

## 多功能海洋平台整体结构强度有限元分析

刘 晗, 蒙古彬\*

北部湾大学 广西壮族自治区钦州

**【摘要】**本文结合自升式生产储油平台引入水下储油概念, 提出了一种可移动组装式水下储油平台概念, 成为集钻、采、储、输于一体的边际油田多功能平台, 适用开采水深 200 米左右的海上边际油田, 以解决传统自升式生产储油装置储油量有限、成本高等问题。针对新型的可移动组装式新型海洋平台, 利用有限元软件 ANSYS 对其进行整体结构强度分析, 并对工况类型、载荷施加计算等问题进行相应说明。

**【关键词】**多功能平台; 生产储油; 环境载荷; 有限元分析

**【收稿日期】**2023 年 11 月 17 日 **【出刊日期】**2023 年 12 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20230030

### Finite element analysis of overall structural strength of multifunctional offshore platform

Han Liu, Zhanbin Meng\*

Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi Zhuang Autonomous Region

**【Abstract】**In this paper, the concept of underwater oil storage is introduced into the jack-up production and storage platform, and a concept of mobile assembled underwater oil storage platform is proposed. It becomes a multifunctional platform of marginal oil field integrating drilling, production, storage and transport, which is suitable for the marginal oil field with a depth of about 200 meters, so as to solve the problems of limited oil storage and high cost of traditional jack-up production and storage device. Aiming at the new movable assembly type offshore platform, the strength analysis of its whole structure is carried out by using the finite element software ANSYS, and the problems of working condition type and load calculation are explained accordingly.

**【Keywords】**Multi-functional platform; Production and storage of oil; Environmental load; Finite element analysis

#### 引言

随着我国经济和技术的快速发展, 对石油能源的需求量也迅速增加, 海洋油气资源的勘探开发受到高度重视, 提高海洋油气资源的产量, 海洋油气的开发已经成为我国能源可持续发展的战略重点<sup>[1]</sup>, 近年来, 这一领域的发展速度显著提升了许多。

目前, CNOOC、Sinopec Group、CNPC 三大集团公司从事海洋油气勘探开发, 在我国多数海域及部分海外区块的勘探开发过程中, 发现了大量的边际断块油田, 其原油储量巨大。与常规油田相比, 边际油田具有规模小、储量小、分布零散且范围广的特点, 油田生产期短, 储层岩性类型多, 开发风险高。针对这些边际断块油气田, 其开发过程中由于受经

济评价的不确定性、环境条件、装备技术水平等因素的制约, 许多边际断块油气田没有得到有效开发, 急需研究相应的技术方案和适用于边际断块油气田的新型平台。

针对于海上油气的开发, 通常采用了以固定式导管架平台、顺应塔 (CT)、FPSO 为基础、利用水下生产设施开发等并存的方式, 如图 1~4 所示。然而, 对于那些位于深度不超过 300 米的水域中且需要不同类型设备支持的石油开采项目来说, 采用固定式的钻井平台与卫星系统是最佳选择。这种方式虽然能提供丰富的开发资源, 但同时也伴随着较高的成本投入。顺应塔平台造价相对高, 无法重复利用, 世界上应用很少, 在其适应水深范围内多为浮式

作者简介: 刘晗 (1997-) 男, 汉, 山东滨州, 研究方向: 海洋工程装备与技术;

\*通讯作者: 蒙古彬 (1979-) 男, 汉, 天津蓟县, 博士, 教授级高工, 研究方向: 船舶与海洋结构物设计技术。

装置取代。目前通用的 FPSO、水下生产装置等更因一次性投资成本的因素, 对一些边际油田开发的经济评价很难过关。在国内, 针对边际断块油田的开发, 主要是依靠移动式采油平台, 传统自升式生产平台最大工作水深仅为 168 米, 世界上仅此几座, 大多数的自升式钻井平台适用 120 米水深以内, 对于水深 200m 海上边际油田, 目前还缺少有效的开发手段和模式, 由此大多数边际断块油田尚未得到有效的开发, 所以亟需开发一种适合于 200 米水深的边际断块油田开发的新型多功能开发装备。

