

文章编号 1004-924X(2014)05-1176-07

## 可变载频径向剪切雅敏干涉仪

朱勇建<sup>1,2\*</sup>, 那景新<sup>2</sup>, 王宇<sup>1</sup>, 职亚楠<sup>3</sup>, 范玉峰<sup>1</sup>

(1. 浙江科技学院 机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310023;

2. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025;

3. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:**基于雅敏干涉装置,提出一种新的可变载频(条纹频率可调)的径向剪切干涉仪。该干涉仪主体由两块雅敏干涉平板、两对可旋转双光楔、两个可变比例的扩束镜组成;双光楔用于调节条纹周期,以获取最佳干涉图;两扩束镜的扩束比例可变,以调节最佳剪切量。两块平板加工误差一致,同时所有光楔来源于同一楔板,参数一致,两扩束镜的性能参数也完全相同,光路对称,严格等光程。提出的干涉仪可一次性完成非球面模具的测量;并根据被测面形情况进行条纹周期和剪切量的调节,获得了最佳条纹图。最后,对球面/非球面模具表面进行了测试。结果显示:通过调节双光楔和扩束比,此干涉仪可获得较好的条纹图,为多种非球面模具的进一步高效检测提供了新的思路。

**关键词:**雅敏干涉仪;径向剪切干涉仪;条纹图;非球面模具

**中图分类号:**TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1176

## Radial shearing Jamin interferometer with variable carrier frequency

ZHU Yong-jian<sup>1,2\*</sup>, NA Jing-xin<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, ZHI Ya-nan<sup>3</sup>, FAN Yu-feng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanics and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;

3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhuyongjian\_hn@126.com

**Abstract:** A new type of radial shearing interferometer with variable carrier frequencies (fringe frequency adjustable) was proposed based on Jamin interferometric plates. The interferometer mainly consists of two Jamin plates, two pairs of rotational optical wedges and two beam expanding/reducing systems with adjustable ratios. The rotational optical wedges were used to adjust fringe periods to obtain an optimum interferogram. The two beam expanding/reducing systems with adjustable ratios could achieve an optimum shear. Moreover, the two optical plates could be machined by cutting half to achieve the same machining error. All the optical wedges and beam expanding/reducing systems

**收稿日期:**2013-07-10;**修订日期:**2013-08-12.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51005212, No. 61275110);浙江省公益计划基金资助项目(No. 2011C21003);汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金资助项目(No. 20111114);中国博士后基金资助项目(No. 2011M500936, No. 2012T50274);中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室开放基金资助项目

were the same in optical parameters and two optical paths were also symmetric and identical. The new interferometer could perform the measurement of aspheric lens mould at one time. The testing experiments of spherical and aspheric moulds show that the interferometer can achieve the best-quality fringe patterns and satisfactory shearing displacement at one time, which provides a solid foundation for the further measurement of various kinds of aspheric moulds.

**Key words:** Jamin interferometer; radial shearing interferometer; fringe pattern; aspheric lens mould

## 1 引言

目前,光学镜头朝着短、小、轻、薄和高像质方向发展<sup>[1]</sup>,而非球面透镜的使用成为推动这一发展趋势的主导力量<sup>[2-3]</sup>。构成镜头的镜片类型主要有玻璃球面透镜、玻璃非球面透镜和塑胶非球面透镜3类。其中,塑胶非球面透镜(口径在100 mm以下)的批量制造主要采用精密注塑成型技术,玻璃非球面透镜(口径在50 mm以下)的批量制造主要采用热模压成型技术。这两类非球面透镜的制造都依赖于超精密模具,因此模具的加工精度和效率便成为制约非球面镜片生产的一个技术瓶颈<sup>[4]</sup>。提高模具的加工精度和效率一个重要的前提就是拥有高效率、高精度的在机面形检测手段。

