

差分五棱镜扫描法在波前检测中的应用

汤兆鑫^{1,2}, 黄 玮^{1,3*}, 许伟才¹, 刘立峰³, 徐象如^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现高精度大口径平行光管波前检测, 评价平行光管出射波前质量, 提出了采用差分五棱镜扫描波前检测方法检测平行光管。该方法为五棱镜扫描法的优化方法, 通过测量波前斜率的变化得到波前曲率的信息来重构波前, 从而消除由于五棱镜扫描法波前检测中质心标定不准确而引入的倾斜和离焦的误差量。通过搭建差分五棱镜扫描法波前检测系统验证了此方法的可行性, 并给出差分五棱镜扫描法误差分析说明此方法可靠性。误差分析表明, 该方法检测精度可以达到 10.54 nm; 实验结果表明, 该方法相比于五棱镜扫描法分别在波面峰谷值(PV)和均方根值(RMS)的重复性精度上提高了 74.41% 和 125.81%。该方法基本满足平行光管波前检测精度高、稳定性好的要求, 可以客观准确地评价平行光管出射波前质量。

关键词: 波前检测; 差分五棱镜扫描法; 平行光管; 误差分析

中图分类号: TN247; TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140706.1003

Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection

TANG Zhao-xin^{1,2}, HUANG Wei^{1,3*}, XU Wei-cai¹, LIU Li-feng³, XU Xiang-ru^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China)*

* *Corresponding author, E-mail: huangw@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to realize the high precise wavefront test of large-aperture collimator and evaluate its wavefront quality, the method of differential pentaprism scanning wavefront detection is proposed in this paper. This method is the optimization of pentaprism scanning detection. Firstly, the information of wavefront curvature is obtained by measuring wavefront slope change to reconstruct the wavefront. The title and defocus error instructed by inaccurate calibration of center of mass are eliminated. Secondly, the differential pentaprism scanning wavefront detection system is established to verify the feasibility of this method. Lastly, the error analysis is given. The error analysis shows that the testing precise of this method is 10.54 nm. The experimental results show that the repeatability precisions of wave peak and valley value(PV) and root mean square

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-10-20

基金项目: 国家重大科学专项资助项目(No. 2012ZX02701001)

(RMS) are increased by 74.41% and 125.81% compared with pentaprism scanning method. This method basically meets the requirements of high accuracy and good stability for collimator wavefront detection, which can be used to evaluate the quality of collimator wavefront.

Key words: wavefront detection; differential pentaprism scanning; collimator; error analysis

1 引言

伴随着科学技术的发展,平行光管的口径不断增大、焦距不断增长,平行光管的装调与检测过程也变得越越来越繁琐,其出射波前质量也较难保证,并且容易受到周围环境的影响^[1-2]。比如:温度、空气扰动、震动或抽真空后光管内外压强差等环境参数的变化引起的离焦问题,降低了大口径平行光管的出射波前质量,进而影响了对大口径光学设备检测的精度。

目前高精度大口径平行光管像质检测的主要方法为采用标准平面镜的自准直检测方法,此方法具有测量结果可靠、灵敏度高等特点。若同时采用菲索数字干涉仪或 Shack-Hartmann 波前传感器,便可达到较高的测量精度。但是由于标准大口径平面镜制造难度大,自身的检测困难等特点,在高精度大口径平行光管检测中此方法受到了极大的限制^[3-6]。为了避免采用平面镜自准直检测法的高成本,一般采用五棱镜扫描法来检测大口径平行光管的 optical 质量。但是因为五棱镜扫描法只能在探测器移动的一维方向上获取波面信息,所以需要多次不同方向上的扫描来获得被测波面上的二维信息。

对此本文提出了一种差分五棱镜扫描波前检测方法,是一种对传统五棱镜扫描法的优化方法,相比五棱镜扫描法波前检测方法,通过测量波前斜率的改变得到波前曲率的信息来重构波前。差分五棱镜扫描法以多一倍采样点数目的代价来消除五棱镜扫描法由于标定质心原点的不准确而带来的波前测量误差,从而提高高精度大口径平行光管由于光源位置的 Z 向离焦与 XY 平面倾斜所引起的离焦和倾斜的测量精度。实验和理论分析验证了该方法的可行性与可靠性,在保证检测要求的同时,该方法具有精度高、稳定性好、成本低、操作方便、制造工艺简单、无需辅助原件等特点,

