

文章编号:1000-582X(2010)12-088-07

车辆悬架磁流变阻尼器动态响应及影响因素分析

张红辉^{a,b}, 童 静^a, 徐海鹏^a

(重庆大学 a. 光电工程学院; b. 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆, 400044)

摘 要:在驱动器、阻尼器和被控系统等不同层次的动态响应研究范畴,指出了阻尼器动态响应的研究内容及方向;根据车辆悬架磁流变阻尼器的实际运行特点,提出了动态响应的合理描述,并探讨了阻尼器动态响应测试研究的若干重要问题;最后,分析了磁流变阻尼器动态响应的影响因素,为提高磁流变阻尼器动态响应性能指出了研究方向。

关键词:磁流变阻尼器;动态响应;测试方法;车辆悬架

中图分类号:TH70

文献标志码:A

Analysis on dynamic response and influential factors of magneto-rheological damper for automotive suspension

ZHANG Hong-hui^{a,b}, TONG Jing^a, XU Hai-peng^a

(a. College of Opto-electronic Engineering; b. Key Laboratory for Opto-electronic Technology & Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Dynamic response is extremely important for Magneto-rheological (MR) damper, and directly affects the MR damper performance in semi-active control system. The dynamic responses for driver, damper and the whole controlled system are discerned, and the research contents and directions of dynamic response of MR dampers are also indicated. Based on the operation characteristics of MR dampers for automotive suspension, a reasonable description of dynamic response is proposed, and some important issues for dynamic response testing are discussed. Finally, the influence factors upon the response time of the MR dampers are investigated, and the directions for further improvement are given.

Key words: magneto-rheological(MR) damper; dynamic response; testing method; automotive suspension

磁流变液(MRF)是一种流变特性随着外加磁场变化的可控智能材料。磁流变阻尼器采用磁流变液作为工作介质,具有阻尼力连续可调、响应速度快、功耗低等特点,在建筑、汽车、航天航空等结构振动抑制领域具有广泛应用前景。作为汽车磁流变半主动悬架系统中的执行器装置,除了阻尼力可控要求外,动态响应特性也是磁流变阻尼器重要的性能

指标,它直接决定了振动抑制的控制周期、应用范围和使用效果。

在讨论主动和半主动振动控制系统的差别时,主动系统的稳定性是主要的关注点之一,由于时滞(动态响应)影响带来的相位失调可能使被控对象失稳;由于没有主动施加作用力,虽然半主动控制系统不至于失稳,但过大的时滞将使半主动控制失去应

收稿日期:2010-07-04

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20070611039);重庆市自然科学基金资助项目(2008BB3300);“211工程”三期建设项目(S-09112)

作者简介:张红辉(1977-),男,重庆大学副教授,主要从事智能结构系统、车辆动力学、汽车电子领域的研究,
(E-mail) Hhzhang@cqu.edu.cn。

有的效果。类比采样定理要求采样频率必须大于等于信号中最高频率的 2 倍,为了对磁流变阻尼器响应进行有效控制以获得良好的振动抑制效果,其动态响应时间必须小于被控对象最小振动周期的 1/2 以上,否则半主动控制将失去意义。

国内外在 MR 阻尼器的动态响应时间研究方面已取得了一些有意义的成果。美国学者 Guangqiang Yang 等^[1]分析了电压源驱动和电流源(PWM 开关方式)驱动,以及线圈串并联关系对磁流变阻尼器响应特性的影响,前者着眼于驱动器的响应性能,后者则改善了磁流变阻尼器本身的电磁响应;Jeong-Hoi Koo 等^[2]不仅研究了磁流变阻尼器动态响应时间测试方法,还给出了阶跃电流峰值、激振速度与系统柔性对响应时间的影响;波兰学者 ANDRZEJ MILECKI^[3]研究了接触开关式,达林顿晶体管式和 PWM 控制式的驱动电路形式对动态响应特性的影响;关新春等^[4]对磁流变减振驱动器的响应时间进行了试验和分析。陈爱军、黄曦等^[5-6]分析了电磁线圈连接方式、阶跃电流幅值、活塞速度值、工作温度等因素对汽车磁流变阻尼器动态响应时间的影响。王宇飞等^[7]分析了阻尼器构造特征参数、系统柔度、活塞运动速度等对磁流变阻尼器响应时间的影响因素,并给出了缩短响应时间的途径和方法。郭鹏飞等^[8]利用有限元分析方法计算并分析了电流响应时间对磁流变阻尼器动态响应时间的影响。

