

# 大口径平面镜局部采样瑞奇-康芒检验

林冬冬<sup>1,2</sup>, 胡明勇<sup>3</sup>, 李金鹏<sup>4</sup>, 丁耀芳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>2</sup>中国科学院南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042;

<sup>3</sup>合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

<sup>4</sup>中科院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042

**摘要** 为了提升大  $F$  数下瑞奇-康芒检验的面形恢复精度, 提出局部采样影响矩阵法, 对干涉仪采集到的压缩椭圆图样按各像素点实际入射角大小分别建立影响矩阵, 恢复像素点的面形偏差。通过该方法遍历整个平面镜镜面, 得到平面镜面形。利用仿真验证了局部采样影响矩阵法的精度并和传统影响矩阵法进行详细对比, 结果表明相较于传统影响矩阵法, 局部采样影响矩阵法在离焦、像散、三级彗差、三级像散、三级球差等因素下的精度提升十分明显, 证明局部采样影响矩阵法更适合瑞奇-康芒检验的面形恢复。

**关键词** 测量; 瑞奇-康芒检验; 大口径平面镜; 影响矩阵; 干涉测量

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031202

## Local Sampling Ritchey-Common Test for Large Aperture Flat Mirror

Lin Dongdong<sup>1,2</sup>, Hu Mingyong<sup>3</sup>, Li Jinpeng<sup>4</sup>, Ding Yaofang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup> Nanjing Research Centre of Astronomical Instruments, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>3</sup> Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

<sup>4</sup> CAS Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210042, China

**Abstract** In order to improve the surface shape recovery accuracy of Ricky-Consens test under large  $F$ -number, a local sampling impact matrix method is proposed. The impact matrix is built according to the actual incident angle of each pixel point for the compressed ellipse patterns collected from an interferometer, and the surface error of the pixel point is recovered. The shape of flat mirror is obtained through this method traversing the entire mirror surface. The accuracy of local sampling impact matrix method is verified through simulation, and it is compared with the traditional impact matrix method in detail. The results show that compared with the traditional impact matrix method, the accuracy of local sampling impact matrix method is obviously improved in different aberrations of defocus, astigmatism, three levels of coma, three levels of astigmatism and three levels of spherical aberration. It is indicated that the local sampling impact matrix method is more suitable for the surface shape recovery Ritchey-Common test.

**Key words** measurement; Ritchey-Common test; large aperture flat mirror; impact matrix; interferometry

**OCIS codes** 120.3180; 120.6650; 240.6700

## 1 引言

平面镜是光学系统自准的标准器具, 对其面形

精度检测有很高的要求。当平面镜直径较小时, 利用干涉计量法对其进行直接测量, 速度精度都非常好。对于 1 m 级以上大口径平面镜, 目前商业标准

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-09-21

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20160154)

作者简介: 林冬冬(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 954190229@qq.com

导师简介: 胡明勇(1976—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光学精密仪器及机械方面的研究。

E-mail: humy8@126.com(通信联系人)

干涉仪很难直接对其进行测量,一种常用的解决方案是瑞奇-康芒法。瑞奇-康芒法实现了用小口径干涉仪测量大口径平面精度,有效降低检测成本,在光学检测领域中有十分重要的意义。在国外,早在1975年就有人使用瑞奇-康芒法对大口径光学平面进行检测,如今美国亚利桑那光学中心和美国Veeco公司的瑞奇-康芒定量检测技术已经比较成熟<sup>[1-2]</sup>。在国内,北京工业大学的曹根瑞教授<sup>[3]</sup>于1988年发表了“计算机辅助的瑞奇-康芒检验”的文章;近年来,南京天文光学技术研究所和中科院南京天文仪器有限公司开始使用瑞奇-康芒法对大口径平面镜面形进行检测;成都光电技术研究所的田秀云等<sup>[4-5]</sup>用数学算法推导出被检平面镜面形误差与检验系统波像差之间的相互关系;南京天文光学技术研究所的袁吕军等<sup>[6]</sup>给出了瑞奇-康芒法的理论推导,并通过计算机编程和实验验证了瑞奇-康芒法用小口径干涉仪进行大口径光学平面元件定量检测的可行性;长春光学精密机械与物理研究所的朱硕等<sup>[7-8]</sup>针对现有数据模型,提出坐标转换关系法来计算平面镜的面形误差。本文根据传统影响矩阵瑞奇-康芒法检测原理,针对传统影响矩阵法面形恢复过程中近似处理产生的误差问题,提出局部采样瑞奇-康芒法,对采集到的干涉图样按像素点分点处理,对每一点单独建立影响矩阵,得到各点面形分布,再将各点面形结果综合得到平面镜面形分布。通过仿真证明此方法的有效性并给出计算精度,与传统影响矩阵法的对比证明该方法一定程度上可以提高计算精度,使面形恢复结果更接近实际面形。最后详细对比了局部采样瑞奇-康芒法和传统影响矩阵瑞奇-康芒法在各种像差下的具体表现。

