

DOI : 10. 15951/j. tmgcxb. 2022. S1. 0435

# 非理想型颗粒惯容系统的减震性能研究

鲁正<sup>1,2</sup> 周超杰<sup>1</sup> 谢丽宇<sup>1</sup> 陈云<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 海南大学, 海南海口 570228)

**摘要:** 该文考虑了非理想型惯容系统中阻尼的存在, 将 PTMD 与惯容系统(惯容单元和阻尼单元并联)相结合, 提出一种新的减震系统—颗粒惯容系统(Particle Inerter System, PIS)。首先, 基于简谐荷载激励分析了惯容系统的动力响应特性; 随后, 建立了 PIS 基于单自由度结构的运动控制方程, 对比研究了 PIS 和 PTMD 在地震激励下的减震性能; 最后, 以 El Centro 波为例, 对 PIS 的减震机理展开分析, 并得到惯质比和阻尼系数对 PIS 控制效果的影响。研究表明, PIS 在不同地震激励作用下的减震性能良好, 相较于 PTMD 减震效果更好, 可以有效抑制单自由度主体结构的震动; 在 El Centro 波作用下, PIS 相比于 PTMD 的峰值和均方根响应减震优势均在 26% 以上, 阻尼器工作行程减少 47.54%, 阻尼器的耗能效率更高, 进而可实现高性能要求下 PTMD 的轻质化设计; 随着惯质比的增大, PIS 的控制效果呈上升趋势, 而阻尼系数则恰恰相反。

**关键词:** 颗粒调谐质量阻尼器; 惯容系统; 颗粒惯容系统; 减震性能; 轻质化设计

**中图分类号:** TU352 TB535 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2022)S1-0168-07

## Study on damping performance of non-ideal particle inerter system

Lu Zheng<sup>1,2</sup> Zhou Chaojie<sup>1</sup> Xie Liyu<sup>1</sup> Chen Yun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** This paper, the existence of non-ideal inerter damping is considered, couples the particle tuned mass damper and the inerter system (inerter unit and damping unit in parallel) to propose a new damping system (Particle Inerter System, PIS). Firstly, the dynamic response characteristics of the inerter system are analyzed under harmonic excitation; then, the motion control equations of the PIS based on the single degree of freedom structure are established, the damping performance of PIS and PTMD under seismic excitation is compared and studied; finally, El Centro wave is used as an example to analyze the damping mechanism of PIS, and the influences of inertance-mass ratio and damping coefficient on the control effect of PIS are obtained. The results show that PIS has great damping performance under different seismic excitation and better damping effect compared with PTMD, which can effectively suppress the vibration of single-degree-of-freedom main structure. Under the excitation of El Centro wave, the peak value and root mean square damping advantages of PIS are more than 26%, the working stroke of the damper is reduced by 47.54% and the energy dissipation efficiency of the damper is higher compared with PTMD, thus achieving the lightweight design of PTMD with high performance requirements. Furthermore, as the inertance-mass ratio increases, the control effect of PIS tends to increase, while the damping factor is the opposite.

**Keywords:** particle tuned mass damper; inerter system; particle inerter system; damping performance; lightweight design

**E-mail:** luzheng 111@tongji.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51922080, 52178296)、上海市优秀学术带头人计划(20XD1423900)和中央高校基本科研业务费专项(11080)

作者简介: 鲁正, 博士, 教授

收稿日期: 2022-08-01

## 引 言

目前地震作用下建筑结构会严重受损甚至倒塌进而造成大量人员伤亡和财产损失，并且会引起一系列次生灾害。因此防灾减震技术在土木工程领域发挥着重要的作用，其中调谐质量阻尼器 (Tuned mass damper, TMD) 由于概念简单、机理明确和设计方法成熟等优点，被广泛应用于工程实践中<sup>[1-2]</sup>。然而 TMD 存在减震频带窄，耐久性差等缺点<sup>[3]</sup>，于是研究者将颗粒阻尼技术应用到调谐质量阻尼器形成颗粒调谐质量阻尼器 (Particle Tuned Mass Damper, PTMD)，其可以一定程度上克服传统调谐质量阻尼器的缺点<sup>[4]</sup>。该系统不仅可以通过调谐机理减震，还可以通过颗粒碰撞以及弹塑性变形耗能，因而减震效果会更好。

