

位姿传感器在冻雨区输电线路监测中的应用研究

陈庆昊, 刘天宇, 王璋奇*

(华北电力大学(保定)机械工程系, 河北保定 071000)

摘要: 冻雨作为一种常见的灾害性天气,常导致高压输电线路积冰,当积冰达到一定的厚度后,覆冰的脱落会引发导线间的闪络,进而导致城市电力供应大面积中断。在冻雨频发区域,故障线路相较于正常线路而言,呈现出导线位移和张力变化较大的显著特征。这些新的特征对现有监测方案提出了更高的要求,为此,本文提出一种基于无线位姿传感器的冻雨区输电线路监测方法。首先分析了无线位姿传感器的优势,开发对应的上位机,设计了一种将传感器安装在直线塔悬垂绝缘子串上,利用测量的倾角结合串长计算实时档距的方案;其次,算法解决实时线长难以测量的问题,并结合实时档距和实时线长得到导线动态张力提出一种基于导线弹性变形的输电线路监测算法,依据相似准则搭建四塔三线输电线路缩比实验平台,验证模型的有效性。结果表明:该方法可以有效利用位姿传感器的实时数据实现对线路张力和位移进行实时精准监测,为电力系统的安全稳定运行提供了有力的技术支持。

关键词: 位姿传感器;冻雨;输电线路;解析解;实时档距;弹性变形

基金项目: 国网宁夏有限公司科技项目(No. SGTYHT/19-JS-215)

中图分类号: TM755;TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)02-0595-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240187

Application Research of Pose Sensors in Monitoring De-Icing Oscillation in Frozen Rain Areas

CHEN Qing-hao, LIU Tian-yu, WANG Zhang-qi*

(Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: Freezing rain is recognized as a common hazardous weather condition that often results in ice accumulation on high-voltage transmission lines. When the ice reaches a certain thickness, the shedding of ice cover can trigger flash-over between grounded wires, leading to widespread interruptions in urban power supply. In regions prone to frequent freezing rain, power lines experiencing ice shedding oscillations exhibit significant characteristics of wire displacement and tension variation compared to normal lines. These new features impose higher demands on existing monitoring schemes. Therefore, this study proposed a method for monitoring ice shedding oscillations on transmission lines based on wireless attitude sensors. Firstly, the advantages of wireless pose sensors were analyzed, and a scheme was designed to install the sensor on the suspension insulator string of a straight tower, using the measured inclination angle combined with the string length to calculate the real-time span. Secondly, an algorithm was designed to solve the problem of difficult measurement of wire stiffness and real-time wire length, and combined with real-time span and real-time wire length to obtain the dynamic tension of the wire. Then, a transmission line monitoring algorithm based on the wire elastic deformation model is proposed, and a four towers three lines transmission line scaling experimental platform is built based on similarity criteria to verify the effectiveness of the model. The results show that this method effectively utilizes real-time data from attitude sensors to achieve precise real-time monitoring of tension and displacement on ice-shedding transmission lines, providing robust technical support for the safe and stable operation of power systems.

Key words: pose sensor; frozen rain; transmission lines; analytical solution; real time span; elastic deformation

Foundation Item(s): State Grid Ningxia Company Ltd Technology Project (No. SGTYHT/19-JS-215)

1 引言

冻雨作为一种典型的灾害性天气,常发生在冬季和早春季节,由低于 0°C 的过冷却水滴、冰晶和雪花,从比较暖的大气层进入近地面的低温层凝结而成^[1-3].自2024年2月份起,受天气影响,中国湖北省武汉市发生大面积低温冻雨灾害,直接导致大规模输电线路覆冰,因冻雨的持续时间长导致覆冰厚度急剧增加,覆冰脱落后引起导线的脱冰振荡,导致导线和地线,相线与相线路间的空气被击穿,造成闪络合闸,严重影响了城市电力供应和交通^[4-6].因此为保障线路的安全运行,有效监测导线的位移和张力的变化,建立一种低延迟、低成本、有较高数据覆盖范围和准确性的模型,对冻雨区脱冰线路状态监测来说是至关重要的.

目前,大多数输电线路仍然采用人工监测的方式,该方式存在监测精度低、反馈时间长和工作强度高缺点.随着计算机技术的不断发展,各类接触式^[7-9]和非接触式^[10-13]的测量技术在监测识别中的应用研究越来越多,文献[14]设计了一套由安装于杆塔上的两个双轴倾角传感器、OPGW光缆、安装在变电站内的光纤光栅解调仪、工控机等构成的监测系统,用来监测杆塔的倾斜情况.文献[15]通过研究悬垂绝缘子风偏的荷载模型,应用光纤传感技术,搭建悬垂绝缘子风偏角在线检测系统,实现了云南电网昭通地区某110 kV杆塔悬垂绝缘子串风偏角的在线监测.文献[16]提出了基于地面三维激光雷达实现输电线路杆塔倾斜度测量的新方法,搭建了试验系统,并基于搭建的试验系统开展了现场可行性与对比测试.

