文章编号　1004-924X(2021)03-0524-12

金属橡胶减振器在同轴两反空间相机中的应用

宋文轩[1,2,3]，李宗轩[1,3*]，谢晓光[1,3]，吴　昊[1,2,3]，张德福[1,3]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院 国防科技创新天基动态快速光学成像技术重点实验室，吉林 长春 130033)

摘要：为了减少振动对同轴两反空间相机的影响，研究了金属橡胶减振结构及同轴两反空间相机的随机振动响应。分析金属橡胶结构的力学模型，研制出串联金属橡胶减振结构，建立空间相机的有限元模型并进行模态分析和随机振动响应分析；最后，通过正弦扫频试验和随机振动试验验证有限元分析的准确性。试验结果表明，装配有金属橡胶减振器的同轴两反空间相机 X，Y 与 Z 三个方向的一阶固有频率均大于 100 Hz，远离卫星的固有频率，不会与卫星发生共振，地面正弦扫频试验也不会发生共振。随机振动试验中同轴两反空间相机在 X，Y 与 Z 三个方向上的输入激励响应为 $4.98g_{rms}$，而次镜在 X，Y 与 Z 三个方向上的振动响应分别为 $3.381g_{rms}$，$2.884g_{rms}$ 和 $1.969g_{rms}$，振动试验后系统没有出现明显像差。金属橡胶减振器对空间相机有显著的减振效果，可为同类型空间相机减振结构的设计提供参考。

关　键　词：空间相机；金属橡胶；减振；有限元分析；随机振动
中图分类号：V445.8　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.37188/OPE.20212903.0524

Application of metal rubber vibration absorber in coaxial dual-reflection space camera

SONG Wen-xuan[1,2,3], LI Zong-xuan[1,3*], XIE Xiao-guang[1,3], WU Hao[1,2,3], ZHANG De-fu[1,3]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Key National Defense Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun*130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: Lizongxuan@ciomp.ac.cn*

Abstract: This paper presents a damped metal-rubber vibration absorber modeled on the response of a coaxial dual-reflection space camera to random vibration. First, we analyze the metal-rubber structure and develop a corresponding metal-rubber damper. We then use finite element analysis (FEA) to develop a model of the space camera and perform a modal analysis and random vibration response analysis of the model. Finally, we verify the accuracy of the FEA via a sinusoidal-sweep vibration test and a random-vibration test. The test results demonstrate that, in the X, Y, and Z directions, the first-order natural frequency of a coaxial dual-reflection space camera equipped with the metal-rubber damper exceeds 100 Hz;

收稿日期：2020-08-29；**修订日期**：2020-09-21.
基金项目：国家科技重大专项(No. 2016YFB0501202)；吉林省科技发展计划资助项目(No. 20180414066GH)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

this frequency is beyond the natural frequency of the satellite. Hence, the camera will resonate with neither the satellite nor the ground sinusoidal sweep vibration. The response of the coaxial dual reflection space camera to excitation in the X, Y, and Z directions is $4.98g_{rms}$ in the random vibration test; the vibration responses of a secondary mirror in the X, Y and Z directions are $3.381g_{rms}$, $2.884g_{rms}$, and $1.969g_{rms}$, respectively. After the vibration test, no evident aberration can be observed in the system. The damped metal-rubber vibration absorber has a significant damping effect on the space camera and has a patent.

Key words: space camera; metal rubber; vibration isolation; finite element analysis; random vibration

1　引　言

在对地观测、深空探索等科学研究中，空间相机发挥着越来越重要的作用。但是在火箭发射升空阶段，连接空间相机的卫星平台受到火箭的脉动推力、喷气噪声以及紊流边界层噪声等综合作用会产生随机振动激励[1]，激励经过卫星平台上的柔性支撑结构传递到空间相机结构上会造成结构变形与微应力，使空间相机的光学元件产生失调与面形误差，从而导致光学系统的成像质量下降。此外，振动也会造成空间相机内部元器件的失效。为了提高空间相机的可靠性，本文设计了金属橡胶减振器。

目前，国内外大多数对金属橡胶的研究集中在其力学模型的建立上。其中，邹广平等提出对弹簧-金属丝网橡胶组合减振器迟滞力学模型[2]。吴荣平等以试验为基础，分析了金属橡胶的密度、金属丝直径、螺旋卷直径及温度对金属橡胶径向刚度特性的影响，并建立了金属橡胶径向力学模型[3]。罗玛等采用准静态压缩试验和有限元仿真研究金属橡胶材料的横向各向同性和应变相关性的非线性特征[4]。金鸣等采用正弦扫频和冲击实验考察了配重、激励幅值以及冲击持续时间等因素对金属橡胶减振器振动冲击响应的影响[5]。近年来，金属橡胶减振器在风力发电机组、航空、航天等领域得到了广泛的应用，用以解决航天航空等仪器设备在高温、高真空、超低温及剧烈振动等环境下的减振防护问题[6-11]。

本文根据空间相机在发射过程中的动力学环境和相机在轨成像质量要求，提出在保证整体结构的一阶固有频率大于100 Hz的前提下，使中高频率的随机振动被减振系统衰减的设计指标。根据这个指标计算金属橡胶减振器的结构参数和材料参数等，以此来设计金属橡胶减振器。所设计的金属橡胶减振器的减振效果明显，满足设计要求。

2　金属橡胶减振器的力学模型

2.1　金属橡胶的本构关系

金属橡胶是干摩擦迟滞阻尼材料，由金属丝制备成螺旋卷，将螺旋卷金属丝定螺距拉伸后按一定形状进行编织铺放制成毛坯后冲压成型[12]。金属橡胶内部有很多孔洞，既呈现类似橡胶材料的弹性和阻尼性能，又保持金属的优异特性，还具有明显的非线性动力学特性。由于在振动过程中受到激励，金属橡胶的金属丝之间相互挤压和滑移摩擦而产生阻尼力，具有黏弹性行为，加载过程中阻尼力阻止金属丝的滑移，卸载过程中阻尼力阻止变形恢复。金属橡胶在加载和卸载过程中的力-位移曲线并不相同，形成了迟滞回

