第28卷第2期 水资源与水工程学报 Vol.28 No.2
2017年 4月 Journal of Water Resources & Water Engineering Apr.,2017

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.02.31

漂浮式风力机张力腿平台“拟静力”结构强度分析

詹 培[1], 叶 舟[1,2], 吴中旺[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: 张力腿平台结构在外界环境载荷作用下的力学分析是张力腿平台设计研究的重点。利用ANSYS软件,采用拟静力分析的方法,对张力腿平台(Tension Leg Platform, TLP)在极端海况风、波、流载荷联合作用下的结构强度进行分析,并针对平台应力集中区域通过添加支撑板的方法进行了局部改进,对改进后的平台再次进行了模拟验证。结果表明:平台立柱隔板的中央位置和立柱顶端变形量较大;平台顶部隔板、底部隔板与立柱联接的地方均出现应力集中;在平台应力集中区域添加支撑板的方法可以明显改善平台局部区域的应力分布,降低应力集中现象的危害。

关键词: 海上风力机; 张力腿平台; 拟静态分析; 结构强度

中图分类号:TV311; TK83 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2017)02-0178-07

Quasi-static and structural strength analysis of tension leg platform for floating wind turbine

ZHAN Pei[1], YE Zhou[1,2], WU Zhongwang[1], 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: Mechanical analysis of tension leg platform (TLP) structure under loads of the external environment is an important research for TLP. Under the combined effects of three types of environment loads in extreme sea conditions of wind, waves and currents, of the structure intensity of TLP was analyzed using ANSYS software as well as quasi-static analysis. Stress concentration areas of platform were improved locally by adding a support plate, and the improved platform was simulated and tested again. The results showed that, structure in the center and top of the column had a large amount of deformation. Stress concentration occurred in the connection area of the top and bottom of the platform and the column. By adding a support plate in the areas with stress concentration, the stress distribution for local area could be significantly improved and the stress concentration can be reduced in stress concentration areas. The research provides references for the structural design of the platform and further optimization.

Key words: offshore wind turbine; tension leg platform; quasi-static analysis; structural strength

1 研究背景

随着陆上风电应用技术的成熟,由陆地向海洋已成为风电发展的主要趋势。相对于陆上风电,海上风能的效益要高20% ~40%,且具有风速高、潜力大、运行稳定、适合大规模开发等优势[1]。支撑结构的形式及特点对海上风力机的安全运行至关重要,目前对支撑结构的研究已成为海上风力机设计的重要组成部分。当水深大于60m时,固定式的支撑结构已无法达到风力机的经济性要求,漂浮式风力机(Offshore Wind Turbine,OWT)无疑是在深水区域的最佳选择[2]。海上漂浮式风力机张力腿平台是垂直系泊的半顺应式半刚性浮式平台,是目前应用较为广泛的海上风力机平台之一,国内外众多学者已对漂浮式风力机张力腿平台(Tension Leg Platform,TLP)进行了一些研究。Lefebvre 等[3]利用美

收稿日期:2016-08-18; **修回日期**:2016-11-23
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:詹 培(1987-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事海上风力机结构设计方面的研究。
通讯作者:叶 舟(1973-),男,河南信阳人,博士,副教授,主要从事流体机械及工程研究。

国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory,NREL)提供的 5MW 海上风力机的设计参数,提出了一种 OWT 平台中央立柱及其结构的设计思路。Bachynski 等[4-5]研究了正常工况下,风轮转动与涡激振动对 TLP 的结构刚度和黏性阻尼的影响,结果表明 TLP 的结构参数对漂浮式风力机整机性能有很大的影响。葛沛[6]根据三维势流理论,分别研究了风载荷、波浪载荷和海流载荷单独作用于 TLP 时,平台立柱和延伸腿的应力分布及各自固有频率,以及风力机和平台之间的耦合机理。孟珣等[7]以海上单立柱风电的支撑结构为研究对象,分析了该结构的固有频约束限制与外界环境荷载的动力特性,综合考虑了环境荷载影响,提出了海上风力机单立柱支撑结构的拟静力分析思路。黄华[8]对海上风力机的单桩基础结构在“拟静力”荷载作用下进行了结构分析,首先采用理论简化方法计算理论解,然后利用有限元方法得到理论解,通过对两者进行对比,分析了海上风力机单桩基础结构的受力、变形及结构强度。胡志敏等[9]采用非线性拟静态分析方法,通过建立张力腿平台本体的二维模型,对典型的单柱张力腿平台进行分析,通过几种极限状态分析了张力腿系泊张力变化与平台运动模态的关系。

