

基于形状记忆合金-悬吊质量摆的风电塔架结构减震控制分析

牛健^{1,2,3}, 阎石^{1,2}, 常洪源⁴

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳农业大学审计处, 辽宁 沈阳 110866; 4. 沈阳铁道勘察设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘要 目的 分析在地震作用下利用形状记忆合金-悬吊质量摆(SMA-SMPD)系统对某风电场 44 m 高水平轴风电塔架结构进行减震控制的效果. 方法 利用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱, 建立一种基于 Bouc-Wen 模型的风电塔架结构 SMA-SMPD 系统力学模型和动力方程, 利用非线性时程方法分析 SMA-SMPD 系统对风电塔架结构减震控制效果, 并与普通悬吊质量摆(SMPD)减震效果进行对比分析. 结果 以 Kobe 地震作用为例, SMPD 控制下的风电塔架结构体系顶部位移、加速度峰值减振率分别为 14.75% 和 13.94%, SMA-SMPD 控制下的风电塔架结构体系顶部位移、加速度峰值减振率分别为 29.23% 和 23.58%, SMA-SMPD 系统减震效果明显优于 SMPD 系统. 结论 SMA-SMPD 系统的震动控制能力明显强于 SMPD 系统, 且能够有效地抑制风电塔架结构的不良振动.

关键词 悬吊质量摆; 形状记忆合金; 风电塔架结构体系; 结构震动响应分析; 减振控制

中图分类号 TU352.1 TG139⁺.6 文献标志码 A

Seismic Vibration Control Analysis of Wind Turbine Tower Structures Based on SMA-SMPD System

NIU Jian^{1,2,3}, YAN Shi^{1,2}, CHANG Hongyuan⁴

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Audit Office, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China, 110866; 4. Shenyang Railway Survey Design Consulting Company Limited, Shenyang, China, 110013)

Abstract: The paper aims at analyzing vibration control effects of a 44 m height horizontal axial wind turbine tower (WTT) system installed shape memory alloy (SMA)-suspension mass pendulum damper (SMPD) system under seismic excitations. The Simulink tool box in Matlab software is applied to set up a dynamic model and motion of equations of the WTT system based

收稿日期: 2020-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705602)

作者简介: 牛健(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事结构抗震减震方面研究.

on Bouc-Wen model to perform a nonlinear time history seismic vibration control effect analysis for WTT structures installed with the SMA-SMPD system, and compared with the seismic control effects of the same system equipped with a normal SMPD. The numerical results show that the peak displacement and acceleration on the top of the WTT structure installed the SMPD system can reduce 14.75% and 13.94% under El-Centro earthquake, respectively. However, the corresponding responses for the same WTT structure installed SMA-SMPD system can obviously reduce 29.23% and 23.58%, respectively, behaving a more excellent vibration control effect for the SMA-SMPD than for the SMPD. Meanwhile, the SMA-SMPD system can effectively suppress the other harmful vibration of WTT structures.

Key words: suspension mass pendulum damper (SMPD); shape memory alloy (SMA); wind turbine tower structure system; structural seismic response analysis; vibration control

风能具有分布广、储量大、利用久等特点^[1]. 风力发电机组为了最大限度利用风能而趋向更高大化,长细比增大、刚度减小、自振频率降低,结构变得柔性化^[2]. 风电塔架除风荷载作用显著外,地震作用同样对其影响强烈. 塔架可发生强度破坏、疲劳破坏、屈曲倾覆等事故,将带来不可估量的损失. 因此,开展风电塔架结构的振动控制研究,确保其在地震等自然灾害作用下安全运行具有重要意义.

I. Lavassas 等^[3-6]采用数值模拟方法对风电塔架结构地震响应规律进行研究. 赵斌等^[7-8]采用模型试验方法对风电塔架结构抗震性能进行了分析与研究. 目前,针对风电塔架结构减震控制研究相对较少,利用智能材料开展减震控制研究相对更少. 基于此,笔者针对风电塔架结构内部空间特点,基于悬吊质量摆减振原理^[9-11],利用 SMA 超弹性特性^[12-14],将 SMA 丝与弹簧叠加而成 SMA 阻尼器,并呈放射状布置在摆锤周围与塔架内壁相连,设计一种 SMA-SMPD 系统^[15-16],可将塔架振动能量集中到 SMA 阻尼器上,实现对塔架结构耗能减震控制的目的.

1 风电塔架结构实例

以三叶片水平轴风力发电机为例,各部分尺寸、参数如图 1、表 1 所示. 塔架底部锚固在钢筋混凝土基础上,地基经加固处理,塔架基础可简化为固接. 为计算方便,将风电塔

架结构简化为竖向悬臂结构,整体划分为 13 段,简化为 13 个质点,其中,风轮、轮毂和机舱简化为 13 号质点,质量相对较大.

