

# 一种形状记忆合金半主动 TMD 系统的试验研究

闫路悦<sup>1</sup>, 黄浩宇<sup>2</sup>, 李易<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 纽卡斯尔大学 工程学院, 纽卡斯尔 NE17RU)

**摘要:** 针对调谐质量阻尼器 (tuned mass damper, TMD) 系统应用于轻型结构时易失调而导致减振效果下降的问题, 提出了一种新型形状记忆合金半主动 TMD 系统。该系统利用钢索悬吊质量块并承担其全部重量, 使用有效截面为矩形的大尺寸镍钛形状记忆合金棒材, 提供 TMD 系统水平面 2 个方向不同的抗弯刚度。为了研究该系统的半主动性能, 进行了足尺形状记忆合金半主动 TMD 系统的自由振动试验, 通过改变形状记忆合金的工作温度, 研究了温度变化对 TMD 系统频率及阻尼比的影响。研究表明, 控制形状记忆合金工作温度从  $-40 \sim +80$  °C, TMD 系统的频率随温度升高呈现升高趋势, 而阻尼比随温度升高呈现下降趋势。将该新型形状记忆合金半主动 TMD 系统应用于受控结构中, 一旦 TMD 失调, 可以通过改变形状记忆合金的温度使其重新调谐。因此, 设计的新型形状记忆合金 TMD 系统在轻型结构减振研究中具有一定的工程应用价值和前景。

**关键词:** 振动控制; 半主动控制; 形状记忆合金; 调谐质量阻尼器; 失调

中图分类号: TU352.1; TG139<sup>+</sup>. 6

文献标识码: A

## Experimental study on a shape memory alloy semi-active TMD system

YAN Luyue<sup>1</sup>, HUANG Haoyu<sup>2</sup>, LI Yi<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Engineering, Newcastle University, Newcastle Upon Tyne NE17RU, UK)

**Abstract:** Due to the problem that the tuned mass damper (TMD) system is easy to be off-tuned when applied to light structures, which leads to the decline of vibration reduction effect, a new shape memory alloy semi-active TMD system is designed in this paper. The system uses steel cables to suspend the mass to bear all its weight. Large shape memory alloy bars with rectangular effective cross sections are used to provide different bending stiffness in the two directions of the TMD system in the horizontal plane. In order to study the semi-active performance of the system, a full-scale shape memory alloy TMD system was subjected to free vibration tests in this paper. By changing the working temperature of the shape memory alloy, the influence of temperature change on the frequency and damping ratio of the TMD system was studied. The test results show that by controlling the working temperature of the shape memory alloy from  $-40$  °C to  $80$  °C, the frequency of the TMD system shows an increasing trend with temperature increases, while the damping ratio shows a decreasing trend with the temperature increases. The results show that the new shape memory alloy semi-active TMD system is applied to controlled structures, and once the TMD is off-tuned, it can be re-tuned by changing the temperature of the shape memory alloy. Therefore, the new shape memory alloy TMD system designed in this paper has certain engineering application value and prospect for the study of light structure vibration reduction.

**Key words:** vibration control; semi-active control; shape memory alloy (SMA); tuned mass damper (TMD); off-tuned

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51908007)

作者简介: 闫路悦 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事现代木结构减震研究。E-mail: 15735044879@163.com

通讯作者: 黄浩宇 (1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事现代木结构减震研究。E-mail: haoyu.huang@ncl.ac.uk

## 0 引言

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)广泛应用于工程结构减震控制。研究发现 TMD 对频率调谐非常敏感且有效频带较窄,在实际应用中很难准确得到受控结构的自然频率,安装 TMD 之后受控结构也依旧存在频率漂移的可能<sup>[1]</sup>,尤其对于一些轻型结构,如轻型钢结构、木结构等,结构自然频率受外界影响较大,更容易导致 TMD 失调。应用半主动 TMD 系统是解决 TMD 失调的有效方法之一,半主动控制依靠较少的外部能源,利用输入的信息改变 TMD 系统的阻尼和刚度,兼具主动控制和被动控制的优点,减振性能优于被动式 TMD,与主动 TMD 相比更加节能<sup>[2-4]</sup>。

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是一种具有形状记忆效应和超弹性效应的智能材料,具有独特的相变特性。SMA 的相变温度为  $A_s$ 、 $A_f$ 、 $M_s$ 、 $M_f$ ,其中  $A_s$  和  $A_f$  分别为 SMA 奥氏体相变的起始和结束温度, $M_s$  和  $M_f$  分别为 SMA 马氏体相变的起始和结束温度。当工作温度高于  $A_f$  时,SMA 发生相变至奥氏体并表现超弹性,SMA 在塑性变形后可不通过加热即自复位至初始形状;当温度低于  $M_f$  时,SMA 相变至马氏体并表现形状记忆效应,塑性加载后 SMA 出现残余变形,但通过加热 SMA 至奥氏体可以使其恢复至变形前的形状<sup>[5]</sup>。随着 SMA 材料的不断发展,不同种类的 SMA 性能不断革新,主要的种类包括 Ni-Ti SMA、Cu SMA 和 Fe SMA。

