

文章编号:1006-1355(2009)05-0016-03

橡胶隔振移动硬盘非线性系统的冲击研究

班书昊¹, 李晓艳¹, 蒋学东¹, 严国新²

(1. 江苏工业学院 机械系, 江苏 常州 213016; 2. 常州寰宇减震器厂, 江苏 常州 213016)

摘要: 在橡胶隔振移动硬盘构成的非线性系统中引入了频率硬化系数, 建立非线性振动微分方程, 并构造相应的仿真计算模型。使用该模型计算具有不同脉冲加速度幅值和脉冲时间宽度的冲击响应, 分析并讨论脉冲信号参数对隔振效果的影响。理论分析与数值模拟表明: 与传统的线性振动模型相比, 引入频率硬化系数的橡胶隔振模型更符合实际, 且具有良好的冲击响应。仿真模型简单, 计算方便, 可以用于快速确定非线性隔振系统的固有频率。

关键词: 振动与波; 橡胶隔振器; 非线性; 半正弦脉冲; 仿真; 冲击响应**中图分类号:** O328;O322 **文献标识码:** A

Study on Impulse Response of Nonlinear System of Mobile Hard Disk with Rubber Isolator

BAN Shu-hao¹, LI Xiao-yan¹, JIANG Xue-dong¹, YAN Guo-xin²(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnical University, Changzhou Jiangsu 213016, China;
2. Changzhou Huanyu Shock Absorber Factory, Changzhou Jiangsu 213016, China)

Abstract: Employing the frequency hardening coefficient in the nonlinear dynamic system consisting of mobile hard disks with rubber isolator, a set of nonlinear differential equations for this system is established. The corresponding model for numerical simulation is constructed. The dynamic responses for different pulse durations and pulse magnitudes of acceleration are computed with this model. The influences of pulse signal parameters on the isolation effect are analyzed and discussed. Theoretical analysis and numerical simulation show that the model presented here is more reasonable than the traditional linear dynamic model. Furthermore, this model is simple and convenience for computation. It can be used to determine the natural frequencies of nonlinear vibration-isolation system effectively.

Key words: vibration and wave; rubber isolator; nonlinear; semi-sinusoidal impulse; simulation; impulse response

橡胶材料是高弹性、低模量及粘弹性的高聚物, 由于具有特殊的微观结构且兼具粘性液体和弹性固体的特性, 在产生动态应力 - 应变时能够通过能量转换和消耗达到良好的减振减噪效果^[1]。由橡胶材料制作的橡胶隔振器是应用最广泛的一类隔振器, 具有结构紧凑、工艺性好、成本低等优点,

还可以根据承载设备的结构要求, 硫化成任意的几何形状。

国内外对橡胶隔振器的隔振性能参数已有了较为充分的研究, 而对其冲击特性的研究还十分欠缺, 这主要是因为: 橡胶隔振器的性能随着橡胶的配方、温度、硬度、受力状态等诸多因素的不同而变化; 橡胶隔振器的动态特性与预载、激振振幅和激振频率等有关^[2,3]; 橡胶隔振器的抗冲击性能不仅取决于材料, 而且还与结构形状有关; 国内外对冲击试验研究主要采用落锤式或摆锤式冲击试验机, 这些试验设备并不是专门针对隔振器的冲击性能进行研究, 无法控制脉冲时间宽度, 从而导致无法

收稿日期: 2009-02-23

作者简介: 班书昊(1978-), 男, 山东临沐人, 04年毕业于清华大学航天航空学院, 获硕士学位, 现为江苏工业学院讲师, 主要从事材料微观断裂与结构冲击隔振控制研究。

E-mail: bansuhua@tsinghua.org.cn

获得充分的抗冲击试验数据。工程中通常用冲击试验得出的数据作为原始数据,来计算评估隔振器对冲击作用的抑制能力^[4-9]。

橡胶隔振器在工程应用中,既要消除振动影响,还需要隔离冲击,因此有必要研究它在冲击条件下的动力学特性。尽管目前已有不同的模型,如 Maxwell 模型, Kelvin - Voigt 模型以及由它们组合而成的模型来表征橡胶隔振器的动态特性^[10-12],但它们都有各自的局限性。

移动硬盘在电子设备中得到广泛应用,但是当用在军工车辆或航天设备中,往往要承受外界较大的冲击力,从而失去正常工作的能力,因此需要采用恰当的隔振器进行隔振,以保证在恶劣的环境中仍然可以正常运行。研究橡胶 - 移动硬盘系统的冲击响应,考虑到在冲击环境下它的刚度特性会产生显著的变化,建立了基于橡胶频率硬化系数的非线性动力学模型,并利用仿真技术求出了不同冲击激励下的动态响应。

