

基于 SMA 弹簧的调频 TMD 减振性能试验研究

鲁正^{1,2}, 赵若宇², 柳祥千², 杜江³, 张国伟⁴

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 结构防灾减灾工程系, 上海 200092;
3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 200092; 4. 北京建筑大学 大型多功能振动台阵实验室, 北京 100044)

摘要:为提高建筑结构的抗震性能,解决传统被动式调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)减振频带窄且自身频率难以调节的缺点,基于由形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)材料制成的 SMA 弹簧,提出了一种具有调频能力的新型 TMD(shape memory alloy tuned mass damper, SMA-TMD)。通过频率测试试验发现,SMA-TMD 的频率会随着通入 SMA 弹簧电流的增大而升高。通过设计并开展振动台试验,验证 SMA-TMD 在调频与减振性能方面的可行性与有效性。试验结果表明,与失谐的传统 TMD 相比,通过调节输入电流而与主体结构再次调谐的 SMA-TMD,在控制结构顶层峰值加速度响应方面,能够展现出更高的减振率,减振性能至少可提升 21.5%。此外,SMA-TMD 的工作行程相比于传统 TMD 也有显著改善,前后 2 组试验工况下的最大工作行程分别至少能够降低 46.9%、39.2%。这不仅能够节省装置的安装空间,预留更多的建筑面积,还可拓宽装置的应用场景,使其能够布置在一些具有空间局限性的结构中。

关键词:形状记忆合金;振动控制;可变频率;调谐质量阻尼器;振动台试验

中图分类号:TU352; TB535; P315.9

文献标志码:A

Experimental study on vibration reduction performance of frequency-adjustable TMD based on SMA springs

LU Zheng^{1,2}, ZHAO Ruoyu², LIU Xiangqian², DU Jiang³, ZHANG Guowei⁴

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve the seismic performance of building structures and overcome the shortcomings of traditional passive tuned mass dampers (TMDs) with narrow vibration reduction frequency bands and difficulty in adjusting their own frequencies, a SMA-TMD with frequency modulation capability is presented based on SMA springs made of shape memory alloy (SMA) materials. Through frequency testing experiments, researchers found that the frequency of SMA-TMD increases with the increase of current flowing into the SMA spring. Shaking table tests were designed and conducted to validate the feasibility and effectiveness of the frequency tuning and vibration reduction performance of the SMA-TMD. The experimental results show that compared to a detuned traditional TMD, the SMA-TMD, which retunes with the main structure by adjusting input current, demonstrates a higher vibration reduction rate in controlling the top floor peak acceleration response of the structure. The damping performance can be improved by at least 21.5%. Furthermore, the working stroke of the SMA-TMD is significantly improved compared to that of the traditional TMD, the maximum working stroke under the two sets of experimental conditions

收稿日期:2024-08-08; 修回日期:2024-12-04

基金项目:北京建筑大学大型多功能振动台阵实验室开放研究专项基金项目(2023MFSTL01);土木工程 I 类高峰学科建设经费资助项目(20223YB15)

作者简介:鲁正(1982—),男,教授,博士,主要从事结构振动控制和工程结构抗震研究。E-mail:luzheng111@tongji.edu.cn

can be reduced by at least 46.9% and 39.2%, respectively. This improvement can save installation space, reserve more building area, and broaden the application scenarios by enabling placement in structures with spatial limitations.

Key words: shape memory alloy; vibration control; variable frequency; tuned mass damper; shaking table test

0 引言

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)是一种在土木工程领域被广泛研究用于结构振动控制的动力吸振装置^[1-2],一般由弹簧、质量块和阻尼装置组成。TMD 由于其力学原理清晰、对原结构改动小以及减振效果明显等特点,在很多工程中得到了广泛的应用:上海气象塔^[3],台北 101 大楼^[4]及上海环球金融中心^[5]等。当主体结构受到外界振动激励时,主体结构的振动会引起 TMD 质量块的振动,从而通过弹簧对主体结构施加一个反向的控制力,振动能量则由阻尼装置消耗掉。李祥秀等^[6]建立了结构-TMD 体系的功率平衡方程,以主结构的耗能功率最小为优化目标得到 TMD 最优频率比及阻尼比,并与以往的 4 种优化方法进行了对比,综合各项指标其控制效果均介于四者之间,但较无控结构相比有很好的控制效果。WANG 等^[7]考虑实际应用中阻尼器的连接,对结构-摆式调谐质量阻尼器(pendulum tuned mass damper, PTMD)系统的力学模型进行了更新,在引入模态振型影响的同时利用不动点理论导出了 PTMD 的解析优化设计公式,结果表明,所提出的优化设计公式比经典公式更有效、更稳健。但需要指出的是,TMD 作为单频率调谐型被动阻尼器仅在特定的较窄频带范围内具有良好的减振控制效果^[8]。

值得注意的是,在土木工程领域的实际工程中,由于主体结构在使用寿命过程中的损伤累计和因使用功能变化而进行的结构改造,以及结构设计阶段所采用的近似分析方法,往往会导致结构的实际频率偏离结构的设计频率,而实际工程中的 TMD 存在难以调节频率的难题,最终会导致 TMD 的减振效果被大大削弱^[9-11]。为了解决上述问题,WANG 等^[12-13]针对具有非线性刚度特性的非线性能量阱(nonlinear energy sink, NES)进行了大量的研究,发现 NES 具有更强的频率鲁棒性,可以与主结构的一系列模态发生瞬时共振。LU 等^[14-15]研究的颗粒阻尼器通过颗粒与颗粒、颗粒与腔体之间的随机碰撞与摩擦耗能,可以有效地克服传统 TMD 减振频带窄、鲁棒性差的缺点。除了上述被动控制措施外,许多学者也进行了相关的自适应和半主动调频控制措施研究^[16]。WANG 等^[17-18]提出了一种可以通过改变悬臂梁的自由端长度来改变刚度和频率的自适应被动变刚度 TMD(adaptive-passive variable stiffness tuned mass damper, APVS-TMD),以及一种通过步进电机改变摆长来改变频率的自适应被动摆式 TMD(adaptive-passive eddy current pendulum tuned mass damper, APEC-TMD)。ZHANG 等^[19]提出了一种新型的半主动变刚度调谐质量阻尼器,其通过改变并联和串联配置的弹簧线圈的数量来改变弹簧的刚度。SUN 等^[20]研究了具有变阻尼系数和变刚度的半主动调谐质量阻尼器,并提出了一种基于短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)的控制算法。

近年来随着智能材料的不断发展,形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)以其优异的形状记忆效应和超弹性能逐渐被引入到解决传统 TMD 减振频带窄这一缺陷的研究中^[21-23]。LU 等^[24]将具有超弹性的 SMA 弹簧引入到调谐吸振器中,发现相比传统钢弹簧 TMD,其减振频带更宽,在不同地震波下均表现出稳定的控制能力,但该研究仍属于被动控制范畴,所采用的 SMA 弹簧不具备变刚度的能力。SATISH 等^[25]利用 SMA 材料制成可变长度的记忆金属线,结合机械装置,实现了对单摆式 TMD 的调频。HUANG 等^[26]利用 SMA 材料制作的杆件(SMA 棒),通过对其温度进行控制,实现了对悬臂式 TMD 的调频。

