

文章编号 1004-924X(2024)21-3200-11

输电铁塔基础根开与高程差自动检测系统

董世杰¹, 张爱华^{1*}, 夏严峰^{2*}, 方宇¹, 范狄庆¹, 张海峰¹

(1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620;

2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 鉴于输电铁塔的基础根开和高程差当前主要采用人工测量的方法, 难以保证测量的精度和效率, 基于激光检测提出的一种通过欧拉变换和误差补偿的自动测量系统。通过高精度电机驱动的二自由度转台, 使用单点激光对特定区域进行指定轨迹的扫描; 进而引入欧拉旋转变换建立测量模型, 基于最小二乘法拟合了标定实验得到的俯仰角误差, 并补偿到测量模型中; 利用激光测距、编码器与姿态传感器的反馈数据直接计算基础根开和高程差, 实现基础根开和高程差的高精度自动检测。最后, 组装装置样机进行室内对比实验并在输电铁塔基础现场进行验证。实验表明, 该装置使用方便, 测量结果与参考值相比, 根开的测量误差可控制在 $\pm 0.2\%$ 之内, 高程差的测量误差在 5 mm 以内, 测量数据与平均值的偏差可控制在 $\pm 0.15\%$ 以内。

关键词: 激光测量; 输电铁塔基础; 自动检测装置; 欧拉旋转变换; 基础根开; 高程差

中图分类号: TH721; TH711; TP23 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243221.3200

Automatic detection device and detection algorithm for transmission tower foundation

DONG Shijie¹, ZHANG Aihua^{1*}, XIA Yanfeng^{2*}, FANG Yu¹, FAN Diqing¹, ZHANG Haifeng¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science,
Shanghai 201620, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

* Corresponding author, E-mail: aihua100yi@163.com; 15800714608@126.com

Abstract: The measurement of foundation openings and tower-pile height differences is predominantly performed manually, which is time-consuming and prone to errors. This study presents an automated measurement method that combines Euler transformation with laser distance measurement to enhance both accuracy and efficiency. The proposed system employs a two-degree-of-freedom turntable, driven by a high-precision motor, and equipped with a single-point laser to scan designated areas along predefined trajectories. An Euler rotation transformation is utilized to establish the measurement model, which is further refined by compensating pitch angle errors obtained from horizontal rotation contour experiments using the least squares method. The integration of laser distance measurement, encoder feedback, and attitude sensor data enables precise calculations of foundation openings and tower-pile height differences. A prototype device was developed and validated through laboratory comparison tests and field experiments on transmis-

收稿日期: 2024-07-31; 修订日期: 2024-09-20.

基金项目: 上海市大型构件智能制造机器人技术协同创新中心开放基金资助项目 (No. ZXP20211101)

sion tower foundations. Results demonstrate that the device is user-friendly and highly accurate, with foundation opening measurement errors controlled within $\pm 0.2\%$, tower-pile height difference errors within 5 mm, and experimental group deviations from the average value maintained within $\pm 0.15\%$. This method significantly improves the precision and efficiency of foundation and tower-pile measurements, offering a robust solution for automated detection in practical engineering applications.

Key words: laser measurement; tower and foundation; automatic detection device; foundation opening; Euler rotation transformation; tower-pile height difference

1 引 言

输电铁塔是输电线路中十分重要的支撑结构,为避免铁塔发生倾斜,甚至出现开裂、倒塌的情况,输电铁塔基础桩的施工须满足设计精度要求。基础根开和高程差是输电铁塔基础的两个重要指标参数,这两个参数的准确测量对保证输电线路的安全有重要意义^[1-2]。目前,现场检测主要通过人工完成,借助工程尺、水平仪等测量工具,需要多人配合且测量流程相对复杂,需手动记录并计算根开和高程差,容易引入人为误差。随着电子信息设备的发展,智能化电网建设的需求日益增加^[3-5],能够实现基础根开与高程差自动检测装置对提升电力建设行业的自动化和智能化水平,以及电网建设的本质安全具有重要价值^[6-7]。

近年来,在长度、距离等几何量测量中,激光测距因精度高、抗干扰能力强的特点,得到了广泛的应用^[8-14]。然而,激光测距时,激光的自动扫描与目标定位是亟待解决的问题。许多研究者通过视觉的方式完成对激光的引导^[15]。张粤港等^[16]利用激光测距实现架空输电线弧垂的测量,王鹤等^[17]利用相机与平面约束方程建立了一种单点激光与相机的标定方法,高豆豆等^[18]提出一种面向激光跟踪测量的基于单目视觉的大范围全自动高精度姿态测量方法,李颖洁等^[19]利用图像识别对光斑位置进行反馈实现激光的自动瞄准。然而,视觉辅助的方法前期准备繁琐复杂,最终设备的准确性与可靠性依赖于视觉算法。同时,基于视觉的处理方法对硬件的要求较高,不利于提升设备的便携性。因此,研究人员借助辅助装置进行定位判断,刘姣月等^[20]利用光电位敏感探测器完成了激光的光电瞄准。基于激光传感器的光学特性设计辅助定位的方法,为辅助

装置设计提供了思路。

在根据激光检测数据计算根开和高程差时,设备通常要调节成水平状态,完全调平是很难实现的。ZHU 等^[21]采用双径光学成像的方法研发了一种光学校准设备来实现设备的高精度调平,但主要采用人工校准的方式,工序繁琐且费时费力。LI 等^[22]设计了一种液压伺服的大型调平平台,它具有良好的承载能力及调平精度,但不利于便携化设计。CUI 等^[23]利用姿态角假定虚拟平面调整着陆器的姿态,虚拟平面的建立保证设备的水平精度与便携式设计。

综上,本文基于激光测距技术,提出无需调平便携式输电铁塔基础根开和高程差自动检测装置与测量算法,通过设计二自由度转动平台,借助数学模型、坐标转换算法以及误差拟合补偿实现了高精度自动测量。

2 原 理

2.1 基础根开与高程差

输电铁塔的基础根开和高程差是决定铁塔基础质量的两个关键参数。以地脚螺栓式基础为例,基础根开是指相邻两个基础地脚螺栓几何中心的距离;高程差指的是各个基础顶面所在水平平面之间的高度差的最大值。基础根开和高程差直接关系到铁塔后续的稳定性,它影响着输电铁塔的整体垂直度和安全性,其定义如图 1 所示。图 1 中:ABCD 为各基础桩的编号,O 点为中心桩的位置,S 为基础根开值, $h_{\max}$ 为各顶面之间的最大高度差即为高程差。

根据《110kV-750kV 架空输电线路施工及验收规范》^[24]标准铁塔基础的要求如表 1 所示。从表 1 中可知,国家标准中基础根开的测量精度需达到

$\pm 0.2\%$ 以内,高程差的精度要到达 $\pm 5\text{ mm}$ 。

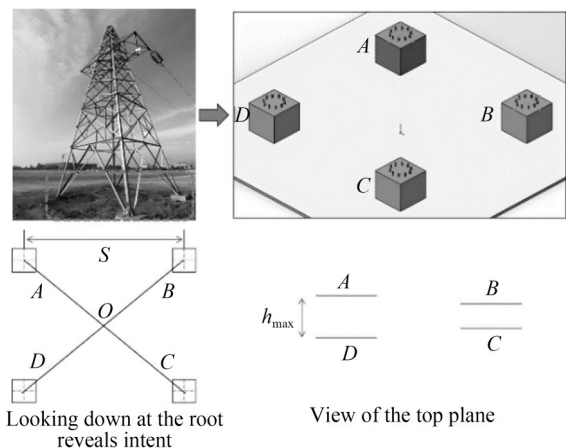


图 1 铁塔基础示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tower foundation

表 1 基础测量精度标准

Tab. 1 Standard of foundation measurement accuracy

项 目	地脚螺栓式
基础根开及对角线尺寸/%	± 0.2
基础顶面高程差/mm	5

2.2 测量模型

首先,基于笛卡尔坐标系原理建立两种坐标系,如图 2 所示。

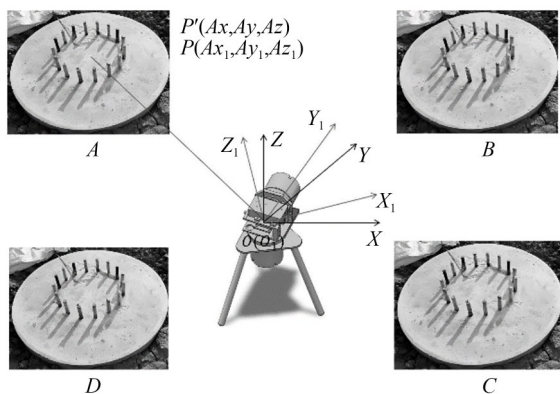


图 2 测量场景中的坐标系

Fig. 2 Coordinates in measurement scene

图 2 中, $P(X_1, Y_1, Z_1)$ 为设备坐标系, 是以设备两电机轴的交点与传感器安装板所在的平面为基础建立的坐标系; $P'(X, Y, Z)$ 为标准坐标系, 是与测量坐标系共原点的水平坐标系。

$P(Ax, Ay, Az)$ 与 $P'(Ax_1, Ay_1, Az_1)$ 坐标的前缀 A 为基础桩代号, 从 A 开始以顺时针的方向分别为基础桩 A 、基础桩 B 、基础桩 C 与基础桩 D 。

测量辅助装置用于引导激光定位。在设备坐标系中, 辅助装置的坐标为:

$$P = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L' \times \cos \theta_2 \times \cos \phi \\ L' \times \cos \theta_2 \times \sin \phi \\ L' \times \sin \theta_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: L' 为修正后的激光距离, ϕ 为水平转角, θ_2 为最终修正俯仰角。

