文章编号:1674-2974(2026)04-0092-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026173

波纹管式复合阻尼隔振器设计与力学特性研究

吴乙万 ,杨浩 ,白鸿柏 †,汤宇 ,饶志强
（福州大学 机械工程及自动化学院 金属橡胶工程研究中心，福建 福州 350108）

摘 要:针对波纹管隔振器与金属橡胶复合隔振器结构复杂、密封性差等问题，设计了一种新型波纹管式复合阻尼隔振器.利用平均刚度、耗能量、结构损耗因子来表征力学性能，针对影响隔振器的不同参数开展静态力学试验.结果表明,金属橡胶与二甲基硅油的添加显著提升了隔振器的力学性能，该性能随着金属橡胶密度的增加而增强.在进行4 mm位移加载时,环状金属橡胶对隔振性能的提升效果显著.随着加载位移增加,耗能和结构损耗因子不断增加,平均刚度呈现略微下降趋势.最后基于迹法等效阻尼模型,考虑密度、变形幅值等变化规律,用参数分解识别法构建静态力学模型,刚度预测误差小于1.5%.

关键词:波纹管;金属橡胶;隔振器;静态力学性能;静态力学模型
中图分类号:TB123 **文献标志码**:A

Design and mechanical properties study of bellows-type composite damping vibration isolator

WU Yiwan, YANG Hao, BAI Hongbai†, TANG Yu, RAO Zhiqiang
(Engineering Research Center for Metal Rubber, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A new type of bellows-type composite damping vibration isolator was designed to address the complex structure and poor sealing of the bellows vibration isolator and the metal rubber composite vibration isolator. Static mechanical tests were carried out on different parameters affecting the vibration isolator. The mechanical properties were characterised using average stiffness, energy dissipation, and structural loss factor. The results showed that the addition of metal rubber and dimethyl silicone oil significantly enhanced the mechanical properties of the vibration isolator and the performance increased with the increase in the density of metal rubber. At 4 mm displacement loading, the annular metal rubber enhanced the vibration isolation performance significantly. As the loading displacement increases, the energy dissipation and structural loss factor increase continuously, while the average stiffness shows a slightly decreasing trend. Finally, based on the equivalent damping model of the trace method and considering the rules of change, such as density and deformation amplitude, a static mechanical model was constructed using the parameter decomposition identification method, with stiffness prediction error of less than 1.5%.

* **收稿日期**:2025-03-06
基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0437), Science and Technology Plan Project of Inner Mongolia Autonomous Region (2021GG0437)
作者简介:吴乙万(1984—),男, 福建厦门人, 福州大学教授, 博士
† 通信联系人,E-mail: bhbk11@sina.com

Key words:bellows;metal rubber;vibration isolator;static mechanical properties;static mechanical model

振动的主要控制方式分为主动控制、被动控制、半主动控制三种.其中主动控制需通过外部能源驱动“主动作动元件”输出控制力,因此对应隔振器一般较为复杂.半主动控制无须输出主动力,而是通过调节隔振器的刚度或阻尼参数适应振动变化,如磁流变弹性体隔振器通过调节电流大小可实现刚度变化[1].而被动控制的隔振器具有结构简单、可靠性高、成本低等诸多优点而被大量应用和研究.如金属弹簧隔振器、橡胶隔振器、金属橡胶隔振器以及专用的X形结构隔振器[2-4].其中金属橡胶是一种由螺旋金属丝缠绕冲压而成的多孔材料,众多国内外学者开展了大量关于金属橡胶相关力学特性的试验[5-9],这些研究揭示了包括变形量、相对密度、丝径等多种因素对金属橡胶宏观力学性能的影响.同时金属橡胶还被应用于复合结构设计[10-13]及设备运用中[14-17].此外,由于金属橡胶的特殊多孔空间结构,其流体渗透性已经有了参数化研究[18],并建立了金属橡胶材料的雷诺方程及水力直径表达式[19].各种研究表明金属橡胶拥有优异的缓冲耗能特性及良好的孔隙特性.但常见的金属橡胶复合隔振器密封性较差且没有充分利用金属橡胶孔隙特性.

金属波纹管因具备良好的位移变形能力和较强的抗过载性能,在外压作用下能够有效缓冲振动,展现出优异的隔振性能.它不仅可以提供刚度作为承载结构,还是一种能产生变形的挠性元件,因此被广泛应用于隔振器的设计与制造中.美国Honeywell公司研制了一系列用于隔离微振动的波纹管式流体阻尼隔振器,其具有较高可靠性且隔振效果良好[20],但结构较为复杂.Ogawa等[21]开发了一种涉及双平衡波纹管(double balanced bellows, DBB)来补偿大气压力,用于真空内部和外部之间隔振.Lee等[22-23]、谢溪凌等[24]及焦雪[25]也利用其特点分别设计了不同类型的波纹管隔振器.此类波纹管隔振器虽利用流体阻尼在刚度、温度适应性及高频衰减率等方面取得一定进展,但也存在制造精度高、结构复杂、密封性不足、使用环境受限等问题.

由于波纹管隔振器和金属橡胶材料具有良好的隔振性能,基于此,本文提出一种新型的波纹管式复合阻尼隔振器.首先,对复合隔振器进行了设计,并通过静态力学试验,探究隔振器内部介质、金属橡胶平均密度、环状金属橡胶结构及加载位移等参数对隔振器力学性能的影响规律,结合试验结果和理论分析,采用参数识别法建立波纹管式复合阻尼隔振器静态力学模型.结果表明,参数识别精度良好,能够满足工程应用的要求.

1　波纹管式复合阻尼隔振器的设计

1.1　波纹管式复合阻尼隔振器结构

波纹管式复合阻尼隔振器使用波纹管作为外壳,所采用的DN32系列型号的金属波纹管主要参数如图1所示.

