

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.010

# 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析\*

何改云 黄鑫 郭龙真

(天津大学 机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350)

**摘要:**针对自由曲面轮廓度误差的评定提出了新的方法,利用实际曲面的重构模型和理论设计模型比较,判断误差是否在要求的公差带范围内。评定的过程为利用三坐标测量机(CMM)在实际加工曲面上获得离散的测点坐标;通过求解最优化问题找到变换矩阵的参数值,将测点从测量坐标系下变换到设计坐标系;利用定位后的测量点坐标,采用B样条插值的方法重构曲面。由于存在测量不确定度,误差评定的最终结果也存在不确定度。针对“S”形试件这类自由曲面,对提出的误差评定方法进行了验证,并且分析了在评定过程中定位误差。重构误差和轮廓度误差的不确定度。实验结果表明,本方法能够客观指导自由曲面加工质量的评价与验收。

**关键词:**自由曲面;轮廓度误差;曲面重构;不确定度

**中图分类号:** TB92; TN06      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty

He Gaiyun Huang Xin Guo Longzhen

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** A new method to evaluate the free-form surface error is proposed in this paper. Testing whether the error is within the required tolerance zone is implemented by comparing the reconstructed machined surface with the design surface. The inspection process is created out by these steps: acquisition of measurement points on the actual surface, transform the measurement points from the measurement coordinate system to design coordinate system by location; the machined surface is reconstructed by the located points based on B-spline interpolation; the reconstructed surface is compared with the design surface. Because of the uncertainty in measurement process, the uncertainty of location, reconstruction, and form error are analyzed. The proposed method is verified in the measuring and analysis of “S” shape test shape. The results show that the proposed method is effective to guide the evaluation and acceptance of free form surface machining quality.

**Keywords:** free-form surface; profile error; surface reconstruction; uncertainty

## 1 引言

随着制造业的发展,自由曲面越来越广泛的应用于汽车、航空航天以及测量等领域。曲面的加工质量对产品的使用功能有着重要的影响。因此为了确保加工质量,自由曲面零件加工误差的测量和分析有着重要的研究意义<sup>[1]</sup>。对于曲面的测量方法,一种是接触式测量,例如三坐标测量机(CMM);另一种非接触式测量,例如激

光扫描仪。由于CMM具有高精度、良好的重复性和可靠性,因此作为主要的测量工具<sup>[2]</sup>。

一般的自由曲面轮廓度误差评定方法是在利用CMM在曲面根据布点策略获得离散的采样点后,需要一个定位过程将测量坐标系与设计坐标系对齐。根据对定位方法的研究,定位主要分为两步,在理论设计曲面上找到与测量点对应距离最近的点,和求解一个变换矩阵的参数<sup>[3]</sup>。针对以上过程,国内外学者做了大量的研究。其中迭代最近点(ICP)法是一类解决定位问题的常用算

法<sup>[4-5]</sup>。Sun 等人<sup>[6]</sup>提出了一种用序列二次规划算法 (SQP) 解决定位问题, 用迭代搜索法求解点到曲面最近距离。He 等人<sup>[7]</sup>基于点到曲面距离函数, 建立误差评定模数学模型, 并用单纯性法和差分进化相结合的算法对模型进行了优化。许多智能算法也应用于误差评定, 例如遗传算法<sup>[8]</sup>、粒子群算法<sup>[9]</sup>等。应用离散采样点进行误差评定的方法十分有效, 但仅限于有限个采样点处的误差值计算, 并不能完全代表实际加工曲面, 对于未采样到的曲面位置仍需要判定是否在公差带范围内, 因此有必要利用采样点对实际加工曲面进行重构。吴石等人<sup>[10]</sup>利用重构 NURBS 曲面拟合加工曲面, 然后利用广义牛顿法计算曲面加工误差。根据产品几何误差检测的规定, 对于曲面误差评定的结果仍需要给出评定结果的不确定度。李红莉等人<sup>[11]</sup>研究了 CMM 面向任务测量的不确定度评定方法。针对自由曲面的误差评定过程, 陈满意人<sup>[12-13]</sup>基于 Bootstrap 的方法分别研究了曲面最佳匹配和误差评定结果的不确定度。Huang 等人<sup>[14]</sup>讨论了测量和布点策略影响曲面重构的不确定度。对于定位, 重构, 误差计算的完整曲面误差评定过程的不确定度, Vahid 等人<sup>[15]</sup>进行了分析, 但是评定结果只针对开式自由曲面。

