

海上漂浮式风力机 Spar 平台结构优化设计探究

叶舟^{1,2}, 周伟¹, 詹培¹, 李春^{1,2}

(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: 以 NREL 5MW 海上风力机 OC3 - Hywind 型 Spar 平台为研究对象, 建立平台有限元模型, 采用有限元方法分析了 100 年一遇极端海况下 Spar 平台的结构强度, 并在满足结构强度要求的条件下, 采用响应面优化设计方法, 以平台结构自身重量为目标函数, 对平台的内部结构进行优化设计。优化结果表明: 优化后平台的结构强度符合设计规范要求; 平台内部的各种肋板与加强筋的结构尺寸更加合理, 并减少了平台结构的用钢量, 降低了 Spar 平台的建造成本。

关键词: 漂浮式风力机; OC3 - Hywind 型 Spar 平台; 结构强度; 优化设计

中图分类号: P752; TK83

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0156-07

Research on structural optimization design of Spar platform for offshore wind turbine

YE Zhou^{1,2}, ZHOU Wei¹, ZHAN Pei¹, LI Chun^{1,2}

(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: Based on the OC3 - Hywind Spar platform of NREL 5MW offshore wind turbine, the finite element model of the platform was established. The structural strength of the Spar platform under extreme sea conditions was analyzed by finite element method. Under the condition of satisfying the structural strength requirement, the optimization design method of the response surface is used to optimize the internal structure of the platform with the weight of the platform structure as the objective function. The optimization results show that the structural strength of the optimized platform is in accordance with the design specification. The structural dimensions of various ribs and stiffeners inside the platform are more reasonable and the amount of steel used in the platform structure is reduced, which reduces the construction cost of the Spar platform.

Key words: offshore wind turbine; OC3 - Hywind Spar platform; structural strength; optimized design

1 研究背景

目前风电场的建设从陆上向海上迈进的趋势已成必然, 支撑平台是海上风力机系统重要的组成部分^[1]。Spar 平台作为海上漂浮式风力机基础平台的一种, 非常适用于重心较高的海上风电系统, 同时具有良好的水动力性能, 平台结构相对较为简单, 适用于深海区域^[2]。Jonkman^[3]以 NREL 5MW 风力机为研究对象, 建立了一种 OC3 Spar 风力机平台支撑结构, 设计了平台相关参数, 并通过定性的假设分析

了平台的水动力特性; 赵晶瑞^[4]依据非线性动力学理论, 并采用数值模拟的方法, 研究经典式 Spar 平台主体运动的非线性稳定性问题, 计算了在规则波浪下平台主体 - 系泊系统的耦合动力响应; 赵静等^[5]对比不同浮式基础结构的性能, 分析了各国模型试验的特点, 探讨了试验研究的关键技术, 给出了适合于我国海上浮式风电机组理论和试验研究的建议, 提出了整体模型、风力发电机模型和锚泊系统模型; Prislun^[6]等在 Spar 平台自行竖立过程中, 提出将一部分海水冲入压载舱, 将海水压载作为 Spar 平台

收稿日期: 2017-10-16; 修回日期: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676131); 上海市科委项目(13DZ2260900)

作者简介: 叶舟(1973-), 男, 河南信阳人, 博士, 副研究员, 主要从事流体机械优化设计、风能利用等方面的研究工作。

通讯作者: 周伟(1992-), 男, 安徽肥东人, 硕士研究生, 研究方向为漂浮式风力机平台结构设计。

的一部分,分析平台结构质量的变化,并将 Spar 平台的运动方程和压载舱的水动力方程相结合得到了解析解。

现阶段而言,海上漂浮式风力机所使用的浮式基础多来源于海洋石油平台,然而海上风电机组浮式基础仍有其自身的结构特点,如其水平荷载和倾覆力矩远远大于海洋石油平台,而竖向荷载小于海洋石油平台^[7]。且目前尚缺乏有关漂浮式风力机平台结构的设计标准,研究设计主要基于海上油气平台的相关规范并靠设计者的经验来进行^[8]。因此,研究 Spar 平台的结构优化设计,对海上风力机的安全稳定作业以及降低海上风电的成本具有非常重要的意义。

