

数字刀口仪定量检验非球面光学元件面形

王小鹏^{1,2} 朱日宏¹ 王 雷² 许荣国²

(¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)
² 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 构建了一台数字化刀口仪, 利用该数字刀口仪对二次非球面光学元件进行实际检验, 获得了非球面光学元件表面面形的均方根(RMS)值和峰谷(PV)值。将数字刀口仪测量结果与干涉仪测量结果进行比较, 测量结果的一致性在 $0.001 \mu\text{m}$ 以内, 验证了数字刀口仪定量检测非球面光学元件的可行性以及所研究的数字刀口仪的准确性。最后对测量结果进行了讨论。

关键词 测量; 非球面光学元件; 刀口检验; 波像差

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0112008

Digitized Foucault Tester for Quantitative Evaluation the Surface of Aspheric Optical Elements

Wang Xiaopeng^{1,2} Zhu Rihong¹ Wang Lei² Xu Rongguo²

(¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)
² Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract A digital knife-edge testing system is established. The knife-edge testing system is used to quantitatively evaluate the wavefront of conicoid aspherical optical element. Root mean square (RMS) and peak-to-valley (PV) values of wavefront aberration of aspherical optical element are given. Measurement results of digital knife-edge testing system are compared with the measurement of interferometer. The measurement results show the consistency within $0.001 \mu\text{m}$, which proves the feasibility of digital knife-edge testing system and the accuracy of the digital knife-edge testing system reported here. The measurement results are discussed in the end.

Key words measurement; aspheric optical element; digital knife-edge testing system; wave-front aberration

OCIS codes 220.1250; 100.2000; 120.6650

1 引 言

非球面光学元件面形的检验是目前光学元件检测技术研究的重点和前沿课题^[1~3]。非球面光学元件面形检测方法复杂, 主要原因在于球面光学元件有无数对称轴, 而非球面光学元件只有一个对称轴, 要获得非球面光学元件的波前及其理想成像点要比球面光学元件困难得多。针对这一技术难题, 研究工作者发展了许多新技术和新方法, 主要有干涉法、轮廓检测法、计算全息法、原子力显微镜检测法以及哈特曼传感器法等^[4~8]。这些方法各自具有不同的

优缺点, 且并没有完全解决非球面光学元件的检测问题。

刀口法是评估光学元件质量的一种经典方法, 根据刀口切割被测光学元件自准直光斑后所形成的阴影图来判断出光学元件的面形。刀口仪的理论误差分辨率可达到 $\lambda/200$, 特别适用于大口径、长焦距以及凹面镜光学元件的检验, 利用刀口仪实现非球面光学元件定量检测一直受到广泛关注^[9,10]。

本文报道了一台数字刀口仪, 并采用此刀口仪对二次非球面光学元件的表面面形进行了实际测

收稿日期: 2010-03-23; **收到修改稿日期:** 2010-06-13

作者简介: 王小鹏(1962—), 男, 博士研究生, 研究员, 主要从事光电总体技术、光学测试与计量等方面的研究。

E-mail: xiaopel@yahoo.com.cn

导师简介: 朱日宏(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学仪器理论与技术以及光学图像的压缩与处理技术等方面的研究。E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

量。将测量结果与干涉仪测量结果相比较,验证了刀口仪定量检测非球面光学元件的可行性,也验证了所研制的数字刀口仪的准确性。

2 数字刀口仪定量检测理论分析

刀口仪定量计算分析原理如图 1 所示。

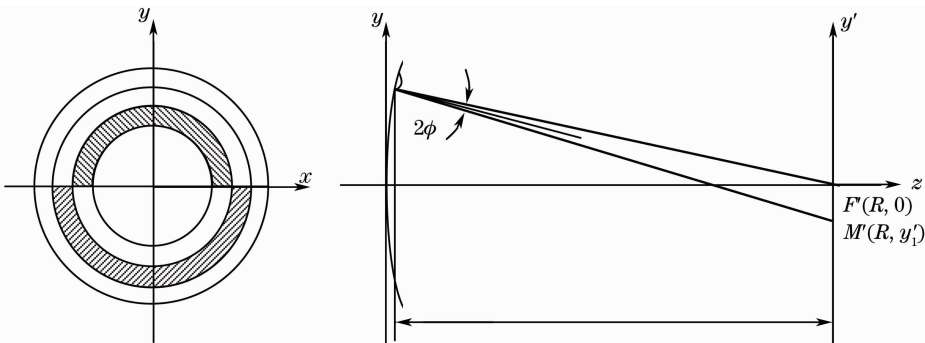


图 1 数字刀口仪测量原理图

Fig.1 Measurement principle of digital Foucault tester

以球面反射镜为例,当点光源放于球心 F' 处,若被测面为理想球面,则由自准直返回的光束将汇聚于 F' 点。而当被测光学元件表面存在缺陷时,光线将偏离汇聚点,到达一个新的位置,如图 1 中 M' 点。光束偏离理想会聚位置的角度 ϕ_x, ϕ_y 可以表示为

