

基于 TMD 的漂浮式风力机振动控制

张晓峰¹, 金 鑫², 林益帆², 谢双义², 何 娇²

(1. 重庆工商职业学院智能制造与汽车学院, 重庆 400052; 2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对漂浮式风力机的振动控制进行研究,探讨将调谐质量阻尼器(TMD)同时安装于风力机的机舱和平台中时对风力机关键部位位移和载荷的影响。首先,建立风力机的多体动力学模型,并对建模准确性进行验证。其次,根据拉格朗日方程搭建四自由度的动力学模型,利用 Levenberg-Marquardt(LM)法对其中的未知参数进行估计。然后以塔顶纵向位移标准偏差最小为控制目标,采用人工鱼群算法同时对TMD的质量、阻尼以及刚度参数进行优化。最后,在5种工况下,分别对风力机模型进行仿真分析,仿真结果表明,在风浪同向和不同向情况下,TMD对塔顶前后位移、塔基前后弯矩、平台纵摇角均有明显的抑制效果。

关键词: 振动控制; 动力学模型; 海上浮动风力机; 调谐质量阻尼器; 人工鱼群算法

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

海上风力机相对于陆上风力机而言有着更稳定的风能资源,对人们居住环境的干扰相对较小。但海上风力机由于同时受到风、海浪及其他载荷的影响,其结构要求相对更高,进一步导致风力机的运行、维护成本增加。因此,对于降低海上风力机尤其是漂浮式风力机的载荷从而提高其可靠性来说显得尤为重要^[1]。

一种方法是通过统一变桨^[2]和独立变桨^[3]控制策略降低风力机所遭受载荷。这些控制策略相对提高了变桨执行器的使用率,而且其控制策略也相对复杂。更为直接的方式就是采用结构振动控制装置,这种方法已经成功的应用于民用建筑结构中^[4-5]。文献[6]对风力机模型进行简化并将TMD安装在塔顶位置。文献[7-10]采用调谐液体阻尼器对海上风力机的结构振动进行控制。文献[11]开发出FAST-SC软件,并以此为工具研究TMD在海上风力发电机上的振动控制效果,但是未对TMD的各项参数进行优化分析,导致TMD的减振效果不是很理想。文献[12]对多种海上风力发电机模型进行简化,并对其进行动力学建模,得到便于进行TMD参数寻优的简化模型,但是其仅优化了TMD的刚度系数和阻尼系数,并未对质量进行优化,且其仿真的工况

有限,无法全面评估TMD的减振效果。文献[13]分析风浪失调对TMD减振效果的影响,发现TMD对减少因风浪失调而急剧增加的风机侧向载荷效果较好,还得出减振效果对TMD的质量与方向不敏感的结论,但是该文并未给出TMD参数的优化过程。

针对以上相关研究中存在的问题,本文针对驳船式漂浮风力机使用TMD的可行性进行相关研究。对风力机进行建模,参数估计及TMD参数的优化并在多种工况下开展仿真,用来评估被动式TMD的控制效果。

1 多体动力学建模与验证

1.1 多体动力学建模

本文基于拉格朗日方程建立多柔体系统动力学方程,用动参考系和弹性变形来描述柔性体的位移,采用模态综合法^[14]对柔性体的模态进行缩减,并采用模态叠加法描述柔性体的变形运动。

齿轮箱是风力机传动链的重要组成部分,在多体建模中,零部件通过柔性体来表示,并通过铰接、约束和力元实现耦合,该模型可充分考虑零部件的柔性、齿轮啮合刚度等特性。表1所示为风力机主要部件的建模要求。图1为风力机多体动力学模型及拓扑图。

收稿日期: 2018-04-20

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

表1 风力机部件建模要求

Table 1 Modeling requirement of wind turbines compomerts

零件名称	建模要求	建模自由度	备注	零件名称	建模要求	建模自由度	备注
叶片	柔性体	固定	铁木辛柯梁	齿轮箱箱体	柔性体	轴向、弯曲、扭转	有限元
轮毂	柔性体	轴向、弯曲、扭转	有限元	发电机转子	刚体	轴向、弯曲、扭转	—
主轴	柔性体	6自由度	有限元	发电机定子	刚体	移动、扭转	4点弹性支撑
塔筒	柔性体	固定	欧拉伯努利梁	轴承	弹簧阻尼	全刚度矩阵	—
主机架	柔性体	固定	有限元	联轴器	刚体	扭转	—

