

# 高精度瑞奇-康芒检测法研究及测试 距离精度影响分析

朱 硕<sup>1,2</sup> 张晓辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为实现高精度瑞奇-康芒法检测,利用检测系统光瞳面与被测平面镜二者间的坐标转换关系,结合最小二乘法直接对测得的系统波像差进行恢复,通过两角度检测分离由光路调整引入的离焦误差,得到更为精准的平面镜面形。分析光路中测试距离对坐标转换关系以及瑞奇角求解精度的影响,根据仿真分析结果确定实验方案。实验中采用两角度检测,对测试波前进行恢复并分离系统调整误差后,最终得到被检平面镜面形,结果峰谷(PV)值为 $0.182\lambda$ 、均方根(RMS)值为 $0.0101\lambda$ ,对比干涉仪直接检测结果 PV 值为 $0.229\lambda$ 、RMS 值为 $0.013\lambda$ ,PV 检测精度优于 $\lambda/20$ ,RMS 检测精度优于 $\lambda/100$ ,实验结果证明了此种面形恢复方法的有效性以及测试距离精度分析理论的正确性,从而实现了瑞奇-康芒法高精度检测。

**关键词** 测量;瑞奇-康芒;精度分析;平面镜;面形误差;测试距离

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0112001

## Study on High Precision Ritchey-Common Test and Analysis of Test Distance Influence

Zhu Shuo<sup>1,2</sup> Zhang Xiaohui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to realize high precision Ritchey-Common test for large flat mirrors, the relationship between the system pupil coordinate and test flat mirror surface coordinate is utilized to dispose the test wavefront, and then combine with the least square method to detach the alignment errors which are caused by the adjustments of optical system, after this an exact flat surface can be obtained. It analyzes the effects of the test distance on the relationship between the two coordinates and the value of Ritchey angle, and makes the test program according to analysis. In the test process, two measurements in different angles have been taken and the wavefront is found, after detaching the power errors, the peak-valley (PV) and root mean square (RMS) of the final results are  $0.182\lambda$  and  $0.0101\lambda$ , compared with the results of Zygo which are  $0.229\lambda$  and  $0.013\lambda$  for PV and RMS, the test accuracies of PV and RMS can reach  $\lambda/20$  and  $\lambda/100$ , respectively. The experimental results prove that this method is effective to calculate the test flat surface and the theory of accuracy analysis is correct, it also realizes the high accuracy of Ritchey-Common test.

**Key words** measurement; Ritchey-Common; accuracy analysis; flat mirror; surface error; test distance

**OCIS codes** 120.3180; 120.4820; 120.3930; 120.6650; 220.4840

收稿日期: 2013-04-02; 收到修改稿日期: 2013-05-10

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)、国家自然科学基金重点项目(11034007)

作者简介: 朱 硕(1986—),女,博士研究生,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: zshuo2011@163.com

导师简介: 张晓辉(1967—),女,研究员,博士生导师,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

## 1 引言

大口径平面镜是光学检测中常用的标准器具,是大口径光学元件、仪器自准检验的必备设备,对其面形精度有很高的要求,需要有相应的高精度检测手段来判断其面形精度是否达到要求<sup>[1-5]</sup>。随着科学技术的发展,平面镜的口径越来越大,传统的干涉测量法无法直接对口径超过 800mm 的平面镜进行检测。目前较为常用的间接检测方法主要有斜入射法、子孔径拼接法、瑞奇-康芒法等<sup>[6]</sup>。斜入射法以一块面形较好的平面镜作为参考镜,光路结构相对简单,但检测时要根据被测平面镜的形状以及尺寸来计算其相对于干涉仪的倾斜角度,并且只在一个方向上对测试范围做了扩展,只能在特定的情况下实现全口径检测,测试具有一定的局限性;子孔径拼接法利用各个子孔径重叠部分信息提取相邻子孔径间的相对平移和旋转,最终将全部信息统一到同一坐标系下,从而恢复出全口径面形结果,检测过程较长,在装调和拼接过程中都会造成误差的传递与累积,测试精度较难保证<sup>[7-11]</sup>;瑞奇-康芒法在测试过程中需要一块口径大于被检平面镜约 1.3 倍的高精度球面镜作为参考镜,相对大口径干涉仪容易制作与检验,具有较高的检测稳定性且易于实现,在大口径平面反射镜检测中较为常用。

早期的瑞奇-康芒检验只能实现半定量的检测,1983 年,Shu<sup>[12]</sup>利用计算机模拟光线追迹搭建仿真光路,通过 Zernike 多项式表达面形误差与系统波像差的具体形式在近似条件下推导出了二者之间的

影响函数<sup>[13-14]</sup>,并利用此影响函数求出平面镜面形误差的 Zernike 多项式系数进而拟合出平面镜的面形,但此函数的推导过程十分复杂,且在使用 Zernike 系数拟合面形的过程中会带来拟合误差影响测试精度。

