

Ritchey 角精度对平面镜检测的影响的分析与验证

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 100049)

摘要 为进一步提高 Ritchey-Common 法的检测精度, 分析了实验中 Ritchey 角精度对整体检测结果的影响。通过仿真模拟, 分析并确定出最佳 Ritchey 角测试范围在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 此时面形误差检测结果精度可达 0.01λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。仿真过程中模拟 Ritchey 角存在误差时对检测结果的影响, 当 Ritchey 角误差控制在 $\pm 1^\circ$ 时, 拟合结果与原始面形的残差降至 0.0007λ , 能够满足测试要求。针对 Ritchey 角测量存在误差的问题, 利用测得系统光瞳面的图像压缩比例来计算 Ritchey 角大小, 此方法的计算误差可控制在 0.2° 以内。实验中选择 3 个角度来检测, 在数据处理时将测得数据两两组合进行解算。 29.6° & 47.8° 组合拟合结果与 Zygo 干涉仪直接检测结果的残差的峰谷 (PV) 值为 0.068λ 、均方根 (RMS) 值为 0.0105λ , 证明 Ritchey 角的选择及其计算精度对检测整体精度具有一定影响。

关键词 测量; 光学检测; Ritchey-Common; 大口径平面镜; 检测精度

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0612001

Analysis and Verification for Accuracy of Ritchey Angle in Flat Mirror Test

Zhu Shou^{1,2} Zhang Xiaohui¹

(¹ 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 In order to improve the accuracy of Ritchey-Common (RC) method, the effect of accuracy of Ritchey angle on test results is mainly discussed. By means of simulations, the measured accuracy of surface error can reach 0.01λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) when Ritchey angle's range is optimized between $20^\circ \sim 50^\circ$. The error of Ritchey angle is simulated to analyze the influence on measured result. When the error of Ritchey angle is controlled within $\pm 1^\circ$, the accuracy of residual error between fitting results and original surface can be decreased to 0.0007λ and meets the measured requirement. To avoid the measurement error of Ritchey angle, the ratio of image size on pupil plane is used to calculate the Ritchey angle, and this method's accuracy can reach to 0.2° . Three Ritchey angles are chosen in the experiment and combined with each two of them. For the residual error between Zygo measurement and group of 29.6° & 47.8° measurement, the peak valley (PV) is 0.068λ and the root mean square (RMS) value is 0.0105λ . The results demonstrate that the choice of Ritchey angle and its calculation accuracy are important to RC method.

Key words measurement; optics test; Ritchey-Common; large flat mirror; test accuracy

OCIS codes 120.3930; 120.6650; 220.4840

收稿日期: 2012-11-06; 收到修改稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)和国家自然科学基金重点基金(11034007)资助课题。

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: zhushuo1986@126.com

导师简介: 张晓辉(1967—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密检测和像质评价技术等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui0123@163.com

1 引 言

随着科学技术的迅速发展,大口径平面镜在空间光学、天文光学等领域的应用已越来越广泛。由于大口径平面镜在光学检测中常作为标准器具,对其面形精度有很高的要求,同时也要求有相应的检测手段能够实现高精度检测^[1]。使用干涉仪直接对平面镜检测是一种常用而有效的方法,但干涉测量法对口径超过 800 mm 的平面镜无法实现直接检测^[2,3]。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 Ritchey-Common (RC) 法等。子孔径拼接法利用各子孔径重叠部分信息计算分析后得到被检面形^[4],检测过程较长,在装调和子孔径的拼接过程中都会造成误差的传递与累积,测试精度难以保证。五棱镜扫描法通过五棱镜与大行程导轨结合自准直仪实现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,测试需要一定时间,在整个过程中环境因素的变化也会给检测结果带来影响^[5~11]。RC 法作为在大口径平面反射镜检测中一种常用的检测方法,测试过程需要配备一块高精度的球面反射镜,检测方法直观、易于实现,且具有很高的检测稳定性。

在国外,RC 法的研究已经相对成熟并取得了较高的测试精度。近些年来,针对大口径平面镜检测问题^[12~14],国内一些研究机构已相继开始使用 RC 法对大口径平面镜进行检测,但 RC 法测试精度仍有待提高。

