

文章编号:1004-4213(2011)09-1361-5

两位置球面面形检测方法研究

彭建华, 沈亦兵, 汪凯巍, 刘勇

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:三位置球面面形绝对检测方法在一定的条件下可以简化为两位置球面面形检测方法. 本文在研究三位置绝对检测原理的基础上, 提出了基于菲索干涉系统新的两位置球面面形检测方法. 该方法的简化条件分为参考面面形误差偶对称或被检面面形误差偶对称两种不同的情况. 实验结果表明, 两位置检测方法可以有效实现 PV_r 值 $\lambda/30$ 的高准确度检测, 且检测结果 PV_r 值重复性在 $\pm\lambda/300$ 范围内, RMS 值重复性在 $\pm\lambda/4\ 000$ 范围内. 采用两位置检测方法得到的面形误差分布结果与三位置绝对检测方法非常接近, PV_r 值相差小于 $\lambda/300$, RMS 值相差小于 $\lambda/2\ 500$. 因此在一定条件下, 两位置检测方法可以有效简化实验装置和检测步骤, 且不失三位置绝对检测方法的准确度和重复性.

关键词:两位置球面面形检测; 三位置绝对检测; 准确度; 重复性

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1361

0 引言

随着光学行业以及相关技术领域的发展, 光学表面面形的加工准确度需求越来越高, 表面加工准确度高低很大程度取决于面形检测准确度, 所以面形检测准确度是构建完善光学系统的基础^[1-4]. 1973 年, A. E. Jesen^[5] 基于泰曼格林干涉系统提出了面形绝对检测的方法, 该方法利用三位置检测消除了面形干涉检测中参考面面形误差的影响. 1976 年, G. Schulz 和 J. Schwider^[6] 认为面形绝对检测的方法同样可以应用于菲索干涉系统中. 但在实际检测中, 三位置检测对实验装置要求较高^[7], 尤其是在被检面旋转 180° 过程中, 需要保持零条纹干涉图. 为了对三位置法进行简化, 1990 年, Katherine Creath 和 James C. Wyant^[8] 提出了两位置球面面形检测的方法. 但在他们的论文中, 两位置球面面形检测原理的推导是基于泰曼格林干涉系统, 但实验却是基于菲索干涉系统, 所以对偶对称误差的扣除比较随意, 虽然最终对比结果的 PV 值和 RMS 值非常接近, 但面形分布相差较大.

为了能通过两位置检测方法实现高准确度的球面面形检测, 本文基于前人的研究工作, 回顾了基于泰曼格林干涉系统的两位置球面面形检测方法, 创新性地提出了基于菲索干涉系统新的两位置球面面形检测方法, 实验验证了新方法的可行性.

1 原理

1.1 基于泰曼格林干涉系统的两位置球面面形检测方法

基于泰曼格林干涉系统, A. E. Jesen^[5] 提出了面形绝对检测的方法. 该方法包括三个位置的检测, 三个位置的参考光路都是相同的; 检测光路如图 1. 第一个位置称为猫眼位置, 入射光线经过标准镜头, 再经置于焦点处的反射镜反射后作为猫眼位置的测量光路; 第二位置称为 0° 位置, 入射光线经过标准镜头, 再经与参考镜共焦的被检球面反射后作为 0° 位置的测量光路; 第三个位置称为 180° 位置, 对比

