

基于 TMD 的半潜式风力机振动控制

金 鑫, 林益帆, 谢双义, 何 娇, 王亚明, 王 宁

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对某 5 MW 半潜式风力机的振动控制进行研究, 以单纯形遗传算法(SCGA)分别对有无行程限制的调谐质量阻尼器(TMD)的固有频率、阻尼比进行参数优化, 探讨经过优化参数后的 TMD 对风力机关键部位位移和载荷的影响。在 SIMPACK 软件中建立半潜式海上风力发电机组的多体动力学模型, 在 5 种工况下对风力发电机进行动力学仿真分析。仿真结果表明, 相较于有行程限制的 TMD, 施加行程限制后的 TMD 减振效果变差, 但考虑到机舱空间的实际大小, TMD 施加行程限制仍有一定的参考意义, 且纵向减振效果优于横向减振效果。

关键词: 海上浮动风力机; 振动控制; 动力学模型; 调谐质量阻尼器; 单纯形遗传算法

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

由于海上风力机存在风、海浪等载荷过大的现象, 故降低风力机载荷以提高其可靠性显得尤为重要^[1]。漂浮式平台主要分为单柱浮标式、驳船式以及张力腿式^[2]。

关于海上漂浮式风力发电机的振动控制一直以来都是研究的重点和热点之一, 特别是针对通过阻尼器来对漂浮式风力机进行减振的研究从未停止。目前, 调谐质量阻尼器(TMD)是运用最广泛的一种控制装置。Colwell 等^[3]建立多自由度的漂浮式风力机模型, 并模拟风力发电机可能遇到的多种工况下的外界风浪联合载荷的激励。然后设计并优化调液柱型阻尼器的参数, 并进行了疲劳分析, 研究表明该阻尼器可提高结构的疲劳寿命。Stewart^[4]通过为 4 个海上风力平台中的每个平台创建一个有限的自由度模型, 开发出一套最佳的被动调谐质量阻尼器。然后, 利用遗传算法将这些模型集成到优化函数中, 找到调谐质量阻尼器的全局最优设计, 实现塔架疲劳损伤的降低。中国在漂浮式风力发电机的振动控制方面也有较多的研究。贺尔铭等^[5]建立漂浮式风力机与调谐质量阻尼器的耦合动力学模型, 对 TMD 参数的优化后, 在多种典型工况下进行模拟仿真, 结果表明优化参数后的

TMD 对风力振动的抑制效果较明显。崔琼^[6]提出一种悬吊式的 TMD 振动控制装置, 分析 TMD 各参数对减小风力机振动的效果的影响, 并模拟了在各种工况下 TMD 的减振效果, 结果表明该 TMD 装置对振动控制具有很强的可行性和有效性。

基于以上前人的相关研究, 本文针对 5 MW 半潜式风力机使用 TMD 的可行性进行相关研究。对风力机建模, 进行 TMD 参数的优化并在多种工况下开展仿真, 用来评估 TMD 的控制效果。

1 基于 TMD 的风力机模型简化

1.1 TMD 阻尼比与频率比的确定

如图 1 是主结构与 TMD 的系统模型, 图中 m_1 、 c_1 、 k_1 分别是主结构的质量、阻尼和刚度系数, m_2 、 c_2 、 k_2 分别是 TMD(子结构)的质量、阻尼和刚度系数, x_1 、 x_2

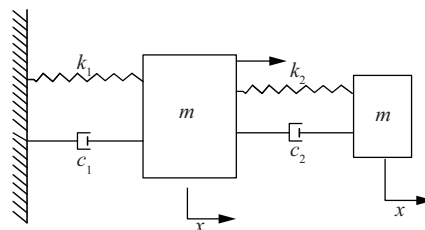


图1 TMD模型

Fig. 1 TMD model

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(51975066)

通信作者: 金 鑫(1979—), 男, 博士、副教授, 主要从事风力发电技术方面的研究。Jinxin191@hotmail.com

分别为主结构和子结构的位移, $F(t)$ 为作用在主结构上的激励。

若力 F 为简谐激励, 根据牛顿第二定律可得主结构的振幅表达式为:

$$\left| \frac{x_1}{x_{st}} \right| = \frac{(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + (2\gamma\lambda\xi_2)^2}{\sqrt{[(1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \mu\gamma^2\lambda^2]^2 + [1 - (1 + \mu)\lambda^2]^2 (2\gamma\lambda\xi_2)^2}} \quad (1)$$

