

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.175

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 风力机结构多重调谐质量阻尼器振动控制对比

唐家伟<sup>a</sup>, 张松涵<sup>a</sup>, 戴靠山<sup>a,b,c</sup>, 施袁锋<sup>a</sup>, 廖光明<sup>a</sup>

(四川大学 a. 土木工程系; b. 深地科学与工程教育部重点实验室; c. 破坏力学与工程防灾减灾  
四川省重点实验室, 成都 610065)

**摘要:** 单调谐质量阻尼器(STMD)作为一种有效的减振器,常安装在高层结构的顶部。由于结构的空间和承重有限,STMD的安装可能会受到限制,特别是对于如风力发电机这类结构。更重要的是,STMD对多模态振动控制效果有限。为了解决上述问题,采用多重调谐质量阻尼器(MTMD),在预先给定初始配置的基础上,研究风力机MTMD系统参数的约束优化问题。采用模态叠加法,综合考虑塔架位移、加速度和底部反力的影响,利用塔架响应相对于地面运动的传递函数,组合后得到阻尼器优化目标,并采用遗传算法搜索MTMD系统的最优设计参数。以某风力机模型为例,通过与经典Den Hartog公式的比较,验证了该方法设计的MTMD系统的工作效率。结果表明:所设计的MTMD系统可适用于多种工作模式,实际应用中具有更好的适用性。

**关键词:** 风电塔;地震响应;振动控制;质量阻尼器;参数优化

**中图分类号:** TU375.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0149-08

## Comparative study on MTMD vibration control of wind turbine structures

TANG Jiawei<sup>a</sup>, ZHANG Songhan<sup>a</sup>, DAI Kaoshan<sup>a,b,c</sup>, SHI Yuanfeng<sup>a</sup>, LIAO Guangming<sup>a</sup>

(a. Department of Civil Engineering; b. MOE Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering; c. Failure Mechanics & Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

**Abstract:** Single tuned mass damper (STMD), being an effective vibration absorber, is generally installed at the top of a flexible structure for vibration control. Due to the limited space, the design and installation of the STMD may be greatly restricted, especially for slender structures such as wind turbine towers. More importantly, the effect of STMD has been proved to be limited for the involvement of multiple modes. For the reasons above, the multiple tuned mass damper (MTMD) has been proposed. In the present work, the constrained parameter optimization of the MTMD system designed for the wind turbines is performed, based on the initial configuration given in advance. The transfer function from the ground motion to the

**收稿日期:** 2020-03-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(51878426);四川省国际合作项目(18GJHZ0111);中央高校基本科研业务费(20826041D4131)

**作者简介:** 唐家伟(1996-),男,主要从事风电塔减振研究, E-mail: jiawei.tang.scu@hotmail.com.

张松涵(通信作者),男,博士, E-mail: songhan.zhang@scu.edu.cn.

**Received:** 2020-03-30

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878426); International Collaboration Program of Sichuan Province (No. 18GJHZ0111); Fundamental Research Funds for Central Universities of China (No. 20826041D4131)

**Author brief:** TANG Jiawei (1996-), research interest: wind turbine tower vibration control, E-mail: jiawei.tang.scu@hotmail.com.

ZHANG Songhan (corresponding author), PhD, E-mail: songhan.zhang@scu.edu.cn.

response of the wind turbine tower is derived by means of modal superposition. A proper objective function is developed by comprehensively considering displacement, acceleration as well as based reaction forces. The genetic algorithm (GA) is employed for searching the optimal design parameters of the MTMD system. A wind turbine model is adopted as an example, and the working efficiency of the MTMD system is finally verified by comparing with the classical Den Hartog's formula. Results reveal that the designed MTMD system is feasible for control of multi-mode vibration, having potential value for broader practical applications.

**Keywords:** wind turbine; seismic response; vibration control; mass damper; parameter optimization

风能是世界上可再生能源之一,在过去 10 年中,其技术日趋成熟。为了进一步提高风能的转换能力,新设计的风力发电机组越来越高,导致结构振动问题凸显,引起了各国学者和工程人员的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。

