

# 基于三维空间模型的特高压耐张塔 跳线间隙检测方法

罗望春<sup>1</sup>, 李庭坚<sup>1</sup>, 姜 诚<sup>1</sup>, 张兴华<sup>1</sup>, 李 翔<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司 超高压输电公司检修试验中心, 广州 510000;

2. 武汉大学, 武汉 430000)

**摘要:** 提出一种基于三维空间模型的特高压耐张塔跳线间隙检测方法研究; 利用三维激光扫描数据建立特高压耐张塔整体空间扫描模型, 并描述激光扫描建模的原理, 确定出待检测标的物的三维点云数据集; 通过预处理的方式去除点云数据检测系统内部噪声和环境噪声, 对点云数据集进行高斯平滑滤波、坐标转换和点云数据拼接, 并输出空间点云数据的文件集合; 获取的跳线检测测量结果中还有可能包含粗差、系统误差和偶然性误差, 利用检测数据分析前必须消除各种误差因素的影响; 实验数据表明, 提出方法的坐标检测精度值能够控制在 $\pm 1^\circ$ , 并且总体的检测残差分布也位于合理的区间范围之内, 实际检测效果优于传统检测方法。

**关键词:** 三维空间模型; 耐张塔跳线; 间隙; 坐标转换

## Gap Detection Method for Jumper of UHV Tension Tower Based on Three-dimensional Space Model

Luo Wangchun<sup>1</sup>, Li Tingjian<sup>1</sup>, Jiang Cheng<sup>1</sup>, Zhang Xinghua<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>2</sup>

(1. China Souther Grid Corp EHV Transmission Companies Test Center, Guangzhou 223003, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** A new method for detecting jumper clearance of UHV tension tower based on three-dimensional space model is proposed. The overall spatial scanning model of UHV tensile tower is established by using 3D laser scanning data, and the principle of laser scanning modeling is described. The internal noise and environmental noise of the point cloud data detection system are removed by pre-processing, and the point cloud data set is carried out. Gauss smoothing filter, coordinate transformation and point cloud data mosaic, and output the file set of spatial point cloud data; the measured results of jumper detection may also contain gross errors, systematic errors and accidental errors, so the influence of various error factors must be eliminated before using detection data analysis. The experimental data show that the coordinate detection accuracy of the proposed method can be controlled at  $\pm 1^\circ$ , and the overall distribution of detection residuals is within a reasonable range. The actual detection effect is better than the traditional detection method.

**Keywords:** three-dimensional space model; tension tower jumper; clearance; coordinate transformation

## 0 引言

目前, 超过 1 000 kV 的超高压输电网络已经成为了我国国家电网的主干网络框架<sup>[1-2]</sup>, 个别电力网络的输电电压甚至超过了 3 000 kV。超高压输电能够满足我国企业和居民日益增长的用电需求, 电网总体运行的稳定性更高, 电力输送的容量更大, 同时也能够保持较低的电网检修率<sup>[3]</sup>。超高压耐张塔的跳线设计<sup>[4-5]</sup>是电力网络电气结构设计核心部分之一, 也是耐张塔网络布线中最复杂的关键工作, 电网中常用的单柱组合式耐张塔的跳线连接大都采用软性连接的方式, 多点固定于塔身的绝缘子串并将跳线水平引出。在雨雪和强风的作用下耐张塔的绝缘子串和跳线会发生倾

斜和偏移, 减小了跳线之间的间隙进而产生风偏放电的现象<sup>[6-7]</sup>, 最终影响电力网络供电的安全性。因此检测超高压耐张塔跳线之间的现有间隙是否合理, 成为保证电力网络安全工作的重要内容之一。由于部分耐张塔位置、塔型及线路布置的特殊性, 为了保证高空带电作业的安全性间隙检测方式的选择至关重要。文献 [8] 提出一种基于悬垂绝缘子串测量的最大跳线间隙测量方法, 但该种检测的方法的准确率较低且存在一定的风险性; 文献 [9] 提出基于超声波检测的方法, 这种方法易受到外界环境的影响, 实际操作难度也较大。为此本文设计了一种基于三维空间模型的耐张塔跳线间隙检测方法, 利用三维激光扫描的方式准确判断跳线间隙是否处理合理的空间之内, 提高检测的安全性。

