

文章编号 1004-924X(2012)03-0527-07

## 双球面法标定立式参考球面的精度分析

谷勇强<sup>1,2\*</sup>, 苗二龙<sup>1</sup>, 隋永新<sup>1</sup>

- (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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**采用双球面法对立式 Fizeau 干涉仪的参考球面进行标定以确定由重力、安装夹持力等导致的面形形变量, 提高立式光学系统中光学元件的面形检测精度。首先, 推导了双球面法标定算法; 进而, 理论分析和模拟计算了影响检测精度的环境、重力、安装夹持力等因素; 最后, 利用双球面法对立式 Fizeau 干涉仪的参考球面进行标定, 并利用误差合成理论分析实验结果。实验结果显示, 利用双球面法标定 F/1.5 的立式 Fizeau 干涉仪参考面的精度为 2.3 nm。其中, 算法本身以及实验操作引起的测量重复性不大于 0.7 nm, 包含环境误差时的重复性低于 1.2 nm; 重力导致的面形形变约为 0.9 nm, 标准镜安装导致的面形形变约为 1.7 nm。结果论证了双球面法具有很高的标定精度; 环境对检测精度的影响与干涉腔长度有关, 长度增加时影响很明显; 立式工作时, 重力、安装等因素导致的标准镜参考球面的面形形变很大, 在高精度使用前必须进行标定。

**关键词:**双球面法; 立式参考球面; 绝对测量; 重力变形; Fizeau 干涉仪

**中图分类号:**TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122003.0527

## Accuracy analysis on calibrating vertical spherical reference by two-sphere method

GU Yong-qiang<sup>1,2\*</sup>, MIAO Er-long<sup>1</sup>, SUI Yong-xin<sup>1</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
- \* *Corresponding author, E-mail: yqgu82@gmail.com*

**Abstract:** The spherical reference in a vertical Fizeau interferometer was calibrated by the two-sphere method to identify the surface deformations induced by gravity, mounting or holding forces to improve the surface measurement accuracy of optical elements in vertical optical systems. First, the algorithm of two-sphere absolute method was deduced. Then, the factors that may influence measurement accuracy, including environment, gravity, mounting or holding forces were analyzed in theory or calculation by simulation. Finally, the spherical reference used in the vertical Fizeau interferometer was calibrated by two-sphere method, and the experimental results were analyzed by the law of error combination. Experimental results indicate that the calibration accuracy by using two-sphere method is 2.3

收稿日期: 2011-05-28; 修订日期: 2011-07-08.

基金项目: 光学系统关键技术研究资助项目 (No. 06E030)

nm RMS for the spherical reference of  $F/1.5$  vertical Fizeau interferometer. Among them, the measurement repeatability induced by the method and experimental operation is no more than 0.7 nm, and that is no more than 1.2 nm while environment influences are taken into account, including vibration and temperature. Furthermore, the surface deformation induced by gravity is about 0.9 nm RMS, and that induced by mounting or holding force is about 1.7 nm. In conclusion, two-sphere method is high precise method that can be used in calibrating vertical spherical reference and the influence of environments on measurement is relative to the length of interferometric cavity. The spherical reference must be calibrated before it is used for high precise measurement vertically, for the surface deformation will be remarkable induced by the gravity, mounting or holding forces.

**Key words:** two sphere method; vertical spherical reference; absolute test; gravity distortion; Fizeau interferometer

## 1 引言

光学元件的面形质量是影响光学系统成像的关键因素之一。随着大口径、超大口径的光学天文望远镜以及深紫外(DUV)、极紫外(EUV)光刻投影物镜等大型高精度光学系统制造的需要<sup>[1-3]</sup>,对光学元件面形的精度(RMS值)要求达到纳米甚至亚纳米水平。Carl Zeiss<sup>[4]</sup>于2010年报道了光刻物镜中的光学元件面形精度要求优于250 pmRMS。高精度光学元件的制造需要在加工过程中不断地检测面形质量,根据检测的结果控制加工的方向,经过多次迭代才能加工出满足要求的元件。计算机控制抛光技术(CCOS)、磁流变技术(MRF)、离子束抛光技术(IBF)<sup>[4-8]</sup>等高精度加工技术的兴起,理论上已能够制作纳米及亚纳米精度的光学元件,而相应的高精度检测技术成为瓶颈。

