

文章编号: 1672-8785(2021)06-0012-07

超长线列碲镉汞探测器组件的 冷头结构设计

刘 伟 张冬亮 闫 杰 张 磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着大规模线列探测器不断实现空间应用, 具有大范围、高分辨率红外扫描探测与目标捕获能力的超长线列拼接探测器的应用需求变得越来越广泛。超长线列碲镉汞红外探测器组件的阵列规模及几何尺寸较大, 导致探测器冷头结构的低温热失配问题被放大。为获得满足低温可靠性及严苛成像需求的冷头结构, 开展了相关冷头结构设计优化方法研究以及获取实物的试验验证工作, 并通过试验验证工作证明本研究采用的结构设计优化方法适用于复杂的大尺寸冷头结构设计。

关键词: 超长线列拼接探测器; 红外焦平面; 冷头; 优化设计

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.06.003

Structure Design of Cold Head for Ultra-Long Linear HgCdTe Detector Assembly

LIU Wei, ZHANG Dong-liang, YAN Jie, ZHANG Lei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the increasing space applications of large-scale linear detectors, the application requirements for ultra-long linear splicing detectors that can perform infrared scanning detection and capture targets with large range and high resolution are becoming more and more extensive. The large scale and geometric dimensions of the HgCdTe infrared detector assembly with ultra-long linear arrays have caused the problem of low-temperature thermal mismatch of the cold head structure of the detector to be magnified. In order to obtain the cold head structure that can meet the low temperature reliability and strict imaging requirements, the research on the optimization method of the relevant cold head structure design and the experimental verification work of obtaining the actual object have been carried out. The experimental verification work has proved that the structural design optimization method in this study is applicable for the complex design of large-size cold head structure.

Key words: ultra-long linear splicing detector; infrared focal plane array; cold head; optimization design

收稿日期: 2020-11-25

作者简介: 刘伟(1983-), 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 主要从事红外探测器封装技术研究。

E-mail: mysticlife@163.com

0 概述

为了满足扩大视场、提高空间分辨率、有效避免外界干扰、提高系统对目标的鉴别能力等空间应用需求,国内外科研机构陆续开展了超长线列红外焦平面探测器的相关研制工作。冷头结构是探测器组件结构的核心部分,是保证探测器稳定工作的基础。

与通用冷头结构相比,超长线列红外焦平面探测器的冷头结构具有较大的设计难度,是实现该类探测器工程化研制的重要研究内容之一。本文将研究该类探测器冷头结构的优化设计(包括研究思路、研究方法以及试验验证工作等),为此类组件的研制工作提供更多的参考。

1 需要解决的问题

红外探测器组件封装结构用于为探测器提供稳定的 80 K 工作温度,保证探测器的输出信号质量;它需要匹配探测器芯片所在冷头结构部件的各功能区域对应材料的低温热膨胀系数,保证探测器芯片的低温热应力以及视场低温焦深变化值分别满足可靠性及成像要求,从而保障组件的正常使用。

红外探测器组件封装结构设计的核心部分为组件冷头结构设计,其合理与否直接影响组件的性能好坏。随着探测器线列规模的增大,大尺寸冷头结构的低温热失配问题凸显。因此需通过优化冷头结构设计来降低热应力对探测器的影响,避免热应力导致探测器光电性能的劣化,以满足红外系统对探测器可靠性及寿命的要求^[1]。

图 1 所示为根据拼接探测器冷头结构设计获得的超长线列碲镉汞红外探测器组件仿真简化模型。在组件安装接口面上安装四根支撑柱。支撑柱上方设有三层功能不同的结构,共同组成探测器的冷头结构。通过对简化模型进行组件低温工况仿真,获得了探测器模块的低温应力及焦面低温光轴方向变形数据(见图 2)。可以看出,探测器低温焦面的光轴方向变形大小为 246 μm ,而空间成像要求焦深容差控制在 50 μm 以内,显然无法满足这一要求。另

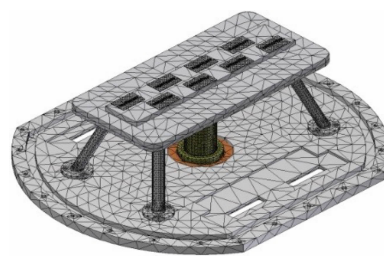


图 1 超长线列碲镉汞红外探测器组件的仿真简化模型

外,当探测器模块低温工作时,最大应力在 150 Mpa 上下,这也无法保证探测器长期工作的可靠性。

由于超长线列碲镉汞红外探测器组件的阵列规模及几何尺寸较大,探测器的封装结构更大,导致探测器冷头结构的低温热失配问题被放大。因此,需要对此种冷头结构进行优化设计,以获得既能满足低温空间成像要求,又可保证探测器长期工作可靠性的探测器冷头结构。

