

干摩擦系统在基础位移冲击激励下的特性*

董智法 申仲翰

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文给出了具有软化弹簧特性的干摩擦隔振系统隔离基础位移冲击激励的理论分析和结果,分析结果表明干摩擦隔冲系统远优于线性阻尼系统,隔冲效果很明显。

关键词: 干摩擦; 隔振器; 半正弦冲击脉冲; 冲击响应

1 引 言

以往的隔振设计对扰动源的频率结构一般按“离散谱”来考虑,也就是认为在某些孤立的频率点上具有能量。由此而来的经典隔振设计思想,是使系统的固有频率都落在几乎不包含扰动能量的频段内,在工程中仍不失为一种有效的方法。

对于舰载、机载、弹载或车载的精密仪器和电子设备而言,其振动环境往往不是由离散的频率分量所组成,而是随机激励或宽带变频激励的环境,常规隔振器的弹性系统几乎无法避免共振。利用干摩擦阻尼原理做成的隔振器,如钢丝绳减振器[1]及文献[2]所介绍的各种装置,都能比较广泛地应用在这种环境中,表现出独特的特性。在文献[3]中对此作了较全面的介绍。

工程中的冲击激励是不可避免的。对于低频的隔冲系统,应用弹簧——阻尼系统隔冲的传统方法,往往不易达到较大的阻尼,系统的相对位移也相当可观。例如车辆运输过程,路面的粗糙不平给予运输物品的冲击,往往产生比较大的位移,特别是精密仪器的运输过程更是困难。在海运中波浪冲击传递着很大的能量,利用常规隔振器隔振,虽然也能起到一定的效果,但是也同时会激起系统的各阶共振,而不能达到比较满意的减振效果。

利用干摩擦原理制作的隔振器有许多(见文献[3])。文献[4]中介绍了类似的干摩擦系统隔振器,并在随机激励下通过实验表明,这种系统呈现良好的减振能力。在冲击防护能力方面,干摩擦隔振器也比传统的隔振器优越。这可以下面的理论分析中看出。

2 理论分析

干摩擦隔振系统的物理模型如图1。由于干摩擦面存在着一些弹性,恢复力与位移的关

系表现为双线性关系, 如图 2(a), 因此, 系统的运动方程为:

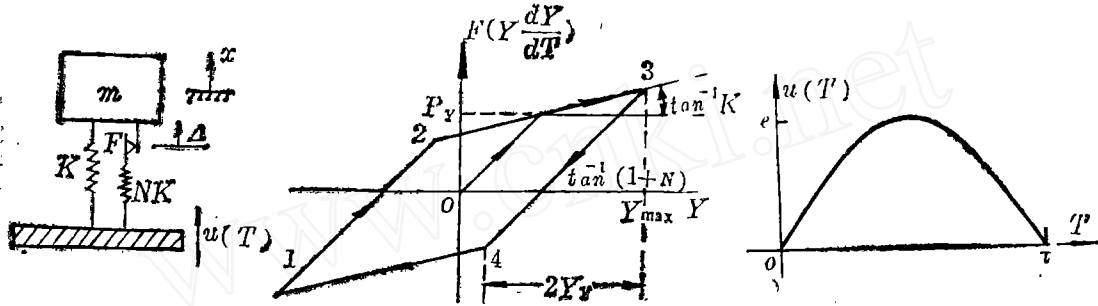


图 1 系统模型图

(a) 双线性滞迟恢复力

(b) 半正弦位移冲击激励

图 2 恢复力与激励位移形式

$$m \frac{d^2 X}{dT^2} + F(X - u(T), \frac{dX}{dT} - \frac{du(T)}{dT}) = 0 \tag{1}$$

以相对位移的形式表示, $Y = X - u(T)$,

$$m \frac{d^2 Y}{dT^2} + F\left(Y, \frac{dY}{dT}\right) = -m \frac{d^2 u(T)}{dT^2} \tag{2}$$

$F\left(Y, \frac{dY}{dT}\right)$ 如图 2(a) 所示. 激励位移 $u(T)$ 采用半正弦冲击脉冲, 见图 2(b), 且

$$u(T) = \begin{cases} e \sin \Omega T & 0 \leq T \leq \tau \\ 0 & T \geq \tau \end{cases} \tag{3}$$

其中圆频率 $\Omega = \pi/\tau$, τ 是半正弦脉冲的持续时间. 定义 $\tau_r = 2\tau/\pi$, 为 $u(T)$ 等效于方波脉冲的持续时间.