对高精度大口径平行光管的装调和检测具有指导意义。

2 原理

2.1 五棱镜扫描法波前检测原理及其问题

五棱镜扫描方法是利用五棱镜把光线转折 90°的特性来检验平面波波前。该方法以 2 个五棱镜(参考镜固定,扫描镜可移动)为一组来测量波前斜率,在扫描方向上得到一维的波前斜率。根据 Shack-Hartmann 原理,利用差分法得到待测波前的波前斜率与探测器上质心位置的改变关系为^[7]:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = S_x = \frac{x_i - x_0}{F}, \quad (1)$$

式中, x_i 为采样点质心位置, x_0 为标定原点质心位置, F 为聚焦透镜焦距。原点位置 x_0 的准确性对实验结果起到了关键作用。但是对于五棱镜扫描波前传感器,很多因素会引起原点质心位置的偏移,其中包括探测器与五棱镜同心度误差,平行光与导轨平行度误差以及实验环境大气湍流和振动误差等^[8-9]。

2.2 差分五棱镜扫描法波前检测原理

传统的 Shack-Hartmann 波前传感器是通过测量波前斜率来重构波前,差分五棱镜扫描法则是通过测量波前曲率来重构波前。波前曲率是波面上任意部分的波前斜率的衍生量,可以在任意方向上进行计算。波前曲率可以由 Laplace 算子计算得出,即分别由在 x 方向和 y 方向的波阵面的二阶导数来计算^[10]:

$$\nabla^2 W(x, y) = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2}. \quad (2)$$

本方法在一维方向上对波前进行检测,可以独立得到测量路径上的波前曲率值,通过测量每个子孔径的波前斜率的改变,利用差分代替微分的思想,通过测量五棱镜移动前后斜率改变值来计算移动距离内的平均波前曲率,如图 1 所示,计

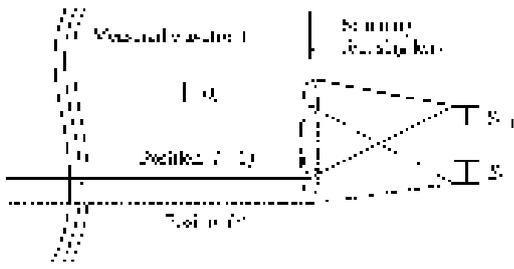


图 1 差分五棱镜扫描法波前检测原理示意图

Fig. 1 Scheme of differential pentaprism scanning wavefront detection

算出的波前曲率可以表示为:

$$c_i = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \Big|_i = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \Big|_i - \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{i-1} \right) / D_x = \left(\frac{x_i - x_{i0}}{F} - \frac{x_{i-1} - x_{(i-1)0}}{F} \right) / D_x, \quad (3)$$

式中, c_i 为波前曲率, D_x 为采样步长, $x_{i0}, x_{(i-1)0}$ 为第 i 和 $i-1$ 个数据的质心坐标。

由式(3)得出:

$$c_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{D_x F} - \frac{x_{i0} - x_{(i-1)0}}{D_x F}. \quad (4)$$

测量步长 D_x 可根据被测波前适当选取, 以避免采样不足造成精度下降的问题^[11]。同时由于整体测量过程非常短, 所以由实验环境产生的随机误差所导致的 x_0 的改变基本为 0, 即 $x_{i0} = x_{(i-1)0}$, 则式(3)可以简化为:

$$\frac{\partial W}{\partial x^2} = c_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{D_x F}, \quad (5)$$

