

文章编号: 1001-2486(2009)04-0036-06

# 内表面间垂直度的高精度测量方法设计与误差分析\*

郑子文, 刘景坡, 陈善勇

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对框体类零件超精密加工的难点问题——内表面间垂直度误差的高精度测量, 提出了一种基于波面干涉技术测量的新方法, 建立了垂直度测量系统, 分析了各调整误差对测量结果的影响。该方法能够实现框体类零件内表面间垂直度误差的高精度测量与评价, 并能得到误差的三维分布, 测量结果可直接用于零件的确定性修形加工。实验表明, 该方法可实现  $0.6''$  的综合测量精度。

**关键词:** 垂直度测量; 内表面; 最小二乘; 波面干涉仪

**中图分类号:** TB92      **文献标识码:** A

## A High Precision Perpendicularity Measurement Method and Analysis for Internal Surfaces

ZHENG Zi-wen, LIU Jing-po, CHEN Shan-yong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** High precision perpendicularity measurement of internal surfaces of frame parts is one of the most difficult problems in manufacturing. A novel method based on wave-front interferometer to measure the internal surfaces of frame parts is introduced in this paper, and the influencing factors in the measurement are also discussed theoretically. The experiment results show that the method can achieve high perpendicularity measurement accuracy of  $0.6''$ . Considering the distribution of the perpendicularity errors derived, the measurement results can be used in error correction machining of the parts.

**Key words:** perpendicularity measurement; internal surface; least square; wave-front interferometer

随着现代科学技术的迅猛发展, 特别是航空航天、信息与微电子等尖端科技的突飞猛进, 对敏感元件的材料、几何特征、力学特性等提出了越来越高的要求。例如, 静电悬浮加速度计<sup>[1-2]</sup> 是用于地球重力场测量的关键器件, 可以实现高精度、高分辨率的微重力测量, 成为目前国际上已实际应用的、分辨率最高的加速度计。为确保静电悬浮加速度计  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  三轴的耦合足够小, 对某敏感元件的精度要求很高, 因其工作表面为内表面, 如何实现内表面的超精密加工与形位误差检测成为当前的难点问题。对于内表面的加工, 常规的超精密磨、铣削难以达到  $0.1\mu\text{m}$  量级的形位精度。现代光学零件的确定性修形方法是解决该问题的有效方法, 但需要获得内表面的三维误差分布, 这对测量方法提出了特别的要求。

目前, 实验室测量形位误差一般采用三坐标测量机、自准直仪、激光等, 这些测量设备或方法都有其自身的局限性。三坐标测量机是现代工业普遍采用的形状和尺寸检测设备, 通过测头采集一些点来计算误差值, 由于采集到的数据有限, 获得的形位误差分布数据不便于确定性误差修正加工, 而且精度只能保证到微米级。用双自准直仪或激光测量可实现相邻表面间垂直度的快速测量, 具有测量装置简单、数据处理方便、测量结果精确度高等优点, 但由于都不能获得被测面的误差分布, 因此无法指导确定性修形加工。

针对该问题, 本文探讨了一种基于波面干涉技术测量框体零件内表面间垂直度误差的新方法, 以期获得对内表面垂直度误差及其分布的高精度测量, 解决利用确定性修形加工方法提高内表面形位误差精度面临的高精度测量问题。

\* 收稿日期: 2009-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60708016)

作者简介: 郑子文(1973-), 男, 副教授, 博士。

# 1 测量原理和方法分析

## 1.1 被测对象及内表面间垂直度的测量方法

被测对象如图 1(a) 所示, 材料为微晶玻璃。目前在形位误差测量中, 干涉测量<sup>[3]</sup> 是精度最高的方法, 但受敏感元件的几何形状限制, 内表面间垂直度不能直接进行干涉测量。