张力腿平台的力学分析是张力腿平台相关研究的重要组成部分,拟静力分析又是动力分析的基础,它可以为平台的结构设计和优化提供重要参数。拟静力方法将复杂的动力问题简化,因此本文使用拟静力分析的方法,对海上漂浮式风力机在极限海况下外界环境载荷进行静力简化,采用有限元软件 ANSYS 分析极端海况下平台结构应力,以判断结构设计的合理性,同时为漂浮式风力机 TLP 平台结构设计和优化提供一定参考。

在海洋工程设计中,使用寿命为 20 年的结构物遭遇百年一遇极端海况的概率为 18%,这说明在 OWT 设计时,必须考虑极端海况下平台的安全性问题[10]。表 1 为我国南海百年一遇极端海况下海洋环境参数[11]。

表 1　中国南海百年一遇极端海况下风、浪、流参数

海况	波浪		风速/	流速/
	有义波高/m	跨零周期/s	$(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	$(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$
无台风	7.3	11.1	28.6	0.85
有台风	13.6	15.1	56.3	2.05

2　环境载荷

漂浮式风力机在正常运行过程中,受到的环境载荷主要来自于海风、波浪、海流,此外还有内波、地震和海冰。考虑到极限海况下 TLP 所受到的环境载荷主要来自于风、浪、流,故本文仅考虑这三种环境载荷对平台结构强度的影响。

2.1　风载荷

漂浮式风力机不同于海上石油平台,除了底部平台所受的风载荷外,矗立的风力机塔架及顶部的风力机叶片均要承受更大力和力矩的风载荷。在额定工况下,漂浮式风力机的风轮正常运转时,整个风轮圆盘的面积全部计入风压面积,但在极限工况下,风轮处于顺桨停转的状态,整个风轮上风压面为叶片迎风面积[12],因此风载荷计算公式为:

$$F_i = C_F \cdot C_h \cdot S_i \cdot P_w \tag{1}$$

$$M_i = \sum_{i=1}^{n} (F_i \cdot H_i) \tag{2}$$

总风力为

$$F_w = \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{3}$$

总力矩为

$$M_w = \sum_{i=1}^{n} M_i \tag{4}$$

式(1)、(2)、(3)、(4)中:i 为受风结构序号;n 为受风结构;F_i 为序号为 i 的受风结构上所受到的风力,N;C_F 为受风构件形状的影响系数;C_h 为风压变化的高度系数;S_i 为迎风向上受风结构的投影面积,$\mathrm{m^2}$;P_w 为受风构件的风压,Pa;M_i 为受风结构力矩,N · m;H_i 为在迎风向上受风结构的投影面积形心距水下侧向阻力中心的高度,m;F_w 为风力机受风结构所受的总风力,N;M_w 为风力机受风结构所受的总力矩,N · m。

2.2　波浪载荷

张力腿平台因结构尺寸比(D/L)一般大于0.2,结构物的存在对波动场有显著影响,所以按照大尺度结构物、用绕射理论来计算其波浪力[12]。规则线性波作用下流场中的速度势为:

$$\begin{aligned}\Phi(x,y,z,t) &= \phi(x,y,z)\mathrm{e}^{-i\omega t} \\ &= [\phi_I(x,y,z) + \phi_D((x,y,z)]\mathrm{e}^{-i\omega t}\end{aligned} \tag{5}$$

式中:ϕ_I 为入射波速度势;ϕ_D 为散射波速度势。因为总的速度势 $\Phi(x,y,z,t)$ 在整个波动场内满足拉普拉斯方程和相应边界条件(结构体物面、相应的

海底与海面)，故由式(4)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

$$p = -\rho\frac{\partial\Phi}{\partial t} \tag{6}$$

则作用于结构物上的波浪力和波浪力矩为

$$F = -\iint_s pn\mathrm{d}s \tag{7}$$

$$M = \iint_s -p(r\times n)\mathrm{d}s \tag{8}$$

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

本文TLP平台所在计算海域水深设定为320 m，海流作用在TLP水面下结构的载荷的计算公式为：

$$F_c = \frac{1}{2}C_D\rho_w V^2 A \tag{9}$$

式中：F_c为海流载荷；C_D为曳力系数；ρ_w为海水密度，kg/m^3；V为设计工况下海流流速，m/s；A为平台水面下结构在流速垂直方向上的投影面积，m^2。由于实际海况下波浪和海流之间的相互作用，文章根据绕射理论计算波浪载荷时，水面下结构物所受的海流载荷根据公式(9)计算得出，然后与波浪载荷的矢量相加。

