

产品·设计

一种三向等刚度橡胶减振器的研制

赵苗苗,段宇星

(中国飞机强度研究所,陕西 西安 710065)

摘要:根据经典隔振理论、橡胶材料本构模型以及应用有限元仿真技术对某卫星惯性设备进行隔振分析,研制一种三向等刚度橡胶减振器。结果表明,橡胶减振器采用宽温域高阻尼硅橡胶材料与金属材料复合制备,在三向振动频率为 (75 ± 5) Hz以及冲击环境下,安装橡胶减振器设备的振动响应量值由 $19g$ (g 为重力加速度)降至 $7.7g$,冲击量值由 $8\ 000g$ 降至 $500g$,满足惯性设备的减振需求。

关键词:橡胶减振器;三向等刚度;振动;冲击;Mooney-Rivlin模型;有限元分析

中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2021)02-0114-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.02.0114



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

目前,高速化和大功率化的装备发展带来很多有害的振动和冲击。宽频随机振动和大量值冲击引起结构的共振效应可造成设备的电子配件结构破坏和疲劳失效,严重影响装备的可靠性,从而造成不可预估的结果。

隔振安装是抑制振动、冲击和噪声的有效途径。减振器能够将设备与机体隔离,作为抑制设备与机体耦合振动的有效配件,已被广泛应用于卫星、导弹、舰船、飞机和车辆上的仪器仪表、导航设备和电子系统等上。高阻尼硅橡胶材料因具有宽温域适用性、高弹性、优良耐候性和长寿命被广泛应用于航空、航天领域的设备减振降噪和密封等方面^[1-3]。

某卫星惯性设备在工作中需要承受 $19g$ (g 为重力加速度)的振动响应量值及 $8\ 000g$ 的冲击量值,超出了设备的负载能力,严重影响其正常使用。本工作基于经典振动理论和橡胶材料的超弹性本构关系,利用有限元分析技术,设计一款兼具缓冲和隔振的橡胶减振器,以解决该惯性设备的振动问题,满足设计要求。

1 隔振系统简化模型及橡胶材料本构模型

1.1 经典隔振理论

设备的隔振设计即通过在设备与基础激励之间设置柔性连接来衰减两者之间的能量传递和隔离两者之间的高频振动。其隔振系统模型可简化为单自由度隔振模型,如图1所示。其中, m 为设备质量, c 为隔振系统阻尼系数, k 为隔振系统弹性系数。

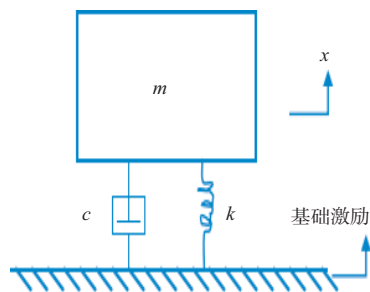


图1 单自由度隔振模型

Fig. 1 Single freedom degree vibration isolation model

隔振的运动方程^[2]为:

$$f(t) = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2)$$

作者简介:赵苗苗(1987—),女,陕西渭南人,中国飞机强度研究所工程师,硕士,主要从事高分子阻尼减振材料的应用研究工作。

E-mail: sxzhaomiaomiao@126.com

引用本文:赵苗苗,段宇星.一种三向等刚度橡胶减振器的研制[J].橡胶工业,2021,68(2):114-118.

Citation: ZHAO Miaomiao, DUAN Yuxing. Development of a Three-dimensional Equal Stiffness Rubber Shock Absorber[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(2): 114-118.

式中, $f(t)$ 为基础激励运动函数, F_0 为无隔振系统时直接作用于设备的力, t 为运动时间, ω 为隔振系统角频率。

隔振传递系数 (T_f) 等于隔振安装环境下作用于设备的力 (F_f) 与 F_0 的比值:

$$T_f = \frac{F_f}{F_0} = \left[\frac{1 + (2\xi\gamma)^2}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, ξ 为隔振系统阻尼比, γ 为隔振系统振动频率比, 可满足如下公式

$$\gamma = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (4)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (6)$$

