

基于光机热集成分析的大规模拼接焦面误差分配

牛盛光^{1,2}, 郭 亮^{1*}, 陆振玉¹, 韩 康¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:随着空间天文、态势感知、环境监测等领域的要求越来越高,空间望远镜正在向着大视场、大口径的方向发展。大规模焦面拼接技术是大视场空间望远镜的关键技术,其主焦面平面度误差($P-V$ 值)分配方法一般都是基于经验的直接赋值法,容易出现误差分配不合理的问题。本文提出一种拼接焦面误差分配方法,通过光机热集成分析对重要参数误差进行精确分配。以 16 片互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器 4×4 机械直接拼接焦面为例,建立了拼接焦面误差树,通过光机热集成分析方法分析了重力和温度等重要参数对拼接焦面平面度的影响,最终给出误差分配结果。分析结果表明:两种不同姿态下重力造成的平面度误差分别为 $0.28\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$,温度造成的平面度总误差为 $5.5\ \mu\text{m}$,留 30% 余量后,确定重力和温度引起的平面度误差分配值分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $7.2\ \mu\text{m}$ 。

关 键 词:焦面变形;光机热集成分析;误差分配;CMOS 拼接

中图分类号:TH74 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2022-0094

Large-scale splicing focal plane error distribution based on optical-structural-thermal integration analysis

NIU Sheng-guang^{1,2}, GUO Liang^{1*}, LU Zhen-yu¹, HAN Kang¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: guoliang@ciomp.ac.cn

Abstract: As the requirements of space astronomy, situational awareness, environmental monitoring and other fields grow higher, space telescopes are developing toward large fields of view and large apertures. Large-scale focal plane stitching technology is the key technology of large-field space telescopes. The allocation method of the main focal plane flatness error ($P-V$ value) is generally a direct assignment method based on experience, which is prone to unreasonable error allocation. In this paper, a method of splicing focal plane error allocation is proposed, which can accurately allocate important parameter errors through optical-structural-thermal integration analysis. Taking 4×4 mechanical direct splicing focal plane with 16 pieces of Comple-

收稿日期:2022-05-09; 修订日期:2022-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61605203); 中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2015173)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61605203); Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2015173)

mentary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) image sensor as an example, an error tree of splicing focal planes is established. The influence of important parameters such as gravity and temperature on the flatness of splicing focal plane is analyzed by the method of optical-structural-thermal integration analysis. The error distribution result is finally given. The analysis shows that the flatness errors caused by gravity under two different attitudes are $0.28\text{ }\mu\text{m}$ and $1.55\text{ }\mu\text{m}$ respectively, and the total flatness error caused by temperature is $5.5\text{ }\mu\text{m}$. After leaving a 30% margin, the assigned values of the flatness error caused by gravity and temperature are determined to be $2\text{ }\mu\text{m}$ and $7.2\text{ }\mu\text{m}$, respectively.

Key words: focal plane deformation; optical-structural-thermal integration analysis; error distribution; CMOS splicing

1 引言

为了进一步探索宇宙,满足国家对空间环境监测和预报的重大战略需求^[1],空间望远镜正在向着大口径、大视场的方向发展^[2-3]。拼接焦面是大视场望远镜完成观测任务的关键部件,用于接收观测信号并进行光电转换^[4]。对于拼接焦面而言,主焦面受温度、重力、拼接装调等多种因素影响将产生变形。这些变形造成主焦面平面度误差,使系统产生局部散焦,进而产生图像模糊,降低成像质量^[5]。如果没有各误差项对主焦面变形造成影响的具体数据,在后期工作中就很难做出有针对性的工作。所以,将造成拼接焦面主焦面平面度的各项误差项逐一列举并合理分配,对保证系统成像质量有重要意义。

