

## 刚性架空接触网汇流排挠度分析\*

代洪宇 冯 超 申正超

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

**摘 要** [目的] 采用刚性架空接触网授流的地铁线路中, 出现了腕臂式悬挂方式下汇流排挠度偏大的现象, 因此, 深入研究汇流排挠度计算方法及汇流排施工架设方案显得尤为重要。[方法] 将刚性架空接触网视为连续梁结构, 推导了汇流排跨中挠度计算公式, 并采用有限元法进行了验证; 结合汇流排施工架设方式, 分析了运营线路汇流排挠度偏大的原因; 为进一步改善刚性架空接触网平顺性, 分析了影响汇流排跨中挠度的各个因素, 从增大汇流排截面惯性矩的角度出发, 给出了截面优化方向。[结果及结论] 刚性架空接触网应视为连续梁结构进行跨中挠度计算; 刚性架空接触网悬挂结构为腕臂式时, 为使汇流排跨中挠度接近理论值, 在架设汇流排时应实施多点支撑, 使其保持水平且无挠度状态; 在增加汇流排截面高度的同时, 合理选择横截面结构能够显著减小跨中挠度, 从而进一步提升刚性架空接触网的平顺性。

**关键词** 轨道交通; 汇流排挠度; 刚性架空接触网; 有限元法

**中图分类号** U225

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.03.003

## Analysis of Busbar Deflection in Rigid Overhead Catenary

DAI Hongyu, FENG Chao, SHEN Zhengchao

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

**Abstract** [Objective] In metro lines utilizing ROC (rigid overhead catenary) for current collection, excessive deflection of busbars is observed under cantilever-type suspension structural condition. Therefore, it is crucial to study the deflection calculation methods and the construction installation schemes for busbars. [Method] ROC is modeled as a continuous beam structure, and a formula for calculating busbar mid-span deflection is derived and validated using finite element method. The causes of excessive deflection in operational lines are analyzed in relation to the busbar construction installation methods. To further improve ROC smoothness, factors influencing the busbar mid-span deflection are studied. Through increasing busbar

cross-section inertia moment, directions for cross-sectional optimization are proposed. [Result & Conclusion] ROC should be treated as a continuous beam structure for mid-span deflection calculation. When using cantilever-type suspension structures in ROC, to ensure that the actual deflection approaches the theoretical value, multi-point supports should be implemented during the busbar installation to maintain a level and deflection-free state. Increasing the busbar cross-section elevation and selecting an appropriate cross-sectional structure can significantly reduce mid-span deflection, thereby further enhancing ROC smoothness.

**Key words** rail transit; busbar deflection; rigid overhead catenary; finite element method

汇流排在刚性架空接触网系统中扮演着夹持固定接触线并传输电流的角色, 其挠度对于确保受电弓在高速取流时的可靠性至关重要。刚性架空接触网的平顺性则由定位点坡度、定位点坡度变化率及汇流排跨中挠度等因素共同决定。

DBJ/T 15-222—2021《轨道交通架空刚性接触网系统技术标准》、CJJ/T 288—2018《城市轨道交通架空接触网技术标准》及 T/CRS C0101—2017《市域铁路设计规范》等规范性文件对刚性架空接触网的坡度及其变化率设定了具体标准; 而汇流排跨中挠度则与产品特性和施工工艺紧密相关, 但当前相关标准中尚未明确汇流排跨中挠度值的具体规定。

自  $\pi$  型汇流排在广州地铁 2 号线成功应用以来, 历经近 20 年的发展, 其截面形状虽有微调, 但主要目的仍是便于施工。为适应受电弓运行速度的提升, 有必要通过增大截面惯性矩的方式对汇流排截面进行优化, 以降低跨中挠度, 从而提升刚性架空接触网的平顺性。

## 1 刚性架空接触网挠度计算

在刚性架空接触网的一个锚段内, 汇流排借助

\* 湾区城际新型刚性接触的弓网系统研究项目 (KY-2022-134)

中间接头相互连接,构成一个整体结构,并通过定位线夹悬挂于多个悬挂装置之上,展现出典型的连续梁特性。文献[1-6]倾向于将刚性架空接触网简化为简支梁模型进行分析,并应用简支梁的挠度计算公式来估算汇流排的挠度,这种做法显然存在不足之处。

