

基于复合悬摆减震系统的小雁塔结构仿真分析*

杨 涛¹, 刘德明¹, 王社良², 李彬彬²

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安, 710048) (2. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055)

摘要 根据悬摆减震原理,结合形状记忆合金(shape memory alloys,简称 SMA)的超弹性,研发了形状记忆合金复合悬摆减震系统(shape memory alloy-suspension pendulum damping system,简称 SMA-SPDS)。建立了 SMA-SPDS 的 Matlab/Simulink 仿真模型,对一个 1/10 的小雁塔结构缩尺模型进行了仿真分析,将仿真分析值与振动台试验结果值验证分析后,进行了小雁塔原型结构工程的优化设置,进一步用该方法对小雁塔原型结构进行了减震分析。结果表明:SMA-SPDS 可以提高原型结构的整体性,增强了小雁塔原型结构的抗震性能;SMA-SPDS 系统性能稳定,且随地震强度的增加,减震效果越明显,尤其是对层间位移角的控制效果显著,大震作用下层间位移角可减小 50% 以上;小雁塔仿真计算模型可以较好地反映其原型结构的真实情况,验证了该仿真分析方法的可行性,可为类似砖石古塔结构的地震保护提供参考。

关键词 小雁塔; 悬摆减震系统; 仿真分析; 地震响应; Matlab

中图分类号 TU352.1

引 言

我国有着悠久的历史,古塔作为一种历史宗教建筑,是全人类宝贵的历史文化遗产^[1]。西安小雁塔是我国密檐式古塔结构的典型代表,具有极高的历史文化价值^[2];然而小雁塔饱经历史沧桑及自然灾害的侵袭,结构内部存在不同程度的损伤,抗灾变能力较差,亟需进行动力灾变保护。因此,对小雁塔的抗灾变保护已成为当前严峻的议题^[3]。

近些年来,国内外学者对古塔结构的抗震保护进行了不断的实践和研究。陈平等^[4-5]运用 ANSYS 对大象寺塔进行了详细的计算与稳定性分析,对古塔结构性能进行综合评判。车爱兰^[6]通过有限元数值计算对应县木塔的动力特性和地震响应进行了研究,提出了木结构古塔健康诊断和维修加固方法。Jaishi 等^[7]通过对尼泊尔古塔寺庙进行现场环境激振得到其动力特性,对有限元模型进行验证并对其抗震能力进行评估。刘晓莉^[8]制作镇国寺白塔的 1/40 的缩尺模型,研究了镇国寺白塔传统砌体材料的破坏准则,模拟了镇国寺白塔在汶川地震中的破坏演变过程,但因为模型制作比例较小,相当于实体堆砌,并不能完全体现原型的结构特点。

结构振动控制是一种已被实际验证能够有效减

小结构地震响应的理论、新方法^[9-10],但国内外学者对 SMA 的研究利用主要集中在阻尼器的研发上,较少应用到实际结构工程。笔者设计并制作了形状记忆合金复合悬摆减震系统,为研究 SMA-SPDS 在小雁塔结构中的消能减震作用,利用 Simulink 建立小雁塔结构在设置 SMA-SPDS 下的 Simulink 仿真模型^[11-13],对小雁塔模型结构进行地震作用下的仿真分析;结合原型结构现状,基于量纲相似理论,设计制作了一个几何相似比为 1/10 的小雁塔模型结构,并进行了小雁塔模型结构振动台试验;将试验结果与仿真分析做对比,验证该仿真模型与计算方法的正确性,并将该仿真模型应用于原型结构,优化并分析了小雁塔原型结构的减震效果。结果表明,SMA-SPDS 可用于小雁塔结构及其类似砖石古塔结构的减震保护,具有较好的工程应用前景。

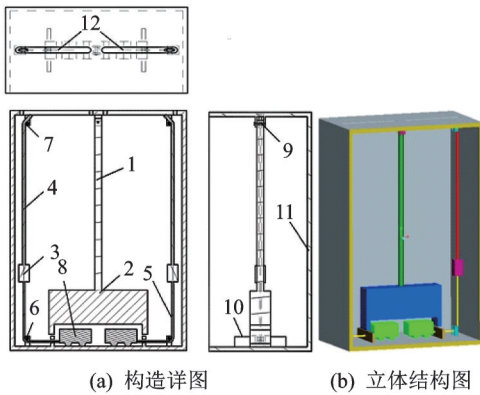
1 形状记忆合金复合悬摆减震系统

1.1 SMA-SPDS 构造设计

利用 SMA 丝的相变伪弹性,结合悬摆减震原理,设计了形状记忆合金复合悬摆减震系统,如图 1 所示。SMA-SPDS 主要由质量振子、摆杆、单向铰、滑块、SMA 丝、挡板及转向滑轮等构成。

* 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-578);陕西省教育厅资助项目(18JK0332);国家自然科学基金资助项目(51678480);西安建筑科技大学结构与抗震教育部重点实验室资助项目(KL-SEER-ME-202003)

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2020-04-25



(a) Construction details (b) Tri-dimensional structure

1-摆杆; 2-质量振子; 3-丝索转换头; 4-钢索; 5-SMA; 6-底部转向滑轮; 7-上部转向滑轮; 8-小车; 9-单向铰; 10-挡板; 11-外壳; 12-钢索通道

图1 SMA-SPDS 构造图

Fig.1 SMA-SPDS structure diagram

1.2 SMA-SPDS 工作原理

以1次循环为例来说明形状记忆合金复合悬摆减震系统的工作原理和过程:①当地震作用较小时,质量振子不与滑块接触,可以自由摆动,通过刚性外壁将反向的惯性力作用于结构之上;②当塔身受地震影响较大时,质量振子与滑块一起运动,若结构向右振动时,质量振子将向左摆动,并带动右侧滑块沿水平滑道运动,拉动右侧SMA丝产生相对位移,此时左侧的SMA丝仍处于静止状态;当质量振子恢复到平衡位置时,SMA丝回到初始预拉状态,右侧SMA丝经历了一个耗能循环过程,形成比较饱满的滞回曲线,实现了对结构的消能减震;同时质量振子的惯性力通过钢索反作用到结构上,对结构的地震响应产生抑制作用,从而使结构的地震响应得到衰减。质量振子向右运动时的原理相同。

悬摆减震体系是一种可设置于古塔结构内部的减震系统,但若单独将悬摆减震体系设置于古塔结构内部楼板上,由于其自身特点对古塔结构起到的减震作用较小。若将悬摆减震体系与SMA丝相结合,利用丝-钢索与古塔结构内部连接,研发性能良好的SMA-SPDS,则可将悬摆减震体系的惯性力通过丝-钢索传递给古塔结构,同时还能利用SMA-SPDS中的SMA丝提供阻尼,达到消能减震的目的,可明显减小古塔结构的地震响应。

