

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.047

# 位移差动自感式磁流变阻尼器设计与试验

胡国良 刘丰硕 刘浩 丁孺琦

(华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室,南昌 330013)

**摘要:**针对磁流变车辆半主动悬架减振系统中使用磁流变阻尼器与传感器分离布置易造成安装空间大、系统可靠性低、维护成本高以及传感器信号易受外部环境干扰等不足,设计了一种位移差动自感式磁流变阻尼器。该阻尼器活塞头凹槽内缠绕2层铜线圈,内层线圈为阻尼励磁线圈,通过控制阻尼励磁线圈输入电流就可控制输出阻尼力,实现阻尼力可控;外层线圈为产生感应电压信号所需感应力线圈,当给感应力线圈通入高频交流电励磁信号时,缠绕在绕线缸体上的两组感应线圈可分别感应出同频率的位移信号,并通过差动原理实现位移差动自感应。推导了位移差动自感应数学模型;搭建测试系统进行自感应特性测试及阻尼力学性能分析。试验结果表明:静态拉伸时阻尼器活塞位移与感应电压成线性关系;动态拉伸时,当振幅分别为5、10、15 mm时,能够产生幅值为0.3、0.6、0.9 V的感应电压,通过拟合可得到阻尼器活塞头位移与自感应电压成线性关系;给阻尼励磁线圈施加1 A直流电时,能产生360 N左右的可控阻尼力。

**关键词:**磁流变阻尼器;位移差动自感应;感应电压;阻尼性能

**中图分类号:** TH137.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0383-07

## Design and Experiment of Novel Displacement Differential Self-induced Magnetorheological Damper

HU Guoliang LIU Fengshuo LIU Hao DING Ruqi

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The separation arrangement of magnetorheological damper (MRD) and sensor in the vehicle semi-active suspension system will result in large installation space, low system reliability and high maintenance cost, especially the external environment interference for the sensor signal. Aiming at these shortcomings, an improved displacement differential self-induced magnetorheological damper (DDSMRD) was developed. There were two layer copper coils wounded on the damper piston head, one was the inner coil, the other was the outer coil. The inner coil can be acted as damping excitation coil, which can control the damping force by adjusting the applied current. The outer coil can be acted as the induced coil, which can generate an induction signal. When the outer coil was input the high frequency AC excitation signal, the self-induced coils wounded on the winding cylinder can generate the displacement signal with the same frequency. Thus, the displacement differential self-induced voltages can be obtained. The mathematical model of the relationship between the self-induced voltage and the damper displacement was derived. A static test rig was built to analyze the self-induced ability, and the results showed that the self-induced voltage was linear to the piston displacement under static tension. Through the dynamic tests, an amplitude voltage of 0.3 V, 0.6 V and 0.9 V was obtained under the piston displacement of 5 mm, 10 mm and 15 mm, respectively, which also showed a good linearity. When the inner coil was applied 1 A current, the proposed damper can generate 360 N damping force.

**Key words:** magnetorheological damper; displacement differential self-induction; induced voltage; damping performance

收稿日期:2017-07-11 修回日期:2017-08-22

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51475165、51765016、11462004)、江西省主要学科学术和技术带头人资助计划项目(20162BCB22019)、江西省创新驱动5511科技创新人才项目(20165BCB18011)和江西省研究生创新基金项目(YC2016-S252)

**作者简介:**胡国良(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事磁流变智能器件及结构、流体传动及控制研究,E-mail: glhu@ecjtu.edu.cn

## 引言

磁流变阻尼器(MRD)目前已广泛应用于车辆、桥梁建筑及大型工程机械减振抗震领域,尤其是配有MRD的车辆半主动悬架减振系统发展更为迅速<sup>[1-2]</sup>。其动态减振机理是灌装在MRD内部的磁流变液能随着输入电流的变化产生不同强度的屈服应力,从而使MRD输出可控阻尼力。与传统弹簧减振系统相比,MRD减振系统具有毫秒级响应速度、较大的输出阻尼力且连续可调等优点<sup>[3-5]</sup>。但需注意的是,为实现良好的半主动控制效果,MRD使用时须搭载位移、速度及加速度等传感器组成反馈环节才能达到良好的控制效果<sup>[6-7]</sup>。

磁流变车辆半主动悬架减振系统中,传感器与MRD分离布置容易造成系统安装空间大、维护成本高,且外部恶劣环境对传感器造成的干扰会影响系统的稳定性及可靠性,从而限制了磁流变车辆半主动悬架控制系统的工程应用。基于此,功能集成型MRD成为国内外研究热点。功能集成型MRD把传感器检测功能和阻尼器阻尼力可控功能集成在一起,极大降低了系统成本和安装空间,并进一步提高了系统可靠性。

