

# 漂浮式风力机 Spar 平台结构动力响应分析

叶舟, 吴中旺, 詹培, 李春

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 采用有限元方法, 基于 Von-Mises 失效理论, 考虑平台结构阻尼和惯性载荷, 利用 ANSYS 有限元软件和开源程序软件 FAST 分别研究了平台动态响应和结构应力。结果表明: 螺旋侧板对 Spar 平台的自振频率没有明显影响; 附加螺旋侧板可以有效减小平台在垂荡和纵摇方向的运动响应, 但在纵荡方向上没有明显改善; 螺旋侧板阻碍了海流的流动, 增加了流动阻力, 平台结构应力略有增加, 且最大切应力约为最大等效应力的二分之一, 但平台结构仍是安全的, 而最大等效应力是影响平台安全稳定工作的关键。

**关键词:** 漂浮式风力机; Spar 平台; 结构优化; 强度; 动态响应

中图分类号: TM614; P731.2 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.07.020

## 引言

从陆地向海洋发展已成为风力发电的主要趋势, 与近海风资源相比, 深海风资源具有能量密度高和开发区域广的优点, 因此深海漂浮式风电场的建设必然成为风电发展的趋势<sup>[1]</sup>; 但海上风电有其特殊的技术难点, 海上风能开发面临的环境条件十分复杂, 必须要考虑风、浪、流等环境载荷对风力设施的作用, 且漂浮式风力机系统还必须考虑其运动性能和定位要求<sup>[2]</sup>; 海上漂浮式风力机系统主要由上部风机、支撑塔架、浮式基础和锚泊系统组成。浮式基础作为塔架和风力机的支撑平台, 它的性能对于漂浮式风机的性能有着重要的影响<sup>[3]</sup>。

Spar 平台是海上漂浮式风力机的一种基础平台, 起初是用于深海油气开采、生产和加工处理<sup>[4]</sup>; 在漂浮式风力机项目的研究中, 1991 年英国贸易工业部首先开发出一种 Spar 式平台的海上漂浮式风力机 FLOAT, 之后根据不同水深和条件又出现其它

Spar 式漂浮式风力机的概念设计并进行样机示范运行, 其在风浪环境下的稳定性较好, 并且建造方便<sup>[5]</sup>; 由于 Spar 平台基础为单柱式, 在海流中因为漩涡自主周期性地脱落会产生很大的涡激力, Spar 平台涡激运动问题从在生产运营过程中被发现之处, 就在工程上引起了很多关注, 目前国际上已经有多家研究机构先后展开 Spar 平台涡激运动方面的研究<sup>[6]</sup>; Jun B. Rho 等通过模型试验和数值模拟方法对应用于石油开发的 Spar 平台的垂荡和纵摇耦合运动进行研究对比, 发现在经典 Spar 平台上附加螺旋侧板和垂荡板可以有效降低平台发生垂荡共振时的幅值, 但在考虑系泊效应时发现有无系泊锚对共振下的纵摇不稳定运动没有明显抑制作用<sup>[7~8]</sup>。

文献[9]联合应用边界元法和几何非线性有限元方法研究 Spar 平台和系泊缆在不规则波中的耦合运动响应时发现, 缆索刚度和初张力的增大可以减小 Spar 平台的纵荡位移, 但对垂荡和纵摇位移基本无影响; 文献[10]利用 CFD 数值计算结合粒子图像测速系统分析探讨了螺旋条纹侧板对柱式结构上尾涡周期性脱落的抑制作用, 发现螺旋高度越高, 螺旋侧板对漩涡结构的破坏效果越强。本文结合以往海上石油平台的研究经验, 借鉴采用在平台柱身外围的螺旋板并结合系泊系统的方式, 验证附加螺旋侧板对平台的运动性能和结构强度的影响。

## 1 环境载荷

漂浮式风力机所受环境载荷包括由环境载荷引起的所有外力, 如系泊力、运动惯性力、液舱晃荡力等。漂浮式风力机所受到的环境载荷主要来自风、

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-07-02

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: 叶舟(1973-), 男, 河南信阳人, 上海理工大学副教授。

