doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240177

采用三维点云的大口径钢管管端圆度测量

赵玉倩[1]，张昌辉[1]，程继兵[2]，茹 翔[2]
（1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院，河北 秦皇岛 066004；
2. 中油宝世顺（秦皇岛）钢管有限公司，河北 秦皇岛 066004）

摘 要：针对当前大口径钢管管端圆度仍依赖人工测量的现状，提出一种高效准确的全自动在线测量方案. 该方案采用激光扫描仪获取待测钢管管端的三维点云，并提出最小正投影面积法和小批量梯度下降法(MBGD)结合的方法，用以精确定位钢管的主轴方向. 针对圆度的测量，将最小二乘法(OLS)与差分进化(DE)算法相结合，提出一种基于最小区域的圆度评定方法. 此外，该方法在变异阶段引入混沌惯性权值，有效避免陷入局部最优解，从而提高评估精度. 实验结果表明，所提方法精度可以达到0. 1 mm，能够满足API 5L标准中钢管管端圆度测量要求.

关 键 词：三维点云；圆度；主轴方向定位；差分进化算法；非接触式测量
中图分类号：TB 92 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3026(2026)02-0066-08

Roundness Measurement of Large-Diameter Steel Pipe Ends Using 3D Point Clouds

ZHAO Yu-qian[1], *ZHANG Chang-hui*[1], *CHENG Ji-bing*[2], *RU Xiang*[2]
（1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Zhongyou Baoshishun (Qinhuangdao) Pipe Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: ZHAO Yu-qian, E-mail: zhaoyuqian@qhd.neu.edu.cn）

Abstract: To address the current reliance on manual measurement for the roundness of large-diameter steel pipe ends, an efficient and accurate fully automated online measurement solution is proposed. A laser scanner is employed to acquire a 3D point cloud of the steel pipe ends, and a method combining the minimum orthogonal projection area method with mini-batch gradient descent (MBGD) is proposed to precisely determine the principal axis direction of the steel pipe. For roundness measurement, the ordinary least squares (OLS) method is combined with the differential evolution (DE) algorithm, and a roundness evaluation method based on the minimum zone roundness is established. Additionally, chaotic inertia weights are introduced during the mutation phase, effectively avoiding local optima and thereby improving evaluation accuracy. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves an accuracy of 0. 1 mm, meeting the roundness measurement requirements specified in the API 5L standard for steel pipe ends.

Key words: 3D point cloud; roundness; principal axis orientation; differential evolution algorithm; non-contact measurement

钢管管端的圆度是评定其工艺质量的核心指标之一，它不仅直接影响钢管连接的精度和密封性，还对后续的焊接和安装过程有着重要的作用[1]. 因此，确保管端圆度的准确测量对于保障钢管整体性能和质量至关重要. 目前，大多数生产企业仍依赖人工进行大口径钢管管端（直径为300~1 200 mm）圆度的测量. 为提高测量的可靠性和降低人工成本，企业亟需采用非接触式的自动化测量方法来替代人工操作.

针对钢管圆度非接触式自动化测量，许多学

收稿日期：2024-10-08
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2022GFZD013）；河北省自然科学基金资助项目（E2022203196）.
作者简介：赵玉倩（1977—），女，河北卢龙人，东北大学副教授，博士生导师.
通信作者：赵玉倩，E-mail：zhaoyuqian@qhd.neu.edu.cn.

者提出了一系列测量方法.黄继庆等[2]利用传感器和滑台搭建了钢管测量装置,应用最小二乘法实现了大口径钢管的圆度测量.丁哲文等[3]通过机器视觉和边缘检测算子Canny实现了小型零件的圆度检测.Yan等[4]通过机器视觉的方法获得亚像素边缘位置,以改进的粒子群优化算法和最小区域法完成了铝管管端圆度测量.Song等[5]开发了一种多传感器集成系统,实现了孔类零件的圆度测量.

随着三维数据采集技术的发展,众多学者探索三维点云处理算法[6].三维点云技术凭借其操作简便、扫描速度快和便携性高等优点,逐渐成为测绘领域的发展趋势[7];Huang等[8]采用三维点云和深度图相互转化的方法,提取出平面焊缝边界,并对焊缝各项尺寸进行了测量;Wang等[9]提出了一种基于超点图结构的树木三维点云分割和测量方法,解决了森林三维点云的语义和实例分割问题;Dou等[10]将三维激光扫描技术用于曲轴同轴度的测量,精度可达4.2 μm;王志远等[11]提出了一种基于三维激光雷达三维点云的枕簧几何尺寸测量方法,通过对三维点云进行降采样、边缘提取和圆形分割,以改进的圆拟合算法对枕簧内、外径进行测量;Han等[12]提出了一种利用三维激光扫描技术自动快速测量船体结构焊缝尺寸的方法,对于平面焊缝无需人工干预即可获取数据;Wang等[13]基于三维激光雷达三维点云提出了一种冰球护肘角度测量方法;夏毅敏等[14]应用三维激光扫描技术检测全断面隧道掘进机(TBM)隧道成型质量,提出了基于三维激光扫描技术的TBM隧道成型质量自动检测方法.本文基于三维点云技术,提出了一种钢管管端圆度非接触式测量方法,为生产企业提供了一种非接触式检测钢管管端圆度的可行方案.

