

# 极端海况下海上漂浮式风力机 张力腿平台动力分析

吴中旺<sup>1</sup>, 叶舟<sup>1,2</sup>, 成欣<sup>1</sup>, 王东华<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>

(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动与传热重点实验室, 上海, 200093)

**摘要:** 根据 NREL5MW 风力机设计参数, 建立整机及其张力腿平台三维模型, 针对平台动力特性, 采用有限元方法, 利用 ANSYS 有限元软件和开源程序软件 FAST, 基于 Block Lanczos 算法和 Von - Mises 失效理论, 考虑平台结构阻尼和惯性载荷, 分别研究了平台振动特性和极端海况下平台结构应力。结果表明: 不同的风波浪流载荷方向对平台强度影响极大; 最大等效应力发生在平台底部圆板边缘即为平台危险区域; 风轮转动和波浪运动均不会引起平台发生共振响应。

**关键词:** 漂浮式风力机; 张力腿平台; 极端海况; 振动; 强度

中图分类号: TK83

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0151-07

## Dynamics analysis of tension leg platform for floating wind turbine under extreme sea condition

WU Zhongwang<sup>1</sup>, YE Zhou<sup>1,2</sup>, CHENG Xin<sup>1</sup>, WANG Donghua<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>

(1. School of 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:** According to the design parameter of NREL 5MW wind turbine, the paper built 3D model of wind turbine and TLP. Based on the algorithm of Block Lanczos and the failure theory of Von - Mises, it used finite element method, ANSYS finite element software and open source software of FAST to study the vibration performance and structure stress of platform under the extreme sea condition by considering the structure damping and inertial load aim at platform dynamic property. The results show that different directions of wind, wave and current load have enormous influence on the strength of platform; the maximum equivalent stress occurs in the margin of bottom plate which is the platform dangerous area; the blade rotation and wave motion can't cause the resonance response of platform.

**Key words:** offshore wind turbine; tension leg platform; extreme sea condition; vibration; strength

由陆地向海洋已成为风力发电发展的主要趋势, 漂浮式风力机的研究逐渐成为风电研究领域的重点与热点。然而漂浮式风力机所处的环境十分复杂, 必须要考虑风、波、流耦合作用对风力机和平台的影响。张力腿平台 (Tension Leg Platform, TLP) 是一种广泛应用的漂浮式风力机平台, 国内外学者对 TLP 结构强度和振动响应展开了大量研究: Simon

Lefebvre<sup>[1]</sup> 等针对美国可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 给出的 5MW 漂浮式风力机设计参数提出漂浮式风力机张力腿平台的中央立柱的初步设计方法。Matha 等<sup>[2]</sup> 探究了漂浮式风力机张力腿平台设计和不稳定的外载荷对平台疲劳寿命的影响, 但并未考虑到波浪海流的耦合作用。Bachynski 等<sup>[3-4]</sup> 研究表明风轮转动和涡激振动对 TLP 的刚度和粘性阻尼产生一定影响并

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2015-06-28

基金项目: 上海市研究生创新基金项目 (JWCXSL1402); 上海市教育委员会科研创新项目 (13YZ066); 国家自然科学基金项目 (51176129); 上海市科委项目 (13DZ2260900)

作者简介: 吴中旺 (1988-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为漂浮式风力机平台结构设计。

通讯作者: 叶舟 (1973-), 男, 河南信阳人, 副研究员, 研究方向为流体机械及工程。

且通过改变平台结构参数来提高张力腿平台漂浮式风力机性能。Khan 等<sup>[5]</sup>基于 Von - Mises 失效理论研究张力腿平台在随机波浪载荷和冲击载荷耦合作用时的动力学特性、系泊强度和可靠性,同时采用灵敏度分析法对影响 TLP 可靠性的各种随机变量如碰撞角度、平台浸水深度及材料屈服应力进行了参数分析,但是没有考虑风力机对平台的影响。Adam 等<sup>[6]</sup>分别用实验和数值模拟的方法研究风载荷和波浪载荷对张力腿平台结构应力的影响并进行对比研究,对 TLP 的进一步设计提供理论参考。文献[7]针对 NREL 5 - MW 张力腿平台漂浮式风力机的基础结构和系泊系统进行了运动响应和自然频率分析。文献[8]采用 Lanczos 方法,研究了重力载荷、波浪载荷和风载荷分别单独作用于张力腿平台时,中央立柱和延伸腿的应力分布及固有频率,而没有考虑到各载荷间是相互耦合的。文献[9]用强耦合法研究了平台尺寸参数与结构动力学特性间关系,同样忽略了风力机对平台的影响。本文考虑平台结构阻尼、惯性载荷和波、流耦合作用,基于 Block Lanczos 算法和 Von - Mises 失效理论,利用 ANSYS 有限元分析软件和 FAST 开源程序软件,研究极端海况下不同载荷作用方向时平台结构强度和振动响应,为平台结构安全设计和平台安装提供一些基础性参考。