2 基本原理

2.1 影响矩阵瑞奇-康芒法检测原理

瑞奇-康芒法原理图如图1所示,系统由干涉仪、被检平面镜、标准球面镜及夹持设备组成,其中标准球面镜的口径略大于平面镜。干涉仪焦点位于标准球面镜经被检平面镜反射后的曲率中心,干涉仪发出光束经被检平面镜反射到达标准球面,经标准球面反射返回待测平面,最后返回干涉仪焦点处与干涉仪参考波面形成干涉。图中干涉仪出射光与被检平面镜法线形成的角 $\theta$ 称为瑞奇角<sup>[9]</sup>。

在瑞奇-康芒检测中,由于光束斜入射到待测平面上,所以在光瞳面上形成的光斑呈椭圆形。计算过程中通过坐标转换公式将光瞳面坐标转换为镜面

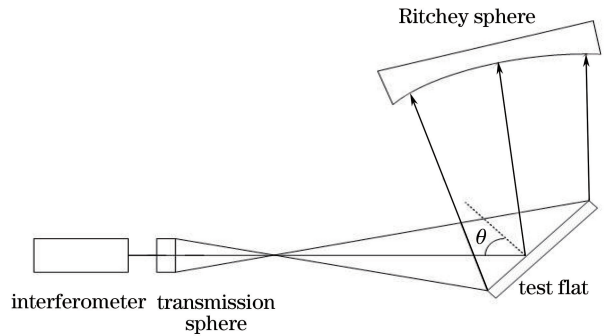


图1 瑞奇-康芒检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Ritchey-Common test

坐标,根据图2,通过几何关系得到镜面坐标系和光瞳坐标系的关系如下<sup>[10]</sup>:

$$x_s = \frac{x_p / \cos \theta}{1 \mp (x_p \tan \theta) / (2F)}, y_s = y_p, \quad (1)$$

式中 $\theta$ 是瑞奇角, $F$ 是发散光束的 $F$ 数; $(x_s, y_s)$ 、 $(x_p, y_p)$ 分别为镜面坐标系和光瞳坐标系中的坐标。

泽尼克多项式能够将波前相位展开成各种像差并具有良好的数学特性,因此瑞奇-康芒检测采用泽尼克多项式来描述和拟合平面面形误差<sup>[11]</sup>。根据被检平面镜的面形误差引起的实际波阵面和理想波阵面的光程差(OPD),建立被检平面面形误差和系统波像差之间的影响函数,简写为:

$$\mathbf{AS} = \mathbf{W}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为影响矩阵, $S$ 为被检平面镜面形误差系数矩阵, $\mathbf{W}$ 为系统波像差系数矩阵。改变瑞奇角的大小,按同样过程再建立一组类似方程,将两组方程组合,利用最小二乘法求出被检平面镜面形误差的各项泽尼克系数,进而拟合得到被检平面镜面形。

## 2.2 局部采样影响矩阵法原理

在上述传统影响矩阵瑞奇-康芒法中,推导过程用到了近似处理,在 $(\tan \theta) / (2F) \ll 1$ 的条件下,一般处理方法是令干涉仪发出的光束在被检平面镜上不同点形成的入射角近似等于瑞奇角 $\theta$ 。实际过程中,由于干涉仪发出的光束通过镜头后是以发散光的形式入射到被检平面镜上,所以被检平面镜上每一点的入射角大小并不相等;由于检验场景和被检平面镜口径限制,不一定能较好满足 $(\tan \theta) / (2F) \ll 1$ 的近似条件,这样会给影响矩阵法面形恢复带来误差。