2.4 环境荷载动力特性及静力简化

风荷载本质上属于动态的，但一些受风结构对它的反应几乎是静态形式。极限海况下，风力机叶轮为顺桨停转状态，下部支撑结构受其的影响可通过等效力替代实现，即将作用于风轮和机舱的风荷载简化为作用于支撑结构顶端的约束力。同时，塔架结构所受的极限风载荷也可以用等效静力的方法。作用于海洋结构上的波浪荷载在性质上属于动态的，但对于目前所遇到的大多数设计水深，这些荷载完全可以用它的等效静力来表示[13]。

本文利用ANSYS水动力学软件Hydrodynamic模块求解极限海况下其时间历程内TLP所受的波浪载荷，利用NREL开源软件FAST计算出时间历程内风载荷，海流载荷根据式(9)计算。根据以上方法将海上风力机TLP所受到的各种类型动力荷载转化为“拟静力”荷载，忽略此时平台底部的惯性载荷及系泊力。

3 结构静力强度分析

3.1 有限元模型

对TLP进行静力分析时，需要两个计算模型，分别为整机的水动力分析模型和平台结构静力学分析模型。前者用来提供结构强度分析的波浪载荷，后者用来分析平台的结构强度。为了能够方便加载和确保平台结构强度分析的准确性，在建模过程中，必须充分考虑平台结构具体参数。

基于NREL 5MW海上风力机的具体设计参数，以此建立研究海上风力机的基础模型。海上风力机及张力腿平台的主要设计参数分别如表2、3所示。漂浮式平台材料一般选用高强度钢，在满足设计要求和使用性能的基础上，选用钢材为EQ36，其具体材料性能参数如表4所示。

表2 5MW海上风力机主要设计参数

风力机参数	数值	风力机参数	数值	风力机参数	数值
传动系统	多级齿轮箱	切入风速/($m\cdot s^{-1}$)	3.0	风轮质量/kg	1.1×10^5
叶片配置	3	额定风速/($m\cdot s^{-1}$)	11.4	机舱质量/kg	2.4×10^5
风轮直径/m	126	切出风速/($m\cdot s^{-1}$)	25.0	塔架质量/kg	3.4746×10^5
轮毂中心高度/m	90	额定转速/($r\cdot min^{-1}$)	12.1	质心位置(x,y,z)/m	(−0.2,0,64)

表3 5MW海上风力机张力腿平台的主要设计参数

平台参数	取材及数值	平台参数	数值	平台参数	数值
材料	EQ36	重心高度/m	−10.109	张伸腿高度(最外层)/m	5
屈服强度/Pa	3.55×10^8	立柱浮体直径/m	10	延伸腿高度(立柱处)/m	11
设计吃水/m	35	立柱浮体高度/m	40	横摇转动惯量/($kg\cdot m^{-2}$)	9.9432×10^8
平台质量/kg	4.403×10^6	延伸腿宽度/m	4	纵摇转动惯量/($kg\cdot m^{-2}$)	9.9432×10^8
排水量/kg	5.974×10^6	延伸腿总长度/m	25	艏摇转动惯量/($kg\cdot m^{-2}$)	9.2949×10^8

表 4　EQ36 材料性能参数

弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	密度 ρ/($kg \cdot m^{-3}$)	屈服强度 σ_s/Pa
2.06×10^{11}	0.32	7.8×10^{3}	3.55×10^{8}

TLP 平台主体部分是由一个竖直的圆柱体立柱结构和四根矩形截面的水平浮筒结构组成。圆柱体立柱位于中央,底端连接了两两对称的四根矩形截面的浮筒,浮筒结构向外延伸,构成悬臂梁结构,中央立柱和下端浮筒均采用水密隔板分隔成相互独立的舱室,以提高平台结构的抗沉性。中央立柱内壁焊接 16 根纵向加强筋,以提高立柱薄壁壳体的载荷承受能力。TLP 整机及平台剖面结构分别如图 1、图 2 所示。以平台重心为坐标原点,建立三维坐标系,则平台沿 x、y、z 轴有 3 个平移的自由度,分别为纵荡、横荡和垂荡,平台绕 x、y、z 轴有 3 个转动的自由度,分别为横摇、纵摇和艏摇。平台的 6 个自由度如图 3 所示。