因此针对“S”形试件这类自由曲面轮廓度误差的评定, 本文首先根据离散的采样点, 利用优化算法对测点进行定位。通过定位后的测点利用 B 样条插值的方法重构实际加工曲面, 利用分割逼近算法求解加工曲面与理论曲面的误差。并对以上过程的不确定度进行了分析。

## 2 自由曲面轮廓度误差评定

自由曲面的测量过程一般为在曲面上采集离散的数据点, 由于测量坐标系与设计坐标系不匹配, 需要将测量的离散点进行定位, 从测量坐标系下变换到设计坐标系下。定位的过程实际上是求解变换矩阵的参数, 使得测量数据点与理想设计曲面对齐。

根据轮廓度公差带有无基准的要求, 定位过程分为两种。当不考虑基准要求时, 通过实际加工曲面上的点与设计曲面进行匹配。定位过程首先是找到每个测点在设计曲面上对应的最近点, 然后求解变换参数, 通过齐次坐标变换矩阵, 使得所有测点到曲面的最大距离最小。旋转参数变化, 测点在理论曲面上对应点也相应的改变。

假设实际测量加工表面得到  $m$  个测点, 齐次坐标表

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u), p \geq 1 \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

示为  $\mathbf{Q}_i^M = (x_i^M, y_i^M, z_i^M, 1) i = 1, 2, \dots, m$ ,  $T$  为一个  $4 \times 4$  的变换矩阵, 将测点从测量坐标系变换到设计坐标系, 变换后测点在设计坐标系下的点表示为  $\mathbf{P}_i^L = (x_i^L, y_i^L, z_i^L, 1)$ , 变换关系表示为:

$$\mathbf{P}_i^L = \mathbf{TQ}_i^M \quad (1)$$

变换矩阵  $T$  是通过 3 个旋转变量和 3 个平移变量表示, 计算公式如下:

$$\mathbf{T}(r_x, r_y, r_z, d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} cr_x cr_z & sr_x sr_y cr_z - cr_x sr_z & cr_x sr_y cr_z + sr_x sr_z & d_x \\ cr_y sr_z & sr_x sr_y sr_z + cr_x cr_z & cr_x sr_y sr_z + sr_x cr_z & d_y \\ -sr_y & sr_x cr_y & cr_x cr_y & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $r_x, r_y, r_z$  为围绕  $x, y, z$  轴的旋转角度,  $d_x, d_y, d_z$  表示为沿  $x, y, z$  轴的平移量。  $c \cdot s \cdot$  分别表示关于旋转角的  $\cos$  函数和  $\sin$  函数。测点变换后的定位点  $\mathbf{P}_i^L$  对应设计曲面上的最近点表示为  $\mathbf{P}_i^D = (x_i^D, y_i^D, z_i^D, 1)$ , 定位点到曲面上对应点之间的距离表示为:

$$L_i = \sqrt{(x_i^L - x_i^D)^2 + (y_i^L - y_i^D)^2 + (z_i^L - z_i^D)^2} \quad (3)$$

根据最小区域原则, 定位过程的数学模型可以表示为:

$$F = \min \{ \max | \mathbf{P}_i - \mathbf{TQ}_i^M | \} = \min \{ \max | d_i(r_x, r_y, r_z, d_x, d_y, d_z) | \} \quad (4)$$

利用 SQP<sup>[7]</sup> 优化算法, 通过求解式 (4) 表示的优化问题得到变换矩阵中的参数  $r_x, r_y, r_z, d_x, d_y, d_z$ 。在优化过程中, 利用分割逼近算法求解测点到曲面中的最近距离。

## 3 曲面重构方法

得到定位点的数据后, 用这些离散的数据点进行曲面重构, 在本文中用 B 样条模型表示自由曲面。B 样条曲面的定义是由两个节点矢量, 两个方向的控制网络以及双变量基函数的乘积表示的, 其方程表示为:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{n_u} \sum_{j=0}^{n_v} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \mathbf{P}_{i,j} \quad (5)$$

式中:  $n_u$  和  $n_v$  分别表示  $u$  向和  $v$  向控制点个数,  $p, q$  分别表示 B 样条模型的阶数。  $\mathbf{P}_{ij}$  表示控制点,  $N_{i,p}(u)$  和  $N_{j,q}(v)$  表示  $u$  向和  $v$  向的  $p$  次和  $q$  次的 B-spline 基函数, B-spline 基函数的递推定义如式 (6) 所示。

