扫描哈特曼波前检测技术的误差分析研究

张 昊[1,2] 闫 锋[1] 魏海松[1,2] 陈新东[1] 程 强[1]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

[2]中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以斜率检测的面形重构算法为基础,结合导轨指向误差的实验标定结果,分析了导轨指向误差来源对实际检测结果的影响,并对理论分析进行了数值仿真与补偿。结果表明,基于扫描哈特曼原理的波前检测技术对高频误差不敏感;通过拟合低频误差可提高波前检测精度。该研究结果对波前检测技术的工程应用具有重要指导意义。

关键词 测量; 哈特曼原理; 斜率检测; 波前检测; 误差分析

中图分类号 O439; TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.111203

Error Analysis of Scanning Hartmann Wavefront Testing Technique

Zhang Hao[1,2] Yan Feng[1] Wei Haisong[1,2] Chen Xindong[1] Cheng Qiang[1]

[1] *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract Based on the surface shape reconstruction algorithm for slope detection in combination with the calibration results of the guideway pointing errors, the influence of the sources of these errors on the actual test results is analyzed and the corresponding numerical simulation and compensation are conducted for the theoretical analysis. The results show that the wavefront testing technique method based on the scanning Hartmann principle is not sensitive to the high-frequency errors, and the wavefront testing accuracy can be improved by fitting to the low-frequency errors. This finding has an important guiding significance in the engineering application of wavefront testing technique.

Key words measurement; Hartmann principle; slope detection; wavefront testing; error analysis

OCIS codes 120.4820; 220.4840; 120.5800

1 引 言

随着人们对光学系统分辨率和成像质量要求的大幅度提升,新一代光学系统的口径不断增大[1],这大大增加了大口径光学系统波前检测的难度[2-3]。传统的大口径光学系统检测技术通常利用高精度的大口径标准元件,因此其在待检设备口径不断增大、精度要求不断提高的趋势下面临技术瓶颈[4]。为降低检测成本、突破传统检测技术的口径限制,一种基于哈特曼原理的小口径单元扫描的检测方式受到广泛关注[5-8]。与传统的哈特曼检测方式相比,该检测方式无需使用哈特曼屏或微透镜阵列。在二维导轨带动下,小口径平行光管按照特定轨迹扫描遍历待检波前的全口径,将采样结果转化为波前斜率数据,从而得到实际待检波前信息[9]。制约扫描检测技术精度的误差源包括采样密度选取、扫描子孔径尺寸、子孔径内光强分布和扫描单元

收稿日期: 2016-08-01; **收到修改稿日期**: 2016-08-04; **网络出版日期**: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505205)

作者简介: 张 昊(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学加工、检测方面的研究。E-mail: zhanghao_nk@126.com

导师简介: 闫 锋(1981—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事光学加工与检测方面的研究。

E-mail: yanfeng@ciomp.ac.cn(**通信联系人**)

指向误差等。其中指向误差对检测技术的实际应用至关重要，是目前扫描技术发展受限的主要原因之一，其余三者对检测精度的影响主要表现为孔径滤波效应，对系统像差的影响较小。

本文基于扫描检测的基本原理，对指向误差的影响因素进行了理论分析，并根据仿真结果进行了导轨标定补偿实验。补偿结果表明，低频误差产生的影响能得到很好的抑制，而高频残差对检测技术的精度影响较小，该补偿结果满足工程要求。

2 波前解算原理与误差

2.1 扫描哈特曼检测原理与算法

与传统的哈特曼检测技术不同，扫描哈特曼斜率检测技术是利用小孔径扫描单元的运动扫描过程来实现全口径的采样，按采样轨迹逐次获得对应子孔径的实际像斑。在实际检测工作中，常采用平行光管进行扫描，其检测光路示意图如图 1 所示，其中 PM 为系统主镜，SM 为系统次镜，TM 为系统三镜。小口径平行光管以扫描方式遍历系统通光口径，并分别成像于电荷耦合器件(CCD)屏幕上，CCD 记录光斑用于波前解算。由于扫描哈特曼技术可以直接利用系统 CCD 进行数据存储，因此其更适合于组装完成的光学系统的波像差检测。

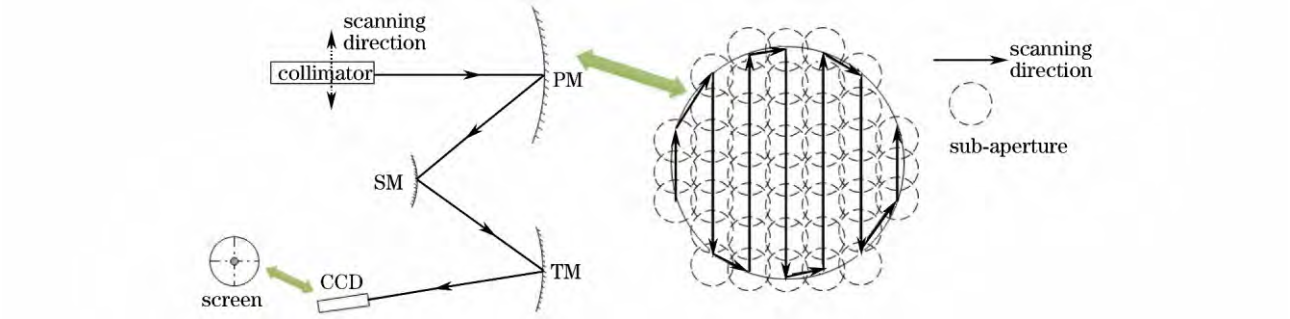


图 1 平行光管扫描检测离轴三反系统光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical paths in off-axis three-mirror anastigmatic system with scanning collimator testing

