

新型砖石古塔结构 SMA 复合悬摆减震系统性能分析

杨涛, 张阳, 刘章锐

(西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了增强对砖石古塔的保护, 提高悬摆阻尼器 (suspension pendulum damper, SPD) 的减震性能, 通过在 SPD 中引入形状记忆合金 (shape memory alloy, SMA), 提出了一种新型 SMA 复合悬摆减震系统。该系统的主要特点是通过 SMA 的超弹性、高阻尼特性, 放大 SPD 中摆锤产生的惯性力, 从而提高减震系统的整体耗能能力。首先, 通过随机等效线性化得到 SMA 的等效恢复力形式, 并类比 SPD 的单自由度计算模型, 推导出 SMA 复合悬摆减震系统的单自由度计算模型; 接着, 介绍了减震系统的构造及工作原理; 研究了 2 种控制参数对该减震系统的影响规律; 最后, 将 SPD 与新型复合悬摆减震系统应用于砖石古塔, 通过 ABAQUS 分析了结构引入减震系统后, 在 3 种不同地震激励下的振动响应。研究结果表明: 在不同地震动作用下, SMA 复合悬摆减震系统相比 SPD 拥有更好的振动控制效果, 具有较好的适用性。

关键词: 悬摆阻尼器; 减震控制; 形状记忆合金; 单自由度结构; 地震响应分析

中图分类号: TU352.1; TP315.9

文献标志码: A

Performance analysis of a new type SMA composite pendulum damping system for ancient masonry pagodas

YANG Tao, ZHANG Yang, LIU Zhangrui

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: To enhance the protection of masonry pagodas and improve the damping performance of suspension pendulum damper (SPD), a novel SMA composite pendulum damping system is proposed, integrating shape memory alloy (SMA) into SPD. This system enhances the inertia force generated by the pendulum within SPD by leveraging the super elasticity and high damping characteristics of SMA, thereby improving the overall energy dissipation capability of the damping system. Initially, the study outlines the process of obtaining the equivalent restoring force of SMA through stochastic equivalent linearization. Subsequently, it establishes the SDOF computational model of the SMA composite pendulum damping system by drawing parallels with the SDOF computational model of SPD. The paper elucidates the structure and operational principles of the damping system, followed by an exploration of the effects of two control parameters on its performance. Further, the study applies both SPD and the new composite pendulum damping system to a masonry pagoda. The structural vibration response is analyzed under three distinct seismic excitations following the implementation of the damping system using ABAQUS software. The findings reveal that the SMA composite pendulum damping system outperforms SPD in vibration control under various seismic excitations, demonstrating its superior applicability.

Key words: suspension pendulum damper; seismic control; shape memory alloy; single-degree-of-freedom structure; seismic response analysis

0 引言

砖石古塔是中国古代建筑的一种典型代表,具有宝贵的文物价值,然而受长期自然风化和地震的影响,多数古建筑的抗震性能严重下降^[1]。近年来,古建筑的保护逐渐受到更多学者的重视,并提出了多种振动控制技术以减小结构在地震动激励下的响应^[2-8],其中,通过在结构中增设耗能减震装置的被动控制,因其在制作成本、构造设计以及工作驱动动力等方面的优势成为应用较为广泛的振动控制方法^[9-12]。

悬吊摆阻尼器作为被动控制装置的一种,可以将自振频率与主结构的频率调节相接近,以此在风荷载、地震荷载等外部激励作用时,产生与结构相反的惯性力,从而减小结构受到的激励响应^[13-14]。但在实际应用中,因结构内部空间的限制以及施工现场的影响,悬吊摆装置的自振频率不易调整至与结构接近,鉴于此,可以通过附加阻尼的方式,提高其耗能能力。形状记忆合金拥有超弹性特性和高阻尼特性,是理想的耗能元件^[15],利用形状记忆合金与悬吊摆结构协调工作,可以放大悬吊摆的阻尼效应,更好地抑制结构响应。

因此,本文将悬吊摆减震装置与形状记忆合金的超弹性特性相结合,提出了一种形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)复合悬摆减震系统,通过类比悬摆减震结构单自由度计算模型,推导出 SMA 复合悬摆减震系统单自由度运动学方程,在此基础上,对其进行减震控制参数分析,同时,利用 ABAQUS 对设有减震装置的砖石古塔模型结构进行有限元仿真,将其与普通悬吊摆阻尼器进行对比,验证了 SMA 复合悬摆减震系统的减震性能。

1 减震原理分析

1.1 SMA 力学模型

对于超弹性 SMA 的力-变形关系, YAN 等^[16]提出了改进 SMA 本构关系,见图 1,并在一些研究中^[17]得到了广泛应用。

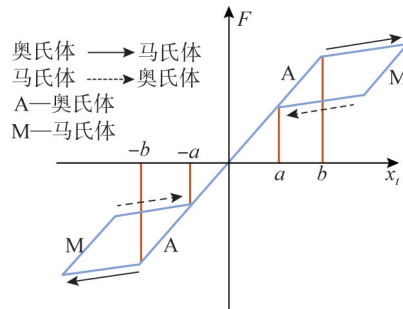


图 1 SMA 力-变形关系

Fig. 1 Force-deformation relationship of the SMA

基于此本构关系, SMA 的非线性恢复力可表示为

$$F_{SMA} = \varphi k_{SMA} x_t + (1 - \varphi) k_{SMA} z_s \quad (1)$$

式中: φ 为 SMA 处于马氏体时的刚度与奥氏体时的刚度之比; k_{SMA} 为 SMA 在奥氏体中的初始刚度; x_t 为 SMA 的位移; z_s 为迟滞位移, 可通过式(2)计算, 得

$$z_s = \{1 - \text{sign}[\text{sign}(|x_t| - a) + 1]\} x_t + \frac{[\text{sign}(|x_t| - a) + 1]}{2} \cdot \left\{ \frac{[\text{sign}(x_t) + \text{sign}(\dot{x}_t)]}{2} (b - a) + a \cdot \text{sign}(x_t) \right\} \quad (2)$$