极端海况下风力机的安全性研究是一个非常重要的课题<sup>[10]</sup>,2003 年的第 13 号台风“杜鹃”,于 9 月 2 日下午横扫汕尾地区的红海湾风电场,导致 13 台风力机遭受不同程度上的破坏,可见研究极端海况下 TLP 的结构强度和振动特性是非常必要的。我国南海极端海况海洋环境参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 中国南海极端海况风、波、流参数

海况	波浪		水平面 10m 高度 风速/(m·s <sup>-1</sup> )	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )
	有义波 高/m	跨零周 期/s		
无台风	7.3	11.1	28.6	0.85
有台风	13.6	15.1	56.3	2.05

## 1 载荷计算原理

### 1.1 波流耦合载荷

平台波浪载荷的计算主要基于三维线性绕射理论和 Morison 方程。海工结构物的特征尺度  $D$  与特征尺度波长  $L$  的比值大于 0.2 时,称为大型结构物,这类海工结构物的存在明显干扰了入射波场,此时

黏性作用可忽略,波浪在结构周围的绕射效应以及浮体运动产生的辐射效应不能忽略,绕射理论是预报平台载荷比较合适的方法<sup>[12]</sup>。

在线性理论下,速度势  $\varphi$  可以分为入射势  $\varphi_I$ 、绕射势  $\varphi_D$  以及物体 6 个自由度运动而引起的辐射势  $\varphi_R$  3 部分组成,即:

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_D + \varphi_R \quad (1)$$

采用 Jonswap 谱作为研究对象,通过频谱来模拟海浪,设预模拟的对象谱  $S(\omega)$  的能量绝大部分分布在  $\omega_L \sim \omega_H$  范围内,其余部分可忽略不计。把频率范围划分为  $n$  个区间,其间距为  $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}$ ,取  $\bar{\omega}_i = (\omega_i + \omega_{i-1})/2$ ,则波浪海流耦合作用下的入射势表达式为:

$$\varphi_0^{(1)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{gA_i \cosh k_i(z+h)}{\omega_i \cosh k_i h} \sin(k_i(x-x_0) \cos\beta + k_i(y-y_0) \sin\beta - \omega_{i_i}(t-t_0)) \quad (2)$$

式中:  $A_i, \omega_i$  分别为组成波的波幅和波浪圆频率,当考虑不规则波浪和海流耦合作用时,  $\omega_{i_i}^2 = k_i g \tanh k_i d - Uk_i$ ;  $k_i$  为各组成波波数;  $t_0$  为聚焦时刻。力和力矩可以由物面积分得到,一阶力和力矩表达式为:

$$\begin{cases} \vec{M}^{(1)} = -\rho \iint_{S_b} \left( \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial t} - U \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial x} + \nabla \varphi^{(1)} \cdot \nabla \vec{\varphi} \right) (\vec{r} \times \vec{n}) ds - \vec{M}_{HS}^{(1)} \\ \vec{F}^{(1)} = -\rho \iint_{S_b} \left( \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial t} - U \frac{\partial \varphi^{(1)}}{\partial x} + \nabla \varphi^{(1)} \cdot \nabla \vec{\varphi} \right) nds - \vec{F}_{HS}^{(1)} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\vec{F}_{HS}^{(1)}$  和  $\vec{M}_{HS}^{(1)}$  分别为恢复力和恢复力矩。