式中, ω_0 为隔振系统固有角频率。

T_f 的最大值即为振动放大倍数 (Q), 当 ξ 比较小时, 有

$$Q = T_{\max} \approx \frac{1}{2\xi} \quad (7)$$

隔振系统的隔振效率 (I) 为

$$I = 100 \times (1 - T) \% \quad (8)$$

式中, T 为 F_f 在整个频段的均方根与 F_0 在整个频段的均方根比值。

当系统激励频率 (f) 大于系统隔振频率的 $\sqrt{2}$ 倍时具有隔振效率。系统隔振频率设计越低, 其静挠度越大, 需要的位移空间越大; 系统隔振频率较大时, 常达不到需求的隔振效率。一般系统隔振频率的设计需要考虑实际安装空间、减振器使用寿命和载荷环境, 工程设计中, f 一般为系统隔振频率的 2~5 倍^[3-4]。

1.2 橡胶材料本构模型

橡胶材料是一种各向同性的近似体积不可压缩的非线性材料, 有超弹性特性。橡胶材料在承受不同载荷时表现出非线性, 其力学行为与应变率有关。传统的弹性模量和泊松比已无法表征橡胶材料的本构关系。国内外学者在橡胶材料方面做了大量研究, 常见的应变势能模型有多项式模型、Ogden模型和Arruda-Boyce模型等, 在特殊条件下也可以使用简化的多项式模型, 比如Mooney-Rivlin模型、Neo-Hookean模型和Yeoh模型^[5-8]。橡胶材料的典型本构模型为多项式模型, 其应变能密度 (W) 表达式^[9]如下

$$W = \sum_{i+j=N} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{K=1}^N \frac{1}{d_K} (J - 1)^{2K} \quad (9)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为第一和第二变形张量不变量; N, C_{ij}, d_K 描述材料与体积变形无关的部分, 根据试验曲线确定, N, i, j, K 为自然数; J 为变形后与变形前的体积比, 假设材料体积不可压缩, 则 $J=1$ 。

1.2.1 Mooney-Rivlin模型

对于完全多项式, 如果 $N=1$, 即可得到Mooney-Rivlin模型, 该模型比较适合中小应变情况, 其表达式如下

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (10)$$

1.2.2 Neo-Hookean模型

对于减缩多项式, 如果 $N=1$, 即可得到Neo-Hookean模型, 其表达式如下

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (11)$$

1.2.3 Yeoh模型

对于减缩多项式, 若 $N=3$, 即可得到Yeoh模型, 其表达式如下

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (12)$$

采用Mooney-Rivlin模型、Neo-Hookean模型和Yeoh模型得出的典型橡胶材料应力-应变拟合曲线如图2所示^[10]。橡胶减振器使用中一般控制橡胶材料应变在 0~30%。从图2可以看出, Mooney-Rivlin模型可以准确模拟橡胶材料在小变形下的应力-应变曲线。

本工作采用中国飞机强度研究所生产的邵尔A型硬度为 30~70 度的宽温域高阻尼硅橡胶材料, 将应力-应变数据输入有限元软件, 经Mooney-

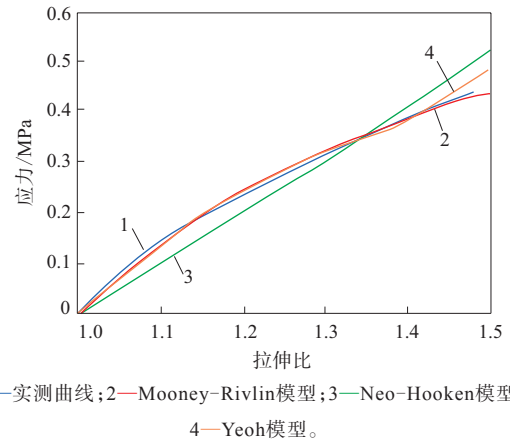


图2 3种模型得出的典型橡胶材料应力-应变拟合曲线
Fig. 2 Stress-strain fitting curves of typical rubber material simulated by three models

Rivlin模型拟合,根据拟合曲线斜率和截距求得硅橡胶材料常数: $C_{10}=-0.1$, $C_{01}=0.35$ 。

2 橡胶减振器设计

2.1 隔振要求

某卫星惯性设备重7 kg,为保证正常使用,设备振动响应量值应由19g降至10g以下,冲击响应量值应由8 000g降至500g以下。

2.2 隔振理论分析

根据经典隔振理论公式(1)~(8)进行计算,当系统隔振频率设计为80 Hz时,设备振动响应量值降至10g以下,冲击响应量值降至500g以下。系统隔振频率为80 Hz时,安装橡胶减振器设备的理论振动响应曲线如图3所示,理论冲击响应曲线如图4所示。