式中: a 为奥氏体相变的弹性极限; b 为触发马氏体相变的位移极限; $\text{sign}(x)$ 为符号函数, 将式(2)中的非线性项 z_s 替换为等效线性化形式 z_{eq} , 则

$$z_{eq} = k_{eq} x_t + c_{eq} \dot{x}_t \quad (3)$$

式中, k_{eq} 和 c_{eq} 为等效线性系数, 可通过式(4)、式(5)计算, 得

$$c_{eq} = \frac{b - a}{\sqrt{2\pi\sigma_{x_t}}} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma_{x_t}}}\right) \right] \quad (4)$$

$$k_{eq} = \frac{b + a}{\sqrt{2\pi\sigma_{x_t}}} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_{x_t}^2}\right) \quad (5)$$

式中: σ_{x_t} 和 $\sigma_{\dot{x}_t}$ 分别为 x_t 和 \dot{x}_t 的均方根; $\text{erf}(x)$ 为误差函数。将式(3)代入式(1),得到 SMA 恢复力的等效形式为

$$F_{\text{SMA}} = \varphi k_{\text{SMA}} x_t + (1-\varphi) k_{\text{SMA}} (k_{\text{eq}} x_t + c_{\text{eq}} \dot{x}_t) \quad (6)$$

SMA 的随机等效阻尼、刚度和恢复力可分别表示为

$$\begin{cases} \tilde{c}_e = (1-\varphi) k_{\text{SMA}} c_{\text{eq}} \\ \tilde{k}_e = \varphi k_{\text{SMA}} + (1-\varphi) k_{\text{SMA}} c_{\text{eq}} \\ F_{\text{SMA}} = \tilde{c}_e \dot{x}_t + \tilde{k}_e x_t \end{cases} \quad (7)$$

1.2 悬摆阻尼器力学模型

悬摆阻尼结构将质量摆锤悬吊在装置顶部,在地震作用下,装置受到的振动由底部传递到悬吊摆锤,使其发生摆动,从而吸收结构的部分动能。悬摆阻尼结构单自由度体系力学模型见图 2。为便于计算,对其进行简化,并作如下假定:①模型上部水平横梁包含控制结构的所有质量,且视为刚性;②模型两侧立柱在竖直方向不可伸长,且忽略其重量;③模型两侧的立柱刚度和阻尼分别为 $k_s/2$ 和 $c_s/2$;④悬吊摆杆不可伸长,且忽略其质量。悬摆阻尼器(suspension pendulum damper, SPD)单自由度结构体系运动方程建立如式(8)所示:

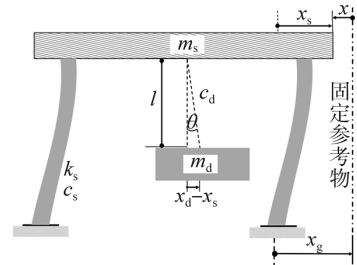


图 2 SPD 力学模型

Fig. 2 Mechanical model of SPD

$$m_d \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + m_d g \frac{(x_d - x_s)}{l} = 0 \quad (8)$$

式中: m_d 、 c_d 和 l 分别为悬摆阻尼结构的质量、阻尼和摆长; $x_s(t)$ 、 $\dot{x}_s(t)$ 分别为结构相对于地面的位移和速度; $x_d(t)$ 、 $\dot{x}_d(t)$ 分别为悬吊摆锤相对于地面的位移和速度;重力加速度用 g 表示。

1.3 SMA 复合悬摆减震系统运动学方程

类比 SPD 力学模型建立的 SMA 复合悬摆减震系统的力学简化模型见图 3。其中各参数含义与前者相同。在外部激励作用下,结构和 SMA 复合悬摆减震系统的单自由度结构体系运动方程分别建立如式(9)、式(10)所示:

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + c_d (\dot{x}_s - \dot{x}_d) + k_s x_s + m_d g \frac{(x_s - x_d)}{l} = -m_s \ddot{x}_g(t) + F_{\text{SMA}} \quad (9)$$

$$m_d \ddot{x}_d + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + m_d g \frac{(x_d - x_s)}{l} = -F_{\text{SMA}} \quad (10)$$

式中: m_s 、 c_s 和 k_s 分别为结构的质量、阻尼和刚度; x_g 为地震加速度。

$(x_d - x_s)$ 即为 SMA 的位移 x_t ,代入式(6),故 SMA 的等效线性恢复力为

$$F_{\text{SMA}} = \varphi k_{\text{SMA}} (x_d - x_s) + (1-\varphi) k_{\text{SMA}} [k_{\text{eq}} (x_d - x_s) + c_{\text{eq}} (\dot{x}_d - \dot{x}_s)] \quad (11)$$

