

## 大口径快反镜面形测试系统设计

刘欣<sup>1</sup>, 杨忠明<sup>1</sup>, 刘兆军<sup>1</sup>, 王继红<sup>2</sup>

1. 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:** 大口径快速反射镜(快反镜)常被应用于空间光通信和激光武器等领域。为实现工作状态下大口径快反镜面形误差的实时检测,设计了大口径快反镜面形测试系统。该系统的口径参数为 400 mm, 工作波长为 633 nm, 由离轴式前置扩束系统和焦面附件系统组成。对测试系统的设计参数及元件参数选择进行了阐述,设计和仿真了光学系统结构,并基于光机热集成分析获得温度变化对光学系统的影响。测试大口径快反镜面形测试系统后结果表明该系统可实现实时记录和高精度测量,且在温度变化的工作环境下也可实现稳定测量,其测量稳定性为  $0.048\lambda$ (RMS,  $\lambda=633$  nm)。

**关键词:** 快反镜; 光学设计; 面形测试系统; 有效口径; 稳定性

**中图分类号:** TN215;TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210514

## Design of large aperture fast steering mirror surface figure test system

Liu Xin<sup>1</sup>, Yang Zhongming<sup>1</sup>, Liu Zhaojun<sup>1</sup>, Wang Jihong<sup>2</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China ;
2. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** The large aperture fast steering mirror(FSM) are often used in the fields of space optical communications and laser weapons. The large aperture fast steering mirror surface figure test system with an effective aperture of 400 mm has a working wavelength of 633 nm. The system is mainly composed of an off-axis beam expanding system and a focal plane system to achieve real-time detection of the mirror surface figure error when the large aperture FSM is working. In this paper, the design parameters of the optical system and the selection of optical element parameters were described. The optical system was designed and simulated, and the effect of temperature variation on the optical system was obtained based on the integrated optical-mechanical-thermal analysis. The test results show that the large aperture fast steering mirror surface figure test system can achieve real-time recording and high precision measurement, meanwhile, the system has stability in a working environment with temperature changes. The stability of the surface figure test system is  $0.048\lambda$  (RMS,  $\lambda=633$  nm).

**Key words:** fast steering mirror; optical design; surface figure test system; effective aperture; stability

收稿日期:2021-07-28; 修订日期:2021-10-30

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:刘欣,女,硕士生,主要从事光学系统设计方面的研究。

导师简介:刘兆军,男,教授,硕士/博士生导师,博士,主要从事激光物理与技术、非线性光学、激光工程及应用方面的研究。

## 0 引言

为了操控输出光束的方向和控制光束的抖动,通过操控导光载体的外表形状变化或内部特征变化从而改变出射光束方向的技术被称为光束指向控制技术。随着科学技术的飞速发展,军事国防等领域中的系统对目标监测的精度需求越来越高,故对光束指向控制技术的精度要求随之增加。快速高精度光束指向控制系统中的核心器件之一是快速控制反射镜(快反镜),激光光束入射其反射镜面上,由于压电陶瓷驱动或音圈电机驱动控制使得反射镜做一定范围的摆动,从而改变光束方向使其发生偏转<sup>[1]</sup>。快反镜在光学成像系统中,通过开环或闭环方式控制反射镜的偏移角度稳定系统视轴以及补偿像移。快反镜响应速度快,控制带宽高,定位准确等优势被得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>,大口径快反镜常用于航空航天领域、大型激光武器、天文望远镜和空间通信等领域<sup>[5-10]</sup>。

大口径光学器件面形检测的方法有干涉仪法、Ritchey-Common 法、斜入射法、子孔径拼接法和五棱镜扫描法等<sup>[11]</sup>,其中,天文望远镜等系统广泛应用于子孔径拼接检测技术及大口径干涉仪进行面形测量,在众多方法中干涉检测法应用得最为广泛,但干涉检测法对环境和设备要求较高,以及成本过高,且测试精度还需进一步提高<sup>[12-14]</sup>,其中陈念年等<sup>[12]</sup>设计的面形拼接测量装置测量误差为  $0.072\lambda$ ,袁理<sup>[14]</sup>设计的面形测试系统精度为  $8.1 \text{ nm rms}$ 。大口径快反镜在实际闭环工作时,其镜面的面形会实时发生变化,由于快反镜动态工作时其面形频繁抖动,测量大口径平面镜面形的方法并不适用。王凯等<sup>[15]</sup>设计快速反射镜静态性能测试系统,该系统仅适用于小口径快反镜,若采用该方法测量大口径快反镜的动态变化则在测量过程中需要一块不小于被检元件尺寸的大口径扰动快反镜,而这样一个扰动镜的成本很高。

