

DOI: 10.7652/xjtuxb201908023

叶身型线轮廓度评定方法研究

何帅¹, 陈富民¹, 李建华¹, 张厅方²

(1. 西安交通大学新能源与质量工程研究所, 710049, 西安; 2. 东方汽轮机有限公司, 618000, 四川德阳)

摘要: 针对传统方法配准时求解基准变换速度缓慢和精度差等问题,提出了一种叶身型线基准误差求解方法。首先采用非均匀有理 B 样条曲线的矩阵形式对叶身型线进行拟合,利用区间搜索的方法寻找实测点所对应理论轮廓上的最近点及偏差;其次运用二维最近点迭代的解析形式,计算基准变换的旋转量和初始平移量,然后对初始平移量加微小扰动,以最短距离均值为优化目标,采用自适应权重粒子群算法重新计算平移量;最终计算叶身型线实测点变换基准后的偏差,得到实测轮廓的轮廓度。实验结果表明,该方法基准变换向量误差在 0.006 左右,相对于采用进化算法直接计算变换参数速度提高了 40% 左右。所提算法适用于三坐标测量叶身型线数据后对叶身型线进行评价,能够有效减小由于基准不重合对偏差计算的影响,避免叶身型线加工质量误判。

关键词: 叶身型线;轮廓度;最近点迭代算法;粒子群算法

中图分类号: TB92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)08-0175-08

Profile Evaluation Method for Blade Pattern

HE Shuai¹, CHEN Fumin¹, LI Jianhua¹, ZHANG Tingfang²

(1. New Energy and Quality Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Eastern Steam Turbine Co. Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: Aiming at the slow solving rate of reference transformation and low accuracy in the traditional method, a method for solving the blade pattern reference error is proposed. The blade pattern is fitted by the matrix form of the non-uniform rational B-spline curve, and the interval search method is used to find the nearest point and deviation on the theoretical blade pattern corresponding to the measured point. The analytic form of two-dimensional iterative closest points is used to calculate the rotation amount of the reference transformation, and then the small disturbance is added to the translation amount calculated by the iterative closest points. The adaptive weight particle swarm optimization algorithm is chosen to recalculate the translation amount with the shortest distance mean as the optimization target. The deviation calculation is performed on the measured points of blade pattern, and the profile of the measured blade pattern is obtained. Experimental results show that the reference transformation vector error in the proposed method is about 0.006, and this method heightens the calculating rate by 40% for direct calculation of transformation parameters compared with the evolutionary algorithm. The proposed method is suitable for the evaluation of the blade pattern after three-coordinate measurement of the blade pattern coordinate data, effectively reduces the influence of the reference misalignment on the deviation calculation, and avoids the misjudgment of the blade pattern processing quality.

收稿日期: 2019-02-18。 作者简介: 何帅(1993—),男,硕士生;陈富民(通信作者),男,副教授,硕士生导师。

网络出版时间: 2019-05-07 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190505.0945.002.html>

Keywords: blade pattern; profile; iterative closest point algorithm; particle swarm optimization

目前对于精密零件的测量,一般采用在三坐标机上测得坐标,再通过相关算法计算所需要的零件质量特性,这种方法属于坐标法。采用坐标法测量零件坐标时,由于无法直接利用被测零件本身基准为测量基准,测量数据里包含测量坐标系与设计坐标系不重合造成的位置误差。叶片属于精密零件,采用坐标法对叶片型线进行质量评定,精度受基准不重合影响比较大,因此需消除测量基准与设计基准不重合对偏差评定的影响^[1-2]。轮廓度评定时需要测量坐标与理论坐标的位置一致,按照最小区域原则^[3]进行叶身型线的轮廓度误差评定,但实现叶身型线最小条件比较困难^[4]。

在评定过程中有两个核心问题需要解决:实测点所对应理论轮廓的最近点计算;如何统一实测基准与设计基准。对于第一个问题,一般对理论型线采用样条函数进行拟合,对拟合的理论型线采用分割逼近^[5]的方法转换为点与点的搜索。对于第二个即基准统一的问题,本质是刚性变换求解的问题,目前求解此问题主要有两种方法:第一种方法是采用进化算法求解变换参数,第二种方法是采用二维最近点迭代算法(ICP)进行求解。采用进化算法求解变换参数需要构建不同的适应度函数,如遗传算法^[5-8]或者粒子群算法^[9]求解基准变换,理论上可以求到变换参数的准确解。进化算法求解齐次变换,需要生成大量初始解,计算量大导致求解配准参数耗费时间较多。由于进化算法的随机性,导致配准计算的稳定性很差,可能陷入局部最优。依据形位误差评定原则最小区域法构建适应度函数,计算出的旋转量与理论值差异较大,而平移量较为准确。