1 研究方法

研究的移动硬盘橡胶隔振系统,安装了如图 1 所示橡胶隔振器。

1.1 橡胶隔振系统物理模型

安装橡胶减震器的单自由度系统可以简化质量-弹簧-阻尼模型,在忽略非线性因素时,即认为隔振器刚度和阻尼保持相对不变,系统可以用下列微分方程来描述



图 1 橡胶隔振器

Fig. 1 A rubber isolator

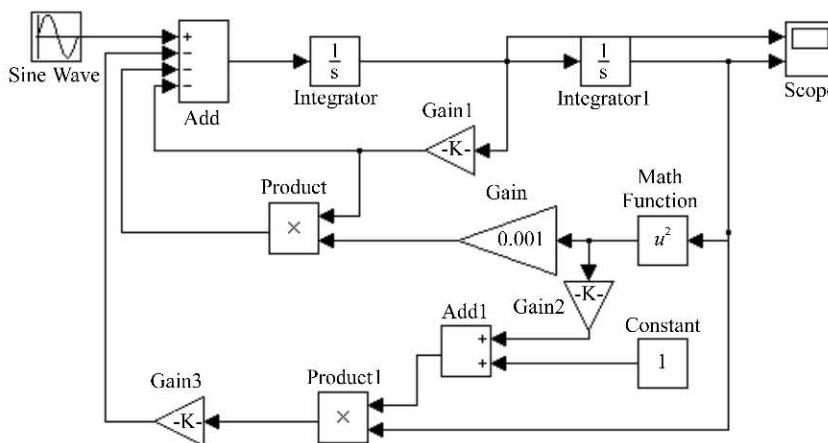


图 2 橡胶隔振器的仿真模型图

Fig. 2 Simulation models of rubber isolators

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中, m 、 k 和 c 分别为设备的质量、橡胶隔振器的刚度和阻尼系数; $f(t)$ 为系统的激励信号。引入参数 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 与 $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k/m}}$, 则方程(1)可化简为

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f(t) \quad (2)$$

对于理想弹簧, ω_n 为常数, 是系统的固有频率。对于橡胶绳减震器, 由于它的刚度与变形有关, 因此需要重新定义 ω_0 。假定橡胶绳减震器的额定载荷为 F , 对应的静态试验变形为 x_0 , 取 $k_0 = F/x_0$ 为系统的额定刚度。定义

$$\omega_0 = \sqrt{k_0/m} \quad (3)$$

ω_0 为系统的额定固有频率, 简称固有频率。将 ω_n 在额定变形 x_0 (x_0 对应着系统的 ω_0) 处进行泰勒展开

$$\omega_n(x) = \omega_0 + \left. \frac{\partial \omega_n}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} (x - x_0)^2 + \dots \quad (4)$$

鉴于橡胶的刚度硬化特征, 可知 ω_n 在 x_0 处取极小值, 故 $\left. \frac{\partial \omega_n}{\partial x} \right|_{x=x_0} = 0$, 且 $\left. \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} > 0$ 。取额定载荷下的静变形 x_0 为坐标原点, 代入式(2)可得系统的运动微分方程

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0(1 + \kappa x^2)\dot{x} + \omega_0^2(1 + \kappa^2 x^2)x = f(t) \quad (5)$$

其中 $\kappa = \frac{\partial^2 \omega_n}{\partial x^2}/2\omega_0$, 称为橡胶隔振器的频率硬化系数。

1.2 橡胶隔振仿真模型

本文借助公式(5)建立橡胶隔振器的仿真模型(图 2), 其中 $f(t)$ 为半正弦脉冲激励信号, $\kappa = 0.001$, 系统的固有频率取 15 Hz, $m = 50$ g, $\xi = 0.45$, $\omega_0 = 15$ rad/s, $\kappa = 0.001 \text{ mm}^{-2}$ 。

2 结果与讨论

针对四个不同脉冲激励信号(表1),采用仿真技术分别计算了安装橡胶隔振器系统的四种冲击响应(表2),由表2可知,对于理想的半正弦冲击,系统的隔振效果主要由脉冲时间宽度决定,即信号1与信号3具有相同的隔振效果,信号2与信号4具有相同的隔振效果。针对工程中最常见的11 ms脉冲信号,采用固有频率15 Hz的橡胶隔振器,隔振效果高达72.2%,而30 ms的脉冲信号,其隔振效果仅为53.1%。因此,要实现宽脉冲时间的冲击隔振,最好降低系统的固有频率。四种响应中,信号1的最大动变形仅为2.99 mm,而信号4的最大动变形则为19.59 mm,约为信号最大动变形的6.5倍。这说明同样的橡胶隔振器在承受不同的冲击激励时,抗疲劳程度也不一样,信号4的隔振器容易疲劳断裂。工程中难以从理论上给出最佳冲击隔振效果,这主要是因为:提高冲击隔振效果意味着降低系统固有频率,但这样却增加了最大动变形,从而导致隔振器抗疲劳能力降低;反之依然。

