

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.011

基于 TMD 控制的浮式风力机稳定性研究

蔡 新^{1,2,3}, 张洪建^{1,3}

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2. 沿海开发与保护协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省风电机组结构工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对浮式风力机受到各种复杂载荷而产生的稳定性问题, 通过在 5 MW Barge 风力机机舱内配置调谐阻尼质量器(TMD), 利用 FAST 模拟结构的动力特性, 研究 TMD 对海上浮式风力机平台运动特性、塔顶位移以及塔架根部载荷的控制效果。此外, 基于遗传算法对 TMD 结构参数进行优化, 并比较了在无控制、无优化 TMD 控制以及优化 TMD 控制下浮式风力机的运动响应。基于实测海况数据, 对优化后的 TMD 进行了合理性与可靠性验证。结果表明: 相较于无优化 TMD, 优化后的 TMD 对浮式风力机横摇、塔顶侧向位移以及塔架根部侧向载荷控制效果更加明显; 优化后 TMD 可以适用于大部分海况, 能够很好地控制高频区间时运动响应的幅度, 并且随着海况等级的提高, 对浮式风力机运动响应控制效果更加明显。结果表明了 TMD 控制方法与优化算法的可靠性与优越性。

关键词: 海上风电场; FAST; 浮式风力机; 动力响应; 调谐阻尼质量器

中图分类号: TK83; O355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)01-0070-07

Stability study of floating wind turbine based on TMD control

CAI Xin^{1,2,3}, ZHANG Hongjian^{1,3}

(1. School of Mechanics and Materials, HoHai University, Nanjing 211100, China;
2. Cooperate Innovation Center for Coastal Development and Protection, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Province Wind Power Structural Engineering Research Center, Nanjing 210098, China)

Abstract: Focusing on the stability problem of floating wind turbine subjected to various complex loads, by equipping a tuned mass damper(TMD) on the nacelle of the 5 MW Barge wind turbine and using FAST to simulate the dynamic performance of the structure, this paper is to investigate the control effect of TMD on the motion characteristics, tower top displacement and tower root load of floating wind turbines. In addition, the TMD structure parameters were optimized based on the Genetic Algorithm. Meanwhile, motion responses of floating wind turbines without the control, with the non-optimized TMD control and with the optimized TMD control were compared. Based on the measured sea state data, the rationality and reliability of optimized TMD were verified. The results show that compared with the non-optimized TMD, the optimized TMD is more effective in controlling the roll, the side-to-side displacement at the tower top and the side-to-side load at the tower root. The optimized TMD can be applied to most sea states and can well control the amplitude of motion response in the high frequency interval of sea state. Besides, with the improvement of sea state level, the control effect of motion response for the floating wind turbine becomes more obvious. The results show the reliability and superiority of TMD control method and optimization algorithm.

Key words: offshore wind farms; FAST; floating wind turbine; dynamic response; tuned mass damper

浮式风力机处于复杂的海洋环境中, 会受到包括风、浪、流、冰等各种外部载荷的作用。这些外部载荷影响浮式风力机的稳定性, 并可能导致其部件故障甚至破坏。为了降低海上风力机组的载荷并提高浮式风力机的稳定性, 许多学者对此进行了研究, 主要分为三方面: (a) 利用控制桨距的方法减小气动载荷从而提高浮式风力机的稳定性, 包括独立变桨控制^[1]、发电机转矩控制^[2]以及气动转子控制^[3]。这种方法对浮式风

基金项目: 江苏高校首批 2011 计划(苏政办发[2013]56 号); 江苏风力发电工程技术中心开放基金(ZK16-03-03); 中央高校基本科研业务费专项(2018B48614)

作者简介: 蔡新(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事风力机降本增效关键技术及应用研究。E-mail: xcail@hhu.edu.cn

引用本文: 蔡新, 张洪建. 基于 TMD 控制的浮式风力机稳定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 70-76.

CAI Xin, ZHANG Hongjian. Stability study of floating wind turbine based on TMD control[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1): 70-76.

