

基于 Poiseuille 流动的汽车磁流变减振器分析与测试^{*}

廖昌荣, 余 淼, 李立新, 杨建春, 陈伟民, 黄尚廉^{**}
(重庆大学智能结构研究中心, 重庆 400044)

摘 要: 利用牛顿流体模型和滨汉流体模型, 对基于 Poiseuille 流动的汽车磁流变减振器进行了分析, 设计制作了微型汽车磁流变减振器, 并对此进行了测试, 测试结果表明: 所提出的分析方法是可行的, 对设计汽车磁流变减振器有一定的指导意义。

关键词: 磁流变液; 减振器; 汽车悬架

中图分类号: TB383 文献标识码: A

1 引 言

传统的汽车悬架系统是按某种特定的路面状况和车辆运行状态进行设计的, 其减振器的特性是不可调的, 当路面状况和车辆运行状态超出设计条件时, 固定阻尼特性的悬架系统的减振效果将大为降低, 轻则影响乘坐的舒适性, 重则影响行车安全。为此, 工业发达国家开发了各种各样的悬架, 其中控制减振器阻尼特性的半主动悬架系统, 以其价格低廉、制造工艺相对简单、减振效果较好, 具有广阔的应用前景。可控减振器一般依据调节阻尼通道的有效面积和调节阻尼油的流动特性进行工作的, 磁流变减振器利用磁流变液的流变特性可受外加磁场控制的特性, 实现阻尼力的控制^[1], 工业发达国家已经开始利用磁流变液来开发汽车可控减振器, 并取得了重大进展^[2,3], 而我国这方面的工作才刚起步, 因此, 对磁流变减振器进行深入研究对开发汽车磁流变减振技术具有非常重要的意义。

2 磁流变减振器的工作模式

磁流变减振器是基于磁流变液的可控特性的一种新型减振器, 其工作原理一般都基于下列两种工作模式^[4]: Poiseuille 流动和 Couette 流动。在 Poiseuille 流动模式中(图 1a), 磁流变液位于两个相对静止的极板之间, 磁流变液流经阻尼通道产生的压力差是受外界磁场控制的, 推动磁流变液流动的活塞所受到的阻尼力就受到外界磁场控制; 在 Couette 流动模式中(图 1b), 磁流变液位于两相对运动的极板之间, 外加磁场方向垂直于极板的相对运动方向, 磁场强度是受控制系统控制的, 由于不同的磁场可以使磁流变液产生不同的剪切屈服应力, 从而极板之间相对运动所产生的阻尼就受到了磁场的控制。本文对基于 Poiseuille 流动模式的磁流变减振器进行了分析和测试。

^{*} 国家自然科学基金(59635140)和重庆市科委院士基金资助项目(98562)。

^{**} 通讯联系人, Email: crliao@263.net

收稿日期: 2001 - 07 - 08; 修回日期: 2001 - 09 - 06。

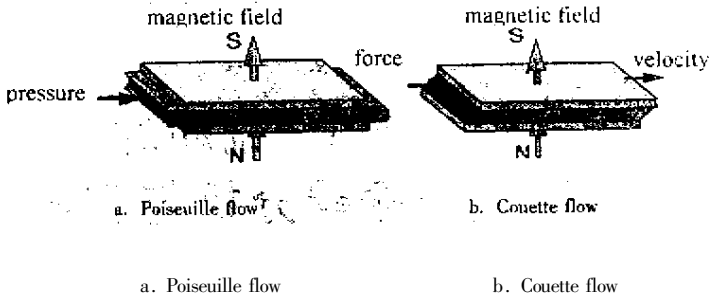


图 1 磁流变减振器的工作模式

Fig.1 Models of MR fluid shock absorber

根据汽车减振器工作特点 本文设计了两级阻尼通道串联的 Poiseuille 流动减振器 (如图 2 所示 活塞在工作缸内由活塞环导向往复移动 利用活塞上的线圈产生磁场来控制磁流变液的

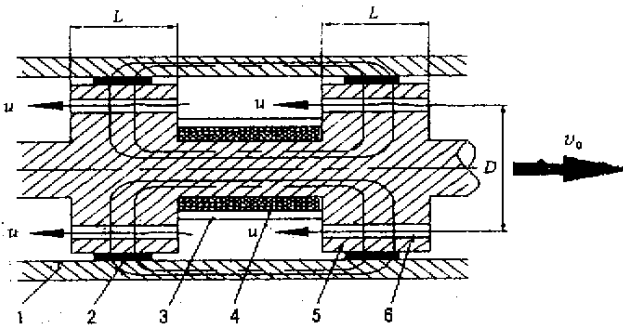


图 2 磁流变减振器的工作原理

1. 工作缸; 2. 活塞环; 3. 线圈外套; 4. 线圈; 5. 活塞; 6. 阻尼通道

Fig.1 Models of MR fluid shock absorber

流动特性 实现对减振器阻尼特性的控制。由于磁流变液在阻尼通道中的流动是沿着减振器的轴向流动的 在周向和径向的流动速度为零 为了简化假设磁流变液在阻尼通道内沿轴向是线性变化的 不计体积力的作用 由流体力学得平板间 Poiseuille 流动的流动方程：

