

# 挤压式磁流变体减振器阻尼力的分析

付 华 傅周东 吴根茂 鲍颖纲

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 在分析了挤压式磁流变体(MR)减振器工作原理的基础上, 通过磁路计算, 推导出挤压式 MR 减振器的阻尼力计算公式。测量了该纳米级铁磁流体在零磁场下粘度。以纳米级铁磁流体为例, 分别计算出该减振器在设定条件下的阻力—位移、阻力—速度变化规律。并讨论位移、速度、加速度和励磁线圈电流对阻尼力的综合影响。为挤压式 MR 减振器的进一步研究提供了理论依据。

关键词: 挤压式 减振器 磁流变体 阻尼力

中图分类号: TB535.1 TB381

## 0 前言

磁流变体是由悬浮在基液的磁性微粒、稳定剂和基液组成。这使得磁流变体既具有普通磁性材料的磁性, 同时又具有液体的流动性。20 世纪 40 年代 J. Rabinow 首先发现了磁流变现象, 即在外加磁场下, 磁流变体的流变特性会随外加磁场强度的变化而变化。随着对磁流变体的研究的深入, 人们发现磁流变体的表观粘度在外加磁场的增加时, 会显著增加甚至变为固体; 当外加磁场撤去时, 磁流变体又恢复到原来的液体状态, 并且其响应时间仅为几毫秒。磁流变体表观粘度无级可调的特性, 使得人们可以应用该材料制作很多种智能设备。20 世纪 60 年代美国首先应用于宇航工业, 后来逐渐转为民用, 现已成为很庞大的产业, 在美国、日本和德国等发达国家都有磁性液体公司。

由于磁流变体减振器具有体积小、功耗少、阻尼力大、动态范围广、频率响应高和适应面宽的优点。特别是避免了传统的被动式减振器适应性差和主动减振器控制算法复杂和控制器稳定性问题。使之成为磁流变体重要的应用和研究领域之一。目前国际上研究出很多基于磁流变体的减振器。尽管形式上各种各样, 但归结起来可以分为 3 大类: 压力驱动模式、剪切模式和挤压模式。基于挤压式减振器小位移大阻尼的特点, 多应用于精密仪器(天平, 光学设备等)消除外界振动噪声的干扰。

由于 MR 减振器是最近几年刚刚兴起(尽管 MR 现象发现比较早), 还没有较为完善的理论体系。目前对其的研究大多是以试验为主, 尽管试验有较高的针对性和准确性。但由于试验普适性差,

很难对减振器的初步设计有参考和指导意义。开展对挤压式 MR 减振器的理论模型的分析 and 理论研究已非常迫切。下面就这方面的问题进行讨论。

## 1 挤压式 MR 减振器的原理

挤压式 MR 减振器原理如图 1, 磁极移动方向与磁场方向相同, 磁流变体在磁极压力的作用下向四周流动。由于结构的限制, 磁极的运动位移较小(一般在 3 mm 左右)。但此结构的磁流变体产生的阻尼力较大。

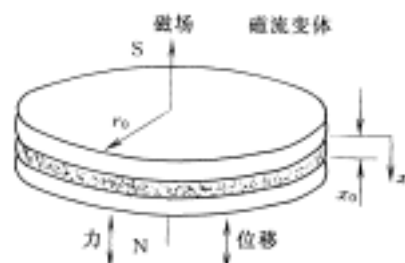


图 1 挤压式磁流变体减振器的原理图

## 2 挤压式 MR 减振器模型的建立

### 2.1 力学模型

根据该减振器的工作原理, 取上板为活动板, 下板为固定板。磁流变体被置于两块半径为  $r_0$  的板子中间, 见图 1。设流体的初始厚度为  $x_0$ , 活动板向下移动的位移为  $x$ 。在这种情况下, 减振器的阻尼由流体的粘性阻力、流体惯量力、由磁流变效应产生的力和初始力四部分组成。