存储每个扫描点对应的实际像斑，进行波前解算。解算流程如图 2 所示[10-12]。

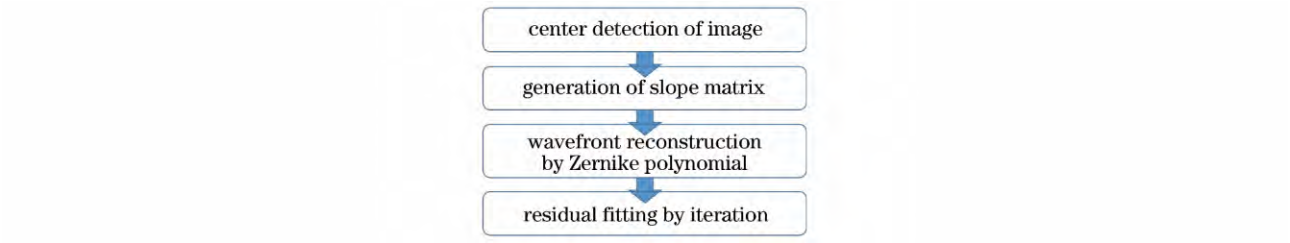


图 2 波前解算流程图

Fig. 2 Flow chart of wavefront reconstruction

以二维运动导轨的水平和竖直方向为 x 轴和 y 轴方向，质心提取的常见算法为

$$\begin{cases}\dfrac{1}{s}\iint_s \dfrac{\partial W(x,y)}{\partial x}\mathrm{d}x\mathrm{d}y = K_x = \dfrac{\Delta x}{f}\\ \dfrac{1}{s}\iint_s \dfrac{\partial W(x,y)}{\partial y}\mathrm{d}x\mathrm{d}y = K_y = \dfrac{\Delta y}{f}\end{cases},\tag{1}$$

式中 S 为扫描单元对应的子口径区域，$W(x,y)$ 为实际波前的相位函数，K_x，K_y 分别为实际波前在 x，y 方向的平均斜率，Δx，Δy 分别为实际像斑在 x，y 方向的偏移量，f 为焦距。对于利用平行光管扫描检测波前的技术，f 为待检光学系统的焦距；对于利用自准直仪检测平面波前的技术，f 为自准直仪焦距。通过对每个扫描点的光斑质心提取，结合由斜率解算波前的重构算法，即可还原待检波前的面形信息。扫描过程中光斑的偏移情况如图 3 所示。

离散化后的质心提取公式为

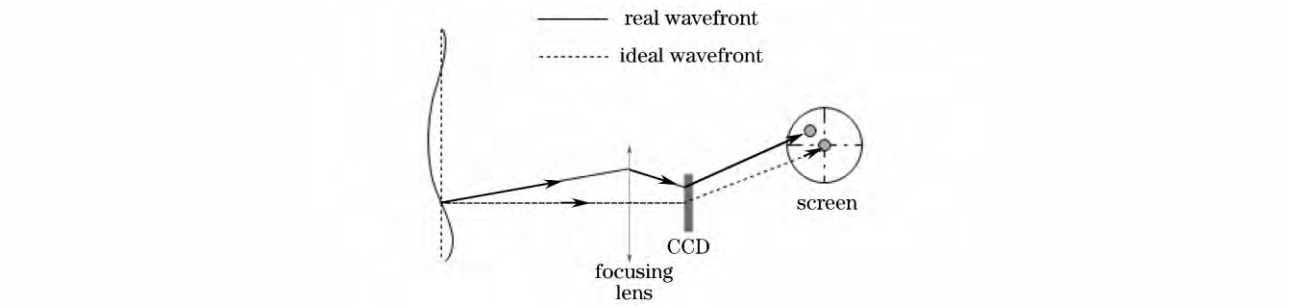


图 3 斜率检测光斑质心偏移示意图

Fig. 3 Schematic diagram for testing spot centroid offsets based on slope measurement

$$\begin{cases} x_c = \left(\sum\limits_{i=x_0-\frac{D_x}{2}}^{x_0+\frac{D_x}{2}}\sum\limits_{j=y_0-\frac{D_y}{2}}^{y_0+\frac{D_y}{2}} x_i I_{ij}\right)\Big/\left(\sum\limits_{i=x_0-\frac{D_x}{2}}^{x_0+\frac{D_x}{2}}\sum\limits_{j=y_0-\frac{D_y}{2}}^{y_0+\frac{D_y}{2}} I_{ij}\right) \\ y_c = \left(\sum\limits_{i=x_0-\frac{D_x}{2}}^{x_0+\frac{D_x}{2}}\sum\limits_{j=y_0-\frac{D_y}{2}}^{y_0+\frac{D_y}{2}} y_j I_{ij}\right)\Big/\left(\sum\limits_{i=x_0-\frac{D_x}{2}}^{x_0+\frac{D_x}{2}}\sum\limits_{j=y_0-\frac{D_y}{2}}^{y_0+\frac{D_y}{2}} I_{ij}\right) \end{cases}, \tag{2}$$

式中 (x_c, y_c) 为质心坐标，(x_0, y_0) 为 CCD 屏幕中央像元坐标，x_i、y_j 为 x、y 方向上第 i、j 个点对应的坐标，D_x、D_y 为光斑在 x、y 方向上的像素数，I_{ij} 为特定像素的灰度值。

该算法对实际检测过程中的各种常见信号噪声（如光电噪声等）比较敏感，可通过设置阈值或增加权重因子来减小噪声对质心提取精度的影响[13-14]。

波前重构主要通过模式法对低阶项进行拟合，即利用一组正交多项式的线性组合来描述空间中的特定波前分布[15-17]。在光学检测技术中，一般采用 Zernike 多项式进行拟合。以 $\boldsymbol{Z}$ 表示 Zernike 多项式在点 (x, y) 处的偏导数矩阵，$\boldsymbol{C}$ 表示对应的系数矩阵，则斜率矩阵为

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{Z}\boldsymbol{C}, \tag{3}$$

由最小二乘法解算系数矩阵 $\boldsymbol{C}$，即在等式两端乘以 $\boldsymbol{Z}$ 的转置矩阵 $\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}$：

$$\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K} = \boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{C}, \tag{4}$$

因此系数矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{C} = (\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z})^{-1}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}。 \tag{5}$$

斜率矩阵和原始波前的系数矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的数值是相同的，故(5)式给出的系数矩阵可直接代入 Zernike 多项式进行波前重构。

