

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.009

引用格式:吴海涛,肖前波,史梦梦,等.输电线舞动监测技术研究[J].重庆大学学报,2025,48(12): 99-112.



输电线舞动监测技术研究

吴海涛^{1a},肖前波^{1a},史梦梦^{1b},李涵²,王鹏²,仲元昌²

(1. 国网重庆市电力公司 a. 电力科学研究院; b. 市北供电分公司,重庆 401121; 2. 重庆大学
电气工程学院,重庆 400044)

摘要:输电线路风偏舞动的爆发频率较高,严重影响电力系统的正常稳定运行,给国民经济带来重大损失,因此,输电线路舞动实时在线监测一直是研究热点。从输电线路舞动成因出发,讨论输电线路舞动在线监测技术及系统性能,分析常用的舞动在线监测方法以及存在的问题,并对目前输电线舞动在线监测技术的难点进行了总结。提出“MEMS(micro electromechanical system)振动传感器+BD(Beidou)差分定位”融合监测方法,以 WSN/GPRS/BD 3 网融合通信组网模式,建立基于北斗通信的天空地一体化大跨越输电线风偏舞动实时在线监测网络化平台,实现输电线舞动的实时监测。

关键词:舞动;输电线路;在线监测;传感器

中图分类号:TP29

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)12-099-14

Research on transmission line galloping monitoring technology

WU Haitao^{1a}, XIAO Qianbo^{1a}, SHI Mengmeng^{1b}, LI Han², WANG Peng², ZHONG Yuanchang²

(1a. Electric Power Research Institute; 1b. Shibei Power Supply Branch, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401121, P. R. China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The frequent occurrence of transmission line galloping induced by wind deflection poses a serious threat to the stable operation of power systems and results in significant economic losses. Therefore, the real-time online monitoring of transmission line galloping has become a key focus of research. This paper reviews the causes of transmission line galloping and discusses the current online monitoring technologies and system performance. Commonly used monitoring methods, and existing limitations are analyzed, and the major challenges faced by current galloping monitoring technologies are summarized. To address these challenges, a fusion monitoring method combining MEMS vibration sensing and BeiDou (BD) differential positioning is proposed. By integrating WSN/GPRS/BD communication networks, a real-time online monitoring platform for large-span transmission lines is established. This platform, which unifies sky, ground and space communication through the BeiDou

收稿日期:2025-04-03

基金项目:国家自然科学基金(联合基金)重点项目(U22B2095);国网重庆电科院科技项目(SGYHT/21-JS-223)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (Joint Fund) Key Project (U22B2095) and State Grid Chongqing Electric Power Research Institute Science and Technology Project (SGTYHT/21-JS-223).

作者简介:吴海涛(1991—),男,工程师,主要从事架空输电线路运检、输电在线监测方向研究。

通信作者:仲元昌,男,教授,博士生导师,(E-mail)zyc@cqu.edu.cn。

system, enables accurate real-time monitoring of transmission line galloping. The proposed approach provides valuable guidance for the real-time online galloping monitoring technologies for transmission lines.

Keywords: galloping; transmission line; online monitoring; sensors

输电线路在运行过程中受到自然环境因素的影响,常常发生舞动现象。随着中国电力需求增长、电力系统电压等级提高、建设规模持续扩张,西北地区电力线路布置环境气候恶劣,加之近年来极端天气事件频发,电网遭受舞动灾害的频率和范围不断扩大,造成的损害日益严重^[1-4]。因此,研究和开发有效的输电线路舞动监测技术,及时发现和预防舞动引发的故障,已成为保障电力系统可靠运行的关键。

国内外学者已围绕输电线路舞动的机理建模、振动控制、在线监测等方向开展了大量研究。早期的研究主要聚焦于舞动的气动不稳定机制与数学建模,如Nigol等^[5-6]提出的扭转舞动机理,加拿大著名学者Yu^[7-8]提出的偏心惯性耦合失稳机理等多自由度导线系统建模方法;近年来则更加关注舞动过程的实测响应分析与在线监测技术。研究者从视频监控、无线传感器等角度出发,提出了多种高精度在线监测方案。

随着传感器技术、无线通信技术和大数据分析技术的快速发展,输电线路舞动在线监测技术也取得了长足进步。基于传感器的在线监测系统能够实时采集和传输输电线路的运行状态数据,通过分析及时发现潜在的舞动问题,显著提升故障预警和应急处理的能力。尤其是MEMS(micro electromechanical system)惯性传感器因其具备小型化、高灵敏度、抗干扰性强等优势,在输电线路舞动监测中得到广泛应用。为此,研究将重点介绍输电线路舞动的成因、危害及其监测方法,分析当前在线监测技术的发展现状及应用实例,探讨未来的研究方向和技术挑战,为输电线路舞动在线监测技术的进一步发展提供参考和借鉴。

1 输电线路舞动的危害及成因

1.1 输电线路舞动的危害

输电线路舞动对电力系统的安全和稳定运行有多方面影响,主要表现在:

1)机械损伤。频繁的舞动会造成输电线路导线磨损,甚至发生断线、拉丝与裂纹等问题,尤其是连接处和固定点附近,这样会降低输电导线的机械性能与使用寿命。导线舞动时对绝缘子串施加额外的机械应力,也可能导致绝缘子串断裂或损坏。严重的舞动可能还会引起塔杆结构的变形或倒塌,造成重大安全事故,如图1~2所示^[9-12]。

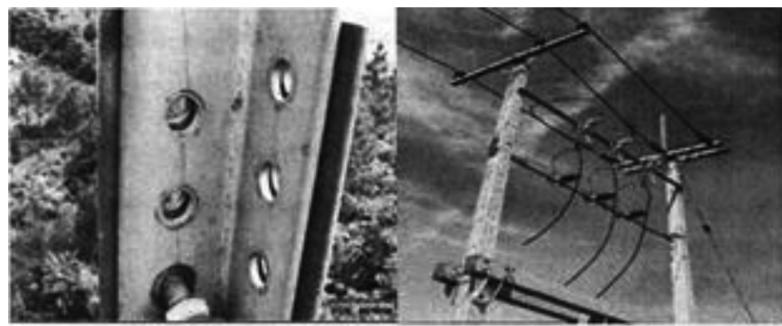


图1 输电线舞动引起的螺栓松动与断丝

Fig. 1 Bolt loosening and broken wire caused by transmission line galloping

2)供电稳定性。舞动导致导线的电气参数变化,引起电压波动,影响电力系统的稳定性和电能质量。严重舞动引发的机械损伤或电气故障可能导致长时间供电中断,影响大范围用户用电,造成线路跳闸、发电厂停运、社会大面积停电^[13]。