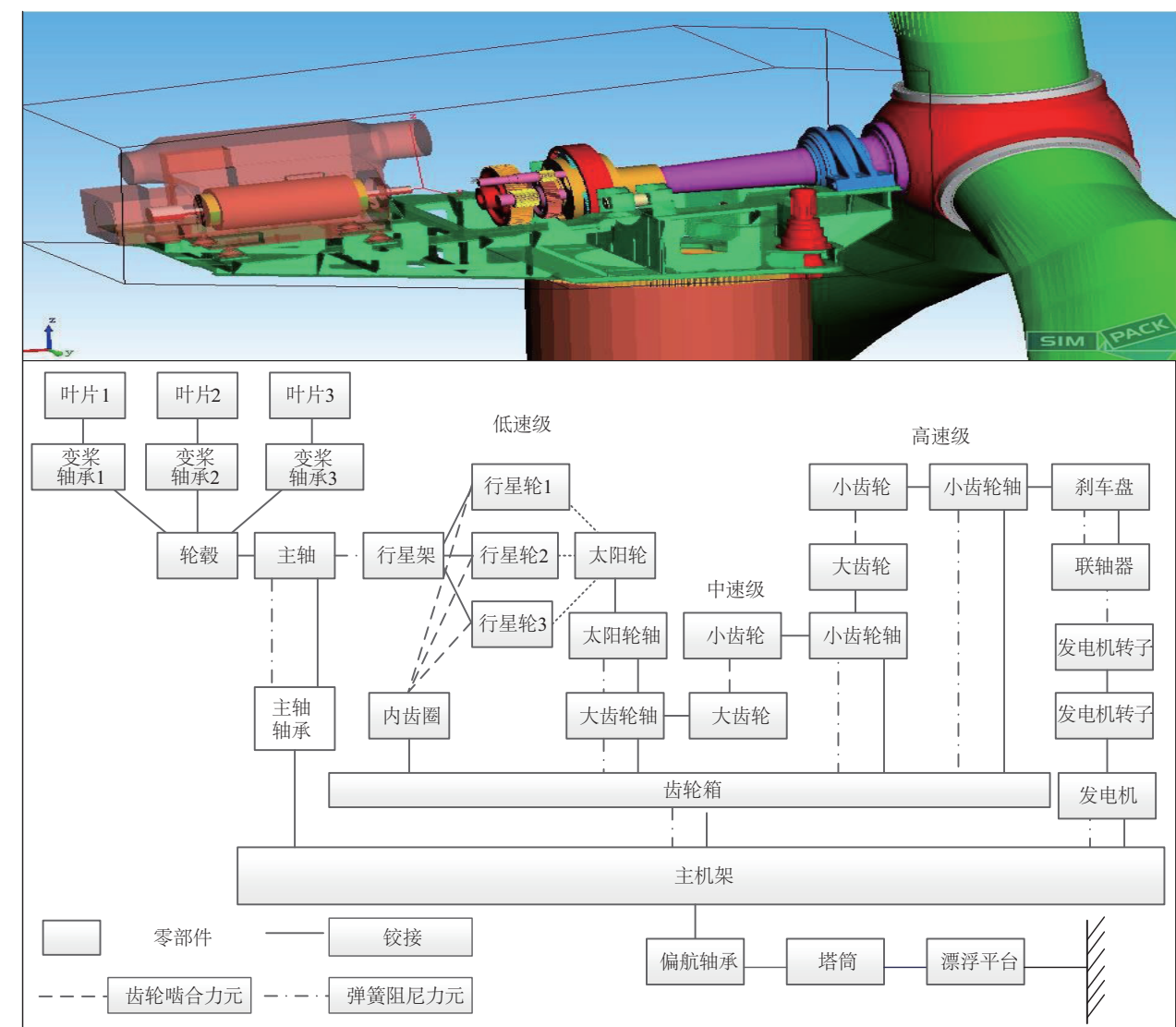


图1 风力机多体动力学模型及拓扑图

Fig. 1 Multi-body dynamics model and topology diagram of wind turbine

1.2 模型验证

为验证多体动力学模型的建模准确性,使用风力发电机分析软件 FAST^[15]进行模态分析对比,并与文献[16]