为实现工作状态下大口径快速反射镜面形误差的实时检测,文中设计了大口径的快反镜面形测试系统,其口径为  $400 \text{ mm}$ ,工作波长为  $633 \text{ nm}$ 。此系统的前置扩束系统为离轴折反射式扩束系统,采用位置敏感探测器 (PSD) 及感光耦合元件 (CCD) 相机对光束质心和光束光斑变化实现实时记录,使用快速补偿镜同步快反镜面型变化频率,采用 PSD 和夏克哈特曼

波前传感器实现对快反镜面形误差实时变化的测量和记录。同时阐述了光学系统参数的设计及其模拟和仿真,并基于光机热仿真分析可知该系统处于  $-10 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  工作环境下时可以进行实时高精度测量和记录且稳定性强,其测量稳定性为  $0.048\lambda(\text{RMS}, \lambda=633 \text{ nm})$ 。

## 1 光学系统仿真设计与温度稳定性分析

### 1.1 光学系统设计

如图 1 所示,文中提出的大口径快反镜面形测试系统由大口径前置离轴扩束系统、光源及光源扩束系统、偏摆补偿组件、波前测量组件、测试结果显示部分、机械支撑系统、电源构成<sup>[16-17]</sup>。如图 2 所示,光学系统主体采用离轴无焦卡塞格林系统光路结构,激光光源发射  $633 \text{ nm}$  波长的光束,光束通过光源扩束系统将光束直径扩束为  $20 \text{ mm}$ ,经过第一个分束镜将光束反射到离轴扩束系统,直径  $20 \text{ mm}$  的光束以  $1:20$  的比例扩束到  $400 \text{ mm}$  的光束,然后入射到待测快反镜的镜面上,通过待测快反镜镜面反射的光束携带待测快反镜镜面的面形变化的信息再次通过离轴扩束系统,光束被缩束为  $20 \text{ mm}$ ,经过第一个分束镜入射到衰减器进行光强衰减,再经过第二个分束镜将光束分成两部分,一部分入射到补偿反射镜,经过第三个分束镜将光束分成两部分,其中一束光入射 CCD 记录光斑变化,另外一束光入射到第一个 PSD 记录光斑质心变化。另一部分经过第四个分束镜将光束分成两部分,其中一束光到经反射镜反射进入到波前传感器进行波前分析,另一束光进入第二个 PSD 记录光斑质心变化。其中第一个 PSD 记录到的质心数据反馈给补偿反射镜,使得补偿反射镜的抖动频率与待测快反镜镜面抖动频率一致保证波前传感器稳定地进行波前分析。

文中采用的扩束系统为离轴无焦卡式系统。其优点为光路中无实际焦点,不会使得光能聚集而造成系统损伤,且结构紧凑,中心无遮挡,光能利用率高<sup>[18]</sup>。光学系统中的单色像差包括球差、彗差、像散、场曲和畸变,分别用  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  表示。在空气介质中,根据三级像差理论,对无穷远成像,可得到五种像差的求解结果为:

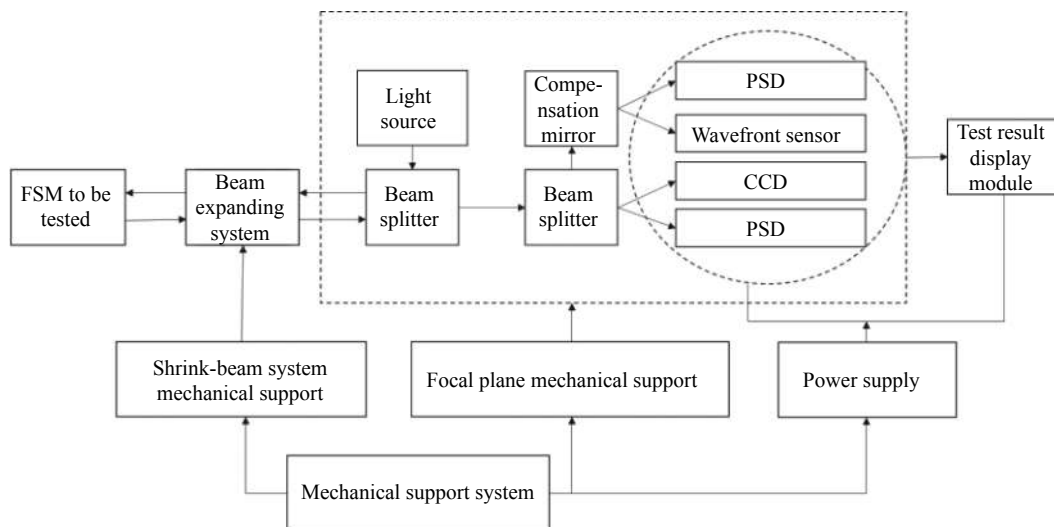


图 1 快反镜面形测试系统

Fig.1 System of surface figure test system

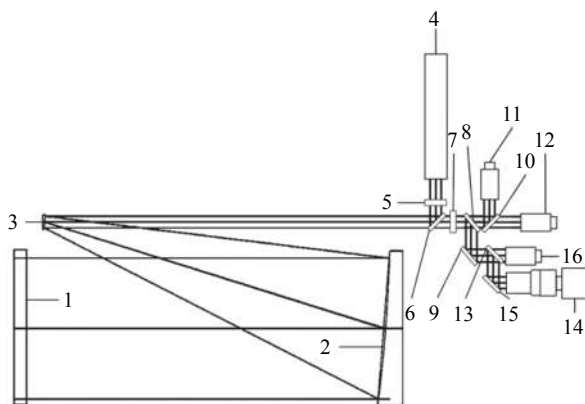


图 2 光学系统结构

Fig.2 Layout of optical system

$$S_1 = -\frac{2h_1^4}{R_1^3} \left( 1 - \frac{1}{\Gamma} - e_1^2 + \frac{1}{\Gamma} e_2^2 \right) \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{2h_1^3}{R_1^3} (y_1 e_1^2 - y_2 e_2^2 - y_1 + y_2) \quad (2)$$

$$S_3 = -\frac{2h_1^2}{R_1} (y_1^2 e_1^2 - \Gamma y_2^2 e_2^2 - y_1^2 + \Gamma y_2^2) \quad (3)$$

$$S_4 = \frac{2}{R_1} (1 - \Gamma) \quad (4)$$

$$S_5 = -\frac{2h_1}{R_1^3} (y_1^3 e_1^2 - \Gamma^2 y_2^3 e_2^2 - y_1^3 + \Gamma y_2^3) \quad (5)$$

式中： $\Gamma$ 为系统的放大倍率； $e_1^2$ 和 $e_2^2$ 为主、次镜面偏心率平方； $h_1$ 为主镜边缘到光轴的距离； $y_1^2$ 和 $y_2^2$ 为主、次镜面表达式。当且仅当 $e_1^2 = e_2^2 = 1$ 时， $S_1 = S_2 = S_3 = S_5 = 0$ ，即若同时消除球差、彗差、像散及畸变，则主

镜和次镜均需为抛物面镜。故前置扩束系统的主、次镜均使用抛物面镜，主、次镜的镀膜方式为金属铝膜同时加有保护膜，其工作波长为 633 nm。无焦卡式系统是常用的扩束系统<sup>[19-21]</sup>，其主镜的焦距和主镜直径的关系为：

$$f_1 = \left( \frac{f_1}{\#} \right) (d_1) \quad (6)$$

次镜的焦距为：

$$f_2 = \frac{f_1}{\Gamma} \quad (7)$$

主镜和次镜的间距为：

$$s = f_1 - f_2 \quad (8)$$

主镜的曲率半径  $R_1$ 、次镜的曲率半径  $R_2$  和它们焦距的关系是：

$$R_1 = -2f_1 \quad (9)$$

$$R_2 = 2f_2 \quad (10)$$

主、次镜的面形参数取 $e_1^2 = e_2^2 = 1$ ，圆锥曲系数 $k_1 = -e_1^2 = -1$ ， $k_2 = -e_2^2 = -1$ 。主镜的离轴量与主、次镜口径的关系为：

$$b > \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} + \frac{b}{5} + p \quad (11)$$

式中： $p$ 为避免机械结构干扰光路所留余量。经上述公式计算，其中主镜的直径 $d_1$ 为 400 mm，曲率半径 $R_1$ 为 3000 mm，离轴量 $b$ 为 330 mm，次镜的直径 $d_2$ 为 55 mm，曲率半径 $R_2$ 为 150 mm，系统的扩束比为 1 : 20，主、次

镜间距  $s$  为 1425 mm, 视场为  $0.05^\circ$ , 前置扩束系统的参数如表 1 所示。为了实现光斑质心坐标变化、光斑变化和光斑波前的准确测量, 需要在数据探测器即 PSD、CCD 和波前传感器前加入缩束系统。基于快反镜面形测试系统的参数指标要求, 选择 Imagine Optic 公司的哈特曼波前传感器, 表 2 为其具体参数。

表 1 缩束系统参数表

**Tab.1 Parameters of shrink-beam system**

Paraxial parameters			
$f_1/\text{mm}$	1500	$R_2/\text{mm}$	150
$f_2/\text{mm}$	75	$b/\text{mm}$	330
$s/\text{mm}$	1425	$k_1$	-1
$R_1/\text{mm}$	-3000	$k_2$	-1

