

文章编号: 1000-8608(2022)04-0433-08

基于人工蜂群算法的海上风机 TMD 振动控制研究

卢东哲¹, 王文华^{*1}, 李昕¹, 韩付成¹, 李颖²

(1. 大连理工大学 建设工程学部 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 浙江科技学院 中德工程师学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 海上风机(OWT)因其高度大、横截面小, 在风、浪联合作用下极易产生振动和变形。目前工业建筑领域常用的被动控制方法, 如调谐质量阻尼器(TMD)、多重调谐质量阻尼器(MTMD)、调谐液体柱型阻尼器(TLCD)等被广泛应用于控制海上风机在极端和疲劳工况下的结构反应。针对 5 MW 导管架式海上风机结构开展被动控制研究, 建立了随机激励作用下海上风机一阶弯曲自由度和 TMD 水平运动自由度的两自由度简化数值仿真模型, 以塔筒顶部位移标准差为优化目标, 利用人工蜂群(ABC)算法对 TMD 的刚度及阻尼参数进行优化。在 FAST 中建立了空气动力-水动力-结构动力-控制系统整体耦合仿真模型并进行动力分析, 对优化后的单频 TMD 在正常和停机工况下的适用性及其减振机理进行研究。结果表明: 基于两自由度简化模型并以人工蜂群算法优化后的 TMD 可有效降低塔筒顶部位移标准差; 在停机工况下, 塔筒顶部位移的主控频率为海上风机基频, 所提出的 TMD 简化优化设计模型是合理的, 可用于开展对导管架式海上风机一阶模态的 TMD 参数优化设计; 在正常工况下, 塔筒顶部位移的主控频率为风频, 在此工况下海上风机响应的控制需要考虑风、浪随机激励的影响。

关键词: 海上风机; 振动控制; 调谐质量阻尼器; 人工蜂群(ABC)算法

中图分类号: TV3

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202204013

0 引言

服役期间, 海上风机结构在风、浪作用下易产生振动和变形, 常因疲劳、失稳等原因发生破坏^[1]。而调谐质量阻尼器(TMD)因其简单性和实用性成为国内外学者解决海上风机结构减振问题的研究热点。Lackner 等^[2]、Ghassem-pour 等^[3]基于单桩式海上风机整体耦合模型, 通过穷举法试算了多组 TMD 质量、刚度和阻尼参数, 分别以等效疲劳荷载和塔筒顶部位移为评价指标确定最优 TMD 参数。Stewart 等^[4-5]建立了两自由度的单桩式海上风机-TMD 运动方程, 在给定 TMD 质量参数下基于遗传算法得到最优 TMD 刚度、阻尼参数, 并以疲劳寿命为评价指标验证了优化后的 TMD 减振效果。贺尔铭等^[6]建立浮式风机-TMD 的耦合动力模型, 利用穷举法得到最优

TMD 参数并在多种典型工况下对其进行模拟仿真, 结果表明经过参数优化后的 TMD 能够明显抑制驳船式风机叶片和塔筒振动。金鑫等^[7]基于海上风机-TMD 两质点简化计算模型, 以动力放大系数为优化目标利用单纯形遗传算法搜索最优 TMD 刚度和阻尼参数, 探讨了经过参数优化后的 TMD 对海上风机结构关键部位位移和荷载的影响。

本文建立包含海上风机结构一阶弯曲自由度和 TMD 水平运动自由度的两自由度简化数值仿真模型, 并基于此采用人工蜂群(ABC)算法^[8]对 TMD 的刚度和阻尼参数进行优化设计。进一步, 基于空气动力-水动力-结构动力-控制系统整体耦合分析方法, 利用 FAST v8^[9]建立导管架式海上风机-TMD 整体耦合计算模型对优化后的 TMD 在正常和停机工况下的适用性及其减振机理进行

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2022-05-31。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001052, 51909238)。

作者简介: 卢东哲(1995-), 女, 博士生, E-mail: ludongzhe@mail.dlut.edu.cn; 王文华*(1989-), 男, 博士, 副教授, E-mail: whwanghydro@dlut.edu.cn。

研究,为导管架式海上风机结构的被动控制研究提供一定的参考.

