

文章编号 1004-924X(2017)09-2448-06

卫星遥感器微振动隔离用液体阻尼隔振器

刘兴天*, 孔祥森, 申军烽, 周徐斌

(上海卫星工程研究所 空间机热一体化技术实验室, 上海 201109)

摘要:针对卫星平台的微振动,提出了具有良好高频衰减及共振峰控制性能的松弛型液体阻尼隔振器。建立了松弛型液体阻尼隔振模型,从传递率的角度分析了提出的松弛型液体阻尼隔振器与传统隔振模型的区别。使用波纹管提供刚度及密封,基于小孔阻尼结构形式,设计了松弛型液体阻尼隔振器并求解了系统的阻尼因子。对所设计的隔振器进行了传递率测试,结果表明,松弛型液体阻尼隔振器在共振频率处能够提供大阻尼,将共振放大倍数控制在2倍以内;在高频隔振区能提供小阻尼,100 Hz衰减率超过95%,隔振性能优于传统隔振器。得到的结果和理论预测吻合较好。该项研究对松弛型液体阻尼隔振器的设计以及其在遥感器微振动隔离的应用上具有很强的指导作用。

关键词:松弛型液体阻尼隔振器;微振动隔离;力传递率;动刚度;卫星遥感器

中图分类号:TP73;V416.21 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172509.2448

Vibration isolator with relaxation type damping for micro-vibration isolation from satellite remote sensors

LIU Xing-tian*, KONG Xiang-sen, SHEN Jun-feng, ZHOU Xu-bin

(Laboratory of Space Mechanical and Thermal Integrative Technology,
Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: xtliu509@126.com

Abstract: A vibration isolator with relaxation type damping was proposed for micro-vibration isolation from satellite remote sensors to get better high frequency attenuation rate as well as the resonance control capacity. A vibration isolation model of the relaxation type viscous damping was established. The absolute transmissibility of the vibration isolator model with relaxation type damping was deduced and compared with that of a traditional Kevin vibration isolation model. The vibration isolator with relaxation type damping was designed by adopting a bellow as spring and an elongated hole to generate damping force. The damping coefficient was solved analytically for the designed structure. The transmissibility experiment for the vibration isolator was conducted. According to the experimental results, it shows that the vibration isolator with relaxation type damping provides a high damping force at the resonance frequency, which controls resonance amplification factor to be with two times. Moreover, it provides a low damping force at the higher frequency, which allows the vibration attenuation at 100 Hz to be over 95%. These results are identical to that of the theoretical prediction and demonstrate that the performance of proposed Vibration isolator is superior to that of traditional

收稿日期:2017-03-13;修订日期:2017-05-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51505294);上海市科委资助项目(No. 14XD1423000)

ones. The research on vibration isolator with relaxation type damping can be as a good instruction to design and apply such kind of vibration isolator in satellite remoter vibration isolation fields.

Key words: relaxation type damping isolator; micro-vibration isolation; force transmissibility; dynamic stiffness; satellite remote sensor

1 引 言

作为人类观察地球的眼睛,遥感卫星在国民生活和国防事业中发挥着不可或缺的作用。遥感卫星的重要指标之一是对地分辨率。随着遥感器的发展,光学系统口径进一步增大,获取高质量图像的积分时间也相应变长,故在成像过程中,遥感器对卫星平台的绝对和相对定位精度的要求非常高。然而,星载转动部件、驱动机构、大型柔性构件受进出阴影、冷热交变等因素影响引起的卫星在轨微振动会使平台发生高频和低频抖动,影响了卫星平台定位精度的提升,给卫星遥感器分辨率的提高带来了不利影响^[1-5]。因此,对平台进行微振动抑制以保障遥感器超静工作环境的重要环节^[6]。