### 1 可移动组装式水下储油平台有限元模型

#### 1.1 平台简介

可移动组装式水下储油平台是一种新型的海洋平台设备, 该平台由上部自升式生产平台主体、水下储油支撑装置、圆柱形桩腿、升降系统及生活楼组成。水下储油及支撑装置经拖航至指定作业区域后, 通过自沉浮技术进行坐底后, 与上部的自升式生产平台通过桩靴承载箱对接并固定后形成一个整体, 成为集钻、采、储、输于一体的边际油田多功能平台。

平台的侧视图见图 5。

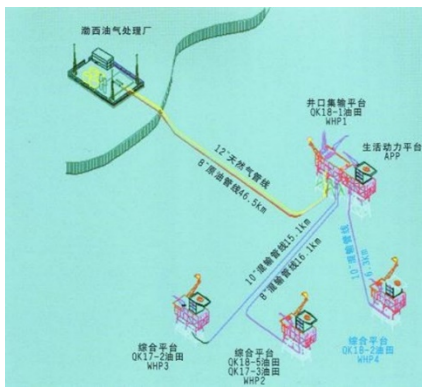


图 1 以固定式导管架平台为基础

目标平台正常作业和风暴自存条件下的环境因素如表 1 所示。

#### 1.2 平台主尺度及结构参数

该平台上部为四桩腿自升式生产平台, 下部为水下储油沉垫支撑装置, 平台主尺度如表 2 所示。

#### 1.3 有限元模型

根据平台基本结构, 建立整体的有限元模型。应用有限元软件 ANSYS, 依据结构的实际受力状态, 结合结构构件的具体尺寸大小, 确定单元类型<sup>[2]</sup>。对于平台的主要部分(如外部护板、各种隔舱、压载水舱外侧、固桩架、桩靴承载箱), 使用 Shell181 壳体单元进行建模; 而对一些较小的构件, 比如普通的横梁、甲板上的纵向肋骨等, 使用 Beam188 单元进行建模; 位于水面以上的桩腿与桩靴承载箱内的桩腿, 使用 PIPE16 单元建模; 位于深水的桩腿和支撑桁架, 使用 PIPE59 单元建模。为了提高计算的精确度, 在划分网格时尽可能地让其呈现出矩形的形态。多功能海洋平台结构材料均采用 DH36、EH36 级钢材, 屈服强度 355MPa, 安全系数取为 1.25, 许用应力为 284MPa。有限元模型图如图 6 所示。



