

# 非球面补偿器的结构设计及装调分析

尤锐, 王一凡, 王文革, 薛育

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为了保证补偿器的技术要求, 既: 偏心差小于  $4''$ , 空气间隔公差小于或等于  $0.002\text{mm}$ 。本文首先通过对非球面加工、检测及装调中应用的补偿法和偏心原理的介绍, 阐述了非球面补偿器的结构设计以及装调原理; 并进行了非球面主镜补偿器的装调误差分析。产品实际装调结果补偿器偏心差为  $1.76''$ , 空气间隔公差  $0.002\text{mm}$ 。验证了补偿器的结构设计及装调原理的正确性和实用性。

**关键词:** 像差补偿法; 偏心; 非球面

中图分类号: O435.2

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2008) 04 - 0071 - 03

## Structural design and adjustment for compensational device of aspherical

YOU Rui ,WANG Yifan ,WANG Wenge ,XUE Yu

(Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Changchun 130033)

**Abstract:** In order to guarantee the technical requirements of a compensational device : centering deviation less than  $4''$ , the tolerance of air interval in a lens less than  $0.002\text{mm}$ , By introducing the compensational method and eccentric method in fabrication, testing, alignment and adjustment of aspherical surface, a structural design and method of alignment and adjustment of a compensational device is expatiated in this article. and error of a compensational device is analyzed. The result of production of centering deviation of a main mirror in a camera is  $1.76''$ , the tolerance of air interval in a lens is  $0.002\text{mm}$ , which approving the correctness and practicability of the principle of structural design and method of alignment and adjustment of a compensational device.

**Key words:** compensational method for aberration; center deviation; aspherical surface

随着科学技术的发展, 人类对空间的探索日趋深入, 特别是光电仪器的空间遥感技术的应用。在空间有效的载荷上安装多个分载荷, 这样对光学的设计、非球面原件的使用、非球面的加工与装调提出了新课题。在光学系统采用非球面结构, 能够使光学系统结构简化, 改善系统的像质、提高光学特性、减轻重量等。因此, 非球面经常应用于大视场、大相对孔径、像差要求高、结构要求紧凑或有特殊要求的光学系统中。

检验非球面镜常利用共轭无像差点方法。如果

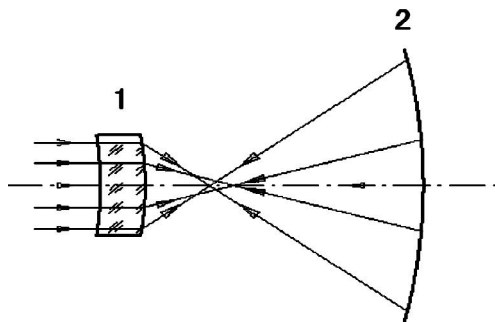
非球面镜找不到轴上无像差点或不能用光学系统作为检验时, 就必须用补偿法检验。

补偿法适宜于检验大口径的二次及高次非球面, 是一种无接触测量。这种方法必须设计出一个球差曲线与被检验非球面法线像差完全重合的光学系统, 称之为补偿器。补偿器直径比被检验镜面小许多倍, 而且均为球面镜。在干涉仪上采用补偿法, 能够保证定性和定量地评价面形偏差。它所检验到的是整个表面, 而不是局部。近来非球面的加工与检验常采用补偿法, 而能够完成此功能的补偿

器又经常是应用光学系统偏心测试及校正原理进行调整的。

## 1 被检验表面的法线像差补偿法的原理

被检验表面的法线像差补偿法的原理是利用补偿器,把平面或球面波前转换为参考非球面波前使之与被检验非球面的理论形状重合。图1表示补偿器1和被检验非球面2的相对位置。非球面顶点曲率中心与补偿器的近轴焦点重合,补偿器的光轴与非球面的对称轴重合。入射在补偿器上的平行光束,出射后转换成所有光线均与非球面法线重合。由非球面反射后,所有光线循原路返回,经补偿器出射后,重新形成平行光束。显然,为实现上述光路,应该使补偿器的球差曲线与被检验非球面法线像差曲线完全重合,因此,可以说补偿器是加工非球面的工具和检验非球面质量的标准。