通过实验可以得到 $\{x_i\}$, 从而得到波前曲率

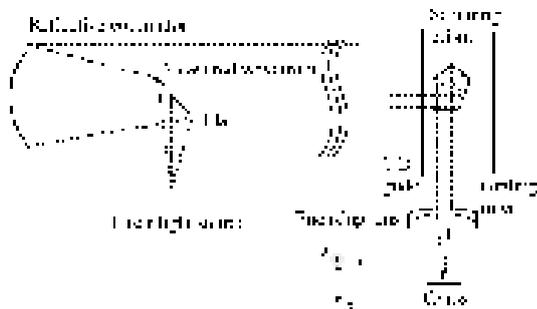


图 2 差分五棱镜扫描法波前检测实验原理图

Fig. 2 Experimental scheme of differential pentaprism scanning wavefront detection

c_i 和重构的一维波前函数 W 。图 2 为差分五棱镜

扫描法波前检测实验原理图。

2.3 差分五棱镜扫描法波前检测重构波前方法

差分五棱镜扫描波前重构方法主要有模式法和区域法, 本实验采用模式法重构波前。由于差分五棱镜扫描法波前探测器是在一维方向上采集波前信息, 无法采用圆域正交的 Zernike 多项式, 所以选用勒让德多项式重构波前, 本实验采用 10 阶勒让德多项式进行计算, 其空间频率级数对应 Zernike 前 35 项。

对于一组实验数据 $\{x_i, y_i\}$, x_i 和 y_i 分别是采用差分五棱镜扫描法波前传感器探测检测的波前一维导轨位置 x_i 和测量该位置的质心坐标 y_i 。由式(5)得:

$$c_i = \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{F} \right) / D_y. \quad (6)$$

设波前曲率为:

$$c_i = a_0 p_0(x) + a_1 p_1(x) + \dots + a_n p_n(x) = \sum_{i=0}^n a_i p_i(x), \quad (7)$$

式中, P 为勒让德正交多项式。由实验数据可得到:

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0(x_0) & p_1(x_0) & \dots & p_n(x_0) \\ p_0(x_1) & p_1(x_1) & \dots & p_n(x_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_0(x_n) & p_1(x_n) & \dots & p_n(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

即:

$$C = PA, \quad (9)$$

$$A = P^{-1}C, \quad (10)$$

将 A 代入 c_i 中, 求得 c_i 表达式 $\sum_{i=0}^n a_i p_i(x)$ 。

由式(5)得:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = c_i = \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{F} \right) / D_y = \sum_{i=10}^n [a_i p_i(x)]. \quad (11)$$

通过求解式(11)可求出来波前 W 。

但由于该重构算法采用波前二阶导数波前曲率经行重构波前, 会导致其对噪声更为敏感, 经过差分法波前重构, 使得噪声的级次向空间频率低的方向移动 2 个级次, 若噪声空间频率接近勒让德多项式拟合最高级次, 则会使其对低频波前拟

合造成影响。

3 差分五棱镜扫描法波前检测系统

差分五棱镜扫描波前检测方法是一种检测大口径平行光管像质的方法,为了验证该方法并为更大口径检测系统的研制提供可靠的理论和实验基础,实验室建立了 400 mm 差分五棱镜扫描法全自动检测系统。该系统是一套小型光机电一体化波前检测仪器,实验装调完成后,通过软件操作来控制实验的全过程,系统组成实物图如图 3 所示。

被检测系统为高精度反射式平行光管,光源发出波长为 546 nm 的可见光,通过反射式平行光管产生口径为 300 mm 的平行光,正入射到可沿精密一维导轨运动的五棱镜上,光线发生 90° 偏

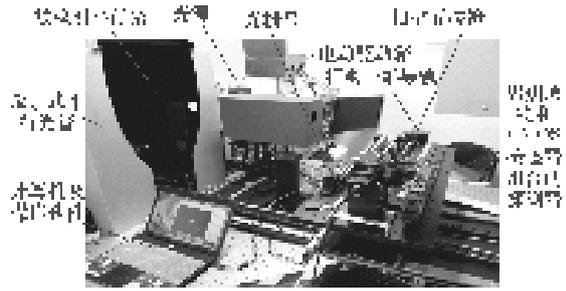


图 3 差分五棱镜扫描法波前检测系统

Fig. 3 Differential pentaprism scanning wavefront detection system

转,进入由聚焦透镜和 CMOS 传感器组成的探测器中,五棱镜位置由光栅尺精确读出。差分五棱镜扫描法波前检测系统主要参数由表 1 给出,平行光管出射波前将由差分五棱镜扫描波前传感器测量。

表 1 差分五棱镜扫描法波前检测系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of wavefront detection system