力机可以产生一定的控制效果,但是复杂的桨距控制策略会增加叶根的疲劳载荷。(b)通过对支撑结构的设计提高浮式风力机的稳定性。Kim 等^[4]研究了系泊系统对 Spar 浮式风力机的影响;丁勤卫等^[5]研究了垂荡板布置形式与数量对 Spar 浮式风力机的影响;黄致谦等^[6]设计了一种新型半潜式平台并与已有的平台进行了对比。然而这些研究通常把研究重点放在浮式平台的设计上,而将风力机上部简化为一个集中质量,无法研究浮式风力机上部的非线性动力学特性。(c)结构控制。结构控制一般用于高层建筑物减振的研究中,海上浮式风力机高度基本在 100 m 以上,因此可以借鉴结构控制的方法来提高浮式风力机的稳定性。结构控制分为被动控制与主动控制,主动控制可以降低浮式风力机的疲劳载荷,但也会降低其功率^[7]。被动控制成本较低,不会影响发电效率,由于减振作用明显,故主体结构可以减小构件截面尺寸,降低成本。诸多学者研究了不同形式的被动结构控制方法,如调谐液体阻尼器^[8]、调谐液体柱阻尼器^[9]、摩擦阻尼器^[10]以及调谐阻尼质量器(tuned mass dampers, TMD)^[11]等。浮式风力机机舱内空间狭小,同等质量混凝土的体积仅为水的 1/3,因此 TMD 更适合浮式风力机。但是 TMD 往往不能宽频吸振,一旦结构振动频率与自振频率相差过大,控制效果会大幅下降,甚至加剧振动。

通过以上研究可知,对提高浮式风力机稳定性的研究取得了很多成果,但仍有不足之处:变桨控制系统可以降低气动载荷,但会增加叶根疲劳载荷;设计支撑结构时会对浮式风力机上部进行简化,不能真实反映浮式风力机运动状况;而结构控制与质量、弹簧和阻尼的参数组合密切相关。目前关于 TMD 参数优化的文献大部分基于批量计算,从大量输出结果中选取较优的结果,以达到参数优化的效果。一旦浮式风力机参数发生变化,又要重新计算,时间成本大大增加。本文利用 FAST 模拟结构的动力特性研究 TMD 对浮式风力机稳定性的影响,考虑了风浪耦合作用,模拟浮式风力机的运动响应。基于遗传算法对 TMD 结构参数进行优化,通过研究 TMD 各个参数对浮式风力机整体运动方式的影响来设置目标函数,不同的浮式风力机只需要修改目标函数中对应的参数,改变算法中迭代次数等参数。结果表明,该方法可以明显提高计算精度,减少计算时间。

1 浮式风力机模型

利用 NREL 开发的 FAST 作为模拟海上风力机性能的主要工具。研究对象为 NREL 5MW Barge 风力机组,为水平轴三叶片风力机,控制方式为独立变桨控制,轮毂高度为 90 m,叶轮直径为 126 m,风力机总质量为 697 t^[12]。

Barge 浮式平台结构形式如图 1 所示。其优点是节省成本,便于现场安装。但是由于其大部分结构在水面之上,所以其对波浪载荷非常敏感。Barge 浮式平台为一个 40 m×40 m×10 m 的长方体,吃水深度为 4 m,平台质量为 5 450 t。系泊系统由 8 根系泊缆组成,长度为 473.3 m,单位长度质量为 130.4 kg/m^[13]。



图 1 Barge 浮式平台示意图
Fig. 1 Diagram of Barge platform

2 模型建立

2.1 风场模型建立

为模拟湍流风,设定风场面积为 150 m×150 m。考虑空间相干性,利用风模拟软件 Turbsim 生成以 Kaimal 风谱模型为基础的风速分布模型^[14],其风谱模型为

$$S(f) = \frac{4 \sigma^2 L / V}{(1 + 6fL/V)^{5/3}} \tag{1}$$

式中: f ——频率; $S(f)$ ——功率密度; σ ——速度标准差; L ——湍流尺度参数; V ——轮毂处风速。

以风力机叶轮中心为参考风速点,设定风力机的额定风速 11.4 m/s 为参考点风速,仿真时间为 10 min,得到符合实际情况的湍流风场。风场计算区域及网格划分如图 2 所示,叶轮中心处风速分布如图 3 所示,图 3 中 x 轴正向为 0°湍流风传播方向; y 轴由右手定则确定; z 轴竖向朝上。

