

DOI: 10.3901/JME.2023.10.152

# 城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究\*

邹栋<sup>1,2</sup> 钟舜聪<sup>1,3</sup> 耿妍<sup>2</sup> 程尧<sup>4</sup> 莫志刚<sup>5</sup> 徐可佳<sup>6</sup> 宋兵<sup>7</sup>  
程斌<sup>7</sup> 张士宇<sup>7</sup> 王志城<sup>8</sup> 华路捷<sup>8</sup> 张亚楠<sup>9</sup>

- (1. 福州大学机械工程学院 福州 350108;
2. 华测检测集团有限公司 深圳 518101;
3. 福州大学福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室 福州 350108;
4. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;
5. 南宁轨道交通集团有限责任公司 南宁 530029;
6. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031;
7. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062;
8. 北京市地铁运营有限公司运营一分公司 北京 100050;
9. 北京市轨道交通建设管理有限公司 北京 100037)

**摘要:** 针对国内城市轨道交通近年来频繁出现的弓网系统异常磨损现象,从接触副结构特征、故障现象及其时空属性、处理措施等方面梳理了近10条地铁线路弓网接触副异常磨损事件。分析当前国内外关于法向载荷、电流、电弧等因素影响弓网系统磨损的主要研究成果;论述弓网系统磨损机制的研究进展;介绍国外研究团队关于弓网系统磨损模型的研究历程。基于工程和科研现状分析结果,参考弓网系统磨损模型制定了弓网系统异常磨损现象的根因分析方法;从地面试验、线路试验和仿真分析、数据处理技术等角度梳理异常磨损致因的验证和确认手段,并介绍刚性接触网关节和跨内数据分割处理方法,同时针对异常磨损的关注热点,利用仿真分析技术实现了滑板凹槽磨损和接触线拉出值布置影响系统性能的量化评估;结合弓网系统相关标准的梳理,介绍抑制异常磨损相关的运用维保措施。最终提出包括异常磨损定义和评估、根因分析、验证与确认、维保控制四个阶段的弓网接触副异常磨损问题应对方案。并基于调研分析结果和异常磨损问题防治框架,展望了科学和工程问题的潜在探索空间。研究结果可为城市轨道交通相关单位应对弓网系统异常磨损事件提供技术和管理参考。

**关键词:** 城市轨道交通;受电弓;刚性接触网;异常磨损;根因分析

**中图分类号:** F416

## Status Analysis and Prevention-treatment Technology Study of Abnormal Wear of Pantograph Catenary System in Urban Rail Transit

ZOU Dong<sup>1,2</sup> ZHONG Shuncong<sup>1,3</sup> GENG Yan<sup>2</sup> CHENG Yao<sup>4</sup> MO Zhigang<sup>5</sup>  
XU Kejie<sup>6</sup> SONG Bing<sup>7</sup> CHENG Bin<sup>7</sup> ZHANG Shiyu<sup>7</sup>  
WANG Zhicheng<sup>8</sup> HUA Lujie<sup>8</sup> ZHANG Yanan<sup>9</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108;
2. Centre Testing International Group Co., Ltd., Shenzhen 518101;
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing, Fuzhou University, Fuzhou 350108;
4. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

\* 国家自然科学基金(51905102)、中国博士后科学基金(2019M662226)和福建省产业技术开发与应用计划引导性(2021H0012)资助项目。20220925收到初稿,20221211收到修改稿

5. Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning 530029;
6. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
7. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., LTD., Changchun 130062;
8. No.1 Branch, Beijing Metro Operations Co., Ltd., Beijing 100050;
9. Beijing Rail Transit Construction Management Co., Ltd., Beijing 100037)

**Abstract:** Aiming at the frequent abnormal wear phenomenon of pantograph-catenary systems in domestic urban rail transit in recent years, the anomaly of pantograph-catenary contact behaviour from nearly 10 subway lines are sorted out from the perspectives of structural characteristics, temporal and spatial attributes of fault phenomena, and treatment measures. The main research results regarding the influence of contact force, current, arc, and other factors on the wear of pantograph and catenary system are analysed; The researches on the wear mechanism of pantograph and catenary system are discussed; A wear model of the pantograph-catenary system proposed by foreign research teams is introduced. Based on the current status analysis of engineering and scientific research, the root cause analysis method of the abnormal wear of pantograph and catenary system is formulated from the wear model; From the perspectives of the ground test, line test, and simulation analysis, data processing technology, etc., the methods available for verifying and validating the cause of abnormal wear are sorted out, together with introducing the method of segmenting operating data between rigid conductor overlaps and sections. Aiming at the hot topics of abnormal wear, the quantitative evaluation of system performance affected by wear groove on pantograph strip and rigid conductor stagger arrangement is realized by using simulation technology. Referring to the standards analysis of pantograph and catenary system, the application and maintenance measures to inhibit abnormal wear are introduced. Finally, a framework dealing with the abnormal wear of pantograph-catenary contact pairs is proposed, which includes four stages: abnormal wear definition and evaluation, root cause analysis, causes verification and validation, and maintaining control. Based on the status analysis results and the proposed framework, the future exploration content of scientific and engineering problems has been prospected. The results of the study would provide technical and management references for the relevant units of urban rail transit to deal with the abnormal wear of pantograph and catenary systems.

**Key words:** urban rail transit; pantograph; overhead rigid conductor systems; abnormal wear; root cause analysis

## 0 前言

干线铁路柔性接触网接触线通过承力索、吊弦悬挂至指定空间位置。而城轨交通架空刚性接触网的接触线直接通过燕尾槽夹持至汇流排下表面(图1), 在与受电弓滑动接触过程中实现导电功能, 具有结构简单、安装空间小、无断线隐患、使用寿命长和运维工作量少等优点<sup>[1]</sup>。

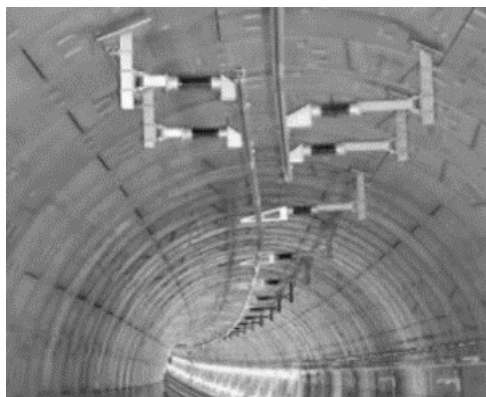


图1 城轨交通刚性接触网

自1998年广州地铁2号线开创我国地铁应用架空刚性接触网技术先河以来, 国内刚性接触网技术发展历经多次里程碑事件。2005年, 广州地铁3号线将架空刚性接触网应用时速首次提升至120 km/h。2019年9月, 北京大兴国际机场线成为我国第一条160 km/h的高速架空刚性接触网。供电系统采用AC 25 kV带回流线的直接供电方式替代了DC 1 500 V供电方案。随后, 广州地铁18、22号线首通段分别于2021年9月和2022年3月开通运营。是国内首次在160 km/h的高速地铁上全面采用AC 27.5 kV架空刚性接触网。

受电弓接触网通过滑动接触完成电能的输送, 在车辆的牵引下, 受电弓持续不断地激振接触网, 激起接触网运动状态的改变, 接触网的运动以弹性波的形式在弓网接触点前后一定范围内传播, 反过来又影响到受电弓的运动, 依此形成弓网系统的动态相互作用。实际上, 由于弓网系统的功能定位, 在受电弓、接触网相互接触的界面上, 不仅存在机

机械能的传递, 还有电能、热能的传递和转换。弓网动态相互作用是典型的多物理场耦合作用情形, 因而弓网系统的匹配设计、运用、维护是一个非常复杂的系统工程。

刚性接触网首次应用至广州地铁 2 号线时, 经历过繁杂的弓网系统接触副异常磨耗治理过程。自 2013 年后, 2 号线异常磨耗才有了明显的增大趋势, 换线次数及磨耗程度超出往年平均值<sup>[2]</sup>。近年来, 随着地铁运营里程的不断增加, 北京、上海、深圳、天津、郑州、西安、石家庄等城市相继出现弓网系统异常磨耗事件并呈多发趋势。

异常磨耗的产生, 降低了设备的使用寿命, 增加维保活动相关人财物投入, 严重情况下还会影响列车的正常运营。受限于弓网系统自身的复杂性和当前载流摩擦磨损研究进展与工程需求的不对称性, 异常磨耗发生后, 地铁运营公司常常缺少行之有效的应对措施。对此, 本文围绕以下问题展开论述, 以期对弓网系统异常磨耗发生前的预防和发生后的治理提供分析框架和技术指引。

(1) 异常磨耗发生时, 弓网接触副外在表现及其时空规律。

(2) 弓网系统磨耗影响因素及磨耗现象认知共识。

(3) 异常磨耗发生后, 应对异常磨耗的技术框架。

(4) 弓网系统异常磨耗关注热点(拉出值布置、滑板打磨)的量化评估。

与此对应的章节安排如下: 第 1 节从工程技术运用和科学问题研究两个方面梳理弓网系统磨耗相关现状, 引出异常磨耗问题的应对策略。第 2 节针对处理异常磨耗问题的挑战, 提出一个完整的技术框架。第 3、4 节针对弓网异常磨耗事件关注热点, 基于本文所提技术框架, 探索接触线拉出值布置策略, 以及滑板磨耗凹坑的维保阈值。最后, 第 5 节从科学研究和工程技术两方面对探索异常磨耗规律的发展方向进行了展望。

## 1 弓网磨耗现状分析

### 1.1 运维现状调研

作者团队通过直接项目参与和公开文献、资料

调研, 从结构形式、异常磨耗现象、异常磨耗时空规律、运营商研究内容及处理措施等方面, 对刚性接触网配幅城轨受电弓时的异常磨耗事件进行了详细梳理。表 1 为公开可查询的弓网系统异常磨耗事件汇总统计。

从结构属性上看, 对于受电弓, 异常磨耗波及的受电弓厂家、滑板品牌众多, 包括天海、中车株机、东洋、STEMMANN 等受电弓, 以及摩根、PANTRAC、HOFFMANN、SCHUNK、东南佳、万高、西屋等滑板。受电弓滑板数量同时包括四滑板受电弓<sup>[2-3]</sup>和双滑板受电弓<sup>[4-7]</sup>。滑板材质则包含纯碳、浸金属碳和粉末冶金碳滑板。对于接触网, 大部分异常磨耗事件都与正弦波类型的拉出值布置相关<sup>[8]</sup>, 但之字形三角波布置的接触网也有异常磨耗事件出现<sup>[9]</sup>。接触线最大拉出值同时包含 200 mm 和 250 mm 两种, 接触线面积则覆盖 120 mm<sup>2</sup> 和 150 mm<sup>2</sup> 两种类型。

从异常磨耗现象层面看(图 2), 对于受电弓滑板, 出现较为频繁的是凹坑或波浪型磨耗, 以及磨耗速率的量级增长。对于滑板异常磨耗率大小, 广州地铁 2 号线认为超过 6.82 mm/万公里为异常磨耗<sup>[8]</sup>, 深圳地铁 11 号线认为超过 4.6 mm/万公里的磨耗率过高<sup>[10]</sup>。南京地铁 4 号线滑板正常磨耗 0.35 mm/万公里, 异常磨耗 40 mm/万公里<sup>[5]</sup>。郑州地铁 1 号线 2 期开通前滑板磨耗 0.4 mm/万公里, 开通后最高可达 12 mm/万公里<sup>[6]</sup>, 郑州地铁 3 号线正常磨耗为 5 mm/万公里, 异常时可到 35 mm/万公里。就接触线而言, 则主要是同区间、同锚段的接触线下表面磨耗宽度及磨耗率差异过大, 以及接触线、汇流排刮擦、接触表面棱边毛刺等。比如广州地铁 2 号线, 正常区段磨耗率 0.001 4 mm<sup>2</sup>/万弓架次, 磨耗严重区段接触线磨耗率可达 0.5 mm<sup>2</sup>/万弓架次<sup>[8]</sup>。

从异常磨耗的空间属性来看, 接触线磨耗严重区段主要集中在出站列车加速区段、分段绝缘器、锚段关节、线岔、弹性道床区段、弯道、坡道区段、汇流排中间接头等位置处<sup>[4,7,11]</sup>。而碳滑板凹坑则大部分出现在最大拉出值附近, 同时滑板中心位置<sup>[10]</sup>、以及最大拉出和滑板中心之间<sup>[6]</sup>也能观测到滑板凹坑。对于异常磨耗的时间属性, 乌鲁木齐 1 号线冬季接触线磨耗宽度的变化速率略高于非冬季<sup>[4]</sup>。南京地铁 4 号线异常磨耗

也发生在冬季,具体时间为 2017 年 11 月至 2018 年 2 月<sup>[5]</sup>。北京地铁 6 号线也是于 2018 年 12 月中旬首次发现弓网异常磨损<sup>[12]</sup>。郑州地铁 3 号线

异常磨损于 2020 年 12 月初发现,运营商认为异常磨损期间磨损量和温湿度有明显的负相关关系<sup>[13]</sup>。

表 1 DC 1500 V 供电制式下弓网系统异常磨损事件分析

地铁线路	受电弓	接触网	异常现象	异常磨损时空属性	研究内容	处理措施
乌鲁木齐 1 号线 <sup>[4]</sup>	弹簧筒式, 双滑板	CTA150	1.滑板波浪型偏磨、掉块 2.同区间、同锚段接触线磨损不均衡 3.燃弧增加	1.2019.06—2020.12 2.曲线段、弹性道床接触线磨损严重 3.出站取流段燃弧严重 4.冬季接触线磨损宽度的变化速率略高于非冬季	1.匀速进出站对比正常运行图,燃弧差异明显 2.调整静态抬升力, 120 N 磨损最小, 130 N 次之, 110 N 最大	1.滑板水平度调整 2.接触网坡度、拉出值分区段调整 3.悬挂螺杆改为弹性螺杆、定位线夹采用弹性线夹
大连地铁 1&2 号线 <sup>[3]</sup>	天海, 四滑板	CTA120, 半正弦波, 最大拉出 200 mm	1.滑板凹坑磨损 2.接触网磨损严重	1.2018.03 2.滑板凹槽位于最大拉出位置 3.接触网磨损严重位于车辆加速区、减振道床、变坡区	—	1.滑板打磨、水平度调整 2.接触网硬点易发区外观检查; 分区段拉出值调整
重庆地铁 1&2 号线 <sup>[14]</sup>	天海, QG-120(B-CQL6), 双滑板, 纯碳滑板	—	1.拉弧烧损 ADD 气管引起降弓保护; 滑板导电胶高温炭化	1.2012.04—2013.06 2.出站、弯道、变坡区段拉弧明显 3.碳滑板与铝合金黏接处烧损	1.静态抬升力 110 N 调整至 120 N, 滑板依然烧损 2.滑板温升试验, 发现滑板载流设计富裕能力不足 3.双滑板改为四滑板, 无烧损	1.滑板重选型为浸金属碳滑板, 换为四滑板 2.硬点易发区接触线安装调整
南京地铁 4 号线 <sup>[5,17]</sup>	崇德霍夫曼, SK1204, 双滑板, 浸金属碳滑板	CTAH120 铜银合金, 正弦波布置, 最大拉出 250 mm	1.滑板磨损率由 0.35 mm/万公里, 增加至 40 mm/万公里 2.滑板单侧“V”形深凹坑 3.滑板崩边	1.2017.11—2018.2 2.部分出站提速区和高速运营区持续燃弧 3.二期开通后发生异常磨损	1.静态抬升力 110 N 调整至 120 N, 滑板依然烧损 2.弹性道床轮对失圆关联性研究, 无关联 3.滑板摩擦磨损试验	1.限制区间速度峰值 2.异常磨损侧接触网拉出值调整 3.碳滑板打磨 4.正弦波改之字形拉出布置
广州地铁 2 号线 <sup>[2,8,11,16]</sup>	四根滑板, 滑板型号 (CY280、PANTRAC 浸金属 RH86M6 滑板、STEMMANN 滑板)	RIS120 铜银合金, 半正弦波, 单次过零, 最大拉出 200 mm	1.滑板凹坑磨损, 伴随磨损速率异常 2.接触线磨损速率由正常 0.001 4 mm <sup>2</sup> /万弓架次上升至 0.5 mm <sup>2</sup> /万弓架次 3.中心锚结异常抬升 4.拉弧严重	1.2003 年开通后即有异常磨损, 恢复后以 2013 为转折点增大 2.滑板凹槽位于拉出值最大位置 3.出站加速区、减振道床、变坡区接触线磨损异常 4.绝缘关节处拉弧增多	1.受电弓整体更换; 磨损率下降, 凹坑依旧 2.静态抬升力 120 N 调至 110 N, 滑板磨损率反增 3.不同类型滑板对比, 部分弃用	1.接触线日常检修调整和局部或整锚段更换 2.滑板类型更换 3.中心锚结位置移动, 两侧加装锚结线夹和调整螺栓 4.滑板打磨
深圳地铁 11 号线 <sup>[10]</sup>	九方-摩根滑板; STEMMAN 受电弓-HOFFMAN 滑板;	1/4 柔性, 3/4 刚性	1.滑板磨损率过高, 型面凹坑 2.拉弧严重 3.滑板缺块	1.凹坑位于滑板中心, 对应膨胀接头处拉出; 2.膨胀接头处拉弧严重 3.运营初期	1.新型弓头, 新型弹簧支撑代替叶片式弹簧	1.接触网拉出值调整 2.膨胀元件整改 3.新型弓头应用 4.碳滑板打磨工艺制作与应用
郑州地铁 1 号线 <sup>[6,15]</sup>	中车株机 TSG18 受电弓、摩根 M258A2 双滑板	正弦波刚, 最大拉出 250 mm	1.滑板磨损速率异常、掉块 2.前后滑板偏磨 3.滑板严重凹坑磨损 4.接触线磨损不均匀, 波浪型磨损 5.拉弧严重 1.接触线局部磨耗较大	1.滑板掉块位置小于最大拉出, 凹坑位置小于最大拉出值 2.二期开通后异常磨损	1.标称静态压力恢复至 120 N, 凹坑消失	1.滑板棱边、凹槽打磨 2.接触线关节调整, 硬点打磨 3.线岔、关节、分段绝缘器外观检查
郑州地铁 3 号线 <sup>[13]</sup>	东南佳, 浸金属碳滑板	—	2.滑板磨耗量急速上升, 磨耗率 35 mm/万公里 3.滑板沟槽磨耗 4.接触线脱槽	1.2020.12—2021.1, 温湿度负相关	1.对比不同滑板, 东南佳碳与摩根同时期磨耗量持平 2.静态抬升力 80 N 至 130 N 调整, 130 N 下磨耗突增	1.拉出值、导高调整

