

杭州地铁5号线弓网异常磨耗分析与应对策略实践效果的研究

李晓磊 叶申 郑剑 杨志钢

杭州杭港地铁五号线有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：本文围绕杭州地铁5号线在2024、2025年冬季发生的两起弓网异常磨耗事件展开系统性分析。通过对这两起事件进行时序剖析、环境因素关联性验证以及技术应对措施效果评估，明确了轨行区湿度降低和接触线边缘状态是引发异常磨耗的重要因素。研究推行了以接触线 $45^\circ \pm 5^\circ$ 倒角处理和轨行区湿度调控为核心的综合应对策略，成功将碳滑板磨耗率从27.49mm/万公里降至6.85mm/万公里，有效消除了因接触线拉丝并导致接地的故障。

对比分析显示，系统化、多专业协同应对模式相较于单一技术措施，效率提升明显。该实践成果不仅解决了杭州地铁5号线的实际难题，也为国内同类轨道交通系统提供了成功案例借鉴，对完善弓网系统安全运行保障具有重要意义。

【关键词】：地铁；弓网系统；异常磨耗；接触线倒角；湿度调控；应对策略

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.083

1 引言

弓网系统作为城市轨道交通电力牵引的核心组成部分，其运行状态直接影响列车供电质量和运营安全。碳滑板异常磨耗是弓网系统常见故障之一，严重时可导致接触线损伤、供电中断甚至行车事故。国内外研究表明，环境湿度、接触线几何参数、受电弓动态特性等因素均与碳滑板磨耗密切相关^[1]。杭州地处亚热带季风气候区，冬季干燥低温环境对弓网系统提出了特殊挑战。

杭州地铁5号线作为连接城西科创大走廊与主城区的重要线路，承担着繁重的客运运输任务，其弓网系统的稳定运行直接关系到全线运营安全与运输效率。2024年—2025年冬季，该线路连续发生两起弓网异常磨耗事件，不仅大幅增加设备维护成本，更对线路运营安全构成严重威胁。与以往单一聚焦设备参数优化的研究不同，本研究立足实际，注重多因素综合分析 with 系统性解决方案构建，将环境因素纳入弓网系统整体管控体系，突破传统单一设备层面的分析局限。基于两次异常磨耗事件的详细监测数据、现场处置记录，系统剖析故障发生机理，科学验证应对策略的实施效果，为国内轨道交通行业弓网系统异常磨耗治理提供实证参考与技术支持。

2 杭州地铁5号线两次弓网异常磨耗的基本情况

2.1 2024年第一次异常磨耗事件

2024年冬季，杭州地铁5号线出现首次弓网异常磨耗现象。通过弓网状态在线监测系统监测及现场人工巡检发现，碳滑板磨耗率较正常运营水平显著攀升，弓网燃弧率同步明显上升，部分区段接触线表面出现不规则异常磨损痕迹，个别区段甚至出现接触线拉丝现象，并引发接地跳闸故障，严重干扰线路正常运营秩序。为快速遏制异常磨耗恶化态势，恢复弓网系统正常运行状态，维修部门立即启动应急处置机制，开展全面排查与专项整治工作，具体处置措施如下：

接触线系统性打磨：自2024年12月26日起，组织专业

运维团队对全线接触线表面实施系统性打磨作业，重点清除接触线表面已产生的毛刺、轻微拉丝痕迹及不均匀磨损部位，恢复接触线接触面光滑度，降低接触线对碳滑条的刮削磨损；后续分别于1月13日—17日、2月6日，针对性组织全线或全线车站重点区段的二次打磨与补强打磨作业，确保接触线表面状态满足运营标准。

碳滑条紧急更换：通过对故障区段碳滑条的批次溯源与质量排查，精准识别出存在质量隐患的1217批次碳滑条，并于1月11日—13日对该批次碳滑条实施紧急全面更换；后续逐步将全线所有问题批次碳滑条替换为质量合格的新批次产品，从设备源头减少异常磨耗诱因。

碳滑板系统性打磨：在异常磨耗事件应对过程中，现场检修人员发现部分碳滑板表面出现明显金属色附着物。经技术检测与分析，该附着物主要来源于弓网异常摩擦过程中，从接触线上剥离的金属微粒；此类金属微粒在碳滑板表面沉积后，不仅改变了碳滑板原有物理特性（如硬度、表面粗糙度），加剧碳滑板与接触线之间的非正常磨耗，还可能形成局部导电热点，进一步诱发接触线拉丝、弓网离线等连锁故障。为迅速遏制磨耗恶化趋势、恢复弓网受流质量，车辆维修团队对所有出现金属色附着的碳滑板，实施专项表面打磨作业，彻底清除表面附着物，恢复碳滑板正常工作状态。

