

# 一类抗冲击载荷的新型橡胶减振器

李晓颜 黄加才 王建月 赵云峰 陈江涛

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 针对某惯测装置冲击环境恶劣的问题,采用理论分析和有限元模拟相结合的方法,研制了能同时兼顾缓冲和阻尼减振的减振器。试验表明,研制的新型橡胶减振器使惯性测量装置的冲击响应由 100 g 下降到 30.3 g,同时兼有阻尼减振效果。

**关键词** 惯测装置,有限元,阻尼,缓冲,减振器

## Design of One New Type Damper for Resisting Shock Load

Li Xiaoyan Huang Jiakai Wang Jianyue Zhao Yunfeng Chen Jiangtao

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Inertial measurement units often suffer from harsh shock environment. By theory analysis and FEM, a new type of damper was developed. While the new type of damper was installed, test results showed that the shock response descended from 100 g to 30.3 g, indicating the new damper is of excellent shock resistance ability and anti-vibration at the same time.

**Key words** IMU, FEM, Damping, Shock resistance, Damper

### 0 引言

装备发展的高速化和大功率化,带来了强烈的振动和高分贝的噪声冲击问题。宽频带随机激振引起结构的多共振效应,可以使电子器件失效,严重影响装备的可靠性。阻尼减振技术是抑制振动、冲击与噪声的有效途径,改善结构及仪器设备动态力学环境的有效手段,已广泛应用于火箭、导弹、卫星、飞机、舰船和车辆上的仪器仪表、导航设备和电子系统等<sup>[1-3]</sup>。

橡胶减振器作为阻尼减振技术的一种,具有以下优点:

(1)可设计性强,可通过调整橡胶配方组分来控制硬度,满足对各方向刚度和强度的要求;

(2)有适当的阻尼,有利于越过共振区,衰减高频振动和噪音;

(3)冲击刚度高于静刚度和动刚度,有利于冲击变形<sup>[4-6]</sup>。

某定位惯测装置,承受的冲击载荷峰值达到 100 g,作用时间为 5 ms,超出了其最大承受 50 g 冲击载荷的能力,严重影响了惯测装置的正常工作,迫切需要对其进行缓冲处理。本文采用理论分析和有限元

模拟相结合的方法,研制了一种能同时兼顾缓冲和减振的橡胶减振器,显著降低了惯性测量装置的冲击响应,有效改善了其动态力学环境,同时满足了减振要求。

### 1 减振器设计

#### 1.1 减振器结构设计

橡胶减振器结构设计应遵循以下几个原则:(1)尽可能保证三个方向的动态刚度一致;(2)为使减振器的阻尼足够大,应尽量让减振器的橡胶发生剪切变形;(3)保证减振器有尽可能大的线性范围。

传统橡胶减振器采用实心结构,在冲击载荷作用下,由于橡胶材料的非线性因素影响,减振器的刚度会随着冲击位移的增大而迅速增大,从而造成冲击响应过大;或者在大载荷冲击作用下,减振器金属件与安装基础发生碰撞而造成冲击响应过大。将实心结构改为空腔式结构,可以最大限度提高其冲击位移,从而能够储存更多的冲击能量,提高设备的抗冲击能力。

考虑到惯测装置安装空间的要求,本文设计了如图 1 所示的空腔式结构的橡胶减振器。

收稿日期:2012-11-05

作者简介:李晓颜,1978 年出生,硕士,主要从事阻尼减振技术研究。E-mail:lxyan78@163.com

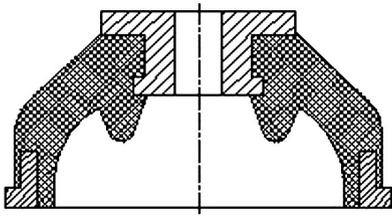


图1 减振器结构示意图

Fig. 1 Structure of the damper

## 1.2 减振器频率设计

理论上隔振和缓冲互相矛盾,理想的隔振器没有缓冲效果,同样理想的缓冲器没有隔振效果,理想隔振器和理想缓冲器是弹性体的两种极限使用状态。

减振器的工作原理是:将瞬态的、强烈的冲击能量先以能的形式最大限度地储存于隔离器(缓冲器)中,使缓冲器产生较大的变形,随后,以系统的固有振动周期缓慢地释放出来,作用于仪器设备上,达到缓冲作用。

