

地铁柔性架空接触网小曲线半径接触线与受电弓异常磨耗关系分析与优化探讨

陶 飞

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 400000

摘 要: 针对重庆地铁某线路柔性架空接触网小曲线半径区段受电弓碳滑板出现的 $\pm 100\text{mm}$ 范围内显著异常磨耗、横向“V”形磨痕及使用寿命降低问题,结合线路接触网设计参数与实际运行工况,分析小曲线区段跨中接触线偏移值与碳滑板异常磨耗的关联。通过计算不同小曲线半径、跨距下接触线跨中理论偏移值,明确接触线几何布置与受电弓碳滑板的接触磨耗问题,揭示小曲线半径下接触线跨中偏移值的偏差是导致碳滑板不均磨耗的其中原因,并从接触线拉出值优化、跨距调整改进等方面提出针对性优化方案,为地铁柔性接触网小曲线区段的设计与运维提供实践参考,以降低受电弓与接触线的异常磨耗,提升接触网系统运行稳定性。

关键词: 接触网;小曲线半径;受电弓碳滑板;异常磨耗;偏移值

1 引言

列车受电弓碳滑板与接触网接触线的良好匹配是列车稳定受流的关键,碳滑板磨耗状态直接关联接触网系统运行可靠性与运营成本,而接触线拉出值的合理布置则是决定碳滑板磨耗均匀性的核心因素。在地铁柔性架空接触网运行过程中,小曲线半径区段因线路几何特性、列车通过时的动态偏移等因素,成为接触线与受电弓磨耗的高发区域。重庆地铁某线路柔性区段运营后,受电弓碳滑板出现典型的横向“V”形异常磨耗问题,严重缩短了碳滑板使用寿命,增加了运维检修工作量。文章以该线路柔性接触网小曲线区段为研究对象,聚焦跨中接触线偏移值这一关键参数,通过理论计算与实际工况结合的方式,分析接触线偏移值与碳滑板异常磨耗的关联规律,探究小曲线半径下接触网布置的优化路径,为解决同类地铁线路的受电弓与接触线异常磨耗问题提供理论与实践依据。

2 受电弓异常磨耗情况

重庆地铁某线路自开通柔性架空接触网区段后,列车受电弓碳滑板出现明显的异常磨耗问题。该线路受电弓碳滑板的异常磨耗主要表现为距中心 $\pm 100\text{mm}$ 范围内的局部显著磨耗,即滑板中部区域磨耗量偏大,两端区域磨耗量显著较小,磨痕剖面呈“V”字形分布。磨耗不均与局部异常磨耗直接导致碳滑板的平均使用寿命大幅降低,相较于设计使用寿命,实际更换周期明显缩短,不仅增加了碳滑板的耗材成本,还因频繁的登顶检修作业,降低了线路的运营效率。

碳滑板的“V”形磨痕与局部异常磨耗并非随机出现,在该线路第3次投运后出现该现象,该区段大部分是柔性架空接触网,初步判断该现象与柔性接触网存在关联。

3 小曲线跨中接触线偏移值分析

3.1 小曲线跨中接触线理论偏移值计算

该线路柔性架空接触网曲线区段严格遵循曲外布置原则,各曲线区段设计拉出值保持统一标准,为接触线与受电弓的匹配提供了基础设计保障。(如图1所示)

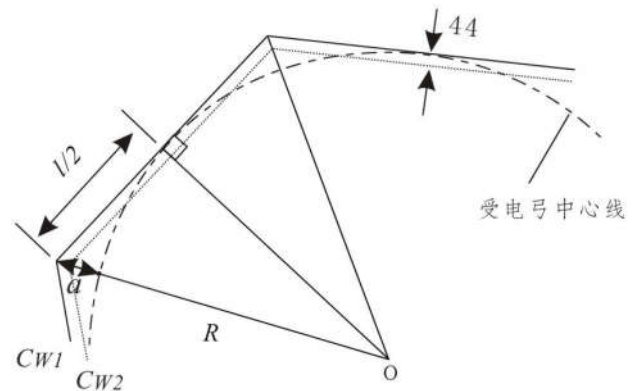


图1 接触线在曲线拉出值布置图

α —拉出值 R —曲线半径 O —圆心 l —跨距 CW —接触线

接触线跨中理论偏移值是以受电弓中心线为基准的无实际工况水平偏移值。在不考虑接触线负载等实际工

况影响时,根据直角三角形勾股定理计算在无风作用下接触线跨中距离受电弓中心的理论偏移值 y , 公式为:

$$y = \sqrt{(R + \alpha)^2 - \frac{l^2}{2}} - R \quad (1)$$

式中 α —拉出值, mm; R —曲线半径, mm; l —跨距, mm。

式(1)是以接触线在曲线区段上布置成割线的条件下解得,因此,当接触线跨中理论偏移值为 0mm 时,表明其在跨中位置与曲线相切,是曲线区段接触线布置的理想状态;当其值为正时,则表明该接触线与曲线相割,跨中接触线向曲线内侧偏移;当其值为负时,则表明该接触线与曲线相离,跨中接触线向曲线外侧偏移;正负决定了其与曲线圆弧的几何关系:零值对应相切,正值对应相割,负值对应相离。

