DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.001

磁流变阻尼器输出阻尼力灵敏度分析*

安晨亮1,马金玉2,王嘉维3,权凌霄3*

(1.北京航天发射技术研究所,北京100076;2.北京精密机电控制设备研究所, 北京100076;3.燕山大学机械工程学院,河北秦皇岛066004)

摘要:针对液压管路系统振动控制问题,对磁流变液阻尼器的液压管路半主动振动控制进行了研究。对磁流变液阻尼器结构进行 了分析,通过机理建模的方法建立了磁流变液输出阻尼力的数学模型,针对磁流变液阻尼器控制电流、活塞运动速度等 10 个与磁 流变阻尼器结构和特性相关的设计参数,建立了其一阶和二阶输出灵敏度方程,得出了系统一阶和二阶输出灵敏度函数表达式;基 于 Matlab 软件求解了其相应的一阶和二阶输出灵敏度函数,结合两项灵敏度指标分析了各参数变化对系统输出阻尼力的影响程 度。研究结果表明:当参数变化 10% 时,励磁线圈匝数、铁芯横截面积以及外筒与活塞缸之间间隙这 3 个设计参数所引起的输出阻 尼力变化百分比最大。

关键词:振动控制;磁流变阻尼器;灵敏度分析;灵敏度方程 中图分类号:TH113.1;TH137.8⁺6 **文献标志码**:A

文章编号:1001-4551(2018)11-1137-08

Sensitivity analysis of output damping force based on magnetorheological damper

AN Chen-liang¹, MA Jin-yu², WANG Jia-wei³, QUAN Ling-xiao³

(1. Beijing Institute of space launch technology, Beijing 100076, China; 2. Beijing precision mechanical and electrical control equipment research institute, Beijing 100076, China; 3. Yanshan University,

school of mechanical engineering, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the vibration control of the hydraulic pipe system, the semi-active vibration control of the hydraulic pipe was studied. A mathematical model of magnetorheological fluid output damping force was established by means of mechanism modeling for the sensitivity analysis of MR fluid design parameters. Aiming at 10 design parameters related to the structure and characteristics of MR damper, the first and the second-order output sensitivity equations were established, and the first-order and second-order output sensitivity function expressions were obtained. Based on Matlab software, the corresponding first-order and second-order output sensitivity functions were solved, the influence degree of each parameter variation on the dynamic characteristics of the system was analyzed. The results indicate that when the parameters change by 10%, combining two sensitivity indexes, the three design parameters of the excitation coil turns, the core cross-sectional area and the gap between the outer cylinder and the piston cylinder cause the maximum percentage change of the output damping force. **Key words**; vibration control; magnetorheological (MRF) damper; sensitivity analysis; sensitivity equation

收稿日期:2018-01-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375423)

作者简介:安晨亮(1978-),男,河北张家口人,硕士研究生,高级工程师,主要从事航天发射技术液压系统开发应用方面的研究。E-mail:an-chl2012@163.com

通信联系人:权凌霄,男,副教授,硕士生导师。E-mail:lingxiao@ysu.edu.cn

0 引 言

振动是普通工业、航空航天等装备领域中普遍存 在的现象^[1-2],如果得不到有效控制,会严重影响装备 的寿命及可靠性,因此,振动控制技术研究十分重 要^[3]。

振动控制可以分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制4类。近年来,随着智能材料的快速发展,利用记忆合金、压电陶瓷、电流变液及磁流变液等智能材料实现半主动振动控制逐渐得到重视,并形成了很多应用成果^[4]。

磁流变阻尼器以磁流变液为主要阻尼材料,其结构简单、响应速度快、阻尼力控制范围较大,能够适应 宽频振动信号的控制,且不需要过多的外部能源接入, 具有更好的控制效果,并逐步得到广泛应用^[5]。虽然 国内外学者对磁流变阻尼器原理,流变特性的研究和 开发磁流变液新的应用等方面取得了丰硕的成果,但 其输出阻尼力变化对每一个的设计参数变化敏感程度 的研究还较少。影响磁流变液输出阻尼力的参数很 多,其中包括阻尼器控制电流、活塞运动速度、励磁线 圈的匝数、活塞的有效长度等因素,依据实际工况条 件,定性地分析每个参数对磁流变阻尼器输出阻尼力 的影响,并定量地掌握所有参数对阻尼特性的影响,结 合结构参数优化理论,可得到磁流变阻尼器结构参数 优化方法^[67]。