1　三维点云的获取及预处理

1.1　激光三角测量法获取三维点云

采用激光三角测量法获取管端三维点云,原理如图1所示.通过将一束激光投射到钢管表面形成激光点,摄像机从另一个角度拍摄激光在物体表面上的反射图像,获取激光点的坐标(x,y).根据激光器、摄像头和激光点之间的几何关系,由式(1)可获得深度信息,即坐标z.

$$z=\frac{Lf}{p_x}. \tag{1}$$

式中:L为激光器与摄像机之间的基线距离;f为摄像机的焦距;p_x为激光反射点在摄像机图像中的水平坐标.

通过逐点扫描物体表面,摄像机不断记录激光反射点的位置变化,从而生成钢管管端的三维点云.钢管实物图及钢管管端三维点云分别如图2和图3所示.

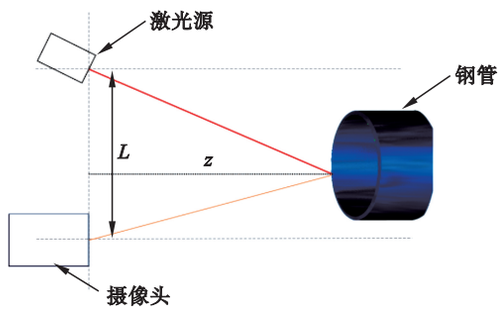


图1　激光三角测量法

Fig.1　Laser triangulation method

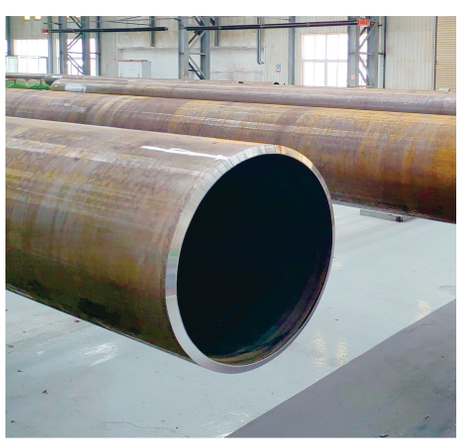


图2　钢管实物

Fig.2　Steel pipe



图3　钢管管端三维点云

Fig.3　3D point cloud of steel pipe end

1.2 三维点云预处理

1.2.1 降 噪

在钢管三维点云获取过程中,由于采集环境、钢管的金属反光特性及设备本身等因素,原始三维点云存在一些噪声点,为避免噪声点对后续测量结果的影响,采用统计滤波算法[15]进行降噪处理.该方法对三维点云中每个点计算其邻域平均值,基于整个三维点云的邻域平均值建立高斯分布函数,通过均值和标准差确定距离阈值,进而判断并移除噪声点,最终获得纯净的钢管管端三维点云.

1.2.2 降采样

管端三维点云数约为400万个,在后续的运算处理中,所需进行的计算量较大.为了减少计算量,在部分计算中采用降采样后的三维点云进行运算.采用体素滤波对三维点云进行降采样处理,该方法将空间划分为固定大小的三维立方体(即体素),并在每个体素内统计点的位置.然后,通过计算每个体素内点的质心,并选择距离质心最近的点作为该体素的代表点,从而得到降采样后的三维点云.

2 主轴方向定位

在圆度评定的过程中,需要获取钢管管端多个截面的点云切片,通过三维点云切片的圆度反映钢管的整体圆度.如图4所示,坐标系 $o'-x'y'z'$ 为理想坐标系,坐标系 $o-xyz$ 为偏差坐标系,为获得理想的三维点云切片,必须精确定位主轴方向;否则所截取的三维点云切片将是沿钢管表面的椭圆,会导致后续计算的圆度出现偏差.在获取钢管管端三维点云时,对于质量约3 t的钢管进行精确定位操作较为困难,因此,需要根据钢管的三维点云计算出钢管主轴的方向,从而获取理想的三维点云切片.为了减小运算量,可通过降采样处理三维点云来进行主轴方向定位.

