

刚性接触网拉出值“八”字布置方案对 弓网磨耗影响分析*

陈显志 燕振刚 田广辉 聂 飞

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 基于刚性接触网拉出值“八”字布置方案, 分析影响刚性接触网弓网磨耗的原因, 提出改善弓网磨耗的措施。[方法] 介绍了电气磨耗和机械磨耗的原理及解决这两类弓网磨耗的措施。重点研究影响弓网间机械磨耗的因素之一“拉出值布置方式”。结合实际工程项目, 利用定量统计方法, 分别从拉出值扫动频率大小、相邻两锚段内悬挂点拉出值扫动频率的一致性和关节悬挂点相对线路中心线位置 3 个方面分析刚性接触网拉出值“八”字布置方案对弓网磨耗的影响。[结果及结论] 在刚性接触网拉出值采用“八”字布置方案情况下, 适度增大拉出值扫动频率值、保持相邻两锚段内悬挂点拉出值扫动频率的一致性和关节悬挂点位于线路中心线同侧, 这些措施都有利于改善碳滑板磨耗的均匀程度。

关键词 地铁; 刚性接触网; 电气磨耗; 机械磨耗; 拉出值“八”字布置方式

中图分类号 TM922.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.038

Impact Analysis of the 八-shaped Layout Scheme of Rigid Catenary Stagger Value on Pantograph-Catenary Wear

CHEN Xianzhi, YAN Zhengang, TIAN Guanghui, NIE Fei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Based on the “八-shaped” layout scheme of the rigid catenary stagger value, the factors affecting the pantograph-catenary (PC) wear of the rigid catenary are analyzed and measures to improve the wear are proposed.

[Method] The principles of electrical wear and mechanical wear, and the measures to solve these two types of PC wear are introduced. One of the factors affecting the mechanical wear between the pantograph and the catenary, that is, the “layout mode of the stagger value” is studied with emphasis. Combining with actual engineering projects and using quantitative statistical methods, the influence of the “八-shaped” layout scheme of the rigid catenary stagger value on the PC wear is

analyzed from three aspects: the magnitude of the sweeping frequency of the stagger value, the consistency of the sweeping frequencies of the stagger values at the suspension points within two adjacent anchor sections, and the position of the suspension points at the joints relative to the track center line. [Result & Conclusion] When the “八-shaped” layout scheme of the stagger value is adopted for the rigid catenary, measures such as increasing moderately the sweeping frequency value of the stagger value, maintaining the consistency of the stagger value sweeping frequencies at the suspension points within two adjacent anchor sections, and keeping the joint suspension points located on the same side of the track center line, are conducive to improving the uniformity of the wear of the carbon slide plate.

Key words metro; rigid catenary; electrical wear; mechanical wear; 八-shaped layout of staggered value

目前, 架空刚性接触网以其结构简单、少维护、无张力、安全性高、载流大及隧道净空要求低等特点^[1], 普遍应用于 DC 1 500 V 直流供电制式的轨道交通项目地下段线路, 部分城市在高架段线路也有应用, 如贵阳地铁 1 号线、深圳地铁 6 号线支线等。建设现代化都市圈正成为我国新型城镇化发展的趋势, 市(域)郊铁路以其快速性、经济、大容量等特征, 连接城市与郊区、中心城市与卫星城镇, 促进了都市圈的资源流动, 提高了都市圈的社会经济活力。近年来, 市(域)郊铁路蓬勃发展, 其供电制式经综合比选多采用 AC 25 kV 交流供电制式。交流制式电压高、绝缘距离大, 地下段线路如采用柔性接触网, 由于其安装所需高度远大于刚性接触网, 势必会导致隧道断面增大, 进而增加土建投资。因此, 市(域)郊铁路项目地下段线路也越来越多采用架空刚性接触网, 如成德线、资阳线、眉山线、北京大兴机场线等项目。

架空刚性接触网经历近 20 年的发展应用, 通过

* 中铁二院工程集团有限责任公司引导科研项目(KDNQ224012)