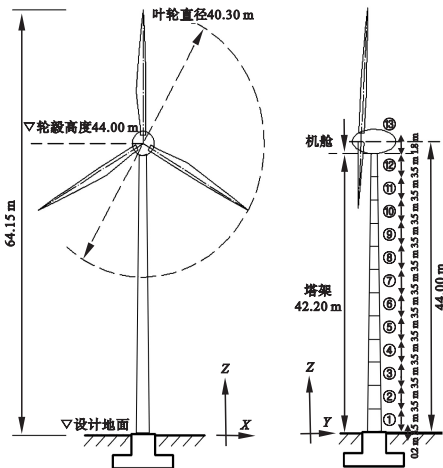


图 1 风电塔架结构示意图

Fig. 1 The schematics of geometric information of wind turbine tower structure

环形截面惯性矩为

$$I_i = \frac{\pi(D_i^4 - d_i^4)}{64} \tag{1}$$

式中: D_i 为外径; d_i 为内径,均为塔架每段中央直径数据; i 为每分析段的编号 ($i = 1, 2, \dots, 13$).

塔架结构以弯曲变形为主,抗侧移刚度为

$$K_i = \frac{12EI_i}{h_i^3} \tag{2}$$

式中: E 为塔架材料的弹性模量; I_i 为第 i 段塔架中部的截面惯性矩; h_i 为第 i 段塔架高度.

表1 风电塔架结构各部分详细参数

Table 1 The detailed parameters of the wind turbine tower structure

编号	质量/kg	底部高度/m	中央高度/m	每段高度/m	底部外径/m	中央外径/m	板厚/m	中央内径/m
13	29 560	42.20	44.00	3.645	1.200	1.200	0.010	1.190
12	1 061	38.70	40.45	3.500	1.279	1.240	0.010	1.230
11	1 355	35.20	36.95	3.500	1.358	1.319	0.012	1.307
10	1 673	31.70	33.45	3.500	1.438	1.398	0.014	1.384
9	2 019	28.20	29.95	3.500	1.517	1.478	0.016	1.462
8	2 390	24.70	26.45	3.500	1.596	1.557	0.018	1.539
7	2 514	21.20	22.95	3.500	1.675	1.636	0.018	1.618
6	2 638	17.70	19.45	3.500	1.754	1.715	0.018	1.697
5	3 063	14.20	15.95	3.500	1.834	1.794	0.020	1.774
4	3 201	10.70	12.45	3.500	1.913	1.874	0.020	1.854
3	3 338	7.20	8.95	3.500	1.992	1.953	0.020	1.933
2	3 473	3.70	5.45	3.500	2.071	2.032	0.020	2.012
1	4 500	0.20	1.95	3.700	2.150	2.111	0.025	2.086

2 SMA-SMPD 设计及简化模型

针对风电塔架结构中心对称特点以及内部有限空间,设计一种刚度和质量可调控的 SMA-SMPD 系统^[15](见图 2)。在 SMPD 周围呈放射状水平布置 8 个 SMA 阻尼器, SMA 阻尼器两端分别与摆锤和主结构相连,风电塔架的振动带动摆锤移动,可将风电塔架结构的位移等效集中到 SMA 阻尼器上^[16]。

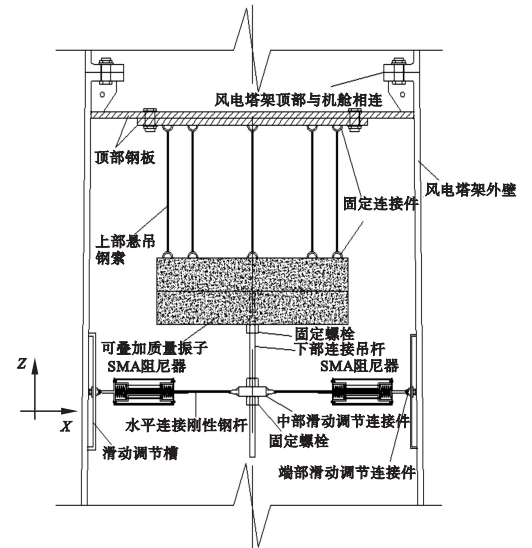


图2 SMA-SMPD 系统剖面示意图

Fig. 2 The schematic of SMA-SMPD system profile

为了解决 SMPD 质量比、频率比无法调节的难题,实现对不同高度、不同质量、不同频率的风电塔架结构振动控制目的, SMA-SMPD 系统具有以下优点:①质量比可调,设置下部连接吊杆可叠加多个质量振子;②频率比可调,调整上部悬吊钢索长度,可调整有效摆长, SMPD 的摆长是影响 SMA-SMPD 系统频率的重要因素;③SMA 阻尼器布置位置灵活可变,设置下部连接吊杆可调整 SMA 阻尼器的水平位置,即附加力矩。