通过式 B 样条曲面的定义, B 样条曲面上任意一点的计算公式可以表示为:

$$S(u, v) = \mathbf{b}(u, v)\mathbf{P} \quad (7)$$

$S(u, v)$  表示曲面上一点坐标, 其中  $\mathbf{b}(u)$  和  $\mathbf{b}(v)$  表示基函数向量:

$$\mathbf{b}(u, v) = [N_{0,p}(u)N_{0,q}(v), N_{0,p}(u)N_{1,q}(v), \dots, N_{0,p}(u)N_{n-1,q}(v), N_{1,p}(u)N_{0,q}(v), N_{1,p}(u)N_{1,q}(v), \dots, N_{1,p}(u)N_{n-1,q}(v), N_{n-1,p}(u)N_{0,q}(v), \dots, N_{n-1,p}(u)N_{n-1,q}(v)]_{1 \times n} \quad (8)$$

式中:  $p$  和  $q$  分别表示  $u$  和  $v$  向的阶数,  $n_u$  和  $n_v$  分别表示  $u$  和  $v$  向控制点个数,  $N_{i,j}(u, v)$  表示 B 样条基函数, 由式 (8) 计算得到.  $n$  表示控制点个数,  $n = n_u \times n_v$ 。

实际加工曲面的重构是通过定位后的测量点。测量数据在拓扑结构上构成矩阵, 并且同一个方向的数据点均匀分布, 数据的形式为  $(r+1) \times (s+1)$ 。测量数据为  $\mathbf{Q}_k = [Q_x, Q_y, Q_z]_{m \times 3}$  其中  $m = (r+1) \times (s+1)$ 。通过创建  $(p, q)$  次 B 样条曲面使其插值于这些点。本文为每个数据点  $\mathbf{Q}_k$  指定一个参数值  $\bar{u}_k$ , 并且选定一个合适的节点矢量  $\mathbf{U}$ 。建立一个系数矩阵为  $m \times m$  的线性方程组,  $m$  个控制点坐标为未知量。求解线性方程组得到  $m$  个控制点  $\mathbf{P}_k = [P_x, P_y, P_z]_{m \times 3}$ 。控制点的坐标值由型值点通过式 (9) 计算得到。

$$\mathbf{P} = (\bar{\mathbf{b}})^{-1}\mathbf{Q} = \boldsymbol{\beta}\mathbf{Q} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{Q}$  表示用于重构曲面的定位后的定位点,  $\mathbf{P}$  表示重构曲面的控制点,  $\bar{\mathbf{b}}$  表示  $m \times m$  的基函数矩阵, 由式 (8) 计算得到,  $m$  表示测量点和反求得到的控制点的个数, 其中的  $u, v$  值用对应第  $i$  个测量点的参数值  $\bar{u}_i, \bar{v}_i$  代替计算,  $\boldsymbol{\beta}$  表示  $\bar{\mathbf{b}}$  的逆矩阵。

在曲面重构的过程中, 需要为每个测点指定一个参数值, 且需要确定合适的节点矢量。每个测点  $\mathbf{Q}_i$  对应的参数值  $(\bar{u}_k, \bar{v}_k)$  用弦长参数化的方法计算, 以  $u$  向参数值为例计算方法如下, 令  $d$  为总弦长。

$$d = \sum_{i=1}^{r+1} |\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_{i-1}| \quad (10)$$

$$\bar{u}_0 = 0, \bar{u}_n = 1$$

$$\bar{u}_i = \bar{u}_{i-1} + \frac{|\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_{i-1}|}{d} \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$

## 4 曲面的轮廓度误差及计算

### 4.1 曲面的轮廓度误差

曲面的轮廓度误差一般用曲面上点的法向偏差衡量。因此计算曲面轮廓度误差可以转化为计算加工曲面到理论曲面的距离。在获得重构的实际加工曲面后, 先将曲面离散为大量点, 然后用重构加工曲面上的点到理

论曲面的最小距离来表示轮廓度误差。对于重构的加工曲面, 只要给定点的参数值  $(u_0, v_0)$ , 就可以得到型值点坐标  $\bar{\mathbf{Q}}_0 = (x_0^q, y_0^q, z_0^q)$ , 计算公式如下:

$$\bar{\mathbf{Q}}_0 = \mathbf{b}(u_0, v_0)\mathbf{P} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{b}(u_0, v_0)$  是一个  $1 \times m$  基函数向量, 由式 (8) 计算得到,  $\mathbf{P}$  是  $m \times 3$  的控制点坐标矩阵。假设重构加工曲面上的点  $\bar{\mathbf{Q}}_i(x_i^q, y_i^q, z_i^q)$ , 对应在设计曲面上的最近点表示为  $\bar{\mathbf{Q}}_i^d(x_i^d, y_i^d, z_i^d)$ , 加工曲面的误差表示为:

$$f_i = \sqrt{(x_i^q - x_i^d)^2 + (y_i^q - y_i^d)^2 + (z_i^q - z_i^d)^2} \quad (13)$$

