

蒋上, 朱东, 刘彦辉, 等. 新型板架式钢平台设计及风—浪—流耦合作用下动力响应分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 151–158. [JIANG Shang, ZHU Dong, LIU Yanhui, et al. Design of a New Plate Frame Steel Type Platform and Its Dynamic Response Analysis Under Wind–Wave–Current Coupling Effect[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 151–158]

新型板架式钢平台设计及风—浪—流耦合作用下动力响应分析

蒋上¹, 朱东², 刘彦辉³, 马凌¹, 高湛²

(1. 中国电力工程顾问集团中电海洋能源工程技术研究院, 广州 510000; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 3. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘要: 针对海上钢平台结构重量比大与空间利用率低等问题, 提出一种新型板架式钢平台结构, 并基于 ANSYS 软件建立一实际海上板架式钢平台结构三维有限元模型, 模拟研究了其在风—浪—流耦合作用下的位移与加速度响应。分析结果表明: 当波流入射角为 90°, 相位角为 81° 时, 结构顶部位移最大; 荷载入射角对结构位移与加速度影响显著, 当荷载作用方向与结构弱轴向重合时, 结构位移与加速度响应显著增大; 板架式钢平台结构极端环境下的加速度响应能满足安全要求。研究对板架式钢平台结构的设计和动力分析有一定的参考意义。

关键词: 板架式钢平台; 风荷载; 波浪荷载; 耦合作用

中图分类号: TU311.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0151-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.17

Design of a New Plate Frame Steel Type Platform and Its Dynamic Response Analysis Under Wind–Wave–Current Coupling Effect

JIANG Shang¹, ZHU Dong², LIU Yanhui³, MA Ling¹, GAO Zhan²

(1. China Power Offshore Energy Engineering and Technology Research Institute, Guangzhou 510000, China;
2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China; 3. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Due to fact the problem of large proportion by weight and low space utilization of offshore steel platform, a new plate frame type steel platform was proposed. The three-dimensional finite element model of plate frame type steel platform was established based on ANSYS finite element software, and the dynamic response law of displacement and acceleration of the platform under wind–wave–current coupling effect are simulated. The results show that the maximum displacement of the top of the structure is observed when the incidence angle of the wave is

收稿日期: 2024-04-13

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“紧凑型轻量化海上风电送出换流站关键技术研究”(DG2-D06-2022)

作者简介: 蒋上(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为现从事海上风力发电土建设计。

通信作者: 刘彦辉(1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向为建构筑物抗震与减隔震。

E-mail: liuyanhui2012@163.com

90° and the phase angle is 81°. The incident angle of the load has a significant impact on the displacement and acceleration responses of the plate frame type steel platform. When the load direction aligns with the weak axis of the structure, the responses of the displacement and acceleration of the structure increase substantially. The research has certain reference significance for the design and dynamic analysis of plate frame type steel platform.

Keywords: Plate frame type steel platform; Wind loads; Wave loads; Coupling effect

0 引言

常规海上换流站多为导管架型平台,通过打入海底的桩柱支撑整个结构^[1],又称为桩式平台。上部结构多为框架式构造,结构重量约占平台重量的2/3,难以实现平台空间的高效利用。而板架式结构具有适应性强、安全可靠、结构重量比低等优点^[2],可实现上部组块的紧凑布置,有助于解决海上风电发展中钢平台结构重量比大的瓶颈。

海上换流站所处环境恶劣,在多种荷载联合作用与环境腐蚀下易发生平台结构抗力衰减^[3],甚至影响结构的安全性。目前,已有多位学者开展了海上平台动力响应与结构优化研究。

朱本瑞等^[4]通过ANSYS APDL编制了多种台风工况下的框架式海洋平台响应分析模型,实现了在平台上波浪荷载的精准施加,并研究了关键构件的应力分布。修宗祥^[5]通过ANSYS有限元软件与MATLAB的便捷交互,以平台频率与安全疲劳可靠性作为评价指标,实现了框架式深水海洋平台结构的优化分析,提高了优化计算效率。杨耀鹏等^[6]以渤海某新建升压站平台为例,采用有限元数值模拟方法分析了典型冰况下升压站平台的抗冰性能。梁瑞等^[7]基于冰载荷参数对框架式导管架平台的影响,使用ANSYS软件搭建了导管架平台模型,分析了不同冰速与冰厚对平台动力响应的影响。颜庆智等^[8]基于环境载荷对框架式海洋平台的影响,搭建有限元模型,分析了结构的动力响应,并在冰载荷作用下进行结构可靠性分析。