磁流变阻尼器的数学模型较为复杂,采用传统的 分析方法难以反映出其非线性问题,使得各参数的定 量分析结论难以获取。灵敏度分析首先应用在数学领 域中,主要用于分析参数变化引起微分方程解的变化。 具体的分析方法是:将微分方程组的特征值、特征向量 作为含有参数的多元函数,直接将它们对参数进行微 分运算^[89]。由于现代控制理论发展的需要,在诸多控 制领域中引入灵敏度分析,研究外干扰对系统性能的 影响,并取得了很好的分析效果。灵敏度分析是一种 能定量分析系统各参数变化对系统特性影响权重的有 效方法,将其运用于磁流变阻尼器能够很好地解决这 一难题。

本文将一阶和二阶输出灵敏度应用于磁流变液振 动控制系统的分析中,建立磁流变液输出阻尼力的数 学模型,研究一阶和二阶输出灵敏度分析方法理论模 型,进而求解出一阶和二阶输出灵敏度分析方法的表 达式,对比活塞运动速度和控制电流等10个参数灵敏 度分析结果的异同点,进行理论分析,得出10个参数 对输出阻尼力的影响程度。

1 磁流变液输出阻尼力的数学建模

1.1 研究对象



当活塞内的励磁线圈通入电流时,在活塞头内部 的导磁体会产生磁场,贯穿环形阻尼孔到外套筒再返 回到活塞中,形成一闭合磁路。此时流经环形阻尼孔 内的磁流变液发生磁化,致使活塞运动时产生较大的 剪切屈服应力,从而形成一定的阻尼力,通过控制磁流 变液阻尼器的电流可用来控制阻尼力大小。

为了得到更多影响磁流变液输出阻尼力的参数, 本文采用的数学建模方法以伪静力模型和 Bingham 模 型为基础。为了计算方便,减少变量数,进行简化:

(1)认为磁流变液不可压缩;

(2)认为温度对阻尼器性能影响很小;

(3)认为零场作用时磁流变液具有较低的黏度;

(4)认为铁芯材料不存在剩磁,磁滞回线包含面积小,矫顽力低,且无涡流损失和磁滞损失。

1.2 流体微分方程推导

磁流变液流变特性可简化为在两相对运动的平板 之间的流动,平板模型如图2所示。



图 2 环形间隙中的流速分布图 g—两平板之间的间隙;v—平板的相对运动速度

本研究建立如图 2 所示的坐标系,磁流变液以体 积流速 Q 在 x 方向上一维流动,在 y 方向不流动,由流 体力学可得出微分方程:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial x}{\partial y} \right)$$
(1)

式中:u,v— 磁流变液在x,y方向上的流动速度; $\partial\sigma_{xx}/\partial x$ — 磁流变液在x方向的压力梯度; ρ — 磁流变 液的密度;t— 时间变量。 为了简化,将压力梯度简化为 x 方向按线性变化, 则得到 $\partial \sigma_{xx}/\partial x = -\Delta p/l$;当流动速度较低时,可不计惯 性效应,则有 $\partial u/\partial t = 0$;令沿 x 方向的剪切应力 $\tau_{yx} = \tau$, 由于磁流变液流动的连续性,沿 x 方向的速度不变,则 有 $\partial u/\partial x = 0$ 。

通过以上简化,基于平面 Poiseuille 流动^[10],可将 式(1)简化为:

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}y} = \frac{\Delta p}{l} \tag{2}$$

式中:*l*— 阻尼通道的长度;Δ*p*— 阻尼通道两端的 压差。

1.3 Bingbam 流体流动分析

在外加磁场作用下,磁流变液表现为 Bingham 流体,在平行板间流动时,则有:

$$\begin{cases} \tau = \tau_{y} \operatorname{sgn}\left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\right) + \eta \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} & (\tau > \tau_{y}) \\ \dot{\gamma} = \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = 0 & (\tau < \tau_{y}) \end{cases}$$
(3)