2 冷头结构的优化设计及验证

首先,简化冷头结构模型,敲定材料范围。根据已有拼接探测器的特征工艺,对探测器冷头结构进行简化定义,包含冷光阑、探测器冷头结构以及制冷机冷头结构等。结合三部分工艺特征,设定可选材料的范围。

其次,设定冷头结构优化目标。为实现组件冷头结构长期工作的可靠性,探测器芯片模块的最大应力需小于 100 Mpa,探测器低温焦面的光轴方向变形需小于 50 μm 。

最后,设置结构的优化变量,并通过将探测器冷头结构的板层厚度值及材料作为变量来进行定义。设置总厚度小于 18 mm,并将每层板的材料设置为可选范围内的材料。

为获取合理的探测器冷头结构,在本次优化设计中引入试验设计(Design of Experiments, DOE)优化迭代方法^[2],以获取最终的探测器冷头结构(见图 3)。DOE 设计方法的优点是能辨识关键的试验因子,从而确定最佳的参数组合;通过构建经验公式和近似模型,分析输入参数与输出参数之间的关系和趋势,最终提取稳定性模型。

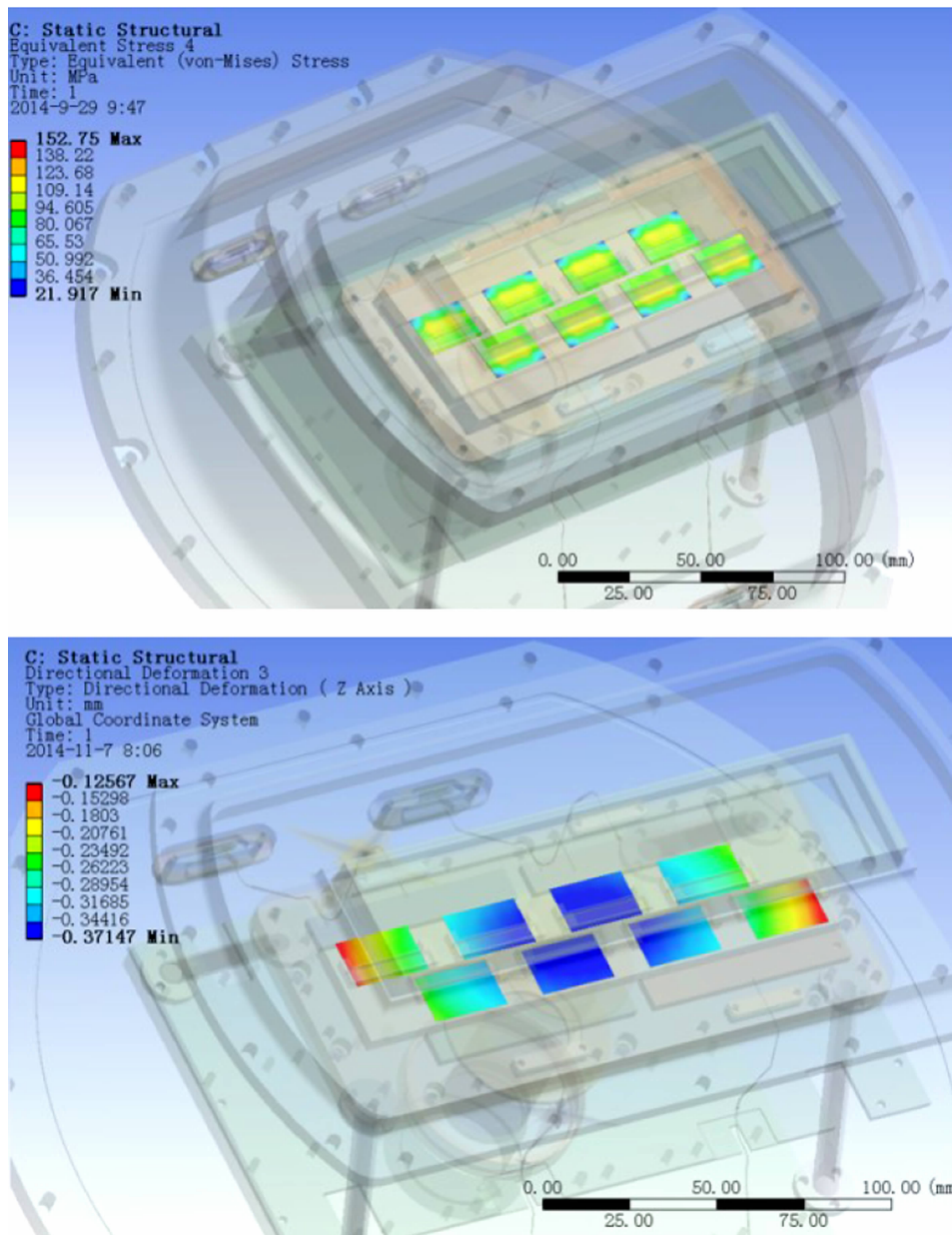


图2 组件焦面变形低温仿真结果及芯片应力仿真结果

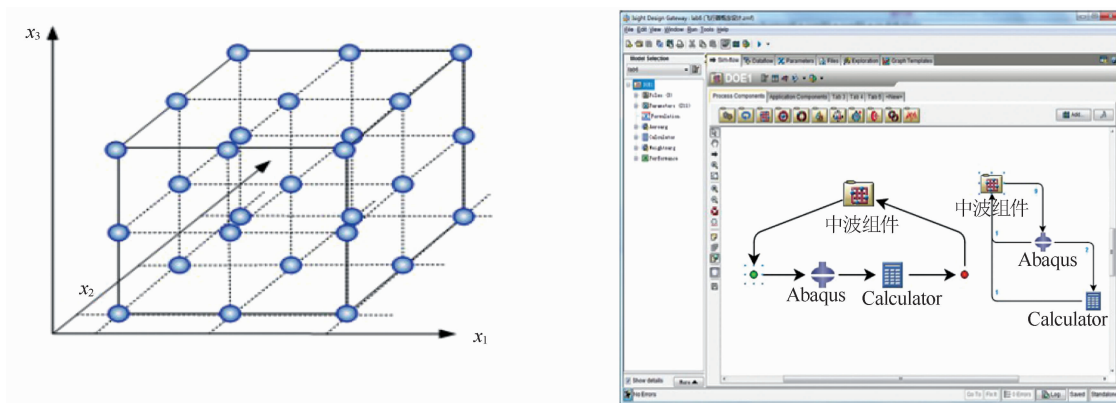


图3 DOE设计模型及本次优化设计方法

