

文章编号 1004-924X(2026)17-2613-09

基于热-结构耦合分析的低温 4×4 拼接探测器 主焦面平面度误差分配

孙政奇^{1,2}, 王之一^{1*}, 王建立^{1,2}, 刘昌华^{1,2}, 杨云竹^{1,2}, 张胜博^{1,2}, 姚凯男^{1,2}

(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:针对低温工况下 4×4 拼接探测器主焦面平面度误差分配中, 温度变形与重力变形分项计算、单一姿态分析难以真实反映实际工作状态的问题, 提出一种基于热-结构耦合分析的低温多姿态平面度误差分配方法。建立包含探测器、拼接基板、垫片和支撑结构的有限元模型, 首先开展稳态热分析, 并将温度场映射至结构模型; 随后在低温热力耦合状态下分别施加 0° , 30° , 45° , 60° 和 90° 重力载荷, 提取主焦面节点法向位移, 去除最佳拟合平面后计算峰谷值 (Peak-to-Valley, PV)。结果表明, 五个姿态下主焦面 PV 值分别为 4.771, 5.182, 7.962, 6.100 和 8.099 μm , 最大值出现在 90° 姿态, 较 0° 姿态增大 69.7%, 45° 和 90° 为主要控制姿态。基于低温多姿态耦合分析结果, 得到主焦面平面度误差分配总值为 38.7 μm 。该方法能够更准确地表征低温服役条件下主焦面平面度变化, 避免温度项与重力项独立叠加造成的误差失真, 可为低温拼接焦面结构设计、装调控制和工程余量确定提供依据。

关键词: 拼接探测器; 焦面平面度; 低温热力耦合; 误差分配; 有限元分析

中图分类号: TN215 文献标识码: A

doi: 10.3724/OPE.20263417.2613

CSTR: 32169.14.OPE.20263417.2613

Flatness error allocation of main focal plane in cryogenic 4×4 mosaic detector based on thermal-structural coupled analysis

SUN Zhengqi^{1,2}, WANG Zhiyi^{1*}, WANG Jianli^{1,2}, LIU Changhua^{1,2}, YANG Yunzhu^{1,2},

ZHANG Shengbo^{1,2}, YAO Kainan^{1,2}

(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: wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn

Abstract: To overcome the limitations of independently calculated thermal and gravitational deformations, as well as single-attitude analyses, in accurately representing the operational state of the main focal plane of a cryogenic (4×4) mosaic detector, a cryogenic multi-attitude flatness-error allocation method based on coupled thermal-structural analysis is proposed. A finite-element model incorporating the detector, mosaic substrate, shims, and support structure was established. Steady-state thermal analysis was

收稿日期: 2026-06-04; 修订日期: 2026-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12133009, No. 12573084)

first conducted, after which the resulting temperature field was mapped onto the structural model. Gravitational loads corresponding to attitudes of 0° , 30° , 45° , 60° , and 90° were subsequently applied under cryogenic thermal – structural coupled conditions. Normal displacements at the main focal-plane nodes were extracted, and peak-to-valley (PV) values were calculated after removal of the best-fit plane. The PV values of the main focal plane at the five attitudes were determined to be 4.771, 5.182, 7.962, 6.100, and 8.099 μm , respectively. The maximum PV value occurred at the 90° attitude, representing a 69.7% increase relative to that at 0° . The 45° and 90° attitudes were identified as the governing conditions. Based on the cryogenic multi-attitude coupled analysis, the total flatness-error allocation for the main focal plane was determined to be 38.7 μm . The proposed method enables a more realistic characterization of focal-plane flatness variations under cryogenic operating conditions, avoids error distortion arising from the independent superposition of thermal and gravitational effects, and provides a basis for structural design, assembly adjustment, and engineering-margin determination of cryogenic mosaic focal planes.

Key words: mosaic detector; focal plane flatness; low-temperature thermal coupling; error allocation; finite element analysis

1 引言

随着空间遥感、天文巡天和低温红外探测技术的进步,光电探测系统逐渐向大视场、高分辨率和高集成度方向演进。受单片探测器制造尺寸、成品率及读出规模限制,大尺寸焦面通常采用多片探测器拼接形成^[1-3]。拼接焦面的平面度直接影响各探测器像面一致性、离焦量及系统成像质量,是焦面组件装调和误差分配中的关键指标。对于低温环境下工作的拼接探测器,材料热膨胀系数不匹配、支撑结构热变形以及安装姿态变化引起的重力挠曲,会共同改变焦面位置与面形状态,使平面度误差呈现明显的工况相关性。

