

基于张力测量的输电线路导线舞动在线监测系统

李炼炼^{1,2} 程鹏^{1,2} 冯满^{1,2} 杨理天^{1,2} 秦浩浩^{1,2} 姜先锋^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院) 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 武汉 430074)

摘要: 本文依据输电线路舞动时导线张力变化的模型, 计算了其水平分量和竖直分量的变化值, 研制了一套可在线测量导线舞动的监测系统。基于导线机械结构, 设计出了适应于线路测量的压力传感器; 通过 A/D 转换, 输出张力变化的数字信号; 基于 ZigBee 无线传输技术, 实现导线张力的在线监测。最后通过某线路对比测试, 证明该测量系统可有效地实现输电线路的舞动测量。当风速大于 6.7 m/s 时, 导线舞动幅值与风速呈现正相关关系, 直到风速为 12 m/s 时, 舞动达到最大值 6.1 m; 随着风速进一步增大, 导线舞动幅值呈现震荡趋势。

关键词: 张力测量; 输电线路; 在线监测; 导线舞动; ZigBee

中图分类号: TH122; TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 080802

On-line monitoring system of transmission line galloping based on tension measurement

Li Lianlian^{1,2} Cheng Peng^{1,2} Feng Man^{1,2} Yang Litian^{1,2} Qin Haohao^{1,2} Jiang Xianfeng^{1,2}

(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the model of tension variation in transmission line, the paper calculates the change in the horizontal component and the vertical component and develops on-line monitoring system of transmission line galloping. Based on conductor structure, the pressure sensor adapted to line measurement is designed. The system exports digital signal of tension variation through A/D transformation. Based on ZigBee wireless transmission technology, the function of tension variation is realized. Finally through certain comparison test of transmission line, it is proved that the measurement system can effectively implement the transmission line galloping. When the wind speed is greater than 6.7 m/s, the galloping amplitude of conductor is positively correlated with the wind speed. When the wind speed is 12 m/s, it reaches a maximum of 6.1 m. As the wind speed increases, the amplitude of the wire is oscillating.

Keywords: tension measurement; transmission line; on-line monitoring; transmission line galloping; ZigBee

0 引言

在电力系统中, 输电线路覆冰现象非常普遍。覆冰导线在强风作用下会发生导线舞动。输电线路发生舞动时幅度较大, 导致导线张力变化相应也很大, 通常可达数十 kN, 最大时可使导线张力增加近一倍。因此, 对导线、金具、绝缘子及杆塔的强度和耐疲劳性能都是一个严峻的考验。尤其是舞动往往伴随有扭转运动分量, 而扭转运动对导线、金具的损伤力更大, 从而会造成连接金具、悬垂金具及绝缘子等的破坏^[1-3]。

目前, 国内外大多是根据架空导线覆冰情况作为可能产生舞动的主要条件。因此, 为了防止导线舞动, 必须掌握输电线路的覆冰情况。覆冰导线张力在线监测系统是线路

覆冰在线监测技术的重要方法之一。国内关于输电线路覆冰在线监测主要集中于导线舞动力学模型的优化或者综合因素的作用^[4-8], 关于测量系统自身设计的准确性未进行有效性验证。本文提出的覆冰导线张力在线监测系统采用嵌入式技术和 ZigBee 无线通信技术^[9-12], 可实现现场覆冰过程张力的测量, 克服了人工巡检带来的危险及困难, 节省了人力、财力, 为线路抗舞动设计提供了科学依据, 为输电线路安全可靠运行创造了条件。

