

文章编号: 1672-8785(2023)07-0034-05

斯特林制冷机驱动器元器件的散热 优化设计及试验研究

张永壮¹ 龚志红² 饶启超¹ 卢旭辰¹

韩蓬磊¹ 温建国¹ 耿利红¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 中国人民解放军 93160 部队, 北京 100071)

摘 要: 驱动器元器件的散热问题一直是斯特林制冷机在高温环境下稳定运行的主要限制因素。以某款斯特林制冷机为研究对象, 通过具体的驱动器元器件的散热结构设计来优化其散热特性。通过试验验证了优化后散热结构的可靠性及散热提升效果。在热真空环境温度 60℃ 条件下, 应用这种散热优化结构的斯特林制冷机的驱动器元器件的平均温降约为 7.18%。通过试验发现, 在热真空环境温度 60℃ 条件下, 用紫铜作为背板材料的元器件的平均温度比用铝作为背板材料时约低 9.05%; 制冷机反向放置时元器件的平均温度比正向放置时约低 19.25%。本文设计的散热优化结构、试验过程及结果, 对具体的工程实践具有一定的指导意义。

关键词: 斯特林制冷机; 元器件散热; 优化设计; 试验研究

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.07.006

Optimization Design and Experimental Study on Heat Dissipation of Stirling Refrigerator Driver Components

ZHANG Yong-zhuang¹, GONG Zhi-hong², RAO Qi-chao¹, LU Xu-chen¹,

HAN Peng-lei¹, WEN Jian-guo¹, GENG Li-hong¹

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Unit 93160 of PLA, Beijing 100071, China)

Abstract: The heat dissipation problem of the Stirling refrigerator driver components has always been the main limiting factor for the stable operation of the Stirling refrigerator in the high-temperature environment. Taking a certain Stirling refrigerator as the research object, its heat dissipation characteristics are optimized by designing the heat dissipation structure of specific driver components. The reliability of the optimized heat dissipation structure and the heat dissipation improvement effect are verified through experiments. Under the condition of a thermal vacuum environment temperature of 60℃, the average temperature drop of the driver com-

收稿日期: 2022-10-24

作者简介: 张永壮(1995-), 男, 河北张家口人, 硕士, 助理工程师, 主要从事红外探测技术、制冷与低温技术研究。E-mail: 1145609512@qq.com

ponents of the Stirling refrigerator using the optimized heat dissipation structure is about 7.18%. According to the experiments, it is found that under the condition of a thermal vacuum environment temperature of 60℃, the average temperature of components using red copper as the backplane material is about 9.05% lower than that of components using aluminum as the backplane material, and the average temperature of components when the refrigerator is placed in the reverse direction is about 19.25% lower than that when it is placed in the forward direction. The designed heat dissipation optimization structure, experimental process and results in this paper have certain guiding significance for specific engineering practice.

Key words: Stirling refrigerator; heat dissipation of components; optimization design; experimental study

0 引言

由于具有体积小、重量轻、结构紧凑等特点, 旋转集成式斯特林制冷机被广泛应用于红外探测领域, 同时在军事、宇航、生物、医学等领域也起着至关重要的作用^[1]。作为斯特林制冷机的中枢控制系统, 驱动器的工作稳定性直接决定着整个制冷机以及红外系统的性能。制冷机驱动器的电子元器件尺寸小, 热流密度大, 散热问题成为整个制冷机驱动系统的最薄弱环节^[2]。因此, 驱动器元器件散热是影响制冷型红外探测器在高温下高效运行的关键因素。

旋转式斯特林制冷机在工作时会放热, 主要包括压缩放热、驱动器元器件放热和电机定子放热。由放热引起的温升会影响制冷机和红外系统的性能^[3]。其具体原因是随着制冷机的持续工作, 内部热量不断积累, 所引起的温升对制冷机的制冷效率、控温稳定性、驱动电子元器件和机械零部件的可靠性等均有很大影响, 会降低制冷机和红外探测器的工作性能及寿命^[4]。近年来, 人们对斯特林制冷机环境适应性的指标要求越来越高。耐高温工作是斯特林制冷机的重要发展方向和必要的考核指标^[5]。散热问题已经成为了斯特林制冷机和制冷型红外探测器性能提升的主要限制因素, 而驱动器元器件散热又是斯特林制冷机散热问题的关键环节。因此, 斯特林制冷机驱动器元器件的散热问题亟待解决。