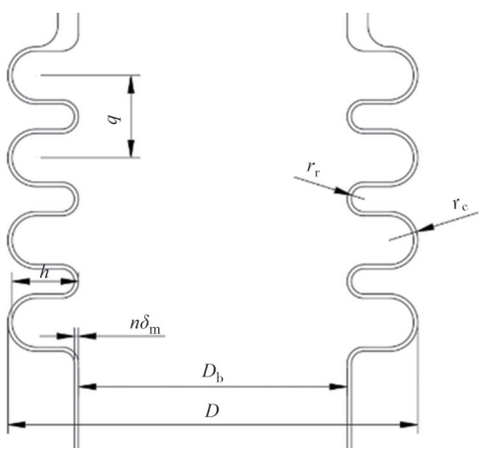


图1　波纹管结构参数

Fig.1　Structural parameters of the bellows

参数包含直边段内径D_b、U型波纹管波峰内壁曲率半径r_c、U型波纹管波峰内壁曲率半径r_r、波距q、波高h、壁厚$n\delta_m$(n表示单层平均壁厚为δ_m的波纹管壁的层数)、波数N.

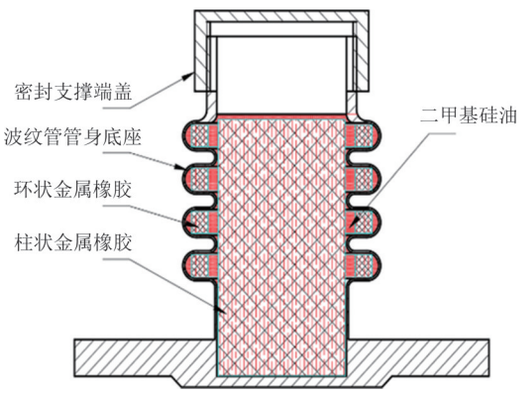
具体参数值见表1.

表1　波纹管参数

Tab.1　Parameters of bellows

参数	数值	参数	数值
D_b/mm	39.0	h/mm	9.6
r_c/mm	4.1	δ_m/mm	0.5
r_r/mm	1.7	n	1
q/mm	11.8	N	4

波纹管内部由金属橡胶和填充在金属橡胶孔隙中的二甲基硅油组成，隔振器剖视图如图2(a)所示，隔振器样机如图2(b)所示.



(a)隔振器剖视图



(b)隔振器样机及金属橡胶样

图2 波纹管式复合阻尼隔振器

Fig.2 Bellows-type composite damping isolator

在该隔振器设计方案中，金属波纹管可起到耐压、密封、弹性支撑的作用，能使复合阻尼隔振器具备在高压、腐蚀等恶劣环境下正常使用的潜能.一方面，金属橡胶良好的孔隙特性也为小孔阻尼的产生创造了一定条件.另一方面，金属橡胶具有优异的力学特性，其填充于金属波纹管的内部，可增强波纹管的耐压性能.考虑到波纹管波峰与波谷的特殊结构，以及在外部作用力时的主要变形部分和应力集中位置，设计了相应的金属橡胶结构，一种环状结构的金属橡胶填充于波峰内部，一种柱状金属橡胶填充于内部波纹管道空腔.

1.2 波纹管式复合阻尼隔振器工作机制理论分析

对金属橡胶样件使用钨灯丝电子显微镜进行拍摄，得到内部金属丝的微观情况如图3所示.可知金属丝之间存在三种接触形式，分别是无接触、点接触、挤压接触.两种金属橡胶通过内部螺旋卷线匝在接触点产生滑移摩擦，以及表层螺旋线匝与波纹管壁之间产生滑移摩擦等作用形式来耗散振动能量.

金属橡胶本质上是细金属丝之间相互交织与缠绕的集合体，这使得其内部存在丰富的空间互联孔隙结构，如图3所示.由于介质的不可压缩特性以及金属橡胶的多孔结构特征，在外部激励作用下介质能够在金属橡胶内部的诸多孔隙结构中流动，从而产生小孔阻尼，进而有效地抑制振动，实现隔振目的.其内部填充的二甲基硅油具有出色的稳定性、极小的黏温系数以及在高低温环境下具有黏度变化极小、热稳定性优异且化学惰性强，耐候性好的特点，是理想的阻尼介质.

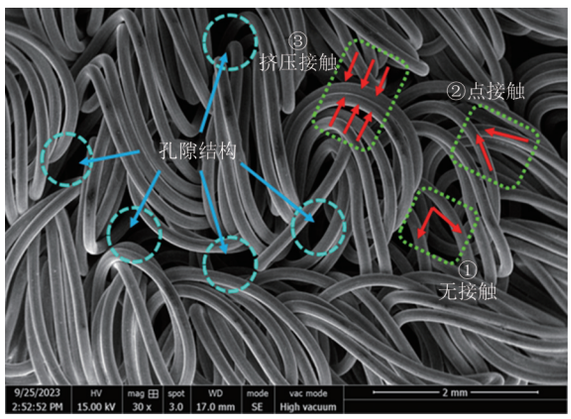


图3 金属橡胶SEM图

Fig.3 SEM image of metal rubber

金属橡胶内部孔隙结构使用孔隙度来进行表征.孔隙度ε使用孔隙空间体积V_p与金属橡胶几何包络总体积V_t的比值来表示：

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} \tag{1}$$

式中：V_s是金属丝的实际占有空间体积.分别对两种体积V_s和V_t进行表征可得：

$$\begin{cases} V_s = \dfrac{m_s}{\rho_s} \\ V_t = \dfrac{m_s}{\rho_t} \end{cases} \tag{2}$$

式中：m_s表示金属丝的实际总重量；ρ_s表示金属丝的实际密度；ρ_t表示金属橡胶的密度，二者关系一般满足$\rho_t < \rho_s$.将式(2)代入式(1)可得：

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_t}{\rho_s} \tag{3}$$

将外界相同激励时隔振器内部硅油运动所产生的流量Q视为一致.简化内部介质复杂运动情况，使用式(4)表征内部硅油介质在金属橡胶孔隙结构中的流体流速v：

$$v = \frac{Q}{A\varepsilon} \tag{4}$$

式中:A表示硅油介质流经金属橡胶的横截面积,对于相同尺寸的金属橡胶视作A一致.准静态作用力下流体阻尼力F为流体阻尼系数c和流体流速v的乘积,将式(3)、式(4)代入分析可得到隔振器内部流体阻尼力F:

$$F = c\frac{Q\rho_s}{A(\rho_s - \rho_t)} \tag{5}$$

由式(5)可知当其他条件不变时,隔振器内部流体阻尼力与金属橡胶密度呈现正相关关系.