结合车辆悬架磁流变半主动振动控制系统这一具体应用对象,探讨磁流变阻尼器的动态响应特性并分析其影响因素,为减小系统时滞、提高磁流变半主动控制效果打下基础。

1 磁流变阻尼器动态响应及其测试方法

1.1 阻尼器动态响应描述

目前国内外不少文献^[2, 4-6]对磁流变阻尼器动态响应时间定义和求取方法上仍存在分歧,主要表现在对阻尼力最终稳态值的规定百分数的选取上,有 63.2%和 95%等;阻尼器的应用背景多样化,有汽车悬架和土木工程等。对于具体的控制对象,阻尼器对动态响应的需求不尽相同,因此如果脱离具体控制对象讨论动态响应特性及定义没有实际意义。汽车悬架半主动控制系统是磁流变阻尼器应用的一个具有良好前景的领域,在总结学者们对磁流变阻尼器动态响应时间定义描述的基础上,对车辆悬架磁流变阻尼器动态响应时间的描述进行简单地分析和探讨。

磁流变阻尼器阻尼力由粘滞阻尼力和库仑阻尼力 2 部分组成

$$F = -C_e V + F_{MR}, \quad (1)$$

式中:粘滞阻尼系数 $C_e = \frac{24\eta A_p^2 l}{bh^3} + \frac{2\eta bl}{h}$;库仑阻尼力

$F_{MR} = -\left(\frac{4lA_p}{\eta} + 2bl\right)\tau_y \operatorname{sgn}(V)$; V 是磁流变阻尼器运动速度; sgn 是符号函数;平行板间隙为 h ;长度为 l ;宽度为 b ; A_p 是活塞有效作用面积; η 是磁流变液的塑性粘度; τ_y 是临界剪切屈服应力。

当阻尼器几何尺寸确定后,粘滞阻尼力只是活塞速度 V 的函数,而库仑阻尼力则来自于磁流变效应。因此当阻尼器几何尺寸确定后及活塞速度恒定时,阻尼力仅与励磁电流大小有关,阻尼力、活塞速度以及励磁电流的关系曲线,如图 1 所示,其中励磁电流 $I_1 < I_2 < I_3$ 。磁流变阻尼器动态响应特性是阻尼力随励磁电流变化而变化的响应特性,为了准确测试磁流变阻尼器的动态响应特性,在有效测试时段可以采用三角波位移激励来保持活塞匀速运动以消除粘滞阻尼力的影响是非常必要的。

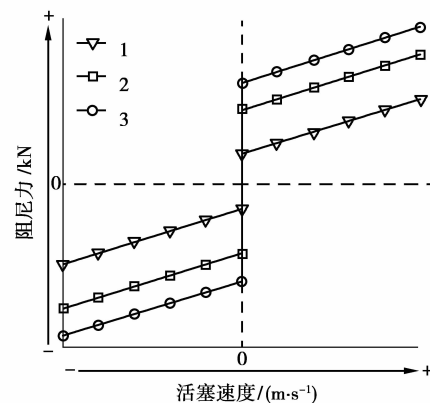


图 1 阻尼力、活塞速度以及励磁电流的关系曲线

车辆悬架振动抑制要求磁流变阻尼器具有压缩阻尼力小、复原阻尼力大的不对称特点。基于此,一般不对处于压缩阶段的磁流变阻尼器施加励磁电流,而将车辆悬架磁流变阻尼器的动态响应研究局限于其复原行程中。汽车磁流变半主动悬架系统是复杂的可变阻尼弹簧质量系统,为了完整地描述磁流变阻尼器动态响应过程,可用阻尼力变化到最终值的 95% 时所需的时间来衡量阻尼器的动态响应。