通讯作者: 吴中旺(1988-), 男, 安徽蚌埠人, 上海理工大学硕士研究生。

浪、流、还有内波、地震和海冰(大块浮冰或冰山), 此处仅涉及前三种载荷。

### 1.1 波浪载荷

平台波浪载荷的计算主要基于三维线性绕射理论和 Morison(莫里森)方程<sup>[11]</sup>。海洋结构的特征尺度  $D$  与波浪波长  $L$  的比值大于 0.2 时,称为大型结构物,这类海洋结构的存在明显干扰了入射波场,此时粘性作用可忽略,波浪在结构周围的绕射效应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>。

在线性规则波作用下,速度势  $\Phi$  可以分为入射势  $\varphi_i$ 、绕射势  $\varphi_d$  以及物体六个自由度运动而引起的辐射势  $\varphi_R$  三部分组成,流场中的速度势可表示为:

$$\Phi(x, y, z, t) = [(\varphi_i + \varphi_d) + \sum_{j=1}^6 \varphi_j x_j] e^{-i\omega t} \quad (1)$$

其中:

$$\varphi_i = \frac{-ig \cosh[k(d+z)] e^{ik(x \cos\theta + y \sin\theta)}}{\omega \cosh(kd)} - \omega^2 \varphi_D +$$

$$2i\omega U_0 \frac{\partial \varphi_D}{\partial x} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial x^2} + g \frac{\partial \varphi_D}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\varphi_j$ —该自由度上的运动势;  $x_j$ — $j$  个自由度上的运动;  $\omega$ —入射波频率, Hz;  $d$ —水深, m;  $k$ —波数;  $\theta$ —波的方向(沿  $x$  轴正向为  $0^\circ$ )。

得到势函数后,一阶波浪力可通过线性伯努利方程求得:

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $P$ —波动场结构物表面上的波压强, Pa;  $\Phi$ —波动场的速度势。通过物体湿表面上的压力积分可求得构件所受水动力,最后将不同波幅、波长、波向及初相位的规则波进行叠加,即可得到不规则波的水动力。

### 1.2 风载荷

漂浮式风力机与普通海洋平台不同,除了平台要承载风载荷外,高耸的塔架及巨大的风力机叶片要承受力和力矩更大的风载荷。由于风轮和塔架所受风载荷的计算原理不同,两者须分别考虑。目前计算风轮风载荷的方法主要有动量理论、叶素-动量理论和 CFD 模拟等。其中,动量理论方法简单有效,常用来估算风力机理想功率和风载荷,特别是海上浮式风力机的初步设计;塔架作为海洋结构物一部分,可以结合漂浮式平台一并计算其风载荷<sup>[13]</sup>。

风轮正常运行下,整个风轮受风面全部计入风压面积;在极限工况下,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<sup>[14]</sup>。漂浮式风力机的风力及风力矩计算公式如下:

$$F_i = C_F \cdot C_h \cdot P_w \quad (4)$$

$$F_w = \sum_{i=1}^n F_i, M = \sum_{i=1}^n F_i \cdot H_i \quad (5)$$

式中:  $i$ —受风结构的序号;  $n$ —受风结构;  $C_F$ —考虑受风构件形状影响系数;  $C_h$ —考虑风压沿高度变化的高度系数;  $S_i$ —受风结构在风向上的投影面积,  $m^2$ ;  $P_w$ —受风构件表面上的风压, Pa;  $H_i$ —受风结构在风向上投影面积形心距水下侧向阻力中心高度, m。

### 1.3 海流载荷

海流载荷是由海流作用在海洋工程结构物上所产生的载荷,海流力是作用在海洋结构物上的一种流动阻力,根据水下结构物上的阻力是流体动能函数的原理,可以按照稳定流动条件下的阻力的数学表达式得到海流力,其计算需合理确定海平面以下某深度的海流速度、阻力系数和惯性力系数。

当只考虑海流作用时,作用在平台水下部分构件的海流载荷可按下式计算:

$$F = 0.5 \rho_w C_D V^2 A \quad (6)$$

式中:  $\rho_w$ —海水密度,  $kg/m^3$ ;  $A$ —结构物在与流向垂直的平面上的投影面积,  $m^2$ ;  $C_D$ —阻力系数。

应注意海流与波浪的相互作用,当采取莫里森公式计算波浪载荷时,应将波浪水质点速度与海流速度矢量相加;当采用绕射理论计算波浪载荷时,海流载荷应按上式计算,并与波浪载荷矢量相加。