综上,已有学者研究了环境荷载作用下海洋平台动力响应与优化,但研究的海洋平台多为框架式构造,较少研究板架式钢平台在环境工况下的动力响应。现针对某板架式钢平台,利用ANSYS有限元软件分析其在环境荷载下的动力响应,为该类型结构的振动监测预警设定提供参考,对板架式钢平台的设计和动力分析有一定的参考意义。

1 结构方案与有限元模型

1.1 结构方案

板架式钢平台的结构形式:上部采用板架结构,共八层,平面尺寸为82.5 m×85.5 m(不包含局部外挑平台),顶层标高约68 m(不包括吊机)。甲板及墙板由图1所示的板材、大梁及扶强材组成,大梁采用T型钢,由于没有立柱与斜撑的影响,相比于框架结构可实现紧凑布置与缩减上部结构尺寸。结构在腿柱与甲板和墙皮连接处采用DH36/EH36加厚板材进行局部加强,底层甲板与下部导管架结构通过立柱钢管连接。导管架设计8个φ2400的钢管主腿,成矩形布置,并在标高-13 m和-45 m处布置φ1400的水平横撑和φ1 200的X斜撑。导管架在主腿底部设置φ5060桩靴,与钢管桩采用水下灌浆方式连接。基础桩桩径4.5 m,桩长约130 m,桩重约840 t。板架式钢平台材料属性如表1所示:

1.2 有限元模型

在满足仿真精度的前提下对原有模型进行简化:电气设备、电缆、通风管道等结构不属于承重受力结构,但其质量较大,在建模时通过质量点进行质量与惯性模拟。

板架式钢平台有限元模型见图2,桩基础采用PIPE16管单元模拟,水中导管采用PIPE59管单元模拟,上部甲板等采用BEAM188单元模拟。PIPE59管单元和PIPE16管单元是梁单元的一种特殊形式,同时支持大位移与大变形。载荷计算时考虑管外壁上的附着层,动力计算时附加质量计入附连水质量与管内、外附着质量。质量点采用MASS21单元模拟,各部件之间均为节点耦合连接。

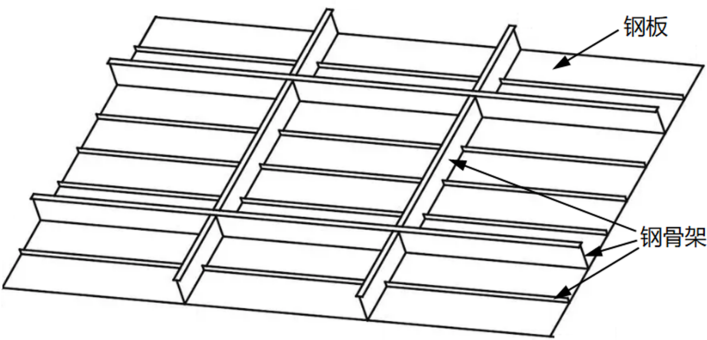


图1 板架结构

Fig.1 Plate frame structure

表1 结构材料属性

Table 1 Material properties of structure

类别	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
上部组块立柱、T梁和加强区域板材	8634	20.0	8.0	0.3	355.0
上部组块甲板、墙皮和扶强材	8634	20.0	8.0	0.3	235.0

1.3 静力分析

文中平台的环境荷载主要为波浪、海流与风荷载，由于波浪相位^[9]角对结构位移响应影响较大，需通过静力分析进行相位角搜索，分析时荷载入射角取90°，风速取25 m/s，波高取11.43 m，计算所得相位角与结构顶部中心点位移的关系曲线如图3所示。

