

文章编号: 1672-8785(2025)09-0001-07

一种斯特林制冷式快速启动 红外探测器

李 娟 王 冠 张利明 耿利红 张 磊 温建国

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 斯特林制冷式红外焦平面探测器组件具有体积小、功耗低、可靠性高等特点, 被广泛应用于各种红外整机系统。其中远程导弹武器系统对制导作战启动时间提出了较高要求, 而现有红外焦平面探测器则较难满足相应需求。通过分析影响红外焦平面探测器启动时间的主要因素, 提出了一种新的设计思路, 即在保证探测器芯片原始性能及探测器光、机、电接口不变的情况下, 通过微型杜瓦、制冷机及其驱动控制器设计来实现快速启动。试验结果表明, 常温下新设计探测器的降温时间在 210 s 以内; 与传统设计相比, 其启动时间大幅缩短, 满足了项目所需, 为红外焦平面探测器在导弹武器系统中的应用提供了新方案。

关键词: 红外焦平面探测器; 快速启动; 斯特林制冷; 微型杜瓦

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.09.001

A Stirling-Cooled Fast-Start Infrared Detector

LI Juan, WANG Guan, ZHANG Li-ming, GENG Li-hong, ZHANG Lei, WEN Jian-guo

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

Abstract: Stirling-cooled infrared focal plane detector modules, characterized by their compact size, low power consumption, and high reliability, are widely used in various infrared systems. Among them, long-range missile weapon systems have high requirements on the startup time of guided operations, but existing infrared focal plane detectors are difficult to meet the corresponding needs. By analyzing the key factors influencing the startup time of infrared focal plane detectors, a novel design approach is proposed. While maintaining the original performance of the detector chip and the detector's optical, mechanical, and electrical interfaces, a micro-dewar, cryocooler, and drive controller are employed to achieve rapid startup. Experimental results show that the new detector design achieves a cooling time of less than 210 seconds at room temperature. Compared with conventional designs, this design significantly shortens the startup time, meeting project requirements and providing a novel solution for the application of infrared focal plane detectors in missile weapon systems.

Key words: infrared focal plane detector; fast-start; Stirling-cooled; micro-dewar

收稿日期: 2025-05-10

作者简介: 李娟(1987-), 女, 高级工程师, 主要从事红外探测器组件研发工作。

E-mail: lijuanbit@163.com

0 引言

红外焦平面探测器是将光学系统接收到的目标红外辐射(热辐射)转换成可检测的电压信号,从而实现对目标的高精度探测。作为热成像系统的核心部件,它已被广泛应用于监视、识别、跟踪、制导、火控、夜视、光电对抗、遥感等各个军事领域^[1]。采用红外焦平面探测器制导的武器系统,对导弹的作战启动时间有着明确的要求。探测器的启动时间已成为导弹的一个重要指标^[2]。近几年,新一代武器系统对红外探测器的快速启动能力提出了迫切的需求。

本文基于华北光电技术研究所成熟的斯特林制冷式中波 640×512 碲镉汞红外探测器产品,在不改变光、机、电接口及外观尺寸的情况下,对探测器启动时间的影响因素进行了分析,并有针对性地对产品部件进行了设计,有效缩短了探测器的制冷启动时间。

1 探测器启动时间的影响因素分析

中波 640×512 红外探测器由焦平面混成芯片、微型杜瓦、斯特林制冷机及其驱动控制器三部分构成。其中,焦平面混成芯片由中波 640×512 碲镉汞芯片和专用读出集成电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)倒装互连而成,用于实现探测器电学输出,且需工作在低

温环境下。微型杜瓦用于封装中波 640×512 混成芯片,通过引线将探测器芯片信号引出至外部成像预处理电路。在探测器芯片附近封装 2 个测温二极管,通过其电压反馈表征探测器芯片的工作温度。微型杜瓦的内部需要具有高真空度来降低其内部热交换,保持探测器芯片工作温度(低温)稳定。斯特林制冷机为探测器芯片提供冷源,保证探测器工作在低温条件下。图 1 为中波 640×512 红外探测器组件的构成图。

