

基于设计波法的半潜型浮式风力机 结构强度校核

桑 松¹, 于 梅¹, 石 晓², 伊淑玉¹, 杨 纯¹, 费圣杰¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 青岛黄海学院智能制造学院, 青岛 266427)

摘 要: 以美国可再生能源实验室(NREL)公布的“5 MW baseline”浮式风力机模型为设计依据,利用设计波的谱分析法,挑选基础结构典型剖面载荷,并对其进行长期预报,计算半潜基础典型受力工况下的设计波要素,结合浮式风力机所受风载荷及6个自由度风力机气动载荷,选择风浪同向为最不利工况,对设计波条件下的结构总体强度进行计算校核。结果表明:结构在2种典型作业工况下强度均满足设计要求。

关键词: 浮式风力机; 设计波法; 谱分析; 剖面载荷; 强度校核

中图分类号: TK81

文献标识码: A

0 引 言

目前,全球范围内面临化石能源日益枯竭的现状,且化石能源燃烧已带来严重的环境污染问题,因此新能源技术的开发研究及应用工作迫在眉睫^[1]。风力发电在新能源开发战略中日益占据核心地位,但浮式风力机支撑结构在复杂的海洋环境载荷以及上部风载荷的共同作用下,极易发生疲劳破坏。而结构总体强度是结构设计时必须要考虑的问题,只有在满足结构强度的条件下才能保证结构的正常工作。Rodier 等^[2]设计了能承载 NREL 5 MW 风力涡轮机的 Wind Float 浮式基础,确定其整体尺寸、结构质量、系泊材料及系泊方式,预报基础结构在频域和时域下的纵荡、横荡和垂荡自由度的运动响应。对结构强度及疲劳强度进行数值分析,并建立模型进行试验,将试验结果和数值模拟结果进行对比分析。

本文根据结构典型的受力工况,利用设计波法确定不同受力工况条件下结构最易发生破坏时对应的波浪周期和波高,组合结构所受风力,

调用有限元分析程序 Sestra 计算在该设计波浪作用下结构的应力水平,然后利用后处理程序 Xtract 取出结构上的最大应力,并参考相关规范进行校核。

1 总体结构模型的建立

计算时根据有关规定对上部风力机结构进行简化,简化过程中保证整个上部结构总的质量、重心位置以及惯性矩等主要参数不发生变化。半潜基础的板壳结构主要包括立柱和浮筒,材料为 Q235 钢,许用应力为 319 MPa,内部均包含多个由纵横舱壁分割开来的内部舱室,此外立柱、浮筒和内部舱室板壁均设有很多纵、横加强筋进行加固。根据美国船级社(ABS)规范要求^[3],在建立半潜基础的总体结构模型时,外板和舱壁等构件采用四节点或三节点壳单元,基础骨架包括纵骨、横梁、肋骨等加强结构简化为空间梁单元。图 1a 和图 1b 分别为结构的湿表面模型和 Morison 有限元模型;图 1c 所示为基础的骨材布置。

收稿日期: 2016-09-26

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2016EEM04); 山东省重点研发专项(2017GHHY15101); 青岛市产业培育计划(17-6-3-26-gx); 山东省高等学校科学技术计划(J17KB018)

通信作者: 桑 松(1974—), 男, 博士、教授, 主要从事深海浮式结构流固耦合非线性动力响应方面的研究。sangqi@ouc.edu.cn

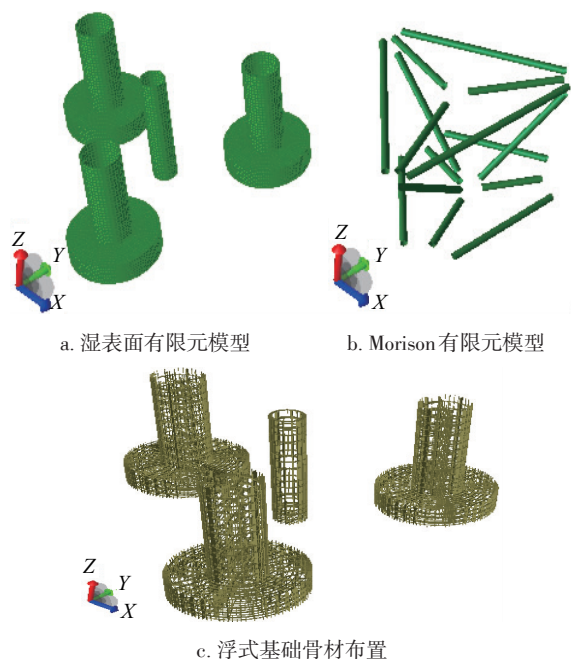


图1 浮式基础湿表面、Morison有限元模型及骨材布置

Fig. 1 Wet surface, Morison finite element model and aggregate arrangement of floating foundation