NEHL等<sup>[8]</sup>根据电磁感应原理,以环形永磁铁与感应线圈的相对运动产生的感应电压信号来表征活塞与阻尼器缸体的相对运动速度。由于环形永磁铁产生的是静磁场,MRD也产生静态磁场;同时感应线圈使用的缸体罩会弱化传感信号,使得该方法很难应用于MRD上。美国MTS公司于2001年将磁致伸缩位移传感器集成在MRD内部,成功研制了具有位移自感功能阻尼器(Magneshock)<sup>[9]</sup>,但由于引入磁致伸缩材料,其成本较高,且对加工精度的要求较高。JUNG等<sup>[10-12]</sup>设计了一种外置感应线圈的MRD系统,MRD运动过程中带动感应线圈在外置静态感应磁场运动,产生感应电压;通过测量外置感应线圈的感应电压幅值和相位就可以表征MRD的运动。WANG等<sup>[13-15]</sup>设计了一种基于磁链原理得到相对位移振动信号的自感应MRD,当活塞杆运动时,感应线圈内的感应电动势发生变化,通过检测感应电动势的变化就可以获得阻尼器运动状态,验证了MRD结构集成和功能复用的可行性。CHEN等<sup>[16-17]</sup>提出了一种自发电自感应功能集成型磁流变阻尼器,该阻尼器集能量采集和位移动态检测于一体,具有自发电和速度感应能力。

基于电磁感应及差动传感原理,课题组提出并设计了一种位移差动自感式磁流变阻尼器(DDSMRD),通过缠绕在活塞头中的励磁线圈分时

复用通入的直流电和交流电信号,差动自感线圈装置能够实现位移的精确测量,同时具有屏蔽外部环境干扰的功能<sup>[18-20]</sup>。然而,由于直流电和交流电的电路耦合,检测到的自感应电压信号较小,测量精度受到影响。为增强位移自感应电压信号,进一步提高测量精度和准确度,本文设计一种阻尼激励线圈与信号激励线圈分离布置的DDSMRD,通过阻尼激励线圈与信号激励线圈分离布置,避开直流电和交流电电路耦合。在不影响输出阻尼力前提下,以实现阻尼器位移精确自感应及阻尼力可控。同时,对所设计的DDSMRD进行结构设计、理论分析和试验验证。

## 1 DDSMRD 结构设计

### 1.1 工作原理及结构

图1为所设计的DDSMRD结构原理图,图2为DDSMRD位移差动自感应工作原理图。该阻尼器活塞头凹槽缠绕2层铜线圈,凹槽内层为铜线绕制的阻尼励磁线圈,凹槽外层为铜线绕制的感应力线圈;绕线缸体上缠绕2个匝数相同但绕向相反的感应线圈I和感应线圈II,构成差动自感应线圈。

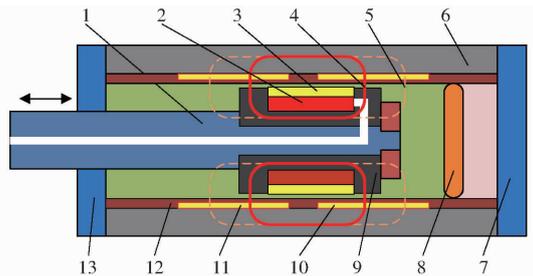
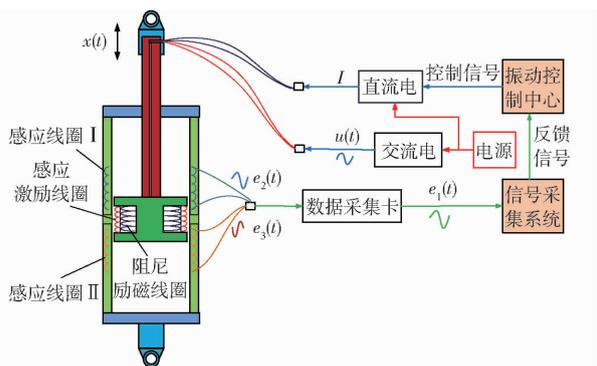


图1 位移差动自感式磁流变阻尼器结构原理图

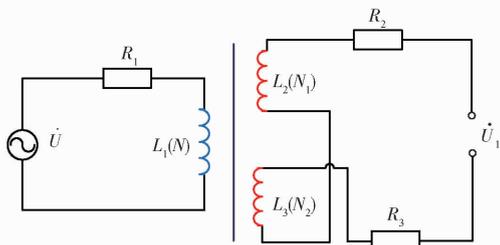
Fig.1 Schematic diagram of DDSMRD

1. 活塞杆 2. 阻尼励磁线圈 3. 感应力励磁线圈 4. 主磁通
5. 漏磁通 6. 阻尼器缸体 7. 后端盖 8. 浮动活塞 9. 活塞头
10. 感应线圈 I 11. 感应线圈 II 12. 绕线缸体 13. 前端盖