1 导线张力测量原理

1.1 舞动对导线水平张力分量的影响

舞动前覆冰导线的形状可近似由图 1 中实线所示。图中 l 为杆塔档距, h_{AB} 为杆塔两端导线高度差, β 为高差角。

T_A 、 T_B 为导线悬挂点轴向张力, T_0 为导线水平张力; T_{yA} 、 T_{yB} 为导线悬挂点竖向张力分量。

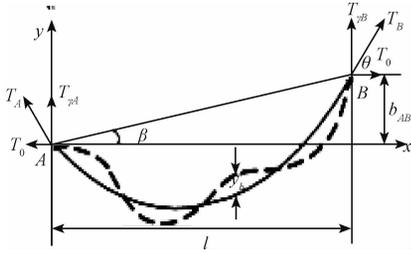


图1 悬挂点不等高示意图

根据斜抛物线方法,导线的挠度曲线方程为

$$y_s(x) = x \tan \beta - \frac{Wx(l-x)}{2T_0 \cos \beta} \quad (1)$$

式中: $y_s(x)$ 为导线上任一点在舞动前的挠度 W 为覆冰导线单位长度荷载, N/m。设导线舞动前的静长度为 L_s , 舞动导线在 t 时刻的长度为 L_g ,

舞动导线在 t 时刻的长度变化量 ΔL 为: $\Delta L = L_g - L_s$

将被积函数展开为泰勒级数,略去高阶项,有:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \int_0^l \left\{ \left[\frac{\partial y_g(x,t)}{\partial x} \right]^2 + 2 \frac{\partial y_g(x,t)}{\partial x} \cdot \frac{dy_s(x)}{dx} \right\} dx \quad (2)$$

$$\Delta T_{yB} =$$

$$\begin{cases} \frac{n^3 \pi k a_0^3}{4l^2} \sin^3(\omega t) + \frac{[N^2 \pi^2 (Wl + 2T_0 \sin \beta) + 16W] l k a_0^3}{8T_0 l \cos \beta} \sin^2(\omega t) - \left[\frac{W(lWl + 2T_0 \sin \beta) k_c}{n \pi T_0^2 \cos^2 \beta} + \frac{n \pi T_0}{l} \right] a_0 \sin \omega t, & n \text{ 为奇数} \\ \frac{n^3 \pi k a_0^3}{4l^2} \sin^3(\omega t) + \frac{n^2 \pi^2 (Wl + 2T_0 \sin \beta) a_0^2}{8l T_0 \cos \beta} \sin^2(\omega t) + \frac{n \pi T_0 a_0}{l} \sin \omega t, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

相对覆冰导线舞动前的张力 T_0 、 T_y , 舞动后引起的导线水平张力和悬挂点张力分量变化的百分比 R_0 、 R_y 可分别表示为:

$$R_0 = \frac{\Delta T_{0\max}}{T_0} \quad R_y = \frac{\Delta T_{y\max}}{T_y} \quad (7)$$

由上述公式可得以下结论:导线水平张力变化量 ΔT_0 是舞动幅值 a_0 的二次函数,悬挂点竖向张力分量的变化量 ΔT_y 是舞动幅值 a_0 的三次函数。 $\Delta T_{0\max}$ 、 $\Delta T_{y\max}$ 随舞动幅值 a_0 的增加而增大; $\Delta T_{0\max}$ 、 $\Delta T_{y\max}$ 随线路档距 l 的增加而减小; $\Delta T_{0\max}$ 、 $\Delta T_{y\max}$ 随线路弧垂 d 的增加而增大。

由上述导线覆冰动态张力分析可知,导线在悬挂点所承受拉力可认为是最大,因此,需要在悬挂点对导线的张力做实时观测。本课题拟采取在覆冰导线悬挂点安装线夹装置,通过线夹上面的拉力传感器来测量导线张力,通过导线张力的变化来判断导线是否覆冰,从而及时做出防舞预警。

2 在线监测系统

在线监控系统的工作过程如下:通过拉力传感器测量

根据弹性变形的“虎克定律”,导线水平张力变化量为

$$\Delta T_0 = EA \frac{\Delta L}{L_s} = k_c \Delta L = \begin{cases} \frac{n^2 \pi k_c a_0^2}{4l} \sin^2 \omega t, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{n^2 \pi k_c a_0^2}{4l} \sin^2 \omega t - \frac{2Wl k_c a_0}{n \pi T_0 \cos \beta} \sin \omega t, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E 为导线的综合弹性模量, N/mm²; A 为导线的横截面积。

