

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0619-04

金属橡胶材料的振动特性

许建东, 郭宝亭, 朱梓根, 李其汉
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过对金属橡胶材料进行振动特性试验, 总结了不同激励水平、不同相对密度及不同材质对其振动特性的影响。在考虑非线性刚度和非线性阻尼的基础上, 给出描述金属橡胶材料动态特性的方法, 进行了稳态振动响应计算, 并与试验结果进行了对比。结果表明: 振动越大, 金属橡胶材料的减振效果越好。

关键词: 航空、航天推进系统; 金属橡胶; 振动特性; 非线性; 传递率

中图分类号: V 231. 96

文献标识码: A

The Vibration Performance of Metal-Rubber Material

XU Jian-dong, GUO Bao-ting, ZHU Zi-gen, LI Qi-han

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: Experiments were performed to study the effect of varies excitation level relative density and material properties on the vibration characteristics of Metal Rubber (MR). Some general disciplinarians of characteristics of MR were found. Based on non-rigidity and non-damping, the method of describing vibration performance of MR was presented, steady response was calculated, and the results were contrast to testing results. The results show that the large the vibration intensity, the better the damping effet will be.

Key words: aerospace propulsion system; metal rubber; vibration performance; nonlinear; transfer

金属橡胶, 因其是由金属丝制成且具有橡胶般的弹性而得名。其力与位移的关系有线性—软特性—硬特性的变化特点。金属橡胶减振器的刚度和阻尼特性与变形有关。当振幅不断改变时, 减振器会呈现不同的刚度和阻尼特性。在振幅很小时, 金属橡胶材料中的金属丝之间不发生滑移, 仅仅是金属橡胶材料中, 螺旋弹簧自身的受载变形, 其刚度几乎不变阻尼也小。当振幅增大时, 金属橡胶材料中的螺旋弹簧相互接触, 并有滑移现象发生, 使得刚度下降, 阻尼也增大。由于接触滑移而产生摩擦, 因而产生阻尼耗散能量。当振幅继续增

大时, 金属橡胶材料中的螺旋弹簧相互接触挤压, 滑移现象减小, 刚度增大。这就是金属橡胶阻尼器的减振机理^[1]。

1 金属橡胶材料的振动特性试验

金属橡胶结构材料具有非线性刚度和非线性阻尼特性, 而非线性刚度特性有三个阶段即线性、软特性和硬特性。由这种材料制成的减振、隔振系统有许多独特的优点, 较之线性系统可以更好地控制振动。隔振效果的好坏可用传递率来近似进行描述。

收稿日期: 2003- 07- 18; 修订日期: 2004- 08- 20

作者简介: 许建东(1965-), 男, 河北饶阳人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 高级工程师, 主要从事航空发动机寿命、故障诊断与状态监控研究。

1.1 试验方法及设备

传递率特性曲线是通过对金属橡胶材料试验件在振动台上,保持振动台面的激励加速度 a_1 为恒定值,进行正弦扫描试验。振动台的激励通过试验件后传递到质量块上,同时记录质量块上振动响应加速度。通过改变 a_1 值的大小,来考核试件在不同载荷下的减振性能。减振效果用阻尼比和传递率 T 来衡量。传递率定义如下:

$$T = a_2/a_1$$

或

$$T = \frac{1 + (2\zeta)^2}{(1 - \zeta)^2 + (2\zeta)^2}$$

当共振时, $\gamma = 1$, 则阻尼比:

$$\zeta = \frac{1}{4(T^2 - 1)}$$

其中: a_2 为材料试验件振动响应的加速度, γ 为频率比, ζ 为阻尼比。

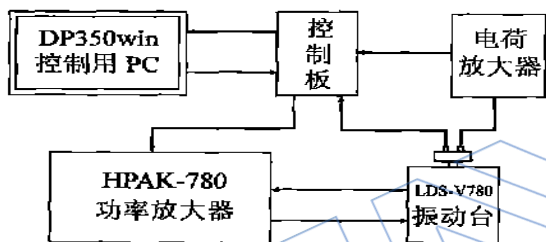


图 1 振动特性试验原理图
Fig. 1 The map of tsetting principium

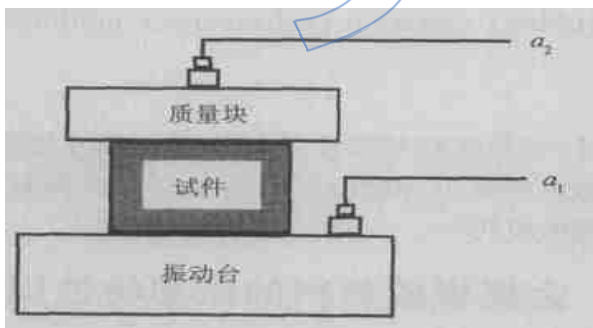


图 2 振动系统模型
Fig. 2 The model of vibration system

试验在振动台上进行。图 1 为金属橡胶减振器的振动特性试验原理图。图 2 为振动系统模型。试验时,为进行定量分析,除了考察不同激振力水平的影响外,其余试验均采用 3 g 常加速度正弦激励,扫频范围 0~1 500 Hz。各试验功率放大器的增益保持相同。试验时环境温度为 20℃。

1.2 传递率特性试验结果

图 3 为金属橡胶材料试验件,在不同激励水平下的传递率曲线。试验件号为 a19。图 4 为超弹性 SE、记忆特性 SME 和 GH4169 三种材料的金属橡胶试验件,在同一激励水平下的传递率曲线。试验件号分别为 ct2, jiyi2 和 gh2。

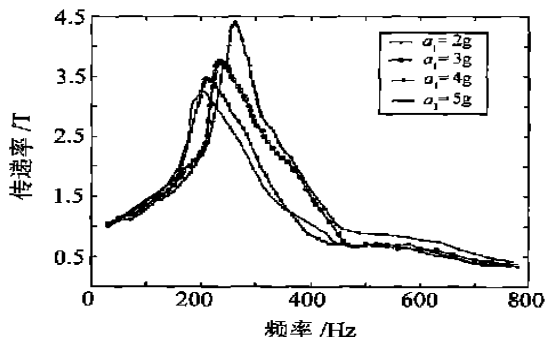


图 3 不同激励水平下的传递率曲线
Fig. 3 Curve of transfer in differ level of vibration

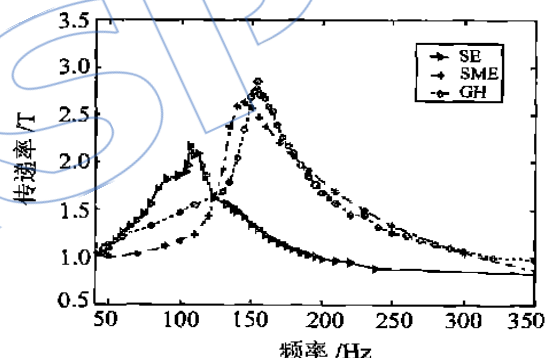


图 4 三种材料同一激励水平下的传递率曲线
Fig. 4 Curve of transfer in differ material

从图 3 中可以看出随激励加速度 a_1 的增加,系统的峰值频率呈下降的趋势;而最大传递率也呈下降的趋势。随着激励的增加,这种变化的趋势逐渐变缓。这说明,系统的刚度和阻尼都发生了变化,共振频率减小,即刚度减小了,而阻尼则增加。幅频传递率曲线峰值向左偏,结构材料试验件振动特性表现为软特性。图 4 的试验结果表明:由不同丝材制成的金属橡胶材料,其最大传递率也不同。这说明金属橡胶的减振效果与其制成材料的丝材有关。

