

文章编号:1000-582X(2002)09-0121-04

电流变减振器阻尼力计算及影响因素分析

陈永光¹, 晏华², 徐宗俊¹, 张力¹

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 后勤工程学院, 重庆 400016)

摘要: 电流变减振器的工作模式主要有流动模式、剪切模式和复合模式等三种。针对流动模式的充气式电流变减振器, 推导出其在压缩和复原过程中阻尼力的计算公式。压缩和复原阻尼力主要由三部分构成, 即电流变液基础粘度引起的本底阻尼力, 电场强度函数的电致阻尼力和气室气体引起的压力。电流变减振器的特点就在于可以通过调节电场强度来控制电致阻尼力, 达到调节复原和压缩阻尼力的目的。并对影响阻尼力大小的结构因素进行了讨论分析。

关键词: 电流变减振器; 阻尼力; 结构

中图分类号: U463.33+5.1

文献标识码: A

电流变减振器是振动主动控制的理想阻尼元件, 它可以根据受控对象的振动状态来进行实时的外加控制, 使振动满足预定的要求。它是利用电流变液的性能, 即电流变液屈服后性质, 其屈服应力随所加的电场强度不同而变化, 具有可控性, 可以实时调整阻尼参数, 而又不施加能量给被隔振系统。从结构上看, 它可以取消传统的节流孔以及控制节流孔开度的装置, 因而结构简单。从控制的角度看, 减振器只需电压信号即可控制阻尼, 动态响应快、能耗低, 是替代传统减振器的最好选择。

从电流变液体减振器中的运动方式, 电流变减振器的结构可以分为固定电极的流动模式、滑动电极的剪切模式、滑动电极的复合模式等三种形式^[1-2]。这三种结构的电流变减振器其阻尼力调节均是通过调节施加在减振器工作电极上的电场场强来实现的, 电极间距是固定不变的。

分析电流变液在减振器中的流动, 对于设计电流变减振器具有重要的意义。电流变液在电场作用下, 流体的力学性能发生明显的变化, 电流变液变成粘塑体, 有明显的抗剪切能力, 其本构方程符合 Bingham 模型^[3-4]: $\tau = \tau_y(E) + \eta\dot{\gamma}$, 即在管内中部形成塞流, 具固体性质。电流变减振器的特点就在于可以通过调节电场强度来控制电致阻尼力, 达到调节复原和压缩阻尼力的目的。

1 筒式电流变减振器阻尼力计算^[5-8]

图 1 所示为充气式电流变液体减振器的原理示意图, 其产生阻尼力的缝隙是圆环形间隙, 因此在一定流量下, 由流体力学计算公式可知, 流体通过间隙在两端所形成的压差 ΔP 为

$$\Delta P = \frac{12\eta l}{h^3\pi(d_3+h)}Q \quad (1)$$

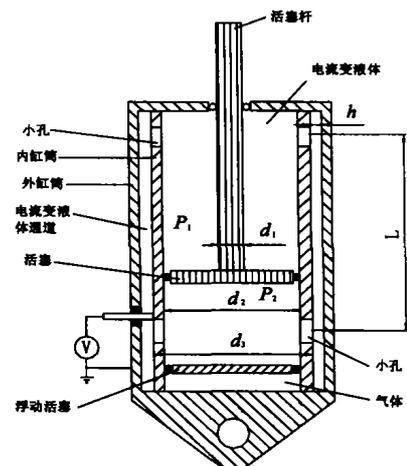


图 1 充气式电流变减振器原理示意图

在电场作用下,

$$\eta = \eta_0 + \tau_y/r \quad (2)$$

其中 η_0 为零电场时电流变液的粘度; η 为施加电场时

• 收稿日期: 2002-06-30

作者简介: 陈永光(1963-), 男, 重庆市人, 后勤工程学院讲师, 重庆大学博士研究生。主要从事 CAD/CAM 研究。

电流变液的粘度; r 为剪切速率; τ_y 为电流变液的屈服应力。

将式(2)代入(1),得

$$\Delta P = \frac{12(\eta_0 + \tau_y/r)l}{h^3\pi(d_3 + h)}Q = \frac{12\eta_0 l}{h^3\pi(d_3 + h)}Q + \frac{12l}{h^3\pi(d_3 + h)}Q \frac{\tau_y}{r} = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (3)$$