在以上研究的基础上,本文通过理论分析,根据瑞奇-康芒检测原理直接对测得的系统波像差进行坐标及幅值关系的处理,避免了使用多项式拟合带来的误差,分离出了调整误差影响,恢复得到了被检平面镜的面形。分析讨论了测试过程中干涉仪标准球面镜头焦点到被检平面镜中心距离的测量精度对检测的影响,根据结论确定适于测试的方案。通过对比瑞奇-康芒法检测小口径平面镜与干涉仪直接检测的结果,证明了这种波前恢复处理方法的有效性并验证有关测试距离精度分析理论的正确性,为提高瑞奇-康芒法的检测精度提供理论依据。

## 2 基本原理

瑞奇-康芒检测原理为:由干涉仪发出的准直光经过标准镜头形成发散光束,标准镜头的焦点与选取的标准球面镜的曲率中心重合,被测平面镜以一定的角度(即瑞奇角,发散光束光轴与被检平面镜法线的夹角)插入到发散光路中,光束经被测平面镜反射到标准球面镜,再由标准球面镜反射再次经过被测平面镜后按原路返回到干涉仪与其内部参考光束发生干涉,最终利用测得波像差分析计算出平面镜的面形误差。图 1 为瑞奇-康芒检测原理图。

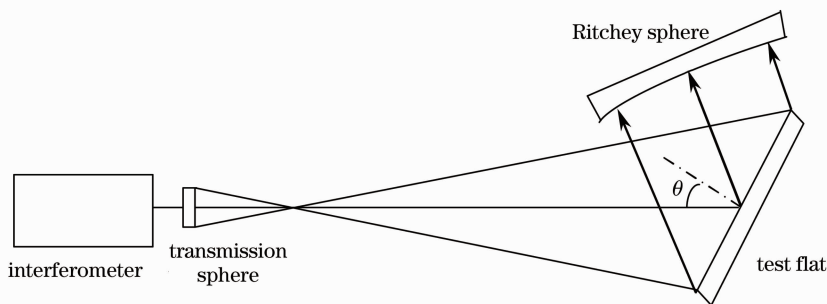


图 1 瑞奇-康芒法检测原理图

Fig. 1 Ritchey-Common test setup

### 2.1 位置及幅值转换关系模型

在瑞奇-康芒检测光路中,由于被测平面镜以一定的角度插入到光路中,导致被测镜表面坐标系与光瞳面坐标系之间存在一定夹角,二者并不重合,在系统的光瞳面上形成近似为椭圆形的光斑,在一个方向上产生了压缩。分别建立被检平面坐标系与

光瞳面坐标系,如图 2 所示,其中  $x_s, y_s$  表示被检平面的表面的坐标系,  $x_p, y_p$  表示光瞳面坐标系。

为得到平面镜的实际面形误差,需要将压缩图像进行展开处理,根据图 2 利用几何关系推导出平面表面坐标系和光瞳面坐标系之间的关系为

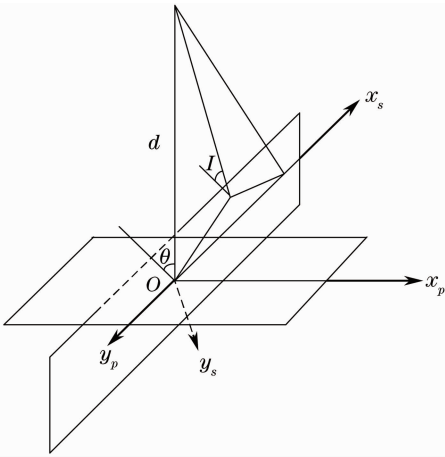


图2 光瞳面与被检平面的坐标关系

Fig. 2 Relationship between pupil coordinate and flat coordinate

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

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

式中  $d$  表示干涉仪镜头焦点到被检平面镜中心的距离。在发散光路中,平面镜上每一点的入射角大小都不相同,根据几何位置关系任意的入射角可以表示为

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

被测平面镜以一定角度  $\theta$  插入到光路中,平面镜面形误差  $\mathbf{S}(x_s, y_s)$  引起了系统波像差  $\mathbf{W}(x_p, y_p)$  的变化,二者之间的关系会随光线在平面镜上入射角大小的不同而不同。在经过两次反射后,二者的关系可表示为

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

式中  $T(\cdot)$  表示光瞳面坐标系  $(x_p, y_p)$  通过(1)、(2)式映射到平面表面坐标系  $(x_s, y_s)$  的幅值转换函数。利用上述转换关系对测得系统波像差进行处理即是对压缩图像的展开,从而恢复出平面镜的面形情况。

## 2.2 最小二乘法分离调整误差量

在光路调整过程中,由于使用一块标准的球面镜作为参考,引入的调整误差中包含有常数项、倾斜项与离焦项的影响,在测得的结果数据中需要将这此影响去除才能得到被检平面镜的真实面形情况;检测时应尽可能使平面镜保持竖直状态,当平面镜子午方向上略有倾斜时不会导致主光线入射角的偏离,只要在不同瑞奇角度测量时保持此方向状态不

