

三维激光点云支持下的变电站立柱倾斜变形监测

吴金波¹, 张晓春¹, 胡伟飞², 陈俊涛¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 国网浙江省电力有限公司紧水滩水力发电厂, 浙江 丽水 323000)

摘要: 水利工程中常用立柱支撑上部结构, 为保证上部结构稳定, 需监测立柱变形, 确保立柱倾斜角度在允许范围内。通过全站扫描仪的波形数字化测距技术进行非接触式测量, 采集高精度点云数据, 采集过程中通过后方交会法计算各观测站的三维坐标, 将观测数据统一到一个坐标系统中, 无需数据配准, 避免了观测误差的传递。提出利用点云的立柱倾斜形变算法, 采集两期点云数据后基于真配对点计算形变量, 并通过点面优化算法减少误差, 计算得到立柱的倾斜角度。为验证形变算法的精度, 设计了仿真试验模拟立柱倾斜变形。试验结果发现, 实际倾斜角为 $0^{\circ}16'49''$, 计算倾斜角为 $0^{\circ}16'57''$, 算法误差小于 $20''$, 满足高耸结构的变形监测要求。所提形变算法可应用于立柱倾斜变形监测领域。

关键词: 全站扫描仪; 点云处理; 后方交会法; 孤立点云选取; 倾斜变形

中图分类号: TV315; [P258]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0150-04

1 引言

由于变电站地基的地质构造和物理性质不均匀, 大气温度和地下水位的季节性变化, 建筑物结构及动荷载作用, 致使承载高压输电线路设备中的立柱存在严重不均匀沉降, 以致各立柱顶端不在同一水平面内, 从而导致开关系统不闭合, 甚至出现电力线绷断, 引起整条输电线路故障。同时, 立柱还存在不同程度倾斜, 严重影响输电设施安全^[1]。因此, 为保证变电站电气设备稳定运行, 需监测承载输电线路立柱的倾斜变形。常见的立柱倾斜变形监测方法包括角度传感器法、力学模型法等。盛春陵等^[2]使用角度传感器测量立柱的倾斜角度, 通过传感器反馈的数据监测倾斜角度; 张浩等^[3]基于三参数地基模型, 建立了边载作用下桥梁桩基—立柱的受力响应控制方程, 并通过桩柱离散和矩阵传递法求得各节点处的形变量。本文在现有研究基础上通过设计仿真试验模拟立柱的倾斜变形, 提出利用三维激光点云计算立柱的倾斜形变量, 并验证其精度。

2 研究方法

先利用全站扫描仪获取变形前后的点云数据, 获取的初始点云中可能存在噪声点干扰, 需预处理点云数据, 去除离群点和浮游噪声点。然后通过改进后的 Hausdorff 距离计算公式选择真配对点, 并在真配对点的基础上运用点面距离计算形变量, 输出形变结果。具体技术路线见图 1。

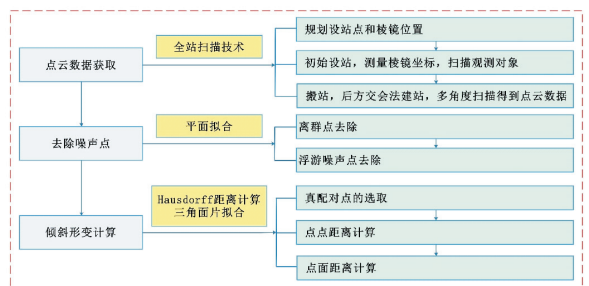


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology road map

2.1 点云数据获取及预处理

全站扫描仪主要运用全站仪“后视点+测站点”的定点设站方式, 基于后方交会法实现点云数据获取, 因此全站扫描仪获取点云数据无需进行

收稿日期: 2022-05-17, 修回日期: 2022-06-18

基金项目: 国网浙江省电力有限公司集体企业科技项目(B2021001); 武汉大学国家大学生创新创业训练计划(S202020603)

作者简介: 吴金波(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工建筑变形监测, E-mail: wujinbo0305@whu.edu.cn

