

用补偿器测量非球面的研究

张忠玉 余景池

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 重点讨论用零补偿器测量光学非球面表面面形精度的方法,并通过补偿器的光学设计,具体分析各参数要素对测量精度的影响,最后给出在非球面数控加工不同阶段中对直径500mm, $f/2$ 的双曲面主镜的检测结果。

关键词 零补偿器 非球面 光学检测

1 引言

非球面元件能有效地消除像差,提高光学系统的成像质量,同时可以减少光学系统的重量,提高稳定性,降低成本等诸多优点,已得到光学工作者的共识,并在空间光学系统、军用光学系统、天文和高科技民用产品中得到了广泛的应用。但长期以来由于非球面元件在制造和检测方面的高难度,使传统的手工加工方式已经不能满足科技发展的要求。在70年代,以美国的Arizona大学和Rochester大学首先开展了计算机控制光学表面成形技术(CCOS)的研究工作,并随着计算机数据处理技术和计算机控制技术的发展,至90年代这一技术发展成熟起来。应用光学国家重点实验室在1992年开始开展光学非球面数控加工设备及其加工工艺技术的研究工作,并在大型非球面主镜的实际加工实践中,形成了有关非球面不同加工阶段的面形误差的评价方法和工艺技术规范,有效地解决了光学非球面的数控加工技术。

实现非球面数控加工的关键,在于检测技术方法的准确与完善。零补偿器能有效地将非球面波前转化成平面波或球面波,从而实现非球面镜在加工过程中的干涉测量。尽管补偿器本身的设计制造装配有相当的难度,由于其结构简单、补偿范围大、元件参数少易于控制等特点,使之成为非球面检测的最有效手段。

2 零补偿器的光学设计

对干涉仪的空间波面是一个理想的平面波,我们采用了Offner零补偿器结构形式进行光

学设计,补偿器产生的波前,用于补偿非球面球差的偏离量,实现在ZYGO数字波面干涉仪上对加工面进行干涉测量,图1为零补偿检验法的原理图:

对一个被检双曲面的方程为

$$z(r) = \frac{r^2}{R + \sqrt{R^2 - (K + 1)r^2}}$$

$z(r)$ 为表面矢高;

r 为表面上任意一点到其对称中心的径向距离;

R 为顶点曲率半径;

K 为偏心率;

的表面其形状可完全由 R 和 K 所确定,顶点曲率半径 R 的偏差将影响焦点位置,偏心率 K 的偏差将主要产生初级球差的偏差从而降低成像质量,它与初级球差系数的关系如下:

$$W_{040} = \frac{\Delta K D}{1024 f_n^3}$$

D 为工件直径, f_n 为主镜 f 数, $f_n = R/2D$ 。为更好地满足非球面参数,对Offner补偿器的补偿镜和场镜均采用了工艺性好的平凸透镜进行光学设计的。设计结果如表1所示,其补偿器的设计残余波像差为 0.001λ P-V,可认为补偿是理想的。

Table 1 Parameters of optical design

1/mm

order	parameter	radius of curvature	thickness	index of refraction	diameter
1		$r_1 = -97.7586$	10.000	1.514798	50.0000
			269.1000		50.0000
2		$r_2 = -332.0619$	5.0000	1.514798	26.3081
					27.1766

3 补偿器的精度分析

3.1 补偿器的精度分析

对主镜补偿器各元素制造时的误差如半径误差 Δr 、间隔和厚度误差 Δd 及折射率误差 Δn 等,它们所表现出的像差形式是球差,它直接影响主镜的 ΔR 和 ΔK 的准确性。表2列出这些误差所引起的波差和 ΔK 的关系,同时也给出减少这些误差的离焦量。

Table 2 Table of tolerance showing the structure function for the null corrector of a primary mirror

	d_1	d_2	d_3	r_1	r_2	n
tolerance	0.05	0.01	0.01	0.02	0.1	1×10^{-6}
wavefront p-v	0	0.06	0.0318	0.086	0.039	0.004
power	0	0.0063	0.0093	0.026	0.0028	0.0003
residual error	0	0.008	0.004	0.008	0.004	0

