文章编号:1002-2082(2012)03-0564-06

极大口径光学望远镜凸非球面副镜 的补偿检测法研究

李 洋^{1,2,3},李新南^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏南京 210042;2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 江苏南京 210042;3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘 要:提出了一种检测大口径、快焦比凸双曲面反射镜的补偿检验方法,补偿系统由一组小透 镜和一块大口径反射标准镜组成,标准镜的口径约为被检验镜的 1.8 倍,该方法为极大口径光 学望远镜凸非球面副镜的检验提供了一种有效的解决方案。以美国 30 m 望远镜(TMT)Φ3.1 m,*F*/1 的凸双曲面副镜为例,进行了补偿光路的设计优化。设计结果表明,该方法可以直接检 测到直径达 3.1 m 的大口径、快焦比凸双曲面副镜的整个表面质量,补偿系统像差被校正得很 好,PV 值约为 λ/100,弥散斑直径在衍射极限范围内。

关键词:补偿检验;大口径;快焦比;凸双曲面镜;补偿器 中图分类号:P111.2;TH706 文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0303007

Null compensator for convex secondary asphere of very large optical telescope

LI Yang^{1,2,3}, LI Xin-nan^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,

CAS, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: A new test for steep convex hyperboloidal secondary mirrors with large aperture and fast focus ratio is presented. It makes use of small correcting lens and an auxiliary ellipsoidal mirror which aperture is about 1.8 times as large as that of the convex mirror tested. This method is sutable for convex secondary asphere of very large aperture optical telescope. Taking TMT as an example whose surface is a convex shape with the diameter of 3.1m, fast focus ratio of F/1 and conic constant of -1. 318 228, a null compensation system is successfully designed and optimized. The design results indicate that the surface quality of the steep convex hyperboloidal secondary mirror could be measured directly, in addition the aberration of the testing system is well corrected, PV is about $\lambda/100$ and the spot diameter is smaller than the diffraction limit. Analyses of the system's wave-front error with respect to the change in the surface parameter of optical elements are described.

Key words: compensation test; large aperture; fast focus ratio; convex hyperboloidal mirror; compensator

收稿日期:2011-04-18; **修回日期:**2011-05-17

作者简介:李洋(1985-),女,吉林磐石人,硕士研究生,主要从事大口径非球面光学检测与光学系统设计。 E-mail:yangli@niaot.ac.cn 引言

天文光学望远镜常常采用全反射形式的两镜 光学系统,其中 Ritchey-Chretien(R-C)系统的应 用十分普遍,因为相对于其他形式的两镜反射系 统而言,R-C系统改善了轴外像差,更重要的是采 用了凸双曲面副镜,镜面被放置在主镜焦点之前, 望远镜镜筒的长度可以大大缩短;这对于降低整 个望远镜机械结构、控制系统、圆顶等方面的造价 具有十分重要的意义[1-2]。困扰凸非球面应用的主 要问题在于其表面质量的评判,必须有足够尺寸 的标准镜面形成一个能够反映其镜面误差的汇聚 波面。目前世界上已经启用的 8 m~10 m 量级的 大型望远镜,副镜的口径一般在1m左右,其加工 过程中的检验已经相当不容易。计划中的下一代 的极大型望远镜通光口径已经达到 30 m 甚至更 大,如美国的 TMT 主镜直径为 30 m,欧洲的 E-ELT 主镜口径为 42 m,它们均采用了凸双曲面镜 形式的副镜,副镜的通光口径达到了3m以上,且 为了顺应主镜的快焦比选择,凸双曲面副镜的相 对口径也非常大,即F/ # 越来越小,这大大增加了 光学制造和检测的难度。

