

doi: 10.3788/gzxb20164507.0722002

折反射式零位补偿检验

张琰¹, 胡文琦¹, 郑列华¹, 郝沛明²

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 同济大学, 上海 200092)

摘要:结合奥夫纳折反射式零位补偿器和马克苏托夫反射式零位补偿器的优点,对大口径、大相对孔径凹非球面加工检验提出一种折反射式零位补偿检验法.该方法采用放置非球面顶点曲率中心之前的两块透镜和一块反射镜来实现大口径凹非球面零位补偿检验.依据三级像差理论,推导了初始结构计算公式;通过对口径为 1 000 mm、顶点曲率半径为 4 000 mm、偏心率为 1.05、中心孔为 200 mm 的凹非球面进行补偿器设计,完成了原理验证,优化后系统剩余波像差峰谷值为 0.004 2λ. 研究表明该方法轴向光路长度短,补偿能力强,可用于允许部分中心遮拦的大口径、大相对孔径凹非球面检验.

关键词:光学设计;折反射式补偿器;三级像差理论;非球面;补偿检验;大口径;大相对孔径

中图分类号: TN247; O435.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0722002-5

Catadioptric Null Compensating Test

ZHANG Long¹, HU Wen-qi¹, ZHENG Lie-hua¹, HAO Pei-ming²

(1 Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(2 Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By combining the advantages of Offner refractive compensator and Maksutov reflective compensator, aiming at the testing of concave aspheric surface with large aperture or large relative aperture, a novel null compensator named catadioptric compensator was proposed. This method uses double lens and single mirror to test concave aspheric surface, the compensator is set between the mirror under test and its curvature center. Based on third-order aberration theory, the calculating formulas of initial structure were derivated. By compensator design for a concave aspheric surface, the principle of the proposed method was verified. The aperture of the aspheric surface is 1 000 mm, the vertex radius of curvature of the aspherical surface is 4 000 mm, the conicoid coefficient is 1.05, the inner hole diameter is 200 mm, the peak valley value of the residual wavefront error of the optimized system is 0.004 2λ. The result shows that the axial testing size of this compensator is short and the compensating ability is strong. If central obscuration is allowed, it is available to test concave aspheric surface with large aperture or large relative aperture.

Key words: Optical design; Catadioptric compensator; Third-order aberration theory; Aspheric; Null test; Large aperture; Large relative aperture

OCIS Codes: 220.1250; 220.1000; 220.4830; 220.4840

0 引言

零位补偿检验是大口径凹非球面反射镜检验的主要手段^[1]. Offner 于 1963 年提出了采用小口径透镜补偿检验大口径非球面的透镜零位补偿检验法,该方法

对大相对孔径非球面检验也能有较好应用^[2]. 目前,国外在大口径非球面检验中大多依靠 Offner 补偿器或者改进的 Offner 补偿器结合干涉仪实现定量检验. GEMINI telescope 的两块主镜口径为 8.1 m, 顶点曲率半径为 28.8 m, 在制造时采用 Offner 补偿器与激光

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB013206)资助

第一作者:张琰(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为光学加工和检测. Email: rocketdragon203@163.com

导师(通讯作者):郑列华(1958-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学加工和检测. Email: dimo818@126.com

收稿日期:2015-12-24;录用日期:2016-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

干涉仪进行了检验^[3]. LSST (The Large Synoptic Survey Telescope) 的 M1 主镜也采用了 Offner 补偿器进行检验^[4]. 最近几年国内从透镜补偿^[5-6]、子口径拼接^[7]、计算机辅助装调^[8]、凸非球面背向零位补偿检验^[9]、高次非球面检验^[10]等方面对透镜式补偿检验开展了相关研究.

20 世纪 50 年代, Maksutov 提出反射镜零位补偿检验^[11-12], 其显著优点是无色差和光路紧凑, 利于长焦距和大口径的凹非球面检验^[13-14]. 同济大学以三级像差理论为基础对反射式补偿检验的各类情况进行了详细分析和研究^[15].

Offner 补偿器补偿能力强, 但补偿器设置在顶点曲率中心之后, 检验光路长, 在检验大口径、长焦距非球面时需要足够大的检测空间, 检测光路往往长达十几米, 甚至几十米. Maksutov 反射式补偿器补偿反射镜设置在顶点曲率中心之前, 检验光路折叠, 轴向尺寸短、体积小, 但仅采用单面反射镜进行补偿, 其补偿能力有限.

