

文章编号 1004-924X(2018)04-0771-07

采用单位激励影响矩阵数值计算的瑞奇-康芒检测技术

刘一鸣^{1,2}, 李金鹏², 陈磊^{1*}, 林冬冬², 郑锋华²

(1. 南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国科学院 南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042)

摘要: 在影响矩阵法瑞奇-康芒检验中, 恢复被测面形的关键在于构建被检平面面形误差与系统波像差之间的 Zernike 系数影响矩阵。为了提高瑞奇-康芒法的检测精度, 研究了采用单位激励法来精确计算影响矩阵的方法。分别重构平面镜仅包含某一种 Zernike 波像差下的系统波像差分布, 经 Zernike 拟合得到该种 Zernike 像差的影响系数向量; 由各 Zernike 像差的影响系数向量组成影响矩阵, 然后用最小二乘拟合出被检平面面形。对口径为 90 mm 的平面镜进行实际检验, 在瑞奇角为 26.5° 与 40.6° 的情况下进行波前恢复, 得到被检平面镜 PV 值为 0.1413 λ , RMS 为 0.0194 λ 。与直接采用平面参考镜检测相比, 瑞奇-康芒法检测误差 PV 值为 0.0828 λ , RMS 为 0.0109 λ 。该方法能够精确生成影响矩阵, 抑制了影响矩阵法中对大 F 数的依赖, 可用于精确恢复平面镜面形。

关键词: 光学检测; 单位激励法; 数值计算; 瑞奇-康芒法; Zernike 拟合

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182604.0771

Ritchey-Common interferometry using unit-excitation influence matrix's numerical calculation method

LIU Yi-ming^{1,2}, LI Jin-peng², CHEN Lei^{1*}, LIN Dong-dong², ZHENG Feng-hua²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

* Corresponding author, E-mail: chenlei@njust.edu.cn

Abstract: Calculating the influence matrix between surface error and wavefront aberration is a key step in the Ritchey-Common test. A method that uses unit-excitation operation to calculate the influence matrix with high accuracy was studied in order to improve the precision of the test. It retrieves the system wavefront aberration when the flat mirror concludes only one kind of Zernike aberration, and obtains the influence coefficient vector through Zernike fitting. The influence matrix is formed from the coefficient vectors of all the Zernike aberrations. Least square fitting is then used to reconstruct the surface shape of the tested mirror. After reconstructing the wavefront with Ritchey angles of 26.5° and 40.5°, the test results show PV and RMS values of 0.1413 λ and 0.0194 λ respectively for the $\Phi 90$ mm flat mirror. Compared to the results from direct testing, the PV and RMS error in the

收稿日期: 2017-12-06; 修订日期: 2018-01-09.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20160154); 国家自然科学基金联合基金资助项目 (No. U1731115)

Ritchey-Common method are 0.0828λ and 0.0109λ , respectively. This method can calculate the influence matrix accurately, eliminate the dependence on the big F -number in traditional influence matrix methods and can reconstruct the surface shape with high precision.

Key words: optical inspection; unit-excitation method; numerical calculation; Ritchey-Common method; Zernike fitting

1 引言

光干涉是一种高效的光学面形检测方法,可以准确反映面形质量,在光学元件的生产加工与检测中有着重要作用。大口径光学平面镜在大口径光学元件的干涉检验中有着不可或缺的作用^[1],随着平面镜口径的不断增大,传统的商用干涉仪已无法满足需求。

目前,大口径平面镜面形检测方法主要有子孔径拼接法^[2-5]、五棱镜法^[6]、斜入射法^[7]以及瑞奇-康芒法。其中,子孔径拼接法与五棱镜法需要高精度的机械导轨配合检验,检测时间较长,检测结果易受气流与振动等因素的影响,且面形恢复算法复杂;斜入射法仅能在单一方向上扩展测量口径。由于瑞奇-康芒法可实现大口径平面镜的全口径测量,在大口径平面镜检测中的应用最广泛。近年来,国内外学者对于瑞奇-康芒法进行了深入的研究^[8-10]。其中,坐标转换法与影响矩阵法是瑞奇-康芒检验中两种主流的方法。长春光机所的朱硕等^[11-12]提出了利用被检平面镜镜面与检测系统光瞳面之间的坐标位置及幅值转换关系计算被检平面镜面形误差的坐标转换法,揭示了平面面形偏差与系统波像差的理论联系。影响矩阵法的优势则在于算法简单,只要求出相应的 Zernike 系数即可得到被测面形,无需进行插值运算等操作,因此受到广泛应用^[13-14]。然而,影响矩阵法通过人工推导平面面形偏差与系统波像差之间的影响矩阵,公式复杂,且推导项数有限。为了简化计算,公式推导是取 F 数足够大时的近似情况。而且在检验超过 1 m 量级口径的平面镜时,测量场地受限,无法构建足够长的测试光路以保证算法要求的 F 数足够大,使用影响矩阵法势必会偏离 F 数足够大的近似情况,降低面形检测精度;且较长的光路对实验环境的要求也更为苛刻,气流与振动等不可控因素会给实验结果带来误差^[15]。

