

# 一种基于高锰铜合金的弹载设备隔振器设计方法

马志毅, 赵敬, 尹晓琳, 牛磊, 王喜超  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 针对弹载设备在复杂力学环境下的高可靠性要求, 提出了一种基于高锰铜合金的隔振器设计方法。首先, 构建了弹载设备动力学模型, 并对高锰铜合金的阻尼特性进行了深入分析, 确定了其阻尼参数。随后, 为了平衡隔振器的阻尼与强度特性, 构建了基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计模型, 并采用遗传算法对隔振器的相关设计参数进行优化设计, 获得较优的设计方案。通过有限元分析和力学试验验证, 结果表明, 相较于传统的硅胶隔振器, 基于高锰铜合金的隔振器变形量减少了 40%, 同时其阻尼特性仍能满足弹载设备的隔振需求, 充分证明了该设计方案的优越性和合理性。

**关键词:** 高锰铜合金; 遗传算法; 参数优化; 隔振设计

中图分类号: V443+2; TH123+3

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)04-0112-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240819001

CSTR: 32406.14.ycyk.20240819001

引用格式: 马志毅, 赵敬, 尹晓琳, 等. 一种基于高锰铜合金的弹载设备隔振器设计方法[J]. 遥测遥控, 2025, 46(4): 112-121.

## Vibration Isolation Design of A Missile-Borne Equipment Based on Mn-Cu Alloys

MA Zhiyi, ZHAO Jing, YIN Xiaolin, NIU Lei, WANG Xichao  
(Beijing Research Institution of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In response to the high reliability requirements of missile-borne equipment in complex mechanical environments, a design method for vibration isolators based on high-manganese copper alloy is proposed. Firstly, a dynamic model of the missile-borne equipment was established, and the damping characteristics of the high-manganese copper alloy were thoroughly analyzed to determine its damping parameters. Subsequently, to balance the damping and strength properties of the vibration isolator, an optimization design model for the missile-borne equipment vibration isolator based on high-manganese copper alloy was constructed. The genetic algorithm was employed to optimize the relevant design parameters of the vibration isolator, resulting in an improved design scheme. Finite element analysis and mechanical testing demonstrates that, compared to traditional silicone rubber vibration isolators, the deformation of the high-manganese copper alloy-based vibration isolator was reduced by 40%, while its damping characteristics still met the vibration isolation requirements of the missile-borne equipment. This fully proves the superiority and rationality of the proposed design scheme.

**Keywords:** Mn-Cu alloys; Genetic algorithm; Parameters optimization; Vibration isolation design

**Citation:** MA Zhiyi, ZHAO Jing, YIN Xiaolin, et al. Vibration Isolation Design of A Missile-Borne Equipment Based on Mn-Cu Alloys[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(4): 112-121.

### 引言

弹载设备隔振设计是一项关键技术, 旨在减少或消除因外部冲击或振动传递给设备的能量, 从而保护弹上敏感设备免受振动影响, 确保其稳定运行、延长使用寿命并提高其性能。

隔振设计一般分为主动隔振和被动隔振<sup>[1]</sup>。由

于弹载设备正常运行需要隔离弹体的振动, 因此多采用被动隔振。受限于弹上空间狭小, 弹载设备通常采用阻尼橡胶垫进行隔振设计。例如, 文献<sup>[2]</sup>采用邵氏硬度为 60 的增强硅橡胶设计了惯导缓冲减振机构; 文献<sup>[3]</sup>采用橡胶与泡沫铝相结合的弹载电子系统抗振方案; 文献<sup>[4]</sup>采用碳/环氧铺层复合材料隔板和硅橡胶组合方式设计导弹隔冲击

结构。由此可见,传统弹载设备隔振设计均以硅橡胶材料为主。尽管硅橡胶材料具有高阻尼特性,能够衰减弹上传递的力学激励,但其刚性较弱<sup>[5]</sup>,弹上制导设备采用以硅橡胶为基础的隔振设计,会在振动过程中产生较大位移,影响设备制导精度。因此,亟须一种兼具高刚性与高阻尼特性的材料用于弹载设备隔振设计。

高锰铜合金因其优异的高阻尼特性,在隔振领域得到了广泛应用。在航天领域,高锰铜合金隔振平台被用于减少反作用轮等功能部件产生的微振动<sup>[6]</sup>,从而提升影像光学载荷的成像稳定性。在隔离振动源方面,高锰铜合金被用于设计振动支撑底座<sup>[7]</sup>,证明了其在隔离随机振动载荷中的有效性。然而,将高锰铜合金应用于弹载设备隔振设计的研究较少。

弹载设备面对极端的力学环境考验,包括强烈的振动、冲击及其他动力学效应。为了确保设备能够在这样的条件下正常工作,隔振设计变得尤为重要<sup>[8]</sup>。传统的隔振措施往往难以同时满足高阻尼和高刚度要求,而基于高锰铜合金的新型隔振器设计为解决这一难题提供了新思路。传统的隔振器设计很大程度上依赖于工程师的经验和直觉,这种“试错式”的设计方法不仅耗时耗力,还难以充分挖掘新材料的潜力,尤其是像高锰铜合金这样拥有独特性质的材料。

针对上述问题,本文提出一种基于高锰铜合金的弹载设备隔振器设计方法。首先,对高锰铜合金力学特性进行分析计算,并对弹载设备进行动力学建模分析。在此基础上,建立了基于高锰铜合金的弹载设备隔振优化设计模型。区别于传统的经验设计的思路,本文采用遗传算法对基于高锰铜合金隔振器的相关参数进行优化设计,获得了较优的设计方案。最后,通过弹载设备的有限元动力学分析以及力学试验验证了该设计方法的优越性和合理性。

