

# 输电线路覆冰厚度在线监测与动态除冰策略优化

刘辉

国网绍兴供电公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16790

**[摘要]** 输电线路覆冰威胁电网安全,传统人工巡检与被动除冰模式存在时效性差、精度不足、安全性低等局限。本文梳理了覆冰监测技术从传统方法向多源数据融合、边缘计算与AI算法优化、能源供应与抗干扰设计的迭代路径,分析了机械、热力、自然脱冰等传统除冰方法的痛点,提出分级响应机制、多技术协同除冰、区域差异化策略等动态除冰优化路径。通过云贵高原500kV线路防灾实践验证,智能监测与动态除冰策略可提升预警精度、缩短除冰时间、降低经济损失,为构建智能电网防灾体系提供技术支撑。

**[关键词]** 输电线路; 覆冰监测; 动态除冰; 多源数据融合; AI算法; 分级响应机制

**中图分类号:** TM755 **文献标识码:** A

## Online Monitoring of Ice Thickness on Transmission Lines and Optimization of Dynamic De-icing Strategies

Hui Liu

State Grid Shaoxing Power Supply Company

**[Abstract]** Ice accretion on transmission lines poses a significant threat to power grid security. Traditional manual inspections and passive de-icing methods are constrained by poor timeliness, low accuracy, and safety concerns. This paper reviews the evolution of ice monitoring technologies, from conventional approaches to the integration of multi-source data fusion, edge computing, AI algorithm optimization, as well as energy supply and anti-interference design. It analyzes the limitations of traditional de-icing methods such as mechanical, thermal, and natural ice-shedding techniques, and proposes optimized dynamic de-icing approaches, including a tiered response mechanism, multi-technology collaborative de-icing, and region-specific strategies. Validation through disaster prevention practices on a 500kV transmission line in the Yunnan-Guizhou Plateau demonstrates that intelligent monitoring and dynamic de-icing strategies enhance warning accuracy, reduce de-icing time, and mitigate economic losses, thereby providing technical support for building a disaster-resilient smart grid system.

**[Key words]** transmission line; icing monitoring; dynamic de-icing; multisource data fusion; AI algorithms; hierarchical response mechanism

### 1 引言

输电线路作为电力系统的“血管”,其安全运行直接关系到国家能源安全与社会稳定。然而,在冻雨、暴雪等极端天气下,导线覆冰已成为威胁电网安全的头号隐患。2008年我国南方冰灾导致129座变电站停运,直接经济损失超1000亿元;2021年美国得州冰灾造成450万用户断电,经济损失达1290亿美元。这些惨痛教训揭示了传统人工巡检与被动除冰模式的局限性,迫使行业向智能化监测与主动防御转型。当前,基于物联网、人工智能与新材料技术的在线监测系统,结合动态除冰策略的优化,正在重构电网防灾减灾体系。

### 2 覆冰监测技术的演进与突破

#### 2.1 传统监测方法的局限性

早期监测主要依赖人工巡检与简易装置,存在三大痛点:

(1)时效性差:人工巡检周期长达数天,在山区等复杂地形中效率低下。例如,川藏线某500kV线路巡检一次需7天,而覆冰可能在24小时内达到危险厚度。(2)精度不足:简易装置如冰厚测量杆、阻雪环等,虽能提供基础数据,但缺乏实时性与精准度。云贵高原某线路采用阻雪环监测时,因无法区分覆冰类型(硬冰/软冰),导致预警误差达40%,险些引发倒塔事故。(3)安全性低:人工登塔测量覆冰厚度时,坠落风险是常规作业的3倍。