由此众多研究者对 PTMD 的减震性能开展了一系列研究。鲁正<sup>[5]</sup>等对附加 PTMD 的五层钢框架结构进行了振动台试验，在地震激励下该装置具有显著的减震效果和鲁棒性，并讨论了不同因素对高层建筑震动响应的减震规律。北京工业大学闫维明等<sup>[6]</sup>完成了类似颗粒调谐质量阻尼系统的高架连续梁桥的振动台试验，发现其减震效果明显，且相比于调谐质量阻尼器的减震频带更宽。李宏男<sup>[7-9]</sup>课题组提出类似机理的碰撞型 TMD (Pounding TMD)，即通过调谐质量块与粘弹性材料的碰撞将震动能量转化为热能，从而达到减震的目的，并将其用在海底电缆和高压输电塔的减震中，既保证 TMD 易于被工程界接受的优点，又充分发挥颗粒 (碰撞) 阻尼器减震频带宽、耐久性好、易于用于极端环境的优势。然而，PTMD 的附加质量比需要达到一定的比例才能较好的发挥作用。因此，亟需通过一定的技术方案进一步提高 PTMD 的减震性能。

惯容器是一种两端点装置，其输出力与两端点相对加速度成正比，可实现以较小的实际质量达到百倍甚至千倍表观质量的动力特性。惯容器的应用在土木工程领域很早便出现。上世纪 70 年代，Kawamata<sup>[10]</sup>提出了一种液体质量泵，充分利用流动液体惯性阻力，实际上就是利用了惯容器的惯性增效机制和阻尼增效机制。2012 年，Ikago 等<sup>[11-12]</sup>提出一种新的减震装置，称为调谐黏滞质量阻尼器 (Tuned viscous mass damper, TVMD)，给出了单自由度结构在简谐激励下最优控制设计的解析解，通过试验验证了其有效性；随后，Zhao 等<sup>[13]</sup>将惯容系统引入颗粒调谐质量阻尼器，提出一种颗粒惯容系统

(PIS)，即将混联 I 型惯容系统替代传统 PTMD 中的阻尼单元，通过优化设计发现 PIS 能够提高 PTMD 的减振控制性能，同时当 PIS 和 PTMD 表现出相同振动控制效果时 PIS 的质量更小。然而，目前既有研究的惯容减震系统，为理想力学模型，即不考虑惯容减震系统内部惯容器附带的阻尼影响。

基于此，本文考虑了非理想型惯容器中阻尼的存在，将 PTMD 与惯容系统 (惯容单元和阻尼单元并联) 相结合，提出一种新型的颗粒惯容系统 (Particle Inerter System, PIS)，即将惯容系统与 PTMD 串联、惯容系统一端接地，使用惯容系统代替部分 PTMD 的质量，可以提升 PTMD 的控制性能以及实现轻质化设计。同时，基于简谐激励分析了惯容系统的动力响应特性；建立了 PIS 基于单自由度结构的运动控制方程，进而得到了主体结构响应；最后，对比研究了 PIS 和 PTMD 在地震激励下的减震性能，并分析了惯质系数和阻尼系数对 PIS 控制效果的影响。

## 1 颗粒惯容系统理论分析

### 1.1 颗粒惯容系统概念设计

PIS 的概念设计简图如图 1 所示。在 PTMD 的基础上耦合惯容系统，以抑制结构的过度震动，惯容系统一端与阻尼器腔体相连，一端与地面相连。

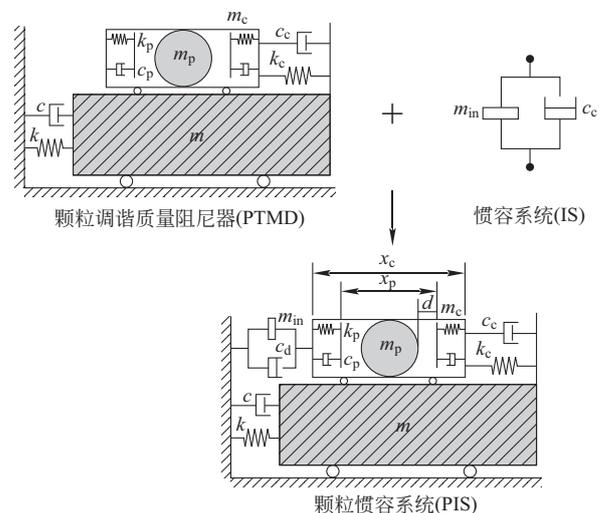


图 1 颗粒调谐质量阻尼器、惯容系统和颗粒惯容系统

Fig. 1 particle tuned mass damper, inerter system, particle inerter system

### 1.2 惯容系统动力分析

惯容器为两端装置，其出力与两端相对加速度成正比。

$$F_{in} = m_{in}(\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1) = m_{in}\ddot{x}_{in} \quad (1)$$

式中： $F_{in}$ 为惯容器出力， $m_{in}$ 为惯质系数(与质量同量纲)， $\ddot{u}_1$ 、 $\ddot{u}_2$ 分别为惯容器两端加速度。物理模型如图2所示。