本文在以上研究基础上,为提高 RC 法的检测精度,着重对 Ritchey 角选取及其计算精度问题进行分析研究。搭建 RC 仿真光路,将不同 Ritchey 角检测结果中各像差项进行分析对比,确定出 Ritchey 角的最佳选择范围。针对 Ritchey 角测量误差问题,给出 Ritchey 角允许误差范围;实验中根据仿真结论选择三个 Ritchey 角对同一被测平面镜进行检测,通过对比不同 Ritchey 角组合计算所得面形结果,证明了理论研究的正确性。在检测过程中保证 Ritchey 角的精度能够提高整个测试的精度,对 Ritchey 角的精度分析为提高大口径平面镜检测精度提供了理论依据。

2 Ritchey-Common 检测原理

图 1 给出了 Ritchey-Common 法检测原理图。干涉仪准直光束经过标准球面镜头变成发散光束,

焦点位于标准球面反射镜的曲率中心处。被检平面镜以一定的 Ritchey 角 θ (发散光束光轴与被检平面镜法线的夹角) 插入到光路中,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,最后根据测得系统波像差数据来计算平面镜的面形误差。该方法要求球面镜口径大于被检平面镜 1.3 倍,通过调整 Ritchey 角和平面镜中心与发散光束焦点的距离,实现小口径干涉仪检测大口径平面镜的目的。

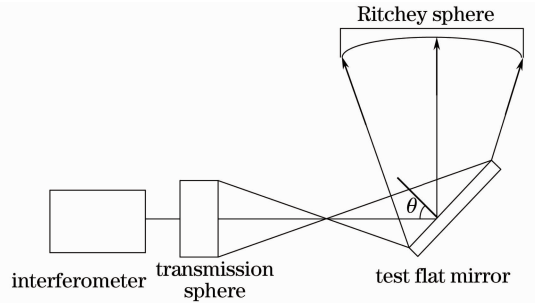


图 1 Ritchey-Common 法检测原理图

Fig. 1 Ritchey-Common test setup

由于被测平面镜斜插入在光路中,被检平面坐标系与光瞳面坐标系并不重合,二者间具有一定的角度,如图 2 所示。根据几何位置关系,推导出两坐标系之间的关系如下:

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

$$y_s \approx y_p, \quad (2)$$

式中 x_s, y_s 表示被检平面坐标, x_p, y_p 表示光瞳面坐标, θ 表示主光线入射角即 Ritchey 角, F 表示发散光束的 F 数。

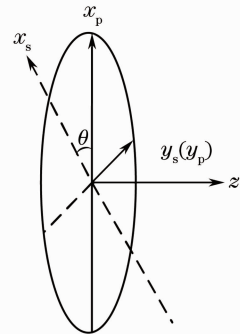


图 2 坐标关系图

Fig. 2 Relationship between coordinates

使用 Zernike 多项式来表示面形误差是一种常用的方法^[15,16],当平面镜的面形误差不是很大时,可以表示成

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

式中 $S_{n,m}$ 表示 Zernike 多项式系数, $Z_{n,m}$ 表示在平面镜坐标系下的 Zernike 多项式基底。当发散光束经过被检平面镜与标准球面镜之后, 平面镜面形误差引起了系统波像差的变化:

$$d_{\text{OPD}}(x_p, y_p) = 4\Delta S(x_s, y_s) \cos I, \quad (4)$$

式中 I 表示平面镜上任意一点的入射角度, 在发散光路中, 此角度可根据几何关系表示成一个与 θ 、 F 和坐标有关系的函数表达式

$$\cos I = \pm \sin\left(\theta - \arctan \frac{2F}{x_p}\right), \quad (5)$$

当 $\frac{\tan \theta}{2F} \ll 1$ 时, 将(1)、(2)、(5)式代入(4)式, 化简后得到

$$d_{\text{OPD}}(x_p, y_p) \approx 4\Delta S\left(\frac{x_p}{\cos \theta}, y_p\right) \cos \theta, \quad (6)$$