塔架内部有限的空间内无法依靠调节摆长来调频,因此采用附加 SMA 阻尼器调节 SMPD 的频率。SMA 阻尼器由 SMA 丝、预压弹簧、推拉杆、内导筒、外筒、弹簧挡板等主要部件组成,具有耗能和可恢复变形双重功能,且在拉、压状态下都参与工作^[16]。

SMA-SMPD 系统计算简图如图 3 所示。假定系统在运动中能量损失较小,并且摆锤摆动的角度较小。其中 ω_d 为摆锤的无阻尼振动频率, θ 为最大位移角, l 为摆的有效长度, h 为 SMA 阻尼器至吊点的力臂长度, m_d 为摆锤质量, $x_d(t)$ 和 $x_{SMA}(t)$ 分别为摆和 SMA 的位移。 $x_d(t)$ 和 $x_{SMA}(t)$ 关系为

$$x_d = x_{SMA} \frac{l}{h}.$$

(3)

当摆锤处于平衡位置时,SMA-SMPD 系统最大动能为

$$T = \frac{1}{2} m_d \omega_d^2 l^2 \theta^2.$$

(4)

当摆锤摆至最高位置时,SMA-SMPD 系统最大势能为

$$V = \frac{1}{2} (kh^2 + m_d gl) \theta^2.$$

(5)

式中: k 为 SMA 阻尼器的刚度系数.

因 SMA-SMPD 系统能量守恒关系 $T = V$, 则

$$\frac{1}{2} m_d \omega_d^2 l^2 \theta^2 = \frac{1}{2} (kh^2 + m_d gl) \theta^2.$$

(6)

由式(6)可以得到 SMA-SMPD 系统的自振频率为

$$\omega_d = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{k}{m_d} \left(\frac{h}{l}\right)^2}.$$

(7)

式(7)可用于设计 SMA-SMPD 系统. 另外, 在 SMA-SMPD 系统中, 受 SMA 在不同相变状态下弹性模量变化较大的影响, 当摆角较大时对 ω_d 有一定影响.

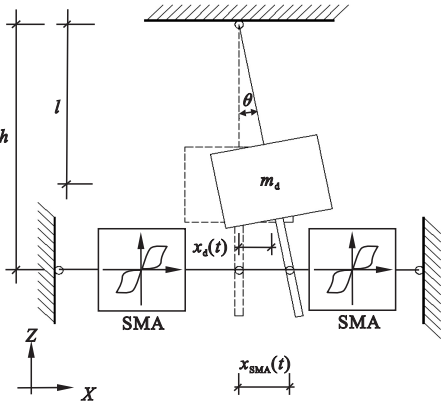


图3 SMA-SMPD 系统计算简图

Fig. 3 The schematic of SMA-SMPD system

3 SMA-SMPD 多自由度体系减振原理

3.1 SMA-SMPD 多自由度体系力学模型

多自由度简化模型可相对精确地计算出风电塔架结构的动力特性,但由于叶片、机舱

的质量、刚度等参数计算复杂,很难准确建立基于叶片的多自由度简化模型,且计算量大而繁琐,因此在 I. Lavassas 等^[3]对风电塔架多自由度简化模型的基础上,根据风电塔架结构实际构造建立如图4所示的串联多自由度体系简化模型.将风轮、轮毂和机舱质量集中在塔架顶端,塔架每段质量集中于此段中部.假定塔架与地基是刚性连接,对塔架底端施加全约束.

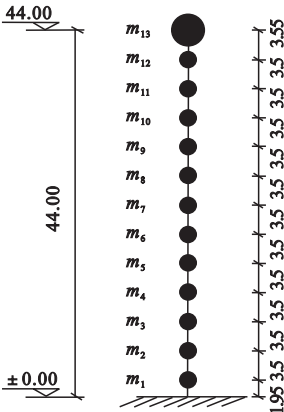


图4 多自由度风电塔架结构简化模型

Fig. 4 The simplified model of MDOF wind turbine tower structure

忽略阻尼影响,风电塔架结构串联多自由度体系简化模型的固有频率和模态振型如表2所示,表中的振型描述与文献[17]中风力机结构模型振型描述相一致.

表2 风电塔架结构多质点体系固有频率

Table 2 The natural frequency of WTTs multi-particle system

模态	频率/Hz	振型描述
1	0.496	塔架摇摆振动
2	0.499	塔架俯仰振动
3	2.190	两叶片反对称拍打耦合偏转
4	2.925	风轮绕主轴扭转、塔架扭转
5	3.256	风轮反对称拍打耦合俯仰
6	7.234	反对称拍打耦合偏转
7	7.468	反对称挥舞耦合仰俯、塔架扭转
8	12.533	对称拍打
9	14.574	三叶片反对称挥舞
10	16.115	两叶片反对称挥舞
11	16.461	反对称挥舞耦合偏转
12	17.682	反对称挥舞耦合扭转

将 SMA-SMPD 系统布置于结构上部,在地震作用下主结构产生振动,带动 SMA-SMPD 摆动,将主结构产生的位移集中于系统中 SMA 阻尼器上,即 SMA 阻尼器吸收了主结构部分动能. SMA-SMPD 产生的惯性力反作用于主结构上,当方向与主结构振动方向相反时,就产生了抑制主结构的振动效果. 基于 Bouc-Wen 模型的 SMA-SMPD 多自由度体系力学模型如图 5 所示. 将该系统悬挂在第 n 个质点下,位于 x 方向上的一对 SMA 阻尼器共同参与耗能工作, Bouc-Wen 力学模型及 SMA 阻尼器简化的力学模型如文献[15]所述.