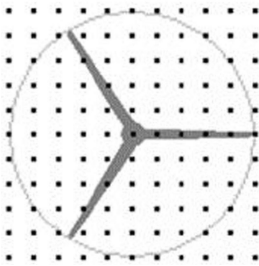


图 2 风场计算区域及网格
Fig. 2 Calculation region and grid of wind field

2.2 波浪载荷模型建立

常见的波浪谱有 PM 谱、Jonswap 谱、BM 谱以及文圣常谱等^[15]。选择实际工程中较为常用的 PM 波浪谱^[16],可表示为

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{0.78}{\omega^5} \exp\left(-\frac{0.74}{U^4} \frac{g^4}{\omega^4}\right) \tag{2}$$

式中: $S_{\zeta}(\omega)$ ——波浪功率谱; U ——波浪传播速度; ω ——波浪圆频率; g ——重力加速度。

设定波浪谱波高为 5 m,波浪周期为 12.4 s。得到充分发展的波浪如图 4 所示。

2.3 TMD 模型建立

建立 TMD 模型的关键在于将 TMD 系统运动方程与风力机原始运动方程进行耦合。机舱中 TMD 原理如图 5 所示。风力机动力学模型可用 Kane 方程表示:

$$F_i + F_i^* = 0 \tag{3}$$

其中

$$F_i = \sum_{r=1}^W (R_{O_r} \cdot u'_{O_i} + M_{O_r} \cdot \omega'_{ri})$$
$$F_i^* = \sum_{r=1}^W (R_{C_r}^* \cdot u'_{C_i} + L_{C_r}^* \cdot \omega'_{ri})$$

式中: F_i ——广义主动力; F_i^* ——广义惯性力; i ——风力机自由度; W ——刚体数; O ——主坐标系原点; C ——刚体质心; R_{O_r} 、 M_{O_r} ——作用在第 r 个刚体的主动力与力矩; u'_{O_i} 、 u'_{C_i} ——主坐标系与局部坐标系中第 r 个刚体相对于第 i 个自由度的偏速度; ω'_{ri} ——第 r 个刚体相对于第 i 个自由度的偏角速度; $R_{C_r}^*$ 、 $L_{C_r}^*$ ——作用在第 r 个刚体的惯性力与力矩。

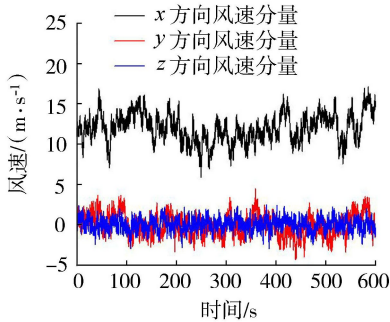


图3 时域风速

Fig.3 Wind velocity in time domain

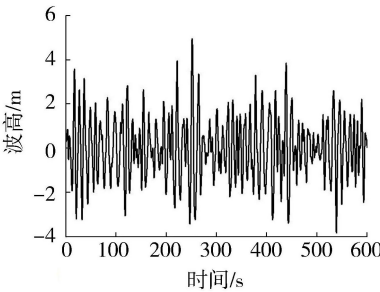


图4 波浪时程

Fig.4 Wave in time domain

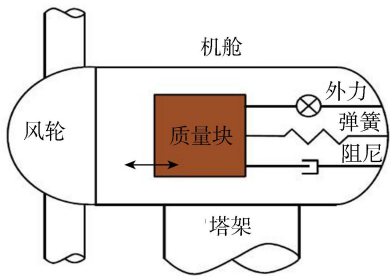


图5 机舱中 TMD 原理

Fig.5 Principal diagram of TMD in nacelle

风力机在配置 TMD 系统后,仅在原有风力机模型上耦合了新的自由度,新的动力学方程中多了与 TMD 自由度相关的主动力和惯性力项。推导过程给出如下假设:TMD 系统位于机舱内,并在机舱坐标系中进行移动;TMD 位置是相对于塔顶中心确定的;忽略 TMD 系统的转动效应。TMD 系统位于机舱底部,由质量系统、弹簧系统和阻尼系统组成。TMD 通过预先人为设置质量、刚度与阻尼,使自振频率接近于风力机自振频率。当 TMD 在外力作用下产生振动时,TMD 会产生与主体结构振动方向相反的惯性力,能量通过阻尼耗散,达到结构稳定控制的目标。TMD 系统运动方程为

$$M\ddot{X} + d(\dot{X} - \dot{x}) + (K + k)X - kx = F(t) \tag{4}$$

$$m\ddot{x} + d(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X) = 0 \tag{5}$$