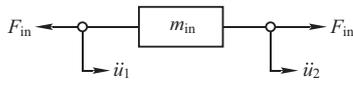


图2 惯容器物理模型  
Fig.2 inerter physical model

由于实际工程中，制作的惯容器均有一定阻尼，因此根据传统的力学基本定律库仑摩擦定律可知，惯容器在实际工作时产生的摩擦阻尼是不可避免的。为考虑该影响而引入惯容单元和阻尼单元并联的惯容系统。分析时将惯容系统一端接地，一端输入简谐激励， $u = u_m \sin(\omega_0 t)$ ， $\omega_0$ 和 $u_m$ 分别为激励圆频率和幅值。惯容系统中阻尼单元的阻尼系数为 $c_d$ ； $x_d$ 为惯容系统中阻尼单元的位移响应。

此时惯容单元和阻尼单元并联(见图3)，阻尼单元位移响应和外激励一致，现考察阻尼单元的加入对惯容系统耗能能力的影响。

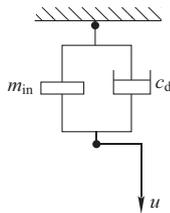


图3 惯容系统在简谐激励下示意图  
Fig.3 Schematic diagram of inerter system under harmonic excitation

阻尼单元和惯容单元出力分别为：

$$F_d = c_d \dot{u} = c_d u_m \omega_0 \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

$$F_{in} = m_{in} \ddot{u} = -m_{in} u_m \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

式中： $c_d$ 和 $m_{in}$ 分别为阻尼单元的阻尼系数和惯容单元的惯质系数。对上式作如下变换：

$$\left(\frac{u}{u_m}\right)^2 + \left(\frac{F_d}{c_d u_m \omega_0}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

$$F_{in} = -m_{in} \omega_0^2 u \quad (5)$$

两者的滞回曲线分别为椭圆和斜直线，滞回曲线与横坐标围成的面积为该单元滞回一周的耗能，可知阻尼单元耗能为 $E_d = \pi c_d \omega_0 u_m^2$ ，惯容单元出力与位移呈负相关，且不能消耗能量。

惯容系统在简谐激励下的滞回曲线如图4所示，滞回一周的耗能为斜椭圆与横坐标围成的面积，通过计算可得( $\theta$ 为椭圆长轴与横坐标夹角)：

$$E_{is} = \pi \frac{u_m}{\cos\theta} c_d u_m \omega_0 \cos\theta = \pi c_d \omega_0 u_m^2 \quad (6)$$

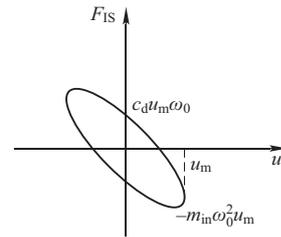


图4 惯容系统的滞回曲线  
Fig.4 Hysteresis curves of inerter system

由此可以看出，将惯容单元与阻尼单元并联其耗能能力依然完全取决于阻尼单元，且与阻尼系数以及外激励的频率和幅值有关。

### 1.3 PIS 控制方程的建立

根据力学模型简图(图1)可以建立单自由度结构附加PIS主体结构在外激励作用下的控制方程：

$$\begin{cases} m \ddot{x} + c \dot{x} + kx - c_c (\dot{x}_c - \dot{x}) - k_c (x_c - x) = -m \ddot{x}_g \\ m_c \ddot{x}_c + c_c (\dot{x}_c - \dot{x}) + k_c (x_c - x) + F_p + F_{is} = -m_c \ddot{x}_g \\ m_p \ddot{x}_p - F_p = 0 \end{cases} \quad (7)$$