许多学者依据文献[10]提出的最近点迭代算法,提出用二维形式的最近点迭代算法计算实测轮廓与理论轮廓的配准参数。文献[11]根据不同区域的公差不同,引入点对权值约束,实现轮廓的高精度配准。文献[12]引入熵的概念,通过最大化熵准则的最近点迭代算法,实现有噪声和离群点的二维点集配准,但其只适用粗配准精度。文献[13]针对平面零件二维轮廓与矢量图形的配准问题,使用二维最近点迭代算法的解析形式进行轮廓间的精配准,可以较好地实现轮廓的位置调整,但是平移量计算误差受实测轮廓影响较大。二维最近点迭代算法求解变换参数速度快,依据原则为最小二乘原则,旋转量求解非常精确,但由于实测点与理论型线总是存

在偏差,采用质心平移的方法获得的平移量误差较大。

基于以上原因,本文提出一种最近点迭代结合粒子群算法的叶身型线基准误差求解方法。首先采用非均匀有理B样条(NURBS)曲线的矩阵形式对叶身型线进行拟合,利用区间搜索的方法寻找实测点所对应理论轮廓上的最近点及偏差;其次运用二维最近点迭代的解析形式计算基准变换的旋转量,然后对最近点迭代计算得到的平移量加微小扰动,以最短距离均值为优化目标,使用自适应权重粒子群算法重新计算平移量。本文对实测点进行基准变换后计算偏差,得到实测轮廓的轮廓度,设定理论变换向量构造仿真数据,以计算结果与理论值的差异验证方法的有效性,并与目前自由曲线配准的方法进行对比。

1 叶身型线数学模型

叶身型线属于自由曲线,理论形式以离散点坐标给出。非均匀有理B样条的出现为标准解析形状和自由曲线提供了统一的数学表示^[14]。国际标准化组织(ISO)在1991年颁布的工业产品几何定义的STEP标准中,NURBS被定义为唯一的自由型曲线曲面表示方法^[15],因此本文采用NURBS对叶身型线进行描述。

常用的NURBS曲线的表达形式有两种,一种是德布尔算法的递推形式,另一种是矩阵形式。虽然德布尔算法概念清晰,但算法复杂,计算量大。曲线轨迹上任意点的求取速度受基函数计算影响较大,为提高曲线的计算速度,采用NURBS曲线矩阵形式计算曲线的系数^[16]。NURBS曲线的非均匀性是指节点矢量与间距为任意值,可在不同区间上得到不同的混合函数形状^[17],曲线随参数变化而变化,可以很好地对自由曲线进行描述^[18]。

由 $n+1$ 个控制顶点定义的 k 次NURBS曲线的数学定义^[14]如下

$$\mathbf{C}(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i \mathbf{p}_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{C}(u)$ 为NURBS曲线的参数形式; u 为参数; w_i 为权重因子; $\mathbf{p}_i$ 为控制点坐标向量; $N_{i,k}(u)$ 为 k 次B样条基函数,表达式如下

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad (3)$$

式中: $u_i, u_{i+1}, u_{i+k}, u_{i+k+1}$ 属于节点向量 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 中的元素。由于节点向量 U 两端节点有 $k+1$ 次重复度,在式(3)的计算过程中可能出现 $\frac{0}{0}$ 的情况,因此规定 $\frac{0}{0}=0$ 。

对离散点坐标进行 NURBS 三次拟合,设 $u \in [u_i, u_{i+1}], i=3, 4, \dots, n$ 。令 $t = \frac{u - u_i}{u_{i+1} - u_i}, t \in [0, 1]$, 则第 i 段曲线可以写成下列矩阵形式^[19]

$$C_i(t) = \frac{\sum_{j=i-3}^i w_j p_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^i w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1, t, t^2, t^3] M_i [\omega_{i-3} p_{i-3}, \omega_{i-2} p_{i-2}, \omega_{i-1} p_{i-1}, \omega_i p_i]^T}{[1, t, t^2, t^3] M_i [\omega_{i-3}, \omega_{i-2}, \omega_{i-1}, \omega_i]^T} \quad (4)$$