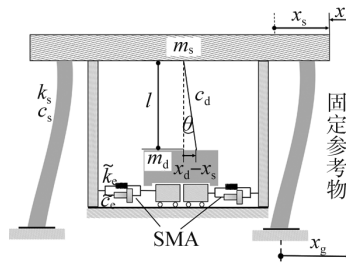


图 3 SMA 复合悬摆减震系统力学模型

Fig. 3 Mechanical model of SMA composite pendulum damping system

2 SMA 复合悬摆减震系统

2.1 构造设计

SMA 复合悬摆减震系统由单向铰、摆杆、悬吊摆锤、滑块、挡板、SMA 丝(直径为 1.0 mm)和转向滑轮组

成见图4。其结构设计如下:①设有开孔的刚性摆杆上端与内部光滑的单向铰相连接,以确保摆杆垂直于开孔方向的运动,系统频率比可通过改变摆杆长度进行调整;②通过螺孔连接摆杆下端与摆锤,并在悬吊摆锤两侧预留附加质量安装位,以便于调整减震系统的质量比范围;③SMA丝的一侧穿过在整个减震系统底部设置的滑块挡板与滑块连接,另一侧借由转向滑轮改变其运动方向后与钢丝绳连接;④整个系统最终通过滑轮结构调整钢缆的运动方向后,与结构地面进行锚固,从而建立装置与系统间的可靠连接。

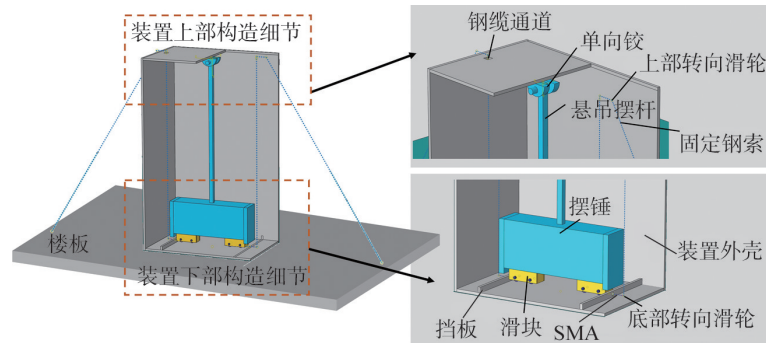


图4 减震系统构造示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vibration damping system construction

2.2 工作原理

通过减震系统一个循环周期的变化情况,对其工作原理进行说明:①当地震效应较小时,悬吊摆锤可以在不接触滑块的情况下自由摆动,使得结构在借由整个减震系统外壳传递的反向惯性力作用下得到控制;②当结构受到严重地震作用时,悬吊摆锤与滑块共同参与工作,此时若结构受到的振动方向向右,则摆锤向相反一侧运动,使得与结构运动方向同侧的滑块牵引其控制的SMA丝参与工作;③一次震动通过结构后,悬吊摆锤将重新回归铅锤位置,SMA丝也同时恢复至预紧状态,并通过一个全滞回曲线的能量消耗循环,将控制作用通过钢索施加于结构上,从而抑制结构的地震响应,实现其能量耗散。悬吊摆锤向右摆动时同理。

3 减震控制参数分析

基于上述的公式推导,对设置该系统的单自由度结构进行控制参数分析。整个系统的减震效果涉及悬吊摆长 l 、摆锤质量 m_d 等多个控制参数,对其具体定义如下:结构圆频率 $\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$ 、结构阻尼比 $\xi_s = c_s/(2m_s\omega_s)$,悬摆式减震结构圆频率 $\omega_d = \sqrt{g/l}$,频率比 λ 为 ω_d/ω_s ,质量比 $\mu = m_d/m_s$ 。定义一个基准模型,结构参数取值: $m_s = 6000 \text{ kg}$, $k_s = 565\,666 \text{ N/m}$, $\xi_s = 0.02$,计算得 $\omega_s = 9.7097 \text{ rad/s}$, $f_1 = 1.5453 \text{ Hz}$ 。

3.1 频率比的影响

整个减震系统的工作过程依赖于悬吊摆锤在结构受到外荷载作用产生振动后随之产生的惯性运动,研究表明^[13-14],对于悬摆式减震结构,当其产生的控制频率与结构的自振频率一致时,二者会形成“反向共振”,即减震系统产生与结构运动同频率的反向荷载,从而应用共振原理对结构的某阶振型或某几阶振型进行减震控制。因此,对于上述假定的基准模型,当二者的频率比为1时,相对应的悬吊摆长 $l = g/\omega_d^2 = 0.1 \text{ m}$ 。若假定质量比 $\mu = 5\%$,则 $m_d = 300 \text{ kg}$ 。采用密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的常规钢材,则当矩形摆锤的底面积为 0.1 m^2 时,对应的高度应为 0.38 m ,显然,此高度与初始设置的悬吊摆长相矛盾。但通过设置SMA丝来辅助调整减震系统的自振频率,即可更好地发挥减震系统的控制效果。根据具体情况,悬摆式减震结构的矩形摆锤底面积一般不宜大于 0.4 m^2 ,综合考虑选择摆锤底面积为 0.2 m^2 ,高度为 0.1 m ,悬吊摆长按照 0.3 m 设计。

则悬摆式减震结构圆频率 $\omega_d = \sqrt{g/l} = 5.715 \text{ rad/s}$,频率比 $\lambda = 58.86\%$ 。要将整个减震系统调频至与基准模型结构一致,即与 ω_s 相等,则

$$\omega_d' = \sqrt{\frac{(m_d g/l) + K}{m_d}} = \sqrt{(g/l) + (K/m_d)} \quad (12)$$