通讯作者: 张晓春(1979-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为全站扫描仪点云数据处理及水工建筑变形监测, E-mail: xc Zhang@whu.edu.cn

配准。展开点云扫描前应围绕扫描目标规划好测站点和棱镜的数量及位置。因需要获取两期点云数据来计算形变量,且需保证两期点云坐标系一致,所以两期点云扫描时的测站点和棱镜位置也应保持不变。

初始点云数据由于仪器误差、扫描区域过大、边缘效应等原因会产生噪声点,影响后续点云形变计算。所以,本文针对离群点和浮游噪声点设计了去噪算法进行去噪预处理,消除噪声点的干扰。

首先,观察点云模型中的点云,通过人机交互方式,直接在点云模型中选中并删除可肉眼辨别的非目标点云噪声点。通过孤立点云的选取算法剔除偏离目标主体点云的离群点。孤立点云选取算法的原理是预先设定一个距离阈值 r 和最大选取点云数量 N ,然后由主体点云中的初始中心点向外搜索半径为 r 的范围,再以其搜索范围内的点作为下一次搜索的中心点进行半径为 r 的搜索,直至没有新的点可以被覆盖或点云数量已达到最大值 N 时停止。剩余点云作为浮游噪声点予以去除。

在初步去除非目标点和离群点后,运用基于投影的点云去噪算法,去除浮游噪声点。浮游噪声点是由于边缘效应、物体表面反射率差异等原因,使采集到的点云偏离物体真实面,浮游噪声点会导致点云模型重建时出现凸起或凹陷,形成不光滑连接。本文先将任一点 A 为中心的空间正方体定义为 A 的邻域,正方体边长为 $2r$ 。然后对邻域内点集进行平面、柱面或二次曲面的拟合计算,一般拟合函数可用最小二乘法计算求解。最后,将该点集中的点投影到拟合面上,设定偏移阈值,删除超出偏移阈值的点,符合偏移阈值的点将偏移至拟合面。为提高去噪精度,对初次拟合、投影后的点,重复上述过程,多次迭代投影,完成去噪。邻域内点坐标集合为:

$$\{P(x, y, z) \mid x_a - r \leq x \leq x_a + r, y_a - r \leq y \leq y_a + r, z_a - r \leq z \leq z_a + r\} \quad (1)$$

式中, P 为属于邻域内的点; (x_a, y_a, z_a) 为邻域中心 A 的坐标。

2.2 形变计算

先采用最邻近点算法选取真实配对点,然后基于点面距离优化法计算形变量。点云模型形变计算具体步骤如下。

步骤 1 基于点点距离的真配对点选取。为计算点云模型的形变量,先将点云视为大量点坐标的集合,通过两期点云中对应点的欧几里得距离得到单点形变量,欧几里得距离 D 的计算公式为:

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (2)$$

式中, (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 分别为第 1、2 期点云中对应点的三维坐标。

但第 2 期扫描的点云不一定包括第 1 期所有点,因此无法直接找出所有对应点,并很难通过欧几里得距离公式计算单点形变量。为考虑三维目标的整体形状,可使用 Hausdorff 距离计算两点集之间的距离^[4]。假设存在两组点集 $A = (a_1, a_2, \dots)$ 、 $B = (a_1, a_2, \dots)$, 则这两组点集之间的 Hausdorff 距离 D_H 为:

$$D_H = \max\{d_h(A, B), d_h(B, A)\} \quad (3)$$

式中, $d_h(A, B)$ 、 $d_h(B, A)$ 分别为 A 到 B 的单向 Hausdorff 距离、 B 到 A 的单向 Hausdorff 距离。

$d_h(A, B)$ 表示点集 A 中每一点到点集 B 的最小距离的最大值,可表示为:

$$d_h(A, B) = \max_{a \in A} \{ \min_{b \in B} \| a - b \| \} \quad (4)$$

$$d_h(B, A) = \max_{b \in B} \{ \min_{a \in A} \| a - b \| \} \quad (5)$$

式中, $\| \cdot \|$ 为点集 A 、 B 之间的距离范式,常用式(2)中的欧几里得距离。

Hausdorff 距离考虑了三维目标的整体形状,但由于最大值计算时,奇异点会影响 Hausdorff 距离计算,导致 Hausdorff 距离偏大。为此,修改距离计算方法。

