

# 活塞式磁性液体减振器的阻尼分析和实验研究\*

杨晓锐<sup>1</sup>, 杨庆新<sup>1,2</sup>, 郭兵<sup>1</sup>, 陈丽斐<sup>1</sup>, 杨文荣<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室 天津 300130;

2. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室 天津 300387)

**摘要:**根据磁性液体的磁粘特性,当磁性液体周围施加垂直于其涡旋矢量方向的磁场时,磁性液体的粘度增加,利用磁性液体作为减振器的阻尼液,通过改变磁场可以调节振动系统的阻尼比,从而达到减振的目的。根据这一特性,提出一种活塞式磁性液体减振器。根据磁性液体的流动方程和连续性方程,建立了减振器中磁性液体的动力学模型,并得到减振器阻尼力与振动速度之间的表达式以及减振系统的阻尼比。设计实验,将磁性液体减振器安装在悬臂梁自由端,利用线圈对减振器施加均匀磁场,研究不同线圈电流时磁性液体减振器对梁振动阻尼比的影响。实验表明,在所假设的条件下,实验结果与理论结果的一致性较好。同时得出,在一定范围内,活塞式磁性液体减振器的阻尼效果随着线圈电流的增大而增大。

**关键词:**磁性液体;磁粘特性;阻尼减振;动力学模型

中图分类号: TM271 TH136 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

## Damping analysis and experiment research of piston magnetic liquid damper

Yang Xiaorui<sup>1</sup>, Yang Qingxin<sup>1,2</sup>, Guo Bing<sup>1</sup>, Chen Lifei<sup>1</sup>, Yang Wenrong<sup>1</sup>

(1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** According to the magneto-viscous characteristic of magnetic liquid, the viscosity of the magnetic liquid will increase when a magnetic field with its direction perpendicular to the direction of the vortex vector of the magnetic liquid around the magnetic liquid. Using magnetic liquid as the damping fluid of the vibration damper, the damping ratio of the vibration system can be changed by adjusting the magnetic field, so that the purpose of vibration damping is achieved. Based on this property, a piston magnetic liquid damper is proposed. The dynamic model of the magnetic liquid in the damper is built according to the flow equation and continuity equation of magnetic liquid. The formula between damping force and vibration speed of the vibration damper and the damping ratio of the vibration damping system are derived. The experiment was designed. A magnetic liquid vibration damper is installed on the free end of the cantilever beam; a coil is used to exert uniform magnetic field on the vibration damper. The effect of the magnetic liquid vibration damper on the damping ratios of the cantilever beam vibration is studied under different coil currents. The experiment results show good agreement between experiment result and theoretical analysis result under the assumed condition. The experiment result also indicates that the damping effect of the piston magnetic liquid damper is enhanced when the current in the coils increases in a certain range.

**Keywords:** magnetic liquid; magneto-viscous characteristic; vibration damping; dynamic model

## 0 引言

随着我国未来建设的发展,高层建筑和桥梁已成为工业建设的主要发展方向,地震和强风将会引发高层建

筑的安全性和舒适性问題<sup>[1]</sup>,而大跨径桥梁在行人和行车的激励下也会产生水平或竖向振动<sup>[2-3]</sup>,同时近海的桥梁和建筑在地震和海风的影响下产生的低频振动也极易出现安全隐患<sup>[4-5]</sup>。美国、日本等国家已在大量建筑和桥梁上安装黏弹性阻尼器和活塞式油阻尼器,以提高建筑

物的抗风抗震能力。而我国国内现有的减振建筑还不是很多,主要是风阻尼器和调谐质量阻尼器。风阻尼器主要应用于高层建筑。调谐质量阻尼器长期工作中,有可能发生疲劳损伤,且阻尼在后期很难调节。压电传感器也常被应用于结构的主动振动控制中,但压电片反复变形易出现残余内应力,引起损伤,电场强度大易导致压电片击穿或断裂<sup>[6-7]</sup>。

