

重心高度对浮式结构水动力性能的影响

陈展,马勇,张亮,吴明辉

哈尔滨工程大学海洋可再生能源研究所,哈尔滨 150001

摘要 通常在计算模拟海上浮式风机平台运动时,外部结构形式是影响水动力性能的主要因素,而重心在水动力计算中的影响则被忽略。为了研究重心变化对结构物水动力响应的影响,以 5MW 浮式风机平台作为研究对象,通过数值模拟的方法,分别对浮筒间距、撑杆形式以及有无垂荡板与重心高度变化结合加以分析研究。结果表明:改变浮筒间距时,重心高度对水动力性能的影响主要体现在横、纵摇及横、纵荡方面,且浮筒间距较大的基础形式达到峰值响应时的重心更低;斜撑的改变与其随重心变动得到的运动幅值规律一致,且峰值响应之后的各响应幅值在数值上基本相同;垂荡板的添加有效降低了纵摇及垂荡幅值;对于三浮筒半潜式平台,最佳重心位置为水下 3~8m 处。

关键词 水动力性能;半潜平台;海上风力发电;重心高度

中图分类号 TK89,U661.32

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.18.002

Impact of the Height of Gravity Center to Hydrodynamic Performance of Floating Structure

CHEN Zhan, MA Yong, ZHANG Liang, WU Minghui

Institute of Ocean Renewable Energy System, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract In general, the external structures are the main factors influencing the hydrodynamic performance in the computation simulation, however, the impact of gravity center on the hydrodynamic calculation is ignored. In order to study the effect of gravity center change on the structure hydrodynamic response, a 5MW floating wind power turbine system is taken as the research object. By means of numerical simulation method, the relationship between the height change of gravity center and float spacing, bar form as well as heave plate, respectively is studied. The results show that when the float distance changing, the effect of gravity center height on hydrodynamic performance is mainly reflected in the cross, longitudinal and transverse, longitudinal swing, and when the basic form of larger float distance reaches at the peak response, the gravity center is even lower; the change of diagonal brace is consistent with the rule of motion amplitude along with gravity center changing, and each response amplitude after peak response in terms of numerical value is basically the same; the heave plate adding is able to effectively reduce the pitching and heaving amplitude; for the three floating semi-submersible platform, the best central location is located at the underwater of 3—8m.

Keywords hydrodynamic performance; semi-submersible platform; offshore wind power; gravity center height

0 引言

由于传统化石能源的锐减及节能减排的提出,清洁能源发展迅速,近 10 年来陆上风能的开发利用得到相当程度的发展,覆盖率也已非常广泛。随着海上石油开采技术的应用,海洋平台技术的发展日渐成熟,也使海上风能开发得到进一步发展^[1-6]。目前,MW 级风机以其更经济高效的特性得到较

多应用,叶轮直径加长也使塔架高度增加,重心高度随之增高^[7-11]。对于三浮筒半潜式平台,最佳重心位置为水下 3~8m,重心高度的调整对于浮体整体稳定性非常重要,而对水动力性能的影响也不可忽视。浮体的重心高度虽然可以通过调节浮筒内压载水的分布进行调整,但是,目前的分析方法在考虑结构优化的同时均不考虑重心高度影响,如此分析结果可能较

收稿日期:2013-01-23;修回日期:2013-03-19

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCF130112)

作者简介:陈展,博士研究生,研究方向为海洋潮流能利用,电子信箱:hithrbeu@163.com;马勇(通信作者),讲师,研究方向为海洋能利用及流体力学测试技术,电子信箱:mayong02@hrbeu.edu.cn

