

钢筋混凝土浮式风机平台概念设计与性能研究

邓露¹ 王彪¹ 肖志颖¹ 宋晓萍²

(1 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2 湘电风能有限公司, 湖南 湘潭 411102)

摘要 鉴于钢筋混凝土结构具有成本低、耐腐蚀和施工简便等优点,根据假设的海况条件和5 MW风机的属性,提出了钢筋混凝土半潜型浮式风机平台的概念设计方案.采用SESAM软件建立水动力模型进行数值模拟,研究了浮式平台的整体性能,包括稳定性、水动力性能和整体强度.结果表明:半潜型浮式平台的稳定性、水动力特性和整体强度良好,能够满足风机正常作业的相关规范要求,验证了钢筋混凝土浮式风机平台的可行性.

关键词 浮式风机; 平台; 钢筋混凝土; 概念设计; 水动力; 强度

中图分类号 TK83 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2016)01-0011-05

Conceptual design and performance analysis of a reinforced concrete platform for floating wind turbines

Deng Lu¹ Wang Biao¹ Xiao Zhiying¹ Song Xiaoping²

(1 College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2 XEMC Windpower Co. Ltd., Xiangtan 411102, Hunan China)

Abstract Reinforced concrete structures have the advantages of low cost, high corrosion resistance and simple construction. A conceptual design of a reinforced concrete semi-submersible floating platform for a 5 MW wind turbine according to specified sea state was proposed. The performance of the floating platform including stability, hydrodynamic responses and strength was analyzed by numerical simulation using the SESAM software. The results show that the performance of the floating platform meets the requirements for the wind turbine to function well in different conditions, illustrating the feasibility of a reinforced concrete floating platform for offshore wind turbines.

Key words floating wind turbine; platform; reinforced concrete; conceptual design; hydrodynamics; strength

我国海上风能资源丰富,加快海上风电建设对改善我国能源结构、促进经济可持续性发展具有重要意义.当前的海上风电场一般采用固定式基础,但在水深大于50 m的海域,固定式基础因成本过高而不再适用,此时浮式基础为开发海上风电提供了一种较经济的选择.近年来关于浮式风机的研究进展迅速^[1].文献^[2]提出多种浮式风机平台的概念设计方案,包括圆台形、三角形和四边形等形式的平台,研究了浮式风机基础的稳定

性、水动力性能和建造成本等. Lefebvre等^[3]提出了浮式风机支撑结构的设计方案 Tri-floater,并对其进行了静水稳定性、水动力特征和强度分析,总结了浮式风机支撑结构的初步设计方法. Ishihara等^[4]设计了可搭载三组风机塔架的半潜型浮式风机基础,通过数值模拟和1/150的缩尺模型试验研究了半潜型浮式风机基础在波浪和风荷载作用下的运动响应特征. Roddier等^[5]研究了浮式风机基础的设计准则,指出浮式风机基础的

收稿日期 2015-05-28.

作者简介 邓露(1984-),男,教授, E-mail: denglu@hnu.edu.cn.

基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA050603); 湖湘青年科技创新创业平台资助项目.

结构设计应借鉴石油平台的技术,同时也要考虑风机的不同功能要求.近年来,国内学者也提出了多种浮式风机的概念设计方案,并研究了浮式风机平台的性能^[6-7].

目前应用最多的钢结构浮式平台具有造价高、易腐蚀、施工工艺要求高等缺点.随着混凝土性能的不断改善和提高,特别是轻质量、高强度等高性能混凝土的出现及应用,使钢筋混凝土的海洋结构成为可能^[8].本研究提出一种钢筋混凝土半潜型浮式风机基础平台的概念设计方案,并建立数值模型,对其在不同工况下的性能进行研究和评估,重点分析了浮式平台的稳定性、水动力性能和整体强度,证明了钢筋混凝土浮式风机平台的可行性.