图 2 以顺应塔 (CT) 为基础



图 3 以 FPSO 为基础

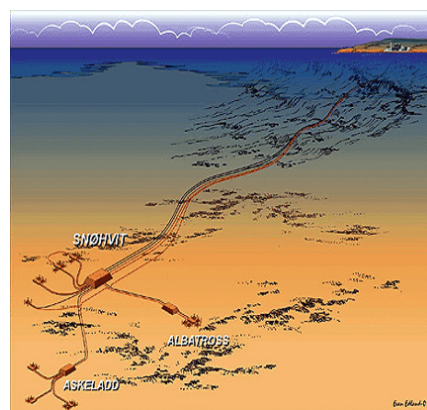


图 4 利用水下生产设施开发

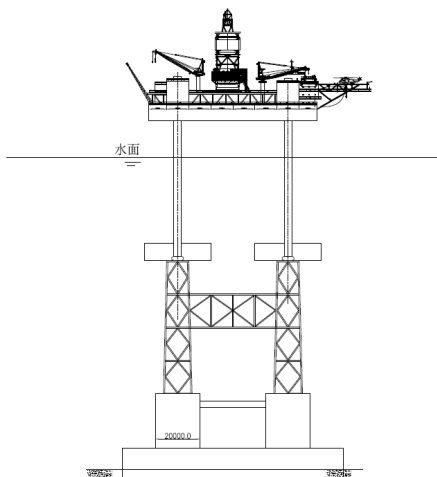


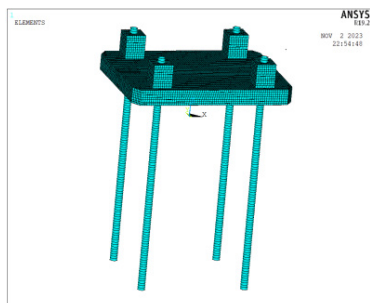
图 5 平台侧视图

表 1 正常作业和风暴自存条件下的环境参数

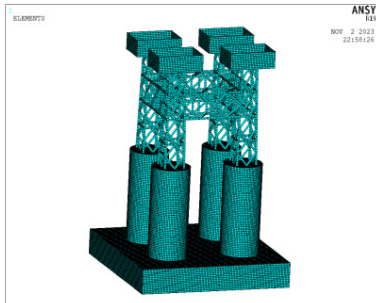
工况	水深	水面流速	中层流速	底层流速	最大波高	周期	风速
正常作业	200m	1.08m/s	0.78 m/s	0.56 m/s	23 m	14.8s	36 m/s
风暴自存	200m	1.08 m/s	0.78 m/s	0.56 m/s	29 m	16.6s	51.5 m/s

表 2 平台主尺度

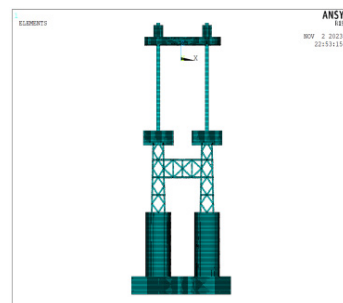
名称	参数值
平台主体型长	76m
平台主体型宽	54m
平台主体型深	6.5m
固桩架	9×8.5×10m
桩腿数量	4 根
桩腿直径	3.5m
桩腿长度	100m
桩腿横向间距	40.5m
桩腿纵向间距	49m
桩靴承载箱	30×20×10m
下部圆柱型储水舱	φ25×55m
储油沉垫	100×100×15m



(a) 上部自升式生产平台



(b) 水下储油支撑装置



(c) 多功能海洋平台

图 6 平台结构有限元模型图

### 2 平台载荷

平台在工作过程中承受的载荷主要有固定载荷、可变载荷及环境载荷<sup>[3]</sup>。各种载荷的施加方式：液舱载荷以面载荷形态在相应区域内施加，设备重量和上层建筑重量根据计算书进行施加，并将其作用于相应位置。悬臂梁结构载荷则是基于悬臂梁重量得出的支反力，然后被添加到甲板区域中。

一般来说，平台计算时会考虑以下坐标系来描述环境载荷，坐标系的原点位于平台中心线的船尾端，x轴正方向指向船艏，y轴正方向指向船的左侧。环境荷载角度是指其与x轴正方向的入射角度。在图7中显示了对平台建模时所采用的坐标系。在本分析中，我们考虑了环境荷载分别为0°、30°、60°、90°、120°、150°和180°时的方向。

在对海洋工程结构的波浪载荷计算中，通常根据海洋工程结构的尺度大小来决定计算其波浪载荷的方法<sup>[4]</sup>。本文研究平台在正常作业与风暴自存工况下的强度，桩腿受波浪载荷作用，桩腿为小尺寸构件，采用莫里森公式计算桩腿受到的波浪载荷。

对于可移动组装式水下储油平台主体舷侧和固桩架部位，风载荷会直接施加于实际作用表面位置。像居住区和生活设施这样的高层建筑部分，模型并未将其完全构建出来，这些结构的风载荷主要通过其在甲板面上的相应位置施加相应的水平作用力，并将实际作用高度的力矩转化为对甲板面的力矩进行施加<sup>[5]</sup>。