1 基于海上风机简化模型的 TMD 优化理论

1.1 海上风机-TMD 两自由度计算理论

基于小变形假定,选取海上风机结构一阶弯曲模态和 TMD 水平运动作为主自由度,将海上风机-TMD 结构简化为两自由度体系,随机激励 $W(t)$ 作用下海上风机-TMD 两自由度体系计算模型如图 1 所示,可得如式(1)、(2)所示运动方程^[10]:

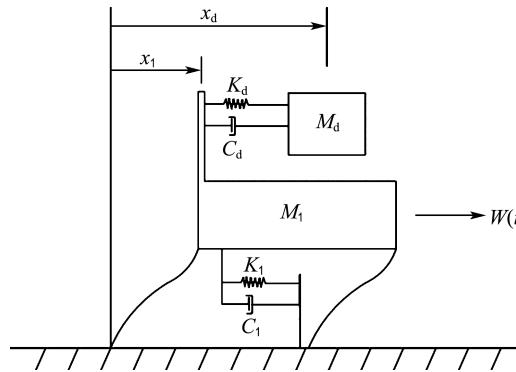


图 1 海上风机-TMD 两自由度简化计算模型

Fig. 1 Simplified two degrees of freedom numerical model of OWT-TMD

$$M_1 \ddot{x}_1 + (C_1 + C_d) \dot{x}_1 + (K_1 + K_d) x_1 - C_d \dot{x}_d - K_d x_d = W(t) \quad (1)$$

$$M_d \ddot{x}_d + C_d (\dot{x}_d - \dot{x}_1) + K_d (x_d - x_1) = 0 \quad (2)$$

式中: M_1 、 C_1 、 K_1 分别为简化后海上风机结构的质量、阻尼和刚度; x_1 、 \dot{x}_1 、 \ddot{x}_1 分别为海上风机结构相对于地面的位移、速度和加速度; M_d 、 C_d 、 K_d 分别为 TMD 的质量、阻尼和刚度; x_d 、 \dot{x}_d 、 \ddot{x}_d 分别为 TMD 相对于地面的位移、速度和加速度.

为便于建立结构位移响应方差数学模型,假定随机激励为白噪声随机过程,其频谱密度为 S_0 ,利用维纳-辛钦关系,基于传递函数解法^[10],便可推导出海上风机结构位移反应 x_1 方差:

$$\sigma_{x_1} = \left[\frac{S_0}{4M_1^3\omega_1^3} \left(\frac{B_1 \zeta_d^3 + B_2 \zeta_d^2 + B_3 \zeta_d + B_4}{D_1 \zeta_d^3 + D_2 \zeta_d^2 + D_3 \zeta_d + D_4} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

其中

$$D_1 = 4\zeta_1(1+\mu)f^2$$

$$D_2 = (\mu + 4\zeta_1^2)f + 4\zeta_1^2(1+\mu)f^3$$

$$D_3 = \zeta_1[1 + (1+\mu)^2f^4] + 2\zeta_1f^2(2\zeta_1^2 - 1)$$

$$D_4 = \zeta_1^2\mu f^3$$

$$B_1 = 4(1+\mu)f^2$$

$$B_2 = 4\zeta_1 f [1 + (1+\mu)f^2]$$

$$B_3 = 1 + (4\zeta_1^2 - \mu - 2)f^2 + (1+\mu)^2f^4$$

$$B_4 = \zeta_1\mu f^2$$

式中: μ 为质量比, $\mu = M_d/M_1$; ω_1 为海上风机结构的角频率, $\omega_1 = \sqrt{K_1/M_1}$; ω_d 为 TMD 的角频率, $\omega_d = \sqrt{K_d/M_d}$; f 为频率比, $f = \omega_d/\omega_1$; ζ_1 为海上风机结构的阻尼比, $\zeta_1 = C_1/2\sqrt{M_1 K_1}$; ζ_d 为 TMD 的阻尼比, $\zeta_d = C_d/2\sqrt{M_d K_d}$.

1.2 基于人工蜂群算法的 TMD 参数优化方法

人工蜂群算法是一种基于蜂群智能行为的优化算法,在解决多变量函数优化问题时,相比于遗传算法、粒子群算法和粒子群进化算法,其优点在于鲁棒性强,在每次迭代过程中都会进行全局和局部的最优解搜索,可避免陷入局部极值^[11],且收敛速度快.

人工蜂群算法通常依据雇佣蜂、观察蜂、侦查蜂寻找最佳蜜源,其过程分为 4 个阶段.

(1) 初始阶段

根据种群大小,确定雇佣蜂数量 n_f 、每个解的优化次数 l 和循环次数 c ,在搜索空间 $[x_j^{\min}, x_j^{\max}]$ 内采用 Tent 映射方法产生的 z_{ij} 生成与雇佣蜂个数相同的初始解 x_{ij} ,如式(4)所示:

$$x_{ij} = x_j^{\min} + z_{ij} (x_j^{\max} - x_j^{\min}); \quad i=1, 2, \dots, n_f, j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中: m 为解的维度; x_j^{\min} 、 x_j^{\max} 分别代表第 j 维解的最小值、最大值.