1.3　金属橡胶参数设计

隔振器内部的金属橡胶选用直径为0.3 mm的304不锈钢丝,其金属丝密度为7.93 g/cm^3.采用文献[12]提到的四步法工艺制备金属橡胶,如图4所示.金属橡胶平均密度ρ_z计算如下:

$$\rho_z = \frac{m_s}{V} \tag{6}$$

式中:m_s是所用金属丝总质量;V是隔振器内部空腔有效体积.

环状金属橡胶通过固定密度参数为2 g/cm^{3}来保证结构一致,其嵌合在波纹壁内臂通过上下波纹管壁挤压接触,既确保安装稳定可靠,又为隔振器提供主要结构支撑.柱状金属橡胶提供丰富的孔隙结构用于产生小孔阻尼.由于柱状金属橡胶占比多、影响大,所以通过调节金属橡胶密度ρ_t来改变波纹管理论金属橡胶平均密度ρ_z.分析可知,波纹管理论金属橡胶平均密度ρ_z也与内部流体阻尼力呈现正相关的变化关系.柱状金属橡胶尺寸设计制作均根据波纹管结构参数来确定使其安装稳定.表2和表3分别为隔振器的环状和柱状金属橡胶试件主要参数.



图4　金属橡胶四步法制备工艺流程

Fig.4　Four-step preparation process of metal rubber

表2　环状金属橡胶试件主要参数

Tab.2　Main parameters of annular metal rubber specimens

环状金属橡胶样件	外径/mm	内径/mm	高度/mm	质量/g
1	53.2	42.26	6.15	9.26
2	52.8	42.32	6.12	9.23
3	52.7	42.82	6.28	9.32
4	53.1	42.63	6.21	9.25
均值	52.95	42.51	6.19	9.27

表3　柱状金属橡胶试件主要参数

Tab.3　Main parameters of columnar metal rubber specimens

波纹管金属橡胶理论平均密度/(g·cm^{-3})	外径/mm		高度/mm		质量/g		实际柱状金属橡胶密度/(g·cm^{-3})
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	
1.0	39.2	0.05	78.4	0.08	83.56	2.53	0.883 6
1.0(无环)	39.3	0.06	77.8	0.12	120.58	3.12	1.278 3
1.5	39.5	0.04	77.3	0.09	143.51	2.35	1.515 7
2.0	39.3	0.02	76.9	0.07	203.46	2.89	2.182 1

1.4　试验设备与方法

为探究加载条件和制备参数对波纹管式复合阻尼隔振器平均刚度(简称刚度)、耗能量、结构损耗因子的影响规律,试验设备采用济南天辰WDW-T10型微机控制电子万能试验机及测试工装,如图5所示.该设备最大试验力为10 kN,加载速度范围为0.01~500 mm/min.

按照《振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法》(GB/T 15168—2013)分别研究在不同加载量下隔振器不同介质、不同金属橡胶平均密度(以下简称密度)、环状金属橡胶结构对波纹管复合阻尼隔振器的静态力学特性的影响.具体隔振器分组如表4所示,试验方案如表5所示.

使用不同隔振器代号对试验中每组别不同隔振器加以区分.由表4和表5可知隔振器1、2、3分别表示介质组中不同介质的隔振器.隔振器3、4、5分别表示密度组中不同密度的隔振器.而隔振器3、6则分别表示环状结构组中不同环状结构的两种隔振器.加载位移组用隔振器3进行试验来表征不同位移压缩下性能指标评价变化.

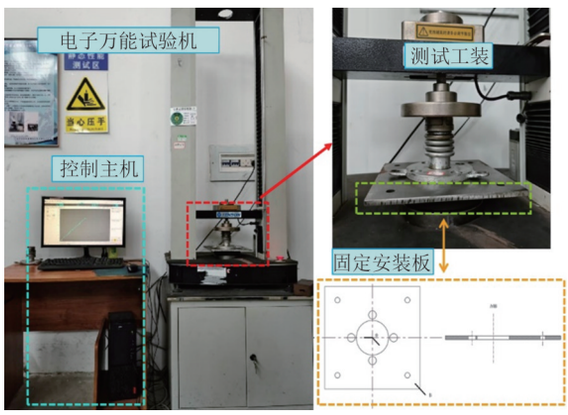


图5 隔振器静态力学试验系统

Fig.5 Static mechanical test system of vibration isolators

表4 隔振器分组

Tab.4 Isolator groups

隔振器代号	介质	金属橡胶平均密度/(g·cm^{-3})	有无环状金属橡胶
隔振器1	无	无	无
隔振器2	金属橡胶	1	有
隔振器3	金属橡胶、二甲基硅油	1	有
隔振器4	金属橡胶、二甲基硅油	1.5	有
隔振器5	金属橡胶、二甲基硅油	2	有
隔振器6	金属橡胶、二甲基硅油	1	无

表5 试验方案

Tab.5 Test protocols

组别	隔振器代号	加载位移/mm
介质组	隔振器1、隔振器2、隔振器3	2/3/4
密度组	隔振器3、隔振器4、隔振器5	2/3/4
环状结构组	隔振器3、隔振器6	2/3/4
加载位移组	隔振器3	2/3/4

1.5 试验表征方法

试验采用等速位移,以0.5 mm/min的加卸载速率对每组隔振器多个样件进行测试.为确保试验准确性,每个隔振器样件在记录试验数据前均进行多次加卸载,得到波纹管式复合阻尼隔振器的滞回曲线如图6所示.

