

地铁刚性接触网异常磨耗分析与防治措施研究

庄道春 施海涛

中铁电气化局集团有限公司 北京市 100036

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19769

[摘要] 随着城市轨道交通运营里程的快速扩张,刚性接触网作为地铁列车供电的核心载体,其异常磨耗问题在多线路长期运营中愈发突出,具体表现为受电弓碳滑板磨耗速率超过 3mm/万公里(超正常水平 1.5 倍)、接触线出现 50-200mm 波长的波磨及单侧偏磨(偏磨量>2mm),极端场景下还会诱发电弧短路与弓网失效故障,不仅严重威胁行车安全,更导致运维成本同比增加 3-5 倍。

本文结合国内重庆地铁 2 号线(山地地形)、广州地铁 3 号线(高温高湿隧道)、西安地铁 4 号线(碱性粉尘环境)、北京地铁 6 号线(冬季低温)等典型线路的现场实测数据,以弓网系统力学-电学-热学耦合作用为核心,系统解析接触网结构缺陷、受电弓参数失配、环境阈值突破及运维协同不足等多维度的成因机理,提出“源头优化-智能监测-精准修复-协同管控”的全周期防治体系,为地铁供电系统高质量运维提供技术支撑。

[关键词] 地铁; 刚性接触网; 异常磨耗; 弓网耦合; 智能监测; 精准修复; 协同管控

1 引言

地铁作为城市公共交通的骨干,2024 年国内运营里程已突破 1.3 万公里,其中 80% 以上的地下线路采用刚性接触网供电。该系统因结构简洁、载流能力强(额定载流 1200A、短时过载 2000A)、运维便捷等优势成为主流选择,但在长期运营中,受材料老化、弓网动态作用及环境侵蚀等因素影响,异常磨耗问题频发。据北京地铁 6 号线、沈阳地铁 1 号线 2023-2024 年度运维数据统计,异常磨耗导致接触线寿命从设计的 30 年缩短至 15 年(降幅 50%),碳滑板更换频次从每 6 个月 1 次增加至每 3 个月 1 次(增幅 2 倍),单次弓网故障平均造成 2.5 小时列车延误,因此开展异常磨耗机理与防治研究对保障线路运营效率具有关键意义。

2 地铁刚性接触网异常磨耗的现状

近年来,国内多座城市地铁线路的刚性接触网异常磨耗问题呈现“多线路、高频次、复合型”特征,尤其在冬季低温(-5℃以下)与高速(120km/h 及以上)运营场景下更为显著:

2.1 典型城市线路案例

北京地铁 6 号线 2023-2024 年冬季(-5℃以下),碳滑板磨耗速率达 4.8mm/万公里,接触线波磨深度最大 0.3mm,较非冬季时段磨耗速率提升 2.1 倍;

广州地铁 3 号线因隧道内高温高湿环境,接触线偏磨量超 3mm 的区段占比达 15%,锚段关节处偏磨现象最为集中;

重庆地铁 2 号线受山地地形影响(线路最大坡度 30‰),锚段关节处接触线电弧烧蚀黑斑发生率达 3.2 次/公里,较平原线路(1.1 次/公里)高 2 倍;

西安地铁 4 号线因隧道内碱性粉尘堆积,接触线磨粒磨损速率达 0.15mm/万公里,较清洁环境(0.08mm/万公里)高 1.8 倍。

2.2 异常磨耗的复合型特征

单一磨耗类型占比不足 30%,多数场景表现为“机械磨耗+电气损伤”或“环境腐蚀+波磨”的复合形态:

沈阳地铁 1 号线冬季:接触线因冻胀卡滞引发波磨(波

长 80-150mm、深度 0.2-0.3mm),同时伴随电弧烧蚀(黑斑面积 5-8mm²),碳滑板表面同步出现熔融凹坑(深度 2-4mm)与机械沟槽(宽度 3-5mm);