综合以上分析,磁流变阻尼器的动态响应可以理解阻尼力随着励磁电流变化的时间历程。而对汽车悬架振动抑制用磁流变阻尼器,其动态响应时间可以描述为:磁流变阻尼器在三角波位移激励下,

在 1 个完整的复原行程内,当阻尼器励磁电流发生阶跃变化时,从电流阶跃发生到阻尼力达到新稳态力值的 95% 时所需的时间。三角波位移激励速度和阻尼器试验行程等可参照《汽车筒式减振器台架试验方法》进行选取,需要特别注意的是,在励磁电流阶跃产生后,在 1 个复原行程中需要留有足够的时间以使阻尼力达到稳态。为了使磁流变阻尼器的动态响应时间具有可比性,可以规定阶跃电流幅值为阻尼器最大允许励磁电流的 1/3 时的上升阶跃和下降阶跃动态响应时间为典型动态响应时间,用于阻尼器动态响应的可比性研究。以图 2 所示的阻尼力与励磁电流随时间变化曲线为例,结合阻尼器动态响应时间的描述,可以认为磁流变阻尼器典型动态响应时间为 $(t_2 - t_1)$ ms。

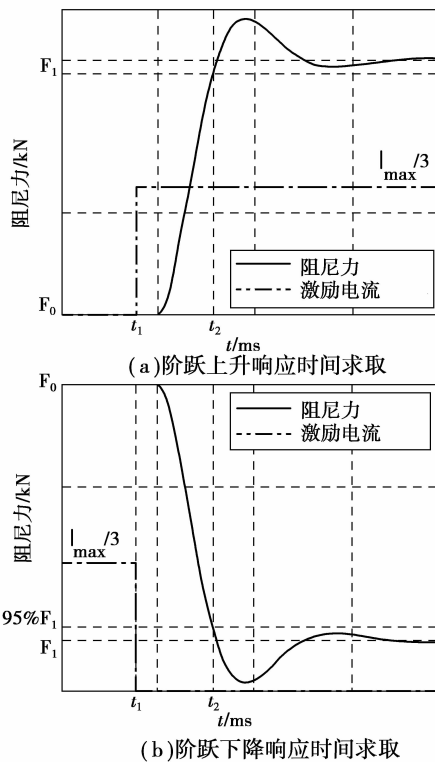


图 2 磁流变阻尼器典型动态响应时间求取方法

1.2 动态响应时间测试方法

Jeong-Hoi Koo^[2], 陈爱军^[5]等在磁流变阻尼器动态响应时间测试方法方面做了大量的工作,一致认为就测试过程中采用三角波位移激励,可以有效地抑制和消除粘滞阻尼力的影响,从而使响应时间特性研究简单化,并给出了各自的磁流变阻尼器动态响应时间测试系统和试验设备。

为获得准确的动态响应时间,除了需要选择适合激励平台、传感器等外,施加励磁电流的时机也是

必须要考虑的环节。车辆悬架对振动能量的消耗主要在阻尼器的复原行程,其垂直振动主要频段在 4~12 Hz 范围,考虑其上限,阻尼器完成一次压缩复原行程仅需 83 ms,由于测试过程需要在仅有 40 ms 左右的复原行程内完成,扣除复原行程起始和终止两端不适于测试的时段,可以在复原行程开始后约 5~10 ms 触发励磁电流源,以保证在一个复原行程中留有足够的时间以使阻尼力达到稳态。输入位移信号和励磁电流阶跃上升和下降的时间关系如图 3 所示。因此典型的磁流变阻尼器响应测试系统需在电流驱动器之前增加一延时触发装置,以保证阻尼器能在合适位置获得励磁电流。

