

基于交比不变性的绝缘子串中轴线提取方法

马志学¹ 袁爱仙² 黄晓波¹ 蔡建峰¹

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局试验研究所 惠州 516001

2. 北京普锐电子有限公司技术部 北京 100070)

摘要: 鉴于绝缘子串沿其中轴线剖面计算其爬电距离的需要,提出一种基于交比不变性的绝缘子串中轴线提取方法。首先利用 Kinect 扫描获取整个绝缘子串点云数据,并根据马氏距离判别剔除其中心数据保留伞裙数据;接着依据绝缘子串各伞裙间存在的交比不变性原理,对其中轴线的方向向量进行受限估计;最后进一步利用交比不变性质来拟合各伞裙的圆心,获取具有全局最优的绝缘子串中轴线方程。实验结果表明,本方法所估计的中轴线方程具有全局最优且准确高效,为后续爬电距离计算提供了有效支撑。

关键词: 绝缘子串,爬电距离,交比不变性,Kinect,马氏距离判别

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Axle wire extraction method of insulator strings based on the cross ratio invariance

Ma Zhixue¹ Yuan Aixian² Huang Xiaobo¹ Cai Jianfeng¹

(1. Test Research Institute of Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, China;)

(2. Department of Technique, Beijing Purui Electronic Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Because of the insulator string creepage distance calculation needs to along one axis section, in this paper, a method of extract axle wire of insulator strings based on the cross ratio invariance is proposed. Firstly, the point cloud data are obtained by Kinect, then on the basis of the Mahalanobis distance discriminant method to eliminate the center data and retain the umbrella skirt data; Secondly, according to the cross-ratio invariance between the umbrella skirt of insulator strings, the direction vector of axle wire is limited to estimate; Finally, we fitting the centers of the umbrella skirt in cross-ratio invariance, and the global optimal equation of the central axis of insulator string is obtained. The experimental results show that, our method can extract a the global optimal, accurate and efficient central axis, and it will provide effective support for subsequent creepage distance measurement.

Keywords: insulator string; creepage distance; cross-ratio invariance; Kinect; Mahalanobis distance discriminant

1 引言

绝缘子爬电距离,简称“爬距”,是指正常承受运行电压的两电极沿绝缘件外表面轮廓的最短距离。爬距是绝缘子的重要的尺寸参数,在一定程度上表征了绝缘子的电气特征、经济性能和安全指数^[1-2]。

由于绝缘子伞裙几何形状复杂,难以直接对其进行爬电距离的数值计算,如何获取高精度的绝缘子爬距是目前尚未解决的难题。目前已有研究人员提出计算爬电距离的方法,文献[3]结合线结构光和视觉摄影测量的方法得到绝缘子爬电距离,但需通过多俯仰角度获取完整的激光条影

像,较为繁琐。文献[4]利用绝缘子伞裙曲线方程和几何关系推导出爬电距离的计算公式,但此方法增加了人为影响因素且计算复杂。

针对目前存在的测量方式复杂、人为因素影响较多等问题,本文提出了基于交比不变性的绝缘子串中轴线提取方法,使后续绝缘子串爬电距离的测量更加精确和高效。首先利用 Kinect 扫描获得整个绝缘子串数据,并依据马氏距离判别方法剔除其串中心数据保留伞裙数据。由于绝缘子串各个伞裙可以近似看作间距相等的空间平行圆簇,其相互平行且间距相等的特性使得其满足交比不变特性,而绝缘子串中轴线可以看作由这些平行圆的圆心构成的一条

空间直线,据此对中轴线进行向量估计,再将中轴线提取过程转化为受约束的多个平行圆的中轴线的全局优化提取问题,最终提取出所需绝缘子串的中轴线。

2 马氏距离判别

绝缘子串中轴线提取需要获取各个相互独立伞裙数据,利用 Kinect 扫描获取整个绝缘子串数据后,需要剔除绝缘子串的中心数据而保留伞裙数据,在此依据马氏距离判别方法^[5-8]获取绝缘子串的伞裙数据。

