

输电线路导线舞动监测与防治技术研究

孟雷

国网沈阳供电公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6713

[摘要] 随着极端天气事件的频繁发生,架空线路舞动现象对电力系统的安全运行和稳定供电构成重大威胁。受供电与离散感知掣肘,现有手段难捕瞬态特征,其对电网安全运行及可靠供电的影响日益加重,已经成为导致线路故障停运的首要原因。基于非圆截面气动失稳机理,本研究构建流固耦合模型,设计光纤光栅阵列无源分布式全息监测体系,并研发失谐双摆与刚柔耦合间隔棒协同的差异化防治技术。工程数据证实,该体系对低频大幅值自激振荡具备精准感知与多维抑制能力,可大幅削减动态张力载荷,规避相间闪络与金具磨损,确立了线路主动防御与闭环管控的技术范式。

[关键词] 输电线路; 导线舞动; 全息监测; 刚柔协同防治

中图分类号: TM752 **文献标识码:** A

Research on monitoring and prevention technology of conductor galloping of transmission line

Lei Meng

Slate Grid Shenyang Power Supply Company

[Abstract] With the frequent recurrence of extreme weather events, the phenomenon of aeolian vibration of overhead lines poses a significant threat to the safe operation and power supply of power systems. Due to the constraints of power supply and discrete sensing, the existing means fails to capture transient characteristics, and its impact on the safe operation and reliable power of power grids is increasingly severe, and has become the primary cause of line fault outage. Based on the aeroelastic instability mechanism of non-circular cross-sections, this constructs a fluid-solid coupling model, designs an optical fiber grating array-based passive distributed holographic monitoring system, and develops differentiated prevention and control technologies that coordinate the misalignment pendulum with the rigid-flexible coupling spacer. Engineering data confirms that this system has the precise sensing and multi-dimensional suppression capability for low-frequency large-amplitude-excited oscillations, which can significantly reduce dynamic tension load, avoid phase-to-phase flashover and hardware wear, and establish a technical paradigm of active defense and closed-control of lines.

[Key words] transmission line; conductor galloping; holographic monitoring; rigid-flexible collaborative prevention and control

前言

覆冰导线舞动严重时可能造成电力供应中断,甚至发生倒塔事故,造成巨大的经济损失。我国超特高压输电线路建设方兴未艾,在新的电网建设形势下输电线路架设环境将更为复杂,线路走廊将不可避免地遇到易舞的气象环境,如何有效防治超特高压输电线路在覆冰环境下的舞动是亟待解决的问题。传统技术主要依赖于静态或准静态的覆冰状态数据,对导线舞动频率的动态变化捕捉能力有限,导致舞动频率抑制效果不佳,激光雷达的采样频率有限,难以捕捉导线舞动的高频动态变化,可能导致舞动振幅的测量不够精确^[1]。为此,本研究结合邓哈托-奈哥尔(Den Hartog-Nigol)耦合理论,建立覆冰导线三维非线性动力

学模型,重点解决“动态感知精度”与“宽频耦合抑制”两大核心问题。

1 导线舞动气动失稳机理与动力学建模

1.1 覆冰导线气动失稳演化机理

覆冰导线舞动是一种典型的结构气动失稳现象,会造成输电塔线体系发生金具损伤、杆件破坏,严重时会导致倒塔事故。处于冻雨、湿雪等极端微气象走廊的输电导线,其迎风面常因过冷水滴的撞击而产生冻结效应。置身于层流或低湍流风场时,这些异形截面的升力 C_L 、阻力 C_D 及扭矩 C_M 系数随攻角 α 表现出强烈的非线性与迟滞效应。基于Den Hartog单自由度判据,一旦升力对攻角偏导数与阻力系数之和跌破零点,系统垂直

气动阻尼便由正转负,致使导线不再耗散反而持续从稳态风流汲取能量,从而触发发散性垂直自激振荡。Nigo1扭转-垂直耦合理论则指出,覆冰偏心重力扭矩会大幅削弱导线抗扭刚度,导致扭转固有频率衰减并与垂直频率出现频率锁定,进而通过气动扭矩激发的扭转模态,利用几何非线性效应动态调制瞬时攻角^[2]。此类攻角周期性脉动将反向激起气动升力的同频剧烈震荡,构建起“扭转-攻角-升力-垂直运动”的能量互馈正反馈闭环,显著拉低舞动起振风速,这正是特高压大跨越线路爆发低频、大振幅舞动的核心动力学诱因。