高阶的拟合残差可采用迭代的方式拟合。残差包含大量噪声信息，可用于探究误差源对检测精度的影响。

2.2 扫描哈特曼检测技术误差分析

质心提取算法难以完全消除的误差源包括背景噪声、光电噪声以及离散采样误差等，其幅值较小，且为随机分布，对检测精度影响不大。波前重构算法中存在拟合残差，主要受多项式的阶次及边缘数据的影响。扫描过程的单元指向误差与实验条件密切相关，可影响解算得到的波前低阶像差，直接决定检测技术的精度。

除震动等导致的随机指向误差之外，扫描过程的指向误差主要指扫描系统的导轨直线度缺陷引入的系统误差，其对检测光路的影响如图 4 所示。对于米量级的导轨而言，指向误差的峰谷（f_{PV}）值达到数十甚至上百角秒。指向误差的影响体现在子孔径偏差、视场偏差和光斑质心的直接偏移三个方面。子孔径偏差是非直线扫描线引起的子孔径中心偏离量。系统主镜上的子孔径偏离量与指向角偏离量的关系为

$$\begin{cases} \Delta x_{\mathrm{PM}} = D \cdot \Delta\theta_x \\ \Delta y_{\mathrm{PM}} = D \cdot \Delta\theta_y \end{cases}, \tag{6}$$

式中 D 为扫描单元到主镜的距离，Δx_{PM}、Δy_{PM} 为 x、y 方向上的子孔径偏离量，$\Delta\theta_x$、$\Delta\theta_y$ 为 x、y 方向上的指向角偏离量。在实际检测光路中，D 一般不超过 1 m。在 $30''$ 的指向误差情况下，子孔径最大偏移量约为 0.14 mm，远小于扫描步长（约为 6.3 mm），此项误差可近似略去。对于一般待检光学系统而言，其有效视场

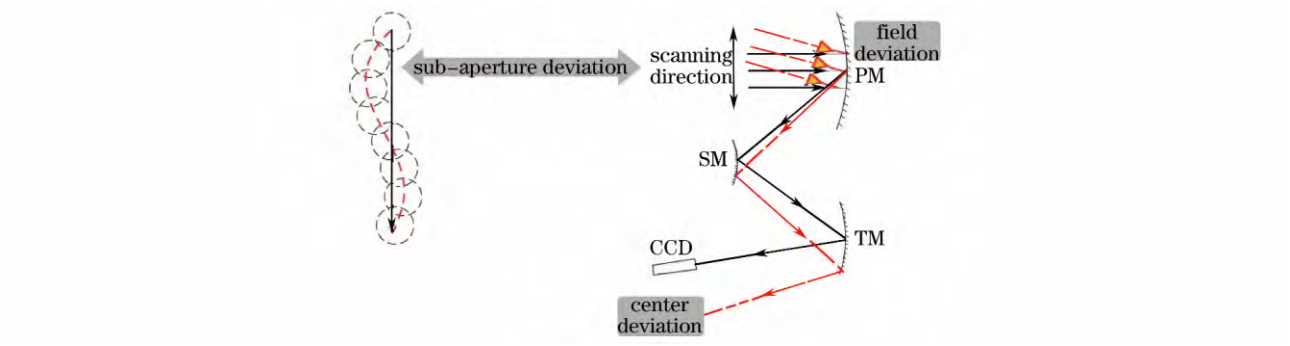


图 4 扫描检测单元指向误差影响示意图

Fig. 4 Schematic diagram of influence of pointing error in scanning testing unit

角不小于 1°,指向误差产生的视场偏差所导致的检测波前差异微乎其微。

光斑质心的直接偏移更为重要,其可能由随机指向误差和导轨系统误差共同引入。偏移量对检测结果的影响如图 5 所示。

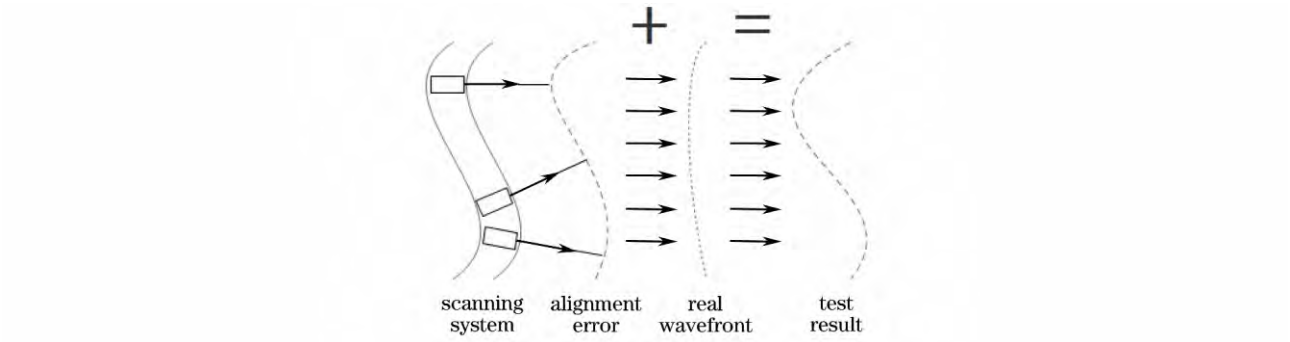


图 5 质心偏移对检测结果的影响

Fig. 5 Influence of centroid offsets on testing results

实际检测中任意采样点的波前斜率表达式为

$$\begin{cases} K_{x,\mathrm{test}} = K_{x,\mathrm{wave}} + K_{x,\mathrm{rail}} + K_{x,\mathrm{random}} = \dfrac{\Delta x}{f} \\ K_{y,\mathrm{test}} = K_{y,\mathrm{wave}} + K_{y,\mathrm{rail}} + K_{y,\mathrm{random}} = \dfrac{\Delta y}{f} \end{cases}, \tag{7}$$

