

文章编号: 1672-8785(2021)06-0019-05

# 大规模红外探测器冷箱结构的优化设计

付志凯 方志浩 张 磊 吴 卿 王成刚

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 针对大规模红外探测器的封装需求, 介绍了冷箱封装结构的设计方法和特点。根据不同类型的大规模红外探测器组件的用途和需求, 对其封装结构、重量、热负载以及可靠性等进行了分析, 并针对某型大规模红外探测器组件的封装结构开展了优化设计。以轻量化、低功耗为设计思路, 采用有限元仿真工具对封装结构进行了优化设计, 使其能够满足设计要求。

**关键词:** 红外探测器; 冷箱; 优化设计

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.06.004

## Optimal Design of Cold Box Structure of Large Scale Infrared Detectors

FU Zhi-kai, FANG Zhi-hao, ZHANG Lei, WU Qing, WANG Cheng-gang

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

**Abstract:** Aiming at the packaging requirements of large scale infrared detectors, the design methods and characteristics of cold box packaging structure are introduced in this paper. According to the use and demand of different types of large scale infrared detector assemblies, their packaging structure, weight, thermal load and reliability are analyzed and studied, and the packaging structure of large scale infrared detector assembly is optimized. Lightweight and low power consumption are taken as the design idea, and the packaging structure is optimized by the finite element simulation tool to meet the design requirements.

**Key words:** infrared detector; cold box; optimal design

### 0 引言

大规模、长线列拼接是近年来红外探测器发展的一个方向。随着空间探测技术的不断发展, 该方向受到了国内外用户的广泛关注。国际上的探测器供应商已经实现了 8000、20000 元超大规模探测器的生产和应用<sup>[1-2]</sup>。

随着探测器芯片规模的不断增大, 封装

结构的尺寸、质量和功耗在不断增大, 以满足探测器性能和可靠性的需求。这对整机系统的影响越来越大<sup>[3]</sup>。本文介绍了一种优化的大规模拼接红外探测器冷箱封装结构, 然后分析和对比了冷箱的设计特点, 并针对小型化和低功耗的发展需求对冷箱的优化设计进行了研究。

**收稿日期:** 2020-11-24

**作者简介:** 付志凯(1985-), 男, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向为红外探测器杜瓦封装结构的设计与仿真。E-mail: fuzhikai258@126.com

## 1 冷箱介绍

冷箱是大规模红外探测器组件的主要封装形式,其功能与杜瓦一致。在光学结构设计中,它提供实现探测器组件与整机光学匹配的接口,同时保证芯片的高精位置要求,并通过内部的光学设计来降低杂散光的干扰<sup>[4]</sup>。在热学设计中,对于大规模探测器芯片,需要尽量降低探测器与冷箱结构的漏热,同时还需满足探测器温度均匀性的要求。在电学设计中,由于探测器规模增大,引线管脚数量不可避免地增加,所以要考虑如何在尽量降低传导漏热的同时进行电学设计和引出接口布局。冷箱提供符合要求的机械接口来与系统对接,同时探测器组件需要保证系统静力学、热应力以及结构动力学的可靠性要求<sup>[5-6]</sup>。

某长行列拼接红外探测器组件的探测器规模超过千元,冷头尺寸大于 95 mm×85 mm,质量约为 0.6 kg。探测器输出管脚的数量超过 100 个。由于传统的微杜瓦封装不满足上述要求,采用了更大冷箱结构(见图 1)的封装形式。

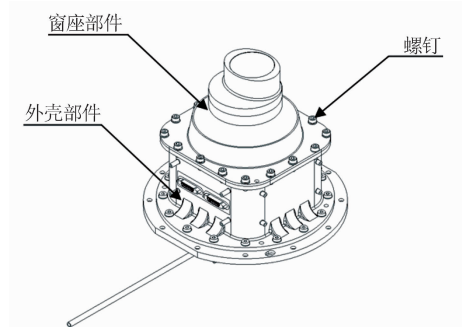


图 1 某长行列拼接冷箱组件

该冷箱结构整体上采用全金属材料。其中,外壳部件通过金属密封丝来耦合集成式冷指,从而保证冷箱内的真空度。为了便于维修拼接探测器,窗座与外壳部件也采用金属丝螺接密封形式。主体采用可伐金属材料,有利于与连接器、窗片等非金属材料焊接,从而保证组件真空性。但是这会导致整体组件质量较大,且冷箱质量达到 9 kg 左右,因此对整机重量影响较大。

