

文章编号 1004-924X(2012)12-2720-08

## 基于 CAD 模型引导测量的自由 曲面定位及轮廓度误差评定

王东霞, 温秀兰\*, 赵艺兵

(南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:**提出将粒子群优化算法与拟随机序列法相结合对基于 CAD 模型引导测量的自由曲面进行高精度检测和轮廓度误差评定的方法。为解决用三坐标测量仪检测自由曲面时存在的设计坐标系与测量坐标系不重合问题,提出用拟粒子群优化算法来实现被测曲面与设计曲面精确定位;针对自由曲面特点,采用轮廓峰谷误差和轮廓均方根误差综合评定自由曲面的形状误差。最后,阐述了用拟粒子群优化算法实现曲面匹配时目标函数值的计算方法,确立了用拟粒子群优化算法优化求解参数向量的具体步骤。对仿真实例和大量实测零件自由曲面轮廓度误差的计算表明:采用本文方法能够实现自由曲面精确定位,其轮廓度误差评定精度比由三坐标测量仪内置软件计算的结果高 8%~15%,适用于对高精度自由曲面零件形状误差的评定。

**关键词:**自由曲面定位;轮廓度误差;CAD 模型;拟随机序列;粒子群优化算法

**中图分类号:**TP391;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2720

## Localization and profile error evaluation of freeform surface based on CAD model-directed measurement

WANG Dong-xia, WEN Xiu-lan\*, ZHAO Yi-bing

(Automation Department, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

\* Corresponding author, E-mail: zdh.xw.xl@njit.edu.cn

**Abstract:** An evaluating method by combination of particle swarm optimization and quasi-random sequence was proposed to detect precisely and evaluate the profile errors of freeform surfaces inspected by Computer Aided Design (CAD) model-directed measuring. In order to solve the un-repetitive problem between design coordinate system and measurement coordinate system when a Coordinate Measurement Machine (CMM) was used to inspect free form surfaces, Quasi Particle Swarm Optimization (QPSO) was proposed to realize the precise localization between measured surface and design surface. Then, according to the features of freeform surface form, the peak-valley error and root mean square error were used to evaluate the freeform surface forms together. The computation method of the objective function was described, in which QPSO is used to match the measured surface and the design surface and the detailed steps were established for solving parameter vectors by using QPSO. Finally, by calculating the surface profile errors of simulation example and many practical measured parts, the

收稿日期:2011-10-20;修订日期:2011-12-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075198);江苏省自然科学基金资助项目(BK2010479);南京工程学院创新基金资助项目(CKJ20100008);江苏省“333 人才工程”和“六大人才高峰”资助项目

results verify that the proposed method can locate precisely freeform surfaces and the evaluation precision of freeform surface profile errors by the proposed method is higher 8%–15% than that by CMM software. The method is suitable for the form error evaluation of high precise freeform surface parts.

**Key words:** freeform surface localization; profile error; CAD model; quasi-random sequence; particle swarm optimization

## 1 引言

自由曲面在汽车、飞机、模具、生物医学等领域应用广泛,对自由曲面零件进行高效率、高精度的检测和轮廓度误差计算对产品的质量和使用寿命至关重要<sup>[1-2]</sup>。根据被测物的 CAD 模型是否已知,可将自由曲面的测量分为 CAD 模型已知的测量和 CAD 模型未知的测量。对于 CAD 模型已知的自由曲面测量,其关键问题是如何高效、可靠、安全地获取待测曲面的几何形状信息,并对其轮廓度误差做出准确的评定<sup>[3]</sup>。面轮廓度公差是实际被测要素对于理想轮廓面的允许变动量。面轮廓度公差分为两类:一类是标明基准的面轮廓度,另一类是未标明基准的面轮廓度。本文研究的是在 CAD 三维模型辅助下对未标明基准的自由曲面轮廓度误差的评定。