活塞式磁性液体减振器是以磁性液体为阻尼液的粘滞型阻尼器。磁性液体也称磁流体或铁磁流体,是一种将纳米级铁磁材料颗粒利用表面活性剂均匀稳定地分散在基载液(如机油、煤油、水等)之中,所形成的稳定胶体悬浮液。磁性液体在磁场的作用下可以被磁化,通常显示超顺磁特性,撤去磁场时,其磁畴又重新恢复杂乱无章的无序状态而消失其宏观特性,不存在磁滞现象,没有剩磁和矫顽力。磁性液体可以将浸在其中的比重比磁性液体大的永磁体悬浮起来,即二阶浮力现象<sup>[8]</sup>。基于其独特的磁学和力学特性<sup>[9]</sup>,磁性液体用作阻尼介质时具有许多独特的优点:其稳定性高,不会发生团聚或沉淀;其动力粘度一般比基载液的粘度大,能够产生较大的粘性阻尼;其粘度随外加磁场增大而增大,且呈非线性,在磁场方向垂直于磁性液体涡旋矢量方向时,磁场对粘度的影响更明显<sup>[10]</sup>,这种特性被称为磁性液体的磁粘特性。

磁性液体在磁性液体应用于阻尼减振方面,美国宇航局对此最早开展了研究,并开发了一种无线电天文探测卫星用磁性液体粘滞阻尼器<sup>[11]</sup>,用来解决卫星中稳定系统引起的振动和扰动振荡。随后,白俄罗斯、日本、德国等对不同结构的主动和被动型磁性液体减振器进行动力学研究并进行实验验证<sup>[12-13]</sup>,在航空、建筑、机械等领域投入使用<sup>[14-15]</sup>。国内方面,对于磁性液体在减振方面的研究主要集中在磁性液体自悬浮特性<sup>[16]</sup>、链状结构机理<sup>[17]</sup>及磁化特性<sup>[18]</sup>等基础物理特性研究,对磁性液体减振器的结构设计和实验研究<sup>[19-20]</sup>等。

本文提出的活塞式磁性液体减振器是基于磁性液体的磁粘特性,实现了阻尼器的粘性阻尼可调节功能。本文建立了此减振器的动力学模型,并通过实验测试其阻尼比。活塞式磁性液体减振器的稳定性高,对振动的响应较快,适合用于高层建筑楼层间以及大跨径桥梁的结构减振系统。

## 1 减振器的结构和工作原理

活塞式磁性液体减振器的结构模型如图1所示,包括一个非磁性的圆柱形液缸,内部装满磁性液体,非磁性圆柱形活塞头,以及减振器液缸外部的电磁线圈。活塞杆通过连接耳环与外部振动件相连,电磁线圈与外部电路连接,为减振器内的磁性液体提供激励磁场。

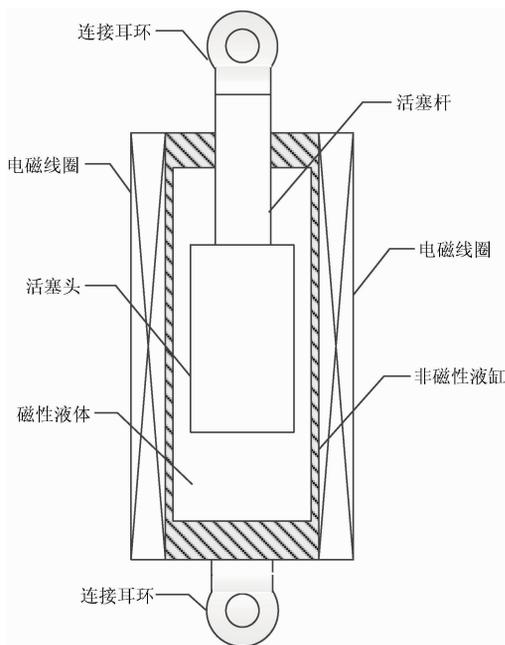


图1 活塞式磁性液体减振器的结构模型

Fig. 1 The structure model of the piston magnetic liquid damper

外界振动会引起活塞产生运动,使磁性液体在减振器液缸中产生流动,沿轴向对活塞头产生压力,沿径向产生流动速度梯度,从而产生粘性力。粘性力与磁性液体的粘度有关,通过调节线圈电流的大小可以调节磁性液体的粘度,控制减振器的阻尼力的大小,从而达到最佳的阻尼效果。