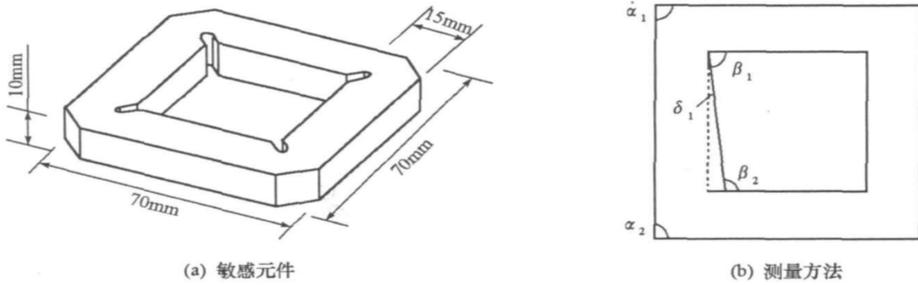


图 1 被测对象与测量方法

Fig. 1 Tested object and testing method

为此, 笔者提出了新的测量方法, 如图 1(b) 所示, 首先测量外表面间垂直度误差  $\alpha$ , 再测量外表面与所对应内表面的平行度误差  $\delta$ , 之后以该角度误差  $\delta$  修正外表面间垂直度误差  $\alpha$ , 最终得到内表面间垂直度误差  $\beta$ 。该方法以  $\delta$  和  $\alpha$  的高精度测量为前提, 外表面间垂直度误差采用相移干涉法测量, 内外表面间平行度误差采用波面干涉仪标准的透射式平行度测量法进行测量<sup>[6]</sup>。

## 1.2 基于干涉仪的外表面垂直度测量原理

采用 Fizeau 型等厚干涉仪<sup>[3]</sup> 进行平面测量时, 实际测量的是参考平面和被测平面之间空气间隙的厚度信息, 测量结果既包含被测平面的面形误差, 又包含相对于与标准参考平面的位置误差。测量外表面间垂直度<sup>[6-8]</sup> 时, 可利用图 2(a) 所示的测量光路, 干涉仪产生的部分激光束经标准参考镜头反射回干涉仪, 形成参考波面; 其余部分激光透射后经被测对象反射至辅助平面反射镜, 并反射回主机形成测试波面。根据测试波面与参考波面的干涉图像可获得被测两面相对于  $90^\circ$  基准角的位置误差, 从而得到外表面间垂直度误差。

本测量系统的标准  $90^\circ$  角, 并非一般意义的实基准角, 而是由两反射平面和参考平面法线夹角的角平分线垂直面组成的虚基准角。该基准角无任何制造误差, 仅取决于两反射平面的平行度误差。

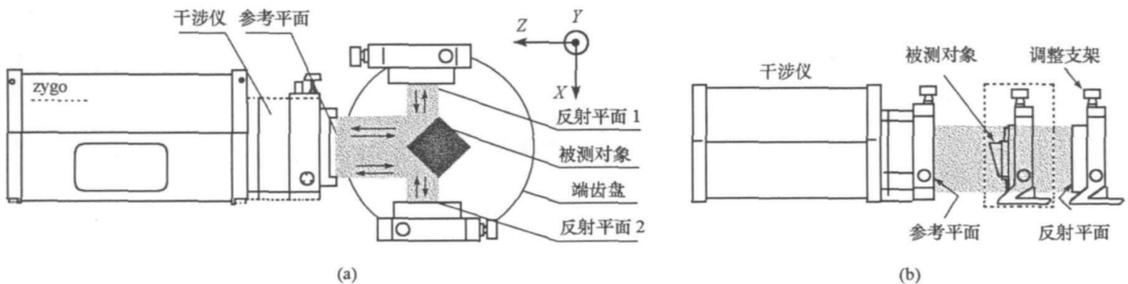


图 2 垂直度及平行度测量示意图

Fig. 2 The layout of perpendicularity & parallelism measurement

建立测量系统的直角坐标系, 原点位于被测角顶点, 干涉仪敏感方向为  $Z$  方向,  $X, Y, Z$  满足右手规则。首先分析理想情况, 即参考平面、被测对象、反射平面无面形误差, 被测角无垂直度误差并且被测对象和反射平面无位置偏差。不妨设参考平面方程为  $z = l$ , 反射平面 1、2 的方程分别为  $x = m, x = n$  ( $n < 0$ ), 显然被测工件相邻两面满足  $z = \pm x$ , 此时  $z$  轴左侧任一点  $B(x, y, z)$  参考波面与测试波面之间光程差(空气折射率为 1, 下略)为

