

# 热环境下金属橡胶隔振结构的耗散特性及参数识别

伍亿 赵永辉 黄锐 刘豪杰<sup>†</sup>

(南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016)

**摘要** 由于金属橡胶的耗散特性对温度非常敏感且显著影响隔振性能,因此,开展热环境下金属橡胶隔振结构的耗散及参数识别研究十分重要.本文设计了一种双层金属橡胶隔振结构,研究了环境温度对该隔振结构耗散特性的影响规律,基于试验数据建立了金属橡胶双层隔振结构的非线性本构模型.首先,在不同温度下对该隔振结构进行了一系列耗散特性试验,绘制了隔振结构在各工况下的耗散特性曲线,计算了隔振结构的耗散系数、耗散能量以及最大变形势能,分析了温度、振幅、频率对金属橡胶双层隔振结构耗散特性的作用规律.然后,使用非线性最小二乘法对隔振结构的参数进行了识别,建立了该金属橡胶隔振结构的非线性泛函本构模型,准确预测了隔振结构在各工况下的耗散特性曲线.

**关键词** 隔振结构, 金属橡胶, 非线性, 耗散特性, 最小二乘法

**中图分类号**:TB123

**文献标志码**:A

## Dissipation Characteristics and Parameter Identification of Metal Rubber Vibration Isolation Structure in Thermal Environment

Wu Yi Zhao Yonghui Huang Rui Liu Haojie<sup>†</sup>

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** Due to its sensitivity to temperature and the significant influence on vibration isolation performance, it is crucial to investigate the dissipation characteristic and parameter identification of metal rubber vibration isolation structure in thermal environments. In this study, a dual-layer metal rubber vibration isolation structure is designed. The influence of environmental temperature on the dissipation characteristic of the isolation structure is investigated. A nonlinear constitutive model for the dual-layer metal rubber isolation structure is established. At first, a series of dissipation characteristic tests are conducted on the isolation structure at different temperatures. Dissipation characteristic curves of the isolation structure under various operating conditions are obtained. The dissipation coefficient, dissipated energy, and maximum deformation potential energy are calculated. The effects of temperature, amplitude, and frequency on the dissipation characteristic of the dual-layer metal rubber isolation structure are analyzed. Then, the parameters of the isolation structure are identified using nonlinear least squares method. A nonlinear functional constitutive model for the metal rubber isolation structure is established. It can accurately predict the dissipation characteristic curves of the isolation structure under different operating conditions.

**Key words** vibration isolator structure, metal rubber, nonlinear, dissipation characteristics, least squares method

## 引言

“金属橡胶”这一称呼源于其同时具有多孔固体与弹性体橡胶的性质,也被称作“缠绕金属丝材料”<sup>[1]</sup>或“金属丝网”<sup>[2-4]</sup>。这类多孔金属是由金属丝网编织并冲压形成的线圈,它构成了金属橡胶隔振结构的阻尼元件以及弹性元件<sup>[5]</sup>。金属橡胶具有耐高低温、耐腐蚀、不易老化的特点,这种隔振元件的体积小,重量轻,易于成形、装配。因此,金属橡胶隔振结构已被广泛用于各种极端环境<sup>[6]</sup>,如高温管路减振<sup>[7]</sup>、涡轮鼓风机<sup>[8]</sup>和转子支架<sup>[9]</sup>等。在上述背景下,国内外学者对金属橡胶隔振结构的隔振性能进行了大量试验研究。如金属橡胶的工艺参数对其隔振性能的影响<sup>[10-12]</sup>、隔振结构的预紧量对其承载能力以及使用寿命的影响等<sup>[13,14]</sup>。然而,由于金属橡胶隔振结构具有记忆特性,属于典型的非线性迟滞阻尼系统,仅依靠试验难以在结构设计初期提供完整的理论指导。因此,开展金属橡胶隔振结构的非线性本构模型建模与参数识别研究十分必要。

目前,基于常温条件下的试验数据,研究人员进行了金属橡胶隔振结构建模与参数识别的系列研究。例如,曹凤利等<sup>[15]</sup>建立了一种描述金属橡胶非对称迟滞回线的数学模型,基于该模型得到了预测曲线并与试验曲线进行了对比。肖坤等<sup>[16]</sup>设计了一种金属橡胶包覆管路结构,并基于动态试验数据建立了金属橡胶的非线性泛函本构关系。路纯红等<sup>[17]</sup>设计开发了一种新型的金属橡胶/橡胶复合叠层耗能器,基于试验数据建立了耗能器的动力学模型。李玉龙等<sup>[18]</sup>借助双折线泛函本构模型,利用粒子群优化算法对不同激励条件下的隔振器模型参数进行了识别。上述研究主要采用了双折线模型、迹法模型和一阶微分方程模型等,但这些建模方法均未考虑环境温度对金属橡胶隔振结构参数的影响。由于金属橡胶的力学特性对温度非常敏感,学者们开展了热环境下金属橡胶隔振结构的建模与参数识别研究。吕正生<sup>[19]</sup>对高温环境下钢丝网垫减振器的力学特性进行了分析,建立了钢丝网垫的粘弹性材料本构模型,并在 ANSYS 中进行了有限元