### 4.2 曲面轮廓度误差计算

在本文中用分割逼近的方法计算重构曲面上点到理论曲面的最短距离, 计算步骤如下。

1) 令  $t = 1, w = 1$ ,  $t$  和  $w$  分别表示分割的次数和初始分割区间的宽度。将整个  $[0, 1]$  区间分别沿  $u$  方向和  $v$  方向分割均成为  $n$  个小区间, 区间宽度为  $\delta = w/n$ 。这样在曲面上形成了  $(n+1) \times (n+1)$  个网格点  $\mathbf{r}(u_l^t, v_k^t)$ , 其中  $l = 0, 1, \dots, n, k = 0, 1, \dots, n$ 。

2) 计算测点  $s_i(x_i, y_i, z_i)$  到每个网格点  $\mathbf{r}(u_l^t, v_k^t)$  的距离  $d_{l,k}^t$ 。

3) 记录测点到网格点中的距离最小点  $\mathbf{r}(u_{l_0}^t, v_{k_0}^t)$  以及到该点的距离  $d_{l_0, k_0}^t$ , 则测点的对应最近点  $\mathbf{r}(u^*, v^*)$  必然位于点  $\mathbf{r}(u_{l_0}^t, v_{k_0}^t)$  临近的 4 个曲面片内。

4) 将点  $\mathbf{r}(u_{l_0}^t, v_{k_0}^t)$  周围的 4 个曲面片进一步细分为  $n \times n$  个小曲面片, 并得到个新的网格点。更新  $w = 2\delta$  或  $w = \delta$  (边界位置时),  $\delta = w/n$ 。如果  $\delta$  小于给定精度, 结束该算法,  $\mathbf{r}(u_{l_0}^t, v_{k_0}^t)$  即为点  $s_i(x_i, y_i, z_i)$  的对应最近点,  $d_{l_0, k_0}^t$  是该点到曲面的最小距离。否则, 令  $t = t + 1$ , 跳转到步骤 2), 继续执行。

## 5 误差评定不确定度分析

在加工曲面的检测过程中, 需要将重构曲面与公差带比较, 判断加工曲面是否合格。由于在测量过程中存在随机误差, 应用测量设备对实际加工曲面进行检测时, 得到的测量点存在不确定度。由于不确定度的影响, 在测点进行定位和用测点重构的曲面也存在不确定度。因此, 在最终加工误差的评定中, 有必要分析由于测量中的随机误差产生的重构曲面存在的不确定度和最终评定结果的不确定度。重构曲面的不确定度主要受测量点的不确定度、定位过程的不确定度和曲面重构的不确定度影响。估算重构曲面的不确定度分为两步, 首先计算定位点的不确定度, 然后由定位点及其不确定度, 经过曲面重构过程, 得到重构曲面控制点的不确定度。根据标准偏

差和方差之间的关系,本文中通过各变量的方差计算不确定度。

### 5.1 定位后测点的不确定度分析

在测量点  $Q_i = (x_i^M, y_i^M, z_i^M)$  经过第一节定位过程后,得到定位点坐标表示为  $P_i^L = (x_i^L, y_i^L, z_i^L)$ 。直接测量结果包括系统误差和随机误差,影响测量不确定度的主要是随机误差。假设随机测量误差服从正态分布,均值为0,在  $X, Y, Z$  这3个方向的方差表示为  $V_{xi}^M, V_{yi}^M, V_{zi}^M$ 。由于变换矩阵参数值的计算是一个非线性的优化过程,与测量点之间无法定义显示函数关系。变换矩阵参数值的方差和均值通过多组不同随机测量误差的测量点,经过多次重复试验得到。由式(1)和(2)定义的定位点坐标与测量点之间的关系,定位点坐标的方差根据方差合成定理由下式计算得到<sup>[14]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{var}(\lambda_i^L) &= \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial r_x}\right)^2 \text{var}(r_x) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial r_y}\right)^2 \text{var}(r_y) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial r_z}\right)^2 \\ &\text{var}(r_z) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial d_x}\right)^2 \text{var}(d_x) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial d_y}\right)^2 \text{var}(d_y) + \\ &\left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial d_z}\right)^2 \text{var}(d_z) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial x_i^M}\right)^2 \text{var}(x_i^M) + \\ &\left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial y_i^M}\right)^2 \text{var}(y_i^M) + \left(\frac{\partial \lambda_i^L}{\partial z_i^M}\right)^2 \text{var}(z_i^M) \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  代表  $x, y, z$  三个方向坐标,不考虑协方差项。假设每个  $x, y, z$  三个方向坐标相对于其他测点都是相互独立的。6个变换矩阵参数值是通过所有的测量点计算得到,单个测点对参数值的影响忽略。

