

120 km/h 及以上高速授电接触轨系统方案研究

黄齐来

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 100044, 北京)

摘要 [目的] 为满足 120 km/h 及以上轨道交通牵引取流需求, 针对高速接触轨系统进行研究, 提出一套完整的优化方案。[方法] 通过分析靴轨授流质量的影响因素, 提出优化高速授流质量的思路。分别从接触轨零部件设计、平面布置和施工安装等方面提出优化措施, 形成一套完整的高速接触轨系统方案。采用减小端部弯头斜率和在端部弯头支架增加弹性元件两种方式, 减小冲击力和延长作用时间, 以改善靴轨接触效果。采用绝缘分段器代替机械断口, 抬高联络通道标高与疏散平台齐平; 车站端头电分段结合道岔布置, 减少接触轨断口数量。通过适当缩短绝缘支撑跨距, 以减小接触轨挠度; 采用模块化装配, 以提高接触轨施工精度。[结果及结论] 通过上述措施, 改善了接触轨系统授流质量, 提高了 120 km/h 及以上的接触轨取流质量。

关键词 城市轨道交通; 高速授电接触轨; 零件优化; 平面布置; 施工安装

中图分类号 TM922.6: U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.047

Scheme of High Speed Contact Rail System for 120 km/h and above

HUANG Qilai

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd, 100044, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to meet the demand for traction current collection in rail transit at the speed of 120 km/h and above, the research on high speed contact rail system is conducted and a complete optimization scheme is proposed.

[Method] Based on the analysis of the influencing factors of shoe rail current collection, the idea about optimizing the quality of the high speed current collection is put forward. Optimization measures are proposed from the aspects of design, plane layout, construction and installation of the contact rail parts, and a complete scheme for the high speed contact rail system is formed. Two methods of reducing the ramp slope and adding elastic elements to the ramp support at the ends are adopted, aiming to reduce the impact force and prolong the action time for the shoe rail contact improvement. The insulation sectionalizer is used to replace the mechanical fracture. The elevation of the connecting passage is raised to be flush with the evacuation

platform. The power section at the station end is laid out in the light of the turnout to reduce the quantity of contact rail fractures. The insulation span is appropriately shortened to reduce the deflection of contact rail. Modular assembly is adopted to improve construction accuracy of the contact rail. [Result & Conclusion] The above measures improve the current collection quality of the contact rail system, raising that of the contact rail at the speed of 120 km/h and above.

Key words urban rail transit; high speed contact rail; parts optimization; plane layout; construction and installation

随着城市轨道交通的快速发展, 线路逐渐覆盖城市郊区或服务于城市组团之间, 设计时速日益提高, 目前已有多个城市在建或规划了 120 km/h 及以上的线路。接触轨与架空接触网作为城市轨道交通牵引动力供电的两种主要制式, 均有大量成熟应用案例。但在新建 120 km/h 及以上城市轨道交通线路的制式比选时, 架空接触网因其在铁路中的应用往往更受青睐, 接触轨则被冠以“适用于低时速”之名。然而早在 1988 年英国 442 号铁路已创下了接触轨系统最高运行速度 167 km/h 的世界纪录, 由此可见运行速度不应是接触轨系统被忽视的原因。

基于对高速接触轨系统的研究, 笔者通过对靴轨授流质量影响因素进行分析, 认为经过对接触轨关键零件进行优化、合理布置平面、提高施工安装精度, 接触轨系统完全能够满足 120 km/h 及以上的授流要求。本文即从接触轨零部件设计、平面布置、安装与施工等方面提出具体优化措施, 形成一套完整的高速接触轨系统的实施方案。

1 靴轨关系影响指标分析

现行关于城市轨道交通接触轨的设计规范包括 GB 50157—2013《地铁设计规范》、CJ/T 414—2012《城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》、CJJ/T 198—2013《城市轨道交通接触轨供电系统技术规范》等, 上述规范只在接触轨零部件尺寸、性能

和安装定位上提出要求,对于靴轨授流质量尚无明确的设计依据。2019年交通运输部颁布的《城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范第1部分:地铁和轻轨》中对接触网弓网关系提出了具体评价指标和测试方法,其授流质量评价指标主要包括接触网动态几何参数、弓网燃弧指标、弓网动态接触力、受电弓垂向加速度(硬点)测试等^[1]。

