

垂荡板对漂浮式风力机水动力特性的研究

叶 舟^{1,2}, 张俊伟¹, 周国龙¹, 李 春^{1,2}, 丁勤卫¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 为研究垂荡板对漂浮式风力机 Spar 平台水动力特性的影响,以 Umaine-Hywind Spar 平台承载的 5 MW 风力机为研究对象,运用数值计算方法得出不同透空率垂荡板和在相同透空率下不同孔数垂荡板的水动力性能,并分析其频域和时域特性。结果表明,在相同孔数不同透空率垂荡板对比分析中,漂浮式风力机 Spar 平台在透空率为 10% 垂荡板作用下的稳定性最佳;选用透空率 10% 的垂荡板,对其进行不同开孔,并对 8 孔、12 孔、16 孔、20 孔、24 孔、28 孔和 32 孔进行水动力特性分析对比,其中附有 24 孔垂荡板漂浮式风力机 Spar 平台的稳定性最好。

关键词: 漂浮式风力机; 透空率; 稳定性; 垂荡板; Spar 平台

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着风能资源开发的不断扩大,尤其在深海处的开发,使得漂浮式风力机的研究备受重视。常用的深水平台有 Spar 平台、TLP 平台和半潜式平台等, Spar 平台凭其良好的稳定性、优质的灵活性和客观的经济性等优点,受到了国内外各研究机构的广泛关注^[1,2]。

为避免平台和波浪产生共振,使平台拥有良好的运动性能,通常要使平台的垂荡运动固有周期远大于波浪周期^[3]。垂荡板的出现改变了 Spar 平台必须依靠大吃水才能保证较大的垂荡固有周期,垂荡板提高的附加质量能增大平台的垂荡自振周期,使之远离波能集中频段;而提供的额外阻尼可有效降低平台的动态响应,提高平台的运动性能^[4,5]。

国内外学者对附有垂荡板漂浮式风力机 Spar 平台进行了水动力特性的理论研究和物理实验。Prislin 等^[6]分别对单块、多块正方形垂荡板的水动力系数进行了自由衰减试验研究,得到附加质量系数的经验公式。Holmes 等^[7]利用 CFD 的方法计算垂荡板垂荡运动过程的受力情况,并且补充了 Morison 方程的计算方法。Thiagarajan 等^[8]测试了圆柱底部附有圆板的垂荡阻尼,并得出粘性阻尼与振幅值的关系。Tao 等^[9]采用数值方法对底部附

有圆板的圆柱水动力特性进行了研究。Carlos 等^[10]使用大尺度模型比较分析了垂荡板的水动力系数和压力载荷。Subbulakshmi 等^[11]分析了垂荡板粘性阻尼的动力响应。纪亨腾等^[12]研究了三角形垂荡板在单板和双板 2 种情况下的强迫振荡;黄苗苗等^[13]对三维复杂结构 Spar 平台垂荡板垂荡水动力性能进行了研究,在 2 种复杂结构垂荡板形式接近时,得到其水动力特性。

垂荡板现主要应用到深海油气结构,并未在漂浮式风力机上广泛应用,且相关文献也甚少。本文结合以往深海油气结构的研究经验,把垂荡板应用到漂浮式风力机上,通过数值计算研究垂荡板对漂浮式风力机 Spar 平台运动性能是否起到改善作用,并对比分析改变透空率后整体结构的动态特性变化情况,以及在相同透空率下不同孔数垂荡板对整体结构的影响。

1 几何模型

1.1 模型与参数

漂浮式风力机主要包括:发电机组系统和支撑体系^[14]。发电机组系统包括发电机组、轮毂、叶片等;支撑体系包括上部的塔架和下部的基础^[15]。此处研究对象为 Umaine-Hywind Spar 平台承载的

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51676131)

通信作者: 张俊伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事海上漂浮式风力机方面的研究。cytheriah@163.com

5 MW 风力机,其风力机平台参数见表 1,根据相应参数建立基于 Spar 平台的漂浮式风力机整机模;型如图 1 所示。

表 1 Umaine-Hywind Spar 平台参数^[16]
Table 1 Parameters of Umaine-Hywind Spar

参数	数值
直径/m	6.5~9.4
吃水/m	120
排水量/m ³	8029
平台总质量/kg	7.466×10 ⁶
重心位置/m	89.92
横摇惯量/kg·m ²	4.229×10 ⁹
纵摇惯量/kg·m ²	4.229×10 ⁹
首摇惯量/kg·m ²	1.642×10 ⁸
系泊缆数量	3
导缆孔/锚深度/m	70/200
导缆孔/锚至平台中心线间距/m	5.2/445
未张紧缆索长度/m	468
缆索直径/m	0.09
缆索质量/kg·m ⁻¹	145
缆索拉伸刚度/N	3.842×10 ⁸

