

基于三维点云处理的交联聚乙烯电缆接头反应力锥参数测量算法

邓磊^{1,2}, 刘桂华^{1,2*}, 邓豪^{1,2}, 黄军杰^{1,2}, 周炳宏^{1,2}

¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

²特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 针对交联聚乙烯(XLPE)电缆接头反应力锥参数测量问题,本文结合XLPE电缆接头结构特征与三维点云处理提出了一种XLPE电缆接头反应力锥参数测量算法。该算法先对点云进行去噪及坐标摆正预处理;之后根据XLPE电缆接头的结构特征,得到反应力锥及其相邻区域的目标点云;然后使用依据目标点云中各点与坐标轴的夹角信息及高度信息提出的点云空间划分方法,实现对目标点云的条状划分及块元划分;接着根据条状点云上块元法向量的轴线夹角及改进的凹凸性准则求得各条状点云不同区域的局部点云;在此基础上,使用随机采样一致性(RANSAC)算法及拉格朗日乘数法求取相邻区域拟合平面的相交线,再根据条状点云上各点到相交线的距离,得到初步测量结果;最后,基于残差估计对初步测量结果进行误差校正,得到最终的测量结果。使用尺寸标准及表面具有缺陷的两类电缆接头点云进行测量实验,测量结果的绝对误差分别小于0.2 mm与1.0 mm,相对误差分别小于0.5%与1.5%,说明所提算法具有较高的鲁棒性与测量精度。

关键词 测量; 三维点云处理; 交联聚乙烯电缆接头; 反应力锥; 参数测量; 机器视觉

中图分类号 TP237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220785

1 引言

交联聚乙烯(XLPE)高压电缆具有良好的耐热性和绝缘性,已被广泛应用于城市电网的输配电系统中^[1]。受制造工艺的限制,目前单根XLPE电缆的最大制造长度为10 km,因此在电力行业施工过程中常需要通过中间接头将多根电缆进行连接再通过终端头与其他设备连接。由于XLPE电缆接头(中间接头与终端头,以下简称“电缆接头”)处有电缆本体绝缘和附加绝缘两种不同的绝缘材料,因此,同层绝缘上相邻两点之间会产生轴向应力。为了均匀此应力,通常会将靠近导体连接端的绝缘层切削为锥形面,即反应力锥^[2]。随着XLPE电缆的大量敷设,XLPE电缆线路的故障随之增多^[3]。据相关电缆故障统计,导致XLPE电缆绝缘故障的原因主要有外力破坏和接头品质不良等,而接头品质不良所引发的故障率最高^[4]。其原因一方面是将金属屏蔽层和绝缘层割开时会在接头表面留下划痕等缺陷,另一方面是目前难以对电缆接头反应力锥区域的各参数进行测量,导致反应力锥尺寸不符合设计要求的非标接头接入了电力系统。此类非标接头长时间在高电压作用下会因抗轴向应力不足而局

部放电,从而导致绝缘击穿^[5]。因此,对电缆接头反应力锥进行相关参数测量,是避免电缆接头带病运行以及保障电力系统安全可靠运行的关键。

目前,工业领域中的技术人员大多使用钢尺、皮尺等接触式测量工具对电缆接头或其他工件的尺寸参数进行测量,但此类测量方法存在主观性强、效率和精度低且容易对被测物造成二次损伤等问题,难以满足测量需求。因此,基于机器视觉的非接触式三维测量技术近年来备受关注。研究人员^[6-8]使用激光发射器发射激光线并使激光线与钢轨相交,形成能反映钢轨表面轮廓信息的激光条纹曲线,然后通过轮廓提取技术对钢轨表面轮廓进行提取,实现了对轨道直线度、扭曲度等几何参数的测量。虽然此类测量方式在工业测量中得到了广泛应用,但其应用场景受到了较大限制。文献[9-10]提出了一种将激光条纹投射到热锻件表面,然后通过检测热锻件表面激光条纹的端点来测量条纹长度,从而确定锻件尺寸的测量方法。这种测量方法具有较快的测量速度,但其测量精度易受条纹数量及条纹投影角度的影响。文献[11-13]基于双目立体视觉实现了对热锻件及罐体类工件尺寸的测量,但由于立体视觉测量严重依赖于图像特征匹配,导致其

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-06-07; 网络首发日期: 2022-06-20

基金项目: 广东电网公司广州供电局委托项目(080044KK52190002)、四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0380)

通信作者: liughua_swit@163.com

测量效率及精度均较低。文献[14]先通过双目线结构光获取承轨台点云数据,然后基于 Spearman 秩相关系数的点云数据分割提取方法,对承轨台的多个几何参数实现了自动非接触测量,并取得了较好的测量效果。该方法对基于点云处理的工件参数测量具有一定的借鉴意义。文献[15]将结构光测量法与深度学习相结合,基于 IHED 网络解决了激光图像的边缘提取难题,实现了对箱体体积的测量。该方法对基于三维深度学习进行工件参数测量的应用起到了推动作用,但目前此类算法的测量精度欠佳。文献[16]基于区域增长法实现了对高铁轨道紧固件关键部位的定位,并在此基础上通过法线等特征实现了对高铁紧固件几何参数的测量。文献[17]通过对所获得的场景点云进行空间划分,然后根据各切片上相邻点水平角及垂直角的差值等特征,实现了对建筑物门窗尺寸的测量。文献[18]使用双目视觉技术和透视变换构建的三维测量系统对内燃机气缸盖进行了尺寸测量,测量结果的最大误差仅为 0.373 mm,具有较高的测量精度,但该算法的鲁棒性较差。

综上所述,基于机器视觉的三维非接触式工件参数测量方法正逐渐应用于各行业,然而,这些测量算法都具有一定的局限性,且难以应用于电缆接头反应力锥的参数测量。这主要是因为电缆接头反应力锥的参数测量不同于其他工件的参数测量,受施工标准和制造工艺的限制,目前难以通过自动化设备进行电缆接头的制作;同时,人工打磨的电缆接头表面存在多种打磨缺陷及区域交界不明显等问题,而且不同技术人员打磨的电缆接头差异性较大。为此,本团队结合电缆接头的结构特征和三维点云处理提出了一种 XLPE 电缆接头反应力锥参数测量算法,并采用该算法实现了 XLPE 电缆接头反应力锥区域起始点外径 D_0 、终止点外径 D_1 、高度 H 、长度 S 的测量。

2 电缆接头反应力锥参数测量算法

所提 XLPE 电缆接头反应力锥参数测量算法的流程图和伪代码分别见图 1 和图 2。测量算法包括以下几个步骤:

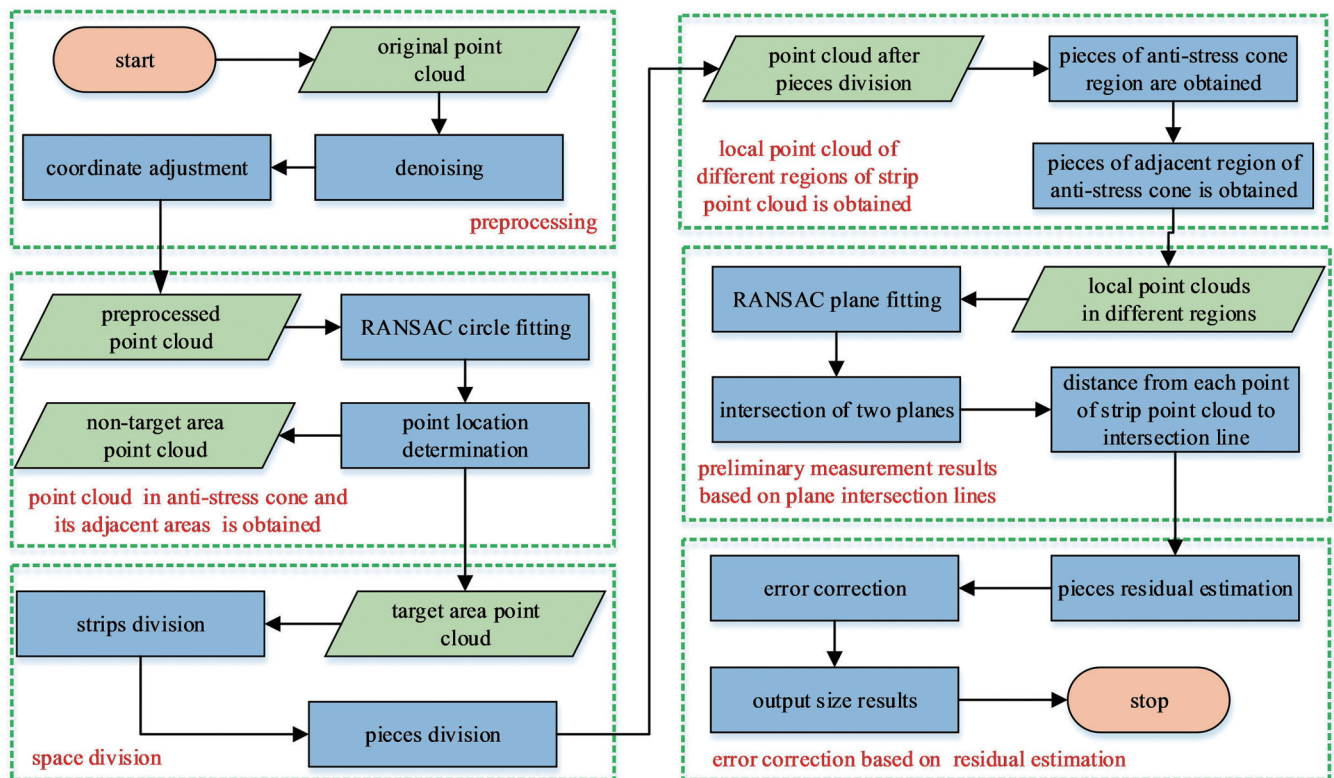


图 1 电缆接头反应力锥参数测量算法流程

Fig. 1 Flow of anti-stress cone of cable joint parameter measurement algorithm

1) 点云预处理。使用半径滤波对所获得的电缆接头点云中的噪点进行去除,再通过随机采样一致性(RANSAC)算法^[19]拟合圆柱实现电缆接头点云的坐标摆正。

2) 反应力锥及其相邻区域目标点云的求取。先等高度地对电缆接头点云进行圆拟合,然后根据拟合

圆的半径变化及电缆接头各区域的距离结构特征,得到反应力锥及其相邻区域的目标点云。

3) 目标点云的空间划分。先根据目标点云中各点的 x 、 y 坐标值完成条状划分,再根据目标点云中各点的 z 坐标值完成各条状点云的块元划分。

4) 各条状点云不同区域局部点云的求取。基于

Algorithm 1: anti-stress cone parameter measurement of cable joint

```

Input: Cable joint point cloud ( $P_o$ )
Output: Measurement results ( $D_o, D_i, H, S$ )
Step 1: Denoising and coordinate adjustment of  $P_o$ 
Step 2: Target area point cloud ( $P$ ) is obtained
1: for ( $i \leq \text{point number of } P_o$ ) do
2:   if  $C_{i_2}(z) \leq z_i < C_{i_1}(z)$  then
3:      $p_i \in P$ 
4:   end if
5: end for
Step 3: Space division of  $P$ 
6: for ( $i \leq \text{point number of } P$ ) do
7:   if  $(m-1) \cdot \eta < \alpha_i \leq m \cdot \eta$  then
8:      $p_i \in S_m$ 
9:   end if
10: end for
11: for ( $m \leq (360^\circ / \eta)$ ) do
12:   for ( $i \leq \text{point number of } S_m$ ) do
13:     if  $(n-1) \cdot h_{1(2)} < z_i \leq n \cdot h_{1(2)}$  then
14:        $p_i \in P_{mn}$ 
15:     end if
16:   end for
17: end for
Step 4: Local point cloud in different region of  $S_m$  is obtained
18: for  $m \leq 360^\circ / \eta$  do
19:   if  $\theta_n < \theta_c$  and  $\beta > \beta_{th}$  then
20:      $n \in V_{m_3}$ 
21:   end if
22:   if  $\theta_n > \theta_c$  and  $\beta > \beta_{th}$  then
23:      $n \in V_{m_4}$ 
24:   end if
25: end for
26:  $L_{m_3}(L_{m_4})$  is obtained in term of  $V_{m_3}(V_{m_4})$ 
Step 5: Preliminary measurement
27: for ( $m \leq 360^\circ / \eta$ ) do
28:    $G_{m_3} = Z[\min(V_{Dm_3})]$ ,  $G_{m_4} = Z[\min(V_{Dm_4})]$ 
29: end for
Step 6: Error correction based on residual estimation
30: for ( $m \leq 360^\circ / \eta$ ) do
31:    $Z_3 = \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{m=1}^{k_1} \tilde{G}_{m_3}$ ,  $Z_4 = \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{m=1}^{k_1} \tilde{G}_{m_4}$ 
32: end for
33: end
34: return  $D_o, D_i, H, S$ 

```

图2 电缆接头反应力锥参数测量算法伪代码

Fig.2 Pseudocode of anti-stress cone of cable joint parameter measurement algorithm

块元法向量轴线夹角及改进的凹凸性准则分别求取各条状点云上交联绝缘区域的局部点云、反应力锥区域的局部点云、内半导体层的局部点云。

5) 基于平面相交线求取初步测量结果。先使用RANSAC算法分别对各条状点云上不同区域的局部点云进行平面拟合,然后使用拉格朗日乘数法求取相邻区域平面的相交线及交线上一点,并计算条状点云上所有点到相交线的距离,最后据此距离关系得到初步测量结果。

6) 残差估计误差校正。根据各块元的残差估计结果对初步测量结果进行误差校正,以提高测量精度。

2.1 点云预处理

使用思看科技(杭州)股份有限公司的复合式三维扫描仪KSCAN20获取电缆接头的点云数据,该扫描仪利用双目视觉原理获得被测物体的三维点云。扫描时,激光发射器发射激光,激光照射在电缆接头表面,采用两个经过校准的工业相机对反射光进行捕捉,然后对当前帧标记点与标记点库进行匹配计算,获得扫描仪和被测物体的空间位置,从而得到电缆接头的三维点云。该扫描仪的最高分辨率可达0.01 mm,最高体积精度为0.01 mm+0.035 mm/m。图3为XLPE电缆接头的结构示意图、实物图以及使用扫描仪获取

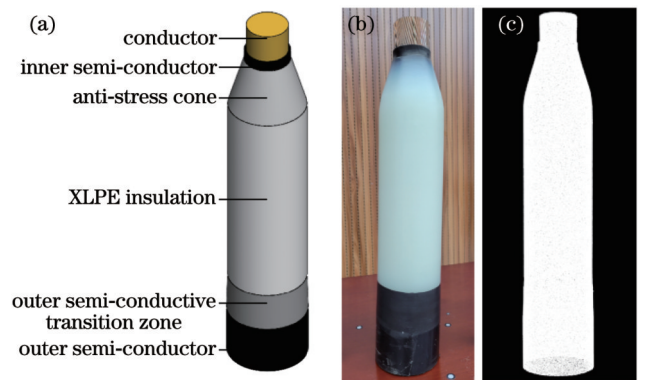


图3 电缆接头。(a)结构图;(b)实物图;(c)点云数据
Fig.3 Cable joint. (a) Structure diagram; (b) physical diagram; (c) point cloud data

的电缆接头的点云数据。

使用扫描仪获取的电缆接头点云数据由于受到环境、被测物体表面性质变化和拼接配准操作等因素的影响,会不可避免地存在一些噪声点^[20]。这些噪声点会对坐标摆正及其他处理造成一定影响,故在算法运行前,本文先采用半径滤波^[21]去除接头点云中的噪声点。

三维点云是对物体表面的离散采样,具有无序性、非均匀性及稀疏性等特点^[22-23]。虽然点云中各点间的

相对位置在空间中是确定的,但点云中各点在 x 、 y 、 z 任一维度上仍然无序,因此在进行后续处理前,本文先对滤波后的电缆接头点云进行“坐标摆正”处理。在对电缆接头点云进行“坐标摆正”时,先使用 RANSAC 算法对其进行圆柱拟合,然后使圆柱的轴线过空间坐标系原点,并且轴线的方向向量与 z 坐标轴同向。图 4 为电缆接头点云坐标摆正示意图。

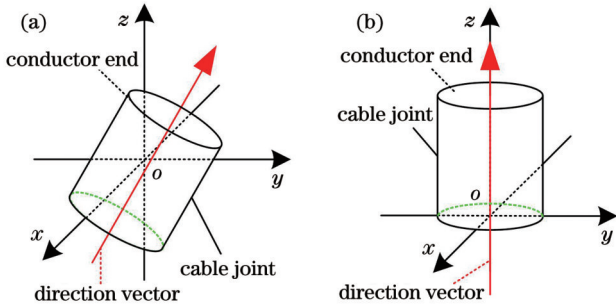


图 4 坐标摆正示意图。(a)摆正前;(b)摆正后

Fig. 4 Coordinate adjustment diagrams. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

2.2 反应力锥及其相邻区域目标点云的求取

本文旨在对 XLPE 电缆接头反应力锥区域的多个参数进行测量,因此可先将处理对象由整个电缆接头点云分割为仅包含反应力锥及其相邻区域的目标点云,以减小其他区域的干扰,提高测量精度。针对类圆柱体结构的电缆接头,将其沿轴线方向切分为多个圆,如图 5(b)所示,然后通过拟合的方式得到各圆的半径信息。由于人工打磨电缆接头表面存在多种缺陷,因此采用抗干扰性较强的 RANSAC 算法进行圆拟合。针对图 5(a)所示的电缆接头点云,使用 RANSAC 算法进行圆拟合的过程为:先将电缆接头点云沿 z 轴方向进行等高度切分,得到拟合各圆所需的点集合 $C_{\text{circle}}(j)$;电缆接头点云中任意一点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 属于某拟合圆的判定公式见式(1),拟合第 j 个圆时,从点集合 $C_{\text{circle}}(j)$ 中随机选取 3 个点拟合圆,然后计算 $C_{\text{circle}}(j)$ 中各点 p_i 到该拟合圆的距离 D_i ;如果 D_i 小于设定阈值 T_{th} ,则点 p_i 被认为是内点,统计出此拟合圆的内点个数,重复此操作,然后选取内点个数最多的拟合圆作为点集合 $C_{\text{circle}}(j)$ 的圆拟合结果。

$$p_i \in C_{\text{circle}}(j), \text{ if } (j-1) \cdot c < z_i \leq j \cdot c, c > 0, j \in \mathbb{N}_+,$$

$$0 < j < [(z_{\text{max}} - z_{\text{min}})/c] + 1, \quad (1)$$

式中: j 为拟合圆编号; $C_{\text{circle}}(j)$ 为拟合第 j 个圆的点集合; z_i 为点 p_i 的 z 坐标值; c 为切分高度; z_{max} 为电缆接头最高点的 z 坐标值; z_{min} 为电缆接头最低点的 z 坐标值。采用所提算法将电缆接头点云沿 z 轴方向按等高度拟合所得拟合圆的半径变化如图 6 所示。

从图 6 可以看出,从外半导体层区域至导体区域,拟合圆的半径虽然在局部范围内并非单调变化,但整

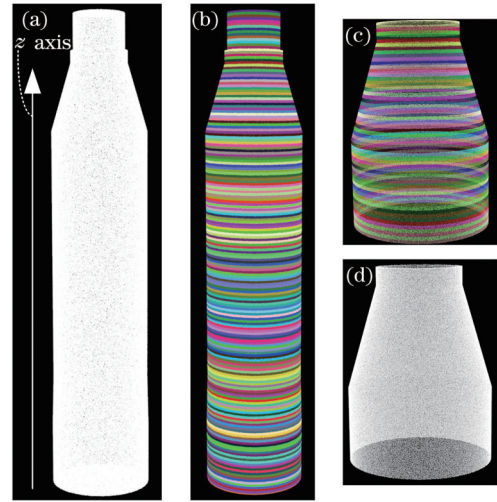


图 5 目标点云求取示意图。(a)接头点云;(b)接头点云圆拟合结果;(c)目标点云拟合圆;(d)目标点云

Fig. 5 Diagram of obtaining target point cloud. (a) Joint point cloud; (b) circle fitting results of joint point cloud; (c) target point cloud fitting circle; (d) target point cloud

