

# 一种离轴抛物面镜像差校正镜组的设计

穆永吉<sup>1,2</sup> 毛一江<sup>1,2</sup> 胡明勇<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 中科院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042

**摘要** 无光焦度校正板在光学像差校正中具有重要的作用。为校正大口径离轴抛物面的轴外像差, 根据离轴抛物面式平行光管的设计特点, 提出了一种用偏置于离轴抛物面镜之后的无光焦度校正板以校正其轴外像差的新结构。根据三级像差理论, 分析并进一步推导了大口径离轴抛物面的单色像差分布系数, 推导出偏置无光焦度校正板与离轴抛物面的空间几何关系, 得出了计算偏置无光焦度校正板初始结构的方法。经过实例验证, 由此方法计算出的初始结构参数正确, 可有效提高优化设计的效率, 同时, 此结构能够以相对较小的口径校正离轴抛物面的轴外像差。

**关键词** 光学设计; 几何光学; 三级像差理论; 平行光管

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0622004

## Design of a Kind of Aberration Corrector for Off-Axis Paraboloid

Mu Yongji<sup>1,2</sup> Mao Yijiang<sup>1,2</sup> Hu Mingyong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Nanjing Astronomical Instruments Research Center, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

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

<sup>3</sup> *Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

**Abstract** Null-corrector plays an important role in correcting the optical aberration. In order to correct the off-axis aberration of the large aperture off-axis paraboloid, a new aberration corrector structure with a decentered and tilted null-corrector set behind the large aperture off-axis paraboloid is present based on the feature of single off-axis paraboloid collimator. The monochrome aberration's seidel coefficient of the off-axis paraboloid is further deduced, and the space relevance between the decentered and tilted null-corrector and the off-axis paraboloid is deduced to calculate the initial structure. The initial structure deduced from this method is proved right with an example and can correct the aberration with a smaller aperture.

**Key words** optical design; geometric optics; third order aberration theory; collimator

**OCIS codes** 080.1005; 080.2740; 220.1000

## 1 引 言

在评价成像系统光学性能指标的过程中, 常用平行光管出射平行光来模拟无穷远物体。目前大口径的平行光管均采用反射式结构, 无色差, 且可镀铝膜, 在较宽波段内有较高的反射率, 其主要结构如下: 1) 单抛物面牛顿式结构, 此类平行光管仅利用圆

锥曲面几何焦点无像差特性, 结构简单, 但有效视场小; 2) 卡塞格林系统或 R-C 系统, 此类系统存在中心遮拦, 虽有效视场较牛顿式结构更大, 但装调相对困难, 稳定性较差; 3) 离轴三反系统, 此类系统可在很大程度上缩小长焦距平行光管的体积, 且视场很大, 是目前空间相机较常用的结构, 但其由三块反射

收稿日期: 2014-01-01; 收到修改稿日期: 2014-02-11

作者简介: 穆永吉(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程光学方面的研究。E-mail: muenjia@foxmail.com

导师简介: 胡明勇(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: humy8@126.com

镜组成,装调非常困难,镜面加工精度要求高,变量多,稳定性差。对于前两种结构形式,已有用无光焦度校正板来校正轴外像差以弥补其缺点的方式,但两者均是校正板光轴与系统光轴重合的结构<sup>[1-3]</sup>,一般置于主镜之前,因此校正板的口径往往都很大,不利于加工。当采用大口径的离轴抛物面作为主镜时,此方法不可用,而置于主镜后的轴上校正镜口径同样相对过大。因此,本文采用一种新的结构,将无光焦度校正板偏置于离轴抛物面后来校正离轴抛物

面的轴外像差,并证明计算出的初始结构参数的正确性。

## 2 新结构的像差分析与初始结构计算

偏置于离轴抛物面的无光焦度校正板光学结构如图 1 所示,无光焦度校正板插入在主镜之后,以离轴抛物面的母抛物面对称轴为主轴,以校正板对称轴为辅轴,辅轴相对于主轴偏心并倾斜。