式中 $K_{x,\mathrm{test}}$ 和 $K_{y,\mathrm{test}}$ 为检测得到的 x、y 方向的波前斜率,$K_{x,\mathrm{wave}}$ 和 $K_{y,\mathrm{wave}}$ 为待检光学系统实际波前像差在扫描子口径处的 x、y 方向的波前斜率,$K_{x,\mathrm{rail}}$ 和 $K_{y,\mathrm{rail}}$ 为导轨在扫描点处的 x、y 方向的波前斜率,$K_{x,\mathrm{random}}$ 和 $K_{y,\mathrm{random}}$ 为随机误差引入的 x、y 方向的波前斜率。不难看出,随机指向误差和导轨系统误差的影响线性传递到斜率矩阵中,且直接体现在光斑位置上,光斑质心算法的优化过程无法消除其影响。由于待检系统像质较高,经过系统焦距放大的指向误差对其产生的影响往往很大。

由(7)式可知,对于理想的平面波前,光斑质心的偏移由导轨自身误差和随机指向误差构成,且满足

$$\begin{cases} \Delta x = (K_{x,\mathrm{rail}} + K_{x,\mathrm{random}}) \cdot f \\ \Delta y = (K_{y,\mathrm{rail}} + K_{y,\mathrm{random}}) \cdot f \end{cases}. \tag{8}$$

对于以 CCD 作为信号接收器的扫描哈特曼检测技术而言,f 为待检系统焦距。由此可知,对于焦距为 2000 mm 的待检系统和像元尺寸为 5 μm×5 μm 的 CCD,30″指向误差产生了约 60 pixel 的光斑质心偏移,严重影响了检测精度。

3 误差分析仿真与标定

3.1 波前重构算法精度分析

首先针对一离轴三反系统分析算法精度。小孔径平行光管沿图 1 所示的轨迹对待检系统的全口径进行

采样，平行光经系统反射后在 CCD 上成像。待检系统入瞳口径为 200 mm，焦距为 2000 mm，平行光管口径为 20 mm。待检系统的实际像差信息如图 6(a)所示，波前像差的均方根为 $f_{\mathrm{RMS}}=0.050\lambda$（入射光波长 $\lambda=632.8$ nm）。此处所有波前图中的 f_{RMS} 值与 f_{PV} 值均以 $\lambda=632.8$ nm 为单位。

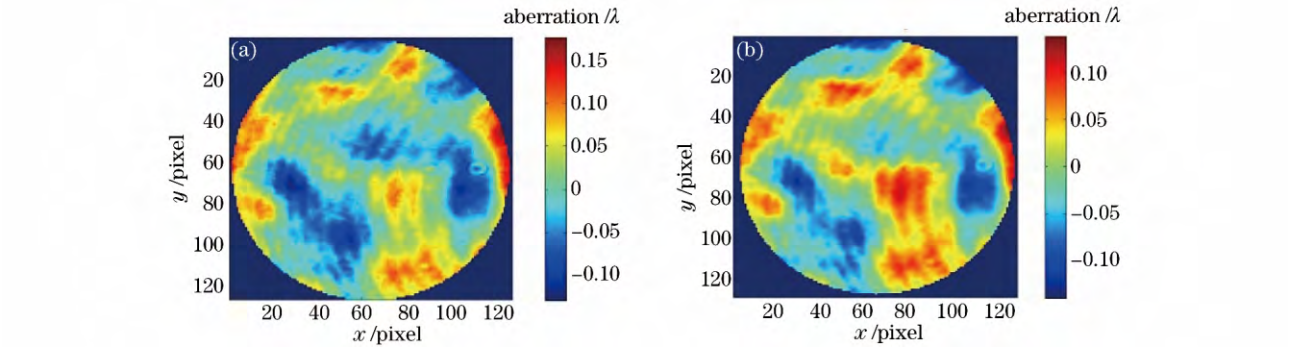


图 6 系统像差。(a)实际像差信息；(b) 直接进行斜率拟合的像差信息

Fig. 6 System aberration. (a) Actual aberration information; (b) aberration information by direct slope fitting

对图 6(a)中的波前信息直接求斜率矩阵，并反演波前得到图 6(b)所示的结果，图中 f_{RMS} 约为 0.047λ，f_{PV} 约为 0.277λ。此时有效采样密度与实际波前信息相同，可利用其直接进行迭代计算以减小重构误差和图 6(a)中的像差。对比可知，波前重构算法具有较高的精度，可满足实际检测需求。实际检测过程与仿真的区别主要体现在扫描孔径的滤波效应上。在实际检测过程中，利用相邻的圆域通光孔径可得到每个采样点的斜率信息，这个过程本质上是一个圆形孔径的低通滤波过程。基于此，进一步对图 6(a)中的结果进行低通滤波处理，得到平滑处理后的波前图如图 7(a)所示。选取的低通滤波口径与仿真检测采取的口径相同。与图 6(a)中的原始像差相比，图 7(a)中的高阶信息明显减少。滤波后的波前 $f_{\mathrm{RMS}}\approx0.0344\lambda$。

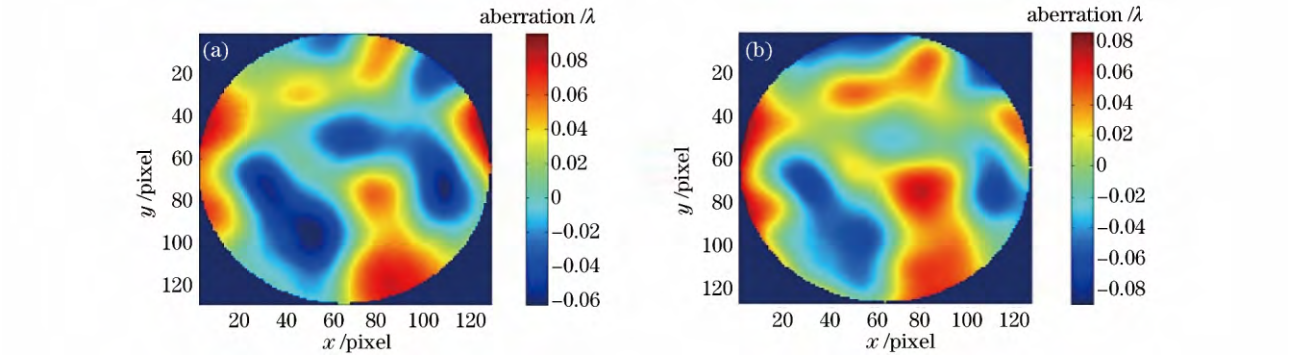


图 7 滤波后的系统像差图。(a)实际像差滤波结果；(b) 无误差源模拟结果

Fig. 7 System aberration map after filtering. (a) Actual aberration result after filtering; (b) simulation result without error sources