## 1 基于高锰铜合金的弹载设备隔振动力学建模分析

### 1.1 高锰铜合金力学特性分析计算

阻尼作为影响隔振性能的关键因素之一,其准确的计算和分析尤为重要,因为它直接影响着

隔振效率、系统稳定性以及能量消耗特性。

一般采用自由振动法测出衰减曲线,通过对数衰减率<sup>[9]</sup>计算阻尼比。

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (1)$$

式中, $\delta$ 是对数衰减率。 $\delta = \frac{1}{i} \ln \frac{A_n}{A_{i+n}}$ ,  $A_n$ 和 $A_{i+n}$ 为衰减曲线上相隔 $n$ 个周期的两个振幅值。如图1所示。

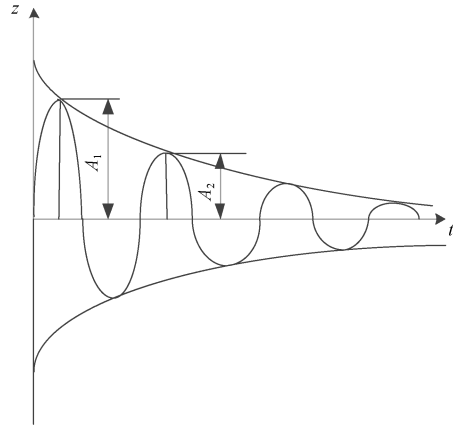


图1 衰减曲线

Fig. 1 Attenuation curve

此外,采用比减振能力(Specific Damping Capacity,  $SDC$ )衡量材料阻尼, $SDC$ 定义如式(2)所示。

$$SDC = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \quad (2)$$

因此,当 $i=1$ 时, $\delta = \ln \frac{A_n}{A_{1+n}}$ ,代入式(2)中,可得式(3)。

$$\delta = -\frac{\ln(1 - SDC)}{2} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)中,可得式(4)。

$$\zeta = \frac{-\frac{\ln(1 - SDC)}{2}}{\sqrt{4\pi^2 + \left(-\frac{\ln(1 - SDC)}{2}\right)^2}} \quad (4)$$

针对弹载设备选取的高锰铜合金,其 $SDC=0.3$ ,那么其阻尼比 $\zeta=0.028$ 。

### 1.2 弹载设备动力学建模与分析

弹载设备通常为连续体结构,由于其结构的复杂性,在进行结构分析时往往难以获得其解析结果。为了简化分析过程,通常采用简化、离散的方式将连续体转化为多自由度系统进行分析。

基于此, 弹载设备的多自由度系统动力学方程<sup>[10]</sup>, 如式(5)所示:

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{c}\{\dot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

式(5)中  $\mathbf{M}$  为质量矩阵,  $\mathbf{c}$  为阻尼矩阵,  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵,  $\mathbf{F}(t)$  为激励力向量。

采用振型叠加法进行分析, 引入广义坐标  $\{q\} = \{q_1, q_2, \dots, q_{n-1}\}$ 。那么方程的解  $\{x(t)\}$  为:

$$\{x(t)\} = \sum_{n=1}^N q_n(t) \{h_n\} = \mathbf{h}\{q\} \quad (6)$$

$\mathbf{h}$  为模态振型矩阵, 由系统各阶固有振型向量构成, 具有时不变特性。

将式(6)代入式(5), 并进行归一化处理, 得到式(7):

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{\mathbf{F}(t)_j^*}{\mathbf{M}_j^*} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{M}_j^* = \{h\}_j^T \mathbf{M} \{h\}_j$  是与第  $j$  振型对应的广义坐标  $q_j$  的广义质量矩阵,  $\zeta_j$  第  $j$  振型模态阻尼比,  $\omega_j$  第  $j$  振型圆频率。  $\mathbf{F}(t)_j^* = \{h\}_j^T \{\mathbf{F}(t)\}$  与第  $j$  振型对应的广义坐标  $q_j$  的广义力。

结合式(6)和式(7)可以得到方程的解  $\{x(t)\}$ :

$$\{x(t)\} = \mathbf{K}^{-1} \{\mathbf{F}(t)\} - \sum_{n=1}^N \{h\}_n \left[ \frac{\ddot{q}_n(t)}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta_n \dot{q}_n(t)}{\omega_n} \right] \quad (8)$$

式中,  $N$  为自由度个数。

动力学分析表明, 当弹载设备的刚度提升且系统阻尼增大时, 通过适当降低系统固有频率, 可使设备的位移响应  $\{x(t)\}$  变小。高锰铜合金因其独特的高刚度和高阻尼特性, 基于高锰铜合金的隔振器可以有效地降低弹载设备的动力学响应。

为了充分发挥基于高锰铜合金的隔振器的效能潜力, 需建立系统化的优化设计方法。而这一过程的核心是构建一个全面且精准的优化设计模型。

## 2 基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计方法

### 2.1 基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计模型

高锰铜合金的核心优势在于其卓越的高阻尼特性, 在外部冲击或振动作用下会发生形变, 从而有效地将机械能转化为热能, 达到隔振效果。因此, 为了发挥高锰铜合金的高阻尼特性, 需要