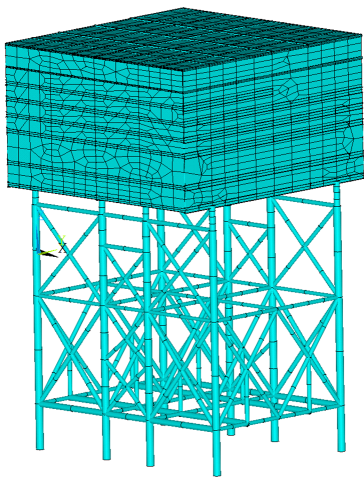


图2 板架式钢平台有限元模型

Fig.2 Finite element model of the plate and frame type steel platform

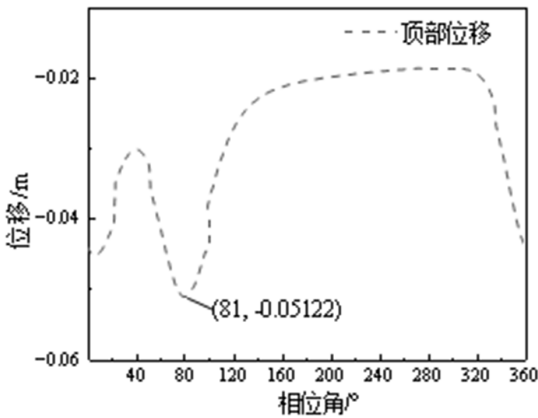


图3 相位角与结构顶部位移关系曲线

Fig.3 The curve between phase angle and displacement at the top of the structure

由图3可看出，当相位角为81°时，结构顶部位移最大，最大值为0.051 m，应力云图如图4所示，最大等效应力为163 Mpa。为准确对比多种工况下结构位移响应和偏安全考虑，文中动力计算工况中波浪相位角均取值81°。

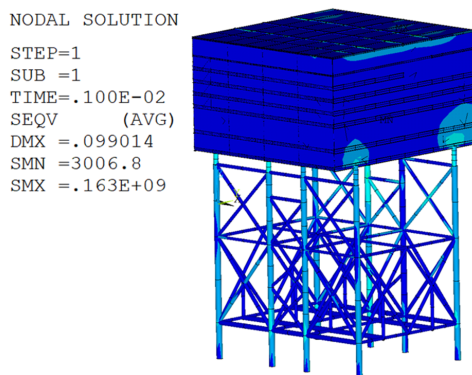


图4 平台等效应力云图

Fig.4 The equivalent stress distribution of the platform

1.4 模态分析

模态分析是研究结构动力特性的基本方法，可以判断具有刚度贡献的结构质量分布的均衡性与合理性，获取结构的自身振动特性^[10]。计算提取的板架式钢平台结构的前3阶频率与振型如表2所示。

表2 结构前3阶自振频率与振型

Table 2 The natural frequency and vibration shapes of the former 3 step of the structure

振型	自振频率/Hz	振型
1	0.243	Y向平动
2	0.417	绕Z轴扭转
3	0.580	X向平动

2 环境荷载计算方法

板架式钢平台结构设计时需考虑波浪、海流、

冰荷载和风荷载等环境荷载^[11]，文中结构所在海域无冰荷载，故模拟时不考虑。

2.1 波浪与海流荷载

波浪荷载是引起海上结构破坏和疲劳损坏的主要荷载。波浪和流荷载计算时应满足《港口与航道水文规范》(JTS145-2015)^[12]规范的相关要求。通过Morison方程计算小物体的波浪力^[13]，该方程可计算任意水深、波高和波长条件下结构的波浪力，并考虑波浪的非线性，其方程如下^[14]：

$$\left\{ \frac{F}{L} \right\}_d = C_D \rho_w \frac{D_c}{2} \left\{ \dot{u}_n \right\} \left\{ \dot{u}_n \right\} + C_M \rho_w \frac{\pi}{4} D_c^2 \left\{ \dot{v}_n \right\} + C_T \rho_w \frac{D_c}{2} \left\{ \dot{u}_t \right\} \left\{ \dot{u}_t \right\} \quad (1)$$

式(1)中： $\{F/L\}_d$ 为垂直于构件的单位长度的波浪力，N； C_D 为法向拖曳力系数； ρ_w 为水的密度， kg/m^3 ； D_c 为包括海生物在内的杆件的外径^[15]，m； $\{\dot{u}_n\}$ 为垂直于构件轴线水流速度矢量分量； C_M 为惯性力系数； $\{\dot{v}_n\}$ 为垂直于构件轴线水流加速度矢量分量； C_T 为切向拖曳力系数； $\{\dot{u}_t\}$ 为相切于构件轴线水流速度矢量分量。

