

文章编号 1004-924X(2002)05-0518-05

# 一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计

郭培基, 余景池, 孙侠菲

(苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**利用补偿器的补偿法是检测高精度非球面的一种非常重要的方法,它可以利用已广泛实用的 Zygo 等高精度的数字干涉仪,用补偿法的关键是补偿器的设计。本文介绍了补偿法检测非球面的原理,针对要检测一种大数值孔径小非球面模芯,设计了一种由4片薄球面透镜组成的补偿器,该补偿器由前后两部分组成,前面两片组成一个数值孔径很小的系统,主要用于产生适量的球差,后组两片组成一个数值孔径较大的系统,并与前面的一起满足被测非球面检测的需要。文中对制造、检测及装调等主要误差源引起误差进行了全面分析。用这种补偿器检测相应的非球面,检测精度可达0.05,可满足光盘物镜非球面模芯的检测需要。

**关键词:**补偿法;补偿器;大数值孔径小非球面  
**中图分类号:**TH74 **文献标识码:**A

## 1 引言

非球面的检测方法有多种,如波带板法、全息法、剪切干涉法、轮廓法等<sup>[1-3,7]</sup>,但是对于小尺寸非球面特别是光盘光学读数头的读出物镜模芯这类只有几毫米直径,精度要求很高(国外的研究表明其面形精度要求优于 $0.2\mu\text{mPV}$ 值<sup>[5]</sup>)的非球面来说,适合的检测方法很少,有提到用光学全息法和计算全息法的<sup>[4,5]</sup>,但由于制作的难度,国内还无法实际应用,国外用的也很少,国外主要是用专为小尺寸非球面制作的一种极坐标的轮廓测量仪,其做法是把非球面放在一精密转台上,精密转台的轴垂直于最接近球面的轴线且过其球心,当转台转动时相对固定的传感测量头就可测出非球面的极坐标偏差,测头可以是接触式的,也可以是非接触式的。这种极坐标轮廓测量仪相对于X-Y坐标轮廓测量仪的优点就是把测量矢高的绝对变化量转化为测量矢高的差分量,但它技术要求高,花费大,并且只能测母线,不能同时测出整个面的误差情况。我们经过认真考虑(主要是要高精度、调整方便、稳定),准备用光学补偿器法,这种方法可以利用已广泛实用的 Zygo 等高精度的数字干涉仪,并且一旦补偿器装校好,其精度稳定可靠。用光学补偿器法的关键是补偿器的设计,

本文设计出了一种考虑到加工、装调等因素影响还能满足使用精度要求的实用补偿器。

## 2 补偿检测法原理

图1是一种用干涉仪检测光学元件的例子,这里被测元件为一球面反射镜。在检测时调整球面反射镜使球面反射镜的球心和理想会聚透镜的焦点重合,如果反射镜是完好的,当准直光经过会聚透镜到达反射镜时,光波面与被测反射镜面相吻合,这样光线原路返回,在经过会聚透镜后,为理想的准直光,当它与参考准直光干涉时,就得到理想干涉图。在图1的检验中,如被检镜是非球面,经过会聚透镜形成的球面波到达非球面时就和被测非球面不一致,经过反射镜反射并再次通过会聚透镜后,就得到非准直的非球面波,因此就不能得到理想干涉条纹,但如果用一个能产生与被测非球面镜准确吻合的非球面波的会聚透镜(补偿器)代替形成标准球面波的会聚透镜,并且被测镜是完善的时候,经过补偿器后的光波到达被测非球面时由于能与其吻合,反射后原路返回,再次经过补偿器后就成为准直光,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。

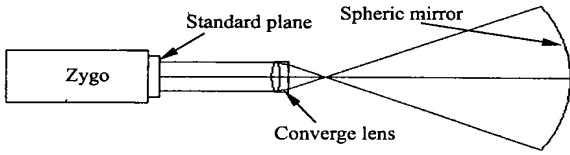


图 1 一种用干涉仪检测球面反射镜的方案  
Fig. 1 Test optics using interferometer.

