

文章编号: 1672-8785(2022)01-0011-06

一种高分辨率红外探测器组件 的扰动抑制设计

刘 伟¹ 陈 剑² 孟令伟¹ 杨 坤²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 中国电子科技集团公司第十六研究所, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 随着空间遥感技术的快速发展, 高分辨率的超大规模拼接类红外探测器的空间应用需求加大。但此类探测器组件的制冷机在工作时扰动明显, 这会影 响探测器的成像质量, 因此需对该扰动进行抑制, 以保证探测器组件的在轨工作状态。介绍了一种首次为超大规模红外探测器组件引入自身减振设计结构并验证有效的研究成果。项目根据获得的制冷机扰动测试结果, 设计了不同扰动传递路径的隔振结构。通过仿真分析和校核修正, 最终完成地面试验验证。该设计可满足探测器组件自身实现超高分辨率扰动抑制的需求。

关键词: 红外探测器; 微振动; 扰动抑制

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.01.003

A Disturbance Suppression Design for a High-Resolution Infrared Detector Assembly

LIU Wei¹, CHEN Jian², MENG Ling-wei¹, YANG Kun²

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

2. The 16th Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: With the rapid development of space remote sensing technology, the demand for space application of high-resolution infrared detectors increases. However, the refrigerator of this type of detector assembly is disturbed obviously during operation, which will affect the imaging quality of the detector. This disturbance needs to be suppressed to ensure the working state of the detector assembly on orbit. A super large-scale infrared detector assembly with a self-damping design structure is firstly introduced, and the effective research results are verified. Based on the obtained refrigerator disturbance test results, vibration isolation structures with different disturbance transmission paths are designed. Through simulation analysis and correction, the ground test verification is finally completed. This design can meet the needs of the detector component to achieve ultra-high-resolution disturbance suppression.

Key words: infrared detector; micro vibration; disturbance suppression

收稿日期: 2021-08-16

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: liuwei26@cetc.com.cn

0 引言

随着空间应用对成像质量(特别是对地高分辨率)需求的不断增强,卫星平台对扰动振源的抑制设计指标也不断提升。作为空间相机的核心部分,红外探测器组件自身的制冷机在工作过程中,内部运动部件往复运动时会产生微颤扰动。这种扰动可能会使卫星光路系统乃至光学元件产生微小抖动,导致卫星相机对地图像的分辨率及成像质量下降。

本项目所研制的红外探测器组件的焦面阵列规模较大,匹配的制冷机规格较高(供冷量大、重量体积大)。探测器组件工作时,由自带制冷机引入的扰动远超在轨扰动振源的抑制要求。考虑到平台等实际因素,探测器组件自身需采取隔振措施,使扰动在组件自身及卫星平台的各个传递路径上均大幅衰减,保证项目用红外探测器组件及卫星相机在轨工作的可靠性。

1 微振动及隔振

微振动是指航天器在轨运行期间,星上运动部件因高速周期性运动或因变轨姿态调整、冷热交变导致的热变形等所引发的扰动,使星体产生的一种幅值较小、频率较高的颤振响应^[1]。

隔振设计可分为主动隔振设计及被动隔振设计。其中,被动隔振设计通过材料本身的弹性和阻尼来吸收振动能量、消减振动传递;主动隔振设计在被动隔振设计的基础上,通过传感器信号转换、改变阻尼材料输出特性来抵消振动^[2]。根据设计内容的不同,隔振可分为定频吸振技术和变频吸振技术。前者是指振源的激励频率相对单一,用惯性力消减干扰力。后者针对振源激励频率范围较宽的特点,引入电磁变频等主动调整刚度环节,适应振源的频谱带,从而起到减振作用。

2 结构布局与仿真分析

红外探测器组件的制冷机主要由压缩机和膨胀机两部分组成^[3]。本项目的制冷机扰动振源对外有三条传递路径:通过制冷机散热接口

传递至卫星平台;通过制冷机的膨胀机及冷指传递至红外探测器焦面及探测器组件与卫星平台安装界面;通过制冷机的压缩机传递至探测器组件与卫星平台安装界面。经分析可知,制冷机的频谱特性相对单一。采用定频吸振技术设计隔振结构,选择简单的被动隔振设计,以满足项目扰动振源的抑制要求。