3) 线路寿命缩短。频繁的舞动会加速导线的老化和磨损, 缩短导线的使用寿命。舞动引起的机械应力和振动会对电力设备造成损害, 缩短设备的使用寿命^[14-15]。

4) 环境影响。舞动会产生低频噪声, 对周围环境产生一定的噪声污染。塔杆和线路的损坏可能对周围生态环境造成破坏, 如倒塌的塔杆破坏植被等。

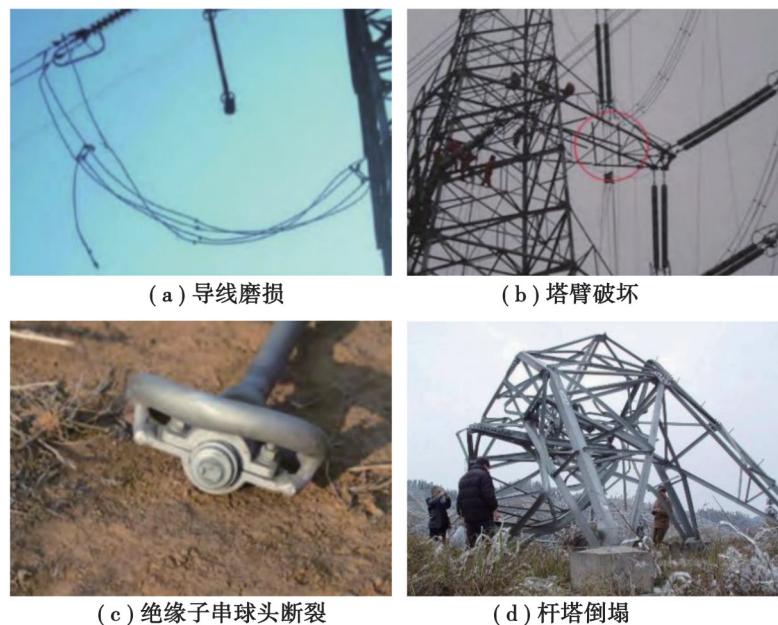


图 2 输电线舞动引起的部分机械损伤

Fig. 2 Partial mechanical damage caused by transmission line galloping

1.2 输电线路舞动原因分析

架空输电线舞动由多种因素引起, 舞动情形繁多, 产生原因复杂^[16-17]。主要因素体现在以下几个方面:

1) 导线覆冰: 通常发生在冬季和初春, 由低温(-20~0 °C)、高湿度(85%以上)、适当风速(1~10 m/s)条件下的雨夹雪、大雾等气象因素造成^[18]。覆冰形状不规则, 如: 扇形、D形等, 一旦受风激发, 可产生低频(0.1~3 Hz)、大幅(20~300倍导线直径)的自激振动^[19]。

2) 风激励: 风速在4~20 m/s区间内, 尤其是风向与线路夹角大于45°时, 常引起导线舞动。舞动在风速较高的早春和冬季更明显^[20]。

3) 线路参数及结构: 导线类型(单线或分裂线)、弧垂、张力、档距等因素影响舞动。大截面或多分裂导线、简单粗糙的导线表面更易产生舞动; 张力半径宽、弧垂小的导线会减少舞动碰撞, 但过大张力半径可能增加相邻导线振动; 档距增加会使舞动幅度变化^[21]。

4) 地理环境: 东-西走向线路易与北风夹角大, 覆冰和舞动更频繁; 分水岭、风口地区覆冰更多; 开阔平原风速稳定, 舞动更显著; 高离地高度的风速较大, 舞动程度也较严重^[22]。

2 输电线路舞动在线监测系统

架空输电线路舞动在线监测系统由在线监测设备、监测终端、通信网络和监测中心主站组成, 如图3所示^[23]。在线监测设备作为数据采集单元自动监测导线舞动相关参数并发送至监测终端, 监测终端对数据内容进行分析与管理, 再通过无线通信发送至监控中心主站, 由后台专家软件根据舞动数学模型或图像算法, 算出导线舞动轨迹。根据数据分析和模型比较, 判断当前线路是否存在异常现象, 当输电线的舞动振幅数据超过设定的警告参数时, 控制系统将会发出警告, 并通过Dashboard和邮件、短信等方式展示数据的状态和警报信息, 便于用户监测和管理, 并引导工作人员进行线路检测。

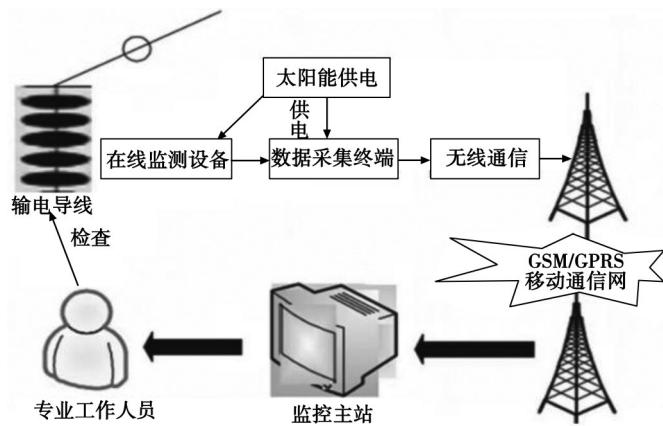


图 3 导线舞动监控系统

Fig. 3 Conductor galloping monitoring system

目前前端监测设备主要采用摄像机、传感器等来监测输电线舞动的相关信息。对于无线通信模块, GPRS/CDMA/INTERNET 技术已广泛应用于输电线路在线监测系统;随着通信技术的进一步发展, 4G/5G 通信模块的应用进一步实现了大跨越输电线路的高精度自动化监测;在线监测装置无线传感终端与数据集中器之间的局域网无线通信则通常采用 ZigBee 无线传输技术^[24], 对终端分布较广泛的户外长距离的底层无线通信则适用具有通信距离远、低功耗等特点的 LoRa(long range) 无线通信技术^[25-26];在山区、沙漠这类偏远地区, 采用卫星通信进行输电线路状态监测数据传输更优。

2.1 视频监控系统

视频监控系统通常通过在每个杆塔上安装监测分机, 实时获取导线舞动和周围环境的图像信息。每个监测单元负责采集现场数据, 并通过 GPRS(general packet radio service) 网络和互联网将信息传输至中心监测服务器。监控中心的主机监护软件在后台运行, 负责收集和控制每个监测单元的数据。服务器对采集到的电力线状况信息进行处理。当监控中心接收到某杆塔的信息时, 系统将激活监护软件, 监控人员可以即时查看信息内容和图像。监护软件结合现场图像和环境参数, 自动分析输电线的舞动情况, 确定舞动的位置和时间, 并及时通知巡检人员, 从而提前发现电力线运行中的异常情况, 避免潜在事故的发生。