光学干涉法是高精度面形检测最成熟和有效的技术之一,而相移式 Fizeau 型干涉仪是目前以纳米级精度检测光学元件面形最常用的设备,近年来这方面的研究非常多,技术的发展也很迅速。但是普通干涉仪的检测结果是参考面与被测面的面形之和,检测精度不高于参考面的精度,而高精度的参考面制作困难,价格昂贵,目前国内没有商业产品,国外的产品价格动辄数十万美元,而且部分禁售。因此,人们在 Fizeau 干涉仪的基础上,又演化出多种测试技术,包括点衍射<sup>[9-10]</sup>、计算全息(CGHI)、Null Lens 以及绝对检测等<sup>[11-13]</sup>,以期实现更高精度的光学检测。

点衍射技术利用小孔产生完美的衍射波前,故其检测精度取决于衍射孔的质量;而高质量的衍射孔制作复杂,同时衍射效应对光强的损失很严重,增加了信息处理的难度;CGH 技术和 Null Lens 技术主要针对非球面和自由曲面的检测,并且波前比较复杂,不容易对波前检测,而且衍射光栅受制作工艺的限制很大。

绝对检测技术需要通过调整干涉仪的干涉腔两端的元件来获得多种干涉图,然后利用数学算法进行波面处理,即可计算被测元件的面形误差,是一种方便、相对容易实现同时又能保证较高检测精度的方法。自三平板绝对检测技术出现以来,又发展出奇偶、旋转平均、双球面、绝对小球等<sup>[11-16]</sup>多种方法对球面或平面面形进行绝对标定,有文献报道的检测精度已经达到亚纳米量级。

本文对利用双球面绝对检测技术标定立式干涉仪标准镜参考球面的精度进行了深入研究。首先对双球面法绝对检测的算法进行了推导,通过理论分析或模拟计算分析了空气温度、气压、振动等环境因素及重力、标准镜安装夹持力等对高精度检测的影响;然后利用双球面法,通过标定了用于立式和卧式两种不同 Fizeau 干涉仪中的标准镜参考球面的面形;进而根据实验结果分析了环境、重力、安装夹持力等对测量的影响,并利用误差合成公式将分析与测量结果对比。结果证实,双球面法是一种高精度绝对检测方法;立式 Fizeau 干涉仪的参考球面在使用前必须进行严格标定。研究结果对利用立式干涉仪实现高精度面形检测具有一定的指导意义。

## 2 双球面绝对测量的原理

### 2.1 相移式 Fizeau 型干涉仪原理

相移式 Fizeau 型干涉仪的原理如图 1 所示。当被测面处于共焦位置时,连续进行 4 次 90° 旋转并记录每次旋转后的测量结果;移动被测面至参考面的焦点位置(即猫眼位置),并记录测量结果。对这些测量结果进行数据处理即可实现双球面绝对检测。