为提高力学冷头的可靠性和稳定性,制冷机采用了 4 支撑结构(见图 2)。该结构的支撑强度高,能够保证探测器焦平面的稳定性,但是导致整体结构尺寸与重量大。

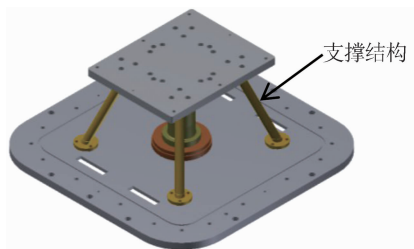


图 2 4 支撑结构的示意图

在电学设计中采用 4 个 37pin 标准连接器,其内部利用聚酰亚胺柔性导线带来引出探测器的电学信号。电学引出形式需要较大外形尺寸的外壳部件。使用电学柔带方便了电学接口位置的设计。但是该方式直接将探测器冷端与外壳相连,造成了传导漏热,增加了组件热负载。此外,大尺寸冷箱内部热辐射面积的增加,也导致了组件热负载的增大。

早期的大规模探测器封装重点关注组件的可靠性,而较少考虑整体结构的尺寸、质量和热负载等。随着探测器规模的不断增大以及航天载荷需求的不断增多,系统的重量和尺寸受到越来越多的关注。由于探测器的封装结构和形式受整机限制,尺寸不可以无限增加。因此,大规模探测器的封装结构也需要实现小型化和低功耗的设计。

## 2 冷箱结构的优化设计

在某型面阵拼接探测器组件的设计中,对冷箱结构设计进行了优化。该项目中拼接探测器的尺寸达到 195 mm×34 mm,导致探测器冷头结构尺寸与重量大。此时,不仅探测器芯片容易造成热应力,而且探测器的温度均匀性会变差,组件的力学可靠性风险也增大了。探测器管脚数量约为 200 个,电学引出结构也会导致整体尺寸增大,冷箱热负载增加。

### 2.1 小型化设计

传统冷箱结构的冷头结构尺寸较大。一般采用 4 根支撑腿的形式,其支撑点位于制冷机

冷指上(见图 2)。这种结构稳定性好、可靠性高,但是会造成冷箱尺寸大。本产品将支撑结构设计在冷箱外壳上,并将其数量优化为 2 个(见图 3)。因此整体结构尺寸大幅缩小。由于采用高强度钛合金材料,支撑结构具有较好的绝热性,从而降低了组件热负载。支撑结构的优化使得制冷机冷指的整体尺寸大幅缩小,有利于组件的小型化、轻量化设计。



图 3 双支撑结构的示意图

冷箱的主体结构选用钛合金材料以满足轻量化和绝热的要求,并且可靠性和封装工艺均能满足项目要求。这极大地减小了冷箱组件的质量,并最终使其达到 3.5 kg 左右。

## 2.2 低漏热设计

由于本产品的电学管脚数量多,采用传统的电学柔带设计会增大冷箱尺寸。此外,电学柔带也会导致冷端与外壳热传导较高,组件热负载增大,以至于制冷机性能要求提高且体积增大。在电学接口设计中,采用标准 51pin 引线模块(见图 4)。通过低导热金属丝键合将引线模块与探测器芯片管脚相连。该方法不仅使结构紧凑,而且还降低了传导漏热。最终冷箱在常温下的热负载约为 2.5 W。

在冷箱结构设计中,极大地缩减了整体尺寸,使得内部热辐射面积缩小,从而降低了冷箱的热负载。另外还节省了制冷机的冷量,并间接缩减了制冷机尺寸,使探测器组件的尺寸和重量减小。

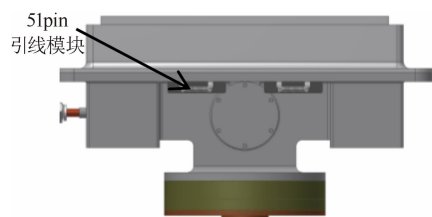


图 4 某型冷箱结构的示意图

## 2.3 可靠性设计

拼接探测器的面阵规模大,尺寸达到 192.6 mm×19.5 mm。在低温下,不同材料的热膨胀系数不同导致热失配,因此需要对冷头结构进行低应力、低变形设计<sup>[4-5]</sup>。