针对这种情况,提出局部采样影响矩阵法,对干涉仪采集到的椭圆形压缩图样,按像素点为单位,对其中每一点根据其实际入射角大小单独建立各自的影响矩阵方程,而不是近似使用瑞奇角。改变瑞奇角重复一次再用最小二乘法得到该点泽尼克系数,

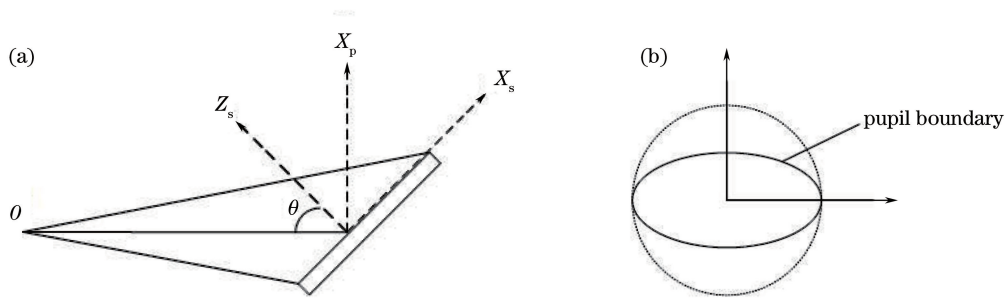


图2 (a)镜面坐标与(b)光瞳坐标关系图

Fig. 2 Relationship between (a) mirror surface and (b) pupil coordinates

恢复该点面形。其他点做同样处理后综合各点面形结果,即为被检平面镜恢复面形。

下面以任意点 $(x_p, y_p)$ 为例推导该点系统波像差和被检平面面形偏差的影响函数,当被检平面镜面形误差 $\Delta S$ 不大时,可以用泽尼克多项式表示为:

$$\Delta S(x_s, y_s) = \sum_{m,n} S_{m,n} Z_{m,n}(x_s, y_s), \quad (3)$$

式中 $m, n$ 为矩阵表示形式下的行和列, $S_{m,n}$ 表示面形误差泽尼克多项式的系数, $Z_{m,n}(x_s, y_s)$ 表示被检平面镜内坐标为 $(x_s, y_s)$ 的点的各个泽尼克多项式的基项。

被检平面镜上任意点入射角 $I$ 可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\cos I = \sin\left(\theta \pm \arctan \frac{2F}{x_p}\right). \quad (4)$$

在检验光路中,被检平面镜的面形偏差会引起实际波阵面和理想波阵面的光程差。被检平面镜面形偏差引起的光程差 $D_{OP}$ 可表示为:

$$D_{OP}(x_p, y_p) = 4\Delta S \cos I = \sum_{m,n} W_{m,n} Z_{m,n}(x_p, y_p), \quad (5)$$

式中 $W_{m,n}$ 表示系统波像差的泽尼克系数。

可以得到任意点系统波像差和被检平面镜面形偏差的影响函数:

$$\sum_{m,n} S_{m,n} Z_{m,n} \left[ \frac{(x_p)/(\cos \theta)}{1 \mp (x_p \tan \theta)/(2F)}, y_p \right] = \frac{1}{4 \sin[\theta \pm \arctan(2F/x_p)]} \sum_{m,n} W_{m,n} Z_{m,n}(x_p, y_p), \quad (6)$$