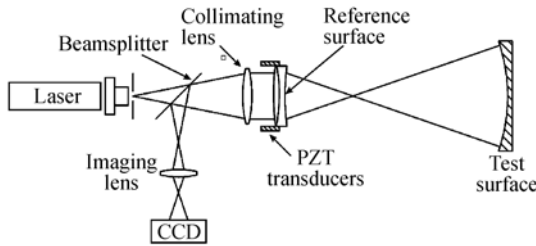


图 1 相移 Fizeau 干涉仪原理图

Fig. 1 Principle diagram of phase-shift Fizeau interferometer

### 2.2 双球法检测原理

当被测镜和标准镜参考球面处于猫眼位置时,记录其测量结果为  $M_4$ ;当被测面和标准镜参考球面处于共焦位置时,测量结果标记为  $M_0$ ,并在此位置 3 次旋转被测镜,每次旋转角度为 90°,并分别标记测量结果为  $M_1, M_2, M_3$ 。将测量结果数据  $M_4$  中心旋转 90, 180, 270°, 得到 3 个新的结果  $M_4^{90}, M_4^{180}, M_4^{270}$ , 同时将测量结果  $M_1, M_2, M_3$  中心旋转 -90, -180 及 -270, 得到 3 个新的结果  $M_1^{90}; M_2^{90}; M_3^{90}$ , 则被测面的面形误差  $T$  的计算公式表达如下

$$T = [M_0 + M_1^{90} + M_2^{90} + M_3^{90} - (M_4 + M_4^{90} + M_4^{180} + M_4^{270})] / 4. \quad (1)$$

干涉仪的系统波前误差为  $W$ , 标准镜参考球面的面形误差为  $R$ , 猫眼位置的测量结果  $M_4$  可以用公式(2)表达

$$M_4(x, y) = [R(x, y) + R(-x, -y) + W(x, y) - W(-x, -y)] / 2. \quad (2)$$

对  $M_4$  进行数据旋转的公式为

$$\begin{aligned} M_4^{90}(x, y) &= [R(-y, x) + R(y, -x) + W(-y, x) - W(y, -x)] / 2, \\ M_4^{180}(x, y) &= [R(-x, -y) + R(x, y) + W(-x, -y) - W(x, y)] / 2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4^{270}(x, y) &= [R(y, -x) + R(-y, x) + W(y, -x) - W(-y, x)] / 2. \end{aligned} \quad (3)$$

公式(2)和公式(3)相加,即可以消除干涉仪的系统波前误差  $W$

$$\begin{aligned} M_4 + M_4^{90} + M_4^{180} + M_4^{270} &= \\ R(x, y) + R(-x, -y) + R(y, -x) + R(-y, x). \end{aligned} \quad (4)$$

当标准镜参考球面和被测面处于共焦位置时,因为 Fizeau 型干涉仪共光路的特点,此时干涉仪的系统波前误差可以忽略,故  $M_0, M_1, M_2, M_3$  可以表达为公式

$$\begin{aligned} M_0(x, y) &= R(x, y) + T(x, y) \\ M_1(x, y) &= R(x, y) + T(-y, x) \\ M_2(x, y) &= R(x, y) + T(-x, -y) \\ M_3(x, y) &= R(x, y) + T(-y, -x) \end{aligned} \quad (5)$$

将  $M_0, M_1, M_2, M_3$  进行数据旋转操作,得到公式(6)

$$\begin{aligned} M_0(x, y) &= R(x, y) + T(x, y) \\ M_1^{90}(x, y) &= R(y, -x) + T(x, y) \\ M_2^{90}(x, y) &= R(-x, -y) + T(x, y) \\ M_3^{90}(x, y) &= R(-y, x) + T(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

将公式(6)中的数据相加

$$\begin{aligned} M_0 + M_1^{90} + M_2^{90} + M_3^{90} &= \\ 4T(x, y) + R(x, y) + R(-x, -y) + R(y, -x) + R(-y, x). \end{aligned} \quad (7)$$

公式(7)与公式(4)结果作差可得到被测面 4 倍的表面面形误差,则标准镜参考球面的面形误差可以表达为公式(8)

$$R = M_0 - T. \quad (8)$$

## 3 检测精度分析

双球面法标定标准镜参考球面面形的误差主要由以下几个方面组成:(1)环境,包括空气温度、气流、振动、气压等引起的误差;(2)参考镜立式使用时重力导致的参考面面形形变;(3)参考镜安装夹持力导致的面形形变;(4)干涉仪主机本身的系统误差等。