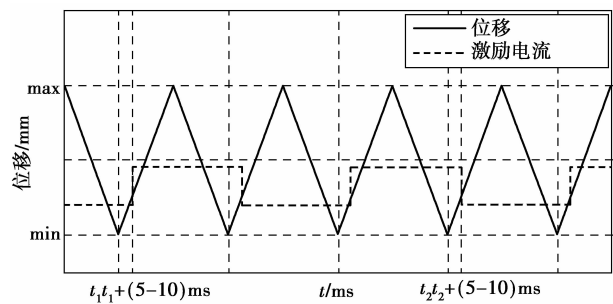


图 3 输入位移信号和励磁电流信号

另外,为在合适的时间点施加励磁电流阶跃,具有由阻尼器运行状态进行触发控制功能、响应时间达毫秒级或者更小的驱动电流驱动器,将对准确地测试出磁流变阻尼器动态响应时间具有重要意义。同时,鉴于系统柔度的影响,在设计测试系统时,磁流变阻尼器应尽量采用刚性连接,使测得的响应时间尽量逼近磁流变阻尼器真实的动态响应时间。典型磁流变阻尼器动态响应时间测试系统构成如图 4 所示。

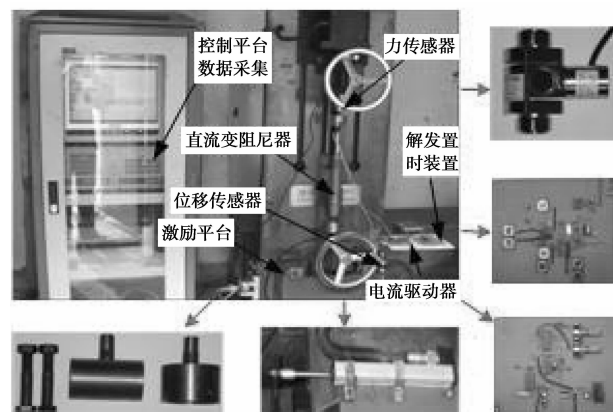


图 4 测试系统

2 动态响应时间影响因素分析

基于磁流变可控阻尼的半主动控制系统由传感器、控制器、驱动器和阻尼器等构成,它们与被控对象一起构成 1 个完整系统。从动态响应分析的角度出发,虽然驱动方式对动态响应时间有着巨大的影响,但它属于驱动器的研究范畴,要综合考虑阻尼器励磁参数进行设计;而系统柔度等的影响则属于系统级的动态响应研究内容。

磁流变阻尼器工作的物理过程可以分解成如下两部分:所施加的励磁电流到对应磁场的建立以及在磁场作用下磁流变效应的产生。因此,只有和磁场建立有关的线圈励磁响应(电磁效应),和确立对外阻尼力表现的磁流变液响应(磁流变效应)有关的因素才能定义为阻尼器动态响应的影响因素。

2.1 电磁响应时间

2.1.1 电磁线圈结构的影响

线圈有 2 种接线方式:并联和串联。为了方便讨论,假设阻尼器有 n 组相同的线圈,其电感和电阻参数分别为 $\frac{L_0}{n}$ 和 $\frac{R_0}{n}$,那么当 n 组线圈串联连接时总电感和电阻分别是 $L_s = L_0$ 和 $R_s = R_0$,而并联连接时总电感和电阻则分别为: $L_p = \frac{L_0}{n^2}$ 和 $R_p = \frac{R_0}{n^2}$,如图 5 所示。

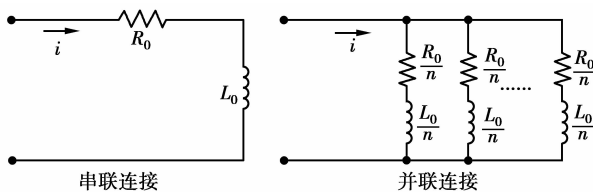


图 5 电磁线圈串并联结构

可见线圈的串并连接方式,具有相同的电感电阻比,即 $\frac{L_s}{R_s} = \frac{L_p}{R_p}$ 。然而,这 2 种连接方式下的励磁电流达到稳态的时间却不相同。

