

# 一种小口径凸非球面补偿器的设计

邢振冲<sup>1,2</sup> 张 葆<sup>1</sup> 洪永丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 离轴三反光学系统目前常被多谱段共口径光学系统作为共口径端,检测离轴三反光学系统中凸非球面次镜时,需要通过补偿法来实现非球面的高精度检测,因此补偿器的优化设计是关键技术之一。对于二次曲面系数较大同时背面为非透射面的小口径凸非球面,无法采用非球面透射式的补偿法进行检测,因此采用凸非球面直接作为反射面的自准直平行光补偿检验法。根据设计思路,利用Zemax软件构建初始结构并对其进行优化,这样简化了初始结构计算过程,同时能得到理想的补偿器系统结构。给出了一个口径为80 mm、二次曲面系数为-6.5,  $F$ 数为5.00375的凸非球面反射镜的补偿器系统的设计过程和公差分析过程,系统工作波长为632.8 nm,均方根值为0.000015 $\lambda$ ,公差分配后残余波像差为0.0104708 $\lambda$ 。

**关键词** 检测; 光学设计; 补偿器; 公差分析

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1116001

## Design of Compensator of Convex Aspheric Surface with Small Apertures

Xing Zhenchong<sup>1,2</sup> Zhang Bao<sup>1</sup> Hong Yongfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** While testing the secondary mirror with convex aspheric of off-axis three-mirror optical system, compensation method is used to achieve high-precision aspheric testing. Thus design of compensator is a key technology. Compensation in transmission form can't be used for small-caliber convex aspheric surface with great quadratic surface coefficient and non-transmissive back surface. So the convex aspheric surface is directly taken as a reflection in auto-collimation parallel light compensation test. According to the design ideas, the initial structure is built by the Zemax firstly, which simplifies the calculation of the initial structure, and can get the desired compensation system structure. The design and tolerance analysis process of convex aspheric secondary mirror compensator system is given with the diameter of 80 mm, the quadratic surface coefficient of -6.5, and the  $F$  number of 5.00375. The system operating wavelength is 632.8 nm. The root mean square (RMS) of wavefront error is 0.000015 $\lambda$ . Analysis results show that the total residual wave aberration of the system is 0.0104708 $\lambda$ , which satisfies the requirement of assembling accuracy.

**Key words** measurement; optical design; compensator; tolerance analysis

**OCIS codes** 220.1250; 090.1000; 120.4630; 120.6650

收稿日期: 2015-06-02; 收到修改稿日期: 2015-07-15

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新资助项目(Y3CX1SS14C)、中国科学院航空成像与测量重点实验室开放基金(Y3HC1SR141)

作者简介: 邢振冲(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chong091010123@163.com

导师简介: 张 葆(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空光电成像技术方面的研究。

E-mail: cleresky@vip.sina.com(通信联系人)

## 1 引 言

随着光电设备使用环境的不断复杂化,激光、红外、可见光等多谱段共口径设计成为了迫切需要,以满足不同情况下的探测要求。只有反射式结构能同时满足红外、激光、可见光多谱段通过。而离轴反射式光学系统比起其他的系统具有体积小,结构紧凑,无中心遮拦,视场可以做,焦距可以做长,口径可以做大等优点<sup>[1-3]</sup>,常被多谱段共口径光电系统作为共口径端<sup>[4-6]</sup>,以满足其对多谱段、大视场、高分辨率、小型化等要求。离轴反射式系统中主镜和三镜常采用凹非球面,次镜常采用凸非球面。凸非球面镜的检验比凹非球面镜困难,特别是无法透射的凸非球面,需要有一束至少接近被检面口径的会聚光束,检测时所需的辅助光学元件甚至要远大于所需要检测的非球面的尺寸<sup>[1]</sup>。采用补偿器进行补偿法检测时,设计出的补偿器对非球面的像差进行补偿,使非球面反射回来的光线经过该装置后又能原路返回,补偿后的无像差像点可用常规的检测方法,如阴影法、干涉法、星点法等进行检测<sup>[7]</sup>。补偿法检测非球面的核心辅助光学装置是补偿器,优质的补偿器能否成功设计是补偿法能否实施的第一关键。机载多谱段光学系统离轴三反系统中的次镜口径较小,有时需要进行特殊结构设计或者采用非透明材料,给非球面检测带来了问题。凸面非球面检测方法主要有辅助球面检测、Hindle球检测、Offner补偿器背部透射检测等方法,然而当凸非球面背部无法透射或者对中心遮拦比有要求的时候,上述方法就无法采用。

