

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.008

基于空间笛卡尔坐标系的孤堡输电线路 杆塔基础偏移状态监测研究

黄会贤¹, 陈新岗^{2,3}, 田勇¹, 冯俊¹, 陈果², 倪志²

(1. 重庆市电力公司长寿供电分公司, 重庆 401220; 2. 重庆理工大学, 重庆 400054; 3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对输电线路杆塔基础被埋置于孤堡中造成重大安全隐患的问题, 笔者提出了进行孤堡输电线路杆塔基础偏移实时监测方法。首先确立输电线路杆塔基础位移检测笛卡尔坐标系, 有效获取孤堡杆塔基础支撑脚处位移量; 其次提出以笛卡尔坐标系为基准的孤堡输电线路杆塔基础偏移算法; 最后结合相关检测数据进行算法验证, 获取了一段时间内基础位移与时间变化关系曲线。对该曲线的分析表明, 文中提出的方法对孤堡输电杆塔基础偏移预警效果好精度高。

关键词: 输电线路; 孤堡; 杆塔基础; 偏移; 笛卡尔坐标系

Research on the Condition Monitoring of Skewing of Isolated Tower Foundation of Transmission Line Based on Cartesian Coordinate

HUANG Huixian¹, CHEN Xingang^{2,3}, TIAN Yong¹, FENG Jun¹, CHEN Guo², NI Zhi²

(1. Changshou Power Supply of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401220, China; 2. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the serious safety problem of which the tower foundation of transmission line is isolated, the paper puts forward a real-time monitoring method for the tower foundation. Firstly, a Cartesian coordinate system for skewing of the tower transmission is established and the skewing distance at the supporting point of the tower foundation is obtained effectively. Secondly, an algorithm to calculate the skewing distance of the tower foundation based on the coordinate system is put forward. With the algorithm, the relationship between skewing and time can be got. Finally, this paper presents experiment data and curve. The analysis indicates that the method presented in this paper has good performance for on-line monitoring of the tower skewing and has good accuracy.

Key words: transmission line; isolation; tower foundation; skewing; Cartesian coordinate system

0 引言

当前, 中国正在开展的特高压电力工程为电能的跨区域远距离传输及分配创造了条件。然而, 特高压电力工程同时也为各种电压等级下的输配电线路的安全与稳定运行提出了更高要求。输电线路由杆塔支撑进行电能的传输和分配, 并形成电力网络。杆塔在电力网络中为线路的分布起到重力支撑、走向转变等重要作用^[1-4]。输电线路杆塔基础是杆塔中主要受力部位, 在各种受力情况下, 杆塔基础应确保杆塔不出现倾覆、下陷与上拔等影响输电线路安全

收稿日期: 2014-10-18; 修回日期: 2014-11-21

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA90018); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室访问学者项目(2007DA10512711410); 2014 渝电科技(SGCQCS00YJJS1400059)。

Project Supported by Natural Science Foundation Project of CQ CSTC (cstc2012jjA90018), State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University (2007DA10512711410), Electric Power Company Technology of Chongqing(SGCQCS00YJJS1400059).

运行的隐患。

工程建设等生产活动对填埋有输电杆塔基础的土壤造成破坏,使其形成倾斜度较高的土坡或孤立于地平面的土堡。另外,在山林地区输电线路中,存在若干输电杆塔矗立于陡坡、山崖等场所。文中将输电杆塔所处的以上类型场所称为孤堡。随着经济的飞速发展,农村城镇化建设,输电线路走廊面临严峻考验,诸多因开发区的建设导致架空输电线路杆塔出现孤堡基础,长期存在着重大安全隐患。

大量运行实例已经表明,对输电杆塔基础隐患的忽视是引起的输电线路运行故障的重要原因之一,已产生了巨大经济及人力损失^[5-6]。造成基础隐患被忽视的原因在于隐患发展的长期性和隐患状态量检测的局限性,即从隐患的出现到其最终形成安全事故是长期过程,且在输电杆塔上对某一检测量的长期检测方案还有待进一步研究。

在当前的研究与应用中,输电杆塔基础位移量检测自动化程度不高故有待改进^[7]。文中旨在通过对输电杆塔塔基位移量检测方法设计,实现杆塔偏移隐患的准确确定及排查,切实降低杆塔偏移隐患造成的损失。

