

文章编号 1004-924X(2007)04-0492-07

# 接触式非球面轮廓测量的数据处理模型

仇谷烽, 郭培基, 谢 滨, 杨晓飞, 王 毅

(苏州大学 现代光学研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**在分析接触式轮廓测量仪误差的基础上,以最小二乘法为基本数学理论,提出了一种能同时校正由于非球面镜放置时存在的 $X$ 、 $Y$ 方向的倾斜、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的偏心,曲率半径不准确、以及由于轮廓仪的旋转中心与探测头的零点之间随机的微小偏移所造成的测量误差的数学模型。数学模拟表明,该模型在校正上述误差源上具有极高的精度,对1 cm以下的偏心 and  $0.1^\circ$ 以下的倾斜可无误差地恢复,对曲率半径的恢复也极为有效。实际工程应用的结果表明,模型是可靠有效的,为接触式非球面轮廓测量提供了一个宽松的镜子放置条件及自动拟合最佳曲率半径的功能。特别是自动校正由于轮廓仪的旋转中心与探测头的零点之间的随机微小偏移所造成的测量误差的功能提高了测量仪的测量精度和测量结果的重复性。

**关键词:**非球面轮廓测量;轮廓仪;数据处理;数学模型;最小二乘法

中图分类号:TH 703 文献标识码:A

## Mathematical model of contacting aspheric surface contour measurement

QI U Gu feng, GUO Pei ji, XIE Bin, YANG Xiao fei, WANG Yi

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

**Abstract:** After analysis of the possible causes for the measurement error of contacting contour measurement instruments, based on the least square method, a mathematical model was established to correct the errors caused by the inclination in  $X$ ,  $Y$  direction, eccentricity in  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  direction that exists in the positioning of aspheric lens, inaccuracy of curvature radius, and the random micro excursion between the circumrotating center and the detecting header of contour measurement instrument. By mathematical simulation, it is proved that this model could achieve high precision in correcting those errors stated above. To eccentricity less than 1 cm and inclination less than  $0.1^\circ$ , this model could completely correct these errors, it is also very effective in correcting the errors of curvature radius. The results of practical engineer implementation indicate that this model is very reliable and effective and can provide a loose lens positioning condition and function of automatic fit of optimal curvature radius for the measurement of contacting aspheric lens contour. Especially this model offers the function of automatic correction of measurement errors originated from the random micro excursion between the circumrotating center and the detecting header of contour measurement instrument, and it will improve the measurement accuracy and measurement result repeatability of the contour measurement instrument.

收稿日期:2006-12-22;修订日期:2007-02-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60278011)

**Key words :** aspheric surface contour measurement ; contour measurement instrument ; data processing ; mathematical model ; least square method

1 引 言

非球面轮廓测量是制作非球面镜过程中的一项关键技术。传统的测量方法对镜子的放置有极严格的要求。镜子中心与探测头零点间微小的偏移,镜子轴线与测量仪旋转平台的不垂直等因素都会造成很大的测量误差;测量时提供的镜子的曲率半径与实际镜子的曲率半径往往有很小的偏差,也会影响测量结果;另外,在实际工程应用中发现,轮廓仪的零点会在某一极小的范围内波动,这一因素在三维轮廓的测量中造成的误差会直接影响测量结果的重复性。对位置放置所造成的误差,传统的方法是在测量过程中尽可能地调整镜子中心位置与探测头零点相一致,然后对测量结果做去倾斜处理。这一方法在精度要求不高的测量过程中可勉强应用,但这一方法在每次测量时,都要花大量时间来调整镜子,且因为镜子中心与探测头中心不可能严格一致,所以测量精度不能达到很高。对曲率半径不准确这一点,实际应用中经常的做法是人工调整这一半径,由主观判断来找到一个合适的曲率半径。这一方法不但增加了测量的时间,同时使测量结果带有一定的主观性。对轮廓仪的零点会在某一极小的范围内波动这一点,普通的轮廓测量中都会忽略这一误差,但随着测量精度的提高,这一误差是不可忽略的。在某些高精度的测量仪中,采用每次测量前重新校正零点的方法来提高测量精度,但这一方法显然会增加测量过程的复杂性。