1.2 舞动对导线竖向张力分量的影响

现计算舞动引起的导线悬挂点 B (高悬挂点) 竖向张力分量的变化量 T_{yB} 。舞动前导线悬挂点 B 处的斜率为

$$\tan \theta = \frac{T_{yB}}{T_0} = \frac{dy_s}{dx} = \tan \beta + \frac{Wl}{2H \cos \beta} \quad (3)$$

因此,舞动前,导线悬挂点竖向张力分量为

$$T_{yB} = \frac{Wl}{2 \cos \beta} + T_0 \tan \beta \quad (4)$$

舞动发生时,导线悬挂点处的斜率为

$$\begin{aligned} \tan \theta' &= \frac{T_{yB} + \Delta T_{yB}}{T_0 + \Delta T_0} = \frac{\partial(y_s + y_g)}{\partial t} \\ &= \tan \beta + \frac{Wl}{2T_0 \cos \beta} + (-1)^n \frac{n \pi a_0}{l} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (5)$$

舞动引起的导线悬挂点 B 竖向张力分量的变化量 ΔT_{yB} 为:

覆冰导线的张力,然后经多路(电路)开关将测得的张力转化成电压或电流模拟信号,接着经过放大器放大模拟信号,最后经过 A/D 转换器将模拟信号转化成处理器能够识别的二进制代码,传送给 CPU,最终通过无线传输模块实现数据的远程传输。该系统本地端如图 2 所示。

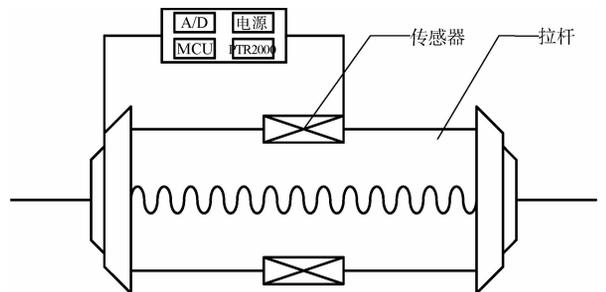


图2 检测系统工作简图

基于张力测量的在线监测系统由数据采集模块、数据处理模块和数据传输模块组成。其系统框图如图 3 所示。

整个在线监控系统实现以下功能:



图 3 张力监测系统框图

1) 实时显示张力数据的变化, 并且采用无线传输方式向后台发布原始张力数据。

2) 历史数据回顾。可以根据要求对某一段时间的历史数据进行查询对比。

3) 趋势分析。根据历史数据和当前数据对比来推断线路覆冰、受力的变化速度与趋势, 绘制成各种趋势曲线, 为早期预测故障和事故的发生提供有效手段。

2.1 数据采集模块

数据采集模块由拉压传感器及传感器安装装置组成^[9-10]。拉压传感器安装在线夹上, 测量覆冰导线所承受的拉力, 如图 4 所示。

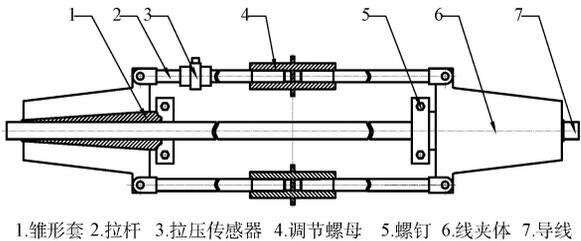


图 4 数据采集模块设计结构

传感器安装装置, 安装在导线悬挂点处, 与压力传感器相结合, 使测力传感器在不影响高压导线输电线路结构及特性的情况下测出导线所受的张力, 同时便于拉力传感器的安装与维护。

