

引用格式: 冯忠强, 吴涛, 袁显举, 等. 磁流变缓冲座椅的最小峰值传递载荷控制方法 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 471-480.
FENG Z Q, WU T, YUAN X J, et al. Minimum peak transfer load control method for magnetorheological shock mitigation seat[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 471-480.

磁流变缓冲座椅的最小峰值传递载荷 控制方法



冯忠强^{1,2*}, 吴涛³, 袁显举^{1,2}, 张继伟^{1,2}, 邱天宇^{1,2}

(1. 湖北汽车工业学院 汽车工程学院, 十堰 442002; 2. 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室, 十堰 442002;
3. 中国兵器工业集团江山重工研究院有限公司, 襄阳 441057)

摘要: 针对最优常加速度控制方法在磁流变缓冲座椅系统中适用冲击强度范围小且不连续的问题, 提出了最小峰值传递载荷控制方法 (MPTL)。基于磁流变座椅系统的动力学方程, 理论推导出系统在 MPTL 方法控制下的状态, 并分析了 MPTL 方法的适用冲击强度范围及所需可控阻尼力范围; 仿真分析了 MPTL 方法在不同冲击条件下的缓冲防护效果, 并通过实验对仿真分析进行验证。结果表明, MPTL 方法不仅可以最小化传递载荷的峰值, 还对冲击强度和负载质量有较好的适应能力。

关键词: 磁流变阻尼器; 缓冲防护; 半主动控制; 峰值传递载荷

中图分类号: TH212

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024262

Minimum peak transfer load control method for magnetorheological shock mitigation seat

FENG Zhongqiang^{1,2*}, WU Tao³, YUAN Xianju^{1,2}, ZHANG Jiwei^{1,2}, and QIU Tianyu^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;
2. Hubei Key Laboratory of Automotive Power Train and Electronic Control, Shiyan 442002, China;
3. Jianshan Heavy Industries Research Institute Co., Ltd., Xiangyang 441057, China)

Abstract: To address the issue of a limited and discontinuous applicable impact intensity range for the optimal constant acceleration (OCA) control method in magnetorheological (MR) seat systems, a minimum peak transmitted load (MPTL) control method is proposed. Based on the dynamic equations of the MR seat system, the state of the system under MPTL control is theoretically derived, and the applicable impact intensity range and the required controllable damping force range for the MPTL method are analyzed. The shock mitigation performance of the MPTL method under various impact conditions is evaluated through simulations, and the simulation results are validated experimentally. The results show that the MPTL method not only minimizes the peak transmitted load but also exhibits strong adaptability to different impact intensities and load masses.

Key words: magnetorheological damper; shock mitigation protection; semi-active control; peak transmitted load

特种车辆中的缓冲座椅系统最主要的功能是减小传递的峰值冲击载荷, 以保护遭受冲击事件的乘员^[1-2]。在现有的缓冲座椅设计中, 常见的方案是使用被动式吸能器来吸收冲击的能量。尽管被动式的缓冲座椅具有结构简单、可靠性高、成本低等优点, 但因为被动式吸能器的载荷特性曲线固定, 无

法对不同工况下的冲击进行调整, 难以达到最佳的缓冲效果^[3-6]。为了使缓冲座椅对不同工况的冲击事件具有一定的适应能力, 以主动式吸能器为核心部件的缓冲座椅被提出。但因为主动式缓冲座椅系统结构复杂、功耗大及成本高等缺点, 限制了它的推广应用^[7]。而使用磁流变阻尼器作为吸能器的缓冲

收稿日期: 2024-09-22

基金项目: 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室项目 (ZDK1201307)

作者简介: 冯忠强, 博士生, 主要从事振动与噪声控制方面的研究。

*通信作者 E-mail: fzqrsyj@163.com

座椅, 结合了被动式缓冲座椅结构简单、高可靠性的优点以及主动式缓冲座椅的冲击工况适应能力, 具有更大的应用潜力^[8-9]。

充分发挥磁流变缓冲座椅的性能需要优秀的半主动缓冲控制方法。为了提高乘员被冲击的安全性, 需尽可能减小传递给系统的峰值冲击载荷, 而实现这一目标的有效策略是“软着陆”, 即充分利用磁流变阻尼器的行程, 使系统负载恰好停止在行程的终点处^[10]。以“软着陆”为控制目标, 文献[11]提出了一种最优常可控阻尼力控制方法, 根据系统状态计算实现“软着陆”所需的可控阻尼力, 称为最优宾汉数控制方法。文献[12-13]对最优宾汉数控制方法进行了改进, 提出了考虑时间滞差的最优宾汉数控制方法, 减小了磁流变阻尼器的响应时间对缓冲控制的影响。在最优宾汉数方法的控制过程中, 磁流变阻尼器输出的可控阻尼力保持不变, 因此峰值传递载荷仍有下降的空间。文献[14-15]提出了最优常加速度(optimal constant acceleration, OCA)控制方法, 在缓冲过程中使系统负载的加速度保持为最优常值, 进一步减小传递的峰值冲击载荷。但磁流变阻尼器的可控阻尼力范围限制了最优常加速度控制方法的适用冲击强度范围, 无法充分利用磁流变阻尼器的耗能能力。

针对最优常加速度控制方法的适用冲击强度范围较小的问题, 本文提出了最小峰值传递载荷(minimum peak transmitted load, MPTL)控制方法。首先, 给出了磁流变缓冲座椅的系统动力学方程, 并通过仿真展示了 OCA 控制方法的局限性, 而后推导了 MPTL 控制方法。再进行 MPTL 方法的应用分析, 包括适用冲击强度范围分析、所需可控阻尼力范围分析以及应用仿真。最后, 搭建了缓冲控制实验平台, 对 MPTL 控制方法的缓冲控制进行了实验验证。

1 MPTL 控制方法

1.1 磁流变缓冲座椅的动力学方程

图 1 展示了单自由度磁流变缓冲座椅系统的模型, 它将乘员和椅面等效为系统的负载质量 m 。磁流变阻尼器连接负载和基础, 用于吸收传递的冲击能量, 它的可用行程为 S 。冲击事件等效为负载的初始下落速度 v_0 , 负载下落的位移为 x 。

对于图 1 所示的单自由度磁流变缓冲座椅系统, 它的动力学方程可以表示为:

$$ma(t) = mg - F_{MR}(t) \quad (1)$$

式中, $a(t)$ 为系统负载的加速度; g 为重力加速

度; $F_{MR}(t)$ 为磁流变阻尼器输出的阻尼力, 由不可控的粘滞阻尼力和可控阻尼力组成, 可表示为:

$$F_{MR}(t) = cv(t) + F_c(t) \quad (2)$$

式中, $v(t)$ 为负载的下落速度, 等同于磁流变阻尼器的活塞运动速度; c 为磁流变阻尼器的粘滞阻尼系数; $F_c(t)$ 为磁流变阻尼器的可控阻尼力。

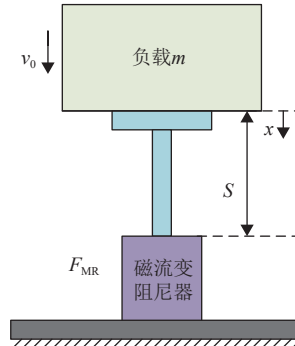


图 1 单自由度磁流变缓冲座椅系统

当冲击事件发生时, 磁流变缓冲座椅系统的初始运动状态为:

$$x(0) = 0, v(0) = v_0 \quad (3)$$

为了提高乘员的安全性, 将“软着陆”作为系统的控制目标, 即负载下降到行程终点时速度恰好为 0。当控制结束时间为 t_s 时, “软着陆”控制目标可表示为:

$$x(t_s) = S, v(t_s) = 0 \quad (4)$$

1.2 OCA 控制方法的局限性

OCA 控制方法是以“软着陆”为控制目标的方法, 在控制过程中使负载加速度保持这个最优常值 a_{oca} 。由于磁流变阻尼器的可控阻尼力非负且存在上限, OCA 方法在磁流变缓冲系统中的应用受到较大限制。通过不同冲击强度下 OCA 方法的缓冲表现进行仿真分析, 进一步看出其局限性, 系统参数如表 1 所示。

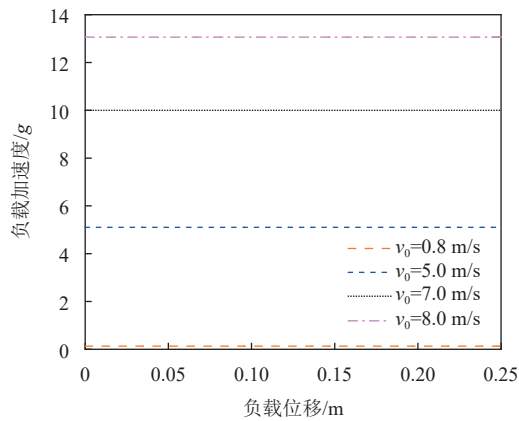
表 1 系统仿真参数

参数	值
负载质量 m/kg	80
粘滞阻尼系数 $c/\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$	1 100
阻尼器行程 S/m	0.25
最大许用加速度 a_{\max}/g	14.5
最大可控阻尼力 $F_{c\max}/\text{kN}$	9

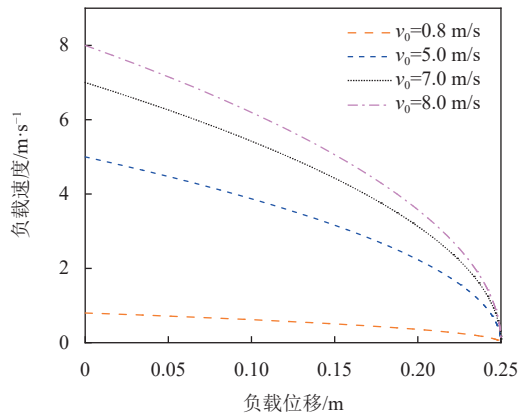
表 1 中的最大许用加速度 a_{\max} 为美军陆军飞行员可接受的乘员损伤风险对应的峰值加速度^[11]; 最大可控阻尼力 $F_{c\max}$ 为磁流变阻尼器在通入饱和

电流时输出的可控阻尼力。

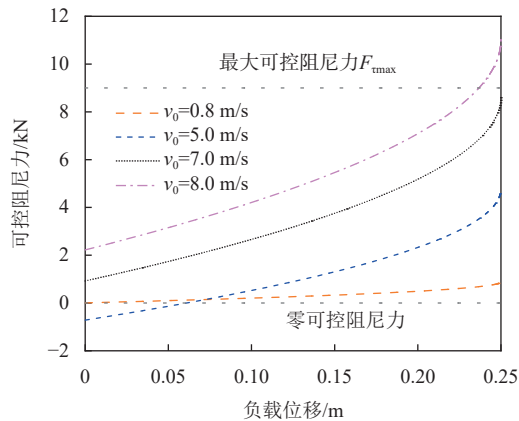
从图2中可以看出, 当冲击强度为0.8 m/s和7.0 m/s时, 最优常加速度方法可以使系统实现“软着陆”控制目标。然而, 当冲击强度为5.0 m/s和8.0 m/s时, OCA方法实现“软着陆”所需的可控阻尼力要么过小(负数), 要么过大(超过最大值 F_{cmax}), 超出了磁流变阻尼器的能力范围。由此可以得出, OCA方法在磁流变缓冲座椅系统中的适用冲击强度范围较小且不连续。



a. 负载位移-负载加速度响应图



b. 负载位移-负载速度响应图



c. 负载位移-可控阻尼力响应图

图2 OCA控制方法仿真结果

1.3 MPTL 控制方法

针对OCA控制方法在磁流变座椅系统中适用冲击强度范围较小的局限性, 提出了一种改进方法——MPTL控制方法。该方法在保持OCA方法最小峰值传递载荷特点的同时, 拓展了适用冲击强度的范围。结合磁流变阻尼器可控阻尼力的特性, MPTL方法划分为3个阶段: 被动控制阶段、常加速度阶段以及最大阻尼力阶段。

1.3.1 被动控制阶段

被动控制阶段是MPTL方法的初始阶段。在此阶段, 由于负载速度较高, 磁流变阻尼器输出的不可控阻尼力过大, 负载的加速度超过MPTL方法所确定的最优加速度 a_{MPTL} 。因此, 磁流变阻尼器输出的可控阻尼力保持为最小值(即0), 表现出被动特性。这一阶段的系统状态为:

$$a(t) = g - \frac{c}{m}v(t) \quad (5)$$

将式(3)所示的初始条件代入到式(5)中, 推导出负载的速度表达式为:

$$v(t) = \frac{mg}{c} - \frac{mg - cv_0}{c}e^{-\frac{ct}{m}} \quad (6)$$

引入无量纲变量 R_v 以及时间常数 τ :

$$R_v = \frac{mg}{cv_0} \quad \tau = \frac{m}{c} \quad (7)$$

对式(6)进行化简后为:

$$v(t) = v_0 \left(R_v + (1 - R_v)e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (8)$$

对式(8)进行积分, 并结合式(3)所示的初始条件, 可以获得负载的位移为:

$$x(t) = v_0 \left[R_v t + \tau(R_v - 1) \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

将 $a(t)$ 、 $v(t)$ 、 $x(t)$ 和 $F_c(t)$ 定义为系统状态。若被动控制阶段的持续时间为 t_1 , 则该阶段结束时的系统状态可以表示为:

$$\begin{cases} a_1 = a(t = t_1) = \frac{v_0(R_v - 1)e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{\tau} \\ v_1 = v(t = t_1) = v_0 \left(R_v + (1 - R_v)e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right) \\ x_1 = x(t = t_1) = v_0 \left[R_v t_1 + \tau(R_v - 1) \left(e^{-\frac{t_1}{\tau}} - 1 \right) \right] \\ F_{c1} = F_c(t = t_1) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

1.3.2 常加速度阶段

当负载加速度降低至MPTL方法确定的最优

常值 a_{MPTL} 时, 系统进入常加速度阶段。在该阶段, 负载加速度维持在最优常值 a_{MPTL} , 且被动控制阶段结束时的系统状态为该阶段的初始状态。此阶段的负载加速度为:

$$a(t) = a_{\text{MPTL}} = a_1 \quad (11)$$

结合式 (10) 对式 (11) 积分, 可以获得该阶段的负载速度方程为:

$$v(t) = v_1 + a_{\text{MPTL}}(t - t_1) \quad (12)$$

类似地, 式 (12) 积分后获得该阶段的负载位移为:

$$x(t) = x_1 + v_1(t - t_1) + \frac{a_{\text{MPTL}}(t - t_1)^2}{2} \quad (13)$$

将式 (12) 带入到式 (2) 中, 可以得到当前阶段的可控阻尼力为:

$$F_c(t) = mg - c(v_1 + a_{\text{MPTL}}(t - t_1)) - ma_{\text{MPTL}} \quad (14)$$

若常加速度阶段的结束时间为 t_2 , 则该阶段结束时的系统状态可以表示为:

$$\begin{cases} a_2 = a(t = t_2) = a_1 \\ v_2 = v(t = t_2) = v_1 + a_1(t_2 - t_1) \\ x_2 = x(t = t_2) = x_1 + v_1(t_2 - t_1) + \frac{a_1(t_2 - t_1)^2}{2} \\ F_{c2} = F_c(t = t_2) = mg - c(v_1 + a_1(t_2 - t_1)) - ma_1 \end{cases} \quad (15)$$

1.3.3 最大阻尼力控制阶段

在常加速度阶段, 磁流变阻尼器输出的可控阻尼力逐渐增加。当可控阻尼力达到最大值 $F_{c\text{max}}$ 时, 系统进入最大阻尼力控制阶段, 此时可控阻尼力保持在最大值 $F_{c\text{max}}$ 不变:

$$F_c(t) = F_{c\text{max}} \quad (16)$$

此时, 负载的加速度为:

$$a(t) = g - \frac{cv(t)}{m} - \frac{F_{c\text{max}}}{m} \quad (17)$$

式 (17) 积分后得到负载的速度方程为:

$$v(t) = v_2 \left[\left(1 + \frac{F_{c\text{max}}}{cv_2} - \frac{mg}{cv_2} \right) e^{\frac{t-t_2}{\tau}} + \frac{mg}{cv_2} - \frac{F_{c\text{max}}}{cv_2} \right] \quad (18)$$

引入无量纲变量对式 (18) 简化:

$$B_i = \frac{F_{c\text{max}}}{cv_2}, \quad R_{v2} = \frac{mg}{cv_2}, \quad R_s = \frac{\tau v_2}{x_2} \quad (19)$$

简化后的负载速度方程为:

$$v(t) = v_2 \left[R_{v2} - B_i + (1 + B_i - R_{v2}) e^{\frac{t-t_2}{\tau}} \right] \quad (20)$$

式 (20) 积分后可获得负载的位移方程:

$$x(t) = x_2 \left[R_s(1 + B_i - R_{v2}) \left(1 - e^{\frac{t-t_2}{\tau}} \right) + R_s(R_{v2} - B_i) \frac{t-t_2}{\tau} + 1 \right] \quad (21)$$

若最大阻尼力控制阶段的结束时间为 t_3 , 则该阶段结束时的系统状态可以表示为:

$$\begin{cases} a_3 = a(t = t_3) = \frac{v_2}{\tau} (R_{v2} - B_i - 1) e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} \\ v_3 = v(t = t_3) = v_2 \left[R_{v2} - B_i + (1 + B_i - R_{v2}) e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} \right] \\ x_3 = x(t = t_3) = x_2 \left[R_s(1 + B_i - R_{v2}) \left(1 - e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} \right) + R_s(R_{v2} - B_i) \frac{t_3-t_2}{\tau} + 1 \right] \\ F_{c3} = F_c(t = t_3) = F_{c\text{max}} \end{cases} \quad (22)$$

因为最大阻尼力控制阶段为 MPTL 方法的结束阶段, 所以式 (22) 也是控制结束时的系统状态, 将其与“软着陆”目标结合, 可以得到确定控制过程的方程组:

$$\begin{cases} F_{c3} = F_{c2} = F_{c\text{max}} \\ v_3 = v_2 \left[R_{v2} - B_i + (1 + B_i - R_{v2}) e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} \right] = 0 \\ x_3 = x_2 \left[R_s(1 + B_i - R_{v2}) \left(1 - e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} \right) + R_s(R_{v2} - B_i) \frac{t_3-t_2}{\tau} + 1 \right] = S \end{cases} \quad (23)$$

求解式 (23) 可以得到 MPTL 方法 3 个阶段的结束时间, 将它们作为中间变量, 可以求得 MPTL 方法的最优常加速度值 a_{MPTL} , 进而确定整个控制过程。可以看出, OCA 方法是 MPTL 方法的特例, 是被动控制阶段和最大阻尼力控制阶段持续时间为零的 MPTL 方法, 并且可以通过反证法证明 MPTL 方法具有最小的峰值传递载荷。

2 MPTL 方法的应用分析

2.1 适用冲击强度范围

适用冲击强度范围是评估缓冲控制方法性能的关键指标。由于 MPTL 方法是对 OCA 方法的改进, 因此有必要对两种方法的适用冲击强度范围进行对比分析。

2.1.1 OCA 方法的适用冲击强度范围

适用冲击强度范围受行程和磁流变阻尼器的可控阻尼范围共同影响, 其中行程与“软着陆”目标密切相关。当以“软着陆”为控制目标时, OCA

方法的非零适用冲击强度边界 v_{OCA} 与行程 S 间的关系为:

$$v_{OCA}^2 = -2aS \quad (24)$$

当可控阻尼力为最小值 0 时, 系统的动力学方程可表示为:

$$mg - cv_{OCA} = ma \quad (25)$$

当可控阻尼力为最大值 F_{cmax} 时, 系统的动力学方程可为:

$$mg - F_{cmax} = ma \quad (26)$$

结合式 (24) 和式 (25), 可以得到关于 v_{OCA} 的一元二次方程:

$$\frac{mv_{OCA}^2}{2S} - cv_{OCA} + mg = 0 \quad (27)$$

可以得到 v_{OCA} 的一个表达式:

$$v_{OCA1}(S) = \frac{S}{\tau} \pm \sqrt{\left(\frac{S}{\tau}\right)^2 - 2Sg} \quad S \geq 2\tau^2g \quad (28)$$

同样地, 结合式 (24) 和式 (26) 求解, 可以得到 v_{OCA} 的另一个表达式:

$$v_{OCA2}(S) = \sqrt{2S\left(\frac{F_{cmax} - mg}{m}\right)} \quad (29)$$

将式 (25) 和式 (26) 联立, 可以得到 OCA 方法非零冲击边界最大值为:

$$v_{OCAmax} = \frac{F_{cmax}}{c} \quad (30)$$

2.1.2 MPTL 方法的适用冲击强度范围

用 v_{MPTL} 表示 MPTL 方法的最大可控冲击强度。当行程较小时, MPTL 方法的被动控制阶段和常加速阶段的持续时间为零, 此时 v_{MPTL} 与行程的关系为:

$$S(v_{MPTL}) = \frac{m(mg - F_{cmax})}{c^2} \ln\left(\frac{F_{cmax} - mg - cv_{MPTL}}{F_{cmax} - mg}\right) - \frac{mv_{MPTL}}{c} \quad (31)$$

$$0 \leq v_{MPTL} \leq v_{MPTL1}$$

式中, v_{MPTL1} 为冲击强度边界的一个阈值, 对应负载的最大许用加速度 a_{max} 以及行程阈值 S_1 , 有:

$$v_{MPTL1} = \frac{mg - F_{cmax} - ma_{max}}{c} \quad (32)$$

当行程超过 S_1 时, v_{MPTL} 超过阈值 v_{MPTL1} , 系统要经历常加速度和最大阻尼力控制两个阶段才能实现“软着陆”, 对应的阻尼器行程 S 和 v_{MPTL} 的

关系可以表示为:

$$v_{MPTL}(S) = \sqrt{2a_{max}(S - S_1) + v_{MPTL1}^2} \quad S_1 \leq S \leq S_2 \quad (33)$$

式中, 行程阈值 S_2 对应了 v_{MPTL} 的另一个阈值 v_{MPTL2} , 此时常加速度阶段的初始可控阻尼力为 0。因此, v_{MPTL2} 为:

$$v_{MPTL2} = \frac{ma_{max} - mg}{c} \quad (34)$$

对于行程超过阈值 S_2 的情况, v_{MPTL} 保持为阈值 v_{MPTL2} 不变, 实现“软着陆”需要经历 MPTL 方法的全部 3 个阶段:

$$v_{MPTL}(S) = v_{MPTL2} \quad S > S_2 \quad (35)$$

2.1.3 适用冲击强度范围对比

图 3 对比展示了 OCA 方法和 MPTL 方法的适用冲击强度范围与行程间的关系, 此时系统的其他参数与表 1 相同。

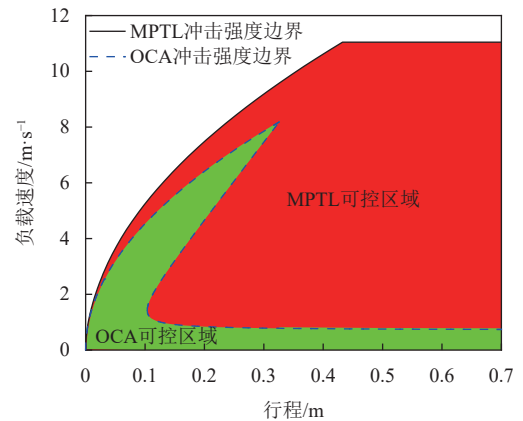


图3 适用冲击强度范围对比图

在图 3 中, 适用冲击强度边界与坐标轴围成的区域代表了对应控制方法的适用冲击强度范围。OCA 方法的适用冲击强度范围小, 在行程超过 0.1 m 后被划分成两个不连续的区域。MPTL 方法的适用冲击强度范围明显大于 OCA 方法, 且区域连续。MPTL 方法的最大适用冲击强度为 11.047 m/s, 大于 OCA 方法的 8.182 m/s, 提升了约 35%。MPTL 方法的适用冲击强度范围约为 OCA 方法的 3 倍。

2.2 MPTL 方法所需可控阻尼力

由于 MPTL 方法在最大阻尼力控制阶段的可控阻尼力保持为最大值, 因此有必要分析实现“软着陆”所需的最大可控阻尼力的范围。

当系统的最大可控冲击强度为 v_{max} 时, 受最

大许用加速度 a_{\max} 的限制, 实现“软着陆”所需的最小行程的 S_{\min} , 它们的关系为:

$$v_{\max}^2 = 2a_{\max}S_{\min} \quad (36)$$

当行程大于阈值 S_{\min} 时, 实现“软着陆”目标所需的最小可控阻尼力为 F_{\min} 。此时, 系统需经历 MPTL 方法的常加速度阶段和最大阻尼力控制阶段, 且常加速度 a_{MPTL} 等于 a_{\max} 。因此, 最小可控阻尼力 F_{\min} 与行程的关系为:

$$S = x_1 \left[1 + R_{s2}T(R_{v3} - B_{i2}) + R_{s2}(1 + B_{i2} - R_{v3})(1 - e^{-T}) \right] \quad S \geq S_{\min} \quad (37)$$

式中, 无量纲变量为:

$$B_{i2} = \frac{F_{\min}}{cv_1}, \quad R_{s2} = \frac{\tau v_1}{x_1}, \quad R_{v3} = \frac{mg}{cv_1}; \quad (38)$$

$$T = -\log\left(\frac{B_{i2} - R_{v3}}{1 + B_{i2} - R_{v3}}\right)$$

由于 MPTL 方法包含最大阻尼力阶段, 系统可充分利用最大可控阻尼力 F_{\max} 。当冲击强度为 v_{\max} 时, 实现“软着陆”仅需经历被动控制阶段和常加速度阶段, 且常加速度阶段结束时的可控阻尼力恰好为 F_{\max} 。因此, 常加速度阶段的初始系统状态为:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{mg - F_{\max}}{m} \\ v_2 = \frac{F_{\max}}{c} \\ x_2 = \tau v_{\max} \left(1 - \frac{F_{\max}}{cv_{\max}} - \frac{mg}{cv_{\max}} \log\left(\frac{mg - F_{\max}}{mg - cv_{\max}}\right) \right) \\ F_2 = 0 \end{cases} \quad (39)$$

求解式 (39), 得到 F_{\max} 与行程 S 之间的关系为:

$$S = -\frac{v_2^2}{2a_2} + x_2 \quad S \geq S_{\min} \quad (40)$$

图 4 给出了所需可控阻尼力与磁流变阻尼器行程间的关系图, 此时系统的其他参数与表 1 一致。

从图 4 中可以看出, 最小可控阻尼力 F_{\min} 与最大可控阻尼力 F_{\max} 随行程的增加而减小。当最大可控阻尼力小于 F_{\min} 时, 系统性能不足, 无法耗散全部的冲击能量, 造成二次端部冲击, 无法实现“软着陆”目标; 当最大可控阻尼力大于 F_{\max} 时, 虽然可以实现“软着陆”, 但阻尼器耗能能力未被充分利用, 磁流变阻尼器的结构尺寸可进一步优化。两曲线间的区域为磁流变缓冲座椅系统的结构设计提供参考。

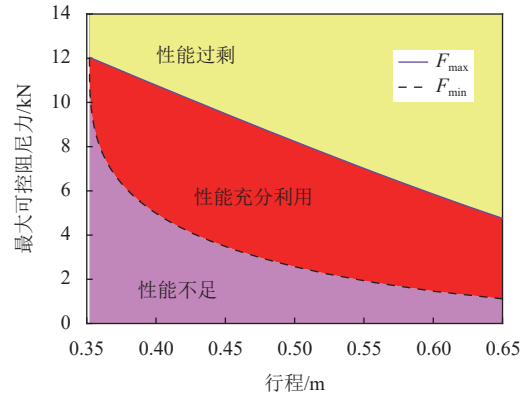
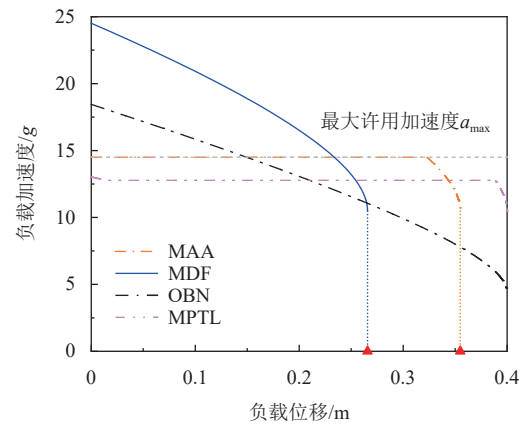


图 4 系统所需的可控阻尼力

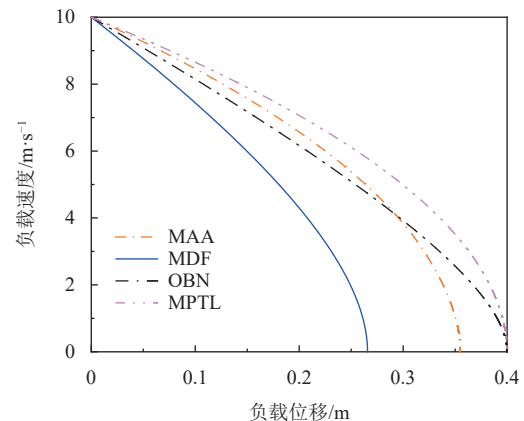
2.3 MPTL 方法的应用仿真

2.3.1 不同控制方法的仿真结果

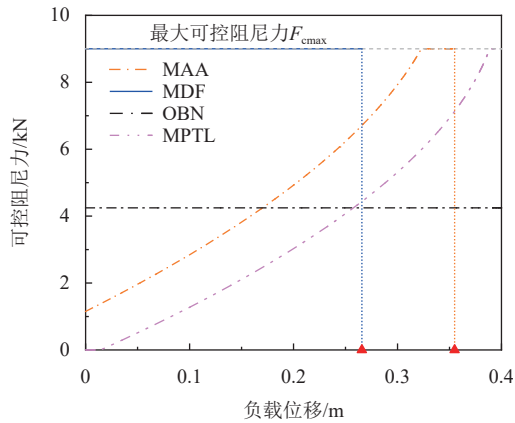
对不同的缓冲控制方法进行缓冲控制仿真, 对比方法分别选用最大许用加速度 (maximum allowable acceleration, MAA) 方法^[8]、最大阻尼力 (maximum damping force, MDF) 方法^[14]、最优宾汉数 (optimal Bingham number, OBN) 方法^[11]和 MPTL 方法。冲击强度为 10 m/s, 行程为 0.4 m, 其他参数如表 1 所示, 仿真结果如图 5 所示。



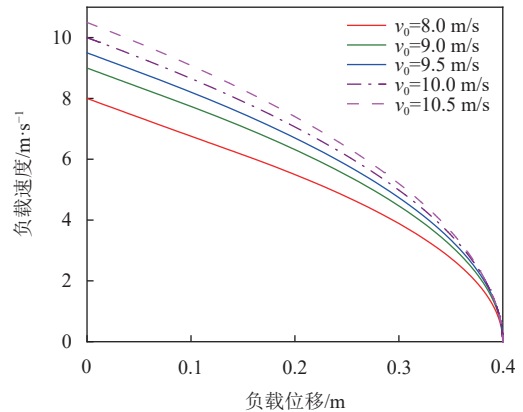
a. 负载位移-负载加速度响应图



b. 负载位移-负载速度响应图



c. 负载位移-可控阻尼力响应图



b. 负载位移-负载速度响应图

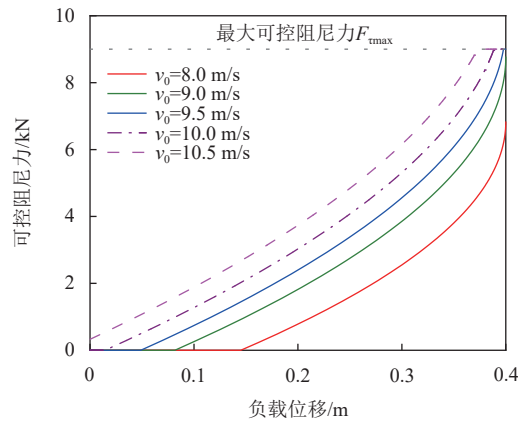
图5 不同控制方法的控制效果

由图5可见, 系统在 MAA 方法和 MDF 方法控制下, 在行程终点前停止, 未能实现“软着陆”; 而 OBN 方法和 MPTL 方法可以实现“软着陆”。在 MDF 方法和 OBN 方法控制下, 峰值传递载荷分别为 24.50 g 和 18.45 g, 均超过最大许用值 14.50 g; MAA 方法控制下的峰值传递载荷等于 14.50 g, 但长时间保持在该峰值不变; MPTL 方法的峰值传递载荷最小, 为 13.03 g, 且峰值维持时间较短。综上, MPTL 方法具有最好的缓冲控制表现。

2.3.2 不同冲击强度的仿真结果

图6给出了不同冲击强度下, 系统在 MPTL 方法控制下的缓冲表现。

由图6可见, MPTL 方法能够在不同强度的冲击下实现“软着陆”控制目标, 表明其对冲击强度具有良好的适应性。随着冲击强度的增加, 负载的峰值传递载荷增加, 被动控制阶段的持续时间缩短, 而最大阻尼力控制阶段的持续时间增加。这是因为冲击强度增大导致需耗散的能量增加, 进而需要更大的可控阻尼力。



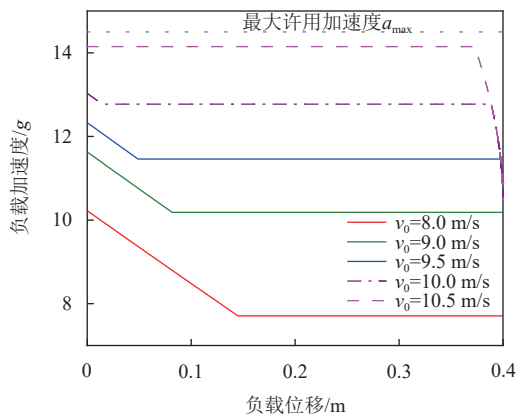
c. 负载位移-可控阻尼力响应图

图6 不同冲击强度下的控制效果

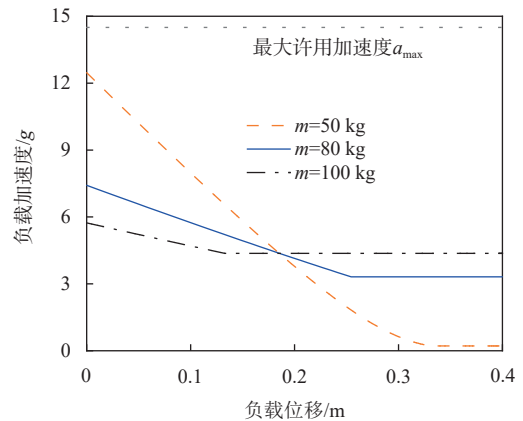
2.3.3 不同负载质量的仿真结果

图7给出了不同负载质量时, 系统在 MPTL 方法控制下的缓冲表现。

由图7可见, MPTL 方法能够在不同负载质量的系统中实现“软着陆”控制目标, 表明其对负载质量具有良好的适应性。负载的峰值加速度随负载质量的增加而减小, 这是因为在相同冲击强度下, 磁流变阻尼器提供的零场阻尼力相同, 因此较小质量的负载加速度较大。



a. 负载位移-负载加速度响应图



a. 负载位移-负载加速度响应图

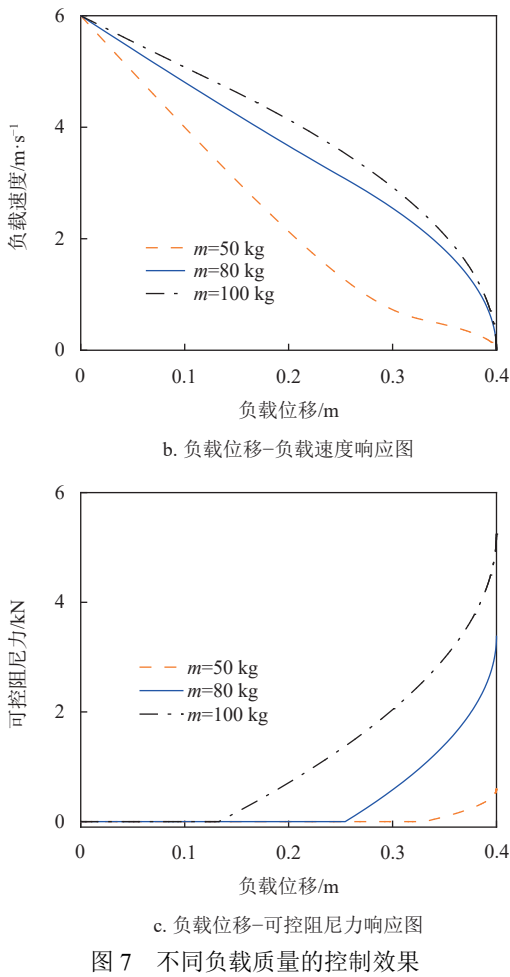


图 7 不同负载质量的控制效果

3 实验研究

为了验证 MPTL 方法的理论和控制效果，搭建了缓冲控制实验平台，平台原理及实物如图 8 所示。实验平台的核心为 CEAST9350 落锤试验机，通过配套控制软件使落锤上升到指定高度后自由下落，从而提供特定的冲击激励。装配的速度传感器可以测量落锤的速度信息，磁流变阻尼器通过夹具固定在试验机下方的箱体内。冲击台面安装在磁流变阻尼器的活塞杆上，并配有蜂窝块，以便三者沿竖直方向共同运动。电控系统由 xPC 实时控制系统、传感器、宿主计算机、目标计算机和驱动电源等组成。传感器测量的信息通过采集卡输入目标计算机；目标机根据输入信息和程序生成指令，并通过输出卡传递给驱动电源，最终完成控制过程。

对 MAA 方法、MDF 方法、OBN 方法和 MPTL 方法进行了缓冲控制实验。实验设定行程为 100 mm，最大可控阻尼力为 1 500 N，实验结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，在 MAA 方法和 MDF 方法的控制下，负载提前停止在 60 mm 处，未能充分利用磁流变阻尼器的行程，没有实现“软着陆”目标。

OBN 方法和 MPTL 方法均实现了“软着陆”目标，但 MPTL 方法的负载峰值加速度最小，仅为 9.17 g，优于 OBN 方法的 13.05 g，展现出较优的缓冲控制实验效果。不同方法控制下负载的峰值加速度以及 MPTL 方法相对不同使峰值加速度降低的幅度如表 2 所示。

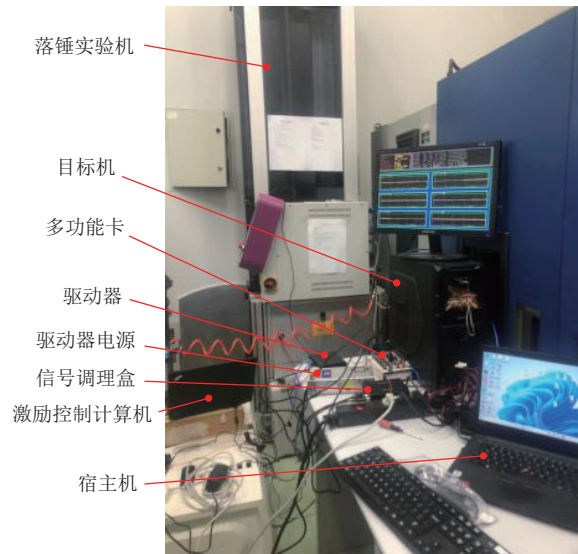
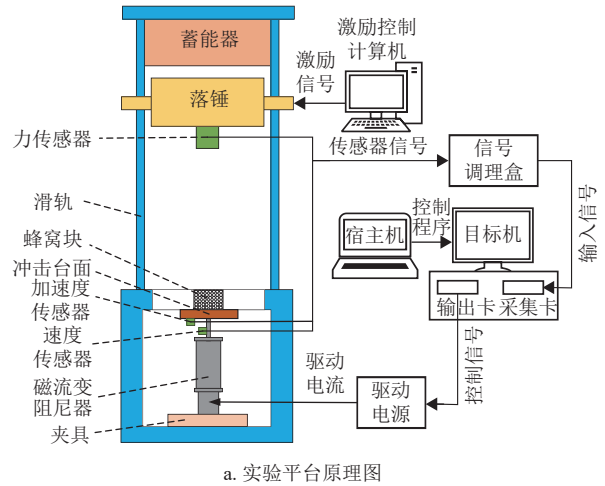


图 8 缓冲控制实验台

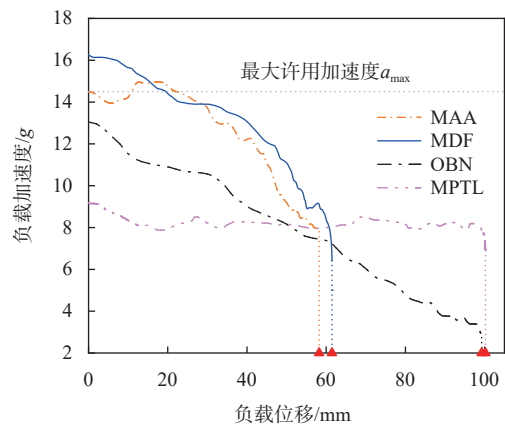
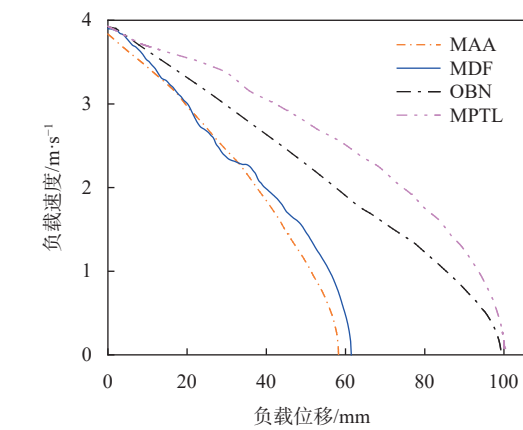
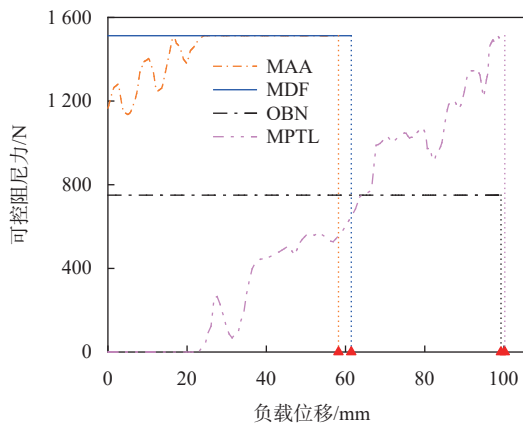


图 9 不同控制方法下负载的峰值加速度



b. 负载位移-负载速度响应图



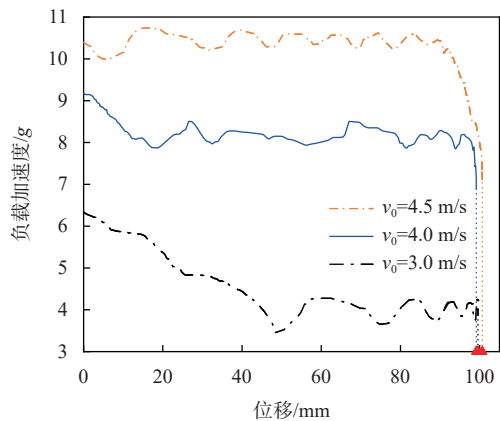
c. 负载位移-可控阻尼力响应图

图9 不同控制方法的实验结果

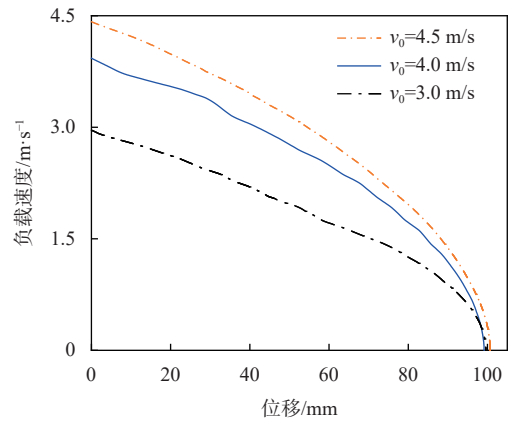
表2 负载峰值加速度及MPTL方法的提升幅度

控制方法	峰值加速度/g	MPTL的提升幅度/%
MAA	14.49	36.71
MDF	16.25	43.57
OBN	13.05	29.73
MPTL	9.17	—

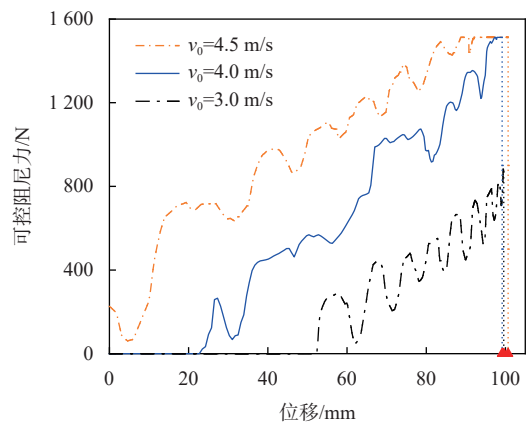
图10给出了不同冲击强度下MPTL方法的缓冲控制实验结果。



a. 负载位移-负载加速度响应图



b. 负载位移-负载加速度响应图

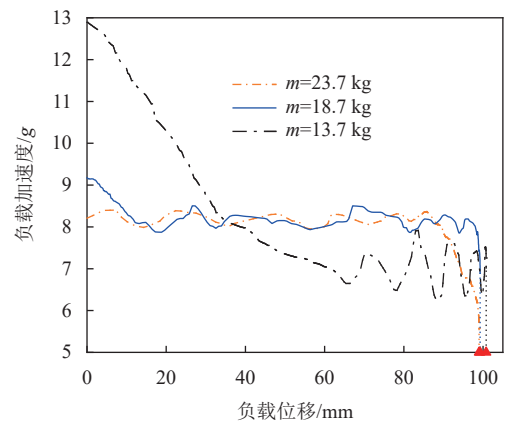


c. 负载位移-负载加速度响应图

图10 不同冲击强度时的实验结果

由图10可见, MPTL方法在不同冲击强度下均能使负载停止在近100 mm处, 实现“软着陆”目标, 验证了其冲击强度的适应性。同时, 峰值传递载荷随着冲击强度的增加而减小。

图11显示了不同负载质量下MPTL方法控制下的缓冲实验结果。可见, MPTL方法可以使不同质量的负载停止在接近100 mm处, 实现“软着陆”控制目标, 验证了其负载质量的适应性。同时, 峰值传递随负载质量的增加而减小。



a. 负载位移-负载加速度响应图

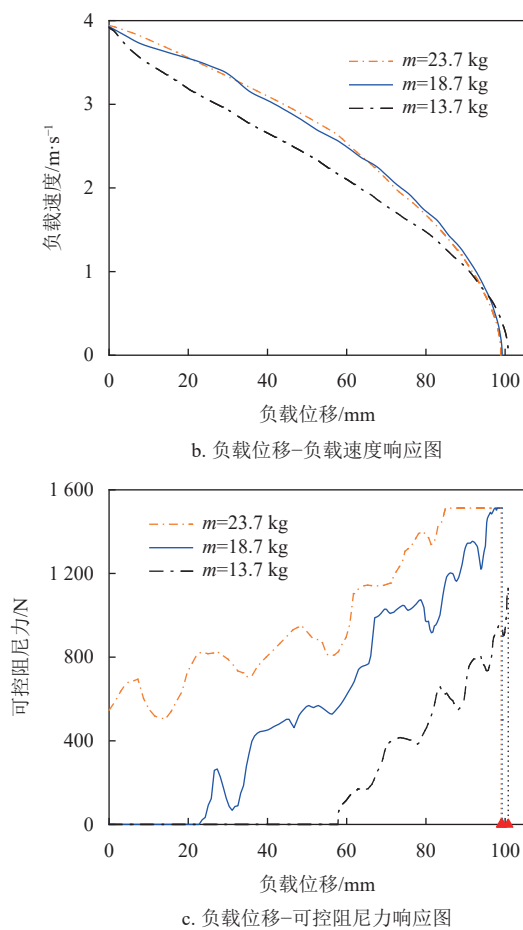


图 11 不同负载质量时的实验结果

4 结束语

针对最优常加速度控制方法的适用冲击强度范围较小的问题,本文提出了 MPTL 控制方法,在不同缓冲控制方法的实验结果中, MPTL 的峰值传递载荷最小,在磁流变缓冲座椅系统中具有更大的适用冲击强度范围。MPTL 控制方法对冲击强度和负载质量有良好的适应性。

参考文献

- [1] YANG X, MA J, WEN D, et al. Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A systematic literature review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 114: 100618.
- [2] JO B, JANG D, HWANG J, et al. Experimental validation for the performance of MR damper aircraft landing gear[J]. Aerospace, 2021, 8(9): 272.
- [3] FASANELLA E L, JACKSON K E. Impact testing and simulation of a crashworthy composite fuselage section

- with energy - absorbing seats and dummies[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2004, 49(2): 140-148.
- [4] 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.
- [5] JACKSON K E, FASANELLA E L, POLANCO M A. Simulating the response of a composite honeycomb energy absorber. I: Dynamic crushing of components and multiterrain impacts[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2014, 27(3): 424-436.
- [6] LI M, DENG Z, LIU R, et al. Crashworthiness design optimisation of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander[J]. International Journal of Crashworthiness, 2011, 16(4): 411-419.
- [7] YU Z, ZHOU X, ZHOU X, et al. Crashworthy subfloor structure of civil aircraft via inclined inward-folding composite tubes[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 189: 107887.
- [8] MACIEJEWSKI I, KRZYZYNSKI T. Control design of semi-active seat suspension systems[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 49(4): 1151-1168.
- [9] ZHANG J, AGRAWAL A K. An innovative hardware emulated simple passive semi-active controller for vibration control of MR dampers[J]. Smart Structures and Systems, 2015, 15(3): 831-846.
- [10] WANG L, ZHOU Y, SHI W, et al. Seismic response control of a nonlinear tall building under mainshock-aftershock sequences using semi-active tuned mass damper[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, DOI: 10.1142/S0219455423400278.
- [11] WERELEY N M, CHOI Y, SINGH H J. Adaptive energy absorbers for drop-induced shock mitigation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(6): 515-519.
- [12] CHOI Y, WERELEY N M. Drop-induced shock mitigation using adaptive magnetorheological energy absorbers incorporating a time lag[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2015, 137(1): 11010.
- [13] ZHANG H, WANG L, SHI W. Seismic control of adaptive variable stiffness intelligent structures using fuzzy control strategy combined with lstm[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107549.
- [14] 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): 55009.
- [15] ZURAWSKI M, GRACZYKOWSKI C, ZALEWSKI R. The prototype, mathematical model, sensitivity analysis and preliminary control strategy for adaptive tuned particle impact damper[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 564: 117799.

编辑 税红