本研究提出将具有双程形状记忆效应(即合金在加热时恢复高温相形状,冷却后又能恢复低温相形状)的 SMA 弹簧用以替换传统 TMD 中的钢弹簧,旨在研发一种基于 SMA 弹簧的具有调频能力的新型 TMD(shape memory alloy tuned mass damper, SMA-TMD),以弥补被动控制装置无法随结构自身特性变化调节系统控制频率的缺陷,且装置简单,原理清晰,频率调节更加便捷,工作行程更小。本文所提出的 SMA-TMD 由 SMA 弹簧、电源箱、质量块和装置底座组成,质量块左右两端的 SMA 弹簧通过简单的电路与电源箱并联,通过改变电源箱的输出电流改变 SMA 弹簧的温度,实现对 SMA-TMD 调频的目的。本文借助 2 个不同自振频率的单自由度结构,以结构顶层峰值加速度响应为减振性能指标,以 TMD 质量块相对结构顶层的相对位移为 TMD 工作行程性能指标,通过试验验证了 SMA-TMD 在调频、减振性能方面的可行性与有效性,同时发现 SMA-TMD 具有优异的工作行程优势,有助于节省安装空间,节约建筑面积。

1 试验概况

1.1 被控主体结构

本研究所采用的被控主体结构为单自由度钢框架结构,由 4 条 270 mm×40 mm×1 mm 的薄钢条作为提供结构抗侧刚度的柱构件,结构底部为一块 250 mm×250 mm×16 mm 的带螺孔钢板,通过螺栓将 4 条钢条的一端固定在底部钢板的 4 个角部,4 条钢条的另外一端同样各预先通过螺栓固定在一块与底部钢板同规格的钢板的 4 个角部,以此作为单自由度钢框架结构的顶层,此时钢框架的尺寸规格为 250 mm×250 mm×270 mm,可以通过增减柱构件中薄钢条的数量或是在顶层增减钢板数量来对该单自由度钢框架结构的自振频率进行调整。由于本文的重点在于测试 SMA-TMD 的调频减振能力,故将采用 2 个自振频率不同的单自由度钢框架结构,通过增减顶层钢板数量的方式调整框架频率,以模拟实际工程中主体结构实际频率由于种种原因发生变化的情况。本文所采用的 2 个单自由度钢框架分别记为 SDOF1 和 SDOF2。

单自由度钢框架结构 SDOF1 的顶层质量为 12.53 kg,钢框架 SDOF2 的顶层质量为 10.43 kg。测试 2 个被控主体结构的自振频率,测试方法为对框架顶层施加一个初位移,用加速度传感器采集框架顶层的自由衰减振动加速度时程,并对采集到的数据进行傅里叶变换处理,以此得到框架的自振频率。测试结果是:钢框架 SDOF1 的自振频率为 1.71 Hz,钢框架 SDOF2 的自振频率为 1.91 Hz。

1.2 SMA-TMD 与传统被动式 TMD 配置

本研究所提出的 SMA-TMD 主要由 SMA 弹簧、电源箱、质量块和装置底座组成,见图 1。质量块底部固接一个带滚珠的小车,该小车与装置底座上的滑轨定向连接,使得质量块能够在滑轨上单向滑动,该 SMA-TMD 的滑动总质量为 0.36 kg。质量块左右两端各通过 1 根 SMA 弹簧与装置底座连接,2 根 SMA 弹簧通过简单的电路与电源箱并联,通过改变电源箱的输出电流改变 SMA 弹簧的温度,实现对 SMA-TMD 调频的目的。

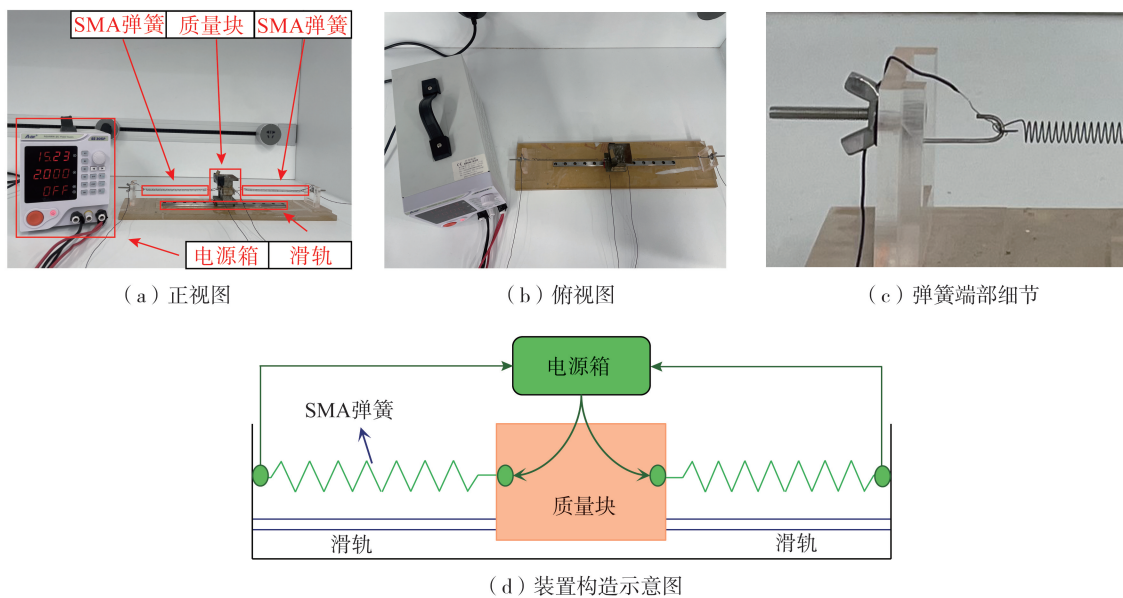


图 1 SMA-TMD

Fig. 1 SMA-TMD

SMA-TMD 所采用的 SMA 弹簧由 Ni-Ti 形状记忆合金制备,其原材料的各化学成分分配比见表 1。SMA 弹簧为丝径为 0.3 mm、外径为 4.6 mm、圈数为 76 圈、初始有效长度为 20 mm 的拉伸弹簧。测试 SMA 弹簧的宏观热力学行为,其相变温度为 50 °C 且具有双程形状记忆效应,见图 2,即当 SMA 弹簧在加热至 40 °C 左右时,SMA 弹簧会逐渐开始自动伸长,主要原因是合金内部开始发生马氏体逆相变,合金内部微观晶相由低温马氏体相转变为高温奥氏体相,随着温度升高至 50 °C 左右,马氏体逆相变结束,弹簧自由伸长至最大长度,且温度越高该 SMA 弹簧的伸长过程进行得越迅速;此时将 SMA 弹簧置于室温环境下,合金内部又会发生马氏体正相变,合金内部微观晶相由高温奥氏体相转变为低温马氏体相,直到相变结束,SMA 弹簧又恢复至初始有效长度。