## 1 基于三维空间模型的跳线间隙检测方法研究

为保证对耐张塔跳线间隙检测的安全性, 远距离非接

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-04-09。

作者简介: 罗望春(1987-), 男, 湖北天门人, 工程师, 主要从事输电线路直升机作业技术应用方向的研究。

触检测是首选的方式，而以全站仪、水平测量仪、和超声波为主体的传统远距离非接触检测方法，都是一种单点的局部测量，无法在一个平面空间内获得连续的可靠跳线间隙数据。而本文三维空间模型的建立是基于三维激光扫描技术，通过激光束的扫描提取出跳线的三维空间坐标数据，进而准确获得扫描标的物的三维空间坐标，并测量出跳线之间的间隙是否在合理、可控的范围之内。

### 1.1 三维空间特高压耐张塔整体测量模型的建立

基于三维激光扫描的特高压耐张塔跳线距离测量方式，是一种远程非接触的主动间隙测量方式，三维空间测量系统主要由 CCD 相机、三维激光扫描仪、数据处理芯片、数据存储系统等组成。在扫描测量的过程中，有三维激光扫描仪向远端的跳线位置发生激光束，其中扫描的角度和激光束的宽度和波形都可以自由调整，从远端扫描可以覆盖整个耐张塔跳线位置全部区域。三维空间特高压耐张塔整体测量模型图像如图 1 所示。

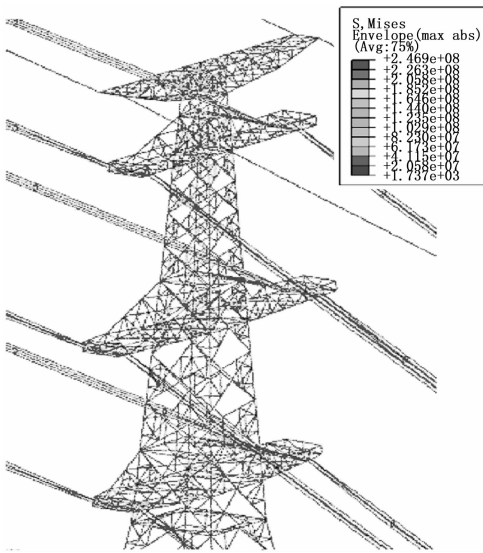


图 1 特高压耐张塔整体测量三维模型

激光扫描仪和 CCD 相机能够接收到耐张塔上载有跳线空间位置信息的激光回拨信息，进而判断出一组或多组跳线之间的距离是否位于合理的区间之内。激光束照射到跳线后会发生漫反射，其中一部光束会按照原有光束的方向对象返回被激光器接收，这些激光回波内含有被检测跳线的空间位置坐标信息，判断坐标的空间位置信息就能够计算出跳线间的距离。激光器发出的光束波长较短，基于相位差的测量方式的精度要高于脉冲测量的方式，如果激光束调制波长的频率越高，测量的精度也会更高。本文基于激光三角法建立三维激光测量模型，激光束照射到耐张塔跳线后会发生形变，激光扫描装置中的 CCD 相机会记录激光束发生形变的位置及位置的空间坐标，并利用空间内测量点的平面三角关系，判断出耐张塔跳线之间的准确距离，三维激光束测量跳线间隙的基本原理图，如图 2 所示。