具体方法如下: 用 Isight 软件调用 ABAQUS 软件分析并使 DOE 组件驱动, 然后通过 Calculator 处理相关数据, 从而获取可满足优化目标^[3]的构成板材料顺序及板层厚度值等结构要素。其中, 优化目标是探测器芯片的热应力在许用范围之内, 且焦面低温变形值满足相机镜头的焦深调整量。

首先, 将仿真模型代入有限元分析软件, 并设置材料参数及边界条件, 包括环境温度 240 K、冷板工作温度 80 K、探测器外表面的反射率、冷屏表面的辐射系数、辐射冷屏内表面的辐射系数、探测器的电功耗以及探测器结构对应的约束关系等。

通过 Calculator 处理相关数据, 获得所有变量(上万种探测器冷头结构材料构成及每层厚度不同取值等)组合中相应探测器芯片的热应力和焦面低温变形值。图 4 所示为截取的部分结果。利用该方法可在短时间内获得满足项目指标要求并同时匹配探测器研制工艺的探测器结构设计方案。

在满足优化目标的方案中, 锁定冷头热质量较小且利于组件满足低温工况及力学环境适应性要求的材料组合, 最终完成超长线

列碲镉汞红外探测器的冷头结构方案的最优选取。

最后将探测器冷头方案细化, 获得最终的模型方案。为便于工程化参数控制, 对探测器方案模型中冷头材料参数的容差范围进行求解, 即设定线胀系数单一参数为变量, 然后利用上述优化求解方法获得可满足优化指标的材料线胀系数的容差控制范围(见表 1)。

最终对探测器组件的结构方案进行仿真和确认(结果见图 5)。探测器芯片的低温热应力的最大值为 79 MPa, 低温焦面焦深变形值为 30 μm , 满足设计指标的要求。