为片面。本文将结构变化与重心高度变化结合加以分析,使结构优化结果更可靠。

1 理论基础

载体在理想流体中的运动方程为

$$[m+a(\omega)]\ddot{x}+B(\omega)\dot{x}+Cx=F(\omega) \quad (1)$$

式中, m 为结构本身的质量, $a(\omega)$ 为与频率有关的加速度, x 为载体的位移, $B(\omega)$ 为与频率有关的线性阻尼系数, C 为恢复力系数, $F(\omega)$ 为简谐激励力。简谐激励力传递函数 $H_{RAO}(\omega)$ 的表达式为

$$H_{RAO}(\omega)=\frac{x}{\zeta_a}=\frac{F_0}{C-[m+a(\omega)]\omega^2+iB(\omega)\omega} \quad (2)$$

式中, 传递函数 $H_{RAO}(\omega)$, 即单位波幅下的响应值, ζ_a 为波高, F_0 为单位波高下线性激励力^[2]。

以纵摇为例讨论重心对响应结果的影响, 简单推导过程如下。

纵倾角表达式为 $\theta=\theta_0\cos\omega_\theta t$, 求导整理后得:

$$\ddot{\theta}=-\theta_0\omega_\theta^2\cos\omega_\theta t \quad (3)$$

所以,

$$\theta_0=\frac{\ddot{\theta}}{\omega_\theta^2\cos\omega_\theta t}=\frac{F_5}{m\omega_\theta^2\cos\omega_\theta t} \quad (4)$$

由式(4)可见, θ_0 即响应幅值与纵摇激励力 F_5 、结构质量 m 、结构固有频率 ω 均有关。

由于

$$\omega_\theta=\sqrt{\frac{m_1gh_z}{I_{yy}}}=\sqrt{\frac{m_1g(R_w-h_{CB})}{I_{yy}}} \quad (5)$$

其中 m_1 为浮体质量, g 为重力加速度, R_w 为稳性半径, h_z 为纵稳性高, I_{yy} 为转动惯量, h_{CB} 为重心到浮心的距离^[13]。

从式(5)可见, 同一结构物随重心增高, ω_θ 减小。因此响应幅值 θ_0 成为与激励力 F_5 、结构质量 m 、结构重心高度有关的函数, 即

$$\theta_0=f(F_5, m, h_{CB}) \quad (6)$$

2 计算模型

参照美国可再生能源实验室 Wind float 模型基础及 5MW 风机相关数据^[14], 经重量中心初步核算, 模型如图 1 所示, 浮式风机平台的侧浮筒直径 10m, 中浮筒直径 6m, 横(斜)撑直径 2m, 浮筒圆心距离 60m, 垂荡板直径 20m, 垂荡板厚度 0.05m, 型深 30m, 吃水 20m, 排水量 6240t。

以该模型为母型进行结构局部改变与调整, 分析这些改变引起的重心高度改变对结构水动力性能的影响。

利用 Sesam 软件进行数值分析。在 Genie 中建模, 其中浮筒部分用板单元, 支撑杆件用杆单元。网格划分后导入 Hydrod 中, 进行水动力分析。设定海况为水深 100m, 进行规则波下水动力分析, 由于杆单元的存在, 使用 JONSWAP 波谱, 有义波高 2m, 平均过零周期 8s^[15], 谱峰因子设为 3.3, 吃水 20m。

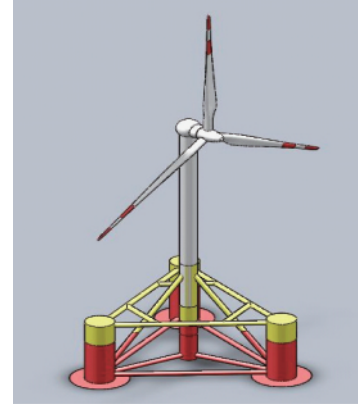


图 1 模型效果

Fig. 1 Result diagram of the model

3 重心及浮筒间距的影响

模型区别在于图 2 浮筒间距为 60m, 图 3 浮筒间距为 80m, 其他模型数据及计算条件相同。

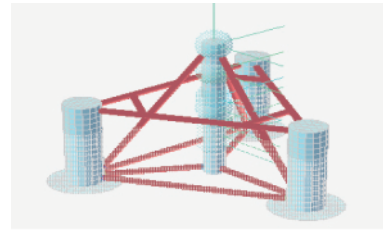


图 2 中浮筒高度 50m 侧浮筒间距 60m

Fig. 2 Buoy at the center position with the height of 50m and buoy at the side position with the spacing of 60m