当阻尼励磁线圈通直流电时,在活塞头与绕线缸体有效阻尼间隙处产生磁场,阻尼间隙处的磁流变液由于磁流变效应产生剪切屈服应力,控制输入电流大小可实现阻尼力可控。当给感应力励磁线圈通入高频交流电励磁信号时,活塞头与阻尼器缸体之间形成闭合磁路,绕线缸体绕线区被交变磁场覆盖部分的感应线圈可分别感应出同频率的电压信号。由于两感应线圈采用差动方式连接,可知位移信号为两感应线圈幅值之差。如图2所示,当感应力励磁线圈处于两感应线圈中间位置时,两感应线圈的感应电压相等,位移信号幅值为零,设为零点位移位置。阻尼器活塞杆伸出时,感应线圈I(线圈匝数为 $N_1$ )感应区的线圈匝数减



(a) 控制原理图



(b) 位移差动自感应原理图

图 2 DDSMRD 位移差动自感应工作原理图

Fig. 2 Diagrams of displacement differential self-induced principle of DDSMRD

少了  $\Delta N$ , 感应线圈 II (线圈匝数为  $N_2$ , 且  $N_1 = N_2$ ) 感应区的线圈匝数增加了  $\Delta N$ , 活塞位移与每个感应区的线圈匝数成正比, 进而活塞的相对位移是每个感应区感应电压变化的两倍。当阻尼器活塞杆回缩时, 感应电压的相位变化  $180^\circ$ , 因此可以根据信号的相位变化来判断运动方向, 从而实现位移差动自感应。当给活塞头的阻尼励磁线圈和感应激励线圈同时通入直流电和交流电时, DDSMRD 就可输出可控阻尼力, 同时得到与位移成正比的自感应电压信号。

由于活塞头和阻尼器缸体均为 10 号钢高导磁性材料, 故交变磁场主要集中在活塞头和阻尼器缸体中。感应线圈 I 和 II 设置在活塞头与阻尼器缸体之间, 交变磁场形成的磁场必须穿过感应线圈区域才能形成闭合磁路; 而阻尼励磁线圈处的感应磁场主要集中在活塞头中, 且阻尼励磁线圈与感应激励线圈相对位移不变, 阻尼励磁线圈受交变磁场而产生的感应电动势始终不变。故在分析感应电压时简化模型, 只需考虑感应激励线圈对感应线圈 I 和 II 的影响。

### 1.2 位移差动自感应数学模型

感应激励线圈中的电流为

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{\dot{U}}{R_1 + j\omega L_1} \quad (1)$$

式中  $R_1$ ——感应激励线圈内阻  
 $L_1$ ——感应激励线圈的自感  
 $\dot{U}$ ——交流激励信号电动势

$\omega$ ——电路阻抗  $Z$ ——角频率

感应线圈内的磁通量可表示为

$$\phi = \frac{N \dot{I}}{R} \quad (2)$$

$$\text{其中 } R = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{2h}{\mu_0 S} \quad (3)$$

式中  $N$ ——感应激励线圈匝数  
 $R$ ——磁路中的总磁阻  
 $l_i$ ——磁力线经过第  $i$  部分的有效长度  
 $\mu_i$ ——第  $i$  部分材料的相对磁导率  
 $\mu_0$ ——真空绝对磁导率  
 $h$ ——空气气隙宽度  
 $S$ ——空气气隙的面积  
 $S_i$ ——磁力线垂直经过第  $i$  部分的横截面面积

忽略活塞运动引起的磁阻变化, 则回路中磁阻为定值。又激励线圈匝数  $N$  为定值, 则由式 (1) ~ (3) 可知磁通正比于激励电压。

设感应激励线圈通入频率为  $f$  的正弦激励, 即

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

则感应线圈 I 和感应线圈 II 中的磁通量可表示为

$$\phi_1(t) = \phi_2(t) = \phi(t) = \phi_m \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

其中  $\phi_m$ ——感应区的磁通峰值  
 $k$ ——比例常量

$U_m$ ——感应激励线圈的信号峰值

感应线圈 I 和感应线圈 II 中的磁链分别为

$$\psi_1(t) = \phi_1(t) N_1(t) = k U_m \sin(2\pi ft) N_1(t) \quad (6)$$

$$\psi_2(t) = \phi_2(t) N_2(t) = k U_m \sin(2\pi ft) N_2(t) \quad (7)$$

$N_1(t)$  和  $N_2(t)$  分别为绕线缸体感应区中感应线圈 I 和感应线圈 II 的线圈匝数, 可表示为

$$N_1(t) = k_1 x_1(t) \quad (8)$$

$$N_2(t) = k_2 x_2(t) \quad (9)$$

$k_1$  和  $k_2$  分别为感应线圈 I 和感应线圈 II 单位长度的线圈匝数, 设计时两感应线圈绕线匝数相等, 即  $k_1 = k_2$ ; 将两感应线圈间隔的中心设为相对位移零点参考位置, 活塞杆伸出方向为正方向,  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  为信号激励线圈相对两感应线圈相对位移, 可得

$$x_1(t) = -x_2(t) = \Delta x(t) \quad (10)$$

感应线圈 I 和感应线圈 II 产生的感应电动势瞬时值分别为  $e_2(t)$  和  $e_3(t)$ , 可表示为

$$e_2(t) = \frac{d\psi_1(t)}{dt} =$$

$$kk_1 U_m \left[ 2\pi f \Delta x(t) \cos(2\pi ft) + \frac{d\Delta x(t)}{dt} \sin(2\pi ft) \right] \quad (11)$$

$$e_3(t) = \frac{d\psi_2(t)}{dt} = -kk_2U_m \left[ 2\pi f\Delta x(t) \cos(2\pi ft) + \frac{d\Delta x(t)}{dt} \sin(2\pi ft) \right] \quad (12)$$