## 2 活塞式磁性液体减振器的阻尼特性

为了方便计算,对减振器取柱坐标系,如图2所示。磁性液体减振器的活塞头半径为 $R_1$ ,减振器液缸半径为 $R_2$ ,活塞头长度为 $L$ 。

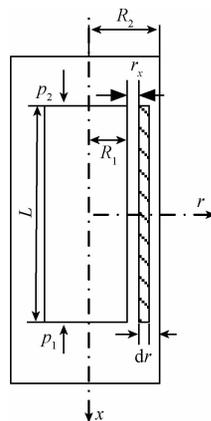


图2 减振器的理论分析模型

Fig. 2 The theoretical analysis model of the damper

活塞头在运动过程中受到的阻尼力  $F_f$ , 包括磁性液体对活塞头侧面的粘性力  $F_\eta$  和对活塞头底面的压力  $F_p$ 。

$$F_f = F_\eta + F_p \quad (1)$$

$$F_\eta = \tau_m \cdot S_1 \quad (2)$$

$$F_p = (p_1 - p_2) \cdot S_m \quad (3)$$

式中:  $\tau_m$  为单位面积上磁性液体对活塞头侧面的粘性力,  $S_1$  为活塞头的侧面积,  $p_1, p_2$  为活塞头两个底面单位面积上的压强,  $S_m$  为活塞头的底面积。

当外界有振动发生时, 活塞头在磁性液体中运动, 从而带动磁性液体发生运动。单位体积磁性液体的运动方程的基本形式如下:

$$\rho_f \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{f}_\eta + \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_m \quad (4)$$

式中:  $\rho_f$  为磁性液体的密度,  $\mathbf{V}$  为磁性液体的流动速度矢量。

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \quad (5)$$

由于在间隙内, 磁性液体只在  $z$  方向发生流动, 且近似为准静态流动, 因此可以得出:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0 \quad \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = 0 \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{f}_\eta$  为单位体积磁性液体的粘性力。

$$\mathbf{f}_\eta = \eta_H \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \eta_H \nabla(\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (7)$$

式中:  $\eta_H$  为磁性液体减振器的粘度,  $\mathbf{f}_p$  为单位体积磁性液体的压力。在此减振器中, 当活塞头运动时, 活塞头两个底面所受压力差与磁性液体所受压力差相等, 且只沿  $z$  方向呈线性变化, 即:

$$\mathbf{f}_p = -\nabla p = \frac{dp}{dz} = \frac{p_1 - p_2}{L} \quad (8)$$

式中:  $p_1, p_2$  是单位体积磁性液体的两个底面的压强。  $\mathbf{f}_m$  为磁场力, 磁性液体在磁场中受到磁场力的来源是分子环形电流受到外磁场作用的结果, 在均匀磁场内, 电流环只受到力矩而没有合成的力, 只有在存在磁场强度梯度的外磁场中, 电流环才会受到力的作用。在本论文的减振器模型中, 磁性液体处于近似均匀磁场, 可近似认为:

$$\mathbf{f}_m = 0 \quad (9)$$

此时, 外磁场对磁性液体的影响主要表现在动力粘度  $\eta_H$  上, 且通常情况下, 外磁场改变磁性液体粘度  $\eta_H$  对流动的影响比磁场力  $\mathbf{f}_m$  的影响大得多。

在减振器中, 当活塞头运动时, 磁性液体在活塞头和液缸间隙中做轴对称流动, 因此, 速度  $\mathbf{V}$  仅为半径  $r$  的函数, 速度矢量可以简写为  $\mathbf{V}$ 。由于磁性液体是不可压缩流体, 其连续性方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (10)$$

将式(6)~(10)代入式(4)化简可得:

$$\eta_H \nabla^2 \mathbf{V} = \frac{p_1 - p_2}{L} \quad (11)$$

另外, 对于液缸和活塞头间隙内磁性液体的流动, 其边界条件为:

$$r = \begin{cases} R_1, & V = \dot{x} \\ R_2, & V = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\dot{x}$  为活塞头的运动速度。

令  $\frac{p_1 - p_2}{L} = F, r_x = R_2 - r, R = R_2 - R_1$ , 根据坐标变换和泰勒公式解方程(11)可得:

$$V = \frac{F}{4\eta_H} r_x^2 - \left( \frac{\dot{x}}{R} + \frac{FR}{4\eta_H} \right) r_x + \dot{x} \quad (13)$$

