

[远程监测]

基于振动监测的电力系统耐张线夹状态远程监测系统设计

文/马波¹ 朱奕强² 吴松¹ 郑伟² 焦晓鹏¹

1. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司; 2. 湖州电力设计院有限公司

针对输电线路耐张线夹故障后产生的振动问题，以加速度及惯性传感单元为基础，设计振动监测算法，并试制耐张线夹振动监测传感器样机，开发一种基于振动监测的远程监测系统。该系统采用振动传感器实时监测耐张线夹的工作状态，通过数据处理和分析系统对其进行在线诊断，并利用物联网技术实现数据远程传输。

电网的安全性和可靠性在高度依赖电力作为主要能源的社会经济背景下变得日益重要，及时发现电网中发生的故障，以及提前发现故障隐患而采取必要措施预防事故的发生是电力运行部门的重要挑战。通过事故原因的分析和统计，改善线路设计和设备的选用也是电力技术人员亟需研究的课题。

架空电力线路是电力传输配送的重要途径，是电网的重要组成部分，但往往处在恶劣的户外环境中，交通又不便利。在这一过程中，保障架空线路安全运行是整个电网安全运行的重要环节，架空线路发生故障占整个电网故障的一半以上。架空电力线路中主要由悬垂线夹和耐张线夹将导线固定在杆塔上，其中耐张线夹由于承受更大的张力并承担线路全部电流的接续，更容易发生故障，包括耐张线夹与引流板以及被压接的导线之间接触不良发生发热烧毁、握力不够导致导线滑移、导线振动不能良好地抑制导致疲劳断股断线等现象。由于这些线夹都安装在杆塔的高处，并处于高电压的环境下，若停电检修则会带来巨大的经济损失，若带电检修则面临严峻的安全考验，如图1所示。为了提高输

电线路的运行安全和减少停电事故发生的风险，发展一种实时、高效的状态监测技术具有重要意义。

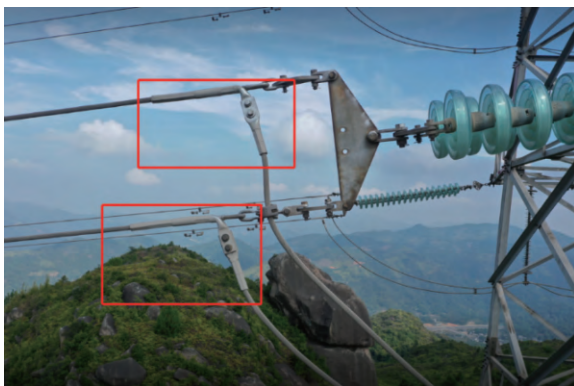


图1 电力架空线路中的耐张线夹

本文基于振动检测技术，提出了一种通过振动监测来预测耐张线夹状态的方法，开发了耐张线夹状态远程监测系统，并重点分析验证了方案的可行性。

基于振动监测的远程监测系统设计

1. 系统组成

该系统装置主要由耐张线夹数据监测模块（包

基金项目：浙江泰仑电力集团有限责任公司科技项目（HZJTKJ2022-05）

含振动数据采集、数据处理和分析单元)、耐张线夹数据传输通信网关(包含数据汇聚及传输通信)和数据监测平台(包含数据服务器及数据监视软件),如图2所示。

在输电线路耐张线夹上加装数据监测模块,配

合杆塔上安装的数据传输通信网关,实时获取耐张线夹振动幅值、轨迹信息,开展耐张线夹状态分析,实现状态的实时监测和风险防控,提醒运检人员及时采取有效防护措施,提高输电线路供电安全。