Wavelength		$\lambda = 546 \text{ nm}$
Focusing lens	Focal Length	$f = 100 \text{ mm}$
	Diameter	$d = 25.4 \text{ mm}$
Pentaprism aperture		$D = 10 \text{ mm}$
Cmos pixel size		pixel = 0.006 mm
Reflective collimator	Focal length	$F = 3\,000 \text{ mm}$
	Diameter	$D_{\text{flat}} = 300 \text{ mm}$
Rail length		$L = 400 \text{ mm}$
Airy disk radius of detector		$D_{\text{airy}} = 2.2204 \text{ pixel}$
Sensitivity		$\theta_{\text{min}} = 9 \times 10^{-6}$ (about 0.016λ)
Dynamic range		$\theta_{\text{max}} = 0.05$ (about 91.5λ)

4 误差分析

影响差分五棱镜扫描法波前测量精度主要因素包括以下 4 点:

(1) 质心探测误差

本实验采用基于模板匹配的探测窗口选取和基于单个光斑的自适应阈值选取的方法探测质心位置,该方法质心探测精度约为 0.15 pixel。对于方形孔径扫描中光斑质心探测误差 Δx 与对应采样点边缘处最大波前探测误差 ΔW 关系为^[12]:

$$\Delta W_1 = \frac{\Delta x \times D}{4\sqrt{3}f} = \frac{\Delta x}{4\sqrt{3}F^\#}, \quad (12)$$

由本实验参数可以得出质心探测不确定度为 $\sigma_1 = \Delta W_1 = 6.49 \text{ nm}$ 。

(2) 波前重构算法误差

设 $f(x) = C_i(x) \in C[a, b]$, 由式(6)得到离散点集 $\{x_i, c_i\}$ 给出,要求一个函数 $C^*(X)$ 与所给数据拟合,在勒让德多项式

$$P = \text{span}\{P_0(x), P_1(x), P_2(x), \dots, P_n(x)\}$$

正交多项式中,取

$$c_i = a_0 p_0(x) + a_1 p_1(x) + a_2 p_2(x) + \dots + a_n p_n(x)$$

使其误差平方和最小,即:

$$\| \varepsilon \|_2^2 = \sum_{i=0}^n [C^*(x) - f(x)]^2 = \min_{c(x) \in P} \sum_{i=0}^n [C(x) - f(x)]^2. \quad (13)$$

若 $C^*(x)$ 法方程的系数矩阵为非奇异对角矩阵,则其系数为:

$$a_i = [f(x), P_i(x)] / [P_i(x), P_i(x)] \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (14)$$

则 $f(x) \in C[-1, 1]$ 在勒让德多项式 P 中最佳逼近函数为:

$$C^*(x) = \sum_{i=0}^n a_i p_i(x) = \sum_{i=0}^n \frac{[f(x), P_i(x)]}{\|P_i(x)\|_2^2} p_i(x), \quad (15)$$

即可以求得:

$$a_i = \frac{(f(x), P_i(x))}{(P_i(x), P_i(x))} = \frac{2i+1}{2} \int_{-1}^1 a_i p_i(x) dx \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n, \quad (16)$$

其平方误差为:

$$\| \varepsilon(x) \|_2^2 = \| f(x) \|_2^2 - \sum_{i=0}^n \left[\frac{[f(x), P_i(x)]}{\|P_i(x)\|_2^2} \right]^2 = \int_{-1}^1 f^2(x) dx - \sum_{i=0}^n \frac{2}{2i+1} a_i^2, \quad (17)$$

且: $\lim_{n \rightarrow \infty} \| C^*(x) - f(x) \|_2^2 = 0$

$f(x)$ 若为光滑曲线,则 $C^*(x)$ 一致收敛于

$f(x)$ 。

并且对于任意 $x \in C[1, -1]$ 和 $\varepsilon \geq 0$, 当 n 足够大时:

$$\sigma_2 = | C^*(x) - f(x) | \leq \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

通过式(18)可得到曲线拟合最大误差,本实验采用 $n = 10$ 阶勒让德多项式拟合,则该重构算法波前最大误差为 $\sigma_2 = 1.286 \text{ nm}$ 。