式中: $M_i(t)$ 为系数矩阵,表达式为

$$M_i = \begin{bmatrix} \frac{(u_{i+1} - u_i)^2}{(u_{i+1} - u_{i-1})(u_{i+1} - u_{i-2})} & 1 - m_{11} - m_{13} & \frac{(u_i - u_{i-1})^2}{(u_{i+2} - u_{i-1})(u_{i+1} - u_{i-1})} & 0 \\ -3m_{11} & 3m_{11} - m_{23} & \frac{3(u_i - u_{i-1})(u_{i+1} - u_i)}{(u_{i+2} - u_{i-1})(u_{i+1} - u_{i-1})} & 0 \\ 3m_{11} & -3m_{11} - m_{33} & \frac{3(u_{i+1} - u_i)^2}{(u_{i+2} - u_{i-1})(u_{i+1} - u_{i-1})} & 0 \\ -m_{11} & m_{11} - m_{43} - m_{44} - \left(\frac{m_{33}}{3} + m_{44} + \frac{(u_{i+1} - u_i)^2}{(u_{i+2} - u_i)(u_{i+2} - u_{i-1})}\right) & \frac{(u_{i+1} - u_i)^2}{(u_{i+3} - u_i)(u_{i+2} - u_i)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $m_{11}, m_{13}, m_{23}, m_{33}, m_{43}, m_{44}$ 分别代替矩阵 M_i 中的元素。

NURBS 曲线最终可以化为以下形式,根据理论坐标数据计算得到 $n-2$ 组系数

$$C_i(t) = \frac{D_0 + D_1 t + D_2 t^2 + D_3 t^3}{D'_0 + D'_1 t + D'_2 t^2 + D'_3 t^3} \quad (6)$$

式中: $D_0, D_1, D_2, D_3, D'_0, D'_1, D'_2, D'_3$ 为 NURBS 曲线矩阵形式第 i 段曲线的 8 个系数。

2 叶身型线配准

在叶身型线测量过程中,由于测量基准与理论设计基准存在不重合误差,对实测点偏差的计算精度影响较大,所以需要减小基准不重合对质量评定的影响。对于基准间的刚性变换参数的求解问题,可以视为实测点集与理论轮廓对应的最近点集间的配准问题。最近点迭代(ICP)算法的优化目标符合形位误差评定的最小二乘原则,算法求取旋转量非常精确,由于存在加工误差,求取的平移量与真值存在较大差异。因此,以 ICP 算法计算旋转量,以所有实测点偏差的绝对值均值作为适应度函数,对 ICP 算法获得的初始平移量加微小扰动,采用自适应权重粒子群算法重新求取平移量。

2.1 实测点与理论轮廓的轮廓度计算

理论点集为有序点集,对理论点集进行 NURBS 矩阵形式拟合,计算实测点的偏差,公式如下

$$p_d = sd_{\min} \quad (7)$$

式中: p_d 为实测点的偏差; s 为位置符号; $d_{\min}$ 为实测点与理论轮廓对应的最近点间的距离。

实测点的位置符号 s 可以用实测点与理论轮廓上对应的两个最近点组成的叉积进行判断。实测点可能位于理论轮廓内,也可能位于理论轮廓外,实测点在理论轮廓外侧时, s 为 1;在理论轮廓内侧时, s 为 -1。

实测点对应的理论轮廓最近点计算步骤如下。

(1) 求出实测点到理论轮廓的最近距离点所在段的索引。

(2) 传入最近点所在理论轮廓段的参数,对参数进行区间划分搜索最近点,如黄金分割或二分法。

当测量基准与理论设计基准统一时,轮廓度 E 定义为

$$E = \max(p_d) - \min(p_d) \quad (8)$$

式中: $\max(p_d)$ 为所有实测点偏差的最大值; $\min(p_d)$ 为所有实测点偏差的最小值。

2.2 改进的叶身型线配准算法

实测点集 P , 数目为 m , 理论点集 Q_0 , 数目为

m_Q ,对理论点集 Q_0 进行 NURBS 矩阵形式拟合。改进的叶身型线配准算法原理如下。

2.2.1 以二维最近点迭代的解析形式求解旋转矩阵 R 和初始平移向量 T_0 。ICP 算法依据的原则是最小二乘,优化的目标为最短距离平方和最小,数学形式如下

$$f(R, T_0) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|Q_i - P_i R - T_0\|_2^2 \quad (9)$$

式中: Q_i 为实测点集 P 对应理论型线的最近点集 Q 中的第 i 个点; P_i 为实测点集 P 的第 i 个点。

二维 ICP 算法的解析算法步骤如下。

Step1:对实测点集 P 搜索对应理论型线的最近点集 Q 。

Step2:对点集 P 和点集 Q 去中心化,分别得到点集 P_1 和点集 Q_1 ,去中心化公式如下

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P - \bar{P} \\ Q_1 &= Q - \bar{Q} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\bar{P}$ 和 $\bar{Q}$ 分别为点集 P 和 Q 的中心。点集去中心化的目的是分离平移量 T_0 ,可以将式(9)转换为

$$f(R) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|Q_{1i} - P_{1i} R\|_2^2 \quad (11)$$