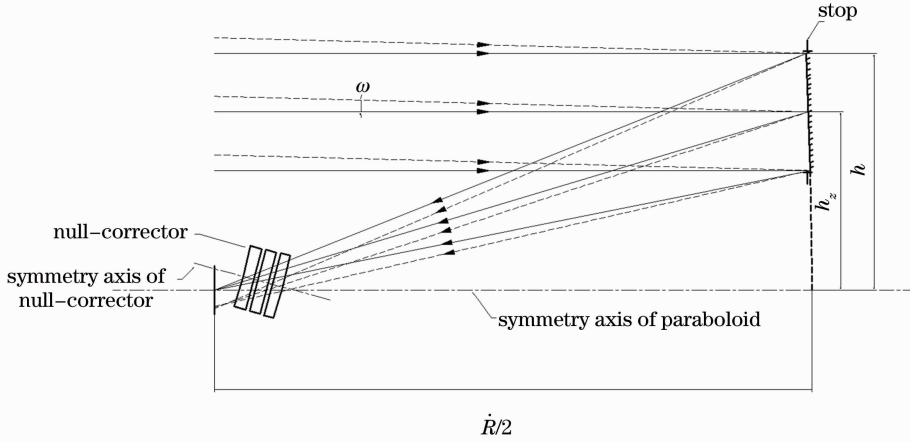


图 1 结构示意图

Fig. 1 Illustration of the structure

### 2.1 离轴抛物面参量选取及各单色像差

系统孔径光阑位于离轴抛物面镜固定框上,根据三级像差理论<sup>[4]</sup>,经整理后离轴抛物面的各单色像差及各单色像差分布系数可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L' = -\frac{1}{2n_k' u_k'} S_I, \quad S_I = S_I' + h \Delta P = 0 \\ K_s' = -\frac{1}{2n_k' u_k'} S_{II}, \quad S_{II} = S_{II}' + h_z \Delta P = \left( \frac{h_z}{h} - \frac{i_z}{i} \right) h \Delta P \\ x_{ts}' = -\frac{1}{n_k' u_k'} S_{III}, \quad S_{III} = S_{III}' + \frac{h_z^2}{h} \Delta P = \left[ \left( \frac{h_z}{h} \right)^2 - \left( \frac{i_z}{i} \right)^2 \right] h \Delta P \\ x_p' = -\frac{1}{2n_k' u_k'} S_{IV}, \quad S_{IV} = S_{IV}' = J^2 \frac{2}{R} = \frac{2h^2 \omega^2}{R} \\ \delta y_z' = -\frac{1}{2n_k' u_k'} S_V, \quad S_V = S_V' + \frac{h_z^3}{h^2} \Delta P = \left[ \left( \frac{h_z}{h} \right)^3 - \left( \frac{i_z}{i} \right)^3 \right] h \Delta P + \frac{2h^2 \omega^2}{R} \frac{i_z}{i} \end{array} \right. , \quad (1)$$

式中  $\Delta P = \frac{2h^3}{R^3}$ ,  $\overset{\circ}{R}$  为离轴抛物面母抛物面顶点的曲率半径,  $S_I', S_{II}', S_{III}', S_{IV}', S_V'$  为半径等于  $\overset{\circ}{R}$  的球面各单色像差分布系数,  $J = nh i_z - nh_z i$  为拉-赫不变量,  $\omega$  为最大视场,  $i_z = \frac{h_z}{R} - \omega$  为第二近轴光线入射角,  $i = \frac{h}{R}$  为第一近轴光线入射角,  $h_z, h$  分别为第二近

轴光线及第一近轴光线在离轴抛物面上的入射高度,均以主轴为参照计量,如图 1 所示。

### 2.2 无光焦度校正板的初始结构

无光焦度校正板为三贴合透镜式结构,并将处于中间的透镜视为由双胶合透镜组成,如图 2 所示,即将其视为由两组双贴合透镜组胶合而成<sup>[5]</sup>。校正板偏心量为  $\Delta h$ (以主轴向上为正),倾斜量为  $\Delta u$ (以偏心和倾斜前位置顺时针旋转为正)。