作为红外探测器组件的三个组成部分,探测器混成芯片、微型杜瓦、斯特林制冷机及驱动控制器是影响探测器启动时间的主要因素,其设计和工艺都是影响探测器快速启动的关键^[3]。因此可从以下几个方面提升探测器的启动性能。

(1)降低探测器混成芯片的功耗。读出电路功耗、探测器芯片尺寸、探测器芯片工作温度的设计均与探测器混成芯片的功耗息息相关。

(2)提高冷头的导热效率、降低微型杜瓦的热容量。冷头的结构设计、杜瓦内部零件的重量、零件材料的选取、杜瓦的绝热及工艺设计等均与微型杜瓦的热容量相关。

(3)提升制冷机的制冷效率。制冷机内部回热器丝网等结构的设计与制冷机内部回热器

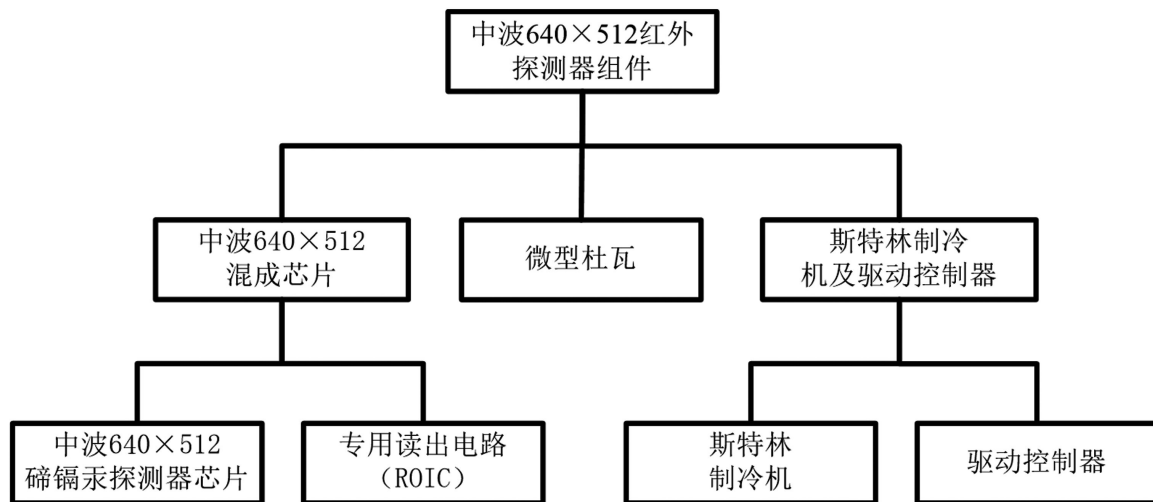


图 1 中波 640×512 红外探测器组件的构成图

的换热性能有较大关系; 制冷机内部充气压力、制冷机供电电压、驱动电机转速等与制冷机的制冷效率息息相关。

红外探测器组件的上述三个部分均对启动时间有较大影响。在实际工作中, 结合整机使用需求, 可针对性地进行设计匹配, 获得最佳的应用性能。

2 快速启动探测器设计方案

本文基于华北光电技术研究所成熟的斯特林制冷式中波 640×512 碲镉汞红外探测器产品, 在保证整机成像性能及接口不变的情况下, 主要从微型杜瓦、斯特林制冷机及其驱动控制器等方面进行了相应设计, 缩短了探测器的启动时间。

2.1 低热容量金属杜瓦设计

典型中波 640×512 红外探测器的微型杜瓦冷头结构如图 2 所示。对于红外探测器组件来说, 冷量的传递路径如下: 冷指的回热器对冷头进行降温, 通过热传导的方式将冷量由下至上传递给冷头部件中的冷台、结构件、框架、探测器芯片、冷屏和滤光片, 同时被冷却的还有引线、冷指以及支撑杆。此外, 由于冷头结构中冷台、结构件、框架、探测器芯片与冷屏之间采用粘接剂进行连接, 粘接剂也将被冷却至一定温度。

