

文章编号:1004-4213(2011)03-0419-5

一种检测大口径光学系统中透射镜组的新方法

明名,王建立,马佩立

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:分析了常规透射镜组检测方法的缺点,在添加简单的辅助元件情况下,提出了一种新的检测透射镜组装调完成后整体组件的方法,从而解决了大口径光学系统应用中透射镜组的 optical 质量检测问题.分别以两个实际光学系统为例,给出了透射镜组的设计和准确度要求.随后利用该方法对实际系统中装调完成后的透射镜组进行检测,并将分析结果和实际检测结果进行比较,得出该方法的检测准确度优于 0.01λ ,证明了该检测方法的可靠性和正确性.最后用检测结果指导装调,使得透射镜组的最终装调完成后的质量满足了要求.

关键词:透射镜组;光学检测;非球面;泽尼克多项式

中图分类号:TH75

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114003.0419

0 引言

现代的天文光学系统中,系统的通光口径越来越大,大口径非球面反射镜的应用也越来越多,这些都导致了透射镜组的普遍应用.首先,当前国内外大口径非球面反射镜面形准确度的检测方法中,最广泛应用的方法是补偿器法^[1-2],而该检测方法中最关键的部分就是透射镜组.代表国外最高光学加工水平的法国 REOSC 光学加工中心,对欧南台的 8 m 极大型望远镜(Very Large Telescope, VLT)主反射镜的面形准确度的检测,就是采用补偿器法^[3],利用透射镜组作为非球面主反射镜的补偿器.在国内,中科院长春光机所加工的 1.3 m 非球面反射镜,同样使用透射镜组作为补偿器来检测其面形准确度^[4].

其次,通光口径在 $\Phi 900$ mm 级以上的光学系统几乎全部采用反射式系统,如卡塞格林式、格利高里式等^[5].但当光学系统需要具有多功能性,如大视场、高分辨率、宽光谱等特性时,纯反射式系统校正像差的变数少,无法满足要求.因此加入透射镜组来校正相应的像差,被普遍应用于大口径的光学系统中.国外的 4.1 m 可见光和红外监视天文望远镜(Visible and Infrared Survey Telescope of Astronomy, VISTA)光学系统^[6],4.2 m 发现频道望远镜(Discovery Channel Telescope, DCT)光学

系统都采用将透射镜组放置在次镜与第一像面之间的方法^[7],来消除大视场等要求带来的像差.

本文首先介绍了透射镜组在光学系统中所发挥的作用,然后以两个实际的光学系统为例,针对透射镜组装调完成后整体组件不能直接检测的缺点,提出了一种新的检测方法来检测最后整体镜组的质量,以验证各元件的装调对准误差是否满足要求.随后对使用该方法检测透射镜组的过程进行了详细描述,最后将实际检测结果与设计和分析结果进行了比较,得出了相应的结论.

1 典型应用

透射镜组重要而广泛的应用主要有两种:一种是作为补偿器检测大口径非球面反射镜的面形误差,一种是用在大口径反射光学系统中校正像差.

透射镜组作为非球面反射镜检测过程中的补偿器光路图.在图 1 中,由两个小口径球面透镜组成的透射镜组作为补偿器^[8],将入射的球面波前补偿为被测镜的理想非球面波前.这样光束经过被测镜反

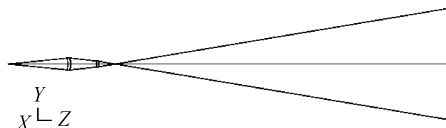


图 1 1 m 非球面反射镜检测的补偿器
Fig. 1 The compensator of 1 m aspheric mirror test

基金项目:中国科学院三期创新基金(No. O65X32C060)资助

第一作者:明名(1983-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为光学系统设计检测和装调. Email:mingm1118@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-08-13;修回日期:2010-11-19

射后原路返回,经补偿器后再次变为球面波,从而与参考球面波相干涉,得到系统的面形误差信息.