同样使用 Zernike 多项式可以用来表示系统波像差, 可将(6)式写为

$$\sum_{n,m} W_{n,m} Z_{n,m}(x_p, y_p) = 4\Delta S\left(\frac{x_p}{\cos \theta}, y_p\right) \cos \theta. \quad (7)$$

由(7)式整理出平面面形误差与系统波像差之间的影响函数^[17,18], 简单记为

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{S} = \mathbf{W}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{A} 为影响函数矩阵, \mathbf{S} 为平面镜面形误差系数

$$\Delta S = 0.00342S_{2,0} - 0.0012S_{2,2} - 0.0017S_{2,-2} + 0.0032S_{3,1} + 0.0048S_{3,-1} - 0.0049S_{3,3} - 0.0073S_{3,-3} - 0.0029S_{4,0} + 0.0012S_{4,2} - 0.0014S_{4,-2} - 0.0025S_{4,4} - 0.0024S_{4,-4}. \quad (9)$$

根据给定的 Zernike 系数, 假定平面镜的面形情况如图 3 所示。

将假设的平面镜插入到仿真光路中, 在 Ritchey 角分别为 20° 、 40° 、 60° 时, 得到的系统波像差如图 4

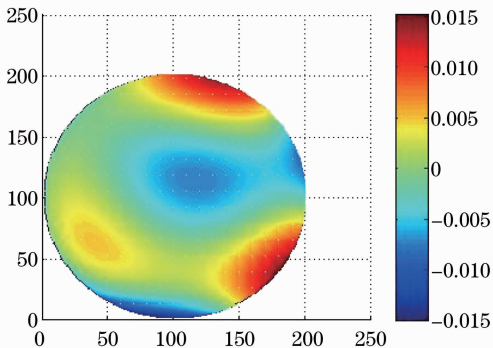


图 3 假设平面镜面形误差
Fig. 3 Supposed flat surface

矩阵, \mathbf{W} 为系统波像差系数矩阵。在实际检测中, 平面镜面形误差对离焦项的贡献与光路调整过程中引入的离焦项无法区分, 单次检测无法体现被检平面镜的真实面形情况, 在数据处理时要舍弃离焦项, 这样 \mathbf{S} 中未知数的个数将会大于测得波像差 \mathbf{W} 的个数, 使(8)式成为不定方程组, 为求得 \mathbf{S} 则要改变主光线入射角大小得到另外一方程组, 二者联立组成一个过定方程组后利用最小二乘法即可求得被检平面镜面形误差的各项 Zernike 系数, 进而拟合出被检平面镜的面形。

3 影响 Ritchey 角精度要素

根据第 2 节介绍的数学模型, \mathbf{S} 矩阵与 \mathbf{W} 矩阵中各项系数的表达形式都与 Ritchey 角有关, 在影响矩阵计算中 θ 角的精度具有很高的影响权重。为使实验结果能够更加真实地反映出被检平面镜的面形情况, 本文将着重分析 Ritchey 角精度对检测结果的影响。

3.1 Ritchey 角选择范围

由于被测平面镜斜插入到检测光路中, 检测系统光瞳面上的光斑形状近似为椭圆。为确定最佳 Ritchey 角测试范围, 在 Zemax 软件中搭建仿真光路, 对算法进行模拟分析。利用 Zernike 多项式表达形式给出一个假定的平面镜面形:

所示。

从图 4 中可以看到波像差形状会随 Ritchey 角的增大而变化。同一被测平面镜在同一光路中由于不同的检测角度会对得到的系统波像差产生不同的影响。通过仿真, 分析 Ritchey 角从 $10^\circ \sim 80^\circ$ 范围对检测结果中各项像差的影响, 表 1 列出了几种常见像差的变化情况。

根据表 1 可以看到平面镜面形误差对各项像差的影响随着 Ritchey 角逐渐增大而改变, 当角度一定时个别像差值甚至会出现一个数量级的变化, 这样在 W_{ij} 参与计算过程中会导致拟合出的面形误差增大, 故 Ritchey 角不能选择过大, 但 Ritchey 角过小又会导致光路中光线的重叠, 同样难以保证检测精度。当 Ritchey 角选择在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 范围内, 平面镜面形误差对系统波像差的影响相对稳定, 适合测试。

