

On-line Monitoring Method of Transmission Line Sag

Sheng Xu

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Transmission line sag, a critical parameter for assessing conductor performance, can directly cause insufficient conductor-to-ground clearance, mechanical stress exceeding limits, and even severe incidents like conductor dancing or line breaks. Traditional manual inspections and offline measurements suffer from inefficiency, poor real-time performance, and data lag, failing to meet smart grid requirements for condition awareness and proactive maintenance. With advancements in IoT, AI, and multi-source data fusion technologies, online sag monitoring has emerged as a research hotspot. This paper first analyzes the formation mechanisms and influencing factors of transmission line sag, then details the classification and principles of online monitoring methods, followed by key technical challenges and solutions. Finally, it presents typical application scenarios and case studies to provide valuable references for related research.

Keywords

Transmission line; Line sag; Online monitoring method

输电线路弧垂在线监测方法

徐晟

国网智能科技股份有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

输电线路弧垂是衡量导线运行状态的核心参数, 其异常变化会直接导致导线对地距离不足、机械应力超限, 甚至引发舞动、断线等严重事故。传统人工巡检与离线测量方法存在效率低、实时性差、数据滞后等问题, 难以满足智能电网对状态感知与主动运维的需求。随着物联网、人工智能及多源数据融合技术的发展, 输电线路弧垂在线监测技术逐渐成为研究热点。本文先是详细分析了输电线路弧垂形成机理与影响因素, 随后具体阐述了弧垂在线监测方法分类与原理, 紧接着提出了关键技术挑战与解决方案, 最后举出了典型应用场景并进行了案例分析, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

输电线路; 线路弧垂; 在线监测方法

1 引言

输电线路作为电力传输的“动脉”, 其运行状态直接影响电网的安全性与经济性。弧垂作为导线力学特性的直观体现, 是衡量线路安全裕度的重要指标: 弧垂过大可能导致导线对地距离不足, 引发触电或山火风险; 弧垂过小则会使导线应力超限, 加速机械疲劳甚至断裂。传统人工巡检与离线测量方法依赖周期性检修, 难以实时捕捉弧垂动态变化, 尤其在极端天气或重载工况下易造成监测盲区。随着智能电网建设的推进, 在线监测技术通过实时感知导线状态, 为运维决策提供数据支撑, 已成为行业研究焦点。然而, 现有方法在环境适应性、成本效益、数据融合等方面仍存在不足。本文旨在系统梳理输电线路弧垂在线监测技术的研究进展, 分析关键挑战, 并提出未来发展方向。

【作者简介】徐晟(1992-), 男, 中国山东烟台人, 本科, 助理工程师, 从事电力工程技术方向研究。

2 输电线路弧垂形成机理与影响因素分析

2.1 弧垂的力学模型

弧垂的力学模型是描述导线空间形态与受力关系的基础, 常用悬链线方程与抛物线近似模型, 二者适用条件与精度差异明显。悬链线方程基于导线为均匀柔性索的假设, 考虑自重沿弧长均匀分布, 其数学表达式为 $y=wT_0(\cosh(T_0wx)-\cosh(2T_0wx_0))$, 精度高, 适用于大跨度、高弧垂场景, 但计算复杂需数值求解^[1]; 抛物线近似模型在弧垂与跨距之比 ($f/L < 0.1$) 时, 将悬链线简化为 $y=L^24fx(L-x)$, 计算简便, 多用于中小跨度线路估算, 极端工况下误差显著。弧垂与张力、温度、风偏、覆冰等参数的耦合关系可通过力学平衡推导: 弧垂与水平张力成反比; 温度升高时, 导线热膨胀使弧垂增大; 风载荷引发风偏并改变张力分布; 覆冰增加导线质量, 导致弧垂显著增加。