2 环境载荷

海上漂浮式风力机 Spar 平台在 100 年一遇极端海况下,主要受到风力机系统和平台自重、海风、波浪和海流载荷以及系泊力、静水压力的作用。

2.1 风载荷

采用由美国国家可再生能源实验室(NREL)针对水平轴风力机研发的开源软件 FAST,计算极限海况下漂浮式风力机的风载荷;FAST 基于动量理论来计算作用于风轮和塔架上的风载荷,塔架所受风载荷可按公式(1)和(2)计算^[9]:

$$F_t = \frac{1}{2} \rho A_t V_h^2(t) \quad (1)$$

$$M_t = \frac{1}{4} \rho A_t V_h^2(t) H_{hub} \quad (2)$$

式中: F_t 为塔架所受风剪切力, kN; M_t 为塔架所受倾覆力矩, kN·m; A_t 为塔架上受风面的投影面积, m²; $V_h(t)$ 为海平面上高度为 h 处的瞬时风速, m/s; H_{hub} 为风力机轮毂高度, m。

2.2 波浪载荷

本文使用 ANSYS 有限元软件 Hydrodynamic 模块计算平台受到的波浪载荷,再通过 ANSYS AQWA 模块形成载荷文件,将水动力载荷传递到静力学模型上,以保证载荷施加的准确性。Hydrodynamic 模块基于辐射-绕射理论计算作用在结构上的波浪载荷,其中速度势和流体压力可表示为:

$$\Phi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) e^{-i\omega t} \\ = [\varphi_l(x, y, z) + \varphi_d(x, y, z)_D] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

式中: φ_l 为入射波的速度势; φ_d 为散射波的速度势。由公式(3)可求得波动场的速度势 Φ , 将其代入线性化的伯努利方程中,即可求得波动场结构物表

面上的波压强分布 p 为:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (4)$$

则作用于结构物上的波浪力和波浪力矩为^[10]:

$$F = - \iint_S p n ds \quad (5)$$

$$M = \iint_S -p(r \times n) ds \quad (6)$$

式中: n 为结构物表面某点的外法线矢量; r 为结构物表面某点到基点(取矩点)的径向矢量。

2.3 海流载荷

海流计算采用线性剪切流,按公式(7)进行求解^[11]。

$$F_c = \frac{1}{2} C_D \rho_w V^2 A \quad (7)$$

式中: C_D 为曳力系数; ρ_w 为海水密度, kg/m³; V 为设计海流流速, m/s; A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积, m²。考虑海流与波浪之间的相互作用,采用绕射理论计算波浪载荷时,海流载荷应按公式(7)计算,并与波浪载荷矢量相加。

2.4 其他载荷

在极限海况下, Spar 平台除了受到海风、波浪和海流 3 种主要载荷外,还受到系泊拉力、静水压力、平台及风力机自身重力和惯性载荷的作用,这些载荷对 Spar 平台整体结构强度均有影响,因此在对 Spar 平台进行应力分析时应给予重视。

“拟静力”算法即等效应力算法,它是用一系列产生与动载荷下结构相同位移场的静载荷代替动载荷,进而将结构动力响应分析转化为结构静力分析^[12]。

计算平台系泊拉力时,通过 ANSYS 有限元软件 Hydrodynamic 模块计算,然后通过拟静力的方法,将时间历程内的系泊拉力转化为等效应力施加在 Spar 平台的静力学模型上;静水压力及惯性载荷通过 AQWA-WAVE 传递至平台的静力学模型;平台及风力机自身重力包括平台自重、压载舱内海水压载物重力和平台上部 NREL 5MW 风力机的重力。

3 结构强度分析

3.1 漂浮式风力机整机系统参数

NREL 5MW 漂浮式风力机整机系统由 3 个部分组成,分别为:风力机系统、Spar 平台和系泊系统。NREL 5MW 风力机包括风轮、机舱、塔架、控制系统等部件,其尺寸和结构的具体参数如表 1 所示^[13]。

表 1 风力机系统参数

系统参数	参数特征或参数值
叶片	迎风,3 叶片
控制系统	变转速,变桨距
功率/MW	5
叶片和轮毂直径/m	126,3
轮毂高度/m	90
切入、额定、切出风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3,11.4,25
切入、额定、切出转速/rpm	6.9,12.1,80
悬垂/m,轴倾斜、圆锥度/($^{\circ}$)	5,5,2.5
重心坐标位置/m	(-0.2,0.0,64.0)
风轮质量/kg	110000
机舱质量/kg	240000
塔架质量/kg	347500