由上式可以看出,在结构确定的情况下,压差主要由流量 Q 、剪切速率 r 和屈服应力 τ_y 所确定。

假设节流环形间隙中间部分的最大流速 u_{\max} 是平均流速 u 的 2 倍,则液流的剪切速率为 r 为

$$r = \frac{u_{\max}}{h/2} = \frac{2u_{\max}}{h} = \frac{4u}{h} \quad (4)$$

根据上述分析,可以求得在压缩和复原行程时,通过环形间隙后上、下腔中的压力差 ΔP , 设 $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$, ΔP_1 为本底阻尼力引起的压差,即与电场无关的阻尼力, ΔP_2 为电致阻尼力引起的压差。

在复原行程时:

$$\Delta P_{1F} = \frac{3\eta_0 l}{h^3(d_3 + h)}(d_2^2 - d_1^2)u \quad (5)$$

$$\Delta P_{2F} = \frac{3l}{h}\tau_y \quad (6)$$

总压差

$$\Delta P_F = \frac{3\eta_0 l}{h^3(d_3 + h)}(d_2^2 - d_1^2)u + \frac{3l}{h}\tau_y \quad (7)$$

在压缩行程时:

$$\Delta P_{1Y} = \frac{3\eta_0 l}{h^3(d_3 + h)}d_2^2 V \quad (8)$$

$$\Delta P_{2Y} = \frac{3l}{h}\tau_y \quad (9)$$

$$\Delta P_Y = \frac{3\eta_0 l}{h^3(d_3 + h)}d_2^2 u + \frac{3l}{h}\tau_y \quad (10)$$

由于连通上、下腔的节流环形通道在液体进出口的压力差 ΔP 等于进口压力 P_2 与出口压力 P_1 之差,在压缩行程时,下腔压力为 P_2 ,上腔压力为 P_1 ,反之在复原行程时上腔压力为 P_2 ,下腔压力为 P_1 。在一般的工程计算时,常将活塞背面的压力 P_1 近似等于零,因此

$$\Delta P = P_2 - P_1 \approx P_2 \quad (11)$$

在压缩行程时总阻尼力为

$$F_Y = P_2 A_F + P_3 A_F = (\Delta P + P_3) A_F = (\Delta P + P_3) \frac{\pi}{4} d_2^2 \quad (12)$$

在复原行程时总阻尼力为

$$F_F = P_2 A_F - P_3 A_F = \Delta P \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) - P_3 \frac{\pi}{4} d_2^2 \quad (13)$$

P_3 为浮动活塞下方气室的压力。

图 2 为气室体积变化尺寸图。其初始充气压力为 P_0 ,浮动活塞距底面距离为 S_0 ,当浮动活塞移动距离 S 时,气体压力变为 P_3 。

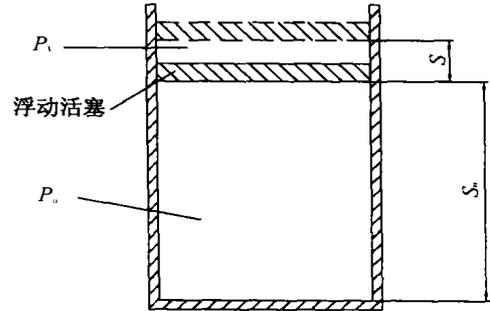


图 2 气室体积变化尺寸图

由于气室体积的变化是由活塞上下运动使作用在浮动活塞上的液体压力变化引起的。由于假设液体为不可压缩流体,根据连续性条件,活塞运动而使得其上下腔液体体积变化应与气室体积变化相等,所以:

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot X = \frac{\pi}{4} d_2^2 \cdot S \quad (14)$$

$$S = (d_1/d_2)^2 \cdot X \quad (15)$$

根据气体状态方程,假设其为等温状态,无热交换,有

$$P_0 S_0 = P_3 (S_0 + S) \quad (16)$$

$$P_3 = \frac{P_0 S_0}{S_0 + S} = \frac{P_0 S_0}{S_0 + (d_1/d_2)^2 X} = \frac{P_0 S_0 d_2^2}{S_0 d_2^2 + d_1^2 X} \quad (17)$$