利用 PIPE59 单元构建了水下支撑桁架及水中的桩腿模型，采用的是 Stokes 五阶波理论方法，实现对受到波流力的影响情况进行自动化计算。该单元是 ANSYS 中专门用于模拟浸没在水中并受波浪、海流力作用的管状结构<sup>[6]</sup>。在运行过程中，需输入如外径、壁厚、CD、CM 等实际参数，并对这些数据

进行设定。软件会依据选择的波浪理论来执行运算，并在对应的节点的位置自动施加波浪力。

### 3 整体结构强度计算分析

#### 3.1 静力分析

静力分析是指用来分析结构在给定静力载荷作用下的响应，不考虑阻尼和惯性力的影响。对于深水自升式平台的静力分析主要是考虑平台自身重力及最大环境荷载状态下的分析。结合 ANSYS 程序的计算结果，以下是平台在作业和自存工况的不同入射角度下，得到的最大波流力和最大相位角，数据如表3所示。

通过对表3的数据分析，可以发现在外荷载达到90°时，无论是作业状态还是自存状态下，平台都呈现出最危险程度。计算结果具体数据详见表4，当平台处在正常作业工况下，其最大的应力值为121.738MPa；平台风暴自存工况下最大应力为137.557 MPa。在这两种工况下，应力最大值皆发生在桩腿和上部平台主体相连的部分，这一区域包含了升降系统和其它部件，这一区域承担来自平台自身的重量及各种设备的竖向载荷，并抵御由风浪流等环境产生的水平载荷。图8~13所示为平台作业和自存工况下的应力分布情况。

#### 3.2 模态分析

模态分析是研究结构动力特性一种方法，模态是指机械结构的固有振动特性，每一个模态都有特定的固有频率、阻尼比和模态振型，模态分析也是进行瞬态动力学分析的出发点。ANSYS 软件进行的模态分析都是线性分析，本文采用 Block Lanczos 法提取平台的前6阶振动特性，平台前6阶的频率如表5所示。计算得到多功能平台前6阶振型结果如图12所示。由图14可知，1~4阶沿X、Y方向振动为主，5~6阶为绕Z轴转动为主，偏移量比较小。

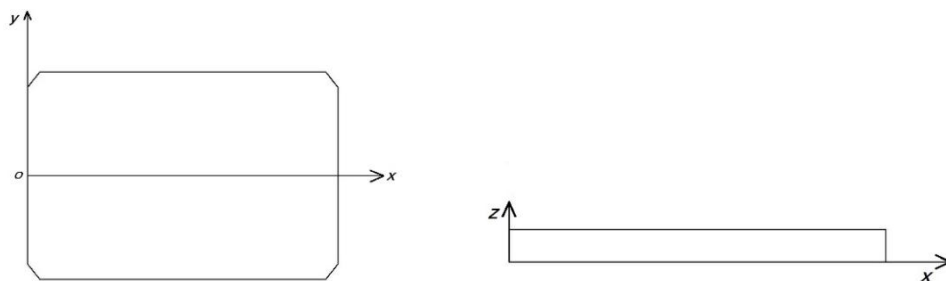


图7 计算坐标系



表 3 不同工况下最大波流力、相位角

工况	作业工况						自存工况							
波高	23m						29m							
周期	14.8s						16.6s							
入射角/度	0	30	60	90	120	150	180	0	30	60	90	120	150	180
最大相位角/度	78	75	76	76	77	78	81	62	61	61	61	62	63	64
最大波流力/KN	6671	6699	6766	6799	6766	6698	6671	8194	8231	8300	8332	8300	8231	8194

表 4 计算结果

工况	外载荷方向	平台整体最大应力 (MPa)	上部平台-桩腿最大应力 (MPa)	平台/桩腿-结构许用应力 (MPa)
正常作业	90°	121.738	121.738	284
风暴自存	90°	137.557	137.557	284