然而因线路的特殊性,导线跨度较大,铁塔结构复杂,适合监测的数据很少,可用于布置的传感器种类也不多,想要对导线位移、速度、张力等状态参数全面进行实时动态监测的难度较大,故现在对线路的监测多停留于静态监测或传感器传输的数据本身,如需获得不同类型的参数,就必须装对应的传感器^[17,18],大大增加了监测成本.对导线状态分析的传统有限元法也只能在离线状态下仿真,无法应用于实时监测,现亟须一种算法能在满足监测数据能够被简单高效获取的同时,还能对有限的测量数据做进一步挖掘和反演,提高监测的效率.

本文将无线位姿传感器引入输电线路监测领域,首次提出一种基于位姿传感器的输电线路监测算法,并设计实验验证.本文的主要创新点和贡献如下:

(1)考虑线路监测需求和绝缘子串的特征,分析无线位姿传感器的优势,开发对应的上位机并设计了一种将无线位姿传感器安装在直线塔悬垂绝缘子串上,利用测量的倾角结合串长计算实时档距的方案.

(2)针对动态张力难以测量的问题,提出一种基于

位移函数的实时线长计算模型,该模型先通过解析解得到相对线长的迭代公式,然后利用迭代参数区分相对线长的正负,最后结合实时档距和实时线长得到导线动态张力.

(3)构建了基于位姿传感器的输电线路监测模型,并依据相似准则搭建四塔三线输电线路缩比实验平台验证模型精度.

2 无线位姿传感器

针对位姿传感器在连续档输电线路中数据传输复杂和安装位置难的问题,本节先分析了位姿传感器的优势,然后基于BWT61CL型传感器的协议和例程,开发对应的位姿传感器上位机作为监测数据的采集和传输的通道,最后对传感器的安装位置进行了分析.

2.1 基于位姿传感器的上位机开发

由于季节性冻雨的影响,湖北武汉所遇到的覆冰脱落引起的输电线路闪络经常发生在城市周边,现有的巡检方式多是派人在易覆冰线路附近搭帐篷观测,耗费很多的人力物力^[19,20].如图1所示的BWT61CL,该传感器融合了高精度的陀螺仪、加速度计以及地磁场传感器,能够迅速而准确地计算出模块当前的实时运动姿态.其性能体现在最高可达200 Hz的数据输出速率上,确保在运动捕捉与数据分析中的高效性与实时性.此外,BWT901的输出内容具备高度的可定制性,能在0.2~200 Hz的范围内灵活调节输出速率.在通信接口方面,该传感器兼容蓝牙2.0与TypeC串口,为用户提供了多样化的连接选择.



图1 位姿传感器

当通过位姿传感器获取悬垂串的对数据后,传感器通过蓝牙传输的方式,每帧发送3个数据包,分别为加速度包、角速度包和角度包,3个数据包顺序输出.当传感器波特率设定为115 200时,每隔10 ms输出一帧数据.其数据是按照16进制发送的,如表1所示,每个数据包中包含11位数据,其中首位数据为帧头,次位数据则用于标识数据包类型.为了有效处理这些数据,

必须开发相应的上位机程序. 该程序负责接收并解析传感器传来的数据包, 进而通过后台程序将收集到的数据实时传输至监测模型中.

表 1 传感器数据包解析示例

数据编号	数据内容	含义
0	0x55	包头
1	0x61	数据标志
2	RollL	X轴角度低位
3	RollH	X轴角度高位
4	PitchL	Y轴角度低位
5	PitchH	Y轴角度高位
6	YawL	Z轴角度低位
7	YawH	Z轴角度高位
8	YY	年
9	MM	月
10	DD	日
11	HH	时
12	MM	分
13	SS	秒

上位机, 作为层次结构中层次较高的计算机或设备, 承担着管理和控制下位机或设备的核心职责. 本节依据 BWT61CL 传感器的协议和例程, 开发位姿传感器的上位机系统. 该系统以蓝牙位姿传感器作为下位机, 通过 .NET Framework 框架构建窗体应用项目. 在上位机程序中, 严格遵循传感器协议, 调用相应的传感器实体类, 接收来自串口连接蓝牙的数据, 并通过实体类中预设的键值, 精准区分不同种类的数据, 如表 2 所示. 此外, 系统构建了加速度传感器的数据读取与显示功能, 确保数据的准确性与实时性. 为进一步提升数据处理效率, 系统启用多个线程并行管理, 实现对多个端口传感器的数据并行读取. 这一设计不仅提高了数据处理速度, 也增强了系统的稳定性和可靠性.

当数据通过上位机解析显示后, 通过 Hslcommunication 通信库提供的 API 函数, 将数据传入到 Redis 数据库中. 其中 Hslcommunication 提供了一系列用于数据通信的协议, 能够实现工业设备和上位机之间的通信以及任意两个程序间的通信; Redis 数据库是一种基于内存开发的开源数据管理系统, 通过键-值对存储数据通常被用于缓存、实时分析等. 因为其数据存储在内存在, 具有极高的读写速度, 实现了数据的快速访问. 而在上位机的底层程序中, 引入 Hslcommunication 的命名空间, 实例化 RedisClient(·) 方法, 在函数中定义所需要连接的 Redis 数据库的 IP 地址和端口号, 然后调用 rs.WriteKey(·) 方法, 在该方法中, 定义需要传输 Redis 数据库中的传感器各数据的键, 并将上位机所接收对应数据传入该函数中, 表 2 详细列出了传感器采集数据

在 Redis 数据库中对应的键, 为数据的后续处理与分析提供了清晰的索引.