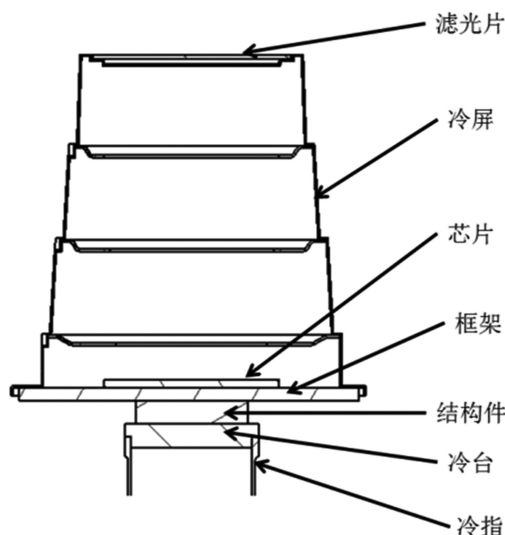


图 2 微型杜瓦冷头结构示意图

根据上述杜瓦内部冷量传递路径, 结合影响杜瓦热容量及热传导效率的影响因素, 重点针对杜瓦冷头结构进行设计, 降低热容量, 提升降温能力。冷头各部件的形态、尺寸、厚度、材料与其热容量息息相关, 但同时由于探测器工作在低温环境下, 还需考虑相邻材料间的热膨胀系数, 以确保探测器的电性能及长期使用可靠性。

本设计中, 滤光片采用常规的热容相对较小的锗基材, 结构件被设计为圆柱形氮化铝结构, 冷屏和框架被设计为异形氮化铝结构, 如图 3 和图 4 所示。冷台采用常规的钛合金材质。对新设计的冷头结构进行了热容计算分析。结果表明, 总的热容量为 447.05 J/K (见表 1)。



图 3 冷屏设计图



图 4 框架设计图

表 1 新设计冷头的具体热容情况

部件名称	比热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	热容/(J·K ⁻¹)
探测器芯片	0.88	37.49
框架	0.75	153.36
结构件	0.75	52.72
滤光片	0.31	13.21
冷屏	0.42	131.51
冷台	0.023	58.76
合计		447.05