Jonkman 根据 IEA 提出的 OC3 - Hywind 型 Spar 平台设计了一种漂浮式风力机 Spar 平台模型,该平台主体包括浮力舱、压载舱和系泊系统,压载舱装有压舱物,通过压载使得整个结构系统的重心压低至浮心之下,从而保证结构的稳定性^[14]。平台参数如表 2 所示。

表 2 漂浮式风力机 Spar 平台参数

平台参数	参数值
直径/m	6.5 ~ 9.4
设计吃水/m	120
总高度/m	130
排水量/ m^3	8029
平台总质量/kg	7.4663×10^6
重心位置/m	-64.585
平台自身质量/kg	4.2348×10^6
横摇惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.9521×10^{10}
纵摇惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.9521×10^{10}
艏摇惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.0805×10^8
平台外筒壁厚度/m	0.06/0.08
平台内隔板厚度/m	0.06/0.08

所研究的 OC3 - Hywind 型 Spar 平台所采用的系泊形式为单索悬链线系泊,其相关参数见表 3。

表 3 系泊缆参数

参数	参数值
长度/m	902.2
直径/m	0.09
质量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	77.71
轴向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	3.842×10^8
最大张力/N	7.5×10^6

漂浮式平台材料一般选用高强度钢^[15],并且在平台的高应力区域选择使用超高强度钢(屈服强度高于 420 MPa)^[16],因此,在满足设计要求、使用性能和经济性的基础上,在设计 OC3 - Hywind 型 Spar 平台时主要选用钢材为 EQ36,在平台的应力集中区域使用 EQ56,其具体材料性能参数如表 4、5 所示。

表 4 EQ36 材料性能参数

性能参数	参数值
弹性模量 E/Pa	2.06×10^{11}
泊松比 μ	0.32
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7.80×10^3
屈服强度 σ_s/Pa	3.55×10^8

表 5 EQ56 材料性能参数

性能参数	参数值
弹性模量 E/Pa	2.10×10^{11}
泊松比 μ	0.30
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7.85×10^3
屈服强度 σ_s/Pa	6.79×10^8

3.2 平台应力分析

3.2.1 Spar 平台有限元模型 对建立的 OC3 - Hywind 型 Spar 平台壳体模型进行网格划分,由于平台的外壳与内部结构均为规则形状,因此,采用结构网格对平台模型进行网格划分,得到平台的有限元静力学模型。考虑计算结果的收敛性与计算资源的有限,平台共划分 344 015 个节点和 344 223 个网格单元。

3.2.2 Spar 平台应力分析 针对 100 年一遇的极端设计海况下,海风、波浪和海流载荷同向且分别沿 0° 、 30° 、 60° 3 个方向作用于风力机系统时,对 OC3 - Hywind 型 Spar 平台的静力学模型进行有限元计算。Spar 平台在 3 种情况下的变形及应力如表 6 所示。限于篇幅,文中只给出海风、波浪和海流载荷同向且沿 0° 方向作用于风力机系统时平台整体和局部的应力云图,分别如图 1、2 所示。

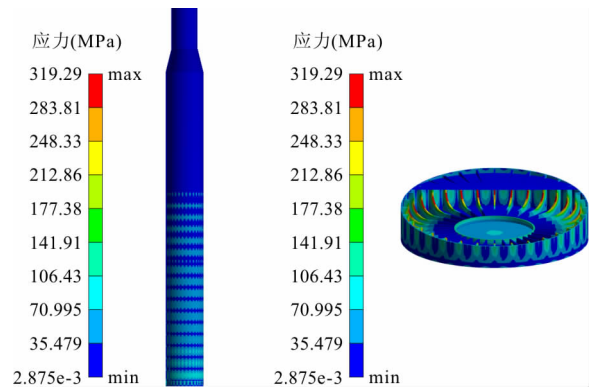


图 1 平台整体等效应力云图 图 2 平台底部等效应力云图(局部)

由表6可知,沿 x 轴正向夹角 0° 方向作用于平台时,平台产生的应力最大, 30° 方向次之, 60° 方向最小。因此在安装平台时,应考虑当地具体环境因素。由图1、2可知,立柱顶端、立柱底端处均发生应力集中,为平台危险区域;立柱顶端应力集中主要因