中的数据进行对比以检验仿真模型准确性。图2为风力机关键模态频率对比,5组数据计算结果很接近,误差均小于5%,证明了本模型的准确性。

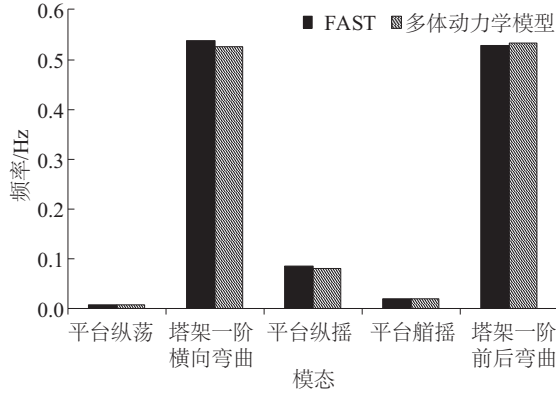


图2 风力机关键模态频率对比

Fig. 2 Critical modal frequency comparison of wind turbine

2 四自由度动力学模型

本文针对 5 MW 驳船型海上风力发电机进行结构振动控制。由于整机的多体动力学模型仿真非常耗时,若基于此模型进行 TMD 参数的设计优化将会异常艰难。因此,首先对海上风力机的动力学模型进行简化,考虑到平台纵摇、塔架 1 阶前后弯曲以及 2 个 TMD 的纵向运动之间的耦合,建立一个四自由度的海上风力机模型,并在此简化模型基础上开展进一步的研究。建立的四自由度海上风力机模型如图 3 所示。图 3 中, θ 为结构绕 y 轴运动的角位移,rad; x 为结构相对于 z 轴的位移,m; R 为风力机系统各部分质心到铰链的距离,m; k 为弹簧刚度,N/m; d 为阻尼系数; m 为风力机系统

各部分质量,kg; d_{p1} 为平台纵摇运动阻尼系数; k_{p1} 为平台纵摇运动刚度,N/rad;下标 T、P、TMD1、TMD2 为对应的塔架、平台以及机舱内的 TMD 和平台内的 TMD; g 为重力加速度,m/s²。

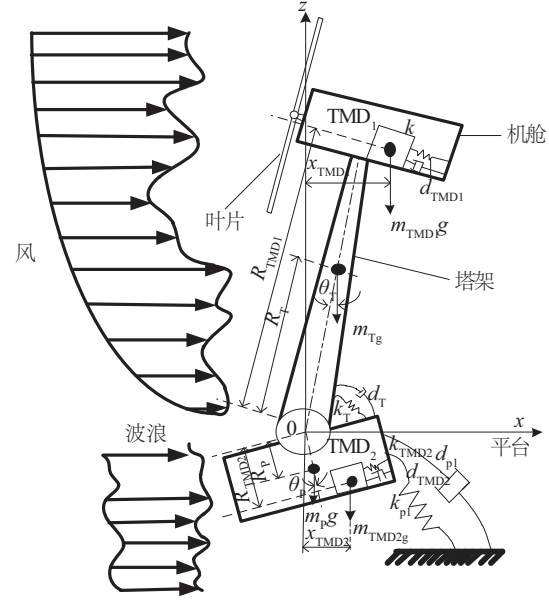


图3 四自由度海上风力发电机模型

Fig. 3 Offshore wind turbine model with 4-DOF

由于海上风力发电机在最恶劣的工况下其塔架和平台绕 y 轴的角位移都不会超过 10° ^[17],所以根据拉格朗日方程在建立动力学方程时可进行小角度假设,其动力学方程如式(1)所示,式中的 I 代表转动惯量:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\theta}_T = -d_T(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_P) - 2m_T R_T^2 \dot{\theta}_T - k_T(\theta_T - \theta_P) + m_T g R_T \theta_T + k_{TMD1} R_{TMD1}(x_{TMD1} - R_{TMD1} \theta_T) - m_{TMD1} g(-3R_{TMD1} \theta_T + x_{TMD1}) + \\ d_{TMD1} R_{TMD1}(\dot{x}_{TMD1} - R_{TMD1} \dot{\theta}_T) \\ I_P \ddot{\theta}_P = k_T(\theta_T - \theta_P) - k_{p1} \theta_P - m_P g R_P \theta_P + d_T(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_P) - d_{p1} \dot{\theta}_P + k_{TMD2} R_{TMD2}(x_{TMD2} - R_{TMD2} \theta_P) + m_{TMD2} g(-3R_{TMD2} \theta_P + x_{TMD2}) + \\ d_{TMD2} R_{TMD2}(\dot{x}_{TMD2} - R_{TMD2} \dot{\theta}_P) \\ m_{TMD1} \ddot{x}_{TMD1} = -k_{TMD1}(x_{TMD1} - R_{TMD1} \theta_T) + m_{TMD1} g \theta_T - d_{TMD1}(\dot{x}_{TMD1} - R_{TMD1} \dot{\theta}_T) \\ m_{TMD2} \ddot{x}_{TMD2} = -k_{TMD2}(x_{TMD2} - R_{TMD2} \theta_P) + m_{TMD2} g \theta_P - d_{TMD2}(\dot{x}_{TMD2} - R_{TMD2} \dot{\theta}_P) \end{cases} \quad (1)$$