本文通过对斯特林制冷机的驱动器元器件结构进行优化设计来提升其散热特性。通过具体试验验证了优化后散热结构的可靠性及散热

提升效果, 同时研究了相关因素对制冷机驱动器元器件散热性能的影响程度, 从而为具体的工程应用提供参考。

1 元器件散热优化设计

1.1 结构设计

由于项目要求较高, 中国电子科技集团第十一研究所的某款 XD-5B 型制冷机在航天组件的热真空试验中出现元器件损耗, 严重影响元器件性能, 导致红外探测器在热真空条件下失效。针对该现象, 本文设计了一种由驱动器背板凸台结构和导热垫夹层组成的装配集成式结构。该结构主要通过增加驱动器发热元器件的主要换热路径来实现散热及其优化。将发热元器件原来通过驱动板导热的单一换热方式改变为通过驱动板和驱动器背板共同导热的多路径换热方式, 增加了换热路径, 使发热元器件多渠道散热, 从而保证元器件处于适宜稳定的工作温度。

斯特林制冷机驱动器元器件的散热优化结构如图 1 所示, 驱动器背板凸台结构如图 2 所示。这种散热优化结构主要包括驱动器背板凸台结构(14~17)和中间导热垫夹层(8~11), 是将驱动器外壳(13)中的驱动板元器件(1~6)和中间导热垫(8~11)以及凸台结构背板(12)装配成的集成式驱动器元器件散热优化结构。

在斯特林制冷机的驱动器背板上, 根据发热元器件到驱动器背板的具体距离和中间导热垫(8~11)厚度核对出驱动器背板凸台的具体高度。此高度需满足规定厚度的导热垫有 20%~40% 压缩量的要求。斯特林制冷机的驱动器背板为凸台结构背板。凸台的

