



# 航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

## 伽马射线探测器冲击减振设计及验证

张志港 孟春玲 王瑞杰 董永伟 孙建超

### Design and validation on impact damping performance of a gamma ray detector

ZHANG Zhigang, MENG Chunling, WANG Ruijie, DONG Yongwei, SUN Jianchao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023138>

---

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 某航天器电子设备减振设计与试验验证

Design and testing of avibration isolator for a spacecraft electronic devices

航天器环境工程. 2020, 37(3): 286–292 <https://doi.org/10.12126/see.2020.03.013>

##### 星箭界面整星隔振设计及减振效果验证

Semi-active and passive design for whole-spacecraft vibration isolation and its validation by engineering test

航天器环境工程. 2019, 36(5): 502–507 <https://doi.org/10.12126/see.2019.05.015>

##### 橡胶减振垫在航天器中的应用及验证

Application and verification of rubber absorber in spacecrafts

航天器环境工程. 2017, 34(5): 549–552 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.017>

##### 三线摆微推力测量系统的阻尼控制优化法

Damping control of trilinear pendulum micro-thrust measurement system

航天器环境工程. 2018, 35(5): 414–419 <https://doi.org/10.12126/see.2018.05.002>

##### 载人航天器仿人型机械臂系统发射过程抑振特性试验研究

Experimental study of launching vibration suppression for humanoid manipulator used in manned spacecraft

航天器环境工程. 2021, 38(1): 38–45 <https://doi.org/10.12126/see.2021.01.006>

##### 两种求解连续体撞振响应方法对比研究

A comparative study of two methods for determining the vibration response of vibro-impact continuum

航天器环境工程. 2017, 34(1): 21–27 <https://doi.org/10.12126/see.2017.01.004>

# 伽马射线探测器冲击减振设计及验证

张志港<sup>1</sup>, 孟春玲<sup>1\*</sup>, 王瑞杰<sup>2\*</sup>, 董永伟<sup>2</sup>, 孙建超<sup>2</sup>

(1. 北京工商大学 人工智能学院, 北京 100048; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 针对某伽马射线探测器受到振动冲击后敏感器件损坏严重的问题进行减振设计, 研究减振器阻尼层尺寸参数对整体固有频率和抗冲击性能的影响, 以及薄壁结构基座对抑制振动和冲击传递的影响; 进而采取设计减振器、合理选取阻尼层尺寸参数、增加二级阻尼缓冲减振和改进薄壁结构的措施完成减振设计; 最后通过仿真和试验验证减振设计的合理性。研究表明: 减振器能够降低结构刚度, 对冲击产生大幅度衰减作用; 阻尼层直径是提高抗冲击性能的主要因素, 探测器整体固有频率和冲击响应均随阻尼层直径的增加而减小; 薄壁结构基座对激励有放大作用, 可以通过调整局部结构降低冲击响应; 二级阻尼缓冲减振设计对关键器件有较好的减振功效, 尤其是在低频段。该研究可为有结构限制要求的航天器的冲击减振设计提供参考。

**关键词:** 减振设计; 有限元法; 阻尼层; 冲击减振; 二级阻尼缓冲减振

中图分类号: V443

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)02-0167-09

DOI: 10.12126/see.2023138

## Design and validation on impact damping performance of a gamma ray detector

ZHANG Zhigang<sup>1</sup>, MENG Chunling<sup>1\*</sup>, WANG Ruijie<sup>2\*</sup>, DONG Yongwei<sup>2</sup>, SUN Jianchao<sup>2</sup>

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In view of the serious damage to the sensitive components of a gamma ray detector from impacting, the influence of damping layer dimension parameters of the shock absorber on its overall natural frequency and impact resistance performance was studied. The effect of the thin-walled structure on the vibration suppression and impact transmission was also investigated. The vibration reduction was completed by proper design of the shock absorber, reasonable selection of damping layer dimension parameters, adding the secondary stage damping buffer, and improving the thin-walled structure. Finally, the design was verified through simulation and test. It is shown that the shock absorber can reduce the structural stiffness and significantly attenuate the impact. The outer diameter of the damping layer is the main factor for improving the shock resistance, as both the overall natural frequency and the impact response decrease with the increasing diameter. The thin-walled structures have an amplification effect on excitation, whose impact response can be reduced by adjusting local structures. The secondary stage damping buffer exhibits a good vibration reduction effect on the key components, and the effect is more pronounced at low frequencies. The above study may provide a reference for the shock attenuation of spacecraft with structural constraints.