1——补偿器 2——被检非球面

图1 检验非球面补偿法的实质

Fig.1 Theory of compensation of checking aspheric

补偿器和非球面一起构成了理论上理想的自准系统,对波前的分析可利用阴影法或干涉法。如果补偿器具有所要求的质量,并相对于被检验非球面正确地安装,那么,波前的变形只能是由非球面的偏差所致,并且放大二倍传递给由补偿器出射的波前,确定波前变形的大小和符号的同时,作出关于非球面质量的结论。

## 2 偏心测量原理

测定光学系统每个面的偏心,一般都采用测量被测定面反射的自准像的方法。如图2所示,在组成光学系统的若干个面(1,2,3,...,n面)中,通过光学中心偏测量仪把指标投影在准备测定的表面,对于测定基准轴,如果所有面都不偏心,指标反射像仍回到基准轴上,如果某一个面偏心,反射像便发生偏移,如果所有各面指标自准像的偏移都经过精确测定,那么各面的球心偏差角可以用以下

公式计算。

$$\tan \alpha = \frac{C}{f'}$$

$\alpha$ : 球心偏差角

$C$ : 球心偏离量(用距离表示)

$f'$ : 光学中心偏测量仪的焦距

根据精确测量并计算出来的各镜面偏心的大小和方向就可以指导镜片的校正量和校正方向。

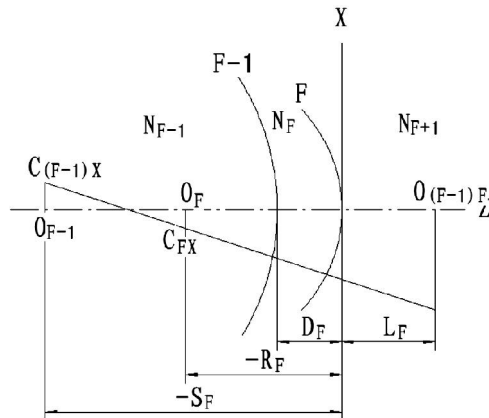


图2 偏心测量原理图

Fig.2 The schematic of eccentric measurement

## 3 补偿器的结构设计

### 3.1 补偿器的特点

补偿器的光学系统的光学零件可以使用透镜或反射镜;可以使用两片透镜或一块反射镜。光学材料为常用材料,但光学零件和组件的光学参数要求加工和装调精确;光学系统偏心差小于 $5''$ ,空气间隔 $+0.002 \sim 0$ mm。常用的补偿器一般都使用两片透镜,本文介绍的补偿器的机械结构按照两片透镜设计。

通常光学镜头的偏心差依靠机械和光学加工精度保证。如果是两片透镜,其偏心差在 $20''$ 左右,而且随着透镜片数增加整组光学系统的偏心差就越大。补偿器是非球面加工与检验的一个标准工具,如果采取常用的机械结构那么装调后的光学系统偏心差就不可能满足非球面的精度。

### 3.2 补偿器的机械结构

补偿器机械材料选择与透镜材料线膨胀系数相接近的金属,保证光学系统的参数不受温度变化而改变。如图3所示。补偿器必须有一镜框具有可调性。此可调镜组外径需要小于主体内孔直径 $0.5$ mm,并且镜框底面加工适当的修研面;物镜框外侧壁顶丝调整处要有适当角度的倾斜面,保证物

镜调好以后,物镜框与主体位置稳定可靠。透镜偏心调整精度检测完后,应修研可调镜组镜框高度。镜框与主体的固定方式可以采用压圈固定,为了保证镜框在主体内的稳定性,要在压圈上均布四个顶丝构成超定位。

主体要留有注胶孔防止松动;留有通气孔保证主体内气压和外界气压平衡。

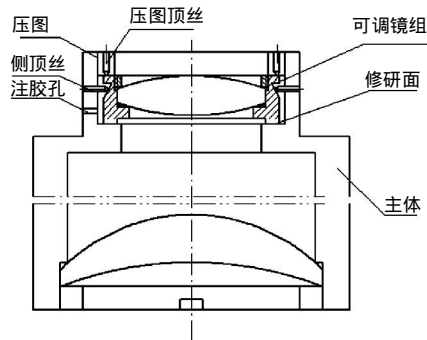


图3 补偿器结构示意图

Fig.3 Structure of compensation device

## 4 非球面主镜补偿器的装调与误差分析

### 4.1 非球面主镜补偿器的装调

如图4所示,补偿器光学系统共有两片透镜,材料皆为K9玻璃。光学设计要求整组光学系统偏心差 $5''$ ;两片透镜空气间隔为151.749 mm,公差为 $+0.002\text{mm} \sim 0\text{mm}$ 。