自由曲面检测最常用的设备之一是三坐标测量机<sup>[4]</sup>,在使用三坐标测量机测量自由曲面零件时,由于被测曲面和设计曲面分别位于 2 个不同的坐标系,在求解自由曲面形状误差时必须找到被测曲面与设计曲面之间的对应关系并将 2 个曲面数据转换到同一坐标系下,此过程称为定位或匹配,通常需要找到合适的三维变换矩阵  $\mathbf{T}$  来完成。由于自由曲面的复杂性,在实际测量过程中获取精确有效的定位方法难度较大,多年来不少学者一直致力于此方面的研究。Sahoo and Menq 较早提出了通过解包含 3 个旋转变量和 3 个平移变量的非线性方程来求得变换矩阵<sup>[5]</sup>; Meng 等提出通过求伪逆来获得变换矩阵<sup>[6]</sup>;文献<sup>[7]</sup>提出用迭代最近点法(ICP)解三维变换矩阵;文献<sup>[8]</sup>提出将基于特征提取的粗匹配与基于点对点的精匹配相结合来实现自由曲面定位和比较;文献<sup>[9]</sup>提出了用五点预定位与融合了最小二乘法和最小条件原则的二次优化精调整相结合实现被测曲面与设计曲面的定位来评定光学自由曲面形状误差。分析现有方法,或需解非线性方程,

或需对测点进行预处理,结果均使算法求解速度慢,鲁棒性差。近年来,虽然新一代几何产品规范(new generation GPS)对直线度<sup>[10]</sup>、平面度<sup>[11]</sup>、圆度<sup>[12]</sup>和圆柱度<sup>[13]</sup>的评定与校验制定了标准,但并未制定自由曲面的测量方法及相关评定与校验标准<sup>[14]</sup>。因此,目前关于复杂曲面形状误差评定的研究多是借鉴规则形状误差如直线度、平面度、圆度等的评定指标,通过拟合操作实际要素计算出轮廓的最大峰谷误差,该方法并未充分考虑自由曲面形状的特点<sup>[15]</sup>。为此,本文针对自由曲面形状特点,提出用拟粒子群优化算法求解参数矩阵实现被测曲面与设计曲面的高精度匹配,采用轮廓峰谷误差和均方根误差 2 个指标综合评定自由曲面,实现了基于 CAD 模型引导测量的自由曲面轮廓度误差计算。

## 2 自由曲面定位

对基于 CAD 模型引导测量的自由曲面进行轮廓度误差评定,关键是要找到被测曲面和设计曲面之间的三维变换矩阵  $\mathbf{T}$ ,使被测曲面和设计曲面匹配,以消除系统误差。假设设计曲面上点为  $s_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ ,  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ,被测曲面上点为  $q_{i,j}(x_{i,j}''', y_{i,j}''', z_{i,j}''')$ ,  $m$  和  $n$  分别为沿  $x$  向和  $y$  向的测点数目;  $s_{i,j}'(x_{i,j}', y_{i,j}', z_{i,j}')$  为被测曲面和设计曲面匹配后被测点  $q_{i,j}$  在设计曲面上的投影点,有  $s_{i,j}' = \mathbf{T}q_{i,j}$ 。定位过程即是找到合适的三维变换矩阵  $\mathbf{T}$ ,使经过坐标变换后被测曲面与设计曲面两组数据对应点之间的距离和最小,其目标函数为:

$$f = \min \left( \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |s_{i,j}' - s_{i,j}| \right) = \min \left( \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |\mathbf{T}q_{i,j} - s_{i,j}| \right), \quad (1)$$

其中  $s_{i,j} = [x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}, 1]^T$ ,  $q_{i,j} = [x_{i,j}''', y_{i,j}''', z_{i,j}''', 1]^T$ ,  $s_{i,j}' = [x_{i,j}', y_{i,j}', z_{i,j}', 1]^T$ 。

变换矩阵  $\mathbf{T}$  由下式计算<sup>[9,14]</sup>:

$$\mathbf{T}(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & t_x \\ \cos \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & t_y \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中,  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  分别为被测曲面绕  $x, y$  和  $z$  轴的旋转量,  $t_x, t_y$  和  $t_z$  分别为被测曲面沿着  $x, y$  和  $z$  轴方向的平移量。由式(2)可见, 变换矩阵  $\mathbf{T}$  是参数向量  $\mathbf{r} = [\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z]$  的函数, 实现自由曲面定位的实质是优化求解参数  $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$  以使目标函数值最小, 即使被测曲面与设计曲面得到最佳匹配。