图 7(b)为基于扫描平行光管原理的仿真检测结果，采样密度设置为 127×127。仿真检测结果去除了离焦项和倾斜项，其低阶像差形式与图 7(a)基本相同，波前 $f_{\mathrm{RMS}}\approx0.0342\lambda$。定义检测技术相对误差为仿真检测波前 f_{RMS} 值与经过低通滤波后的系统实际波像差 f_{RMS} 的相对差异，即

$$\delta_{\mathrm{r}}=\left|\frac{f_{\mathrm{RMS,simulation}}-f_{\mathrm{RMS,ideal}}}{f_{\mathrm{RMS,ideal}}}\right|\times100\%, \tag{9}$$

式中 δ_{r} 为相对误差，$f_{\mathrm{RMS,simulation}}$ 为仿真检测结果的像差均方根值，$f_{\mathrm{RMS,ideal}}$ 为理想像差滤波结果的像差均方根值。以实际像差滤波结果的像差均方根值作为相对误差的参考真值。对于无误差源情况的仿真检测结果，相对误差约为 0.6%。仿真检测理想地还原了待检系统实际波前像差的低阶信息，相对误差较小，表明波前重构算法和质心提取算法的精度满足实际工程要求。

3.2 扫描单元随机指向误差的仿真

指向误差可以分为随机误差和有重复性的导轨直线度误差。对于随机误差，可假设其在两个扫描方向上均随机出现，且幅值满足

$$\begin{cases}\Delta\theta_{x,\max} = 2'' \\ \Delta\theta_{y,\max} = 2''\end{cases}。 \tag{10}$$

幅值选取的主要考虑因素包括实际检测技术实现难度和待检系统自身像差信息。在实验室条件下，对米量级行程的二维导轨系统，两个方向在扫描全程中的指向误差的重复定位精度达到 2″是可以实现的。对于选取的待检系统，如此大幅度的随机误差对斜率矩阵的影响相当明显。引入随机误差前后的斜率矩阵如图 8 所示。可以看到，在噪声的影响下，几乎已经无法辨认斜率矩阵自身的信息。在此基础上引入波前重构算法并进行模拟检测。

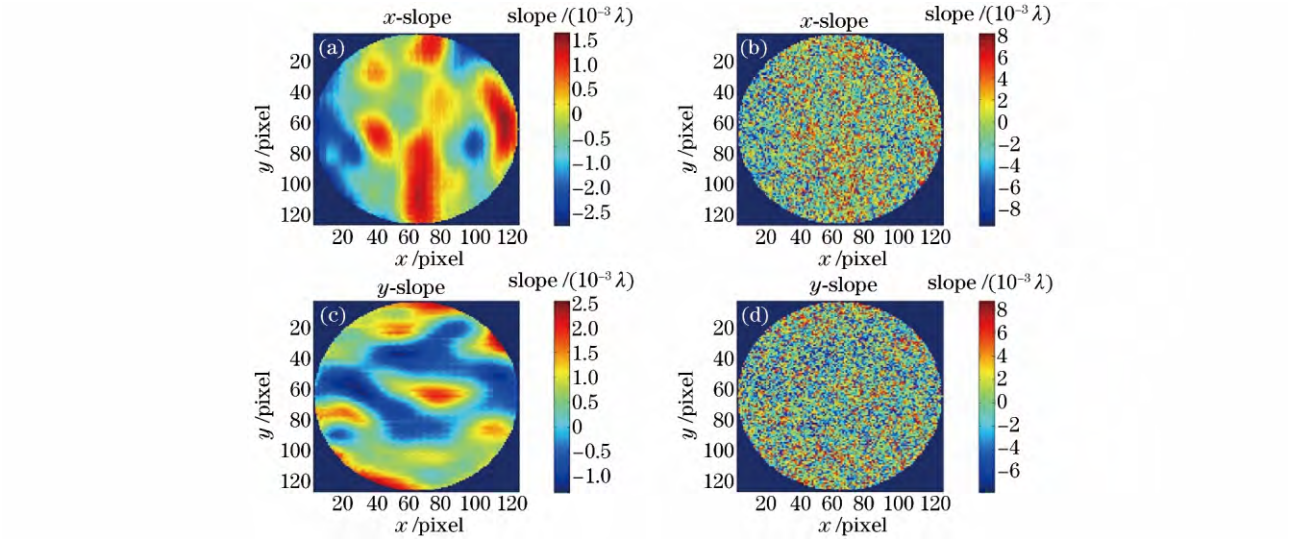


图 8 斜率矩阵的变化。(a)(c)理想情况下的斜率矩阵；(b)(d) 加入随机误差后的斜率矩阵

Fig. 8 Variation of slope matrix. (a)(c) Ideal slope matrix; (b)(d) slope matrix with random errors

模拟检测结果如图 9(a)所示。尽管随机误差的幅度已经完全湮没有效像差信息，仿真结果依然令人满意。与图 7(b)中给出的仿真结果相比，低阶面形特征并无太大差别，验证了随机误差对检测技术的影响主要是以高阶形式出现的理论。引入 2″随机误差后的波前像差均方根值约为 0.035λ，与滤波后的系统实际像差相比，相对误差约为 1.7%，表明此时的低阶像差检测精度依然满足实际工程要求。图 9(b)所示为低阶拟合残差，f_{RMS} 值约为 0.008λ，分布形式杂乱，几乎不包含低阶像差信息。由此可知，对于无规则的噪声信息，即使其幅值较大，依然不会对检测精度产生太大影响，检测技术对于实际条件的震动与气流等影响并不敏感。