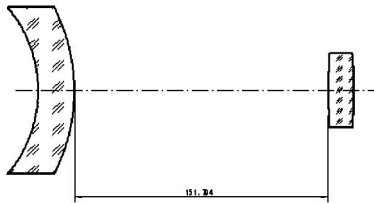


图4 补偿器光学系统

Fig.4 Optical system of compensation

基于上述光学系统的设计要求,选用装调的光学仪器为内调焦定心仪(简称定心仪)、三坐标测量仪、数显表、干涉仪。在装调前使用干涉仪定量检测已加工完的各透镜的面形误差和半径值,并反馈给光学设计复算实际使用的光学空气间隔;通过光学偏心程序计算出各面球心像的位置。如表1所示。表中 $l'_{f,n}$ 表示第 $f$ 面的球心传到第 $n$ 面后的球心像位置。

根据球心像的位置,经定心仪可以找到各面的球心像。通过修研可调镜组的修研面及在间隙量中平移调整透镜偏心差,同时兼顾测量两组透镜的空气间隔。在每片透镜偏心差 $5''$ 时必须将整个光学

表1 各面球心像位置

Tab.1 Each surface location of image of spherical center

序号	球心像距
$L_{1,1}$	-260.074
$L_{2,1}$	213.3099
$L_{3,2}$	-124.3991
$L_{3,1}$	-112.4550
$l_{4,3}$	94.8474
$l_{4,2}$	-90.9214
$l_{4,1}$	-81.0995
$l_{5,4}$	319.0831
$l_{5,3}$	-568.4725
$l_{5,2}$	-3081.2633
$l_{5,1}$	668.5632

系统进行偏心测量,经偏心程序计算出最佳基准轴和各面偏心差。

上述系统装调完毕后,球心偏、面倾角、偏心方向角最终测量结果如表2所示。

表2 球心偏、面倾角、偏心方向角最终测量结果

Tab.2 Final test result of deviation of spherical center、slant angle、direction angle

面数序号	球心偏(mm)	面倾角(°)	偏心方向角(°)
1	0.0022	1.76	26.58
2	0.0013	0.47	299.20
3	0.0004	1.03	138.56
4	0.0007	1.31	288.52

从表中可看出面倾角(即偏心量)最大为 $1.76''$ ,小于 $4''$ 的光学设计要求。

空气间隔经测定 $151.750\text{mm}+0.002\text{mm}$ 。

从上述数据看,由于非球面主镜的补偿器调整机构设计合理,装调方法正确,装配结果完全满足了光学设计的要求。

### 4.2 补偿器装调误差分析

补偿器装调有偏心差和空气间隔两个精度要求。偏心差来源于仪器(定心仪)精度误差、瞄准误差、高精度转台精度。空气间隔误差为测量仪器引起的,即三坐标测量仪和数显表的精度。

系统偏心误差:  $\sigma = \pm (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)^{1/2} = \pm 1.3''$

其中 $\sigma_1$ —定心仪误差为 $0.5''$

$\sigma_2$ —瞄准误差 $0.67''$

$\sigma_3$ —高精度转台精度 $1''$

表1: 补偿器各面球心像位置

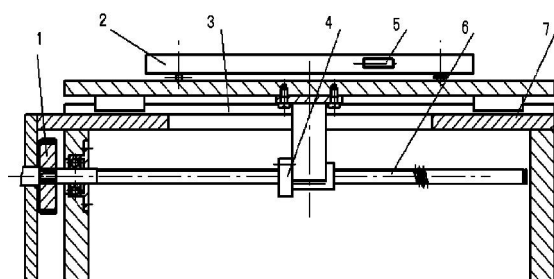
空气间隔误差:  $\sigma = \pm (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} = 0.0018\text{mm}$