2.2 无线传感器在线监测系统

基于无线传感器网络的输电线路在线监测系统主要由无线传感器节点、塔上监控终端及监控中心主站构成, 如图 4 所示^[27]。

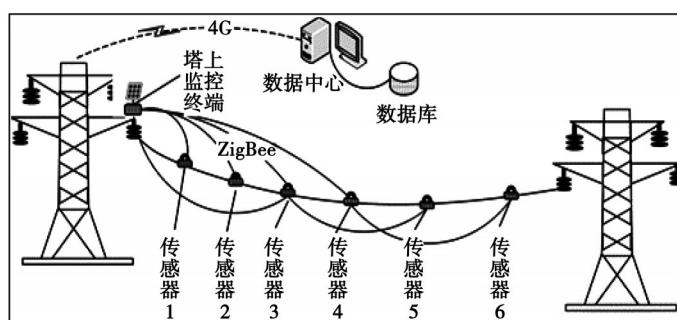


图 4 无线传感器网络的输电线路在线监测系统

Fig. 4 An online monitoring system for transmission lines based on wireless sensor networks

线上传感器负责采集舞动信息, 通过在输电线上按固定间距布置传感器, 在舞动发生时, 传感器采集舞动数据, 并通过 ZigBee 无线传输协议将其传输至塔上的终端。终端接收来自传感器的舞动信息, 进行相应数据处理, 再通过 4G/5G 网络传输至监控中心。

3 舞动监测方法

3.1 图像处理

传统图像处理的舞动监测法是在杆塔上安装摄像机直接拍摄,再通过无线通信网络将数据传输到监控主站,经数字图像处理技术获得输电线路舞动的特征参数^[28-29]。刘桂华等^[30]通过在杆塔上固定摄像头拍摄杆塔和电缆图像,在电力线上加装参照物增强识别效果的方法实现输电线舞动监测;谢天叶^[31]使用Android手机作为视频采集和图像处理装置的监测系统,提出基于视觉目标检测和目标跟踪算法的视频图像处理技术,实现了输电线舞动监测;任佳颖等^[32]采用相关图像处理算法定位跟踪间隔棒,得到输电线位置的移动,计算出输电线舞动的幅值和频率。基于视频图像相关监测方法更直观地监测输电线运动状态,但是冰雪或大雾天的可见度低易导致拍摄视频图形失真^[33],且图像传输对信号传输要求较高,数据量大传输较慢,无法进行全天监控,如若拍成二维图像,则会缺失三维的运动。

3.2 传感器应用

3.2.1 光纤光栅传感器

近年来,以光纤 Bragg 光栅为代表的光学测量技术备受关注,其通过对光纤光栅反射光波长变化的检测处理实现对温度及应变的监测,与传统传感器相比,光纤光栅传感器具有优良的绝缘性能、抗电磁干扰、耐腐蚀、使用寿命长、体积小巧、传输距离远,不需要外部电源,支持分布式测量,具有极高的测量灵敏度,其测量原理如图 5 所示^[34-37]。Bjerkan 等^[38]通过分布式光纤传感器网络采集了 160 m 档距导线在不同覆冰和振动条件下的温度和力学参数,并进行了舞动轨迹拟合;陆飙等^[39]通过偏振光时域反射仪 POTRD(polarized optical time reflectometer domain)实现光纤复合架空导线的舞动分布式在线监测,成功地测量了 48 km 线路上多个位置的舞动情况;张旭平等^[40]基于多参量分布式光纤传感技术,提出一种导线覆冰舞动监测方法,同时根据覆冰舞动的形成条件,提出依据频率分量寻找舞动中心,两者结合判断覆冰舞动概率。利用光纤光栅传感器测量精度较高、范围远、不易受高压磁场的干扰,但是组建光纤网络成本较高,布置传感器困难,且传感点数受限,更适用于长距离架空输电线路和电缆的在线监测,同时,光栅传感器还存在温度干扰、信息传输困难的问题^[41-44]。

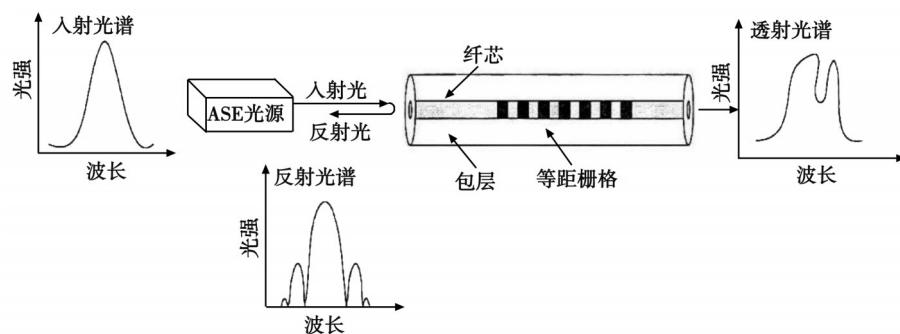


图 5 光纤光栅原理图

Fig. 5 Schematic diagram of a fiber Bragg grating

3.2.2 加速度传感器

基于加速度传感器的舞动监测系统先将导线舞动转化为电信号,再由单片机内置 ADC(analog-to-digital converter)完成数字化采集,经过初步的信号处理后,测量数据通过 GSM(global system for mobile communications)模块进行无线传输,发送至监控系统进行综合分析。随后通过加速度、速度和位移之间的数学关系,对加速度进行一次和二次积分,获得物体的速度矢量和位移矢量^[45-46]。黄官宝等^[47]开发的在线监测装置如图 6 所示。重庆大学张帆团队^[48]研制了一套以加速度传感器为核心的定位系统。由加速度传感器、无线 GSM(global system for mobile communications)模块、数据采集终端与数据分析平台构成。该方案可对 1 次舞动过程进行较完整记录;若叠加风速与覆冰监测,可较为准确判定舞动的触发与结束条件。然而,工程

落地面临 2 类挑战:1)传感器布设:传感器数量增多虽能提升数据完备性与拟合精度,但同时提高成本与计算负荷,数量过少则可能导致拟合不足、轨迹估计偏差;2)导线扭转影响未被充分考虑:在线监测采用的三轴加速度计未校正扭转对测量与解算的干扰^[49],误差会随时间积累并被放大,最终造成累积偏差增大与数据失真。