本文基于波像差补偿原理,提出了一种简单快捷的构建凸非球面补偿器初始结构的方案。利用Zemax软件对初始结构进行进一步优化设计,得到了良好的结果。

## 2 初始结构的选择

非球面的参数性质基本决定了补偿器结构的选择。图1为二次曲面的一部分, $P(x,y)$ 为其上任意一点, $PC'$ 为该点的法线,法线与光轴( $x$ 轴)交于点 $C'$ , $C$ 是曲面顶点曲率中心。记 $CC'$ 为法向像差 $\Delta R$ ,矢高为 $x$ ,边缘点法线与光轴夹角为 $\varphi$ ,计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}}, \quad (1)$$

$$\Delta R = x \cdot (-K), \quad (2)$$

$$R = R_0 + \Delta R, \quad (3)$$

$$\tan \varphi = D/(2R), \quad (4)$$

其中 $R_0$ 为二次曲面顶点曲率半径,顶点曲率 $c = 1/R_0$ , $R$ 为边缘点曲率半径, $D$ 为二次曲面直径, $K$ 为二次曲面系数。由于是离轴三反光学系统,实际被检反射镜为口径为40 mm,离轴量为20 mm,补偿器设计针对其母镜进行设计,当母镜检测系统满足检测要求时,由于实际被检反射镜是母镜中一部分,被检反射镜检测光路精度要优于母镜检测精度,也满足检测要求。被检非球面反射镜母镜口径为80 mm,母镜其他参数以及根据(1)~(4)式计算的结果如表1所示,以下所述被检测非球面反射镜均指母镜。

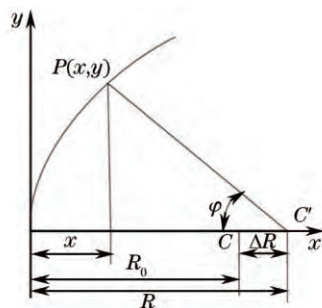


图1 非球面的法线性质

Fig.1 Normal characters of aspheric surface

根据以上数据,计算得到非球面度和非球面陡度如图2和图3所示,非球面度的切线斜率,即非球面陡度,其很大程度上反映出其加工的难易程度。在结构上,次镜为便于安装固定和配合稳定措施,其背部经过了特殊结构设计,为非透射面,如图4所示。针对该结构特点,采用凸非球面正面反射型平行光自准直补偿

检测法,系统工作波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,一束平行光经过补偿器(补偿镜可以为反射镜或者透镜)后,沿着非球面法线方向入射到凸非球面反射面,然后原路返回,出射光依旧是平行光。由于是平行光自准直光路,可方便直接与干涉仪对接,如图5所示。

表1 非球面参数

Table 1 Parameters of aspheric surface

Parameter	Value
$R_0 / \text{mm}$	800.6
$D / \text{mm}$	80
$K$	-6.5
$\Delta R / \lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$	10.2291
$\varphi / (^\circ)$	2.8409