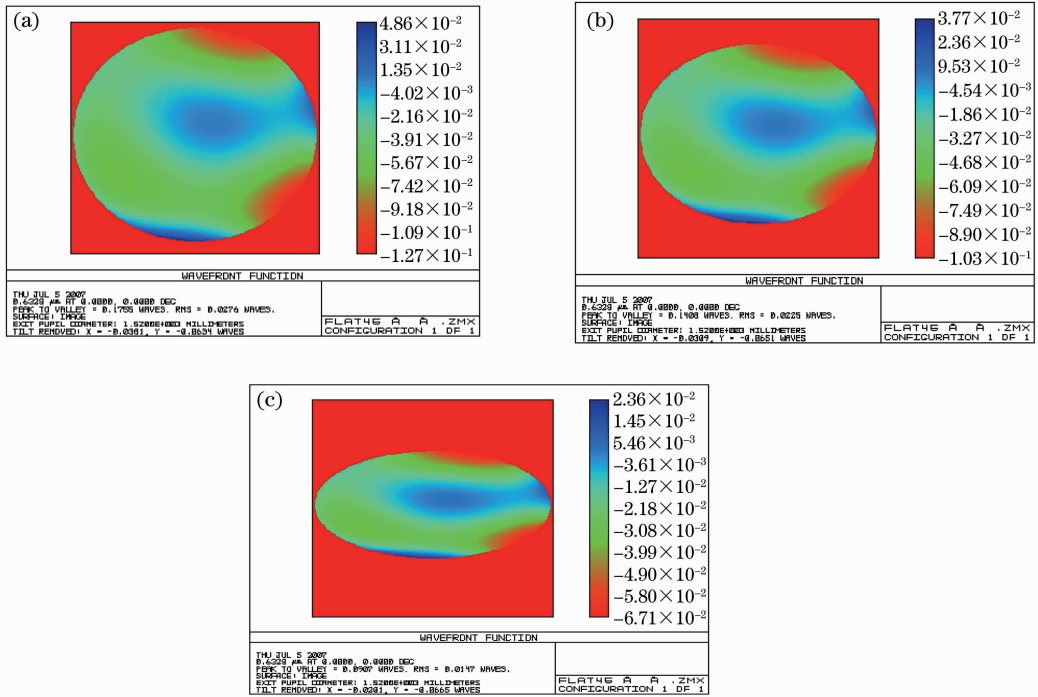


图 4 不同 Ritchey 角下的系统波像差。(a) $\theta = 20^\circ$; (b) $\theta = 40^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$

Fig. 4 Wave aberrations in different Ritchey angles. (a) $\theta = 20^\circ$; (b) $\theta = 40^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$

表 1 部分波像差大小

Table 1 Several wave aberrations

	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
$W_{2,0}$	-0.022	-0.021	0.020	-0.017	-0.016	-0.012	-0.008	-0.004
$W_{2,2}$	0.008	0.009	0.009	0.009	0.008	0.006	0.004	0.002
$W_{3,-1}$	-0.029	-0.027	-0.024	-0.021	-0.017	-0.012	-0.008	-0.004
$W_{3,3}$	0.031	0.029	0.027	0.024	0.021	0.016	0.011	0.005
$W_{4,0}$	0.018	0.017	0.016	0.014	0.012	0.009	0.006	0.003
$W_{4,-2}$	0.009	0.009	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002
$W_{4,-4}$	0.014	0.013	0.013	0.012	0.008	0.006	0.004	0.002
$W_{5,-3}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001

3.2 Ritchey 角角度误差允许范围

在实际检测过程中,常用的 Ritchey 角测量方法是根据几何三角关系进行求解。通过对 Ritchey 角所在三角形三边的测量,利用余弦定理得到 θ 值,如图 5 所示。

为得到较为精准的 Ritchey 角 θ ,在光路调整过程中必须将干涉仪镜头、被检平面镜以及标准球面反射镜三者的中心对准,使光轴保持一致,从图 6 中可以看到,若光轴对准过程中存在偏差则求解出的 θ_1 并不是实际 Ritchey 角 θ 的大小,将此时的 Ritchey 角代入(7)式中求解会使求出的 S 存在很大误差,最终拟合出的平面镜面形不能完全体现被检平面镜的实际面形情况,检测精度难以得到保证。