式中: τ — 流体的剪切应力, $Pa;\tau_{y}$ — 磁致剪切屈服应 力, $Pa;\eta$ — 磁流变液表观粘度系数, $Pa \cdot s;\gamma$ — 流体的 剪应变率,Pa/s;H— 磁场强度, T_{o}

理论上剪切屈服强度与磁感应强度可近似描述如 下^[11]:

$$\tau_{y} = 152B - 11.4 \tag{4}$$

在平板模型中,磁流变液受到的剪切应力沿平板间隙是按线性分布的,因此,可以将磁流变液的流动分为3个区域,其流动速度分别用 *u*₁、*u*₂ 和 *u*₃ 表示,其边界条件分别为:

$$\begin{split} & [\underline{\nabla} \underline{\psi}] : 0 \leq y \leq y_1, \tau = \tau_y + \eta (du_1/du_2), u_1(0) = \\ & 0, du_1(y_1)/dy = 0; [\underline{\nabla} \underline{\psi}] : y_1 \leq y \leq y_2, du_2(y_1 < y < \\ & y_0)/dy = 0, \tau(y_1) = -\tau_y, \tau(y_2) = \tau_y; [\underline{\nabla} \underline{\psi}] : y_2 \leq y \leq \\ & g, \tau = -\tau_y + \eta (du_1/dy), u_3(g) = -v, du_3(y_2)/dy = 0_{\circ} \\ & f [\underline{\nabla} \underline{\psi}] : \psi = \psi + \psi + \psi + \psi + \psi = 0 \end{split}$$

在区域 ① 中,将 τ 代入控制微分方程(2) 可得:

$$\eta \, \frac{\mathrm{d}^2 u_1}{\mathrm{d}y^2} = \frac{\Delta p}{l} \tag{5}$$

由边界条件求解式(5),可得到区域①的流速为:

$$u_{1} = \frac{\Delta p}{2\eta l} (y^{2} - 2y_{1}y)$$
(6)

同理,可求得区域②的流速为:

$$u_2 = -\frac{\Delta p}{2\eta l} y_1^2 \tag{7}$$

区域③的流速为:

$$u_{3} = \frac{\Delta p}{2l\eta^{2}} (\eta y^{2} - 2y_{2}y + 2gy_{2} - g^{2}\eta) - v \quad (8)$$

利用控制微分方程(2)与边界条件: $\tau(g/2) = 0, \bar{x}$

解出磁流变液剪切应力的分布为 $\tau = \Delta p / (2l(2y - g))_{\circ}$ 由 $\tau(y_1) = -\tau_y, \tau(y_2) = \tau_y, \eta$ 得:

$$y_1 = \frac{g}{2} - \frac{l\tau_y}{\Delta p} \tag{9}$$

$$y_2 = \frac{g}{2} + \frac{l\tau_y}{\Delta p} \tag{10}$$

刚性流动区的厚度 δ 为:

$$\delta = y_2 - y_1 = \frac{2l\tau_y}{\Delta p} \tag{11}$$

引入一个非量纲因子,即:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{g} = \frac{2l\tau_y}{g\Delta p} \tag{12}$$

再将式(12)代入式(9,10)中,可得:

$$y_1 = \frac{g}{2}(1 - \bar{\delta}) \tag{13}$$

$$y_2 = \frac{g}{2}(1+\bar{\delta}) \tag{14}$$

两平板间隙中的磁流变液的体积流量 Q 关系式为^[12]:

$$Q = \int_{0}^{y_{1}} bu_{1} dy + \int_{y_{1}}^{y_{2}} bu_{2} dy + \int_{y_{2}}^{g} bu_{3} dy \qquad (15)$$

