

多层挤压式电流变阻尼器理论建模研究*

赵霞 张永发

(北京理工大学理学院力学系,北京 100081)

摘要 提出了一种多层挤压式的电流变阻尼器模型,首先基于电流变 Bi-Viscosity 塑性模型,对挤压式电流变阻尼器进行了数学建模及讨论,然后对其动态特性进行研究,输入采用正弦波激励,模拟分析了阻尼器在不同外部条件下输出的阻尼力. 仿真结果表明,阻尼力是激励振幅、频率和外加电压的增函数,阻尼力分为粘性阻尼和电致阻尼两部分,阻尼器的阻尼可控部分是其电致阻尼力,可以通过外加电压对其调节,同时模型也可应用于挤压式磁流变液阻尼器的理论设计.

关键词 电流变液, 电流变阻尼器, 多层挤压式, 动态特性

引言

目前,履带式车辆的悬挂系统通常采用的是被动悬挂,弹簧的刚度和阻尼系数都是不可调整的,减振效果差,不能同时满足车辆行驶平顺性和安全性的要求. 主动悬挂系统虽然控制效果好,但是结构复杂、成本高、能耗大. 半主动悬挂系统是基于可调的阻尼器(或弹簧),针对履带车辆行驶的路面情况,对悬架的参数进行实时调整,能够改善驾驶人员的乘坐舒适性,提高行驶速度,对提高履带车辆的机动性和战斗力有重要的意义^[1-2]. 本文研究的是半主动悬挂系统中的一个重要部件:利用电流变液作为工作液的电流变阻尼器,它是半主动悬架的控制执行器件,可以通过外加电场的变化实现阻尼力的连续调节,并且响应迅速,为车辆的实时控制提供了可能^[3-5].

根据工作液在阻尼器中的能量转换形式,可将目前的电流变阻尼器分为三种:剪切模式、流动模式和挤压模式. 近期研究发现^[6-7],电流变液体在压缩状态下比剪切状态时可以提供大一个数量级的屈服应力. 那么在效率相同的情况下,挤压式的电流变阻尼器就可以设计的更加简单紧凑. 由于电流变液在电场作用下呈现出复杂的强非线性,挤压式电流变阻尼器在理论建模等方面未得到很好的解决,又由于目前已研制电流变液的屈服应力不是很高,为了进一步改进电流变阻尼器的动力特性,

本文提出了一种多层挤压式的电流变阻尼器模型,在详细分析电流变液在极板间的流动特性的基础上,建立了电流变阻尼器阻尼力与外加电场之间的理论模型,为今后挤压式电流变阻尼器的力学计算及结构设计提供了理论基础.

1 原理分析

电流变液是由固体颗粒均匀分散在非导电的母液中制成的悬浮液,在外加电场下表现出快速的、可逆的粘度变化^[8]. 多层挤压式电流变阻尼器由四个圆形平板型的电极两两相连组成,放置在绝缘槽中,下极板与绝缘槽固接,电流变液充满在电极的间隙中,示意图如图1所示,电极板上下相对运动挤压中间的电流变液体,当在极板上加上电场之后,间隙中的电流变液粘度增加,发生粘塑性流动,在极板上产生压差,使极板的相对运动的阻尼力增加.

电流变液的本构关系可由 Bingham 模型或 Bi-Viscosity 模型描述,本文采用的是后者,如图2所示,剪切力 τ 由下式给出^[9]

$$\tau = \begin{cases} \eta_r \frac{du}{dz} & (\tau \leq \tau_1) \\ \tau_0 + \eta \frac{du}{dz} & (\tau > \tau_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_0 = \tau_1(1 - \gamma) \quad (2)$$

其中 η 为动力粘度, $\frac{du}{dz}$ 为速度梯度, τ_1 为屈服应力, $\gamma = \eta/\eta_r$, 当 γ 趋近 0 时就转变为 Bingham 模型.

2006-09-21 收到第1稿,2006-09-29 收到修改稿.