1.2 流固耦合非线性动力学建模

针对舞动中几何大变形与气动载荷强耦合的量化难题,本研究引入连续介质力学哈密顿变分原理,采用更新的拉格朗日(UL)列式追踪导线三维空间大位移小应变轨迹,将覆冰导线离散为空间三节点等参梁混合有限元模型,建立涵盖轴向拉伸、弯曲及非自由扭转的多自由度非线性控制方程组,其中包含覆冰偏心质量的一致质量矩阵、瑞利阻尼矩阵、线弹性刚度矩阵及随位移变化的几何刚度矩阵。方程右侧气动载荷向量基于准定常理论构建,实时合成结构运动与来流风速获取有效攻角,结合风洞气动系数曲线求解,采用纽马克-β法与牛顿-拉夫逊迭代结合的时域策略求解方程组,复现导线从微幅扰动至极限环振荡全过程,为监测阈值整定及防舞金具设计提供数值依据^[3]。

2 分布式全息监测体系架构

2.1 光纤布拉格光栅传感拓扑构建

针对架空输电线路舞动特点,结合导线、分裂数及排列形式等方面的技术参数,提出架空输电线路导线限位式防舞技术,能够有效地提升架空线路的防舞能力,保障线路安全运行。首先构建链路重要度模型实现对链路运行业务的分类;其次,搭建业务量疏导模型以降低系统整体的平均阻塞率,提高链路保护的运行效率;最后按照链路重要度模型采用不同算法进行链路保护。核心传感单元采用光纤布拉格光栅(FBG),将其刻写于抗弯曲特种光纤纤芯,通过紫外光掩膜相位技术调制折射率形成周期性分布。在物理拓扑层面,将FBG传感器阵列封装于微型化金属毛细管中,沿导线纵向以特定间距及圆周方向正交部署,形成多维应变感知节点。传感光缆通过光纤复合架空地线(OPGW)或全介质自承式光缆(ADSS)的空余纤芯进行信号传输,实现长距离、无源化的全线覆盖,从物理层解决了有源传感器供电受限与信号衰减的难题^[4]。

2.2 高频解调与多参量交叉解耦

导线舞动伴随剧烈的动态应变场变化及环境温度波动,导致FBG反射波长发生漂移。为实现动态应变的精准提取,采用基于可调谐法布里-珀罗滤波器的千赫兹级高速解调仪,实时捕获波长漂移量。由于波长漂移 $\Delta\lambda_B$ 同时受轴向应变 \mathcal{E} 和温度变化 ΔT 的调制,存在交叉敏感效应,其耦合关系表述为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\mathcal{E} + (\alpha_f + \xi)\Delta T \quad (1)$$

式中: P_e 为光纤有效弹光系数; α_f 为热膨胀系数; ξ 为热光系数。为解耦温度干扰,在每个应变测点旁并联一个不受力的松弛态FBG作为温度补偿参考基准,通过差分算法剔除温度项 $(\alpha_f + \xi)\Delta T$,分离出纯净的动态机械应变信号。解调系统同步执行小波阈值去噪,滤除高频风振噪声,保留反映舞动能量的低频(0.1Hz~3Hz)特征分量。

2.3 运动状态反演与特征图谱识别

导线的非线性舞动是指超特高压输电线路导线在外力作用下经历复杂扭转和形变的现象,且这些外力的作用特性均呈现非线性状态。非线性行为会导致输电线路导线所受气动载荷发生突变,从而使其舞动形态多次改变。对于超特高压输电线路导线的非线性舞动行为,通过视觉帧差法可提取导线振幅和速度的变化信息,以及可能出现的扭转等复杂运动。在导线舞动区域内,通过比较连续两帧或多帧视觉图像之间的差异,可以完整提取出导线的运动信息。由于输电线路导线的非线性舞动主要表现为类椭圆状的运动行为,因此在定义振幅与速度时,还应考虑运动区域内参数指标的线性变化状态。

3 差异化防治技术与结构优化

3.1 失谐原理双摆防舞者动力学配置

基于Nigo1扭转-垂直耦合失稳机理,舞动的激发源于导线覆冰后的扭转固有频率 f_t 与垂直固有频率 f_v 相互接近,导致气动升力与扭转力矩发生频率锁定。为此,采用双摆防舞者,通过偏心质量块引入附加惯性矩。依据线路模态分析结果,将防舞者安装于舞动半波波腹位置。在动力学模型中,防舞器的介入显著降低了系统的扭转刚度质量比,迫使覆冰导线的扭转频率 f_t 向低频偏移,从而拉大与垂直频率 f_v 的比值区间(使 $f_t/f_v < 1$ 或 $f_t/f_v > 1.3$)。在空间配置上,依据模态分析结果,将防舞者安装于导线舞动半波的波腹位置,利用偏心重锤对扭转运动的惯性约束,破坏气动载荷输入的正反馈回路,阻止初始微幅振动向大幅稳态舞动演化。

3.2 刚柔耦合相间间隔棒阻尼协同

针对单一防舞者在大跨越、特重冰区可能出现的抑制失效问题,构建基于相间间隔棒的刚柔耦合抑制体系。输电线路防舞动装置由定位环、多个弧形管、弧形轴和安装单元组成^[5]。多个弧形管均匀地绕定位环分布,并与定位环同轴固定连接。在弧形管的中部设置了间隔板,增强了结构的稳固性。弧形轴与定位环同轴设置,位于每两个相邻的弧形管之间,弧形轴的两端分别穿过相邻的弧形管,并能够在间隔板之间滑动。实际安装中,受导线张力波动影响,防舞者安装角度存在 $\pm 3^\circ$ 的误差,经模态仿真验证,该误差对扭转频率偏移的影响 $\leq 2\%$,处于工程允许范围。