### 3 用拟粒子群优化算法实现自由曲面定位

粒子群优化算法(PSO)源于对鸟群和鱼群群体运动行为的研究, 其理论依据是人工生命和演化计算理论, 是对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集的模拟<sup>[16]</sup>。因其算法简单, 收敛速度较快, 已有许多非常成功的实际应用<sup>[17-18]</sup>。在粒子群优化算法中, 粒子的初始位置和初始速度通常由伪随机数随机产生<sup>[16-18]</sup>, 分布均匀的初始种群可以加速进化算法收敛速度这一结论已得到证明。考虑到拟随机数序列较伪随机数序列更能够均匀地充满采样空间, 使计算结果更稳定可靠, 已有学者将其应用于遗传算法和进化规划中, 并取得了良好效果<sup>[19-20]</sup>。借鉴该思想, 本文将拟随机 Halton 序列用于粒子群优化算法中来产生粒子初始位置和初始速度, 简称为拟粒子群优化算法(Quasi-Particle Swarm Optimization, QPSO), 然后, 将其用于参数矩阵的优化求解来实现自由曲面定位, 最终完成自由曲面轮廓度误差评定。

#### 3.1 拟随机 Halton 序列

拟随机数序列能够均匀地充满采样空间, 使计算结果稳定可靠, 因此已被成功应用于数值积分、随机优化等多个领域。常用的拟随机序列有 Van der Corput 序列、Halton 序列、Faure 序列、Sobol 序列。这里采用拟随机 Halton 序列在参数采样区间产生参数值  $t_i (i=1, 2, \dots, M)$ , 为了使  $t_i$  均匀地充满采样空间,  $M$  通常取较大的值。

Halton 序列产生<sup>[21]</sup>:

设  $b$  为基数, 某一整数  $k, k \geq 0$  可以用基数  $b$  表示为:

$$k = \omega_j b^j + \omega_{j-1} b^{j-1} + \dots + \omega_1 b + \omega_0, \quad (3)$$

其中  $\omega_i \in \{0, 1, \dots, b-1\}, i=0, 1, \dots, j$ 。定义基数  $b$  的逆函数  $\phi_b(k)$  为:

$$\phi_b(k) = \omega_0/b^0 + \omega_1/b^1 + \dots + \omega_j/b^{j+1}, \quad (4)$$

注意对于每一个整数  $k \geq 0, \phi_b(k) \in [0, 1]$ 。

Halton 序列中的第  $k$  个元素由式(4)求得。如果取  $b_1, \dots, b_w$  共  $w$  个不同的基数, 则可得到长度为  $l$  的  $w$  维 Halton 序列  $\{x_1, \dots, x_l\}$ , 该序列的第  $k$  个元素为:  $\mathbf{X}_k = [\phi_{b_1}(k-1), \dots, \phi_{b_d}(k-1)]^T, k=1, \dots, l$ 。

#### 3.2 基于拟粒子群优化算法的自由曲面定位

实现自由曲面定位即是优化求解参数向量  $\mathbf{r} = [\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z]$  以使目标函数式(1)最小, 属于复杂的非线性优化问题, 非常适合用拟粒子群优化算法求解, 其步骤如下:

Step1 设进化代数  $t=0$ , 基于拟随机 Halton 序列随机产生粒子的初始位置  $\mathbf{p}_j^0$  和初始速度  $\mathbf{v}_j^0$ , 其中  $j=1, 2, \dots, N, N$  为粒子种群规模。

以 6 维的实数向量表示第  $j$  个粒子的位置, 表示为  $\mathbf{p}_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}, a_{6j})$ , 其中  $(a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}, a_{6j})$  分别为对应变换矩阵中参数  $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$  的可能取值, 以另一个 6 维的实数向量表示种群第  $j$  个粒子的速度, 表示为  $\mathbf{v}_j = (b_{1j}, b_{2j}, b_{3j}, b_{4j}, b_{5j}, b_{6j})$ , 其中  $(b_{1j}, b_{2j}, b_{3j}, b_{4j}, b_{5j}, b_{6j})$  分别为对应粒子在  $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$  上的飞行速度。

Step2 采用浓缩因子法修改粒子速度

第  $j$  个粒子在迭代的第  $t$  代采用如下浓缩因子法修改速度:

$$\mathbf{v}_j^{t+1} = K(\mathbf{v}_j^t + c_1 \mathbf{r}_{1j}^t (\mathbf{p}_j^t - \mathbf{p}_j^t) + c_2 \mathbf{r}_{2j}^t (\mathbf{p}'^t - \mathbf{p}_j^t)), \quad (5)$$

$$K = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|}. \quad (6)$$

式中  $\mathbf{v}_j^t, \mathbf{p}_j^t$  分别为第  $j$  个粒子在第  $t$  代的速度和位置,  $\mathbf{r}_{1j}^t$  和  $\mathbf{r}_{2j}^t$  分别为第  $j$  个粒子第  $t$  代  $[0, 1]$  区间产生的随机数,  $c_1, c_2$  为加速因子, 分别决定第  $j$  个