结合 Offner 折射式和 Maksutov 反射式零位补偿检验的优点, 提出折反射式零位补偿检验, 采用两块透镜和一块球面反射镜进行补偿检验, 在具备高补偿能力的同时缩短检验光路的轴向尺寸.

1 折反射式零位补偿器设计方法

折反射式零位补偿器的设计以经典三级像差理论为基础, 首先, 对光路初始结构进行预先规划和公式推导, 进而采用 PW 法, 求解出满足初始规划的光路结构参数, 然后在此基础上采用 Zemax 软件进行缩放和优化设计, 得出各光学元件的最终结构参数及相互间隔.

1.1 折反射式零位补偿器系统配置

折反射式零位补偿器系统配置如图 1. 图中 4 为允许部分中心遮拦的待检凹非球面, 有限远补偿透镜 1、2 与补偿反射镜 3 共同组成了折反射式零位补偿器. 光线由 o_1 点发出, 经补偿透镜 1、2 折射和补偿反射镜 3 反射后与待检凹非球面 4 的法线重合, 从非球面 4 反射的光线按原路返回到 o_1 . o_1 、 o_2 和 o_3 点是共轭点, u_1 为起始角, 法线角 $u_4 = u'_4 = u'_3$.

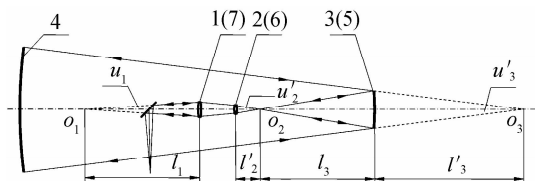


图 1 折反射式补偿器

Fig. 1 Catadioptric compensator

1.2 补偿透镜和反射镜的像差校正与分配

按三级像差理论, 令球差系数 S_1 为零, 有

$$S_1 = h_1 \vec{P}_1 + h_2 \vec{P}_2 + h_3 \vec{P}_3 + h_4 P_4 + h_4^4 K + h_3 \vec{P}_5 + h_6 \vec{P}_6 + h_7 \vec{P}_7 = 0 \quad (1)$$

式中, h 为各镜面的光线入射高度, $h_1 = h_7$; \vec{P}_i 和 \vec{P}_i 分别表示光线正向和反向经过第 i 个透镜或者反射镜时对应透镜或反射镜的 P 值, $\vec{P}_1 = \vec{P}_7 = P_1$, $h_2 = h_6$, $\vec{P}_2 = \vec{P}_6 = P_2$, $h_3 = h_5$, $\vec{P}_3 = \vec{P}_5 = P_3$, $P_4 = 0$; $K = -(n'_4 - n_4) e^2 / r_{06}^3$; r_{06} 为待检凹非球面 4 的顶点曲率半径, e^2 为偏心率; p_i 定义为 $P_i = [n_i n'_i (u'_i - u_i) / (n_i - n'_i)]^2 (u'_i / n'_i - u_i / n_i)$ n_i 为对应材料的折射率, 设定折射率为 $n_1 = n'_1 = n_2 = n'_2 = n_3 = 1$, $n'_3 = n_4 = -1$, $n'_4 = n_5 = 1$, $n_6 = n'_6 = n_7 = n'_7 = -1$, 同时, 补偿透镜 1、2 的材料折射率为 n . 故有 $K = -2e^2 / r_{06}^3$.

按图 1, 设定系统结构尺寸为: $h_4 = -1$, $r_{06} = 1$, $u'_3 = u_4 = u'_4 = h_4 / r_{06} = -1$. 则根据放大率 β 和遮拦比 α 的定义有

$$\begin{cases} \beta_1 = u_1 / u'_1 \\ \beta_2 = u_2 / u'_2 \\ \beta_3 = u_3 / u'_3 = -u_3 \\ \beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3 = u_1 / u'_3 = -u_1 \\ \alpha_1 = h_1 / h_4 \\ \alpha_2 = h_2 / h_4 \\ \alpha_3 = h_3 / h_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_i 和 u'_i 为对应光线的入射角和出射角.