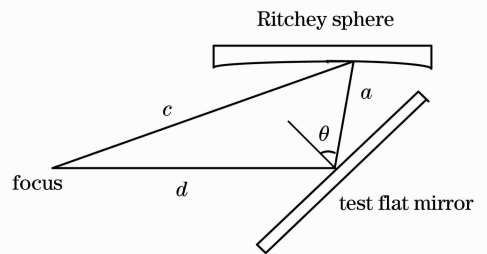


图 5 Ritchey 角求解图

Fig. 5 Solve the Ritchey angle

在仿真实验中,根据假设的平面,对 Ritchey 角度偏差带来的影响进行研究,表 2 给出了当 Ritchey 角为 45° 时在不同偏差角度下拟合得到的面形与原始假设面形的残差的均方根(RMS)值。

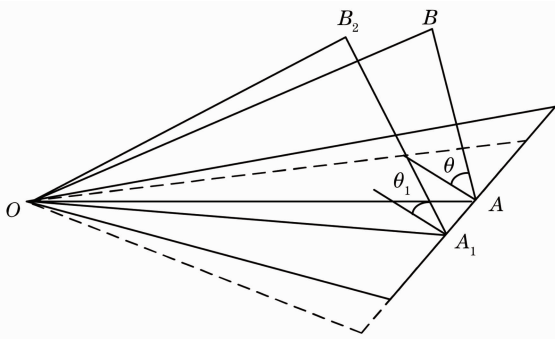


图 6 角度偏差

Fig. 6 Angle deviation

表 2 残差均方根值

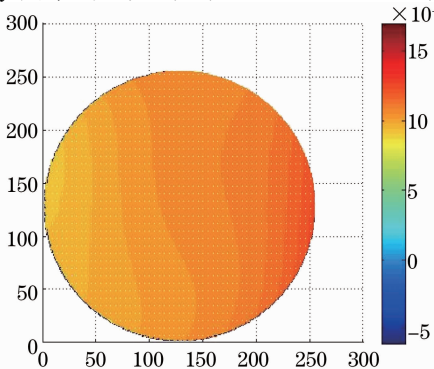
Table 2 RMS values of residual error

$\Delta\theta / (^{\circ})$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
RMS $/(10^{-3} \lambda)$	0.677	0.66	0.66	0.69	0.67
$\Delta\theta / (^{\circ})$	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1
RMS $/(10^{-3} \lambda)$	0.71	0.71	0.68	0.69	0.70

根据表 2 数据,当角度偏差为 $\pm 1^{\circ}$ 时,残差 RMS 值大小在 $0.7 \times 10^{-3} \lambda$ 左右。从仿真结果可以看出当 Ritchey 角测量偏差控制在 $\pm 1^{\circ}$ 以内,检测精度是能够得到保证的。图 7 给出了在角度误差为 1° 时的残差图。为了减少 Ritchey 角测量误差,本文利用检测得到的光瞳面图像压缩比例解算 Ritchey 角。同样在 45° 仿真测试光路中,根据光瞳压缩比例算出的 Ritchey 角值为 44.8° ,相比设定值 45° 相差 0.2° ,由

$$\alpha = \frac{\theta' - \theta}{\theta} \times 100\% \quad (10)$$

计算可得其相对误差为 0.44% 。其中 θ, θ' 分别代表实际 Ritchey 角大小、计算得到的 Ritchey 角大小, α 为相对误差。为进一步验证此方法的有效性,对设定的 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 仿真光路分别利用此方法进行 Ritchey 角求解,结果如表 3 所示。通过多次计算分

图 7 角度误差 1° 时的残差图Fig. 7 Residual error of 1°

析得到计算精度可控制在 0.2° 以内,在允许误差范围内^[19]。表 3 Ritchey 角计算结果

Table 3 Calculation of Ritchey angles

Set value $/(^{\circ})$	20	30	40	45	50	60
Calculated value $/(^{\circ})$	19.9	30.1	40.1	44.8	49.8	59.9