另外，PTMD的控制方程分别为：

$$\begin{cases} m \ddot{x} + c \dot{x} + kx - c_c (\dot{x}_c - \dot{x}) - k_c (x_c - x) = -m \ddot{x}_g \\ m_c \ddot{x}_c + c_c (\dot{x}_c - \dot{x}) + k_c (x_c - x) + F_p = -m_c \ddot{x}_g \\ m_p \ddot{x}_p - F_p = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $m$ ， $c$ ， $k$ 分别代表单自由度主体结构的质量、阻尼系数和刚度系数； $\ddot{x}_g$ 表示外激励加速度； $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 分别为主体结构的位移、速度和加速度； $x_c$ 、 $\dot{x}_c$ 、 $\ddot{x}_c$ 分别为腔体的位移、速度和加速度； $x_p$ 、 $\dot{x}_p$ 、 $\ddot{x}_p$ 分别为颗粒的位移、速度和加速度； $m_c$ 、 $c_c$ 、 $k_c$ 分别为腔体的质量、阻尼系数和刚度系数， $c_c$ 和 $k_c$ 用于模拟腔体与主体结构的相互作用； $m_p$ 、 $c_p$ 、 $k_p$ 分别为等效单颗粒质量、颗粒阻尼系数和颗粒碰撞弹簧刚度， $k_p$ 和 $c_p$ 用来模拟颗粒与腔体壁之间的碰撞行为； $F_p = c_p H(z, \dot{z}) + k_p G(z)$ 为颗粒-腔体的非线性控制力，非线性弹性力函数 $G(z)$ 和非线性阻尼力函数 $H(z, \dot{z})$ 如图5所示，其中 $z = x_p - x_c$ 和 $\dot{z} = \dot{x}_p - \dot{x}_c$ 分别为颗粒与腔体的相对位移和相对速度， $d$ 为颗粒自由运动距离； $F_{is} = c_d \dot{x}_c + m_{in} \ddot{x}_c$ 为惯容系统的出力。

为了研究方便，定义如下无量纲参数：

$$\begin{aligned} \mu_{in} &= \frac{m_{in}}{m}, \quad \mu_{PIS} = \frac{m_c + m_p}{m}, \quad \xi_c = \frac{c_c}{2(m_c + m_p + m_{in})\omega_c} \quad (9) \\ \alpha &= \frac{R_{UC} - R_{PIS}(R_{PTMD})}{R_{UC}} \times 100\%, \quad \beta = \frac{R_{PTMD} - R_{PIS}}{R_{PTMD}} \times 100\% \quad (10) \end{aligned}$$

式中： $\omega_c = \sqrt{k_c / (m_c + m_p + m_{in})}$  为腔体圆频率，同时定义为 PIS 的名义圆频率； $\xi_c$  为腔体阻尼比； $\mu_{in}$  为惯质比； $\mu_{PIS}$  为附加质量比； $\alpha$  为减震率； $\beta$  为 PIS 相对于 PTMD 的减震优势； $R_{UC}$  为无控结构响应； $R_{PIS}$  为附加 PIS 结构响应； $R_{PTMD}$  为附加 PTMD 结构响应。

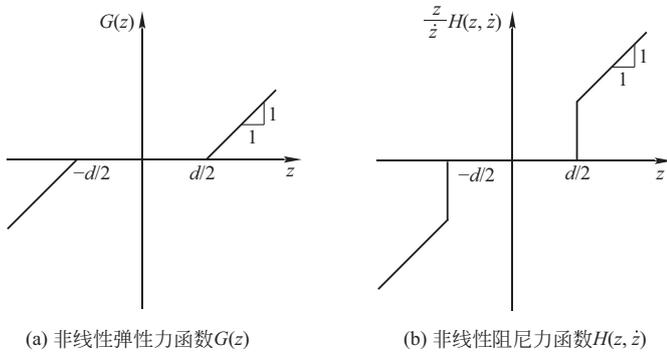


图 5 颗粒-腔体壁碰撞非线性力函数  
Fig. 5 Nonlinear force function for particle-cavity wall collision

## 2 减震性能验证

本节考察 PIS 在地震激励下的减震性能，进一步讨论 PIS 相较于 PTMD 的优越性，并对其减震机理作进一步分析。在分析过程中，单自由度主体结构的参数为  $m = 100\text{kg}$ ， $k = 4800\text{N/s}$ ，主体结构阻尼系数取 1% 临界阻尼系数，一阶自振频率为 1.1Hz，PIS 和 PTMD 参数取值根据传统设计方法确定： $\mu_{PIS} = \mu_{PTMD} = 0.02$ ， $\xi_c = 0.10$ ， $\xi_p = 0.375$ ， $d = 0.01$ ，具体参见文献<sup>[14-15]</sup>，本节设定惯质比  $\mu_{in} = 0.04$ ，阻尼系数  $c_d = 0.5c_c$ 。

选取 El Centro 波、Chi-Chi 波和 AWW0.9-1 波 (PGA=0.1g) 输入以验证 PIS 在地震激励下的减震性能。通过计算得到附加 PTMD 以及 PIS 主体结构在不同地震激励下的减震效果，如表 1 所示。可见 PIS 在地震波激励下的减震性能良好；相较于 PTMD 在峰值和均方根上均有一定的控制优势。比如 El Centro 波作用下峰值和均方根减震优势均在 26% 以上。