图 1　TLP 整机结构

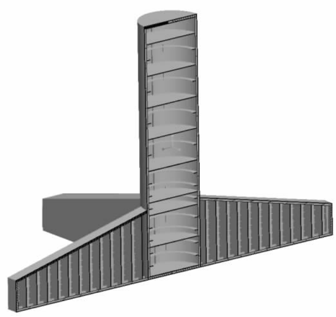


图 2　TLP 剖面结构

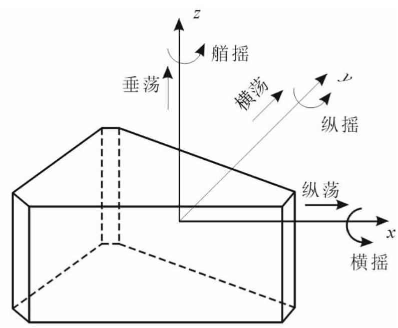


图 3　TLP 6 自由度

TLP 作为一种既无人也无危险化学品存在的浮式结构,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(American Bureau of Shipping,ABS)规范设计平台是相当保守的。综合考虑下,依据 ABS《浮式生产系统建造和入级指南》安全系数规定,平台结构的安全系数选定为 1.25[14]。ABS 规范规定的许用应力校核准则为

$$F = F_y/F_s \tag{10}$$

式中:F 为许用应力,Pa;F_y 为屈服强度,Pa;F_s 为安全系数。

对建立的 TLP 三维模型进行网格划分,其中在立柱的顶部与底部为四面体网格,立柱的中间部分为六面体网格,延伸腿及部分肋板结构网格为六面体等结构网格。整个平台共有 3 359 247 个节点和 1 188 380 个单元网格。

3.2　结构静力强度分析

平台结构必须保证在工作过程中有足够的强度抵御极端载荷,因此,必须要对 TLP 结构进行强度分析,计算其在极端海况下结构应力状况。

3.2.1　*结构静力学方程*　本文采用单立柱结构对称张力腿平台,假设海上漂浮式风力机张力腿平台材料是连续、均匀且各项同性的,忽略随时间变化的载荷、惯性力和阻尼,其结构静力学方程为:

$$Ku = F \tag{11}$$

式中:K 为刚度矩阵;u 为位移矢量;F 为静力载荷,N。

3.2.2　*“拟静力”算法*　“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[15],其过程如图 4 所示。

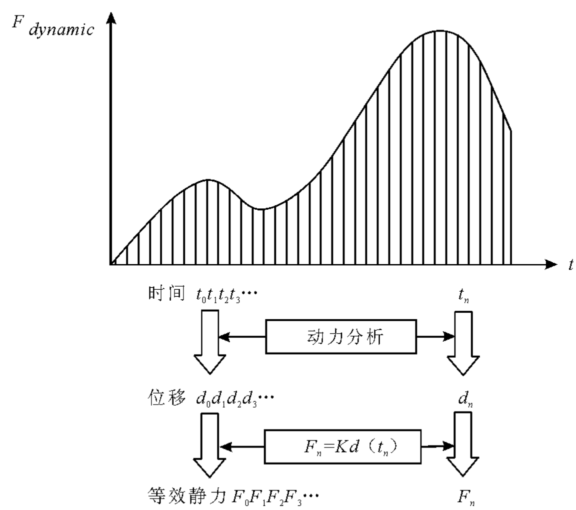


图 4　“拟静力”算法示意图

按照结构动力学理论,多自由度系统结构运动的微分方程为:

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = f(t) \tag{12}$$

式中:M 为质量矩阵;C 为阻尼矩阵;K 为刚度矩阵;d 为时间 t 时结构位移向量;f 为动载荷,N。

静力载荷作用下，多自由度系统结构所受到的外力与其位移向量之间满足如下方程：

$$F_{static} = KX \tag{13}$$

式中：F_{static} 为静力载荷，N；X 为静力作用下结构的位移向量。根据结构在产生相同的位移场时产生相同的应力分布的原理，可用等效静力载荷代替结构在受到动载荷时任一时刻时所受到的外力，而不改变结构此时的应力分布，如下方程所示：

$$F = Kd(t_a) = f(t_a) - Md(t_a) - C_d(t_a) \tag{14}$$

式中：F 为时间 t_a 时结构所受的外力；$f(t_a)$ 为时间 t_a 时结构所受的动载荷；$d(t_a)$ 为时间 t_a 时结构位移向量。

3.2.3 等效静力计算 拟静力方法是将复杂的动力问题简化，因此要计算平台结构应力，需首先对海上漂浮式风力机在极限海况下外界环境载荷进行静力简化。由开源软件 FAST 计算出时间历程内风载荷，由水动力学软件 Hydrodynamic 计算出时间历程内 TLP 的波浪载荷。海流载荷由式(9)计算，设定 TLP 平台所在海域水深为 320 m，故曳力系数 C_D 取 1.2[16]，忽略 TLP 吃水深度上的海流速度变化，由 TLP 平台柱体与张力腿的最大投影面积可求得作用于平台柱体与底部张力腿上的海流载荷。

由于在极端海况下风力机处于顺桨状态，且作用于风力机及 TLP 在各自由度上运动响应不同，导致各种类型的动力荷载在各自由度上的数量级变化较大。

拟静力简化时，抓主要因素，忽略次要因素，数量级较大的载荷是造成平台结构产生应力的主要因素，而数量级较小的载荷对平台结构的影响几乎可以忽略不计。因此，考虑动力荷载在运动响应较大自由度上的载荷变化，根据“拟静力”载荷算法，将计算出的时间历程内的动载荷转化为“拟静力”载荷，并按照国家设计规范中的《建筑结构载荷规定》的有关载荷的规定[17]，得到风、波、流 3 种载荷的等效静力简化结果如表 5 所示。

3.2.4 结果与分析 使用 ANSYS 结构静力学模块对 TLP 进行结构静力学分析，风、波、流 3 种环境载荷施加平台的力均沿同一方向。分别考察风、波、流沿如下表所示 3 个方向时平台的受力状况，平台在 3 种情况下的变形及应力如表 6 所示。风、波、流沿 x 轴正向作用时平台的变形及应力云图如图 5 所示，其中图 5(e)、(f)为局部放大图。

表 5 等效静力载荷

荷载	风载荷		波浪载荷		海流载荷	
参数	总风力/N	总力矩/N·m	波浪力/N	波浪力矩/N·m	海流力/N	
数值	1.24×10^6	3.01×10^6	2.031×10^6	6.409×10^6	7.29×10^5	1.034×10^6
方向	轮毂中心 x 轴负向	逆时针方向	平台立柱 x 轴负向	逆时针方向	平台立柱 x 轴负向	平台立柱 x 轴负向
作用位置	轮毂中心点	轮毂中心点 y 轴	平台立柱 x 轴正向一侧的有义波高范围内	平台立柱与水面中心点 y 轴	平台柱体水面以下部分 x 轴正向一侧	底部张力腿表面

表 6 张力腿平台变形及应力

项目	x 轴正向		x 轴正向夹角 22.5°		x 轴正向夹角 45°	
	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	347.6	立柱底端	429.8	立柱底端	362.4	立柱底端
最大切应力/MPa	191.5	立柱底端	223.0	立柱底端	199.7	立柱底端
最大主应力/MPa	96.16	立柱底端	97.50	立柱底端	94.42	立柱底端
最大变形/mm	8.146	立柱顶端	8.052	立柱顶端	8.062	立柱顶端

由图 5 及表 6 可知：

(1)由图 5(a)可知，立柱底端隔板中央位置变形量较大。此外，立柱与延伸腿交接面以上，随高度增加，平台变形量增大；

(2)由图 5(b)、(e)、(f)可知，立柱顶端、立柱底端与延伸腿连接处均发生应力集中，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，立柱与延伸腿连接处应力集中主要因为此处为结构结合区域，载荷较为集中；