在设计时降低其结构刚度。基于高锰铜合金的隔振器一般设计成如图2所示形式。

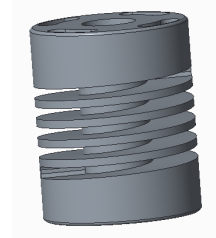


图2 基于高锰铜合金的隔振器

Fig. 2 Vibration isolation based on Mn-Cu alloys

弹载设备在动态工况下需承受显著的高加速度载荷, 过低的结构刚度会导致其局部应力过大, 因此需要在高阻尼特性和高强度之间找到平衡, 这样既能够确保高锰铜合金结构在降低结构刚度的同时, 仍能保持足够的强度和耐久性。

通过静力学有限元分析, 其计算结果如图3所示。

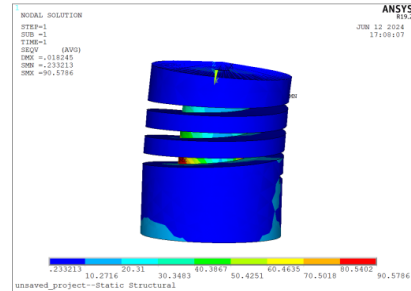


图3 应力云图

Fig. 3 Stress diagram

由应力云图可知, 隔振器的螺距和母线高度会影响隔振器的刚度和强度, 因此将螺距和母线高度作为设计变量, 如图4所示。

根据上文的分析, 基于高锰铜隔振器的大变形和高强度是一对矛盾体, 因此建立优化设计模型如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \text{obj} \quad & \max \quad \Delta(L_1, L_2) \\ \text{sub} \quad & s(L_1, L_2) \leq \alpha \\ & L_1 \in [0.006, 0.015] \\ & L_2 \in [0.001, 0.0055] \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\Delta(L_1, L_2)$  为最大变形量,  $s(L_1, L_2)$  为最大等效应力,  $L_1$  为母线高度,  $L_2$  为螺距,  $\alpha$  为高锰铜合金的强度极限。

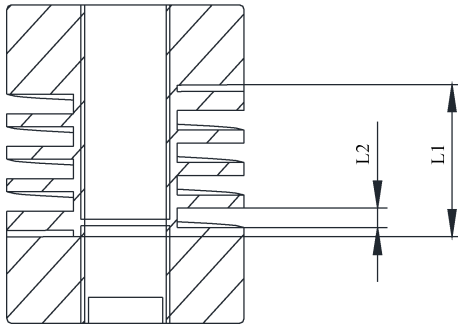


图4 参数示意图

Fig. 4 Parameter diagram

### 2.2 基于遗传算法的高锰铜合金隔振器优化设计

在弹载设备用高阻尼锰铜合金隔振器的优化设计中，传统的优化方法通常依赖有限元分析的迭代计算流程，存在显著的计算瓶颈。每次迭代所需的有限元求解过程将消耗大量计算资源，严重制约设计效率。基于此，本研究引入Kriging代理模型这一先进近似建模技术，通过构建高精度替代模型实现优化流程的加速。

Kriging代理模型作为一种基于统计方法的表面拟合技术<sup>[11]</sup>，它通过构建一个空间变异函数模拟数据的空间依赖性。这种模型不仅能够提供未知点的预测值，还能给出预测误差的方差。建立表达式如下：

$$y = g(x)\lambda + z(x) \quad (10)$$

式中， $g(x)$ 为全局回归模型， $\lambda$ 为回归系数， $z(x)$ 为误差随机过程。

针对基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计模型， $x = (L_1, L_2)$ ， $y = (\Delta, s)$ ，这样样本维度  $m=2$ ，通过拉丁超立方抽样以及有限元计算可以计算出  $n$  个样本点，即  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，以及对应

的响应值  $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ ，那么对预测点  $x'$  的响应估计值，如式(11)所示。

$$y'(x') = g(x')\lambda' + r^T(x')R^{-1}(y - I\lambda') \quad (11)$$

$\lambda'$ 为 $\lambda$ 的估计值， $y$ 为样本数据， $I$ 为单位向量。 $R$ 为随机误差的相关矩阵， $r(x')$ 为样本点和预测点的相关向量。

遗传算法作为一种基于生物进化原理的智能优化技术<sup>[12]</sup>，它可以帮助工程师在复杂的设计空间中找到最佳的解决方案。在寻找高锰铜合金结构设计的平衡方案时，遗传算法可以通过模拟自然选择的过程，逐步优化设计参数，以达到预定的性能指标。

针对基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计，确定适应度函数如式(12)所示。

$$f(\Delta(L_1, L_2)) = \exp(\Delta(L_1, L_2)) \quad (12)$$

选择概率  $P_j$  定义如式(13)所示。

$$P_j = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^m f_j} \quad (13)$$

式中  $f_j$  为第  $j$  个体的适应度。

针对高锰铜合金的弹载设备隔振器的遗传算法优化流程如图5所示，具体步骤如下：

- ① 建立基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化设计模型。
- ② 采用拉丁超立方抽样并进行有限元分析，获取样本空间。
- ③ 基于样本空间建立Kriging代理模型。
- ④ 进入遗传算法流程，利用选择概率选择进入下一代的个体，并按照相应的概率进行交叉和变异操作，若同时满足公式(9)的约束条件，以及适应度函数的收敛条件，则输出最优解。