2.2 数据处理模块

数据采集处理模块, 由多路开关、采样器、采样保持器、放大器、A/D 转换器、I/O 接口和微处理器 CPU 组成, 系统框图如图 5 所示。拉压力传感器采集的模拟信号(覆冰导线承受的张力转化而成的电流或电压信号)通过多路开关定时的采集器, 然后经过放大器将采集的微弱信号进行放大, 最后经 A/D 转换器, 使采集的数据从模拟信号转换到数字信号, 传送给处理器处理^[11-12]。

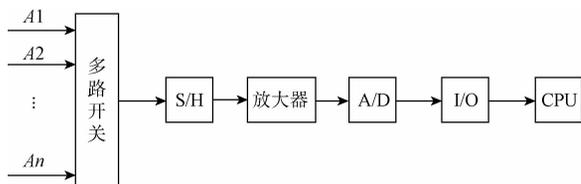


图 5 数据采集处理模块

2.3 数据传输模块

数据传输模块, 将现场测得的数据通过无线传输的方

式传送给后台的计算机进行仿真计算, 从而得到覆冰与张力关系, 为防舞预警提供参考数据。

由于输电线路属于高压强电磁环境, 采用最新的 ZigBee 技术, 具有较强的干扰性, 可实现自组网, 并且可以提供远距离, 低误码率的数据传输, 同时支持低功耗模式, 降低系统功耗^[13-15]。

在无线发射过程中由处理器将张力信息发给 ZigBee 模块。在与上位机通信的过程中需要遵循通信协议。协议的制定主要是由标示符开头, 中间字节有明确的意义, 加上结束符。这样的协议建立在 ZigBee 模块的透明传输基础之上, 用简单的协议保证通信的准确性, 在线监测系统的流程图如图 6 所示。

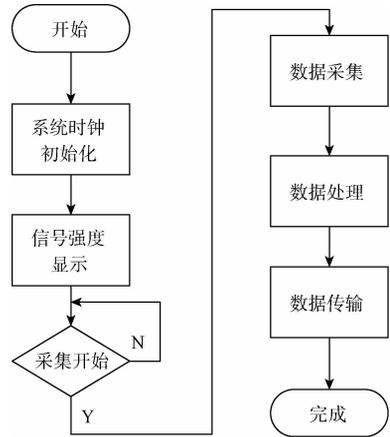


图 6 监测系统流程

在数据采集的过程中调用系统 A/D 采集功能对于多路采集信号分时进行采集, 同时使用系统提供的 DMA 功能预先划定一片存储区域, 实现数据的快速传输, 完成数据采集功能后就可以进行数据处理。

在数据处理过程中首先使用平均值滤波, 对于同一信号多次采样求平均值。根据制定的简单通信协议判断串口接收数据的含义。当接收到发送数据指令时, 访问最新的电场采集数据, 发送数据到上位机。

3 试验验证

2016 年冬天在某输电线路进行导线覆冰观测试验, 导线参数见表 1, 由于线路自身受重力影响, 线路悬垂点受到张力最大, 经过测量为 10.7 m, 本文以此点为测量点, 通过高精度摄像机拍摄的导线舞动数据, 与本文设计的在线监测系统进行对比分析。

表 1 试验线路的基本参数 (m)

型号	极间距	对地高度	档距
LCJQ-300	12.5	14	400

累积通过监测系统测量的数据, 对其进行傅里叶变

换,求出导线舞动的主频率,然后依据式(3)和式(6)可求出导线舞动幅度,对比两种方式的数据,如图7所示,可以看出数据基本一致,满足现场测试的要求。

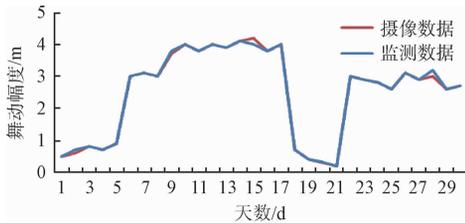


图7 测量系统数据和摄像数据对比

为了进一步研究风速和导线舞动值之间的关系,对该实验线路段加装风速监测装置,记录风速和导线舞动数据,经过研究进行了风速和导线舞动幅值的测量,测量数据如图8所示。由图可知:当风速达到6.7 m/s时,随着风速的继续增加,导线舞动的幅度会进一步增大。风速达到12 m/s时,导线舞动的幅度会有所下降,呈现震荡的趋势。其中最大舞动幅度为6.1 m。