根据 P_3 的定义有

$$P_3 = [n_3 n'_3 (u'_3 - u_3) / (n_3 - n'_3)]^2 (u'_3 / n'_3 - u_3 / n_3) = 1/4 (1 - \beta_3)^2 (1 + \beta_3) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得

$$2h_1 P_1 + 2h_2 P_2 + 2h_3 P_3 + 2h_4 e^2 = 0$$

即

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + e^2 = 0 \quad (4)$$

式中, 设定比例系数 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{13} , 使其满足 $m_{11} + m_{12} + m_{13} = 1$, 通过合理选择该系数, 并根据式(4)可将待检凹非球面 4 的法距差分别分配给补偿透镜 1、2 及补偿反射镜 3, 可得

$$\begin{cases} P_1 = -m_{11} e^2 / \alpha_1 \\ P_2 = -m_{12} e^2 / \alpha_2 \\ P_3 = -m_{13} e^2 / \alpha_3 \end{cases} \quad (5)$$

式(3)和(5)中 P_3 相等, 故有

$$\alpha_3 (1 - \beta_3)^2 (1 + \beta_3) = -4m_{13} e^2 \quad (6)$$

对补偿反射镜 3 而言, 式(6)中 e^2 已知, 设定 α_3 和 m_{13} , 即可求解 β_3 (m_{13} 的取值为 $0.1 \leq m_{13} \leq 0.5$, α_3 的取值为 $0.2 \leq \alpha_3 \leq 0.5$).

1.3 补偿透镜和反射镜的偏角分配

由近轴光焦度定义, 折反射式补偿器总偏转角为

$$h\varphi = h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 = u'_3 - u_1 = -(1-\beta)$$

其中,

$$\begin{cases} h_1\varphi_1 = u'_1 - u_1 = -m_{21}(1-\beta) \\ h_2\varphi_2 = u'_2 - u_2 = -m_{22}(1-\beta) \\ h_3\varphi_3 = u'_3 - u_3 = -m_{23}(1-\beta) \end{cases} \quad (7)$$

式中, m_{21} 、 m_{22} 、 m_{23} 是光焦度系数因子, 并且满足 $m_{21} + m_{22} + m_{23} = 1$, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为透镜 1、2 和反射镜 3 的光焦度, 式中 β 依据实际要求确定。

1.4 初始结构参数的确定

对补偿透镜 1 和 2 而言

$$\begin{cases} P'_1 = P_1 / (h_1\varphi_1)^3 \\ P'_2 = P_2 / (h_2\varphi_2)^3 \end{cases} \quad (8)$$

式中 P'_1 、 P'_2 , 分别为 P_1 、 P_2 的归化值. 弯曲 Q 与 P 的关系式为

$$\begin{cases} Q_1 = av_1 - b \pm \sqrt{c[P'_1 - P_0^\infty + c(v_1 + v_1^2)]} \\ Q_2 = av_2 - b \pm \sqrt{c[P'_2 - P_0^\infty + c(v_2 + v_2^2)]} \end{cases} \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} P_0^\infty = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right] \\ a = \frac{2n+2}{n+2} \\ b = \frac{3n}{2(n-2)(n+2)} \\ c = \frac{n}{(n+2)} \\ v_1 = \frac{u_1}{h_1\varphi_1} \\ v_2 = \frac{u_2}{h_2\varphi_2} \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} \varphi_1 = (h_1\varphi_1) / h_1 = (u'_1 - u_1) / h_1 \\ \varphi_2 = (h_2\varphi_2) / h_2 = (u'_2 - u_2) / h_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} c_1 = Q_1 + n / (n-1), r_1 = 1 / c_1\varphi_1 \\ c_2 = Q_1 + 1, r_2 = 1 / c_2\varphi_1 \\ c_3 = Q_2 + n / (n-1), r_3 = 1 / c_3\varphi_2 \\ c_4 = Q_2 + 1, r_4 = 1 / c_4\varphi_2 \end{cases} \quad (12)$$

对补偿反射镜 3, 按近轴公式有

$$2h_3 / r_5 = u'_3 + u_3$$

故有

$$r_5 = 2h_3 / (u'_3 + u_3) = 2\alpha_3 / (1 + \beta_3) \quad (13)$$

将设定的 α_3 和 β_3 代入式(13)可求解 r_5 .