图2是透射镜组作为反射光学系统中的校正镜部分校正像差的光路图.整个系统只有一片非球面反射镜,由四片透射镜组构成校正像差的主要部分,来消除系统残余的彗差、像散、色差和畸变.

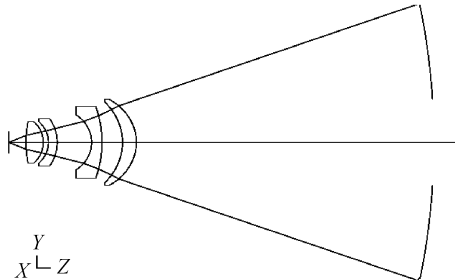


图2 $\Phi 900$ mm 大视场光学系统

Fig. 2 $\Phi 900$ mm optical system of wide field of view

在这两种应用中,透射镜组都是关键的组成部分,因此要求其光学元件加工、装调对准都具有很高的准确度.对这两种重要的应用中的透射镜组,每一步对指标要求的检测都具有重要意义,都是必要而严格的.

2 检测方法

2.1 当前检测现状

本文给出了两个实际系统的例子,分别是口径为 $\Phi 1$ m 非球面反射镜的面形误差检测系统和口径为 $\Phi 900$ mm 的大视场光学系统.

对这样的实际光学系统来说,最后的可调整量只有元件之间的轴向距离,其它各项具有不可调节性.因此,由透射镜组构成的补偿器必须完全按照公差要求来加工和装调对准.这就要求对加工、装调对准完成后各项公差的检测必须精确.当前采取的方法是首先对加工完成后的各光学元件的加工误差进行单独的检测,然后将检测完成后的各个元件在定心仪上对准装调成为一个整体组件,并测量其中一些能够检测的装调误差,满足要求后投入使用.

对透射镜组加工、检测、装调对准的模式,存在着一个缺点:即对最后对准装调完成后的整体组件无法得到定量的检测结果,导致对使用时的整体透射镜组件质量缺乏定量的了解,使得出现问题后查找原因的过程变得困难.

2.2 新的检测方法

针对于透射镜组对准装调完成后的整体组件质量无法定量评价的问题,本文提出了一种新的检测方法,能够对透射镜组装调完成后的整体组件质量的进行定量检测.

2.2.1 $\Phi 1$ m 非球面反射镜检测

该实际系统是为了检测通光口径为 1 m 非球面反射镜的面形准确度.该系统的光路形式如图1,由两个小口径透镜组成补偿器.

表1是 $\Phi 1$ m 非球面反射镜面形误差检测的实际准确度要求.

表1 1 m 非球面反射镜面形误差检测准确度要求

Table 1 Accuracy of 1m aspheric mirror figure error testing

Surface kind	Hyperbolic
Conic constant	-1.135
Figure error	$< \lambda/30$ (rms, $\lambda = 632.8$ nm)
System wavefront	$< \lambda/70$ (rms, $\lambda = 632.8$ nm)

可以看出,被测非球面反射镜的面形误差 (rms) 小于 $\lambda/30$,除去被测镜的面形误差,补偿器检测光路实际装调对准完成后的波像差 (rms) 小于 $\lambda/70$,对被测镜的面形误差检测几乎没有影响.

根据系统的准确度要求,必须在设计中得出补偿器的加工和装调对准的公差.在表2中,没有包括透射镜组的玻璃材料的性能公差,因为这些参量是在设计前需要实测的,从而按照材料的实测参量进行设计.其中前四项为光学元件加工公差,后两项为装调对准公差.

表2 补偿器的公差要求

Table 2 Tolerance of compensator

Tolerance	Range
Radius	± 0.01 mm
Thickness	± 0.02 mm
Figure error	$< \lambda/100$ (rms, $\lambda = 632.8$ nm)
Tilt of manufacture	$\pm 10''$
Tilt of alignment	$\pm 10''$
Decent of alignment	± 0.01 mm
Distance between lens	± 0.01 mm

为了对装调对准完成后的整体组件质量进行定量检测,以验证装调对准结果的准确性,本文提出了一种新的辅助检测方法,以波像差作为评价标准.