表1 SMA 弹簧原材料各化学成分比

化学元素	成分含量	化学元素	成分含量	化学元素	成分含量	化学元素	成分含量
Ni	55.700	Cu	0.010	Fe	0.010	H	0.001
C	0.030	Cr	0.010	O	0.039	Ti	余量
Co	0.010	Nb	0.010	N	0.003		

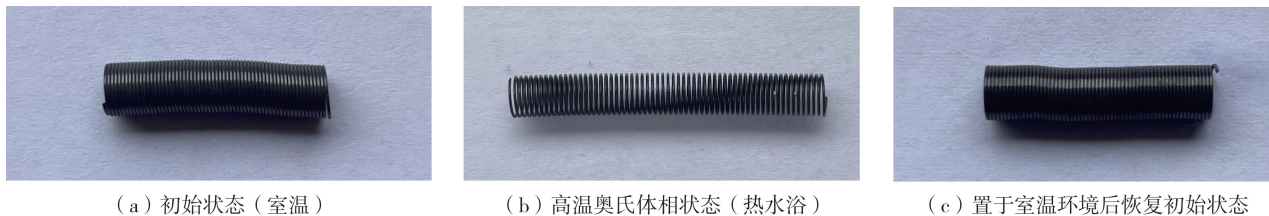


图2 SMA 弹簧双程形状记忆效应演示 I

Fig. 2 Demonstration of bidirectional shape memory effect in SMA spring I

另外,在室温环境下,将处于初始有效长度状态的 SMA 弹簧用外力拉伸至远超其初始有效长度, SMA 弹簧将产生大量的塑性残余变形,并保持当前长度而无法恢复至初始有效长度,合金内部微观晶相发生应力诱发的奥氏体相向马氏体相的转变。此时,将 SMA 弹簧升温且保持其温度大于等于其相变温度, SMA 弹簧会逐渐缩短恢复至高温奥氏体相状态下的长度,该 SMA 弹簧的恢复过程同样是温度越高恢复越快,从而表现出更大的恢复力;然后将其置于室温环境下, SMA 弹簧又会逐渐恢复至初始有效长度,整个过程见图 3。

上述 SMA 弹簧的宏观热力学行为是:通过改变输入电流实现对 SMA-TMD 的调频奠定了可行性基础。

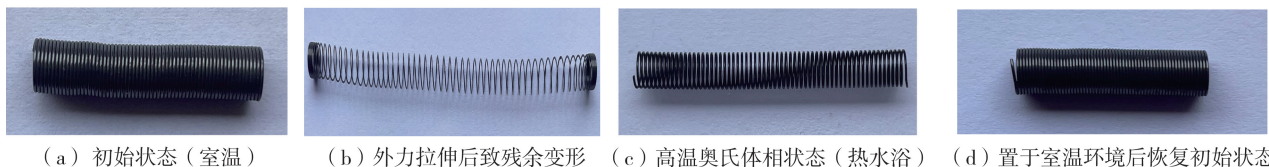


图3 SMA 弹簧双程形状记忆效应演示 II

Fig. 3 Demonstration of bidirectional shape memory effect in SMA spring II

接下来开展 SMA 弹簧性能试验,以定量地揭示弹簧刚度随着电流输入的变化规律。由于 SMA 弹簧在沿弹簧长度方向受力较小时表现为线性刚度,受力较大时会进入非线性阶段,这将导致当测试 SMA 弹簧刚度所采用的重物质量不同时,测得的弹簧刚度也会有所不同,从而影响测量结果的准确性;另外 SMA 弹簧尺寸较小且直接通入电流,直接测试弹簧刚度具有一定的危险性。然而, SMA 弹簧随着通入电流的不同而展现出来不同的刚度特性,最终将体现在 SMA-TMD 不同的频率特性上。因此,本文将直接测试在 SMA 弹簧通入不同电流时的 SMA-TMD 的频率,将 SMA-TMD 视为单独的一个单自由度结构,对 SMA-TMD 进行扫频试验,通过 2 个激光位移传感器分别采集 SMA-TMD 装置底座和滑动质量块的位移时程数据,以此得到滑动质量块相对于装置底座的相对位移,对采集到的相对位移时程数据进行傅里叶变换处理,最终得到 SMA-TMD 的频率。

SMA-TMD 的 2 根 SMA 弹簧与电源箱并联,即通过单根 SMA 弹簧的电流为电源箱输出电流的一半。电源箱输出电流共设置 5 个档位,分别为 0.5 A、1.0 A、1.5 A、2.0 A、2.5 A。SMA-TMD 在不同档位下的频率见表 2 和图 4,电流越大, SMA-TMD 的频率越大,且增大趋势逐渐变缓。

表2 SMA-TMD 的频率随电流的变化规律

Table 2 Variation law of the frequency of SMA-TMD with electric current

电源箱输出电流/A	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
SMA-TMD 频率/Hz	1.70	1.80	1.86	1.91	1.94

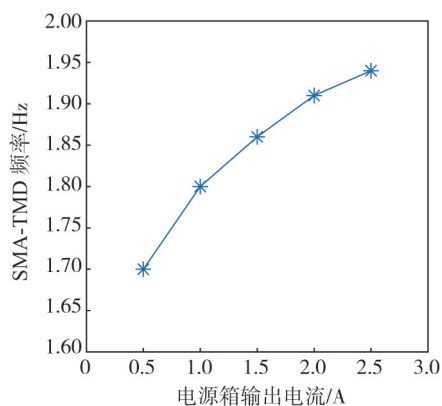


图4 SMA-TMD 的频率随电流的变化规律

Fig. 4 Variation law of the frequency of SMA-TMD with electric current

基于得到的 SMA-TMD 频率随电流的变化规律,提出 SMA-TMD 调频系统控制流程,见图 5。本研究所采用的电源箱为 SS-305P 可编程电源,配置有与笔记本电脑联机的通讯接口,可通过电脑程序直接控制电源的输出电压和电流。本文所以提出的调频 SMA-TMD,仅在检测到结构自振频率改变时(通常,因使用功能改变导致结构荷载分布的改变或对结构的改造,以及遭受强风、地震作用导致结构刚度的退化,会使结构自振频率发生变化),才调节电源箱输出电流,由于实际工程结构的频率变化周期常以月或年计,远远超出调节结束后 SMA-TMD 达到目标频率值所需时间,故不同大小电流对 SMA 弹簧调温变化快慢所产生的时滞效应不会对其控制效果有影响。当调节结束后,通入 SMA 弹簧的电流保持恒定,SMA-TMD 的控制方式同样是被动式的。