### 1.4 惯性载荷

由于受到风、波浪和海流等环境载荷作用,导致平台在 6 自由度上产生运动加速度,由此必须要考虑平台因运动加速度产生的惯性载荷。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:  $T_N$ —通过 ANSYS 模态分析求得的固有周期, s;  $T$ —波浪周期, s;  $\xi$ —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:  $F_{in}$  —平台因振动产生的惯性力  $N$ ;  $F_{Max}$  —最大波浪力  $N$ ;  $F_{Min}$  —最小波浪力  $N$ 。

## 2 漂浮式风力机建模与计算

### 2.1 整机建模

本研究漂浮式风力机平台选择 OC3 - Hywind Spar Buoy<sup>[15]</sup>, 平台及系泊参数如表 1 所示。风力机选择 NREL 5MW 风力机<sup>[16]</sup>, 风力机参数如表 2 所示。

表 1 OC3 - Hywind Spar Buoy 参数

Tab. 1 Parameters of the OC3 - Hywind spar buoy

参数	数值	参数	数值
直径/m	6.5 ~ 9.4	平台壁厚/m	0.02
吃水/m	120	系泊缆数目	3
排水量/m <sup>3</sup>	8 029	导缆孔/锚深度/m	70 200
平台总质量/kg	$7.466 \times 10^6$	导缆孔/锚至平台中心线间距/m	5.2 445
质心/m	89.92	未张紧缆索长度/m	468
横摇惯量/kg·m <sup>-1</sup>	$4.229 \times 10^9$	缆索直径/m	0.09
纵摇惯量/kg·m <sup>-1</sup>	$4.229 \times 10^9$	缆索质量/kg	145
首摇惯量/kg·m <sup>-1</sup>	$1.642 \times 10^8$	缆索拉伸刚度/N	$3.842 \times 10^8$
材料	EQ36		

表 2 NREL 5 MW 风力机参数

Tab. 2 Parameters of the NREL 5MW wind turbine

参数	数值	参数	数值
叶片数	3	切出风速/m·s <sup>-1</sup>	25
风轮直径/m	126	额定风速/m·s <sup>-1</sup>	12
轮毂直径/m	3.0	风轮质量/kg	$1.1 \times 10^4$
轮毂高度/m	90	机舱质量/kg	$2.4 \times 10^5$
切入风速/m·s <sup>-1</sup>	3	塔架质量/kg	$3.47 \times 10^5$

基于 NREL 5MW 风力机参数和 OC3 - Hywind Spar Buoy 参数建立漂浮式风力机整机模型如图 1 所示。参照海上石油平台的研究经验, 在 Spar 平台柱身附加螺旋侧板再次进行建模, 如图 2 所示。根据控制变量法, 附加螺旋侧板的 Spar 平台相关参数应与不附加螺旋侧板的 Spar 平台取值相同。

### 2.2 计算工况与处理步骤

主要时域环境参数如下:

(1) 最不利条件为风、浪、流均 180° 方向迎面

入射;

(2) 风速谱选择 Ochi & Shin 谱, 风轮中心高度处参考额定风速为 11.4 m/s;

(3) 随机波浪谱选择 P - M 谱, 谱峰周期 8.7 s, 有义波高为 6 m;

(4) 海流速度从海平面 0.95 m/s 线性减至海底 0 m/s;

(5) 对系泊系统进行了适当简化, 忽略了系泊系统阻力。



图 1 风力机模型及其系泊系统

Fig. 1 Model for wind turbines and their mooring systems



图 2 附有螺旋侧板 Spar 平台

Fig. 2 Spar platform attached with helical side plates

主要计算和处理分析步骤如下:

(1) 根据已有参数对风力机及平台进行建模和网格划分;

(2) 分别在 ANSYS 频域和时域模块对导入的

模型进行频域和时域计算。其中,额定入流风速下风轮所受到的时变风载荷由 NREL 开发的开源软件 FAST 求得,并编辑成外力/矩的载荷文件附加到结构上,用以分析平台的整体时域响应;

(3) 在 ANSYS 瞬态结构动力学模块对导入模型进行强度计算。其中,波浪载荷的添加是通过 ANSYS 链接文件,将第(2)步的计算结果导入到结构载荷中;