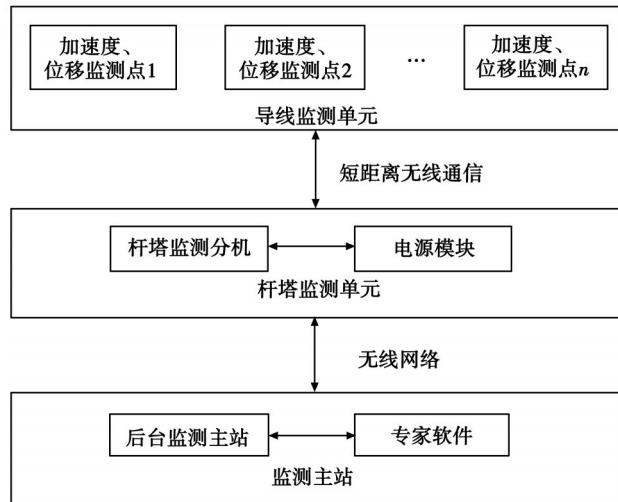


图 6 基于加速度传感器的舞动监测系统框图

Fig. 6 Block diagram of dance monitoring system based on accelerometer

3.2.3 惯性 MEMS 传感器

为削弱导线扭转对测量精度的影响,多位学者提出了基于惯性测量单元的在线监测方法。利用惯性测量单元可同时获取舞动过程中的线加速度与角速度,既能反演被测点位移演化,也能刻画扭转动态,从而更全面、准确地重建输电线路的姿态。

MEMS 惯性传感器属于微纳加工技术,利用微电子工艺在芯片上制备微型机械结构,通过微结构电学参数的变化换算得到加速度、角速度等量。将其刚性固定于导线进行接触式监测,以输出的惯性信息表征舞动状态量(角速度、加速度、幅值、频率等),结合相应的解算与识别算法完成参数估计。

朱勤翔^[50]通过采用增加三轴磁力计构成九轴传感器实时还原了整根输电线舞动状态,克服了加速度计受扭转干扰的问题;张博等^[51]以 MEMS 六轴惯性传感器为监测装置,采用融合 Mahony 滤波的姿态解算,结合对线路位移的解算实现输电线路舞动轨迹的监测;丁扬等^[52]则在使用六轴传感器的基础上,利用改进的 Mahony 滤波姿态算法,结合时域-频域积分的方式,对舞动姿态求解算法进行优化,得到更精确的舞动参数。

惯性 MEMS 传感器的高可靠性和稳定性使其在恶劣的环境条件下仍能正常工作,适应极端天气如大风、暴雪等带来的挑战。它们的低成本和批量生产能力也使得大规模部署成为可能,为电力系统提供全面、实时的舞动监测网络。综合来看,惯性 MEMS 传感器在输电线路舞动监测中的应用,不仅提升了监测的精度和效率,还为电力系统的安全运行提供了坚实保障。

3.2.4 差分 GPS 在线监测

GPS 定位法在靠近用户 GPS 接收机处设置的坐标已知,且差分基准站精度高,以此接收 GPS 信号并对比处理后,将数据实时传送至移动站。移动站接收基准站信息,修正观测结果,通过数据链传输给用户,实现精准定位。差分定位包括位置差分、伪距差分和载波相位差分 3 种方式。基于 DGPS 的输电线路舞动和风偏在线监测方案如图 7 所示^[53-54]。

胡志坚等^[55]从 GPS 定位机理出发,借助后台专家系统提取导线的经度、纬度与高程三维信息,并完成向三维笛卡尔坐标系的精确映射,随后引入人工神经网络对定位误差进行建模与校正,最终获得导线的舞动与

风偏轨迹; 汪涛等^[56]则以 SPSA 为核心求解器, 对样本导线的姿态参数进行同步估计与迭代收敛, 实验表明该算法具较高精度与快速收敛性, 在基于 GPS 的实现中, 通过实时获取导航电文与载波相位解算姿态角与等效长度, 推得舞动幅值; 梁东等^[57]提出一种基于北斗定位技术的舞动监测方法, 利用 RTKLIB 仿真工具生成模拟的卫星定位数据, 并通过舞动监测算法进行测试, 验证了该方法的有效性。

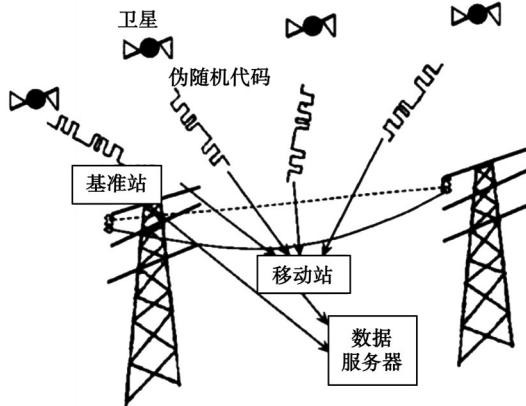


图 7 基于 DGPS 的在线监测方案

Fig. 7 DGPS configuration for online monitoring

3.2.5 “MEMS 振动传感器+BD 差分定位”融合监测

由于风偏舞动幅度较大(达到米级), 传统的振动传感器不能满足这样大的动态测量范围, 而 GPS 差分定位技术, 可以满足大范围的位置变化。因此, 为了充分发挥各自的优势, 提出“MEMS 振动传感器+BD 差分定位”融合感知模式。

在工程应用中, 差分基准站通常布设在坐标已知、环境稳定的固定点位, 移动站与被定位的移动载体(如导线测点、巡检平台等)绑定使用。同一服务区域内一般配置一座基准站, 可同时为多台移动站提供改正信息。移动站在运动过程中通过无线链路实时接收基准站发布的差分改正数, 对自身解算结果进行在线校准, 从而获取经修正的实时位置, 这一过程即为实时差分动态定位。

位置差分定位法要求基准站与移动站在同一历元同步观测一组卫星并接收观测数据, 但其定位效果通常不及伪距差分法稳健与精确, 因此, 在本研究中优先采用伪距差分定位方案。基本原理如下: GPS 接收机接收可观测到的卫星发送来的信息, 利用已知基准站 b 的准确坐标 $\mathbf{S}_b(X_b, Y_b, Z_b)$ 以及星历计算的某卫星 j 的地心坐标 $\mathbf{S}_j(X_j, Y_j, Z_j)$, 就可计算得到同一时刻两者的几何距离 ρ_b^j ; 同理, 又设移动站 a 的坐标为 $\mathbf{S}_a(X_a, Y_a, Z_a)$, 也可同时得移动站 a 到卫星 j 的几何距离 ρ_a^j 。则有

$$\rho_b^j = \|\mathbf{S}_j - \mathbf{S}_b\| = \sqrt{(X_j - X_b)^2 + (Y_j - Y_b)^2 + (Z_j - Z_b)^2}, \quad (1)$$

$$\rho_a^j = \|\mathbf{S}_j - \mathbf{S}_a\| = \sqrt{(X_j - X_a)^2 + (Y_j - Y_a)^2 + (Z_j - Z_a)^2}. \quad (2)$$

对同一颗卫星 j 做“接收机间单差”, 其单差伪距方程如式(3)所示

$$\nabla P^j = (\rho_a^j - \rho_b^j) + c(\delta t_a - \delta t_b) + \Delta I^j + \Delta T^j + \nabla \varepsilon_P^j, \quad (3)$$