在被检验镜口径很大的情况下,检测用的标 准镜问题将会更加突出。标准镜制作面临的困难 将是多方面的,包括镜坯材料与镜面制作设备等。 就凸非球面常用的检测方法而言,无像差点检测 (Hindle 检验法)中标准镜口径比被检验镜大几 倍^[3];改进的 Hindle 检验法需要比被检验镜略大 的透反镜;全息法则需要与被检验镜口径接近的 全息样板及全息样板的制作设备[4];反射镜补偿 法所需的标准镜口径约为被检验镜的 1.5 倍。以 TMT 望远镜凸双曲面副镜为例:有效口径为 Φ 3.1 m,中心允许遮拦小于 Φ 0.3 m,Hindle 检验 法所需的标准球面镜口径大于 20 m;全息法所需 全息样板的口径必须大于 3.1 m,且需要大口径的 激光直写设备来刻制全息样板。由于目前镜坯最 大尺寸的限度为 8 m,透射形式的大口径标准镜的 表1 椭球面反射镜初始结构计算公式及结果

镜坯材料也不容易获得。权衡上述几种检验方法,反射镜补偿法可操作性相对更强一些。

1 反射镜补偿法检测原理

潘君骅于 1960 年提出了凸面镜的反射镜补偿 法^[5],补偿光路参见图 1。其基本原理是利用辅助 标准镜产生的球差补偿被检验镜的法线像差。图 1 中 M_1 为标准镜,镜面参数为 y_1 、 \mathring{R}_1 、 e_1^2 ; M_2 为被 检验镜,镜面参数为 y_2 、 \mathring{R}_2 、 e_2^2 ; S_0 为被检验镜顶点 曲率中心; S_y 为被检验镜边缘带法线与光轴交点; S 为检验点位置。要达到补偿目的,必须使 S 点发 出的光束经过辅助标准镜反射后,完全沿着被检 验镜的法线方向进行。光束在被检验镜上反射 后,按原来方向回到 S 点。这种情况下,辅助标准 镜的非球面系数满足以下关系^[5]:



图 1 反射镜检测凸非球面光路图

Fig. 1 Convex asphere testing system using a reflector

通过分析补偿方程(1)式可知,当被检验凸面 镜的非球面系数 $e_2^2 > 0$ 且不十分大时,辅助标准 镜 e_1^2 之值总在 $0 \sim 1$ 之间,是一个凹椭球面,原理 上可以利用其一对共轭焦点进行检验,不要额外 的辅助镜^[6-7]。表 1 给出了辅助标准镜参数求解公 式,同时列出了参数为 Φ_3 .1 m, $e_2^2 = -1$.318 228,

 \dot{R}_2 = $6~228~{
m mm}$ 的 TMT 望远镜凸双曲面副镜所需 辅助反射镜的初始结构计算结果。

Table 1	Formula	and	parameters	of	ellipsoidal	mirror

	y_1/mm	Δ/mm	s_0 /mm	$\mathring{R}_1/\mathrm{mm}$	e_1^2
计算公式	ay_2	$-\frac{y_2}{2}$	$\mathring{R}_2(\alpha-1)+\Delta$	$\frac{2\alpha\alpha_0}{s_0+\alpha R_2}\mathring{R}_2$	$(\frac{1}{\alpha}\frac{\dot{R}_{1}}{\dot{R}_{2}})^{3}\frac{e_{2}^{2}}{2\alpha}+(\frac{1}{\alpha}\frac{\dot{R}_{1}}{\dot{R}_{2}}-1)^{2}$
计算结果	2 867.5	-800	4 493.528	6 465.4	0.275 567 17

表中: $\alpha \approx \frac{y_1}{y_2}$,代表辅助标准镜相对于被检镜的大 小,这里取 $\alpha = 1.85$; $\Delta \in S$ 点引出被检验镜的距 离,取 $\Delta = -\frac{y_2}{2}$ 。

由计算结果可知:标准镜为直径 ϕ 为 5.73 m 的椭球面反射镜。由于这种形式的检测光路剩余 像差随被检凸镜相对口径及偏心率的增大而增 大,对于本文焦比为 F/1的被检镜,由一片标准反 射镜补偿后仍然会存在很大的剩余像差,在本例 中,补偿后系统残余波值为 $W_{040} = 3.09 \times 10^4 \lambda$,主 要表现为球差,需要加入另外的光学元件来消除 其影响,本文选择采用小透镜组。

2 补偿器设计方法

我们拟设计的补偿器为 offner 结构,由场镜 和一片补偿透镜组成,将此补偿后的波面成像到 补偿镜上。由小口径补偿透镜和大口径椭球面反 射镜组合后共同产生的球差将被用于抵消被检验 镜的法线像差。根据像差理论,要使组合补偿系 统的像差为零,必须满足:

 $S_{I\Delta} + S_{I\#} + S_{I*} = 0$ (2) 式中: $S_{I\Delta}$ 、 $S_{I\#}$ 、 S_{I*} 分别表示被测凸双曲面副镜球 差系数、椭球面反射镜球差系数和小口径补偿透 镜组球差系数。由(2)式可知补偿透镜组球差系数 $S_{I*} = -1.545 \times 10^{4} \lambda$ 。

设补偿镜的焦距、垂轴放大率和半孔径分别 为 $f_1, m_1, h_1;$ 场镜的焦距、垂轴放大率和半孔径分 别为 $f_2, m_2, h_2, h(3)$ 式、(4)式可求出场镜的焦距 与垂轴放大率^[8]:

$$f_{2}' = \frac{2Rh_{1} + 2h_{1}\dot{l_{2}}}{D + 2h_{1}}$$
(3)

式中:R为椭球面反射镜补偿后汇聚点到椭球面反 射镜的距离,此处R = 4 493 mm;D为椭球面镜 直径。

$$m_2 = \frac{f_2' - l_2'}{f_2'} \tag{4}$$

$$m = m_1 m_2 = -\frac{2A_M}{A_0} \tag{5}$$

式中: $A_M = F/D$,表示非球面相对孔径的倒数; $A_0 = f_2/2h_1$,代表补偿镜会聚角。

$$S_1^{\mathbf{J}} + S_1^{\mathbf{J}} = S_{1\mathbf{A}} \tag{6}$$

$$S_1^{\mathbf{z}} + f_1 P_1 (m_2 - m)^4 / 4$$
 (7)

$$S_1^{t_0} = f_2' P_2 (1 - m_2)^4 / 4 \tag{8}$$

其中: $P_i = (\frac{n_i}{n_i - 1})^2 + \frac{n_i}{n_i(n_i - 1)} \times \left[B_i + \frac{2(n_i^2 - 1)(m_i + 1)}{(n_i + 2)(m_i - 1)}\right]^2 - \frac{n_i(m_i + 1)^2}{(n_i + 2)(m_i - 1)^2}; B_i$ 为透

镜的形状系数。

将(7) 式、(8) 式带入(6) 式可得补偿透镜的焦距:

$$f_{1}^{'} = \frac{S_{III} - f_{2}^{'} P_{2} (1 - m_{2})^{4} / 4}{f_{1}^{'} P_{1} (m_{2} - m)^{4} / 4}$$
(9)

根据(10)式可求出补偿透镜和场镜的曲率 半径:

$$\begin{cases} r_{i1} = \frac{2(n_i - 1)f'_i}{B_i + 1} \\ r_{i2} = \frac{2(n_i - 1)f'_i}{B_i + 1} \end{cases}$$
(10)

3 补偿系统设计结果

根据以上设计方法,本文设计了一个补偿检 测系统,用于检验直径 3.1 m,顶点曲率半径 R= $6\ 227.\ 68\ mm$,焦比 F/1的凸双曲面镜,在实例 中取补偿器半口径,补偿镜和场镜均选用 JGS1 (折射率1.46, 阿贝常数68)玻璃,检验光束波长 0.632 8 μm 进行计算^[9-11]。根据(2)式~(10)式 可计算出补偿镜和场镜的初始结构。将初始结 构用 zemax 光学设计软件进一步优化,通过改变 椭球面反射镜曲率半径和非球面系数、补偿镜、 场镜曲率半径和中心间隔进一步校正系统,优化 后的补偿系统设计结果如表 2 所示;优化后的补 偿检验系统光路如图 2 所示。图 3~图 5 分别给 出了补偿检验系统的点列图(圆圈表示艾里斑大 小)、球差曲线、波像差图。由图 3 可以看出,检 测系统的弥散斑直径约为 0.4 µm,小于艾里斑直 径;图4显示了系统高级球差得到了很好的校 正,各孔径带球差值在0.07 mm以下;图 5 给出 了系统的波像差, P-V值约为 $\lambda/100$ 。

