

大口径封窗透射波前的检测方法

刘 强^{1,2,3} 徐 晨^{1,2} 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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 封窗经常使用在望远镜和大口径平行光管等光学系统中, 置于整个系统最前端, 其透射波前误差将影响整个系统的成像质量。检测手段决定加工精度, 当封窗口径大于目前商用平面干涉仪的最大口径 $\Phi 800$ mm 时, 则无法进行全口径检测。针对这一问题, 提出了 1 种新型的封窗全口径透射检验方法, 将待测封窗置于由球面干涉仪和大口径、长焦距的标准凹球面镜组成的光路中进行透射检验。利用该检测方法成功检测了一块口径为 $\Phi 856$ mm、厚度为 35 mm、材料为熔融石英的封窗, 检测结果均方根(RMS)值为 0.0191λ ($\lambda = 632.8$ nm), 满足设计要求。实验结果验证了该检测方法对于大口径封窗透射检验的可行性。

关键词 测量; 光学检测; 干涉测量; 波前检测; 封窗

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0812003

Measurement Method for Transmission Wavefront of Large Aperture Window

Liu Qiang^{1,2,3} Xu Chen^{1,2} Li Xinnan^{1,2}

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The windows are often used in the telescopes and large aperture collimators. A window is placed at the front of the system, and its transmitted wavefront error has great influence on the image quality of the system. The way of measurement determines the machining precision. When the window is greater than the current commercial plane interferometer with the maximum diameter of $\Phi 800$ mm, it's unable to carry out the full aperture testing. To solve this problem, a new method for testing full aperture window transmission is put forward that the window is put in the optical system consisting of a spherical interferometer and a concave spherical mirror with big diameter and long focal length. The method has been successfully used to test a fused silica window with $\Phi 856$ mm diameter and 35 mm thickness. The root mean square (RMS) value of measurement result is 0.0191λ ($\lambda = 632.8$ nm), which satisfies the design requirements. The feasibility of this method used in transmission measurement of large aperture windows is verified.

Key words measurement; optical measurement; interferometry; wavefront measurement; windows

OCIS codes 120.3180; 220.4840

1 引 言

大口径太阳望远镜和大口径、长焦距平行光管等系统的光路较长, 需要消除光学系统内部空气湍流的扰动, 方法为在系统前端添加封窗, 抽取真空, 使得整个系统处于真空密封环境中^[1]; 同时, 添加封窗可以保护系统中的光学元件, 延长系统的使用寿命^[2]。例如, 美国萨克拉门托峰天文台的理察·邓莲太阳望远镜采用

收稿日期: 2016-02-03; **收到修改稿日期:** 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(11273041)

作者简介: 刘 强(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学检测方面的研究。E-mail: qliu@niaot.ac.cn

导师简介: 李新南(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大口径天文光学非球面应用方面的研究。

E-mail: xnli@niaot.ac.cn

的是直径为 750 mm 的封窗^[3];我国一米新真空太阳望远镜采用了 4 块封窗,口径最大为 1.2 m^[4]。封窗添加在整个系统的最前端,对透射波前的影响大,进而影响整个系统的成像质量^[5]。因此,要想控制封窗的影响,对其透射检测至关重要。

随着望远镜口径越来越大,封窗的尺寸也随之增大,这对于封窗的检测带来了更大的挑战^[6]。检验封窗的传统方法是利用 1 台可以完全覆盖封窗的平面干涉仪进行检测,主要进行 2 次测量:空腔测试和透射测试^[7]。传统检验方法的最大限制是平面干涉仪的口径大小,目前世界上最大口径的商用平面干涉仪是美国 ZYGO 公司生产的,口径为 800 mm,当封窗口径大于 800 mm 时则无法利用该方法进行全口径检测。另外,当封窗两面平行度较好,检测时会存在寄生条纹,也不利于检测。

针对传统检测方法中难以对口径大于 800 mm 的封窗进行全口径检测的问题,本文提出了 1 种新型的大口径封窗透射波前检测方法,即:利用球面干涉仪和标准凹球面镜构建光路,进而实现对封窗的透射检测,并实际检测了口径为 856 mm 的熔融石英封窗。同时,分析了封窗置于非平行光路中引入的系统误差和封窗在检验光路中倾斜角度的阈值范围等。