根据磁性液体的流动速度, 计算减振器液缸和活塞头之间的间隙内磁性液体的流量为:

$$Q = \int_0^r 2\pi r V dr_x = \pi R \left( R_1 + \frac{R}{3} \right) \dot{x} - \frac{\pi R^3 (2R_1 + R)}{24\eta_H} F \quad (14)$$

根据减振器内磁性液体的质量守恒, 可以得出:

$$Q + S_m \dot{x} = 0 \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)可以得出:

$$F = 8\eta_H \frac{3R_1^2 + 3R_1R + R^2}{R^3(2R_1 + R)} \dot{x} \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)可以得出磁性液体的流动速度为:

$$V = \left[ \frac{6R_1^2 + 6RR_1 + 2R^2}{R^3(2R_1 + R)} r_x^2 - \left( \frac{6R_1^2 + 8R_1R + 3R^2}{R^2(2R_1 + R)} \right) r_x + 1 \right] \dot{x} \quad (17)$$

由磁性液体的流动速度, 可以得出单位面积磁性液体对活塞头的粘性力为:

$$\tau_m = \eta_H \left( \frac{\partial V}{\partial r_x} \right)_{r=r_0} = \eta_H \left[ \frac{6R_1^2 + 8R_1R + 3R^2}{R^2(2R_1 + R)} \right] \dot{x} \quad (18)$$

所以, 活塞头受到的阻尼力为:

$$F_f = \eta_H \pi L \dot{x} \cdot \frac{24R_1^4 + 36R_1^3R + 24R_1^2R^2 + 3R_1R^3}{R^3(2R_1 + R)} \quad (19)$$

本文的振动激励由一端固定, 一端自由振动的悬臂梁提供。悬臂梁和减振器可以简化为一个一阶振动模型, 如图 3 所示。悬臂梁的阻尼相对于减振器来说比较小, 因此可以忽略不计。

物块的运动微分方程为:

$$m_{eq} \ddot{x} = -c_{eq} \dot{x} - k_{eq} x \quad (20)$$

式中:  $m_{eq}$  为振动系统中悬臂梁和活塞的质量之和。令

$$p_n^2 = \frac{k_{eq}}{m_{eq}}, 2n = \frac{c_{eq}}{m_{eq}}, \text{振动系统的等效弹性系数由悬臂梁提供。}$$

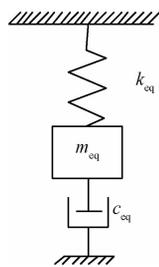


图3 减振系统的等效一阶模型

Fig. 3 Equivalent first order model of the vibration damping system

$$k_{eq} = 4\pi^2 f_n^2 m_{eq} \quad (21)$$

悬臂梁的固有频率  $f_n$  可以通过实验测定。由式(15)

可知,振动系统的等效阻尼系数为:

$$c_{eq} = \eta_H \pi L \zeta \quad (22)$$

$$\text{式中: } \zeta = \frac{24R_1^4 + 36R_1^3R + 24R_1^2R^2 + 3R_1R^3}{R^3(2R_1 + R)}。$$

振动系统的临界阻尼为:

$$c_c = 2nm = 2\sqrt{k_{eq}m_{eq}} \quad (23)$$

因此,系统的阻尼比为:

$$\xi = \frac{c_{eq}}{c_c} = 2\eta_H L f_n m_{eq} \zeta \quad (24)$$

同一个系统,受相同的运动初始条件激励,临界阻尼情形中位移最大,而且返回平衡位置最快。在小阻尼系统下,  $\xi < 1$ , 阻尼比越大,则系统的阻尼越接近临界阻尼,说明减振器的减振性能越好。