2 设置 SMA-SPDS 的小雁塔结构仿真分析

2.1 小雁塔现场调查

小雁塔为唐代密檐砖佛塔,由塔基、塔身和塔顶

三部分组成,原有15层。塔顶由圆形刹座、两重相轮和宝瓶形刹顶组成,现保留13层,高为43.38 m。塔身平面呈方形,底边长为11.38 m,塔身略呈棱形,青砖砌成,单壁中空,内壁有登塔砖砌蹬道。2层以上均逐层递减,高度从3.76 m至顶层不足1 m。

小雁塔主体结构采用灰砖错缝砌筑,经现场测试灰砖抗压强度在0.71 MPa~1.88 MPa,胶结材料主要为橙黄泥和生石灰,黏性较好,但强度不高。1965年文物保护部门对小雁塔进行了较大规模的修缮,在第2,5,9及13层顶板处浇筑钢筋混凝土梁和楼板,增加其整体性。

2.2 小雁塔试验模型

本试验根据1965年小雁塔修缮后的现存状况,设计并制作小雁塔模型结构,综合考虑振动台的台面尺寸及承载能力,取尺寸相似系数 $S_l = 1/10$,总高度为4 m。模型设计采用欠人工质量方法,将配重设置在塔身墙壁的配重箱内,根据小雁塔原型结构材料的性能,同时兼顾试验的可行性,模型塔身选用经过加工处理的青砖。青砖主要有2种规格:塔身主体结构用砖为110 mm×50 mm×25 mm;挑檐处用砖为110 mm×50 mm×10 mm。塔身尺寸和整体模型如图2所示,SMA-SPDS在小雁塔内的设置和连接如图3所示。将SAM丝通过丝-索转换接头与钢索连接,经过SMA-SPDS底部和顶部的转向滑轮转向后固定于结构的底板处。本次测试采用INV3060A多通道动态数据采集仪、941-B型水平及垂向速度传感器等。

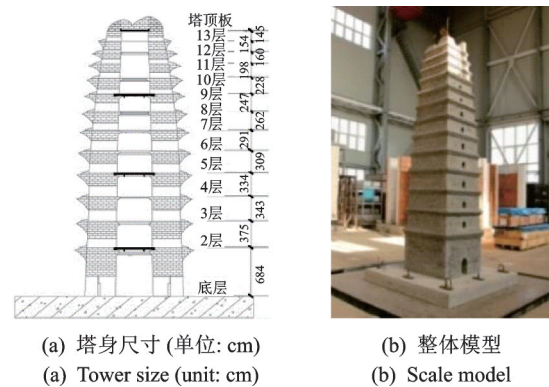


图2 塔身尺寸和整体模型

Fig.2 Tower dimensions and overall model

由于模型所选材料为砖砌体,其承载力等参数与原型结构基本相同,故可取 $S_E = 1$ 。根据 Buckingham 理论和量纲分析,计算出模型和原型结构之间的相似关系,从而求得本次试验的各相似系数,如表1所示。

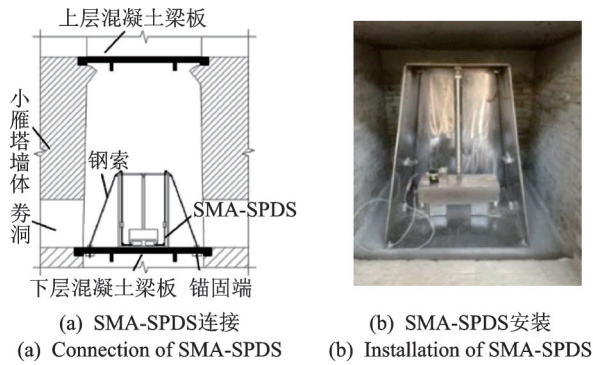


图 3 SMA-SPDS 安装设置图

Fig.3 SMA-SPDS installation setup diagram

表 1 模型相似关系表

Tab.1 Model similarity relation table

相似物理量	符号	公式	相似比
尺寸	S_l	模型 l /原型 l	0.1
弹性模量	S_E	模型 E /原型 E	1
质量	S_m	模型 m /原型 m	0.003 61
密度	S_ρ	$S_\rho = S_m/S_l^3$	3.61
加速度	S_a	$S_a = S_E S_l^2/S_m$	2.77
应力	S_σ	$S_\sigma = S_E/S_a$	0.361
时间	S_t	$S_t = \sqrt{S_l/S_a}$	0.19
位移	S_w	$S_w = S_l$	0.1
速度	S_v	$S_v = \sqrt{S_l S_a}$	0.526
频率	S_f	$S_f = 1/S_t$	5.26

2.3 试验方案

根据 GB50011—2010(2016 年版)《建筑设计抗震规范》^[14]规定,本试验选取了 2 条真实强震记录(El-Centro 波(NS)和江油波(EW)地震记录)和 1 条人工波(上海波),进行模拟地震振动台试验。根据试验方案对小雁塔模型结构依次进行 8 度小震(0.2g)、8 度中震(0.6g)和 8 度大震(0.9g)下的模拟振动台试验,观察设置与未设置 SMA-SPDS 的小雁塔模型结构的试验现象。

2.4 设置减震系统的小雁塔结构仿真过程

笔者假定小雁塔结构在楼板平面内刚度无限大,并不考虑扭转效应,采用层间剪切串联多自由度振动模型进行分析。将设置 SMA-SPDS 的小雁塔结构分为小雁塔主体结构 and SMA-SPDS 两部分考虑,可分别列出各自的运动方程。

2.4.1 小雁塔结构仿真模型的建立

考虑 SMA-SPDS 的作用,小雁塔主体结构运动方程可表示为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g + P^T f \quad (1)$$

其中: P 为 $n \times m$ 阶设置矩阵, m 为减震装置设置数量,在减震装置设置位置处为 1,其余元素为 0; f 为被动控制力向量, $f = \bar{C}(\dot{\bar{x}} - P\dot{x}) + \bar{K}(\bar{x} - Px)$; \bar{x} 和 $\dot{\bar{x}}$ 分别为减震装置的位移向量和速度向量。

引入状态向量 $Z = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}$,则小雁塔主体结构

构状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) \\ Y(t) = CZ(t) + DU(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $Y(t)$ 为系统输出矩阵; $U(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g + P^T f$; $A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$; $B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ M^{-1} \end{bmatrix}_{2n \times n}$; $C = I_{2n \times 2n}$; $D = 0_{2n \times n}$; I 为下角标注维数的单位向量; 0 为下角标注维数的零向量。