**Keywords:** vibration reduction design; finite element method; damping layer; impact damping; secondary stage damping buffer vibration reduction

收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2024-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 11961141013); 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金项目(编号: U1631242)

引用格式: 张志港, 孟春玲, 王瑞杰, 等. 伽马射线探测器冲击减振设计及验证[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 167-175  
ZHANG Z G, MENG C L, WANG R J, et al. Design and validation on impact damping performance of a gamma ray detector[J].  
Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 167-175

## 0 引言

用于测量空间伽马射线偏振的某伽马射线探测器安装于航天器后锥段的外舱壁上,要经受发射段由火箭发动机引起的低频振动和级间分离段由火工品爆炸产生的高频冲击。这些冲击的响应谱频带较宽<sup>[1]</sup>,特别是探测器金属基座底面所承受的最大冲击量级高达 500g。探测器内部的金属基座上安装有多阳极光电倍增管(MAPMT),其为探测器内部的主要器件,是一种由光阴极、倍增级和多阳极组成的玻璃封装高真空器件。摸底试验发现,MAPMT 所能承受的冲击量级仅为 100g。对该探测器整体进行轴向 500g 冲击试验,发现 MAPMT 表面玻璃碎裂、内部结构损坏。因此,需要对该探测器进行冲击减振设计,以减少传递响应,保证其正常工作。

目前对航天器的冲击减振设计主要采取结构优化、被动抑制和主动控制方式<sup>[2]</sup>。主动控制减振效果好,但一般适用于结构设计初期。而该探测器已基本成型,整体结构及高度不能改变,质量变化要求不超过 5%。对于这类有空间、位置和质量限制要求的情况,只能通过改进局部结构、调整刚度,或者对关键器件采取减振或隔振措施<sup>[3]</sup>来实现减振。改进局部结构需要结合探测器的结构特点。该探测器起支撑作用的金属基座为薄壁结构,其模态密度大,在宽频激励下易产生多阶次振动<sup>[4-5]</sup>。对于薄壁结构的减振设计,有学者采用施加硬涂层阻尼的方式<sup>[6]</sup>,更多的是直接使用减振器,而对于通过薄壁结构的调整进行减振的研究较少。减振器的阻尼层多采用橡胶材料,通过橡胶材料的黏弹性特性消耗振动能量,适用于全频率范围的振动控制,尤其在高频段的振动抑制效果更加明显<sup>[7]</sup>。因此有很多学者对橡胶阻尼层进行了研究,如橡胶阻尼层内外直径和硅油黏度对静态结构刚度的影响<sup>[8]</sup>,以及通过参数优化方法比较不同约束厚度、不同阻尼层厚度的结构阻尼性能等<sup>[9]</sup>。然而,关于阻尼层厚度和外直径对结构整体刚度以及抗冲击性能的影响尚缺乏深入研究。

本文基于考核性冲击试验,根据探测器的限制要求和结构特点,提出冲击减振措施;对减振器进行结构设计,并研究橡胶阻尼层的厚度和直径对结构刚度和抗冲击性能的影响,以及薄壁结构基座的

刚性对抑制振动和冲击传递的作用;进一步,针对探测器内部的关键敏感器件提出二级阻尼缓冲减振的设计思路。研究旨在为同类航天器的冲击减振设计提供指导和借鉴。

## 1 探测器的冲击试验及分析

为了解探测器整体的抗冲击性能以及由基座底面到探测单体的激励传递情况,对探测器进行轴向 500g 冲击摸底试验,发现 MAPMT 受损严重。

### 1.1 伽马射线探测器及探测单体结构

某伽马射线探测器结构如图 1 所示,主要由碳纤维外壳包裹的 25 个探测单体和金属基座等组成,25 个探测单体置于金属基座内部的 25 个井格内并通过螺栓连接,每个探测单体内部有力学敏感器件 MAPMT 和前端电子学等。

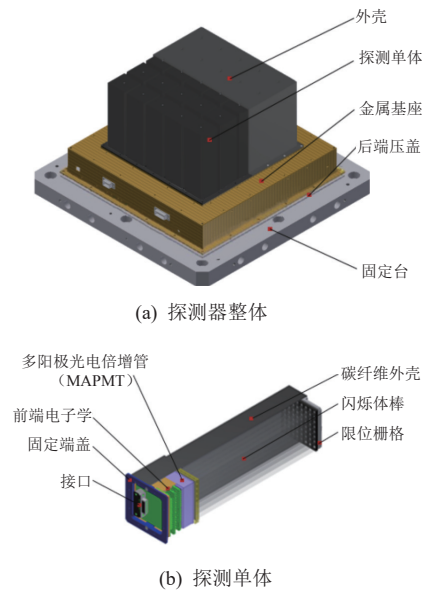


图 1 伽马射线探测器结构  
Fig. 1 Structure of the gamma ray detector

### 1.2 考核性冲击试验

为进一步分析结构特点及激励传递情况,采用 4 个真实单体及 21 个同质量、同形状的配重单体,开展了轴向(垂直于金属基座安装面,沿探测单体安装方向)250g 量级考核性冲击试验,在框架内、外共设置 10 个测点,测点位置如图 2 所示,其中:测点 1~4 和 7 位于探测器金属基座内不同的井格框架上,测点 5、6 位于探测单体的前端电子学底部,测点 8 位于配重单体底部,测点 9 位于探测器顶部,测点 10 位于金属基座上表面。通过分析各个测点的响应,为减振设计提供方向和依据。