### 3.1 环境影响分析

环境是制约检测精度的重要因素之一。根据修正后的 Edlen 公式<sup>[17-18]</sup>进行推导,则室温(20 °C)以及标准大气压(1.01 × 10<sup>5</sup> Pa)下,温度变化  $\Delta t$  与光程差变化  $\Delta OPD$  的关系可以近似用

公式(9)表达

$$\Delta OPD \approx -92.5 \times 10^{-8} L \times \Delta t, \quad (9)$$

其中  $L$  为干涉腔长度。由公式得知当干涉仪的干涉腔长度为 100 mm 时,温度变化 0.1 °C 光程差的相应变化约 9.25 nm。普通相移式干涉仪对振动也非常敏感,且无法通过移相算法完全消除。为降低环境的影响,需要对实验室温度变化进行控制,并采用隔振平台降低振动;同时因为温度等一般是随机变化的,多次平均测量可以很好的消除部分环境干扰。

### 3.2 重力影响分析

光学元件的表面面形受重力的影响非常大,相同的光学元件在卧式和立式不同的使用状态下,面形变化很大。针对 15 cm(6 in) F/1.5 的标准参考镜组,假定含参考球面的镜片的径厚比为 6,镜组装卡方式为胶结,则利用软件仿真卧式和立式状态下的面形差结果如图 2 所示。 $X$  轴和  $Y$  轴分别代表镜片的尺寸,单位为 mm;不同的颜色代表镜面的高度,单位是  $\mu\text{m}$ 。在去除最佳拟合球面后,RMS 值变化约 0.9 nm(在球面的高精度检测中,干涉仪并不能精确地获知被测球面的真实位置,而是去除最佳拟合的 power 项)。

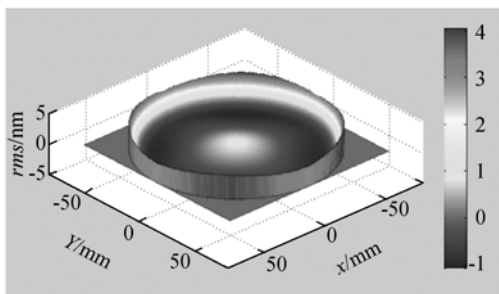


图 2 重力变形

Fig. 2 Deformation caused by gravity

### 3.3 其它误差分析

不同干涉仪主机具有不同的系统误差。例如回程误差会随着干涉仪主机、标准参考镜以及被测镜变化。标准参考镜组的装卡应力会造成一定的面形变化;将参考镜、被测镜安装于干涉仪主机时,夹持应力也会导致参考面和被测面的面形发生变化。当在特定干涉仪上使用特定标准参考镜时,由于高精度检测前系统要静置很长时间,一般不会也很难对干涉仪和标准参考镜再进行调整,故这些因素导致的测量误差基本是固定值,可以

在使用前进行标定。

## 4 双球面绝对检测实验

实验使用的仪器包括 Zygo 公司的相移式 Fizeau 型立式和卧式干涉仪,15 cm(6 in) F/0.75 和 F/1.5 的 2 组标准球面参考镜以及一块 F/0.68 的被测球面镜。为实现高精度检测,实验室对环境的洁净度、空气温度、振动等都做了严格的控制。

### 4.1 重复性实验

首先使用立式干涉仪, F/1.5 的标准参考镜,进行 4 次双球面绝对检测实验。为保证测量准确,尽量降低温度、振动等随机误差的影响,实验在连续 2 天内完成,并且每次实验均采集了 5 组数据进行平均,每组数据又进行了 16 次位相平均,最后将结果代入 2.2 节的公式进行计算,得到标准镜参考球面的面形。将 4 次双球面绝对检测的结果按照像素对应进行平均,然后分别与单次测量结果相减,根据相减结果的 RMS 判断重复性。测量结果如图 3 所示。