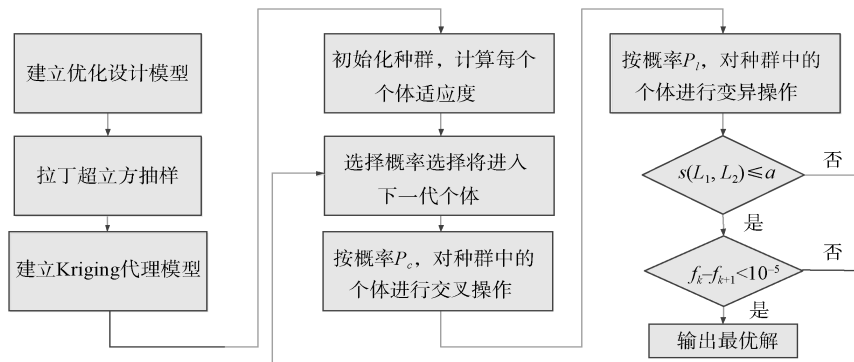


图5 基于遗传算法的高锰铜合金隔振器设计流程图

Fig. 5 Design process of Mn-Cu alloys vibration isolation based on genetic algorithm

### 3 基于高锰铜合金的弹载设备隔振器优化迭代计算

通过拉丁超立方抽样<sup>[13]</sup>，在上述参数取值范围内选取9个样本点，再利用有限元模型分别计算每个样本点对应的最大变形量和最大等效应力，这样就得到了初始的样本空间，如表1所示。

表 1 样本空间  
Table 1 Sample space

| $L_1$ (m) | $L_2$ (m) | $s$ (MPa) | $\Delta$ (mm) |
|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 0.012 2   | 0.003 6   | 47.43     | 0.023         |
| 0.011 1   | 0.004 3   | 45.79     | 0.017         |
| 0.006 7   | 0.005 1   | 27.46     | 0.007         |
| 0.014 4   | 0.003 0   | 64.31     | 0.031         |
| 0.01      | 0.005 5   | 38.98     | 0.011 7       |
| 0.013 3   | 0.005 5   | 55.04     | 0.020 9       |
| 0.007 8   | 0.004 9   | 29.84     | 0.010 1       |
| 0.006     | 0.004 3   | 26.38     | 0.007 2       |

为了减少有限元计算的次数并降低优化迭代时间，采用Kriging代理模型是一种有效的方法<sup>[14]</sup>。Kriging模型是一种基于统计的插值方法，它能够预测值及其不确定性估计，在优化设计过程中，Kriging模型可以作为一个快速响应的“代理”模型，代替有限元分析，从而减少计算量<sup>[15]</sup>。