不断改进汇流排型式、接触线材质、悬挂装置结构和施工工艺等,其缺陷被逐步克服,其优良的性能在国内地铁运营过程中得到充分证明。虽然其优点显著,但是仍然普遍存在弓网磨耗异常的现象,严重影响弓网间取流质量,也大大加重了接触线和受电弓碳滑板的磨耗,缩短使用寿命,增加运营维护成本。如何有效改善弓网磨耗、降低运营成本,仍是重要的研究课题。因此,有必要先分析影响刚性接触网弓网间异常磨耗的原因,寻找有效措施来解决弓网磨耗问题。

1 刚性接触网磨耗产生原因分析

1.1 电气磨耗

电气磨耗多出现在列车出站和区间加速取流变化区段,接触线磨耗异常严重,伴随烧蚀、灼点等特征,而在非加速区段磨耗相对较轻。列车在出站和坡度区段运行时起动加速度短时集中增加,引起列车牵引电流短时激增,是造成电气磨耗的主要原因。电气磨耗一是与取流的大小和取流时的速度相关,取流大和取流时速度低均会使导线温度升高而破坏导线的机械特性,从而加剧导线的磨耗;二是与受电弓稳定性相关,在加速区段,由于弓网间处于波动状态,接触压力的不稳定和受电弓晃动量大都会导致弓网离线率增大,使得弓网间拉弧现象增加,会进一步恶化接触线的磨耗。

目前,还没有有效的措施来解决列车出站加速区段的磨耗问题,列车加速区段的磨耗是电气磨耗和弓网机械磨耗双重作用的结果。可以考虑通过以下3种措施来尝试解决电气磨耗问题:

1) 更换接触线材质。将列车出站方向300 m左右的加速区段接触线材质由铜银合金接触线(CTA)更换为耐磨性更好、导电率接近的材质,如铜铬锆合金接触线(CTCZ)。CTCZ导电率达到90%以上,相比于CTA,其电阻提高<1%。另外,因为CTCZ的电阻温度系数小于CTA的(CTA的为0.003 8,CTCZ的为0.003 2),所以在运营过程中,随着导线温度的升高,更有利于导电。同时,将目前的接触线与受电弓碳滑板间的“线-面接触”改为“面-面”接触也是一个研究方向。预磨型接触线,因为与受电弓接触面增大,所以压强变小、耐磨性提高,杭州地铁正在进行试挂试验,实际效果有待进一步验证。

2) 优化列车的牵引加速策略。不同的加速策

略下,加速段和取流值分布都有区别。国内地铁项目,通常列车采用“无级变速”和“提速不设挡位”的加速策略,刚性接触网出站段锚段接触线磨耗相对较轻。因此,优化列车加速策略对改善出站段弓网磨耗是有利的。

3) 在列车加速区段增加弓网间电能传输能力,有效抑制大取流下接触线急剧温升,维持导线机械性能,减缓磨耗。由于双接触线汇流排结构复杂且换线工艺复杂,在实际工程中极少应用。可以考虑在加速区段布置双锚段,另一锚段起分流作用,增加弓网间接触点,提高电能传输能力。双锚段悬挂点需错位布置,锚段首尾端电连接并联,两锚段间距应满足放线小车作业要求。

1.2 机械磨耗

机械磨耗的主要原因与受电弓和刚性接触网之间的相互作用有关。一是与弓网间接触压力的突变有关。列车运行过程中,受线路条件、轨道振动的影响,车体本身会有多方向的晃动,导致受电弓会发生相对于刚性接触网水平和垂直方向的振动。由于刚性接触网本身结构特点决定了其弹性较差,弓网间接触压力不稳定,出现由大到小、由小到大的突变情况,受电弓会对接触线产生冲击,严重的会形成硬点。弓网间接触压力不稳定现象在加速区段、减振道床区段、曲线段、锚段关节、中间接头及线路变坡点表现的尤为突出。二是与刚性接触网拉出值布置方式密切相关,是影响弓网间机械磨耗的另一重要因素。不同的拉出值布置方式下,受电弓碳滑板磨耗均匀度差别较大。因此,如何合理布置刚性接触网悬挂点拉出值,使接触线经过受电弓碳滑板的分布相对均匀,充分利用碳滑板工作宽度,是刚性接触网设计工作的重要内容。