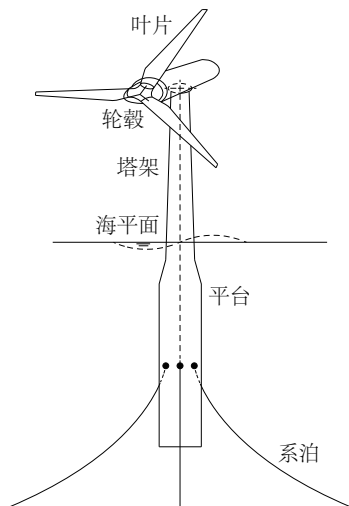


图 1 漂浮式风力机整机模型
Fig. 1 Floating wind turbine model

1.2 幅值响应算子

浮体波频运动 6 个自由度响应的稳态幅值,称为幅值运动响应算子(RAO)。该算子是由波浪激励到船体或浮体运动的传递函数,为船体或浮体运

动谱与波浪谱的比值,表征单位波幅的特征响应。

对于平动有: $Y_{y\zeta}^2(\omega) = \frac{S_{y\zeta}(\omega)}{S_{\zeta}(\omega)}$, 对于转动有:

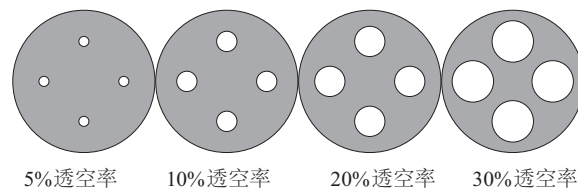
$Y_{\theta\zeta}^2(\omega) = \frac{S_{\theta\zeta}(\omega)}{S_{\zeta}(\omega)}$, 其中 $S_{y\zeta}(\omega)$ 和 $S_{\theta\zeta}(\omega)$ 分别为海上结构物的平动运动谱和转动运动谱; $S_{\zeta}(\omega)$ 为波浪谱; $Y_{y\zeta}^2(\omega)$ 和 $Y_{\theta\zeta}^2(\omega)$ 为平动和转动的幅值响应算子。

1.3 计算工况

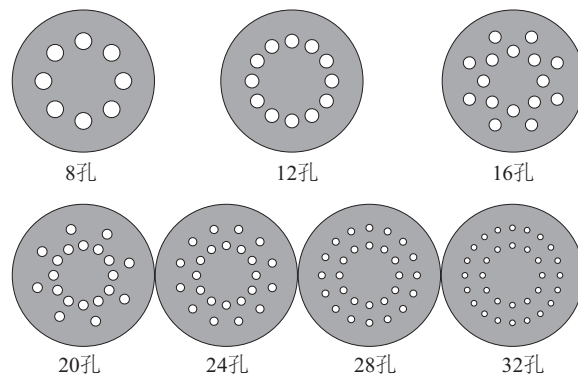
为对比和分析透空率对附有垂荡板漂浮式风力机 Spar 平台的影响,采用数值计算方法对模型进行频域和时域分析。

主要时域参数:1)最不利条件选用漂浮式风力机致动盘的迎风方向,对于风、浪、流均采用此方向,故主要分析纵荡、垂荡和纵摇 3 个自由度上的响应;2)为分析透空率对漂浮式风力机在极限海况下的影响,风速谱选择 Ochi & Shin 谱,其轮毂处风速为 11.4 m/s;随机波浪谱选用 P-M 谱,其有义波高为 8 m;并设定垂荡板深处的海流流速为 1 m/s;3)对系泊系统进行适当简化,并忽略系泊系统阻力。

根据以上海况和漂浮式风力机参数,分别对附有不同透空率和相同透空率下孔数不同分布的垂荡板进行分析对比。在图 2 中,图 2a 为相同孔数不同透空率垂荡板示意图,图 2b 为透空率 10%时



a. 不同透空率垂荡板



b. 相同透空率不同孔数垂荡板

图 2 垂荡板示意图

Fig. 2 Heave plate diagram

不同孔数垂荡板示意图,其孔数分别为8孔、12孔、16孔、20孔、24孔、28孔和32孔,与其对应孔半径为0.548、0.447、0.387、0.346、0.316、0.292、0.274 m。