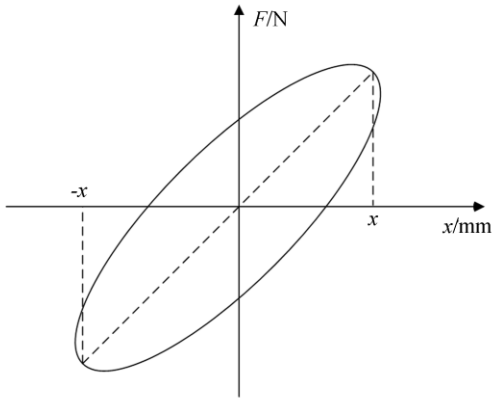


图1　金属橡胶的迟滞曲线

Fig. 1　Hysteresis curve of metal rubber

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

线。图1为金属橡胶的迟滞曲线，曲线所围成的迟滞环的面积即为振动过程中消耗的能量，金属橡胶通过能量耗散来减振。

金属橡胶的性能采用双折线模型，其本构关系式为[13]：

$$G(t)=k_1x(t)+k_3x^3(t)+c\dot{x}(t)+z(t), \tag{1}$$

$$\mathrm{d}z(t)=\frac{k_s}{2}\{1+\mathrm{sgn}[z_s-|z(t)|]\}\mathrm{d}x(t), \tag{2}$$

式中：$x(t)$和$\dot{x}(t)$分别为金属橡胶块受激励后产生的变形量和变形速度；k_1是线性刚度系数；k_3为非线性刚度系数；c为黏弹阻尼系数；$G(t)$为恢复力，与金属橡胶块受激励点的位移和速度有关，因此是无记忆恢复力；$z(t)$是金属橡胶变形过程中干摩擦引起的有记忆恢复力，与整个变形历史有关，因此金属橡胶减振器具有滞后非线性性能；z_s表示最大滑移恢复力；k_s表示滑移刚度。

2.2　金属橡胶减振系统的动力学模型

典型的金属橡胶阻尼元件的等效减振动力学模型如图2所示，它由基体、金属橡胶和被减振物体组成[14]。金属橡胶与基体和被减振物体M相连，其中，被减振物体M质量为m，金属橡胶减振器的质量很小，忽略不计。基体受外部环境激励产生位移$z(t)$，外部激励通过基体和金属橡胶使物体M产生位移$x(t)$。

金属橡胶具有迟滞阻尼特性，其动态模型可

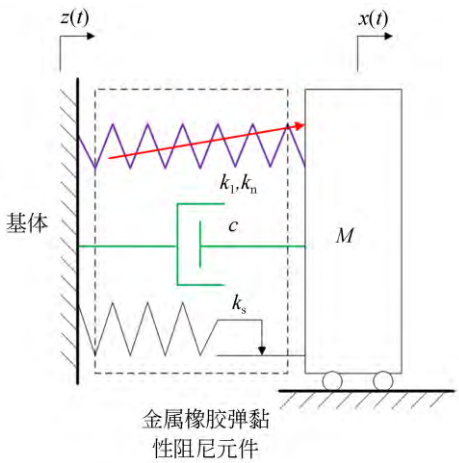


图2　金属橡胶的等效动力学模型

Fig. 2　Equivalent dynamical model of metal rubber

用高阶非线性刚度与等效黏性阻尼力叠加的方法构造[15]，结合金属橡胶的非线性本构关系，金属橡胶阻尼元件的非线性动力学微分方程为：

$$m\ddot{x}+k_1(x-z)+k_n(x-z)^3+c(\dot{x}-\dot{z})+F(t)=0, \tag{3}$$

式中：k_1为线性刚度系数，k_n为非线性刚度，c为阻尼系数，$F(t)$为有记忆恢复力。

由式(3)可以看出，金属橡胶阻尼和刚度的复杂性及非线性。在工程上金属橡胶的动力学很难得到进一步分析，因此，简化金属橡胶减振系统的非线性动力学模型，简化后的动力学模型如图3所示。

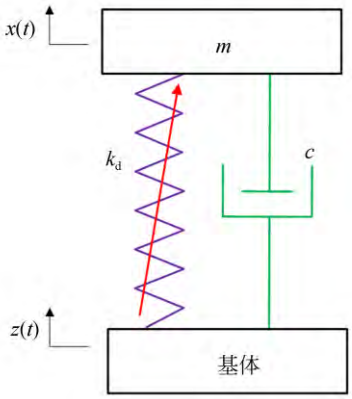


图3　金属橡胶减振系统的动力学模型

Fig. 3　Dynamical model of metal rubber isolation system

由图3可以得到简化后的金属橡胶减振系统的动力学微分方程为：

$$m\ddot{x}+k_d(x-z)+c(\dot{x}-\dot{z})=0, \tag{4}$$

令$x-z=y$，得：

$$m\ddot{y}+k_dy+c\dot{y}=-m\ddot{z}. \tag{5}$$

对式(5)进行拉普拉斯变换，得到：

$$\Phi(s)=\frac{Y(s)}{Z(s)}=\frac{-ms^2}{ms^2+cs+k_d}. \tag{6}$$

由$X(s)=Z(s)+Y(s)$得：

$$G(s)=\frac{X(s)}{Z(s)}=\frac{cs+k_d}{ms^2+cs+k_d}. \tag{7}$$

令ω_n为减振系统的无阻尼自然频率，ξ为减振系统阻尼比，得到：

$$k_d=m\omega_n{}^2, c=2m\xi\omega_n, \tag{8}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$G(s)=\frac{X(s)}{Z(s)}=\frac{\omega_n{}^2+2\xi\omega_n s}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n{}^2},\quad(9)$$

其中 $G(s)$ 为响应幅值与激励幅值的传递函数。

对式(9)进行频域分析，令 $s=j\omega$，$\lambda=\frac{\omega}{\omega_n}$，得到减振系统的动力放大系数为：

$$T=\left|G(j\omega)\right|=\sqrt{\frac{1+(2\xi\lambda)^2}{(1-\lambda^2)^2+(2\xi\lambda)^2}}.\quad(10)$$

分析式(10)可以得到：当 $\lambda>\sqrt{2}$ 时，金属橡胶才有减振效果；随着 λ 的增大，减振效果会进一步增强；当 $\lambda<\sqrt{2}$ 时，金属橡胶会放大振动。

减振系统的动态刚度可由以下公式计算：

$$k=\frac{p}{g}(2\pi f_0)^2,\quad(11)$$

式中：p 为减振器所承担的重力，g 为重力加速度，f_0 为系统的最高固有频率[16]。

3　金属橡胶减振器结构设计

3.1　金属橡胶的特点

空间相机在发射过程中，振动力学环境所含频率范围宽广，尤其在低频段模态分布密集，容易激起共振。根据火箭发射阶段振动环境的特点，金属橡胶减振器应具有较高阻尼，以抑制共振，在中高频段，金属橡胶减振器应该有效降低加速度响应均方值，以达到良好的衰减振动作用[17]。

空间相机在轨运行时处于周期性高低温和太空辐射环境，因此对减振器材料要求很高，普通橡胶材料并不适合。金属橡胶具有耐高低温、耐腐蚀、不易老化、抗冲击和工作寿命长的特点，而且能够在较宽的频带内减振，适用于空间相机减振器。此外，单个金属橡胶减振器具有非对称弹性，且由于黏性阻尼力及双折线恢复力的影响，更容易引起减振器力学性能的不稳定，这样导致金属橡胶减振器很难达到理想的动力学性能，因此空间相机减振器采用两个金属橡胶串联成一组的方式，每组金属橡胶减振器上下两个金属橡胶减振元件性能一致。为了获得稳定的减振性能，上下减振元件的拉压必须要保持一致。

3.2　金属橡胶减振器的参数计算

根据振动理论，选择的阻尼比 ξ 使振动传递率 T 控制在 3～4，金属橡胶的阻尼比可设计为 $\xi=0.2$[18]。

像元级的振动量会对图像产生较大影响。从空间相机的成像要求和动力学环境出发，设计的减振器要保证能对 20 Hz 以上的振动被动减振，为避免与卫星发生共振，还要保证空间相机的一阶固有频率大于 100 Hz。同轴两反空间相机质量为 25 kg，取 $g=9.8\,\mathrm{m/s^2}$，整个空间相机共有 12 组金属橡胶减振器。

由式(11)得固有频率范围为：

$$f_0<f/\sqrt{2}=14.14\,\mathrm{Hz}.$$

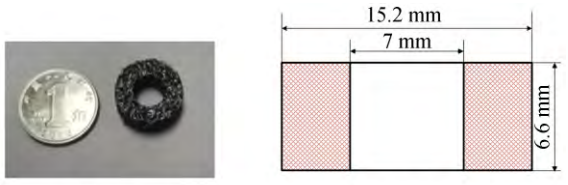
每组金属橡胶减振器的刚度为：

$$k_1\leqslant\left(2\pi f_0\right)^2(m/12)=16\,444.3\,\mathrm{N/m}.$$

每组金属橡胶减振器采用上下两个金属橡胶减振元件串联的方式，因此单个金属橡胶元件的刚度应为：

$$k=\frac{1}{2}k_1\leqslant 8\,222.2\,\mathrm{N/m}.$$

稳定的奥氏体单相组织可明显提高金属橡胶的疲劳韧性，金属丝材料选为 1Cr18Ni9Ti。根据金属橡胶的刚度约束条件和减振设计指标，设计金属丝丝径为 0.2 mm，相对密度为 0.2，将定螺距螺旋状态金属丝放入模具中，通过冲压方法得到黏弹性金属橡胶块，金属丝螺旋卷直径为 15.2 mm，厚度为 6.6 mm。制作的金属橡胶块如图 4 所示。



(a) 金属橡胶外形
(a) Shape of metal rubber

(b) 金属橡胶尺寸
(b) Size of metal rubber

图 4　金属橡胶

Fig. 4　Metal rubber

3.3　同轴两反空间相机支撑结构和金属橡胶减振系统的设计

由于桁架结构具有质量轻、承载比高的特点，空间相机选用桁架结构，通过桁架将主镜承

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力室结构和次镜支撑结构固定连接在一起。近年来，复合轻质材料被广泛应用于航天工程领域[19]，由于空间相机常用弹性模量相对较大的材料，因此桁架材料选用碳纤维复合材料。

空间相机末端采用Bipod柔性支撑结构，Bipod柔性支撑结构由一定角度的柔性铰链组成，材料为钛合金TC4。根据三点定位原理，将3个Bipod柔性支撑结构三等分分布在空间相机主镜承力室的圆周内，呈中心对称。这种支撑方式约束空间相机6个方向的自由度，卸载了空间相机内部热应力，能够减小应力对镜面面形的影响。

根据金属橡胶的特点设计空间相机的减振系统，如图5所示，其作用主要是隔离空间相机沿z方向的振动。Bipod柔性支撑结构上下两侧通过金属橡胶减振器与空间相机固定连接。

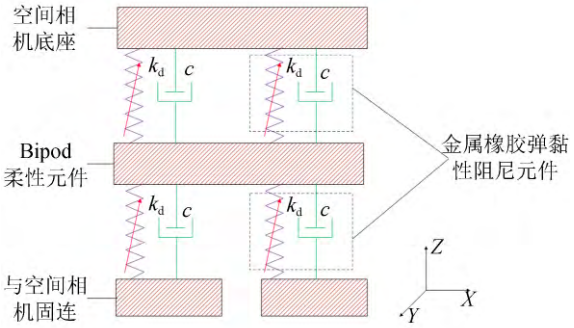


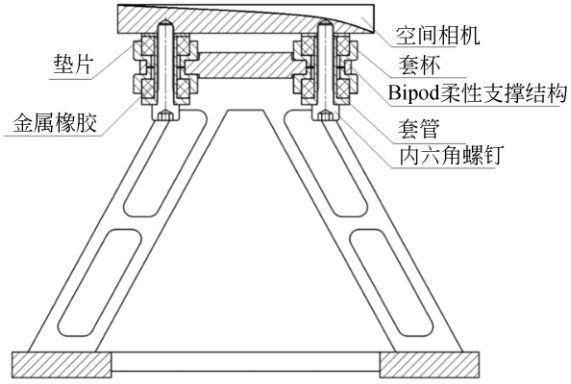
图5 减振系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vibration absorber system

金属橡胶减振器由金属橡胶、套杯、套管、垫片和螺钉组成，金属橡胶的侧面和底面与套杯贴合，金属橡胶不接触套杯的一侧高出套杯2 mm，并且与平垫贴合。金属橡胶的内孔与套管过盈配合，金属橡胶在不受力的初始状态时填充于套杯内，与套杯过盈配合，当空间相机因外部环境发生振动时，振动引起空间相机沿各个方向的偏移进而使金属橡胶金属丝相互挤压和滑移摩擦消耗能量以抑制同轴两反空间相机的振动。根据金属橡胶减振系统，Bipod柔性支撑结构上下侧对称安装8个性能和尺寸均一致的金属橡胶减振器，上下侧为一组，而且固定位置一一对应，利用螺钉将金属橡胶减振器和Bipod柔性支撑结构固定在空间相机上。金属橡胶减振器结构如图6所示。

(a) 金属橡胶减振器结构实物图

(a) Physical map of metal rubber vibration absorber

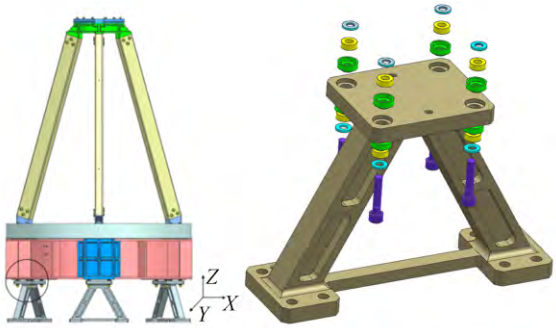


(b) 金属橡胶减振器剖视图

(b) Sectional view of metal rubber vibration absorber

图6 金属橡胶减振器结构

Fig. 6 Structure of metal rubber vibration absorber



(a) 减振器位置 (b) 爆炸示意图

(a) Position of vibration absorber (b) Explosion diagram

图7 金属橡胶减振器的安装位置和爆炸示意图

Fig. 7 Position and explosion diagram of metal rubber vibration absorber

图7为金属橡胶减振器的安装位置和爆炸示意图。金属橡胶减振器安装在Bipod柔性支撑结构上，布置于主镜承力室桁架埋件的正下方，增

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

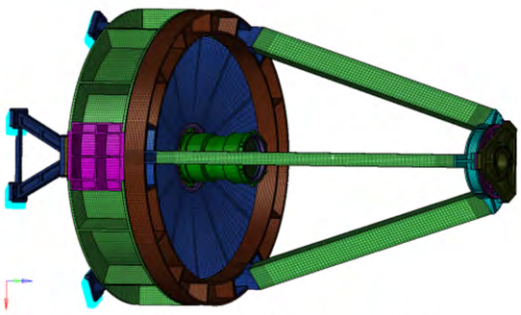
加了空间相机的刚度。爆炸示意图展示了金属橡胶减振器各组成部分的安装顺序。

4　有限元仿真

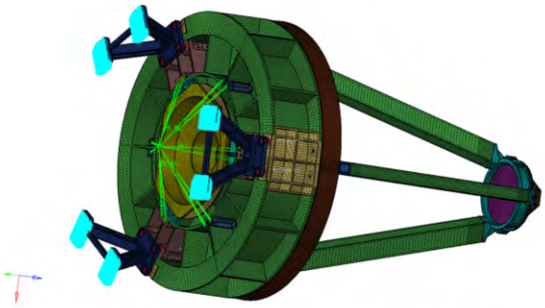
4.1　空间相机有限元模型的建立

为了分析金属橡胶减振器的减振性能，分别进行金属橡胶减振系统和无减振系统的空间相机有限元仿真分析。无减震的空间相机Bipod柔性支撑结构与空间相机主镜承力室连接处采用聚酰亚胺隔热垫代替。

利用HyperMesh软件对上述两种系统空间相机分别建立整体有限元模型，采用八节点六面体单元对各零件进行有限元网格划分，个别过渡连接的地方采用五面体楔形单元，在关键的力的传递路径上和局部开孔处以及关键连接位置网格划分较密以提高运算精度，非关键部位网格划分较稀疏。两种形式的空间相机的有限元模型如图8所示，电箱用质量点代替，并用RBE2与空间相机主镜承力室结构网格的节点连接，质量点坐标与电箱质心位置一致。桁架与桁架埋件之间的胶黏连接部分利用共节点方式连接。金属橡胶减振器采用BUSH单元模拟，根据以往试验结果，整机结构的阻尼系数取0.02。空间相机有限元模型各零件的材料属性和真实空间相机相同，如表1所示。



(a) 无减振系统空间相机的有限元模型
(a) Finite element model of space camera without vibration absorber



(b) 金属橡胶减振系统空间相机的有限元模型
(b) Finite element model of space camera equipped with metal rubber vibration absorber

图8　空间相机的有限元模型
Fig. 8　Finite element model of space camera

表1　材料的属性参数
Tab. 1　Parameters of materials

材　料	密度 $\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	应用结构
碳纤维(M40)	1.56	70	0.30	桁架等
微晶玻璃	2.53	90	0.24	透镜
钛合金(TC4)	4.44	107	0.34	支腿等
殷钢(4J32)	8.1	138	0.25	芯轴等

4.2　动力学分析

空间相机有限元仿真分析的边界条件为Bipod柔性支撑结构与卫星连接处的节点施加6个自由度的约束，如图8所示。采用MSC/Nastran对有上述两种系统的空间相机进行模态分析，得到这两种系统光机结构的整机约束模态分析结果，如表2所示。金属橡胶减振系统空间相机的前两阶模态振型如图9所示。

由表2可知，有金属橡胶减振系统空间相机的基频为125.61 Hz＞100 Hz。金属橡胶减振器对空间相机基频的影响较小，满足空间相机结构设计要求。

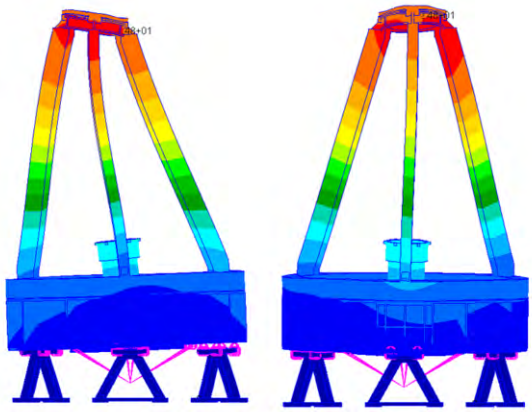
对上述两种空间相机的有限元模型进行随机振动分析，在Bipod柔性支撑结构与卫星连接处节点分别施加X，Y和Z三个方向的单位加速度载荷谱，三个方向如图7所示(下同)，频率为10～2 000 Hz，总均方根植为4.98g_{rms}，加速度功率谱密度如表3所示。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　两种空间相机的模态分析结果

Tab. 2　Modal analysis result of two space cameras(Hz)

阶数	无减振系统频率	金属橡胶减振系统频率
1	156.82	125.61
2	156.85	125.63
3	186.71	170.33
4	187.30	170.90
5	220.25	210.48
6	220.31	210.86
7	266.94	216.57
8	306.62	262.36
9	341.47	262.77
10	341.54	263.40



(a) 第一阶
(a) First mode

(b) 第二阶
(b) Second mode

图 9　空间相机前两阶模态振型

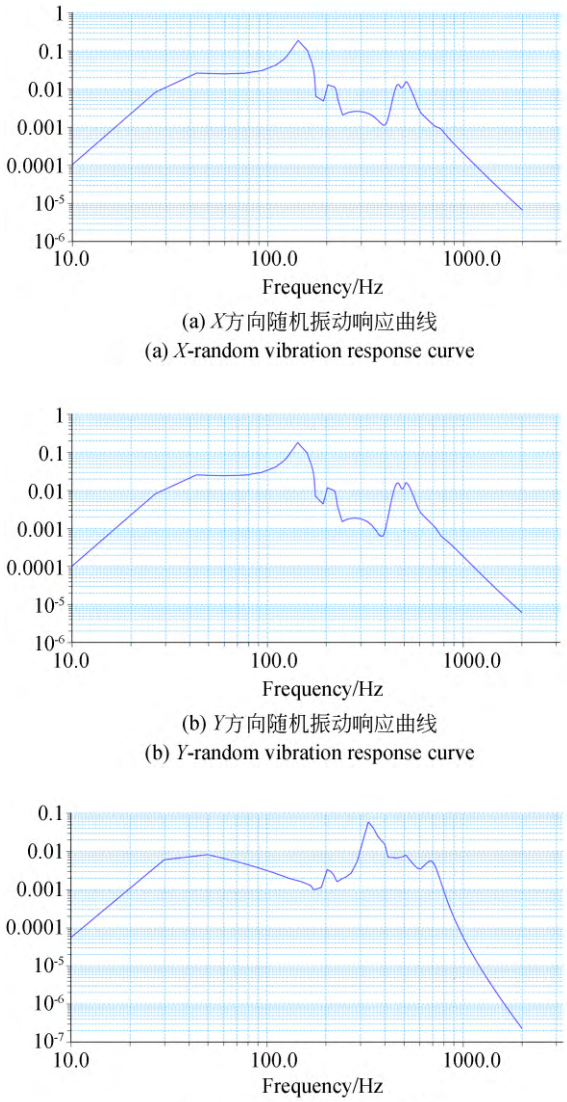
Fig. 9　First two vibration modes of space camera

表 3　加速度功率谱密度

Tab. 3　Acceleration power spectral density

频率/Hz	功率谱密度/(g^{-2}·Hz^{-1})
10	0.000 05
35	0.015
195	0.015
200	0.05
510	0.05
600	0.01
605	0.01
2000	0.001

图 10 为 MSC/Nastran 软件得到的分别在 X, Y 和 Z 三个方向的振动激励下金属橡胶减振系统空间相机次镜位置处的随机振动响应曲线，表 4 列出了金属橡胶减振系统空间相机和无减振系统空间相机分别在 X, Y 和 Z 三个方向的振动激励下次镜处节点的随机振动响应有限元仿真结果。



(a) X方向随机振动响应曲线
(a) X-random vibration response curve

(b) Y方向随机振动响应曲线
(b) Y-random vibration response curve

(c) Z方向随机振动响应曲线
(c) Z-random vibration response curve

图 10　随机振动响应结果

Fig. 10　Result of random vibration response

表 4　随机振动响应分析结果

Tab. 4　Analysis results of random vibration response

(g_{rms})

振动方向	安装金属橡胶减振器	未安装减振器
X	3.352	16.01
Y	3.300	15.65
Z	2.267	18.29

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图 10 和表 4 可知振源传来的随机振动响应被金属橡胶减振器衰减。与输入激励的总均方根值相比，次镜处 X，Y 和 Z 三个振动激励方向的加速度均方根值分别降低 33%，34% 和 54%，而未安装减振器的空间相机次镜处 X，Y 与 Z 三个振动激励方向的加速度响应分别放大 3.2，3.14 和 3.67 倍。

金属橡胶有非线性动力学特性，在振动过程中表现出滞后非线性，仅依靠有限元分析不能保证动力学分析结果准确，还需要进行试验验证。

5　试　验

5.1　振动试验方法

为提高光机结构稳定性，试验前对空间相机进行随机振动，以消除加工时光机结构和金属橡胶产生的内应力。利用振动试验台对两种系统空间相机进行正弦扫频试验和随机振动试验，一是采用无减振方式，用聚酰亚胺垫块代替金属橡胶，装配在空间相机与 Bipod 柔性支撑结构之间；二是采用金属橡胶减振方式。

为了测试减振系统的性能，对金属橡胶减振系统空间相机进行振动试验时，将 Bipod 柔性支撑结构固定在振动工装上。在空间相机底座 Bipod 柔性支撑结构附近安装两个测试点，分别在空间相机底座上方和 Bipod 柔性支撑结构底面，对比两个测试点的频率，并在空间相机远离减振系统的次镜柔性支撑支架位置处安装一个测试点以分析减振系统对次镜的影响，在空间相机工装处布置控制点，振动试验现场如图 11 所示，振动测试点如图 12 所示。

图 11　振动试验现场

Fig. 11　Working site of vibration test

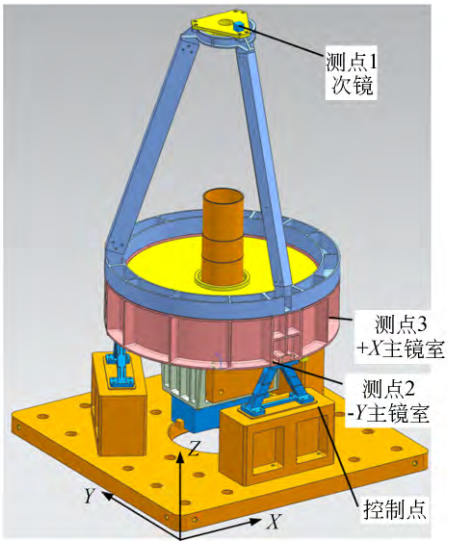


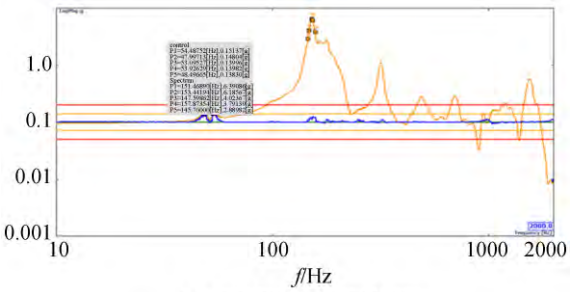
图 12　振动测试点

Fig. 12　Vibration test points

5.2　同轴两反空间相机正弦扫频振动试验

试验扫频范围为 10～2000 Hz，扫描率为 4 oct/min，得到无减振系统空间相机和金属橡胶减振系统空间相机的 X，Y 与 Z 三个方向的振动响应，上述两种系统的空间相机 X 方向扫频曲线如图 13 所示，对比两种系统空间相机 X，Y 与 Z 三个方向的一阶固有频率，如表 5 所示。

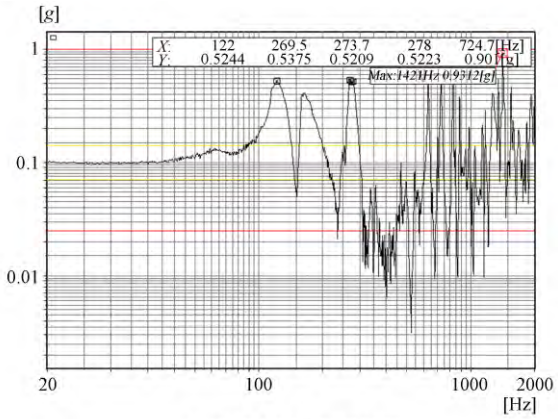
由表 5 可知，金属橡胶减振空间相机的一阶频率均大于 100 Hz，远离卫星固有频率，正弦扫频试验中空间相机没有发生共振，空间相机的结构可靠性高。



(a) 未安装金属橡胶减振器

(a) Installed without metal rubber vibration absorber

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(b) 安装金属橡胶减振器

(b) Installed with metal rubber vibration absorber

图 13　正弦扫频振动试验结果

Fig. 13　Curves of sinusoidal sweep vibration response

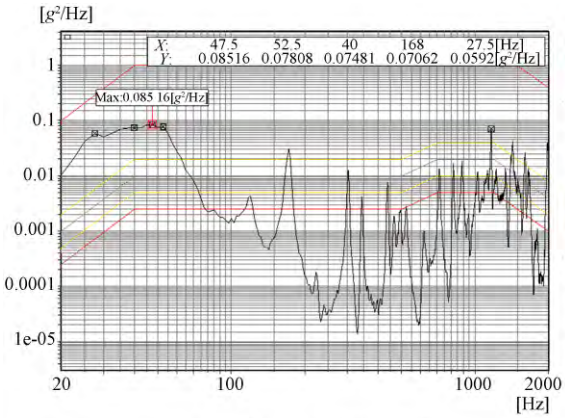
表 5　试验数据对比

Tab. 5　Comparison of test data　(Hz)

振动方向	安装金属橡胶减振器	未安装减振器
X	122	151.47
Y	123	152.65
Z	101	759.3

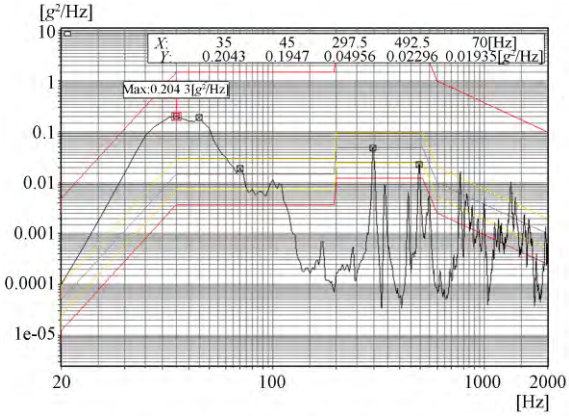
5.3　同轴两反空间相机随机振动试验

为进一步检验金属橡胶减振器的减振性能，对无减振系统空间相机和金属橡胶减振系统空间相机进行随机振动试验。随机振动试验采用模拟火箭发射时的功率谱密度，功率谱密度如表3所示，随机试验频率为10～2 000 Hz，总均方根植为4.98g_{rms}，在X，Y与Z三个方向分别施加振动激励，试验得到金属橡胶减振系统空间相机次



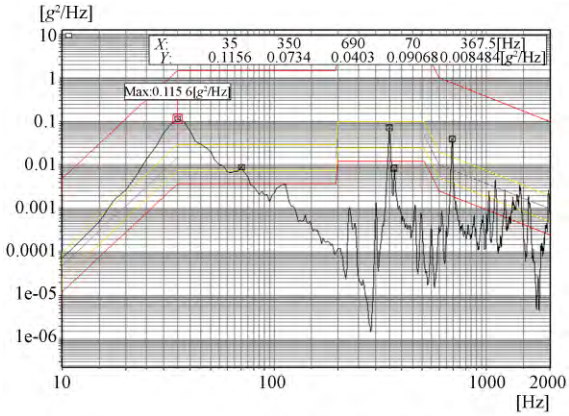
(a) X方向随机振动响应曲线

(a) Curve of X-random vibration response



(b) Y方向随机振动响应曲线

(b) Curve of Y-random vibration response



(c) Z方向随机振动响应曲线

(c) Curve of Z-random vibration response

图 14　随机振动试验结果

Fig. 14　Test results of random vibration

镜位置三个方向的随机振动响应试验结果，如图14所示。比较两种系统空间相机X，Y与Z三个方向次镜采样位置的随机振动响应试验结果，如表6所示。

从表6可得，与无减振空间相机的随机振动试验响应结果相比，金属橡胶减振系统空间相机X，Y与Z三个方向的加速度均方根值（Root Mean Square，RMS）的下降率分别为

表 6　随机振动响应试验结果

Tab. 6　Test results of random vibration response (g_{rms})

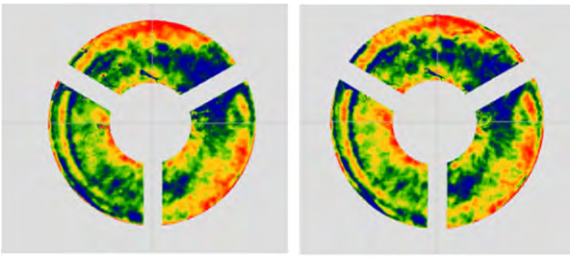
振动方向	安装金属橡胶减振器	未安装减振器
X	3.381	15.40
Y	2.884	14.00
Z	1.969	17.62

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

78%，79% 和 89%。

5.4　试验前后光学检测结果对比

振动导致像点与焦面相对位置发生变化，该变化会造成系统调制传递函数（Modulation Transfer Function，MTF）下降，从而影响像质[20]。在振动试验前后进行光学系统波像差检测，检测结果如图 15 所示。



(a) 试验前
(a) Before test

(b) 试验后
(b) After test

图 15　波像差检测结果

Fig. 15　Test results of wave aberration

振动试验前后波像差 RMS 值分别为 0.101λ 和 0.091λ，光学系统的 MTF 各个视场平均值为 0.2，系统成像质量满足使用要求。

5.5　结果与分析

正弦扫频振动试验与随机振动试验的响应量级均与有限元仿真分析值相差不大。金属橡胶能大幅降低振源传递来的振动量，在振动后光学系统波像差满足使用要求。

6　结　论

本文通过分析成像质量对振动的要求和金属橡胶的动力学得到金属橡胶刚度的取值范围，从这个范围和减振指标出发设计出金属橡胶的参数，根据空间相机支撑结构的特点和金属橡胶的减振系统设计出金属橡胶减振器。对空间相机进行有限元仿真和振动试验验证，试验结果表明，金属橡胶减振系统空间相机 X，Y 与 Z 三个方向的一阶固有频率均大于 100 Hz，满足结构设计要求；与输入激励总 RMS 值 $4.98g_{rms}$ 相比，金属橡胶减振系统空间相机 X，Y 与 Z 三个方向的随机振动响应加速度 RMS 分别降低 32%，42% 和 60%，减振效果显著。该金属橡胶减振器对同类型空间相机减振系统的设计具有重要应用价值。

参考文献：

[1]　毛国斌．某航天器姿态控制机组随机振动响应分析[J]．上海航天，2007，24(3)：54-57.
MAO G B. Random vibration response prediction of some spacecraft attitude-control thruster set[J]. *Aerospace Shanghai*, 2007, 24(3): 54-57. (in Chinese)

[2]　邹广平，张冰，唱忠良，等．弹簧-金属丝网橡胶组合减振器迟滞力学模型及实验研究[J]．力学学报，2018，50(5)：1125-1134.
ZOU G P, ZHANG B, CHANG ZH L, *et al.*. Hysteresis mechanical model and experimental study of spring metal-net rubber combination damper[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(5): 1125-1134. (in Chinese)

[3]　吴荣平，白鸿柏，路纯红．环形金属橡胶的径向压缩性能及力学模型分析[J]．机械科学与技术，2018，37(4)：635-640.
WU R P, BAI H B, LU CH H. Analysis of radial compressive properties and mechanical model for ring metal rubber[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(4): 635-640. (in Chinese)

[4]　罗玛，张大义，朱海雄，等．基于试验数据识别的金属橡胶有限元仿真方法[J]．航空发动机，2017，43(3)：56-61.
LUO M, ZHANG D Y, ZHU H X, *et al.*. Finite element simulation method of metal rubber based on tested parameter identification [J]. *Aeroengine*, 2017, 43(3): 56-61. (in Chinese)

[5]　金鸣，薛前光，田立强，等．金属橡胶减振器振动及冲击特性实验研究[J]．电子产品可靠性与环境试验，2012，30(2)：20-23.
JIN M, XUE Q G, TIAN L Q, *et al.*. Experimental study on vibration and shock characteristics of metal rubber damper[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2012, 30(2): 20-23. (in Chinese)

[6]　李中郢，卢正人．航天器用新型金属橡胶减振器[J]．上海航天，2005，22(5)：58-61.
LI ZH Y, LU ZH R. New all-metal damper for

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

spacecraft[J]. *Aerospace Shanghai*, 2005, 22(5): 58-61. (in Chinese)

[7] 岳涛, 林胜, 胡伟辉, 等. 一种高容量金属橡胶缓冲器研制[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 246-249.
YUE T, LIN SH, HU W H, *et al.*. Research and development of a high capacity metal rubber buffer [J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(3): 246-249. (in Chinese)

[8] 白鸿柏, 路纯红, 李冬伟, 等. 车用柴油机电控器金属橡胶隔振器设计与试验[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 155-157.
BAI H B, LU CH H, LI D W, *et al.*. Design and experimental investigation of metal rubber vibration isolators for the electric controller of vehicle's diesel [J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(5): 155-157. (in Chinese)

[9] 单林庆, 范柱子, 蒋庆华. 金属减振器在稳定平台中的应用与研究[J]. 科技资讯, 2012, 10(14): 87-88.
SHAN L Q, FAN ZH Z, JIANG Q H . Application and research of the metal damper in inertia platform [J]. *Science and Technology Information*, 2012,10(14): 87-88. (in Chinese)

[10] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 金属橡胶的研究及应用进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 103-108.
LI Y L, HE ZH B, BAI G, *et al.*. Advances in research and application of metal rubber[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(1): 103-108. (in Chinese)

[11] 宫晓春,赵薇,秦玉灵,等. 某型金属减振器的加速贮存验证试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020,6:1672-9242
GONG X CH, ZHAO W, QIN Y L, *et al.*. Research on accelerated storage validation test method of the certain type metal damper [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 6: 1672-9242. (in Chinese)

[12] YAN L T, WANG R R, LI H Y, *et al.*. Effect of different forming processes on the mechanical performance of metal rubber[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5/6/7/8): 2225-2231.

[13] 李玉龙, 白鸿柏, 何忠波, 等. 金属橡胶消极减振系统复杂响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 87-92.
LI Y L, BAI H B, HE ZH B, *et al.*. Complex response characteristics of a passive metal-rubber vibration isolation system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(4): 87-92. (in Chinese)

[14] YU H J, SUN X T, XU J, *et al.*. Transition sets analysis based parametrical design of nonlinear metal rubber isolator[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2017, 96: 93-105.

[15] 李宇明, 郑坚, 白鸿柏. 金属橡胶材料的动态力学模型[J]. 材料研究学报, 2003, 17(5): 499-504.
LI Y M, ZHENG J, BAI H B. Dynamic mechanics model of metal-rubber materials [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2003, 17(5): 499-504. (in Chinese)

[16] 王忠素, 吴清文, 郭权峰, 等. 空间光学载荷探测器组件抗冲击隔振设计[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(8): 2098-2105.
WANG ZH S, WU Q W, GUO Q F, *et al.*. Design of anti-shock vibration isolation for detector module of space optics load [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2098-2105. (in Chinese)

[17] 张针粒, 李世其, 朱文革, 等. 新型近等强度高阻尼航天载荷隔振器研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 1-6.
ZHANG ZH L, LI SH Q, ZHU W G, *et al.*. New quasi-equal strength and high damping isolator for spacecraft payload[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(11): 1-6. (in Chinese)

[18] 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. (in Chinese)

[19] 翟岩. 大型空间红外相机多反光学系统桁架杆框架的设计[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(11): 2923-2930.
ZHAI Y. Design of truss framework of multi-mirror optical system for large-scale space infrared camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11):

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2923-2930. (in Chinese)

[20] 李颐，刘伟，张晓辉，等. 机载光谱仪高模态主支撑结构优化[J]. 光学 精密工程，2019，27(8)：1783-1792.

LI Y, LIU W, ZHANG X H, *et al.*. Optimized design of high-mode main support structure for airborne spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1783-1792. (in Chinese)

作者简介：

宋文轩(1989－)，男，黑龙江黑河人，硕士研究生，2012年于东北林业大学获得学士学位，主要从事微纳光学遥感器光机结构集成优化设计的研究。E-mail：songwenxuanaa@163.com

通讯作者：

李宗轩(1986－)，男，河北衡水人，博士，硕士生导师，2009年于中国科学技术大学获得学士学位，2014年于中科院长春光机所获得博士学位，主要从事空间光学遥感载荷设计与集成分析方面的研究。E-mail：Lizongxuan@ciomp.ac.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net