影响矩阵的实质是建立平面面形偏差与系统波像差之间的线性关系。本文提出了 Zernike 像差单位激励影响矩阵数值算法,以仿真计算代替理论推导,无需取近似化公式,降低了 F 数的限制,使得影响矩阵近似条件弱化、计算精度提高,进而提高了瑞奇-康芒法的检测精度。

2 单位激励影响矩阵数值计算原理

图 1 是瑞奇-康芒法检测原理图。干涉仪的出射准直光束经过标准镜头后成为发散光束,标准镜头焦点与球面反射镜曲率中心重合。被测平面镜与主光轴成 θ 角,即瑞奇角,发散光束经平面镜反射到球面镜上,随后原路返回到干涉仪内产生干涉。

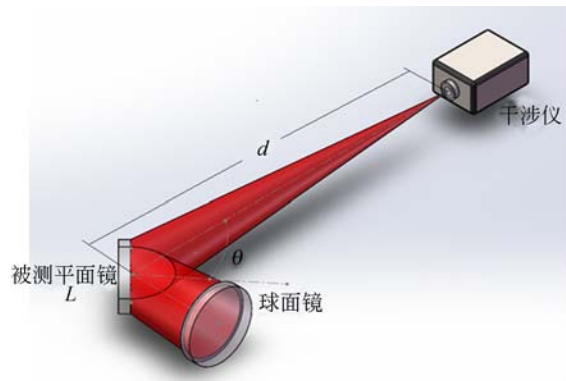


图 1 瑞奇-康芒法检测原理图

Fig. 1 Principle of Ritchey-Common test

本文提出了 Zernike 像差单位激励运算法来精确地计算影响矩阵。影响矩阵、平面面形偏差以及系统波像差 Zernike 系数之间的关系可以表示为^[14]:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{S} = \mathbf{W}, \quad (1)$$

式(1)可以写成:

$$[\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{A}_n] \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \mathbf{W}, \quad (2)$$

其中: \mathbf{A} 为影响矩阵, \mathbf{S} 为被检平面镜面形 Zernike 系数矩阵, \mathbf{W} 为系统波像差 Zernike 系数矩阵。此时对面形偏差做 Zernike 像差单位激励计算, 即分别设定 S_i 为 1, 其余项为 0, 则式(3)可以写成:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \mathbf{W}_1 |_{s_1=1, s_2=0, \dots, s_n=0} \\ \mathbf{A}_2 = \mathbf{W}_2 |_{s_1=0, s_2=1, \dots, s_n=0} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_n = \mathbf{W}_n |_{s_1=0, s_2=0, \dots, s_n=1} \end{cases} \quad (3)$$

此式的物理意义是当平面面形仅包含某一种波像差系数 S_i 时, 影响矩阵中的列向量 \mathbf{A}_i 即为瑞奇-康芒检测系统的系统波像差系数 W_i , 则只需得到 W_i 即可获得影响矩阵中的各列向量。

系统波像差系数 W_i 可以根据光瞳面坐标系与平面镜坐标系之间的转换关系通过理论推导获得。在瑞奇-康芒检测光路中, 光瞳面坐标系与平面镜坐标系之间的转换关系为^[11]:

$$x_s = \frac{d \cdot x_p}{d \cdot \cos \theta - x_p \cdot \sin \theta}, \quad (4)$$

$$y_s = \frac{y_p \cdot (d + x_s \cdot \sin \theta)}{d}, \quad (5)$$

其中: x_s 与 y_s 表示平面镜镜面坐标, x_p 与 y_p 表示系统光瞳面坐标, θ 即瑞奇角, d 为干涉仪镜头焦点到被检平面镜中心的距离。任意光线的入射角度 I 可表示为:

$$\cos I = \frac{d \cdot \cos \theta}{\sqrt{(d \cdot \sin \theta + x_p)^2 + y_p^2 + (d \cdot \cos \theta)^2}}, \quad (6)$$