### 3 被检模芯非球面的分析及补偿器的设计<sup>[5-6]</sup>

如果以  $z$  轴为旋转对称轴,并用下面公式表示被测表面:

$$z = \frac{cs^2}{1 + [1 - (k + 1)c^2s^2]^{1/2}} + a_1s^2 + a_2s^4 + a_3s^6 + a_4s^8 + a_5s^{10} + a_6s^{12}$$

其中:  $S^2 = x^2 + y^2$ , (1)

那么第一个被测模芯非球面方程的系数为:

- $c = - 1/3.1$
- $k = - 0.765$
- $a_1 = - 0.0593$
- $a_2 = - 0.00588$
- $a_3 = 0.00017$
- $a_4 = - 7.38e - 5$
- $a_5 = 9.58e - 6$
- $a_6 = - 4.25e - 7$

其口径为 4.4mm, 顶点曲率半径为 2.267mm。

图 2 为其非球面度曲线(非球面与最接近球面的差,主要反映加工的难度),图 3 为此面与最佳拟合球面(非球面与之比较时非球面度曲线切线的最大斜率最小,主要反映检测的难度)偏离量曲线切线的斜率。

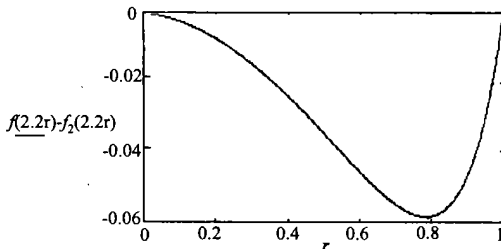


图 2 非球面对其最接近球面的偏离  
Fig. 2 Surface's departure to its nearest spheric surface.

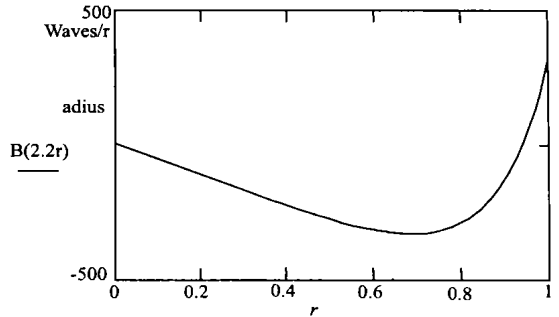


图 3 非球面对最佳拟合球面偏离量的导数  
Fig. 3 Slope of the surface's departure to best fitting spheric surface.

从上面的数据可知,按顶点曲率半径算第一面的 F 数为 0.515,与最接近球面的最大偏离为 0.056mm,这个值本身并不大,但是考虑到它的孔径只有 4.4mm,这个非球面度就非常大了,第一面与其最佳拟合球面比较时非球面度的斜率最大高达 149waves/mm(328waves/2.2mm)。

我们的设计以最简单的单片式补偿器为基础,且补偿器置于平行光路中(其基本结构如图 4 所示)。对于这种小尺寸非球面的补偿器,确定初始结构参数时,须考虑补偿器口径、后工作距离、可能的复杂化程度及工艺性等大尺寸非球面补偿器设计时较少或根本不用考虑的因素。

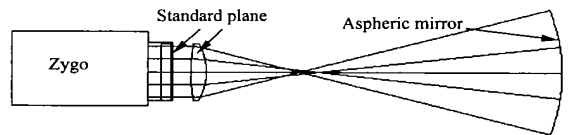


图 4 一种用 Zygo 干涉仪和补偿器检测非球面的基本结构  
Fig. 4 Basic structure of null test using simple null lenses by Zygo.

经过多次反复分析设计优化,设计出如图 5 所示四片单透镜组成的补偿系统,该系统由前后两部分组成,前面两片组成一个数值孔径很小的系统,主要用于产生适量的负球差,后组两片组成一个数值孔径较大的系统,它与前面的一起满足被测非球面的需要。图 6 是经过补偿器,从被检非球面反射回的光波再次经过补偿器后的平行波面的残余波像差。下面的精度分析表明这种补偿



根据误差均方根合成原理,得到系统对称性误差源引起的残留波像差(RMS)的变化量:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sqrt{0.006^2 + 0.016^2 + 5 \times 0.001^2 + 0.004^2 + 0.007^2 + 0.003^2} \\ &= 0.019 \end{aligned} \quad (2)$$