为顶端载荷较大,立柱底端应力集中主要因为此处受到的静水压力与惯性载荷较大;立柱底部隔板与纵向加强筋连接处位置应力集中最为明显,此处的等效应力在3种作用角度下的最大值依次为319.3、308.1、282.7 MPa。

表6 海风、波浪和海流荷载同向作用时 Spar 平台变形及应力

项目	x 轴正向		x 轴正向夹角 30°		x 轴正向夹角 60°	
	数值	分布位置	数值	分布位置	数值	分布位置
最大等效应力/MPa	319.30	立柱底端	308.1	立柱底端	282.7	立柱底端
最大切应力/MPa	162.96	立柱底端	158.6	立柱底端	134.8	立柱底端
最大主应力/MPa	163.03	立柱底端	164.1	立柱底端	152.4	立柱底端
最大变形量/m	0.015	立柱顶端	0.0137	立柱顶端	0.0129	立柱顶端

由以上分析可知,海风、波浪和海流荷载同向且分别沿 0° 、 30° 、 60° 3个方向作用于风力机系统时, 0° 方向作用下引起的平台的结构应力最大,因此对该工况下的平台应力进行分析。经分析可知,平台结构最大应力发生在压载舱底部纵向加强筋与环向隔板横向加强筋倒圆角的过度区域,此处为平台的应力集中区域,设计时选用超高强度钢 EQ56。

3.3 强度校核

OC3-Hywind 型 Spar 平台主要采用高强度钢 EQ36 制造,在平台底部应力集中区域采用超高强度钢 EQ56 制造,EQ36 屈服强度为 355 MPa,EQ56 屈服强度为 679 MPa。平台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,海上漂浮式风力机 Spar 平台作为一种即无人也无危险化学品的浮式结构,结构失效一般不会造成灾难性的危害,因此按照海洋石油工业中 ABS 规范设计平台是相当保守的。综合考虑下,平台结构的安全系数取为 1.25^[17]。ABS 规范规定的许用应力校核准则为:

$$F = F_y / F_s \quad (8)$$

式中: F 为许用应力,N; F_y 为屈服强度,MPa; F_s 为安全系数。由式(8)可知,EQ36 许用应力为 284 MPa,EQ56 许用应力为 543.2 MPa。在极端海况下,海风、波浪和海流荷载同向且沿任意方向作用于风力机整机系统时,平台的最大等效应力均小于平台材料许用应力,因此 OC3-Hywind 型 Spar 平台满足材料结构强度要求。

4 结构优化分析

Spar 平台结构复杂,整体尺寸较大,在建造过程中消耗大量钢材,成本增加。因此,在满足平台结构

强度的前提下,减少平台整体重量以达到减少耗材,对降低平台的建造成本具有重要意义。采用响应面优化设计方法对 Spar 平台整体结构进行优化。

4.1 优化设计理论

4.1.1 响应面模型 响应面模型是用来模拟设计变量与目标之间响应关系的一种近似模型,其大多数采用低阶多项式,是一种最普遍的近似模型。构造一种拟合度高的响应面模型对优化分析的过程及结构尤为重要,本文选用 Kriging 响应面法构造响应面模型,在 Kriging 响应面模型中,真实未知函数如下:

$$\tilde{y} = f(x) + z(x) \quad (9)$$

式中: $f(x)$ 为 x 多项式函数; $z(x)$ 为一随机部分。在设计空间中 $f(x)$ 提供全局的模拟近似和 $\tilde{y}$ 的数学期望, $z(x)$ 提供模拟局部偏差的近似。 $z(x)$ 服从正态高斯随机分布,具有无偏性和估计方差最小的特征, $z(x)$ 的协方差矩阵为:

$$\text{Cov}[z(x^i), z(x^j)] = \sigma^2 R[r(x^i, x^j)] \quad (10)$$

式中: σ^2 为 $z(x)$ 的方差; R 为相关矩阵; $r(x^i, x^j)$ 为相关函数。被广泛采用的相关函数为高斯相关函数:

$$r(x^i, x^j) = \exp\left(-\sum_{l=1}^k \theta_l |x_l^i - x_l^j|\right) \quad (11)$$

式中: k 为设计变量的个数; θ_l 为未知的相关参数; x_l^i, x_l^j 为采样点 x^i, x^j 的第 l 个分量。基于 $z(x)$ 的无偏性和估计方差最小可得出相关参数 θ_l ,由最大可能估计给出,即在 $\theta > 0$ 时使下式最大^[18]:

$$\theta_l = -\frac{n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |R|}{2} \quad (12)$$