2.1 基于主成分分析法的主轴方向初定位

由于钢管三维点云在空间中主轴方向与坐标轴方向偏离较大,采用主成分分析(PCA)[16]法进行主轴方向的初步寻找.PCA法是一种高维数据降维技术,通过计算协方差矩阵的特征值和特征向量来获取数据变异性的最大方向和次要方向.具体方法如下:

对钢管管端三维点云 C_n 进行去中心化处理.

$$\boldsymbol{C}=\left[c_1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_i,\cdots,c_n-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_i\right]. \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{C}$ 为去中心化后的点云矩阵;n 为点云总数量;c_i 为第 i 个三维点.

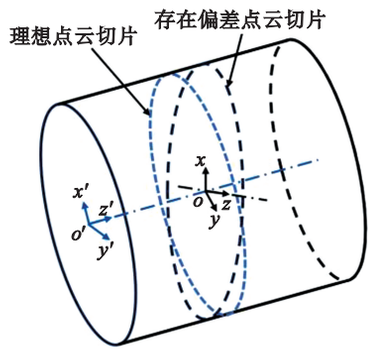


图4 主轴偏离而导致的非理想切片

Fig. 4 Non-ideal slicing caused by principal axis deviation

构建协方差矩阵 $\boldsymbol{A}$.

$$\boldsymbol{A}=\frac{1}{N-1}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}. \tag{3}$$

对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行特征值分解,得到其特征值和特征向量,其中特征值表示数据沿特征向量方向的方差大小.

由于获取的钢管管端直径(508 mm)远大于其长度(150 mm),导致管端径向变化大于轴向变化,使得最大特征值对应的方向为管端径向方向,而钢管管端的主轴方向为第2大特征值对应的特征向量.对于实际钢管三维点云,钢管管壁粗糙度、焊缝修磨处的凸起和表面的凹坑都会影响方向向量的计算结果,因此基于PCA法获取的主轴方向与实际方向仍存在偏差.

2.2 正投影面积梯度下降法

对于钢管三维点云,沿主轴方向的投影面积一定是最小的.根据这一特性,本文提出采用正投影面积梯度下降法精确获取三维点云主轴的方向,通过不断改变投影方向计算钢管三维点云的投影面积,投影面积最小的方向即为主轴方向.

2.2.1 凸包法投影面积计算

三维点云的投影是二维点集,将点集中的边界点依次连接形成多边形,且多边形的每条边均不向内弯曲,构建一个包含所有点的凸多边形,该多边形的面积即为三维点云的投影面积.

凸包法原理如图5所示.寻找三维点云投影点集 B_l 中坐标值 x 最大点 b_1 和最小点 b_2,以 b_1 和

b_2构成的线段将点集B_l分成2子集,寻找每个子集里距离线段最远的点$b_{\max}$,连接$b_{\max}b_1$和$b_{\max}b_2$构成2个新的线段将子集再次分割,显然三角形$b_{\max}b_1b_2$内部的点永远不可能是凸包的一部分,以线段$b_{\max}b_1$和$b_{\max}b_2$为新的边界,不断寻找三角形外部的点,直到外部不存在点为止.寻找到的所有端点构成点集U,所有点便包含在以点集U构成的多边形内部.计算多边形的面积S.

$$S=\frac{1}{2}\left|\sum_{i=1}^{l-1}\left(x_iy_{i+1}-x_{i+1}y_i\right)+\left(x_ly_1-x_iy_l\right)\right|. \quad (4)$$

式中:(x_i,y_i)是第i个多边形顶点的坐标值;l为通过凸包算法寻找出的顶点总数.

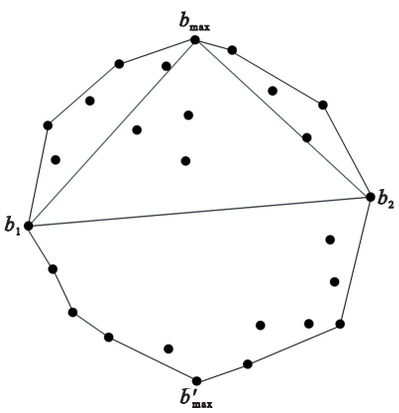


图5　凸包法原理

Fig. 5　Principle of convex hull method

2.2.2　基于小批量梯度下降法(MBGD)的最小投影面积优化方法

对于最小面积的寻找,每变换一次角度都需要计算投影面积,采用遍历所有旋转角度的方法寻找最小投影面积效率低下.为快速获取管端三维点云的最小投影面积,采用梯度下降法(GD)进行优化.GD通过计算目标函数相对于参数的梯度来控制目标函数的迭代方向,从而求解最优解.由于三维点云点数较多,若采用全部点计算梯度会导致运算时间过长,可以使用三维点云中的一部分更新梯度,来减少每次迭代的计算量,即采用MBGD,每次迭代从样本中抽取一个包含m个样本的子集进行梯度优化.以投影面积函数$M\left(\theta_x,\theta_y\right)$为目标函数,计算小批量的平均梯度.

$$\left.\begin{aligned}\nabla M(\theta_x)&=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial M_i}{\partial\theta_x};\\ \nabla M(\theta_y)&=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial M_i}{\partial\theta_y}.\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

式中:$\nabla M(\theta_x)$为目标函数关于θ_x的梯度方向;$\nabla M(\theta_y)$为目标函数关于θ_y的梯度方向;M_i为第i个样本的投影面积;θ_x为绕x轴旋转角度;θ_y为绕y轴旋转角度.

