

文章编号 1004-924X(2013)11-2813-08

接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型

仇谷烽*, 余景池, 黄启泰, 倪颖, 王毅
(苏州大学现代光学研究所, 江苏苏州 215006)

摘要:为了能够在接触式自由曲面轮廓测量过程中放宽对工件位置调整的要求并提供高精度的测量结果,本文运用最小二乘法的基本原理,提出了一个可通过测量数据拟合出一个最佳位置放置参数的数学模型。该模型能同时校正自由曲面放置时存在的绕 X、Y、Z 轴的微小旋转量及沿 X、Y、Z 方向上的微小偏离量所造成的测量误差。大量数学模拟结果表明,该模型在恢复上述误差源上具有很高的精度,可精确地恢复 1 cm 以下的偏心和 0.1° 以下的旋转量。对一实际自由曲面的测量结果表明,该模型可靠有效,为接触式三坐标测量自由曲面轮廓提供了宽松的镜子放置条件,同时提供了可靠的测量结果。其分析数据的基本原理对其它非接触式的自由曲面的轮廓测量同样具有较高的参考价值。

关键词:自由曲面;轮廓测量;三坐标测量仪;数据处理模型;最小二乘法

中图分类号:TH72;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2813

Mathematical model of contacting freeform surface contour measurement

QIU Gu-feng*, YU Jing-chi, HUANG Qi-tai, NI Ying, WANG Yi

(*Institute of Modern Optics, Soochow University, Suzhou 215006 China*)

* *Corresponding author, E-mail: qiugufeng@suda.edu.cn*

Abstract: To unwind the requirement of a freeform surface for the position adjustment and to provide high precision measurement results in a high precision contacting freeform surface contour measurement, this paper proposes a mathematical model based on the least square method. The model can fit the measured data to obtain optimized position parameters. After analysis of possible causes for the measurement error of Coordinate Measuring Machine (CMM), the model can be used to correct the errors caused by the rotation in the X, Y, Z axes and the eccentricity in the X, Y, Z direction that exist in the positioning of freeform surface. By mathematical simulations, it is proved that this model achieves high precision in correction of the errors for eccentricity less than 1 cm and inclination less than 0.1° and shows a very reliable and effective result. It provides loose workpiece positioning conditions, high precision and reliable measurement results. The analysis principles proposed also offer a reference for other contacting freeform surface contour measurement methods.

Key words: freeform surface; contour measurement; Coordinate Measuring Machine (CMM); mathematical model; Least square method

1 引言

现代光学系统正向着小体积、轻质量、结构简单和高性价比等方向发展,这使得传统光学元件越来越难以满足市场的需求。伴随着现代光学设计水平不断发展而产生的自由曲面光学元件,因具有能简化系统结构,减少镜片数量,显著减小镜片尺寸,进一步提高成像质量,可获得特殊的光学性能等优良特性而在光学系统中的应用越来越广泛。

自由曲面光学元件在光电及光通讯产品中的应用日益广泛,采用该类光学元件的彩色显像管、液晶显示器、数码相机、光纤通讯等产品已形成了数以万亿计的全球市场。目前自由曲面已经广泛应用于数码摄像镜头、激光打印机扫描仪镜头、衍射光学器件、宽带光纤耦合器、背投电视的后反射镜、车灯的反射镜和灯罩、平面显示器的导光板等产品。在国防和军事领域,自由曲面光学元件在各种可见光瞄准器、头盔显示器、微光夜视器等系统中也有着广泛应用^[1-2]。

现有的光学自由曲面元件加工制造工艺相对比较薄弱。光学自由曲面加工技术中最为关键的技术是检测技术。目前的自由曲面测量技术包括:三坐标、莫尔法、条纹投影法、非零位干涉检测方法以及计算全息术(CGH)等。其中接触式三坐标测量法能测量几乎任何类型的自由曲面面形,但通常其精度有限,随着三坐标技术的不断发展,目前高精度的三坐标测量精度能达到 $0.3 \mu\text{m}$ 以下,这一精度可满足普通光学成像系统的需求。但三坐标对自由曲面面形精度的分析,目前尚无成熟的技术和方法。目前大都采用自由曲面的某些特征信息,通过迭代来获得工件坐标系统与检测坐标系统之间的偏差^[3-5,7]。但这些采用局部特征的方法不具有通用性,且精度不够高。