4 实验系统组成

为验证 Ritchey 角选择范围对检测精度的影响,实验通过对小口径平面镜检测来证明理论分析的正确性。实验选择一块口径为 280 mm 、曲率半径为 1172 mm 的标准球面镜和一块口径为 40 mm 平面镜,实验平台布局如图 8 所示。系统主要由干涉仪、标准干涉镜头、标准球面反射镜和被检平面镜四个部分组成。

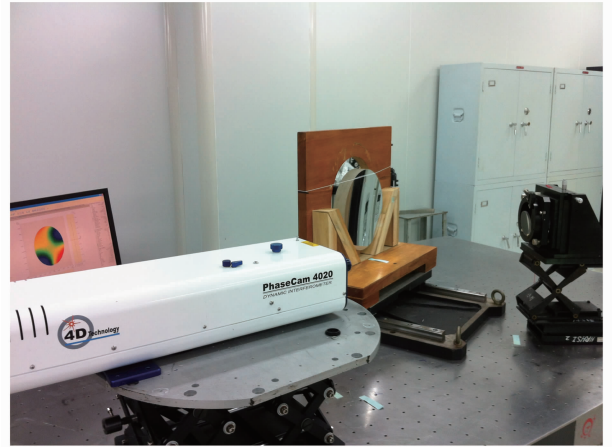


图 8 实验平台布局

Fig. 8 Experimental layout

为了降低振动给实验带来的影响,选择抗震能力优于 Zygo 干涉仪的 4D 动态干涉仪进行实验。在搭建实验光路的过程中,要确保干涉仪标准镜头、被检平面镜及标准球面反射镜三者的中心对准光轴保持一致,这点对于 Ritchey 角求解具有重要意义。根据第 2 节的理论分析,选择 29.6° 、 47.8° 、 55.8° 这三个角度进行三次实验,其中一个角度超出最佳测试范围,方便后续数据处理时用作对比。

实验步骤首先对标准球面反射镜进行标定,得到球面镜的面形误差;第二步搭建 RC 检测光路,获得第一个测试角度下的系统波像差;第三步改变 Ritchey 角大小,进行第二次检测,在改变 Ritchey 角的过程中必须确保干涉标准镜头焦点到平面镜中心的距离保持不变,从而保证在两个坐标系下对应坐标转换关系的一致性与正确性。同样方法改变 Ritchey 角到第三个角度进行检测,微调光路直到干

涉仪所测得的波像差稳定为止。在数据处理过程中将三次检测得到的数据进行两两组组合,使用本文介绍的计算方法得到三组面形结果,比较三组计算结果与 Zygo 干涉仪直接检测结果并进行精度分析。