表 2 波前传感器参数

Tab.2 Parameters of wavefront sensors

Item	Parameter	Item	Parameter
Sensor type	HASO3 FAST	Repeatability/rms	$<\lambda/200$
Wavelength range/nm	350-1100	Wavefront measurement accuracy in absolute/rms	$\sim \lambda/100$
Aperture/ $\text{mm}^2$	$1.7 \times 1.7$	Wavefront measurement accuracy in absolute/rms	$\sim \lambda/150$
Number of microlenses	$14 \times 14$	Spatial sampling/ $\mu\text{m}$	$\sim 110$
Tilt dynamic range	$>\pm 3^\circ$	Max acquisition frequency/Hz	900
Min measured curvature/m	$\pm 0.025$	Processing frequency/Hz	800

将以上参数输入 Zemax 软件中实行系统优化从而得到光学系统的最佳设计, 图 3 为光学系统的仿真结果。同时, 考虑视场变化对快反镜面形测试系统的影响, 在 Zemax 中设定工作波长为 633 nm 与视场角度  $0.05^\circ$ 。根据仿真结果可得, 系统像差与视场角度增减成正比关系, 当视场角为  $0.05^\circ$  时系统的 PV 值为  $0.008\lambda$ , RMS 值为  $0.006\lambda$ 。

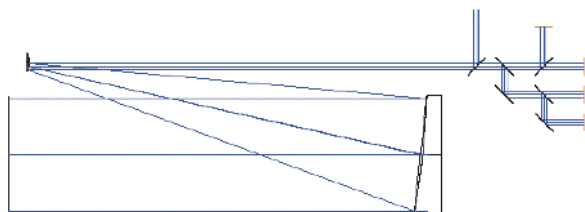


图 3 系统光路图

Fig.3 Layout of system

### 1.2 温度稳定性分析

考虑快反镜面形测试系统实际检测面形误差时外界环境温度会产生变化, 由于光学镜片和机械结构的热膨胀系数不同, 且温度变化对使得镜片和机械结构产生热应力和热变形而影响光束传播导致光学系统性能下降进而影响快反镜面形测试系统的测量精度。光机热集成分析方法 (TSO) 是一种通过结合光学、机械学和热力学等多个学科为一体的计算过程, 于 1981 年由美国 Honeywell 公司的 Miller 等人<sup>[22]</sup> 最

早提出, 其通过综合分析机械结构系统, 光学设计, 材料选择以及外界环境等多方面因素之间的关系, 对光学系统施加热载荷以仿真分析系统性能的优劣, 从而判断光学系统的温度稳定性<sup>[16-17, 23-25]</sup>。文中通过光机热集成分析对快反镜面形测试光学系统进行温度稳定性分析, 光机热集成分析的流程如图 4 所示<sup>[16-17, 26]</sup>。

快反镜面形测试系统检测状态时, 其前置离轴无焦卡式扩束系统主要会受到外部工作环境温度变化的影响。根据光学系统设计采用 SolidWorks 软件建立系统的结构模型, 依据系统部件材料的差异导入模型元件的对应参数, 采用 Patran 软件创建有限元模型, 其中网格划分的大小、疏密程度会影响分析结果的准确度。文中采用六面体网格对模型进行网格划分, 使用手动划分网格方法, 其中划分的网格模型单元总数为 37671 个, 网格最小的尺寸为 1 mm, 最大的尺寸为 33 mm, 其有限元模型如图 5 所示。

划分网格后, 对有限元模型添加约束条件, 其中位移边界条件为限制支撑腿位移的自由度。基于温度变化对光学系统性能的影响, 环境参考温度选取为  $20^\circ\text{C}$ , 温度分析范围为  $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ , 以  $10^\circ\text{C}$  温差为梯度计算光学系统的温度稳定性情况。通过对模型施加  $\pm 30^\circ\text{C}$  的热载荷, 输入参数后即可生成分析计算所用的 .bdf 模型。采用 Nastran 软件打开 .bdf 模型进行分析计算获得 .xdb 结果文件, 再采用 Patran 软件将其