本文通过选取真配对点的方式来获取一一对应点,如图 2 所示。即选择第 2 期点云中的任意

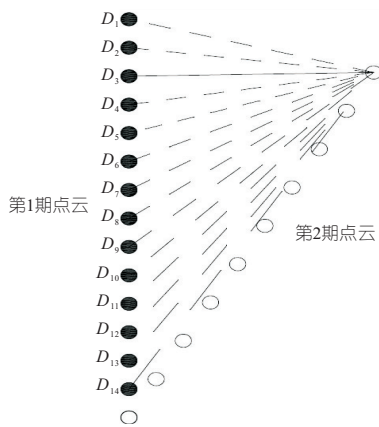


图 2 真配对点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of true pairing point

一点,与第 1 期点云中每一个点进行配对,计算欧几里得距离,选择最小距离(最邻近点)作为真配对点。然后遍历第 2 期的每一个点,完成所有真配对点的选取。如图 2 所示, D_3 为最小距离,所以 D_3 两端的点为真配对点,真配对点选取对应公式为:

$$D = \min\{D_1, D_2, D_3, \dots\} \quad (6)$$

步骤 2 基于点面距离优化法的形变量计算。在现实问题中,扫描观测目标的真实形变不会是单点的位移,而是由点控制的一个区域的连续形变,在区域中各点的位移相互关联,相对的实际数学模型中,最邻近点的欧几里德距离并不一定为点云模型的真实形变量,如图 3 所示,它们之间存在误差。需通过设计优化算法,将误差调整到允许范围。

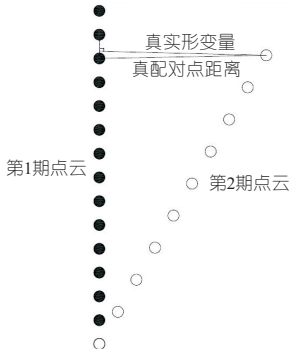


图 3 最邻近点距离和真实形变量比较
Fig. 3 Comparison of distance between nearest neighbors and true deformation

本文优化算法为对第 2 期点云中的任意一点 P ,选择其最邻近点后在最邻近点的几个相邻点间进行局部建模,拟合三角面片,计算点到三角面片的距离最小值。经多次试验选取不同数量的相邻点,当相邻点数量过少时,优化效果不显著,当相邻点数量过多,形变计算量大大增加,计算效率降低,本文模拟试验中点云数量接近 30×10^4 个,当相邻点数量选取为 7 时,无法完成计算,所以选择 6 个相邻点进行三角面片拟合。由点到点的距离改进为点到面的距离,以此替换最邻近点距离,见图 4。经优化后减少了误差,在统计上更加精

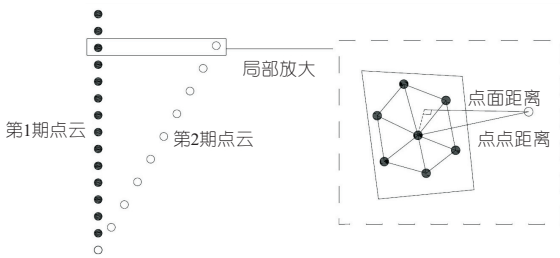


图 4 点点距离与点面距离的误差比较
Fig. 4 The error comparison between the distance between the dots and the distance between the dots and the surface

确。拟合三角面片的平面方程为:

$$A'x + B'y + C'z + D' = 0 \quad (7)$$

式中, A' 、 B' 、 C' 、 D' 均为常数; x 、 y 、 z 为平面上点的坐标。

点到平面的距离 d 的计算公式为:

$$d = |A'x_1 + B'y_1 + C'z_1 + D'| / \sqrt{A'^2 + B'^2 + C'^2} \quad (8)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 为平面外一点的坐标。