1 概念设计方案

安装海域的水深为 60 m,采用美国国家可再生能源实验室的 5 MW 风机模型^[9],海况条件见表 1.根据安装海域的海况条件,并参考已有钢结构海上浮式风机结构形式,设计了一种钢筋混凝土的半潜型浮式风机平台,概念设计方案如图 1(a)所示.三个边浮筒呈等边三角形布置,中浮筒位于三角形的中心,浮筒之间通过水平和斜向构件连接,塔架位于中浮筒之上.浮筒和连接构件均为钢筋混凝土结构,混凝土采用轻骨料混凝土 LC55,密度取 1 950 kg/m³;边浮筒底部的压水板为钢结构.

表 1 海况条件

海况	作业工况	自存工况
风速/(m·s ⁻¹)	11.4	44.1
波浪有义波高/m	3.1	11.1
波浪谱峰周期/s	5.5	13.1
流速/(m·s ⁻¹)	1.5	2.6

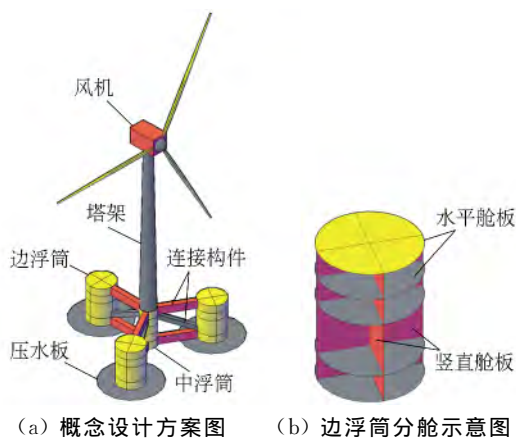


图 1 钢筋混凝土浮式风机的设计方案图

边浮筒由 5 块水平舱板和 2 块相互垂直的竖向舱板划分成 16 个舱室,从底到顶舱室高度依次是 4, 8, 4 和 4 m,如图 1(b)所示,底层舱室为海水压载舱;中浮筒由 6 块水平舱板划分成 5 个舱室,舱室高度均为 4 m.主要构件尺寸:边/中浮筒高度为 20 m/20 m;边浮筒中心线距离 50 m;边/中浮筒直径为 14 m/8 m;边/中浮筒外壁壁厚为 0.40 m/0.50 m;边/中浮筒水平舱板厚均为底部 0.50 m,其余 0.25 m;边浮筒竖向舱板厚度为 0.30 m;水平连接构件箱型 3.0 m×4.0 m,壁厚为 0.30 m;斜向连接构件箱型 3.0 m×2.5 m,壁厚为 0.30 m;压水板半径为 17 m;空载排水量为 7 010 t;压载排水量为 7 956 t;惯性矩 $I_{xx}/I_{yy} = 29.45 \text{ m}^4/29.45 \text{ m}^4$;空载整体重心相对于海平面坐标(0,0,0.56)m.

2 稳定性分析

稳定性是指浮式平台在外荷载作用下发生倾斜后恢复到原来平衡位置的能力,主要研究复原力矩与风倾力矩随倾角变化的关系.通过分析不同工况下的完整稳定性和破舱稳定性,确定浮式平台的最优主尺寸.

2.1 计算模型

采用 SESAM 软件中的 GeniE 模块建立浮式风机的整体模型,HydroD 模块进行数值模拟.平台吃水深度为 15 m,边浮筒底部压载舱室的渗透率取 1.0,压载水的填充率为 0.7,计算浮式平台在不同倾角下复原力矩与风倾力矩的关系.

对于风轮平面与浮式平台所形成的不同夹角,不同的风向可能引起浮式平台绕不同的轴发生倾斜,风轮平面与平台的夹角、风向角、倾斜轴等因素的不确定性导致平台的稳定性验算在理论上存在很多工况.根据风机运营的规律和相关规范的规定^[10-11]提出以下假设:正常作业时,风机的偏航系统可使风轮平面始终与风向垂直;浮式平台破舱后,风轮停止转动;不考虑系泊的有利约束,假设平台处于无系泊的漂浮状态;边浮筒的暴露部分可能被撞击而破损进水,一般在吃水以下 3 m 至以上 5 m 范围可能破损,因此边浮筒顶部两层外侧的 4 个舱室为最可能破损的舱室.