3.2 SMA-SMPD 多自由度体系运动方程

风电塔架结构的地震响应以一阶振型为主,最大位移发生在结构顶部. 而当 SMA-SMPD系统安装在塔架顶部时减震效果最

$$M_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & m_d \end{bmatrix}. \tag{8}$$

$$K_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & -k_{n-2} & k_{n-2} + k_{n-1} & -k_n & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & 0 & -k_n & k_n + \frac{m_d g}{l} & -\frac{m_d g}{l} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -\frac{m_d g}{l} & \frac{m_d g}{l} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

式中: n 取 13; m_i 为 i 质点的质量; c_i 为 i 质点的阻尼; k_i 为 i 质点相连下部侧移刚度; m_d 为摆球质量; c_d 为摆的阻尼; l 为摆长.

风电塔架是一种头重脚轻的悬臂式结构,与普通的结构相比,其结构阻尼比非常小. 阻尼比取 $\zeta=0.5\%$,采用 Rayleigh 阻尼

$$C = \alpha_1 M + \alpha_2 K. \tag{11}$$

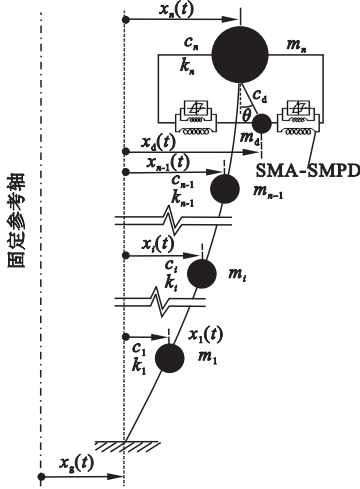


图 5 SMA-SMPD 多自由度体系力学模型

Fig. 5 Mechanical model of SMA-SMPD for the MDOF system 好,控制第 13 号节点的运动. 安装 SMA-SMPD 的风电塔架系统的质量、阻尼和刚度矩阵为 M 、 C 和 K ,即

$$C_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & c_n & -c_d \\ 0 & \cdots & 0 & c_d \end{bmatrix}. \tag{9}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\omega_1\omega_2\zeta}{\omega_1 + \omega_2}. \tag{12}$$

$$\alpha_2 = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2}. \tag{13}$$

式中: ω_1 为塔架结构一阶固有圆频率; ω_2 为塔架结构二阶固有圆频率; α_1 和 α_2 为比例系数.

风电塔架结构 SMA-SMPD 多自由度体

系运动方程

$$\begin{aligned} & \boldsymbol{M} \cdot \ddot{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{C} \cdot \dot{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{x}(t) = \\ & -\boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{I} \cdot \ddot{\boldsymbol{x}}_g(t) + \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{F}_{\text{SMA}}(t). \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{x}(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{x}}(t)$ 和 $\ddot{\boldsymbol{x}}(t)$ 分别为多质点体系的相对位移、速度和加速度向量,其中包括质量摆自由度; \boldsymbol{I} 为单位矩阵; \boldsymbol{H} 为质量摆位置矩阵; $\boldsymbol{F}_{\text{SMA}}(t)$ 为 SMA-SMPD 系统中 SMA 提供的控制力^[16],其中超弹性 SMA 滞回性能由 Bouc-Wen 模型确定,即

$$\boldsymbol{F}_{\text{SMA}}(t) = \alpha k [\boldsymbol{x}_{\text{SMA}}(t) - \boldsymbol{x}_n(t)] + (1 - \alpha) k \boldsymbol{z}(t) + k_t [(\boldsymbol{x}_{\text{SMA}}(t) - \boldsymbol{x}_n(t) + \boldsymbol{x}_0)]. \quad (15)$$

式中: α 为 SMA 丝屈服后刚度与弹性刚度的比值; k 为 SMA 丝弹性刚度; $\boldsymbol{x}_{\text{SMA}}(t) - \boldsymbol{x}_n(t)$ 为 SMA 阻尼器伸长(或压缩)位移向量; k_t 为阻尼器内置弹簧刚度; \boldsymbol{x}_0 为弹簧预压缩的位移; $\boldsymbol{z}(t)$ 为 SMA 非线性滞回位移向量,即