通过接触网弓网关系评价指标可类比推导出靴轨授流质量的影响因素及关键指标如表1所示。

表1 靴轨授流质量影响因素及关键指标

Tab.1 Influencing factors and key indicators of shoe rail current collection quality

影响因素	关键指标
靴轨接触压力	平均接触力最大值
	平均接触力最小值
	标准偏差
燃弧	燃弧次数
	燃弧率
	一次燃弧持续时间
接触轨平顺性	接触轨平顺性质量指数
端部弯头振动冲击	集电靴最大垂向加速度
	集电靴最大垂向偏移量
碳滑板磨耗	平均磨耗速度

进一步分析可知,上述指标中靴轨接触压力由车辆集电靴技术决定,而燃弧、接触轨平顺性、端部弯头振动冲击、碳滑板磨耗等指标则由接触轨零件结构型式和安装质量决定。例如,接触轨布置中设置的机械断口,是产生燃弧和振动冲击的主要原因;接触轨膨胀接头处的缝隙、接触轨支撑点间的挠度,则直接影响接触轨平顺性和碳滑板磨耗。根据调研,已运营线路中的接触轨事故也主要由接触轨端部弯头、膨胀接头等上述关键零部件的失效导致。因此,为了满足120 km/h及以上接触轨的可靠运行,本文有针对性地提出以下优化设计思路:

- 1) 优化接触轨端部弯头形式,改善靴轨冲击振动影响;
 - 2) 优化平面布置,减少接触轨断口数量,减少燃弧;
 - 3) 控制施工安装质量,提高接触轨平顺性。
- 本文将从以上3个方面分别介绍具体的优化措施,提供一套完整的适用于120 km/h及以上的高速接触轨系统方案。

2 零部件优化设计

接触轨端部弯头是实现集电靴顺利通过接触轨断口的必要装置,以保证集电靴平稳驶入或离开接触轨。由于集电靴和接触轨的“离合”是在带电状态下完成的,端部弯头需适应集电靴与接触轨的冲击及电弧现象的发生。因此,当车辆行驶速度较快时,接触轨授流效果主要受制于端部弯头。

利用动量定理和牛顿第二定律,可列出集电靴与端部弯头相互作用的接触力关系式为:

$$Ft = mv \quad (1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \quad (2)$$

式中:

- F ——集电靴对端部弯头的冲击力;
 t ——作用时间;
 v ——行车速度;
 a ——集电靴受到冲击的加速度。

由此可知,冲击力 F 越小加速度 a 越小;作用时间 t 越大时,加速度 a 越小。根据受力分解,作用于高速弯头方向的冲击力 F 取决于端部弯头的斜率,降低 F ,需要减小端部弯头的坡度。同时,作用时间 t 越小,则加速度 a 越大,易出现打火和拉弧现象,不利于集电靴的取流和使用寿命。综上,为改善端部弯头与集电靴的接触性能,需从两方面进行改进,即减小端部弯头斜率以降低冲击力 F 、延长作用时间以减小冲击加速度 a 。

2.1 减少接触轨端部弯头斜率

按照CJT 414—2012《城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》6.4.1.2中给出的接触轨端部弯头斜率选用如表2所示,120 km/h时弯头斜率不宜大于1:50^[2]。

表2 接触轨端部弯头斜率选用表

列车运行速度 v /(km/h)	端部弯头斜率
0~35	不宜大于1:22
>35~90	不宜大于1:41
>90~120	不宜大于1:50

通过建立接触轨端部弯头与集电靴碰撞模型,可仿真得到:当端部弯头斜率为1:50时接触力波动明显且多次离线;端部弯头斜率为1:60和1:70时可满足120 km/h要求,但对于斜率1:70的端部弯

头,在集电靴脱离接触轨的瞬间,接触力变化相对斜率 1:60 的端部弯头更大^[3]。调研目前我国已运营和在建的设计速度 120 km/h 线路中采用的端部弯头斜率如表 3 所示,均采用了 1:60 的斜率,而 1:70 斜率的端部弯头尚未接受实际运营的检验。