将 SMA 应用于 TMD 系统,构成 SMA-TMD 复合系统<sup>[6]</sup>,通过控制温度来改变 TMD 系统刚度和阻尼,实现对受控结构提供半主动控制,可以有效克服 TMD 系统的失调问题,且 SMA 的性能受温度控制能力强,能够在更宽频域下解决 TMD 失调问题。TORRA 等<sup>[7]</sup>研究结果表明,Ni-Ti SMA 的动态力学性能随温度变化而改变,温度上升 Ni-Ti SMA 的相变应力与弹性模量增长,阻尼比下降。与其他类型的 SMA 相比,Ni-Ti SMA 的材料性能对温度变化较为敏感,更适和应用于半主动控制。孙万泉等<sup>[1]</sup>利用 SMA 的变弹模特性设计 SMA-TMD 半主动控制系统,能够有效抑制结构自振频率漂移。HUANG 等<sup>[8-9]</sup>进行不同温度下单根 SMA 棒材的自由振动试验,证明了温度控制 SMA 棒材刚度和阻尼比的可能性。HUANG 等<sup>[10]</sup>对一缩尺二层钢框架结构进行了振动台试验,TMD 失调后可通过冷却或加热 SMA 可以使 TMD 重新调谐。然而缩尺试验可能会出现尺寸效应;同时,现有的 SMA-TMD 研究较多的使用了 SMA 丝材<sup>[11-13]</sup>,而将 TMD 系统应用于足尺结构时,丝材的耗能性能、刚度和强度都有限;此外,大尺寸与小尺寸 SMA 棒材在材料性能方面也有着区别,晶界对 SMA 动态力学性能影响显著<sup>[5]</sup>;当 SMA 棒材尺寸较大时,还需验证在加热或冷却时,是否能够有足够的效果来控制 SMA 刚度的变化,进而对受控结构进行半主动控制。因此,有必要进行足尺的 SMA-TMD 试验验证其对受控结构半主动控制的可行性。

TMD 按形式可分为支撑式、摆式和悬吊式。悬吊质量摆阻器具有构造与原理简单和减振效果显著等优点。闫维明等<sup>[14]</sup>设计了新型悬吊型 TMD 并将其应用于某标志塔进行风振控制,结果表明 TMD 的位移减震控制效果可达到 30% 左右。牛健等<sup>[15]</sup>设计基于 SMA 的悬吊质量摆减振系统,在 Matlab 软件中验证其在不同地震作用下对结构体系的减振效果。在足尺试验中,若使用 SMA 棒材悬吊质量块,会使 SMA 棒材产生较大的预应力,使得疲劳周期降低<sup>[16]</sup>,甚至发生断裂,存在安全隐患,而现阶段很少有关于悬吊式 TMD 足尺试验的研究。

本文设计了悬吊式 SMA-TMD 系统,利用钢索悬吊质量块,避免 SMA 棒材产生较大预应力,利用 Ni-Ti SMA 材性受温度控制强的特性,使用多个大尺寸 SMA 棒材并联受弯提供足够的刚度和强度,将结构振动的能量转换至 SMA-TMD 系统上,达到 SMA-TMD 对受控结构实现半主动减振控制的目的。本研究进行了 SMA-TMD 系统的足尺自由振动试验,改变 SMA 棒材工作温度,探究温度变化对 SMA-TMD 系统频率及阻尼比影响,得到对受控结构半主动控制的有效频域。

## 1 SMA-TMD 构造设计

SMA-TMD 系统  $z$ - $y$  立面构造示意图如图 1(a) 所示( $z$ - $y$  立面示意图与  $z$ - $y$  立面相同),其中质量块为质量 0.964 8 t 的立方体,由 4 根长度为 150 mm 的钢索悬吊承担其质量。质量块中心至摆心的距离  $l$  为 476.5 mm,万向铰较心距离摆心距离  $h$  为 789 mm。如图 1(b) 所示,设计 SMA 棒材有效长度为 132 mm,矩