式中 $Z_{m,n}(x_p, y_p)$ 表示光瞳坐标系下点 $(x_p, y_p)$ 的泽尼克多项式基项。为方便表示,设 $a = \sin[\theta \pm \arctan(2F/x_p)]$ ,  $b = \cos \theta \mp (x_p \sin \theta)/(2F)$ ,系统波像差的泽尼克系数 $W_{m,n}$ 可以用 $a, b$ 表示,受限于篇幅,这里仅给出部分用前5阶泽尼克多项式(21项)表示的面形误差和系统波像差的关系式:

$$W_{2,0} = \left(\frac{2a}{b^2} + 2a\right) S_{2,0} + \left(\frac{a}{b^2} - a\right) S_{2,2} +$$

$$\left(\frac{9a}{2b^4} - \frac{3a}{b^2} - \frac{3a}{2}\right) S_{4,0} + \left(\frac{3a}{b^4} - \frac{3a}{b^2}\right) S_{4,2} + \left(\frac{3a}{4b^4} - \frac{3a}{2b^2} + \frac{3a}{4}\right) S_{4,4}, \quad (7)$$

$$W_{2,-2} = \left(\frac{4a}{b^2} - 4a\right) S_{2,0} + \left(\frac{2a}{b^2} + 2a\right) S_{2,2} + \left(\frac{9a}{b^4} - \frac{12a}{b^2} + 3a\right) S_{4,0} + \left(\frac{6a}{b^4} - \frac{6a}{b^2}\right) S_{4,2} + \left(\frac{3a}{2b^4} - \frac{3a}{2}\right) S_{4,4}, \quad (8)$$

$$W_{2,-2} = \frac{4a}{b} S_{2,-2} + \left(\frac{6a}{b^3} - 6\frac{a}{b}\right) S_{4,-2} + \left(\frac{3a}{b^3} - 3\frac{a}{b}\right) S_{4,-4}, \quad (9)$$

$$W_{4,0} = \left(\frac{3a}{2b^4} + \frac{a}{b^2} + \frac{3a}{2}\right) S_{4,0} + \left(\frac{a}{b^4} - a\right) S_{4,2} + \left(\frac{a}{4b^4} - \frac{a}{2b^2} + \frac{a}{4}\right) S_{4,4}, \quad (10)$$

$$W_{4,2} = \left(\frac{3a}{b^4} - 3a\right) S_{4,0} + \left(\frac{2a}{b^4} + 2a\right) S_{4,2} + \left(\frac{a}{2b^4} - \frac{a}{2}\right) S_{4,4}, \quad (11)$$

$$W_{4,-2} = \left(\frac{2a}{b^3} + 2\frac{a}{b}\right) S_{4,-2} + \left(\frac{a}{b^3} - \frac{a}{b}\right) S_{4,-4}, \quad (12)$$

$$W_{4,4} = \left(\frac{3a}{b^4} + 3a - \frac{6a}{b^2}\right) S_{4,0} + \left(\frac{2a}{b^4} - 2a\right) S_{4,2} + \left(\frac{a}{2b^4} + \frac{a}{2} + \frac{3a}{b^2}\right) S_{4,4}, \quad (13)$$

$$W_{4,-4} = \left(\frac{4a}{b^3} - 4\frac{a}{b}\right) S_{4,-2} + \left(\frac{2a}{b^3} + 2\frac{a}{b}\right) S_{4,-4}. \quad (14)$$

为了求出点 $(x_p, y_p)$ 的面形,将各面形误差和系统波像差的关系式写成(2)式的方程形式,改变瑞奇角的大小,按同样过程再建立一组类似方程,利用最小二乘法求出点 $(x_p, y_p)$ 面形误差的各项泽尼克系数,进而拟合得到该点面形。因为 $a, b$ 的值与镜

面各点的坐标 $(x_p, y_p)$ 有关,所以平面镜每一点建立的影响矩阵都是独立的。将该过程遍历整个被检平面镜,其余各点按同样方法建立各自影响矩阵得到面形后,即可综合各点面形结果得到被检平面镜面形。

### 3 仿 真

为了验证局部采样影响矩阵法的面形恢复精度,用 Matlab 软件对该方法的面形恢复做了仿真。设  $F$  数为 10,用 21 项泽尼克多项式设定一个包含各种面形误差的待测平面,然后根据设定面形构造压缩椭圆图形和系统波像差,最后用局部采样影响矩阵法进行面形恢复。设被检平面镜的面形为:

$$\Delta S = 0.0033S_{2,0} + 0.0032S_{2,2} + 0.0025S_{2,-2} + 0.0022S_{3,1} + 0.0031S_{3,-1} + 0.0044S_{3,3} + 0.0041S_{3,-3} + 0.0036S_{4,0} + 0.0066S_{4,2} + 0.0070S_{4,-2} + 0.0056S_{4,4} + 0.0069S_{4,-4} + 0.0059S_{5,1} + 0.0058S_{5,-1} + 0.0063S_{5,3} + 0.0049S_{5,-3} + 0.0050S_{5,5} + 0.0008S_{5,-5}。 (15)$$

