

## [船舶结构]

## 深水半潜式钻井平台波浪载荷预报与结构强度评估\*

张海彬 沈志平 李小平

(708 研究所 上海 200011)

[关键词]半潜式钻井平台;波浪载荷;强度评估

[摘要]采用理论分析和模型试验相结合的方法,对一深水半潜式钻井平台进行了波浪载荷预报和结构强度评估,进而为平台结构设计提供了参考依据。同时,对半潜式平台波浪载荷预报和结构强度评估的分析方法和流程进行了归纳与总结。

[中图分类号]U661.43 [文献标识码]A [文章编号]1001-9855(2007)02-0033-06

## Wave load calculation and structural strength assessment for deepwater semi-submersible

Zhang Haibin Shen Zhiping Li Xiaoping

**Keywords:** semi-submersible drilling units; wave loads; strength assessment

**Abstract:** In this paper, the wave load calculation and structural strength assessment for a deepwater semi-submersible drilling unit is carried out with the combination of theoretical analysis and model test, which provide the basis for the structural design of the drilling unit. At the same time, the analysis method and procedure of the wave load calculation and structural strength assessment for deepwater semi-submersible drilling units are illustrated and summarized.

### 1 前 言

海洋是一个有待开发的巨大资源宝库,它不仅富有水资源与生物资源,而且在海底蕴藏着极为丰富的油气资源。石油和天然气在能源结构中占有相当重要的地位。当陆上油气资源经过长期、大规模开发之后,世界范围内的油气勘探与开发已转向了广袤的海洋,并逐渐形成了投资高、风险大、高新技术密集的能源工业新领域。随着海洋油气开发逐渐向深海推进,传统的导管架平台和重力式平台由于其自重和工程造价随水深大幅度地增加,已经不能适应深水油气资源开发的需要。目前,国际上用于

深海勘探的主流装备形式是半潜式钻井平台,而用于深海采油的装备主要是 Spar 平台和张力腿平台。从我国现状来看,深海钻采装备都处于前期开发研究阶段,采用半潜式平台进行深海勘探钻井是发展趋势。

世界上各主要深水油田的海洋环境通常都较为恶劣,并且半潜式平台与一般航行船舶不同,在遇到恶劣海况时不能规避,因而在结构设计阶段必须要考虑其在生命期内可能要遭遇的极限海况,要具备足够的强度抵御“百年一遇”的恶劣海况,以保障平台上的人员以及设备的安全。目前,各大船级社规范均要求半潜式平台的波浪载荷预报和结构强度评

\* [收稿日期]2006-9-22

[作者简介]张海彬(1976-),男,汉族,辽宁新民人,博士,从事船舶与海洋工程结构设计及理论分析工作。

沈志平(1959.11-),男,汉族,教授级高工,从事船舶总体设计与研究工作。

李小平(1969.9-),男,汉族,江西高安人,研究员,从事船舶与海洋工程结构强度研究和设计。

估采用直接计算方法,其中波浪载荷预报推荐采用基于三维水动力理论的设计波方法,强度分析则推荐采用有限元分析方法。

本文阐述了半潜式平台波浪载荷预报和结构强度评估的分析方法和流程,并对一深水半潜式钻井平台进行了实际数值分析。在波浪载荷计算中,采用基于三维水动力理论的设计波方法,并结合水池模型试验对输入阻尼参数进行了修正。结构强度评估采用有限元分析方法,在获得平台主体结构的应力水平后,按照规范规定的应力衡准进行结构强度校核。

## 2 分析方法及流程

半潜式平台作为常年作业于海上油田的海洋工程结构物,在其寿命期内所遭受的载荷除了自重和静水载荷之外,还将遭受风载荷、流载荷和波浪载荷,以及地震、海啸等偶然性载荷。规范规定,在采用百年一遇的最大规则波对半潜式平台进行波浪载荷计算与结构总强度评估时,可以忽略流载荷和风载荷的贡献。在设计波分析中,假定平台在规则波上处于瞬时静止,其不平衡力由平台运动加速度引起的平台惯性力来平衡,进而计算平台主体结构的应力水平,并根据规范的强度要求校核平台的结构安全性。下面分别介绍半潜式平台波浪载荷预报和结构强度评估方法。