为解决上述问题,本文对接触式非球面轮廓测量仪进行了较为全面的误差分析,以确定上述因素会造成什么样的测量误差;在此基础上,以最小二乘法为基本理论,找到了一种能同时校正镜子的位置误差,曲率半径误差及轮廓仪的零点漂移误差的数学模型。通过数学模拟和实际工程应用二个途径验证了模型的有效性。模型对高精度接触式非球面轮廓的测量具有极大的帮助,同时对非接触式轮廓测量过程中的数据处理也具有较高的参考价值。

2 接触式轮廓测量原理及误差分析

接触式三维轮廓仪的工作原理如图 1 所示。整个系统主要由三部分组成:水平导轨、旋转平台和探测头。通过水平导轨的水平移动与旋转平台的旋转可测量被测物体的三维轮廓数据。其三维数据的测量过程可简述如下:

首先,探测头在水平导轨上的位置归零,即把探测头移动到图 1 的  $X-Z$  坐标系的原点;然后把被测物体放置于旋转平台的中心位置;最后把探测头向  $X$  负方向移动一个距离  $r$ ,旋转平台顺时针转动一个角度  $\theta$ ,这时探测头可测量被测物体在图 1 的  $X'-Y'-Z'$  坐标系统中坐标  $(r \cdot \cos(\theta+180^\circ), r \cdot \sin(\theta+180^\circ))$  处的值(这里假定旋转平台的旋转中心与水平导轨的零点重合)。通过选取不同的  $r$  和  $\theta$ ,就能测量被测物体任一坐标点处的值,从而完成被测物体三维轮廓的测量。

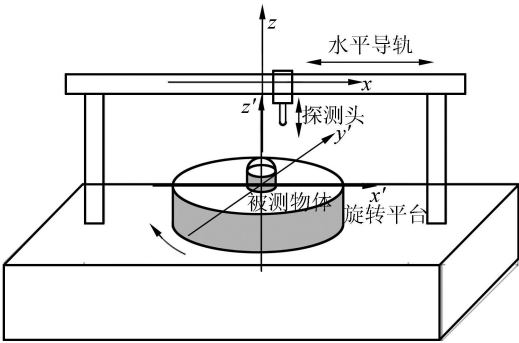


图 1 轮廓仪工作原理

Fig . 1 Principle of contacting contour measurement

利用上述接触式三维轮廓测量仪测量物体的三维轮廓时,除去仪器本身固有的不可校正的误差,如探测头的测量精度,导轨的定位精度外,还有许多由于测量过程中人为的因素或仪器本身固有但是可校正的误差,主要包括:探测头在水平导轨上的移动轨迹并非是一条直线;测量物体的中心与旋转平台的旋转中心之间的偏差;被测量物体与  $X'$  轴及与  $Y'$  轴之间存在一定的角度;探测头在  $X$  轴上的零点与旋转中心之间存在的微小

偏移;探测头具有一定大小,一般为半球,这一结果造成探测头与被测物体的接触点并不在理想位置,从而引起测量误差;提供的曲率半径不准确也会影响最后的测量结果。这些误差可简述如下:

(a)水平导轨引起的测量误差

由于探测头所处的移动导轨不可能完全是一条直线,所造成的后果是测量的基准值在不同的位置是不同的。这一误差所造成的实际测量结果是:测量一个标准平面上的一条直线时,测量的数据并非是一条直线,而是一条有起伏的不规则曲线。

这一误差虽然很严重,但由于导轨的误差比较固定,所以是可以校正的。方法是测量一个标准平面上的一条直线,测量数据理论上应当是一条直线,所以测量数据中在某一位置  $x$  处偏离直线的数值即是导轨在  $x$  处的误差。记录下这一数值,以后在相同位置  $x$  处的测量值都减去这一值即可校正这一误差。