在平台的平面内建立如图 2 所示的平面坐标系,规定与 x 轴正方向所形成的角度为方向角,逆时针为正.

2.2 完整稳定性分析

根据 DNV 和 CCS 规范^[10-11]的相关规定,浮

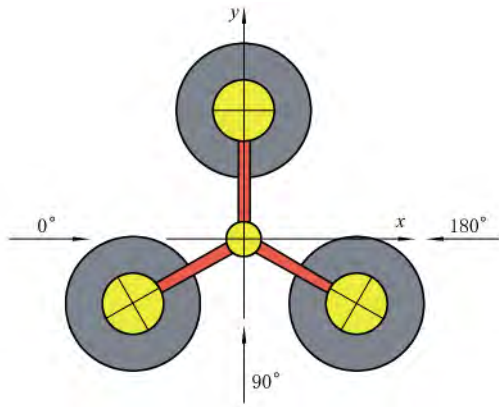


图 2 浮式平台的平面坐标系

式平台的完整稳定性应满足:从正浮状态至第二交角的范围内,复原力矩值大于 0,且复原力矩曲线下的面积与风倾力矩曲线下的面积之比应大于 1.3;复原力矩曲线在正浮状态至第二交角的范围内都应为正值。

由于浮式平台是多轴对称,可只考虑风向角为 30°~90°范围内的完整稳定性.各种工况下完整稳定性的衡准值见表 1.

表 1 不同工况下完整稳定性的衡准值

工况	风向角/(°)	倾斜轴/(°)	第一交角/(°)	面积比
作业 工况	30	120	2.46	10.45
	45	135	2.46	9.71
	60	150	2.46	7.52
	75	165	2.47	4.43
	90	180	2.45	3.49
自存 工况	30	120	2.43	9.66
	45	135	2.43	8.94
	60	150	2.43	6.86
	75	165	2.44	3.94
	90	180	2.42	3.06

由表 1 可见:所有工况的第一交角均小于 10°,面积比大于 1.3,且复原力矩曲线在正浮状态至第二交角的范围内都为正值,因此浮式平台的完整稳定性满足要求;相同风向角时,自存工况下的面积比更小,说明自存工况下的稳定性更差;两种工况下的面积比均在 30°处最大,而在 90°处最小,因此最不利风向角为 90°,此工况下边浮筒顶部浸没后,平台的水线面面积减小最快。

2.3 破舱稳定性分析

风机浮筒舱室划分原则是对稳定性起重要作用的舱室高度值不宜太大,以免舱室破损进水后,浮式平台的稳定性受到较大影响,因此在满足使用功能的前提下,可能破损范围内的舱室应尽量细分.根据 DNV 和 CCS 规范^[10-11]的相关规定,浮式平台的破舱稳定性应满足:力矩曲线的第一交角不大于 17°;从第一交角到第二交角至少有 7°

的范围,且在此范围内某角度处的复原力矩至少达到风倾力矩的 2 倍.

由于浮式平台是多轴对称,因此可只分析其中一个边浮筒在不同的破舱工况下的稳定性.破舱主要考虑水线面附近暴露区域的四个舱室,即将边浮筒的顶层外侧舱室编为 1,2 号,第二层外侧舱室编为 3,4 号,以下将专门研究不同舱室破损后浮式风机平台的稳定性.

完整稳定性的分析结果表明自存工况比作业工况更差,因此将专门研究自存工况破舱稳定性.浮式平台破舱后的最不利工况是以浮式平台正浮时的水线面与破舱后的水线面的交线(即自然倾斜轴)为倾斜轴,且风轮平面与自然倾斜轴平行,风荷载指向破舱的浮筒.不同工况下破舱稳定性的衡准值详见表 2.表中复原力矩和风倾力矩对应的平台倾覆角均为 10°.