$$Q_{1} = \int_{0}^{y_{1}} bu_{1} dy = -\Delta p b y_{1}^{3} / (3l\eta) ,$$

$$Q_{2} = -\Delta p b y_{1}^{2} (y_{2} - y_{1}) / (2l\eta) ,$$

$$Q_{3} = (\Delta p b / (2l\eta^{2}(g - y_{2})) \left[\frac{1}{3} \eta (g^{2} + gy_{2} + y_{2}^{2}) - y_{2}^{2} + gy_{2} - g^{2} \eta - 2l \eta^{2} v / \Delta p \right]_{0}$$

$$H H \phi h t d\psi \phi dt I = H \phi \phi \phi \phi H = 1 t dt$$

根据流体力学连续性原埋, 磁流变液阻尼力为:

$$F = -\Delta pA \tag{16}$$

并有以下关系式:

$$Q = Av \tag{17}$$

式中:A— 活塞作用面积,A = $(\pi/4)(D^2 - d^2),b = \pi(D+g)$

1.4 磁路计算

为了简化计算,假设阻尼器铁芯的磁导率为一定 值,并忽略漏磁效应和摩擦损失。

磁路的磁阻 $R_{\rm m}$,磁通 φ 和磁势 $F_{\rm f}$ 有以下关系:

$$F_{\rm f} = R_{\rm m}\varphi \tag{18}$$

磁势 F_{f} 又可以表示为:

$$F_{\rm f} = NI(AT) \tag{19}$$

$$B = \mu H \tag{20}$$

式中:B-磁感应强度;µ-铁芯磁导率。

磁通量公式为:

$$\varphi = BS \tag{21}$$

式中:S-- 铁芯的横截面积。

综合(18~21),可得出磁场强度:

$$H = \frac{NI}{\mu R_{\rm m} S} \tag{22}$$

假设磁路平均长度为L(m),相对磁导率为 $\mu_{\rm B}$,则 磁阻 R_m 可以表示为:

$$R_{\rm m} = L/(\mu S) = (l/(\mu_{\rm R}\mu_0 S))(AT/(Wb))$$

根据阻尼器铁芯的结构特点,将磁路分为3个部 分进行分析^[13],导磁体磁阻计算图如图3所示。



图 3 导磁体磁阻计算图

区域①、区域②与区域③组成导磁体,与工作间 隙组成闭合磁路。磁流变液的线圈电流是由励磁电流 和铁损电流组成,当振动频率不大时可将线圈电流看 成励磁电流,各区域的磁阻为,

区域①:
$$R_{m_1} = \frac{l - 2b_0}{\frac{\pi}{4}\mu(D - 2h)^2}$$
 (23)

区域②:
$$R_{m_2} = \frac{D}{\mu D \pi b_0} = \frac{1}{2\mu \pi b_0}$$
 (24)

区域③:
$$R_{m_3} = \frac{l - b_0}{\mu_r \pi \left(D + g + \frac{a}{2} \right) a}$$
 (25)

磁流变液的磁阻近似为.

$$R_{\rm MR} = \frac{\ln\left(1 + \frac{2g}{D}\right)}{2\mu_0\mu_{\rm MR}\pi b_0} \tag{26}$$

式中:µ,—工作缸材料的磁导率;µм-磁流变液的相 对磁导率, *µ*_{MB} = 2.5。

总磁阻可近似为:

$$R_{\rm m} = R_{\rm m_1} + 2R_{\rm m_2} + R_{\rm m_3} + R_{\rm MR}$$
(27)
综上所述,可以得到阻尼力公式:

$$H_3F^3 + H_2F^2 + H_1F + H_0 = 0$$
(28)
其中:

 $-3blgv\eta^2)/A^3$.

$$H_{3} = -((9/4)bg^{3} - (3/2)\eta bg^{3} - 6Avl\eta^{2} - 3blgv\eta^{2})/A^{3},$$

$$H_{2} = ((15/4)bl\tau_{y}g^{2} + (13/4)b\eta l\tau_{y}g^{2} - (3/2)b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} - (3/2)b\eta g^{3} - (3/2)b\eta g$$

$$6bv\tau_{y}l^{2}\eta^{2})/A^{2},$$

$$H_{1} = (7\eta bgl^{2}\tau_{y}^{2} + 9bgl^{2}\tau_{y}^{2} - b\eta l^{2}\tau_{y}^{2})/A,$$