表 3 设计速度 120 km/h 线路接触轨端部弯头斜率设计值

Tab.3 Design value of contact rail end bend slope for 120 km/h line		
线路名称	设计速度/(km/h)	端部弯头选用斜率
上海轨道交通 16 号线	120	1:60
青岛蓝色硅谷线	120	1:60
青岛地铁 13 号线	120	1:60
武汉地铁 16 号线	120	1:60

此外,采用 1:60 斜率的端部弯头,在不同时速下仿真对比集电靴接触力变化如图 1 所示。从图 1 可以看出,速度为 160 km/h 时则接触力显著提升。

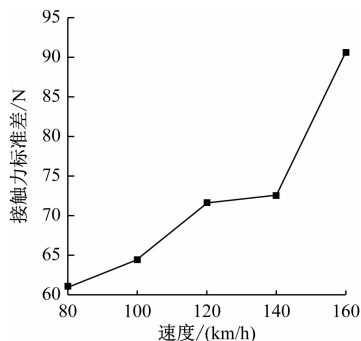


图 1 斜率 1:60 的端部弯头在不同列车速度下的接触力标准差对比

Fig.1 Comparison of contact force standard deviation of end bend with 1:60 slope under different train speeds

综上所述,斜率 1:60 的端部弯头受力小、稳定性好,已有实际应用案例,推荐速度为 120 ~ 140 km/h 线路接触轨采用斜率 1:60 的端部弯头。对于列车速度 160 km/h 以上线路,供电系统制式需结合线路整体因素通过经济技术比选来综合确定。当采用接触轨系统经济合理时,由于进一步减小斜率的效果甚微,且端部弯头长度太长也不利于实际工程安装,因此接触轨端部弯头的斜率不建议低于 1:60。

2.2 延长靴轨作用时间

为延长靴轨作用时间,可在接触轨端部弯头的支撑部位增加弹性元件,利用弹簧阻尼元件减小集电靴与接触轨端部弯头间的冲击强度,延长作用时

间。弹性端部弯头在现有的端部弯头基础上增加 4 组弹性元件,由高速弹性端部弯头本体、悬吊连接板、弹簧、导套以及紧固元件等组成,如图 2 所示。目前,相关产品已有挂网试验,通过相关仿真和挂网检验,增加弹性元件后,在入轨和离轨的接触过程中集电靴的运动加速度明显减小,对延长作用时间、减少拉弧有一定的效果。

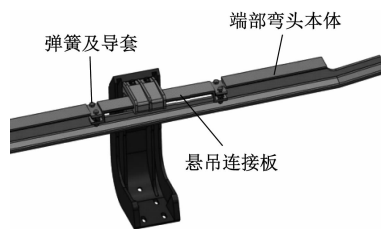


图 2 高速弹性端部弯头安装图

Fig.2 Installation diagram of high-speed elastic end bend

3 平面布置优化设计

列车在高速取流过程中,若接触轨存在机械断口,集电靴不可避免会产生较大振动,影响授流质量。因此,减少接触轨断口数量是提升接触轨系统高速取流的最有效途径。根据工程实际经验,可从两方面提出优化策略:一方面通过开发研制器件式分段零部件替代原始的机械断口;另一方面结合功能和线路,在接触轨布置时减少断口设置。

3.1 区间变电所处接触轨断口优化

为充分发挥高速度的优势,匹配 120 km/h、140 km/h 的速度效能,线路站间距不宜小于 2.4 km 和 3.1 km。长大区间牵引变电所数量多,区间电分段的常规做法是采用机械断口形式,导致车辆频繁通过断口区,易发生拉弧现象。

为减少区间接触轨断口数量,提升授流质量,降低磨耗,在区间牵引所电分段处可采用贯通式绝缘分段器实现电气隔离,以替代传统的机械断口。该产品主要由绝缘滑轨和绝缘板组成,绝缘滑轨采用两套并排放置的绝缘板夹持,两端通过螺栓与接触轨轨腰进行可靠连接。目前,我国已有多个供货厂商在研发此类器件式分段设备,也已有产品在地铁项目中试验挂网,经运营检验,其效果良好。