表 2 不同工况下破舱稳定性的衡准值

参数	破损舱室				
	1 号	3 号	1,2 号	1,3 号	3,4 号
第一交角/(°)	2.97	4.30	4.04	5.49	6.41
第二交角/(°)	31.41	33.69	22.31	24.78	26.97
角度差/(°)	28.44	29.39	18.27	19.29	20.56
复原力矩/ (10 ⁸ N·m)	1.81	1.87	1.22	1.31	1.37
风倾力矩/ (10 ⁸ N·m)	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
力矩比值	3.30	3.41	2.22	2.39	2.40

由表 2 可知:第一交角均小于 17°;两个交角的角度差大于 7°,且在 10°处的力矩比值均大于 2;外侧顶部的 1,2 号舱室同时破舱的工况最不利,力矩比值为 2.22 略大于限值 2,满足要求且又不过大,说明浮式平台的主尺寸较合适,因此浮式平台的破舱稳定性满足要求。

3 水动力性能分析

水动力性能分析主要是研究浮式平台在波浪荷载作用下的运动规律,分析浮式平台在不同周期的波浪荷载作用下的运动响应的幅值,即幅频响应(response amplitude operators, RAO),并提出控制平台位移或振动的措施,使浮式平台的振动周期避开主要波浪周期范围,防止发生共振。

3.1 理论基础

幅频响应是浮体在不同频率单位波幅的规则波作用下的位移响应.在某一特定频率的规则波作用下,浮体随时间变化的位移响应可写为

$$R(\omega, \beta, t) = A \operatorname{Re} [| H(\omega, \beta) | e^{i(\omega t + \varphi)}],$$

式中： ω 为入射波角频率； β 为波浪入射方向； A 为入射波波幅； t 为时间； $H(\omega, \beta)$ 为响应传递函数，即幅频响应算子； φ 为响应与入射波的相位差。

半潜型浮式平台在横摇、纵摇和垂荡三个自由度方向上具有较大的静水回复力，其运动主要由一阶波浪力引起，且系泊对此三个自由度方向上的运动约束较小。而半潜型浮式平台在横荡、纵荡和首摇运动上基本没有静水回复力，其运动主要通过系泊系统控制^[12]。因此，在初步设计阶段可不考虑系泊对浮式平台的约束作用，只计算横摇、纵摇和垂荡三个自由度上的 RAO，在频域内分析浮式平台在波浪力作用下运动响应的规律，使浮式平台运动的固有周期避开主要波浪周期范围，评价浮式基础的耐波性。

3.2 水动力模型

海洋中的结构物会受到波浪荷载作用，其中细长小尺度结构物所受的波浪荷载采用 Morison 公式计算，而大尺度结构物的波浪荷载采用势流理论计算。根据入射波的波高、波长与结构物尺寸的相对大小关系可知，概念设计方案中的浮筒和连接构件均属于大尺寸构件，因此在 HydroD/Wadam 中建立浮式风机整体模型，包括转子-机舱体系、塔架和平台，其中舱壁和连接构件采用板单元，压水板的支撑梁采用梁单元。

3.3 计算与分析

计算坐标系和浪向角的规定见图 2。考虑平台多轴对称，选取浪向角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，间隔为 15° ，波浪周期为 $2 \sim 60$ s，间隔为 2 s，波高为 2 m。图 3