2 环境载荷的计算

2.1 风载荷的计算

深海浮式风力机受到多种外载荷作用,其中风载荷对基础的总强度校核起决定性作用。本文选取半潜型浮式风力机在额定风速正常作业工况下(相当于1 a一遇正常作业海况)和停机保护工况下(相当于50 a一遇的风暴自存海况)2种工况下的风力进行计算。

浮式风电系统在正常运转状态下,不仅要计入风力机、塔架和浮式基础受到的风载荷,还要计入风力机运转时产生的空气动力载荷;系统在极限状态下风力机停机,无气动载荷,只需计入风力机、塔架和浮式基础受到的极限风载荷。

2.1.1 塔架及浮式基础风载荷的计算

塔架及浮式基础受到的风载荷参考《海上移动平台入级与建造规范》给出的表达式进行计算^[4]:

$$F = C_s C_h S p \quad (1)$$

式中, C_s ——承受风载荷构件的形状系数; C_h ——承受风载荷构件的高度系数; S ——浮式风电系统受风压构件的正投影面积, m^2 ; p ——风压, $p = 0.613 \times 10^{-3} V^2$, kPa , V 为风速。

2.1.2 极限海况下叶片承受的风载荷

在极限海况下为了防止受到损坏,风力机处于顺桨停转状态,风轮不承受空气动力载荷,而是承受极限风载荷。如果极限风速定义为最大瞬时风速,那么极限风载荷与风倾力矩的表达式为^[5]:

$$F = \frac{1}{2} \rho V_{\max}^2 (C_{D1} A + C_{D2} \int_0^H f(h) dh) \quad (2)$$

$$N = \int_0^H \frac{1}{2} C_{D1} \rho V_{\max}^2 f(h) dh + \frac{1}{2} C_{D2} \rho V_{\max}^2 A \quad (3)$$

式中, F ——极限海况下的风载荷; ρ ——空气密度; V_{\max} ——极限风速; C_{D1} ——风轮的风阻力系数; A ——风轮的迎风面积; C_{D2} ——塔架的风阻力系数; H ——轮毂高度; $f(h)$ ——高度 h 处的塔架截面直径。

表1为浮式风力机基础在2种载况下风载荷计算结果。

表1 风载荷计算数据

Table 1 Calculation data of wind load

工况		分段中点/m	风压面积/m ²	高度系数	形状系数	相对风速/m·s ⁻¹	风载荷/N
作业工况	立柱	6.00	120.00	1.00	0.5	7.802	2239.318
		6.00	78.00	1.00	0.5	7.802	1455.557
生存工况	立柱	6.00	120.00	1.00	0.5	37.576	51933.890
		6.00	78.00	1.00	0.5	37.576	33757.029
	塔架	13.65	21.45	1.00	0.5	42.159	11685.618
		22.90	93.94	1.10	0.5	45.326	65070.544
		38.25	86.65	1.20	0.5	48.701	75591.659
		53.50	75.90	1.30	0.5	51.044	78797.320
		67.50	68.03	1.37	0.5	52.732	79435.267
		81.80	47.21	1.43	0.5	54.170	60719.505

极端海况下的风速远超过风力机的切出风速, 风力机处于停机保护状态, 作用在风力机叶片上的载荷由式(2)计算得 809500 N。

作业海况下叶片所受气动载荷由 FAST 计算得出, 在时程力中取水平推力最大的一组风力机载荷施加到结构上校核结构强度。图 2 为 0° 方向(即风向沿 x 轴正向)额定风速下生成的塔筒底部 6 个自由度的风力机载荷。