日本国家天文台建造的 Subaru Telescope,其相机 Suprime-Cam 采用 10 片 CCD (Charge Coupled Device) 进行 2×5 的拼接,在设计阶段,工作人员就将其主焦面 $60\text{ }\mu\text{m}$ 平面度误差分配到重力、单片 CCD 平面度、装调误差等几个方面,并直接赋予误差项数值,最后通过实验验证是否达到分配的目标^[6-7]。LSST (The Large Synoptic Survey Telescope) 焦平面使用 189 片 CCD 进行拼接,由于使用 CCD 数量多,所以拼接步骤分两步:首先,将 9 片 CCD 按照 3×3 阵列拼接到小的基板上,并命名为“raft”,再将 21 个 raft 拼接到大的拼接基板上。工作人员通过分析主焦面平面度误差来源,将平面度误差分配到单片 CCD 平面度误差、raft 单元和主焦面的组装误差、热力造成的焦面变形等几个方面,也直接将误差项赋予数值^[8-9]。J-PAS (Javalambre Physics-of-the-Acceler-

ating-Universe Astrophysical Survey) 使用的相机,其焦平面是由 14 个科学 CCD、8 个波前传感器、4 个导向 CCD 组成。在设计阶段,工作人员直接分配给拼接焦面平面度 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的误差,后期通过精密的热控制来保证焦平面在低温工况下的平面度^[10-11]。TAOS II (The Transneptunian Automated Occultation Survey) 相机焦平面是由 10 片 CMOS 图像传感器拼接而成的,设计人员考虑了单片图像传感器的平面度、重力等因素引起的主焦面平面度变化,并规定了各项允许的极限值,通过仿真分析验证焦面平面度是否满足需求^[12-13]。以上对于拼接焦面平面度误差分配的方式都是基于经验对主焦面平面度误差直接进行分配赋值。这种分配方式虽然很直接,但是分配的误差值难免会出现不合理的情况,例如实测值超过误差分配值,一旦出现异常情况则需要重新进行误差分配,增大工作量。

针对现有误差分配方式的不足之处,本文提出一种基于光机热集成分析的误差分配方法,分析重力和温度对拼接焦面平面度的影响,根据分析结果,对造成主焦面平面度误差进行科学、合理的分配。

2 集成分析方法与误差来源

2.1 光机热集成分析方法

光机热集成分析是一种将光学、机械、热等多个学科综合考虑并进行仿真的分析方法,主要研究多种载荷下,光机系统的部件发生变形对系统造成的影响^[14]。目前,光机热集成分析已广泛应用于空间望远镜、工业相机、航天相机等光机系统的设计阶段,其分析结果也成为光机系统设

计的重要依据^[15-16]。本文将光机热集成分析引入到误差分配中,根据分析结果对重要误差参数进行精确分配,大大提高了误差分配的可信度,对拼接焦面误差分配具有重要指导意义。