当三坐标探针与工件接触时,三坐标测量仪能精确标定工件在其定义的参考坐标系统下探针中心的当前三维坐标值。探针一般是几毫米直径的标准球面,如果工件是自由曲面,则很难确定探针与工件的实际接触位置。除此之外,需要分析出实际面形与理想面形之间的偏差,不过这要求工件坐标系统与三坐标的测量坐标系统相同,而

实际工件放置到三坐标上时,不可能让工件坐标系统与三坐标定义的坐标系统重合。因此,要想分析出这一偏差,首先要分析出三坐标的坐标系统与工件坐标系统间的偏离量,然后把测量结果通过坐标变换,转换到工件坐标系统上才能得出其实际面形与理论面形之间的偏差。如何分析出三坐标系统与工件坐标系统的偏离量是自由曲面测量中的关键。

本文以最小二乘法为基础,建立了能够根据测量结果精确分析出两个坐标系统之间的偏离量的数据处理模型,从而为进行高精度的面形误差分析提供了工具。通过数学模拟和实际工程应用验证了模型的有效性,对高精度接触式自由曲面的测量具有极大的帮助,其它非接触式的自由曲面的轮廓测量同样具有较高的参考价值。

2 接触式三坐标测量自由曲面轮廓原理

三坐标测量机(CMM)根据其结构有很多种,本文就目前最广泛的移动桥式三坐标测量机为例说明其测量原理。移动桥式三坐标测量机的基本结构如图 1 所示。它主要由 4 部分组成:工作台,桥框,滑块和主轴。

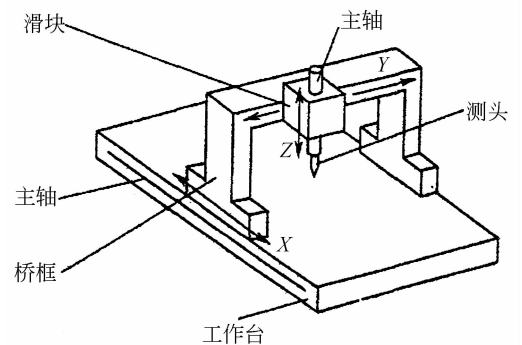


图 1 移动桥式三坐标测量机

Fig. 1 Moving contour CMM based bridge

测量时,工件放置在工作台上,测头安装在主轴上。通过数控系统移动测头位置,使测头与工件接触,系统能自动记录接触时的三维坐标信息,从而可获取被测工件的轮廓。配以适当的软件就能分析测量结果。X 方向的光栅尺用来反馈当前的坐标信息。

3 接触式三坐标轮廓测量数据处理模型

从三坐标的测量原理可知,最终的测量结果实际上是三坐标探针测头中心在整个测量过程中的轨迹。分析自由曲面的偏差数据,必须解决 2 个问题:首先要三坐标的测量坐标系与工件的坐标系统一到相同的坐标系,其次要求出探针测头与工件的实际接触位置,来补偿由于探针测头不是理想点所引起的测量误差。

对于第一个问题,通过最小二乘法来确定三坐标测量坐标系与工件坐标系间的偏移量。对于第二个问题,要想求出探针测头与曲面的实际接触点将是极其复杂的,但从曲面来求取探针测头中心的位置相对简单。根据自由曲面方程及探针测头的半径,先求出理想状态下测头中心位置所对应的曲面。然后以此曲面来替代原始的自由曲面方程。理论上该曲面为三坐标在测量工件过程中探针测头中心的运动轨迹所对应的曲面,简化了整个数据分析模型。该方法与文献[1]相同。

设所测量的自由曲面方程为: $z=f(x,y)$

设点 $(x_0,y_0,f(x_0,y_0))$ 为曲面上的一点,则当一个半径为 r 的理想球面与其接触时,对应的球心位置 (x,y,z) 可表示为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' - x_0 \\ y' - y_0 \\ z' - z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

测量数据点经过以上变换,就能符合式(1)、(2)及(3)所确定的曲面。为了讨论方便,设其显式方程为: $z=F(x,y)$ 。

实际测量中,参数 $(x_0,y_0,z_0,\alpha,\beta,\gamma)$ 是未知的。工程运用中可用使下式最小的参数 $(x'_0,$

$$x = x_0 - \frac{r \cdot f'_x(x_0,y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0,y_0)^2 + f'_y(x_0,y_0)^2}}, \quad (1)$$

$$y = y_0 - \frac{r \cdot f'_y(x_0,y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0,y_0)^2 + f'_y(x_0,y_0)^2}}, \quad (2)$$

$$z = f(x_0,y_0) + \frac{r}{\sqrt{1 + f'_x(x_0,y_0)^2 + f'_y(x_0,y_0)^2}}, \quad (3)$$