根据上述产生的样本空间建立Kriging模型，如图6所示。

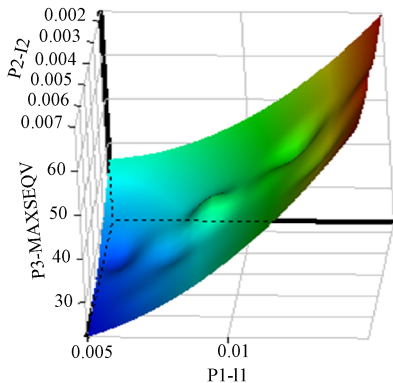


图 6 Kriging 模型  
Fig. 6 Kriging model

从图中可以看出，该Kriging模型显示出较强的非线性特征，那么就需要采用较复杂的策略来捕捉这些非线性关系。遗传算法作为一种全局优

化算法，可以有效地搜索复杂的非线性空间。

为了保证基于高锰铜隔振器具有较强的安全性，将强度极限 $\alpha$ 设定为60 MPa，并开展迭代计算。计算结果如图7~图10所示。

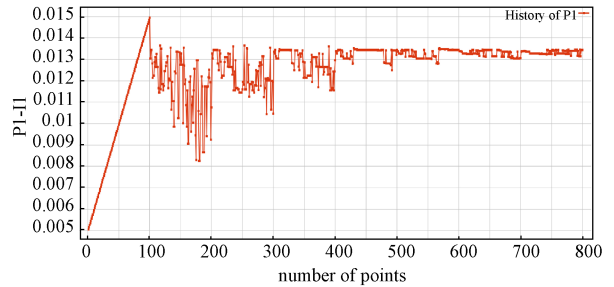


图 7 参数  $L_1$  迭代过程

Fig. 7  $L_1$  iterative process

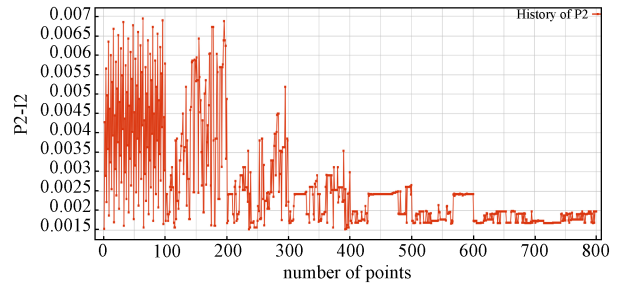


图 8 参数  $L_2$  迭代过程

Fig. 8  $L_2$  iterative process

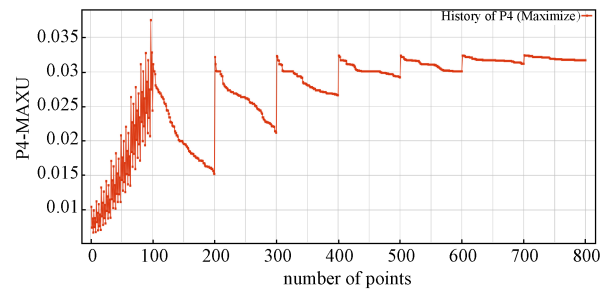


图 9 参数  $\Delta$  迭代过程

Fig. 9  $\Delta$  iterative process

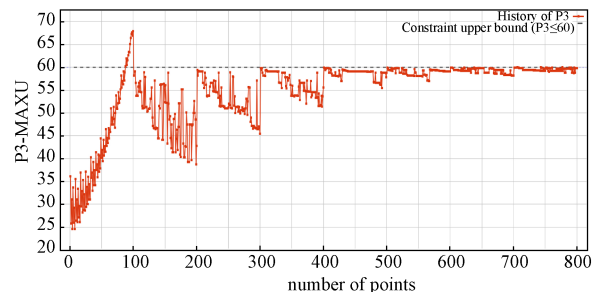


图 10 参数  $s$  迭代过程

Fig. 10  $s$  iterative process

看出在迭代 1 000 步后, 各个参数趋于收敛。最终迭代计算结果如式(14)所示。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0133 \\ 0.0017 \end{bmatrix} \quad (14)$$

#### 4 工程案例

根据第三节计算的结果, 着手为某弹载设备设计基于高锰铜合金的隔振器。该弹载设备位于弹体前端, 涵盖射频天线部分和电子舱部分。其中, 射频天线阵面法向与弹体 X 轴平行, 具体布局情况如图 11 所示。

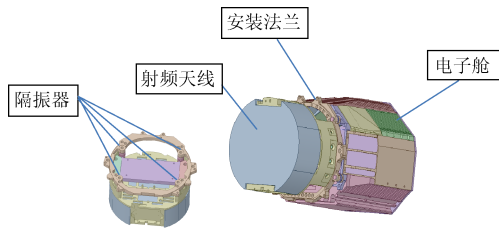


图 11 弹载设备

Fig. 11 Missile-borne equipment

从图 11 中可知, 射频天线和电子舱均与安装法兰相连接, 整个弹载设备通过安装法兰与弹体相连。因此弹上的力学激励便经由安装法兰传递到射频天线和电子舱。传统的设计方案是在射频天线、电子舱与安装法兰的连接处加装基于硅橡胶的被动隔振器。但这种被动隔振器的刚度较差, 会对射频天线的指向精度产生影响。因此采用基于高锰铜合金的被动隔振器。

##### 4.1 随机振动分析

在弹载环境下进行隔振器的动力学分析, 是一项至关重要的任务。弹载设备所处的动力学环境极端复杂, 这就要求弹载设备隔振器能有效隔绝由于发射、飞行等过程产生的剧烈振动, 从而保护敏感载荷免受损害。尤其重要的是, 控制弹载设备的加速度响应均方根值低于 30 g, 这是确保电子元件、光学组件和精密仪器安全运行的关键指标。

为了评估隔振器能否满足这一关键指标, 需要针对某弹载设备进行随机振动分析。而模态分析是随机振动分析的基础, 某弹载设备的模态分析结果如图 12 所示。

在完成模态分析的基础上, 进一步开展随机振动分析, 评价基于高锰铜合金隔振器的减振效果。

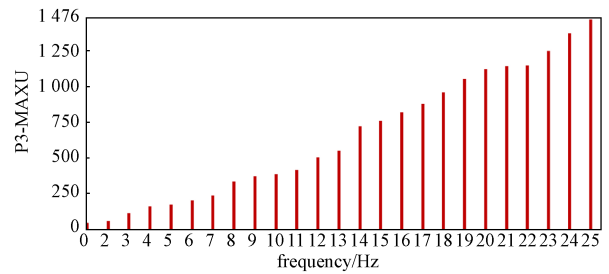


图 12 模态分析频率分布图

Fig. 12 Modal frequency distribution chart

在 X、Y、Z 方向上, 分别施加如图 13 所示随机振动载荷。当采用铝合金、高锰铜和硅橡胶作为隔振材料时, 射频天线的加速度响应曲线如图 14~图 16 所示。