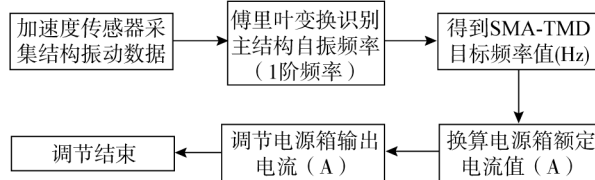


图 5 SMA-TMD 调频系统控制流程

Fig. 5 Control flow of SMA-TMD frequency-adjustable system

为验证本研究所提出的 SMA-TMD 调频后的控制性能,选取 SMA-TMD 在电源箱输出电流为 0.5 A 和 2.0 A 时的这 2 个档位进行后续振动台试验,频率分别与被控主体结构 SDOF1 和 SDOF2 相调谐。

作为对照组的传统被动式 TMD 的配置,除了提供装置刚度的弹簧采用的是普通钢弹簧且没有连接电源箱外,其余构造均与 SMA-TMD 相同。将传统被动式 TMD 的频率调整至 1.70 Hz,与钢框架 SDOF1 的频率相调谐。

1.3 试验仪器与测点布置

本试验所采用的地震波输入装置为 Quanser 公司单向振动台试验系统(Shake table II),见图 6。

本试验主要测试被控主体结构的顶层加速度响应和 TMD 质量块相对于结构顶层的相对位移响应。其中,加速度传感器为 ZC1100L 压电式传感器,电压灵敏度为 1023 mV/g,频率范围为 0.5~2000 Hz,共 1 个,布置在被控主体结构顶层位置;位移传感器为 HG-C 1400 微型激光位移传感器,灵敏度为 12.5 mV/mm,量程为±200 mm,共 2 个,测点布置在被控主体结构顶层位置和 TMD 质量块位置。具体的试验布置和测点布置分别见图 7 和图 8。

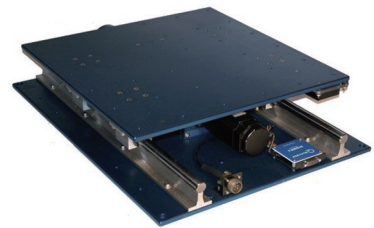


图 6 振动台 II

Fig. 6 Shake table II

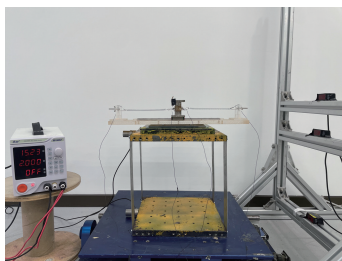


图 7 试验布置

Fig. 7 Experimental layout

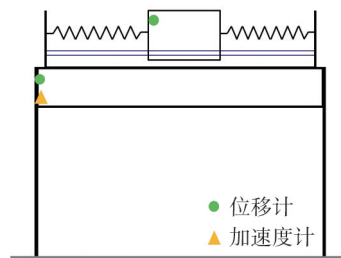


图 8 测点布置

Fig. 8 Measuring points layout

1.4 试验工况设置

本研究中,减振性能试验的试验工况共设置 2 组。其中,第 1 组的被控主体结构为 SDOF1,且下面又分为无控、传统 TMD 控制和 0.5 A 档 SMA-TMD 控制 3 种状态,该组的传统 TMD 和 SMA-TMD 均与被控主体结构的自振频率相调谐,主要目的是体现 SMA-TMD 的工作行程优势;第 2 组的被控主体结构为 SDOF2,以模拟主体结构在使用寿命期内由于种种原因其自振频率发生变化,另外下面又分为无控、传统 TMD 控制和 2.0 A 档 SMA-TMD 控制 3 种状态,该组的传统 TMD 与被控主体结构的自振频率失谐,而 SMA-TMD 则通过

调节电源箱输入 SMA 弹簧的电流,使其与被控主体结构再次调谐,该组试验的主要目的是测试 SMA-TMD 的调频减振性能,同时凸显 SMA-TMD 的工作行程优势。

本研究中,减振性能试验的底部激励输入选取包括正弦波、El Centro 波、AWX0.9-1 波和 Northridge 波。由于 Shake Table II 的最大行程限制,试验过程中除正弦波外,其余所有地震波的峰值位移都被缩放为 ± 3 cm,此外还将对各原始地震波的峰值加速度进行一定缩放。为了防止无控结构在正弦激励输入下被破坏,2 组工况的正弦激励峰值位移取 0.1 cm,另外考虑到 2 组试验工况的被控主体结构不同的自振频率,实际结构底部激励选取如下。第 1 组试验工况的底部激励输入分别是: SIN1(峰值位移 0.1 cm,频率 1.70 Hz 的正弦波)、EQ1(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.1 g 的 AWX0.9-1 波)、EQ2(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.06 g 的 Northridge 波)、EQ3(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.08 g 的 Northridge 波);第 2 组试验工况的底部激励输入分别是: SIN2(峰值位移 0.1 cm,频率 1.90 Hz 的正弦波)、EQ4(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.1 g 的 El Centro 波)、EQ5(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.12 g 的 Northridge 波)、EQ6(峰值位移 3 cm,峰值加速度 0.14 g 的 Northridge 波)。相应的地震波加速度时程曲线见图 9 和图 10。由于实际地震波激励的随机性,以及本研究的重点在于证明所提出 SMA-TMD 的调频减振能力,上述对原始地震波数据进行的缩放并不影响试验结果的准确性。文中所采用的加速度单位均为 g ,即重力加速度, $1 g = 9.794 \text{ m/s}^2$ 。