2 计算模型

与深海油气结构相比,除基础平台上的载荷冲击外,作用于风力机上的风载荷引发的翻转运动同样是漂浮式风力机设计中需要考虑的问题^[17]。漂浮式风力机所受环境载荷包括由环境载荷引起的所有外力,如波浪漂移阻尼力、系泊力和运动惯性力等。漂浮式风力机所受到的环境载荷主要来自风、浪、流。

2.1 基本计算理论

作用在浮式结构物上的力 F 一般包括辐射力 F_R 、波浪激励力 F_W 、波浪漂移阻尼力 F_{WD} 、粘性阻尼力 F_{MD} 、静水恢复力 F_{HS} 、系泊力 F_M 、风作用力 F_{Wind} 和海流力 $F_{Current}$ 。

$$F = F_R + F_W + F_{WD} + F_{MD} + F_{HS} + F_M + F_{Wind} + F_{Current} \quad (1)$$

2.2 风载荷

通常认为脉动风是高斯随机过程,可采用脉动风谱进行描述,国际上推荐很多风谱模型^[18]。海上测量到的风谱在低频区域具有更多能量,而在低频载荷激励下,系泊浮式结构物在自然频率附近产生大幅度的低频共振运动。

无量纲化的频率:

$$f_* = fz \sqrt{\bar{U}_z} \quad (2)$$

无量纲化的风谱:

$$S(f_*) = fS(f)/u_*^2(u_* = \sqrt{C_{10}}\bar{U}_{10}) \quad (3)$$

式中, f ——频率, Hz; z ——海平面上高度, m; \bar{U}_z ——高度 z 处的平均风速, m/s; $S(f)$ ——风谱密度, m^2/s ; u_* ——剪切速度, m/s; \bar{U}_{10} ——10 m 高度处的平均风速, m/s; C_{10} ——表面拖曳力系数, $C_{10} \approx 0.000794 + 0.00006658\bar{U}_{10}$ 。

Ochi & Shin 谱:

$$S(f_*) = \begin{cases} 583f_*, & 0 \leq f_* \leq 0.003 \\ \frac{420f_*^{0.7}}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}}, & 0.003 \leq f_* \leq 0.1 \\ \frac{838f_*}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}}, & f_* \geq 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

漂浮式风力机高耸的塔架及巨大的风力机叶

片要承受更大的风载荷,常用动量理论方法来估算风力机理想功率和风载荷,特别是海上浮式风力机的初步设计;塔架作为海洋结构物一部分,可结合漂浮式平台一并计算其风载荷^[19]。

风力机正常发电时,整个风轮受风面全部计入风压面积;作用在风轮扫掠面积上的平均压力 p_{wind} 为:

$$p_{wind} = 0.5\rho_a C_{FB} u^2 \quad (5)$$

作用在塔架顶部(轮毂处)的水平风力 F_{wind} 为:

$$F_{wind} = p_{wind} A_0 \quad (6)$$

式中, ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ; C_{FB} ——系数,根据贝茨公式取 8/9; u ——风速, m/s; A_0 ——风轮扫掠面积, m^2 。

极限工况下(停止发电状态),风轮处于顺桨停转状态,风轮上的风压面变为叶片的迎风面积^[20],作用在风轮上的 p_{wind} 和 F_{wind} 为:

$$p_{wind} = C_{D0} \rho_a u^2 \quad (7)$$

$$F_{wind} = p_{wind} S \quad (8)$$

式中, C_{D0} ——阻力系数,一般取 1.0~1.1; S ——风轮固态面积,一般为风轮扫掠面积的 5%~10%, m^2 。

2.3 波浪载荷

波浪载荷是漂浮式风力机平台所受的主要环境载荷,比风载荷更为复杂。采用辐射-绕射理论来求解线性势流理论范围内的浮体所受波浪力问题,在规则线性波作用下,定义流场中的速度势为:

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (9)$$

式中,势函数 ϕ 来自 6 个自由度上的入射波场、绕射波场和辐射波场,速度势 Φ 分解为 3 部分:

$$\Phi = \Phi_i + \Phi_d + \Phi_r \quad (10)$$

式中, Φ_i ——入射势; Φ_d ——绕射势; Φ_r ——辐射势。

浮体的运动导致流场的变化所产生的辐射波动场,在这个波动场中结构必然受到辐射力的作用,辐射力是浮体以波激频率作强迫摇荡时所受到力和力矩,为浮体运动的函数,且通常用附加质量项和阻尼项来表示。