式中: K 为SMA复合悬摆减震系统的整体刚度,考虑SMA的弹性模量在不同相变状态下的变化因素,进一步推导其取值,为

$$K = m_d(\omega_s^2 l - g)/l \quad (13)$$

3.2 质量比的影响

已有研究表明^[14],质量比是影响悬摆式减震结构的一个重要因素,通常情况下,质量比 μ 越大,减震效果越明显。但综合考虑实际情况,质量比 μ 过大不仅会增加造价也不便于安装,因此将其取值范围设为 1%~5%之间进行参数分析。采用减震率对系统的减震效果进行评估,位移减震率和加速度减震率分别表示为 ζ_D 与 ζ_A ;无控结构与受控结构的位移、加速度响应峰值分别用 D_{UC} 、 D_C 和 A_{UC} 、 A_C 来表示,具体定义如式(14)、式(15)所示:

$$\zeta_D = \frac{D_{UC} - D_C}{D_{UC}} \times 100\% \tag{14}$$

$$\zeta_A = \frac{A_{UC} - A_C}{A_{UC}} \times 100\% \tag{15}$$

采用江油波进行地震动激励,将峰值加速度按照 8 度多遇地震调频为 0.2 g,分别对采用不同质量比 μ 的无控单自由度基准模型,仅 SPD 控制和 SMA 复合悬摆减震系统控制的单自由度基准模型的减震效果进行分析。图 5、图 6 分别为质量比为 1%、3%和 5%时的加速度、位移时程曲线对比,不同质量比下基准模型的加速度、位移减震率见表 1。由表 1 可知,对于控制结构,质量比越大,振动控制效果越明显,但考虑实际安装空间等限制,质量比也应控制不宜过大,对于该假定的基准模型,取 4%为宜。

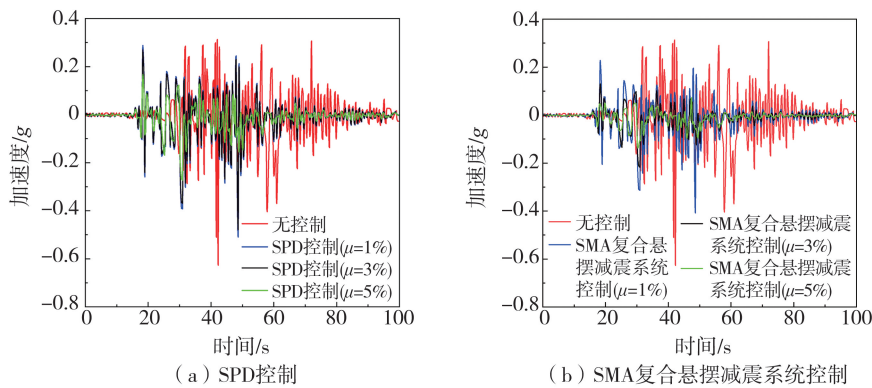


图 5 不同质量比控制下模型结构的加速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration time history curves of model structures under different mass ratios control

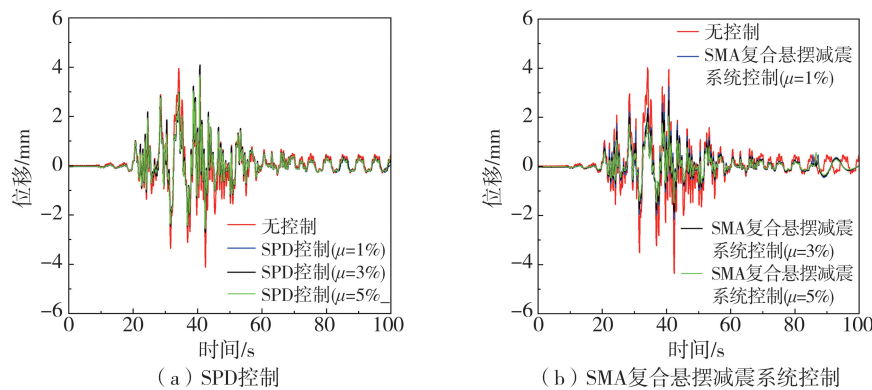


图 6 不同质量比控制下模型结构的位移响应时程曲线

Fig. 6 Time history curves of displacement response of model structures under different mass ratios control

表 1 江油波激励下不同质量比基准模型减震率

Table 1 Seismic mitigation rates for different mass ratios under Jianguo wave excitations

质量比/%	无控制		SPD 控制				SMA 复合悬摆减震系统控制			
	位移/mm	加速度/g	位移/mm	减震率 ζ_D /%	加速度/g	减震率 ζ_A /%	位移/mm	减震率 ζ_D /%	加速度/g	减震率 ζ_A /%
1	4.025	0.314	4.083	-1.44	0.283	9.87	3.266	18.86	0.225	18.79
2	4.025	0.314	4.084	-1.47	0.276	12.10	3.192	20.70	0.214	31.85
3	4.025	0.314	4.085	-1.49	0.265	15.61	2.967	26.26	0.195	37.90
4	4.025	0.314	4.085	-1.49	0.251	20.06	2.738	31.96	0.189	39.81
5	4.025	0.314	4.085	-1.49	0.245	21.97	2.584	35.80	0.182	42.04

4 砖石结构减震分析

进一步探究 SPD 与 SMA 复合悬摆减震系统附加于砖石古塔结构后,在地震激励作用下的振动控制效果。考虑到地震激励的随机性以及结构位移和加速度响应在不同地震激励下的影响存在差异等因素,结合 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[18]中的规定,见图 7。选取 El Centro 波、江油波以及 1 个人工上海波,共 3 条地震波作为激励,并均调幅至 0.2 g。由图可知,经傅里叶变换后,3 条地震波的频率分布各不相同,其中 El Centro 的频谱特性丰富;江油波持续时间较长,且在低频区间反应剧烈;人工波与所选结构的自振频率较接近。