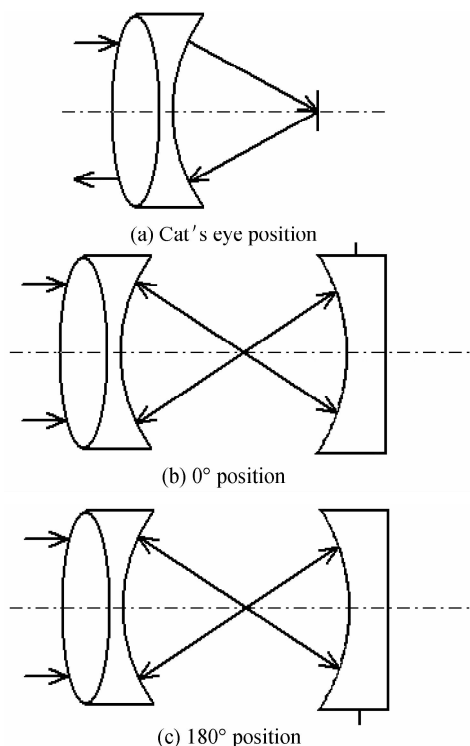


图 1 球面绝对检测原理
Fig. 1 Absolute test of spherical surface

第一作者: 彭建华(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学球面面形高准确度检测. Email: jiefpn@126.com

导师(通讯作者): 沈亦兵(1961—), 男, 教授, 主要研究方向为光学检测和高性能光学成像系统. Email: shenrr@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-05-20

于 0° 位置不同,被检球面关于光轴旋转 180° .

假设参考光路引入的误差为 W_r ,标准镜头引入误差为 W_{div} ,被检面的误差为 W_t ,各部分误差可以线性叠加,则三个位置的检测结果 W_{cat} 、 W_{0° 、 W_{180° 分别可以表示为^[7-8]

$$W_{cat} = W_r + \frac{1}{2}(W_{div} + \overline{W_{div}}) \quad (1)$$

$$W_{0^\circ} = W_r + W_{div} + W_t \quad (2)$$

$$W_{180^\circ} = W_r + W_{div} + \overline{W_t} \quad (3)$$

式(3)中,上标“ $\overline{\quad}$ ”表示在有效检测孔径内,数据分布关于圆心旋转 180° .则被检面的面形误差 W_t 可以表示为

$$W_t = \frac{1}{2}[(W_{0^\circ} + \overline{W_{180^\circ}}) - (W_{cat} + \overline{W_{cat}})] \quad (4)$$

假设标准镜头的误差仅存在偶对称误差,即 $W_{div} = \overline{W_{div}}$,结合式(1)和式(2),则两位置检测方法的原理可以表示为

$$W_t = W_{0^\circ} - W_{cat} \quad (5)$$

式(5)即为 Katherine Creath 和 James C. Wyant^[8]基于泰曼格林干涉系统提出的两位置球面面形检测的基本原理,但他们的验证实验是基于菲索干涉系统.尽管三位置球面面形绝对检测可以适用于泰曼格林干涉系统和菲索干涉系统,但基于这两种系统的两位置球面面形检测原理却是不同的.

1.2 基于菲索干涉系统的两位置球面面形检测方法

与泰曼格林干涉系统不同的是,在菲索干涉系统中,标准镜头最后一个面为参考面,三位置检测的检测光路与泰曼格林干涉系统是一致的.假设参考面引入误差为 W_r ,被检面引入误差为 W_t ,参考面前后的介质折射率分别为 n 、1.则三个位置的检测结果分别可以表示为^[6,9-10]

$$W_{cat} = \frac{n+1}{2}W_r - \frac{n-1}{2}\overline{W_r} \quad (6)$$

$$W_{0^\circ} = W_r + W_t \quad (7)$$

$$W_{180^\circ} = W_r + \overline{W_t} \quad (8)$$

则被检面的面形误差 W_t 可以表示为

$$W_t = \frac{1}{2}[(W_{0^\circ} + \overline{W_{180^\circ}}) - (W_{cat} + \overline{W_{cat}})] \quad (9)$$

基于泰曼格林干涉系统的球面面形绝对检测方法中需要引入整个标准镜头的误差,而基于菲索干涉系统的球面面形绝对检测方法中只需引入标准镜头中参考面的误差.所以,基于泰曼格林干涉系统的两位置检测方法需要假设整个标准镜头引入的误差是偶对称,而基于菲索干涉系统的两位置检测方法只需要对标准镜头的参考面进行讨论.