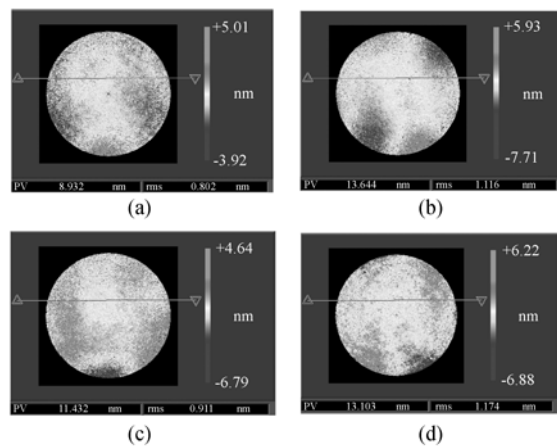


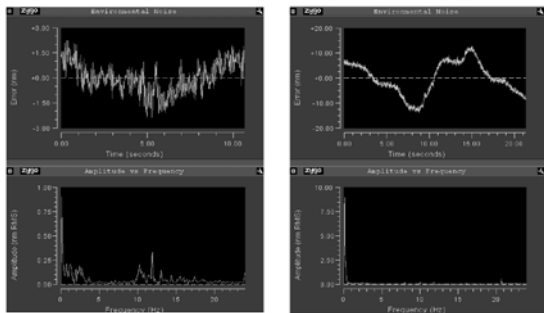
图 3 图 3 双球面法的重复性测试

Fig. 3 Repeatability test of two-sphere method

测试结果显示,测量重复性很高,RMS 值为 0.8~1.2 nm。由于标准参考镜  $F$  数比较大,干涉腔的长度很长,环境因素的影响比较大。在更换 F/0.75 的标准参考镜后进行同样的测量以及数据处理时,因为干涉腔的长度减小很多,重复性降至 0.4~0.7 nm。

标定 F/1.5 和 F/0.75 标准镜参考球面时的环境振动测试结果如图 4 所示。F/1.5 时的环境振动比 F/0.75 时差,证明在采用 16 次位相平

均、至少 5 次测量平均后,振动并非是影响测量重复性的主要因素。



(a) F/1.5 (b) F/0.75

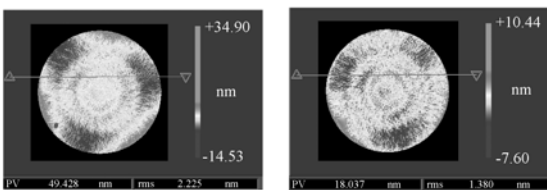
图 4 振动测试

Fig. 4 Vibration tests

温度变化、梯度分布不均匀性和气流扰动等对测量结果的影响较难从实验中提取,本文仅针对 F/0.75 的标准镜,连续进行 10 次测量,并计算测量结果 RMS 值的标准方差,结果为 0.2 nm,说明在短腔长时环境的干扰很小。由此得知,短腔长时,测量重复性主要由双球面检测原理以及操作中产生的对准、调整等误差引起。按照误差合成理论,双球面法的本身误差不高于 0.7 nm,进而推知,干涉腔变长时环境的影响显著。

### 4.2 重力影响实验

为实验测量出重力导致的面形变化量,分别利用卧式和立式干涉仪对 F/1.5 的标准镜参考球面进行双球面标定,测量结果如图 5 所示。



(a) 立式测量 (b) 卧式测量  
(a) Vertical test (b) Horizontal test

图 5 立式和卧式测量对比

Fig. 5 Comparison between vertical and horizontal tests

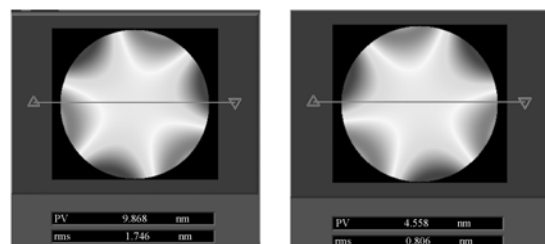
实验结果显示,相同的标准镜参考球面在立式干涉仪上的测量结果大于卧式干涉仪的测量结果。但是两种测量的环境不同,并且标准镜安装时的夹持力大小也不同,这些因素导致的测量误差不同;同时,标准镜安装时的角度不同,实验中