(1) 在零磁场下的流体粘性阻尼力

由牛顿粘性定律得式(1)<sup>[1,2]</sup>

$$F_1 = \frac{3}{2} \eta_0 r_0^4 \frac{\dot{x}}{(x_0 - x)^3} \quad (1)$$

式中  $\eta_0$ ——磁流体在零磁场下的粘度  
 $\dot{x}$ ——活动板(上板)运动的速度

(2) 流体的惯性力

由流体的动量方程得

$$F_2 = \frac{d(m\dot{x})}{dt} = \rho \pi r_0^2 \ddot{x}(x_0 - x) + \rho \pi r_0^2 \dot{x}^2 \quad (2)$$

式中  $m$ ——流体质量  
 $\rho$ ——流体的密度

$\ddot{x}$ ——活动板的加速度

(3) 磁流变体效应产生的阻力

由参考文献[2]，磁流变体效应产生的阻力为

$$F_3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \tau_y \frac{\text{sgn}(\dot{x})}{(x_0 - x)} \quad (3)$$

式中  $\tau_y$ ——磁场引起的磁流变体屈服应力

(4) 初始力

$$F_4 = \frac{4}{3} \pi r_0^2 p_0 \quad (4)$$

式中  $p_0$ ——初始压力

将四部分力相加，即得到该减振器总阻尼力

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \frac{3}{2} \eta_0 r_0^4 \frac{\dot{x}}{(x_0 - x)^3} + \rho \pi r_0^2 (x_0 - x) \ddot{x} + \rho \pi r_0^2 \dot{x}^2 + \frac{4}{3} \pi r_0^3 \tau_y \frac{\text{sgn}(\dot{x})}{(x_0 - x)} + \frac{4}{3} \pi r_0^2 p_0 \quad (5)$$

### 2.2 磁路计算

磁流变体和衔铁工作点的选定。衔铁的磁通为  $\Phi_a = B_a \times A_a'$ ；磁流变体的磁通  $\Phi_f = B_f \times A_f'$ ，两式中  $A_a'$ 、 $A_f'$  分别为考虑边缘效应的有效截面积。根据磁通连续原理，磁通密度为  $\Phi_f = \Phi_a$ 。

衔铁的工作点

$$B_a = \frac{\Phi_a}{A_a} = \frac{B_f A_f'}{A_a} \quad (6)$$

由图2 衔铁的BH曲线确定  $H_a$

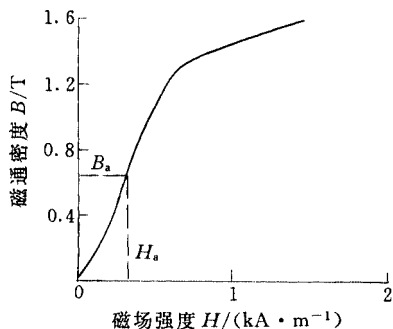


图2 衔铁的BH曲线

同样，也可以通过图3 确定磁流变体的工作点  $B_f$ 、 $H_f$ 。

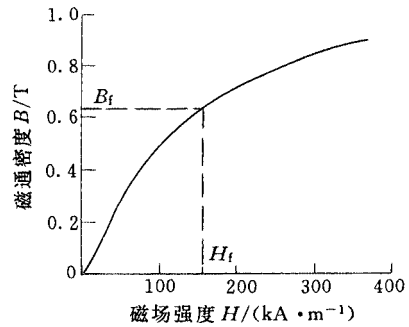


图3 磁流变体的BH曲线

将减振器的磁路简化为图4 所示的磁路。设衔铁的磁路路径长度为  $l_a$ ，磁隙为  $x_0 - x$ 。衔铁和磁隙的磁场强度分别为  $H_a$ 、 $H_f$ 。由 Kirchoffs 定律

$$NI = H_a l_a + H_f (x_0 - x) \quad (7)$$

由于  $H_f$  比  $H_a$  大很多(两个数量级)，而  $l_a$  与  $x_0 - x$  通常相差一个数量级。所以  $H_a l_a$  与  $H_f (x_0 - x)$  相比可忽略不计。则有