形有效截面尺寸为 15 mm( $x$  方向) $\times$ 25 mm( $y$  方向),以提供 TMD 这 2 个方向( $x,y$ )不同的抗弯刚度,设置过渡段长度为 20 mm 以便 SMA 棒材受弯。SMA-TMD 系统试验图如图 2(a)所示,在底板上设置钢框架,利用钢框架次梁承担质量块质量;质量块底端焊接圆柱,万向铰上端通过圆柱与质量块固接,SMA 上端固定段通过万向铰与质量块连接,下端固定段伸入套筒固接于底板,如图 2(b)所示;质量块由钢索悬吊于钢框架次梁上如图 2(c)所示;4 根 SMA 棒材分布于质量块底端角部,避免质量块在自由振动中出现扭转,如图 2(d)所示。当 SMA-TMD 受到激励时,可以使钢索悬吊质量块摆动,使 SMA 棒材受弯提供  $x,y$  这 2 个方向刚度。4 根大尺寸 Ni-Ti SMA 棒材平行受弯,提供 TMD 足够的受弯刚度,为单根 SMA 棒材受弯刚度的 4 倍。

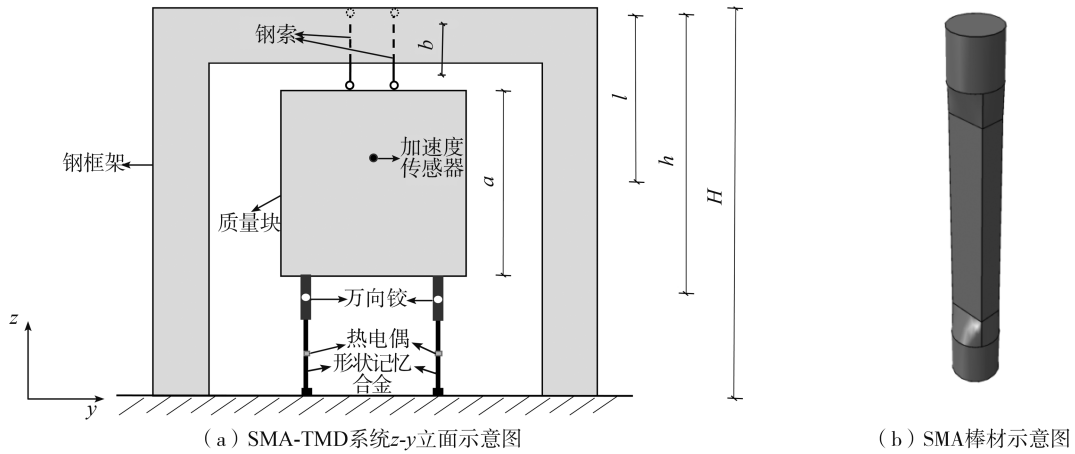


图 1 SMA-TMD 系统及 SMA 棒材示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMA bar and SMA-TMD system

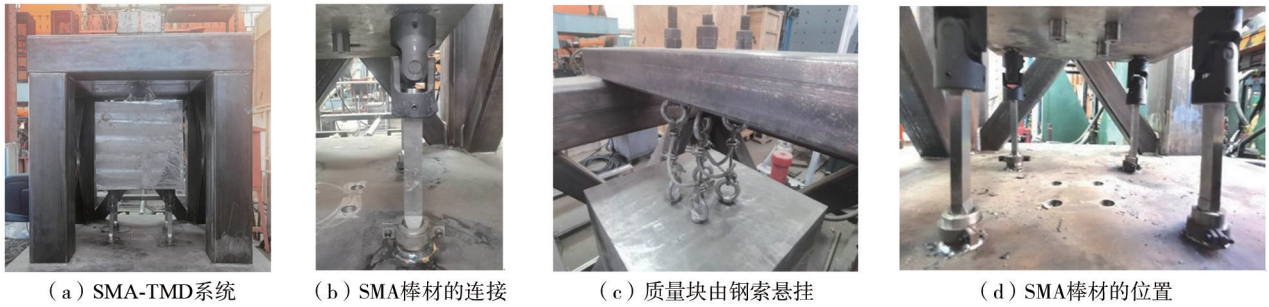


图 2 SMA-TMD 系统的构造图

Fig. 2 Construction diagram of the SMA-TMD system

## 2 SMA-TMD 减振原理

基于传统悬吊式 TMD 力学模型,得到 SMA-TMD 系统应用于受控结构时的力学模型,如图 3 所示,受控结构简化为单自由度体系,质量为  $m_1$ 、刚度为  $k_1$ 、阻尼为  $c_1$ 。施加在受控结构的荷载为  $F_1(t)$ ,受控结构位移为  $x_1(t)$ ,钢索摆动角度为  $\theta(t)$ ,设计 SMA 棒材有效截面为矩形,提供  $x,y$  方向不同的抗弯刚度,图 3 为  $z-y$  平面力学模型, $z-x$  平面与  $z-y$  平面力学模型相同,仅 SMA 棒材提供的受弯刚度不同。设计 SMA-TMD 系统为悬吊型,质量块的质量全部由钢索承担,如图 2(c)所示。底板焊接套筒为可拆卸,在钢索悬吊质量块之后安装 4 根 SMA 棒材,通过调整图 2(c)次梁上方螺栓使得质量块水平,在质量块水平静止状态下,4 根 SMA 棒材上端与万向铰下端套筒均可滑动,安装方便的同时避免由 SMA 悬吊质量块产生较大预应力。由多个大尺寸 Ni-Ti SMA 棒材并联受弯提供 SMA-TMD 系统的总刚度  $k_2$ ,质量块的质量为  $m_2$ ,阻尼  $c_2$ , $l$  为质量块质心与摆心之间的距离。忽略 SMA 棒材轴向变形,同时忽略 SMA 棒材质量,将 SMA 棒材抗弯刚度与阻尼等效于万向铰铰心,距离摆心距离为  $h$ 。