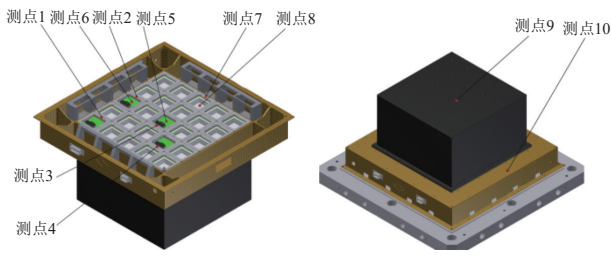


图 2 探测器冲击试验的测点位置

Fig. 2 Positions of the measurement points in the detector impact test

### 1.3 试验结果与分析

冲击隔离系数  $\eta$  是评价结构抗冲击性能的指标之一, 指响应加速度和激励加速度的峰值之比, 即

$$\eta = a_{\max} / a_{0\max}, \quad (1)$$

式中:  $a_{\max}$  为响应加速度的峰值;  $a_{0\max}$  为激励加速度的峰值。当  $\eta < 1$  时, 说明结构具有减振或隔振效果, 且  $\eta$  的值越小, 隔振效果越好, 抗冲击性能也越高<sup>[10]</sup>。

对探测器进行扫频试验, 测得其固有频率为 350 Hz。各测点冲击响应结果如表 1 和图 3 所示。

表 1 探测器冲击试验结果

Table 1 Impact test results of the detector

测点	响应峰值 $a_{\max}/g$	冲击隔离系数
1	550	2.20
2	495	1.98
3	764	3.06
4	866	3.46
5	352	1.41
6	440	1.76
7	528	2.11
8	782	3.13
9	715	2.86
10	1480	5.92

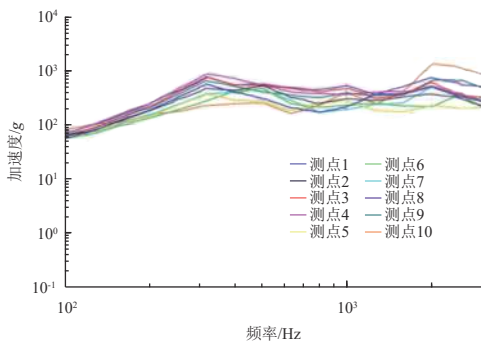


图 3 探测器冲击试验各测点的响应加速度曲线

Fig. 3 Impact response acceleration curves of the measurement points in the detector impact test

分析试验结果可看出:

1) 在 250g 冲击量级下, 各测点响应明显放大,

响应峰值在 352g~1480g 之间; 各真实探测单体上测点的响应相差较大, 位于探测器内部中心附近、探测器顶部和金属基座上表面的测点 3、4、9 和 10 的响应峰值较高。

2) 位于探测单体安装面上的测点 3、4 的响应峰值分别为 764g、866g, 配重单体底部的测点 8 的响应峰值为 782g, 电子学底部的测点 5、6 的响应峰值分别为 352g、440g, 且单体内部 MAPMT 均无损坏, 这说明冲击由探测器底面传递到单体内部有衰减。综合摸底和考核性冲击试验的结果以及探测单体的结构, 分析认为探测单体内部各组件之间没有硬连接, 存在一定的间隙, 此结构形式对冲击具有较好的衰减作用, 但响应仍较大, 故考虑在间隙处减振。

3) 位于金属基座上的测点 10 的响应峰值为 1480g, 冲击隔离系数为 5.92, 框架上其余测点 1、2、3、4 冲击隔离系数在 1.98~3.46 之间, 说明输入激励由基座底面传递的过程中, 经过薄壁金属基座具有明显放大作用。

4) 结构的固有频率为 350 Hz, 远超过不低于 100 Hz 的设计要求, 说明整体结构刚度偏大, 而这会导致减振频带变窄。根据探测器的结构特点, 可以采用在平台与探测器安装面之间设计阻尼减振器的被动抑制方式进行减振, 并通过调整基座结构及刚度减小对激励的传递。

## 2 冲击减振设计与研究

减振设计的本质是根据外界激励的频率特性进行频率设计和阻尼设计<sup>[11]</sup>。频率设计是使结构固有频率低于激振力中能量较高的频率, 可通过增加减振器改变结构的刚度来实现。阻尼设计则是控制放大系数, 减小冲击响应, 可通过调整减振器的结构尺寸、合理改进基座结构和增加减振垫来实现。

### 2.1 减振器的理论刚度和阻尼计算

减振器可以等效为弹簧-阻尼单元。将探测器系统等效为单自由度受迫振动系统, 如图 4 所示。

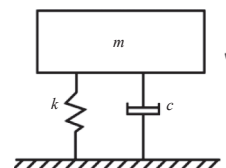


图 4 单自由度受迫振动系统

Fig. 4 Forced vibration system of single degree of freedom

单自由度受迫振动系统的运动微分方程为

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

式中:  $m$ 、 $k$  和  $c$  分别为系统的质量、减振器的刚度系数和阻尼系数;  $y(t)$  为输入系统的激励运动函数;  $F_0$  为激振力幅值;  $\omega$  为激振力圆频率。