由此状态方程即可求解小雁塔主体结构相对于地面的位移和速度,而加速度不宜于用 Simulink 中的 Derivative 求导模块。Derivative 模块的输出属于近似求解,为减小结果误差,结构加速度可由式(3)直接求出

$$\ddot{x} = M^{-1}(-M\ddot{x}_g + P^T f - C\dot{x} - Kx) \quad (3)$$

小雁塔主体结构和被动控制力 Simulink 仿真模型如图 4 和图 5 所示。

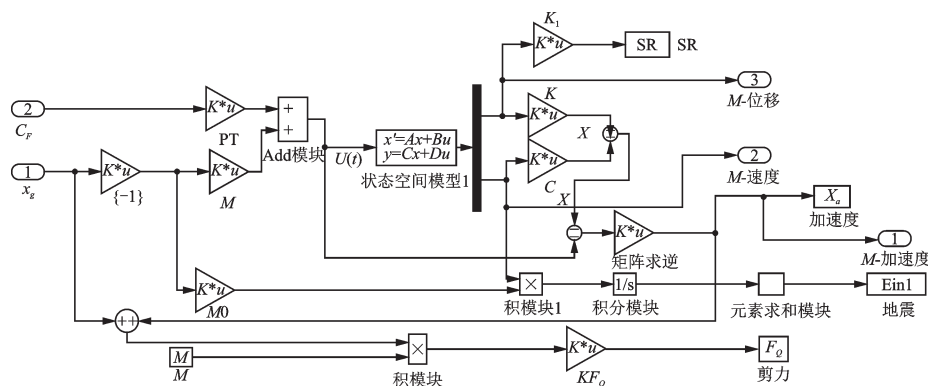


图 4 小雁塔主体结构仿真模型

Fig.4 Simulation model of main structure of Xiaoyan Pagoda

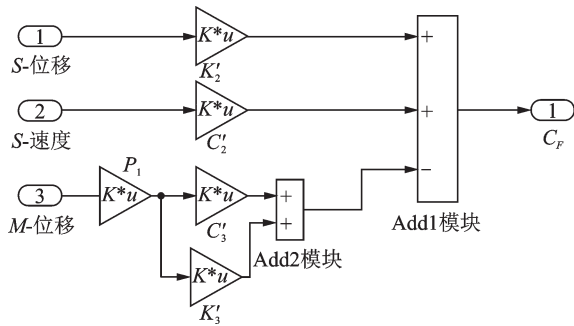


图5 被动控制力仿真模型

Fig.5 Passive control force simulation model

2.4.2 SMA-SPDS 仿真模型的建立

SMA-SPDS 的运动方程为

$$\bar{M}P\ddot{x} + \bar{M}(\ddot{x} - P\ddot{x}) + \bar{C}(\dot{x} - P\dot{x}) + K(\bar{x} - P\bar{x}) = -\bar{M}\ddot{x}_g$$

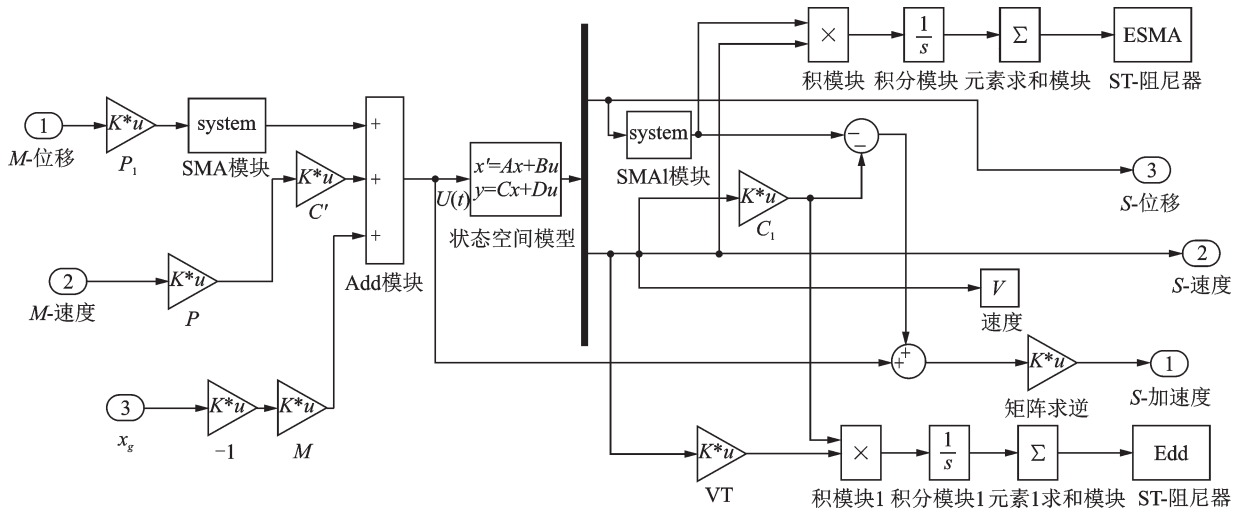


图6 SMA-SPDS 仿真模型

Fig.6 SMA-SPDS simulation model

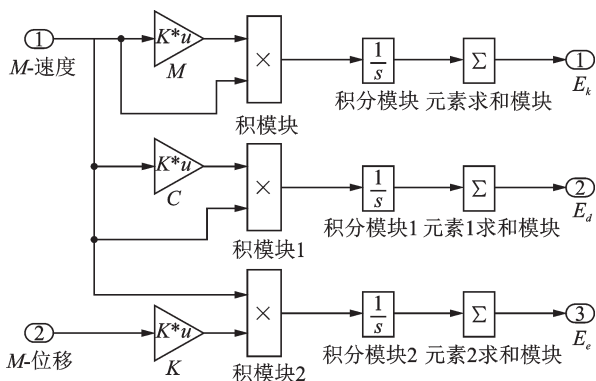


图7 小雁塔主结构能量反应仿真模型

Fig.7 Simulation model of main structure energy response of Xiaoyan Pagoda

2.4.4 Simulink 主仿真模型

小雁塔减震结构体系 Simulink 主仿真模型如图8所示,该模型由小雁塔主结构、SMA-SPDS、被

参照小雁塔仿真模型的建立,可以求得 SMA-SPDS 减震装置的加速度向量表达式为

$$\ddot{x} = \bar{M}(-\bar{M}\ddot{x}_g + \bar{C}P^T\dot{x} + \bar{K}P^T x - \bar{C}\dot{x} - \bar{K}x) \quad (4)$$