每次迭代更新角度为

$$\left.\begin{aligned}\theta_x^{(t+1)}&=\theta_x^{(t)}-\eta\nabla M(\theta_x);\\ \theta_y^{(t+1)}&=\theta_y^{(t)}-\eta\nabla M(\theta_y).\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

式中:η为学习率;t为当前迭代次数.

学习率η在MBGD中决定了每次迭代时参数更新的步长大小,直接影响运算结果的准确度.学习率过小会导致计算过程非常缓慢,可能需要大量迭代次数才能达到最优解;学习率过大可能导致梯度更新过度,使优化路径在目标函数曲面上振荡或发散.为了提高运算速度并寻找最优解,可采用动态调整学习率的方法.在运算过程中,随着迭代次数的增加,学习率逐渐减小.设定初始学习率为η_0,每经过一定的迭代次数c,学习率乘以衰减因子α更新为新的学习率η_t.

$$\eta_t=\eta_0\cdot\alpha^{\lfloor t/c\rfloor}. \quad (7)$$

每次迭代后检查目标函数值的变化是否小于预设的阈值ε.如果满足该条件,则认为算法已收敛,停止迭代.如图6所示,使用MBGD可以有方向地寻找到最小正投影面积,每次迭代都朝着正投影面积减小的方向前进.

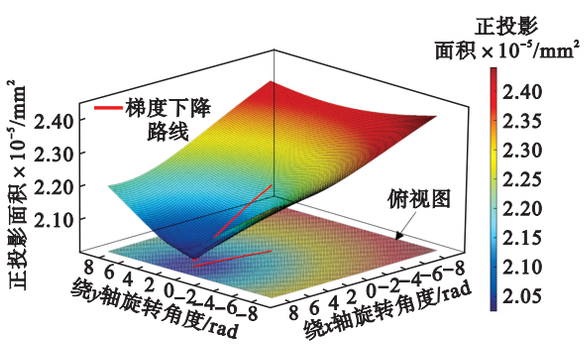


图6　正投影面积

Fig. 6　Projection area

3　基于差分进化优化的最小二乘法(OLS-DE)圆度评定模型

为计算钢管管端圆度,对钢管管端三维点云进行切片处理,通过多个三维点云切片的圆度值来表示钢管管端的整体圆度.圆度误差评定有4种方法:最小区域圆法、最小二乘圆法、最大内切圆法及最小外接圆法.其中最小区域圆法的评定精度最高[17].如图7所示,使用最小区域圆法进行圆度评定时,核心问题是找到一组拟合的同心圆,使同心圆之间形成的环形区域包含所有采样

点,同心圆外圆半径 $R_{\max}$ 和内圆半径 $R_{\min}$ 的差值即为圆度 e.

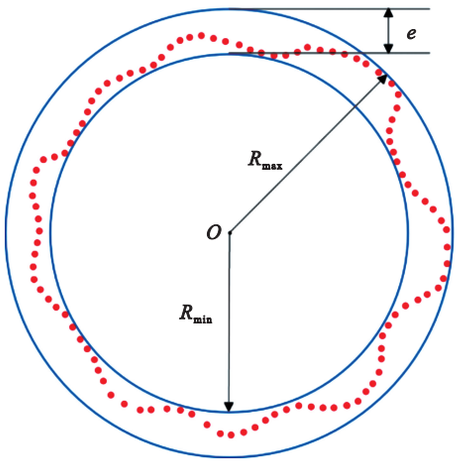


图7 最小区域圆法

Fig. 7 Minimum enclosing circle method

3.1 三维点云切片

理想情况下,三维点云切片的厚度应为零.然而由于三维点云是离散的,零厚度的切片实际上无法获取.因此,截取的三维点云切片需要具有一定的厚度,以确保其中包含足够的点用于圆度误差的计算.切片的厚度可根据实际三维点云的密度进行选择,通常略小于点与点之间的平均距离.

沿垂直于主轴方向获取多组三维点云切片,如图8所示.切片包含钢管管端内壁和外壁的截面信息.通过基于区域增长的分割算法,利用基于距离的邻域搜索将内壁截面和外壁截面分割.本文利用外壁的三维点云切片进行圆度检测.