令  $\omega_n$  为系统的固有圆频率,  $\zeta$  为减振系统阻尼比, 则

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n}. \quad (3)$$

对式 (2) 进行拉普拉斯变换及频域分析, 得到受迫振动响应值与激励振动输入值的比, 即为减振系统的放大系数

$$T = \frac{1 + 4\zeta^2\lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}, \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为频率比,  $\lambda = \omega/\omega_n = f_n/f_0$ , 其中  $f_n$  和  $f_0$  分别为减振前和减振后的系统固有频率; 一般情况下,  $T$  为 3~4<sup>[12]</sup>。

只有当  $f_n/f_0 > \sqrt{2}$  时, 系统才具有减振效果, 且频率比越大减振效果越好。

该探测器的固有频率  $f_n = 350$  Hz, 则  $f_0$  应小于  $350/\sqrt{2} \approx 247.5$  Hz。

探测器质量  $m = 25$  kg, 减振器安装在螺栓孔位置, 设计数量  $n = 20$ , 则

$$k = \frac{m}{n}(2\pi f_0)^2 = 3.02 \times 10^6 \text{ N/m}, \quad (5)$$

即每个减振器的理论刚度应  $< 3.02 \times 10^6$  N/m。

当激励频率与系统固有频率相等, 即频率比  $\lambda = 1$  时, 系统发生共振。若减振设计取  $T = 3.5$ , 代入式 (4) 可求得试验过程中减振系统的阻尼比  $\zeta$  约为 0.15, 因此减振器材料阻尼比应满足  $\zeta > 0.15$ 。

## 2.2 减振器的结构设计

以丁基橡胶和硅橡胶为基础的共混型橡胶材料阻尼系数高、与金属材料黏结强度较高。结合体积和质量等要求, 选用 Zn-39 作为减振器材料, 其阻尼比  $\zeta$  为 0.4, 满足设计要求。

探测器在发射过程中, 探测单体不仅受到轴向较大的振动和冲击, 还会在径向产生振动, 因此, 设计有上、中、下三层阻尼结构的减振器(如图 5 所示)。上、下阻尼层尺寸较大, 约束在金属基座上,

主要抑制轴向振动; 中阻尼层嵌套在基座孔内, 主要抑制径向振动。此外, 采用不锈钢衬套和垫片作为支撑结构和约束层, 限制阻尼层因冲击能量产生的变形, 使探测器更加稳定。

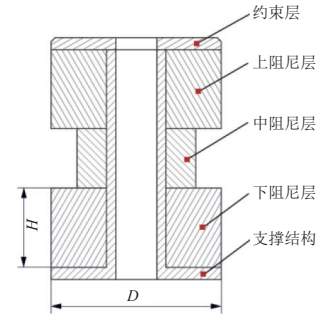


图 5 用于伽马探测器的减振器结构

Fig. 5 Structure of the absorber used for the gamma ray detector

## 2.3 阻尼层尺寸参数设计

中阻尼层嵌套在基座孔内, 其厚度和内外径均为固定值。在轴向起减振作用的上、下阻尼层的厚度和直径会影响探测器整体结构的抗振性能: 尺寸参数不同, 对能量的吸收、振动抑制、结构的冲击传递效果等都存在差异。

### 2.3.1 尺寸参数研究范围

阻尼层的尺寸参数受到探测器结构的限制, 且阻尼层过厚会改变探测器整体的质量和质心位置, 影响减振效果。支撑结构和约束层的内径需安装 M5 螺栓, 金属衬套的内径为 5.2 mm, 故阻尼层的内直径为固定值 7 mm; 原金属基座底边宽度为 10 mm, 但该尺寸下无法保证减振设计的效果, 因此考虑适当增加金属基座底边宽度, 同时保持阻尼层与基座底边的边距为 2 mm。最终确定的阻尼层尺寸参数范围如表 2 所示。

表 2 减振器阻尼层尺寸参数范围

Table 2 Dimension parameters of damping layer of the vibration absorber

阻尼层参数	数值
厚度 $H/\text{mm}$	1~20
内直径/mm	7
外直径(直径) $D/\text{mm}$	8~24

### 2.3.2 有限元仿真计算与结果分析

为研究阻尼层厚度和直径对探测器刚度和抗冲击性能的影响, 需要建立多个有限元模型。通过合理的简化和建模研究, 确定了有限元模型的建模方案: 简化闪烁体及 MAPMT 为质心处的质量点,

通过 coupling 耦合至探测单体的外壳上；采用 tie 连接简化金属基座和外壳之间的螺栓连接；基座和探测单体之间的螺栓采用实体单元；所有的碳纤维外壳采用正交各向异性的壳单元；不锈钢衬套等支撑结构采用实体单元；其他部件均采用各向同性的壳单元；各部件之间采用了 tie、coupling、MCB 等多种连接方式。以试验测得的系统固有频率 350 Hz、响应加速度 2279g 为参考，有限元模型的仿真固有频率为 340 Hz，最大响应加速度为 2018g，可见该有限元模型是合理有效的。

