

文章编号: 1000-8055(2004) 03-0305-05

磁流变阻尼器性能及振动控制

夏品奇, 岳海龙

(南京航空航天大学 直升机旋翼动力学国家级重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于 Bouc-Wen 磁滞模型, 分析了磁流变阻尼器的性能; 采用能量法和梯形积分法计算了磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数; 将磁流变阻尼器用于结构振动系统隔振, 给出了结构在基础激励下的振动控制效果——传递率及稳态响应的相位图。

关键词: 航空、航天推进系统; 磁流变阻尼器; 振动控制; 等效线性阻尼系数; 能量耗散法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Performance of Magnetorheological Damper with its Application to Vibration Control

XIA Pin-qi, YUE Hai-long

(National Laboratory of Rotorcraft Aeromechanics,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Magnetorheological (MR) fluid damper is a relatively new type of device for application to semi-active vibration control. The essential characteristic of the fluid is its ability to reversibly change from a free-flowing, linear viscous fluid to semisolid with a controllable yield strength in milliseconds when exposed to an magnetic field. External energy required by the adjustable fluid damper is minuscule and the damping force produced by the damper is large, while speed of its response is on the order of milliseconds. In this paper, the performance and equivalent linear damping coefficient of MR damper are analyzed based on the Bouc-Wen model, the energy dissipation method and the trapezoidal rule. Applying the MR damper model to an oscillator with signal degree of freedom harmonically excited through its support, the transmissibility which is the degree of relative isolation and defined as the ratio of amplitude of motion of the oscillator to amplitude of motion of the support is determined, and the phase angle of steady response as well.

Key words: aerospace propulsion system; magnetorheological damper; vibration control; equivalent linear damping coefficient; energy dissipation method

磁流变材料是一种流动粘度可控的智能材料, 在外磁场的作用下, 磁流变材料在毫秒级的时间内就可从自由流动的液体状态变成半固体的状态, 而且这种状态的转变还是可逆的, 即在外磁场

去掉后, 又可回复到自由流动的状态。这种物理状态的变化使磁流变材料的流动粘度发生了变化, 从而导致了阻尼力的变化。如果把这种智能材料制成智能阻尼器, 那么就可根据结构不同的振动

收稿日期: 2003- 06- 09; 修订日期: 2003- 10- 08

基金项目: 航空科学基金资助项目(01A52006)

作者简介: 夏品奇(1963-), 男, 江苏人, 南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室教授, 博士, 主要从事直升机动力学与振动控制研究。

状态提供抑制振动所需要的阻尼。这种半主动式的智能阻尼器结构简单、重量轻、安全可靠, 是一种非常有应用前景的振动控制装置, 如半主动抗震控制^[1], 增加直升机旋翼稳定性的减摆器^[2], 增加耐坠性的起陆架阻尼器^[3]等。由于磁流变阻尼器具有独特的优良性能, 已受到工业界和工程界的广泛关注, 美国 LORD 公司已生产出了具有实用意义的产品, 如图1所示。

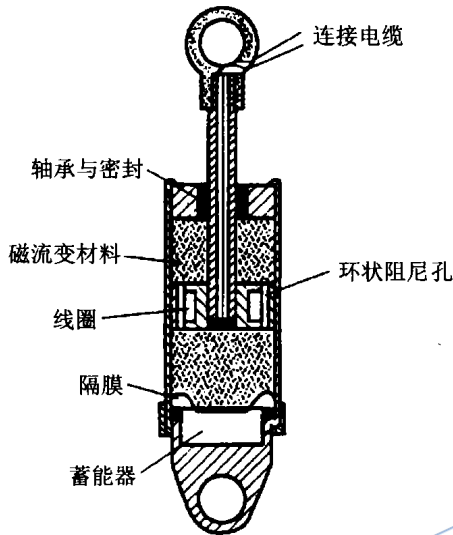


图1 磁流变阻尼器结构
Fig. 1 Configuration of MR damper

磁流变阻尼器的性能可有多种数学模型描述^[4], 这些数学模型基本上都由一组复杂的非线性方程构成, 虽能较好地描述磁流变阻尼器的性能, 但求解不方便, 给分析磁流变阻尼器的应用带来一定的困难, 因而求出磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数是很有实际意义的。基于这样的考虑, 本文采用能量法和梯形积分法计算出了磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数, 其与输入电压和运动幅值有关, 因此, 改变输入电压大小, 就能控制磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数, 从而达到控制振动水平的目的。将磁流变阻尼器用于结构对基础激励的振动控制, 本文得到了隔振的传递率和相位图。

