

极寒气候下高铁接触网运维技术研究

姜川 刘毅 毕春明

中国铁路哈尔滨局集团有限公司调度所 黑龙江 哈尔滨 150006

【摘要】：我国高寒地区高速铁路里程持续增长，极寒、暴雪、冻雾、大风等恶劣气候对高铁接触网设备稳定运行造成极大影响。接触网作为高铁牵引供电系统的核心露天设备，长期暴露在低温冻害环境中，易出现导线覆冰、零部件冻损、弓网匹配失效、设备绝缘下降等故障，直接引发列车降速、晚点甚至停运，严重威胁高铁行车安全。本文结合高寒地区高铁接触网运行实际，系统分析极寒气候对接触网设备的损害机理与典型故障类型，梳理当前高寒接触网运维工作存在的短板与管理问题，针对性研究覆冰防治、设备防冻、智能巡检、故障应急处置等核心运维技术，提出适配极寒环境的接触网常态化运维优化策略。研究结果可为高寒高铁接触网冬季运维作业、故障防控、设备升级改造提供技术参考，有效提升极寒气候下高铁牵引供电系统的安全稳定性与运维智能化水平。

【关键词】：极寒气候；高速铁路；接触网；运维技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.083

1 引言

接触网是电力机车唯一的供电设备，具备无备用、全天候运行、露天布设的特点，其运行状态直接决定高铁行车效率与安全。相较于常温地区，极寒气候下的低温收缩、冰雪附着、冻融循环等环境因素，会大幅加剧接触线、腕臂、吊弦、绝缘子、连接金具等核心部件的老化与损坏，弓网受流质量显著下降，设备故障发生率是普通地区的2-3倍。

因此，深入研究极寒气候下高铁接触网故障规律，优化升级运维技术体系，构建常态化防冻、智能化监测、高效化除冰、标准化应急的运维模式，对保障高寒高铁冬季安全稳定运营具有重要意义与应用价值。

2 极寒气候下高铁接触网典型故障及危害机理

2.1 导线覆冰与舞动故障

覆冰是极寒地区接触网最频发的故障类型，冻雨、湿雪附着在接触线、承力索表面，在低温环境下快速冻结形成冰层。根据形成形态可分为霜冰、雨淞、混合淞三类，其中雨淞质地坚硬、附着力强，清除难度最大，对设备危害最严重。

冰层附着会大幅增加线索自重，导致接触网弛度增大、导线张力超标，超出设备设计承载限时，会引发接触线变形、承力索断股甚至断线事故。此外，导线覆冰会导致弓网接触压力不稳定，列车高速运行时易出现离线、电弧烧蚀问题，加剧接触线磨损，缩短设备使用寿命。

2.2 金属零部件低温冻损故障

高铁接触网腕臂、定位装置、吊弦、金具等金属零部件均为精密受力部件，普通碳素钢、铝合金材质在极寒低温环境下会出现冷脆现象，材料韧性大幅下降、脆性急剧提升。长期低温冻融循环中，零部件内部应力集中，易出现裂纹、断裂、变形等损伤。

尤其是整体吊弦，极寒天气下线缆硬化、弹性失效，无法自适应导线弛度变化，极易发生断裂脱落；定位线夹、抱箍等紧固件受低温收缩影响，螺纹间隙变化，易出现松动、滑脱，导致接触网参数偏移，几何尺寸超标。同时，低温环境下金属部件衔接处易积水结冰，冻胀作用会撑开连接缝隙，造成设备密封失效、结构松动，引发持续性设备隐患。

2.3 绝缘子绝缘失效与闪络故障

极寒地区的冰雪、雾霾天气会导致绝缘子表面附着冰雪、污秽混合物，形成导电水膜，大幅降低绝缘子绝缘性能。普通瓷、玻璃绝缘子在覆冰积雪状态下，表面泄漏电流增大，极易发生沿面闪络、跳闸故障，造成牵引供电中断。