不同规范中Morison公式水动力参数的取值如表3所示，参考港口与航道水文规范选取给定的 $C_D=1.2$ ， $C_M=2.0$ 。海流荷载通过波浪水质点速度上叠加流速来计算，并考虑海流速度随水深的线性变化，实现海流荷载的准确模拟。

表3 不同规范中水动力参数

Table 3 Hydrodynamic parameters in different standards

系数	DNV-OS-J101 ^[16]	海上固定平台入级与建造规范 ^[17]	港口与航道水文规范&滩海环境条件与荷载技术规范 ^[12,18]	ISO19902 ^[19]
拖曳力系数 C_D	0.65~1.05	0.6~1.0	1.2	0.65
惯性力系数 C_M	2.0	2.0	2.0	1.6

海流中，水质点的运动周期随时间变化缓慢，计算海流对结构物的作用力时，可把海流近似为稳定流动，假定海流对结构物的作用力只有阻力。考虑海流作用时，单位长度上圆管构件的海流力 F_L 可由式2计算^[20]：

$$F_L = \frac{1}{2} C_D \rho A u_L^2 \quad (2)$$

式(2)中： F_L 为海流力，N； C_D 为阻力系数； ρ 为海水密度， kg/m^3 ； A 为单位长度构件在海流向的投影面积， m^2 ； u_L 为设计海流流速， m/s 。

海洋环境中，波浪和海流是共同作用的，模拟分析时必须考虑波浪和海流的耦合。根据板架式钢平台的结构特点和仿真需求，选用ANSYS进行有限元模拟，ANSYS中PIPE59管单元支持考虑

圆管形构件的流体静力、动力效应,可计算水中的圆管形构件的浮力、流力、波浪力的静载荷与动载荷。本文即通过 PIPE59 单元对导管架施加波浪与海流荷载,并通过水动力表定义与修改水流方向、波浪理论与相位角等参数。

2.2 风荷载

板架式钢平台的风荷载需根据周年观测风速与理论公式计算,根据 API RP 2A-WSD 规范^[19],作用在结构上的风荷载可按式 3 计算;

$$F=(\rho/2)(V)^2C_sA \tag{3}$$

式(3)中: F 为风荷载, N; V 为风速, m/s; C_s 为形状系数; A 为物体面积, m²; ρ 为空气密度, 取 1.266 kg/m³。 C_s 取值见表 4。结构所在海域多年平均风速 3.8 m/s, 2008 年 9 月 24 日受强台风“黑格比”影响时实测 10 min 平均风速 34.6 m/s。

表 4 风荷载形状系数

Table 4 Shape factor of wind load	
杆件	风荷载形状系数
梁	1.5
建筑物侧面	1.5
圆柱形构件	0.5
平台的投影面积	1.0

3 动力响应分析

动力分析时将风荷载均匀施加于导管架与上部结构节点,波浪与海流荷载由 Pipe59 单元施加于导管架节点,时间步长取 0.25 s。静力分析时发现平台顶部位移响应最大,故选取平台顶部中心点 A 作为参考点提取各工况动力响应。模态分析时发现钢平台的 X 向(强轴向)一阶自振频率为 Y 向(弱轴向)一阶自振频率的 2.39 倍,表明结构水平双向的刚度差异较大,因此模拟工况中设置荷载入射方向变量,研究荷载入射方向对结构动力响应的影响,荷载入射方向定义如图 5 所示。

结合板架式钢平台附近海域环境水文,设置表 5 所示的 17 种荷载工况。工况 1 到 13 中入射角范围 (0°~180°),间隔为 15°,海域表层流速为 1.19 m/s,风速为 25 m/s(50 年一遇)。为比较海流与风荷载变化对结构动力响应的影响程度,增加不同波浪与风速对比工况(工况 14-工况 17,流速 2.38 m/s,风速 50 m/s)。