$$\Delta = 2(l - z + m - x) = 2(l + m) \quad (1)$$

Z 轴右侧任一点  $B'(x, y, z)$  ( $x < 0$ ) 的光程差(Optical Path Difference, OPD)为

$$\Delta = 2(l - z + x - n) = 2(l - n) \quad (2)$$

在理想情况下参考波面与测试波面光程差处处相等,干涉图像为一片均匀白光。

当被测对象存在位置误差时(由于左右两侧对称,只对其中的一个面进行分析),图3中  $OB$  表示理想平面位置( $z = -x$ ),  $OB'$  表示实际位置,二者偏离角度为  $\theta$ 。对于空间内任意一点  $B(x, y, z)$ , 变换之后的坐标  $B'(x', y', z')$  为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos\theta + z \sin\theta \\ y \\ -x \sin\theta + z \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

此时光程差为

$$\Delta' = 2(l - z' + m - x') = 2(l + m + 2x \sin\theta) = 2(l + m + 2x(\theta - \frac{\theta^3}{3!} + o(\theta^3))) \quad (4)$$

$\theta$  的高阶小量的影响很小,忽略后的测量值为

$$PV_{\text{测}} = \frac{\Delta'_{\text{max}} - \Delta'_{\text{min}}}{2} = 2\theta(x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) = 2\theta L_{\text{测}} = \sqrt{2}PV \quad (5)$$

$$\theta_{\text{测}} = PV_{\text{测}}/L_{\text{测}} = 2\theta \quad (6)$$

通过上述分析可知,当被测对象存在角度误差时,光程差发生变化,出现明暗相间的干涉条纹。利用干涉图像可分析被测对象相邻两面相对于  $90^\circ$  基准角的角度误差,即相邻两面间的垂直度误差。需要注意的是,在测量中,被测对象相邻两面的实际位置是最小二乘法确定的,当该面面形误差较大时会出现拟合误差,因此要将其加工到较高精度。

### 1.3 内外表面间平行度测量及内表面间垂直度误差的获取

测量内外表面间平行度<sup>[3-4]</sup>时,可参考图2(b)所示的光路。首先不放入被测对象,根据干涉图像可获得面形测量结果1;然后保持反射平面不动,在其与干涉仪主机之间放入被测对象,此时被测平行度误差会调制测试波面,使得干涉图样发生变化,获得面形测量结果2。将测量结果2与测量结果1相减,即得到去除了反射平面面形和位置误差影响的被测对象平行度误差测量结果。

在获取敏感元件外表面间垂直度误差  $\alpha$  以及内外表面间平行度误差  $\delta$  后,就可以间接获得内表面间垂直度误差  $\beta_i$ 。如图1(b)所示,内外表面间平行度误差  $\delta_i$  引起  $\beta_1$  和  $\beta_2$  两个角度的变化,并且  $\beta_1$  减小  $\delta_i$ ,  $\beta_2$  增大  $\delta_i$ , 则内表面间垂直度误差为

$$\beta_i = \alpha_i - \delta_i + \delta_{i-1} \quad (7)$$

## 2 测量方法及误差分析

影响本系统测量精度的因素主要是:参考平面、被测工件、反射平面的平面度误差;反射平面与参考平面的垂直度误差;反射平面之间的平行度误差;被测对象的调整误差;干涉仪误差;环境因素等。参考平面采用 zygo 标准4英寸平面镜头, PV 值  $\lambda/20$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ), 估计其误差为  $0.0653''$ ; 反射平面采用一级平面平晶, PV 值  $0.05\mu\text{m}$ , 估计其误差为  $0.1031''$ , 满足测量精度的要求。