2 金属橡胶材料的振动特性分析

金属橡胶结构材料作为弹性元件,具有变刚度、变阻尼的非线性迟滞特性,其本构关系非常复杂。它不仅能够承受大变形,而且还具有很好的隔

冲能力,能保证在较宽的频带内吸振。为了金属橡胶材料的开发和应用,有必要对其动态特性进行研究。

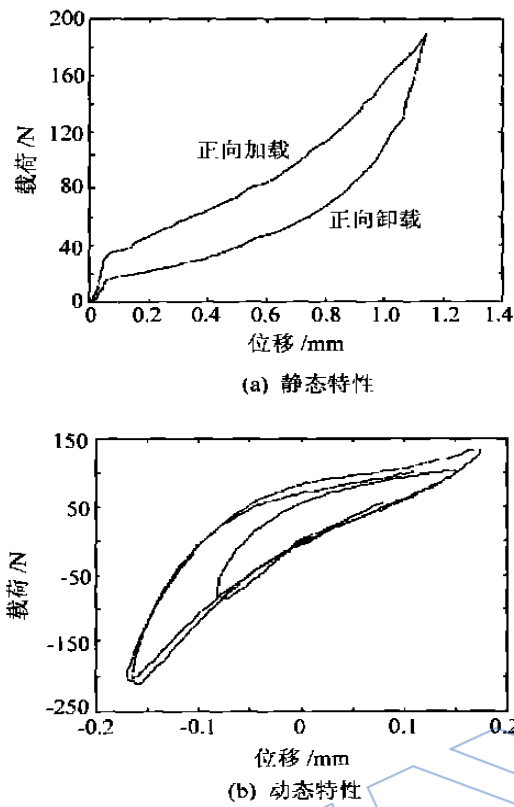


图 5 力—位移特性曲线
Fig. 5 Curve of force—displacement

对具有迟滞非线性系统,学者们提出了许多系统结构的理论模型,这些模型都有其各自的特点和使用范围^[2,3]。如图 5(b)所示的是金属橡胶材料试验件 a17 的振动特性曲线,不难看出,它具有非线性迟滞特性。对于它的动力特性,目前还没有一种较好的数学模型来描述。针对金属橡胶结构材料的特点,以及前面大量的静态和动态试验结果的总结。这里使用如下方法,为了便于工程应用,以及金属橡胶结构材料在本文中的实际应用情况,建立一种近似的模型,设滞后角为 α ,则有^[4]:

$$\begin{aligned} K^* &= Ke^{j\alpha} = K(\cos \alpha + j \sin \alpha) = \\ &= K \cos \alpha (1 + j \tan \alpha) = K (1 + j \eta) \end{aligned} \quad (1)$$

式中包含有阻尼的刚度称之为复刚度 K^* ,它的刚度性质用 K 表示,而阻尼性质则用损耗因子 η 表示。

对于金属橡胶结构材料,由于刚度是非线性的,不是常量。因此,复刚度可表示为:

$$K^* = AK_{MR}(1 + j\eta) \quad (2)$$

其中 A 为待定系数, K_{MR} 为文献[1]中第四章式(4-3)得到静刚度。所以,金属橡胶结构材料的运动微分方程可表示为:

$$M\ddot{x} + AK_{MR}(1 + j\eta)x = F \quad (3)$$

这里的阻尼损耗因子,可由试验方法得到,由试验件 a13, a14 和 a15 的试验结果(如图 7~9 中虚线部分)求得式(3)中的待定系数 A ,则方程为:

$$M\ddot{x} + 0.828 6K_{MR}(1 + j\eta)x = F \quad (4)$$

通过试验件 a13, a14, a15 和 a16 的传递率特性试验结果,用半功率法近似求得金属橡胶结构材料的阻尼比系数,并用 $\eta = 2\zeta$ 换算成阻尼损耗因子 η 列于表 1 中。

表 1 半功率法求得各试验件的阻尼损耗系数

Table 1 Damping wear coefficient of test parts in half-power

激振加速度水平/ g	10	4	1
试件 a13	0.55	0.40	0.33
试件 a14	0.46	0.43	0.31
试件 a15	0.42	0.38	0.26
试件 a16	0.38	0.29	0.21

以上所用试验件的丝材均为 GH4169、丝径 0.15 mm、螺旋径 1.3 mm、且体积相同、相对密度(即金属橡胶材料密度与金属丝密度之比)分别为 0.18, 0.236, 0.273 和 0.32。图 6 为单自由度质量块计算简图。其中质量块的质量为 1 000 g, 振动台的扫描频率从 0~400 Hz, 激振水平分别为 1 g, 4 g 和 10 g。计算时,可以根据激励水平,求出受迫振动在时域内稳态响应的振幅,此时的振幅为相对值,考虑激励的影响,在与激励水平之比即为该质量块振动系统的绝对传递率。