接下来，输入激励以 El Centro 波为例进一步探究 PIS 的减震性能。图 6 为 El Centro 波作用下主体结构的位移响应、加速度响应以及腔体相对位移响应。从图 6 中可明显看出在 El Centro 波下 PTMD 和 PIS 均可显著降低主体结构的位移和加速度响应，且 PIS 的减震效果优于 PTMD。主要原因在于，两种阻尼器均调谐至主体结构一阶频率，可将大量的输入能量传递到阻尼器，并通过阻尼器将能量消耗。PIS

由于惯容系统的存在，调谐的同时可以将能量储存于惯容系统，最后传递给 PTMD，使 PTMD 颗粒-腔体之间的碰撞更加激烈，因此 PIS 的耗能效率更高，减震效果会更好。

表 1 PTMD 和 PIS 对主体结构减震效果

Table 1 Damping effects of PTMD and PIS on main structure

地震波		峰值 (%)		均方根 (%)	
		位移	加速度	位移	加速度
El Centro	$\alpha_{PTMD}$	27.24	21.62	44.92	41.23
	$\alpha_{PIS}$	50.69	42.66	62.54	57.64
	$\beta$	32.22	26.85	31.98	27.92
Chi-Chi	$\alpha_{PTMD}$	59.57	34.07	60.43	57.94
	$\alpha_{PIS}$	63.96	37.96	70.60	67.11
	$\beta$	10.86	9.91	25.69	21.81
AWX0.9-1	$\alpha_{PTMD}$	22.15	27.34	47.87	48.50
	$\alpha_{PIS}$	43.96	37.00	60.56	63.66
	$\beta$	28.02	13.29	24.34	29.43

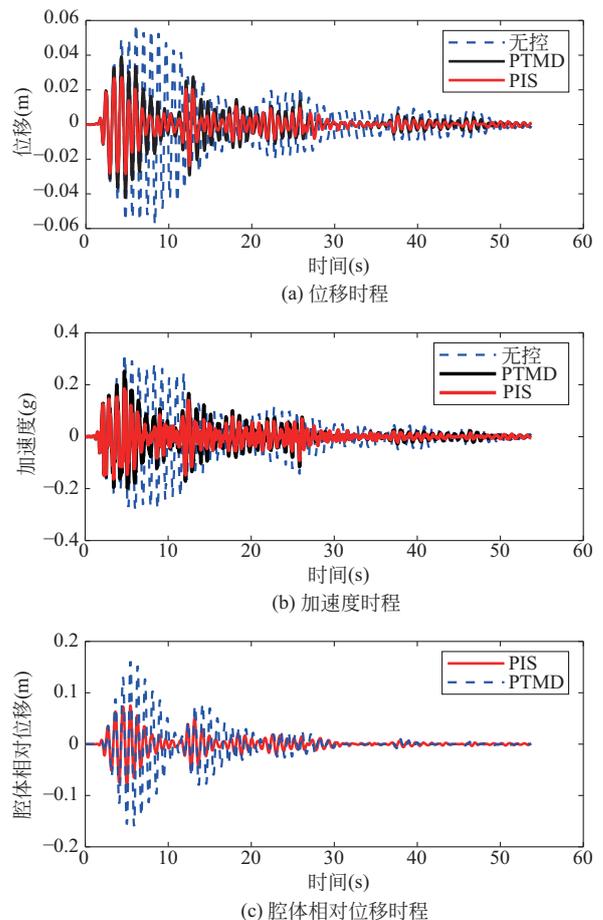


图 6 El Centro 波作用下主体结构的时程响应

Fig. 6 Time-history response of main structure under El Centro wave

在 El Centro 波作用下, PIS 的峰值位移减震率比 PTMD 高出 23.45%, 而 PTMD 要达到 50% 左右的减震率需要质量比为 5.6%。由此表明 PIS 可有效的减少阻尼器的附加质量比, 为 PTMD 的轻质化设计提供重要的参考。此外, 由于惯容系统的协同作用, PIS 的腔体运行幅值可降低为 PTMD 峰值相对位移的 47.54%, 该优势在实际工程应用中, 可有效节约建筑空间, 避免阻尼器与结构构件的碰撞。

### 3 减震机理分析

由于惯容系统的存在会使腔体的运动更加剧烈, 使得颗粒-腔体之间的碰撞加剧, 图 7 给出了 El Centro 波激励下 PTMD 和 PIS 中颗粒-腔体壁的非线性控制力  $F_p$  随时间变化的曲线, 形态呈齿状, 主要是由于颗粒与腔体发生碰撞和动量交换使得颗粒的加速度和速度发生突变。从中可以看出由于惯容系统的作用使得碰撞力放大了 2~3 倍, 显著加剧了颗粒与腔体之间的碰撞。