变即可,可以作为不影响波像差的因素来考虑。因此,干涉仪检测到的波像差可以分解为:干涉仪球面标准镜头面形误差、标准球面镜面形误差、被检平面面形误差以及调整引入的误差。其中,干涉仪球面镜头作为标准具通常忽略其影响,标准球面镜可在检测前先进行标定,并作为系统误差予以修正,而由调整检测光路引入的误差与平面镜面形误差混合在一起,单次检测无法区分。

常用的两种分离误差的方法分别是改变瑞奇角的大小或者以平面镜的法线为轴旋转平面镜进行检测,但当平面镜的口径大于 1 m 时,其实际重量在 1 t 以上,测试时要想使用绕平面镜法线旋转的方式进行检测,不但在一定程度上受限于装调机构,不易调整,并且在旋转过程中平面镜面形由于重力以及其自身支撑结构的影响会发生变化,增加检测难度。为了得到真实的平面镜面形误差,采用改变瑞奇角大小的方式进行两角度检测以分离出系统调整误差,在调整光路过程中更为灵活、易于实现。假设  $\mathbf{W}_1(x_p, y_p)$ 、 $\mathbf{W}_2(x_p, y_p)$  为两个不同角度下的波前检测结果,根据(1)~(3)式将两次测得波前数据进行处理可以得到两角度检测的面形结果  $\mathbf{S}_1(x_s, y_s)$ 、 $\mathbf{S}_2(x_s, y_s)$ 。设  $\mathbf{S}_0(x_s, y_s)$  为被测平面镜的实际面形,则两次测试结果可分别表示为

$$\mathbf{S}_1(x_s, y_s) = \mathbf{S}_0(x_s, y_s) + \sum_{i=1}^4 a_{1i} \mathbf{Z}_{1i}(x_s, y_s), \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_2(x_s, y_s) = \mathbf{S}_0(x_s, y_s) + \sum_{i=1}^4 a_{2i} \mathbf{Z}_{2i}(x_s, y_s), \quad (6)$$

式中  $a_{1i}$ 、 $a_{2i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别表示两次角度测试中由检测系统引入的常数项、 $x$  倾斜项、 $y$  倾斜项与离焦项误差的系数。 $\mathbf{Z}_{1i}$ 、 $\mathbf{Z}_{2i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别表示光瞳面泽尼克多项式常数项、倾斜项和离焦项映射到平面表面坐标系后的基底。由于常数项及倾斜项对面形误差的影响通常忽略不考虑,则(5)、(6)式可简化为

$$\mathbf{S}_1(x_s, y_s) = \mathbf{S}_0(x_s, y_s) + a_1 \mathbf{Z}_1(x_s, y_s), \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_2(x_s, y_s) = \mathbf{S}_0(x_s, y_s) + a_2 \mathbf{Z}_2(x_s, y_s), \quad (8)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$  分别代表两次检测中由系统调整误差引入的离焦误差的系数。 $\mathbf{Z}_1$ 、 $\mathbf{Z}_2$  分别表示光瞳面坐标系下泽尼克多项式表示的离焦项误差映射到平面表面坐标系下的面形误差。通过(7)式与(8)式可以得到一个与真实面形无关的系统误差多项式:

$$\Delta \mathbf{S} = \mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2 = a_1 \mathbf{Z}_1 - a_2 \mathbf{Z}_2 = a \mathbf{Z}, \quad (9)$$

$$a = \Delta \mathbf{S}^T (\mathbf{Z} \mathbf{Z}^T)^{-1}, \quad (10)$$

利用(9)、(10)式对整个检测口径内的所有数据点进

行最小二乘法拟合,分离出两次角度检测的系统误差系数  $a$ ,最后可根据(11)式得到最终的面形检测结果:

$$S_0^* = S_1 - a_1 Z_1. \quad (11)$$

在实际检测中,当选择的标准球面镜、两次测试角度以及平面镜在光路中测试位置确定之后,对于不同的被测平面镜,系统引入的离焦是可以计算的,可以预先确定并予以剔除。此种数据处理方法同样适用于其他形状的平面镜,测试过程中保证坐标位置对应关系的正确性即可。此方法对光学平面镜面形加工也具有一定的指导意义,由于结果中由调整引入的离焦误差已被剔除,得到的面形数据精度较高且镜面本身的离焦的大小、量级与方向都可以确定,当像差值不满足实际加工要求时可根据检测结果来细化下一步的加工方案。

### 3 测试距离对检测结果的影响

在实际检测过程中,需要根据被检平面镜的口径来选择适于测试的球面镜作为参考,针对不同的球面镜要选取参数不同的干涉仪标准镜头来搭建测试光路,在选择的过程中需要注意的是保证选取的干涉仪镜头其  $F$  数小于标准球面镜的  $R^\#$ ,并且尽可能地接近  $R^\#$ ,使干涉仪的发散光束能够对平面