### 5.2 重构曲面的不确定度

估算重构曲面上一点的不确定度分为两步,估算控制点的不确定度,将控制点的不确定度传递到曲面上任意一点的不确定度。重构曲面的控制点可通过定位点,由式(9)定义的的重构方法计算得到。重构控制点的方差度根据 Vahid Mehrad<sup>[15]</sup>的方法,由定位后点的方差计算。重构后控制点的方差计算公式为:

$$\mathbf{V}_\lambda^p = (\bar{\mathbf{b}})^{-1} \mathbf{V}_\lambda^L [(\bar{\mathbf{b}})^{-1}]^T \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{V}_\lambda^p$  表示控制点在  $\lambda$  方向的协方差矩阵,  $\mathbf{V}_\lambda^L$  是对角矩阵表示所有定位点在  $\lambda$  方向的方差,  $\lambda$  代表  $X, Y, Z$  方向。  $\mathbf{V}_\lambda^L$  由式(15)计算得到,  $\bar{\mathbf{b}}$  表示重构过程中的基函数矩阵,由式(8)计算得到。得到控制点的不确定度后,可以根据 Huang<sup>[14]</sup>的方法计算重构曲面上任意一点的方差,计算公式为:

$$\mathbf{V}_\lambda^q = (\mathbf{b}(u_0, v_0)) \mathbf{V}_\lambda^p (\mathbf{b}(u_0, v_0))^T \quad (16)$$

式中:  $(u_0, v_0)$  表示重构曲面上任意一点对应参数值,  $\mathbf{b}$  表示基函数向量。重构曲面上任意一点  $\lambda$  方向方差只受控制点对应  $\lambda$  方向方差值的影响,  $\mathbf{V}_\lambda^q = (\text{var}(x^q), \text{var}(y^q), \text{var}(z^q))$

### 5.3 轮廓度误差的不确定度

由式(13)定义的轮廓度误差计算公式,在得到重构曲面上任意一点坐标  $X, Y, Z$  方向的方差值后,可由方差合成定理进行计算,重构曲面上任意一点坐标的方差值由式(16)计算。被测量的合成方差可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} u_f^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x^q}\right)^2 \text{var}(x^q) + \left(\frac{\partial f}{\partial y^q}\right)^2 \text{var}(y^q) + \\ &\left(\frac{\partial f}{\partial z^q}\right)^2 \text{var}(z^q) \end{aligned} \quad (17)$$

取包含因子  $k = 2$ , 误差值的扩展不确定度由式(18)计算,评定结果的不确定度用扩展不确定度表示。

$$U = 2u_f \quad (18)$$

## 6 模拟实验验证

为验证本文提出的自由曲面轮廓度误差评定和不确定度估算方法的有效性,以“S”形试件曲面为模型进行评定方法的验证。“S”形试件是一种新的五轴数控机床精度检验试件,目前已得到一定的推广。试件的“S”形曲面具有开闭角、扭曲角等典型的自由曲面特征。其轮廓度误差的评定不同于一般的开式曲面,需要在法方向计算每个测点的偏差及不确定度。在实验中,首先按等参数在曲面均分选取160个测点,试件的模型和布点方式如图1所示。利用设计模型上的点,通过下式产生实际加工曲面上的模拟检测点。

$$\mathbf{Q}_i^M = \mathbf{T}(\mathbf{S}(u, v) + \vec{\mathbf{n}}\mathbf{E}_{\text{form}}) + \mathbf{E}_{\text{meas}} \quad (19)$$

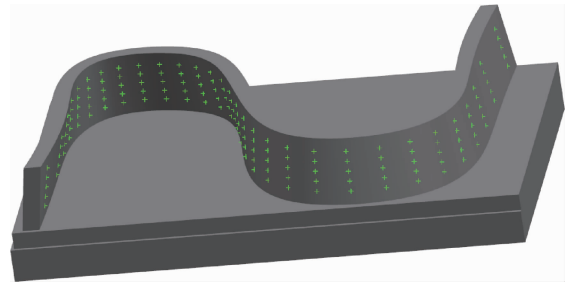


图1 “S”试件模型及测点分布

Fig.1 CAD model of “S” shape specimen and sampling points distribution

$\mathbf{Q}_i^M$  模拟得到的测量点,  $\mathbf{S}(u, v)$  表示设计模型上的点,  $\mathbf{T}$  表示变换矩阵,对应的参数值为  $[0.05, -0.03, 0.01, 0.01, 0.02, -0.031]$ ,  $\vec{\mathbf{n}}$  表示模型上对应点的法向量,  $\mathbf{E}_{\text{form}}$  表示服从正态分布,均值为0,标准差为0.025的随机误差,  $\mathbf{E}_{\text{meas}}$  表示服从正态分布,均值为0,标准差为0.002的随机测量误差。