在非球面透镜模具的加工过程中,常用的测量方法是接触探针扫描法<sup>[5-6]</sup>,其形状测量精度可满足模具的加工需求;但测量速度较慢,且在探针使用一段时间后测头磨损,从而导致测量误差偏大,需更换测头。另外,该方法只能测量模具的二维截面轮廓,无法得到三维信息;在测量不同材质的模具时,测头容易划伤模具表面。这些问题严重制约着接触式方法在模具在机测量方面的进一步应用。因此,国内外学者提出了许多非接触式测量方案,用于测量非球面透镜模具的面形<sup>[7-10]</sup>。其中,光学干涉测量方法的研究最热,而在光学干涉测量方法中,剪切干涉法由于不需要额外引入参考光学元件而大受青睐。Seung-Woo Kim等人<sup>[11]</sup>采用四方棱镜构成横向剪切干涉仪,用以检测非球面透镜的透射波面。Jae-Bong Song等人<sup>[12]</sup>采用一块楔板和两块透射光栅构成横向剪切干涉仪,并对该干涉仪的测量误差进行了理论分析。在国内,北京工业大学和美国亚利桑那大学合作提出了基于双折射板的横向剪切干

涉法<sup>[13]</sup>。中国航空精密机械研究所提出了压电陶瓷(PZT)相移式横向剪切干涉法非球面面形测量的检测装置及配套软件,实现了部分非球面光学零件的测量<sup>[14]</sup>;西安工业大学也对这种剪切干涉法进行了深入研究<sup>[15]</sup>,并取得了较好的研究成果。南京理工大学和南昌大学研究了波带板径向剪切法测量非球面,测量精度小于 $0.2\ \mu\text{m}$ ,但此方法只适合检测非球面度不是很大的透镜或普通平面镜、球面镜等<sup>[16]</sup>。浙江大学对径向剪切干涉法测量深度非球面的参数进行了讨论和系统的理论优化<sup>[17]</sup>。香港科技大学研究了横向剪切干涉技术,并对该技术进行了理论分析<sup>[18]</sup>。西安交通大学和西安工业大学联合研究了环境振动对PZT相移型横向剪切非球面干涉仪的影响,提出了误差补偿算法,并理论分析了算法的可行性<sup>[19]</sup>。由此可见,剪切干涉仪测量非球面的方法各式各样,测量精度高低不一,所针对的测量对象也不尽相同,但目前还未有将它用于非球面透镜模具检测的研究报道。

本文针对非球面模具的特点,基于雅敏干涉双平板提出了一种新的条纹周期可调的径向剪切干涉仪。该干涉仪主体由两块雅敏干涉平板、两对可旋转双光楔、两个可变比例的扩束镜组成,双光楔用于调节条纹周期和条纹方向,两扩束镜的扩束比例可变,可根据被测非球面度来调节剪切量。两块平板和两扩束镜的性能参数均相同,光路对称,严格等光程。新型干涉仪可一次性完成非球面模具的测量,并能根据被测面形情况调节条纹周期和剪切量,从而获得最佳条纹图。

## 2 径向剪切干涉

根据径向剪切干涉仪的原理,采用扩束/缩束系统形成径向剪切,扩束和缩束后的波面如图1所示。

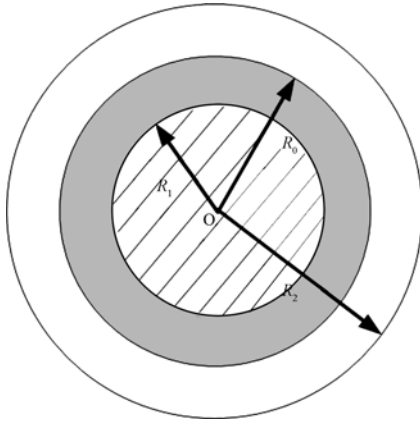


图 1 径向剪切干涉原理示意图

Fig. 1 Scheme of radial shearing interferometry

图中  $R_0$  为原始波面半径,  $R_1$  为缩束后的波面半径,  $R_2$  为扩束后的波面半径。剪切干涉后形成的条纹图在扩束、缩束后的重叠区域在  $R_1$ , 在极坐标  $(r, \theta)$  下, 波面的缩小率和放大率分别为:<sup>[20]</sup>