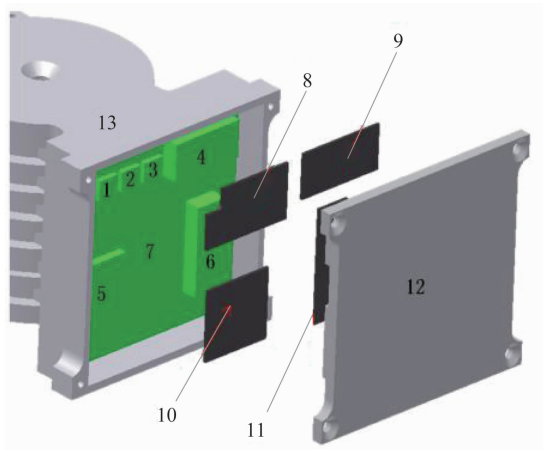


图 1 斯特林制冷机驱动器元器件的散热优化结构

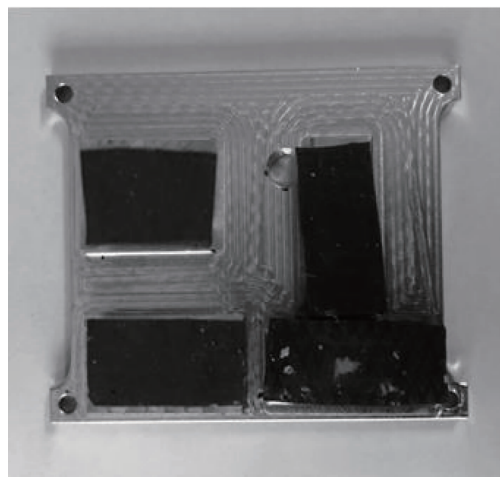


图 4 驱动器背板凸台结构和中间导热垫的实物图

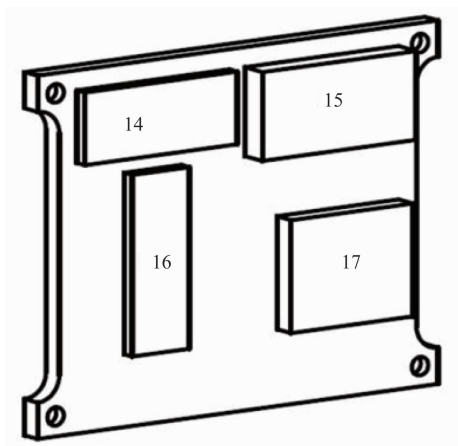


图 2 驱动器背板凸台结构

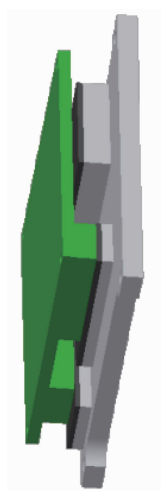


图 3 散热优化结构的集成装配示意图

具体面积应和中间导热垫的面积一致。二者尺寸应略大于发热元器件的面积，将发热元器件全覆盖，以充分利用导热面积，从而达到最佳散热状态。

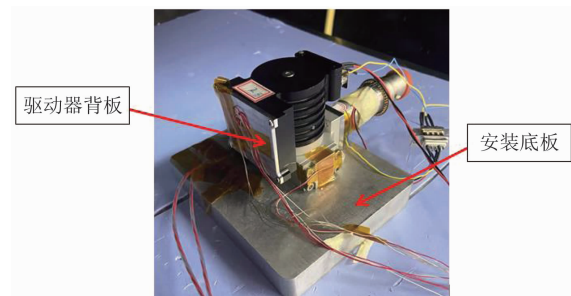


图 5 热真空试验的实物图

图 3 为斯特林制冷机驱动器元器件散热优化结构的集成装配示意图。图 4 为驱动器背板凸台结构和中间导热垫的实物图。采用这种散热优化结构相当于增加了驱动板发热元器件的热传导路径(发热元器件到中间导热垫，再到驱动器凸台背板)，增大了换热效率，提升了斯特林制冷机驱动器发热元器件的散热效果。这样可将驱动器发热元器件原来通过驱动板导热的单一换热方式改变为通过驱动板和驱动器背板共同导热的多路径换热方式，增加了换热路径，实现了元器件多渠道散热，使得驱动器元器件的散热效果大幅提升。

1.2 试验研究

以上散热优化结构在旋转集成式斯特林制冷机驱动器元器件散热试验中发挥了积极的作用。图 5 为具体试验的实物图。在热真空试验条件(真空度为 1.3×10^{-3} Pa, 热真空罐子的环境温度为 $50^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$, 控制试验的单一变量为是否应用该散热优化结构)下, 稳定工作的

制冷机驱动器元器件 1、2、3 的温度对比情况如表 1 (采用热电偶实测元器件温度) 所示。

通过具体的试验数据可以得出, 在相同的试验条件下, 应用该结构的斯特林制冷机稳定工作时, 元器件的温度会有明显降低。在热真空环境温度 50℃ 条件下, 三款元器件的平均温度降低 4.71℃, 平均温降约为 4.91%; 在热真空环境温度 60℃ 条件下, 三款元器件的平均温度降低 7.99℃, 平均温降约为 7.18%。根据具体的试验结果可以明显得出, 这种斯特林制冷机驱动器元器件散热优化结构, 可使驱动器元器件的散热效果大幅提升。

2 相关因素影响分析

为研究这种斯特林制冷机驱动器元器件散热优化结构的背板材料和制冷机放置方向对驱动器元器件散热的影响, 本文开展了相关对比试验。

2.1 驱动器背板材料对元器件散热的影响

为了研究散热优化结构的驱动器背板材料对元器件散热性能的影响, 我们安排了具体试验: 在热真空试验条件 (真空度为 1.3×10^{-3} Pa, 热真空罐子的环境温度为 60℃/70℃, 控制试验的单一变量为驱动器背板材料) 下, 稳定工作的制冷机驱动器元器件 1、2、3 的温度对比情况如表 2 (采用热电偶实测元器件温度) 所示。

通过具体的试验数据可以得出, 在相同的试验条件下, 这种散热优化结构的驱动器背板

材料会明显影响元器件的散热性能。在热真空环境温度 60℃ 条件下, 使用紫铜作为背板材料的元器件的平均温度比使用铝作为背板材料的元器件的平均温度低 9.35℃ (约低 9.05%)。在热真空环境温度 70℃ 条件下, 使用紫铜作为背板材料的元器件的平均温度比使用铝作为背板材料的平均温度低 6.01℃ (约低 5.44%)。根据具体的试验结果可以明显得出, 背板材料对散热优化结构的影响较大, 使用紫铜作为背板材料的元器件的散热效果比使用铝作为背板材料时更好。