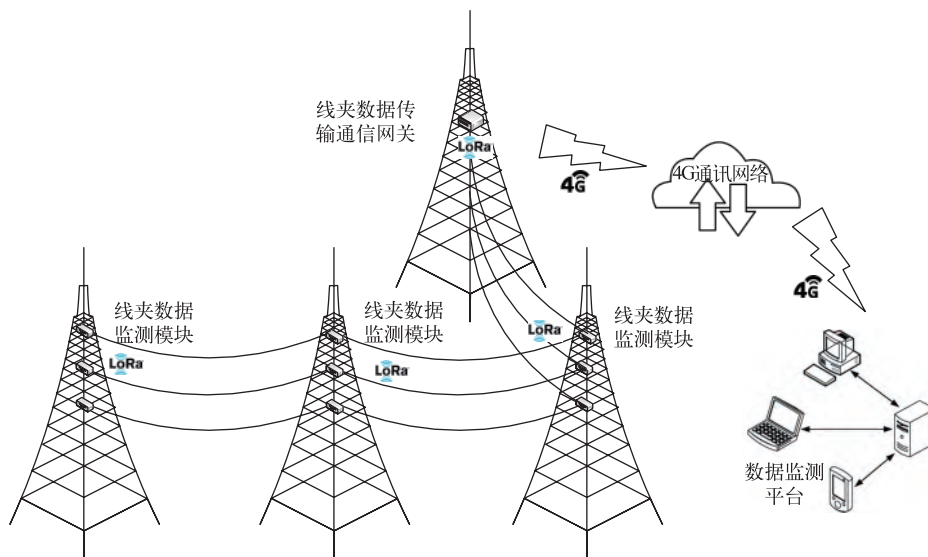


图2 耐张线夹远程监测系统架构

2. 技术原理

耐张线夹监测主要以耐张线夹振动监测为重要依据。振动可视为耐张线夹上各个点做平移及扭转的叠加,因此可基于惯性测量单元进行耐张线夹上一点运动状态的监测。惯性测量单元是测量物体三轴姿态角以及加速度的装置,一个惯性测量单元由三个单轴的加速度传感器和三个单轴的陀螺仪组成。获取耐张线夹振动时的三轴角速度、三轴加速度,通过卡尔曼滤波算法和姿态融合算法对测量装置进行姿态调整并滤除重力加速度,然后结合边界条件对加速度进行积分获得耐张线夹的三轴振动轨迹,从而得到振动的幅值、频率和倾斜角等特征量。

耐张线夹数据监测模块通过 Lora(远距离无线电)低功耗窄带传输技术将计算得到的耐张线夹振动幅值、振动频率等特征量上传到铁塔上数据传输通信网关,再由塔上数据传输通信网关将数据通过4G无线传输方式上传到输电线路振动预警监测平台。维护人员可通过耐张线夹状态监测平台实时查看耐张线夹实时状态及历史报警状态,如超过预警值,系统可将预警信息实时推送到运维人员手

机上。

监测算法与数据分析

1. 振动信号处理方法

耐张线夹数据监测模块采用姿态传感器 MPU6050来测量耐张线夹上的振动状态。该传感器可以实现较高的测量准确度和稳定性,同时功耗较低,适合于嵌入式系统和移动设备。传感器由三轴加速度计和三轴陀螺仪组成,它可以测量物体在 x 、 y 、 z 三个方向上的加速度和角速度。加速度计可以检测物体的线性加速度,而陀螺仪可以检测物体的角速度。通过将加速度计和陀螺仪的测量结果进行组合,可以计算出物体的方向和角度。

由于姿态传感器MPU6050的测量结果受到环境因素的影响较大,其次传感器自身的噪声误差无法避免,如果不进行滤波等处理,噪声带来的误差只会越来越剧烈甚至会导致数据无法正常使用。所以需要通过对算法进行数据处理和滤波,才能得到可靠的结果。

本系统使用卡尔曼滤波算法对传感器的信号进行处理以达到更好的测量效果,通过该算法可以最

大限度地减少与真实信号值的误差，如图3所示。

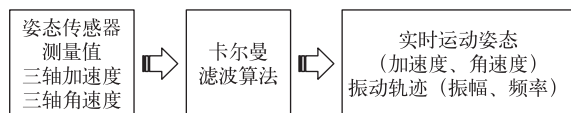


图3 姿态传感器IMU滤波过程

卡尔曼滤波（Kalman Filtering）是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法。卡尔曼滤波用来估计带噪声信号中隐藏的真实信息，它的输入信号带有“过程噪声”和“观测噪声”，输出信号是对真实信号的最优估计，处理的本质是对噪声的滤除。卡尔曼滤波主要是运用五个经典方程，详细步骤如下。