由于感应线圈 I 和感应线圈 II 采用差动连接, 根据差动原理可得

$$e_1(t) = e_2(t) - e_3(t) = 2kk_1U_m \left[ 2\pi f\Delta x(t) \cos(2\pi ft) + \frac{d\Delta x(t)}{dt} \sin(2\pi ft) \right] \quad (13)$$

由于激励信号的频率相对于阻尼器往复运动的频率较高, 则

$$2\pi f\Delta x(t) \cos(2\pi ft) \gg \frac{d\Delta x(t)}{dt} \sin(2\pi ft) \quad (14)$$

最后得到位移差动自感应电压有效值为

$$U_1 = 4\pi fkk_1U_m\Delta x(t) \quad (15)$$

式中  $f$ ——常数

综上所述, 感应电动势有效值  $U_1$  与阻尼器活塞头的相对位移成正比例关系, 能实现位移差动自感应。

### 1.3 样机及关键结构参数

图 3a 所示为 DDSMRD 关键零部件, 为使 MRD 的阻尼通道和信号磁场通道中磁场较为集中, 选用高导磁材料作为主磁通的材料, 活塞头及阻尼器缸体构成了阻尼通道的主磁通, 选用 10 号钢导磁材料; 绕线缸体的绕线区为信号主磁通路, 同时为避免磁路分散漏磁, 绕线缸体、活塞杆、前后端盖及浮动活塞选用不锈钢材料。图 3b 为装有阻尼励磁线圈及感激励线圈的活塞头和绕有差动自感线圈的绕线缸体, 图中的阻尼励磁线圈及感激励线圈分层缠在活塞头凹槽上, 阻尼励磁线圈在凹槽内层, 感激励线圈在凹槽外层, 分别从活塞杆的引线孔引出; 绕线缸体上设有差动连接的感应线圈 I 和感应线圈 II。图 3c 为装配完成的 DDSMRD 样机, 表 1 为 DDSMRD 的关键尺寸及结构参数。



图 3 DDSMRD 的关键零件及样机

Fig. 3 Key components and prototypes of DDSMRD

表 1 DDSMRD 关键结构参数

Tab. 1 Key parameters of DDSMRD

参数	数值
活塞杆后端直径 $d_2$ /mm	10
活塞头最大直径 $D$ /mm	42
活塞头中间直径 $d_3$ /mm	22
活塞头绕线区宽度 $u$ /mm	30
有效阻尼长度 $l_1$ /mm	16
阻尼间隙 $h$ /mm	1
单个绕线区长度 $l_2$ /mm	45
绕线缸体内径 $D_1$ /mm	44
阻尼器缸体外径 $D_2$ /mm	64
活塞头运动行程 $X$ /mm	30
绕线区缸体厚度 $P$ /mm	2
阻尼器缸体厚度 $w$ /mm	8
阻尼励磁线圈匝数 $N_Z$	570
感激励线圈匝数 $N$	280
自感线圈匝数 $N_1$	295
自感线圈匝数 $N_2$	295

## 2 DDSMRD 静态自感应性能分析

图 4 所示为 DDSMRD 静态拉伸试验数据采集

系统, 该系统主要由数据采集卡、函数信号发生器、DDSMRD 以及数据采集界面组成。函数信号发生器主要给活塞头的信号激励线圈提供激励信号, 数据采集卡能够采集感应电压, 数据采集界面能够显示和分析所采集的感应电压。为研究感应电压的幅值随活塞运动的相对位移之间的关系, 通过函数信号发生器给 DDSMRD 的信号激励线圈施加频率为 1 kHz、电压幅值为 10 V 的正弦激励, 感激励线圈的中心与两差动感应线圈中心为参考零点位置。活

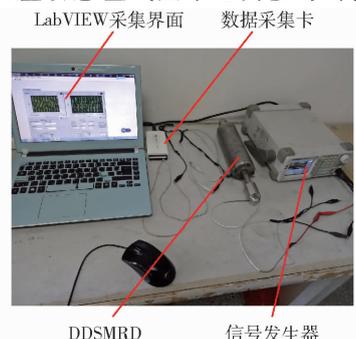


图 4 DDSMRD 静态拉伸试验系统

Fig. 4 Static test system of DDSMRD

塞向上为正, 向下为负, 分别标记出活塞杆 5 mm、10 mm、15 mm 位置, 然后测量其感应电压的信号。

图 5 所示为 DDSMRD 在不同位置处输出的感应电压。图 5a 所示为活塞头从相对位置 0 mm 到 15 mm 位置处的两处感应电压, 可以看出在相对位置为 15 mm 处感应电压为 0.9 V; 在相对位置为