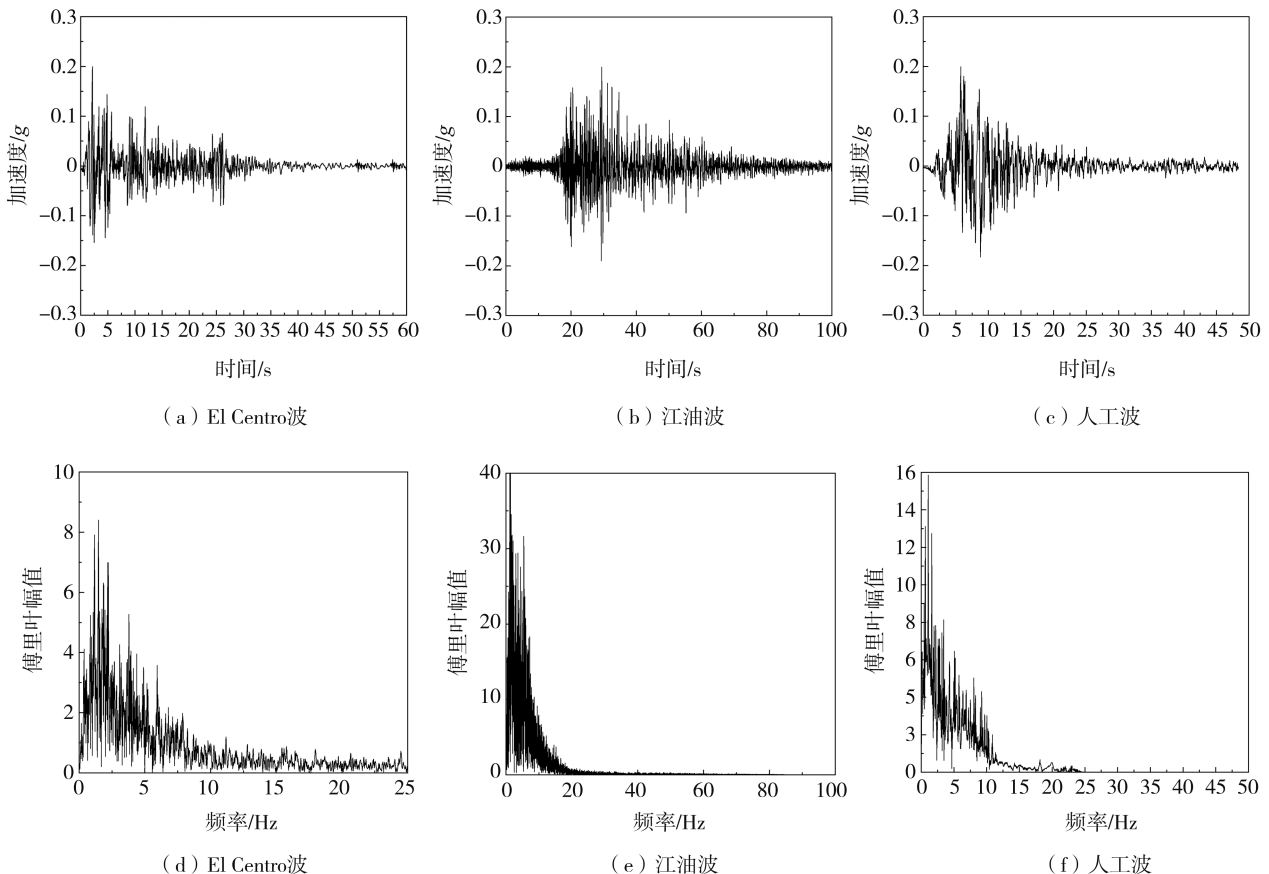


图 7 地震激励时程曲线及频谱曲线

Fig. 7 Time history curves and spectrum curves of selected seismic excitations

4.1 仿真结构模型

选取文献[19]中的试验结构进行仿真分析。由于该试验结构经修缮后,自 2 层起每隔 2~3 层增设了钢筋混凝土梁、板构件,因此,原砖石古塔可近似简化为剪切框架结构,进而与前文所述理论模型更好地适应。模型结构及其下部地基土均采用三维实体单元建立,减震系统除钢索、定滑轮采用连接器建立以外,剩余部件均采用三维实体单元建立,结构各层间的相互作用采用 Tie 绑定进行约束,边界条件除对底部地基土进行三方向自由度固定外,还通过固结边界条件固定减震系统在 2、4、8 层的混凝土楼板上,采用无转动刚度的 Hinge 连接单元模拟 SMA 丝与钢索、小车车轴转动之间的连接,采用只允许轴向运动的 Slip Ring 连接单元模拟钢索与 SMA 丝的运动过程。为消除地震波在地基土中的反弹,采用六面体扫掠网格进行划分,并通过修改 inp 文件,将地基土单元修改为无限元 CIN3D8^[20],SMA 丝使用 T3D2 桁架单元,其余部件选用 C3D8R 单元类型。通过模态分析得到模型结构自振频率,并用瑞丽阻尼方法求出结构材料的两系数 α 、 β 分别为 1.7075、0.2668,地基土材料的 α 、 β 分别为 0.4831、0.001665。模型建立效果及装置布置情况见图 8,模型赋予材料参数见表 2。