对项目所用制冷机进行微振动测试。加载制冷机功率为星上工作功率。通过悬吊法测量各个自由度的振动特性(方向定义见图 1)。

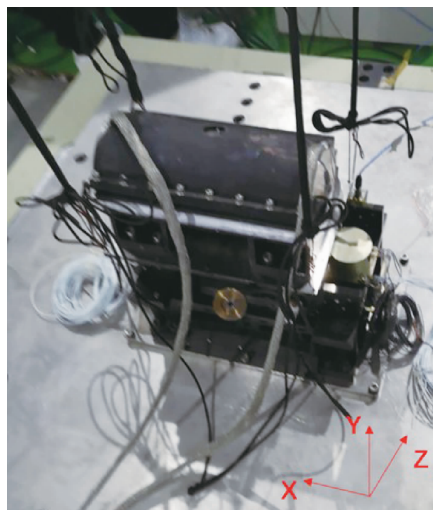


图 1 扰振特性试验

分析表 1 和表 2 中的微振动测试数据,对红外探测器组件的扰动抑制结构进行设计和布局。将组件热接口设置为柔性轻质高效导热索结构,由石墨烯和紫铜构成,保证制冷机压缩机的导热需求,同时消减制冷机扰动通过散热接口向卫星平台传递。在组件制冷机膨胀机与探测器组件与卫星平台安装界面处,设置波纹管连接结构,以消减膨胀机内部相对运动产生的扰动传递至红外探测器组件与卫星相机的安装界面。在制冷机冷指与探测器焦面界面间设置柔性冷链结构,大幅消减膨胀机内部通过制冷机冷指传递至红外探测器焦面的颤振响应。在制冷机的安装支架上设置 4 个对称的隔振器。隔振器的落位位置尽量靠近制冷机的重心位置,以达到更好的隔振效果。设计隔振器的刚度矩阵和阻尼特性,通过仿真分析校核隔振

表 1 制冷机扰振力(时域)试验数据

自由度	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/N\cdot m$	$M_y/N\cdot m$	$M_z/N\cdot m$
振幅	1.55	6.20	0.80	0.40	0.075	0.30

表 2 制冷机扰振力(频域)试验数据

自由度	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/N\cdot m$	$M_y/N\cdot m$	$M_z/N\cdot m$
50 Hz 振幅	0.61	3.87	0.26	0.21	0.03	0.06
100 Hz 振幅	0.03	0.46	0.07	0.04	0.01	0.01
150 Hz 振幅	0.89	0.29	0.12	0.04	0.01	0.14

效果。可以看出, 隔振器起到消减制冷机压缩机传递至探测器组件与卫星平台安装界面扰动的作用。在探测器组件与卫星平台安装界面处, 添加制冷机环抱安装支架及锁紧器连接机构。安装支架用于承载地面试验阶段的重力载荷及地面力学试验(包括发射过程中的)载荷。入轨后解锁, 使制冷机在预设悬浮位置工作, 且隔振器发挥隔振作用(具体模型见图 2)。

