

文章编号: 1003-501X(2010)04-0083-05

# TMC 系统主镜的平板补偿自准检验方法

钟 兴<sup>1</sup>, 刘春雨<sup>1,2</sup>, 金 光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 针对 TMC(三镜卡塞格林)光学系统凹椭球面主镜的检验, 本文提出了一种平板补偿的自准检验方法。该方法克服了 OFFENER 零位补偿器本身性能难以检验, 只能靠加工和装调保证精度的问题。针对 TMC 主镜面形与抛物面接近的特点, 对平板补偿的自准检验方案进行了理论分析, 利用二次非球面的法线像差性质推导了检验光路中球差的表达式, 并利用最小剩余球差进行补偿平板参数的确定。对某 TMC 系统顶点曲率 1589 mm, 二次系数-0.983, 口径  $\Phi 500$  mm 的主镜检验, 设计了尺寸仅为  $\Phi 34.2$  mm $\times$ 9.126 5 mm 的补偿平板。在 ZEMAX 中计算的结果表明, 经平板补偿后的检验光路波像差 RMS 值为  $0.003\lambda$ , 可满足 TMC 主镜的高精度检验要求。对补偿平板的检验方法, 以及加工和使用中应当采取的措施也进行了考虑。与常用检验方法相比, 本文方法具有容易对平板性能进行检验, 成本低、研制周期短等优点。

**关键词:** TMC 系统; 凹椭球面镜; 平板补偿; 自准检验

中图分类号: TH74

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.04.016

## Slab Compensated Auto-collimation Method to Test Primary Mirror of TMC System

ZHONG Xing<sup>1</sup>, LIU Chun-yu<sup>1,2</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** For testing the concave ellipsoidal mirror of Three Mirror Cassegrain (TMC) optical system, a slab compensated auto-collimation method is suggested. This method can avoid the problem that the performance of null compensator is hard to be evaluated, and the development of null compensator cost too much. Taking advantage of the shape of TMC system's primary mirror near to parabolic, slab compensated auto-collimation method is analyzed to test it. Expression of spherical aberration in testing optical system is deduced by conic aspheric normal character, and the parameters of compensated slab are given by solving minimal residual spherical aberration. For test of some actual  $\Phi 500$  mm mirror which has 1589 mm vertex radius and -0.983 conic coefficient, a slab compensator with only size  $\Phi 34.2$  mm $\times$ 9.126 5 mm is designed. The wavefront aberration of test optics compensated by slab is only  $0.003\lambda$ , matching the demand of precise test. The test, manufacture and use of the slab are also considered. The slab compensated auto-collimation method is obviously low-cost, and it is easy to evaluate the performance of the slab.

**Key words:** TMC system; concave ellipsoidal mirror; slab compensator; auto-collimation test

## 0 引言

TMC 系统可在较短的光学筒长内做到长焦距, 因此近年来广泛地应用于小卫星空间相机的设计中。例如美国商业遥感卫星 IKONOS, 火星探测器高分辨相机 HIRISE, 意法联合研制的号称“下一代极限性能

收稿日期: 2009-11-09; 收到修改稿日期: 2009-12-24

基金项目: 国家 863 高技术项目

作者简介: 钟兴(1982-), 男(汉族), 四川自贡人。助理研究员, 博士, 主要研究工作是光学系统设计与检测。E-mail: ciomper@163.com。

小卫星” Pleiades 等都使用了此类系统<sup>[1-2]</sup>。TMC 系统的主镜、次镜和三镜均为二次曲面,在光学设计软件中,二次曲面面形描述一般采用直角坐标系,表达式如下:

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

其中:  $c$  为曲率(顶点半径  $R_0$  的倒数),  $z$  为矢高,  $y$  为径向坐标,  $K$  为二次系数,  $K = -e^2$ 。