(b)测量物体位置放置不精确所造成的误差

假定测量物体在  $X'-Y'-Z'$  坐标系中的理论曲面方程为:

$$Z'=f(x',y'), \tag{1}$$

现在由于放置位置不准确,使测量物体的中心不在坐标原点。现假设实际的位置为  $(x_0',y_0')$ ,则轮廓仪测量的位置  $(x',y')$  处的值实际上是物体  $(x'-x_0',y'-y_0')$  处的值。测量误差为:

$$\Delta=f(x',y')-f(x'-x_0',y'-y_0')$$

(c)测量物体与测量坐标系之间存在的倾斜角度引起的误差

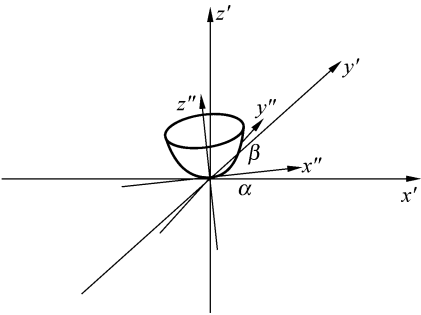


图 2 测量体与测量坐标轴之间的倾斜  
Fig. 2 Tilting of test object and test coordinate axis

假定测量物体在  $X'-Y'-Z'$  坐标系中与

$X'$  轴之间有一个角度  $\alpha$ ,与  $Y'$  轴之间有一个角度  $\beta$ ,如图 2 所示(注:由于本文的处理均在  $X''-Y''-Z''$  坐标系中进行,因此以它为基准坐标系,在此条件下角度  $\alpha,\beta$  均为负值)。根据坐标旋转理论<sup>[3]</sup>有:

$$x''=x'\cdot\cos\alpha-z'\cdot\sin\alpha, \tag{2}$$

$$y''=y'\cdot\cos\beta-[z'\cdot\cos\alpha+x'\cdot\sin\alpha]\cdot\sin\beta, \tag{3}$$

$$z''=[z'\cdot\cos\alpha+x'\cdot\sin\alpha]\cdot\cos\beta+y'\cdot\sin\beta, \tag{4}$$

在坐标系  $X'-Y'-Z'$  中测得的值  $(x',y',z')$  换成  $(x'',y'',z'')$  后才满足方程。即:

$$z''=f(x'',y'')$$

轮廓仪实际测量的是物体在  $(x'',y'')$  处的值,理论上应当为  $z''$ ,但用户自认为测量的是  $(x',y')$  处的值。测量误差可认为是:

$$\Delta=z'-f(x'',y'')$$

(d)探测头的零点与旋转平台的旋转中心不重合引起的误差

假设探测头的零点与旋转平台的旋转中心有一个偏移  $(m,n)$ ,如图 3 所示。这一偏移造成的结果是测量坐标的误差。在探测头的零点与旋转平台的旋转中心重合时,当探测头向  $X$  负方向移动距离  $r$ ,旋转平台顺时针转动角度  $\theta$ ,则这时认为探测头测量的是坐标  $(r\cdot\cos(\theta+180^\circ),r\cdot\sin(\theta+180^\circ))$  处的值。但当存在偏移  $(m,n)$  时,实际测量的是坐标  $(\rho\cdot\cos(\theta+180^\circ-\gamma),\rho\cdot\sin(\theta+180^\circ-\gamma))$  处的值。