微振动频率较宽,幅值较低,对其进行有效控制十分困难。近年来,空间微重力的隔振新方法层出不穷:裴亚鲁^[7]提出了网结构模型来满足航天器微振动高性能隔振的特殊要求;张尧^[8-9]使用被动隔振支杆组成隔振平台对金字塔形控制力矩陀螺组进行了微振动隔离,并评价了隔振装置对星体姿态稳定度的改善作用。宏观上来讲,隔振器的性能主要由刚度和阻尼决定。刚度控制着隔振系统的共振频率,而阻尼则控制着共振时的响应幅值。然而,阻尼的设计不能过大,因为较大的阻尼会在降低共振峰值的同时,降低隔振器在较高频的衰减效果。而阻尼过小则会引起较大的振峰,不利于隔振。

研究表明,松弛型液体阻尼隔振器能够克服以上矛盾,具有共振大阻尼,高频小阻尼的特性,其隔振效果较传统隔振器提高很多,因而近年来受到广泛关注^[10-12]。

实际上,被动隔振的理论已经相当成熟,目前的研究热点主要集中在如何提高特定的隔振性能并进行工程应用。本文探讨了一种能够兼顾共振

峰控制和高频衰减效果的松弛型液体阻尼隔振器,求解了系统的传递率,并分析了设计此类隔振器的设计要点。使用小孔阻尼和波纹管设计了松弛型液体阻尼隔振器并进行了实验研究。传递率实验表明,松弛型液体阻尼隔振器可以同时实现共振峰和低频振动的良好控制。本文的研究对卫星传感器微振动控制具有实际意义。

2 液体阻尼隔振器

2.1 卫星平台振源特性

飞轮是卫星姿态控制的主要执行部件,其转速高且转速不断变化,是卫星上的主要振源。实测的某型号飞轮激励源数据如图 1 所示。从图中可以看出,卫星飞轮的频率主要集中在中高频,从 10 Hz 开始至 200 Hz,频域较宽。值得一提的是,通常遥感器以及卫星平台主要的振动频率也在 100 Hz 左右,很容易和飞轮频率出现共振。因此,在进行微振动被动隔振设计时,要充分考虑到隔振系统的共振峰控制以及高频衰减特性。若选择较大的阻尼系数,则会损失高频衰减效果,反之则容易使共振放大倍数过高。

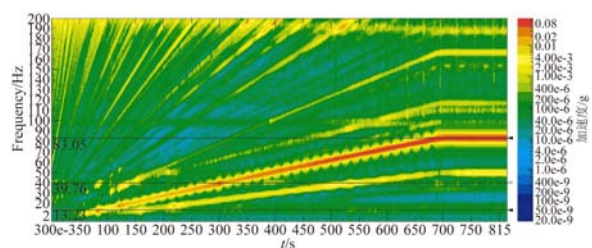


图 1 某卫星飞轮激励振源特性

Fig. 1 Vibration characteristic of a reaction wheel assembly

2.2 液体阻尼隔振器模型

经典的振动力学中,将隔振器简化为如图 2 所示的刚度和阻尼的 Kevin 模型^[13],在此基础上,将阻尼单元串联刚度为 K_2 的弹簧便组成了松弛型液体阻尼隔振单元模型。

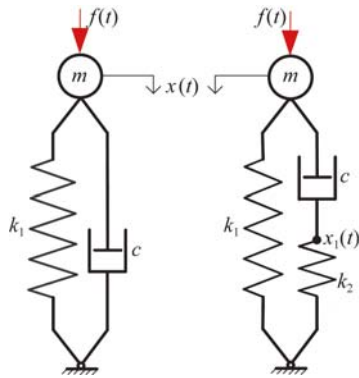


图 2 Kevin 简化隔振模型(左图)和液体阻尼简化隔振模型(右图)

Fig. 2 Kevin vibration isolation model (left) and model with relaxation type damping (right)