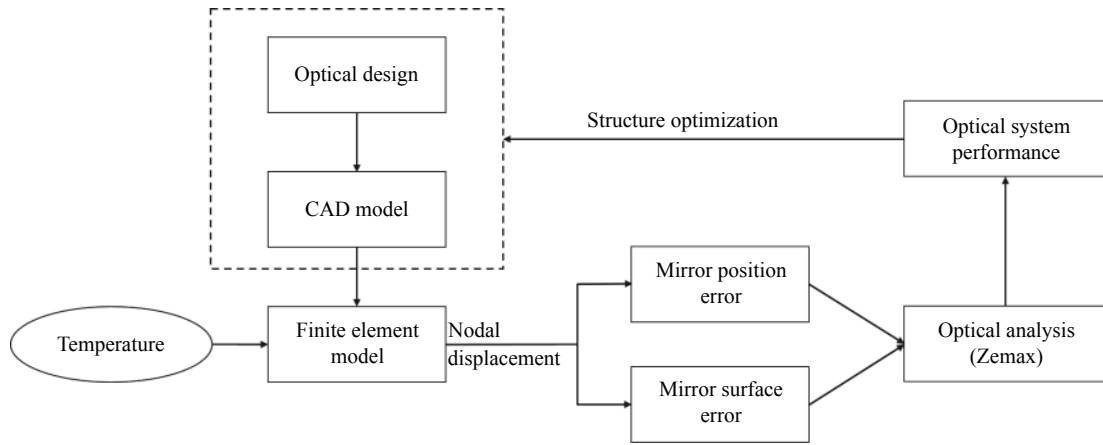


图 4 光机热集成分析流程图

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

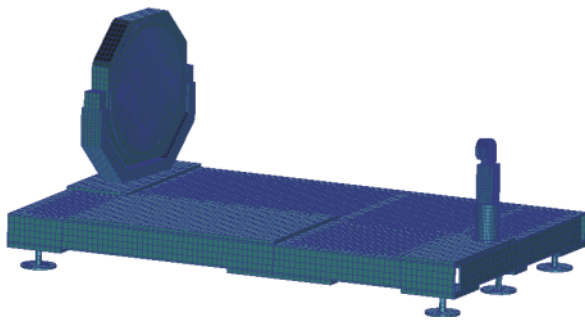


图 5 系统有限元模型图

Fig.5 Finite element model of system

打开.xdb 结果文件进行计算, 得到系统的热变形云图如图 6 所示。

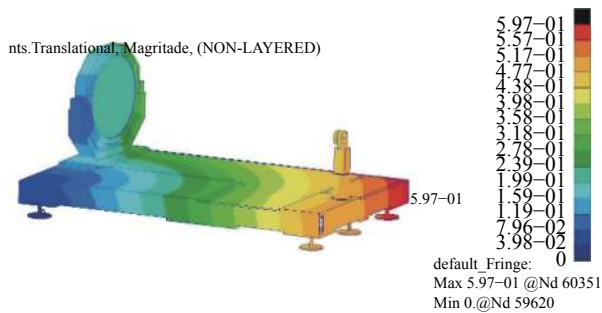
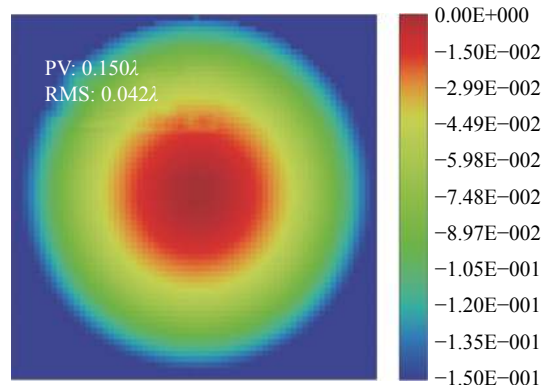


图 6 系统位移云图

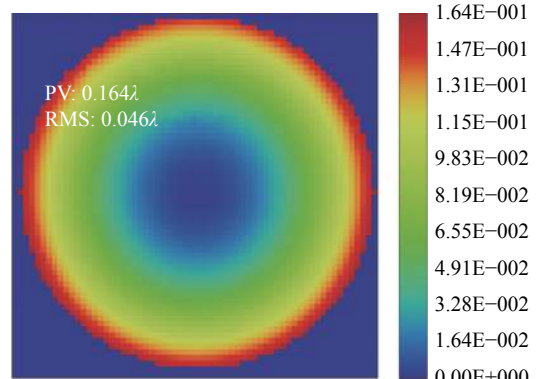
Fig.6 Displacement nephogram of system

由于外界环境温度的变化会使得镜片面形和镜片间距产生变化, 故完成光学系统机械热分析之后, 需要分析温度变化对镜片面形产生的影响, 故下一步将进行对镜片面形变化的数据拟合分析。其中数据拟合分析的方法有二次曲面拟合法, 齐次坐标变换

法, Zernike 多项式拟合等<sup>[17, 27]</sup>。文中采用 Zernike 多项式拟合的方法在 MATLAB 软件中实现数据拟合分析, 将获得的数据导入 Zemax 软件中得到像差数据(如图 7 所示), 并且当温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 镜面面形 RMS 值为  $0.042\lambda$ (RMS,  $\lambda=633\text{ nm}$ ), 温度为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 镜面面形 RMS 值为  $0.046\lambda$ (RMS,  $\lambda=633\text{ nm}$ )。