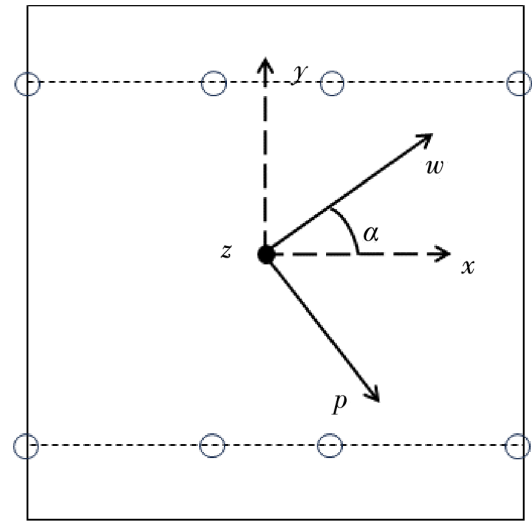


图 5 入射角 α 定义
Fig.5 Definition of the incident angle α

表 5 荷载工况
Table 5 Loading cases

编号	入射角/(°)	荷载描述	
		流速/(m·s ⁻¹)	风速/(m·s ⁻¹)
1-13	0~180	1.19	25
14	0	2.38	25
15	0	1.19	50
16	90	2.38	25
17	90	1.19	50

3.1 位移响应分析

平台在前 13 种工况下参考点 A 点的位移响应极值如图 6 所示,各工况中位移响应极值均在响应趋于稳定时选取。

如图 6 所示, X 向位移在入射角为 0°时最大,在入射角为 90°时最小,且入射角在 (75°~105°) 范围内,入射角变化对 X 向位移影响不显著,入射角由 0°增大为 75°时, X 向位移降低 11.90%,入射角由 75°增大为 90°时, X 向位移降低 44.86%。 Y 向位移在入射角为 90°时最大,在入射角为 0°时最小,入射角在 (0°~180°) 范围内,入射角对 Y 向位移影响显著,入射角由 0°增大为 90°时, Y 向位移增大 664.9%。 综上,荷载入射角对结构位移影响显著,且对 X 向(强轴向)位移影响小于对 Y 向(弱轴向)位移的影响。

工况 (1、7、14、15、16 与 17) 中结构顶部位移响应如表 6 所示。由该表可以发现,当荷载作用

方向由强轴向(0°)变化为弱轴向(90°)时,结构X向(强轴向)位移平均减小62.49%,结构Y向(弱轴向)位移平均增大765.37%。所以,当荷载作用方向与结构Y向(弱轴向)重合时,结构位移响应显著增大,对结构安全最不利。

当入射角为0°,流速增大100%时,X向位移增大19.0%,Y向位移增大9.1%,风速增大100%时,X向位移增大85.7%,Y向位移增大54.55%;

所以当入射角为0°时,流速变化对结构位移影响不显著,风速变化对结构位移影响显著。当入射角为90°,流速增大100%时,X向位移未发生变化,Y向位移增大24.15%;当风速增大100%时,X向位移降低17.65%,Y向位移增大81.62%;所以当入射角为90°时,流速与风速变化对结构X向(强轴向)位移影响不显著,对结构Y向(弱轴向)位移影响显著。