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{z}}(t) = & A \left[\frac{h}{l} \dot{\boldsymbol{x}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{x}}_n(t) \right] - \\ & \beta \left| \frac{h}{l} \dot{\boldsymbol{x}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{x}}_n(t) \right| |\boldsymbol{z}(t)|^{m-1} \boldsymbol{z}(t) - \\ & \gamma \left[\frac{h}{l} \dot{\boldsymbol{x}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{x}}_n(t) \right] |\boldsymbol{z}(t)|^m. \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $\boldsymbol{x}_d(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{x}}_d(t)$ 和 $\ddot{\boldsymbol{x}}_d(t)$ 分别为悬吊质量摆的相对位移、速度和加速度向量; $\boldsymbol{x}_n(t)$ 为悬吊质量摆所关联质点的相对位移; A 、 β 和 γ 为影响滞回环形状和大小的模型参数; m 为影响滞回曲线光滑程度的模型阶数,均由试验确定。

4 地震作用下风电塔架结构减振控制效果分析

为了验证地震作用下 SMA-SMPD 的振动控制效果,依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)要求^[18],选取两条典型的 El-Centro 和 Kobe 天然地震波以及一条人工模拟地震记录.将加速度峰值按 7 度罕遇烈度调为 220 cm/s²,模拟不同地震激励下风电塔架结构在无控制、SMPD 控制和 SMA-SMPD

控制下的动力响应,以及该系统对不同控制位置 and 不同控制振型的减振效果分析。

4.1 不同地震波的减振效果分析

在不同地震作用下,分别建立了风电塔架结构在无控制、SMPD 控制和 SMA-SMPD 控制 3 种方案.研究表明质量比不宜过大,文中均取 3%^[16].以控制结构第一振型来调整 SMPD 和 SMA-SMPD 频率.受篇幅所限,笔者以 Kobe 地震激励为例,提取了风电塔架结构 13 号节点(顶点)的位移和加速度时程曲线进行对比分析,结果如图 6、图 7 所示,塔架各质点的位移、加速度包络图见图 8, SMA 阻尼器力-位移曲线详见图 9,风电塔架结构顶点减振控制效果见表 3.

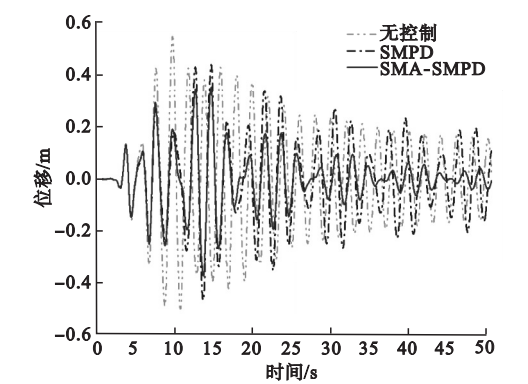


图 6 Kobe 地震激励下风电塔架结构顶点位移响应
Fig. 6 WTTs displacement response under Kobe earthquake records

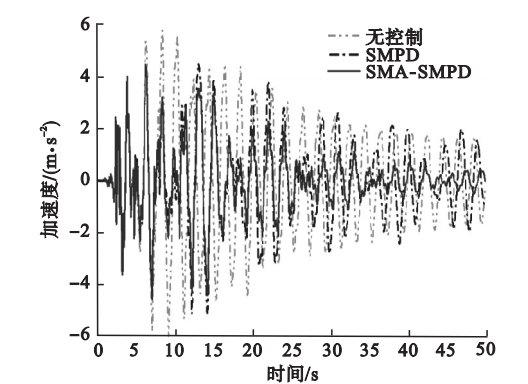


图 7 Kobe 地震激励下风电塔架结构顶点加速度响应
Fig. 7 WTTs acceleration response under Kobe earthquake records

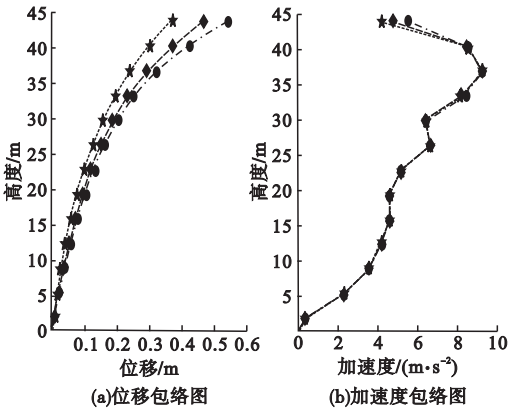


图8 Kobe地震激励下塔身响应包络图

Fig. 8 Envelopes of the WTTs under Kobe earthquake records

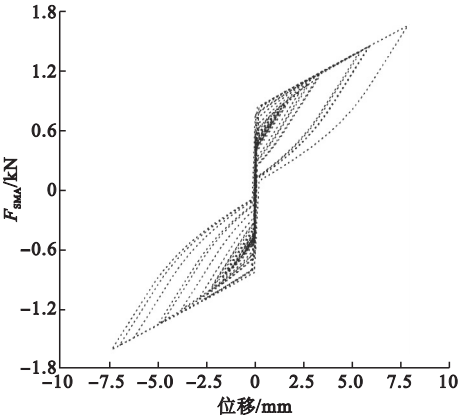


图9 Kobe地震激励下SMA阻尼器力-位移曲线

Fig. 9 The force-displacement curves of the SMA damper under Kobe earthquake records