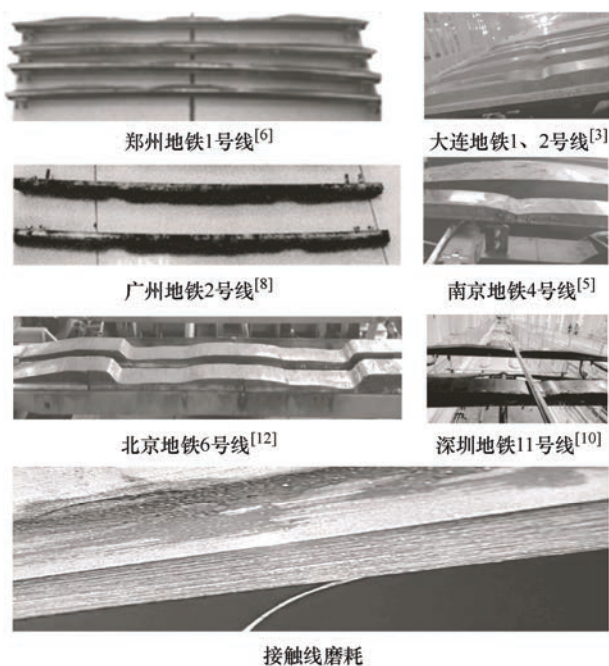


图 2 城轨交通弓网异常磨损现象

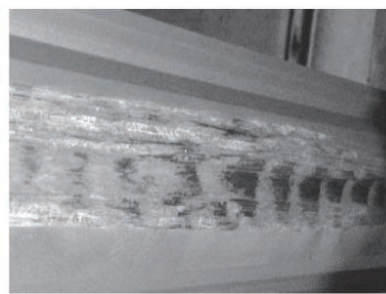
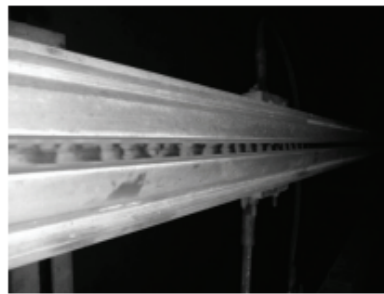
为分析弓网系统异常磨损发生原因,各地铁运营商运用了多种验证和确认手段。主要包括换用正常磨损线路的受电弓<sup>[2]</sup>,受电弓标称静态抬升力调整<sup>[2,4,13-15]</sup>,对比不同类型的滑板<sup>[16]</sup>,列车匀速进出站不停车对比正常运行图<sup>[4]</sup>,滑板温升试验<sup>[14]</sup>,滑板摩擦磨损试验<sup>[17]</sup>,轮对失圆相关性分析<sup>[5]</sup>,弓头结构改造等<sup>[10]</sup>。

而对于异常磨损后的处理措施,除去外观检查,增加网轨检等日常检修作业内容频次,其他方面主要集中在接触网几何参数调整、滑板打磨、弓头水平度调整、接触网局部或整锚段换线、膨胀元件整改<sup>[10]</sup>、中心锚结位置调整和加装锚结线夹及调整螺栓<sup>[8]</sup>、接触网悬挂螺杆改为弹性螺杆、定位线夹采用弹性线夹<sup>[4]</sup>、受电弓弓头零部件<sup>[10]</sup>及滑板替换等。

从调研结果来看,有两个现象值得关注。首先,几乎所有的异常磨损事件都伴随着明显的弓网燃弧增加;其次,在郑州地铁 1 号线和广州地铁 2 号线,接触线出现了类似钢轨波磨的波浪型磨损<sup>[15]</sup>。

其中,弓网异常磨损事件伴随燃弧现象增加,为探索磨损规律提供着手点。而接触线、钢轨同时存在波浪型磨损(图 3),一方面可以借鉴日本刚性接触网波浪型磨损的研究成果<sup>[18]</sup>,同时弓网系统摩擦磨损的探索可借鉴钢轨波磨现象相关的研究手段<sup>[19-20]</sup>。

调研结果还表明,城市轨道交通弓网系统异常磨损现象尚未得到根本解决。尤其是异常磨损现象周期性出现的线路,地铁运营商往往需要在备品备

(a) 广州地铁 2 号线<sup>[11]</sup>(b) 郑州地铁 1 号线<sup>[15]</sup>

(c) 钢轨波磨

图 3 接触线与钢轨波磨

件、检修频次等方面提前准备并增加投入。异常磨损现象的科学应对,尚有以下问题待进一步解决。

(1) 影响接触副磨损的运用参数及其相互关联关系尚不明确,研究性试验缺少科学的工况设计,不能对异常磨损形成的根本原因做精准定向。比如受电弓抬升力影响试验,由于没有匹配其他运用参数共同设计试验工况,导致试验结果无法支撑运维决策。

(2) 接触副异常磨损现象时空规律复杂,弓网系统运维活动与车辆、供电等专业关联,异常磨损治理措施缺少统一、规范的流程管理,整改措施的有效性无法得到验证,难以形成可推广复制的异常磨损应对经验。

(3) 城市轨道交通刚性接触网、受电弓专项标准、规范有待完善。比如刚性接触网布置的量化参数管理、接触副打磨标准的建设等。各地铁运营商



凭经验完成各自的弓网系统检修工作, 检修效率参差不齐且试错成本过高。

## 1.2 研究现状分析

### 1.2.1 磨损影响因素

弓网系统处于多物理场相互作用环境, 其接触界面存在包括热能、机械能和电能在内的多种能量转换形式(图 4)。多物理场作用下, 弓网系统的摩擦磨损性能是一般力学性能、流体力学气动效应、电气效应以及热效应相互影响和作用的结果。弓网系统运用参数包括滑动速度、法向载荷、电流强度等; 运用状态表征参数则包括接触电阻、接触副温升、磨损率、摩擦因数、燃弧率等。

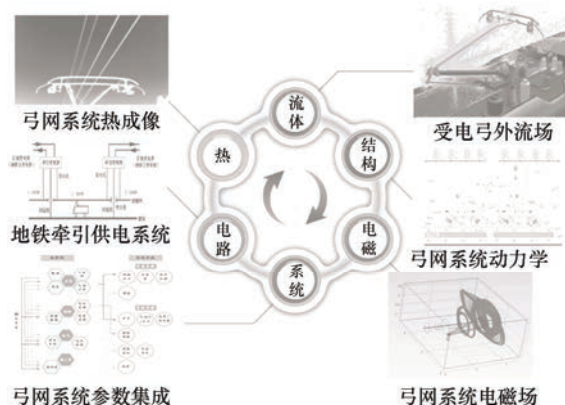


图 4 弓网系统学科交叉

考虑到多物理场下弓网摩擦磨损现象缺少完备的理论解, 本节介绍法向载荷、摩擦速度、电流、燃弧率、温度等因素影响下弓网载流摩擦磨损的客观试验研究结果, 以建立各运用参数或表征参数与弓网系统载流摩擦磨损关联关系的直观认知。

(1) 法向载荷。章赛丹等<sup>[21]</sup>在交流制式下, 控制电流为 250 A、滑动速度为 160 km/h、法向载荷为 50 N、70 N、90 N、110 N 和 130 N, 研究碳滑板/铜接触线匹配时的接触特性。其研究表明, 开始阶段滑板磨损率较大, 20 min 后进入稳定期, 滑板磨损率降低并持续稳定至 80 min 试验结束。在稳定期内, 滑板的磨损率随法向载荷的增加先减小后增大, 呈“U”形分布, 磨损率处于 0.025~0.13 mg/s 范围, 并且 90 N 时磨损率最小。陈忠华等<sup>[22]</sup>在 150 km/h 运行速度条件下, 设置法向载荷在 40~120 N 范围内变化, 也发现滑板磨损率随法向载荷的增加呈现“U”字形变化, 磨损率量级在 0~150 g/万公里变化。同时, 利用多目标粒子群算法求解电流相对稳定系数(电流取值范围为 100~300 A)和磨损率的帕雷托最优解, 计算得到的最优法向载荷为 58.1 N。

(2) 运行速度。陈忠华等<sup>[22]</sup>采用纯铜接触线配幅浸金属滑板, 设置法向载荷为 80 N, 从载流摩擦磨损试验结果发现各种不同电流情况下(100~300 A), 滑板磨损率随速度增加而下降, 速度 50 km/h 时磨损率最大, 接近 700 g/万公里。杨正海等<sup>[23]</sup>采用粉末冶金工艺的铜-石墨滑板材料配幅铬青铜接触线, 研究了法向载荷为 70 N、电流分别为 60 A 和 120 A、滑动速度在 10 m/s 到 40 m/s 范围内变化时的滑板磨损率, 发现磨损率随速度呈现单调递增特性, 以 30 m/s 为界, 磨损率随速度增加急剧增大, 磨损率范围为 0.25~2.25 mg/m。杨广英等<sup>[24]</sup>分别在 250 km/h、300 km/h 和 350 km/h 速度下, 对 CTS150 型铜锡合金接触导线配 DSA380 碳滑板进行里程 6 000 km 的磨耗性能测试, 电流强度取为工频交流 500 A。结果表明, 三种速度下滑板重量磨耗比分别为 30 g/万公里、16 g/万公里、25 g/万公里。同时, 在 6 000 km 试验里程范围内, 接触线磨耗比随速度变化曲线相互交错, 没有特定的单调递增或递减规律。

(3) 电流。梅桂明等<sup>[25]</sup>采用铜银合金接触线配幅浸金属碳滑板, 设置滑动速度为 60 km/h、每根滑板与接触线之间的法向载荷取 30 N、滑动距离为 150 km。对比 0 A 和 400 A 直流电作用下的滑板磨损率。结果表明, 无电流时滑板磨耗比为 0.096 mm<sup>3</sup>/km; 电流 400 A 时, 滑板磨耗比为 5.1 mm<sup>3</sup>/km, 即载流情况下磨损率比不载流工况大 53 倍。郭凤仪等<sup>[26]</sup>使用 120 mm<sup>2</sup> 铜锡合金导线匹配铜基粉末冶金滑板、浸铜碳滑板, 研究电流大小对滑板磨损率的影响。发现电流在 150~500 A 内变化时, 两种材料的滑板磨损率随电流的增大而增大, 在不同电流范围之内, 磨损率随电流变化增幅不同。

(4) 燃弧。王鑫等<sup>[27]</sup>采用纯碳滑板和纯铜接触线配副, 设置电流为 100 A, 并通过变动法向载荷来影响接触副电弧平均放电时间, 间接控制电弧能量大小。在 20~90 N 范围内, 法向载荷越大, 放电时间越短, 电弧能量越小, 确认电弧能量和磨损量近似成正比。胡道春等<sup>[28]</sup>设计三因素(力、电流、速度)四水平的试验条件, 得出法向载荷 50~80 N、滑动速度 30~60 m/s、电流 70~160 A 时, 单位载荷及单位摩擦行程的磨损体积与电弧能量呈幂函数关系。KUBO 等<sup>[29-30]</sup>在直流电作用下完成浸金属碳滑板和纯铜接触线的试验, 相对滑动速度设置为 100 km/h, 且电流从 0~200 A 变化。其研究表明磨损率受电弧放电的强度和持续时间影响, 认为电弧放电引起的滑板表面热效应对滑板磨损率起主导作用, 同样认为磨损率和电弧能量成正比。KUBOTA

等<sup>[31]</sup>则设置 55.6 m/s 的摩擦速度和 59 N 的法向载荷,外加 DC 电流 100~500 A,也发现浸铜 C/C 复合滑板的磨损与电弧放电能量成正比。MEI 等<sup>[32-34]</sup>的研究结果也表明,无论是交流还是直流电,在实验室条件下,滑板磨损率均与电弧能量呈比例关系。

(5) 温度。在弓网系统运用参数、表征参数相互关联关系方面,西南交通大学团队<sup>[32-36]</sup>基于其载流摩擦磨损试验台做了初步的探索,研究了电流、法向载荷、燃弧量和温度的变化,建立了各物理量与滑板温度分布的关系。其结果表明,纯碳滑板配幅铜银接触线载流时,在 20~140 N 法向载荷范围内,温升与法向载荷成反比;0~200 A 范围内,温升与电流大小成正比;50~300 km/h 范围内,温升与速度成正比,同时温升与电弧能量相关系数为 0.903。最终结果表明滑板温度越高,磨损率越大。

从宏观尺度上看,接触副温升能量来源主要包括机械摩擦热、电流焦耳热、电弧热。对此,王英等<sup>[37]</sup>分别建立了摩擦功率  $q_F$ ,电流焦耳热功率  $q_I$ 、燃弧热功率  $q_A$  的计算方法

$$q_F = \frac{\mu F v}{A} \quad q_I = \frac{\rho l}{A_r} \cdot \frac{I^2}{A} \quad q_A = \Psi \frac{UI}{A} \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为滑动摩擦因数;  $F$  为弓网平均接触力;  $v$  为滑动速度;  $A$  为名义接触面积;  $l$  为接触长度;  $A_r$  为实际接触面积;  $\rho$  为电阻率;  $I$  为电流大小;  $U$  为电弧电压;  $\Psi$  为热流分布系数。在此基础上,周悦等<sup>[38]</sup>基于销盘式试验台,进一步研究了 RIM120 铜镁接触线配幅纯碳滑板时三种热源的影响规律。静置接触状态下,电流焦耳热在 15 min 内使滑板在室温下升高至 170 °C。无电流纯滚动摩擦下,摩擦热在 15 min 内使滑板温度仅升高 1 °C。载流滚动摩擦情形下,电流焦耳热、摩擦热、电弧热共同作用,15 min 内滑板温度稳定在 130~140 °C。

从上述试验研究结果来看,对于弓网载流摩擦磨损,目前已知晓的规律包括以下内容:① 接触副接触电阻包括表面收缩电阻和膜层电阻,其值等于接触元件电阻率除以导电斑直径,导电斑个数越多、半径越大,电阻越小;② 法向载荷变化时,磨损量呈 U 型变化;③ 摩擦速度变化时,弓网接触副磨损量不全是随速度单调变化;④ 电流越大,磨损率越大,不同电流区间,磨损率增幅不同;⑤ 电弧能量越大,磨损率越大;⑥ 载流情况下,弓网接触副温升与法向载荷成反比,与电流、摩擦速度、电弧能量成正比。