### 1.2 风载荷

在极限海况下,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。根据我国海上漂浮式移动平台入级规范,作用于结构上的风力  $F$  可按式计算,并确定合力作用点的垂直高度<sup>[13]</sup>:

$$P = 0.613 \times 10^{-3} V_w^2 \quad (4)$$

$$F = C_h C_s S P \quad (5)$$

式中:  $P$  为风压, kPa;  $V_w$  为设计风速, m/s;  $S$  为平台在正浮或倾斜状态时,受风结构的正投影面积, m<sup>2</sup>;  $C_h, C_s$  为受风构件的高度系数与受风构件的形状系数。

按 API - RP2A 计算风速,平均风速一般取 1 h 的平均风速,重现期为 100 年,参考高度为海平面以上 10 m 处。其他高度处的平均风速通过修正参考点的风速获得,静水面高度为  $z$  处的平均风速,具体计算式如下:

$$V_w(h, z) = V_w(h, z_R) (z/z_R)^{0.125} \quad (6)$$

式中:  $z$  为静水面以上的垂向高度,  $m$ ;  $z_R$  为平均风速的参考点,  $10\text{ m}$ ;  $V_w(h, z_R)$  为参考点处的平均风速,  $m/s$ ;  $V_w(h, z)$  为静水面高度为  $z$  处的平均风速,  $m/s$ 。

### 1.3 惯性载荷

由于受到风、波浪和海流等环境载荷作用, 导致平台产生运动响应而引起的惯性载荷必须考虑。平台通过拟静态分析计算惯性载荷来考虑平台的动力响应。基于 SDOF 方法计算动力放大因子  $DAF$

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T_N}{T}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{T_N}{T}\right]^2}} \quad (7)$$

式中:  $T_N$  是通过 ANSYS 模态分析求得的固有周期,  $s$ ;  $T$  为波浪周期,  $s$ ;  $\xi$  为阻尼系数。

平台因振动产生的惯性载荷为

$$F_{in} = (1 - DAF)(F_{max} - F_{min})/2 \quad (8)$$

式中:  $F_{in}$  为平台因振动产生的惯性力,  $N$ ;  $F_{max}$  为最

大波浪力,  $N$ ;  $F_{min}$  为最小波浪力,  $N$ 。

## 2 模态分析

### 2.1 有限元模型

根据 NREL 5MW 漂浮式风力机及其张力腿平台的具体设计参数<sup>[14]</sup>, 利用 CAD 三维建模软件建立风力机、平台和系泊的几何模型。风力机及其张力腿平台主要设计参数分别如表 2、3 所示, 几何模型分别如图 1、2 所示。平台主体由一个垂直的圆柱体结构和 4 根矩形截面的水平浮筒组成。中央立柱下端连接了 4 根矩形截面的浮筒, 浮筒向外延伸成悬臂梁结构, 中央立柱和浮筒均采用水密板分成独立的舱室。系泊底端在海底固定约束, 系泊上端与平台延伸腿间球关节连接。整个平台结构采用实体单元建模, 立柱网格为六面体网格, 沿壁厚方向划分成 3 层, 以保证计算的准确性; 延伸腿及部分肋板结构网格为四面体网格。整个平台共有 8959696 个节点和 3869894 个单元网格。

表 2 5 MW 漂浮式风力机主要设计参数

叶片配置	风轮直径/m	风轮质量/kg	额定风速/ $(m \cdot s^{-1})$	切出风速/ $(m \cdot s^{-1})$	额定转速/ $(r \cdot min^{-1})$	轮毂中心高度/m	机舱质量/kg	塔架质量/kg	质心位置/m
3	126	$1.1 \times 10^5$	11.4	25	12.1	90	$2.4 \times 10^5$	$3.4746 \times 10^5$	(-0.2, 0, 64)

表 3 5 MW 海上漂浮式风力机 TLP 主要设计参数

设计吃水	立柱直径	纵向加强筋数	环向加强筋数	延伸腿数量	T 型加强筋数	平台质量	立柱高度	纵筋翼板厚度	环筋翼板厚度
35	10	32	3	4	18	$5.8 \times 10^6$	40	0.03	0.02
延伸腿高度(外侧)	T 筋腹板高度	重心高度	圆柱加强筋直径	纵筋翼板宽度	环筋翼板宽度	延伸腿高度(内侧)	T 筋腹板厚度	平台壁厚	圆柱加强筋厚度
5	0.45	17.2	5	0.3	0.2	11	0.015	0.02	0.02
纵筋翼板厚度	环筋翼板厚度	延伸腿长度	T 筋翼板宽度	排水质量	舱室高度	纵筋翼板高度	环筋翼板高度	延伸腿宽度	T 筋翼板厚度
0.015	0.02	25	0.304	$6.3 \times 10^6$	3/5/5/5/ 5/5/2/5/5	0.413	0.55	4	0.02