式中: X ——支撑系统位移; x ——TMD 位移; d ——TMD 阻尼; k ——TMD 刚度; K ——支撑系统刚度; M ——支撑系统质量; m ——TMD 质量; $F(t)$ ——外部负载。

由振动力学原理可以得到主系统振动响应 A 为

$$A = \sqrt{\frac{(2\beta f)^2 + (f - \lambda)^2}{(2\beta f)^2[(1 + \mu)f^2 - 1]^2 + [\mu\lambda^2 f^2 - (f^2 - 1)(f^2 - \lambda^2)]^2}} \tag{6}$$

其中

$$f = \tilde{\omega}/\Omega \quad \lambda = \omega/\Omega \quad \mu = m/M \quad \beta = d/(2\sqrt{mk})$$

式中: $\tilde{\omega}$ ——外部载荷频率; Ω ——风力机固有频率; λ ——TMD 与风力机固有频率比; ω ——TMD 固有频率; β ——TMD 临界阻尼比; μ ——TMD 与主结构质量比。由此可见,风力机结构的运动由质量、刚度与阻尼共同确定。其最优参数组合的研究显得尤为重要。

3 TMD 系统参数优化

遗传算法的原理是通过模拟物种进化从而得到最优解。遗传算法相较于其他优化算法速度更快、更准确,并且能够自动调整搜索方向,其主要过程为首先随机产生一个初始种群,之后按照优胜劣汰的原则,进化出更加符合要求的结果,根据目标函数与约束条件来选择个体,并进行交叉与变异生成新的种群,最后得到满足要求的最优结果^[17]。遗传算法流程如图 6 所示。

TMD 系统主要包括质量系统、刚度系统和阻尼系统,说明结构参数主要表现为质量、刚度和阻尼的变化影响浮式风力机动力响应,通过调整各项参数使 TMD 吸收更多结构振动产生的能量,从而减小结构振动响应。采用遗传算法作为优化方法对质量、刚度和阻尼数值进行优化,目标函数为使 TMD 系统自振频率接近浮式风力机自振频率。根据 TMD 设计的相关规范^[18],确定各参数计算取值范围: $10\text{ t} \leq m \leq 40\text{ t}$, $5\text{ kN/m} \leq k \leq 25\text{ kN/m}$, $6\text{ kN} \cdot \text{s/m} \leq d \leq 25\text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。

利用 Matlab 编写优化算法程序,其中算法控制进化的参数中交叉概率、变异概率及进化代数分别为 0.65、0.08 与 2000。得到优化后的 TMD 质量为 20 902 kg,刚度为 8 374 N/m,阻尼为 22 830 N · s/m。高耸建筑结构中,TMD 质量一般占结构整体质量的 0.25% ~ 2.00%。本文 TMD 质量占结构总质量的 0.34%,符合质量比要求。

4 结果与分析

海上浮式风力机组稳定性主要表现为平台运动响应与塔顶位移,而塔架载荷大小决定了风力机组的可靠性与安全寿命,故以平台运动、塔顶位移与塔架根部载荷为研究重点。初始 TMD 为根据 Den Hartog 原则^[19]确定的参数,质量 20 t,弹簧刚度 10 kN/m,阻尼 50 kN · s/m。风浪均垂直于叶轮。

4.1 TMD 对平台稳定性的影响

由图 7 可知:TMD 对平台纵荡、横荡和垂荡影响较小,对横摇、纵摇和首摇影响较为明显,优化 TMD 相较于无 TMD 控制效果更好;优化 TMD 使横摇范围从 1.51° ~ -1.32°降低为 0.98° ~ -0.82°,降幅达 35%;纵摇范围从 12.05° ~ -10.77°降为 10.87° ~ -9.18°,降幅达 9.8%;首摇范围从 11.12° ~ -8.72°降至 9.18° ~ -8.83°,降幅达 17.4%。由此可见,TMD 对平台影响主要体现在抑制平台转动。究其原因,浮式风力机平动周期相较于转动周期更大,TMD 自振频率更接近浮式风力机转动频率。而 TMD 仅在水平方向运动,故对垂荡影响很小。