(4) 重新建立附加螺旋侧板的平台结构模型,重复以上步骤得出新的计算结果;

(5) 数据处理、生成变化曲线,并分析对比有无螺旋侧板对结构各响应参数的影响。

### 3 结果与分析

#### 3.1 频域特性

频域计算中,浮体在外界载荷作用下的运动方程为:

$$(M + A)\ddot{x} + (B_w + B_m)\dot{x} + (K_w + K_t + K_m)x = F_s + F_i + F_d + F_m + F_w + F_D \quad (9)$$

式中:  $M$ 、 $A$ —结构质量矩阵、附加质量矩阵;  $B_m$ 、 $B_w$ —系泊系统阻尼矩阵、波阻尼矩阵;  $K_w$ 、 $K_t$ 、 $K_m$ —水动力恢复刚度矩阵、张力腿刚度矩阵、 $K_m$ —锚缆贡献刚度矩阵;  $F_s$ 、 $F_i$ 、 $F_d$ 、 $F_m$ 、 $F_D$ —静水力、入射波浪力、绕射波浪力、波浪慢漂力、海流作用力  $N$ ;  $x$ —平台位移  $\mu$ ;  $\dot{x}$ —平台速度  $\mu/s$ ;  $\ddot{x}$ —平台加速度  $\mu/s^2$ 。

海洋结构物在不规则海浪作用下,其响应也是不规则的随机过程。随机波浪可视为无数个振幅不等、频率不等、初相位随机且与  $x$  轴呈不同角度传播的简单余弦波的叠加。利用叠加原理,采用谱分析法得到结构响应的各种统计值。海浪作用下浮体的

响应可用下式表示:

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_x(\omega) \quad (10)$$

式中:  $S_y(\omega)$ —响应谱;  $S_x(\omega)$ —波能谱密度函数;  $H(\omega)$ —频率响应函数 RAO,也即常说的幅值响应算子,RAO—波浪激励到船体或浮体运动的传递函数,表征单位波幅的特征响应。

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。

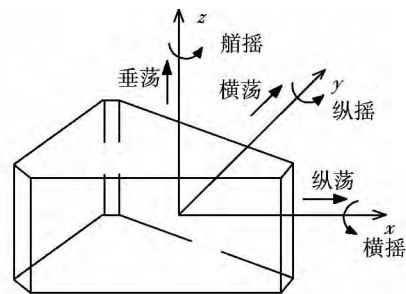


图 3 TLP 六自由度

Fig. 3 Six freedom degrees of the TLP

由于风浪流均为  $180^\circ$  入射,因此主要分析沿  $x$  轴的平动(纵荡)、沿  $z$  轴的平动(垂荡)和绕  $y$  轴的转动(纵摇)上的幅值响应算子,计算时长为 2 h,时间步长为 1 s。

图 4 为不附加 Spar 型漂浮式风力机与平台附加螺旋侧板后频域 RAO 的对比情况,其中纵轴表示对应单位波幅的位移或偏转角。可以看出两种情形下 RAO 随频率的变化趋势基本近似,峰值均出现在低频波浪作用下(不到  $0.5 \text{ rad/s}$ ),而且附加螺旋侧板后自振频率没有发生明显偏移。附加螺旋侧板之后,结构的垂荡和纵摇得到了显著的抑制,这是因为它们的存在增大了结构垂荡和纵摇运动的阻尼。