首先,建立了有限元结构分析模型,添加重力载荷,通过分析得到拼接焦面受重力影响的变形量;之后,建立有限元热分析模型并进行热分析,

得到拼接焦面的温度分布云图;最后,将热分析得到的结果作为载荷条件加载到结构分析模型上,进行集成分析得到拼接焦面受温度影响的变形量。

2.2 拼接焦面结构组成

本文拼接焦面结构如图 1 所示。主要由 16 片 CMOS 图像传感器、拼接基板、3 个支撑结构组成。

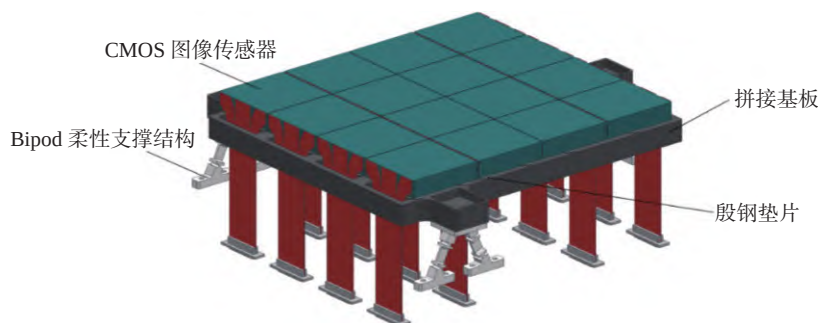


图 1 拼接焦面结构

Fig. 1 Stitched focal plane structure

图像传感器封装基底的材料为碳化硅,传感器底部设计有 3 个安装螺柱,每个螺柱固定一个可拆卸的股钢垫片与拼接基板直接接触。拼接基板也采用碳化硅材料加工而成,并预留好图像传感器与支撑结构的安装孔与螺纹孔。拼接焦面的支撑结构选择用铝加工制成 Bipod 支撑结构,可在一定程度上释放装配应力与热应力,减小对主焦面面形的影响^[17]。16 片 CMOS 图像传感器,以机械直接拼接方式在拼接基板上进行 4×4 的拼接,主焦面规模达 267 mm×289 mm。

2.3 误差来源分析及误差树建立

类比大口径望远镜光学系统误差分析^[18],对拼接焦面误差来源进行分析。经分析,主焦面平面度误差主要来源于以下几方面:(1) CMOS 图像传感器感光面平面度误差;(2) 主焦面常温拼接后的变形(包含测量误差);(3) 支撑结构装调引起的主焦面变形;(4) 在轨重力释放引起的主焦面变形;(5) 环境温度变化引起的主焦面变形;(6) 随机误差。

其中,主焦面常温拼接后的变形包含测量误差,主要由拼接精度决定,股钢垫片的修磨直接影响拼接精度,通常通过修磨股钢垫片来保证常温下拼接后的主焦面平面度在一定范围内。环境温度变化造成的平面度误差包含主焦面与安装基面由于温差过大、主焦面温度分布不均匀造成的焦

面变形。

通过对现有拼接焦面误差分配方式调查发现,重力、温度两个因素造成的主焦面平面度误差是不可避免的。工作人员在分析时,也着重分析了这两个因素造成的平面度误差。所以,对于重力、温度两个重要参数更需要精确分配。

根据上述分析,建立拼接焦面误差树,如图 2 所示。主焦面平面度总误差等于各项误差之和。

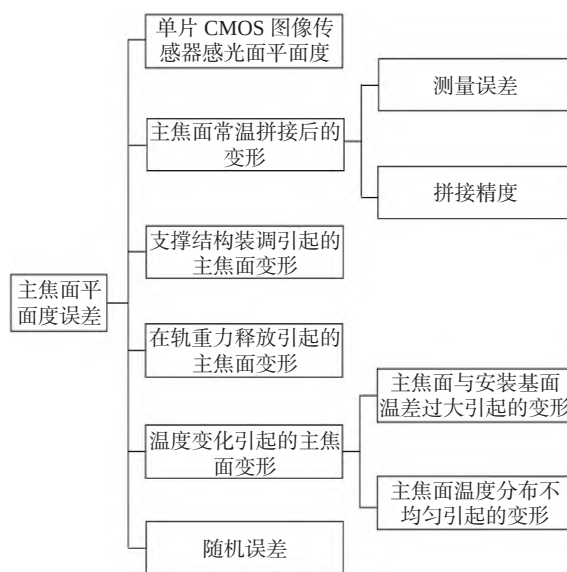


图 2 主焦面平面度误差树

Fig. 2 Main focal plane flatness error tree

3 误差分析与分配

3.1 单片 CMOS 图像传感器感光面平面度

单片 CMOS 图像传感器感光面平面度由目前生产技术水平决定。经生产单位提供,单片 CMOS 图像传感器感光面平面度不大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.2 主焦面常温拼接后的变形

主焦面常温拼接后的变形主要由拼接精度直接影响,而且包含测量设备误差,一般通过修磨殷钢垫片使主焦面平面度保持在一定范围内。由 T.Sako 等人研制的 MOA-cam3 空间相机,其焦面由 10 片 CCD 拼接组成,常温拼接后的主焦面变形约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。在此,引用 MOA-cam3 空间相机焦面常温拼接的变形数据。考虑到本文与 MOA-cam3 空间相机使用的图像传感器数量及规格都不相同,所以在其基础上多留 30% 余量,加上三维表面形貌仪的激光探头有 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的测量误差,最终给主焦面常温拼接后的变形分配 $8.5\text{ }\mu\text{m}$ 误差。