现有的结构振动控制方式主要分为 3 种:被动控制、半主动控制和主动控制。风电塔的半主动和主动控制技术已有不少成果<sup>[7-11]</sup>,但工程中被动控制的实践应用更为广泛。Murtagh 等<sup>[12]</sup>在考虑气动效应和耦合作用时讨论了 TMD 的振动控制效果。Hussan 等<sup>[13]</sup>基于响应面法对风电塔 MTMD 参数优化进行了研究。Zuo 等<sup>[14]</sup>讨论了 MTMD 在风电塔中对于地震、风浪等多灾害的控制效果。张自立等<sup>[15]</sup>在风电塔上使用了一种球形减振器(BVA)。刘文峰等<sup>[16]</sup>设计了一种可用于风电塔中的调谐液体柱形阻尼器(TLCD)。戴靠山等<sup>[17]</sup>提出一种可应用于风电塔的调谐液体颗粒阻尼(TLPD)。Zhao 等<sup>[18]</sup>开发了一种剪刀式支撑粘滞阻尼器(VD-SJB)。Zhang 等<sup>[19]</sup>研究了风电塔上使用调谐式并联惯容质量系统(TPIMS)的可行性,旨在开发一种区别于传统 TMD 的轻型阻尼器。从经典的 Den Hartog 公式<sup>[20]</sup>开始,STMD 的优化设计在众多研究者的努力下得到进一步发展,使其更加成熟<sup>[21-22]</sup>。然而,对于 MTMD,由于优化目的和方法不同,其对应的参数优化设计也难以有公认的统一标准<sup>[23-24]</sup>。

笔者将研究优化后的 MTMD 系统在塔类结构中的应用。在不受外部荷载影响的情况下,通过考虑在基底简谐加速度激励下结构的相对位移、绝对加速度、底部剪力和弯矩的传递函数,从而组合得到频域内的目标函数,并利用遗传算法搜索 MTMD 的最佳参数。计算在风荷载和地震加速度作用下的结构动力响应,并与经典 Den Hartog 公式设计的

TMD 进行比较,验证该方法设计的 MTMD 控制效果。

## 1 风塔模型

以某一典型的 1.5 MW 风力发电机组塔为例,该塔主要由 Q345 钢制成,材料参数如下: $E=191$  GPa, $\rho=7\ 850$  kg/m<sup>3</sup>, $\nu=0.3$ ,叶片则由玻璃纤维增强材料(GRP)制成。塔筒直径从顶部的 2.955 m 到底部的 4.035 m 分段线性变化,塔总高度为 61.8 m,轮毂中心高为 63.3 m。风机的总质量  $m_s$  约为 184 t,塔顶包括机舱和叶片的附加质量  $m_b$  约为 93 t。塔筒整体大致轮廓如图 1 所示,具体细节见文献<sup>[1]</sup>。

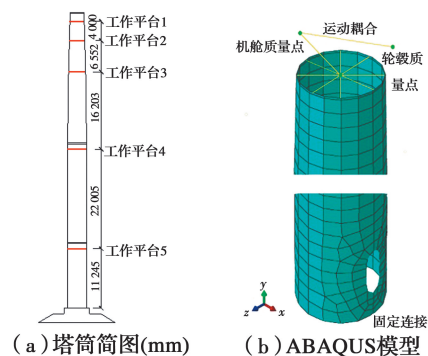


图 1 风电塔模型

Fig. 1 Wind Turbine Model

对该塔进行有限元建模,考虑到塔的截面变化,将塔分为  $m$  个高度不同的梁单元。整个塔的质量矩阵( $M_s$ )、刚度矩阵( $K_s$ )根据铁摩辛柯梁理论<sup>[25]</sup>计算,而阻尼矩阵  $C_s$  通过瑞利阻尼计算得到。由此,可以通过解决  $(K_s - \omega^2 M_s) \Phi = 0$  这一特征方程,得到塔的振动模态  $\Phi$  和圆频率  $\omega$ ,并通过自行开发的有限元分析工具箱(TFEA)进行相应的动力响应计算。

通过求解特征值问题,可得到塔的模式参数。作为对比研究,同样的塔也在 ABAQUS 有限元软件中建模,如图 1(b)所示,使用精细化单元网格的

壳单元约束底部边界,使其完全固定。

图 2 对比了两种有限元模型的塔身前后方向的归一化振型,表 1 分别列出了使用壳单元模型、TFEA 梁模型以及场地实测<sup>[27]</sup>得到的风塔频率值。从结果来看,TFEA 中的等效模型得到了较好的验证,将使用该等效的梁模型来进行讨论计算。