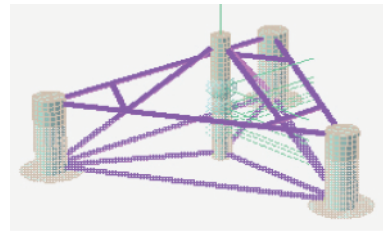


图 3 中浮筒高度 50m 侧浮筒间距 80m

Fig. 3 Buoy at the center position with the height of 50m and buoy at the side position with the spacing of 80m

由于模型中心对称, 横摇与纵摇的运动规律只需调整浪向即可重复彼此规律性, 横、纵荡亦然。因此横纵摇与横纵荡的响应在此只取其一。将重心位于水线处时定为 $z=0$ 。对于图 2 所示模型进行数值模拟, 计算每一重心高度下的六自由度波频运动响应, 并提取每一重心高度下取得的最大传递函数及出现的波频, 将其称为最大响应幅值。对于图 3, 经计算, 发现其结构共振时对应的重心较低。由于风机本身塔架高度很大, 很难满足较低重心的要求, 模型计算时最低重心取到水下 14m 处, 此位置已在浮心之下, 对于模型优选比较而言已足够。

为了便于观察分析,本文中不同结构状态下模型的垂荡、横摇、纵荡、艏摇的最大响应幅值绘制在同一图中,图中纵坐标仅代表数值,其响应幅值的单位于图注说明。从图4计算结果可以看出,艏摇与垂荡值基本与重心高度无关。横摇与纵荡均在水面下1m左右出现最大响应,纵荡峰值响应达到54°。本文称不同高度的最大响应为峰值响应。纵荡峰值响应达到5.7m,表明该形式的模型在此发生共振最为强烈,造成响应的突变。这一点在为了满足稳定性要求而调整重心高度时应十分注意。水面10m之上纵摇规律性较明显;随重心高度的增加而增大,但幅度增加并不明显。且此段重心过高,实际结构中重心将不予满足稳定性等要求,所以下面讨论中,将重心设置于水面附近。

从图5计算结果可以看出,艏摇与垂荡值基本与重心高度无关。横摇与纵荡均在重心处于水面下11m左右出现最大响应,横摇峰值响应达到22.7°,纵荡峰值响应达到5.0m。表明该形式的模型在重心位于水下11m左右时将发生最强烈共振。

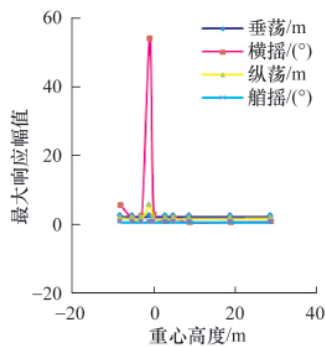


图4 侧浮筒间距60m响应结果

Fig. 4 Results figure of buoy at the side position with the spacing of 60m

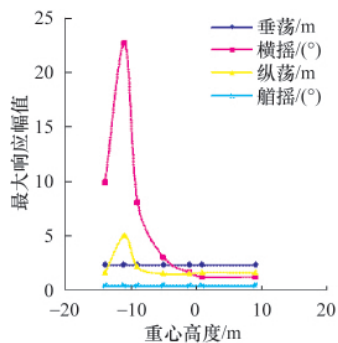


图5 侧浮筒间距80m响应结果

Fig. 5 Results figure of buoy at the side position with the spacing of 80m

从图4和图5比较可得,对于三浮筒形式的浮式基础,改变浮筒间距,其水动力性能随重心高度变化的规律为:垂荡、艏摇无明显变化,横摇幅值随重心高度的增加先增大后减小,且浮筒间距较大的基础形式达到峰值响应时的重心更