磨耗严重接触线更换：1月14日—27日期间，对全线接触线磨耗状态实施全面检测，对磨耗率超过安全限值（尤其是已发现的多处磨耗率 $>30\%$ 的锚段）的接触线，采取局部更换或整锚段更换措施，从根本上消除接触线过度磨耗引发的断裂、接地等安全高风险点。

受电弓参数调整：1月14日—20日期间，通过分梯度测试调整受电弓静态接触压力，持续监测并分析不同压力参数下，碳滑板磨耗速率与弓网接触状态的变化规律，尝试寻找受电弓最优工作参数，减少因接触压力不合理导致的异常磨耗。

经过近3个月的持续跟进处置与动态优化调整，弓网系统运行关系逐步恢复正常，碳滑板磨耗率降至安全运营范围，未再发生接触线拉丝及接地跳闸故障。同时，结合行业同类故障处置经验及本次事件处置过程中的数据积累，运维团队发现，冬季低温干燥季节，弓网异常磨耗发生概率显著高于其他季节，初步判断环境温湿度是影响弓网运行状态的重要因素，但未开展系统性试验验证。

耗率降至正常运营水平，本次异常磨耗故障得到彻底遏制。

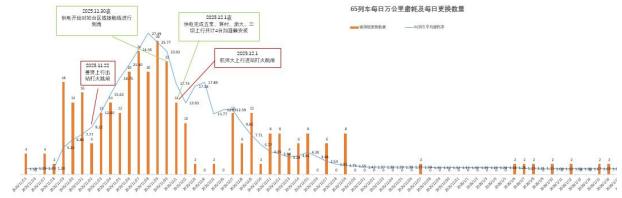


图2 2025年第二次异常磨耗各阶段



图1 2024年第一次异常磨耗各阶段

2.2 2025年第二次异常磨耗事件

2025年11月19日至2026年1月13日，杭州地铁5号线再次发生弓网异常磨耗事件，结合2024年异常磨耗处理及同行业相关经验，运营单位迅速成立专项工作组，启动异常磨耗原因分析与针对性处置工作，严防故障进一步扩大蔓延。根据本次异常磨耗事件的发展历程、核心特征及处置效果，可划分为三个典型阶段（图2）：

3 两次弓网异常磨耗的分析与应对策略

3.1 应对策略比较

阶段①（异常磨耗初期：2025.11.19-11.22）：受电弓碳滑板异常磨耗区域呈逐步扩大趋势。此阶段恰逢杭州地区遭遇大幅降温降湿天气，空气平均含湿量从 $9.63\text{g}/\text{m}^3$ 急剧降至 $4.24\text{g}/\text{m}^3$ ，低温干燥环境导致弓网接触界面润滑机制失效，黏着磨损与磨粒磨损加剧^[1]，为2024年异常磨耗的环境因素猜测提供了直接实证支撑。

序号	1	2
类型	通用措施	专项措施
2024年整治行动	1.高温区域限速，减少弓网动态冲击； 2.碳滑板维护：表面打磨加湿、车载摄像头轮巡甄别异常磨耗滑板、提高更换阈值； 3.接触线维护：车站区域接触线打磨（5轮）；更换严重磨耗锚段接触线（13个锚段）。	1.测试车辆不同取流模式，观察对磨耗的影响（效果不明显）； 2.测试调整受电弓静态压力，尝试优化接触状态（效果不明显）； 3.测试小交路跑行影响，排查运营组织对磨耗的作用（与全线磨耗接近，无明显关联）； 4.监造碳滑板保供，保障应急更换需求（应急手段，不解决根本诱因）。
2025年整治行动	1.高温区域限速，延续通用防控措施； 2.碳滑板维护：与第一次措施相同，保持维护标准一致性； 3.接触线维护：车站区域接触线打磨（5轮）；更换严重磨耗锚段接触线（9个锚段），因处置及时，严重磨耗锚段数量减少。	1.组织登乘巡视，加密弓网状态监测频次，精准掌握磨耗发展态势； 2.安装隧道加湿器4台（自2025年12月1日起），针对性改善轨行区低湿度环境； 3.全面推行接触线 $45^\circ\pm 5^\circ$ 倒角处理（自2025年11月30日起），消除接触线边缘几何缺陷。
备注	通用措施可有效控制情况进一步恶化，缓解异常磨耗态势，但未能从根本上解决问题，属于“治标”措施。	第二次专项措施针对性解决了环境湿度不足和设备几何缺陷两大问题，实施后效果显著。