### 3 活塞式磁性液体减振器的实验研究

#### 3.1 实验装置和相关参数

本文通过实验研究了线圈电流对悬臂梁的减振效果的影响。实验装置主要包括磁性液体减振器、悬臂梁、信号采集仪、位移传感器、电磁线圈、直流电源、计算机等,如图4所示。

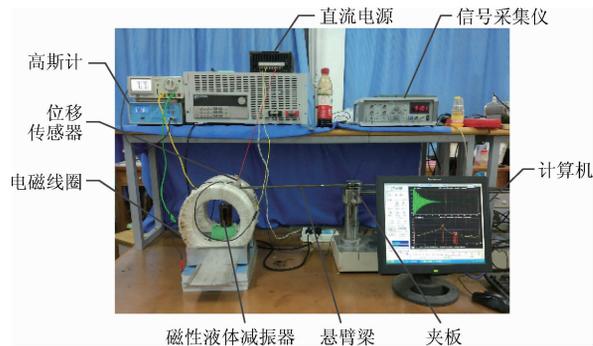


图4 实验装置

Fig. 4 The experiment devices

电磁线圈选用环氧树脂材料作为线圈骨架,线圈骨架半径为7.5 cm,选用直径为0.98 mm的铜导线,每个线圈的匝数  $N$  均为2 000匝,通入线圈的直流电流范围为0~3 A,可产生磁场范围为0~35 mT。减振器的相关参数如表1所示。减振器放置在线圈的中心位置,调节线圈电流的大小,可以调节磁性液体所处的磁场强度,从而改变减振器的阻尼系数。

表1 减振器的相关参数

Table 1 The parameters of the damper

	材质	半径/mm	长度/mm
减振器液缸	铝	$R_2 = 20$	60
活塞头	铝	$R_1 = 10$	$L = 30$

实验使用煤油基  $Fe_3O_4$  磁性液体,密度为  $1.76 \text{ g/cm}^3$ ,磁化曲线如图5所示。

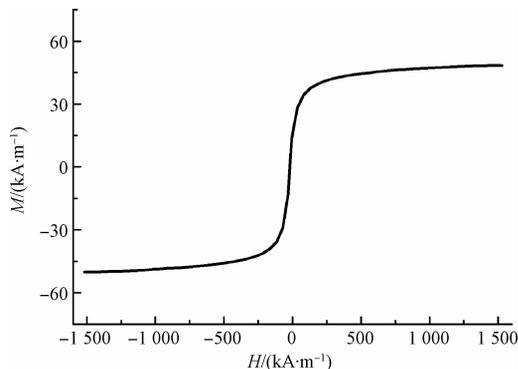


图5 实验中煤油基磁性液体的磁化曲线

Fig. 5 Magnetization curve of kerosene-based magnetic liquid in the experiment

通过实验测定,此煤油基磁性液体的粘度与磁感应强度大小的变化关系如图6所示。

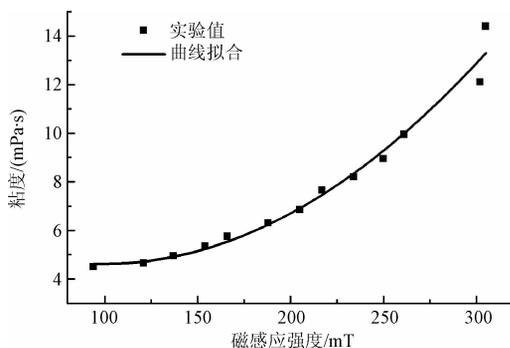


图6 实验中煤油基磁性液体的粘度随磁场的变化关系

Fig. 6 The relationship between the viscosity of kerosene-based magnetic liquid and the magnetic field in the experiment

其中,拟合曲线的表达式如下:

$$\eta_H = 6.6312 - 0.0406B + 0.0002B^2 \quad (25)$$

式中: $B$  为垂直于磁性液体涡旋矢量方向上的磁感应强度大小。

悬臂梁选用厚度为 3 mm、宽度为 30 mm、臂长可调的磷铜板,一端固定在 INV-1601 振动台的夹板上,另一端安装磁性液体减振器并在竖直方向自由振动,通过调节臂长可以改变悬臂梁的振动频率。位移传感器固定在悬臂梁自由端,用于测量梁的振幅,并将信号传入信号采集仪进行处理。

### 3.2 实验内容

将磁性液体减振器的活塞杆与悬臂梁自由端固定,非磁性液缸与振动台基座固定。调节悬臂梁的臂长为 60 cm,在梁自由端施加 12 mm 的初始位移。不加减振器与加不同线圈电流  $I$  的减振器时,梁自由端振幅如图 7 所示。