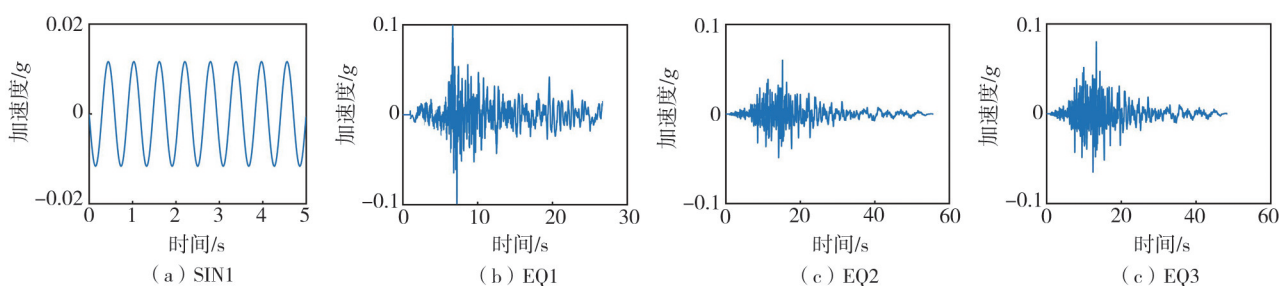


图 9 第 1 组试验工况的底部激励输入

Fig. 9 Input of base excitation for the first set of test conditions

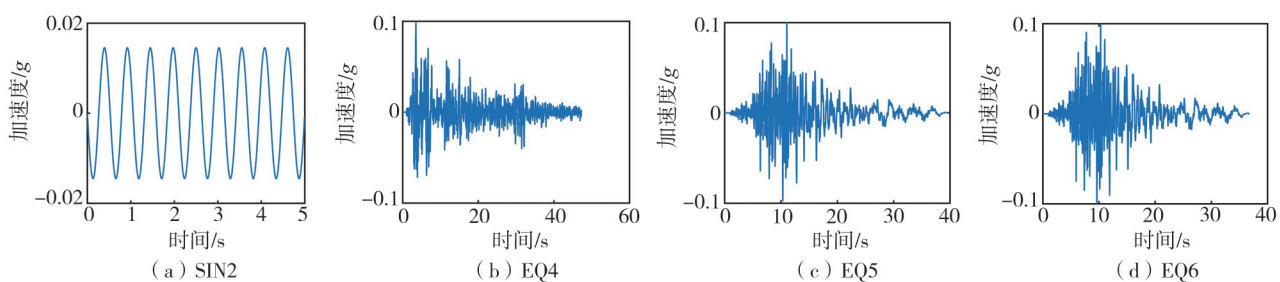


图 10 第 2 组试验工况的底部激励输入

Fig. 10 Input of base excitation for the second set of test conditions

2 试验结果及分析

基于上述试验概况介绍的被控主体结构参数、阻尼器系统参数以及结构底部激励输入开展小型振动台试验,检验本文所提出的 SMA-TMD 在调频、减振性能方面的可行性与有效性,并验证其在工作行程上的优势,为 SMA-TMD 的实际应用提供重要依据。在分析试验结果之前,先定义本文用于评估阻尼器系统减振效果的性能指标:

1) 阻尼器控制下的结构顶层峰值加速度响应减振率为

$$\alpha = \frac{(|R_u| - |R_c|)}{|R_u|} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_u 为无控结构的顶层峰值加速度响应; R_c 为有控结构的顶层峰值加速度响应。

2) SMA-TMD 相较于传统 TMD 的结构顶层峰值加速度响应控制提升率为

$$\beta_\alpha = \frac{(|R_T| - |R_S|)}{|R_T|} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_T 为传统 TMD 控制下结构的顶层峰值加速度响应; R_S 为 SMA-TMD 控制下结构的顶层峰值加速度响应。

3)SMA-TMD 相较于传统 TMD 的最大工作行程改良率为

$$\beta_D = \frac{(|D_T| - |D_S|)}{|D_T|} \times 100\% \quad (3)$$

式中: D_T 为传统 TMD 的最大工作行程; D_S 为 SMA-TMD 的最大工作行程。

2.1 第 1 组试验工况

4 种底部激励输入下(SIN1、EQ1、EQ2、EQ3),有无阻尼器控制的钢框架 SDOF1 顶层位置加速度响应曲线对比见图 11,表 3 提取了相应的钢框架 SDOF1 顶层位置峰值加速度响应;SMA-TMD 和传统 TMD 的工作行程曲线对比见图 12,表 4 提取了相应的 SMA-TMD 和传统 TMD 的最大工作行程。第 1 组试验工况,传统 TMD 和 SMA-TMD 均与被控主体结构 SDOF1 的自振频率相调谐。

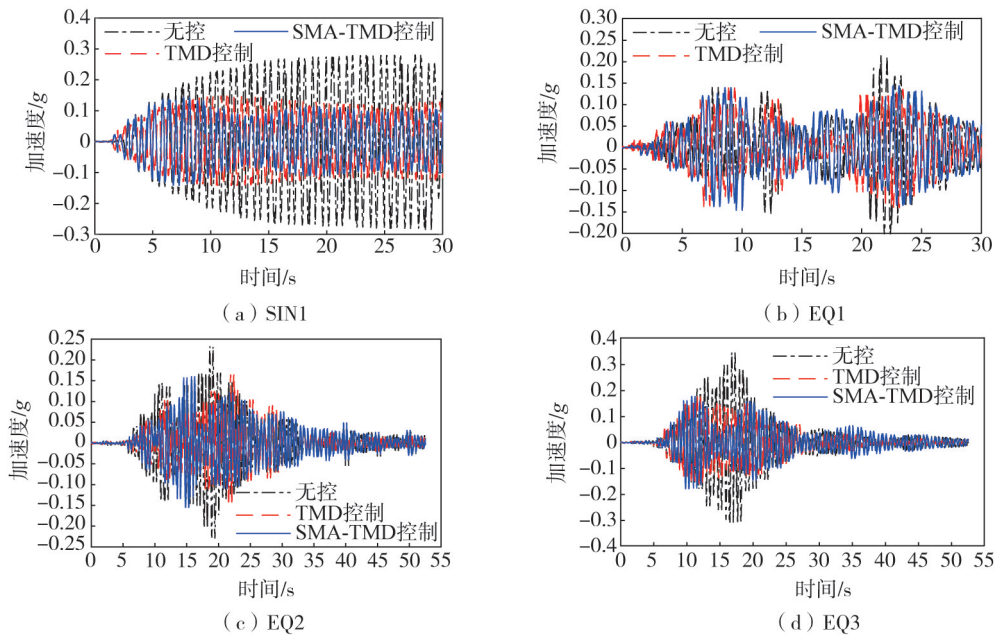


图 11 不同底部激励作用下有/无控制的 SDOF1 顶层加速度响应对比

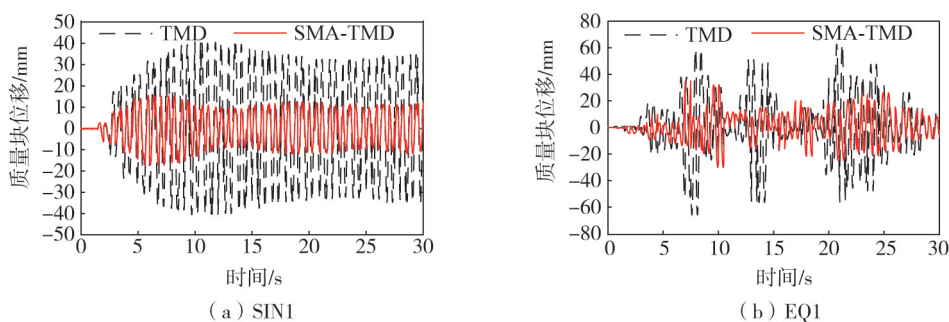
Fig. 11 Comparison of top floor peak acceleration responses of SDOF1 with and without control under different base excitations

表 3 不同底部激励作用下有/无控制的 SDOF1 顶层峰值加速度响应对比

Table 3 Comparison of top floor peak acceleration responses of SDOF1 with and without control under different base excitations

底部激励	无控			TMD 控制		SAM-TMD 控制		底部激励	无控			TMD 控制		SAM-TMD 控制	
	R_u/g	R_T/g	$\alpha/\%$	R_T/g	$\alpha/\%$	R_S/g	$\alpha/\%$		R_u/g	R_T/g	$\alpha/\%$	R_S/g	$\alpha/\%$		
SIN1	-0.284	0.150	47.2	0.143	49.6			EQ2	0.233	0.165	29.2	0.160	31.3		
EQ1	0.214	-0.140	34.6	-0.146	31.8			EQ3	0.347	0.177	49.0	0.178	48.7		