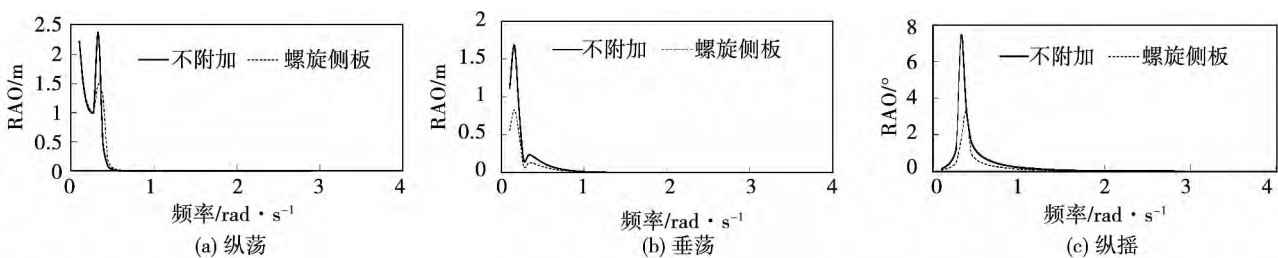


图 4 频域 RAO 对比

Fig. 4 Comparison of the frequency-domain RAO

### 3.2 时域响应分析

频域分析通常只适用于稳态问题,并未考虑系泊的影响以及风、流等载荷的作用,其无法解决瞬态问题和强非线性问题。对于漂浮式风力机系统,须在时域内模拟结构在风浪流环境中的运动响应。时域计算中,浮体的总体运动方程可表示为:

$$(m + a') \ddot{x}(t) + \int_{-\infty}^t K(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau + cx(t) = F(t) \quad (11)$$

式中:方程右端为结构所受的各种作用力,包括一阶波浪力、二阶波浪力、波浪漂移力、风力、流力和系泊力等; $a'$ —与频率相关函数, $K$ —迟滞函数:

$$\begin{cases} a' = a(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \\ K(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \end{cases} \quad (12)$$

考虑到入流载荷的方向,这里主要分析的漂浮式风力机在所给环境载荷作用下的时域特性变化情况为两种情形下结构的纵荡、垂荡和纵摇上基于 RAO 的时间历程,由于数据点过多且分布密集,图 5 给出了不附加 Spar 平台为基础的结构时域 RAO,表 3 对两种平台结构的时间历程做了相关统计。可以看出,在所设定的外界风、浪、流载荷作用下,附加螺旋侧板可以有效减少垂荡和纵摇振动的位移/偏转幅值,但纵荡自由度上的 RAO 幅值并没有得到明显改善。得到的结论与频域分析基本接近,综合整体来讲,考虑风、浪、流实际载荷作用时,附加螺旋侧板能够有效降低平台的动态响应。

表 3 时域 RAO 对比

Tab. 3 Comparison of the time-domain RAO

	不附加			螺旋侧板		
	纵荡	垂荡	纵摇	纵荡	垂荡	纵摇
最大值	0.74	0.62	10.92	0.68	0.33	5.36
平均值	0.004	0.003 3	0.016	0.003	0.016	0.09
标准差	0.26	0.23	3.11	0.25	0.11	1.37

### 3.3 强度分析

考虑到惯性载荷和结构阻尼对平台结构强度的影响,用瞬态结构动力学模块分析平台结构强度。其方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (13)$$

式中: $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 $u$ —系统的加速度、速度和位移向量; $M$ 、 $C$ 、 $K$ 、 $F(t)$ —平台的质量矩阵、阻尼矩阵、刚

度矩阵和节点载荷向量。并由各自的单元矩阵或向量集成,即:

$$\begin{cases} M = \sum_e M^e, C = \sum_e C^e \\ K = \sum_e K^e, F = \sum_e F^e \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} M^e = \int_{V_e} \rho N^T N dV, C^e = \int_{V_e} \mu N^T N dV \\ K^e = \int_{V_e} B^T D B dV, F^e = \int_{V_e} N^T f dV + \int_{S_e} N^T T dS \end{cases} \quad (15)$$

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

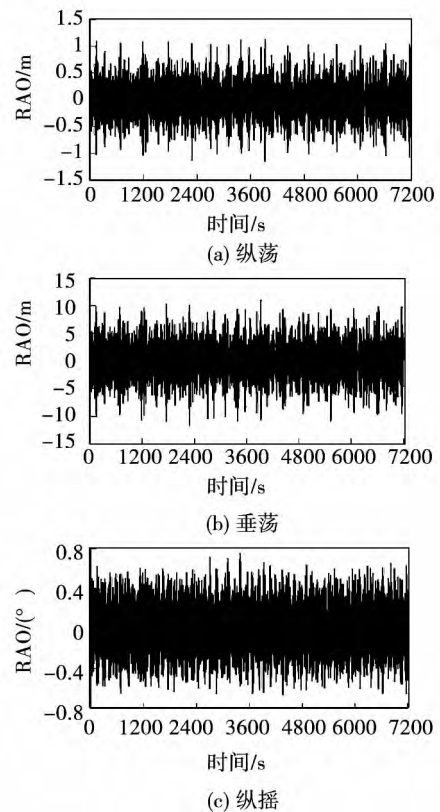


图 5 不附加平台的时域 RAO

Fig. 5 Time-domain RAO not attached with helical side plates

阻尼矩阵的比例系数  $\mu$  在一般情况下是依赖于频率的,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:

$$C^e = \alpha M + \beta K \tag{16}$$

式中:  $\alpha$  —与质量成比例的阻尼系数;  $\beta$  —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(16)得到:

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{\xi}{\pi f_{\text{response}}} \tag{17}$$

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

系泊底端在海底固定约束 ,系泊上端与平台外壁球关节连接。整个平台结构采用实体单元建模 ,立柱网格以六面体网格为主导 ,沿壁厚方向划分成 3 层 ,以保证计算的准确性 整个平台共有 4 539 573 个节点和 1 830 805 个单元网格。用瞬态结构动力学方法求解结构强度 设置 4 个载荷步 每个载荷步设置 10 个子载荷步的加载方式进行求解计算。

从表 4 可以看出附加螺旋侧板以后平台的等效应力、切应力和主应力都相应增加 ,主要是因为螺旋侧板阻碍了海流的流动 ,产生较大的结构阻尼。平台最大切应力和最大主应力均约为最大等效应力的二分之一 ,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。应力增加将直接影响到平台的结构强度和实用寿命。根据 ABS(美国船级社)规范的确定 ,根据 ABS APRIL2004 《浮式生产系统建造和入级指南》的安全系数规定: 结构安全系数为 1.2<sup>[19]</sup>。ABS 规范规定的许用应力校核准则为:

$$F = F_y / F_s \tag{18}$$

式中:  $F$  —许用应力 N;  $F_y$  —屈服强度, MPa;  $F_s$  —安全系数。平台使用材料 EQ36 的屈服强度为 356 MPa ,许用应力可为 296.7 MPa 根据冯·米塞斯 (Von-Mises) 失效理论 ,仍能满足结构强度要求 ,故在提高平台运动响应性能的同时可以满足结构强度设计要求。

表 4 平台应力对比

Tab. 4 Comparison of the stress of the platform

平台形式	最大等效应力 /MPa	最大切应力 /MPa	最大主应力 /MPa
不附加	272.34	136.23	142.28
螺旋侧板	290.3	149.61	173.35

### 4 结 论

基于 ANSYS 水动力与结构模块 ,分析了 Spar

平台在风、浪、流作用下的运动响应 ,及平台附加螺旋侧板后的结构应力 得出以下结论:

(1) 在 Spar 平台运动响应方面 ,分别对平台进行频域和时域分析 ,得出附加螺旋侧板可以有效减少垂荡和纵摇振动的位移/偏转幅值 ,但纵荡自由度上的 RAO 幅值并没有得到明显改善。频域与时域分析的结果相似 ,频域分析可作为平台动态响应的初步分析方法;

(2) 相同的外界载荷下 ,Spar 平台附加螺旋侧板比不附加螺旋侧板时的纵荡、垂荡和纵摇运动均有减小 ,说明附加螺旋侧板有助于抑制 Spar 平台的运动响应 ,特别是平台垂荡和纵摇方向的运动;

(3) 附加螺旋侧板后 ,螺旋侧板阻碍了海流的流动 ,产生较大的结构阻尼 ,Spar 平台的结构应力有所增加 ,但是仍可满足结构强度设计要求。

### 参考文献:

[1] 张 德. 风能资源数值模拟及其在中国能源评估中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学 2009: 14 - 36.  
ZHANG De. Study of the numerical simulation of wind energy resources and its applications in evaluation of energy sources in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University 2009: 14 - 36.

[2] 朱仁传 缪国平 范 菊 等. 海上浮式风力机及其动力学问题[J]. 应用数学和力学 2013 34(10): 1110 - 1118.  
ZHU Ren-chuan ,MIAO Guo-ping ,FAN Ju ,et al. Offshore floating-type wind turbines and their dynamic problems[J]. Applied Mathematics and Mechanics 2013 34(10): 1110 - 1118.