系统波像差可表示为^[11]:

$$W(x_p, y_p) = 4 \cos I * S(x_s, y_s), \quad (7)$$

$$S = \sum a_i * Z_n, \quad (8)$$

其中: a_i 为 Zernike 多项式系数, Z_n 为 Zernike 多项式基底, S 为平面镜面形, W 为系统波像差。已知平面面形偏差系数 a_i , 可以由式(4)~式(8)构造任意瑞奇角下的系统波像差函数 W 。

由 W 通过 Zernike 拟合即可得到影响矩阵中的各列向量, 将这些系统波像差 Zernike 系数向量按列排列, 可得到瑞奇-康芒系数影响矩阵 $[\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \dots \ \mathbf{A}_n]$ 。利用瑞奇-康芒系数影响矩阵以及实际测得的系统波像差 Zernike 系数, 采用最小二乘拟合得到平面镜面形偏差 Zernike 系数^[13], 进而恢复平面镜面形偏差。

影响矩阵法忽略了入射的径向方向角^[14], 取大 F 数情况下的近似情况, 即光束入射到平面镜

上不同点的径向方向角相同。式(4)和式(5)精确推导了具有不同入射角的入射光线, 其光瞳面坐标与平面镜坐标的转换关系, 避免了近似推导所引入的误差, 理论上降低了影响矩阵法中对于大 F 数的依赖, 使影响矩阵更能准确反映系统波像差与面形偏差的线性关系, 提高了检测精度。

3 算法仿真与实验验证

3.1 仿真分析

3.1.1 仿真计算

本节将验证第 2 节中描述的 Zernike 像差单位激励数值计算方法的正确性。取前 40 项 Zernike 多项式表征被测平面面形, 并将表征后的平面作为验证算法的被测平面镜, 平面镜口径 L 为 90 mm, 其面形如图 2 所示, 其峰谷值(PV)为 0.2568λ , 均方根值(RMS)为 0.0330λ 。设定瑞奇角分别为 26.5° 与 40.6° , d 为 1 000 mm, 重构系统波像差分布, 分别如图 3(a)和 3(b)所示。

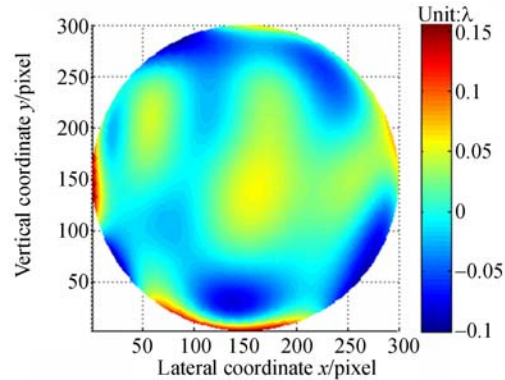
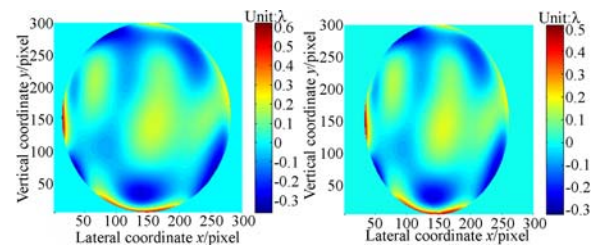


图 2 仿真被测平面面形

Fig. 2 Surface of simulated mirror



(a) 瑞奇角为 26.5°

(b) 瑞奇角为 40.6°

(a) Ritchey angle of 26.5°

(b) Ritchey angle of 40.6°

图 3 系统波像差

Fig. 3 System wave aberration

分别拟合如图 3 所示的两个瑞奇角度下的系

统波像差系数,得到 Zernike 系数向量 W_s, W_t ,按照第 2 节所述计算瑞奇角分别为 26.5° 与 40.6° 的影响矩阵 A_s, A_t ,结合公式(1)将两组数据联立为 $\begin{bmatrix} A_s \\ A_t \end{bmatrix} \cdot S = \begin{bmatrix} W_s \\ W_t \end{bmatrix}$,通过最小二乘拟合即得到平面镜面形的 Zernike 系数,进而恢复平面镜的面形偏差。恢复得到的平面镜面形如图 4 所示,其峰谷值(PV)为 0.2568λ ,均方根值(RMS)为 0.0330λ 。将所得平面镜面形减去仿真设定面形后,得到结果如图 5 所示,仿真偏差说明该方法能够精确恢复平面镜面形。