1 磁流变阻尼器性能

Spencer 等^[5]基于 Bouc-Wen 磁滞模型为磁流变阻尼器建立了数学模型, 该模型由下列7个方程描述:

$$f = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (1)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha \dot{z} + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (2)$$

$$\dot{z} = - \gamma \left| \dot{x} - \dot{y} \right| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (4)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (5)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (6)$$

$$\dot{u} = - \eta (u - v) \quad (7)$$

式中: x, v 和 f 分别是位移、电压和力, 它们都是时间的函数; y, z , 和 u 是中间变量; 其余14个模型参数由实验数据拟合得到, 其数值^[5]列于表1。该组非线性方程适合于描述如图1所示的磁流变阻尼器的性能, 如果给定位移 x 和输入电压 v , 那么磁流变阻尼器就能产生力 f 。假设位移 $x = 1.5 \sin(5\pi t)$, 电压 $v = 1.25 + t$, 于是, 由方程组(1)~(7)给出的磁流变阻尼器的力-位移回线和力-速度回线分别如图2和图3所示。图2中的力-

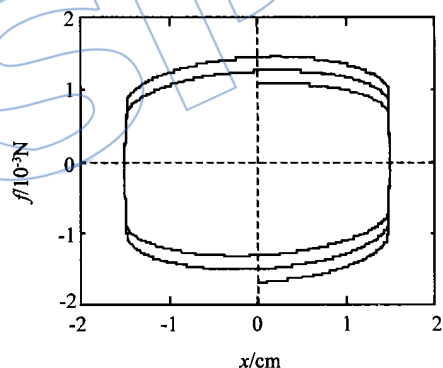


图2 磁流变阻尼器的力-位移回线
Fig. 2 Force-displacement loops of MR damper

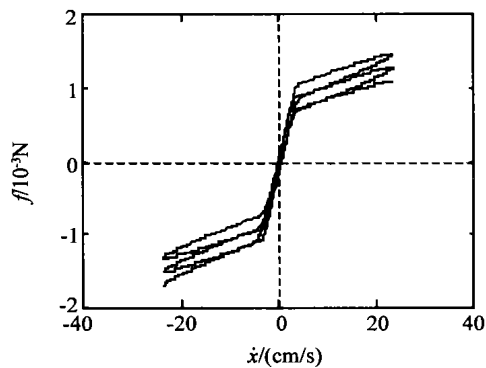


图3 磁流变阻尼器的力-速度回线
Fig. 3 Force-velocity loops of MR damper

表1 磁流变阻尼器模型参数
Table 1 Parameter values of MR samper model

$c_{0l}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm})$	21.0	$\alpha_a/(\text{N}/\text{cm})$	14.0
$c_{0l}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}\cdot\text{V})$	3.5	$\alpha_b/(\text{N}/\text{cm}\cdot\text{V})$	695.0
$k_0/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm})$	46.9	$\gamma/(\text{cm}^{-2})$	363.0
$c_{1l}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm})$	283.0	$\beta/(\text{cm}^{-2})$	363.0
$c_{1l}/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}\cdot\text{V})$	2.95	A	301.0
$k_1/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm})$	5.0	n	2
x_1/cm	14.3	$\eta/(\text{s}^{-1})$	190

位移回线随时间增加沿顺时针方向回转,图3中的力-速度回线随时间增加沿逆时针方向回转。这些曲线代表了磁流变阻尼器的性能。

2 磁流变阻尼器的等效线性阻尼

上面介绍的磁流变阻尼器性能是通过一组非线性方程来描述的,这在分析它的实际应用时不方便,原因是不容易求解该组非线性方程。如果能得到磁流变阻尼器的等效线性阻尼,那么分析磁流变阻尼器的应用就会变得容易得多。能量法是一种将非线性阻尼化为等效线性阻尼的基本方法,采用该法求得的等效阻尼误差较小。通过运动一周或一个循环内非线性阻尼器消耗的能量与等效线性阻尼消耗的能量相等求得等效线性阻尼。设阻尼器产生的阻尼力为 $f(t)$,阻尼器杆件的运动速度为 $\dot{x}(t)$,于是两者的关系为:

$$f(t) = C_{eq}\dot{x}(t) \tag{8}$$

式中, C_{eq} 是等效线性阻尼系数。于是阻尼器杆件在运动一周内消耗的能量 E 可用下式计算:

$$E = \oint f(t) dx = \int_0^{2\pi/\Omega} f(t) \dot{x}(t) dt \tag{9}$$

式中, Ω 是运动圆频率。设阻尼器杆件作简谐运动,位移为 $x(t) = X_0\sin(\Omega t)$,代入式(9)可求出等效线性阻尼系数 C_{eq} :

$$C_{eq} = \frac{E}{\pi\Omega X_0^2} \tag{10}$$

式中 E 也可以是磁流变阻尼器循环一周所耗散的能量,它可以通过一周的力-位移回线(如图2所示)所包围的面积求得,根据回线形状特点,采用梯形法则积分法计算回线包围的面积可得到较为精确的计算结果。设 $\Omega = 5\pi$,于是在不同常电压和振幅 X_0 时的能量值如图4所示,进而由式(10)可求得等效线性阻尼系数 C_{eq} 如图5所示。需要指出的是,磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数与电

压和振幅有关。

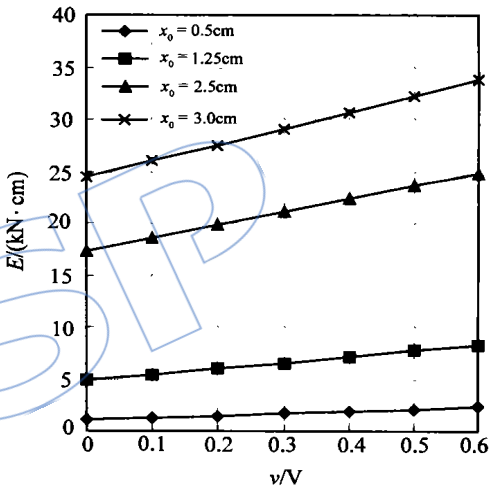


图4 磁流变阻尼器能量耗散曲线
Fig. 4 Energy dissipation of MR damper

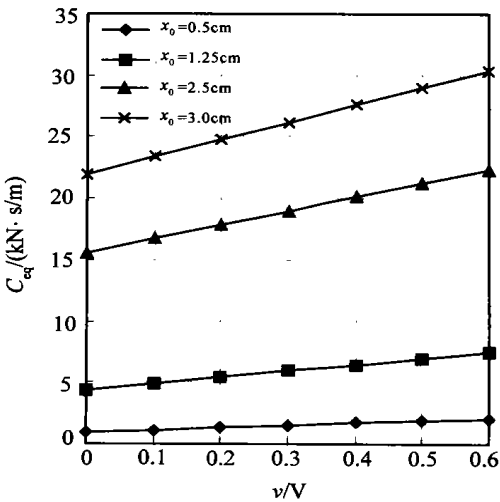


图5 磁流变阻尼器能量系数曲线
Fig. 5 Equivalent damping of MR damper

3 基础隔振响应分析

将磁流变阻尼器用做隔振器, 研究振动控制的效果, 如图6所示为一单自由度振动系统, 受基础激励, 在基础与质量块之间安装了磁流变阻尼器。

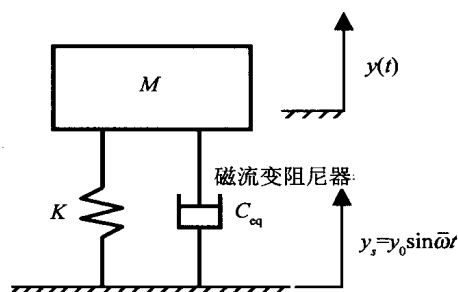


图6 单自由度基础激励振动系统

Fig. 6 SDOF support excited vibration system

对于如图6所示的振动系统, 在基础激励下质量块的隔振程度称为传递率 T_r , 它定义为质量块的振动幅值与基础激励幅值之比^[6]。经分析, 图6所示振动系统的传递率 T_r 的计算公式如下:

$$T_r = \frac{1 + (2\xi\gamma)^2}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2} \quad (11)$$

式中, 等效阻尼比 ξ 为 $\xi = C_{eq} / 2 \sqrt{KM}$, 频率比 $\gamma = \bar{\omega} / \omega_n$ 相位角 θ 为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\xi\gamma}{1 - \gamma^2} \quad (12)$$