对不同阻尼层尺寸参数的有限元仿真模型进行模态分析和轴向冲击分析，结果如图 6 和图 7 所示。

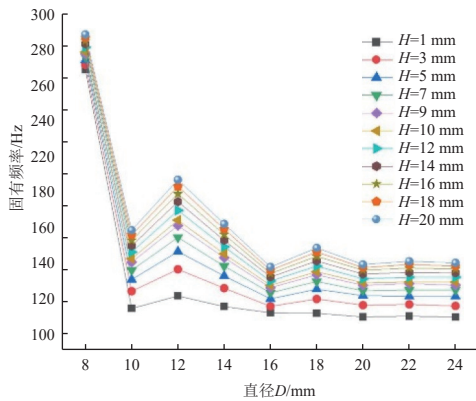


图 6 阻尼层尺寸参数对探测器固有频率的影响

Fig. 6 Influence of damping layer dimensions on natural frequency of the detector

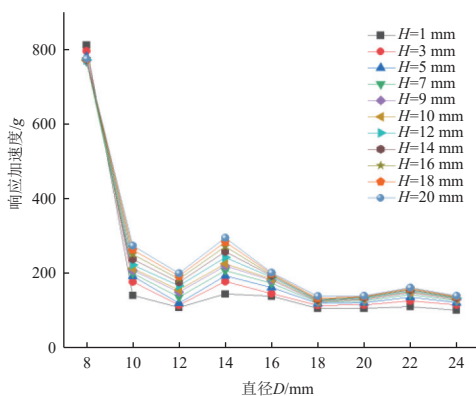


图 7 阻尼层尺寸参数对探测器冲击响应的影响

Fig. 7 Influence of damping layer dimensions on impact response of the detector

对图中数据比较分析可以看出：

1) 对应不同阻尼层尺寸参数的减振器，探测器整体固有频率都明显下降，冲击响应都明显减小（由增加减振器前的 2018g 降低至 102g~811g），说明增加减振器使探测器整体刚度减小，抗冲击性能

增强。而且固有频率和冲击响应变化范围都很大，说明阻尼层不同尺寸参数对探测器整体力学性能影响较大。

2) 当阻尼层直径  $D$  由 8 mm 增加到 10 mm 时，探测器整体固有频率和冲击响应均大幅度下降；当  $D > 10$  mm 时，固有频率与冲击响应在一定范围内波动并呈整体下降趋势，随着  $D$  的增加，下降趋势逐渐变缓。

3) 当  $D > 10$  mm 时，对应  $D=12$  mm 和  $D=18$  mm 的固有频率有 2 个峰值，而加速度曲线有 2 个波谷。分析认为，此时探测器有较高的固有频率，系统整体刚度较大，但阻尼层和整体结构能够吸收更多的能量，因而传递至探测单体等位置的能量较低，响应较小。

4) 当  $D=14$  mm 时，冲击响应产生了波峰，但对比  $D=10$  mm 时的冲击响应可以发现，二者基本相等。分析认为，该波峰是由于  $D=12$  mm 所对应的频率共振时探测器整体的冲击响应减小产生的。

5) 当  $D$  一定时，固有频率和冲击响应均随厚度  $H$  的增加而增大。当  $H$  一定时，固有频率和冲击响应加速度随  $D$  变化的趋势完全一致，固有频率都在  $D$  为 12 mm、18 mm 时出现峰值，说明阻尼层直径是影响系统固有频率和冲击响应的主要因素，即阻尼层直径是影响结构刚度和抗冲击性能的主要因素。

### 2.3.3 尺寸参数的确定

当  $H$  较小时，减振器刚度不足，整体结构的固有频率和冲击响应都较低；当  $D$  较小时，整体结构的固有频率和冲击响应都较大。综合考虑空间、质量、固有频率和冲击响应，确定阻尼层的厚度  $H=10$  mm、直径  $D=20$  mm，基座宽度增加 12 mm，对应该参数下整体探测器固有频率为 134 Hz，最大冲击响应为 125g。

## 2.4 基座的改进设计和探测器整体刚度及抗冲击性能分析

根据考核性冲击试验，薄壁结构的金属基座对输入激励有放大作用。在原减振设计方案(金属基座宽度增加，带减振器)的基础上，通过调整加强筋的位置、高度和角度来研究其对薄壁结构刚度的影响，进而明确其对振动抑制和冲击传递的影响。改

进设计后,探测器的固有频率、冲击响应和最大应力仿真结果如表 3 所示。

表 3 改进设计前后探测器力学性能对比

Table 3 Comparison of mechanical properties of the detector before and after improvement

参数	金属基座加宽+ 减振器	金属基座加宽+ 加强筋+减振器
固有频率/Hz	134	137
冲击响应/g	125	116
最大应力/MPa	412	376

由表 3 可以看到,改进设计后,探测器的固有频率略有提高,冲击响应减小,最大应力减小。进一步对比分析可知,通过增加薄壁结构金属基座的底边宽度和增设加强筋,增加了薄壁结构的刚度,但对探测器整体结构刚度的影响较小,因此整体结构的固有频率变化很小;但薄壁结构刚度的增加使其冲击响应减小,降低了应力集中,因此在一定程度上抑制了振动和冲击的传递,能够提高探测器整体的抗冲击性能。