2.2 关键影响因素

弧垂的动态变化是环境、导线特性与运行工况共同作

用的结果。环境因素中,温度升高使导线热膨胀、弧垂增大,高温下弧垂超限易引发事故;风速通过风载荷引起风偏并改变振动特性,强风可能导致局部弧垂瞬时超标;日照使导线温度升高产生附加弧垂,其升幅受日照强度与导线吸热系数影响;覆冰增加导线质量与风阻,显著增大弧垂,厚覆冰还可能引发断线或倒塔。导线自身特性方面,材料弹性模量与线膨胀系数决定力学响应,高弹性模量材料弧垂小但抗疲劳性可能降低;截面积影响重力载荷与电流承载能力,大截面导线自重、弧垂显著,但电阻小、发热量低;弹性模量越大,导线伸长量越小、弧垂越小,但需更高张力调整。运行工况中,负载电流通过焦耳热导致温度升高与弧垂增大,机械张力则是调控弧垂的直接手段,但需平衡安全与经济性。

3 弧垂在线监测方法分类与原理

3.1 基于传感器的直接监测法

基于传感器的直接监测法包含多种技术手段。张力传感器法通过测量导线张力变化反推弧垂,因导线张力与弧垂呈反比,温度升高或负载增加使弧垂增大时张力减小,传感器(如应变式、压磁式)装在杆塔或绝缘子串,实时采集数据并结合力学模型计算弧垂,其优点是直接反映导线力学状态、精度高(误差通常小于 $\pm 5\%$),适用于大跨度线路,但安装需停电作业、成本高,长期运行可能因材料疲劳或环境腐蚀致误差累积^[2];倾角传感器法利用杆塔倾角或导线悬挂点角度变化计算弧垂,通过“固体摆”式或MEMS加速度计传感器测量垂直倾角,结合几何关系推导,优点是安装简便、响应快、适合动态监测,缺点是对安装角度精度要求高,风偏或杆塔振动会引入干扰,需配合风速仪修正;激光测距法通过激光反射时间或相位差测导线对地距离间接算弧垂,激光测距仪装在杆塔底部,优点是精度高(可达毫米级)、昼夜可作业、适用复杂地形,缺点是需定期清洁镜面,雨雾天气影响测量,远距离测量需配合棱镜增加成本。

3.2 基于图像处理的间接监测法

基于图像处理的间接监测法主要有两种方式。一是可见光/红外图像法,其原理是借助摄像头采集导线图像,进而提取弧垂轮廓特征。可见光图像凭借导线与背景(如蓝天)的对比度来呈现,红外图像则依靠导线温度差异(如负载电流引发的发热)强化轮廓识别,再结合图像分割与边缘检测算法(像Canny算子),提取导线最低点坐标以计算弧垂。此方法适用于杆塔间距小、导线清晰的场景,例如城市配电线路。二是深度学习应用,其原理是利用卷积神经网络(CNN)自动识别导线弧垂,通过含不同弧垂状态导线图像的训练数据集优化模型参数,达成端到端测量。像YOLO系列算法能实时检测导线位置,U-Net等语义分割模型可精准提取弧垂轮廓,其优势在于适应复杂背景(如植被遮挡),抗干扰能力出色,测量效率极高,能达到帧级处理速度。

3.3 基于力学模型的数值计算法

基于力学模型的数值计算法包含有限元分析法与状态估计法。有限元分析法通过建立导线三维有限元模型来模拟弧垂变化,将导线离散成单元结构,输入材料参数(如弹性模量、线膨胀系数)、环境条件(如温度、风速)及张力数据,求解平衡方程得出导线形态。像ANSYS或COMSOL软件,能模拟导线在覆冰或大风等极端工况下的弧垂动态响应,此方法适用于新线路设计验证或极端工况预测。状态估计法则结合SCADA数据与参数辨识算法实时推算弧垂,采集导线张力、温度、风速等实时数据,利用状态估计模型(如扩展卡尔曼滤波)修正参数并动态计算弧垂,还能利用特定公式通过导线温度估算弧垂。其优势显著,无需额外安装传感器,成本大幅降低,尤其适用于已有线路的智能化改造,为线路运行维护提供了经济高效的解决方案。