由图 11 和表 3 可知,当 SMA-TMD 和传统 TMD 均与被控结构调谐时,对于被控结构的顶层加速度响应,两者都能达到不错的控制效果。传统 TMD 对于钢框架 SDOF1 顶层峰值加速度响应的减振率依次为47.2%、34.6%、29.2%、49.0%;SMA-TMD 对于钢框架 SDOF1 顶层峰值加速度响应的减振率依次为49.6%、31.8%、31.3%、48.7%。这说明调谐的 SMA-TMD 能够达到调谐的传统 TMD 的减振效果。



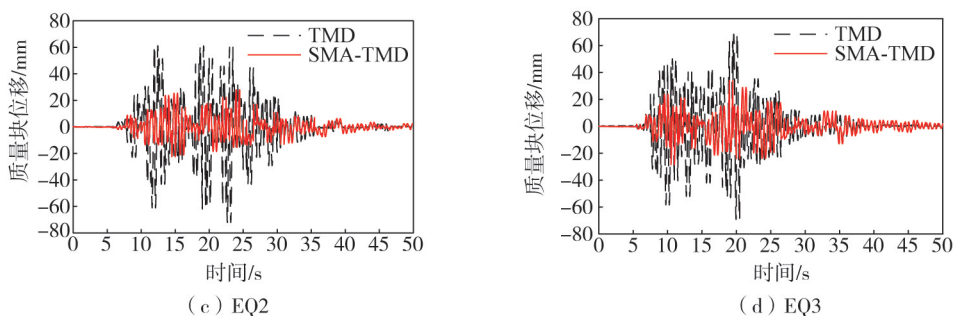


图 12 不同底部激励作用下阻尼器工作行程对比 I

Fig. 12 Comparison of damper working stroke under different base excitations I

虽然在该组工况下 SMA-TMD 和传统 TMD 都有着不相上下的减振效果,但由图 12 和表 4 可知,SMA-TMD 的工作行程相比于传统 TMD 能够有较大幅度的缩减,阻尼器装置的最大工作行程改良率分别为 57.9%、46.9%、61.2%、50.7%。

SMA-TMD 的工作行程之所以能够有如此大的改善,是因为在 SMA 弹簧随着质量块往复运动而被拉长和缩短的过程中,质量块的动能被 SMA 弹簧吸收。由图 3 可知,当 SMA 弹簧被过度拉长时,会产生很大的残余变形,这便将质量块的动能转化为 SMA 弹簧的残余变形能,合金内部微观晶相发生应力诱发的奥氏体相向马氏体相的转变,随后有电流通入的 SMA 弹簧在高温的作用下发生马氏体相向奥氏体相的转变,同时 SMA 弹簧缩短,准备进行下一个循环的能量转换。在 SMA-TMD 的工作过程中,SMA 弹簧不断重复进行上述过程,从而有效吸收质量块的动能,改善装置的工作行程。这将大大节省装置的安装空间,预留更多的建筑面积,同时还能拓宽装置的应用场景,使其允许被布置在一些具有空间局限性的结构中。

2.2 第 2 组试验工况

4 种底部激励输入下(SIN2、EQ4、EQ5、EQ6),有无阻尼器控制的钢框架 SDOF2 顶层位置加速度响应曲线对比见图 13,表 5 提取了相应的钢框架 SDOF2 顶层位置峰值加速度响应;SMA-TMD 和传统 TMD 的工作行程曲线对比见图 14,表 6 提取了相应的 SMA-TMD 和传统 TMD 的最大工作行程。第 2 组试验工况,传统 TMD 与被控主体结构 SDOF2 的自振频率失谐,而 SMA-TMD 则通过调节电源箱输入 SMA 弹簧的电流,使其与被控主体结构再次调谐。

表 4 不同底部激励作用下阻尼器工作行程对比 I

Table 4 Comparison of damper working stroke under different base excitations I

底部激励	TMD/mm	SMA-TMD/mm	改良率/%
SIN1	40.9	-17.2	57.9
EQ1	-65.9	35.0	46.9
EQ2	-72.1	28.0	61.2
EQ3	-69.2	34.1	50.7

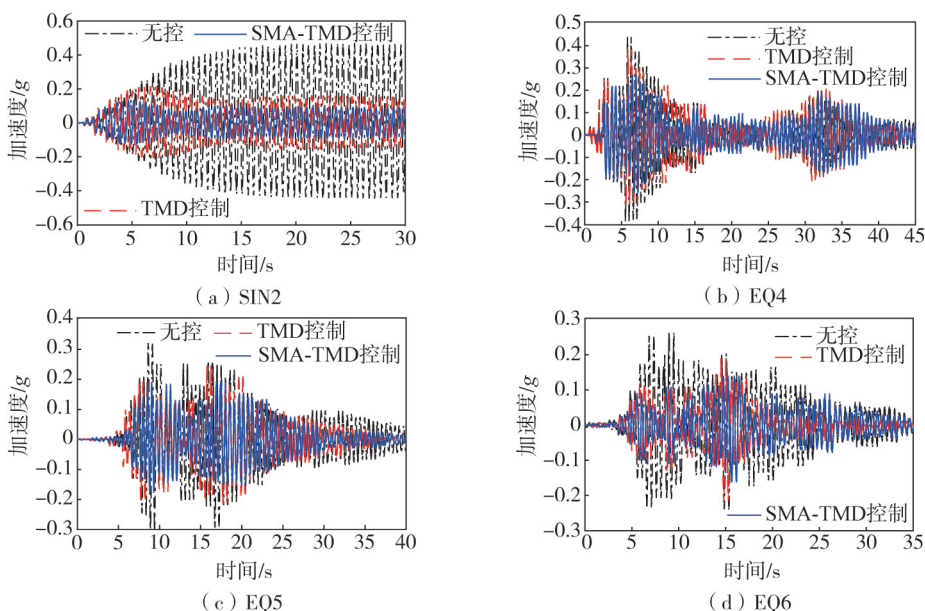


图 13 不同底部激励作用下有无控制的 SDOF2 顶层加速度响应对比

Fig. 13 Comparison of top floor acceleration responses of SDOF2 with and without control under different base excitations

表 5 不同底部激励作用下有无控制的 SDOF2 顶层峰值加速度响应对比

Table 5 Comparison of top floor peak acceleration responses of SDOF2 with and without control under different base excitations

底部激励	无控	TMD 控制			SMA-TMD 控制		提升率 $\beta_a/\%$
	R_u/g	R_T/g	$\alpha/\%$	R_S/g	$\alpha/\%$		
SIN2	0.472	0.216	54.2	0.133	71.8	38.4	
EQ4	0.439	0.383	12.8	0.268	39.0	30.0	
EQ5	0.321	0.246	23.4	0.193	39.9	21.5	
EQ6	0.261	-0.215	17.6	-0.162	37.9	24.7	

此时,SMA-TMD 相较于传统 TMD 的结构顶层峰值加速度响应控制提升率依次为 38.4%、30.0%、21.5%、24.7%。由此可见,再次调频的 SMA-TMD 相比于自身频率无法调节的传统 TMD,其对于结构顶层峰值加速度响应具有更好的控制效果,说明本研究所提出的 SMA-TMD 的调频减振性能可行且有效。