仿真。颜秉金<sup>[20]</sup>推导并计算了高温环境下金属橡胶隔振系统的动响应,但他们均未将温度作为变量考虑到建模当中,仅对不同温度下的结构参数进行了识别。Jiang 等<sup>[21]</sup>设计了一种用于管道隔振的缠绕金属丝材料对称阻尼结构,对其进行了耗散特性试验并以温度等参数作为变量建模,得到了管道缠绕金属丝材料的非线性恢复力模型。但该模型在振幅较大的情况下无法精确描述结构刚度的变化。

本文设计了一种双层金属橡胶隔振结构,开展了热环境下的耗散特性试验。根据试验数据计算了隔振结构的耗散系数、耗散能量、最大变形势能,分析了温度、振幅、频率对该结构耗散特性的影响规律,建立了该隔振结构的非线性恢复力泛函本构模型,较好地描述了金属橡胶隔振结构的恢复力随温度、振幅、频率、位移变化的趋势,为设计初期金属橡胶隔振元件的参数选定提供了理论指导。

## 1 耗散特性参数及试验方案

作为干摩擦阻尼元件,金属橡胶具有记忆特性。因此,金属橡胶的恢复力与位移之间存在一定的迟滞性,图 1 为金属橡胶隔振结构的耗散特性曲线示意图。该曲线由两部分组成,分别代表加载和卸载时金属橡胶隔振结构的恢复力与位移间的关系。

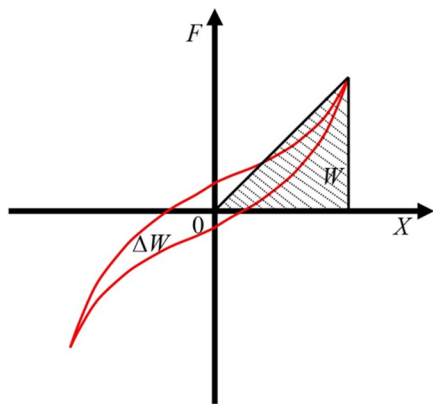


图 1 耗散特性曲线

Fig.1 Dissipation characteristic curve

耗散特性曲线围成的面积为一个振动周期内金属橡胶隔振结构所耗散的能量  $\Delta W$ ,  $X$  轴与耗散特性曲线最大值围成的三角形面积为金属橡胶隔振结构一个振动周期内的最大变形势能  $W$ 。因此,

金属橡胶隔振结构的能量耗散系数可以表示为：

$$\eta_e = \frac{\Delta W}{W}$$

(1)

假设耗散特性试验中施加在金属橡胶隔振结构上的正弦位移激励为：

$$X = X_0 \sin \omega t$$

(2)

其中,  $X_0$  为位移激励幅值,  $\omega$  为激励频率,  $t$  为时间. 金属橡胶隔振结构产生的恢复力方程可以表示为：

$$F = F_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

(3)

其中,  $F_0$  为恢复力幅值,  $\varphi$  为恢复力相对于位移的滞后角. 一个振动周期内金属橡胶隔振结构所耗散的能量可以表示为：

$$\Delta W = \oint F dX = \pi F_0 X_0 \sin \varphi$$

(4)

一个周期内结构的最大变形势能为：

$$W = 2\pi \cdot \frac{1}{2} F_0 X_0 \cos \varphi = \pi F_0 X_0 \cos \varphi$$

(5)

代入式(1)可以得到隔振结构的能量耗散系数：

$$\eta_e = \tan \varphi$$

(6)

如图 2 所示, 本文试验使用空心圆柱形金属橡胶元件. 金属丝牌号为 1Cr18Ni9Ti, 丝径为 0.2mm, 密度为 7800kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为  $E = 198\,000\text{MPa}$ , 外径为  $R = 37\text{mm}$ , 内径  $r = 17\text{mm}$ , 高度  $L = 13\text{mm}$ . 如图 3 所示, 设计了由上夹持端、下夹持端、上端盖以及下端盖组成的夹具, 上下端盖由螺纹连接从而便于调整隔振结构的预压缩量. 试验参数设置如下: 隔振结构的预压缩量为 5mm, 温度为 20℃、100℃、200℃, 振幅为 1.0mm、1.5mm、1.8mm、

2.0mm, 频率为 2Hz、3Hz、4Hz、5Hz.

热环境下金属橡胶隔振结构的耗散试验设备如图 4 所示, 包括 MTS370.25 环境试验机、专用夹具、高温胶带、热电偶温度传感器等. 通过计算机设定试验的位移激励幅值、频率、循环次数以及环境温度, 夹具的上下夹持端分别夹持在 MTS 试验机上下夹头. 通过试验机对下夹头施加位移激励, 试验的位移数据和恢复力数据由试验机内置的位移传感器和力传感器记录并存储. 如图 5 所示, 环境箱内的温度由温度控制器根据设定值自动控制, 试验件表面温度通过粘在试验件表面的热电偶温度传感器测量并实时显示.



图 4 耗散特性试验设备及装配  
Fig.4 Dissipation characteristic test equipment and assembly



图 5 环境温度控制器及热电偶传感器  
Fig.5 Environmental temperature controller and thermocouple sensor



图 2 金属橡胶  
Fig.2 Metal rubber

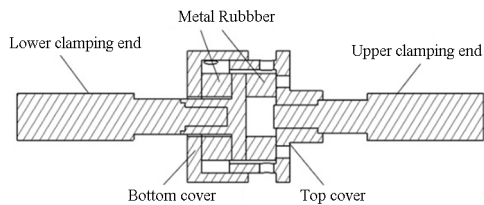


图 3 耗散特性试验夹具  
Fig.3 Dissipation characteristic test fixture

## 2 耗散试验结果分析

根据上述试验方案, 开展了热环境下金属橡胶隔振结构的耗散特性试验, 振幅、频率、温度等参数对结构耗散特性的影响规律分析如下.