由于本文通过波前曲率积分重构得到波前,可通过截断误差来估计积分重构误差,由于该波前曲率积分重构截断误差限为 13 阶小量,对空间频率为低频(Zernike 前 35 项,空间频率为 10 阶)的波前其误差可以忽略不计,若要反应中高频项信息,则需要增大勒让德多项式阶数,使其截断误差减小到可控范围内。

(3) 导轨运动误差

导轨运动误差主要为:由于导轨滑块在导轨移动过程中水平度的改变使得五棱镜有沿 x 轴和 z 轴的旋转,而引起的质心探测器上位置横向的改变;由导轨运动中由于直线度、光栅尺精度、导轨分辨率对实验定位精度造成的影响。由于本实验仅采集一维方向上数据,则引起探测器质心位置纵向偏离误差源不会影响本方法检测精度,具体情况见表 2(坐标系如图 2 所示)。

表 2 导轨运动误差对波前不确定度影响

Tab. 2 Impact of rail movement error on the the wavefront uncertainty

Error Sources	Error value	Wavefront error
Rotating the x -axis slider	$\theta_y < 5'$	$\sigma_3 = 3.31 \text{ nm}$
Rotating the z -axis slider	$\theta_z < 5'$	$\sigma_4 = 2.74 \text{ nm}$
Positioning accuracy	Straightness; $S_1 < 5 \mu\text{m}$	$\sigma_5 = 4.91 \text{ nm}$
	Grating resolution; $S_2 < 1 \mu\text{m}$	

(4) 环境误差

实验过程中由于大气湍流、空气折射率不均匀、温度、气压、实验抗震台的轻微震动等实验室环境误差,导致本方法产生波前误差,其波前不确定度估算为^[13]: $\sigma_6 = 5 \text{ nm}$ 。

(5) 系统误差和总体精度

本方法由于是通过波前斜率的改变来得到波前曲率,从而重构波前。因此该方法利用波前斜率相减可以消除引起每个波前斜率改变相同程度的部分系统误差,如五棱镜制造和面型误差、五棱镜位置误差、导轨与平行光管平行度误差等。

经过以上分析本方法总体精度为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2} = 10.54 \text{ nm}, \quad (23)$$

可以满足高精度平行光管波前检测精度,为评价高精度平行光管出射波面质量提供可靠理论依据。

5 实验结果与分析

利用建立的差分五棱镜扫描波前探测实验系统对平行光管进行了一系列检测实验。通过实验结果来验证差分法原理的可行性,通过对比差分法波前检测结果和则 Zygo 数字干涉仪检测结果说明该方法的准确性,以及对比五棱镜扫描法和差分法的重复性精度,和去倾斜和离焦测量结果的重复性精度,来说明差分法的优点及实验结果的可靠性。

5.1 差分五棱镜扫描法准确性对比分析

以 $D_x = 3.75 \text{ mm}$ 为步长,测量 80 个数据点得到的实验结果如图 4。

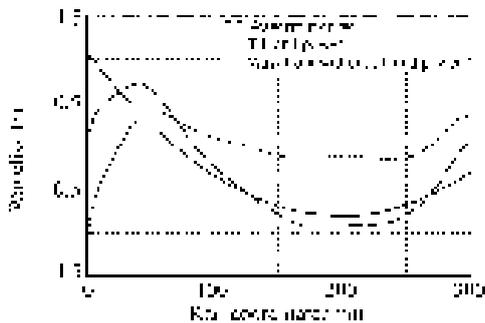


图 4 差分法实验结果数据及去倾斜和离焦后一维波前

Fig. 4 Result data of 1-D wavefront without tilt and power

图中差分法测量平行光管波前(长虚线) $PV_1 = 146.87 \text{ nm}$ (0.269λ)、 $RMS_1 = 68.80 \text{ nm}$ (0.126λ),去除倾斜和离焦(实线)后得到平行光管出射波前(短虚线) $PV_2 = 119.57 \text{ nm}$ (0.219λ)、 $RMS_2 = 19.65 \text{ nm}$ (0.036λ)。

为了验证差分五棱镜扫描法检测结果的正确性,将它和 Zygo 干涉测量结果进行对比。Zygo 干涉测量中补偿器的设计满足公差要求,并经过严格的装配和标定,其前后两个面的面形 RMS 分别优于 $\lambda/60$ 、 $\lambda/100$,因此可以认为该检测结果准确