在图3中, L_1 和 L_2 是装调对准完成后的透射镜组,即补偿器.由干涉仪发出的无像差光束,经补偿器之后入射到一个标准球面反射镜上,经反射后其光束原路返回,并与干涉仪出口处的参考光束发生干涉.由于该检测方法中用到的标准球面反射镜面形已知,因此可以很容易的得到装调对准完成后



图3 补偿器整体组件的检测

Fig. 3 The test of compensator group

补偿器组件质量的定量数据,从而确定其是否满足最初的设计要求,能否作为检具投入使用。

在该系统中,检测光路的设计波像差(rms)为 0.007λ 。这种检测方法,所需辅助元件为一片凹面球面反射镜。在 $\Phi 1\text{ m}$ 非球面反射镜的实际检测系统中,该标准球面反射镜通光口径为 $\Phi 20\text{ mm}$,面形误差为 $\lambda/100$,对于小口径球面凹面反射镜来说,加工和检测都简单而方便。

该方法虽然只是检测透射镜组整体组件的局部口径,但是由于各元件之间的装调误差对局部口径的影响也能直接通过数据反映出来,能够与此建立一一对应的关系。因此,这种检测整体组件的局部口径的方法是正确的,这降低了设计和实际检测的难度,能得到同样精确的结果。

表3是该检测光路的结构参量,其中 R_1 、 R_2 分别为各透镜的前后表面曲率半径, D 为透镜的通光口径, d 为透镜的中心厚度。所有参量都是元件加工完成后的实测参量。

表3 补偿器整体组件检测光路参量

Element number	R_1/mm	R_2/mm	D/mm	d/mm
L ₁	-610.63	-88.38	82	20.02
L ₂	291.11	-427.5	42	13.04
SPHERE	1000	∞	20	/

2.2.2 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统

$\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统是一个目标探测系统,包括一片非球面主反射镜,四片透镜构成的校正镜组。该系统的光路形式如图2,其中第一片透镜 L_1 的凹面为椭球面,剩余表面均为球面。

表4是 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统的实际技术指标要求。

表4 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统的参量要求

System type	Catadioptric
Field of view	3.6°
Focal length	1 100 mm
Spot size	$\leq 20\ \mu\text{m}$

该系统的准确度要求不如非球面镜检测光路的高,但是其透射镜组中有一片为非球面。

在该光学系统中,由4片透射镜构成的校正镜组的主要作用是校正大视场带来的彗差、像散和畸变,以及大相对孔径带来的球差。和2.2.1节中作为检具的补偿器相比,该校正镜组的加工和装调对准准确度要求明显降低了。

在表5中,同样不包括透射镜组的玻璃材料性能公差。其中前四项为光学元件加工公差,后两项为装调对准公差。相比于其它项,校正镜组各元件的加

工倾斜和装调倾斜变化最少,因为在这样的大视场下,元件之间的倾斜,尤其是非球面镜的偏心和倾斜会带来很大的彗差,有时甚至会带来一部分像散。

表5 校正镜组的公差要求

Tolerance	Range
Radius	$\pm 0.05\text{ mm}$
Thickness	$\pm 0.05\text{ mm}$
Figure error	$< \lambda/30$ (rms, $\lambda=632.8\text{ nm}$)
Tilt of manufacture	$\pm 20''$
Tilt of alignment	$\pm 20''$
Decenter of alignment	$\pm 0.05\text{ mm}$
Distance between lens	$\pm 0.05\text{ mm}$

同样采用2.2.1节中提出的检测方法对装调对准完成后的整体校正镜组的质量进行定量检测。在这之前,各个元件单独的检测已经完成了,这样能够根据各元件的实际加工参量来设计整体组件的检测光路。

在图4中,对装调完成后校正镜组整体组件的检测原理和上节是一样的,利用一片辅助标准球面反射镜来实现。在不考虑透射镜组中各元件之间的装调公差时,该校正镜组检测光路的设计波像差(rms)为 0.005λ ,完全能够满足检测要求。

