

大口径多光谱通道波前测量系统设计

张 禹¹, 杨忠明¹, 刘兆军¹, 王继红²

(1. 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 366237;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610206)

摘要: 随着波前测量技术的发展, 具有多光谱通道的大口径波前测量系统成为波前测量领域的研究热点。设计了一种大口径多光谱通道波前测量系统, 主要由前置 RC 缩束系统、调光组件、分光组件和波前传感器等组成, 有效口径为 450 mm, 工作波段为 0.5~0.8 μm 、0.9~1.7 μm 和 3~5 μm 。给出了光学系统的设计参数, 描述了系统中光学元件的参数选择, 运用 Zemax 软件完成了光学系统的建模和仿真。进行了机械系统的方案设计, 并完成了系统的光机热集成分析。测试了大口径多光谱通道波前测量系统的各项参数, 结果表明该波前测量系统的有效口径大于 450 mm, 在 -10~50 $^{\circ}\text{C}$ 工作环境下, 对可见光、近红外、中红外波段的波前均可实现高精度实时稳定测量, 系统的波前测量稳定性优于 $0.05\lambda(\text{RMS}, \lambda=532 \text{ nm})$ 。

关键词: 光学设计; 波前测量系统; 有效口径; 稳定性

中图分类号: TN215; TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190559

Design of large aperture multi-spectra channel wavefront measurement system

Zhang Yu¹, Yang Zhongming¹, Liu Zhaojun¹, Wang Jihong²

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 366237, China;
2. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610206, China)

Abstract: With the development of wavefront measurement technology, the large aperture and multi-spectra channel wavefront measurement system had become a research hotspot in the field of wavefront measurement. The large aperture and multi-spectra channel wavefront measurement system was mainly composed of fore RC shrink-beam system, dimming component, beam splitters and wavefront sensors. The system with an effective aperture of 450 mm had working wavelengths of 0.5–0.8 μm , 0.9–1.7 μm and 3–5 μm . The design parameters of the optical system were given, the selection of optical element parameters in the system was described. The modeling and simulation of the optical system were completed by Zemax. The design scheme of the mechanical system was finished, and integrated optical-mechanical-thermal analysis of the system were completed. The parameters of the large aperture and multi-spectra channel wavefront measurement system are tested, the results show that the effective aperture of the wavefront measurement system is larger than 450 mm, at the environment of -10-50 $^{\circ}\text{C}$, the system can measure wavefronts in the visible, near-infrared, and mid-infrared bands with high

收稿日期: 2019-12-01; 修订日期: 2020-01-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61905131); 山东省自然科学基金 (ZR2019QF013); 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放课题计划 (3091801410413)

作者简介: 张禹 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事光学系统设计方面的研究工作。Email: 201732376@mail.sdu.edu.cn

导师简介: 杨忠明 (1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学精密测试技术、光学系统设计方面的研究工作。

Email: zhongming.yang@sdu.edu.cn

precision and stability, the stability of the wavefront measurement system is better than 0.05λ (RMS, $\lambda=532$ nm).

Key words: optical design; wavefront measurement system; effective aperture; stability

0 引言

随着光学加工工艺的发展,大口径光学元件制造技术有了巨大的进步,大口径光学系统在军事、航天和天文观测领域有广泛的应用,在大口径光学系统的装调和检测过程中,大口径波前检测技术得到了广泛的关注。目前,大口径波前检测技术主要有子孔径拼接检测技术^[1]、五棱镜扫描检测技术^[2]和夏克·哈特曼大口径波前传感技术^[3]。子孔径拼接检测技术会产生一定的低阶倾斜等难以消除的误差,子孔径拼接次数越多,则最终拼接结果精度越低,而且不能实现波前的实时测量^[4]。五棱镜扫描检测技术中测角仪的姿态变化误差会降低测量的精度,而且检测效率较低^[5]。夏克·哈特曼波前传感器用一组二维排列的微透镜阵列对待测波前进行分割,在微透镜阵列的后焦面上进行成像,当待测波前存在像差时,成像点和理想位置存在偏移量,通过偏移量可以求出对应子孔径的平均波前斜率,利用波前重构算法恢复出波前信息。夏克·哈特曼大口径波前传感技术,采用大口径前置缩束系统与夏克·哈特曼波前传感器结合,实现大口径波前的实时测量。在 2012 年,西安电子科技大学实现了 220 mm 口径的大功率激光波前的测量^[6]。2014 年,印度学者 Kumar M S 提出了一种夏克·哈特曼波前传感技术,可以应用于 700 mm 的大口径光学系统^[7]。此外,2018 年,南京理工大学陈磊等人使用点衍射干涉检测法实现了 400 mm 口径的大口径光学元件瞬态波前检测^[8]。