由三级像差理论可知无光焦度校正板无色差，无光焦度校正板的各单色像差分布系数如下<sup>[6]</sup>：即  $C_I = C_{II} = 0$ ，因此保留了反射镜的无色差特性。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L'_C = -\frac{1}{2n'_k u'_k} S_I, \quad S_I = \sum_1^j h_j^4 \varphi_j^3 P_j \\ K'_{sC} = -\frac{1}{2n'_k u'_k} S_{II}, \quad S_{II} = \sum_1^j h_{zj} h_j^3 \varphi_j^3 P_j + J \sum_1^j h_j^2 \varphi_j^2 W_j \\ x'_{sC} = -\frac{1}{n'_k u'_k} S_{III}, \quad S_{III} = \sum_1^j h_{zj}^2 h_j^2 \varphi_j^3 P_j + 2J \sum_1^j h_{zj} h_j \varphi_j^2 W_j + J^2 \sum_1^j \varphi_j \\ x'_{\mu C} = -\frac{1}{2n'_k u'_k} S_{IV}, \quad S_{IV} = J^2 \mu \sum_1^j \varphi_j \\ \delta y'_{zC} = -\frac{1}{2n'_k u'_k} S_V, \quad S_V = \sum_1^j h_{zj}^3 h_j \varphi_j^3 P_j + 3J \sum_1^j h_{zj}^2 \varphi_j^2 W_j + J^2 (3 + \mu) \sum_1^j \frac{h_{zj}}{h_j} \varphi_j \end{array} \right. , \quad (2)$$

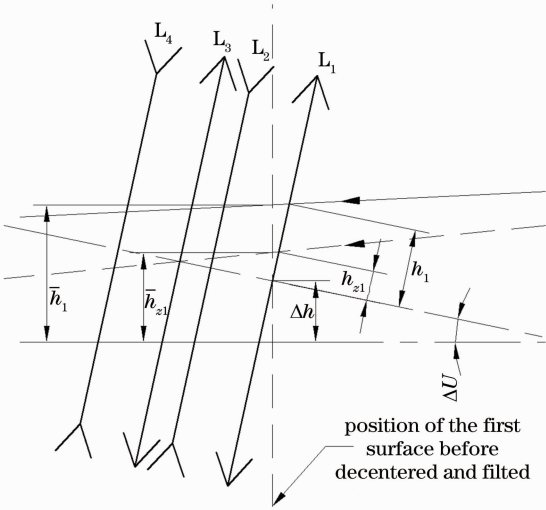


图 2 偏心和倾斜放置的无光焦度校正板

Fig. 2 Decentered and tilted null-corrector

式中各量均以辅轴为参照计量， $\varphi_j$  为各透镜光焦度， $\sum_1^j \varphi_j = 0$ ， $P_j = \frac{P}{(h\varphi)^3}$ ， $W_j = \frac{W}{(h\varphi)^2}$  为沿光线方向的归化  $P$ 、 $W$  参数。

求解初始结构时将校正板视为薄透镜，则近轴光线在各个面上的高度等于其在校正板第一个面的高度。因无光焦度系统垂轴放大率  $\beta = 1$ ，但校正板相对于主轴具有偏心和倾斜，因此相对于主轴的各参量值需换算为相对于辅轴的值。第一近轴光线在校正板上的高度  $h_1$  与在校正板偏心和倾斜前的高度  $\bar{h}_1$  的几何关系如图 3 所示，在  $\triangle ABC$  内由正弦

定理可得

$$\frac{\bar{h}_1 - \Delta h}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \Delta u + u'\right)} = \frac{h_1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - u'\right)} \Rightarrow h_1 = \frac{(\bar{h}_1 - \Delta h) \cos u'}{\cos(\Delta u - u')} \approx \frac{\bar{h}_1 - \Delta h}{1 + \Delta u \cdot u'}, \quad (3)$$

式中  $u'$  为光线经离轴抛物面镜反射后与主轴的夹角。同理可得第二近轴光线在校正板上的高度  $h_{z1}$  与  $\bar{h}_{z1}$  的关系为

$$h_{z1} = \frac{(\bar{h}_{z1} - \Delta h) \cos u'}{\cos(\Delta u - u')} \approx \frac{\bar{h}_{z1} - \Delta h}{1 + \Delta u \cdot u'}, \quad (4)$$