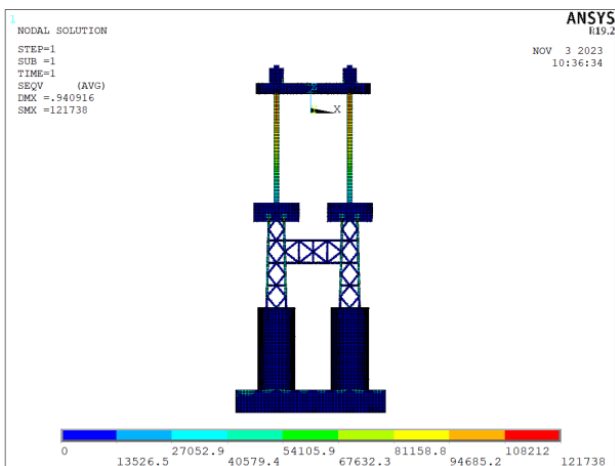


图 8 平台整体应力分布 (作业 90°)

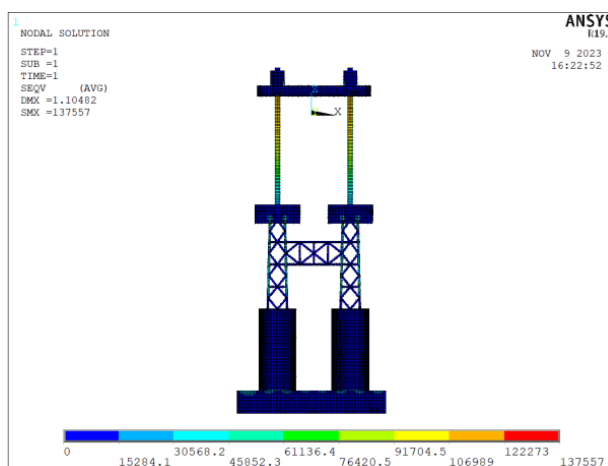


图 9 平台整体应力分布 (自存 90°)

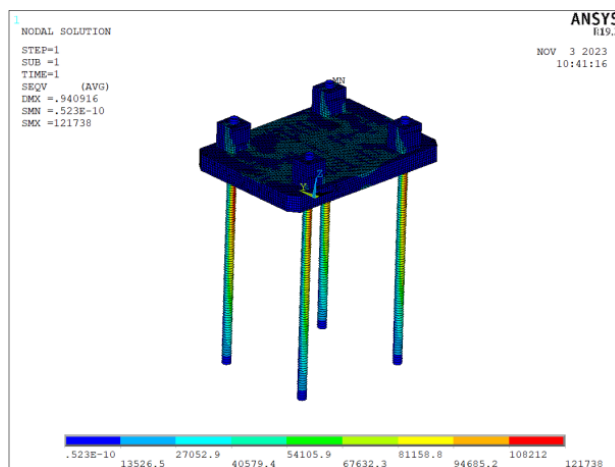


图 10 上部平台应力分布 (作业 90°)

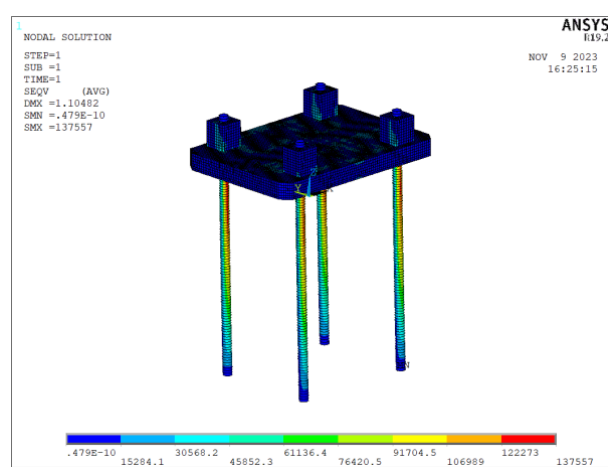


图 11 上部平台应力分布 (自存 90°)