SMA-SPDS 的 Simulink 仿真模型如图6所示。

2.4.3 能量反应仿真模型

当设置 SMA-SPDS 的小雁塔结构遭受地震作用袭击时,大部分的地震能量将由减震系统耗散掉^[15],因此减震系统的耗能能力将直接影响小雁塔结构的抗震性能。如果对设置 SMA-SPDS 的小雁塔结构的运动方程在地震持续时间 t_0 内的任一时刻 t 进行积分,则可简化得到能量平衡方程式^[16-18]为

$$E(t) = E_k(t) + E_c(t) + E_e(t) + E_d(t) \quad (5)$$

小雁塔主结构能量反应仿真模型如图7所示。

动控制力和主结构能量四大子系统构成。M-加速度、M-速度和M-位移分别为小雁塔主结构相对于地面的加速度、速度和位移;S-加速度、S-速度和S-位移分别为减震装置加速度、速度和位移; x_g, C_F 分别为地震加速度和被动控制力; E_k, E_e 和 E_c 分别为小雁塔主结构的动能、变形能和阻尼耗能。

2.5 试验结果

2.5.1 模型结构动力特性

在结构振动台试验中通常采用白噪声扫频的方法来测试结构在不同强度地震作用后的动力特性,因此在试验中每进行一次相同强度的地震作用后,输入加速度峰值为 50g 的白噪声对模型结构进行扫频,对扫频所得结构加速度响应进行计算,完成小雁塔模型结构的自振频率的求解,结果如表2所示。

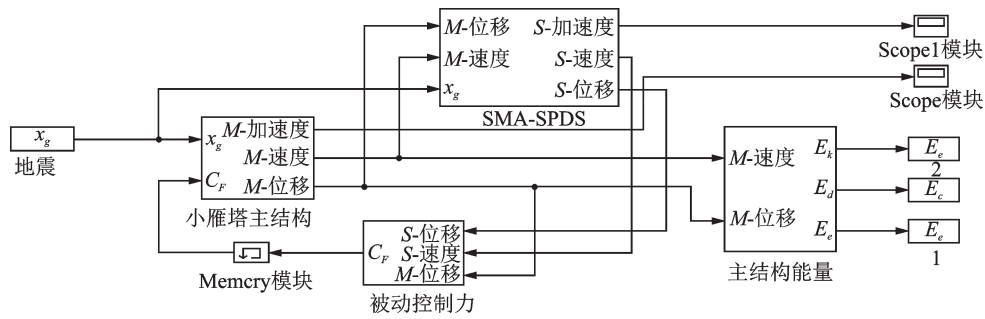


图8 小雁塔减震结构主模型

Fig.8 Main model of Xiaoyan Pagoda shock absorption structure

表2 小雁塔模型结构自振频率和周期

Tab.2 Natural vibration frequency and period of Xiaoyan Pagoda model structure

试验工况	1阶		2阶		
	f/Hz	周期/s	f/Hz	周期/s	
无控	震前	5.83	0.17	14.13	0.071
	小震	5.31	0.19	14.12	0.071
	中震	5.05	0.20	13.98	0.072
	大震	4.71	0.21	13.81	0.072
有控	震前	6.08	0.16	15.23	0.066
	小震	5.98	0.17	15.23	0.066
	中震	5.93	0.17	14.97	0.067
	大震	5.45	0.18	14.97	0.067

表4 有控8度塔身顶层加速度极值

Tab.4 Maximum acceleration of the top floor of the controlled 8-degree tower g

位置	El-Centro波		江油波		人工波	
	极大	极小	极大	极小	极大	极小
小震	0.552	-0.570	0.512	-0.528	0.587	-0.604
中震	0.886	-0.937	1.338	-1.387	1.461	-1.474
大震	1.239	-1.458	1.739	-1.782	1.830	-1.714

表5 无控8度塔身顶层相对位移最大值

Tab.5 Maximum relative displacement of the top floor of the uncontrolled 8-degree tower mm

位置	El-Centro波		江油波		人工波	
	实测位移	相对位移	实测位移	相对位移	实测位移	相对位移
小震	5.011	3.197	4.354	2.094	15.16	5.318
中震	9.485	5.819	8.169	3.530	28.89	10.190
大震	16.840	11.870	12.230	5.908	62.06	31.830

表6 有控8度塔身顶层相对位移最大值

Tab.6 The maximum relative displacement of the top floor of the controlled 8-degree tower mm

位置	El-Centro波		江油波		人工波	
	实测位移	相对位移	实测位移	相对位移	实测位移	相对位移
小震	3.550	2.021	3.594	1.376	13.87	3.509
中震	7.668	4.117	7.068	2.442	23.97	7.057
大震	13.210	8.051	10.030	4.098	49.49	23.32

表3 无控8度塔身顶层加速度极值

Tab.3 Maximum acceleration of the top floor of the uncontrolled 8-degree tower g

位置	El-Centro波		江油波		人工波	
	极大	极小	极大	极小	极大	极小
小震	0.647	-0.661	0.603	-0.624	0.688	-0.694
中震	1.231	-1.304	1.770	-1.815	1.972	-1.938
大震	1.813	-1.914	2.354	-2.460	2.664	-2.589

2.6 小雁塔模型结构仿真与试验结果对比

根据上述试验结果与用Simulink仿真方法对小雁塔模型结构仿真分析进行对比,给出小雁塔模型结构在设置和未设置SMA-SPDS下的Simulink仿真与试验结果塔身顶层加速度对比图,用来说明仿真的合理性,如图9、图10所示。

2.5.2 模型结构加速度响应分析

在不同地震波的作用下,小雁塔模型结构的加速度响应剧烈区间与输入地震波基本一致,都集中在输入加速度峰值附近。随着地震波强度减弱,结构的响应也逐渐减小。同时在不同地震波作用下,模型结构都会有多个加速度响应值较大的点出现,尤其以江油波表现最为明显。小雁塔模型结构的加速度响应峰值如表3、表4所示。