4.2 TMD 对塔顶位移的影响

由图 8 可知:TMD 使塔顶各向位移均有减小,优化 TMD 的控制效果则更加明显;塔顶前后位移从 2.18 ~ -1.64 m 降为 2.11 ~ -1.56 m,说明 TMD 对塔顶前后位移影响不大;塔顶侧向位移从 0.22 ~ -0.32 m 降至 0.18 ~ -0.3 m,降幅达 21.4%,标准差从 0.08 降至 0.04,说明塔顶侧向运动稳定性得到提高。这是因为塔架侧向运动主要是由湍流风与尾流中的漩涡共同作用引起的,由于 TMD 控制系统为动力减振装置,故对脉动风载荷引起的动力响应有更好的控制效果。

4.3 TMD 对塔架根部动力响应的影响

由图 9 可知:TMD 对塔架根部剪力与弯矩均有显著影响;在配置优化 TMD 时,塔架根部前后剪力从 4 464 ~ -3 771 kN 降至 4 261 ~ -3 538 kN,降幅为 9.5%;塔架根部前后弯矩从 357 100 ~ -280 500 kN · m 降至 343 700 ~ -265 500 kN · m,降幅仅为 3.9%,可知 TMD 对塔架根部纵向载荷影响不大。塔架根部侧向剪力