### 1.1 数值分析法计算

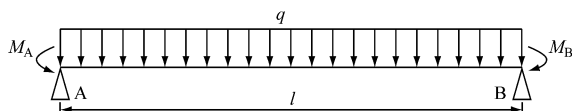
采用数值分析法计算时,假设如下:

1) 将连续梁的截面设定为汇流排夹持接触线后的外部轮廓,且假定该连续梁为等跨距、等截面、均质且无限跨的连续梁模型,暂不考虑中间接头对挠度计算的影响;

2) 鉴于接触线材质的弹性模量约为汇流排的1.7倍,同时考虑到汇流排的截面积远大于接触线的截面积,因此,连续梁的弹性模量取值采用汇流排材质的弹性模量,即69 GPa;

3) 连续梁仅承受自重荷载,且所有支撑点均处于同一水平高度。

图1为连续梁结构的简化示意图。



注:  $q$ —均布荷载;  $l$ —跨距;  $M_A$ 、 $M_B$ —支座A、B处的弯矩。

图1 连续梁结构简图

Fig. 1 Structural diagram of continuous beam

均布荷载作用下<sup>[7]</sup>,连续梁支座弯矩  $M_A =$

$M_B = \frac{ql^2}{12}$ 。跨中最大挠度取值为:

$$f_{\max} = k \frac{ql^4}{24EI} \quad (1)$$

式中:

$k$ ——挠度系数;

$E$ ——弹性模量,单位 GPa;

$I$ ——截面惯性矩,单位  $\text{cm}^4$ 。

挠度系数  $k$  的取值由系数  $k_1$  及  $k_2$  共同决定,  $k_1$  及  $k_2$  取值为:

$$k_1 = \frac{4M_A}{ql^2} \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{4M_B}{ql^2} \quad (3)$$

由表1可知<sup>[7]</sup>,当  $k_1 = k_2$  时,  $k$  与  $k_1$  呈线性关系。经计算,  $k_1 = k_2 = 1/3$ ,  $k = 0.0625$ ,即连续梁跨中最大挠度取值为:  $0.0625ql^4/24EI$ 。

表1  $k$  与  $k_1$  及  $k_2$  关系表

Tab. 1 Relationship between  $k$  and  $k_1/k_2$

| 系数    | $k$ 的取值 |      |         |       |         |      |         |  |
|-------|---------|------|---------|-------|---------|------|---------|--|
| $k_1$ | 0.237 5 | 0.2  | 0.162 5 | 0.125 | 0.087 5 | 0.05 | 0.012 5 |  |
| $k_2$ | 0.1     | 0.15 | 0.2     | 0.25  | 0.3     | 0.35 | 0.4     |  |

以我国某设计时速达160 km并采用刚性架空接触网进行电流传输的地铁线路(以下简称“X线”)作为实例,该线路的一个标准锚段长度为502 m,其跨距分布具体为1.5 m(锚段关节处悬臂跨)+2.0 m+4.0 m+4.5 m+5.0 m+6.0 m+8.0 m(重复57次)+6.0 m+5.0 m+4.5 m+4.0 m+2.0 m+1.5 m。X线选用的是Furrer + Frey公司生产的CR4系列汇流排,接触线则采用标称截面面积为150  $\text{mm}^2$ 的镀锡扁平银铜合金材质。汇流排夹持接触线后的外部轮廓如图2所示,该截面的横向惯性矩  $I$  值为396.317  $\text{cm}^4$ 。在此配置下,接触线与汇流排的单位长度质量分别设定为1.406 kg/m和6.1 kg/m,由此计算得出在重力作用下的均布荷载为73.56 N/m。

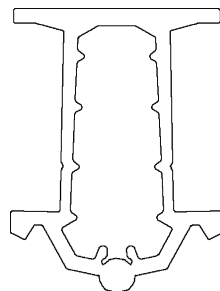


图2 汇流排夹持接触线外轮廓

Fig. 2 External contour of busbar clamping contact wire

经计算,不同跨距对应跨中挠度如图3所示,其中,8 m跨距对应跨中挠度为2.87 mm。

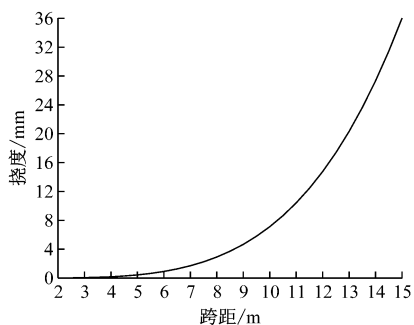


图3 不同跨距对应跨中挠度图

Fig. 3 Diagram of mid-span deflection corresponding to different spans

## 1.2 有限元法计算

基于 1.1 节的假设条件,将汇流排与接触线视为一个整体,并采用汇流排材质的密度作为该整体的密度。利用 Ansys 软件中的 Beam4 单元构建连续梁模型,设定单元长度为 0.1 m。在此设定下,由于汇流排与接触线密度差异所导致的接触线补偿质量计算为 0.098 1 kg。