同时，低温冻融循环会导致绝缘子瓷体产生细微裂纹，冰雪渗入裂纹后反复冻胀，会加剧瓷体破损、掉块，彻底丧失绝缘性能。部分复合绝缘子在长期低温、紫外线、冰雪侵蚀下，护套会出现硬化、开裂、粉化现象，芯棒防水性能失效，引发内部受潮、击穿故障，严重威胁供电系统稳定。

2.4 弓网匹配性能劣化故障

高铁正常运行依赖稳定的弓网接触关系，极寒气候会从多维度破坏弓网匹配状态。一方面，接触线低温收缩、弛度变化，导致导线高度、拉出值等关键几何参数偏离标准范围；另一方面，受电弓滑板在低温下硬度提升、韧性下降，与覆冰接触线摩擦系数异常，高速运行时易出现冲击振动、离线电弧。

弓网离线产生的高温电弧会烧蚀接触线与滑板，形成局部灼伤、麻点，长期累积会引发接触线断线、滑板断裂等恶性故障。同时，低温导致接触网线索弹性降低、阻尼变小，列车通过时导线振动加剧，进一步恶化弓网受流条件，形成“振动-磨损-故障”的恶性循环。

3 极寒气候下高铁接触网传统运维存在的问题

3.1 运维模式适配性不足，针对性薄弱

当前多数高寒高铁接触网运维体系沿用常温地区标准，未充分适配极寒环境的故障规律。日常检修项目、周期、标准未针对低温冻害、覆冰隐患优化，常规巡检仅排查显性故障，对低温引发的隐性裂纹、内部应力、绝缘衰减、参数偏移等隐患排查不足。

冬季运维多以故障后抢修为主，预防性运维体系不完善，无法实现冰雪灾害、低温冻害的提前预判与提前防控，导致设备故障反复发生，运维被动性极强。

3.2 除冰技术落后，作业效率低、风险高

传统接触网除冰主要依赖人工除冰、机车带热滑除冰两种方式。人工攀爬除冰需要作业人员在零下几十度的高空、露天环境作业，劳动强度大、作业时间长，且存在高空坠落、触电、设备坠落等高风险隐患，同时天窗作业时间有限，无法实现大面积快速除冰。

机车热滑除冰依赖列车高速摩擦除冰，除冰效果不稳定，厚冰层无法彻底清除，且极易造成接触线、受电弓磨损，甚至引发弓网事故，无法适配极寒极端覆冰天气的运维需求。此外，新型自动化、智能化除冰设备普及不足，除冰技术体系滞后于高寒高铁运营需求。

3.3 智能监测水平不足，隐患预警滞后

目前接触网监测多依赖人工巡检、固定视频监控，监测覆盖范围有限、实时性差。极寒暴雪、大雾天气下，人工可视度低，巡检漏检、误检率大幅提升；传统监测设备无法精准识别冰层厚度、零部件微裂纹、绝缘性能衰减等隐性隐患。

同时，缺乏完善的极寒环境故障预警模型，无法结合温度、风速、降雪量等气象数据预判覆冰、舞动风险，隐患发现滞后，难以实现提前防控，极易引发突发性供电故障。

3.4 设备耐寒性能不足，老化失效速度快

早期高寒高铁接触网部分零部件采用普通温型号，未适配极寒低温工况。普通金属金具、吊弦耐寒性差，冷脆断裂频发；普通绝缘子抗冻、抗污闪能力弱，冬季闪络跳闸率居高不下；线索防腐防冻涂层性能不足，低温下易脱落、失效，加剧设备损坏。

