

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007070

## 微纳型空间相机被动式隔振系统设计\*

张 刘<sup>1</sup>, 王泰雷<sup>1</sup>, 郑潇逸<sup>1</sup>, 赵 宇<sup>2</sup>, 张 帆<sup>1</sup>

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130012; 2. 上海航天控制技术研究所 上海 201100)

**摘 要:**为了改善某型号微纳型空间相机在发射阶段的振动环境并避免相机发生破坏,针对微纳型空间相机的任务需求设计了一种被动式隔振系统。首先,对相机隔振系统进行了建模,研究了隔振系统的响应特性。然后,通过对隔振系统振动的耦合模型进行分析计算,实现了振动解耦并与传统分布形式进行了对比分析。根据相机结构参数和隔振系统模型,对被动式隔振器进行了计算与设计,基频为 120 Hz 且质量仅占相机的 1.7%。最后,通过有限元分析方法对隔振系统进行了动力学仿真,并对相机本体和隔振系统分别进行了振动试验。试验结果表明,本研究被动式隔振系统对微纳型空间相机的正弦振动与随机振动响应隔振效率分别达到了 55% 和 81%,隔振系统的有效性和合理性得到了验证。

**关键词:**微纳型空间相机;被动式隔振;隔振系统;振动解耦;隔振器

中图分类号: TH113.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590

## Design of a passive vibration isolation system for micro-nano space camera

Zhang Liu<sup>1</sup>, Wang Tailei<sup>1</sup>, Zheng Xiaoyi<sup>1</sup>, Zhao Yu<sup>2</sup>, Zhang Fan<sup>1</sup>

(1. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201100, China)

**Abstract:**To improve the vibration environment of the micro-nano space camera during launch and avoid damage, a passive vibration isolation system is designed for the mission requirements of micro-nano space camera. Firstly, the camera vibration isolation system model is formulated and the response characteristics of the system is studied. Then, the vibration isolation system is decoupled and compared with the traditional method. Based on the camera parameters and the vibration isolation system, the passive rubber vibration isolator structure is calculated and designed. The fundamental frequency is 120 Hz and the mass fraction of camera is 1.7%. Finally, the dynamic simulation of the vibration isolation system is implemented by the finite element analysis method. The vibration tests of the space camera and the vibration isolation system are carried out. Experimental results show that the isolation efficiency of the passive vibration isolation system for the sinusoidal vibration and random vibration response of the micro-nano space camera can reach 55% and 81%, respectively. The validity and rationality of the vibration isolation system are verified.

**Keywords:** micro-nano space camera; passive isolation; vibration isolation system; vibration decoupling; vibration isolator

## 0 引 言

空间相机是一种具有极高精密度的对地观测光学成像仪器,也是光学遥感卫星的核心星载设备。微纳型空间相机更具有高度轻量化、短研制周期和低制造成本等特点<sup>[1-2]</sup>。一方面,对于搭载微纳型空间相机的轻小型卫星平台而言通常其结构刚度很大且阻尼很小,运载火箭

的振动载荷几乎全部传递到了星载设备上,因此在进入到预定工作轨道之前空间相机会受到来自运载火箭的复杂振动载荷影响,其力学环境极为严苛<sup>[3]</sup>。另一方面,其本身结构装配关系复杂、组件间定位精度高且结构轻量化程度高,因此对力学输入响应敏感。大量级的振动激励会使得相机的成像性能和工作可靠性大幅度下降。根据空间相机受到的振动激励特点,可分为低频正弦振动激励和高频随机振动激励<sup>[4]</sup>。其中,低频正弦激励由发动

收稿日期:2020-11-03 Received Date: 2020-11-03

\* 基金项目:科技部重点研发计划项目(2016YFB0501000,2016YFB0501002)、上海航天科技创新基金(SAST2018046)项目资助

机启停、跨音速和级间分离等工况引起,高频随机振动激励由发动机喷流噪声、整流罩气动噪声和火工装置等环境引起。根据美国航空航天局的一份研究报告中指出,近45%的航天器损坏是由于其所处的恶劣的振动环境造成的,这也成为了空间相机主要的研制约束之一<sup>[5]</sup>。

改善空间相机在发射过程中振动环境的有效方法之一,就是针对相机和卫星平台的应用场景和结构特性,并依据振动输入条件分析出空间相机的动力学特性,设计合理的隔振系统来减弱振动载荷以保证空间相机不会发生破坏。隔振系统由隔振器组成,以控制方式分类可分为被动式隔振器、主动式隔振器和主/被动式隔振器3种<sup>[6-7]</sup>。相对于其他类型的隔振器,被动式隔振器具有周期短、成本低、质量小、可靠性高及结构形式简单等特点,这些特点极佳得契合了微纳型空间相机的研制目标。美国CSA公司研制出了两种分别为单向和多向的被动式隔振器,且成功应用在了六种卫星型号中<sup>[8]</sup>。Chen等<sup>[9]</sup>为抑制微振动建立了一种振动隔离系统。刘世平等<sup>[10]</sup>研制出了一种梳妆形相机隔振结构,表现出了一定的隔振效果。李林等<sup>[11]</sup>以随机振动响应均方根值(root mean square, RMS)值为目标优选了一种空间相机柔性支撑结构。关新等<sup>[12]</sup>设计了一种利用阻尼器与弹簧的隔振器来隔绝空间相机所受到的低频振动。