当电流源的比例增益 γ 比较大时,阶跃输入信号会使电流源达到其饱和电压 V_{\max} 。则采用串联方式时线圈中电流的控制方程式:

$$L_s \frac{d}{dt}i(t) + R_s i(t) = V_{\max}, \quad (2)$$

而采用并联方式时每个线圈中电流的控制方程式:

$$\frac{L_0}{n} \frac{di(t)}{dt} + \frac{R_0}{n} i(t) = V_{\max}, \quad (3)$$

对方程(2)求解得

$$i_s(t) = \frac{V_{\max}}{R_0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{L_0}{R_0}, \quad (4)$$

对方程(3)求解得

$$i_p(t) = \frac{nV_{\max}}{R_0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{L_0}{R_0}, \quad (5)$$

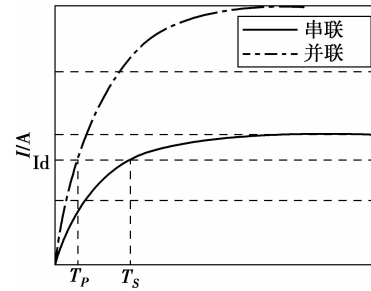


图 6 串并联连接时线圈电流与时间关系曲线

对比式(4)和式(5),可以得出线圈电流与时间的关系图,如图 6 所示。要到达相同的期望电流,并联连接时所有时间 T_p 明显小于串联连接时所有时间 T_s 。

在此仅对(5)式进行变换,得到到达期望电流 i_d 的时间

$$t_0 = -\left(\frac{L_0}{R_0}\right) \ln\left(1 - \frac{R_0 i_d}{n V_{\max}}\right), \quad (6)$$

将上式经行泰勒级数分解得

$$t_0 = \left(\frac{L_0 i_d}{V_{\max}}\right) \left(\frac{1}{n}\right) + \left(\frac{L_0 R_0 i_d^2}{2V_{\max}^2}\right) \left(\frac{1}{n^2}\right) + \dots, \quad (7)$$

一般而言, V_{\max} 要比 $R_0 i_d$ 大几倍,所以级数首项就可以反映出 t_0 的大小。因此到达期望电流 i_d 的时间 t_0 与线圈并联个数成反比与电感 L_0 成正比。所以,相对于串联连接,采用线圈并联连接能缩短线圈电流的响应时间,改善磁流变阻尼器的动态性能。

2.1.2 涡流效应的影响

磁流变阻尼器工作原理是通过改变励磁电流的大小,而引起磁场的变化,使磁流变液流动性质发生变化而达到改变阻尼力的目的。通常情况下,线圈缠绕在由低碳钢等其它铁磁性材料制成的活塞本体上,根据法拉第电磁感应定律,线圈中变化的磁场将在铁芯内部产生感应电势,从而产生涡电流,而涡电流所激发的磁场方向总是与励磁电流所激发的磁场

相反,因此它会对励磁电流所激发的磁场变化起阻碍作用,从而延长由励磁电流所激发的磁场响应时间。

郭鹏飞、关新春等^[8]研究了涡流和励磁电流响应时间对阻尼力响应时间的影响,经实验研究发现因涡流效应的存在,磁场的响应均落后于励磁电流,如图 7 所示;另外利用有限元计算并得到了,电流响应时间缩短为 50 ms 后平均有效剪切屈服应力时程曲线,与缩短前的实测阻尼力时程曲线对比发现,在大多数情况下阻尼力响应时间缩短不多。由于涡流的存在,缩短电流响应时间,一方面会直接缩短阻尼力响应时间,另一方面,也会产生更大的涡流,从而又延长了阻尼力的响应时间。