表 2 传感器数值及对应键

串口名称	数据名称	对应 Redis 键值
JY901	X轴方向角度	AngleX
	Y轴方向角度	AngleY
	Z轴方向角度	AngleZ
JY9012	X轴方向角度	AngleX ₁
	Y轴方向角度	AngleY ₁
	Z轴方向角度	AngleZ ₁

上位机启动后, 实时解析传感器所采集的悬垂串角度参数, 并将数据传输到 Redis 数据库中, 通过 Redis Desktop Manager 可视化管理器, 可以观察到在 Redis 数据库中存储的角度数据. 然后通过 Hslcommunication 库中的 rs.ReadKey(·) 函数, 读取所需要获取的角度数据的对应键值, 即可实现外部物理数据传入到监测模型中.

在完成了上位机的开发, 建立起稳定的数据采集与传输通道之后, 接下来将对传感器的安装位置进行分析.

2.2 位姿传感器的安装位置分析

考虑到现有的复合绝缘子串和玻璃陶瓷串的伞裙位置存在涂层, 导致传感器难以有效附着. 同时, 线夹表面呈现出凸起的弧状结构, 进一步加大了传感器固定的难度. 此外, 悬垂绝缘子串与横担、线夹与悬垂绝缘子串、线夹与导线之间的连接处存在三个可旋转节点, 这无疑增加了测量的复杂性. 不过在实验过程中观察到, 线夹与悬垂串、线夹与导线连接处的旋转角度相对较小. 因此, 本文选择悬垂绝缘子串与横担的旋转角度作为测量角度, 以悬垂绝缘子串与横担的连接点至线夹与导线的连接点作为绝缘子串的长度基准. 在此基础上, 利用魔术贴将传感器稳固地固定在球头位置, 如图 2 所示. 通过实时测量绕轴转动的角度, 并结合已知的绝缘子串长度, 可以精确地计算出绝缘子挂线点的水平位移.

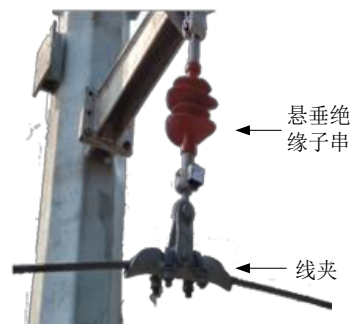


图 2 安装位置

连续 n 档线路中,需要安装 $n-1$ 个传感器,经过测量可以得到 $n-1$ 个悬垂绝缘子串对应的 $n-1$ 个时间序列 $\{\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{n-1}\}$, 每个时间序列具有如下形式:

$$\theta_N = (\theta_{N,1}, \theta_{N,2}, \dots, \theta_{N,T}), N=1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

其中, T 为时间序列的长度. 任意时间段的档距可以表示为

$$\begin{Bmatrix} L_i^1 \\ L_i^2 \\ \vdots \\ L_i^n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_0^1 \\ L_0^2 \\ \vdots \\ L_0^n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} b_2 \sin \theta_i^2 \\ b_3 \sin \theta_i^3 - b_2 \sin \theta_i^2 \\ \vdots \\ -b_n \sin \theta_i^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, L_0^n 为第 n 档导线的初始档距, b_n 为第 n 个悬垂绝缘子串的长度, 即导线实时档距可由位姿传感器测量的角度结合初始档距计算得到. 下面根据传感器传输的实时数据, 设计导线振荡监测算法, 以实现线路状态的精准监测与分析.

3 基于位姿传感器的线路监测算法研究

3.1 导线实时线长和张力的分析

线长作为计算导线实时拉力的关键参数^[2], 其计算需依赖于导线位形函数; 然而在实际操作中, 我们发现直接通过对位形函数进行积分的方案过于繁琐, 本节提出一种适用于用位移函数来描述线长的方法.

一般情况下, 为方便推导计算递推式的同时保持较高的精度, 利用泰勒展开, 取前三项得到一般情况下的导线线长公式:

$$S = \int_0^{L_0} \sqrt{1 + (y')^2} dx \approx \int_0^{L_0} \left[1 + \frac{(y')^2}{2} - \frac{(y')^4}{8} \right] dx \quad (3)$$

由文献[2]可知导线的位移的导数可表示为

$$y'(x, t) = [w(x, t) + Z_0(x)]' \quad (4)$$

将式(4)带入式(3)进行泰勒展开的难度较大, 这里提出一种采用位移线长来求解导线线长的方法. 将文献[2]中的导线振荡解析解带入式(4), 再利用三角函数系的正交性, 可得到位移函数积分出的线长:

$$S = L + \frac{L}{4} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^2 - \frac{3L}{64} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^4 \quad (5)$$

式(5)中, $D_{i,j}$ 是和与时间有关的参数, 取值范围是 $[-1, 1]$. 对式(5)进行简单分析可知, 线长 S 是恒大于 0 的, 而位移函数取的是以自重线形作为平衡位置, 故当导线在自重位置上方时, 相对线长应为负数, 和上述公式计算结果矛盾, 分析产生问题的原因是公式只适用于绝对线长, 不能直接代入位移用弧长积分得到, 这里我们提出一种相对线长的表示方式, 来求解绝对线长.