以多体动力学分析软件 SIMPACK 为基础,结合空气动力学代码 Aerodyn 和水动力载荷计算代码 HydroDyn 及控制分析软件 Matlab/Simulink,可建立风力发电机组的气-液-弹-控(aero-hydro-servo-elastic)耦合仿真模型,如图 4 所示。

3 参数估计与验证

在风力机四自由度模型建立过程中需要用到塔架和平台的转动惯量以及平台纵摇和塔架前后运动的刚度和阻尼系数,而这些参数无法直接获得,因此需要对这些参数进行估计。对未知参数的估计采用的是 LM (Levenberg-Marquardt)法^[18]。该方法通过减小估计模

型的响应与 SIMPACK 模型响应之间的误差平方和来估计未知参数。

误差平方和可用式(2)表示:

$$S(U) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n w_j [y_j(t_i) - f_j(t_i, U)]^2 \quad (2)$$

式中, $y_j(t_i)$ ——模型在 t_i 时刻的第 j 个输出; $f_j(t_i, U)$ ——当未知参数为 U 时,模型在 t_i 时刻的第 j 个输出; w_j ——第 j 个输出的权重。

由于 LM 法对初值比较敏感,故未知参数的起始值要选取合理,否则可能导致结果无法收敛。未知参数的初始值参照^[19]进行选取。对估计参数进行仿真验证,得

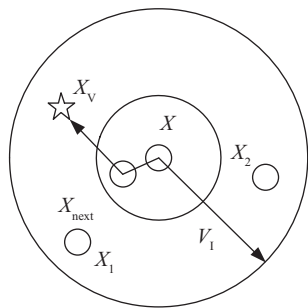


图6 人工鱼群算法概念模型

Fig. 6 Conceptual model of artificial fish swarm algorithm

如果搜索的次数越多,这条人工鱼对这片区域的了解也就越多,就越有利于找到合适的生存位置。

具体表达式为:

$$X_v = X + V_i \times R_d \quad (4)$$

$$X_{next} = X + \frac{X_v - X}{\|X_v - X\|} \times S \times R_d \quad (5)$$

式中, R_d ——随机函数,产生 0~1 之间的随机数;
 S ——步长。

表 2 给出的是本程序使用的一些主要参数值,利用参数估计模型进行仿真,仿真时间 200 s,得到结果如表 3 所示。

表2 人工鱼群算法参数值

Table 2 Parameter values of artificial fish swarm algorithm

参数	设定值	参数	设定值	参数	设定值
鱼群规模 N	100	拥挤度因子 δ	0.618	代数 M	100
视野 V_i	1	尝试次数 n	100	步长 S	0.4

表3 人工鱼群算法参数优化结果 ($T=200$ s)Table 3 TMD parameter optimization results of AFSA ($T=200$ s)

TMD 位置	标准偏差 J/m	TMD1 质量 M_{TMD1}/kg	TMD1 刚度 $k_{TMD1}/N \cdot m^{-1}$	TMD1 阻尼 $d_{TMD1}/N \cdot s \cdot m^{-1}$	TMD2 质量 M_{TMD2}/kg	TMD2 刚度 $k_{TMD2}/N \cdot m^{-1}$	TMD2 阻尼 $d_{TMD2}/N \cdot s \cdot m^{-1}$
机舱和平台	0.1287	3184	5261	64913	24540	10042	14332