分别将 ΔP 、 P_3 、 $\tau_y = KE^2$ 代入阻尼力计算公式(12)、(13)中,得到压缩和复原阻尼力为:

$$F_Y = \frac{3\eta_0 l \pi}{4h^3(d_3 + h)} d_2^4 V + \frac{3l \pi K}{4h} d_2^2 E^2 + \frac{P_0 S_0 \pi d_2^4}{4(S_0 d_2^2 + d_1^2 X)} \quad (18)$$

$$F_F = \frac{3\eta_0 l \pi}{4h^3(d_3 + h)} (d_2^2 - d_1^2)^2 V + \frac{3l \pi K}{4h} (d_2^2 - d_1^2) E^2 - \frac{P_0 S_0 \pi d_2^4}{4(S_0 d_2^2 + d_1^2 X)} \quad (19)$$

$$\text{令} \begin{cases} C_Y = \frac{3\eta_0 l \pi}{4h^3(d_3 + h)d_2^4} \\ C_F = \frac{3\eta_0 l \pi}{4h^3(d_3 + h)}(d_2^2 - d_1^2)^2 \\ K_Y = \frac{3l\pi K}{4h}d_2^2 \\ K_F = \frac{3l\pi K}{4h}(d_2^2 - d_1^2) \\ F_q(P_0, S_0, X) = \frac{P_0 S_0 \pi d_2^4}{4(S_0 d_2^2 + d_1^2 X)} \end{cases} \quad (20)$$

压缩和复原阻尼力可变为：

$$F_Y = C_Y V + K_Y E^2 + F_q(P_0, S_0, X) \quad (21)$$

$$F_F = C_F V + K_F E^2 + F_q(P_0, S_0, X) \quad (22)$$

其中 C_Y 、 C_F 为本底阻尼系数， K_Y 、 K_F 为与电流变液体有关的系数。

从电流变减振器的阻尼力计算公式可以看出，电场强度、电场因素系数、基础粘度、节流环形间隙的大小和长度、内外筒直径、活塞杆直径和活塞直径等都会影响减振器的阻尼力。压缩和复原阻尼力由三部分构成，第一部分为电流变液基础粘度引起的阻尼力，称为本底阻尼力，与电场强度无关；第二部分为电致阻尼力，它是电场强度的函数；第三部分为气室气体引起的压力，它使压缩阻尼力增大，而使复原阻尼力减小。电

流变减振器的特点就在于可以通过调节电场强度来控制电致阻尼力，达到调节复原和压缩阻尼力的目的。

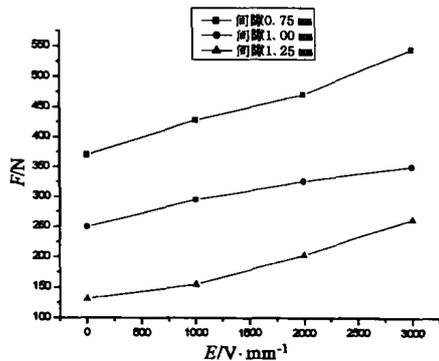
2 电流变减振器阻尼力影响因素分析

2.1 阻尼通道的影响

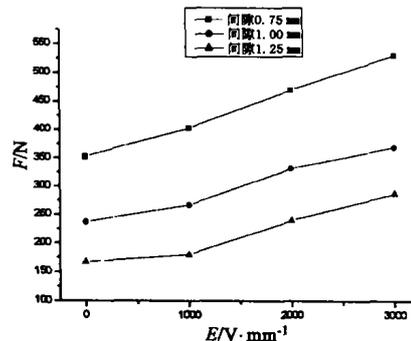
阻尼通道的结构尺寸直接影响着减振器的阻尼特性，其中主要是环形间隙大小和环形面长度。

由公式(18)、(19)可以看出，随着环形间隙减小，压缩和复原阻尼力均增大，这是因为间隙较小时，电场强度增强，电流变液的剪切屈服应力较大，减振器上下腔之间产生了较大的压力差，电致阻尼力增大；另外由于阻尼通道流通面积减小，本底阻尼力也相应增大。图3的实验结果也显示了不同间隙值时阻尼力的实测大小，对复原和压缩阻尼力的影响规律基本相同。但间隙不宜过小，因为若间隙过小，正负极之间容易被高压电击穿，造成失效，且随着电流变液体的粘度增大，流体流动不畅。所以通常的间隙取为 0.5 ~ 2 mm。

当阻尼通道长度的增加，导致了更多的电流变液产生电流变效应，电流变液在阻尼通道中流动阻力增大，减振器上下腔之间产生更大的压力差。但阻尼通道长度受到安装结构尺寸的限制，所以其长度应根据实际需要而定。