针对上述弓网间机械磨耗问题,国内地铁项目已经采取一系列的措施来解决这类磨耗,效果显著。由于刚性悬挂本身结构特点是弹性较差,因此引入弹性绝缘组件或弹性定位线夹来增加刚性悬挂的弹性;施工时严格控制中间接头安装位置,禁止在跨距中间前后2~3 m范围内安装中间接头,以减小跨中弛度,避免接触线导高突变和硬点的形成;提高施工精度,切实保证接触线导高、弛度和汇流排中心线对轨面连线的垂直度,减缓接触压力的突变和接触线的偏磨;优化刚性接触网悬挂点拉出值布置方式,充分利用碳滑板工作宽度,使碳滑板磨耗均匀,延长其使用寿命。本文重点分析研究刚

性接触网拉出值布置相关因素对受电弓碳滑板磨损均匀度的影响。

2 刚性接触网拉出值布置方式

目前,国内地铁项目刚性接触网主流的拉出值布置方式主要有正弦波布置方式和“八”字布置方式。两种布置方式统一的前提是:将曲线区段按照直线段考虑,以受电弓为中心将悬挂点分布在其两侧。基于此研究刚性接触网以受电弓为中心的相对轨迹^[2]。实践表明,正弦波布置方式下,受电弓碳滑板往往在最大拉出值附近更易形成凹槽,碳滑板多呈现波浪状,均匀度差,不平整的碳滑板会加剧机械磨损和电气磨损,影响使用寿命。正弦波布置方式下碳滑板磨损均匀度较差的根本原因是接触线在经过受电弓碳滑板时扫动频率不一致,导致刚性接触网悬挂点经过碳滑板不同位置的次数差异较大,长期运行下,经过悬挂点次数多的碳滑板位置就形成了凹槽。

“八”字布置方式的原理是一致的,细节上略有区别,如图1所示。在中铁二院工程集团有限责任公司实用新型专利“刚性接触网平面布置优化结构”中,锚段每个悬挂点的拉出值在顺线路方向按2~5 mm/m的恒定变化率设置,每个锚段只弯曲一次,将每个锚段最大拉出值所在的悬挂点设为中心锚结^[3];悬挂点A最大拉出值 ≤ 280 mm,最大拉出值悬挂点相邻两侧悬挂点B的拉出值 ≤ 250 mm^[3];悬挂点C、D和C'、D'分布在受电弓中心两侧,即线路中心线两侧,拉出值 ≤ 200 mm。该“八”字布置方式和参数设定已广泛应用在杭州、成都、贵阳、深圳等地铁项目中,受电弓碳滑板整体的磨损程度、均匀度都要明显优于正弦波布置方式,有效提高了碳滑板的使用寿命,改善了取流质量。

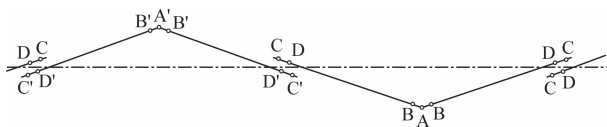


图1 拉出值“八”字布置示意图(关节悬挂点位于线路中心线异侧)

Fig. 1 Schematic diagram of the “八-shaped” layout of the stagger value (joint suspension points on the opposite side of the track)

虽然碳滑板的磨损得到很大改善,但其平整度、均匀度依然没有达到理想情况,还是需要运营

人员定期对其进行打磨处理。为进一步改善受电弓碳滑板磨损均匀度问题,本文基于刚性接触网拉出值“八”字布置方式从拉出值扫动频率大小、中心锚结相邻悬挂点是否设置次大值、关节悬挂点位于线路中心线的同侧和异侧3个方面进行分析,研究刚性接触网悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数差异情况,为优化刚性拉出值“八”字布置方式、提高碳滑板磨损均匀度、改善弓网磨损提供参考。

2.1 悬挂点拉出值扫动频率大小的影响

目前,国内地铁项目中普遍采用的受电弓弓头长度有1 550 mm和1 700 mm两种,碳滑板长度分别为800 mm和1 050 mm,受电弓与接触网的最大滑行范围分别为 ± 400 mm和 ± 500 mm。根据CJJT 96—2018《地铁限界标准》,地铁A型车和B型车车体动态垂直和水平移动距离均为30 mm;A型车受电弓动态水平移动距离为 ± 44 mm,B型车动态水平移动距离为 ± 49 mm。综合考虑车体、受电弓的水平晃动量,地铁A型车和B型车受电弓最大水平晃动量分别为 ± 74 mm和 ± 79 mm。