低。图2模型与图3模型的水动力响应规律基本一致。由于计算时试取了少量关于重心的离散点,未必能取到峰值响应的重心高,因此不能凭此断定哪种形式峰值响应更大,但通过图表可以确定浮筒间距较大的结构形式取得峰值响应的重心位置更低。

4 撑杆形式

撑杆的尺寸相比浮筒而言是非常小的,但由于其是浮筒之间的唯一连接构件,是载荷传递的唯一途径,并且由于其还将承受较大的弯矩,因此撑杆本身也是平台的重要构件之一。在水动力计算中,上层横撑构件由于不入水,对水动力性能的影响只体现在质量矩阵与惯性半径方面。底部横撑已较为简约,水动力方面不做改变,所以优化目标将是斜撑出水高度。

由于撑杆本身尺寸较小,因此改变撑杆尺寸而带来的影响不明显。由图6模型计算得到的峰值响应为9.2°,图2模型为54°。为便于观察,将图2模型结果峰值响应在图中设定到9.2°,见图7,以发现其运动幅值随重心变化的规律。

从图7、图8可以看出,斜撑的改变与其随重心变动得到的运动幅值规律非常一致,且峰值响应点过后的不同重心对应的响应幅值在数值上几乎相同,因此设计时,斜撑出水高度应调低。

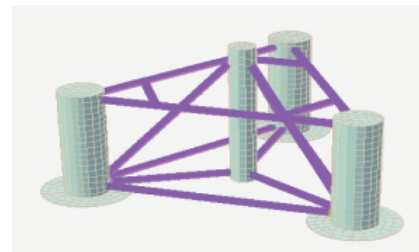


图6 侧浮筒距离60m中浮筒高度40m

Fig. 6 Buoy at the side position with the spacing of 60m and buoy at the center position with the height of 40m

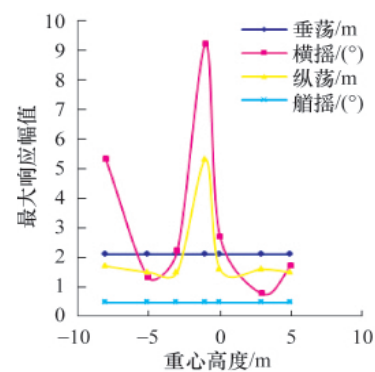


图7 中浮筒高40m响应结果

Fig. 7 Results figure of buoy at the center position with the height of 40m

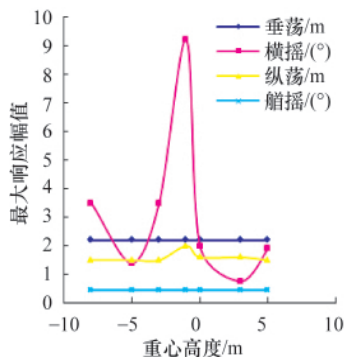


图8 中浮筒高 50m 结果修订

Fig. 8 Results revision diagram of buoy at the center position with the height of 50m

5 垂荡板的影响

软件计算基于势流理论,黏性阻尼不能直接计入,只计入辐射阻尼和附加质量项,使垂荡板的优化结果偏于保守,但可以给出一定程度的参考。数值模拟有无垂荡板产生水动力响应影响的模型如图9所示。

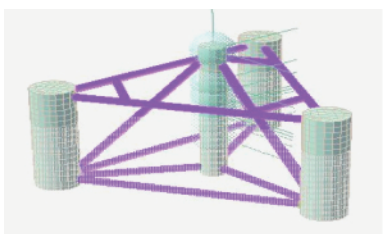


图9 中浮筒高 40m 无垂荡板

Fig. 9 Buoy at the center position with the height of 40m (no heave plate)