假设标准镜头参考面的面形误差仅存在偶对称

误差,即 $W_r = \overline{W_r}$,结合式(6)和式(7),则两位置检测方法的原理可以表示为

$$W_t = W_{0^\circ} - \frac{1}{2}(W_{cat} + \overline{W_{cat}}) \quad (10)$$

同样可以对被检面的面形误差进行讨论,如果被检面的面形误差仅存在偶对称误差,即 $W_t = \overline{W_t}$,结合式(6)和式(7),则两位置检测方法的原理可以表示为

$$W_t = \frac{1}{2}[(W_{0^\circ} + \overline{W_{0^\circ}}) - (W_{cat} + \overline{W_{cat}})] \quad (11)$$

所以本文基于菲索干涉系统提出新的两位置球面面形检测方法分为参考面面形误差偶对称和被检面面形误差偶对称为前提的两种情况.相比于1.1中针对整个标准镜头的假设,这两种情况是针对单个面的假设,前提条件较为宽松.

2 实验

为了验证两位置球面面形检测原理的可行性,将本方法与三位置球面面形绝对检测的方法进行对比.实验采用三位置球面面形绝对检测的检测机构.

为了实现绝对检测的三位置测量,被检面必须配套六个自由度的调节机构,在该机构中有 x 、 y 、 z 三个方向调节的能力,以及绕 x 轴、绕 y 轴和绕光轴 z 旋转的能力^[7].如图2,导轨用来粗调被检面在 z 方向上的位移, x 轴位移台、 y 轴位移台、 z 轴位移台分别用来微调被检面在 x 、 y 、 z 方向上的位移,二维倾斜台用来调整被检面在 x 、 y 方向的倾斜,旋转台用来实现被检面绕光轴 z 轴的旋转能力.

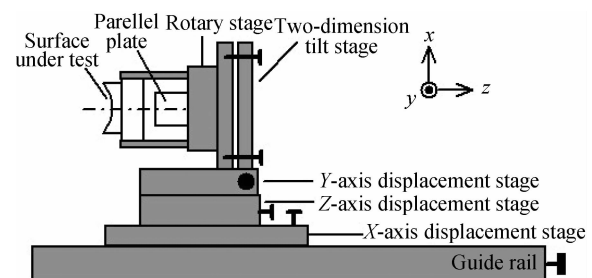


图2 拥有六个自由度的被检面调整装置
Fig. 2 Mount with six degrees of freedom for alignment of surface under test

三位置球面面形绝对检测的一个关键技术就是 0° 位置和 180° 位置之间的 180° 旋转角度控制.结合旋转台、平行平板、自准直仪设计了一种高精度旋转误差控制装置.图3中,左边的虚线框为自准直仪部分,右边的虚线框为被检镜头机构上的旋转台部分.自准直仪光源的发散光经透镜成像聚焦于分划板,再经物镜产生平行光,入射至平行平板.若平行平板与光线垂直,反射光沿原路返回,再经物镜聚焦于分划板,若平行平板与自准直仪的相对位置调节精确,可在目镜后观察到十字线聚焦在分划板的中

心. 转动旋转台, 使用平行平板的另一个表面来反射从自准直仪出射的平行光, 直到观察到十字线再次聚焦在分划板的中心. 则转动旋转台之前的位置可用于 0° 位置的检测, 转动旋转台之后的位置可用于 180° 位置的检测. 该旋转误差控制装置只需要平行度好的平行平板和自准直仪即能实现 180° 的旋转功能. 实验中所使用的平行平板经测量后存在 $3''$ 的平行度, 所以该旋转装置能实现 $3''$ 的旋转角度控制准确度.