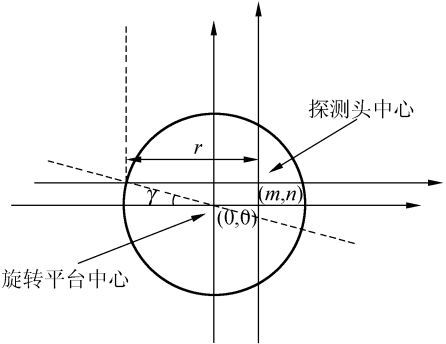


图 3 探测头零点与旋转中心的偏移  
Fig. 3 Zero point of detector and center of circumrotation

其中:

$$\rho=\sqrt{(r-m)^2+n^2}$$

$$\gamma=\arcsin\left[\sin\left(\frac{r}{\rho}\right)\right]$$

测量误差可认为是:

$$\Delta=f\left(r\cdot\cos\left(\theta+180\right),r\cdot\sin\left(\theta+180\right)\right)-f\left(\rho\cdot\cos\left(\theta+180-\gamma\right),\rho\cdot\sin\left(\theta+180-\gamma\right)\right)$$

(e) 探测头半径引起的测量误差

假定  $z=f(x,y)$  是测量物体的理论曲面方程,测量仪探测头的球头半径为  $r$ 。如图 4 所示,当探测头调整到点  $(x,y)$ —探测头球头中心位置,准备测量被测物体在点  $(x,y)$  处的值时,由于探测头有一定的大小,因此实际测量的是球头与轮廓的切点  $(x+\Delta x,y+\Delta y)$  处的值。

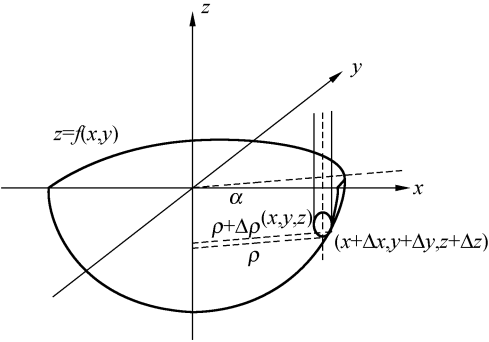


图 4 探测头尺寸引起的测量误差

Fig. 4 Error source of detector size

对于旋转对称体,假设探测头球心到中心  $z$  轴的距离为  $\rho$ ,切点到中心  $z$  轴的距离为  $\rho+\Delta\rho$ 。

探测仪在  $(x,y)$  处的读数为  $g_i(x_i,y_i)$ ,则有:

$$g_i(x_i+\Delta x,y_i+\Delta y)=g_i(x_i,y_i)-r+r\cdot c$$

其中

$$\theta=\arctan\left(f'\left(\rho+\Delta\rho,0\right)\right),\tag{5}$$

另外有:

$$\frac{\Delta\rho}{r}=\sin\left(\theta\right)=\sin\left(\arctan\left(f'\left(\rho+\Delta\rho,0\right)\right)\right),\tag{6}$$

通过求解式(6)的超越方程,就能确定  $\Delta\rho$  及  $\theta$ 。其中  $\theta$  为探测头球心与切点的连线与  $Z$  轴的夹角。

假设测量坐标 0 点,探测球头与轮廓的切点及轮廓的中心三点确定的平面与  $x-z$  平面的夹角为  $\alpha$ ,则:

$$\tan\left(\alpha\right)=\frac{y}{x},\tag{7}$$

$$\begin{cases} \Delta x=\Delta\rho\cdot\cos\left(\alpha\right) \\ \Delta y=\Delta\rho\cdot\sin\left(\alpha\right), \end{cases}\tag{8}$$

根据式(7),(8)可对测量点的数据进行修正,从而

获得相对正确的结果。

测量误差可表示为:

$$\Delta=f\left(x',y'\right)-f\left(x'+\Delta x',y'+\Delta y'\right)$$

(f) 曲率半径误差

轮廓测量的结果一般是测量轮廓与标准轮廓的差值,因此,如果提供的曲率半径与实际的不符时,测量结果就会不准确。

3 接触式轮廓测量数据处理模型

由上一节的分析知,可校正的误差主要有 6 种:导轨误差、测量物体放置的位置误差、测量物体与测量系统的坐标系统存在一定的角度、探测头的零点位置与旋转平台的旋转中心的偏移、探测头有一定尺寸引起的测量误差及曲率半径误差。