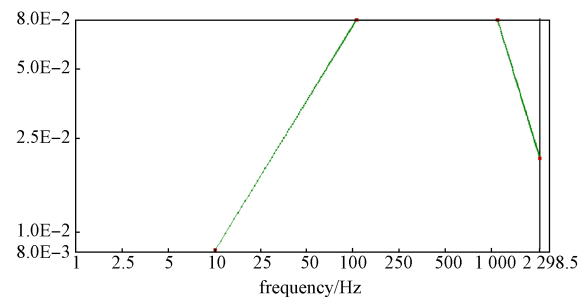


图 13 随机振动载荷谱

Fig. 13 Random vibration load

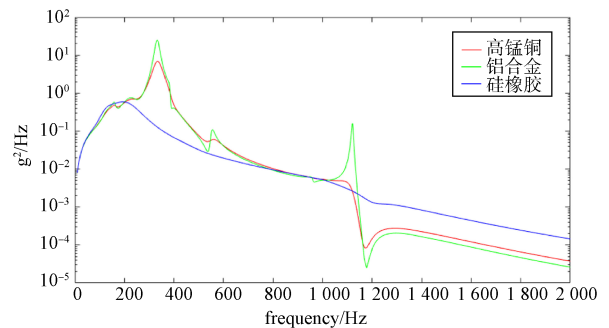


图 14 X 方向加速度仿真响应曲线

Fig. 14 X-direction acceleration simulation response curve

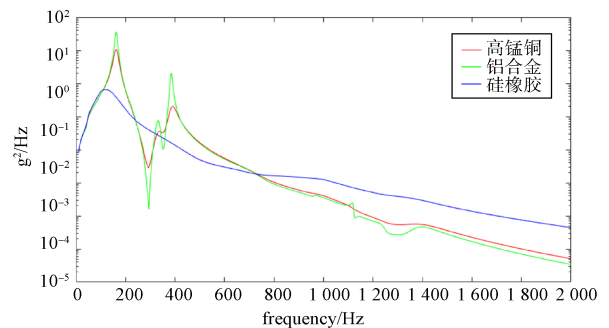


图 15 Y 方向加速度仿真响应曲线

Fig. 15 Y-direction acceleration simulation response curve

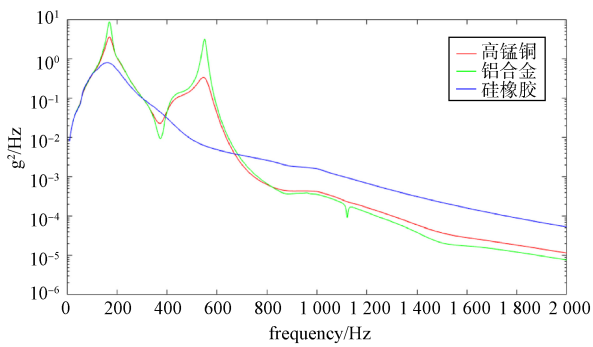


图 16 Z方向加速度仿真响应曲线

Fig. 16 Z-direction acceleration simulation response curve

对比分别基于高锰铜、铝合金和硅橡胶的隔振器的加速度响应曲线，可以看出硅橡胶具有高阻尼特性，能够使加速度响应曲线变得比较平缓，从而降低射频天线加速度响应。基于高锰铜合金的阻尼特性介于硅橡胶和铝合金之间，能够压低由于共振引起的加速度响应波峰。

基于高锰铜、铝合金和硅橡胶隔振器的加速度响应均方根值，具体数据如表 2 所示。

表 2 加速度响应对比结果

Table 2 Comparison results of acceleration response

|              | 高锰铜     | 铝合金     | 硅橡胶     |
|--------------|---------|---------|---------|
| X方向加速度响应均方根值 | 22.63 g | 30.69 g | 10.86 g |
| Y方向加速度响应均方根值 | 18.79 g | 25.98 g | 8.61 g  |
| Z方向加速度响应均方根值 | 15.67 g | 20.04 g | 10.53 g |

由上表可以分析得出，基于硅橡胶隔振器的减震效率确实是三种材料中最高的，高锰铜次之，铝合金最差。但基于高锰铜的隔振器仍然能够满足加速度响应小于 30 g 的要求，而基于铝合金的隔振器在承受 X 方向随机振动载荷时，其响应超过 30 g，无法满足弹上工作要求。从响应图可以看出，基于硅橡胶的隔振器共振峰比较靠前，可知其刚度比较低。因此需要对其变形量展开分析，具体分析结果见表 3。

表 3 变形对比结果

Table 3 Comparison results of deformation

|          | 高锰铜      | 铝合金      | 硅橡胶      |
|----------|----------|----------|----------|
| X方向加速度载荷 | 0.079 mm | 0.079 mm | 0.133 mm |
| Y方向加速度载荷 | 0.154 mm | 0.155 mm | 0.349 mm |
| Z方向加速度载荷 | 0.1mm    | 0.101 mm | 0.175 mm |

通过仿真分析可以看出，在加速度载荷作用下，基于高锰铜与铝合金隔振器的射频天线位移量基本一致，而基于硅橡胶隔振器的射频天线位移量要增大 40%~50%，尤其是在 Y 方向加速度载荷作用下，基于硅橡胶隔振器的射频天线位移量为 0.349 mm，会导致方位角误差 0.2°，无法满足弹载设备工作要求。