因此,拉出值“八”字布置方式下,设定刚性接触网悬挂点A最大拉出值为280 mm是合理的,地铁A型车和B型车受电弓碳滑板与接触线间有效滑行范围分别为 ± 354 mm和 ± 359 mm,两种弓头长度的受电弓均不会发生脱弓的事故。对于列车采用受电弓弓头长度为1 700 mm的线路,为了充分利用碳滑板有效工作宽度,刚性接触网悬挂点A最大拉出值可以设定为300 mm。

拉出值“八”字布置方式下悬挂点拉出值扫动频率计算公式为:

$$K_{BB'} = \frac{a_B - a_{B'} + S}{q_{L-B'C'} + q_{L-BC} - 6.6/5.6} \quad (1)$$

$$a_{x_i} = a_{x_{i+1}} - K_{BB'} L_{Bx_i} \quad (2)$$

$$a'_{x_i} = a'_{x_{i-1}} + K_{BB'} L_{B'x'_i} \quad (3)$$

式中:

$K_{BB'}$ ——悬挂点拉出值扫动频率;

a_B ——悬挂点B次大拉出值;

$a_{B'}$ ——悬挂点B'次大拉出值;

$q_{L-B'C'}$ ——悬挂点B'和C'间跨距和;

q_{L-BC} ——悬挂点B和C间跨距和;

a_{x_i} ——线路下侧锚段悬挂点拉出值;

a'_{x_i} ——线路上侧锚段悬挂点拉出值;

S ——锚段关节间距;

L_{Bx_i} ——悬挂点 x_{i+1} 和 x_i 间距;

$L_{B'x'_i}$ ——悬挂点 x'_i 和 x'_{i-1} 间距。

其中,选用的汇流排端部弯头长度分为 7.50 m 或 5.95 m 两种,对应锚段关节重叠段长度分别为 6.6 m 和 5.6 m。从式(1)中可知悬挂点拉出值的扫动频率 $K_{BB'}$ 大小与次大拉出值 a_B 和 $a_{B'}$ 、锚段关节间距 S 和锚段长度有关系。因此,在次大拉出值、锚段长度和端部弯头选定的情况下,影响拉出值扫动频率的因素只有锚段关节间距 S 。

结合杭州至富阳城际铁路(以下简称“杭富线”)工程拉出值布置方式进行分析。本工程线路全长为 23.5 km,正线总悬挂点数约为 6 900 个,列车采用弓头长度为 1 550 mm 的受电弓,锚段关节悬挂点分布在线路中心两侧。同时约定:当锚段关节间距 >260 mm 时,关节悬挂点最大拉出值 ≤ 250 mm;当锚段关节间距 ≤ 260 mm 时,关节悬挂点最大拉出值 ≤ 200 mm。采用定量统计方法,研究不同拉出值扫动频率下,悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数差异,从而得出有利于碳滑板磨耗均匀度最优布置方案。

方案 1:设置杭富线工程拉出值布置方案,绝缘锚段关节间距为 260 mm,非绝缘锚段关节间距为 200 mm,锚段关节悬挂点最大拉出值 ≤ 200 mm,且保持相邻两锚段 B-B' 内悬挂点拉出值扫动频率一致,约为 2.5 ~ 3.5 mm/m。得到全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数统计柱形图,如图 2 所示。