式中, μ ——质量比, $\mu = m_2/m_1$; ω_1 ——主结构的固有频率, $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$; ω_2 ——子结构的固有频率, $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$; ξ_2 ——子结构的阻尼比, $\xi_2 = c_2/2\sqrt{m_2k_2}$; x_1, x_{st} ——主结构振幅和静变形 (Fk_1), F 为简谐激励; γ ——子结构与主结构的频率之比, $\gamma = \omega_2/\omega_1$; λ ——激励频率与主结构的频率比, $\lambda = \omega/\omega_1$ 。

1.2 控制目标确定

在 TMD 参数的初步设计之前, 先确定控制的对象。在本文中, 采用 TMD 装置控制的是半潜式海上风力发电机组的塔顶前后的振动响应, 包括塔顶的位移、速度、加速度以及塔基载荷等。为使减振效果最好, TMD 一般安装在动力响应最大的地方 (本文中即是塔顶处), 综合空间位置及安装考虑, 将 TMD 装置安放在塔顶的机舱里面。由于漂浮式风力机的载荷响应是以平台刚体俯仰和塔架 1 阶弯曲的联合振型为主, 该振型为风力机的纵向振型, 故仅考虑在机舱内部沿纵向安装 TMD^[7]。系统 TMD 在半潜式海上风力发电机组的安装如图 2 所示。

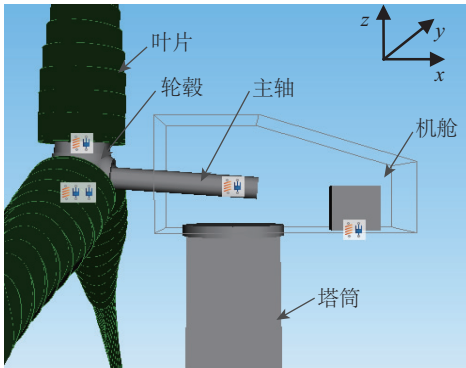


图2 TMD安装位置

Fig. 2 TMD installation location

在质量块和机舱之间的是弹簧和阻尼器, 与质量块一起构成 TMD 系统, 并且将质量块和机舱连接在一起。风力机模型拓扑图如图 3 所示, 图中 FE 代表力

元, α 、 β 、 γ 分别代表绕 x 、 y 、 z 轴的旋转自由度, x 、 y 、 z 代表沿 x 、 y 、 z 轴的移动自由度。

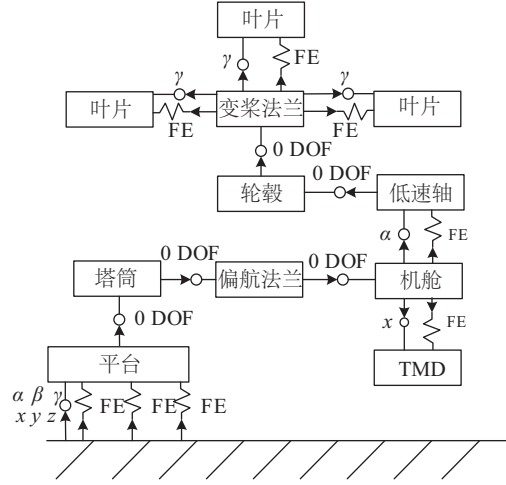


图3 风力机模型拓扑图

Fig. 3 Topology of wind turbine model

在 SIMPACK 软件中选择 241 号力元来计算空气动力载荷, 选择 244 号力元来计算水动力载荷。

国内外漂浮式风力机权威学者 Lackner^[8]验证, 漂浮式风力发电机组的振动响应, 包括塔顶的位移、塔基等载荷, 主要是由漂浮式平台纵摇的固有频率引起的。所以在主结构模型简化过程中, 将纵摇固有频率视为主结构的固有频率。在 SIMPACK 软件中对半潜式海上风力发电机进行固有频率的分析, 得到纵摇的固有频率为 0.1016 Hz, 该阶模态阻尼比为 0.08%, 则可将主结构的固有频率及阻尼比也设为此二参数。

2 TMD 参数优化

TMD 的参数设计主要是确定 TMD 与主结构的质量比、弹簧的刚度系数和阻尼器的阻尼比。在质量比方面, 参考 TMD 与主结构的质量比一般在 0.5%~2% 之间^[9], 本文选取质量比 1.5% 进行计算。根据半潜式海上风力机的数据, 该海上风力机的总质量为 6149460.5 kg。由于在该风力机的纵摇和塔架弯曲联合振型中, 该模态阻尼为 0.08%, 可忽略不计, 因此可采用 1.1 节中得到的动力放大系数计算公式, 对 TMD 的刚度系数和阻尼系数进行参数设计。

