

一种高灵敏度超导接收前端的结构与仿真^{*}

刘海建, 陈宇鹏, 左 涛, 尚承伟

(中国电子科技集团公司第十六研究所, 安徽 合肥 230043)

摘 要:空间用超导接收前端必须经受热真空和振动、冲击等环境适应性测试的考验,需要可靠的集成设计来控制制冷机冷指的变形量,而可靠的结构设计是关键。文中介绍了一种空间用高灵敏度超导接收前端的小型化、低漏热和高可靠性的结构设计方案。该接收前端采用自制的分置式斯特林制冷机(2.8 W @ 77 K)。采用特殊结构设计的铝板底座有效地将制冷机产生的热量传送到安装平台,满足了热真空指标。采用冷焊制成的异种形状的柔性导热带大大减小了制冷机冷指受应力冲击所造成的变形。采用隔热支撑结构连接超导滤波器和低温放大器等器件,既满足了机械强度要求,又有效地减小了漏热。对关键部件进行了实物测试,并采用 Pro/E 和 ANSYS 对整机进行仿真,验证了这种结构设计的可行性。

关键词:超导接收;结构设计;建模仿真

中图分类号:TH122 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2013)04-0018-04

Structure Design and Simulation of a High Sensitive Superconducting Receiving Frontend

LIU Hai-jian, CHEN Yu-peng, ZUO Tao, SHANG Cheng-wei

(The 16th Research Institute of CETC, Hefei 230043, China)

Abstract: The superconducting receiving frontend used in space must undergo thermal vacuum and environmental adaptability test such as vibration, shock, and so on. Reliable integrated design is required to control the deformation of refrigerator head. Reliable structural design is most important. This paper introduces a structural design scheme about the miniaturization, low heat leakage and high reliability of a high sensitive superconducting receiving frontend used in space. The frontend employs split Stirling cryocooler (2.8 W @ 77 K) made by ourselves. The aluminum plate base designed by special structure effectively transfers the heat generated by refrigerator to installation platform, satisfying the thermal vacuum requirement. The flexible heat conducting band with irregular shape made by cold welding greatly reduces the deformation of the refrigerator head caused by stress and impact. The heat insulating support structure connects superconducting filter and devices such as cryogenic amplifier, not only satisfying the mechanical strength requirement but also effectively reducing the heat leakage. Key parts are tested, and the whole machine is simulated using Pro/E and ANSYS, verifying that the design is feasible.

Key words: superconducting receiving; structure design; modeling and simulation

引 言

利用高温超导材料先进制备技术和超导应用技术制成的高温超导滤波器系统在通信、军事方面具有重要的应用价值,将其应用于电子装备的接收前端,可大

幅度提高接收机的灵敏度和选择性,提高通信距离和质量,提高制导精确度,增强抗干扰能力等。目前美国已将高温超导微波接收机广泛应用于雷达、军事通信和导弹制导等,使现代武器装备的性能提高到了一个新的水平。我国已将高温超导技术列入“国家中

* 收稿日期:2013-07-02

期科技发展规划”^[1]。目前高温超导材料与技术产业处于起飞的前夜,今后十年是研发高温超导材料先进制备技术和超导应用技术的关键时期,也是我国能否在未来超导技术产业的国际竞争中取得优势的关键时期^[1]。

目前空间用高温高灵敏度超导接收前端所面临的主要问题有:小型化设计、较高的机械可靠性以及低漏热。针对这些问题,本文介绍了一种高温高灵敏度超导接收前端的结构设计。

1 一种高温高灵敏度超导接收前端的整体结构

空间用小型化超导接收前端主要包括制冷系统、控制系统、超导滤波放大系统等。其中包括高温超导滤波器和低温低噪声放大器的放大电路为其核心部分,滤波器微带电路由高温超导薄膜材料制作,工作在60~80 K低温环境^[1],所以制冷机组件也是接收前端的一个关键部件,制冷机与高温超导滤波器之间的连接也成为其中一项关键技术。整机结构如图1所示。