为了满足不同波长范围光学系统波像差检测和

不同工作波段激光波前质量的检测需求,多家单位对多光谱通道波前测量系统展开研究。2017 年,西安光学应用研究所设计了双波段波前检测红外自适应系统,系统口径达到 300 mm,使用光谱分光镜将可见光和红外光分开,可测量波段为 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 和 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,该系统使用双光谱通道实现光学自适应的功能^[9]。2017 年,西安工业大学设计了双波段自适应光学系统,采用共光路结构,系统口径为 600 mm,可测量波段 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,利用可见光和红外光双光谱通道实现了光学自适应功能^[10]。

文中设计了 450 mm 口径的波前测量系统,可检测光谱范围为: $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。该系统采用同轴 RC 系统作为前置缩束系统,使用短波通滤光片将可见光、近红外和中红外波段的光束依次分束,分别采用夏克哈特曼可见光波前传感器、四波横向剪切近红外波前传感器和四波横向剪切中红外波前传感器实现对波前质量的测量。在 $-10 \sim 50$ °C 工作环境下,可以实现对大口径波前的高精度稳定测量,被测波前波长为 532 nm 时,在 50 分钟的测量时间内,测量稳定性优于 0.05λ (RMS, $\lambda=532$ nm)。

1 光学系统设计与仿真

1.1 光学系统设计

文中研究的波前测量系统是可以测量可见光、近红外和中红外波前的大口径波前测量系统,主要由前置缩束系统、调光组件、分束镜、离轴抛物面反射镜、波前传感器、测试结果显示模块、电源、机械支撑及调节系统构成,如图 1 所示。

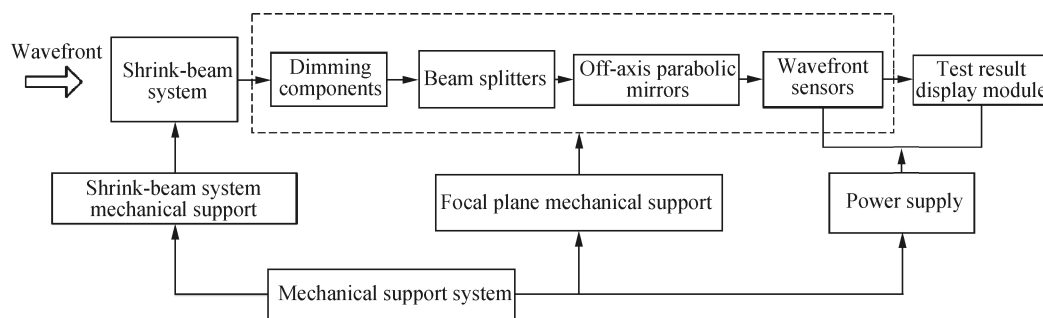


图 1 波前测量系统

Fig.1 System of wavefront measurement

光学系统采用同轴反射式光路结构,如图 2 所示,待测波前首先经过由主镜和次镜组成的缩束系统,然后经过调光组件进行光强衰减,再经过分束镜将红外光、近红外光和可见光分开,最后通过离轴抛物面反射镜的准直入射到波前传感器进行波前分

析。一部分可见光进入到对点系统,检验光束能否对焦。前置缩束系统、调光组件、分束镜、离轴抛物面反射镜、波前传感器以及对点系统的光路结构设计满足光瞳衔接原理,从而实现对不同波段大口径波前的有效测量。