用平均刚度k_s来表征此隔振器的承载能力,如式(7)所示.其中F_{max}表示最大载荷力,X_{max}表示最大加载位移.

$$k_s = \frac{F_{max}}{X_{max}} \tag{7}$$

根据滞回曲线的特性,该隔振器的静态结构损耗因子η为:

$$\eta = \frac{\Delta W}{\pi U} \tag{8}$$

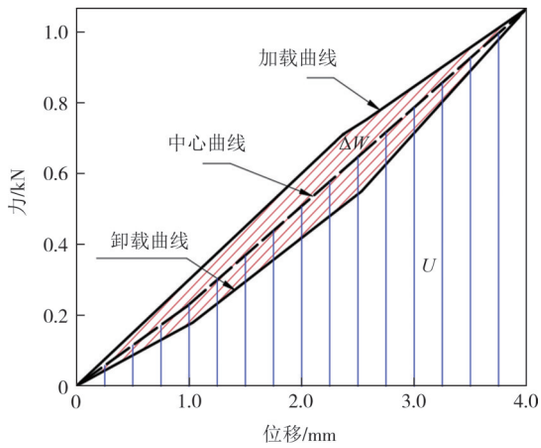


图6 波纹管式复合阻尼隔振器滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curve of bellows-type composite damping isolator

$$U = W - \Delta W/2 \tag{9}$$

式中:ΔW为加载曲线和卸载曲线所包围的面积为单次加卸载周期内隔振器总耗能;U为单次加载中隔振器全部所耗能量的中心曲线和坐标轴包围的面积;W为加载曲线与坐标轴围成的面积,即在加载过程中外力所做的功.

2 试验结果与分析

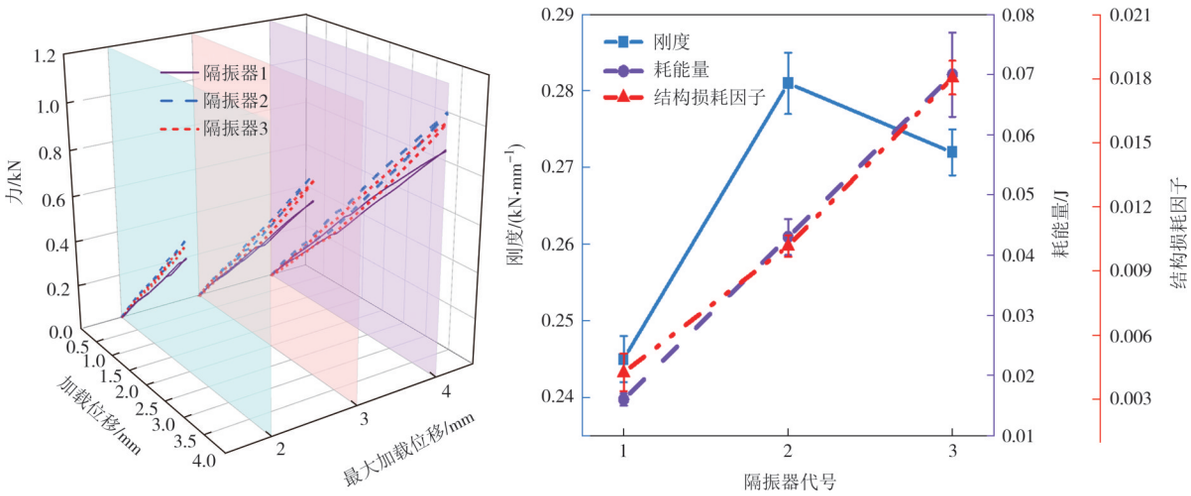
2.1 不同介质隔振器阻尼特性

根据表4中介质组的参数,可得到不同加载位移下隔振器1、2、3的滞回曲线图7(a).由于隔振器在三种位移加载状态下呈现的变化趋势相同,所以取3 mm加载状态,用上述表征计算方法计算三种隔振器的刚度、耗能量和结构损耗因子等性能评价指标具体变化作图7(b).

由图7(b)可知,加入金属橡胶后,隔振器的刚度明显提升.从隔振器2和隔振器1的评价指标对比可以看出裸波纹管在加入金属橡胶后,隔振器的刚度得到明显提升.这主要是因为原本波纹管内为空气介质,而加入金属橡胶取代空气介质后,金属橡胶内部的金属丝之间和金属丝与波纹管壁之间存在着挤压、滑移、接触的摩擦力作用,这显著增强了隔振器的承载能力.因此隔振器的刚度得以提升.

隔振器3的刚度低于隔振器2是由于加入的二甲基硅油在金属丝表面形成润滑作用,这导致相互发生在金属丝表面的干摩擦系数相比没有二甲基硅油状态降低,从而导致摩擦力减小,进而隔振器的刚度出现下降.

随着金属橡胶和二甲基硅油的加入,耗能量和



(a)介质组隔振器滞回曲线　　(b)3 mm位移下不同隔振器评价指标变化曲线

图 7　介质组隔振器对比

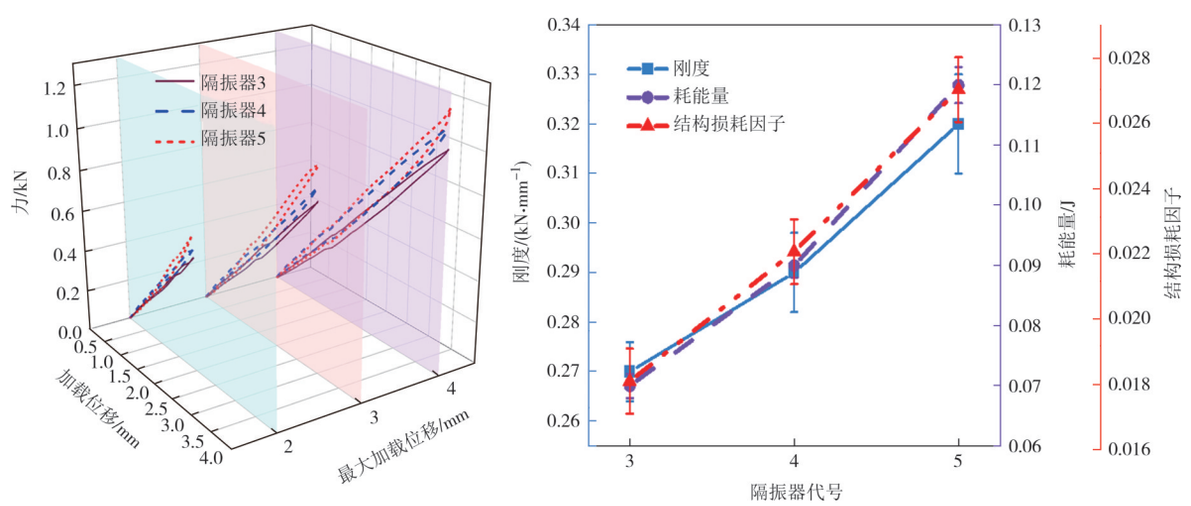
Fig.7　Comparison of vibration isolators in dielectric group

结构损耗因子都得到显著提升.这是因为金属橡胶和二甲基硅油的协同能量耗散,金属橡胶的加入增加了摩擦力,摩擦力将能量转变为热能进行耗散,而二甲基硅油则是在具有良好孔隙特性的金属橡胶中流动产生黏滞小孔阻尼进行能量的进一步耗散,所以耗能显著增加,对应结构损耗因子也增加.