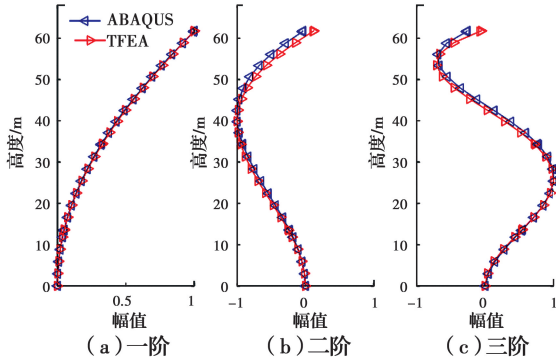


图 2 风电塔振型

Fig. 2 Vibration modes of wind turbine

表 1 不同方法计算的前后自振频率

Table 1 The fore-aft vibration frequency for different method

模态	实测	ABAQUS	TFEA
1	0.480	0.471	0.482
2	4.080	3.932	4.084
3		9.268	9.198

## 2 MTMD 设计

### 2.1 初始配置

如图 1 所示,该在役塔中共有 5 个工作平台可以用于设备承载,拟在平台上考察不同的 TMD 配置方案,TMD 的数量 1~5 个不等。每个 TMD 将进一步调整,以配合塔特定的振动模态,因此,MTMD 系统有大量可能的位置布置方式。其中,当 TMD 安装在模态峰值处时,工作效率较高,这一结论已得到验证。鉴于这一事实,这里考虑几个合理的配置进行比较研究。TMD 的所有布置描述如表 2 所示。

Case 1: 5 个 TMD 置于给定位置时,一些固定平台的位置靠近振型,可以利用它来调整不同的频率。

Case 2: 由于塔底位移较小,底部的 TMD 对能量耗散的贡献要小于上部的 TMD,由此,考虑了涉

及 3 个 TMD 的配置。

Case 3: 为了比较 MTMD 的控制效果,还考虑了单个 TMD,它位于塔的顶部且对结构的一阶模态进行调谐。

Case 4: 考虑在相同的位置和调谐阶次,采用经典 Den Hartog 公式进行比较。

表 2 MTMD 配置方案

Table 2 Configurations of MTMD

Case	TMD1	TMD 2	TMD 3	TMD 4	TMD 5
1	60.00(1)	56.00(1)	49.45(2)	33.25(2)	11.25(3)
2	60.00(1)	56.00(1)	49.45(2)		
3	61.80(1)				
4	61.80(1)				

注:表中数值代表 TMD 的安装高度,m;括号内的值表示 TMD 的调谐阶次。

### 2.2 参数优化

2.2.1 简化模型 风塔可简化建模为一伸臂梁结构,顶部附加相关的平动质量( $m_b$ )和转动惯量( $m_r$ )。如图 3 所示,MTMD 系统由固定在塔上的若干个 TMD 组成,每个 TMD 的设计包括其滑块质量( $m_t$ )、粘滞阻尼系数( $c_t$ )和弹簧刚度( $k_t$ )。实际工程中,由于塔身截面的变化,将塔身离散成多个高度和截面不同的单元后进一步进行组合,整个系统的运动方程如式(1)所示。

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\mathbf{L}\ddot{x}_g \\
 & \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_t \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s + \mathbf{P}^T \mathbf{K}_t \mathbf{P} & -\mathbf{P}^T \mathbf{K}_t \\ -\mathbf{K}_t \mathbf{P} & \mathbf{K}_t \end{bmatrix} \\
 & \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{P}^T \mathbf{C}_t \mathbf{P} & -\mathbf{P}^T \mathbf{C}_t \\ -\mathbf{C}_t \mathbf{P} & \mathbf{C}_t \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}_s$  分别为主结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{M}_t$ 、 $\mathbf{C}_t$ 、 $\mathbf{K}_t$  分别为 TMD 的质量、阻尼和刚度对角矩阵; $\mathbf{L}$  为输入惯性力的位置矩阵,  $\mathbf{L} = [1, 1, 1, \dots]^T$ ;  $\mathbf{P}$  是 TMD 的位置矩阵,维数为  $n \times m$ ,其中, $n$  为 TMD 的个数, $m$  为结构自由度的个数。

2.2.2 优化设计目标 众所周知,传递函数表示在各个频率下结构响应与激励的放大关系。因此,如果传递函数整体得到抑制,可以减小结构在外部激励下的振动响应,附加有 MTMD 结构的传递函数计算如文献[27]所示。基于此,本文的目标函数以频域内传递函数峰值的减少作为 TMD 优化设计依据,表示为

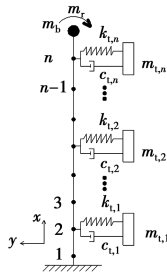


图 3 MTMD 系统力学模型

Fig. 3 Mechanical model of MTMD System

$$r_{i,j} = \frac{\max(|H_{(\omega_t)_{i,j}}|)}{\max(|H_{(\omega_s)_{i,j}}|)} \quad (2)$$