Beam4 单元的实常数设定如下:横截面积取

$2\,415\text{ mm}^2$ ;截面惯性矩在横向为  $396.317\text{ cm}^4$ ,在纵向为  $124.147\text{ cm}^4$ ;截面高度为 117 mm;截面宽度为 85 mm。

经过计算,得到了不同跨距下对应的跨中挠度值,如表 2 所示。对比数值法与有限元法的计算结果,两者呈现出高度的一致性,这验证了汇流排跨中最大挠度计算公式的准确性和有效性。

表 2 各跨距对应跨中挠度取值表

Tab. 2 Deflection values corresponding to each span

| 计算方法        | 跨距/m |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|             | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 数值法跨中挠度/mm  | 0.01 | 0.06 | 0.18 | 0.44 | 0.91 | 1.68 | 2.87 | 4.60 | 7.01 | 10.26 | 14.53 | 20.01 | 27.91 |
| 有限元法跨中挠度/mm | 0.01 | 0.06 | 0.18 | 0.44 | 0.91 | 1.68 | 2.87 | 4.59 | 7.00 | 10.25 | 14.51 | 19.99 | 26.89 |
| 相对误差/%      | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.04  |

## 1.3 含中间接头的挠度计算

中间接头是两根汇流排之间机械和电气连接的部件,长为 0.4 m。含中间接头的截面如图 4 所示。中间接头在一跨内的布置位置影响跨中挠度及弓网动态性能,宜布置在一跨内弯矩零点处。

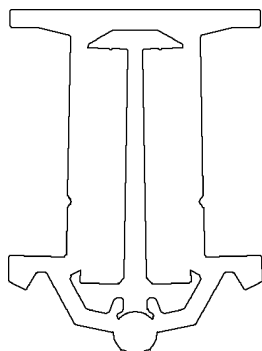


图 4 汇流排夹持接触线外轮廓(含中间接头)

Fig. 4 External contour of busbar clamping contact wire (including intermediate joint)

在 X 线的 502 m 标准锚段内,除连接汇流排终端的中间接头距离定位点固定为 1.5 m 外,其余中间接头距离定位点的分布遵循 1.0 m 与 3.0 m 交替的模式。

针对含有中间接头的截面,Beam4 单元的实常数设定如下:横截面积设定为  $4\,659\text{ mm}^2$ ;截面惯性矩在横向为  $508.503\text{ cm}^4$ ,在纵向为  $148.357\text{ cm}^4$ ;截面高度为 117 mm;截面宽度为 85 mm。

依据中间接头的实际分布位置,构建了 502 m 标准锚段的有限元模型,并进行了相应的计算。计

算结果中,前 1/4 锚段的汇流排挠度曲线如图 5 所示。

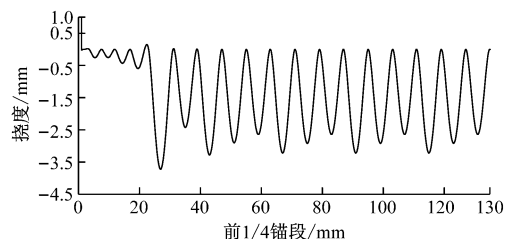


图 5 前 1/4 锚段汇流排挠度曲线

Fig. 5 Deflection curve of busbar in the first 1/4 anchor section

受锚段关节处过渡跨的影响,锚段内的前 2 个 8 m 跨距的跨中挠度分别达到了 3.72 mm 和 2.43 mm。相比之下,6 m 过渡跨的跨中挠度较小,仅为 0.6 mm,并且在定位点处出现了负弛度现象。当受电弓以高速通过这些跨距时,由于相邻跨距之间存在较大的挠度差异,导致受电弓的跟随性能不佳,这可能会引发燃弧等异常现象。