在相对线长里, 用位移的正负可以区分相对线长的正负, 而位移的正负和 $D_{i,j}$ 的正负有关, 故在导线自

重位形下时, $D_{i,j} < 0$, 相对线长为

$$S_F = \frac{L}{4} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^2 - \frac{3L}{64} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^4 \quad (6)$$

同理, 在导线自重位形上时, $D_{i,j} > 0$, 相对线长为

$$S_F = -\frac{L}{4} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^2 + \frac{3L}{64} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^4 \quad (7)$$

而在位移解析解中, 平衡位置为相对线长等于档距时, 位置解析解中, 平衡位置为绝对线长等于导线自重线长时, 绝对线长和相对线长的关系为相对线长和档距的差值等于绝对线长和自重线长的差值, 即

$$S_F = S - S_0 \quad (8)$$

将式(14)代入式(12)和式(13)可得:

$$S = \begin{cases} S_0 + \frac{L}{4} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^2 - \frac{3L}{64} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^4 & (A_{i,j} < 0) \\ S_0 - \frac{L}{4} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^2 + \frac{3L}{64} \sum_{j=1}^n D_{i,j}^4 & (A_{i,j} > 0) \end{cases} \quad (9)$$

故实时张力可表示为

$$T = EA(S - L)/L \quad (10)$$

式(10)中, 导线拉伸刚度由文献[2]中的方法确定. 通过这个方案, 用位移函数描述了导线的动态张力, 方便了对导线实时线长的获取和对线路张力的监测.

3.2 监测算法设计

在实验中发现架空输电线的振荡是多阶共振的, 仅取一阶振型做计算得到的结论不够精确^[21], 且传统方法求解中缺少与实时数据连接的具体方法^[2]. 下面提出一种利用正弦级数来描述导线振荡的方法, 将实时数据参与每一次迭代更新中来解决导线多阶模态融合共振的监测问题.

基于位姿传感器的监测算法流程如图 3 所示. 在进行迭代参数更新之前, 需要用初始线形判定所需的三角函数阶数, 具体流程如图 3 所示.

步骤 1: 前期准备

通过调研和图纸的收集, 得到线路初始参数, 包括初始档距、初始张力、初始线长等. 然后通过正弦级数拟合初始位形, 用相对误差比较确定所取阶数:

$$\hat{Z}_0(x) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{2mgL_0^2}{j^3 \pi^3 T_0} \right) [\cos(j\pi) - 1] \sin\left(\frac{j\pi x}{L_0}\right) \quad (11)$$

$$Z_0(x) = -\frac{2T_0}{m} \operatorname{sh} \frac{mx}{2T_0} \operatorname{sh} \frac{m(L_0 - x)}{2T_0} \quad (12)$$

其中, Z_0 表示用悬链线模型描述的初始线形, \hat{Z}_0 表示用正弦级数描述的导线初始线形. 用平均绝对百分比误差 MAPE (Mean Absolute Percentage Error) 作为量化指标分析相对误差:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{Z}_0 - Z_0}{Z_0} \right| \times 100\% \quad (13)$$

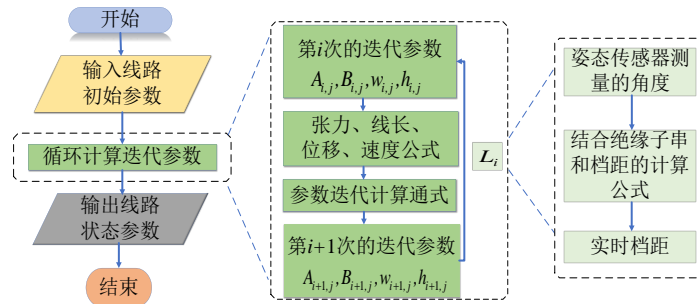


图3 迭代监测算法流程图

其中, N 表示取点的数量, MAPE 数值越小, 模型精度越高, 取使平均绝对百分比误差在 1% 以内的 n 的值作为初始阶数.

步骤 2: 参数迭代计算

分析解析解^[2]的结构可知, 导线振荡位形可以看作是由无穷个正弦级数叠加而成, 为便于实时数据参与计算, 通过换元简化, 任意一档在第 i 个时间段第 j 阶的振动位移函数可表示为

$$W_{i,j}(x) = A_{i,j} \sin\left(\frac{j\pi x}{L_i}\right) \quad (14)$$

式(14)中, $i=1, 2, \dots, N; j=2, 3, \dots, n; L_i$ 可通过第 2.2 节的测量方案应用位姿传感器得到. 下面设 Δt 为迭代间隔的时间段, $A_{i,j}$ 作为和时间有关的迭代参数, 其值由上一时间段的参数表示:

$$A_{i,j} = e^{(-h_{i,j}\Delta t)} \left[A_{i,j-1} \cos(w_{i,j-1}\Delta t) + A_{i,j-1} \cos(w_{i,j-1}\Delta t) \right] \quad (15)$$

式(15)中,

$$w_{i,j} = \sqrt{\frac{\pi^2 j^2 a_i^2}{L_i^2} - h_{i,j}^2}, \quad a_i = \sqrt{T_i^k / m_0}, \quad h_{i,j} = \frac{\pi c a_i k_j}{2L_i} \quad (16)$$