导轨误差可通过测量标准平面来测量导轨在不同位置的误差值,利用这一值来修正测量数据就能有效地消除这一误差。探测头半径误差,在偏心与旋转角度确定后也很容易校正,下面的模型仅讨论剩余的 4 项误差。

对于曲率半径为  $R$ ,偏心率为  $k$  的非球面镜方程为<sup>[1]</sup>:

$$f\left(x,y\right)=\frac{c\cdot\left(x^2+y^2\right)}{1+\sqrt{1-\left(k+1\right)\cdot c^2\cdot\left(x^2+y^2\right)}}$$

其中  $c=1/R$ 。

假设置时,镜子中心在测量坐标系中的位置为  $(x_0,y_0,z_0)$ ,镜子与测量坐标系的  $X$  轴之间的夹角为  $\alpha$ ,与  $Y$  轴之间的夹角为  $\beta$ ,测量时探测头零点在  $X-Y$  平面上的坐标为  $(m,n)$ ,镜子实际曲率半径为  $R+\Delta R$ 。设点集  $(x_i',y_i',z_i')$  为这一条件下的测量数据。

考虑探测点零点与旋转中心的偏移后,实际的坐标值应为:

$$\begin{aligned} x_i'' &= \left[ \frac{x_i' \left( \sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2} - m \right)}{\sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2}} + \frac{y_i' \cdot n}{\sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2}} \right] \\ y_i'' &= \left[ \frac{y_i' \left( \sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2} - m \right)}{\sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2}} - \frac{x_i' \cdot n}{\sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2}} \right] \\ z_i'' &= z_i' \end{aligned}$$

通过以下的坐标平移和旋转,可把测量值变换到与非球面标准方程相一致的坐标系中:

$$\begin{aligned} x_i &= (x_i'' - x_0) \cdot \cos\alpha - (z_i'' - z_0) \cdot \sin\alpha \\ y_i &= (y_i'' - y_0) \cdot \cos\beta - [(z_i'' - z_0) \cdot \cos\alpha + \end{aligned}$$

$$z_i = [(x_i'' - x_0) \cdot \sin \alpha + (y_i'' - y_0) \cdot \sin \beta + (z_i'' - z_0) \cdot \cos \alpha + (x_i'' - x_0) \cdot \sin \alpha] \cdot \cos \beta + (y_i'' - y_0) \cdot \sin \beta$$

最后考虑曲率半径误差后,在理想状态下有:

$$z_i - f(x_i, y_i, \Delta R) = 0$$

其中:

$$f(x, y, \Delta R) = \frac{c \cdot (x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k + 1) \cdot c^2 \cdot (x^2 + y^2)}}$$

其中  $c = 1/(R + \Delta R)$ 。

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial \alpha} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \alpha} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial \beta} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \beta} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \beta} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial x_0} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial x_0} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial x_0} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial y_0} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial y_0} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial y_0} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial z_0} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial z_0} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial z_0} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial m} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial m} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial m} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial n} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial n} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial n} \right] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)] \cdot \left[ \frac{\partial z_i}{\partial \Delta R} - f'_x(x_i, y_i) \frac{\partial x_i}{\partial \Delta R} - f'_y(x_i, y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \Delta R} \right] &= 0 \end{aligned} \right.$$

理论上只要能求解出上述方程组,就能获得最佳的参数 $(x_0', y_0', z_0', \alpha', \beta', m', n', \Delta R')$ ,根据这一结果对测试获得的原始数据进行处理就能获得精确的非球面轮廓。上述方程组是一个 8 元超越方程组,实际工程中可应用拟牛顿法求解<sup>[2]</sup>。

4 数据模拟处理及实际工程应用

将从理论和实际应用两方面来验证模型的有效性。

4.1 数据模拟验证

根据上述误差分析,利用计算机模拟给定参数 $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, m, n, \Delta R)$ 下的点集,再加入一定幅度的随机误差,然后利用上述的数据模型进行处理,观察其估计的参数 $(x_0', y_0', z_0', \alpha', \beta', m', n', \Delta R')$ 与实际参数之间的区别。