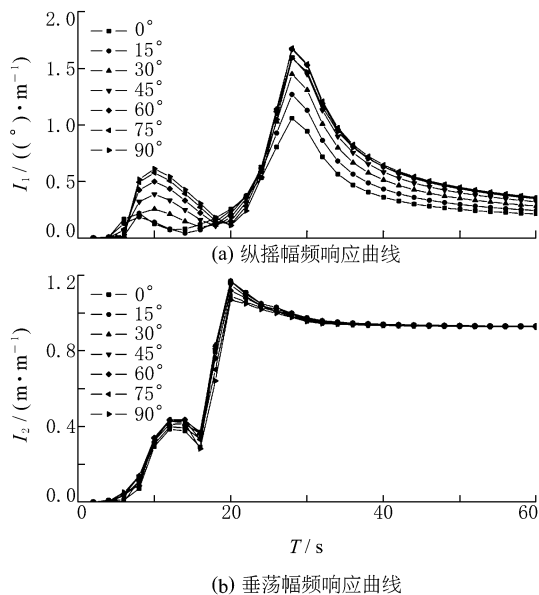


图 3 纵摇和垂荡运动的幅频响应曲线

是不同浪向角作用下纵摇和垂荡的幅频响应曲线。图中： T 为波浪周期； I_1 为纵摇幅值； I_2 为垂荡幅值。

由图 3 可见：在不同浪向角下，纵摇的运动响应变化较大，但其幅频响应曲线随波浪周期的变化趋势基本一致，均在 28 s 时达到幅值；在不同浪向角作用下，垂荡运动响应基本相同，均在 20 s 时达到幅值。

安装海域的波浪周期主要集中于 $3.1 \sim 13.1$ s，而浮式平台的纵摇和垂荡运动的峰值周期分别是 28 s 和 20 s；因此平台的运动基本避开了主要的波浪周期范围，满足水动力耐波性的要求。

4 整体强度分析

整体强度分析是计算平台在风、浪、流等荷载共同作用下的内力，并验算钢筋混凝土结构构件的承载能力，以确定结构构件的厚度和配筋等。

4.1 计算模型

为了防止浮式平台产生刚体位移，约束平台模型上不共线的三个节点以消除其在六个自由度上的刚体位移，约束点的支撑须保持浮式平台的稳定，但不影响在 Wadam 中的水动力分析。分别选取三块压水板下表面的三个节点设置支撑来约束平台的刚体位移，节点约束分别是：节点 1， x, y, z 方向上的位移 $U_x = U_y = U_z = 0$ ；节点 2， $U_y = U_z = 0$ ；节点 3， $U_z = 0$ 。

4.2 荷载计算与组合

环境荷载主要包括风、浪、流等荷载，其中波浪荷载和静水荷载由 Wadam 分别计算并施加到模型上，而流荷载和风荷载根据规范^[10-11]所给出的经验公式进行计算，以静力荷载的方式施加到模型上。

文献[13]根据荷载的不同作用方向进行组合，验证了浮式平台的整体强度，但不能准确分析节点处的强度。本研究采用随机性设计波法对不同荷载工况下的波浪周期和浪向进行搜索，在频域内计算关键截面特征荷载量的响应谱曲线，以确定最危险浪向、周期和相位等设计波参数。DNV 规范^[10]对四立柱半潜型石油平台的特征面作出了规定，但未对概念设计的三立柱半潜型平台做相应规定。此处选取了 4 个剖面(如图 4 所示)，并确定了 9 个特征量进行分析(如表 3 所示)。