2.1 单纯形编码遗传算法

由于遗传算法存在收敛缓慢、计算成本高等问题, 文献[10]集合了基于单纯形局部优化算法的 Nelder-Mead 法, 提出单纯形编码遗传算法^[11], 是目前最有效的

无需求导的非线性最优化算法之一。单纯形遗传算法的适应度就是塔顶位移的幅值即评价指标 J , 单纯形遗传算法的步骤如图 4 所示。

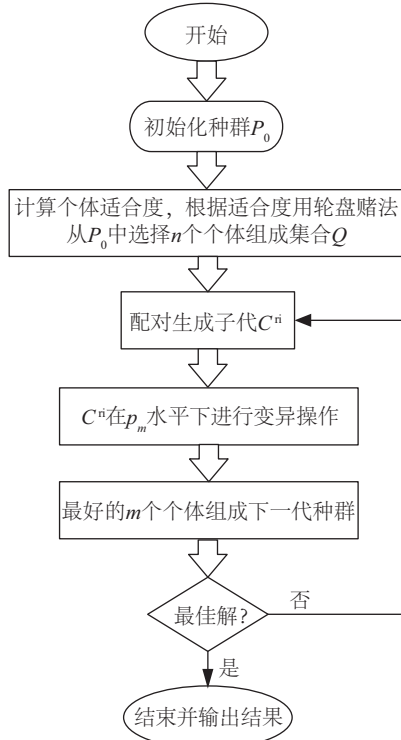


图 4 单纯性遗传算法流程

Fig. 4 Flow chart of SCGA

1) 优化目标的确定

将式(1)表示的动力放大系数作为优化的目标函数 P_0 为:

$$P_0 = \min[\max A(\omega_2, \xi_2)] \quad (2)$$

$$A = \left| \frac{x_1}{x_{st}} \right| \quad (3)$$

式中, A ——动力放大因子; 最后需要优化的参数为 ω_2 和 ξ_2 。

2) 设定边界条件

为满足优化目标, 此处的弹簧刚度和阻尼系数应尽可能取较大值, 当考虑 TMD 行程限制时, 本文边界条件设置: $4000 < \text{TMD 刚度 } k_{\text{TMD}} < 6000 \text{ N/m}$, $1000 < \text{TMD 阻尼 } d_{\text{TMD}} < 10000 \text{ Ns/m}$, $-10 < \text{TMD 位移 } x_{\text{TMD}} < 10 \text{ m}$ 。

3) 单纯形遗传算法中输入参数的确定

为在算法运行过程中参数设置的方便, 将 ω_2 和 ξ_2 作为上文(图 4)提到的个体 C^n 所含有的变量来进行优化。

4) 单纯形遗传算法中输出参数的确定

根据单纯形遗传算法的思想, 将塔顶纵向位移标幅值作为输出的参数 Y_i , 则函数的关系式为:

$$Y_i = \text{SCGA}(X_i) \quad (4)$$

式中, Y_i ——塔顶纵向位移幅值; $\text{SCGA}(\cdot)$ ——单纯形遗传算法; X_i ——待优化参数 ω_2 和 ξ_2 。

图 5 是在平面中展示的交叉的例子, $S^1 \sim S^3$ 分别代表不同的父代, $x^1 \sim x^3$ 分别代表不同编号的顶点, d 代表父代之间的最大距离。通过 S^1, S^2, S^3 顶点的平均值来计算单纯形, 如图 5a 所示, 图 5b 展示的是循环中创建的子代 C^1, C^2, C^3 。