图 1 风力机、平台及和系泊

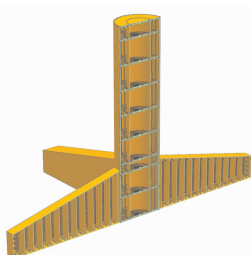


图 2 TLP 结构剖视图

### 2.2 共振分析

以平台重心作为原点建立三维坐标系, 沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴有 3 个平移自由度, 分别为纵荡、横荡和垂荡, 绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴有 3 个转动自由度, 分别为横摇、纵摇和艏摇, 如图 3 所示。本文主要研究平台的振动特性, 平台前 12 阶模态频率如表 4 所示, 从表 4 可看出第 2、3 阶, 第 5、6 阶和第 7、8 阶频率基本相同, 这主要是因为平台是关于  $xoz$  平面和  $yoz$  平面对称的原因。平台前 6 阶振型如图 4 所示, 分别是: 第 1 阶为平台绕  $z$

轴作1阶扭转振型,第2、3阶分别为  $x = -y, x = y$  方向上1阶弯曲振型,第4阶为1阶弯曲扭转复合振型,第5、6阶分别为  $x, y$  轴上的1阶弯曲振型,但是平台立柱和延伸腿的弯曲振型方向时刻相反。

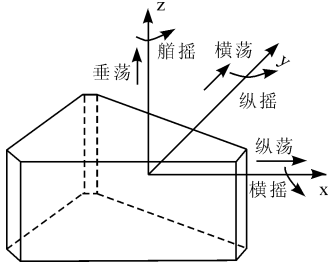


图3 TLP六自由度

根据结构动力学理论可知:在小阻尼情况下,通常将  $0.75 < \omega/\omega_n < 1.25$  的区间称为共振区<sup>[15]</sup>。

表4 平台前12阶模态频率

											Hz
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.7976	3.9793	3.9795	4.0922	4.1029	4.1033	7.2359	7.2364	8.7752	8.9952	15.354	16.783

### 3 瞬态结构动力学分析

#### 3.1 理论模型

考虑到极端海况下气动载荷和波浪载荷在时间历程上的非稳定性、平台结构的半顺应半刚性的结构特点、平台本身结构的复杂性和平台材料特性,在平台结构强度设计计算时必须考虑到惯性载荷和结构阻尼对平台结构强度的影响,因此采用瞬态结构动力学模块分析平台结构强度。其基本方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \tag{9}$$

式中:  $\ddot{u}, \dot{u}$  和  $u$  分别为系统的加速度、速度和位移向量;  $M, C, K, F(t)$  分别为平台的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点载荷向量。

方程(9) 由各自的单元矩阵或向量集成,即

$$\begin{cases} M = \sum_e M^e, C = \sum_e C^e \\ K = \sum_e K^e, F(t) = \sum_e F^e \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} M^e = \int_{V_e} \rho N^T N dV, C^e = \int_{V_e} \mu N^T N dV \\ K^e = \int_{V_e} B^T D B dV, F^e = \int_{V_e} N^T f dV + \int_{S_e^g} N^T N dS \end{cases} \tag{11}$$

式中:  $M^e$  为单元质量矩阵;  $C^e$  为单元阻尼矩阵;  $K^e$  为单元刚度矩阵;  $F^e$  为单元载荷向量;  $\rho$  为材料密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $N$  为形函数矩阵;  $\mu$  为阻尼矩阵的比例系数;  $B$  为应变矩阵;  $D$  为弹性矩阵;  $f$  为单元体积力向量;  $T$  为单元边界面积力向量。

共振的主要激励源是风轮额定频率、3倍额定频率和波浪频率。风轮额定转速为  $12.1 \text{ r/min}$ , 额定频率即为  $0.2017 \text{ Hz}$ , 3倍额定频率为  $0.605 \text{ Hz}$  均远小于平台振动频率,因此风轮不会引起平台的共振。