$$\gamma_r = \rho_0 / \rho_1, \quad (1)$$

$$\gamma_e = \rho_0 / \rho_2, \quad (2)$$

其中:  $\rho_0$  为干涉图中某点的径向距离与原始波面最大半径之比,  $\rho_1, \rho_2$  分别为该点的径向距离与缩小波面、扩大波面最大半径之比, 并且  $\rho_2 \leq \rho_0 \leq \rho_1$ , 剪切量  $\chi = \gamma_r / \gamma_e$ 。若被测的原始波面复振幅为:

$$E(\rho, \theta) = A(\rho, \theta) e^{ikW(\rho, \theta)}, \quad (3)$$

其中:  $A$  为振幅,  $k$  为波数,  $W$  为相位, 则缩小波面的复振幅为:

$$E\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] = A\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] e^{ikW\left(\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right)}; \quad (4)$$

扩大波面的复振幅为:

$$E\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] = A\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] e^{ikW\left(\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right)}. \quad (5)$$

根据光学干涉理论, 径向剪切干涉产生的干涉光强为:

$$I\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] = \left[ E\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] + E\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] \right] \cdot \left[ E\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] + E\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] \right]^*, \quad (6)$$

其中:  $*$  表示共轭。处理式(6)得到:

$$I\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] = \left| A\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] \right|^2 + \left| A\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] \right|^2 + 2A\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] \cdot A\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right] \cdot \cos\left[k\Delta W\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right]\right], \quad (7)$$

其中:  $\Delta W$  为缩小波面与扩大波面的相位差,

$$\Delta W\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] = W\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] - W\left[\frac{\rho}{\gamma_e}, \theta\right]. \quad (8)$$

而波面函数的一般形式为:<sup>[21]</sup>

$$W(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^k \sum_{i=0}^j \rho^j (a_{ji} \cos i\theta + b_{ji} \sin i\theta), \quad (9)$$

其中:  $j$  和  $i$  具有相同的奇偶性。将式(9)代入式(8)得:

$$\Delta W\left[\frac{\rho}{\gamma_r}, \theta\right] = \sum_{j=0}^k \sum_{i=0}^j (1 - \chi^j) \left[\frac{\rho}{\gamma_r}\right]^j \cdot (a_{ji} \cos i\theta + b_{ji} \sin i\theta). \quad (10)$$

当  $\chi$  趋近于 0 时, 径向剪切干涉波面相位差  $\Delta W$  表示的是缩小波面的相位信息。

### 3 实验原理与实验装置

#### 3.1 实验原理

根据剪切干涉原理, 干涉仪的基本结构基于雅敏干涉平板, 两雅敏干涉平板平行放置, 并与纸面成  $45^\circ$  角, 一块为雅敏输入平板, 另一块为雅敏输出平板, 如图 2 所示。由 He-Ne 激光器发出的激光经过扩束系统和光阑后, 通过半透半反的分束镜和聚焦透镜进行聚焦。在焦点之后放置被测非球面模具, 模具表面反射的激光再次通过聚焦透镜, 并被分束镜反射, 以  $45^\circ$  角入射到雅敏输入平板, 经过其前后表面反射形成两路光。经前表面反射形成的一路光经过缩束系统和可旋转双光楔后入射到雅敏输出平板的前表面, 并透射进入其后表面, 经后表面反射形成剪切干涉的第一路光; 而被输入平板后表面反射形成的另一路光, 经过扩束系统和可旋转双光楔后, 入射到雅敏输出平板的前表面, 被直接反射后形成剪切干涉的另一路光。被输出平板前后表面反射的两路光形成剪切干涉, 由 CCD 进行探测, 并输入到计算机进行处理。缩束系统和扩束系统对波面进行压缩和扩张, 形成径向剪切干涉。一对双光楔的作用有两个, 一是判断两光路是否形成干涉; 二是调节干涉条纹的周期和倾斜方向, 以获取最佳条纹质量。光束入射方向与双光楔中的两相邻单光楔面垂直。同时, 扩束系统和缩束系统的参数、材质等完全相同, 扩束比可变或使光束出入端相反; 双光楔中的两单光楔角度的参数和材质也完全相同,