$$H_{0} = l^{3}\tau_{y}^{3}(b\eta - 2\eta + 3b)_{\circ}$$

磁流变液输出阻尼力一阶灵敏度 2

2.1 一阶灵敏度函数推导

本文主要分析磁流变液输出阻尼力对系统模型中 10个参数的输出灵敏度。系统各参数的输出灵敏度方 程的表达式为:

$$\dot{\lambda}_{\alpha} = f(\boldsymbol{\alpha}, t) \tag{29}$$

式中: α —所研究的参数; λ_{α} —每个参数的一阶灵敏 度:t-时间。

 α 取 10 个参数, 即: $\alpha = \lceil \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8 \rceil$ $\alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}$

其中:磁流变液阻尼器控制电流 α, 和活塞运动速 度 α, 可影响最终输出阻尼力, 其值可以根据实际工况 而调整;励磁线圈匝数 α_3 、铁芯的横截面积 α_4 ,铁芯的 磁导率 α_5 和磁流变液表观粘度系数 α_6 ,均会影响剪切 屈服应力,进而影响输出阻尼力的大小;外筒和活塞杠 之间的间隙 α_1 ,活塞阻尼环内径 α_8 的大小,活塞轴直 径 α, 的大小和活塞的有效长度 α, 10 的设定均会影响输 出阻尼力的大小。

笔者对阻尼力方程(28)中的阻尼力F对各参数α 求一阶偏导,通过 Matlab 软件的仿真计算,可得到各 参数的一阶输出灵敏度函数:

$$\begin{split} \dot{\lambda}_{\alpha_{1}} &= \frac{\partial F}{\partial \alpha_{1}} = \left[3A^{3}l^{3}\tau_{y}^{2}(2\eta - b\eta - 3b)\left(\frac{I + e}{14\ 580} + 1\ 281\right) + \\ 2A^{2}\tau_{y}F(7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \cdot \left(\frac{I + e}{14\ 580} + 1\ 281\right) + \\ AF^{2}\left(\frac{15}{4}blg^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2}\right)\left(\frac{I + e}{14\ 580} + 1\ 281\right) \right] \\ \left[A^{2}(7\eta bgl^{2}\tau_{y}^{2} + 9bgl^{2}\tau_{y}^{2} - b\eta l^{2}\tau_{y}^{2}) + 2AF\left(\frac{15}{4}bl\tau_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6bv\tau_{y}l^{2}\eta^{2}\right) - 3F^{2}\left(\frac{9}{4}bg^{3} - \frac{3}{2}\eta bg^{3} - 6Avl\eta^{2} - 3bglv\eta^{2}\right) \right]^{-1} \end{split}$$
(30)

式中:A—活塞作用面积,b = $\pi(D+g)$; τ_x —磁致剪切 屈服应力;η—磁流变液表观粘度系数;I—磁流变液 控制电流;g--外筒和活塞杆之间的间隙;v--活塞运 动速度;1—活塞有效长度;F—磁流变液输出阻尼力。

由于篇幅有限,本文仅给出控制电流的一阶输出 灵敏度函数。

2.2 一阶灵敏度函数仿真

基于计算出的一阶输出灵敏度方程,本研究在 Matlab软件主界面中进行编程。磁流变液输出阻尼力 输出灵敏度函数曲线如图4所示。



从图4中可以看出:α₂、α₆和α₁₀都会对系统输出 阻尼力变化产生影响^[14],其他7个参数在整个调整时 间内都对系统动态产生较大影响,对系统稳态影响相 对较小,在采样时间末会趋于稳定。α₂的变化会引起 阻尼器内高压腔流至低压腔流量的变化从而导致阻尼 力的变化,α₆的改变会增加零磁场强度时的输出阻尼 力,α₁₀的增加能使得磁流变液流过的阻尼孔长度变大 而增加阻尼力,使磁阻变大导致磁场强度降低,进而导 致磁流变液的剪切力减小,因而这3个参数都能持续 对系统稳态造成影响,最终没有趋于稳定。而其余参数 的变化对系统稳态影响相对较小,在采样时间末趋于 稳定。