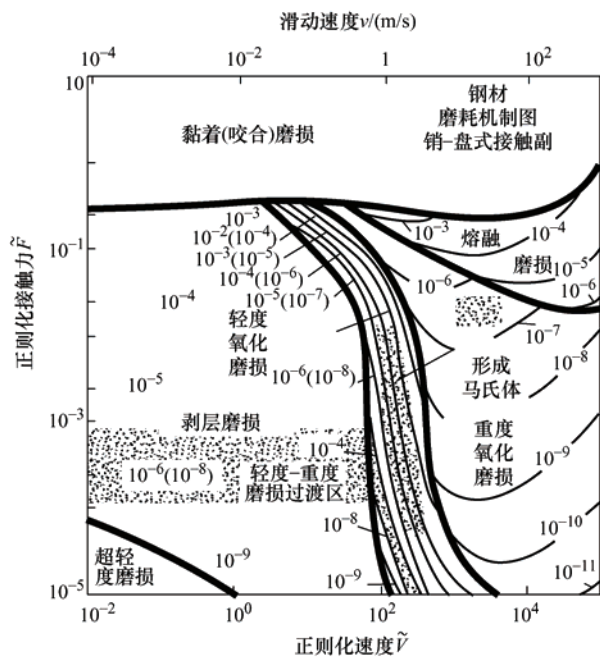
研究结果还表明,弓网接触副接触电阻、法向载荷、运行速度、电流、电弧能量等运用参数、表征参数之间相互关联紧密,但各变量之间的耦合作用机制及解耦验证其对接触副磨损规律的影响方面还缺少研究成果的支撑。

### 1.2.2 磨损机制

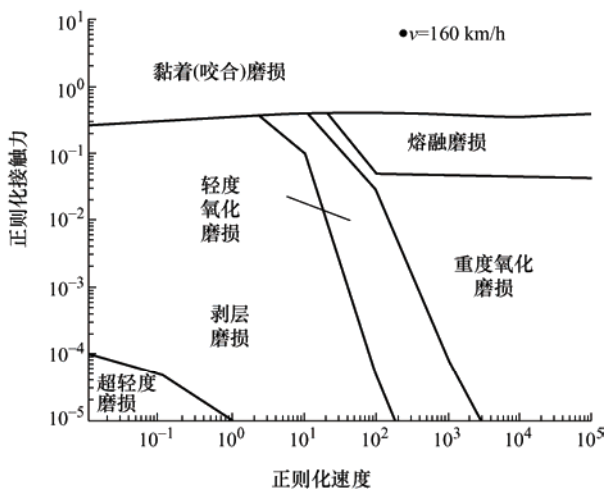
从摩擦磨损角度看,在受电弓抬升力和列车牵引的共同作用下,受电弓滑板抬升至与接触线稳定接触后并高速滑动以实现电能传输。由于真实接触表面存在不同尺度的粗糙度,接触副的接触行为实际是大量表面凸出峰接触的综合效应。载流情况下,占名义面积 1% 左右的凸出峰承担了所有的接触力、电流、热传导功能,因此,真实接触应力、电流密度、热通量远高于名义应力、名义电流和名义热通量。这种接触区凸出峰上的热、电、力载荷集中效应,成为弓网载流摩擦磨损的关键特征<sup>[39-40]</sup>。此外,由于弓网接触副材质的不同,相同运用参数条件导致弓网接触呈现典型的非对称接触行为,以及同线路不同摩擦副之间异常磨损现象的扩散转移,也是弓网载流摩擦磨损的主要特征。

对于弓网接触副磨损机制,由于工况、设备条件、环境因素的差异导致对弓网载流摩擦磨损试验结果的解读不尽相同,科研领域对弓网载流摩擦磨损的主要机制也有不同的看法。其中,张永振等<sup>[39]</sup>认为载荷集中效应会引起导电斑熔融,从而黏着磨损占主导地位。胡艳等<sup>[35]</sup>采用销盘式试验台,以纯碳滑板配幅铜银接触线,探索了温度变化时弓网接触副磨损机制的演变规律。其结果表明,温升 50 °C 左右时,碳滑板表面以片状剥离的机械磨损为主;温升 90 °C 左右时,碳滑板表面以机械磨损为主,并出现少量的烧蚀区域;温升在 180~200 °C 时,碳滑板表面出现大量的烧蚀区域,以电弧烧蚀磨损为主;温升在 300 °C 左右时,碳滑板易出现疲劳裂纹,以电弧烧蚀磨损为主。李含欣等<sup>[41]</sup>则基于往复摩擦磨损试验仪研究了湿度变化时弓网接触副磨损机制的变动规律。接触副为纯铜接触棒和纯碳棒,试验施加法向载荷为 4 N,滑动位移幅值为 6 mm,电流分别为 0 A 和 5 A。其结果表明,在低湿度(10% RH)环境下,主要的磨损机制是黏着磨损和磨粒磨损;中湿环境(35% RH~55% RH)下,水膜充当润滑膜减轻了黏着磨损和磨粒磨损,但电流诱发了电化学反应,磨损机制是轻微的黏着磨损、磨粒磨损和氧化磨损共同作用;高湿环境(80% RH)下,主要的磨损机制是氧化磨损,并伴随黏着磨损。

实际上, 这些不同类型的磨损可以单独发生, 也可以相继或同时发生(复合的磨损形式)。1981 年国际摩擦学会议首次提出建立磨损机制图的设想后。在 1987 年, LIM 等<sup>[42]</sup>借鉴金属材料塑性变形图的制作过程, 采用理论与试验相结合的方法, 构造出了摩擦学研究领域中第一幅磨损机制图(图 5a), 并明确提出了磨损机制图的概念和制作方法<sup>[43]</sup>。BUCCA 等<sup>[44]</sup>基于 LIM 等<sup>[42-43]</sup>的研究结果, 采用铜-铜接触材料配幅, 制作了弓网领域内的第一幅磨损机制图(图 5b)。BUCCA 假设电流贡献小于机械贡献, 并将电流的焦耳效应等效至法向载荷, 用法向载荷和相对摩擦速度表征接触副工作条件, 基于试验结果判定弓网系统主要磨损机制为氧化磨损。



(a) LIM提出的磨损机制图<sup>[42]</sup>



(b) BUCCA提出的弓网接触副磨损机制图<sup>[44]</sup>

图 5 磨耗机制图

当前, 科研领域主要采用伯韦尔(BURWELL)的观点<sup>[45]</sup>, 根据磨损机理的不同, 把黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损和表面疲劳磨损列为磨损的主要类型, 而把表面侵蚀, 冲蚀等列为次要类型(表 2)。文献中可以找到各种描述和命名这些磨损机制的方法<sup>[46-47]</sup>。然而, 在真实服役环境下, 弓网系统磨损现象的时空规律复杂多变, 磨耗影响因子间的相互作用机制尚不明确。直到目前, 关于弓网接触副的载流摩擦磨损机理还不十分清楚, 也没有统一的定量定律。

表 2 磨损类型<sup>[45]</sup>

磨损类型	基本特征	常用模型	基本定律	影响因素
黏着磨损	材料转移	阿查得模型	磨损体积与滑动距离、载荷、较软材料得屈服极限成正比	互溶性、载荷、温度、速度
磨粒磨损	材料分离	犁刨理论	同上	硬度、弹性模量、磨粒尺寸、载荷等
疲劳磨损	宏观: 重复变形 微观: 疲劳脱落	疲劳寿命模型 柯拉盖尔 斯阿查得理论	寿命与载荷有关 磨损率与循环次数成反比, 与载荷成正比	硬度、粗糙度却笑、载荷及润滑 粗糙度、载荷、硬度及循环次数
化学磨损	(电)化学反应	同黏着磨损	材料与环境的化学反应速度越大, 磨损越快	材料与环境的化学反应速度等
其他磨损			诸如微动磨损、侵蚀磨损等	

### 1.2.3 磨损模型

当弓网接触副摩擦磨损机制及其物理过程认知尚不充分的情况下, 基于运用参数和状态参数相关试验结果建立弓网接触副磨损模型, 是可接受的权宜之计。在这方面, 意大利米兰理工大学有过比较完整的探索<sup>[44, 48-50]</sup>。

COLLINA 等<sup>[48]</sup>基于 ZHAO 等<sup>[51]</sup>的研究成果, 将 ARCHARD 定理引入弓网接触副的机械磨耗模型, 同时假设电气磨耗与电流焦耳热成正比, 并设置机械磨耗、电气磨耗权重系数  $k_1$ 、 $k_2$ , 建立了他们第一个弓网接触副磨损率经验模型

$$A = k_1 \left( 1 + \frac{i}{i_0} \right)^n \frac{F_c V}{H V_0} + k_2 R (F_c) i^2 \quad (2)$$

式中, 第一项是 ARCHARD 公式代表的机械磨耗贡献,  $i$  是电流大小,  $F_c$  是弓网接触力,  $H$  是接触幅中软材料的硬度,  $V$  是摩擦速度, 下标“0”表示对应物理量的参考值, 括号表示的电流修正项说明机械磨耗贡献随电流增加而下降。第二项的电气磨耗被假设为与电流焦耳热成比例。其中接触电阻  $R$  用接触副串联电阻率  $\rho_c$  和接触力  $F_c$  表示为



$$R(F_c) = \frac{\rho_c}{2\sqrt{F_c/(\pi H)}} \quad (3)$$

该模型被用于研究 DC 3 kV 下 150 mm<sup>2</sup> 接触线的磨损规律, 但没有区分交流和直流制式, 也没有考虑燃弧的影响。

随后, BUCCA 等<sup>[44]</sup>引入 GW 模型建立接触力和真实接触面积大小关系以计算接触电阻。再利用图 5a)所示磨损机制图, 制作了碳、铜材料相关的磨损机制图(图 5b)。同时, 作者将电流焦耳热效应等效成机械载荷, 将磨损机制相关物理量无量纲化后, 根据运用参数范围确认了弓网接触副主导的磨损机制。在认为接触线以氧化磨损为主、铜或碳滑板以熔融磨损为主的前提下, 提出了接触线磨损率计算公式, 并利用直流条件下的线路和台架试验数据进行了修正。在此基础上, BUCCA 等<sup>[49]</sup>进一步提出了一种启发式的接触线磨损模型, 该模型同时考虑了由于摩擦引起的机械磨损、电流焦耳热引起的电气磨损以及电弧引起的磨损

$$NWR = k_1 \left( \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{i_c}{i_0} \right) \right)^{-\alpha} \left( \frac{F_m}{F_0} \right)^{\beta} \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c F_m i_c^2}{HV_0} \cdot (1-\eta) + k_3 \eta \frac{V_a i_c}{V_0 H_m \rho} \quad (4)$$

式中,  $i_c$  为电流大小,  $F_m$  为平均接触力,  $H_m$  为材料熔化潜热,  $V_a$  为电弧电压, 通常取决于接触离线期间滑板和接触线之间的距离、接触离线之前的电流以及穿过接触区的气流速度。其余参数说明见表 3。从式(4)中可发现, 第一项机械磨损考虑了电流的影响, 同时第二项电流焦耳热效应通过接触电阻也考虑了法向接触力的影响, 而电弧对磨损的贡献则与电弧功率成正比。

表 3 磨损模型参数说明<sup>[49-50]</sup>

参数	接触线	滑板
法向磨损率 NWR/(m <sup>2</sup> /km)	—	—
机械磨损权重 $k_1$	0.4 921	6. 650
电气磨损权重 $k_2$	0.4 626	4. 995
燃弧磨损权重 $k_3$	29.6 836	3 230
机械磨损对电流强度的依赖系数 $\alpha$	17.1 235	0
机械磨损对力的依赖系数 $\beta$	0.2 119	-0. 450
材料密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	—	—
材料硬度 $H$	—	—
离线率 $u$	—	—
弓网接触电阻 $R_c/\Omega$	—	—

式(4)所示模型基于纯铜接触线台架试验数据经最小二乘拟合得到, 试验速度包括 160 km/h, 200 km/h, 直流电流从 0~1 000 A 变化。基于该模型绘制磨损率随接触力和电流大小的变化三维图如图 6 所示, 可看出接触线的磨损率主要在两种情况下增加: 第一种情况是电流大小约为 300 A 时接触力的增加, 第二种情况是接触力值小于 40 N 时电流的增加。BUCCA 等<sup>[49]</sup>认为, 在第一种情况下, 电流润滑效应消失, 磨粒磨损占主导; 而在第二种情况下, 接触力太小导致接触电阻偏大, 引起电气贡献增加, 并且主要磨损机制为熔融磨损。

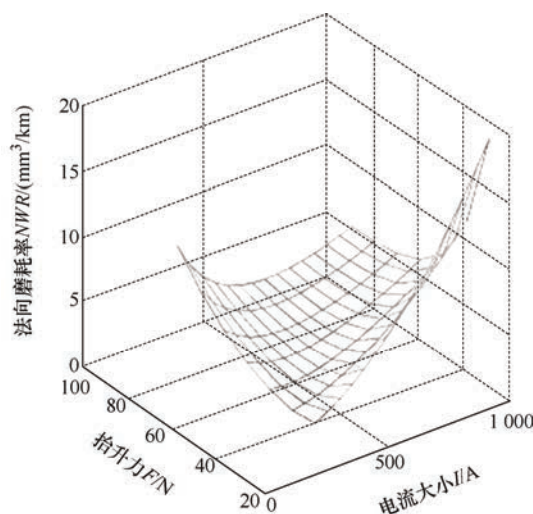


图 6 接触线磨损随接触力和电流的变化<sup>[49]</sup>

DEROSA 等<sup>[50]</sup>基于 BUCCA 等的工作<sup>[44, 49]</sup>, 进一步将式(4)所代表磨损模型扩展至交流工况下的 100 mm<sup>2</sup> 铜镁接触线和浸金属碳滑板。试验台接触副接触力在 60~90 N 变化, 16.67 Hz AC 电流强度在 300 A 和 400 A 之间, 列车速度为 210 km/h。并利用试验结果分别对受电弓滑板和接触线的磨耗模型系数做了标定(表 3)。DEROSA 等<sup>[50]</sup>认为电流的适当增加会增加润滑, 从而减少机械磨损, 但由于弓网接触副材料性质不同, 模型参数  $\alpha$  对应的电流润滑效应对接触线和滑板效果不同, 主要对接触线有利。因此, 滑板磨耗模型中排除了电流润滑作用( $\alpha=0$ ), 该现象也被台架试验拟合结果所证明。值得注意的是, 式(4)采用了磨耗影响因素相对基准工况参数的变化来预测接触线、滑板的磨损量, 以将实验室结论推广至弓网实际场景。其中基准工况参数为电流强度 300 A(AC 16.67 Hz)、法向载荷 60 N、列车速度 210 km/h。

米兰理工大学团队提出的弓网接触副磨损模型同时考虑了机械磨耗、电流焦耳热引起的磨耗和燃弧磨耗, 并引入了机械、电气作用的耦合作用机制。

基于这个模型,一方面可以基于运用参数预测弓网接触副的磨损率,另一方面可以根据目标磨损率控制既有线路的运用参数。但需注意的是,式(4)仅是个启发模型,在使用过程中,可以参照这个模型的拟合思路针对特定的弓网系统进行数据拟合。

### 1.3 异常磨损应对策略

由于弓网系统异常磨损对应的多物理场问题缺少封闭解,针对单物理场分析需求开展的仿真研究需要引入人为假设和经验公式,以简化仿真过程。仿真场景与真实物理过程全貌存在一定偏差,因此基于台架试验完成弓网载流摩擦磨损是当前科研领域的主要手段。

然而,城市轨道交通未采用 25 kV 供电制式之前,地铁列车在一公里到几公里长度的相邻车站间完成出站加速、惰行、进站停车的运行周期,区间接触网一个锚段的长度在 200~300 m,接触副相对滑动速度范围最高可达 44.44 m/s,单个受电弓平均接触力从 60 N 到 300 N 不等,动态接触力则可到 500 N,DC 1 500 V 供电制式下单个受电弓电流强度最高不超过 3 000 A,AC 25 kV 供电制式下为 400~500 A。此类实际场景参数在实验室环境内难以同时实现,尤其受限于室内接触线长度,弓网载流摩擦磨损的试验研究大都基于环-块或销-盘式试验台完成。从电气参数来看,试验台供电功率与弓网实际场景存在一定的差异;从机械相互作用来看,由于实验室无法模拟平直的接触线空间布置,导致真实弓网系统的横向和垂向振动耦合关系发生变化,进一步影响弓网系统的热量分布规律。总之,试验台接触副机械振动耦合关系、散热周期、电力参数设置与弓网系统真实场景的偏差,导致台架试验结果外推至真实场景时存在较大的不确定性。如研究现状分析所示,针对同一磨损影响因素的不同台架试验,有可能得到不一样的试验结果。