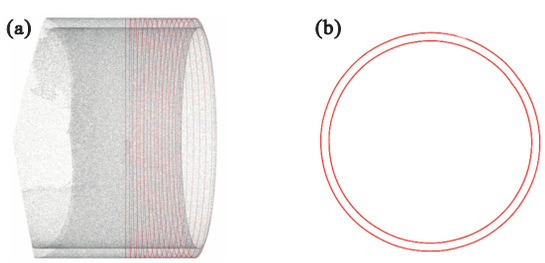


图8 三维点云切片

Fig. 8 3D point cloud slices

(a)—点云切片位置;(b)—轴向点云切片.

3.2 DE评定模型

由于三维点云切片中点的数量较多,传统方法在寻找拟合中心时难以兼顾速度和精度.在处理优化问题时,差分进化(DE)算法表现出优异的计算性能.DE算法是一种基于种群的全局优化算法.通过变异、交叉和选择3个主要步骤进化个体,并对种群个体进行差分操作,逐步逼近全局最优解.这种算法能够有效应对复杂的三维点云,提升拟合中心的计算精度.

DE算法的初值采用最小二乘法获取,根据最小二乘法,获取最小二乘圆心 (x_0, y_0) 和半径 r_0,构建三维向量 $\boldsymbol{\alpha}_0=(x_0, y_0, r_0)$ 为初始解.对初始解 $\boldsymbol{\alpha}_0$ 引入一定范围内的随机偏差生成不同的个体 $\boldsymbol{\alpha}_i$, $\boldsymbol{\alpha}_i=(x_i, y_i, r_i)$,每个个体的特征参数为其圆心坐标和半径值,所有个体构成初始种群.以最小区域圆度构建适应度函数,对每个个体计算适应度值,即圆度.

$$\left.\begin{aligned} R_{\max}&=\max\left(\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}\right);\\ R_{\min}&=\min\left(\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}\right);\\ e&=R_{\max}-R_{\min}. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

通过计算初始种群中所有个体的适应度,识别出当前种群中的最优解(即适应度最高的个体),作为后续迭代时参考的基准.

对种群进行变异处理时,针对种群中的每个个体,随机选择若干其他个体,计算它们之间的差异向量,并将该差异向量作为变异系数.然后,将该变异系数叠加到该个体上,生成一个新的变异向量.

$$\boldsymbol{v}_i^{h+1}=\boldsymbol{\alpha}_{r1}^h+F\cdot(\boldsymbol{\alpha}_{r2}^h-\boldsymbol{\alpha}_{r3}^h). \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{v}_i^{h+1}$ 为变异向量;$\boldsymbol{\alpha}_{r1}^h$, $\boldsymbol{\alpha}_{r2}^h$, $\boldsymbol{\alpha}_{r3}^h$ 为从种群中随机选择3个个体;F 为变异系数;h 为当前迭代次数.

将变异向量与当前个体进行交叉处理,生成新的实验向量.通过设定交叉概率,随机选择变异向量和当前个体的部分维度进行组合.

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{u}_i^{h+1}&=\boldsymbol{v}_i^{h+1}, \varepsilon_i(0,1)\leqslant P;\\ \boldsymbol{u}_i^{h+1}&=\boldsymbol{\alpha}_i^h, \varepsilon_i(0,1)>P. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中:P 为交叉概率;$\varepsilon_i(0,1)$ 为 $\varepsilon_i(0,1)$ 之间的随机数;$\boldsymbol{u}_i^{h+1}$ 为交叉生成的新的实验向量.

交叉的目的在于结合全局探索与局部利用,通过变异操作生成新的候选解以引入多样性,防止陷入局部最优.而交叉操作则通过部分保留当前解的信息,生成混合的实验向量,从而在探索新区域的同时,保持已有解的优良特性,最终推动算法向全局最优解收敛.

变异和交叉处理后计算种群每个个体的适应度值.通过式(11)对新的实验向量 $\boldsymbol{u}_i^{h+1}$ 和当前个体 $\boldsymbol{\alpha}_i^h$ 进行筛选.

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_i^{h+1}&=\boldsymbol{u}_i^{h+1}, H(\boldsymbol{u}_i^{h+1})\leqslant H(\boldsymbol{\alpha}_i^h);\\ \boldsymbol{\alpha}_i^{h+1}&=\boldsymbol{\alpha}_i^h, H(\boldsymbol{u}_i^{h+1})>H(\boldsymbol{\alpha}_i^h). \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

在每次迭代结束后,如果新的实验向量的适应度 $H(\boldsymbol{u}_i^{h+1})$ 小于等于当前个体的适应度 $H(\boldsymbol{\alpha}_i^h)$ 则选择新的实验向量 $\boldsymbol{u}_i^{h+1}$. 否则,保留当前个体的适应度值 $\boldsymbol{\alpha}_i^h$. 评估新一代个体 $\boldsymbol{\alpha}_i^{h+1}$ 中最优个体是否已收敛到期望的水平,若已达到,则最佳个体的位置即为拟合圆的理想坐标位置,其适应度值反映圆度.