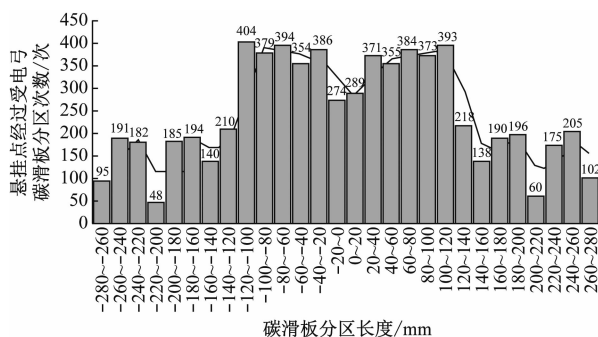


图2 方案1悬挂点经过碳滑板不同位置的次数统计结果

Fig. 2 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 1

方案 2:通过增加锚段关节间距 S 值,设定绝缘和非绝缘锚段关节间距均为 400 mm,增大悬挂点拉出值扫动频率值。且保持相邻两锚段 B-B' 内悬挂

点拉出值扫动频率一致,约为 3.8 ~ 4.5 mm/m。得到全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数统计柱形图,如图 3 所示。

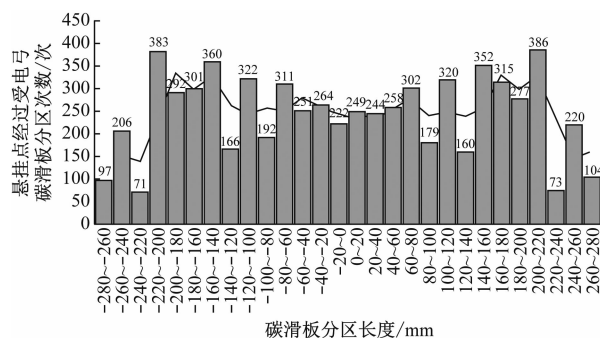


图3 方案2悬挂点经过碳滑板不同位置的次数统计结果

Fig. 3 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 2

方案 3:设定绝缘和非绝缘锚段关节间距均为 400 mm,改变关节处悬挂点拉出值扫动频率值。对锚段关节处相邻两锚段第一个悬挂点 C 和 C' 拉出值赋值 200 mm,对称布置在受电弓中心两侧。此时关节处悬挂点拉出值扫动频率与相邻锚段 B-D 和 B'-D' 其他悬挂点拉出值扫动频率不一致。得到全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数统计柱形图,如图 4 所示。

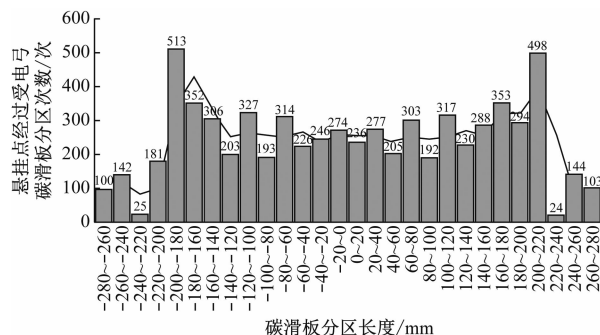


图4 方案3悬挂点经过碳滑板不同位置的次数统计结果

Fig. 4 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 3

对图 2 与图 3 进行对比分析可知:增大悬挂点拉出值扫动频率,有助于改善受电弓碳滑板磨耗的均匀度,可避免长时间运行情况下在受电弓中间范围形成残月状凹坑。对图 3 和图 4 进行对比分析可知:保持关节悬挂点与相邻锚段内悬挂点拉出值扫动频率一致性非常重要,对锚段关节处悬挂点赋

值,使其对称布置在受电弓中心两侧,会导致受电弓两侧 $\pm 180 \sim \pm 200$ mm 范围内经过悬挂点的次数增多,长时间运行情况下会导致受电弓两侧局部出现凹槽,恶化弓网磨损。文献[4]根据实际项目中受电弓碳滑板剩余厚度的统计结果,也充分证明了关节处悬挂点与相邻锚段其他悬挂点拉出值扫动频率一致有助于改善碳滑板磨损均匀度。

2.2 中心锚结两侧相邻悬挂点拉出值是否设置为次大值的影响

方案4:设定绝缘和非绝缘锚段关节间距均为400 mm,且中心锚结两侧相邻悬挂点拉出值不赋值为250 mm。确保相邻两锚段 A-A'内悬挂点拉出值扫动频率一致,约为4.5~5.0 mm/m。得到全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同区间位置的次数统计柱形图,如图5所示。