由于浮体振动而产生的辐射力为:

$$F_{ji} = - \int_S i\omega \rho \Phi_i n_j dS \quad (11)$$

式中, ω ——入射波的频率, s^{-1} ; ρ ——海水密度, kg/m^3 ; n_j ——物体表面内法线的 j 方向向量。

将速度势表示为实部和虚部则得到:

$$\begin{aligned} F_{ji} &= \omega \rho x \int_S \Phi_i^{\text{Im}} n_j dS - i \omega \rho x \int_S \Phi_i^{\text{Re}} n_j dS \\ &= -A_{ji} \ddot{x} - B_{ji} \dot{x} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} A_{ji} = \frac{\rho}{\omega} \int_S \Phi_i^{\text{Im}} n_j dS \\ B_{ji} = \rho \int_S \Phi_i^{\text{Re}} n_j dS \end{cases} \quad (13)$$

式中, A_{ji} ——附加质量系数; B_{ji} ——阻尼系数; x ——浮体位移, m; \dot{x} ——速度, m/s; \ddot{x} ——加速度, m^2/s 。

结构物在规则入射波中受到的作用力和力矩,即为所谓的波浪激振力,由 Froude-Krylov 力(F-K 力)和绕射力来表示。

流域中任一点的一阶入射波速度势可表示为:

$$\Phi_i = \frac{-ig \cosh[k(d+Z)] e^{ik(X \cos \theta + Y \sin \theta)}}{\omega \cosh(kd)} \quad (14)$$

式中, d ——水深, m; Z ——波高, m; k ——波数, ($k = 2\pi/L$, L 为波长, m); θ ——波的方向(沿 x 轴正向为 0°), ($^\circ$)。

绕射势 Φ_d 需同时满足和入射波势相同的自由面条件、物面条件、水底条件和拉普拉斯方程。

$$-\omega^2 \Phi_d + 2i\omega U_0 \frac{\partial \Phi_d}{\partial x} + U_0^2 \frac{\partial^2 \Phi_d}{\partial x^2} + g \frac{\partial \Phi_d}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

由于结构物的运动和动载荷以激励它的波浪力相同的频率作简谐振荡,辐射-绕射问题可看成是以上 2 个问题的线性叠加。单位波幅的入射、绕射和辐射波作用下的整个速度势函数可表示为:

$$\Phi(x, y, z) e^{-i\omega t} = \left[(\Phi_i + \Phi_d) + \sum_{j=1}^6 \Phi_j x_j \right] e^{-i\omega t} \quad (16)$$

式中, Φ_j ——第 j 个自由度运动的势; x_j ——单位波幅下第 j 个自由度上的运动。

若要得到流体压力和物体位移等物理量,必须求解很复杂的速度势函数,可以通过包含流域的表面边界条件和格林公式来实现。得到势函数之后,一阶波浪力可通过线性伯努利方程求得:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (17)$$

式中, p ——一阶波浪力, N。

通过物体浸湿表面上的压力积分可求得结构的流体作用力。最后通过叠加不同波幅、波长和波

向的规则波可得到不规则波中的结果。

2.4 海流载荷

海流载荷是由海流作用在海洋工程结构物上所产生的载荷,海流力是作用在海洋结构物上的一种流动阻力,根据水下结构物上的阻力是流体动能函数的原理,可按照稳定流动条件下的阻力数学表达式得到海流力,其计算需合理确定海平面以下某深度的海流速度、阻力系数和惯性力系数。

当只考虑海流作用时,作用在平台水下部分构件的海流载荷可按式(18)计算:

$$F_c = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_0 \quad (18)$$

式中, C_D ——曳力系数; V ——设计海流流速, m/s; A_0 ——构件在与流速垂直平面上的投影面积, m^2 。应注意海流与波浪的相互作用,当采用绕射理论计算波浪载荷时,海流载荷应按式(18)计算,并与波浪载荷矢量相加。