## 2.5 二级阻尼缓冲减振设计

阻尼减振器在高频段振动抑制效果明显;为在其他频段也能更好地保护探测单体,减小冲击响应,在探测单体内部进行二级阻尼缓冲减振设计。

为了增加冲击缓冲行程,在每个探测单体内闪烁体棒和限位栅格间设计正方形减振垫,各减振垫之间留有一定的间隙,可以大大增加压缩行程。材料选择 Gap1500 环氧树脂,其泊松比约为 0.35,具有良好的耐久性、弹性和低频减振性能,在复杂的力学环境中能起到良好的缓冲作用,有效抑制低频振动。二级阻尼缓冲减振垫如图 8 所示。

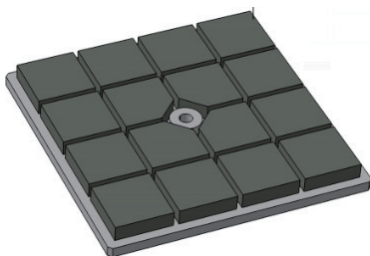


图 8 二级阻尼缓冲减振垫

Fig. 8 Secondary stage damping buffer for vibration reduction

## 2.6 减振设计仿真验证

经过上述减振设计后,探测器整体结构高度不变,质量增加 1.47 kg,质量变化不超过 5%,满足设计要求。减振设计前后模型的冲击响应仿真结果如

图 9 所示。减振设计后,探测器固有频率由 340 Hz 减至 135 Hz,刚度减小;轴向最大冲击响应由 2018g 减至 111g,降幅超过 90%;内部 MAPMT 四周壁处响应仅为 95g 左右,抗冲击性能显著提高。仿真结果验证了减振设计的合理性和有效性,还需进一步通过试验验证。

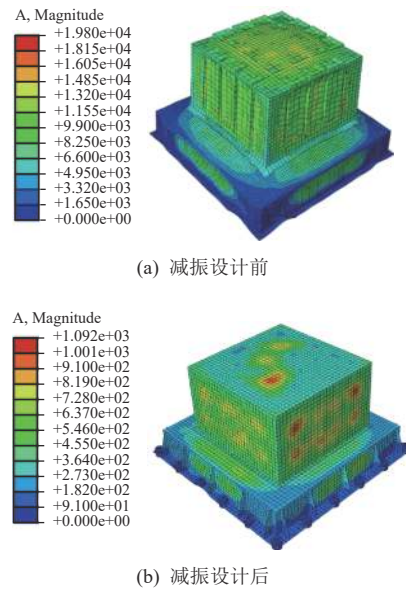


图 9 减振设计前后的冲击响应仿真对比

Fig. 9 Simulation comparison of impact response before and after vibration reduction design

## 3 试验验证及结果分析

### 3.1 扫频试验结果及分析

对减振设计后的探测器进行扫频试验,得到其固有频率为 127 Hz,与有限元仿真结果 135 Hz 基本一致。减振设计前的固有频率为 350 Hz,计算频率比  $\lambda=2.76$ ,大于  $\sqrt{2}$ ,减振效果明显。

根据式 (5) 计算得出减振器刚度为  $1.91 \times 10^4$  N/m,满足理论刚度  $< 3.02 \times 10^6$  N/m 的要求。

### 3.2 二级阻尼缓冲减振设计的合理性验证与分析

为验证二级阻尼缓冲减振在频域范围内的减振作用,在探测单体内部 MAPMT 固定处设置测点 11(如图 10 所示)并进行有/无二级阻尼缓冲减振的冲击试验,结果对比如图 11 所示。

结果显示:探测单体无二级阻尼缓冲减振的响应加速度最大值为 210g,在 200~600 Hz 与 1000~3000 Hz 频段的响应均明显放大。有二级阻尼缓冲减振的响应加速度最大值为 130g,在 200~500 Hz 频段的响应明显减小,振动抑制效果显著;虽然

500~3000 Hz 频段的响应有一定程度变大,但仍小于减振设计前的响应。

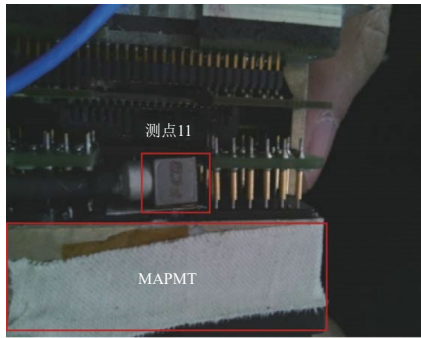


图 10 测点位置

Fig. 10 Position of the measurement point

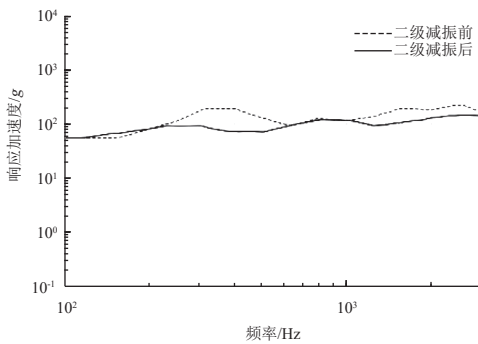


图 11 有/无二级阻尼缓冲减振的冲击响应对比

Fig. 11 Comparison between impact response with and without secondary stage damping buffer for vibration reduction