Table 2parameters of compensation system						
项目	平面镜	补偿透镜 1	补偿透镜 2	椭球面反射镜	凸双曲面副镜	
与前一个面间隔 /mm	3 200	150	30	4 646.222	5 446.222	
口径/mm	270 526	98.474	75.063	5 708	3 100	
	276.320	98.065	71.474			
(顶点)曲率半径 /mm		532.38	171.24	C EOC 99	6 227 60	
		-234.69	-545.88	0 500.88	0 227.08	
材料		JGS1	JGS1			
旋转角度/°	45					
非球面系数				-0.330301	-1.318228	

表 2 补偿系统结构参数



面镜

凸双曲面次镜 图 2 补偿系统光路图



MILETARIA SUBJECT AND SUBJECT

图 5 波像差 Fig. 5 Wavefront map

由像质评价图可见,设计的补偿检验系统完 全达到衍射极限,具有很高的检测精度,光线完全 自准回来,在光源处放置刀口仪或干涉仪便可对 此 TMT 凸双曲面副镜进行检测。

4 精度分析

补偿器各元件参数的加工与检测等测量误差 以及透镜材料的折射率测量误差、均匀性的影响 必然会对检测系统产生影响,对检验结果的影响 也各不相同。透镜材料均匀性及折射率测量误差 的影响,根据实测值,均可通过调整各镜面间距消 除。文章下面主要对补偿器加工测量误差进行精 度分析。表 3、表 4 分别给出了椭球面反射镜(曲 率半径及非球面系数)和补偿透镜自身参数(曲率 半径及两透镜间距离)的变化对被检测凸双曲面 镜的影响。其中 ΔR_{*} 和 ΔK_{*} 分别表示被检验凸 双曲面镜顶点曲率半径和非球面系数的变化量; ΔR_{a} 和 ΔK_{a} 分别表示椭球面反射镜顶点曲率半 径和非球面系数的变化量;△d₁表示场镜和椭球面 反射镜之间的距离变化量; Δd_2 表示被检凸双曲面 镜和椭球面反射镜间的距离变化量;Δd₁₂表示补偿 透镜和场镜之间的距离变化量。

表 3 椭球面反射镜参数变化对被检测凸双曲面镜和各镜 面间隔的影响

Table 3 Effect ellipsoidal mirror parameters on convex hyperboloidal secondary mirror and distance

		AD /mm	$\wedge K$	Δd_1	Δd_2
		$\Delta \kappa_{\#} / \mathrm{mm}$	$\Delta \Lambda_{\pm}$	$/\mathrm{mm}$	$/\mathrm{mm}$
$\Delta R_{\rm K}$ 4	<mark>每增加</mark> 1mm	0.278	1.15×10^{-4}	0.633	1.921
$\Delta K_{\rm kc}$	$+5 \times 10^{-4}$	-5.839	3.979×10^{-3}	1.239	1.243
	-5×10^{-4}	5.851	3.979×10^{-3}	2.471	2.471

表 4 补偿透镜曲率半径及间隔的变化对被检测凸双曲面 镜及各镜面间隔的影响

 Table 4
 Effect of variation of lens parameters on convex

	hyperboloidal secondary mirror and distance					
		$\Delta R_{\#}/\mu \mathrm{m}$	$\Delta K_{\#}$	$\Delta d_1/\mu{ m m}$	$\Delta d_2/\mu{ m m}$	
$\Delta R_{11}/\mu m$	18	21.778	3×10^{-6}	5.72	35.144	
	18	-21.458	3×10^{-6}	0.803	40	
$\Delta R_{12}/\mu { m m}$	+0.2	2.816	0	2.481	4.988	
	-0.2	-1.494	0	2.729	3.36	
$\Delta R_{21}/\mu { m m}$	+2.8	-3.342	6×10^{-6}	11.599	54.947	
	-2.8	3.187	6×10^{-6}	6.665	59.955	
$\Delta R_{22}/\mu{ m m}$	36.4	102.89	4.5×10 ⁻⁵	5.963	75.2	
	-36.4 -	-103.01	4.5×10 ⁻⁵	1.02	70.209	
$\Delta R_{12}/\mu { m m}$	+0.01	163.8	5. 1×10^{-5}	2.15	174.32	
	-0.01	163.4	5. 1×10^{-5}	2.37	179.43	