2.3 一阶输出灵敏度分析

图 4 中,一阶输出灵敏度函数时程曲线描述了参数 α 对磁流变液阻尼器输出阻尼力 F 影响的动态变化 过程,为量化参数 α 变化对阻尼力 F 变化的影响程度, 定义两种灵敏度衡量指标。

将磁流变液阻尼器输出阻尼力的变化量 ΔF 与参数变化之前最大阻尼力的百分比,用于衡量各个参数变化对阻尼力 F 的影响程度。该百分比的表达式为:

$$\frac{\Delta F_i}{F_{\max}} \times 100\% = \frac{\dot{\lambda}_{\alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i}{F_{\max}} \times 100\%$$
(31)

本研究把该百分比的最大值定义为峰值灵敏度指标,用 *s*₁ 表示,其表达式为:

$$s_{1} = \frac{\mid \Delta F_{i} \mid}{F_{\max}} \Big|_{\max} \times 100\% = \frac{\mid \dot{\lambda}_{\alpha_{i}} \mid \cdot \Delta \alpha_{i}}{F_{\max}} \Big|_{\max} \times 100\%$$
(32)

为了衡量在采样时间内各参数变化对阻尼特性影响的总体程度,本研究将 λ_{α_i} · $\Delta\alpha_i$ 在采样时间内对时间 t 的积分定义为均值灵敏度指标,用 s_2 表示,其表达式为:

$$s_2 = \int_0^{t_0} |\dot{\lambda}_{\alpha_i}| \cdot \Delta \alpha_i \mathrm{d}t \qquad (33)$$

通过定义两种灵敏度衡量指标,可定量分析参数 α的变化对磁流变液阻尼器输出阻尼力 F 的影响 程度。

根据式(31) 计算得出各参数变化 10% 时,采用 柱形图的方式表达参数的一阶输出灵敏度的峰值灵敏 度指标和均值灵敏度指标量化结果,如图 5 所示。



从图5中可以看出:

(1) 励磁线圈匝数 α₃、铁芯的磁导率 α₅ 和外筒和 活塞之间的间隙 α₇ 所占比例较大,峰值灵敏度指标数 值在 40% 以上,均值灵敏度指标数值皆大于 60 N,可 以看出这 3 个参数变化 10%,可以使阻尼力的变化很 大;

(2)铁芯的磁导率 α,的两项灵敏度指标都很大, 在设计磁流变液阻尼器时要首先考虑的因素,特别是 其峰值灵敏度指标数值很大,说明该参数可以使得阻 尼力变化瞬间变得很大,为避免阻尼力过大损坏磁流 变液阻尼器,所以在选用磁芯材料时应该将铁芯的最 大磁导率作为选择材料的主要依据。同时,励磁线圈匝 数 α,和外筒和活塞之间的间隙 α,的两项灵敏度指标 都很大,其参数也是在设计磁流变液阻尼器时需要着 重考虑;

(3)由于文章篇幅有限,当参数变化1%和20%时,参数变化引起的输出阻尼力变化趋势与参数变化10%结论相同。

3 磁流变液输出阻尼力二阶灵敏度

3.1 二阶灵敏度函数推导

由于本文只为求解得出单个参数对阻尼特性的影 响权重,将阻尼力 F 对参数 α 的二阶输出灵敏度函数 定义为:

$$\dot{\lambda}_{\alpha_i} = \frac{\partial \dot{\lambda}_{\alpha_i}^i}{\partial \alpha_i} \tag{34}$$

其物理意义为参数 α_i 的变化对参数 α_i 的变化引 起的阻尼力 F 的变化率的变化产生的影响,亦即 α_i 对 $\partial F / \partial \alpha_i$ 产生的影响。