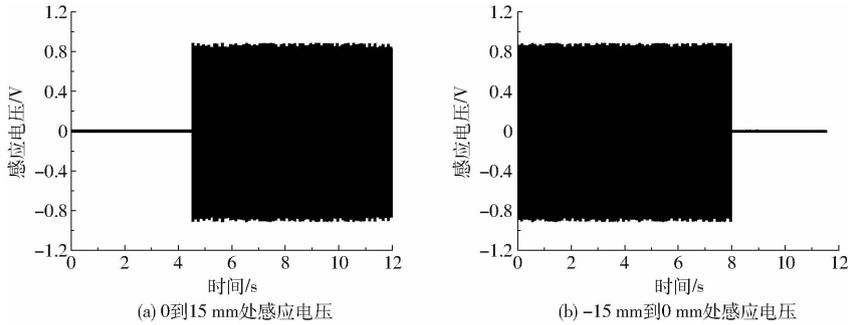


图 5 不同位置处静态感应电压变化

Fig. 5 Static self-induced voltage at different positions

图 6 所示为活塞头在相对位移为 5、10、15 mm 位置处的感应电压幅值变化情况。从图 6 可看出, 相对位移为 5 mm 处的感应电压幅值为 0.3 V; 相对位移为 10 mm 处的感应电压幅值为 0.6 V; 相对位移为 15 mm 处的感应电压幅值为 0.9 V。另外, 从图中可观察到相对位置为 10 mm 处的感应电压幅值是 5 mm 处感应电压幅值的 2 倍; 而相对位移为 15 mm 处的感应电压幅值为相对位置为 5 mm 处感应电压幅值的 3 倍。从图 6 可得 DDSMRD 的感应电压幅值与活塞头的相对位移成线性关系, 这与式 (15) 理论推导计算相吻合。

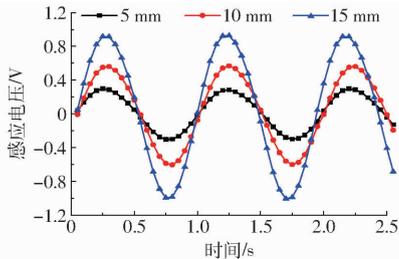


图 6 不同相对位移下静态感应电压变化

Fig. 6 Static self-induced voltage at different displacements

图 7 所示为相对位移由 0 mm 变化到 15 mm 位置时感应电压幅值变化。从图 7 可以看出, 随着活塞头相对位移连续增大, 感应电压幅值也呈比例增大。这进一步验证了 DDSMRD 的感应电压幅值与活塞头相对位移成线性比例关系。

图 8 为给感应激励线圈施加相同的激励信号时, 3 个典型位置处的感应电压计算值与试验值之间的偏差率变化曲线。从图 8 可以看出, 理论计算值与试验测试值的感应电压偏差率不超过 5%, 理论计算与试验相差很小, 满足实现相对位移与感应电压成线性比例关系。

0 mm 处感应电压 0.001 V。图 5b 所示为活塞头从相对位置 -15 mm 到 0 mm 位置处的感应电压, 从图中可以看出最大位移处的感应电压的幅值都为 0.9 V; 相对位置为 0 mm 处的感应电压为 0.001 V。由于绕线缸体加工误差以及感应线圈缠绕中存在的误差, 导致中间位置处感应电压不为零。

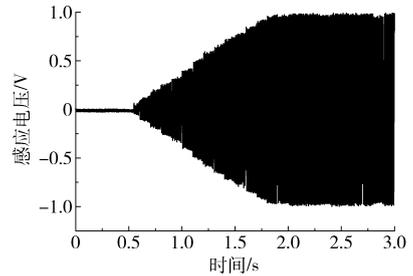


图 7 相对位移由 0 mm 变化到 15 mm 时静态感应电压

Fig. 7 Static self-induced voltage at displacement changing from 0 mm to 15 mm

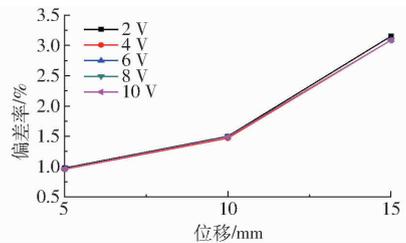


图 8 静态感应电压偏差率曲线

Fig. 8 Variation curves of static self-induced voltage

### 3 DDSMRD 动态自感应性能分析

#### 3.1 动态拉伸测试系统搭建

图 9 所示为搭建的 DDSMRD 动态拉伸试验测试系统。该系统主要由 DDSMRD、激振器、功率放大器、直流电源、函数信号发生器、LVDT 位移传感器、LabVIEW 测试界面、力传感器及数据采集卡等组成。激振器的振动中心与力传感器以及活塞杆中心在同一直线上, 力传感器可实时监测阻尼器在激振器作用下输出阻尼力; LVDT 位移传感器通过测量平衡板的振动即可测量 DDSMRD 的位移变化; 直流电源 DC2 给阻尼励磁线圈提供直流电, 来调节阻尼器输出阻尼力; 信号发生器给感应激励线圈通入