此外,SMA-TMD 的工作行程优势依旧不小,阻尼器装置的最大工作行程改良率分别为 42.4%、42.4%、52.2%、39.2%。该组工况下,传统 TMD 由于与主体结构失谐,其工作性能没有被完全激发,即传统 TMD 的质量块无法充分移动并耗能,而 SMA-TMD 由于再次与主体结构调谐而处于完全工作状态,SMA-TMD 的质量块能够相对充分地移动并使被控结构的能量得到转移与耗散,所以其工作行程优势不如第 1 组工况,但至少 39.2%的改良率也足够可观。这说明本文所提出的 SMA-TMD 能够在保证其调频减振性能的同时,改善阻尼器的工作行程。

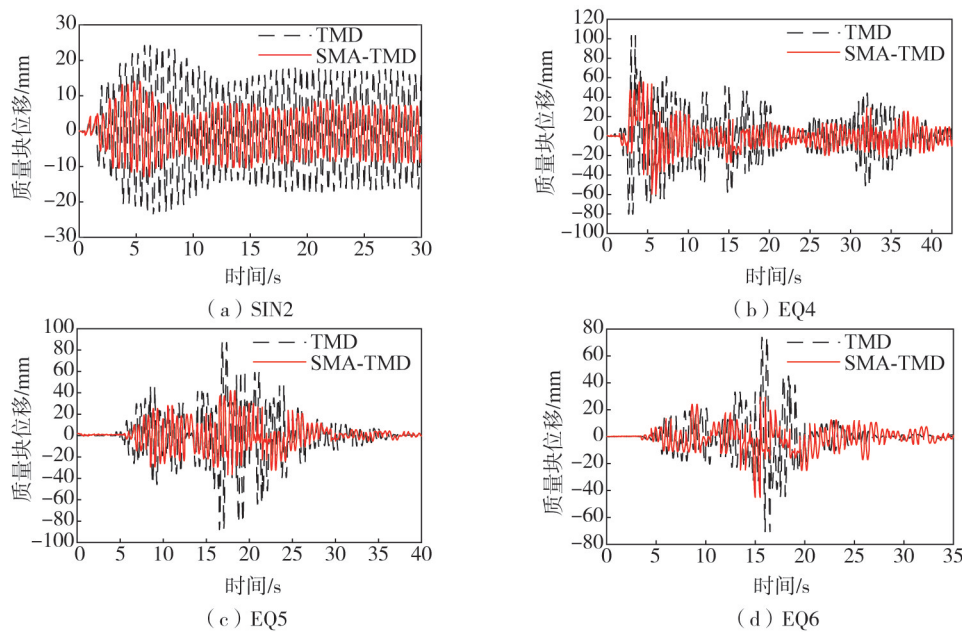


图 14 不同底部激励作用下阻尼器工作行程对比 II

Fig. 14 Comparison of damper working stroke under different base excitations II

表 6 不同底部激励作用下阻尼器工作行程对比 II

Table 6 Comparison of damper working stroke under different base excitations II

底部激励	TMD/mm	SMA-TMD/mm	改良率/%	底部激励	TMD/mm	SMA-TMD/mm	改良率/%
SIN2	24.3	14.0	42.4	EQ5	-88.1	42.1	52.2
EQ4	103.5	-59.6	42.4	EQ6	74.0	-45.0	39.2

2.3 频域分析

由图 11 和图 13 可知,虽然 SMA-TMD 在控制结构顶层峰值加速度响应上具有不错的效果,但在部分加载时段上,SMA-TMD 相比传统 TMD,控制效果未能体现出优势。因此,绘制出结构顶层加速度响应的归一化功率谱密度见图 15,从频域角度揭示该原因。在抑制结构基频附近的响应上,调谐的 SMA-TMD 基本上能够达到调谐的传统 TMD 的减振效果见图 15(a)~(c),且调谐的 SMA-TMD 比失谐的传统 TMD 的减振效果更好,见

图 15(d)~(f)。然而,在远离结构基频的频率分量处,由于 SMA 弹簧的非线性特性,功率谱幅值会略有放大,与结构基频附近的峰值相比,该放大效应不起主导作用,SMA-TMD 的调频减振性能是可行且有效的。

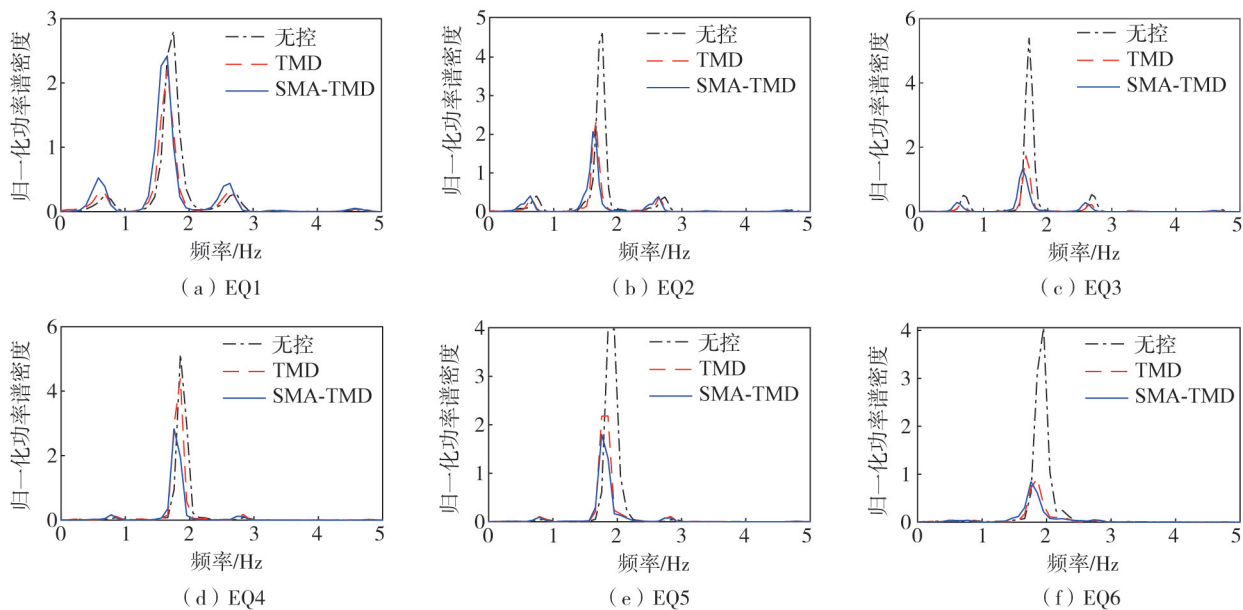


图 15 不同地震波下结构顶层加速度归一化功率谱密度

Fig. 15 Normalized power spectral density of top floor acceleration of the structure under different earthquake excitations