2 检测原理

2.1 封窗透射检验原理

封窗透射检验原理如图 1 所示^[8]。球面干涉仪发出的标准球面波经过封窗到达标准凹球面镜,凹球面镜将透射封窗的波前反射,并自准直回干涉仪,然后与标准球面波发生干涉,通过对干涉的检测就可以得到封窗对透射波前的影响。



图 1 封窗透射检验示意图

Fig. 1 Schematic of the transmission test of the window

利用 Zemax 对封窗透射检测进行光路模拟,模拟数据和模拟光路图分别如图 2 和图 3 所示,标准凹球面镜的曲率半径为 10800 mm,封窗与标准球面镜间隔为 500 mm。

Surf. type	Comment	Radius	Thickness	Glass
OBJ	Standard	Infinity	1.028×10 ⁴	V
1*	Standard	Infinity	35.000	1.46, 67.8
2*	Standard	Infinity	500.000	
STO	Standard	-1.080×10 ⁴	-500.000	P Mirror
4*	Standard	Infinity	-35.000	P 1.46, 67.8 P
5*	Standard	Infinity	-1.028×10 ⁴	P
IMA	Standard	Infinity	-	

图 2 Zemax 模拟数据

Fig. 2 Zemax simulation data

封窗置于光路中引入的初级球差为;Zernike 球差系数是-0.0037,Seidel 球差系数为-0.0003。图 4 为引入的波像差图,其中均方根(RMS)为 0.0037λ(λ=632.8 nm)。比封窗设计图纸要求(RMS 为 0.025λ)小一个量级。

封窗在单色非平行光的检验光路中将产生球差,初级球差值 δl 为^[9]

$$\delta l = \frac{n^2 - 1}{2n^3} h u_1^2, \quad (1)$$

式中 n 为封窗材料的折射率, h 为封窗的厚度, u₁ 为光线在封窗上的入射角。由(1)式可知,当封窗厚度确定后,封窗在非平行光路中引入的球差与入射角平方成正比。显而易见,封窗越靠近标准凹球面镜,入射角

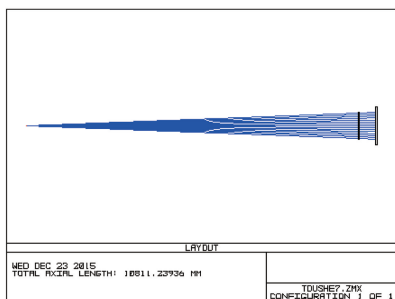


图 3 Zemax 模拟的封窗透射二维图

Fig. 3 Two-dimensional graph of window transmission simulated by Zemax

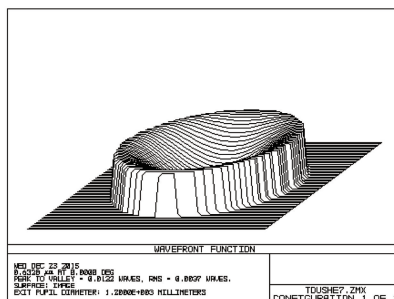


图 4 波像差图

Fig. 4 Wave aberration graph

越小,引入的球差则越小。封窗与标准凹球面镜间隔过大时无法进行全口径检测,间隔太小则不利于对封窗的调整,也存在风险。因此,需要合理控制封窗与标准凹球面镜的间隔。

实验中标准凹球面镜口径 $D_1=1080$ mm,曲率半径 $R=10800$ mm,球面干涉仪镜头 $F/\# = 7$ 。光路如图 5 所示, D 为封窗口径。