从图10与图11可以看出,垂荡板的有无对运动幅值随重心高度变化的整体规律影响不大,都是重心位于水面附近达到最大响应幅值。但垂荡板的存在使垂荡、纵摇幅值响应在对应点处减小1/2。无垂荡板时垂荡幅值约3.5m,有垂荡板时垂荡幅值约2.2m,无垂荡板时纵荡峰值响应约19°,有垂荡板时纵荡峰值响应约9.2°。

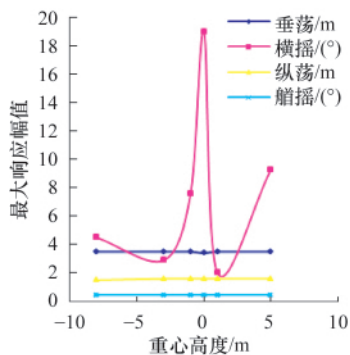


图10 无垂荡板响应结果

Fig. 10 Results figure (without heave plate)

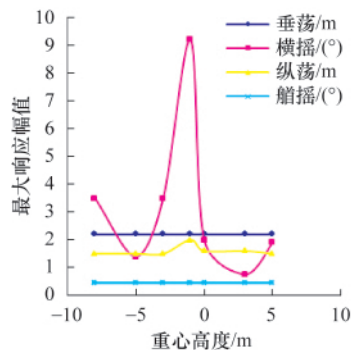


图11 有垂荡板响应结果

Fig. 11 Results figure (with heave plate)

6 结论

通过计算分析可以发现,重心对结构的水动力响应确有不同的影响,具体表现在以下方面。

1) 重心高度对水动力性能的影响主要体现在横、纵摇及横、纵荡方面,对艏摇和垂荡几乎没有影响。由于垂荡、纵摇、纵荡之间存在耦合,垂荡随之也有变化,但由于影响很小可以忽略。

2) 对于同一结构形式的局部改变,重心高度相同,最大响应幅值有所不同,但其水动力性能随波频的变化趋势相似。

3) 浮筒间距变大,水线面面积增大,随重心高度由低到高变化,最大响应幅值的变化趋势一致,但浮筒间距较大的在重心较低处出现最大响应幅值。

4) 斜撑出水高度降低,对水动力性能影响不大,表现在随重心高度变化其最大响应幅值变化趋势不变,仅影响幅值大小,斜撑出水较低,得到较小的峰值响应。

5) 垂荡板的添加有效降低了纵摇及垂荡幅值,在数值上减少到约为无垂荡板时的1/2,且在对应重心高度上整体都有相应减小。

最终通过重心范围的估算及上述结构对比得到,母型方案设计相对合理,可进一步降低斜撑出水高度,以优化浮体水动力性能。本文中只取部分重心高度离散点做了简单分析,细化重心高度分布可能得到更准确的结果。在理论部分只对基本的影响参数做了简单定性分析,而各个变量之间的相互影响实际上是非常复杂的,有待于进一步研究分析。

参考文献 (References)

- [1] 姜鹏飞. 国内发展海上风电的前景和经济分析[J]. 机电信息, 2009, 31 (24): 96, 112.
Jiang Pengfei. Mechanical and Electrical Information, 2009, 31 (24): 96, 112.
- [2] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130-134.
Huang Weiping, Liu Jianjun, Zhao Zhanhua. The Ocean Engineering,

