

地铁刚性架空接触网汇流排中间接头布置原则研究^{*}

代洪宇 冯超 申正超 桑国阳

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

摘要 [目的]地铁刚性架空接触网汇流排中间接头长期工作于受电弓与接触网之间复杂的耦合振动系统之中,中间接头的布置不合理,易存在接头处螺栓松脱及塌腰的现象,导致接头处出现硬点,进一步导致接头处出现接触线磨损偏大和拉弧现象,因此需对中间接头的布置原则进行研究。[方法]将地铁刚性架空接触网等效成无限跨连续梁,采用有限元法对其弯矩进行计算;分析了不同标准跨距下中间接头最优安装位置,结合不同汇流排标准长度,研究了标准锚段内中间接头的最优布置方案;分析了中间接头不同安装位置对汇流排挠度及其结构动力特性的影响。[结果及结论]为使中间接头处于良好受力状态,可通过匹配标准跨距与相应汇流排长度,确保锚段内所有中间接头均安装在汇流排零弯矩点附近;中间接头在一跨内的安装位置对汇流排跨中挠度值存在一定的影响,而对整锚段汇流排结构动力特性的影响可忽略。**关键词** 地铁;刚性架空接触网;汇流排;中间接头;布置原则

中图分类号 U225.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230604

Arrangement Principles of the Busbar Interlocking Joint in Metro Rigid Overhead Catenary System

DAI Hongyu, FENG Chao, SHEN Zhengchao, SANG Guoyang

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

Abstract [Objective] The busbar interlocking joints of metro rigid overhead catenary system operate for extended periods within the complex coupled vibration system formed between the pantograph and the contact wire. Improper arrangement of intermediate joints can easily lead to issues such as bolt loosening and joint deformation at the connection points, resulting in hard spots, which can further cause excessive wear of the contact wire and arcing phenomena at the joints. Therefore, it is necessary to study the arranging principle for interlocking joints. [Method] The metro rigid overhead catenary system is modeled as an infinite-span continuous beam, and its

bending moment is calculated using the finite element method. The optimal installation positions of interlocking joints under different standard span lengths are analyzed. Based on various standard lengths of busbar, the optimal arrangement scheme of interlocking joints within a standard anchoring section is proposed. Additionally, the influence of different installation positions of interlocking joints on the deflection of busbar and the dynamic characteristics of the structure is analyzed. [Result & Conclusion] To ensure a favorable stress condition at the interlocking joints, it is recommended to match the standard span length with the corresponding busbar length, thereby ensuring that all interlocking joints within the anchoring section are installed near the zero-bending-moment points of busbar. The installation position of interlocking joints within a span has a certain impact on the mid-span deflection of busbar, while its influence on the overall structural dynamic characteristics of the anchoring section is negligible.

Key words metro; rigid overhead catenary; busbar; interlocking joint; arrangement principle

中间接头是两根汇流排之间机械和电气连接的部件^[1],长期工作于受电弓与接触网之间复杂的耦合振动系统之中,其状态直接影响着弓网动态相互作用质量^[2]。在刚性架空接触网的日常巡检中,发现中间接头的布置不合理容易导致螺栓滑牙、螺栓松脱以及汇流排接头处塌腰。这些问题会进一步导致中间接头处出现硬点,进而引发接触线磨损偏大和拉弧现象^[3-8]。

刚性架空接触网1个跨距内的弯矩极值通常出现在定位点和跨度中点处^[9-10]。如果中间接头安装在弯矩极值点,除了承受轴力外,还会受到较大的弯矩作用,导致其工作状态不利^[11]。本文通过计算汇流排弯矩,确定了不同标准跨距下中间接头的最优安装位置,为后续施工安装提供了参考。

1 汇流排弯矩计算

在刚性架空接触网的1个锚段内,汇流排之间

^{*} 广州地铁设计研究院股份有限公司科研开发项目(KY-2022-134)