基于悬吊型 TMD 及小摆角假设,由图 3 力学模型及虚功原理推导其运动方程:

$$-\delta W_s = k_2 \theta(t) h \delta(\theta(t) h) + k_1 x_1(t) \delta x_1(t) = k_2 h^2 \theta(t) \delta \theta(t) + k_1 x_1(t) \delta x_1(t) \quad (1)$$

$$-\delta W_D = c_2 \dot{\theta}(t) h \delta(\theta(t) h) + c_1 \dot{x}_1(t) \delta x_1(t) = c_2 h^2 \dot{\theta}(t) \delta(\theta(t)) + c_1 \dot{x}_1 \delta x_1(t) \quad (2)$$

$$-\delta W_I = m_2(l \ddot{\theta}(t) + \ddot{x}_1(t)) \delta(l\theta(t) + x_1(t)) + m_1 \ddot{x}_1(t) \delta x_1(t) = m_2 l^2 \ddot{\theta}(t) \delta\theta(t) + m_2 l \ddot{x}_1(t) \delta\theta(t) + m_2 l \ddot{\theta}(t) \delta x_1(t) + m_2 \ddot{x}_1(t) \delta x_1(t) + m_1 \ddot{x}_1(t) \delta x_1(t) \quad (3)$$

$$\delta W_p = -m_2 g \theta(t) \delta(l\theta(t)) = -m_2 g l \theta(t) \delta\theta(t) + F_1(t) \delta x_1(t) \quad (4)$$

由式(1)~式(4)得

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) + m_2 l \ddot{\theta}(t) + m_2 \ddot{x}_1(t) = F_1(t) \quad (5)$$

$$m_2 l^2 \ddot{\theta}(t) + c_2 h^2 \dot{\theta}(t) + (k_2 h^2 + m_2 g l) \theta(t) + m_2 l \ddot{x}_1(t) = 0 \quad (6)$$

由式(5)、式(6)得出 SMA-TMD 系统应用于受控结构的运动方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2 l \\ m_2 l & m_2 l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & m_2 g l + k_2 h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

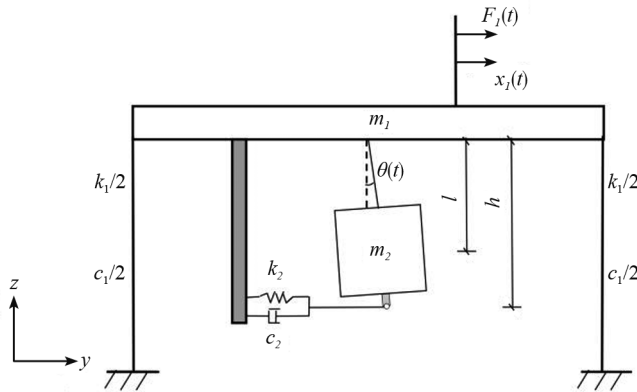


图3 SMA-TMD 系统应用于受控结构时的力学模型

Fig. 3 Mechanical model of SMA-TMD system applied to controlled structures

### 3 SMA-TMD 自由振动试验

#### 3.1 试验材料

在不同的 SMA 种类中, Ni-Ti SMA 发展最为成熟, 易于购买, 材料特性优良, 拥有良好的受温度影响特性, 适合应用于半主动控制, 同时 Ni-Ti SMA 晶体较小, 不易发生晶界断裂, 因此本文阻尼器试验选用 Ni-Ti SMA 棒材。根据西安赛特金属材料有限公司提供成分表得知 Ni-Ti SMA 的化学成分约为: Ni 为 56%, Ti 为 43%。为了将 SMA 棒材应用于 TMD 中, 需研究温度对其性能的控制, 分析 SMA 相变温度及热力学性能。使用差式扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 对 13.6 mg 上述 Ni-Ti SMA 试样进行测试, 记录试样的 DSC 曲线, 温度设定  $-40 \sim -100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 测得 SMA 的相变温度为  $M_f = -11.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $M_s = -9.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_s = -2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_f = 25.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2 试验方案