国内外大型光电系统均对低温拼接焦面的热稳定性和平面度控制提出了较高要求。Euclid 可见光成像仪采用大规模 CCD 焦面,用于空间弱引力透镜观测^[4]。Roman 空间望远镜宽视场仪器采用 18 片 H4RG 近红外探测器阵列,对探测器性能和焦面稳定性提出了严格要求^[5-6]。Gaia 任务中 106 片 CCD 构成大规模空间焦面,其探测器系统长期工作稳定性直接关系到高精度天体测量性能^[7-8]。地基大视场相机同样面临低温真空环境下的焦面平面度控制问题,DECam 对低温真空杜瓦内大规模 CCD 焦面开展了平面度测量研究,并提出 60 μm 包络平面度控制要求^[9]。LSST/Rubin 相机采用多 raft 结构构建大规模 CCD 焦面,并对

焦面均匀性、稳定性及实验室表征方法开展了系统研究^[10-12]。WFST 主焦相机采用大靶面拼接 CCD 焦面,是国内大视场巡天相机的重要代表^[13-14]。此外,PLATO 焦面组件采用垫片进行焦面位置和姿态调整,其热机械设计和装调方式对低温焦面工程实现具有参考价值^[15-16]。上述研究表明,低温拼接焦面的平面度控制已成为大视场高性能成像系统中的共性关键问题。

在现有拼接焦面误差分析中,低温热变形和重力变形常被分别建模,并将二者作为独立误差项进行合成^[17]。光机热集成分析和热-结构耦合分析已被广泛用于光学系统面形误差、热变形和结构载荷影响评估^[18]。然而,对于低温工作的拼接探测器,温度场、材料热收缩、接触约束和重力姿态之间存在耦合作用,红外焦平面封装和低温探测器组件研究也表明,低温热失配会引起焦面翘曲、热应力和面形变化^[19-22]。特别是对于多姿态工作的焦面组件,重力方向变化会改变基板及探测器支撑区域的挠曲分布,而低温收缩又会改变组件整体刚度与相对位置。若仅采用单一姿态重力变形结果,或将低温项与重力项简单叠加,可能低估焦面平面度误差,或误判其极值工况,不利于后续误差分配和结构优化。

针对上述问题,本文以 4×4 拼接探测器焦面组件为研究对象,建立低温多姿态热力耦合有限元分析模型。以主焦面平面度 PV 值为评价指

标,分别计算低温环境下 0°, 30°, 45°, 60° 和 90° 等典型姿态的焦面变形,分析不同姿态下焦面平面度误差变化规律。在此基础上,以多姿态耦合工况下的平面度包络值作为主要误差输入,开展拼接焦面平面度误差分配研究。本文方法避免了低温变形与重力变形简单线性叠加所带来的偏差,可为低温拼接探测器焦面结构设计、装调控制和工程余量确定提供依据。

2 低温多姿态耦合分析方法与误差来源

2.1 低温多姿态热力耦合分析方法

低温多姿态热力耦合分析旨在获得拼接探测器实际工作状态下的主焦面变形,避免将温度变形和重力变形分项计算。本文采用热—结构顺序耦合方法进行分析。首先建立焦面组件三维有限元模型,在热分析模块中设置材料热物性参数、制冷边界、接触导热条件和环境温度,求解低温稳态温度场。随后将温度场映射至结构分析模型,作为结构分析的温度载荷。在结构模型中设置材料力学参数、接触关系和支撑约束,获得低温热收缩和热应力引起的结构状态。在此基础上施加不同方向重力载荷,得到各姿态下主焦面法向位移分布。

温度场映射关系可表示为:

$$T_s = LT_t, \quad (1)$$

其中: T_s 为结构分析模型节点温度矩阵, T_t 为热分析模型节点温度矩阵, L 为温度场映射矩阵。当热模型与结构模型节点重合时,温度可直接传递;当节点不重合时,可通过邻近节点插值得到结构节点温度。