### 2.1 振幅对耗散特性的影响

首先, 研究了振幅对耗散特性的影响规律. 温度为 20℃、激励频率为 3Hz 时, 金属橡胶隔振结构

的耗散特性随激励振幅的变化如图 6 所示.随着振幅的增加,金属橡胶隔振结构的最大变形量逐渐增大,产生的恢复力逐渐变大,耗散特性曲线的斜率、所围成的面积也逐渐增大.

根据图 6 所示的耗散特性曲线,计算不同振幅下金属橡胶隔振结构的耗散特性参数如表 1 所示.结构的耗散能量以及最大变形势能均随着振幅的增大逐渐增大.上述现象的原因:随着振幅的增加,金属橡胶试验件的压缩量逐渐增大,其内部金属丝之间的触点也越来越多,产生的摩擦力增大.且接触点之间产生滑移,导致其承载能力、消耗振动能量的能力增强.但两个参数的增大速度不一致,导致隔振结构的耗散系数随振幅的增大逐渐减小.

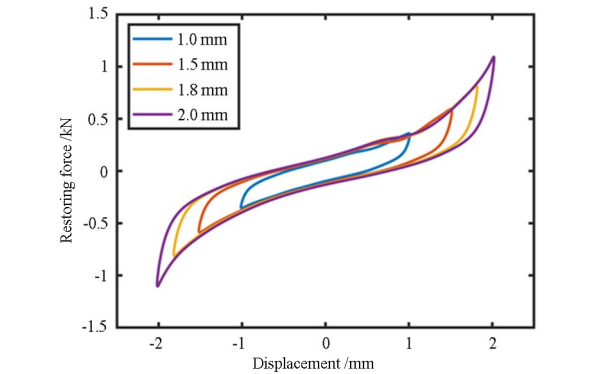


图 6 不同振幅的迟滞回路 ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $f=3\text{Hz}$ )  
Fig.6 Hysteresis loops of different amplitudes ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $f=3\text{Hz}$ )

表 1 不同振幅下的耗散特性参数			
Table 1 Dissipation characteristic parameters of different amplitudes			
$X_0/\text{mm}$	$\eta_e$	$\Delta W/\text{kN}\cdot\text{mm}$	$W/\text{kN}\cdot\text{mm}$
1.0	2.1162	0.3822	0.1806
1.5	1.6880	0.7559	0.4478
1.8	1.4237	1.0547	0.7408
2.0	1.1660	1.2870	1.1038

2.2 频率对耗散特性的影响

然后,研究了频率对耗散特性的影响规律.温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、振幅为  $1.8\text{mm}$  时,金属橡胶隔振结构的耗散特性随激励频率的变化如图 7 所示.随着频率的变化,金属橡胶隔振结构的耗散特性曲线变化很小,其斜率以及围成的面积基本保持不变.

根据图 7 所示的耗散特性曲线,计算不同振幅下金属橡胶隔振结构的耗散特性参数如表 2 所示.频率对于结构的耗散能量、最大变形势能以及耗散

系数的影响很小,没有明显的规律.因此,金属橡胶隔振结构的耗散特性对于频率的变化并不敏感.

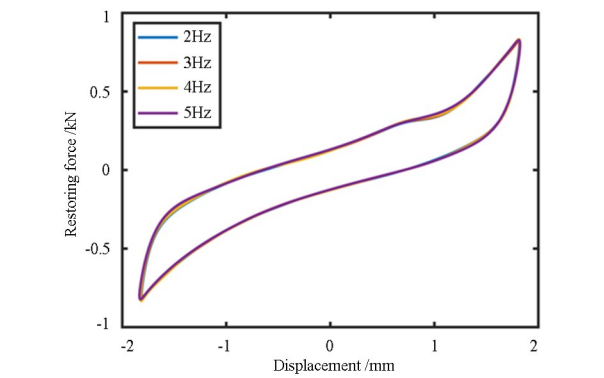


图 7 不同频率的迟滞回路 ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $A=1.8\text{mm}$ )  
Fig.7 Hysteresis loops of different frequencies ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $A=1.8\text{mm}$ )

表 2 不同频率下隔振结构的耗散特性参数			
Table 2 Dissipation characteristic parameters of different frequencies			
$\omega/\text{Hz}$	$\eta_e$	$\Delta W/\text{kN}\cdot\text{mm}$	$W/\text{kN}\cdot\text{mm}$
2	1.4114	1.0477	0.7423
3	1.4237	1.0547	0.7408
4	1.4178	1.0683	0.7535
5	1.4354	1.0768	0.7502

2.3 温度对耗散特性的影响

最后,研究了温度对耗散特性的影响规律.振幅为  $1.8\text{mm}$ 、频率为  $3\text{Hz}$  时,金属橡胶隔振结构的耗散特性随温度的变化如图 8 所示.当环境温度低于  $100^{\circ}\text{C}$  时,结构产生的最大恢复力、耗散特性曲线围成的面积均在减小.在温度达到  $200^{\circ}\text{C}$  时,结构产生的恢复力、耗散特性曲线围成的面积均增大.