表3 不同地震波作用下风电塔架结构顶点减振控制效果

Table 3 Vibration control performance for wind turbine tower structure system under different earthquakes

地震波	无控制		SMPD 控制				SMA-SMPD 控制			
	位移/m	加速度/ (m·s ⁻²)	位移/m	减震率/ %	加速度/ (m·s ⁻²)	减震率/ %	位移/m	减震率/ %	加速度/ (m·s ⁻²)	减震率/ %
El-Centro	0.207	3.359	0.155	25.12	3.128	6.88	0.129	37.68	3.123	7.03
Kobe	0.544	5.471	0.464	14.75	4.708	13.94	0.385	29.23	4.181	23.58
人工波	0.230	2.863	0.185	19.57	2.554	10.79	0.155	32.61	2.422	15.40

综合图表可以发现,不同地震波作用下 SMPD 和 SMA-SMPD 均能有效降低风电塔架结构的动力响应,而 SMA-SMPD 的减振效果明显优于 SMPD. 以 Kobe 地震作用为例,SMA-SMPD 的减振率均高于 SMPD 减震率;位移响应包络图中两种控制方案的塔身位移均比无控制时有所减小,而 SMA-SMPD 控制的塔身位移随高度的增加控制效果更优,而塔身最大加速度在上 1/3 高度位置. 从图 9 中可以发现,SMA 阻尼器力-位移滞回曲线饱满,说明该减振装置具有稳定的耗能能力,且随着位移幅值的增大,滞回环面积增大. SMA 阻尼器的行程为 ± 9 mm,SMA 阻尼器的屈服范围为 ± 2.1 kN 由试验确定^[19].

4.2 SMA-SMPD 布置位置的减振效果分析

建立 SMA-SMPD 分别布置在 13、12、11、10、9 号节点上 5 种布置方案. 调频控制结构第一振型,在 Kobe 地震激励下,提取 13 号节点的位移和加速度时程曲线进行对比分

析,计算 SMA-SMPD 对顶点位移、加速度峰值及均方根值的减震率. 不同布置位置的塔顶位移、加速度时程曲线如图 10、图 11 所示,位移、加速度峰值和均方根值减振控制效果见表 4.

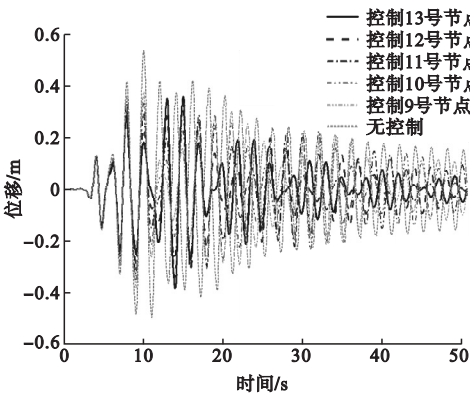


图10 Kobe地震激励下不同布置位置的塔顶位移响应

Fig. 10 The displacement response of the WTTs top in different positions under Kobe earthquake records

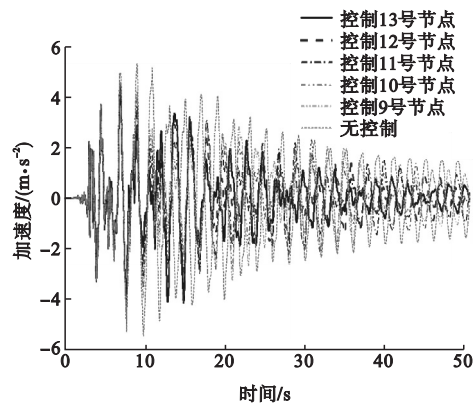


图 11 Kobe 地震激励下不同布置位置的塔顶加速度响应

Fig. 11 The acceleration response of the WTTs top in different positions under Kobe earthquake records

从图和表中可以发现,将 SMA-SMPD 布置在不同节点位置上均能降低风电塔架结构的动力响应,而布置在 13 节点上时的减振

效果最明显;随着布置位置的下移,顶点位移均方根值、加速度峰值、加速度均方根值的减震率逐渐降低,只有顶点位移峰值减震率先增大后减小.

4.3 SMA-SMPD 控制不同振型的减振效果分析

将 SMA-SMPD 布置在第 13 节点位置,分别将其频率调整到结构的前 5 阶频率进行对比分析.在 Kobe 地震激励下,提取 13 号节点的位移和加速度时程曲线,计算 SMA-SMPD 在控制不同振型时对顶点位移、加速度峰值及均方根值的减震率.控制结构前 5 阶振型时的塔顶位移、加速度时程曲线如图 12、图 13 所示,塔顶位移、加速度峰值和均方根值减振控制效果见表 5.