为对比一阶灵敏度的分析结果,二阶输出灵敏度 函数求解的仿真条件与一阶求解时相同,在 Matlab 主 界面中进行编程,基于二阶输出灵敏度特殊表达式 (34)计算得出灵敏度函数。对阻尼力方程(28)中的 阻尼力 F 对个参数 α 求二阶偏导,可得到各参数的二 阶输出灵敏度函数:

$$\begin{split} \dot{\lambda}_{\alpha_{1}} &= \frac{\partial \dot{\lambda}_{\alpha_{1}}}{\partial \alpha_{1}} = \left\{ \left[6A^{3}l^{3}\tau_{y}(2\eta - b\eta - 3b) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 2A^{2}F(7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \cdot \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 2A^{2}\tau_{y}(7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 2AF\left(\frac{15}{4}blg^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 2AF\left(\frac{15}{4}blg^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 3AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 2AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right)^{2} + 3F\left(\frac{9}{4}bg^{3} - \frac{3}{2}\eta bg^{3} - 6Avl\eta^{2} - 3bglv\eta^{2} \right) \right] - \left[3A^{3}l^{3}\tau_{y}^{2}(2\eta - b\eta - 3b) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2A^{2}\tau_{y}F(7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blg^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) \right] \cdot \left[2A^{2}\tau_{y} \cdot (7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \right) \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blg^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \cdot \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) \right] \cdot \left[2A^{2}\tau_{y} \cdot (7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \right] \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta lg^{2} - 6bvl^{2}\eta^{2} \right) \cdot \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) \right] \cdot \left[2A^{2}\tau_{y} \cdot (7\eta bgl^{2} + 9bgl^{2} - b\eta l^{2}) \right] \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} \right) \cdot \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2A\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} \right) \cdot \left(\frac{l + e}{14 \, 580} + 1 \, 281 \right) + 2A\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} \right) + 2AF\left(\frac{15}{4}blr_{y}g^{2} + \frac{13}{4}b\eta l\tau_{y}g^{2} - \frac{3}{2}b\eta g^{3} - 6Avl\eta^{2} \right) + 2A$$

3.2 二阶灵敏度函数仿真

磁流变液输出阻尼力二阶输出灵敏度函数曲线如 图 6 所示。

从图6可以看出:除了活塞运动速度 α₂、磁流变液 表观粘度系数 α₆ 和活塞的有效长度 α₁₀ 在采样时间内 对系统的动态与稳态均产生影响之外,其他 7 个参数 在整个调整时间内都对系统动态产生较大影响,在采 样时间末开始趋向于平稳,这与一阶输出灵敏度分析 结果相近。

二阶输出灵敏度分析方法的两项灵敏度衡量指标 可表示为:

$$s_{1} = \frac{\left| \Delta F_{i} \right|}{F_{\max}} \left| \sum_{\max} \times 100\% \right| = \frac{\left| \dot{\lambda}_{\alpha_{i}} \cdot \Delta \alpha_{i} + \frac{1}{2} (\ddot{\lambda}_{\alpha_{i}}) \cdot \Delta \alpha_{i}^{2} \right|}{F_{\max}} \right|_{\max} \times 100\% \quad (36)$$

$$s_2 = \int_0^{t_0} \left| \dot{\lambda}_{\alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i + \frac{1}{2} (\ddot{\lambda}_{\alpha_i}) \cdot \Delta \alpha_i^2 \right| dt \quad (37)$$

为研究其与一阶输出灵敏度分析方法的异同点, 笔者将参数变化10%,将得到的系统各参数的两项灵 敏度对比柱形图合并,如图7所示。







从图7中可以看出:

(1) 励磁线圈匝数 α₃、铁芯的磁导率 α₅ 和外筒和 活塞之间的间隙 α₇ 对阻尼力变化最大值的百分比较 大,该结论与一阶输出灵敏度分析方法所得结果相 吻合;

(2)一阶输出灵敏度的两项灵敏度衡量指标值与 参数变化量成正比关系,而当考虑二阶输出灵敏度时, 两项灵敏度衡量指标值却与参数变化量不成成正比关 系,这是泰勒展开式决定的;

(3)两种灵敏度分析方法根据两项灵敏度衡量指标,量化所得结果变化规律是相似的。二阶输出灵敏度分析方法虽然相比一阶输出灵敏度分析方法精度更高,但是其求解难度大为提高,并且考虑到当参数变化较小时,两种灵敏度分析结果较为相近,所以当参数变化量较小时可只求解一阶输出灵敏度,得到参数对系统的影响程度。然而当参数变化量较大时,必须考虑二阶泰勒展开式的影响。因为一阶泰勒展开式能大概分析出各参数对阻尼力变化量影响权重趋势,而二阶泰勒展开式是对一阶泰勒展开式的补充,使得其分析结果更为准确,该结论与轨迹灵敏度泰勒展开式分析