同步安排对探测器组件进行实物验证试验和开关机温度冲击试验。通过将探测器组件冷头的工作温度在常温 293 K 与低温 80 K 之间反复循环来进行温度冲击, 以验证探测器冷头结构的低温工作可靠性。验证件累计完成了 150 次温度冲击。测试组件的性能(包含探测器的平均峰值响应率、噪声、盲元)及制冷机功率基本不变, 证明组件的冷头结构满足长期工作可靠性要求。在温度冲击过程中穿插验证件的焦面低温变形测试试验, 即

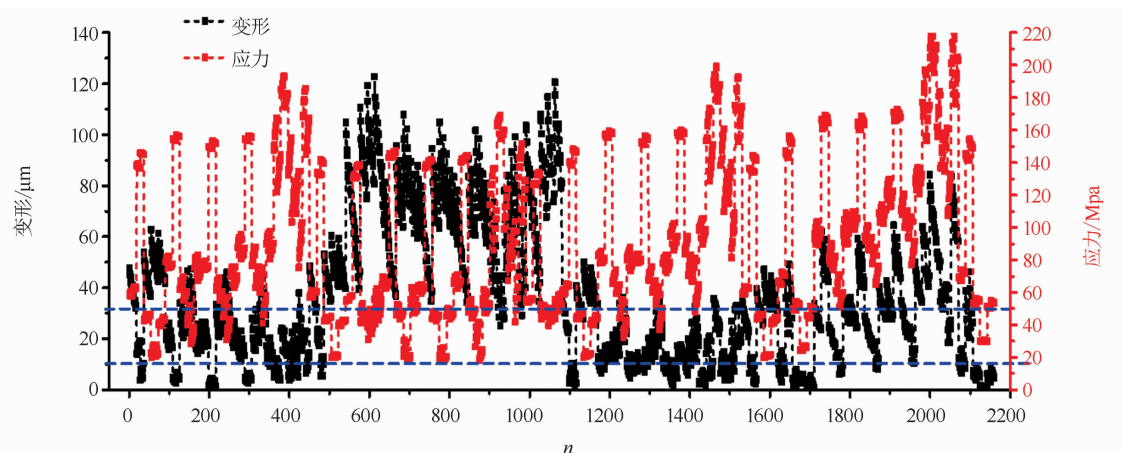


图 4 不同变量组合中相应探测器冷头结构芯片的低温热应力及焦面变形值

表 1 低温线胀系数的容差控制范围

低温线胀系数	4.2×10^{-6}	4.4×10^{-6}	4.6×10^{-6}	4.8×10^{-6}
探测器芯片/MPa	95.1	93.2	91.6	90.4
电学结构/MPa	36.4	35.9	35.9	36.5
滤光片结构/MPa	95.1	96.7	97.9	98.9

把组件的红外窗口更换为可见光窗口。图6所示为验证件的焦面变形测试封装结构。在探测器焦面验证件的表面上刻蚀像素级标记图形,如图7所示。然后通过MATLAB对焦面测试数据进行处理。具体步骤如下:通过将低温下实测的20个坐标点数据代入软件来进行编程处理,获得焦面拟合面及变形值

(见图8)。验证件焦面低温下实测为上凸变形,变形值为 $34\ \mu\text{m}$ 。该结果与仿真此冷头结构低温80 K工作时对应的焦面变形上凸趋势相同,且与 $30\ \mu\text{m}$ 变形值接近。因此可认为本次冷头结构设计优化方法有效,所获冷头结构可满足超长线列拼接探测器组件的可靠性及成像要求。