粒子向局部最佳粒子  $\rho_j^t$  和全局最佳粒子  $\psi^t$  方向飞行的相对拉力,  $K$  为浓缩因子,  $c_1, c_2$  满足  $\varphi = c_1 + c_2$ 。

Step3 用修改后的速度  $v_j^{t+1}$  改变粒子位置  
在迭代的第  $t$  代, 将第  $j$  个粒子位置  $p_j^t$  修改为:

$$p_j^{t+1} = p_j^t + v_j^{t+1} \Delta t. \quad (7)$$

式中,  $\Delta t$  为时间步长, 通常设置为 1。

Step4 计算粒子位置改变后的所有粒子目标函数值  $f(p_j^{t+1}), j=1, 2, \dots, N$ 。  $f(p_j^{t+1})$  数值越小, 说明参数  $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$  对应的三维变换矩阵使被测曲面与设计曲面匹配的程度越好。

Step5 更新局部最佳粒子位置  $\rho_j^t$

如果位置改变后粒子目标函数值小于未改变前粒子局部最佳位置的值, 则更新粒子的局部最佳粒子位置为  $\rho_j^t$ , 否则, 其局部最佳粒子位置不变。

Step6 更新全局最佳粒子位置

找出位置改变后目标函数值最小的粒子, 如果该粒子的目标函数值小于未改变前全局最佳粒子位置的目标函数值, 则用该粒子更新全局最佳粒子位置  $\psi^t$  作为  $t+1$  代的全局最佳粒子位置, 否则, 全局最佳粒子位置不变。

Step7 判断是否满足终止条件, 若不满足, 则  $t=t+1$ , 转 Step 2; 否则输出优化所得参数  $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ , 完成自由曲面定位。

#### 4 自由曲面轮廓度误差

考虑到自由曲面零件的非对称性和对整个曲面光滑性的要求, 本文提出采用轮廓峰谷误差、轮廓均方根误差 2 个指标来综合评定自由曲面轮廓度误差。设被测曲面与设计曲面匹配后, 被测曲面上任意一点  $q_{i,j}$  在设计曲面上的投影点  $s_{i,j}'$  与设计曲面对应点  $s_{i,j}$  之间的距离  $d_{i,j}$  为:

$$d_{i,j} = \pm \sqrt{(x_{i,j}' - x_{i,j})^2 + (y_{i,j}' - y_{i,j})^2 + (z_{i,j}' - z_{i,j})^2}. \quad (8)$$

如果  $s_{i,j}'$  在  $s_{i,j}$  上方, 则  $d_{i,j}$  取正值, 否则取负值。

轮廓峰谷误差为  $d_{i,j}$  中最大值与最小值之差, 即:

$$E_{pv} = \max(d_{i,j}) - \min(d_{i,j}). \quad (9)$$

轮廓均方根误差为:

$$E_{rs} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{i,j}^2}. \quad (10)$$

### 5 实验与结果

#### 5.1 仿真实例

为了验证算法的有效性, 本文先选用典型测试函数 Rosenbrock function 进行分析:

$$f_1(x) = 100 \times (x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2, -2.048 \leq x_1, x_2 \leq 2.048. \quad (11)$$

该函数三维图如图 1 所示, 全局最小值为 0, 位于点  $(1.0, 1.0)$ , 其周围区域变化平缓, 属于难度较大的优化问题, 常被用来检验进化算法的有效性<sup>[22]</sup>。分别用 QPSO 和 PSO 优化求解该函数最小值, 优化过程如图 2 所示。