正弦激励信号,使感应线圈获得感应电压;直流电源 DC1 给力传感器和位移传感器提供正常工作直流电源;LabVIEW 测试界面显示采集到的阻尼力和位移信号变化。



图9 DDSMRD 动态拉伸试验测试系统

Fig. 9 DDSMRD dynamic tensile test system

1. 信号发生器 2. 直流电源 DC1 3. 数据采集卡 4. 采集界面
5. 力传感器 6. LVDT 位移传感器 7. DDSMRD 8. 直流电源 DC2
9. 激振信号源 10. 激振器

### 3.2 自感应特性分析

测试时,给 DDSMRD 感应激励线圈施加幅值 10 V 及频率 1 kHz 的正弦信号,激振器设为频率为 0.5 Hz 正弦位移加载方式,振幅设定为 5、10、15 mm。图 10 所示为输入电流 1 A 时感应电压随振动幅值变化曲线,可看出振幅为 5 mm 时感应电压在 0.3 V 左右,且感应电动势的幅值随位移变化符合活塞头位移正弦变化趋势。由于活塞头的正负循环往复运动,可观察到感应电压幅值变化趋势也相同。当信号激励线圈越过平衡电压位置时,相位变化 180°,两个波形为一个周期;由于采集卡的采样频率及精度影响,经时间序列换算得到图形周期存在一定误差,但并不影响感应电压幅值随活塞头相对位移成比例变化的趋势。将激振器的振幅调整为 10 mm 和 15 mm 时,感应电压幅值分别接近 0.6 V 和 0.9 V,且差动感应电压幅值随相对位移变化呈类似活塞头位移正弦变化的趋势。试验中通过 LVDT 位移传感器对激振器的振幅波峰波谷进行监测,感应电压的波峰变化来源于激振器自身,且感应电压波峰最大值反映振幅最大值。

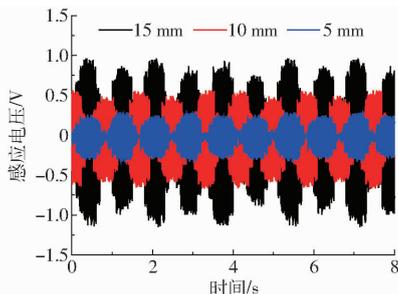


图10 典型拉伸位移下感应电压变化

Fig. 10 Self-induced voltage change at typical damper displacements

图 11 为动态拉伸感应电压随位移变化曲线,从图 11 可看出,本设计活塞头具有阻尼励磁线圈和感应激励线圈的双层线圈 DDSMRD 动态拉伸试验中感应电压与加载的最大位移幅值成线性比例关系;原课题组设计的活塞头分时复用直流电和交流电单一线圈的 DDSMRD 的动态拉伸试验中感应电压与加载的最大位移幅值之间也成线性比例关系。但是双层线圈 DDSMRD 在相同位置处感应电压是单一线圈 DDSMRD 的感应电压的 10 倍。这导致外界环境干扰对单一线圈 DDSMRD 影响相对较大,而对双层线圈 DDSMRD 的影响较小。因此,具有阻尼励磁线圈和感应激励线圈的双层线圈配置的新型 DDSMRD 能够增强位移自感应电压信号,可进一步提高测量精度和准确度。

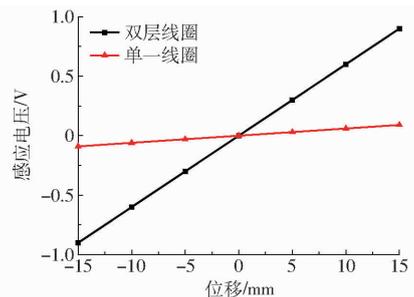


图11 感应电压随位移变化情况

Fig. 11 Self-induced voltage under different damper displacements

### 3.3 阻尼动力性能分析

图 12 为阻尼力随位移的变化曲线,试验时激振器频率为 0.5 Hz、振幅为 15 mm、正弦位移加载,阻尼激励线圈加载直流电分别为 0、0.25、0.5、0.75、1 A。如图 12 所示,随着输入电流的增大,相同位移处的阻尼力也逐渐增大,且阻尼力随相对位移变化曲线呈回字型由内向外分布;另外,阻尼力在方向相反、大小相等的拉伸位移处基本相同。当加载直流电为 0 A 时,阻尼力表现为粘滞阻尼力,跟阻尼器的运动速度成正比;平衡位置处速度最大,此时最大粘滞阻尼力为 60 N。当电流为 1 A 时,阻尼器的阻尼力由可控阻尼力和粘滞阻尼力组成,其最大值约为