阶段②（问题爆发期：2025.11.22-12.1）：碳滑板磨耗率从 $9.22\text{mm}/\text{万公里}$ 飙升至 $27.49\text{mm}/\text{万公里}$ ，并维持在高位运行；同时接触线出现明显拉丝现象，最终导致2次正线跳闸事故。拉丝现象的本质是接触线边缘尖锐凸起引发的“切削式机械磨损”作用，叠加弓网间隙放电产生的电弧烧蚀，形成恶性循环^[3]。期间受三次寒潮影响，碳滑板异常磨耗面呈现动态变化特征。

阶段③（应对改善期：2025.12.1-2026.1.13）：在沿用2024年接触线打磨、碳滑板维护等常规处置措施的基础上，专项工作组结合本次事件的环境诱因及设备关键问题，杭州地铁5号线创新采取针对性处置措施：于12月1日在正线四个车站加装加湿器，以改善轨行区空气湿度，缓解低湿度环境对弓网接触界面的不利影响；自11月30日起，组织接触网团队对全线接触线实施 $45^\circ\pm 5^\circ$ 倒角处理，彻底消除接触线边缘尖锐凸起，从根源上解决“切削式机械磨损”问题。各项措施实施后，碳滑板磨耗率呈现持续稳步下降趋势，接触线拉丝现象彻底消除，弓网系统运行逐步趋于稳定；至2026年1月13日，碳滑板磨

3.2 实施效果评估

2025-2026年第二次事件的系统化应对策略取得了显著效果(图3):

磨耗率控制:碳滑板磨耗率从峰值 27.49mm/万公里逐步下降, 12月15日降至 14.32mm/万公里, 2026年1月13日进一步降至 1.3mm/万公里, 达到并优于国家标准《城市轨道交通车辆用碳滑板》GB/T 38955-2020 规定的正常磨耗水平($\leq 1.5\text{mm/万公里}$)。

故障消除:接触线拉丝现象在实施倒角处理后完全消失, 2025年12月8日至研究期末(2026年1月13日)期间未发生任何弓网跳闸事件, 运营安全性得到根本性提升。倒角处理通过优化接触应力分布, 避免了“切削式机械磨损”作用对碳滑板的损伤, 同时降低了弓网放电概率^[2]。

长期效果:与2024年同期相比, 碳滑板使用寿命延长2.3倍, 维护成本降低约180万元/季度。

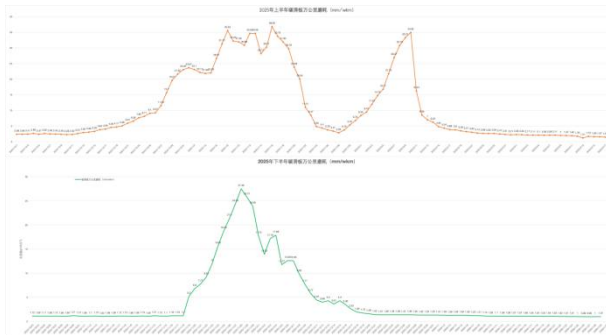


图3 2024年、2025年异常磨耗(碳滑板)对比

4 关键技术创新与原因分析

4.1 关键技术突破

(1) 接触线倒角角度优化: 为解决接触线边缘毛刺引发的“切削式机械磨损”效应, 实践依据《零件倒圆与倒角》(GB/T6403.4-2008) 标准, 选择了 45° 倒角作为优化方案。杭州地铁5号线实践数据显示, 采用 45° ± 5° 的倒角处理后, 拉丝现象基本消除, 异常磨耗被有效遏制。该工艺使接触应力分布更均匀, 避免了局部应力集中对碳滑板的快速损伤, 进而降低了接触网受损的几率。



图4 接触线边角处理前、处理后对比

(2) 环境-设备联动调控: 本研究创新性地构建了“轨行区湿度调控”与“接触线几何优化”的双维度协同控制策略。

数据表明, 适当增加湿度(如维持空气含湿量在合理范围)可以在接触界面形成吸附水膜, 减轻黏着磨耗; 同时促进材料表面氧化, 隔离金属对磨, 并降低接触电阻以减少电弧烧蚀^[3]。为精确分析, 本研究采用“空气含湿量”替代“相对湿度”, 以排除温度变化的干扰, 明确验证了低湿度与异常磨耗的直接关联。