式中: Q_{1i} 为最近点集 Q_1 中的第 i 个点; P_{1i} 为实测点集 P_1 的第 i 个点。

Step3:计算旋转矩阵 R 。二维点集配准旋转矩阵 R 由一个旋转角度 θ 构成,公式如下

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),得到

$$f(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ((Q_{1i}^x - P_{1i}^x \cos\theta + P_{1i}^y \sin\theta)^2 + (Q_{1i}^y - P_{1i}^x \sin\theta - P_{1i}^y \cos\theta)^2) \quad (13)$$

式中: Q_{1i}^x 为点集 Q_1 的第 i 个点的横坐标; P_{1i}^x 为点集 P_1 的第 i 个点的横坐标; P_{1i}^y 为点集 P_1 的第 i 个点的纵坐标; Q_{1i}^y 为点集 Q_1 的第 i 个点的纵坐标。

对式(13)所示的函数进行求导,得到

$$\frac{f(\theta)}{\partial\theta} = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (\sin\theta(Q_{1i}^x P_{1i}^x + Q_{1i}^y P_{1i}^y) + \cos\theta(Q_{1i}^x P_{1i}^y - Q_{1i}^y P_{1i}^x)) \quad (14)$$

求得 $f(\theta)$ 的极值点

$$\theta = -\arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^m (Q_{1i}^x P_{1i}^y - Q_{1i}^y P_{1i}^x)}{\sum_{i=1}^m (Q_{1i}^x P_{1i}^x + Q_{1i}^y P_{1i}^y)}\right) \quad (15)$$

Step4:求取平移向量

$$T_0 = \bar{Q} - \bar{P} R \quad (16)$$

Step5:更新实测点集 P ,更新公式如下

$$P = PR + T_0 \quad (17)$$

Step6:重复 Step1~Step5,直到算法收敛,得到基准变换的旋转矩阵 R 和初始平移向量 T_0 。

2.2.2 采用自适应权重粒子群算法重新计算基准变换的平移量 T 。由于存在偏差,ICP 算法难以精确获得基准变换的平移量,建立如下适应度函数

$$f(T) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|p_{di}\| \quad (18)$$

式中: p_{di} 为第 i 个实测点的偏差。

运用自适应权重粒子群算法^[20],以 T_0 加微小扰动生成初始解空间,重新计算平移向量,计算步骤如下。

Step1:设置算法参数,种群数量 N 为 30,自我学习因子 c_1 为 0.9,群体学习因子 c_2 为 0.9,最大惯性权重 $w_{\max}$ 为 0.8,最小惯性权重 $w_{\min}$ 为 0.2。

Step2:初始化解空间和速度,计算所有粒子的适应度值,并且找出解空间的最佳个体 z_g 和最佳适应度值 f_z

$$\left. \begin{aligned} x_i &= T_0 + N_1 \\ v_i &= N_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: x_i 为解空间的第 i 个解向量; v_i 为解空间的第 i 个解的速度向量; N_1 为均值为 0、方差为 0.04 的正态分布生成的 2 维度的随机向量; N_2 为均值为 0、方差为 1 的正态分布生成的 2 维度的随机向量。

Step3:进入主循环,计算种群的适应度,并且记录种群最小适应度 $f_{\min}$ 及种群适应度的均值 f_{avg} 。计算个体的惯性权重 w ,更新速度及个体,更新规则如下

$$\left. \begin{aligned} w &= w_{\min} + (f - f_{\min})(w_{\max} - w_{\min}) / (f_{\text{avg}} - f_{\min}) \\ v_i &= w v_i + c_1 r(z_i - x_i) + c_2 r(z_g - x_i) \\ x_i &= x_i + v_i \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: f 为第 i 个粒子的适应度值; z_i 为第 i 个粒子在迭代过程中的历史最佳个体。

Step4:最后比较个体更新前后的适应度值,如果更新后的个体适应度更小,则保留更新后的个体,否则保留更新前的个体。计算更新后的种群适应度值,寻找出最佳个体及其适应度值代替 z_g 和 f_z 。