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{\Delta p}{L} \tag{1}$$

其中, τ 为磁流变液的剪切应力; y 为垂直于磁流变液流动方向的坐标; L 为阻尼通道的长度; Δp 为阻尼通道两端的压力差。

3 汽车磁流变减振器的分析

3.1 牛顿流体分析

在没有外加磁场的作用下 磁流变液表现为牛顿流体 其剪应力 τ 可用下式来表示：

$$\tau = \mu_0 \frac{du}{dy} \tag{2}$$

其中, u 为磁流变液的流动速度; μ_0 为磁流变液的粘度。

将(2)式代入(1)式,利用边界条件: $u(0)=0$; $u(h)=0$ 求解二阶微分方程,得出平行板通道的速度分布:

$$u(y) = \frac{\Delta p}{2\mu_0 L} (y^2 - hy) \tag{3}$$

流过阻尼通道的磁流变液可通过下列公式计算:

$$Q = \int_0^h bu(y) dy = -\frac{h^3 b \Delta p}{12\mu_0 L} \tag{4}$$

其中, b 为阻尼通道的宽度; h 为阻尼通道的间隙厚度。由流体力学连续性原理和本文所设计的汽车磁流变减振器是两个阻尼通道串联,并注意到: $b = \pi D$, $Q = -AV_0$ 和 $F = 2\Delta pA$, 得下列阻尼力计算公式:

$$F = -\frac{24\mu_0 A^2 L}{\pi Dh^3} V_0 \tag{5}$$

其中, A 为减振器活塞的作用面积; F 为减振器的阻尼力。

3.2 宾汉塑性流体分析

在外加磁场的作用下,磁流变液表现为宾汉流体,其本构关系可以用下列方程来描述:

$$\begin{cases} \tau = \tau_y \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dy}\right) + \mu \frac{du}{dy} & \tau > \tau_y \\ \frac{du}{dy} = 0 & \tau \leq \tau_y \end{cases} \tag{6}$$

其中, τ_y 为磁流变液的屈服剪力值; μ 为磁流变液的塑性粘度。

在阻尼通道中,磁流变液的流动分为三个区域,如图3所示,且满足下列边界条件:

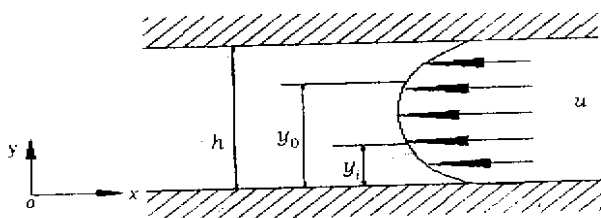


图3 阻尼通道中磁流变液的速度分布

Fig.3 Velocity profile of magnetorheological fluid in passage

区域1:屈服流动, $0 \leq y \leq y_i$, $\tau = \tau_y + \mu \frac{du}{dy}$, $u(0)=0$, $\frac{du(y_i)}{dy} = 0$;

区域2:刚性流动, $y_i \leq y \leq y_0$, $\frac{du}{dy} = 0$, $\tau(y_i) = \tau_y$, $\tau(y_0) = -\tau_y$, $u(y_i \leq y \leq y_0) = c$;

区域3:屈服流动, $y_0 \leq y \leq h$, $\tau = -\tau_y + \mu \frac{du}{dy}$, $u(h)=0$, $\frac{du(y_0)}{dy} = 0$;

分别建立三个流动区域的微分方程:

$$\text{区域1: } \mu \frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{\Delta p}{L} \tag{7}$$

$$\text{区域2: } u(y_i \leq y \leq y_0) = c (\text{常数}) \tag{8}$$

$$\text{区域3: } \mu \frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{\Delta p}{L} \tag{9}$$