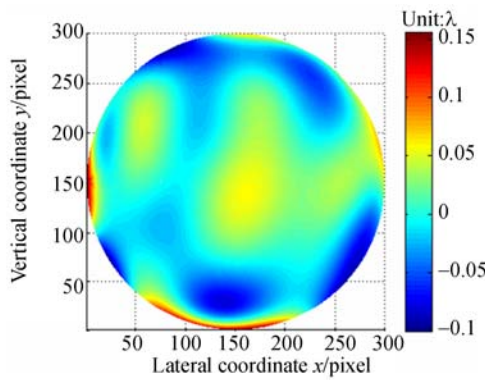


图 4 算法恢复被测平面面形

Fig. 4 Surface shape of simulated tested mirror

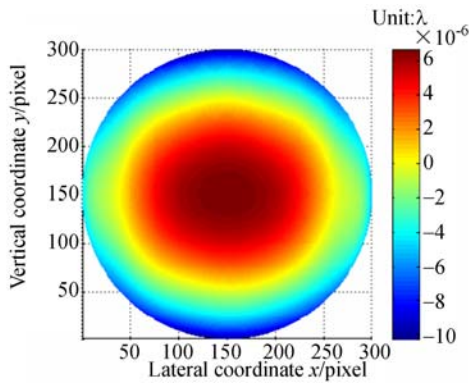


图 5 面形仿真偏差

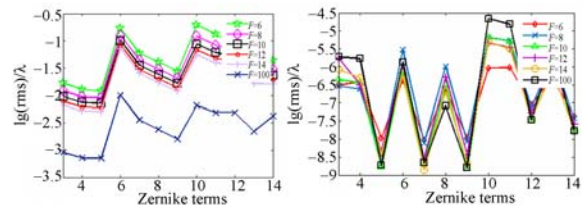
Fig. 5 Surface error in simulation

3.1.2 F 数的影响

为了验证 F 数对 Zernike 像差单位激励数值计算方法的影响,针对第 3~14 项 Zernike 像差,包括离焦、0 度初级像散、45 度初级像散、x 轴初级彗差、y 轴初级彗差、倾斜三叶像差、垂直三叶像差、初级球差、0 度二级像散、45 度二级像散、倾斜四叶像差、垂直四叶像差;分别仿真仅包含一种

Zernike 像差的平面镜面形,再利用所提方法与影响矩阵法分别进行面形恢复,以分析各种像差在不同 F 数下的计算精度。

设定瑞奇角分别为 26.5° 与 40.6° , d 为 1000 mm ,分别变更 F 数为 $6, 8, 10, 12, 14, 100$,重构系统波像差分布。按照 3.1.1 节所述,求得仿真偏差如图 6 所示。影响矩阵法的偏差随着 F 数的增大逐渐变小,单位激励法则基本抑制了 F 数的影响。对于个别像差,如第 6 项、第 10 项,影响矩阵法的计算误差较大,单位激励法则对于每一种像差都有较好的计算精度。在 F 数为 100 时,满足影响矩阵法所需要的近似条件为: $\frac{\tan \theta}{2F/\#} \ll 1$,检测误差小于 0.01λ 。由于干涉仪检测精度的限制,影响矩阵法与单位激励法的实际检测效果在此时趋同。



(a)影响矩阵法

(b)单位激励法

(a) Unit-excitation method (b) Influence matrix method

图 6 仿真偏差

Fig. 6 Error in simulation

3.2 实验

首先用 Zygo 干涉仪检测反射球面镜的面形偏差,标定系统误差,如图 7 所示,其 PV 值为 0.1547λ ,RMS 为 0.0123λ 。

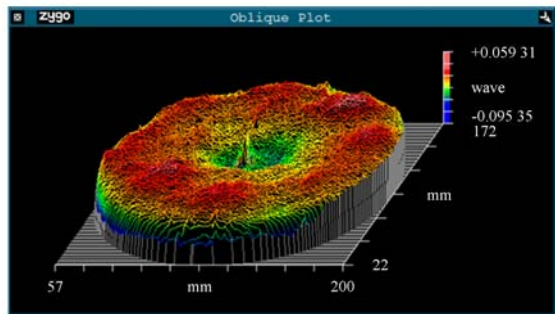


图 7 反射球面镜面形

Fig. 7 Surface shape of Ritchey sphere

然后搭建瑞奇-康芒检测光路,实验检测装置如图 8 所示,被测平面镜口径 L 为 90 mm ,反射

球面镜口径为 300 mm,曲率半径为 1 000 mm, $d=850$ mm,选用 $F=3.3$ 的干涉仪标准镜头,测试波长为 632.8 nm,出射的发散光束焦点与球面镜曲率中心重合。