* 国家部委预研项目(405020104)

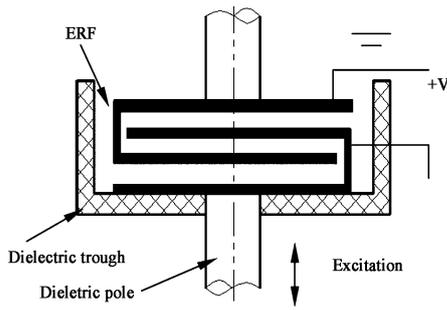


图1 多层挤压式电流变阻尼器结构简图
Fig. 1 Schematic of multi-electrode squeeze ER damper

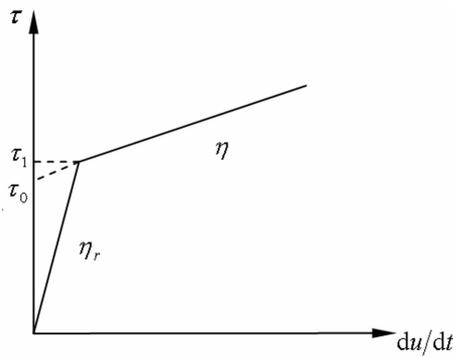


图2 Bi-Viscosity 塑性模型
Fig. 2 Bi-Viscosity plastic model

2 阻尼器的数学建模及讨论

阻尼器极板之间的缝隙初始时相等,取其中一层进行分析,电流变液体在平板间挤压流动的示意图如图3所示,下极板在其平衡位置振动,上极板固定且初始位置为 $z = h_0$,极板半径为 a , $z = h_1$, $z = h_2$ 是两个屈服面,假设流体速度和剪应力在屈服面上连续,根据 Navier-Stokes 方程,并作准静态假设,则有

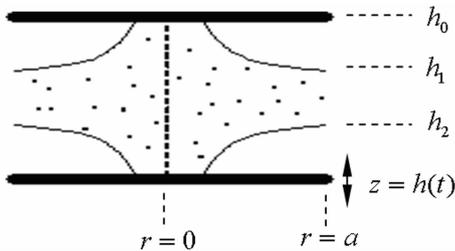


图3 平板挤压流动示意图
Fig. 3 Schematic diagram of squeeze flow mode

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{dp}{dr} \quad (3)$$

其中 $\frac{dp}{dr}$ 是径向压力梯度。

假设流体在极板边界无滑移,即 $u(h_0) = u(h(t)) = 0$, (3)式可解得

$$\tau = \frac{dp}{dr} [z - (h(t) + h_0)/2] \quad (4)$$

两个屈服面可以表示为

$$h_1 = 1/2(h_0 + h(t) - 2\tau_1 / (dp/dr)) \quad (5)$$

$$h_2 = 1/2(h_0 + h(t) + 2\tau_1 / (dp/dr)) \quad (6)$$

由(1)式和(4)式可以得到极板间的速度分布型。

当 $h(t) \leq z \leq h_2$ 时有

$$u_1(z) = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dr} [z^2 - (h_0 + h(t))z + h_0h(t) - \frac{\tau_0}{\eta}(z - h(t))] \quad (7)$$

当 $h_2 \leq z \leq (h_0 + h(t))/2$ 时有

$$u_2(z) = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dr} [z^2 - (h_0 + h(t))z + (h_0 + h(t))^2/4 - \tau_1^2 / (dp/dr)^2] + u_1(h_2) \quad (8)$$

根据流量守恒,则有

$$Q = 2\pi r \int_{h(t)}^{h_0} u dz = \pi r^2 \dot{h}(t) \quad (9)$$

将(7)式、(8)式代入方程(9),得到

$$G^3 - 3[S + (1 - \gamma)/2]G^2 + (1 - \gamma)/2 = 0 \quad (10)$$

其中 $G = \frac{h(t) - h_0}{2\tau_1} \cdot \frac{dp}{dr}$, $S = \frac{h(t)\eta r}{(h(t) - h_0)^2\tau_1}$, 是两个无量纲的参数。

作用在上极板上的力可以表示为

$$F = \int_0^a 2\pi r p(r) dr = -\pi \int_0^a r^2 \frac{dp}{dr} dr \quad (11)$$

将上面定义的两个无量纲参数代入,积分整理得到

$$F = \frac{2\pi\tau_1 a^3}{h_0 - h(t)} \left[\frac{1}{108} \left(\frac{\gamma}{\chi} \right)^3 + \frac{1}{3} \int_{\gamma/3}^{\chi} GS^2 dS \right] \quad (12)$$

其中

$$\chi = S(a) = \frac{\dot{h}(t)\eta a}{(h(t) - h_0)^2\tau_1} \quad (13)$$

当屈服面存在时,通过(10)式求解出 G 和 S 的数值解,再代入(12)式积分,求出其中一层的阻尼力 F ,将阻尼器三层的力相加,就可以得到阻尼器总的输出阻尼力。

3 减振器工作特性分析

为了直观地了解多层挤压式阻尼器的工作特性,下面对其进行了计算机模拟分析,其中电流变液参数选用文献[9]中的实验参数,动力粘度 η 为

2. $96 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 密度为 900 kg m^{-3} , 电流变液的屈服应力满足下面关系^[10]

$$\tau_1 = AE^b \quad (14)$$

其中 E 是外加电场强度, A 和 b 是常数, A 和 b 分别为 5.769×10^{-12} 和 2.