基于坐标变换的原理, 通过姿态传感器建立欧拉旋转变换公式, 利用式 (2) 将测量坐标系中的坐标转换为标准坐标系下的坐标:

$$P' = BP, \quad (2)$$

式中: P' 大地坐标系下的坐标, B 为由优化后的欧拉旋转矩阵。

通过各个基础桩测量点在标准坐标系下的坐标值, 根据空间几何的坐标特性计算基础根开与高程差, 分别为:

$$S = \sqrt{(Ax - Bx)^2 + (Ay - By)^2}, \quad (3)$$

$$\Delta h = |Az - Bz|$$

式中: S 为根开值; x, y, z 为标准坐标系下的坐标; A 为基础桩代号; Δh 为高程差。

式 (2) 中用到了优化的欧拉旋转矩阵, 这里利用姿态传感器建立欧拉旋转矩阵:

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = T_1 T_2 T_3$$

式中: α 为姿态偏转角, β 为姿态俯仰角, γ 为姿态横滚角, A 为此时的欧拉变换矩阵。

为了简化计算, 水平转动上的变化已经由电机编码器的位置体现, 姿态传感器偏转角是水平方向变换的重复引入, 所以假设它为 0 不会影响

计算精度。将 A 优化得到:

$$B=\begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

(5)

3 检测系统与误差补偿

3.1 基础检测装置

输电铁塔基础检测装置通过高精度关节电机驱动,基于 PLC 的控制器承载测量控制算法、驱动电机运行,利用激光与编码器的反馈数据,结合姿态传感器计算基础的根开值与高程差。整体装置采用模块化结构,主要由测量传感、电机传动和安装支撑 3 部分组成。其中,测量传感模块主要包含激光测距仪、卫星定位模块与姿态传感器。通过激光传感器获取测量目标与标志物的直线距离,卫星定位获取当前设备的位置信息,姿态传感器得到测量坐标系与大地坐标系的姿态偏差。电机传动模块由电机、电机控制器及输出端编码器组成,用于驱动监测设备双轴转动,完成激光在空间内的扫描运动,利用输出端编码器得到实时的位置反馈值。安装支撑模块主要用于支撑激光、姿态等传感器,并将电机与测量传感部分连接起来。

输电铁塔自动检测装置的主体结构如图 3 所示。根据激光反射原理,不同材料对激光的反射光强度不同。以输电铁塔基础混凝土灌注桩为例,测量中不同材料的回光量如表 2 所示。由表 2 可以看出:利用反光材料设计辅助装置,通过激

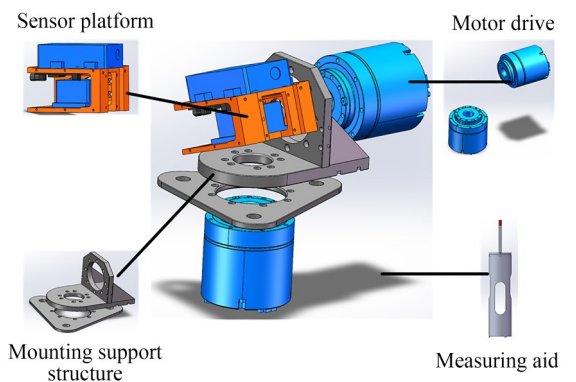


图 3 输电铁塔基础检测装置结构

Fig. 3 Structure diagram of transmission tower foundation detection devices

表 2 材料与其回光量

Tab. 2 Material and return light

材 料	回光量
混凝土	200
土壤	70
反光材料(绿)	2 500
反光材料(红)	2 700

光反射器读取光强信息作为驱动装置自动扫描的判定依据,能够实现自动检测。

考虑到 PLC 的稳定性与可靠性,方便易用,本文基于 PLC 设计输电铁塔基础测量装置的控制系統。传感器通过 RS485 与 PLC 进行通讯,控制系统与通讯连接如图 4 所示。

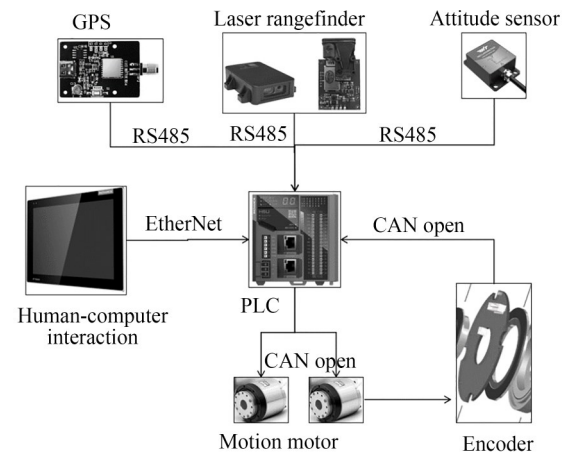


图 4 通讯拓扑图

Fig. 4 Communication topology

3.2 误差分析与补偿

3.2.1 误差分析

检测系统误差主要分为两部分:一部分来源于传感器,主要包括距离误差与角度误差,设备各传感器的精度如表 3 所示;另一部分来源于结构设计与安装所引起的误差。

传感器带来的误差主要体现在坐标计算过程中,以图 2 中 AB 两点之间的水平距离为例,其误差为:

$$d_1=\sqrt{2(D+\Delta D)^2-2(D+\Delta D)\cos(\omega+\Delta\omega)}$$
$$d_2=\sqrt{2D^2-2D\cos(\omega)}$$
$$\Delta S_{AB}=d_1-d_2$$