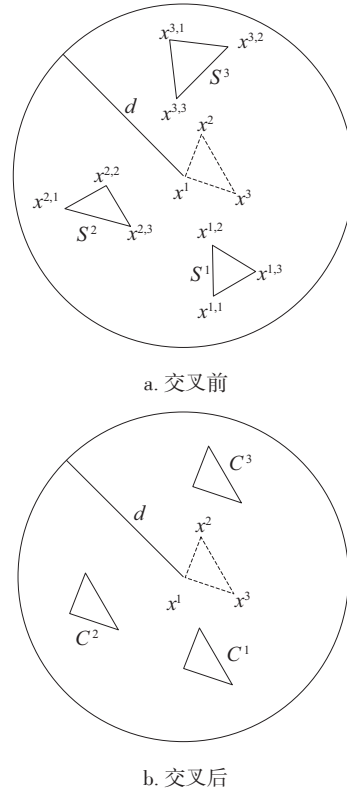


图 5 在平面中表示的交叉的例子

Fig. 5 An example of SCGA crossover in two dimensions

2.2 TMD 参数优化

由 1.1 节中推导 TMD 的参数过程可得最后推导出来的 TMD 的参数是建立忽略主结构阻尼的前提条件下得到的, 对通过上述介绍的单纯形编码遗传算法进行参数优化, 以求在质量比不变的情况下增加 TMD 的减振率。取 TMD 不做限制和限制在 $\pm 10 \text{ m}$ 内这 2 种情况, 最后, 质量比为 1.5% 的 TMD 优化后的参数如表 1 所示。

表1 单纯形遗传算法参数优化结果

Table 1 Parameter optimization results of SCGA

参数	频率/Hz	阻尼比	刚度系数/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	阻尼系数/ $\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1}$
无行程限制	0.1052	0.1026	28221	6240
有行程限制	0.2410	0.1066	148061	14845

3 TMD减振效果分析

得到TMD的参数后,对工况进行设计,考虑到切入风速、额定风速和切出风速附近,以及不同的海况,采用JONSWAP波浪谱,谱峰值周期为6.5 s,具体工况如表2所示。仿真630 s时间,以振动响应的最大值的降低率为评价标准分别衡量TMD有行程限制和无行程限制时的减振效果。得到图6~图10所示的各评价指标的幅值。

表2 设计载荷工况

Table 2 Design load cases

工况	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	波高/ m	工况	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	波高/ m
1	4	2.1	4	18	6.1
2	8	3.6	5	24	7.5
3	12	4.9	—	—	—

