

doi:10.3788/gzxb20164512.1222001

折反射式零位补偿检验(续)

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:为了研究双透镜和球面镜之间不同球差分配对折反射式补偿器补偿效果的影响,以三级像差理论为基础,针对两个不同相对口径的凹抛物面镜,采用不同内部球差分配,分别设计了一组折反射式补偿器,将结果绘制成曲线.从曲线可看出,当球面镜球差分配系数从 0 逐渐增大到 0.5 时,对应折反射式补偿器补偿能力先增强,达到极值后下降.球面镜球差分配系数为零时,球面镜不承担球差,球面镜变成半径无穷大的平面镜,折反射式补偿器即变为 Offner 补偿器.研究表明,折反射式补偿器补偿能力强,但不同内部球差分配对补偿效果影响较大,合理选择球面镜球差分配系数对折反射式补偿器设计是有利的.

关键词:光学设计;折反射式补偿器;三级像差理论;非球面;零位补偿检验;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)12-1222001-4

Catadioptric Null Compensating Test(Continued)

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: In order to study the effect of different spherical aberration distribution between the double lens and single mirror on the compensation results of catadioptric compensator, based on the third-order aberration theory, aiming at two concave paraboloidal surfaces with different relative apertures, a set of catadioptric compensators with different spherical aberration assignment were designed, and the curves of the design results were drawn. The curves indicate that, when the spherical aberration bearing ratios of the single mirror increase from 0 to 0.5, the compensating ability of the catadioptric compensators rises first, and begins to decrease after reaching the maximum. When the spherical aberration bearing ratio of the single mirror is 0, it means that the single mirror will not help to the final compensation and the single mirror becomes a plane reflector, and the catadioptric compensator becomes an Offner compensator. The results show that, the compensating ability of catadioptric compensator is strong, the different distribution of spherical aberration bearing ratios has a great impact on the compensating results, and it is good to the catadioptric compensator design to choose a reasonable spherical aberration bearing ratio for the single mirror.

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

OCIS Codes: 220.0220; 220.1250; 220.1000; 220.4830; 220.4840

0 引言

近几十年来,大口径二次非球面镜作为关键部件,

在天文光学、空间光学等领域的大型光学系统中得到了广泛应用,如 GMT (Giant Magellan Telescope)^[1]、LBT(Large Binocular Telescope)^[2]、VLT(Very Large

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:2016-07-12;录用日期:2016-08-31

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

Telescope)^[3]等望远镜中所采用的单块非球面镜,其口径都达到了8m以上.零位补偿检验法目前仍然是大口径二次曲面检验的主要手段^[4],典型代表有Offner透射式补偿器^[5]、Maksutov反射式补偿器^[6]、计算机全息检测法^[7]等.针对大口径非球面的检验国内先后围绕镜式补偿检验^[8]、透镜补偿检验^[9]、干涉零位补偿检验^[10]、凸非球面背向零位补偿检验^[11]、计算机产生全息图对补偿器的检测^[12]、激光跟踪仪检验非球面面形^[13]、离轴非球面镜补偿检验的计算机辅助装调^[14]等方面展开了相关研究.

Offner透射式补偿器采用透镜进行补偿检验,对大口径和大相对孔径非球面检验有较好应用^[15],检测时补偿器放在待检镜顶点曲率中心之后,检验光路长,往往达到十几米,甚至几十米.Maksutov反射式补偿器^[16]利用反射镜进行非球面法线像差补偿,实现非球面检验,补偿反射镜放置在待检镜顶点曲率中心之前,检验光路折叠紧凑,因采用单片反射镜补偿,其补偿能力有限.

为了能在提高补偿器补偿能力的同时缩短检测光路轴向空间,折反射式补偿器作为一种新的零位补偿检验法被提了出来.该补偿器利用双透镜和反射镜共同补偿非球面法线像差,其基于三级像差理论的初始结构PW求解法及原理验证实例已在《折反射式零位补偿检验》一文中进行了介绍.为便于折反射式补偿器的应用,针对同一待检镜,设计了一组具有不同反射镜球差分配系数的补偿器,研究了待检非球面法线像差在双透镜和反射镜之间的不同分配对最终补偿效果的影响,同时对补偿器实际应用时的中心遮拦、检测点引出、透镜间距控制等问题展开了讨论和分析,可为折反射式补偿器的实际应用提供参考.