图5 空气含水率变化与异常磨耗期间碳滑板数据对比

4.2 原因综合分析

基于两次事件的对比分析, 弓网异常磨耗的主要原因可归纳为以下三个方面:

(1) 环境因素: 冬季低湿度导致接触界面润滑与导电机制双重失效。事件期间, 杭州地区空气含湿量从 9.63g/m³ 降至 4.24g/m³ 的低位。低湿度环境下, 弓网接触界面无法形成有效吸附水膜, 铜颗粒与磨屑易附着在接触表面, 导致黏着磨耗与磨粒磨耗加剧, 形成犁沟状磨耗痕迹^[6]。同时, 低湿度使接触电阻增大, 弓网间易产生间隙放电, 电弧高温进一步破坏碳滑板表面碳晶层, 形成“机械磨耗+电气磨耗”的恶性循环^[3]。

(2) 设备关键因素: 接触线边缘几何缺陷对碳滑板表面形成“切削式机械磨耗”是内在诱因。接触线工作面边缘存在的毛刺、锐角等几何缺陷, 是引发异常磨耗的关键设备因素。在低湿度条件下, 这些尖锐结构与碳滑板接触时产生局部应力集中^[4](应力峰值可达正常接触的3-5倍), 导致碳滑板表面材料快速剥离。这与《电力牵引用接触线第1部分: 铜及铜合金接触线》GB/T 12971.1-2023 中第6.9条要求: 铜和铜合金接触线表面应光洁, 无裂纹、伤痕、毛刺、折边、硬弯、扭曲等缺陷的要求一致。

(3) 系统耦合因素: 刚性悬挂+高牵引电流的叠加效应。杭州地铁5号线采用刚性悬挂接触网, 其弹性均匀性较柔性悬挂较差, 受电弓动态接触压力波动更为明显^[5]。叠加出站加速区段牵引电流达 3500A 的高负荷特性, 进一步加剧磨耗: 一是高电流产生的焦耳热使接触线温度升高, 材料硬度下降, 机械磨耗加剧; 二是动态接触压力波动导致弓网频繁出现瞬时脱离, 引发电弧放电, 电气磨耗占比进一步提升; 三是刚性悬挂的波磨效应使接触线表面形成周期性凹凸结构, 受电弓通过时产生高频冲击, 加速碳滑板局部磨耗^[7]。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) 环境因素关键作用：杭州地区冬季干燥气候（空气含湿量 $<5\text{g}/\text{m}^3$ ）是引发弓网异常磨耗的主要外部因素，两次事件的时间节点与湿度变化高度吻合，证实了环境-设备交互作用理论。

(2) 设备特性具决定性影响：接触线工作面边缘几何状态对碳滑板磨耗起关键性作用， $45^\circ \pm 5^\circ$ 倒角可有效消除“切削式机械磨耗”，完全解决拉丝问题。

(3) 系统化应对策略优越性：单一技术措施（如仅调整接触压力）效果有限，而环境调控与设备处理相结合的综合策

略提供了有效弓网异常磨耗的处置模式。

5.2 展望

(1) 智能化预警：开发基于大数据的弓网状态预测模型，结合环境参数实时监测，实现异常磨耗的早期预警。

(2) 材料优化：研究适应杭州气候特点的碳滑板和接触线新材料，提高在干燥环境下的耐磨性和导电性。

(3) 标准体系完善：基于本研究成果，参与修订国家和行业标准，将环境因素纳入弓网系统设计和维护标准体系。

(4) 跨气候区验证：在不同气候条件的城市轨道交通系统中验证本技术方案的适用性，形成区域性应对策略指南。

参考文献：

- [1] 邹栋,钟舜聪,等.城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究[J].机械工程学报,2023,59(10):152-178.
- [2] 王彩文,陈康康,林坤,等.轨道交通电客车碳滑板圆角倒角与磨耗率的相关性研究[J].运输经理世界,2025(6).
- [3] 张永振,杨正海,上官宝.载流摩擦的研究现状与挑战[J].自然杂志,2014,36(4):256-263.
- [4] Stress Concentration Factor-an overview[EB/OL].ScienceDirect Topics.
- [5] 陈伟,陈光雄,李红,等.弓网振幅对纯碳及浸金属碳滑板载流摩擦磨损性能的影响[J].润滑与密封,2015,40(9):25-29.
- [6] 孙逸翔.相对湿度对纯铜载流磨损的影响[D].洛阳:河南科技大学,2017.
- [7] 陈忠华,李兵红,陈明阳,等.弓网滑动电接触电磁热力耦合效应研究进展[J].电工技术学报,2023,38(10):2777-2793.