通过中间接头连接成为整体,并利用定位线夹将其悬吊固定在多个悬挂装置上,形成典型的连续梁结构^[12-13]。

1.1 数值分析法计算

采用数值分析法计算定位点及跨度中点弯矩时,做如下假设:

1) 将中间接头考虑为汇流排在重力作用下的附加荷载,连续梁截面取汇流排夹持接触线后的外轮廓,该连续梁为等跨距、等截面的均质无限跨连续梁^[14]。

2) 接触线材质的弹性模量约为汇流排的 1.7 倍,考虑汇流排截面面积远大于接触线截面积,连续梁弹性模量取汇流排材质的弹性模量^[15],即 69 GPa。

3) 连续梁仅受自重荷载作用,且所有支座均等高。

图 1 为连续梁结构简图及弯矩示意图。图 1 中: q 为均布荷载, l 为跨距, M_A 、 M_B 、 M_C 分别为支座 A、B 处及跨度中点 C 处弯矩。

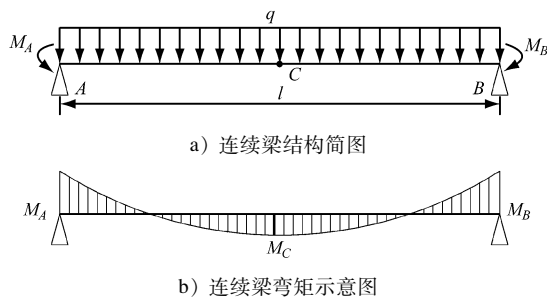


图 1 连续梁结构简图及弯矩示意图

Fig. 1 Structural diagram of continuous beam and its bending moment

在均布荷载作用下,无限跨连续梁支座弯矩 M_A 及跨度中点弯矩 M_C 为^[16]:

$$M_A = M_B = -\frac{ql^2}{12} \quad (1)$$

$$M_C = \frac{ql^2}{24} \quad (2)$$

以 8 m 跨距为例,汇流排采用 Furrer + Frey 公司 CR4 型,接触线采用标称截面为 150 mm^2 的镀锡扁平银铜合金接触线。汇流排夹持接触线外轮廓如图 2 所示。该截面横向惯性矩为 396.317 cm^4 ;接触线与汇流排单位长度质量分别取 1.406 kg/m 、 6.100 kg/m ,即重力作用下的均布荷载为 73.56 N/m 。经计算,定位点处弯矩值为 -392.32 Nm ,跨度

中点处弯矩值为 196.16 Nm 。

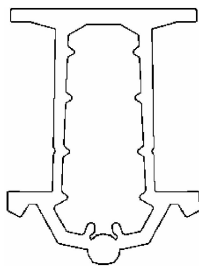


图 2 汇流排夹持接触线外轮廓

Fig. 2 External contour of busbar clamping contact wire

1.2 有限元法计算

基于本文第 1.1 节假设,将汇流排与接触线考虑为一体,其密度取汇流排材质的密度。采用 ANSYS 软件中的 Beam4 单元建立无限跨连续梁模型,单元长度取 2.5 cm ,则因汇流排与接触线密度差引起的接触线补偿质量为 0.0245 kg 。

Beam4 单元参数取值如下:横截面积为 2415 mm^2 ;截面惯性矩分别为 396.317 cm^4 (横向)、 124.147 cm^4 (纵向);截面高 117 mm ,宽 85 mm 。

经计算,不同跨距连续梁仅受重力荷载作用时,其定位点及跨度中点处弯矩如图 3 所示。以 8 m 跨距为例,定位点处弯矩值为 -392.31 Nm ,跨距中点处弯矩值为 196.16 Nm 。可见,有限元法计算结果与数值分析法计算结果一致。