可靠。

图 5 为 Zygo 干涉仪检测测量结果,其面型 PV 和 RMS (去倾斜和离焦) 分别为: 0.231λ 和 0.036λ 。在面型结果上取差分法波前扫描一维路径上波面信息,其 PV 和 RMS 分别为 0.214λ 和 0.036λ 。由图 4 可知,差分五棱镜扫描法波前检测 PV 和 RMS (去倾斜和离焦) 结果分别为 0.219λ 和 0.036λ 。两种方法检测结果 PV 值相差 0.005λ ,RMS 值相同,且从图 4 和图 5 比较可知,去倾斜和离焦后的波前检测曲线分布基本一致。从而证明了差分五棱镜扫描法波前检测的准确性,以及理论误差分析是正确的。

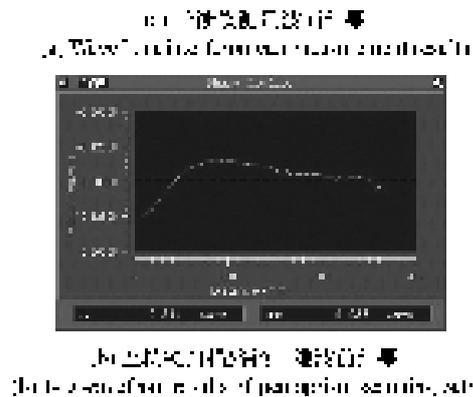
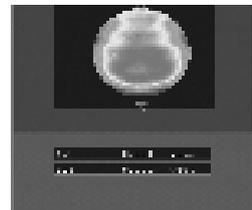


图 5 zygo 干涉仪波前检测结果

Fig. 5 Result data with zygo interferometer

5.2 差分五棱镜扫描法重复性结果分析

分别用五棱镜扫描法和差分法进行 40 次重复测量得到的 PV、RMS 值以及去倾斜和离焦后 PV、RMS 值的平均值和方差由图 6 和表 3 给出。

由图 6 和表 3 可以看出,与五棱镜扫描法相比较,差分法在重复性精度上有明显提高,在 PV 和 RMS 的标准差上分别提高了 74.41% 和 125.81%。在去倾斜和离焦后,两种方法基本保持了相同的重复精度,PV 和 RMS 标准差分别为 0.0043λ 和 0.0011λ 。可见,差分法由于消除了