5 实验结果与分析

三组角度组合顺序为 29.6° & 47.8°, 29.6° &

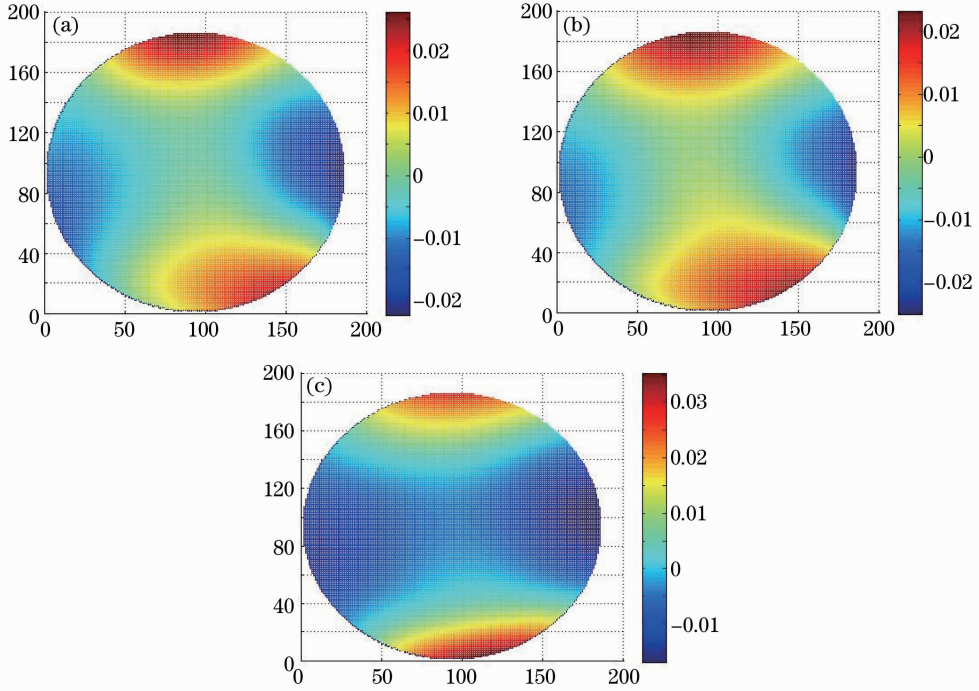


图 9 三组拟合面形对比。(a) 29.6° & 47.8°; (b) 29.6° & 55.8°; (c) 47.8° & 55.8°

Fig. 9 Fitting surface in different Ritchey angels. (a) 29.6° & 47.8°; (b) 29.6° & 55.8°; (c) 47.8° & 55.8°

表 4 组拟合面形的 PV 值和 RMS 值

Table 4 PV and RMS values of fitting surfaces in three tests

	Result 1	Result 2	Result 3
PV /λ	0.0978	0.0982	0.104
RMS /λ	0.0186	0.0186	0.021

55.8°以及 47.8° & 55.8°,对三次测试后获得波像差数据利用本文介绍的算法进行处理后,最终拟合出三组平面镜面形误差,结果如图 9 所示。

计算各拟合面形误差的峰谷(PV)值、均方根值,如表 4 所示。

Zygo 干涉仪直接对平面镜检测得到的面形情况如图 10所示,PV 值为 0.104λ,RMS 值为 0.017λ。

进一步分析三次检测结果精度,计算三组拟合结果与 Zygo 干涉仪测得结果的残差 PV 值和 RMS 值^[20],如表 5 所示。

表 5 残差的 PV 值和 RMS 值

Table 5 PV and RMS values of surface errors after detach

Residual error	Result 1	Result 2	Result 3
PV /λ	0.068	0.072	0.099
RMS /λ	0.0105	0.0110	0.0165

通过计算数据分析可以看到,在两个 Ritchey 角都选择在 20°~50°范围内时,最终结果与 Zygo 干涉仪直接检测结果的残差 PV 值精度可达 0.1λ、RMS 值精度可达到 0.01λ。当 Ritchey 角超出最佳范围,其单次检测得到的数据存在误差相对较大,必然会导致最小二乘结果也存在一定误差致使拟合得到的面形较实际有所偏离,本次实验中 29.6° & 55.8°和 47.8° & 55.8°这两组检测结果其残差 PV、RMS 值精度相对第一组都有所降低,证明了选择合

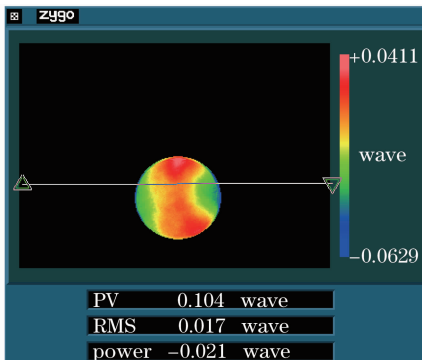


图 10 Zygo 干涉仪测得平面镜面形

Fig. 10 Flat surface measured by Zygo

适的 Ritchey 角进行检测会提高整体检测精度。

在实验光路调整过程中,干涉仪标准镜头、被测平面镜及标准球面反射镜三者光轴对准时难以避免会存在误差。为了进一步提高实验的检测精度,选用文中所述的通过测得系统光瞳面图像压缩比例的方法计算得到更为准确的 Ritchey 角,同时避免了测量 Ritchey 角所在三角形三边长度,对于三边长度的测量,不仅在测试过程中人为影响很大,且三角形三个顶点的位置很难保证在多次测量下保持不变,对求解 Ritchey 角大小具有很大的影响。在转动平面镜改变 Ritchey 角过程中,需要保证平面镜中心在干涉仪光轴上且距离标准干涉镜头焦点 d 的长度保持不变,从而保证改变 Ritchey 角的过程中坐标位置转换关系一致,可以通过高精度转台或高精度测量装置来减小位置误差。实验过程中为减小环境和人为因素的影响,必须进行多次测量取稳定的检测数据进行计算。