2.5.3 模型结构位移响应分析

小雁塔模型结构顶层的相对位移如表5、表6所示。

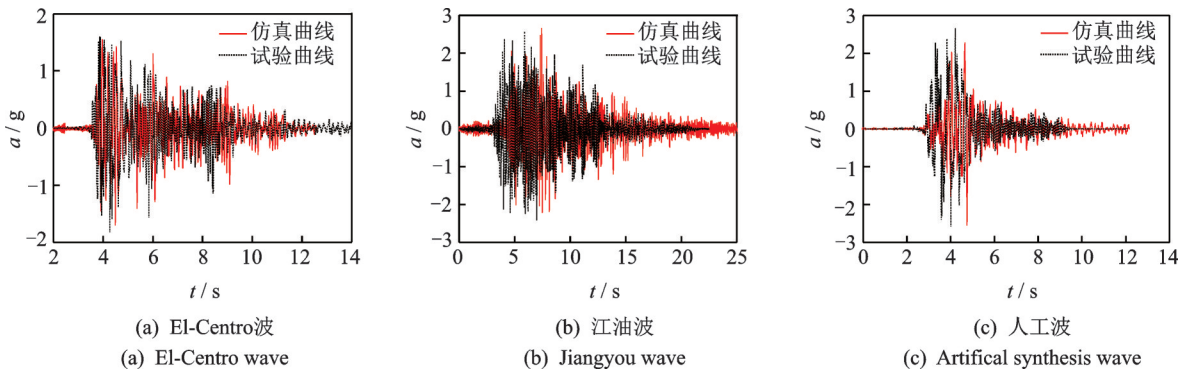


图9 8度大震下无控塔身顶部加速度仿真与试验对比图

Fig.9 Comparison diagram of acceleration simulation and test on top of uncontrolled tower under 8 degree earthquake

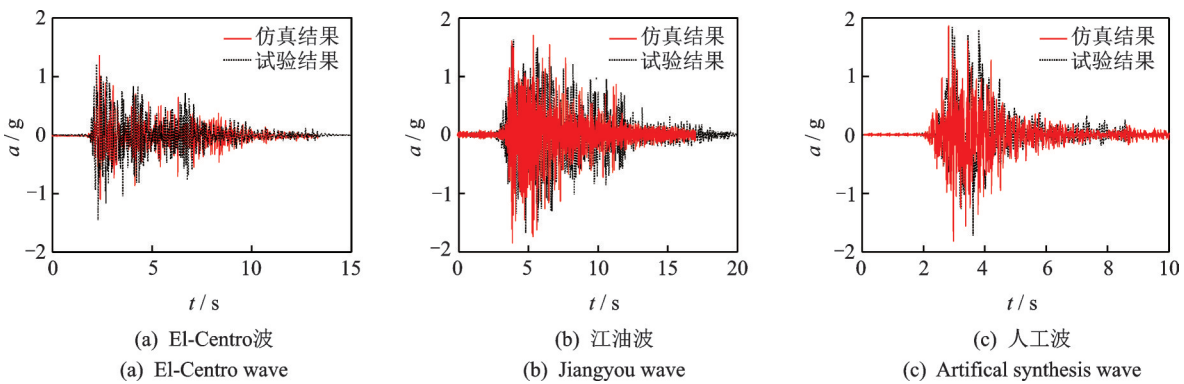


图10 8度大震下有控塔身顶部加速度仿真与试验对比图

Fig.10 Comparison diagram of acceleration simulation and test on top of control tower under 8 degree earthquake

在不同试验过程中小雁塔模型结构随着地震的增大其加速度响应也逐渐增大,塔身顶部从最初的0.6g增加到2.58g。当模型结构中设置SMA-SPDS后,可以明显减小地震所带来的加速度响应,平均降幅在15%左右,可知本系统在小雁塔结构中能起到较好的减震作用。

由图9和图10可以看出,小雁塔模型结构的Simulink仿真结果与试验结果吻合较好,Simulink仿真方法可以很好地模拟小雁塔模型结构设置与未设置SMA-SPDS的地震响应情况,因此可以将上述Simulink仿真程序应用到模拟小雁塔原型结构的地震响应情况,从而得到在原型结构上设置SMA-SPDS较为真实的减震效果。

3 小雁塔原型结构仿真分析

3.1 SMA-SPDS位置场所优化

笔者研发的SMA-SPDS通过控制小雁塔结构的振型来达到减振效果,故设置的SMA-SPDS应与结构的振型调谐。通过对该系统配置场所的巧妙选定实现多自由度体系在各个模态单位实现振动控

制,减振模态要选择在最有效且干扰其他模态工作的配置场所。由等效质量概念^[19]可知:在某个模态的振动波腹(最大振幅点),等效质量为最小;在某个模态的振动节点(振幅为0),等效质量为无限大。

脉动法在自然环境条件下就可完成对建筑物动力特性的测量,适合历史建筑的动力特性的测试,现场测试结果得到小雁塔结构的水平方向自振频率、阻尼比和振型等动力特性。自振频率和阻尼比如表7所示,现场测试如图11所示,模态振型如图12所示。

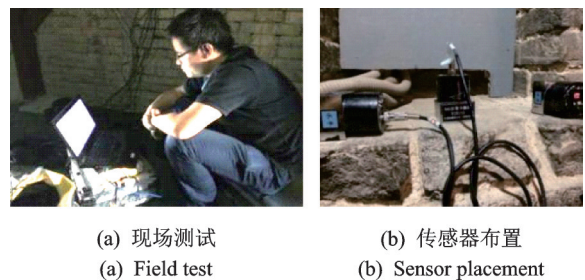


图11 现场测试图

Fig.11 Field test chart

现场动力测试可以确定小雁塔原型结构模态控制的SMA-SPDS布置位置:控制1阶模态设置在顶层;控制2阶模态设置在9层;控制3阶模态也设置在

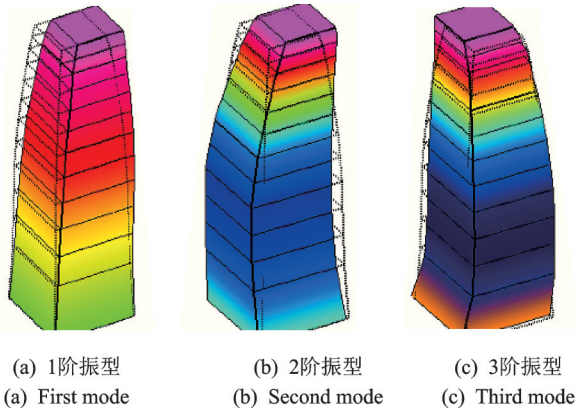


图 12 小雁塔模态振型图

Fig.12 Modal shape diagram of Xiaoyan Pagoda

表 7 小雁塔动力特征值

Tab.7 Xiaoyan Pagoda dynamic characteristic value

阶数	f/Hz	周期/s	阻尼比/%
1 阶	1.348	0.74	0.902
2 阶	3.401	0.29	2.201
3 阶	5.303	0.19	6.560