当仅用这些离散的测点进行加工误差评定时,只计算了这些有限的检测点出的误差。当用连续的重构曲面

进行误差评定时,可以评定整个曲面的误差值。在获得模拟的测量坐标点后,首先按照第1节的方法,将测点与理论曲面进行匹配。利用本文中的方法,重构加工曲面,然后计算偏差值。计算获得的偏差在曲面UV方向的分布如图2所示。其中最大的法向偏差为0.1069,取包含因子 $k = 2$ ,扩展不确定度为0.0038。在“S”曲面上的误差分布如图3所示。利用Imageware重构加工曲面,获得曲面的偏差分布如图4所示,比较两种方法误差的最大值与分布情况,大致相同。

标准草案中给出的轮廓度公差值为0.15,对曲面是否超差进行判定。考虑误差值的扩展不确定度,根据ISO 14253-1:1998对测量结果的判定准则。在给定的公差值下,对曲面的合格情况如图7所示。其中灰色区域为合格区域,黑色区域为不合格,白色区域为不确定区域,在该区域无法判断合格或者不合格。

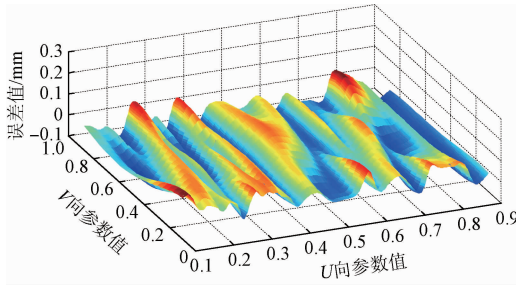


图2 UV方向误差分布图

Fig. 2 The error distribution on UV direction

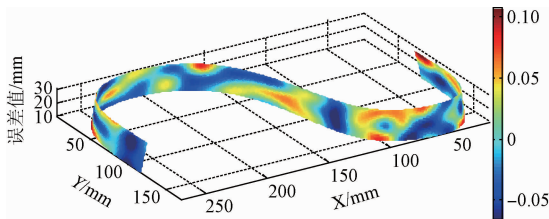


图3 “S”形曲面加工误差分布

Fig. 3 The error distribution on “S” shape surface

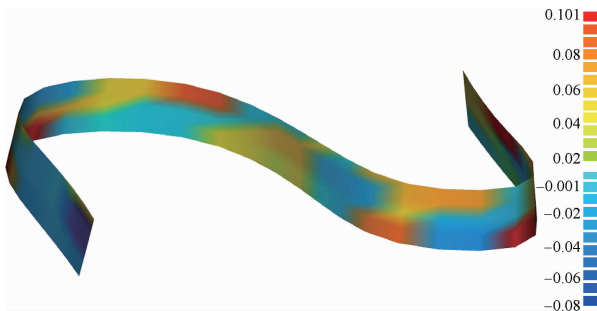


图4 Imageware 曲面误差分析

Fig. 4 The analysis of surface error by Imageware

通过本文中的方法,分析由于测量点的不确定度,导致评定误差结果的存在不确定度,并用扩展不确定度表示,得到误差值的范围。误差值及在UV方向的分布范围如图5所示。取曲面上一条截交线, $v = 0.039, u \in [0,1]$ ,误差值及范围如图6所示。截交线的部分测点坐标,误差值及不确定度如表1所示。根据“S”形试件