于是, 质量块的稳态振动响应 $y(t)$ 为:

$$y(t) = T_r y_0 \sin(\bar{\omega}t + \beta - \theta) \quad (13)$$

式中: 角度 $\beta = \tan^{-1}(2\xi\gamma)$ 。

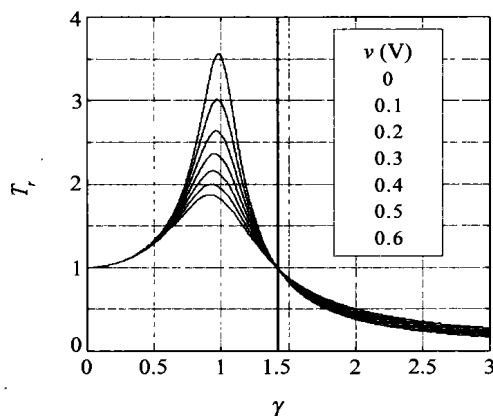


图7 传递率对频率比曲线

Fig. 7 Transmissibility versus frequency ratio

假设质量块 $M = 1\,000\text{ kg}$, 弹簧刚度 $K = 10\,000\text{ N/m}$, 等效阻尼系数取自图5中的最低曲线上

的一组数值, 计算图6所示振动系统在基础激励下采用磁流变阻尼器的振动控制效果——传递率 T_r 。图7和图8分别是传递率 T_r 对频率比 γ 的曲线和相位角 θ 对频率比 γ 的曲线。在图7中, 从上到下的电压值(从小到大)分别对应频率比 $\gamma = \sqrt{2}$ 左边的从上到下的曲线, 响应峰值并不在频率比 $\gamma = 1$ 处, 而是在小于 $\gamma = 1$ 处, 且随电压值减小, 峰值越靠近处。在图8中, 从上到下的电压值分别对应频率比 $\gamma = 1$ 右边的从上到下的曲线。从图7可以看出, 随着输入电压值的增加, 响应峰值的传递率减小, 且输入电压增加不大, 传递率减小却很明显, 这说明磁流变阻尼器对振动控制有明显的效果。因此, 只要对输入电压进行适当的控制, 就能对结构振动进行方便而有效地控制。由于这种振动控制不需要作动机构, 因此是一种半主动控制。

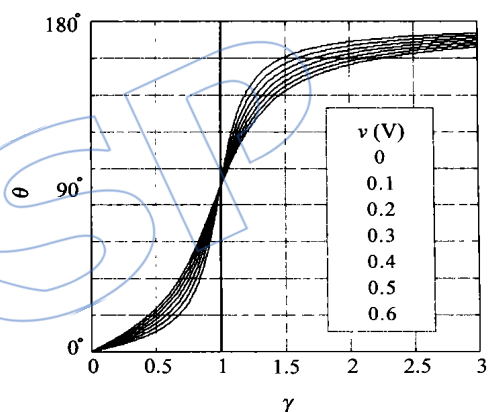


图8 相位角对频率比曲线

Fig. 8 Phase angle versus frequency ratio

4 结 论

(1) 磁流变阻尼器的性能可用一组非线性方程组来描述, 但求解不方便, 给分析磁流变阻尼器的实际应用带来困难。采用能量法和梯形积分法可解出磁流变阻尼器的等效线性阻尼系数, 这给分析磁流变阻尼器的实际应用带来了方便。

(2) 受基础激励的单自由度振动系统的传递率计算表明, 磁流变阻尼器对其振动控制有明显的效果, 只要适当地改变磁流变阻尼器的输入电压, 就能对结构振动进行有效的半主动控制。

参考文献:

- [1] Carlson J D, Spencer B F. Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control[A]. Proceedings of 3rd International Conference on Motion and Vibration Control

[C]. Chiba, Japan, September, 1996, (3): 35– 40.

[2] Kamath G M, Wereley N M, Jolly M R. Characterization of Semi-Active Magnetorheological Lag Mode Dampers [R]. SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, San Diego CA, March 1998: 3329– 3337.

[3] Ervin R D, Lou Z, Filisko F E, Winkler C B. Electrorheology for Smart Landing Gear[R]. NASA– CR– 2000883 (N96– 25313), 30 April 1996.

[4] Li P, Kamath G M, Wereley N M. Analysis and Testing of a Linear Stroke Magnetorheological Damper[A]. Proceedings of the AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum[C]. Long Beach CA, April 1998: 2841– 2856.

[5] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model for Magnetorheological Dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230– 238.

[6] Paz M. Structural Dynamics–Theory and Computation[M]. 3rd Edition, Chapman & Hall, 1991.

JASRSP