其中发射光束与基线的夹角为  $\beta$ 、发射光束的旋转角度

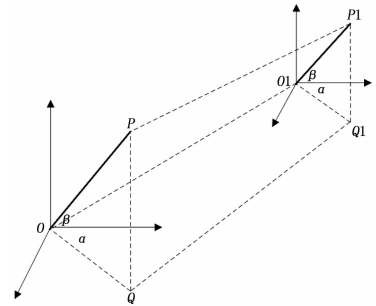


图 2 三维空间扫描原理图

为  $\alpha$ ， $OP$  的长度为  $l$ ，可以计算出空间任一点  $P$  的坐标  $P(x, y, z)$  的坐标：

$$\begin{cases} x = \frac{\cos\beta\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)}l \\ y = \frac{\sin\beta\sin\alpha\cos\beta}{\cos(\alpha + \beta)}l \\ z = \frac{\sin\alpha\sin\beta\cos\beta}{\cos(\alpha + \beta)}l \end{cases} \quad (1)$$

经过三维激光束扫描得到了耐张塔跳线上点的空间坐标，与大地坐标呈现出空间上的对应关系。其中点  $O_1$  到  $P_1$  间的直线距离为  $l'$ ，这时跳线上任一点的空间坐标  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  可以表示为：

$$\begin{cases} x_1 = \sin\beta\cos\alpha l' \\ y_1 = \cos\alpha\sin\alpha l' \\ z_1 = \sin\beta l' \end{cases} \quad (2)$$

提取的耐张塔跳线点云数据集合的夹角  $\beta$ 、旋转角  $\alpha$  的变化方向与原始的大地坐标系一致，仅是在空间的位置和距离上不一致，因此可以实现两个坐标系在空间相对位置上的转变和参数修正。

### 1.2 三维空间点云数据的预处理

由于非接触的跳线间隙检测距离较远，因此基于三维空间模型的跳线间隙检测方式易受到外界环境噪声因素的干扰，降低了总体测量的准确性。为保证测量的准确性，提取到跳线空间位置的点云数据集合后，需要对含有噪声因素的点云数据集合进行降噪、配准、拼接等预处理工作，激光位置点云集合的降噪是预处理过程的核心环节，噪声的过滤需要采用多种过滤方式相结合的方法，具体的噪声过滤方式包括离群过滤、统计过滤、角度过滤和平滑过滤。离群噪声过滤可以滤除所有点云数据点中偏离值较大的数据点，这些激光数据点的坐标值不符合耐张塔跳线检测的基本要求，会产生较大的干扰性，增加数据的扫描误差。标准的耐张塔跳线空间坐标都位于一个固定的阈值范围内，如果提取的点云数据集合中存在个别数据点的  $x$ 、 $y$  和  $z$  值超过了合理的阈值范围，离群过滤就能够首先剔除这些干扰的空间数据点。预处理激光点云跳线图像如图 3 所示。

统计过滤能够改善提取到的激光点云数据集合密度不均的问题，跳线点云数据集合密度过高或密度不均都会影响到最终的测量精度。点云集合的密度标准以全部数据的平均值为基准，并依据跳线激光点云集合的正太分布规律

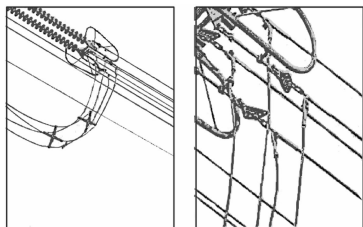


图 3 预处理激光点云跳线图像

对密度进行全范围的动态调整。同样激光扫描时的系统噪声和环境噪声也会导致测量的角度发生一定程度的偏差, 对激光束角度偏差的调整也可以提高总体上的跳线测量精度。数据平滑过滤是处理脱离群噪点、角度偏差和密度偏差后, 对跳线点云数据集合的综合处理, 点云数据的平滑处理采取中值滤波与高斯滤波相结合的方式, 提高激光点云数据集合空间排列的平滑度和均衡度。跳线数据点集合的均值有时会受到集合内异常数据的干扰, 而经平滑滤波处理后可以降低这种对于总体点云数据的不利影响, 是点云数据集合的分布更为均衡, 降低测量误差提高跳线间隙的检测精度。高斯滤波方式以点云数据点的中值滤波为基础, 抽取点云数据集合中的全部奇数点, 以奇数点为中值重新排序, 进而删除差别过大的数据点, 高斯平滑滤波的效果如图 4 所示。