顶层,由于顶层已作为 1 阶模态控制点,因此可另外选择 5 层作为 SMA-SPDS 控制 3 阶模态的设置场所。

3.2 SMA-SPDS 参数优化

假设结构具有 n 个 SMA-SPDS,利用模态坐标建立 n 个单自由度体系,则附加 SMA-SPDS 的结构运动方程为

$$\Phi^T G \Phi \delta = \Phi^T (F - F_d) \quad (6)$$

其中: F_d 为 SMS-SPDS 的作用力向量。

由 SMA-SPDS 得到的作用力向量是位移向量 X 的函数,传递矩阵设为 H ,则作用力向量表示为

$$F_d = H X \quad (7)$$

附带有 SMA-SPDS 的多自由度体系可解耦为

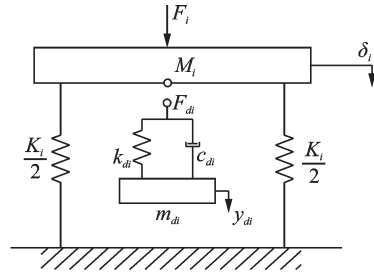
$$G_{di} = \frac{1 - (\omega/\omega_{di})^2 + 2j\zeta_i(\omega/\omega_{di})}{(\frac{\omega}{\Omega_i})^2 (\frac{\omega}{\omega_{di}})^2 - \{(\frac{\omega}{\omega_{di}})^2 + (\frac{\omega}{\Omega_i})^2(1 + \mu_i)\} + 2j\zeta_i(\frac{\omega}{\omega_{di}})(\frac{\omega}{\omega_{di}})\{1 - (\frac{\omega}{\Omega_i})^2(1 + \mu_i)\}} \frac{1}{K_i} \quad (10)$$

其中: $\omega_{di} = \sqrt{k_{di}/m_{di}}$; $\zeta_i = c_{di}/2m_{di}\omega_i$; $\mu_i = m_{di}/M_i$; $\omega_{di}, \zeta_i, \mu_i$ 分别为 i 阶模态减振系统的固有频率、阻尼比和质量比。

形状记忆合金复合悬摆减震系统的最佳设计以定点理论为基础,其核心思想是在有阻尼振动系统的频率响应曲线上,寻找与阻尼无关的特定点,利用特定点进行减振装置的优化设计^[20-21]。本研究利用定点理论对 SMA-SPDS 进行优化设计。

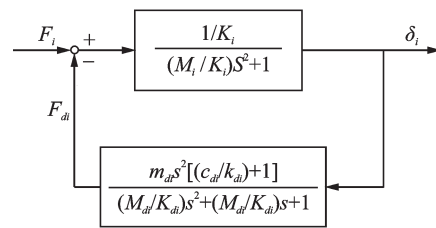
设含阻尼元素 ζ 的单自由度减振体系,频率传

单自由度体系,则 i 阶模态附加 SMA-SPDS 的单自由度体系力学模型如图 13 表示,该系统的质量、SMA 刚度和阻尼系数分别设为 m_{di}, k_{di} 和 c_{di} 。



(a) 力学模型

(a) Mechanical model



(b) 控制流程图

(b) Control flow chart

图 13 i 阶模态的单自由度体系附加减振系统简化模型图

Fig.13 A simplified model diagram of vibration reduction system is added to the single-degree-of-freedom system of order i mode

通过附加 SMA-SPDS 而产生的作用力 F_{di} 为

$$F_{di} = \frac{-m_{di}\omega^2(k_{di} - jc_{di}\omega)}{k_{di} - m_{di}\omega^2 + jc_{di}\omega} \delta_i \quad (8)$$

由式(8)看出, SMA-SPDS 充当反馈补偿元素的作用,可以导出传递函数 G_{di} 的表达式为

$$\delta_i/F_i = G_{di} \quad (9)$$

其中: G_{di} 为含有该减振系统的 i 阶模态的传递函数。

递函数表示为

$$G(\omega) = \frac{C(\omega) + \zeta D(\omega)}{A(\omega) + \zeta B(\omega)} \quad (11)$$

其中: $C(\omega), A(\omega)$ 为不含 ζ 的关于 ω 的系数项; $D(\omega), B(\omega)$ 为包含 ζ 的关于 ω 的系数项。

$\zeta = 0$ 时,频率传递函数为

$$G(\omega)|_{\zeta=0} = C(\omega)/A(\omega) \quad (12)$$

$\zeta = \infty$ 时,频率传递函数为

$$G(\omega)|_{\zeta=\infty} = D(\omega)/B(\omega) \quad (13)$$

相对 ζ 独立的频率传递函数为

$$G(\omega) = \left(\frac{D(\omega)}{B(\omega)} \right) \left(\frac{C(\omega)/D(\omega) + \zeta}{A(\omega)/B(\omega) + \zeta} \right) = \frac{D(\omega)}{B(\omega)} \quad (14)$$

其中: ζ 为任意实数。

相对 ζ 独立的频率传递函数由式(15)决定

$$G(\omega)|_{\zeta=0} = G(\omega)|_{\zeta=\infty} \quad (15)$$

当 $\zeta = 0$ 或 $\zeta = \infty$ 时, 频率传递函数的交点与 ζ 无关, 因此该交点就是频率响应曲线的最大值, 所确定的 ζ 值即为最佳阻尼值。在进行 SMA-SPDS 参数设计时, 利用定点高度相等, 可求出减振装置的最佳调谐值。

对于多自由度体系减振装置最佳设计, 利用前文模态分析, 可将多自由度减振体系解耦为单自由度减振体系, 求出相应的频率传递函数, 如式(10)所示。利用式(10)~(14), 即可得出 i 阶模态的单自由度减振装置最佳设计条件, 从而可以确定 SMA-SPDS 中的主要参数如下。

最佳调谐 $\frac{\omega_i}{\Omega_i} = \frac{1}{1 + \mu_i} \quad (16)$

最佳阻尼比 $\zeta_i = \sqrt{\frac{3\mu_i}{8(1 + \mu_i)}} \quad (17)$

最大幅度系数 $\left(\frac{X}{X_{st}} \right)_{\max} = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu_i}} \quad (18)$

减振装置频率 $\omega_i = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{k_{eq}}{m} \left(\frac{m}{l} \right)^2} \quad (19)$

其中: ω_i 为 i 阶模态减振装置固有频率; Ω_i 为 i 阶模态结构固有频率; ζ_i 为 i 阶模态阻尼比; k_{eq} 为 SMA 丝等效割线刚度; l 为有效摆长; μ_i 为 i 阶模态质量比。