(a)  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

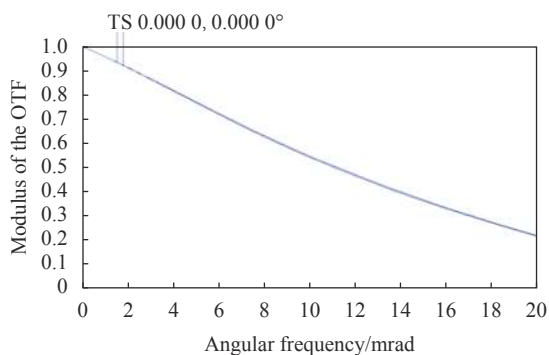


(b)  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

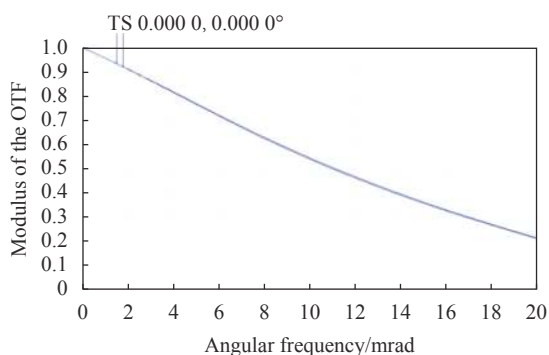
图 7 不同温度下的波像差图

Fig.7 Wavefront aberration at different temperatures

同时,如图 8 所示,外界环境温度变化后光学系统的 $MTF$ 变化不大,当温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,截止频率为 $20\text{ lp/mm}$ 处的光学系统各视场的 $MTF$ 均高于 $0.2$ 。图 9 表示系统在 $20^{\circ}$ 时,镜片无刚性位移,不会产生面形变化,截止频率为 $20\text{ lp/mm}$ 处的光学系统各视场的 $MTF$ 均为 $0$ 。图 10 表明光学系统在 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,镜面面形虽然随外界环境温度变化也随之成线性变化,但在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极值情况下,镜面面形 $RMS$ 值仍满足光学系统的性能指标,证明了快反镜面形测试系统具有温度稳定性。



(a)  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b)  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 8 不同温度下的系统  $MTF$  曲线图

Fig.8 MTF curve of system at different temperatures

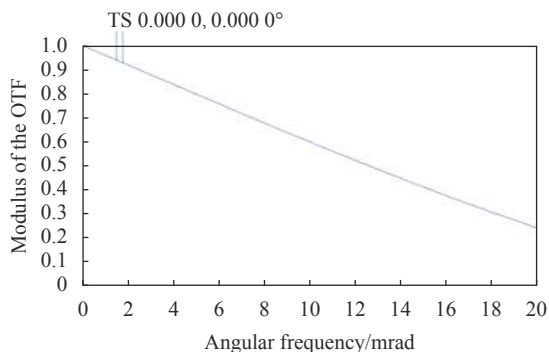


图 9  $20^{\circ}$ 时系统  $MTF$  曲线图

Fig.9 MTF curve of system at  $20^{\circ}$

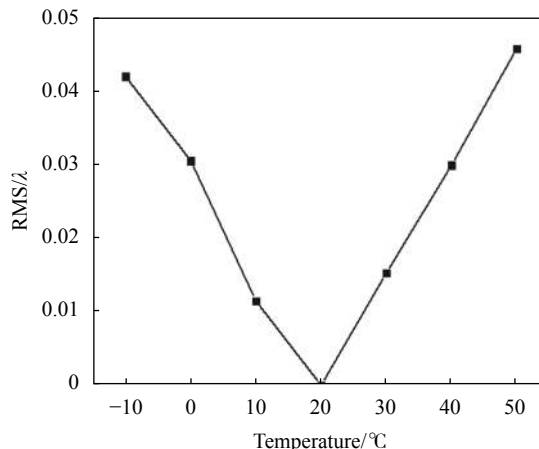


图 10 系统像差  $RMS$  随温度变化曲线

Fig.10 Curve of system aberration  $RMS$  with temperature

## 2 光学系统装调与机械稳定性分析

文中采用的前置大口径扩束光学系统为离轴无焦卡式扩束光学系统,该系统虽然具有结构紧凑,中心无遮挡以及光能利用率高等优势,但安装调试该系统具有一定的难度系数。图 11 为快反镜面形测试系统的装调流程即安装调试前置扩束系统的主镜及其面形检测、主次镜联合调试、前置扩束光学系统检测和焦面附件系统安装调试,其中前置大口径扩束光学系统的装调根据自动准直检测原理实行安装调试过程,该过程使用动态干涉仪实时检测光学系统的波像差,使得前置大口径扩束光学系统达到参数指标要求<sup>[16-17, 28]</sup>。

前置大口径扩束光学系统装调的使用工具主要有 4D 干涉仪和 500 mm 口径平面镜,具体过程为:首先判定平面镜与机械支撑结构的对应位置,放置主镜并在其理论焦点处放置 4D 干涉仪,调整主镜以确定其焦点位置,确定位置后使用干涉仪检测主镜面形,微调达到参数标准后固定主镜位置。再者放置次镜并确认主、次镜的对应位置,再将 4D 干涉仪放置次镜反射出光方向进行主、次镜联调,使得前置大口径扩束光学系统的波像差达到参数要求<sup>[17, 28]</sup>。后将光源及光源扩束系统、分束镜组、反射镜、补偿反射镜、PSD 组、CCD、波前传感器等器件依次放置于面形测试光路中,可实现实时测量并记录快反镜面形误差信息。经测量该系统波前误差为 $0.046\lambda$  ( $RMS, \lambda=633\text{ nm}$ ),前置扩束系统的扩束比为 $1:20$ ,且系统被集成封装到箱体中,图 12 为系统实物图。