$$\phi_x = (-1/n)[\partial\Delta w(x,y)/\partial x], \quad (1)$$

$$\phi_y = (-1/n)[\partial\Delta w(x,y)/\partial y], \quad (2)$$

式中 n 为空气折射率,在此假定为 1, $\Delta w(x,y)$ 为被测元件由于面形差产生的波像差。

刀口在 $x'y'$ 平面进行切割,由刀口的切割位置就可获得汇聚光束偏离理想汇聚中心的距离 E_x, E_y 。而由于 $E_x = R\phi_x, E_y = R\phi_y$ (R 为偏折光束的曲率半径),则由偏离距离 E_x, E_y 就可计算得到被测元件的面形

$$\Delta f_{OPD} = \frac{1}{R} \iint E(x,y) dx dy. \quad (3)$$

通过准确判断刀口切割一半光束时的刀口位置就可建立每一个像素对应的偏离值,从而获得被测元件的面形值。

3 数字化刀口仪构成

数字化刀口仪检测系统光学原理如图 2 所示。数字刀口仪由光源、刀口、三维移动平台、CCD 相机图像以及计算机采集处理系统构成。采用固定光源的设置方式,光源发出的光经过分光镜后照射到被测光学元件表面,经过被测光学元件反射,再经过分光镜聚焦到点光源的共轭位置,刀口就在此共轭位置处进行切割,CCD 位于刀口之后,接收刀口切割后形成的图像。采用这种光源结构的优点是光源固定不动,则当刀口切割光斑时,光斑位置不发生移

动,便于图像处理。利用 CodeV 软件计算可知,这种结构引入的波像差在 $0.02 \mu\text{m}$ 以内,因此满足了精度要求。

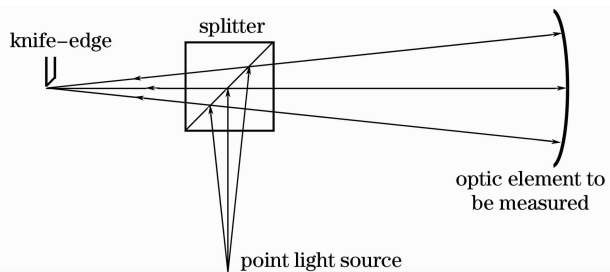


图 2 数字化刀口仪的光学系统构成原理图

Fig.2 Optical system for digitized Foucault tester

采用 VC++ 编制测量程序,对整套系统进行控制、分析、处理和计算。获得被测光学元件的三维面形差,计算出峰谷(PV)值和均方根(RMS)值。

4 实验结果

利用系统对一个口径为 80 mm,焦距为 1200 mm 的近似球面的抛物面镜光学元件表面面形进行测量。测量结果如图 3 和 4 所示,其中 λ 为点

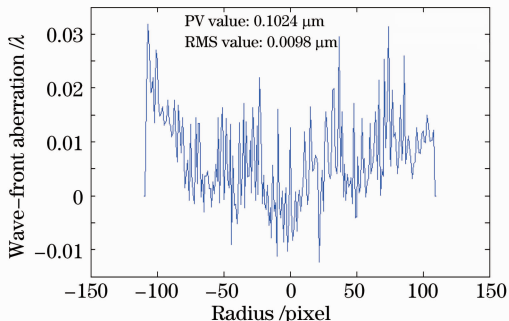
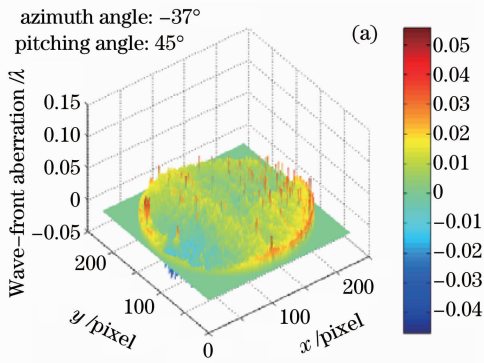


图 3 径向波像差

Fig.3 Wave-front aberration in radial direction

光源波长。

图3表示被测光学元件的二维波像差,图4表



示三维波像差测量结果。同时也用干涉仪对该光学元件表面面形进行了检测,结果如图5所示。

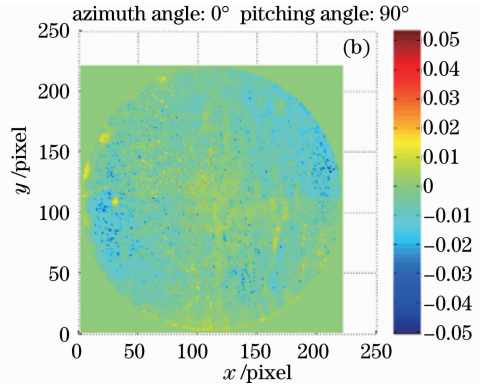


图4 三维波像差(a)斜视图和(b)俯视图

Fig. 4 (a) oblique view and (b) vertical view for three-dimensional wave-front aberration