1 输电杆塔基础受力特征

对输电线路杆塔基础进行受力分析表明,基础所受力包括:由荷载引起的下压力、上拔力,由横向水平荷载引起的水平力,由杆塔塔基坡度引起的水平力等^[8-10]。输电线路杆塔基础受力特征应依据具体土壤环境及基础结构设计进行分析。

正常情况下,直线型杆塔基础上受力示意图见图1。

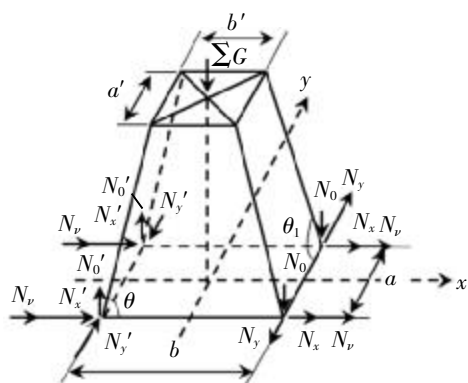


图1 直线型杆塔基础受力示意图

Fig. 1 Force analysis of transmission tower

然而在实际运行条件下,设计中杆塔基础周边土壤状态会受到生产建设等人为因素影响或地理环境突变等自然因素影响进而产生变化。在一定长度的时间范围内,土壤环境的变化会导致输电线路杆

塔基础发生偏移或沉降。因对土壤环境变化的精确检测难度极大,故直接对输电线路杆塔基础的监测有重大现实意义。进一步,对于输电杆塔安全乃至输配电网络安全而言,也具有极大必要性。

文中提出并设计孤堡输电线路杆塔基础位移在线监测方案。该方案可实时记录杆塔基础位移情况,并向线路运维人员及时提出准确杆塔基础偏移状态信息,以便对杆塔状态进行长期监测与研究。

2 孤堡输电杆塔基础位移检测方法

实地考察表明,孤堡输电线路杆塔基础外围土壤长期暴露在空气中,受到雨水侵蚀,风化剥落,生产建设等因素综合作用,致使塔基受力数值与方向发生缓慢地变化。加之杆塔荷载自身重力的影响,杆塔基础偏移事故无法有效避免。

结合工程实际,在输电杆塔基础偏移的检测中,关键技术在于获取杆塔基础上支撑脚处的位置坐标,并建立起在一定时间范围内各支撑脚的相对位移测量坐标系。当前,主要存在基于GPS的无线传感定位方法及强制对中法等措施可以建立起在一定空间内的相对位移测量坐标系^[11]。但在对孤堡输电杆塔的偏移测量中,现有的检测方法存在检测数据精度不高及检测结果受环境变化影响大等缺陷。文中结合工程实际测量要求,设计了基于空间笛卡尔坐标系的孤堡输电杆塔基础偏移状态监测方法。

2.1 孤堡杆塔基础位移检测笛卡尔坐标系建立方法

笛卡尔坐标是17世纪由DESCARTES R提出。实践证明,应用笛卡尔坐标系可将空间中点的位置信息准确反应为坐标系中向量数据,便于数据统计、运算及分析,对于空间中多点间距离计算具有简单、迅速、误差小等优势^[12-14]。文中通过构建的空间笛卡尔坐标系为基础,确立孤堡杆塔基础偏移检测方案。

在空间笛卡尔坐标系的建立过程中,坐标原点或参考测量点位置的确定将决定坐标系中所得出的孤堡输电杆塔基础的偏移数值的精确度及灵敏度。故应首先根据坐标系中检测对象特点确立坐标原点。

坐标原点选取具有3种方案,分别为:①以4个支撑脚之一作为坐标原点;②以杆塔外部某处作为坐标原点;③以杆塔内部某处作为坐标原点。

分析输电杆塔基础固有结构的受力特点可知,杆塔4支撑脚处受力情况最复杂,应该作为检测杆塔基础位移主要对象而非原点。另外,孤堡输电杆塔在形成过程中,杆塔基础整体高出地平面,且周边生产生活中各种外力因素将对杆塔外部频繁造成人为破坏,故在杆塔外部某处设立原点的方案并不

可取。因为在杆塔内部的孤堡顶端土质相对稳定,且因孤堡自身高度而避免了生产活动中对检测传感器位置产生的计划外改变,从而可显著提高测量精确度。因此,在孤堡杆塔内部设立坐标原点是建立文中监测系统中设计空间笛卡尔坐标系的唯一选择。

