

# 新型椭球形窗口零位检测技术研究

曲贺盟 张 新 王灵杰 张继真

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 椭球形窗口的检测技术严重阻碍其成功应用。首先简要介绍了目前普遍使用的非球面检测技术,并针对椭球形窗口大倾斜、大偏心、深非球面的特点,基于零位补偿检测法原理,设计了一种适合椭球形窗口检测的改进型 Offner 零位补偿检测系统。检测系统包括补偿镜、场镜和标准球面参考镜,检测系统工作原理为:干涉仪出射平行光线通过补偿镜及场镜产生修正波前,通过椭球形窗口照射到标准球面反射镜,并按原光路返回与参考光线干涉,其干涉结果显示出椭球形窗口的面形偏差。实现了对椭球形窗口的高精度全口径一次检测并给出了完整的设计结果。检测了长径比为 1.0,口径为 110 mm 的椭球形窗口,其波前残余波像差均方根值为  $0.0052\lambda$ 。设计结果为实际使用提供了一定的参考。

**关键词** 光学设计;光学检测;椭球形窗口;零位检测;零位补偿器设计

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0222001

## Research of Null Optics Testing for Elliptical Windows

Qu Hemeng Zhang Xin Wang Lingjie Zhang Jizhen

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** The elliptical windows testing technology has become the biggest block of development. In order to resolve the problem, the present testing technology for the asphere is expressed briefly. For the elliptical windows characterized by large tilt and large eccentricity deep asphere, based on the compensation theory, an improved Offner null testing compensator system for elliptical windows test is designed. The testing system includes compensator lens, field lens and a spherical reference mirror. The principle of Offner's refractive null lens testing system is that when parallel light from interferometer passes through the compensator lens and the field lens, correction wavefront is produced. After transmission through elliptical window and reflection of spherical reference mirror, light returns back according the original path and interferes with the reference light. The interference results display elliptical window shape deviation. The null lens testing system is implemented and the whole design results are demonstrated. For the tested elliptical window with fineness ratio of 1.0 and aperture of 110 mm, the root-mean-square (RMS) value of the final residual wavefront error is  $0.0052\lambda$ . Design results provide a certain reference to practical applications.

**Key words** optical design; optical metrology; elliptical window; null test; null lens compensator design

**OCIS codes** 220.1000; 220.2740; 220.3630

## 1 引 言

椭球形窗口具有较长的长径比,空气动力学性能优良,能够显著减少平台整体的空气阻力,同时可轻易获得超过  $180^\circ$  的无渐晕扫描视场,实现更好的隐身效果,大幅提高了平台整体的性能<sup>[1-4]</sup>。目前,

椭球形窗口已成为各国研究的重点。然而,与传统的半球形和平板形窗口相比,椭球形窗口具有大倾斜、大偏心及深非球面的特点,对加工和检测技术提出了更高的要求。而椭球形窗口加工与检测上的困难,很大程度地制约着椭球形窗口的发展及广泛应

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 曲贺盟(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail: quhemeng@126.com

用。为获得高精度的椭球形窗口,需要切实可行的检测方法,提供可靠的测量结果从而指导加工。因此,椭球形窗口检测技术的增强,是其得以广泛应用的先决条件<sup>[5-7]</sup>。

当前较为普遍的非球面检测方法主要有面型轮廓仪测量法、干涉法、计算全息法、光学补偿法、径向剪切法等<sup>[8]</sup>。其中轮廓仪检测方式无法达到较高的检测精度,同时由于属于接触式测量,会对镜面造成一定程度的损伤;计算全息法无法针对斜率较大的非球面进行精准检测;径向剪切法仅能够针对小口径、小相对孔径的非球面进行检测。因此对于椭球形窗口这种大偏离量和大斜度深透射式非球面的特点,传统的非球面检测技术已经不再适合,必须设计出新的适合椭球形窗口的检测技术。新型检测技术成功的关键在于是否具有可重复性,精度是否达到要求,装调是否简易。研究表明,Offner 零位补偿法可以用于检测大偏离量、大斜度和大口径面形,适合检验椭球形窗口。本文介绍了一种基于 Offner 零位补偿法的改进型零位检测技术并给出了一套完整的检测系统结果。将该技术应用于检测长径比为 1.0 的椭球形窗口,取得了满意的检测效果。