2.2　不同金属橡胶平均密度隔振器阻尼特性

根据表4中密度组的参数,得到不同加载位移下隔振器3、4、5的滞回曲线图8(a).由于波纹管隔振器在三种位移加载状态下呈现的变化趋势相同,所以对三种隔振器3 mm加载下的刚度、耗能量和结构损耗因子等性能指标进行计算作图8(b).

由图8(b)可知,随着隔振器内部金属橡胶平均密度的增加,其刚度、耗能量以及结构损耗因子也同步增加.金属橡胶密度增大导致内部孔隙度减小,小孔直径也随之减小.在外力作用下,二甲基硅油在隔振器内部产生流动,由伯努利原理和式(5)可知在流量不变情况下,在孔隙效应[12]下较小孔径中流速增大,从而流动产生的阻尼力也增大.金属橡胶内部的金属丝可看作由多个小曲梁组成,金属橡胶密度越大,在同位移加载下单位体积金属橡胶内部金属螺旋卷接触点增加,小曲梁等效长度越短,刚度越大,导致金属橡胶总刚度增加.密度大的金属橡胶内部金属丝的接触滑移数增多,提高了对能量的耗散能力,硅油在金属橡胶孔隙中流动产生的小孔阻尼力增强,对应其耗散能量也得到提高,所以耗能量和结构损耗因子随着金属橡胶平均密度增加同步提升.



(a)密度组隔振器滞回曲线　　(b)3 mm位移下不同隔振器评价指标变化曲线

图 8　密度组隔振器对比

Fig.8　Comparison of vibration isolators in density group

2.3 环状金属橡胶对隔振器阻尼特性的影响

根据表4中环状结构组的参数,可得到不同加载位移下隔振器3、6的滞回曲线,如图9所示,可知在2、3 mm加载状态下隔振器6的刚度更大,4 mm加载状态下隔振器3的刚度更大.包络面积二者较接近.采用上述评价指标计算方法对两组隔振器在2、3、4 mm加载下的三种评价指标进行计算并作图10进行分析.

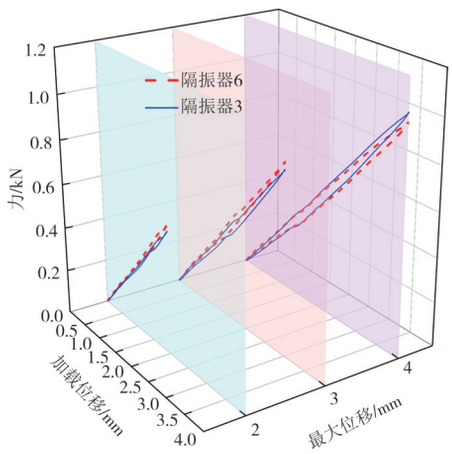
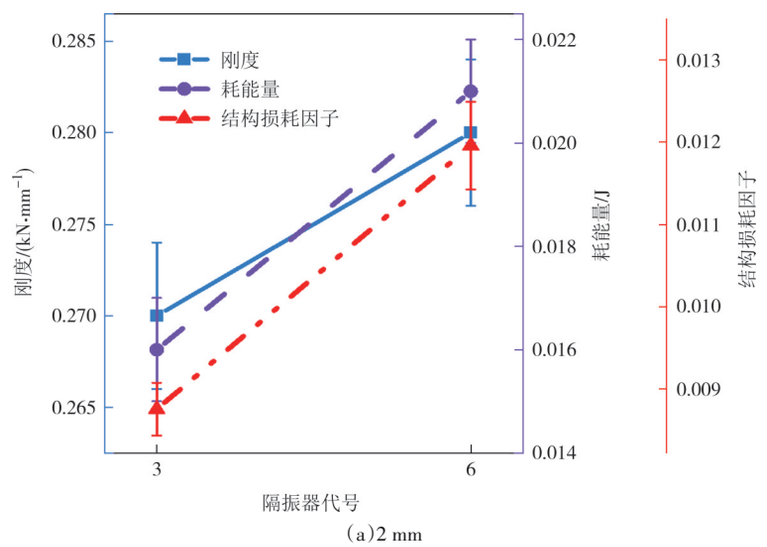


图9 环状结构组隔振器滞回曲线

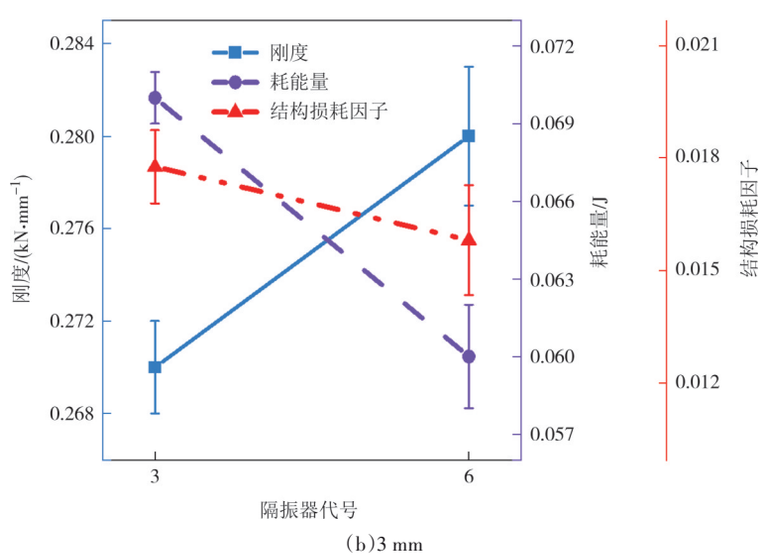
Fig.9 Hysteretic curve of the vibration isolator in annular structure group

由表3可知,隔振器3和隔振器6虽然金属橡胶平均密度一致,但是由于隔振器6没有环状金属橡胶结构所以对应的柱状金属橡胶密度更大,其柱状金属橡胶实际密度为1.278 3 g/cm^3,大于隔振器3的柱状金属橡胶密度(0.883 6 g/cm^3).