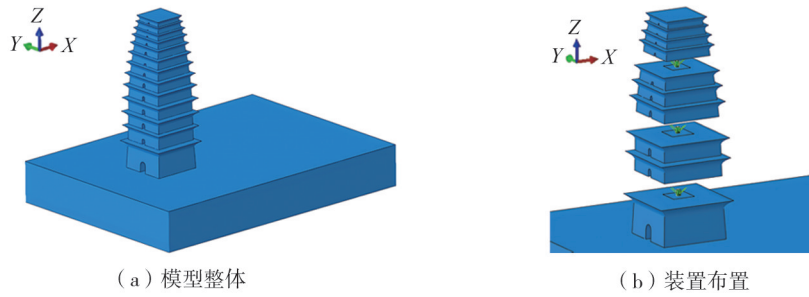


图 8 模型整体与装置布置

Fig. 8 Overall model and layout position of the device

表 2 基本材料参数

Table 2 Basic material parameters

材料	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/MPa
地基土	2 030	0.21	20
砌砖	1 200	0.15	703
混凝土	2 400	0.16	30 000
钢索	7 800	0.30	200 000
SMA	6 500	0.33	54 400(奥氏体)

4.2 减震控制性能

4.2.1 动力放大系数

模型结构在无控制状态和分别在 2 种减震系统控制下的各层动力放大系数绘制,见图 9。由图可知,在引入减震系统后,结构在 3 种地震动激励下的动力响应均有所减小。其中,在 El Centro 波激励下,设置 SPD 后,动力放大系数仅平均减小了 2.64%,相比之下,引入 SMA 复合悬摆减震系统后,动力放大系数平均减小了 6.97%;在江油波激励下,引入复合悬摆减震系统后,动力放大系数平均减小了 7.64%;而在人工波激励下,结构在引入 SMA 复合悬摆减震系统后,动力放大系数与无控制相比平均减小了 17.50%,这表明,复合悬摆减震系统对与结构自振频率相近的地震动激励控制效果更加显著。

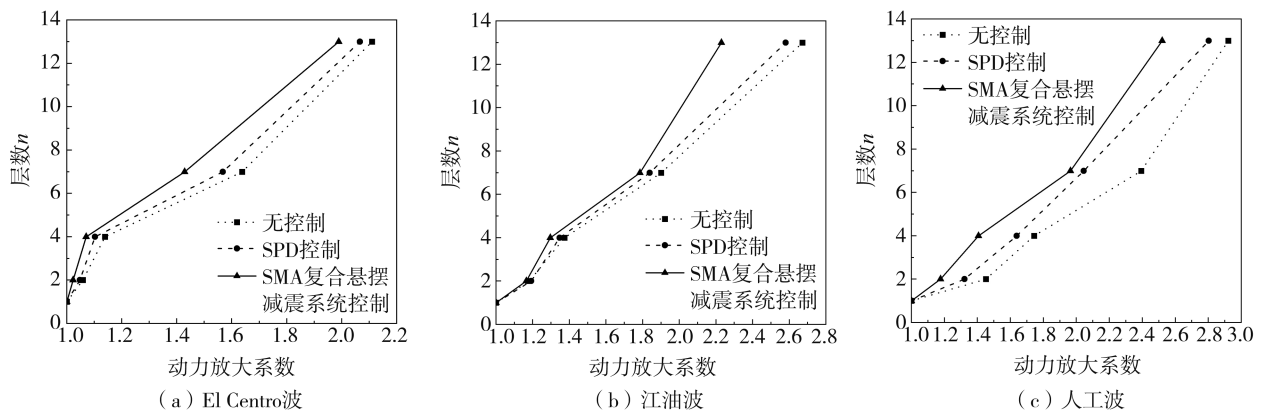


图 9 不同地震动激励下结构动力放大系数

Fig. 9 Structural dynamic amplification factors under various seismic excitations

4.2.2 结构层间位移

模型结构在无控制和分别在 2 种减震系统控制下的层间位移角分布情况见图 10。由图可知,结构层间位移角随着层数的升高依次增大,直至结构顶部达到最大值。根据文献[21]中建议的关于砖石古塔类建筑的位移角限值区间可以得出,在 El Centro 波激励下,结构无控制时,从第 8 层开始发生中度破坏,层间位移角达到 1/1819,最终发展至顶层 1/450,超出 1/500 严重破坏极限;而在设置 2 种减震系统后,层间位移角均有所减小,在设置 SPD 后,结构自 8 层以下始终保持在中等破坏限值 1/1200 以下,结构顶部的层间位移角为 1/508,控制在避免发生严重破坏的限值内;相比 SPD,结构在设置 SMA 复合悬摆减震系统后,控制效果更

为显著,仅顶部的层间位移角接近中等破坏,达到 1/685。在江油波激励下,结构在设置 SPD 与 SMA 复合悬摆减震系统后,顶部的层间位移角分别控制在 1/896 和 1/1016,对比分析可知,相较于前者,后者尚未达到中等破坏程度。结构层间位移情况在人工波激励下也类似,但由于其频率与结构更为接近,整体响应情况较前 2 种激励更大。