### 4.2 力学试验

为了验证基于高锰铜隔振器的力学性能，在 10t 振动台上进行了振动试验。弹载设备安装状态如图 17 所示。



图 17 力学试验

Fig. 17 Mechanical experiment

通过在射频天线粘贴的传感器，采集的数据和仿真数据对比结果如图 18 至图 20 所示。

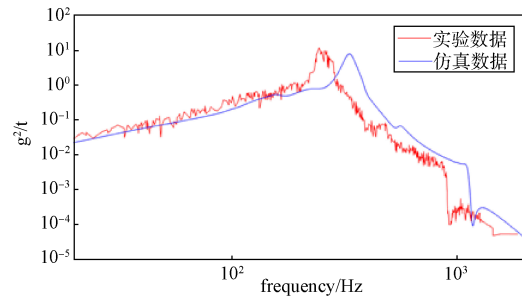


图 18 X方向加速度响应曲线

Fig. 18 X-direction acceleration response curve

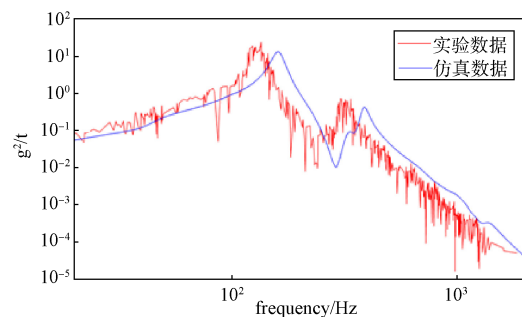


图 19 Y方向加速度响应曲线

Fig. 19 Y-direction acceleration response curve

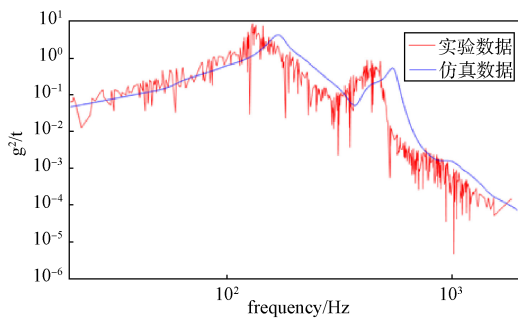


图20 Z方向加速度响应曲线

Fig. 20 Z-direction acceleration response curve

可以看出力学实验结果和仿真结果基本一致，能够证明基于高锰铜隔振器的减振效果。

为精准检验基于高锰铜隔振器的刚度特性，将两相机架设在振动台侧方，相机间隔距离 $B$ ，距离被测物高度 $d$ ，并以特定角度观测被测件，确保被测件处于两相机的交汇公共视场内。相机布置示意如图21所示。

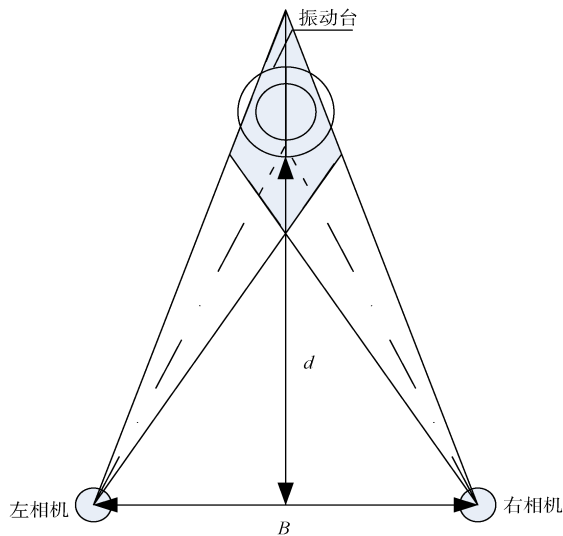


图21 高速相机布局

Fig. 21 High-speed camera configuration

弹载设备上布置4~5个测点用于测量弹载设备的抖动位移，支撑框架上粘贴8~9个测点，用来分离振动台的振动位移。测试结果如图22~图24所示。

通过相机测试可以看出：在受到Y方向随机振动时位移最大，最大位移为0.12 mm，仿真结果相符，且满足弹载设备工作需要，证明基于高锰铜隔振器刚度能够适应弹上力学环境。

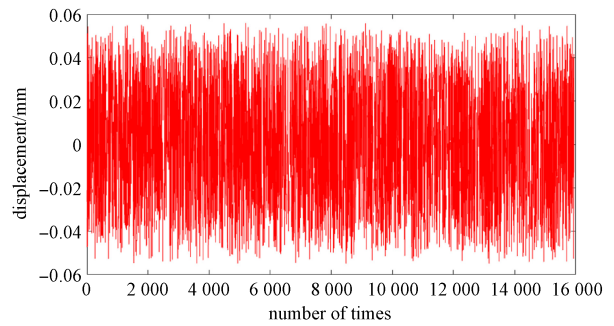


图22 X方向变形测试曲线

Fig. 22 X-direction deformation test curve

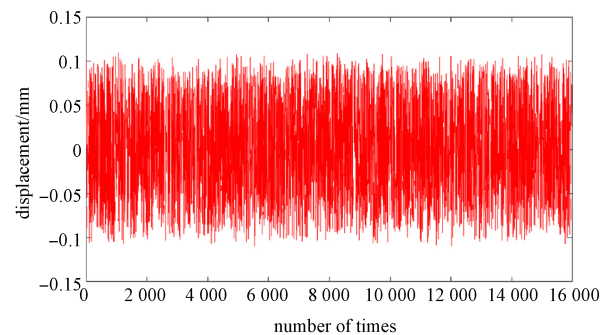


图23 Y方向变形测试曲线

Fig. 23 Y-direction deformation test curve

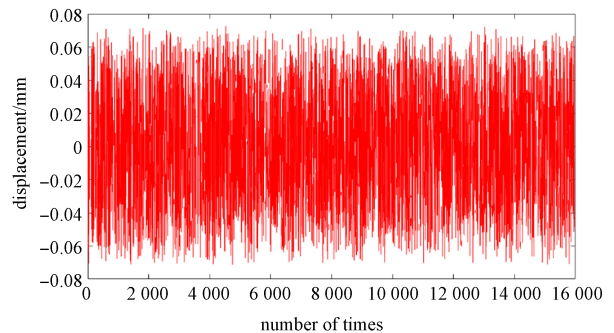


图24 Z方向变形测试曲线

Fig. 24 Z-direction deformation test curve

## 5 结束语

针对弹载设备隔振设计需求，在高锰铜合金阻尼特性分析计算以及弹载设备动力学模型的基础上，建立基于高锰铜合金的隔振器优化设计模型，并采用遗传算法对隔振器的相关设计参数进行优化设计，获得较优的设计方案，并通过弹载设备的有限元动力学分析以及随机振动力学试验，证明了该设计方法的优越性和合理性，并得出以下结论：