1) 根据前一状态的真实值 $\tilde{x}_{i-1}$ 来预测当前状态的预测值

$$\tilde{x}_i; \tilde{x}_i = F\tilde{x}_{i-1} + B u_i \quad (1)$$

式中， F 为过程噪声的协方差矩阵； B 为控制矩阵。

2) 卡尔曼增益

$$K_i = \frac{P_i^- H^T}{H P_i^- H^T + R} \quad (2)$$

式中， H 为观测转移矩阵，表示状态值和观测值之间的转换关系； R 为观测噪声的协方差矩阵。

3) 根据 Z_i 和 K_i 对 $\tilde{x}_i$ 进行校正，得到状态最优估计值

$$\tilde{x}_i; \tilde{x}_i = \tilde{x}_i + K_i \left(z_i - H \tilde{x}_i \right) \quad (3)$$

式中， $K_i \left(z_i - H \tilde{x}_i \right)$ 为预测值的观测修正。

4) 计算后验误差（真实值和估计值的差）的协方差矩阵

$$P_i = (I - K_i H) P_i^- \quad (4)$$

5) 计算下一时刻的先验误差（真实值和预测值的差）的协方差矩阵

$$P_{i+1}^-; P_{i+1}^- = F P_i F^T + Q_{i+1} \quad (5)$$

如图4所示，卡尔曼滤波器的总体设计流程为：

①根据初始状态进行当前状态的预测；②对预测值进行观测修正；③通过校正得到最优估计值。该过程一直在重复更新当前状态。

本系统使用了陀螺仪预估出姿态角，后面的测量模型中用加速度计的测量模型做后验估计，完成整个卡尔曼滤波的过程。卡尔曼滤波实际效果如图

5所示，其中灰色曲线为MCU传感器的角度测量值（带有大量抖动），红色曲线为卡尔曼滤波后的最优估计值（信号接近实际效果）。

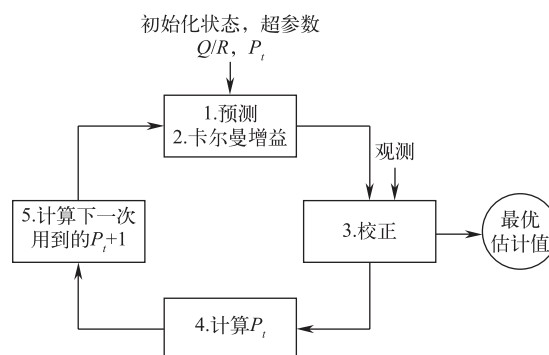


图4 卡尔曼滤波设计流程

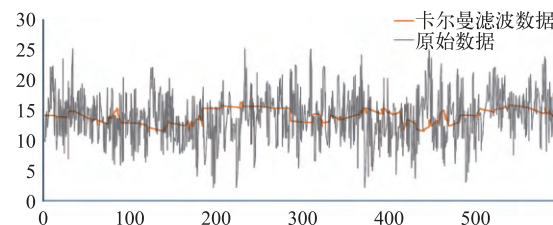


图5 卡尔曼滤波效果

由于卡尔曼滤波器仅仅依靠上一次系统状态和定义系统状态被修正概率的方差矩阵，所以卡尔曼滤波器不需要很长的系统状态历史来进行滤波，可确保系统的高实时性要求，满足本系统耐张线夹振动测量的实时性要求。

2. 耐张线夹振动异常状态判断标准

影响耐张线夹振动的因素主要有：风速、风向、档距、悬点高度、导线应力、地形以及地物等，在实际运行过程中振动主要受风的影响较大。由于风速是空间和时间的函数，所以在测试过程中多种振动频率同时存在，在某些情况下会出现短暂的高频振动，当风速达到 0.5~10 m/s 时，输电线路会产生频率为 3~150 Hz 的微幅振动现象。

所以耐张线夹振动异常标准需结合振动频率、持续时间及姿态等多个因素共同进行判断，本系统可配置多种工况和参数，并结合历史数据和经验规律，制定异常状态判断标准。

系统采用的主要振动分析方法如下。

(1) 趋势分析

长时间采集耐张线夹振动数据，依据耐张线夹

设备历史数据绘制出设备状态变化曲线，如图6所示，并根据振动变化趋势，全面准确分析判断耐张线夹的运行状态。该分析方法受外界环境因素影响较大，准确度较低，需要结合同一时刻多个线夹的数据来进行分析。