根据对比分析,二级阻尼缓冲减振设计具有较好的减振效果,特别是在低频段的减振效果更加明显,能够有效减小结构的振动幅度,降低振动频率,提高探测器的抗冲击性。

### 3.3 冲击试验与分析

为验证减振设计的合理性和有效性,采用爆炸冲击方式进行轴向 500g 冲击试验。将探测器固定在支撑结构上(如图 12 所示),测点数量及位置与考核性冲击试验中的完全相同;实时监测 MAPMT 的电压波动情况,通过是否发生瞬间短路现象来判断 MAPMT 是否受到撞击或损伤。

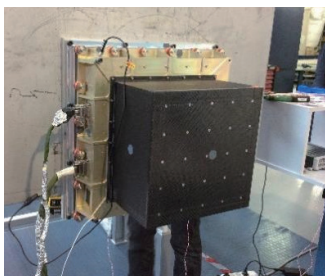


图 12 伽马射线探测器轴向冲击试验

Fig. 12 Axial impact test of the gamma ray detector

试验过程中未监测到 MAPMT 电压波动,试验后探测器结构无破坏。冲击试验结果如表 4 所示。减振设计前/后探测器的冲击隔离系数对比结果如图 13 所示。

表 4 伽马射线探测器冲击试验结果

Table 4 Impact test results of the gamma ray detector

测点	响应峰值 $a_{max}/g$	冲击隔离系数
1	101	0.20
2	76	0.15
3	100	0.20
4	114	0.23
5	69	0.14
6	130	0.26
7	111	0.22
8	87	0.17
9	124	0.25
10	127	0.25

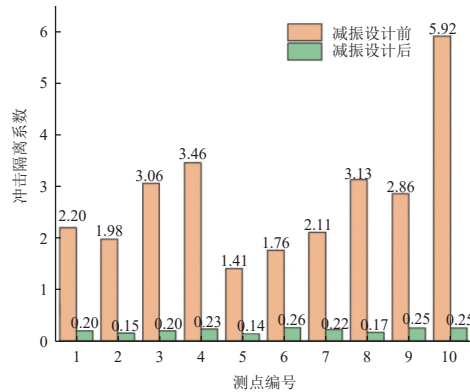


图 13 减振设计前/后伽马射线探测器冲击隔离系数对比  
Fig. 13 Comparison between shock isolation coefficients of the gamma ray detector before and after impact damping design

由表 4 可见:减振设计后,500g 冲击量级下探测器冲击响应为 69g~130g(仿真结果最大冲击量级为 111g);各测点冲击隔离系数都小于 1 且相差不大,最大值仅为 0.26,相较减振设计前,冲击隔离系数减小至 1/10 左右,说明减振设计合理且探测器整体的减振效果明显;位于探测单体电子学底部的测点 5、6 的响应分别为 69g、130g,冲击量级较小,且内部设计了二级阻尼减振垫,进一步增加了 MAPMT 的安全性;位于金属基座上的测点 10 的响应为 127g,冲击隔离系数由 5.92 减小至 0.25,相较于框架上其余测点 1~4 的下降幅度较大,说明通过增加金属基座底边宽度、增设加强筋能够削弱薄壁结构的响应放大以及对激励的传递。

探测器在减振设计前后的冲击响应对比如图 14 所示,可见,测点 11 在减振设计后的最大冲



击响应为 82g, 与减振设计前的最大冲击响应 2279g 相比, 响应量级大幅度下降, 可以保证 MAPMT 在严苛力学环境下的安全性。

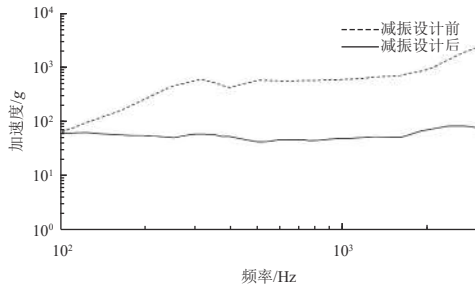


图 14 减振设计前/后伽马射线探测器的冲击响应

Fig. 14 Impact response of the gamma ray detector with and without vibration reduction design

## 4 结论

本文根据某伽马射线探测器的特点和减振需求提出了减振设计方案, 并通过有限元仿真和冲击试验验证了该设计的有效性。具体结论如下:

1) 减振器能大幅降低某伽马射线探测器整体结构的刚度, 减小冲击响应, 提高其抗冲击性能。

2) 对于减振器常用的圆形阻尼层, 其外直径是影响探测器固有频率和冲击响应(即探测器刚度)的主要因素。当阻尼层较小时, 随着外直径的增加, 探测器固有频率降低, 冲击响应减弱; 但当外直径增加到一定值时, 这种作用不再明显。

3) 增加探测器整体的刚度会提高探测器整体结构的固有频率, 对减振不利; 但阻尼层和整体结构能够吸收更多的能量, 使冲击响应减小。

4) 探测器金属基座薄壁结构对输入激励有明显的放大作用。通过增加基座底边宽度、增设加强筋可以提高薄壁结构的刚度, 进而使得金属基座振动响应减小, 在一定程度上抑制了振动和冲击的传递, 提高了探测器整体的抗冲击性能和强度。

5) 减振器对高频振动抑制效果明显, 二级阻尼缓冲减振设计能在低频段提高减振效果, 二者结合可保证全频段内探测器敏感器件的安全性。

### 参考文献 (References)

- [1] 王锡雄, 秦朝烨, 丁继锋, 等. 基于激光激励的火工冲击响应及其特性研究[J]. 宇航学报, 2018, 39(4): 464-470  
WANG X X, QIN C Y, DING J F, et al. Analysis of shock response induced by laser and its features[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(4): 464-470
- [2] 李明荣, 彭超, 张亚玓. 机载振动敏感设备减振设计方法与应用[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(1): 104-111  
LI M R, PENG C, ZHANG Y D. Vibration reduction method of airborne vibration-sensitive equipment and its application[J]. *Radar Science and Technology*, 2019, 17(1): 104-111
- [3] 张群, 邢建伟, 毕京丹, 等. 火箭界面整星隔振设计及减振效果验证[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(5): 502-507  
ZHANG Q, XING J W, BI J D, et al. Semi-active and passive design for whole-spacecraft vibration isolation and its validation by engineering test[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2019, 36(5): 502-507
- [4] 高世民, 王延荣, 叶航. 薄壁结构干摩擦阻尼减振设计分析[J]. 航空发动机, 2022, 48(5): 116-123  
GAO S M, WANG Y R, YE H. Design analysis for dry friction damping vibration suppression of thin-walled structures[J]. *Aeroengine*, 2022, 48(5): 116-123
- [5] 张永杰, 陈利斌, 张菩仁, 等. 扩散声场作用下 C/SiC 复合材料薄壁结构的全频段响应分析[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(4): 344-349  
ZHANG Y J, CHEN L B, ZHANG P R, et al. The full spectrum stress field in C/SiC composite thin plate structure under a diffusive acoustic field[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2019, 36(4): 344-349
- [6] 张月, 杨建, 宋华. 薄壁构件硬涂层阻尼减振的数值与实验研究进展[J]. 辽宁科技大学学报, 2020, 43(6): 457-462  
ZHANG Y, YANG J, SONG H. Progress in numerical and experimental research on hard-coating damping of thin-walled structures[J]. *Journal of Liaoning University of Science and Technology*, 2020, 43(6): 457-462
- [7] 张正峰, 叶青, 吕鹏, 等. 橡胶减振垫在航天器中的应用及验证[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(5): 549-552  
ZHANG Z F, YE Q, LÜ P, et al. Application and verification of rubber absorber in spacecrafts[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2017, 34(5): 549-552
- [8] 伍魏明, 朱如鹏, 李苗苗, 等. 环形橡胶-硅油组合式减振器静态刚度特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 93-96  
WU W M, ZHU R P, LI M M, et al. Study of static stiffness of annular rubber-silicone oil damper[J]. *Machine Building and Automation*, 2019, 48(5): 93-96
- [9] 郭铁能, 杨涛. ZN-35 橡胶减振垫动力学参数试验研究[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(5): 34-39  
GUO T N, YANG T. Experimental research on dynamic parameters of ZN-35 rubber damping pad[J]. *Special*

- Purpose Rubber Products, 2020, 41(5): 34-39
- [10] 鲍继轩. 金属橡胶减振器抗冲击力学性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2022: 17-18
- [11] 龙龙, 王立武, 滕海山, 等. 某航天器电子设备减振设计与试验验证[J]. [航天器环境工程](#), 2020, 37(3): 286-292  
LONG L, WANG L W, TENG H S, et al. Design and testing of a vibration isolator for a spacecraft electronic devices[J]. [Spacecraft Environment Engineering](#), 2020, 37(3): 286-292
- [12] 王平, 张国玉, 高玉军, 等. 金属橡胶减振器在机载光电吊舱复合减振系统中的应用[J]. [振动与冲击](#), 2014, 33(5): 193-199  
WANG P, ZHANG G Y, GAO Y J, et al. Application of metal-rubber dampers in vibration reduction system of an airborne electro-optical pod[J]. [Journal of Vibration and Shock](#), 2014, 33(5): 193-199

(编辑: 许京媛)

一作简介: 张志港, 硕士研究生, 主要研究方向为结构力学。

\*通信作者: 孟春玲, 教授, 主要研究方向为固体力学。王瑞杰, 高级工程师, 主要研究方向为航天载荷结构设计与分析。