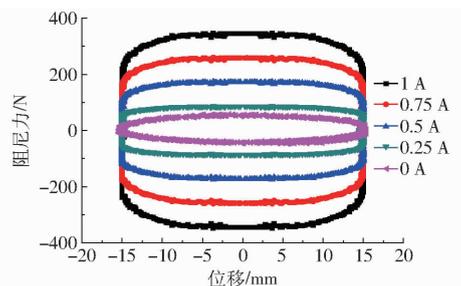


图12 不同激励电流下阻尼力与位移关系

Fig. 12 Damping force-displacement relation of DDSMRD under different currents

360 N, 可计算出阻尼力可调系数  $\beta$  为 6。

图 13 所示为激振器振幅 15 mm 情况下, DDSMRD 检测的相对位移与 LVDT 位移传感器实测位移对比曲线, 从图 13 可看出, 相对于 LVDT 位移传感器, DDSMRD 具有较高精度的位移自感应功能。

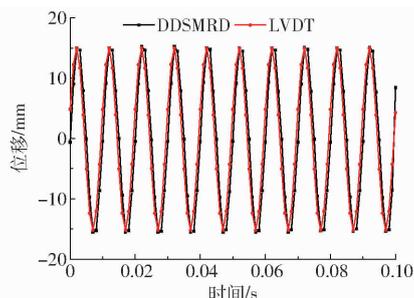


图 13 DDSMRD 检测与 LVDT 实测位移对比曲线

Fig. 13 Displacement comparison curves between DDSMRD tests and LVDT measurements

图 14 所示为在输入不同位移下, DDSMRD 和 LVDT 检测的电压变化关系, 可发现 DDSMRD 的感应电压幅值线性度为 4.84%。线性度较小, 反映了相对位移测量精度较高。进一步说明所设计的 DDSMRD 能够实现阻尼力可控和位移自感应复合功能。

## 4 结论

(1) 设计了一种位移差动自感式磁流变阻尼器 (DDSMRD)。该阻尼器活塞头凹槽内缠绕 2 层铜线圈, 内层线圈为阻尼励磁线圈, 通过控制阻尼励磁线

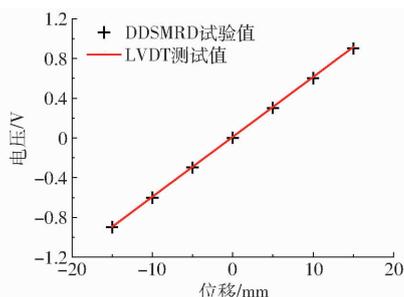


图 14 DDSMRD 实测电压与 LVDT 检测电压对比

Fig. 14 Comparison of DDSMRD measured voltage and LVDT output voltage

圈输入电流可控制输出阻尼力, 实现阻尼力可控; 外层线圈为产生感应电压信号所需的感应激励线圈, 当给感应力线圈通入高频交流电励磁信号时, 缠绕在绕线缸体上的 2 组感应线圈可分别感应出同频率的位移信号, 可实现位移差动自感应。

(2) 搭建静态拉伸感应电压测试系统, 对 DDSMRD 进行静态拉伸试验分析, 结果表明 DDSMRD 静态感应电压幅值与阻尼器相对位移成线性比例关系。

(3) 搭建动态拉伸感应电压测试和力学性能分析系统, 对 DDSMRD 进行动态拉伸试验。发现 DDSMRD 粘滞阻尼力为 60 N, 最大输出阻尼力约为 360 N, 阻尼力可调系数为 6。另外, 与 LVDT 位移传感器对比, DDSMRD 具有较高精度的位移自感应功能, 线性度为 4.84%。表明所设计的 DDSMRD 能够实现位阻尼力可控和位移自感应复合功能。

## 参 考 文 献

- ZHU X C, JING X J, CHENG L. Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(8): 839–873.
- HU Guoliang, LIU Qianjie, DING Ruqi, et al. Vibration control of semi-active suspension system with magnetorheological damper based on hyperbolic tangent model [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5): 1–15.
- 寇发荣. 汽车磁流变半主动悬架系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 280–287. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160437&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160437&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.037.
- KOU Farong. Design and test of vehicle semi-active suspension with magnetorheological damper [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 280–287. (in Chinese)
- HU Guoliang, LIU Fengshuo, XIE Zheng, et al. Design, analysis and experimental evaluation of a double coil magnetorheological fluid damper [J]. Shock and Vibration, 2016(2): 1–12.
- HEMANTH K, KUMAT H, GANGADHARAN K V. Vertical dynamic analysis of a quarter car suspension system with MR damper [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016: 1–11.
- GAGOROWSKI A. Controlling the magnetorheological suspension of a vehicle seat including the biomechanics of the driver [J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(2): 264–278.
- TANG X, DU H P, SUN S S, et al. Takagi-sugeno fuzzy control for semi-active vehicle suspension with a magnetorheological damper and experimental validation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 291–300.
- NEHL T W, BETTS J A, MIHALKO L S. An integrated relative velocity sensor for real-time damping applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(4): 873–881.
- RUSSELL J L J. Magnetostrictive position sensors enter the automotive market [J]. Sensors, 2001, 18: 26–31.