Step5:重复 Step3~Step4,直到收敛或者固定迭代次数,输出最佳个体 z_g ,即重新计算的平移量 T 。

计算出旋转矩阵 R 和平移量 T 后,对实测点集进行基准变换,此时实测型线与理论型线达到最佳配准。

3 算法验证及实例分析

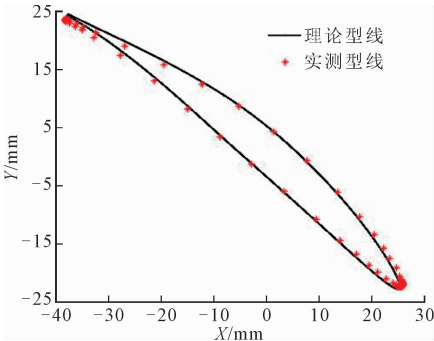
3.1 样本构造

本文样本的构造方法如下。以理论数据 Q_0 (有序点集,数目为 200) 进行 NURBS 拟合,得到 199 段的理论轮廓。以正态分布 $N(u,\sigma^2)$ 生成两组 199 个偏差 p_d ,其中 u 为 0, σ 为 0.03。根据参数曲线的等距公式生成偏距点集 P_0 ,每个偏距点的位置取理论轮廓曲线段的中间位置。构建基准变换向量 T_1 (0.02,0.1,-0.1),其中 0.02 为旋转角度,0.1 为 x 方向平移量,-0.1 为 y 方向平移量。将点集 P_0 进行 T_1 的基准变换,变换后的点集 P_2 作为实测数据。基准变换 T_1 为理论基准到实测基准,而配准是求实测基准到理论基准的变换向量,所以配准参数的理

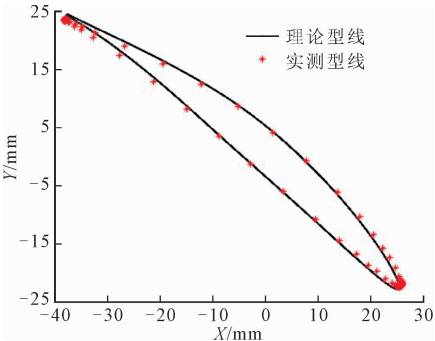
论值应为基准变换向量 T_1 构成的齐次刚性变换矩阵的逆矩阵对应的基准变换向量。配准的理论基准变换向量为(-0.02,-0.098,0.102),样本 1 偏差极差为 0.215 4,样本 2 偏差极差为 0.163 6。本文算法实验在 Matlab2017b 中进行。

3.2 不同适应度函数求解结果的对比

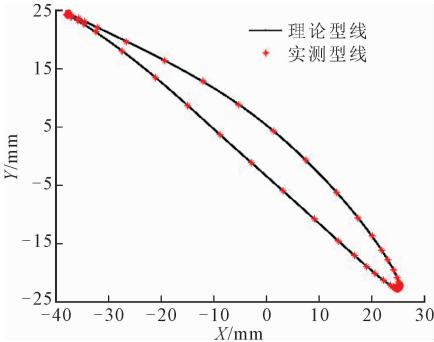
遗传算法和粒子群算法同属于进化算法,自适应权重粒子群算法简单,收敛较快,是一种全局寻优的进化算法。本文分别以式(8)(18)作为适应度函数,以自适应权重粒子群算法优化上述适应度函数,计算实测基准到理论基准的变换向量。以求出的变换向量与理论变换向量的欧式距离度量基准转换的误差,样本数据及配准结果如图 1 所示,计算结果如表 1 所示。



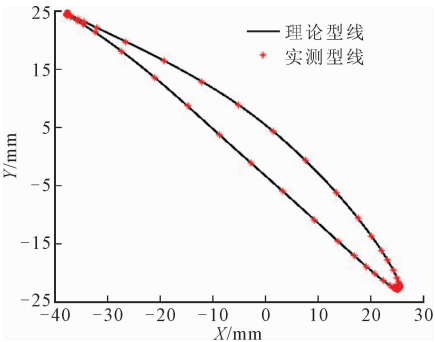
(a) 样本 1 数据



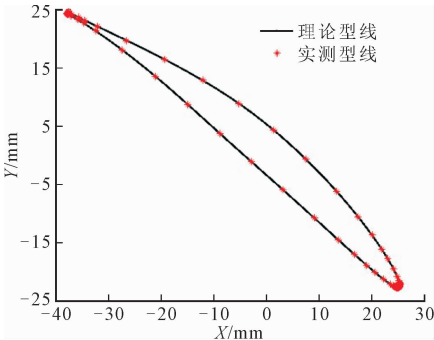
(b) 样本 2 数据



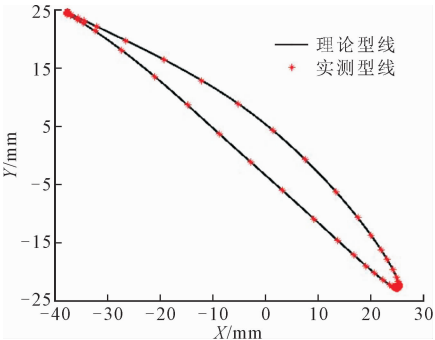
(c) 轮廓度配准结果(样本 1)



