

文章编号:1001-4500(2007)06-0029-05

# 基于 ABAQUS/AQUA 的深水导管架平台动力分析研究

杨江辉<sup>1</sup>, 张 宏<sup>2</sup>, 刘锦昆<sup>3</sup>, 何 锋<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学, 北京 102200;

2. 胜利油田胜利工程设计咨询有限责任公司, 东营 257000)

**摘 要:**运用 ABAQUS/AQUA 中的波流耦合算法模拟分析了较大水深海洋导管架平台在随机波浪作用下的应力变化及振动响应过程, 包括海流载荷引起的拖拽力作用和附近水质量惯性力影响。通过大量数值模拟计算, 得出了一些有规律性的曲线, 为随机波作用下深水导管架动力响应分析提供借鉴。

**关键词:**平台; 波流耦合; 动力响应; ABAQUS/AQUA

**中图分类号:** P752

**文献标识码:** A

## 1 引言

我国海洋石油开发经历了两个发展阶段。1957 年到 1979 年为第一阶段, 并在渤海浅水区进行开发试验。1980 年开始的第二阶段是合作开发阶段, 这阶段我国海洋石油执行了将自主经营和对外合作相结合的政策, 即利用国外的先进技术和资金来开发我国的海洋石油资源, 海上油气开发逐步由浅水迈向了深水, 导管架平台被广泛应用于海上油田开发。随着工作水深的增加, 平台桩腿延长, 整体刚度变小, 自振频率降低, 对波浪的激振较为敏感, 即使在未发生共振的条件下, 结构动力响应也可能很大。因此必须对较大水深导管架平台进行动力分析。

ABAQUS/AQUA 是美孚石油公司同 ABAQUS 公司合作开发的大型通用有限元软件 ABAQUS 的海工模块, 该模块的用途是模拟海上结构, 例如海洋石油平台或船体。其具体功能包括模拟波浪、风载荷、浮力和海流拖拽力的影响等。本文使用 ABAQUS/AQUA, 实现对较大水深的八腿柱导管架平台的动力响应分析。找出其在随机波浪作用下的动力响应规律, 为我国深水油气资源的开发提供借鉴。

## 2 计算理论和方法

在深水导管架结构的动力响应分析中, 波浪力是十分重要的, 它是平台设计中的控制荷载。计算小尺度孤立桩柱上的波浪力是由莫里森提出, 但对导管架平台而言, 由于导管架是一个无限自由度的连续体, 且结构是由细长杆件构成(如图 1), 考虑到实际结构理想化后, 波浪和结构之间相对运动的力都集中作用在质点上<sup>[1]</sup>, 因此要对莫里森方程进行修正。假定: (1)波浪力随水深减小的变化呈台阶性, 以质点相邻节间的中点之间的整个区段为一台阶; (2)作用于每杆件上的波浪力, 邻近杆件并不干扰流体运动, 采用未扰动流体速度计算波浪力。作用于某质点上的波浪力是实际结构与该质点有关的区段内所有杆件波浪力之和; (3)斜杆的波浪力按流向的投影长度计算, 作用在与杆件平行方向的波浪力忽略不计; (4)各力相对于水平质点引起的净距, 可以忽略不计。根据以上假定, 应用莫里森方程

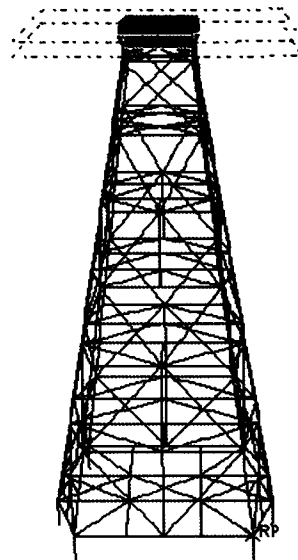


图 1 平台几何模型

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 中石化“深水油田开发关键技术预研”科技攻关项目(合同号 JP05008)