式中: n_s 为响应值的个数; $\hat{\sigma}^2$ 为方差估计值; R 为待测点与样本之间的相关值。

4.1.2 筛选方法 筛选方法是基于 Hammersley 算法的准随机数发生器的非迭代直接采样方法,支持多

目标、多约束条件以及所有类型的输入参数,允许生成新的样本集,并根据目标和约束对样本进行排序,适用于所有类型的输入参数,通常用于初步设计。

由于 OC3 - Hywind 型 Spar 平台是大型海上复杂建筑,在极限工况下,平台自身受到的载荷及平台结构的响应较为复杂,因此选用筛选方法对平台的整体结构进行初步优化设计。

4.2 Spar 平台结构优化设计

OC3 - Hywind 型 Spar 平台结构较为复杂,规模庞大,考虑仿真计算资源的代价,首先采用试验设计方法,对所选取的设计变量进行组合,得到优化所需的样本,然后采用响应面模型对设计变量进行灵敏度分析,最后运用筛选方法对样本进行优化和筛选,得出最佳设计方案。

4.2.1 优化参数设置 OC3 - Hywind 型 Spar 平台结构由浮力舱、可变浮舱和压载舱 3 个舱段组成,且可变浮舱和压载舱内部结构的壁厚相同,选型相似,因此将 Spar 平台分浮力舱和压载舱两个部分,分别对这两个部分的内部结构的尺寸进行优化设计。

(1)目标函数:Spar 平台的设计目标是在满足结构强度要求的前提下,使平台的用料最少,也即平台结构的自重尽可能最小,因此优化的目标函数为:
 $\min \text{mass} = f(x)$ 。

(2)设计变量:根据 OC3 - Hywind 型 Spar 平台内部结构特点,通过 Design Modeler 对平台内部结构进行详细的参数建模并提取设计变量。最后得出 8 个结构设计变量用于结构优化,如表 7 所示;各个设计变量初始值及范围如表 8 所示。

表 7 结构设计变量表

结构位置	设计变量名称	符号
平台上段	密封板横向加强筋长度	P_3
	密封板横向加强筋高度	P_4
平台中段	密封板横向加强筋长度	P_5
	密封板横向加强筋高度	P_6
平台下段	环向隔板横向加强筋长度	P_7
	环向隔板横向加强筋高度	P_8
	环向隔板内径	P_2
	纵向加强筋高度	P_1

(3)约束条件:由以上分析可知在极限海况下,Spar 平台结构的实际应力应小于平台材料的许用应力,由于平台在设计时其底部的应力集中区域使用了超高强度钢 EQ56,其他部分使用高强度钢 EQ36,

且平台底部应力集中区域结构的等效应力远高于平台的其它部位,EQ36 许用应力为 284 MPa,EQ56 许用应力为 543.2 MPa,考虑两者的差别并兼顾平台整体的强度要求,在进行优化时设置平台的最大等效应力小于 355 MPa。

表 8 结构设计变量初始值及范围

设计变量	上限	初始值	下限
P_1	0.35	0.30	0.25
P_2	2.20	2.00	1.50
P_3	2.85	2.75	2.00
P_4	0.32	0.30	0.27
P_5	4.30	4.20	3.00
P_6	0.32	0.30	0.27
P_7	2.80	2.70	2.00
P_8	0.33	0.20	0.27

4.2.2 设计变量灵敏度分析 灵敏度是指目标函数或某个约束条件相对于某一个设计变量的变化而得到的变化率,在数值上它等于设计变量做单位改变时目标函数或约束条件所对应的改变,其真正含义是计算目标函数或者约束条件的导数^[19]。运用中心组合设计方法对表 7 中的 8 个设计变量进行交叉组合,得到 81 个样本点,然后对这些样本点进行求解计算。

根据每个样本点计算的结果,构造响应面模型,对各个设计参数进行灵敏度分析。各个设计变量对 Spar 平台结构等效应力的灵敏度情况如图 3 所示,各个设计变量对 Spar 平台总质量的灵敏度情况如图 4 所示。