根据对某 TMC 系统进行设计得到的结果,主镜的通光口径为  $\Phi 500$  mm,顶点曲率半径为 1589 mm,二次系数  $K = -0.983$ 。从类型来看,该 TMC 系统的主镜属于凹椭球面<sup>[3]</sup>。对于凹椭球面,通常采用 OFFENER 零位补偿器进行检验。一般而言,补偿器由 2~3 片 K9 玻璃透镜组成,如图 1 所示。由于对零位补偿器进行性能检验比较麻烦(需使用金刚石车削非球面镜或者 CGH 等),目前只能靠选用好的材料和提高加工装调环节要求来控制其精度,因此零位补偿器不仅误差环节较多,且研制周期较长,费用高<sup>[4-7]</sup>。

本文通过研究,利用平面反射镜和标准透射平板设计了 TMC 主镜的自准检验方案,并给出了误差环节分析的结果以及平板的检验考虑,表明此方案满足面形  $\lambda/40$ (RMS 值),二次系数精度优于  $1 \times 10^{-5}$  的主镜检验要求。与补偿器方案相比,自准检验光路虽然需要一块与主镜至少同等口径的平面镜,但由于这样的平面镜属于经常用到的通用设备。因此,自准检验方法可以大大节省周期和成本。

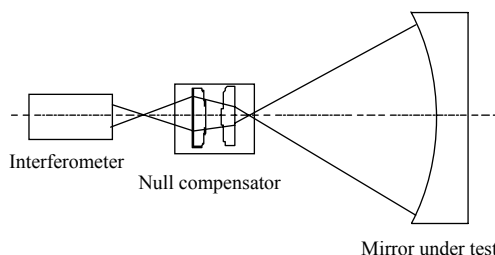


图1 凹椭球面的零位检验光路

Fig.1 Null test of concave ellipsoidal mirror

## 1 理论分析

通过非球面的光学性质可以知道,平行入射光经过抛物面镜反射后在其焦点形成完善像点,因此对抛物面反射镜可以用平面反射镜自准的方法进行检测。

分析准直光经 TMC 主镜反射如图 2 所示,与光轴平行的准直光线入射到镜面一点  $P(x, y)$ ,镜面法线  $PC$  与光轴夹角为  $\varphi$ ,反射光线  $PF$  与光轴夹角为  $\theta$ ,反射光线与光轴交于点  $F$ 。

根据图中几何关系,容易得到:

$$\theta = 2\varphi \quad (2)$$

由非球面的法线像差性质<sup>[8]</sup>,有:

$$\overline{OC_y} - x = R_0 - (1 - e^2)x \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{y}{R_0 - (1 - e^2)x} \quad (4)$$

根据式(2)、(3)和(4),可以得到 TMC 主镜的球差为

$$\delta L'_1 = z - \frac{y}{\tan(\pi - 2\varphi)} - \frac{R_0}{2} \quad (5)$$

TMC 主镜的球差曲线如图 3 所示,从曲线可以看出,主镜高口径的反射光线与光轴的交点有靠近坐标零点的趋势(即负球差),而检测光路要求球差为零。因此,需要在光路中引入补偿元件。会聚光路中的玻璃平板可产生正球差,正好可以用来补偿 TMC 主镜的负球差,即

$$\delta L = \delta L'_1 + \delta L'_2 = 0$$

在 TMC 反射光路中,加入平板玻璃如图 4 所示,在 TMC 主镜上坐标  $y$  点光线对应平板上的  $y_H$ ,有:

$$y_H = y + (p - z) \cdot \tan(\pi - \theta) \quad (6)$$

由平板玻璃的光学性质

$$\theta' = \theta / n \quad (7)$$

$$y'_H = y_H - d \tan \theta' \quad (8)$$

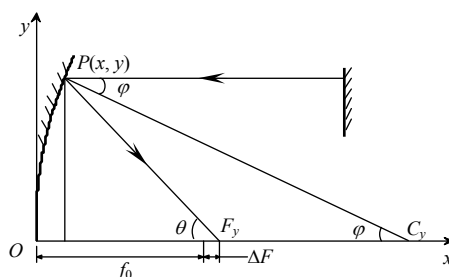


图2 TMC 主镜对准直光的反射

Fig.2 Reflection of collimated light on primary mirror

容易推得经平板补偿后残余球差的表达式为

$$\delta L(d,s)=s-\frac{y-d\cdot\tan(2\varphi/n)+(p-z)\cdot\tan(\pi-2\varphi)}{\tan(2\varphi)}$$