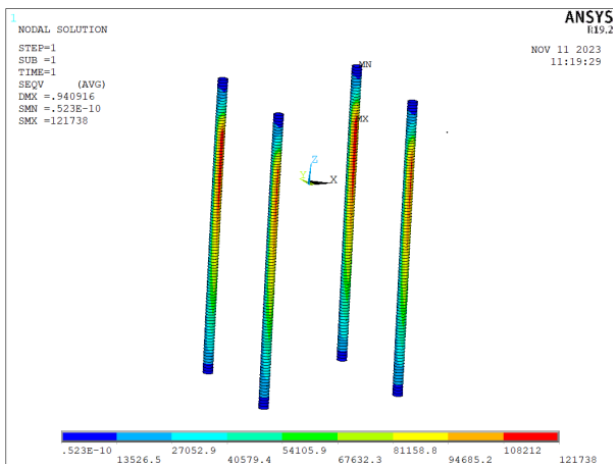


图 12 桩腿应力分布 (作业 90°)

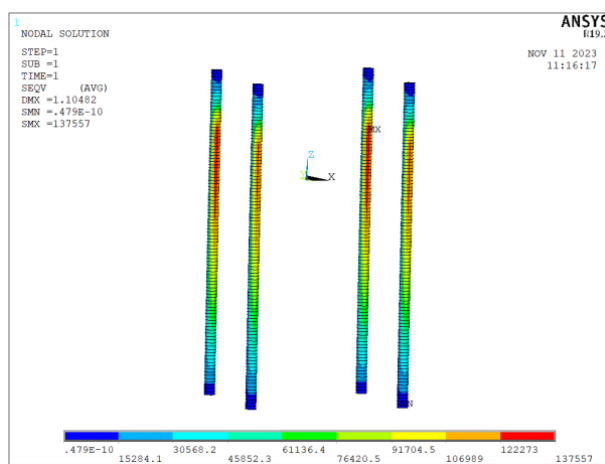
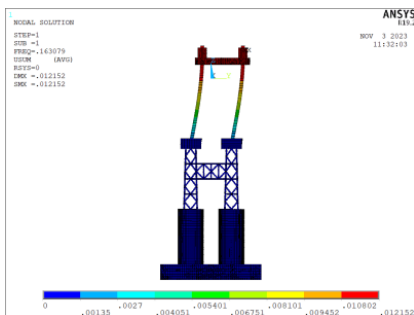


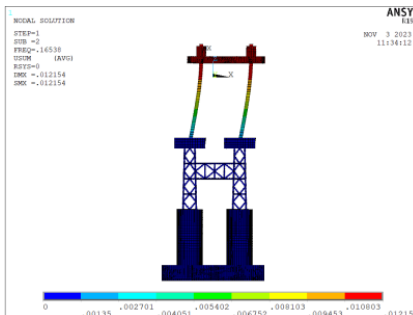
图 13 桩腿应力分布 (自存 90°)

表 5 计算结果

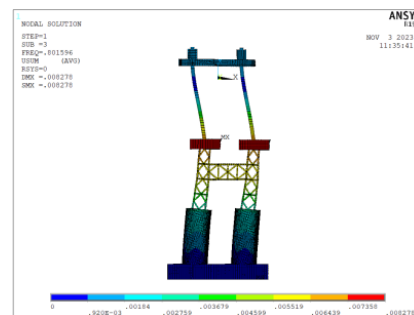
频率阶数	频率值 (Hz)
1	0.16308
2	0.16538
3	0.80160
4	0.80228
5	1.0673
6	1.2952