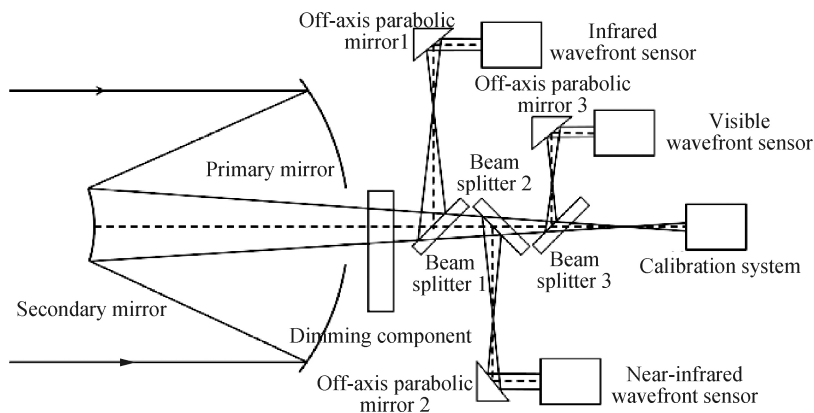


图 2 光学系统结构

Fig.2 Layout of optical system

反射式 RC 系统是常用的大口径光学前置系统之一^[1]。镀膜方式为铝膜加保护膜,工作波长为 0.5 ~ 5 μm。进行光学设计之前,首先进行 RC 系统参数的计算。主镜的直径 d 为 450 mm,系统的 F 数为 10,主镜的 F 数为 1.928,主镜和焦点之间的距离 s 为 150 mm,视场角度为 0.05°。计算过程如下。

系统的有效焦距和主镜直径的关系为:

$$f = (f/\#)(d) \quad (1)$$

同理,主镜的有效焦距由以下公式计算出:

$$f_1 = (f_1/\#)(d) \quad (2)$$

次镜到焦点的距离 B 可以表示为:

$$B = \frac{f(f_1 - l)}{f_1} \quad (3)$$

将 $B=(l+s)$ 代入公式 (3),可得主镜和次镜的间距 l :

$$l = \frac{f_1(f - s)}{(f_1 + f)} \quad (4)$$

同理可知次镜的焦距长度:

$$f_2 = \frac{l(l + s)}{(2l + s - f)} \quad (5)$$

主镜的曲率半径 R_1 、次镜的曲率半径 R_2 和它们焦距的关系为:

$$R_1 = -2f_1 \quad (6)$$

$$R_2 = 2f_2 \quad (7)$$

主镜的通孔直径表达式为:

$$d_h = \frac{d}{f} + \frac{2(FOV)f_1(f^2 - s^2)}{f(f + s)} \quad (8)$$

经过上述公式计算,可得表 1 中系统的近轴参数。

表 1 RC 系统近轴参数表

Tab.1 Paraxial parameters of RC system

Paraxial parameters			
f/mm	4 500	l/mm	700
$f/\#$	10.0	s/mm	150
B/mm	850	R_1/mm	-1 762
f_1/mm	863	R_2/mm	-403.4
f_2	-201.7	d_h/mm	397.9

$$k_1 = -\frac{2(f_1 - l)f_1^2}{f^2 l} - 1 \quad (9)$$

$$k_2 = -\left(\frac{f_1 + s}{2l - f_1 + s}\right)^2 + \frac{2f(f_1 + f_1 - l)^3}{l(f_1 - l)^3} \quad (10)$$

RC 系统的三次圆锥系数经过计算可得: $k_1 = -1.017 1$, $k_2 = -2.344$ 。

根据不同条件下的光强测量要求,使用 12 个不

同衰减强度的中性密度滤光片作为系统的调光组件,利用电动调节装置实现对滤光片的切换,实现衰减倍率 1~10 000 倍的调节。系统使用两个短波通滤光片作为分束镜,分束镜 1 截止波长为 1.8 μm,可以实现 3~5 μm 波段的反射,0.9~1.7 μm 和 0.5~0.8 μm 波段的透射;分束镜 2 截止波长为 900 nm,可以实现 0.9~1.7 μm 波段的反射,0.5~0.8 μm 波段的透射。波前测量系统可以实现测量的波段:0.5~0.8 μm、0.9~1.7 μm 和 3~5 μm。

为了保证波前质心坐标测量的准确性,需要对波

前进行准直后入射到波前传感器,使用离轴抛物面反射镜完成球面波的准直。为满足多通道波前的测量要求,文中的波前测量系统使用三个波前传感器分别对可见光、近红外和中红外波前进行测量。主要考虑到测量波段、有效口径、子孔径数、测量精度和采样频率等因素,选择可见光的夏克哈特曼波前传感器,近红外和中红外的四波剪切波前传感器作为波前探测组件。