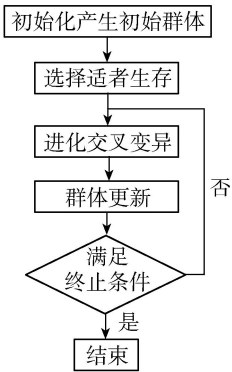


图 6 遗传算法优化流程
Fig. 6 Optimization flow chart of Genetic Algorithm

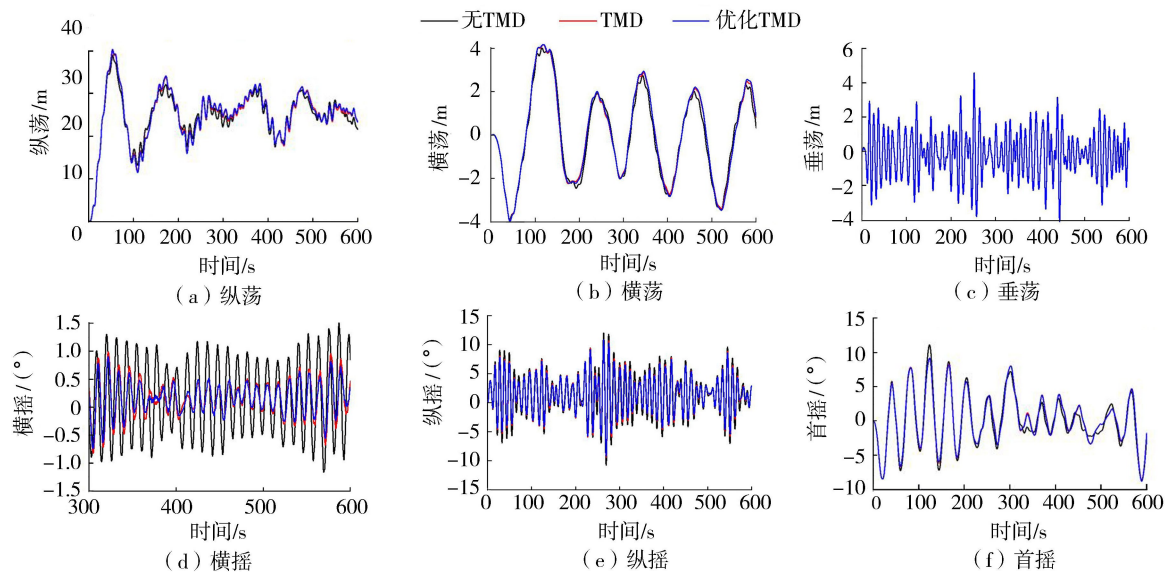


图7 平台运动6自由度时历运动曲线

Fig.7 Motion curve of platform motion with 6 DOFs

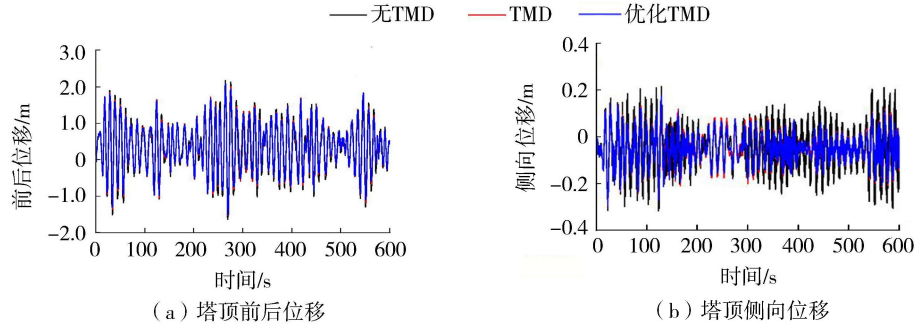


图8 塔顶部位移时域

Fig.8 Tower top displacement in time domain

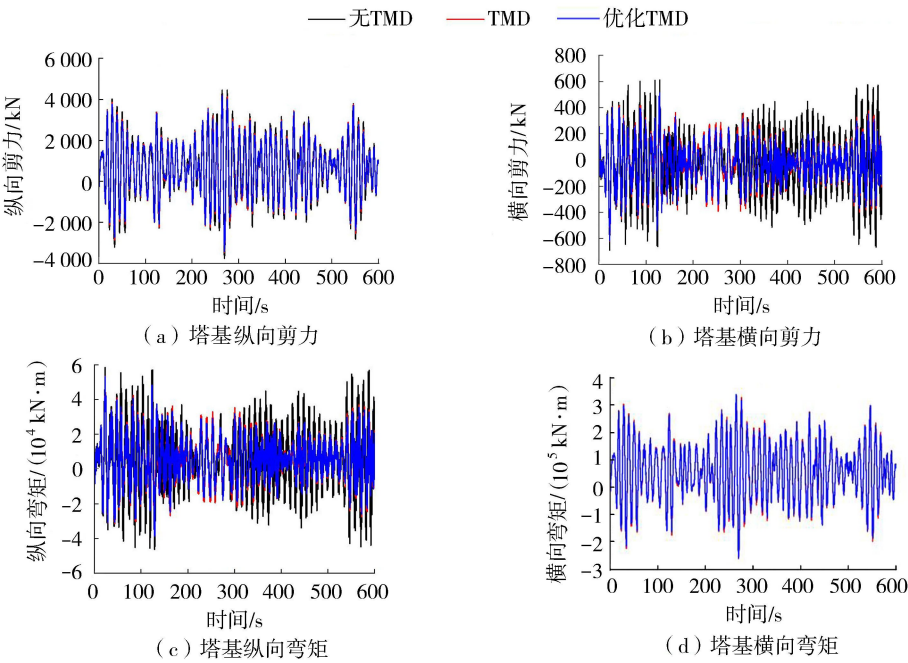


图9 塔基载荷时域

Fig.9 Tower root load in time domain

从 614 ~ -690 kN 降至 503 ~ -667 kN,降幅达 22.1%;塔架根部侧向弯矩从 58 460 ~ -46 190 kN · m 降至 56 120 ~ -28 620 kN · m,降幅达 8.4%。这是因为浮式风力机顺风向的运动主要为静力响应,而由湍流风和尾流造成的侧向运动属于动力响应。由于 TMD 控制系统为动力减振装置,故对动力响应有更好的控制效果。

4.4 算例验证

为验证优化结果的可靠性,选取北太平洋实测海况统计数据^[20]中出现概率最高的 5 种海况对 TMD 优化前后浮式风力机进行计算。海况数据见表 1。由结果可知,TMD 主要影响横摇、塔架根部侧向位移与载荷。故仅对这 4 个参数的时间序列进行快速傅里叶变换,得到频域分析结果,如图 10 所示。

表 1 海况数据
Table 1 Sea state data

海况	风速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	有义 波高/m	波浪 周期/s	出现 概率/%
1	8.5	0.30	7.5	6.80
2	13.5	0.88	7.5	23.70
3	19.0	1.88	8.8	27.80
4	24.5	3.25	9.7	20.64
5	37.5	5.00	12.4	13.15