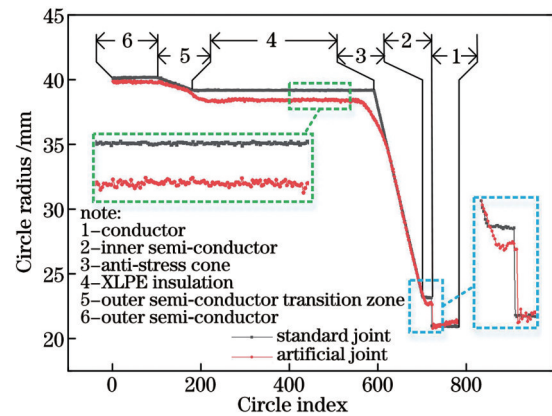


图 6 电缆接头拟合圆半径变化

Fig. 6 Change of cable joint fitting circle radius

体上在逐渐变小,而且内半导体层区域与导体区域交界处两相邻圆的半径在整条曲线中出现了最大跳变。根据此跳变特性以及电缆接头交联绝缘区域中的点到导体顶端距离大致稳定的结构特征,设计了反应力锥及其相邻区域目标点云求取算法,如式(2)所示。对图 5(a)使用所提算法求取目标区域点云,结果如图 5(d)所示。下文若无特殊说明,“电缆接头”一词均指图 5(d)所示的 XLPE 电缆接头。

$$\begin{cases} j_1 = j, \text{ when } r_j - r_{j+1} \text{ is max} \\ j_2 = \min(V_x), \text{ if } z_{\text{max}} - C_j(z) < D_{\text{th}}, j \in V_x, \\ p_i \in P, \text{ if } C_{j_2}(z) \leq z_i < C_{j_1}(z) \end{cases} \quad (2)$$

式中: j 为拟合圆编号; j_1 为内半导体层区域与导体区域交界处的拟合圆编号; r_j 为图 5(b)中第 j 个拟合圆的半径; $C_j(z)$ 为第 j 个拟合圆圆心的 z 坐标值; D_{th} 为距离阈值,由电缆结构决定; V_x 为完整电缆接头上拟合圆圆心的 z 坐标值与导体区域最高点 z 坐标值的差小于

距离阈值的拟合圆编号集合; j_2 为交联绝缘区域某拟合圆的索引; z_i 为点 p_i 的 z 坐标值; P 为反应力锥及其相邻区域的目标点云。

2.3 电缆接头点云空间划分

点云空间划分的目的不是实现物体各部分的准确分割, 而是将点云划分为性质上类似或距离上相近的块元, 从而突出被测物体的局部特征。针对类圆柱体的电缆接头点云, 现有点云空间划分方法所

得块元之间点数差距较大, 导致局部特征不稳定, 因此, 本文提出了一种新的点云空间划分算法。针对电缆接头点云 P , 使用所提方法进行空间划分的步骤如下:

1) 将反应力锥及其相邻区域的目标点云按式(1)进行圆拟合, 拟合结果如图 5(c) 所示, 然后根据式(3)将目标点云的点划分至反应力锥区域集合与其他区域集合。

$$\begin{cases} C_{\text{circle}}(j) \in P_v, h_1 = h, \text{ if } (r_j - r_{j+1}) < 0.5 \\ C_{\text{circle}}(j) \in P_t, h_2 = \sqrt{h^2 - (r_j - r_{j+1})^2}, \text{ if } (r_j - r_{j+1}) \geq 0.5 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: P_v 为其他区域的点集合; P_t 为反应力锥区域的点集合; h_1 为其他区域的块元划分高度; h_2 为反应力锥区域的块元划分高度; h 为设定的常数。

2) 将电缆接头等角度划分为多个条状点云, 点云 P 中任意一点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 属于某条状点云的判定公式为

$$\begin{cases} \text{when } (x_i > 0, y_i > 0), \alpha_i = \arctan(|y_i/x_i|) \\ \text{when } (x_i < 0, y_i > 0), \alpha_i = 90^\circ + \arctan(|y_i/x_i|) \\ \text{when } (x_i < 0, y_i < 0), \alpha_i = 180^\circ + \arctan(|y_i/x_i|) \\ \text{when } (x_i > 0, y_i < 0), \alpha_i = 270^\circ + \arctan(|y_i/x_i|) \\ p_i \in S_m, \text{ if } (m-1) \cdot \eta < \alpha_i \leq m \cdot \eta, m \in \mathbb{N}_+, 0 < m < (360^\circ/\eta) + 1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: i 为电缆接头点云中点的编号; S_m 为划分出来的第 m 个条状点云; m 为条状点云的编号; η 为条状点云的角度; y_i, x_i 分别为点 p_i 的 y 坐标值与 x 坐标值。

3) 将条状点云 S_m 内落在集合 P_v 中的点按式(5)进行块元划分, 落在集合 P_t 中的点按式(6)进行块元划分。

$$p_i \in P_{mv}, \text{ if } (v-1) \cdot h_1 < z_i \leq v \cdot h_1, \quad (5)$$

$$p_i \in P_{mt}, \text{ if } (t-1) \cdot h_2 < z_i \leq t \cdot h_2, \quad (6)$$

式中: P_{mv} 为第 m 个条状点云 S_m 上其他区域划分出来的第 v 个块元; v 为块元编号; P_{mt} 为条状点云 S_m 上反应力锥区域划分出来的第 t 个块元; t 为块元编号。

4) 对条状点云 S_m 上的所有块元进行质心估计,

估计公式为

$$p_c = (x_c, y_c, z_c) = \frac{1}{k} \cdot \left(\sum_{i=1}^k x_i, \sum_{i=1}^k y_i, \sum_{i=1}^k z_i \right), \quad (7)$$

式中: p_c 为块元质心; x_c, y_c, z_c 分别为块元质心的 x, y, z 坐标值; x_i, y_i, z_i 分别为块元第 i 个点的 x, y, z 坐标值; k 为块元上点的数量。

5) 对条状点云上的所有块元按质心 z 坐标值从小到大编号得到块元 P_{mn} , 下标 m 指代条状点云编号, n 指代条状点云上的块元编号。重复步骤 3)~步骤 5), 对所有条状点云完成块元划分。

使用所提方法对电缆接头点云进行空间划分的结果如图 7 所示。

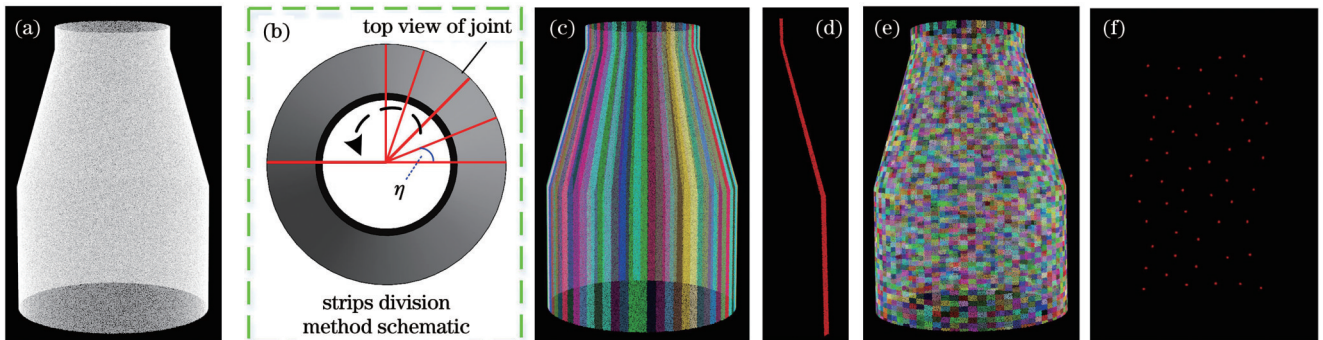


图 7 电缆接头点云的空间划分。(a) 目标点云; (b) 条状划分方式; (c) 图(a)的条状划分结果; (d) 条状点云示例; (e) 图(a)的块元划分结果; (f) 块元示例

Fig. 7 Space division of cable joint point cloud. (a) Target point cloud; (b) strips division mode; (c) strips division results of figure (a); (d) an example of strip point cloud; (e) pieces division results of figure (a); (f) an example of piece

为验证所提空间划分方法的有效性,分别使用所提方法及等高度切分法对标准电缆接头点云及人工打磨电缆接头进行空间划分,并对条状点云上各块元的

点数变化进行分析,结果如图 8 所示。等高度切分是指对条状点云按等高度进行块元划分,不根据区域的变化改变块元的划分高度。

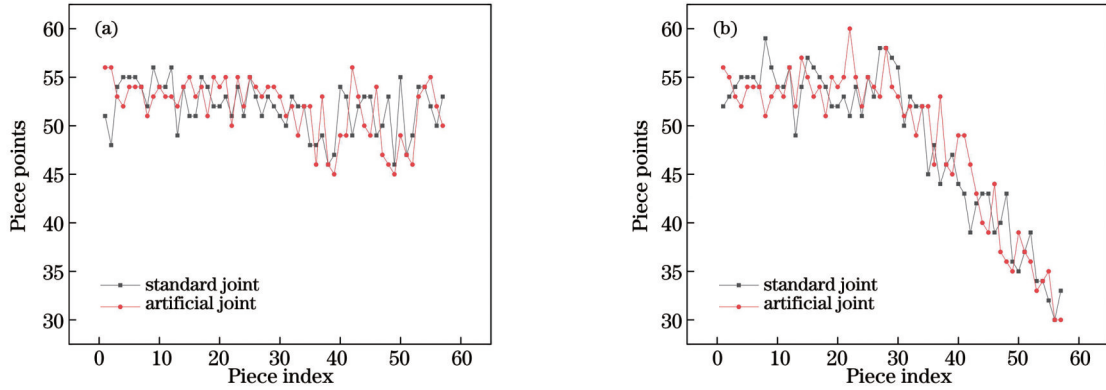


图 8 不同空间划分方法所得块元点数分析。(a)本文方法;(b)等高度切分法

Fig.8 Analysis of piece points obtained by different space division methods. (a) Ours; (b) equal height division