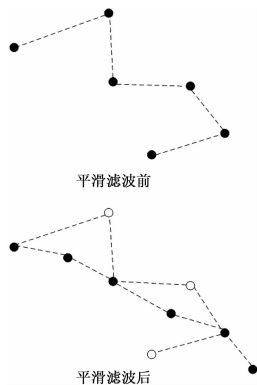


图 4 高斯平滑滤波效果示意图

经高斯滤波平滑处理后, 点云数据集合中的异常数据点被提出, 减少了对耐张塔跳线空间距离检测的营销, 高斯平滑滤波在去噪同时还云数据集合的空间位置坐标做加权平均处理, 是点云集合内的空间位置坐标分布更为均匀, 数据点空间位置状态越好, 对于跳线检测测量的准确性就越高。提取点云数据集合后为了获取更为完整的跳线间隙值, 需要对多个点云集合进行有机拼接, 提高间隙测量的精度, 此外多站测量与拼接的方式还有助于提高总体空间位置坐标集合的完整性。激光点云数据集合的拼接主要依靠点云坐标转换, 能够提高后续数据分析的精度和跳线间隙检测的精度。在坐标系的坐标值转换中, 将原有点云数据中的多个靶标重叠, 并重新平衡  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的数值, 以参考面和基础方向为基准进行距离的转换和角度的转换, 转换模型如下所示:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + \tau) H(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $[x, y, z]$  原始的大地坐标系,  $[x_i, y_i, z_i]$  为耐张塔待测量跳线任一点的坐标集合,  $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]$  为坐标系的平移参数,  $\tau$  为坐标系的缩放参数,  $H(\theta)$  为系统选择矩阵, 激光点云数据集合的具体拼接历程如图 5 所示。

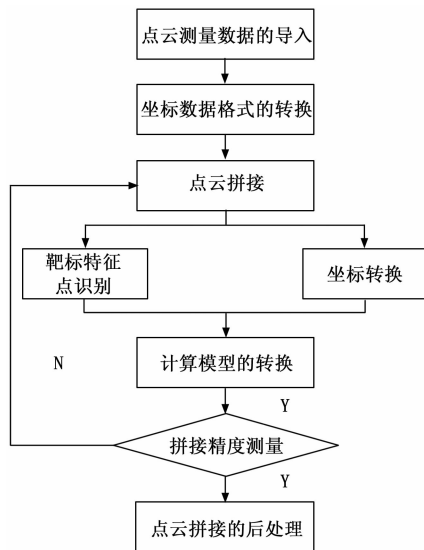


图 5 跳线数据点坐标集合的拼接流程

三维激光扫描仪使得获取点的效率极大提高, 可以快速采集百万的点云数据, 数据建模时, 不可能将所有点云全部利用, 大量的点云数据占用大量存储空间, 增大计算机的运行负荷, 使得运算效率降低。在逆向工程中提取能反应物体特征的点, 减少数据冗余, 能提高计算机的运算效率。点云数据的精简方法有许多种, 常用的方法包括小波变换方法、八叉树分解法等, 点云数据集合精简后能够提高数据的传输效率, 提高跳线间隙检测的总体效率。将去噪处理后的点云数据集合从预先设定好的软件中导出, 数据导出的格式主要包括开放矢量模式, 二进制模式, 其中开放型矢量模式的兼容性较好, 但占用了过大的存储空间; 而二进制模式的点云数据集合读取速度更快, 但兼容性略差于开放矢量模式。有时为了三维建模的需要, 耐张塔跳线间隙的三维点云数据集合还有必要转化为 DXF 文件格式, 在这种三维格式下的文件, 可以自由在二维平面空间和三维立体空间之间转换, 方便了点云数据文件的编辑和传递。在导出跳线的扫描点时, 再根据具体的需求设置点云数据的空间阈值范围, 以保证测量数据误差能够被控制在最小的范围之内。