根据图 8 所示的耗散特性曲线,计算不同温度

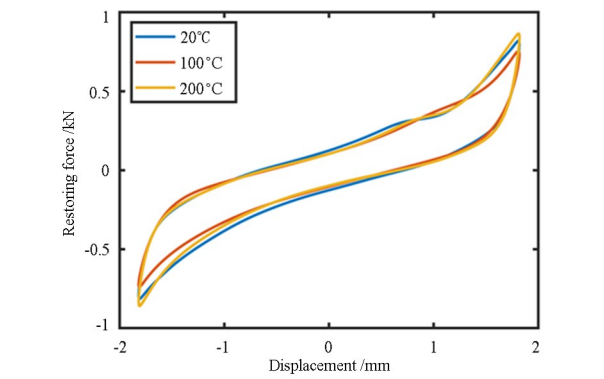


图 8 不同温度的迟滞回路 ( $f=3\text{Hz}$ ,  $A=1.8\text{mm}$ )  
Fig.8 Hysteresis loops of different temperatures ( $f=3\text{Hz}$ ,  $A=1.8\text{mm}$ )



下隔振结构的耗散特性参数如表 3 所示.随着环境温度的升高,隔振结构的耗散能量和最大变形势能先减小后增大,而耗散系数则是略有减小.当环境温度在 100℃ 及以下时,随着温度的升高,本文采用的金属橡胶试验件内部金属丝之间的摩擦系数升高、接触点增加,金属丝之间的摩擦力增大.同时,金属丝自身的弹性模量随温度的升高逐渐减小,金属丝的刚度降低、弹性力减小.但由于金属丝之间的摩擦力增大的速度不及弹性力降低的速度,金属橡胶隔振结构的耗散能量、最大变形势能均呈现减小的趋势.当温度高于 100℃ 时,由于表面发生氧化,金属丝的弹性模量趋于稳定.随着温度的升高,由于金属橡胶膨胀和夹具的限制,金属丝之间的触点迅速增加,金属丝之间的摩擦力也迅速增大.因此,耗散能量、最大变形势能均呈现增大的趋势.

表 3 不同温度下隔振结构的耗散特性参数  
Table 3 Dissipation characteristic parameters of different temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	$\eta_e$	$\Delta W/\text{kN}\cdot\text{mm}$	$W/\text{kN}\cdot\text{mm}$
20	1.4237	1.0547	0.7408
100	1.3238	0.9018	0.6812
200	1.2251	0.9865	0.7726

### 3 参数辨识模型及验证

#### 3.1 参数辨识模型

金属橡胶隔振结构服役期间,金属丝间会产生滑移、摩擦、挤压等相对运动,将造成隔振结构的非线性本构关系.另外,金属橡胶产生的恢复力在时间上具有记忆特性,且弹性恢复力关于横轴并非为对称的.因此,本文采用具有描述非线性弹性能力的双折线迟滞恢复力模型来分析金属橡胶隔振

结构的恢复力.  
如图 9 所示,金属橡胶隔振结构模型的具有记忆特性的非线性恢复力  $z(t)$  可表示为增量形式:

$$\begin{cases} \text{d}z(t) = \frac{k_s}{2} \{1 + \text{sgn}[z_s - |z(t)|]\} \text{d}y(t) \\ k_s = \frac{z_s}{y_s} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $y(t)$  为弹性元件的位移,  $z(t)$  为滞后力的记忆恢复力部分,  $k_s$  为未产生滑移时的线性刚度,  $z_s$  为滑移时的记忆恢复力,  $y_s$  为金属丝之间相对运动的最大位移.假设结构受正弦位移激励:

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

其中,  $y_m$  为位移振幅,  $\omega$  为激励频率,  $\varphi$  为位移的初始相位角.假设与变形历史相关的记忆恢复力和与变形历史无关的无记忆恢复力互不影响,则结构的非线性恢复力可表示为:

$$g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} = g_0\{y(t), \dot{y}(t)\} + z(t) \quad (9)$$

其中,无记忆恢复力  $g_0\{y(t), \dot{y}(t)\}$  如下式所示:

$$\begin{aligned} g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} &= \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{2i-1} y^{2i-1}(t) + \\ &\sum_{i=0}^{(n-1)/2} a_{2i} y^{2i}(t) \text{sgn}[\dot{y}(t)] \\ &= Q_1(t) + Q_2(t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $Q_1(t)$  为单值非线性函数,  $Q_2(t)$  为双值非线性闭合曲线.忽略高阶阻尼力以及与变形量、变形速度有关的复杂阻尼力,双值非线性闭合曲线所表示的非线性阻尼力可以简化为线性粘性阻尼力  $c\dot{y}(t)$  及滞后阻尼力  $z(t)$  之和.忽略高阶非线性弹性恢复力,金属橡胶隔振结构的非线性本构关系可以表示为:

$$\begin{aligned} g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} \\ = k_1 y(t) + k_3 y^3(t) + k_5 y^5(t) + c\dot{y}(t) + z(t) \end{aligned} \quad (11)$$

如图 10 所示,对试验得到的耗散特性曲线进行精确分解,可以得到金属橡胶隔振结构的非线性函数本构关系.非线性阻尼力是一条双值非线性闭合曲线,反映了金属橡胶隔振结构的复杂阻尼成分,可表示为:

$$F_c = c |\dot{y}(t)|^\alpha \text{sgn}[\dot{y}(t)] \quad (12)$$

其中,  $c$  为等效黏性阻尼系数,  $\alpha$  为阻尼成分因子.