由图 7 及图 8 可以看出,使用本文所提点云空间划分方法在对尺寸标准的电缆接头点云及人工打磨电缆接头点云进行空间划分均能取得较好的空间划分效果,而且本文所提空间划分方法所得块元之间的点数量波动小于等高度切分法,保证了块元对被测物体局部特征描述的一致性。

2.4 条状点云不同区域局部点云的求取

条状点云不同区域局部点云的求取是指基于块元法向量轴线夹角及改进的凹凸性准则,分别获得各条状点云上处于交联绝缘区域块元、反应力锥区域块元及内半导体层区域块元,然后用对应区域块元构成对应区域的局部点云。基于两块元 P_1 、 P_2 的法向量与质心差向量之间的夹角关系,判断两块元凹凸性^[24]关系的公式为

$$\begin{cases} n_1 \cdot d > n_2 \cdot d \Rightarrow \text{convex, if } \theta_1 < \theta_2 \\ n_1 \cdot d < n_2 \cdot d \Rightarrow \text{convex, if } \theta_1 > \theta_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: n_1 、 n_2 为块元 P_1 、 P_2 的法向量; d 为两块元质心的差向量; θ_1 、 θ_2 分别为 n_1 、 n_2 与向量 d 的夹角,其中向量 n_1 、 n_2 的夹角 β [$\beta = \angle(n_1, n_2)$] 满足

$$n_1 \cdot n_2 = |n_1 \cdot n_2| \cdot \cos(\beta) \quad (9)$$

图 8 为两块元凹凸性判别示意图,其中 s_1 、 s_2 为块元 P_1 、 P_2 的质心坐标。由式(8)及图 9 可知,当 $n_1 \cdot d >$

$n_2 \cdot d$ 时,两个块元之间是凸连接,否则为凹连接。

在实际的电缆接头制作中,技术人员会使用砂纸等打磨工具将电缆接头上交联绝缘区域与反应力锥区域交界处、反应力锥区域与内半导体层区域交界处打磨成圆弧状,以进一步改善电缆接头的电气性能。这种圆弧过渡结构不仅会导致区域交界处块元的轴线夹角存在缓慢变化的过程,如图 10 所示,还会使区域交界点附近块元与区域内块元的凹凸性连接关系变得不稳定。因此,本文在根据凹凸性准则求取目标区域块元时,对原有凹凸性准则进行了改进,增加了角度阈值,以确保所得块元为所需区域块元。设两块元法向量夹角为 β ,当夹角 β 小于 β_{th} 时,不使用该块元内的点参与该区域的平面拟合。改进后的凹凸性准则为

$$\begin{cases} \text{convex, if } \theta_1 < \theta_2 \text{ and } \beta > \beta_{th} \\ \text{concave, if } \theta_1 > \theta_2 \text{ and } \beta > \beta_{th}, \\ \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中: β 为两块元的法向量夹角; β_{th} 为夹角阈值。当 $\theta_1 < \theta_2$ 且 $\beta > \beta_{th}$ 时,两块元为凸连接;当 $\theta_1 > \theta_2$ 且 $\beta >$

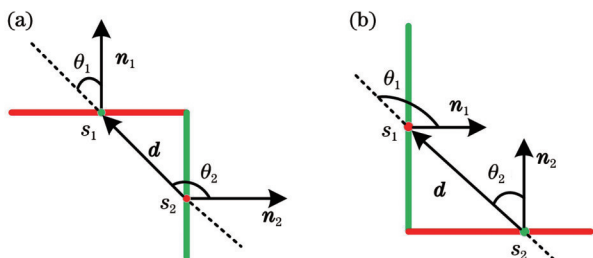


图 9 凹凸性判别示意图。(a)凸连接示意图;(b)凹连接示意图
Fig.9 Concave-convex decision diagrams. (a) Convex diagram; (b) concave diagram

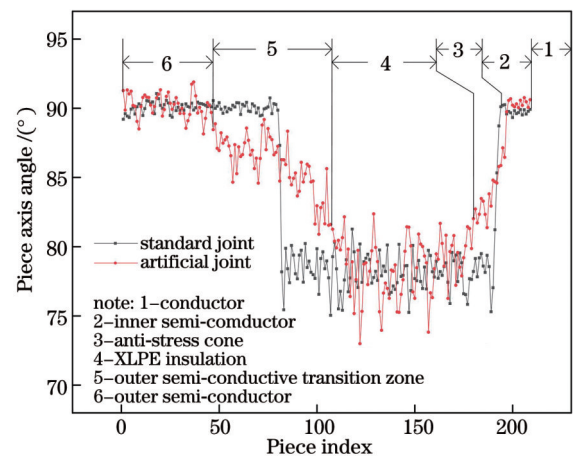


图 10 条状点云上块元的轴线夹角变化

Fig. 10 Change of piece axis angle on strip point cloud

β_{th} 时, 两块元为凹连接。

从图 10 可以看出, 无论是尺寸标准的电缆接头还是人工打磨的电缆接头, 空间划分所得条状点云上反应力锥区域块元法向量与电缆接头轴向量的轴线夹角, 小于交联绝缘区域块元轴线夹角与内半导体层区域块元的轴线夹角, 而且人工打磨的电缆接头在交联绝缘与反应力锥区域、反应力锥与内半导体区域均存在明显的过渡区域。由电缆结构及凹凸性原理可知, 针对条状划分所得的任意一个条状电缆接头点云, 交联绝缘区域上的块元与反应力锥区域上的块元为凸连接关系, 反应力锥区域上的块元与内半导体层区域上的块元为凹连接关系。因此, 得到多个反应力锥区域上的块元后, 依据凹凸性准则便可以得到多个交联绝缘区域块元与多个内半导体层区域块元。根据这一特征及式(10)所示的改进后的凹凸连接关系, 可求取条状点云上交联绝缘区域块元、反应力锥区域块元、内半导体层区域块元。求取步骤为:

1) 使用 RANSAC 对条状点云上的各块元进行平面拟合, 以平面法向量作为块元法向量。

2) 按式(11)计算条状点云 S_m 上所有块元法向量与电缆接头轴向量的轴线夹角, 由式(12)得到多个处于反应力锥区域的块元编号。

$$\varphi_n = \arccos \left[\frac{(x_1 \cdot x_a + y_1 \cdot y_a + z_1 \cdot z_a)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2}} \right] (0 < \varphi_n), \quad (11)$$

$$\begin{cases} n \in V_{m_1}, & \text{if } \varphi_{th1} < \varphi_n < \varphi_{th2} \\ n \in V_{m_2}, & \text{else} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: φ_n 为任意一块元法向量与电缆接头轴向量的轴线夹角; $\mathbf{n}_1(x_1, y_1, z_1)$ 为当前条状点云上任意一块元的法向量; $\mathbf{n}_a(x_a, y_a, z_a)$ 为电缆接头轴向量; V_{m_1} 是根据块元轴线夹角关系求得的反应力锥区域块元编号集合; φ_{th1} 为夹角阈值 1; φ_{th2} 为夹角阈值 2; n 为块元编号。

3) 对步骤 2) 所得集合 V_{m_1} 中所有元素按从小到大进行排序, 取中间值对应的块元 P_c , 将其按改进后的凹凸性准则与 V_{m_2} 集合中所有元素对应的块元进行凹凸性连接分析, 并根据式(13)分别得到部分交联绝

缘区域块元编号集合与部分内半导体层区域块元编号集合。

$$\begin{cases} n \in V_{m_3}, & \text{if } \theta_n < \theta_c \text{ and } \beta > \beta_{th} \\ n \in V_{m_4}, & \text{if } \theta_n > \theta_c \text{ and } \beta > \beta_{th}, \\ & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: θ_n 为块元 p_n 法向量与块元 p_n, P_c 质心差向量的夹角; θ_c 为块元 P_c 法向量与块元 p_n, P_c 质心差向量的夹角; V_{m_3} 为第 m 个条状点云上部分交联绝缘块元编号集合; V_{m_4} 为第 m 个条状点云上部分内半导体层块元编号集合。

4) 将条状点云上 V_{m_1} 集合对应的块元构成交联绝缘区域局部点云 L_{m_1} , V_{m_3} 集合对应的块元构成反应力锥区域局部点云 L_{m_3} , V_{m_4} 集合对应的块元构成内半导体层区域局部点云 L_{m_4} 。

5) 对空间划分所得的所有条状点云重复步骤 1)~步骤 4), 得到各条状点云上交联绝缘区域局部点云、反应力锥区域局部点云与内半导体层区域局部点云。

2.5 基于平面相交线求取初步测量结果

已知空间中两相交平面的相交线可由相交线上一点及其方向向量表示, 即

$$l = p - t \cdot n, \quad (14)$$

式中: $p(p_x, p_y, p_z)$ 为相交线上一点; $n(n_x, n_y, n_z)$ 为相交线的方向向量。 $p(p_x, p_y, p_z)$ 满足约束条件。

$$\begin{cases} (p - p_1) \cdot n_1 = 0 \\ (p - p_2) \cdot n_2 = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $p_1(p_{1x}, p_{1y}, p_{1z})$ 为平面 U_1 上的一点; $p_2(p_{2x}, p_{2y}, p_{2z})$ 为平面 U_2 上一点; $n_1(n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$ 为平面 U_1 的法向量; $n_2(n_{2x}, n_{2y}, n_{2z})$ 为平面 U_2 的法向量。根据平面 U_1 的法向量、平面 U_2 的法向量、 U_1 平面上一点、 U_2 平面上一点构建拉格朗日函数, 求取空间两相交平面相交线及交线上一点的步骤^[25]如下:

1) 求取平面 U_1, U_2 交线的方向向量 $n(n_x, n_y, n_z)$, 计算公式为

$$n = n_1 \times n_2. \quad (16)$$

2) 根据式(15)所示的约束条件构建拉格朗日函数

$$\begin{aligned} w = & \|p - p_0\|^2 + \lambda(p - p_1) \cdot n_1 + \mu(p - p_2) \cdot n_2 = (p_x - p_{0x})^2 + (p_y - p_{0y})^2 + (p_z - p_{0z})^2 + \\ & \lambda p_x n_{1x} + \lambda p_y n_{1y} + \lambda p_z n_{1z} - \lambda p_1 \cdot n_1 + \mu p_x n_{2x} + \mu p_y n_{2y} + \mu p_z n_{2z} - \mu p_2 \cdot n_2, \end{aligned} \quad (17)$$