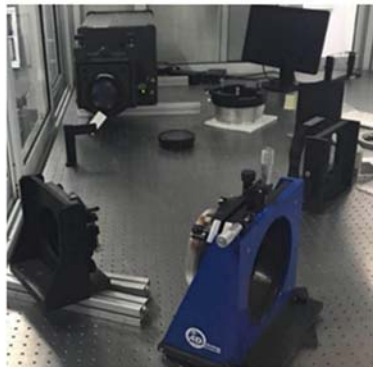
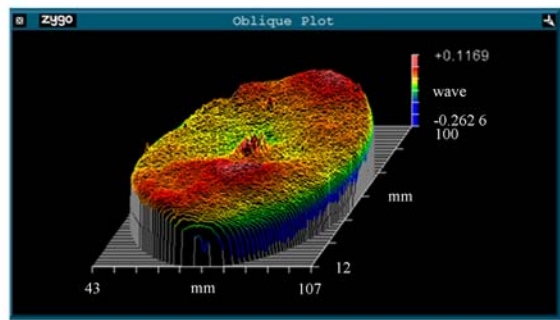


图 8 瑞奇-康芒检测装置
Fig. 8 Ritchey-Common test set up

在瑞奇角分别为 26.5°与 40.6°时,采集到的近椭圆形系统波像差如图 9(a)和 9(b)所示。

系统波像差包含两部分,一部分由球面镜面形引入,一部分由待测平面镜面形引入。在两瑞奇角下系统波像差测定实验过程中,首先通过十字叉丝定位标准镜头、待测平面镜与球面镜,使得干涉仪镜头焦点、待测平面镜几何中心与球面镜的曲率中心三点对齐在主光轴上。根据光路几何性质,可以计算出待测平面镜边界在球面镜所在平面上的大小。从而可以在图 7 所示的球面镜面形检测结果中框定椭圆光瞳范围内的球面面形数据,进而实现系统波像差与球面面形的点对点相减,得到待测平面镜在瑞奇-康芒光路中所引入的波像差。



(b) 40.6°系统波像差
(b) System wavefront aberration in 40.6°

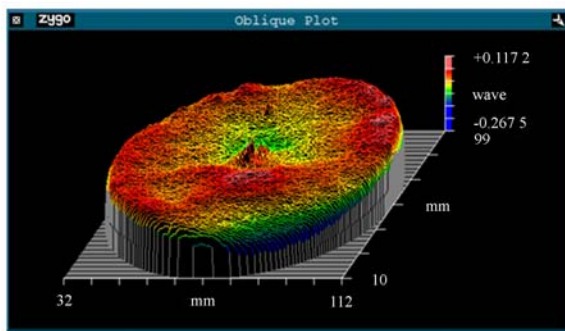
图 9 近椭圆形系统波像差

Fig. 9 Wavefront aberration of elliptical system

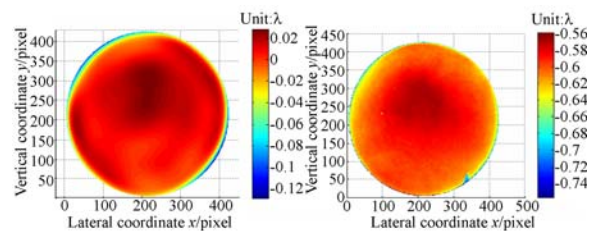
将待测平面镜引入的波像差去除常数项、倾斜项与离焦项,分别拟合两个瑞奇角度下的系统波像差系数得到 Zernike 系数向量 W_s, W_t ,然后通过单位激励法分别计算两个瑞奇角度下的系数影响矩阵 A_s, A_t ,结合公式(1)将两组数据联立为

$$\begin{bmatrix} A_s \\ A_t \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} W_s \\ W_t \end{bmatrix}$$