表 4 Kobe 波作用下不同布置位置的风电塔架结构顶点减振控制效果

Table 4 Vibration control performance for wind turbine tower structure peak in different positions under the Kobe earthquakes

控制位置	位移峰值/m	位移峰值减震率/%	位移均方根值/m	位移均方根值减震率/%	加速度峰值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	加速度峰值减震率/%	加速度均方根值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	加速度均方根值减震率/%
13 号节点	0.385	29.23	0.108	45.98	4.181	23.58	1.145	42.10
12 号节点	0.360	33.82	0.115	42.52	4.401	19.56	1.189	39.85
11 号节点	0.337	38.05	0.124	37.82	4.611	15.72	1.259	36.34
10 号节点	0.358	34.19	0.131	34.30	4.767	12.88	1.312	33.67
9 号节点	0.384	29.41	0.136	31.92	4.883	10.75	1.348	31.84
无控制	0.544	—	0.200	—	5.471	—	1.977	—

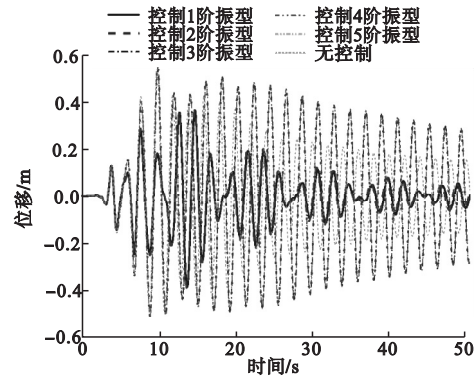


图 12 Kobe 地震激励下控制不同振型的塔顶位移响应

Fig. 12 WTTs displacement response with different vibration modes under Kobe earthquake records

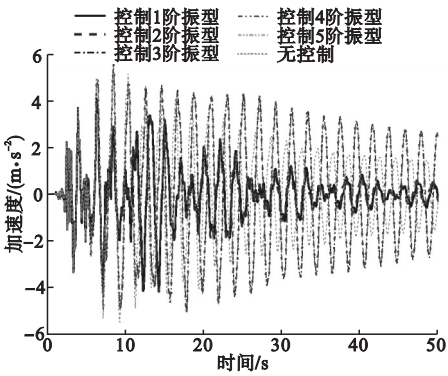


图 13 Kobe 地震激励下控制不同振型的塔顶加速度响应

Fig. 13 WTTs acceleration response with different vibration modes under Kobe earthquake records

表5 Kobe波作用下控制不同振型的风电塔架结构顶点减振控制效果

Table 5 Vibration control performance for wind turbine tower structure peak with different vibration modes under the Kobe earthquakes

控制振型	位移峰值/ m	位移峰值 减震率/%	位移均方 根值/m	位移均方根 值减震率/%	加速度峰值/ (m·s ⁻²)	加速度峰值 减震率/%	加速度均方 根值/(m·s ⁻²)	加速度均方根 值减震率/%
1阶振型	0.385	29.23	0.108	45.98	4.181	23.58	1.145	42.10
2阶振型	0.391	28.12	0.111	44.72	4.153	24.09	1.157	41.49
3阶振型	0.549	-0.96	0.277	-38.40	5.148	0.96	2.552	-29.05
4阶振型	0.549	-0.98	0.276	-37.85	5.554	-1.53	2.546	-28.75
5阶振型	0.549	-0.99	0.275	-37.71	5.587	-2.13	2.544	-28.67
无控制	0.544	—	0.200	—	5.471	—	1.977	—

综合分析图表可以发现,调整 SMA-SMPD 频率控制结构前两阶振型时,对顶点位移和加速度减振控制效果明显;当调整控制结构 3 至 5 阶频率时,对顶点位移和加速度无减振控制效果,且存在放大动力响应的现象.当控制 1 阶振型时,塔顶位移峰值、位移均方根值、加速度峰值、加速度均方根值减震率分别可以达到 29.23%、45.98%、23.58%、42.10%;而控制 3 阶振型时,塔顶位移峰值、位移均方根值、加速度峰值、加速度均方根值减震率分别降低到 -0.96%、-38.40%、0.96%、-29.05%.由于风电塔架这种高耸结构的地震响应以第一振型摆振为主^[20],为了获得对风电塔架结构更好的控制效果,应将 SMA-SMPD 调频至结构第一自振频率.

5 结 论

- (1)在地震活跃地区,地震作用对头重脚轻的高柔风电塔架结构的影响不容忽视,主观认为风荷载对其起控制作用而忽略地震作用是不严谨的.
- (2)SMA-SMPD 综合了 SMA 阻尼器和 TMD 两种减振装置的优点,超弹性滞回耗能能力对风电塔架这种高耸结构在不同的地震作用下均具有良好的控制效果.
- (3)风电塔架结构的顶端振动幅度较

大,为了避免塔架发生振动破坏,应将 SMA-SMPD 设置在结构顶点下方.