下面对于其他误差因素的影响进行详细分析,各调整误差约为角秒级,忽略其高阶小量后结果如表1所示。其中  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别表示被测工件绕 X, Y, Z 轴方向的转动角度,  $\gamma_x, \gamma_y$  分别是反射平面绕 X, Y 轴的转动角度,  $\alpha$  为 x 方向垂直度测量结果。

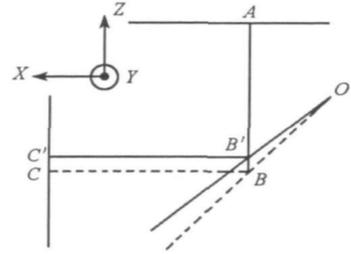


图3 被测工件存在角度误差时的光程差  
Fig.3 OPD induced by tested element error

表 1 测量误差分析  
Tab. 1 Measurement error analysis

变量	变换矩阵	光程差	影响程度	说明
$\theta_x$	$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix}$	$\Delta'_L = 2(l + m + \theta_x^2 x' - \theta_x y')$ $\Delta'_R = 2(l - n - \theta_x^2 x' - \theta_x y')$	$\alpha = o(\theta_x)$	在 $x$ 方向无变化, 对测量结果无影响
$\theta_y$	$T_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix}$	$\Delta'_L = 2(l + m + \frac{2\theta_y}{1 - \theta_y^2} x')$ $\Delta'_R = 2(l - n + \frac{2\theta_y}{1 + \theta_y^2} x')$	$\alpha = \frac{\theta_y - \theta_y}{2} = o(\theta_y)$	大小相等, 符号相反, 相互抵消
$\theta_z$	$T_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta'_L = 2(l + m - \frac{\theta_z^2}{1 + \theta_z^2} x' + \frac{\theta_z}{1 + \theta_z^2} y')$ $\Delta'_R = 2(l - n + \frac{\theta_z^2}{1 + \theta_z^2} x' - \frac{\theta_z}{1 + \theta_z^2} y')$	$\alpha = o(\theta_z)$	在 $x$ 方向无变化, 对测量结果无影响
$Y_y$	$R_y = \begin{bmatrix} \cos Y_y & 0 & \sin Y_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin Y_y & 0 & \cos Y_y \end{bmatrix}$	$\Delta'_L = 2(l + m + Y_{Ly} x')$ $\Delta'_R = 2(l + m - Y_{Ry} x')$	$\alpha = \frac{Y_{Ly} - Y_{Ry}}{2}$	控制两反射平面间的平行度
$Y_z$	$R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos Y_z & -\sin Y_z \\ 0 & \sin Y_z & \cos Y_z \end{bmatrix}$	$\Delta'_L = 2(l + m + Y_{Lz} y')$ $\Delta'_R = 2(l - n + Y_{Rz} y')$	$\alpha = o(Y_z)$	在 $x$ 方向无变化, 对测量结果无影响

可见, 测量结果  $\alpha$  是反射平面位置误差 ( $Y_x$ ) 和被测对象调整误差 ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) 的高阶小量, 对于这些误差有抑制作用。反射平面间平行度误差是该测量系统的确定性误差源, 需限制在  $0.3 \lambda$  以内, 引起微小确定性误差为  $0.1958''$ , 满足“十分之一”准则<sup>[9-10]</sup>, 并且根据四边形闭合角度为  $360^\circ$  的原理, 有望通过进一步处理消除该误差。

按 95% 概率<sup>[9]</sup>, 整个实验系统的  $B$  类不确定度为  $0.0632''$ , 平行度测量实验系统的  $B$  类不确定度为  $0.1758''$ 。