同时,现状分析部分结果还表明,弓网系统磨损包括电气磨损和机械磨损;磨损机制涉及黏着磨损、磨粒磨损、电弧侵蚀、氧化磨损等不同类型;弓网接触副热源包括摩擦热、电流焦耳热、电弧热。总之,弓网系统热、电、力三个层面不同运用参数和性能指标之间映射关系复杂,且相互影响甚至干涉。科研工作者对系统异常磨损原因还未形成统一的结论,对弓网系统异常磨损现象的认知也还有非常大的探索空间。实际上,完全解决弓网磨损问题不可能也没必要。

当弓网异常磨损现象被确认发生后,相关方遵循统一且规范的问题分析框架,科学地排查引起异

常磨损的根本原因,尽早验证和确认异常磨损相关控制变量,并通过合理的维保手段抑制和缓解异常磨损的发展态势,是当前阶段应对异常磨损事件较为可取的应对策略。

## 2 异常磨损问题分析框架

针对城轨交通弓网系统异常磨损事件缺乏规范化分析论证流程的现状,在梳理异常磨损定义的基础上,作者团队基于以往项目经验和调研结果,提出了图 7 所示的弓网系统异常磨损分析论证框架。通过对弓网系统异常磨损的量化评估、根因分析、验证确认、维保控制,以实现弓网接触副运用周期内的动态管理。

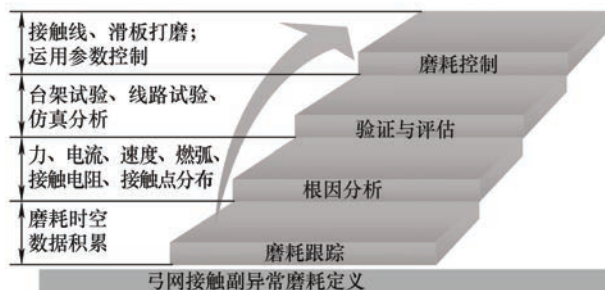


图 7 弓网异常磨损分析论证框架

### 2.1 异常磨损定义

静置的接触网和运动的受电弓通过滑动接触实现电能的传输,弓网系统因相对运动而产生摩擦,而磨损正是摩擦产生的结果。具体来说,磨损是接触副相对运动时,在表面物质相互作用下,接触副表面材料不断损失或破坏的现象。表面物质相互作用主要包括机械运动、电化学作用和热作用等。同时磨损强调相对运动,而损失包括材料直接耗失和材料的转移,破坏包括产生残余变形,断裂,失去表面精度和光泽等。不断损失或破坏则说明磨损过程是连续的、有规律的,而不是偶然的几次。

如前所述,在多物理场共同作用下,弓网磨损受到多物理参数的影响,其表现形式是一个复杂的时空变化过程。从时间尺度上看,弓网接触副摩擦磨损一般可分为三个阶段(图 8)。在跑合阶段,表面被磨平,实际接触面积不断增大,表面应变硬化,磨损速率较快;在稳定磨损阶段,斜率是磨损速率,大多数接触副在稳定磨损阶段服役;在剧烈磨损阶段,随磨损的增长,表面质量恶化,表面间隙增大,磨损增加,接触副快速失效。从而弓网系统的异常磨损表现形式之一为接触副磨损量随时间的变化率超过设计值或用户要求。

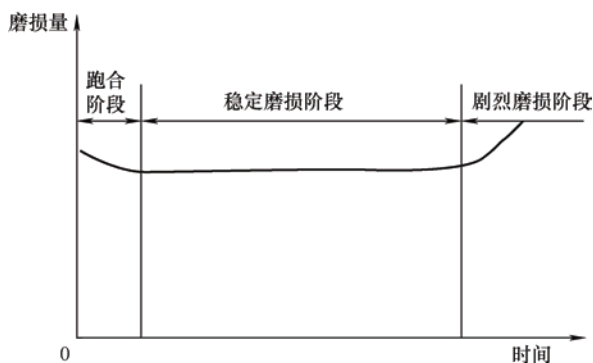


图 8 典型磨损特性曲线

从空间尺度上来看，对于受电弓滑板，异常磨损表现为某一观测时刻滑板表面形貌的异常；对于接触线，则表现为同区段不同位置磨损率不同。正常磨损情形下，碳基材料由滑板向接触线的转移能够增加接触副的润滑程度。当接触副表面形貌因异常磨损而被破坏时，滑板碳基材料中的金属成分在燃弧侵蚀的作用下熔融析出，会转移吸附至亲和性更好的铜合金接触线上，同时在滑板表面留下孔隙。从而后续正常滑板通过异常磨损的接触线、或异常磨损的滑板通过正常的接触线区段时，会造成异常磨损在全线弓网系统内扩散。

总的来说，弓网系统常见的异常磨损表现形式如表 4 和表 5 所示。

表 4 受电弓滑板异常磨损现象

序号	受电弓滑板	说明
1	掉块	滑板上表面不规则的材料脱落
2	崩边	滑板上表面与侧面结合处材料脱落
3	磨损速率超限	万公里滑板材料损失超过既定限度
4	磨损型面异常	凹坑、波磨
5	烧蚀	电弧作用引起的材料烧蚀形成的局部斑点、凸起
6	表面光泽度破坏	氧化层破坏、犁沟
7	裂纹	滑板表面裂纹

表 5 接触网异常磨损表现形式

序号	刚性接触网	说明
1	分段绝缘器零部件脱落	受电弓通过时，分段绝缘器部件撞击脱落
2	接触线拉丝	接触线下表面剥层磨损引起的材料破坏
3	接触线磨损速率超限	一定弓架次条件下磨损率超出规定限度
4	汇流排/接触线刮擦	关节、线叉或其他位置接触网部件表面擦伤
5	接触线烧蚀	电弧作用引起的材料烧蚀形成的局部斑点、凸起
6	表面光泽度破坏	接触线氧化层破坏、犁沟

## 2.2 异常磨损量化评估

从调研结果看，目前国内地铁运营商滑板磨损率的范围从 0.4 mm/万公里<sup>[6]</sup>到 40 mm/万公里<sup>[5]</sup>；接触线磨损率则从 0.0 014 mm<sup>2</sup>/万弓架次至 0.5 mm<sup>2</sup>/万弓架次<sup>[8]</sup>。滑板、接触线磨损率量化指标跨越两个数量级，一方面有异常磨损的影响存在，另一方面，也存在运营商磨损数据统计方法不统一的原因。为了量化评估弓网系统异常磨损现象，依据接触副异常磨损数据分析结果支撑地铁运营商运维决策，需要对接触副异常磨损的时空属性进行监视与测量。此外，弓网系统供应商在对比分析其产品在不同地区使用时的磨耗表现，也有采用统一的测量标准对磨损进行跟踪的需求。

对此，GB/T 34572<sup>[52]</sup>指明了滑板高度磨耗比  $W_{gd}$ 、接触线磨耗比  $W_{jcx}$  计算公式

$$W_{gd} = \frac{h_{cs} - h_{mh}}{L_{jc}} \quad W_{jcx} = \frac{A_{xcs} - A_{xmh}}{n_{sdg}} \quad (5)$$

式中， $h$  为高度， $A$  为面积，下标 cs 表示初始、mh 表示磨耗后， $L_{jc}$  为机车车辆行驶里程， $n_{sdg}$  表示受电弓通过接触线次数(弓架次)。

式(5)通过引入里程和弓架次，衡量了弓网接触副磨损量随时间的变化规律。而由于滑板与接触线磨损率的空间变化属性，在不同位置应用式(5)计量磨损率时会给出不同的结果，从而需要对计算结果进行平均处理。

为了规范受电弓滑板磨耗监测，对于时间相关的磨损率，建议采用线路最大拉出值范围内各滑板高度采样点的平均磨耗进行度量(式(6))，其中  $i$  表示采样点， $\overline{h_{mh}}$  为平均磨耗高度，采样点个数  $N$  至少为 7 个(图 9)。对于空间相关的磨耗型面异常，不考虑掉块、崩边的情况下，建议使用高度采样数据峭度值  $K_s$  进行衡量(式(7))，其取值范围为  $[0, \infty]$ ，数值越大，型面异常度越高。

$$W_{gd} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{cs,i} - h_{mh,i}) / L_{jc} \quad (6)$$

$$K_s = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{mh,i} - \overline{h_{mh}})^4}{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{mh,i} - \overline{h_{mh}})^2 \right)^2} - 3 \quad (7)$$



图 9 受电弓滑板磨耗采样点



对于接触线磨损量随时间的变化规律跟踪, 首先需要根据实际接触线截面形状建立其下表面磨损宽度(图 10)与磨损面积的对应点表, 并基于车底交路图或专用测量装备记录各站点区间内每日弓架次增加量, 在测得接触线磨损宽度后通过查表以确认接触线磨损率。对于接触线磨损率的空间变化, 可以类似式(7)的方式, 收集接触线弹性变化较大点位置的磨损宽度, 比如锚段关节、中心锚结、最大拉出位置、拉出值为零位置等。同时需要以站点区间为评估对象, 并区分加速区段、分段绝缘器、锚段关节、线岔、弹性道床区段、弯道、坡道区段、汇流排中间接头以分类整理。对于图 3 所示波长更小的波浪形磨损, 则需要考虑精度更高但成本更大的摄影测量系统以收集磨损数据。



图 10 接触线磨损测量

### 2.3 异常磨损根因分析

基于异常磨损的定义, 通过对磨损数据的监测

跟踪, 确认有发生异常磨损的趋势或已经发生异常磨损后, 需要统一的分析框架, 以规范化的形式对引起异常磨损发生的原因进行分析, 以层层递进排除的方式, 缩小影响因素的排查范围, 做到精细化的异常磨损致因分析。

从第 1.2 节所述磨损模型来看, 影响磨损的量化因素主要包括接触力、接触电阻、摩擦速度、燃弧率、材料、接触点位置等因素。考虑到弓网系统各物理量之间的相互影响关系尚未有明确的推演逻辑路径。本文从受电弓、接触网、车体等对象出发, 归纳有可能引起这些因素变化的外部因素, 以追踪异常磨损的影响因素, 结果如图 11 所示。

其中, 影响弓网接触力大小的因素主要有受电弓运行速度、抬升力、工作高度、滑板不平, 线路不平顺, 车辆晃动、抖动、踏面缺陷、弓间距, 接触网悬挂及其空间位置设置、悬挂参数、垂向不平顺度、零部件撞击等。影响电流强度的因素有滑板载流量、滑板条数, 线路坡度, 车辆加(减)速度、惰行速度等。对于弓网燃弧, 一方面与弓网接触力紧密关联, 同时受环境温湿度、雨雪冰及隧道风的影响。而接触网布置, 车顶晃动、线路半径等主要影响弓网接触点位置。

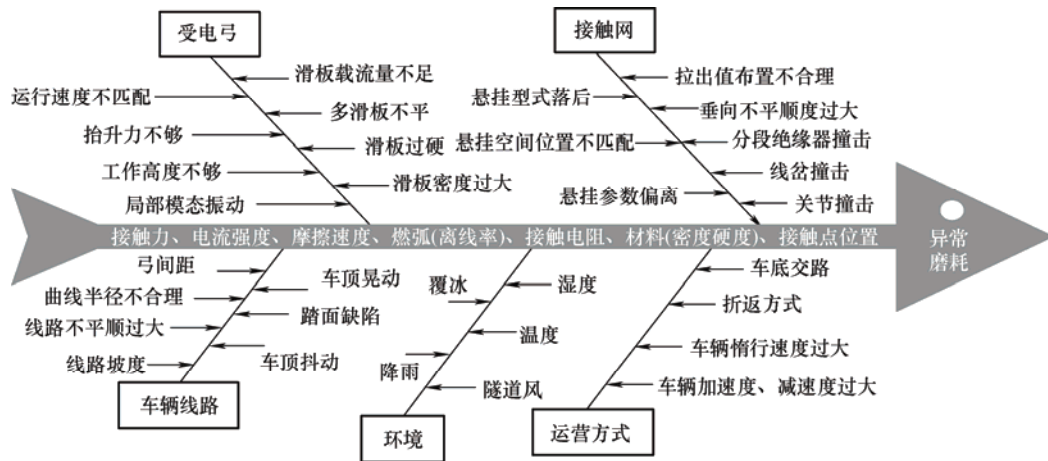


图 11 弓网系统异常磨损原因分析

### 2.4 异常磨损根因验证与确认

通过根因分析, 缩小异常磨损影响因素排查范围、甚至已初步确认引起异常磨损的影响因素后, 还需要通过各种切实可行的技术手段来验证和确认异常磨损发生的原因和变量因素, 以支撑异常磨损治理相关运维决策。从当前工程需求和科学技术现状来看, 主要可以通过线路试验、地面试验、仿真分析、数据处理等手段完成异常磨损致因的验证与确认。

#### 2.4.1 线路试验技术

线路试验技术是弓网系统异常磨损发生后的首选验证与确认手段。运营单位弓网系统主管部门可基于图 11 建立运营数据的日常收集制度, 及时完成弓网系统异常磨损现象的识别与确认, 避免局部发生的异常磨损扩散至全线接触网。在没有配备弓网在线监测系统的线路, 可以通过加装相应的监测设备开展运营场景下载流摩擦磨损的专项测试。实际上, 在企事业单位的引导和科研力量的联合推动下,



行业内已经形成了较为完善弓网系统的线路测试技术方案。

从前述调研现状和弓网接触副磨损模型来看,影响接触副磨损的关键物理量为运行速度、抬升力、电流、燃弧率,同时线路试验还可考虑环境因素的影响以及接触线异常磨损的空间变化规律。加之弓网各磨损影响因素都可以与接触点温升建立联系,因此较为完备的线路测试项点应包含车速、抬升力、电流电压、燃弧率、接触点温度、环境温湿度等。

为了准确的把握试验参数对试验结果的影响规律,可基于正交表对试验工况进行科学设计,以避免对所有参数所有水平都相互搭配进行全面试验。如表 6 所示,仅需要完成 9 次试验就可积累 3 水平 4 参数的数据记录。正交表记号  $L_n(r^m)$  中,  $n$  表示试验次数,  $r$  为参数水平数,  $m$  为安排的参数个数。试验完成后可进一步可以利用方差分析等技术分析试验参数对试验结果影响的显著性,更为详细的论述可参见文献[53]。

表 6 正交试验设计表  $L_9(3^4)$

试验号	列号			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	4

值得注意的是,弓网接触力的准确测量一直面临重大的挑战。随着城轨车辆运行速度的提升,弓头弹性振动导致接触力惯性修正可靠性降低,同时气动力的影响也逐步增大。目前,有关国内地铁受电弓等效气动抬升系数的研究尚未见报道, TB/T 3271 [54] 中平均抬升力气动系数直接沿用欧洲相关标准。即便以最小的气动系数 0.000 228 为例,在 160 km/h 条件下,平均气动力可达 7.2 N,同时由于前滑板的尾流效应,后滑板的气动抬升力与前滑板差异明显[55],从而弓头气动力矩会严重影响受电弓等效气动抬升系数计算结果。同时,就燃弧的测量而言, GB/T 32592 [56] 要求在不小于 10 km 的控制区段内测量燃弧相关数据,且运行速度保持恒定,误差在 2.5 km/h 以内。这一燃弧测量要求直接参考干

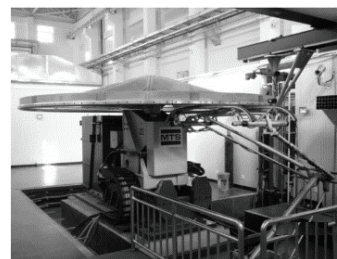
线铁路,不适用于运行区间短、加减速频繁的城轨交通运营环境,因此该要求相关的评估指标应谨慎使用。此外,由于弓网电弧在交直流情形下伏安特性的差异,城轨直流供电制式下,测试系统对燃弧起始和终止响应时间的要求也应与干线铁路有所区别。