冷头设计要考虑材料热膨胀系数的匹配、导热性、可加工性以及装配工艺的可实现性。冷头体系采用陶瓷材料,并将探测器芯片直接粘接在冷头上。冷头基板通过螺钉固定在支撑腿上。图 5 和图 6 分别为算得的探测器应力云图和变形云图(最大值分别为 38.3 MPa 和 21 μm)。可以看出,该设计能够满足芯片的工作要求。

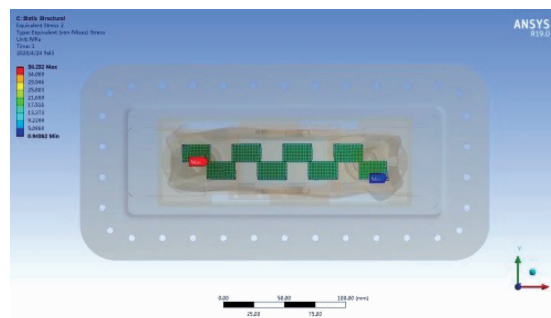


图 5 探测器应力云图

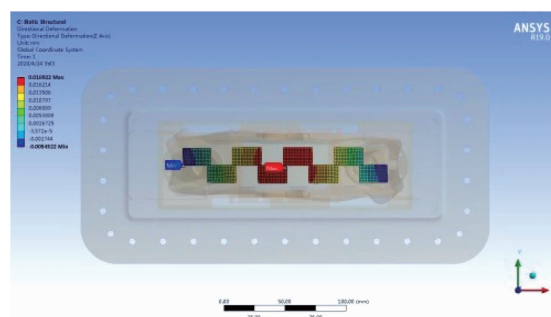


图 6 探测器变形云图

冷箱结构的制备主要通过高强度粘接、螺接以及压封工艺来实现,从而保证结构强度。为了提高组件的力学强度,本项目将耦合接口设计在冷箱中部的重心位置上,并使用有限元分析软件进行模态和力学分析。

表 1 列出了冷箱组件的模态分析结果。其中,第一阶和第二阶模态表现为冷屏的俯仰振动;第三阶和第四阶模态表现为冷头结构的俯仰振动;第五阶和第六阶模态表现为冷屏的扭曲。图 7 为模态分析云图。由于前六阶模态的

表1 模态分析结果

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率	334.2 Hz	342.17 Hz	561 Hz	612.59 Hz	722.58 Hz	730.04 Hz