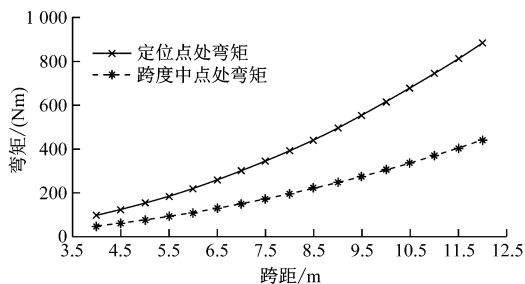


图 3 不同跨距下连续梁定位点及跨距中点处弯矩

Fig. 3 Continuous beam positioning points and span mid-point bending moment under different span lengths

2 中间接头最优布置分析

为保证中间接头能处于良好的受力状态,其安装位置的选择至关重要,应避免安装于 1 跨内汇流排弯矩较大区段,宜安装于汇流排弯矩零点处。

2.1 中间接头安装点及汇流排长度分析

计算汇流排不同跨距下的弯矩,统计弯矩特征值点距离定位点的距离,如表 1 所示。其中: L_a 表

示弯矩零点距定位点的距离, L_m 表示跨度内弯矩值 绝对值与跨度中点弯矩值相等点距定位点的距离。

表 1 汇流排不同跨距下的 L_a 和 L_m
Tab. 1 L_a and L_m of busbar under different span lengths

跨距/m	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0
L_a /mm	845	951	1 057	1 162	1 268	1 374	1 479	1 585	1 691	1 796	1 902	2 008	2 113	2 219	2 325	2 430	2 536
L_m /mm	367	413	459	505	551	596	642	688	734	780	826	872	917	963	1 009	1 055	1 101

以 8 m 跨距为例, 汇流排 1 个跨距内的弯矩曲线如图 4 所示。由图 4 可见: 距定位点约 0.734 m 处弯矩绝对值与跨距中点处弯矩值相等。

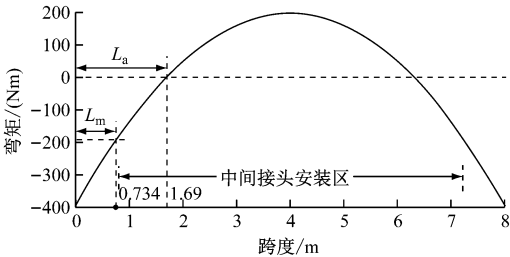


图 4 跨距为 8 m 的汇流排弯矩曲线

Fig. 4 Bending moment curve of busbar within 8-meter span

若 1 个锚段内标准跨距选用 8 m, 接触网设计时, 通常要求中间接头不能安装于定位点两侧 0.8 m 范围内。在 0.8 ~ 7.2 m 范围内, 中间接头安装点的弯矩值均不超过跨距中点弯矩值。

汇流排标准制造长度为 12 m, 若采用非标准长度汇流排, 则可将 1 个锚段标准跨内中间接头布置于弯矩零点附近。

若 1 个锚段内标准跨距为 7.5 m, 则弯矩零点与定位点相距 1.585 m。中间接头若安装于弯矩零点处, 则汇流排长度应为 7.5 m 的整数倍。若汇流排长度取 7.5 m, 则 1 个锚段内中间接头数量较多; 若汇流排长度取 15.0 m, 则不利于汇流排安装。

考虑将中间接头安装于弯矩零点附近。经分析, 中间接头最优布置方案为: 将 22.5 m 等分成两份, 单根汇流排长 11.25 m, 则中间接头安装点偏离弯矩零点 0.29 m, 即中间接头安装点与定位点相距 1.875 m, 该点弯矩值为 43.1 Nm。7.5 m 标准跨距下中间接头布置示意图如图 5 所示。