3.2 区间联络通道处接触轨断口优化

根据《地铁设计规范》28.2.4 要求,区间相邻两个联络通道间隔不应大于 600 m^[4],而为保证人员疏散路径通畅,在联络通道处的疏散平台楼梯处接

触轨设置机械分段,如图3所示。从全线的角度看,区间联络通道处接触轨断口多达数十处,由于区间列车旅行速度快,严重影响授流质量和集电靴的寿命。

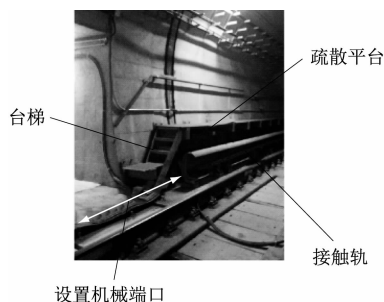


图3 接触轨在联络通道处断开

Fig. 3 Contact rail fracture at connection channel

在保证安全疏散的前提下,可将联络通道底的标高抬高至与疏散平台齐平,疏散平台楼梯设置在远离通道口安全区域,且楼梯底层平台与接触轨防护罩顶部齐平。此时在联络通道处接触轨无需断轨,如图4所示。应急情况下乘客通过疏散平台和道床进行疏散,利用接触轨防护罩登上疏散平台,再经联络通道转移至安全区间。此方案可避免接触轨在联络通道处断开,解决了影响区间高速取流的重大问题。



图4 接触轨在联络通道处不断开

Fig. 4 Contact rail with out fracture at connection channel

若联络通道因结构设计等原因无法做到与疏散平台标高齐平时,为减少区间接触轨断口数量,也可以将接触轨全安装于疏散平台对侧,但此方案可能对隧道内管线布置和设备限界造成影响,需与相关专业配合协调,以保证足够的安装空间。

3.3 道岔区接触轨断口优化

由于车站站前、站后经常设有渡线,接触轨在道岔处设置断口。而有牵引变电所的车站惰性侧还需设电分段,根据工程经验,接触轨在电分段处和渡线道岔处的机械分段可以结合布置,以减少1

个接触轨的分断点,如图5所示。

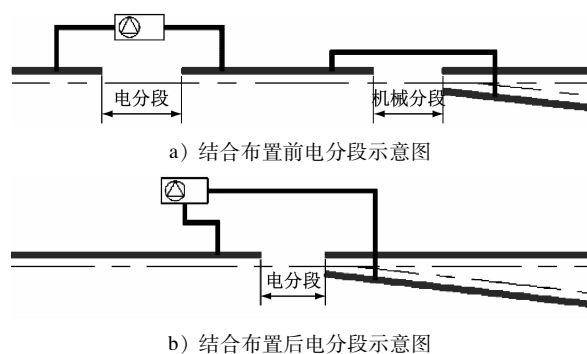


图5 车站端头电分段与道岔机械分段的结合布置

Fig. 5 Combined arrangement of station end electrical segmentation and turnout mechanical section

除了优化道岔处的布置方案外,地下车站电分段还可与相关专业作进一步配合优化,如结合人防门和站台端头的楼梯进行布置。由于目前地铁列车在不同动车间设有横联开关,列车各动车单元间高压牵引母线贯通,因此大断口电分段意义不大。接触轨在车站电分段的断口长度应优先考虑上述优化条件,在无特殊要求时建议采用小断口形式。

综上所述,通过采用绝缘分段器、抬高联络通道标高、电分段与机械分段合并设置等措施,可以减少大量接触轨断口。以某条在建的34 km地铁工程统计,经上述方案优化后,正线接触轨断口数量由160处降低至86处,减少约45%,且剩余断口均位于道岔等运行速度较慢的区段,整体优化效果显著。

4 安装与施工优化措施

4.1 合理选择跨距减小接触轨挠度

接触轨竖向挠度与绝缘支撑跨距直接相关,跨距越小,挠度也越小、接触轨平顺度越高。但是跨距越小,所需支撑点越多,成本随之增加^[5]。采用简支梁模型计算接触轨挠度,最大挠度值方程为:

$$Y_{\max} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (3)$$

式中:

q ——平均荷载;

l ——接触轨跨距;

I ——截面惯性矩;