### 1.3 跳线测量数据误差控制与间隙精准检测的实现

任何的跳线间隙检测手段都不能保持零误差, 基于激光束扫描的三维空间模型也不能始终控制在无误差的状态。测量数据通过仪器扫描提取数据, 即使将点云数据分析和预处理后系统误差依然存在。三维激光扫描器所提取数据信息包含有用的信息和误差信息两个方面, 测量误差按类

别区分可以分为粗差、系统误差和偶然性误差等几个类别,粗差是最容易被识别的误差,其误差的绝对值要明显大于系统性误差和偶然误差。这类误差通常是由人为操作原因或系统原因而导致的错误。对于这一类别的误差要首先予以剔除,因为这类误差的存在会直接导致耐张塔跳线测量数据的失真,消除这种人为或设备的误差后再去除系统误差或偶然性误差。系统性误差在概率上表现为一种大概率的事件,这与偶然性误差有本质的区别,系统误差是在多次测量的过程所累积误差总量,系统误差可以通过设备的维护或软件系统的更新升级而降低。在针对耐张塔跳线检测的行为,可以通过多次调整测量的角度,变换测量次序等方式降低系统误差的不利影响。

系统误差会随着设备使用时间的延长而增加,如果系统误差过高只能通过设备整体更新或主要模块更新的方式降低系统误差。偶然性误差与三维空间测量设备本身无关,主要是由于外界测量环境变化而导致系统误差的增加,因此控制偶然性误差特别要重视测量时的外界环境变化,大风和雨雪天气会提高偶然性误差发生的概率。偶然性测量误差没有具体的规律可寻,有时测量人员的设备使用习惯也会导致误差的增加,因此对于专业的耐张塔跳线间隙检测活动,还需要进行统一的专业化培训,以降低使用习惯不同而导致的偶然性误差的增加。耐张塔跳线测量数据的总体误差包括粗差、系统性误差和偶然性误差的总和,从整体的分布规律来看,误差的分布符合整体分布规律,当三维空间模型中的激光器扫描待检测跳线设备时,光束会向两侧发散,距离越远光束的发散量会越大,这是设备内部的机械结构与反光镜的之间同样会产生误差,误差项 $\sigma$ 可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (\tau \times l)^2} \quad (4)$$

其中: $\sigma_0$ 为固定的误差项,同样在激光束扫描中扫描的角度也会出现误差,误差角度 $\beta'$ 的正切值可以表示为:

$$\tan \beta' = \frac{1}{2l} \quad (5)$$

尽管误差角度 $\beta'$ 的值很小,但也会影响到耐张塔跳线间隙测量的准确性。尽管误差不会对测量数值产生致命性的影响,但误差越小对于间隙范围的控制就会越准确,发生放电现象的风险也就会越低。除了粗差之外系统误差和偶然性测量误差都无法从本质上消除,但可以控制在一个较低的范围之内,具体的误差控制步骤如下:

1) 规范和统一测量系统及测量设备的使用规则和使用方法,降低不同使用习惯而导致的误差。

2) 每次重启测量设备后具有对系统进行初始化,修正设备的软件系统。

3) 在测量系统中引入一些校准参数,提高系统的测量稳定性。

4) 对于个别重要的耐张塔跳线可以将测量系统与远程卫星系统同步,进一步降低系统本身的误差和偶然性误差。经过误差修正后跳线检测数据的在精度和完整性都有了显

著性提高,在将这些测量得到的跳线间隙数据与理论数据比对,就能够准确的预测出每一组耐张塔跳线数据是否存在放电的风险。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 检测点布置