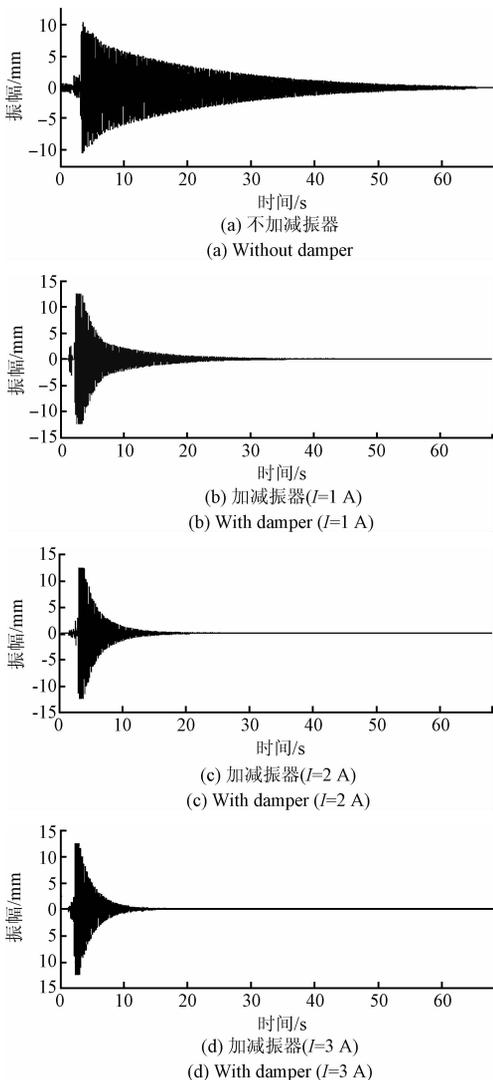


图 7 悬臂梁自由端的随时间的振幅变化  
Fig. 7 The curves of the amplitude of the free end of the cantilever beam vs. time

由图 7(a)可以看出,在不加减振器的情况下,悬臂梁自由端的振幅在 65 s 时振幅为 0,梁停止振动。当梁自由端安装磁性液体阻尼器,并且线圈电流越来越大时,梁自由端振幅衰减至 0 所需时间越来越少,如图 7(b) ~ (d) 所示。安装减振器后,梁自由端的振动阻尼比增加,振幅衰减加快,说明磁性液体减振器对梁自由端的振动产生减振效果,且随线圈电流越大,减振效果越好。

其中,图 7(a) 的最大振幅比图 7(b) ~ (d) 的最大振幅稍小,出现误差的主要原因:1) 不加减振器时,梁的自由端无负载,对悬臂梁自由端施加 12 mm 的初始位移,由于梁存在弹性阻尼,故最大位移稍小于 12 mm;当加减振器的情况下,梁自由端与减振器的活塞连接,由于活塞重力,使得自由端在平衡位置的初始位移略大于 0,在此平衡位置施加相同的初始位移,使得实际初始位移略大于 12 mm,故而使得最大振幅略大于无减振器的情况。2) 由于人为施加初始位移,可能造成初始位移存在误差。3) 重复实验使得梁发生轻微变形,导致初始位移略增大。由于误差对减振系统阻尼比的影响在允许范围之内,所以其对减振效果的影响可以忽略。

臂长为 60 cm 的梁振动的阻尼比随线圈电流变化的理论值和实验结果的对比如图 8 所示。

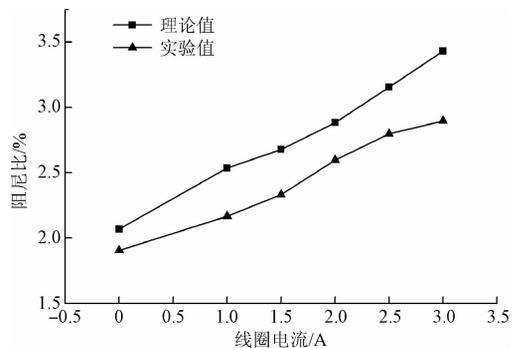


图 8 梁振动的阻尼比随线圈电流的变化  
Fig. 8 The curves of the damping ratio of the cantilever beam vibration vs. the coil current