西安地铁 4 号线:接触线同时存在磨粒磨损(表面粗糙度 Ra=2.8 μm)与电弧烧蚀(烧蚀点密度 2 个/米)的区段占比达 22%,碳滑板磨耗呈现“不均匀沟槽+局部崩裂”特征。

3 异常磨耗成因分析

刚性接触网异常磨耗是多因素动态耦合的结果,通过弓网系统的力、电、热交互不断加剧,核心成因可分为四类:

3.1 接触网自身特性缺陷

3.1.1 设计布置不合理

正弦波布置方式下,受电弓碳滑板与接触线的滑动摩擦路径存在显著差异。仿真数据显示,正弦波拉出值布置时,碳滑板中部磨耗段与边缘磨耗段的摩擦距离差异达 2.3 倍,导致碳滑板表面形成“中间薄、两侧厚”的非均匀磨耗形态,进而引发接触线单侧受力集中,偏磨风险增加 60%。



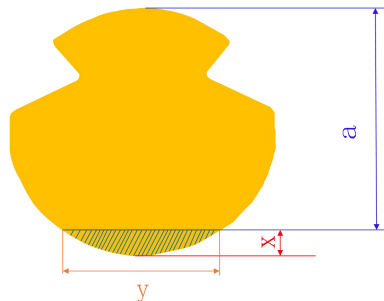
3.1.2 结构参数偏差

安装阶段的参数误差直接诱发异常磨耗:接触线嵌入汇流排深度偏差>1mm 时,接触线与汇流排的受力传递不均,局部应力集中系数达 1.8;拉出值偏差超 ±30mm 时,受电弓碳滑板单侧接触比例超 70%,偏磨速率提升 2 倍;汇流排定位线夹膨胀系数>2.4×10⁻⁵℃⁻¹ 时,冬季温差>20℃会导致线夹卡滞,形成刚性硬点,诱发摩擦自激振动,接触线波磨形成周期从正常的 5 年缩短至 1.5 年。锚段关节非工

作支抬高量不足 ($<2\text{mm}$) 会导致碳滑板撞击接触线, 形成局部集中磨耗。

3.1.3 材料与截面影响

大截面接触线 (y 值 $>8\text{mm}$) 虽载流能力提升, 但侧棱锋利度增加, 与碳滑板形成“互切效应”, 碳滑板磨耗速率提升 1.5 倍; 银铜合金接触线抗拉强度 $<360\text{MPa}$ 时, 在电弧热效应 (温度 $>3000^\circ\text{C}$) 与机械压力 ($>80\text{N}$) 共同作用下, 磨耗速率较高强度材质高 1.2 倍; 汇流排表面异物堆积使摩擦系数从 0.12 升至 0.18 时, 摩擦自激振动振幅增加 3 倍, 波磨深度超 0.2mm 的区段占比提升至 25%。



a — 接触线磨耗后剩余厚度

x — 接触线磨耗厚度

y — 接触线磨耗截面宽度

3.2 受电弓参数匹配失准

3.2.1 机械参数偏差

接触压力波动: 受电弓抬升压力偏离标准值 $\pm 10\text{N}$ 时, 接触力稳定性下降 40%, 压力过高 ($>90\text{N}$) 导致碳滑板机械磨耗速率增加 1.3 倍, 压力过低 ($<70\text{N}$) 则使离线燃弧频次提升 3 倍;

碳滑板水平度偏差: 双碳板弓头水平差 $>1\text{mm}$ 时, 单侧受力占比超 80%, 碳滑板偏磨率达 65%, 且接触线单侧磨耗量超双侧均匀磨耗的 2 倍;

动态跟随性不足: 受电弓阻尼系数 $<500\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 时, 在 $120\text{km}/\text{h}$ 速度下无法适配接触线 $\pm 5\text{mm}$ 的起伏量, 接触不良率较低速 ($80\text{km}/\text{h}$) 时段增加 30%, 拉弧能量超 200J 的频次提升 2.5 倍。