4 结束语

本文以磁流变液为研究对象,使用一阶输出灵敏 度和二阶输出灵敏度两种灵敏度分析方法,研究了磁 流变液的10个参数灵敏度,力求为磁流变液的优化设 计及振动控制算法的完善提供基础。

本文以伪静力模型和 Bingham 流体模型为基础建 立了磁流变液阻尼力的数学模型,在此基础上推导出 了一阶输出灵敏度和二阶输出灵敏度的函数表达式, 对 10 个参数进行了灵敏度仿真分析。当参数变化量 相同时,活塞运动速度、铁芯的横截面积、磁流变液的 表观粘度系数、活塞轴直径和活塞的有效长度5个参 数使得磁流变液阻尼力变化较小,磁流变液阻尼器的 控制电流和活塞阻尼环内径引起阻尼力变化相对较 大,而励磁线圈匝数、铁芯的磁导率和外筒和活塞之间 的间隙引起阻尼力变化很大,设计磁流变液阻尼器时 需要着重考虑。

本研究所得到的理论模型和分析方法可为磁流变 液阻尼器阻尼力建模、磁流变液阻尼器的设计及半主 动振动控制算法的完善提供参考。

参考文献(References):

- [1] 李硕卫,张国贤.现代液压技术的发展现状[J].机械工程 师,2009(2):54-57.
- [2] 权凌霄,孔祥东,俞 滨,等.液压管路流固耦合振动研究 现状及发展趋势[J].机械工程学报,2015,51(18):1-6.
- [3] 刘 伟,刘永寿,姜志峰,等.液压源管路系统随机压力脉动可靠性研究[J].振动与冲击,2011,30(6):265-268.
- [4] SHORTER P J. Wave propagation and damping in linear viscoelastic laminates [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2004, 115 (5):1917-1925.
- [5] MAZLAN S A, ISMAIL I, ZAMZURI H, et al. Compressive

and tensile stresses of magneto-rheological fluids in squeeze mode[J]. Int. J. Appl. Electrom, 2011(36):327-337.

- [6] 贾鹏飞,刘亚俊,蒋征学.基于变频的液压系统溢流结构 优化[J].液压与气动,2010(11):9-12.
- [7] 贾文华,殷晨波,曹东辉.基于 AMESim/Matlab 的液压换
 向阀的优化设计[J].机床与液压,2013,41(15):182-183.
- [8] 庞碧君,刘麦学.正态随机规划的确定性规划及其灵敏度 分析[J].数学的实践与认识,2007,37(1):66-71.
- [9] 潘意志,曹明华.线形分式规划消耗系数矩阵灵敏度分析 及应用[J].数学的实践与认识,2006,36(5):274-278.
- [10] 曹建国,富丽娟,邓国红,等. 汽车磁流变液减振器的力 学特性分析. 矿山机械,2005,33(8):41-44.
- [11] 兰文奎. 磁流变减振器设计及实验研究[D]. 重庆:重庆 大学汽车工程学院,2007.
- [12] 马 然,朱思洪,梁 林,等.磁流变减振器建模与试验
 [J].机械工程学报,2014,50(4):135-141.
- [13] 邹继斌. 磁路与磁场[M]. 哈尔滨,哈尔滨工业大学出版 社,1998.
- [14] 杨淮楠,麦云飞.弹性支撑颗粒碰撞阻尼的设计与实验研究[J].轻工机械,2017,35(2):16-19.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

安晨亮,马金玉,王嘉维,等. 磁流变阻尼器输出阻尼力灵敏度分析[J]. 机电工程,2018,35(11):1137-1144.

AN Chen-liang, MA Jin-yu, WANG Jia-wei, et al. Sensitivity analysis of output damping force based on magnetorheological damper[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(11):1137-1144. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn