

文章编号 1004-924X(2014)01-0007-06

误差分离技术在平面镜瑞奇-康芒法检测中的应用

朱 硕^{1,2*}, 张晓辉¹

(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 130049)

摘要: 为了提高瑞奇-康芒法检测平面镜面形误差的精度, 提出了利用检测系统光瞳面与被检平面镜表面的坐标映射关系插值拟合平面镜面形的方法。结合最小二乘法分析, 解算了由光路调整引入的离焦误差, 获得了更为真实的平面镜面形误差。理论仿真分析显示, 此方法的平面镜测量误差可控制在 $\lambda/100$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 量级。对口径为 40 mm 的小口径平面镜进行了实际检测, 检测过程中通过多角度旋转被测平面镜, 利用坐标映射关系和幅值转换关系对测试波前进行恢复, 在分离系统离焦误差后得到被检平面镜面形 RMS 值为 0.018 6 λ , 与干涉仪直接检测得到的 RMS 值 0.021 λ 相比, 残差为 0.002 4 λ 。实验结果证明了此种误差分离技术在瑞奇-康芒法对平面镜面形检测时的有效性与准确性。

关键词: 光学检测; 平面镜; 瑞奇-康芒法; 误差分离; 最小二乘法

中图分类号: TH706 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20142201.0007

Application of error detaching to Ritchey-Common test for flat mirrors

ZHU Shuo^{1,2*}, ZHANG Xiao-hui¹

(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)*

* *Corresponding author, E-mail: zhushuo1986@126.com*

Abstract: To improve the accuracy of Ritchey-Common test for a flat mirror, a new method to use the relationship between the system pupil coordinate and the test mirror coordinate to interpolate and fit the test mirror surface was proposed. On the basis of the least square method, the system defocus error and surface error in two test angles were detached to gain a more actual flat surface error. The simulation analysis shows that the test error can be controlled under $\lambda/100$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$). A flat mirror with a diameter of 40 mm was tested. In the test process, the test flat mirror was rotated with different angles and the wavefront was reconstructed through the relationship between coordinate mapping and amplitude conversion. The obtained results show that the RMS of the test mirror surface is 0.018 6 λ after detaching the defocus error of the system. As compared with the test RMS of 0.021 λ from an interferometer, the residual error is 0.002 4 λ . Experiment results indicate that this error detaching method is valid and accurate in the Ritchey-Common test for flat mirrors.

Key words: optics test; flat mirror; Ritchey-Common method; error detaching; least square method

收稿日期: 2012-07-02; 修订日期: 2012-07-18.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA040503); 国家自然科学基金重点项目 (No. 11034007)

1 引言

大口径平面镜在空间光学、天文光学等领域有着广泛的应用。随着平面镜口径的增大,对其面形检测精度的要求也越来越高。在光学平面镜面形检测中,干涉测量法是一种常用的方法。目前,可用于平面检测的商业干涉仪的最大口径为 800 mm,因此对于口径超过 800 mm 的平面镜,干涉仪无法对它进行直接检测^[1]。常用的间接检测方法主要有子孔径拼接法、五棱镜扫描法和瑞奇-康芒法(Ritchey-Common, RC)等。子孔径拼接法对子孔径重叠部分信息进行计算分析后得到面形检测结果^[2-3],但其检测时间较长,且在装调和子孔径拼接的过程中误差会累积与传递,难以保证测试精度^[4]。五棱镜扫描法通过五棱镜、大行程导轨并结合自准直仪对被测平面镜各点法线方向上的角度偏移量进行测试,测试过程中难以确保大行程导轨在测试方向上的稳定性以及测角装置的精度^[5]。RC 法尽管需要配备一块高精度的球面反射镜来实现平面镜检测,但该方法直观、易于实现,且具有很高的检测稳定性,因而被广泛应用于大口径平面镜检测,并已成为 1 m 以上大口径平面镜的常用检测方法。

20 世纪 80 年代,国外提出用计算机模拟光线追迹搭建检测光路,通过 Zernike 多项式表示平面面形误差的具体形式找出了面形误差与系统波像差之间的影响函数^[6],进而求得被检平面的面形误差,有效地解决了 RC 的数据处理问题。2003 年,Sen Han 运用 RC 法借助 veeco 干涉仪完成了大口径六边形平面镜的检测^[7]。目前,国外对 RC 检测方法的研究已经相对成熟,并取得了较高的检测精度。近年来,随着我国对大口径光学系统研究的深入,对 RC 法的检测精度要求也越来越高。