主焦面平面度采用 PV 值评价。设提取的主焦面节点法向位移为 z_i , 首先采用最小二乘方法拟合参考平面:

$$z = ax + by + c. \quad (2)$$

节点相对于拟合平面的残差为:

$$\Delta z_i = z_i - (ax_i + by_i + c). \quad (3)$$

主焦面平面度 PV 值为:

$$PV = \max(\Delta z_i) - \min(\Delta z_i). \quad (4)$$

通过去除最佳拟合平面,可以剔除整体刚体平移和倾斜对平面度评价的影响,仅保留主焦面

自身面形误差。

低温多姿态热力耦合分析流程如图 1 所示。

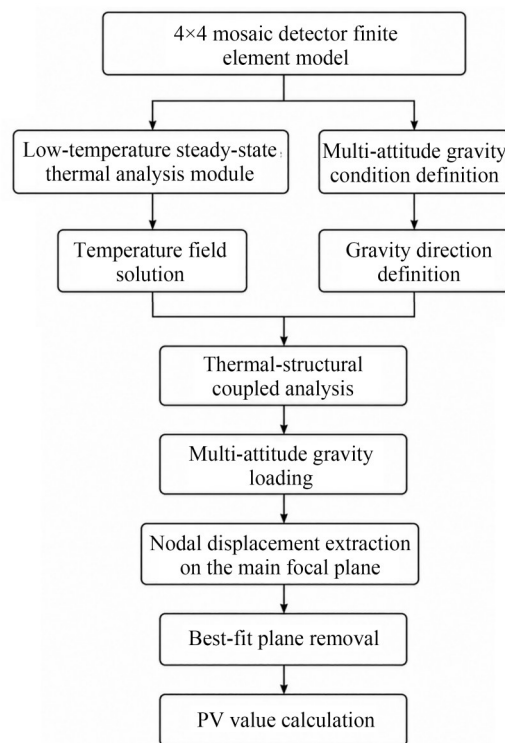


图 1 低温多姿态热力耦合分析流程图

Fig. 1 Flowchart of cryogenic multi-attitude thermal-structural coupled analysis

2.2 4×4 拼接探测器结构组成

本文研究对象为 4×4 拼接探测器主焦面组件,由 16 片探测器、拼接基板、垫片调节单元和支撑结构组成。16 片探测器以 4×4 阵列形式安装在拼接基板上,共同形成主焦面。探测器材料为 SiC,拼接基板材料为殷钢,垫片材料为紫铜。每片探测器通过三点垫片支撑方式与拼接基板连接,该结构可实现探测器高度和倾角的局部调整,适用于低温焦面组件的精密装调。4×4 拼接探测器结构示意图如图 2 所示。

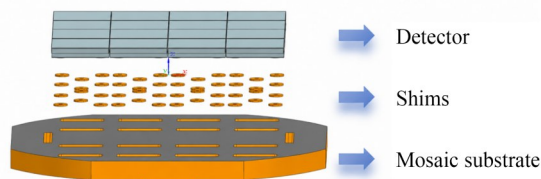


图 2 4×4 拼接探测器结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of 4×4 mosaic detector

由于探测器、基板和垫片材料不同,低温下各部件收缩量存在差异,接触界面处可能产生热应力和局部变形。因此,低温条件下的主焦面平面度不仅取决于单片探测器平面度和常温拼接精度,还与热力耦合状态和姿态重力载荷密切相关。

2.3 主焦面平面度误差形成机理与来源分解

4×4 拼接探测器主焦面平面度误差并非由单一环节决定,而是在探测器制造、常温装调、接口约束、低温状态转移和姿态载荷作用过程中共同形成。为明确各误差源与工程环节之间的对应关系,本文从工程实现过程出发,将主焦面平面度误差划分为初始几何基准误差、常温装调与基准传递误差、支撑与接口约束误差、低温多姿态热力耦合变形误差以及测量与模型不确定性五类。

(1) 初始几何基准误差。该类误差主要受探测器本体面形、探测器安装基准面、拼接基板安装面以及垫片初始厚度一致性影响。对于拼接焦面而言,单片探测器平面度只是初始误差的组成部分,探测器与垫片、垫片与基板之间的安装基准同样会影响最终主焦面共面性。因此,本文将探测器本体平面度与相关安装基准统一归入初始几何基准误差。

(2) 常温装调与基准传递误差。拼接探测器通常在常温环境下完成装配和检测,常温装调结果需要通过垫片、基板和支撑结构传递到最终主焦面。探测器定位误差、常温测量误差会导致各探测器相对高度和倾角偏离理想状态。该类误差主要反映常温装配阶段形成的主焦面初始平面度。

(3) 支撑与接口约束误差。主焦面组件在实际结构中通过支撑结构与整机连接。支撑安装面加工误差、安装孔位置误差、连接预紧力不一致、接触刚度差异以及界面约束状态均会改变拼接基板的受力和变形传递路径。在低温环境下,接触状态和约束边界会影响热应力分布,从而进一步改变主焦面法向位移。

(4) 低温多姿态热力耦合变形误差。低温工作状态下,探测器、垫片、基板和支撑结构因材料热膨胀系数不同而产生差异性热收缩,温度梯度和界面约束会引起热应力及初始热变形。在此