利用上述边界条件,求解微分方程(7)(9)得三个流动区域得速度分布:

$$u_1(y) = \frac{\Delta p}{2\mu L}(y^2 - 2y_0y)$$

$$u_2(y) = -\frac{\Delta p}{2\mu L}y_i^2$$

$$u_3(y) = \frac{\Delta p}{2\mu L}[y^2 - h^2 + 2y_0(h - y)]$$

由流体力学连续性原理知,流经阻尼通道的磁流变液等于活塞所占的体积,得下列方程:

$$\int_0^y bu_1(y)dy + \int_{y_i}^y bu_2(y)dy + \int_{y_0}^h bu_3(y)dy = AV_0 \quad (10)$$

化简上述方程,并注意 $F = 2\Delta pA$, $b = \pi D$,得下列方程:

$$\left(\frac{\pi Dh^3}{24\mu LA^3}\right)F^3 - \left(\frac{\pi Dh^2\tau_v}{4\mu A^2} + \frac{V_0}{A}\right)F^2 - \left(\frac{\pi DL^2\tau_v^3}{3\mu}\right) = 0 \quad (11)$$

利用上述方程,给定结构参数和磁流变液的特性参数,便可以得出阻尼力随阻尼间隙的变化,阻尼力随阻尼通道长度的变化。利用 Matlab 计算得出的结果如图 4 所示。根据减振器的结构要求、磁流变液的特性和动态磁路设计原理,便可进行磁流变减振器设计。

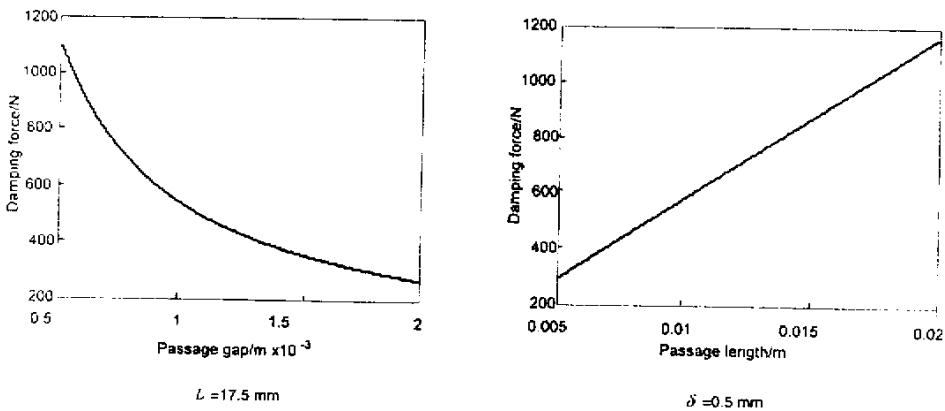


图 4 阻尼力与阻尼间隙、通道长度的关系

Fig.4 Damping force vs. passage gap and passage length

4 汽车磁流变减振器试验

根据长安微型汽车前悬架系统的技术要求,设计制作了微型汽车磁流变减振器,该减振器采用了国家仪表功能材料工程研究中心提供的磁流变液,国家客车质量检测中心对磁流变减振器的示功进行了测试,测试采用正弦振动其最大速度 $V_0 = 0.3 \text{ m/s}$,振幅为 $\pm 25 \text{ mm}$,其示功特性曲线如图 5 所示,从图中可以看出,随着线圈电流强度的增加,示功图的面积逐渐增大,表明了减振器的阻尼力增大和在一个循环中减振器所耗散的功增大。减振器在相同速度条件下,对励磁线圈加不同的电流,减振器的阻尼力也发生变化,如图 6 所示。从图中可以看出,减振器的阻尼力理论值与实验值基本吻合,其主要误差来自于活塞杆与密封元件之间的摩擦、磁流变液性能的测试误差和磁路的损失等,当电流达到 1 安培时,减振器的阻尼力增加较慢,这是由于磁路与磁流变液的饱和所致,在设计磁流变减振器时,应该引起注意。

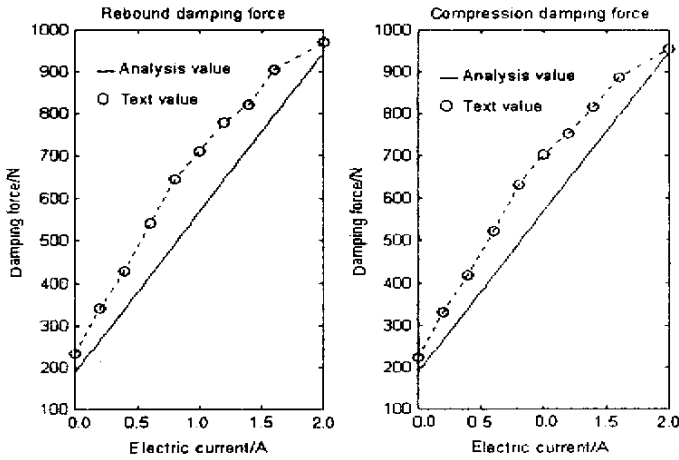


图 5 阻尼力与电流的关系曲线 (速度 = 0.3 m/s)