镜进行全口径检测,其中  $R^\#$  为球面镜曲率半径与其口径的比值。为了能得到较为准确的检测结果,在搭建检测光路时应尽量将被检平面镜放置在更靠近标准球面镜的位置以减小测试中由球面镜面形引入的误差,在实际检测时还要综合考虑检测光路中其他因素来确定合适的测试距离  $d$ (即干涉仪镜头焦点到平面镜中心距离)。

从第2节介绍的数学模型可以看到,对波像差进行恢复得到平面面形误差的过程实际是对各采样点坐标位置及幅值两部分关系的转换。从坐标位置上看,光瞳面坐标到平面镜坐标间的映射是非线性关系,在转化的过程中会产生畸变,同时坐标比例发生变化,分布形式如图3所示,需要进行插值拟合等必要的数学处理才能得到实际的平面镜镜面坐标;从幅值关系上看,波像差与面形误差二者的影响函数  $T(\cdot)$  的具体分布如图4所示,各采样点处的幅值大小不同且不具有回转对称性。根据数学关系模型可以看到,测试距离  $d$  在整个数据处理过程中对坐标及幅值转换关系具有一定作用,其测量精度直接影响到坐标转换关系的正确性以及各点幅值变换的对应性,当  $d$  存在测量误差时会导致坐标位置的偏移以及各点处幅值转换不对应,使最终结果无法体现出平面镜的真实面形情况。

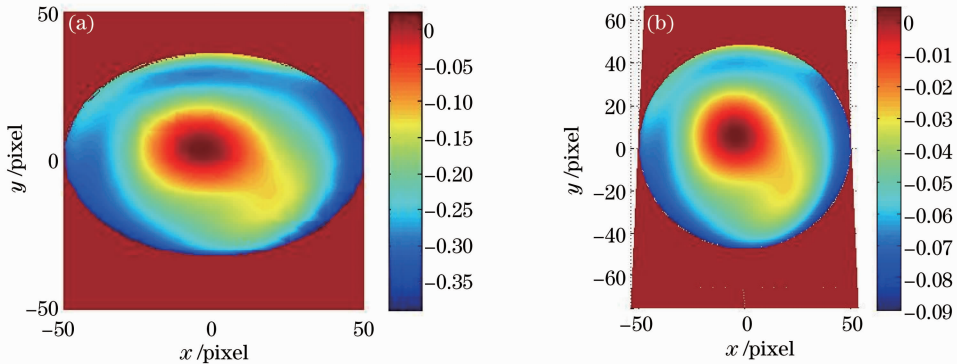


图3 光瞳面坐标映射到镜面坐标分布形式

Fig. 3 Condition of system pupil coordinates transfer to test surface

在实际测试中由于人为因素与环境因素的影响难免会使测得的  $d$  值带有误差,为分析当  $d$  存在测量误差给检测结果带来的影响,在 Zemax 软件中搭建仿真测试光路,首先利用 Zernike 多项式给出一个假定的平面镜面形,其面形情况如图5(a)所示。将此平面镜插入到仿真光路中,光线追迹后得到的检测系统的波像差如图5(b)所示,假设当测试距离  $d$  存在 5 mm 的测量误差,根据本文介绍的算法对

获得的系统波像差数据进行计算并进行插值拟合等处理后得到的结果如图5(c)所示,计算拟合结果与原始面形的残差其峰谷(PV)值为  $0.0506\lambda$ 、均方根(RMS)值为  $0.0024\lambda$ ,残差面形分布如图5(d)所示。从仿真结果中可以看到,当测试距离的测量误差在一定范围内时,检测精度可以得到保证。但由于测试距离是根据实际检测来确定的,其选取的位置针对不同的平面镜有所不同,检测前可以根据待

检平面镜及选取的标准球面镜的具体情况进行仿真分析,从而确定  $d$  的测量误差的允许范围。

测试距离  $d$  的测量精度不但对坐标及幅值转换关系具有一定作用,对瑞奇角的求解也具有一定影响<sup>[15]</sup>。通常瑞奇角  $\theta$  是根据图 6 中的几何三角关系可根据下式进行求解:

$$\cos 2\theta = \frac{d^2 + a^2 - c^2}{2da} \quad (14)$$

式中  $a, c$  分别为平面镜中心到标准球面镜中心的距离和标准球面镜中心到干涉仪镜头焦点的距离。

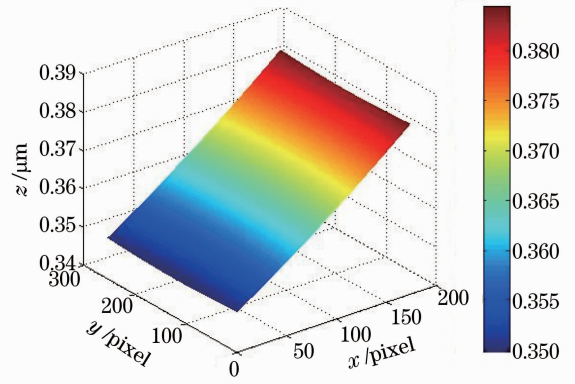


图 4  $T(\cdot)$  的分布形式

Fig. 4 Distribution of  $T(\cdot)$

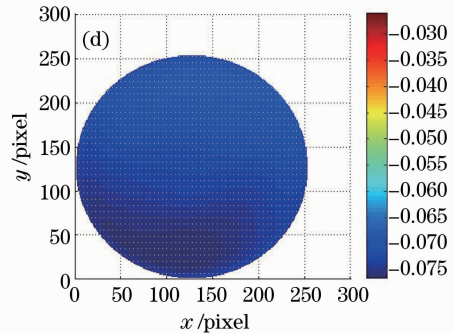
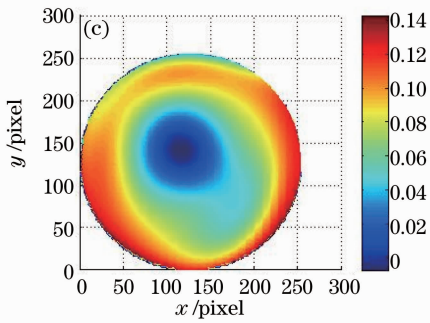
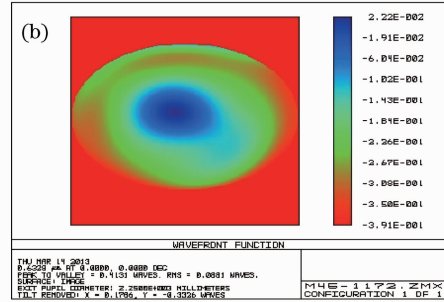
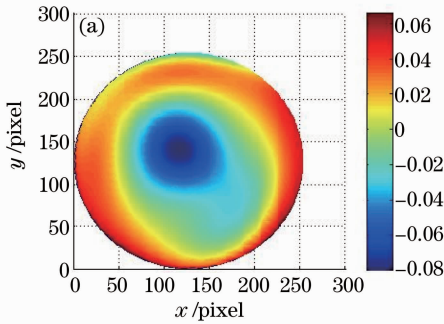


图 5 仿真结果图。(a)假设面形图; (b)波前图; (c)拟合结果; (d)残差图

Fig. 5 Results of simulation. (a) Supposed surface; (b) test wavefront; (c) fitting result; (d) residual errors

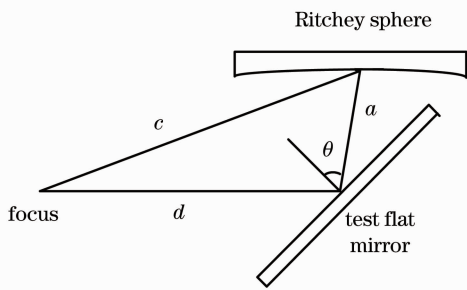


图 6 瑞奇角求解图

Fig. 6 Solution diagram of the Ritchey angle

同样在上述仿真光路中分析当  $d$  存在测量误差时对瑞奇角  $\theta$  求解的影响。从图 7 中可以看出,瑞奇角计算误差会随着测量误差的增大而增大,近

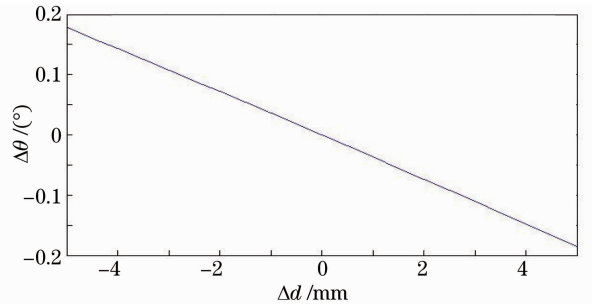


图 7  $\Delta d$  对瑞奇角的影响

Fig. 7 Influence of  $\Delta d$  on Ritchey angle

似呈线性关系。在检测不同的平面镜时也要根据实际情况讨论分析来确定测量误差的影响。测量过程中需要注意的是在旋转平面镜前后要保证瑞奇角所

在三角形三个顶点位置标定的准确性与一致性,同时还需保证在改变瑞奇角大小进行两次测量时测试距离  $d$  的长度不变,从而保证两次检测中的坐标系转换关系的一致性,实验中可利用高精度转台以及高精度测量装置进行多次测量求平均值来减小测量误差。