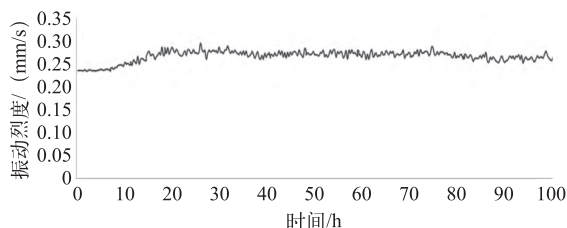


图6 振动烈度长期趋势图

(2) 时域频域分析

时域特征参数分析方法是在时域内对耐张线夹振动信号进行滤波、放大、统计特征计算和相关性分析等处理，特征参数会随着设备故障的出现和加深而发生特定的变化。通过时域特征参数可以进行初步的故障识别，但如果要对故障进一步定位和判断故障类型，则需要对时域波形进行分析来判断发生异常的部件。频域分析方法是利用傅里叶变换得到原始时域振动信号的频率成分在频谱图中的分布情况，进而发现故障特征频率，通过比对故障状态与正常状态下振动信号的特征频率，实现故障识别。相较于时域分析方法，频域分析方法能够更加直观地提取到故障特征信息。

(3) 加速度分析

加速度包络分析技术用了放大、滤波手段增强调制信号，滤去低频干扰信号，由于所采集的振动信号是在较高的频率范围，使低频干扰得到了有效抑制，如图7所示，对于设备故障早期产生的周期性共振有明显的识别效果。

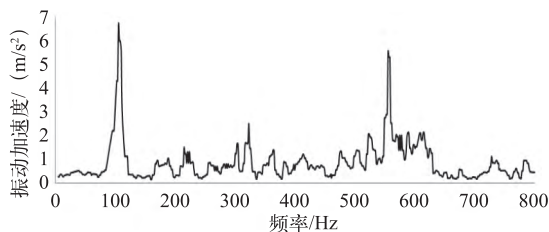


图7 振动加速度分析图

耐张线夹数据监测模块设计

耐张线夹数据监测模块结构主要由线夹固定抱

箍结构、监测线路PCB板、锂电池槽、盖板组成。总体而言，监测模块整体结构简单可靠，结构的选材上采用了密度低、强度高和耐腐蚀性好的高强度铝合金等材料，设计上尽量做到精巧、方便和灵活。为防止高压电场对装置电控的影响，对所有控制电路进行了屏蔽处理，环氧树脂全密封封装，对所有零件外表面进行了表面防腐的阳极处理，满足现场使用要求。

耐张线夹数据监测模块结构如图8所示。

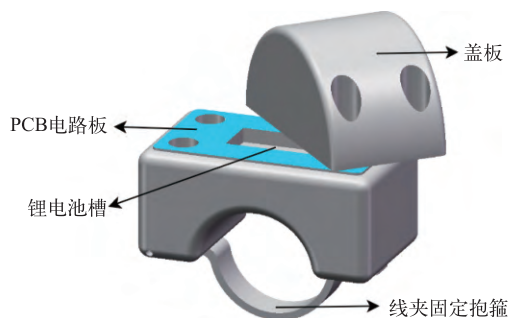


图8 耐张线夹数据监测模块结构示意图

耐张线夹数据监测模块PCB电路板采用螺丝固定安装于耐张线夹监测模块结构中，该电路板实现耐张线夹振动数据的采集及通信传输功能，由IMU传感器、电池管理电路、MCU控制器和Lora无线芯片单元构成。

IMU传感器为耐张线夹振动数据采集核心器件加速度传感器，选用InvenSense公司MEMS三轴加速度传感器芯片MPU6050，该芯片具有高准确度、低功耗和成本低廉的特点，它可以测量物体在 x 、 y 、 z 三个方向上的加速度和角速度。该芯片可获取 $\pm 16\text{ g}$ 的加速度数据和高达 400 kHz 的 I^2C 通信速率，同时它的待机电流 $5\text{ }\mu\text{A}$ 、工作电流 $500\text{ }\mu\text{A}$ ，可以大大降低模块的功耗，从而确保产品运行的稳定性和模块采样的准确性。

试验及应用

1. 振动试验

根据 Q/GDW 245—2010《输电线路微风振动监测装置技术规范》等标准，委托国内某防振研究机构进行了振幅与频率监测产品试验，振动测试平台如图9所示。振动试验的原理是通过试验台控制振动频率，通过长期监测模块监测端部耐张线夹位置的振动幅值，根据实时和长期振动频率判断耐张线