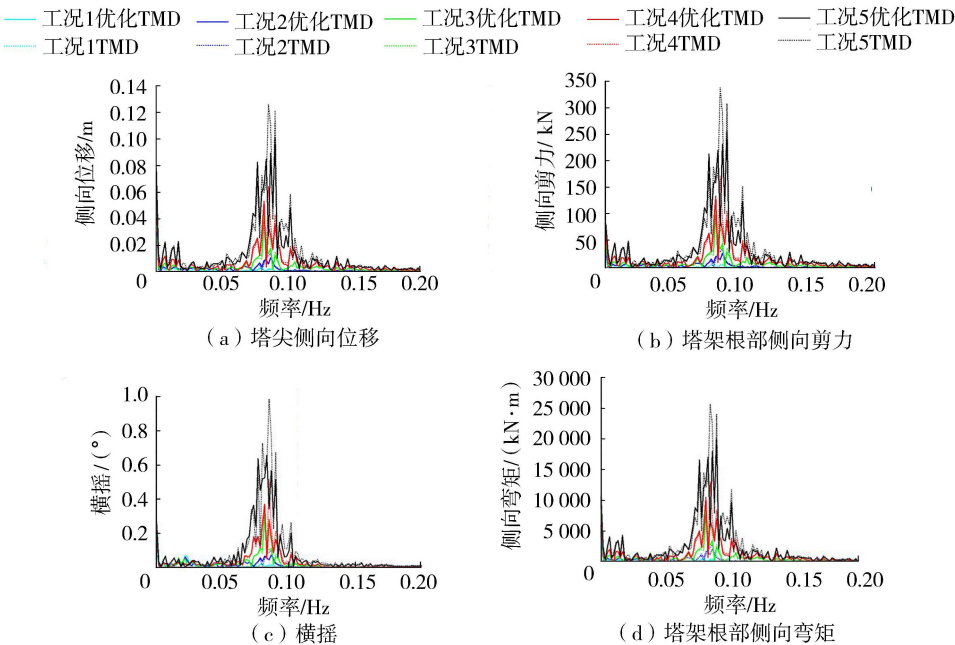


图 10 风力机运动响应频域

Fig. 10 Motion response of wind turbine in frequency domain

通过对比有无优化 TMD 的浮式风力机在实测海况高频区间中频域运动响应可知:浮式风力机运动主要集中在波频为 0.07 ~ 0.11 Hz 的区间内;随着海况愈发恶劣,浮式风力机运动响应的峰值逐渐变大;配置优化后 TMD 的浮式风力机相较于配置未优化 TMD 的浮式风力机,波频内的响应幅值明显降低。5 种海况下,峰值频率处的塔顶侧向位移分别降低 1.8%、24.3%、27.8%、17.7%、19.6%;峰值频率处的横摇分别降低 2.7%、27.0%、19.8%、28.1%、33.3%;峰值频率处的塔架根部侧向剪力分别降低 8.0%、24.4%、27.0%、21.9%、24.4%;峰值频率处的塔架根部侧向弯矩分别降低 10.5%、24.2%、27.5%、19.7%、21.7%。说明优化后的 TMD 在大部分海况下可以更好地吸收风力机运动产生的能量,对浮式风力机运动响应的抑制效果优于未优化 TMD。在恶劣海况下,控制效果更加明显。

5 结 论

本文以 NREL 开发的 5MW Barge 风力机为研究对象,在机舱中配置 TMD 对浮式风力机运动响应进行控制,利用 Kaimal 风谱计算湍流风,PM 波浪谱生成波浪载荷。考虑风浪耦合作用,基于 FAST 仿真模拟浮式风力机运动响应。此外,基于遗传算法对 TMD 结构参数进行优化,得到各参数最优组合,并基于 5 种实测海况对优化后的 TMD 进行了合理性与可靠性验证。根据计算结果,得到以下结论:

a. 以遗传算法为基础,对 TMD 系统的质量、刚度与阻尼参数进行了优化,得到各结构参数的最优组合为质量 20 902 kg、刚度 8 374 N/m、阻尼 22 830 N · s/m。

b. 由于 TMD 自振频率更接近于风力机转动频率且仅在水平方向运动,故 TMD 对浮式风力机的 6 自由度运动控制主要体现在对横摇、纵摇与首摇的抑制方面。其中,TMD 对横摇的控制效果最明显。

c. 湍流风载荷中包括静力作用与动力作用两个方面。浮式风力机顺风向的运动主要为静力响应,而由湍流风和尾流造成的侧向运动属于动力响应。由于 TMD 控制系统为动力减振装置,故对动力响应有更好的控制效果。所以 TMD 对塔顶侧向位移与载荷的控制效果更加明显。

d. 在实际海况中,优化后 TMD 控制效果明显优于未优化 TMD,可以明显降低浮式风力机运动高频区间内的幅度,适用于 90% 以上的海况。同时随着海况等级的提高,优化后的 TMD 控制效果更加明显。