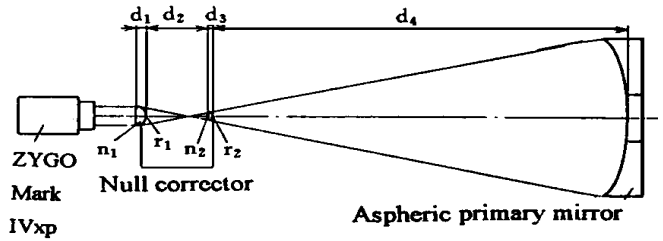


Fig. 1 The schematic of compensating test theory

由 Δk 的允许误差 0.001 可算出最佳焦面处允许的初级球差 $W_{040允}$,

$$W_{040允} = \frac{\Delta K D}{1024 f_n^2} = 0.0827\lambda$$

而由表2中所列的误差引起的像差主要也是初级球差为:

$$W_{040实} = \overline{\delta_{i_2}^2 + \delta_{i_3}^2 + \delta_{r_1}^2 + \delta_{r_2}^2} = 0.02\lambda$$

比较二式的结果有 $W_{040实} < W_{040允}$ 。由上分析知,只要在现有的工艺水平基础上,在补偿器加工时严格控制各参数的精度,是能满足非球面技术指标要求的。

3.2 补偿器的偶然误差

主镜补偿器偶然因素的影响是随机的,它对光学系统质量有严重的影响,也应严格地加以控制,补偿器的偶然误差主要有三方面:

a) 透镜表面面形误差:以现有的加工水平每面面形误差可达 $\lambda/20$,则光束两次通过每一面产生的波差为

$$\delta_1 = 2 \times (n - 1) \times 0.05\lambda \doteq 0.05\lambda$$

b) 透镜材料不均匀误差:一级玻璃的折射率不均匀差为 1×10^{-6} ,补偿器透镜总厚度为 15mm,故所产生的波差为

$$\delta_2 = t \cdot \Delta n = 0.0237\lambda$$

c) 干涉仪引入的误差:干涉仪标准面误差小于 $\delta_3 = \lambda/30$,干涉图处理时产生的边界误差相当于 CCD 上的一个像元约为

$$\delta_4 = \lambda/100$$

补偿器两透镜的不同心误差由于为全对称结构而自动消除,而不影响测量结果。总误差为:

$$W_{实} = \overline{4\delta_1^2 + 2\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = 0.111(\lambda)$$

由于被检测面为反射面,面形误差要求为 $\lambda/20$,在干涉仪测量时将放大两倍,即 $W_{允} = 0.1\lambda$ 。

每次在 9 个不同的方位进行测量,将结果取平均值。则 $W_{实}$ 可减少 3 倍,即 $W_{实} = 0.037\lambda$ 。此时测量系统精度已高于被检主镜的三倍左右,其检测结果是可靠的。

4 检测结果

Φ500mm 非球面主镜的实际检测系统如图2所示:

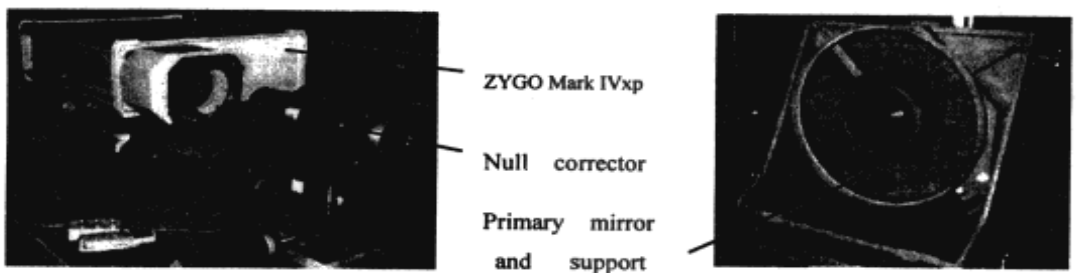


Fig. 2 Testing system of aspheric primary mirror

由于干涉仪空间的波面采用的是平面波,它对测量系统的调整带来极大的方便,其中补偿器的补偿透镜和场镜光轴的不同心微小偏差,由该反射式补偿检验的对称性,其影响自动消除。干涉仪、补偿器和被检主镜三者的共轴调整,可根据 ZYGO 干涉仪获得的干涉图以及 Zernike 多项式的系数的大小,通过各自微调机构,使得干涉图中的倾斜、离焦和彗差量为最小即可实现。利用该补偿器在非球面数控加工过程中,不同加工阶段获得的干涉图如图3所示:

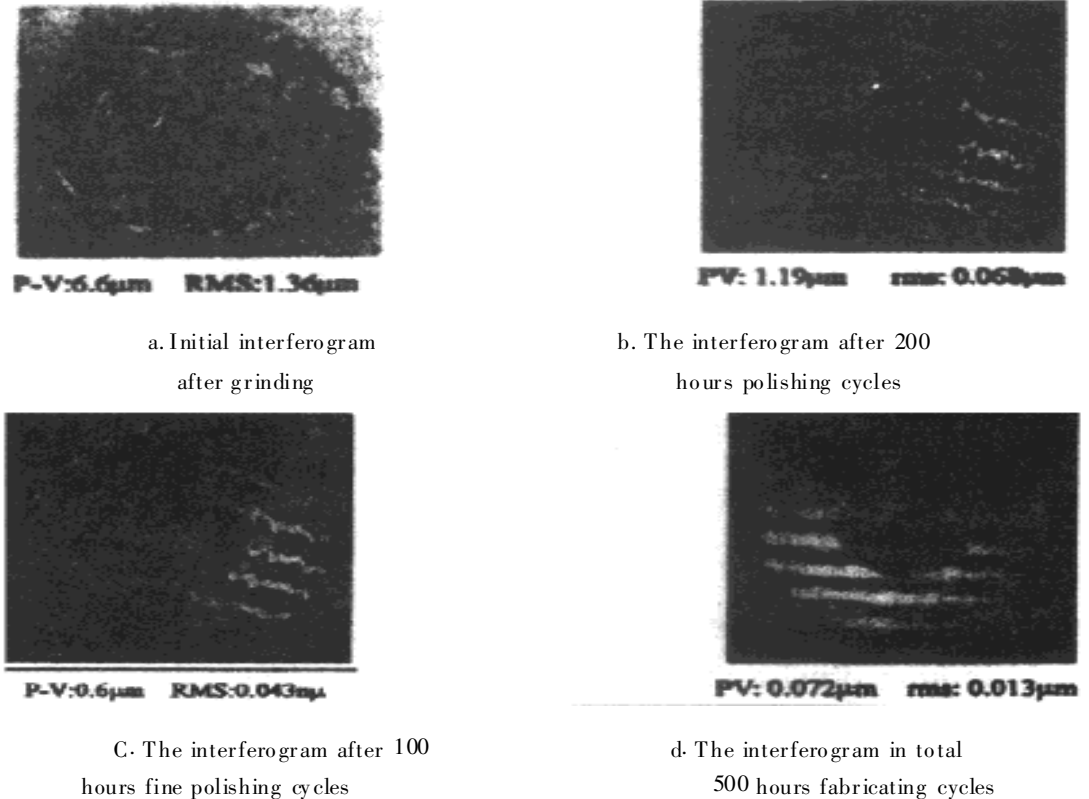


Fig. 3 Testing results for a 500mm aspheric primary mirror in different fabricating stages

5 结 论

本实验室对 Offner 零补偿器的加工装配和使用作了较为深入的研究并利用补偿器和 ZYGO 数字波面干涉仪组成的检测系统,成功地解决了 $\Phi 500\text{mm}$, $f/2$ 非球面主镜在数控加工过程中对加工表面面形的高精度检测,显著地提高了加工的效率。零补偿器对各种误差的反应非常敏感,但在现有的技术手段只要严格加以控制,是完全可以实现的。

参 考 文 献

- 1 辛企明. 近代光学制造技术. 北京: 国防工业出版社, 1997
- 2 Anderson D. Fabrication and testing of the 3.5m, $f/1.75$ WIYN primary mirror. Proc SPIE, 1994: 193 ~ 205

- 3 Burge Jim. Certification of null correctors for primary mirror. Proc SPIE, 1994: 248 ~ 259
- 4 Burge James H. Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes. [Ph. D dissertation]: University of Arizona, 1993

Study of Testing Aspheric Surface with Null Corrector

ZHANG Zhong-Yu, YU Jing-Chi

(*The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

In this paper, the testing technique of figure accuracy for optics aspheric surface with null corrector is introduced. We present the optical design of corrector and analyze influence of different parameters on testing accuracy. Finally, the testing results for a 500-mm diam. $f/2$ hyperbolic primary mirror in different stages of computer controlled aspheric surface fabrication are given.

Key words: Null corrector, Aspheric surface, Optical testing

张忠玉 男, 助研, 1988年毕业于武汉测绘科技大学光学仪器系, 同年7月至今, 在中科院长春光学精密机械研究所工作, 主要从事光学超精密加工和检测技术的研究。