该线路柔性接触网正线设计双承力索、双接触线结构,曲线区段拉出值设计为 $\pm 250\text{mm}$, 两条接触线之间的水平间距为 44mm。

接触网在该线路不同小曲线半径和不同跨距条件下,依据式(1)计算出接触线跨中理论偏移值,计算结果如表 1 所示。

表 1 不同小曲线半径双接触线跨中理论偏移值

序号	曲线半径/m	跨距/m	CW1 理论偏移值/mm	CW2 理论偏移值/mm
1	345	25	-24	20
2	350	25	-27	17
3	354	25	-30	14
4	450	27.5	-40	4
5	450	30	0	44
6	545	30	-43	1
7	550	30	-46	-2

从表 1 计算结果可看出,当 CW2 接触线跨中理论偏移值存在正值情况,则表明该接触线与受电弓中心线相割。因碳滑板在整个跨距内跟踪接触线呈横向运动,其磨损分布情况如下:在 +250mm~+206mm 范围内磨耗 CW1 一条接触线;在 +206mm~0 范围内同时磨耗 CW1 和 CW2 两条接触线;在 0mm~-46mm 范围内仅磨耗 CW2 一条接触线,反方向曲线区段同理。因此,碳滑板在 +44mm~-46mm 范围存在重合磨耗现象,重合磨耗现象与碳滑板横向普遍呈现“V”形磨痕相吻合。(如图 2 所示)

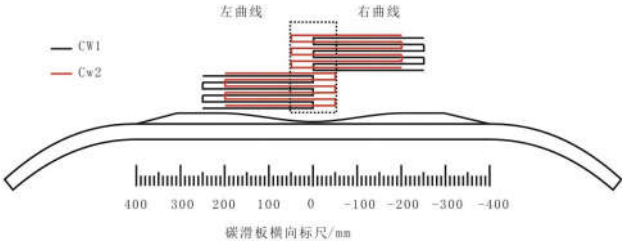


图 2 接触线在受电弓碳滑板横向偏移轨迹图(单位 mm)

小曲线半径对接触线跨中理论偏移值影响显著,曲线半径越小,跨中理论偏移值越大,接触线与曲线圆弧的几何偏差越明显;同时,跨距调整可有效降低小曲线半径区段的接触线跨中理论偏移值,是改善接触线几何布置的有效手段。该线路未考虑到双接触线情况,部分小曲线半径区段因未完全根据曲内接触线理论偏移值优化跨距,导致接触线跨中理论偏移值超出合理范围,为碳滑板异常磨损埋下隐患。

3.2 小曲线区段跨中接触线风偏值分析

由于风对架空接触网的线和导线施加的力使其水平方向偏离,出现“风偏”。与风载成正比,而偏离与线张力成反比。接触线的允许偏移(风偏)受到受电弓弓头的工作范围限制。^[1]

该线路柔性接触网正线设计链形悬挂方式,线索在跨中所受的实际风负载影响曲线区段跨中接触线偏移值,结合《电气化铁路接触网》和技术资料,接触线与受电弓在曲线区段跨中处的最大水平风偏移值 b_{jmax} 公式为^[2]:

$$b_{jmax} = \frac{l^2}{8} \left(\frac{p_j}{T_j} + \frac{1}{R} \right) - a + \gamma_j \quad (2)$$

式中: l —曲线区段跨距值, m; P_j —接触线单位长度所受的风荷载, kN/m; T_j —接触线的额定张力, kN; α —接触线在曲线区段的拉出值, mm; γ_j —接触线在水平面处的支柱挠度, mm; R —曲线半径值, m。

曲线区段拉出值是 250mm, 接触线额定张力取 12kN, 支柱挠度为 25 mm, 接触线单位长度所受的风荷载 $6.6 \times 10^{-2} \text{kN/m}$, 两条接触线(CW1、CW2)之间的水平间距为 44mm, 曲线半径、跨距取现场实际值。依据式(2)计算出小曲线半径双接触线在跨中最大水平风偏移值。

该线路包含向左右两种曲线,在跨中位置,接触线所受的最大水平风荷载可分为来自左侧与右侧两种风向。左右曲线半径区段接触线存在同时向受风方向偏

移,其对碳滑板“V”形磨耗的系统性影响仍然存在。因此,依据式(2)计算出接触线跨中最大水平风偏移值,当最大水平风向右吹时,左右曲线跨中接触线偏移值同时向右偏移;当最大水平风向左吹时同理,表明碳滑板在+76mm~-76mm范围存在重合磨耗现象。因此,重合磨耗偏移在+76mm~-76mm范围与碳滑板在距中心100mm横向呈现“V”形磨痕接近。