本文针对瑞奇-康芒法的检测精度,提出了一种利用坐标映射关系结合最小二乘法分析两角度面形检测数据,并分离出系统离焦像差的误差分离方法。此方法的测量误差可控制在 $\lambda/100$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 量级。文中通过实验证明了这种误差分离方法可以提高 RC 法的检测精度。

2 误差分离技术原理

图 1 为 RC 法检测的原理图。干涉仪准直光束经过标准球面镜头变成发散光束,焦点位于球面反射镜的曲率中心。被检平面镜以一定的瑞奇角 θ (发散光束光轴与被检平面镜法线的夹角) 插入光路中^[8]。发散光束经过平面镜反射到球面镜上,再沿原光路返回与干涉仪内部的参考光束发生干涉,最后根据所测波前图来计算平面镜的面形误差。该方法要求球面镜口径略大于被检平面镜,通过调整不同瑞奇角下被检平面镜与标准球面反射镜的位置实现小口径干涉仪检测大口径平面镜的目的。

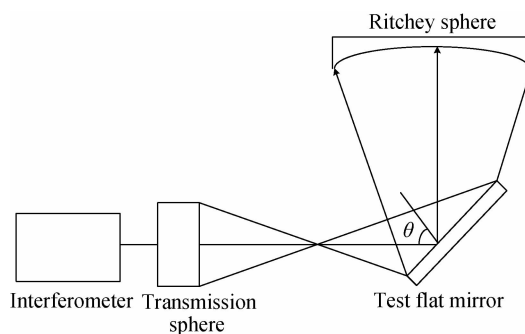


图 1 瑞奇-康芒法检测原理图

Fig. 1 Principle of Ritchey-common test

2.1 光瞳面坐标与被检平面坐标的映射关系

在 RC 检测中,由于光束是以一定的瑞奇角倾斜入射到平面镜上的,所以系统检测光瞳面上的光斑形状为椭圆^[9]。分别建立被检平面坐标系与光瞳面坐标系,如图 2 所示。 x_s, y_s 表示被检平面坐标系, x_p, y_p 表示光瞳面坐标系。

利用几何关系推导出被检平面坐标系和光瞳面坐标系之间的关系为:

$$x_s = \frac{d \cdot x_p}{d \cdot \cos \theta - x_p \cdot \sin \theta}, \quad (1)$$

$$y_s = \frac{y_p \cdot (d + x_p \cdot \sin \theta)}{d}, \quad (2)$$

式中: d 表示干涉仪焦点到平面镜中心的距离。在光轴倾斜入射的发射光路中入射角可以表示为:

$$\cos \varphi = \frac{d \cdot \cos \theta}{\sqrt{(d \cdot \sin \theta + x_p)^2 + y_p^2 + (d \cdot \cos \theta)^2}} \quad (3)$$

被检平面以一定的瑞奇角 θ 插入到光路中, 平面镜面形误差 $S(x_s, y_s)$ 引起了系统波像差 $W(x_p, y_p)$ 的变化。经过两次反射后, 二者的关系为:

$$S(x_s, y_s) = T \left[\frac{W(x_p, y_p)}{4 \cdot \cos \varphi} \right], \quad (4)$$

式中: $T[\cdot]$ 表示光瞳面坐标系 (x_p, y_p) 通过式(1)和式(2)映射到被检平面坐标系 (x_s, y_s) 的算子。

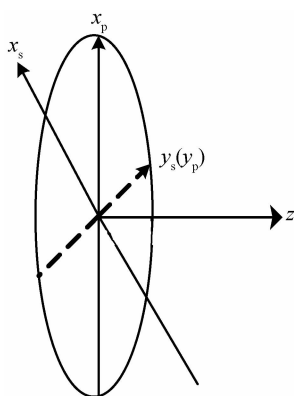


图 2 光瞳面与被检平面的坐标关系

Fig. 2 Relation between pupil coordinate and flat coordinate

2.2 两角度检测分离系统误差

光学检测通常不关注被检平面面形的常数项影响。平面镜弧矢方向的倾斜不会导致主光线入射角的偏离, 所以不作为波像差的引入因素。因此, 干涉仪检测到的波像差可以分解为 4 部分: 干涉仪球面镜头的面形误差、标准球面反射镜的面形误差、被检平面的面形误差以及干涉仪离焦引入的误差。其中, 干涉仪球面镜头和标准球面反射镜的面形误差可以预先标定, 并作为系统误差予以补偿。而调整检测光路引入的干涉仪离焦误差与平面镜面形误差混在一起, 单次检测无法将它们区分开。