其中:

$$f'_x(x_0,y_0) = \frac{\partial f(x_0,y_0)}{\partial x}$$

$$f'_y(x_0,y_0) = \frac{\partial f(x_0,y_0)}{\partial y}$$

由式(1)、(2)及(3)所确定的曲面为在理想状态下三坐标的测量结果。

假定工件坐标系为 $x-y-z$,三坐标测量时定义的参考坐标系为 $x'-y'-z'$,由于工件放置不可能处于理想位置,会造成系统的偏离,且不可能事先获知。假定这二个坐标系间具有偏离量 $(x_0,y_0,z_0,\alpha,\beta,\gamma)$ 。即 $x'-y'-z'$ 坐标系中的点 (x',y',z') 分别在 x,y 和 z 轴方向上平移 x_0,y_0 和 z_0 ,然后绕 x 轴旋转角度 α ,绕 y 轴旋转角度 β ,再绕 z 轴旋转角度 γ 后,就能获得对应应在 $x-y-z$ 坐标系中对应的点坐标。二坐标系间的变换关系为^[2]:

$(y'_0,z'_0,\alpha',\beta',\gamma')$ 作为它的最佳匹配值^[6]:

$$G(x_0,y_0,z_0,\alpha,\beta,\gamma) = \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i,y_i)]^2. \quad (5)$$

要使上式最小,必须使其一阶偏导数为 0,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial \alpha} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \alpha} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial \beta} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \beta} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial \gamma} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \gamma} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial x_0} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial x_0} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial x_0} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial y_0} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial y_0} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial y_0} \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - F(x_i, y_i)] \cdot \left[\frac{\partial z_i}{\partial z_0} - F'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial z_0} - F'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial z_0} \right] = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

只要能求解出上述方程组,就能获得最佳的参数 $(x'_0, y'_0, z'_0, \alpha', \beta', \gamma')$,根据这一分析结果对测试获得的原始数据进行处理就能恢复出精确的自由曲面轮廓。实际工程中,可应用拟牛顿法来求解上述 6 元超越方程组。理论上,只要工件任意位置的曲率半径大于探测头的曲率半径,上述模型就能适用,但考虑到解方程组的难度,一般曲率半径太大或太小的工件分析都会比较困难。实际应用中,工件曲率半径从 10~6 000 mm 均得到了很好的应用。小于 10 或大于 6 000 mm 的工件还没有试验过。

上述方程组中的函数 $z=F(x, y)$,及其对 x, y 的偏导数,虽然不能求解出显式的表达式,但可通过求解方程组及隐式求导的方式来获取。

对于给定的 x, y ,通过求解式(1)、(2),可获得对应的 x_0, y_0 。从而可求出对应的 z :

$$z = F(x, y) = f(x_0, y_0) + \frac{r}{\sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} \quad (7)$$

对应的对 x, y 的偏导数可表示为:

$$F'_x(x, y) = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial x} + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y_0} \frac{\partial y_0}{\partial x} \quad (8)$$

$$F'_y(x, y) = \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial y} + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y_0} \frac{\partial y_0}{\partial y} \quad (9)$$

其中:

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial x_0} = f'_x(x_0, y_0) - \frac{r[f''_{x^2}(x_0, y_0) + f''_{xy}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2] \sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial y_0} = f'_y(x_0, y_0) - \frac{r[f''_{y^2}(x_0, y_0) + f''_{xy}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2] \sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} \quad (11)$$

由式(1)可得:

$$\frac{\partial x}{\partial x_0} = 1 - \frac{r \cdot f''_{x^2}(x_0, y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} + \frac{r \cdot f'_x(x_0, y_0) \cdot [f''_{x^2}(x_0, y_0) + f''_{xy}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y_0} = - \frac{r \cdot f''_{xy}(x_0, y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} + \frac{r \cdot f'_x(x_0, y_0) \cdot [f''_{xy}(x_0, y_0) + f''_{y^2}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