SMA-TMD 系统的自由振动试验在北京工业大学结构实验室进行。试验目的为探究温度变化对 SMA-TMD 系统力学性能的影响, 得到其对受控结构半主动控制的有效频域。分别在  $x$ 、 $y$  方向上给质量块施加一定的初始位移, 使得质量块自由振动, 在质量块  $x$ 、 $y$  这 2 个方向上分别连接加速度传感器, 获得质量块在自由振动中的加速度时程曲线, 采样频率为 1000 Hz。在 4 根 SMA 棒材中部外表面分别连接 4 个热电偶测温仪, 在 SMA 棒材周围附有保温材料, Ni-Ti SMA 对温度较为敏感, 使用热风枪和降温喷雾可以迅速改变 SMA 棒材工作温度, 在加热或降温后确保 1 min 内 SMA 棒材温度不发生变化, 即开始进行自由振动试验, 控制其工作温度从  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  变化到  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度间隔取  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。SMA-TMD 系统自由振动试验编号如表 1 所示, 共进行 26 组 SMA-TMD 系统自由振动试验。仪器连接位置均如图 1(a) 所示,  $z$ - $x$  平面与  $z$ - $y$  平面相同。

表 1 不同温度下 SMA-TMD 自由振动试验方案

Table 1 SMA-TMD free vibration test schemes at different temperature

方向	试验编号	SMA 工作温度/°C	方向	试验编号	SMA 工作温度/°C
x 方向	1	-40	y 方向	14	-40
	2	-30		15	-30
	3	-20		16	-20
	4	-10		17	-10
	5	0		18	0
	6	10		19	10
	7	20		20	20
	8	30		21	30
	9	40		22	40
	10	50		23	50
	11	60		24	60
	12	70		25	70
	13	80		26	80

### 4 试验结果及分析

表 1 中试验 1~13 和试验 14~26 分别为随着 SMA 工作温度从-40~+80 °C 变化,每隔 10 °C 对 SMA-TMD 系统进行自由振动试验。分析试验测得质量块加速度时程,使用矩阵束 (matrix pencil) 方法计算阻尼器 x、y 方向的频率和阻尼比,变化曲线如图 4 所示,SMA-TMD 系统的频率随温度升高呈上升趋势,阻尼比随温度升高呈下降趋势;在 x 方向阻尼器频率从 1.8842 Hz 增大到 2.3029 Hz,频率变化差值达 0.4187 Hz,阻尼比从 12.86%减小至 2.69%,在 y 方向阻尼器频率从 2.6166 Hz 增大到 3.5812 Hz,频率变化差值达 0.9646 Hz,阻尼比从 10.06%减小至 3.54%。

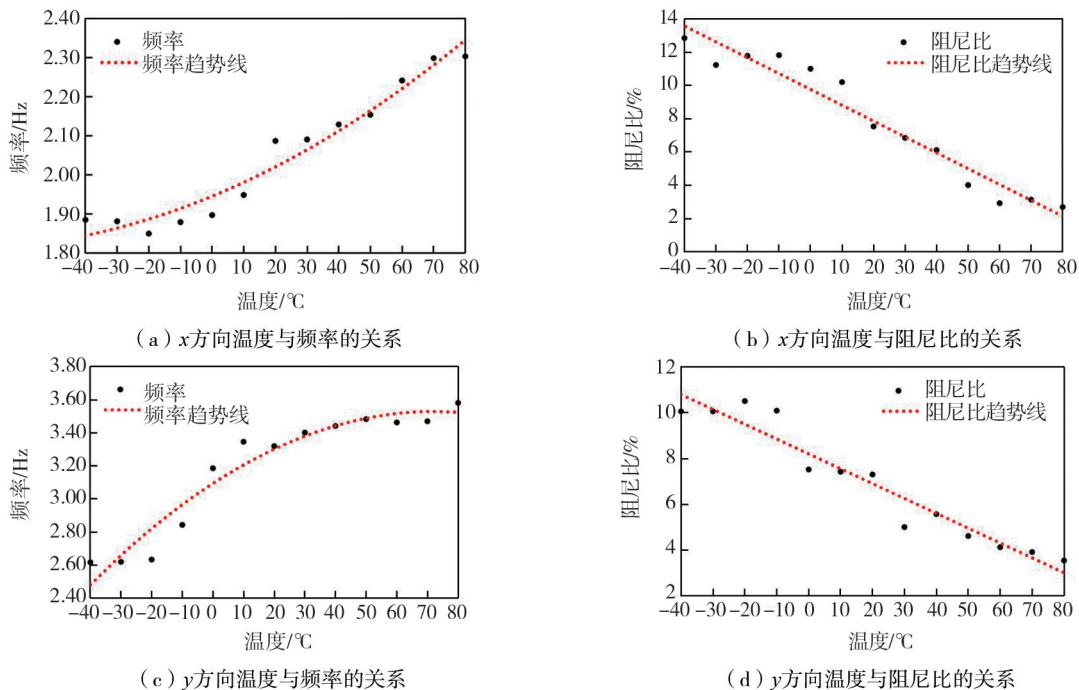


图 4 SMA-TMD 在 x、y 方向随温度变化的频率和阻尼比曲线

Fig. 4 Frequency and damping ratio curves of the SMA-TMD with temperature variation in x and y directions