1 折反射式补偿器设计

1.1 折反射式补偿器结构

折反射式补偿器结构如图1,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,经非球面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.在实际应用时通过转折镜8将发光点和检测点 o_1 引到光路旁侧进行检验.

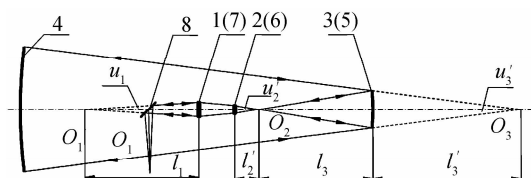


图1 折反射式补偿器

Fig.1 Catadioptric compensator

1.2 折反射式补偿器设计主要步骤

折反射式补偿器基于三级像差理论的公式推导和

设计方法已在《折反射式零位补偿检验》一文中详细介绍,其主要设计步骤如下:

1) 补偿器总体设定与规化

初始设定:包括规化前初始入射角 u_{10} ,透镜1、透镜2、反射镜3相对于待检镜4的遮拦比 α_1 、 α_2 、 α_3 ($0.2 \leq \alpha_3 \leq 0.5$).由规化前初始入射角和规化前反射镜3边缘光线出射角 u_{30} 可求得折反射式补偿器总的放大率 β .

规化:为方便求解将待检镜半口径规化为1,待检镜的顶点曲率半径规化为-1.

2) 将待检非球面的法线像差分配给透镜1、2和反射镜3

通过令包含待检镜在内的整个系统球差 $S_1=0$,可推导出

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + e^2 = 0 \quad (1)$$

式中, P_1 、 P_2 、 P_3 分别为透镜1、2、反射镜3的 P 值,其定义为

$$P_i = [n_i n'_i (u'_i - u_i) / (n_i - n'_i)]^2 (u'_i / n'_i - u_i / n_i),$$

n_i 和 n'_i 为镜子入射和出射区材料折射率, u_i 和 u'_i 为对应的光线入射角和出射角; e 为待检非球面的二次曲线偏心率.

引入分配系数 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{13} ,令

$$m_{11} = -(\alpha_1 P_1) / e^2, m_{12} = -(\alpha_2 P_2) / e^2, \\ m_{13} = -(\alpha_3 P_3) / e^2, \text{显然 } m_{11} + m_{12} + m_{13} = 1.$$

故有

$$P_1 = -m_{11} e^2 / \alpha_1, P_2 = -m_{12} e^2 / \alpha_2, P_3 = -m_{13} e^2 / \alpha_3.$$

设定 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{13} ($0.1 \leq m_{13} \leq 0.5$)取值即可实现补偿透镜1、2和补偿反射镜3之间的球差分配.

3) 光线在透镜1、2和反射镜3上的偏转角

光线经过补偿器的总偏转角为

$$h\varphi = h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2 + h_3 \varphi_3 = u'_3 - u_1 = -(1 - \beta) \quad (2)$$

经过补偿透镜1、2和反射镜3的偏转角为

$$h_1 \varphi_1 = u'_1 - u_1, h_2 \varphi_2 = u'_2 - u_2, h_3 \varphi_3 = u'_3 - u_3 \quad (3)$$

式中: u_i 和 u'_i 分别表示光线经过第 i 个元件的入射角和出射角, h_i 表示光线在第 i 个元件上的入射高度, φ 为折反射系统的光焦度, φ_i 为第 i 个光学元件的光焦度.设定 u'_1 的值,即可通过式(2)、(3)求出对应的 $h_1 \varphi_1$ 、 $h_2 \varphi_2$ 、 $h_3 \varphi_3$.

4) 采用PW法求解透镜1和透镜2的曲率半径

根据前面求出的 P_1 、 P_2 及 $h_1 \varphi_1$ 、 $h_2 \varphi_2$ 即可采用光学设计PW法求出透镜1、2对应的曲率半径 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 .