① 高锰铜合金兼具高阻尼与高刚度特性。在

满足弹上设备减震需求的基础上, 能够维持较高的刚度, 这样在吸收弹上传递的能量的同时, 依然能够提供足够的支撑力, 防止大变形产生。

② 基于高锰铜合金的隔振器设计可借助遗传算法实现, 借此能够有效解决隔振器高强度和高阻尼之间的矛盾。

③ 在力学实验中, 通过射频天线的随机振动响应以及变形量测量, 验证了基于高锰铜合金的隔振器仿真分析结果的准确性。

④ 力学试验证明基于高锰铜合金的隔振器能够有效衰减弹上的力学激励并维持较小的变形, 确保弹载设备在复杂的弹上力学环境下正常运行。

### 参 考 文 献

- [1] 张能, 何琳, 李彦. 圆柱壳体内主被动隔振过定控制系统试验研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(1): 129-134.  
ZHANG Neng, HE Lin, LI Yan. Experimental study of active-passive vibration isolation over-determined control system mounted in a cylindrical shell[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(1): 129-134.
- [2] 程文娟, 白真, 何宁. 基于有限元算法的惯导缓冲减振机构设计[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(6): 47-50.  
CHENG Wenjuan, BAI Zhen, HE Ning. Optimized design on vibration isolation of inertial navigation by using Finite element method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(6): 47-50.
- [3] 李沅, 李凯, 王晓飞, 等. 弹载制导系统抗振动与高过载冲击设计仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 294-297.  
LI Yuan, LI Kai, WANG Xiaofei, et al. Simulation analysis on vibration and high overload impact of missile guidance system[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 294-297.
- [4] 任怀宇. 粘弹阻尼减振在导弹隔冲击结构中的应用[J]. 宇航学报, 2007, 26(6): 1495-1499.  
REN Huaiyu. The application of viscoelastic damping vibration suppression for shock-isolation structure of multi-stage missile[J]. Journal of Astronautics, 2007, 26(6): 1495-1499.
- [5] 王端义, 徐文涛. 航天结构带频率禁区的动力学拓扑优化设计[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2575-2581.  
Wang Duanyil, Xu Wentao. Dynamic topological optimal design of aerospace structure with frequencies constraints [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(6): 2575-2581.
- [6] 李林峰, 张激扬, 罗睿智. 反作用轮主被动隔振器的复合控制研究[J]. 空间控制技术与应用, 2018, 44(6): 14-21.  
LI Linfeng, ZHANG Jiyang, LUO Ruizhi. Composite control of an active-passive micro vibration isolator utilized for reaction wheel assembly[J]. Aerospace Control and Application, 2018, 44(6): 14-21.
- [7] 王乃亮, 冀璞光, 殷福星, 等. M2052高阻尼合金在结构件减振中的应用研究[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(3): 89-93.  
WANG Nailiang, JI Puguang, YIN Fuxing, et al. Research of M2052 high damping alloy applied in the vibration reduction of structural component[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2017, 46(3): 89-93.
- [8] 卢凤双, 苗永岭, 田宇鹏, 等. M2052高阻尼合金的研究及应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 20(4): 44-48.  
LU Fengshuang, MIAO Yongling, TIAN Yupeng, et al. Research and application of M2052 High Damping Alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 20(4): 44-48.
- [9] 王玉柱, 于树志, 安志欣, 等. 铜基防振合金的高阻尼特性[J]. 功能材料, 1987, 4: 35-41.  
WANG Yuzhu, YU Shuzhi, AN Zhixin, et al. High-damping character of copper base damping alloys[J]. Journal of Functional Materials, 1987, 4: 35-41.
- [10] 马志毅, 张彬, 楚雪梅. 船载雷达随机振动疲劳寿命分析[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 111-119.  
MA Zhiyi, ZHANG Bin, CHU Xuemei. Fatigue life prediction of shipborne radar based on random vibration analysis[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 111-119.
- [11] 李小刚, 程锦, 刘振宇, 等. 基于双层更新Kriging模型的机械结构动态特性稳健优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 166-172.  
LI Xiaogang, CHENG Jin, LIU Zhenyu, et al. Robust optimization for dynamic characteristics of mechanical

- structures based on double renewal Kriging model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 166-172.
- [12] 马志毅, 张雪峰, 尹晓琳. 遗传算法和RBF神经网络在蜂窝结构等效力学参数计算中的应用[J]. 振动与冲击, 2016, 37(3): 64-72.
- MA Zhiyi, ZHANG Xuefeng, YIN Xiaolin. Application of genetic algorithm and RBF neural network in equivalent mechanics parameter calculation of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 37(3): 64-72.
- [13] 王文竹, 李杰, 刘刚. 基于Kriging代理模型鼓式制动器稳定性的优化设计[J]. 机械传动, 2020, 40(11): 135-138.
- WANG Wenzhu, LI Jie, LI Gang. Optimization design of drum brake stability based on Kriging surrogate model [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 40(11): 135-138.
- [14] 陈哲, 杨旭锋, 程鑫. 基于改进Kriging模型的主动学习可靠性分析方法[J]. 振动工程学报, 2021, 43(1): 129-136.
- CHEN Zhe, YANG XuFeng, CHENG Xin. Active learning method based on improved kriging model for reliability analysis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 43(1): 129-136.
- [15] 吴海波, 刘海龙, 魏丽君. 基于粒子群优化Kriging模型的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 51(2): 121-127.
- WU Haibo, LIU Hailong, WEI Lijun. A slope reliability analysis approach using the particle-swarm-optimization-based Kriging Model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 51(2): 121-127.

#### [作者简介]

- 马志毅 1988年生, 硕士, 高级工程师。  
赵敬 1986年生, 学士, 工程师。  
尹晓琳 1988年生, 硕士, 工程师。  
牛磊 1978年生, 硕士, 高级工程师。  
王喜超 1988年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 赵尹默)