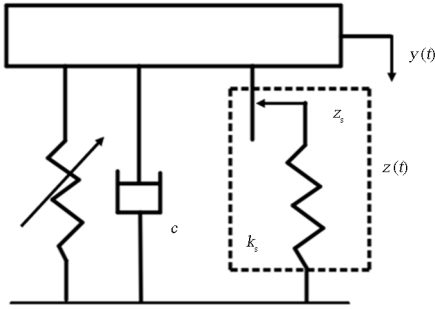


图 9 金属橡胶隔振结构的耗散试验模型

Fig.9 Dissipation test model for metal rubber vibration isolator

阻尼成分因子越大,阻尼力对速度变化越敏感。

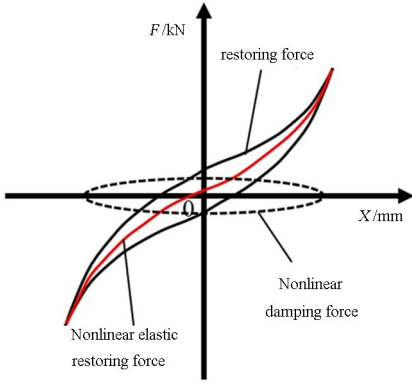


图 10 非线性恢复力的分解

Fig.10 Decomposition of nonlinear restoring force

考虑到弹性恢复力和阻尼力随金属橡胶元件变形幅值和激励频率的变化,金属橡胶隔振结构的非线性本构关系可表示为:

$$g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} = k_1(A)y(t) + k_3(A)y^3(t) + k_5(A)y^5(t) + c(A, f) |\dot{y}(t)|^{a(A, f)} \operatorname{sgn}[\dot{y}(t)] \quad (13)$$

其中,  $k_1$  为一次线性刚度系数,  $k_3$  为三次非线性刚度系数,  $k_5$  为五次非线性刚度系数,  $A$  为振幅,  $f$  为频率,  $y(t)$  为振动位移。耗散特性试验结果表明,金属橡胶隔振结构的耗散特性与温度有关。因此,金属橡胶隔振结构的非线性恢复力可以表示为与振幅、温度以及频率相关的函数:

$$g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} = F_k + F_c \\ = k_1(A, T)y(t) + k_3(A, T)y(t)^3 + k_5(A, T)y(t)^5 + c(A, f) |\dot{y}(t)|^{a(A, f)} \operatorname{sgn}[\dot{y}(t)] \quad (14)$$

其中,  $F_k$  为非线性弹性力,  $F_c$  为非线性阻尼力。

### 3.2 参数辨识

使用非线性最小二乘法,对试验所测得的不同温度、振幅、频率下隔振结构的耗散特性曲线进行拟合,可以得到:

$$g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} = \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{2i-1} y(t)^{2i-1} + \sum_{i=0}^{(n-1)/2} a_{2i} y(t)^{2i} \operatorname{sgn}[\dot{y}(t)] \quad (15)$$

其中,  $n$  为根据拟合精度选择的幂级数多项式项数(奇数),奇数项系数为非线性弹性恢复力的刚度系数。根据刚度系数的拟合结果绘制非线性刚度随温度、振幅变化的空间曲面如图 11、图 12 和图 13 所

示。

如图 11 所示,  $k_1$  随环境温度的升高先减小后增大,随振幅的变化规律则比较复杂,采用多项式对其进行拟合能够有较好的精度。因此,  $k_1(A, T)$  的函数表达式为:

$$k_1(A, T) = 0.2900 - 0.0586A - 0.0008T - 0.0151A^2 + 0.0009AT - 8.1947 \times 10^{-8}T^2 + 0.0192A^3 - 0.0004A^2T + 1.0153 \times 10^{-6}AT^2 \quad (16)$$

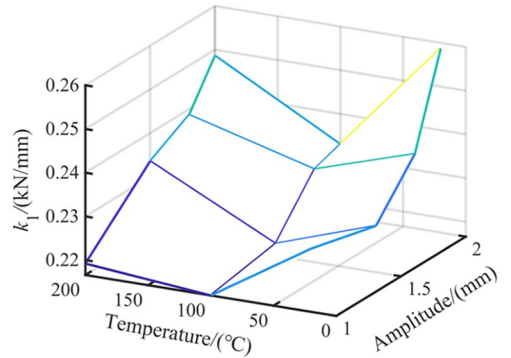


图 11  $k_1$  随温度振幅变化的空间曲面

Fig.11 Variations of  $k_1$  with temperature and amplitude

如图 12 所示,  $k_3$  随着环境温度的升高,先增大后减小,且在不同温度下,随振幅变化的规律比较复杂。因此,  $k_3(A, T)$  可用多项式拟合为:

$$k_3(A, T) = -0.6525 + 0.9041A + 0.0010T - 0.4442A^2 - 0.0008AT - 2.9429 \times 10^{-6}T^2 + 0.0676A^3 + 0.0002A^2T + 5.8782 \times 10^{-7}AT^2 \quad (17)$$