作者简介: 杨江辉(1981-), 男, 硕士生, 从事工程结构研究。

可得到作用于某个质点上的波浪力:

$$F_i(t) = \sum_j \rho (C_M - 1) \frac{\pi D_{ij}^2}{4} L_{ij} (\ddot{u}_{ij} - \ddot{x}_i) + \rho \frac{\pi D_{ij}^2}{4} L_{ij} \dot{u}_{ij} + 0.5 \sum_j C_D D_{ij} L_{ij} |u_{ij} - \dot{x}_i|$$

这里假定  $C_D, C_M$  值对所有杆都相同, 它们分别是拖曳力系数和惯性力系数;  $D_{ij}$  是杆的外直径,  $L_{ij}$  是半杆的投影长度, 下标  $i, j$  代表与第  $i$  自由度相连  $j$  根杆;  $\rho$  是海水密度,  $u, \dot{u}$  分别为水质点速度、加速度;  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  分别为结构的位移、速度、加速度。

### 3 有限元分析

平台总体结构的有限元分析, 是将整个平台结构离散为功能与原结构相当的有限元模型, 按照实际结构情况划分节点和单元, 然后把全部载荷等效为节点载荷作用在节点上, 而节点由单元的刚度支持, 进而计算节点的位移和应力, 最后算出单元应力而得到平台整体结构的应力状况和整体变形, 本文以 180m 水深某导管架平台为例, 建立了深水导管架的有限元模型。

#### 3.1 平台模型和环境参数

平台水深 180m, 采用八腿柱导管架, 节点采用 k 型和 x 型结构布置。平台总共分七层, 该导管架平台的结构如图 1 所示, 采用对称布置。控制环境参数如下:

设计水深: 180m (理论深度基准面)。

设计波高:

百年一遇最大波高:  $H_{\max} = 30\text{m}$ ,  $T = 14\text{s}$

百年一遇有效波高:  $H_{\frac{1}{3}} = 1.6\bar{H} = 18.07\text{m}$ ,  $T = 11\text{s}$

一年一遇最大波高:  $H_{\max} = 15.29\text{m}$ ,  $T = 9.9\text{s}$

一年一遇有效波高:  $H_{\frac{1}{3}} = 1.6\bar{H} = 13.11\text{m}$ ,  $T = 9\text{s}$

设计流速:

百年一遇表面流速:  $V_c = 3\text{m/s}$  百年一遇海底流速:  $V_c = 1.1\text{m/s}$

一年一遇表面流速:  $V_c = 1.60\text{m/s}$  一年一遇海底流速:  $V_c = 0.62\text{m/s}$

假设随着水深增加流速线性递减 (见图 2)。

设计风速: 40 m/s

#### 3.2 材料属性和边界条件

导管架所用钢的材料属性: 弹性阶段:  $\lambda = 0.3$ , 弹性模量  $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ , 塑性阶段, 应力应变关系如表 1 所示。为了简化计算, 在确定平台的边界条件时将桩腿的下部模拟为刚性固定端。即  $U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ 。

#### 3.3 求解控制

在 ABAQUS 中由各点坐标生成有限元结构模型, 整个平台主体结构为空间梁组合结构, 甲板采用壳单元 S4R, 导管架部分采用空间梁单元 B31, 离散的八桩导管架有限元模型中节点总数为 2786 个, 单元总数为 2978 个。平台的结构模型采用类型是腿柱在泥面以下 6 倍桩径处为固定端。ABAQUS 采用能量原理的有限离散单元法, 逐渐施加载荷, 控制截面的应力/应变, 满足使用者给定的材料本构关系, 得到结构的力与变形的平衡。