6 结 论

为进一步提高在平面镜面形检测中 Ritchey-Common 法的检测精度,着重分析了 Ritchey 角精度对整个检测结果的影响。通过理论仿真,确定出最佳 Ritchey 角检测范围在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间;针对 Ritchey 角测量误差问题,分析并证明了当 Ritchey 角误差控制在 $\pm 1^{\circ}$ 时,检测精度仍然可以得到保证;为得到更为准确的 Ritchey 角,利用干涉仪测得系统光瞳面图像压缩比例来计算 Ritchey 角的大小;最后通过实验分别在三组 Ritchey 角下拟合出被检平面面形,对比 Zygo 干涉仪直接检测的结果,计算残差 PV 值及 RMS 值,结果表明当 Ritchey 角选择在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间时,残差 PV 值精度可达 0.1λ , RMS 值精度可达 0.01λ ,证明了仿真分析理论的正确性,也为提高 Ritchey-Common 法检测精度提供了依据,在实验中选择合适的 Ritchey 角进行检测可以提高 Ritchey-Common 法的整体检测精度,使测得结果更为真实准确。

参 考 文 献

- 1 Ma Chuntao, Luo Hongxin, Wang Jie *et al.*. Surface error measurement of plane mirrors based on oblique incidence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071201
马春桃, 罗红心, 王 劫等. 斜入射法检测平面反射镜的面形误差[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 071201
- 2 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, 裴真威. 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
- 3 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley Press, 2007
- 4 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
- 5 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
- 6 Ma Dongmei, Sun Yuejun, Zhang Bo *et al.*. High precision large flat mirror measurement by angle difference testing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(S0): 121~126
马冬梅, 孙月军, 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
- 7 Ma Dongmei, Liu Zhixiang, Ma Lei *et al.*. Influences of alignment error in pentaprism scanning system on fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2517~2523
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
- 8 Chen Fengjun, Yin Shaohun, Yu Jianwu *et al.*. An ultra-precision on machine measurement method of aspheric surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 071203
陈逢军, 尹韶辉, 余剑武等. 一种超精密非球面在位测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(7): 071203
- 9 Zhang Jinping, Zhang Xuejun, 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 Wang Zongyang, Wang Bin, Wu Yuanhao *et al.*. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0701007
汪宗洋, 王 斌, 吴元昊等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0701007
- 11 Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin *et al.*. Image restoration by phase-diverse speckle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1165~1170
王建立, 汪宗洋, 王 斌等. 相位差异散斑法图像复原技术[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(5): 1165~1170
- 12 Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Wensheng *et al.*. Improvements of surface profile measuring device for wolter type-I mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412007
崔天刚, 张宏吉, 马文生等. Wolter I 型反射镜面形检测装置的改进[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0412007
- 13 Xu Yang, Tang Feng, Wang Xiangzhao *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
- 14 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
- 15 K. L. Shu. Ray-trace analysis and data reduction method for the Ritchey-Common test [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(12):

- 1879~1886
- 16 S. Han, E. Novak, M. Schuring. Application of Ritchey-Common test in large flat measurements[C]. *SPIE*, 2001, **4399**: 131~136
- 17 Yuan Lūjun, Xing Na. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 737~744
袁吕军, 邢 娜. 大口径光学平面镜瑞奇-康芒检测技术的研究 [J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 737~744
- 18 Tian Xiuyun, Wu Shibin, Wu Fan *et al.*. A data progress 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
- 19 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003. 67~74
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 67~74
- 20 ZYGO Corporation. Ritchey-Common Metropro Application[M]. Connecticut: ZYGO Corporation, 2004
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 1~10

栏目编辑: 何卓铭