式中:  $\max(|H_{(\omega_t)_{i,j}}|)$  和  $\max(|H_{(\omega_s)_{i,j}}|)$  分别为有、无 TMD 时结构在第  $i$  阶模态下第  $j$  类响应传递函数的最大值。

TMD 优化目标函数可以写成式(3), 其中:  $\omega_i$  是  $i$  阶模态的权重因子;  $\eta_j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 为顶部位移、加速度、底部剪力、底部弯矩的权重因子, 可根据实际需求灵活赋值。欲控制顶部的位移, 可以定义一个更大的  $\eta_j$  值, 对于其他控制目标亦是如此。

$$\begin{cases} \text{Obj: } J = \min \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^4 \omega_i \eta_j r_{i,j} \\ \text{Subject to: } \mu = 0.01, 0.02, \dots, 0.10; k_{t,n} > 0, c_{t,n} > 0 \\ \text{Find: } f_{t,n,\text{opt}}, \xi_{t,n,\text{opt}} \text{ (for } n = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (3)$$

### 2.3 MTMD 优化

在上述基础上, 利用遗传算法对 TMD 参数进行优化。对于优化的目标函数, 根据每阶模态参与的不同, 选取各模态下的质量参与系数作为式(3)中定义的权重因子  $\omega_i$ , 考虑对前 3 阶模态进行相应的控制, 其中,  $\omega_1$  到  $\omega_3$  分别为 70.36%、11.96%、4.82%。而式(3)中  $\eta_j$  表示不同类型响应的权值因子, 假定各响应对 TMD 的影响程度相同, 即  $\eta_j$  值均为 1, 当然也可以根据实际需要进行调整。本次算例将 MTMD 的质量比拟定为所有 TMD 总质量与结构总质量的比值 ( $\mu = Nm_t/m_s$ ),  $N$  为 TMD 个数, 不同个数的 TMD 时, 单个的质量有所差异。

根据遗传算法优化方法<sup>[28]</sup>, 可得到各 TMD 不同高度和调谐方式下的最优调谐频率  $f_{\text{opt}} = \omega_t/\omega_s$  和阻尼比  $\xi_{\text{opt}} = c_t/(2m_t\omega_t)$ , 图 4 给出了 Case 1 下各 TMD 参数优化结果。Den Hartog<sup>[20]</sup> 采用定点理论推导了单自由度系统在基底简谐激励下的最优调谐频率和阻尼比, 分别为  $f_{\text{opt}} = \sqrt{1-0.5\mu}/(1+\mu)$ ,

$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{3\mu}/[8(1+\mu)(1-0.5\mu)]$ , 其曲线如图 4 中粗实线所示。该经典公式忽略了结构的自身阻尼且只进行单个优化目标, 而本文方法考虑了组合目标及结构阻尼的影响, 从图 4 中可看出, 该方式计算得到的 TMD 频率比、阻尼比与经典公式有所差异, 其最佳参数值随高度和调谐阶次有所变化。

通过优化计算得到的目标函数适应度值在不同质量比下的结果如图 5 所示, 其中, Case 1 和 Case 2 均小于 Case 3 和 Case 4, 说明高阶模态对其结构的响应也有所贡献, 在实际计算过程中应当予以考虑。

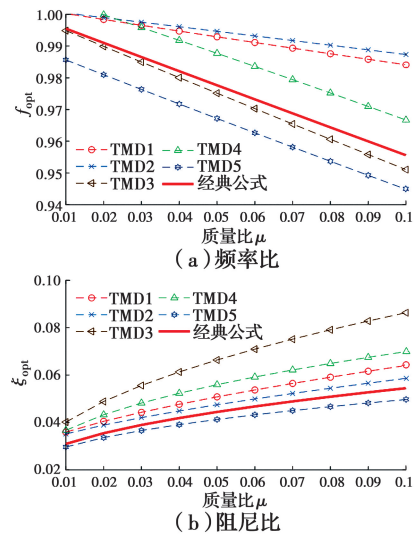


图 4 不同 TMD 高度和调谐阶次下的最佳频率比和阻尼比  
Fig. 4 Optimal tuning ratio and damping ratio of TMD for different heights and tuning modes

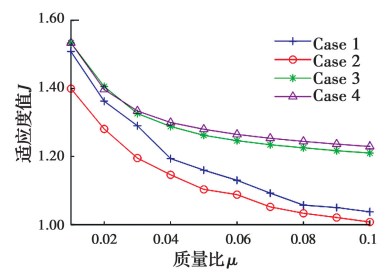


图 5 不同质量比下各方案的最优适应度值  
Fig. 5 Optimal fitness value of each cases considering different mass ratios