搜索最不利波浪时的参数设置如下：采用 Jonswap 谱，谱峰系数取 3.3；浪向角为 $-90^\circ \sim$

90°,步长为 15°,波浪周期为 2~30 s,步长为 1 s. 结合波浪荷载特征量的 RAO 和波浪谱密度

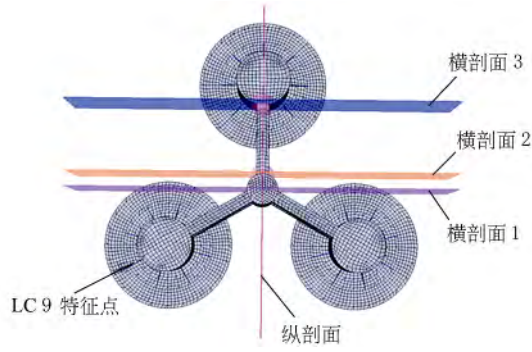


图 4 强度分析的剖面 and 节点

表 3 波浪荷载作用下的特征量选取

工况	波浪荷载特征量	备注
LC1	横剖面 1 的轴力 N_Y	特征截面
LC2	横剖面 2 的轴力 N_Y	关键节点
LC3	横剖面 2 的弯矩 M_Z	关键节点
LC4	横剖面 2 的弯矩 M_X	关键节点
LC5	横剖面 3 的轴力 N_Y	关键节点
LC6	横剖面 3 的弯矩 M_Z	关键节点
LC7	横剖面 3 的弯矩 M_X	关键节点
LC8	纵剖面 1 的轴力 N_X	特征截面
LC9	垂荡板的垂向加速度 a_z	关键节点

函数,计算波浪荷载特征量响应谱

$$S_R(\omega) = [H(\omega, \beta)]^2 S_\zeta(\omega),$$

式中 $S_\zeta(\omega)$ 为波浪谱. 根据上式计算了不同工况下的响应谱曲线,因自存工况下的波浪荷载和结构响应更大,故选取响应谱曲线极值所对应波浪的浪向角、周期和相位作为设计波参数,具体如表 4 所示.

表 4 自存工况下的设计波参数

工况	浪向角/(°)	周期/s	相位/(°)	响应幅值
LC1	90	18.1	-97.705	2.64×10^7
LC2	-90	17.5	143.727	1.11×10^7
LC3	0	17.9	101.976	1.81×10^8
LC4	90	18.0	170.574	2.19×10^8
LC5	-90	18.2	126.076	1.10×10^7
LC6	60	18.3	118.258	6.46×10^7
LC7	60	18.2	-173.533	3.83×10^8
LC8	-90	17.9	-138.721	7.85×10^7
LC9	0	18.0	92.422	2.80

为保证钢筋混凝土浮式平台能满足不同海况下的强度要求,须验算最不利载荷组合,即风、浪和流作用方向一致的情况. 分别计算平台在风、浪和流作用下的内力,根据 DNV 规范^[10]选取组合系数进行组合.

4.3 内力分析与强度验算

图 5 为 LC3 工况下浮式平台的内力云图. 由

图 5 可见:a. 中心浮筒和边浮筒的外壁与连接构件及舱板相交处的内力数值较大,而外壁的其他区域内力比较均匀;b. 中心浮筒外壁的内力比边浮筒大,特别是中心浮筒与下层水平连接构件相交部位的环向拉压轴力较大;c. 边浮筒中的竖向舱板底部内力较大,而水平舱板的内力相对较小. 综合分析可知:钢筋混凝土浮式风机平台的整体受力特征显著,浮筒与构件的连接部位受力较大,其他区域受力比较均匀. 因此具体结构设计时,构件连接部位可选取更多的特征量进行分析.

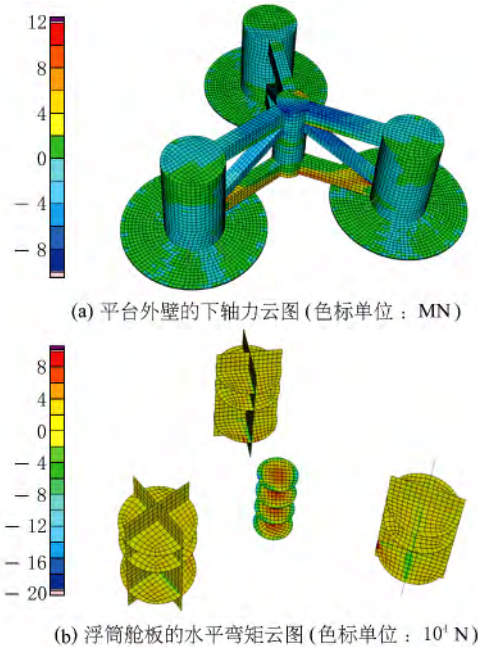


图 5 LC3 工况下浮式平台的内力云图

提取内力云图中的构件内力,计算配筋并验算强度,限于篇幅,此处仅给出部分计算结果. 边浮筒外壁厚为 400 mm,内外层配筋为 20@200,裂缝为 0.049 mm,其他构件计算方法类似,因此浮式平台的整体强度满足要求.