3.2.2 材料性能差异

浸金属碳滑板 (硬度 96HS 、电阻率 $8\mu\Omega\cdot\text{m}$) 与纯碳滑板 (硬度 65HS 、电阻率 $35\mu\Omega\cdot\text{m}$) 的耐磨性能差异显著, 混用于同一线路时, 因磨耗速率不同导致弓网接触高度差超 1.5mm , 接触线局部磨耗量增加 40%; 新碳滑板未预打磨时, 表面粗糙度 R_a 值达 $3.2\mu\text{m}$, 较稳定期 ($R_a=0.8\mu\text{m}$) 的接触不良率增加 40%, 拉弧频次提升 3 倍。

3.3 环境与运行条件影响

3.3.1 环境参数阈值突破

温湿度: 空气湿度 $<8\text{g}/\text{m}^3$ 时, 碳滑板表面润滑膜破裂, 磨耗速率倍增; 冬季温度骤降 (-5°C 以下) 使接触线收缩量超 $3\text{mm}/100\text{m}$, 汇流排线夹卡滞率达 30%, 沈阳地铁 1、2 号线、北京地铁 6 号线异常磨耗集中发生于该时段。

粉尘与腐蚀: 隧道内粉尘颗粒物 (直径 $>5\mu\text{m}$ 、浓度 $>$

$50\text{mg}/\text{m}^3$) 附着时, 接触线磨粒磨损速率提升 1.8 倍, 且粉尘中 SiO_2 成分 (占比 65%) 会加剧接触线表面划伤; 隧道内腐蚀性水蒸气 ($\text{pH}<5.5$) 在汇流排表面结成凝露, 或接触网上方渗漏水滴落在汇流排上, 在电气作用下加速汇流排腐蚀 (腐蚀速率 $0.12\text{mm}/\text{年}$), 导致汇流排夹持力下降 25%, 接触线嵌入松脱形成硬点, 诱发波磨、偏磨甚至燃弧。

3.3.2 运行状态变化

速度提升: 运营时速从 $80\text{km}/\text{h}$ 增至 $120\text{km}/\text{h}$ 时, 弓网摩擦速度从 $0.022\text{m}/\text{s}$ 升至 $0.033\text{m}/\text{s}$, 空气动力载荷波动幅度增加 30%, 接触压力波动幅度增加 30%, 波磨风险上升。

电流波动: 大电流出站区段 (电流 $>1000\text{A}$) 连续燃弧概率达 15%, 当电弧能量达 3800J 时, 接触线烧蚀深度超 0.5mm , 且烧蚀区域的耐磨性下降 50%, 形成“烧蚀 - 磨耗”恶性循环。

3.4 运维管理机制不足

检修精度不足: 人工测量接触线导高、拉出值时误差超 $\pm 10\text{mm}$, 碳滑板平整度调整偏差 $>0.5\text{mm}$, 导致弓网匹配不良;

跨专业协同缺失: 轨道轨距调整 $\pm 2\text{mm}$ 未同步通知接触网专业时, 接触线导高偏差超 5mm , 广州地铁 3 号线曾因该问题导致 100m 区段接触线偏磨量超 2.5mm ; 弓网专业间信息不畅通, 无法及时处置早期异常, 使磨耗问题从局部扩散至全线。新碳滑板更换后 1 周内表面平整度不足, 弓网接触不良率较稳定期增加 40%, 拉弧频次显著上升。

监测滞后: 传统人工检测效率低 (单公里耗时 >2 小时), 无法及时捕捉早期异常, 使局部磨耗扩散至全线。

4 异常磨耗系统性防治措施

4.1 源头防控与材料优化

4.1.1 接触网结构优化

拉出值布置改进: 将正弦波布置调整为“之字形 + 小幅度波动”布置, 拉出值波动范围控制在 $\pm 15\text{mm}$, 相邻定位点偏移方向交替, 使碳滑板磨耗均匀性提升 50%;

悬挂方式升级: 改硬悬挂为弹性悬挂 (弹性系数 $20\text{--}30\text{N}/\text{mm}$), 在锚段关节、线岔等关键部位加装减震器, 刚性硬点减少 60%;