## 3 控制效果比较

### 3.1 荷载设置

为了比较不同 MTMD 情况下和 STMD 情况下的减振效果, 在该塔上分别施加了风荷载和地震激励, 忽略两者之间的组合效应。对于风荷载, 考虑了在停机工况下的情形, 通过在 FAST 软件<sup>[29]</sup> 中建模并

生成相应的风速,进而转换成相应的风荷载。FAST 软件中使用冯卡门风谱作为生成风速的依据,其中部分参数如下:轮毂处平均风速为 42.5 m/s、风速标准差为 6.081 m/s、湍流强度为 42.0 m,所生成的轮毂处风速功率谱密度(PSD)如图 6(a)所示。对于地震激励,选择了两种典型的地震动记录(EI Centro 波和 Kobe 波),以及功率谱密度为 1 ((m/s)<sup>2</sup>/Hz) 的白噪声作为基底激励,其对应的功率谱值如图 6(b)所示。

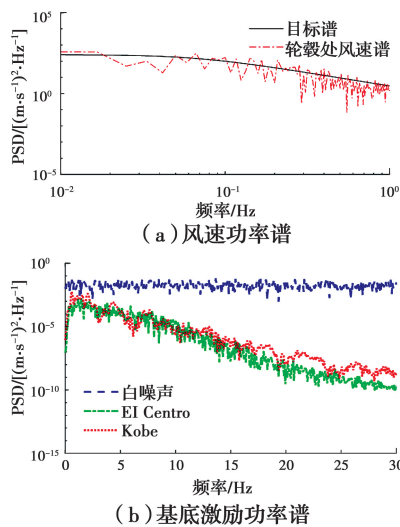


图 6 轮毂处风速和基底激励功率谱  
Fig. 6 PSD values of wind speeds at the hub and base excitations

### 3.2 时程比较

为了对减振效果进行全面的评价,定义了一系列指标,表示为

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 1 - \frac{\max(x_t)}{\max(x_u)}, R_2 = 1 - \frac{\max(a_t)}{\max(a_u)}, \\
 R_3 &= 1 - \frac{\max(Q_t)}{\max(Q_u)}, R_4 = 1 - \frac{\max(M_t)}{\max(M_u)}, \\
 R_5 &= 1 - \frac{\text{rms}(x_t)}{\text{rms}(x_u)}, R_6 = 1 - \frac{\text{rms}(a_t)}{\text{rms}(a_u)}, \\
 R_7 &= 1 - \frac{\text{rms}(Q_t)}{\text{rms}(Q_u)}, R_8 = 1 - \frac{\text{rms}(M_t)}{\text{rms}(M_u)} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中: $x$  和  $a$  为塔顶位移和加速度; $Q$  和  $M$  为塔底剪力和弯矩,下标  $t$  和  $u$  分别表示有、无 TMD 控制的状态。由于这些响应都是时间函数,所以,考虑了结构响应的最大绝对值和均方根值,以便更直观地验证 MTMD 的有效性。利用 Newmark- $\beta$  方法计算风荷载和地震激励下塔架的时程响应,图 7 绘出了当 TMD 总质量比为 0.04 时各载荷下结构顶部相对地

面位移的响应曲线。

对于风荷载的情况,由于风荷载的平均值是非零的,响应包含静态部分和脉动部分,在评价减振效果时,主要考虑其脉动响应。风荷载的频率主要在低频段,从长期来看,单个 TMD 在控制风荷载方面效果更好,Case 3 显示出对于抑制一阶响应更为有效。在地震响应中,由于所包含的频率更广,MTMD 的控制能力得到更加充分的发挥。同时也表明 TMD 在以上优化过程中得到的最佳参数也可以用于风荷载作用下的结构控制并取得较好效果,若考虑风荷载下的结构响应目标函数,可优化获得一组新的 MTMD 参数,但尽管如此,本文设计所得的最优 MTMD 已证实除地震以外的其他工况下均有良好的鲁棒性。