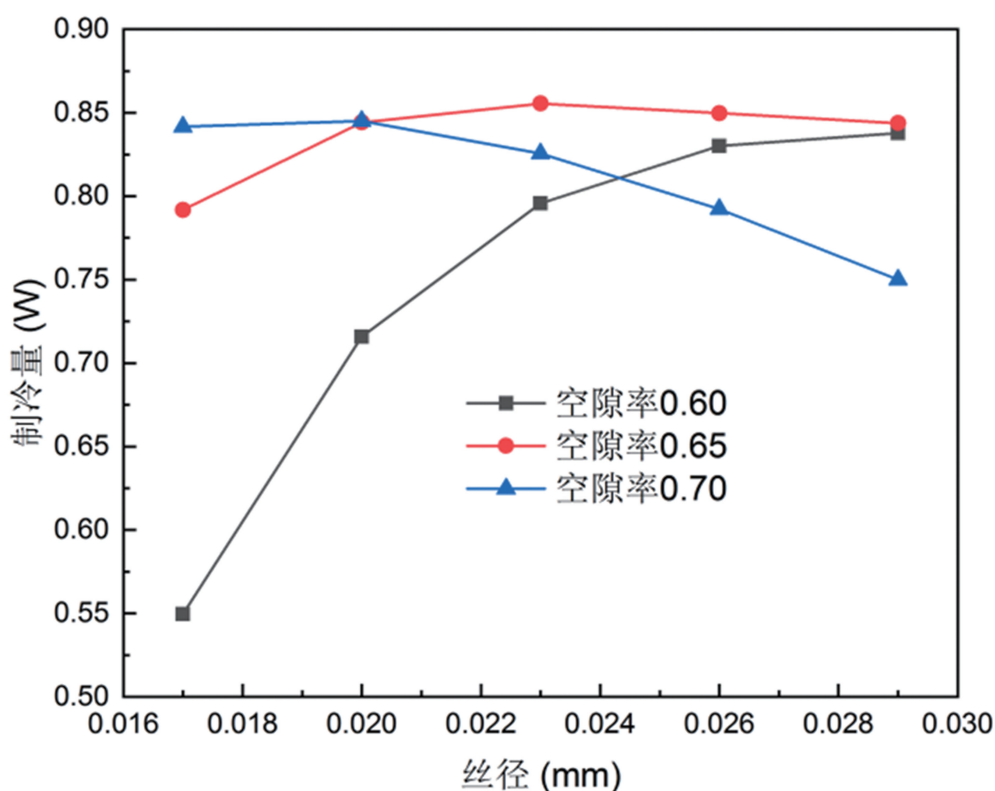


图 5 回热器空隙率和丝网丝径对制冷机制冷量的影响

2.2 高效率低漏热制冷机设计

回热器是斯特林制冷机中最关键的部件，热力损失主要发生在回热器中^[4]。因此，本文从制冷机回热器方面着手进行研究，使制冷机制冷效率更高、输出更多的冷量。

本文以华北光电技术研究所定型的 XD-5B 斯特林制冷机结构为基础，结合仿真手段，对制冷机内部影响制冷效率的回热器进行了设计。热导率高的小直径不锈钢编织丝网可以使室温至液氮温区的回热器填料热容得到充分利用^[5]，有利于回热器中冷、热流体间的高效换

热。因此，回热器的填料采用常规不锈钢编织丝网。通过建立制冷机数值计算模型，分析了回热器的空隙率和丝网丝径的影响，获得了最佳参数，完成了制冷机设计。

在制冷机计算模型仿真中，常温条件下制冷温度为工作温度(80 K)时制冷机制冷量随回热器空隙率和丝网丝径的变化情况如图 5 所示。可以看出，随着丝网丝径的增加，制冷机的制冷量先增大后减小，即存在使制冷机制冷量达到最大值的最优回热器丝网丝径；在不同丝网丝径情况下，回热器空隙率对制冷量的影

响不尽相同。根据仿真结果, 在回热器空隙率和丝网丝径设定范围内, 当回热器空隙率为 0.65、丝网丝径为 0.023 mm 时, 制冷机的制冷量最大, 制冷效率最高。

因此, 采用新方案中的丝网丝径对制冷机回热器进行填充, 同时采用了华北光电技术研究所定型的 XD-5B 斯特林制冷机结构。制冷机装配完成后, 测试了制冷机的冷量(结果见表 2)。