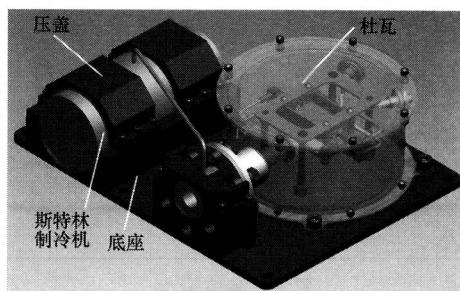


图1 整机结构

1.1 小型化设计

本结构采用自制的分置式斯特林制冷机,由压盖将制冷机固定在底座上。根据制冷机结构,底座采用密度较小导热系数较高的铝板制成特殊的整体式。放大器滤波器上下排列以减小空间占用,用螺钉固定在支板下面,通过支杆安装在底座上。杜瓦筒根据结构特点合理地固定在底座上以减小整体结构尺寸。此结构长251 cm,宽194 cm,杜瓦外径 $\Phi 122$ cm,整体高度不超过90 cm,总质量不超过10 kg。完全可以满足空间用超导接收前端的要求。

1.2 机械可靠性设计

空间用的超导接收前端一定要能够经受较高的力学环境试验要求。本结构的滤波器放大器腔体及SMA等由4根支杆支撑(图2),通过导热带连接在冷指冷头上。斯特林制冷机冷指为薄壁件,较大变形量可使制冷机失效,因此必须有足够的机械强度来保证制冷机的正常工作。支撑杆采用环氧层压玻璃布棒

(弯曲压缩强度均大于240 MPa)^[2]。柔性导热带采用铜箔冷焊压制而成的异种形状,一端夹在滤波器放大器腔体之间,通过螺钉固定在支板下面,由4根环氧玻璃布棒支撑在杜瓦底板上。导热带另一端用螺钉连接在冷头上。腔体、SMA及元器件等在强烈的振动冲击下可能对冷指造成很大的变形,柔性导热带可以大大减小冷指上的受力,保证制冷机的正常工作。

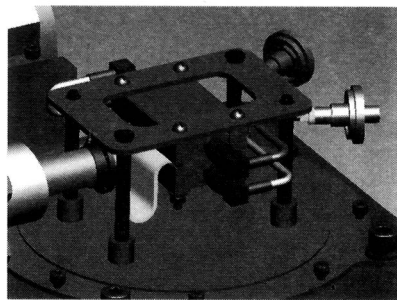


图2 支撑结构

1.3 低漏热设计

传导漏热主要由4根支撑杆和射频引线造成。为减少传导漏热,4根支撑杆采用强度较高、导热系数较小(小于0.28)的非金属材料环氧玻璃布棒^[3]。辐射漏热是空间中主要的漏热方式,在滤波器放大器腔体表面镀银以减小法向发射率从而减少热辐射^[4]。另外杜瓦采用活密封(方便对杜瓦筒内元器件进行包裹),用绝热材料包裹元器件,这样可以大大减少辐射漏热,如果进行多层包裹,辐射漏热将可忽略。

2 机械强度可靠性分析

机械强度可靠性分析主要是校核4根环氧玻璃布棒能否对腔体及元器件起到稳定的支撑作用。腔体、SMA、弯头等所有元器件总重约 8.57×10^{-2} kg,最大加速度取30g,分别对冷头X、Y、Z三个方向进行应力分析。为减少计算量,简化模型去掉不影响计算结果的部分,用Pro/E建模将其导入ANSYS Workbench中,划分网格后如图3所示。