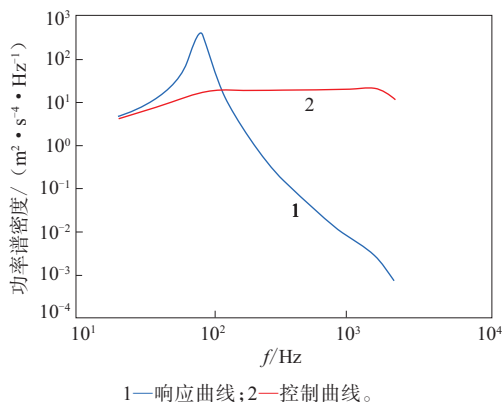
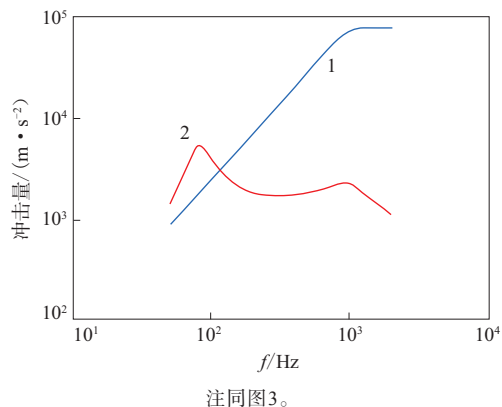


图3 安装橡胶减振器设备的理论振动响应曲线

Fig. 3 Theoretical vibration response curves of equipment with rubber shock absorber



注同图3。

图4 安装橡胶减振器设备的理论冲击响应曲线

Fig. 4 Theoretical shock response curves of equipment with rubber shock absorber

2.3 橡胶减振器有限元设计

采用商用有限元仿真软件,选用自研GZ系列橡胶减振器进行改型设计,以系统隔振频率、橡胶减振器变形量、橡胶减振器安装结构以及材料参数为约束条件求取最优解。选用Mooney-Rivlin模型为橡胶材料本构关系,金属材料模量为206 000 MPa,密度为 $7.8 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比为0.3;硅橡胶材料密度为 $1.2 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。经有限元仿真得到橡胶减振器的前3阶模态为3个方向的平动,如图5所示,其中X向振动频率为77.14 Hz,Y向振动频率为78.28 Hz,Z向振动频率为77.97 Hz。从图5可以看出,橡胶减振器的X,Y,Z 3个方向实现等刚度。

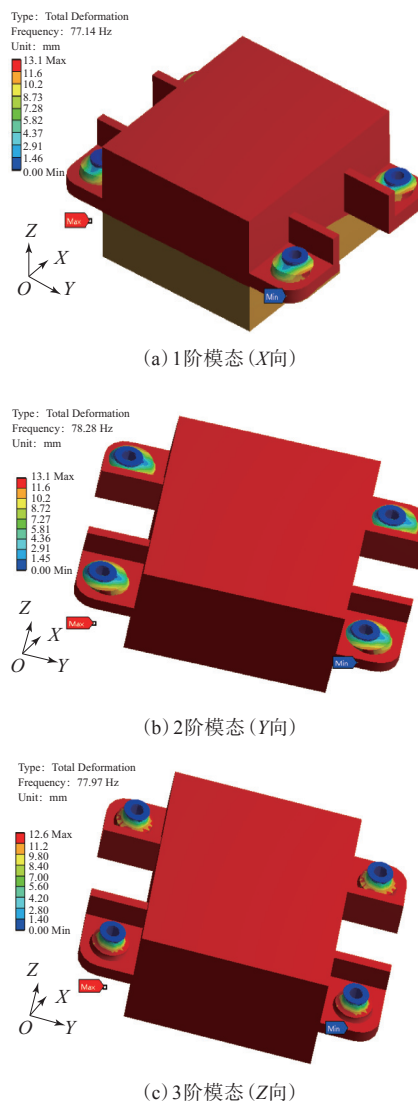
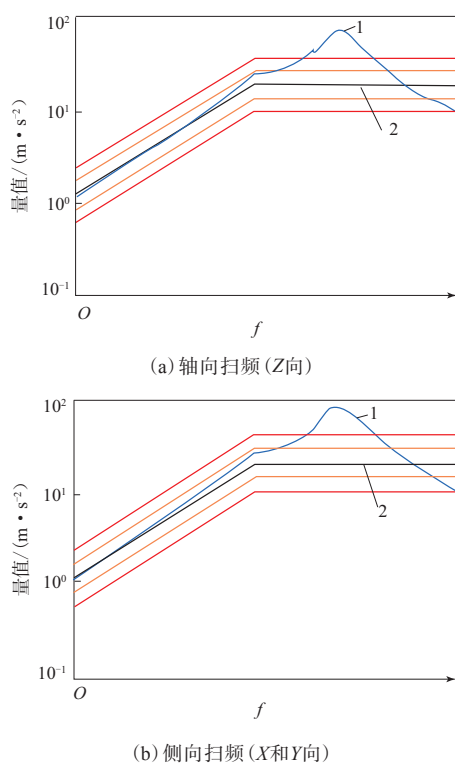