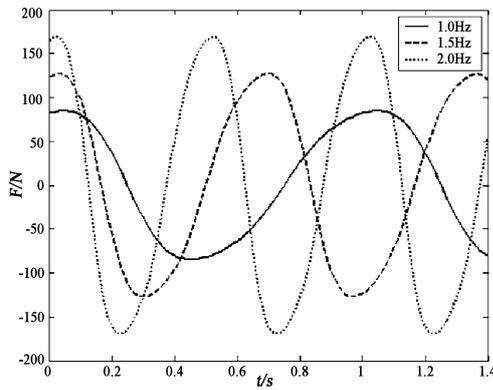


图 4 电场 0kV 时阻尼器时间 - 力曲线

Fig. 4 Damper force with time for potential difference 0kV

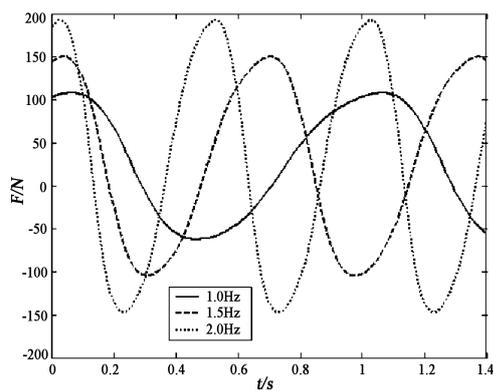


图 5 电场 5kV 时阻尼器时间 - 力曲线

Fig. 5 Damper force with time for potential difference 5kV

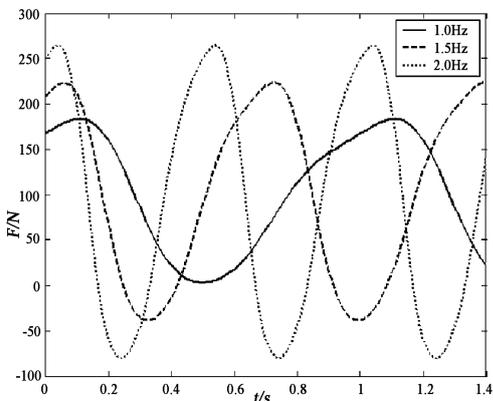


图 6 电场 10kV 时阻尼器时间 - 力曲线

Fig. 6 Damper force with time for potential difference 10kV

阻尼器的相邻两层极板间初始距离均为 2mm, 极板半径为 50mm, 振动激励选用正弦激励, 即

$$h(t) = h_m \sin \omega t \quad (15)$$

式中 h_m 、 ω 为振动的幅值和角频率.

图 4、图 5 和图 6 分别是挤压式电流变阻尼器在不加电压和外加电压为 5kV 和 10kV 时的输出力与时间的曲线. 从图中可以看出, 加上电压, 电流变液从 Newton 流体变为 Bi - viscous 流体, 阻尼器输出的阻尼力不同, 随着外加电压的增大, 阻尼力也随之增加. 并且由于电流变液的流变特性, 其剪切屈服应力只与外加电场有关, 当外加电压相同, 电流变液受到挤压和拉伸时, 极板间隙不同, 电场也就不同, 因而阻尼器挤压和拉伸流动的力与时间曲线是非对称的.