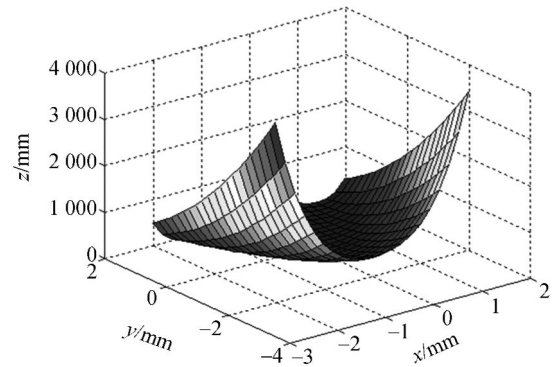


图 1 设计曲面

Fig. 1 Designed surface

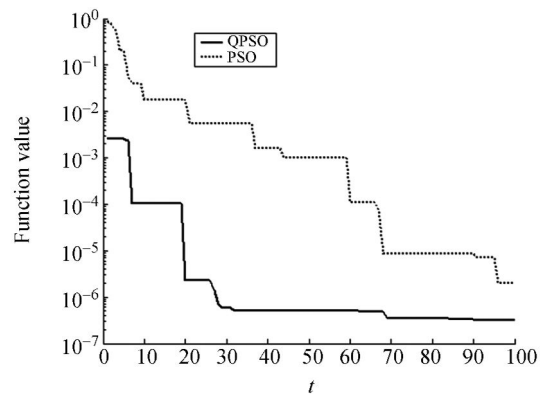


图 2  $f_1(x)$  优化过程

Fig. 2 Optimization process for  $f_1(x)$

由图 2 可见, QPSO 和 PSO 均能搜索到全局最优解, 但 QPSO 优化速度明显优于 PSO。其次将该曲面经参数向量  $t = [0, 0.1, 0.2, -10, 1]$  平

移和旋转后获得的曲面作为被测曲面,用 QPSO 优化求解参数向量,实现被测曲面与设计曲面的定位,求得参数向量结果为  $t=[9.649\ 934\ 3 \times 10^{-9}, 0.099\ 999\ 921, 7.980\ 216\ 4 \times 10^{-6}, 2.000\ 055\ 4, -9.999\ 968\ 8, 0.999\ 996\ 93]$ ,再计算其形状误差,结果列于表 1。

表 1 轮廓度误差  
Tab.1 Profile errors

方法		轮廓峰谷误差	轮廓均方根误差
		$E_{pv}/\text{mm}$	$E_{rs}/\text{mm}$
仿真实例	QPSO	$3.178 \times 10^{-4}$	$8.738 \times 10^{-5}$
	QPSO	0.387 1	0.082 1
实测零件 1	CMM software	0.435 0	—
	QPSO	0.798 5	0.202 8
实测零件 2	CMM software	0.871 4	—

由表 1 可见,轮廓峰谷误差和均方根误差均接近 0,这是因为被测曲面是直接由设计曲面转换而来的,理论上形状误差为零。

考虑到 QPSO 初始种群产生和更新粒子速度时都基于随机策略,这将导致优化过程的计算结果不稳定。为了验证算法的稳定性,对该仿真实例采用 QPSO 重复运行 10 次,10 次运行的初始种群采用拟 Halton 序列随机产生,最大进化代数均设定为 100 代,10 次运行求得轮廓峰谷误差和均方根误差的平均值和标准差值如表 2 所示,可见 QPSO 能够快速稳定地找到参数向量的最优解,完成自由曲面精确定位。

表 2 10 次运行结果

Tab.2 Results of run 10 times

	轮廓峰谷误差	轮廓均方根误差
	$E_{pv}/\text{mm}$	$E_{rs}/\text{mm}$
平均值	$2.476 \times 10^{-4}$	$6.153 \times 10^{-5}$
标准差	$1.483 \times 10^{-5}$	$3.102 \times 10^{-6}$

## 5.2 实测零件

在 PLITZ Hitech LV-800 加工中心上基于不同 CAD 模型加工多个自由曲面零件。图 3 为其中一个零件,其上端面为一自由曲面,采用安装 Renishaw MH20i 测头的 NC454 三坐标测量仪实测该零件。

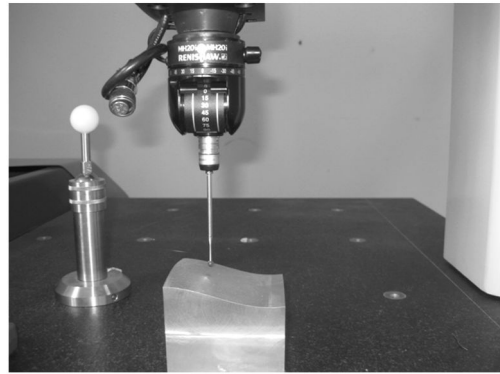


图 3 零件实测图

Fig.3 Measurement figure of parts

检测时,先以 IGES 格式导入零件 CAD 模型,在 CAD 模型上用鼠标选择 12 个点,这 12 个点尽可能均匀分布于被测曲面上,手动操纵测量机测量选中的这 12 个点,测量顺序要求和鼠标采点顺序一致。然后选择 RationalDMIS CAD++ 提供的迭代功能,设定迭代次数为 160,变化值为 0.2 进行迭代拟合。为了提高拟合精度,再将自动测量的 12 个点进行迭代拟合,然后由 CAD 模型引导自动测量自由曲面上 100 点,测量数据见表 3。