由表 3 可以看出,椭球面反射镜顶点曲率半径 每变化 1 mm 对被检凸双曲面镜顶点曲率半径和 非球面系数的影响均不是很大; 椭球面反射镜非 球面系数变化 5×10^{-4} ,对被检凸双曲面镜顶点曲 率半径和非球面系数的影响较大;由表 4 可以看出 透镜曲率半径的变化量(N=1)对被检测凸双曲面 镜顶点曲率半径影响较小,在微米量级,其均方根 值约为 105.242 μ m;且其对被检凸双曲面镜非球 面系数的影响的均方根值约为 6.8×10^{-5} ;补偿透 镜和场镜距离变化为 0.01 mm,对被检凸双曲面 镜顶点曲率半径及非球面系数的影响也在允许误 差范围内。

5 结论

本文设计了焦比 *F*/1,有效口径 3.1 m 的 TMT 凸双曲面副镜的补偿检验系统,并对检测系 统进行了精度分析。从设计结果可以看出,系统 被很好地校正,完全达到衍射极限,这说明补偿系 统采用小口径透镜组和大口径反射镜检测大口 径、快焦比的凸双曲面反射镜是一种有效的方法。 参考文献:

[1] 侯溪,伍凡.大型双曲面次镜面形检测技术现状及发 展趋势[J].中国光学与应用光学,2010,3(4):310-315.

HOU Xi, WU Fan. Status and trends of surface measurement technologies for large hyperboloidal secondary mirrors [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics,2010,3(4):310-315. (in Chinese with an English abstract)

- [2] SMITH W S, JONES G W. Comparison of metrology methods for large astronomical secondary mirrors
 [J]. SPIE, 1994,2263:243-252.
- [3] 曾晶,李新南.大口径快焦比凸双曲面拼接检测方法 研究[J].天文研究与技术,2009,6(2):154-157.
 ZENG Jing, LI Xin-nan. Study of the tests of large aperture and fast focal ratio convex hyperboloid mirrors with a stitching method [J]. Astronomical Research& Technology,2009,6(2):154-157. (in Chinese with an English abstract)
- [4] BURGE J H, SU P, ZHAO C. Optical metrology for very large convex aspheres [J]. SPIE, 2008, 7018:1-12.
- [5] 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.

PAN Jun-hua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [D]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)

 [6] 王欣,潘君骅. 2.4 米天文望远镜光学系统的设计及 副镜检验的几种可能方案[J]. 云南天文台台刊, 2002, 2(2):41-47.
 WANG Xin, PAN Jun-hua. Optic system design of a

2. 4m class telescope and several methods for testing the secondary mirror [J]. Publications of Yunnan Observatory, 2002,2(2):41-47. (in Chinese with an English abstract)

- [7] 伍凡. 非球面零检验的镜式补偿器设计[J]. 应用光 学,1994,17(4):12-15.
 WU Fan. Design of mirror compensator for asphere null check [J]. Journal of Applied Optic, 1994,17
 - (4):12-15. (in Chinese with an English abstract)

 [8] 伍凡. 非球面零检验的 offner 补偿器设计[J]. 应用 光学,1993,16(3):8-11.
 WU Fan. Design of reflective offner compensator for

null testing of aspherical surface [J]. Journal of Applied Optic, 1993,16(3):8-11. (in Chinese with an English abstract)

[9] MALACARA D. Optical shop testing-3rd ed. [M].

Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 355-358.

- [10] 张以谟. 应用光学 [M]. 北京:机械工业出版 社,1987.
 ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [11] 胡明勇,刘文清,张权,等. 超大相对孔径抛物面反

射镜的补偿检验[J]. 量子电子学报,2006,23(2): 156-158.

HU Ming-yong, LIU Wen-qing, ZHANG Quan, et al. Testing of paraboloid mirror with super relative aperture using compensator [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006,23(2):156-158. (in Chinese with an English abstract)