(2) 雇佣蜂阶段

每只雇佣蜂利用其当前解 x_{ij} 计算其蜜源量 f_i 和适应度 g_i ,适应度计算如式(5)所示,并采用式(6)随机搜索新解 x'_{ij} . 在得到新解后,采用式(5)重新计算其蜜源量 f'_i 和适应度 g'_i ,当新解的适应度 g'_i 大于旧解的适应度 g_i 时,采用新解继续搜索,否则被抛弃.

$$g_i = \begin{cases} 1/(1+f_i); & f_i > 0 \\ 1 + |f_i|; & f_i \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$x'_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) + \psi_{ij} (x_{bj} - x_{ij}) \quad (6)$$

式中: f_i 为第 i 个食物源的蜜源量,即第 i 个解的目标函数值; k 为随机选择索引, $k=1, 2, \dots, n_f$ 且 $k \neq i$; φ_{ij} 为 $[-1, 1]$ 的随机数; ψ_{ij} 为 $[0, 1.5]$ 内的均匀随机数; x_{bj} 为第 j 维全局最优解; x'_{ij} 为生成的新解.

(3) 观察蜂阶段

观察蜂依据式(7)计算得到适应度分布概率 p_i , 并在 $[0, 1]$ 产生一个随机值 r , 当 $r < p_i$ 时, 则进行雇佣蜂阶段。

$$p_i = g_i / \sum_{i=1}^{n_f} g_i \quad (7)$$

(4) 捣查蜂阶段

当达到指定的优化次数 l 后仍未找到符合要求的蜜源, 则雇佣蜂和观察蜂转变为捣查蜂, 并采用式(8)将当前解 x_{ij} 修正为 x_{ij}^* :

$$x_{ij}^* = x_{ij} + l_\beta (x_{bj} - x_{ij}) \quad (8)$$

其中 l_β 为 Levy 飞行步长。

本研究以白噪声随机过程下海上风机-TMD 两自由度简化模型所得结构位移标准差最小为优化目标, 采用人工蜂群算法开展适用于海上风机结构一阶弯曲自由度被动调谐减振控制的 TMD 刚度和阻尼参数优化设计研究, 提出的优化设计流程如图 2 所示。