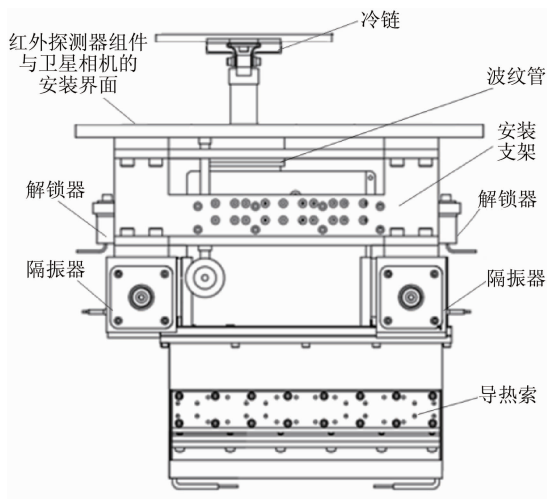


图 2 扰振抑制结构

隔振器的设计原则是尽量压低隔振频率, 即保证隔振系统的一阶频率不高于整星姿态控制系统和卫星柔性附件模态, 同时尽可能压低机构横向刚度, 以提高振动的衰减倍数。

在设计过程中, 将隔振器、波纹管、冷链和导热索等模型参数代入仿真模型, 生成红外探测器组件在轨状态模态计算模型。仿真中将组件的制冷机隔振部分视为集中质量。隔振器采用实体单元建模, 导热索、波纹管和冷链采用壳单元建模。导热索按照实际的安装方式, 一侧与组件的制冷机集中质量刚性连接, 建立

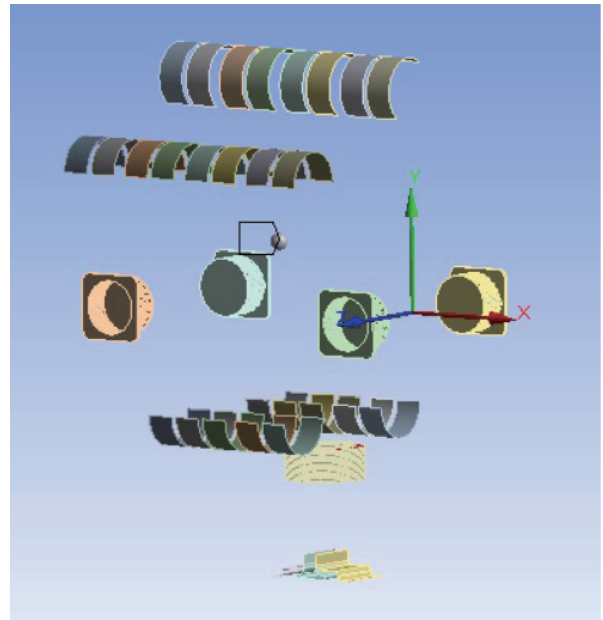


图 3 在轨扰振抑制结构的仿真模型

多点约束(Multi-Point Constrains, MPC); 另一侧与外部刚性连接。

设计过程中, 首先获取红外探测器组件的前六阶模态, 并要求该组件的一阶频率满足设计指标对频率下限的要求。在此前提下进一步核对, 在隔振器刚度满足 15% 负偏差的情况下, 仍能满足项目指标对频率下限的要求, 保证项目用红外探测器组件的隔振设计发挥效用。然后使用在轨状态模态计算模型, 向制冷机集中质量加载制冷机时域扰振力及力矩, 并求解隔振后扰振力的时域响应。最终项目用红外探测器组件隔振后的仿真结果如图 4 所示。可以看出, 最终振源制冷机压缩机及膨胀机隔振后的残余扰振力可满足设计指标的时域性能要求。为了校核频域性能, 又对该结果进行了快速傅里叶变换, 得到了图 5 所示的频域响应