三款波前传感器具体参数如表 2 所示。

表 2 波前传感器参数

Tab.2 Parameters of wavefront sensors

Item	Visible wavefront sensor	Near-infrared wavefront sensor	Mid-infrared wavefront sensor
Wavelength range/μm	0.5-0.8	0.9-1.7	3-5
Aperture/mm ²	3.60×4.50	9.60×7.68	10.88 ×8.16
Number of microlenses	32 × 40	160 × 120	160 × 120
Accuracy	4 nm RMS	15 nm RMS	25 nm RMS
Acquisition frequency/Hz	50	120	50

1.2 光学系统仿真

根据 1.1 节计算得到的各光学元件的参数,利用 Zemax 软件对光学系统进行建模和仿真,仿真结果如图 3 所示,根据仿真结果不断优化,从而得到光学元件和系统最优设计参数。

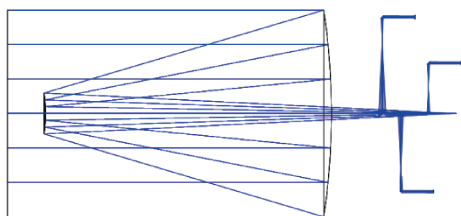


图 3 系统光路图

Fig.3 Layout of system optical path diagram

系统测量的环形孔径具有中心遮拦,需要 Zernike 多项式拟合进行像差分析。波长为 532 nm 时,利用 Zemax 对波前测量系统不同视场的波前进行分析,随着视场的增加系统像差逐渐增加,0°视场仿真结果 PV 值为 0.009λ, RMS 值为 0.003λ; 0.05°视场仿真结果 PV 值为 0.019λ, RMS 值为 0.005λ。

1.3 光机热集成分析

如图 4 所示,波前测量系统的光机热集成分析结

合光学、机械和热学为一体,充分考虑光学系统、机械结构和外部环境温度的影响,利用光学设计、三维建模、有限元分析和接口编程等手段,将温度变化反馈成最终的成像质量,在不断优化的过程中实现波前测量系统的最佳化设计。波前测量系统的工作环境变化时,光学镜片和机械结构的温度会受到环境温度变化的影响,主次镜的面形和主次镜之间的间距会发生变化,影响缩束系统的成像质量,进而影响波前测量系统的测量精度^[12-13]。

首先根据系统要求进行光学设计,基于光学系统建立波前测量系统的 CAD 模型。在结构模型的基础上生成有限元模型,将环境温度的变化作为载荷施加到有限元模型上进行热分析,求得光学镜片的变形和机械结构的刚性位移,结合 Zernike 多项式对镜片变形拟合分析得到镜片的 Zernike 系数。将面形改变系数和镜片之间的间距改变带入光学设计软件 Zemax 中,对光学传递函数和像质进行分析,对光学和结构设计的环节进行优化直至成像质量良好,光机热集成分析是一个首尾呼应的闭环设计过程。

在波前测量系统中,主要考虑温度变化对 RC 缩束系统的影响,RC 缩束系统主要由主镜、次镜、镜片

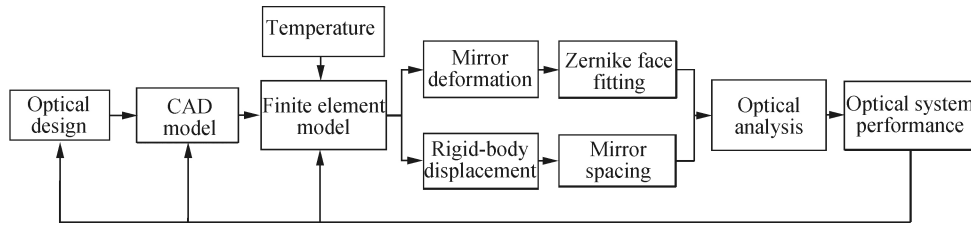


图 4 光机热集成分析流程图

Fig.4 Flow chart of integrated optical-mechanical-thermal analysis

支撑件、底板和支撑脚结构组成。根据材料的不同对模型中的元件进行材料参数的赋值。利用 Patran 软件进行网格划分,通过约束支腿位移的自由度来定义边界条件,环境温度设置为 20 °C,施加±30 °C 的温度载荷,提交 Nastran 软件进行计算。利用 Patran 实现结果关联与分析,热变形云图如图 5 所示。