2.3 精度计算方法

本文基于两期点云的真配对点选取及优化算法来减少误差。影响试验精度的因素主要包括仪器自身的扫描精度及偏心误差 $\Delta_{\text{仪器}}$ 、三角面片建模误差 $\Delta_{\text{模}}$ 等,这些因素相互独立,则形变误差 Δ 为:

$$\Delta = \Delta_{\text{仪器}} + \Delta_{\text{模}} + \Delta_{\text{其他}} \quad (9)$$

但由于目前对模型重建的精度分析缺少统一评价标准,不能为重建模型提供较为准确的精度估计值,因此很难通过误差计算公式直接评价形变计算精度。本文通过设计试验(图 5)模拟立柱

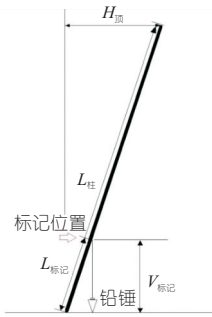


图 5 精度计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of precision calculation

的倾斜变形,在标记位置设置铅锤,选取精度远高于目标精度的千分尺获取标记位置的竖直高度 $V_{\text{标记}}$,同时测量标记位置到立柱底端的长度 $L_{\text{标记}}$,计算立柱的实际倾斜角 $\alpha_{\text{实际}}$,作为评价方法精度的形变真值。再依据本文提出算法得到立柱顶端水平形变量 $H_{\text{顶}}$ 和已知立柱长度 $L_{\text{柱}}$,计算倾斜角 $\alpha_{\text{算法}}$ 和计算误差,以验证该方法在变形监测中的可行性。 $\alpha_{\text{实际}}$ 、 $\alpha_{\text{算法}}$ (所需数据测量方法见图 5) 的计算公式为:

$$\alpha_{\text{实际}} = \cos^{-1}(V_{\text{标记}} / L_{\text{标记}}) \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{算法}} = \sin^{-1}(H_{\text{顶}} / L_{\text{柱}}) \quad (11)$$

$$\Delta = |\alpha_{\text{实际}} - \alpha_{\text{算法}}| \quad (12)$$

依据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)^[5],高度小于 20 m 的高耸结构基础的倾斜允许值为 0.008,对应倾斜角为 0.458° ,再结合《建筑变形测量规范》(JGJ8-2016)^[6],观测误差不应超过其变形允许值的 1/20,计算出算法精度要求其倾斜角度误差应小于 0.023° ,本文以此作为验证误差是否满足要求的标准。

3 结果与分析

基于 Leica MS50 全站扫描仪采集点云数据。MS50 采用波形数字化的测距原理,融合了传统相位法和脉冲法,同时具有相位法光斑小、精度

高、测量范围远的优点和脉冲法的快速测距优点。相较于传统方法,在确保测距精度的条件下,测量效率提高约 50%,测程可达 10 000 m。本文将设计仿真试验模拟立柱的倾斜变形,对比实际精确测量得到的倾斜角和算法计算得到的倾斜角,验证其精度。

3.1 试验方法

为验证算法精度,用连接固定底座的立柱进行模拟倾斜变形试验。首先将立柱竖直放置,在立柱模具上作一个清晰标记,用精度为 $1 \mu\text{m}$ 的千分尺精确测量标记位置至底座的距离,记为 $L_{\text{标记}}$ 。选择一个位置作为初始测站点安置全站扫描仪,进行对中整平。在目标周围设立棱镜作为后视点,选用“测量”模式采集棱镜的三维坐标。选用全站扫描仪“测量+”模式对目标进行三维激光扫描,扫描完毕后搬站。以后方交会法计算新站点的设站坐标,使得每一站都在同一坐标系下,再对目标进行三维激光扫描。多次搬站使得点云扫描范围包含目标的各个角度,则第 1 期扫描完成,得到相应目标点云数据。点云扫描示意图见图 6。