为了得到真实的平面镜面形误差, 采用两次角度检测来分离系统误差与面形误差^[10]。假设 $S_1(x_s, y_s)$ 、 $S_2(x_s, y_s)$ 为两次面形检测结果,

$S_0(x_s, y_s)$ 为被测平面镜的实际面形, 两次测试结果分别表示为:

$$S_1(x_s, y_s) = S_0(x_s, y_s) + a_1 \cdot D_1(x_s, y_s), \quad (5)$$

$$S_2(x_s, y_s) = S_0(x_s, y_s) + a_2 \cdot D_2(x_s, y_s), \quad (6)$$

其中: a_1, a_2 分别表示两次角度检测中由系统调整误差引入的离焦项的系数; D_1, D_2 分别表示光瞳面泽尼克多项式离焦项映射到被检平面坐标系下的面形误差。当 θ 分别为 20° 和 34° 时, 被检平面坐标系下离焦项面形误差的形状如图 3 所示。

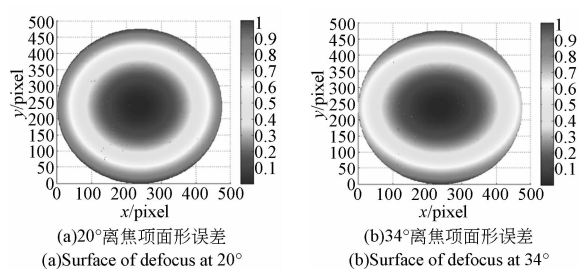


图 3 不同瑞奇角下平面坐标系离焦项面形

Fig. 3 Surface shapes at different Ricthey angles

式(5)与式(6)相减可以得到与真实面形无关的系统误差多项式:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = a_1 D_1 - a_2 D_2 = a \mathbf{D}, \quad (7)$$

$$a = \Delta \mathbf{S} \mathbf{D}^T (\mathbf{D} \mathbf{D}^T)^{-1}. \quad (8)$$

对整个检测口径内的所有数据点进行最小二乘法拟合, 利用式(8)分离出两次角度检测的系统误差系数 a , 最后得到两次角度检测法的最优解 $S_0^* = S_1 - a_1 \cdot D_1$ 或者 $S_0^* = S_2 - a_2 \cdot D_2$ 。

在实际检测中, 在确定两次测试角度以及干涉仪焦点到平面镜中心的距离 d 之后, 对于不同的被测平面镜可以确定系统引入的离焦, 并预先计算予以剔除。

3 实验系统组成

实验系统主要由 4D 干涉仪、球面镜头、标准球面镜与被测平面镜 4 个部分组成, 如图 4 所示。由 4D 干涉仪球面镜头产生发散球面波, 经待测平面镜反射到标准球面镜, 光束再按原路返回后与干涉仪内部的参考光束产生干涉。标准球面镜

口径为 280 mm, 曲率半径为 1 172 mm。为了验证 RC 法的检测精度, 被检平面镜口径选为 40 mm, 以方便干涉仪直接检测面形作为对比结果。干涉仪焦点到平面镜中心的距离为 675 mm, 标准球面反射镜上的光斑能够完全返回入射到面形内部。在不同的瑞奇角下分析比较面形误差对系统波像差的影响可知, 瑞奇角选择过大时检测误差增大, 在瑞奇角 $\leq 45^\circ$ 时影响相对稳定, 但瑞奇角过小会导致光线重叠, 难以保证检测精度。实验选择 20, 30, 25 和 34° 这 4 个角度进行测试。

实验首先对标准球面反射镜进行检测, 得到球面镜的面形误差; 第二步搭建 RC 检测光路获得系统波像差, 在搭建光路的过程中保证干涉仪标准镜头、被测平面镜与标准球面镜的中心对准, 光轴一致, 从而保证检测精度; 第三步旋转被测平面镜, 改变瑞奇角进行第二次检测。在旋转被测平面镜时, 仍然要保证三镜的中心对准且光轴一致, 微调光路直到干涉仪所测得的波像差稳定为止。在第一组瑞奇角 20, 30° 下测试后, 为了进一步验证不同角度下的实验精度, 改变瑞奇角, 再在 25 和 34° 下进行检测。最后利用 Zygo 干涉仪直接检测平面镜面形^[11], 对比实验 RC 法与干涉仪直接检测的结果来分析 RC 法的检测精度。