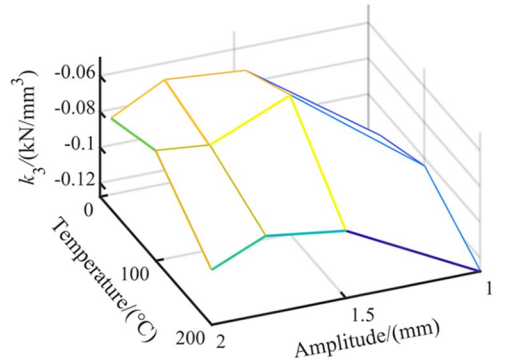


图 12  $k_3$  随温度振幅变化的空间曲面

Fig.12 Variations of  $k_3$  with temperature and amplitude

如图 13 所示,随着振幅逐渐增大,  $k_5$  逐渐减小。温度升高时,  $k_5$  先减小后增大。对  $k_5$  随温度振幅变化的空间曲面进行拟合,发现使用指数函数与正弦函数结合的多项式拟合精度较高。因此,  $k_5(A, T)$  可表示为:

$$k_5(A, T) = 0.0343 - 0.0129 \sin(0.7683AT) +$$

$$1.1633e^{-(1.3933A)^2}$$

(18)

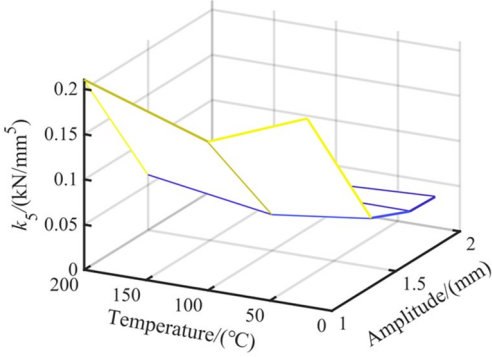


图 13  $k_5$  随温度振幅变化的空间曲面  
Fig.13 Variations of  $k_5$  with temperature and amplitude

整理式(16)~式(18),可以得到非线性弹性力关于振幅、温度的函数表达式:

$$F_k = k_1(A, T)y(t) + k_3(A, T)y^3(t) + k_5(A, T)y^5(t) \quad (19)$$

从试验所得的耗散曲线的恢复力数据中减去非线性弹性力  $F_k$ , 可得到非线性阻尼力  $F_e$ :

$$F_e = g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} - k_1(A, T)y(t) - k_3(A, T)y^3(t) - k_5(A, T)y^5(t) \quad (20)$$

对非线性阻尼力进行参数识别,可得到等效黏性阻尼系数  $c$  以及阻尼成分因子  $\alpha$ 。根据识别结果,绘制其随振幅、频率变化的空间曲面如图 14 和图 15 所示。

如图 14 所示,等效黏性阻尼系数  $c$  随振幅的增大逐渐减小,随频率的增大逐渐减小。通过非线性最小二乘法对  $c$  随振幅频率变化的空间曲面进行拟合,发现选用幂函数拟合的精度较高。黏性阻尼系数识别结果为:

$$c(A, f) = 1.1150A^{-1.2060}f^{-0.3929} \quad (21)$$

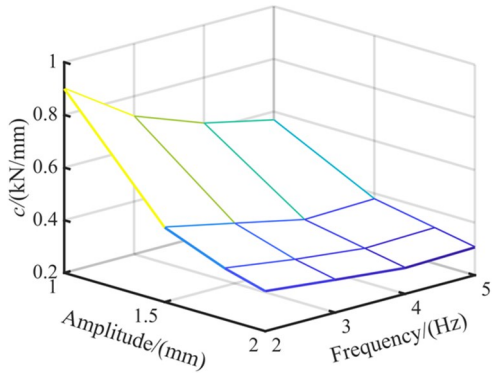


图 14  $c$  随振幅频率变化的空间曲面  
Fig.14 Variations of  $c$  with amplitude and frequency

如图 15 所示,阻尼成分因子  $\alpha$  随振幅的增大逐渐减小,但对频率变化并不敏感。通过非线性最

小二乘法对  $\alpha$  随振幅频率变化的空间曲面进行拟

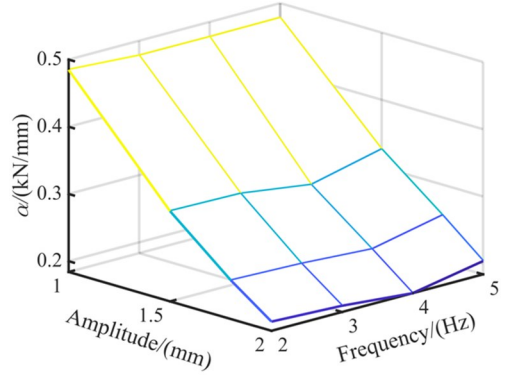


图 15 随振幅频率变化的空间曲面  
Fig.15 Variations of with amplitude and frequency

合,发现选用幂函数拟合的精度较高。阻尼成分因子识别结果为:

$$\alpha(A, f) = 0.4859A^{-1.1983}f^{-0.0026} \quad (22)$$

将式(16)~式(18)、式(21)和式(22)代入式(14),金属橡胶隔振结构的非线性恢复力泛函可表示为:

$$\begin{aligned} g_n\{y(t), \dot{y}(t), t\} &= k_1(A)y(t) + k_3(A)y^3(t) + k_5(A)y^5(t) + \\ &c(A, f) |\dot{y}(t)|^{\alpha(A, f)} \operatorname{sgn}[\dot{y}(t)] \\ &= (0.2900 - 0.0586A - 0.0008T - \\ &0.0151A^2 + 0.0009AT - 8.1947 \times 10^{-8}T^2 + \\ &0.0192A^3 - 0.0004A^2T + 1.0153 \times \\ &10^{-6}AT^2)y(t) + (-0.6525 + 0.9041A + \\ &0.0010T - 0.4442A^2 - 0.0008AT - 2.9429 \times \\ &10^{-6}T^2 + 0.0676A^3 + 0.0002A^2T + 5.8782 \times \\ &10^{-7}AT^2)y(t)^3 + [0.0343 - \\ &0.0129\sin(0.7683AT) + 1.1633e^{-(1.3933A)^2}]y(t)^5 + \\ &(1.1150A^{-1.2060}f^{-0.3929}) \times \\ &|\dot{y}(t)|^{0.4859A^{-1.1983}f^{-0.0026}} \operatorname{sgn}[\dot{y}(t)] \end{aligned} \quad (23)$$