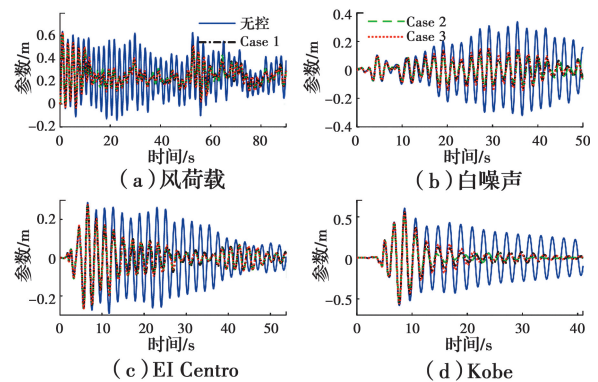


图 7 不同激励下的顶部位移响应

Fig. 7 Displacement responses at the top of tower under different excitations

根据时域响应计算出式(4)中各指标,表示阻尼器减振效率。从图 8 和图 9 可以看出,质量比越大,TMD 阻尼器能量耗散越大,减振效果越好。将 Den Hartog 公式得到的结果与本文提出的方法进行了比较,可以在图 8 和图 9 中看到,在单个 TMD 质量比相同时,无论是峰值还是均方值的控制指标,Case 3 和 Case 4 两种方式下结构的响应同样都得到了较好的控制,且 Case 3 的控制效果略微占优。当同等质量大小的单个 TMD 分成多个小质量块时,MTMD 同样也能有效地控制系统的响应,而且能减轻高阶模态引起的底部应力。

对于响应峰值指标,MTMD 可以避免单个 TMD 失谐的情况,在不同外部激励下均能起到相应的控制能力,如图 8 所示,在 Kobe 地震激励和风荷载的 R2 指标中,Case 1 和 Case 2 的作用效果好于

单个 TMD 的情况。对于均方值指标, MTMD 控制结构一阶的部分较单个 TMD 时更少, 其中一部分用于控制结构的高阶部分, 但对响应的抑制效果都比较好。此外, 从结果可以看出, 即使 TMD 的位置已确定, 但在振型模态峰值附近位置处, 也可以通过

合理设计达到减振的目的, 适用于在役使用中无法添置新工作平台的塔类结构。且该方法设计的 MTMD 系统, 结构响应中的主导模态与 TMD 设计时的模态基本一致, 能获得较好的鲁棒性, 而在大多数条件下, 这一前提条件并不难实现。