在 8 m 标准跨距内,中间接头距离定位点的距离按照 1 m 和 3 m 交替分布。在这种分布模式下,对应标准跨的跨中挠度也呈现出交替分布的特点,具体为 3.22 mm、2.92 mm、2.64 mm 的循环。

当计算模型中包含中间接头时,一个锚段内 8 m 跨距的最大跨中挠度仍为 3.72 mm。

## 2 运营线路汇流排挠度分析

刚性架空接触网的汇流排悬挂方式主要包括

腕臂式和门式两种<sup>[8]</sup>。在腕臂式悬挂方式(见图6)中,汇流排与定位线夹之间的所有自由度均受到约束,而汇流排的热胀冷缩应力则通过腕臂的转动来释放。另一方面,门式悬挂方式在直流供电制式的地铁线路中得到了广泛应用。在这种悬挂方式中,汇流排的上表面与定位线夹之间保持了一定的间隙,使得汇流排能够在线夹内部滑动,从而有效释放热胀冷缩应力。

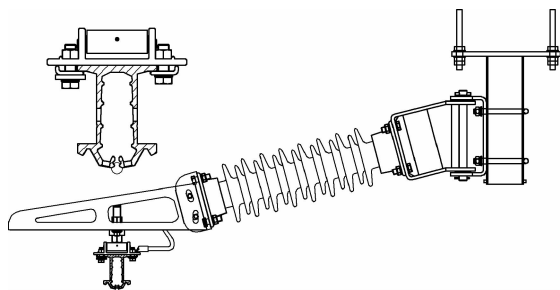


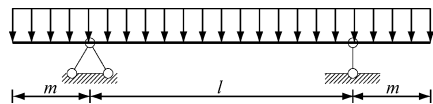
图6 腕臂式悬挂方式

Fig. 6 Cantilever suspension mode

X线采用的是腕臂式悬挂方式。在日常运维过程中观察到,当定位点的导高精度被调整至 $\pm 1$  mm范围内时,多个8 m跨距的跨中挠度接近8 mm,这一数值远超理论计算所得的挠度值。针对这一现象,分析认为可能的原因包括汇流排产品本身及汇流排架设工艺两个方面。

### 2.1 汇流排挠度测试

根据TB/T 3252—2022《电气化铁路刚性悬挂接触网汇流排及零部件》的规定,汇流排的挠度测量试验结果应当不超过70 mm。汇流排的挠度测量可以等效为计算一个两端带有悬臂的梁(见图7)在自重作用下产生的跨中挠度。



注:m—悬臂长度。

图7 两端带悬臂的梁简图

Fig. 7 Diagram of beam with cantilever at both ends

如图7所示, $l$ 取值为11.9 m,梁跨中挠度计算式<sup>[7]</sup>为:

$$f_{\max} = \frac{ql^4}{384EI}(5 - 24r^2) \quad (4)$$

$$r = m/l$$

其中: $m$ 取值为50 mm, $l$ 取值为344.356 cm<sup>4</sup>,其他参数定义及取值参照1.1节。

经计算,12 m单根汇流排的挠度测量试验数值法所得结果为65.69 mm,有限元法所得结果为65.60 mm。汇流排型式检验中,5根样品的挠度平均值达到62.7 mm,与理论计算结果相近,表明汇流排材质并非导致刚性架空接触网跨中挠度偏大的主要因素。

### 2.2 汇流排架设工艺

图8为理论计算边界与汇流排架设示意图。连续梁挠度的理论计算基于以下边界条件:梁在起始状态下保持水平且无弛度,当支撑于支座上后,在重力作用下形成挠度。在实际汇流排架设过程中,通常采用人工操作两台或三台梯车,利用绳索将汇流排提升至安装高度后进行悬挂定位。由于一跨内汇流排的支撑点数量有限,在悬挂定位之前,汇流排已经存在一定的挠度。当支撑点被撤去后,重力作用下的挠度值将超出理论计算值。