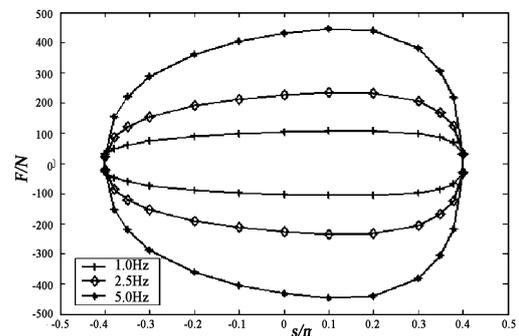


图 7 不同频率下阻尼器的示功特性

Fig. 7 Damper force with displacement for different frequencies

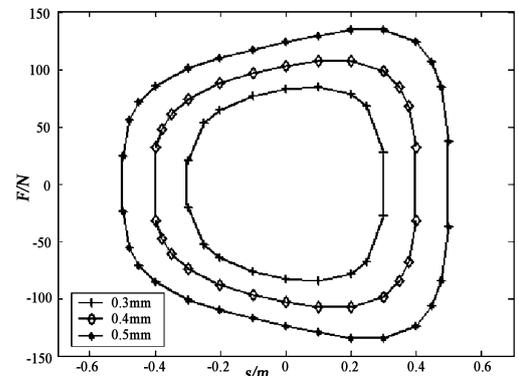


图 8 不同振幅下阻尼器的示功特性

Fig. 8 Damper force with displacement for different amplitudes

图 7 是在外加电压和激励振幅相同的情况下, 不同的激励频率时, 阻尼器力和位移的曲线, 即阻尼器的示功特性, 可以看出, 阻尼器的输出力与激励频率有关, 频率越高, 阻尼力越大. 图 8 是在其他条件相同时, 不同振幅下阻尼器的示功特性, 阻尼力随着振幅的增大而增大.

以上的仿真结果表明, 多层挤压式电流变阻尼器的阻尼力是激励振幅、频率和外加电压的函数, 并且随着振幅、频率和电压的增加而增加. 也就是说, 阻尼器的阻尼效应主要体现为两个方面: 与激励振幅和频率(激励速度)相关的粘性阻尼和与电

场相关的电致阻尼力。

4 结论

分析了多层挤压式电流变阻尼器在不同外加条件下输出的阻尼力,模拟分析结果表明,阻尼力是激励振幅、频率和外加电压的增函数,阻尼力分为粘性阻尼和电致阻尼两部分。在外加电场为零或是低电压时,电流变液仍处于液态,此时激励振幅和频率主要影响阻尼力,随着外加电压的增加,电场强度升高,电流变由液态转化为类固态,与电场相关的电致阻尼力明显增加,由此可见,阻尼器的阻尼可控部分是其电致阻尼力。同时文中提出的阻尼器理论模型也可适用于磁流变液阻尼器,与电流变液不同的是磁流变液的屈服应力与磁场强度有关。

参 考 文 献

- 吕建刚,易当祥,张进秋. 电流变阻尼器动力特性的研究. 力学季刊,2002,23(2):288~292(Lu Jian-gang, Yi Dangxiang, Zhang Jinqiu. Research of dynamic character of electrorheological dampers. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2002,23(2):288~292(in Chinese))
- 管继富,顾亮,候朝桢. 履带式车辆半主动悬挂的自适应控制. 兵工学报,2004,25(4):389~393(Guan Jifu, Gu Liang, Hou Chaozhen. Adaptive control for semi-active suspension on tracked vehicle. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4):389~393(in Chinese))
- Choi S B, Kim W K. Vibration control of semi-active suspension featuring ER fluid damper. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 234(3):537~546
- Wei Chenguan, Fu Zhao. Electrorheological fluid and its application in vibration control. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1994, 3(1):91~98
- Zhang Shaohua, Li Meiyan. Theoretical research on electrorheological isolator. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 10(4):349~355
- Sproston J L, Rigby S G, William E W, et al. Numerical simulation of electrorheological fluids in oscillatory compressive squeeze-flow. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1994; 27(2):338~343
- Monkman G J. The electrorheological effect under compressive stress. *J. of Physics D Applied Physics*, 1995, 28(3):588~593
- Wei Chenguan, Fu Zhao. Electrorheological fluid and its application in vibration control. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1994, 3(1):91~98
- William E W, Rigby S G, Sproston J L. Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1993, 47:221~238
- Stanway R, Sproston J L, Prendergast M J, et al. ER fluids in squeeze-flow mode: an application to vibration isolation. *Journal of Electrostatics*, 1992, 28:89~94

RESEARCH ON THEORETICAL MODELING OF MULTI-ELECTRODE SQUEEZE MODE ER DAMPER*

Zhao Xia Zhang Yongfa

(School of Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The multi-electrode squeeze ER damper was presented. The mathematic model and dynamic characteristics of the ER damper were investigated based on the Bi-Viscosity plasticity model. Then the output forces of ER damper were simulated in different situations under sinusoidal input. Results show that the damper force is an increasing function of the input amplitude, frequency and potential difference, and it is composed of the viscous damping and electro-damping force. Actually the controllable part is the electro-damping force, which can be adjusted by potential difference. The theoretical analysis can also be utilized for the MR damper.

Key words ER fluid, ER damper, multi-electrode squeeze, dynamic characteristics