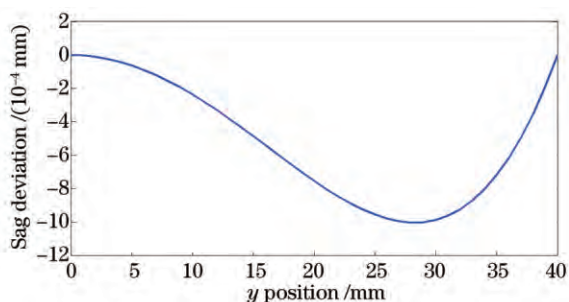


图2 非球面与最佳比较球偏离量

Fig.2 Aspheric surface's departure to the best fit sphere

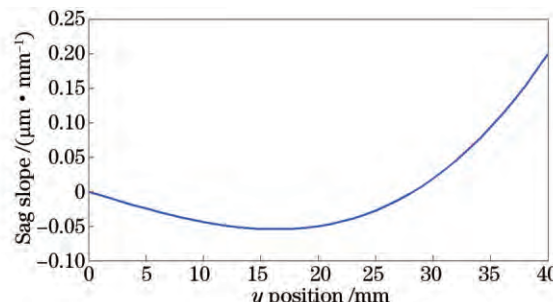


图3 非球面偏离量切线曲线斜率图

Fig.3 Slope of aspheric surface's departure to the best fit sphere

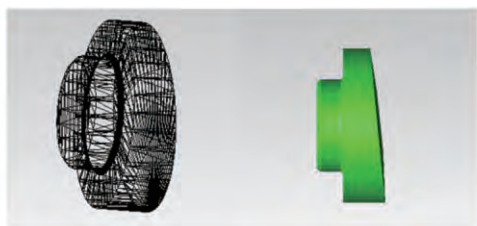


图4 被检凸非球面结构图

Fig.4 Structure of the secondary mirror with convex aspheric

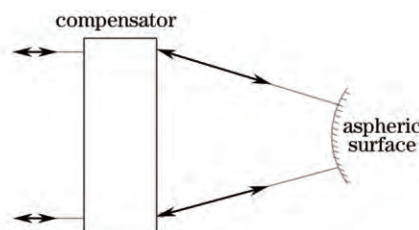


图5 检测系统光路图

Fig.5 Optical path of the detection system

根据该次镜的特点以及图5的设计理念,补偿器采用反射方法(Hindle球法等)或补偿器系统采用图6透射形式的设计结构。对于口径为80 mm、二次曲面系数为-6.5的次镜,当补偿器采用反射形式,例如Hindle球法,系统会存在中心遮拦,无法测量到非球面中心区域的面形。因此采用图6的设计结构,补偿器系统采用透射形式。

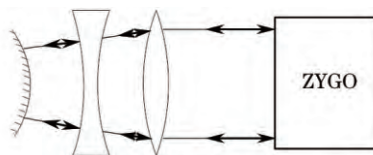


图6 平行光自准直补偿检验法(正面反射)

Fig.6 Primary design scheme of compensator with auto-collimation (positive reflection)

### 3 构建补偿器初始结构

#### 3.1 补偿器初始结构计算方案分析

光学系统的初始结构计算通常采用代数法和缩放法,代数法是根据像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构的方法,缩放法根据相近似的结构作为初始结构<sup>[8]</sup>。然而,缩放法得到优质的光学设计的前提是选择的缩放对象系统合适,因此缩放法具有一定的局限性。非球面补偿器是与被检面一一对应,因此很难找到合适的缩放对象,因此补偿器初始结构一般使用代数法进行求解。但是,代数法求解初始结构过程繁

琐,准确性差。而且代数法求解是基于近轴光学条件,即使进行实际光学系统结构求解,仍然是基于近轴光学公式<sup>[8-9]</sup>。采用代数法求解初始结构,首先利用赛德和数或者波像差理论表示像差,其次,采用近轴光学计算公式计算外形尺寸和实际光学系统结构,这些计算方案的前提是近轴光学条件,即:

$$\tan U' \approx U'. \quad (5)$$

当非球面边缘点法线与光轴夹角比较大时,导致补偿器像方孔径角  $U'$  也比较大。当  $U'$  比较大时,这种近似势必会导致初始结构结果带有一定的不准确性。

根据补偿原理,整个光学系统的球差系数应该为零,即补偿器的球差系数应该等于负的非球面系统的球差系数。由于光线入射并反射离开凸非球面,其面形误差是以2倍关系引入光路,因此根据补偿原理可得:

$$W_{040C} = -1/2 W_{040N}, \quad (6)$$

其中  $W_{040C}$  和  $W_{040N}$  分别代表补偿器和被检面的波球差系数,根据波像差理论<sup>[6]</sup>,被检面产生的波球差为:

$$W_{040N} = 1/32 y^4 \phi^3 \sigma_i, \quad (7)$$

$$\sigma_i = Y^2 + K, \quad (8)$$

$$Y = \frac{1+M}{1-M}, \quad (9)$$

其中  $M$  为被检面放大率,  $\phi$  为非球面反射镜光焦度,对于反射面而言,被检非球面的整体放大率  $M=-1$ 。因此被检非球面引入的波球差为:

$$W_{040N} = 1/32 y^4 \phi^3 K = 12.47\lambda. \quad (10)$$

这里选择波像差理论进行初始结构的构建以及之后的优化。因为若采用基于波像差理论的计算方法进行补偿器的初始结构计算<sup>[6,10]</sup>,波像差表达式可表示为

$$W_{040} = -\frac{1}{8}(ni)^2 lu \left( \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) = \frac{1}{8} \sum S_i, \quad (11)$$