3.3 支撑结构装调引起的变形

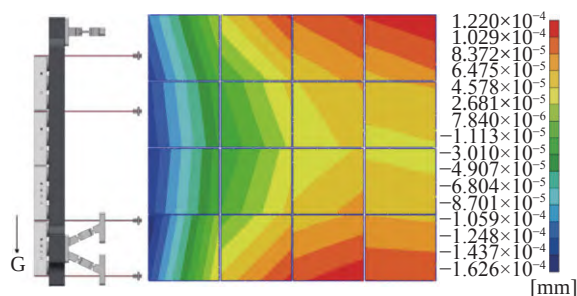
拼接焦面的支撑部件为 Bipod 柔性支撑结构,可在一定程度释放装配应力和热应力。经分析得知, Bipod 柔性支撑结构对主焦面变形的影响不超过 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.4 重力引起的主焦面变形

在地面上很难模拟失重环境,所以在地面进行面形检测时,将拼接焦面整体转一个角度,使焦面法线方向的重力负载为零,通过转换角度的方法来验证焦面在各个姿态下的自重力变形是否满足设计要求。所以在仿真分析阶段,要使主焦面法线方向的重力负载为零,通过转换角度的方法计算焦面在各个姿态下重力引起的变形,边界条件为支撑结构的 12 个安装孔固定,载荷条件为各个姿态下的重力载荷。

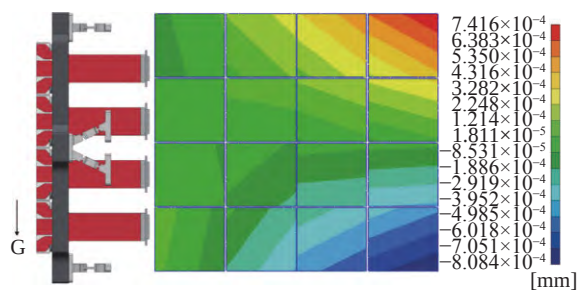
主焦面测试姿态为主焦面法线平行于地面时的姿态,定义图 3(a)(彩图见期刊电子版)姿态为测试姿态 1。整个焦平面的位移云图在图 3(a)给出,此时主焦面最大变形为 $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 。图 3(b)(彩图见期刊电子版)为焦平面由测试姿态 1 沿拼接焦面法线旋转 90° ,定义该姿态为测试姿态 2。图 3(b)给出了该姿态下主焦面位移云图,该姿态下主焦面最大变形为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 。最终以最大变形量为仿真结果。考虑到有限元分析模型的简化,网格划

分的大小不同且不对称,会导致仿真结果与实际测量结果有一定偏差,所以,在这里将最终分配结果在仿真结果的基础上留 30% 的余量,约为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) 测试姿态 1 重力引起的位移云图

(a) Displacement nephogram due to gravity in the test pose 1



(b) 测试姿态 2 重力引起的变形

(b) Displacement nephogram due to gravity in the test pose 2

图 3 重力引起的主焦面变形分析

Fig. 3 Analysis of distortion of the main focal plane due to gravity

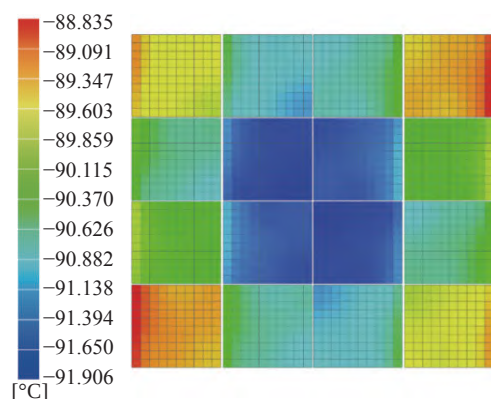
3.5 温度引起的主焦面变形

对比多种热控方案,主焦面的温差最终控制为 $3.1\text{ }^\circ\text{C}$,图 4(a)(彩图见期刊电子版)为主焦面的温度分布云图。光机热集成仿真比较重要的一个步骤就是将热分析得到的温度场作为载荷条件加载到结构模型上,将热模型的节点温度映射到结构分析模型上,即温度场映射:

$$\mathbf{T}_k = \mathbf{L}\mathbf{T}_T, \quad (1)$$

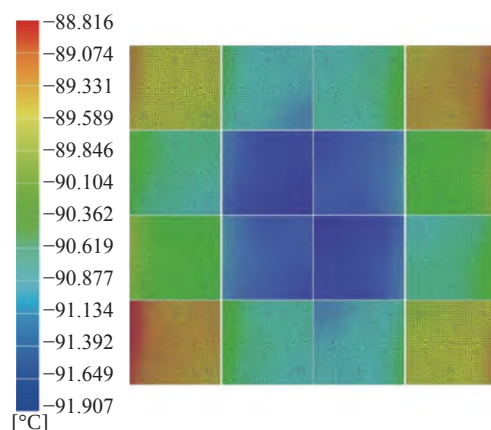
式中, $\mathbf{T}_k$ 代表与热分析模型相近节点的结构分析模型节点温度矩阵, $\mathbf{T}_T$ 代表热分析模型节点温度矩阵, $\mathbf{L}$ 代表线性插值矩阵。若热模型节点与结构模型节点重合则温度直接映射,若不重合,则通过周围点的温度进行线性插值得到结构模型节点温度进行映射。图 4(b)(彩图见期刊电子版)为温度场映射的结果。

主焦面的工作温度约为 $-90\text{ }^\circ\text{C}$,远远低于拼接焦面的安装基面温度,加上安装基面的材料为钛合金,其与图像传感器碳化硅材料线胀系数差别很大,所以会引起主焦面变形。通过有限元仿



(a) 焦面热分析结果

(a) Result of focal plane thermal analysis



(b) 温度场映射结果

(b) Result of temperature field mapping

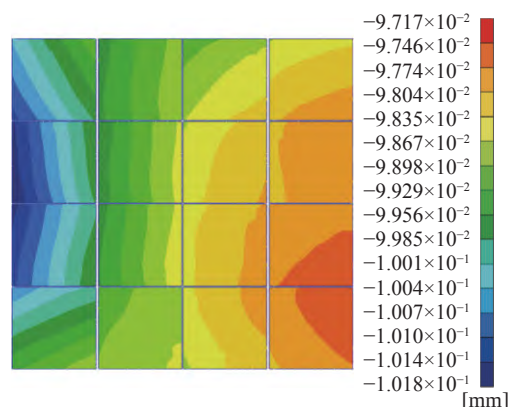
图 4 焦面热分析与温度场映射结果

Fig. 4 Results of focal plane thermal analysis and temperature field mapping

真分析软件计算因焦面与安装基面温差过大引起的主焦面变形,边界条件为 3 个支撑结构的 12 个安装孔固定,载荷条件为焦面温度 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$,支撑结构底部安装面温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 5(a)(彩图见期刊电子版)显示由于主焦面与安装基面温差过大引起的主焦面变形量为 $4.63\text{ }\mu\text{m}$ 。

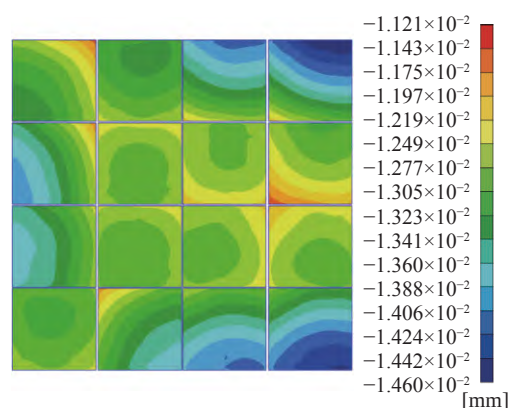
低温热管安装在拼接基板的背面,在主焦面工作时提供制冷。由于各个部件的材料不一致,传热效果也就不同,加上零部件在结构设计时不完全对称,会使主焦面的温度分布不均匀,从而造成主焦面变形。通过有限元仿真分析软件计算焦面自身温度不均匀引起的变形,边界条件为拼接基板 3 个安装面无摩擦滑动,载荷条件为焦面温度场。图 5(b)(彩图见期刊电子版)显示焦面自身温度不均匀引起的主焦面变形量为 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 。