(6)

式中: d_1 为 AB 带传感器误差的计算距离, d_2 为

AB 距离的真实值, ΔS_{AB} 为计算距离的误差, D 为测量距离, ΔD 为激光测距仪的距离误差, $\Delta \omega$ 为编码器所产生的误差。若测量距离为 10 m, 通过式 (6) 可知距离最大误差为 ± 7 mm, 并且

该误差随着激光传感器精度的提高而降低。因此, 传感器误差并不是本系统的主要误差, 可通过多次测量求平均值的方式降低传感器误差。

表 3 传感器的精度参数

Tab. 3 Sensor accuracy parameters

传感器类型	传感器型号	测量参数	精度
激光测距仪	MyAntenna-L2s	距离	$\pm 1.5 \text{ mm} + D \times 0.05\%$
姿态传感器	HWT605	姿态角	$\pm 0.05^\circ$
关节电机	eRob70H	电机运动角	$\pm 0.004^\circ$

转台装配过程中产生的角度误差会较大幅度地影响转台精度, 在十米及其以上的长距离测量范围里造成的误差在厘米级, 因此, 结构误差在系统整体误差中占据较大的比重^[25]。本研究利用实验标定并基于最小二乘法拟合法来补偿结构误差。

3. 2. 2 误差补偿

结构误差为本研究系统中的主要误差。如图 5 所示, 激光设计时的偏移量 n 导致激光传感器的测量距离 L 不能表示坐标系原点到测量目标的距离。此外, 电机编码器的俯仰角 θ 也不能直接作为坐标计算的俯仰角 θ_1 , 需要将传感器获取的数据通过式 (7) 进行转换:

$$L_1 = \sqrt{n^2 + L^2}$$
$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{n^2 + L_1^2 - L^2}{2nL_1}\right) - \theta - 90^\circ, \quad (7)$$

式中: n 为激光在测量坐标系 Z 轴上距原点的偏距, L 为激光测量的距离, L_1 为待测目标至原点的距离, θ 为俯仰角, θ_1 为初次修正的俯仰转角。

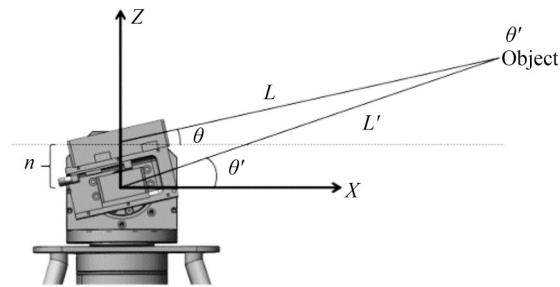


图 5 激光传感器的偏移

Fig. 5 Offset of laser sensor



图 6 回转标定实验

Fig. 6 Horizontal rotation contour experiment

实验步骤如下:

- (1) 设备架设时取三脚架安装板上等间距的点, 令它与地面的距离相等;
- (2) 水平电机驱动设备水平旋转, 每 15° 调节一次俯仰角度, 在等距的条件下使得光斑出现在同一高度上, 记录此时的俯仰角度, 数据如表 4 所示;
- (3) 将实验数据利用最小二乘法拟合并补偿到控制算法中。

从 15° 开始每隔 15° 测量一次俯仰偏差角, 直至水平测完一周, 结果如表 4 所示。

表 4 水平方位所对应的俯仰偏差

Tab. 4 Pitch deviation corresponding to horizontal (°)

水平方位	俯仰偏差	水平方位	俯仰偏差	水平方位	俯仰偏差	水平方位	俯仰偏差
15	0.11	105	1.25	195	1.77	285	0.41
30	0.28	120	1.45	210	1.61	300	0.22
45	0.50	135	1.60	225	1.41	315	0.08
60	0.72	150	1.80	240	1.18	330	0.02
75	0.87	165	1.88	255	0.88	345	0.01
90	1.05	180	1.87	270	0.64	360	0.01

最小二乘法可以将离散的数据拟合为连续的数据,既能够方便控制系统的输入又可以提高补偿算法的精度。它主要有以下几个步骤:

(1) 建立拟合函数模型:

$$f(x) = k_0 + k_1x + \dots + k_ix^i$$

$$f(x) = \sum_{i=0}^i k_ix^i \quad (8)$$

(2) 定义残差与残差向量:

$$\delta_i = f(x_i) - y_i$$

$$\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i) \quad (9)$$

式中: δ_i 为残差, δ 为残差向量, x 为表 3 中水平方位, y 为表中水平方位对应的俯仰偏差。

(3) 利用最小平方和求拟合函数:

$$\|\delta\|^2 = \sum_{i=0}^i (\delta_i^2) \quad (10)$$

当式(10)中残差的平方和取最小值时, $f(x)$ 即为最优的拟合曲线。图 7 为利用表 4 中实验测

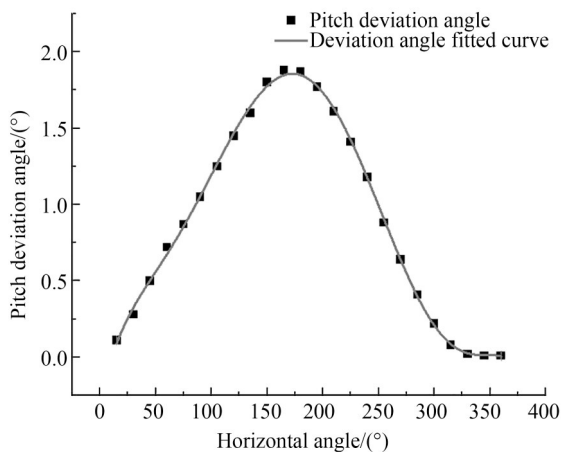


图 7 水平-俯仰偏差角与其拟合曲线

Fig. 7 Horizontal angle-pitch deviation angle and its fitting curve

得的离散数据的拟合曲线。

最终修正的俯仰角为:

$$\theta_2 = \theta_1 - f(x) \quad (11)$$

3.3 激光扫描控制策略

表 5 展示了控制逻辑的伪代码。

表 5 扫描运动逻辑控制

Tab. 5 Logic control of scanning motion

算法 1: 扫描运动逻辑控制

```

1 初始化参数
2 while True:
3  读取传感器数据 //俯仰电机位置,水平电机位置,
  激光测距仪 L, 光强反馈 Q
4  if mode == 1: // 粗扫模式
5    水平电机正向运动 80°, 速度 20
6  else if mode == 2: // 精扫模式
7    if perform_fine_scan_cycle(): //达成判定条
      件,记录数据并退出精扫模式
8    dataset.append()
9    pitch_encoder_position ← 0 //俯仰电机归零
10   mode ← 1 // 切换回粗扫模式
11  if horizontal_encoder_value > 360:
12    stop_all_motors() //停止所有运动并退出循环
13    Break
14def perform_fine_scan_cycle():
15  设置正向运动水平 10°,俯仰向上 0.5°,10 s 后负向
    水平运动 10°俯仰向上 0.5°
16  if  $L_{\min} < L < L_{\max}$ ,  $2500 < Q < 3100$  //检查是否满足
    条件
17    return True //条件满足,返回 True 以记录数据
18  else
19    负向运动并回到初始位置
20  return False //条件不满足,返回 False

```

3.4 人机交互的建立

人机交互界面主要由手动/自动界面组成。手动界面作为主界面如图 8 所示,分为以下 4 个区:

(1) 功能区按钮包括了上电时刻的姿态记录、设备急停、状态恢复、电机复位、结果记录等功能;

(2) 电机的位置读取与输入区可以实时显示此时两电机的位置,也可以对电机下达下一步的

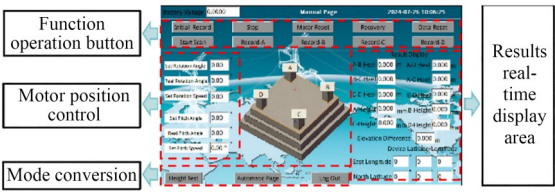


图8 人机交互手动界面-主界面

Fig. 8 Manual interface-main interface for human-computer interaction

位置命令；

(3)模式转换区主要是手/自动功能及各种测试模式之间的转换；

(4)结果显示区,该区域显示的实验测量结果包括根开值、最大高程差、设备此时的经纬度等。

手动操作时,只需要按下激光巡位按钮在设定角度框中输入所需角度即可完成激光控制。

自动测量界面如图9所示。点击自动页面时由主页面切换至自动页面,此时会跳出距离阈值的输入弹窗,设置好距离阈值后点击开始扫描按钮即可自动测量。

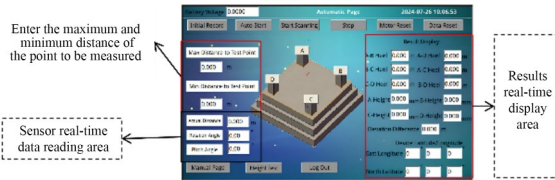


图9 自动界面

Fig. 9 Automatic interface

4 实验及结果分析

4.1 对比实验

在实验室内模拟现场测量并采用传统的人工测量方式进行对比实验。采用一款国标高精度的标尺作为测量标准,标尺刻度精度为 $\pm 0.7\text{ mm}$ 。图10(a)为实验室内模拟的现场测量环境,图10(b)为人工使用工程尺测量的方式。根据模拟实验,将10次测量数据绘制为图11。