各面之间的归化间距为

$$\begin{cases} d_{01} = -d_{1112} = 0 - l_1 = -h_1 / u_1 \\ d_{12} = -d_{1011} = 0 \\ d_{23} = -d_{910} = l'_1 - l_2 = (h_1 - h_2) / u'_1 \\ d_{34} = -d_{89} = 0 \\ d_{45} = -d_{78} = l'_2 - l_3 = (h_2 - h_3) / u'_2 \\ d_{56} = -d_{67} = l'_3 - l_4 = (h_3 - h_4) / u'_3 \end{cases}$$

将在规划条件下计算得出的 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 、 d_{01} 、 d_{12} 、 d_{23} 、 d_{34} 、 d_{45} 、 d_{56} 、 d_{67} 、 d_{78} 、 d_{89} 、 d_{910} 、 d_{1011} 、 d_{1112} 及待检非球面参数带入 Zemax 进行优化计算, 然后对优化结果进行加厚和二次优化计算, 直至得到满意结果为止。

2 设计实例

实际待检凹双曲面参数为: 口径 $\Phi_0 = 1\ 000$ mm, 顶点曲率半径 $r_0 = 4\ 000$ mm, 中心孔 $\Phi_i = 200$ mm, $e^2 = 1.05$, 透镜材料为 K9 玻璃, 设计的折反射式零位补偿器实际检测光路如图 2。

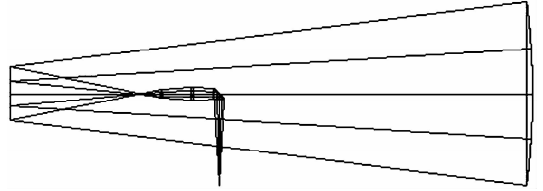


图 2 折反射式补偿器实际检测光路

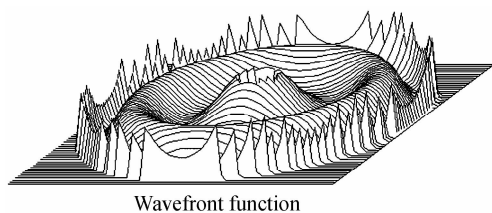
Fig. 2 Actual testing optical path of the catadioptric compensator

将由公式计算的初始规划参数带入 Zemax 验证 $s_1 = 0$ 后, 即可进行初步优化. 将该优化值整体按比例放大 4000 倍, 并在此基础上, 利用 Zemax 程序进行优化-加厚-再优化, 直到得出设计要求的结果. 优化后系统残余波像差峰谷值 (Peak Valley, PV) 为 $0.004\ 2\lambda$, 最终设计结果如表 1 和图 3、4. 补偿器结构的理想轴向尺寸为 2 875 mm. 考虑到中间安装两透镜镜筒的实际结构遮拦, 该补偿器产生的检测镜实际中心遮拦约为 150 mm, 中心遮拦比优于 1/6.

表 1 系统结构参数

Table 1 Structure parameters of system

Surf	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
OBJ	Standard	Infinity	500		0	0
1	Coordbrk	-	0		-	-
2	Standard	Infinity	0	Mirror	80.2218	0
3	Coordbrk	-	-142.856		-	-
4	Standard	-546.0940	-14	K9	69.1351	0
5	Standard	203.1588	-156.9840		69.4081	0
6	Standard	-390.0676	-7	K9	47.2333	0
7	Standard	127.3593	-828.9240		46.6872	0
8	Standard	3806.3413	2875.000	Mirror	290.0296	0
STO	Standard	-4000	-2875.000	Mirror	1000	-1.05
10	Standard	3806.3413	828.9240	Mirror	290.0287	0
11	Standard	127.3593	7	K9	46.6880	0
12	Standard	-390.0676	156.9840		47.2340	0
13	Standard	203.1588	14	K9	69.4081	0
14	Standard	-546.0940	142.856		69.1351	0
15	Coordbrk	-	0		-	-
16	Standard	Infinity	0	Mirror	80.2210	0
17	Coordbrk	-	-500		-	-
IMA	Standard	Infinity			0.0031	0



Wavefront function

图 3 系统残余波像差

Fig. 3 Wave aberration of the system

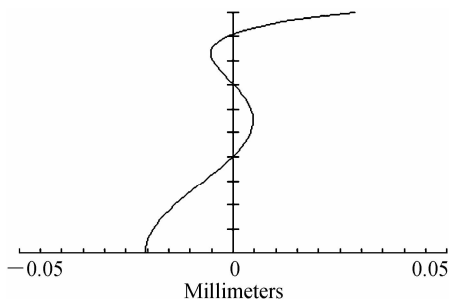


图 4 系统球差曲线

Fig. 4 Longitudinal aberration

3 折反射式补偿器研究

3.1 与 Offner 折射式及 Maksutov 反射式补偿器的比较

针对参数为 $\Phi_0 = 2\,000\text{ mm}$, $r_0 = 8\,000\text{ mm}$, $e^2 = 1.05$ 的非球面, 分别采用如图 5、6 所示的 Offner 折射式、Maksutov 反射式、折反射式补偿器进行设计, 最终结果如表 2.