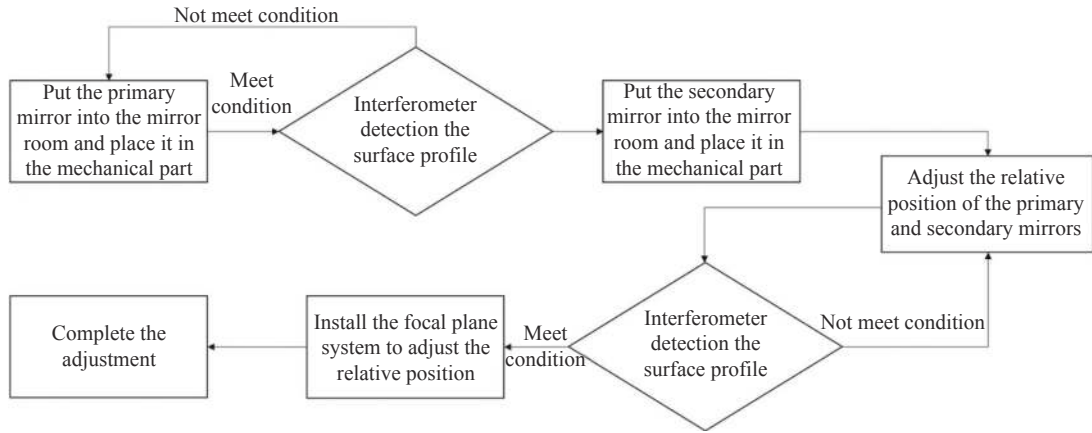


图 11 系统装调流程图

Fig.11 Flow chart of system installation

机械稳定性同样是光学系统测试能力的重要指标。将口径为 500 mm 的平面镜放置于快反镜面形测试系统前,并在系统稳定后实行稳定性检测。每 5 min 记录一次数据,共 10 次(如图 13 所示),并计算 10 次数据的均方根值。经测试,快反镜面形测试系统的稳定性为  $0.048\lambda$ (RMS,  $\lambda=633\text{ nm}$ ),结果表明该系统稳定性较高,具有较好的测试能力。

差数据的 Zernike 多项式拟合系数,以便后续系统的测试与数据分析。



图 12 快反镜面形测试系统图

Fig.12 Picture of surface figure test system of FSM

为了验证快反镜面形测试系统实时测量与记录快反镜面误差信息的功能,将快反镜置于快反镜面形测试系统的出光口处,光束经前置扩束系统及快反镜反射后,入射至数据采集硬件即 PSD、CCD 和波前传感器中。PSD 实时采集并记录光斑质心的变化,CCD 实时采集并记录光斑的变化。经测试,被测快反镜工作状态下的面形误差为  $0.059\lambda$ (RMS,  $\lambda=633\text{ nm}$ ),如图 14 所示。同时测试软件分析并记录快反镜面形误