其中  $n, u, l$  分别为物方折射率、孔径角、截距;  $n', u'$  分别为像方折射率、孔径角。假设补偿镜初级球差系数  $\sum S_i$  与实际值差距为  $\Delta$ , 根据 (11) 式,采用波像差表示形式后,补偿镜波球差系数  $W_{040}$  与实际值差距为  $1/8\Delta$ 。因此,使用波像差理论表示系统像差,可以减小误差,提高补偿器初始结构的准确性。

### 3.2 利用 Zemax 构建初始结构

以往的补偿器设计方法是根据非球面的参数计算出其球差,从而得到补偿器的球差,然后计算出补偿器的初始结构。这里把非球面检测光学系统分为两部分:补偿器和被检非球面。根据补偿器的球差系数应该为负的非球面系统的球差系数这一原理,控制补偿器像差,利用法向像差和边缘点法线与光轴夹角控制补偿器外形尺寸。被检面二次曲面系数  $K=-6.5$ ,口径为  $2y=80$  mm,顶点曲率半径为  $R=800.6$  mm,利用 (1)~(4)式和(10)式计算得:法线与光轴夹角  $\varphi = 2.8409^\circ$ ,法向像差为  $\Delta R = 10.2291 \lambda$ ,  $W_{040N} = 12.47 \lambda$ 。

利用 Zemax 软件仅通过设置操作数控制:总像差为  $W_{040C}$ ,最后一个面口径为 80 mm,全孔径光线与光轴夹角为  $2.8409^\circ$ 。利用软件自动优化计算快速得到补偿器的初始结构,图 7 所示。然后,将优化出的补偿器与被检面组合在一起得到补偿法检测系统的初始结构,结构参数如表 2 所示,结构如图 8 所示。构建初始结构的整个过程快捷而准确。

表 2 检测系统初始结构参数

Table 2 Initiating structure parameters of the testing system

Surface	$r$ /mm	$d$ /mm	Glass
OBJ		Infinity	
1	324.1894	19	H-BAK7
2	$-1.634 \times 10^5$	3	
3	246.9325	10	H-BAK7
4	183.0443	4.4719	
5	237.5137	20	H-BAK7
7	221.4999	100	
8	800.6		Mirror



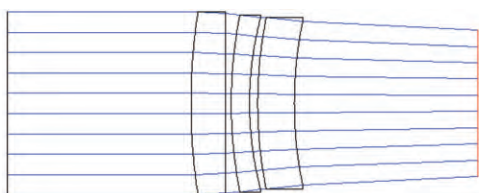


图7 补偿器初始结构图

Fig.7 Initiating optical layout of the compensator system

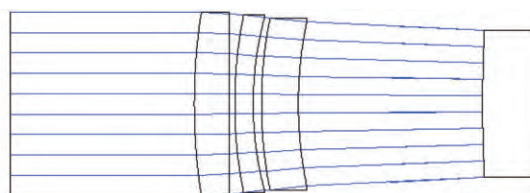


图8 检测系统初始结构图

Fig.8 Initiating optical layout of the testing system

### 3.3 补偿器的优化设计

在上述初始结构的基础上,进一步优化设计。实际设计的检测光学系统已远超过衍射极限,因此补偿器需要采用波前图来衡量系统的性能<sup>[10]</sup>。优化结果结构参数如表3所示,其中补偿器系统口径为100 mm,结构如图9所示。检测系统的光程差(OPD)如图10所示,出射光线光程差小于 $0.000094\lambda$ ,接近平行光。检测系统的波阵面图为图11,检测系统的均方根(RMS)值为 $0.000015117\lambda$ ,峰谷(PV)值为 $0.0001\lambda$ 。检测系统的 $W_{040}$ 系数如表4所示,检测系统总的剩余波像差 $W_{040}$ 为 $0.001749\lambda$ 。综上所述,检测系统像差已得到补偿,出射光非常接近平行光。当被检非球面为实际次镜时,检测系统结构如图12所示。