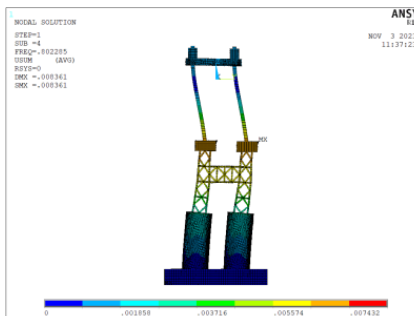
(a) 一阶振型



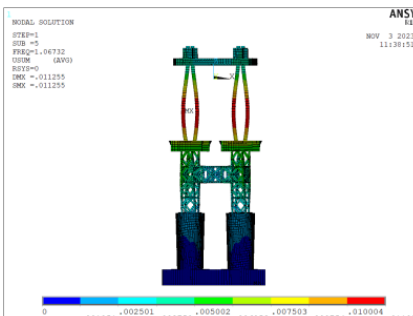
(b) 二阶振型



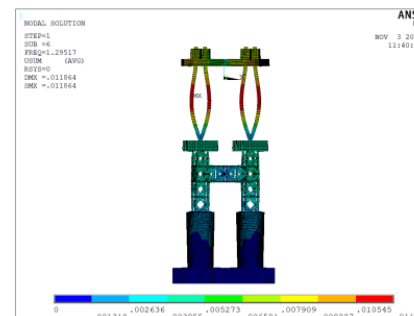
(c) 三阶振型



(d) 四阶振型



(e) 五阶振型



(f) 六阶振型

图 14 平台结构前 6 阶模态分析位移图

### 3.3 动力响应分析

瞬态动力学分析 (Transient Structural) 是用于分析载荷随时间变化的结构的动力学响应的方法。用于确定结构在受到稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合下随时间变化的位移、应变和应力。为了获取平台真实速度和加速度响应, 需要动力时程分析来进行全面评估, 本节使用瞬态动力学方法进行分析。在对海洋构造物进行动力学分析时, 瑞利阻尼是常见的因素, 也就是说, 我们将阻尼矩阵定义为

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为质量阻尼系数和刚度阻尼系数。阻尼系数  $\alpha$  和  $\beta$  大小与振型阻尼比和固有频率有关<sup>[7]</sup>, 可以通过计算平台结构的前两个固有频率来确定。

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

式中,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  是平台结构的前两节固有频率, 这些频率是通过平台结构进行模态分析来获取的。 $\xi_1$  和  $\xi_2$  表示相应的阻尼比, 通常选取在 2%~5% 之间。

利用 ANSYS 瞬态分析方法, 分析结构的动力响应。以 100s 为一个周期, 时间间隔为 0.1s, 以波流角度为 90° 为例, 正常作业工况与风暴自存工况下, 选取整体位移、应力最大处进行相应分析, 得到结构响应如图 15~16 所示。

根据图 15~16 多功能平台结构动力响应, 可以得出正常作业工况下载荷作用平台最大位移为 1.58 m, 最大应力为 200.32MPa, 最大加速度为 0.907342 m/s<sup>2</sup>。风暴自存工况下载荷作用平台最大位移为 1.86 m, 最大应力为 212.51MPa, 最大加速度为 0.526944 m/s<sup>2</sup>。