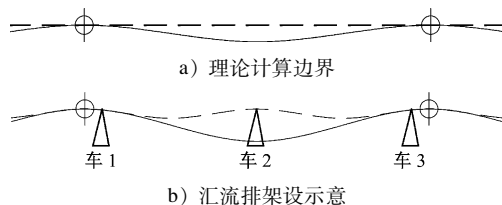


图8 理论计算边界与汇流排架设示意图

Fig. 8 Schematic diagram of theoretical calculation boundary and busbar setup

在X线汇流排的架设过程中,仅采用2台梯车进行作业,且该线汇流排与定位线夹之间约束了所有自由度。因此,汇流排因热胀冷缩产生的应力一部分通过腕臂的转动得到释放,而另一部分则因需克服腕臂转动的阻力,在重力作用下进一步加剧了跨中的挠度。

相比之下,门式悬挂方式采用B型定位线夹,允许汇流排在定位线夹内滑动。因此,由汇流排架设方式带来的富余弛度可以通过汇流排在热胀冷缩过程中在线夹内的滑动得到一定程度的缓解。

为确保汇流排在悬挂定位于定位点时保持水平无挠度状态,应对其进行多点支撑。

### 3 大截面惯性矩汇流排

广州地铁18号线的刚性架空接触网在试验中达到了176 km/h的最高速度,这一成就刷新了国内地铁试跑速度的最高纪录。为确保受电弓在更高速度下能够稳定受流,对刚性架空接触网的平顺性



提出了更为严格的要求。

汇流排的挠度是影响刚性架空接触网平顺性的关键因素。根据式(1),在跨距保持恒定的情况下,减小梁在自重作用下的挠度可以通过增大梁的截面惯性矩和材料弹性模量来实现。

当汇流排夹持接触线后,其剖面形状可近似视为空心矩形截面,如图9所示。该截面的横向惯性矩与截面高度的三次方成正比,而与截面宽度成线性关系。为了增大横向截面惯性矩,更优选的方式是增加汇流排的截面高度。

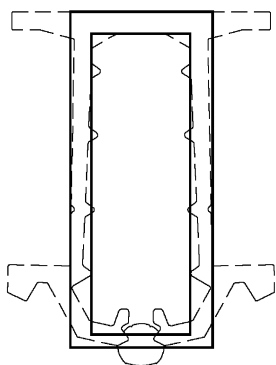


图9 汇流排接触线近似等效截面

Fig. 9 Approximate equivalent section of busbar contact wire

为维持汇流排的夹持力,可在现有汇流排基础上增加其截面高度,具体结构如图10所示。鉴于截面高度的增加会导致汇流排单位长度质量的提升,因此需权衡截面结构形式与截面积之间的关系。采用诸如 Isight、Pro/E、Ansys 等软件进行截面优化,可实现小截面积对应大截面惯性矩的优化设计。

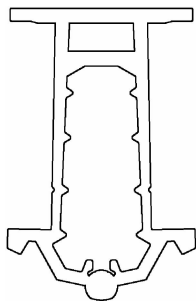


图10 大截面惯性矩汇流排截面

Fig. 10 Large section inertia moment on busbar section

图10展示了具有大截面惯性矩的汇流排截面。以该截面为例,当汇流排截面高度设定为130 mm时,8 m跨距下的跨中挠度降低至2.15 mm,相较于原汇流排截面(高度为110 mm)的跨中挠度减少了约26.4%。

在增加汇流排截面高度的同时,合理选择横截面结构能够显著减小跨中挠度,从而提升刚性架空接触网的平顺性。在列车运行速度不高的情况下,采用大截面惯性矩的汇流排可适当增加标准跨距,从而在确保弓网动态性能的同时,减少工程投资及运维成本。

## 4 结语

本文将刚性架空接触网视为连续梁结构,推导出了汇流排跨中挠度的计算公式,并分析了运营线路中汇流排挠度过大的原因,同时研究了影响汇流排挠度的因素。所得结论如下:

1) 刚性架空接触网呈现出典型的连续梁结构特征,汇流排跨中挠度的计算公式为: $(0.0625ql^4)/24EI$ 。锚段关节处的过渡跨与其相邻标准跨的跨中挠度差异过大,不利于受电弓的高速取流,因此应合理设计锚段关节过渡跨的跨距。