从而形成等光程干涉, 减少系统误差。

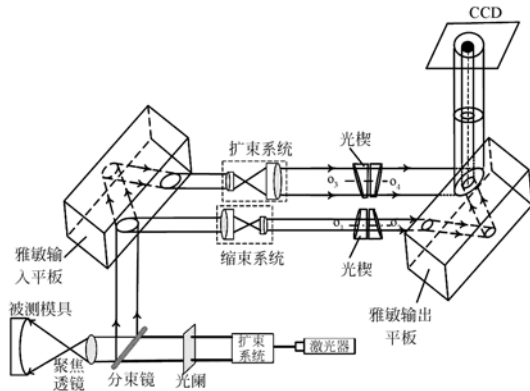


图 2 非球面模具测量的实验原理图

Fig. 2 Experimental principle of aspheric mould measurement with radial shearing interferometry

在图 2 中, 双光楔由 2 个可相对旋转的单光楔构成, 楔角  $\alpha$  很小(远小于  $1^\circ$ ), 因此入射角  $\theta$  可以认为是 0, 那么光线通过双光楔后产生的横向剪切量为  $0^{[22]}$ ; 光线单独通过双光楔产生的干涉条纹是背景条纹, 其条纹周期  $T$ (干涉条纹宽度)与光线出射角  $\delta$  的关系为:

$$T = \frac{\lambda}{2 \sin \delta} \approx \frac{\lambda}{2\delta} = \frac{\lambda}{4(n-1)a \cos [(\theta_1 - \theta_2)/2]}, \quad (11)$$

其中:  $\lambda$  为光波长,  $n$  为折射率,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  是两单光楔的相对转角。

### 3.2 实验装置

如图 2 所示, 干涉仪的系统误差主要来自干涉平板、双光楔和扩束/缩束系统。干涉平板选择一级 K9 玻璃, 光胶加工使角度和厚度误差一致, 前后表面的平行度为  $1''$ 。光楔材料同样选择一级 K9 玻璃, 采用在同一楔板同一水平位置进行切割, 楔角误差保持在  $\pm 2''$ 。扩束镜采用大恒产品, 扩束比为 2~6 倍, 波前误差为  $\lambda/5$ 。实验装置如图 3 所示。

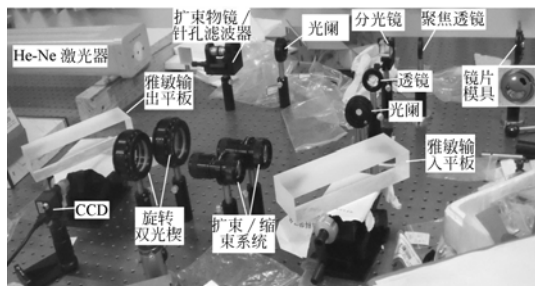


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

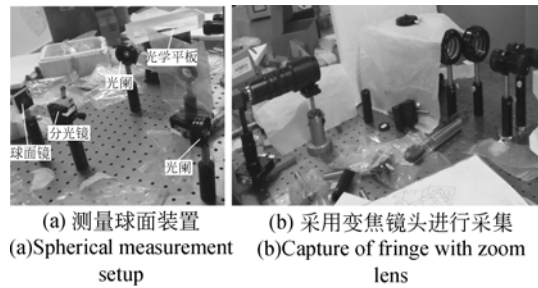


图 4 测量球面实验装置

Fig. 4 Experimental setup for spherical surface measurement

实验中先对球面进行干涉测试, 如图 4(a) 所示。在球面测试时, 不需要聚焦透镜就能得到较清晰的干涉图。由于光强和 CCD 幅面的限制, 无法采集到完整的干涉图样, 因此利用变焦镜头和透明纸作为辅助元件进行干涉图全景采集, 如图 4(b) 所示, 采集到的图像如图 5(a) 所示, 此时剪切量为 0.57 mm。从图 5 中可以看到, 径向剪切干涉条纹存在一定的球差, 这是由扩束/缩束系统引起的, 因此获得的干涉图需要消球差。图 5(b)、5(c) 中噪声点基本来自于背景光。