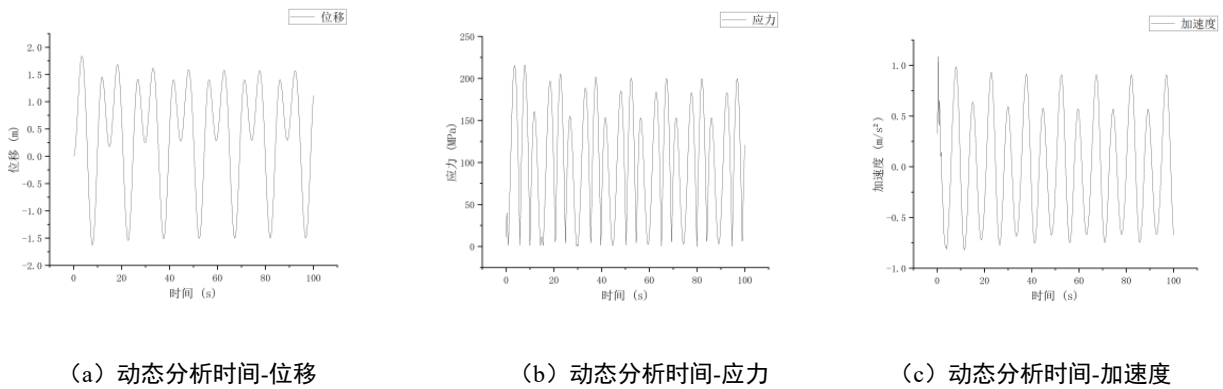


图 15 正常作业工况下平台动力响应分析

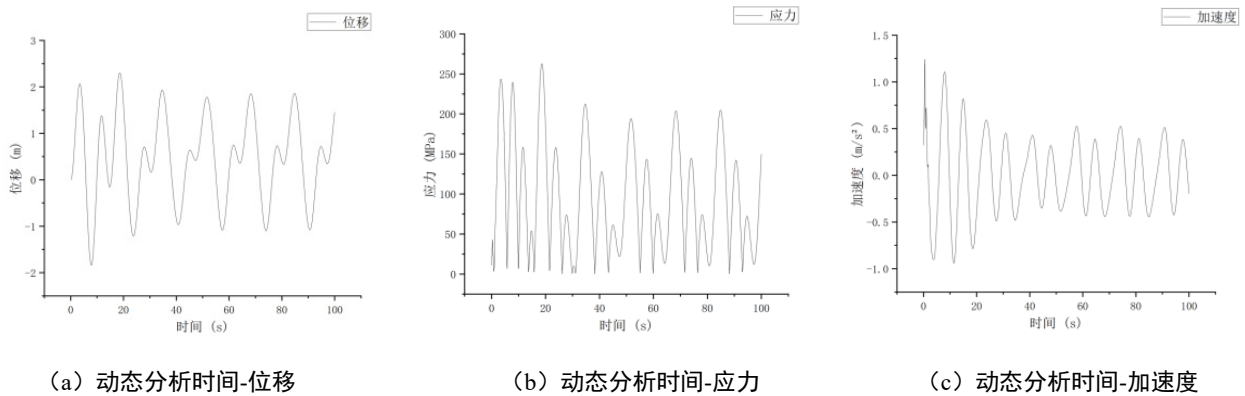


图 16 风暴自存工况下平台动力响应分析

#### 4 结论

根据规范对多功能海洋平台的整体结构强度评估方法进行了研究探讨, 得到以下结论:

(1) 根据平台的 CAD 结构图, 使用有限元软件 ANSYS 构建了具有多功能海上平台的有限元模型, 并向其施加了风、波浪及海流的环境载荷。运用静力分析、模态分析和瞬间动态动力学分析的方法对多功能海上平台在正常作业及风暴自存工况下进行整体结构强度分析。

(2) 为了确保计算结果与实际情况相符, 本文研究如何计算环境载荷, 包括风、浪、流等。保证环境载荷的作用与实际情况相符。

(3) 完成了对可移动组装式水下储油平台整体有限元模型的屈服强度校核, 并满足所有所需的强度标准要求。

#### 参考文献

- [1] 张用德,袁学强.我国海洋钻井平台发展现状和趋势[J].石油矿场机械.2008,37(9)14-17.
- [2] 章毅.某型自升式作业平台结构性能研究[D].华中科技大学,2019.
- [3] 吴成利.坐底式海洋平台整体结构强度有限元分析[C].

中国科学技术协会,天津市人民政府.第十三届中国科协年会第13分会场-海洋工程装备发展论坛论文集,2011:5.

- [4] 竺艳蓉.海洋工程波浪力学[M].天津:天津大学出版社,1991.
- [5] 蒙古彬.自升式海洋平台整体结构强度有限元分析[C].渤海湾油气勘探开发工程技术论文集(第十三集).中国石油大学出版社,2008:6.
- [6] 李茜,杨树耕.采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析.中国海洋平台.2003.
- [7] 杨冬平,陈国明.海洋平台结构连续倒塌非线性动力响应分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010,42(2): 267-271.

**版权声明:** ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**