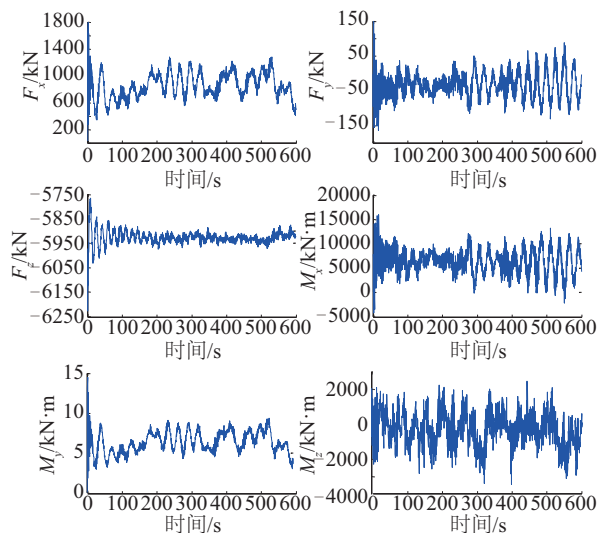


图2 额定风速下塔筒底部6个自由度风力机载荷

Fig. 2 Six degrees freedom wind turbine load under rated wind speed at bottom of tower drum

2.2 波浪载荷的计算

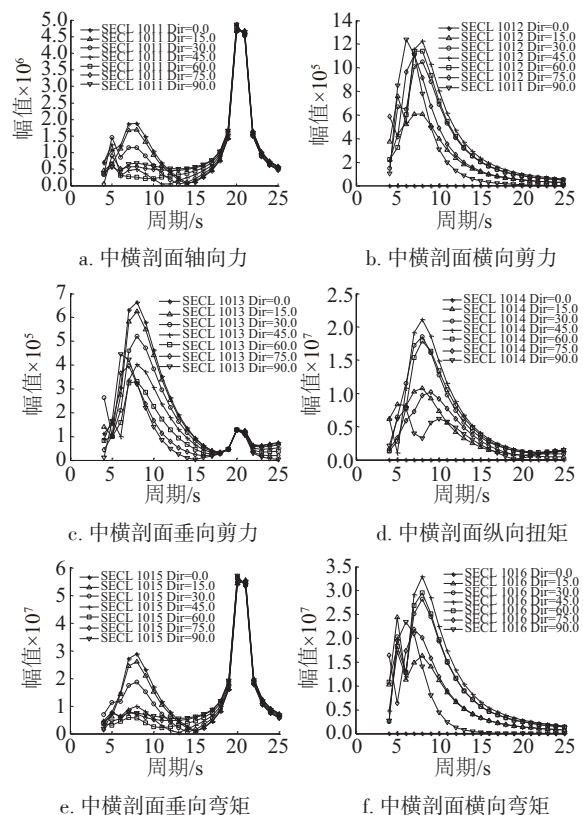
波浪载荷是半潜基础所受外载荷的主要部分, 对于波浪载荷的不确定性, 目前比较普遍的方法是将动力问题转化为准静力问题来处理, 即假定基础承受规则波作用, 将瞬时作用在基础上的最大波浪载荷施加到基础结构, 同时考虑结构运动产生的惯性力和其他载荷, 认为所有外载荷保持静力平衡, 从而转化为静力问题。本文采用准静态分析方法, 选择水动力预报载荷达到极值的瞬时时刻系统运动引起的惯性力、液体对舱壁的水动压力与湿表面水压力施加到结构有限元模型进行有限元分析计算; 采用基于谱分析的设计波方法计算波浪载荷^[6]。由于半潜基础纵向和横向尺度基本相同, 因此进行波浪载荷长期预报之前必须选定多组典型控制剖面, 一般选在波浪荷载响应最大部位和结构最薄弱部位。对于半潜式平台, 通常考虑 7 种对总

体强度最具威胁载荷: 浮筒间横向分离力, 关于横轴的扭矩, 浮筒间纵向剪切力, 浮筒上垂向波浪弯矩, 甲板纵向、横向、垂向加速度, 后 3 种控制参数体现了惯性力对于结构总强度的影响。借鉴海洋平台的典型剖面选取原则, 选取 18 种典型剖面计算剖面载荷^[7]。