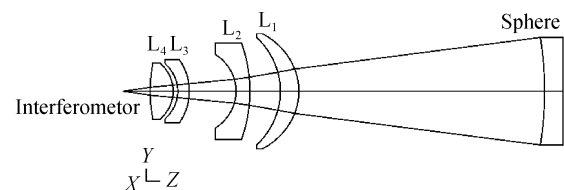


图4 校正镜整体组件的检测

Fig. 4 The test of corrector group

表6是该检测光路的结构参量,其中 R_1 、 R_2 分别为各透镜的前后表面曲率半径, D 为透镜的通光口径, d 为透镜的中心厚度。所有参量都是元件加工完成后的实测参量。

表6 校正镜组整体组件检测光路参量

Element number	R_1/mm	R_2/mm	D/mm	d/mm
L ₁	-163.26	-191.24	280	40.05
L ₂	-383.71	-111.65	234	30.04
L ₃	-147.58	-94.88	154	25.02
L ₄	-95.74	381.99	130	50.04
SPHERE	-917.1	∞	260	/

3 结果分析

考虑到目前正在对 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统中的校正镜组进行装调对准,没有其它附加条件就能直接进行检测,快捷而方便。因此,在本文中,只以作为校正镜的透射镜组装调对准完成的整体组件进

行定量检测的实际结果为例,来验证本文所提出的辅助光学元件检测法的正确性和可靠性.

表 7 是各元件带有装调对准公差时,补偿器组件检测光路设计、分析结果与实际装调完成后的检测结果比较.分析时的结果已经考虑了标准球面镜的面形误差,实际检测用到的该标准球面镜的面形准确度为 $\lambda/100$,其面形准确度对整个检测系统波像差的影响仅为 0.005λ .根据分析的结果,在检测过程中,通过调节干涉仪、校正镜组整体和标准球面镜之间的关系,将球差和彗差各项均调至最小.考虑到实际的装调对准误差是小于公差范围的,因此,分析值即是各元件装调误差均位于最大且互相没有抵消时的数值.在测量过程中,以表 7 中的四项数值为标准,当测量结果中某一项大于分析值时,就认为该组件中某一元件或者几个元件的装调对准误差超出了公差范围.此时需要重新对装调对准公差进行单独检测,找出超出的一项或几项装调误差,并修正到满足公差要求为止.

表 7 设计、分析结果与实际检测结果的比较

Table 7 Comparison of designed and analyzed and measured results

	Designed	Analyzed	Measured
Spherical	-0.0072λ	-0.023λ	-0.022
Coma in X	0.003λ	0.074λ	0.085
Coma in Y	0.001λ	-0.067λ	-0.082
WF error(rms)	0.005λ	0.044λ	0.055λ

这里选取了泽尼克(Zernike)多项式系数中的初级球差和彗差项,因为球差对装调公差中的元件间距很敏感,而彗差对装调公差中的元件相对偏心和倾斜更为敏感.其中,设计值代表利用各元件加工完成后的实测加工数据设计的检测光路各个像差值,分析值代表在设计检测光路中添加各元件之间的最大相对装调公差后的各个像差值,测量值代表实际测量结果中的各个像差值.

由上面的比较可以看出,实际检测得到的结果与分析值只有彗差的差别较大.而影响彗差的因素包括元件的偏心和倾斜,尤其以非球面元件的影响最大,因此首先检测非球面镜相对于校正镜组最佳光轴的偏心和倾斜值,得到其在 X、Y 方向偏心量分别为 0.097 mm 和 0.087 mm ,倾斜量分别为 $21.19''$ 和 $20.46''$.其中偏心量严重超出了公差范围,需要进行修正.修正后测得其偏心和倾斜量分别为 0.037 mm , 0.042 mm , $19.27''$ 和 $20.12''$.因此,认为该装调误差结果已经基本满足了装调公差要求,而随后对组件的测量结果也印证了这一点.分析和实际测量的结果表明测量准确度为 0.011λ ,其测量过

程是正确而可靠的.