当温度在-10~+30 °C 范围内,阻尼器频率变化较大,温度在-20 °C 以下及 50 °C 以上时,阻尼器频率变化较为平缓。试验中采用的 Ni-Ti SMA 棒材的相变温度为  $M_f = -11.1$  °C,  $M_s = -9.3$  °C,  $A_s = -2.2$  °C,  $A_f = 25.7$  °C,当温度低于-11.1 °C 时,SMA 的晶体状态无法从马氏体转变为奥氏体,当温度在 -11.1~+25.7 °C 时,

SMA 完成从马氏体变化到奥氏体的晶体相变,同时,在此温度阶段,SMA 处于马氏体与奥氏体的混合状态,此时阻尼最大,从 25.7 °C 至马氏体消失温度  $M_d$  时,SMA 实现其超弹性性能。因此,当 SMA 工作温度处于晶体状态改变范围内,TMD 频率变化较大,同时,此时的 SMA 阻尼最大,可耗散更多的振动能量。本文 SMA-TMD 系统在常温(20 °C)时,SMA 晶体相变处于马氏体与奥氏体混合状态,更利于通过控制 SMA 温度使阻尼器在更宽频域内快速重新调谐。因此,SMA-TMD 系统适用于受控结构的自然频率范围,应在 -10~+30 °C 时,SMA-TMD 系统频域内, $x$  方向为 1.878 4~2.090 1 Hz, $y$  方向为 2.843 1~3.401 1 Hz。

根据能量守恒关系,SMA-TMD 系统频率公式为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{k_2}{m_2} \left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (8)$$

式中  $g$  为重力加速度。

由式(8)可知,SMA-TMD 系统频率与质量块质量  $m_2$ 、有效摆长  $l$  和 SMA-TMD 刚度  $k_2$  相关,而 SMA 刚度则与其有效长度及有效截面尺寸有关。根据式(8)可得 SMA-TMD 等效刚度公式为

$$k_2 = m_2 l (\omega_2^2 l - g) / h^2 \quad (9)$$

式中  $\omega_2$  为 SMA-TMD 系统圆频率。

根据试验数据计算所得 SMA-TMD 系统频率,由式(9)可计算 SMA-TMD 系统等效刚度。SMA 棒材与质量块平行连接,且具有相同的位移和加速度,SMA-TMD 系统等效刚度和阻尼系数为 4 根 SMA 棒材相加之和。由等效刚度与  $\omega_2$  关系可知,随着 SMA 棒材工作温度升高,SMA-TMD 系统等效刚度也随之呈现升高趋势,反之,等效刚度呈下降趋势,SMA-TMD 在  $x$ 、 $y$  方向随温度变化的等效刚度曲线如图 5 所示, $x$  方向 SMA-TMD 系统等效刚度从 42.08 N/mm 变化到 66.44 N/mm, $y$  方向从 87.88 N/mm 变化到 170.93 N/mm,整体变化趋势与 SMA-TMD 系统频率变化趋势相同。

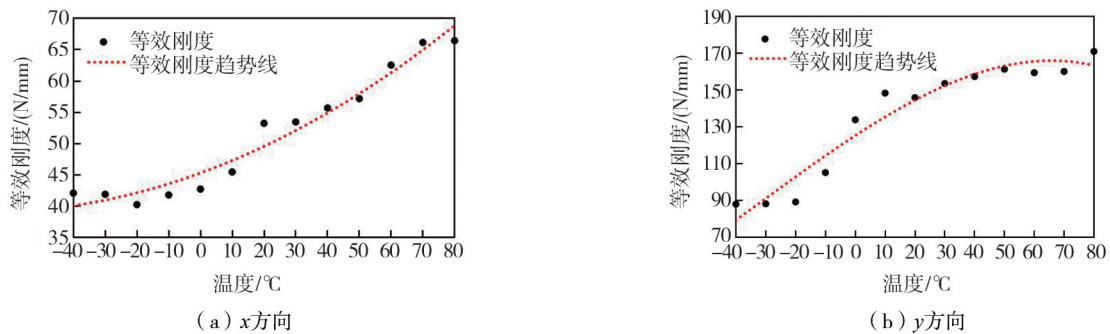


图5 SMA-TMD 在  $x$ 、 $y$  方向随温度变化的等效刚度曲线

Fig. 5 Equivalent stiffness curves of the SMA-TMD with temperature variation in  $x$  and  $y$  directions