在受迫力激励下, Kevin 隔振模型的运动方程可以写为:

$$m\ddot{x} + k_1 x(t) + c\dot{x}(t) = F(t). \quad (1)$$

而液体阻尼隔振模型的动力学方程可用下式表示:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + k_1 x(t) + c[\dot{x}(t) - \dot{x}_1(t)] = F(t) \\ c[\dot{x}(t) - \dot{x}_1(t)] - k_2 x_1(t) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: m 为被隔振质量, $x(t)$ 为质量的绝对位移, $x_1(t)$ 为定义的阻尼器和弹簧连接处的位移, $F(t)$ 为施加在质量上的受迫激励力, c 为线性黏弹性阻尼因子。

对于上述系统, 感兴趣的主要是传递到基础的力 $F_T(t)$, 对于图 2 中的左图和右图, 传递至基础的力分别为:

$$F_{T1}(t) = k_1 x(t) + c\dot{x}(t) \quad (3)$$

和

$$F_{T2}(t) = k_1 x(t) + k_2 x_1(t). \quad (4)$$

2.3 隔振系统传递特性

这里使用力传递率表示隔振器的隔振性能。对于图 2 中的隔振器, 其传递率定义为传递至基础的力的幅值和激励力幅值之比。分别对式(2)、式(4)使用拉氏变化求解力传递率, 式(2)变为:

$$\begin{cases} (ms^2 + k + cs)X(s) - csX_1(s) = F(s) \\ csX(s) - (cs + k_2)X_1(s) = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)可以求得松弛型液体阻尼隔振器的传递率为:

$$G(s) = \frac{(k_1 + k_2)cs + k_1 k_2}{mcs^3 + k_2 ms^2 + (k_1 + k_2)cs + k_1 k_2}. \quad (6)$$

令上式中的 $s = j\omega$ 。可以得到松弛型液体阻

尼隔振系统的力传递率:

$$T_r = \sqrt{\left[\frac{1 + 4[(1+N)/N]^2 \zeta^2 \Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + (4/N^2) \zeta^2 \Omega^2 (N + 1 - \Omega^2)^2} \right]}, \quad (7)$$

其中: $N = k_2/k_1$ 为定义的松弛刚度和支撑刚度的刚度比; $\Omega = \omega/\omega_n$ 为激励频率与系统固有频率之比; $\zeta = c/(2\sqrt{mk_1})$ 为定义的系统阻尼比。对于 Kevin 系统, 其力传递率为:

$$T_K = \left[\frac{1 + 4\zeta^2 \Omega^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 4\zeta^2 \Omega^2} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

不同于 Kevin 隔振模型, 松弛型液体阻尼隔振器的传递率不仅受到阻尼因子的影响, 还受到松弛刚度 k_2 的影响, 对于给定的阻尼比 $\zeta = 0.2$, 不同刚度比对松弛型液体阻尼隔振系统传递率的影响如图 3 所示。从图中可以看出, 若 k_2 太小, 阻尼力无法在隔振两端传递, 则阻尼起不到效果, 而随着 k_2 的增大, 在共振峰时松弛型液体阻尼隔振器和 Kevin 隔振模型共振放大比一致, 但是其高频传递率更加陡峭, 对高频振动的衰减效果更好。实际上, 设刚度比固定, 对于松弛型液体阻尼隔振器, 最好的传递曲线表达式为:

$$T_{r, opt} = 1 + \frac{2}{N}. \quad (9)$$

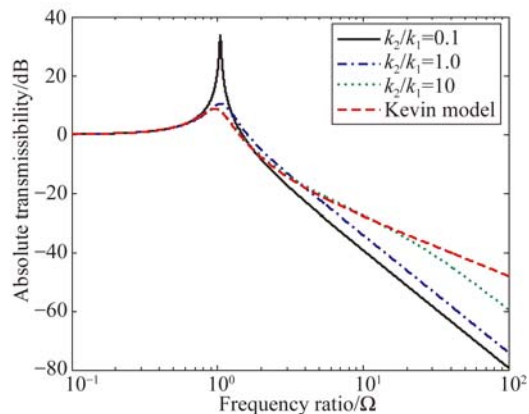


图 3 刚度比对松弛型液体阻尼隔振器传递率的影响曲线: $\zeta = 0.2$

Fig. 3 Effect of stiffness ratio on transmissibility of vibration isolator with relaxation type damping for $\zeta = 0.2$