实际测量中,参数 $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, m, n, \Delta R)$ 是未知的。工程运用中可用使下式最小的参数 $(x_0', y_0', z_0', \alpha', \beta', m', n', \Delta R')$ 作为它的最佳匹配值。

$$F(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, m, n, \Delta R) = \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i, \Delta R)]^2$$

由数学知识知,要使上式最小,必须使上式的一阶偏导数为 0,即:

通过大量模拟数据的处理结果表明,本模型可精确地复原上述误差。限于篇幅,下面仅给出二个模拟实例。

实例 1: 非球面镜参数  $R = 899$ ,  $k = -0.963\ 565$ 。探测头球面半径  $r = 1.3\ \text{mm}$ , 模拟参数 $(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, m, n, \Delta R)$ 为 $(10, 10, -80, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0)$ 。上述值中  $x_0, y_0, z_0, m, n$  的单位为  $\text{mm}$ ,  $\alpha, \beta$  的单位为 $(^\circ)$ 。模拟点集是一系列同心圆,这些圆的半径间隔为  $15\ \text{mm}$ , 角度间隔为  $10^\circ$ , 半径范围为 $[0, 165]$ , 总点数为  $36 \times 11 + 1 = 397$ (半径为 0 的圆仅一点)。

上述参数中  $\Delta R$  为 0, 模拟时以实际的曲率半径来生成数据,但在数据处理时输入的曲率半径将为 889,也即有  $10\ \text{mm}$  的偏差。

实例 1 中不加随机误差,在实例 2 中将加入一定幅度的随机误差。

实例 1 的数据处理结果如表 1 所示:

数据处理时镜子的输入参数为: $R=889$ ,  
 $k=-0.963\ 565$ 。也即人为给出了 10 mm 的曲

率半径误差。在解方程组时的初值全部设置为 0。

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 2 所示。

表 1 不带随机误差的数据模拟及数据处理结果

Tab .1 Results of data si mulating and processing witho ut rando m error

误差源	真实值	求解方程给定初值	数据处理结果	镜面误差
$x_0$	10 mm	0	9.999 764	$PV=0.000\ 683\ \mu\text{m}$ $r\ ms=0.000\ 120\ \mu\text{m}$
$y_0$	10 mm	0	9.998 606	
$z_0$	-80 mm	0	-79.999 997	注: $PV$ 为最大误差与最小误差的差值 $r\ ms$ 为误差的均方根值。
$\alpha$	0.1°	0	0.100 015	
$\beta$	0.1°	0	0.100 089	
$m$	0.1 mm	0	0.099 998	
$n$	0.1 mm	0	0.100 000	
$\Delta R$	-10 mm	0	-10.000 024	

表 2 带不同幅度随机误差的数据模拟及数据处理结果

Tab .2 Results of data si mulating and processing with rando m error

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 $\mu\text{m}$	
$x_0$	10 mm	0	9.976 053	10.003 710	9.999 852	$PV=3.118\ 966\ \mu\text{m}$ $r\ ms=0.853\ 321\ \mu\text{m}$
$y_0$	10 mm	0	9.853 517	10.003 156	9.998 486	
$z_0$	-80 mm	0	-79.999 722	-80.000 012	-79.999 996	$PV=0.311\ 440\ \mu\text{m}$ $r\ ms=0.088\ 456\ 5\ \mu\text{m}$
$\alpha$	0.1°	0	0.101 523	0.099 766	0.100 010	
$\beta$	0.1°	0	0.109 224	0.099 799	0.100 096	
$m$	0.1 mm	0	0.096 238	0.100 171	0.100 026	$PV=0.031\ 849\ \mu\text{m}$ $r\ ms=0.008\ 258\ \mu\text{m}$
$n$	0.1 mm	0	0.099 079	0.099 919	0.100 009	
$\Delta R$	-10 mm	0	-10.050 273	-9.997 180	-9.999 829	