2) 汇流排的架设工艺以及定位点导高误差是影响跨中挠度的主要因素。在架设汇流排时,应实施多点支撑,确保其保持水平且无挠度状态。

3) 在增加汇流排截面高度的同时,合理选择横截面结构能够显著减小跨中挠度,从而进一步提升刚性架空接触网的平顺性。

## 参考文献

- [1] 尹魁元. 接触网刚性悬挂跨距的选择[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(4): 105.  
YIN Kuiyuan. Choice of the span of rigid suspension catenary[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(4): 105.
- [2] 彭世杰. 影响刚性悬挂跨距长度的因素分析[J]. 中国科技信息, 2012(12): 95.  
PENG Shijie. Analysis of factors affecting the span length of rigid suspension[J]. China Science and Technology Information, 2012(12): 95.
- [3] 王洪林. 设计时速120 km线路架空刚性悬挂接触网跨距选择[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(10): 79.  
WANG Honglin. Selection of overhead rigid catenary span on the designed 120 km/h line[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(10): 79.
- [4] 原华, 毕继红, 周全智. 刚性悬挂接触网弓网耦合仿真研究[J]. 低温建筑技术, 2007(2): 51.  
YUAN Hua, BI Jihong, ZHOU Quanzhi. Pantograph-catenary coupling simulation research for rigid suspension catenary[J]. Low Temperature Architecture, Technology, 2007(2): 51.

(下转第24页)

- crete joints [C]. // Structures Congress 2015. Portland, Oregon. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015: 1999.
- [20] 钟春玲, 李雷. 全预制装配式车站节点的连接方式研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(6): 1.
- ZHONG Chunling, LI Lei. Exploration of prefabricated station [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(6): 1.
- [21] GIL LORENZO S. The role of temporary spear bolts in gasketed longitudinal joints of concrete segmental linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103576.
- [22] 朱瑶宏, 柳献, 张晨光, 等. 地铁盾构隧道纵缝接头螺栓形式对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1427.
- ZHU Yaohong, LIU Xian, ZHANG Chenguang, et al. Contrast test research on longitudinal joint with different forms of bolts in metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1427.
- [23] 薛伟辰, 胡翔. 预制混凝土框架结构体系研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1241.
- XUE Weichen, HU Xiang. Research progress on precast concrete frame structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1241.
- [24] LIU X, JIANG Z, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 685.
- [25] RODRÍGUEZ M E, TORRES-MATOS M. Seismic behavior of a type of welded precast concrete beam-column connection[J]. PCI Journal, 2013, 58(3): 81.
- [26] 苗欣蔚, 黄炜, 凌柯, 等. 干式连接装配式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 36.
- MIAO Xinwei, HUANG Wei, LING Ke, et al. Experimental study on seismic behavior of fabricated composite wall based on different horizontal joints dry connection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 36.
- [27] SUN L F, CHEN Z L, LI J C, et al. Weld strength analysis of T-joint segments of the metro crossing passage by the shield method based sub-model[J]. Materials Science Forum, 2019, 971: 27.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for prefabricated concrete buildings; GB/T 51231—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [29] KURAMA Y C, SRITHARAN S, FLEISCHMAN R B, et al. Seismic-resistant precast concrete structures: state of the art[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 03118001.
- [30] ABOUHAMDIAH I S, AL-OSTA M A, BALUCH M H. Structural behavior of cast - in C - channel anchors in precast concrete under uniaxial tension[J]. 2017. 10.
- [31] ISHIGAKI H, SAWAKAMI S, MORI M, et al. An experimental study on design method for segment joint of shield tunnel which is subject to high tensile force[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2016, 72(3): 136.
- 收稿日期:2022-11-18 修回日期:2023-05-05 出版日期:2025-03-10  
Received:2022-11-18 Revised:2023-05-05 Published:2025-03-10  
• 第一作者:丁先立,正高级工程师,dingxianli@dsjy.com  
通信作者:王冉,工程师,wangran2@gmdi.cn  
• ©《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 18 页)

- [5] 裘金真. 刚性悬挂弓网系统的动态仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- XI Jinzhen. Study on dynamic simulation of rigid suspension pantograph-catenary system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [6] 周韬. 不同列车运行速度下架空刚性接触网跨距的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 158.
- ZHOU Tao. Selection of overhead rigid catenary span based on different train operating speeds[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 158.
- [7] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册: 第二版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- Editorial Committee of Static Calculations for Building Structures. Static calculations for building structures: 2nd ed[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [8] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and rigid catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- 收稿日期:2022-11-25 修回日期:2023-02-24 出版日期:2025-03-10  
Received:2022-11-25 Revised:2023-02-24 Published:2025-03-10  
• 通信作者:代洪宇,工程师,315586546@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