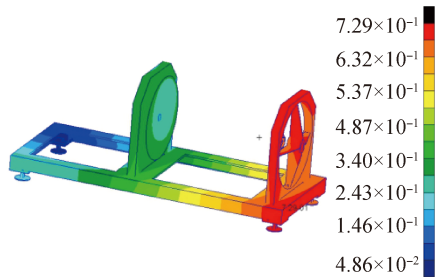


图 5 系统位移云图

Fig.5 Displacement distribution of system

温度变化会引起镜片面形变化和镜片间距变化,利用 Zernike 多项式将镜片热变形数据进行面形拟合,得到各项 Zernike 系数^[14]。文中采用 MATLAB 软件对接口程序进行编程,可以提高数据的处理效率。将镜片面形变化的 Zernike 系数和镜片之间间距的变化带入光学设计软件 Zemax 中,得到系统温度变化后的像差数据,如图 6 所示。

系统调焦到最佳像面位置,当温度为-10 °C 时,RMS 值为 0.039λ(RMS, λ=532 nm)。当温度为 50 °C 时,RMS 值为 0.032λ(RMS, λ=532 nm)。如图 7 所示,系统在此温度区间内的热变形呈现线性规律,初始温度 20 °C,-10 °C 和 50 °C 分别代表了系统的最大正负变形量,则在整个温度区间内系统的热变形均满足光学系统的性能指标,因此系统的光机热集成分析符合要求。文中使用的光机热集成设计分析方法对大口径双镜系统光机设计有很好的参考价值。

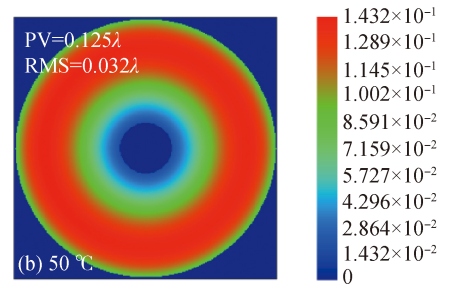
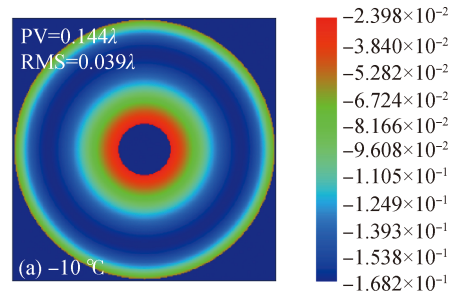


图 6 不同温度下的波像差图

Fig.6 Wavefront aberration at different temperatures

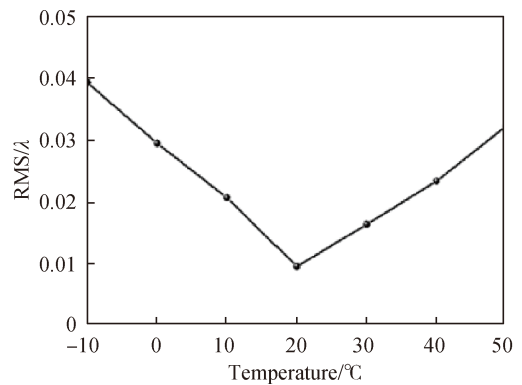


图 7 系统像差 RMS 随温度变化曲线

Fig.7 Curve of system aberration RMS with temperature

2 参数测试

2.1 系统装调与测试

本系统为反射式光学系统,装调过程基于自准直检测原理,面形和波像差检测采用动态干涉仪。系统装调由主镜装调及面形检测、主次镜联调、测量光路

装调及检测和系统封装四个部分组成^[15]。将主镜装入镜室并置于机械件中,在焦点位置放置动态干涉仪,对主镜进行面型检测,微调主镜位置建立装调基准,装调过程中主镜的位置不再改变。然后将次镜放入到镜室并置于机械件中,将动态干涉仪放置到系统的焦点位置,根据波前误差对次镜进行微调;依次将调光组件、分束镜、离轴抛物面反射镜、波前传感器和对点系统等器件放置到波前测量光路中,并满足技术要求。系统波前误差为 0.051λ (RMS, $\lambda=532\text{ nm}$),焦距和视场角由经纬仪测得,分别为 $4\ 500\text{ mm}$ 和 $\pm 0.07^\circ$ 。最后将系统集成封装到箱体中,结构牢固,稳定可靠,可以实现对波前的高精度稳定测量,系统实物图如图 8 所示。