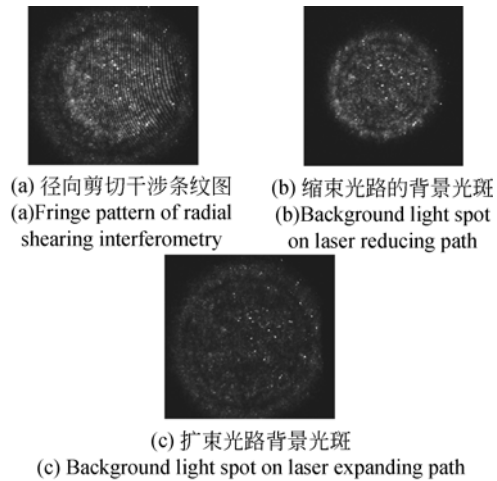


图 5 干涉条纹图及背景光斑

Fig. 5 Fringe patterns and background light spots

加入衰减片, 调节曝光量, 采用 CCD(大恒, 640 pixel $\times$ 480 pixel) 直接采集干涉图, 结果如图 6 所示。由于双光楔的相对转角不同, 得到了不同周期和不同倾斜角度的条纹图。

在采用图 3 所示装置测试非球面模具样品的(碳化钨模具)局部表面时, 需要在对称光路中加入相同的聚焦透镜调节光束, 这样才能获得干涉

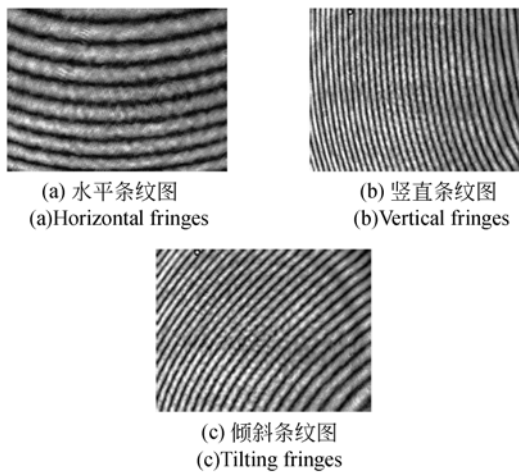


图 6 球面测量条纹图

Fig. 6 Fringes in spherical measurement

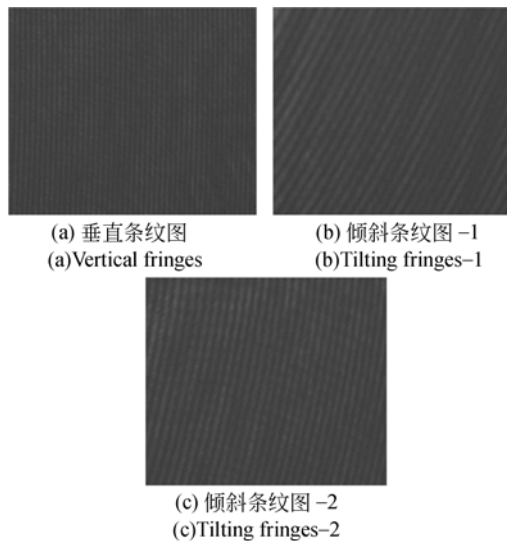


图 7 非球面测量干涉条纹图

Fig. 7 Fringe patterns in aspheric measurement

图。图 7 为实验所获得的干涉条纹图。图 7(a) 为垂直条纹图, 条纹周期为 72 pixel; 图 7(b)、7(c) 为倾斜干涉条纹图。如图所示, 图 7 中的条纹并不很直, 存在由透镜引起的球差。为了对比, 去掉扩束/缩束系统, 仅保留双光楔, 这样产生的干涉条纹为背景条纹, 调节双光楔的相对转角到合适位置, 获得了几组垂直条纹, 如图 8 所示。由图 8 可知, 剪切干涉系统的像差主要来自扩束/缩束系统, 目视估计由此产生的误差在  $\lambda/5 \sim \lambda/4$ ; 而扩束/缩束系统的制造误差是  $\lambda/5$ , 因此由聚焦透镜产生的最大误差约是  $\lambda/20$ 。由此可见, 最大的测量误差源为扩束/缩束系统。干涉仪的其他