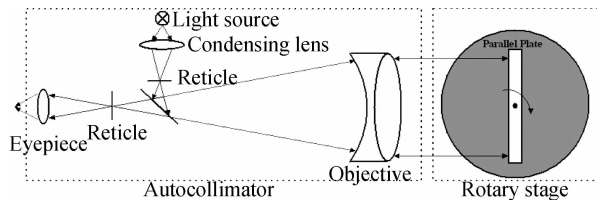


图3 旋转误差控制装置

Fig. 3 Mount for controlling rotary error

实验基于 Zygo 干涉仪, 使用 $F/0.75$ 、参考面 PV 值准确度为 $\lambda/40$ 的标准镜头, 对球面进行绝对检测. 为了减小环境的扰动, 所有实验装置置于防震气浮光学平台上, 并且由屏蔽罩笼罩, 实验室中应尽可能减小人为等因素产生的扰动. 在猫眼位置处, 可以通过观察干涉图控制平板的离焦情况, 通过调节平板的倾斜让平板的表面与光轴垂直, 测量波前与参考波前的中心重合, 调整误差较小. 0° 位置, 调节自准直仪和旋转台, 使得从平行平板某一侧反射的十字线聚焦自准直仪中分划板的中央, 通过观察干涉图调节被检面的调整机构, 调出零条纹的干涉图, 调整误差是比较小的. 180° 位置, 调节旋转台, 使得从平板另一侧反射的十字线聚焦分划板的中央, 再调出零条纹的干涉图; 若调节零条纹的过程造成十字线出现偏差, 再微调旋转台, 最终确定十字线聚焦于分划板的中央并且无干涉条纹.

3 分析

将猫眼位置、 0° 位置、 180° 位置的实验数据去除机构调整误差后^[8], 根据式(9)计算三位置球面面形绝对检测的结果, 如图 4. 将猫眼位置、 0° 位置的实验数据去除机构装调误差后, 分别根据式(10)、式(11)计算两位置球面面形检测的结果, 分别如图 5 (a)、图 5(b). 为了去除实验中由于灰尘等因素产生的粗大误差, 图 4 和图 5 的结果已经剔除了超出 Zernike 拟合残差三倍标准差的数据, 所以其评价值为 PV_r ^[12] 而不是 PV.

从图 4 和图 5 的面形分布来看, 三位置检测结果和两位置检测结果的面形误差分布非常接近.

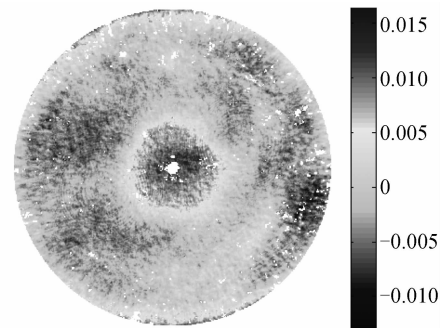
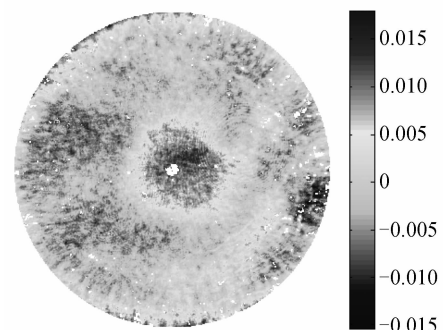
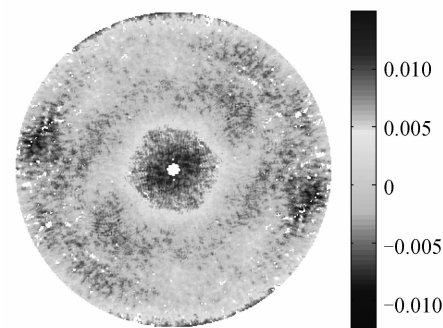


图4 三位置球面面形绝对检测结果分布

Fig. 4 Result of three-position absolute spherical testing



(a) According to equation (10)