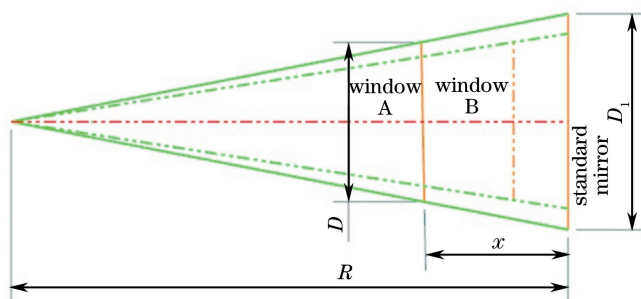


图 5 封窗位置示意图

Fig. 5 Schematic of window position

对封窗进行全口径检测,则封窗的位置所在范围 x 由下式求得:

$$\frac{D_1}{R} = \frac{D}{R - x}, \quad (2)$$

由(2)式得到 $x \approx 2240$ mm,即封窗与标准球面镜在 $0 \sim 2240$ mm 的间隔范围内均可全口径检测。当封窗与标准球面镜的间隔为 2240 mm,利用 Zemax 模拟得到此时的波像差的 RMS 为 0.0063λ 。即封窗在检测光路中满足全口径检测的同时,引入的波像差小于封窗图纸设计要求的 1 个量级,对于检测精度影响较小。另外,考虑到封窗的调整和安全,实验中封窗与标准球面镜的间隔采用 500 mm。

2.2 封窗单面光焦距的控制

封窗置于检测光路中将引入轴向位移,如图 6 所示。图中 C 为球面镜曲率中心, C' 为加入封窗后的汇聚中心,二者之间的距离即为引入的轴向位移。当封窗存在一定的光焦距时,无法分辨检测结果中的离焦是

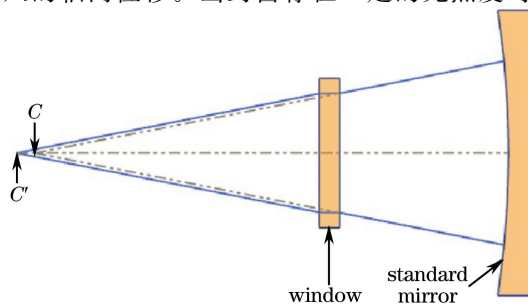


图 6 轴向位移示意图

Fig. 6 Schematic of longitudinal displacement

封窗本身存在的光焦度还是由调节轴向位移引起的。

针对这一问题,需要单独对封窗光焦度进行控制。通过控制封窗的单面光圈,使得封窗两面的 power 值(表征离焦量)较小。利用郭守敬望远镜(LAMOST)的 MA(反射施密特改正板)子镜检测装置进行检测,检测光路如图 7^[10]所示。口径为 100 mm 的平面干涉仪发出平面波前,经过平面反射镜到达凸抛物面副镜,再反射回口径为 900 mm 的凹抛物面主镜,副镜和主镜曲率中心重合,由主镜反射得到平行光束,光束口径为 900 mm。

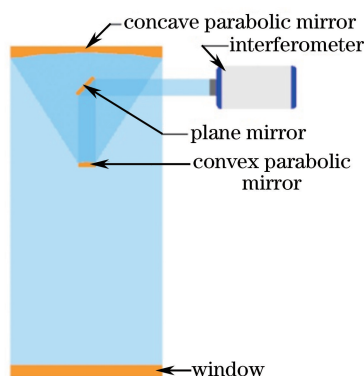


图 7 封窗单面检测示意图

Fig. 7 Schematic of single surface measurement of window

利用标准平面镜调整干涉仪和凸抛物面次镜,使整个系统的 power 值较小,然后测得系统误差;用待测封窗替换标准平面镜,检测其面形,剔除系统误差后即为封窗单面的面形误差。使用该方法控制封窗 2 个面的平整度,使 power 值趋于 0,即可进行透射检验。

2.3 封窗倾角的控制

封窗位于检测光路中,封窗倾斜将使封窗光轴和检测光路光轴产生夹角,这会引入像差(主要表现为像散),用波像差表征^[11]。不同封窗倾斜角度($-5^\circ \sim 5^\circ$)对波像差的影响如图 8 所示,图中横坐标为封窗相对于于竖直方向的夹角,纵坐标为系统引入的波像差,用 RMS 来表征^[12]。图中横向截止线是封窗加工所需要达到的精度(RMS 为 0.025λ)。由图 8 可以看出,RMS 满足设计精度,封窗倾角的临界值约为 1.8° 。