从图11可以看出,相较于人工测量数据,圆点所表示的设备测量数据的平均值与标尺示数更接近,离散程度更小。



(a) 自动测量 (b) 人工测量
(a) Automatic measurement (b) Manual measurement

图10 设备测量与人工测量对比实验

Fig. 10 Comparison test between equipment measurement and manual measurement

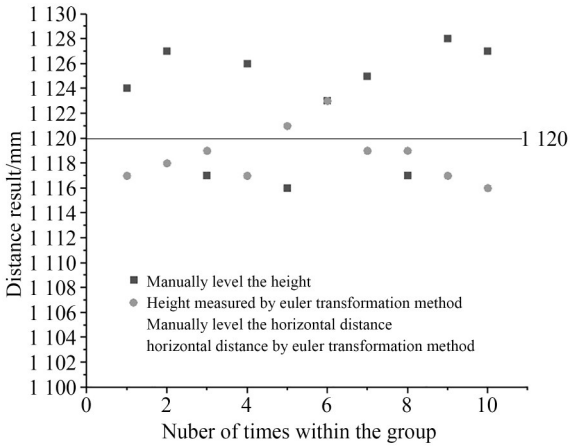


图11 实验测量结果对比

Fig. 11 Comparison of test results

4.2 铁塔基础现场实验

如图12所示,本次选取上海某地架设的220 kV输电铁塔基础的施工现场作为实验场地。以现场方形阵列的四基础桩作为实验对象,如图12(a)所示,将测量设备放置于中心桩的位置,使得各个基础桩与设备连线的夹角大约为 90° 。搭建步骤如下:

(1)由于现场并无实际的中心桩,所以将测量设备架设于两组对角桩连线的交点处,如图12(b)所示;

(2)设备架设好后,根据基础根开值的测量要求在各个基础桩上放置辅助测量装置。

(3)根据现场实际情况估计合理距离阈值,现场基础根开值的设计值约为10 m,从而得到各基础桩到测量设备的距离约为7 m,故将 $L_{\min}$ 设为6 m, $L_{\max}$ 设为8 m作为判断条件。

现场实测数据如表6所示,参考值(真值)为现场技术团队通过一台精度为 $\pm 2\text{ mm} + D \times 2 \times$

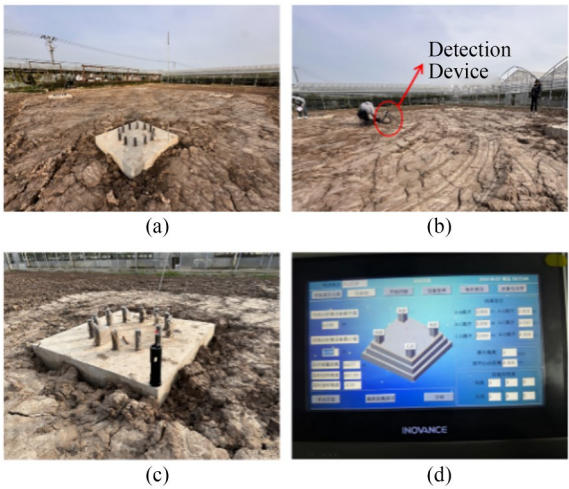


图 12 铁塔基础现场测试
Fig. 12 Tower foundation field test

表 6 现场测试数据

Tab. 6 Field test data

数据	现场参考值(真值)	人工测量	实际测量
AB/m	10.487	10.490	10.486
BC/m	10.500	10.510	10.494
CD/m	10.481	10.485	10.478
DA/m	10.475	10.482	10.469
高差/mm	22	29	25

10^{-6} 的全站仪测出,人工测量由现场技术人员测量给出,实际测量值为研究设备的测量结果。相较于现场技术人员给出的测量结果,本设备的测量结果更接近参考值。其中,AB 为 A 桩与 B 桩之间的根开值。