其中: c 为光速; δt_a 、 δt_b 为 2 接收机钟差; $\Delta I^j = I_a^j - I_b^j$ 为电离层延迟差; $\Delta T^j = T_a^j - T_b^j$ 为对流层延迟差; $\nabla \varepsilon_P^j$ 为单差伪距的测量噪声与多路径等残差。

进一步, 另选参考卫星 m, 其坐标为 $\mathbf{S}_m(X_m, Y_m, Z_m)$, 可做“卫星间双差”, 以消去接收机钟差, 其中, $\nabla \varepsilon_P^{jm}$ 为双差观测的合成残差, 包含未消的大气、轨道、噪声等微小误差量

$$\Delta \nabla P^{jm} = (\nabla P^j - \nabla P^m) = [(\rho_a^j - \rho_b^j) - (\rho_a^m - \rho_b^m)] + \nabla \varepsilon_P^{jm}. \quad (4)$$

则几何差可用“基线向量”线性化并组装为矩阵方程

$$\begin{aligned} \mathbf{k} &= \mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b = \begin{bmatrix} X_a - X_b \\ Y_a - Y_b \\ Z_a - Z_b \end{bmatrix}, \rho_a^j - \rho_b^j \approx (\mathbf{e}_b^j)^T \cdot \mathbf{k}; \\ \mathbf{e}_b^j &= \frac{\mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b}{\|\mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b\|}, \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{k} + \mathbf{v}, \hat{\mathbf{k}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{y}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \mathbf{k} 为基线向量(从基准站指向移动站); \mathbf{H} 为设计矩阵, 每一行为 $(\mathbf{e}_b^j - \mathbf{e}_b^m)^T$; \mathbf{e}_b^j 为 LOS 单位向量(从基准站指向卫星 j); \mathbf{y} 为观测向量, 由多颗卫星的双差观测 $\Delta \nabla P^m$ 组成; $\hat{\mathbf{k}}$ 为带权最小二乘的基线估计。

最后, 将估计的基线加到基准站坐标上, 可以计算移动站 a 的坐标 $\mathbf{S}_a(X_a, Y_a, Z_a)$:

$$\mathbf{S}_a = \mathbf{S}_b + \hat{\mathbf{k}}, \quad (6)$$

在上述理论指导下, 笔者构建了由微型 RTK 定位模块和一套微型 RTK 移动定位模块构成的输电线 BD 差分测动系统。其中, RTK 定位模块包括 RTK 定位基站、GPS 天线、外接电源; RTK 移动定位模块包括 RTK 定位装置、GPS 天线、外接电源, 其系统硬件构成如图 8 所示。

实时动态(real-time kinematic, RTK)载波相位差分技术, 是实时处理 2 个测量站载波相位观测量的差分方法, 将基准站采集的载波相位发给用户接收机, 进行求差解算坐标, 以提高 GPS 定位精度。由基准站接收机、数据链、流动站接收机 3 部分组成, 是一种能够在户外实时得到厘米级定位精度的测量方法。

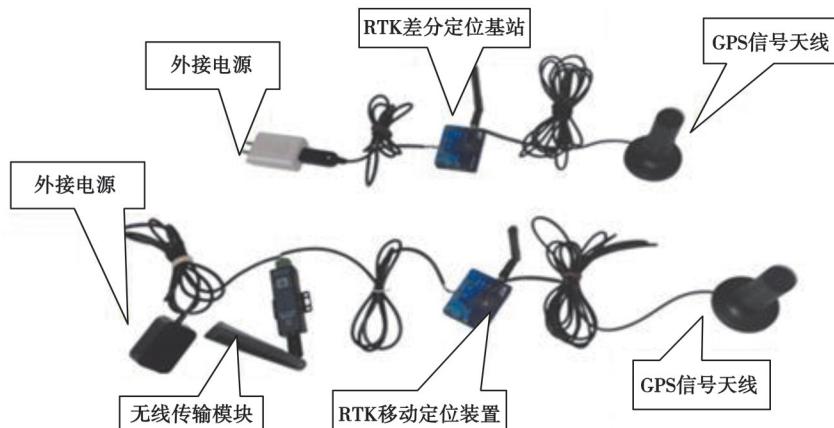


图 8 基于北斗差分定位的输电线路舞动监测硬件终端

Fig. 8 Hardware terminal for transmission line galloping monitoring based on BeiDou differential positioning

4 分析与讨论

4.1 现存问题分析

1)耐久性与稳定性: 输电线舞动监测设备长期暴露在复杂户外环境中, 承受高温、湿度、雷击等影响, 易导致传感器失灵和数据传输不稳定, 影响监测的可靠性和准确性。

2)传感器布置与数量: 传感器数量影响监测精度和成本, 过多增加成本和计算量, 过少则降低监测精度, 无法准确拟合风动轨迹。

3)供电问题: 太阳能电池受天气影响, 自取电系统设备复杂, 面临供电不稳的挑战^[58]。

4)数据传输与存储: 偏远地区信号覆盖差, 无线传输技术有限, 易造成数据丢失或延迟, 同时数据存储面临容量和处理速度限制。

5)成本与维护: 高精度监测设备昂贵, 广泛部署和维护需要大量资金和人力, 限制技术推广。

4.2 基于智能间隔棒的监测系统创新技术

针对输电线舞动监测系统现有问题, 提出基于无线智能间隔棒的监测方法: 以现有的“间隔棒”为载体, 建立基于无线智能间隔棒的输电线风偏舞动监测理论、输电线风偏舞动参数获取方法、天空地一体化输电线实时在线监测组网技术, 并开展输电线风偏舞动监测验证。该监测系统主要从以下几点解决当前监测难题:

1) 建立基于北斗通信的天空地一体化大跨越输电线风偏舞动实时在线监测网络化平台, 完成大跨越输电线风偏舞动实时在线监测的天空地一体化组网。

确立基于在线自获能的电力线振动监测方法, 通过开发面向智能间隔棒应用的多源环境能量获取发电装置, 为输电线路的智能间隔棒提供稳定、高效和足够的电能支撑; 同时采用 WSN/GPRS/BD 3 网融合技术, 完成大跨越输电线风偏舞动实时在线监测的天空地一体化组网, 实现各大跨度输电线路在极端环境状态下统一监测的无缝覆盖, 建立基于北斗通信的天空地一体化大跨越输电线风偏舞动实时在线监测网络化平台, 其组网架构如图 9 所示, 解决了传感器供电及数据传输与储存问题。