速度函数可用迭代式表示为

$$v_i(x) = (w_{i-1,j} B_{i,j} - A_{i-1,j} h_{i-1,j}) \sin\left(\frac{j\pi x}{L_i}\right) \quad (17)$$

式(17)中,

$$B_{i,j} = \frac{e^{(-h_{i,j}\Delta t)}}{w_{i,j-1}} \left[(B_{i-1,j} w_{i-1,j} - A_{i-1,j} h_{i-1,j}) \cos(w_{i-1,j}\Delta t) - (B_{i-1,j} h_{i-1,j} + A_{i-1,j} w_{i-1,j}) \sin(w_{i-1,j}\Delta t) + A_{i-1,j} h_{i-1,j} \right] \quad (18)$$

综上所述, 导线的振荡过程可以表现为 4 个参数 $A_{i,j}, B_{i,j}, w_{i,j}, h_{i,j}$ 持续的迭代更新循环过程. 在此过程中, 导线的实时位移与张力均可通过迭代参数得以精确表达, 从而将连续体的振动转化为具体几个参数不断迭代演化的过程. 这种转化不仅深化了对导线振荡本质的理解, 也为线路状态监测提供了新思路.

4 实例分析验证

为评估本文所提监测方法的有效性, 本节依据文献[22]所提的方法以连续档架空导线为分析对象, 从几何、气动、能量三个条件中选取关键参数, 采用量纲分析方法得到模型与原型的相似准则, 利用钢管杆塔头结合混凝土桩搭建缩比实验台, 对模型精度进行测试.

在城市与旅游通道等周边规划中, 钢管杆因其优越的特性常被推荐用于电力线路的架设. 钢管杆不仅体积小巧, 占地面积相对较小, 更在美观度上较铁塔更胜一筹. 与铁塔的四脚支撑相比, 钢管杆单脚稳固, 从而显著减少了杆塔对地面的占用, 这一特点在土地资源尤为紧缺的城市环境中显得尤为重要, 尤其适用于那些路径走廊受限的城市线路. 故在本节的实验中, 如图 4 所示, 本文搭建了一个连续档输电线路模型, 采用了钢管杆作为主要支撑结构. 为节省空间并方便挂线, 本文简化了塔身的设计, 直接将塔头安装在混凝土桩基础上. 此外, 在直线塔的悬垂绝缘子球头上安装了位姿传感器, 用以精确测量悬垂绝缘子串的摆动角度. 基于这一实验平台, 进一步分析了不同覆冰厚度和位置对线路的影响.

因场地空间所限, 实验的完整细节难以仅凭照片呈现, 故采用图 5 简化示意图辅助阐述实验过程. 在此次实验中, 每档档距设定为 10 m, 导线长度质量为



图4 连续档输电线路实验平台

0.376 2 kg/m, 导线外径 10.5 mm. 保证全过程在无风条件下进行. 实验分成三组, 第一组实验为线路第二档覆冰, 覆冰厚度分别为 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm, 其他两档未覆冰. 第二组实验为线路第一档覆冰, 覆冰厚度 10 mm, 其他两档未覆冰. 第三组实验为线路第三档覆冰, 覆冰厚度为 10 mm, 其他两档未覆冰. 本次实验通过内置芯片的脱冰实验箱来进行, 每个实验箱均与电磁铁相连接. 电磁铁上悬挂了沙袋, 以模拟实际覆冰工况, 为实验提供了贴近真实环境的条件. 实验中, 导线的挂点被依次编号以便于数据的记录与分析. 为了验证监测模型的准确性, 实验在线路右侧安装了张力传感器. 通过实时监测导线在脱冰过程中的张力变化, 并与模型预测值进行对比, 可以全面评估模型的精度. 将张力传感器和对位移识别点的图像处理得到的张力与位移, 和基于位姿传感器的监测模型计算得到的张力与位移比较来验证模型精度.

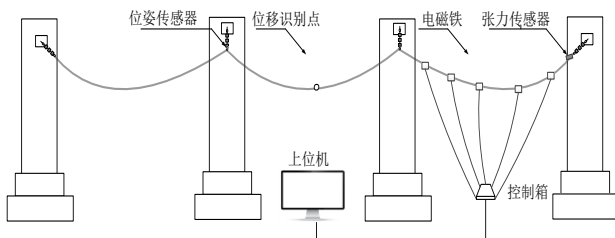
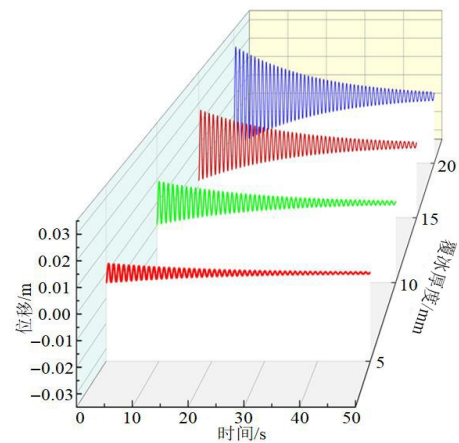


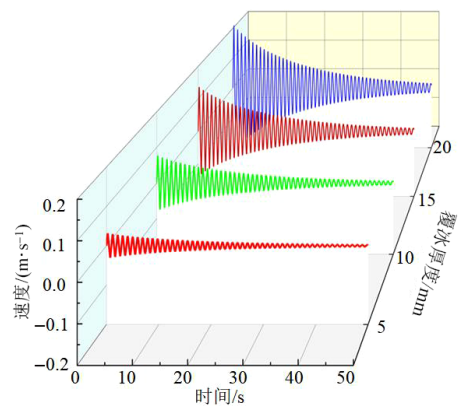
图5 实验平台简化示意图

下面采用本系统进行了连续档局部脱冰. 第一组为第二档整档脱冰实验. 覆冰厚度分别为 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm, 其他两档未覆冰.