## 2 传统 Offner 零位补偿检测技术

Offner 零位补偿法是一种干涉测量技术,主要分为反射式补偿法和折射式补偿法<sup>[9]</sup>。折射式补偿法的工作原理如图 1 所示。根据非球面光学元件的参数,设计并制造光学零位补偿器,干涉仪发出的球面波前透过补偿系统转化为与待检测非球面相匹配的非球面波前,并经过非球面反射,再次经过补偿系统转化为带有非球面偏差信息的球面波,并与干涉仪参考球面波发生干涉。如果补偿后的波前与参考波前匹配理想,干涉条纹就是直条纹。反之,条纹就是弯曲的,弯曲的程度就显示了非球面表面偏离理想表面的程度。对干涉条纹进行分析处理就可得到非球面的面形误差。

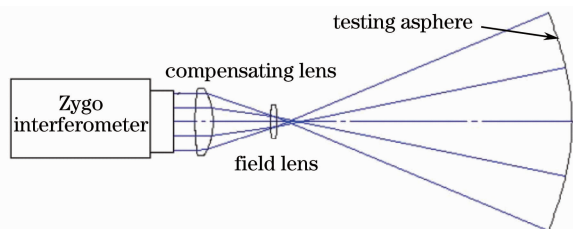


图 1 Offner 折射式零位补偿法示意图

Fig. 1 Optical schematic of Offner refractive null test

折射式 Offner 补偿器由补偿镜和场镜两部分组成。补偿镜可以较大程度地补偿非球面产生的初高级球差,场镜可将补偿镜成像在非球面表面,并补偿部分高级像差。在加工和装调方面,希望将补偿系统镜组设计为平凸或平凹形,有益于光学系统的设计和加工,并在一定程度上降低系统装调难度。

## 3 适合椭球形窗口的零位补偿器

### 3.1 补偿器设计原理

针对椭球形窗口大倾斜、大偏心及深非球面的特点,采用透射式 Offner 补偿系统通过平行光线进行检测。与传统反射非球面检测不同,椭球形窗口由于长径比较大,非球面斜率较大,无法实现反射检测。因此在本方案中将传统 Offner 补偿系统进行改进,在待检椭球形窗口后加入一块标准球面参考反射镜,将椭球形窗口作为透射原件的一部分进行检测可降低补偿系统设计难度,提高检测精度。

将干涉仪产生的平面波前经过补偿器转化为非球面波,使之与被检窗口非球面面形相匹配,透过椭球形窗口照射到标准球面参考镜上,并原路反射回干涉仪,与干涉仪的参考波面相干涉,其干涉结果显示为椭球形窗口的面形偏差。光路如图 2 所示。采用该检测方法优势在于,对于大倾斜、大偏心、深非球面椭球形窗口可实现全口径一次检测,精度高,并且检测系统的装调公差要求较低,特别是零位补偿镜的离轴不会引入较大的像差。而存在的劣势在于,对于不同的椭球形窗口需要设计不同的补偿器系统,成本较大。

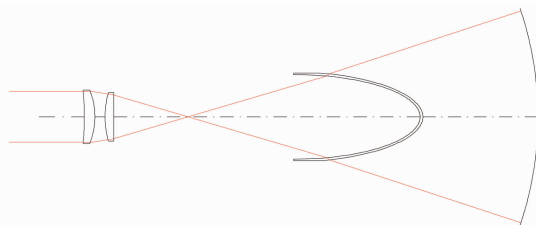


图 2 椭球形窗口的零位检测光路图

Fig. 2 Optical path of null lens test layout for elliptical window

设计中干涉仪检验时使用平行光路是为了降低系统调整难度。虽然采用平行光时对补偿系统的口径存在严格限制<sup>[10]</sup>,但会聚光在检测过程中的装调难度会对检测过程带来很大困难<sup>[11-12]</sup>。

### 3.2 零位补偿器应用光学模型建立

首先建立椭球形窗口零位检测系统光路模型,如图 3 所示。

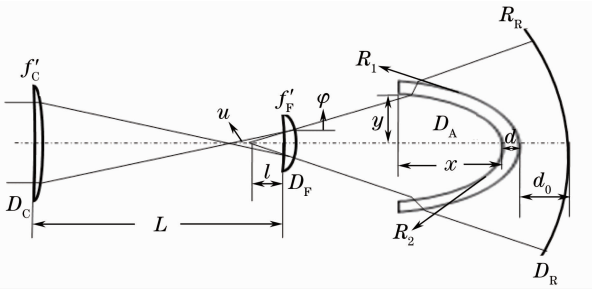


图 3 椭球形窗口零位检测系统

Fig. 3 Layout of elliptical window Offner null test system

图 3 为改进零位检测系统，其中  $f'_C, f'_F, D_C, D_F$  分别为补偿镜和场镜的焦距与口径； $R_R, D_R$  分别为标准球面参考镜的半径与口径； $R_1, R_2, D_A, d$  分别为被检头罩的内外半径、口径、厚度； $d_0$  为标准球面反射镜与被检头罩间距离； $\varphi$  为系统的孔径角； $l$  为场镜与标准球面参考镜球心距离； $L$  为场镜与补偿镜间距离。通过计算可知：

$$f'_C = \frac{D_C}{D_F + D_C} L, \quad (1)$$

$$f'_F = \frac{l \tan \varphi}{\tan u - \tan \varphi}, \quad (2)$$

其中，

$$\tan u = \frac{D_F}{2LD_C} (D_F + D_C), \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{y}{R_R - d - d_0 - x}, \quad (4)$$