并没有在镜面上作物理标定,故较难对两次测量结果直接相减,很难直接提取出重力导致的标准镜参考球面的面形变化,只能通过后续的数据处理进行分析。

### 4.3 夹持力影响实验

分析立式和卧式干涉仪标定 F/1.5 标准镜参考球面的实验结果,发现三叶草像差均是面形误差的最主要组成部分。利用 Zernike 多项式对面形测量结果进行拟合,并提取出其中的三叶草像差专门分析,结果如图 6 所示。当采用立式干涉仪测量标准镜参考球面的面形时,三叶草像差产生的 RMS 值达到了 1.75 nm;采用卧式干涉仪测量时,三叶草像差产生的 RMS 值仅为 0.8 nm。常用高精度加工方式,磁流变加工或 IBF 加工不容易产生较明显的三叶草误差,故此误差不应该来源于参考球面的本身面形。因为在干涉仪其它使用过程中并未观察到明显的三叶草误差,故此误差来源于干涉仪系统本身的可能性也不大,则最大可能是标准镜安装时由于夹持力较大而产生的,并且因为标准镜较重,在立式使用时标准镜或被测镜的安装夹持力一般会大于卧式。

根据实验结果以及对 Zernike 多项式各系数的分析,其他像差都不大,说明干涉仪主机的系统误差并不明显,或者与此参考面面形耦合较好。



(a) 立式测量 (b) 卧式测量  
(a) Vertical test (b) Horizontal test

图 6 三叶草误

Fig. 6 Trefoil errors

## 5 分析

环境误差,重力导致的参考球面面形形变,与夹持力等导致的面形变化相对独立,故可以采用误差合成的方式进行数据处理。根据误差合成公式

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots} \quad (10)$$

对于 F/1.5 的参考球面,厂家的标定结果为

1.08 nm。当采用立式干涉仪进行检测时,环境、双球面法本身以及实验操作等引起的误差约 1.0 nm;重力引起的面形形变约 0.9 nm;夹持力导致的面形形变(三叶草像差)约为 1.75 nm,根据公式(10),计算得最终结果为 2.45 nm,与双球面法标定的平均结果 2.23 nm(见图 5a)非常接近。考虑到重力与夹持力引起的面形形变并非完全独立,并且厂家标定结果也应含一部分测量误差,故数据合成结果略大于测量结果

$$\sigma_{\text{ver}} = \sqrt{1.08^2 + 1.0^2 + 1.75^2 + 0.9^2} \approx 2.45.$$

同样对卧式干涉仪测量参考球面的结果进行数据处理。环境、双球面法本身以及实验操作等引起的误差约 0.6 nm;夹持力引起的面形形变(三叶草像差)为 0.8 nm,根据公式(10)计算结果为 1.47 nm,也略大于测量平均结果 1.38 nm。