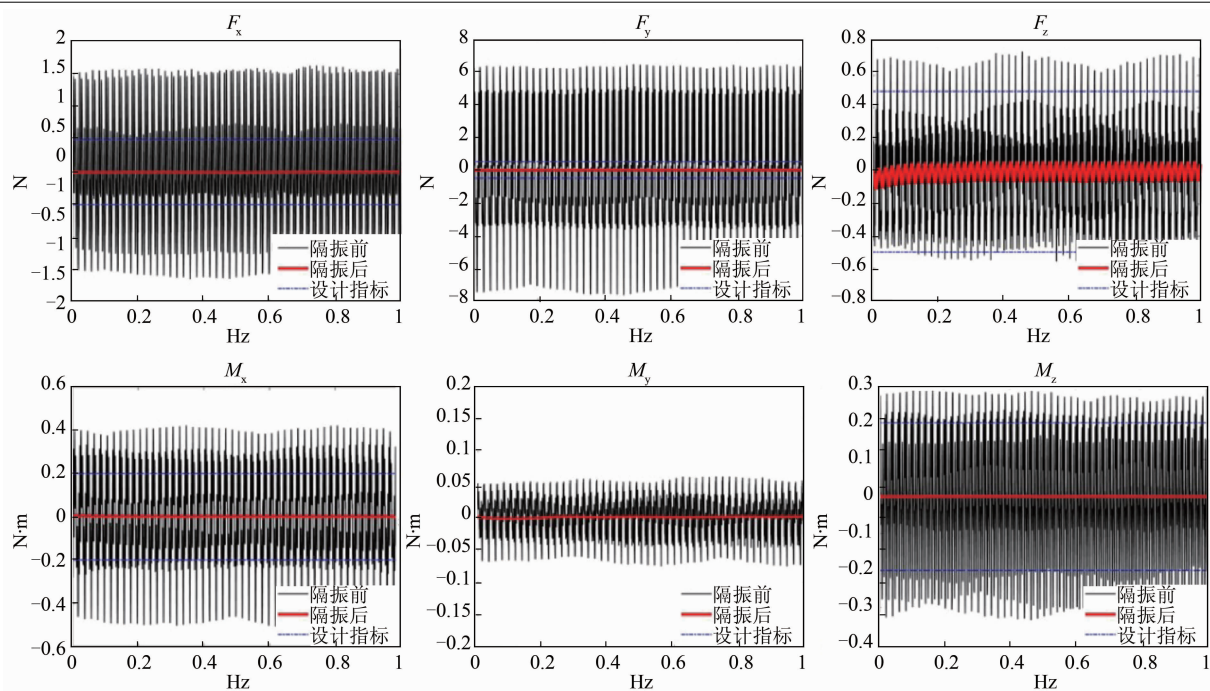


图4 抑制后制冷机扰振力的时域响应

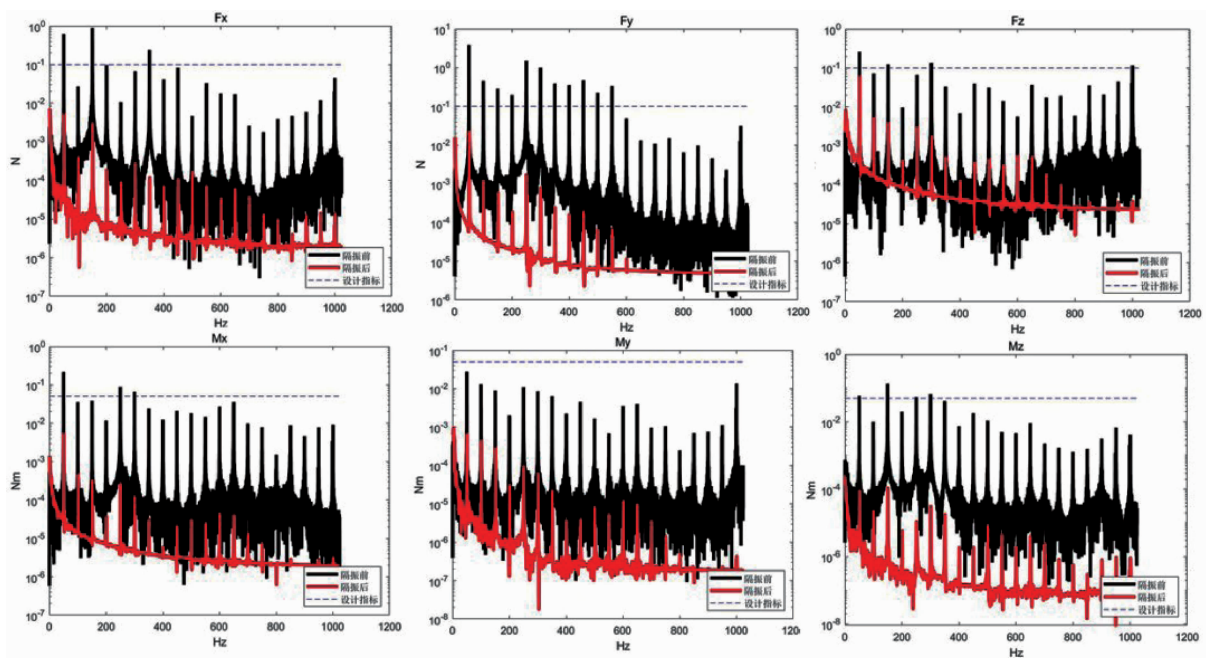


图5 抑制后制冷机扰振力的频域响应

曲线。可以看出,设计指标中的频域性能指标同样可满足在轨扰动振源的抑制要求。

3 微振动测试

将用上述仿真方法获取的扰动抑制结构安装在项目红外探测器组件上,并测量组件最终的隔振效果。使用高精度6分量振动测试台进

行本次微振动测试,并用数据采集分析与放大器系统进行采集及分析,如图6所示。将装有项目扰动抑制结构的红外探测器组件刚性固定在测力平台上。此时采用悬吊法进行重力卸载,使隔振机构处于平衡位置;模拟组件在轨的工作状态。因项目测试指标极高,需先采集