基础上,不同重力姿态会改变载荷方向,使主焦面变形极值位置和变形幅值发生变化。由于低温变形和重力变形在实际工作中同时存在,且 PV 值由变形场极值决定,二者不宜作为独立误差项直接叠加。本文将统一为低温多姿态热力耦合变形误差,并以低温耦合多姿态有限元计算得到的最大 PV 值作为该项误差分配依据。

(5) 测量与模型不确定性。该类误差包括常温检测重复性、节点提取误差、有限元网格离散误差、材料参数偏差等。该项不直接对应某一确定结构部件,但会影响误差分配结果的可信度,因此在误差预算中应作为不确定性项予以考虑。

综合考虑以上误差来源,本文建立主焦面平面度误差来源分解模型,如图 3 所示。

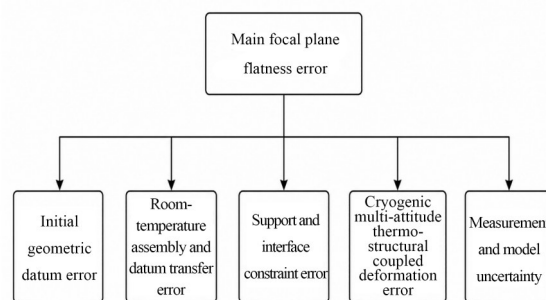


图3 4×4 拼接探测器主焦面平面度误差来源分解模型
Fig. 3 Error source decomposition model of main focal plane flatness for 4×4 mosaic detector

3 低温多姿态有限元分析与误差分配

3.1 有限元耦合分析设置

为获得低温多姿态耦合条件下的主焦面变形,建立4×4拼接探测器有限元模型。模型包括16片探测器、拼接基板、48个垫片以及支撑结构。为提高计算效率,在不影响主焦面变形评价的前提下,对螺纹、倒角和局部小孔等非关键细节进行简化。探测器与垫片、垫片与拼接基板之间采用接触关系描述,在支撑结构安装面选取安装面施加固定约束。

本文对有限元模型采用分区网格划分策略:拼接基板采用六面体网格划分,16片探测器采用四面体网格划分方法。为验证网格划分对主焦面变形计算结果的影响,本文选取90°姿态

作为网格无关性验证工况,分别建立粗网格、中等网格和细网格三种网格方案。粗网格、中等网格和细网格的节点数分别为 287 946,460 305 和 919 098,单元数分别为 124 267,198 990 和 411 771。计算结果表明,粗网格、中等网格和细网格对应的 90°姿态主焦面 PV 值分别为 8.159,8.099 和 8.092 μm 。由粗网格加密至中等网格时,PV 相对变化率为 0.74%;由中等网格加密至细网格时,PV 相对变化率为 0.086%。随着网格加密,主焦面 PV 值逐渐趋于稳定,说明中等网格已能够满足本文主焦面平面度计算精度要求。综合考虑计算精度和计算效率,后续低温多姿态有限元分析均采用中等网格方案。

低温稳态热分析中,设定装调温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,工作温度为−30 $^{\circ}\text{C}$ 。考虑到本文工作温度为−30 $^{\circ}\text{C}$,与装调温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 之间温差较小,材料参数采用材料手册中 20 $^{\circ}\text{C}$ 至−30 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的平均参数。制冷温度边界施加在拼接基板冷端连接区域,温度设为−30 $^{\circ}\text{C}$,组件外表面与低温环境之间存在辐射换热,因此在模型外表面设置辐射边界条件。探测器、垫片和基板之间通过接触导热传递热量。热分析完成后,将温度场映射至结构模型,计算材料热收缩差异、接触约束和支撑约束共同引起的低温热力耦合状态。

在低温热力耦合状态基础上,分别施加 0°,30°,45°,60°和 90°五个典型姿态重力载荷。各姿态计算均采用相同几何模型、相同材料参数、相同接触关系、相同边界约束、相同网格划分和相同主焦面节点集,仅改变重力载荷方向。通过保持网格和节点集一致,可避免不同姿态之间因网格差异引入额外数值误差,从而保证 0°,30°,45°,60°和 90°姿态下主焦面平面度结果具有可比性。

需要说明的是,本文的重力载荷不是施加在常温无热应力状态下,而是施加在低温热力耦合结构状态基础上,从而同时考虑低温热变形和姿态重力对主焦面平面度的影响。图 4 为低温稳态温度场云图。

由图 4 可知,低温稳态热分析后,焦面组件温度分布整体较为平缓,温度最大值为

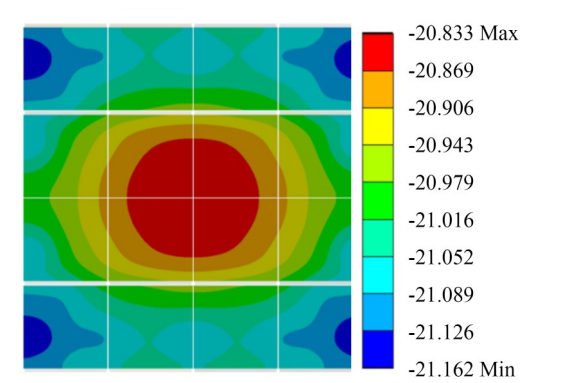


图 4 低温稳态温度场云图
Fig. 4 Steady-state temperature distribution under cryogenic condition

−20.833 $^{\circ}\text{C}$,最小值为−21.162 $^{\circ}\text{C}$,温差约为 0.329 $^{\circ}\text{C}$ 。温度场呈现较好的对称性,中心区域温度相对较高,边缘及角部区域温度相对较低,说明在制冷边界和辐射换热的共同作用下,焦面组件内部存在一定温度梯度。

3.2 低温多姿态主焦面平面度结果

在−30 $^{\circ}\text{C}$ 低温热力耦合状态基础上,分别施加 0°,30°,45°,60°和 90°五个典型姿态重力载荷。各姿态均提取相同主焦面节点集,节点数为 20 336 个,并采用最小二乘平面去除整体倾斜后计算主焦面 PV 值,结果如表 1 所示。

表 1 低温多姿态主焦面平面度结果		
Tab. 1 Flatness results of main focal plane under cryogenic multi-attitude conditions		
Attitude/($^{\circ}$)	Number of nodes	PV/ μm
0	20 336	4.771
30	20 336	5.182
45	20 336	7.962
60	20 336	6.100
90	20 336	8.099

由表 1 可知,在低温热力耦合状态下,主焦面平面度随重力姿态变化呈现明显差异。0°姿态下主焦面 PV 值为 4.771 μm ;90°姿态下 PV 值增大至 8.099 μm ,相比 0°姿态增大约 69.7%,说明重力方向变化会显著影响低温状态下主焦面法向变形。

图 5 为低温多姿态主焦面法向位移云图。

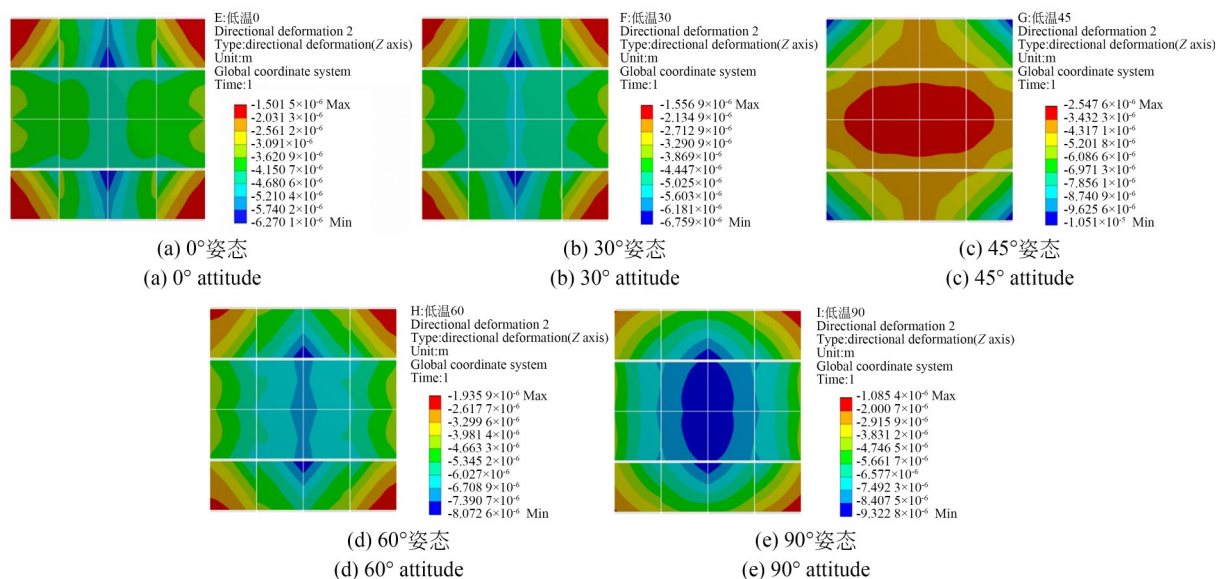


图5 低温多姿态热力耦合状态下主焦面法向位移云图

Fig. 5 Normal displacement nephograms of main focal plane under cryogenic multi-attitude thermal-structural coupled conditions

3.3 低温与多姿态重力耦合影响分析

首先,低温热变形改变了结构初始状态。低温环境下,材料热收缩不匹配和约束作用会使焦面组件产生初始热变形和热应力,此时结构受力状态已不同于常温装调状态,重力载荷作用下的变形响应也随之改变。

其次,多姿态重力会改变变形分布和极值位置。由图5可知,低温热力耦合状态下主焦面法向位移分布随姿态角变化明显。0°和30°姿态下,主焦面变形分布相对平缓,法向位移范围分别约为 $4.769 \mu\text{m}$ 和 $5.203 \mu\text{m}$ 。45°姿态下,主焦面中心区域与边缘区域位移差异增大,法向位移范围增至约 $7.963 \mu\text{m}$,表明重力法向分量和切向分量共同作用,使拼接基板产生弯曲与扭转耦合变形。60°姿态下,法向位移范围约为 $6.133 \mu\text{m}$,低于45°姿态,说明主焦面平面度并不随姿态角增大而单调恶化。90°姿态下,主焦面中部低位移区域更加明显,法向位移范围约为 $8.237 \mu\text{m}$,为各姿态中最大。该姿态下重力主要沿主焦面切向作用,易引起拼接基板侧向挠曲和垫片支撑区域局部变形,从而增大主焦面法向位移差异。上述结果表明,45°和90°姿态为本文结构的主要控制姿态,低温多姿态耦合分析对于主焦面平面度误差评价是必要的。

通过低温与多姿态重力耦合影响分析,后续

焦面平面度优化设计不宜仅针对单一姿态进行,而应以多姿态平面度均衡为目标,综合考虑各典型姿态下的PV值变化规律,建立兼顾最大PV值和多姿态整体波动的评价准则。

最后,低温与重力的耦合变形不能由单独PV值相加得到。即使在小变形线性假设下,不同载荷引起的位移场可以近似叠加。若低温变形极值点与重力变形极值点不一致,直接线性叠加会产生保守或失真的估计结果。本文在低温热力耦合状态下直接施加多姿态重力载荷,可获得更接近实际工作条件的主焦面平面度误差。

3.4 主焦面平面度误差分配结果

根据探测器实测结果,单片探测器感光面平面度实测值分布在 $13 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间,最大值不大于 $20 \mu\text{m}$ 。为保证误差分配结果能够覆盖实测数据范围,本文将探测器本体初始几何基准误差取为 $20.0 \mu\text{m}$ 。

根据李艳春等^[23]对空间相机TDI CCD焦平面高精度拼接的研究,采用交错搭接紧凑机械设计,共面误差可控制在 $5 \mu\text{m}$ 以内。考虑到本文研究对象为 4×4 面阵拼接结构,装调复杂度更高,在此基础上留30%余量,综合确定常温装调与基准传递误差为 $6.5 \mu\text{m}$ 。考虑本文常温拼接检测过程中测量平台测量精度优于 $1 \mu\text{m}$,为保证误差分配的保守性,将测量平台误差按 $1 \mu\text{m}$ 计

入该项误差。由此确定常温装调与基准传递误差为 7.5 μm 。

支撑与接口约束误差主要受支撑安装面几何精度、螺钉预紧一致性以及支撑安装前后主焦面 PV 变化等因素影响。根据支撑结构装调精度要求将支撑与接口约束误差取为 2.0 μm 。

由表 1 可知,低温多姿态热力耦合工况下主焦面最大 PV 值为 8.099 μm ,出现在 90°姿态。为便于工程误差分配,本文将该项误差分配值取为 8.1 μm 。

测量与模型不确定性综合考虑测量重复性、网格离散及材料参数误差。测量平台重复定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。中等网格(本文最终采用方案)加密至细网格后,90°姿态 PV 计算值仅由 8.099 μm 变为 8.092 μm ,相对变化率仅 0.085%,网格

离散引入的计算误差量级极小,对总不确定度贡献可忽略。材料热膨胀系数、弹性模量等物性参数的测试误差通常为 2%~5%,综合考虑材料参数偏差对计算结果的影响约为 0.2 μm 。各子项不确定性相对独立,采用方和根方法合成测量与模型不确定性,并在工程上取保守上限 1.1 μm 作为本项误差分配值。