由于测量结果不稳定,采用式(12)来验证本检测设备的一致性。

$$\varepsilon = \frac{nS - \sum_{i=0}^n S_i}{\sum_{i=0}^n S_i}, \quad (12)$$

式中: S 为实测根开值, S_i 为该组内根开值。

当式(13)成立时符合检测设备对一致性的要求。利用实验中各根开值绘制散点图,均差范围如图 13 所示。

$$|\varepsilon| \leq S_{\text{测量均值}} \times 0.15\%. \quad (13)$$

由图 13 可以看出,各基础根开与其平均值的差值均在 $\pm 0.15\%$ 以内。

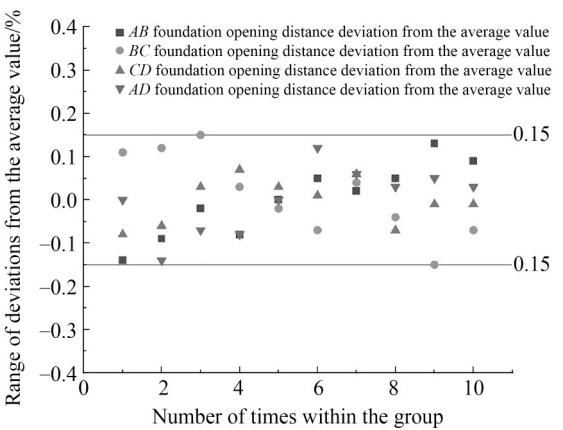


图 13 基础根开均差分布
Fig. 13 Distribution of foundation opening difference

在实际输电铁塔的基础测量标准中,准确性要求为 $\pm 0.2\%$ 则需要满足式(14),现场测试结果如图 14 所示。

$$\eta = \frac{S - S_{\text{true}}}{S_{\text{true}}}, \quad (14)$$
$$|\eta| \leq S_{\text{true}} \times 0.2\%$$

式中: S_{true} 为测量值所对应根开值的真实值, η 为误差与真实值的比值。

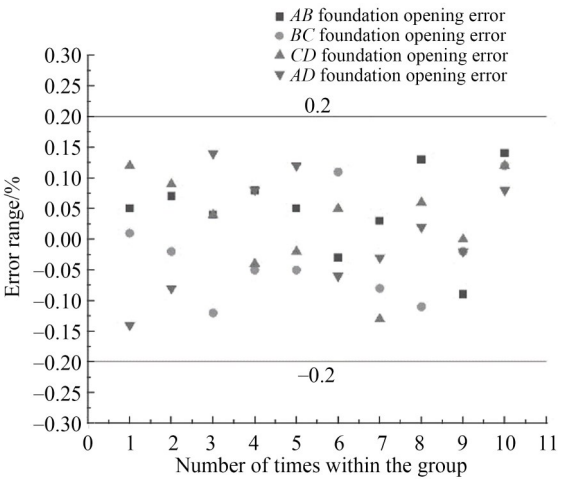


图 14 基础根开误差分布
Fig. 14 Error distribution of foundation opening

由图 14 可以看出,各基础桩根开值的误差均在 $\pm 0.2\%$ 以内。

根据测量标准与现场实际情况划定高程差最大不可超过 27 mm,最小不可低于 17 mm,如图 15 所示,10 组高差数据中均符合要求。

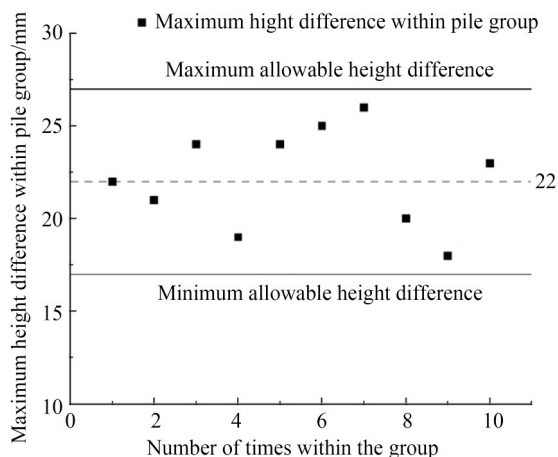


图 15 基础最大高差

Fig. 15 Maximum tower-pile height difference

4.3 结果分析与讨论

现场实验展示该设备的一致性达到 $\pm 0.15\%$; 各组数据与真实值的偏差在 $\pm 0.2\%$ 之间, 最大高差与参考值的差均在 ± 5 mm 以内, 符合标准要求。本设备仅需一人操作测量, 减少

了传统手动测量所需的劳动力。

5 结 论

本文提出了一种输电铁塔基础检测的装置与控制系统, 通过人机交互设计与便携式的测量设备, 将传统多人配合完成的测量缩减至仅需一人, 减少了劳动力的需求。利用激光测距仪, 借助二自由度转台驱动, 采用 PLC 作为控制核心并设计控制程序, 设计高效的控制逻辑, 在保证精度的基础上解决了激光测距仪无法定位目标点的问题。通过最小二乘法将实验测得的离散安装误差拟合为连续误差补偿至测量模型中, 并通过姿态传感器利用欧拉旋转进一步修正水平数据。现场实验结果显示, 设备多次测量结果的一致性达到 $\pm 0.15\%$, 基础根开测量精度达到了 $\pm 0.2\%$, 高程差精度在 5 mm 以内, 提高了测量精度。后续将针对适用范围更广且更高效的激光定位技术开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨自岗, 冀宏领. 220kV 架空输电线路杆塔倾斜的原因分析及处理[J]. 中国电力, 2016, 49(S1): 40-43.
YANG Z G, JI H L. Cause analysis and treatment of tower inclination of 220kV overhead transmission line[J]. *Electric Power*, 2016, 49(S1): 40-43. (in Chinese)
- [2] 朱凌, 陈涛威, 周晨, 等. 考虑风速风向联合分布的大风灾害下电力断线倒塔概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 115-122.
ZHU L, CHEN T W, ZHOU C, *et al.* Probability prediction of transmission line breakage and tower topple over under wind disaster considering the joint distribution of wind speed and wind direction [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 115-122. (in Chinese)
- [3] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高压技术, 2023, 49(5): 1765-1778.
SHENG G H, QIAN Y, LUO L G, *et al.* Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 1765-1778. (in Chinese)
- [4] 李锋, 王莹, 周良松, 等. 基于 PSASP 的电网智能仿真工具设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 132-139.
LI F, WANG Y, ZHOU L S, *et al.* Design and implementation of a power grid intelligent simulation tool based on PSASP [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 132-139. (in Chinese)
- [5] FAHEEM M, SHAH S B H, BUTT R A, *et al.* Smart grid communication and information technologies in the perspective of industry 4.0: opportunities and challenges [J]. *Computer Science Review*, 2018, 30: 1-30.
- [6] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Z P, LIN Y F, WANG T, *et al.* Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 10-20. (in Chinese)
- [7] TIWARI A, PINDORIYA N M. Automated demand response in smart distribution grid: a review on metering infrastructure, communication technolo-