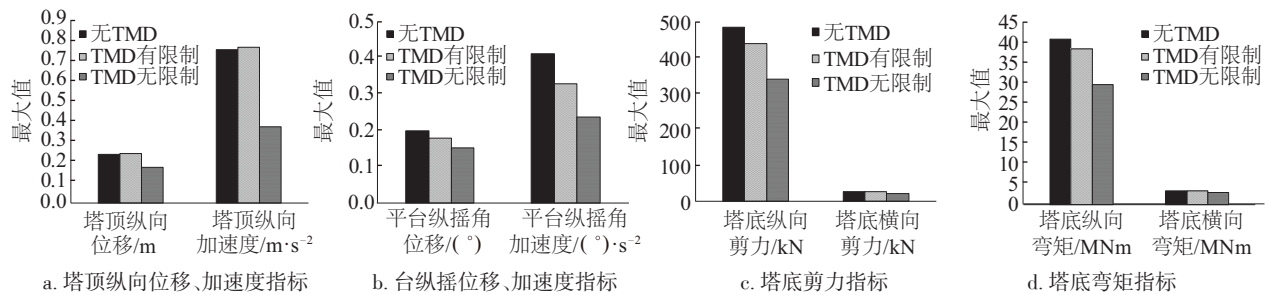


图6 在工况1下各评价指标的最大值

Fig. 6 Maximum of each evaluation index under the working condition 1

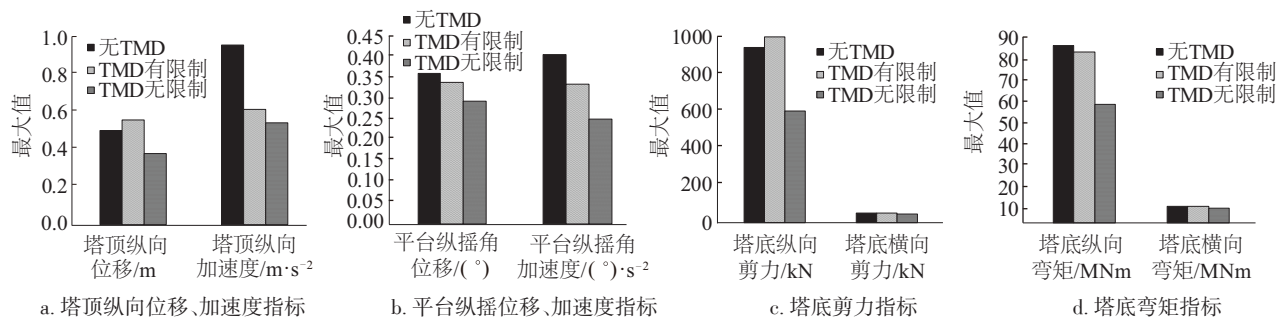


图7 在工况2下各评价指标的最大值

Fig. 7 Maximum of each evaluation index under the working condition 2

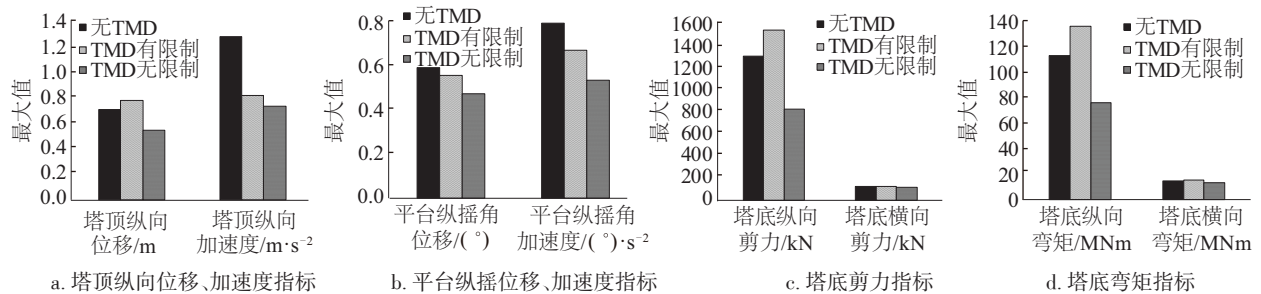


图8 在工况3下各评价指标的最大值

Fig. 8 Maximum of each evaluation index under working condition 3

