DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.005

# 冲击载荷下磁流变变刚度变阻尼缓冲系统减振控制

董小闵<sup>1,2</sup> 余 淼<sup>2</sup> 廖昌荣<sup>2</sup> 陈伟民<sup>2</sup> (1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

【摘要】 针对传统缓冲着陆装置阻尼刚度不可调节的局限性,提出采用基于磁流变技术的自适应变阻尼变刚 度缓冲装置。首先从理论上研究了采用磁流变阻尼器实现刚度阻尼等效控制的原理,分析了刚度阻尼调节范围; 进而设计了基于能量守恒原理和天棚阻尼控制技术的飞行器缓冲着陆的自适应控制器,最后通过数值分析考察缓 冲器和控制策略的有效性。分析结果表明,与被动缓冲装置相比,基于磁流变技术的缓冲装置不仅能降低着陆冲 击过程的峰值载荷,而且需要的行程也较小,表明设计的缓冲装置和控制策略是有效的。

关键词:磁流变液 半主动控制 变刚度 冲击载荷
中图分类号: U463.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0020-05

## Absorbing Control of Magneto-rheological Variable Stiffness and Damping System under Impact Load

Dong Xiaomin<sup>1,2</sup> Yu Miao<sup>2</sup> Liao Changrong<sup>2</sup> Chen Weimin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Key Lab of Optoelectronic Technology and System of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

### Abstract

To overcome the limitation of traditional absorber systems with invariable damping and stiffness characteristics which can only achieve good absorbing performance under designed conditions, a new absorber based on two magneto-rheological (MR) dampers was proposed to realize the variable damping and stiffness characteristics. As the first step, the theory of variable damping and stiffness characteristics of the proposed absorber was analyzed, and the adjustable range of variable damping and stiffness was also analyzed. Then an adaptive controller based on the energy principle and skyhook control was developed. Finally, a numerical simulation was performed to validate the proposed absorber and the controller. The simulations show that the absorbing system based on the MR absorber could greatly reduce the peak impact load of sprung mass with smaller stroke of absorbing system. Moreover, it has better performance than passive absorbing system, which shows that the absorber based on MR variable stiffness and damping is feasible in practice.

Key words Magneto-rheological fluid, Semi-active control, Variable stiffness, Impact load

引言

飞行器的缓冲装置是吸收和耗散着陆过程产生 能量的主要部件,其吸收耗散能量的能力大小直接 关系到宇航员与重要仪表的安全。因此,提高缓冲 装置的性能具有非常重要的意义。

目前采用着陆缓冲装置都属于被动隔离方式, 有缓冲降落伞、缓冲气囊和机械可压缩装置3种形

收稿日期:2009-04-20 修回日期:2009-07-27

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(60804018、50830202)、重庆市自然科学基金资助项目(2008BB6184)和中国博士后科学基金特别资助项目 (200902292)

作者简介: 董小闵,副教授,博士后,主要从事智能机械结构及控制研究, E-mail: xmdong@ cqu. edu. cn

式<sup>[1]</sup>,这些缓冲装置具有结构简单、质量轻、维修简 单以及安全性好等特点,并获得了大量的应用。但 是,这些装置通常根据理想的设计条件(如高度、着 陆速度等)来确定装置的特性参数(如阻尼和刚 度),一旦着陆条件偏离设计条件,其缓冲性能则很 难满足要求。因此,为了克服传统缓冲装置的不足, 有必要研究能够根据环境变化自适应调节系统刚度 和阻尼的缓冲装置。

近年发展起来的磁流变阻尼技术为实现这种自 适应缓冲装置提供了可能<sup>[2]</sup>。基于磁流变阻尼技 术的执行器件由于具有阻尼连续可调、结构简单、功 耗低、动态范围宽等特点,受到了大量研究人员的重 视,国内外的研究人员也开始将磁流变技术应用于 飞机起落架<sup>[3-6]</sup>,但大多数研究集中于阻尼的调节, 局限性非常明显,因为飞行器着陆缓冲时,持续时间 非常短(几十毫秒内),飞行器最大的最大动态载荷 通常发生在前几个周期,仅仅调节阻尼是不够的,还 需要能自适应调节刚度。但传统的刚度调节属于主 动控制的范畴,存在结构复杂,能耗大等缺点,应用 受到限制。

为此,本文在对磁流变技术研究的基础上<sup>[7]</sup>, 提出将磁流变半主动控制技术用于缓冲器设计,实 现阻尼刚度的同时调节。

## 1 基于磁流变技术的变刚度变阻尼原理分析

飞行器缓冲着陆冲击过程的力学模型可简化为 一个二自由度的动力学模型,如图 1a 所示,模型包 括簧载质量 m<sub>s</sub>、非簧载质量 m<sub>u</sub>、磁流变阻尼器 c<sub>1</sub> 和 c<sub>2</sub> 以及弹簧 k<sub>s1</sub>、k<sub>s2</sub>以及 k<sub>u</sub>。这里磁流变阻尼器 2 和 一个弹簧并联,与前期的汽车磁流变阻尼器具有相 似的结构,如图 2 所示。

阻尼器具有双通道结构,处于混合工作模式。 当活塞左右运动时,磁流变液流过内筒和活塞之间 的径向通道而产生阻尼。当输入励磁磁场发生变化 时,磁流变液流变特性发生变化,从而产生可控的阻 尼力,经过理论推导和前期对磁流变阻尼器的工作





Fig. 1 Two degrees of freedom model of variable stiffness and damping and its equivalent model



图 2 磁流变阻尼器结构原理图

Fig. 2Schematic diagram of magneto-rheological damper1. 活塞杆2. 外筒3. 内筒4. 活塞5. 线圈6. 磁流变液

特性测试,其阻尼力  $F_d$  与活塞运动的相对速度 v、激励电流 I 的关系可以表示为<sup>[8]</sup>

$$F_d = c_s v + F_{MR} \operatorname{sgn} v \tag{1}$$

$$F_{MR} = aI^2 + bI + c \tag{2}$$

式中 c<sub>s</sub>——粘滞阻尼系数

F<sub>MR</sub>——库仑阻尼力

a、b、c——由试验数据拟合得到的常数

由式(1)可知,磁流变阻尼器的阻尼力由粘滞 阻尼力和库仑阻尼力组成,当阻尼器几何尺寸确定 后,粘滞阻尼力只是活塞运动速度的函数,不可控。 而库仑阻尼力则是励磁电流的函数,因此可通过调 节输入阻尼器的励磁电流大小实现阻尼力的调节, 实现阻尼系数的变化。以下为了简化分析,将两支 磁流变阻尼系数分别记为 c<sub>1</sub> 和 c<sub>2</sub>。由前期的试验 测试可知,磁流变阻尼器的基值阻尼系数(或最小阻尼 系数)500 N·s/m,最大阻尼系数为3 500 N·s/m。

图 1b 表示飞行器缓冲着陆冲击过程的等效模型,模型具有等效的阻尼系数 c<sub>s</sub> 和刚度 k<sub>s</sub>。根据牛顿第二定律,图 1 的动力学方程分别为

$$m_{s} \ddot{z}_{s} - c_{1} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) - k_{s2} (z_{s} - z_{m}) - c_{2} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{m}) = 0$$
(3)

$$m_{u} \ddot{z}_{u} + c_{1} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) + k_{s1} (z_{m} - z_{u}) - k (z_{m} - z_{u}) = 0$$
(4)

$$k_{s2}(z_{s} - z_{m}) + c_{2}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{m}) - k_{s1}(z_{m} - z_{n}) = 0$$
(5)

$$m_{s}\ddot{z}_{s} - c_{s}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) - k_{s}(z_{s} - z_{u}) = 0$$

$$m_{u}\ddot{z}_{u} + c_{s}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) + k_{s}(z_{s} - z_{u}) -$$
(6)

$$k_u(z_u - z_r) = 0 \tag{7}$$

利用 Laplace 变换,可求图 1a 及等效力学模型 图 1b 的簧载质量位移与输入位移激励之间的传递 函数表达式分别为

$$\frac{z_s}{z_r} = \frac{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4}{b_1 s^6 + b_2 s^5 + b_3 s^4 + b_4 s^3 + b_5 s^2 + b_6 s + b_7} (8)$$
$$\frac{z_s}{z_r} = \frac{c_s k_u s + k_s k_u}{m_s s^4 + (m_s c_s + m_u c_s) s^3 + (m_s k_s + m_s k_u + m_u k_s) s^2 + k_u c_s s + k_s k_u} (9)$$

 $m_{\mu}$ 

其中  

$$a_1 = c_1c_2^2k_u$$
  
 $a_2 = c_2^2k_uk_{s1} + 2c_1c_2k_uk_{s1} + 2c_1c_2k_uk_{s2}$   
 $a_3 = c_1k_{s1}^2k_u + c_2k_uk_{s1}^2 + 2c_2k_uk_{s2}k_{s1} + c_1k_{s2}^2k_u + 2c_1k_{s1}k_uk_{s2}$   
 $a_4 = k_{s1}k_uk_{s2} + k_{s1}k_{s2}^2k_u$   
 $b_1 = m_sc_2^2m_u$   
 $b_2 = 2m_sc_2m_uk_{s2} + m_sc_2^2c_1 + 2m_sc_2m_uk_{s1} + c_1c_2m_u$   
 $b_3 = c_2^2k_{s1}m_u + m_sk_{s2}^2m_u + 2c_1c_2m_uk_{s1} + 2c_1c_2m_uk_{s2} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + m_sc_2^2k_{s2} + c_1k_{s2}^2m_u + k_{s1}^2c_2m_u + 2c_1c_2k_{s2} + m_sk_{s1}^2m_u + 2c_1c_2k_{s2} + m_sk_{s1}^2m_u + 2m_sk_{s1}m_uk_{s2} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + m_sc_2^2k_u + 2c_1^2c_2^2$   
 $b_4 = m_sk_{s2}^2c_1 + 3c_1c_2k_{s1} + c_2c_1 + 4c_1^2c_2k_{s1} + 4c_1^2c_2^2k_{s2} + c_1k_{s2}^2m_u + k_{s1}^2c_2m_u + c_1c_2^2k_u + 2m_sc_2k_uk_{s2} + 2c_1k_{s1}m_uk_{s2} + m_sk_{s1}^2c_1 + 2m_sc_2k_{s1}k_{s2} + 2m_sk_{s1}c_1k_{s2} + 2m_sc_2k_{s1}k_{s2} + 2m_sk_{s1}c_1k_{s2} + 2m_sc_2k_uk_{s1}$   
 $b_5 = 3c_1k_{s1}^2c_2 + m_sk_{s1}^2k_u + k_{s1}k_{s2}^2m_u + 2m_sk_{s1}k_{s2} + 2c_1^2k_{s2}^2 - 2c_2c_1k_{s2} + k_{s1}^2c_2^2 - c_1c_2k_{s1} + 4c_1^2k_{s1}k_{s2} + 2c_1^2k_{s1}^2 + m_sk_{s1}^2k_{s2} + m_sk_{s1}^2k_{s2} + 2c_1^2k_{s2}^2 + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + 2c_1k_{s2}^2k_{s1} + 2c_1k_{s2}^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2k_{s2} + k_{s1}c$ 

$$\frac{z_{s}(jw)}{z_{r}(jw)} = \frac{k_{s}^{*}k_{u}+jw_{s}^{*}c_{s}k_{u}}{m_{u}m_{s}w^{4}-(m_{s}k_{s}^{*}+m_{s}k_{u}+m_{u}k_{s}^{*})w^{2}+k_{s}^{*}k_{u}-j[(m_{s}c_{s}^{*}+m_{u}c_{s}^{*})w^{3}+k_{u}c_{s}^{*}w]}$$
(10)

12

其中  

$$c_{s}^{*} = c_{1} + \frac{k_{s1}c_{2}}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$

$$k_{s}^{*} = k_{s1} - \frac{k_{s1}^{2}(k_{s1} + k_{s2})}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$

$$\frac{z_{s}(jw)}{z_{r}(jw)} =$$

$$\frac{k_{s}k_{u} + jw_{s}ck_{u}}{m_{u}m_{s}w^{4} - (m_{s}k_{s} + m_{s}k_{u} + m_{u}k_{s})w^{2} + k_{s}k_{u} - j[(m_{s}c_{s} + m_{u}c_{s})w^{3} + k_{u}c_{s}w]}$$
(11)

比较式(10)、(11)两式可得等效力学模型图 1b 对 应的阻尼系数和刚度系数为

$$c_{s} = c_{1} + \frac{k_{s1}^{2}c_{2}}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$
(12)

$$k_{s} = k_{s1} - \frac{k_{s1}^{2} (k_{s1} + k_{s2})}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$
(13)

如果再令  $\eta = \frac{k_{s2}}{k_{s1}}$ ,则式(12)、(13)可改写为

$$c_{s} = c_{1} + \frac{1}{\frac{(1+\eta)^{2}}{c_{2}} + \left(\frac{w}{k_{s1}}\right)^{2}c_{2}}$$
(14)

$$k_{s} = k_{s1} \left[ 1 - \frac{1 + \eta}{\left(1 + \eta\right)^{2} + \left(\frac{c_{2}w}{k_{s}}\right)^{2}} \right]$$
(15)

当激励频率一定时,对式(14)、(15)讨论如下:

(1) 图 1b 的等效刚度  $k_1$  与阻尼系数  $c_1$  无关, 而等效刚度 k, 和等效阻尼系数 c, 与串联的阻尼器 阻尼系数 c, 有非线性函数关系。

(2) 式(14)表明,当 $c_2 = 0$ 或∞时, $c_s = c_1$ ,当 $c_2$ 由零增加到∞时,c,将在c,基础上先增加后下降, 但始终大于 c1。

(3) 式(15)表明,当  $c_2 = 0$  时,  $k_s = \frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1} + k_{s2}}$ ,相 当于2个弹簧串联, $c_2 = \infty$ 时, $k_s = k_{s1}$ 。

由以上讨论可知,当调节串联的阻尼器阻尼系 数时,系统的等效阻尼和刚度将同时发生变化,串联 的阻尼器能调节的等效刚度的范围是  $\left[\frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1}+k_{s2}}\right]$  $k_{s_1}$ ] =  $\left[\frac{k_{s_1}}{1/n+1}, k_{s_1}\right]$ ,因此为了获得比较大的调节 范围,η值需要取得较小,但由于磁流变阻尼器2的 行程和簧载质量与非簧载质量之间行程的限制,不 能取得太小,本文取 0.5。由于串联的阻尼器对系 统的等效阻尼影响非单调,且不能单独调节,因此, 为了使系统能获得需要的阻尼,采用可调节的磁流 变阻尼器。总之,采用两个可调节阻尼的磁流变阻 尼器,可独立改变系统的阻尼和刚度。

图 3 给出了阻尼比 $\zeta_2$  对位移传递的影响,这里  $\zeta_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{mk_2}}, \text{ ft} @ \texttt{c} \zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{mk_1}} \land \texttt{T} @ \texttt{t}, \texttt{I} @ \texttt{b} \&$  $m_s = 100 \text{ kg}, m_u = 15 \text{ kg}, k_u = 161 900 \text{ N/m}, k_{s1} =$ 30 000 N/m,  $k_{c_2} = 15\ 000\ \text{N/m}$ ,  $c_1 = 1\ 000\ \text{N} \cdot \text{s/m}_{\odot}$ 图 3 可以看出,随着阻尼比ζ2 的增加,共振峰向高 频方向移动,因此可通过调节阻尼比ζ。来获得近似 于等效的刚度改变。

#### 2 控制器设计

飞行器的缓冲着陆过程中,由于高度、初始速度

其中





Fig. 3 Effect of damping ratio  $\zeta_2$  on displacement transfer

的不同(图4),地面传给飞行器的冲击载荷也不相同,缓冲器的目标就是要使飞行器在着陆时产生的冲击载荷尽可能小,以降低冲击载荷对飞行器上仪器的损坏。由于整个冲击过程持续时间短(仅几百甚至几十毫秒),对传感器、控制器和执行器要求比较高,采用传统基于阀式的阻尼器很难满足这种需要,磁流变阻尼器由于具有结构简单、响应速度快等特点<sup>[2]</sup>,因此可用于飞行器的缓冲着陆过程实时控制,为了充分发挥磁流变阻尼器的性能,采用有效的控制策略非常关键。



Fig. 4 Landing course of an aircraft with 2-DOF

在飞行器着陆过程中,冲击过程的能量部分转 化为弹性势能,部分耗散于阻尼器,最后振动能量均 通过阻尼器加以耗散。理论上希望振动能量在阻尼

器的一个行程内完全耗 散,这样飞行器就不会出 现反弹,同时,最大的冲击 载荷比较小,如图 5 所示。 为了使缓冲器效率达到最 大,即在理想状态下,满足 吸收完能量的同时,缓冲 器载荷最好为一恒定值, 即 $F = F_{max2}$ ,沿图 5 中曲 线 2 进行。为此,本文基 于能量守恒原理和天棚阻 尼控制,将强冲击能量分 布在相对更宽的时间(或



缓冲器行程)内,在区域 *A*、*B*、*C* 应采取不同的控制 策略。

## 2.1 目标加速度设定

由于簧载质量加速度与其冲击载荷有一一对应 的关系,在有限的行程 S<sub>max</sub>之内以缓冲器的效率达 到最大为控制目标,即在理想状态下(图5),忽略非 簧载质量的动能和势能,满足吸收完所需吸收的能 量的同时,缓冲器的载荷为恒定值,即

$$a_{\rm set} = F/m_s = \frac{1}{2} v_0^2 / S_{\rm max}$$
 (16)

## 2.2 阻尼控制策略

缓冲着陆过程时间短,这给控制策略的设计带 来了很大的挑战,应用复杂的控制策略会带来传感 和计算困难,本文采用经典的天棚阻尼控制策略以 获得理想的减速度。当簧载质量测量加速度小于设 定值时(对应于图 5 中区域 A 和 C),采用大的阻尼 值,使簧载质量测量加速度迅速逼近理想加速度值, 当簧载质量测量加速度大于设定值时(对应于图 5 中区域 B),应采用尽可能小的阻尼值以使簧载质量 测量加速度维持在设定值。考虑到磁流变阻尼器阻 尼力的可实现性,控制规律总结为

$$c_{1} = \begin{cases} c_{1\max} & (a_{ms} < a_{set} \coprod \dot{z}_{s} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) > 0) \\ c_{1\min} & (a_{ms} \ge a_{set} \nexists \dot{z}_{s} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) \le 0) \end{cases}$$
(17)  
$$+ c_{1\max} c_{1\min} - \overleftarrow{a} \overleftarrow{a} \overleftarrow{b} \nexists a a_{set} \nexists a_{set} \# a_{set$$

数和基值阻尼系数

a<sub>ms</sub>——簧载质量测量加速度

## 2.3 等效刚度控制策略

式

刚度对于缓冲效果影响比较大,理想情况下,刚 度越小越好,这样可获得小的冲击载荷,但这会带来 振动能量不能迅速衰减,出现反复振动,同时受制于 实际缓冲器的工作行程,刚度系数也不能取得太小。 一般来说,对于确定的着陆条件都有最优的刚度系 数,Leitmann根据能量守恒原理提出了一种变刚度 控制策略<sup>[9]</sup>,分析表明控制非常有效。本文对这种 控制策略进行变换,通过控制磁流变阻尼器 2 的阻 尼大小来间接实现刚度的控制,与等效阻尼控制策 略相类似,提出以下控制方案为

$$c_{2} = \begin{cases} c_{2\max} & (a_{ms} < a_{set} \coprod z_{s} \dot{z}_{s} > 0) \\ c_{2\min} & (a_{ms} \ge a_{set} \overrightarrow{m} z_{s} z_{s} \le 0) \end{cases}$$
(18)

式中 c<sub>2max</sub>、c<sub>2min</sub>——磁流变阻尼器 2 的最大阻尼系 数和基值阻尼系数

## 3 冲击载荷下数值分析

为了考察磁流变变刚度变阻尼缓冲器的控制效 果,本文模拟飞行器以2m/s的速度在地面着陆的 过程。冲击过程包括两个阶段:缓冲器未被压缩阶段,这个阶段簧载质量和非簧载质量都具有一定的 初速度和加速度;缓冲器被压缩阶段,在这一过程 中,簧载质量和非簧载质量的初始能量被弹性材料 存储并耗散于磁流变阻尼器。分别对被动情况和半 主动控制进行分析,结果如图 6~9 所示。



Fig. 6 Acceleration time history of sprung mass

从图 6 可以看出,与被动情况相比较,采用磁流 变变刚度变阻尼的缓冲器的簧载质量加速度峰值被 削弱超过 25%,并且动态响应时间更短。由于飞行 器受到的冲击载荷与加速度有对应关系,因此从 图 7 可得到相似的结论。



Fig. 7 Impact load time history of sprung mass

图 8 给出了缓冲器的功量图,从图中可以看出, 采用磁流变变刚度变阻尼的缓冲器在减小最大冲击 载荷的同时,需要的最大行程比被动的情况更小。 图 9 给出了缓冲器分别实现变刚度变阻尼的控制 力,从该图可看出,磁流变阻尼器 1 的输出要大于磁 流变阻尼器 2 的输出,表明为了获得小的冲击载荷



Fig. 9 Input control force

和行程,实现刚度控制的磁流变阻尼器2的输出要小。

### 4 结论

(1)提出了一种采用磁流变技术的变刚度变阻 尼缓冲器,并从理论上推导了变刚度、变阻尼原理及 变化范围。

(2)设计了基于能量守恒原理和天棚控制策略 的变刚度变阻尼自适应控制器。

(3)数值计算结果表明,与被动缓冲器相比较, 基于磁流变变刚度变阻尼的缓冲器在飞行器着陆过 程中受到的冲击载荷更小,而且需要的行程空间更 小,这表明本文提出的缓冲器能在实际中应用。为 了进一步验证本文的缓冲器与控制策略的有效性, 下一步将通过跌落试验模拟飞行器缓冲着陆过程, 进行实时控制研究。

参考文献

- 张熇,殷礼明,褚桂柏.中国深空探测器技术的发展与展望[J].国际太空,2003(2):39~43.
   Zhang H, Yin L M, Zhu G B. Development and forecast of deep sky detector in China [J]. Space International, 2003(2): 39~43. (in Chinese)
- 2 Goncalves F D, Koo J H, Ahmadian M. A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies part I: MR fluid and MR fluid models[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006,38(5):203 ~ 220.
- 3 Mikulowski G M, Holnicki-Szulc H. Adaptive landing gear concept—feedback control validation [J]. Smart Materials and Structures, 2007,16(6): 2146~2158.
- 4 Batterbee D C, Sim N D, Stanway R, et al. Magnetorheological landing gear: I. a design methodology[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2 429 ~ 2 440.
   (下转第 39 页)

- 43 Huang C, Bradford J M. Application of a laser scanner to quantify soil microtopography [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(1):14~21.
- 44 Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation[J]. J. Soil Sci., 1983, 34(3):577 ~ 597.
- 45 Rajendra M P. Modeling and simulation of surface roughness [J]. Applied Surface Science, 2004, 228(1~4): 213~220.
- 46 侯占峰,鲁植雄,赵兰英. 耕作土壤地貌不平度的分形特性[J]. 农业机械学报,2007,38(4):50~53.
  Hou Zhanfeng, Lu Zhixiong, Zhao Lanying. Fractal behavior of tillage soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):50~53. (in Chinese)
- 47 鲁植雄,赵兰英,侯占峰.路面不平度的分形特征[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(2):111~114. Lu Zhixiong, Zhao Lanying, Hou Zhanfeng. Fractal behavior of road profile roughness [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2):111~114. (in Chinese)
- 48 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 73~80.
  Ge Shirong. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces [J]. Tribology, 1997, 17(1): 73~80.
  (in Chinese)
- 49 Andrle R, Abrahams A. Fractal techniques and the surface roughness of talus slope [J]. Earth Surf. Proc. Land, 1989, 14(3):197 ~ 209.
- 50 García Moreno R, Díaz Álvarez M C, Saa Requejo A, et al. Multifractal analysis of soil surface roughness [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 512 ~ 520.
- 51 曹汉强,朱光喜,李旭涛,等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(12): 1182~1185.

Cao Hanqiang, Zhu Guangxi, Li Xutao, et al. Multi-fractal and its application in terrain character analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1182 ~1185. (in Chinese)

- 52 Freebairn D M, Gupta S C, Onstad C A, et al. Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(4):1183 ~1189.
- 53 Monteith N H. The role of surface roughness in runoff [J]. Soil Conserv. J., 1974, 30: 42~45.
- 54 Onstad C A. Depressional storage on tilled soil surfaces [J]. Trans. of the ASAE, 1984, 27(3): 729 ~732.
- 55 Kamphorst E C, Jetten V, Guerif J, et al. Predicting depressional storage from soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(3): 1749 ~ 1758.
- 56 Hansen B, Schjonning P, Sibbesen E. Roughness index for estimation of depression storage capacity of tilled soil surface [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(1~2): 103~111.

- (上接第 24 页)
  - 5 贾玉红,武晓娟. 基于磁流变缓冲器的飞机起落架模糊控制[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(11):1264~1267.

Jia Yuhong, Wu Xiaojuan. Fuzzy control of landing gear based on MR damper [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1 264 ~ 1 267. (in Chinese)

- 6 祝世兴,李永洁,王力克. 模糊控制磁流变减振器在起落架中的应用探析[J]. 液压与气动,2008(12):68~70. Zhu Shixing, Li Yongjie, Wang Like. Analysis of application of fuzzy control MR fluid absorber in landing gear[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008(12):68~70. (in Chinese)
- 7 Dong X M, Yu M, Li Z S, et al. Neural network compensation of semi-active control for magneto-rheological suspension with time delay uncertainty[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(1): 1 ~ 14.
- 8 余森,廖昌荣,李立新.磁流变减振器控制研究[J].化学物理学报,2001,14(5):606~612. Yu M, Liao C R, Li L X. Research on control method for MR damper[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(5):606~612. (in Chinese)
- 9 Leitmann G. Semiactive control for vibration attenuation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(6): 841 ~ 846.

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.005

# 冲击载荷下磁流变变刚度变阻尼缓冲系统减振控制

董小闵<sup>1,2</sup> 余 淼<sup>2</sup> 廖昌荣<sup>2</sup> 陈伟民<sup>2</sup> (1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

【摘要】 针对传统缓冲着陆装置阻尼刚度不可调节的局限性,提出采用基于磁流变技术的自适应变阻尼变刚 度缓冲装置。首先从理论上研究了采用磁流变阻尼器实现刚度阻尼等效控制的原理,分析了刚度阻尼调节范围; 进而设计了基于能量守恒原理和天棚阻尼控制技术的飞行器缓冲着陆的自适应控制器,最后通过数值分析考察缓 冲器和控制策略的有效性。分析结果表明,与被动缓冲装置相比,基于磁流变技术的缓冲装置不仅能降低着陆冲 击过程的峰值载荷,而且需要的行程也较小,表明设计的缓冲装置和控制策略是有效的。

关键词:磁流变液 半主动控制 变刚度 冲击载荷
中图分类号: U463.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0020-05

## Absorbing Control of Magneto-rheological Variable Stiffness and Damping System under Impact Load

Dong Xiaomin<sup>1,2</sup> Yu Miao<sup>2</sup> Liao Changrong<sup>2</sup> Chen Weimin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Key Lab of Optoelectronic Technology and System of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

### Abstract

To overcome the limitation of traditional absorber systems with invariable damping and stiffness characteristics which can only achieve good absorbing performance under designed conditions, a new absorber based on two magneto-rheological (MR) dampers was proposed to realize the variable damping and stiffness characteristics. As the first step, the theory of variable damping and stiffness characteristics of the proposed absorber was analyzed, and the adjustable range of variable damping and stiffness was also analyzed. Then an adaptive controller based on the energy principle and skyhook control was developed. Finally, a numerical simulation was performed to validate the proposed absorber and the controller. The simulations show that the absorbing system based on the MR absorber could greatly reduce the peak impact load of sprung mass with smaller stroke of absorbing system. Moreover, it has better performance than passive absorbing system, which shows that the absorber based on MR variable stiffness and damping is feasible in practice.

Key words Magneto-rheological fluid, Semi-active control, Variable stiffness, Impact load

引言

飞行器的缓冲装置是吸收和耗散着陆过程产生 能量的主要部件,其吸收耗散能量的能力大小直接 关系到宇航员与重要仪表的安全。因此,提高缓冲 装置的性能具有非常重要的意义。

目前采用着陆缓冲装置都属于被动隔离方式, 有缓冲降落伞、缓冲气囊和机械可压缩装置3种形

收稿日期:2009-04-20 修回日期:2009-07-27

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(60804018、50830202)、重庆市自然科学基金资助项目(2008BB6184)和中国博士后科学基金特别资助项目 (200902292)

作者简介: 董小闵,副教授,博士后,主要从事智能机械结构及控制研究, E-mail: xmdong@ cqu. edu. cn

式<sup>[1]</sup>,这些缓冲装置具有结构简单、质量轻、维修简 单以及安全性好等特点,并获得了大量的应用。但 是,这些装置通常根据理想的设计条件(如高度、着 陆速度等)来确定装置的特性参数(如阻尼和刚 度),一旦着陆条件偏离设计条件,其缓冲性能则很 难满足要求。因此,为了克服传统缓冲装置的不足, 有必要研究能够根据环境变化自适应调节系统刚度 和阻尼的缓冲装置。

近年发展起来的磁流变阻尼技术为实现这种自 适应缓冲装置提供了可能<sup>[2]</sup>。基于磁流变阻尼技 术的执行器件由于具有阻尼连续可调、结构简单、功 耗低、动态范围宽等特点,受到了大量研究人员的重 视,国内外的研究人员也开始将磁流变技术应用于 飞机起落架<sup>[3-6]</sup>,但大多数研究集中于阻尼的调节, 局限性非常明显,因为飞行器着陆缓冲时,持续时间 非常短(几十毫秒内),飞行器最大的最大动态载荷 通常发生在前几个周期,仅仅调节阻尼是不够的,还 需要能自适应调节刚度。但传统的刚度调节属于主 动控制的范畴,存在结构复杂,能耗大等缺点,应用 受到限制。

为此,本文在对磁流变技术研究的基础上<sup>[7]</sup>, 提出将磁流变半主动控制技术用于缓冲器设计,实 现阻尼刚度的同时调节。

## 1 基于磁流变技术的变刚度变阻尼原理分析

飞行器缓冲着陆冲击过程的力学模型可简化为 一个二自由度的动力学模型,如图 1a 所示,模型包 括簧载质量 m<sub>s</sub>、非簧载质量 m<sub>u</sub>、磁流变阻尼器 c<sub>1</sub> 和 c<sub>2</sub> 以及弹簧 k<sub>s1</sub>、k<sub>s2</sub>以及 k<sub>u</sub>。这里磁流变阻尼器 2 和 一个弹簧并联,与前期的汽车磁流变阻尼器具有相 似的结构,如图 2 所示。

阻尼器具有双通道结构,处于混合工作模式。 当活塞左右运动时,磁流变液流过内筒和活塞之间 的径向通道而产生阻尼。当输入励磁磁场发生变化 时,磁流变液流变特性发生变化,从而产生可控的阻 尼力,经过理论推导和前期对磁流变阻尼器的工作





Fig. 1 Two degrees of freedom model of variable stiffness and damping and its equivalent model



图 2 磁流变阻尼器结构原理图

Fig. 2Schematic diagram of magneto-rheological damper1. 活塞杆2. 外筒3. 内筒4. 活塞5. 线圈6. 磁流变液

特性测试,其阻尼力  $F_d$  与活塞运动的相对速度 v、激励电流 I 的关系可以表示为<sup>[8]</sup>

$$F_d = c_s v + F_{MR} \operatorname{sgn} v \tag{1}$$

$$F_{MR} = aI^2 + bI + c \tag{2}$$

式中 c<sub>s</sub>——粘滞阻尼系数

F<sub>MR</sub>——库仑阻尼力

a、b、c——由试验数据拟合得到的常数

由式(1)可知,磁流变阻尼器的阻尼力由粘滞 阻尼力和库仑阻尼力组成,当阻尼器几何尺寸确定 后,粘滞阻尼力只是活塞运动速度的函数,不可控。 而库仑阻尼力则是励磁电流的函数,因此可通过调 节输入阻尼器的励磁电流大小实现阻尼力的调节, 实现阻尼系数的变化。以下为了简化分析,将两支 磁流变阻尼系数分别记为 c<sub>1</sub> 和 c<sub>2</sub>。由前期的试验 测试可知,磁流变阻尼器的基值阻尼系数(或最小阻尼 系数)500 N·s/m,最大阻尼系数为3 500 N·s/m。

图 1b 表示飞行器缓冲着陆冲击过程的等效模型,模型具有等效的阻尼系数 c<sub>s</sub> 和刚度 k<sub>s</sub>。根据牛顿第二定律,图 1 的动力学方程分别为

$$m_{s} \ddot{z}_{s} - c_{1} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) - k_{s2} (z_{s} - z_{m}) - c_{2} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{m}) = 0$$
(3)

$$m_{u} \ddot{z}_{u} + c_{1} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) + k_{s1} (z_{m} - z_{u}) - k (z_{m} - z_{u}) = 0$$
(4)

$$k_{s2}(z_{s} - z_{m}) + c_{2}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{m}) - k_{s1}(z_{m} - z_{n}) = 0$$
(5)

$$m_{s}\ddot{z}_{s} - c_{s}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) - k_{s}(z_{s} - z_{u}) = 0$$

$$m_{u}\ddot{z}_{u} + c_{s}(\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) + k_{s}(z_{s} - z_{u}) -$$
(6)

$$k_u(z_u - z_r) = 0 \tag{7}$$

利用 Laplace 变换,可求图 1a 及等效力学模型 图 1b 的簧载质量位移与输入位移激励之间的传递 函数表达式分别为

$$\frac{z_s}{z_r} = \frac{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4}{b_1 s^6 + b_2 s^5 + b_3 s^4 + b_4 s^3 + b_5 s^2 + b_6 s + b_7} (8)$$
$$\frac{z_s}{z_r} = \frac{c_s k_u s + k_s k_u}{m_s s^4 + (m_s c_s + m_u c_s) s^3 + (m_s k_s + m_s k_u + m_u k_s) s^2 + k_u c_s s + k_s k_u} (9)$$

 $m_{\mu}$ 

其中  

$$a_1 = c_1c_2^2k_u$$
  
 $a_2 = c_2^2k_uk_{s1} + 2c_1c_2k_uk_{s1} + 2c_1c_2k_uk_{s2}$   
 $a_3 = c_1k_{s1}^2k_u + c_2k_uk_{s1}^2 + 2c_2k_uk_{s2}k_{s1} + c_1k_{s2}^2k_u + 2c_1k_{s1}k_uk_{s2}$   
 $a_4 = k_{s1}k_uk_{s2} + k_{s1}k_{s2}^2k_u$   
 $b_1 = m_sc_2^2m_u$   
 $b_2 = 2m_sc_2m_uk_{s2} + m_sc_2^2c_1 + 2m_sc_2m_uk_{s1} + c_1c_2m_u$   
 $b_3 = c_2^2k_{s1}m_u + m_sk_{s2}^2m_u + 2c_1c_2m_uk_{s1} + 2c_1c_2m_uk_{s2} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + m_sc_2^2k_{s2} + c_1k_{s2}^2m_u + k_{s1}^2c_2m_u + 2c_1c_2k_{s2} + m_sk_{s1}^2m_u + 2c_1c_2k_{s2} + m_sk_{s1}^2m_u + 2m_sk_{s1}m_uk_{s2} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + 2m_sc_2c_1k_{s1} + m_sc_2^2k_{s1} + m_sc_2^2k_u + 2c_1^2c_2^2$   
 $b_4 = m_sk_{s2}^2c_1 + 3c_1c_2k_{s1} + c_2c_1 + 4c_1^2c_2k_{s1} + 4c_1^2c_2^2k_{s2} + c_1k_{s2}^2m_u + k_{s1}^2c_2m_u + c_1c_2^2k_u + 2m_sc_2k_uk_{s2} + 2c_1k_{s1}m_uk_{s2} + m_sk_{s1}^2c_1 + 2m_sc_2k_{s1}k_{s2} + 2m_sk_{s1}c_1k_{s2} + 2m_sc_2k_{s1}k_{s2} + 2m_sk_{s1}c_1k_{s2} + 2m_sc_2k_uk_{s1}$   
 $b_5 = 3c_1k_{s1}^2c_2 + m_sk_{s1}^2k_u + k_{s1}k_{s2}^2m_u + 2m_sk_{s1}k_{s2} + 2c_1^2k_{s2}^2 - 2c_2c_1k_{s2} + k_{s1}^2c_2^2 - c_1c_2k_{s1} + 4c_1^2k_{s1}k_{s2} + 2c_1^2k_{s1}^2 + m_sk_{s1}^2k_{s2} + m_sk_{s1}^2k_{s2} + 2c_1^2k_{s2}^2 + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + 2c_1k_{s2}^2k_{s1} + 2c_1k_{s2}^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2^2k_{s2} + k_{s1}c_2k_{s2} + k_{s1}c$ 

$$\frac{z_{s}(jw)}{z_{r}(jw)} = \frac{k_{s}^{*}k_{u}+jw_{s}^{*}c_{s}k_{u}}{m_{u}m_{s}w^{4}-(m_{s}k_{s}^{*}+m_{s}k_{u}+m_{u}k_{s}^{*})w^{2}+k_{s}^{*}k_{u}-j[(m_{s}c_{s}^{*}+m_{u}c_{s}^{*})w^{3}+k_{u}c_{s}^{*}w]}$$
(10)

12

其中  

$$c_{s}^{*} = c_{1} + \frac{k_{s1}c_{2}}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$

$$k_{s}^{*} = k_{s1} - \frac{k_{s1}^{2}(k_{s1} + k_{s2})}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$

$$\frac{z_{s}(jw)}{z_{r}(jw)} =$$

$$\frac{k_{s}k_{u} + jw_{s}ck_{u}}{m_{u}m_{s}w^{4} - (m_{s}k_{s} + m_{s}k_{u} + m_{u}k_{s})w^{2} + k_{s}k_{u} - j[(m_{s}c_{s} + m_{u}c_{s})w^{3} + k_{u}c_{s}w]}$$
(11)

比较式(10)、(11)两式可得等效力学模型图 1b 对 应的阻尼系数和刚度系数为

$$c_{s} = c_{1} + \frac{k_{s1}^{2}c_{2}}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$
(12)

$$k_{s} = k_{s1} - \frac{k_{s1}^{2} (k_{s1} + k_{s2})}{(k_{s1} + k_{s2})^{2} + (c_{2}w)^{2}}$$
(13)

如果再令  $\eta = \frac{k_{s2}}{k_{s1}}$ ,则式(12)、(13)可改写为

$$c_{s} = c_{1} + \frac{1}{\frac{(1+\eta)^{2}}{c_{2}} + \left(\frac{w}{k_{s1}}\right)^{2}c_{2}}$$
(14)

$$k_{s} = k_{s1} \left[ 1 - \frac{1 + \eta}{\left(1 + \eta\right)^{2} + \left(\frac{c_{2}w}{k_{s}}\right)^{2}} \right]$$
(15)

当激励频率一定时,对式(14)、(15)讨论如下:

(1) 图 1b 的等效刚度  $k_1$  与阻尼系数  $c_1$  无关, 而等效刚度 k, 和等效阻尼系数 c, 与串联的阻尼器 阻尼系数 c, 有非线性函数关系。

(2) 式(14)表明,当 $c_2 = 0$ 或∞时, $c_s = c_1$ ,当 $c_2$ 由零增加到∞时,c,将在c,基础上先增加后下降, 但始终大于 c1。

(3) 式(15)表明,当  $c_2 = 0$  时,  $k_s = \frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1} + k_{s2}}$ ,相 当于2个弹簧串联, $c_2 = \infty$ 时, $k_s = k_{s1}$ 。

由以上讨论可知,当调节串联的阻尼器阻尼系 数时,系统的等效阻尼和刚度将同时发生变化,串联 的阻尼器能调节的等效刚度的范围是  $\left[\frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1}+k_{s2}}\right]$  $k_{s_1}$ ] =  $\left[\frac{k_{s_1}}{1/n+1}, k_{s_1}\right]$ ,因此为了获得比较大的调节 范围,η值需要取得较小,但由于磁流变阻尼器2的 行程和簧载质量与非簧载质量之间行程的限制,不 能取得太小,本文取 0.5。由于串联的阻尼器对系 统的等效阻尼影响非单调,且不能单独调节,因此, 为了使系统能获得需要的阻尼,采用可调节的磁流 变阻尼器。总之,采用两个可调节阻尼的磁流变阻 尼器,可独立改变系统的阻尼和刚度。

图 3 给出了阻尼比 $\zeta_2$  对位移传递的影响,这里  $\zeta_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{mk_2}}, \text{ ft} @ \texttt{c} \zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{mk_1}} \land \texttt{T} @ \texttt{t}, \texttt{I} @ \texttt{b} \&$  $m_s = 100 \text{ kg}, m_u = 15 \text{ kg}, k_u = 161 900 \text{ N/m}, k_{s1} =$ 30 000 N/m,  $k_{c_2} = 15\ 000\ \text{N/m}$ ,  $c_1 = 1\ 000\ \text{N} \cdot \text{s/m}_{\odot}$ 图 3 可以看出,随着阻尼比ζ2 的增加,共振峰向高 频方向移动,因此可通过调节阻尼比ζ。来获得近似 于等效的刚度改变。

#### 2 控制器设计

飞行器的缓冲着陆过程中,由于高度、初始速度

其中





Fig. 3 Effect of damping ratio  $\zeta_2$  on displacement transfer

的不同(图4),地面传给飞行器的冲击载荷也不相同,缓冲器的目标就是要使飞行器在着陆时产生的冲击载荷尽可能小,以降低冲击载荷对飞行器上仪器的损坏。由于整个冲击过程持续时间短(仅几百甚至几十毫秒),对传感器、控制器和执行器要求比较高,采用传统基于阀式的阻尼器很难满足这种需要,磁流变阻尼器由于具有结构简单、响应速度快等特点<sup>[2]</sup>,因此可用于飞行器的缓冲着陆过程实时控制,为了充分发挥磁流变阻尼器的性能,采用有效的控制策略非常关键。



Fig. 4 Landing course of an aircraft with 2-DOF

在飞行器着陆过程中,冲击过程的能量部分转 化为弹性势能,部分耗散于阻尼器,最后振动能量均 通过阻尼器加以耗散。理论上希望振动能量在阻尼

器的一个行程内完全耗 散,这样飞行器就不会出 现反弹,同时,最大的冲击 载荷比较小,如图 5 所示。 为了使缓冲器效率达到最 大,即在理想状态下,满足 吸收完能量的同时,缓冲 器载荷最好为一恒定值, 即 $F = F_{max2}$ ,沿图 5 中曲 线 2 进行。为此,本文基 于能量守恒原理和天棚阻 尼控制,将强冲击能量分 布在相对更宽的时间(或



缓冲器行程)内,在区域 *A*、*B*、*C* 应采取不同的控制 策略。

## 2.1 目标加速度设定

由于簧载质量加速度与其冲击载荷有一一对应 的关系,在有限的行程 S<sub>max</sub>之内以缓冲器的效率达 到最大为控制目标,即在理想状态下(图5),忽略非 簧载质量的动能和势能,满足吸收完所需吸收的能 量的同时,缓冲器的载荷为恒定值,即

$$a_{\rm set} = F/m_s = \frac{1}{2} v_0^2 / S_{\rm max}$$
 (16)

## 2.2 阻尼控制策略

缓冲着陆过程时间短,这给控制策略的设计带 来了很大的挑战,应用复杂的控制策略会带来传感 和计算困难,本文采用经典的天棚阻尼控制策略以 获得理想的减速度。当簧载质量测量加速度小于设 定值时(对应于图 5 中区域 A 和 C),采用大的阻尼 值,使簧载质量测量加速度迅速逼近理想加速度值, 当簧载质量测量加速度大于设定值时(对应于图 5 中区域 B),应采用尽可能小的阻尼值以使簧载质量 测量加速度维持在设定值。考虑到磁流变阻尼器阻 尼力的可实现性,控制规律总结为

$$c_{1} = \begin{cases} c_{1\max} & (a_{ms} < a_{set} \coprod \dot{z}_{s} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) > 0) \\ c_{1\min} & (a_{ms} \ge a_{set} \nexists \dot{z}_{s} (\dot{z}_{s} - \dot{z}_{u}) \le 0) \end{cases}$$
(17)  
$$+ c_{1\max} c_{1\min} - \overleftarrow{a} \overleftarrow{a} \overleftarrow{b} \nexists a a_{set} \nexists a_{set} \# a_{set$$

数和基值阻尼系数

a<sub>ms</sub>——簧载质量测量加速度

## 2.3 等效刚度控制策略

式

刚度对于缓冲效果影响比较大,理想情况下,刚 度越小越好,这样可获得小的冲击载荷,但这会带来 振动能量不能迅速衰减,出现反复振动,同时受制于 实际缓冲器的工作行程,刚度系数也不能取得太小。 一般来说,对于确定的着陆条件都有最优的刚度系 数,Leitmann根据能量守恒原理提出了一种变刚度 控制策略<sup>[9]</sup>,分析表明控制非常有效。本文对这种 控制策略进行变换,通过控制磁流变阻尼器 2 的阻 尼大小来间接实现刚度的控制,与等效阻尼控制策 略相类似,提出以下控制方案为

$$c_{2} = \begin{cases} c_{2\max} & (a_{ms} < a_{set} \coprod z_{s} \dot{z}_{s} > 0) \\ c_{2\min} & (a_{ms} \ge a_{set} \overrightarrow{m} z_{s} z_{s} \le 0) \end{cases}$$
(18)

式中 c<sub>2max</sub>、c<sub>2min</sub>——磁流变阻尼器 2 的最大阻尼系 数和基值阻尼系数

## 3 冲击载荷下数值分析

为了考察磁流变变刚度变阻尼缓冲器的控制效 果,本文模拟飞行器以2m/s的速度在地面着陆的 过程。冲击过程包括两个阶段:缓冲器未被压缩阶段,这个阶段簧载质量和非簧载质量都具有一定的 初速度和加速度;缓冲器被压缩阶段,在这一过程 中,簧载质量和非簧载质量的初始能量被弹性材料 存储并耗散于磁流变阻尼器。分别对被动情况和半 主动控制进行分析,结果如图 6~9 所示。



Fig. 6 Acceleration time history of sprung mass

从图 6 可以看出,与被动情况相比较,采用磁流 变变刚度变阻尼的缓冲器的簧载质量加速度峰值被 削弱超过 25%,并且动态响应时间更短。由于飞行 器受到的冲击载荷与加速度有对应关系,因此从 图 7 可得到相似的结论。



Fig. 7 Impact load time history of sprung mass

图 8 给出了缓冲器的功量图,从图中可以看出, 采用磁流变变刚度变阻尼的缓冲器在减小最大冲击 载荷的同时,需要的最大行程比被动的情况更小。 图 9 给出了缓冲器分别实现变刚度变阻尼的控制 力,从该图可看出,磁流变阻尼器 1 的输出要大于磁 流变阻尼器 2 的输出,表明为了获得小的冲击载荷



Fig. 9 Input control force

和行程,实现刚度控制的磁流变阻尼器2的输出要小。

### 4 结论

(1)提出了一种采用磁流变技术的变刚度变阻 尼缓冲器,并从理论上推导了变刚度、变阻尼原理及 变化范围。

(2)设计了基于能量守恒原理和天棚控制策略 的变刚度变阻尼自适应控制器。

(3)数值计算结果表明,与被动缓冲器相比较, 基于磁流变变刚度变阻尼的缓冲器在飞行器着陆过 程中受到的冲击载荷更小,而且需要的行程空间更 小,这表明本文提出的缓冲器能在实际中应用。为 了进一步验证本文的缓冲器与控制策略的有效性, 下一步将通过跌落试验模拟飞行器缓冲着陆过程, 进行实时控制研究。

参考文献

- 张熇,殷礼明,褚桂柏.中国深空探测器技术的发展与展望[J].国际太空,2003(2):39~43.
   Zhang H, Yin L M, Zhu G B. Development and forecast of deep sky detector in China [J]. Space International, 2003(2): 39~43. (in Chinese)
- 2 Goncalves F D, Koo J H, Ahmadian M. A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies part I: MR fluid and MR fluid models[J]. The Shock and Vibration Digest, 2006,38(5):203 ~ 220.
- 3 Mikulowski G M, Holnicki-Szulc H. Adaptive landing gear concept—feedback control validation [J]. Smart Materials and Structures, 2007,16(6): 2146~2158.
- 4 Batterbee D C, Sim N D, Stanway R, et al. Magnetorheological landing gear: I. a design methodology[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2 429 ~ 2 440.
   (下转第 39 页)

- 43 Huang C, Bradford J M. Application of a laser scanner to quantify soil microtopography [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(1):14~21.
- 44 Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation[J]. J. Soil Sci., 1983, 34(3):577 ~ 597.
- 45 Rajendra M P. Modeling and simulation of surface roughness [J]. Applied Surface Science, 2004, 228(1~4): 213~220.
- 46 侯占峰,鲁植雄,赵兰英. 耕作土壤地貌不平度的分形特性[J]. 农业机械学报,2007,38(4):50~53.
  Hou Zhanfeng, Lu Zhixiong, Zhao Lanying. Fractal behavior of tillage soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):50~53. (in Chinese)
- 47 鲁植雄,赵兰英,侯占峰.路面不平度的分形特征[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(2):111~114. Lu Zhixiong, Zhao Lanying, Hou Zhanfeng. Fractal behavior of road profile roughness [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2):111~114. (in Chinese)
- 48 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 73~80.
  Ge Shirong. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces [J]. Tribology, 1997, 17(1): 73~80.
  (in Chinese)
- 49 Andrle R, Abrahams A. Fractal techniques and the surface roughness of talus slope [J]. Earth Surf. Proc. Land, 1989, 14(3):197 ~ 209.
- 50 García Moreno R, Díaz Álvarez M C, Saa Requejo A, et al. Multifractal analysis of soil surface roughness [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 512 ~ 520.
- 51 曹汉强,朱光喜,李旭涛,等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(12): 1182~1185.

Cao Hanqiang, Zhu Guangxi, Li Xutao, et al. Multi-fractal and its application in terrain character analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1182 ~1185. (in Chinese)

- 52 Freebairn D M, Gupta S C, Onstad C A, et al. Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(4):1183 ~1189.
- 53 Monteith N H. The role of surface roughness in runoff [J]. Soil Conserv. J., 1974, 30: 42~45.
- 54 Onstad C A. Depressional storage on tilled soil surfaces [J]. Trans. of the ASAE, 1984, 27(3): 729 ~732.
- 55 Kamphorst E C, Jetten V, Guerif J, et al. Predicting depressional storage from soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(3): 1749 ~ 1758.
- 56 Hansen B, Schjonning P, Sibbesen E. Roughness index for estimation of depression storage capacity of tilled soil surface [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(1~2): 103~111.

- (上接第 24 页)
  - 5 贾玉红,武晓娟. 基于磁流变缓冲器的飞机起落架模糊控制[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(11):1264~1267.

Jia Yuhong, Wu Xiaojuan. Fuzzy control of landing gear based on MR damper [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1 264 ~ 1 267. (in Chinese)

- 6 祝世兴,李永洁,王力克. 模糊控制磁流变减振器在起落架中的应用探析[J]. 液压与气动,2008(12):68~70. Zhu Shixing, Li Yongjie, Wang Like. Analysis of application of fuzzy control MR fluid absorber in landing gear[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008(12):68~70. (in Chinese)
- 7 Dong X M, Yu M, Li Z S, et al. Neural network compensation of semi-active control for magneto-rheological suspension with time delay uncertainty[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(1): 1 ~ 14.
- 8 余森,廖昌荣,李立新.磁流变减振器控制研究[J].化学物理学报,2001,14(5):606~612. Yu M, Liao C R, Li L X. Research on control method for MR damper[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(5):606~612. (in Chinese)
- 9 Leitmann G. Semiactive control for vibration attenuation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(6): 841 ~ 846.