为简化分析,用每面的偏心误差代替其倾斜误差,表的第七列是被认为能控制的偏心量,第八列相应情况下的残留波像差,第九列是系统波像差的变化量,于是得到由偏心引起的残留波像差(RMS)的变化量:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \sqrt{0.011^2 + 0.024^2 + 0.02^2 + 0.001^2 + 0.015^2 + 0.02^2} \\ &= 0.042 \end{aligned} \quad (3)$$

因为加工能控制每面的局部面形误差(RMS)到  $\lambda/50$ ,于是由透镜面形误差引起的系统的波像差(RMS)的变化为:

$$2 \times (1.5 - 1) \times \sqrt{8} \times \lambda/50 = 0.057 \quad (4)$$

补偿透镜系统的材料经过测量筛选,折射率不均匀性能可保证到  $1 \times 10^{-6}$ ,补偿透镜的总厚度为 50mm,于是得到由折射率不均匀性引起的系统的波像差的变化。

波像差的 P-V 值变化为:

$$\frac{50 \times 2 \times 10^{-6}}{0.6328 \times 10^{-3}} = 0.158 \quad (5)$$

波像差的 RMS 值变化约为:

$$\frac{0.158}{4} = 0.04$$

综上可得到系统的非对称误差源引起的残留波像差(RMS)的变化为:

$$\sigma_2 = \sqrt{0.042^2 + 0.057^2 + 0.04^2} = 0.067 \quad (6)$$

这样,由于制造、检测、装调等误差以及材料的折射率测量误差、均匀性的影响引起的系统的波像差(RMS)的变化为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0.019^2 + 0.067^2} = 0.07 \quad (7)$$

系统最后总的残留波像差(RMS)为:

$$0.07 + 0.02 = 0.09 \quad (8)$$

## 5 结 论

通过上面分析可知对于理想非球面系统残留波像差(RMS 值)小于 0.1,由于被测表面是在反射状态下检测的,其面形误差在最后检测的波像差中基本上是加倍表现,因此我们用此补偿系统能检测到的面形精度可到 0.05 ( $= 0.6328\mu\text{m}$ ),可以满足光盘物镜非球面模芯的检测精度要求。

### 参考文献:

- [1] James C. Wyant. Interferometric testing of aspheric surfaces[J]. *SPIE*, 1987, 816, 19 - 39.
- [2] Malacara D. Optical shop testing[M]. Wiley & Sons: New York, 1978: 439-449.
- [3] Stahl H P. Aspheric surface testing techniques[J]. *SPIE*, 1990, 1332, 66-76.
- [4] Dil J G, Greve P F. Measurement of steep aspheric surfaces[J]. *Appl Opt.* 1978, 553(17).
- [5] Visser D, Gjsbers T G, Jorna R A M. Molds and measurements for replicated aspheric lenses for optical recording[J]. *Appl. Opt.* 1985, 24: 18-48.
- [6] Juang J D, Chang M W. Making a null lens by using optimization and manufacturing iterations[J]. *SPIE*, 1994, 135-144.
- [7] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 科学出版社, 1994.

## Null lens design for small aspherical surface with large NA

GUO Pei-ji, YU Jing-chi, SHUN Xia-fei

(Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** Compensation null test is a very important method in testing aspherical surface with high accuracy, in which a Zygo high accuracy digital interferometer is used. The design of a null lens is the key problem

for compensation null test. In this paper, the principle of compensation null test is described. In connection with the being tested small aspherical mold surface with large NA, we developed a kind of null lens system made up of four thin lenses. The first two thin lenses form a system with very small NA mainly used to produce suitable spherical aberration; the other two form a large NA system, which together with that of the front two elements meets the null testing need. The wavefront variation of testing system due to the manufacture, test, assembly and adjustment errors is analyzed in detail. We are capable of measuring the aspherical surface to the accuracy of 0.05  $\mu\text{m}$ , which is enough to satisfy the testing of the mold surfaces of compact disc object lenses.

**Key words:** compensation null test; null lenses; small aspherical surface with large NA

**作者简介:**郭培基(1968 - ),男,湖北武穴市人,博士,从事光学超精加工与检测方面的研究工作。