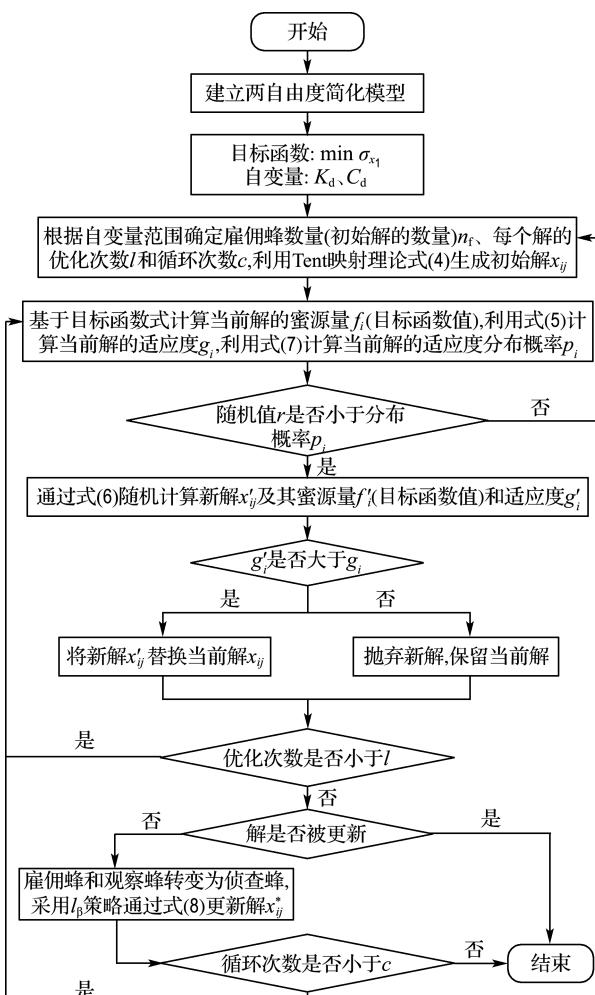


图 2 人工蜂群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of ABC algorithm

2 海上风机及设计工况

2.1 海上风机

本文基于美国可再生能源实验室(NREL)开发的 5 MW^[12]海上风机模型开展振动控制分析, 该模型主要参数如表 1 所示。根据 5 MW 海上风机切入和额定转速可确定 1 P 和 3 P 允许的频率为 0.22~0.32 Hz。海上风机基础结构采用 OC4 项目导管架基础结构^[13], 基础顶面长和宽均为 9.6 m, 基础底面长和宽均为 12 m, 导管架基础结构参数如图 3 所示。基础结构杆件的弹性模量 E 为 210 GPa, 剪切模量 G 为 80.8 GPa, 密度 ρ 为 7 850 kg · m⁻³。

表 1 NREL 5 MW 基准风机主要参数

Tab. 1 Main parameters of NREL 5 MW baseline wind turbine

额定功率/MW	转子布局/方向	控制方式	转子、轮毂	轮毂中心高度/m
5	逆风、3 叶片	变速、变桨	126、3	90、87.6
切入、额定、切出 风速/(m · s ⁻¹)	切入、额定转速/ (r · min ⁻¹)	转子质量/kg	机舱质量/kg	
3、11.4、25	6.9、12.1	110 000	240 000	

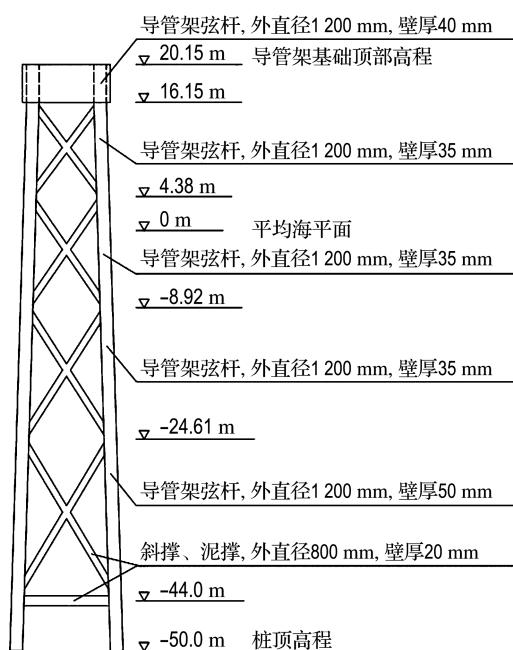


图 3 导管架基础结构参数

Fig. 3 Parameters of jacket substructure

2.2 设计工况

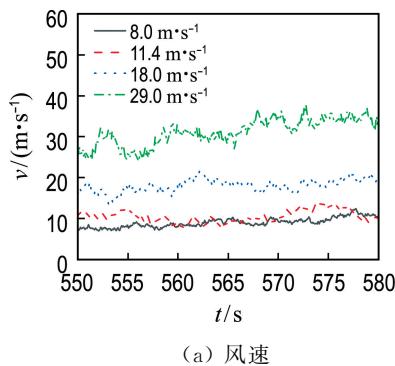
根据我国东南海域实测海况数据和表 1 所列

的 5 MW 基准风机运行风速区间,为研究不同运行状态下海上风机的动力特性和 TMD 控制效果,依据 GB/T 31517—2015 规范^[14]选取典型风、浪荷载组合,如表 2 所示。利用 TurbSim^[15]基于 IEC Kaimal 湍流模型生成脉动风速时程,基于 JONSWAP 谱拟合得到随机波高时程,得到的风速和波高时程曲线如图 4 所示。

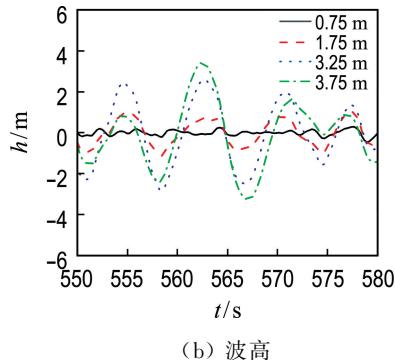
表 2 设计荷载工况

Tab. 2 Design load cases

工况 编号	平均风速/ (m·s ⁻¹)	有义波 高/m	谱峰周 期/s	运行 状态	控制策略
1	8.0	0.75	4.5	正常运行	变速
2	11.4	1.75	6.5	正常运行	变速、变桨
3	18.0	3.25	8.5	正常运行	变速、变桨
4	29.0	3.75	11.5	停机	顺桨,高速 传动轴制动