5) 求解反射镜的曲率半径

针对反射镜3的 P_3 有

$$-m_{13} e^2 / \alpha_3 = P_3 = \left[\frac{n_3 n'_3 (u'_3 - u_3)}{n_3 - n'_3} \right]^2 \left(\frac{u'_3}{n'_3} - \frac{u_3}{n_3} \right) = \\ \frac{1}{4} (1 - \beta_3)^2 (1 + \beta_3) \quad (4)$$

式中, n_3 和 n'_3 分别为光线入射和出射反射镜时的介质折射率, 故有 $n_3 = 1, n'_3 = -1$. β_3 为反射镜的放大率, 由式(4)可求出 β_3 , 进而可由式(5)求出反射镜曲率半径 r_3 .

$$r_3 = 2\alpha_3 / (1 + \beta_3) \quad (5)$$

6) 各元件之间间距的确定

$$d_{01} = -d_{1112} = 0 - l_1 = -h_1 / u_1, \quad d_{12} = -d_{1011} = 0,$$

$$d_{23} = -d_{910} = l'_1 - l_2 = (h_1 - h_2) / u'_1,$$

$$d_{34} = -d_{89} = 0, \quad d_{45} = -d_{78} = (h_2 - h_3) / u'_2,$$

$$d_{56} = -d_{67} = (h_3 - h_4) / u'_3.$$

式中 d_{i+1} 表示从第 i 面到 $i+1$ 面的间距。

7) 将所得折反射式补偿器的初始结构参数代入 ZEMAX 软件验证 $S_1 = 0$ 后, 即可进行优化—缩放—加厚—优化, 直至获得所需要的结果。

2 不同球差分配对补偿效果的影响

为了研究透镜和反射镜之间不同球差分配对补偿效果的影响, 针对口径为 $\Phi_0 = 4\,000$ mm, 偏心率平方 $e^2 = 1$, 顶点曲率半径分别为 $r_0 = 24\,000$ mm 和 $r_0 = 16\,000$ mm 的两块抛物面镜, 令反射镜承担的法线像差比例系数分别为 $m_{13} = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$, 为其设计相应的折反射式补偿器, 为寻找规律, 在补偿器设计时, 将透镜 1、反射镜 3 的遮拦比分别约定为 $1/20, 0.3$, 设计结果见表 1、2 及图 2、3。

表 1 $r_0 = 24\,000$ mm 抛物面镜不同球差分配设计结果

Table 1 Design results of the paraboloidal mirror ($r_0 = 24\,000$ mm) with different spherical aberration distribution

No.	m_{13}	PV(λ)	rms(λ)
1	0	0.033	0.007 1
2	0.1	0.016 8	0.003 5
3	0.2	0.009 2	0.001 9
4	0.3	0.004 8	0.001 0
5	0.4	0.004 1	0.000 8
6	0.5	0.006 2	0.001 3

表 2 $r_0 = 16\,000$ mm 抛物面镜不同球差分配设计结果

Table 2 Design results of the paraboloidal mirror ($r_0 = 16\,000$ mm) with different spherical aberration distribution

No.	m_{13}	PV(λ)	rms(λ)
1	0	0.035 4	0.009 6
2	0.1	0.026	0.005 5
3	0.2	0.020 1	0.004 3
4	0.3	0.020 5	0.004 5
5	0.4	0.058 6	0.012 3
6	0.5	0.105	0.022 5

从图 2 可看出伴随着反射镜所承担球差的增大, 对应折反射式补偿器的补偿能力先增大, 在 $m_{13} = 0.3$

附近出现极值, 随后又有所下降. 相对口径的增大使得补偿器的设计难度迅速增加. 当反射镜的球差分配系数 $m_{13} = 0$ 时, 即反射镜不分担球差, 其 P 值为零, 对应的球面曲率半径变为无穷大, 球面反射镜退化成平面反射镜, 此时折反射式补偿器退化成 Offner 补偿器. 从图 3 可看出伴随着球面镜所承担法线像差的增大, 球面镜的曲率半径会逐渐变小.