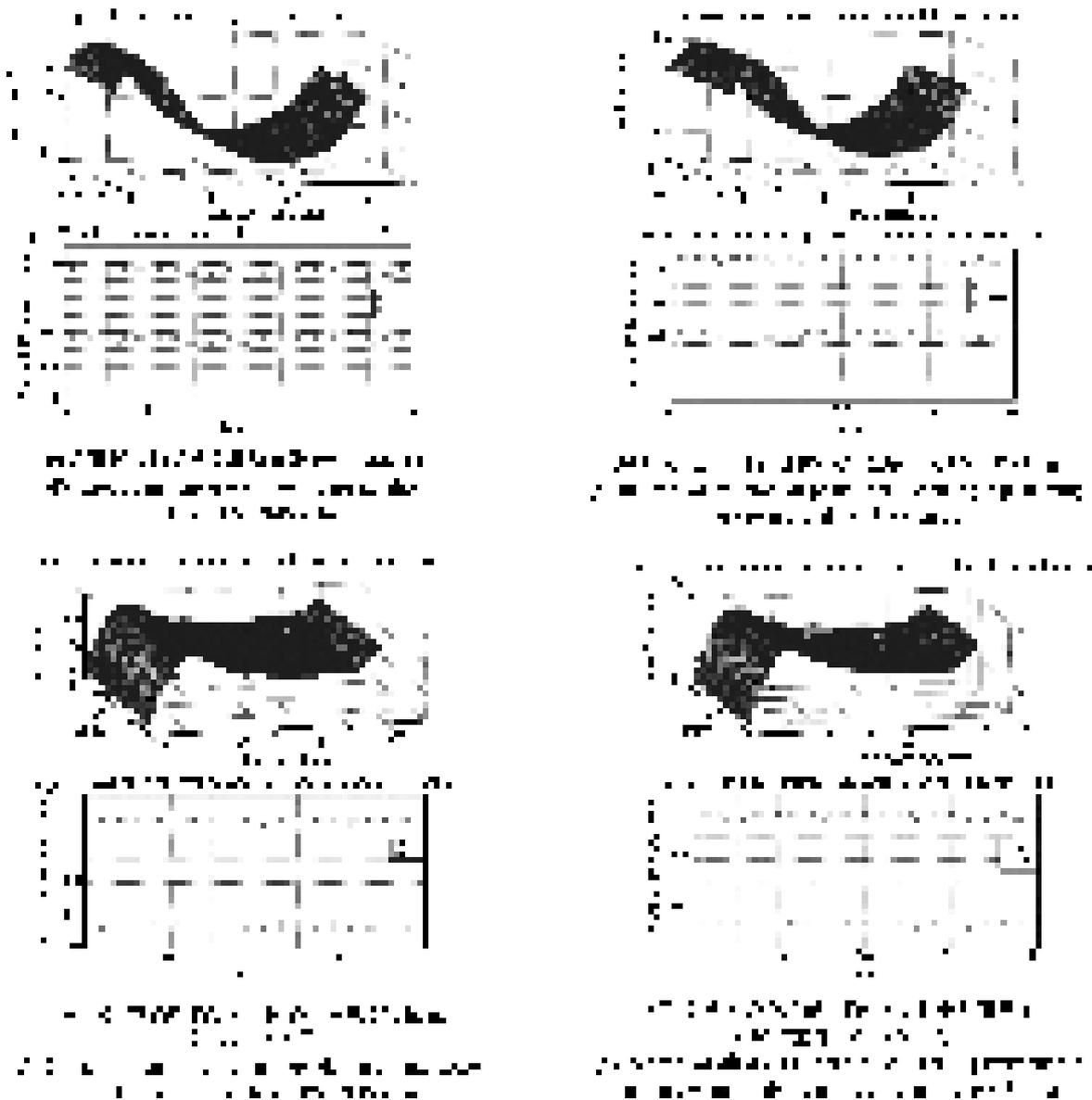


图6 重复性实验结果

Fig. 6 Repeatability results

表3 重复性实验 PV、RMS 值统计结果

Tab.3 Statistics results of the PV、RMS values in repeatability experiments

	PV value(w/λ)		RMS value(w/λ)	
	Average value	Standard deviation	Average value	Standard deviation
a	0.276 2	0.007 5	0.132 0	0.007 0
b	0.269 7	0.004 3	0.125 5	0.003 1
c	0.216 6	0.004 2	0.036 4	0.001 1
d	0.218 4	0.004 3	0.036 8	0.001 1

注: $\lambda = 546 \text{ nm}$.

五棱镜扫描法由于质心标定不准确所引起的倾斜和离焦误差,使得测量结果重复性精度提高,理论分析和实验结果得到了相互印证。而未去倾斜和离焦时得到的高重复性精度,对高精度平行光管光源位置的 Z 向离焦 ($\Delta\text{defocus}$) 与 XY 平面倾斜 ($\Delta\text{tilt} - x$ 和 $\Delta\text{tilt} - y$) 引起的离焦和倾斜的调整具有重要意义。由于实验过程中存在导轨水平度误差、测量过程中抗震台的轻微震动以及质心探测误差等因素导致测量精度无法继续提高,因此可以采用震动滤波算法和更精确的质心探测方法

来提高差分法的测量精度。

6 结 论

本文提出了一种差分五棱镜扫描波前检测方法来测量高精度大口径平行光管的波前,该方法通过测量波前曲率来重构波前,以多一倍采样点数目的代价来消除五棱镜扫描法由于标定质心原点的不准确而带来的波前测量误差。差分五棱镜扫描波前检测方法不仅包含五棱镜扫描法所具有

的成本低、操作方便、制造工艺简单、无需辅助原件、探测精度高等特点,还减少了五棱镜扫描法引入的倾斜和离焦的误差量,从而提高了高精度大口径平行光管由于光源位置的 Z 向离焦与 XY 平面倾斜而引起离焦和倾斜的测量精度。实验结果和理论分析表明,该方法检测精度可达 10.54 nm,并且相比于五棱镜扫描法分别在波面 PV 和 RMS 的重复性精度上提高了 74.41% 和 125.81%。