3.3　OLS-DE评定模型

对于庞大的三维点云,基础的DE算法虽然可以找到最优解,但迭代时间长,且在迭代过程中面临陷入局部最优的问题,往往无法准确找到全局最优解.因此,本文在DE算法的基础上采用最小二乘法进行优化,提出了基于OLS-DE的圆度评定方法,并引入了混沌惯性权值,提高了算法的全局搜索能力.

3.3.1　种群范围

DE算法交叉变异过程有一定的随机性,以帮助算法在搜索空间中进行全局搜索并找到最优解.然而,这种随机性可能导致生成许多远离最优解的无效个体,从而降低算法的效率.为了加快收敛,本文采用最小二乘法划定种群个体的生成范围,并结合个体最优策略进行变异处理.最小包容区域圆心一定位于以 (x_0, y_0) 为圆心、最小二乘圆度 e_0 为半径的圆内.规定该圆为初始种群的生成范围,生成的种群个体必须位于该范围内,从而使每个个体都位于最优解附近,加快算法的收敛.

3.3.2　个体最优

为提高算法的效率,在每次迭代结束后,选择适应度最好的个体 $\boldsymbol{\alpha}_b$ 作为参考个体,确保搜索过程更加聚焦于优秀的解.因此,在进行变异操作时,选择 $\boldsymbol{\alpha}_b$ 作为基准,能够更快速地引导搜索到最优区域,并优化搜索过程.将式(9)修改为

$$\boldsymbol{v}_i^{h+1}=\boldsymbol{\alpha}_b^h+F(\boldsymbol{\alpha}_{r1}-\boldsymbol{\alpha}_{r2})+F(\boldsymbol{\alpha}_{r3}-\boldsymbol{\alpha}_{r4}). \tag{12}$$

此修改增强了算法的局部搜索能力,避免种群过早收敛至局部最优解.同时,通过差分项的更新,维持种群中优秀解的多样性,从而进一步优化解的搜索过程.

3.3.3　混沌惯性权值

在迭代过程中,差分进化算法面临陷入局部最优的问题,导致无法寻找到全局最优解.采用混沌惯性权值替代传统的随机数生成器,可增强算法的随机性,避免陷入局部最优.本文将混沌惯性权重引入到交叉操作中,增加随机性和灵活性,从而提高算法的全局搜索能力.

$$k_{n+1}=rk_n(1-k_n). \tag{13}$$

式中:k_n 为第 n 次迭代的混沌数,r 是控制参数.

利用混沌映射生成交叉概率.

$$P=(P_{\min}+(P_{\max}-P_{\min})k_n). \tag{14}$$

式中:$P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 是交叉概率的最小值和最大值.

随着迭代的进行,原变异方程在当前最佳解附近进行局部搜索,从而陷入局部最优解.加入混沌惯性权重后,每次更新增大了偏离当前最优解的概率,扩大了全局搜索范围,能够有效跳出局部最优解.

4　实验分析

4.1　主轴定位仿真验证

基于某钢管生产企业的钢管数据,用SolidWorks软件仿真构建了3个直缝钢管管端三维模型,利用Geomagic@Wrap软件将其转换为三维点云,具体信息如表1所示.

表1　标准钢管基本参数

Table 1　Basic parameters of standard steel pipes

钢管直径/mm	钢管长度/mm	主轴方向	圆度/mm	三维点云数
300	150	Z轴	2	15 000
500	150	Z轴	4	20 000
800	150	Z轴	6	40 000

本文对正投影面积梯度下降法、PCA法和椭圆圆心拟合法进行对比实验.正投影面积梯度下降法程序参数设置如下:小批量样本 m=1 000,初始学习率 $\eta_0=0.1$,衰减因子 $\alpha=0.6$. 椭圆圆心拟合法原理为将同一根轴的多个切片拟合成椭圆,对椭圆圆心进行最小二乘法空间直线拟合,以拟合直线为主轴方向.计算每种方法得出的主轴方向和实际主轴方向的角度偏差,对比结果如表2所示.由于焊缝和表面粗糙度的影响,PCA法和椭圆拟合法对主轴方向的寻找出现偏差,而本文正投影面积梯度下降法具有较高的鲁棒性,可精确获取钢管管端的主轴方向.