此外，冬季设备冻损后的更换、修复作业频繁，但临时更换的配件耐寒标准不统一，设备整体抗寒稳定性差，长期运行隐患较多。

3.5 冬季应急运维体系不完善

极寒冰雪天气具有突发性、持续性强的特点，而部分运维班组缺乏专项防冻除冰应急预案，应急物资、耐寒设备储备不足，除冰机具、抢修器材、防寒装备配置不完善。

同时，冬季夜间、暴雪天气应急作业流程不规范，抢修人员极寒环境作业经验不足，故障排查、处置效率低下，故障恢复时间长，无法满足高铁快速恢复运营的需求。

4 极寒气候下高铁接触网核心运维优化技术

4.1 分级式覆冰防控与智能除冰技术

针对极寒地区接触网覆冰故障特点，构建“预防-监测-除冰”一体化覆冰防控体系，根据覆冰厚度、气象等级实行分级运维管控。

在预防阶段，对接触线、承力索喷涂新型耐寒防冰疏水涂层，该涂层具备低温稳定、疏水防霜、耐摩擦的特点，可大幅降低冰雪附着，减少覆冰生成量；对绝缘子采用防污闪防冻复合涂层，抑制冰雪、污秽堆积，杜绝绝缘闪络故障。

在监测阶段，部署基于阻抗监测与机器视觉的智能覆冰监测系统，通过沿线布设的温度、张力、图像传感器，实时采集导线覆冰厚度、张力变化、环境气象数据，依托大数据算法构建覆冰预警模型，实现轻度、中度、重度覆冰分级预警，为运维作业提供精准依据。

在除冰作业阶段，淘汰单一人工除冰模式，采用多元化智能除冰技术。轻度覆冰采用机车智能热滑除冰，优化热滑速度与频次，在保护弓网设备的前提下高效除冰；中度覆冰采用无人机机械振动除冰、热风吹扫除冰技术，无人机搭载振动装置、热风设备，实现无接触、全覆盖快速除冰，规避高空作业风险；重度覆冰采用直流融冰技术，利用直流电流热效应对线索加热融冰，适配大面积、厚冰层覆冰场景，除冰效率高、设备损耗小。

4.2 低温设备防冻改造与部件优化技术

针对金属零部件低温冷脆、冻裂问题，全面推进接触网设备耐寒升级改造。统一更换低温高强度合金金具、耐低温整体吊弦，此类配件适配-40℃极寒工况，具备韧性高、抗冷脆、抗冻胀的优势，大幅降低零部件断裂故障率。

优化腕臂、定位装置结构设计，在金属连接缝隙加装防冻密封垫片、防水胶套，杜绝雨雪积水渗入冻结，防止冻胀导致结构松动、变形；对接触网支柱基础、接地装置进行防冻加固，优化排水结构，避免地基冻融沉降引发的设备倾斜、参数偏移。

同时，建立冬季设备专项保养制度，低温环境下定期对金具螺纹、衔接部位涂抹低温防冻润滑脂，防止螺栓冻结卡死、锈蚀松动；对线索张力进行季节性调整，适配低温收缩特性，保证接触网弛度、张力处于标准范围，维持稳定的弓网匹配关系。

4.3 极寒环境智能巡检与隐患排查技术

适配极寒恶劣天气巡检需求，构建“无人机巡检+在线监

测+人工复核”的立体化智能巡检体系，弥补传统人工巡检的短板。

常态化采用无人机全自动巡检模式，搭载高清摄像头、红外测温设备，可在暴雪、大风、低温天气下全天候作业，精准识别导线覆冰、零部件裂纹、螺栓松动、绝缘子破损等隐患，实现全线无死角巡检。依托在线监测系统，实时监测弓网接触压力、导线张力、设备绝缘电阻等核心参数，动态掌握设备运行状态，及时发现隐性故障隐患。

4.4 弓网系统低温匹配优化技术

为解决极寒气候弓网受流劣化问题，优化弓网系统低温匹配性能。根据冬季低温导线收缩特性，动态调整接触线高度、拉出值、吊弦间距等几何参数，抵消低温形变带来的参数偏差，保证弓网接触稳定。

选用耐低温高韧性受电弓滑板，提升低温环境下的摩擦适配性，减少冲击振动与离线电弧；同时，定期对弓网匹配状态进行动态检测，通过弓网检测数据分析受流质量变化，针对性优化设备参数，持续提升极寒环境下弓网运行稳定性。