选择 RationalDMIS CAD++ 软件曲面轮廓度误差计算功能,求得的曲面轮廓最大偏差为 0.225 04 mm,最小偏差为 -0.209 97 mm,即轮廓峰谷误差为 0.435 01 mm。采用本文提出的拟粒子群优化算法优化参数向量实现被测曲面与设计曲面的定位后,计算的形状误差结果也列于表 1。由表 1 可见,采用本文提出方法计算的轮廓峰谷误差明显小于 RationalDMIS CAD++ 的计算结果,其精度提高 12.4%。

图 4 为一自由曲面零件的 CAD 模型图,将该零件在 PLITZ Hitech LV-800 加工中心加工后,采用三坐标测量仪实测该零件,应用本文提出方法计算其轮廓峰谷误差和轮廓均方根误差及由 RationalDMIS CAD++ 软件计算结果,均列于表 1。由表 1 可见,采用本文提出方法计算轮廓峰谷误差为 0.798 5 mm,而 RationalDMIS CAD++ 的计算结果为 0.871 4 mm,其精度提高了 9.1%。其原因是 RationalDMIS CAD++ 采用的是迭代计算,其计算结果与所选初始值有关,初始值选择不当,很容易陷入局部最小,以致于不能搜索到全局最优解。由此可见,采用 QPSO 算法能够实现精确定位,提高自由曲面轮廓度误差评定精度。

表 3 实测数据

Tab. 3 Practical measured data											
											mm
No	X	Y	Z	No	X	Y	Z	No	X	Y	Z
1	-26.085 8	-29.759 8	-6.153 0	35	2.881 8	-2.948 8	-8.394 7	69	20.284 4	18.670 3	-13.501 3
2	-20.289 5	-29.761 1	-5.119 5	36	-2.919 2	-2.944 5	-8.799 5	70	26.084 8	18.668 7	-13.946 6
3	-14.494 4	-29.760 9	-4.176 9	37	-8.721 1	-2.939 4	-9.400 7	71	26.084 9	22.356 5	-14.289 6
4	-8.700 1	-29.760 4	-3.391 2	38	-14.526 9	-2.928 2	-10.162 7	72	20.282 0	22.359 2	-13.855 8
5	-2.904 3	-29.762 3	-2.782 2	39	-20.322 3	-2.932 9	-11.115 8	73	14.481 4	22.363 9	-13.630 6
6	2.890 8	-29.761 3	-2.374 5	40	-26.121 2	-2.925 5	-12.143 6	74	8.683 9	22.361 7	-13.626 8
7	8.685 4	-29.764 5	-2.183 8	41	-26.120 5	5.134 0	-14.466 3	75	2.884 8	22.362 0	-13.840 9
8	14.478 9	-29.764 3	-2.216 1	42	-20.320 8	5.129 5	-13.440 0	76	-2.911 4	22.360 7	-14.278 6
9	20.273 4	-29.767 1	-2.471 0	43	-14.522 2	5.125 0	-12.497 4	77	-8.704 7	22.360 8	-14.906 3
10	26.066 0	-29.768 0	-2.937 3	44	-8.720 7	5.121 7	-11.713 2	78	-14.499 1	22.360 5	-15.711 3
11	26.068 8	-24.545 5	-3.563 9	45	-2.919 4	5.119 3	-11.108 2	79	-20.288 8	22.361 3	-16.670 9
12	20.277 4	-24.541 3	-3.094 1	46	2.880 6	5.118 2	-10.698 5	80	-26.085 3	22.358 5	-17.718 7
13	14.480 2	-24.535 8	-2.839 4	47	8.680 6	5.113 2	-10.503 1	81	-26.072 8	26.061 7	-17.926 3
14	8.683 0	-24.535 5	-2.806 6	48	14.481 9	5.113 8	-10.530 4	82	-20.280 7	26.066 5	-16.881 0
15	2.888 0	-24.533 8	-2.992 4	49	20.282 9	5.106 7	-10.782 0	83	-14.488 8	26.063 4	-15.916 1
16	-2.909 6	-24.529 6	-3.398 2	50	26.082 7	5.100 0	-11.246 1	84	-8.698 2	26.062 4	-15.100 0
17	-8.708 4	-24.526 7	-4.003 5	51	26.082 1	12.322 8	-12.934 1	85	-2.906 8	26.065 1	-14.466 9
18	-14.503 9	-24.525 4	-4.783 5	52	20.285 4	12.326 2	-12.475 4	86	2.887 5	26.062 9	-14.027 8
19	-20.300 7	-24.524 9	-5.720 1	53	14.482 1	12.330 5	-12.234 4	87	8.683 1	26.065 8	-13.804 6
20	-26.100 2	-24.521 3	-6.755 8	54	8.681 6	12.330 9	-12.216 0	88	14.482 0	26.067 9	-13.801 4
21	-26.119 5	-13.642 9	-9.078 9	55	2.881 7	12.331 0	-12.419 9	89	20.282 9	26.060 4	-14.016 7
22	-20.315 6	-13.650 0	-8.046 2	56	-2.917 3	12.329 2	-12.841 8	90	26.083 1	26.058 1	-14.444 1
23	-14.515 3	-13.653 4	-7.113 1	57	-8.716 9	12.329 7	-13.457 6	91	26.081 3	29.757 8	-14.399 6
24	-8.718 5	-13.661 9	-6.336 9	58	-14.514 5	12.333 8	-14.246 5	92	20.280 8	29.762 5	-13.973 2
25	-2.918 1	-13.666 0	-5.737 3	59	-20.311 4	12.333 8	-15.194 8	93	14.484 7	29.768 1	-13.756 1
26	2.883 4	-13.668 6	-5.333 7	60	-26.109 4	12.334 2	-16.225 8	94	8.683 9	29.769 1	-13.775 4
27	8.682 8	-13.673 1	-5.150 2	61	-26.094 8	18.669 9	-17.323 9	95	2.890 1	29.772 0	-14.006 0
28	14.481 7	-13.677 9	-5.185 6	62	-20.298 0	18.672 4	-16.274 1	96	-2.901 1	29.774 2	-14.457 2
29	20.281 8	-13.686 0	-5.444 3	63	-14.504 5	18.672 4	-15.326 4	97	-8.689 8	29.775 3	-15.099 3
30	26.075 3	-13.691 2	-5.913 8	64	-8.708 8	18.669 5	-14.529 4	98	-14.477 4	29.776 4	-15.938 1
31	26.081 5	-2.974 7	-8.961 2	65	-2.912 6	18.671 9	-13.902 2	99	-20.267 1	29.777 9	-16.906 5
32	20.282 8	-2.965 6	-8.493 4	66	2.884 8	18.672 8	-13.473 9	100	-26.055 7	29.776 2	-17.949 3
33	14.483 6	-2.957 7	-8.241 1	67	8.684 1	18.674 1	-13.263 2				
34	8.683 8	-2.955 3	-8.207 8	68	14.482 9	18.675 5	-13.271 5				