4.2　圆度评定仿真验证

从仿真获取的标准钢管三维点云中提取点云切片,采用本文算法对每个三维点云切片进行30次圆度评估.程序参数设置如下:种群大小为50;$P_{\min}=0.2$;$P_{\max}=0.8$;$F=0.6$. 结果如图9a和图9b所示.从图中可以看出,对于不同口径的钢管,圆度测量的精度均能达到0.02 mm,且口径越小,精度越高.通过30次重复测量,圆度测量结果波

动较小,表明该算法具有良好的稳定性.

表2 主轴方向偏差角度测量值

Table 2 Measurement values of principal axis orientation deviation angle

钢管直径	偏差角度/rad		
mm	PCA法	椭圆圆心拟合法	正投影面积梯度下降法
300	0.367	0.059	0.9×10^{-5}
500	0.557	0.159	4.1×10^{-5}
800	0.757	0.359	3×10^{-5}

为了验证OLS-DE在管端三维点云圆度误差评定的效果,本文以仿真构建的圆度为4 mm、口径为500 mm的钢管三维点云通过鲸鱼算法[18](WOA)、蝙蝠算法[19](BA)进行圆度测量对比实验.从图10可以看出,由于三维点云切片数目庞大,DE算法和BA收敛速度较慢,对于大量数据的优化效果较差.管端表面粗糙度较大,获取的三维点云切片形状不规则,这导致WOA在90次的迭代中没有跳出局部最优解,计算的圆度与实际偏差较大.本文提出的OLS-DE收敛速度远快于WOA,BA及DE算法,结果表明,本文算法适用于大口径管端三维点云的圆度评定.

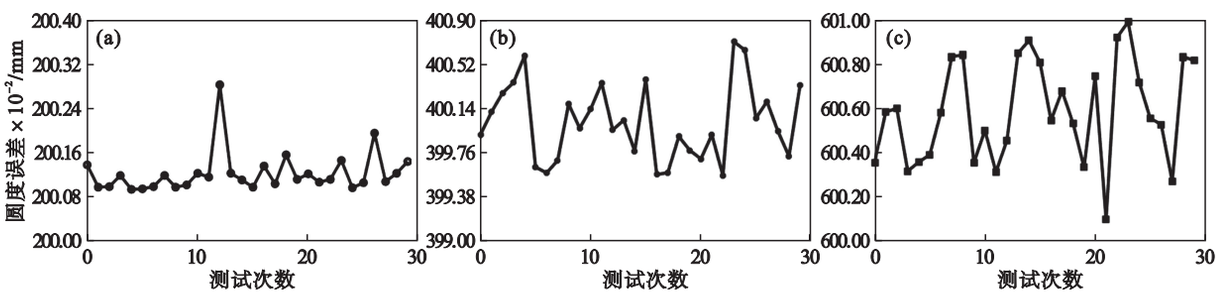


图9 OLS-DE算法测试

Fig. 9 OLS-DE algorithm testing

(a)—300 mm口径钢管;(b)—500 mm口径钢管;(c)—800 mm口径钢管.

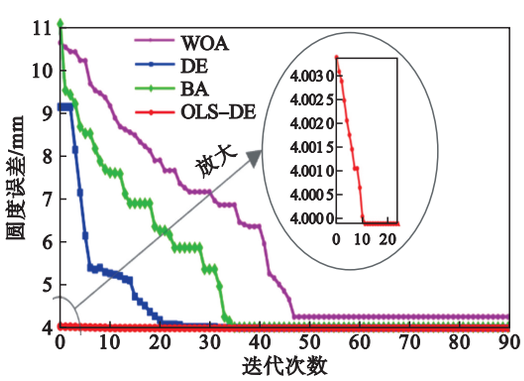


图10 算法收敛性测试

Fig. 10 Algorithm convergence testing

4.3 实验验证

对某钢管生产企业生产的直径为508 mm的3根钢管进行管端圆度检测,在Linux平台上采用C++编程语言结合PCL实现了钢管圆度测量算法,算法参数设置与仿真参数设置一致.三维点云的获取使用FreeScan Trak Pro2扫描仪扫描钢管端部150 mm获取三维点云,系统精度为0.023 mm,三维点云数约为400万个,扫描时间为1 min/根.采用本文基于三维点云OLS-DE的圆度评定方法和钢管圆度测量仪对选用的3根钢管进行圆度测量,本文基于三维点云OLS-DE的圆度评定方法参数设置与4.1节和4.2节的仿真过程一致.由表3可知测量结果误差小于0.1 mm,进行一次完整的测量(包括数据采集)明显快于圆度测量仪测量,能够满足钢管管端圆度非接触式检测的要求.