在大多数海况下,波浪频率较小,一般在  $0.2 \text{ Hz}$  以下,而风暴中的波浪频率为  $0.05 \sim 0.2 \text{ Hz}$ , 在这种情况下,由于海洋复杂环境荷载以低频率为主,而海洋低频率主要包括3部分:差频波浪力引起的低频慢漂响应;海流引起的涡激运动响应;风和海流引起的湍流效应,这些低频率一般在  $0.033 \text{ Hz}$  左右<sup>[16]</sup>。对于张力腿平台而言,自振频率较大,超过  $3.7976 \text{ Hz}$ ,与波浪频率相差较大,从而能够有效避开海洋低频区对结构造成的不利影响。

阻尼矩阵的比例系数  $\mu$  在一般情况下是依赖于频率的,因此在实际分析中,要精确确定阻尼矩阵是相当困难的,通常允许将实际结构的阻尼矩阵简化为  $M$  和  $K$  的线性组合<sup>[17]</sup>,即

$$C^e = \alpha M + \beta K \tag{12}$$

式中:  $\alpha$  为与质量成比例的阻尼系数;  $\beta$  为与刚度成比例的阻尼系数。由于  $\alpha$  的数值很小,所以可只考虑  $\beta$  阻尼<sup>[18]</sup>。 $\beta$  阻尼可根据式(12) 得到:

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{\xi}{\pi f_{\text{response}}} \tag{13}$$

式中:  $\xi$  为阻尼系数,取值为  $0.01$ ;  $\omega$  为主要响应圆频率,  $\text{rad/s}$ ;  $f_{\text{response}}$  为主要响应工程频率,  $\text{rad/s}$ 。

#### 3.2 强度分析流程

考虑到平台水下部分既受到波浪力和海流力的耦合作用,因此通过 ANSYS 有限元软件 AWQA 模块来准确计算波浪和海流的耦合作用力。

风力机和平台水上部分均受到风载荷的作用,并且风作用在塔架和风轮上有绕射作用,因此为获得准确的风载荷,故用开源程序 FAST 计算。

考虑到惯性载荷和阻尼作用,在机构计算中采用瞬态机构动力学模块和模态模块。具体如图5所示。

#### 3.3 强度分析

漂浮式平台一般采用高强度钢 EQ36 制造,屈服强度为  $355 \text{ MPa}$ ,密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为  $0.32$ ,弹性模量为  $206 \text{ GPa}$ 。

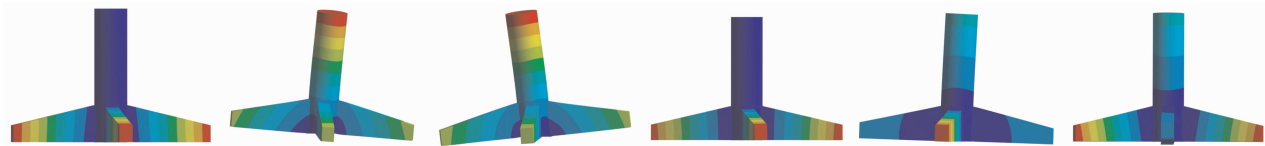


图 4 平台第 1~6 阶模态振型

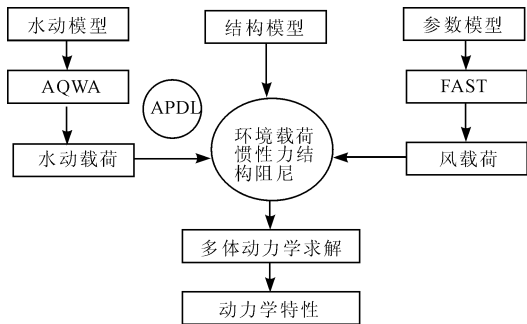


图 5 计算流程图

TLP 的壳体材料的许用应力按美国船级社 (American Bureau of Shipping, ABS) 规范的规定确定, 根据 ABS《浮式生产系统建造和入级指南》(Guide for building and classing of floating production installations, APRIL2004) 的安全系数规定: 结构安全系数为 2.0<sup>[19]</sup>。ABS 规范规定的许用应力校核准则为:

$$F = F_y / F_s \quad (14)$$

式中:  $F$  为许用应力,  $N$ ;  $F_y$  为屈服强度,  $MPa$ ;  $F_s$  为安全系数。海上漂浮式风力机安装固定后, 风、波、流载荷可能以不同方向作用于风力机和平台上, 采用开源程序软件 FAST 计算的风载荷时程曲线如图 6 所示, 利用 ANSYS 有限元软件 Hydrodynamic 模块计算的波浪海流耦合载荷如图 7 所示。