(3)立柱底部隔板与纵向加强筋连接处位置应

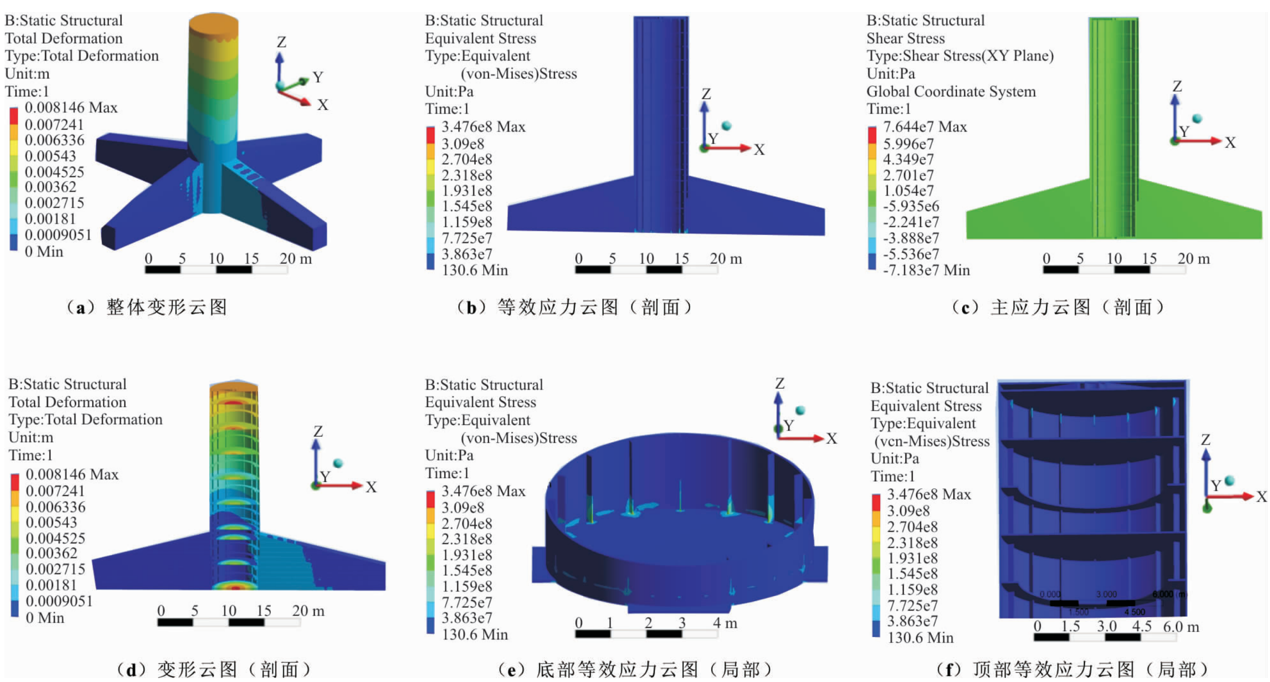
力集中最为明显,此处的等效应力在 3 种情况下的最大值依次为 347.6 MPa、429.8 MPa、362.4 MPa,接近或大于平台材料的屈服强度;

(4)不同方向风、浪、流对平台应力大小也有影响。其中沿 x 轴正向夹角 22.5°方向作用于平台时,平台产生的应力最大,45°方向次之,x 轴正向最小。因此在安装平台时,应考虑当地具体环境因素。

由表 4 和式(10)可知,平台选用钢材的许用应力为 284MPa。结合表 6 与图 5(b)、(e)、(f)并由第三、四强度理论可知,除立柱底部区域纵向加强筋应力集中位置外,其余结构的等效应力均低于 284 MPa。因此应对平台应力集中区域的结构进行改进,以改善外界载荷作用下的平台的应力分布。

4　结构改进方案及验证

由于 TLP 平台的外部尺寸较大,受到的外界载荷较为复杂,因此在进行初步结构设计时,很难保证外界载荷作用下平台各部分结构受力均匀。在上述 TLP 的结构建模中,虽然按照文献保证了平台外部尺寸及相应的运动响应,但平台内部出现了严重应力集中区域,这些区域的载荷甚至超出了材料的许用应力,如上述分析的 3 种情况下,立柱底部应力集中区域的等效应力最大值依次为 347.6、429.8、362.4 MPa。因此对平台的后期改进及优化是必要且必须的。因此本文通过在局部应力集中区域添加支撑板的方法,对 TLP 平台进行了初步改进,并对改进后的平台进行了相同工况下的拟静力分析,以验证改进后的效果。由图 5(e)、(f)可知,平台底部应力集中区域主要集中在平台的顶部和顶部,故对平台的底部与顶部应力集中区域添加支撑板,以改善其的应力分部状况。其中,TLP 底部改进后的结构模型及风、波、流沿 x 轴正向作用时的等效应力云图如图 6 所示。