综上所述,所设计方案旨在利用孤堡顶端的较好稳定性特点,建立用于孤堡输电杆塔基础位移检测的杆塔支撑脚相对位移测量空间笛卡尔坐标系。具体实施方案为:

- 1) 在测量空间内选取稳定的坐标原点(参考测量点);
- 2) 在杆塔支撑脚位置加装固定传感器;
- 3) 求取测量点与坐标原点(参考测量点)相对位移。

在该方案中,空间笛卡尔坐标系中坐标原点设置于孤堡杆塔基础的土壤中央表层位置处,见图 2 中 O 点。

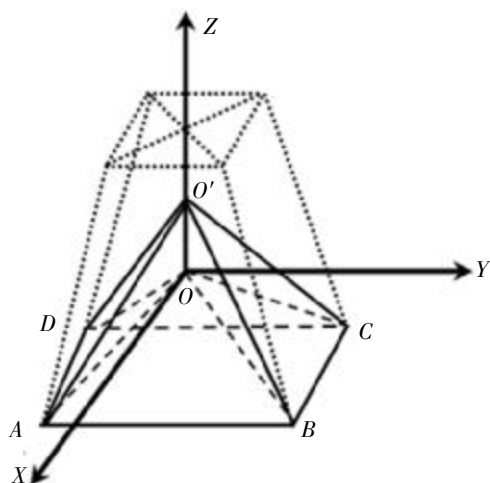


图 2 空间笛卡尔坐标系建立示意图

Fig. 2 Design of Cartesian coordinate system

图 2 中,在确立参考测量点,并结合孤堡杆塔基础 4 支撑脚: A 点、 B 点、 C 点、 D 点后,即可建立起孤堡杆塔基础偏移测量的空间笛卡尔坐标系。坐标系中,将测量参考点 O 设计为坐标系坐标原点,并将 OO' 所在方向作为 z 轴正方向,将地理正东方向作为 x 轴、将地理正北方向作为 y 轴。

利用所建立孤堡杆塔基础偏移空间笛卡尔坐标系可进行杆塔基础位移量监测。依据设计要求,建立空间笛卡尔坐标系的目标为准确获取 4 支撑脚 A 、 B 、 C 、 D 在坐标系中的坐标数值。

在坐标系中,以 A 、 B 、 C 、 D 、 O' 为顶点所构成的五面立体结构中各边边长: OA 、 OB 、 OC 、 OD 、 $O'A$ 、 $O'B$ 、 $O'C$ 、 $O'D$ 、 AB 、 BC 、 CD 、 DA 被设计为坐标系中待测数据,需由传感器准确测量。

将 OA 、 OB 、 OC 、 OD 投影到平面 XOY 上,见图 3。获取坐标系中各点距离数据后,图 3(a)~(d)中四边形各边亦可依据几何定理分别获取,进而依据余弦定理分别获取见图 3 中 4 个角度数据: φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 。在角度计算中,须预先将传感器连线 CD (即投影中 $C'D'$)与 X 轴正方向的夹角 γ 的数值测量获取。

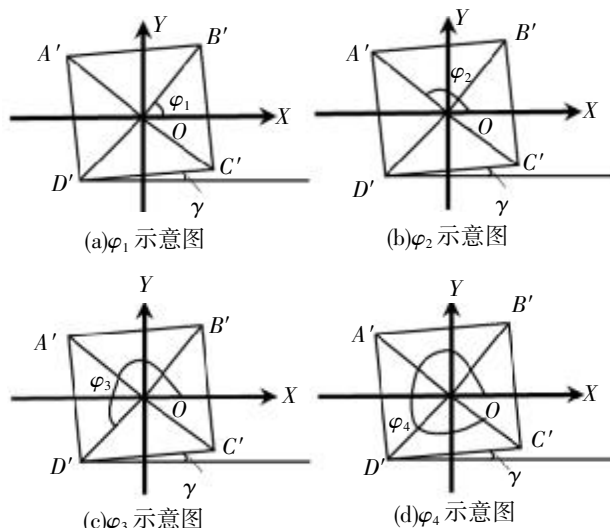


图 3 杆塔支撑脚投影于 XOY 平面示意图

Fig. 3 Projection of supports on XOY plane

依据所测坐标系中两点距离数据余弦定理,亦可获取 4 支撑脚与测量参考点 O 连线与 Z 轴正半轴间夹角分别为: θ_A 、 θ_B 、 θ_C 、 θ_D ,见图 4。