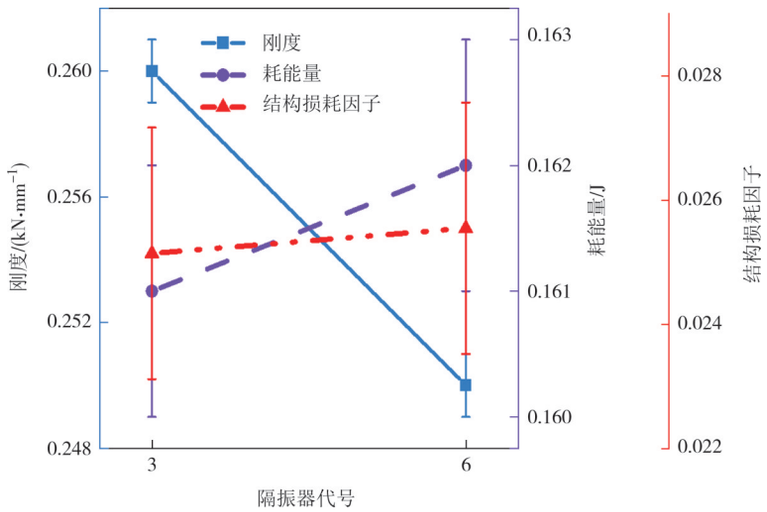
由图10(a)可知,2 mm加载状态下,无环状金属橡胶结构的隔振器6的刚度、耗能量、结构损耗因子大于对照组隔振器3,是因为在2 mm位移加载时环状金属橡胶挤压不充分,几乎没有作用,而隔振器6的柱状金属橡胶密度大,由前文可知刚度、耗能和损耗因子与金属橡胶密度存在正相关关系,所以无环状结构金属橡胶隔振器6阻尼特性更好.



(a)2 mm



(b)3 mm



(c)4 mm

图 10　不同位移下两种隔振器评价指标变化曲线

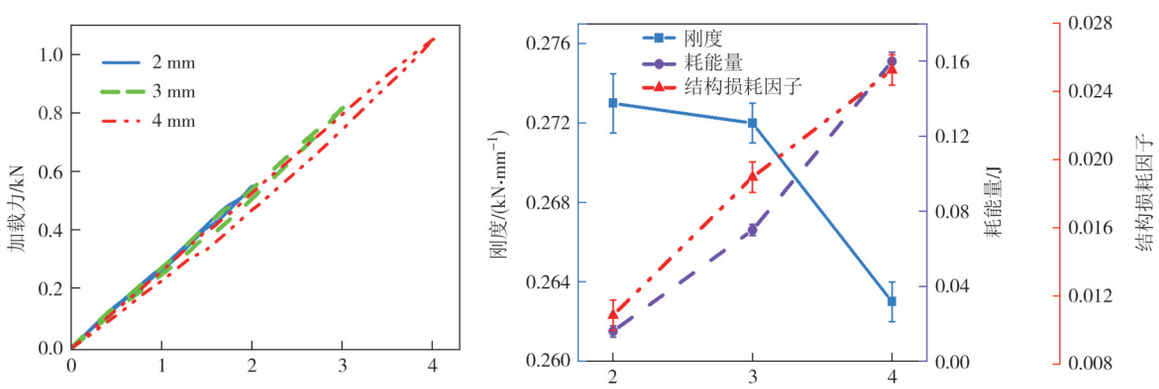
Fig.10　Curves of the variation of evaluation indexes for two vibration isolators under different displacements

由图 10(b)可知，当加载位移为 3 mm 时，无环状金属橡胶结构的隔振器 6 的刚度略大于对照组隔振器 3，而耗能量和结构损耗因子关系却略小于后者. 此刻由于隔振器 3 的环状金属橡胶开始受到挤压，内部金属丝发生摩擦滑移进而耗散能量. 而隔振器 6 的金属橡胶内部硅油流动更加快速，流体阻尼力增加，刚度提升. 但是这些材料的刚度和耗能特性之间往往伴随着相同的改变趋势，所以在 3 mm 位移下刚度和耗散能量没有明确的大小关系，应该考虑试验实际情况和测量误差的影响.

由图 10(c)可知，当加载位移为 4 mm 时，对照组隔振器 3 的刚度大于无环状金属橡胶结构的隔振器 6，而耗能量仅相差 0.6% 左右，结构损耗因子也只相差 1.5% 左右. 这是由于在 4 mm 加载状态下环状金属橡胶受到充分挤压，内部金属丝摩擦挤压非常充分，其承载能力及刚度得到显著提升. 同时耗能量和结构损耗因子的差异表明当金属橡胶平均密度一致时，在内部流体阻尼作用下隔振器所产生的耗能也几乎一致.

2.4　不同位移状态下隔振器刚度耗能特性变化

针对加载位移组选取隔振器 3 在不同加载位移下的滞回曲线作图 11(a)，并对刚度、耗能量、结构损耗因子评价指标变化作图 11(b).



(a)滞回曲线　　(b)评价指标变化曲线

图 11　隔振器 3 在不同位移加载下的数据

Fig.11　Data of vibration isolator 3 under different displacement loading

由图 11 可知，加载位移提升使得波纹管壁的局部结构产生一定的变形导致刚度出现略微降低. 如波纹褶皱部分在大位移的加载时存在重叠甚至出现波纹嵌套变形现象，这种变形使得荷载在波纹管上均匀分布，进而导致刚度降低. 对于耗能量和结构损耗因子的变化，在波纹管的变形过程会耗散能量，内部金属橡胶中金属丝摩擦滑移增多会进一步耗散能量，同时二甲基硅油在位移加载过程中充分流动

从而产生的小孔阻尼总量增加，耗散能量增加.综上，隔振器的耗能量和结构损耗因子随加载位移增加而增加，刚度随加载位移增加而下降.