3 谱分析方法确定设计荷载工况

3.1 典型载荷截面剖面载荷响应传递函数

计算中采用的波浪谱是 Pierson-Moskowitz 谱^[8], 设计海域为南海某海域。18 种典型剖面载荷传递函数如图 3 所示。从幅值响应传递函数(RAO)曲线可看出, 各方向力的数量级在 $10^6 \sim 10^7$ 之间, 力矩的数量级在 $10^7 \sim 10^8$ 之间, 且峰值多出现于 20~21 s 周期及 6~8 s 周期间。中横剖面与中纵剖面的轴向力趋势基本相同, 但数量级有差别。两面的横向剪力及垂向剪力随周期的趋势及大小亦相似, 两面的垂向扭矩趋势与其轴向力趋势相同, 这是由于轴向力对此力矩的影响最大。另外可看出此二面的剖面载荷的对称性, 数量级的差别则由方向谱所致, 这也体现了结构的中心对称性。



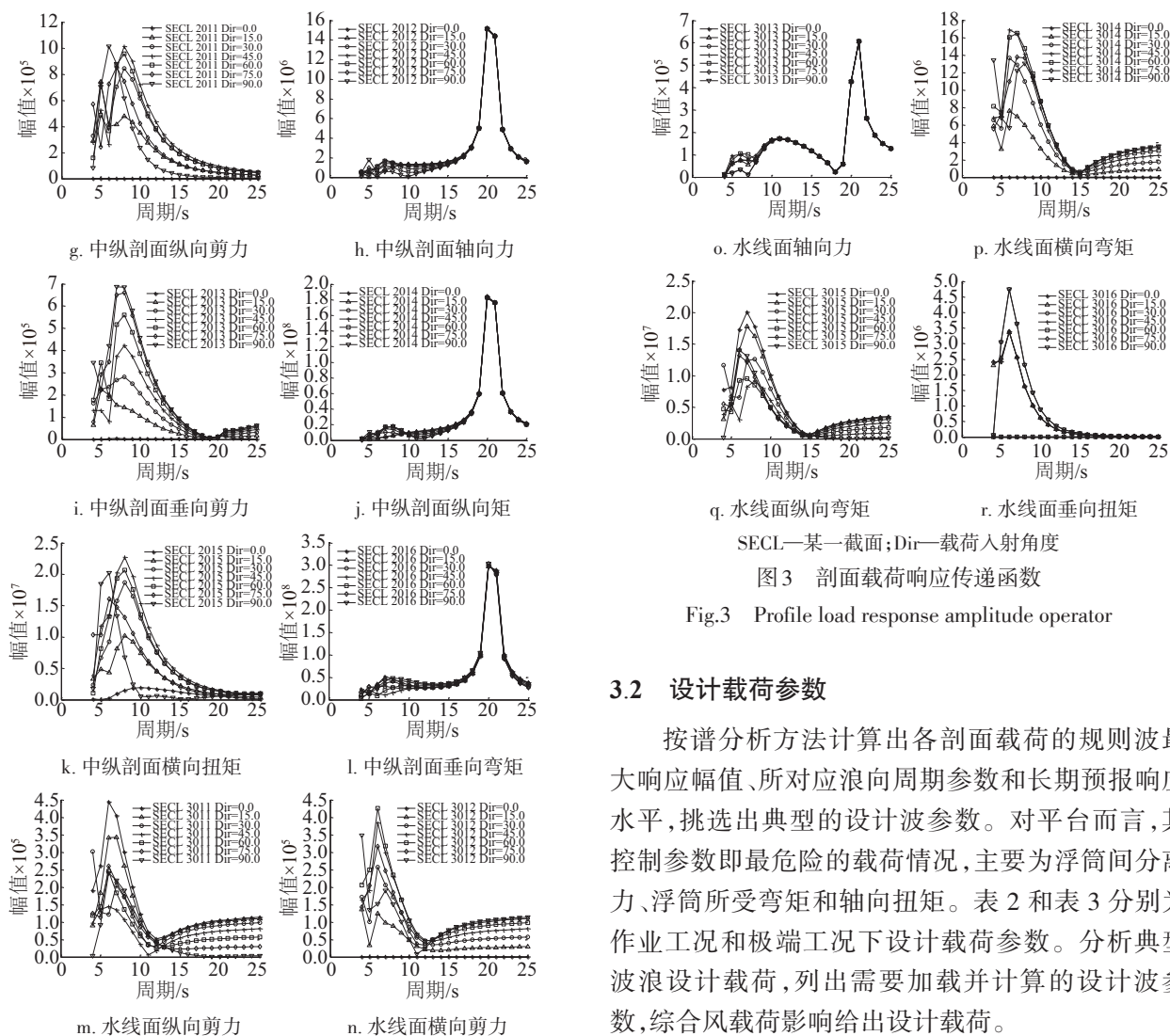


图3 剖面载荷响应传递函数

Fig.3 Profile load response amplitude operator

3.2 设计载荷参数

按谱分析方法计算出各剖面载荷的规则波最大响应幅值、所对应浪向周期参数和长期预报响应水平,挑选出典型的设计波参数。对平台而言,其控制参数即最危险的载荷情况,主要为浮筒间分离力、浮筒所受弯矩和轴向扭矩。表2和表3分别为作业工况和极端工况下设计载荷参数。分析典型波浪设计载荷,列出需要加载并计算的设计波参数,综合风载荷影响给出设计载荷。

表2 作业工况下设计载荷参数

Table 2 Design load parameter under operating condition

设计载荷	中横剖面				中纵剖面			水线面				
	1015垂 向弯矩	1013垂 向剪力	1014纵 向扭矩	1016横 向弯矩	2011纵 向剪力	2013纵 向剪力	2014纵 向弯矩	3011纵 向剪力	3012横 向剪力	3013轴 向力	3014横 向弯矩	3015纵 向弯矩
响应周期/s	20	8	7	8	6	7	20	6	6	21	6	7
不利浪向/(°)	90	0	45	45	90	90	0	0	60	90	45	0
设计波幅/m	2.015	4.352	3.978	3.993	4.427	4.391	1.76	2.622	2.723	2.299	3.998	3.45
设计波长/m	558.216	99.820	76.425	99.820	56.149	76.425	558.216	56.149	56.149	582.888	56.149	76.425