各 SMA-SPDS 设置场所确定后, 各模态控制下 SMA-SPDS 的目标阻尼比设计为: $\zeta_1 = 0.11, \zeta_2 = 0.078, \zeta_3 = 0.05$ 。由式(18)可求得各个模态设置的 SMA-SPDS 的质量比为: $\mu_1 = 0.03, \mu_2 = 0.02, \mu_3 = 0.007$, 从而可以确定各 SMA-SPDS 的参数, 见表 8。

表 8 小雁塔原型结构 SMA-SPDS 参数设计建议值

Tab.8 The recommended design value of sma - spds parameters for the prototype structure of Xiaoyan Pagoda

阶数	质量/kg	摆长/m	SMA 直径/mm	SMA 数量
1 阶	832	1.534	1.0	6
2 阶	634	1.241	1.0	4
3 阶	459	0.953	1.0	4

3.3 减振效果

在比较 SMA-SPDS 的优化控制效果时, 取结构顶层为研究对象, 对其在控制不同阶次振型下的优化控制效果进行分析。由于篇幅限制, 此处仅列出 8 度大震作用下典型地震波江油波不同阶次振型的小雁塔结构顶层的位移和加速度时程图。

表 9 和表 10 分别给出 8 度大震下 El-Centro 波、江油波、人工波的优化控制 1 阶振型、优化控制前 2 阶振型、优化控制前 3 阶振型和无控状态下顶层最大位移与加速度的响应对比, 并引入控制效果系数 α 以反映 SMA-SPDS 对小雁塔原型结构地震响应的控制效果

$$\alpha = (|X|_1 - |X|_2) / |X|_1$$

表 9 SMA-SPDS 优化控制位移效果对比

Tab.9 Comparison of optimal control displacement with SMA-SPDS

地震波	控制振型阶次	结构最大位移/mm		$\alpha/\%$
		无控	优化控制	
El-Centro	1 阶	—	191.06	17.9
	2 阶	232.96	163.25	29.9
	3 阶	—	140.28	39.8
江油波	1 阶	—	211.63	23.5
	2 阶	266.34	183.34	33.7
	3 阶	—	152.89	44.7
人工波	1 阶	—	133.52	18.3
	2 阶	163.45	108.71	33.5
	3 阶	—	86.84	46.9

表 10 SMA-SPDS 优化控制加速度效果对比

Tab.10 Comparison of optimal control acceleration with SMA-SPDS

地震波	控制振型阶次	结构最大加速度/g		$\alpha/\%$
		无控	优化控制	
El-Centro	1 阶	—	0.68	16.0
	2 阶	0.81	0.55	32.1
	3 阶	—	0.50	38.2
江油波	1 阶	—	0.63	27.5
	2 阶	0.87	0.60	31.0
	3 阶	—	0.47	46.0
人工波	1 阶	—	0.77	7.2
	2 阶	0.83	0.58	30.1
	3 阶	—	0.45	45.8

其中: $|X|_1$ 为未设置 SMA-SPDS 的小雁塔结构的地震响应; $|X|_2$ 为优化设置 SMA-SPDS 时小雁塔结构的地震响应。

由图 14~15 分析可知,通过控制不同阶次振型,均可对小雁塔原型结构位移和加速度起到控制效果,且随着控制的阶次提高,对小雁塔原型结构顶

层控制效果越显著。由表 10 可知,若控制小雁塔原型结构前 2 阶振型,在 8 度大震作用下,结构的位移响应平均降低 32.4%,加速度平均降低 31.1%;当控制 3 阶振型时,小雁塔结构位移和加速度响应分别平均降低 43.8% 和 43.3%。由此可知,随着控制模态阶次的提高,需要相应地增加 SMA-SPDS 的数量,同时小雁塔结构的控制效果也有明显提高。

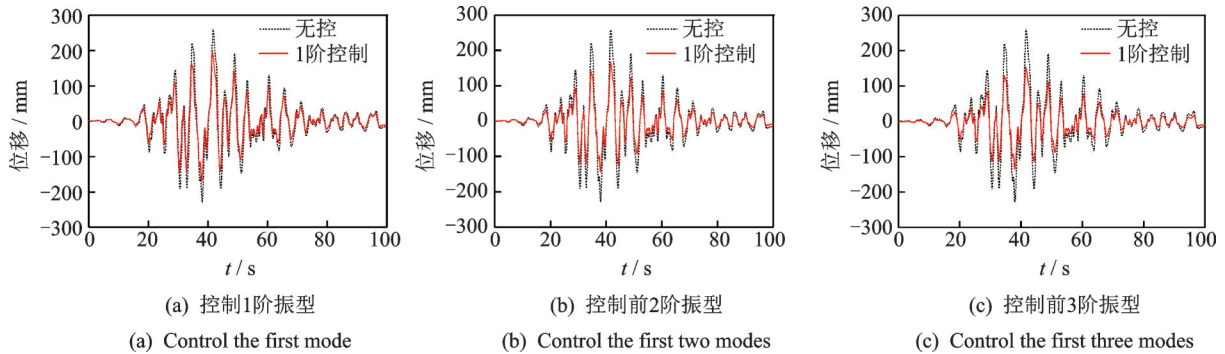


图 14 江油波优化控制不同振型位移时程图

Fig.14 The time-history diagram of optimal control of different displacement modes by Jiang You wave

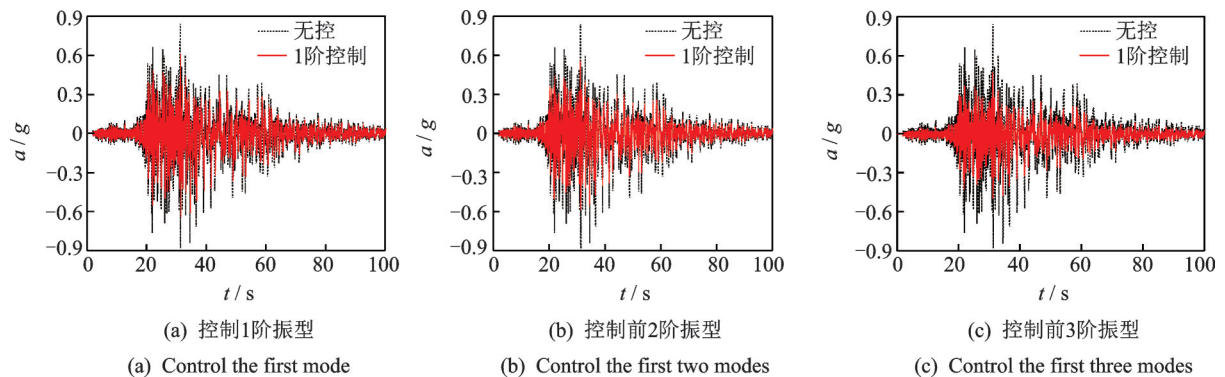


图 15 江油波优化控制不同振型加速度时程图

Fig.15 Jiang You wave optimization control acceleration time history diagram of different modes