通过 Zernike 重构得到被测平面面形如图 10(a)所示,其面形 PV 值为 0.141 3λ,RMS 为 0.019 4λ。使用 Zygo 干涉仪直接测量平面镜,得到被测平面面形如图 10(b)所示,PV 值为 0.138 6λ,RMS 为 0.018 6λ。将两者相减,得到偏差如图 11 所示,PV 值为 0.082 8λ,RMS 为 0.010 9λ。由实验结果可知,采用单位激励影响矩阵计算方法的瑞奇-康芒检验,可以精确恢复平面镜面形。



(a) 26.5°系统波像差
(a) System wavefront aberration in 26.5°



(a) 瑞奇-康芒法 (b) Zygo 干涉仪
(a) Ritchey-Common method (b) Zygo interferometer

图 10 检测结果

Fig. 10 Test results

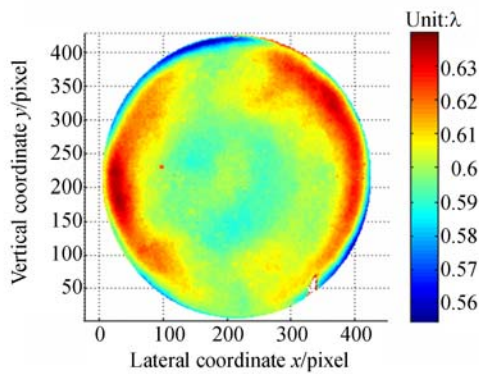


图 11 实验偏差

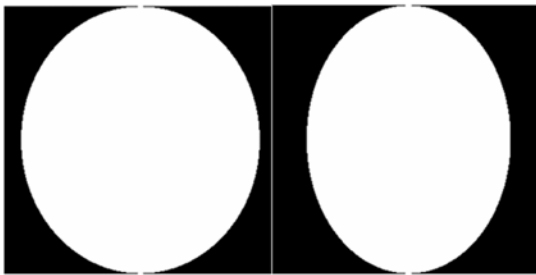
Fig. 11 Error in experiment

4 讨论

4.1 瑞奇角计算

影响矩阵中的各元素是以瑞奇角 θ 为变量的函数,所以瑞奇角的精确计算在瑞奇-康芒检验中十分重要。通常根据光路的几何三角关系计算瑞奇角,但是三边长的手工测量对操作员的测量技能要求较高。

本文根据干涉仪获取图像的压缩比例来计算瑞奇角,测出干涉仪镜头焦点沿光轴到被检平面镜的距离 d 为 850 mm,平面镜口径 L 为 90 mm,半径为 45 mm,归一化为 $d=850/45\approx 18.89$,利用图像边缘检测法获取图像边界如图 12 所示。



(a) 26.5°

(b) 40.6°

图 12 边缘检测图

Fig. 12 Edge detection images

测出椭圆的长短轴长度,分别为 p, q , 设 $n=q/pn_a$ 。瑞奇角可由公式(9)推得:

参考文献:

[1] 刘晓梅. 光学平面的绝对检测[D]. 南京:南京理工

$$\cos \theta = \frac{d^2 - \sqrt{d^4 - 4n(n \times d - n)}}{2n}, \quad (9)$$

计算得到瑞奇角分别为 26.5° 与 40.6° 。

4.2 对准误差

在干涉仪获取系统波像差后需要扣除球面镜的面形,以分离出被测平面所引入的系统波像差。然而在实验中,很难将干涉仪焦点、平面镜圆心与球面镜圆心三点同时准确地对齐在主光轴上,在扣除系统误差时无法做到波前的点对点精确相减,从而引入球面差分误差。

将球面镜面形表征为 $W(x, y)$,则当作瑞奇-康芒检测时,主光轴偏离球面镜圆心,经过 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 时,引入的误差为 $\frac{\partial W}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial W}{\partial y} \Delta y$ 。

因此在实际检验中,为了减小这种误差,应尽量选用面形较好的球面镜。

4.3 标准平面镜偏差

在使用 Zygo 干涉仪直接测量平面镜作对比实验时,得到的检测结果会引入标准镜头本身的面形偏差。标准镜头的面形 PV 值为 0.05λ ,结合石英玻璃本身对于 632.8 nm 波长光束的折射率约为 $1.54^{[16]}$,则在最终结果中将引入约 0.0770λ 的偏差,与之前得到的偏差 PV 值 0.0828λ 相比,两者相当。标准平面镜所引入的面形偏差有可能是误差的主要来源之一,下一步工作将会对标准平面镜的面形进行标定,进一步确定标准镜所引入的误差。

