

文章编号 1004-924X(2006)02-0202-05

用校正法提高补偿器检测法的精度

郭培基, 余景池

(苏州大学 现代光学技术省重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要: 研究了一种测量、分离补偿法检测补偿器非圆对称误差的技术, 这种技术基于波面误差可用泽尼克圆多项式来表述。通过使补偿器或被测非球面绕系统光轴旋转到多个不同的角度, 得到多个测量结果, 根据这些测量结果, 计算得到由补偿器误差带来的波面误差的非圆对称项泽尼克圆多项式系数, 接着根据这些非圆对称项泽尼克圆多项式系数制作一个校正文件对非球面的测量结果进行校正, 利用该技术可有效减轻对补偿器材料、加工及装校的苛刻要求, 提高测量精度。实验结果表明: 对某一被测非球面不用该技术时测量结果为 0.105λ (RMS), 应用此技术后的测量结果为 0.026λ (RMS), 且被测面在几个任意不同角度时的测量结果相差只有 0.001λ (RMS), 效果很好。该技术已被应用到实际的双曲面凸面反射镜的测量中。

关键词: 测量精度; 补偿器; 非圆对称误差; 泽尼克圆多项式; 校正法

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A

Improving precision of null lens method with correction technique

GUO Pei-ji, YU Jing-chi

(*Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province,
Suzhou University, Suzhou 215006, China*)

Abstract: Based on the wavefront aberration, a technique expressed by Zernike's circle polynomials was developed to test and separate the unsymmetrical error of null lens. By turning the null lens or the tested surface in different angles along their optic axis, the different testing results were obtained. According to these results, the wavefront aberration's unsymmetrical coefficients of Zernike's circle polynomials caused by the error of null lens were obtained, then a corrective file to correct the last testing result can be given. With this technique, the demands on the material, manufacturing, and assembly of null lens is not so critical, and the test accuracy is improved observably. The experimental results show, before and after the correction technique is used, the test result is 0.105λ and 0.026λ , respectively, and the difference among four testing results of the mirror in four different orientations is less than 0.001λ , so that the technique has been successfully applied to test a hyperboloid convex surface.

Key words: test accuracy; null lens; unsymmetrical error; Zernike's circle polynomial; correction technique

收稿日期: 2005-12-22; 修订日期: 2006-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 60278011)

1 引言

由于在光学系统中应用非球面不但能简化系统结构,还能提高系统性能,因此非球面在光学系统中应用得越来越广泛。检测是高精度非球面应用最为关键的技术,也是现在尚未完全成熟的技术,如何客观、准确地评价非球面是高精度非球面应用的基础。在过去的几十年中人们研究提出了许多检测方法^[1-3]:哈特曼法、光栅法、刀口法、零检验的无像差点、补偿器、光学全息法、计算全息(CGH)法(包括波带板法)以及非零检验的高分辨率的接收器件法、欠采样法、长波长法、双波长全息法、剪切干涉法、环状子孔径法、液体补偿干涉法等,在这些方法中借助补偿器的零检验法是高精度非球面检测的主要方法。

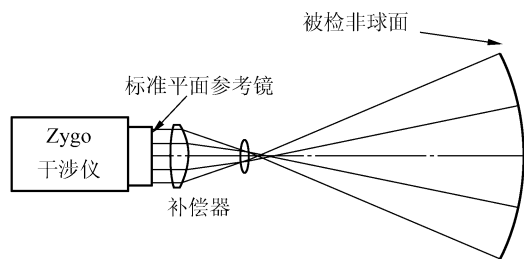


图 1 用补偿器检测非球面的一种光路安排
Fig. 1 A kind of arrangement using null lenses to test aspherical mirror

借助补偿器的零检验法有许多种光路安排,图 1 给出了其中一种,这里点光源位于无限远,Zygo 干涉仪射出一束平行光,平行光通过补偿器后变成非球面波,当其到达被测非球面就成为一个与被测理想非球面镜准确吻合的非球面波,如被测镜是完善的时候,光波反射后就原路返回,当其与参考准直光干涉时就得到理想干涉条纹,实际条纹与理想干涉条纹的差异就反映了非球面的表面误差。由于补偿器的误差直接影响被测非球面的测量精度,通常补偿器材料的光学均匀性、补偿器每个元件的表面质量及其装配要求都非常严格。在检测中,由补偿器误差带来的波面误差分为圆对称和非圆对称两种。本文研究提出了一种校正这种非圆对称误差的技术。首先给出了校正技术的原理和数学模型,然后给出了一个实例,实例表明该技术非常有效,并已被应用到实际的双