3 松弛型液体阻尼隔振器实验研究

3.1 松弛型液体阻尼隔振器设计

将液体密封在焊接波纹管腔体中, 液体来回

流过挡板上的小孔产生阻尼,对应于图 2(右)中的阻尼因子 c ,焊接波纹管的刚度为 k_1 ,最外面的焊接波纹管其刚度为 k_2 ,起到的作用主要是在高频,避免了阻尼无法流动而产生刚度硬化,所设计的松弛型液体阻尼隔振器原理如图 4 所示。

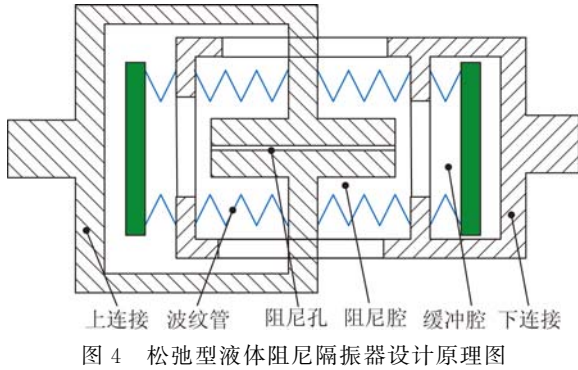


Fig. 4 Design diagram of vibration isolator with relaxation type damping

两个腔体内的流体在阻尼孔来回流动从而产生阻尼力如图 5。其中,焊接波纹管的公称直径为 D ,阻尼通道的直径为 d ,其长度用 L 表示,液体的运动黏度为 μ 。当隔振单元的位移为 x 时,可以计算得出通过流体的流量以及小孔两段的压力差值。这个压差和阻尼小孔的面积相乘,可以得到阻尼力。阻尼因子和阻尼力成正比的,因此,阻尼因子 C 为:

$$C = \frac{8\pi D^4 L \mu}{d^4}$$

根据隔振需求,隔振器的刚度设计为: $k_1 = 20 \text{ N/mm}$, $k_2 = 100 \text{ N/mm}$ 。阻尼孔的长度有 3 个规格,可以提供的阻尼因子分别为: $c_1 = 400 \text{ Nm/s}$, $c_2 = 700 \text{ Nm/s}$, $c_3 = 3\,000 \text{ Nm/s}$ 。

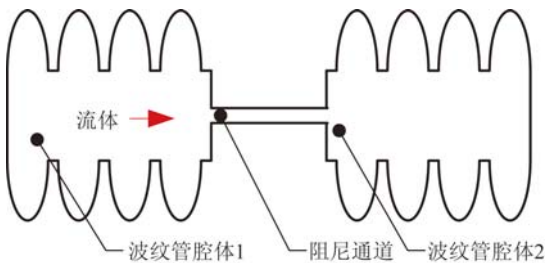


Fig. 5 Viscous damping model with elongated hole

3.2 传递率试验

使用激振器输出正弦慢扫频信号,扫频的加速度值依据某型号整星微振动试验最大包络量级确

定。采用加速度传感器测量隔振器输入端和输出端的加速度值进行传递率的评价。试验现场如图 6 所示,图中,质量块和阻尼器使用悬吊绳水平布置。

对所设计的 3 种阻尼的隔振器均进行了传递率测试,所得曲线如图 7 所示,根据式(7)计算出的理论传递曲线也画在图中,如实线所示。从图中可以看出,试验值和理论值吻合较好,从放大峰值来看,阻尼因子适中才能获取最小共振放大峰值,阻尼因子不同会使得共振峰出现的频率偏移,阻尼因子增大,系统的共振峰向高频偏移。图中, c_1 、 c_2 、 c_3 分别对应的共振峰放大峰值为:6,8 和 16 Hz。实际上,松弛型液体阻尼隔振器的共振峰出现频率应在 $[\sqrt{k_1/m}, \sqrt{(k_1+k_2)/m}]$ 之间。