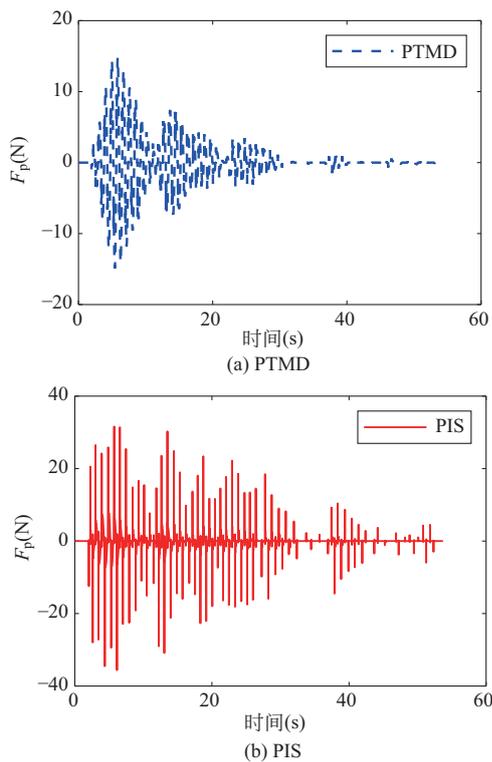


图 7 颗粒-腔体壁的非线性控制力时程图  
Fig. 7 Time history diagram of particle-cavity wall nonlinear control force

图 8 给出了主体结构附加 PIS 和 PTMD 时的能量时程曲线。对比图 8(a) 和图 8(b) 可知, 主体结构附加 PIS 时地震激励输入的总能量从附加 PTMD 时的

11.52J 减少为 9.71J, 降低了 18.64%。与此同时, 两种阻尼系统运行期间累计消耗的能量比例也有显著的差别, PTMD 运行 53.5 秒后累计耗散能量为 8.48J, 占系统输入能量的 72.28%; 而 PIS 在相应时间内累计消耗的能量为 8.32J, 占比高达 85.8%, 提高了阻尼系统的能量耗散效率。

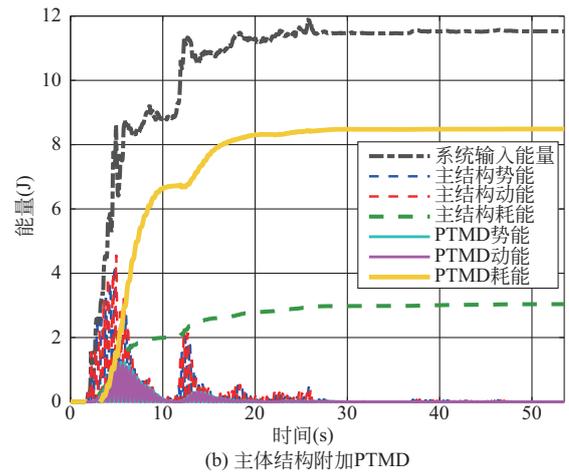
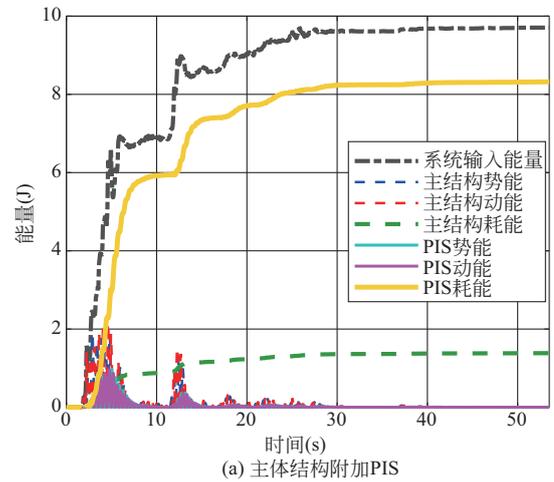


图 8 能量时程曲线  
Fig. 8 Energy time history curve

图 9 给出了不同惯质比下附加 PIS 的主体结构在 El Centro 波激励下的峰值和均方根减震率曲线。从图中可以看出, 随着惯质比的增大, 结构的峰值响应和均方根响应减震率均表现为非线性增大, 但是减震效率不断降低。因此, 在对 PIS 进行设计时, 可以适当的选 择惯质比(0.06~0.10), 使颗粒的运动产生高效的碰撞, 最大程度地削弱主体结构的响应, 从而将 PIS 的作用发挥到最大。

考虑惯容系统阻尼系数  $c_d$  对 PIS 在 El Centro 波激励下的结构减震控制效果的影响,  $c_d$  取值范围为  $(0-1)c_c$ , 步长取 0.1, 当  $c_d$  等于零时, 即为理想型颗粒惯容系统。从图 10 可以看出, 随着阻尼系数  $c_d$