从图 8 中可以看出,实验结果与理论分析的一致性较好,梁振动的阻尼比随着减振器周围磁感应强度的增加而增大,减振效果变佳。理论值大于实验值的部分主要是由于磁性液体在流动过程中会出现剪切变稀,而在理论分析过程中为了简化计算,忽略了这一变化。

为了研究磁性液体减振器对不同频率的振动的减振效果,调节悬臂梁臂长,分别对臂长为 40、60 和 80 cm 的悬臂梁进行实验。在线圈通入 1、1.5、2、2.5 和 3 A 时,测量梁振动的阻尼比,如图 9 所示。

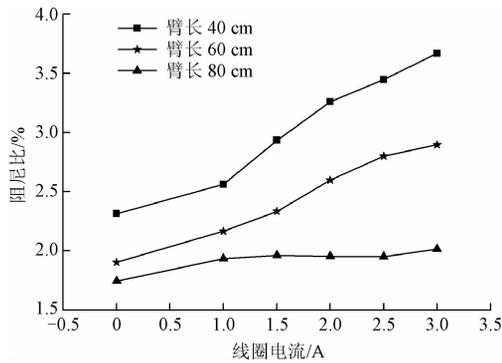


图9 不同臂长的悬臂梁振动阻尼比  
随线圈电流的变化

Fig. 9 The curves of the damping ratio of the cantilever beam vibration vs. coil current for different arm lengths

由图9可以看出,在同一臂长下,梁振动的阻尼比随线圈电流的增加而增加;在不改变减振器尺寸的情况下,臂长越小,梁振动的阻尼比越大,且随着线圈电流的增大,阻尼比增加的越快。这说明减振器周围的磁场越强,减振器对振动的阻尼效果越好,且在振动频率较高时,这种影响效果更明显。

## 4 结 论

本文基于磁性液体的磁粘特性,提出了一种活塞式磁性液体减振器,建立了这种减振器的动力学模型,结合悬臂梁自由端的等效一阶自由振动的力学分析,得出减振器施加于悬臂梁自由端时梁振动的阻尼比。

设计实验验证了减振器的磁场对减振器的阻尼比具有调节作用。实验结果证明,理论与实验结果的一致性较好。线圈电流越大,磁感应强度越大,振动频率越高,梁振动的阻尼比越大,减振器的减振性能越好。

改变悬臂梁的臂长,臂长越短,振动频率越高,梁振动的阻尼比越大,减振器对悬臂梁振动的阻尼效果越好。

## 参考文献

[1] 谢丽宇,唐和生,薛松涛. 减振高层建筑的极限破坏及性能再生的研究现状及前景[J]. 结构工程师, 2014,30(3): 205-212.  
XIE L Y, TANG H SH, XUE S T. State-of-the-art and future trend in limit state and rehabilitation of vibration-controlled high-rise buildings[J]. Structural Engineers, 2014, 30(3): 205-212.

[2] 刘洋. 抗震防落梁油阻尼器设计及性能研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2015.  
LIU Y. Study on design and performance of oil damper used for unseating prevention of bridges[D]. Harbin;

Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015.

- [3] 周海俊,孙利民. 附加双线性油阻尼器斜拉索的阻尼特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 1-5.  
ZHOU H J, SUN L M. Damping of taut cable with attached bilinear viscous damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 1-5.
- [4] OHNO K, SHIMODA M, SAWADA T. Optimal design of a tuned liquid damper using a magnetic fluid with one electromagnet [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2008, 20(20):1586-1594.
- [5] 邝昊,黄毅,王佳茜,等. 基于 CompactRIO 的变姿态超长柔性臂架振动主动控制系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(增刊1):87-92.  
KUANG H, HUANG Y, WANG J Q et al. Research on active vibration control of super-long flexible boom in time-varying position based on CompactRIO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (Suppl. 1): 87-92.
- [6] 马天兵,杜菲,熊能,等. 柔性机械臂振动控制中的压电传感器故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1408-1413.  
MA T B, DU F, XIONG N, et al. Faults diagnosis of piezoelectric sensor for flexible arm vibration control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12): 1408-1413.
- [7] 于志亮,刘杨,王岩,等. 基于改进 PI 模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 129-135.  
YU ZH L, LIU Y, WANG Y, et al. Hysteresis compensation and control of piezoelectric actuator based on an improved PI model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 129-135.
- [8] 苏树强,李德才. 新型磁流体水平传感器的研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 431-439.  
SU SH Q, LI D C. Research and design of a novel magnetic fluid tilt sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 431-439.
- [9] 钱乐平,李德才. 新型磁性液体惯性传感器的理论与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 507-514.  
QIAN L P, LI D C. Theoretical and experimental study of a novel magnetic fluid inertial sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 507-514.
- [10] 刘雪莉,杨庆新,杨文荣,等. 磁性液体磁粘特性的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(24):3554-3557.