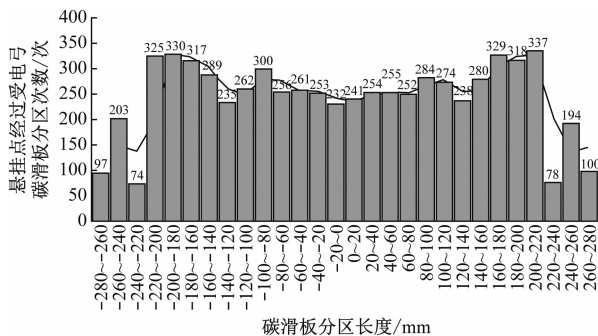


图5 方案4悬挂点经过碳滑板不同位置次数统计结果
Fig. 5 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 4

方案5:设定绝缘和非绝缘锚段关节间距均为500 mm,且中心锚结两侧相邻悬挂点拉出值不赋值为250 mm。确保相邻两锚段 A-A'内悬挂点拉出值扫动频率一致,约为5.0 mm/m。得到全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同区间位置的次数统计柱形图,如图6所示。

对图3和图5对比分析可知:确保相邻两锚段 A-A'内悬挂点拉出值扫动频率的一致性,对改善受电弓碳滑板磨损均匀度有重要的促进作用。因全线锚段长度不一致,对中心锚结两侧相邻悬挂点赋值后会导致拉出值扫动频率在中心锚结附近频繁波动,进而使碳滑板磨损不均。为了更好地改善弓网关系,全线刚性悬挂布置应尽量做到等锚段布置,这有利于悬挂点拉出值扫动频率的一致性。对图5和图6对比分析可知:无限制加大锚段关节间

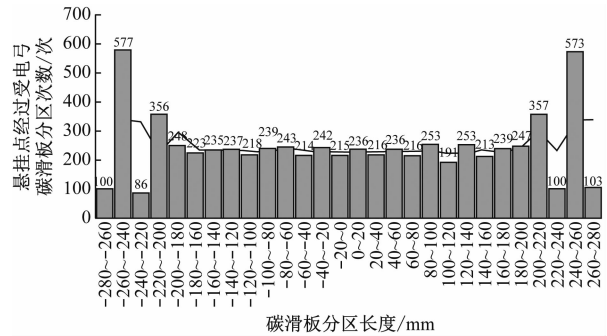


图6 方案5悬挂点经过碳滑板不同区间位置的次数统计
Fig. 6 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 5

距,增大拉出值扫动频率,虽然可以使受电弓碳滑板中间大部分区域磨损更加均匀,但会导致悬挂点经过碳滑板边缘区间($\pm 240 \sim \pm 260$ mm)的次数几乎成倍增加,在边缘附近形成较深凹槽,很难通过人工打磨调整碳滑板平整度,严重影响受电弓的使用寿命。同时,关节间距过大更易使晃动的受电弓发生偏斜,过关节时,偏斜的受电弓与另一支锚段接触线会发生过度磨损。因此,关节间距大小选择要综合考虑受电弓具体型号。

2.3 锚段关节悬挂点位于线路同侧的影响

上述刚性接触网拉出值布置方案均是研究锚段关节悬挂点分布在线路中心线两侧时的情况,从悬挂点经过受电弓不同位置的次数分布图可以发现:悬挂点经过受电弓 ± 220 mm 范围分布相对均匀,在 $\pm 280 \sim \pm 220$ mm 范围分布差异较大。针对这种现象,探索研究锚段关节悬挂点位置对此分布的影响。

方案6:关节悬挂点位于线路中心线同侧示意图如图7所示。在悬挂点 A 最大拉出值为280 mm、关节最大间距 ≤ 260 mm、关节悬挂点 C 最大拉出值 ≤ 280 mm 的情况下,全线悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的次数的分布情况,如图8所示。

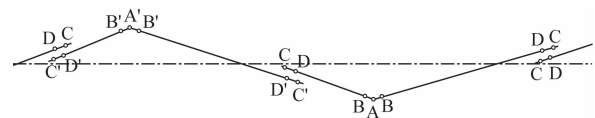


图7 拉出值“八”字布置示意图(关节悬挂点位于线路同侧)
Fig. 7 Schematic diagram of the "八-shaped" layout of the stagger value (suspension points at the joints on the same side of the track)