各项误差分配结果如表 2 所示。由表可知,各误差项分配值分别为 20.0, 7.5, 2.0, 8.1 和 1.1 μm ,合计为 38.7 μm 。与将低温变形和重力变形作为两个独立误差项的分配方式相比,本文将二者统一为低温热力耦合多姿态重力变形误差项,更符合低温拼接探测器实际工作状态,也避免了不同载荷下 PV 值简单相加带来的误差估计不合理问题。

表 2 主焦面平面度误差分配结果
Tab. 2 Error allocation results of main focal plane flatness

误差类型	Allocation value/ μm	Basis for allocation
初始几何基准误差	≤ 20.0	探测器实测数据
常温装调与基准传递误差	≤ 7.5	常温拼接检测结果、测量平台误差
支撑与接口约束误差	≤ 2.0	支撑结构装调精度要求
低温多姿态热力耦合变形误差	≤ 8.1	本文低温多姿态热力耦合有限元分析
测量与模型不确定性	≤ 1.1	测量重复性、网格离散、材料参数不确定性评估
合 计	≤ 38.7	误差预算结果

4 结 论

本文建立了包含探测器、拼接基板、垫片和支撑结构的热—结构耦合有限元模型。通过将低温稳态温度场映射至结构模型,并在低温热力耦合状态下施加不同方向重力载荷,可同时考虑材料热收缩、接触约束、热应力和姿态重力对主焦面平面度的影响。该方法避免了将低温变形和重力变形作为独立误差项简单叠加造成的偏差,更符合低温拼接探测器实际服役状态。低温多姿态分析结果表明,0°,30°,45°,60°和 90°姿态下主焦面 PV 值分别为 4.771, 5.182, 7.962, 6.100 和 8.099 μm 。90°姿态 PV 值最大,较 0°姿态增大 69.7%;45°姿态 PV 值为 7.962 μm ,与 90°姿态接近,二者为本文结构的主要控制姿态。主焦面平面度随姿态角变化并非单调增大,说明

姿态重力影响不仅与重力方向有关,还与拼接基板刚度分布、支撑约束、垫片局部支撑状态和低温初始热变形场相关。因此,低温多姿态耦合分析对于识别主焦面平面度控制工况具有必要性。

基于主焦面平面度误差来源分解模型,本文结合探测器实测数据、常温拼接检测结果、支撑结构装调精度要求、低温多姿态有限元分析结果以及测量与模型不确定性评估,对主焦面平面度误差进行分配。初始几何基准误差、常温装调与基准传递误差、支撑与接口约束误差、低温多姿态热力耦合变形误差以及测量与模型不确定性分别取 $\leq 20.0, \leq 7.5, \leq 2.0, \leq 8.1$ 和 $\leq 1.1 \mu\text{m}$,误差预算合计 $\leq 38.7 \mu\text{m}$ 。该分配方法将低温热变形和多姿态重力影响统一为低温多姿态热力耦合变形误差项,提高了误差分配结果与实际工况的一致性。

本文仍以有限元分析和工程误差预算为主,后续需进一步结合低温实测和多姿态装调试验对模型进行验证。同时,后续优化设计不宜仅针对单一姿态进行,应以多姿态平面度均衡为目标,综合考虑各典型姿态下的PV值变化规律,进一步开展垫片厚度修磨补偿、支撑结构刚度优化和温度场均匀性改善等研究,以提升低温拼接探测器主焦面平面度水平。

参考文献:

- [1] 冯晓鹏,王之一,王建立,等. 基于边缘增强弱监督K-means的大口径望远镜拼接探测器点云分割[J]. 光学精密工程, 2025, 33(21): 3331-3342.
FENG X P, WANG ZH Y, WANG J L, *et al.* Edge-enhanced weak-supervised K-means point cloud segmentation for large-aperture telescope tiled detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3331-3342. (in Chinese)
- [2] 刘昌华. 主焦点式大口径大视场光学校正镜及拼接探测器关键技术[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
LIU CH H. *Key Technologies of Corrector Lens and Mosaic Sensors for Large Aperture and Wide-Field Telescope*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [3] 赵宏超,张晓芊,安其昌. 基于通道光谱色散的拼接探测器平整度检测方法[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(4): 889-898.
ZHAO H CH, ZHANG X Q, AN Q CH. Flatness detection method of splicing detector based on channel spectral dispersion[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 889-898. (in Chinese)
- [4] COLLABORATION E, CROPPER M S, AL-BAHLAWAN A, *et al.* Euclid: II. the VIS instrument [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, 697: A2.
- [5] DOMBER J L, GYGAX J, AUMILLER P, *et al.* Roman Space Telescope wide field instrument design evolution[C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. July 17-23, 2022. Montréal, Canada. SPIE, 2022: 61.
- [6] MOSBY G, RAUSCHER B J, BENNETT C, *et al.* Properties and characteristics of the nancy grace