3 结果与分析

3.1 频域特性

频域计算中,由牛顿第二定律和角动量定理,浮体在外界载荷作用下的运动方程为:

$$(M+A)\ddot{x} + B\dot{x} + Cx = F_w \quad (19)$$

式中, M ——广义质量矩阵; C ——静水恢复力矩阵; F_w ——波浪激励力; A 、 B ——附加质量矩阵和阻尼矩阵。

设浮体的运动形式为 $x = \bar{x} e^{-i\omega t}$,代入式(19)可得一阶波浪力作用下的频域运动方程:

$$[-\omega^2(M+A) - i\omega B + C] \bar{x} = f_w \quad (20)$$

这是一个复系数的代数方程组。求解该方程组便可以得到频率 ω 时,浮体在一阶波浪力作用下运动响应 \bar{x} 。

图 3 为附有不同透空率垂荡板漂浮式风力机平台的纵荡、垂荡和纵摇 3 个自由度上的响应。横坐标为波浪频率,纵坐标为各自由度上的响应,因平台的响应主要集中在低频段,波浪频率在 0.6 rad/s 其值逐渐趋于零,故着重分析 0~1 rad/s 的波浪频率段。其计算结果表明:

1)无论在哪个自由度上,波能频率集中在低频区,整体结构极易与波浪产生共振,故减小整体结构在此频率段的运动是非常重要的。

2)在纵荡自由度上,不同透空率垂荡板对整体结构的影响很小,漂浮式风力机平台在4种不同方案下,其运动特性并无明显区别,都是同一波浪频率下出现峰值并随着波浪频率的增大整体结构的纵荡响应逐渐减小直至趋于0。

3)在垂荡和纵摇2个自由度上,不同透空率对垂荡板的性能有着明显的影响,但并未按照随着透空率的增大垂荡板的性能越好,而这4种方案中,附有透空率为10%垂荡板漂浮式风力机 Spar 平台的垂荡运动和纵摇运动都是最为稳定的,其响应值分别为1.95 m和5.50°。

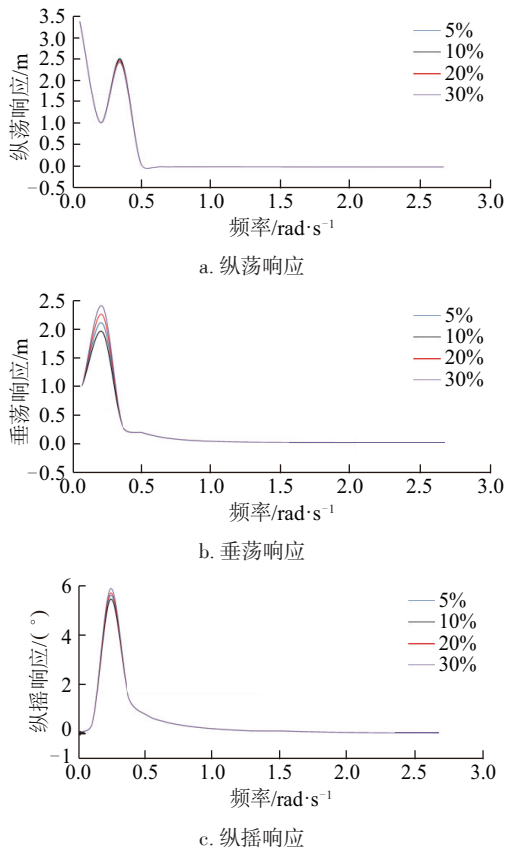


图3 不同透空率垂荡板响应值

Fig. 3 Response values of different penetration rate

根据以上结果,选取透空率为10%垂荡板,并对垂荡板进行开孔,对比分析不同孔数垂荡板对整体结构的影响。图4为透空率为10%不同孔数垂荡板运动响应。其计算结果表明:尽管改变孔数和孔径,但对漂浮式风力机 Spar 平台纵荡运动并无影

响;改变孔数对整体结构的垂荡和纵摇运动有一定影响,整体结构的垂荡运动随着孔数的增多其稳定性越好,但在垂荡板为24孔时整体结构的垂荡运动和32孔时的几乎相等,均约为1.73 m;而整体结构的纵摇运动并未随着孔数的增多而减小,反而垂荡板为28孔和32孔时,其纵摇运动最为剧烈,最稳定的是24孔垂荡板。