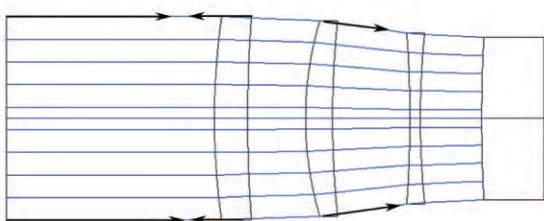


图9 补偿器检测最终光学结构图

Fig.9 Final optical layout of the compensator system

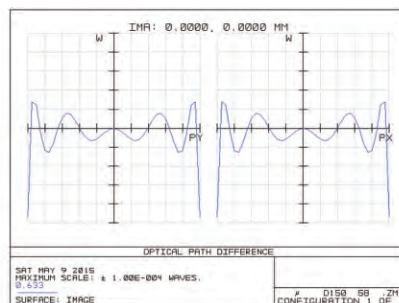


图10 检测系统的光程差图

Fig.10 OPD map of the testing system

表3 检测系统初始结构参数

Table 3 Initiating structure parameters of the testing system

Surface	$r$ /mm	$d$ /mm	Glass
OBJ		Infinity	
1	361.1067	16	H-BAK7
2	700.7204	27.8	
3	171.1302	13	H-BAK7
4	479.3588	37.2	
5	-593.9201	5	H-BAK7
6	423.4108	29.5	
7	800.6		Mirror

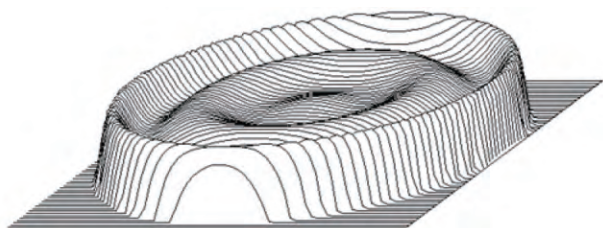


图11 补偿检测系统的波阵面图

Fig.11 Wavefront map of the compensator system

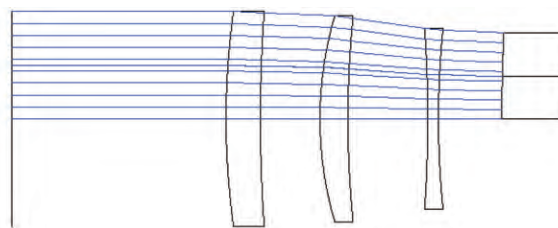


图12 补偿器检测实际光学结构图

Fig.12 Actual optical layout of the compensator system

表4 检测系统 $W_{040}$ 系数

Table 4  $W_{040}$  of the testing system

Surf	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tot
$W_{040} / \lambda$	0	6.053385	0.064844	23.486879	1.219173	-36.962437	0.123859	0	0	12.026829	0.001749

## 4 公差分析

由于补偿器属于高精度要求光学系统,公差分析十分必要。由于系统工作波长为单色波长,并不存在二次光谱,所以透镜的色散系数不用考虑。但是,由于补偿器透镜材料的均匀性对补偿效果有明显的影响,选择透镜材料时需要考虑折射率特性,因此透镜材料选择均匀性能良好的H-BAK7玻璃(成都光明光电股份有限公司)。公差分析过程中,不需要引入阿贝常数公差,只需要考虑折射率公差。根据调研,得出了目前工艺的公差容限,如表5所示。基于以上所述,对设计结果按照给出的公差条件进行敏感度分析,将装配时补偿器最后一面到被检测面之间的空气间隔作为系统公差的补偿,部分结构参数变化引起的波像差RMS值变化如表6所示,表6中RMS值其单位为 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。表6中第1列是非球面补偿器系统的结构数据,第2列是透镜曲率半径和透镜厚度的加工误差,当结构参数发生变化时,系统波像差RMS变化的最大量如第3列表示,偏心 and 倾斜误差如第4列所示,相应的系统波像差RMS变化如第5列所示。该系统的曲率半径和其厚度在加工公差范围内变化时,系统性能变化不大。公差分析结果如表7所示,灵敏度分析结果为波像差RMS等于 $0.0104708\lambda$ ,相应的补偿量如表8所示。从蒙特卡罗分析结果可知,当补偿器进行加工生产时,补偿器的波像差RMS有90%的概率可以达到 $0.00969970\lambda$ 。

表5 结构参数的公差容限

Table 5 Tolerance preset parameters of structural parameters

Radius (Fringe)	Surface tolerance			Element tolerance			
	Thickness /mm	Decenter /mm	Tilt /(°)	S+A Irreg (Fringe)	Decenter /mm	Tilt /(°)	Index
$\pm 1$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	$\pm 0.002$	$\pm 1$	$\pm 0.01$	$\pm 0.002$	0.00002