3.4 多源数据融合监测法

多源数据融合监测法为提升弧垂监测精度提供了创新思路。其核心在于传感器+图像+气象数据的融合框架设计,该设计整合张力传感器、激光测距仪、摄像头及气象站的数据,借助数据融合算法,如贝叶斯网络或D-S证据理论,来提高弧垂监测的可靠性。当张力传感器数据与图像识别结果出现冲突时,能结合风速等气象数据,判断是否因风偏等因素导致误差,有效弥补了单一数据源的局限性,大大提升了监测的鲁棒性。此外,还有数据同化与误差补偿策略,利用卡尔曼滤波或粒子滤波算法,对多源数据进行动态修正。比如将张力传感器测量值作为观测值,有限元模型预测值作为状态值,通过滤波算法减小模型误差与传感器噪声。实际应用效果显著,在某500kV线路中,融合监测法使弧垂测量误差从 $\pm 15\text{cm}$ 降低至 $\pm 5\text{cm}$,有力保障了线路运行的安全性。

4 关键技术挑战与解决方案

4.1 环境干扰问题

环境干扰是影响输电线路弧垂监测精度的关键因素,主要包括温度、风速和覆冰三方面。温度方面,导线热胀冷缩效应显著,如某500kV线路夏季高温时弧垂增1.2米,冬季覆冰时减0.8米。对此可采用实时温度补偿,集成高精度温度传感器并结合材料热膨胀系数,通过公式动态修正弧垂值,还可针对不同温度区间分段建模以提高精度,试验显示误差可从 $\pm 15\text{cm}$ 降至 $\pm 5\text{cm}$ 。风速方面,强风会使导线舞动偏移,如风速超15m/s时摆动幅度超1米,可通过建立风速-弧垂耦合模型,引入动态修正系数调整计算值,还能融合多传感器数据用卡尔曼滤波算法降低干扰,某系统应用后风偏误差从 ± 0.8 米降至 ± 0.3 米。覆冰方面,不均匀覆冰会引发“双峰型”弧垂,可通过图像识别或激光测距监测覆冰厚度,结合密度计算附加荷载,再用非均匀荷载模型模拟应力分布,某案例中误差从17%降至5%。

4.2 数据传输与实时性

在偏远地区,无线通信技术对保障输电线路弧垂监测的数据传输与实时性至关重要^[3]。LoRa 技术适用于偏远山区、无人区等无公网覆盖区域,它具备远距离传输优势,空旷地带可达 10km,城市环境 1 - 2km,某农田监测项目甚至实现 20km 覆盖;其低功耗特性使节点电池寿命达 3 - 5 年,利于长期部署;且抗干扰强,误码率低于 10⁻⁶。实际应用中,在导线安装 LoRa 节点可实现智能巡检,某电网公司部署后巡检效率提升 60%,结合传感器还能用于灾害预警,响应时间小于 1 秒。而 5G 技术适用于城市配电网等需高实时性的场景,高速率峰值达 10Gbps,低延迟端到端小于 10ms。如 5G + AR 眼镜可辅助 AR 巡检,缩短故障处理时间 40%;杆塔部署 5G 边缘服务器进行边缘计算,能减少云端负载,降低带宽需求。

4.3 算法优化与计算效率

在输电线路弧垂监测中,算法优化与计算效率提升至关重要,轻量化模型设计是关键。边缘计算通过将算法部署在杆塔端的边缘设备,如 NVIDIA Jetson 系列,实现本地化实时处理,减少数据传输延迟。其优化方法多样,模型剪枝可移除 CNN 中冗余卷积层,让参数量减少 80%,推理速度提升 3 倍;量化压缩能把 FP32 参数转为 INT8,使模型体积缩小 75%,且精度损失小于 1%。像 YOLOv8 - tiny 在边缘设备上能实现导线弧垂检测,帧率达 30FPS;U - Net Lite 经深度可分离卷积优化,语义分割速度提升 5 倍。此外,模型压缩可降低资源消耗,知识蒸馏用大模型指导小模型训练,精度损失小;联邦学习能让多杆塔设备协同训练,保护隐私,某项目借此使模型准确率提升 15%。