- gy and optimization models[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 206: 107835.
- [8] SHENDRYK I, BROICH M, TULBURE M G, *et al.* Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 69-83.
- [9] BUDZYN G, RZEPKA J, KALUZA P. Laser interferometer based instrument for 3D dynamic measurements of CNC machines geometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106594.
- [10] 赵家豪, 杨帅, 杨铮, 等. 激光共焦干涉面形快速高精度自动测量[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(9): 1320-1329.
- ZHAO J H, YANG S H, YANG Z H, *et al.* Laser confocal interference surface rapid and high-precision automatic measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1320-1329. (in Chinese)
- [11] WYSE S V, HULME P E, ETHERINGTON T R. Combining laser rangefinder and viewshed technologies to improve ground surveys of invasive tree distributions[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(3): 734-742.
- [12] KIM J, CHUNG W. Localization of a mobile robot using a laser range finder in a glass-walled environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3616-3627.
- [13] CAVEDO F, NORGIA M, PESATORI A, *et al.* Steel pipe measurement system based on laser rangefinder[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(6): 1472-1477.
- [14] MA D H, WU J N, LIU T, *et al.* Deformation analysis of the flexspline of harmonic drive gears considering the driving speed effect using laser sensors[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(8): 1175-1187.
- [15] RAKHMATULIN I, RISBRIDGER D, CARTER R M, *et al.* A review of automation of laser optics alignment with a focus on machine learning applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 173: 107923.
- [16] ZHANG Y G, FANG Y, ZHOU X F, *et al.* Sag measurement method of wind-induced vibration for uniced overhead power line via laser rangefinder and angle monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2024, 73: 3334362.
- [17] 王鹤, 李泽明. 激光测距仪与相机信息融合过程中位姿标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(4): 0413002.
- WANG H, LI Z M. Calibration method of laser range finder and camera in information fusion process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0413002. (in Chinese)
- [18] 高豆豆, 董登峰, 邱启帆, 等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 976-986.
- GAO D D, DONG D F, QIU Q F, *et al.* Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(7): 976-986. (in Chinese)
- [19] 李颖洁, 陈铭, 陈黎, 等. 激光聚变实验中诊断设备反馈控制瞄准技术[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(10): 2147-2154.
- LI Y J, CHEN M, CHEN L, *et al.* A feedback control aiming technique of the diagnostic equipments in the inertial confinement fusion experiments[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(10): 2147-2154. (in Chinese)
- [20] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1558-1564.
- LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.* Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [21] ZHU L J, ZHU Y X, LIANG Q, *et al.* A novel Dual-Path optical coincidence imaging method for measurement of difference of Leveling-Staff-Zero-Error[J]. *Measurement*, 2024, 229: 114408.
- [22] LI L, CHEN H X, JIN R, *et al.* Independent metering-based leveling system with multi-actuator for energy saving: modeling, control, and application on large-size forming equipment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 302: 118119.
- [23] CUI P Y, ZHANG C Y, LIANG Z X. Optimal attitude control for landing on asteroid with a flexible lander[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 149: 109149.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范: GB 50233—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction and acceptance of 110 kV-750 kV over-

- head transmission line: GB 50233—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [25] 王福全, 王珏, 谢志江, 等. 精密转台角分度误差补偿[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2165-2172.

WANG F Q, WANG J, XIE ZH J, *et al.* Compensation of angular indexing error for precision turntable[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2165-2172. (in Chinese)

作者简介:



董世杰(1999—),男,山东济南人,硕士研究生,2022年于上海工程技术大学获得学士学位,主要从事控制系统的研究。E-mail: shijied123@163.com

通讯作者:



张爱华(1986—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,2014年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事智能装备及其控制系统,分布式控制、智能体运动控制等研究。E-mail: aihua100yi@163.com