其中 $\sigma_1$ —三坐标误差 $0.0015\text{mm}$

$\sigma_2$ —数显表误差 $0.001\text{mm}$

(下转第83页)

步进电机(步距角为 $1.8^\circ$ /步,并且采用十分之一细分技术),通过一对速比的齿轮副减速后,再由滚动螺旋副实现运动。为保证传动时电机轴和小齿轮轴两轴的同轴度要求,此系统选用一弹性联轴器,利用弹性联轴器的弹性补偿来控制相联接两轴的相对位移。齿轮副从动轮与滚珠丝杠相连,传动方式采用丝杠转动,螺母移动形式。螺母固定座穿过固定板的中心槽来实现与拖动板的连接,在水平固定板上平行地安装滚动直线导轨副,直线导轨的滑块连接拖动板,通过拖动板来带动工作台移动,实现工作台的Y向精密微动。拖动板与工作台通过调节螺钉相连接,利用调整螺母实现对工作台水平方向的调整。精密工作台的结构如图2所示。



1—齿轮 2—工作台 3—直线导轨 4—丝杠螺母,  
5—水准仪 6—滚珠丝杠 7—导轨滑块

图2 精密微动工作台

Fig.2 Precision fretting system

此方案中选定导程为 $p=25\text{mm}$ 的滚珠丝杠,由方案对电机和丝杠的型号要求,可以得到工作台在y向最小进给量为 $0.25\mu\text{m}/\text{脉冲}$  ( $((0.36^\circ/10)/360^\circ=x/250^\circ \Rightarrow x=0.25/\mu\text{m}/\text{脉冲})$ )。用水准器来建立工作台的水平基准面,确定此工作台处于水平位置。鉴于系

统的要求,此处选用管状水准器,内充乙醚。两个水准器安装在工作台相互垂直的两个侧面上。测量前,用微调螺母调整,直到两个高精度的水准器都能显示水平为止。

## 4 结论

这种三维表面粗糙度测量系统最大的特点是测量元区域化,即在待测表面上测取大量数据,以对整个表面的粗糙度作整体、客观地评价。采用一般轮廓仪传感器与微型计算机相连,辅之以精密工作台的微量进给,当工作台的精度达到一定要求时,所构成的微机化测量系统可以较好地实现表面粗糙度的三维测量。这种测量系统完全有可能取代目前昂贵的高档轮廓仪,并且具有可供操作人员进一步开发所需软件的特点,这是我国发展表面粗糙度、波度等计量仪器的一个重要方向。通过检测,所设计的精密工作台的精度能满足需要。

## 参考文献

- [1] 冢田.表面粗糙度的三维测量法、表面粗糙度及其测量译文集[C].中国计量出版社,1987:229-233.
- [2] 姜华洲.表面粗糙度的微机化测量、几何量精度测量论文选集[C].中国计量出版社,1989:9-15.
- [3] 张鄂.带微型机的表面三维形貌测量系统[J].计量学报,1987,8(3):224-229.
- [4] 张鄂.表面三维形貌参数及其评定[J].上海交通大学学报,1988,22(1):66-76.
- [5] GB/T1031-1995.表面粗糙度参数及其数值[S].北京:中国标准出版社,1995.

(上接第73页)

## 5 结论

通过上述对非球面主镜加工、检验用补偿器的原理和机械机构、装调的分析,结构设计必须符合装调与检测的需要,才能达到补偿器高精度的要求。本文采用了合理的结构设计及选用合理的检测手段,使补偿器才能为非球面的加工与检验提供一个真实、准确的标准和工具,完全满足非球面主镜的装调、检测要求。同时,也为由多组透镜组成的高精度遥感镜头的结构设计提供一个参考。

## 参考文献

- [1] 杨力.先进光学制造技术[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] 王之江.光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [3] 牛海燕,张学军. $\Phi 124\text{mm}$ 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J].光学精密工程,2006,14(4):539-544.
- [4] 毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [5] 郑学文,王全波.精密仪器设计[M].北京:兵器工业出版社,1992.
- [6] 郭培基,余景池.用校正法提高补偿器检测法的精度[J].光学精密工程,2006,14(2):202-206.