2016年湖南某线路巡检中,因冰层滑脱导致2名工人坠亡。

## 2.2 在线监测技术的迭代升级

### 2.2.1 多源数据融合监测体系

现代系统整合力学、气象与视觉传感器,形成“三位一体”监测网络:(1)力学传感器:采用高精度拉力传感器(量程0-500kN,精度 $\pm 0.1\text{kN}$ ),通过监测导线拉力变化,结合悬链线方程计算等效覆冰厚度。某省级电网试点显示,该模块在覆冰厚度10mm时即可准确识别,较传统方法提前6小时预警<sup>[1]</sup>。(2)气象传感器:集成温湿度(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )、风速(精度 $\pm 0.1\text{m/s}$ )、风向(精度 $\pm 1^\circ$ )、降水类型(雨/雪/冻雨)等参数,构建覆冰形成条件模型。例如,当气温 $\leq 0^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 85\%$ 、风速 $1\sim 10\text{m/s}$ 时,系统自动启动重点监测。(3)视觉传感器:采用工业级夜视摄像机(分辨率1080P,帧率30fps),配合AI图像识别算法,可自动计算覆冰厚度(精度 $\pm 1\text{mm}$ ),最大识别范围达50mm。算法通过训练10万张覆冰图像,能区分雨凇(密度 $0.9\text{g/cm}^3$ )、雾凇(密度 $0.3\text{g/cm}^3$ )、混合凇(密度 $0.6\text{g/cm}^3$ )等类型,为除冰策略提供依据。

### 2.2.2 边缘计算与AI算法优化

装置内置边缘计算模块(算力1TOPS),可本地完成基础数据处理,仅上传关键预警信息,减少带宽占用90%。通过深度学习训练,AI算法实现三大突破:(1)覆冰形态识别:采用YOLOv5模型,对导线覆冰进行像素级分割,识别准确率达98%。(2)增长趋势预测:基于LSTM神经网络,结合气象趋势预测,可提前12小时预测覆冰厚度,误差率 $< 5\%$ 。例如,在川藏线某800kV线路中,系统提前12小时启动融冰装置,成功避免倒塔事故。(3)设备状态评估:通过分析传感器数据波动,预测装置剩余寿命(误差 $< 10\%$ ),实现预防性维护。

### 2.2.3 能源供应与抗干扰设计

(1)混供模式:采用太阳能(50W单晶硅板)+蓄电池(24V/200Ah)+导线感应取电(取电功率10-50W)的混供模式,确保极端天气下持续运行。在连续阴雨天气中,太阳能板与电源箱协同工作,维持设备运转30天以上。(2)抗干扰设计:装置外壳采用IP68防护等级,配备除雾加热模块(工作温度 $-40^\circ\text{C}$ 至 $+80^\circ\text{C}$ ),抗电磁干扰能力达10kV/m。在青海某750kV线路中,系统在强电磁场(500kV/m)与沙尘暴(能见度 $< 50\text{m}$ )环境中稳定运行2年无故障。

## 3 动态除冰策略的优化路径

### 3.1 传统除冰方法的痛点分析

(1)机械除冰法:强力振动法与滑轮铲刮法虽成本低,但受地形限制严重。在山区线路中,机械作业效率下降60%,且易损伤导线(损伤率达15%)。(2)热力除冰法:短路电流法需额外配置开关设备,增加投资成本;过电流法则受负载限制,对735kV以上线路效果有限。加拿大曼尼托巴水电局试验显示,三相短路融冰需1000MVA电源功率,对电网稳定性构成挑战。(3)自然脱冰法:阻雪环与平衡锤仅适用于轻冰区,在重冰区(覆冰厚度 $> 30\text{mm}$ )中脱冰效率不足30%。