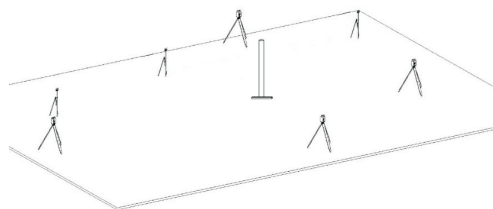


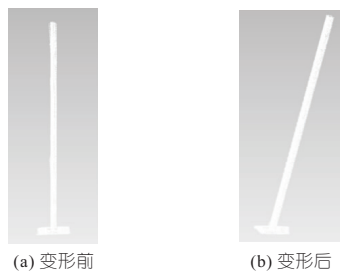
图 6 点云扫描示意图

Fig. 6 Point cloud scanning diagram

调整立柱使其小角度倾斜并保持倾斜状态,从标记位置放下一个铅锤,调整铅锤长度使铅锤尖端刚好触及地面,用千分尺测量此时的铅锤长度,记为 $V_{\text{标记}}$ 。然后重复设站扫描过程,得到第 2 期点云数据。根据提出的形变算法计算两期点云形变,然后依据式(10)、(11)、(12)计算 $\alpha_{\text{实际}}$ 、 $\alpha_{\text{算法}}$ 和形变误差 Δ 。

3.2 试验结果及精度分析

首先将试验采集到的点云数据进行去噪预处理,去除非目标点云、离群点和浮游噪声点,提高点云数据处理的速度和准确性,完成预处理后的点云模型见图 7。然后基于提出的利用三维激光点云的立柱倾斜形变算法计算倾斜角度和形变误差。试验测得的实际数据和所提算法得到的结果见表 1。由表 1 中倾斜角 $\alpha_{\text{实际}}$ 、 $\alpha_{\text{算法}}$ 可看出,利用三维激光点云的立柱倾斜形变算法计算得到的倾斜角与实际倾斜角之间误差小于 $20''$ ($\approx 0.0056^\circ$),小于最大允许倾斜角度误差 0.023° ,可见提出的利用三维激光点云的立柱倾斜形变算



(a) 变形前 (b) 变形后

图 7 试验点云模型

Fig. 7 Experimental point cloud model

表 1 试验结果分析表

Tab. 1 Test result analysis table

类别	直角边长度	斜边长度	倾斜角
实测数据	铅锤长度 $V_{\text{标记}} = 10.932 \text{ mm}$	$L_{\text{标记}} = 11.376 \text{ mm}$	$\alpha_{\text{实际}} = 0^\circ 16' 49''$
计算数据	形变量 $H_{\text{顶}} = 557.631 \text{ mm}$	$L_{\text{桩}} = 2\,000.000 \text{ mm}$	$\alpha_{\text{算法}} = 0^\circ 16' 57''$

法精度满足要求。试验结果表明,所提出的搜索真配对点,将点面之间的最小距离作为形变计算结果的方法,具有较高的计算精度。

4 结论

a. 传统变形监测只能采取单点测量,本文基于三维激光点云计算形变量,对去噪后的点云选取真配对点,利用点面距离优化形变计算方法。点云采集过程无需布设特征点,较好解决了高压设备和高耸结构无法贴反射片的问题。

b. 常规利用角度传感器测量立柱倾斜形变的方法需预先在立柱底面安装传感器,仅适用于施工建设阶段。本文提出的利用三维激光点云的立柱倾斜形变算法通过全站扫描仪获取立柱的三维点云数据,适用于施工和运行各个阶段,且能在无设计资料的场景使用,解决了力学模型方法的局限性。

c. 本文设计了倾斜变形仿真试验,模拟变电站的立柱倾斜变形,将计算倾斜角和实际倾斜角进行比较,误差为 $20''$ ($\approx 0.0056^\circ$),满足高耸建筑物的变形测量要求。

参考文献:

- [1] 夏传义,花向红,杨荣华,等. 变电站高压输电线路设备中的混凝土柱变形检测研究[C]//2005 现代工程测量技术发展与应用研讨交流会. 现代工程测量技术发展与应用研讨交流会论文集. 宁波:中国测绘学会, 2005:436-441.
- [2] 盛春陵,李仁民,王守超,等. 逆作法中立柱调垂方法探讨[J]. 岩石工程学报,2012,34(增刊):595-597.
- [3] 张浩,石名磊,郭院成,等. 边载作用下桥梁桩基—立柱的位移特征与受力分析[J]. 岩土力学,2017,38(9):2683-2692.