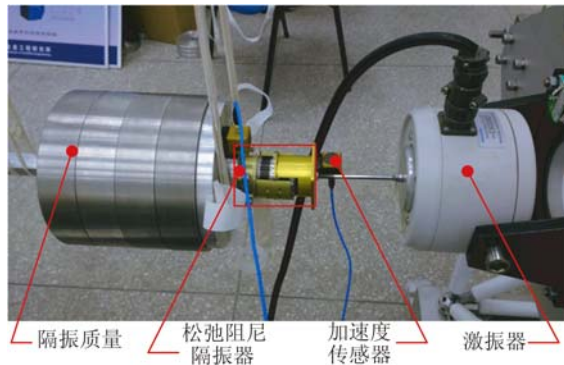


Fig. 6 Picture of the transmissibility experiment of isolator with relaxation type damping

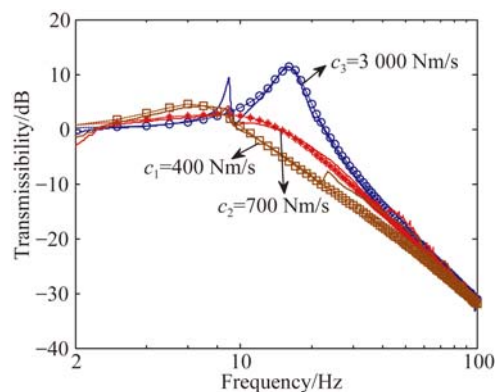


Fig. 7 Experimental and theoretical transmissibility results of vibration isolator with relaxation type damping for different viscous damping coefficients

相对于 Kevin 隔振模型,若设计得当,松弛型

液体阻尼隔振模型具有更好的隔振效果。为了进行对比,选择共振峰最小的松弛型液体阻尼隔振器,并设 Kevin 隔振模型和松弛型液体阻尼隔振模型的高频衰减效果一致。图 8 中给出了二者的传递率,对比可知,若高频衰减速率一致,则 Kevin 模型的共振放大倍数要大于 15,而此时,松弛型液体阻尼隔振器的放大倍数则在 2 以下。

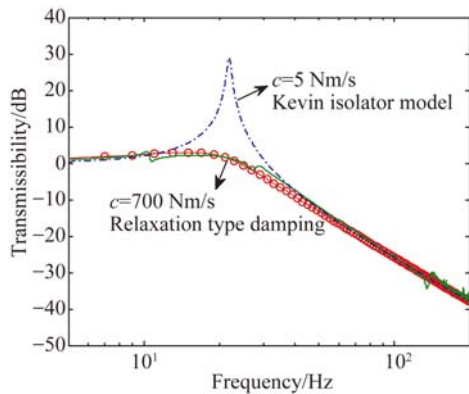


图 8 松弛型液体阻尼隔振器传递率和 Kevin 隔振模型传递率的比较

Fig. 8 Comparison of transmissibilities between vibration isolator with relaxation type damping and Kevin isolator model

参考文献:

- [1] 关新. 高分辨率遥感卫星隔振与姿态控制一体化设计[D]. 北京:清华大学, 2012.
GUAN X. *Integrated design of vibration isolation and attitude control for high resolution remote sensing satellites* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [2] 孙阳. 卫星平台在轨颤振对高分辨率传感器成像质量影响的研究[D]. 长春:中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
SUN Y. *On-orbit platform jitter effect on image quality of high-resolution remote sensor* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [3] 邓勤. 卫星颤振对遥感成像质量影响研究及实验验证[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
DENG Q. *Research of motion estimation algorithm based on digital* [D]. Hangzhou: Zhejiang Univer-