Fig.5 Plot of damping force vs. electric current (velocity = 0.3m/s)

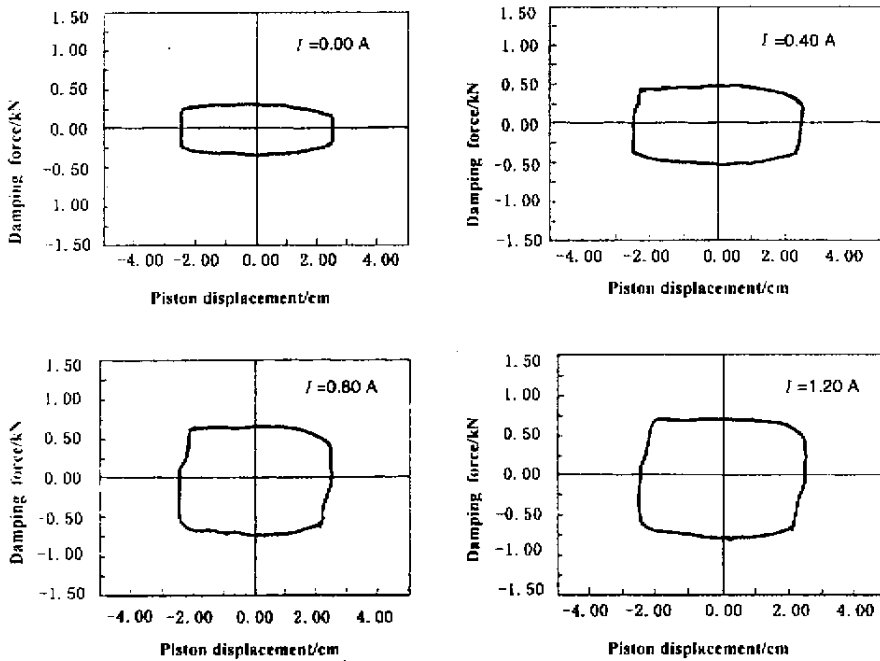


图 6 磁流变减振器的示功特性

Fig.6 Damping force vs. displacement

5 结论

本文利用牛顿流体模型和宾汉流体模型,对基于 Poiseuille 流动的汽车磁流变减振器进行了分析,设计制作了微型汽车磁流变减振器,并对此进行了测试,可以得出下列结论:

1. 磁流变减振器与传统的可控减振器相比,其运动部件大为减少,结构简单,是一种具有应用广泛前景的可控减振器。
2. 磁流变减振器阻尼特性是受励磁线圈的电流控制的,通过调节电流,使阻尼通道中的磁场强度发生变化,引起磁流变液产生磁流变效应,达到调节阻尼力的目的。
3. 根据本文所提出的分析方法和设计原理,设计的磁流变减振器达到了相应的目的,实验测试结果与理论分析的结果基本是相吻合的。

参 考 文 献

- [1] Mark R Jolly , Jonathan W Bender , David Carlson J. *SPIE* , 1998 , **3327** : 262
 [2] Anderw N Vavreck. *SPIE* , 2000 , **4073** : 252
 [3] Abdulazim H Falah , William W Clark , Pradeep P Phule. *SPIE* , 1998 , **3327** : 276
 [4] Jason Lindler , Norman M Werely. *SPIE* , 1998 , **3327** : 226

Analysis and Testing of Automotive MR Fluid Shock Absorber Based on Poiseuille Flow Mode^{*}

Liao Changrong , Yu Miao , Li Lixin ,

Yang Jianchun , Chen Weimin , Huang Shanglian^{**}

(Center for Intelligent Structures , Chongqing University , Chongqing 400044)

Abstract Analysis methodology and design theory of magnetorheological fluid (MR fluid) shock absorber based on of Poiseuille flow mode have been parented using Newton fluid model nonlinear Bingham plastic model. In the light of the technician requirements for Changan mini – automobile , a MR fluid shock absorber has been designed and fabricated using commercial MR fluid. We have validated experimentally the nonlinear MR fluid shock absorber model. The experimental results reveal that the analysis methodology and design theory is reasonable and the MR fluid shock absorber for a specific application can be designed according to the design methodology developed.

Key words Magnetorheological fluid , Shock absorber , Automobile suspension

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of China (59635140) and Academician Foundation of Chongqing (98562).

^{**} To whom correspondence should addressed , Email : crliao@263.net