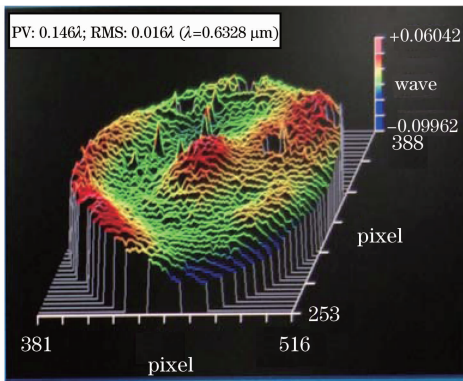


图5 干涉仪检测结果

Fig. 5 Measurement result of interferometer

利用系统测量得到的光学元件的PV值与RMS值,分别与干涉仪测量结果相比较,结果如表1所示。

表1 PV值和RMS值测量结果

Table 1 Measurement results of PV and RMS

Tester	P-V / μm	RMS / μm
Knife-edge testing system	0.1024	0.0098
Interferometer	0.0923	0.0101

由表1可见,PV值刀口仪与干涉仪的测量结果的一致性达到 $0.01 \mu\text{m}$,而RMS值的一致性在 $0.001 \mu\text{m}$ 以内,从而验证了数字刀口仪的正确性。

5 结论

利用所发展的数字刀口仪对大口径、长焦距和近似球面的抛物面镜光学元件面形进行检测,获得了二维与三维波像差图,并计算得到了光学元件的二维和三维波像差。由刀口仪测量结果可知,数字刀口仪的灵敏度很高,可以与干涉仪相比拟,但在测量过程中,由于实验中采用的刀口移动平台的精度

限制,导致刀口仪测量结果存在随机起伏,可以通过软件处理,用多次测量平均等方法实现数据平滑。与传统的干涉仪相比,数字刀口仪光学元件面形检测技术不需要引入额外的、面形已知的高精度参考平面,因此更适合于大口径光学元件面形的检测,且该技术的进一步发展有望实现大口径非球面光学元件的面形检测,因此具有相当大的发展前景及潜力。

参考文献

- Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 27~34
张伟,李洪玉,于国彧. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 27~34
- Lei Baiping, Wu Fan, Zhou Chenbo. Application of Ronchi grating to the quantitative measurement of large-aperture aspheric surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2441~2445
雷柏平,伍凡,周晨波. 龙基光栅在大口径非球面定量测量中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2441~2445
- Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Binzhi *et al.*. Testing of large aspheric surfaces by subaperture stitching interferometry [J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(2): 243~248
王孝坤,郑立功,张斌智等. 子孔径拼接检测大口径非球面技术的研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(2): 243~248
- Yu Jingchi, Sun Xiafei, Guo Peiji *et al.*. A study on testing techniques for optical elements [J]. *Opto-Electron. Engng.*, 2002, **29**(s1): 15~18
余景池,孙侠菲,郭培基等. 光学元件检测技术的研究[J]. *光电工程*, 2002, **29**(s1): 15~18
- Li Jianxin. Study on image processing algorithms of automatic measurement system for Hartmann-based spherical-aberration [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(6): 45~47
李建新. 哈特曼法像差自动测量系统图像处理算法的研究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(6): 45~47
- Wu Gaofeng, Chen Qiang, Hou Xi *et al.*. Interferometric testing the vertex radius and conic constant of a conic surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2804~2807
吴高峰,陈强,侯溪等. 干涉法测量非球面顶点半径和二次常数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2804~2807
- Hu Te, Zhang Haitao, Pang Yongjie *et al.*. Simulation of CGH testing aspherical surface [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1):

44~46

- 胡特, 张海涛, 宠永杰等. 计算全息检测非球面的模拟计算研究[J]. 激光杂志, 2009, **30**(1): 44~46
- 8 He Jun, Chen Lei. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer[J]. *Opt. Precision Engng.*, 2010, **18**(1): 69~74
- 贺俊, 陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(1): 69~74
- 9 Zhang Jun, Dong Jun, Zhang Yan *et al.*. Study on digital knife-edge test[J]. *Opto-Electron. Engng.*, 2005, **32**(5): 65~68
- 张均, 董军, 张艳等. 数字刀口检测技术[J]. 光电工程, 2005, **32**(5): 65~68
- 10 Wang Xiaopeng, Zhu Rihong, Wang Lei. Digital Foucault tester for the measurement of parabolic waveform [C]. *SPIE*, 2009, **7384**: 738422