[3] 叶小嵘 张 亮 吴海涛 等. 平台运动对海上浮式风机的气动性能影响研究[J]. 华中科技大学学报,2012,40(3): 123 - 126.  
YE Xiao-rong ,ZHANG Liang ,WU Hai-tao ,et al. Study of the influence of the movement of a platform on the aerodynamic performance of an offshore floating type wind turbine[J]. Journal of Central China University of Science and Technology ,2012 ,40(3): 123 - 126.

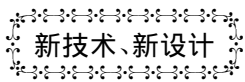
[4] 张 帆 杨建民 李润培. Spar 平台的发展趋势及其关键技术[J]. 中国海洋平台 2005 20(2): 6 - 11.  
ZHANG Fan ,YANG Jian-min ,LI Run-pei. Development tendency of Spar platforms and key technologies[J]. China Offshore Platform 2005 20(2): 6 - 11.

[5] Tong K C ,Quarton D C ,Standing R. Float-a Floating Offshore WindTurbine System in Wind Energy Conversion[C]. Proceedings of the BWEA Wind Energy Conference. York ,England: 1993: 407 - 413.

[6] 王 颖 杨建民 杨晨俊. Spar 平台涡激运动关键特性研究进展[J]. 中国海洋平台 2008 23(3): 1 - 10.  
WANG Ying ,YANG Jian-min ,YANG Jun-chen. Advances in the study of the key characteristics of the vortex-excited movement of Spar platforms[J]. China Offshore Platform 2008 23(3): 1 - 10.

- [7] Jun B. Rho ,Hang S. Choi. Heave and Pitch Motions of a Spar platform with damping plate [C]. Proceedings of 12<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu ,Japan 2002: 198 – 201.
- [8] Jun B. Rho ,Hang S. Choi. An experimental study for mooring effects on the stability of Spar platform [C]. Proceedings of 13<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference ,Honolulu , USA 2003.
- [9] 王兴刚, 孙昭晨, 梁书秀. 深水 Spar 平台在不规则波中的运动响应 [J]. 中国造船 2011, 52(2): 16 – 24.  
WANG Xing-gang SUN Zhao-chen LIANG Shu-xiu. Movement responses of a deep water Spar platform to irregular waves [J]. China Shipbuilding 2011, 52(2): 16 – 24.
- [10] 郝志永, 余旭恒, 宓为建. 柱状结构条纹列板对尾涡形态变化的影响机理 [J]. 上海海事大学学报 2012, 33(2): 55 – 60.  
HAO Zhi-yong ,YU Heng-xu ,MI Wei-jian. Mechanism governing the influence of the stripe row plates with the pillar-shaped structure on any change of the morphology and state of the vortexes in the wake [J]. Journal of Shanghai Maritime University 2012, 33(2): 55 – 60.
- [11] 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.  
KANG A-zhen ZHU Bing ,XING Fan ,et al. Numerical simulation of a super large-sized structure subjected to an action of the wave forces [J]. Engineering Mechanics 2014, 31(8): 108 – 115.
- [12] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.  
ZHU Yan-rong. Wave mechanics in oceanological engineering [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.
- [13] 葛 沛. 海上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: 32 – 33.  
GE Pei. Selection of the type of a platform for offshore floating tupe wind turbines and its structural design [D]. Harbin: Harbin Engineering University 2011.
- [14] 赵 静. 海上风机流载荷计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 12 – 16.  
ZHAO Jing. Calculation of the flow load on an offshore wind turbine [D]. Harbin: Harbin Engineering University 2009.
- [15] Jonkman J M ,Matha D. A Quantitative Comparison of the response of Three Floating Platforms [C]. European Offshore Wind 2009 Conference and Exhibition ,Stockholm 2009.
- [16] Roberston A N ,Jonkman J M. Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts [C]. International Society of Offshore and Polar Engineers 2011 Conference ,Hawaii 2011.
- [17] 王勳成. 有限元法 [M]. 北京: 清华大学出版社 2003.  
WANG Xu-cheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press 2003.
- [18] C. Cai ,H. Zheng ,M. S. Khan ,et al. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS [C]. CAD FEM user 's meeting and ANSYS conference ,Friedrichshafen: 2002.
- [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.  
Editorial Committee of "Offshore petroleum engineering design guide". Deep water oil and gas field development technology for offshore petroleum engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press 2011.