4 工程应用效果与数据实证

4.1 试验线路概况与方案实施

选定穿越重冰区微气象走廊的某500kV超高压双回路输电线路为实证对象,以检验导线舞动监测与防治技术的工程实效。该区段地处高海拔风口,冬季冻雨大风交织,易发非对称覆冰,

且大跨越档距致使低频大幅舞动频发，引发导、地线鞭击事故，甚至发生金具断裂事故。作业前工作人员需要全面了解线路的高度、跨度、导线张力等参数，按设计要求进行后续防舞动装置的安装。

实验效能对比，观测组量化效能：对照组沿用“惯性传感器监测+单一失谐摆”传统方案，受制于加速度计局部采集、电池寿命及带宽瓶颈，仅靠普通防舞锤调节，缺乏多维协同。

实验组则全线部署“分布式全息监测+刚柔协同防治”新方案，依托光纤光栅阵列捕捉毫秒级应变，集成双摆防舞者与相间间隔棒闭环治理。当两组线路处于同等覆冰（10~12mm）及侧向风速（12~15m/s）工况时，同步记录动力响应，锁定舞动幅值、动态张力演变及频率分布等核心指标。

4.2 监测数据对比与效能分析

边缘计算模块对监测系统捕获的时域响应数据实施多尺度特征提取后，表1详列了两组方案在典型舞动事件中的治理实效。

表1 舞动特征参数与治理效能对比数据

评估指标	传统方案(对照组)	本文方案(实验组)	性能提升/变化
垂直舞动最大幅值	7.82 m	0.98 m	降低 87.5%
水平位移峰值	4.15 m	0.55 m	降低 86.7%
导线动态张力峰值	145.6 kN	55.2 kN	削减 62.1%
舞动持续时间	> 5.0 h	0.3 h	缩短 94.0%
振动主频率	0.28 Hz	0.85 Hz	频谱高频化
相间绝缘安全裕度	临界报警	优良	系统本质安全

数据表明，传统方案虽在起振阶段施加干扰，却因水平约束缺失及耗散机制匮乏，难以阻止系统陷入大幅低频振荡。

反观本文方案，其垂直舞动幅值由7.82m骤降至0.98m，87.5%的降幅将导线轨迹严格锁定于安全走廊，阻断相间闪络路径；水平位移峰值被压缩至0.55m，得益于相间间隔棒提供的横向刚度约束，攻克了传统防舞器在水平控制领域的短板。就能量耗散与受力维度而言，舞动持续时长从逾5小时削减至0.3小时，证明刚

柔协同体系的高阻尼特性可迅速衰减气动输入能量，破坏极限环振荡条件以促使系统回归稳态。

此外，导线动态张力峰值削减62.1%，令绝缘子串动载荷重回安全设计区间，延缓设备疲劳老化。频谱分析显示，舞动主频由0.28Hz跃升至0.85Hz，印证了双摆防舞者通过频率失谐策略，成功将结构固有频率移出气动失稳敏感区。上述实证确认，全息感知与多维防治的耦合机制，确立了对导线舞动灾害的主动防御与精准管控能力。

5 结语

本文梳理分析输电导线覆冰舞动特征及其影响因素，介绍目前针对输电线路舞动机理的理论研究，总结提出可行的线路舞动监测预警技术与防治措施。对当前研究存在的问题和局限性进行总结，为减少和抑制因舞动产生的故障同时提高电网运行可靠性提供理论基础与指导。工程实测表明，该技术能适应恶劣工况，将导线舞动幅度及动力响应严格锁定在安全阈值内。相关成果推动了运维模式由被动抢险向主动防御转变，兼具电网防灾减灾的工程参考与理论价值。

[参考文献]

- [1]冯雨晴,王明达.在线监测技术在输电线路导线舞动分析中的应用[J].集成电路应用,2024,41(05):422-424.
- [2]黄儒宇.输电线路防舞技术的探究[J].机电技术,2024(5):55-59.
- [3]杨爽,马淑芳.延迟反馈对Turing和Hopf分岔转换的控制[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2024,40(05):585-591.
- [4]薛晓岚,孟秋实,胡燃,等.OPGW光缆路由带电智能识别与校核系统研究[J].电工技术,2025,(13):146-148+152.
- [5]张亚辉.架空导线扭转覆冰流固耦合舞动及间隔棒联合防舞研究[D].兰州交通大学,2024.

作者简介:

孟雷(1980-),男,汉族,辽宁省沈阳人,本科(工学学士),工程师,研究方向:输电线路运维。