由(3)、(4)式可知第一近轴光线与第二近轴光线在校正板上的高度是校正板偏心量  $\Delta h$  和倾斜量  $\Delta u$  的函数。

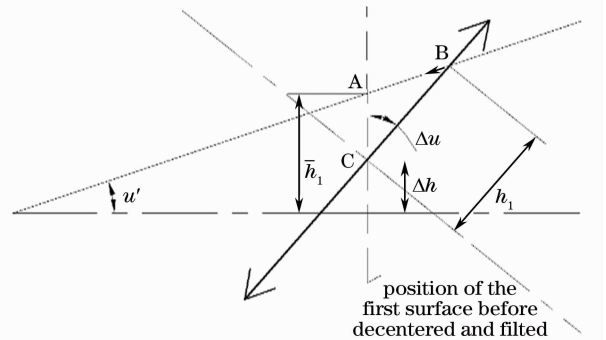


图 3 近轴光线的几何关系

Fig. 3 Geometry of the paraxial beams

由偏心和倾斜引起的像面高度关系如图 4 所示，由  $\triangle ABC \sim \triangle ADE$  可得

$$\left. \begin{array}{l} \frac{-\bar{y}'}{-y'} = \frac{-\bar{y}' / \cos \Delta u}{-y' + a} \\ a = -l'_F \tan \Delta u + \Delta h \end{array} \right\} \Rightarrow y' = \bar{y}' \cos \Delta u + l'_F \sin \Delta u - \Delta h \cos \Delta u \Rightarrow y' \approx \bar{y}' + l'_F \cdot \Delta u - \Delta h, \quad (5)$$

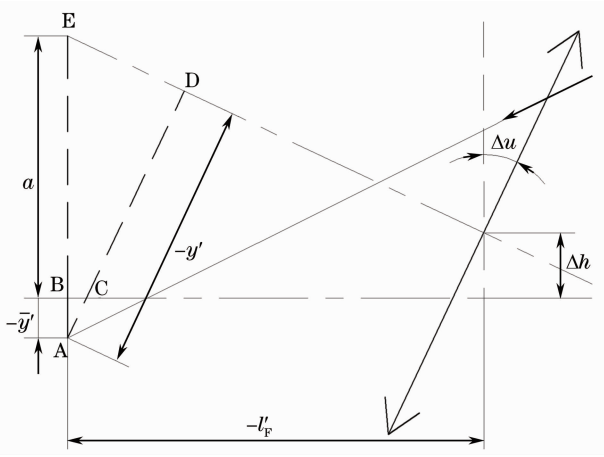


图 4 主轴与辅轴的像面关系

Fig. 4 Relation between the main axis and assist axis

式中  $l'_F$  为未偏置时校正板的后截距, 已知相对于辅轴的像高便可求得校正板的拉-赫不变量

$$J = n_1 y_1 u_1 = n'_8 y'_8 u'_8 = -y'(\Delta u - u'), \quad (6)$$

式中  $n_1 = n'_8 = -1, u_1 = u'_8 = \Delta u - u'$ 。由(6)式可知校正板偏置后相对于辅轴的拉-赫不变量也是校正板偏心量  $\Delta h$  和倾斜量  $\Delta u$  的函数。

由上, 当选定校正板的偏心量  $\Delta h$  和倾斜量  $\Delta u$ 、插入距离(即未偏置时的后截距), 以及各透镜的光焦度后, 再由消像差条件便可求出校正板各透镜的  $P, W$  值。为求解方便, 令  $\varphi_1 = -\varphi_2 = \varphi_3 = -\varphi_4$ 。通过双贴合透镜  $P, W$  值与透镜弯曲系数  $Q$  之间的关系<sup>[1]</sup>, 可得如下方程组:

$$\begin{cases} \vec{Q}_1 - \vec{Q}_2 = \vec{W}_{12} \left( \frac{n}{n+1} \right) \\ \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2 = \left[ \frac{\vec{P}_{12}}{\vec{W}_{12}} - \frac{3n}{(n+1)(n-1)} + 4u_1 \right] \left( \frac{n+1}{n+2} \right) \\ \vec{Q}_3 - \vec{Q}_4 = \vec{W}_{34} \left( \frac{n}{n+1} \right) \\ \vec{Q}_3 + \vec{Q}_4 = \left[ \frac{\vec{P}_{34}}{\vec{W}_{34}} - \frac{3n}{(n+1)(n-1)} + 4u_1 \right] \left( \frac{n+1}{n+2} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\vec{P}_{12} = \vec{P}_1 - \vec{P}_2, \vec{P}_{34} = \vec{P}_3 - \vec{P}_4, \vec{W}_{12} = \vec{W}_1 + \vec{W}_2, \vec{W}_{34} = \vec{W}_3 + \vec{W}_4$ , 因将中间透镜视为由  $L_2$  与  $L_3$  胶合而成, 故应有透镜半径  $r_3 = r_4$ , 根据透镜弯曲系数与半径的关系式

表 2 无光焦度校正板各面曲率半径( $10^3$  mm)

Table 2 Radius of curvature of the surfaces of the null-corrector ( $10^3$  mm)