3 静态力学模型

以密度组的隔振器3、4、5为研究对象建立静态力学模型进行分析.由波纹管式复合阻尼隔振器的静态力学试验可知，隔振器受到压缩产生的三种力分别是波纹管外壳弹性力、金属橡胶内部作用力、二甲基硅油产生的黏滞阻尼力.

由前文已知密度组隔振器刚度和耗能量变化趋势相同，所以可以通过对刚度的性能分析来探究耗能指标的变化趋势.并且隔振器静态力学滞回曲线加载端保持较好的线性特征，因此选择线性关系来描述其加载力F随刚度系数k_z和加载位移x变化的趋势.

$$F = k_z x \tag{10}$$

将金属橡胶平均密度和加载位移引入刚度系数的模型分析中，计算出不同金属橡胶平均密度和加载位移状态下的隔振器刚度系数，如表6所示.

表6 不同密度隔振器在不同加载位移下的刚度系数k_z

Tab.6 Stiffness coefficient k_z of vibration isolators with different densities under different loading displacements

加载位移/mm	不同密度隔振器的刚度系数k_z		
	密度/(g·cm^{-3})		
	1.0	1.5	2.0
2	0.273 6	0.295 0	0.329 0
3	0.272 1	0.293 3	0.323 9
4	0.263 2	0.288 1	0.306 0

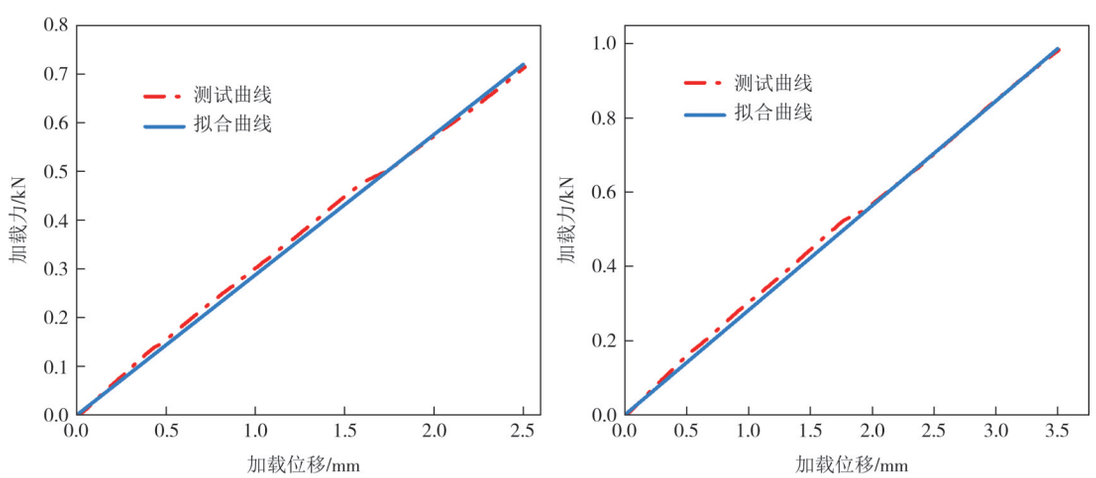
考虑到刚度系数k_z的变化情况较为复杂，单一多项式或线性函数的形式不能很好地描述其变化趋势.结合金属橡胶碟簧复合隔振器中使用的迹法等效阻尼模型[10]，选择使用幂函数的形式来描述刚度系数与加载位移A和金属橡胶密度ρ的关系，其函数关系式如下：

$$k_z(\rho, A) = n_1 \rho^{n_2} A^{n_3} \tag{11}$$

将各参数进行拟合可得：

$$k_z(\rho, A) = 0.286\,6\rho^{0.245\,7} A^{-0.064} \tag{12}$$

为验证所建模型中密度和位移影响因子的准确性，对金属橡胶密度为1.3 g/cm^{3}的隔振器试验组在2.5 mm和3.5 mm加载位移下的性能进行测试，并对曲线进行拟合，如图12所示.



(a)加载2.5 mm拟合对比图 (b)加载3.5 mm拟合对比图

图12 密度为1.3 g/cm^{3}的隔振器拟合对比图

Fig.12 The comparison chart of the vibration isolator with a density of 1.3 g/cm^3

从图12可知，模型拟合曲线与试验曲线具有较好一致性.进一步计算刚度系数的拟合误差，图12(a)的刚度拟合误差为1.12%，图12(b)的刚度拟合误差为0.61%.所以幂函数拟合波纹管式复合阻尼隔振器刚度性能效果良好，精度较高.该模型在本文试验条件下，能准确预测不同密度和加载位移下的静态力学刚度性能.因此，该建模方法为波纹管式复合阻尼隔振器综合性能研究提供了重要参考.

4 结 论

1)采用等速位移加载对波纹管复合阻尼隔振器进行试验探究.以耗能量、结构损耗因子和平均刚度来表征波纹管式复合阻尼隔振器的静态力学性能.

结果表明添加金属橡胶和二甲基硅油对隔振器阻尼性能有较大提升.随着金属橡胶密度增加,隔振器阻尼性能也不断提升.环状金属橡胶对隔振器阻尼性能的提升效果在4 mm位移最明显,在3 mm位移加载下性能需要综合考虑环状金属橡胶挤压程度与柱状金属橡胶密度影响.随着隔振器的加载位移增加,耗能量和结构损耗因子不断增加,而刚度则呈现略微下降趋势.

2)基于迹法等效阻尼模型,考虑金属橡胶平均密度和加载位移的影响,使用参数分解识别法建立静态力学模型,并基于隔振器的刚度性能指标值进行拟合,拟合误差分别为1.12%和0.61%,证明模型能够较好预测波纹管式复合阻尼隔振器的静态力学刚度性能,进一步为工程应用研究奠定基础.