部件轻量化: 正线区段减少膨胀接头数量 (每 2km 不超过 1 个), 采用铝合金汇流排 (密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$) 替代传统钢质汇流排, 降低动态载荷波动幅度 20%。

4.1.2 材料升级

接触线选型: $120\text{km}/\text{h}$ 线路优先采用 150mm^2 高强度银铜合金接触线 (抗拉强度 $\geq 360\text{MPa}$), 表面喷涂纳米陶瓷耐磨涂层 (厚度 $5\text{--}8\mu\text{m}$), 摩擦系数降至 $0.1\text{--}0.12$, 磨耗速率降低 40%;

碳滑板统一: 全线采用浸金属碳滑板 (硬度 96HS), 新滑板更换前进行机械预打磨 (表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$), 磨合期从 7 天缩短至 3 天, 接触不良率下降 60%。

4.2 智能监测与精准处置

4.2.1 动态监测技术应用

弓网状态监测: 列车弓头加装激光点云传感器 (精度 0.01mm) 与电弧能量分析仪, 实时采集接触线轮廓、碳滑板

磨损深度及电弧能量,当碳滑板磨损速率 $>2.5\text{mm}/\text{万公里}$ 或电弧能量 $>200\text{J}$ 时自动预警;

环境参数监测:隧道内每500m布置温湿度传感器(测量范围 -30°C - 60°C 、 0 - 100% RH)与粉尘浓度检测仪(检测精度 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$),湿度 $<8\text{g}/\text{m}^3$ 或粉尘浓度 $>50\text{mg}/\text{m}^3$ 时触发调控指令;

大数据预测:建立磨损数据库,整合接触线y值、碳滑板磨损深度等12项参数,采用分形预测模型(精度 $>92\%$)预判30天内磨损趋势,北京地铁6号线应用后异常处置提前量从24小时延长至72小时。

4.2.2 检测机制优化

差异化检测频次:冬季低温(-5°C 以下)、高粉尘时段(浓度 $>50\text{mg}/\text{m}^3$)每两周检测1次,重点监控汇流排伸缩量(阈值 $\pm 3\text{mm}$)、分段绝缘器过渡平滑度(偏差 $\leq 0.5\text{mm}$);正常工况下每月检测1次,确保异常识别覆盖率100%;

检测技术升级:采用车载式激光检测系统(检测速度 $60\text{km}/\text{h}$),单公里检测耗时缩短至15分钟,较传统人工提升8倍,且接触线磨损宽度测量误差 $<\pm 0.1\text{mm}$ 。

4.2.3 精准处置和修复

接触线打磨:对侧棱锋利的接触线采用弧形砂轮打磨(半径 5mm),消除“锋刃效应”;波磨区段采用动态压力调节打磨(打磨压力 50 - 80N),使表面粗糙度 R_a 值降至 $0.8\mu\text{m}$ 以下,波磨深度 $>0.2\text{mm}$ 的区段修复率达95%;

汇流排维护:季节转换前(温差 $>15^{\circ}\text{C}$)调整汇流排线夹松紧度(扭矩 25 - $30\text{N}\cdot\text{m}$),防止线夹卡滞;腐蚀区段每半年采用中性清洗剂清洁汇流排,涂覆防腐涂层(厚度 10 - $15\mu\text{m}$),腐蚀速率降低60%;

碳滑板修复:偏磨量 $<3\text{mm}$ 的碳滑板采用机械打磨修复(打磨后平整度偏差 $\leq 0.3\text{mm}$),凹陷 $>3\text{mm}$ 时立即更换,避免切削接触线。

4.3 运维管理与协同管控

4.3.1 跨专业联动机制

参数同步调整:建立“轨道-接触网”联动制度,轨道轨距、超高调整前72小时通报接触网专业,同步适配接触线导高(偏差 $\leq 3\text{mm}$),上海地铁应用后因轨网参数失配导致的磨损问题减少70%;