为了解决某型号微纳型空间相机易于在振动激励下发生破坏且在发射过程中振动环境较为恶劣问题,本文在不改变现有空间相机-卫星平台的机械接口前提下,建立隔振系统模型及分布方式,结合橡胶隔振器力学特性和结构形式,设计出了一种适用于微纳型空间相机的被动式隔振系统。通过仿真分析和振动试验相结合的方法,验证了所设计的被动式隔振系统各项指标满足使用要求。

## 1 空间相机隔振系统动力学模型

### 1.1 强迫振动下隔振系统动力学模型

将空间相机单轴向简谐运动的隔振系统简化为图1所示的动力学模型。其中, $m$ 为空间相机质量, $m_f$ 为运载火箭及卫星平台即基础质量,相对于运载火箭及卫星平台而言微纳型空间相机的质量极小,即 $m \gg m_f$ 。

当来自基础的强迫振动为 $u = u_0 \sin \omega t$ 时,空间相机的运动微分方程为:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot (\dot{x} - \dot{u}) + k \cdot (x - u) = 0 \quad (1)$$

其中, $c$ 为隔振系统的阻尼系数; $k$ 为隔振系统的刚度; $x$ 为空间相机的振幅值。特别的,系统固有频率为 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ,临界阻尼系数为 $c_c = 2\sqrt{km}$ ,阻尼比为 $\zeta = c/c_c$ ,频率比为 $\lambda = \omega/\omega_n$ 。令初始振幅值为 $x_0$ ,初始相

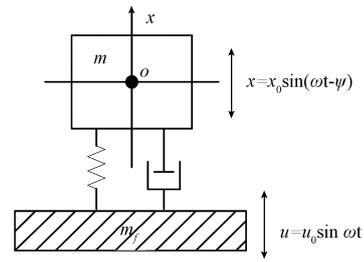


图1 相机强迫振动动力学模型

Fig. 1 Camera dynamics model of forced vibration

角为 $\psi$ ,设式(1)的特解为 $x = x_0 \sin(\omega t - \psi)$ 并带入式(1)可得,

$$x_0 = u_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + 2\zeta\lambda^2}{(1 - \zeta^2)^2 + 2\zeta\lambda^2}} = u_0 \cdot T_A \quad (2)$$

式中: $T_A$ 为系统振动传递率,令 $I = 1 - T_A$ 为隔振效率,它们反映出了系统的隔振效果是隔振系统设计成败的关键因素。

从图2中可以看出,不论阻尼比 $\zeta$ 取何值,只有当频率比 $\lambda > \sqrt{2}$ 时,振动传递率 $T_A$ 才小于1。为了达到隔振的目的,必须首先满足 $\lambda > \sqrt{2}$ 的条件,此时振动传递率 $T_A$ 随着频率比 $\lambda$ 的增大而减小,即隔振效果越来越好。但是当 $\lambda > 5$ 时 $I \rightarrow 1$ ,隔振效果改善不明显。

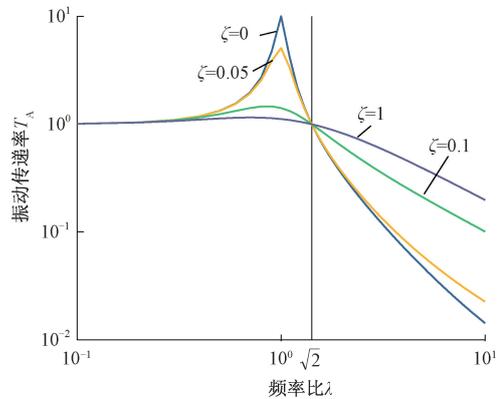


图2 振动传递率

Fig. 2 Vibration transmissibility

### 1.2 空间相机在随机激励下的响应

前文给出了空间相机隔振系统在基础强迫振动下的振动传递特性,但是在相机进入既定工作轨道前除了要受到简谐运动形式的强迫振动外,还要受到大量级的随机激励的力学环境影响。当基础受到一随机激励 $x(t)$ 时,设空间相机响应函数为 $y(t)$ ,则其运动方程为:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2y(t) = \omega_n^2x(t) \quad (3)$$

根据式(3)可以得到其频响特性为:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - \lambda^2 + 2j\zeta\lambda} \quad (4)$$

式中:  $j = \sqrt{-1}$ 。当输入  $x(t)$  为理想白噪声时,其功率谱密度  $S_x(\omega) = S_0$ ,因此可得输出  $y(t)$  的功率谱密度为:

$$S_y(\omega) = \frac{\omega_n^4 S_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 \omega_n^2} \quad (5)$$