曲面凸面反射镜的测量中。

2 理论分析和数学模型

为分析光学检测的结果,常把检测得到的波面数据用多项式的形式表示,由于泽尼克圆多项式的一些项与光学检测中像差的一些项相近,因此可把检测得到的波面数据表示成泽尼克圆多项式的线性组合^[5]。由于泽尼克圆多项式只在圆域具有正交性,对非圆域的数据不一定正确,因此本文提出的数学模型主要用于圆形反射镜的测量。

表 1 给出了泽尼克圆多项式的表达式^[6](这里仅给出了开始的 25 项)。在表中, θ =极坐标的极角, ρ =半径(半口径被规范化为 1)。数 m 和 n 为对应泽尼克圆多项式下标。

假设被检测镜的误差为 $\varphi_a(\rho, \theta)$, 且

$$\varphi_a(\rho, \theta) = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + a_3 Z_3 + a_4 Z_4 + a_5 Z_5 + a_6 Z_6 + a_7 Z_7 + a_8 Z_8 + \dots, \quad (1)$$

假设由于补偿器误差引起的波面误差为 $\varphi_b(\rho, \theta)$, 且

$$\varphi_b(\rho, \theta) = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 + b_4 Z_4 + b_5 Z_5 + b_6 Z_6 + b_7 Z_7 + b_8 Z_8 + \dots, \quad (2)$$

经检测得到的检测结果为 $\varphi(\rho, \theta)$, 且

$$\varphi(\rho, \theta) = c_1 Z_1 + c_2 Z_2 + c_3 Z_3 + c_4 Z_4 + c_5 Z_5 + c_6 Z_6 + c_7 Z_7 + c_8 Z_8 + \dots, \quad (3)$$

那么我们得到:

$$\varphi(\rho, \theta) = \varphi_a(\rho, \theta) + \varphi_b(\rho, \theta), \quad (4)$$

(假定检测结果已考虑到光波从被检反射镜反射一次,两次通过补偿器)

如果把补偿器绕其光轴转 90° , 那么得到由于补偿器误差引起的波面误差为 $\varphi_b(\rho, \theta + 90^\circ)$, 且

$$\begin{aligned} \varphi_b(\rho, \theta + 90^\circ) = & b_1 Z_1(\rho, \theta + 90^\circ) + \\ & b_2 Z_2(\rho, \theta + 90^\circ) + b_3 Z_3(\rho, \theta + 90^\circ) + \\ & b_4 Z_4(\rho, \theta + 90^\circ) + b_5 Z_5(\rho, \theta + 90^\circ) + \\ & b_6 Z_6(\rho, \theta + 90^\circ) + b_7 Z_7(\rho, \theta + 90^\circ) + \\ & b_8 Z_8(\rho, \theta + 90^\circ) + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

被检镜的误差不变

$$\varphi_a(\rho, \theta) = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + a_3 Z_3 + a_4 Z_4 + a_5 Z_5 + a_6 Z_6 + a_7 Z_7 + a_8 Z_8 + \dots, \quad (6)$$

此时得到的检测结果为 $\varphi^*(\rho, \theta)$

$$\varphi^*(\rho, \theta) = c_1^* Z_1 + c_2^* Z_2 + c_3^* Z_3 + c_4^* Z_4 + c_5^* Z_5 + c_6^* Z_6 + c_7^* Z_7 + c_8^* Z_8 + \dots, \quad (7)$$

表 1 泽尼克圆多项式表达式

Tab. 1 Zernike polynomial expressions

n	m	Term #	Polynomial expression	Meaning	Brief exp.
0	0	1	1	Piston	Z_1
	+1	2	$\rho \cos \theta$	X Tilt	Z_2
1	-1	3	$\rho \sin \theta$	Y Tilt	Z_3
	0	4	$2\rho^2 - 1$	Focus	Z_4
	+2	5	$\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatism 0° or 90°	Z_5
	-2	6	$\rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatism $\pm 45^\circ$	Z_6
2	+1	7	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	X Coma and Tilt	Z_7
	-1	8	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	Y Coma and Tilt	Z_8
	0	9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical and Focus	Z_9
	+3	10	$\rho^3 \cos 3\theta$		Z_{10}
	-3	11	$\rho^3 \sin 3\theta$		Z_{11}
	+2	12	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta$		Z_{12}
3	-2	13	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta$		Z_{13}
	+1	14	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta$		Z_{14}
	-1	15	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta$		Z_{15}
	0	16	$20\rho^6 - 30\rho^4 - 12\rho^2 + 1$		Z_{16}
	+4	17	$\rho^4 \cos 4\theta$		Z_{17}
	-4	18	$\rho^4 \sin 4\theta$		Z_{18}
	+3	19	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \cos 3\theta$		Z_{19}
	-3	20	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \sin 3\theta$		Z_{20}
4	+2	21	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \cos 2\theta$		Z_{21}
	-2	22	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \sin 2\theta$		Z_{22}
	+1	23	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 + 4)\rho \cos \theta$		Z_{23}
	-1	24	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 + 4)\rho \sin \theta$		Z_{24}
	0	25	$70\rho^6 - 140\rho^4 + 90\rho^2 - 20\rho^2 + 1$		Z_{25}