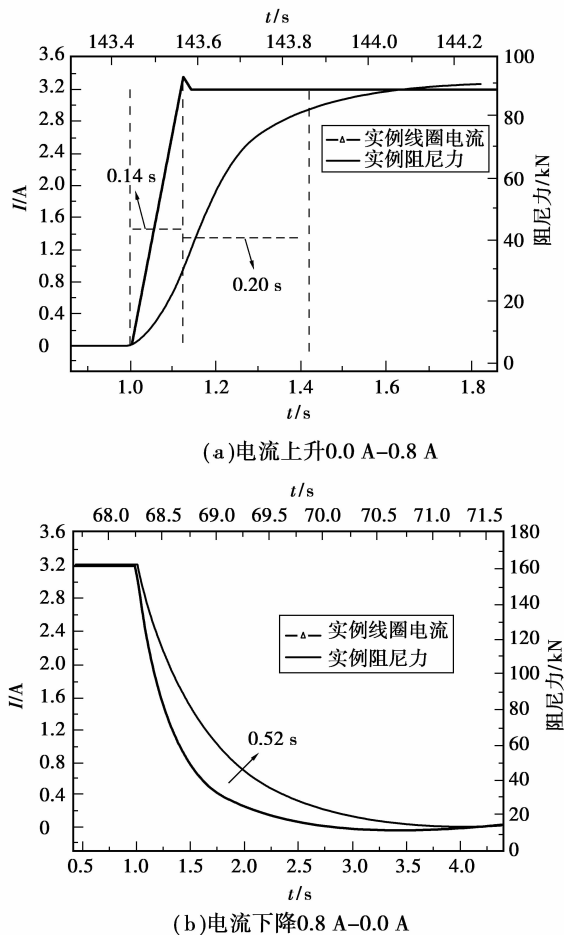


图 7 实测阻电流程与实测阻尼力时程的对比

因此为了减小涡流效应对动态响应的影响,不仅需要阻尼器活塞材料开展进一步研究,采用高电阻率材料和特殊的结构措施使涡流减小,还需考虑励磁电流变化的方式。

2.1.3 磁滞效应的影响

外磁场变化时,磁化强度的变化滞后于外磁场的变化称为磁滞效应。当撤去外磁场时,铁磁体仍保留部分磁性,磁化强度不为零,称为剩磁。磁流变阻尼器的铁磁性材料磁芯存在磁滞效应,并随着磁场强度的增大而增大。由于磁滞效应的存在,必然会延长磁流变阻尼器响应时间,在下降阶跃动态响应条件下尤为严重。目前解决磁滞效应对磁流变阻尼器响应时间影响的研究还很少,Guangqiang Yang 等^[1]通过一系列的试验研究发现反向电流驱动技术能减小磁滞效应并缩短下降阶跃响应时间。

2.2 磁流变液响应时间

2.2.1 材料因素

磁流变液的响应时间是当施加或消除外加磁场时,磁流变液建立或者消除磁流变效应所需要的时间。磁流变液是由可在磁场中产生极化的磁性颗粒、温度效应较小的载液和防止粒子结团和沉降的稳定剂组成的悬浮液。磁流变效应受很多因素的影响,如:磁性颗粒的体积含量,载液粘度等,它们都对阻尼器的动态响应时间产生影响。

1) 磁性粒子因素

H. V. Ly 等研究发现磁流变液形成稳定链状结构所需时间与颗粒体积分数成指数下降关系^[9]。颗粒的体积含量越大,单位体积内悬浮颗粒越多,颗粒间距离越小,有效磁导率越高,从而加速了磁性颗粒聚集形成稳定的链状结构,磁流变效应响应时间相应缩短。福特公司 Ginder 研究发现^[10],磁性粒子的体积含量增加,虽有利于提高磁流变液的力学性能,但当粒子含量大于 30% 时,磁流变液易出现沉淀,这将影响磁流变液的磁流变效应。

2) 载液粘度因素

文献^[4, 11]将磁流变阻尼器动态响应时间近似成稳定流动牛顿流体压差突变和平板间压差不变时流体瞬间流变 2 个阶段时间总和,并推导了其动态响应时间的理论计算公式。