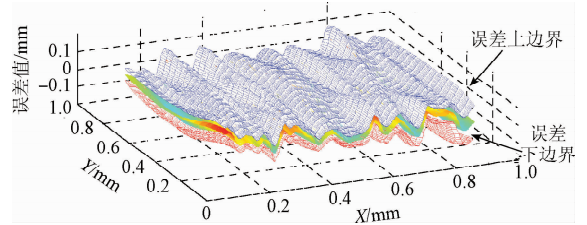


图5 曲面误差范围

Fig. 5 Variation boundaries of manufacturing errors

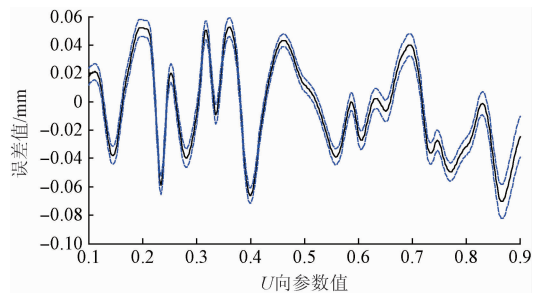


图6 曲面一条截交线的误差分布

Fig. 6 The error distribution on an intersection line

表1 测点误差值及不确定度

Table 1 Error and uncertainty of measuring points on reconstruction surface

$u$	$X/mm$	$Y/mm$	$Z/mm$	误差值/mm	$u_f/mm$
0.100	23.861 7	83.398 6	23.072 0	0.017 7	0.002 8
0.200	26.841 2	141.998	23.073 3	0.051 7	0.002 9
0.300	75.720 7	165.544	23.093 8	0.011 3	0.003 2
0.400	116.716	124.479	23.097 6	-0.066 4	0.002 70
0.501	133.708	65.538 5	23.084 0	0.011 66	0.002 30
0.601	168.856	16.751 5	23.081 3	-0.023 8	0.003 21
0.701	228.367	11.565 9	23.081 3	0.037 71	0.003 89
0.801	264.400	57.537 3	23.100 9	-0.031 12	0.003 10
0.900	266.536	117.639	23.111 1	-0.024 73	0.007 30

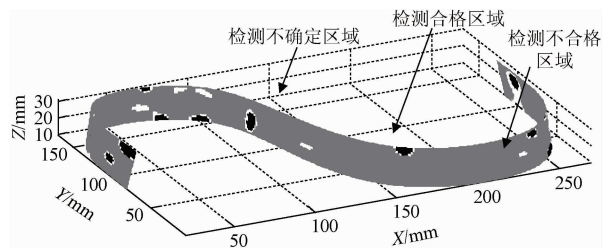


图7 曲面评定结果显示

Fig. 7 The results of surface evaluation

## 7 结 论

一般的曲面误差只通过计算有限个采样点处的偏差值进行。有限个采样点并不能完全代表实际加工曲面。所以本文针对“S”形试件这类自由曲面,提出了基于CMM测量和B样条曲面重构的误差评定方法。首先利用CMM在曲面获取测量点,将采样点与理论设计曲面进行匹配,利用匹配后的定位点重构曲面,比较重构曲面与理论曲面的偏差。将本文中的计算结果与Imageware重构曲面后获得的误差进行了对比,误差分布大致相同。

由于测量中存在不确定度,使得最终误差的评定结果存在不确定度。基于以上评定过程,分析了测量不确定度对最终误差评定结果的影响。在给定的公差下,将考虑不确定度的误差评定结果显示在曲面,能够直观地看到检测合格区域、不合格区域,和不确定区域。