参考文献:

- [1] BREIFFNI F, ANDREA S, BISWAJIT B. Wavelet-based individual blade pitch control for vibration control of wind turbine blades [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(1): 12-16.
- [2] JALADI K K, SANDHU K S. Real-time simulator based hybrid control of DFIG-WES [J]. ISA Transactions, 2019, 93: 325-340.
- [3] MINGMING Z, HONGLEI Y, JIANZHONG X. Numerical investigation of a azimuth dependent smart rotor control on a large-scale offshore wind turbine [J]. Renewable Energy, 2017, 105: 248-256.
- [4] KIM Y H, HONG S Y, NAM B W. A numerical study of the motion and structural responses of interlinked spars in irregular waves [J]. Journal of Ocean and Wind Energy, 2014, 1(3): 161-169.
- [5] 丁勤卫, 李春, 袁伟斌, 等. 风波耦合作用下垂荡板对漂浮式风力机 Spar 平台动态响应影响 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1113-1126. (DING Qinwei, LI Chun, YUAN Weibin, et al. Effects of heave plate on dynamic response of floating wind turbine Spar platform under the coupling effects of wind and wave [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(4): 1113-1126. (in Chinese))
- [6] 黄致谦, 丁勤卫, 李春, 等. 新型漂浮式风力机半潜平台抑制摇荡运动设计研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 185-193. (HUANG Zhiqian, DING Qinwei, LI Chun, et al. Research on design of new floating wind turbine semi-submersible platform to suppress heave motion [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2018, 38(24): 185-193. (in Chinese))
- [7] 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(15): 54-61.
- [8] DHIRENDRA K. PANDE Y, MOHIT K. et al. A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 401-428.
- [9] TANVEER M, USMAN M, KHAN I U, et al. Application of tuned liquid column ball damper (TLCBD) for improved vibration control performance of multi-storey structure [J]. PloS One, 2019, 14(10): 1-15.
- [10] MAJD A, HALA D, JAAFAR H, et al. Effectiveness of friction dampers on the seismic behavior of high rise building VS shear wall system [J]. Engineering Reports, 2019, 1(5): e12057.
- [11] RITA G, MARIANTONIETTA M. Optimum design of tuned mass dampers for different earthquake ground motion parameters and models [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2019, 28(17): e1672.
- [12] RANJEET A. Development of a robust nonlinear pitch angle controller for a redesigned 5MW wind turbine blade tip [J]. Energy Reports, 2019, 5: 136-144.
- [13] XIN T, XIAOWEI Z, ARIS K. Passive vibration control of an offshore floating hydrostatic wind turbine model [J]. Wind Energy, 2018, 21(9): 697-714.
- [14] ARUNDHUTI B, TANUSREE C, VASANT M, et al. Dynamic analysis of an offshore wind turbine under random wind and wave excitation with soil-structure interaction and blade tower coupling [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 205699.
- [15] 唐友刚, 桂龙, 曹菡, 等. 海上风力机半潜式基础概念设计与水动力性能分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(11): 1314-1319. (TANG Yougang, GUI Long, CAO Han, et al. Concept design and hydrodynamic performance analysis of semi-submersible foundation of offshore wind turbine [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014(11): 1314-1319. (in Chinese))
- [16] HWUSUB C, KYUNG S. Estimation of significant wave period from wave spectrum [J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 105699.
- [17] GUSTAVO C S, PASSO S, MARTIN H. et al. Genetic algorithms applied to an evolutionary model of industrial dynamics [J]. Economi A, 2020, 21: 279-296.
- [18] 陈士平. 调谐质量阻尼器的参数研究与简化设计 [J]. 世界地震工程, 1998(4): 91-107. (CHEN Shiping. Parameter research and simplified design of tuned mass damper [J]. World Seismic Engineering, 1998(4): 91-107. (in Chinese))
- [19] DEN H. Mechanical Vibrations [M]. New York: Hill, 1956.
- [20] FALTINSEN O M. 船舶与海洋工程环境载荷 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.