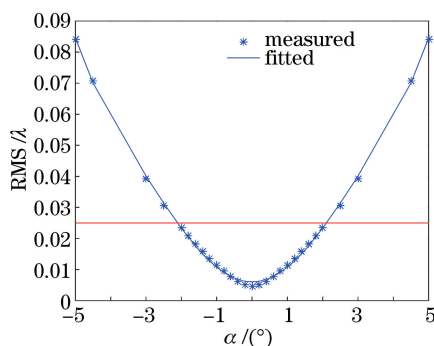


图 8 封窗倾角的影响

Fig. 8 Influence of the dip angle of the window

当封窗所在平面与干涉仪光轴垂直,封窗前后表面反射的光均会进入干涉仪,检测过程中将出现寄生条纹,无法进行测量。实验中,利用封窗在光路中倾斜 1 个微小的角度来消除这一影响,如图 9 所示。图中 d_1 为封窗后表面反射的光线在镜头所在平面与光轴的距离, d_2 为封窗前表面反射的光线在镜头所在平面与光轴的距离, p 为镜头到封窗的距离, α 为封窗倾斜角度,干涉仪镜头有效口径 $d_0 = 7$ mm。若要前后表面反射的光线不进入干涉仪,只需满足 $d_2 > d_0/2$ 即可。

$$d_2 \approx p \cdot \tan(2\alpha) = (R - h - q) \cdot \tan(2\alpha) > \frac{d_0}{2}, \quad (3)$$

式中 h 为封窗厚度, q 为封窗与标准凹球面镜之间的间隔,由(3)式求得 $\alpha > 0.01^\circ$ 。

综上,既要封窗前后表面反射光不影响检测,又要满足系统本身误差小于封窗设计精度,那么封窗位于光路中的倾角应在 $0.01^\circ \sim 1.8^\circ$ 之间。倾角 1.8° 为临界值,为了达到较高的精度,倾角大小应尽量接近 0.01° 。

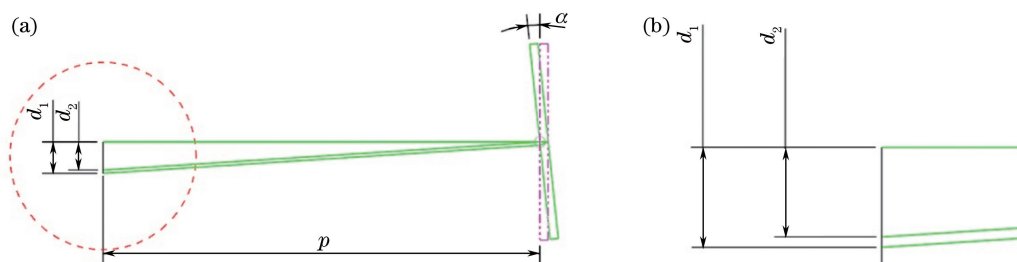


图9 封窗倾斜消除寄生条纹示意图。(a)整体光路示意图;(b)局部放大图

Fig. 9 Schematic of eliminating parasitic stripe by tilting window.

(a) Schematic of integer light path; (b) local amplification map

2.4 系统误差的标定

干涉仪本身的系统误差和标准球面镜的面形误差都对检测结果存在影响^[13]。利用如图10所示的光路对检测系统的系统误差进行标定。从封窗的检测结果中剔除利用该光路检测得到的系统误差,可进一步提高检测精度。

对封窗进行透射检验后,移去封窗。封窗引入的轴向位移导致标准凹球面镜的球心与干涉仪镜头的会聚点不重合,应沿光轴轴向调节干涉仪的五维调整台(不宜调节标准球面镜,因为其质量过重且移动存在安全风险),以满足光程的变化。



图10 系统误差检测示意图

Fig. 10 Schematic of system error test

3 实 验

实验检测1块口径为856 mm、厚度为35 mm的封窗,材料为熔融石英,透射波前需要达到的精度要求:RMS为 0.025λ 。

3.1 单面检测实验

实验采用的干涉仪是ESDI公司生产的口径为100 mm的非索移相平面干涉仪。经扩束后,有效检测口径为900 mm,其装置如图11(a)所示,可参考图7的示意图,标准平面镜如图11(b)所示。