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$
-1.133608	4.8100524	6.3951456	6.3951456	4.8102580	-1.1335966

$$\begin{cases} c_1 = \vec{Q}_1 + n/(n-1) & r_1 = 1/(c_1 \varphi_{12}) \\ c_2 = \vec{Q}_1 + 1 & r_2 = 1/(c_2 \varphi_{12}) \\ c_3 = -(\vec{Q}_2 + 1) & r_3 = -1/(c_3 \varphi_{12}) \\ c_4 = -\vec{Q}_2 - n/(n-1) & r_4 = -1/(c_4 \varphi_{12}) \\ c_5 = \vec{Q}_3 + n/(n-1) & r_5 = 1/(c_5 \varphi_{34}) \\ c_6 = \vec{Q}_3 + 1 & r_6 = 1/(c_6 \varphi_{34}) \\ c_7 = -(\vec{Q}_4 + 1) & r_7 = -1/(c_7 \varphi_{34}) \\ c_8 = -\vec{Q}_4 - n/(n-1) & r_8 = -1/(c_8 \varphi_{34}) \end{cases}. \quad (8)$$

可得  $\vec{Q}_2 = \vec{Q}_3$ , 同时有校正板的  $\vec{P}_C = \vec{P}_{12} + \vec{P}_{34}, \vec{W}_C = \vec{W}_{12} + \vec{W}_{34}$ , 便可求得校正板各面的曲率半径。

### 3 设计实例

在对新结构分析的基础上, 以设计一有效口径  $\Phi 500$  mm, 焦距 10 m, 离轴量为 600 mm, 有效视场  $\pm 0.5$  mrad 的平行光管为例。将有关参数代入(1)式, 由此可计算出离轴抛物面反射镜的初级像差, 取第一近轴光线高度  $h = 850$  mm, 即反射镜的上边缘光线, 其各单色像差如表 1 所示。

表 1 离轴抛物面各单色像差

Table 1 Monochrome aberration of the off-axis paraboloid

$\delta L'$	$K'_s / \text{mm}$	$X'_{is} / \text{mm}$	$X'_p / \text{mm}$	$\Delta y'$
0	$-9.03 \times 10^{-3}$	0.303	$-1.25 \times 10^{-3}$	$-1.37 \times 10^{-2}$

将校正板偏心量设定为  $\Delta h = 30.05$  mm, 倾斜量  $\Delta u = -3.438^\circ$ , 后截距  $l'_F = -410$  mm, 令  $\varphi_1 = -\varphi_2 = \varphi_3 = -\varphi_4 = 0.5$ , 材料选取其对  $d$  光折射率为  $n = 1.4587$  的熔石英玻璃, 第二近轴光线在像面上相对于主轴的高度  $\bar{y}' \approx \frac{\omega}{2} \cdot \frac{R}{2} = -5$  mm。消像差条件选取校正离轴抛物面的彗差及畸变, 根据几何关系, 校正板像面上某一像点相对于辅轴的各几何像差应等于同一像点相对于主轴的像差乘以偏置角度的方向余弦的相反数, 即

$$\begin{cases} K'_{sC} = -K'_s \cos \Delta u = 9.0149986 \times 10^{-3} \text{ mm} \\ \delta y'_{cC} = -\delta y'_c \cos \Delta u = 1.3625437 \times 10^{-2} \text{ mm} \end{cases}, \quad (9)$$

由(2)~(8)式便可求得无光焦度校正板各面的曲率半径, 如表 2 所示。

表 2 中各曲率半径是将校正板视为薄透镜所得,现将透镜加厚,选取各透镜中心厚度为 15 mm,透镜间距为 10 mm,得无光焦度校正板初始结构如表 3 所示。

将系统初始结构输入 Zemax 程序,插入校正板前后,视场为  $\omega=0.5$  mrad 的系统像面处的畸变、慧

差及波像差比较如图 5~7 所示,最大畸变由  $1.5025 \times 10^{-4}$  mm 变为  $2.042 \times 10^{-5}$  mm,彗差由  $11.02 \mu\text{m}$  变为  $5.121 \mu\text{m}$ ,可见,所计算出的校正板初始结构是正确的,有效地减小了离轴抛物面的彗差及畸变,同时改善了系统的波像差,使均方根(RMS)波像差由  $0.0573\lambda$  减小为  $0.0358\lambda$ 。

表 3 无光焦度校正板初始结构

Table 3 Initial structure of the null-corrector

	Surface1	Surface2	Surface3	Surface4	Surface5	Surface6
$R / (10^3 \text{ mm})$	-1.133608	4.5308376	5.6568151	5.2840341	3.6983837	-8.0576647
$d / \text{mm}$	-15	-10	-15	-10	-15	-364.299488
Glass	KS <sup>①</sup>	—	KS <sup>①</sup>	—	KS <sup>①</sup>	—

① The glass type KS based on the building materials industry standard of optical fused-silica, JC/T185-1996.