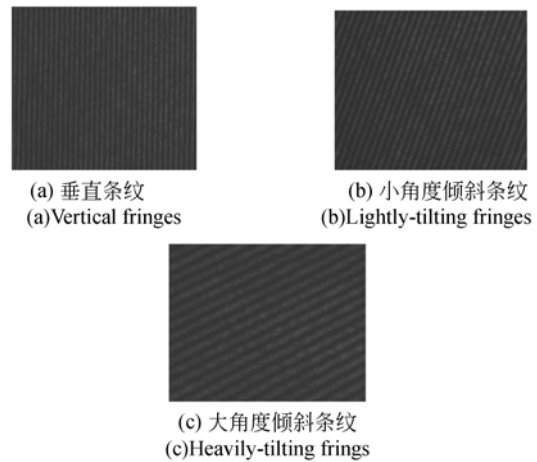


图 8 去掉扩束/缩束系统后的干涉条纹

Fig. 8 Fringes without laser expanding/reducing system

误差来源主要包括: (1) 雅敏光学平板两平行面的平行度误差, 本实验用到的平板平行度制造误差为  $\Delta P = 1''/200 \text{ mm}$ ; (2) 雅敏平板的面形误差  $N$  为 0.2 光圈, 即面形误差  $\Delta S_1 = \lambda/10$ ; (3) 光楔的角度误差  $\Delta \alpha = 2''/10'$ ; (4) 光楔的面形误差  $\Delta S_2 = \lambda/10$ ; (5) 由 CCD 和图像采集系统引入的随机误差; (6) 相位提取和相位解包裹引起的图像处理误差等。通过对平板和光楔进行一致性加工(将一整块平板或楔板一分为二或一分为四), 并优化条纹图处理算法, 干涉系统的整体误差可以保证在  $\lambda/10$  以内, 但前提是所采用的扩束/缩束系统的制造误差在  $\lambda/10$  以内, 此时, 剪切干涉仪的测量误差可以达到  $\lambda/10$ 。

## 4 结 论

本文提出了一种基于条纹可调节的非球面测量剪切干涉仪。该干涉仪采用扩束/缩束系统实现径向剪切, 通过调节扩束比控制剪切量, 引入双光楔判断光路是否干涉, 并可根据需要获得最佳条纹周期和倾斜量, 便于后续进一步处理。实验系统采用对称光路, 尽量减少引入光学元件所带来的误差。光学平板和双光楔均采用干涉仪级玻璃, 加工时一分二或一分四, 保持误差一致。扩束/缩束系统采用大恒公司的 2~6 倍扩束比的扩束镜。实验结果表明, 未加聚焦透镜时测量球面镜所得的干涉条纹弯曲度较大, 条纹清晰但有较大球差; 引入聚焦透镜后, 获得了较好的条纹图,