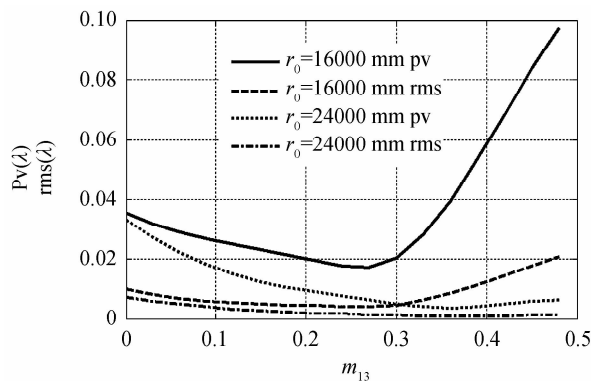


图 2 不同球差分配的补偿能力曲线

Fig. 2 Compensating curves with different spherical aberration distribution

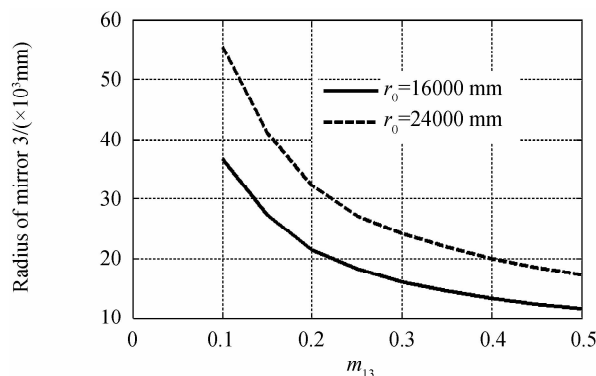


图 3 不同球差分配时的反射镜曲率半径

Fig. 3 Radius of mirror 3 of catadioptric compensator with different spherical aberration distribution

3 实际应用时需注意的问题

3.1 45°转折镜的添加

在实际应用中需要采用图 1 中 8 所示的 45°转折镜将发光点和检测点引到轴向光路的旁侧以方便采用干涉仪进行检验, 发光点和检测点能否引出, 取决于转折镜相对于透镜 1 的轴向位置, 以及光线初始入射角, 转折镜靠近透镜 1、光线初始入射角小对发光点和检测点的引出有利, 反之则不利. 实际使用时, 初始入射角的正切值应控制在 $1/20 \sim 1/14$ 为宜, 并根据该初始入射角选择合适的干涉仪镜头。

3.2 中心遮拦的考虑

折反射式补偿器中反射镜的引入, 导致补偿器会在非球面中心形成中心遮拦, 实际遮拦比的大小与透镜 1 和透镜 2 的口径有关, 其中透镜 2 的影响最显著,

通过控制透镜 1 和透镜 2 的遮拦比,可将最终中心遮拦比控制在 1/6 到 1/10 以内。

3.3 两块透镜间距的控制

实际使用时两块透镜会安装在一个镜筒内,这两块透镜的中心距如果过长会给其装调带来较大的困难,从目前装调条件来看,两透镜的中心距应控制在 450 mm 以内为宜.影响两块透镜中心距的主要因素是透镜 1 和透镜 2 的遮拦比之差,因此在初始规化和 Zemax 优化过程中需对这两个参数进行必要控制。

3.4 公差分析

在实际应用时,应预先对所设计的折反射式补偿器进行灵敏度和公差分析,以确定现有加工和装调能力是否能够满足补偿器的公差分配要求.例如对口径为 $\Phi_0=4\ 000\text{ mm}$ 、偏心率平方为 $e^2=1$ 、顶点曲率半径 $r_0=16\ 000\text{ mm}$ 且球差分配系数 $m_{13}=0.2$ 的设计结果进行公差分析,补偿器主要参数允差列表见表 3。

表 3 补偿器主要参数允差
Table 3 Main errors of compensator

Item	Value
$r_1 \pm \Delta r_1$	$2\ 999.028 \pm 2\text{ mm}$
$r_2 \pm \Delta r_2$	$379.167 \pm 0.035\text{ mm}$
$r_3 \pm \Delta r_3$	$1\ 660.005 \pm 0.85\text{ mm}$
$r_4 \pm \Delta r_4$	$1\ 046.632 \pm 0.3\text{ mm}$
$r_5 \pm \Delta r_5$	$22\ 444.670 \pm 10\text{ mm}$
$d_{12} \pm \Delta d_{12}$	$50 \pm 0.005\text{ mm}$
$d_{23} \pm \Delta d_{23}$	$285 \pm 0.005\text{ mm}$
$d_{34} \pm \Delta d_{34}$	$36 \pm 0.005\text{ mm}$
Δn	$1e-6$
Eccentricity of lens	$6''$