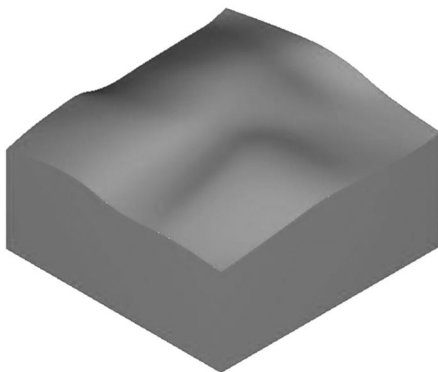


图 4 零件 CAD 模型图

Fig. 4 CAD model figure of parts

## 6 结 论

为了对基于 CAD 模型引导测量的自由曲面进行高精度检测和轮廓度误差评定,针对使用三坐标测量零件时由于被测曲面和设计曲面分别位于 2 个不同坐标系而产生的曲面不匹配问题,提出将粒子群优化算法与拟随机序列结合优化参数向量实现被测曲面与设计曲面的精确定位。针对自由曲面的形状特点,提出用轮廓峰谷误差和均方根误差综合评定自由曲面轮廓度误差。分析了

用拟粒子群优化算法实现曲面匹配时目标函数值的计算方法及求解参数向量的具体步骤。实验结果证实:采用本文方法能够有效地排除由于基准不统一而导致的定位误差,使自由曲面轮廓度误

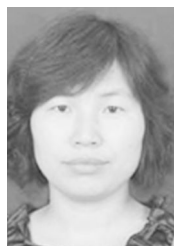
差评定精度比由三坐标测量仪内置软件计算的结果提高 8%~15%,适用于对高精度自由曲面零件轮廓度误差的评定。