(a) 风速



(b) 波高

图 4 风速和波高时程曲线

Fig. 4 The time-history curves of the wind speed and wave height

3 优化设计 TMD 减振效果研究

由海上风机-TMD 两自由度体系计算模型计算得到单自由度海上风机结构一阶固有频率为 0.318 Hz。TMD 与海上风机结构的质量比取值

范围一般为 0.5%~2.0%^[16]。该样本海上风机 M_1 为 454 872 kg,本文拟定质量比为 2.0%,则 TMD 质量为 9 097 kg。拟定 TMD 刚度优化取值为 30 000~150 000 N·m⁻¹,阻尼优化取值为 1 000~20 000 N·s·m⁻¹。运用 1.2 节基于简化模型的 TMD 参数优化设计流程,经过 20 次迭代优化得到当 TMD 质量为 9 097 kg 时,对应的最优刚度和阻尼分别为 $K_d = 35 666 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $C_d = 2 527 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,迭代过程如图 5 所示。

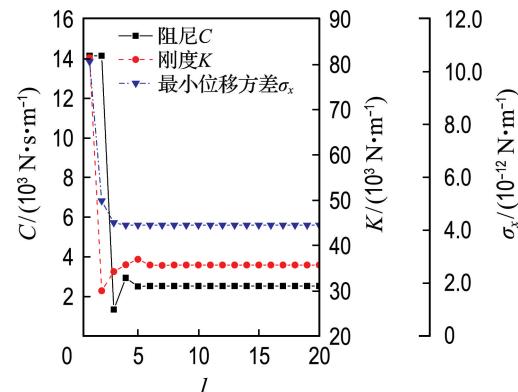


图 5 优化迭代过程

Fig. 5 Optimization iterative process

3.1 FAST 整体耦合计算模型

基于 FAST 建立空气动力-水动力-结构动力-控制系统整体耦合计算模型开展海上风机整体结构动力响应时域计算,具体如下:

FAST 主程序读入导管架式海上风机整体结构模型输入文件;将风速时程文件和海况文件分别导入脉动风模块和水动力模块,利用气弹分析模块和水动力模块进行气弹性和水动力分析,得到气动力荷载和水动力荷载;依据风机运行状态,伺服控制模块启动相应控制策略,在伺服控制模块里调用 TMD 程序进行结构振动控制;弹性动力模块和基础结构模块开展整体结构动力反应分析从而得到整体结构位移、内力等动力响应参数。

各设计工况下风、浪作用方向均沿图 6 所示整体坐标系 x 轴正方向。模拟总时长为 630 s,计算步长为 0.005 s。利用 FAST 在机舱内前后方向(图 6 所示整体坐标系 x 轴方向)建立一个单自由度 TMD 模型,主要包括质量、刚度和阻尼 3 个参数,并基于相关假定将弹性恢复力、阻尼力和惯性力的合力反作用于海上风机结构。上述耦合振动控制过程通过 FAST 中伺服控制模块 TMD 子程序^[17]与弹性动力模块的耦合数值仿真计算来

实现, FAST 各模块的耦合分析流程如图 7 所示。

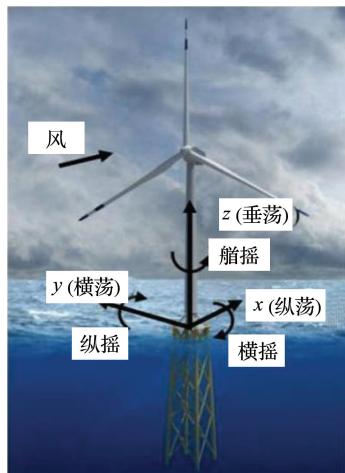


图 6 导管架式海上风机整体坐标系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of global coordinate system of the jacket-type OWT

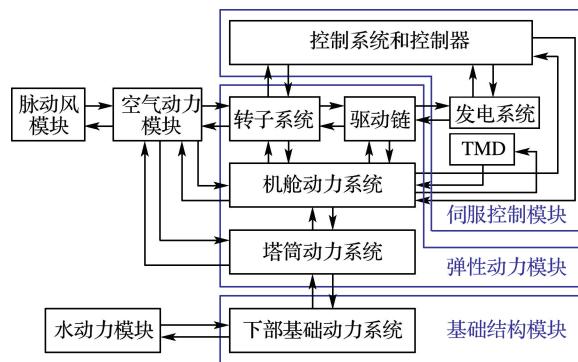


图 7 FAST 海上风机整体耦合模型分析流程

Fig. 7 OWT fully coupled model analysis process in FAST

3.2 TMD 参数验证

通过自由衰减测试工况验证基于海上风机-TMD 两自由度简化模型并优化后的 TMD 减振控制效果沿塔筒顶部 x 轴方向施加 1.0 m 初始位移, 得到有无 TMD 塔筒顶部位移时域、频域响应如图 8、9 所示。由图可知, 优化后 TMD 有效地控制了以结构基频为主控频率的海上风机塔筒顶部位移自由衰减时程。