### 3 测量实验系统及结果

在上述分析的基础上, 构建了专用的垂直度干涉测量实验系统, 如图 4 所示, 主要由波面干涉仪、端齿盘、两个平面反射镜及相应的调整支架构成。

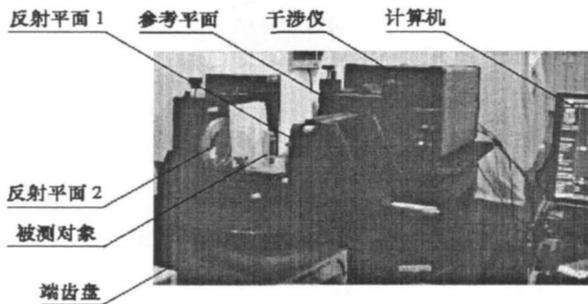


图 4 垂直度测量系统实物图

Fig. 4 Photo of perpendicularity measurement system

干涉测量仪采用 zygo GPI XP 干涉仪, 配合分辨率为  $640 \times 480$  像素的 CCD 及 MetroPro 分析软件, 使得测量精度优于  $\lambda/100$ 。端齿盘用于实现反射平面转位, 主要保证反射平面与参考镜头的垂直度误差小于  $2''$ , 测量结果对该误差不敏感, 能够满足要求。整个测量过程在专用的数字波面干涉测量实验室进

行,可以保证温度、空气波动、震动等环境因素对测量结果的影响降低到很小程度。在 MATLAB 和 MetroPro 平台上开发了数据处理程序。

测量流程可以描述为:安装反射镜 1、2,调整两个反射镜,使其平行度小于  $0.3\lambda$ 。将端齿盘转动  $90^\circ$ ,在此过程中,动作应轻微平缓,不能有冲击震动。然后放置并调整被测对象位置,使被测对象相邻两面的干涉条纹到最清晰、最稀疏、最均匀状态,进行测量,获得被测工件相邻两面的位置和面形误差数据。图 5 显示了外表面角  $\alpha_3$  的一次干涉测量结果。

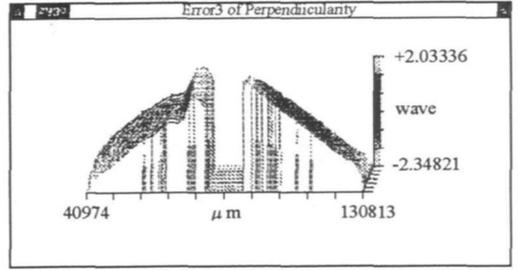


图 5 敏感元件某一角  $\alpha_3$  垂直度干涉测量结果  
Fig. 5 Perpendicularity measurement error of  $\alpha_3$

本文采用最小二乘法<sup>[11]</sup>对垂直度误差进行评价,该算法计算简便、易于实现、结果可靠,是工程中应用最多的形位误差评价算法之一。敏感元件外表面间垂直度评价结果如表 2 所示,内外表面间平行度评价结果,见表 3。其中,  $s(X_k)$  为单次测量值的实验标准偏差,  $s(\bar{X})$  为算术平均值的实验标准偏差,即 A 类标准不确定度。

表 2 外表面间垂直度测量结果

Tab. 2 Perpendicularity measurement results of external surfaces

垂直度	1 次测量	2 次测量	3 次测量	4 次测量	5 次测量	平均值	$s(X_k)$	$s(\bar{X})$
$\alpha_1$	- 7.2679 <sup>〃</sup>	- 7.3946 <sup>〃</sup>	- 7.4070 <sup>〃</sup>	- 7.3689 <sup>〃</sup>	- 7.4936 <sup>〃</sup>	- 7.3864 <sup>〃</sup>	0.0811 <sup>〃</sup>	0.0363
$\alpha_2$	8.5465 <sup>〃</sup>	8.6649 <sup>〃</sup>	8.5265 <sup>〃</sup>	8.6737 <sup>〃</sup>	8.6784 <sup>〃</sup>	8.6180 <sup>〃</sup>	0.0749 <sup>〃</sup>	0.0335
$\alpha_3$	- 12.1249 <sup>〃</sup>	- 12.2050 <sup>〃</sup>	- 11.9354 <sup>〃</sup>	- 12.0614 <sup>〃</sup>	- 12.0227 <sup>〃</sup>	- 12.0699 <sup>〃</sup>	0.1021 <sup>〃</sup>	0.0457
$\alpha_4$	11.4729 <sup>〃</sup>	11.2787 <sup>〃</sup>	11.1754 <sup>〃</sup>	11.2533 <sup>〃</sup>	11.5097 <sup>〃</sup>	11.3380 <sup>〃</sup>	0.1456 <sup>〃</sup>	0.0651
$\Sigma$	0.6266 <sup>〃</sup>	0.3440 <sup>〃</sup>	0.3595 <sup>〃</sup>	0.4967 <sup>〃</sup>	0.6718 <sup>〃</sup>	0.4997 <sup>〃</sup>	0.1497 <sup>〃</sup>	0.0669