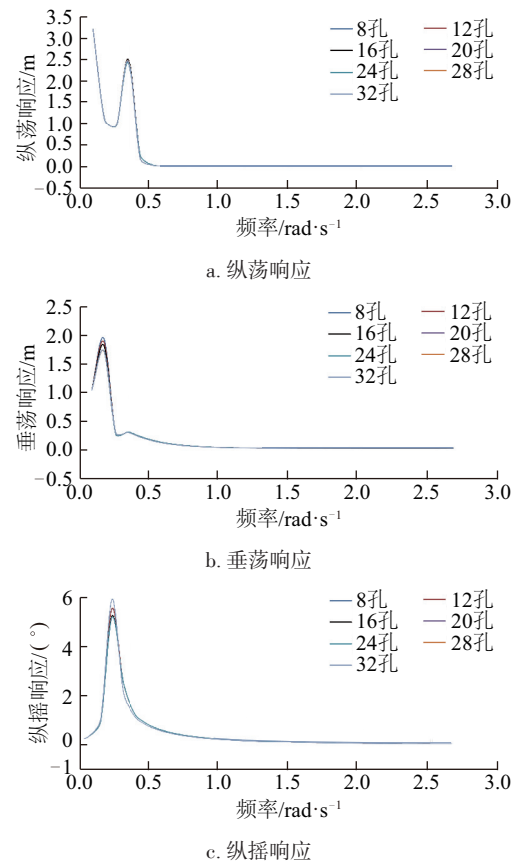


图4 垂荡板运动响应

Fig. 4 Motion response of heave plate

3.2 时域分析

风、浪和流联合作用下六自由度系泊浮体耦合动力方程如式(21)所示:

$$[M + m(\infty)]\ddot{x}(t) + \int_{-\infty}^t [K(t-\tau)]\dot{x}(\tau)d\tau + b_{WD}(t)\dot{x} + [C]x(t) = F_w^{(0)} + F_w^{(2)} + F_{MD}(t) + F_{wind}(t) + F_M \quad (21)$$

式中, K ——迟滞函数。

对于二阶微分方程 $\ddot{\xi} = F[\Delta t, \xi, \dot{\xi}]$, 可应用四阶 Runge-Kutta 方法进行求解。物体的位移和速度可以分别表达为:

$$\begin{cases} \xi(t+\Delta t) = \xi(t) + \Delta t \dot{\xi}(t) + \Delta t(M_1 + M_2 + M_3)/6 \\ \dot{\xi}(t+\Delta t) = \dot{\xi}(t) + (M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4)/6 \end{cases} \quad (22)$$

式中,

$$\begin{cases} M_1 = \Delta t \cdot F[t, \xi(t), \dot{\xi}(t)] \\ M_2 = \Delta t \cdot F[t + 0.5\Delta t, \xi(t) + 0.5\Delta t \cdot \dot{\xi}(t), \dot{\xi}(t) + 0.5M_1] \\ M_3 = \Delta t \cdot F[t + 0.5\Delta t, \xi(t) + 0.5\Delta t \cdot \dot{\xi}(t) + \\ 0.25\Delta t \cdot M_1, \dot{\xi}(t) + 0.5M_2] \\ M_4 = \Delta t \cdot F[t + \Delta t, \xi(t) + \Delta t \cdot \dot{\xi}(t) + 0.5\Delta t \cdot M_2, \dot{\xi}(t) + M_3] \end{cases} \quad (23)$$

根据频域分析结果,整体结构的纵荡运动并无明显差异,所以在时域分析中,只分析垂荡和纵摇上的运动。图 5 为漂浮式风力机在垂荡和纵摇自由度上的时域响应。此处主要对比分析 8 孔和 24 孔的垂荡和纵摇响应,其计算结果表明:整体结构在垂荡和纵摇 2 个自由度上的剧烈运动主要体现在 200~400 s 和 600~700 s 内;尽管 2 种方案的透空率相同,不同孔数垂荡板作用下的漂浮式风力机 Spar 平台的运动幅值却有着明显的不同,8 孔垂荡板的垂荡和纵摇响应幅值在 $-3.93 \sim 4.13$ m 和 $-10.02^\circ \sim 10.39^\circ$,而 24 孔垂荡板的幅值范围为 $-2.95 \sim 3.21$ m 和 $-7.88^\circ \sim 8.12^\circ$;而改变垂荡板的孔数并未改变整体结构运动的往复周期。

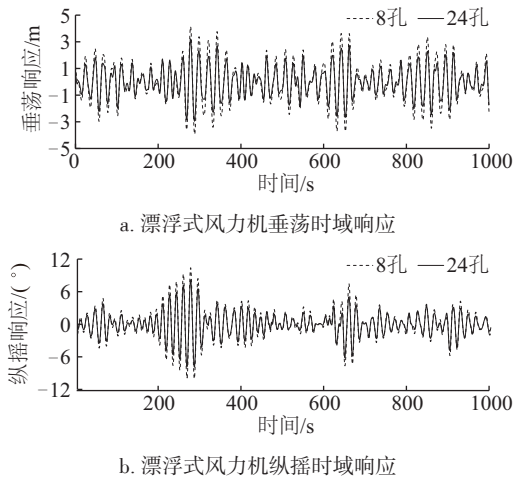


图 5 漂浮式风力机垂荡和纵摇时域响应

Fig. 5 Time response of floating wind turbine of heave and pitch

图 6 为附有 8 孔和 24 孔垂荡板的漂浮式风力机 Spar 平台垂荡和纵摇加速度时域对比图,横坐标为时间,纵坐标为加速度。其计算结果表明:8 孔垂荡板的垂荡和纵摇加速度幅值范围分别在 $-0.50 \sim$