瞬态响应分析时, 总共使用了 4 个分析步骤, 在第一个静态一般分析步骤中施加重力, 是通过海洋平台整体施加加速度来实现, 在  $z$  向加重力加速度  $-9.81\text{m/s}^2$ ; 在第二个静态一般分析步骤中施加甲板上模块载荷, 以集中力形式实现; 第三个为特征频率和振型提取的线性摄动步骤, 用以提取各阶模态的频率和振型; 第四个是隐式动态分析步骤, 通过在 ABAQUS/AQUA 中编写程序实现施加波浪载荷、海流作用。本文重点关心的是隐式动态分析步骤, 由于结构是非线性的, 因此使用非对称求解器, 即用小的初始增量, 以保证

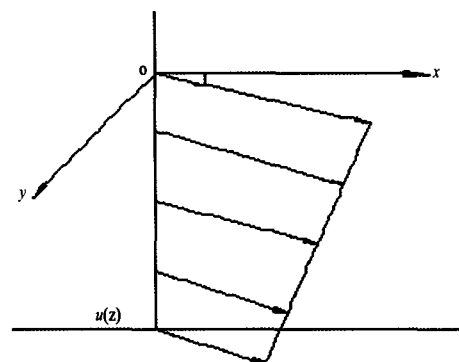


图 2 线性分布流

表 1 材料属性

应力 / Pa	塑性应变
2.99e8	0.0000
3.01e8	0.0001
3.52e8	0.0250
3.75e8	0.1000
3.94e8	0.2000
4.00e8	0.3500

求解均匀、收敛,加大求解总时间以便观察响应各量的周期或非周期性的规律变化。由于平台各个腿柱、横杆、斜撑的管径、壁厚不同,因此程序需要分多步进行编写,以确保完整和准确。

#### 4 计算结果

在导管架结构设计中,百年一遇的风浪作为生存条件,以一年一遇的风浪作为操作条件,在风、浪和海流组合作用中考虑最大值不同时出现的关系。本文研究的目标是平台应力变化以及振动情况,因此考虑比较恶劣的海况条件。分别计算了生存条件的强度(图 3 所示)和操作条件的振动情况(见图 4~图 14)。

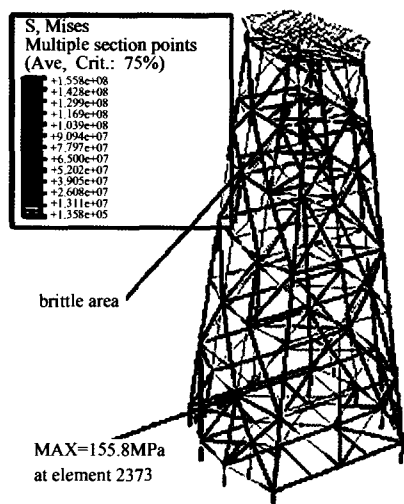


图 3 平台 Mises 应力

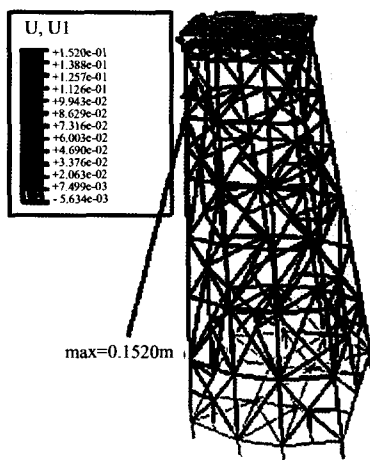


图 4 平台  $x$  方向位移分布

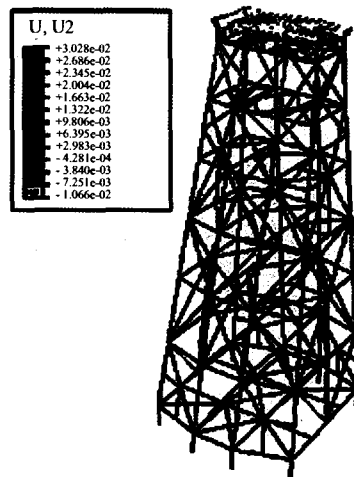


图 5 平台  $y$  方向位移分布

从图 3 知,导管架平台在百年一遇极限工况下应力峰值出现在下部斜撑处(如图中箭头所示),其值为 155.8MPa,小于钢材的许用应力。故平台强度安全。在平台的局部区域出现应力集中,长时间的反复波流冲刷会引起这些区域首先疲劳,进而可能出现断裂。