表 3 内外表面间平行度测量结果

Tab. 3 Parallelism measurement results of internal-external surfaces

平行度	1 次测量	2 次测量	3 次测量	4 次测量	5 次测量	平均值	$s(X_k)$	$s(\bar{X})$
$\delta_1$	2.9159 <sup>〃</sup>	2.9320 <sup>〃</sup>	2.9598 <sup>〃</sup>	2.9453 <sup>〃</sup>	2.9159 <sup>〃</sup>	2.9338 <sup>〃</sup>	0.0191 <sup>〃</sup>	0.0085 <sup>〃</sup>
$\delta_2$	1.2692 <sup>〃</sup>	1.2949 <sup>〃</sup>	1.2938 <sup>〃</sup>	1.2853 <sup>〃</sup>	1.3031 <sup>〃</sup>	1.2893 <sup>〃</sup>	0.0129 <sup>〃</sup>	0.0058 <sup>〃</sup>
$\delta_3$	- 4.7817 <sup>〃</sup>	- 4.7425 <sup>〃</sup>	- 4.8437 <sup>〃</sup>	- 4.8862 <sup>〃</sup>	- 4.7779 <sup>〃</sup>	- 4.8046 <sup>〃</sup>	0.0576 <sup>〃</sup>	0.0258 <sup>〃</sup>
$\delta_4$	- 2.6263 <sup>〃</sup>	- 2.6048 <sup>〃</sup>	- 2.6604 <sup>〃</sup>	- 2.6837 <sup>〃</sup>	- 2.6243 <sup>〃</sup>	- 2.6399 <sup>〃</sup>	0.0316 <sup>〃</sup>	0.0141 <sup>〃</sup>

可见,垂直度单次测量标准偏差小于  $0.15''$ ,平行度单次测量标准偏差小于  $0.06''$ ,数据分散性小,重复精度高,满足测量要求。

根据式(7),又已知  $\alpha_i$ 、 $\delta_i$  各不相关,则内表面间垂直度误差  $\beta$  的实验标准偏差<sup>[9]</sup>为

$$s_{\beta} = \sqrt{s_{\alpha}^2 + s_{\delta}^2 + s_{\delta-1}^2} \quad (8)$$

合成标准不确定度<sup>[9]</sup>为

$$u = \sqrt{\sum s_i^2 + \sum u_i^2} \quad (9)$$

最终敏感元件内表面间垂直度误差如表 4 所示。

表 4 内表面间垂直度测量结果

Tab. 4 Derived perpendicularity measurement results of internal surfaces

被测角	平均值	$s$	$\sigma$	被测角	平均值	$s$	$\sigma$
$\beta_1$	-13.085''	0.089	0.260''	$\beta_2$	10.138''	0.078	0.259''
$\beta_3$	-6.099''	0.118	0.262''	$\beta_4$	9.046''	0.160	0.266''

可见, 在外表面垂直度及内外表面平行度的高精度和高稳定测量结果的基础上, 内表面间垂直度误差合成标准不确定度小于  $0.3''$ , 置信概率  $95\%$ <sup>[9]</sup> 的扩展不确定度小于  $0.6''$ 。图 6 显示了 4 个内表面垂直度误差和面形误差的最终结果。