4 结果分析

为更全面地考察 TMD 在多种工况下的振动抑制效果,根据 IEC 61400-3 设计标准选取 5 种风浪载荷工况如表 4 所示^[21]。

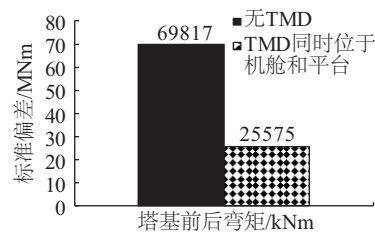
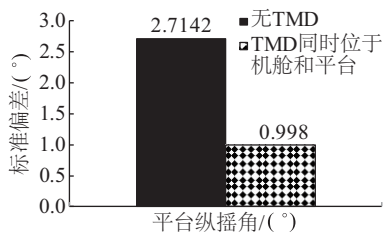
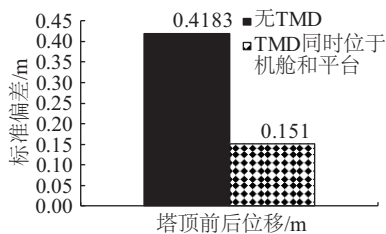
工况 1~工况 5 分别表示风力发电机在切入风速附近、低于额定风速、额定风速附近、高于额定风速和切出风速附近运行。在风浪同向情况下,进行仿真分析得到

图 7 所示的各评价指标的标准偏差以及表 5 所示的 TMD 对各评价指标标准偏差的抑制率。

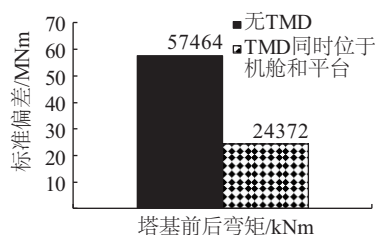
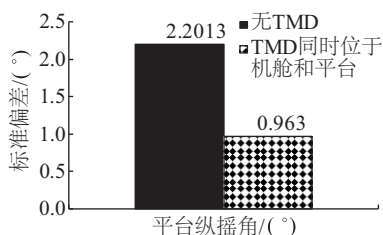
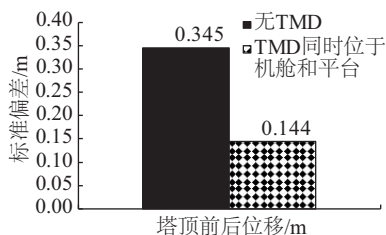
表4 5种典型风浪载荷工况