$$H_f = \frac{NI}{(x_0 - x)} \quad (8)$$

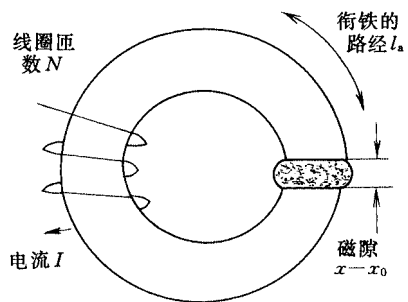


图4 磁流变体的磁路示意图

由式(8)可知 MR 的磁场强度与线圈电流和减振器位移有关。即对于挤压式 MR 减振器来说，即使线圈电流恒定时，其工作点也是不断变化的。故在该减振器的设计和计算中，要不断判断衔铁和 MR 的工作点，以确定在计算 MR 的磁场强度时，是否忽略衔铁的影响。

$$\tau_y = \alpha H_f^\beta \quad (9)$$

$$F = \frac{3}{2} \eta_0 r_0^4 \frac{\dot{x}}{(x_0 - x)^3} + \rho \pi r_0^2 (x_0 - x) \ddot{x} + \rho \pi r_0^2 \dot{x}^2 + \frac{4}{3} \pi r_0^3 \alpha (NI)^\beta \frac{\text{sgn}(\dot{x})}{(x_0 - x)^{1+\beta}} + \frac{4}{3} \pi r_0^2 p_0 \quad (10)$$

式中  $\alpha$ ——试验测得的系数

$\beta$ ——等于 2 的指数

### 3 挤压式 MR 减振器特性计算与分析

#### 3.1 粘度测量

测量装置采用德国 HAAKE 公司的 RV20 粘度仪。测量时的温度 22.8 °C，转速 20 r/min。首先用 1 号硅油对粘度仪进行标定(图 5)，得到修正系数  $A=7.555$ ， $M=23.4$ 。然后测出零磁场下纳米级磁流变体的切应力—转速曲线(图 6)。从图 6 我们可以看出：在零磁场下磁流变体可以近似地认为是牛顿流体。从而得到磁流变体的粘度  $\eta_0=1.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

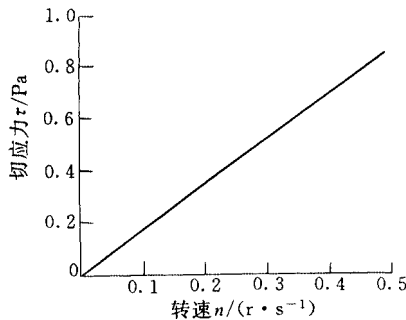


图 5 1 号硅油的切应力—转速曲线

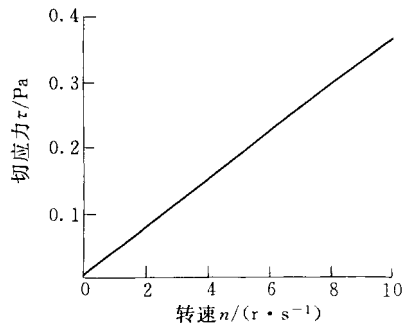


图 6 磁流变体的切应力—转速曲线

#### 3.2 计算的参数设置

设半径  $r=20 \text{ mm}$ ， $\beta=2$ ， $\rho=4 \text{ t/m}^3$ ，设减振器的最大位移为  $0.8 \text{ mm}$ ，运动频率为  $5 \text{ Hz}$ 。减振器位移  $x=0.8 \sin\theta$ ， $\theta$  在  $0\sim\pi/2$  范围内。

#### 3.3 计算结果与分析

图 7、8 为减振器阻力—位移和阻力—速度曲线。图 7 中，在位移  $0\sim 0.73 \text{ mm}$  时，阻力随位移增大而增大。位移在  $0.73\sim 0.80 \text{ mm}$  之间，阻力随位移增大而减小。这是活动板的移动速度增大和磁隙减小所引起磁流变体磁场增加的共同结果。

图 8 中，活动板速度在  $0\sim 3 \text{ mm/s}$  之间，阻力随位移速度增加而增大。在  $3\sim 8 \text{ mm/s}$  间，则相反。这是由于速度 ( $\dot{x}=2x_0\omega\cos\theta$ ) 增加时，位移 ( $x=x_0\sin\theta$ ) 小造成的。