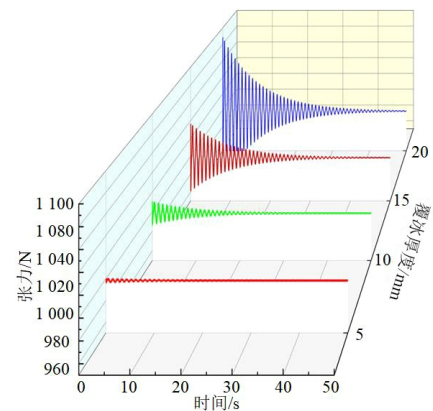
图6(a)为基于位姿传感器计算出的不同覆冰厚度下的第二档导线中点的位移时程曲线, 可以看出位移自0轴下方开始, 逐渐增大, 到0轴上方某个值停下来, 然后继续做衰减振荡, 最后在0轴附近平衡. 这是由于位移函数以自重线形作为平衡位置, 在有覆冰时的位移为负值, 由于阻尼的存在, 使得导线振幅不断减小, 最终在自重位置处平衡; 且随着覆冰厚度的不断增大, 导线的最大幅值越来越大, 这是因为初始覆冰厚度增大了导线的线长, 使得弹性势能增大, 故位移的幅值变大. 图6(b)为基于位姿传感器计算出的第二档档中点的不同覆冰厚度下的速度时程曲线, 初始值为0, 然后越过0轴向上, 到达最大值后开始做衰减振荡, 最后归于0轴. 这是由于导线初始速度为0, 正方向向上, 故开始速度的值为正, 由于阻尼的存在使最终速度为0; 且随着覆冰厚度增大, 速度的最大值也不断增大. 图6(c)为基于位姿传感器计算出的不同覆冰厚度下的张力时程曲线, 可以看出张力始终为正值, 由大变小, 最终归于一个定值, 这是由于导线有自重伸长, 张力始终存在; 且开始时覆冰, 内部张力变大, 脱冰平衡后张力会



(a) 位移时程曲线



(b) 速度时程曲线



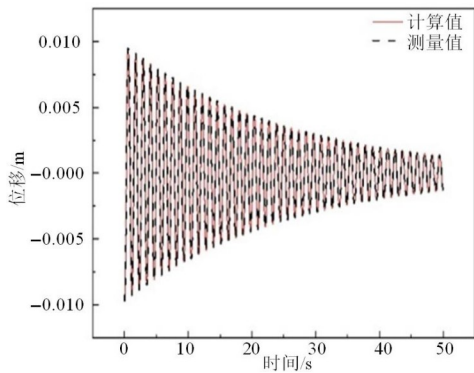
(c) 张力时程曲线

图6 第二档导线状态参数随覆冰厚度的变化

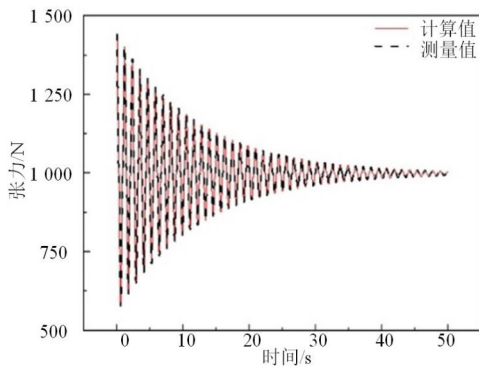
收敛于导线自重下的线形对应的张力, 且随着覆冰厚度的增大, 导线张力的最大值增大.

将 10 mm 覆冰张力和位移计算值和测量值对比得到的结果如图7所示.

图7为第二档 10 mm 覆冰脱冰后张力和位移计算值和测量值对比, 可以看出数据吻合度较好, 基本满足



(a) 位移对比图



(b) 张力对比图

图7 张力和位移对比图

监测需要,可用来做冻雨区导线脱冰的高精度实时监测.下面对张力计算值的曲线进行局部放大,观察曲线内部特征如图8所示.