(9)

其中： $d$  为补偿平板的厚度， $s$  为像点与平板距离， $p$  为待检镜面与平板的距离， $n$  为折射率，对 K9 玻璃  $n=1.516374(587.6\text{ nm 时})$ 。

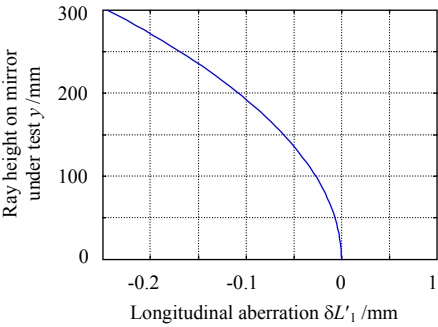


图 3 TMC 主镜的球差曲线

Fig.3 Spherical aberration of primary mirror

$p$  值主要决定补偿平板的放置位置和口径，本文主镜的焦距为  $1589/2=794.5\text{ mm}$ ，选取平板距待检镜  $740\text{ mm}$  (即  $p=740$ ) 的情况进行研究。

球差曲线  $\delta L$  与主镜的径向坐标有关，引入评价因子

$$\Delta=\max|\delta L|$$

(10)

对球差的抵消程度进行描述。 $\Delta$  越小，代表剩余球差越小。

通过寻找  $\Delta$  的最小值，对补偿平板的最佳厚度和像点距离进行求解，得到  $d=9.1265$ ， $s=48.4817$ ， $\Delta=3.3369\times10^{-4}$ 。平板的厚度为  $9.1265\text{ mm}$ ，通光口径  $\Phi 42.6\text{ mm}$ ，剩余球差曲线如图 5 所示。

2 检验光路的波像差

将上节计算得到的参数代入到光学软件 ZEMAX 中对检验光路的波像差进行考察，设计平板补偿自准法检验 TMC 主镜的光路，如图 6 所示，检验光路由待检镜、平面反射镜和补偿平板组成。实际使用时，像点与干涉仪焦点重合，构成类似抛物面检验的自准光路，只是在光路中多了一片起到补偿作用的双通过平板。

在 ZEMAX 中输入的数据如表 1 所示(值得注意的是，本设计实例 K9 折射率使用的是 d 光数据，实际干涉检验应用中，应使用实际材料在 He-Ne 激光器波长  $632.8\text{ nm}$  处的折射率测量结果，并精确到  $3\times10^{-6}$ )。