3.3 小曲线区段跨中实际偏移值的偏差分析

该线路曲线区段接触网各定位点拉出值虽采用统一设计值,但实际施工过程中不可避免产生定位点拉出值偏差,此类偏差经接触线柔性传递在跨中位置持续累积,形成静态偏移偏差;而列车高速通过曲线时产生的离心力,是放大跨中接触线实际偏移偏差的关键动态因素。根据力学原理,列车达到线路设计速度时,随着曲线半径增加,横向摆动量变大,曲线半径越大受电弓向外轨方向摆动趋势越加明显^[3]。列车沿曲线轨道做圆周运动时会产生向外的离心力,该力经车体传递至受电弓碳滑板,进而对接触线形成横向作用力。直线区段列车行驶的离心力可忽略不计,曲线区段则截然不同,高速行驶产生的离心力会推动受电弓碳滑板向曲线外侧偏移,与跨中位置已形成的偏移值累积偏差相互叠加,进一步放大跨中接触线的实际偏移量,最终加剧碳滑板的不均磨耗,这一作用机制与现场观测到的碳滑板在距中心100mm横向位置呈现“V”形磨痕的特征高度吻合。

小曲线半径接触线跨中偏移值必然影响碳滑板“V”形磨痕,但碳滑板“V”形磨痕不全是小曲线半径接触线跨中偏移值造成,若调整小曲线半径接触线跨中偏移值,碳滑板“V”形磨痕会得到改善。

4 优化方案

基于小曲线半径区段接触线偏移值与碳滑板异常磨耗的分析,从理论设计优化、实际运维改进、新线区段统一考虑三个方面,提出针对性的接触网优化方案。

方案一,在新线设计时,针对小曲线半径区段,严格遵循“小曲线半径配小跨距”的原则,对双接触线的拉出值进行同时考虑布置,让跨中内侧接触线偏移值在受电弓中心线外,让靠曲线内侧接触线与受电弓中心线相离或相切,采用调整跨距使跨中理论偏移值控制在曲线外侧相切是理想状态。

方案二,调整小曲线半径区段拉出值,加大定位点拉出值改变跨中偏移值,改变定位点拉出值使跨中内侧接触线偏移值在受电弓中心线外,但定位点拉出值不应

超过安全值。

方案三,针对同一条线,在新线路区段设计时,改变刚性接触网拉出值布置弥补前一区段的异常磨耗情况。刚性接触网的拉出值范围为 $\pm 200\text{mm}$,每个锚段的定位点拉出值设置成正弦波排列,在该线路前3次投运完成后,碳滑板横向普遍呈现“V”形磨痕现象。与设计沟通后,在新延伸线的刚性拉出值进行调整,刚性接触网的拉出值范围为从 $\pm 200\text{mm}$ 调整到 $\pm 250\text{mm}$,使碳滑板两边磨耗大中间磨耗小,让碳滑板在该线路运行下整体磨耗均匀。

5 结论

基于小曲线半径区段接触线偏移值与碳滑板“V”形异常磨耗的核心关联,结合线路柔性接触网结构特性、运营工况及施工情况,通过理论设计优化、运维改进与新线统筹规划三方面优化,形成的接触网优化方案具备明确针对性与实操可行性。结论如下:

优化方案以控制接触线跨中偏移值为核心抓手,通过精准调控拉出值与跨距两大关键参数,可有效改善受电弓与接触线的接触匹配特性,从根源上缓解碳滑板“V”形异常磨耗问题。新线设计阶段遵循“小曲线半径配小跨距”原则,同步优化双接触线拉出值布置,使跨中内侧接触线偏移值处于受电弓中心线外侧(理想状态为曲线外侧相切),为接触网长期稳定运行奠定设计基础;既有线路通过将小曲线半径区段拉出值调整不超过安全值,在规避脱弓隐患的前提下,实现跨中偏移值的合理修正,快速改善运维阶段的磨耗问题;针对线路延伸场景,通过刚性接触网拉出值正弦波排列的优化调整,可弥补既有区段的磨耗缺陷,形成全线路接触网参数的协同适配。三类方案分别对应新线设计、既有线运维、线路延伸三种场景,形成优化体系,既保障了方案的科学性与安全性,又兼顾了现场实施的灵活性与经济性,为同类线路接触网碳滑板异常磨耗问题的解决提供了可复制、可推广的技术路径。

参考文献

- [1] 邓诚, 黄河. 关于大风条件下接触网偏移的讨论[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(8):29-31+48.
- [2] 吉鹏霄, 张桂林. 电气化铁路接触网[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [3] 孔龙飞, 宋诗扬, 郝迎杰, 等. 高速铁路接触网受电弓动态包络线试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(1):122-129.