(a) 整体变形云图　(b) 等效应力云图(剖面)　(c) 主应力云图(剖面)

(d) 变形云图(剖面)　(e) 底部等效应力云图(局部)　(f) 顶部等效应力云图(局部)

图 5　TLP 变形及应力云图

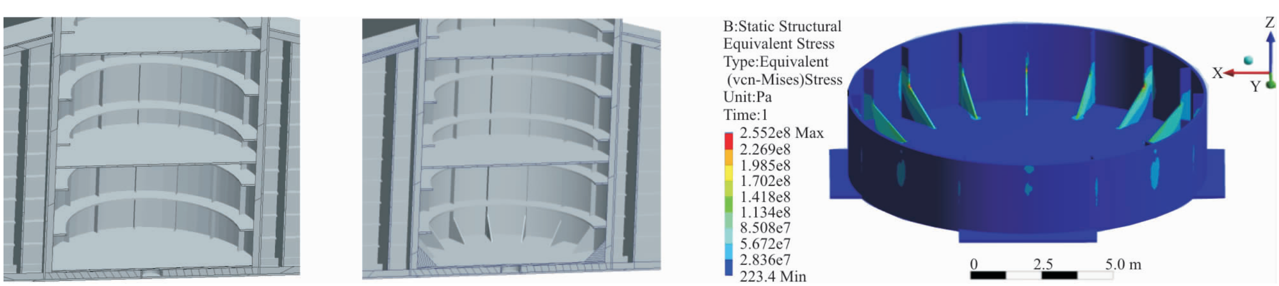


图 6　TLP 底部的结构及改进后底部等效应力云图(剖面)

由图5(e)和图6(c)可知,改进后TLP应力集中区域较改进前明显减小,并且平台的最大等效应力值从354 Mpa减小至255 Mpa,小于钢材的许用应力。这从理论上说明,对平台的应力集中区域添加支撑板,可以明显改善平台的受力状况,改进平台初步设计的不足,减小TLP应力集中所带来的危害。

5 结 论

研究表明,张力腿浮式风力机平台作为浮式平台的一种,其设计不同于一般的海洋结构物。本文通过对TLP在极端海况下风、浪、流3种载荷作用下的拟静力分析及结构改进,得出如下结论:

(1)立柱底端隔板中央位置变形量较大,立柱与延伸腿交接面以上部分,随高度增加,平台变形增大。应考虑结构变形量较大的区域对平台动态特性的影响。

(2)平台立柱顶部和底部发生应力集中,且平台立柱底部应力集中的区域及最大等效应力值均高于平台立柱顶部。根据ABS安全系数规定以及第三、四强度理论可知,平台立柱底部为平台危险区域。

(3)TLP在实际设计时,应对平台结构进行改进及优化。在平台结构的应力集中区域添加支撑板是一种有效措施,可减小平台结构的应力集中区域所受的最大应力值,改善平台结构的受力状况。

参考文献:

[1] 张子瑞. 海上风电"取经"丹麦[N]. 中国能源报,2015-07-06.

[2] 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,2010,29(4):122-126.

[3] 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.

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

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

[6] 葛 沛. 海上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,2012.

[7] 孟 珣,侯金林,于春洁,等. 海上风力发电单立柱支撑结构拟静力分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(2):89-94.

[8] 黄 华. 海上风力机单桩基础结构静动力分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[9] 胡志敏,董艳秋,杨冠声,等. 张力腿平台拟静态分析[J]. 中国海洋平台,2001,16(4):21-25.

[10] 赵 静. 海上风力机流载荷计算[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.

[11]《海洋石油工程设计指南》编委会. 海上石油工程FPSO与单点系泊系统设计[M]. 北京:石油工业出版社,2009.

[12] 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.

[13] 国家发展和改革委员会. 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 SY/T10030-2004[S]. 北京:2004.

[14]《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.

[15] 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(19-20):2015-2122.

[16] 李 春,叶 舟,高 伟,等. 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.

[17] 中华人民共和国建设部. 建筑结构载荷规范 GB50009-2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.