式(5)的函数图像如图3所示,当输入功率谱密度  $S_x(\omega)$  为恒定值  $S_0$  的情况下,输出功率谱密度  $S_y(\omega)$  将具有窄带形状,其在  $\omega = (1 \pm \zeta)\omega_n$  附近能量形成陡峰, $\zeta$  值的增大会使能量在更宽的频带通过,但是会大幅度的减小峰值。

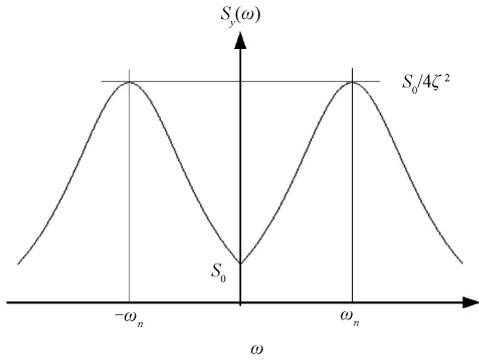


图3 功率谱密度

Fig. 3 Power spectral density

通常情况下,可以通过功率谱密度的 RMS 来评价被隔振设备对随机激励产生的响应情况,它对于本文空间相机隔振系统而言,与基础绝对位移的均方根值为:

$$g_{rms} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_y(\omega) d\omega = \frac{\pi S_0 \omega_n}{2\zeta} \quad (6)$$

由式(6)可知,空间相机对随机激励的响应  $g_{rms}$  值可以通过调整固有频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\zeta$  降低。

## 2 隔振系统几何分布方式研究

### 2.1 隔振器分布方式选择

通常情况下隔振系统由多个隔振器组成以提高隔振效果,因此要尽可能的避免多个隔振器引起的振动耦合的发生,在进行隔振系统设计时应应对隔振器的几何分布方式进行着重考虑。考虑到空间相机的结构形式和安装特点本文采用辐射式分布方式。如图4所示,隔振器均匀布置在同一圆平面上,本文取隔振器数量  $N = 12$ ,设相机重心位置为  $o$ ,隔振器的刚度方向  $p$  平行于轴向参考坐标轴  $ox$ ,刚度方向  $q$  与半径为  $R$  的圆周相切,刚度方向  $r$  为隔振器布置圆周径向。

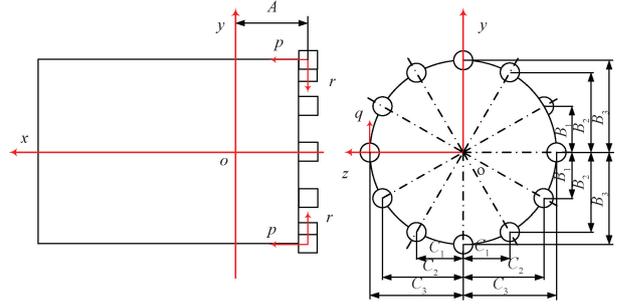


图4 隔振器布置方式

Fig. 4 Layout of the vibration isolator

### 2.2 振动的耦合与解耦

图4所示的隔振系统中,多自由度辐射式隔振系统的位能为:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{12} (k_{pi} \delta_{pi}^2 + k_{qi} \delta_{qi}^2 + k_{ri} \delta_{ri}^2) \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为隔振器在3个方向产生的平动和转动所引起的变形;  $\theta$ 、 $\phi$  和  $\psi$  为隔振器刚度与3个方向的夹角。结合图4,隔振器变形  $\delta_{pi}$ 、 $\delta_{qi}$  和  $\delta_{ri}$  的表达式为:

$$\begin{cases} \delta_{pi}^2 = \rho_a \cos \theta_{pi} + \rho_b \cos \phi_{pi} + \rho_c \cos \psi_{pi} \\ \delta_{qi}^2 = \rho_a \cos \theta_{qi} + \rho_b \cos \phi_{qi} + \rho_c \cos \psi_{qi} \\ \delta_{ri}^2 = \rho_a \cos \theta_{ri} + \rho_b \cos \phi_{ri} + \rho_c \cos \psi_{ri} \end{cases} \quad (8)$$