综上所述,关于测试距离  $d$  的位置选取及其误差允许范围的确定,要根据具实际检测进行具体分析。针对口径不同的平面镜选取的适于测试的标准球面镜及干涉仪标准镜头也有所不同,测试距离要根据选择的球面镜的曲率半径、发散光束发散角的大小、平面镜上测试采样点的个数以及调整架位置等因素综合考虑再来确定,实验前可进行仿真分析确定出  $d$  的误差允许范围,最后根据分析得到的结论搭建检测光路,实验中采取相应的手段来保证  $d$  的测量精度,以提高最终拟合得到的平面镜面形精度。

## 4 实验结果与分析

为验证数据处理方法及精度理论分析的正确性与有效性,选择一块口径为 73 mm 的平面镜进行瑞奇-康芒检测,实验中使用的标准球面镜口径为 280 mm 曲率半径为 1172 mm,为了降低测试过程中震动带来的影响选择抗震能力较好的四维(4D)动态干涉仪来进行瑞奇-康芒实验,实验平台布局如图 8 所示。

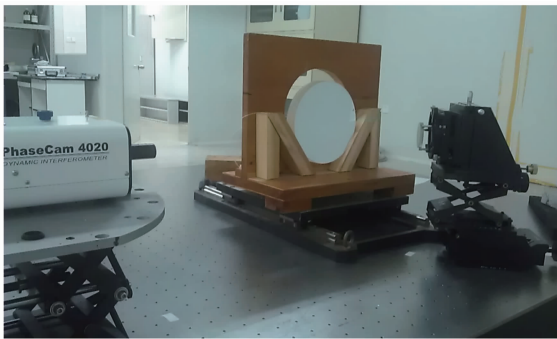


图 8 实验平台示意图

Fig. 8 Experimental layout

根据仿真分析结果以及实验环境综合考虑确定实验中的测试距离为 790 mm,使平面镜尽量靠近球面镜以减小测试光路中由球面反射镜引入的误差,并且满足光束经标准球面镜反射后能够完全返回并入射在面形内部做到全口径检测。在选择干涉仪标准镜头时,由于实验条件有限,选用的标准球面镜口径相比被检平面镜大很多,所以选择干涉仪标

准镜头的焦距为 50 mm 已能够满足测试要求。实验中的两个瑞奇角经分析后分别确定为  $28.7^\circ$  和  $37.6^\circ$ <sup>[15]</sup>。

实验首先对标准球面镜进行标定<sup>[16]</sup>,球面镜的面形情况如图 9 所示。然后搭建瑞奇-康芒检测光路,将被检平面镜以一定角度斜插入到检测光路中并调整标准球面镜到相应位置,通过测试获得检测系统波像差,在搭建光路的过程中确保干涉仪标准镜头、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。最后旋转被测平面镜,改变瑞奇角到第二个测试角度进行检测,在旋转被测平面镜过程中,要确保平面镜中心点的位置不变且距离干涉仪焦点的距离不变,保证两次检测中坐标映射关系的一致性,微调光路直到干涉仪所测得的波像差稳定后再记录数据<sup>[17]</sup>。

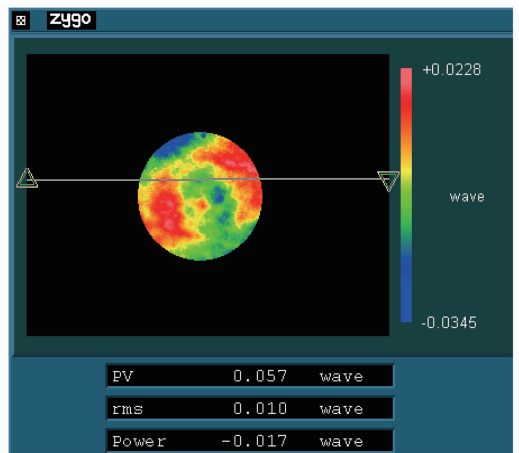


图 9 标准球面镜面形

Fig. 9 Reference sphere surface error

由于选择的参考球面镜其面形精度可达到  $\lambda/100$ ,精度较高,实验中可以忽略其误差影响。两次检测分别得到瑞奇角为  $28.7^\circ$  和  $37.6^\circ$  时的测试波前,如图 10 所示。从图中可以看到波前图在瑞奇角方向产生了压缩,压缩情况与瑞奇角的大小有关。使用上述瑞奇-康芒检测算法对测得的波像差进行图像展开与分析处理,利用坐标映射关系和幅值转换关系插值拟合分别得到两次测试下的平面镜面形,根据两次检测结果,结合理论分析利用最小二乘法进行误差分离,分离出的离焦项系数如表 1 所示。根据(11)式计算得到最终被检平面镜的面形情况,如图 11 所示。

由于 4D 干涉仪提供的准直光束口径较小无法对口径过大的平面镜直进行检测,为验证检测结果的正确性,使用 Zygo 干涉仪直接检测此平面镜检测,结果如图 12 所示。使用瑞奇-康芒法检测得