设定平面面形如图 3(a)所示,峰谷(PV)值为  $0.0758\lambda$  ( $\lambda$  为波长),均方根误差(RMS)值为  $0.0076\lambda$ 。利用局部采样影响矩阵法仿真恢复得到的面形如图 3(b)所示,PV 值为  $0.0811\lambda$ ,RMS 值为  $0.0067\lambda$ 。仿真结果显示该方法的 PV 检测精度达到  $0.0053\lambda$ ,RMS 检测精度达到  $0.0009\lambda$ 。

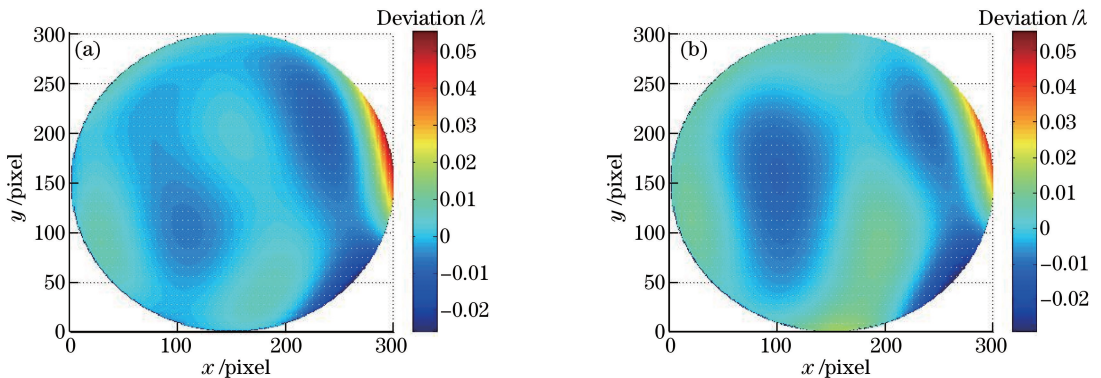


图 3 仿真面形图。(a)设定平面初始面形;(b)局部采样影响矩阵法恢复的面形

Fig. 3 Surface shape of simulation. (a) Initial surface shape of set plane; (b) recovery surface shape of local sampling impact matrix method

为对比传统影响矩阵法和局部采样影响矩阵法的精度,在程序中分别用传统影响矩阵法和局部采样影响矩阵法恢复面形,将各自恢复的面形结果减去设定平面的初始面形得到面形偏差图,分别如图

4(a)和(b)所示,面形偏差图 RMS 值分别为  $0.0082\lambda$ 和  $0.0040\lambda$ 。面形偏差图和数据表明,相对传统影响矩阵法,局部采样影响矩阵法能有效提高恢复精度。

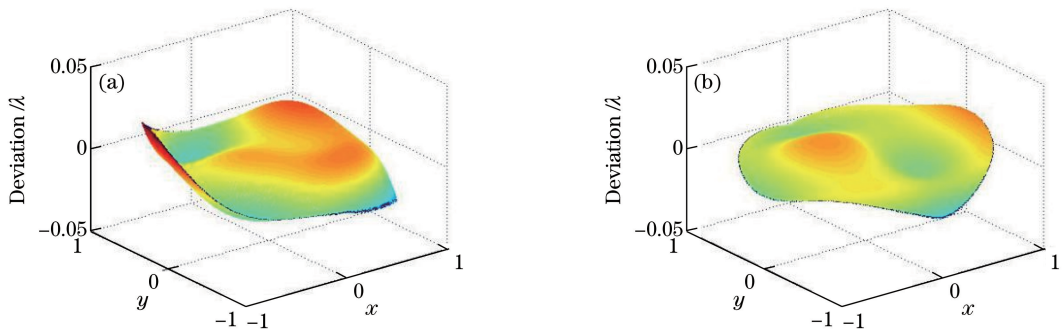


图 4 面形偏差图。(a)传统影响矩阵法的面形偏差;(b)局部采样影响矩阵法的面形偏差

Fig. 4 Results of surface shape deviation. (a) Surface shape deviation of traditional impact matrix method; (b) surface shape deviation of local sampling impact matrix method