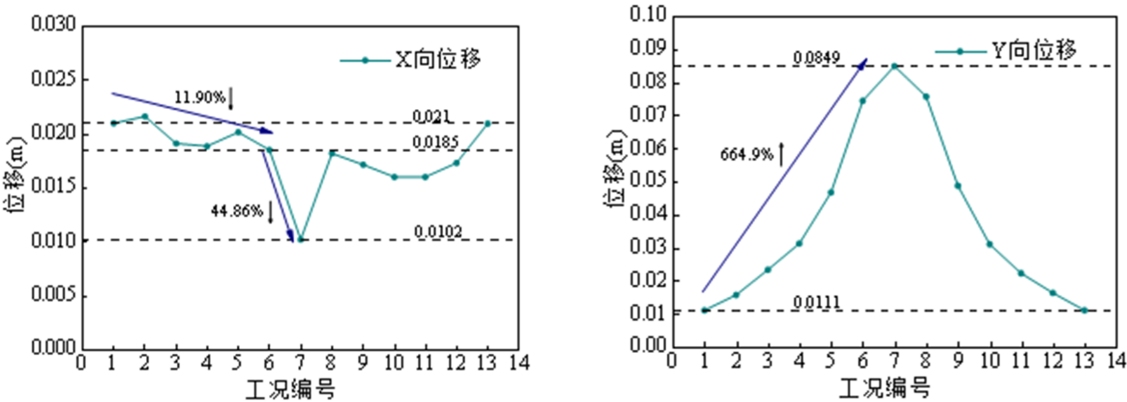


图6 A点位移响应极值
Fig.6 Extreme displacement response at point A

表6 结构动力响应
Table 6 The dynamic response of the structure

工况编号	入射角	流速/(m·s ⁻¹)	风速/(m·s ⁻¹)	位移/(m)		加速度/(m·s ⁻¹)	
				X向	Y向	X向	Y向
1	0	1.19	25	0.021	0.011	0.020	0.021
14	0	2.38	25	0.025	0.012	0.022	0.025
15	0	1.19	50	0.039	0.017	0.018	0.022
7	90	1.19	25	0.010	0.085	0.017	0.099
16	90	2.38	25	0.010	0.105	0.020	0.129
17	90	1.19	50	0.008	0.156	0.017	0.109

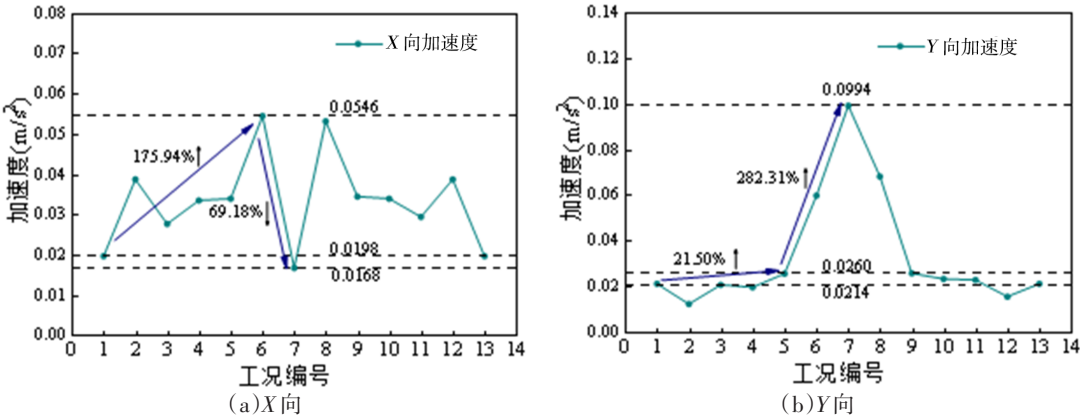


图7 A点加速度响应极值
Fig.7 Extreme acceleration response at point A

3.2 加速度响应分析

平台在前13种工况下参考点A点的加速度响应极值如图7所示。如图所示,荷载入射角对结构加速度影响显著。 X 向加速度在入射角为 75° 时最大,在入射角为 90° 时最小,且入射角在 $(0^\circ \sim 180^\circ)$ 范围内, X 向加速度对入射角均比较敏感,入射角由 0° 增大为 75° 时, X 向加速度增大175.94%,入射角由 75° 增大为 90° 时, X 向加速度降低69.18%。

Y 向加速度在入射角为 90° 时最大,在 15° 时最小。入射角在 $(0^\circ \sim 60^\circ)$ 范围内, Y 向加速度对入射角不敏感,入射角由 0° 增大为 60° 时,加速度增大21.50%;入射角在 $(60^\circ \sim 90^\circ)$ 范围内, Y 向加速度对入射角敏感,入射角由 60° 增大为 90° 时,加速度增大282.31%;

综上,荷载入射角对结构加速度影响显著,且对 X 向(强轴向)加速度影响小于对 Y 向(弱轴向)加速度的影响。

工况(1、7、14、15、16与17)中结构顶部加速度响应如表6所示。由该表可以发现,当荷载作用方向由强轴向(0°)变化为弱轴向(90°)时,结构 X 向(强轴向)加速度平均减小10.49%,结构 Y 向(弱轴向)位移平均增大396.55%。所以,当荷载作用方向与结构 Y 向(弱轴向)重合时,结构加速度响应显著增大,对结构安全最不利。