阶段一:稳定流动牛顿流体压差突变时间

$$\tau_n = \left(\frac{1}{(2k-1)\pi} \right)^2 \frac{h^2}{\lambda}, \quad (8)$$

阶段二:平板间压差不变时流体瞬间流变时间

$$\tau_n = \left(\frac{1}{2k\pi} \right)^2 \frac{h^2}{\lambda}, \quad (9)$$

其中: λ 是流体的动力粘度, $\lambda = \frac{\eta}{\rho}$; η 是流体的

表观粘度; ρ 是流体比重; h 是平板间的间隙。

分析公式(8)和(9),可知随着流体粘度的减小,响应时间增大。

通过施加励磁电流产生磁流变效应时,磁性颗粒在载液中运动,既要与载液中其它粒子发生磁相互作用,还存在颗粒间的碰撞,并要受到载液粘性阻力的影响。其中颗粒在运动中受到的粘性阻力^[12]

$$F_v = -6\pi\alpha\eta \frac{dr}{dt}, \quad (10)$$

其中: η 为液体的粘性系数; α 为磁性颗粒的半径; r 是 2 磁性颗粒之间的相对位置。

由动力学分析可知,磁性颗粒向磁场方向偏转速度受到粘性阻力的影响,而偏转速度影响形成稳定链状结构所需时间。当动力粘度过大时,磁性颗粒的运动时的粘性阻力过大,可能会使磁性颗粒偏转困难,这将延长形成稳定链状结构的时间。当动力粘度过小时,此时磁性颗粒的运动时的粘性阻力过小,颗粒偏转速度过大,可能会使磁性颗粒在以磁场方向为中心发生振荡,这也将延长链状结构的稳定时间。因此有必要开展进一步的研究确定最佳载液粘度,使磁流变效应响应时间达到最短,这部分的研究成果尚未见文献报道。

2.2.2 剪切速率的影响

根据磁畴理论对磁流变效应的分析,在外加磁场作用下,如果能在较短时间里形成稳定的链状结构,那么磁流变效应的动态响应时间短,反之,动态响应时间长。

阻尼通道中磁流变液的剪切速率受到阻尼间隙和活塞速度等因素的影响。在其它条件一致时,阻尼间隙减小或者活塞速度增大,阻尼通道中磁流变液的剪切速率增大,加剧了对磁流变液的成链结构的破坏,从而使形成稳定的链状结构更为困难;而当阻尼间隙增大时,沿磁场方向磁性颗粒成链时间延长,可能延长磁流变效应达到稳态的时间而使阻尼器的动态响应时间增加,需要进一步的研究加以证明。

2.2.3 其他因素的影响

1)温度的影响

陶剑青等^[13]研究认为磁流变效应受温度的影响,且随着温度的升高,将有利于磁流变液中磁性颗粒(磁畴)的运动,所以能更快地建立稳定的链状结构,从而加快了磁流变液响应时间。

磁流变液跟其他油液一样,粘度随温度的变化

存在指数关系。粘温关系为

$$\mu_T = \mu_0 e^{-\lambda(T-T_0)}, \quad (11)$$

其中: μ_T 、 μ_0 分别是磁流变液在温度为 T 和 T_0 时的动力粘度系数; λ 是粘温系数。

因此,磁流变液粘度随着温度的升高而降低,而磁流变效应受动力粘度的影响,故温度还间接影响着磁流变液响应时间。

2)磁流变液中空气含量的影响

Hayward^[14]研究表明:流体的体积弹性模量随其夹带空气的含量而变化。文献[4]借鉴 Nakano 等人对电流变装置的研究方法,得到磁流变减振驱动器响应时间 T 的表达式为

$$T = \frac{R_{n0}V_c}{K}, \quad (12)$$

其中: V_c 是油缸内流体的体积; K 是流体的体积弹性模量; R_{n0} 是流体初始状态的阻抗。

显然,磁流变液中空气含量通过影响磁流变的体积弹性模量来间接影响磁流变阻尼器响应时间。因此需要设计专门用于将磁流变液注入阻尼器的设备,以减少和消除流体中的空气含量。