### 4 分析讨论

不同泽尼克多项式对应不同的像差类别,前三项多项式代表的常数项、 $x$ 方向倾斜、 $y$ 方向倾斜在

实际检测中并不影响系统波像差,后 8 项分别代表离焦、 $0^\circ$ 像散、 $45^\circ$ 像散、 $x$ 方向三级彗差、 $y$ 方向三级彗差、 $x$ 方向三级像散、 $y$ 方向三级像散、三级球差,详细对比传统影响矩阵法和局部采样影响矩阵法在



不同像差下的面形恢复精度,设定对应像差的泽尼克系数值(以下均取 0.6),其他系数均取 0,分别用两

种方法进行面形恢复仿真,将恢复所得面形减去设定平面面形得到面形偏差图,分别如图 5、图 6 所示。

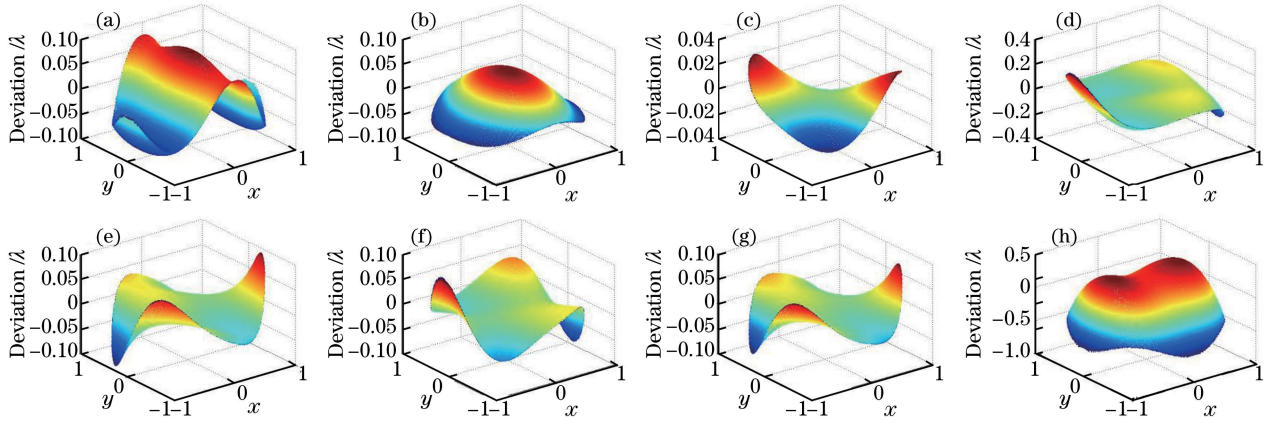


图 5 传统影响矩阵法在不同像差下的面形偏差图。(a)离焦;(b)  $0^\circ$ 像散;(c)  $45^\circ$ 像散;(d)  $x$  方向三级彗差;(e)  $y$  方向三级彗差;(f)  $x$  方向三级像散;(g)  $y$  方向三级像散;(h)三级球差

Fig. 5 Surface shape deviation of traditional impact matrix method in different aberrations. (a) Defocus; (b)  $0^\circ$  astigmatism; (c)  $45^\circ$  astigmatism; (d) three levels of coma in  $x$  direction; (e) three levels of coma in  $y$  direction; (f) three levels of astigmatism in  $x$  direction; (g) three levels of astigmatism in  $y$  direction; (h) three levels of spherical aberration