其中，

$$y = D_A/2, \quad (5)$$

$$x = \frac{R_1 - \sqrt{R_1^2 - (1 - e_1^2)y^2}}{1 - e_1^2}. \quad (6)$$

补偿器位于平行光路中，其球差系数

$$S_1^{(C)} = e_1^4 \left[ \frac{n+2}{n} \varphi \rho_1^2 - \frac{2n+1}{n-1} \varphi^2 \rho_1 + \frac{n^2}{(n-1)^2} \varphi^3 \right]. \quad (7)$$

式中  $e_1$  为离心率， $n$  为补偿器折射率， $\rho_1$  为补偿透镜表面曲率。

由于补偿器设计时最优方案为平凸或平凹透镜，当平面背对干涉仪时，补偿镜  $r_{C2} = \infty$ ，补偿透镜的焦距与补偿镜半径  $r_{C1}$  之间的关系为  $\rho_1 = \varphi/(n-1)$ ，代入(7)式得

$$S_1^{(C)} = e_1^4 \varphi^3 P_1, \quad (8)$$

当平面正对干涉仪时， $r_{C1} \rightarrow \infty, l_1 \rightarrow \infty, l'_1 \rightarrow \infty, l_2 \rightarrow \infty$ 。代入(7)式得到

$$S_1^{(C)} = e_1^4 \varphi^3 P_2, \quad (9)$$

式中  $P_1, P_2$  为 PW 法设计系数。基于 Offner 零位

检测理论，假设  $S_1^{(C)}, S_1^{(F)}, S_1^{(A)}$  分别为补偿镜、场镜、待检椭球形窗口的球差系数，

$$S_1^{(C)} + S_1^{(A)} + S_1^{(F)} = 0. \quad (10)$$

对于高次非球面，其球差系数  $S_1^{(A)}$  为

$$S_1^{(A)} = -2u'^2 \delta L^{(A)}. \quad (11)$$

式中  $u'$  为孔径角，由于  $u = 0, h\varphi = u' - u = u'$ ，补偿器焦距为  $f'$ ，将(8),(9)式和(11)式代入(10)式得

$$f' = \frac{\delta L^{(A)}}{u'^2 P}, \quad (12)$$

其中，

$$P = \left[ \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right]^2 \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (13)$$

$$K = -\frac{e_1^2}{R^3} \Delta n, \quad (14)$$

(14)式中  $K$  为非球面系数。

通过上面的推导，可以求解出椭球形窗口检测系统的初始结构，并输入光学设计软件进行进一步优化。

## 4 设计实例

待检测椭球形窗口材料为 ZnS、长径比为 1.0、口径为  $\Phi 110$  mm。根据上面推导的公式实际设计的补偿系统包括补偿镜、场镜和标准球面参考镜。补偿镜几乎可以用于补偿非球面产生的全部球差，场镜则可用于把补偿镜成像于非球面上并消除部分高级像差。通过光学设计软件 RAID 优化程序，控制实际入射光线与指定表面的法线的夹角。在优化函数编辑器(MFE)控制中用入瞳口径 PY 为 0.25、0.5、0.75、1 的孔径角进行计算和优化，权重为 1。在优化中可以根据情况来修正权重，并根据情况增加入射光线条数，最后得到最优结果。检测系统光路图如图 4 所示，设计结果如图 5 所示，优化后系统残余波像差，峰谷(PV)值为  $0.0304\lambda$ ，均方根(RMS)值为  $0.0052\lambda$ 。