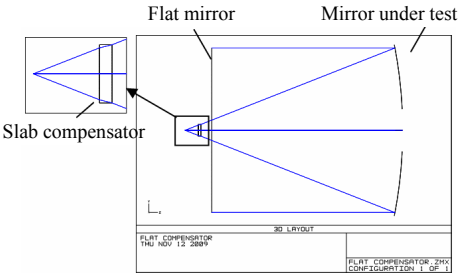


图 6 平板补偿自准法检验 TMC 主镜的光路

Fig.6 Slab compensated auto-collimation test of primary mirror of TMC system

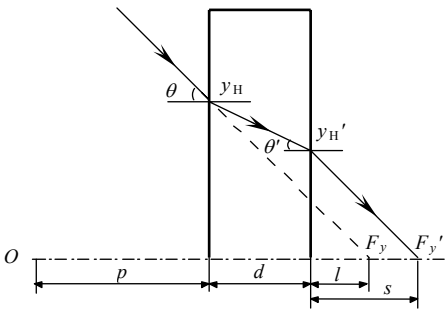


图 4 在 TMC 主镜反射光路中的平板分析

Fig.4 Analysis of slab in primary mirror's reflected light

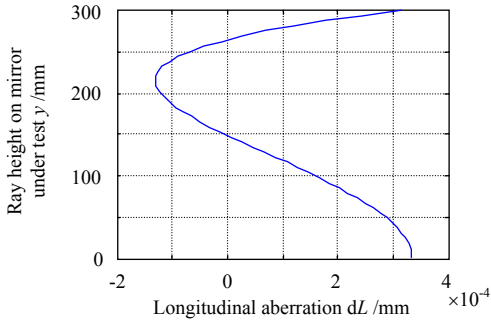


图 5 平板补偿后的剩余球差曲线

Fig.5 Residual spherical aberration compensated by slab

表 1 ZEMAX 中光路设计数据

Table 1 Design data in ZEMAX

Radius	Thickness	Glass	Conic
Infinity	48.481 7		
Infinity	9.126 5	K9	
Infinity	740		
-158 9	-700	Mirror	-0.983
Infinity	700	Mirror	
-158 9	-740	Mirror	-0.983
Infinity	-9.126 5	K9	
Infinity	-48.481 7		

检验光路设计得到干涉图如图 7 所示,波像差如图 8 所示,系统的波像差 PV 值为  $0.0085\lambda$ ,RMS 值为  $0.003\lambda$ 。

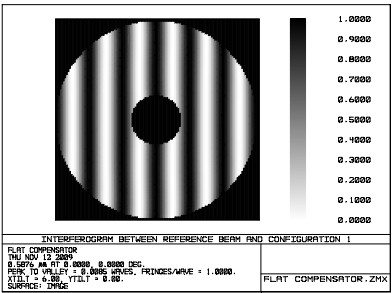


图 7 检验光路干涉图

Fig.7 Interferogram of test optics

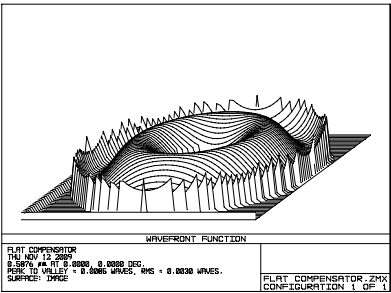


图 8 检验光路波像差图

Fig.8 Wavefront of test optics

3 误差分析

TMC 系统的主镜是作为系统的入瞳,其面形误差将全部进入到像面,成为系统的波像差<sup>[9]</sup>。因此,主镜的检验精度要求较高,其面形误差要求优于  $\lambda/40$ (RMS 值),因此,根据经验,平板在检验光路中引入的波像差至少应优于  $\lambda/120$ (RMS 值),具体检验方法见下节。

此外,TMC 系统主镜二次系数  $K$  的误差要求小于  $4\times10^{-4}$ 。本文方案中影响二次系数  $K$  检测精度的环节如表 2 所示。

表 2 二次系数检测误差分析  
Table 2 Error analysis of conic coefficient test

No.	Parameter	Tolerance /mm	$\Delta K$
1	Distance from focus	$\pm 0.1$	$2\times10^{-6}$
2	Slab's thickness	$\pm 0.001$	$2\times10^{-6}$
3	Tested mirror's distance	$\pm 0.5$	$1\times10^{-5}$

因此, $K$  值测量误差  $\Delta K = \sqrt{\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2} \approx 1\times10^{-5}$ ,满足检验使用要求。

4 补偿平板的检验

补偿平板的检验需要在安装在夹持件之后进行,避免夹持应力引起变形。在恒温室中,利用 ZYGO 干涉仪和标准平面对双通过光路中的平板进行性能检验,检验设置如图 9 所示。