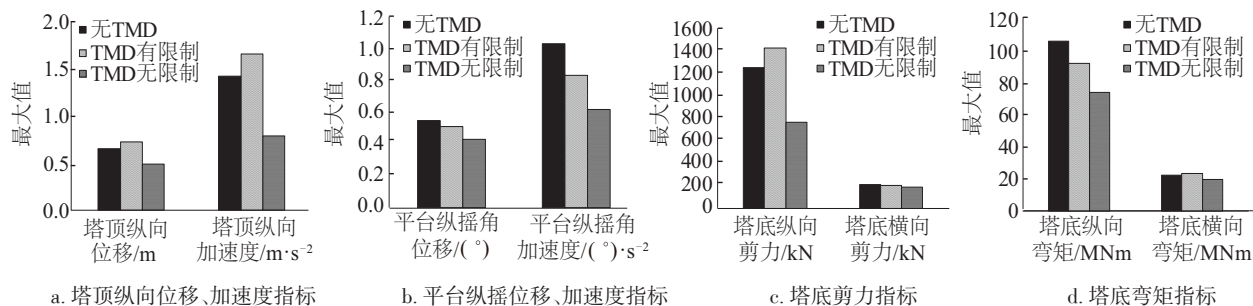


图9 在工况4下各评价指标的最大值

Fig. 9 Maximum of each evaluation index under working condition 4

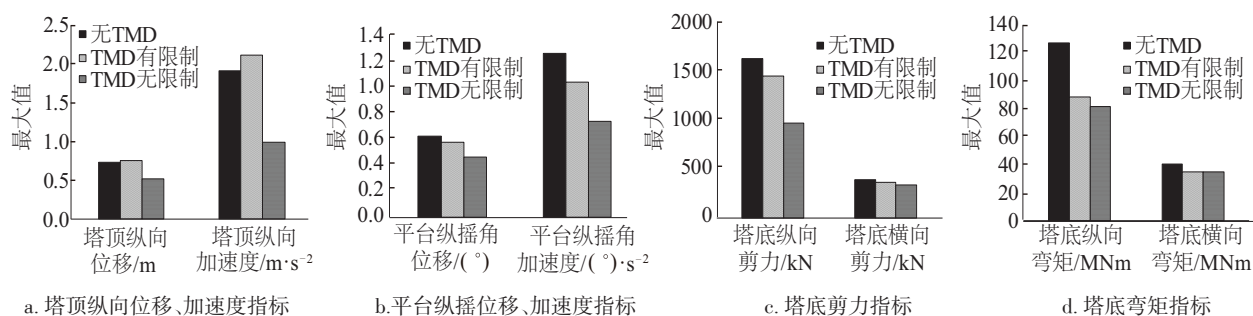


图10 在工况5下各评价指标的最大值

Fig. 10 Maximum of each evaluation index under working condition 5

图 11 表示的 TMD 有无行程限制的行程对比以及表 3 所示的 TMD 对各评价指标的抑制率。由于篇幅所

限,只展示工况 3 的仿真结果如图 12 所示。

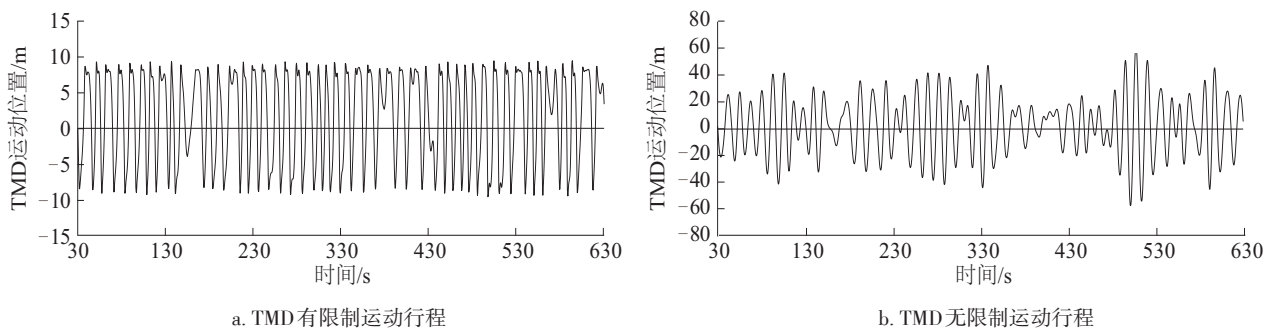
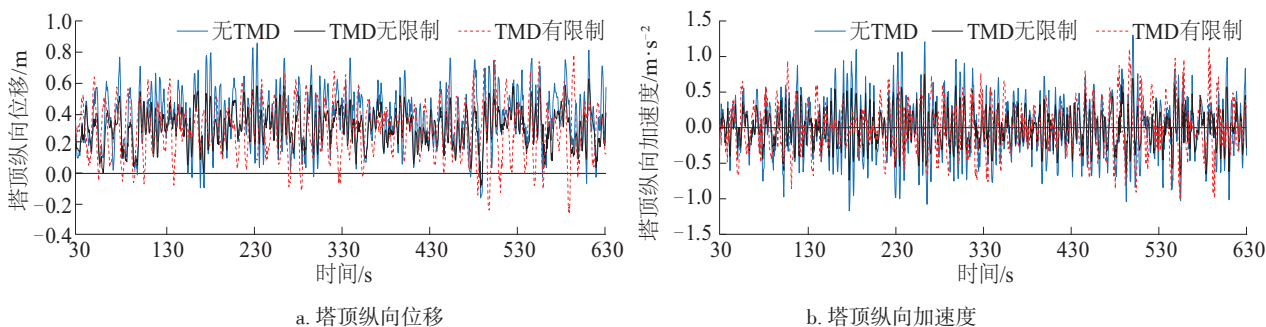