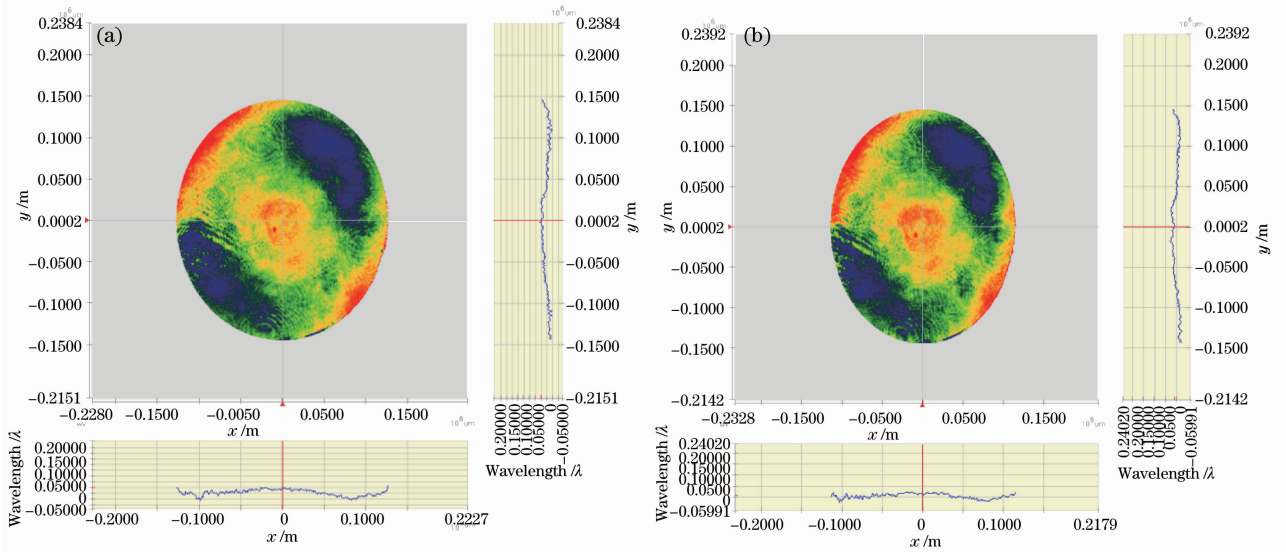


图 10 两角度检测下的波像差。(a) 28.7°波像差；(b) 37.6°波像差

Fig. 10 Wavefront in two test angles. (a) 28.7° wavefront; (b) 37.6° wavefront

表 1 离焦项系数

Table 1 Coefficients of defocus

Ritchey angle / (°)	Coefficient / $\mu\text{m}$
28.7	-0.0016
37.6	-0.0020

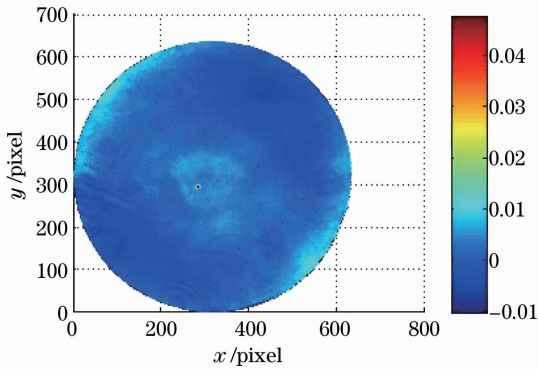


图 11 最终面形结果。PV: 0.182λ, RMS: 0.0101λ

Fig. 11 Final surface result. PV: 0.182λ,

RMS: 0.0101λ

到的最终结果其 PV 值为 0.182λ, RMS 值为 0.0101λ, 干涉仪直接检测结果 PV 值为 0.229λ, RMS 值为 0.013λ。对比两测试结果, 面形情况有较好的一致性, PV 检测精度优于  $\lambda/20$ , RMS 检测精度优于  $\lambda/100$ , 满足检测精度要求。

实验结果证明了此种数据处理方法的有效性以及精度分析理论的正确性, 利用幅值及坐标转换关系法恢复得到平面镜面形的计算精度可以达到  $\lambda/100$ , 实现高精度瑞奇-康芒检测。在实验中需要注意的是: 随着瑞奇角的增大, 检测系统光瞳面上的图像压缩比例会逐渐增大, 导致测得的系统波前中由