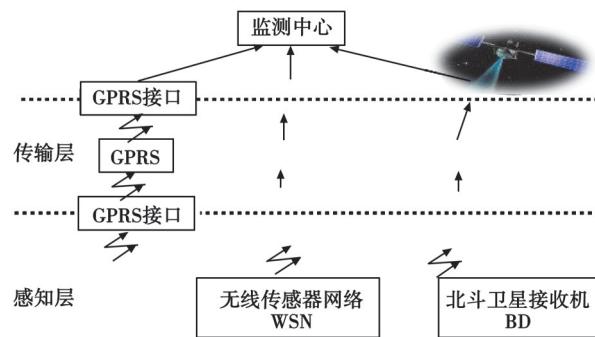


图 9 WSN/GPRS/BD3 网融合组网架构

Fig.9 WSN/GPRS/BD converged networking architecture

2) 从输电线风偏舞动曲线的时域、频域及空域特征出发, 建立大跨越输电线风偏舞动特征与风载荷数据之间的映射关系模型; 通过在间隔棒的中央安装 MEMS 惯性传感器, 建立基于 MEMS 惯性传感器阵列的大跨越输电线风偏舞动监测系统, 形成基于 MEMS 惯性传感器阵列的大跨越输电线风偏舞动监测基础理论和数据获取机制。同时基于风偏舞动曲线重建原理, 研究输电线的风偏舞动特征, 探索稀疏重建方法, 用传感器获取的数据重构风偏舞动曲线, 解决传感器的布置问题。

最终构建能实现大跨越输电线风偏舞动实时在线监测的天空地一体化平台, 对舞动数据进行分析处理, 设定预警阈值, 实现大跨越输电线风偏舞动预警。基于上述 2 点, 构建的大跨越输电线风偏舞动无线远程监测平台如图 10 所示。



图 10 大跨越输电线风偏舞动无线远程监测平台

Fig.10 Wireless remote monitoring platform for wind-induced galloping and swing of long-span transmission lines

整个系统通过传感器接口与数据采集、数据传输、数据存储与分析、可视化与预警界面等模块的协同工作, 集成了实时数据采集、智能分析和异常状态预警的功能。该系统可以有效提高电力线路的巡检效率和安全防护能力, 减少由风偏舞动引发的安全事故风险, 实现对输电线路的智能化管理与维护, 确保电网的可靠

性和可持续运行。测回的数据案例及可视化如图11~12所示,验证了所提方法的有效性,能有效实现输电线舞动数据的实时监测。

2025-01-10 14:42:10 系统时间	403.60 m GPS高度	0.73 位置定位精度	12 卫星数量	6:42:9 GPS时间
106.600 353 3° 经度	29.534 352° 纬度	0° 运动航向角	0.016v668 km GPS地速	单点定位 定位状态
0° 差分航向角	0 m 差分高度	0 m 差分距离		

图11 监测系统测回数据

Fig. 11 The data measured and retrieved by the monitoring system

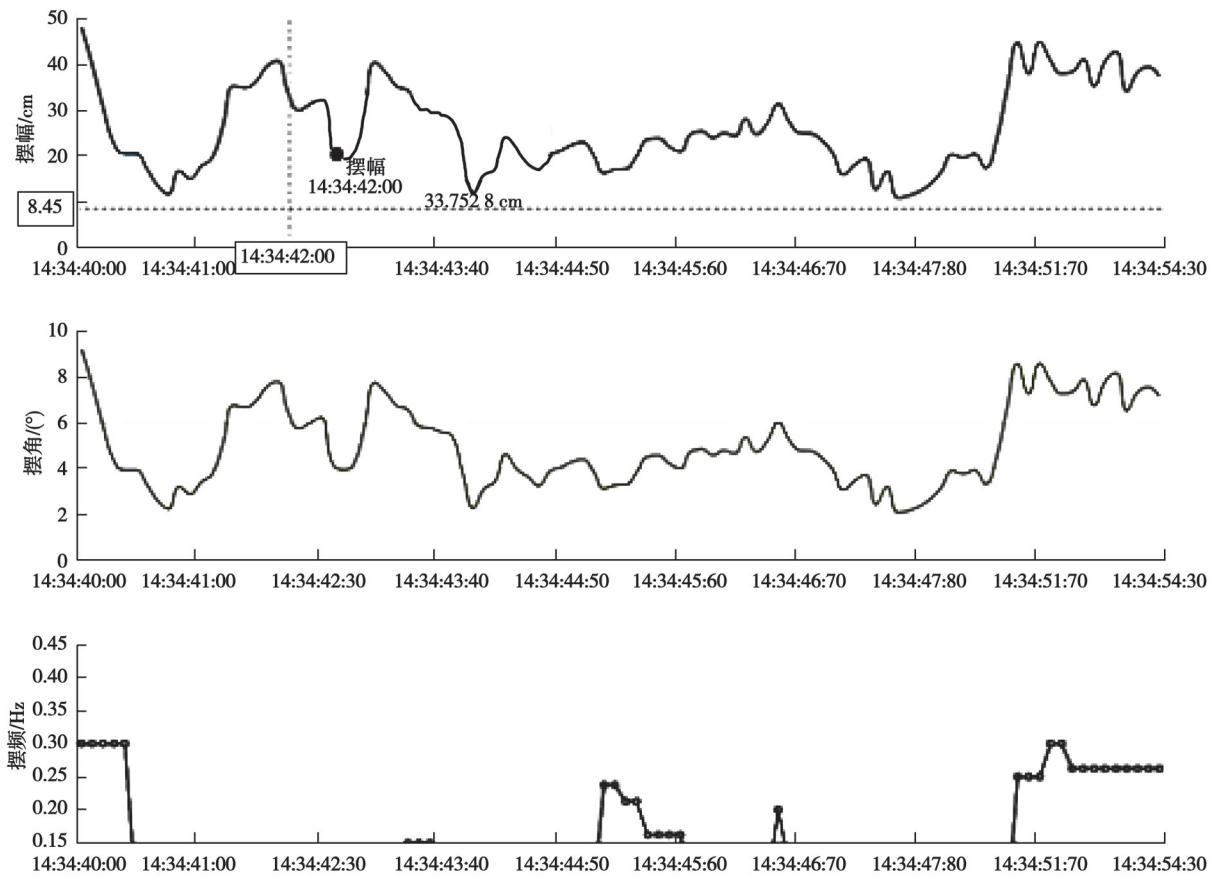


图12 舞动数据可视化

Fig. 12 Visualization of galloping data

5 结语

除以上问题与建议外,输电线监测技术还可从以下方面进一步研究发展。

- 1) 新型能源解决方案:未来的监测系统可以采用更加高效的能源解决方案,比如集成多种能源形式(如太阳能和自取电系统)进行供电,或者采用新型高效蓄电技术来提高供电可靠性。
- 2) 提升数据传输的可靠性和覆盖范围:利用5G技术、低轨卫星通信以及更先进的无线传输协议来提高