且

$$\varphi^*(\rho, \theta) = \varphi_a(\rho, \theta) + \varphi_b(\rho, \theta + 90^\circ), \quad (8)$$

根据泽尼克圆多项式性质, 对检测结果的第五和第六项, 容易得到:

$$c_5 \rho^2 \cos 2\theta = a_5 \rho^2 \cos 2\theta + b_5 \rho^2 \cos 2\theta, \quad (9)$$

$$c_6 \rho^2 \sin 2\theta = a_6 \rho^2 \sin 2\theta + b_6 \rho^2 \sin 2\theta, \quad (10)$$

$$c_5^* \rho^2 \cos 2\theta = a_5 \rho^2 \cos 2\theta + b_5 \rho^2 \cos 2(\theta + 90^\circ), \quad (11)$$

$$c_6^* \rho^2 \sin 2\theta = a_6 \rho^2 \sin 2\theta + b_6 \rho^2 \sin 2(\theta + 90^\circ), \quad (12)$$

根据式(9)和式(11), 得到:

$$b_5 = \frac{c_5 - c_5^*}{2}, \quad (13)$$

根据式(10)和式(12), 得到:

$$b_6 = \frac{c_6 - c_6^*}{2}, \quad (14)$$

显然 $c_5 c_6 c_5^* c_6^*$ 可以从两次的测量结果中得到, 因此又可以根据式(13)和式(14)计算得到 b_5 和 b_6 , 用类似于上面的计算式还可以计算得到其他包含 2θ 的项如 b_{12} 、 b_{13} 等。把补偿器绕其光轴分

别转 180° 、 60° 、 45° , 根据测量结果可以分别计算得到包含 θ , 3θ , 4θ 的各非圆对称项系数(注意: 不包括第二、第三、第七、第八项, 因为第二、第三项还包括被检镜面倾斜的贡献, 第七、第八项还包括补偿器和被检镜面微量不同轴的贡献, 而在评价被检非球面时常常要去掉这四项的影响)。根据把被检镜绕其光轴旋转到不同角度处(补偿器不动)得到的多个测量结果, 同样能计算出由于补偿器误差引起波面误差的非圆对称项系数 b_5 和 b_6 等。根据这些非圆对称项系数, 可以制作一个补偿文件, 在测量的结果中把其作为系统误差减掉, 从而得到精度更高、更真实的测量结果。

3 试验及结果

为检测一种非球面, 设计了一个由三片透镜组成的补偿器, 图 2 是由此补偿器检测得到的结果。实验发现当把补偿器绕其光轴转动到不同的角度时, 测量结果不一致, 特别是其泽尼克圆多项

式中第五、第六、第十、第十一、第十四、第十五及第十七项的系数变化较大。当把被测镜绕其光轴转动到不同的角度时, 测量结果变化不大, 但也有约 $0.01 \lambda\text{RMS}(\lambda=0.6328 \mu\text{m}, \text{下同})$ 。根据上述现象, 很容易判断补偿器引入了较大的非对称误差。

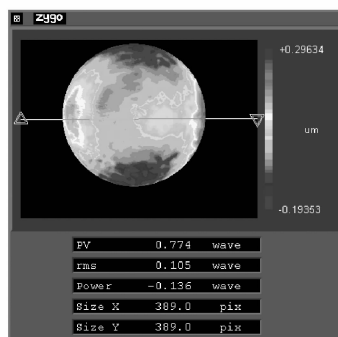


图 2 没有用校正技术的检测结果

Fig. 2 Test result without corrective file

用前面研究得到的方法, 得到了由于补偿器误差引起波面误差的第五、第六、第十、第十一、第十四、第十五及第十七项系数非圆对称项如图 3 所示。图 4 是根据图 3 的系数值得到的补偿波面, 下面检测时的补偿文件与图 4 一致。