相位角/(°)	11.832	119.531	28.092	157.897	-22.669	84.957	-167.134	146.331	19.568	-167.399	-158.370	139.464
不利风向/(°)	90	0	45	45	90	90	0	0	60	90	45	0

4 强度校核

按照计算出的设计波参数,对模型施加波浪

载荷,具体步骤是:先采用 SESAM 水动力分析模块 Wadam 计算水动力载荷,再把水动力载荷传递到有限元模型。按照计算出的风浪作用方向,以

表3 极端工况下设计载荷参数

Table 3 Design load parameter under extreme condition

设计载荷	中横剖面				中纵剖面			水线面				
	1015垂 向弯矩	1016横 向弯矩	1013垂 向剪力	1014纵 向扭矩	2011纵 向剪力	2013纵 向剪力	2014纵 向弯矩	3011纵 向剪力	3012横 向剪力	3013轴 向力	3014横 向弯矩	3015纵 向弯矩
响应周期/s	20	8	8	7	8	7	20	6	6	21	6	7
不利浪向/(°)	90	45	0	45	45	90	0	0	60	90	45	0
设计波幅/m	2.400	4.548	4.951	4.564	4.548	4.997	1.886	2.973	3.096	2.718	4.538	3.923
设计波长/m	558.216	99.820	99.820	76.425	99.820	76.425	558.216	56.149	56.149	582.888	56.149	76.425
相位角/(°)	11.832	157.897	119.531	28.092	157.897	84.957	-167.134	146.331	19.568	-167.399	-158.37	139.464
不利风向/(°)	90	45	0	45	45	90	0	0	60	90	45	0

风浪同向最不利状态对结构施加不同方向风载荷。调用 Sestra 模块进行基础结构的有限元分析计算,在 Xtract 中组合结果、查看。在 Xtract 模块可叠加静水压力、波浪力和风力共同作用的结构应力,作业状态和极端状态结果分别如表 4 和表 5 所示,其中波浪力需输入波幅参数,结构应力最终分别以等效应力云图的方式输出,如图 4 和表 5 所示。

从各组合工况结构应力水平可看出,在结构连接处及结构几何尺寸变形处应力值较大,相比其他部位更易受到损伤。

表4 作业状态各工况应力

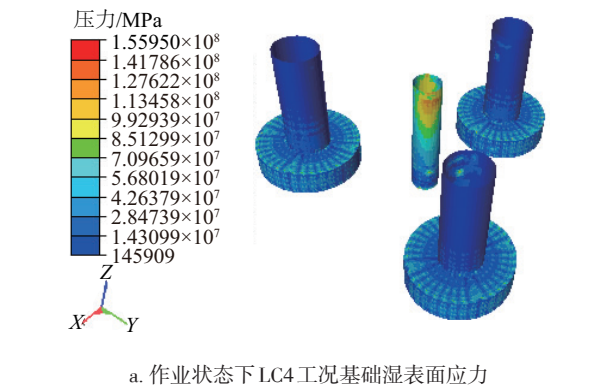
Table 4 Stress of various working condition under operating status