(d) 轮廓度配准结果(样本 2)



(e) 最短距离均值配准结果(样本 1)



(f) 最短距离均值配准结果(样本 2)

图 1 不同适应度函数样本数据及配准结果

表 1 不同适应度函数计算结果的对比

样本	适应度函数	基准变换向量	变换向量计算误差	轮廓度	计算时间/s
1	轮廓度	(-0.020 8, -0.102 5, 0.094 3)	0.009 0	0.182 9	45.72
	最短距离均值	(-0.020 2, -0.094 6, 0.108 8)	0.007 6	0.199 6	46.34
2	轮廓度	(-0.020 3, -0.089 1, 0.088 6)	0.016 1	0.175 0	46.44
	最短距离均值	(-0.020 1, -0.099 9, 0.098 7)	0.003 8	0.164 2	45.41

综上所述所求解的基准变换向量理论值为(-0.020, -0.098, 0.102), 样本 1 的偏差极差为 0.215 4, 即样本 1 的轮廓度理论值为 0.215 4; 样本 2 的偏差极差为 0.163 6, 即样本 2 的轮廓度理论值为 0.163 6。样本 1(轮廓度)的轮廓度计算值与理论值差异为 -0.032 5, 样本 1(最短距离均值)的轮廓度计算值与理论值差异为 -0.015 8。样本 2(轮廓度)的轮廓度计算值与理论值差异为 0.011 4, 样本 2(最短距离均值)的轮廓度计算值与理论值差异为 0.000 6。

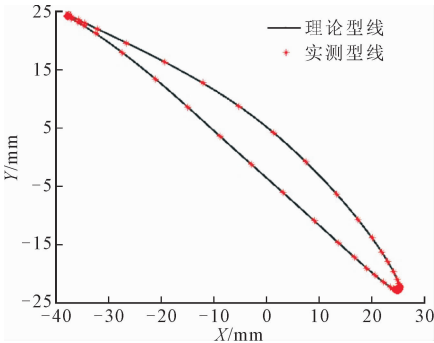
综合样本 1 和样本 2 的计算结果, 经以最短距离均值最小为优化目标, 求得的基准变换向量更接近理论值, 所求的轮廓度也更接近理论值。因此, 本文方法选择最短距离均值为适应度函数, 重新求取平移量。

3.3 本文算法与 ICP 算法的对比

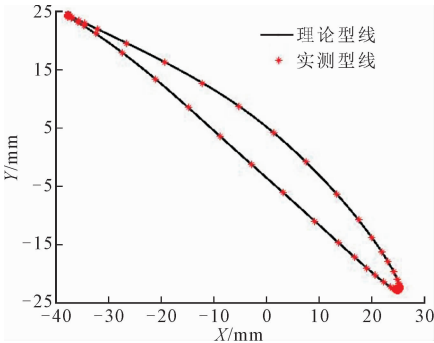
标准 ICP 算法采用 SVD 分解去中心化后的点集的协方差矩阵。本文推导了二维 ICP 算法的解析

形式, 避免出现协方差矩阵分解失败的情况。ICP 算法依据最小二乘原则, 求解刚性变换参数非常快, 但由于存在加工误差, 平移量计算误差较大。根据 3.2 小节, 以最短距离均值作为优化目标, 计算结果更加贴近真值, 因此采用自适应权重粒子群算法重新求取平移量。由于减小了优化的维度并且得到了初始的平移量, 算法计算速度更快, 同时保证了精度。分别以 ICP 算法和本文算法对样本 1 和样本 2 进行配准, 以计算所得变换向量与理论变换向量的欧式距离度量基准转换误差, 样本数据集配准结果如图 2 所示, 计算结果如表 2 所示。