从图 4 可以看出平台在  $x$  方向有明显的整体振动现象,在  $x$  型斜撑处有最大位移 0.1520m,在这种工况下虽然平台未发生破坏,但是整体振动对平台甲板设备影响很大,应采取减振措施。图 5 中显示平台在  $y$  方向迎波浪入射方向出现振动,由于其值不大,故而影响不显著。

由 ABAQUS 的时间历程后处理可得到上层平台四个角点(节点 17,19,2,20)在载荷作用下的时间位移、速度、能量曲线(图 6~图 14)。

从图 6~图 8 可以看出,上层甲板四个角点在  $x$  方向有最大位移 0.12m(是四个角点中的最大位移值而非整个导管架平台的最大位移值),沿  $x, y, z$  个方向的位移响应曲线随时间的变化规律表现为近似周期性的振荡运动。 $x, y$  方向响应曲线表现为弱非线性, $z$  方向位移响应曲线表现为强非线性。这是由于存在非线性耦合的影响。

从图 9~图 11 可以看出上层甲板四个角点有  $x$  方向的最大速度为 0.18m/s,沿  $x, y, z$  方向的速度随时间变化的响应曲线表现为非周期性衰减振荡运动,三曲线都表现为强非线性。 $x$  方向的速度值远大于  $y, z$  方向的速度值,振动主要表现为  $x$  方向的衰减振动,刚开始振动很剧烈,但是随时间的增加振动明显衰减。

图 12~图 14 为平台甲板四个角点的能量变化曲线,应变能和内能呈周期性振荡。这也体现出了平台整体能量守恒的原理。动能变化曲线表现为非周期性无规则衰减振荡运动,这是由于平台的速度呈非周期性衰减振动而造成的。