由此得到隔振器6个方向的刚度如下,

$$\begin{cases} k_{xxi} = k_{pi} \cos^2 \theta_{pi} + k_{qi} \cos^2 \theta_{qi} + k_{ri} \cos^2 \theta_{ri} \\ k_{yyi} = k_{pi} \cos^2 \phi_{pi} + k_{qi} \cos^2 \phi_{qi} + k_{ri} \cos^2 \phi_{ri} \\ k_{zzi} = k_{pi} \cos^2 \psi_{pi} + k_{qi} \cos^2 \psi_{qi} + k_{ri} \cos^2 \psi_{ri} \\ k_{xyi} = k_{pi} \cos \theta_{pi} \cos \phi_{pi} + k_{qi} \cos \theta_{qi} \cos \phi_{qi} + \\ k_{ri} \cos \theta_{ri} \cos \phi_{ri} \\ k_{yxi} = k_{pi} \cos \theta_{pi} \cos \phi_{pi} + k_{qi} \cos \theta_{qi} \cos \phi_{qi} + \\ k_{ri} \cos \theta_{ri} \cos \phi_{ri} \\ k_{zyi} = k_{pi} \cos \phi_{pi} \cos \psi_{pi} + k_{qi} \cos \phi_{qi} \cos \psi_{qi} + \\ k_{ri} \cos \phi_{ri} \cos \psi_{ri} \\ k_{zxi} = k_{pi} \cos \psi_{pi} \cos \theta_{pi} + k_{qi} \cos \psi_{qi} \cos \theta_{qi} + \\ k_{ri} \cos \psi_{ri} \cos \theta_{ri} \\ k_{xzi} = k_{pi} \cos \psi_{pi} \cos \theta_{pi} + k_{qi} \cos \psi_{qi} \cos \theta_{qi} + \\ k_{ri} \cos \psi_{ri} \cos \theta_{ri} \end{cases} \quad (9)$$

根据辐射式隔振器分布规律,式(9)中第  $i$  个 ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ) 隔振器与坐标轴夹角数值如表1所示。

另外,在辐射式分布的隔振系统中隔振器属于并联隔振系统,其某一方向的等效刚度  $k$  与单个隔振器在该方向的刚度  $k_i$  的关系为:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i \quad (10)$$

表1 隔振器分布参数

Table 1 Layout parameter of the vibration isolator

	$x$	$y$	$z$
$p$	$\theta_{pi} = 0$	$\varphi_{pi} = \frac{\pi}{2}$	$\psi_{pi} = \frac{\pi}{2}$
$q$	$\theta_{qi} = \frac{\pi}{2}$	$\varphi_{qi} = \frac{(i-1)\pi}{6}$	$\psi_{qi} = \frac{\pi}{2} - \frac{(i-1)\pi}{6}$
$r$	$\theta_{ri} = \frac{\pi}{2}$	$\varphi_{ri} = \frac{\pi}{2} + \frac{(i-1)\pi}{6}$	$\psi_{ri} = \frac{(i-1)\pi}{6}$

将式(8)的计算结果带入式(7),并引用式(10),再根据式(9)和表1中的分布参数,然后通过两次偏微分计算,再经过简化后可得到采用辐射式分布隔振器组成隔振系统的各向等效刚度表达式为:

$$\begin{cases} k_{xx} = \sum_{i=1}^{12} k_{pi}, k_{\alpha\alpha} = \sum_{i=1}^{12} k_{qi} R^2 \\ k_{yy} = k_{zz} = \sum_{i=1}^{12} (k_{qi} + k_{ri})/2 \\ k_{\beta\beta} = k_{\gamma\gamma} = \sum_{i=1}^{12} [(k_{qi} + k_{ri})A^2 + k_{pi}R^2]/2 \\ k_{\gamma\gamma} = k_{\gamma\gamma} = \sum_{i=1}^{12} (k_{qi} + k_{ri})A/2 \\ k_{\alpha\beta} = k_{\beta\alpha} = -\sum_{i=1}^{12} (k_{qi} + k_{ri})A/2 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)转化为隔振系统的刚度矩阵  $\mathbf{K}$  形式为,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 & 0 & 0 & k_{\gamma\gamma} \\ 0 & 0 & k_{zz} & 0 & k_{\alpha\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{\beta\alpha} & 0 & k_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & k_{\gamma\gamma} & 0 & 0 & 0 & k_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (12)$$

从式(12)中可以看出,隔振系统的刚度矩阵  $\mathbf{K}$  中只存在  $k_{\gamma\gamma}$  和  $k_{\alpha\beta}$  两个耦合刚度,其他方向的耦合刚度值均为0,因此易于控制振型。特别的,隔振系统的对于结构上较为敏感的3个平动方向独立振动引起的固有频率  $\omega_{nx}$ 、 $\omega_{ny}$  和  $\omega_{nz}$  得到了解耦。

同理,对于隔振系统分布的一般形式而言,它的刚度矩阵  $\mathbf{K}'$  为:

$$\mathbf{K}' = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 & 0 & k_{\alpha\beta} & k_{xy} \\ 0 & k_{yy} & 0 & k_{\gamma\alpha} & 0 & k_{\gamma\gamma} \\ 0 & 0 & k_{zz} & k_{z\alpha} & k_{\alpha\beta} & 0 \\ 0 & k_{\alpha\gamma} & k_{\alpha z} & k_{\alpha\alpha} & k_{\alpha\beta} & 0 \\ k_{\beta\alpha} & 0 & k_{\beta z} & k_{\beta\alpha} & k_{\beta\beta} & k_{\beta\gamma} \\ k_{\gamma\alpha} & k_{\gamma\gamma} & 0 & 0 & k_{\gamma\beta} & k_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在这种一般分布方式中:隔振器刚度周各自与参考坐标轴平行。由式(13)可知,一般分布的隔振系统具有16种耦合刚度,相较于本文采用的辐射式分布方式多出了12种耦合刚度,其所产生的耦合固有频率极不利于隔振器的设计且会使空间相机的力学环境进一步恶化。进一步的,当隔振器刚度方向与空间相机的轴向方向不一致时,存在夹角的隔振系统的一般分布刚度矩阵  $\mathbf{K}''$  为,