- 2009, 27(2): 130-134.
- [3] 黄东风. 欧洲海上风电的发展[J]. 能源工程, 2008, 24(2): 24-27.
Huang Dongfeng. Energy Engineering, 2008, 24(2): 24-27.
- [4] 刘琦, 许移庆. 世界海上风电投资分析[J]. 电器工业, 2009, 20(6): 45-47, 51.
Liu Qi, Xu Yiqing. China Electrical Equipment Industry, 2009, 20(6): 45-47, 51.
- [5] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳. 近海风力发电技术的现状及展望[J]. 电机与控制应用, 2005, 32(9): 57-60.
Xing Zuoxia, Zheng Qionglin, Yao Xingjia. Electric Machines & Control Application, 2005, 32(9): 57-60.
- [6] 张新燕, 何山, 张晓波, 等. 风力发电机组主要部件故障诊断研究[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2009, 26(2): 140-144.
Zhang Xinyan, He Shan, Zhang Xiaobo, et al. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2009, 26(2): 140-144.
- [7] Henderson A R, Witcher D. Floating offshore wind energy: A review of the current status and assessment of the prospects [J]. Wind Engineering, 2010, 34(1): 1-16.
- [8] 苗立杰. 直驱式变速变桨距永磁风力发电机组研制 [J]. 上海电力, 2007, 21(3): 306-309.
Miao Lijie. Shanghai Electric Power, 2007, 21(3): 306-309.
- [9] Cheng P W, van Kuik G A M, van Bussel G J W, et al. Bayesian analysis applied to statistical uncertainties of extreme response distributions of offshore wind turbines[J]. Wind Engineering, 2002, 26(3): 10-16.
- [10] 丁习坤, 孙文磊. 大型风电机组传动系统动力学仿真分析[J]. 机床与液压, 2011, 39(3): 91-93, 96.
Ding Xikun, Sun Wenlei. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(3): 91-93, 96.
- [11] 肖京平, 陈坤, 刘刚. 10MW 风电机组空气动力设计初探 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 674-680.
Xiao Jingping, Chen Kun, Liu Gang. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5): 674-680.
- [12] 朱航. 半潜式平台运动性能与活动垂荡板减振系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Zhu Hang. Studies on the motion performance of a semi-submersible platform and the heave motion damping system using moveable heave-plate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [13] 杨铭, 毛筱菲. 基于 iSIGHT 的船型耐波性优化研究 [J]. 船海工程, 2011, 40(3): 62-65.
Yang Ming, Mao Xiaofei. Ship & Ocean Engineering, 2011, 40 (3): 62-65.
- [14] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for off shore wind turbine system development, NREL/TP-500-38060 [R]. [s.l.]: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [15] 罗伯特·E·兰德尔. 海洋工程基础[M]. 杨樾, 包从喜, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2004: 75-101.
Robert E R. The base of ocean engineering [M]. Yang You, Bao Congxi, Trans. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004: 75-101.

(责任编辑 齐志红)

· 学术动态 ·



中国科协科普部开展“公众喜爱的科普作品”推介活动

为贯彻落实《全民科学素质行动计划纲要实施方案(2011—2015年)》，扩大科普作品的社会影响和传播范围，向社会推介一批科学健康、品味高雅的优秀科普图书、影视作品和期刊，中国科协科普部于2013年5月30日至12月31日组织开展“公众喜爱的科普作品”推介活动。

2013年5月30日至7月14日为作品推荐期。其后将经过作品评议、作品推介，于9月全国科普日期间公布优秀科普图书目录(100本)、优秀科普期刊目录(30种)，11月公布优秀科普影视作品目录(70部)。通过公众投票，选出“公众喜爱的科普作品”(每类10种)。9月全国科普日期间公布“公众爱读的十本科普图书”、“公众喜爱的十种科普期刊”，12月份公布“公众爱看的十部科普影片”。

其后将面向基层组织进行推介：各学会、地方科协利用组织体系进行推介；通过科普教育基地、中小学校、农家书屋、大型书展、文化节、书城等进行推介。

利用媒体进行推介：充分利用多种媒体平台，采取新闻报道、专题报道、电台访谈、微博互动、微信互动、网络专题页面等方式进行宣传和推广。

并将开展科普创意阅读活动、优秀科普作品校园传播、优秀科普影视作品播映等活动。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/14773161.html>。