参考文献:

- [1] 王建立,刘欣悦. 智能光学的概念及发展[J]. 中国光学,2013,6(4):437-448.
WANG J L,LIU X Y. Concept and development of smart optics[J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):437-448(in Chinese)
- [2] 田园,韩昌元,马冬梅,等. 大型平行光管像质实时监测的可行性论证[J]. 光电工程,2010,37(4):48-52.
TIAN Y,HAN CH Y,MA D M,*et al.*. Feasibility of real-time monitoring for large-scale collimator[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2010,37(4):48-52. (in Chinese)
- [3] PLATT B C,SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *J. Refractive Surgery*,2001,17(5):573-577.
- [4] 汤国茂,何玉梅,廖周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法[J]. 中国激光,2010,37(3):795-799.
TANG G M,HE Y M,LIAO ZH. Radial hartmann method for measuring large optical system[J]. *Chinese J. Lasers*,2010,37(3):795-799 (in Chinese)
- [5] 朱咸昌,伍凡,曹学东. 基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的微透镜阵列焦距测量[J]. 光学精密工程,2013,21(5):1121~1128.
ZHU X CH,WU F,CAO X D. Focal length measurement of microlens-array based on wavefront testing principle of Hartmann-Shack sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(5):1121-1128. (in Chinese)
- [6] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学,2012,5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*,2012,5(4):327-336(in Chinese)
- [7] VINNA L,HSIANG-CHUN. Shack-Hartmann wavefront sensor with high sensitivity by using long focal length microlens array[J]. *SPIE*,2011,8165:81650V-1~81650V-9.
- [8] 马冬梅,韩昌元. 基于五棱镜扫描技术测试大口径平面镜的系统设计[J]. 电子测量技术,2007,30(11):90-95.
MA D M,HAN CH Y. System design of large flat mirror measurement based on Pentagon prism scanning technique[J]. *Electronic Measurement Technology*,2007,30(11):90-95 (in Chinese)
- [9] 常山,曹益平,陈永权. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响[J]. 光学仪器,2005,27(3):12-16.
CHANG SH,CAO Y P,CHEN Y Q. Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measurement[J]. *Optical Instruments*,2005,27(3):12-16. (in Chinese)
- [10] WEI YAO ZHAOU,JANNICK ROLLAND. Differential wavefront curvature sensor[J]. *SPIE*,2005,5869:17-1-17-8.
- [11] 陈红丽,饶长辉. 根据远场光斑确定夏克-哈特曼传感器采样率的一种方法[J]. 光学学报,2009,29(5):1137-1142.
CHENG H L,RAO CH H. A Method on the decision of resolution of Shack-Hartman sensor according to far-field spot [J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(5):1137-1142. (in Chinese)
- [12] PENG SU,YANG YU,QIUDONG ZHU,*et al.*. A self referenced Hartmann testing-radial slope testing[J]. *SPIE*,2002,4926:140~145.

- [13] 刘兆栋,于丽娜,韩志刚. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前[J]. 中国激光,2010,37(4):1082-1087.

LIU ZH D, YU L N, HAN, ZH G, *et al.*. Measurement of the wavefront collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(4): 1082-1087. (in Chinese)

作者简介:



汤兆鑫(1989—),男,辽宁大连人,硕士研究生,2008年于兰州大学获得学士学位,主要从事光学设计与波像差检测,哈特曼波前探测器等方面的研究。E-mail: tangzhx08@126.com



刘立峰(1975—),男,吉林长春人,博士,副研究员,1998年于吉林大学获得学士学位,2003年、2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光谱分析、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail: liulf@cnilaser.com



黄玮(1965—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获得学士学位,1986年于中国科学院长春物理研究所获得硕士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn



徐象如(1989—),男,河南人,博士研究生,2008年于兰州大学获得学士学位,主要从事光学设计与偏振像差方面的研究。E-mail: xuxr08@lzu.cn



许伟才(1984—),男,湖北武汉人,副研究员,2006年于武汉大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事深紫外光学系统设计方面的研究。E-mail: xuweicaixx@163.com