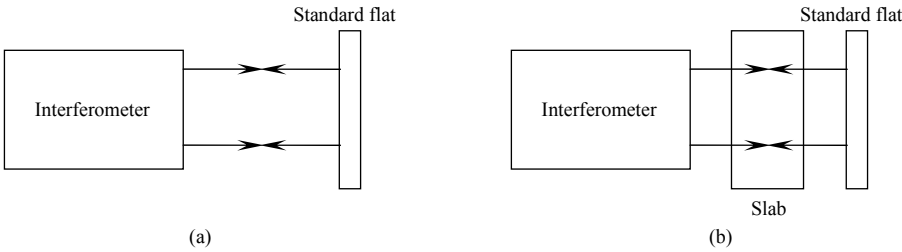


图 9 平板性能检验的光路设置  
Fig.9 Test set-up of slab performance

图 9(a)设置得到的检测结果为  $W_1$ ,图 9(b)设置得到的检测结果为  $W_2$ 。双通过光路中的平板引入的波像差  $W_{\text{flat}}$  可由下式得到:

$$W_{\text{flat}} = W_2 - W_1 \tag{11}$$

ZYGO 干涉仪提供了系统误差去除功能,可将  $W_1$  存为 SysErr.dat 文件,由干涉仪软件完成波面相减操

作, 对测试结果分析时应包括除相位因子外的所有项。

在平板的实际加工和使用中, 可采取的措施和应注意的事项有: 1) 适当增大加工口径以保证中心通光区域的面形; 2) 为了在平板修等光程的同时放宽厚度公差, 加工完成后使用千分表精测平板厚度至  $1\ \mu\text{m}$ , 根据精测结果, 在光学软件中复算空气间隔的调整量; 3) 实际使用中, 环境温度要求与检验时温度相同。

## 5 结 论

本文 TMC 系统主镜自准检验方案所用的平板补偿器尺寸仅为  $\phi 34.2\ \text{mm} \times 9.1265\ \text{mm}$ , 因此其玻璃材料的光学均匀性、气泡度和条纹度等均可以得到较好的保证。玻璃平板加工工艺简单, 修等光程精度高, 并且可使用干涉仪进行定量检验, 克服了零位补偿器的性能检验问题。与零位补偿器检测方案相比, 可减少误差环节, 并缩短研制周期, 降低成本。在 TMC 系统主镜的非球面检验中, 具有较高的应用价值。

### 参考文献:

- [1] ZYREK R. Mars exploration strategy: follow the water [C/OL]. Keynote Presentation, 24th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, Feb, 2001. [http://marsoweb.nas.nasa.gov/HIRISE/papers/other/gallagher\\_SPIE\\_2005.pdf](http://marsoweb.nas.nasa.gov/HIRISE/papers/other/gallagher_SPIE_2005.pdf).
- [2] Kubik Philippe, Pascal Véronique, Latry Christophe, *et al.* Pleiades image quality: from users' needs to products definition [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2005, **5978**: 188-198.
- [3] Lampton M, Sholl M. Comparison of on-axis three mirror anastigmatic telescopes [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2007, **6687**: 1-8.
- [4] Mallik Proteep C V, Zehnder Rene, Burge James H. Absolute calibration of null correctors using dual computer-generated holograms [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2007, **6721**: 1-16.
- [5] Zehnder Rene, Burge James H, Zhao Chunyu. Use of computer generated holograms for alignment of complex null correctors [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2006, **6273**: 1-8.
- [6] 郭培基, 余景池. 用校正法提高补偿器检测法的精度[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(2): 202-206.  
GUO Pei-ji, YU Jing-chi. Improving precision of null lens method with correction technique [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(2): 202-206.
- [7] 郭培基, 余景池. 设计非球面检测用补偿器应注意的几个问题[J]. 光学技术, 2006, **32**(1): 118-120.  
GUO Pei-ji, YU Jing-chi. Some problems about compensator designing [J]. **Optical technique**, 2006, **32**(1): 118-120.
- [8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1994.  
PAN Jun-hua. **Design, Machining and Testing of Optical Aspheric Surface** [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1994.
- [9] 钟兴, 金光, 王栋, 等. 共轴 TMA 反射镜面形不规则对波前误差的影响[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(8): 1516-1520.  
ZHONG Xing, JIN Guang, WANG Dong, *et al.* Influence of surface irregularity of on-axis TMA mirror on wave-front error [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(8): 1516-1520.