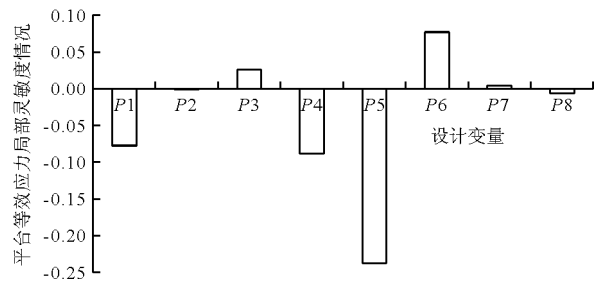


图 3 各个设计变量对 Spar 平台等效应力的灵敏度情况

由图 3 可知,平台中段密封板横向加强筋长度 P_5 对 Spar 平台等效应力的影响最大,其次是平台上段密封板横向加强筋高度 P_4 ,然后是纵向加强筋高度 P_1 和平台中段密封板横向加强筋高度 P_6 ,对 Spar 平台等效应力的影响最小的是环向隔板内径 P_2 。

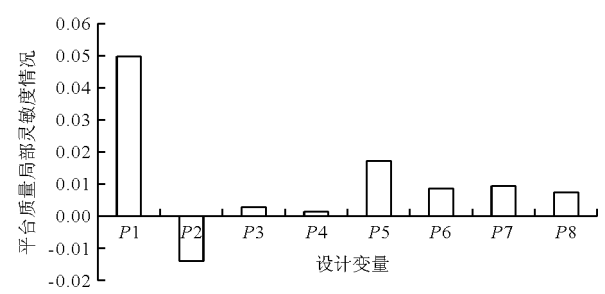


图 4 各个设计变量对 Spar 平台质量的灵敏度情况

由图 4 可知,纵向加强筋高度 $P1$ 对 Spar 平台质量的影响最大,其次是平台中段密封板横向加强筋长度 $P5$,然后是平台下段环向隔板内径 $P2$,平台上段密封板横向加强筋高度 $P4$ 对 Spar 平台质量的影响最小。所以在后续的改进设计中,应进一步减小环向隔板内径、平台下段环向隔板横向加强筋长度和平台下段环向隔板横向加强筋高度。

4.3 优化设计结果与分析

OC3-Hywind 型 Spar 平台各个设计变量优化后结果如表 9 所示。对 Spar 平台的初始设计方案和优化后得到的平台结构方案进行了对比,优化前后平台的最大等效应力和平台自身结构质量如表 10 所示。根据优化后得到的最佳设计变量,对 Spar 平台的结构模型进行修改,对修改后的平台结构在相同海况下进行有限元静力学分析,得到平台整体等效应力云图和平台底部等效应力云图(局部)如图 5 和图 6 所示。

表 9 Spar 平台优化结果

设计变量	初始值/m	优化结果/m
$P1$	0.30	0.25
$P2$	2.00	1.80
$P3$	2.75	2.45
$P4$	0.30	0.28
$P5$	4.20	3.40
$P6$	0.30	0.27
$P7$	2.70	2.00
$P8$	0.20	0.27

表 10 设计方案优化前后对比

设计方案	最大等效应力/MPa	最大变形量/m	平台自身结构质量/kg
初始设计方案	319.29	0.015	4234800
优化后方案	332.62	0.017	4017900

由表 10 可知,优化后 Spar 平台在相同极限海况下,平台最大等效应力值大于优化前,但差值不

大,自身结构质量小于优化前。优化后的平台结构中,各种肋板与加强筋的结构尺寸更加合理,不仅保证了平台结构的强度,而且降低了平台的质量,其中平台自身结构质量相比优化前减少 216900kg,也即减少了平台的用钢量,降低了 Spar 平台的建造成本,同时亦证明了优化设计方案的可行性。

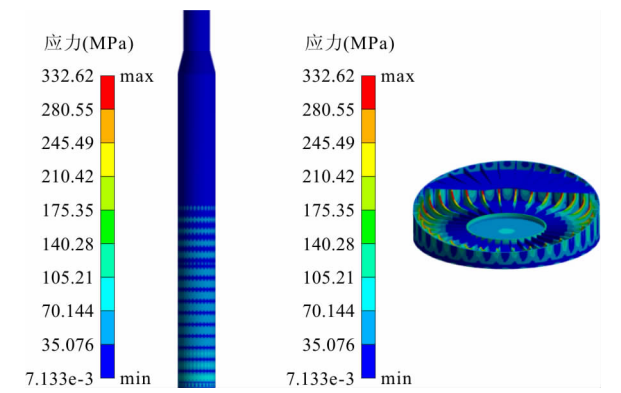


图 5 平台整体等效应力云图 图 6 平台底部等效应力云图(局部)