图5 橡胶减振器振型云图

Fig. 5 Vibration mode nephogram of rubber shock absorber

2.4 试验验证

依据仿真结果对橡胶减振器进行设计和加工,在振动台上测试橡胶减振器的振动冲击性能,实测试验曲线如图6和7所示。其中,红色线为报警线,黄色线为容差线;图6(a)和(b)中,峰值处 f 分别为80.4和77.2 Hz。



1—响应信号;2—实际控制信号。

图6 轴向和侧向扫频结果
Fig. 6 Axial and lateral sweep results

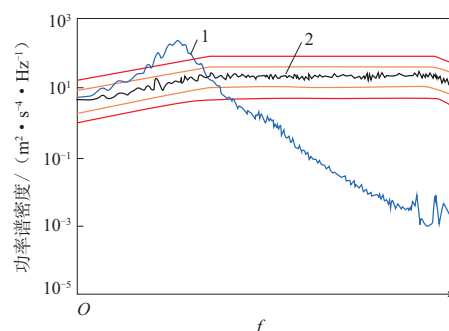
根据图6和7计算得出,安装橡胶减振器后,设备振动量值由19g降至7.7g,冲击量值由8 000g降至500g,极大地降低了系统的振动、冲击响应,满足惯性设备的使用环境要求。

3 结语

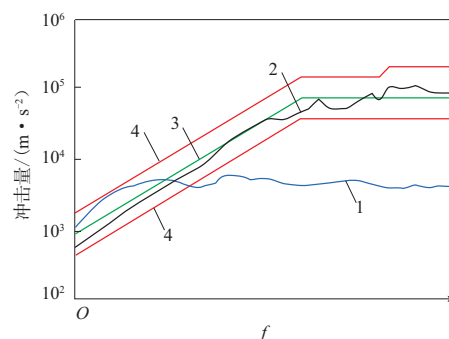
采用本研制橡胶减振器对某卫星惯性设备进行隔振缓冲处理,减振效果良好,缓冲效果优异,减少了该设备的振动冲击问题。

参考文献:

- [1] 常冠军. 粘弹性阻尼材料[M]. 北京:国防工业出版社,2012:10.
- [2] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.



(a) 振动测试



(b) 冲击响应

1—响应信号;2—实际控制信号;3—目标控制信号;4—中断限制。

图7 振动和冲击响应结果

Fig. 7 Vibration and shock response results

- [3] 张晓林,梁栋,赵树高. 不同硫化体系天然橡胶阻尼减震材料的硫化动力学及性能研究[J]. 橡胶工业,2018,65(8):845-849.
- [4] He B, Zhang C H, Ding A. Finite Element Analysis of Ionic Liquid Gel Soft Actuator[J]. Chinese Physics B,2017,26(12):126102.
- [5] 陈侃,沈景凤,余关仁,等. 轨道用橡胶扣件Mooney-Rivlin模型参数确定及压缩变形的有限元模拟[J]. 机械工程材料,2016,40(4):89-92.
- [6] 侯传伦,戚援,王慎,等. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的橡胶弹性车轮刚度特性分析[J]. 内燃机与配件,2018(11):38-40.
- [7] Zhao G F, Ma Y H, Li Y M, et al. Development of a Modified Mooney-Rivlin Constitutive Model for Rubber to Investigate the Effects of Aging and Marine Corrosion on Seismic Isolated Bearings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017,16(4):815-826.
- [8] 王锐,李世其,宋少云. 隔振橡胶本构建模研究[J]. 振动与冲击, 2007,16(1):77-79.
- [9] 刘文玺,周其斗. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 船舶力学,2014,18(4):433-440.
- [10] 段宇星,杨强,赵苗苗,等. 弹性体材料应变率相关力学行为模型[J]. 橡胶工业,2020,67(12):899-903.