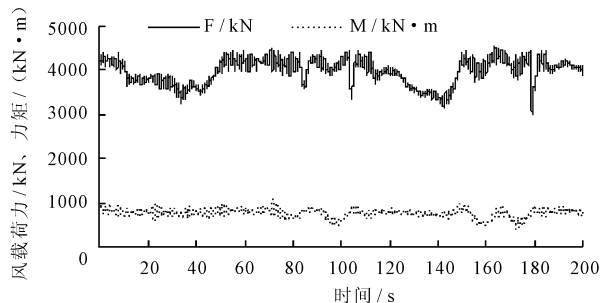


图 6 风载荷时程曲线

由于平台结构关于  $xoy$  和  $yoZ$  平面对称, 故当风、波、流载荷沿同一方向时, 只要研究  $0^\circ \sim 45^\circ$  内风、波、流载荷作用角度即可保证全部角度方向的载荷情况; 当风、波载荷均沿  $0^\circ$ , 海流载荷沿不同方向时, 只要研究  $0^\circ \sim 180^\circ$  内海流载荷作用角度即可。为了研究方便和实际海洋海况, 现取风、波、流载荷

沿同一方向且为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和风、波载荷均沿  $0^\circ$  方向, 海流载荷分别沿  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $105^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $165^\circ$ 、 $180^\circ$  方向作用于风力机和平台上的 16 种海况作为研究 TLP 强度特性的基础海况模型, 分别如图 8 和图 9 所示。

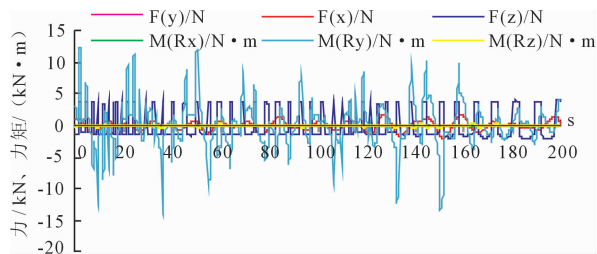


图 7 波浪耦合载荷时程曲线

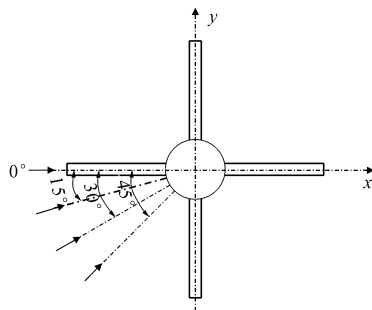


图 8 风、波、流相同方向载荷模型

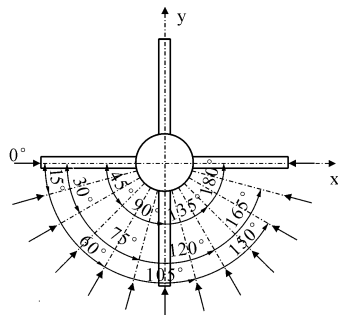


图 9 风、波为  $0^\circ$ , 海流方向变化载荷模型

3.3.1 风、波、流载荷沿同一方向时 TLP 的应力特性 图 10 为风、波、流方向均沿  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  时的平台应力情况, 从图 10 可看出随着风、浪、流载荷作用于整机的角度增加, 平台最大等效应力和最大切应力逐渐增大; 平台最大切应力约为最大等效应力的  $1/2$ 。