图11 TMD行程对比

Fig. 11 Comparison of TMD stroke



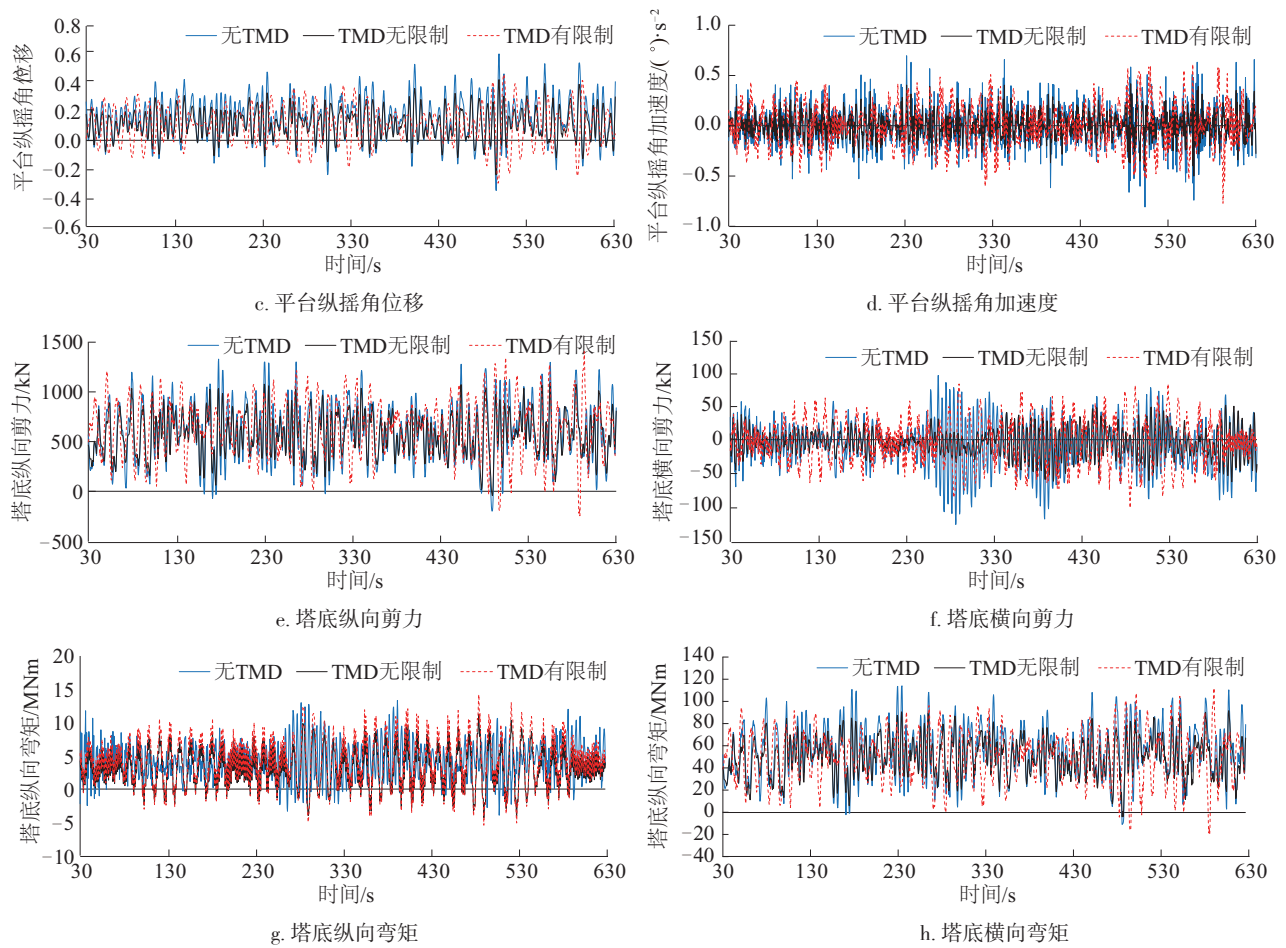


图12 在工况3下的各评价指标值

Fig. 12 Each evaluation index under working condition 3

从图6~图12中可看出当TMD无行程限制时其减振效果相比于无TMD时大多数的评价指标均有提升。因为本文中TMD安装方向为纵向,因此风力机纵向振

动响应的减振效果较好,对横向振动响应的减振效果一般。当TMD施加行程限制后,由于TMD的固有频率发生了较大改变(详见表1),因此TMD的减振效果

表3 TMD参数优化后减振效果(%)

Table 3 Effect of vibration reduction after TMD parameter optimization (%)

评价指标	工况1		工况2		工况3		工况4		工况5	
	无限制	有限制	无限制	有限制	无限制	有限制	无限制	有限制	无限制	有限制
塔顶纵向位移	26.9	-0.2	24.9	-10.7	23.1	-7.6	25.8	-10.2	29.3	-2.6
塔顶纵向加速度	49.9	-9.8	43.2	36.1	42.6	-1.0	44.2	-16.3	48.4	-10.3
平台纵摇角位移	23.1	10.2	18.7	6.1	19.8	6.2	21.5	7.6	25.9	8.2
平台纵摇角加速度	42.3	20.1	38.0	17.1	32.4	15.6	40.1	19.3	41.4	17.7
塔底纵向剪力	30.0	9.6	36.1	-6.3	36.5	-18.1	38.9	-13.9	40.3	10.6
塔底纵向弯矩	27.3	5.7	32.9	3.7	33.0	-20.1	29.9	13.0	35.8	30.2
塔底横向剪力	8.4	1.4	9.1	1.7	5.7	3.3	11.1	2.5	12.9	6.3
塔底横向弯矩	9.1	0.6	7.9	-2.4	10.5	-4.3	10.6	-5.0	13.5	13.6