作者贡献声明:

孙政奇:低温多姿态热力耦合仿真,论文构思与撰写;

王之一:低温热力耦合分析方法指导,论文审核;

王建立、姚凯男:论文写作指导;

刘昌华:结构设计与有限元建模指导;

杨云竹:低温热力耦合结果分析;

张胜博:仿真结果整理。

- Roman space telescope H4RG-10 detectors [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2020, 6(4): 046001.
- [7] COLLABORATION G, PRUSTI T, DE BRUIJNE J H J, *et al.* The Gaia mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: A1.
- [8] CROWLEY C, KOHLEY R, HAMBLY N C, *et al.* Gaia Data release 1: on-orbit performance of the Gaia CCDs at L2 [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: A6.
- [9] HAO J G, ESTRADA J, CEASE H, *et al.* Measuring the flatness of focal plane for very large mosaic CCD camera[J]. *Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, 2010, 7735: 77353U.
- [10] KAHN S M, KURITA N, GILMORE K, *et al.* Design and development of the 3.2 gigapixel camera for the Large Synoptic Survey Telescope [J]. *Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, 2010, 7735: 77350J.
- [11] O'CONNOR P. Uniformity and stability of the LSST focal plane [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, 5(4): 1.
- [12] SNYDER A, BARRAU A, BRADSHAW A, *et al.* Laboratory measurements of instrumental signatures of the LSST camera focal plane [EB/OL]. 2021: *arXiv*: 2101.01281. <https://arxiv.org/abs/2101.01281>.
- [13] ZHANG H F, FENG Q, WANG J, *et al.* WFST primary mosaic CCD camera and its first light[C]. *X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy XI*. June 16-22, 2024. Yokohama, Japan. SPIE, 2024: 46.
- [14] CHEN C, ZHANG J, ZHANG H F, *et al.* De-

- sign of CCD test platform of scientific imaging for wide field survey telescope [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2022, 8(1): 016005.
- [15] MORENO J, VIELBA E, MANJÓN A, *et al.* PLATO FPA. focal plane assembly of PLATO instrument [C]. *International Conference on Space Optics-ICSO 2018. October 9-12, 2018. Chania, Greece*. SPIE, 2019: 130.
- [16] MANJÓN A, ALCACERA M A, CATALÁN I, *et al.* Focal plane assemblies for PLATO mission cameras: vibration test approach from prototype to serial-produced units [C]. *International Conference on Space Optics-ICSO 2024, Bellingham*. SPIE, 2025, 13527: 135271B.
- [17] 牛盛光, 郭亮, 陆振玉, 等. 基于光机热集成分析的大规模拼接焦面误差分配[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 1000-1006.
NIU SH G, GUO L, LU ZH Y, *et al.* Large-scale splicing focal plane error distribution based on opticalstructural-thermal integration analysis [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1000-1006. (in Chinese)
- [18] 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]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 20210617.
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]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210617. (in Chinese)
- [19] SU W X, ZHANG C Y, MO D F, *et al.* Finite element analysis of the package structure of HgCdTe infrared focal plane array detector [J]. *AIP Advances*, 2024, 14(3): 035247.
- [20] DUPERREX L, PESCI R, LE BOTERF P, *et al.* Simulation and measurement of residual stress and warpage in a HgCdTe-based infrared detector at 100 K [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813: 141148.
- [21] 张阳, 莫德锋, 李俊, 等. 超大面阵红外焦平面探测器杜瓦热机结构研究(内封面文章)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(6): 9-17.
ZHANG Y, MO D F, LI J, *et al.* Research on the thermomechanical architecture of Dewar of the large format infrared detector (inner cover paper) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(6): 9-17. (in Chinese)
- [22] WU Y, FENG Y T, *et al.* Structural design and cryogenic stability analysis for long-wave infrared spatial heterodyne spectrometers [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(30): 8044.
- [23] LI Y C, DONG J H, LI W, *et al.* High-precision splicing and testing for the FPA of space camera [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2013, 146(1): 1-9.

作者简介:



孙政奇(2003—),男,吉林长春人,硕士研究生,2025年于厦门大学获得学士学位,主要从事有限元分析及非接触式光学探针测量方面的研究。E-mail: sunzhengqi25@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



王之一(1996—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2018年于山东大学获得学士学位,2024年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径光学自由曲面精密检测及非接触式光学探针测量等方面的研究。E-mail: wangzhiyi18@mails.ucas.edu.cn