综合考虑小雁塔实际工程的复杂性、成本控制、可操作性以及小雁塔原型结构的可观光性等因素,笔者建议考虑控制小雁塔原型结构前 3 阶振型。

4 结论

1) 通过 Simulink 建立了设置 SMA-SPDS 的小雁塔仿真模型结构,与振动台试验结果对比,研究了小雁塔模型结构在 8 度大震下的地震响应,结果表明仿真分析结果与试验结果吻合较好,说明所建立的设置与未设置 SMA-SPDS 的小雁塔仿真计算模型可以较好地反映试验的真实情况。

2) 将小雁塔模型结构 Simulink 仿真模型应用到小雁塔原型结构的模拟计算,进行了小雁塔原型结构在 8 度小震、中震及大震下的模拟分析。结果表明:当小雁塔原型结构设置减震系统后,各阶频率

均有所提高,说明 SMA-SPDS 可以提高原型结构的整体抗震性能;同时,SMA-SPDS 对减小小雁塔结构的地震响应具有明显的作用,且随地震强度的增加,减震效果越明显。

3) 针对小雁塔原型结构,对 SMA-SPDS 的参数、布置位置等进行了优化设计,对比分析了小雁塔原型结构中布置 SMA-SPDS 优化前后的地震响应情况。结果表明,通过控制不同阶次振型,均可对小雁塔原型结构位移和加速度起到控制效果,且随着控制的阶次提高,对小雁塔原型结构顶层控制效果越显著。当控制 3 阶振型时,小雁塔结构位移和加速度响应分别降低 43.8% 和 43.3%,优化效果显著。

4) 形状记忆合金复合悬摆减震系统对小雁塔结构的保护,严格遵循古塔结构抗震保护的“最小干预”原则,可有效减小塔体的地震响应,对于类似古塔的抗震保护具有一定的参考价值 and 工程意义。

参 考 文 献

- [1] 张驭寰. 古塔实录[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011:1-44.
- [2] SOROUSHIAN S, MARAGAKIS E, ARASH E Z, et al. Response of a 2-story test-bed structure for the seismic evaluation of nonstructural systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016(1): 19-29.
- [3] 杨涛. 基于SMA-SPDS的小雁塔结构减震控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [4] 陈平, 王智华, 沈治国. 大象寺塔现状安全稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010(2): 67-69.
CHEN Ping, WANG Zhihua, SHEN Zhiguo. Analysis on safety stability of Daxiangsi Pagoda [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010(2): 67-69. (in Chinese)
- [5] 陈平, 赵冬, 沈治国. 古塔纠偏的有限元应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006(2): 241-244.
CHEN Ping, ZHAO Dong, SHEN Zhiguo. Finite element stress analysis on the correction of the ancient pagoda [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006(2): 241-244. (in Chinese)
- [6] 车爱兰. 应县木结构古塔动力特性及地震响应分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [7] JAISHI B, REN W X, ZONG Z H, et al. Dynamic and seismic performance of old multi-tiered temples in nepal [J]. Engineering Structures, 2003, 25(14): 1827-1839.
- [8] 刘晓莉. 砖塔模型的振动台试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [9] JAE K, YUN K, CHAE B. Implementation of configuration dependent stiffness proportional damping for the dynamics of rigid multi-block systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(1): 87-97.
- [10] 周乾, 闫维明, 周锡元, 等. 古建筑榫卯节点抗震性能试验[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 679-684.
ZHOU Qian, YAN Weiming, ZHOU Xiyuan, et al. Aseismic behavior of chinese ancient tenon-mortise joint [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679-684. (in Chinese)
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 基于Matlab/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 129-164.
- [12] 毛利军, 李爱群. 基于SIMULINK的基础滑移隔震结构仿真计算分析[J]. 东南大学学报, 2002, 32(5): 804-808.
MAO Lijun, LI Aiqun. Seismic simulation of a sliding structure based on SIMULINK [J]. Journal of Southeast University, 2002, 32(5): 804-808. (in Chinese)
- [13] CEK P, REYNOLDS D, SEIDMAN T. Computational modeling of vibration damping in SMA wires [J]. Continuummech Thermodyn, 2004(16): 495-514.
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] 周建龙, 江晓峰, 王建. 基于能量分析的抗震设计与工程应用研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(341): 150-154, 13.
ZHOU Jianlong, JIANG Xiaofeng, WANG Jian. Energy-based seismic design and engineering application research [J]. Building Structure, 2012, 42(341): 150-154, 13. (in Chinese)
- [16] 付亮华. 基于能量平衡的抗震结构地震反应分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [17] 熊仲明, 张萍萍, 韦俊, 等. 滑移隔震结构基于能量分析的简化计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 305-309.
XIONG Zhongming, ZHANG Pingping, WEI Jun, et al. Study on the simplified method of energy analysis based on sliding isolation structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2012, 44(3): 305-309. (in Chinese)
- [18] 秋山宏. 基于能量平衡的建筑结构抗震设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 80-97.
- [19] 背户一登. 结构振动控制[M]. 马立新, 李孜, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011: 45-73.
- [20] 倪铭. 双重调谐吸振器及其参数优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [21] 彭凌云, 康迎杰, 秦丽, 等. 风荷载作用下复刚度阻尼TMD减振结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2015(21): 25-30.
PENG Lingyun, KANG Yingjie, QIN Li, et al. Optimal design for structures including TMDs with complex stiffness and damping under wind loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(21): 25-30. (in Chinese)
- [22] 张莹, 孙广俊, 李鸿晶. 钢筋混凝土框架近断层速度脉冲地震响应分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 611-619.
ZHANG Ying, SUN Guangjun, LI Hongjing. Near-fault velocity pulse motions on seismic responses of the RC frame [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 611-619. (in Chinese)



第一作者简介: 杨涛, 男, 1984年6月生, 博士。主要研究方向为古建筑保护、工程结构抗震。曾发表《A Shape memory alloy-pendulum damping system for small wild goose pagoda》(《International Journal of Safety and Security Engineering》2020, Vol.10)等论文。
E-mail: yangtao0604@163.com

通信作者简介: 王社良, 男, 1956年11月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料和智能结构。
E-mail: sheliangw@163.com