其中,

$$p_0 = \frac{(p_1 + p_2)}{2} = \left(\frac{p_{1x} + p_{2x}}{2}, \frac{p_{1y} + p_{2y}}{2}, \frac{p_{1z} + p_{2z}}{2} \right), \quad (18)$$

式中: λ, μ 为拉格朗日乘数。

3) 按式(19)所示方程组求解相交线上一点 $p(p_x, p_y, p_z)$, 从而得到相交平面的交线方程。

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial p_x} = 2(p_x - p_{0x}) + \lambda n_{1x} + \mu n_{2x} = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial p_y} = 2(p_y - p_{0y}) + \lambda n_{1y} + \mu n_{2y} = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial p_z} = 2(p_z - p_{0z}) + \lambda n_{1z} + \mu n_{2z} = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial \lambda} = p_x n_{1x} + p_y n_{1y} + p_z n_{1z} - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{n}_1 = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial \mu} = p_x n_{2x} + p_y n_{2y} + p_z n_{2z} - \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{n}_2 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & n_{1x} & n_{2x} \\ 0 & 2 & 0 & n_{1y} & n_{2y} \\ 0 & 0 & 2 & n_{1z} & n_{2z} \\ n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} & 0 & 0 \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_{0x} \\ 2p_{0y} \\ 2p_{0z} \\ \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{n}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

针对图 7(a)所示的电缆接头,使用式(4)将其划分为条状点云。当划分角度较小时,条状点云 S_m 可以看成是由交联绝缘平面、交联绝缘区域与反应力锥区

域过渡曲面、反应力锥平面、反应力锥区域与内半导体层区域过渡曲面、内半导体层平面构成的,如图 11 所示。

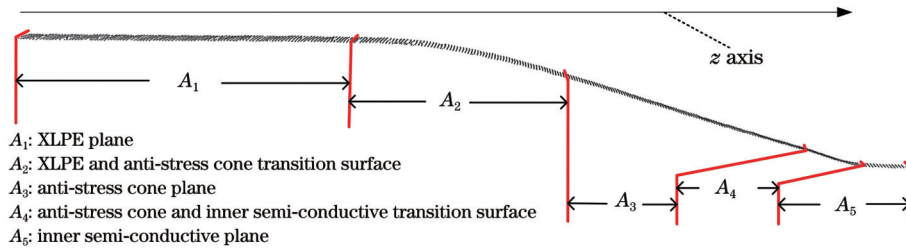


图 11 平面与曲面组成的条状点云示意图

Fig. 11 Diagram of strip point cloud formed by planes and surfaces

由电缆接头结构及图 11 可知,反应力锥与交联绝缘区域的交界点在反应力锥平面与交联绝缘平面的交线处,反应力锥区域与内半导体层区域的交界点在反应力锥平面与内半导体层平面的交线处。因此,求取第 m 个条状点云 S_m 上反应力锥区域与交联绝缘区域

的交界点,就是求取反应力锥局部点云 L_{m_1} 拟合平面与交联绝缘局部点云 L_{m_3} 拟合平面的空间交线,而求取反应力锥区域与内半导体层区域交界点则是求取反应力锥局部点云 L_{m_1} 拟合平面与交联绝缘局部点云 L_{m_4} 拟合平面的空间交线,如图 12 所示。

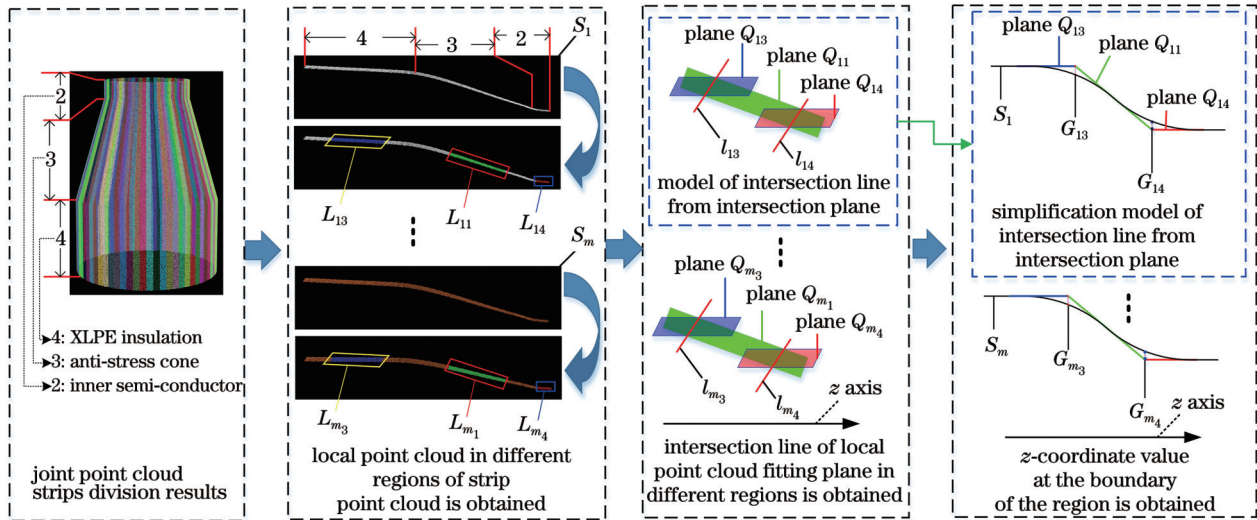


图 12 反应力锥起点与终点求取流程示意图

Fig. 12 Calculation process diagram of starting point and ending point of anti-stress cone

基于空间平面交线求取电缆接头反应力锥区域起点、终点的步骤如下:

1) 使用RANSAC算法分别对基于块元轴线夹角及改进凹凸性准则所得的局部点云 L_{m_1} 、 L_{m_3} 、 L_{m_4} 进行

平面拟合,得到平面 Q_{m_1} 、 Q_{m_3} 、 Q_{m_4} ;

2) 基于拉格朗日乘法求取平面 Q_{m_1} 与平面 Q_{m_3} 相交线 l_{m_3} 的方向向量及交线上一点、平面 Q_{m_1} 与平面 Q_{m_4} 相交线 l_{m_4} 的方向向量及交线上一点;

3) 按式(20)分别计算当前条状点云上各点与相交线 l_{m_3} 、 l_{m_4} 的空间距离, 取与 l_{m_3} 距离最小的点的 z 坐标值作为当前条上联接绝缘区域与反应力锥区域交界

点的 z 坐标值, 与 l_{m_4} 距离最小的点的 z 坐标值作为当前条上反应力锥区域与内半导体层区域交界点的 z 坐标值。

$$\begin{cases} D_{i_3} = \frac{|\mathbf{n}_{m_3} \times (\mathbf{p}_{m_3} - \mathbf{p}_i)|}{|\mathbf{n}_{m_3}|}, D_{i_3} \in V_{Dm_3}, G_{m_3} = z[\min(V_{Dm_3})] \\ D_{i_4} = \frac{|\mathbf{n}_{m_4} \times (\mathbf{p}_{m_4} - \mathbf{p}_i)|}{|\mathbf{n}_{m_4}|}, D_{i_4} \in V_{Dm_4}, G_{m_4} = z[\min(V_{Dm_4})] \end{cases}, \quad (20)$$

式中: D_{i_3} 、 D_{i_4} 分别为条状点云 S_m 上一点 \mathbf{p}_i 到相交线 l_{m_3} 、 l_{m_4} 的距离; $\mathbf{n}_{m_3}(n_{m_3x}, n_{m_3y}, n_{m_3z})$ 、 $\mathbf{n}_{m_4}(n_{m_4x}, n_{m_4y}, n_{m_4z})$ 分别为平面相交线 l_{m_3} 、 l_{m_4} 的方向向量; $\mathbf{p}_{m_3}(p_{m_3x}, p_{m_3y}, p_{m_3z})$ 、 $\mathbf{p}_{m_4}(p_{m_4x}, p_{m_4y}, p_{m_4z})$ 分别为相交线 l_{m_3} 、 l_{m_4} 上一点; $\mathbf{p}_i(x_i, y_i, z_i)$ 为条状点云 S_m 中任意一点; V_{Dm_3} 、 V_{Dm_4} 分别为条状点云 S_m 上各点到相交线 l_{m_3} 、 l_{m_4} 距离的集合; G_{m_3} 为条状点云 S_m 上联接绝缘区域与反应力锥区域交界点的 z 坐标值; G_{m_4} 为反应力锥区域与内半导体层区域交界点的 z 坐标值。

4) 对空间划分所得的所有条状点云执行步骤 1)~步骤 3), 得到各条状点云上联接绝缘区域与反应力锥区域的交界点的 z 坐标值 G_{m_3} 以及反应力锥区域与内半导体层区域的交界点的 z 坐标值 G_{m_4} 。

2.6 残差估计误差校正

如前所述, 为使制作的电缆接头具有更佳的性能, 技术人员通常会将电缆接头的交界处打磨成弧状, 以便包缠增绕绝缘, 进一步改善绝缘表面的电位分布。但这种弧状结构会导致基于相邻区域平面相交线求取的反应力锥与联接绝缘区域交界点、反应力锥与内半导体层区域交界点均向反应力锥区域偏移, 从而

导致测量值与真实值之间出现较大偏差, 如图 13 所示。因此, 本文采用残差估计的方式对基于平面相交线求取的初步测量结果进行误差校正。

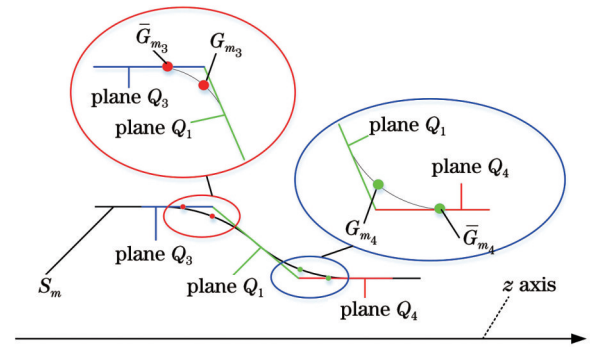


图 13 基于残差估计的误差校正示意图

Fig. 13 Diagram of error correction based on residual estimation

基于残差估计对初步测量结果进行误差校正的步骤如下:

1) 对当前条状点云上的所有块元进行质心估计, 估计公式见式(7)。

2) 计算质心 z 坐标值小于 G_{m_3} 的残差、质心 z 坐标值大于 G_{m_4} 的残差, 计算公式为

$$\begin{cases} D_{mn3} = \frac{1}{k_{mn}} \cdot \sum_{i=1}^{k_{mn}} \frac{|a_{m_3} \cdot x_i + b_{m_3} \cdot y_i + c_{m_3} \cdot z_i + d_{m_3}|}{\sqrt{a_{m_3}^2 + b_{m_3}^2 + c_{m_3}^2}}, \text{ if } z_{mn} < G_{m_3} \\ D_{mn4} = \frac{1}{k_{mn}} \cdot \sum_{i=1}^{k_{mn}} \frac{|a_{m_4} \cdot x_i + b_{m_4} \cdot y_i + c_{m_4} \cdot z_i + d_{m_4}|}{\sqrt{a_{m_4}^2 + b_{m_4}^2 + c_{m_4}^2}}, \text{ if } z_{mn} > G_{m_4} \end{cases}, \quad (21)$$

式中: z_{mn} 为第 m 个条状点云上第 n 个块元质心的 z 坐标值; D_{mn3} 为第 m 个条状点云上第 n 个块元与联接绝缘区域局部点云拟合平面 Q_{m_3} 的残差; D_{mn4} 为第 m 个条状点云上第 n 个块元与内半区域局部点云拟合平面 Q_{m_4} 的残差; $(a_{m_3}, b_{m_3}, c_{m_3}, d_{m_3})$ 为第 m 个条状点云上交

联接绝缘区域局部点云拟合平面 Q_{m_3} 的平面参数; $(a_{m_4}, b_{m_4}, c_{m_4}, d_{m_4})$ 为第 m 个条状点云上内半导体层区域局部点云拟合平面 Q_{m_4} 的平面参数。

3) 根据步骤 2) 得到的块元残差估计结果求取区域交界点, 计算公式为

$$\begin{cases} \bar{G}_{m_3} = \frac{1}{k_{mn}} \sum_{i=1}^{k_{mn}} z_{mni}, \text{ when } D_{th3} < D_{mn3} \text{ and } D_{mn3} < D_{m(n+1)3} \\ \bar{G}_{m_4} = \frac{1}{k_{mn}} \sum_{i=1}^{k_{mn}} z_{mni}, \text{ when } D_{mn4} < D_{th4} \text{ and } D_{m(n+1)4} < D_{mn4} \end{cases}, \quad (22)$$

式中: D_{th3} 为求联接绝缘区域与反应力锥区域交界点的阈值; \bar{G}_{m_3} 为第 m 个条状点云上初步测量结果 G_{m_3} 的

误差校正结果; D_{th4} 为求反应力锥区域与内半导体层区域交界点的阈值; \bar{G}_{m_4} 为初步测量结果 G_{m_4} 的误差校

正结果。

4) 对空间划分所得所有条状点云执行步骤 1)~步骤 3), 得到各条状点云上交联绝缘区域与反应力锥区域交界点的 z 坐标值 \overline{G}_{m_3} 以及反应力锥区域与内半导体层区域交界点的 z 坐标值 \overline{G}_{m_4} 。

5) 根据各条状点云所得 \overline{G}_{m_3} 、 \overline{G}_{m_4} , 计算区域交界值, 计算公式为

$$\begin{cases} Z_3 = \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{m=1}^{k_1} \overline{G}_{m_3} \\ Z_4 = \frac{1}{k_1} \cdot \sum_{m=1}^{k_1} \overline{G}_{m_4} \end{cases}, \quad (23)$$

式中: Z_3 为电缆接头交联绝缘区域与反应力锥区域交界点的 z 坐标值; Z_4 为反应力锥区域与内半导体层区域交界点的 z 坐标值; η 为条状点云划分角度; k_1 为条状点云数量, $k_1 = 360^\circ/\eta$ 。

3 实验结果与分析

为评估本文所提算法的性能, 对南网工匠大学清河区专业技术人员制作的真实电缆接头的反应力锥以及软件生成的标准电缆接头点云反应力锥的各参数进行测量实验。电缆接头反应力锥被测参数如图 14 所示, 各参数的含义及计算方法如表 1 所示。各电缆接头反应力锥参数的测量均在同一实验平台上进行, 实验平台为 Intel Core i7-11700K, 内存 32 GB, 程序开发平台为 Visual Studio 2015@PCL1.8.1。采用参数测量通用评价指标——相对误差与绝对误差对测量精度进行量化评价^[26], 相对误差与绝对误差的

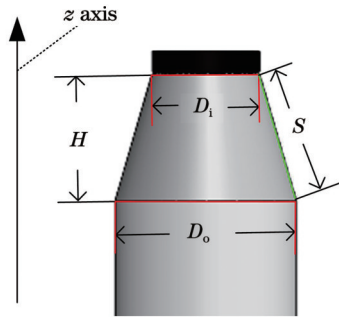


图 14 反应力锥被测参数示意图

Fig. 14 Diagram of measured parameter of anti-stress cone

表 1 反应力锥被测量参数含义及计算方法

Table 1 Explanation of measured parameters of anti-stress cone and their calculation methods

Measured parameter	Meaning	Calculation method
D_i	End diameter	Diameter of fitting circle at Z_4
D_o	Start diameter	Diameter of fitting circle at Z_3
H	Height	$Z_4 - Z_3$
S	Slope length	$\sqrt{[(D_o - D_i)/2]^2 + H^2}$

计算公式见式(24)。

$$\begin{cases} e(x) = x^* - x \\ e_r(x) = \frac{|e(x)|}{x^*} \times 100\% \end{cases}, \quad (24)$$

式中: $e(x)$ 为绝对误差; x^* 为被测参数的精确值; x 为被测参数的测量值; $e_r(x)$ 为相对误差。其中, 人工打磨电缆接头的精确值由南网工匠大学清河校区的多位技术人员通过专业测量工具通过多次测量取平均值获得, 精度为 1.0 mm。为了更明显地展现本文所提算法对电缆接头参数测量的优越性, 将圆拟合半径变化法^[27]作为对比算法。半径变化法利用相邻拟合圆的半径差实现区域交界点的求取。表 2 为测量结果, 实验时各参数的具体取值如下: $c = 0.75$, $h = 0.5$ mm, $\eta = 5^\circ$, $\varphi_{th1} = 75^\circ$, $\varphi_{th2} = 85^\circ$, $\beta_{th} = 10^\circ$, $D_{th3} = 0.35$ mm, $D_{th4} = 0.4$ mm。

由表 2 可知, 虽然半径变化法耗时较少, 但其精度远低于本文所提算法。分析表 2 数据可以发现, 半径变化法求取的交联绝缘区域与反应力锥区域交界点、反应力锥区域与内半导体层区域交界点均向反应力锥区域偏移。这是由于电缆接头区域交界处存在弧状过渡区域, 该过渡区域导致区域交界处的半径差值并不明显, 而反应力锥区域相邻拟合圆半径存在较大变化, 因此测量结果的误差较大。

为了直观地展示本文所提算法中的关键模块对算法测量精度的影响, 分别就空间划分方式、残差估计误差校正模块对算法的影响进行了分析, 结果如表 3、表 4 所示。

由表 3 可知, 两种算法的耗时较为接近, 但本文空间划分方法取得的测量效果更好。这是由于条状点云按等高度进行块元划分所得块元之间的点数差距较大, 块元对被测物体局部特征描述存在差异, 因此测量效果不佳。

由表 4 可知, 本文所提算法对标准电缆接头的反应力锥各参数进行测量时, 绝对误差小于 0.2 mm, 相对误差小于 0.5%。由于标准电缆接头区域交界处不存在弧状过渡结构, 因此残差校正前后的参数测量值没有变化。对打磨过的电缆接头的反应力锥进行参数测量时, 经残差估计精度校正后的绝对误差均小于 1.0 mm, 相对误差均小于 1.5%。分析可知, 标准件测量误差主要来源于式(22)的计算过程(该式在计算校正后区域的交界点时, 只能定位到某一块元, 取该块元上所有 z 坐标值的均值作为区域交界点)。还有一部分误差来自平面拟合时的拟合误差。人工打磨接头测量误差除了与标准件有同样的误差来源以外, 还有一项来源是人工测量的真值存在一定误差。通过对比残差估计误差校正前后的测量值, 验证了残差估计误差校正模块的有效性。

为了直观地展示式(3)中块元划分高度 h 对所提

表 2 不同方法的测量结果
Table 2 Measurement results of different methods

Joint	Index	Measured value of radius change				Measured value of ours			
		D_i	D_o	S	H	D_i	D_o	S	H
Standard joint	x^*/mm	46.40	78.40	57.28	55.00	46.40	78.40	57.28	55.00
	x/mm	48.35	75.63	49.28	47.35	46.29	78.39	57.42	55.13
	$e(x)/\text{mm}$	-1.95	2.77	8.00	7.65	0.11	0.01	-0.14	-0.13
	$e_r(x)/\%$	4.20	3.53	13.97	13.91	0.24	0.01	0.24	0.24
	Points	766310				766310			
	Time/s	6.63				18.87			
Artificial joint ^①	x^*/mm	47.00	78.00	53.79	51.50	47.00	78.00	53.79	51.50
	x/mm	49.84	76.13	45.62	43.68	46.88	78.32	53.21	50.83
	$e(x)/\text{mm}$	-2.84	1.87	8.17	7.82	0.12	-0.32	0.58	0.67
	$e_r(x)/\%$	6.04	2.40	15.18	15.18	0.26	0.41	1.08	1.30
	Points	814402				814402			
	Time/s	7.14				19.85			
Artificial joint ^②	x^*/mm	45.50	77.50	59.68	57.50	45.50	77.50	59.68	57.50
	x/mm	46.62	74.87	52.69	50.76	45.97	77.21	59.28	57.19
	$e(x)/\text{mm}$	-1.12	2.63	6.99	6.74	-0.47	0.29	0.40	0.31
	$e_r(x)/\%$	2.46	3.39	11.71	11.72	1.03	0.37	0.67	0.54
	Points	898623				898623			
	Time/s	7.74				19.38			

表 3 不同空间划分方式下的测量结果
Table 3 Measurement results for different space division methods

Joint	Index	Measured value of equal height division				Measured value of ours			
		D_i	D_o	S	H	D_i	D_o	S	H
Standard joint	x^*/mm	46.40	78.40	57.28	55.00	46.40	78.40	57.28	55.00
	x/mm	47.16	76.36	55.56	53.60	46.29	78.39	57.42	55.13
	$e(x)/\text{mm}$	-0.76	2.04	1.72	1.40	0.11	0.01	-0.14	-0.13
	$e_r(x)/\%$	1.64	2.60	3.00	2.55	0.24	0.01	0.24	0.24
	Points	766310				766310			
	Time/s	18.36				18.87			
Artificial joint ^①	x^*/mm	47.00	78.00	53.79	51.50	47.00	78.00	53.79	51.50
	x/mm	47.87	76.84	52.66	50.63	46.88	78.32	53.21	50.83
	$e(x)/\text{mm}$	-0.87	1.16	1.13	0.87	0.12	-0.32	0.58	0.67
	$e_r(x)/\%$	1.85	1.49	2.10	1.69	0.26	0.41	1.08	1.30
	Points	814402				814402			
	Time/s	19.64				19.85			
Artificial joint ^②	x^*/mm	45.50	77.50	59.68	57.50	45.50	77.50	59.68	57.50
	x/mm	46.16	76.81	58.92	56.89	45.97	77.21	59.28	57.19
	$e(x)/\text{mm}$	-0.66	0.69	0.76	0.61	-0.47	0.29	0.40	0.31
	$e_r(x)/\%$	1.45	0.89	1.27	1.06	1.03	0.37	0.67	0.54
	Points	898623				898623			
	Time/s	19.43				19.38			

表 4 误差校正前后的测量结果
Table 4 Measurement results before and after error correction

Joint	Index	Measured value before error correction				Measured value after error correction			
		D_i	D_o	S	H	D_i	D_o	S	H
Standard joint	x^* /mm	46.40	78.40	57.28	55.00	46.40	78.40	57.28	55.00
	x /mm	46.29	78.39	57.42	55.13	46.29	78.39	57.42	55.13
	$e(x)$ /mm	0.11	0.01	-0.14	-0.13	0.11	0.01	-0.14	-0.13
	$e_r(x)$ /%	0.24	0.01	0.24	0.24	0.24	0.01	0.24	0.24
	Points	766310							
	Time /s	18.87							
Artificial joint ^①	x^* /mm	47.00	78.00	53.79	51.50	47.00	78.00	53.79	51.50
	x /mm	47.46	77.36	51.45	49.23	46.88	78.32	53.21	50.83
	$e(x)$ /mm	-0.46	0.64	2.34	2.27	0.12	-0.32	0.58	0.67
	$e_r(x)$ /%	0.98	0.82	4.35	4.41	0.26	0.41	1.08	1.30
	Points	814402							
	Time /s	19.85							
Artificial joint ^②	x^* /mm	45.50	77.50	59.68	57.50	45.50	77.50	59.68	57.50
	x /mm	46.36	76.06	57.12	55.16	45.97	77.21	59.28	57.19
	$e(x)$ /mm	-0.86	1.44	2.56	2.34	-0.47	0.29	0.40	0.31
	$e_r(x)$ /%	1.89	1.85	4.29	4.07	1.03	0.37	0.67	0.54
	Points	898623							
	Time /s	19.38							

算法精度的影响,设置不同的 h 值对标准电缆接头的反应力锥高度 H (精确值 $H^*=55.00$ mm) 进行了测量。测量结果如表 5 所示。

表 5 块元划分高度 h 对算法精度的影响
Table 5 Effect of piece height h on algorithm accuracy

h /mm	H /mm	$e(x)$ /mm	$e_r(x)$ /%
0.1	55.61	-0.61	1.11
0.2	55.52	-0.52	0.95
0.3	55.43	-0.43	0.78
0.4	55.38	-0.38	0.69
0.5	55.25	-0.25	0.45
0.6	55.53	-0.53	0.96
0.7	55.74	-0.74	1.35
0.8	55.87	-0.87	1.58
0.9	56.01	-1.01	1.84
1.0	56.12	-1.12	2.04

由表 5 可知,当空间划分高度由 0.1 mm 增至 1.0 mm 时,算法的测量精度出现先增加后降低的趋势。这是由于当空间划分块元高度 h 较小时,单个块元点数过少,块元法线估计误差较大,导致基于轴线夹角及块元凹凸性求取条状点云上各区域局部点云的误

差增大,从而导致测量误差增大;当空间划分块元高度 h 较大时,块元内各点 z 坐标值的跨度过大,导致测量误差增大。

此外,为探索所提算法中关键参数对算法精度的影响,在不同的条状划分角度 η 以及交界点估计阈值 D_{th3}, D_{th4} 下,使用控制变量法对同一技术人员打磨的电缆接头的反应力锥高度 H (精确值 $H^*=57.50$ mm) 进行参数测量及误差分析。结果如表 6、表 7、表 8 所示。

表 6 空间划分条状点云角度 η 对算法精度的影响
Table 6 Effect of strip point cloud angle η on algorithm accuracy

η /($^\circ$)	H /mm	$e(x)$ /mm	$e_r(x)$ /%
1	61.07	-3.57	6.21
2	60.17	-2.67	4.64
3	59.37	-1.87	3.25
4	58.40	-0.90	1.57
5	57.96	-0.46	0.80
6	57.18	0.32	0.56
7	56.62	0.88	1.53
8	56.13	1.37	2.38
9	55.47	2.03	3.53
10	54.10	3.40	5.91

表7 残差估计精度校正阈值 D_{th3} 对算法精度的影响
Table 7 Effect of threshold D_{th3} on algorithm accuracy

D_{th3}	H/mm	$e(x)/mm$	$e_r(x)/\%$
0.10	60.75	-3.25	5.65
0.15	59.83	-2.33	4.05
0.20	59.34	-1.84	3.20
0.25	58.63	-1.13	1.97
0.30	58.14	-0.64	1.11
0.35	57.96	-0.46	0.80
0.40	57.13	0.37	0.64
0.45	56.73	0.77	1.34
0.50	56.31	1.19	2.07
0.55	55.81	1.69	2.94

表8 残差估计精度校正阈值 D_{th4} 对算法精度的影响
Table 8 Effect of threshold D_{th4} on algorithm accuracy

D_{th4}	H/mm	$e(x)/mm$	$e_r(x)/\%$
0.10	61.03	-3.53	6.14
0.15	60.47	-2.97	5.17
0.20	59.67	-2.17	3.77
0.25	59.14	-1.64	2.85
0.30	58.66	-1.16	2.02
0.35	57.96	-0.46	0.80
0.40	57.36	0.14	0.24
0.45	56.78	0.72	1.30
0.50	56.21	1.29	2.24
0.55	55.73	1.77	3.08

由表6可知,当划分角度由 1° 增至 10° 时,算法精度呈现先增加后降低的趋势。这是由于当空间划分角度较小时,各区域局部点云进行平面拟合的点数量过少,算法对电缆表面缺陷的抗干扰性变差,从而使得平面拟合误差较大;当空间划分角度过大时,参与拟合平面的点不再处于平面上,而是处于一个曲面上,拟合平面误差也会过大,从而导致交线偏差过大。

由表7可知,随着残差估计精度校正阈值 D_{th3} 由 0.10 增至 0.55,算法测量精度呈现先增加后降低的变化趋势。这是由于当阈值 D_{th3} 较小时,求得的内半导电层区域与反应力锥区域的交界点向内半导电层区域偏移,导致测量值大于真实值;当阈值 D_{th3} 较大时,求得的内半导电层区域与反应力锥区域的交界点向反应力锥区域偏移,导致测量值小于真实值。

由表8可知,随着残差估计精度校正阈值 D_{th4} 由 0.10 增至 0.55,算法测量精度出现先增加后降低的变化趋势。这是由于当阈值 D_{th4} 较小时,求得的内半导电层区域与反应力锥区域的交界点向内半导电层区域

偏移,导致测量值大于真实值;当阈值 D_{th4} 较大时,求得的内半导电层区域与反应力锥区域的交界点向反应力锥区域偏移,导致测量值小于真实值。

4 结 论

本文结合 XLPE 电缆接头结构特征与三维点云处理提出了一种 XLPE 电缆接头反应力锥参数测量算法。该算法先采用半径滤波对原始点云数据进行噪点去除处理,并使用 RANSAC 算法对电缆接头点云进行圆柱拟合,实现坐标摆正;然后基于电缆接头不同区域拟合圆的半径变化以及电缆接头各区域的距离结构特征,进行反应力锥及相邻区域目标点云的求取。在此基础上,针对现有有点云空间划分方法应用于类圆柱体结构电缆接头划分效果不佳的问题,本文提出了一种新的点云空间划分方法,有效实现了对电缆接头点云的条状划分及块元划分;接着,基于块元的轴线夹角及改进的凹凸性准则求取各条状点云不同区域的局部点云;然后对条状点云上的各局部点云分别进行平面拟合,并使用拉格朗日乘数法求取相邻区域拟合平面的相交线,再通过条状点云上各点到相交线的距离关系,得到初步测量结果;最后针对区域间的圆弧过渡结构使初步测量结果向反应力锥区域偏移的问题,提出了基于残差估计的误差校正方法,以进一步提高测量精度。

选用标准电缆接头的点云数据以及多根人工打磨的电缆接头对所提算法进行了实验验证,结果表明:对标准电缆接头点云反应力锥各参数进行测量时,绝对误差小于 0.2 mm,相对误差小于 0.5%;对人工打磨的多根电缆接头反应力锥各参数进行测量时,绝对误差均小于 1.0 mm,相对误差均小于 1.5%。这一结果表明本文所提算法具有较高的测量精度与鲁棒性,可以为电力行业电缆接头反应力锥参数测量提供精确的测量数据。本文所提算法在对 XLPE 电缆接头反应力锥参数进行测量时达到了一定的精度,后续本团队将针对缩短算法耗时的措施进行研究,同时尝试将文中的多个阈值设计为自适应阈值,以提高该算法的实时性与泛化性。

参 考 文 献

- [1] Bhatti A A, Yang B, Peng X S, et al. Simulation of temperature distribution behavior of high voltage cable joints with typical defects [C]// 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 8-11, 2021, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2021: 1139-1143.
- [2] 王晓建, 陈振, 胥晶, 等. 一种电缆主绝缘层反应力锥加工方法: CN111525464A[P]. 2020-08-11.
Wang X J, Chen Z, Xu J, et al. Cable main insulation layer reaction force cone processing method: CN111525464A[P]. 2020-08-11.
- [3] Su G Q, Liang X J, Li G C, et al. Interface defect breakdown property and electric field simulation of distribution cable accessories[C]// 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), April 11-15, 2021,

- Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [4] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的 10 kV 配电网中间接头受潮定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 825-832.
Li R, Zhou K, Wan H, et al. Moisture location of 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 825-832.
- [5] Zhou X X, Cao J P, Wang S H, et al. Simulation of electric field around typical defects in 110 kV XLPE power cable joints[C]// 2017 International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDs), September 5-8, 2017, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2017: 21-24.
- [6] Meng Y, Chen F, Hao X D, et al. Research on rail profile measurement method based on machine vision[C]// 2020 Chinese Automation Congress (CAC), November 6-8, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020: 2576-2581.
- [7] Molleda J, Usamentiaga R, Millara Á F, et al. A profile measurement system for rail quality assessment during manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2684-2692.
- [8] Zhou P, Xu K, Wang D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision[J]. IEEE Access, 2018, 6: 16423-16431.
- [9] Liu Y, Jia Z Y, Liu W, et al. An improved image acquisition method for measuring hot forgings using machine vision[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 238: 369-378.
- [10] Liu W, Jia X H, Jia Z Y, et al. Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 237-244.
- [11] Yang J H, Liu W, Fan C N, et al. Improved calibration method of binocular vision measurement system for large hot forging[C]// 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics, June 8-10, 2016, Santa Clara, CA. New York: IEEE Press, 2016: 918-922.
- [12] Zhou Y J, Wu Y C, Luo C. A fast dimensional measurement method for large hot forgings based on line reconstruction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5): 1713-1724.
- [13] Miao H S, Li Y C, Wei M, et al. An improved method of gray-code with binocular vision for workpiece 3D measurement[C]// 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), July 4-8, 2018, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2018: 1798-1803.
- [14] 王雪嵩, 邵双运, 苏晓东, 等. 基于双目线结构光的承轨台测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211202.
Wang X S, Shao S Y, Su X D, et al. Measurement of rail bearing platform based on binocular line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211202.
- [15] Peng T, Zhang Z J, Song Y J, et al. Portable system for box volume measurement based on line-structured light vision and deep learning[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3921.
- [16] Cui H, Hu Q W, Mao Q Z. Real-time geometric parameter measurement of high-speed railway fastener based on point cloud from structured light sensors[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3675.
- [17] 赵梦娜, 花向红, 冯绍权, 等. 基于点云切片的建筑物门窗信息提取[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604002.
Zhao M N, Hua X H, Feng S Q, et al. Information extraction of buildings, doors, and windows based on point cloud slices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604002.
- [18] Ngo N V, Hsu Q C, Hsiao W L, et al. Development of a simple three-dimensional machine-vision measurement system for in-process mechanical parts[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 168781401771718.
- [19] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [20] 闫利, 任大伟, 谢洪, 等. 激光点云与密集匹配点云融合方法[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0910003.
Yan L, Ren D W, Xie H, et al. Fusion method of LiDAR point cloud and dense matching point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0910003.
- [21] Rusu R B, Cousins S. 3D is here: point cloud library (PCL)[C]// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9-13, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011.
- [22] 李绕波, 袁希平, 甘淑, 等. 一种基于对偶四元素描述的线面特征约束的点云配准方法[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0214003.
Li R B, Yuan X P, Gan S, et al. Point cloud registration method based on dual quaternion description of line-planar feature constraints[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0214003.
- [23] 徐田野, 丁海勇. 基于融合图卷积的深度学习点云分类方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0228005.
Xu T Y, Ding H Y. Deep learning point cloud classification method based on fusion graph convolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0228005.
- [24] Stein S C, Schoeler M, Papon J, et al. Object partitioning using local convexity[C]// 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 304-311.
- [25] Príamos Georgiades. Plane-to-plane intersection[M]// Graphics Gems III (IBM version). Santa Clara, California: Crystal Graphics, Inc., 1992: 233-235.
- [26] Wang Z Q, Guo D, Wang Y J, et al. Research on self-calibration strategy of workpiece processing based on machine vision[C]// 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 23-27, 2021, Qufu, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [27] 刘城. 基于机器视觉的高压电缆开线缺陷检测研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
Liu C. Research on open wire defect detection of high voltage cable based on machine vision[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.

Measurement Algorithm for Anti-Stress Cone Parameters of Cross-Linked Polyethylene Cable Joint Based on Three-Dimensional Point Cloud Processing

Deng Lei^{1,2}, Liu Guihua^{1,2*}, Deng Hao^{1,2}, Huang Junjie^{1,2}, Zhou Binghong^{1,2}

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

²Key Laboratory of Special Environment Robotics of Sichuan Province, Mianyang 621010, Sichuan, China

Abstract

Objective Cross-linked polyethylene (XLPE) cable is an important part of the Chinese power system, and it plays a vital role in the

transmission of power resources, therefore ensuring the normal operation of its lines is critical. According to some relevant cable fault statistics, the main cause of XLPE cable failure is a poor quality anti-stress cone in the cable joint, which is because all parameters of the anti-stress cone of cable joints are currently measured manually using contact measuring tools, such as tape measure. This measurement method has large errors and is prone to causing secondary damage to the measured object. The other cause is some nonstandard joints whose anti-stress cone size does not meet the design requirements are often connected to the power system. Under long-term high-voltage action, nonstandard joints can cause partial discharge due to insufficient resistance to axial stress, resulting in the insulation breakdown. Existing noncontact parameter measurement methods are difficult to apply to the parameter measurement of anti-stress cones. Therefore, we combined the structural characteristics of the cable joint with three-dimensional (3D) point cloud processing to propose a parameter measurement algorithm for the anti-stress cone of the XLPE cable joint, which can realize the effective measurement of all parameters of the cable joint anti-stress cone, which is critical to ensure safe and reliable operation of the power system.

Methods First, this algorithm performs denoising and coordinate adjustment on a cable joint point cloud. Second, the target point cloud of the anti-stress cone and its adjacent area is obtained according to the XLPE cable joint characteristics. Then, the target point cloud is divided into strips and pieces using the point cloud space division method based on the angle and height information between each point and the coordinate axis in the target point cloud. Following that, the local point clouds of different regions on each strip point cloud are obtained using the included axis angle of the piece normal vector on the strip point cloud and the improved concave-convex criterion. On this basis, the random sample consensus (RANSAC) algorithm and Lagrange multiplier method are used to obtain the intersection line of the adjacent plane, and preliminary measurement results are obtained on the basis of the distance relationship between each point on the strip point cloud and the intersection line. Finally, residual estimation is used to correct the error of the preliminary measurement results to obtain the final measurement results.

Results and Discussions The proposed XLPE cable joint anti-stress cone parameter measurement algorithm has high-measurement accuracy and robustness. When it measures the parameters of the cable joint anti-stress cones with standard size, the absolute error is less than 0.2 mm, and the relative error is less than 0.5%; when it measures the parameters of the anti-stress cones of the cable joints polished by different technicians, the absolute error is less than 1.0 mm, and the relative error is less than 1.5% (Table 4), which meets the industry measurement accuracy requirements. Compared with the radius change method, it has higher measurement accuracy (Table 2). To address the problem that the number of points between the pieces obtained using the existing point cloud space division method is relatively large, resulting in the instability of local features, a new point cloud space division method that can achieve a good division effect is proposed (Figs. 6 and 7, Table 3), the best angle range of strip division is 4° – 6° (Table 6), and the best setting constant range of piece division is 0.4–0.6 mm (Table 5). To address the problem that the initial measurement value is shifted to the anti-stress cone region due to the structure of the cable joint, a residual estimation error correction method is proposed, which effectively improves the measurement accuracy of the algorithm (Fig. 12, Table 4). The optimal threshold range of D_{th3} and D_{th4} is 0.35–0.45 mm (Tables 7 and 8).

Conclusions In this paper, we proposed a 3D point cloud-based algorithm for measuring the anti-stress cone parameters of XLPE cable joints. The target point cloud is obtained by the proposed obtaining method; on this basis, the measurement of the parameters of the anti-stress cone of the cable joint is realized, which reduces the interference of the nontarget area and improves the processing efficiency of the algorithm. The proposed cable joint with a quasi-cylindrical structure ensures the consistency of the piece element's description of the measured object's characteristics. The original concave-convex criterion is improved to eliminate the influence of the piece elements in the transition area based on the changes in the included angle of the piece elements on the strip point cloud. The robustness of the algorithm is ensured using a preliminary measurement method based on the structural characteristics of the anti-stress cone. To avoid the problem that the preliminary measurement results are shifted to the anti-stress cone region due to the arc-shaped transition structure at the junction point of the anti-stress cone, the residual estimation error correction method is used to improve the measurement accuracy of the algorithm. Two types of cable joint point clouds with standard dimensions and surface defects were used for measurement experiments, and the experimental results show that the proposed algorithm has high-measurement accuracy and robustness.

Key words measurement; three-dimensional point cloud processing; cross-linked polyethylene cable joint; anti-stress cone; parameter measurement; machine vision