调节凸抛物面次镜,使整个系统的power值趋于0。用封窗替换标准平面镜,分别检测封窗2个面的power值,通过加工使封窗两面的power值均趋于0。利用该方法来实现控制封窗光焦度的目的,以备后续加工与透射检验。

3.2 封窗的透射检验实验

实验采用的是4D公司生产的对振动不敏感的PaseCam4020泰曼-格林干涉仪,该干涉仪采用的标准凹球面镜口径为1080 mm,曲率半径为10800 mm。实验装置如图12所示,图12(b)为图12(a)中封窗和标准球面镜处的放大图。实验中,检测光路长,存在气流不稳和空气沉积现象,使用风扇让空气均匀,并且通过多次测量取平均的方式来消除随机误差对检测结果的影响^[14]。

封窗置于标准凹球面镜前的500 mm处,调整封窗和干涉仪的位置进行检测;移去封窗,检测系统误差,RMS为 0.0180λ 。进行系统误差标定得到的条纹图如图13所示,标定的系统误差对应的面形图如图14所

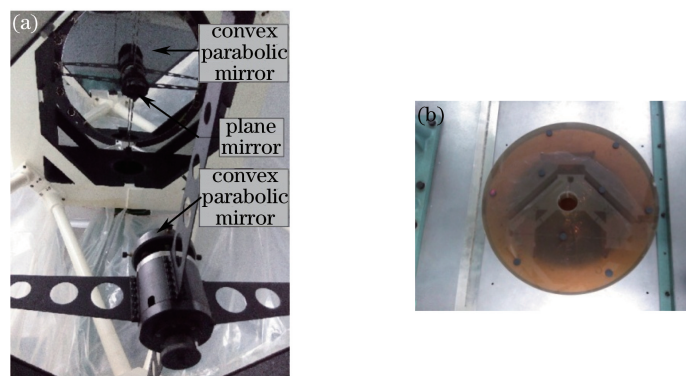


图 11 (a)封窗单面检测装置; (b)标准平面镜

Fig. 11 (a) Single surface measurement device of window; (b) standard plane mirror

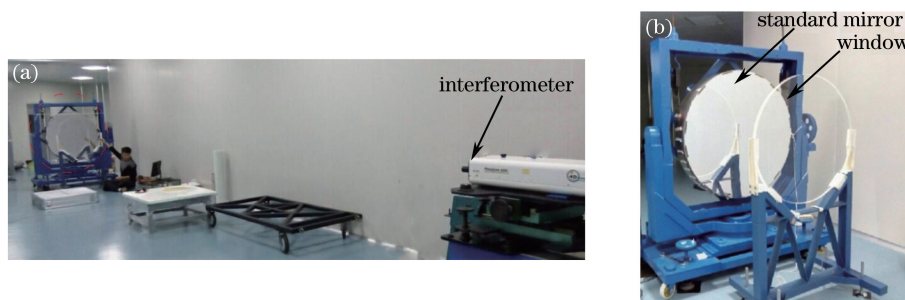


图 12 透射检验光路图。(a)整体光路图; (b)局部放大图

Fig. 12 Optical path map of transmission measurement. (a) Overall light path map; (b) local amplification map

示。从封窗透射检测得到的面形误差中剔除系统误差,得到封窗对透射波前的影响,此时 RMS 为 0.0191λ 。封窗对透射波前影响的条纹图如图 15 所示,封窗对透射波前影响的面形图如图 16 所示,完全满足设计要求。