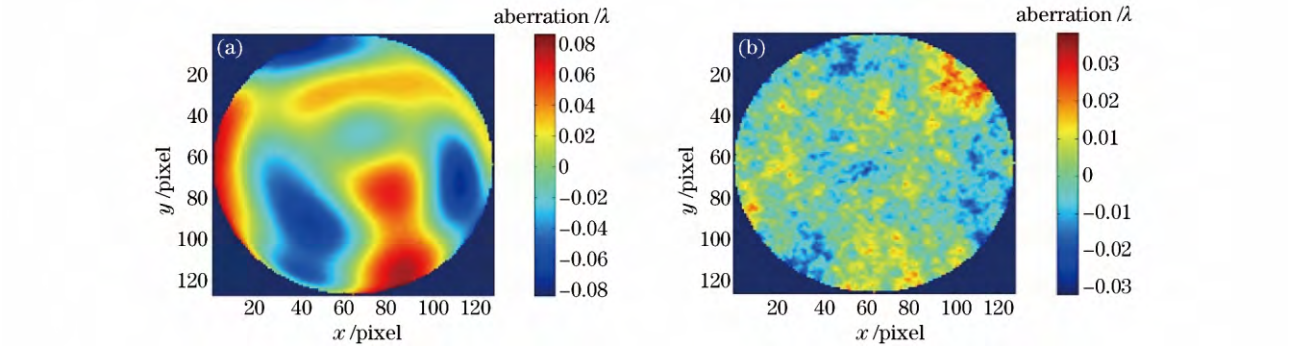


图 9 加入随机误差的仿真结果。(a)随机误差为 2″时的模拟结果；(b)低阶拟合残差

Fig. 9 Simulation results with random errors. (a) Simulation results when random error is 2″; (b) residual errors in low-order fitting

3.3 导轨直线度引入的指向误差仿真

二维平动导轨可近似为两根互相垂直的导轨(以下分别称水平与垂直导轨为 x、y 导轨),在扫描过程中独立引入各自具有重复性的指向误差。单条导轨的指向误差可由自准直仪等设备辅助标定,包含不同空间频率分量,其中空间频率较低的分量以单一低阶像差的形式影响检测结果。对于线性导轨指向误差,其在检测结果中表现为像散像差。设置 x、y 方向的线性指向偏差系数分别为 0.5″和 0.3″,仿真检测结果如图 10 所示。

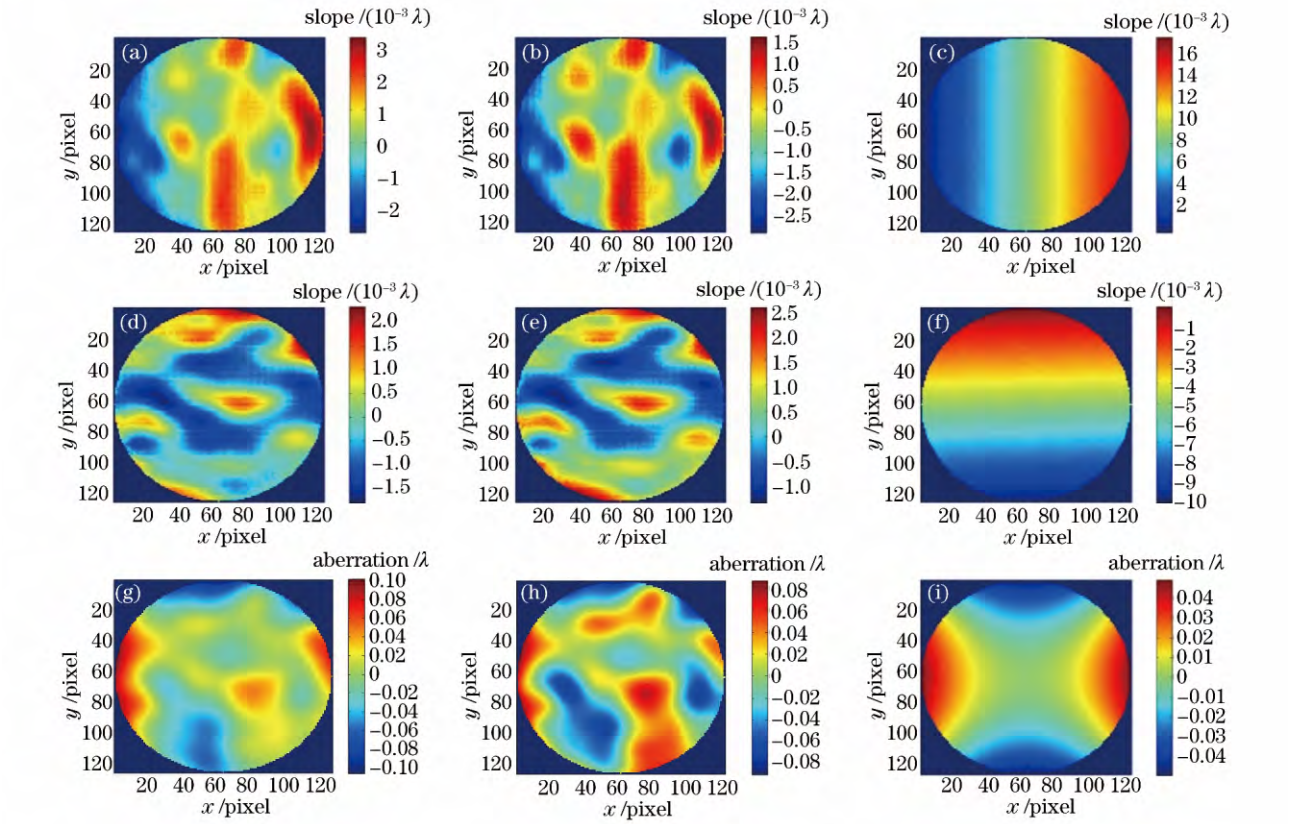


图 10 加入线性指向误差的仿真结果与理想值。(a)(d)(g) 加入误差后的仿真结果;(b)(e)(h) 理想值;(c)(f)(i) 二者之差

Fig. 10 Ideal results and simulation results with linear pointing errors. (a)(d)(g) Simulation results with linear errors; (b)(e)(h) ideal results; (c)(f)(i) difference between these two kind of results