- LIU X L, YANG Q X, YANG W R. Research on viscosity of magnetic liquids in magnetic field [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44 (24): 3554-3557.
- [11] ROBERT K., GABOR M. Some applications of ferrofluid magnetic colloids [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1970, 6(3):694-698.
- [12] KUNIO S, SHINICHI K, MAKIO I, et al. Magnetic fluid damper [J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 1996, 41(6):470.
- [13] SHOHEI H, MANABU S. Effective method of applying magnetic field on a tuned liquid damper using a magnetic fluid[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007, 25(1):139-143.
- [14] OHNO K, HAYATO S, TATSUO S. Analysis of liquid sloshing of a tuned magnetic fluid damper for single and co-axial cylindrical containers[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(10):1389-1393.
- [15] TOSHIYUKI O, HIDEAKI M. Damping characteristics of a magnetic fluid tuned liquid column damper under static magnetic fields [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45 (1): 659-662.
- [16] 刘桂雄, 徐晨, 张沛强, 等. 永磁体在磁流体中的磁力学建模及自悬浮位置可控性[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 2005-2010.
- LIU G X, XU CH, ZHANG P Q. Magneto mechanical modeling of magnet immersed in magnetic fluid and controllability of self-suspension [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 2005-2010.
- [17] 李艳琴, 部德才, 李学慧. 磁性液体纳米磁性颗粒磁场诱导链状结构研究 [J]. 无机材料学报, 2013, 28(7): 745-750.
- LI Y Q, BU D C, LI X H. Magnetic field induced chain alignment of ferroparticles in magnetic fluid[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(7): 745-750.
- [18] 龚小敏, 陈龙龙, 李军明, 等. 水-甘油基  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$  复合微粒磁性液体的磁化性质[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2014, 36(5): 78-83.
- GONG X M, CHEN L L, LI J M, et al. Magnetization behavior of ferrofluids based on  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$  composite

nanoparticles in Water-Glyceryl carrier liquids[J]. Journal of Southwest University :Natural Science Edition, 2014, 36(5): 78-83.

- [19] 丁一, 李德才, 王庆雷. 磁性液体阻尼减振器的设计与实验研究[J]. 载人航天, 2013, 19(1): 77-79.
- DING Y, LI D C, WANG Q L. The Design and experimental study of the magnetic fluid damper [J]. Manned Spaceflight, 2013, 19(1):77-79.
- [20] 杨文明, 李德才, 冯振华. 磁性液体阻尼减振器动力学建模及实验[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 253-259.
- YANG W M, LI D C, FENG ZH H. Dynamic modeling and experiment of ferrofluid damper [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):253-259.

## 作者简介



**杨晓锐**, 2011年于河北工业大学获得学士学位, 现为河北工业大学在读博士研究生, 主要研究方向为工程电磁场与磁技术研究和磁性纳米材料的理论及应用。

E-mail:shary\_yang87@163.com

**Yang Xiaorui** received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2011. Now, she is a Ph. D. candidate in Hebei University of Technology in 2011. Her main research interest includes engineering electro-magnetic field and magnetic technology research, theory and application research of magnetic nano-materials.



**杨文荣** (通讯作者), 1991年于河北工学院获得学士学位, 分别在2002年和2006年于河北工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为河北工业大学电气工程学院教授, 主要研究方向为工程电磁场与磁技术研究和磁性纳米材料的理论及应用。

E-mail:wryang@hebut.edu.cn

**Yang Wenrong** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hebei Technology College in 1991, received her M.Sc. and Ph. D. degrees both from Hebei University of Technology in 2002 and 2006, respectively. Now, she is a professor in School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology. Her main research interest includes engineering electro-magnetic field and magnetic technology research, theory and application research of magnetic nano-materials.