经分析, 为使中间接头安装于弯矩零点附近, 不同标准跨距对应标准汇流排长度取值及中间接头安装位置如表 2 所示。

2.2 锚段内中间接头布置

城市轨道交通新建线路刚性架空接触网多采用滑槽安装, 锚段标准跨距与盾构管片环宽呈整数

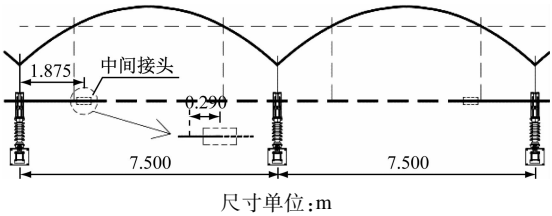


图 5 7.5 m 标准跨距下中间接头布置示意图

Fig. 5 Diagram of 7.5 m standard span interlocking joint arrangement

表 2 汇流排长度及中间接头安装位置

Tab. 2 Busbar lengths and interlocking joint installation positions

跨距/m	汇流排长度/m	安装点距弯矩零点距离/m	安装点距定位点距离/m	安装点处弯矩值/(Nm)
6.0	12.00	0	1.268	0
6.5	13.00	0	1.374	0
7.0	14.00	0	1.479	0
7.0	10.50	0.271	1.750	37.550
7.5	11.25	0.290	1.875	43.100
8.0	12.00	0.309	2.000	49.050
8.5	12.75	0.329	2.125	55.365
9.0	13.50	0.348	2.250	62.070

倍, 通常取 7.5 m 或 8.0 m。为保证锚段关节过渡后, 后续锚段定位点与滑槽匹配, 锚段悬臂跨与过渡跨的总长应是标准跨距的整数倍。

以广州地铁 12 号线为例, 盾构管片环宽为 1.5 m, 则 240 m 标准锚段跨距组成为 1.5 m + 3.0 m + 4.5 m + 6.0 m + 7.5 m × 28 + 6.0 m + 4.5 m + 3.0 m + 1.5 m, 半锚段的悬臂跨与过渡跨总长 15 m。

1) 方案一 汇流排标准长度取 11.25 m。结合本文第 2.1 节结论, 则该锚段汇流排可布置为 5.950 m + 7.175 m + 11.250 m × 19 + 7.175 m + 5.950 m。其中: 5.95 m 为汇流排端部弯头长度, 7.175 m 由整根汇流排切割而成。该方案标准跨内中间接头统一安装于弯矩零点附近, 弯矩值仅为 43.1 Nm; 过渡跨内 7.175 m 汇流排两端弯矩值分别为 37.9 Nm 及 63.79 Nm。该方案汇流排仅需切

割两次。

2) 方案二 汇流排取常规标准长度 12 m。由表 1 可得,中间接头安装点与定位点距离应大于 0.7 m,则该锚段汇流排常规布置为 $5.95 \text{ m} + (12.00 \text{ m} + 6.00 \text{ m} + 12.00 \text{ m}) \times 7 + 6.00 \text{ m} + 12.00 \text{ m} + 5.95 \text{ m}$ 。标准跨内中间接头与定位点之间的距离以 1.5 m、3.0 m 交替循环,对应弯矩值分别为 13.8 Nm、151.7 Nm。该方案汇流排需切割 4 次。

综上,锚段内标准跨距取 7.5 m,汇流排标准长度取 11.25 m 时,中间接头均可安装于弯矩零点附近,其受力较常规安装方案更优,且汇流排切割次数减半。

3 中间接头安装位置影响分析

中间接头质量约为 2.4 kg,其安装改变了两根汇流排连接处 0.4 m 范围内的截面特性,故需分析中间接头安装位置对汇流排挠度及振动特性的影响。

3.1 中间接头安装位置对汇流排挠度的影响

不考虑中间接头时,1 个锚段内的标准跨可等效为等跨距、等截面的均质无限跨连续梁。跨中挠度计算公式为^[20]:

$$f_{\max} = qI^4 / (384EI) \quad (3)$$

式中:

E ——弹性模量;

I ——截面惯性矩。

经计算,跨距为 7.5 m 时, f_{\max} 为 2.2 mm。

在本文第 1.2 节有限元建模参数的基础上,通过建模分析本文第 2.2 节方案一和方案二汇流排挠度,如图 6 所示。由图 6 可见:不考虑中间接头时,跨中挠度值为 2.21 mm,与数值分析法计算结果一致;方案一标准跨跨中挠度值呈 2.02 mm、2.41 mm、2.41 mm 交替分布;方案二标准跨跨中挠度值