固定校正板偏心和倾斜量以优化校正板各面曲率半径,在得到一组成像较好结果的曲率半径后,取消各面半径的变量标志,优化校正板偏心量和倾斜量及各透镜间距以得到更好的结果。实验证明,经由正确的初始结构进行优化设计,各参量均有较快的收敛速度,优化设计时间有效减少。优化后校正板偏心量  $\Delta h = 29.580339$  mm,倾斜量  $\Delta u = -3.686468^\circ$ ,校正板结构如表 4 所示,插入折转镜后的系统结构如图 8 所示。优化后的系统像面处波像差满足要求,在最大视场  $\omega=0.5$  mrad 处的 RMS 波相差为  $0.0344\lambda$ ,如图 9 所示。

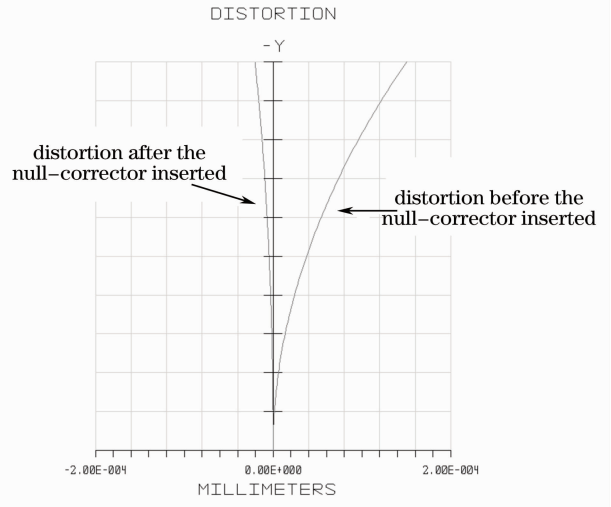


图 5 插入校正板前后像面畸变比较  
Fig. 5 Distortion comparison before and after the null-corrector inserted

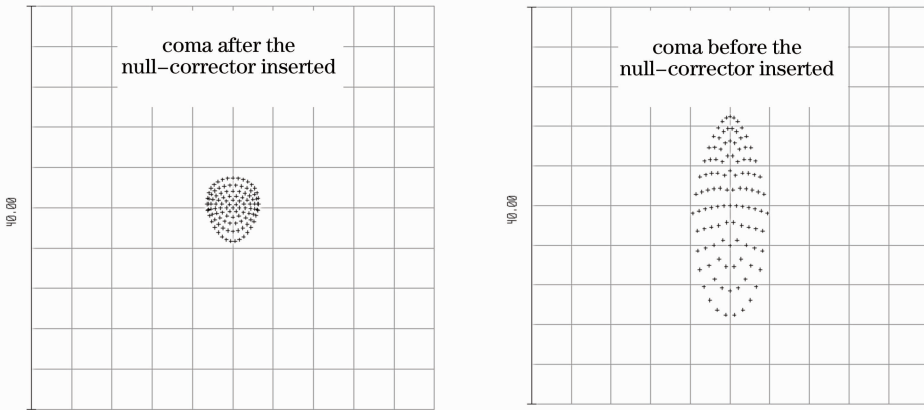


图 6 插入校正板前后像面彗差比较  
Fig. 6 Coma comparison before and after the null-corrector inserted

表 4 优化后的无光焦度校正板结构

Table 4 Null-corrector structure after optimization

	Surface1	Surface2	Surface3	Surface4	Surface5	Surface6
R /mm	-1106.625305	4539.173531	26480.70	7193.602969	2491.306583	-996.450889
d /mm	-15	-10	-15	-10	-15	-364.299488
Glass	KS	-	KS	-	KS	-