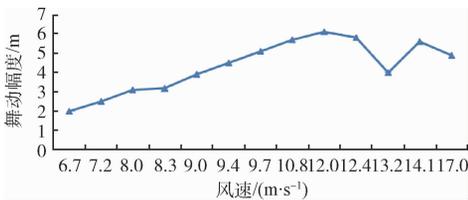


图8 导线舞动幅度与风速的关系

4 结 论

依据输电线路舞动时导线张力变化的斜抛物线模型,计算了其水平分量和竖直分量的变化值,在此基础上研制了压力传感器,基于 ZigBee 无线传输技术,完成了整套输电线路在线监测系统的研制。通过某线路对比测试,证明该测量系统可有效地实现输电线路的舞动测量。导线舞动幅值与风速有一定的关系:在一定范围内,导线舞动幅值与风速呈正相关,风速达到12 m/s时,导线舞动呈现最大值6.1 m,随着风速进一步增大,导线舞动呈现震荡趋势。

参考文献

- [1] 郝淑英,周坤涛,刘君,等.考虑多种因素的覆冰输电线路舞动的有限元分析[J].天津理工大学学报,2011,26(6):7-11.
- [2] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.输电线路导线舞动荷载分析[J].中国电机工程学报,2011,31(16):102-107.

- [3] 刘亚坤,李林锐,李世龙,等.架空输电线路的舞动幅值分析与试验研究[J].上海交通大学学报,2016,50(6):826-830.
- [4] 王彦,乐滨.一种在线监测导线舞动的张力测量系统的设计[J].湖北大学学报,2014,36(6):549-551.
- [5] 张子翀,王健.基于拉力和倾角的输电线路覆冰厚度预测模型[J].广东电力,2015,28(6):83-86.
- [6] 陈金熠,范春菊,胡天强,等.考虑架空输电线路状态的线路覆冰监测系统的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):93-97.
- [7] 张乐,周步祥,王小红,等.导线覆冰监测系统的力学模型与预警功能优化[J].电力系统保护与控制,2014,26(11):43-45.
- [8] 姚陈果,张磊,李成祥,等.基于力学分析和弧垂测量导线覆冰厚度测量方法[J].高电压技术,2013,39(5):1204-1209.
- [9] 胡俊峰,蔡建阳,郑昌虎.一种具有力传感的微夹持器设计与标定[J].电子测量与仪器学报,2016,30(3):407-410.
- [10] 崔宏敏,陈宝成,丁钟凯,等.压力传感器结构参数识别及优化方法[J].仪器仪表学报,2016,37(12):2805-2810.
- [11] 徐玉丹,陶辉,秦龙,等.一种基于FPGA的芯片测试多通道串口扩展设计[J].电子测量技术,2013,36(3):89-93.
- [12] 马庆功,莫玉华,郑恩兴.基于RS485多机通信系统设计[J].电子世界,2012(11):132-133.
- [13] 周岭松,余春暄.基于ZigBee技术的温、湿度控制系统[J].电子测量技术,2011,34(6):47-49.
- [14] 张冲,熊勇,房卫东,等.ZigBee网络性能测试系统研究[J].国网电子测量技术,2015,34(8):74-77.
- [15] 鲍贤亮,陈年海,徐一凡,等.基于ZigBee技术的无线脉搏传感网[J].电子测量技术,2015,38(2):105-108.

作者简介

李炼炼,1988年出生,工程师,从事输电线路运行维护和在线监测。

E-mail:leelianlian@163.com

程鹏,1986年出生,工程师,主要从事输电线路覆冰导线舞动的研究。

E-mail:278381722@qq.com