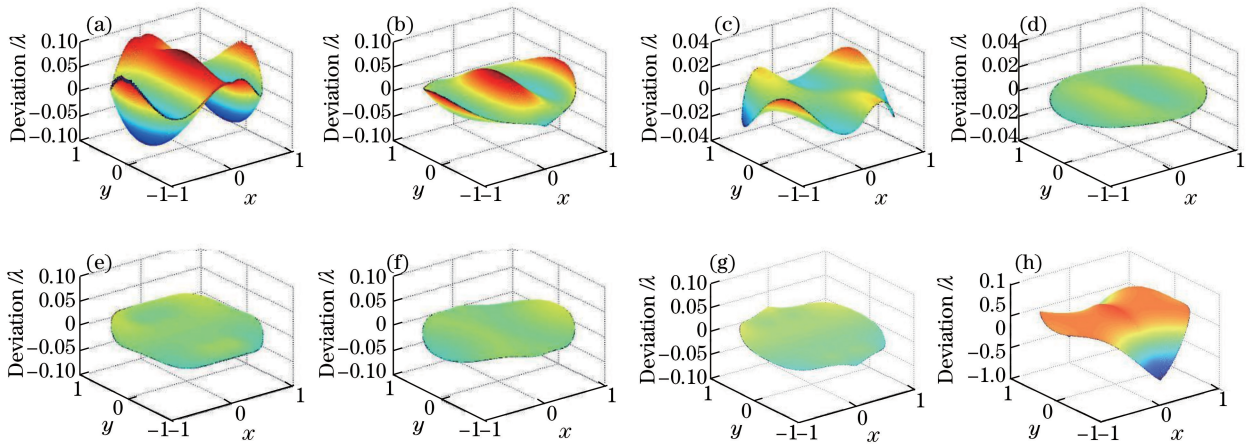


图 6 局部采样影响矩阵法在不同像差下的面形偏差图。(a)离焦;(b)  $0^\circ$ 像散;(c)  $45^\circ$ 像散;(d)  $x$  方向三级彗差;(e)  $y$  方向三级彗差;(f)  $x$  方向三级像散;(g)  $y$  方向三级像散;(h) 三级球差

Fig. 6 Surface shape deviation of local sampling impact matrix method in different aberrations. (a) Defocus; (b)  $0^\circ$  astigmatism; (c)  $45^\circ$  astigmatism; (d) three levels of coma in  $x$  direction; (e) three levels of coma in  $y$  direction; (f) three levels of astigmatism in  $x$  direction; (g) three levels of astigmatism in  $y$  direction; (h) three levels of spherical aberration

影响瑞奇-康芒法检测精度的主要因素有干涉仪离焦、干涉仪镜头和标准球面镜本身的面形误差、瑞奇角角度等<sup>[13]</sup>。其中,干涉仪离焦误差和被检平面镜的波面误差混合在一起,通过旋转角度测量两次将二者分离;干涉仪镜头和标准球面镜的面形误差可以预先标定,作为系统误差从结果中扣除;实际测试中,瑞奇角角度的选择对瑞奇-康芒法检测精度影响较大,通过仿真,得到瑞奇角最佳范围为  $30^\circ \sim 50^\circ$ ,此时测试结果表现较好。从图 5、图 6 可以看出,局部采样影响矩阵法相较传统影响矩阵法在偏

差图边缘的精度提升十分明显,这是由于传统影响矩阵法近似瑞奇角的处理方式,相较局部采样法会多出瑞奇角近似处理产生的误差,这种误差在图像边缘会随实际入射角相较瑞奇角偏差的增大而增大,局部采样法按照各点实际入射角的处理可以有效降低该类型误差。

对于这 8 类像差,测得的两种方法面形偏差图 RMS 值如表 1 所示。各类型像差下,局部采样影响矩阵法的 RMS 值均大幅下降,面形恢复精度相较传统影响矩阵法大幅提升。其中,在离焦、 $0^\circ$ 像散、 $45^\circ$ 像

散、 $x$  方向三级彗差、 $y$  方向三级彗差、 $x$  方向三级像散、 $y$  方向三级像散、三级球差因素下,局部采样影响矩阵法的 RMS 值分别下降至传统影响矩阵法的

80.36%、50.18%、50.00%、38.78%、26.79%、26.60%、27.96%、55.17%。面形偏差图和 RMS 值表明,局部采样影响矩阵法能有效提高面形恢复精度。