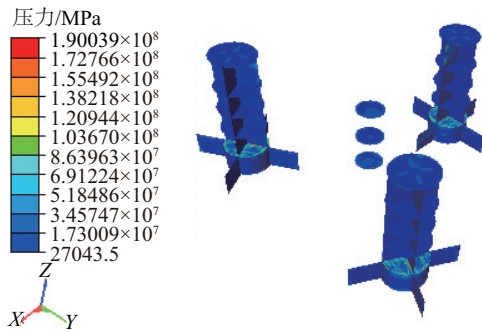
工况	许用应力/MPa	最大等效应力/MPa
LC1	319	232.507
LC2	319	188.302
LC3	319	189.841
LC4	319	190.039
LC5	319	187.567
LC6	319	188.034
LC7	319	223.579
LC8	319	191.496
LC9	319	206.111
LC10	319	178.204
LC11	319	198.241
LC12	319	192.560

表5 极端状态各工况应力

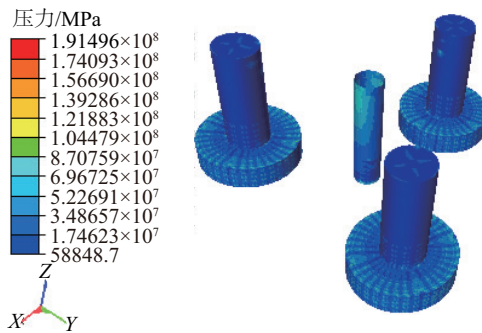
Table 5 Stress of various working condition under extreme status

工况	许用应力/MPa	最大等效应力/MPa
LC1	319	249.338
LC2	319	188.823
LC3	319	189.944
LC4	319	190.222
LC5	319	187.433
LC6	319	188.509
LC7	319	228.708
LC8	319	191.822
LC9	319	189.824
LC10	319	176.166
LC11	319	192.095
LC12	319	193.032