3 结论

本文针对传统 TMD 减振频带窄且自身频率难以调节的缺点,基于由 SMA 材料制成的 SMA 弹簧,提出了一种具有调频能力的 SMA-TMD。通过设计并开展试验,可以得出以下结论:

1) 通过测试通入不同电流的 SMA-TMD 的频率发现,SMA-TMD 的频率随着通入电流的增大而增大。当结构自振频率发生改变时,可以通过调节输入 SMA-TMD 的电流,使其再次与结构变化后的自振频率调谐。

2) 第 1 组小振动台试验证明,在控制结构顶层峰值加速度响应上,调谐的 SMA-TMD 能够达到调谐的传统 TMD 的减振效果,并且 SMA-TMD 的工作行程相比于传统 TMD 有较大程度的改善,最大工作行程改良率在 46.9% 以上。

3) 第 2 组小振动台试验证明,在控制结构顶层峰值加速度响应上,相比于非调谐传统 TMD,在不同类型的底部激励下,调谐的 SMA-TMD 均能表现出更好的控制效果,响应控制提升率在 21.5% 以上,验证了本研究提出的 SMA-TMD 在调频、减振性能方面的可行性与有效性。此时,SMA-TMD 的最大工作行程改良率在 39.2% 以上。

4) 由于 SMA-TMD 的工作行程相较于传统 TMD 有较大程度改善,因此其允许被布置在一些具有空间局限性的结构中。然而,目前对于 SMA-TMD 的研究仅处于初步阶段,试验采用的是小尺寸模型,要使其在实际工程结构中能够输出足够大的控制力,还需进一步探索。

参考文献:

- [1] 徐怀兵, 欧进萍. 设置混合调谐质量阻尼器的高层建筑风振控制实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 144-154.
XU Huaibing, OU Jinping. Design method for wind-induced vibration control of high-rise buildings with hybrid tuned mass dampers[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 144-154. (in Chinese)
- [2] YANG F, SEDAGHATI R, ESMAILZADEH E. Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review [J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(7/8): 812-836.
- [3] 盛克苏, 瞿伟廉, 秦惠纪. U 型水箱对高层建筑和高耸结构风振反应的控制[J]. 武汉工业大学学报, 1997, 19(3): 120-122.
SHENG Kesu, QU Weilian, QIN Huiji. Control for wind vibration responses of high rise structures and tall buildings by U shape water tank[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1997, 19(3): 120-122. (in Chinese)
- [4] 谢绍松, 张敬昌, 钟俊宏. 台北 101 大楼的耐震及抗风设计[J]. 建筑施工, 2005, 27(10): 7-9.

- XIE Shaosong, ZHANG Jingchang, ZHONG Junhong. Aseismatic and wind-resisting design for Taipei 101[J]. Building Construction, 2005, 27(10): 7-9. (in Chinese)
- [5] SHI W X, SHAN J Z, LU X L. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient vibration response[J]. Engineering Structures, 2012, 36: 14-26.
- [6] 李祥秀, 谭平, 刘良坤, 等. 基于功率法的TMD系统参数优化与减振性能分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 6-11, 17.
LI Xiangxiu, TAN Ping, LIU Liangkun, et al. Parametric optimization and aseismic performance of a TMD system based on power method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 6-11, 17. (in Chinese)
- [7] WANG W X, YU T F, YANG Z L, et al. Optimum design of pendulum tuned mass dampers considering control performance degradation from damper connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(12): 04023163.
- [8] 刘保东, 朱晞. MTMD系统抗震控制研究[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 127-130, 136.
LIU Baodong, ZHU Xi. Seismic control of structure with multiple tuned mass damper system[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 127-130, 136. (in Chinese)
- [9] 鲁正, 王自欣, 吕西林. 非线性能量阱技术研究综述[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 1-16, 26.
LU Zheng, WANG Zixin, LÜ Xilin. A review on nonlinear energy sink technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 1-16, 26. (in Chinese)
- [10] KHANSEFID A, AHMADIZADEH M. An investigation of the effects of structural nonlinearity on the seismic performance degradation of active and passive control systems used for supplemental energy dissipation[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(16): 3544-3554.
- [11] 王梁坤, 施卫星, 王洪涛, 等. 自适应TMD减振性能试验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 781-788, 905.
WANG Liangkun, SHI Weixing, WANG Hongtao, et al. An adaptive-passive tuned mass damper system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 781-788, 905. (in Chinese)
- [12] WANG J J, ZHANG C, LI H B, et al. A vertical-vibro-impact-enhanced track bistable nonlinear energy sink for robust and comprehensive control of structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(5): e2931.
- [13] 刘志彬, 谭平, 王菁菁, 等. 新型非对称惯容NES减震控制性能研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(2): 116-125.
LIU Zhibin, TAN Ping, WANG Jingjing, et al. Performance analysis of a novel asymmetric inerter NES for seismic response mitigation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(2): 116-125. (in Chinese)
- [14] LU Z, WANG Z X, MASRI S F, et al. Particle impact dampers: Past, present, and future[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2058.
- [15] LU Z, ZHAO S Q, MA C Z, et al. Experimental and analytical study on the performance of wind turbine tower attached with particle tuned mass damper[J]. Engineering Structures, 2023, 294: 116784.
- [16] KOUTSOLOUKAS L, NIKITAS N, ARISTIDOU P. Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures[J]. Developments in the Built Environment, 2022, 12: 100094.
- [17] WANG L K, NAGARAJAIAH S, ZHOU Y, et al. Experimental study on adaptive-passive tuned mass damper with variable stiffness for vertical human-induced vibration control[J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115714.
- [18] WANG L K, SHI W X, ZHOU Y. Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil-structure interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 158: 107298.
- [19] ZHANG L, HONG L, DHUPIA J S, et al. A novel semi-active tuned mass damper with a continuously tunable stiffness[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(2): 281-293.
- [20] SUN C, NAGARAJAIAH S. Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(6): 890-906.
- [21] 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)
- [22] 闫路悦, 黄浩宇, 李易. 一种形状记忆合金半主动TMD系统的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(2): 81-88.
YAN Luyue, HUANG Haoyu, LI Yi. Experimental study on a shape memory alloy semi-active TMD system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(2): 81-88. (in Chinese)
- [23] 颜学渊, 王璇, 曹晨, 等. 复合型阻尼器研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 54-70.
YAN Xueyuan, WANG Xuan, CAO Chen, et al. State of the art of composite damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 54-70. (in Chinese)
- [24] LU Z, RONG K J, TIAN L, et al. Studies on the damping mechanism of shape memory alloy-spring tuned vibration absorber attached to a multi-degree-of-freedom structure[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(19/20): 2666-2677.
- [25] PASALA D T R, NAGARAJAIAH S. Adaptive-length pendulum smart tuned mass damper using shape-memory-alloy wire for tuning period in real time[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(2): 203-217.
- [26] HUANG H Y, CHANG W S. Re-tuning an off-tuned tuned mass damper by adjusting temperature of shape memory alloy: Exposed to wind action[J]. Structures, 2020, 25: 180-189.