表 2 制冷机冷量

温度	制冷机冷量/mW
常温(80 K@25 °C)	752
高温(80 K@70 °C)	536

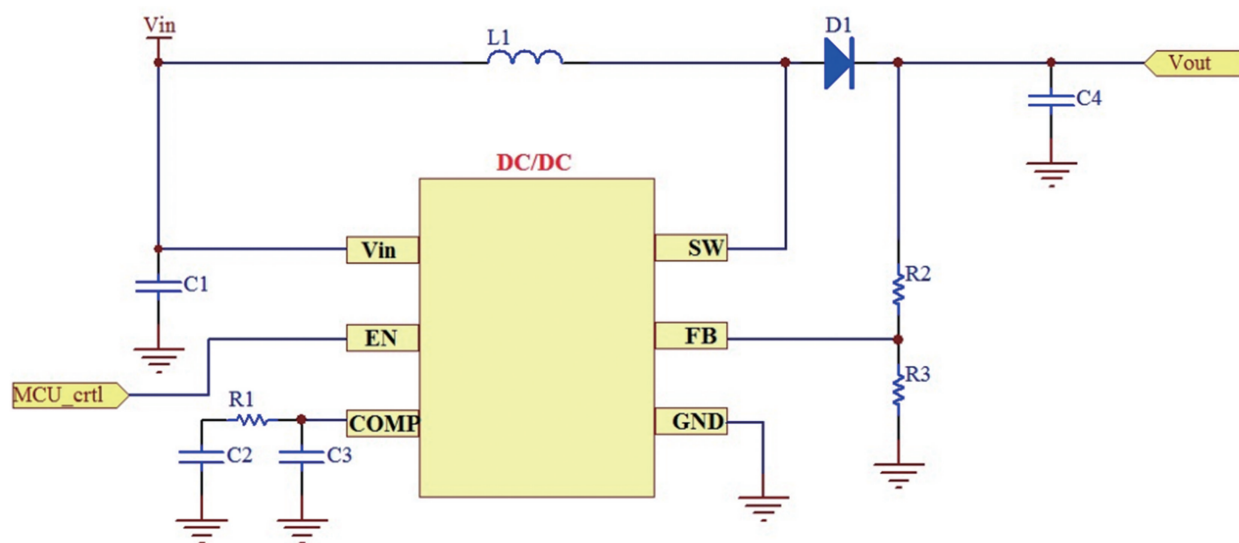


图 6 DC/DC 电源升压模块示意图

3 产品测试及验证情况

为了验证新设计的杜瓦冷头结构的性能, 我们开展了中波 640×512 探测器组件的微型杜瓦封装试验, 并将新设计的制冷机及驱动控制器与其耦合, 成功组装出光、机、电接口以及外形尺寸与原组件保持一致的红外探测器组件(见图 8)。测试结果显示, 新设计的红外探测器组件在常温(25 °C±2 °C)下的启动时间可达到 210 s 以内; 高温(60 °C±2 °C)环境中, 其启动时间也在 250 s 以内。相比之下, 常规中波 640×512 红外探测器的降温时间明显更长。这表明新设计在提升红外探测器组件的快

2.3 制冷机驱动设计

斯特林制冷机的驱动控制器驱动电机, 通过斯特林制冷机循环产生冷量, 将中波 640×512 探测器芯片降温至低温。通过真空微型杜瓦内部测温二极管的电压反馈值进行闭环控制, 将探测器芯片的工作温度稳定在设定值。因此, 制冷机驱动控制器与制冷机降温性能息息相关。

通过设计 DC/DC 电源升压模块(见图 6), 使制冷机驱动控制器具备快速响应性能; 匹配高速电机, 改善了制冷机的电机性能曲线, 大幅缩短了降温时间。优化前后的性能对比情况如图 7 所示。

速启动能力方面取得了显著成效(具体测试数据见表 3)。

为了进一步验证新设计红外探测器组件的稳定性和可靠性, 我们对其进行了 2000 次开关机试验以及典型环境适应性试验。在这些严格的测试过程中, 该组件始终保持着稳定的功能和性能, 没有出现任何明显的性能下降或功能异常现象。这充分证明了新设计的探测器组件在不同的工作条件下都能够保持良好的工作状态, 具有较高的稳定性和可靠性, 满足了项目对红外探测器组件的实际应用需求。