平台结构在风浪稍大时存在明显振动,并且振动的加速度过大,这将会给作业人员带来明显的不适感。

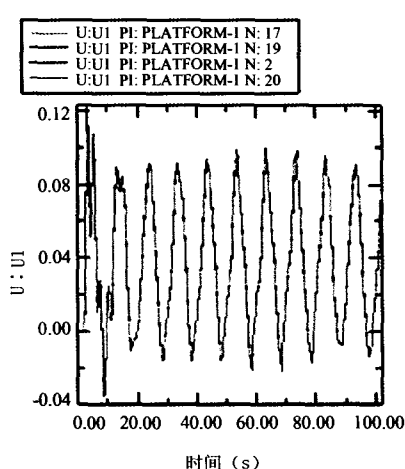
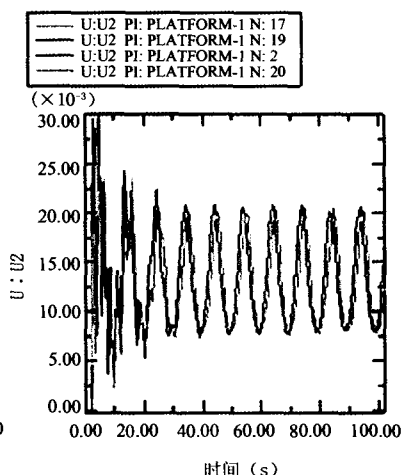
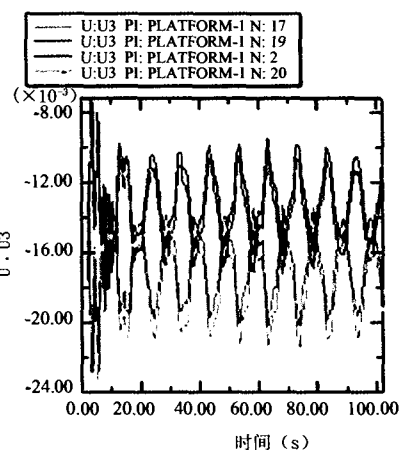
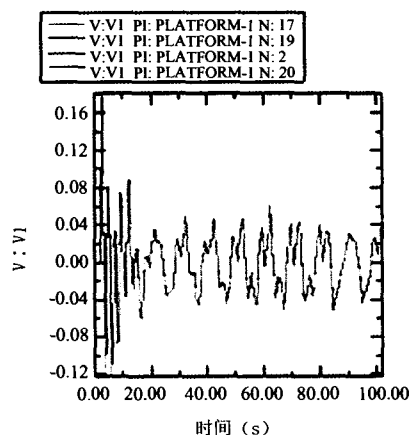
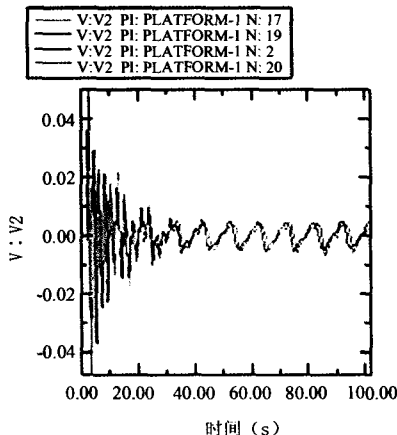
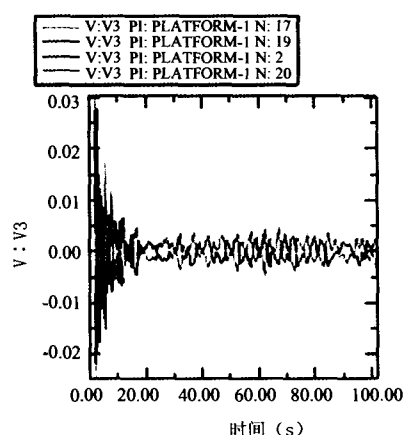
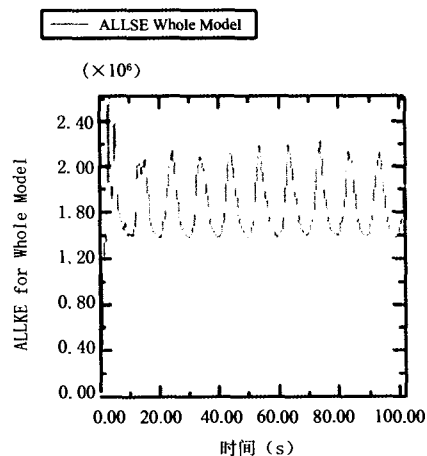
图 6 四角点  $x$  方向位移响应曲线图 7 四角点  $y$  方向位移响应曲线图 8 四角点  $z$  方向位移响应曲线图 9 四角点  $x$  方向速度响应曲线图 10 四角点  $y$  方向速度响应曲线图 11 四角点  $z$  方向速度响应曲线