在图 7、8 中可以知道当磁流变体未达到磁饱和

时，电流增加阻力也会随之大幅增加。

加速度(由于减振器的结构原因产生)和一般初始力(为静载荷如重力、大气压等)影响不大。

由式(7)可见，即使线圈电流恒定，由于磁隙的变化，衔铁和磁流变体的工作点还是变化的。

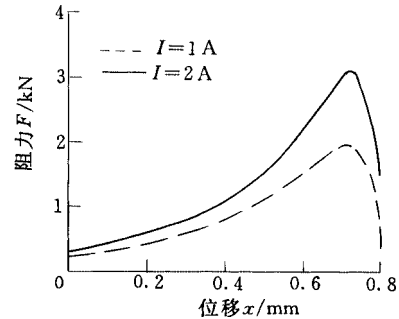


图 7 阻力—位移曲线

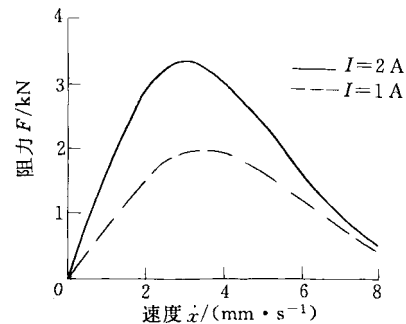


图 8 阻力—速度曲线

## 4 结论

当该减振器活动板发生位移，由于磁隙的变化，实际上是磁路发生了变化。即衔铁和 MR 流体的磁场工作点是变化的。

影响阻尼力的因素很多：MR 流体的粘度(0 磁场下的)，磁场下的应力指数  $\beta$ ，系数  $\alpha$  以及减振器运动状态(位移、速度、加速度)。其中对于小尺寸的减振器且密度不大的 MR 流体，加速度对减振器的影响不大。从位移—阻尼力曲线、速度—阻尼力曲线看出。由于诸多因数的影响，曲线均为先单调增加达到某一最大值，然后再单调减小。

线圈的电流增加阻尼力增大。

### 参 考 文 献

- 1 Sims N D, Stanway R, Yang J S. Vibration isolation using a magneto-rheological Damper in the squeeze-flow mode. In: Proceedings SPIE 7th International Symposium on Smart Structures and Structures and Materials, Newport Beach, 2000: 520~526
- 2 Jolly M R, Carlson J D. Controllable squeeze-film damping

- using an MR fluid. In: Proceedings of Actuator'96, Bremen, Germany, 1996: 333~336
- 3 Stanway R, Sims N D, Johnson Andrew R. Modeling and control of a magnetorheological vibration isolator. In : Proceeding of SPIE Vol. 3989, 2000: 184~193
- 4 Snyder Rebecca A, Kamath Gopalakrishna M, Wereley Norman M. Characterization and analysis of magnetorheological damper behavior due to sinusoidal loading. In: Proceedings SPIE 7th International Symposium on Smart Structures and Structures and Materials, Newport Beach, 2000: 213~229

### ANALYSIS ON SQUEEZE-MODE MR VIBRATION ISOLATOR DAMPER FORCE

*Fu Hua Fu Zhoudong Wu Genmao Bao Yinggang  
(Zhejiang University)*

**Abstract:** Based on the principle of squeeze-flow mode magnetorheological (MR) fluid isolator, damper force equation of the isolator is deduced. According to the MR fluid viscosity without magnetic field and other enactment parameters, the damper force-speed relationship and damper force-displacement relationship are respectively gotten. Moreover, the integrate affects of damper forces by displacement, speed, acceleration, coil current are discussed. Those calculations and analysis are very useful for father research of MR vibration isolator.

**Key words:** Squeeze mode Vibration isolator

Magnetorheological fluid Damper force

作者简介: 付华, 男, 1962 年出生, 博士研究生。主要研究方向为磁流变体器件、振动控制及自动化控制。