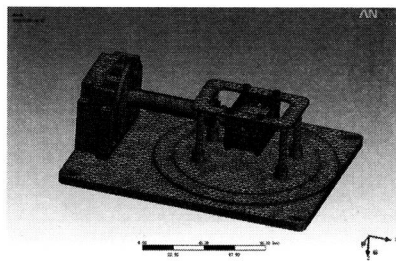


图3 简化后网格模型

施加约束、载荷后计算所得X、Y、Z三个方向的变形云图和应力云图如图4~图6所示。

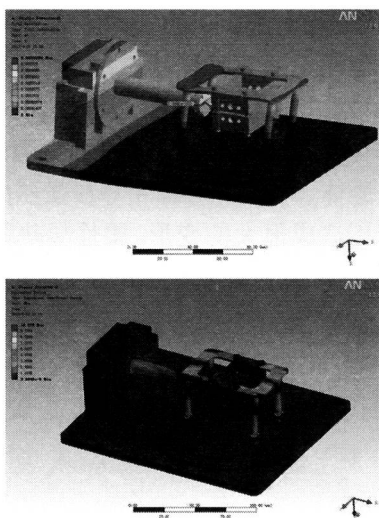


图4 X方向变形、应力云图

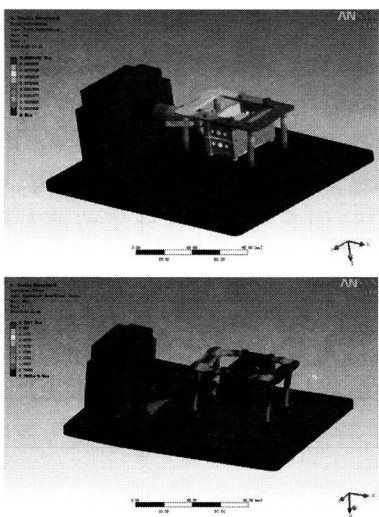


图5 Y方向变形、应力云图

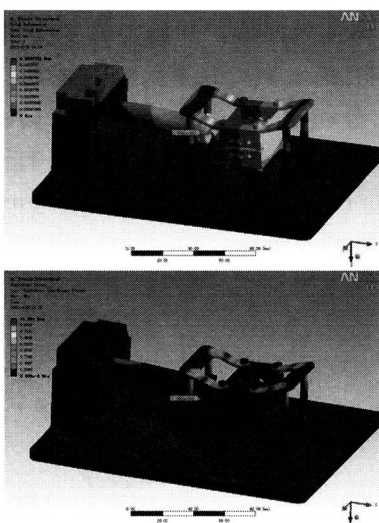


图6 Z方向变形、应力云图

根据斯特林制冷机设计要求:冷头可承受最大径向力 $F_r = 30 \text{ N}$, 最大轴向力 $F_a = 300 \text{ N}$; 冷指上最大变形量不超过 0.009 mm 。从计算结果可以看出, 冷头最

大变形量 X 方向为 $0.002 499 \text{ mm}$, Y 方向为 $0.004 876 \text{ mm}$, Z 方向为 $0.002 569 \text{ mm}$, 完全满足要求。

3 漏热损失分析

3.1 传导漏热

整体底板固定在温度不高于 40°C 的安装平台上, 斯特林制冷机冷头温度为 $77 \text{ K} (-196.16^\circ\text{C})$ 。传导漏热主要由 4 根环氧层压玻璃布棒和射频引线造成。

首先对零件添加材料属性: 底板为铝板, 杜瓦为不锈钢, 支撑杆为环氧层压玻璃布棒, 支板为不锈钢, 滤波器放大器腔体为铝合金, 导热带为无氧铜。模型划分网格后如图 7 所示。

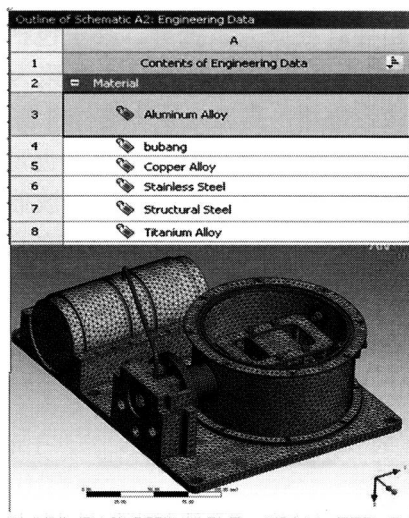


图7 网格模型

施加热载荷, 通过后处理得到计算结果如图 8 所示。从温度分布云图可见环氧玻璃布棒上温度梯度很大, 因此环氧玻璃布棒的传导漏热作用显著。计算得到总传导漏热为 $0.143 47 \text{ W}$, 如图 9 所示。