### 3.3 模型验证

为了验证所构建的金属橡胶隔振结构非线性恢复力模型的精度,对不同温度、振幅以及频率下金属橡胶隔振结构的耗散特性曲线进行了预测。如图 16 所示,所建立的非线性恢复力本构模型能够较好地描述其非线性恢复力随温度、振幅、频率以及位移的变化规律。在振幅较小 ( $A < 1.8\text{mm}$ ) 时,预测结果与试验吻合良好。当振幅增大时,尽管局部预测误差增大,但总体趋势仍能可靠预测。预测精度降低的原因:在振幅较大

时,本试验采用的金属橡胶试验件的非线性阻尼

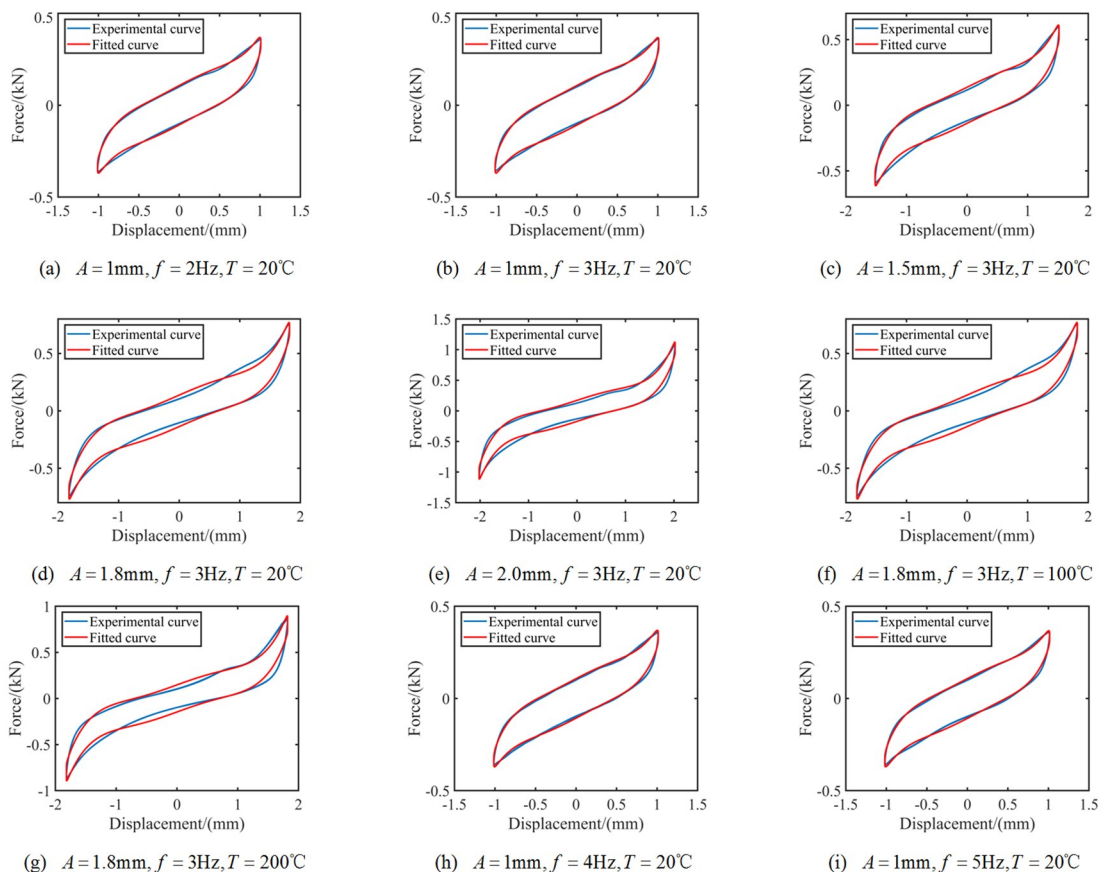


图 16 试验与拟合曲线对比

Fig.16 Comparison between experimental and fitted curves

力并不是标准的椭圆,与阻尼力模型存在差异,导致预测结果略有误差。

## 4 结论

本文设计了一种用于热环境下的双层金属橡胶隔振结构,通过开展不同工况的耗散特性试验,研究了温度、振幅以及频率对于其耗散特性的影响规律,建立了金属橡胶隔振结构的非线性恢复力模型,其预测结果与试验吻合良好.研究主要得出如下结论:

(1)在振幅为 1mm~2mm 的范围内,随着振幅的增加,所设计隔振结构的耗散系数逐渐减小,耗散能量以及最大变形势能逐渐增加。

(2)在频率为 2Hz~5Hz 的范围内,所设计隔振结构的耗散特性对频率的变化并不敏感。

(3)随着环境温度升高,所设计隔振结构的耗散系数略有减小,其耗散能量以及最大变形势能在 20°C~200°C 范围内先减小后增大。

(4)建立了该隔振结构的非线性恢复力本构模

型,通过与试验对比验证了其合理性以及精度。

## 参考文献

- [1] LIU P, HE G, WU L H. Uniaxial tensile stress-strain behavior of entangled steel wire material [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 509 (1/2): 69—75.
- [2] 朱芹,樊文欣,张保成,等.金属丝网减振器的建模与参数识别[J].科学技术与工程,2017,17(28): 47—51.  
ZHU Q, FAN W X, ZHANG B C, et al. Mechanical modeling and parameter identification of the metal-net vibration absorber [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(28): 47—51. (in Chinese)
- [3] 董万元,杨利,师永宁.金属丝网非线性隔振器的动静态特性研究[J].实验力学,2019,34(5): 897—903.  
DONG W Y, YANG L, SHI Y N. Investigation on



- dynamic and static vibration characteristics of metal wire mesh nonlinear vibration isolator [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(5): 897—903. (in Chinese)
- [4] ZARZOUR M, VANCE J. Experimental evaluation of a metal mesh bearing damper [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(2): 326—329.
- [5] 李宇燕, 黄协清. 密度和形状因子变化时金属橡胶材料的本构关系[J]. *航空学报*, 2008, 29(4): 1084—1090.
- LI Y Y, HUANG X Q. Constitutive relation for metal-rubber with different density and shape factor [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(4): 1084—1090. (in Chinese)
- [6] WU Y W, LI S Z, BAI H B, et al. Experimental and constitutive model on dynamic compressive mechanical properties of entangled metallic wire material under low-velocity impact [J]. *Materials*, 2020, 13(6): 1396.
- [7] 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+258.
- 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+258. (in Chinese)
- [8] LEE Y B, PARK D J, KIM C H, et al. Rotordynamic characteristics of a micro turbo generator supported by air foil bearings [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(2): 297—303.
- [9] MA Y H, ZHANG Q C, ZHANG D Y, et al. A novel smart rotor support with shape memory alloy metal rubber for high temperatures and variable amplitude vibrations [J]. *Smart Material Structures*, 2014, 23(12): 125016.
- [10] 姜洪源, 董春芳, 敖宏瑞, 等. 航空发动机用金属橡胶隔振器动静态性能的研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(2): 140—142.
- JIANG H Y, DONG C F, AO H R, et al. Research on dynamic and static characteristics of metal rubber isolator used in aero-engine [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(2): 140—142. (in Chinese)
- [11] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞, 等. 金属橡胶与弹簧组合型隔振器建模及分析方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(5): 520—524.
- JIANG H Y, XIA Y H, AO H R, et al. Modeling and analyzing method of metal rubber-spring isolator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(5): 520—524. (in Chinese)
- [12] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞, 等. 金属橡胶与弹簧组合型隔振器动静态性能的分析[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(21): 1801—1804.
- JIANG H Y, XIA Y H, AO H R, et al. Analysis of the static and dynamic performance of metal rubber-spring isolator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(21): 1801—1804. (in Chinese)
- [13] 闫辉, 夏宇宏, 姜洪源, 等. 复杂形状的金属橡胶隔振器当量弹性模量研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(3): 46—49.
- YAN H, XIA Y H, JIANG H Y, et al. Study on the equivalent elastic modulus of metal rubber isolator with complex structure [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 23(3): 46—49. (in Chinese)
- [14] JIANG H Y, XIA Y H, AO H R, et al. Lifetime of metal rubber isolator with different vibration amplitudes [J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 2005, 12(2): 181—185.
- [15] 曹凤利, 宋彬, 王怀光, 等. 金属橡胶非对称迟滞回线动力学建模研究[J]. *机械工程师*, 2022(11): 24—26.
- CAO F L, SONG B, WANG H G, et al. Research on dynamic modeling of the asymmetric hysteresis loop of metal rubber [J]. *Mechanical Engineer*, 2022(11): 24—26. (in Chinese)
- [16] 肖坤, 白鸿柏, 薛新, 等. 高温管路包覆金属橡胶耗能特性及参数识别[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(1): 11—17.
- XIAO K, BAI H B, XUE X, et al. Energy dissipation characteristics and parameter identification of metal rubber coated pipe in high temperature environment [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(1): 11—17. (in Chinese)
- [17] 路纯红, 白鸿柏, 胡仁喜. 金属橡胶/橡胶复合叠层耗能器动力学模型[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(5): 493—497.
- LU C H, BAI H B, HU R X. Dynamic model of metal rubber/rubber composite laminated damper [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21

(5): 493—497. (in Chinese)

[18] 李玉龙, 白鸿柏, 何忠波, 等. 金属橡胶非线性隔振器试验研究与参数分析[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2): 194—200.

LI Y L, BAI H B, HE Z B, et al. Experimental study and parameter analysis of nonlinear metal-rubber isolators [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(2): 194—200. (in Chinese)

[19] 吕正生. 高温环境下钢丝网垫减振器的力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

LV Z S. Study the mechanical characteristics of steel-net pad damper in the high temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

[20] 颜秉金. 高温环境下金属橡胶隔振器的性能分析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

YAN B J. Dynamic and static experimental study on metal rubber vibration isolator in high-temperature environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[21] JIANG F, DING Z Y, WU Y W, et al. Energy dissipation characteristics and parameter identification of symmetrically coated damping structure of pipelines under different temperature environment [J]. Symmetry, 2020, 12: 1283.