图 8 波前测量系统图

Fig.8 Picture of wavefront measurement system

2.2 稳定性测试与波前测量

稳定性是波前测量系统的重要参数,在稳定性测试中,系统前放置口径 500 mm 的平行光管,待系统稳定后,做相对测量,如图 9 所示,每隔 5 min 采集一次,共 10 次数据,计算 10 次数据的均方根值。经过检测,波前测量系统的稳定性为 0.032λ (RMS, $\lambda=532.8\text{ nm}$),

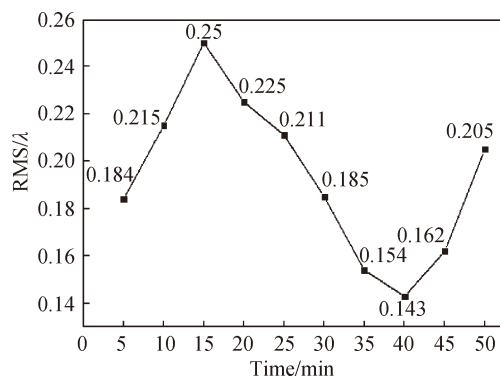


图 9 系统像差 RMS 随时间变化曲线

Fig.9 Curve of system aberration RMS with time

说明本系统具有较高的检测稳定性,满足系统的设计要求。

根据光强提示调整调光组件,保证系统中波前传感器的安全使用。使用可见光波前传感器测量平行光管产生的波长为 632.8 nm 的波前,结果如图 10(a) 所示, PV 值为 0.007λ (RMS, $\lambda=632.8\text{ nm}$), RMS 值为 0.051λ (RMS, $\lambda=632.8\text{ nm}$);使用近红外波前传感器测量大口近红外激光系统产生的波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的波

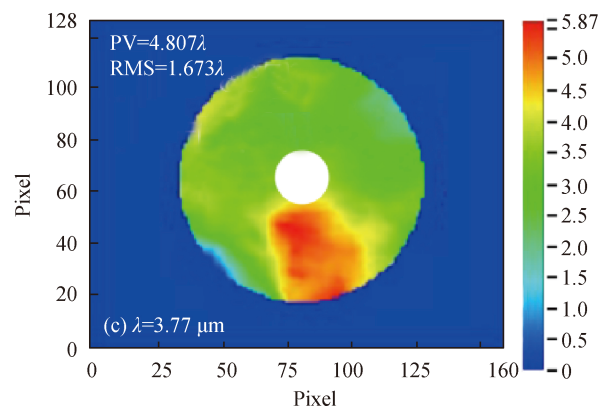
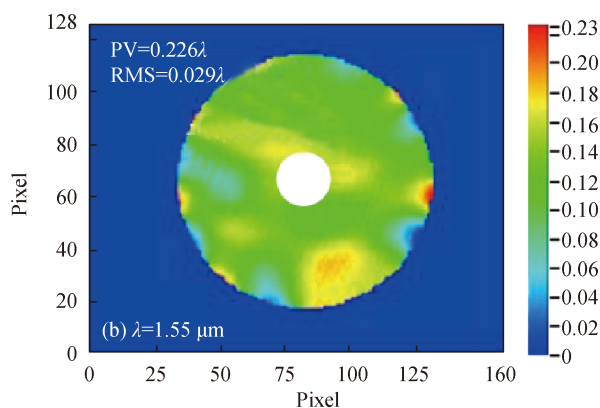
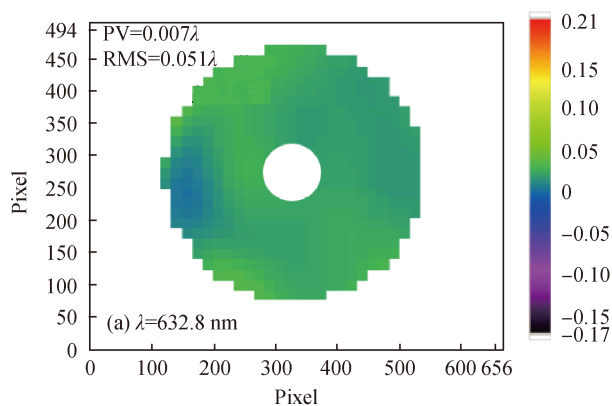