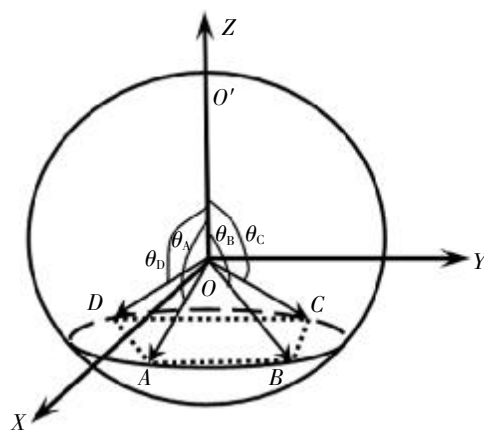


图 4 球面坐标系

Fig. 4 Design of spherical coordinate system

通过上述方法,即通过测量及计算方式获取在球面坐标系下 4 支撑脚的准确坐标值,如对 A 点而言,其球面坐标可表示为 $(r_{OA}, \varphi_1, \theta_A)$ 。将球面坐标下点坐标转换至空间笛卡尔坐标系中坐标,即在所建立空间笛卡尔坐标系中准确获取输电杆塔 4 支撑脚的直角坐标数值 (x, y, z) 。其过程见图 5 所示方式。

检测系统可在一段时间范围内获取并记录各时间点处的孤堡输电杆塔 4 支撑脚在空间笛卡尔坐标系中的坐标数值。对于孤堡输电杆塔基础整体偏移

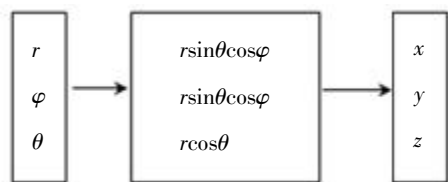


图 5 坐标变换示意图

Fig. 5 Transformation of coordinates

的监测,即是利用上述检测数据作为依据,进而获取杆塔支撑脚在对应时间段内的位移数值。

所建立的空间笛卡尔坐标系进行孤堡杆塔基础位移检测的方案,依托杆塔各组成部分建立空间笛卡尔坐标系,极大避免输电杆塔基础之外的各种因环境因素变化而对检测引入的误差,具有算法简便、灵敏度高、稳定性好、成本较低等优点。通过选配适

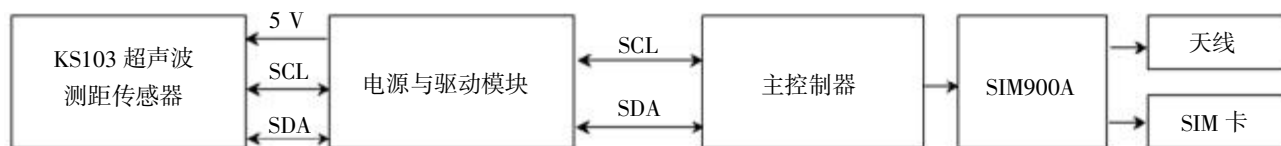


图 6 孤堡输电杆塔基础位移检测系统结构组成示意图

Fig. 6 Sketch of monitoring skewing system of transmission tower stand on slope

超声波测距传感器分别被安装在矗立于孤堡上的支撑杆顶部及杆塔 4 支撑脚底部。在刚性良好的支撑杆的顶端安装传感器后,将其稳固直立于土壤中。图 7 为孤堡输电杆塔上超声波测距传感器模块安装示意图。

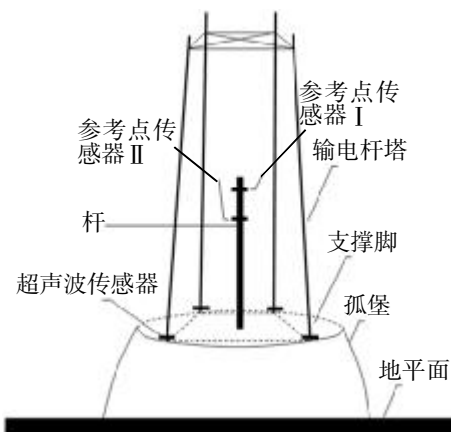


图 7 超声波测距传感器模块安装示意图

Fig. 7 Install location of ultrasonic transducer

系统控制电路中,主控芯片采用 STM32L 系列 ARM 内核 32 位微控制器,选用 stm32l152rht6 芯片,其具有 128 kB 闪存储存容量,具有工业级温度范围。该芯片需 3.3 V 供电,传感器的电平信号幅值为 5 V,但 CPU 使用 FT 引脚与其连接,能够承受 5 V 的电压,所以无需电平转换。