0.42 m/s^2 和 $-1.29 \sim 1.26 (^\circ)/\text{s}^2$; 24 孔垂荡板的幅值分别为 $-0.41 \sim 0.35 \text{ m/s}^2$ 和 $-1.00 \sim 0.98 (^\circ)/\text{s}^2$ 。漂浮式风力机垂荡加速度的往复周期相比于纵摇加速度要小得多,尽管垂荡加速度的幅值范围比较小,但是这种过于频繁的往复运动对整个结构的疲劳有很大的影响;对于整个结构的纵摇现象,纵摇加速度达到了 $1 (^\circ)/\text{s}^2$ 使得较大的纵摇角出现,其根本原因是由于稳心高的周期性变化导致结构瞬时湿表面积的迅速变化,从而导致纵摇静水恢复力的非线性变化。

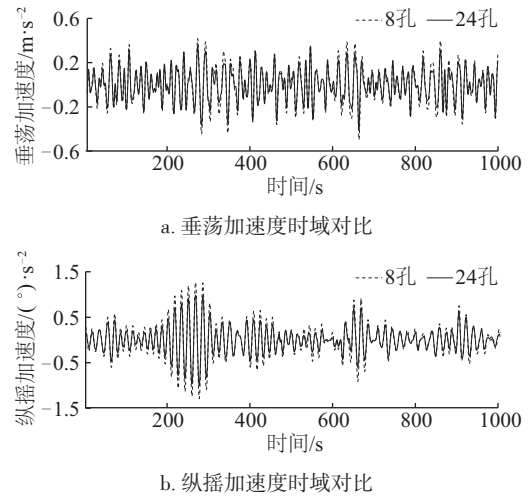


图 6 漂浮式风力机垂荡和纵摇加速度时域对比

Fig. 6 Time domain comparison of heave and pitch acceleration of floating wind turbine

4 结 论

1) 在相同孔数不同透空率情况下,其透空率分别为 5%、10%、20% 和 30%,漂浮式风力机 Spar 平台的垂荡和纵摇运动有一定区别,但整体结构的稳定性并未随着透空率的增加而增大,其中透空率为 10% 垂荡板的性能最优。

2) 在相同透空率(10%)垂荡板时,分别对开孔数 8 孔、12 孔、16 孔、20 孔、24 孔、28 孔和 36 孔进行讨论分析,在这 7 种方案中,24 孔垂荡板的性能最优,孔数的增多会使流体与垂荡板接触湿表面积更多,更大地增加整个结构的附加质量和阻尼,但并非孔数越多越好,垂荡板孔数过多也会致使整个结构的性能降低。

3) 对于漂浮式风力机 Spar 平台而言,需考虑下面基础平台的垂荡运动,还要考虑上部高耸的塔架

捕风,故减小漂浮式风力机的垂荡和纵摇运动对其有着重要的意义,而开孔垂荡板能有效提高漂浮式风力机的运动性能。

[参考文献]