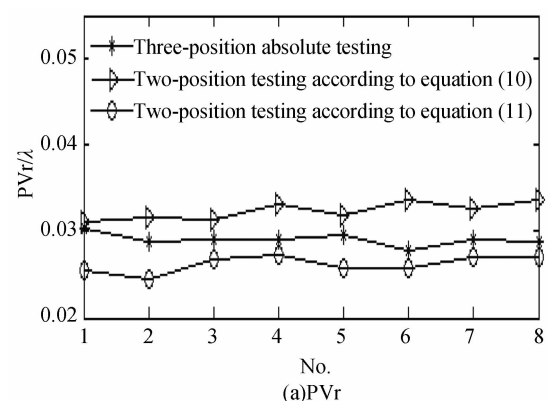


(b) According to equation (11)

图5 两位置球面面形检测结果分布

Fig. 5 Results of two-position spherical testing

图 6 显示了 8 次检测结果的评价值. 从图 6 中可以看出, 根据式(10)两位置检测原理得到结果的评价值大于三位置绝对检测原理得到结果的评价值; 根据式(11)两位置检测原理得到结果的评价值小于三位置绝对检测原理得到结果的评价值.



(a) PVr

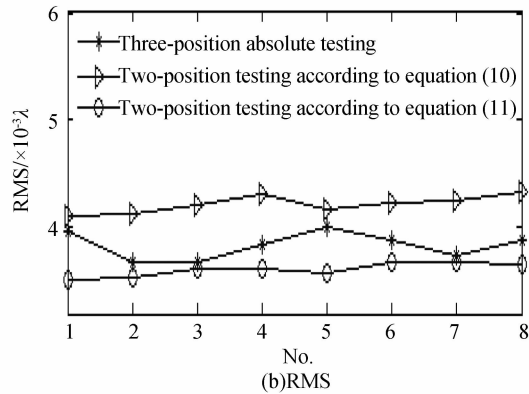


图 6 两位置检测结果和三位置绝对检测结果的评价值
Fig. 6 Evaluation values of results obtained using three-position absolute testing and two-position testing

表 1 显示了上述 8 次检测的 PV_r、RMS 的均值和三倍标准差. 其中, 三倍标准差用于表征检测结果的重复性. 从表 1 中可以看出: 第一, 根据式(10)两位置检测原理得到结果的 PV_r 值高于三位置绝对

表 1 检测结果 PV_r、RMS 的均值和三倍标准差

Table 1 Mean and triple standard deviation of PV_r and RMS

Method	Three-position testing		Two-position testing (According to equation 10)		Two-position testing (According to equation 11)	
	PV _r (λ)	RMS(λ)	PV _r (λ)	RMS(λ)	PV _r (λ)	RMS(λ)
Mean	0.0291	0.0038	0.0324	0.0042	0.0262	0.0036
Triple standard deviation	0.0022	0.00036	0.0031	0.00024	0.0029	0.00019

4 总结

本文基于菲索干涉系统提出了新的两位置球面面形检测方法, 并且通过实验对该方法进行了验证. 通过原理性分析和实验验证得出该方法有如下三点优点: 第一, 相比于前人基于泰曼格林干涉系统的两位置球面面形检测方法而言, 该方法是针对干涉系统中一个光学面进行讨论的, 前提条件要求较低, 即只需假设参考面或被检面面形误差偶对称. 第二, 该方法可以检测得到与三位置绝对检测方法非常接近的面形分布, 重复性也能得到保证. 第三, 该方法可以简化检测步骤和实验装置, 即只需要两步检测, 并且不需要 180° 旋转误差控制装置. 两位置球面面形检测方法不是严格意义上的绝对检测, 但在一定的前提条件下, 该方法的检测结果不失三位置绝对检测的准确度和重复性, 对光学球面的加工同样具有很好的指导意义.