的增大, PIS 的控制效果呈缓慢下降趋势; 与此同时, 阻尼器腔体运动相对位移峰值相对于 PTMD 的降低效果增大。主要原因是由于  $c_d$  越大, 作用在腔体上的控制力越大, 阻碍了腔体的运动, 使得其运行位移峰值会逐渐降低。进一步地, 导致  $c_c$  的耗能减少, 颗粒碰撞耗能减少, 虽然阻尼单元  $c_d$  增加了一部分耗能, 但整体来看阻尼器的耗能水平是减少的。因此当前原有的理想型颗粒惯容系统的减震效果存在高估的现象, 而在实际加工过程中应尽量减小惯容器的阻尼系数, 以保证 PIS 良好的控制效果。

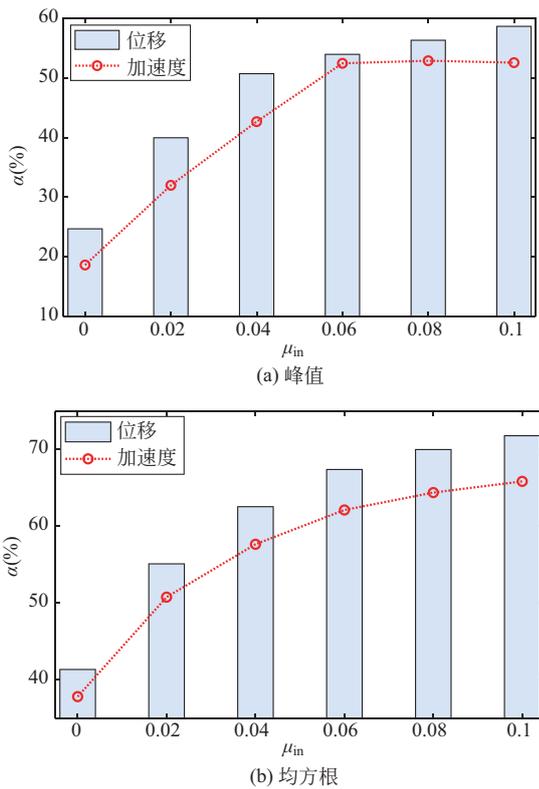


图 9 El Centro 波作用下惯质比对 PIS 控制效果的影响  
Fig. 9 Influence of inertance-mass ratio on PIS control effect under El Centro wave

#### 4 结 论

通过对颗粒惯容系统进行理论分析设计和减震性能验证, 得到如下结论。

(1) PIS 在地震激励作用下的控制性能良好, 可以显著减小主体结构位移和加速度响应; 相较于 PTMD 具有更优异的减震性能, El Centro 波作用下峰值和均方根减震优势均在 26% 以上, 且 PIS 可有效降低 PTMD 的附加质量而保持相近的减震效果, 实现了 PTMD 的轻质化设计。

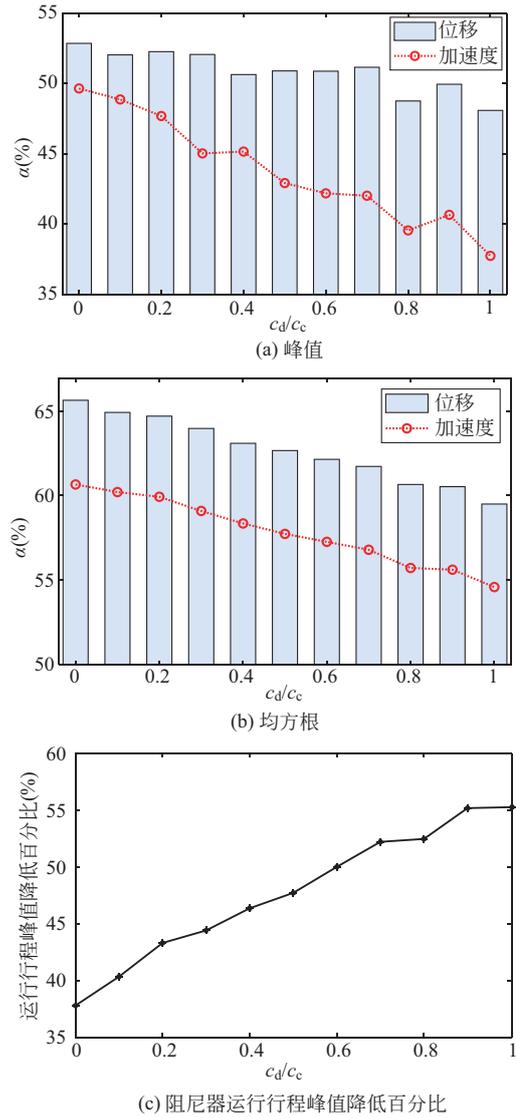


图 10 El Centro 波作用下阻尼系数  $C_d$  对 PIS 控制效果的影响  
Fig. 10 Influence of damping coefficient  $C_d$  on PIS control effect under El Centro wave