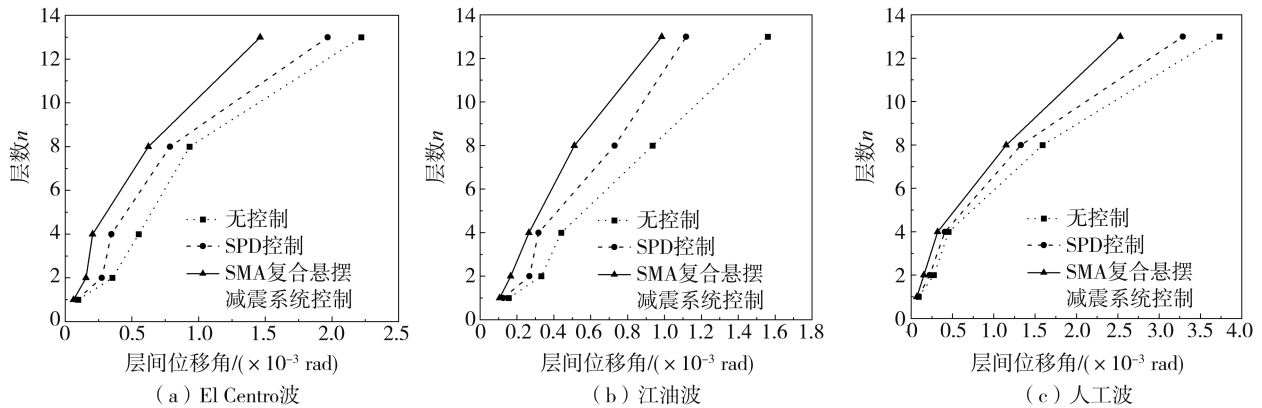


图 10 不同地震动激励下结构层间位移角

Fig. 10 Interlayer displacement angles of structures under various seismic excitations

4.2.3 结构顶部时程

无控制结构和分别在 2 种减震系统控制下模型结构的顶部响应时程整体和局部图见图 11。由于篇幅有限,仅展示了在 El Centro 波激励时的响应情况。整体上 SPD 对结构的减震效果不明显,尤其是对位移响应的控制,出现了部分放大的情况,说明仅通过 SPD 的悬吊摆长调节减震系统频率比无法使其自身频率与模型结构接近,但在 SPD 两侧增设 SMA 后,提供了附加阻尼,使其相较于 SPD 对模型结构有更好的减震效果。图中 El Centro 波激励下控制结构响应开始时存在部分放大的情况,这是由于悬吊摆锤对频率更为敏感,SMA 尚未参与工作导致。

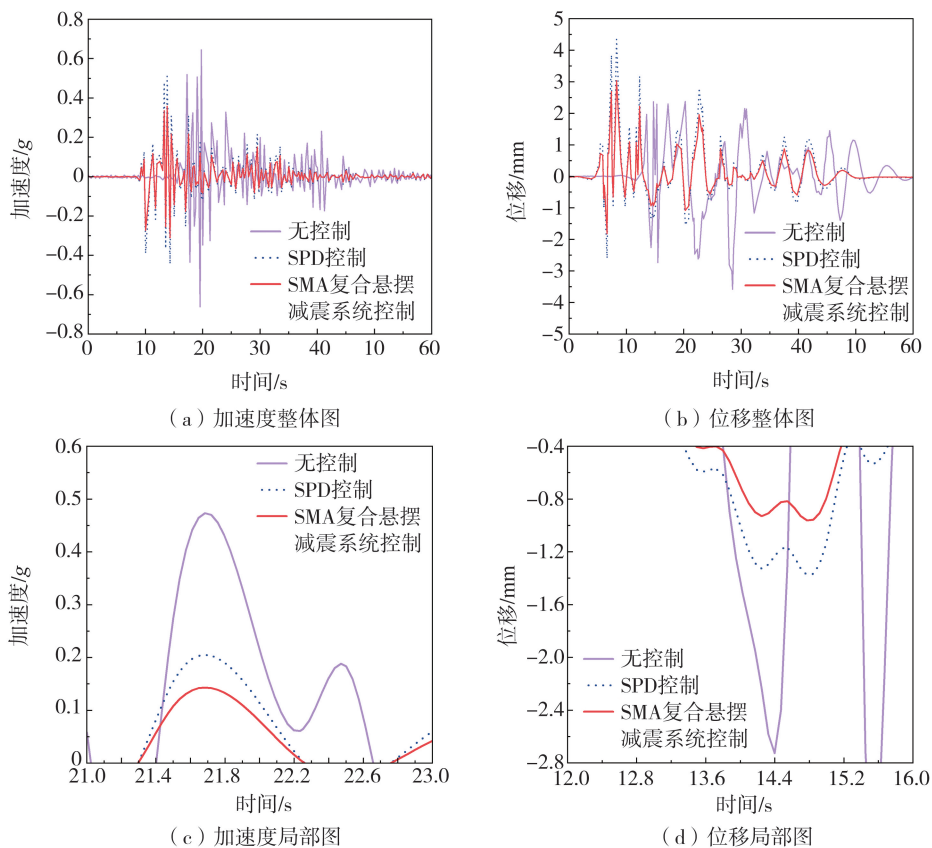


图 11 模型结构在 El Centro 波激励下的顶部时程响应曲线

Fig. 11 Top time history curves of model structure under El Centro wave excitation

表3对比了模型结构在不同地震动激励下,分别设置2种控制系统后的减震率。数据表明,复合悬摆减震系统在峰值位移和峰值加速度控制方面均优于SPD。尤其是在El Centro波的作用下,前者的峰值位移响应比后者降低了21.71%,加速度降低了23.76%。在人工波的影响下,该系统也显示出显著的优势,进一步表明,通过附加SMA调整系统频率比,对接近结构自振频率的地震动具有更佳的控制效果。综合分析模型在3种不同地震动激励特性下的响应情况,该系统展现出更优越的控制效果和适应性。

表3 不同地震动激励下结构顶部减震率对比

地震激励		El Centro 波	江油波	人工波
加速度减震率	SPD	20.81	14.13	5.61
	SMA 复合悬摆减震系统	44.57	36.52	33.93
位移减震率	SPD	27.61	15.76	5.72
	SMA 复合悬摆减震系统	49.32	40.61	34.01