$$\mathbf{K}'' = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{xy} \\ 0 & k_{yy} & 0 & 0 & 0 & k_{\gamma\gamma} \\ 0 & 0 & k_{zz} & k_{z\alpha} & k_{z\beta} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\alpha z} & k_{\alpha\alpha} & k_{\alpha\beta} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\beta z} & k_{\beta\alpha} & k_{\beta\beta} & 0 \\ k_{\gamma\alpha} & k_{\gamma\gamma} & 0 & 0 & 0 & k_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)可知,当斜置隔振器时耦合刚度由16种缩减为10种,不仅没有根本解决耦合固有频率较多的问题,同时也增加了隔振器的设计和安装难度,因此不适用于微纳型的空间相机。

### 3 隔振系统设计与仿真研究

#### 3.1 隔振器结构

本文隔振系统结合微纳型空间相机的任务需求选择被动式隔振方案,其中橡胶隔振器具有质量轻、包络小、价格低和安装方式简便等特点<sup>[13]</sup>,多用于被动式隔振系统中。因此,根据前文建立的振动耦合模型,本文使用12个隔振器作为连接元件连接空间相机和卫星平台,保留原有相机-平台机械接口的前提下,采用前文设计的辐射式布置方式构成了一个隔振系统,如图5所示。

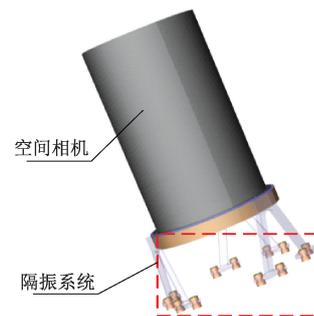


图5 被动式隔振系统设计

Fig. 5 Design of the passive vibration isolation system

如图6所示为单个隔振器的结构组成,橡胶隔振器由螺钉、限位垫片、隔振橡胶和限位套筒组成。单个隔振器组件质量为9.5g,且整个隔振系统质量仅占空间相机本体质量的1.7%,符合微纳遥感载荷使用要求。

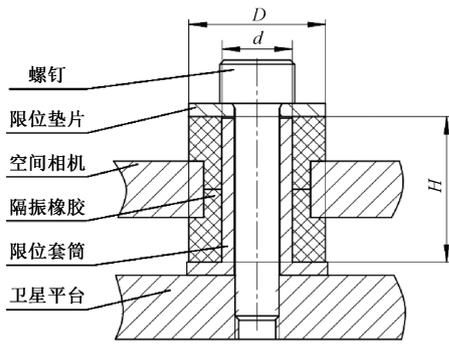


图6 橡胶隔振器外形结构

Fig. 6 Structure of the rubber vibration isolator

### 3.2 隔振系统参数设计

#### 1) 基础频率计算

建立无隔振系统的空间相机有限元模型并进行模态分析,忽略空间相机的局部模态后可以得到空间相机的轴向一阶频率为 419 Hz。根据前文建模分析可知,为了保证空间相机的指向精度和碰撞安全距离,隔振系统合理的频率比选择范围为  $2.5 < \lambda < 4.5$ ,本文取  $\lambda = 3.5$ ,则隔振系统轴向固有频率取  $f_{nx} = 120$  Hz。

#### 2) 弹性模量计算

隔振系统固有频率  $f_n$  计算公式为:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (15)$$

式中:代入  $f_{nx} = 120$  Hz 可得隔振系统轴向动态刚度  $k_{xx} = 3229$  kN/m,则根据式(10)单个橡胶隔振器的轴向动态刚度  $k_p = k_{xx}/12 = 270$  kN/m。进一步,环形橡胶隔振器轴向动态弹性模量  $E_{dx}$  表达式为:

$$E_{dx} = \frac{4k_p H}{\pi(D^2 - d^2)\gamma_x} \quad (16)$$

式中:  $\gamma_x$  为橡胶隔振器的轴向形状影响系数,其表达式为:

$$\gamma_x = 1.2 \left( 1 + \frac{(D-d)^2}{10H^2} \right) \quad (17)$$

根据式(15)、(16)和(17)可计算出单个橡胶减震器的轴向动态弹性模量  $E_{dq} = 390$  MPa。另外,一般取橡胶隔振器静态弹性模量  $E_s = E_d/(1.2 \sim 1.6)$ ,本文取下限值则单个橡胶隔振器的轴向静态弹性模量为  $E_{sq} = 330$  MPa。

#### 3) 阻尼比计算

阻尼比的作用是控制共振区和高频区的振幅,过高或过低的阻尼比都会对隔振系统的隔振效果产生负面影响。由图2可知当发生共振时空间相机的振动传递率达到峰值,因此为了避免在共振条件下空间相机发生破坏本文限制此时系统振动传递率  $T_A = 5$ ,通过式(2)计算得

到该条件下隔振系统得阻尼比  $\zeta = 0.1$ 。

### 3.3 隔振系统有限元仿真

为了验证隔振系统参数设计结果,有必要通过有限元分析方法进行仿真验证。一方面,有限元分析已经广泛的应用于光机结构的设计验证中<sup>[14-15]</sup>;另一方面,可以一定程度上确保隔振系统的成功研制。本文建立隔振系统有限元模型并与空间相机形成装配,通过模态分析和正弦频率响应分析的动力学分析方法对隔振系统设计结果进行验证,仿真结果如图7和8所示。

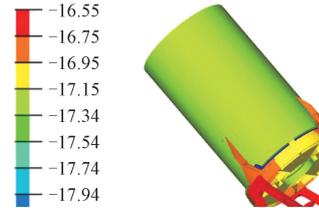


图7 模态分析

Fig. 7 Modal analysis

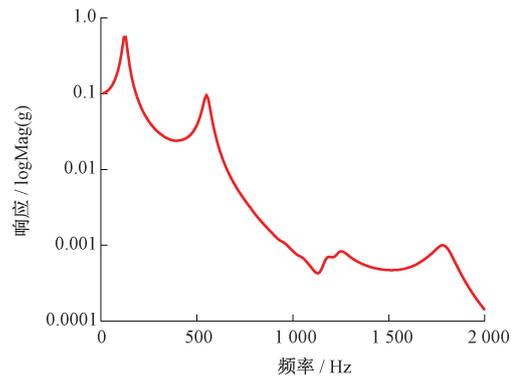


图8 正弦频率响应分析

Fig. 8 Sine-frequency response analysis

由图7可知,安装隔振系统后的空间相机轴向固有频率为 126 Hz,与理论计算之间的误差值为 4.6%,符合动力学有限元仿真误差要求。

由图8可知,对于量级为 0.1 g 的轴向振动输入,安装隔振系统后的空间相机主镜的共振峰值为 0.55 g,与理论计算之间的误差值仅为 10%。

## 4 隔振系统振动试验

本文利用振动试验台模拟空间相机在运载火箭发射过程中受到的振动激励,如图9所示为振动试验现场隔振器布置图。将加速度传感器布置在对振动激励较为敏感的主反射镜上,通过加速度传感器的输出信号考察空间相机的振动响应特性。试验时对相机进行轴向进行正弦振动试验,为了全面的考察相机本体和隔振系统的频

率与响应特性,正弦振动试验采用全频段扫频方式进行。如表 2 和 3 所示为本次振动试验的输入条件,从试验的安全性出发,本次正弦振动试验与随机振动试验在低量级条件下进行。

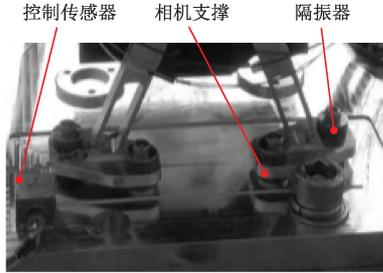


图 9 振动试验现场隔振器布置

Fig. 9 Layout of vibration isolator of vibration test field

表 2 正弦振动试验条件

Table 2 Condition of sine vibration test

频率范围/Hz	振动幅值/g	扫描率/(oct·min <sup>-1</sup> )
10~2 000	0.1	4

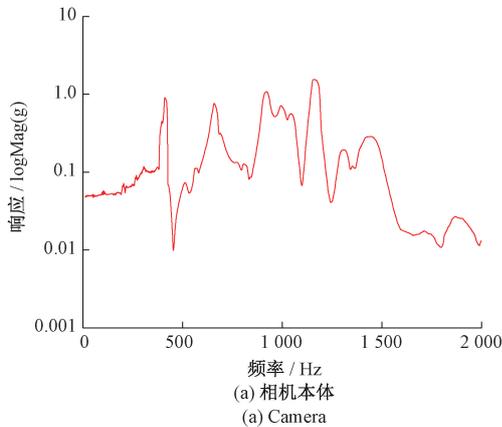
表 3 随机振动试验条件

Table 3 Condition of random vibration test

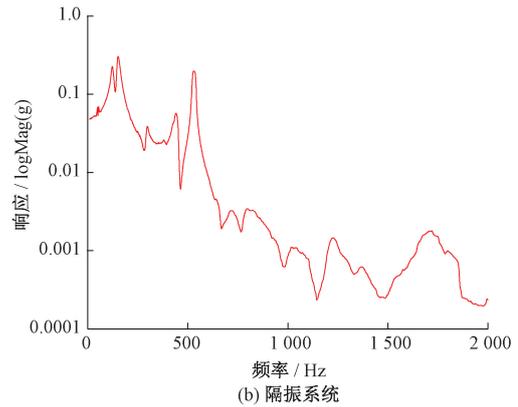
频率范围/Hz	功率谱密度	RMS/g
20~100	+3 dB/oct	
100~1 500	0.2 g <sup>2</sup> /Hz	13.6
1 500~2 000	-6.0 dB/oct	

#### 4.1 正弦振动试验

对相机本体与加装隔振系统的相机分别进行表 2 试验条件下的正弦振动试验,两种状态下相机对正弦振动激励的响应曲线如图 10 所示,振动试验结果如表 4 所示。



(a) 相机本体  
(a) Camera



(b) 隔振系统  
(b) Vibration isolation system

图 10 正弦振动试验数据

Fig. 10 Data of sine vibration test

表 4 正弦扫频振动试验结果

Table 4 Results of sine vibration test

	相机本体			隔振系统		
	理论值	仿真值	试验值	理论值	仿真值	试验值
频率/Hz	-	419	423	120	126	123
响应/g	-	-	1	0.5	0.55	0.48

一方面,相机本体基频与模态分析结果基本一致,分析结果能够用于隔振系统设计。另一方面,相机本体轴向正弦响应峰值为基础激励的 10 倍。加装隔振系统后,相机轴向固有频率降至 123 Hz 且理论值相差 3%,相机轴向正弦响应峰值降至 0.45 g,降幅达 55%。试验结果表明,隔振系统能够大幅度降低相机对正弦振动的响应幅值,达到了前文的设计要求,并且固有频率和响应幅值的理论值和仿真值接近试验值,验证了本文设计方法的正确性。

#### 4.2 随机振动试验

对相机本体与加装隔振系统的相机分别进行表 3 试验条件下的随机振动试验,两种状态下相机对随机振动激励的振动试验结果如表 5 和图 11 所示。

表 5 随机振动试验数据

Table 5 Results of random vibration test

	相机本体		隔振系统	
	试验值/g	放大倍数	试验值/g	放大倍数
响应	15.5	6.5	2.9	0.2

试验结果表明,加装隔振系统后相机轴向随机振动响应放大倍数大幅度下降,降幅达 81%,说明本研究隔振系统对随机振动激励具有较好的抑制效果,能够较大幅度的抑制随机振动激励中的高频振动振幅,从而保护相机不在火箭飞行阶段发生破坏。

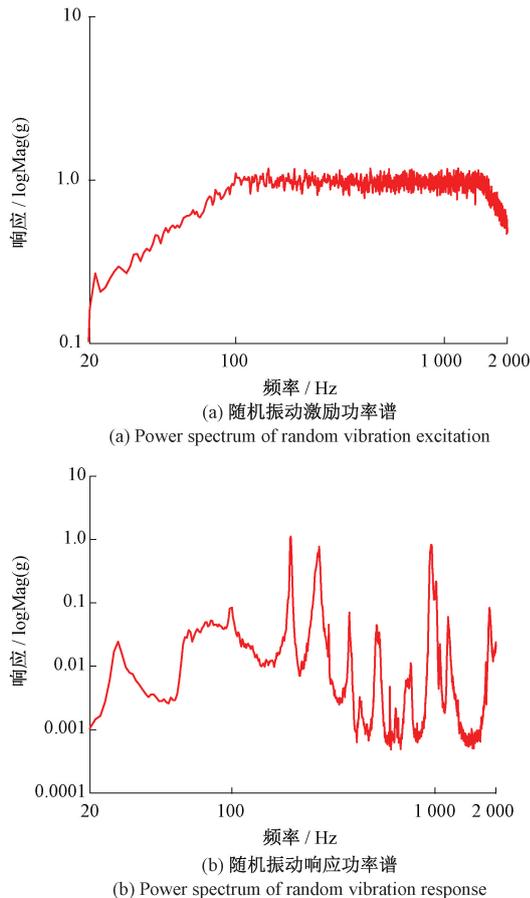


图 11 随机振动试验数据  
Fig. 11 Data of random vibration test

## 5 结 论

本文为了改善某型号微纳型空间相机在发射阶段所受运载火箭产生的振动环境以免相机发生破坏,并针对微纳型空间相机的任务需求设计了一种被动式隔振系统。建立了隔振系统动力学模型,研究了对相机隔振系统进行了建模,研究隔振系统响应特性并确定了隔振系统主要参数设计原则。通过对隔振系统振动的耦合情况进行分析计算,实现了振动解耦的同时也确定了隔振系统的几何分布方式并与传统方式进行了对比分析。结合相机结构参数和隔振系统模型,在不改变原有相机-卫星的机械接口前提下设计了隔振器系统且仅占整机质量的1.7%,然后完成了隔振系统详细参数设计,隔振系统理论轴向固有频率为120 Hz且振动传递率为5倍,二者的有限元仿真值分别为126 Hz和5.5倍。本文对相机本体和加装隔振两种状态下的空间相机进行了振动试验,通过与理论值和仿真值的对比,验证了隔振系统的设计与仿真的正确性。同时,试验结果表明本研究被动式隔