(4)风电塔架这种高耸结构地震响应以第一振型为主,应将 SMA-SMPD 频率调至结构第一阶频率附近,重点控制第一阶振型.

参考文献

[1] 阎石,牛健,于君元,等. 风力发电机塔架结构减震控制研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2016,36(1):75-83.
(YAN Shi,NIU Jian, YU Junyuan, et al. Review of vibration control research of wind turbine tower structures [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering,2016,36(1):75-83.

[2] 祝磊,许楠,高颖. 风力发电设备塔架结构设计指南及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
(ZHU Lei,XU Nan, GAO Ying. Guidelines for design of wind turbine support structures and foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014.)

[3] LAVASSAS I,NIKOLAIDIS G,ZERVAS P, et al. Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower [J]. Engineering structures,2003,25(8):1097-1106.

[4] WITCHER D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain [J]. Wind engineering,2005(8):81-91.

[5] PATIL A, JUNG S, KWON O S. Structural performance of a parked wind turbine tower subjected to strong ground motions [J]. Engineering structures,2016,120:92-102.

[6] SADOWSKI A J, CAMARA A, MALAGA-CHUQUITAYPE C,et al. Seismic analysis of a tall metal wind turbine support tower with realistic geometric imperfections [J]. Earthquake engineering and structural dynamics,2017,46:201-219.

- [7] 赵斌,马飞,陈建兵. 风力发电塔系统 TMD 控制振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2012,45(1):142-145.
(ZHAO Bin, MA Fei, CHEN Jianbing. Shake table experimental study on vibration control of wind turbine tower using TMD[J]. China civil engineering journal, 2012,45(1):142-145.)
- [8] 戴靠山,毛振西,赵志,等. 不同频谱特性地震动下某风电塔响应振动台试验研究[J]. 工程科学与技术,2018,50(3):125-133.
(DAI Kaoshan, MAO Zhenxi, ZHAO Zhi, et al. Shaking table test study on seismic responses of a wind turbine under ground motions with different spectral characteristics [J]. Advanced engineering sciences, 2018, 50 (3):125-133.)
- [9] 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.)
- [10] 李宏男, SINGH M P. 结构动力吸振摆的优化参数[J]. 世界地震工程, 1994(4):14-17.
(LI Hongnan, SINGH M P. Optimum parameters of vibration energy-dissipating pendulum for structures [J]. World earthquake engineering, 1994(4):14-17.)
- [11] 李宏男,宋本友. 高层建筑利用悬吊质量摆的减震研究[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(4):55-61.
(LI Hongnan, SONG Benyou. Seismic response reduction for tall buildings by suspended mass pendulums [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1995, 15 (4):55-61.)
- [12] YAN Shi, NIU Jian, MAO Peng, et al. Experimental research on passive control of steel frame structure using SMA wires [J]. Mathematical problems in engineering, 2013 (5):1-12.
- [13] 钱辉,李宏男,任文杰,等. 形状记忆合金复合摩擦阻尼器设计及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9):58-64.
(QIAN Hui, LI Hongnan, Ren Wenjie, et al. Experimental investigation of an innovative hybrid shape memory alloys friction damper [J]. Journal of building structures, 2011, 32 (9):58-64.)
- [14] 任文杰,李宏男,宋钢兵,等. 新型自复位 SMA 阻尼器对框架结构减震控制的研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6):14-20.
(REN Wenjie, LI Hongnan, SONG Gangbing, et al. Study on seismic response control of frame structure using innovative re-centring SMA damper [J]. China civil engineering journal, 2013, 46(6):14-20.)
- [15] 阎石,牛健. 基于风电塔架结构的智能材料耗能阻尼器研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020, 4:13-17.
(YAN Shi, NIU Jian. Research on intelligent material energy dissipating damper based on wind turbine tower Structures [J]. Intelligent building and intelligent city, 2020, 4:13-17.)
- [16] 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.)
- [17] 马哲,曾攀,雷丽萍. 考虑耦合效应的水平轴风力机有限元建模与变形行为分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(1):211-222.
(MA Zhe, ZENG Pan, LEI Liping. Finite element modeling and vibration analysis of wind turbine with the coupling effects [J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(1):211-222.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for seismic design of buildings; GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [19] 阎石,蒋欣欣,杜长虹,等. 一种新型变形可恢复 SMA 阻尼器力学性能的研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(4):96-102.
(YAN Shi, JIANG Xinxin, DU Changhong, et al. Mechanical performances of a new type of resilient SMA damper[J]. World earthquake engineering, 2020, 36(4):96-102.)
- [20] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
(LI Aiqun. Vibration control of engineering structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)