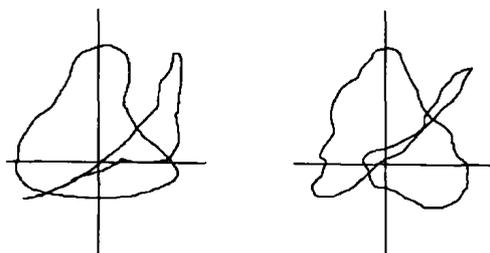


(a) 压缩阻尼力



(b) 复原阻尼力

图 3 不同间隙对阻尼力的影响



(a) 复原行程

(b) 压缩行程

图 4 复原和压缩行程示功图畸变

2.2 气室对体积的补偿及充气气压大小

由于减振器通常是采用单伸出轴结构，在活塞上下运动时，活塞杆占用一部分体积使得减振器在复原过程中由于上腔经阻尼通道流入下腔的液体不能完全填充下腔的空间，或者由于泄漏，造成减振器在复原和压缩过程中产生“空行程”现象，减振器的示功图发生畸变。图4分别为复原和压缩行程中由于出现“空行程”所造成示功图发生畸变的情况。

在传统的被动式减振器中，解决“空行程”一般采用“双筒结构”和“充气结构”进行补偿。在电流变减振

器有用“三筒结构”，它类似于被动减振器的“双筒结构”，它是在中筒与外筒之间形成一个补偿腔来储备一部分电流变液，当活塞向上运动，下腔产生一个负压区，补偿腔内的电流变液通过底阀进入下腔进行补偿。但这种减振器，由于采用三筒结构，使结构复杂，同时也不利于散热。本设计采用“双筒充气式结构”，在浮动活塞下方的密闭空间中充入一定压力的氮气，当活塞

向上运动，下腔产生一个负压区，气体压力推动浮动活塞上行，补偿其体积的不足。气室气压大小的选择应考虑两个因素：一是应能保证在活塞上下运动时浮动活塞能按照某种规律自由的上下运动，使活塞下腔始终充满油液，不产生“空行程”；二是气室气压不能过大而造成压缩阻尼力过大，而使复原阻尼力过小。图 5 反映了不同气压下阻尼力的情况。