在其他条件相同的情况下,减振器的频率越低其减振效果越好,因此可以通过理论分析得出减振器在满足缓冲性能下对应的频率,以此作为设计减振器阻尼橡胶材料的依据。

$$\ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\ddot{Y}_0}{1 - \lambda^2} (\sin \omega t - \lambda \sin \omega_n t) & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{\ddot{Y}_0 \lambda}{[\lambda^2 - 1]} \left[ (1 + \cos \frac{\pi}{\lambda}) \sin \omega_n t - (\sin \frac{\pi}{\lambda}) \cos \omega_n t \right] & t \geq \tau \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ ,  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。

系统响应可分为两个阶段:激励作用期间为第一阶段  $0 \leq t \leq \tau$ ,激励作用后为第二阶段  $t > \tau$ 。冲击响应的最大值所在的阶段应根据情况进行分析。

根据式(1)和式(2)可求出系统冲击响应的最大比值(冲击放大倍数),计算结果如下<sup>[9]</sup>:

(1)当  $0 < \tau f < 0.5$ ,即  $\omega > \omega_n$  时,系统最大响应幅值出现在第二阶段:

$$\eta_{\max} = \frac{4\tau f}{1 - 4(\tau f)^2} \cos(\pi \tau f) \quad (3)$$

式中,  $f = \frac{\omega_n}{2\pi}$ 。

(2)当  $\tau f > 0.5$ ,即  $\omega < \omega_n$  时,系统最大响应幅值出现在第一阶段:

$$\eta_{\max} = \frac{2\tau f}{2\tau f - 1} \sin\left(\frac{2\pi n}{1 + 2\tau f}\right) \quad (4)$$

式中,  $n = \frac{1}{4} + \frac{1}{2}\tau f$  四舍五入取整。

为便于计算,可将安装减振器的系统简化为一个单自由度模型,如图2所示。

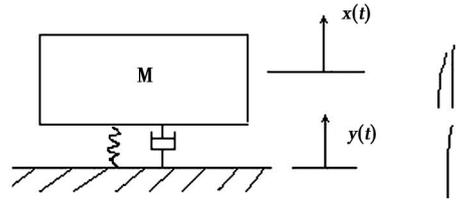


图2 单自由度模型

Fig. 2 One freedom system model

在冲击载荷作用下,结构将在很短的时间内达到最大响应,结构的阻尼还来不及吸收较多的能量,其对结构的最大响应影响不大<sup>[7]</sup>,因此一般采用无阻尼模型来研究冲击响应的最大峰值。

对图2所示的单自由度模型,在不考虑阻尼的情况下,受如式(1)所示半正弦冲击载荷的作用:

$$\ddot{y}(t) = \begin{cases} \ddot{Y}_0 \sin \omega t & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t \geq \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\omega = \frac{\pi}{\tau}$ 。结构的冲击响应为<sup>[8]</sup>:

(3)当  $\tau f = 0.5$  时,系统的最大响应幅值发生在冲击激励作用结束的瞬间:

$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

惯测装置总质量为 27 kg,要求冲击响应的放大倍数小于 0.5,冲击时间按 5 ms 计算,代入公式(3)可以得出,需要系统的固有频率小于 26 Hz。

## 2 有限元数值分析

系统固有频率应小于 26 Hz,减振器的频率越低其减振效果越好,但还应综合考虑减振器的允许变形空间要求以及系统稳定性要求,故系统频率不能太低,设定为  $(20 \pm 5)$  Hz。

采用 MSC. Nastran 有限元分析软件,对系统进行有限元数值分析<sup>[10]</sup>,以确定减振器橡胶的性能要求。

### 2.1 有限元模型的建立

考虑到六面体单元精度较高,故整个支架均采用六面体单元。对于惯测装置,刚度较大,故采用集中质量代替,边界条件为减振器的四个安装孔对应位置节点的三个平动自由度全部约束。整个模型共 22 465 个节点,19 940 个单元。减振器有限元模型见图 3,

整个系统的有限元模型见图4。

分析中金属材料的模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>,橡胶材料的性能参数则需要根据频率[(20±5) Hz]要求进行调整。

