计[J]. 都市轨道交通, 2005, 18(4): 97.
- GAO Liping. The technologic design of garage for train parking and inspecting in Tuqiao depot of Beijing Metro Batong Line[J]. Urban Rapin Rail Transit, 2005, 18(4): 97.
- [5] 程保青. 城轨交通车场线轨道结构的探讨[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(12): 87.
- CHENG Baoqing. Discussion on yard track structure of urban mass transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(12): 87.
- [6] 何刚, 唐国民. 立柱式检查坑整体道床架轨法施工技术研究[J]. 铁道标准设计, 2008, 52(7): 53.
- HE Gang, TANG Guomin. Research on the construction technology of the monolithic track bed underlaying track method for the pillar inspection pit [J]. Railway Standard Design, 2008, 52(7): 53.
- [7] 林茹冰. 立柱式整体道床裂缝预防与控制研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- LIN Rubing. Prevention and control of structural cracks on column monolithic track bed [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [8] 姜俊楠. 轨道交通车场内检查坑预制装配式混凝土立柱设计及应用分析[J]. 隧道与轨道交通, 2021(2): 58.
- JIANG Junnan. Design and application analysis of prefabricated concrete column for inspection pit in rail transit depot[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(2): 58.
- [9] 段玉振, 吴建忠, 刘观, 等. 城市轨道交通预制H型板柱组合轨道结构的研究与设计[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 124.
- DUAN Yuzhen, WU Jianzhong, LIU Guan, et al. Research and design of prefabricated H-shaped slab-column combined track structure for urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 124.
- [10] 陈鹏, 张宏亮, 焦雷, 等. 预制钢立柱检查坑轨道结构及施工工法: 202010191014.1[P]. 2020-06-02.
- CHEN Peng, ZHANG Hongliang, JIAO Lei, et al. Prefabricated steel column inspection pit track structure and construction technique; 202010191014.1[P]. 2020-06-02.
- [11] 刘峰. 无缝线路稳定性有限元分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- LIU Feng. Analysis of continues welded track stability based on finite element method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [12] 张勇. 路基上双块式无砟轨道空间力学及裂缝特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- ZHANG Yong. Study on space mechanics and crack characteristics of twin-block ballastless track on subgrade [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [13] 中国铁道学会. 市域铁路设计规范: T/CRS C0101—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- China Railway Society. Code for design of suburban railway: T/CRS C0101—2017 [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [14] 练松良. 轨道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006:198.
- LIAN Songliang. Railway engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2006:198.
- [15] 陈厚嫦, 黄体忠, 王群伟, 等. 轮对内侧距对机车车辆动力学性能影响的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 99.
- CHEN Houchang, HUANG Tizhong, WANG Qunwei, et al. Test study on the influence of the distance between backs of the wheel flanges on rolling stock's dynamic performance[J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 99.
- [16] 宋丹丹. 350公里标准动车组轮轨载荷特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- SONG Dandan. Research on wheel/rail force characteristics of 350 km/h EMU [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [17] 杨文茂, 周华龙, 辛涛, 等. 深圳地铁11号线橡胶弹簧浮置板轨道动力仿真及测试[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 52.
- YANG Wenmao, ZHOU Hualong, XIN Tao, et al. Simulation and dynamic test of rubber spring floating slab in Shenzhen Metro Line 11[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(1): 52.
- 收稿日期:2023-02-14 修回日期:2023-05-04 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-02-14 Revised:2023-05-04 Published:2025-04-10  
· 通信作者:刘观,高级工程师,75994776@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

## 《城市轨道交通研究》2024年七个虚拟专辑全部上线

本刊编辑部将《城市轨道交通研究》2024年刊发的14个期次(12期正刊和2期增刊)中的所有论文,按照通信信号、机车车辆、规划与投融资、土建工程、供电、机电设备和运营管理七个专业分类集结后,编撰成七个虚拟专辑,并按刊发期序和起页顺序进行了重新编排。此外还为每篇文献均配备了标准的引文格式。欢迎广大读者扫码下载。