系统采用 SIM900A 无线模块作为数据通讯模块。该模块广泛应用于数据传输、无线通讯等领

宣传感器,其可获取极高检测精度。

2.2 孤堡输电杆塔基础位移检测系统实现

选取适宜传感器,并结合孤堡输电杆塔固有结构,即可利用所建空间笛卡尔坐标系构成其基础偏移检测系统。系统所包含装置主要构成有:电源模块、传感器模块、系统控制电路、数据通讯模块等。

系统设计中,采用太阳能光伏发电与蓄电池组合形成电源模块,保证设备能够在户外长期运行。

距离准确检测选用 KS103 超声波距离检测传感器,在检测模式下,检测范围 0.01~10 m,工作电压范围 3.0~5.5 V;采用可调滤波降噪技术,电源电压受干扰或噪音较大时,仍可正常工作。图 6 为系统主要结构组成示意图。

域^[15-16]。其具有短信业务以及提供标准的 UART 接口等功能,采用中国移动 GSM900 频段进行通信。

综上所述,当孤堡周边地质情况变化而造成超声波传感器间距缓慢变化后,传感器将测量数据提供至微处理器进行处理,按照 2.1 小节中所建立方法,即可准确获取杆塔基础位移数量。系统设定检测数据定时采集并由数据通讯模块将信息传输至上位机。文中涉及算法在上位机中实现完成。最终准确地呈现各个塔基偏移量以及预警信息。

3 孤堡输电杆塔基础位移实验方法及检测数据分析

针对提出的孤堡输电杆塔偏移算法及系统,文中通过构造孤堡输电杆塔结构对杆塔偏移状态进行了模拟检测实验。

模拟实验中,按比例在实验室中搭建了直线型孤堡输电杆塔的局部结构,主要包含以砂土堆积形成的孤堡以及填埋于孤堡中的 4 个杆塔支撑脚为主的杆塔模型。将输电杆塔 4 支撑脚分别标记为 A 号、B 号、C 号、D 号。4 点形成平面中矩形,该矩形 4 边长分别为 0.280、0.275、0.270、0.275 m。将监测系统实物安装于按实验要求所构造的 1:10 孤堡输电杆塔上。

实验中以水冲刷孤堡土壤的形式模拟自然环境对孤堡及杆塔造成的影响,并按固定时间间隔由传感器获取距离数据经控制系统传至上位机进行处

理。考虑到孤堡输电杆塔基础的地质结构变化是个较为漫长的过程,故将采样时间间隔设计为每 12 h 进行一次。

所测实验数据见表 1。表 1 中 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分别为输电杆塔 4 支撑脚相对于首次测量位置的随时间发生变化的相对位移量。

表 1 孤堡输电杆塔基础相对位移检测数据

Table 1 Test data tower supports skewing

采样次数	S_A/m	S_B/m	S_C/m	S_D/m
0	0.003 1	0.002 3	0.009 1	0.007 1
1	0.001 0	0.007 9	0.021 5	0.014 0
2	0.002 8	0.016 1	0.028 2	0.022 7
3	0.003 5	0.028 1	0.041 5	0.028 6
4	0.009 0	0.028 5	0.040 1	0.025 4
5	0.011 6	0.035 4	0.050 9	0.036 8
6	0.015 7	0.043 4	0.073 3	0.053 1
7	0.017 1	0.045 0	0.074 8	0.051 8
8	0.021 7	0.056 7	0.077 0	0.055 3
9	0.024 3	0.062 0	0.094 3	0.065 8
10	0.029 8	0.070 6	0.104 2	0.085 0
11	0.028 0	0.072 5	0.101 0	0.079 7
12	0.031 7	0.077 7	0.103 7	0.089 9
13	0.034 0	0.084 2	0.119 4	0.104 2
14	0.035 5	0.093 3	0.120 4	0.108 3
15	0.044 5	0.103 0	0.129 9	0.118 6
16	0.045 6	0.108 4	0.126 2	0.114 7
17	0.048 4	0.110 9	0.125 9	0.111 1
18	0.052 0	0.121 4	0.138 8	0.124 4
19	0.053 5	0.130 9	0.154 1	0.144 2
20	0.053 1	0.142 2	0.175 9	0.167 4
21	0.054 5	0.144 1	0.177 2	0.167 2
22	0.055 0	0.147 6	0.180 5	0.167 9