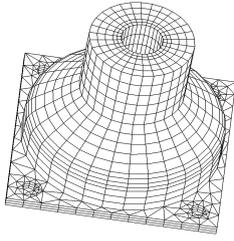


图3 减振器有限元模型

Fig.3 FEM model of the damper

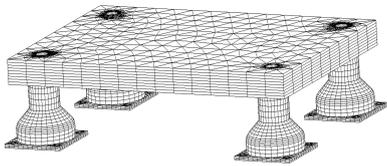


图4 惯测系统有限元模型

Fig.4 FEM model of inertial measurement system

## 2.2 复特征值分析结果

通过计算得出:橡胶材料的弹性模量为 4.5 MPa、阻尼系数为 0.3 时,系统的前三阶模态见表1。

表1 复特征值分析结果

Tab.1 Results of complex eigenvalue analysis

模态	频率/Hz	结构阻尼系数	振型
1	17.7	0.289	图5
2	18.6	0.289	图6
3	24.9	0.289	图7

由表1和图5~图7可知,系统的前三阶模态为沿三个方向的平动,频率为 17.7~24.9 Hz,满足系统的频率设计要求。且三阶模态的结构阻尼系数均为 0.289,阻尼系数较大,对系统的振动能起到良好的抑制作用。

Para: 0382 04C:End685  
Datum: Default\_A1:Mode 1 Freq = 17.713 Eigenvalue: Translational (NONLINEAR)

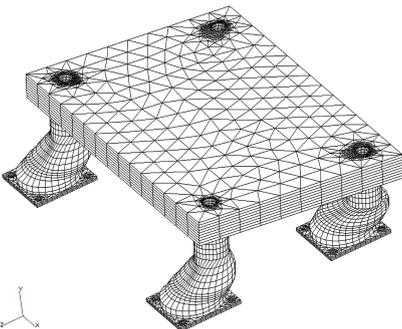


图5 复特征值分析一阶振型

Fig.5 First mode of complex eigenvalue analysis

Para: 0382 04C:End685  
Datum: Default\_A1:Mode 2 Freq = 18.584 Eigenvalue: Translational (NONLINEAR)

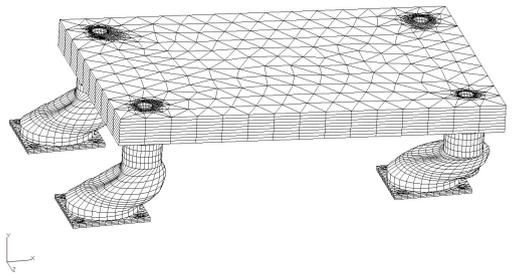


图6 复特征值分析二阶振型

Fig.6 Second mode of complex eigenvalue analysis

Para: 0382 04C:End685  
Datum: Default\_A1:Mode 3 Freq = 24.95 Eigenvalue: Translational (NONLINEAR)

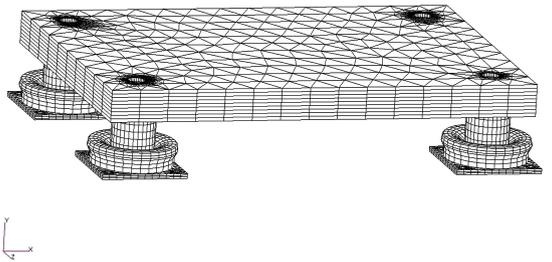


图7 复特征值分析三阶振型

Fig.7 Third mode of complex eigenvalue analysis

## 3 结果与分析

根据有限元分析对阻尼橡胶材料性能要求,从 ZN 系列阻尼材料中选择橡胶材料<sup>[2~3]</sup>,完成减振器制作,并进行冲击和振动试验,结果见图8~图10。