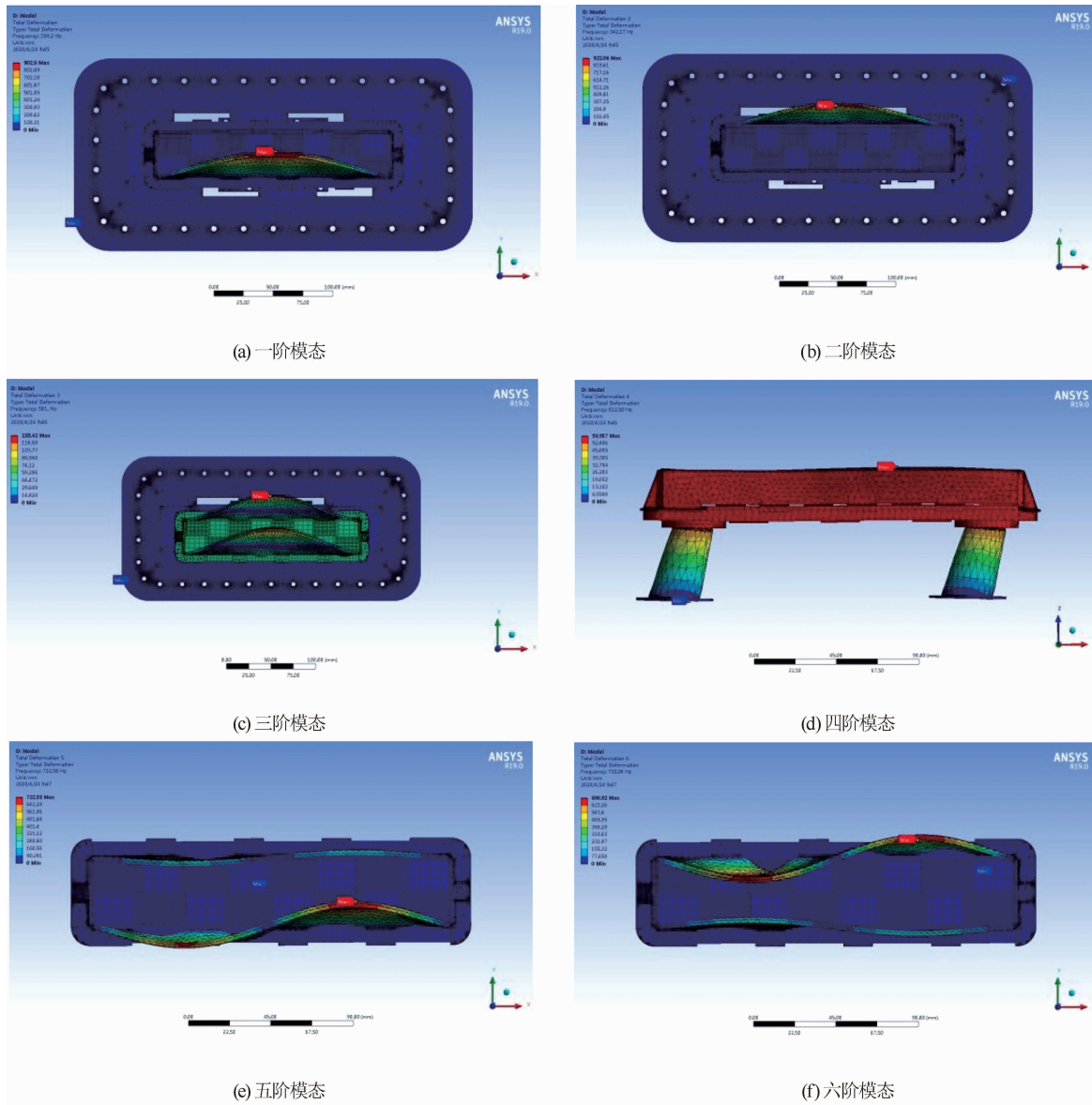


图7 模态分析云图

频率范围为 334.2~730.04 Hz, 因此红外探测器组件在低频激励下不易发生振动。

由于冷屏发生了俯仰振动, 其根部区域的受力大, 出现了明显的应力集中现象。支撑结构连接冷头和外壳, 因此发生较大振动时它与冷头的连接处受到较大的约束力, 导致支撑端部出现应力集中(仿真结果见表 2)。可以看出, 结构都处在安全范围内。

表2 红外组件振动应力分析结果(单位: MPa)

	冷屏	支撑结构
正弦振动	0.8	5.8
随机振动	33.6	209.7
半正弦脉冲	54.3	23.8
加速度脉冲	10.8	38.5
目标要求	$\leq 150$	$\leq 895$

### 3 结论

大规模、长线列拼接探测器的封装不可避免地需要采用冷箱形式。本文比较了传统的冷箱结构, 然后通过材料和结构上的优化开展了相关研究, 并得出了以下结论:

(1) 通过对冷箱组件的材料、制冷形式、机械结构以及电学接口等进行优化设计, 能够为整机系统的集成化和轻量化留有足够的余量, 对实际工程应用有重要意义。

(2) 在现有设计的基础上, 通过优化支撑结构和电学引出方式可以有效缩小探测器组件的质量、体积和功耗, 并能满足航天应用条件。

(3) 对于大面阵和超长线列探测器的冷箱设计来说, 探测器的低温应力和变形仍有优化空间, 可靠性也有待实际验证。因此, 下一阶段将针对这些方面开展研究。

### 参考文献

- [1] 谭振, 杨海玲, 孙海燕, 等. 大面阵碲镉汞长波红外焦平面器件刻蚀工艺非均匀性研究 [J]. *红外*, 2019, **40**(9): 6–11.
- [2] 范广宇. 直线脉管集成耦合杜瓦封装设计及其关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [3] 徐圣亚, 戴立群, 孙启扬, 等. 大规模红外探测器杜瓦热负载实验测量研究 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(8): 739–742.
- [4] 付志凯, 魏威, 张磊, 等. 不同冷屏黑化工艺对红外探测器性能的影响 [J]. *红外*, 2019, **40**(11): 17–22.
- [5] 陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [6] 王成刚, 东海杰. 超长线列碲镉汞红外探测器拼接方式对比分析 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(8): 920–923.