#### 2.4.2 地面试验技术

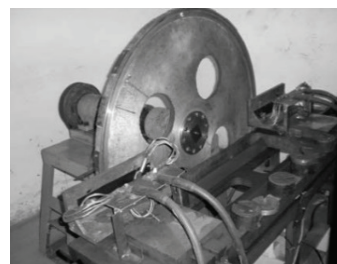
由于不受线路条件的影响,地面试验的组织安排更为灵活,因而支撑了大量科研成果的输出,同时也可作为线路试验的补充,用于验证和确认引起异常磨损发生的根本原因。从图 11 所示弓网接触副异常磨损根因分析结果来看,基于地面试验台可以完成:① 不同材料配幅时的摩擦磨损性能对比;② 受电弓滑板载流量及摩擦磨损性能验证;③ 法向载荷、电流大小、运行速度影响下弓网系统摩擦磨损规律及运用参数优化;④ 温湿度及雨水环境下摩擦磨损性能退化规律等试验内容研究。目前国内有三家单位[57-59]成功研制并应用了弓网载流摩擦磨损试验台(图 12)。各单位试验台参数汇总如表 7 所示,相关方可根据其自身需求选择相应的试验台完成弓网载流摩擦磨损试验。



(a) 西南交通大学[57]



(b) 铁道科学研究院[58]



(c) 辽宁工程技术大学[59]

图 12 弓网载流摩擦磨损试验台

表 7 国内弓网载流摩擦磨损试验台

	西南交通大学 <sup>[57]</sup>	铁道科学研究院 <sup>[58]</sup>	辽宁工程技术大学 <sup>[59]</sup>
转盘直径/m	1.1	4.0	1.0
最高模拟车速/(km/h)	400	500	282
直流制式	0~1 500 V, 0~700 A	—	—
交流制式	150 kVA, 0~700 A	0~1 000 A	6 kVA, 0~800 A
模拟拉出值/mm	±55	±350	37.5

如第 1.3 节所述, 由于电力参数设置、机械振动耦合关系、以及接触副散热周期的差异, 地面试验结果直接外推至真实场景时面临较大的不确定性。因而需要设定基准工况, 研究运用参数相对基准工况变化时弓网系统载流摩擦磨损的演变规律。同时, 从研究现状分析可看出, 试验过程中运用参数的设定、接触副磨损量的计量等存在单位不一致的现象, 导致不同单位试验结果横向对比困难。对于法向载荷、电流等物理量, 可以采用接触应力、电流密度单位, 而对于磨损率的计量, 可参照 TB/T 1842.2<sup>[60]</sup>的要求执行。此外, 实际弓网系统运用场景下, 燃弧总时长相对运行时长总体而言较小 (TB/T 3271<sup>[54]</sup>要求 160 km/h 以下时燃弧率小于 0.1%), 试验过程中应注意控制燃弧率大小, 以正确模拟机械作用、电流焦耳热效应和燃弧侵蚀对磨损量的贡献大小。

#### 2.4.3 仿真分析技术

弓网系统的仿真研究主要包括动力学<sup>[61-62]</sup>、电路<sup>[63]</sup>、热力学<sup>[64-65]</sup>、和机电耦合仿真<sup>[66]</sup>等。当异常磨损影响因素验证确认环节需要对比分析的工况条件在线路或地面试验过程中无法实现时, 仿真分析可作为重要的论证工具, 用于异常磨损发生的根因分析。值得一提的是, 在 2014 年, 意大利米兰理工大学组织了全球 10 家弓网系统相关研究机构, 针对同一套结构参数, 完成了多工况的仿真建模和分析<sup>[59]</sup>。并基于仿真结果的离散程度, 对各单位采用的动力学仿真技术进行评估, 为弓网仿真技术验证提供了关键基准, 详细研究结果可见文献[62]。

#### 2.4.4 数据处理技术

无论是异常磨损影响因素的验证与确认, 还是

异常磨损控制措施的效果评估, 都离不开基于数据分析的运维决策。针对磨损治理需求, 分别从基于场景的数据分段、数据变换滤波、特征提取等角度进行论述。

(1) 数据定位和分段。不同于弓网系统功能、性能相关的型式试验, 异常磨损影响因素的验证和确认不适合采用基于合格与否的二元判定对数据进行分析, 更为重要的是发现异常磨损各影响因素的异常。通常来说, 关节处接触网弹性分布的突变会对弓网动态相互作用造成冲击。因此, 磨损相关数据的异常分析, 应区分接触网锚段内和锚段关节通过两种情形。

图 13 和图 14 分别为三角波和正弦波拉出值的线路测量结果, 图中同时展示了应用差分技术对接触网关节的识别。基于锚段关节的识别, 可确认关节处等效拉出值是否有偏转 (图 13 有偏转, 图 14 无偏转), 还可分辨受电弓通过关节时左右接触线相对滑板的进出关系 (图 13 中 24 个左进右出关节, 图 14 中 6 个左出右进关节)。一旦识别锚段关节所在数据区域, 可基于关节的起始点位置完成数据的场景分段, 以对跨内和关节通过时的数据分别进行处理和分析。

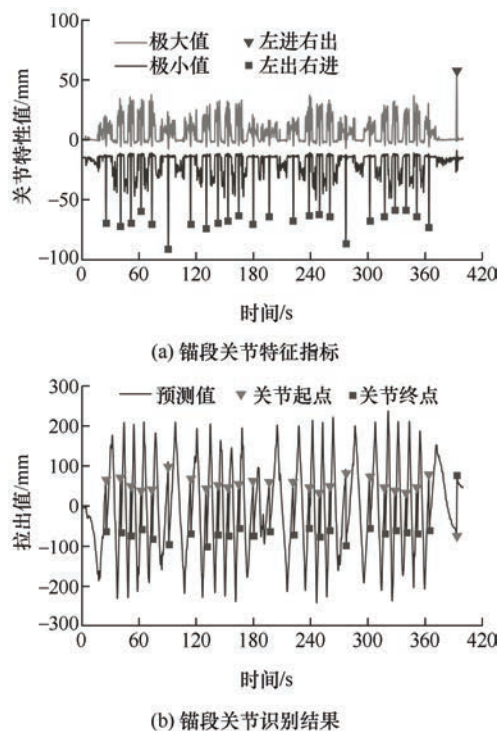


图 13 三角波拉出时锚段关节的定位

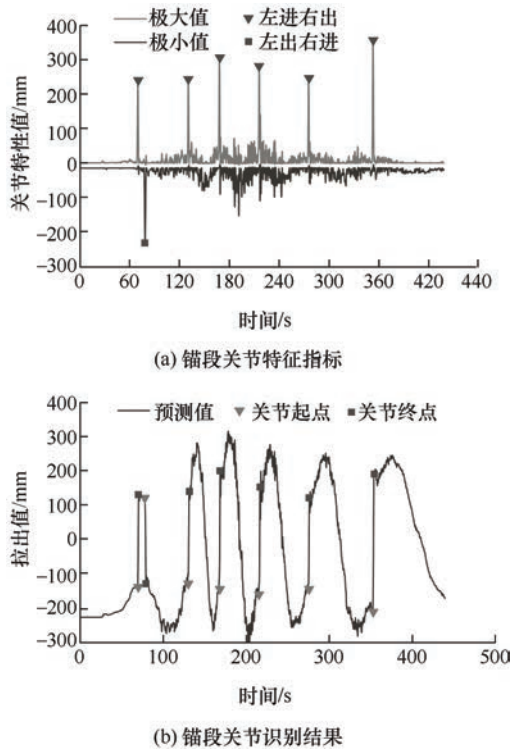


图 14 正弦波拉出值时槽段关节的定位

(2) 变换和滤波。通常,在运用特征工程技术对数据进行深度挖掘之前,需要利用各种变换和(或)滤波技术对原始数据进行处理。从变换角度来看,有频域或时频域的变换,也有基于各种基函数的展开变换(或分量分离)技术。相比数据变换,数据的滤波或平滑技术应用更为基础,比如 EN50367<sup>[67]</sup>要求对弓网数据进行 20 Hz 低通滤波。试验数据处理的滤波属于离散时间滤波器,其选择依据是要确定一个系统(传递函数或差分方程),使该系统在给定

$$\begin{aligned}
 y_1(n) &= x(n) * h(n) \xrightarrow{DFT} Y_1(\exp(j\omega)) = X(\exp(j\omega)) \times H(\exp(j\omega)) \\
 y_2(n) &= y_1(N-1-n) \xrightarrow{DFT} Y_2(\exp(j\omega)) = \exp(-j\omega(N-1)) Y_1(\exp(j\omega)) \\
 y_3(n) &= y_2(n) * h(n) \xrightarrow{DFT} Y_3(\exp(j\omega)) = Y_2(\exp(j\omega)) \times H(\exp(j\omega)) \\
 y(n) &= y_3(N-1-n) \xrightarrow{DFT} Y(\exp(j\omega)) = \exp(-j\omega(N-1)) \times Y_3(\exp(j\omega))
 \end{aligned}$$

从而没有相位失真

$$Y(\exp(j\omega)) = X \exp(-j\omega(N-1)) |H(\exp(j\omega))|^2 \quad (13)$$

(3) 特征与测度。数据特征是数据分析算法的输入,一个分析算法的性能,不仅取决于算法本身的特性,还受输入特征质量的影响。从特征工程角度来看,常见的处理手段包括以下内容:通过数据清洗实现特征增强、通过生成新属性来完成特征构建、剔除坏的属性以完成特征选择、还可以采用各种变换方法实现特征转换<sup>[68]</sup>。

以接触网质量评价指标 CQI 和 CDI 为例<sup>[69-70]</sup>,

的“容限”内逼近所希望的冲击响应或频率响应(图 15)。这样的系统分为两类:无限脉冲响应 IIR 和有限脉冲响应 FIR 系统。而 FIR 和 IIR 滤波器相位特性差异、设计难度等都存在差异。IIR 巴特沃斯滤波器是目前比较常用的滤波器。对于滤波器参数,不仅需要设置阻带、通带频率,还需要设定其对应的衰减幅度,这样才能建立统一的数据比对标准,消除不同采样频率对数据结果的影响。比如对于阻带频率,设置其幅值衰减为 60 dB 时,对应  $\delta_s = 0.001$ ,对于通带频率,可以选用功率衰减一半时的频率  $\omega_h = \omega_p$  为参考频率,此时幅值衰减至 0.707 9,对应  $\delta_p = 0.2921$ 。

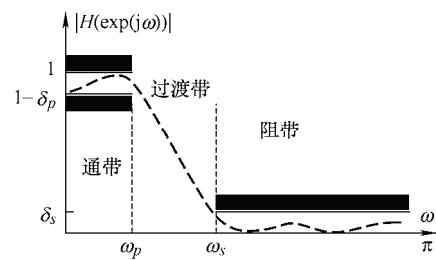


图 15 低通滤波器容限示意图

基于数据特征定位异常/故障的时空属性时,滤波器的相位差会影响定位结果的准确性。为去除滤波器导致的相位差,可采用零相位滤波技术。先将输入序列  $x(n)$  按顺序滤波( $h(n)$  或  $H(\exp(j\omega))$ ),然后将所得结果逆转反向后( $y_2(n)$ )通过滤波器,最后将所结果  $y_3(n)$  逆转后输出,即得精确零相位失真的输出序列  $y(n)$ ,其中,  $n$  为离散时刻,  $N$  为序列长度。

确认合适的接触网评定长度范围后,采用具备单调性的功效函数(比如 Logsig 函数)将接触网几何参数、弓网动态相互作用等参数映射至得分区间,再基于各评估分量的权重将各变量得分加权归一化为 CQI 或 CDI,最终得到评定区段的质量评价指标。此类质量指标,能够支撑在全国范围内使用统一的指标完成接触网质量水平的综合评价,支撑制定统一的接触网检修规程。此类系统质量评价的二元判断或区间判定,用一个通用且固定的指标来评判系统是否满足验收要求。而异常磨损相关的数据分析需要通过对各项数据的变化规律进行挖掘,建立原始数据在不同时空尺度上的特征,来提高异常识别



算法的性能, 以及及时发现弓网系统异常磨损指征。

弓网动态相互作用物理量时间序列的特征可按以下四类指标进行处理。① 基于数理统计的描述性统计量, 包括峰值、RMS 水平、峰度、偏度、峰间幅值、波峰因子等; ② 瞬态脉冲指标, 比如上升时间、下降时间、压摆率、过冲、下冲、稳定时间、脉冲宽度、占空比等; ③ 频谱测量量, 比如功率和带宽, 通道功率、带宽、均值频率、中位数频率、谐波失真、谱峭度等; ④ 各种熵, 比如香农熵、条件熵、模糊熵、样本熵、排列熵及功率谱熵等。

## 2.5 异常磨损维保控制

对于异常磨损问题, 当通过根因分析及验证和确认手段明确了异常磨损发生的原因后, 需要通过相应的维保手段来抑制异常磨损的进一步恶化。同时, 正常磨损情况下, 也需要规范的维保手段来避免异常磨损事件发生。为此, 本文主要从运维规程、运维数据管理两个方面进行分析。

### 2.5.1 弓网系统设计要

维保和预防措施旨在将磨损水平及系统状态恢复至满足设计要求。因而弓网系统相关设计标准、规范可为相关单位执行弓网系统运检修生产活动及设立维保规程提供参考。

对受电弓而言, 相关标准包括 GB/T 21561.2<sup>[71]</sup>, IEC 60494-2<sup>[72]</sup>和 EN 50206<sup>[73]</sup>。三项标准同时规定了受电弓标称静态接触力、平均静态接触力的定义和计算方法, 并对受电弓升降弓过程中静态接触力允许偏差做了规定。在弓网动态相互作用技术要求方面, TB/T 3271<sup>[54]</sup>, EN 50367<sup>[67]</sup>, IEC 62486<sup>[74]</sup>都做了比较完备的说明; 与此对应, GB/T 32592<sup>[56]</sup>, EN 50317<sup>[75]</sup>, IEC 62846<sup>[76]</sup>, GB/T 20908<sup>[77]</sup>, TB/T 3185<sup>[78]</sup>则对弓网动态作用的测试过程做了详细规定。由于刚性接触网条件下受电弓工作高度位于受电弓工作范围的下半部分, 引用此类标准过程中, 应注意城轨标准对于干线铁路标准相关条款直接引用时的适用性。

从受电弓滑板来看, 与其相关的标准为 TB/T 1842 系列标准, 该系列标准分为粉末冶金滑板、碳基复合材料滑板、碳滑板三个部分。其中浸金属滑板(碳基复合材料滑板)主要适用于城轨交通, 干线铁路则碳滑板以为主。TB/T 1842.2<sup>[60]</sup>指出, 碳基复合材料包括浸金属碳材料、碳纤维材料、多元碳化物复合材料三种。该标准同时要求, 碳基复合材料滑板在静态额定电流情况下, 温度稳定后持续 30 min, 不应超过 150 ℃。在动态额定电流情况下, 温度稳定后持续 1 h, 滑板剪切强度不应小于

5 MPa, 黏接电阻不应大于 1 mΩ。此外, 浸金属碳材料在 20 ℃时电阻率小于 10 μΩ·m, 洛氏硬度(HR5/150)小于等于 120, 体积密度小于 4.0 g/cm<sup>3</sup>。碳基复合材料滑板与接触线磨损比如表 8 所示。值得注意的是, 从当前公开报道的文献看, 仅郑州地铁 1 号线所述正常磨损率(0.4 mm/万公里)满足该标准要求。

表 8 滑板、接触线磨损比要求<sup>[60]</sup>

项目名称	速度 160 km/h 以下	速度 200 km/h 及以上
碳基复合材料滑板高度磨损比/(mm/万机车公里)	≤1.5	≤2.5
接触线磨损比/(mm <sup>2</sup> /万弓架次)	≤0.015	≤0.015

对接触网而言, 目前使用较为广泛的设计标准主要有 TB 10009<sup>[79]</sup>和 TB 10075<sup>[80]</sup>。然而这两项标准在适用范围条款中明确说明仅适用于接触网标称电压为 25 kV 的牵引供电工程。此外, IEC 60913<sup>[81]</sup>和 EN 50119<sup>[82]</sup>同时对架空接触网系统的基础设计数据、系统要求、结构和测试等方面都做了比较详细的说明, 虽然没有明确说明适用 DC1500 V 架空刚性接触网, 但具备参考意义。GB 50157<sup>[83]</sup>中有涉及 DC1500 V 刚性接触网的部分。关于接触网平面布置, 该标准提到: “架空接触线的布置, 应保证受电弓磨损均匀, 刚性架空接触网一个锚段范围内的布置宜成正弦波形态, 锚段中部定位点拉出值宜为零”。

2021 年 5 月, 广东省住房和城乡建设厅批准《轨道交通架空刚性接触网系统技术标准》为广东省地方标准<sup>[84]</sup>。该标准对架空刚性接触网的设计、零部件、施工验收和维修做了全面规定。其中接触网平面布置条文提到: “架空刚性接触网悬挂宜采用类之字形布置方式, 设计速度不高于 120 km/h 时, 最大坡度不超过 1‰, 坡度变化率不超过 0.5‰”。值得关注的是, 该标准更新了 GB 50157<sup>[80]</sup>中的关于刚性接触网拉出值宜按正弦波布置的建议。