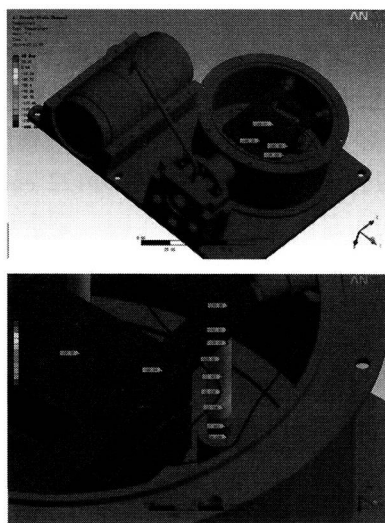


图8 温度分布云图

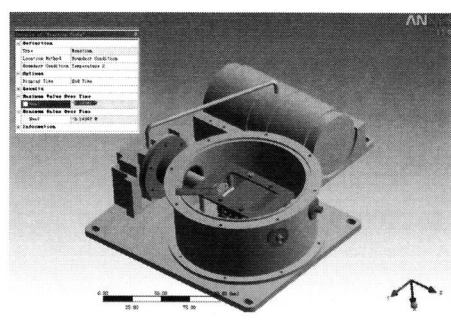


图 9 传导漏热计算结果

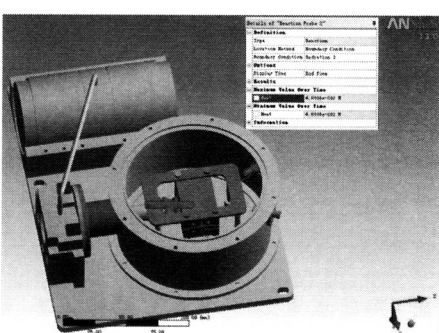


图 12 导热带辐射漏热

3.2 辐射漏热

滤波器放大器腔体表面法向发射率 ε 取 0.03,支板、导热带 ε 分别取 0.06、0.03。腔体、支板及导热带对于杜瓦筒内壁的辐射换热角系数认定为 1^[3]。添加热载荷后计算结果:腔体辐射漏热 0.098 3 W(图 10),支板辐射漏热 0.071 1 W(图 11),导热带(冷板)辐射漏热 0.040 9 W(图 12)。

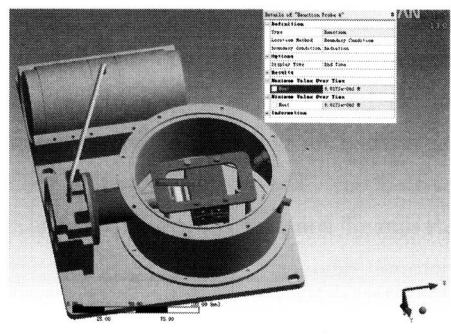


图 10 腔体辐射漏热

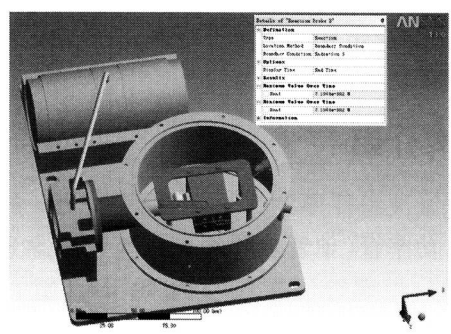


图 11 支板辐射漏热

传导总漏热为 0.143 47 W,辐射总漏热为 0.098 3+0.071 1+0.040 9=0.210 3 W,漏热总损失 0.353 77 W。从计算结果可以看出,漏热损失完全满足要求。

4 结束语

本文详细介绍了一种高温高灵敏度超导接收机的结构设计,首次采用分子扩散焊技术用铜箔大电流加热压制而成异形形状的柔性导热冷板,可缓冲和吸收较大的冲击力和振动,从而有效地保证斯特林制冷机和超导接收前端正常工作。采用环氧层压玻璃布棒制成的支撑杆可大大减小传导漏热损失。4 根支撑杆成对角两顶两压来固定滤波放大器件,支撑杆下端做成螺纹来调节柔性冷板的高度。整体结构简单可靠。应用 Pro/E 建立三维模型,用 ANSYS 对其进行力学和热学分析并结合理论计算验证该结构稳定可靠,可作为其他结构设计的参考。

参考文献

[1] 周廉,甘子钊. 中国高温超导材料及战略研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 131-136.

[2] 方昆凡. 工程材料手册:非金属材料卷[M]. 北京: 北京出版社, 2000.

[3] 陶文铨, 杨世铭. 传热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1998: 253-274.

[4] BIAN Y B, GUO J, GAO C Z, et al. A miniaturized HTS microwave receiver front-end subsystem for radar and communication applications[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2010, 470(15-16): 617-621.

刘海建(1984-),男,硕士研究生,主要从事电子机械结构设计与仿真。