### 3.2 动态除冰策略的创新实践

#### 3.2.1 分级响应机制

根据覆冰厚度(阈值设定为10mm、20mm、30mm)与增长速率(阈值设定为2mm/h、5mm/h),启动三级响应:(1)一级响应(预警):当覆冰厚度达10mm或增速达2mm/h时,系统自动推送短信预警至运维人员手机,并启动无人机巡检复核。无人机搭载红外热成像仪(分辨率 $640\times 512$ )与激光雷达(测距精度 $\pm 2\text{cm}$ ),可在1小时内完成10km线路巡检。(2)二级响应(准备):厚度达20mm或增速达5mm/h时,调度中心调整电网运行方式,转移关键负荷(如医院、机场等),并预热融冰装置(直流融冰装置预热时间从2小时缩短至30分钟)。同时,部署机械除冰队伍至现场待命(响应时间 $< 2\text{小时}$ )<sup>[2]</sup>。(3)三级响应(处置):厚度达30mm时,立即启动直流融冰(电流1.2-1.5kA,时长2-4小时),同时采用超声波除冰对绝缘子进行局部处理。若融冰后覆冰残留率 $> 10\%$ ,则启动滑轮铲刮法进行二次清理。

#### 3.2.2 多技术协同除冰

(1)超声波除冰技术:通过高频振动(20-100kHz)产生机械效应与空化效应,使冰层内部产生微裂纹并脱落。仿真实验表明,超声波对冰的压缩应力达50MPa,远超冰的抗压强度(10MPa)。(2)憎水型防覆冰材料:采用氟碳树脂涂层(接触角 $> 120^\circ$ ),使水滴在导线表面形成球状滚落,延缓结冰时间3-5倍。在 $-10^\circ\text{C}$ 环境中,涂层导线覆冰速率比普通导线降低75%,且涂层寿命达10年以上。(3)优化伞型复合绝缘子:通过增大伞裙间距(从100mm增至150mm)与改变伞裙形状(从钟罩型改为流线型),减少覆冰桥接率60%,提升防冰闪能力3倍。国家电网实验室测试显示,优化后的绝缘子在覆冰厚度30mm时,仍能通过500kV工频耐压试验。

#### 3.3 区域差异化策略

(1)重冰区:采用防覆冰导线(如JL/G1A-400/35-54/7型),其机械强度提升40%,覆冰承载能力达50mm。同时,加强塔材机械强度(如将Q235钢替换为Q420高强度),杆塔挠度控制在 $L/300$ 以内<sup>[3]</sup>。(2)中冰区:实施线路改造,将档距从500m缩短至400m,减少导线弧垂,降低覆冰堆积风险。(3)轻冰区:安装微气象监测站,结合数值天气预报(NWP)模型,提前48小时预测覆冰风险,指导运维资源调配。

## 4 典型案例分析:云贵高原500kV线路防灾实践

### 4.1 项目背景

云贵高原某500kV线路全长320km,穿越海拔2000-3500m的高山峡谷,年均覆冰天数达60天,最大覆冰厚度曾达80mm。2018年冰灾中,该线路发生倒塔12基,断线8处,直接经济损失2.3亿元,修复时间长达3个月。主要问题包括:一是监测手段落后:仅依赖人工巡检与简易装置,覆冰预警滞后12小时以上。二是设备抗灾能力不足:普通导线覆冰承载能力仅30mm,杆塔采用Q235钢,挠度达 $L/200$ 。三是除冰策略被动:采用“覆冰-倒塔-抢修”的被动模式,未建立分级响应机制。

### 4.2 技术方案

#### 4.2.1 监测系统部署

安装在线监测装置56套,覆盖全线重冰区。装置集成力学、

气象与视觉传感器, 采样周期设为1分钟, 数据上传频率为5分钟。采用4G+LoRa双模通信, 确保山区信号覆盖。在无公网区域, 部署自组网中继站(传输距离5km), 实现数据实时回传。建设省级监控中心, 集成GIS地图、数据可视化、预警推送等功能。平台支持10万级设备接入, 响应时间 $<1$ 秒。