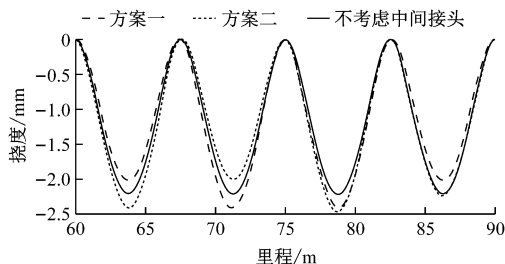


图6 跨距为 7.5 m 时的汇流排挠度曲线

Fig. 6 Busbar deflection curve of 7.5 m span

呈 2.42 mm、2.01 mm、2.46 mm、2.24 mm 交替分布。综上,方案一和方案二中间接头安装位置的不同对汇流排跨中挠度的影响相当。

3.2 中间接头安装位置对汇流排振动特性的影响

方案一和方案二中间接头布置方案不同,即 1 个锚段内汇流排构成不同。通过模态分析,研究方案一和方案二 1 个锚段内汇流排结构动力特性的差异。

方案一和方案二汇流排模态阶数与频率的对应关系如图 7 所示。汇流排垂直变形量如图 8 所示。由图 7 和图 8 可见:方案一与方案二汇流排模态各阶频率相当,且均略低于不考虑中间接头时的