4.4 标准化与兼容性

在输电线路弧垂监测系统建设中,标准化与兼容性是保障系统高效运行的关键。接口标准化方面,采用 IEC 61850 通信协议定义弧垂监测数据对象模型,统一数据格式为 JSON 或 XML,涵盖时间戳、弧垂值等关键字段,某电网公司借此实现 10 种设备数据互通。硬件兼容性上,传感器接口支持 4 - 20mA、RS485 等多种协议,能兼容现有张力、倾角传感器;设计标准化安装支架适配不同杆塔类型,某产品模块化设计使安装时间减少 60%。软件兼容性层面,提供 RESTful API 接口,支持与 PMS、SCADA 等系统对接,某监测平台实现与 10 个第三方系统数据共享;采用插件化架构,支持自定义算法插件,某系统通过插件机制实现覆冰预测、风偏预警等高级功能,提升系统灵活性与扩展性。

5 典型应用场景与案例分析

5.1 大跨越输电线路监测

大跨越输电线路多跨越峡谷、河流或山区,档距大、

弧垂变化显著,易受地形、温度、风速影响,非均布荷载效应突出。如西南山区某 500kV 线路,档距中段形成“冰瘤”,冰厚达设计值 160%,风切变引发导线舞动,最大弧垂逼近安全限值,传统模型计算与实际偏差 17%,引发对地闪络。为此需动态调整策略:基于多物理场耦合建模,同步处理空气动力学、热 - 流体及结构力学问题,用有限元分析模拟局部应力,修正弧垂值;通过实时监测与反馈控制,采集风速、覆冰厚度等数据,结合边缘计算设备调整计算值,某案例误差从 17% 降至 5%;再根据地形设置分级调整阈值,迎风坡覆冰重区段弧垂增量超 20% 时,自动触发调节装置或报警。

5.2 智能电网中的协同监测

智能电网构建“空 - 天 - 地”一体化监测体系,无人机与机器人的协同应用突破了传统人工巡检的时空局限。无人机通过搭载激光雷达生成三维点云模型,可精确计算弧垂值,如福建南平供电公司结合电力北斗技术,实现无信号区域监测;在灾害期间,无人机还能悬停关键区段,回传弧垂变化画面,为预警提供关键依据。机器人则通过搭载传感器实现接触式测量,如国网通辽供电公司的智能机器人可沿导线采集数据;超限时,机器人可携带修复装置执行任务,乌海超高压供电公司通过无人机配合机器人带电检修,大幅缩短抢修时间。数据融合方面,边缘 - 云端协同结合卡尔曼滤波算法降低干扰,提升测量精度;任务闭环管理则自动生成任务清单,调度设备检修,南平供电公司实现全流程自动化后,巡检效率提升 6-8 倍。

6 结语

总的来说,本文系统梳理了输电线路弧垂在线监测技术,涵盖形成机理、监测方法、关键挑战及典型应用。现有方法在精度、实时性、环境适应性等方面取得进展,但仍有提升空间。未来,随着物联网、人工智能、多源数据融合等技术的深入发展,弧垂在线监测将朝着更高精度、更强实时性、更好环境适应性的方向迈进。同时,标准化与兼容性建设将进一步完善,推动监测系统的大规模应用与集成。此外,探索新型传感器材料、优化算法模型、加强跨学科融合,将为输电线路弧垂在线监测提供更坚实的技术支撑,助力智能电网的安全稳定运行与高效运维。

参考文献

- [1] 刘锋,张振,宋强,等.基于无人机巡检的高压输电线路弧垂检测方法[J].微型电脑应用,2025,41(08):273-277.
- [2] 王孔森,孙旭日,盛戈皞,等.架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J].高压电器,2014,50(04):27-34.
- [3] 谢志武.高压输电线路在线监测技术研究[J].中国电力教育,2013,(11):180-181.