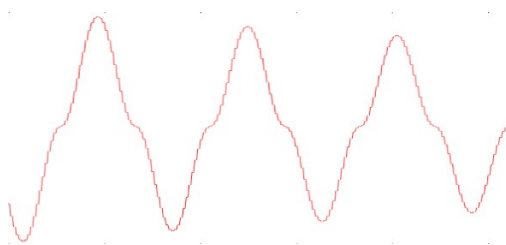
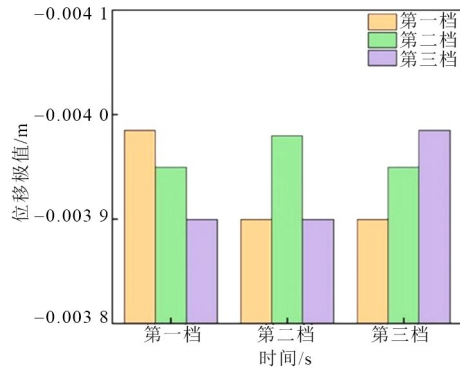


图8 张力时程曲线局部放大图

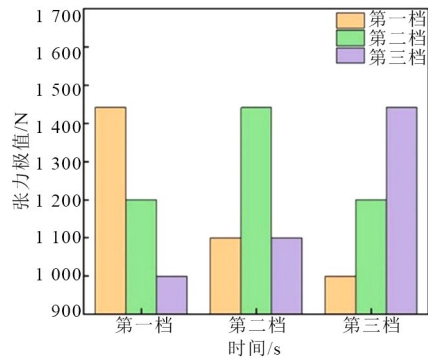
图8为第二档导线10 mm脱冰时程曲线局部放大图,可以看出张力曲线是由小段直线片拼接而成,并不是传感器输出的那种连续曲线,这是由于本文将不断变化的实时档距和张力简化在一个小时间段内,实时档距和张力不变来方便求解,故呈现这样的特征,符合预期.

第二组实验为线路第一档覆冰,覆冰厚度为10 mm,其他两档未覆冰.第三组实验为线路第三档覆冰,覆冰厚度为10 mm,其他两档未覆冰,将结果和第一组实验同厚度覆冰脱落计算结果对比.

图9为不同档覆冰后张力传感器读取的导线张力与计算出的导线张力对比图,可以看出,在第一档覆冰时,第一档的位移极值最大,张力极值最大,第三档位移极值最小,张力极值最小;第二档覆冰时,第二档位移极值最大,张力极值最大,第一档和第三档位移极值最小,张力极值最小.这是由于等档距悬挂导线,第一档和第三档是对称的;第三档覆冰时,第三档的位移极值最大,张力极值最大,第一档位移极值最小,张力极值最小.故可以得出结论,越靠近覆冰档,张力和位移变化越大.



(a) 10 mm覆冰脱冰位移极值比较



(b) 10 mm覆冰脱冰张力极值比较

图9 同覆冰厚度导线状态参数对比图

5 结论

本文针对冻雨区故障线路监测难的问题,设计了一种基于位姿传感器的脱冰振荡监测算法,最后搭建实验平台进行验证.

(1)分析线路实际监测需求,设计了一种基于无线位姿传感器的实时档距监测方法,并开发了对应的上位机系统,方便数据与监测模型的实时交互.

(2)考虑动态张力监测的复杂性,本文给出了一种基于位移函数的实时张力计算模型.该模型能够充分利用位姿传感器采集的数据,精准地反演出导线的动态张力.同时,为了更全面地描述导线振荡的多阶模态

融合现象,引入了多阶正弦级数进行计算.通过实时数据参与每一次迭代更新来解决线路监测中的关键问题,从而提高监测的准确性和可靠性.

(3) 搭建缩比实验平台对模型精度验证,实验中发现由模型计算出的导线张力曲线并不连续,而是由一段一段的直线连接而成,符合迭代模型的特征,导线上任意一点的位移自0轴下方开始,逐渐增大,到0轴上方某个值停下来,然后做衰减振荡,最后在0轴附近平衡,且随着覆冰厚度的不断增大,导线的振幅越来越大.导线速度初始值为0,然后越过0轴向上,到达最大值后开始做衰减振荡,最后归于0轴,且随着覆冰厚度增大,速度的幅值也不断增大.导线张力随着覆冰厚度的增大而增大,且越靠近覆冰档,张力和位移变化越大,越远离覆冰档,张力和位移变化越小.