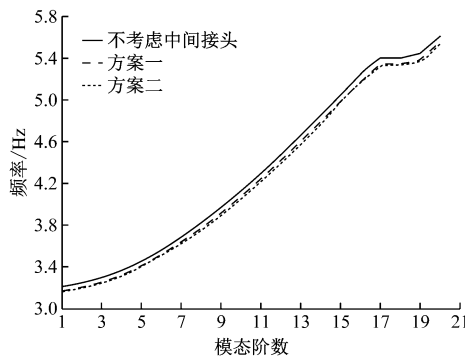


图7 汇流排模态阶数-频率关系曲线

Fig. 7 Curves of busbar modal order and frequency relation

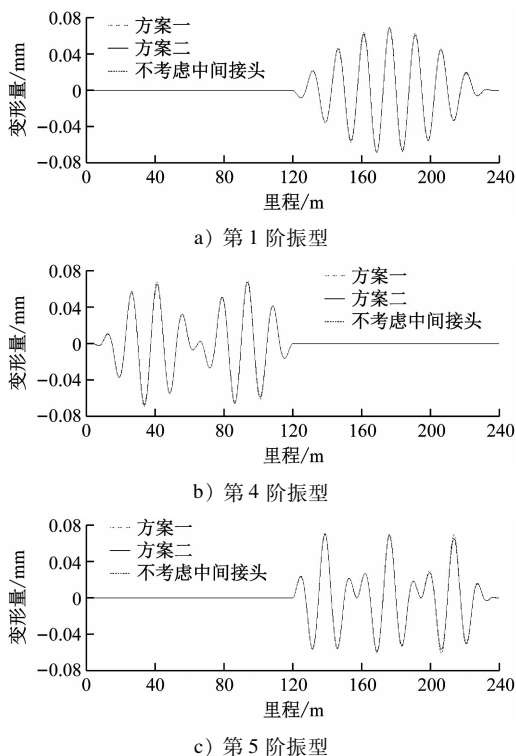


图8 汇流排垂直变形量

Fig. 8 Busbar vertical deformation amount

频率;两个方案下汇流排垂直变形一致,且仅变形曲线波峰和波谷处极值存在细微差异。综上,方案一和方案二中间接头安装位置的不同对汇流排结构动力特性的影响可忽略。

4 结论

1) 为使中间接头受力良好,不同标准跨距可匹配标准汇流排长度,使锚段内所有中间接头布置在汇流排的零弯矩点附近。

2) 中间接头在1跨内的安装位置对汇流排跨中挠度存在一定的影响,对整个锚段汇流排结构动力特性的影响可忽略。

参考文献

- [1] 国家铁路局. 电气化铁路刚性悬挂接触网汇流排及零部件: TB/T 3252—2022[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
National Railway Administration. Overhead conductor rail and fittings for rigid overhead contact system in electrification railway: TB/T 3252—2022[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2022.
- [2] 于金鑫, 于龙, 冯超. 基于仿真方法研究中间接头对弓网接触压力的影响[J]. 电工技术, 2018(16): 150.
YU Jinxin, YU Long, FENG Chao. Study of the impact of the inter-locking joint on the contact pressure of pantograph-catenary system based on simulation method[J]. Electric Engineering, 2018(16): 150.
- [3] 赵刚, 叶义鹏, 周俊, 等. 刚性接触网维护检修重点及处理措施[J]. 科技风, 2018(21): 143.
ZHAO Gang, YE Yipeng, ZHOU Jun, et al. The key points of maintenance and treatment measures of overhead conductor rail[J]. Technology Wind, 2018(21): 143.
- [4] 武承晨. 城市轨道交通供电系统中接触网技术性能和常见故障分析[J]. 中国设备工程, 2020(8): 54.
WU Chengchen. Analysis of technical performance and common faults of catenary in urban rail transit power supply system[J]. China Plant Engineering, 2020(8): 54.
- [5] 郭建华. 地铁供电系统中刚性接触网常见故障和防范策略研究[J]. 中国设备工程, 2021(20): 73.
GUO Jianhua. Study on common faults and preventive strategies of rigid catenary in metro power supply system[J]. China Plant Engineering, 2021(20): 73.
- [6] 彭章硕. 地铁刚性接触网塌网故障应急方案优化研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 54.
PENG Zhangshuo. Research on emergency plan optimization for metro rigid suspension catenary collapse[J]. Modern Urban Transit, 2021(9): 54.
- [7] 张璐. 广州地铁二号线刚性接触线磨损分析报告与应对措施[J]. 中国新技术新产品, 2018(10): 96.
ZHANG Lu. Research report and countermeasures on wear analysis of contact wire of Guangzhou Metro Line 2[J]. New Technology & New Products of China, 2018(10): 96.
- [8] 胡舜. 刚性接触网在运营中出现的問題及处理方法[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(3): 127.
HU Shun. Problems in the rigid catenary system in operation and countermeasures[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(3): 127.
- [9] 盛良, 赵立峰, 张文轩, 等. 地铁架空刚性接触网弓网系统运行特征分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8): 63.
SHENG Liang, ZHAO Lifeng, ZHANG Wenxuan, et al. Analysis of performance characteristics of metro rigid overhead contact system and pantograph-overhead contact wire[J]. Modern Urban Transit, 2019(8): 63.
- [10] 牛景露. 地铁隧道内160 km/h刚性接触网技术研究[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(5): 143.
NIU Jinglu. Study on 160 km/h rigid catenary technology in subway tunnel[J]. Technology Innovation and Application, 2019, 9(5): 143.
- [11] 李鲲鹏, 关金发. 轨道交通架空刚性接触网强度匹配仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 145.
LI Kunpeng, GUAN Jinfa. Simulation research on dynamic matching proposal of pantograph and rigid conductor rail in rail transit[J]. Computer Simulation, 2019, 36(8): 145.
- [12] 董昭德. 接触网[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2022: 59.
DONG Zhaode. Catenary system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2022: 59.
- [13] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 156.
WU Jiqin. Pantograph and catenary system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 156.
- [14] 代洪宇. 200 km/h交流刚性接触网方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
DAI Hongyu. Research on 200 km/h AC rigid catenary scheme[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [15] 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 overhead conductor rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [16] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
Editorial Committee of Static Calculations for Building Structures. Static calculations for building structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.

· 收稿日期:2023-05-30 修回日期:2023-07-15 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-30 Revised:2023-07-15 Published:2025-06-10
· 通信作者:代洪宇,工程师,1315586546@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