## 5 讨论

本研究进行了足尺的 SMA-TMD 自由振动试验,使用了大尺寸 Ni-Ti SMA 棒材提供 TMD 抗弯刚度,使用多个 SMA 棒材并联组合,增加了 SMA-TMD 阻尼,消耗了更多能量,使得自由振动可以快速衰减,减少了 SMA 的循环变形。工程中也可采用并联多根不同相变温度的 SMA 棒材受弯为阻尼器提供刚度,可实现更大范围的改变温度。SMA 棒材尺寸不同,热量的传递可能不同,温度对其刚度的影响也可能不同。本研究设计 SMA-TMD 采用了 Ni-Ti SMA 棒材,利用其对温度敏感的特性,实现对 SMA 棒材的快速升温降温。试验中应用的 Ni-Ti SMA 棒材尺寸较大,加热与冷却措施都直接针对 SMA 棒材的外表面,今后可以采用更为先进有效的加热或冷却措施,如通过电流焦耳加热 SMA 棒材,温度高低均由直流电源的电压控制,采用四氟乙烷冷却 SMA 棒材,使得温度控制更加充分<sup>[17-18]</sup>。在实际应用中,将 SMA-TMD 系统安置于建筑结构室内,同时 SMA 棒材周围附有保温材料或置于保温箱中,受外界温度影响小,温度控制也更加稳定有效。本文设计 SMA-TMD 系统主要针对轻型结构如木结构等,因此质量块质量较轻,阻尼器质量块与受控结构质量比最适宜在 1%~5% 范围内,在实际应用中可根据受控结构质量以及施工造价等因素设计质量块质量。在施加质量块初始位移使其自由振动的过程中,质量块出现了轻微的扭转,在今后的应用中,可将钢索悬吊质量块角

部,保证 SMA-TMD 系统的低阶模态为质量块分别在  $x$ 、 $y$  方向的摆动。

多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)在基于单个 TMD 理论上被提出,MTMD 具有多个不同动力特性且频率呈线性分布的单阻尼器,可进一步改善单个 TMD 的有效性和鲁棒性,同时可以在较宽频带上对受控结构进行振动控制<sup>[19-20]</sup>。当 MTMD 质量更大时对受控结果的振动控制更强<sup>[21]</sup>,本研究中的 SMA-TMD 质量块质量为 0.964 t,今后可以将 SMA-TMD 应用为多阻尼器(MTMD),增大多阻尼器质量块的总质量与受控结构质量的质量比,来对受控结构达到更好的减振效果,同时也扩大了温度调节 MTMD 的频带宽,对受控结构形成更好的半主动控制。轻型结构质量较轻,在荷载激励下易产生较大加速度,且结构自然频率易改变导致 TMD 漂移,MTMD 可以在更宽频域上解决 TMD 失调问题,同时 MTMD 也分散了阻尼器质量,更有利于楼板承载。

本文设计的 SMA-TMD 系统在未来应用于轻型结构减震中,可在一定频域内解决 TMD 系统容易失调后造成严重后果的问题。当受控结构受到地震作用产生振动,对应用 SMA-TMD 系统的受控结构进行结构健康检测,检测结构质量、刚度变化,当受控结构的质量、刚度由于装饰、维修和人员设备的移动发生改变等原因导致 TMD 系统失调时,可立即通过信号处理,结合人工智能、机器学习<sup>[22-23]</sup>等技术快速运算地震及结构信息,迅速改变 SMA 温度使得 TMD 系统重新调谐,形成对受控结构的半主动控制。

## 6 结论

本文针对 TMD 系统应用在轻型结构中易失调的问题,提出一种 SMA-TMD 半主动控制系统,进行了足尺自由振动试验。结论如下:

1) SMA 棒材工作温度从  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化到  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , SMA-TMD 系统  $x$  方向频率变化差值达 0.4187 Hz,  $y$  方向频率变化差值达 0.964 6 Hz,  $x$  方向阻尼比变化差值达 10.17%,  $y$  方向阻尼比变化差值达 6.52%。