实验用扫描检测的距离为距耐张塔跳线直线距离 300 m,共提取 8 个扫描点云数据集合,检测点的布置图 6 所示。

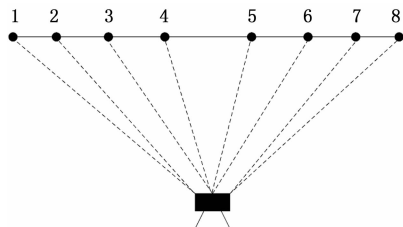


图 6 实验用跳线间隙检测点布置图

分别设置了 6 挡垂直扫描分辨率、水平扫描分辨率和扫描时间,具体如表 1 所示。

表 1 扫描分辨率及扫描时间的确定

序号	垂直扫描分辨率 $^{\circ}$	水平扫描分辨率 $^{\circ}$	扫描检测时间 s
1	0.0356	0.0125	352
2	0.0452	0.0184	334
3	0.0524	0.0234	315
4	0.0660	0.0352	265
5	0.0689	0.0461	278
6	0.0744	0.0488	302

### 2.2 测量精度分析与比较

鉴于耐张塔跳线间隙测量的重要性程度,本文选择了第 6 种垂直分辨率和水平分辨率(最高分辨率)。为使测量的结果更为直观和具体,引入了传统的基于超声波测量的方法进行对比验证。随机提取 8 个测量点的坐标数据,采用两种测量方法进行检测并对比检测结果,如表 2 及表 3 所示:

表 2 基于三维空间模型的跳线间隙检测精度数据

检测点	理论值			测量值		
	$x$	$y$	$z$	$x_i$	$y_i$	$z_i$
1	112	95	82	118.52	94.87	82.23
2	105	52	46	104.97	51.98	46.06
3	47	32	18	46.75	32.65	18.01
4	55	256	98	55.24	256.87	97.55
5	36	15	28	35.87	14.85	28.80
6	148	88	79	148.52	87.89	78.87
7	67	36	81	66.38	36.14	81.18
8	68	66	158	67.68	66.05	158.82

对表 2 进行分析,从 8 个测量点提取的测量值可知,本文提出的基于三维空间模型的检测方法的测量数据接近于标准的理想数据, $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的最大偏差值均被控制

在  $1^\circ$  以内。

表3 基于超声波跳线间隙检测精度数据

检测点	理论值			测量值		
	$x$	$y$	$z$	$x_i$	$y_i$	$z_i$
1	112	95	82	119.20	92.31	71.88
2	105	52	46	103.23	55.36	48.47
3	47	32	18	40.15	32.15	19.14
4	55	256	98	52.14	245.11	96.48
5	36	15	28	35.39	15.02	27.41
6	148	88	79	146.78	86.15	78.41
7	67	36	81	66.58	34.56	80.15
8	68	66	158	67.48	65.85	148.87

对表3进行分析,从8个测量点提取的测量值可知,传统的基于超声波检测算法的测量数据与标准的理想数据之间的差值较大,甚至有些差值接近  $10^\circ$ ,如在第四个点的  $y$  向检测值就超过了标准值  $10^\circ$ 。这表明传统的基于超声波检测算法的最大问题是稳定性差,而检测精度过低会直接影响耐张塔跳线安全性和整个电网供电的稳定性。

综合表2和表3的结果可知,本文所提方法能够准确地对跳线间隙数据进行检测,坐标检测精度值能够控制在  $\pm 1$  之内,检测效果更理想。

### 2.3 跳线检测残差计算结果比较与分析

耐张塔跳线检测的残差分布情况能够揭示出多样条件下跳线间隙检测总体效果。本文随机抽取了1200个检测点,统计分析总体的残差分布情况。基于三维空间模型的检测方法和基于超声波的检测方法的全部残差分布情况分别如图7和图8所示。