在滑移状态, 运动方程为:

$$m \frac{d^2 X}{dT^2} + K(X - u(T)) + \lambda F = 0 \tag{4}$$

F 是摩擦力; $\lambda = \sin\left(\frac{dY}{dT}\right)$, 取决于质量 m 向上或向下滑移的方向.

引入无量纲量 x, ω, t, f .

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{e}, & \omega &= \frac{\Omega}{\sqrt{K/m}} \\ t &= \frac{T}{\sqrt{m/K}}, & f &= \frac{F}{Ke} \end{aligned}$$

e 为 $u(T)$ 的最大位移幅值, Ω 为半正弦波 $u(T)$ 的圆频率.

无量纲化方程(4),

$$\ddot{x} + x = \sin \omega t - \lambda f \tag{5}$$

其解,
$$x = -\lambda f + \frac{\sin \omega t}{1 - \omega^2} + A \sin t + B \cos t \quad (6)$$

A, B 由初始滑移时, x_0, \dot{x}_0 和 t_0 决定,

$$\begin{aligned} A &= \alpha \sin t_0 + \beta \cos t_0, & B &= \alpha \cos t_0 - \beta \sin t_0 \\ \alpha &= x_0 + \lambda f - \frac{\cos \omega t_0}{1 - \omega^2}, & \beta &= \dot{x}_0 - \frac{\omega \cos \omega t_0}{1 - \omega^2} \end{aligned}$$

当 $V = (\dot{x} - \omega \cos \omega t)\lambda = 0$, $t = t_1$ 时系统停止滑移进入滞迟运动状态。

此时, 摩擦片的相对位移 Δ 为

$$\Delta = u(T) + \lambda F / NK - X$$

无量纲化后 $\delta = \frac{\Delta}{e}$, 上式为 $\delta = \sin \omega t + \frac{\lambda f}{N} - x$ 。当滑移停止时, $\delta|_{t=t_1} = \delta_0$ 。其中, N 为

双线性滞迟隔振系统的刚度比 (见图 1)。

在滞迟运动状态, 相对位移 Δ 保持 Δ_0 , 运动方程:

$$m \frac{d^2 X}{dT^2} = -K(X - u(T)) - NK(X + \Delta_0 - u(T))$$

引入无量纲化参数, 方程简化为:

$$\ddot{x} + (N+1)x = (N+1)\sin \omega t - N\delta_0 \quad (9)$$

解为
$$x = -\frac{N\delta_0}{N+1} + \frac{(N+1)\sin \omega t}{N+1-\omega^2} + A_1 \sin \sqrt{N+1} t + B_1 \cos \sqrt{N+1} t$$

A_1, B_1 由滞迟状态初始条件 t_1, x_1, \dot{x}_1 和 δ_0 所决定。

从滞迟状态进入滑移状态的条件, 无量纲化形式是, $|N(x + \delta_0 - \sin \omega t)| + f$, 滑移方向取决于此时绝对值内的数的符号, 与之同号。

3 结 论

根据以上的理论分析, 可以得到各种参数 (N, f, ω) 时系统的冲击响应结果。对不同的刚度比 N , 在各个摩擦参数 f 值时的计算结果如图 3(a)(b)(c) 所示。从结果中可以看到, 干摩擦隔振器的隔振效果是明显的。