当选取的幅值系数远小于系统自身像差信息时,很难直接从斜率图中观察到检测结果差异。代入波前重构算法,去掉拟合结果中的倾斜项和离焦项后,得到重构波前如图 10(g)所示,其中 f_{RMS} 为 0.030λ。与图 10(h)中的理想情况(f_{RMS} 为 0.034λ)相比,相对误差约为 11%,表明此时指向误差对扫描检测结果影响较大,使检测精度难以满足工程需求。对于周期性的指向误差,选取傅里叶级数中的 $b\sin(2dw)$ 项进行仿真,其中 b 为幅值系数,d 为导轨位置,w 为导轨总长决定的相位系数。x、y 方向的幅值系数分别设置为 0.3″ 和 0.2″,仿真结果如图 11 所示。结果表明,低阶指向误差对检测技术影响很大,在极小的误差幅值下依然会产

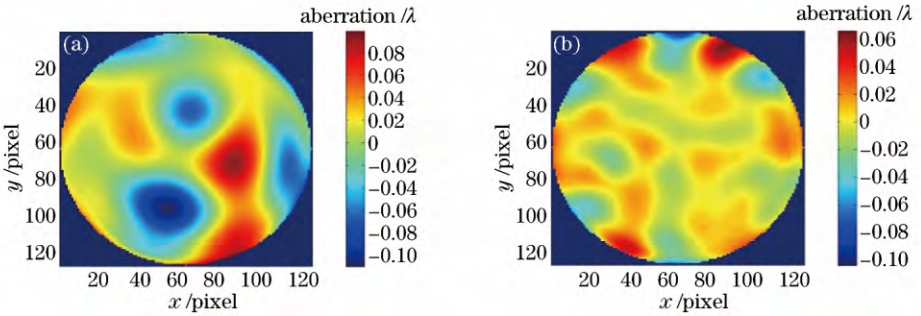


图 11 (a) 低频周期性误差仿真结果及其 (b) 拟合残差

Fig. 11 (a) Simulation results with low frequency periodic errors and their corresponding (b) residual error fitting

生足以湮没实际像差信息的偏差。在实际工程中，制造行程在米量级、全程指向误差优于 0.3″的二维导轨的成本极高，难度极大。因此，对低阶误差的标定拟合是有必要的。通过拟合，使得具有重复性的大幅值的低阶指向误差得到补偿，仅留下中高频残差，这样可大大提高检测技术精度。

3.4 导轨误差标定与拟合

一般而言，行程为米量级的单条导轨，在其单程扫描过程中，载物平台的指向变化可达数十甚至上百角秒。导轨单向运动的自身重复性可以达到 1″以内的精度。由于导轨本身的形貌特点，这一指向变化通常是连续、低频的，可以近似用简单的数学模型表示导轨直线度。利用自准直仪和小平面镜，可对单个导轨扫描运动中的某一指向分量偏差进行简单标定。对行程为 900 mm 的二维运动导轨，将其 y 坐标设置为固定值时，对 x 导轨全行程单向单次运动的扭摆误差进行标定，结果如图 12 所示。在扫描全程内，指向误差幅值为 36.3″，且能以低阶、完备、正交的周期性多项式进行拟合。选取傅里叶拟合形式，拟合多项为

$$\begin{cases}\Delta\theta_X = a_0 + a_1\cos(dw) + b_1\sin(dw) + a_2\cos(2dw) + b_2\sin(2dw) + \cdots \\ \Delta\theta_Y = a_0' + a_1'\cos(dw) + b_1'\sin(dw) + a_2'\cos(2dw) + b_2'\sin(2dw) + \cdots\end{cases}, \tag{11}$$

式中 a_i，b_i，a_i'，b_i'为拟合各项系数，w 为与导轨行程有关的常数因子，d 为 x 导轨的水平位置坐标。图 12 中拟合多项式的最高阶次为 5。

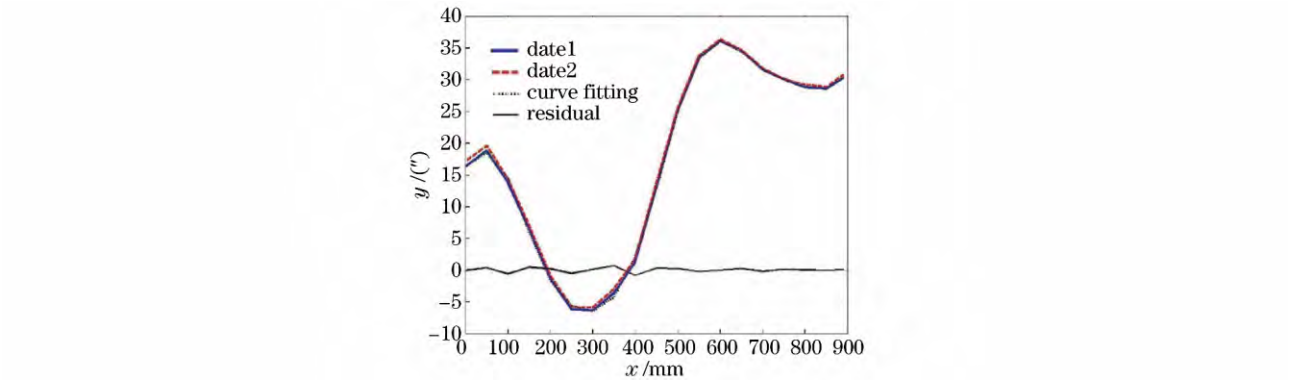


图 12 经过标定的一条 x 导轨的扭摆方向指向误差曲线

Fig. 12 Torsional error distribution curve of an x-direction rail after calibration

利用傅里叶拟合，可以将指向误差中不同空间频率分量简单分开，便于进一步讨论高频与低频分量的影响。拟合系数及拟合精度见表 1，相关系数 $R=0.9997$。对拟合残差再次进行傅里叶拟合，其低阶项的系数均在 0.1″以下，可近似认为拟合残差不携带低阶信息。其中六阶项的系数最大，约为 1″。

表 1 傅里叶拟合系数与精度

Table 1 Fourier fitting coefficients and accuracy

Coefficient	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Value /(″)	19.54	−8.186	5.677	−2.604	0.6231	1.286
Coefficient	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	w
Value /(″)	−15.46	−2.021	6.746	2.016	1.601	0.004983