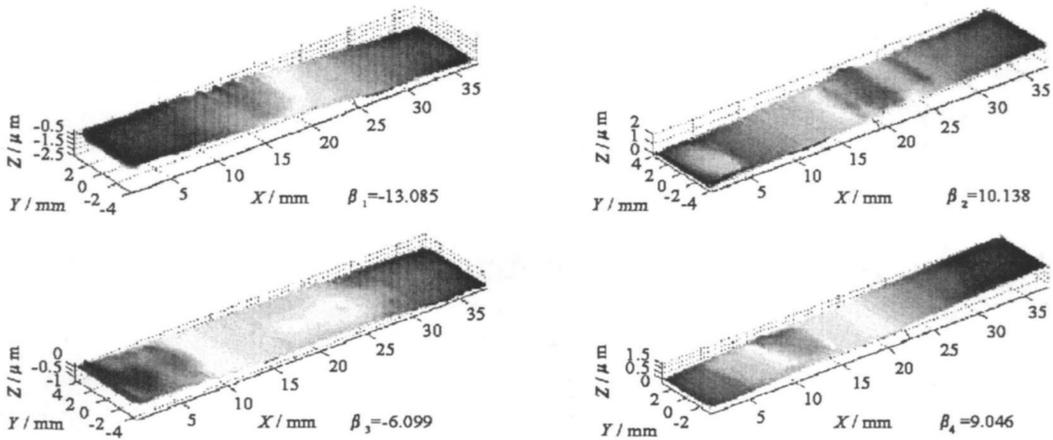


图 6 敏感元件内表面 1~ 4 垂直度误差及面形误差

Fig. 6 Error of perpendicularity and flatness of internal surfaces 1~ 4

需要注意的是, 该方法只对一个方向上的垂直度敏感。在本测量结果中, 只获得了沿测量系统  $X$  方向的垂直度误差, 而相邻两面在另一方向  $Y$  向的垂直度误差 (即塔差) 可采用类似方法获得。

## 4 结论

(1) 基于波面干涉测量, 提出了一种内表面垂直度测量的新方法, 开发了高精度测量实验系统, 并对各种因素的影响进行了系统分析。利用该方法成功地解决了敏感元件垂直度超精密检测问题。同时, 该方法具有普适性, 对于其他角度检测, 具有一定的参考意义。

(2) 该方法能够同时获得 3 位误差分布数据, 从而为离子束、磁流变等确定性研抛提供修形依据。

## 参考文献:

[1] Touloul P, Foulon B, Willmenot E. Electrostatic Space Accelerometers for Present and Future Missions[C]. Acta Astronautica, 1999, 45( 10) : 605-617.

[2] 薛大同. 重力测量卫星专用加速度计的关键技术[R]. 中国宇航学会第二届学术年会, 2006.

[3] Malacara, Daniel. Optical Shop Testing[M]. New York, Wiley-Interscience, 2007.

[4] Vannonia M, Bertozzi R. Parallelism Error Characterization with Mechanical and Interferometric Methods[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45: 719- 722.

[5] Bhattacharya J C. Measurement of Parallelism of the Surfaces of a Transparent Sample[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35: 27- 31.

[6] Angle Measurement MetroPro Application[EB]. Zygo Manual OMP- 0831D, 2004.

[7] Quiroga J A, Servin M, Marroquin J L, et al. Estimation the Orientation Term of the General Quadrature Transform from a Single N-dimensional Fringe Pattern[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22( 3) : 439- 444.

[8] 郑子文, 翁雷, 陈善勇, 等. 高精度六面体垂直度误差测量的一种新方法[J]. 光学技术, 2008, 34: 391- 394.

[9] 《测量技术手册》编辑委员会. 测量技术手册. 第 1 卷: 技术基础[M]. 北京: 中国计量出版社, 1996.

[10] 王中宇, 刘智敏, 夏新涛, 等. 测量误差与不确定度评定[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[11] 温照森, 陈循, 徐永成, 等. 机械系统建模与动态分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.