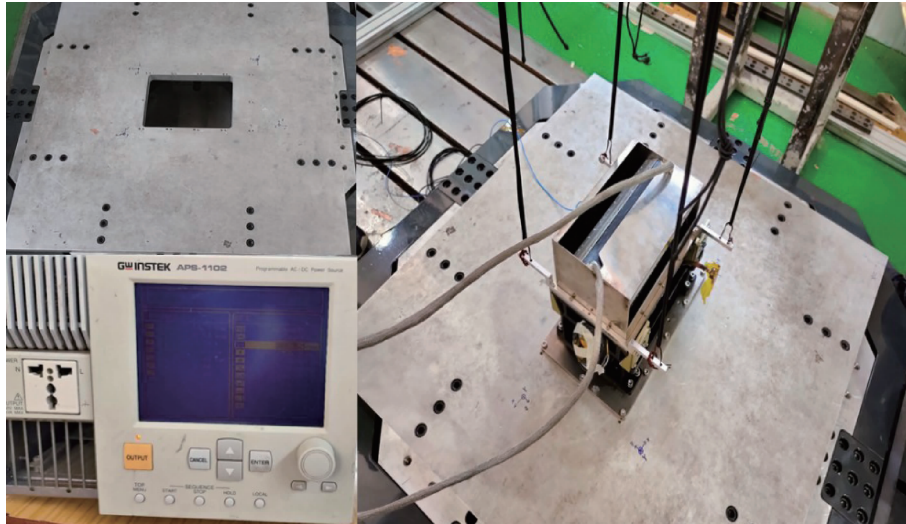


图 6 微振动测试平台以及扰振力和扰振力矩悬吊测试

表 3 扰振力测试数据(时域)

自由度	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/N\cdot m$	$M_y/N\cdot m$	$M_z/N\cdot m$
隔振前振幅	1.55	6.20	0.80	0.40	0.075	0.30
隔振后振幅	0.03	0.07	0.03	0.008	0.004	0.008