从设计结果可看出, 折反射式补偿器的补偿能力最强, 轴向检测光路短, 与 Offner 折射式补偿器相比, 折反射式补偿器光路缩短了 5 330 mm, 近似缩短一半, 这在大口径、长焦距非球面检测上有一定优势.

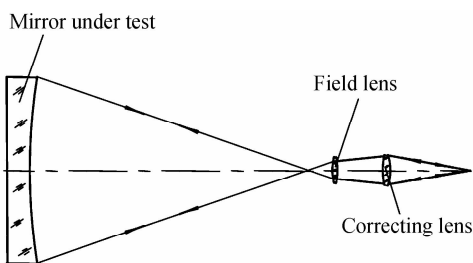


图 5 Offner 折射式补偿器

Fig. 5 Offner refractive compensator

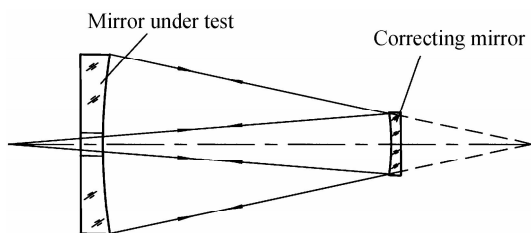


图 6 Maksutov 反射式补偿器

Fig. 6 Maksutov reflective compensator

表 2 系统结构参数

Table 2 Structure parameters of system

No.	Type	Wave aberration	Axial testing size/mm
1	Catadioptric	PV=0.0041 λ	5 670 mm
2	Offner	PV=0.0082 λ	11 000 mm
3	Maksutov	PV=2.47 λ	4 000 mm

Offner 折射式补偿器无中心遮拦问题, 折反射式和 Maksutov 反射式补偿器均会产生一定的中心遮拦. 折反射式补偿器可通过降低两块透镜的遮拦比, 来降低最终系统对检测镜中心的遮拦. 表 2 中的折反射式补偿器实际中心遮拦 320 mm, 中心遮拦比优于 1/6.

Maksutov 反射式补偿器由于采用单面球面镜来进行补偿检验, 补偿能力有限, 不适用于相对口径较大的非球面镜检验. 另外, 从光路组成来看, 折反射式补偿器元件多, 补偿器装调有一定难度.

3.2 不同相对孔径待检镜的折反射式补偿器设计结果比较

采用文中的设计方法分别为表 3 中不同相对孔径待检镜设计折反射式补偿器, 为便于对比, 将各补偿器的对应参数均约定为 $\alpha_1 = -0.075$, $\alpha_2 = -0.065$, $\alpha_3 = 0.3$, 各补偿器的透镜均采用 K9 玻璃. 最终优化设计结果及其相对孔径如图 7.

从图 7 可看出, 折反射式补偿检验对大口径和大相对孔径凹非球面检验是非常有利的, $\Phi_0 = 2\,000\text{ mm}$ 、F/1.5 的反射镜采用折反射式补偿检验, 其系统残余波像差 $PV \leq 0.008\,7\lambda$. 另外也可看到, 伴随着相对孔径的增大, 系统剩余波像差急剧增大, 补偿器设计难度也相应增大.

表 3 待检反射镜参数

Table 3 Parameters of mirrors

No.	Φ_0/mm	r_0/mm	e^2
1	2 000	6 000	1.05
2	2 000	8 000	1.05
3	2 000	10 000	1.05
4	2 000	12 000	1.05
5	2 000	14 000	1.05
6	2 000	16 000	1.05