Table 4 Five typical wind and wave load cases

	项目				
	1	2	3	4	5
轮毂风速/ $m \cdot s^{-1}$	4	8	12	18	24
有效浪高/m	1.7	2.0	2.6	4.0	5.6



a. 工况 1



b. 工况 2

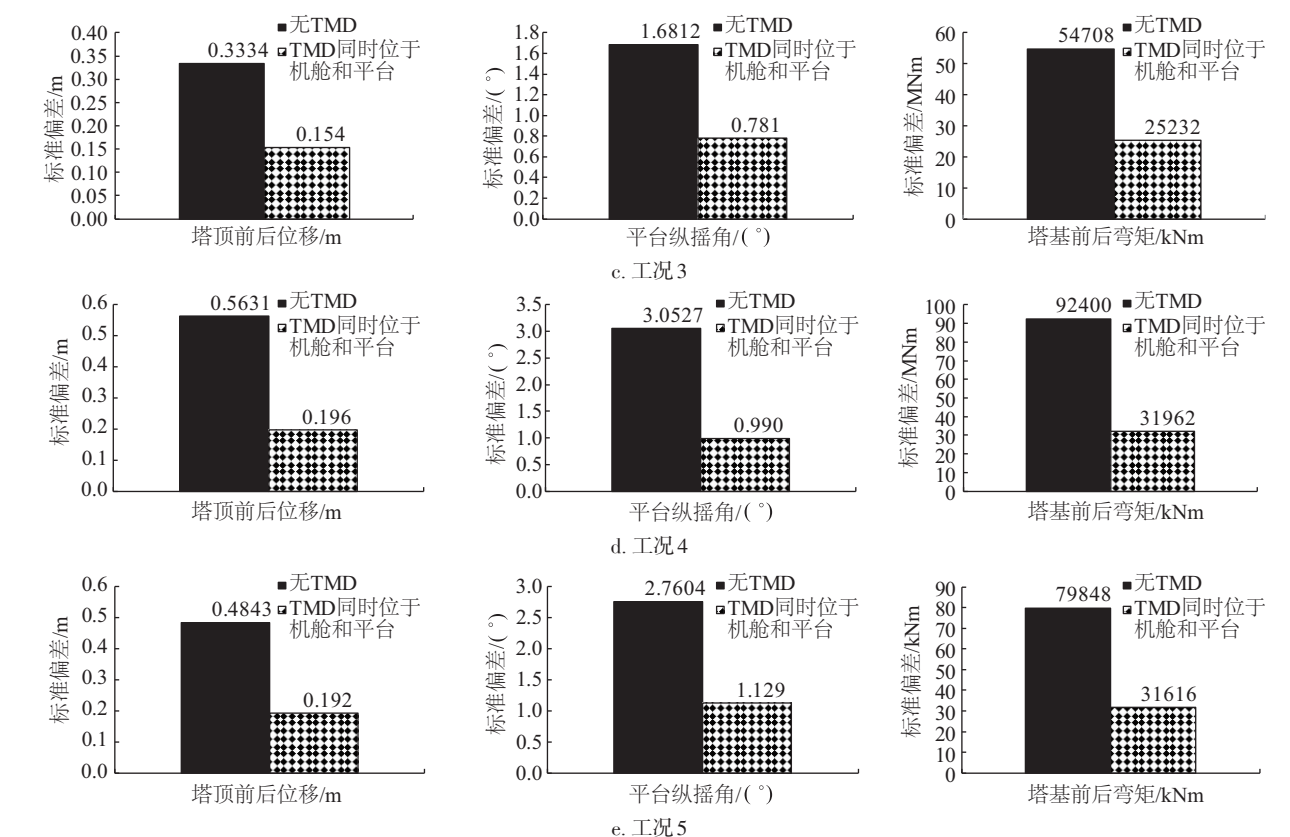


图7 在5种工况下各评价指标的标准差

Fig. 7 Standard deviation of each evaluation index under 5 working conditions

表5 TMD对评价指标标准偏差的抑制率

Table 5 Suppression rate of standard deviation of evaluation index with TMD

TMD 安装位置	无TMD	TMD 位于机舱和平台/%				
	工况 1~工况 5	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
塔顶前后位移/m	—	72.0	62.9	54.2	74.9	58.1
塔基前后弯矩/kNm	—	71.3	62.1	54.1	75.2	58.1
平台纵摇角/(°)	—	69.7	59.3	52.4	77.3	55.0

同时,为验证风浪不同向情况下 TMD 对不同评价指标的抑制效果,选取偏差角度为 30°在 5 种工况下进行仿真分析,结果如表 6 及图 8、图 9 所示。

表6 风浪偏差角度为30°时TMD对评价指标标准偏差的影响

Table 6 Influence of standard deviation of each evaluation index with TMD when the misaligned angle is 30°

工况	TMD 安装情况	平台纵摇角/(°)	塔顶前后位移/m	塔基前后弯矩/kNm
1	无TMD	1.731	0.277	46220
	有TMD	1.336	0.204	34892
2	无TMD	1.841	0.305	50793
	有TMD	1.534	0.244	41310
3	无TMD	1.447	0.270	44606
	有TMD	1.126	0.215	35796
4	无TMD	2.903	0.549	90128
	有TMD	1.938	0.394	64982
5	无TMD	2.406	0.428	71019
	有TMD	1.374	0.257	42485