图 12 平台整体应变能变化曲线

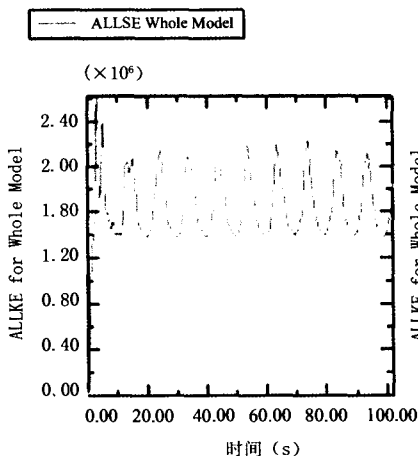


图 13 平台整体内能变化曲线

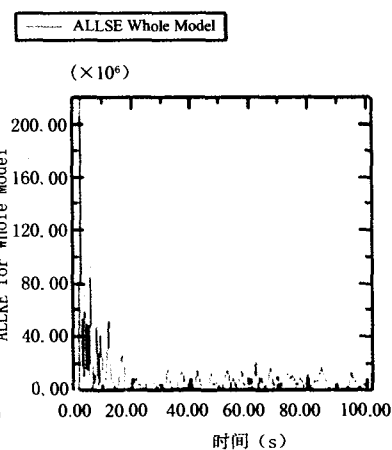


图 14 平台整体动能变化曲线

## 5 结束语

通常条件下导管架平台适应水深小于 300m, 对较大水深导管架平台做数值模拟时, 由于平台结构庞大复杂, 建模和求解计算比较困难。但 ABAQUS/AQUA 提供了较为完整的求解方法, 其迭代算法可以方便

快速对复杂矩阵进行处理。这种方法能够推广到各种类型的平台上去,也可以用来研究海况变化下导管架平台的动力响应规律,从而反过来指导平台的设计,这种反馈效应在工程设计中是非常有价值的。

另外,深水导管架平台与浅水有着明显的区别,深水导管架平台的整体刚度变小,自振频率降低,有可能落入波浪频率范围而引发共振,对波浪的激振较为敏感,因此建议增加减振或隔振措施,以便于操作工人正常作业。

### 参考文献

- [1] 陆文发,李林普,高明道. 近海导管架平台[M]. 北京:中国海洋出版社,1992.
- [2] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社 2006.
- [3] 庄茁,张帆等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [4] (美)J. F. 威尔逊. 海洋结构动力学[M]. 石油工业出版社,1984.
- [5] 竺艳蓉著. 海洋工程波浪力学[M]. 天津大学出版社 1991.
- [6] 深水油田开发关键技术预研[R]. 中国石化集团胜利石油管理局.
- [7] 欧进萍,段忠东,肖仪清等著 海洋平台结构安全评定—理论方法与应用[M] 北京 科学出版社 2003.
- [8] 董艳秋. 深海采油平台波浪载荷及响应[M]. 天津大学出版社 2005.
- [9] 陆建辉. 随机波浪激励下海洋平台振动控制技术研究[D]. 2004. 6.

## THE DYNAMIC ANALYSIS OF DEEP WATER JACKET PLATFORM BASED ON ABAQUS/AQUA

YANG Jianghui<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, LIU Jinkun<sup>3</sup>, HE Feng<sup>4</sup>

(China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Based on ABAQUS/AQUA, this paper analyses the variety of stresses and the process of the vibration response by imitating the deep water Jacket platform under the effect of random wave, which taking account of the influence of the drage stress by current and the inertia force by added mass. Through a large number of calculations, it obtains some regulation curves which help to analyse the dynamic response of deep sea Jackets.

**Key words:** platform; coupling; dynamic analysis; ABAQUS/AQUA

(上接第 28 页)

## FEM ANALYSIS FOR ICE-INDUCE VIBRATION OF JZ20-2NW PLATFORM

WU Wenhua<sup>1</sup>, YU Baijie<sup>1</sup>, YUE Qianjin<sup>1</sup>, CHEN liang<sup>2</sup>

(1. Dalian University of Technology. Dalian 116085,

2. Maison WorleyParsons engineering company, Beijing 100027, China)

**Abstract:** The dynamic fracture process of sea ice interacting with JZ20-2NW platform is performed on the basis of finite element software—LS-DYNA. The crack propagated processes which obtained in numerical results of sea ice are similar with that of obtained in situ observation. The break-length of sea ice and the triangle shaped ice force temporal curve can be determined from the simulated results. The peak force of sea ice in numerical results is consistent with static ice force formulation (Hirayama-Obara). The displacements and accelerations in platform are also given in the paper.

**Key words:** JZ20-2NW platform, crack propagation, ice force, ice induced vibration, finite element simulation.