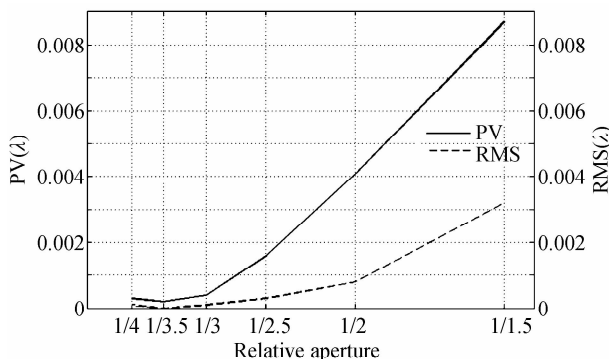


图 7 不同相对孔径待检镜的折反射式补偿器设计结果

Fig. 7 Catadioptric compensator design results of mirrors with different relative aperture

4 结论

本文提出的折反射式零位补偿检验综合了 Offner 折射式和 Maksutov 反射式补偿器在实际大口径凹非球面检验应用中的优点,理论分析和实例设计结果表明,该方法为允许部分中心遮拦(中心遮拦比 $\leq 1/6$)的大口径、大相对孔径凹非球面检验提供了一种可行的检验方法.该方法补偿能力强,光路紧凑,由于光路元件多,有一定的装调难度.接下来将针对折反射式补偿器装调误差对检测结果的影响以及检测光路装调误差控制展开进一步研究,实现折反射式零位补偿检验在实际检测中的应用.

参考文献

- [1] YAO Jin-gang, ZHANG Jin-ping, ZHENG Lie-hua, *et al.* A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(6): 0622003
姚劲刚, 张金平, 郑列华, 等. 干涉零位补偿检验研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(6): 0622003.
- [2] MALACARA D. Optical shop testing[M]. Yang Li, Wu Fan Transl. Beijing: *China Machine Press*, 2012, 340-347.
马拉卡拉 D. 光学车间检测[M]. 杨力, 伍凡, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012, 340-347.
- [3] CAYREL M. Completion of VLT and GEMINI primary mirrors at REOSC[C]. SPIE, 2000, **4003**: 14-23.
- [4] MICHAEL T, HUBERT M, JAMES H, *et al.* Optical testing of the LSST combined primary/tertiary mirror[C]. SPIE, 2010, **7739**: 77932V.
- [5] FU Lian-xiao, WU Yong-gang, HAO Pei-ming, *et al.* The study and analysis of lens-compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2057-2061.
付联效, 吴永刚, 郝沛明, 等. 透镜补偿检验的研究与分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2057-2061.
- [6] HAO Pei-ming, LI Ke-xin, YUAN Li-yin, *et al.* Null compensation test with zero-power corrector[C]. SPIE, 2007, **6723**: 67230B.
- [7] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun, *et al.* Testing an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 92-97.
王孝坤, 郑立功, 张学军, 等. 子孔径拼接干涉检测离轴非球面的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 92-97.
- [8] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai, MA Zhen, *et al.* Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2220-2223.
陈钦芳, 李英才, 马臻, 等. 离轴非球面反射镜补偿检验的计算机辅助装调技术研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2220-2223.
- [9] YE Lu, ZHANG Jin-ping, ZHENG Lie-hua, *et al.* Design of back null compensator test method of convex aspherical surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0422002.
叶璐, 张金平, 郑列华, 等. 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.
- [10] ZHENG Li-gong, CHANG Jun, ZHANG Xue-jun. Fabricating and testing of a large NA, even high order aspheric lens[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5), 584-586.
郑立功, 常军, 张学军, 等. 大数值孔径、高次非球面透镜的加工与检验[J]. *光学技术*, 2003, **29**(5), 584-586.
- [11] PAN Jun-hua. Design, fabrication and testing of optical aspheric surface[M]. Suzhou: Suzhou university press, 2004, 42-51.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004, 42-51.
- [12] YUAN Ying-hua, Hu Jian-jun, PAN Jun-hua. Design of a testing compensator for F/3 hyperbolic mirror[C]. SPIE, 2010, **7849**: 78491T.
- [13] YANG Li. Advanced optical manufacturing technologies [M]. Beijing: Science Press, 2001. 328-356.
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 328-356.
- [14] LI Hong-guang, LIU Xiu-mei, DA Zheng-shang, *et al.* Mirror-compensation test of abaxial elliptic surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 2152-2155.
李红光, 刘秀梅, 达争尚, 等. 离轴椭圆面的反射式补偿检验[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(8): 2152-2155.
- [15] HAO Pei-ming, Fu Lian-xiao, YUAN Li-yin, *et al.* Compensation and test of reflective mirror [C]. SPIE, 2006, **6150**: 615017.