对拟合结果的低阶项进行补偿，并代入残差中的六阶项进行仿真，结果如图 13 所示，其中 f_{RMS} 约为 0.034λ。由图可知，拟合结果比较理想，波前像差的均方根值的相对误差约为 1%。经过标定与补偿，检测技术的精度得到了大幅度提高，检测技术可以应用于工程实践。

仿真实验中选取的待检系统的波前像差均方根为 0.05λ，小于实际工程的 0.07λ，因此相同的指向误差对实际检测精度的影响会小于对仿真中选取的系统的影响，仿真的结果对实际工程实践提供了理论指导。

4 结 论

对基于斜率拟合波前的扫描哈特曼光学检测技术中扫描单元指向误差的影响进行了仿真分析，并对实际光学系统的软件模型给出了仿真检测结果。研究表明，随机分布的高频指向误差对检测精度的影响较小，

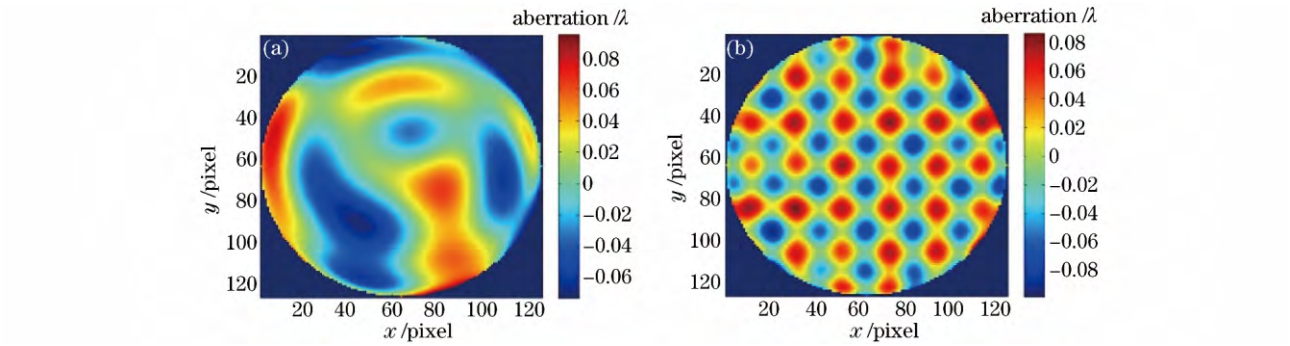


图 13 (a) 高频周期性误差仿真结果及其 (b) 拟合残差

Fig. 13 (a) Simulation results with high frequency periodic errors and their corresponding (b) residual error fitting

一般的导轨系统精度可以满足工程应用要求。导轨自身以低阶形式存在的直线度误差对检测精度有较大影响,在实际工程应用中应对其进行标定与多项式拟合,拟合后检测精度明显提升。

与其他大口径光学检测技术不同,这一检测技术对地基振动或轻微的气流扰动等高频误差源不敏感。因此其在外场条件下有较大的应用空间,若能实现对扫描指向精度的高精度标定与补偿,将有望实现对大口径光学系统的外场复检。但基于扫描法的检测技术存在检测周期长的问题,下一步研究应当通过合理规划扫描单元结构以及优化运动轨迹来提高检测效率。

参 考 文 献

1 Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.
薛栋林, 郑立功, 张 峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学 精密工程, 2011, 12: 2813-2820.

2 Qi Erhui, Luo Xiao, Zheng Ligong, *et al*. Optical testing of large optical flat mirror with non-circular pupil based on scanning pentaprism technology[J]. Journal of Optoelectronics· Laser, 2014, 25(7): 1370-1375.
戚二辉, 罗 霄, 郑立功, 等. 大口径非圆形光学平面的五棱镜扫描检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1370-1375.

3 Zheng Ligong, Yan Lisong, Wang Xiaokun, *et al*. Research on sub-aperture stitching testing technology based on iterative gradient algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011202.
郑立功, 闫力松, 王孝坤, 等. 基于迭代梯度算法的子孔径拼接检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011202.

4 Tang Guomao, He Yumei, Liao Zhou. Radial Hartmann method for measuring large optical system[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 795-799.
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.

5 Díaz-Uribe R, Granados-Agustín F, Cornejo-Rodríguez A. Classical Hartmann test with scanning[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13959-13973.

6 Floriot J, Levecq X, Bucourt S, *et al*. Surface metrology with a stitching Shack-Hartmann profilometric head[C]. SPIE, 2007, 6616: 66162A.

7 Ohl IV R, Antonille S, Aronstein D, *et al*. A scanning Hartmann focus test for the EUVI telescopes aboard STEREO [C]. SPIE, 2007, 6676: 66760G.

8 He Y M, Tang G M. Subaperture stitching based on Hartmann wavefront sensor[C]. SPIE, 2010, 7656: 765603.

9 Jiang W H, Li H G. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. SPIE, 1990, 1271: 82-93.

10 Idir M, Kaznatcheev K, Dovillaire G, *et al*. A 2D high accuracy slope measuring system based on a stitching Shack Hartmann optical head[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2770-2781.

11 Baik S H, Park S K, Kim C J, *et al*. A center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Optics and Laser Technology, 2007, 39(2): 262-267.

12 Lu Wenchuan. Research on testing large diameter off axis aspherical surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and

Physics), 2012.

卢文川. SHWS检测大口径离轴非球面的应用研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.

13 Irwan R, Lane R G. Analysis of optimal centroid estimation applied to Shack-Hartmann sensing. Applied Optics, 1999, 38(32): 6737-6743.

14 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.

李 晶, 巩 岩, 呼新荣, 等. 哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.

15 Soloviev O, Vdovin G. Estimation of the total error of modal wavefront reconstruction with Zernike polynomials and Hartmann-Shack test[C]. SPIE, 2005, 6018: 60181D.

16 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(10): 1236-1240.

李新阳, 姜文汉. 哈特曼-夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1236-1240.

17 Bruno T L, Wirth A, Jankevics A J. Applying Hartmann wavefront sensing technology to precision optical testing of the Hubble space telescope correctors[C]. SPIE, 1993, 1920: 328-336.