振系统能够较大程度减弱微纳型空间相机的正弦振动激励与随机振动激励响应,验证了隔振系统设计的合理性与有效性。

## 参考文献

- [1] 王泰雷,张雷,贾学志,等. 微纳遥感相机一体式超轻主支撑结构优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 1-15.  
WANG T L, ZHANG L, JIA X ZH, et al. Optimization design of the integrated ultra-light main supporting structure of micro-nano remote-sensing camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 1-15.
- [2] DENOYER K K, JOHNSON C D. Recent achievement in vibration isolation systems for space launch and on-orbit applications [C]. 52nd International Astronautical Congress, Paris: IAF, 2011, 4-11.
- [3] ZHANG Y, FANG B, CHEN Y. Vibration isolation performance evaluation of the discrete whole-spacecraft vibration isolation platform for flexible spacecrafts [J]. Meccanica, 2012, 47(5): 1185-1195.
- [4] 潘忠文,廉永正,曾耀祥,等. 运载火箭振动环境试验条件解析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(6): 29-32.  
PAN ZH W, LIAN Y ZH, ZENG Y X, et al. Elucidation of vibration environment test conditions for launch vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(6): 29-32.
- [5] LIU L K, ZHENG G T. Parameter analysis of PAF for whole-spacecraft vibration isolation [J]. Aerospace Science and Technology, 2007(6): 464-472.
- [6] 陈健,冯淑红,柳征勇,等. 航天器系统级减振/隔振应用研究及其进展[J]. 强度与环境, 2013(5): 37-42.  
CHEN J, FENG SH H, LIU ZH Y, et al. Development of application for planet system-level vibration reduction [J]. Structure & Environment Engineering, 2013(5): 37-42.
- [7] ITSURO K, SHIGEKI K, NAOKI H, et al. Design of dielectric elastomer actuators for vibration control at high frequencies [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 157-158: 849-857.
- [8] JOHNSON C D, WILKE P S. Protecting satellites from the dynamics of the launch environment [J]. Protecting Satellites from the Dynamics of the Launch Environment, 2006(3): 910.
- [9] CHEN S B, XUAN M, XIN J, et al. Design and experiment of dual micro-vibration isolation system for optical satellite flywheel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 179: 105592.

- [10] 刘世平,熊琦,李世其,等. 星载相机隔振器的结构优化和隔振性能分析[J]. 中国机械工程, 2017(13): 1523-1534.  
LIU SH P, XIONG Q, LI SH Q, et al. Structure optimization and isolating performance analysis of spaceborne camera isolator [J]. China Mechanical Engineering, 2017(13):1523-1534.
- [11] 李林,王栋,孔林,等. 随机振动响应下空间相机支撑结构设计及试验[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 208-212.  
LI L, WANG D, KONG L, et al. Design and tests for a space camera support structure under random vibration responses [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 208-212.
- [12] 关新,王光远,梁鲁,等. 空间相机低频隔振系统及试验验证[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(6): 53-61.  
GUAN X, WANG G Y, LIANG L, et al. Experimental demonstration of a low frequency isolation system for high resolution optical payload [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(6):53-61.
- [13] 何林涛,冷献春,任建峰. 航空小型轴套式橡胶隔振器的设计[J]. 机械与电子, 2014(5):20-23.  
HE L T, LENG X CH, REN J Y. Designing of the small sleeve rubber absorber for aviation [J]. Machinery & Electronics, 2014(5):20-23.
- [14] ZHANG L, WANG T L, ZHANG F, et al. Design and optimization of integrated flexure mounts for unloading lateral gravity of a lightweight mirror for space application [J]. Applied Optics, 2021(60):417-426.

- [15] 魏加立,曲慧东,王永宪,等. 空间 TOF 相机大视场光学镜头结构优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10):131-128.  
WEI J L, QU H D, WANG Y X, et al. Structure optimization design of large field of view optical lens for the space TOF camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10):131-128.

### 作者简介



张刘,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为吉林大学仪器科学与电气工程学院教授,主要研究方向为航天光学遥感技术。

E-mail: zhangliu@jlu.edu.cn

**Zhang Liu** received his Ph. D. degree from Harbin Institute of technology in 2007. He is currently a professor in the School of Instrumentation Science and Electrical Engineering at Jilin University. His main research interest is aerospace optical remote sensing technology.



张帆(通信作者),2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为吉林大学仪器科学与电气工程学院副教授,主要研究方向为空间光学遥感器设计与仿真。

E-mail: zhangfan1@jlu.edu.cn

**Zhang Fan** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2011. He is currently an associate professor in the School of Instrumentation Science and Electrical Engineering at Jilin University. His main research interests include design and simulation of space optical remote sensor.