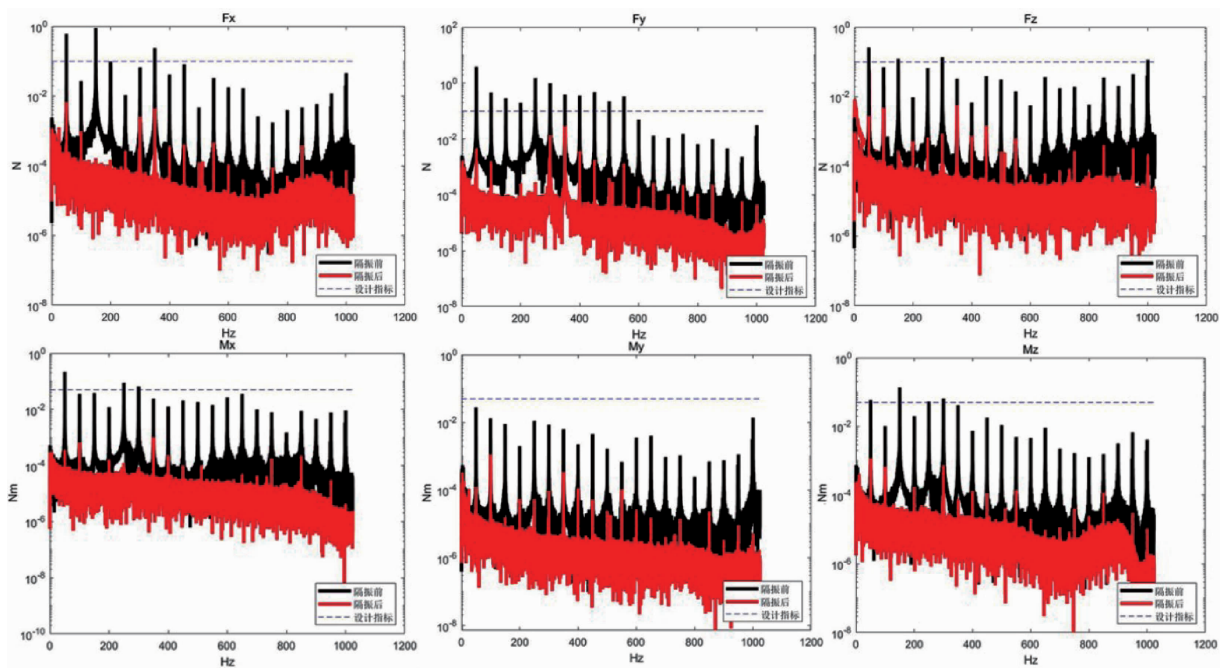


图 7 扰振力测试数据(频域)

测力平台的系统噪声, 并对测试平台进行校准。在满足要求后, 对制冷机加载恒定的在轨最大工作功率。待制冷机在此加载功率下平稳运行后, 采集此时的噪声水平。当噪声远低于测试指标量级时, 采集和测试该工况下的微振动数据。其中采样频率为 2048 Hz, 测试时间

为 16 s。最后, 通过计算获得隔振后的扰振力和扰振力矩。

从表 3 及图 7 中可以看出, 项目设计的扰动抑制结构的隔振效果理想。添加扰动抑制结构后, 红外探测器组件的振源制冷机压缩机及膨胀机传递到测力平台上的扰振力下降了一至

两个数量级。同时该试验模拟了项目用红外探测器组件在轨扰振的最恶劣工况。试验表面隔振措施施加后,红外探测器组件振源频域上和时域上残余的扰振力都能满足相机在轨扰动振源的抑制指标要求。因此,该扰动抑制结构设计验证有效。

4 结论

本文介绍的扰动抑制结构属于被动隔振设计。从仿真分析及地面模拟试验结果中可以看出,扰动抑制效果非常明显;同时经过力学及热真空试验等地面试验考核后,微振动测试数据保持不变。这说明此扰动结构设计合理,具备在轨应用的条件。该研究首次通过为红外探测器组件引入系统隔振设计来获取高可靠性扰

动抑制结构,可满足红外探测器组件超高分辨率的扰动抑制指标要求,对有类似需求的红外探测器研制具有一定的借鉴意义。而且随着新材料及相应工艺的研发,隔振机构将会发挥更大的效能。

参考文献

- [1] 蒋国伟,周徐斌,申军烽. 卫星微振动虚拟仿真技术研究及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(9): 2206-2211.
- [2] 马红伟,赵力辉. 通用隔振技术研究 [J]. 物探装备, 2021, 31(1): 5-9.
- [3] 黄燕,王正,张铠. 分置式斯特林制冷机微振动抑制技术研究 [J]. 低温技术, 2020, 49(5): 14-18.