依据表 1 中数据,由上位机绘制完成四支撑脚相对首次测量位置位移与测量时间的关系曲线。该曲线见图 8。

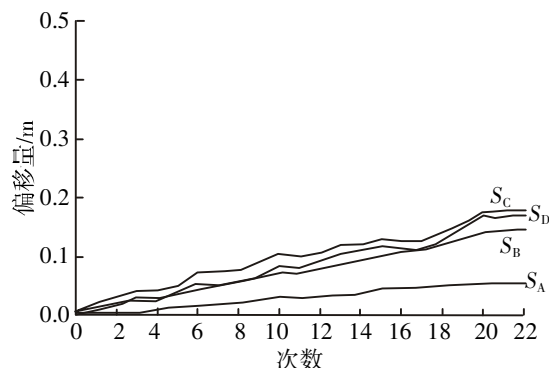


图 8 位移与测量时间的关系曲线

Fig. 8 Skewing-time curve

由以上检测数据及关系曲线分析可得出以下结论:

1)在此次测量时间内,输电杆塔塔基向基础 C 号支撑脚方向偏移最为严重。其表现形式为杆塔基础在 C 号支撑脚处存在向外侧移动趋势。主要原因在于,孤堡上土壤所处状态发生了变化,造成的坡度变化引起杆塔基础在 C 号支撑脚处所受水平推力增强。

2)输电杆塔基础在 C 号支撑脚处的偏移,造成对 B 号及 D 号支撑脚处基础受到横向水平力作用,结合该处下压力影响,B 号、D 号杆塔基础也随之向基础 C 号杆塔基础方向偏移。

3)D 号杆塔基础的偏移量多于 B 号杆塔基础,表明孤堡输电杆塔基础的整体偏移趋势为向 C 号杆塔基础及 D 号杆塔基础的结合部位方向偏移。

4)在第 17 次采样时,各支撑脚处所测的偏移量有明显回降。据此分析可见,C 号杆塔基础处、D 号杆塔基础处已做了工程加固处理,以预防偏移量加大。然而进一步分析可知,并没有整体进行加固,A 号杆塔基础处、B 号杆塔基础处依然呈现出持续偏移的趋势。

5)A 号杆塔基础处变化较为平缓,亦表明孤堡输电杆塔基础偏移方向在 A 号杆塔基础的相反方向。

该次监测模拟实验持续时间较短,传感器位置相对固定。但在长时间监测中,传感器的安装位置受到传输电缆牵引力的长时间影响,位置易发生变化,对测量的精度有一定影响。

另外,就监测数据对于判别输电线路杆塔基础状态的效果而言,短期监测数据将造成基础自然沉降与基础偏移两种状态下区别效果不佳。故孤堡输电线路杆塔基础偏移状态监测数据的获取应与线路杆塔的运行同步,实现长期杆塔基础状态监测与研究。

4 结语

输电杆塔基础位移在线监测系统,在国内尚未进行系统化的研究以及商业运用,暂无较为成熟的监测方法。文中从检测的原理及应用角度对塔基基础偏移检测方法进行研究。通过建立空间笛卡尔坐标系,精确计算塔基在空间中偏移距离,加之测距传感器精度足够高,能满足长时间对缓慢变化的孤堡输电杆塔塔基检测需要,能有效应用于输电线路安全维护工程实践中。文中提及在线监测方法,能准确提供表征杆塔基础隐患的状态量数据,提升了线路安全运行维护水平。

参考文献:

- [1] 李虎威, 李升来, 李 慧. 电力杆塔倾斜预警装置的设计与研究[J]. 广东电力, 2011, 24(2):56-59.
LI Huwei, LI Shenglai, LI Hui. Design and research of warning devices for inclination of poles and towers [J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(2):56-59.
- [2] 王佳伟. 低成本、低功耗杆塔倾角监测仪设计[D]. 山西: 太原理工大学, 2010.
WANG Jiawei. Design of low cost, low power tower angle monitor [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [3] 蚁泽沛. 粤北输电线路覆冰造成杆塔屈服原因分析[J]. 广东电力, 2008, 21(5):5-11.
YI Zepei. Causal investigation into yield of iced transmission line supports in north Guangdong[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(5):5-11.
- [4] 叶子菀, 郭 勇, 尚 奎. 山坡地形输电线路的覆冰脱冰研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7):1959-1964.
YE Ziwan, GUO Yong, SHANG Kui. Research on ice accretion and shedding of ice-coating on transmission lines located in hillside areas[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1959-1964.
- [5] 李清华, 杨靖波. 特高压输电杆塔动力特性分析快速建模研究[J]. 电力建设, 2006, 27(5):5-7.
LI Qinghua, YANG Jingbo. Study on rapid modeling of dynamic characteristic analysis for EHV transmission towers[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(5):5-7.
- [6] 胡 毅, 刘 庭, 刘 凯. 110 kV 输电线路复合材料杆塔特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(4):801-808.
HU Yi, LIU Ting, LIU Kai. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):801-808.
- [7] 徐 伟. 输电杆塔监测装置研究[D]. 湖北: 武汉科技大学, 2012.
XU Wei. Research on transmission tower monitoring device[D]. Hubei: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [8] 伍 艺. 高压输电线路杆塔基础稳定性的研究[J]. 价值工程, 2012(11):47.
WU Yi. Stability of poles foundation in high-voltage transmission line[J]. Value Engineering, 2012(11):47.
- [9] 童雪芳, 董晓辉, 谷定燮. 特高压输电线路杆塔基础独立接地性能仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12):3323-3330.
TONG Xuefang, DONG Xiaohui, GU Dingxie. Independent ground performance simulation analysis of UHV transmission line tower footings [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12):3323-3330.
- [10] 甘凤林, 李小磊, 高 黔. 拉线初始预应力分布对拉线杆塔受力影响的研究[J]. 广东电力, 2010, 23(9):7-10.
GAN Fenglin, LI Xiaolei, GAO Qian. Influence of initial prestress distribution of guy for mechanics of guyed transmission tower[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(9):7-10.
- [11] 姜华根. 测量仪器对中方法研究[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(2):56-60.
JIANG Huagen. Research on methods of shaft alignment of measuring instrument[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2003, 23(2):56-60.
- [12] 张国政, 杨海卉. 笛卡尔坐标系在数控机床中的应用[J]. 重庆科技学院学报, 2012, 14(1):121-125.
ZHANG Guozheng, YANG Haihui. Cartesian coordinate system in the application of the nc machine tools [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2012, 14(1):121-125.
- [13] 慈元卓, 谭跃进, 徐一帆. 大地坐标系下目标运动预测——一种基于高斯分布的求解方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1):176-185.
CI Yuanzhuo, TAN Yuejin, XU Yifan. Motion prediction geodetic coordinate systems: A solution based on Gaussian distribution [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(1):176-185.
- [14] 宋 元, 章新华, 许林周. 基于 UT 变换的传感器航迹数据无偏转换[J]. 数据采集与处理, 2009(24):111-114.
SONG Yuan, ZHANG Xinhua, XU Linzhou. Transform of sensor track data using unscented transformation[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009(24):111-114.
- [15] 翟 顺, 王卫红, 张 衍. 基于 SIM900A 的物联网短信报警系统[J]. 现代电子技术, 2012, 35(5):86-89.
ZHAI Shun, WANG Weihong, ZHANG Kan. IOT SMS alarm system based on SIM900A [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(5):86-89.
- [16] 陈新岗, 马志鹏, 李 山. 一种输电线路绝缘子闪络报警定位系统[J]. 电瓷避雷器, 2013(3):1-7.
CHEN Xingang, MA Zhipeng, LI Shan. One of the positioning alarm system for transmission line insulator flashover[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3):1-7.

黄会贤(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路运维、检修和管理、高压与绝缘技术研究。

陈新岗(1968—), 男, 教授, 现从事电气设备在线监测及过电压、信号采集与信号处理、智能传感器等方面的研究和教学工作。

(编辑 袁 妮)