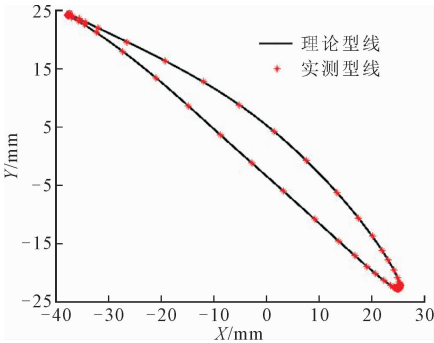
由表 2 可以看出, 采用 ICP 算法虽然计算速度快, 但计算出的基准变换向量误差较大, 计算所得的轮廓度明显偏离理论值, 主要影响因素为平移量计算不准确。本文算法基准变换向量计算值与理论值的误差在 0.006 左右, 样本 1 的轮廓度计算相对误差为 2.8%, 样本 2 的轮廓度计算相对误差为 1.2%,



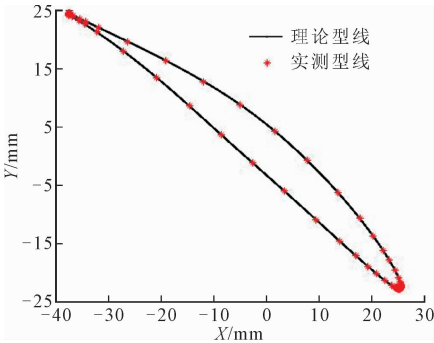
(a) ICP 算法配准结果(样本 1)



(b) ICP 算法配准结果(样本 2)



(c) 本文算法配准结果(样本 1)



(d) 本文算法配准结果(样本 2)

图 2 ICP 算法与本文算法配准结果的对比

表 2 ICP 算法与本文算法配准计算结果的比较

样本	适应度函数	基准变换向量	变换向量计算误差	轮廓度	计算时间/s
1	ICP 算法	(-0.020 0, -0.100 7, 0.112 1)	0.010 5	0.777 4	3.19
	本文算法	(-0.020 0, -0.095 9, 0.107 3)	0.005 7	0.209 4	25.20
2	ICP 算法	(-0.020 0, -0.110 7, 0.107 2)	0.013 7	0.733 0	3.08
	本文算法	(-0.020 0, -0.092 3, 0.102 0)	0.005 7	0.165 6	25.56

计算结果已经非常接近理论值。与采用进化算法相比,本文所提算法直接计算所有变换参数的速度要快 40%左右。

4 结 论

本文采用 NURBS 的矩阵形式对叶身型线进行拟合,一次性计算出拟合曲线的所有参数,避免了德布尔算法递归形式的大量计算,采用区间搜索求解点到曲线的最近点,计算速度快,精度高。此外,提出了一种叶身型线配准算法,首先通过二维 ICP 算法的解析形式精确获得配准的旋转量,其次以实测点集最短距离均值作为适应度函数,采用自适应权重粒子群算法重新优化平移量,基准变换向量误差在 0.006 左右,相对于采用进化算法直接计算配准参数的速度提高了 40%左右。所提算法适用于三坐标测量叶身型线数据后对叶身型线进行评价,能够有效减小由于基准不重合对偏差计算的影响,避免叶身型线加工质量误判。

参考文献:

[1] LI Yadong. Automatic localization and comparison for free-form surface inspection [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2006, 25(4): 251-268.

[2] 何改云,黄鑫,郭龙真. 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 395-401.

HE Gaiyun, HUANG Xin, GUO Longzhen. Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 395-401.

[3] 陆辛成,黄美发,唐哲敏,等. 一种基于最小条件的线轮廓度误差评定方法 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2320-2326.

LU Xincheng, HUANG Meifa, TANG Zhemin, et al. An evaluation method of line profile errors based on least condition principle [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(19): 2320-2326.

[4] 陈潇. 基于非均匀有理 B 样条的船体分段测量 [D].

哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 39-40.

[5] 廖平. 分割逼近法快速求解点到复杂平面曲线最小距离 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 163-164.

LIAO Ping. Fast calculating minimum distance between point and complex curve with subdivision approximating algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(10): 163-164.

[6] 王伯平. 基于遗传算法和自适应的平面线轮廓度误差评定方法 [J]. 工程设计学报, 2004, 11(2): 68-72.

WANG Boping. Evaluation method of plane line profile error based on genetic algorithm and auto-spotting [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2004, 11(2): 68-72.

[7] 郭慧,马永有,潘家祯. 基于遗传算法的复杂平面曲线轮廓度误差评定 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2007, 33(6): 888-892.

GUO Hui, MA Yongyou, PAN Jiazhen. Error evaluation on planar free-form curve profile based on genetic algorithm [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2007, 33(6): 888-892.