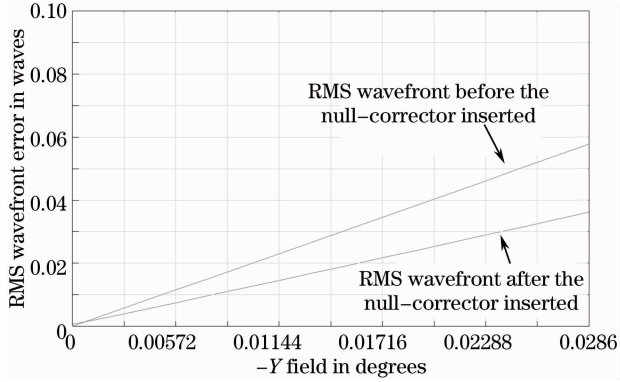


图 7 插入校正板前后波像差比较

Fig. 7 Wavefront comparison before and after the null-corrector inserted

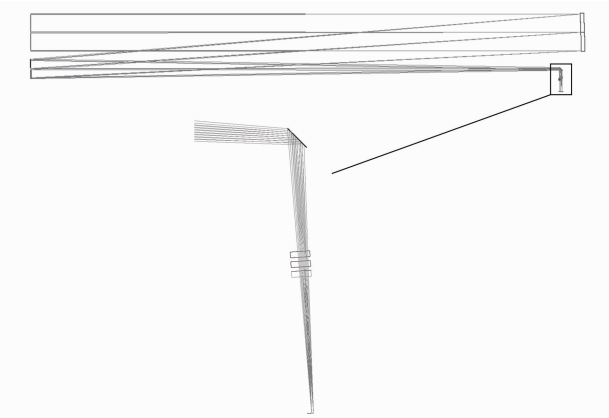


图 8 插入折转镜后的校正板光路图

Fig. 8 Illustration for the lens after the fold mirror inserted

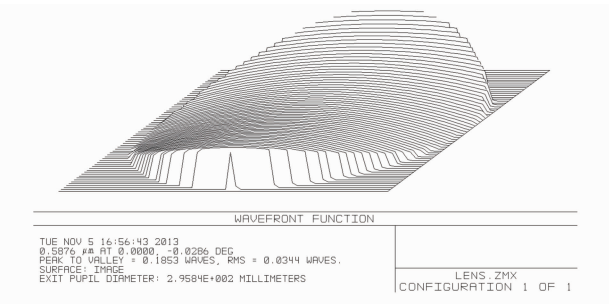


图 9  $\omega=0.5$  mrad 时的波面图

Fig. 9 RMS wavefront at  $\omega=0.5$  mrad

## 4 结 论

为矫正大口径离轴抛物面像差提出了一种将无光焦度校正板偏置于焦面前的新结构形式,此结构可以有效地减小校正板的口径,同时校正像差。通过分析离轴抛物面镜的像差及偏置无光焦度校正板光轴与离轴抛物面母抛物面对称轴之间的几何关系,得出了计算偏置无光焦度校正板初始结构的方法,经过实验验证,由此方法计算出的初始结构正确。此新型结构可普遍适用于大口径离轴抛物面像差的矫正。

## 参 考 文 献

- 1 Xiao Guanghui, Hao Peiming. Deign of Newton optical system iwth zero-power corrector [J]. J Applied Optics, 2008, 29(5): 753-757.  
肖光辉,郝沛明.一种带有无光焦度校正板的牛顿光学系统的设计[J].应用光学,2008,29(5):753-757.
- 2 He Zongping, Zhao Wencai, Hao Peiming. Study of an optical system with a two-lens null corrector and a single reflector [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(3): 346-349.
- 3 He Zongping, Hu Mingyong, Zhang Quan. Aberration characteristics of a two-mirror system with a two-lens zero-power corrector placed before the primary mirror [J]. Chinese J Quantum Electronics, 2006, 23(1): 31-36.  
何宗平,胡明勇,张权.双贴合无光焦度校正板在主反射镜前的两镜系统的像差特性[J].量子电子学,2006,23(1):31-36.
- 4 Lin Dajian. Engineering Optical Systems Design [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 266-268.  
林大键.工程光学系统设计[M].北京:机械工业出版社,1987.266-268.
- 5 He Zongping, Zhao Wencai, Wang Peng, et al.. A method of solving the initial structure of a three-thin-lens null corrector [J]. J Applied Optics, 2004, 25(1): 21-23.  
何宗平,赵文才,王鹏,等.无光焦度3贴合薄透镜组初始结构参数求解方法探讨[J].应用光学,2004,25(1):21-23.
- 6 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. 206-211.  
郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2010.206-211.

栏目编辑:韩峰