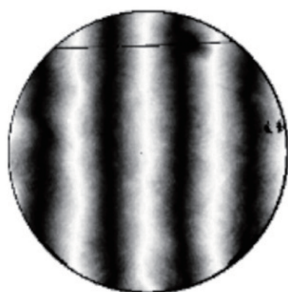


图 13 系统误差条纹图

Fig. 13 Fringe pattern of system error

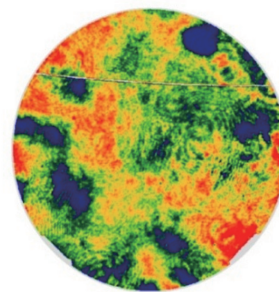


图 14 系统误差面形图

Fig. 14 Surface figure of system error

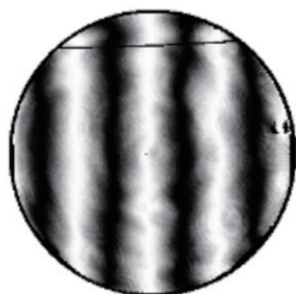


图 15 封窗透射检验条纹图

Fig. 15 Fringe pattern of window transmission measurement

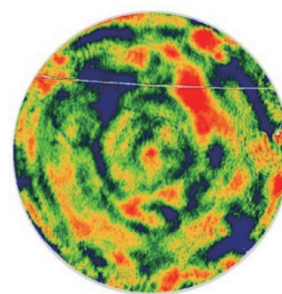


图 16 封窗透射检验面形图

Fig. 16 Surface figure of window transmission measurement

4 结 论

针对目前大型望远镜和平行光管中经常使用的大口径封窗的全口径透射检验难题,提出了1种新的透射检验方法,利用泰曼-格林型干涉仪和长焦距标准凹球面镜进行透射检验,并分析了该检测方法中存在的系统误差。利用该方法成功检测了1块材料为熔融石英、口径为856 mm、厚度为35 mm的封窗,加工精度RMS可控制在 0.02λ 以内。该方法的研究为大口径封窗的检测提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 Au R H. Optical window systems[C]. SPIE, 1990, 1326: 242-243.
- 2 Xu Liang, Li Chuang. Deformation of optical window and its influence on collimator's optical performance[J]. Applied Optics, 2010, 31(6): 914-915.
许 亮, 李 创. 光学窗口变形对平行光管光学性能影响分析[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 914-915.
- 3 von der Lühe O. History of solar telescopes[J]. Experimental Astronomy, 2009, 25(1): 193-207.
- 4 Liu Zhong. Development of a new vacuum solar telescope and its application in solar observation[J]. Yunnan Science and Technology Management, 2015, 28(6): 78-79.
刘 忠. 一米新真空太阳望远镜研制及其在太阳观测中的应用[J]. 云南科技管理, 2015, 28(6): 78-79.
- 5 Lü Baobin, Yang Lihua, Ma Zhen, *et al.* Influence of optic window deformation on collimator image quality[J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24(2): 12-14.
吕保斌, 杨利华, 马 臻, 等. 光学窗口形变对平行光管像质影响[J]. 光电技术应用, 2009, 24(2): 12-14.
- 6 Hao Zhongxiong. Status and trends of astronomical telescope[J]. Modern Scientific Instruments, 2007, (5): 30-33.
郝钟雄. 天文望远镜现状及发展趋势[J]. 现代科学仪器, 2007, (5): 30-33.
- 7 Xu Xinhua, Wang Qing, Song Bo, *et al.* Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412002.
徐新华, 王 青, 宋 波, 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412002.
- 8 Malacara D. Optical shop testing[M]. Canada: John Wiley & Sons, 2007: 498-543.
- 9 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical optical, aberrations and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015: 137-138.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学像差光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015: 137-138.
- 10 Cui Xiangqun, Li Xinnan. Processing and testing in LAMOST optical system[J]. Ninth National Symposium Optical Test Paper (Abstract Book), 2001.
崔向群, 李新南. LAMOST 光学系统的加工与检测[J]. 第9届全国光学测试学术讨论会论文(摘要集), 2001.
- 11 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.* Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.
- 12 Kumar Y P, Chatterjee S. Measurement of moderate wedge angles of optical windows using a wedge shear plate[J]. Optical Engineering, 2010, 49(6): 063603.
- 13 Feng Mingchun, Liu Wenqing, Xu Liang, *et al.* Analysis of the mirror surface errors in a Michelson interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0423002.
冯明春, 刘文清, 徐 亮, 等. 迈克耳孙干涉仪中的镜面面形误差研究分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0423002.
- 14 Jiang Yao, Bai Jian, Luo Jia, *et al.* An error calibration method against aberration in long focal length measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222002.
江 瑶, 白 剑, 罗 佳, 等. 长焦距测量系统的像差误差校正方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222002.