( 刘 瑶 编辑)



新技术、新设计

## 2013 年 1 月到 2014 年 6 月中国订购和安装的燃气轮机装置

据《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年年度手册发布了 2013 年 1 月到 2014 年 6 月中国(包括台湾)向国外订购的燃气轮机及其安装的详细情况。

叙述了燃气轮机装置订购和安装的细节,包括地区、开发商和现场、类型(简单循环,联合循环,船舶推进,油 & 气产输,热电联产,独立电力生产商)、燃气轮机数量和型号、机组 ISO 额定功率、燃气轮机制造厂商以及燃料。

2013 年 1 月 ~ 2014 年 6 月我国向乌克兰 Zorya-Mashproekt、俄罗斯 Aviadvigatel-Perm、英国 Rolls-Royce(三个公司购买中小功率燃气轮机,主要用于舰船推进和油 & 气产输)、美国 GE、德国 Siemens、日本 MHI、法国 Alston(四个公司购买大功率燃气轮机,用于联合循环电站和联合循环热电联产装置)共购买了 87 台燃气轮机。

这 87 台机组的功率等如下: 5 ~ 10 MW 29 台; 10 ~ 20 MW 6 台; 20 ~ 30 MW 2 台; 30 ~ 50 MW 8 台; 50 ~ 100 MW 2 台; 100 ~ 200 MW 8 台; 200 ~ 300 MW 21 台; > 300 MW 11 台。

这 87 台燃气轮机也包括我国台湾向 MHI 购买的用于建筑联合循环电站的 6 台 M50J 燃气轮机,每台 ISO 额定功率为 327 MW。

( 吉桂明 摘译)

翼缝宽度对翼型气动特性的影响 = **Influence of the Flap Slot Width on the Hydrodynamic Characteristics of an Airfoil** [刊 汉] LI Run-jie , LI Chun , LI Qian-qian , YE Zhou ( College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) , LI Chun , YE Zhou ( Shanghai City Key Laboratory on Multi-phase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31( 7 ) . - 117 ~ 122

In the light of the problem of the stall of an airfoil , the CFD numerical simulation method was employed. With the airfoil NACA0018 serving as the reference airfoil , the influence of the flap slot width on the distribution of the pressure and flow field contours was analyzed. The calculation results show that when the airfoil has a small attack angle , the flap slot width exerts a relatively small influence on the suction side of the airfoil while exercise a relatively big influence on the high pressure zone in the pressure side of the airfoil. When airfoil has a big attack angle , the presence of the flap slot will change the configuration of the flow field formed by the airfoil , thus reducing the number of vortexes evolved in the wake and narrowing the range of the vortexes. At a large attack angle , the flap slot will exert a relatively big influence on the range of the high pressure zone on the pressure surface and the low pressure zone on the suction surface. It has been known by comparing the influence of the three kinds of flap slot width on the pressure and streamline contours of the airfoil that when the flap slot width  $w = 0.1\% c$  , the hydrodynamic performance of the airfoil will be optimal. **Key words:** airfoil , flap , flap slot width , hydrodynamic characteristics

漂浮式风力机 Spar 平台结构动力响应分析 = **Analysis on the Dynamical Response of the Structure of the Spar Platform for Floating Wind Turbines** [刊 汉] YE Zhou , WU Zhong-wang , ZHAN Pei , LI Chun ( College of Energy and Power Engineering , University of Shanghai for Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) , YE Zhou , LI Chun ( Shanghai City Key Laboratory on Multi-phase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31( 7 ) . - 123 ~ 129

By using the finite element method , based on Von-Mises failure theory , with the damping and inertial load of the structure of the platform being taken into consideration , the Ansys finite element software and the open source program software FAST were used respectively to study the dynamic response and structural stress of the platform. It has been found that a helical side plate has no conspicuous influence on the self-vibration frequency of the spar platform and the additionally installed helical side plate can effectively decrease the movement response along the vertical and horizontal vibration direction , however , achieve no obvious improvement in the horizontal vibration direction. The helical side plate will block the ocean current and increase the flow resistance. In addition , the structural stress of the platform will somewhat increase and the maximum shear stress will be approximately half of the maximum equivalent shear stress , which is critical for securing the safe and stable operation of the platform , however , the structure of the platform is still safe. **Key words:** floating wind turbine , Spar platform , structural optimization , strength , dynamic response