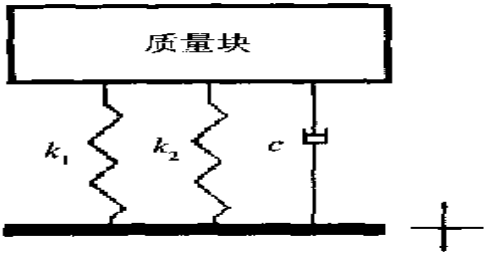


图 6 质量块振动系统
Fig. 6 System of vibration

图 7~图 10 为上述试件的传递率曲线。

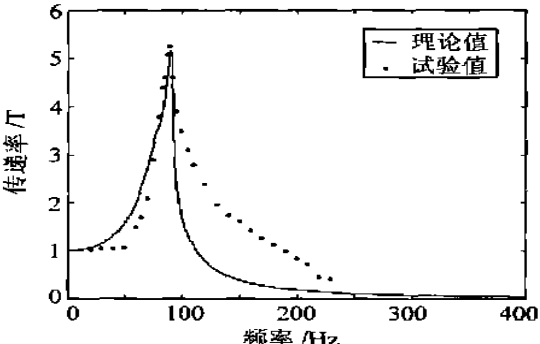
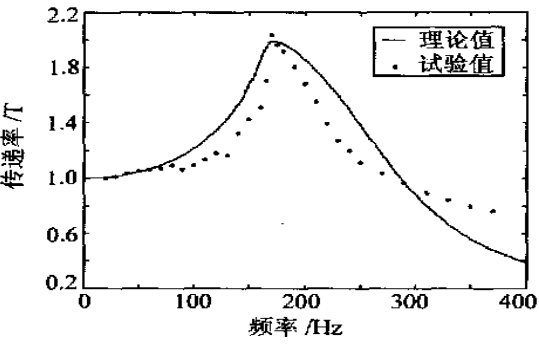


图 7 试验件 a13 激励水平 10 g 的传递率曲线
Fig. 7 Curve of transfer of test part a13 in 10 g

图 10 试验件 a16 激励水平 1 g 的传递率曲线
Fig. 10 Curve of transfer of test part a16 in 1 g

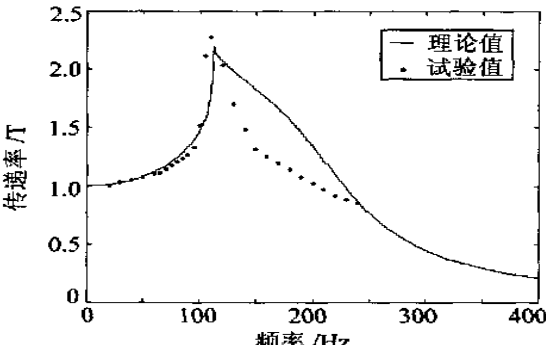


图 8 试验件 a14 激励水平 10 g 的传递率曲线
Fig. 8 Curve of transfer of test part a14 in 10 g

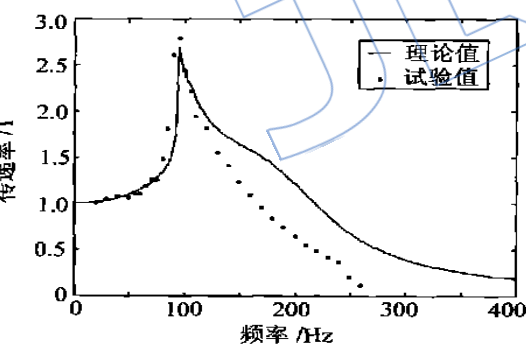


图 9 试验件 a15 激励水平 4 g 的传递率曲线
Fig. 9 Curve of transfer of test part a15 in 4 g

从上述理论与试验的结果来看,理论值与试验值基本吻合。最大传递率及峰值处的频率对应

的很好,而其余部分则有一定的误差,这是由于动态特性模型中阻尼部分还有待进一步的研究。

3 结 论

金属橡胶结构材料具有优良的减振特性,它不仅具有非线性刚度,而且还具有非线性阻尼。通过对金属橡胶材料的振动特性试验与理论分析,可以得出如下结论:

- (1) 对同一试验件(a19),随着激励加速度的增加,系统的峰值频率呈下降的趋势,最大传递率下降,减振效果也越好(如图 3)。
- (2) 用本文给出的理论描述方法,可以分析金属橡胶材料的振动特性,与试验结果对比较好。
- (3) 金属橡胶材料的相对密度越高,其振动特性曲线峰值越向右偏,表现为硬特性;反之,曲线峰值越向左偏,表现为软特性。

参考文献:

[1] 郭宝亭. 金属橡胶阻尼器性能和在转子系统减振应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

[2] 张景绘. 动力学系统建模 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[3] 龚宪生. 钢丝绳联轴器迟滞特性的建模与参数辨识 [J]. 重庆大学学报, 1996, 19(5): 30- 36.

[4] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.