由式(2)可得:

$$\frac{\partial y}{\partial x_0} = - \frac{r \cdot f''_{xy}(x_0, y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} + \frac{r \cdot f'_y(x_0, y_0) \cdot [f''_{x^2}(x_0, y_0) + f''_{xy}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial y}{\partial y_0} = 1 - \frac{r \cdot f''_{y^2}(x_0, y_0)}{\sqrt{1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2}} + \frac{r \cdot f'_y(x_0, y_0) \cdot [f''_{xy}(x_0, y_0) + f''_{y^2}(x_0, y_0)]}{[1 + f'_x(x_0, y_0)^2 + f'_y(x_0, y_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (15)$$

4 数据模拟及工程应用

4.1 数据模拟

根据上述分析,在给定三坐标测量头半径 $r=0.75$ 时,利用计算机来模拟给定参数 $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ 下的数据集,为了使模拟更接近实际情况,数据中加入了给定幅度的随机误差(即在每个数据点上,用计算机的随机函数生成一个 0 到 1 之间的随机浮点数,然后把这一随机数乘上给定的幅度,最后叠加到模拟数据中),利用数据处理模型处理,比较其估计的参

数 $(x'_0, y'_0, z'_0, \alpha', \beta', \gamma')$ 与实际设定参数的区别。数据模拟结果表明,本模型可精确地复原上述误差。

实例 1:自由曲面方程为:

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + a[0]x + a[1]y + a[2]x^2 + a[3]xy + a[4]y^2 + \dots \tag{16}$$

上述表达式中, x 与 y 的最高次数为 10 次,系数 a 共有 65 项。

其中: $c=1/R, R=41.543, k=-0.183\ 959\ 0$, 系数 a 如表 1 所示。

表 1 自由曲面方程系数
Tab.1 Index of freeform

$a[0]$	$2.258\ 550 \times 10^{-3}$	$a[1]$	$4.631\ 650 \times 10^{-2}$	$a[2]$	$-1.446\ 260 \times 10^{-3}$	$a[3]$	$3.269\ 060 \times 10^{-6}$	$a[4]$	$-9.463\ 520 \times 10^{-5}$
$a[5]$	$2.253\ 880 \times 10^{-6}$	$a[6]$	$-3.250\ 460 \times 10^{-5}$	$a[7]$	$-1.172\ 970 \times 10^{-6}$	$a[8]$	$2.359\ 640 \times 10^{-6}$	$a[9]$	$5.035\ 760 \times 10^{-6}$
$a[10]$	$-9.313\ 060 \times 10^{-9}$	$a[11]$	$6.572\ 770 \times 10^{-7}$	$a[12]$	$-1.230\ 620 \times 10^{-9}$	$a[13]$	$2.516\ 160 \times 10^{-9}$	$a[14]$	$1.775\ 450 \times 10^{-9}$
$a[15]$	$-2.614\ 120 \times 10^{-8}$	$a[16]$	$4.257\ 070 \times 10^{-10}$	$a[17]$	$1.336\ 200 \times 10^{-9}$	$a[18]$	$6.521\ 420 \times 10^{-11}$	$a[19]$	$5.375\ 520 \times 10^{-11}$

其余系数 a 均为 0。

探测头球面半径 $r=0.75\ \text{mm}$,模拟参数 $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ 为 $(1, 1, 0, 0.1, 0.1, 0.1)$ 。上述值中 x_0, y_0, z_0 的单位为 mm , α, β, γ 的单位为 $(^\circ)$ 。模拟点集是 25×25 的矩形阵列, x, y 方向上的间隔均为 $1\ \text{mm}$ 。

说明:上述参数中 z_0 为 0,因为实际测量时,在中心处对零位,因此这一值近似为 0。

实例 1 无随机误差,在实例 2 中将加入给定幅度的随机误差。

实例 1 的数据处理结果如表 2 所示:在解方程组时的初值全部设置为 0。

表 2 无随机误差的数据模拟及处理结果
Tab.2 Results of data simulating and processing without random errors