3.3.2 风、波载荷方向均沿  $0^\circ$ , 海流载荷方向沿不

同方向时 TLP 的应力特性 在海洋中发生的波浪多属风力引起的风成波且同时为波形向前移动的推进波,波浪推进方向和风向相同。图 11 为风、波载荷均沿 0°,海流载荷沿 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、150°、165°、180°时的平台应力。从图 11 可看出随着海流载荷作用于整机上的角度增加,平台最大等效应力和最大切应力先增加再减小再次增加最后减小,分别在 90°出现极大值和 45°出现极小值,并且在 20°左右平台的最大切应力与最大等效应力最大和在 180°时平台最大等效应力与最大切应力最小。这是因为波浪推进方向和海流流动方向相反,致使波浪和海流间的耦合作用力相对减小。平台受到的等效应力和切应力减小;平台最大切应力同样约为最大等效应力的 1/2。

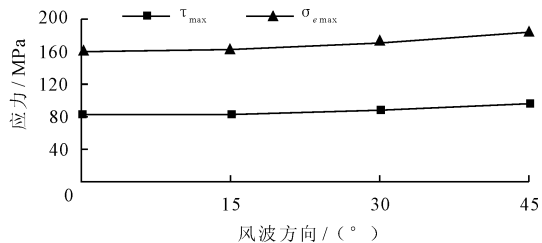


图 10 风、波、流均沿 0°、15°、30°、45°时的平台应力

综合图 10 和图 11 可得出在 16 种海况条件下,平台最大切应力均约为最大等效应力的 1/2,由此可判断最大等效应力是影响平台安全稳定工作的关键。找出最大等效应力位置即找到平台危险区域,在平台应力云图中即可清晰看出。考虑到风、波载荷均沿 0°方向,海流载荷沿 180°方向和风、波、流载荷均沿 45°方向作用于整机时平台应力的特殊性,现给出此两种海况下的平台等效应力云图,分别如图 12、13 所示。

从图 12 和 13 可知最大等效应力集中在中央立柱的底部圆板边缘,具体位置在底部圆板与延伸腿和中央立柱的交接处,此处为平台危险区域。这主要因为 3 个结构的交接处易发生应力集中和底部受到载荷较大的缘故,故此处结构设计应引起设计者特别关注。

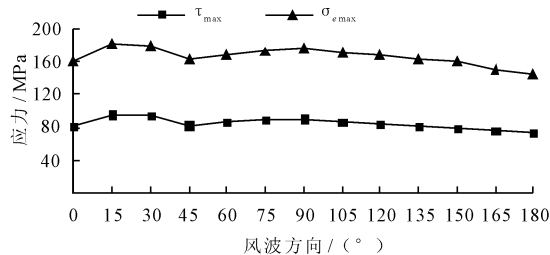
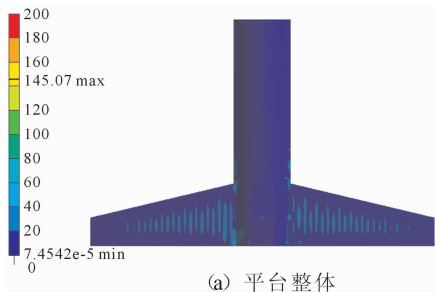
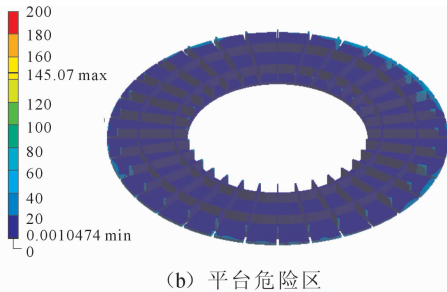