参考文献

- [1] GONÇALVES A, MARQUES M C, LOUREIRO S, et al. Disruption risk analysis of the overhead power lines in Portugal[J]. *Energy*, 2023, 263: 125583.
- [2] CHEN Q H, LIU T Y, WANG Z Q, et al. Research on digital twin dynamic modeling method for transmission line deicing system[J]. *Energies*, 2024, 17(6): 1424.
- [3] ZHANG Z J, ZHANG H, YUE S, et al. Growth characteristics and influence analysis of insulator strings in natural icing[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 228: 110097.
- [4] CHEN L Z, SHI X H, PENG B, et al. Dynamic simulation of power systems considering transmission lines icing and insulators flashover in extreme weather[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 39656-39664.
- [5] LIU Y, LI C, YIN F H, et al. Dynamic interactive characteristics between icicle growth and corona discharge on HVDC outdoor insulators during icing accretion[J]. *High Voltage*, 2023, 8(3): 570-582.
- [6] WENG B J, GAO W, ZHENG W C, et al. Newly designed identifying method for ice thickness on high-voltage transmission lines via machine vision[J]. *High Voltage*, 2021, 6(5): 904-922.
- [7] 朱物华. 电力线路上载波通道中噪声的相关分析[J]. *电子学报*, 1965, 4(4): 333-353.
ZHU W H. Synopsis: Correlation analysis of noise in power line carrier channels[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1965, 4(4): 333-353. (in Chinese)
- [8] 严晋德. 架空地线对于电信线路实际屏蔽系数的普遍计算公式[J]. *电子学报*, 1965, 4(2): 190-204.
YAN J D. The general formulas for computing actual shielding factors of overhead ground wires[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1965, 4(2): 190-204. (in Chinese)
- [9] 高明,赵振刚,李英娜,等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜监测研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(12): 51-59.
GAO M, ZHAO Z G, LI Y N, et al. Monitoring and research on tilt of transmission line tower based on optical fiber sensing[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(12): 51-59. (in Chinese)
- [10] 王笛,胡辽林. 基于双目视觉的改进特征立体匹配方法[J]. *电子学报*, 2022, 50(1): 157-166.
WANG D, HU L L. Improved feature stereo matching method based on binocular vision[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 157-166. (in Chinese)
- [11] 杨曦,张鑫,郭浩远,等. 基于不变特征的多源遥感图像舰船目标检测算法[J]. *电子学报*, 2022, 50(4): 887-899.
YANG X, ZHANG X, GUO H Y, et al. Invariant features based ship detection model for multi-source remote sensing images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(4): 887-899. (in Chinese)
- [12] 汪成亮,刘艺镏. 基于震动信号的异常步态识别[J]. *电子学报*, 2023, 51(8): 2088-2097.
WANG C L, LIU Y L. Recognition of abnormal gait based on vibration signal[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(8): 2088-2097. (in Chinese)
- [13] 常文文,闫光辉,杨志飞,等. 基于脑电熵值特征和功能连接的不同线型道路下驾驶状态检测[J]. *电子学报*, 2023, 51(10): 2874-2883.
CHANG W W, YAN G H, YANG Z F, et al. Detection of driving state under different curve road based on entropy and functional connectivity of EEG[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(10): 2874-2883. (in Chinese)
- [14] 周湛,张志坤,赵振刚,等. 基于光纤传感的输电线路悬垂绝缘子风偏角监测研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(3): 81-87.
ZHOU Z, ZHANG Z K, ZHAO Z G, et al. Monitoring of wind deflection angle of suspension insulator string for power lines based on optical fiber sensing[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(3): 81-87. (in Chinese)
- [15] 李鑫,刘帅男,杨桢,等. 基于改进Cascade R-CNN的输电线路多目标检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 24-32.
LI X, LIU S N, YANG Z, et al. Multi-target detection of transmission lines based on improved cascade R-CNN[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(10): 24-32. (in Chinese)

- [16] 沈小军, 杜勇, 王仁德, 等. 基于地面激光雷达的输电线路铁塔倾斜度测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4): 516-521.
SHEN X J, DU Y, WANG R D, et al. Inclination measurement of transmission line tower based on terrestrial 3D lidar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 516-521. (in Chinese)
- [17] 樊绍胜, 杨迪, 邹德华, 等. 输电线路螺栓紧固带电作业机器人的视觉搜索、识别与定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1514-1523.
FAN S S, YANG D, ZOU D H, et al. Vision-based tracing, recognition and positioning strategy for bolt tightening live working robot on power transmission line[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1514-1523. (in Chinese)
- [18] 周孝法, 张越港, 方宇, 等. 相似性度量与牛顿插值融合的架空输电线弧垂测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 221-229.
ZHOU X F, ZHANG Y G, FANG Y, et al. Research on sag measurement method of overhead transmission line based on fusion of similarity measure and Newton interpolation method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 221-229. (in Chinese)
- [19] 王璋奇, 齐立忠, 王剑. 架空导线模拟覆冰脱落高精度时序控制系统研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 45-50.
WANG Z Q, QIL Z, WANG J. Research on high precision time sequence control system for simulated ice shedding of overhead conductors[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2016, 43(3): 45-50. (in Chinese)
- [20] 王璋奇, 王剑, 齐立忠. 同期脱冰架空输电导线的动张力特性实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(1): 157-162.
WANG Z Q, WANG J, QI L Z. Experimental study on the dynamic tension characteristics of the overhead transmission conductor under synchronous ice shedding[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1): 157-162. (in Chinese)
- [21] 霍冰, 刘习军, 张素侠. 相邻档距作用下覆冰导线舞动的复杂运动响应[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 249-256.
HUO B, LIU X J, ZHANG S X. Complex response of galloping for an iced transmission line considering excitation of adjacent span[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 249-256. (in Chinese)
- [22] 胡鑫, 王璋奇, 田瑞. 架空线路风偏计算的多刚体动力学模型及其分析[J]. 振动工程学报, 2023, 36(3): 737-747.
HU X, WANG Z Q, TIAN R. Multi-rigid-body dynamic model and analysis for wind-induced deflection calculation of overhead lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(3): 737-747. (in Chinese)

作者简介



陈庆昊 男, 1993年5月出生. 现为华北电力大学机械工程系博士研究生. 主要研究方向为输电线路孪生系统.
E-mail: 2272512713@qq.com



刘天宇 男, 1998年5月出生. 现为华北电力大学机械工程系硕士研究生. 主要研究方向为输电线路孪生系统.
E-mail: m15831293160@163.com



王璋奇 男, 1964年5月出生. 现为华北电力大学机械工程系教授、博士生导师.
E-mail: 120192102122@ncepu.edu.cn