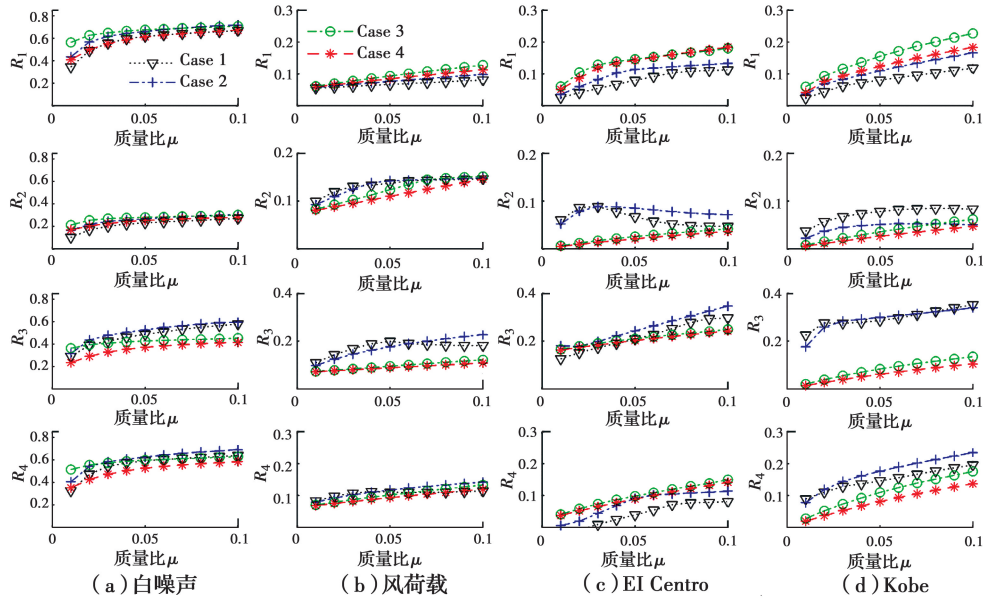


图 8 随质量比增大的峰值减震指标对比

Fig. 8 Comparison of peak value indicators with increasing mass ratio

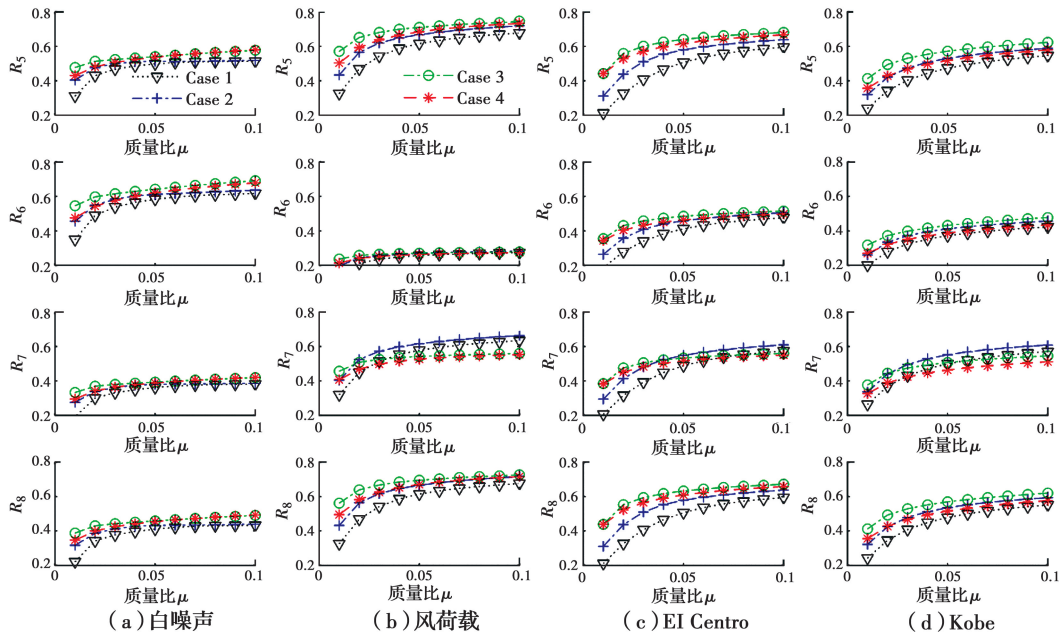


图 9 随质量比增大的均方值减震指标对比

Fig. 9 Comparison of RMS value indicators with increasing mass ratio

#### 4 结论

提出了一种基于传递函数和遗传算法优化相结

合的风电塔 MTMD 系统优化设计方法, 该方法考虑了各个 TMD 只能安装在少数几个特定位置的客观条件。利用结构的传递函数作为 TMD 优化的依

据,通过遗传算法优化得到阻尼器的最佳参数。该方法可以实现 MTMD 的鲁棒性设计,并在考虑一系列基底激励和风荷载的情况下进行数值研究,得出以下结论:

1)设计的 MTMD 系统从降低传递函数的峰值入手进行优化,在不同激励情况下具有稳定的减振性能,并验证了该方法在实际应用中的可行性。

2)所提出的目标函数涉及多个指标,包括选定模态下的塔顶位移、塔顶加速度、塔底剪力和弯矩,而不是单一项。权重因子可以根据实际需求灵活定义。结果表明,该系统能够满足大部分要求,为 TMD 装置的应用提供了广阔的空间。

3)采用该方式设计得到的 STMD 参数较经典公式更为合理,减振效果可提高约 5%。在减振性能相当时,使用 MTMD 有助于减轻塔顶集中荷载,提高结构的稳定性。且用该方式得到的参数不仅适用于地震激励,同样适应于风荷载作用,具有良好的鲁棒性。在风和地震的组合作用下,TMD 装置的工作环境将更为复杂,参数设计需深入论证。