5 结论

本文利用SPD减震原理和SMA的超弹性特性,设计了一种新型SMA复合悬摆减震系统,并详细介绍了其细部构造及工作原理。通过对比常规SPD减震原理,建立了SMA复合悬摆减震系统的单自由度运动学方程,并研究了频率比和质量比这2个控制参数对减震系统性能的影响。通过ABAQUS分别模拟了2种减震系统控制下的砖石古塔结构在不同地震动激励时的减震效果,得出如下主要结论:

1) 通过SMA辅助调节SPD的自振频率,使其接近结构主频率,可以在装置尺寸不变的情况下更好地发挥其控制效果。

2) 质量比是影响减震系统性能的重要因素,随着质量比的增大,减震系统的控制效果也更加显著;在不同的质量比工况下,SMA复合悬摆减震系统的减震效果均优于SPD,且消除了SPD对控制结构位移的放大现象。

3) 通过有限元分析得出,SMA复合悬摆减震系统可以较好地抑制加速度放大系数,减小层间位移角以控制结构的地震响应,并对与结构自振频率相近的地震有着更显著的加速度控制效果。

4) 所提出的新型减震系统结合了SMA和SPD装置的优点,特殊的超弹性恢复能力可以有效地控制结构体系的地震响应,可以在传统古建筑中得到应用推广。

参考文献:

- [1] 谌壮丽,王桢.古塔纠倾加固技术[M].北京:中国铁道出版社,2011.
CHEN Zhuangli, WANG Zhen. Rectification and reinforcement technology of ancient pagoda[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [2] PAVIA A, SCOZZESE F, PETRUCCI E, et al. Seismic upgrading of a historical masonry bell tower through an internal dissipative steel structure[J]. Buildings, 2021, 11(1): 24.
- [3] NOCHEBUENA-MORA E, MENDES N, LOURENÇO P B, et al. Vibration control systems: A review of their application to historical unreinforced masonry buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103333.
- [4] ISLAM N U, JANGID R S. Seismic performance of the inerter and negative stiffness-based dampers for vibration control of structures[J]. Frontiers in Built Environment, 2021, 7: 773622.
- [5] XIANG P, NISHITANI A. Seismic vibration control of building structures with multiple tuned mass damper floors integrated[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(6): 909-925.
- [6] HOSSEINI LAVASSANI S H, SHANGAPOUR S, HOMAMI P, et al. An innovative methodology for hybrid vibration control (MR+TMD) of buildings under seismic excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 155: 107175.
- [7] ZHAO Z P, ZHANG R F, JIANG Y Y, et al. Seismic response mitigation of structures with a friction pendulum inerter system[J]. Engineering Structures, 2019, 193: 110-120.
- [8] WANG J J, WANG B, LIU Z B, et al. Seismic response mitigation of building structures with a novel vibro-impact dual-mass damper[J]. Engineering Structures, 2020, 215: 110673.
- [9] ROY T, MATSAGAR V. Effectiveness of passive response control devices in buildings under earthquake and wind during design life[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(2): 252-268.
- [10] ELIAS S, MATSAGAR V. Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers[J]. Annual Reviews in Control, 2017, 44: 129-156.
- [11] BENEDETTI A, LANDI L C, MERENDA D G. Displacement-based design of an energy dissipating system for seismic upgrading of existing masonry structures[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2014, 18(4): 477-501.

- [12] SHIRAI K, ITO T, KIKUCHI M. Seismic response control effects for reinforced-concrete buildings incorporating a passive variable friction device [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105388.
- [13] 李宏男, M.P.Singh. 结构动力吸振摆的优化参数[J]. *世界地震工程*, 1994, 10(4): 14-17.
LI Hongnan, M.P.SINGH. Optimum parameters of vibration energy-dissipating pendulum for structures[J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 1994, 10(4): 14-17. (in Chinese)
- [14] 李宏男. 摆—结构体系减震性能研究[J]. *工程力学*, 1996, 13(3): 123-129.
LI Hongnan. Study on vibration damping properties of pendulum-structure system [J]. *Engineering Mechanics*, 1996, 13(3): 123-129. (in Chinese)
- [15] 黄浩宇, 张纹韶. 不同种类形状记忆合金在结构振动控制中的研究现状[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18): 154-164.
HUANG Haoyu, ZHANG Wenshao. Research overview of different families of shape memory alloys used in structure vibration control[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18): 154-164. (in Chinese)
- [16] YAN X, NIE J. Response of SMA superplastic systems under random excitation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 23(5): 893-901.
- [17] CAO L Y, LI C X. Tuned tandem mass dampers-inerters with broadband high effectiveness for structures under white noise base excitations[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(4): e2319.
- [18] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.(in Chinese)
- [19] 钱春宇, 徐敦峰, 浩文明, 等. 西安小雁塔结构模型振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(22): 67-75.
QIAN Chunyu, XU Dunfeng, Hao Wenming, et al. Shaking table test on a model of Xi'an Xiaoyan pagoda[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(22): 67-75. (in Chinese)
- [20] SALEH ASHEGHABADI M, ALI Z. Infinite element boundary conditions for dynamic models under seismic loading[J]. *Indian Journal of Physics*, 2020, 94(6): 907-917.
- [21] 杨涛, 王社良, 刘德明, 等. 基于IDA方法的小雁塔结构抗震性能评估[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(1): 162-174.
YANG Tao, WANG Sheliang, LIU Deming, et al. Seismic performance evaluation of small wild goose pagoda structure based on IDA method[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(1): 162-174. (in Chinese)