收稿日期:2020-08-29

Development of a Three-dimensional Equal Stiffness Rubber Shock Absorber

ZHAO Miaomiao, DUAN Yuxing

(China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the classical vibration isolation theory, the constitutive model of rubber materials and the application of finite element simulation technology, the vibration isolation analysis of a satellite inertial equipment was carried out, and a three-dimensional equal stiffness rubber shock absorber was developed. The rubber shock absorber was made of a wide temperature range high damping silicone rubber and metal materials. In a three-dimensional vibration frequency of (75 ± 5) Hz and an impact environment, the vibration response value of the equipment with rubber shock absorber was reduced from $19g$ (g was the acceleration of gravity) to $7.7g$, and the impact value was reduced from $8\,000g$ to $500g$, which met the damping requirements of inertial equipment.

Key words: rubber shock absorber; three-dimensional equal stiffness; vibration; impact; Mooney-Rivlin model; finite element analysis

一种三元乙丙橡胶组合物 由天津中和胶业股份有限公司申请的专利(公布号 CN 111808375A, 公布日期 2020-10-23)“一种三元乙丙橡胶组合物”, 涉及的三元乙丙橡胶(EPDM)组合物配方为: EPDM 100, 天然橡胶 55~75, 丁腈橡胶 30~40, 碳酸钙 15~20, 炭黑 6.5~12, 白炭黑 30~40, 钛酸酯偶联剂 5~10, 氧化锌 5~10, 硬脂酸 0.5~1.5, 醋酸丁酯 5~10, 石蜡油 10~15, 植物油 15~28, 石蜡 0.02~2, 增塑剂 10~15, 软化剂 1.5~2, 聚乙二醇 1~3, 碳酸钠 0.5~3, 氧化镁 1~2, 抗氧化剂 0.1~1.5, 防老剂 0.5~2.5, 硫化剂DCP 3~8, 硫黄 0.3~1, 交联剂 2~4, 交联助剂 0.2~2.5, 促进剂 1~8。该EPDM组合物原料易得, 成本低廉, 成分环保, 具有良好的透气性能和韧性, 且具有拉伸强度和拉伸伸长率高以及压缩永久变形小的特点。

(本刊编辑部 赵敏)

一种防火减震硅橡胶及其制备方法 由贵州红阳机械有限责任公司和贵州大学申请的专利(公布号 CN 111793362A, 公布日期 2020-10-20)“一种防火减震硅橡胶及其制备方法”, 涉及

的硅橡胶配方为: 苯基硅橡胶 115~155, 蒙脱土改性材料 10~15, 赤泥/氧化钙/碳酸锂/氯化钾 7~13, 羟基磷灰石/蛇纹石粉 3~8, 硫化剂 1~2。该硅橡胶具有优良的防火阻燃性能、耐高低温性能、耐水性能、抗氧化性能、力学性能、结壳性能和抗软化性能, 不易产生明显裂缝, 遇到机械震动和水淋不发生开裂和剥落, 可应用于极端环境中。

(本刊编辑部 赵敏)

一种新型橡胶卫生防护地垫及其制备方法

由青岛丽安防护新材有限公司申请的专利(公布号 CN 111793253A, 公布日期 2020-10-20)“一种新型橡胶卫生防护地垫及其制备方法”, 涉及的防护地垫配方为: 天然橡胶 65~75, 丁苯橡胶 25~35, 白炭黑 40~50, 硫酸钡 35~45, 氧化锌 3~5, 硬脂酸 1~3, 载银抗菌剂 2~3, 环烷油 8~12, 防老剂 1~3, 无机颜料 2~5, 硫黄 1~3, 促进剂 2~4。该防护地垫采用耐腐蚀和杀菌消毒配方, 安全性能和耐热性能极高, 稳定性能极好, 产品在使用过程中不会因环境变化造成腐蚀和霉变现象。

(本刊编辑部 赵敏)