$$\sigma_{\text{hor}} = \sqrt{1.08^2 + 0.8^2 + 0.6^2} \approx 1.47.$$

## 6 结 论

采用双球面法对立式Fizeau干涉仪的参考

球面进行了标定,结果显示双球面绝对检测是一种很高精度的标定球面面形的方法,由算法本身以及实验操作误差等引起的测量重复性低于 0.7 nm;考虑到环境因素的影响,在干涉腔比较长时(200 mm 左右)重复性升到 1.0~1.2 nm。如果能够对环境进行严格的控制,并尽量缩短干涉腔长度,双球面法可以对重复性要求不高于 1 nm 的球面进行绝对标定。要求更高时,可采取更严格的环境控制措施,降低干涉腔长度,减少实验操作误差或采用其它精度更高的绝对标定方法。重力、标准镜立式安装时的夹持力等导致的参考面面形变形很大,一般会在 1~2 nm 量级,尤其夹持力的大小不容易控制,每次重新安装标准镜时产生的面形变化也不同,故在使用立式干涉仪进行高精度检测前,必须先标定其参考面的面形。另外,对双球面法的标定精度、立式干涉仪标准镜参考面的误差等做了深入的分析 and 实验验证,分析和实验结果对双球面法的应用范围以及如何提高立式干涉仪的检测精度均有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] CLAMPIN M, Status of the james webb space telescope (JWST)[J]. *SPIE*, 2008,7010:1-70100L.
- [2] MATSUYAMA T, OHMURA Y, WILLIAMSON D M. The lithographic lens: its history and evolution [C]. *SPIE*, 2006,6154: 24-37.
- [3] 林强,金春水,向鹏,等.离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(2):144-150.  
LIN Q, JIN CH SH, XIANG P, *et al.*. Computer-aided alignment of Schwarzschild objective with off axis illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):144-150. (in Chinese)
- [4] ARNOLD T, BOHM G, FECHNER R, *et al.*. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques-status and outlook [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010,616:147-156.
- [5] 武建芬,卢振武,张红鑫,等.光学非球面离子束加工模型及误差控制[J] *光学 精密工程*, 2009,17(11):2678-2689.  
WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.*. Model of ion beam figuring in aspheric optics and its error control [J] *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2678-2689. (in Chinese)
- [6] 周旭升,大中型非球面计算机控制研抛工艺方法研究[D].北京:中国科学院研究生院,2007  
ZHOU X SH, *Study on techniques in computer-controlled grinding and polishing for large and medium aspheric surfaces* [D]. Beijing: Graduate university of Chinese Academy of Science,2007. (in Chinese)
- [7] KORDONSKI W. *Apparatus and method for abrasive jet finishing of deep concave surfaces using magneto-rheological fluid* [P]. US Patent, 2003, 6561874.
- [8] MOH L L, GEK S CH, QUN Y L, *et al.*. Ion Beam Figuring (IBF) for high precision optics [J]. *SPIE*,2010,7591:1-9.
- [9] TAKAYUKI H, CHIDANE O, MASANOBU H. EUV wavefront metrology system in EUVA [J] *SPIE*, 2004, 5374:797-807.
- [10] 马强,刘伟奇,李香波,等.点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J], *光学学报*, 2008, 28(12):

- 2321-2324.
- MA Q, LIU W Q, LI X B, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J] *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2321-2324. (in Chinese)
- [11] WYANT J C, O'NEILL P K, Computer generated hologram; null lens test of aspheric wavefronts [J] *Applied optics*, 1974, 13(12):2762-2765.
- [12] SCHULZ G, SCHWIDER J, Interferometric testing of smooth surfaces [J] *Progress in Optics (North-Holland, Amsterdam)*, 1976, 13: 93-167.
- [13] GUNTER S and JORGEN G, Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation [J] *APPLIED OPTICS*, 1992, 31(19):3767-3780.
- [14] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat [J] *Opt. Precision Eng.*, 1984,23:379-383.
- [15] AI. C., WYANT J C, Absolute testing of flats by using even and odd functions [J] *Appl. Opt.* 1993,32:4698-4705.
- [16] PARKS R E. A practical implementation of the random ball test [J] in *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest*, 2006, 12:1-3.
- [17] EDLEN B, The refractive index of air [J] *Metrologia*, 1966,2(2):71-80.
- [18] BRICH K P, DOWNS M J. Correction to the updated edlen equation for the refractive index of air [J] *Metrologia*, 1994, 31(4): 315-316.

#### 作者简介:



谷勇强(1982—),男,河北赵县人,助理研究员,2004年、2007年于中国科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事高精度光学加工与检测方面的研究。  
E-mail: yqgu82@gmail.com



苗二龙(1976—),男,甘肃兰州人,副研究员,2001年、2007年于中国科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事光刻投影物镜中的光学检测方面的研究。  
E-mail: miaoxx@gmail.com



隋永新(1970—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1993年、1996年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事网络信息安全、光学信息融合、辐射定标技术以及高精度光学检测等方面的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)