设整个绝缘子串点云数据为 $(x_i, y_i) \in R^3 \times R^1$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, 即共有 N 个点云数据, x_i 是三维点云坐标, $y_i \in \{-1, 1\}$ 是 x_i 的标识。令 \mathbf{X} 表示 $N \times 3$ 的输入矩阵, 即每行为一个点云数据, 则整个绝缘子串点云数据的均值 $\boldsymbol{\mu}$ 和协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 可以描述为,

$$\boldsymbol{\mu} = E[\mathbf{X}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_i \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = E[(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})] = \frac{1}{N} \mathbf{X}^T \mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\mu} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X}_i 为 \mathbf{X} 的第 i 列数据, $\boldsymbol{\mu}$ 为 1×3 的行向量, $\boldsymbol{\Sigma}$ 为 3×3 的矩阵, 则点云数据中任意点 x_i 到均值中心的马氏距离表示为, 其中当绝缘子串轴长大于伞裙半径时协方差矩阵不变, 反之的协方差矩阵取逆,

$$d(x_i, \boldsymbol{\mu}) = \sqrt{(x_i - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (x_i - \boldsymbol{\mu})} \quad (3)$$

此时即可依据各点云数据距离均值中心的马氏距离判别其是否为伞裙数据, 若其马氏距离大于给定阈值, 则认为其为伞裙数据, 否则认为其为中心数据,

$$y_i = \begin{cases} 1 & d(x_i, \boldsymbol{\mu}) > \eta \\ -1 & d(x_i, \boldsymbol{\mu}) \leq \eta \end{cases} \quad (4)$$

其中, η 为判别阈值。

3 中轴线向量估计

依赖马氏距离判别即可获取相互独立的 m 个伞裙点云, 每个伞裙所包含的点云数据数目分别为 n_i 个, $i = 1, 2, \dots, m$, 则 m 个伞裙间可以近似为 m 个相互平行的平面, 即各个伞裙具有相同的法向量且为中轴线方向向量, 同时各个相邻平面间的距离均相等为 Δd , 即为 m 个伞裙间所具有的交比不变性质^[9-10], 因而由该 m 个伞裙构成的平行平面簇表示为:

$$\mathbf{n}^T \mathbf{x} + d_i = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]$, \mathbf{n} 为中轴线的方向向量, 且 $\|\mathbf{n}\| = 1$, $\mathbf{x} = [x \ y \ z]$, \mathbf{x} 为伞裙数据的三维坐标, $d_i = d + i \cdot \Delta d$, $i = 1, 2, \dots, m$, 共有 5 个参数需要估计。

此时 m 个伞裙数据所构成的平行平面簇的目标方程为,

$$J = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{n}^T \mathbf{x}_{ij} + d_i)^2 \quad (6)$$

式中: m 为绝缘子串伞裙数目, n_i 为第 i 个伞裙的数据

数目。

进而令

$$\begin{cases} \mathbf{u} = [n_x \ n_y \ n_z \ d \ \Delta d]^T \\ \boldsymbol{\xi} = [x \ y \ z \ 1 \ i]^T \end{cases} \quad (7)$$

则平行平面簇的目标方程可以重写为:

$$J = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}_{ij})^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \mathbf{u}^T \boldsymbol{\xi}_{ij} \boldsymbol{\xi}_{ij}^T \mathbf{u} \quad (8)$$

$$\mathbf{u} = (\mathbf{u}, \mathbf{M} \mathbf{u})$$

其中,

$$\mathbf{M} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i} \begin{bmatrix} x_{ij}^2 & x_{ij} y_{ij} & x_{ij} z_{ij} & x_{ij} & i x_{ij} \\ x_{ij} y_{ij} & y_{ij}^2 & y_{ij} z_{ij} & y_{ij} & i y_{ij} \\ x_{ij} z_{ij} & y_{ij} z_{ij} & z_{ij}^2 & z_{ij} & i z_{ij} \\ x_{ij} & y_{ij} & z_{ij} & 1 & i \\ i x_{ij} & i y_{ij} & i z_{ij} & i & i^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最终将目标参数求解问题转化为特征值估计问题, 即

$$\mathbf{M} \mathbf{u} = \lambda \mathbf{u} \quad (10)$$

式中: 特征值 λ 所对应的参数即为所求解的平行平面簇方程参数。

4 中轴线圆心拟合

绝缘子串中轴线方向向量估计完成后, 仅需中轴线上的一点即可获取其空间直线方程, 然而依赖一个伞裙的圆心数据确定的直线方程, 只能获得局部最优的直线方程估计而未能充分所有伞裙数据, 在此希望再次利用交比不变性约束获取具有全局最优的轴线方程。设由轴线向量 (n_x, n_y, n_z) 和基准圆心 (a, b, c) 构成的直线方程为:

$$\frac{x-a}{n_x} = \frac{y-b}{n_y} = \frac{z-c}{n_z} = t \quad (11)$$

则任意伞裙与基准伞裙间构成的平行圆环间距关系为:

$$n_d = \frac{(\mathbf{n}^T \mathbf{x} + d) - (\mathbf{n}^T \mathbf{x} + d_i)}{\|\mathbf{n}\|} = -i \cdot \Delta d \quad (12)$$

此时任意伞裙圆心坐标与基准伞裙圆心坐标间关系为:

$$\begin{cases} a_i = a - (i \Delta d) n_x \\ b_i = b - (i \Delta d) n_y \\ c_i = c - (i \Delta d) n_z \end{cases} \quad (13)$$

空间中圆的一般方程可以描述为空间球体与空间平面的交线, 如式(14)所示, 此处的特殊之处在于伞裙的圆心与空间球体的圆心为同一点, 伞裙的圆心坐标位于平行平面上, 且平行平面的法向量为中轴线的方向向量,

$$\begin{cases} (x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2 = r_i^2 \\ n_x a_i + n_y b_i + n_z c_i + d + i \Delta d = 0 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)中第一个非线性球面方程转为平面线性方程为:

$$2x a_i + 2y b_i + 2z c_i + e_i = x^2 + y^2 + z^2 \quad (15)$$

其中, 式左侧的 a_i, b_i, c_i 和 e_i 为未知参数,

$$e_i = r_i^2 - (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) \quad (16)$$

结合式(5)、式(13)和式(15)消去待估计参数 c 则有

$$\left(2x - \frac{2zn_x}{n_z}\right)a + \left(2y - \frac{2zn_y}{n_z}\right)b + e_i = f_i + \frac{2zd}{n_z} \quad (17)$$

其中,式左侧 a 、 b 和 e_i 为待估计参数,即共有 $2+m$ 个参数需要估计,

$$f_i = x^2 + y^2 + z^2 + i\Delta d(2xn_x + 2yn_y + 2zn_z) \quad (18)$$

将式(17)重写为矩阵式为

$$\begin{bmatrix} 2x_{ij} - \frac{2z_{ij}n_x}{n_z} & 2y_{ij} - \frac{2z_{ij}n_y}{n_z} & i_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ e_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij} + \frac{2z_{ij}d}{n_z} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $i_i = [0_1, \dots, 1_i, \dots, 0_m]$, $e_m = [e_1, \dots, e_m]^T$, 将估计后的 a 、 b 和 e_i 代入式(13)和式(16)中即可获得各个伞裙的圆心坐标和半径。

5 实验与分析

本文实验在自然场景下进行,绝缘子无约束地被摆放,实验设备包括电动转台、深度摄像机 Kinect v2 和计算机,如图1所示,本文算法通过 C++ 和 MATLAB 语言混合编写实现。

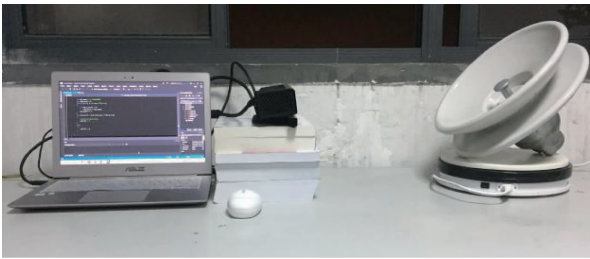


图1 实验设备与实验场景

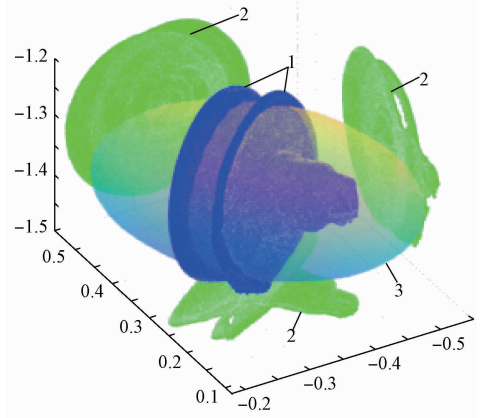
对于绝缘子串的扫描可以通过两种方式来实现:一种是用用户手持 Kinect 相机缓缓围绕绝缘子运动一周来覆盖物体的整个表面;另一种是将绝缘子串摆放在一个电动转台上进行跟踪采集。

将绝缘子放在电动转台上匀速旋转一周,在此期间用 Kinect 采集 600 幅深度图像,图像分辨率为 512×424 ,每秒采集 30 帧,采集完成之后输入到实验程序中进行三维重建,通过 KinectFusion 算法融合得到绝缘子的三维重建模型,如图2所示。

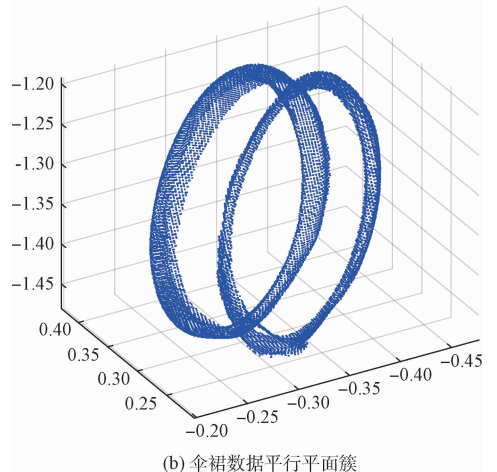


图2 绝缘子串三维重建模型

为此绝缘子串在 3 个坐标平面上的投影。椭球部分 3 为绝缘子串点云数据经马氏距离判别中协方差的逆,其数值计算结果如表 1 所示。由第 2 节可知,椭球内的绝缘子串点云数据为所要剔除的串中心数据,椭球外的绝缘子串点云数据为需要保留的伞裙数据,伞裙数据构成的平行平面簇如图 3(b)所示。



(a) 绝缘子串点云数据



(b) 伞裙数据平行平面簇

图3 绝缘子串马氏距离判别

表1 均置于协方差计算结果

参数类型	参数符号	计算结果
均值	μ	[0.304 2 -0.347 8 -1.335 7]
协方差	Σ	$\begin{bmatrix} 0.002 6 & -0.001 6 & 0.000 5 \\ -0.001 6 & 0.004 3 & 0.000 2 \\ 0.000 5 & 0.000 2 & 0.005 3 \end{bmatrix}$
阈值	η	0.001

图4中心深色伞裙1为基准伞裙,圆心点 O_1 为基准圆心,绿色伞裙2为绝缘子串其余伞裙部分,圆心点 O_2 为伞裙圆心。圆心 O_1 与圆心 O_2 的连线段为所求绝缘子串中轴线。各伞裙参数计算结果如表 2 所示。

图 3(a)中深色数据 1 为绝缘子串点云数据,绿色数据

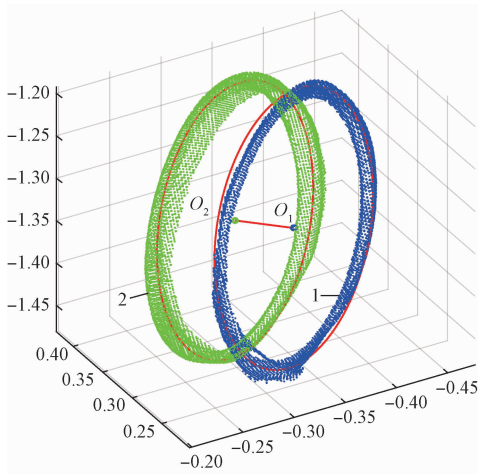


图4 绝缘子中轴线圆心拟合

表2 伞裙参数估计结果

参数类型	参数符号	估计结果
平面参数	$[n_x \ n_y \ n_z]$	$[-0.8328 \ -0.5290 \ 0.1630]$
	$[d \ \Delta d]$	$[0.2770 \ 0.0567]$
基准圆心	$[a \ b \ c]$	$[0.2961 \ 0.3433 \ -0.3532]$

图5为绝缘子串中轴线提取最终结果,其已经过数据变换将中轴线变换至 z 轴,数据1为绝缘子点云数据,3个坐标平面上的数据2为此绝缘子串的投影。直线 L 为本文算法提取的绝缘子串中轴线,可以看出中轴线位置穿过绝缘子串中心,且与坐标 z 轴保持一致。

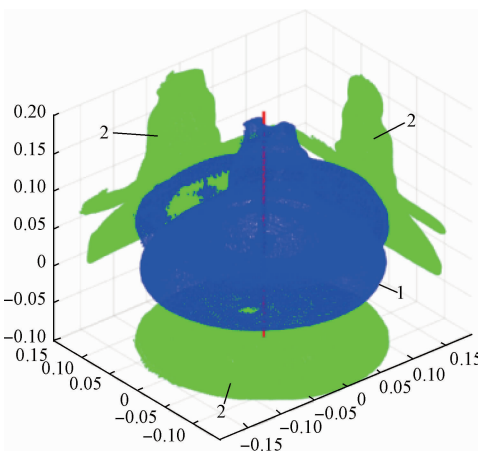


图5 绝缘子串中轴线提取结果

图6为经中轴线进行一定角度旋转时,绝缘子串点云的沿中轴线剖面。实验中旋转角度分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° ,可以看出绝缘子串的各个剖面大致相同且为轴对称图形,说明本文算法提取的绝缘子串中轴线与其实际中轴线相一致,此时即可计算其各个剖面的爬电距离,并利用其平均值用以精确表征绝缘子串的爬电距离。

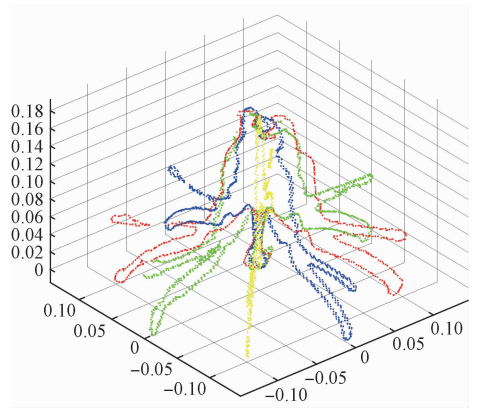


图6 绝缘子串剖面视图

6 结 论

本文提出了一种基于交比不变性的绝缘子串中轴线提取方法。首先获取整个绝缘子串点云图,并根据马氏距离判别方法保留其伞裙数据,然后依据各伞裙间的交比不变性,对绝缘子串中轴线进行方向向量估计后,对其各个伞裙进行圆心拟合,最终得到此绝缘子串具有全局最优的中轴线方程。实验结果表明,该算法可以准确地提取出绝缘子串的中轴线,能够在绝缘子串爬电距离测量中充分发挥作用。

参考文献

- [1] 丘志贤. 绝缘子的爬电距离、表面积、体积及形状因数的计算[J]. 电瓷避雷器, 1998(3): 14-20.
- [2] 赵振兵, 王乐. 一种航拍绝缘子串图像自动定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 558-565.
- [3] 刘亚文, 江健武, 唐敏, 等. 变电站绝缘子爬电距离摄影测量方法[J]. 测绘通报, 2012(12): 15-17, 39.
- [4] 张顶峰, 张嘉楠. 复合绝缘子爬电距离计算公式推导及应用[J]. 河南科技, 2014(11X): 109-111.
- [5] SHEN H H, YANG J, WANG SH T. Attribute weighted mercer kernel based fuzzy clustering algorithm for general non-spherical data sets[J]. Soft Computer, 2006(10): 1061-1073.
- [6] PAWK Z. Rough set theory and its applications to data analysis [J]. Cybernetics and Systems, 1998(29): 661-668.
- [7] PAWLAK Z. Rough sets, theoretical aspects of reasoning about data [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [8] 骆志高, 李旭东, 赵俊丽, 等. 利用马氏距离判别法准确实现对裂纹的识别[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 186-188.

(下转第131页)