4.2 实际工程应用

模型在某轮廓仪上获得了实际的应用,取得了较为满意的结果。轮廓仪的测量精度大约在 3~4  $\mu\text{m}$ 。这里以某一非球面镜为例,给出其实际测量结果。

非球面镜参数: $R=899,k=-0.963\ 565$ 。

轮廓仪探测头半径: $r=1.3\ \text{mm}$ 。

非球面镜的采样点:半径为 70~160 mm,采样间隔为 5 mm,角度间隔为 10°。总采样点为:  
[ $\frac{(160-70)}{5}+1$ ] $\times 36=684$ 。

该非球面镜已经在干涉仪下检测过, $PV$  在 1  $\mu\text{m}$  以下。

利用模型处理数据后,获得的检测结果如图 5 所示。其确定的参数为: $x_0=1.480\ 013$ ,  
 $y_0=1.673\ 945,z_0=-20.239\ 083,\alpha=-0.128\ 613$ ,

$\beta=-0.112\ 382,m=0.136\ 583,n=-0.002\ 229$ ,  
 $\Delta R=-2.685$ 。

测量结果: $PV=2.195\ 833,r\ ms=0.497\ 022$ 。

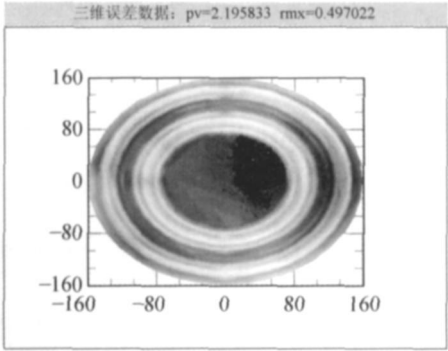


图 5 实际工程测量结果

Fig .5 Result of practical testing

从实际测量结果看,模型分析获得的测量精度已经接近或达到了探测仪本身的测量精度。

5 结 论

在分析接触式轮廓仪误差的基础上,运用最小二乘法的基本原理,提出了一个可同时消除由于非球面镜放置时存在的  $X$ 、 $Y$  方向的倾斜、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的偏心,曲率半径不准确、以及由于轮廓仪的旋转中心与探测头的零点之间的随机的微小偏移所造成的测量误差的数学模型。从理论上的数据模拟到实际工程应用都证明,模型能有效地校正上述的误差源。从带有随机误差的数据模拟更表明,模型的校正精度会随着随机误差的幅度减小而增加。模型的这一特征使它非常适合运

用在非球面镜制作过程中的面形检测。非球面镜制作的早期,面型误差很大,这时模型的恢复精度相对较差,但对于这时的实际面形而言,这一误差是完全可接受的。随着镜子面形的逐步完善,模型的分析精度也不断在提高,从带随机误差的数据模拟可观察到,模型的分析误差就  $PV$  值而言,其相对精度始终在 10% 以下。这一特性使模型在镜面误差大于或接近仪器本身测量精度的范围内都可有效使用。

模型的最大优点是在提供高精度测量结果的同时,放宽了镜子的放置条件,从而方便了镜子制作过程中的面形检测过程。模型的提出是基于接触式轮廓仪的,但模型本身及其推导模型的思想在非接触式轮廓仪中同样适用。

参考文献:

[1] 薛栋林,张忠玉,张学军.一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J].光学精密工程,2005,13(2):198-204.  
XUE D L,ZHANG ZH Y,ZHANG X J, et al. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)

[2] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等.大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J].光学精密工程,2006,14(4):533-538.  
LI R G,ZHENG L G,XUE D L, et al. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off axis aspheric surface with big aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)

[3] 牛海燕,张学军.Φ124 mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J].光学精密工程,2006,14(4):539-544.  
NIU H Y,ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of Φ124 mm aspheric reaction burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)

作者简介:仇谷烽(1974—),男,江苏苏州人,现在苏州大学现代光学研究所工作,主要从事光学检测软件的开发工作。  
E-mail:qiugufeng@suda.edu.cn