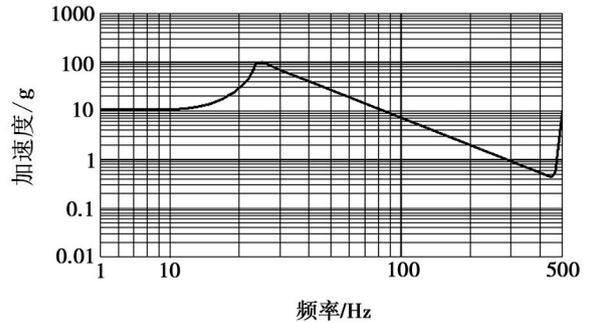


图8 正弦扫描试验结果

Fig.8 Result of sine-swept vibration test

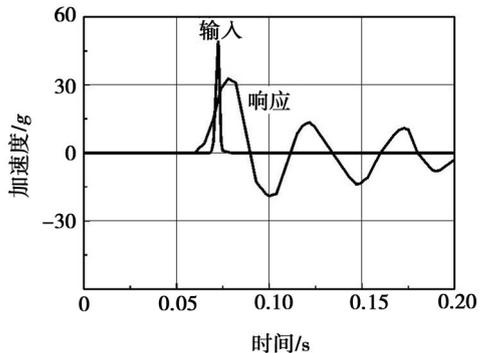


图9 60 g/5 ms 冲击试验加速度响应曲线

Fig.9 Acceleration response curve of shock test 60 g/5 ms

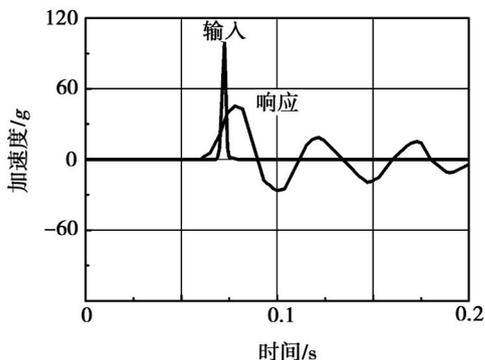


图 10 100 g/5 ms 冲击试验加速度响应曲线

Fig. 10 Acceleration response curve of shock test 100 g/5 ms

由图 9 ~ 图 10 可以看出,安装减振器后,系统在冲击峰值为 60 g、作用时间为 5 ms 冲击载荷作用下的最大响应值为 32.8 g;在冲击峰值为 100 g、作用时间为 5 ms 冲击载荷作用下的最大响应值为 45.5 g,极大地降低了系统的冲击响应,满足了惯测装置的使用环境要求。

#### 4 结论

(1) 采用空腔式阻尼橡胶减振器对某定位惯测装置进行处理,减振效果良好,缓冲效果优异,改善了惯测装置的动态工作环境。

(2) 理论分析结合有限元数值模拟方法,研制的

减振器满足设计要求,验证了计算模型和计算方法的有效性,为今后类似结构的缓冲设计提供指导。

#### 参考文献

- [1] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1983:88-133
- [2] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺,2009,39(5):1-5
- [3] 赵云峰. ZN 系列粘弹性阻尼材料的性能及应用[J]. 宇航材料工艺,2001(2):19-23
- [4] 林生义. 橡胶减振器的现状及发展趋势[J]. 中国橡胶,1999(16):4-10
- [5] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002
- [6] 王贵一. 橡胶减振器的设计原理和性能测试[J]. 特种橡胶制品,1998,19(6):42-47
- [7] 李方泽,刘馥清,王正. 工程振动测试与分析[M]. 北京:高等教育出版社,1992
- [8] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998
- [9] 莫平,程晓果,余盛强,等. 冲击响应谱在惯导减振缓冲设计中的应用[J]. 战术导弹控制技术,2008(1):60-63
- [10] 马爱军,周传月,王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005

(编辑 任涛)

## 复杂网格结构用高温高韧复合材料及软模成型技术 通过成果鉴定

航天材料及工艺研究所承担的“复杂网格结构用高温高韧复合材料及软模成型技术”于 2012 年 12 月顺利通过中国航天科技集团公司组织的成果鉴定。鉴定委员会认为该成果创新性强,具有自主知识产权,达到国际先进水平。

该课题首次采用柔性芳香胺作增韧剂,研制出具有优良工艺性的高温高韧热熔环氧树脂体系,解决了耐高温环氧树脂的增韧技术,在保持分子结构刚度的同时提高了环氧树脂的韧性。

利用具有自主知识产权的回转体类网格-蒙皮结构产品的软模成型技术,将以往空间回转体网格模具的加工转化为平面模具的加工,解决了网格结构成型金属模具加压不均匀的问题,使模具制造成本降低 25% 以上,模具装拆效率提高 50% 以上。

该成果已成功应用于多种型号的产品生产和研制中,有效地提高了复合材料结构件的性价比,对于飞行器的高性能、低成本、批量化生产具有重要意义。

· 罗焱 ·