2.2 制冷机放置方向对元器件散热的影响

制冷机在安装底板上的放置方式可以是曲轴箱底面朝下接触安装底板的正向放置, 也可以是电机顶端平面朝下接触安装底板的反向放置。为研究制冷机放置方向对元器件散热的影响, 开展具体的研究试验: 在热真空试验条件 (真空度为 1.3×10^{-3} Pa, 热真空罐子的环境温度为 50℃/60℃, 控制试验的单一变量为制冷机的放置方向) 下, 稳定工作的制冷机驱动器元器件 1、2、3 的温度对比情况如表 3 (采用热电偶实测元器件温度) 所示。

通过具体的试验数据可以得出, 在相同的试验条件下, 制冷机的放置方向会明显影响元器件的散热性能。在热真空环境温度 50℃ 条件下, 制冷机反向放置时元器件的平均温度比正向放置时低 23.16℃ (约低 25.41%)。在热真空环境温度 60℃ 条件下, 制冷机反向放置

表 1 制冷机驱动器元器件的温度对比情况

环境温度/℃	是否应用该结构	发热元器件 1 温度/℃	发热元器件 2 温度/℃	发热元器件 3 温度/℃
50	否	97.13	93.82	96.66
50	是	90.66	90.69	92.13
60	否	112.69	109.09	112.12
60	是	104.42	102.95	102.57

表 2 制冷机驱动器元器件的温度对比情况

环境温度/℃	驱动器背板材料	发热元器件 1 温度/℃	发热元器件 2 温度/℃	发热元器件 3 温度/℃
60	铝	104.42	102.95	102.57
60	紫铜	93.62	94.77	93.51
70	铝	110.04	110.05	111.46
70	紫铜	104.13	105.3	104.1

表 3 制冷机驱动器元器件的温度对比情况

环境温度/℃	制冷机放置方向	发热元器件 1 温度/℃	发热元器件 2 温度/℃	发热元器件 3 温度/℃
50	正向	90.66	90.69	92.13
50	反向	67.9	68.5	67.6
60	正向	104.42	102.95	102.57
60	反向	83.46	83.77	83.06

时元器件的平均温度比正向放置时低 19.88℃ (约低 19.25%)。根据具体的试验结果可以明显得出, 制冷机的放置方向对驱动器元器件散热性能的影响很大, 且制冷机反向放置时元器件的散热效果提升很大。这是由于散热元器件的导热路径更短, 导热热阻较小。

3 结束语

本文以中国电子科技集团第十一研究所的某款 XD-5B 型制冷机为研究对象, 通过具体的结构设计优化了其驱动器元器件的散热特性。这种散热优化结构可将驱动器发热元器件原来通过驱动板导热的单一换热方式改变为通过驱动板和驱动器背板共同导热的多路径换热方式, 增加了换热路径, 实现了元器件多渠道散热。通过具体试验验证, 采用这种散热优化结构的斯特林制冷机的驱动器元器件的平均温降约为 7.18%, 驱动器元器件的散热效果得到了大幅提升。

此外, 本文还通过具体试验研究了这种散热优化结构的背板材料和制冷机放置方向对驱动器元器件散热的影响程度。结果表明, 驱动器背板材料对散热优化结构的影响较大, 使用紫铜作为背板材料的元器件的散热效果比使用铝作为背板材料时更好; 制冷机的放置方向对

驱动器元器件散热性能的影响很大, 且制冷机反向放置时元器件的散热性能提升很大。

本文根据具体工程应用设计的斯特林制冷机驱动器元器件散热优化结构以及相关的实验研究过程与结果, 对于具体的制冷机驱动器元器件散热的工程实践具有一定的指导意义。以后将在散热优化结构的材料选择以及增加元器件导热路径等方面继续深入研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李庆友, 王文, 周根明. 电子元器件散热方法研究 [J]. 电子器件, 2005, 28(4): 937-941.
- [3] 辛光磊, 迟国春, 饶启超, 等. 旋转式斯特林制冷机热仿真分析与优化 [J]. 低温与超导, 2020, 48(2): 12-16.
- [4] 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.
- [5] 张文君, 詹培, 陶余钱, 等. 斯特林制冷机热环境适应能力优化设计 [J]. 低温与超导, 2022, 50(8): 64-68.