共振时提供大阻尼,高频时通过松弛弹簧缓冲阻尼力,提供小阻尼,因此,松弛型液体阻尼隔振器的优点在于能够很好地衰减高频振动,同时将共振放大倍数控制在较低水平。对于卫星微振动隔离来说,这个特性能够使松弛型液体隔振器在主动段和在轨段均提供良好的性能。

4 结 论

本文对用于卫星传感器微振动隔离的松弛型液体阻尼隔振器进行了理论分析和实验研究。分析了阻尼因子对隔振器传递率的影响,结果表明,对于刚度比固定的隔振器,设计合理的阻尼因子值,可获取最小的共振放大倍数。松弛型液体阻尼隔振器具有共振大阻尼,高频小阻尼的特性,在共振频率区可以明显降低系统的传递率,但在高频振动衰减区具有较快的振动衰减能力,其隔振性能远优于传统隔振器。实验结果表明,隔振器能够将共振峰放大倍数控制在 2 以下,同时 100 Hz 时振动隔离达 95% 以上。这些结论对松弛型液体阻尼隔振器的设计和在传感器微振动隔离的应用上具有现实意义。

sity, 2013. (in Chinese)

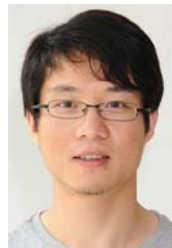
- [4] 赵光旭. 相机平台颤振对高分辨率光学遥感成像的影响分析[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
ZHAO G X. *The camera platform flutter analysis of the influence of high-resolution optical remote sensing imaging* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [5] 李林, 王栋, 徐婧, 等. 飞轮组件微振动对高分辨率光学卫星光轴的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):2515-2522.
LI L, WANG D, XU J, et al.. Influence of micro-vibration of flywheel components on optical axis of high resolution optical satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):2515-2522. (in Chinese)
- [6] 董瑶海. 航天器微振动—理论与实践[M]. 北京:中国宇航出版社, 2015.
DONG Y H. *Spacecraft Micro-Vibration—Theory and Application* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015. (in Chinese)
- [7] 裴亚鲁, 黄修长, 张志谊. 网结构隔振特性的理论与实验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1):13-18.

- PEI Y L, HUANG X C, ZHANG ZH Y. Theoretical and experimental study on the vibration isolation performance of a grid-structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(1):13-18. (in Chinese)
- [8] ZHANGY, XU S J. Vibration isolation platform for control moment gyroscopes on satellites [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, 25(4): 641-652.
- [9] ZHANGY, ZHANG J R, XU S J. Parameters design of vibration isolation platform for control moment gyroscopes [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 81 (2):645-659.
- [10] DAVISL P, WILSON J F, JEWELL R E. Hubble space telescope reaction wheel assembly vibration isolation system [R]. Huntsville, AL: NASA Marshall Space Flight Center, 1986.
- [11] WILSONG W, WOLKE P J. Performance prediction of D-strut isolation systems [J]. *SPIE*, 1997, 3045:236-250.
- [12] BOYD J, HYDE T T, OSTERBERG D, *et al.*. Performance of a launch and on-orbit isolator [J]. *SPIE*, 2001, 4327:433-440.
- [13] 丁旭杰. 非线性隔振抗冲器的设计与建模研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- DING X J. *Study on the design and modeling of nonlinear vibration and shock isolator* [D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

作者简介:



刘兴天(1984—),男,江苏徐州人,博士,2013年于上海交通大学获得博士学位,主要从事卫星结构设计、非线性动力学、结构振动控制相关工作。E-mail:xtliu509@126.com



孔祥森(1985—),男,江苏扬州人,硕士,2011年于上海航天技术研究院获得硕士学位,主要从事卫星结构设计、动力学仿真相关工作。E-mail:chinakons@hotmail.com