以上两种情况,共同造成温度对主焦面平面的影响。通过有限元分析软件计算由于温度变化对主焦面产生的总变形,边界条件为支撑结构



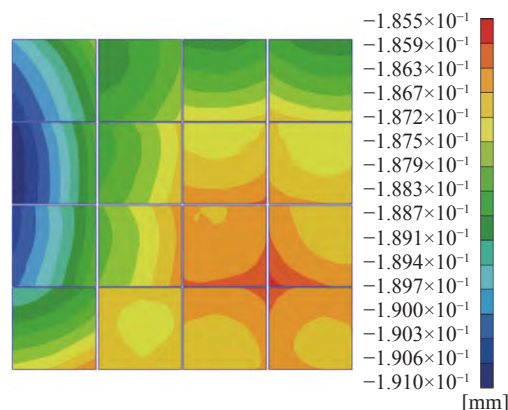
(a) 主焦面与安装基面温差过大引起的位移云图

(a) Displacement nephogram caused by an excessive temperature difference between the main focal plane and the installation base



(b) 主焦面温度不均匀引起的位移云图

(b) Displacement nephogram caused by uneven temperature of the main focal plane



(c) 温度引起的总位移云图

(c) Total deformation of the main focal plane due to temperature

图 5 温度引起的主焦面变形分析

Fig. 5 Analysis of deformation of the main focal plane due to temperature

的 12 个安装孔固定,载荷条件为焦面温度场。图 5(c)(彩图见期刊电子版)为温度变化引起的主焦面的总位移云图。由分析可知,温度对主焦面造成的总变形量为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 。最终分配结果在仿真结果的基础上留 30% 的余量,约为 $7.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.6 随机误差

随机误差虽然小,但是不可避免的。考虑到工作人员造成的轻微震动、环境的气压和温度以及测量设备传动部件的摩擦都会引起主焦面平面度测量值的不稳定,最终将随机误差定为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。最终误差分配结果如表1所示。

表1 误差分配结果
Tab. 1 Results of the error distribution

误差项	范围/ μm	仿真结果/ μm
单片CMOS图像传感器感光面平面度	≤ 20	—
主焦面常温拼接后的变形: (a) 测量误差; (b) 拼接精度	≤ 8.5	—
支撑结构装调引起的主焦面变形	≤ 2	—
在轨重力释放引起的主焦面变形	≤ 2	1.55
温度引起的主焦面变形: (a) 主焦面与安装基面温差过大; (b) 主焦面温度分布不均匀	≤ 7.2	5.5
随机误差	≤ 0.5	—
合计	≤ 40.2	—

参考文献:

- [1] 方成, 顾伯忠, 袁祥岩, 等. 2.5 m大视场高分辨率望远镜[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2019, 49(5): 059603. FANG CH, GU B ZH, YUAN X Y, *et al.*. 2.5 m wide-field and high-resolution telescope[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(5): 059603. (in Chinese)
- [2] 李宗轩, 金光, 张雷, 等. 3.5m口径空间望远镜单块式主镜技术展望[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 532-541. LI Z X, JIN G, ZHANG L, *et al.*. Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 532-541. (in Chinese)
- [3] 曹小涛, 孙天宇, 赵运隆, 等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 739-748. CAO X T, SUN T Y, ZHAO Y L, *et al.*. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 739-748. (in Chinese)
- [4] SAKO T, SEKIGUCHI T, SASAKI M, *et al.*. MOA-cam3: a wide-field mosaic CCD camera for a gravitational microlensing survey in New Zealand[J]. *Experimental Astronomy*, 2008, 22(1): 51-66.
- [5] OLIVIER S S, SEPPALA L, GILMORE K, *et al.*. LSST camera optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62730Y.
- [6] OBUCHI Y, KOMIYAMA Y, KAMATA Y, *et al.*. Hyper Suprime-Cam: implementation and performance of the cryogenic Dewar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8446: 84466Q.
- [7] KOMIYAMA Y, OBUCHI Y, NAKAYA H, *et al.*. Hyper Suprime-Cam: camera Dewar design[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2018, 70(SP1): S2.
- [8] RASMUSSEN A P, HALE L, KIM P, *et al.*. Focal plane metrology for the LSST camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62732U.
- [9] TAKACS P Z, O'CONNOR P, RADEKA V, *et al.*. LSST detector module and raft assembly metrology concepts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62733Q.
- [10] ROBBINS M S, BASTABLE M, BATES A, *et al.*. Performance of the e2v 1.2 GPix cryogenic camera for the J-PAS 2.5m survey telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9908: 990811.
- [11] TAYLOR K, MARÍN-FRANCH A, LAPORTE R, *et al.*. JPCAM: a 1.2 GPIXEL camera for the J-PAS survey[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2014, 3(1): 1350010.
- [12] PRATLONG J, WANG S Y, LEHNER M, *et al.*. A 9 megapixel large-area back-thinned CMOS sensor with high sensitivity and high frame-rate for the TAOS II program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9915: 991514.
- [13] WANG S Y, GEARY J C, AMATO S M, *et al.*. High speed wide field CMOS camera for transneptunian automatic occultation survey[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9147: 914772.

4 结 论

本文提出了一种基于光机热集成分析的拼接焦面平面度误差分配方法,通过光机热集成分析对重要参数误差进行精确分配。以16片CMOS图像传感器4×4机械直接拼接焦面为例,建立了误差树,分析重力、温度等重要参数对拼接焦面平面度的影响。分析结果表明:两种不同姿态下重力造成的平面度误差分别为 $0.28\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$,温度造成的平面度总误差为 $5.5\ \mu\text{m}$,留30%余量后,确定重力和温度引起的平面度误差分配值分别为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $7.2\ \mu\text{m}$ 。经过误差分配,最终确定主焦面平面度总误差不超过 $40.2\ \mu\text{m}$ 。本文所研究的基于光机热集成分析的大规模拼接焦面误差分配可为同类拼接焦面的误差分配提供参考。

- [14] 温敬阳. 光机热集成分析方法与技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
WEN J Y. Research on methods and techniques of optomechanical integrated analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [15] 王增伟, 赵知诚, 杨溢, 等. 基于刚体运动完备方程的光机热集成分析方法[J/OL]. 红外与激光工程, (2021-11-11). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211110.1706.004.html>.
WANG Z W, ZHAO ZH CH, YANG Y, *et al.*. Thermal-structural-optical integrated analysis method based on the complete equations of rigid body motion[J/OL]. Infrared and Laser Engineering, (2021-11-11). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211110.1706.004.html>. (in Chinese)
- [16] 赵晓东, 王晶. 米级口径经纬仪保护窗口镜面变形分析[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 654-661.
ZHAO X D, WANG J. Analysis of the mirror deformation of one-meter theodolite protective window[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 654-661. (in Chinese)
- [17] 张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 438-443.
ZHANG L M, WANG F G, AN Q CH, *et al.*. Application of Bipod to supporting Structure of minitype reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 438-443. (in Chinese)
- [18] 明名, 王建立, 张景旭, 等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 104-108.
MING M, WANG J L, ZHANG J X, *et al.*. Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 104-108. (in Chinese)

作者简介:



牛盛光(1997—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 2020 年于青岛理工大学获得工学学士学位, 主要从事大规模焦平面拼接的研究。E-mail: 961568790@qq.com



郭亮(1982—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2004 年、2006 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位, 2013 年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事传热质学研究、航空/航天光学遥感器热控制技术研究、光电材料与器件技术研究。E-mail: guoliang@ciomp.ac.cn