3 结 论

磁流变阻尼器的动态响应性能是限制其在半主动振动控制系统中应用场合的重要指标。根据目前有关动态响应研究中存在的主体不明的客观情况,指出了阻尼器动态响应的研究范畴及内容,并针对车辆悬架振动抑制用磁流变阻尼器,给出了相应的动态响应时间的相关描述和测试研究中需要注意的若干问题。分析了阻尼器动态响应的若干影响因素,提出了磁流变液载液粘度、阻尼器阻尼通道间隙等因素对动态响应时间影响效果的若干分析与解释,确定了后续研究的内容,为进一步提高阻尼器的动态响应性能指明了努力方向。

参考文献:

- [1] YANG G Q. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation, modeling, testing and control[D]. Indiana ;University of Notre Dame, 2001.
- [2] KOO J H, GONCALVES F D, AHMADIAN M. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15 (2): 351-358.
- [3] MILECKI A. Investigation of dynamic properties and

- control method influences on MR fluid dampers' performance [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(7/8):453-458.
- [4] 关新春, 欧进萍. 磁流变减振驱动器的响应时间试验与分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(6):96-102.
GUAN XIN-CHUN, OU JIN-PIN. Response time experiment and analysis of magnetorheological fluid actuator[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(6):96-102.
- [5] 陈爱军. 汽车磁流变阻尼器动态响应特性的研究[D]. 重庆:重庆大学硕士论文, 2005.
- [6] 黄曦, 余森, 陈爱军, 等. 磁流变液阻尼器动态响应及其影响因素分析[J]. *功能材料*, 2006, 5(37):808-813.
HUANG XI, YU MIAO, CHEN AI-JUN. Analysis of dynamic response time of MR damper and its influential factor[J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 5(37):808-813.
- [7] 王宇飞, 何琳, 单树军. 磁流变阻尼器响应时间的影响因素和优化途径研究[J]. *船海工程*, 2006, 35(6):103-106.
WANG YU-FEI, HE LIN, SHAN SHU-JUN. Investigation on the influence factors and optimization approaches of MR dampers' response time[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2006, 35(6):103-106.
- [8] 郭鹏飞, 关新春, 欧进萍. 磁流变液阻尼器响应时间的试验研究及其动态磁场有限元分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(6):1-4.
GUO PENG-FEI, GUAN XIN-CHUN, OU JIN-PIN. Experimental study and dynamic magnetic finite element analysis on the response time of magnetorheological fluid dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(6):1-4.
- [9] LY H V, REITICH F, JOLLY M R, et al. Simulations of particle dynamics in magnetorheological fluids[J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 155(1):160-177.
- [10] GINDER J M, DAVIS L C. Shear stresses in magnetorheological fluids: role of magnetic saturation [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(26):3410-3412.
- [11] 吕建刚, 易当祥, 张进秋, 等. 履带车辆磁流变减振器响应时间研究[J]. *实验力学*, 2001, 16(3):320-324.
LV JIAN-GANG, YI DANG-XIANG, ZHANG JIN-QIU, et al. A research on the response time of magnetorheological damper in tracked vehicle [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, 16(3):320-324.
- [12] 李海涛, 彭向和, 陈伟民. 磁流变液流变特性的数值模拟分析[J]. *功能材料*, 2006, 5(37):701-712.
LI HAI-TAO, PENG XIANG-HE, CHEN WEI-MIN. Analysis on the rheological properties of MRF [J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 5(37):701-712.
- [13] 陶剑青, 程海斌, 李祥辉. 纳米复合磁流变液的流变特性[J]. *中国粉体技术*, 2005, 11(3):26-28.
TAO JIAN-QING, CHENG HAI-BIN, LI XIANG-HUI. Rheological characteristics of nanocomposite-based magnetorheological suspension[J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, 11(3):26-28.
- [14] HAYWARD A T J. Aeration in hydraulic system-its assessment and control [C] // *Conference on Oil Hydraulic Power and Control*. [S. l.]:[s. n.], 1961:216-224.

(编辑 陈移峰)