图 5 是 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统中的透射校正镜组在装调对准修正完毕后的整体组件检测结果,已经满足了预期的公差要求.

Surface/Wavefront map

Zernike polynomials

Zernike coefficients from 81002 data points

Order:10th Terms:36 rms:0.022

-0.157 -0.784 0.161 -0.016

-0.005 0.006 0.014 -0.009 0.022

-0.006 -0.002 0.000 0.001 -0.014 -0.012 -0.013

-0.000 0.001 -0.002 -0.000 -0.003 0.002 -0.014 -0.013 -0.005

0.002 -0.001 -0.000 0.001 0.001 0.001 -0.001 0.001 -0.013 -0.013 0.002

图 5 校正镜组最后的检测结果

Fig. 5 Final measurement result of corrector group

4 结论

本文通过对透射镜组在大口径光学系统中的典型应用介绍,详细阐述了透射镜组所起的作用,即作为非球面反射镜面形准确度检测中的补偿器和作为很多光学系统中的校正镜组.分别以 $\Phi 1\text{ m}$ 的非球面反射镜面形准确度检测和 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统为例,对其在各个系统中的准确度要求进行了分析.并针对于这两种应用中的透射镜组在对准装调完成后无法对其整体组件进行定量检测的缺点,提出了一种利用辅助球面反射镜检测装调对准完成后的透射镜组整体组件的方法.最后用通过对 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统的透射校正镜组整体组件的实际检测,证明了该方法的正确性和可靠性.该方法在国内其它文献中未有提及,具有较强的创新意义.

参考文献

- [1] GUO Pei-ji, YU Jin-chi. Null lens design for small aspherical surface with large NA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(5):518-522.
郭培基,余景池.一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(5):518-522.
- [2] CHEN Xu, LIU Wei-qi, KANG Yu-si, et al. Design and tolerance analysis of offner compensator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1):88-93.
陈旭,刘伟奇,康玉思,等. Offner 补偿器的结构与装调[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(1):88-93.
- [3] QUAN Gui-qin, AN Yu-ying, LI Qing-guo, et al. Test of large aperture parabola mirror by laser interferometric [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10):2035-2038.
权贵秦,安毓英,李庆国,等.激光干涉法检测大口径抛物面反射镜[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10):2035-2038.
- [4] GUO Pei-ji, YU Jing-chi. Some problems about compensator designing [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1):118-120.
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.
- [5] CUI Ji-cheng. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11):2087-2091.

- 崔继承. 大口径折射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(11): 2087-2091.
- [6] ETTEDGUI-ATAD E, WORSWICK S. Optical design concept of the 4 m visible and infrared survey telescope for astronomy[C]. *SPIE*, 2003, **4842**: 95-105.
- [7] SEBRING T A, DUNHAM E, MILLIS R L, *et al.* The discovery channel telescope: a wide field telescope in northern arizona[C]. *SPIE*, 2004, **5489**: 658-666.
- [8] KREMER R M, DEBOO B J, SASIAN J M, *et al.* Null corrector design for white light scatterplate interferometry on a large conic surface[C]. *SPIE*, 2001, **4442**: 26-33.
- [7] SEBRING T A, DUNHAM E, MILLIS R L, *et al.* The

A New Method for Testing the Whole Lens Group of Large Optic System

MING Ming, WANG Jian-li, MA Pei-li

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: As a frequent part of optical systems, the lens group plays an important role in the large aperture optical system, but the lens group can not be tested directly after alignment. The disadvantage during common measurement of the lens group was analyzed. With adding one simple optical element, a new method for testing the whole lens group after alignment, which solves the test problem of lens group applied in the large aperture optic systems. Two practical optical systems were given, and the design and accuracy demand of the lens group were analyzed. Next, the lens group of the practical optical systems with the new method were tested, and the comparison of analyzed results and test results proved the reliability and precision of this method, which derives that the precision of measurement is better than 0.01λ . At last, the optical quality of lens group after final alignment meets the design requirement.

Key words: Lens group; Optic test; Aspheric; Zernike polynomial