

DOI: 10.3901/JME.2021.01.121

磁流变半主动落锤冲击缓冲系统的“软着陆” 控制试验与分析*

白先旭 杨 森

(合肥工业大学车辆工程系 合肥 230009)

摘要: 研究了基于磁流变能量吸收器(Magnetorheological energy absorber, MREA)的单自由度冲击缓冲控制系统在落锤激励条件下的控制方法,实现最大化利用 MREA 的活塞行程并在活塞行程终点落锤速度减小至 0 的落锤“软着陆”控制目标。建立了基于 MREA 的单自由度冲击缓冲系统的动力学模型和试验测试系统。为了准确模拟 MREA 的磁滞非线性力,基于基本 RC 算子磁滞模型研究了 MREA 磁滞非线性力前馈跟踪方案。根据落锤的实时状态得出落锤下落的期望反馈,从而得出期望阻尼力进而实现落锤的缓冲控制。仿真分析和试验测试验证了基于准确的 MREA 磁滞非线性力模型的 MREA 冲击缓冲系统“软着陆”控制方案的可行性。

关键词: 冲击控制; 磁滞模拟; 磁流变液; 磁流变能量吸收器; 软着陆; 半主动控制

中图分类号: O328

Experimental Test and Analysis of “Soft-landing” Control for Drop-induced Shock Systems using Magnetorheological Energy Absorber

BAI Xianxu YANG Sen

(Department of Vehicle Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Aiming at realizing a “soft landing”, i.e., the final velocity of the payload exactly reduces to 0 when consuming the total piston stroke of magnetorheological energy absorber (MREA), a control algorithm for the single-degree-of-freedom shock mitigation system based on MREA under drop-induced shock excitation is investigated in this paper. The dynamic model and the experimental setup of the single-degree-of-freedom shock mitigation system are established. A feedforward damping force tracking scheme based on a basic resistor-capacitor (RC) operator-based hysteresis model is presented and is employed to accurately describe and predict the hysteretic nonlinearity of MREA. According to the real-time states of the dropped mass, the system controller calculates and outputs the appropriate damping force of MREA to achieve the desired minimized deceleration of the payload. The feasibility and the capability of the designed control algorithm for the shock mitigation system based on MREA with precise hysteresis model are validated via simulation analyses and experimental tests.

Key words: shock control; hysteresis modeling; magnetorheological fluid; magnetorheological energy absorber; soft landing; semi-active control

0 前言

最小化冲击载荷作用于重要负载引起的结构损伤是振动和冲击控制领域的重要课题。特种车辆遭遇地雷等简易爆炸装置、直升机的起落及坠毁、火

炮后座的反冲载荷、波浪对船体的冲撞等产生的冲击载荷都会作用于重要负载(如驾乘人员和仪器设备系统)并造成结构损伤^[1-4]。磁流变能量吸收器(Magnetorheological energy absorber, MREA)是一种阻尼可控执行器,不仅阻尼力无级可控、动态可控范围大,而且响应时间短(毫秒级)。有关 MREA 的非线性力学特性研究^[5-7]和基于 MERA 的振动/冲击应用研究^[8-12]已有不少文献可以参考。

* 国家自然科学基金资助项目(51305114)。20191219 收到初稿, 20201009 收到修改稿

基于 MREA 实现冲击载荷最小化的核心在于充分利用 MREA 的活塞行程, 实现“软着陆”的控制目标, 即在 MREA 活塞行程末端速度恰好为 0, 且控制对象基本在匀减速工况下减速至 0。然而, 迄今在国内外文献中尚未见到 MREA 冲击缓冲系统的“软着陆”试验系统和实际应用。进一步分析 MREA 冲击缓冲控制系统实现冲击载荷最小化的关键: ① 对“软着陆”控制策略的理解。② MREA 的磁滞非线性力的高效描述。理论上, Wereley 等^[12]提出了 MREA 冲击缓冲系统的“软着陆”控制策略的基本概念, 并基于 MREA 的单自由度系统运动微分方程, 得到了负载加速度最小化的数值分析结果。但他们在系统动力学建模过程中对 MREA 的磁滞非线性力进行的数学模型描述, 从系统试验的角度来看, 是无法应用于“软着陆”控制器并满足实时控制需求的。针对关键②, BAI 等^[13-15]基于现象模型研究了变结构现象模型, 接着又提出了一种通用于磁滞特性模拟的“形状函数+记忆机制”的建模方法, 在该磁滞建模框架下以基本 RC 磁滞算子替代经典的 Bouc-Wen 算子, 将模型运算效率提升了一倍以上, 实现了 MREA 的磁滞非线性力学的高效描述。

基于以上, 本文将综合“软着陆”控制方法, 在试验测试系统中实现基于 MREA 的冲击缓冲控制系统负载的“软着陆”控制目标。主要从两个方面进行研究: ① 基于基本 RC 算子的磁滞非线性模型跟踪 MREA 的非线性阻尼力。② 基于 MREA 的落锤单自由度系统, 采用“软着陆”控制策略并结合落锤的状态进行反馈控制, 仿真并试验验证控制策略的可行性和有效性。

1 冲击缓冲系统“软着陆”控制原理

基于 MREA 的单自由度控制系统的落锤下落冲击结构如图 1 所示, 运动方程可表示为

$$m\ddot{z} + mg + F_{\text{MREA}} = 0 \quad (1)$$

式中, m 为落锤质量; \ddot{z} 为落锤下落的加速度; g 为重力加速度; F_{MREA} 为 MREA 阻尼力。

图 2 是落锤冲击缓冲控制系统的“软着陆”控制原理图。根据图 2, 为实现最大化利用 MREA 的活塞行程并在活塞行程终点速度减小至 0 的落锤冲击“软着陆”效果, 结合落锤的位移和速度并根据上一时刻落锤加速度, 可以计算得到当前冲击缓冲系统的期望阻尼力, 经 MREA 力跟踪单元输出实际跟踪阻尼力, 最终控制落锤达到“软着陆”效果。控制过程可以表达为

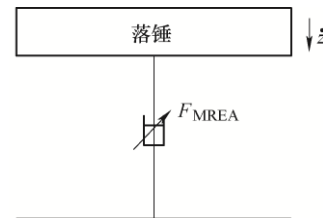


图 1 落锤冲击结构示意图

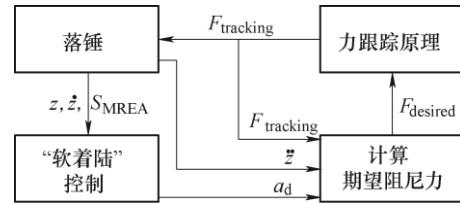


图 2 落锤冲击缓冲系统控制原理

$$2a_d S_{\text{MREA}} = \dot{z}^2 \quad (2a)$$

$$\Delta + ma_d = m\ddot{z} \quad (2b)$$

$$F_{\text{desired}} = F_{\text{tracking}} + \Delta \quad (2c)$$

式中, a_d 为落锤的期望加速度; S_{MREA} 为 MREA 的剩余可用行程; \dot{z} 为落锤的下落速度; Δ 为输出期望加速度 a_d 与当前加速度 \ddot{z} 所需合外力的差; F_{desired} 为控制系统的期望输出阻尼力; F_{tracking} 为 MREA 实际输出阻尼力。

2 MREA 力跟踪原理

基于基本 RC 算子^[15]的磁滞非线性模型拟合 MREA 的非线性力特性。图 3 所示为一种以 RC 算子替换 Bouc-Wen 算子表征 MREA 磁滞非线性特性的模型原理示意图, 表达式为

$$F_{\text{MREA}} = c\dot{x} + \alpha z + kx + f \quad (3)$$

$$z(t) = 1 - 2\exp(-g_1(S)/a) \quad \dot{x}(t) > 0 \quad (4a)$$

$$z(t) = -1 + 2\exp(g_2(S)/a) \quad \dot{x}(t) < 0 \quad (4b)$$

$$\dot{z}(t) = 0 \quad \dot{x}(t) = 0 \quad (4c)$$

$$S_0 = g_1^{-1}(-\ln((1 - z(t^*))/2)a) \\ x_0 = x(t^*), \text{加载时} \quad (4d)$$

$$S_0 = g_2^{-1}(\ln((1 + z(t^*))/2)a) \\ x_0 = x(t^*), \text{卸载时} \quad (4e)$$

$$S(t) = S_0 + x(t) - x_0 \quad (4f)$$

$$g_1(S) = |S|^b \quad (4g)$$

$$g_2(S) = -|S|^b \quad (4h)$$

式中, f 为初始位移弹性力; c 、 α 和 k 分别为阻尼系数、磁滞系数和刚度系数; x 、 \dot{x} 和 z 分别为 MREA 的激励位移、激励速度和磁滞输出参数(取值范围 $(-1, 1)$, 由式(4a)~(4c)表达, a 为大于 0 的磁滞因子);

S 为虚拟位移; g_1 和 g_2 是虚拟位移 S 的形状函数; b 为磁滞因子; g_1^{-1} 和 g_2^{-1} 分别是 g_1 和 g_2 的逆函数; S_0 和 x_0 分别是新的单调激励下 t^* 时刻的虚拟位移参考点和位移参考点。

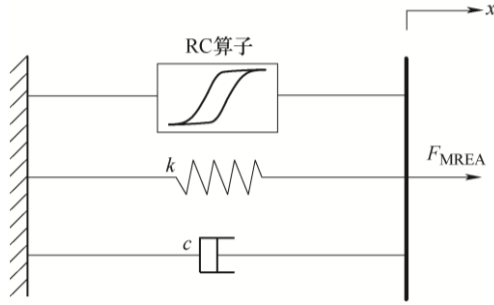


图 3 基本 RC 算子磁滞模型

图 4 为基于基本 RC 算子磁滞模型的前馈跟踪控制原理图，表达式为

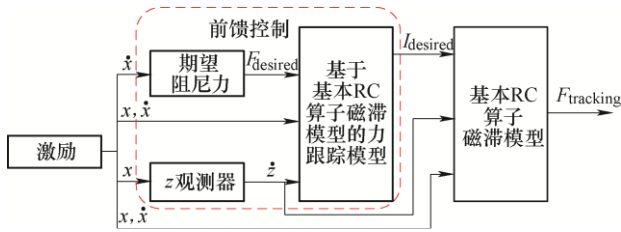


图 4 基于基本 RC 算子磁滞模型的力跟踪原理

$$F_{\text{tracking}} = c\dot{x} + \alpha\hat{z} + kx + f \quad (5a)$$

$$F_{\text{desired}} = \lambda\dot{x} \quad (5b)$$

$$c = c_1 I^2 + c_2 I + c_3 \quad (5c)$$

$$\alpha = \alpha_1 I^2 + \alpha_2 I + \alpha_3 \quad (5d)$$

$$\min(|F_{\text{tracking}} - F_{\text{desired}}|), I \in [0, I_{\max}] \quad (5e)$$

式中, λ 为常数, 与激励速度共同决定期望阻力 F_{desired} 的输出; c 和 α 是与电流 I 相关的参数; 参数 c_1 、 c_2 、 c_3 和 α_1 、 α_2 、 α_3 分别拟合 c 和 α 与电流 I 的关系, 采用式(5c)和(5d)拟合。磁滞输出 \hat{z} 由式(4a)~(4h)给出。式(5e)改写为

$$\min(|L\dot{x}^2 + M\dot{x} + N|), I \in [0, I_{\max}] \quad (6)$$

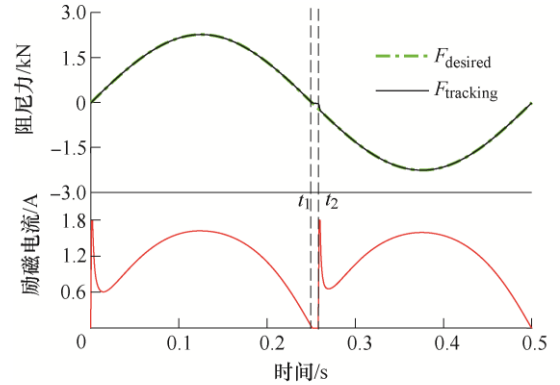
式中, $L = c_1\dot{x} + \alpha_1\hat{z}$ 、 $M = c_2\dot{x} + \alpha_2\hat{z}$ 和 $N = (c_3 - \lambda)\dot{x} + \alpha_3\hat{z} + kx + f$ 是与励磁电流无关、只与外部激励有关的变量。

3 数值仿真与分析

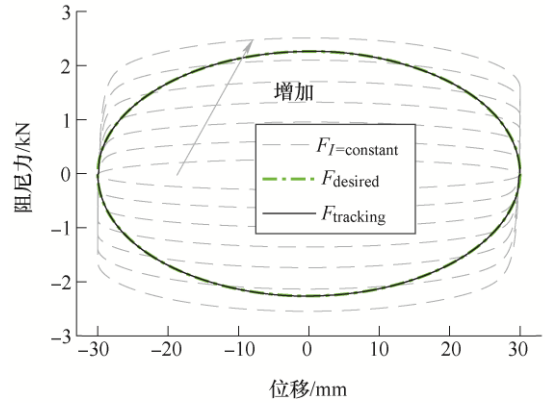
3.1 力跟踪仿真结果

根据 MREA 力与位移、力与速度试验数据, 采用遗传算法辨识基本 RC 算子磁滞模型的未知参数 ($a, b, c_1, c_2, c_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, k, f$)。在 MATLAB/Simulink

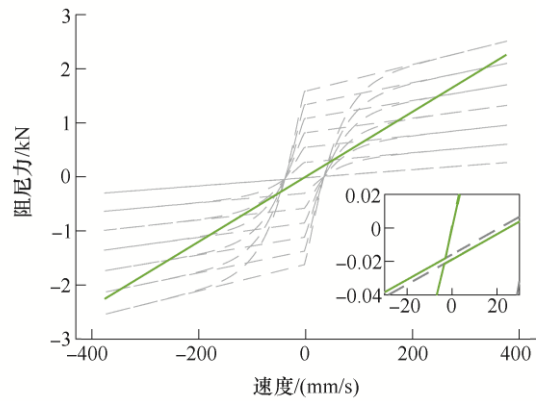
中搭建如图 4 所示的力跟踪控制原理, 图 5a、5b 和 5c 分别给出了 MREA 的阻尼力与励磁电流的时间历程曲线、阻尼力与位移的跟踪曲线及阻尼力与速度的跟踪曲线, 其中灰色虚线 ($F_{I=\text{constant}}$) 是 0、0.3 A、0.6 A、0.9 A、1.2 A、1.5 A 和 1.8 A 恒定电流下基本 RC 算子磁滞模型的计算结果。图 5a 所示的跟踪阻尼力和期望阻尼力对比结果表明, 基于跟踪控制原理(图 4)能够实现期望阻尼力的高效跟踪。在开始阶段, 为尽快跟踪上期望阻尼力, 电流快速上升至最大值; 在 t_1 ~ t_2 内, 受 MREA 残余阻尼力和前屈服刚度影



(a) 阻尼力和励磁电流的时间历程曲线



(b) 阻尼力-位移跟踪曲线



(c) 阻尼力-速度跟踪曲线

图 5 力跟踪仿真结果

响, 即使电流降低至 0, 也不能避免跟踪误差。根

据图 5c 所示的阻尼力与速度的跟踪曲线, 当期望阻尼力不大于 MREA 的被动阻尼力时, 跟踪阻尼力的轨迹沿着 MREA 最小的力与速度曲线输出, 即最小化了跟踪误差(误差为 0.47%)。

3.2 落锤冲击系统仿真结果

在 MATLAB/Simulink 中搭建原理如图 2 的控制系統, 设定落锤速度 \dot{z} 从 -2 m/s 开始加速, MREA 活塞行程为 100 mm 。图 6a 和图 6b 分别给出了落锤加速度、MREA 活塞行程的时间历程曲线和控制输出的期望阻尼力、跟踪阻尼力及 MREA 的输入励磁电流的时间历程曲线。根据图 6a 所示结果, 落锤以几乎恒定的加速度下落, 消耗了全部 MREA 活塞行程, 实现了落锤“软着陆”的控制目标。在图 6a 和 6b 中 0.08 s 前后出现跳变, 其根本原因在于, 受到残余阻尼力和前屈服刚度的影响, 低速激励区域内 MREA 的可控特性有限, 即使励磁电流骤降到 0 A , 也不可避免出现跟踪误差。图 5a 所示的 t_1-t_2 时间段内出现的跳变原因也在于此。但是从图 6 可以看出, 可控吸能执行器 MREA 和力跟踪策略已基本符合“软着陆”控制系统的要求。

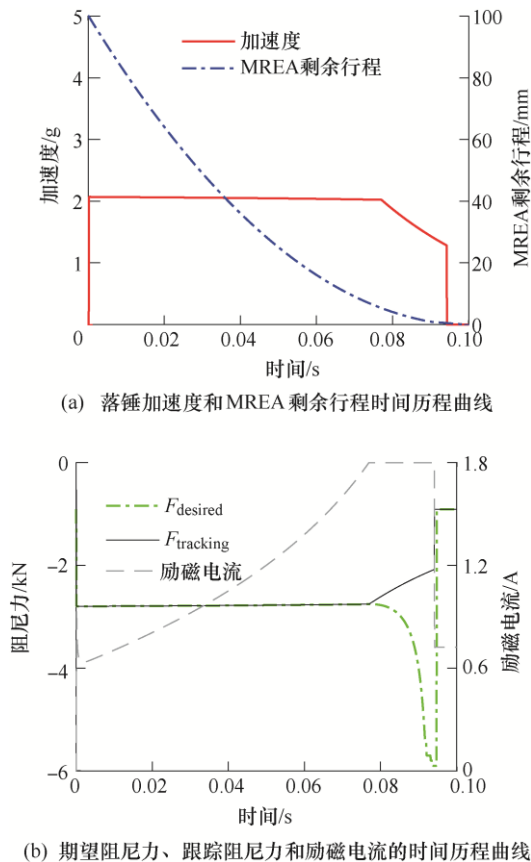


图 6 落锤冲击缓冲控制系统仿真结果

4 试验测试

4.1 力跟踪系统试验结果

图 7 是基于图 2 搭建的力跟踪快速控制原型系统。试验中, 激振台输出幅值 20 mm 、频率 0.5 Hz 的正弦位移激励作用于 MREA。根据式(5b), 设定期望阻尼力为与 MREA 激励速度相关的函数(速度信号通过对激励位移微分实时获取)。试验结果如图 8 所示。图 8a 是期望阻尼力、实际输出阻尼力和期望励磁电流、实际输入电流的时间历程曲线。根据图 8a, 实际输入励磁电流 I_{actual} 与期望励磁电流 I_{desired} 基本一致, 实际输出阻尼力 F_{tracking} 基本跟随期望阻尼力 F_{desired} , 结合图 5a, 试验结果与仿真结果阻尼力和励磁电流变化趋势基本相同, 尤其是激励速度接近于 0 时, 进一步验证了图 4 所示的前馈跟踪控制策略对 MREA 输出期望阻尼力高效跟踪性能。如图 8b 和 8c 所示的 MREA 的阻尼力与位移跟踪曲线和阻尼力与速度跟踪曲线, MREA 的实际输出阻尼力总体上很好地跟随期望阻尼力。

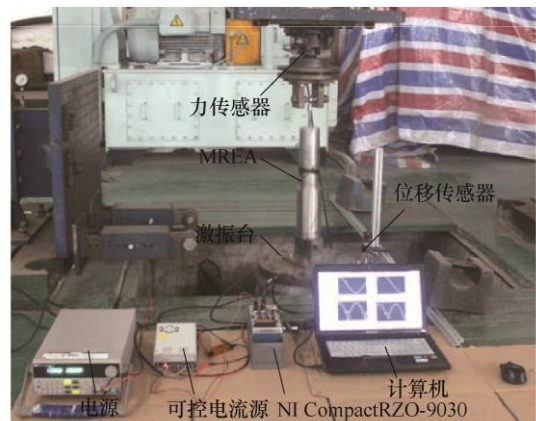
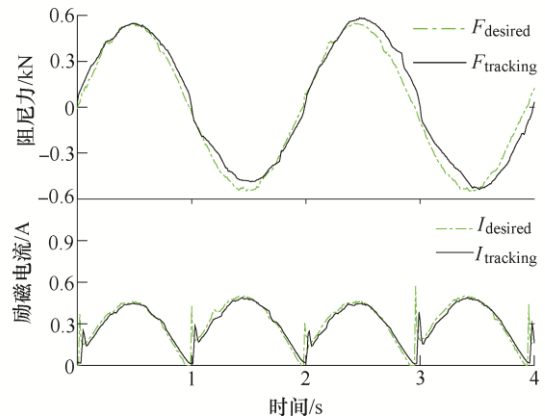


图 7 MREA 力跟踪系统快速控制原型系统



(a) 期望阻尼力和跟踪阻尼力、期望励磁电流和实际励磁电流的时间历程曲线

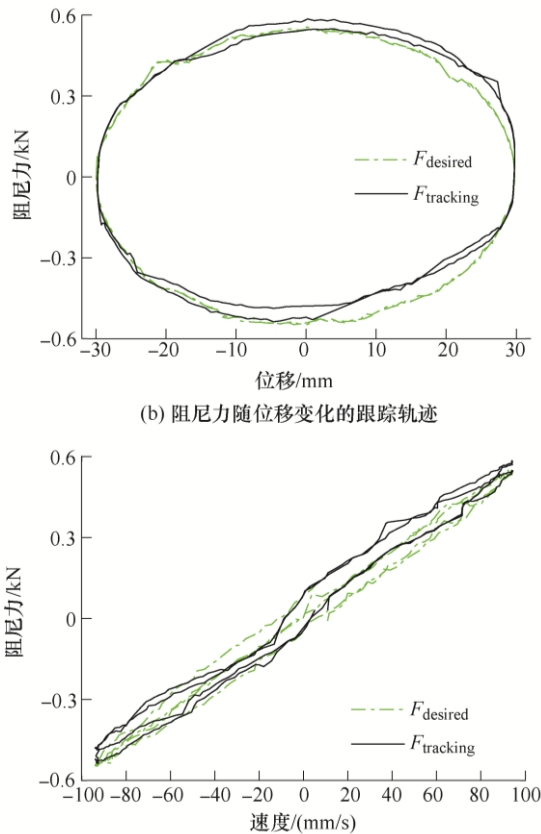


图 8 力跟踪系统试验结果

4.2 落锤冲击系统试验结果

图 9 是基于图 1 和图 2 搭建的落锤冲击“软着陆”快速控制原型系统。试验中 NI CompactRIO-9030 采集 MREA 位移和阻尼力信号并与计算机交互并输出控制信号至可控电流驱动器, 由可控电流驱动器输出期望励磁电流控制 MREA 的输出阻尼力, 达到落锤“软着陆”的目的。

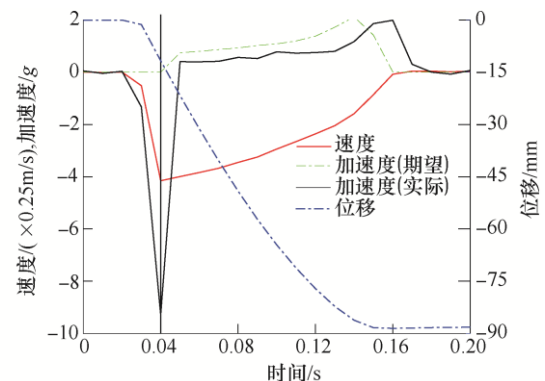


图 9 落锤冲击缓冲系统快速控制原型系统

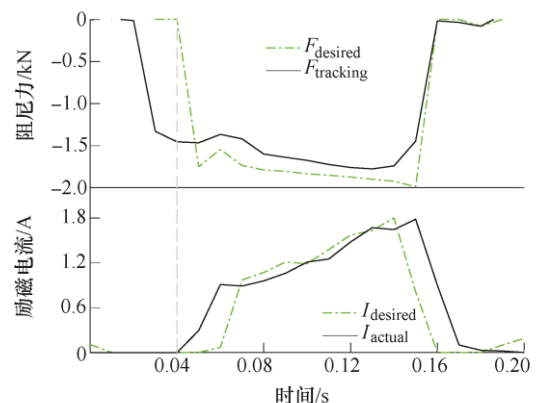
落锤下落产生初始激励速度与 MREA 活塞杆撞击, 二者获得同一速度(即图 1 中的 \dot{z})后完成“软着陆”。值得注意的是, 以落锤下落撞击 MREA 活塞杆达到同一速度为临界, 之前为准备阶段, 之后

为“软着陆”阶段。准备阶段是本文获取冲击激励的初始速度的手段, 而“软着陆”的控制对象是落锤, 从“软着陆”阶段开始, MREA 活塞的响应即为落锤的响应。

设定 MREA 活塞最大安全行程为 90 mm(最大可用行程为 100 mm), 落锤质量为 93 kg。试验结果如图 10 所示, 图 10a 和图 10b 分别给出了 MREA 活塞杆位移、速度和加速度的时间历程曲线与控制器期望阻尼力和期望励磁电流、MREA 跟踪阻尼力和实际输入 MREA 励磁电流的时间历程曲线。如从图 10a 所示, 0.04 s 之前是准备阶段, 0.04 s 时刻落锤与活塞杆达到同一速度($\dot{z} = -1.0385 \text{ m/s}$)。0.04 s 后开始“软着陆”阶段, 绿色点划线是控制器输出的期望加速度。落锤实际加速度保持在期望加速度上下, 最终在 MREA 活塞下降 88.44 mm 时(即使用了设定的活塞行程的 98.27%), 落锤速度减小至 0, 达到了“软着陆”的目的。根据图 10b, 在 0.04 s 之前期望阻尼力为 0, MREA 活塞杆在落锤的撞击下获得较大速度。控制器在 0.04 s 做出控制信号响应, 并使可控电流驱动器输出期望励磁电流至 MREA, 使得落锤速度基本保持在同一加速度情况下减小至 0, 实现了落锤“软着陆”的控制目标。



(a) MREA 活塞位移、速度和加速度的时间历程曲线



(b) MREA 跟踪期望阻尼力的时间历程曲线和 MREA 输入励磁电流时间历程曲线

图 10 落锤冲击缓冲系统试验结果

5 结论

本文基于可控吸能执行器 MERA 实现了落锤的“软着陆”控制。基于基本 RC 算子的磁滞非线性模型提出 MREA 非线性阻尼力的前馈跟踪控制策略,并基于“软着陆”控制策略和系统状态反馈控制实现落锤下落冲击加速度的最小化。仿真和试验结果表明以下几点。

(1) 基于 RC 算子磁滞非线性模型的前馈跟踪控制策略可以用以实现期望阻尼力地精确跟踪,仅在受到 MREA 自身残余阻尼力的影响下,出现了不可避免的微小跟踪误差。

(2) 根据“软着陆”控制策略设计的冲击缓冲控制系统,可以实现落锤“软着陆”的控制目标:落锤速度在同一加速度下减小至 0 时 MREA 可用行程几乎用完(使用了活塞全部行程的 98.27%)。未能精确使用全部活塞行程的原因在于 MREA 的磁滞非线性力未能被基于 RC 算子磁滞非线性模型精确预测。磁流变系统的精确控制应用的基本前提依然是高效的磁滞非线性模型。

所实现的磁流变半主动落锤冲击缓冲控制,对磁流变技术在诸如特种车辆减振抗爆座椅、飞机起落架、火炮后座的反冲缓冲系统中的应用奠定了重要理论基础,提供了可靠的技术手段。

参 考 文 献

- [1] BOILEAU P É, RAKHEJA S. Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver: Measurement and model development[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1998, 22(6): 449-472.
- [2] DESJARDINS S P. The evolution of energy absorption systems for crashworthy helicopter seats[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2006, 51(2): 150-163.
- [3] WU Y C, CHANG H, TSUNG T T. Dynamic characteristics of a recoil system when firing projectiles with mach 4.4 muzzle velocity from a 105 mm cannon[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2010, 39(4): 509-513.
- [4] 张莉洁, 常家东, 王炅, 等. 磁流变冲击后坐控制系统试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 115-120.
ZHANG Lijie, CHANG Jiadong, WANG Jiong, et al. Experiments on magneto-rheological recoil control system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 115-120.
- [5] 潘公宇, 杨海, 徐腾跃, 等. 磁流变液阻尼器试验与建模研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6): 36-40.
PAN Gongyu, YANG Hai, XU Tengyue, et al. Tests and modeling for magneto-rheological (MR) dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6): 36-40.
- [6] 胡红生, 王炅, 钱苏翔, 等. 冲击载荷下的磁流变减振器动力学建模与滑模控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 84-91.
HU Hongsheng, WANG Jiong, QIAN Suxiang, et al. Dynamic modeling and its sliding controller of MR shock absorber under impact load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 84-91.
- [7] SHOU M, LIAO C, ZHANG H, et al. Modeling and testing of magnetorheological energy absorbers considering inertia effect with non-averaged acceleration under impact conditions[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(11): 115028.
- [8] 程明, 陈照波, 杨树涛, 等. 应用磁流变技术的星箭界面半主动隔振研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1): 86-92.
CHENG Ming, CHEN Zhaobo, YANG Shutao, et al. Study of semi-active satellite and rocket system vibration isolation using magnetorheological technology[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(1): 86-92.
- [9] HIEMENZ G J, CHOI Y T, WERELEY N M. Semi-active control of vertical stroking helicopter crew seat for enhanced crashworthiness[J]. Journal of aircraft, 2007, 44(3): 1031-1034.
- [10] SINGH H J, WERELEY N M. Optimal control of gun recoil in direct fire using magnetorheological absorbers[J]. Smart materials and Structures, 2014, 23(5): 055009.
- [11] LI Z, GONG Y, WANG J. Optimal control with fuzzy compensation for a magnetorheological fluid damper employed in a gun recoil system[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(5): 677-688.
- [12] WERELEY N M, CHOI Y T, SINGH H J. Adaptive energy absorbers for drop-induced shock mitigation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(6): 515-519.
- [13] BAI X X, CHEN P, QIAN L J. Principle and validation of

- modified hysteretic models for magnetorheological dampers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(8): 085014.
- [14] CHEN P, BAI X X, QIAN L J, et al. An approach for hysteresis modeling based on shape function and memory mechanism[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3): 1270-1278.
- [15] BAI X X, CAI F L, CHEN P. Resistor-capacitor (RC) operator-based hysteresis model for magnetorheological (MR) dampers[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 157-169.

作者简介: 白先旭(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为智能结构与系统、车辆系统动力学与控制。
E-mail: bai@hfut.edu.cn