(2) 相比于 PTMD, PIS 的腔体的相对位移幅值可降低峰值 47.54%, 进而一方面可以提高阻尼系统的适用性, 另一方面也可以提高建筑结构的空间利用率从而提高项目效益。

(3) 惯容系统会使得 PIS 的颗粒-腔体壁的非线性控制力加大, 强化颗粒-腔体之间的碰撞耗能, 增大了作用在主体结构上的控制力, 进而提高了减震效果。

(4) PIS 可减少地震激励输入的总能量且耗散能量的效率更高, 进而可使得主体结构动力响应发生更大的衰减。

(5) 随着惯容系统中阻尼系数  $c_d$  的增大, PIS 的控制效果呈缓慢下降趋势, 表明当前原有的理想型

颗粒惯容系统的减震效果存在高估的现象,而在实际加工过程中应尽量减小惯容器的阻尼系数;在对 PIS 进行设计时,可以适当的选择惯质比(0.06 ~ 0.10)。

本文以单自由度结构系统为研究对象,研究了 PIS 在三种地震波激励下的减振控制性能。初步探讨了 PIS 的减振机理,为进一步研究弹塑性多自由度结构提供参考。

#### 参 考 文 献

- [1] Basu B, Bursi O S, Casciati F, et al. A european association for the control of structures joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(12): 1414-1436
- [2] Casciati S, Chassiakos A G, Masri S F. Toward a paradigm for civil structural control [J]. Smart Structures and Systems, 2014, 14(5): 981-1004
- [3] 李春祥, 韩兵康, 杜冬. 结构双重调谐质量阻尼器 (DTMD)控制策略研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 1-9 (Li Chunxiang, Han Bingkang, Du Dong. Control strategy of double tuned mass damper for structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 1-9 (in Chinese))
- [4] 鲁正, 廖元, 吕西林. 调谐质量阻尼器和调谐型颗粒阻尼器减震性能对比研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 163-168 (Lu Zheng, Liao Yuan, Lv Xilin. Comparison study of damping performance between tuned mass damper and tuned particle damper [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 163-168 (in Chinese))
- [5] 鲁正, 王佃超, 吕西林. 颗粒调谐质量阻尼系统对高层建筑风振控制的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 92-98 (Lu Zheng, Wang Dianchao, Lv Xilin. Experimental study on wind-induced vibration control of particle tuned mass damper system on high-rise buildings [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 92-98 (in Chinese))
- [6] Yan W M, Xu W B, Wang J, et al. Experimental research on the effects of a tuned particle damper on a viaduct system under seismic loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(3): 4013004. 1-4013004. 10
- [7] Li H N, Zhang P, Song G B, et al. Robustness study of the pounding tuned mass damper for vibration control of subsea jumpers[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(9). DOI:10.1088/0964-1726/24/9/095001
- [8] Zhang P, Song G B, Li H N, et al. Seismic control of power transmission tower using pounding TMD[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(10): 1395-1406
- [9] Zhang P, Li L, Patil D, et al. Parametric study of pounding tuned mass damper for subsea jumpers[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(1): 015028
- [10] Kawamata S. Development of a vibration control system of structures by means of mass pumps[R]. Tokyo: University of Tokyo, 1973
- [11] Ikago K, Sugimura Y, Saito K, et al. Modal response characteristics of a multiple-degree-of-freedom structure incorporated with tuned viscous mass dampers[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2012, 11(2): 375-382
- [12] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453-474
- [13] Zhao Z P, Zhang R F, Lu Z. A particle inerter system for structural seismic response mitigation[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2019, 356(14): 7669-7688
- [14] 鲁正, 张恒锐, 吕西林. 基于性能的调谐冲击阻尼器优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(21): 1-5, 23 (Lu Zheng, Zhang Hengrui, Lv Xilin. Performance-based optimal design for tuned impact dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(21): 1-5, 23 (in Chinese))
- [15] Masri S F. General motion of impact dampers [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1970, 47(1B): 229-237

鲁 正(1982— ),男,博士,教授。主要从事结构振动控制、建筑结构抗震方面的研究。

周超杰(1997— ),男,硕士研究生。主要从事结构抗震、振动控制方面的研究。

谢丽宇(1978— ),男,博士,副教授。主要从事结构健康监测和振动控制方面的研究。

陈 云(1980— ),男,博士,教授。主要从事结构抗震研究。