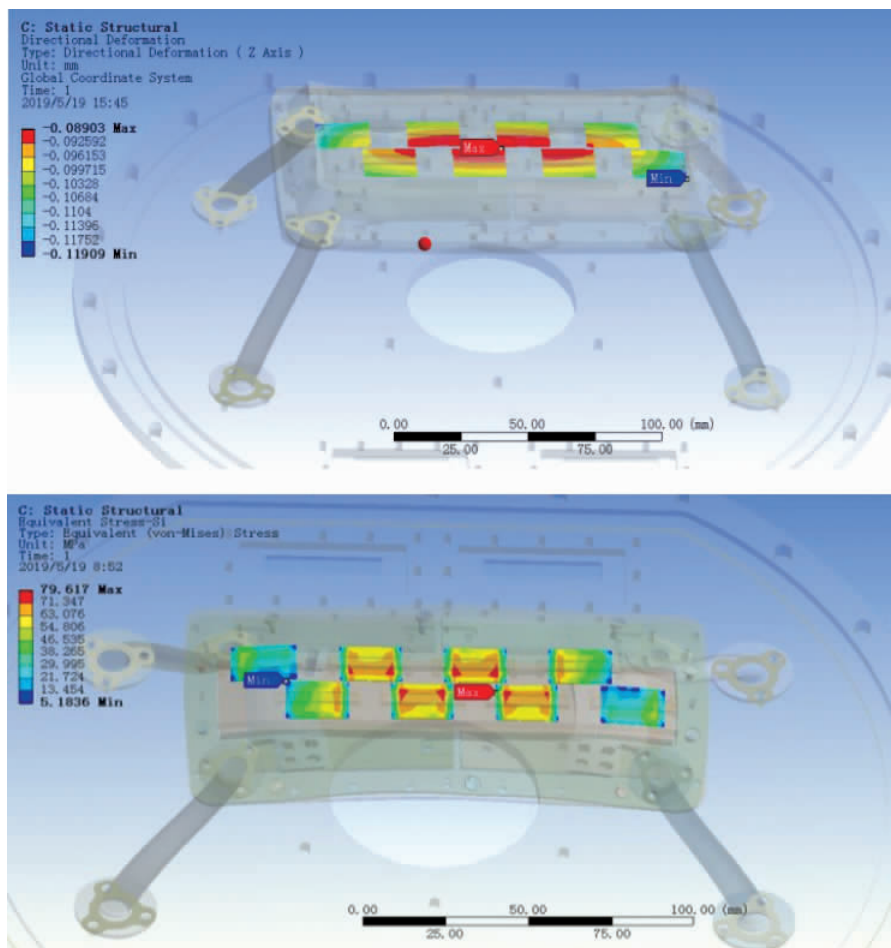


图5 探测器冷头结构(关注部分)的低温热应力及焦深变化

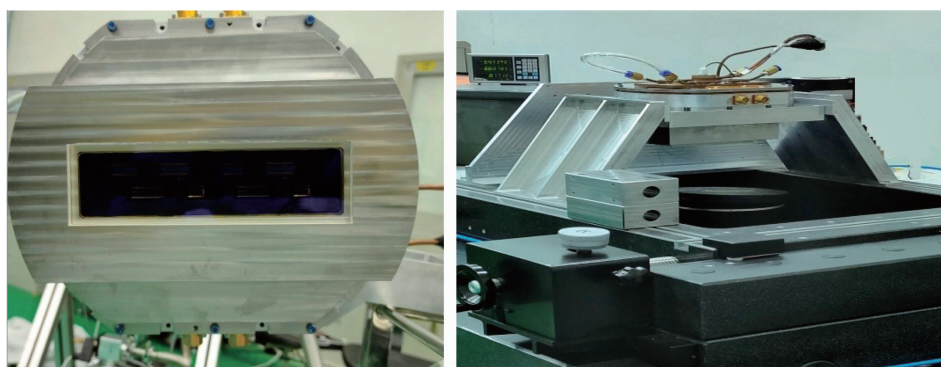


图6 低温焦面变形测试的封装结构及低温焦面测试平台

3 小结

基于 DOE 设计方法, 用 Isight 软件调用 ABAQUS 软件分析, 然后通过用 Calculator 处理相关数据并进行往复迭代计算, 可在短时间内获得满足可靠性要求的超长线列红外焦平面探测器冷头结构。这种优化设计方法可用于解决相似阵列规模的拼接类探测器组件的冷头优化设计难题。但受限于现有的探测器组件材料及工艺, 该方法无法获得满足成像及低温可靠性要求的超大规模阵列探测器的冷头结构形式。而随着更多宇航新材料及新工艺的研发和

推出, 可以增加更多的结构优化匹配组合形式。此类冷头设计优化方法可为超大规模阵列探测器的冷头结构设计提供可操作方案。

参考文献

- [1] 东海杰. 长线列红外探测器组件冷台面结构设计 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 1020–1022.
- [2] 倪计民. DoE 在高压共轨柴油机优化设计中的应用 [J]. *内燃机学报*, 2009, **27**(3): 231–236.
- [3] 周素霞. 基于 Isight 集成平台的轨道弹条扣件优化设计 [J]. *中国科技论文*, 2019, **14**(2): 145–149.