3.3 TMD 减振效果研究

本文选取 4 种代表性工况, 以响应标准差减小率为评价指标研究被动控制 TMD 对不同运行状态下降海风机控制效果。为消除初始瞬态效应, 去除前 30 s 数据进行统计得到响应标准差, 按照式(9)计算得到各工况下响应标准差减小率, 各工况最优 TMD 参数减振效果见表 3。

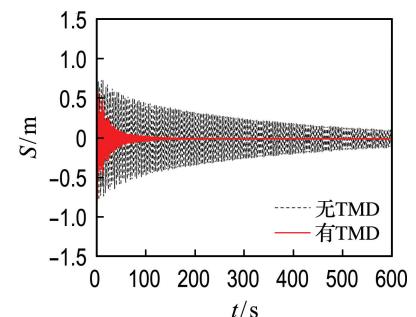


图 8 塔筒顶部位移时域控制效果

Fig. 8 Control effects of tower top displacement in the time domain

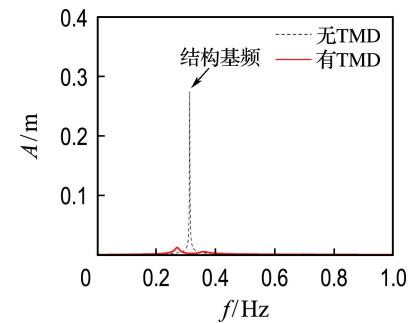


图 9 塔筒顶部位移频域控制效果

Fig. 9 Control effects of tower top displacement in the frequency domain

$$\Delta = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2} \times 100\% \quad (9)$$

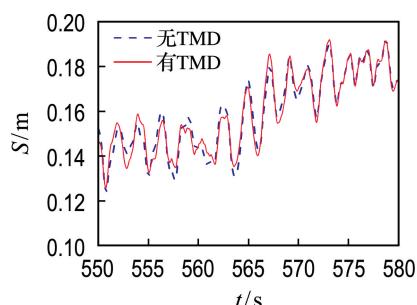
式中: Δ 为响应标准差的减小率, σ_1 为有 TMD 结构响应标准差, σ_2 为无 TMD 结构响应标准差。

表 3 最优 TMD 参数减振效果

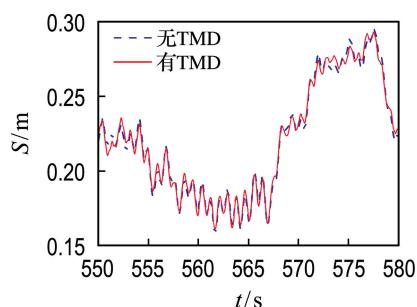
Tab. 3 Vibration reduction effect of optimal TMD parameters

工况	塔筒顶部位移标准差减小率/%
1	0.33
2	0.44
3	1.51
4	38.53

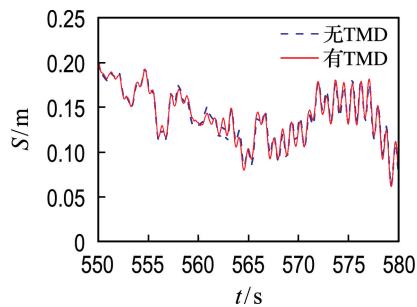
海上风机塔筒顶部位移时域控制效果如图 10 所示。由图 10 并结合表 3 数据可知, 额定风速以下工况 1, TMD 对塔筒顶部位移标准差减小率为 0.33%; 额定风速工况 2, TMD 对塔筒顶部位移标准差减小率为 0.44%; 额定风速以上工况 3, TMD 对塔筒顶部位移标准差减小率为 1.51%; 停机工况 4, TMD 对塔筒顶部位移标准差减小率为 38.53%。综合各项评价指标可得, 相对于正常



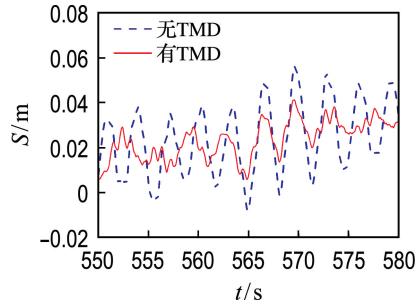
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