表3 钢管管端圆度测量值

Table 3 Measurement value of roundness of steel pipe end

钢管	基于三维点云OLS-DE的圆度评定		圆度测量仪	
	圆度/mm	时间/s	圆度/mm	时间/s
钢管1	2.127	62	2.1	141
钢管2	2.082	65	2.0	139
钢管3	2.053	63	2.0	149

5 结 论

1)针对大口径钢管管端圆度测量问题,本文提出了基于三维点云的非接触自动化测量方法,验证了三维扫描技术在尺寸测量领域的可行性.

2)针对钢管三维点云的主轴方向定位,本文提出了将最小正投影面积法与小批量梯度下降法相结合的方法.该方法能精确获取各轴类三维点云的主轴方向.

3)针对DE算法计算三维点云圆度收敛速度

慢、计算量大、早熟收敛的问题,本文结合OLS算法提出了OLS-DE算法,仿真和实例验证表明,OLS-DE算法是评估圆度的有效手段,具有优异的收敛性和稳定性.

参考文献:

[1] 李晓. 2022年以来我国钢管行业的运行情况及未来展望[J]. 钢管, 2023, 52(6): 1-5.
(Li Xiao. Operation situation of domestic steel tube industry since 2022 and prospect for its future[J]. *Steel Pipe*, 2023, 52(6): 1-5.)

[2] 黄继庆, 冯伟华, 孟凡佳, 等. 钢管管端尺寸综合测量装置设计与应用[J]. 焊管, 2020, 43(10): 51-55.
(Huang Ji-qing, Feng Wei-hua, Meng Fan-jia, et al. Design and application of comprehensive measurement device for steel pipe end dimension[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2020, 43(10): 51-55.)

[3] 丁哲文, 张瑞, 朱振伟, 等. 基于机器视觉的小型零件圆度测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024 (4): 171-174,180.
(Ding Zhe-wen, Zhang Rui, Zhu Zhen-wei, et al. The roundness measurement of small parts based on machine vision [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024 (4): 171-174,180.)

[4] Yan G P, Zhang J S, Zhou J H, et al. Research on roundness detection and evaluation of aluminum hose tail based on machine vision [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2024, 25(6): 1127-1137.

[5] Song C, Jiao L, Wang X B, et al. Development and testing of a muti-sensor measurement system for roundness and axis straightness errors of deep-hole parts [J]. *Measurement*, 2022, 198: 111069.

[6] Moemen M Y, Elghamrawy H, Givigi S N, et al. 3-D reconstruction and measurement system based on multimobile robot machine vision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5003109.

[7] Zou B C, Qiu H D, Lu Y F. Point cloud reduction and denoising based on optimized down sampling and bilateral filtering[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 136316-136326.

[8] Huang W, Kovacevic R. A laser-based vision system for weld quality inspection [J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 506-521.

[9] Wang D. Unsupervised semantic and instance segmentation of forest point clouds [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 165: 86-97.

[10] Dou Y P, Zheng S, Ren H R, et al. Research on the measurement method of crankshaft coaxiality error based on three-dimensional point cloud[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(3): 035202.

[11] 王志远, 刘桓龙, 刘威. 基于三维激光三维点云的枕簧几何尺寸测量方法[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1904001.
(Wang Zhi-yuan, Liu Huan-long, Liu Wei. Geometric dimension measurement method for bolster spring based on three-dimensional laser point clouds [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1904001.)

[12] Han Y C, Peng F, Wang Z, et al. An automatic measurement method for hull weld seam dimensions based on 3D laser scanning[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 312: 118922.

[13] Wang L J, Deng J L, Chen X Z, et al. Angle measurement method of ice hockey elbow pads based on 3D LiDAR point cloud [C]//2022 China Automation Congress (CAC). Xiamen, 2023: 3489-3494.

[14] 夏毅敏, 郭子泺, 邓朝辉, 等. 基于点云的TBM隧道成型质量检测方法及应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6):864-870.
(Xia Yi-min, Guo Zi-luo, Deng Chao-hui, et al. TBM tunnel shaping quality detection method and its application based on point cloud[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(6): 864-870.)

[15] Yin Y L, Wan W G, Liu R. Filtering outliers using statistical analysis on neighbors distances [C]//IET International Conference on Smart and Sustainable City 2013. Shanghai, 2014: 149-152.

[16] Abdi H, Williams L J. Principal component analysis [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Computational Statistics*, 2010, 2(4): 433-459.

[17] Sui W T, Zhang D. Four methods for roundness evaluation [J]. *Physics Procedia*, 2012, 24: 2159-2164.

[18] 许高齐. 大口径管道几何量非接触式测量关键技术研究[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2020.
(Xu Gao-qi. Research on the key technology of non-contact measurement of the geometry for large diameter pipeline [D]. Wuhu:Anhui Polytechnic University, 2020.)

[19] He Q Z, Zheng P, Lyu X C, et al. A new method for evaluating roundness error based on improved bat algorithm [J]. *Measurement*, 2024, 238: 115314.