误差源	真实值	求解方程给定初值	数据处理结果	镜面误差
x_0/mm	1	0	1.000 118	
y_0/mm	1	0	$9.999\ 229 \times 10^{-1}$	$\text{PV}=1.035\ 636 \times 10^{-5}\ \mu\text{m}$
z_0/mm	0	0	$5.000\ 037 \times 10^{-2}$	$\text{RMS}=1.538\ 669 \times 10^{-6}\ \mu\text{m}$
$\alpha/(\text{^\circ})$	0.1	0	$1.000\ 158 \times 10^{-1}$	注:PV 为最大误差与最小误差的差值, RMS 为误差的均方根值。
$\beta/(\text{^\circ})$	0.1	0	$9.995\ 916 \times 10^{-2}$	
$\gamma/(\text{^\circ})$	0.1	0	$9.991\ 846\ 4 \times 10^{-2}$	

实例 2:所有参数同实例 1,不同的是加入了一定

幅度的随机误差,其结果如表 3 所示。

表 3 带给定不同幅度随机误差的数据模拟及处理结果

Tab. 3 Results of data simulating and processing with random errors

误差源	真实值	求解方程 给定初值	数据处理结果			镜面误差
			幅度为 $3 \mu\text{m}$	幅度为 $0.3 \mu\text{m}$	幅度为 $0.03 \mu\text{m}$	
x_0/mm	1	0	1.011 940	1.001 311	1.000 251	PV=3.486 351 μm
y_0/mm	1	0	1.028 395	1.002 799	1.000 230	RMS=0.868 114 μm
z_0/mm	0	0	0.052 788	0.050 279	0.050 029	PV=0.349 859 μm
$\alpha/(\circ)$	0.1	0	0.139 854	0.104 037	0.100 445 2	RMS=0.086 818 μm
$\beta/(\circ)$	0.1	0	0.086 911	0.098 639	0.099 808	PV=0.038 767 μm
$\gamma/(\circ)$	0.1	0	0.041 962 3	0.094 077	0.099 364	RMS=0.008 779 μm

4.2 工程应用

基于思瑞的 Croma 686 三坐标编写了自由曲面的测量和分析程序,取得了较为满意的结果。三坐标的最大允许示值误差 $MPE_E = 2.8 + L/300 \mu\text{m}$,最大允许探测误差 $MPE_p = 3.5 \mu\text{m}$ 。以一个由多项式表达的自由曲面为例,给出了其实际的测量结果。

自由曲面的方程为:

$$z(x, y) = a_1 x^2 + a_2 x^4 + a_3 x^6 + a_4 x^8 + a_5 y^2 + a_6 y^4 + a_7 y^6 + a_8 y^8,$$

其中:

$$a_1 = -3.545 461 6 \times 10^{-4}$$

$$a_2 = -5.642 602 4 \times 10^{-6}$$

$$a_3 = 5.058 092 4 \times 10^{-8}$$

$$a_4 = -1.442 327 2 \times 10^{-10}$$

$$a_5 = -3.384 119 8 \times 10^{-4}$$

$$a_6 = -5.686 554 0 \times 10^{-6}$$

$$a_7 = 4.740 512 0 \times 10^{-8}$$

$$a_8 = -1.243 268 1 \times 10^{-10}$$

三坐标所用的测头半径为: $r=0.75 \text{ mm}$ 。

该自由曲面是用自己研发的 KFQM-20A 数控非球面铣磨机加工而成的。该铣磨机在加工非球面时,一般误差在 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 左右。通过三坐标的测量,再利用模型处理数据后,实际的测量结果如图(2)所示。模型分析出的位置偏差参数为:

$$x_0 = -8.475 088 \times 10^{-2}, y_0 = 2.142 177 \times 10^{-1}, z_0 = -1.589 153$$

$$\alpha = -3.188 886 \times 10^{-2}, \beta = 3.443 361 \times 10^{-2}, \gamma = 7.818 205$$

测量结果:

$$PV = 6.5 \times 10^{-3} \text{ mm}, RMS = 1.2 \times 10^{-3} \text{ mm}.$$

从实际测量结果看,模型分析获得的测量精度与铣磨机的加工精度吻合。

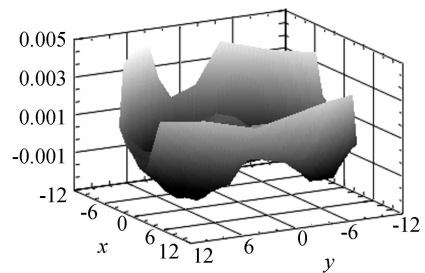


图 2 实际工程测量结果

Fig. 2 Results of practical testing

5 结论

针对工件的位置放置误差,运用最小二乘法,提出了一个可通过测量数据拟合出一个最佳的位置放置参数的数学模型。通过这一估算的位置放置参数,就能计算出实际的面形误差。对于测头不是理想点造成的测量误差,采用了一种从工件面形直接计算出对应的测头中心所对应的曲面,并以此曲面替代原始的曲面,很好地解决了由于实际测头非理想点所造成的测量误差。