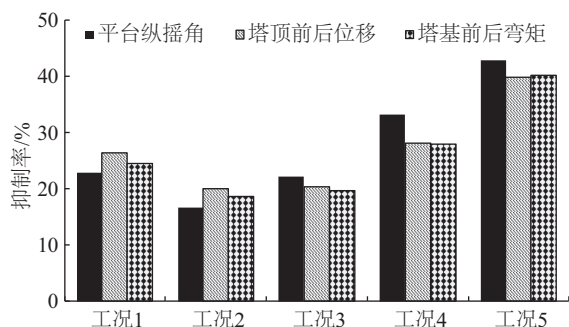
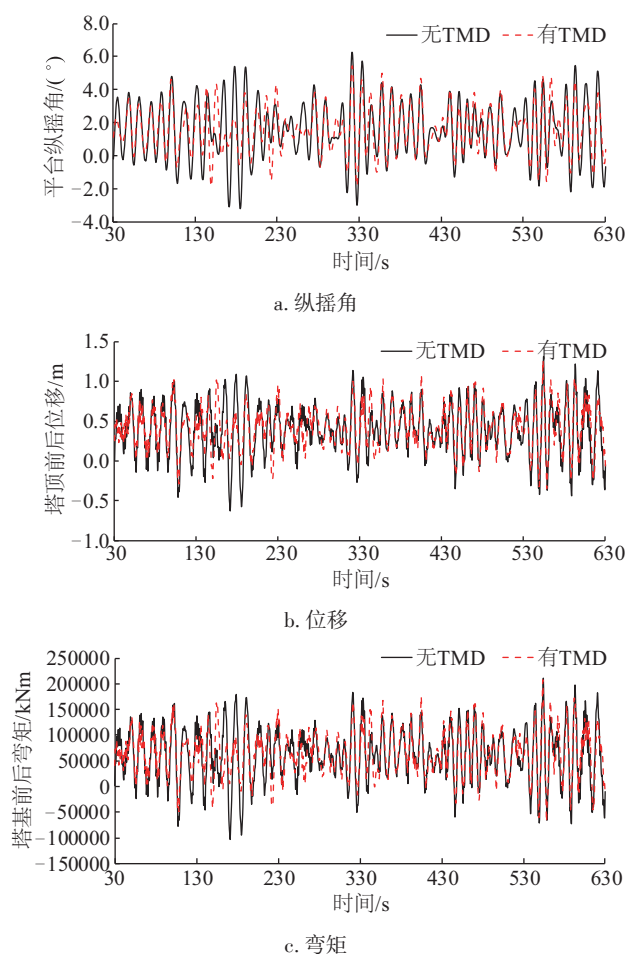
图8 风浪偏差角度为 30° 时TMD对各评价指标的抑制率Fig. 8 Suppression rate of standard deviation of each evaluation index with TMD when the misaligned angle is 30° 

图9 工况3下的各评价指标

Fig. 9 Each evaluation index under the working condition 3

从图7~图9及表5、表6中可看出:1)在风浪同向的5种工况下,TMD对各评价指标都起到较好的抑制效果,标准偏差抑制率最大达到77.3%;2)在风浪同向的工况1和工况4下TMD对各评价指标的抑制效果最好。这是因为在切入风速附近,风速和波浪的作用力较

小还不足以引起平台的运动,此时TMD本身质量较大,也起到了很好的抑制效果;当处于风力机处于切入风速和额定风速之间时,由于作用于叶轮上的恒定风力分量使TMD大部分时间都靠于一侧,因此TMD的抑制效果有限;当风力机处于切出风速附近时,风和波浪力作用很大,引起平台的剧烈运动,所设计的TMD抑制作用有限;3)在风浪不同向的5种工况下,TMD对各评价指标也都起到较好的抑制效果,标准偏差抑制率最大达到42.9%。

5 结 论

本文根据拉格朗日方程搭建了四自由度的驳船型漂浮式风力机的动力学模型(TMD同时位于机舱和平台),并在Simpack软件中对其进行建模。利用LM法对风力机未知参数进行估计,以塔顶纵向位移标准偏差最小为控制目标,利用人工鱼群算法对TMD的质量、阻尼以及刚度参数同时进行优化。最后,在5种工况下,并在风浪同向和不同向时,分别对无TMD和TMD同时位于机舱和平台的风力机模型进行仿真分析。仿真结果表明,在风浪同向时,相对于未安装TMD,在机舱和平台中同时安装经人工鱼群算法优化后的TMD对塔顶前后位移、塔基前后弯矩、平台纵摇角都有明显的抑制效果。在风浪不同向时TMD对各评价指标均起到较好的抑制效果。

[参考文献]

- [1] MUSIAL W, BUTTERFIELD S, RAM B. Energy from offshore wind [C]//Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, May 2006: 1888-1898.
- [2] JONKMAN J. Influence of control on the pitch damping of a floating wind turbine[R]. 2008 ASME wind energy symposium. Reno, Nevada, National Renewable Energy Laboratory; January 7-10, 2008.
- [3] NAMIK H, STOL K. Individual blade pitch control of a spar—Buoy floating wind turbine[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2013, 22(1): 214-223.
- [4] TANG Y, GU M. Analysis on control of wind induced vibration of a super—Tall building with TMD[J]. Journal of vibration & shock, 2006, 25(2): 16-19.
- [5] SINGH M P, MATHEU E E, SUAREZ L E. Active and semi-active control of structures under seismic excitation [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1997, 26(2): 193-213.