传输稳定性和覆盖范围。通过开发抗干扰能力更强的通信设备和算法, 确保在复杂地形和极端天气条件下数据的完整性和实时性。

3) 智能分析与决策支持系统: 引入人工智能和机器学习技术, 对收集到的大量数据进行深度分析, 预测风动趋势, 识别异常情况, 提供更准确的预警和决策支持。这将进一步提高输电线舞动监测的效率, 确保电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] Jin S L, Feng S L, Liu X L, et al. On the formation and wind enhancement mechanisms of a Mongolian cyclone that caused a transmission line galloping trip in Gansu province[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021, 14(2): 100022.
- [2] Lilien J L, Havard D G. Galloping database on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 670-674.
- [3] Lu M L, Popplewell N, Shah A H, et al. Hybrid nutation damper for controlling galloping power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 450-456.
- [4] Kikuchi N, Matsuzaki Y, Banse H, et al. Development of conductors with reduced wind drag and wind noise for overhead power transmission lines[J]. Furukawa Review, 2002(21): 50-55.
- [5] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part I-den hartog mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(2): 699-707.
- [6] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping-part II torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2005, PAS-100: 708-720.
- [7] Yu P, Shah A H, Popplewell N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(1): 140-145.
- [8] Yu P, Shan A H, Popplewell N. Instability trends of inertially coupled galloping Part I: Initiation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(4): 663-678.
- [9] Druez J, Louchez S, McComber P. Ice shedding from cables[J]. Cold Regions Science and Technology, 1995, 23(4): 377-388.
- [10] 朱宽军, 刘超群, 任西春. 架空输电线路舞动时导线动态张力分析[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 40-44.
Zhu K J, Liu C Q, Ren X C. Analysis on dynamic tension of conductor under transmission line galloping[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 40-44. (in Chinese)
- [11] 王晓彪, 于洪海, 肖信昌. 输电线路覆冰舞动原因分析及预防措施[J]. 电力安全技术, 2017, 19(5): 8-11.
Wang X B, Yu H H, Xiao X C. Cause analysis and preventive measures of icing galloping of transmission lines[J]. Electric Safety Technology, 2017, 19(5): 8-11. (in Chinese)
- [12] 张平. 架空输电线路导线舞动原因分析及防治措施[J]. 内蒙古电力技术, 2009, 27(5): 11-13.
Zhang P. Cause analysis on overhead transmission line galloping and its prevention measures[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009, 27(5): 11-13. (in Chinese)
- [13] 闵光云, 赵鑫, 刘小会. 架空覆冰输电线路舞动研究进展[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 116-128.
Min G Y, Zhao X, Liu X H. Research progress of galloping of overhead iced transmission lines[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 116-128. (in Chinese)
- [14] 米玛顿珠. 输电线路舞动分析与合理防治方式初探[J]. 中国新技术新产品, 2016(22): 53.
Mi M D Z. Analysis of transmission line galloping and preliminary study on reasonable prevention methods[J]. New Technology & New Products of China, 2016(22): 53. (in Chinese)
- [15] 陈忠源, 崔亚茹, 唐苑雯, 等. 输电线路舞动原因与应对措施分析[J]. 电子技术, 2023, 52(7): 382-383.
Chen Z Y, Cui Y R, Tang Y W, et al. Analysis of causes and countermeasures for transmission line galloping[J]. Electronic Technology, 2023, 52(7): 382-383. (in Chinese)
- [16] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Wang J. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [17] 史昌明, 党乐, 唐钰博, 等. 输电线路覆冰舞动原因与预防措施分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 364-365.
Shi C M, Dang L, Tang Y B, et al. Analysis of causes and preventive measures for transmission line ice galloping[J]. Application of IC, 2023, 40(3): 364-365. (in Chinese)

[18] 刘昌盛, 刘和志, 姜丁尤, 等. 输电线路覆冰舞动研究综述[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 156-164.
Liu C S, Liu H Z, Jiang D Y, et al. Research overview on galloping of iced transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24): 156-164. (in Chinese)

[19] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Guo Y L, Li G X, You C Y. Transmission line galloping[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)

[20] 李献忠, 雷莱. 架空输电线路的舞动原因及防治措施[J]. 仪表技术, 2019(4): 41-43.
Li X Z, Lei L. Causes and preventive measures of galloping of overhead transmission lines[J]. Instrumentation Technology, 2019(4): 41-43. (in Chinese)

[21] 余江. 超特高压输电线路覆冰舞动机理及其防治技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Yu J. Research of galloping mechanism and anti-galloping prevention technology on iced ultra-high voltage transmission lines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[22] 龚舒, 陈绍南, 肖静, 等. 无线电能传输系统实本征态与零相角点分析[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(2): 140-148.
Gong S, Chen S N, Xiao J, et al. Analysis of real eigenstates and zero phase angle of wireless power transfer system[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(2): 140-148.

[23] 周军, 方镇. 基于多源传感的高压配电网输电线舞动系统[J]. 通信电源技术, 2023, 40(6): 69-71.
Zhou J, Fang Z. Transmission line galloping system for high-voltage distribution network based on multi-source Sensing[J]. Communication Power Technologies, 2023, 40(6): 69-71. (in Chinese)

[24] 陈刚, 冯建辉, 秦建明. 输电线路在线监测信息无线传输技术现状[J]. 云南电力技术, 2023, 51(1): 13-17.
Chen G, Feng J H, Qin J M. Research status of wireless transmission technology for online monitoring information of transmission lines[J]. Yunnan Electric Power, 2023, 51(1): 13-17. (in Chinese)

[25] Kong P Y, Liu C W, Jiang J A. Cost-efficient placement of communication connections for transmission line monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4058-4067.

[26] Parri L, Parrino S, Peruzzi G, et al. Low power wide area networks (LPWAN) at sea: performance analysis of offshore data transmission by means of LoRaWAN connectivity for marine monitoring applications[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3239.

[27] 张博, 常帅帅, 陶亚光, 等. 基于无线传输的输电线路舞动监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 103-108.
Zhang B, Chang S S, Tao Y G, et al. Design of transmission line galloping monitoring system based on wireless transmission [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 103-108. (in Chinese)

[28] 毛龙华. 架空输电线舞动与断丝在线监测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Mao L H. Research on on-line monitoring technology for galloping and wire breakage of transmission line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)

[29] Li Z J, Feng S Q, Wang S X, et al. Transmission line galloping monitoring based on digital image processing technology[J]. Industrial Control Computer, 2010(6): 36-37.