Zernike Polynomials				
Zernike Coefficients				
Order:	8th	Terms:	25	rms: 0.000
-0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000
0.243	-0.018	-0.000	-0.000	0.000
0.024	-0.016	0.000	-0.000	0.110 -0.023 0.000
0.015	-0.000	0.000	0.000	0.000 0.000 -0.000 0.000 0.000

图 3 校正文件的泽尼克多项式系数

Fig. 3 Zernike polynomial coefficients of the corrective file

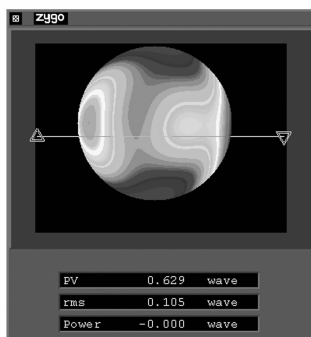


图 4 校正波面

Fig. 4 Corrective wavefront

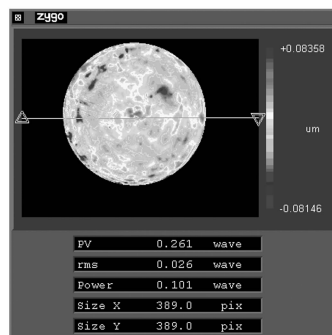
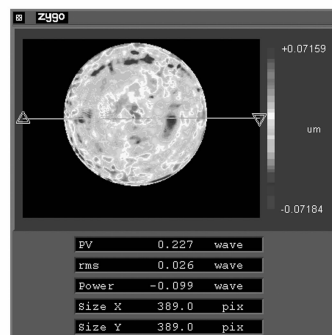
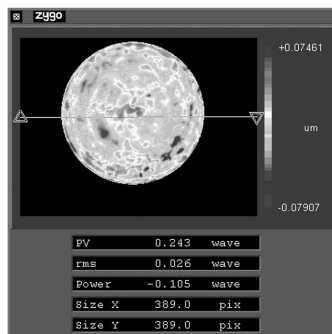
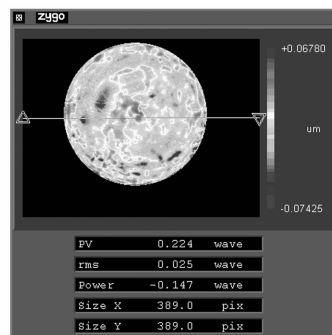


图 5 用校正技术后的测量结果(被测面在四个任意方位)

Fig. 5 Four testing results with corrective file(test-mirrored is in four different angles)

用得到的补偿文件(用 Zygo 干涉仪时, 只需要把检测时的控制按钮 Subtract Sys Error 设置为 on, 且使系统误差文件名与需要的补偿文件名一致即可)和设计的补偿器对被检非球面镜进行了再测量, 图 5(a)给出了测量结果。把被测镜绕其

光轴转动到其它三个任意的角度,得到的测量结果分别如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。从结果看四个不同角度的测量结果相差只有 0.001λ ,这说明本文的技术是有效的。

4 结 论

本文研究得到了一种测量、分离补偿法检测

中补偿器非圆对称误差的技术。利用此技术可以从测量结果中把由于补偿器的非对称误差引起的测量误差分离出来,制作一个系统校正文件,从而可有效减轻对补偿器材料、加工及装校的苛刻要求,提高测量结果的精度。试验表明此技术效果很好,已被应用到实际的双曲面凸面反射镜的测量中,多个不同方向的测量结果误差小于 0.001λ 。

参考文献:

- [1] WYANT J C. Interferometric testing of aspheric surface[J]. *SPIE*,1987, 816:19-39.
- [2] STAHL P. Aspheric surface testing techniques[J]. *SPIE*,1996,1332:66-76.
- [3] 卢振武,刘华,李凤有,等. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. *光学 精密工程*,2004,12(6),555-559.
LU Z W,LIU H,LI F Y, *et al.* A spheric surface testing with CGH on curved surface[J]. *Optics and Precision Engineering*,2004,12(6):555-559. (in Chinese)
- [4] WYANT J C,CREATH K. *Applied optics and optical engineering*[M]. New York:Academic Press,1986.

作者简介:郭培基(1968—),男,工作于苏州大学现代光学技术省重点实验室。主要研究方向为光学超精加工与检测。

Email: gpj@suda.edu.cn