5 结论

本文采用单位激励影响矩阵数值算法,避免了繁复的公式推导与矩阵计算,可以更为精确地计算影响矩阵,提高了影响矩阵法瑞奇-康芒检验的检测精度。通过仿真验证了本方法可以抑制瑞奇-康芒检验中对于光路大 F 数的依赖,通过算法仿真与实验对比验证了本方法的正确性。与平面干涉仪检测相比,单位激励影响矩阵数值算法的误差 RMS 值为 0.0109λ ,检测结果可以真实地反映被测平面镜的面形。

大学,2004:1-2.

LIU X M. Absolute Measurement of Optical Plane [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2004:1-2. (in Chinese)

- [2] KIM C J, WYANT J. Subaperture test of a large flat on a fast spherical surface[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1981,71:15-87.
- [3] 丁凌艳,戴一帆,陈善勇. 平面子孔径拼接测量研究[J]. *光学精密工程*, 2008,16(6):978-985.
DING L Y, DAI Y F, CHEN SH Y. Experiment of sub-aperture stitching interferometry for flat mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):978-985. (in Chinese)
- [4] LIU Y M, LAWRENCE G N, KOLIOPOULOS C L. Subaperture testing of aspheres with annular zone[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4504-4513.
- [5] FLEIG J, DUMAS P, MURPHY P, et al.. An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces[J]. *SPIE*, 2003, 5188: 296-307.
- [6] 马冬梅,刘志祥,马磊,等. 五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析[J]. *光学精密工程*, 2008,16(12):2517-2523.
MA D M, LIU ZH X, MA L, et al.. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2517-2523. (in Chinese)
- [7] 韩志刚,陈磊,高波,等. 基于斜入射的平面度绝对检验方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011,32(3):707-712.
HAN ZH G, CHEN L, GAO B, et al.. Absolute flatness measurement method based on oblique incidence testing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011,32(3):707-712. (in Chinese)
- [8] SHU K L. Ray-trace analysis of alignment and data reduction methods for the Ritchey-Common test[J]. *Applied Optics*, 1983,22(12):1879-1892.
- [9] 曹根瑞. 计算机辅助的瑞奇-康芒检验[J]. *北京工业学院学报*, 1988,8(4):46-53.
CAO G R. Computer-assisted Ritchey-Common test[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1988,8(4):46-53. (in Chinese)
- [10] 张宗. $\Phi 1.1$ 米平面镜的瑞奇-康芒检验方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- ZHANG Z. *Study on the Ritchey-Common Test of $\Phi 1.1$ m Flat Mirror*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 朱硕,张晓辉. 高精度瑞奇-康芒检测法研究及测试距离精度影响分析[J]. *光学学报*, 2014,34(1):121-128.
ZHU SH, ZHANG X H. Study on high precision Ritchey-Common test and analysis of test distance influence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 121-128. (in Chinese)
- [12] 朱硕,张晓辉. 误差分离技术在平面镜瑞奇-康芒法检测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2014,22(1):7-12.
ZHU SH, ZHANG X H. Application of error detaching to Ritchey-Common test for flat mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 7-12. (in Chinese)
- [13] 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.
TIAN X Y, WANG SH 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. (in Chinese)
- [14] 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.
YUAN L J, XING N. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics[J]. *Optical Technique*, 2007,33(5):737-744. (in Chinese)
- [15] 姜自波,李新南,季波. 空气垂直温度梯度对长焦镜面检测精度的影响分析[J]. *光学学报*, 2015,35(10):1012004.
JIANG Z B, LI X N, JI B. Influence analysis of testing accuracy for long focal length mirror by vertical temperature gradient of air[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015,35(10):1012004. (in Chinese)
- [16] GHOSH G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals[J]. *Optics Communications*, 1999,163(1-3):95-102.

作者简介:



刘一鸣(1993—),男,江苏徐州人,2015年于江苏师范大学获得学士学位,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: liuyiming17@163.com

导师简介:



陈磊(1964—),男,江苏南京人,博士,研究员,博士生导师,1987年、1990年、1997年于南京理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密光学测试与光电智能化仪器等方面的研究。E-mail:chenlei@njjust.edu.cn