4.5 极寒天气标准化应急运维技术

构建专业化、标准化的冬季应急运维体系，提升极端冰雪天气故障处置能力。制定分级冰雪灾害应急预案，根据暴雪、寒潮、覆冰等级，明确作业流程、人员分工、处置标准，实现故障快速响应、快速处置。

完善应急物资储备，专项储备耐寒除冰设备、无人机、直流融冰装置、防冻抢修工具，以及低温防护装备，保证极端天气下物资充足可用；组建冬季专项应急抢修队伍，开展极寒除冰、设备抢修、故障处置专项培训与演练，提升作业人员低温环境实操能力。

建立气象联动运维机制，提前对接气象部门，预判寒潮、暴雪天气，提前开展设备预除冰、预加固作业，落实防控措施；故障发生后，优化天窗作业组织，压缩抢修时长，最大限度降低设备故障对高铁运营的影响。

5 极寒气候下高铁接触网运维保障策略

5.1 完善差异化冬季运维管理制度

结合极寒地区气候特征与设备故障规律，修订专项运维规程，建立冬夏差异化运维体系。调整冬季检修周期，严寒覆冰期加密巡检频次，重点设备每日巡检、关键区段实时监测；细化冬季检修标准，新增低温防冻、覆冰防控、设备冷损排查

参考文献：

- [1] 张波.极寒天气高速铁路接触网故障分析及运维对策[J].铁道工程学报,2024(02):78-83.
- [2] 李建军.高寒地区高铁接触网覆冰危害及融冰技术研究[J].电气化铁道,2023(05):45-49.
- [3] 王浩.恶劣气候下铁路接触网智能巡检与故障预警技术[J].铁道标准设计,2024(01):112-116.

项检修项目，杜绝粗放式运维。

建立设备全生命周期冬季档案，记录低温冻损、覆冰故障、检修改造数据，总结故障发生规律，持续优化运维方案，实现精准化、差异化运维。

5.2 推进设备耐寒标准化升级

逐步淘汰普通型不耐寒设备，全面推行高寒专用接触网设备标准，从设备源头提升抗寒能力。新建、改造工程严格采用耐低温线索、防冻金具、抗闪络绝缘子、耐寒吊弦等专用配件，统一高寒设备技术标准。

5.3 强化运维人员专业能力建设

针对极寒运维技术特点，开展常态化专项培训，重点围绕覆冰防控、智能设备操作、低温故障抢修、安全作业规范等内容开展教学，提升人员冬季运维专业技能。

定期组织极寒天气应急演练，模拟覆冰断线、设备冻裂、绝缘闪络等典型故障场景，提升队伍应急处置、协同作业能力；强化冬季安全作业培训，规范低温高空、露天作业流程，杜绝安全事故发生。

5.4 构建智能化运维管理平台

依托大数据、物联网技术，搭建高寒高铁接触网冬季智能运维平台，整合气象数据、设备监测数据、故障数据、检修数据，实现设备状态实时监控、故障智能预警、运维任务智能派发、检修过程全程管控。

通过平台数据分析，精准研判设备故障趋势，提前制定预防性运维计划，推动运维模式从“故障抢修型”向“预测预防型”转变，全面提升极寒环境下接触网运维智能化、精细化水平。

6 结论

极寒气候下的低温冻胀、冰雪覆冰、大风舞动等恶劣工况，会引发高铁接触网覆冰、零部件冻损、绝缘失效、弓网失配等一系列故障，是影响高寒高铁冬季安全稳定运营的核心因素。本文通过分析极寒气候接触网故障危害机理，针对性提出分级覆冰防控、设备耐寒改造、智能立体化巡检、弓网匹配优化、标准化应急处置等核心运维技术，配套完善差异化管理制度、设备升级、人员培训、智能平台建设等保障策略，构建了一套适配极寒环境的高铁接触网运维技术体系，可有效降低冬季设备故障发生率，提升牵引供电系统运行稳定性。