- [1] Antonutti R, Peyrard C, Johanning L, et al. An investigation of the effects of wind-induced inclination on floating wind turbine dynamics: Heave plate excursion [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 91: 208—217.
- [2] 丁红岩, 翟少华, 张浦阳. 海上风电大尺度顶承式筒型基础承载力特性有限元分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(6): 124—132.
- [2] Ding Hongyan, Zhai Shaohua, Zhang Puyang. Finite element analysis of bearing capacity behavior of cover-load-bearing large-scale bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 124—132.
- [3] Li Jinxuan, Liu Shuxue, Zhao Min, et al. Experimental investigation of the hydrodynamic characteristics of heave plates using forced oscillation [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 66: 82—91.
- [4] Tao Longbin, Daniel Dray. Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35: 1006—1014.
- [5] 丁勤卫, 李 春, 周国龙, 等. 陆海风力机动态响应对比[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(1): 65—73.
- [5] Ding Qinwei, Li Chun, Zhou Guolong, et al. Comparison of dynamic response between stationary and floating wind turbines [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, 36(1): 65—73.
- [6] Prislin I, Blevins R D, Halkyard J E. Viscous damping and added mass of solid square plates [A]. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* [C], 1998, 5—9.
- [7] Holmes S, Bhat S, Sablok A. Heave plate design with computational fluid dynamics [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2001, 123: 23—28.
- [8] Thiagarajan K, Troesch A. Effects of appendages and small currents on the hydrodynamic heave damping of TLP columns [J]. *Journal on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1998, 120: 37—42.
- [9] Tao L, Thiagarajan K P. Low KC flow regimes of oscillating sharp edges I. Vortex shedding observation [J]. *Applied Ocean Research*, 2003, 25: 21—35.
- [10] Carlos L P, Antonio S I. Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models [J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 864—881.
- [11] Subbulakshmi A, Jithin J, Sundaravadivelu R, et al. Effect of viscous damping on hydrodynamic response of spar with heave plate [J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 508—515.
- [12] 纪亨腾, 黄国梁, 范 菊. 垂荡阻尼板的强迫振荡试验[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(7): 977—980.
- [12] Ji Hengtong, Huang Guoliang, Fan Ju. The forced oscillation tests on heave damping plates [J]. *Journal of Shanghaijiaotong University*, 2003, 37(7): 977—980.
- [13] 黄苗苗, 吴乘胜, 吴维武, 等. 三维复杂结构 Spar 平台垂荡板垂荡水动力性能研究[J]. *海洋工程*, 2013, 31(5): 18—23.
- [13] Huang Miaomiao, Wu Chengsheng, Wu Weiwu. Research on hydrodynamic characteristics of complex three-dimensional heave damping plates on Spar platforms [J]. *The Ocean Engineering*, 2013, 31(5): 18—23.
- [14] 严 磊. 风力发电机支撑体系结构设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2008, 9—10.
- [14] Yan Lei. Research on structure design of wind turbine supporting system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008, 9—10.
- [15] 张 旭, 邢静忠. 叶片局部损伤对大型水平轴风力机静动态特性影响的仿真分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 406—412.
- [15] Zhang Xu, Xing Jingzhong. Simulation analysis on the effect of local damage of blade on static and dynamic characteristics for large horizontal axis wind turbine [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 406—412.
- [16] Robertson A N, Jonkman J M. Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts [A]. *International Society of Offshore and Polar Engineers 2011 Conference* [C], Hawaii, USA, 2011, 443—450.
- [17] 刘 强, 杨 科, 黄宸武, 等. 漂浮式风力机动态响应特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(7): 1256—1261.
- [17] Liu Qiang, Yang Ke, Huang Chenwu, et al. Study on the dynamic response of floating wind turbines [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(7): 1256—1261.
- [18] Chakrabarti S K. Non-Linear methods in offshore engineering [M]. Elsevier: Amsterdam, 1990.

- [19] 彭文春, 邓宗伟, 高乾丰, 等. 风机塔筒流固耦合分析与受力监测研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 136—142.
- [19] Peng Wenchun, Deng Zongwei, Gao Qianfeng, et al. Fluid-solid interaction analysis and stress monitoring research of wind turbine tower[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 136—142.
- [20] 赵 静. 海上风机流载荷计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009, 12—16.
- [20] Zhao Jing. Study of hydrodynamic loads on offshore wind turbines [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009, 12—16.

RESEARCH ON HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FLOATING WIND TURBINE WITH HEAVE PLATE

Ye Zhou^{1,2}, Zhang Junwei¹, Zhou Guolong¹, Li Chun^{1,2}, Ding Qinwei¹

(1. Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to investigate the influence of heave plates on floating wind turbine Spar platform hydrodynamic characteristics, the study focuses on 5 MW offshore wind turbine loaded by Umaine-Hywind Spar platform. By applying numerical methods, the hydrodynamic performances of heave plates with different vacancy rates and the same permeable rate in different numbers of holes are obtained. In addition, frequency domain and time domain characteristics are analyzed. In comparative study of heave plates with the same permeable rate in different numbers of holes, two results are showed. The first one is that the Spar platform has the best stability when the permeable rate is 10%. The second one is, when choosing the heave plate with a permeable rate of 10% and opening different numbers of holes, includes 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 32 holes, the heave plate which has 24 holes owns the best stability.

Keywords: floating wind turbine; heave plate; vacancy rate; stability; Spar platform