但由扩束/缩束系统引入的像差依然较大,后续工作考虑采用精度更高的扩束/缩束系统。根据现有条件,本干涉仪可以获得较好的干涉图像,并

能进一步实现非球面模具的表面测量。下一步的研究重点将放在提高扩束/缩束系统的制造精度上。

#### 参考文献:

- [1] 陈琛,胡春海.球幕投影通用型变焦鱼眼镜头设计[J].光学精密工程,2013,21(2):323-335.  
CHEN CH, HU CH H. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):323-335. (in Chinese)
- [2] 李杰,伍凡,吴时彬,等.接触式大型非球面镜面形测量中测量点分布的确定[J].光学精密工程,2012,20(4):727-732.  
LI J, WU F, WU SH B, et al.. Determination of measurement point distribution for contact measurement of large aspheric mirror surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):727-732. (in Chinese)
- [3] 王孝坤,王丽辉,张学军.干涉法实时测量浅度非球面技术[J].光学精密工程,2008,16(2):184-189.  
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing of weak aspheric surface by real-time interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):184-189. (in Chinese)
- [4] LIU J C, GUO Y B, LIU G J. Research on micro/nano metre measuring technique of optical aspheric surface [C]. *International Technology & Innovation Conference*, 2006, 2006(CP524):1290-1294.
- [5] ARAI Y, GAO W, HIROKI S, et al.. On-machine measurement of aspherical surface profile [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, 2(3):210-216.
- [6] 李荣彬,杜雪,张志辉.自由曲面光学设计与先进制造技术[M].香港:香港理工大学先进光学制造中心,2005.  
LI R B, DU X, ZHANG ZH H. *Optical Design and Advanced Manufacturing Technology of Free-form Surface* [M]. HongKong: The Hong Kong Polytechnic University, 2005. (in Chinese)
- [7] CAMPOS-GARCÍA M, BOLADO-GÓMEZ R, DÍAZ-URIBE R. Testing fast aspheric concave surfaces with a cylindrical null screen [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(6):849-859.
- [8] PRUSS C, TIZIANI H J. Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1-3):15-19.
- [9] BURGE J H, WYANT J C. *Use of Computer Generated Holograms for Testing Aspheric Optics* [M]. Tucson: Optical Sciences Center, University of Arizona, 2004.
- [10] MURPHY P, FLEIG J, FORBES G. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [J]. *SPIE*, 2006, 6293:62930J.1-J.10.
- [11] KIM S W, CHO W J, KIM B C. Lateral-shearing interferometer using square prisms for optical testing of aspheric lenses [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, 9:1129-1136.
- [12] SONG J B, LEE Y W, LEE I W. Optical test of aspheric elements using instantaneous wedge plate phase shifting lateral shearing interferometer [J]. *SPIE*, 2005, 5638:902-908.
- [13] GAO H, XIN Q M, HUANG K X. Aspheric surface testing by a phase-shifting shearing interferometer [J]. *SPIE*, 1994, 1994:145-149.
- [14] LUO S B, ZHANG J M. Research on ultra-precision machining and measuring technology for aspherical surface [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003, 9:58-61.
- [15] 刘中本,田爱玲,齐文浦.光学非球面面形测试仪.西安工业学院:中国, No. CN2526783 [P]. 2002.  
LIU ZH B, TIAN A L, QI W P, et al.. Optical aspheric testing instrument; *China*, No. CN2526783 [P]. 2002. (in Chinese)
- [16] ZHANG B, MA L, WANG M, et al.. Aspheric lens testing by means of compact radial shearing interferometer with two zone plates [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):37-46.
- [17] LIU D, YANG Y Y, SHEN Y B, et al.. System optimization of radial shearing interferometer for aspheric testing [J]. *SPIE*, 2008, 6834:68340U.
- [18] LIU X, GAO Y, CHANG M. A new lateral shearing interferometric measurement method for aspheric lenses under the condition of vibrations [C]. *Precision Engineering Nanotechnology*, 2001:458-461.
- [19] CAO J F, TIAN A L, LIU B C, et al.. Vibration influence and error compensation of aspherical surface

- interferometer [J]. *SPIE*, 2008, 7155:71552V.
- [20] JIN Y F. *Research on Reconstructing Algorithm on Radial Shearing Interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] LI D H, CHEN H X, CHEN Z P. Simple algorithms of wavefront reconstruction for cycle radial shearing interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(8):1893-1898.
- [22] 朱勇建, 那景新, 潘卫清, 等. 条纹周期动态可调的通用型干涉仪[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 109-116.
- ZHU Y J, NA J X, PAN W Q, *et al.*. Universal interferometer based on dynamically-adjusted fringe periods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):109-116. (in Chinese)

**作者简介:**

朱勇建(1979—),男,江西瑞昌人,博士后,副研究员,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中科院上海光机所获得博士学位,主要从事光学干涉测量方面的研究。  
E-mail:zhuyongjian\_hn@126.com

**导师简介:**

那景新(1957—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究领域为汽车车身结构轻量化设计与性能分析。  
E-mail:najx@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)