有所降低,甚至部分评价指标的抑制率变为负值,但考虑到机舱的实际空间大小,TMD 施加行程限制仍有一定的意义。

4 结 论

本文对半潜式海上风力发电机组进行研究,结合空气动力载荷和水动力载荷的计算理论,设计多种工况,对振动响应规律进行分析。在 SIMPACK 软件中建立半潜式海上风力发电机组的多体动力学模型,并进行模态分析,得到振动控制的关键固有频率。将 TMD 系统安装在动力响应最大的塔顶处,并初步确定 TMD 的质量参数。以塔顶纵向位移幅值的降低率为目标,在质量比一定的情况下,在 TMD 有行程限制与无行程限制的条件下,分别利用单纯形编码遗传算法对 TMD 的固有频率和阻尼比进行参数优化。

1)在多工况的仿真结果中显示,相比与 TMD 有行程限制,TMD 无行程限制时因其固有频域与控制主频率接近,因此其减振效果理想;

2)考虑到机舱空间的实际大小,当 TMD 施加行程限制后因其固有频率改变较大,减振效果变差,但对大部分评价指标仍有一定抑制效果,因此 TMD 施加行程限制仍有一定参考意义;

3)因为该 TMD 安装方向为纵向,因此对风力机纵向振动响应的减振效果较好,对横向振动响应的减振效果一般。

[参考文献]

- [1] MUSIAL W, BUTTERFIELD S, RAM B. Energy from offshore wind [C]//Proceedings Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2006.
- [2] LACKNER M. Controlling platform motions and reducing blade loads for floating wind turbines[J]. Wind engineering, 2009, 33(6): 541-553.
- [3] COLWELL S, BASU B. Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control [J]. Engineering structures, 2009, 31(2): 358-368.
- [4] STEWART G, LACKNER M. Determining optimal tuned mass damper parameters for offshore wind turbines using a genetic algorithm [C]//AISA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine (Dallas/Ft.Worth Region), Texas, 2013.
- [5] 贺尔铭, 胡亚琪, 张扬. 基于TMD的海上浮动风力机结构振动控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(1): 55-61.
HE E M, HU Y Q, ZHANG Y. Structural vibration control of offshore floating wind turbine based on TMD [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(1): 55-61.
- [6] 崔琼. 悬吊式TMD对近海风机的振动控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
CUI Q. Study on the vibration control of offshore wind turbines by means of pendulum damper[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [7] 贺尔铭, 胡亚琪, 张扬. TMD对海上浮动基风力机振动抑制的优化设计[J/OL]. 中国科技论文在线, 2014.
HE E M, HU Y Q, ZHANG Y. Optimization design of TMD and vibration suppression of offshore floating wind turbine[J/OL]. Sciencepaper online, 2014.
- [8] LACKNER M. Controlling platform motions and reducing blade loads for floating wind turbines[J]. Wind engineering, 2009, 33(6): 541-553.
- [9] BRODERSEN M L, BJØRKE A S, HØGSBERG J. Active tuned mass damper for damping of offshore wind turbine vibrations[J]. Wind energy, 2016, 20(5): 783-796.
- [10] KELLEY C T. Iterative methods for optimization (SIAM 1999 187s) [J]. Journal of applied probability, 1999, 9: 878.
- [11] HEDAR A R, Fukushima M. Minimizing multimodal functions by simplex coding genetic algorithm[J]. Optimization methods & software, 2010, 18(3): 265-282.

VIBRATION CONTROL OF SEMI-SUBMERSIBLE WIND TURBINE BASED ON TMD

Jin Xin, Lin Yifan, Xie Shuangyi, He Jiao, Wang Yaming, Wang Ning

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this paper, the vibration control of the semi-submersible wind turbine is studied. Taking a 5 MW semi-submersible offshore wind turbine as an example, based on the simple coding genetic algorithm (SCGA), the natural frequency and damping ratio of the tuned mass damper (TMD) with stroke limitation and no stroke limitation is optimized. The influence of TMD on the displacement and load of the key position of the wind turbine is discussed. The multi-body dynamic model of semi-submersible offshore wind turbine is established in SIMPACK software. Under five conditions, the wind turbine model is simulated. The simulation results show that effect of TMD with stroke limitation is worse than that with no stroke limitation. But considering the real size of the nacelle space, TMD stroke limitation still has certain reference significance, and the longitudinal vibration damping effect is better than that of lateral vibration reduction effect.

Keywords: offshore wind turbines; vibration control; dynamic models; tuned mass damper; simplex coding genetic algorithm