图 4 实验平台示意图

Fig. 4 Experimental setup

4 实验结果与分析

经过多次检测得到瑞奇角分别为 20, 30, 25 和 34° 时的系统波像差, 使用上述 RC 检测算法对测得的波像差进行恢复与分析处理, 利用坐标映射关系和幅值转换关系插值拟合得到被测平面镜的面形, 如图 5(a)~(d) 所示。解算各瑞奇角的

平面镜面形 RMS 值, 如表 1 所示。

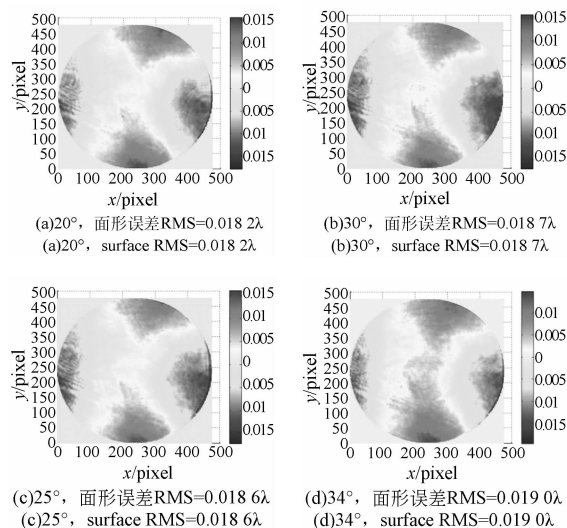


图 5 多角度检测面形误差

Fig. 5 Surface deviations at different RC angels

表 1 不同瑞奇角时的面形 RMS

Tab. 1 RMS at different RC angels

瑞奇角/(°)	RMS 值(λ)
20	0.018 2
30	0.018 7
25	0.018 6
34	0.019 0

本实验采用所提出的误差分离方法对瑞奇角分别为 20° 和 30°, 25° 和 34° 的 2 组测试结果通过坐标映射关系恢复波像差后, 结合最小二乘法分析面形数据, 最终分离出系统误差, 结果如表 2 所示。

使用 Zygo 干涉仪直接检测平面镜, 检测结果如图 6 所示。被检平面镜的面形误差 RMS 值为 0.021 λ 。

表 2 误差分离后的平面镜面形 RMS 值

Tab. 2 RMSs after surface error detaching

瑞奇角/(°)	离焦系数(10^{-2})	误差分离后平面镜 RMS(λ)
20	0.054 7	0.018 3
30	-0.011 2	0.018 8
25	0.130 0	0.018 6
34	0.080 0	0.018 9

经误差分离之后,比较 4 组分离结果并对其 RMS 值进行误差分析,平均检测结果得到 RMS 为 0.0186λ ,均方根误差为 0.0002 ,显示此方法能够保证检测的结果的稳定性^[12],对比干涉仪直接检测结果 0.021λ ,残差值为 0.0024λ ,满足精度要求。

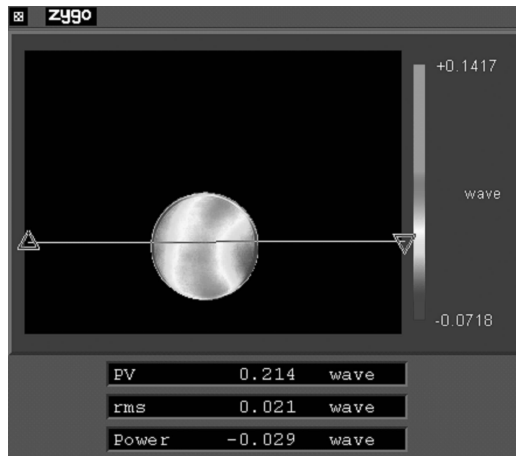


图 6 Zygo 干涉仪测得的平面镜面形
Fig. 6 Flat surface measured by Zygo

实验结果验证了本文所提出的误差分离方法的可行性。两组数据的测试结果也表明了在不同瑞奇角组合条件下,该方法仍然可以有效地分离系统的离焦误差。

为了进一步减小残差,提高 RC 法的检测精度,使用 Zygo 干涉仪对标准球面镜进行检测标定,结果如图 7 所示。标准球面镜面形的 RMS 值约为 $\lambda/100$,由于面形精度较高,实验中可以忽略其面形误差的影响。但是还存在其它的误差:光束倾斜入射形成的近似椭圆域展开为圆域时,插值拟合造成面形平滑,镜面的高频误差无法体现;随着瑞奇角的增大,测得的面形误差会有一定偏差,所以实验中瑞奇角不能太大;在平面镜转动改变瑞奇角的过程中,需要保证平面镜中心在干涉仪光轴上且距离焦距点 d 的长度保持不变,从