图3分别给出了信号3半正弦脉冲信号、系统的位移响应和加速度响应。响应时间截取了600 ms。由图可知90 ms后系统的能量几乎全部被橡胶隔振器吸收掉。这说明橡胶隔振器在承受冲击时,具有较大的阻尼比,具有良好的吸能特性。图4为信号3的位移和加速度的初始响应和剩余响应。对于11 ms宽度的半正弦冲击而言,加速度响应最大值和位移响应最大值皆出现在初始响应阶段,由于橡胶具有刚度硬化特征,所以最大动变形降低的很快,超过1个脉冲周期后,动变形几乎可以忽略。

表1 四种半正弦脉冲信号

Tab. 1 Four kinds of half-sine impulses

	信号1	信号2	信号3	信号4
加速度幅值 a/g	10	10	30	30
脉冲时间宽度 t/ms	11	30	11	30

表2 四种半正弦脉冲响应

Tab. 2 Responses to four kinds of half-sine impulses

	信号1	信号2	信号3	信号4
最大动变形 y/mm	2.99	5.79	11.17	19.59
最大动载荷 F_{\max}/N	1 362.6	2 297.8	4 087.8	6 893.3
隔振效果 η	72.2%	53.1%	72.2%	53.1%
隔振后的加速 a_2/g	2.78	4.69	8.34	14.07

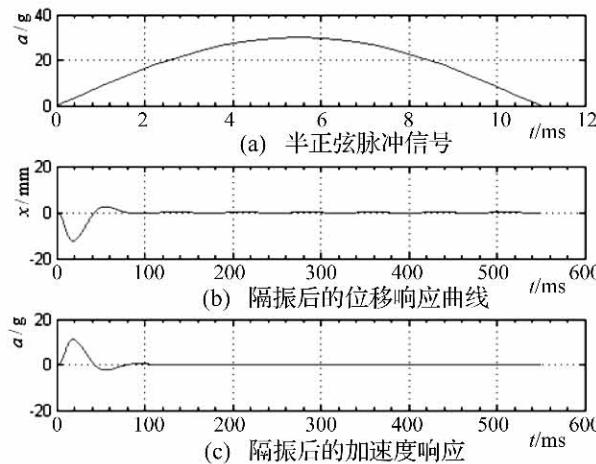


图3 信号3的冲击响应曲线

Fig. 3 Responses to half-sine impulse 3

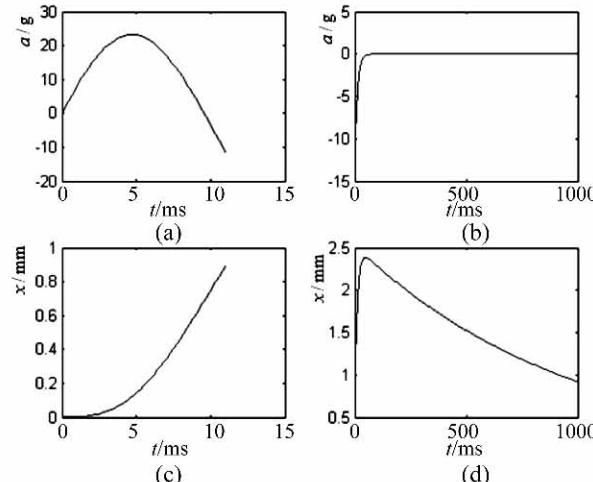


图4 信号3的初始响应与剩余响应

(a) 为加速度初始响应;(b) 为加速度剩余响应;
(c) 为位移初时响应;(d) 为位移剩余响应。

Fig. 4 Initial and residual responses to signal 3

- (a) is the initial responses of acceleration;
- (b) is the residual responses of acceleration;
- (c) is the initial responses of displace;
- (d) is the residual responses of displace.

3 结语

本文以橡胶材料的应力-应变为基础,考虑到橡胶隔振器的非线性特征,引入了频率硬化系数,建立了相应的非线性动力学数学模型和仿真模型,并计算了4种半正弦冲击信号下的系统响应,详细给出了信号3的仿真结果。该数学模型由于考虑了橡胶的特性,因此更加符合实际情况;针对数学模型的求解复杂性,建立的仿真模型计算效率高,在一定程度上可以部分代替实验,节约研究成本。尽

(下转第110页)