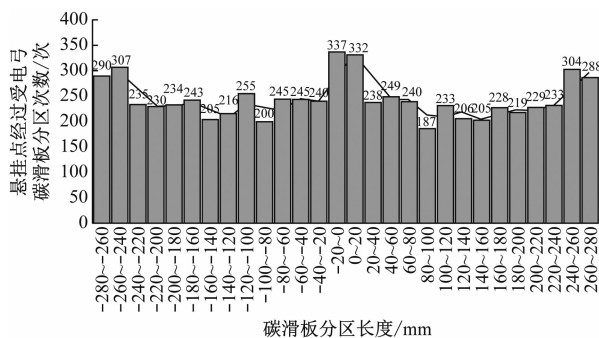


图8 方案6悬挂点经过碳滑板不同位置次数统计结果

Fig. 8 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 6

对图5和图8对比分析可知:当锚段关节悬挂点于线路同侧布置时,通过合理控制关节间距和关节处悬挂点拉出值的大小,能够确保相邻两锚段A'-A内悬挂点拉出值扫动频率一致,可以使悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的分布更均匀,使碳滑板磨耗均匀度更好,若配合人工对碳滑板进行打磨维护,则能有效提高碳滑板的使用寿命,减少运营维护成本。这一结论还需通过实际项目进行检验。

3 结语

电气磨耗和机械磨耗是影响刚性接触网弓网磨耗的主要原因。可以选用耐磨性更好、导电率相当的接触线材质,以及通过优化列车加速段取流分布来改善电气磨耗。适度增大悬挂点拉出值扫动频率、确保相邻两锚段内悬挂点扫动频率的一致性,有助于改善碳滑板磨耗均匀度。当关节悬挂点布置在线路中心线同侧时,理论上可以使碳滑板磨

耗更均匀。上述研究结论可为改善弓网磨耗、提高碳滑板磨耗均匀度提供参考,也有利于采用AC 25 kV交流供电制式的地下段采用架空刚性接触网的应用推广。

参考文献

- [1] 李静,周宁,邹栋,等. 刚性接触网拉出值布置方式对弓网受流性能影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 82.
LI Jing, ZHOU Ning, ZOU Dong, et al. Influence of rigid catenary stagger layout modes on current collection performance of pantograph catenary[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12): 82.
- [2] 尹魁元. 接触网刚性悬挂拉出值布置方式比较[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 81.
YIN Kuiyuan. On the stagger layout arrangement of overhead rigid suspension[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 81.
- [3] 陈显志,陈勇,陈建君,等. 刚性接触网平面布置优化结构: CN 102910089A[P]. 2013-02-06.
CHEN Xianzhi, CHEN Yong, CHEN Jianjun, et al. Optimization of the planar arrangement of rigid overhead contact system structure: CN 102910089A[P]. 2013-02-06.
- [4] 曾纯昌. 刚性悬挂拉出值布置对受流质量的影响[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(1): 68.
ZENG Chunchang. Current collection quality affected by the rigid catenary stagger arrangement [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(1): 68.

· 收稿日期:2023-06-18 修回日期:2023-10-25 出版日期:2025-05-10

Received:2023-06-18 Revised:2023-10-25 Published:2025-05-10

· 第一作者:陈显志,高级工程师,11986378@qq.com

通信作者:燕振刚,高级工程师,1184230657@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

(上接第 225 页)

LANG Peng. Study on collision dynamics of current collector/three-rail elbow[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

- [7] 刘子知,孙福臻. 基于受流器参数化模型的靴轨动态接触仿真[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(6): 36.

LIU Zizhi, SUN Fuzhen. Dynamic contact simulation of shoe-rail system based on parametric model of current collector[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(6): 36.

- [8] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271.

GONG Maoguo, JIAO Licheng, YANG Dongdong, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 271.

- [9] 宁晓芳. 受流器/第三轨系统受流质量评价指标研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

NING Xiaofang. Study on current collector/third rail system current collector quality evaluation index[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

· 收稿日期:2023-01-04 修回日期:2023-02-04 出版日期:2025-05-10

Received:2023-01-04 Revised:2023-02-04 Published:2025-05-10

· 通信作者:阮杰,副教授,eric_ru007@sina.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