- 10 韩宗奇, 李亮. 测定汽车滑行阻力系数的方法[J]. 汽车工程, 2002, 24(4):364-366.  
HAN Zongqi, LI Liang. A method of determining coasting resistance coefficient [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(4): 364-366. (in Chinese)
- 11 HAUSMANN A, DEPCIK C. A cost-effective alternative to moving floor wind tunnels in order to calculate rolling resistance and aerodynamic drag coefficients [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2014, 7(2): 703-713.
- 12 BRACE C J, BURKE R, MOFFA J. Increasing accuracy and repeatability of fuel consumption measurement in chassis dynamometer testing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(9): 1163-1177.
- 13 SAE J2263—2008 Road load measurement using on board anemometry and coastdown techniques [S]. 2008.
- 14 National Instruments Corporation. Operation instructions and specifications NI cRIO-9030 [M]. Austin, TX: National Instruments Corporation, 2014.
- 15 Trimble Navigation Limited. Trimble BD985 GNSS receiver module[M]. Sunnyvale, CA: Trimble Navigation Limited, 2014.
- 16 张小龙, 陈彬, 宋健, 等. 基于支持向量机的道路坡度实时预测方法试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):14-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20141103&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141103&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.003.  
ZHANG Xiaolong, CHEN Bin, SONG Jian, et al. Experimental research on real-time prediction method for road slope based on support vector machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):14-19. (in Chinese)
- 17 Trimble Navigation Limited. Trimble Juno T41 handheld with Android operating system user guide [M]. Sunnyvale, CA: Trimble Navigation Limited, 2013.
- 18 WU Jun, GU Zhengqi, ZHONG Zhihua. Numerical simulation of airflow around the car body using SST turbulence model [J]. SAE Technical Paper 2002-01-2042, 2002.
- 19 吴宗玲, 闫连山, 曾德兵, 等. 基于 ARM + CPLD 的高精度超声波风速仪的设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(6):101-103, 107.  
WU Zongling, YAN Lianshan, ZENG Debing, et al. Design of ultrasonic wave anemometer with highprecision based on ARM + CPLD [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(6):101-103, 107 (in Chinese)
- 20 Gill Instruments Ltd. WindObserver-65 ultrasonic anemometer user manual issue 1 [M]. Hampshire, UK: Gill Instruments Ltd, 2012.
- 21 张小龙, 潘登, 姜山, 等. 基于加速度的汽车悬架位移实时测试方法试验研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 15-22. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131003&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131003&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.003.  
ZHANG Xiaolong, PAN Deng, JIANG Shan, et al. Experiment on real-time test method for automotive suspension distance based on acceleration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 15-22. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 389 页)

- 10 JUNG H J, KIM I H, KOO J H. A multi-functional cable-damper system for vibration mitigation, tension estimation and energy harvesting[J]. Smart Structures and Systems, 2011, 7(5): 379-392.
- 11 JUNG H J, CHOI K M, JR B F S, et al. Application of some semi-active control algorithms to a smart base-isolated building employing MR dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(2-3): 693-704.
- 12 JUNG H J, JANG D D, CHOI K M, et al. Vibration mitigation of highway isolated bridge using MR damper-based smart passive control system employing an electromagnetic induction part[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(6): 613-625.
- 13 WANG D H, WANG T. Principle, design and modeling of an integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper based on electromagnetic induction[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 095025.
- 14 WANG D H, BAI X X, LIAO W H. An integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper: prototyping and testing[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(10): 105008.
- 15 WANG D H, BAI X X. Pareto optimization-based tradeoff between the damping force and the sensed relative displacement of a self-sensing magnetorheological damper [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(22): 1451-1467.
- 16 CHEN C, LIAO W H. A self-sensing magnetorheological damper with power generation[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(2): 025014.
- 17 CHEN C, LIAO W H. A self-powered, self-sensing magnetorheological damper[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, 2010: 1364-1369.
- 18 HU Guoliang, RU Yi, LI Weihua. Design and development of a novel displacement differential self-induced magnetorheological damper[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(5): 527-540.
- 19 HU Guoliang, ZHOU Wei, LIAO Mingke, et al. A new magnetorheological damper with improved displacement differential self-induced ability [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(8): 087001.
- 20 HU Guoliang, ZHOU Wei, LIAO Mingke, et al. Static and dynamic experiment evaluations of a displacement differential self-induced magnetorheological damper [J]. Shock and Vibration, 2015(11): 1-10.