### 2.5.2 异常磨损维保关注点

从异常磨损事件的时空特性以及各运营商应对异常磨损的处理措施来看, 当异常磨损发生后, 对于受电弓, 检修过程中需要关注受电弓滑板的水平度、升降弓过程中的抬升力曲线。从弓网动态相互作用来看, 由于所有的异常磨损事件都伴随着燃弧量的增加。为此, 需要重点关注弓网接触副通过电流、电压, 以及燃弧发生的位置。同时, 有条件的情况下, 可以对弓网接触点的温度进行跟踪。对于刚性接触网, 关注的重点区段应包括列车加速区段, 弹性道床区段, 弯道、坡道区段, 重点需要关注的零部件对象包括以下内容。



刚性锚段关节: 锚段关节水平及垂直间距、汇流排终端抬高情况。

刚性线岔: 悬挂点处拉出值情况, 始触区等高情况, 线岔处的点连接线、接地跳线。

刚性分段绝缘器: 分段绝缘器导流板等高情况; 分段绝缘器中心与线路中心偏移情况; 分段绝缘器与汇流排、接触线接头状况及接触线与分段过渡情况; 分段绝缘器主绝缘状况; 连接螺栓紧固情况。

汇流排: 汇流排表面裂纹、扭曲变形、污损腐蚀情况; 接触线嵌入汇流排情况; 汇流排接头缝宽度及螺栓紧固情况; 接触线在锚段末端汇流排外余长以及对地绝缘距离; 汇流排在汇流排线夹内顺线路的滑动情况; 汇流排终端到相邻悬挂点的距离;

定位、支撑装置: 槽钢底座、悬吊槽钢、悬垂吊挂、T 形头螺栓安装情况; 绝缘部件完好情况; 带电体距接地体的绝缘距离; 各连接螺栓紧固情况。

此外, 对于异常磨耗情形中接触网关注点的数据获取频次, 则可参考国内第一份严格区分柔性接触网和刚性接触网的江苏省地方标准 DB32/T 3291<sup>[85]</sup>, 该标准对接触网巡视与检测、接触网小修(项目、周期、内容和技术要求)做了详细规定。

### 2.5.3 接触副打磨

接触线/滑板的打磨是地铁运营商应对弓网接触副异常磨耗的常用手段。其关键环节涉及到接触副磨损后型面数据的量化管理。

对此, 刘秀美等<sup>[3]</sup>建议确保碳滑板磨耗面至托架底部的厚度大于 24 mm, 碳条有效厚度要大于 5 mm, 当同一根滑板条磨耗面出现波浪状且波浪高点与最低点高度差超过 4 mm 时, 应对高点进行打磨, 以保证滑板平滑过渡。两根碳滑板的厚度差超过 5 mm, 需对其进行更换。陈昌进等<sup>[15]</sup>则建议, 滑板厚度最低处应不低于 4 mm; 对于 50 mm 范围内凹槽深度大于 3 mm 的部位进行打磨, 确保碳滑板表面平滑; 对于 50 mm 范围内凹槽深度大于 6 mm 的碳滑板必须进行更换; 赵慧阳等<sup>[7]</sup>建议滑板的碳层厚度小于 6 mm 时更换碳滑板; 谭冬华等<sup>[86]</sup>建议, 当碳滑板凹凸超过 1~2 mm 时, 对碳滑板进行打磨。此外, 深圳地铁均衡修规程要求, 滑板厚度最低处应不低于 5 mm。对凹槽曲率半径介于 106 mm 与 158 mm 之间, 以及凹槽曲率半径小于 106 mm 但 50 mm 范围内凹槽深度小 3 mm 的, 用便携式多功能切割打磨仪(或平锉刀)打磨, 使其曲率半径大于 158 mm(即 50 mm 范围内凹槽深度少 2 mm); 对 50 mm 范围内凹槽深度大于 3 mm 的必须进行更换。

在接触网方面, DBJ T 15-222<sup>[84]</sup>要求: 当整锚段接触线的磨耗高度达到总高度的一半, 或接触线局部下表面宽度大于 12 mm 时, 需要整锚段或者局部更换接触线。

总的来说, 应对弓网系统异常磨耗所采取的打磨和更换措施, 缺少制度化的量化管理规定。DBJT 15-222<sup>[84]</sup>按照标准值、警示值、限界值对设备状态进行了初步的等级划分, 但没有覆盖受电弓滑板。为规范化弓网系统异常磨耗相关的数据管理, 有待围绕接触副异常磨耗的参数化定义、异常磨耗后弓网系统性能劣化趋势、以及磨耗治理经济成本等方面, 制定适用城市轨道交通运用环境的弓网系统打磨专项指南或规范。

### 2.5.4 基于数据治理的智能运维

在城市轨道交通建设投入放缓、运维新技术需求日益增长的大背景下, 数字化转型成为城轨交通上下游企业完成业务场景创新, 实现价值体系优化和重构的重要手段。从而, 地铁运营商及相关单位可利用异常磨耗事件发生的契机, 以磨耗治理场景需求为导向, 以运维数据为基础, 以算法为支撑, 逐步在弓网磨耗治理领域实现智能运维系统的工程化落地(图 16)。

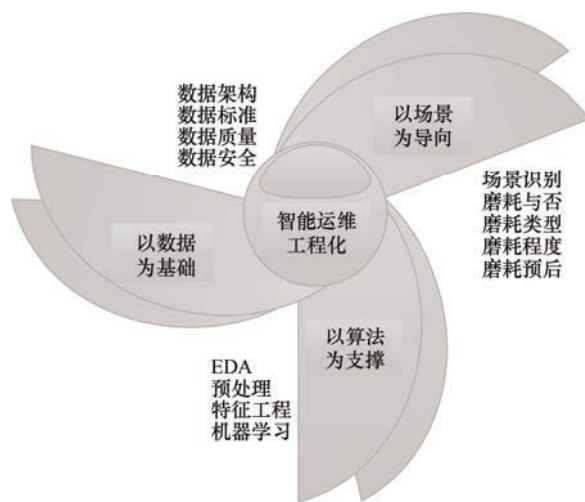


图 16 智能运维工程化落地三驾马车

首先, 以弓网多物理场耦合作用现象的控制为核心目标, 基于列车运行区段的场景识别, 从异常磨耗存在性、类型、位置、程度、磨耗寿命等角度, 确认弓网系统运用效能提升的数字化/智能化改造需求, 明确运维数据价值提升的战略规划。

其次, 针对接触网、受电弓、车线耦合、运营方式、环境因素建立标准化的数据采集规范, 确保运维数据质量, 同时建立符合战略规划的企业级数据架构和数据安全规划, 以运维数据为基础夯实智能运维系统核心驱动要素。

第三, 以弓网系统设计参数、检修参数、运用参数、状态监测参数等多源异构数据为输入, 按照探索性数据分析(EDA)、预处理、特征工程、机器学习算法设计, 建立规范化的数据分析流程, 以算法为支撑, 面向场景需求贯通数据、算法和运维业务决策。

### 3 接触线拉出值布置影响评估

从作者团队参与的弓网系统异常磨损治理项目来看, 接触线拉出值的布置是弓网系统异常磨损现象根因分析的关注热点和重点<sup>[87-88]</sup>。多家地铁运营商在弓网系统异常磨损期间按正弦波或三角波布置方式调整接触线的拉出值。然而, 对于刚性接触网拉出值的布置类型, 行业内尚未达成一致意见。GB 50157<sup>[83]</sup>建议刚性网一个锚段内设置为正弦波布置, 广东省地标<sup>[84]</sup>和方岩<sup>[89]</sup>则建议拉出值应采用三角波的方式布置。从磨损模型中影响弓网系统异常磨损的参数来看, 接触网布置主要从三个方面影响接触副的磨损率。

(1) 拉出值整体布置方式, 一方面决定了一个周期内弓网接触点在受电弓滑板上的分布规律, 另外还影响滑板上移动热源的移动速度和滑板散热周期, 从而影响滑板磨损后的型面特征和接触线磨损率的空间分布。

(2) 拉出值布置对应的扫掠速度, 影响弓网接触点分离瞬间的相对滑动速度, 决定摩擦磨损物理过程的时间尺度。如图 17 所示,  $\theta$  是接触线切线偏离轨道中心线的夹角。 $\tan\theta$  定义为接触线拉出值的扫掠速度, 即单位前进距离上拉出值的变化量, 单位为 mm/m, 扫掠速度绝对值越大, 拉出值越陡; 绝对值越小, 拉出值越平缓。从行业经验来看, 扫掠速度一般限制在 3~15 mm/m 内变化。

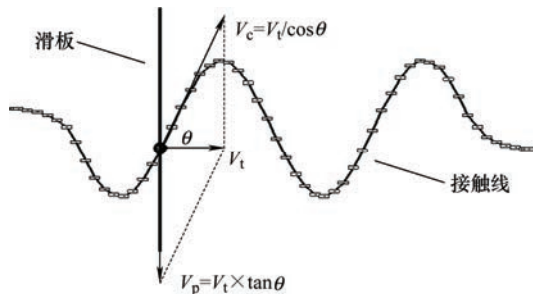


图 17 拉出情况下弓网接触点相对速度

(3) 接触网拉出值的过零点次数, 决定了受电弓通过关节时等效拉出值(空间力系等效载荷作用点横向位置)相对跨内拉出值的偏转与否, 从而影响受电弓通过关节时冲击效应的强度。

本文以表 9 所示 4 种接触网布置方案为例, 基于动力学仿真技术示例说明接触网布置对弓网动态相互作用的影响。从拉出值波形来看, 包括正弦和三角波两种形式, 同时改变拉出值过零点次数, 以控制关节位置等效拉出值的偏转; 从扫掠速度来看, 最大扫掠速度控制在 7 mm/m 以内, 其中正弦布置扫掠速度连续变化, 最大值在跨中, 三角波布置扫掠速度在直线段保持相同, 一个周期内有跳变。从一个锚段内接触点分布来看, 正弦波布置时, 最大拉出值和关节处的接触点分布较为集中。三角波布置时, 接触点分布整体更均匀。关节处等效拉出值的偏转与否, 控制了滑板中心邻近区域相对滑板两侧的接触点分布密集程度。同时, 为了对比接触网布置对异常磨损后滑板的适应性, 在滑板上设置了单侧磨损凹坑。

图 18 为上述四种不同类型接触网拉出值布置对应的弓网动态相互作用时程曲线。从图 18 a 可看出, 当滑板存在凹坑时, 正弦波布置的接触网弓网接触力和振动加速度响应都存在较为明显的冲击效应。图 18 b 则表明, 当关节位置等效接触点发生偏转时, 弓网冲击更为明显。

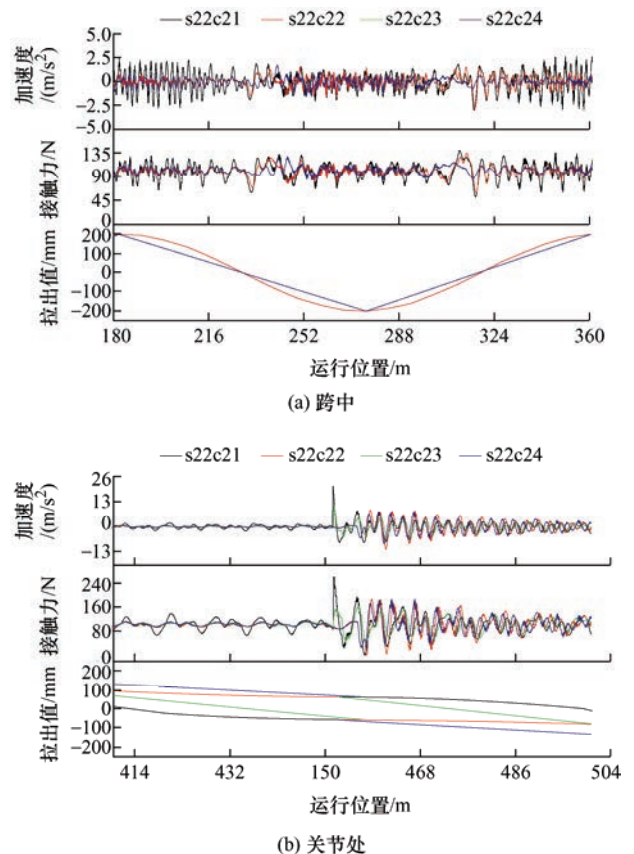
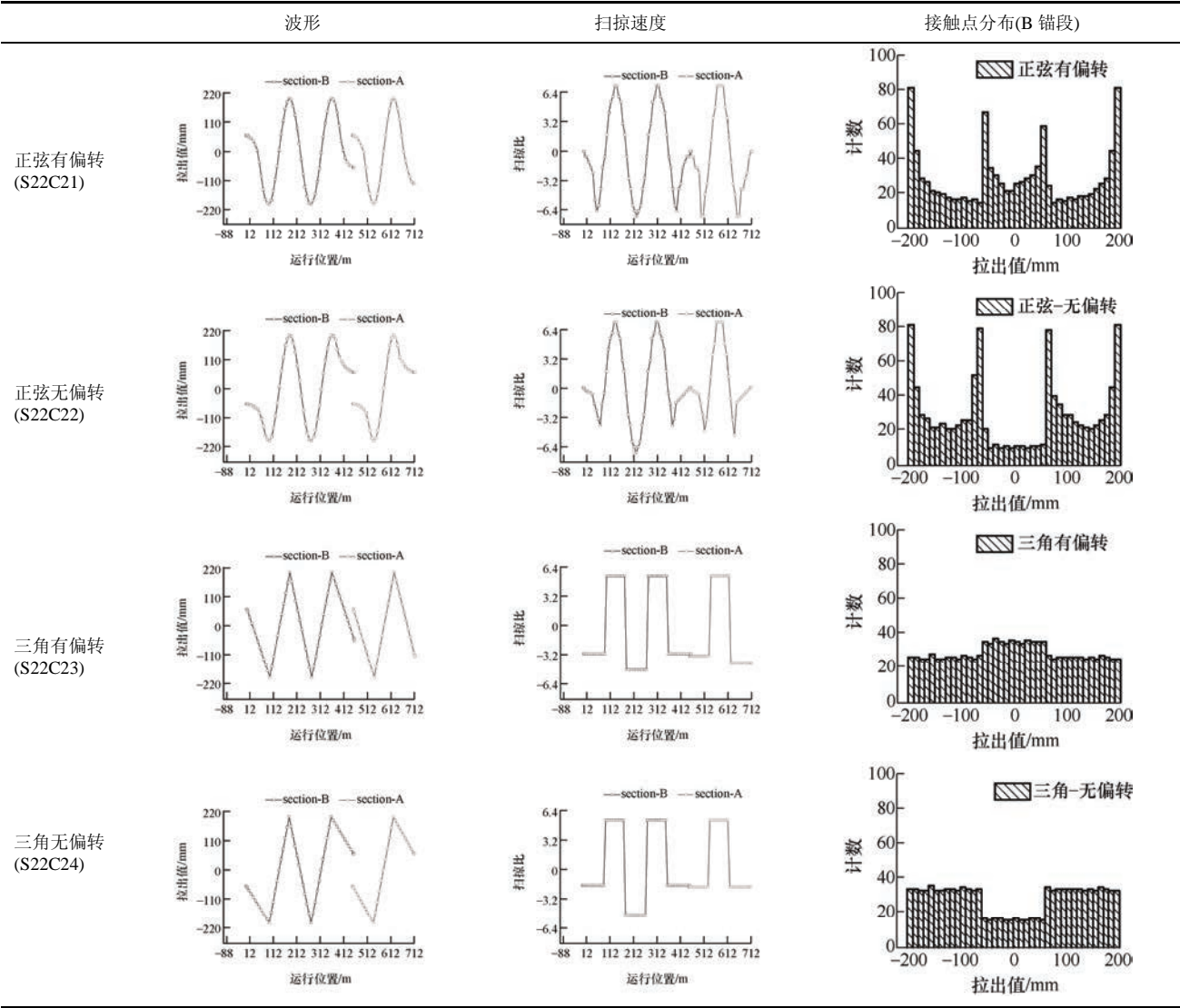