#### 参考文献:

- [1] SADOWSKI A J, CAMARA A, MÁLAGA-CHUQUITAYPE C, et al. Seismic analysis of a tall metal wind turbine support tower with realistic geometric imperfections [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46(2): 201-219.
- [2] 戴靠山,赵志,毛振西. 风力发电塔筒极端动力荷载作用下破坏的对比研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(15): 252-257, 272.
- DAI K S, ZHAO Z, MAO Z X. Failure of a wind turbine tower under extreme dynamic loads [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(15): 252-257, 272. (in Chinese)
- [3] WANG Y, DAI K S, XU Y F, et al. Field testing of wind turbine towers with contact and noncontact vibration measurement methods [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 04019094.
- [4] AUSTIN S, JERATH S. Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2017, 8(3): 323-331.
- [5] 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 K S, MAO Z X, ZHAO Z, 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. (in Chinese)
- [6] ZHAO Z, DAI K S, CAMARA A, et al. Wind turbine tower failure modes under seismic and wind loads [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(2): 04019015.
- [7] BRODERSEN M L, BJØRKE A S, HØGSBERG J. Active tuned mass damper for damping of offshore wind turbine vibrations [J]. *Wind Energy*, 2017, 20(5): 783-796.
- [8] FITZGERALD B, BASU B, NIELSEN S R K. Active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(12): 1377-1396.
- [9] LACKNER M A, ROTE A M. Structural control of floating wind turbines [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(4): 704-719.
- [10] FITZGERALD B, SARKAR S, STAINO A. Improved reliability of wind turbine towers with active tuned mass dampers (ATMDs) [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 419: 103-122.
- [11] HU Y Q, HE E M. Active structural control of a floating wind turbine with a stroke-limited hybrid mass damper [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 410: 447-472.
- [12] MURTAGH P J, GHOSH A, BASU B, et al. Passive control of wind turbine vibrations including blade/tower interaction and rotationally sampled turbulence [J]. *Wind Energy*, 2008, 11(4): 305-317.
- [13] HUSSAN M, SHARMIN F, KIM D. Multiple tuned mass damper based vibration mitigation of offshore wind turbine considering soil-structure interaction [J]. *China Ocean Engineering*, 2017, 31(4): 476-486.
- [14] ZUO H R, BI K M, HAO H. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards [J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 303-315.
- [15] 张自立,陈建兵,李杰. 圆球减振装置对风力发电高塔

- 的振动控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 144-149.
- ZHANG Z L, CHEN J B, LI J. Investigation on vibration control of wind turbines using a ball vibration absorber [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 144-149. (in Chinese)
- [16] 刘文峰, 陈建兵, 李杰. 大型海上风力发电高塔随机最优减震控制[J]. 土木工程学报, 2012, 45(Sup2): 22-26.
- LIU W F, CHEN J B, LI J. Stochastic optimal vibration control of offshore wind turbine tower systems using TLCD [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup2): 22-26. (in Chinese)
- [17] 戴靠山, 王健泽, 毛日丰, 等. 新型风电塔减振器的概念设计和试验初步验证[J]. 土木工程学报, 2014, 47(Sup1): 90-95.
- DAI K S, WANG J Z, MAO R F, et al. Conceptual design and shaking table test of a new passive damper for wind turbine towers [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup1): 90-95. (in Chinese)
- [18] ZHAO Z, DAI K S, LALONDE E R, et al. Studies on application of scissor-jack braced viscous damper system in wind turbines under seismic and wind loads [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109294.
- [19] ZHANG R F, ZHAO Z P, DAI K S. Seismic response mitigation of a wind turbine tower using a tuned parallel inerter mass system [J]. Engineering Structures, 2019, 180: 29-39.
- [20] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations [M]. John Siley and Sons, Inc, 1957.
- [21] WARBURTON G B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(3): 381-401.
- [22] 潘毅, 包韵雷, 国巍, 等. 摆式电涡流 TMD-钢框架结构的耦合计算方法与减震分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 84-93.
- PAN Y, BAO Y L, GUO W, et al. Coupling calculation method and seismic analysis of pendulum eddy current TMD-steel frame structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 84-93. (in Chinese)
- [23] ELIAS S, MATSAGAR V, DATTA T K. Effectiveness of distributed tuned mass dampers for multi-mode control of chimney under earthquakes [J]. Engineering Structures, 2016, 124: 1-16.
- [24] JANGID R S, DATTA T K. Performance of multiple tuned mass dampers for torsionally coupled system [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(3): 307-317.
- [25] 杜柏松, 项海帆, 葛耀君, 等. 剪切效应梁单元刚度和质量矩阵的推导及应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 502-507.
- DU B S, XIANG H F, GE Y J, et al. Derivation and application of 3D-beam's element stiffness and mass matrix with shear effect [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(4): 502-507. (in Chinese)
- [26] DAI K S, HUANG Y C, GONG C Q, et al. Rapid seismic analysis methodology for in-service wind turbine towers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(3): 539-548.
- [27] 涂文戈, 邹银生. MTMD 减震结构体系的频域分析 [J]. 工程力学, 2003, 20(3): 78-88.
- TU W G, ZOU Y S. Analysis of multistory structures with MTMD in frequency domain [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 78-88. (in Chinese)
- [28] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- LEI Y J, ZHANG S W. Matlab genetic algorithm toolbox and its application [M]. Version 2.0. Xi'an: Xidian University Press, 2014. (in Chinese)
- [29] NREL. NWTTC Information Portal (FAST) [EB/OL]. <https://www.nrel.gov/wind/nwtc.html>.

(编辑 王秀玲)