表中 Δr_i 表示对应透镜和反射镜曲率半径的允许公差, Δd_{12} 和 Δd_{34} 分别表示透镜 1 和 2 的中心厚度公差, Δd_{23} 表示两透镜间隔的公差, Δn 表示透镜折射率公差.表中所要求的加工和装配误差以现有的加工水平是可以达到的.由于折反射式补偿器相对 Offner 补偿器多出一块球面反射镜,其装调工作会相对复杂一些。

4 结论

折反射式补偿器中透镜和反射镜之间不同的非球面法线像差分配,会导致不同的补偿效果,随着球面反射镜所承担法线像差的增大,其曲率半径逐渐减小,同时补偿器的补偿能力先增大后减小,在 $m_{13}=0.3$ 附近出现极值;球面反射镜不承担法线像差时,其半径为无穷大即退变为平面镜,此时补偿器即退化成 Offner 补偿器;在实际应用时应根据实际情况对初始入射角、中心遮拦比、透镜间距等参数进行预先规化和控制.上述研究结果,对折反射式补偿器设计、应用是非常有用的。

参考文献

- [1] MARTIN H M, ALLEN R G, KIM D W, *et al.* Fabrication and testing of the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope[C]. SPIE, 2010, **7739**: 77390A-1-11.
- [2] MARTIN H M, ALLEN R G, CUERDEN B, *et al.* Manufacture of the second 8.4 m primary mirror for the Large Binocular Telescope [C]. SPIE, 2006, **6273**: 62730C-1-10.
- [3] CAYREL M. Completion of VLT and GEMINI primary mirrors at REOSC[C]. SPIE, 2000, **4003**: 14-23.
- [4] Д. Т. ПУРЯЙЕВ. Optical aspheric test [M]. Yang Li Transl. Beijing: Science Press, 1982, 114-129
Д. Т. 普里亚耶夫. 光学非球面检验[M]. 杨力译. 北京:科学出版社, 1982, 114-1299.
- [5] OFFNER A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. *Applied Optics*, 1963, **2**: 153.
- [6] MOROSI C, FURLANIS, FRANCHINI M, Single-mirror compensator for an aspheric concave mirror (Maksutov' s scheme)[C]. SPIE, 1994, **2199**: 645-650.
- [7] PRUSS C, REICHELT S, TIZIANI H J, *et al.* Computer-generated holograms in interferometric testing [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**: 2534-2540.
- [8] HAO Peiming, Fu Lian-xiao, YUAN Li-yin, *et al.* Compensating test of the reflective mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 831- 835.
郝沛明, 付联效, 袁立银, 等. 反射镜补偿检验[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 831-835.
- [9] WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le. Optofluidic varitocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(6): 718-723.
吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. 发光学报, 2015, **36**(6): 718-723.
- [10] 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.
- [11] YE Lu, ZHANG Jin-ping, ZHENG Lie-hua, *et al.* Design of back null compensator test method of convex aspherical surface[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2015, **44**(4): 0422002.
叶璐, 张金平, 郑列华, 等. 凸非球面向零位补偿检验的设计方法[J]. 光子学报, 2015, **44**(4): 0422002.
- [12] WANG Chun-xia, WU Fan, HOU De-sheng, *et al.* Research on testing the null corrector using the computer-generated hologram[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(5): 592-594.
王春霞, 伍凡, 侯德胜, 等. 计算机产生全息图对补偿器检测的技术研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(5): 592-594.
- [13] WANG Xiao-kun. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, **41**(4): 380-383.
王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 380-383.
- [14] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai, MA Zhen, *et al.* Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing[J]. *Acta Photonic 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.
- [15] DANIEL MALACARA. Optical shop testing[M]. Yang Li, Wu Fan Transl. Beijing: China Machine Press, 2012: 340-347.
D. 马拉卡拉. 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.
- [16] 潘君骥. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京:科学出版社, 2004: 47-51.