夹是否出现振动异常，试验结果均符合相关要求。

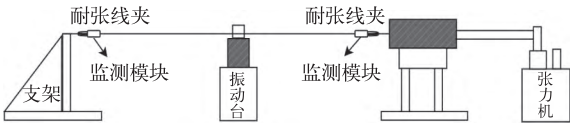


图9 耐张线夹数据监测模块振动测试装置

其中，振幅与频率试验详细数据见表1，可以看出振幅与频率监测准确度满足相关技术规范。

表1 耐张线夹振幅与频率测试数据

测试样品编号	技术标准要求误差 (%)	频率最大相对误差 (%)	幅值最大相对误差 (%)
1	≤10	±1.2	±3.5
2	≤10	±2.5	±1.3
3	≤10	±3.1	±2.2
4	≤10	±3.2	±3.2
5	≤10	±1.3	±2.3

2. 现场应用

耐张线夹状态监测系统基于无线传感器网络技术，监测模块可以直接安装在耐张线夹接线板中心位置，实时在线监测整个耐张线夹的振动状态，并基于无线通信方式回传到系统云平台，相关人员可以在平台及手机推送中实时查看回传的耐张线夹状态信息、报警信息、实时曲线，如图10所示，并根据预警信息及时做出维护处理，保障输电线路的安全运行。

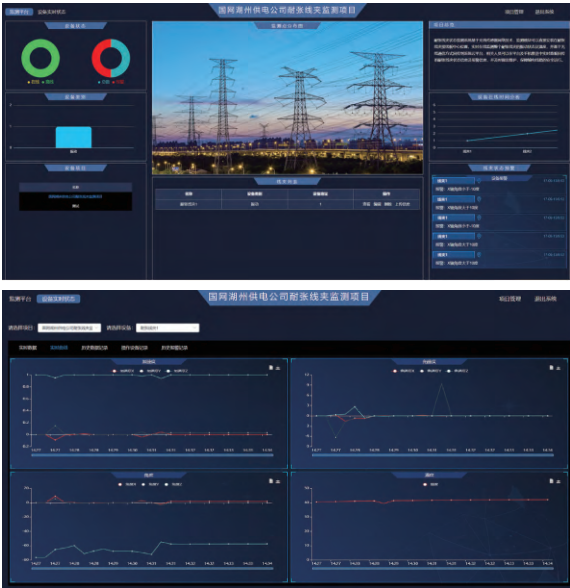


图10 湖州供电公司耐张线夹状态远程监测平台

系统在国网浙江省电力有限公司湖州供电公司某220 kV输电线路进行了现场安装应用，在输电线路安装耐张线夹监测模块10套，在邻近杆塔上安装数据传输基站2台及太阳能板（含蓄电池）2块。经过在实际输电线路中安装使用和实验验证，该监测装置的性能和准确性得到充分肯定。

结束语

本论文提出一种基于振动监测的电力系统耐张线夹状态远程监测装置，通过实时监测、在线诊断和远程传输数据，有效解决耐张线夹状态监测难题。通过远程无线监测装置及预警系统，可以对电力线路中的关键设备和重要的状态信息进行监测，特别是对耐张线夹进行姿态、振动舞动等状态信息进行远程监测，不但可以快速定位故障位置，还可以提前发现事故隐患，甚至为预测线路剩余使用寿命提供分析数据。

在实际应用中，该装置能有效提高电力系统的运行安全性和稳定性，而且降低维护成本和工作强度，具有广阔的市场前景和应用潜力。EA

(收稿日期：2023-11-03)

参考文献

[1] 段玉飞，王伟．基于物联网的输电线路智能监测系统研究与应用[J]．电力信息与通信技术，2019，17(07)：21-28．
[2] 刘丽榕，王玉东，肖智宏，等．输电线路在线监测系统通信传输方式研究[J]．电力系统通信，2011，32(4)：20-25．
[3] 万林．高压输电线路耐张线夹在线监测方法与技术看[D]．武汉：武汉大学，2019．
[4] 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[J]．仪表技术与传感器，2022(3)：103-108．
[5] 刘颖，杨媛，徐金涛．融合互补滤波和卡尔曼滤波的姿态解算算法[J]．西安邮电大学学报，2021，26(4)：98-104．
[6] 王斌．基于无线通信的高压输电线在线监测系统应用研究[J]．科技风，2017(11)：78．