- [6] 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.
- [7] COLWELL S, BASU B. Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control[J]. *Engineering structures*, 2009, 31(2): 358-368.
- [8] COUDURIER C, LEPREUX O, PETIT N. Passive and semi-active control of an offshore floating wind turbine using a tuned liquid column damper[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(16): 241-247.
- [9] DEZVAREH R, BARGI K, MOUSAVI S A. Control of wind/wave- induced vibrations of jacket- type offshore wind turbines through tuned liquid column gas dampers[J]. *Structure & infrastructure engineering*, 2016, 12(3): 312-326.
- [10] ZHANG Z, BASU B, NIELSEN S R K. Tuned liquid column dampers for mitigation of edgewise vibrations in rotating wind turbine blades[J]. *Structural control & health monitoring*, 2015, 22(3): 500-517.
- [11] LACKNER M A, ROTE A M A. Passive structural control of offshore wind turbines[J]. *Wind energy*, 2011, 14(3): 373-388.
- [12] STEWART G M. Load reduction of floating wind turbines using tuned mass dampers[D]. Amherst: University of Massachusetts, 2012.
- [13] STEWART G M, LACKNER M A. The impact of passive tuned mass dampers and wind- wave misalignment on offshore wind turbine loads[J]. *Engineering structures*, 2014, 73: 54-61.
- [14] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- HONG J Z. Computational multibody dynamics[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1999.
- [15] JONKMAN J M, BUHL Jr. M L. FAST user's guide[R]. National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO(USA), Tech. Rep. NREL/EL-500-36970, 2005.
- [16] MATHA D. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform with a comparison to other floating turbine concepts[R]. Tech. Rep. NREL/SR- 500- 45891, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colo, USA, 2010.
- [17] STEWART G M. Load reduction of floating wind turbines using tuned mass dampers[D]. Amherst: University of Massachusetts, 2012.
- [18] RANGANATHAN A. The Levenberg- Marquardt algorithm[J]. *Tutorial on LM algorithm*, 2004, 11(1): 101-110.
- [19] SI Y, KARIMI H R, GAO H. Modelling and optimization of a passive structural control design for a spar-type floating wind turbine[J]. *Engineering structures*, 2014, 69(9): 168-182.
- [20] 张大斌, 杨添柔, 温梅, 等. 基于差分进化的鱼群算法及其函数优化应用[J]. *计算机工程*, 2013, 39(5): 18-27.
- ZHANG D B, YANG T R, WEN M, et al. Fish swarm algorithm based on differential evolution and its function optimization application[J]. *Computer engineering*, 2013, 39(5): 18-17.
- [21] JONKMAN J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[D]. University of Colorado at Boulder, 2007.

VIBRATION CONTROL OF FLOATING WIND TURBINES BASED ON TMD

Zhang Xiaofeng¹, Jin Xin², Lin Yifan², Xie Shuangyi², He Jiao²

(1. *Institute of Intelligent Manufacturing and Automotive, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 400052, China;*

2. *College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: In this paper, the vibration control of floating wind turbine is studied, and the influence of TMD installed in the nacelle and platform simultaneously on the displacement and load of the key parts of the wind turbine is discussed. Firstly, the multi-body dynamic model of wind turbine is established and the accuracy of modeling is verified. Then, the dynamic model of four degrees of freedom (4-DOF) is built according to Lagrange equation, and the unknown parameters are estimated by Levenberg-Marquardt (LM) method, and the wind turbine model is built in SIMPACK software. Thirdly, the minimum standard deviation of the tower top longitudinal displacement is taken as the control objective, and the mass, damping coefficient and stiffness coefficient of the TMD are optimized by artificial fish swarm algorithm (AFSA). Finally, the wind turbine model with all-DOF is simulated under five load cases respectively. The simulation results show that, Whether wind and wave are in the same direction or not, TMD installed in the nacelle and platform simultaneously will have obvious effect on anteroposterior displacement of the tower top, anteroposterior bending moments of the base and pitch Angle of platform compared with no TMD.

Keywords: vibration control; dynamic models; offshore wind turbines; tuned mass damper(TMD); artificial fish swarm algorithm (AFSA)