理想状态下的数据模拟、带随机误差的数据模拟及实际工程应用都证明:本模型能有效地恢复上述的误差,从带有随机误差的数据模拟表明,模型的恢复精度会随着所加入的随机误差的幅度减小

而增加。这一特征非常适用于自由曲面工件制作过程中的面形检测。随着加工的深入,镜子面形逐步完善,同时模型的分析精度也在不断提高,从数据模拟的结果可观察到,模型分析的误差就 PV 值而言,其相对精度始终在 15% 左右。这使模型在自由曲面镜面误差大于或接近三坐标本身测量精度的范围内都可有效地使用。

在宽松的镜子放置条件下能提供高精度的测

量结果,从而方便了自由曲面制作过程中的面形检测过程。模型根据测量的理想曲面直接计算出测头中心轨迹的理想曲面,以此替代实际的测量面形,从而大大简化了这一误差的校正方法,且提供了比传统方法更为精确的测量结果。模型的提出是基于接触式三坐标测量仪的,但模型本身及其推导模型的基本原理在其它非接触式轮廓仪中同样适用。

参考文献:

- [1] XIONG Z H, LI Z X. Error compensation of work-piece localization [C]. *Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001:2249-2254.
- [2] 杨钦,徐永安,翟红英,等. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
YANG Q, XU Y A, ZHAI H Y. *Computer Graphics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 李全胜,成晔,张伯鹏. 光学自由曲面计算机控制加工中的面形检测研究[J]. *光学精密工程*, 1999, 7 (3): 89-96.
LI Q SH, CHENG Y, ZHANG B P. Study on profile measuring in computer controlled fabrication of optical freeform surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7 (3): 89-96. (in Chinese)
- [4] 杜建军,高栋,孔令豹. 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): 133-135.
DU J J, GAO D, KONG L B. Study of matching methods for error evaluation of optical freeform surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (1): 133-135. (in Chinese)
- [5] 李圣怡,陈善勇,戴一帆. 自由曲面光学器件检测技术[J]. *纳米技术与精密工程*, 2005, 3 (2): 132-133.
LI S H Y, CHEN S H Y, DAI Y F. Inspection of freeform optics[J]. *Nano. Precision Eng.*, 2005, 3(2): 132-133. (in Chinese)
- [6] 仇谷烽,郭培基,解滨,等. 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 492-498.
QIU G F, GUO P J, XIE B, et al.. Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (4): 492-498. (in Chinese)
- [7] 王东霞,温秀兰,赵艺兵,等. 基于 CAD 模型引导测量的自由曲面定位及轮廓度误差评定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2720-2727.
WANG D X, WEN X L, ZHAO Y B. Localization and profile error evaluation of freeform surface based on CAD model-directed measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2720-2727. (in Chinese)

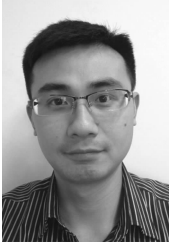
作者简介:



仇谷烽(1974—),男,江苏苏州人,博士,高级工程师,1997年、2002年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事光学检测软件的开发。E-mail: qiugufeng@suda.edu.cn



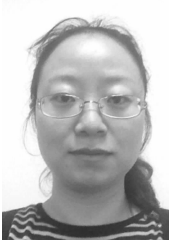
余景池(1943—),男,浙江温州人,博士生导师,1981年于中国科学院长春光学精密研究所获得硕士学位,主要从事数控非球面加工方面的研究。E-mail: jcyu@suda.edu.cn



黄启泰(1979—),男,江苏扬州人,博士,副研究员,主要从事光学非球面元件加工与检测方面的研究。E-mail: huangqitai@126.com



王毅(1977—),男,江苏扬州人,博士研究生,助理研究员,研究方向为非球面加工与检测。E-mail: wangyi77103@sohu.com



倪颖(1977—),女,江苏苏州人,博士,副研究员,主要从事非球面加工与检测方面的研究。E-mail: nyjanet@etang.com

(版权所有 未经许可 不得转载)