2) SMA-TMD 系统的频率随温度升高呈上升趋势,阻尼比随温度升高呈减小趋势;其中,当 SMA 工作温度处于晶体状态改变范围内时, TMD 频率变化较大。

3) 当轻型结构质量改变等原因导致 TMD 失调时,可通过快速改变 SMA 棒材工作温度来控制 TMD 系统刚度和阻尼,使得 SMA-TMD 系统重新调谐。

## 参考文献:

- [1] 孙万泉,李庆斌. 基于形状记忆合金的 TMD 半主动控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(6): 164-168.  
SUN Wanquan, LI Qingbin. TMD semi-active control with shape memory alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6): 164-168. (in Chinese)
- [2] 李春祥,刘艳霞,王肇民. 质量阻尼器的发展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 194-206.  
LI Chunxiang, LIU Yanxia, WANG Zhaomin. A review on mass dampers[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 194-206. (in Chinese)
- [3] 韩兵康,杜冬. 结构半主动调谐质量阻尼器的发展[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 46-49, 148.  
HAN Bingkang, DU Dong. Development of semi-active tuned mass dampers for structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 46-49, 148. (in Chinese)
- [4] 石运东,韦鑫,丁阳,等. 三维隔震单层球面网壳结构频率相关变阻尼半主动控制[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(1): 143-153.  
SHI Yundong, WEI Xin, DING Yang, et al. Semi-active control with frequency dependent variable damping for three-dimensional isolated single-layer spherical reticulated shell structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 143-153. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] TORRA V, ISALGUE A, LOVEY F C, et al. Shape memory alloys: From the physical properties of metastable phase transitions to dampers for civil engineering applications[J]. Journal De Physique IV (Proceedings), 2004, 113: 85-90.
- [8] HUANG H Y, CHANG W S, MOSALAM K M. Feasibility of shape memory alloy in a tuneable mass damper to reduce excessive in-service vibration[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(2): e1858.
- [9] 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.

- [10] HUANG H Y, MOSALAM K M, CHANG W S. Adaptive tuned mass damper with shape memory alloy for seismic application[J]. *Engineering Structures*, 2020, 223: 111171.
- [11] 薛素铎, 董军辉, 卞晓芳, 等. 一种新型形状记忆合金阻尼器[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(3): 45-50.  
XUE Suduo, DONG Junhui, BIAN Xiaofang, et al. A new type of shape memory alloy damper[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3): 45-50. (in Chinese)
- [12] 任文杰, 王利强, 马志成, 等. 形状记忆合金-摩擦复合阻尼器力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(2): 83-90.  
REN Wenjie, WANG Liqiang, MA Zhicheng, et al. Investigation on mechanical behavior of innovative shape memory alloy-friction damper[J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(2): 83-90. (in Chinese)
- [13] 苗效栋. 新型形状记忆合金阻尼器及其减震性能的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
MIAO Xiaodong. Research on a new shape memory alloy damper and its seismic performance[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [14] 闫维明, 纪金豹, 蒋华戈, 等. 新型悬吊式 TMD 及其在某标志塔风振控制中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(2): 55-60.  
YAN Weiming, JI Jinbao, JIANG Huage, et al. A new type pendulous TMD and its application on a tower for wind-induced vibration control[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(2): 55-60. (in Chinese)
- [15] 牛健, 阎石. 基于形状记忆合金-悬吊质量摆减振系统的结构地震响应分析[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(4): 130-137.  
NIU Jian, YAN Shi. Structural seismic response analysis based on shape memory alloy-suspension mass pendulum damping system[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(4): 130-137. (in Chinese)
- [16] HUANG H Y, ZHU Y Z, CHANG W S. Comparison of bending fatigue of NiTi and CuAlMn shape memory alloy bars[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 8024803.
- [17] HUANG W. On the selection of shape memory alloys for actuators[J]. *Materials & Design*, 2002, 23(1): 11-19.
- [18] CHEN J Y, LEI L P, FANG G. Elastocaloric cooling of shape memory alloys: A review[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 28: 102706.
- [19] YAMAGUCHI H, HARNPORNCHAI N. Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1993, 22(1): 51-62.
- [20] KAREEM A, KLINE S. Performance of multiple mass dampers under random loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(2): 348-361.
- [21] 郑罡, 高赞明, 倪一清. 高层建筑 MTMD 风振控制的参数优化[J]. *振动与冲击*, 2004, 23(3): 119-122, 144.  
ZHENG Gang, GAO Zanning, NI Yiqing. Parameter optimization of multi-TMDs for wind-excited vibration suppression of tall buildings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2004, 23(3): 119-122, 144. (in Chinese)
- [22] 袁爱璟, 王伟君, 彭菲, 等. 机器学习在地震预测中的应用进展[J]. *地震*, 2021, 41(1): 51-66.  
YUAN Aijing, WANG Weijun, PENG Fei, et al. Recent progress of earthquake prediction with machine learning[J]. *Earthquake*, 2021, 41(1): 51-66. (in Chinese)
- [23] 贾佳, 王夫运, 吴庆举. 机器学习在地震检测与震相识别的应用综述[J]. *地震工程学报*, 2019, 41(6): 1419-1425.  
JIA Jia, WANG Fuyun, WU Qingju. Review of the application of machine learning in seismic detection and phase identification[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(6): 1419-1425. (in Chinese)