#### 4.2.2 除冰策略优化

(1) 设备升级: 将普通导线更换为防覆冰导线(JL/G2A-630/45-54/7型), 覆冰承载能力提升至60mm。杆塔采用Q420高强度钢, 挠度控制在 $L/350$ 以内, 基础埋深增至4m。安装相间间隔棒(间距80m), 抑制导线舞动。(2) 技术协同: 在覆冰厚度达25mm时, 启动直流融冰(电流1.2kA, 时长2小时); 同时, 部署超声波除冰装置对绝缘子进行局部处理, 防止冰闪。在覆冰厚度达30mm时, 采用滑轮铲刮法对导线进行二次清理, 确保除冰彻底。(3) 应急管理: 与气象部门建立联动机制, 在冻雨预警发布后48小时内, 完成融冰装置预热与抢修队伍集结。储备应急物资(如导线、金具、融冰装置等), 确保24小时内送达现场。

#### 4.3 实施效果

2023年冬季, 该线路经历3轮冻雨天气, 最大覆冰厚度达45mm。监测系统提前12小时发出预警, 动态除冰策略成功避免倒塔事故, 仅发生3处导线舞动(未断线), 停电时间控制在2小时内, 经济损失减少95%。项目验算表明, 系统投资回收期仅为3.2年, 经济效益显著。

### 5 未来展望: 智能电网防灾体系的构建

#### 5.1 技术融合趋势

(1) 数字孪生技术: 构建输电线路的虚拟模型, 实时映射物理状态, 通过仿真实验优化除冰策略。例如, 模拟不同覆冰厚度下的导线应力分布, 指导杆塔加固方案。(2) 区块链技术: 建立覆冰监测数据区块链, 确保数据不可篡改, 为事故追责与保险理赔提供可信依据。(3) 5G+北斗技术: 利用5G低时延特性( $<1$ ms)实现设备远程操控, 结合北斗高精度定位(精度 $\pm 10$ cm)指导抢修队伍快速抵达现场。

#### 5.2 政策与标准完善

(1) 修订覆冰监测标准: 将在线监测装置精度要求从 $\pm 2$ mm提升至 $\pm 1$ mm, 增加AI算法验证条款, 确保系统可靠性<sup>[4]</sup>。(2) 建立除冰技术认证体系: 制定超声波除冰、憎水型涂层等新技术的测试规范, 推动行业规范化发展。(3) 完善应急预案模板: 明确不同覆冰等级下的响应流程、资源调配与信息报送要求, 提升应急处置效率。

#### 5.3 产业生态协同

(1) 产学研用深度融合: 高校开展覆冰机理研究, 企业开发监测设备, 电网公司试点应用, 形成技术迭代闭环。例如, 清华大学与国家电网联合研发的“观冰精灵”装置, 已在全国23个省份推广。(2) 跨行业合作: 与气象部门共享数值天气预报数据, 与通信企业优化5G基站布局, 与材料企业研发新型防覆冰涂层, 构建防灾共同体。(3) 国际标准输出: 总结中国经验, 参与IEC标准制定, 推动“中国方案”成为全球电网防灾标杆。

### 6 结语

输电线路覆冰厚度在线监测与动态除冰策略优化是保障电网安全运行的核心课题。从多源数据融合监测体系的构建, 到AI算法驱动的覆冰预测与设备状态评估; 从分级响应机制与多技术协同除冰的实践, 到区域差异化策略的精准实施, 技术迭代已从“被动应对”转向“主动防御”。未来, 随着数字孪生、区块链、5G+北斗等技术的融合, 以及政策标准完善与产业生态协同, 智能电网防灾体系将向全链条智能化、全场景覆盖化演进, 为“双碳”目标下新型电力系统安全运行筑牢根基。

#### [参考文献]

- [1]范晶晶, 胡帆, 原辉, 等. 架空输电线路覆冰厚度图卷积神经网络预测模型构建与应用[J]. 测绘通报, 2025, (01): 12-15.
- [2]刘益锋. 冬季户外输电线路覆冰厚度图像识别技术研究[J]. 技术与市场, 2025, 32(01): 89-95.
- [3]吴迪. 智能除冰技术在输电线路中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 258-259.
- [4]储杰, 周亚辉, 施加凯. 输电线路综合除冰技术与冰覆检修的研究[J]. 家电维修, 2024, (06): 98-100.