图 11 风波方向为 0°,海流方向不同时的平台应力情况

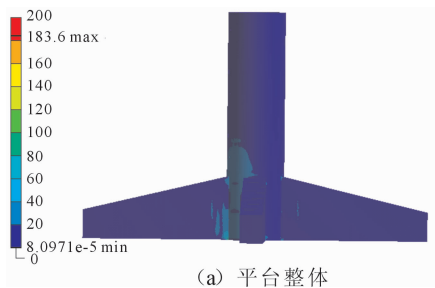


(a) 平台整体

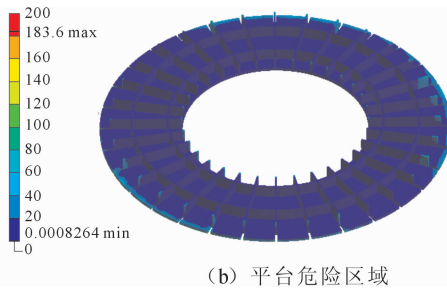


(b) 平台危险区

图 12 风、波载荷方向为 0°,海流载荷方向为 180°时平台应力云图



(a) 平台整体



(b) 平台危险区域

图 13 风、波、流载荷方向均为 45°时平台应力云图

在 16 种海况条件下,当风、波载荷均沿 0°方向且海流载荷沿 180°方向作用于整机时,平台的最大等效

应力最小且为 145.07 MPa,小于材料许用应力,根据 Von - Mises 失效理论,即此平台是满足结构强度设计

的;然而当风、波、流载荷均沿 $45^\circ$ 方向作用于整机时,平台的最大等效应力最大且为 $183.6\text{ MPa}$ ,大于材料许用应力,即此平台是不能满足结构强度设计要求的。由此可知,风、波、流载荷作用方向对平台应力的影响是极大的,可直接影响极端海况下海上漂浮式风力机的安全性,因此在海上漂浮式风力机张力腿平台安装时,应根据当地海况选择合适的安装角度,这样可以更好的保证平台的安全性。

## 4 结 语

(1)最大等效应力是影响平台安全稳定工作的关键,平台危险区域在底部圆板上且为底部圆板、延伸腿和中央立柱的交接处。

(2)风、波、流载荷作用方向对平台应力影响极大,在海上漂浮式风力机张力腿平台安装时,应根据当地海况选择合适的安装角度,以保证平台安全稳定运行。

(3)风、波、流载荷均沿 $45^\circ$ 方向作用于整机时,平台最大等效应力最大;风、波载荷沿 $0^\circ$ 方向,海流载荷沿 $180^\circ$ 方向作用于整机时,平台应力最小。

(4)平台自然频率远大于风轮旋转频率和波浪频率,能够有效避免风轮转动和海洋低频运动响应对平台的共振影响。

## 参考文献:

[1] Lefebvre S, Collu M. Preliminary design of a floating support structure for a 5MW offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2012, 40(2): 15-26.

[2] Denis Matha. Model development and load analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform, with a comparison to other floating turbine concepts[R]. Colorado: the University of Colorado, 2010.

[3] Bachynski E E, Moan T. Ringing loads on tension leg platform wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2014, 84(4): 237-248.

[4] Bachynski E E, Moan T. Design considerations for tension leg platform wind turbines[J]. Marine Structures, 2012, 29(1): 89-114.

[5] Khan R A, Siddiqui N A, Naqvi S Q A, et al. Reliability anal-

ysis of TLP tethers under impulsive loading[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(1): 73-83.

[6] Adam F, Myland T, Schuldt B, et al. Evaluation of internal force superposition on a TLP for wind turbines[J]. Renewable Energy, 2014, 71(11): 271-275.

[7] Zhao Yongsheng, Yang Jianmin, He Yanping. Preliminary Design of a Multi-Column TLP Foundation for a 5-MW Offshore Wind Turbine[J]. Energies, 2012, 5(10): 3874-3891.

[8] 葛沛. 海上漂浮式浮式风力机平台选型与结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[9] Huang Hu, Zhang Sherong. Dynamic analysis of tension leg platform for offshore wind turbine support as fluid-structure interaction[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(1): 123-131.

[10] 程昌钧. 海洋环境条件下风力机结构的气动力学性能与安全性问题[C] // 胡文瑞. 全国风力机空气动力学学术会议论文集, 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2007: 12-19.

[11] 《海洋石油工程设计指南》编委会. 海洋石油工程 FPSO 与单点系泊系统设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.

[12] 康啊真, 祝兵, 邢帆, 等. 超大型结构物受波浪力作用的数值模拟[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 108-115.

[13] 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.

[14] Jonkman JM, S. Butterfield, W. Musial, et al. Definition of a 5 MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.

[15] 徐赵东, 马乐为. 结构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[16] 张社荣, 黄虎. 海上张力腿平台风电机组结构动力特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1198-1203.

[17] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[18] Cai Chengtao, Zheng Husna, Khan M. S, et al. Modeling of material damping properties in ANSYS[C] // CAD FEM user's meeting and ANSYS conference, Friedrichshafen: 2002: 1-16.

[19] 海洋石油工程设计指南编委会. 海洋石油工程深水油气田开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.