联合工作组机制:组建弓网联合运维小组,每周对研磨数据进行分析(接触线Y值变化、碳滑板研磨速率),在48小时内处置苗头性问题,如拉弧频次增加、研磨速率突升。在沈阳地铁1号线应用该机制后故障处置效率提高50%。

4.3.2 环境与运行优化

环境温湿度调控:隧道内安装喷雾增湿系统,湿度 $<8\text{g}/\text{m}^3$ 时自动启动(增湿量 5 - $10\text{g}/\text{m}^3$);冬季接触线采用电伴热(功率 $20\text{W}/\text{m}$),温度 $<-5^{\circ}\text{C}$ 时自动开启,沈阳地铁应用后接触线冻胀卡滞率降至5%以下;

运行速度调整:大电流出站区段采用ATP人工驾驶模式,电流波动幅度控制在 $\pm 100\text{A}$ 以内;磨损严重区段(接触线偏磨量 $>2\text{mm}$)临时限速至 $80\text{km}/\text{h}$,弓网摩擦速度降低30%,磨损速率下降25%。

4.4 弓网系统匹配优化

机械匹配:将受电弓静态接触压力优化为 $80\pm 5\text{N}$,阻尼系数调整至 550 - $600\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$, $120\text{km}/\text{h}$ 速度下接触压力波动幅度减少30%,接触不良率降至5%以下;

电气匹配:通过材料试验确定“ 150mm^2 银铜合金接触线+浸金属碳滑板”的最优适配组合,电气磨损量较传统组合下降45%,载流稳定性提升20%。

5 结论

地铁刚性接触网异常磨损以“机械-电气-环境”复合型为主,核心评判指标为碳滑板磨损速率 $>3\text{mm}/\text{万公里}$ 、接触线截面积剩余率 $<60\%$,其成因是接触网结构缺陷、受电弓参数失配、环境阈值突破及运维协同不足的耦合结果;

“源头优化-智能监测-精准修复-协同管控”体系可有效控制异常磨损: 150mm^2 银铜合金接触线与浸金属碳滑板适配应用使磨损速率降低40%,激光点云检测技术实现异常识别效率提升8倍,跨专业联动机制减少参数失配问题70%;

未来需进一步融合数字孪生技术与AI诊断模型,构建“接触网-受电弓-环境”实时仿真系统,实现磨损风险的提前1周预测,推动运维模式从“状态修”向“预测修”转型。

[参考文献]

- [1]李明,王强.地铁 $120\text{km}/\text{h}$ 刚性接触网局部磨损分析及预防措施[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):123-127.
- [2]盛良.基于近距离检测的刚性悬挂接触线磨损连续测量装置研制[J].铁道标准设计,2023,67(3):89-93.
- [3]张华,刘敏.通过调整刚性接触网正弦波拉出值改善运营线路中弓网异常磨损的应用实践[J].电气化铁道,2024,35(1):45-49.
- [4]何良圆,王亚杰.地铁接触网异常磨损原因分析[J].中国铁路,2022,(8):78-82.
- [5]赵伟,陈亮.电气化铁路接触线磨损动态检测系统研究[J].仪器仪表学报,2023,44(5):102-110.
- [6]孙涛.城市轨道交通架空刚性悬挂接触网弓网磨损及改进措施[J].铁道工程学报,2022,39(12):56-60.
- [7]北京地铁运营有限公司.北京地铁异常磨损检测与自动处理装置技术报告[R].2023.
- [8]上海申通地铁集团.上海轨道交通架空刚性悬挂接触网改进实践[R].2024.
- [9]陈晓,李娜.地铁刚性接触网纳米涂层耐磨性能研究[J].材料保护,2023,56(4):89-94.
- [10]王健.基于激光点云的接触网磨损动态检测技术[J].光学技术,2024,50(2):210-215.
- [11]刘畅,周明.地铁刚性接触网跨专业协同运维机制研究[J].城市轨道交通研究,2024,27(4):98-102.
- [12]中国城市轨道交通协会.中国城市轨道交通运营里程统计报告(2024年度)[R].2024.