图 10 不同波长下的波前图

Fig.10 Wavefront maps at different wavelengths

前,测量结果如图 10(b)所示,PV 值为 0.226λ (RMS, $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$),RMS 值为 0.029λ (RMS, $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$);使用中红外波前传感器测量大口径中红外激光系统产生的波长为 $3.77\ \mu\text{m}$ 的波前,测量结果如图 10(c)所示,PV 值为 4.807λ (RMS, $\lambda=3.77\ \mu\text{m}$),RMS 值为 1.673λ (RMS, $\lambda=3.77\ \mu\text{m}$)。

3 结 论

文中设计和研制了一种大口径多光谱通道波前测量系统,阐述了波前测量系统的光机结构设计,给出了光学系统的设计方案以及各光学元件的参数,运用 Zemax 软件完成了光学系统的建模和仿真,并对波前测量系统进行了光机热集成分析。测试结果表明:波前测量系统有效口径大于 $450\ \text{mm}$,工作波段为 $0.5\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 、 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,在 $-10\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 工作环境下,在 $50\ \text{min}$ 的测量时间内,测量稳定性优于 0.05λ (RMS, $\lambda=532\ \text{nm}$)。该系统可同时满足可见光、近红外和中红外大口径波前的精确实时测量。

参考文献:

- [1] Yan Gongjing, Zhang Xianzhong. Technology of sub-aperture stitching testing optical convex spherical mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0517002. (in Chinese)
- [2] Yuan Li, Zhang Xiaohui. Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 920-931. (in Chinese)
- [3] Zhang Jinping, Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, et al. Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt & Precision Eng*, 2012, 20(3): 492-498. (in Chinese)
- [4] Zhao Xianyu, Xue Donglin, Cheng Qiang. Research on Hartmann principle based on sub-aperture slope scanning detection and error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0813003. (in Chinese)
- [5] Tang Zhaoxin, Huang Wei, Xu Weicai, et al. Application of differential pentaprism scanning in wavefront detection [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 1003-1011. (in Chinese)
- [6] Xiang Liwei. Design of high-power laser wavefront measurement system[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [7] Kumar M S, Narayanamurthy C S, Kumar A S K. Design and development of Shack-Hartmann wavefront sensor-based testing of high-resolution optical system for earth observation [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 101-114.
- [8] Meng Shi, Chen Lei, Zhu Wenhua, et al. Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(1): 59-65. (in Chinese)
- [9] Zhang Xunzhi, Luan Yadong, Li Yuan, et al. Design of dual-waveband telescope and infrared objective in infrared adaptive system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 19-23. (in Chinese)
- [10] Xu Huangrong. Design of dual-band adaptive optical system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017. (in Chinese)
- [11] Alvarado-Martínez J J, Granados-Agustín F S, Vázquez-Montiel S, et al. Design of a two-mirror telescope using a free-form surface for the primary mirror[C]/Modeling Aspects in Optical Metrology V II. International Society for Optics and Photonics, 2019, 11057: 110571T.
- [12] Guo Jiang, Zhu Lei, Zhao Ji, et al. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror [J]. *Opt & Precision Eng*, 2019, 27(5): 1138-1147. (in Chinese)
- [13] Yue Baoyi, Liu Jun, Guo Jia, et al. Optical system design of folded/diffractive co-aperture infrared dual-band beam positioner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 47(4): 0418003. (in Chinese)
- [14] Pan Yue, Xu Xiping, Qiao Yang. Optical-structural-thermal analysis of zoom infrared dual-band projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 242-249. (in Chinese)
- [15] Zhao Qi, Hu Mingyong, Li Mingjie, et al. Assembly technology of altaz off-axis beam expanding optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 563-569. (in Chinese)