E ——整体弹性模量;

Y_{\max} ——最大挠度值。

将不同的跨距值分别代入式(3)计算最大挠度

值,得到如图 6 所示曲线。针对列车速度 120 km/h 及以上工程,建议适当减小跨距以保证跨中挠度 ≤ 1 mm。由计算可知,将跨距由 5 m 缩小至小于 4 m 时,最大挠度值可从 2.95 mm 下降至 0.93 mm。支架数量增加 25%,但挠度值减小 68%,取流效果提升可观。

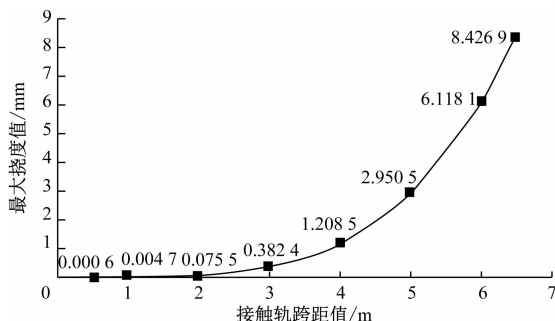


图 6 接触轨不同支架间距时的最大挠度值

Fig. 6 Maximum deflection values of contact rail with different support spacing

4.2 采用模块化安装形式提高施工质量

当设计的接触轨安装形式过多时,施工中易造成错装、混装和安装效率低等问题。采用模块化的装配形式和统一的支架跨距,有利于提升整体施工安装质量。具体措施可包括:

1) 采用模块化的装配形式,减少零件种类,有助于作业人员熟练工艺,提高施工精度和效率。

2) 调节接触轨端部弯头和膨胀接头直轨段的长度,使其支撑跨距与普通接触轨一致,全线统一跨距值,以便于轨道预留轨枕,提高安装基础精度。

3) 优先以轨枕面或预制混凝土支墩作为绝缘支撑的安装面,以保证基础精度、提升整体平顺度。

4) 按照接触轨供货批次,在每根接触轨上依次钢印编号,安装时按编号顺序进行安装,可保证接触轨端面紧密贴合。

5 结语

本文通过对高速接触轨授流质量影响因素的分析,从接触轨零件、平面布置及施工安装等方面提出优化思路,为后续项目提供参考。接触轨和架空接触网均能满足速度为 120 km/h 的取流需求,应结合工程实际情况,通过经济技术比选,综合确定

适宜的牵引网供电制式。

参考文献

- [1] 交通运输部. 城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范 第 1 部分: 地铁和轻轨: 交办运[2023]56 号文[S]. 北京: 交通运输部, 2019.
Ministry of Transport. Technical specifications for safety assessment before initial operation of urban rail transit Part 1: Subway and light rail[S]. Beijing: Ministry of Transport, 2019.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求: CJ/T 414—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 13-14.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical requirements of aluminum-steel conductor rail for urban rail transit: CJ/T 414—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 13-14.
- [3] 张芳志. 适用于市域轨道交通的 120 km/h 接触轨系统技术研究[J]. 中国高新技术企业, 2016(16): 98.
ZHANG Fangzhi. Research on 120 km/h contact rail system technology suitable for urban rail transit[J]. China High-Tech Enterprises, 2016(16): 98.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [5] 李国玉, 申宁, 张维, 等. 青岛地铁蓝色硅谷线 DC 1 500 V 120 km/h 接触轨系统的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015(3): 3757.
LI Guoyu, SHEN Ning, ZHANG Wei, et al. Application of DC 1 500 V 120 km/h contact rail system in Qingdao metro blue silicon valley line[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2015(3): 3757.
- [6] 黄齐来, 张维, 郭志奇. 车载超级电容储能式有轨电车的充电轨设计及应用[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(2): 132.
HUANG Qilai, ZHANG Wei, GUO Zhiqi. Application of modern tram charging rail based on vehicular super-capacitor energy storage[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(2): 132.

· 收稿日期: 2021-12-09 修回日期: 2022-02-22 出版日期: 2024-06-10

Received: 2021-12-09 Revised: 2022-02-22 Published: 2024-06-10

· 作者: 黄齐来, 高级工程师, huangqilai@bjucd.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