参考文献

[1] 黄学功, 刘涛, 马伟佳, 等. 基于MRE隔振器的变刚度半主动隔振系统分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(8):27-36.
HUANG X G,LIU T,MA W J,et al. Analysis of variable stiffness semi-active vibration isolation system based on MRE isolator[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(8): 27-36.(in Chinese)

[2] 刘国勇, 赵鹏鹏, 刘海平, 等. 一种嵌套式X型结构的高阻尼隔振器性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 31-37.
LIU G Y,ZHAO P P,LIU H P,et al. Study on performance of a novel high-damping vibration isolator with nested X-shaped structure[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(2): 31-37.(in Chinese)

[3] 刘国勇, 郝鹏鹏, 赵鹏鹏, 等.一种几何非线性低刚度高阻尼隔振器动态特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022,49(4): 168-176.
LIU G Y, HAO P P, ZHAO P P, et al. Study on dynamic characteristics of a type of vibration isolator with geometrically nonlinear low stiffness and high damping[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(4): 168-176.(in Chinese)

[4] 朱冬梅,肖凯莉,刘海平. 含中间质量改进三参数隔振器动力学特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(8): 72-81.
ZHU D M, XIAO K L, LIU H P. Research on dynamics characteristics of improved three-parameter isolator with intermediate mass [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(8): 72-81.(in Chinese)

[5] CHANDRASEKHAR K, RONGONG J, CROSS E. Mechanical behaviour of tangled metal wire devices[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 13-29.

[6] 王燃,王玮,吴乙万,等.盆形金属橡胶三向动态力学性能试验研究[J].兵器材料科学与工程, 2023, 46(1): 27-34.
WANG R, WANG W, WU Y W, et al. Experimental study on three-way dynamic mechanical properties of basin-shaped metal-rubber[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(1): 27-34.(in Chinese)

[7] 卢成壮,李静媛,周邦阳,等.金属橡胶的刚度特性和阻尼试验研究[J].振动与冲击,2017,36(8):203-208.
LU C Z, LI J Y, ZHOU B Y, et al. An experimental study on stiffness characteristics and damping of metal rubber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 203-208.(in Chinese)

[8] 王玮,汤宇,吴乙万,等. 盆形金属橡胶三向准静态试验研究[J]. 机械强度,2023,45(2): 331-340.
WANG W,TANG Y,WU Y W,et al. Experimental investigation on the tri-directional quasi-static of pot-shaped metal rubber[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 331-340.(in Chinese)

[9] MEZGHANI F, DEL RINCON A F, BEN SOUF M A, et al. Experimental investigation on the influence of relative density on the compressive behaviour of metal mesh isolator [C]//Design and Modeling of Mechanical Systems—Ⅲ. Cham:Springer,2018: 941-947.

[10] 吴乙万, 程湖, 白鸿柏, 等. 金属橡胶/碟簧叠层复合结构阻尼特性及其非对称迟滞模型参数识别[J]. 振动与冲击, 2022, 41(20): 270-276.
WU Y W, CHENG H, BAI H B, et al. Damping characteristics and parameter identification of an asymmetric hysteresis model of entangled metallic wire materials/disc springs laminated composite dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(20): 270-276.(in Chinese)

[11] 任志英, 尧杰程, 黄伟, 等. 金属橡胶-硅橡胶复合阻尼结构的减振性能[J]. 振动与冲击, 2022, 41(24): 234-240.
REN Z Y, YAO J C, HUANG W, et al. Performance of the composite damping damper structure compose of metal rubber and silicone rubber [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(24): 234-240.(in Chinese)

[12] 程湖. 低速冲击载荷下金属橡胶复合缓冲器设计与试验研究[D]. 福州:福州大学,2022.
CHENG H. Design and experimental investigation of composite energy absorber with entangled porous metallic wire materials (EPMWMs) subjected to low-velocity impact loading [D]. Fuzhou:Fuzhou University,2022.(in Chinese)

[13] WANG Y J, ZHANG Z J, XUE X M, et al. Experimental investigation on enhanced mechanical and damping performance of corrugated structure with metal rubber [J]. Thin-Walled

Structures, 2020, 154: 106816.

[14] ERTAS B H. Compliant hybrid journal bearings using integral wire mesh dampers[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(2): 022503.

[15] 李敏, 白鸿柏, 薛新. 波纹管金属橡胶包覆结构非线性阻尼特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 119-127.
LI M, BAI H B, XUE X. Nonlinear damping characteristics of bellows structures cladded with metal rubber [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 119-127. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 肖坤, 白鸿柏, 薛新, 等. 金属橡胶包覆管路阻尼结构减振性能研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(23): 239-245.
XIAO K, BAI H B, XUE X, et al. Vibration reduction performance of metal rubber coated pipeline damping structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(23): 239-245. (in Chinese)

[18] 国亚东. 金属橡胶液体过滤特性及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 42-59.
GUO Y D. Liquid filtration characteristics of metal rubber material and experimental study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

[19] JIANG H Y. Analysis on infiltrative characteristics of deformable porous metal rubber material and paramaters identification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2005, 18(4): 562.

[20] DAVIS P, CUNNINGHAM D, HARRELL J. Advanced 1.5 Hz passive viscous isolation system [C]//35th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Hilton Head, SC, USA. AIAA, 1994: AIAA1994-1651.

[21] OGAWA Y, MICHIZONO S, SAITO Y, et al. Double-balanced bellows for vibration isolation between the inside and outside of a vacuum, application to gravitational-wave experiments [J]. Vacuum, 1993, 44(5/6/7): 465-468.

[22] LEE D O, PARK G, HAN J H. Experimental study on on-orbit and launch environment vibration isolation performance of a vibration isolator using bellows and viscous fluid[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 45: 1-9.

[23] LEE D O, PARK G, HAN J H. Hybrid isolation of micro vibrations induced by reaction wheels[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 363: 1-17.

[24] 谢溪凌, 陈燕毫, 刁建超, 等. 波纹管-黏滞流体隔振器特性与实验[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 201-205.
XIE X L, CHEN Y H, DIAO J C, et al. Experiment of an isolator fabricated with diaphragm bellows and viscous fluid[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(4): 201-205. (in Chinese)

[25] 焦雪. 波纹管型流体阻尼隔振器的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
JIAO X. Design and research of bellows fluid damping vibration isolator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)