[30] 刘桂华, 刘焕玲, 肖宇峰, 等. 智能视频分析在输电线舞动监测中的应用[J]. 工具技术, 2012, 46(3): 81-84.
Liu G H, Liu H L, Xiao Y F, et al. Application of intelligent video analysis in monitoring wave of power line[J]. Tool Engineering, 2012, 46(3): 81-84. (in Chinese)

[31] 谢天叶. 基于视频跟踪的输电线路舞动监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Xie T Y. Research on monitoring technology of transmission line galloping based on video tracking[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

[32] 任佳颖, 李小雨, 房体育, 等. 基于间隔棒跟踪的输电线舞动检测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(4): 424-432.
Ren J Y, Li X Y, Fang T Y, et al. Detection of transmission line galloping based on spacer tracking[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(4): 424-432. (in Chinese)

[33] 王鹤. 输电线路覆冰图像处理与识别技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
Wang H. Research on technologies of image processing and recognition of icing transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009. (in Chinese)

[34] 肖渊, 马龙涛, 黄新波. 输电线路导线舞动在线监测技术研究现状[J]. 机电一体化, 2014, 20(6): 11-15, 21.
Xiao Y, Ma L T, Huang X B. Research status of on-line monitoring technique of conductor galloping of transmission lines[J]. Mechatronics, 2014, 20(6): 11-15, 21. (in Chinese)

[35] 王敏学, 李黎, 周达明, 等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3591-3600.
Wang M X, Li L, Zhou D M, et al. Overview of studies on application of distributed optical fiber sensing technology in online monitoring of transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3591-3600. (in Chinese)

[36] 唐元春, 李翠, 黄宁, 等. 基于分布式光纤传感的架空输电线路舞动与雷击监测技术进展[J]. 光电子技术, 2023, 43(4): 337-346.
Tang Y C, Li C, Huang N, et al. Overhead transmission line dancing and lightning strike monitoring technology based on distributed optical fiber sensing[J]. Optoelectronic Technology, 2023, 43(4): 337-346. (in Chinese)

[37] 周瑞. 面向输电线路状态监测的光纤传感器及覆冰智能预测关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
Zhou R. Research on the key technology of optical fiber sensor for power transmission lines monitoring and intelligent prediction of icing [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese)

[38] Bjerkan L. Application of fiber-optic Bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines[J]. Applied Optics, 2000, 39(4): 554.

[39] 陆飙, 陈利民, 刘晓波, 等. 一种新型输电线缆风舞在线监测系统及其舞动参数测量方法[J]. 电力学报, 2017, 32(1): 49-56.
Lu B, Chen L M, Liu X B, et al. A novel on-line power transmission line galloping monitoring system and its quantitative measurement method[J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(1): 49-56. (in Chinese)

[40] 张旭萍, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电子技术, 2017, 37(4): 221-229.
Zhang X P, Wu J L, Shan Y Y, et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(4): 221-229. (in Chinese)

[41] 马国明, 王思涵, 秦炜淇, 等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3032-3047.
Ma G M, Wang S H, Qin W Q, et al. Research and prospect in optical fiber sensing of transmission line operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3032-3047. (in Chinese)

[42] Lu L D, Liang Y, Li B L, et al. Maintenance of the OPGW using a distributed optical fiber sensor[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 1251-1256.

[43] Lu L D, Liang Y, Li B L, et al. Experimental study on location of lightning stroke on OPGW by means of a distributed optical fiber temperature sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 79-82.

[44] 孙求国. 输电线路舞动在线监测技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
Sun Q G. Research on on-line monitoring technology of transmission line galloping[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012. (in Chinese)

[45] 任欢. 基于加速度传感器的输电线路舞动轨迹仿真及监测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Ren H. Study on galloping trajectory simulation of transmission line and galloping monitoring system based on accelerometer sensors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)

[46] Liao J S, Zhou Q, Ma X M, et al. A study on improved measuring method of transmission lines galloping amplitude based on acceleration transducer[C]//2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Shanghai, China: IEEE, 2012: 178-181.

[47] 黄官宝, 黄新波, 赵雪松, 等. 输电线路导线舞动在线监测系统设计[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 85-89.
Huang G B, Huang X B, Zhao X S, et al. On-line monitoring system design on transmission line galloping[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 85-89. (in Chinese)

[48] 张帆. 基于加速度传感器定位的输电线舞动监测装置研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
Zhang F. Study on monitoring device of transmission lines galloping based on accelerometer sensor location[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)

[49] 任鹏亮, 谢凯, 陈钊, 等. 输电线路舞动监测技术综述[J]. 河南科技, 2015, 34(16): 129-132.
Ren P L, Xie K, Chen Z, et al. Review on galloping monitoring technology for transmission line[J]. Henan Science and Technology, 2015, 34(16): 129-132. (in Chinese)

[50] 朱勤翔. 基于九轴传感器的输电线舞动监测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Zhu Q X. Monitoring system for power transmission line galloping based on marg sensor[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2017. (in Chinese)

[51] 张博, 陶亚光, 常帅帅, 等. MEMS 传感器输电线路舞动轨迹监测[J]. 中国测试, 2022, 48(1): 53-59.
Zhang B, Tao Y G, Chang S S, et al. Transmission line galloping trajectory monitoring based on MEMS sensor[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 53-59. (in Chinese)

[52] 丁杨, 林孟豪, 路金达. 惯性 MEMS 传感器在输电线舞动状态监测中的优化设计与应用[J]. 电子器件, 2023, 46(6): 1572-1577.
Ding Y, Lin M H, Lu J D. Optimal design and application of inertial MEMS sensor in transmission line galloping state monitoring[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(6): 1572-1577. (in Chinese)

[53] 王广运. 差分 GPS 定位技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
Wang G Y. Differential GPS positioning technology and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1996. (in Chinese)

[54] Mensah-Bonsu C, Krekeler U F, Heydt G T, et al. Application of the Global Positioning System to the measurement of overhead power transmission conductor sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 273-278.

[55] 胡志坚, 李洪江, 文习山, 等. 基于差分 GPS 的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 120-124.
Hu Z J, Li H J, Wen X S, et al. On-line monitoring method of transmission line galloping and wind deflection based on differential GPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 120-124. (in Chinese)

[56] 汪涛. 基于 GPS 的输电导线舞动在线监测方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
Wang T. Research on on-line monitoring method of transmission line galloping based on GPS[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)

[57] 梁东, 张雪, 冯茂秘. 基于北斗定位技术的输电线路舞动监测方法研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(8): 16-18.
Liang D, Zhang X, Feng M M. Research on monitoring method for transmission line galloping based on Beidou positioning technology[J]. Communication Power Technologies, 2024, 41(8): 16-18. (in Chinese)

[58] 陆虹辰, 董金熹, 刘浠流, 等. 电动汽车无线充电系统恒流/恒压输出与抗偏移磁能耦合机构研究[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(8): 65-80.
Lu H C, Dong J X, Liu X L, et al. Research on constant current/constant voltage output of electric vehicle wireless charging system and anti-offset magnetic energy coupling mechanism[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(8): 65-80. (in Chinese)

(编辑 侯 湘)