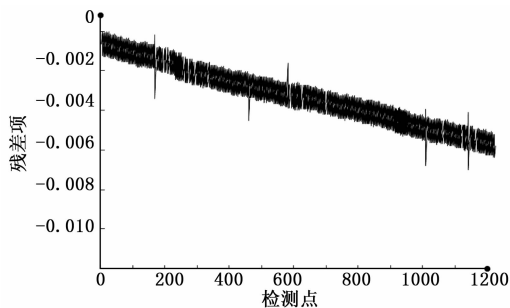


图7 基于三维空间模型的跳线检测残差分布

通过分析图7可知,实验曲线变化较为平稳,这表明实验中的全部测试点的残差分布较为均匀,异常波动被控制在10次以内,总体测试数据的残差走向呈现出缓慢的增加状态,这种状态稳定且可控。

通过分析图8可知,实验数据曲线变化不定,实验中的全部测试点的总体残差值更高,最高值超过了  $-0.01$ 。在全部1200个检测点中的残差奇异波动数量较多,明显多于本文所提的基于三维空间模型的检验方法,这表明该种跳线间隙检测方法的准确性和稳定性均较差。

综合图7和图8的结果可知,本文所提方法能够准确地对跳线检测的残差值进行计算,且总体的检测残差分布也

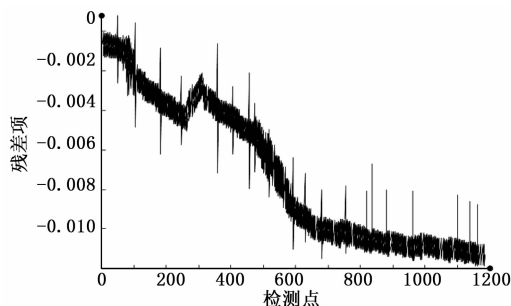


图8 基于超声波跳线间隙检测方法的检测残差分布

位于合理的区间范围之内,检测效果比传统检测方法更好。

### 3 结论

特高压耐张塔的跳线结构是保证高压供电稳定运行的关键因素之一,如果耐张塔的跳线间隙过密会导致高空放电现象的发生,给高压输电带来一定的安全隐患。本文提出一种基于空间模型的跳线间隙检测方法研究,利用激光束检测在远距离、非接触检测中精度高、误差小的优势,建立了一种三维空间扫描模型,提取了耐张塔跳线间隙的空间点云数据集合,并滤除了来自于系统内部和外界环境的噪声,保证高压线系统的安全稳定运行。随着电力用户总体数量的增加及用电规模的变大,特高压输电网络的规模还在不断地扩大,高压输电的安全性已经成为电力网络运行所面临的首要难题。而三维空间检测模型作为一种有效的检测方法,不仅可以应用在跳线检测的检测方面,还能够拓展到电网检测的其他相关领域。

#### 参考文献:

- [1] 杨娜,陈煜,潘卓洪,等. 准东—皖南  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电工程受端电网的直流偏磁影响预测及治理 [J]. 电网技术, 2018, 42 (2).
- [2] 刘昌盛,谢云云,周前,等. 高压直流输电参与的电网恢复路径优化方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (9): 2579-2588.
- [3] 徐涛,张梦彬. 风电场低电压穿越与无功补偿协调控制对电网稳定性的影响 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33 (2): 100-103.
- [4] 黄福勇,巢亚锋,王成,等.  $\pm 800$  kV 复奉线连接金具温升异常原因分析及处理措施 [J]. 高压电器, 2017 (5): 175-180.
- [5] 吴庆华,刘文勋,李健,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流线路跳线上绕耐张塔研究 [J]. 四川电力技术, 2017, 40 (1): 47-50.
- [6] 唐重魁,吕玉祥. 高压直流放电噪声频谱特性研究与测试分析 [J]. 电力电子技术, 2017 (4): 111-113.
- [7] 方璐,徐先勇,刘定国. 基于 UHV-FTRTPS 的特高压交流变压器局部放电试验技术 [J]. 高电压技术, 2017, 43 (1): 231-237.
- [8] 刘夏清,江维,吴功平,等. 高压线路末端可重构四臂移动作业机器人控制系统设计 [J]. 高压电器, 2017 (5): 68-74.
- [9] 李锦廷,苟延龙. 基于超声波测距的安保系统设计与可靠性分析 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (14): 140-143.