### 参考文献:

- [1] XU Y, JIANG J, LI Z X. Cyclic optimization for localization in freeform surface inspection [J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(2):361-374.
- [2] LI YD, GU PH. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. *Computer-Aided Design*, 2004,36(13):1395-1417.
- [3] 李剑, 王文, 陈子辰. 自由曲面测量若干关键问题的研究[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(5):764-766.  
LI J, WANG W, CHEN Z CH. Study on some key issues in the measurement of free-form surface [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(5):764-766. (in Chinese)
- [4] 李大鹏. 三坐标测量机在复杂自由曲面检测中的应用[J]. *工具技术*, 2007, 41(9):85-87.  
LI D P. Application of coordinate measuring machine in measuring complex freeform surface [J]. *Tool Technology*, 2007, 41(9):85-87. (in Chinese)
- [5] SAHOO K C, MENG CH. Localization of 3-D objects having complex sculptured surfaces using tactile sensing and surface description [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, 113(1):85-92.
- [6] MENG C H, YAU H T, LAI G Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection [J]. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1992, 8(2):268-278.
- [7] ZHANG Z. Iterative point matching for registration of freeform curves and surfaces [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2): 119-152.
- [8] LI Y D, GU P H. Automatic localization and comparison for free-form surface inspection [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(4):251-267.
- [9] 杜建军, 高栋, 孔令豹, 等. 光学自由曲面误差评定中匹配方法的研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1):133-138.
- [10] DU J J, GAO D, KONG L B, *et al.*. Study of matching methods for error evaluation of optical free-form surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):133-138. (in Chinese)
- [11] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO/TS 12780-1—2003, Geometrical product specifications (GPS)-Straightness-Part 1: Vocabulary and parameters of straightness [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2003.
- [12] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO/TS 12781-1—2003, Geometrical product specifications (GPS)-Flatness-Part 1: Vocabulary and parameters of Flatness [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2003.
- [13] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO/TS 12181-1—2003, Geometrical product specifications (GPS)-Roundness-Part 1: Vocabulary and parameters of Roundness [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2003.
- [14] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO/TS 12180-1—2003, Geometrical product specifications (GPS)-Cylindricity-Part 1: Vocabulary and parameters of Cylindricity [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2003.
- [15] CHEUNG C F, LI H F, KONG L B, *et al.*. Measuring ultra-precision freeform surfaces using a robust form characterization method [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(3): 488-494.
- [16] CERARDI A, MENEGHELLO R, CONCHERI G, *et al.*. Form errors estimation in free-form 2D and 3D geometries [C]. *Proceedings of International Conference on Innovative Methods in Product Design, Italy: Venice, June 15-17, 2011: 550-555.*

- [16] EBERHART R, SHI Y, KENNEDY J. *Swarm Intelligence* [M]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 2001.
- [17] SAMANTA B, NATARAJ C. Use of particle swarm optimization for machinery fault detection [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(2): 308-316.
- [18] WEN X L, HUANG J C, SHENG D H, et al.. Conicity and cylindricity error evaluation using particle swarm optimization[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(2): 338-346.
- [19] BOHM W, GEYER-SCHULTS A. *Exact Uniform Initialization for Genetic Programming, Foundations of Genetic Algorithms IV* [M]. California: Morgan Kaufmann, 1997.
- [20] MAARANEN H, MIETTINEN K, MAKELA M. Quasi-random initial population for genetic algorithms [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2004, 47(12): 1885-1895.
- [21] RAFAJLOWICZA E, SCHWABE R. Halton andammersley sequences in multivariate nonparametric regression [J]. *Statistics & Probability Letters*, 2006, 76(8): 803-812.
- [22] LIANGF J J, QIN A K, SUGANTHAN P, et al.. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions [J]. *IEEE Trans. On Evolutionary Computation*, 2006, 10(1):281-295.

#### 作者简介:



王东霞(1973—),女,河南南阳人,博士研究生,讲师,1997年、2003年于山东科技大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为精密计量技术、进化计算。E-mail:zdhxwdx@njit.edu.cn



赵艺兵(1966—),男,内蒙古呼和浩特人,高级实验师,1988年于太原理工大学获得学士学位,主要从事数控技术、逆向工程方面的研究。E-mail:zdhxzyb@njit.edu.cn



温秀兰(1966—),女,内蒙古丰镇人,博士,教授,1988年于南京理工大学获得学士学位,1991年于中北大学获得硕士学位,2004年于东南大学获得博士学位,主要研究方向为智能计算、逆向工程、精密计量技术。E-mail:zdhxwxl@njit.edu.cn