通过这些详细的试验测试, 我们可以得出以下结论: 新设计的杜瓦冷头结构与制冷机及

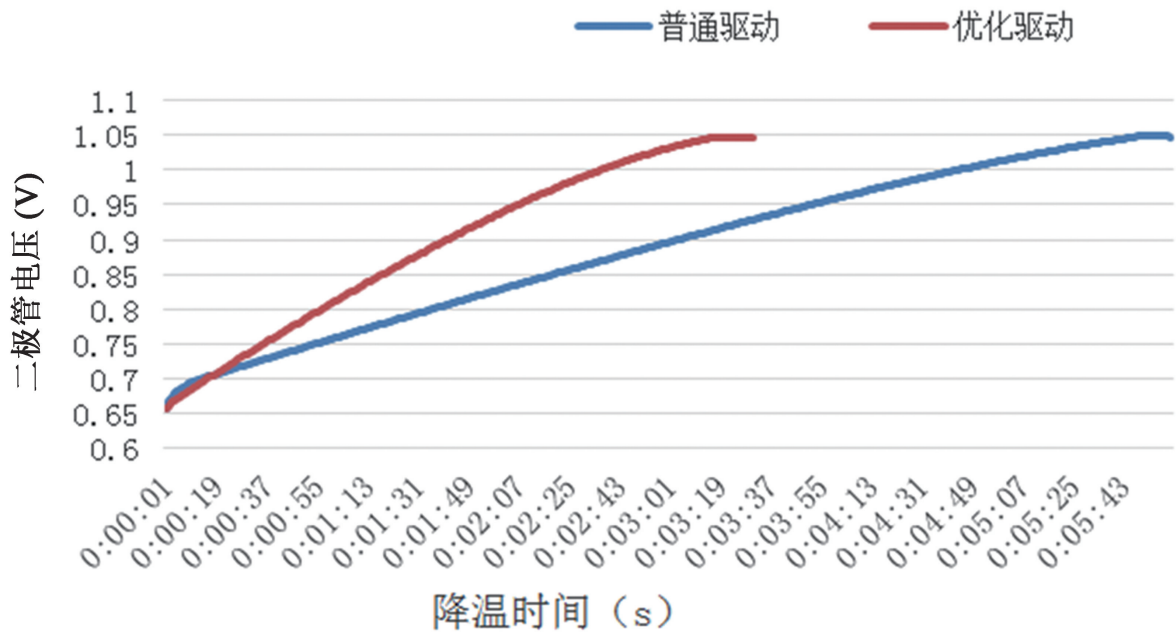


图 7 驱动的二极管电压值随降温时间的变化



图 8 中波 640×512 红外探测器组件的实物图

表 3 新设计探测器组件的降温时间测试情况

组件编号	常温(25℃±2℃)	高温(60℃±2℃)
1	180 s	221 s
2	178 s	215 s
3	186 s	225 s
4	191 s	241 s

驱动控制器的优化组合，不仅显著提高了红外探测器组件的启动速度，而且还确保了其在各种环境下的可靠性。这种改进对于提升红外武器系统的整体性能具有重要意义，不仅缩短了作战响应时间，还增强了系统的适应性和可靠性，为红外技术在军事领域的应用提供了有力支持。

4 结束语

本文揭示了影响制冷时间的关键因素及其相互作用规律，为采用同类斯特林制冷机结构的红外探测器组件设计提供了优化思路与借鉴方案，具有一定的理论意义和实用价值。与传统设计相比，本设计在保持原有接口和尺寸的基础上实现了更短的制冷时间，显著提升了探

测器组件的快速启动能力, 为红外武器系统的快速作战响应提供了有力支持。通过对关键结构和控制系统进行改进, 可以实现更高效、更可靠的红外探测解决方案。未来, 我们计划在此基础上进一步研究如何优化探测器组件在更极端环境下的性能表现, 以及如何进一步提高其长期工作的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 应承平. 红外焦平面阵列串音测试技术研究 [J]. 计测技术, 2006, **26**(21): 24–28.
- [2] 王三煜. 制冷器在导弹系统中的应用 [J]. 红外技术, 2005, **27**(5): 399–402.
- [3] 李进武, 刘建伟, 李娟, 等. 红外焦平面探测器快速启动的影响因素分析 [J]. 红外, 2017, **38**(12): 13–17.
- [4] 罗高乔, 叶重, 绳春晨, 等. 斯特林制冷机混合填料回热器性能优化及试验研究 [J]. 低温工程, 2017, **21**(5): 42–48.
- [5] 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 迟国春, 孙浩, 王亮, 等. 红外探测器组件制冷参数分析 [J]. 红外技术, 2019, **41**(7): 683–688.