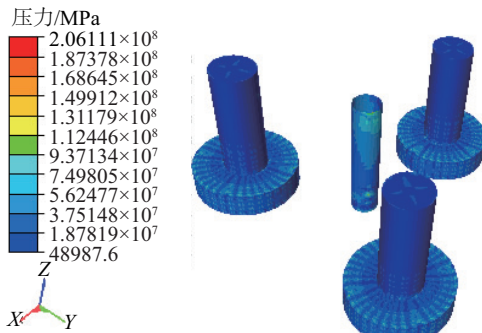




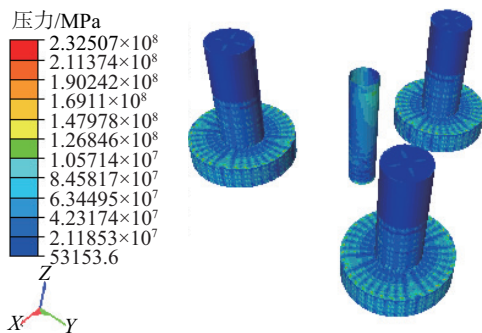
b. 作业状态下 LC4 工况基础内部舱壁应力



c. 作业状态下 LC8 工况基础结构应力



d. 作业状态下 LC9 工况基础结构应力

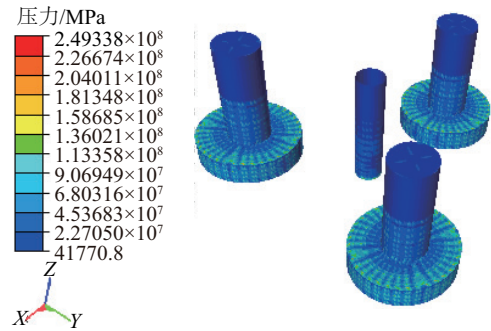


e. 作业状态下 LC10 工况基础结构应力

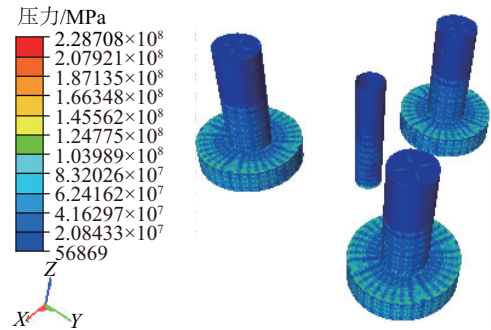
图 4 工况基础湿表面及结构应力

Fig. 4 Wet surface and structural stress of working condition of foundation

图 5 所示。由计算数据可知, LC1 和 LC7 工况分别对应中横剖面垂向弯矩和中纵剖面纵向弯矩,说明在极端工况下,由于结构 3 个立柱之间距离较大,造成波浪引起的中纵剖面和中横剖面弯矩较大,因此在结构初步设计时,立柱间间距是一个很敏感的参数,要综合各方面因素进行优化。各工况基础结构所受最大等效应力均未超出结构许用应力,结构总体强度满足规范要求。



a. 极端状态下 LC1 工况基础结构应力



b. 极端状态下 LC7 工况基础结构应力

图 5 极端状态下 LC1 和 LC2 工况基础结构应力

Fig. 5 LC1, LC2's structural stress of working condition of foundation under extreme status

5 结 论

本文建立结构总体强度评估的计算流程,介绍海上风力机半潜基础的典型剖面载荷,采用设计波的谱分析法,对各典型剖面载荷进行长期海况预报,计算出半潜型基础典型受力工况下的设计波要素,结合浮式风力机所受六自由度风力机载荷,选择风浪同向为最不利工况,对设计波条件下的结构总体强度进行计算校核。结果表明:浮式基础在 2 种载况下的总体强度均满足设计要求。

极端状态中 LC1 和 LC7 工况应力水平最大,如

[参考文献]

- [1] US Department of Energy. 20% wind energy by 2030; Increasing wind energy's contribution to US electricity supply[R]. DOE/GO-102008-2567, 2008.
- [2] Roddier Dominique, Cermelli Christian, Aubault Alexia, et al. Wind float: A floating foundation for offshore wind turbines[J]. Renewable Sustainable Energy, 2010, 033104: 1—34;
- [3] ABS 0006-2015. Rules for building and classing mobile offshore drilling unites[S].
- [4] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范(2005) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [4] CCS. Rules for the classification and construction of offshore mobile platform(2005) [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] 张 亮, 叶小嵘, 吴海涛. 海上浮式风力机环境载荷及运动性能分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 871—875.
- [5] Zhang Liang, Ye Xiaorong, Wu Haitao. Floating on the sea wind machine environment load and sports performance analysis [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(5): 871—875.
- [6] 冯国庆, 任慧龙. 船体结构疲劳评估的设计波法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(4): 430—434.
- [6] Feng Guoqing, Ren Huilong. The design of the hull structure fatigue assessment wave method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(4): 430—434.
- [7] 冯国庆, 任慧龙, 李 辉. 实用船舶结构疲劳评估方法概要[J]. 舰船科学技术, 2009, (1): 23—28;
- [7] Feng Guoqing, Ren Huilong, Li Hui. The practical ship structure fatigue assessment methods [J]. Ship Science and Technology, 2009, (1): 23—28.
- [8] 戴仰山, 沈进威, 宋竞正. 船舶波浪载荷[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] Dai Yangshan, Shen Jinwei, Song Jingzheng. Ship wave load [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

STRENGTH CHECK ON DEEP SEA SEMI-SUBMERSIBLE FLOATING WIND TURBINE BASED ON DESIGN WAVE METHOD

Sang Song¹, Yu Mei¹, Shi Xiao², Yi Shuyu¹, Yang Chun¹, Fei Shengjie¹

(1. School of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Institute of Intelligent Manufacturing, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

Abstract: In this paper, American National Renewable Energy Laboratory (NREL) offshore published 5 MW baseline wind turbine is chosen as design reference. Using the design wave spectrum analysis, select the typical load profiles of infrastructure, and then carry on the long-term forecast to calculate the design wave elements of the semi-submersible foundation under typical force conditions. Combine with the wind load of structure and the six degrees of freedom of wind turbine load, choose wind and waves in the same direction as the most unfavorable conditions. Check the overall structural strength under design wave conditions, the results showed that the structural strength satisfies the requirements.

Keywords: floating wind turbine; design wave method; spectrum analysis; profile load; strength check