表 1 不同像差下两种方法的 RMS 值对比

Table 1 Comparison of RMS values of two methods under different aberrations

Method	Defocus	$\lambda$						
		0° astigmatism	45° astigmatism	Three levels of coma in $x$ direction	Three levels of coma in $y$ direction	Three levels of astigmatism in $x$ direction	Three levels of astigmatism in $y$ direction	Three levels of spherical aberration
Traditional impact matrix	0.0545	0.0273	0.0108	0.0539	0.0224	0.0203	0.0186	0.2436
Local sampling impact matrix	0.0438	0.0137	0.0054	0.0209	0.0060	0.0054	0.0052	0.1344

## 5 结 论

针对传统影响矩阵瑞奇-康芒法面形恢复过程中近似处理产生的误差问题,提出局部采样影响矩阵法,对采集到的椭圆形干涉图样分点处理,按像素为单位对每一点单独建立各自影响矩阵来恢复该点面形,遍历整个平面镜得到被检平面镜面形。详细介绍了该方法的原理,进行程序仿真,分析该方法面形恢复精度,并和传统影响矩阵法进行对比。局部采样影响矩阵法的 PV 检测精度达到  $0.0053\lambda$ , RMS 检测精度达到  $0.0009\lambda$ 。相较传统影响矩阵法,局部采样影响矩阵法在离焦、像散、三级彗差、三级像散、三级球差等像差因素下精度提升十分明显。各种像差的定量影响还需在后续研究中继续探索。

## 参 考 文 献

- [1] Shu K L. Ray-trace analysis and data reduction methods for the Ritchey-Common test[J]. Applied Optics, 1983, 22(12): 1879-1885.
- [2] Han S, Novak E, Schurig M. Ritchey-Common test used for measurement of astronomical optic [C]. SPIE, 2003, 4842: 270-273.
- [3] Cao G R. Computer added Ritchey-Common test[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1988(4): 46-53.  
曹根瑞. 计算机辅助的瑞奇-康芒检验[J]. 北京理工大学学报, 1988(4): 46-53.
- [4] Tian X Y, Wu S B, Wu F, *et al.* A data processing method in Ritchey-Common test[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(1): 23-31.  
田秀云, 吴时彬, 伍凡, 等. 瑞奇-康芒法中的一种数据处理方法[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 23-31.

- [5] Tian X Y, Wu S B, Wu F, *et al.* Quantitative test method of Ritchey-Common test in large high precision flat measurements[J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 486-488.  
田秀云, 吴时彬, 伍凡, 等. 高精度大口径平面镜瑞奇-康芒定量检测方法研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 486-488.
- [6] Yuan L J, Xing N. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics [J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 737-744.  
袁吕军, 邢娜. 大口径光学平面瑞奇-康芒检测技术的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 737-744.
- [7] Zhu S, Zhang X H. Comparative study on data processing method for large flat mirror in Ritchey-Common test[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 698-703.  
朱硕, 张晓辉. 瑞奇-康芒式大口径平面镜面形数据处理方法对比研究[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 698-703.
- [8] Zhu S, Zhang X H. Study on high precision Ritchey-Common test and analysis of test distance influence [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0112001.  
朱硕, 张晓辉. 高精度瑞奇-康芒检验法研究及测试距离精度影响分析[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0112001.
- [9] Zhu S, Zhang X H. Analysis and verification for accuracy of Ritchey angle in flat mirror test[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612001.  
朱硕, 张晓辉. Ritchey角精度对平面镜检测的影响的分析与验证 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612001.
- [10] 赵兵. 瑞奇-康芒检验与面形评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

- [11] Tang G M, He Y M, Liao Z. Radial Hartmann method for measuring large optical system [J]. Chinese Journal of 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.
- [12] 张宗.  $\Phi 1.1\text{ m}$  平面镜的瑞奇-康芒检验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [13] Xu L B, Zhou Y, Zhu R H, *et al.* Research progress on wavefront aberration detection technology of meter-sized optical elements in inertial confinement fusion systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120001.  
徐隆波, 周游, 朱日宏, 等. 惯性约束聚变系统中米量级光学元件波面误差检测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120001.