参考文献

- [1] MALACARA D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2007: 501-503.
- [2] MING Ming, WANG Jian-li, MA Pei-li. A new method for testing the whole lens group of large optic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 419-423.
明名, 王建立, 马佩立. 一种检测大口径光学系统中透射镜组的新方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 419-423.
- [3] QUAN Gui-qin, AN Yu-ying, LI Qing-guo, *et al.* Test of large

检测原理得到结果的 PV_r 值 $\lambda/300$, RMS 值高于 $\lambda/2500$; 根据式(11)两位置检测原理得到结果的 PV_r 值低于三位置绝对检测原理得到结果的 PV_r 值 $\lambda/500$, RMS 值低于 $\lambda/5000$. 第二, 实验结果重复性较好, 三位置绝对检测原理得到结果的 PV_r 值重复性在 $\pm\lambda/400$ 范围内, RMS 值重复性在 $\pm\lambda/2500$ 范围内; 两位置检测原理得到结果的 PV_r 值重复性在 $\pm\lambda/300$ 范围内, RMS 值重复性在 $\pm\lambda/4000$ 范围内.

导致实验检测结果不稳定的主要因素包括: 干涉仪系统误差(包括 PZT 移相误差和 CCD 误差), 以及环境扰动误差. 并且本文设计的旋转误差控制装置只能保证旋转角度的精确, 而无法严格要求被检面旋转 180° 过程中, 始终保持零条纹干涉图. 所以除了由于忽略面形本身奇对称误差之外, 上述因素也是导致两位置检测结果和三位置检测结果产生偏差的原因.

aperture parabola mirror by laser interferometric[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2035-2038.

权贵秦, 安毓英, 李庆国, 等. 激光干涉法检测大口径抛物面反射镜[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 2035-2038.

- [4] YANG Yong-ying, ZHUO Yong-mo. Profiler with non-contact testing ultra-smooth surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(4): 371-374.
杨雨英, 卓永模. 超光滑表面无损检测轮廓仪[J]. *光子学报*, 1999, **28**(4): 371-374.
- [5] JENSEN A E. Absolute calibration method for Twyman-Green wavefront testing interferometers[J]. *JOSA*, 1973, **63A**(10): 1313.
- [6] SCHULZ G, SCHWIDER J. Interferometric testing of smooth surfaces [C]. *Progress in optics XIII*, North-Holland, Amsterdam, 1976: 92-167.
- [7] ELSSNER K-E, BUROW E, GRZANNA J, *et al.* Absolute sphericity measurement[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(21): 4649-4661.
- [8] CREATH K, WYANT J C. Testing spherical surfaces; a fast, quasi-absolute technique[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(22): 4350-4354.
- [9] TRUAX B E. Absolute interferometric testing of spherical surfaces[C]. *SPIE*, 1990, **1400**: 61-68.
- [10] SCHREINER R, SCHWIDER J, LINDLEIN N, *et al.* Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(32): 6134-6141.
- [11] WANG D S, WANG K W, SHEN Y B, *et al.* Error analysis of spherical ultra-precision measurement [C]. *SPIE*, 2010, **7656**: 76560O-1-76560O-7.
- [12] 徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 101-102.

Method of Two-position Spherical Testing

PENG Jian-hua, SHEN Yi-bing, WANG Kai-wei, LIU Yong

(*State Key Laboratory of Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: Three-position absolute surface testing technology can be simplified to method of two-position surface testing under some certain conditions. Based on the study of three-position absolute surface testing technology, a new method of two-position spherical testing via Fizeau interferometer is proposed. The method respectively assumes that the surface error of reference surface or test surface only contains aberrations with even symmetry. Results show that $\lambda/30$ PVr surface error can be measured though two-position testing as well as the method is repeatable to $\lambda/300$ PVr and $\lambda/4000$ RMS. Besides, the distribution of surface error measured through two-position testing is very close to one measured though three-position testing. The PVr difference is less than $\lambda/300$ and the RMS difference is less than $\lambda/2500$. So under certain assumptions, experimental device and process can be simplified through two-position testing method, while the accuracy and repeatability can be maintained.

Key words: Two-position spherical testing; Three-position absolute testing; Accuracy; Repeatability