当入射角为 0° ,流速增大100%时, X 向加速度增大10.0%, Y 向加速度增大19.05%,风速增大100%时, X 向加速度降低10.0%, Y 向加速度增大4.76%;所以当入射角为 0° 时,流速与风速变化对结构 X 向与 Y 向加速度影响不显著。当入射角为 90° ,流速增大100%时, X 向加速度增大17.6%, Y 向加速度增大30.3%;当风速增大100%时, X 向加速度不变, Y 向加速度增大10.1%;所以当入射角为 90° 时,流速与风速变化对结构加速度影响均不显著。

由规范NORSOKS-002^[21]可知,海洋平台允许的最大加速度为 $2(\text{m/s}^2)$,所以该板架式钢平台的加速度响应满足安全要求。

4 结语

提出一种新型板架式钢平台结构,通过对板架

式钢平台有限元模型进行风—浪—流耦合作用下结构动力响应计算与分析,可得如下结论:

(1)当荷载入射角为 90° ,相位角为 81° 时,板架式钢平台结构顶部位移最大。

(2)荷载入射角对结构位移与加速度影响显著,对结构弱轴向的动力响应影响强于对强轴向。当荷载作用方向与结构弱轴向重合时,结构位移与加速度响应显著增大,对结构安全不利。在进行板架式钢平台结构设计时,应考虑荷载入射角对结构动力响应的影响。

(3)荷载方向与强轴向重合时,风速变化对结构位移影响显著,流速变化对结构位移影响不显著;荷载方向与弱轴向重合时,流速与风速变化对结构强轴向位移影响不显著,对结构弱轴向位移影响显著;流速与风速变化对结构加速度影响不显著。

(4)根据动力响应结果,该板架式钢平台的加速度满足安全要求。

参考文献

- [1] 任红伟. 基于ANSYS的导管架平台强度分析[J]. 石化技术, 2018, 25(4): 142-143.
- [2] 郭德文. 东海大陆架导管架平台强度及可靠性研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2018.
- [3] 李琮琦, 刘荣桂. 海工混凝土耐久性试验方法研究进展[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(4): 242-246.
- [4] 朱本瑞, 陈国明, 刘康, 等. 深水导管架平台抗台风极限承载能力[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 152-158.
- [5] 修宗祥. 深水导管架海洋平台安全可靠性能分析及优化设计[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [6] 杨耀鹏, 张大勇, 姜春娟, 等. 渤海某新建升压站平台的抗冰性能分析[J]. 船海工程, 2015, 44(6): 111-115.
- [7] 梁瑞, 孟祥鼎. 冰载荷下冰速与冰厚对平台动力响应的影响[J]. 化工机械, 2017, 44(6): 662-666.
- [8] 颜庆智, 杨凤军. 渤海湾海洋平台在环境荷载作用下可靠性分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(24): 5782-5787+5796.
- [9] 闫琛, 周全智, 王雨, 等. 海上风电吸力筒—导管架风机基础筒顶连接结构研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2128-2135.
- [10] 白记东. 大跨弦支穹顶结构的风振响应分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(6): 60-62+76.
- [11] 张纪刚, 舒凡, 赵铁军, 等. 不锈钢管混凝土海洋平台导管腿轴压性能分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 581-585.

- [12] 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 93.
- [13] 吴明军, 陈文元, 肖盛莲. 地震和波浪力共同作用下桥墩的动力响应研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6): 157-159.
- [14] 刘洪涛. 随机波浪荷载作用下海洋导管架平台疲劳寿命预测分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [15] 吴家鸣, 刘昊宇. 不同浪向的波浪载荷作用下导管架平台主桩强度分析[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(3): 85-93.
- [16] DNV. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101-2013[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2013.
- [17] 国家船舶检验局海船规范科学研究所. 海上固定平台直升机场规划、设计和建造的推荐作法: SY-T 10038-2002[S]. 北京: 人民交通出版社, 1992.
- [18] 海洋石油工程专业标准化委员会. 石油天然气行业标准: SY/T 4084-2010[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 16.
- [19] GB-BSI. Petroleum and natural gas industries-fixed steel offshore structures: ISO 19902-2020[S]. Australia: International Organization for Standardization, 2020.
- [20] 金宇航, 闫培雷, 郭恩栋, 等. 地震—台风耦合作用下近海导管架平台动力响应分析[J]. 震灾防御技术, 2022, 17(1): 132-142.
- [21] Norwegian Oil Industry Association. Working environment: NORSOK standard S-002[S]. Lysaker: Standards Norway, 2018.