图 18 不同布置方式下弓网动态时程曲线

表 9 刚性接触网拉出值布置及其扫掠速度和分布



参照第 2.4 节所述弓网系统动态响应时间序列的特征值分析,表 10 列出了四种接触网布置对应的弓网接触力统计指标,并按跨内和关节处做了场景区分。从表中可看出,三角波布置的接触网,弓网接触力的振荡以及峰峰值相

比正弦波布置都要小,且在关节处和跨内都是同样的趋势。对于正弦波布置,关节处等效拉出值无偏转时能降低跨内和跨中的接触力震荡和峰峰值。对于三角波布置,有偏转相比无偏转受流性能较好。

表 10 跨内和关节处不同接触网布置时接触力的统计

工况	工况描述	Mean/N		Std/N		Min/N		Max/N	
		跨内	关节	跨内	关节	跨内	关节	跨内	关节
S22C21	正弦有偏转	101.33	101.85	15.28	28.09	52.23	0	141.21	261.02
S22C22	正弦无偏转	101.26	101.14	9.57	24.92	60.35	0	136.12	187.29
S22C23	三角有偏转	102.72	102.91	6.62	18.48	83.92	41.36	129.36	164.99
S22C24	三角无偏转	102.71	103.20	6.62	21.74	83.90	18.69	129.38	187.00



## 4 滑板磨耗凹坑维保阈值分析

滑板打磨是地铁运营商应对弓网系统异常磨耗的常用维保措施,而前述调研和分析结果表明,滑板磨耗凹坑打磨的数字化管理缺少统一的标准。为此,本文从滑板磨耗凹坑影响系统动力学性能的角度出发,基于弓网仿真技术,对滑板磨耗凹坑的维保阈值进行初步探索。

(1) 滑板凹坑参数化。为研究图 19 所示的滑板磨耗凹坑对弓网系统性能的影响规律,用式(8)参数化磨耗凹坑,输入仿真模型完成弓网动态相互作用仿真模拟。该凹坑函数在凹坑和既有型面连接处导数为零,可确保光滑过渡。其中,  $x$ 、 $y$  分别为凹坑点云位置和高度,  $t$  为中间变量,  $x_u$  为凹坑的上边界,  $x_d$  为凹坑的下边界。

$$y = t^2(3 - 2t) \quad t = \max\left(0, \min\left(1, \frac{x - x_d}{x_u - x_d}\right)\right) \quad (8)$$

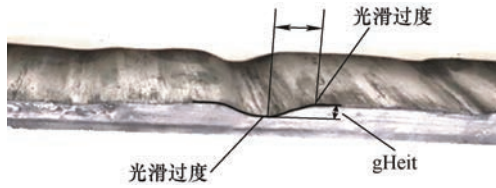


图 19 受电弓滑板凹坑示意图

通过控制凹坑长度、深度,本文模拟了形如图 20 所示的三类滑板型面磨耗凹坑。包括拉出值范围内整体均匀磨耗,深度设置为 0 mm、2.5 mm、5 mm、7.5 mm、10 mm、15 mm;磨耗凹坑位于滑板中心,磨耗深度设置为 10 mm,宽度在 25 mm、37.5 mm、50 mm、75 mm、100 mm 范围内变化;凹坑位于拉出值-60 位置处的偏心磨耗,此时锚段关节内接触线拉出值与凹坑位置相同,以模拟凹坑磨耗滑板的关节通过性能,凹坑长度设置为 50 mm,深度在 2.5 mm、5 mm、7.5 mm、10 mm、15 mm 范围内变化。

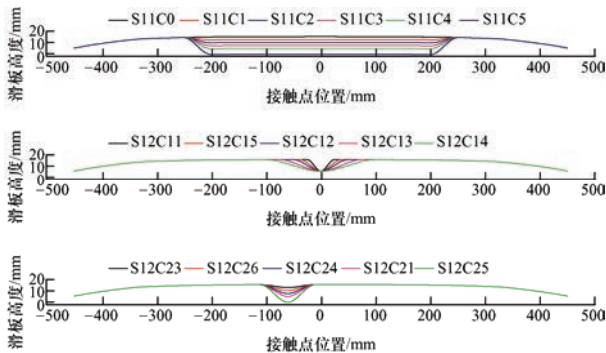


图 20 受电弓滑板凹坑参数化工况

(2) 滑板磨耗凹坑影响。图 21 为滑板磨耗情形下受电弓通过凹坑位置时弓网动态响应的时程曲线。从图 21a 可看出,滑板凹坑位于滑板中心位置,且凹坑深度 10 mm,宽度 25 mm 时,弓网接触发生了离线,同时振动加速度数据表明凹坑位置冲击明显,且冲击能量的衰减过程持续近 100 m。同时,由于凹坑的存在,弓头位移在进入凹坑底部之前就发生改变,在凹坑中心位置达到最大值。由图 21b 可看出,相比滑板中心位置的磨耗凹坑,关节内接触线所在位置的滑板凹坑对弓网动态相互作用的冲击更为明显,接触力、弓头侧滚角、振动加速度,都在滑板凹坑与关节接触时出现明显的冲击。而弓头位移响应,则在接触点进入滑板凹坑时就已经发生改变。

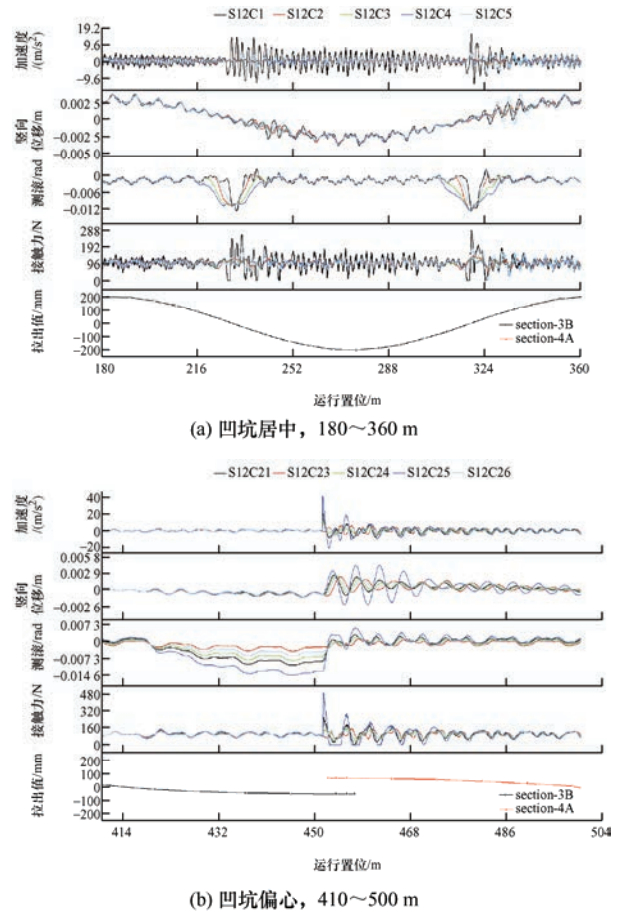


图 21 弓网动态相互作用时程曲线

将滑板凹坑参数按深长比无量纲化后,图 22 给出了弓网接触力震荡特征随凹坑深长比的变动情况,从中可看出,关节内接触线拉出值对应的滑板凹坑对受流性能影响更为明显。当凹坑的深长比达到 0.2 时,接触力标准差已开始接近平均值(100 N)的三分之一,预示弓网离线的可能性越来越大。因此,滑板磨耗凹坑 0.2 的深长比,可以作为滑板凹



坑打磨的临界值使用。

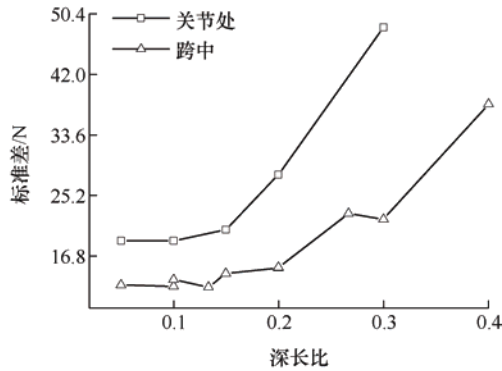


图 22 受电弓磨损凹坑对接触力的影响

## 5 结论与展望

弓网关系多物理场共同作用的特征属性，导致单一物理场中，或多物理场中特定接触副/特定工况条件下探索得到的异常磨损规律难以支撑其运维决策。对于认知弓网系统物理量间耦合作用机制，及耦合关系的解耦验证试验设计，尚缺少多变量关联关系的系统性研究成果支撑。弓网系统设计、制造、检修相关科学研究和工程管理还有大量的探索空间，具体来说，在科学研究层面包括以下内容。

(1) 标准化弓网载流摩擦磨损台架试验流程。根据城轨弓网系统实际运用环境，制定标准化的试验台参数技术规范；针对弓网异常磨损事件燃弧增加的共性，严格控制燃弧热、电流焦耳热、电弧热的比重，基于科学的试验工况设计和标准化的试验数据后处理方法，研究弓网电接触热源作用规律及其对磨损的影响；考虑试验台与真实运用场景机械振动耦合关系、散热周期、电力参数设置的差异，建立台架试验数据、模型至实际场景的标准化外推算法。

(2) 加紧研制适用于国内城轨交通弓网接触副的磨损机制图和磨损模型。针对国内常用的材料配幅、运用及环境条件，考虑热、电、力等多物理场耦合作用，研究磨损影响因素耦合及解耦机理，确认弓网接触副磨损机制及其转换条件，进一步研制表征运用参数、状态参数关联关系的磨损模型，指导弓网系统新线产品选型和既有线运用参数优化。

(3) 基于早期微弱指征的异常磨损识别算法研究。针对弓网系统运用参数、状态参数的复杂关联关系，在时域、频域、时频域内研究异常磨损的多维度特征指标建模方法，以异常磨损存在性、位置、类型、程度以及剩余磨损寿命识别需求为导向，借

助机器学习、模式识别、数据挖掘等技术，研制弓网接触副异常磨损识别算法，支撑异常磨损事件的及早发现和及早治理。

在工程应用层面，包括以下内容。

(1) 尽早启动弓网系统运维数据治理项目。地铁运营商宜发挥其处于运维数据生命周期源头的节点优势，围绕影响弓网接触副磨损的设计参数、运用参数、状态参数、检修参数等，建立标准化的运维数据采集规范；研究通畅的跨部门数据共享机制，联合科研机构完成数据分析标准建设，共同打造数据、算法、场景驱动的智能运维系统落地示范工程。基于数据决策完成弓网系统运用参数、检修规程的优化，最终实现弓网系统可靠性、可用性、安全性、经济性的提升。

(2) 加快城轨弓网系统造运检修相关标准体系建设。从弓网系统设计、制造、运用、检测、维修等视角，全面梳理干线铁路弓网系统相关标准在城市轨道交通领域内的适用性。根据干线铁路和城轨交通弓网系统运用环境的差异，修订或制定适用于城轨交通弓网系统的标准规范。针对城轨交通刚性接触网，考虑锚段内、线岔、关节、坡道、弯道、电分段等场景，细化接触线几何参数设计指标，以适用滑板磨损后的受流功能需求。在弓网系统异常磨损治理方面，拓宽弓网在线监测系统技术规范覆盖范围，加入异常磨损检测功能，同时重点关注接触线、滑板磨损的评估、更换、打磨标准建设。

## 参考文献

- [1] 李金华. 架空刚性接触网系统技术发展回顾[J]. 电气化铁道, 2020, 31: 17-20.  
LI Jinhua. Review on technical development of overhead rigid catenary system[J]. Electric Railway, 2020, 31: 17-20.
- [2] 刘国良. 广州地铁二号线列车受电弓碳滑板异常磨损分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 312(2): 52-53.  
LIU Guoliang. Analysis of pantograph carbon contact strip abnormal wear on Guangzhou metro line 2 train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2008, 312(2): 52-53.
- [3] 刘秀美, 徐崎姝, 李亮, 等. 大连地铁 1&2 号线受电弓碳滑板异常磨损研究[J]. 铁道机车与动车, 2020, 5(4): 30-33.  
LIU Xiumei, XU Qishu, LI Liang, et al. Study on abnormal wear of pantograph carbon strip of Dalian metro line 1 and 2[J]. Railway Locomotive and Motor Car,