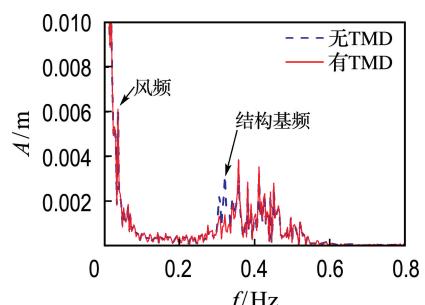
(d) 工况 4

图 10 各设计荷载工况下塔筒顶部位移时域控制效果

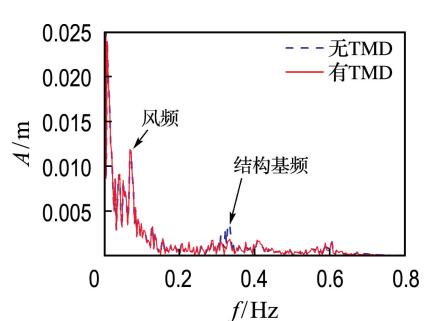
Fig. 10 Time domain control effect of tower top displacement under various design load cases

运行工况,停机工况下 TMD 减振效果更为明显。

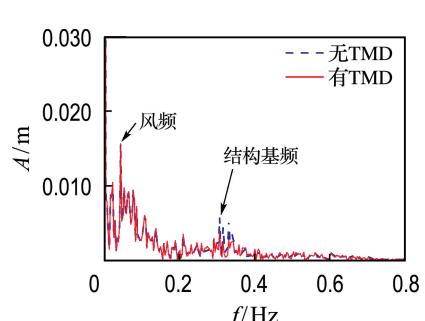
各设计荷载工况下塔筒顶部位移频域控制效果如图 11 所示。由图可知,所选取正常运行工况 1~3,塔筒顶部位移响应的控制频率包含风频、结构基频。而对于停机工况 4,海上风机所采取的控



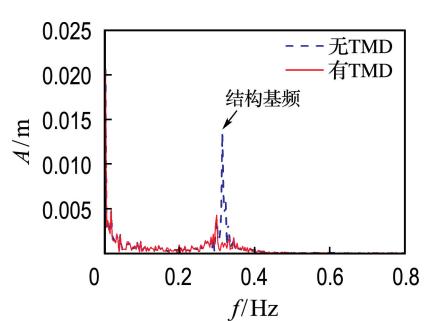
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 11 各设计荷载工况下塔筒顶部位移频域控制效果

Fig. 11 Frequency domain control effect of tower top displacement under various design load cases

制策略为叶片顺桨和高速传动轴制动,此时在风、浪荷载作用下,海上风机结构基频的影响效果明显大于风频,结构基频成为结构响应的最主要控

制频率。同时,注意到该频率为 TMD 的调谐减振频率,故 TMD 在显著降低整体结构基频频域响应幅值的同时,也有效地控制了该工况下塔筒顶部位移运动响应。对于正常运行工况,虽然所设计 TMD 仍能有效控制整体结构基频幅值,但该工况下结构响应具有多个频率分量,并且整体基频影响明显弱于风荷载频率,由此削弱了正常运行工况下 TMD 减振效果。

综上所述,本文所提出的海上风机-TMD 两自由度简化模型,以塔筒顶部位移标准差为优化目标,利用人工蜂群算法得到优化后的 TMD 能够有效控制风、浪作用下停机状态导管架式海上风机结构的运动响应。但作为单频调谐控制方法,当海上风机结构响应主要控制频率与海上风机整体结构基频差异较大时,将明显削弱 TMD 的控制效果。

4 结 论

(1)按照两自由度简化模型得到优化后的 TMD,可使导管架式海上风机一阶模态顺风向塔筒顶部位移标准差减小率最大为 38.53%。

(2)由停机工况下 TMD 减振效果可得,塔筒顶部位移的主控频率为整体结构基频,所提出的海上风机-TMD 简化优化设计模型合理,可用于开展针对海上风机一阶模态的 TMD 参数优化设计。

(3)由正常工况下 TMD 减振效果可得,塔筒顶部位移的主控频率为风频,而该 TMD 针对结构基频而设计,所以对结构未起到明显的控制效果。

参考文献:

- [1] 汤炜梁,袁奇,韩中合.风力机塔筒抗台风设计 [J].太阳能学报,2008,29(4): 422-427.
TANG Weiliang, YUAN Qi, HAN Zhonghe. Withstanding typhoon design of wind turbine tower [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, 29(4): 422-427. (in Chinese)
- [2] LACKNER M A, ROTEA M A. Passive structural control of offshore wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2011, 14(3): 373-388.
- [3] GHASSEMPOUR M, FAILLA G, ARENA F. Vibration mitigation in offshore wind turbine via tuned mass damper [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 610-636.
- [4] STEWART G M. Load reduction of floating wind turbines using tuned mass dampers [D]. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2012.
- [5] STEWART G, LACKNER M. Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1090-1104.
- [6] 贺尔铭,胡亚琪,张扬.基于 TMD 的海上浮动风机结构振动控制研究 [J].西北工业大学学报,2014,32(1): 55-61.
HE Ermeng, HU Yaqi, ZHANG Yang. Structural vibration control of offshore floating wind turbine based on TMD [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(1): 55-61. (in Chinese)
- [7] 金鑫,林益帆,谢双义,等.基于 TMD 的半潜式风力机振动控制 [J].太阳能学报,2020,41(6): 86-93.
JIN Xin, LIN Yifan, XIE Shuangyi, et al. Vibration control of semi-submersible wind turbine based on TMD [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(6): 86-93. (in Chinese)
- [8] KARABOGA D, AKAY B. A comparative study of artificial bee colony algorithm [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 214(1): 108-132.
- [9] JONKMAN B, JONKMAN J. FAST v8.16.00abjj [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [10] 周福霖.工程结构减震控制 [M].北京:地震出版社,1997.
- [11] ZHOU Fulin. *Engineering Structure Damping Control* [M]. Beijing: Seismological Press, 1997. (in Chinese)
- [12] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. *Journal of Global Optimization*, 2007, 39(3): 459-471.
- [13] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. Maryland: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [14] VORPAHL F, POPKO W, KAUFER D. Description of a basic model of the "UpWind reference jacket" for code comparison in the OC4 project under IEA Wind Annex XXX [R]. Connecticut: OC4 Phase I Offshore Wind Turbine

- Model, 2013.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海上风力发电机组设计要求: GB/T 31517—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design Requirements for Offshore Wind Turbines: GB/T 31517-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [15] JONKMAN B J, KILCHER L. TurbSim user's guide: Version 1.06.00 (draft version) [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [16] BRODERSEN M L, BJØRKE A, HØGSBERG J. Active tuned mass damper for damping of offshore wind turbine vibrations [J]. *Wind Energy*, 2017, 20(5): 783–796.
- [17] CAVA W L, LACKNER M A. Theory manual for the tuned mass damper module in FAST v8 [J]. *arXiv*, 2020: 20200576560.

Research on TMD vibration control in offshore wind turbine based on artificial bee colony algorithm

LU Dongzhe¹, WANG Wenhua^{*1}, LI Xin¹, HAN Fucheng¹, LI Ying²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Chinese-German Institute for Applied Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Due to its large height and small cross section, offshore wind turbine (OWT) is prone to vibration and deformation under the wind and waves. The passive control method commonly applied in the field of industrial buildings, such as the tuned mass damper (TMD), multiple tuned mass damper (MTMD) and tuned liquid column damper (TLCD) is widely used to control the structural response of the OWT under extreme and fatigue conditions. The research on passive control of 5 MW jacket-type OWT is carried out. Simplified numerical simulation model with two degrees of freedom (2-DOF), the OWT first order bending degree of freedom and the TMD horizontal movement degree of freedom is established under random excitation. The stiffness and damping parameters of TMD are optimized by artificial bee colony (ABC) algorithm with the standard deviation of the tower top displacement as the optimization objective. The aerodynamic-hydrodynamic-structural dynamic-control system fully coupled simulation model is established in FAST for dynamic analysis, the applicability of optimized single-frequency TMD and the mechanism of reducing vibration under operational and parked conditions are studied. The result shows that the TMD based on the 2-DOF simplified model and optimized by the artificial bee colony algorithm can effectively reduce the standard deviation of the tower top displacement. The dominant frequency of the tower top displacement is the fundamental frequency of the OWT under the parked condition, the simplified optimization design model of TMD is reasonable and can be applied to the optimization design of TMD parameters for the first order mode of the jacket-type OWT. The wind frequency dominates the structural responses under the operation states, so for the control of the responses of OWT under such load cases, the influence of random excitation of wind and wave should be considered.

Key words: offshore wind turbine; vibration control; tuned mass damper; artificial bee colony (ABC) algorithm