由于检测系统中补偿镜和场镜均采用平凸结构形式，且全部为球面设计，便于加工和装调，从而保证了高精度的椭球形窗口检测。

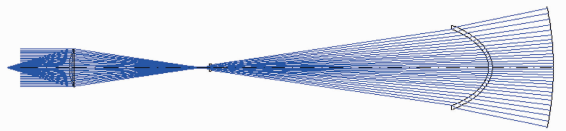


图 4 椭球形窗口零位检测设计结果

Fig. 4 Design results of null lens test layout for elliptical window

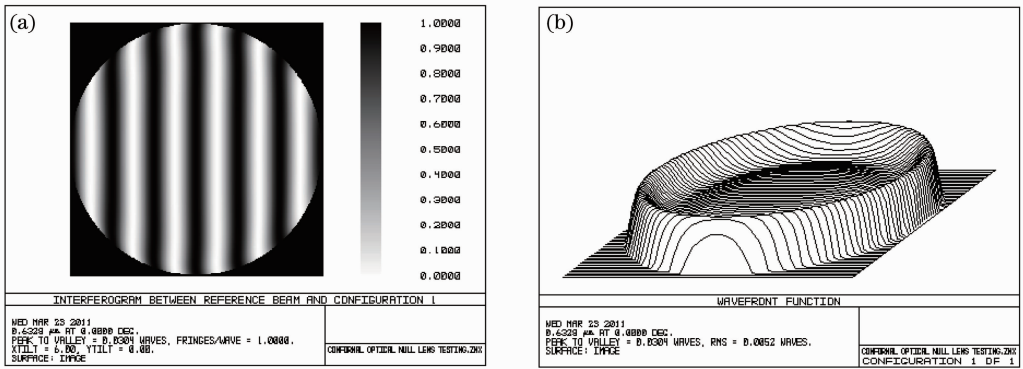


图5 椭球形窗口零位检测补偿器设计结果。(a)干涉图；(b)波前图

Fig. 5 Design results of null lens test for elliptical window. (a) Interferogram; (b) wavefront figure

## 5 系统公差分析

Offner 零位补偿系统属于对系统公差较敏感的系统,因此对于系统公差的分析十分重要。分析结果表明,系统场镜的位置对系统公差分配贡献较大,当场镜顶点位于标准球面参考镜曲率中心附近位置时,场镜的误差对补偿系统的检测精度影响相对较小。因此在设计过程中将场镜约束在该位置进行设计,显著降低了系统的公差要求。

对于补偿镜和场镜材料的折射率需要严格控制,折射率采用实测数据,其检测精度需优于  $5 \times 10^{-6}$ ,面形精度 PV 值为  $\lambda/10$ ,RMS 值为  $\lambda/50$ ,单面反射率不大于 0.2%,镜面曲率半径误差优于 0.005%,厚度误差小于 0.01 mm,镜片加工偏心公差小于  $15''$ ;装调时的透镜间隔公差为 0.01 mm,倾斜公差小于  $10''$ ,偏心公差小于  $\pm 0.005$  mm。虽然镜片的曲率半径与厚度在加工中产生的误差可由装调间隔弥补,但在加工中仍需尽量保证上述公差。在满足上述公差要求的前提下,可以保证检测系统的检测精度要求。

## 6 结 论

探讨了椭球形窗口补偿检测技术,并针对椭球形窗口大偏离量和大斜度深非球面的特点,经过优选,确定采用一种改进的 Offner 零位补偿检测技术。针对长径比为 1.0 的 ZnS 椭球形窗口设计了一套检测系统,检测系统加入一块标准球面参考镜,实现了对椭球形窗口全口径一次检测。设计结果残余波像差达到 PV 值为  $0.0304\lambda$ ,RMS 值为  $0.0052\lambda$ 。该方法检测精度高,并且加入标准球面参考镜使得系统在设计 and 装调等方面有更多的优化空

间。该方法为新型椭球形窗口的工程化应用提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- Zhang Rongshi. Recent advances in infrared window and dome technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 107-112.  
张荣实. 红外窗口/整流罩技术新进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 107-112.
- J P Knapp. Fundamentals of conformal dome design [C]. SPIE, 2002, 4832: 394-409.
- Zhang Xingde, Liu Lin, Li Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601-606.  
张兴德, 刘琳, 李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 601-606.
- Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573.  
罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 565-573.
- Patrick A Trotta. Precision conformal optics technology program [C]. SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- James P Mills. Conformal optics: theory and practice [C]. SPIE, 2001, 4442: 101-107.
- Scott A Lerner, Jose M Sasian, John E Greivenkamp, et al.. Interferometric metrology of conformal domes [C]. SPIE, 1999, 3705: 221-226.
- Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.  
张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- Guo Peiji, Yu Jingchi. Corrective technique of null lens's unsymmetrical error [C]. SPIE, 2006, 6150: 615002.
- Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, et al.. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 688-696.  
刘东, 杨甬英, 田超, 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 688-696.
- Chen Qinfang, Li Yingcai, Ma Zhen, et al.. Alignment of off-axis conic aspheric mirrors in stigmatic null test [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222001.  
陈钦芳, 李英才, 马臻, 等. 离轴二次非球面反射镜无像差点法检测的误差分离技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222001.