5 结语

本研究提出了钢筋混凝土浮式风机平台的概念设计方案,通过稳定性分析确定平台主尺寸,水动力分析确定压水板结构,整体强度验算确定构件的厚度和配筋. 研究结果表明:钢筋混凝土结构浮式风机平台的概念设计方案是可行的,在规定的坐标系下,首先根据海况信息和风机属性提出概念设计方案;然后通过稳定性分析确定平台主尺寸,水动力分析确定压水板结构,整体强度验算确定构件的厚度和配筋. 在规定的坐标系下,完整稳定性的最不利风向角为 90°,破舱稳定性的最不利工况是边浮筒顶层外侧 (下转第 21 页)

- 2014.
- [12] 中国铁道科学研究院. 京津城际铁路 CRTS II 型板式无砟轨道设计原理与方法总结[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008.
- [13] Zhang L, Teng J G. Finite element prediction of interfacial stresses in structural members bonded with a thin plate[J]. *Engineering Structure*, 2010, 32(2): 459-471.
- [14] Stephen J, Xia L, Ravindra D, et al. A discrete damage zone model for mixed-mode delamination of composites under high-cycle fatigue[J]. *International Journal of Fracture*, 2014, 190(1/2): 53-74.
- [15] Xu X P, Needleman A. Numerical simulations of dynamic crack growth along an interface[J]. *International Journal of Fracture*, 1996, 74(4): 289-324.

(上接第 15 页)的 1 号和 2 号舱室同时破损并进水的工况. 浮式平台整体受力比较均匀,但连接构件与浮筒外壁及连接节点处内力较大,可采用本文方法进一步分析.

参 考 文 献

- [1] Arapogianni A, Genachte A, Ochagavia R M, et al. Deep water—the next step for offshore wind energy [R]. Brussels: European Wind Energy Association, 2013.
- [2] Bulder B H, van Hees M T, Henderson A, et al. Study to feasibility of and boundary conditions for floating offshore wind turbines [R]. Delft: ECN, MARIN, TNO, TUD, MSC, Lagerway the Windmaster, 2002.
- [3] Lefebvre S, Collu M. Preliminary design of a floating support structure for 5 MW offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 40: 15-26.
- [4] Ishihara T, Phuc P V. A study on the dynamic response of a semi-submersible floating offshore wind turbine system, part 1: a water tank test [C] // ICWE12. Cairns: 2007; 2511-2518.
- [5] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. Windfloat; a floating foundation for offshore wind turbines[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, 2(3): 1-34.
- [6] 张亮,邓慧静. 浮式风机半潜平台稳定性数值分析[J]. *应用科技*, 2011, 38(10): 13-17.
- [7] 唐友刚,桂龙,曹菡,等. 海上风机半潜型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, 35(11): 1314-1319.
- [8] 邢至庄,王惟诚,钱令希. 海上混凝土平台的现状与发展[J]. *中国海上油气: 工程*, 1998, 10(1): 9-16.
- [9] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden: NREL, 2009.
- [10] DET NDRSKE VERITAS AS. DNV—OS—J103 Design of floating wind turbine structures[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2013.
- [11] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [12] 王俊荣,谢彬. 半潜式平台水动力性能级运动响应研究综述[J]. *中国造船*, 2009, 50(S1): 255-261.
- [13] 唐友刚,王涵,陶海成,等. 海上风机半潜型浮式基础结构设计及整体强度分析[J]. *中国造船*, 2013, 54(3): 85-93.