[8] 温秀兰,赵艺兵,王东霞,等. 改进遗传算法与拟随机序列结合评定自由曲线轮廓度误差 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 835-842.

WEN Xiulan, ZHAO Yibing, WANG Dongxia, et al. Evaluating freeform curve profile error based on improved genetic algorithm and quasi random sequence [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 835-842.

[9] 苏娜,郭慧. 自由曲线轮廓度误差评定及其可视化 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2010, 36(4): 402-405, 420.

SU Na, GUO Hui. The profile error evaluation and visualization of free-form curve [J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2010, 36(4): 402-405, 420.

[10] BESL P J, MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[11] 蒋睿嵩,魏发远,冯大勇,等. 一种权值约束的精确

- 配准算法 [J]. 图学学报, 2014, 35(2): 167-172.
- JIANG Ruisong, WEI Fayuan, FENG Dayong, et al. A new weight constraint precision registration algorithm [J]. Journal of Graphics, 2014, 35(2): 167-172.
- [12] XU Guanglin, DU Shaoyi, XUE Jianru. Precise 2D point set registration using iterative closest algorithm and correntropy [C] // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. New York, NY, USA: IEEE, 2016: 4627-4631.
- [13] 黄方, 宁涛, 陈志同, 等. 二维点轮廓与矢量轮廓配准研究 [J]. 图学学报, 2016, 37(5): 598-606.
- HUANG Fang, NING Tao, CHEN Zhitong, et al. Registration of planar point cloud and vector graphics [J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5): 598-606.
- [14] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 227-230.
- [15] 蒋四军. 复杂曲线曲面 CNC 插补技术的研究及其自动编程系统的开发 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007: 7-8.
- [16] 杨凡, 董长双. NURBS 曲线实时插补方法的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2009(3): 129-130, 133.
- YANG Fan, DONG Changshuang. Research on real-time interpolation algorithm for NURBS curve [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(3): 129-130, 133.
- [17] 刘洋, 孙劲光, 刘颖. NURBS 构造 N 边域曲面方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004(S1): 4-5.
- LIU Yang, SUN Jinguang, LIU Ying. Method of constructing curved surface of N boundary field with NURBS [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2004(S1): 4-5.
- [18] 张瑞军, 刘小群. NURBS 曲线在控制臂数学建模中的应用 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(2): 17-18, 22.
- ZHANG Ruijun, LIU Xiaoqun. Application of NURBS curve in mathematical modeling of control arm [J]. Tractor & Farm Transporter, 2017, 44(2): 17-18, 22.
- [19] LIU Ligang, WANG Guojin. Explicit matrix representation for NURBS curves and surfaces [J]. Computer-Aided Geometric Design, 2002, 19(6): 409-419.
- [20] 张晓莉, 王秦飞, 冀汶莉. 一种改进的自适应惯性权重的粒子群算法 [J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(3): 66-70.
- ZHANG Xiaoli, WANG Qinfei, JI Wenli. An improved particle swarm optimization algorithm for adaptive inertial weights [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 66-70.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 150 页)

- [16] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 5-6.
- [17] 王鋈晟. 七芯铠装测井电缆传输特性仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017: 7-13.
- [18] 王磊. 基于扫频法电容电流测量装置的研制 [D]. 长春: 东北电力大学, 2006: 27-31.
- [19] 严干贵, 李果雪, 张正茂, 等. 基于扫频法配电网电容电流测量装置研制 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 64-68.
- YAN Gangui, LI Guoxue, ZHANG Zhengmao, et al. Development of capacitive current measuring instrument based on frequency scanning method for power distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3): 64-68.
- [20] 张宇, 陈乔夫, 谢冰若, 等. 扫频检测电网对地电容的改进型方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 40-45.
- ZHANG Yu, CHEN Qiaofu, XIE Bingruo, et al. A modified method for detecting system capacitance to earth based on frequency scanning [J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 40-45.
- [21] 刘勇, 汲胜昌, 梁笑尘, 等. 检测变压器绕组变形的扫频阻抗法原理及应用 [J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 85-88.
- LIU Yong, JI Shengchang, LIANG Xiaochen, et al. Principle and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer winding deformation [J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 85-88.
- [22] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505-4516.
- LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505-4516.
- [23] 王振浩, 孙伟红, 辛业春, 等. 基于 PSCAD 的调容式消弧线圈设计 [J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 46-48.
- WANG Zhenhao, SUN Weihong, XIN Yechun, et al. Design of new capacitor automatic tuning arc-suppression coil based on PSCAD [J]. Power Electronics, 2008, 42(3): 46-48.

(编辑 杜秀杰)