- 2020, 5(4): 30-33.
- [4] 刘宇, 徐平. 乌鲁木齐地铁 1 号线弓网异常磨损研究及解决措施[J]. 设备管理与维修, 2021, 20(2): 32-33.
- LIU Yu, XU Ping. Study on abnormal wear of pantograph and catenary of Urumqi metro line 1 and its solutions[J]. Equipment Management and Maintenance, 2021, 20(2): 32-33.
- [5] 李家栋. 南京地铁 4 号线弓网异常磨损问题探讨[J]. 交通世界, 2020, 552(30): 13-14.
- LI Jiadong. Discussion on abnormal wear of pantograph and catenary of Nanjing metro line 4[J]. Transpoworld, 2020, 552(30): 13-14.
- [6] 刘腾飞. 郑州地铁 1 号线车辆受电弓典型故障分析及措施[J]. 机车车辆工艺, 2018, 2(5): 47-48.
- LIU Tengfei. Typical fault analysis and measures of vehicle pantograph of Zhengzhou metro line 1[J]. Rolling Stock Technology, 2018, 2(5): 47-48.
- [7] 赵慧阳. 郑州地铁 2 号线碳滑板磨损分析及选型[J]. 工程技术研究, 2019, 4(10): 223-224.
- ZHAO Huiyang. Wear analysis and type selection of carbon strip for Zhengzhou metro line 2[J]. Engineering Technology Research, 2019, 4(10): 223-224.
- [8] 朱星光, 陈善乐, 秦建伟. 广州地铁 2 号线弓网关系优化设计研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(7): 63-68.
- ZHU Xingguang, CHEN Shanle, QIN Jianwei. Research on optimal design of pantograph-catenary relationship of guangzhou metro line 2[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(7): 63-68.
- [9] 余运嵩. 城市轨道交通刚性接触网异常磨损分析与应对措施[J]. 技术与市场, 2019, 26(2): 138-139.
- YU Yunsong. Analysis and countermeasures of abnormal wear of rigid catenary in urban rail transit[J]. Technology and Market, 2019, 26(2): 138-139.
- [10] 朱伟鹏. 深圳地铁 11 号线受电弓碳滑板磨损率研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(4): 121-126.
- ZHU Weipeng. Study on wear rate of pantograph carbon strip of Shenzhen metro line 11[J]. Railway Rolling Stock, 2018, 38(4): 121-126.
- [11] 张璐. 广州地铁二号线刚性接触线磨损分析报告与应对措施[J]. 中国新技术新产品, 2018, 10(5): 1-3.
- ZHANG Lu. Analysis and research report on wear of rigid contact line of Guangzhou metro line 2 and Countermeasures[J]. China's New Technologies and Products, 2018, 10(5): 1-3.
- [12] 周成尧, 刘畅. 北京地铁 6 号线受电弓滑板异常磨损研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39: 51-54.
- ZHOU Chengyao, LIU Chang. Study on abnormal wear of pantograph strip of Beijing metro line 6[J]. Railway Rolling Stock, 2019, 39: 51-54.
- [13] 宋相宇, 李耕, 高志良, 等. 郑州地铁 3 号线弓网异常磨损情况分析[J]. 河南科技, 2021, 40(36): 77-79.
- SONG Xiangyu, LI Gen, GAO Zhiliang, et al. Analysis on abnormal wear of pantograph and catenary of Zhengzhou metro line 3[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(36): 77-79.
- [14] 朱波. 重庆地铁车辆受电弓滑板拉弧烧损情况的分析及解决措施[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39: 63-67.
- ZHU Bo. Analysis and solution of arcing damage of pantograph strip of Chongqing metro vehicle[J]. Railway Rolling Stock, 2019, 39: 63-67.
- [15] 陈昌进, 张立军. 郑州地铁 1 号线弓网异常磨损原因分析及整改[J]. 电气化铁道, 2020, 31(6): 77-79.
- CHEN Chanjin, ZHANG Lijun. Cause analysis and rectification of abnormal wear of pantograph and catenary of Zhengzhou metro line 1[J]. Electrified Railway, 2020, 31(6): 77-79.
- [16] 蒋灵君. 刚性接触网线路车辆碳滑板异常磨损分析[J]. 现代城市轨道交通, 2011, 1(3): 1-3
- JIANG Lingjun. Analysis on abnormal wear of carbon strip of rigid catenary line vehicle[J]. Modern Urban Rail Transit, 2011, 1(3): 1-3
- [17] 诸忠华. 南京地铁 4 号线弓网异常磨损研究与解决[J]. 设备管理与维修, 2020, 1(12): 34-35.
- ZHU Zhonghua. Research and solution on abnormal wear of pantograph and catenary of Nanjing metro line 4[J]. Equipment Management and Maintenance, 2020, 1(12): 34-35.
- [18] TATSUYA K, MITSUO A. Mechanism of undulating wear formation of overhead rigid conductor line related to dynamic characteristics of pantographs[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2012, 6(5): 641-654.
- [19] 金学松, 李霞, 李伟, 等. 铁路钢轨波浪形磨损研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 264-273.
- JIN Xuesong, LI Xia, LI Wei, et al. Review of rail corrugation progress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 264-273.
- [20] 金学松, 吴越, 梁树林, 等. 高速列车车轮多边形磨损、机理、影响和对策分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 118-136.
- JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Characteristics-mechanism-influences and countermeasures of polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 118-136.
- [21] 章赛丹, 陈光雄, 杨红娟. 接触压力对碳滑板/铜接触线载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 1-5.
- ZHANG Saidan, CHEN Guangxiong, YANG Hongjuan. Effect of contact pressure on current carrying friction and wear properties of carbon strip/copper contact wire[J]. Lubrication and Sealing, 2012, 37(9): 1-5.
- [22] 陈忠华, 王铁军, 回立川, 等. 弓网系统滑动电接触最优压力载荷的确定[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 86-92.
- CHEN Zhonghua, WANG Tiejun, HUI Lichuan, et al. Determination of the optimal contact load in pantograph-catenary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 86-92.
- [23] 杨正海, 上官宝, 孙乐民, 等. 相对滑动速度对铜-石墨复合材料载流摩擦性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 117-122.
- YANG Zhenghai, SHANGGUAN Bao, SUN Lemin, et al. Effect of relative sliding speed on current carrying friction properties of copper graphite composites[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 117-122.
- [24] 杨广英, 徐超, 杨才智, 等. 铜锡合金接触导线高速磨损性能试验研究[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(11): 31-33.
- YANG Guangying, XU Chao, YANG Caizhi, et al. Experimental study on high speed wear performance of copper tin alloy contact wire[J]. Railway Technical Supervision, 2016, 44(11): 31-33.
- [25] 梅桂明. 刚性接触网-受电弓载流磨损性能的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1305-1310.
- MEI Guiming. Experimental study on wear performance of rigid catenary-pantograph system with direct current[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1305-1310.
- [26] 郭凤仪, 马同立, 陈忠华, 等. 不同载流条件下滑动电接触特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 18-23.
- GUO Fengyi, MA Tongli, CHEN Zhonghua, et al. Sliding electrical contact characteristics under different current carrying conditions[J]. Journal of Electrotechnics, 2009, 24(12): 18-23.
- [27] 王鑫, 陈光雄, 杨红娟, 等. 电弧能量对碳滑板/铜接触线高速滑动摩擦磨损性能影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(6): 1-4.
- WANG Xin, CHEN Guangxiong, YANG Hongjuan, et al. Effect of arc energy on high speed sliding friction and wear properties of carbon strip/copper contact wire[J]. Lubrication and Sealing, 2011, 36(6): 1-4.
- [28] 胡道春, 孙乐民, 上官宝, 等. 电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 36-42.
- HU Daochun, SUN Lemin, SHANGGUAN Bao, et al. Effect of arc energy on current carrying friction and wear properties of metal impregnated carbon strip material[J]. Journal of Tribology, 2009, 29(1): 36-42.
- [29] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. Wear, 1998, 216(1): 172-178.
- [30] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. Tribology International, 1999, 32 (1): 367-378.
- [31] KUBOTA Y, NAGASAKA S, MIYAUCHI T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current[J]. Wear, 2013, 302(1): 1492-1498.
- [32] MEI Guiming. Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage[J]. Tribology International, 2020, 151(11): 1-13.
- [33] MEI Guiming. Impact of voltage on the electric sliding tribological properties of current collectors against overhead lines[J]. Wear, 2021, 474(6): 1-13.
- [34] MEI Guiming, FU Wenming, CHEN Guangxiong, et al. Effect of high-density current on the wear of carbon sliders against Cu-Ag wires[J]. Wear, 2020, 452(7): 1-7.
- [35] 胡艳, 董丙杰, 黄海, 等. 碳滑板电滑动温升及其对滑板磨损影响的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 677-683.
- HU Yan, DONG Bingjie, HUANG Hai, et al. Experimental study on electric sliding temperature rise of carbon strip and its influence on strip wear[J]. Journal of Tribology, 2015, 35(6): 677-683.
- [36] CHEN G, HU Y, YANG H J, et al. Experimental study on the temperature of the contact strip in sliding electric contact[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231 (1): 1268-1275.
- [37] 王英, 刘志刚, 黄可, 等. 计及机械和电气特性的弓网表面热流分析和计算[J]. 铁道学报, 2014, 36(7): 36-43.

- WANG Ying, LIU Zhigang, HUANG Ke, et al. Analysis and calculation of surface heat flow of pantograph and catenary considering mechanical and electrical characteristics[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36 (7): 36-43.
- [38] 周悦, 魏文赋, 高国强, 等. 弓网电接触系统滑板温升特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 74-80.
- ZHOU Yue, WEI Wenbin, GAO Guoqiang, et al. Characteristics of temperature rise of pantograph strip in electric contact system between pantograph and catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 74-80.
- [39] 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.
- ZHANG Yongzhen, YANG Zhenghai, SHANGGUAN Bao. Research status and challenges of current carrying friction[J]. Journal of Nature, 2014, 36(4): 256-263.
- [40] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 载流摩擦磨损研究现状及展望[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2272-2280.
- HUI Yang, LIU Guiming, YAN Tao, et al. Research status and prospect of current carrying friction and wear[J]. Material Guide, 2019, 33(13): 2272-2280.
- [41] 李含欣, 季德惠, 沈明学, 等. 环境湿度对碳/铜滑动接触副载流摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 709-718.
- LI Hanxin, JI Dehui, SHEN Mingxue, et al. Effect of environmental humidity on tribological behavior of carbon/copper current-carrying sliding contact pairs[J]. Journal of Tribology, 2022, 42(4): 709-718.
- [42] LIM S C, ASHBY M F. Wear-Mechanism maps[J]. Acta Metallurgica, 1987, 35(1): 1-24.
- [43] LIM S C. Recent developments in wear-mechanism maps[J]. Tribology International, 1998, 31(1): 87-97.
- [44] BUCCA G, COLLINA A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system[J]. Wear, 2009, 266(1): 46-59.
- [45] 谭慧强. 铜基湿式摩擦副摩擦学性能及磨损图研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- TAN Huiqiang. Study on tribological performance and wear diagram of copper based wet friction pair[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [46] KATO K. Classification of wear mechanisms/models[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology, 2005, 216(6): 349-355.
- [47] SIEBERG P M, KURTULAN D, HANKE S. Wear mechanism classification using artificial intelligence[J]. Materials, 2022, 15(7): 2358-2374.
- [48] COLLINA A, MELZI S, FACCHINETTI A. On the prediction of wear of contact wire in OHE lines: A proposed model[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37 (1): 579-592.
- [49] BUCCA G, COLLINA A. Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model[J]. Tribology International, 2015, 92 (1): 47-56.
- [50] DEROSA S, NVIK P, COLLINA A, et al. A heuristic wear model for the contact strip and contact wire in pantograph-catenary interaction for railway operations under 15 kV 16.67 Hz AC systems[J]. Wear, 2020, 456(9): 1-29.
- [51] ZHAO H, BARBER G C, LIU J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current[J]. Wear, 2001, 249(1): 409-414.
- [52] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 34572—2017 轨道交通受流系统受电弓碳滑板试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the people's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 34572—2017 Test method for pantograph carbon strip of rail transit current collection system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [53] 里云艳. 试验设计与数据处理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- LI Yunyan. Experimental design and data processing[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [54] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3271—2011 轨道交通-受流系统-受电弓与接触网相互作用准则[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2011.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T 3271—2011 Rail transit-current collection system-interaction criterion between pantograph and catenary[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2011.
- [55] DAI Z, LI T, DENG J, et al. Effect of the strip spacing on the aerodynamic performance of a high-speed double-strip pantograph[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 1(1): 1-17.
- [56] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32592—2016 轨道交通 受流



- 系统 受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of quality Supervision , Inspection, and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 32592—2016 Requirements and verification of dynamic interaction measurement between pantograph and catenary in rail transit current collection system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [57] 杨红娟, 胡艳, 陈光雄. 受电弓滑板载流磨损机理演变过程试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 77-83.
- YANG Hongjuan , HU Yan , CHEN Guangxiong. Experimental study on evolution of wear mechanism of contact strip with electric current[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 77-83.
- [58] 王亚春, 陈立明, 杨才智. 高速铁路弓网关系模拟试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 79-85.
- WANG Yachun , CHEN Liming , YANG Caizhi. Simulation test study on Pantograph catenary relationship of high speed railway[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 79-85.
- [59] 姜国强. 弓网滑动电接触摩擦磨损行为研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- JIANG Guoqiang. Study on friction and wear behavior of pantograph catenary sliding electrical contact[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2010.
- [60] 国家铁路局. TB/T 1842.2—2016 受电弓滑板 第 2 部分: 碳基复合材料滑板[S]. 北京: 国家铁路局, 2017.
- National Railway Administration. TB/T 1842.2—2016 Pantograph strip; Part 2: Carbon matrix composite strip[S]. Beijing: National Railway Administration, 2017.
- [61] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50318: 2018 Railway applications-Current collection systems-Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S]. Brussels: CLC/TC 9X-Electrical and Electronic Applications for Railways, 2018.
- [62] BRUNI S, AMBROSIO J, CARNICERO A, et al. The results of the pantograph-catenary interaction benchmark[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(3): 412-435.
- [63] 高国强. 轨道交通弓网系统电接触[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
- GAO Guoqiang. Electric contact of pantograph catenary system of rail transit[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018.
- [64] 郭凤仪, 陈明阳, 陈忠华, 等. 弓网滑动电接触摩擦力特性与建模研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2982-2990.
- GUO Fengyi, CHEN Mingyang, CHEN Zhonghua, et al. Study on friction characteristics and modeling of pantograph catenary sliding electrical contact[J]. Journal of Electrotechnics, 2018, 33(13): 2982-2990.
- [65] 郭凤仪, 谷欣, 王智勇, 等. 电弧对弓网系统接触线温度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 332-337.
- GUO Fengyi, GU Xin, WANG Zhiyong, et al. Influence of arc on contact wire temperature of pantograph catenary system[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2020, 39(4): 332-337.
- [66] BUCCA G, COLLINA A, MANIGRASSO R, et al. Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph-catenary interaction[J]. Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J Rail Rapid Transit 2011, 225 (5): 483-499.
- [67] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50367: 2012+A1: 2016. Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line[S]. Brussels: ŽEN-Electrical Applications for Railways, 2016.
- [68] 锡南尔茨代尔米. 特征工程入门与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- SINAN O. Feature engineering made easy[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2019.
- [69] 乔凯庆, 汪海瑛, 杨志鹏, 等. 接触网动态性能评价指标应用研究[J]. 中国铁路, 2021(4): 80-84.
- QIAO Kaiqing, WANG Haiying, YANG Zhipeng, et al. Research on the application of catenary dynamic performance evaluation index[J]. China Railway , 2021(4): 80-84.
- [70] 王婧, 张文轩, 王斌, 等. 弓网运行质量指数评价函数优化研究[J]. 中国铁路, 2020(8): 1-6.
- WANG Jing, ZHANG Wenxuan, WANG Bin, et al. Research on optimization of evaluation function of pantograph catenary operation quality index[J]. China Railway, 2020(8): 1-6.
- [71] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21561.2—2018 轨道交通 机车车辆受电弓特性和试验 第 2 部分: 地铁和轻轨车辆受电弓[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

- State Administration of Market Supervision, China National Standardization Administration. GB/T 21561.2—2018 Rail transit-pantograph characteristics and tests for rolling stock-Part 2: Pantographs for Metro and light rail vehicles[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [72] International Electrotechnical Commission. IEC 60494-2 2013 Railway applications-Rolling stock-Pantographs - Characteristics and tests-Part 2: Pantographs for metros and light rail vehicles[S]. Switzerland: TC 9-Electrical Equipment and Systems for Railways, 2013.
- [73] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50206-2 Railway applications-rolling stock- pantographs: characteristics and tests. Part 2: Pantographs for metros and light rail vehicles[S]. Brussels: CLC/TC 9X-Electrical and Electronic Applications for Railways, 2010.
- [74] International Electrotechnical Commission. IEC 62486 Railway applications-current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contact line[S]. Switzerland: TC 9 - Electrical Equipment and Systems for Railways, 2017.
- [75] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50317 Railway applications-Current collection systems-Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S]. Brussels: CLC/TC 9X-Electrical and Electronic Applications for Railways, 2012.
- [76] International Electrotechnical Commission. IEC 62846 Railway applications-Current collection systems-Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line[S]. Switzerland: TC 9 - Electrical Equipment and Systems for Railways, 2016.
- [77] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20908—2007 城市轨道交通接触网检测车通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 20908—2007 General specification for OCS inspection vehicle of Urban Rail Transit[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [78] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3185—2007 电力机车受电弓动态检测系统[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2007.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T 3185—2007 Dynamic detection system of electric locomotive pantograph[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2007.
- [79] 国家铁路局. TB 10009—2016 铁路电力牵引供电设计规范[S]. 北京: 国家铁路局, 2016.
- National Railway Administration. TB 10009—2016 Code for design of railway electric traction power supply[S]. Beijing: National Railway Administration, 2016.
- [80] 中华人民共和国铁道部. TB 10075—2000 铁路电力牵引供电隧道内接触网设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2000.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10075—2000 Code for design of OCS in railway electric traction power supply tunnel[S]. Beijing: Ministry of Railways of the People's Republic of China, 2000.
- [81] International Electrotechnical Commission. IEC 60913 Railway applications-fixed installations-electric traction overhead contact lines[S]. Switzerland: TC 9-Electrical Equipment and Systems for Railways, 2013.
- [82] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN 50119 Railway applications-fixed installations-electric traction overhead contact lines[S]. Brussels: CLC/TC 9X-Electrical and Electronic Applications for Railways, 2013.
- [83] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50157—2013 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of The People's Republic of China. GB 50157—2013 Code for design of Metro[S]. Beijing: China Architecture Press, 2013.
- [84] 广东省住房和城乡建设厅. DBJ/T 15-222—2021 轨道交通架空刚性接触网系统技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Department of Housing and Urban Rural Development of Guangdong Province. DBJ/T 15-222—2021 Technical standard for overhead rigid conductor system of rail transit[S]. Beijing: China Architecture Press, 2021.
- [85] 江苏省质量技术监督局. DB 32/T 3291—2017 城市轨道交通接触网系统维护与检修技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Jiangsu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. DB 32/T 3291—2017 Technical code for maintenance and overhaul of OCS system of Urban Rail Transit[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [86] 谭冬华. 架空刚性接触悬挂弓网磨损异常的解决办法[J]. 都市轨道交通, 2007, 1(2): 88-91.

- TAN Donghua. Solutions to abnormal wear of overhead rigid contact suspension pantograph and catenary[J]. Urban Fast Rail Transit, 2007, 1(2): 88-91.
- [87] 盛良, 赵立峰, 张文轩, 等. 地铁架空刚性接触网弓网系统运行特征分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019, 1(8): 1-7. SHENG Liang, ZHAO Lifeng, ZHANG Wenxuan, et al. Analysis on operation characteristics of metro overhead rigid catenary pantograph catenary system[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019, 1(8): 1-7.
- [88] 任杰. 关于降低刚性架空接触网磨耗不均匀的研究[J]. 工程与建设, 2021, 35(6): 1-3. REN Jie. Study on reducing uneven wear of rigid overhead catenary[J]. Engineering and Construction, 2021, 35(6): 1-3.
- [89] 方岩, 吴积钦, 唐浩, 等. 地铁受电弓滑板磨耗分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(4): 18-22. FANG Yan, WU Jiqin, TANG Hao, et al. Wear analysis of metro pantograph strip[J]. Electric Locomotives and Urban Rail Vehicles, 2018, 41(4): 18-22.

---

作者简介: 邹栋, 男, 1985 年出生, 博士。主要研究方向为车辆动力学、轨道交通装备数字化运维技术。

E-mail: zdong\_hn@163.com

钟舜聪(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能传感与诊断、光学和太赫兹仪器、无损检测和定量评价。

E-mail: sczhong@fzu.edu.cn