## 参考文献

- [ 1 ] SAVIO E, CHIFFRE L D, SCHMITT R. Metrology of freeform shaped parts [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 810-835.
- [ 2 ] 蔺小军, 郭研, 吴广, 等. 等高法叶片型面CMM测量数据处理算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2442-2450.  
LIN X J, GUO Y, WU G, et al. CMM measuring data processing algorithms for blades about the contour measurement [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2013, 34(11): 2442-2450.
- [ 3 ] LI Y, GU P. Automatic localization and comparison for free-form surface inspection [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2006, 25(4): 251-268.
- [ 4 ] SCHWEINOCHE M, SCH FER R, SACHAROW A, et al. A non-rigid registration method for the efficient analysis of shape deviations in production engineering applications [J]. Production Engineering, 2016, 10(2): 137-146.
- [ 5 ] BERGSTR M P. Reliable updates of the transformation in the iterative closest point algorithm [J]. Computational Optimization & Applications, 2016, 63(2): 543-557.
- [ 6 ] SUN Y, WANG X, GUO D, et al. Machining localization and quality evaluation of parts with sculptured surfaces using SQP method [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(11-12): 1131-1139.
- [ 7 ] HE G, ZHANG M, SONG Z. Error evaluation of free-form surface based on distance function of measured point to surface[J]. Computer-Aided Design, 2015, 65(C): 11-7.
- [ 8 ] 廖平. 基于遗传算法和分割逼近法精确计算复杂曲面轮廓度误差[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 1-7.  
LIAO P. Calculating of complex surface profile error based on subdivision approach algorithm and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 1-7.
- [ 9 ] WEN X, ZHAO Y, WANG D, et al. Accurate evaluation of free-form surface profile error based on Quasi particle swarm optimization algorithm and surface subdivision [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2): 406-13.
- [ 10 ] 吴石, 李荣义, 刘献礼, 等. 基于自适应采样的曲面加工误差在机测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 83-90.  
WU SH, LI R Y, LIU X L, et al. On-machine measurement method of processing error based on the mould surface adaptive sampling[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2016, 37(1): 83-90.
- [ 11 ] 李红莉, 陈晓怀, 杨桥, 等. CMM面向任务的多测量策略测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1772-1780.  
LI H L, CHEN X H, YANG Q, et al. Task-oriented measurement uncertainty evaluation of CMM under multi-strategies[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1772-1780.
- [ 12 ] 陈满意, 王建军. 基于Bootstrap的曲面最佳适配不确定度评定[J]. 中国机械工程, 2010, 21(24): 2918-2920.  
CHEN M Y, WANG J J. Uncertainty Evaluation of Freeform Surface Best Fit Based on Bootstrap Method[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(24): 2918-2920.
- [ 13 ] 陈满意, 吴伟. 自由曲面测量轮廓度不确定度的研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 72-4.  
CHEN M Y, WU W. Research on uncertainty evaluation of free-form surface profile [J], Machine Tool and Hydraulics, 2012, 40(1): 72-4.
- [ 14 ] HUANG Y, QIAN X. An efficient sensing localization algorithm for free-form surface digitization [J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2008, 8(2): 0210081-02100810.
- [ 15 ] MEHRAD V, XUE D, GU P. Inspection of freeform surfaces considering uncertainties in measurement, localization and surface reconstruction [J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(8): 50-61.
- [ 16 ] BACHMANN J, LINARES J M, SPRAUEL J M, et al. Aide in decision-making: Contribution to uncertainties in three-dimensional measurement [J]. Precision Engineering, 2004, 28(1): 78-88.

## 作者简介



何改云, 1965 年出生, 博士, 现为天津大学教授、博士生导师, 主要研究方向为现代质量控制和 CAD/CAM/CAI 集成技术等  
E-mail: hegaiyun@tju.edu.cn

**He Gaiyun** was born in 1965, Ph. D., professor and Ph. D. supervisor in Tianjin University. Her main research direction is modern quality and CAD/CAM/CAI integration



黄鑫, 1992 年出生, 现为天津大学在读研究生, 主要研究方向为质量检测, 测量不确定度。

E-mail: huangxintju@tju.edu.cn

**Huang Xin** was born in 1992, M. Sc. candidate in Tianjin University. His main research direction is quality inspection and measurement uncertainty.

## 泰克为树莓派提供当前及下一代高速接口开发测试解决方案

### 23 GHz 混合信号示波器和 25 GS/s 任意波形发生器帮助树莓派测试 HDMI、MIPI 和 USB 接口

泰克科技公司日前宣布, 它将为树莓派研发实验室全面配备泰克最新高速测试解决方案。树莓派是一家低成本、高性能计算机设计商, 其新建的研发实验室将把重点放在高速串行设计和验证测试上。泰克最新测试设备将满足其当前需求, 同时确保提供足够的带宽, 支持任何未来高速接口, 这些都要求使用最高性能的测试仪器。

为支持这些高速复杂的验证测试, 实验室将配备业内最强大的混合信号测试解决方案。实验室中采用的端到端发送和接收测试解决方案包括泰克 AWG70002A 25 GS/s 任意波形发生器和 MSO72304DX 23 GHz 混合信号实时示波器。

“树莓派一直很低调, 实际上我们拥有大量复杂的高速串行总线, 每条总线都面临着自己独特的挑战。

HDMI、USB 和 MIPI DPHY 等每种接口采用的测试方法差异非常大。”树莓派首席硬件工程师 Mike Stimson 说, “通过与泰克的合作, 我们不仅能够迅速简便地测试每种接口, 同时也使树莓派对将来可能遇到的新接口标准和要求做好准备。”

“泰克的目标是消除创造灵感与实现变革世界的技术之间的障碍。我们非常荣幸能够与树莓派一道, 把数字世界带向全世界。”泰克科技欧洲、中东和非洲商业运营副总裁 Dave Farrell 说, “下一代数字接口标准及日益复杂的测试要求, 正挑战当前一致性测试和调试工具的极限。这一合作及泰克解决方案将保证树莓派能够在当今及未来数字世界创新中发挥关键作用。我们期待着本次合作在树莓派整个社区中应用到领先的优异技术。”