由图 5 和图 6 可知,Spar 平台底部危险区域的最大等效应力值为 332.62 MPa,小于该部分所用材料(EQ56)的许用应力 543.2 MPa。平台其他区域的最大等效应力值小于 245.5 MPa,小于所用材料(EQ36)的许用应力 284 MPa。优化后的 Spar 平台的 1~8 阶模态频率如表 11 所示。

表 11 优化后 Spar 平台的 1~8 阶模态频率

阶数	1	2	3	4
频率/Hz	3.0623	3.0727	3.0766	3.0937
阶数	5	6	7	8
频率/Hz	7.1508	7.1725	7.8464	12.016

而在大多数海况下,波浪频率一般在 0.2 Hz 以下,极限海况下的波浪频率为 0.05~0.2 Hz。对于优化后的 Spar 平台而言,自振频率较大,超过 3.0623 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。综上说明优化后的 Spar 平台结构符合设计要求。

5 结 论

(1)采用 Design Modeler 参数化建模方法对平台进行精细的参数化建模,得出用于结构优化的 8 个主要结构参数。大型结构物的参数化建模和设计参数的提取与管理是一项繁琐复杂的工作,通过本次对 Spar 平台结构建模,得出了 ANSYS Design Modeler 参数化建模是一种处理该类问题合理、有效

的方法,在很大程度上提高了工程设计的效率。

(2) 基于 ABS 规范对 OC3 - Hywind 型 Spar 平台强度分析的结果进行强度校核, 计算结果表明, 风、浪、流同向且沿 0° 方向作用于风力机系统时, 平台的结构响应最大; 立柱顶端与底端的变形量较大, 均发生应力集中, 为平台危险区域, 且立柱底部隔板与纵向加强筋连接处位置应力集中现象最为明显。强度校核的结果表明, 平台的等效应力满足设计规范要求。

(3) 采用响应面优化设计方法, 针对 OC3 - Hywind 型 Spar 平台内部结构进行了尺寸优化设计。通过对设计方案优化前后的对比, 得出优化后的平台结构中, 各种肋板与加强筋的结构尺寸更加合理, 不仅保证了平台结构的强度, 还一定程度上减少了平台自身结构的质量, 降低了 Spar 平台的建造成本。

参考文献:

- [1] 张亮, 吴海涛, 荆丰梅, 等. 海上漂浮式风力机研究进展及发展趋势[J]. 海洋技术, 2012, 29(4): 122 - 126.
- [2] 王海瓊. 海上风电 Spar 浮式基础运动特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3] JONKMAN J M. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3[R]. Colorado, National renewable energy laboratory, 2010.
- [4] 赵晶瑞. 经典式 Spar 平台非线性耦合动力响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [5] 赵静, 张亮, 叶小嵘, 等. 模型试验技术在海上浮式风电开发中的应用[J]. 中国电力, 2011, 44(9): 55 - 60.
- [6] PRISLIN I, STEEN A, HALKYARD J. Upending of a spar offshore platform: prediction of motions and loading[C] // Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Enghleering Conference, Stavanger, Norway: June 17 - 22, 2001.
- [7] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130 - 134.
- [8] 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.
- [9] 李春. 现代陆海风力机计算与仿真[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [10] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 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] CHOI W S, PARK G J. Structural optimization using equivalent static loads at all time intervals[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(19): 2105 - 2122.
- [13] JONKMAN J, MATHA D. Quantitative comparison of the responses of three floating platforms[J]. Australian Historical Studies, 2010, 32(3): 351 - 355.
- [14] 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.
- [15] 徐龙坤. 深海浮式平台局部结构可靠度分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [16] 白艳彬. 深水半潜式钻井平台总体强度分析及疲劳强度评估[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [17] 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, 2012.
- [18] 王晓锋, 席光, 王尚锦. Kriging 与响应面方法在气动优化设计中的应用[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 423 - 425.
- [19] ZHANG Yan, XIONG Fenfen, YANG Shuxing, et al. Optimization design of composite wing structure of a minitype unmanned aerial vehicle[J]. Advanced Materials Research, 2011, 156 - 157(1): 1532 - 1536.