我们计算了线性阻尼系统的响应值, 见图 3(d)。与干摩擦系统的计算值作为对比, 可以看到, 干摩擦隔振器在位移激励下的隔冲能力远优于线性弹簧阻尼系统。

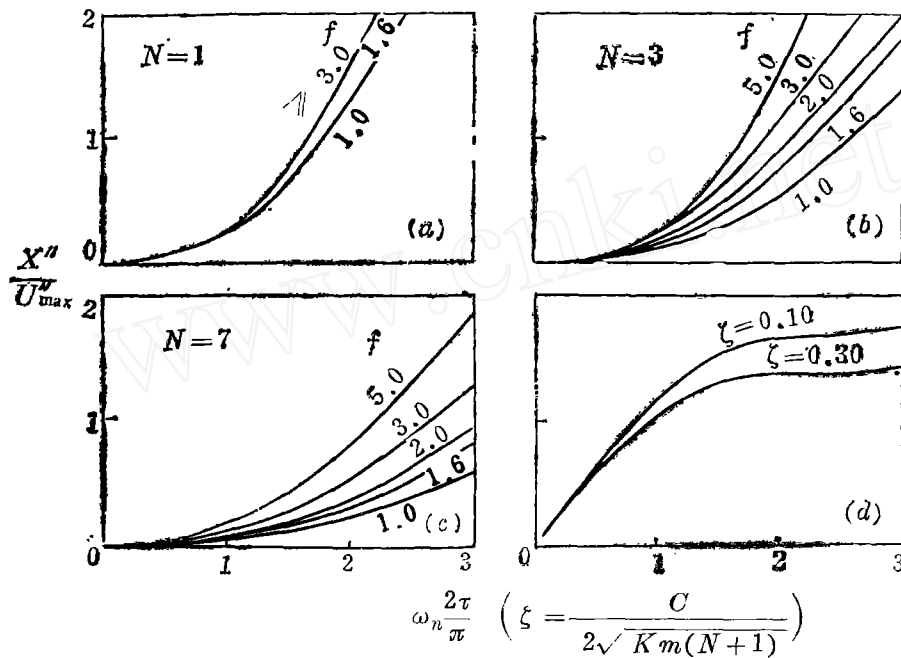


图 3 不同刚度比 N , 在各个摩擦参数 f 值时的计算结果
 (a) $N=1$ (b) $N=3$ (c) $N=7$ (d) 线性

参 考 文 献

- [1] 张强星: 振动和冲击的隔离——介绍一种新型的非线性隔振器, 1984.6.力学所.
- [2] J. M. Kelly: *Seismic Base Isolation: A Review*, The 2nd U. S. National conf. on Earthq. Engng., 1978, pp. 823-837.
- [3] 张强星: 干摩擦减振隔振, 噪声与振动控制, 1984, 10, No. 5.
- [4] 勾厚渝: 复合阻尼隔振器, 噪声与振动控制, 1986, No. 4, pp. 20~27.

THE BEHAVIOUR OF A DRY FRICTION SYSTEM FOR ISOLATING BASE DISPLACEMENT SHOCK EXCITATION

Dong Zhifa Shen Zhonghan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Under base displacement shock excitation, the theoretical analysis and numerical results of a dry friction shock isolation system with softening spring behaviour are given. The results show that a dry friction shock isolation system is more efficient than a linear spring damping system, and has good shock isolation effectiveness.

Keywords: dry friction, isolator, half-cycle sine shock impulse, shock response.

THE SIMPLE COMPUTATION OF STRESS INTENSITY FACTOR FOR THREE-DIMENSIONAL CRACKS IN CONCRETE

Zhang Zhenxi Liu Guangting Zhang Guangdou

(Tsinghua University)

Abstract

Based on the characteristics of concrete, a finite element method for evaluating the stress intensity factors of three dimensional cracks in brittle materials is proposed and utilized to analyze the stability and the damage degree of the cracks in concrete structures. Its feature is no requirement both for dividing too fine mesh at surrounding region of crack tip and for using special tip element. It is convenient to be applied in engineering. This method has been used to determine the stability of cracking and to compute the stress redistribution in an arch dam. It was proven efficient.

Keywords: concrete, crack, stress intensity factor, finite element method.

SIMPLIFIED CALCULATIONS OF LIMIT LOADS FOR ANNULAR PLATES BY METHOD OF SINGULAR FUNCTION

Liu Fulin

(Liaoning University)

Abstract

In this paper, for the first time a method of singular function is applied to structural plastic limit analysis, and simplified calculations of limit loads of some annular plates are carried out. The advantage of the method is simpler and more convenient than other methods. Besides, its concept is very clear.

Keywords: singular function, annular plates, yield condition, limit load.