而可通过高精度转台或高精度测量装置来减小位置误差;实验过程中为了减小人为和环境的影响,必须多次测量取稳定的检测数据进行计算。

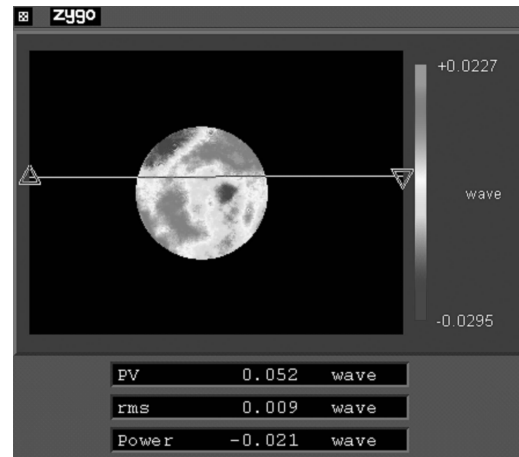


图 7 Zygo 干涉仪测得的标准球面镜面形
Fig. 7 Surface of standard sphere mirror measured by Zygo

5 结 论

为提高 RC 法的检测精度,本文利用两角度测试及坐标映射关系,结合最小二乘法分析面形数据解算出由光路调整引入的离焦误差。通过实验验证了这种误差分离方法的有效性与精确性。对口径为 40 mm 的小口径平面镜进行了检测,通过实验测得波前恢复被测平面镜面形,并经本文提出的误差分离方法进行分离处理后得到面形 RMS 值为 0.0186λ 。对比干涉测量法直接检测结果 0.021λ 可知,面形检测精度优于 0.0024λ ,误差可以控制在 $\lambda/100$ 量级,检测结果更为真实地反映出了被测平面镜的面形。实验表明,此种误差分离方法可以提高 RC 法的检测精度,并满足实际测试的精度要求。

参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York: Wiley, 2007.
- [2] 王孝坤,王丽辉,张学军.子孔径拼接干涉法检测非球面[J].光学精密工程,2007,15(2):192-198.
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing

asphere by sub-aperture stitching interferometric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 192-198. (in Chinese)

- [3] 王孝坤.子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿[J].中国光学,2013,6(1):88-95.
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching

- interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [4] 李新南, 张明意. 大口径光学平面的子孔径拼接检测研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(4): 514-517.
LI X N, ZHANG M Y. Study in the sub-aperture stitching interferometry for large plano-optics[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(4): 514-517. (in Chinese)
- [5] 马冬梅, 孙军月, 张波, 等. 高精度大口径平面镜面形角差法测试探究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(S0): 121-126.
MA D M, SUN J Y, ZHANG B, *et al.*. High precision large flat mirror measurement by angle difference testing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(S0): 121-126. (in Chinese)
- [6] SHU K L. Ray-trace analysis and data reduction method for the Ritchey-Common test[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(12): 1879-1886.
- [7] HAN S, NOVAK E, SCHURING M. Application of Ritchey-Common test in large flat measurements [J]. *SPIE*, 2001, 4399(67): 131-136.
- [8] 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.
TIAN X Y, WU S H B, WU F, *et al.*. A data progress method in Ritchey-Common test[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 23-31. (in Chinese)
- [9] 曹根瑞, 安德逊, 邵联贞, 等. 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, ANDERSON, SHAO L ZH, *et al.*. Computer added Ritchey-Common test [J]. *Journal of Beijing Inst. Technol.*, 1988, 8(4): 46-53. (in Chinese).
- [10] 袁吕军, 邢娜. 大口径光学平面镜瑞奇-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)
- [11] ZYGO CORPORATION. *Ritchey-Common Metropro Application*[M]. Connecticut: ZYGO Corporation, 2004.
- [12] 毛英泰. *误差理论与精度分析*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
MAO Y T. *Theory of Error and Precision and Analysis*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)

作者简介:



朱 硕(1986-), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 2009 年于长春工业大学获得学士学位, 主要从事高精度大口径光学平面镜面形检测等方面的研究。E-mail: zhushuo1986@126.com

导师简介:



张晓辉(1967-), 女, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1991 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光学检测、像质评价技术等方面的研究。E-mail: zhangxiaohui0123@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)