表6 部分结构参数变化引起的波像差变化最大值

Table 6 Maximum variation of the wavefront caused by the errors

	1	2	3 ( $10^{-4}$ )	4	5 ( $10^{-4}$ )
R1	361.10	$\pm 1$	7.76	$\pm 0.002$	4.17
T1	16	$\pm 0.01$	5.59	$\pm 0.01$	4.08
R2	700.72	$\pm 1$	1.73	$\pm 0.01$	4.08
D1	27.8	$\pm 0.01$	24.61		
R3	171.13	$\pm 1$	16.45	$\pm 0.002$	22.61
T2	13	$\pm 0.01$	47.79	$\pm 0.01$	6.67
R4	479.35	$\pm 1$	6.69	$\pm 0.01$	6.67
D2	37.2	$\pm 0.01$	6.36		
R5	-593.92	$\pm 1$	93.30	$\pm 0.002$	20.54
T3	5	$\pm 0.01$	7.89	$\pm 0.01$	26.69
R6	423.41	$\pm 1$	14.28	$\pm 0.01$	26.69
D3	29.5	$\pm 0.01$	3.38		

表7 公差分析结果

Table 7 Analysis result of the tolerance

Data items	Values
Nominal RMS wavefront	$0.000015117\lambda$
Estimated hange	$0.0103829\lambda$
Estimated RMS wavefront	$0.0104708\lambda$
	90%: $0.00969970\lambda$
	80%: $0.00730520\lambda$
Monte Carlo analysis	50%: $0.00450235\lambda$
	20%: $0.00267239\lambda$
	10%: $0.00150777\lambda$

表 8 公差补偿量

Table 8 Compensation dosage of the tolerance

	Max	Min
Amount of compensation	30.5 mm	29.0 mm

除此之外,偶然因素的影响对光学系统质量也会产生一定的影响,也应当加以控制。补偿器的非对称误差主要有3个方面:透镜表面面形误差,透镜材料不均匀误差,干涉仪引入的误差。在此之前,镜表面面形误差和材料的不均匀误差已经被考虑,需要再分析干涉仪引入的误差。当选择的干涉仪的标准面误差(RMS)小于 $\lambda/100$ 时,系统最后的残留波像差(RMS)变化量为:

$$\delta = \sqrt{0.0103829^2 + 0.001^2} \approx 0.0104 \lambda, \quad (12)$$

系统残留波像差(RMS)为:

$$\delta_s = 0.0104 \lambda + 0.000015117 \lambda \approx 0.0104 \lambda. \quad (13)$$

由于被检测表面为反射面,当面形精度要求为 $\lambda/50$ ,在干涉仪测量时将被放大2倍<sup>[12]</sup>, $\delta_{s-permit} = \lambda/25$ 。因此,补偿器的精度满足检测要求。

对补偿器各元件制造时的误差如半径误差 $\Delta r$ 、间隔和厚度误差 $\Delta d$ 等,它们所表现出的像差形式是球差,将直接影响主镜顶点曲率半径 $R$ 的偏差的 $\Delta R$ 和 $K$ 的偏差 $\Delta K$ 的准确性。二次曲面的表面形状可完全由 $R$ 和 $K$ 所确定, $\Delta R$ 将影响焦点位置, $\Delta K$ 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<sup>[11-13]</sup>:

$$W_{040} = \frac{\Delta K \cdot D}{1024 \cdot f_n^3}, \quad (14)$$

式中 $D$ 为直径, $f_n$ 为被检面 $F$ 数。根据(7)~(9)式可得:

$$\frac{\Delta K}{K} + 4 \frac{\Delta y}{y} = 3 \frac{\Delta R}{R}. \quad (15)$$

表 9 制造误差引起的波差以及相应的离焦量

Table 9 Table of tolerance showing the structure function for the null corrector of a mirror