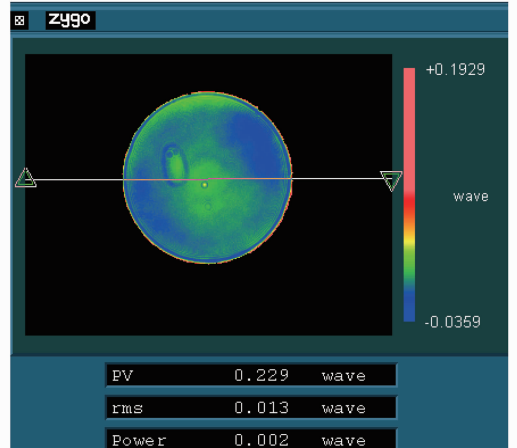


图 12 干涉仪直接检测结果

Fig. 12 Results measured by Zygo interferometer

检测角度带来的误差增大, 使检测灵敏度降低, 在将测得的波前信息从近似椭圆域展开为圆域时, 插值拟合会使部分高频误差被平滑掉, 平面镜面情况无法完全体现, 故瑞奇角不能选择过大; 在改变瑞奇角大小进行第二次检测时, 需要保证平面镜中心在转动前后保持在同一个位置, 可以利用十字线在镜面中心位置做标记, 以便在光路调整时中心位置能够对准的更精确; 为降低人为因素和环境因素给实验结果带来的影响, 实验在气浮平台上进行, 多次测量直到测得稳定的检测数据后进行计算。

## 5 结 论

为实现高精度瑞奇-康芒法检测平面镜, 根据检测系统光瞳面与被检平面表面的坐标映射关系与幅

值转换关系对测得的系统波进行恢复处理,结合最小二乘法解算并分离出由光路调整引入的离焦误差,使最终结果更为准确地反映出平面镜面形。详细分析了实验中测试距离的测量精度对检测结果的影响,根据仿真分析结果以及实际测试条件确定检测方案以保证测试精度。对口径为 73 mm 的平面镜进行检测,通过本文提出的波前处理方法对测得数据进行解算后,最终结果 PV 值为  $0.182\lambda$ , RMS 值为  $0.0101\lambda$ 。对比使用干涉仪直接检测的结果, PV 检测精度达到  $\lambda/20$ 、RMS 检测精度达到  $\lambda/100$ ,证明了此种数据处理方法的有效性以及精度分析理论的正确性,最终实现了瑞奇-康芒法高精度检测。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xiaohong, Gao Bilie, Cui Xiangqun. New application of stitching interferometry by using Ritchey-Common method for testing the large aperture optical flat [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(4): 611-613.  
杨晓洪, 高必烈, 崔向群. 检测大口径光学平面镜时干涉条纹的子孔径拼接方法[J]. *光学技术*, 2005, 31(4): 611-613.
- 2 Proteep C V Mallik, Chunyu Zhao, James H Burge. Measurement of a 2-meter flat using a pentaprism scanning system [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(2): 023602.
- 3 Shao Jing, Ma Dongmei, Nie Zhenwei. Accurate test of optical wavefront for optical imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2583-2588.  
邵 晶, 马冬梅, 聂真威. 光学成像系统光学波前的高精度测试[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2583-2588.
- 4 Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng, *et al.*. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 1224-1228.  
李 直, 赵 洋, 李达成, 等. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪[J]. *光学学报*, 2002, 22(10): 1224-1228.
- 5 Wang Xiaokun. Fabrication and testing of large aperture off-axis SiC aspheric mirror [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 49(1): 011201.  
王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011201.
- 6 Xu Yang, Tang Feng, Wang Xiangchao, *et al.*. Measurement error analysis of absolute flatness test [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1008009.  
徐 洋, 唐 锋, 王向朝, 等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008009.
- 7 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2022-2026.  
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2022-2026.
- 8 Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Wensheng, *et al.*. Design of online measuring device for surface profile of Wolter type-I mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1082-1087.  
崔天刚, 张宏吉, 马文生, 等. Wolter I 型反射镜面形在线检测装置设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1082-1087.
- 9 Zhang Jinping, Zhang Xuejiun, Zhang Zhongyu, *et al.*. Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 492-497.  
张金平, 张学军, 张忠玉, 等. Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 492-497.
- 10 Chai Liqun, Shi Qikai, Wei Xiaohong, *et al.*. Testing of root mean square of mid-spatial-frequency wavefront for large flat [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108003.  
柴立群, 石琦凯, 魏小红, 等. 大口径平板中频波前均方根的测量误差[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108003.
- 11 Liu Zhaodong. The Research of Calibration and Testing Techniques of  $\Phi 600$  mm Near-Infrared Phase-Shifting Fizeau Interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. 55-82.  
刘兆栋.  $\Phi 600$  mm 近红外相移斐素干涉仪校准及测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011. 55-82.
- 12 K L Shu. Ray-trace analysis and data reduction method for the Ritchey-Common test [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(12): 1879-1886.
- 13 D Malacala. *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley, 2007.
- 14 Sen Han, Erik Novak, Mike Schurig. Ritchey-common test used for measurement of astronomical optic [C]. *SPIE*, 2003, 4842: 270-273.
- 15 Zhu Shuo, Zhang Xiaohui. 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.
- 16 ZYGO Corporation. GPI XP/D and GPI PE Metropro Application [M]. Connecticut: ZYGO Corporation, 2007.
- 17 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112001.  
王汝东, 田 伟, 王 平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112001.

栏目编辑: 何卓铭