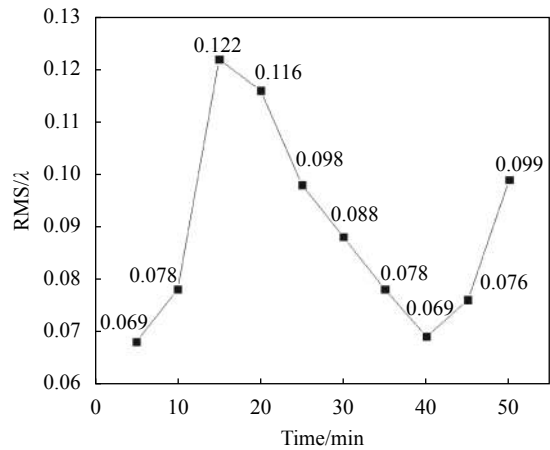


图 13 RMS 随时间变化曲线

Fig.13 Curve of RMS with time

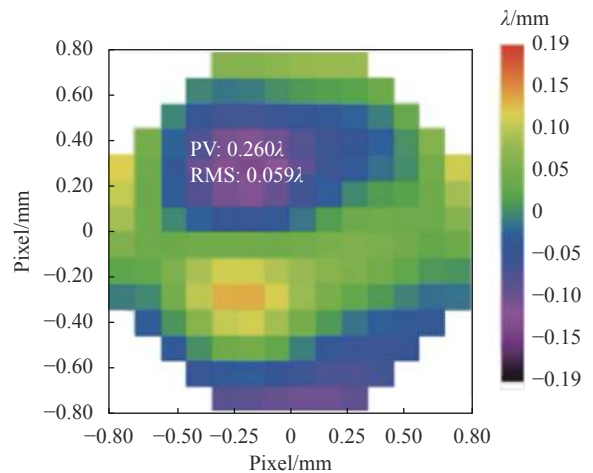


图 14 波前传感器测量的波像差

Fig.14 Wave aberration measured by wavefront sensor

### 3 结 论

为实现工作状态下大口径快反镜面形误差的实时检测,文中设计了大口径快反镜面形测试系统,并进行了快反镜面形测试系统的光学机械结构设计,阐述了光学系统的设计方案和参数设计及其模拟和仿真,并基于光机热仿真分析可知该系统处于 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作环境下时可以进行实时高精度测量和记录且及稳定性强,其测量稳定性为 $0.048\lambda(\text{RMS}, \lambda=633\text{ nm})$ 。

#### 参考文献:

- [1] Fang Chu. Design and research on fast steering mirror system used in beam steering control devices [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [2] Loney G C. Design of a small-aperture steering mirror for high bandwidth acquisition and tracking [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1360-1365.
- [3] Algrain M C. High-bandwidth attitude jitter determination for pointing and tracking systems [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(7): 2092-2110.
- [4] Reynold W C, Richard H V. Fast steering mirrors in optical control systems[C]//Proc SPIE, 1990, 1303: 245-251.
- [5] Raj A A B, Selvi J A V, Kumar D, et al. Design of cognitive decision making controller for autonomous online adaptive beam steering in free space optical communication system [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 84: 765-799.
- [6] Sweeney M N, Erdelyi E, Ketabchi M, et al. Design considerations for optical pointing and scanning mechanisms[C]//Proc SPIE, 2003, 5176: 135-146.
- [7] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Opt & Precision Eng*, 2014, 22(6): 1548-1554. (in Chinese)
- [8] Tanzillo J N, Dunbar C B, Lee S. Development of a lasercom testbed for the pointing, acquisition, and tracking subsystem of satellite-to-satellite laser communications link[C]//Proc SPIE, 2008, 6877: 687704.
- [9] Cho M K, Corredor A, Dribusch C, et al. Development of a fast steering secondary mirror prototype for the Giant Magellan Telescope[C]// Proc SPIE, 2012, 8444: 844420.
- [10] Watson J, Avicola K, Payne A, et al. Fast steering mirror systems for the U-AVLIS program at LLNL[C]//Proc SPIE, 2012, 2375: 96-102.
- [11] 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)
- [12] Chen Haiping, Xiong Zhao, Cao Tingfen, et al. Research on surface measure device for process of large aperture mirror assembly [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212002. (in Chinese)
- [13] Han Z, Yin L, Chen L, et al. Absolute flatness testing of skip-flat interferometry by matrix analysis in polar coordinates [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2387.
- [14] Yuan Li. Measurements of topography of a 1.5 m flat mirror and control of errors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [15] Wang Kai, Gao Xuepeng. Research on testing system of fast steering mirror [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 1-5. (in Chinese)
- [16] Zhang Yu, Yang Zhongming, Liu Zhaojun, et al. Design of large aperture multi-spectra channel wavefront measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190559. (in Chinese)
- [17] Zhang Yu. Research on coaxial large aperture multi-spectra channel wavefront measurement system[D]. Qingdao: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [18] Ma Tao. Research on mid-infrared laser tracking and launching system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] Jiang Kai. The study of off-axis catadioptric MWIR continuous zoom optical system[D]. Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [20] Gu Xixi. Research on design technology of off-axis reflective optical system with freeform surface[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [21] Jiang Kai, Zhou Sizhong, Wang Yanbin, et al. Design of large aperture off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2467-2471. (in Chinese)
- [22] Miller J, Hatch M, Green K. Predicting performance of optical systems undergoing thermal/mechanical loadings using



- integrated thermal/structural/optical numerical methods [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 166-174.
- [23] 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)
- [24] Han X, Zhang J, Gao T Y, et al. Research on thermal integrated optomechanical analysis method of transmissive infrared optical systems [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(12): 1136-1141. (in Chinese)
- [25] 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, 48(4): 0418003. (in Chinese)
- [26] Pan Yue, Xu Xiping, Qiao Yang. Optical-structural-thermal analysis of zoom infrared dual-band projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0522001. (in Chinese)
- [27] Zhang Haosu, Zhao Yan, Xu Dong. Infrared imaging model based on coordinate conversion [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(8): 112-118. (in Chinese)
- [28] Zhao Qi, Hu Mingyong, Li Mingjie, et al. Assembly technology of alt-az off-axis beam expanding optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 563-569. (in Chinese)