	$d_1$ /mm	$d_2$ /mm	$d_3$ /mm	$d_4$ /mm	$d_5$ /mm	$r_1$ /mm	$r_2$ /mm	$r_3$ /mm	$r_4$ /mm	$r_5$ /mm	$r_6$ /mm	$n/10^{-5}$
Tolerance	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	1
PV	0.0016	0.0003	0.0037	0.0035	0.0007	0.0011	0.0003	0.0074	0.0012	0.0013	0.0017	0.0019
Power	0.0026	0.0064	0.3511	0.3327	0.0527	-0.1031	0.005	-0.5769	0.0818	-0.1288	0.1297	0.0272
RMS	0.0004	0.0001	0.0008	0.0008	0.0002	0.0004	0.0001	0.0017	0.0003	0.0003	0.0004	0.0005

当 $\Delta K = 0.0025$ , $\Delta y = 0.01$  mm时, $\Delta R = 0.3$  mm, $\Delta K$ 和 $\Delta R$ 变化值为标准值的0.038%和0.034%,满足本项目的光学设计要求。此情况下最佳焦面处允许的初级球差为<sup>[13]</sup>

$$W_{RMS-permit} = \frac{\Delta K \cdot D}{1024 \cdot f_n^3} = 2.463 \times 10^{-3}. \quad (16)$$

根据表9所列的误差引起的像差主要也是初级球差为<sup>[12]</sup>:

$$W_{RMS-permit} = \sqrt{\sum W_i^2} = 2.267 \times 10^{-3}, \quad (17)$$

其中 $W_i$ 为每一项误差引起的初级球差,比较(16)、(17)式,可以得出:各个误差在加工时如果控制得当,补偿器就能满足非球面检测的技术指标要求。

## 5 结 论

常见补偿器设计都是利用近轴光学条件下的公式求解初始结构,计算过程繁琐且结果引入的误差很多,初始结构准确性很差。利用Zemax软件快速方便地构建出准确性高的初始结构,对其优化设计后得到一种三片式补偿器的结构形式,设计结果可很好地平衡像差,剩余像差很小。补偿系统设计结果剩余波像差均方根值小于 $0.000015 \lambda$ ,满足了高精度检测补偿器的设计要求。最后对透镜进行了公差分析和误差性能预算,给出了各面的公差和系统综合残余波像差,各项指标均合理,验证了本设计方案的可行性和准确性。

该设计思想和初始结构设计方法对补偿器的设计具有一定的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Jiaxin. Test of Asphere of Off-Axis Three-Mirror Optical System and Adjustment[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006: 21-26.  
张佳欣. 离轴三反系统非球面检验与系统装调[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 21-26.
- 2 Yang Xiaofei. Study on the Computer-Aided Alignment of Three-Mirror Optical System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 1-16.  
杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2004: 1-16.
- 3 Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 278-280.  
张 亮, 安 源, 金 光. 大口径、大相对孔径非球面凹镜的零位补偿器设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- 4 Guo Chengnan. The Design of Common Aperture Multi-Band Optical System[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 1-20.  
郭晟男. 多谱段共孔径光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 1-20.
- 5 Shen Honghai, Huang Meng, Li Jiaquan, *et al.*. Recent progress in aerial eletro-optic payloads and their key technologies[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 20-28.  
沈宏海, 黄 猛, 李嘉全, 等 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 20-28.
- 6 Joseph M G. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond: Willmann-Bell, 2002: 405-412.
- 7 Wu Fan. Design of reflective Offner compensator for null testing of aspherical surface[J]. Applied Optics, 1993, 14(3): 8-11.  
伍 凡. 非球面零检验的 Offner 补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3): 8-11.
- 8 Ye Lu. Design of back null compensator test method of convex aspherical surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422002.  
叶 璐. 凸非球面背向零位补偿检验的设计方法[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0422002.
- 9 Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 603-6015.  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 603-6015.
- 10 Cheng Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of reflective Offner compensator for null testing of aspherical surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 88-93.  
陈 旭, 刘伟奇, 康玉思, 等. Offner 补偿器的结构与装调[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- 11 Zhang Zhongyu, Yu Jingchi. The research of aspheric surface testing using the compensator[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(1): 126-129.  
张忠玉, 余景池. 用补偿器测量非球面的研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 126-129.
- 12 Wang Quandou. Study on the Computer Controlled Manufacturing Technology of Off-Axis Aspherics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001: 80-85.  
王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001: 80-85.
- 13 Chen Xindong, Li Ruigang. Research on geometric parameter measurement method using laser tracker in null lens asphere testing [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0508007.  
陈新东, 李锐刚. 非球面 Null Lens 补偿检测中采用激光跟踪仪测量几何参数方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508007.

栏目编辑: 韩 峰