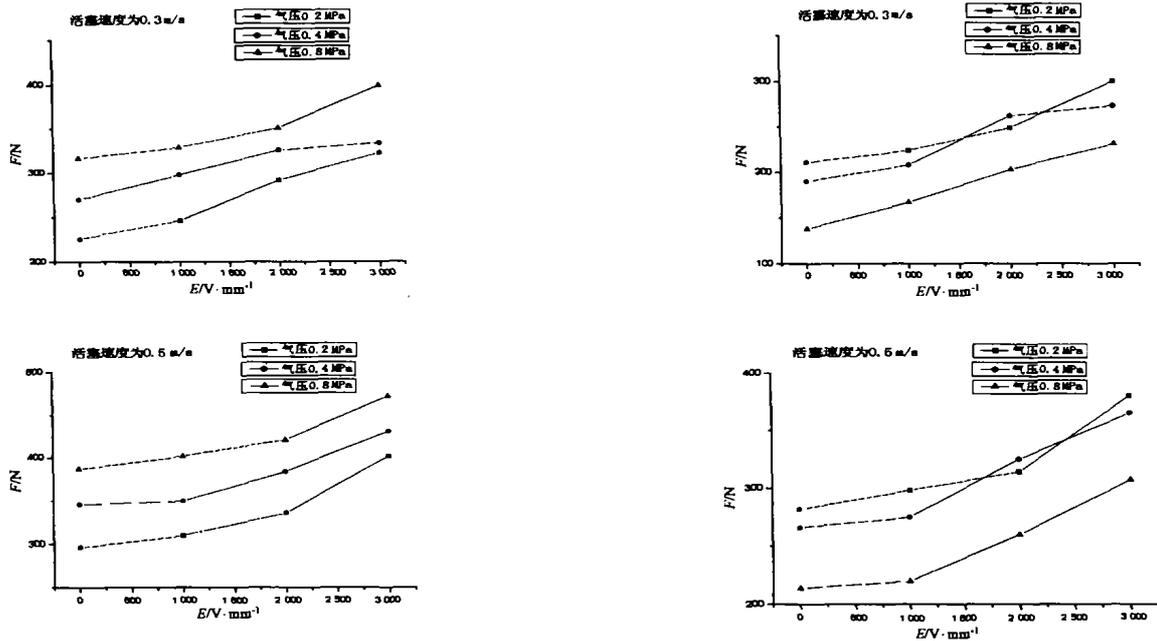


图 5 充气气压对阻尼力的影响

2.3 零件加工质量对施加电场的影响

在工作中，高压电正负极分别施加在电流变液体减振器的内外筒上，使内外筒间的间隙形成高压电场。如果施加的电压越高，那么，电流变效应越强，复原、压缩阻力可调节的范围越大，但是由于内外筒间的间隙较小，一旦电压过高，将会导致漏电流过大和电流变液被击穿，使其成为导体，电压下降，而无法工作。从电流变减振器结构，除了内外筒中直接与电流变液接触部分的间隙保持一定以外，其它部分可以适当的加大，可防止空气击穿和电晕现象，从而提高电压。尤其对内外筒表面和端部的加工质量提出要求，要求其表面光洁，提高精度和降低表面粗糙度，不得有毛刺和尖点，否则，加上电压后，将在这些地方首先被击穿，无法提高电压。

3 结 论

本文分析了充气式电流变减振器在压缩和复原过程中阻尼力的计算公式，压缩和复原阻尼力由三部分构成，第一部分为本底阻尼力，与电场强度无关，第二部分为电致阻尼力，它是电场强度的函数，第三部分为气室气体引起的压力，电流变减振器的特点就在于可以通过调节电场强度来控制电致阻尼力，达到调节

复原和压缩阻尼力的目的，并针对影响阻尼力的其他因素，如阻尼通道、充气压力和减振器加工质量进行了分析讨论。

参考文献：

- [1] 杜善义, 冷劲松, 王殿富. 智能材料系统和结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 133 - 145.
- [2] JANOCHA H, RECK B, BOLTER R. Practice - Relevant Aspects of Constructing ER Fluid Actuators[J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10(23&24): 3 243 - 3 255.
- [3] PETEK N K. An electronically controlled shock absorber using electrorheological fluid[J]. SAE paper, 920275.
- [4] 张庙康, 胡海岩. 车辆悬架振动控制系统研究进展[EB/OL]. 柳州市科技信息网 <http://www.lzisti.net.cn>, 2001.
- [5] 魏宸官. 电流变技术—机理·材料·工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000: 78 - 82, 293 - 313.
- [6] 周亨达. 工程流体力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 94 - 104.
- [7] 张绪祥, 关丽. 电流变智能阻尼器的阻力分析[J]. 武汉化工学院学报, 1999, 21(4): 43 - 48.
- [8] JUNJIRO ONODA, HYUN - UNG OH, KENJI MINESUGI. Improved electrorheological - fluid variable damper designed for semi - active vibration suppression[J]. AIAA Journal 2000, 38(9): 736 - 1 741.

(下转第 128 页)

Product Modeling in Virtual Manufacture

ZHENG Tai-xiong, HE Yu-lin, LIU Cheng-jun

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The competition among enterprises becomes more and more drastic. In order to win the market, so as to put itself in a steady station, the enterprise put forward many advanced manufacturing modes. Virtual manufacture is put forward by American as a wholly new concept under this situation. It is thought as advanced manufacturing technology of the 21st century. Based on the analysis to the prior, the author expatiated the concept of virtual manufacture and put forward the three demands which the product model suited for the virtual manufacture must satisfy. On the bases the author set up the product model which is composed by product function express and product definition and expatiated the product function and product definition at detail.

Key words: virtual manufacture; product modeling; product data model

(责任编辑 张小强)

(上接第 124 页)

Damping Force of Electro-rheological Damper

CHEN Yong-guang¹, YAN Hua², XU Zong-jun¹, ZHANG Li¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Logistical Engineering University, Chongqing 400016, China)

Abstract: There are three working modes of electro-rheological(ER) damper, flow mode of fixed electrode, shear mode of slide electrode, mixer mode of slide electrode. The damping force is analyzed for gas-filled ER damper of flow mode of fixed electrode. There are three sections of damping force, and they are background damping force of a fluid viscosity, electric damping force of applied electric field and pressure of gas. The characteristic of ER damper is adjustable by electric field strength for electric damping force. At the same time, some structure factors of ER damper are discussed.

Key words: electro-rheological damper; damping force; structure

(责任编辑 张小强)