### 2.1 半潜式平台波浪载荷预报方法

#### 2.1.1 典型波浪工况

半潜式平台在波浪中的载荷与平台的装载工况、波浪的波高、周期和相位、以及浪向角都有密切的关系,而且在平台的使用过程中,这些因素有多种不同的组合状态。所以,进行平台强度校核时,需要对平台的多个受力状态进行分析。半潜式平台的典型装载工况包括作业工况、生存工况和拖航工况,需要分别进行受静水载荷和受最大波浪载荷条件下的总强度分析。根据工程实践和规范的要求,半潜式平台的典型波浪工况通常包括:

- 最大横向受力状态
- 最大扭转状态
- 最大纵向剪切状态
- 甲板处纵向和横向加速度最大状态

#### · 最大垂向弯曲状态

对于各典型波浪工况,需要采用三维水动力理论分别计算相应特征波浪载荷的传递函数(包括幅频响应和相频响应),从而确定特征波浪载荷最大时的设计波参数(包括设计波的周期、波幅、相位和浪向)。

#### 2.1.2 设计波参数计算

设计波参数计算方法包括确定性方法和谱分析方法,其中确定性方法是较为常用的计算方法。设计波参数计算的确定性方法通过极限规则波波陡来确定设计波波幅,其分析步骤如下:

第一步:根据平台尺度确定各典型波浪工况下的浪向和特征周期;

第二步:计算平台在典型波浪工况下特征波浪载荷的传递函数,波浪周期范围取为3~25s,在特征周期附近步长取0.2~0.5s,在其它区域可取1.0~2.0s;

第三步:按照(1)式计算各波浪周期所对应的极限规则波波高H:

$$S = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad (1)$$

ABS规范推荐的极限规则波波陡 $S$ 为 $\frac{1}{10}$ <sup>[1]</sup>,而DNV规范规定的极限规则波波陡<sup>[2]</sup>为:

$$S = \begin{cases} \frac{1}{7} & T \leq 6 \\ \frac{1}{7 + \frac{0.93}{H_{100}}(T^2 - 36)} & T > 6 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $H_{100}$ 为百年一遇的最大极限波高,一般取32m。

第四步:将各特征波浪载荷响应的传递函数与其波浪周期所对应的极限规则波波幅(极限波高的一半)相乘;

第五步:第四步计算结果中最大值所对应的周期和波幅即为设计波的周期和波幅,进而可以在特征波浪载荷相频响应中得到该设计波的相位。

这样,可以进一步进行设计波浪载荷计算和结构强度评估。

#### 2.1.3 对理论预报方法的修正

目前,大多数水动力分析理论均是基于势流理论,无法考虑流体的粘性效应,也没有考虑系泊系统

对平台运动的影响。因而,理论预报的平台垂荡运动在固有周期附近将远大于实际值,需要通过与模型试验的对比分析,确定平台垂荡运动的临界阻尼,以对理论预报方法进行修正。一般而言,平台垂荡运动的临界阻尼介于2%~7%之间。

## 2.2 半潜式平台主体结构强度评估方法

在设计波参数确定以后,就可以采用三维水动力理论计算半潜式平台在该设计波中的运动和载荷,进而采用准静态方法对平台整体结构进行有限元分析和强度评估。

### 2.2.1 结构分析模型和载荷施加

各船级社都对半潜式平台结构总强度分析方法做了要求。ABS 船级社规范规定,半潜式平台结构总强度评估用于考核平台沉垫、立柱和撑杆等结构的屈服强度,必须采用有限元方法进行分析。有限元分析模型中,对于外板、甲板板和舱壁等主要承载结构可以采用粗网格的壳单元,主要结构连接区域(应力敏感区)要采用较细网格的壳单元,所有的第二类承载构件(如扶强材和桁材)可以采用梁单元。水动压力、静水压力以及惯性加速度要施加到整体有限元模型上,并确保有限元模型的平衡,计算得到的沉垫、上甲板、立柱和撑杆等结构的总应力用于屈服强度校核。

### 2.2.2 位移边界条件

为了避免结构模型发生刚体位移,必须在模型中施加一定的位移边界条件。根据实际情况,位移边界条件可以是弹性固定或刚性固定。通常在结构强度较大并且远离结构强度评估区域选取3个不共线的节点,每个节点施加如下的位移边界条件:

节点1:限制 X、Y、Z 三个方向的位移

节点2:限制 Y、Z 两个方向的位移

节点3:限制 Z 方向的位移

### 2.2.3 应力衡准

ABS 船级社针对半潜式平台结构分析规定了许用应力标准。对于应力分量以及由应力分量组合而得应力的许用应力为:

$$F = \frac{F_y}{F.S.} \quad (3)$$

其中, $F_y$  为材料屈服极限, $F.S.$  为安全因子,安全因子的选取标准见表1。

对于板壳结构,可以采用 von Mises 等效应力进

行校核。等效应力  $\sigma_{eqv}$  的表达式为:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma_x$  为平板  $x$  方向的平面应力, $\sigma_y$  为平板  $y$  方向的平面应力, $\tau_{xy}$  为平面剪应力。

等效应力的许用应力同式(3),安全因子选取标准见表2。

表1 屈服应力安全因子

工 况	静水工况	波浪组合工况
轴向拉伸、弯曲	1.67	1.25
剪切	2.50	1.88

表2 等效应力安全因子

工 况	静水工况	波浪组合工况
等效应力	1.43	1.11

## 2.3 半潜式平台波浪载荷预报与结构强度评估常用分析软件

目前,半潜式平台波浪载荷预报一般采用三维线性频域水动力理论。基于该理论的商业软件有美国麻省理工大学开发的 WAMIT, DNV 船级社开发的 SESAM/WADAM<sup>[3]</sup>, BV 船级社开发的 HydroStar 等。

对于结构有限元分析软件开发比较成熟,可以选用的商业软件也比较多,如 MSC 公司的 MSC/NASTRAN, ANSYS 公司的 ANSYS, 以及 ABAQUS 软件等等。各个船级社也相应开发了自己的有限元分析程序,如 DNV 船级社的 SESAM/SESTRA<sup>[4]</sup>, 中国船级社的海虹之彩等。

在用设计波方法对半潜式平台进行波浪载荷预报和结构强度评估时,需要将平台湿表面的水动压力、液舱载荷以及惯性载荷施加到有限元模型上,并且要确保模型的静力和动力平衡。如果完全靠手工加载,工作量将异常繁重,而且容易出错。因而,能够实现波浪载荷计算结果的自动加载是非常重要的。值得庆幸的是, DNV 船级社在这方面作了许多卓有成效的工作,其 SESAM 软件包可以将波浪载荷预报和结构有限元分析无缝地衔接起来,从而大大减少工作量。

### 3 分析实例

为了进一步研究半潜式平台波浪载荷预报与结构强度评估的方法和规律,并能指导平台结构设计,对一半潜式钻井平台在各典型波浪工况下的载荷进行了计算,在确定设计波参数之后,进一步对平台整体结构进行了有限元分析与强度校核。波浪载荷预

报和强度评估是按照 ABS 规范的要求进行的,采用的计算软件为 DNV 船级社开发的 SESAM 软件包。

#### 3.1 目标平台主尺度

该深水半潜式钻井平台为钢质全焊接结构,包括 2 个沉垫、4 根圆角方立柱、1 个箱形封闭式上平台、2 根水平撑杆及上层建筑和直升机平台。目标平台的主尺度参数见表 3。

表 3 目标平台主尺度

沉垫	106.05 × 18 × 9 m	沉垫间距	63.75 m
横撑	48.75 × 3.75 × 2.25 m	立柱(圆角半径)	15 × 15(2.5) m
立柱纵向间距	63.75 m	立柱横向间距	63.75 m
中间甲板/下甲板	78.75 × 78.75 m	主甲板	78.75 × 78.75 m
主甲板距基线	49.5 m	中央月池开口	43 × 9 m
作业吃水/排水量	24 m/46 865 t	生存吃水/排水量	18 m/41 482 t
拖航吃水/排水量	8.5 m/31 109 t	最大作业水深	3 000 m

#### 3.2 目标平台波浪载荷预报

鉴于半潜式平台在生存装载工况时将会遭受百年一遇的极限波浪载荷,对平台结构强度的要求最大,因而本文针对平台生存装载工况下的各典型波浪工况进行波浪载荷计算和设计波参数搜索。对于其它装载工况,可采用类似的方法。设计波参数计算采用确定性方法,极限规则波波陡按 ABS 船级社规范取为 1/10。

##### 3.2.1 三维水动力模型

采用 SESAM/PatranPre,根据平台型线建立了三维湿表面模型。三维湿表面模型划分到立柱顶端,共 11 024 块面元。此外,对于横撑类小构件建立莫里森模型,采用莫里森方程计算波浪载荷。三维湿表面模型和莫里森模型如图 1 所示。

对应于目标平台生存装载工况,采用 SESAM/PREFEM<sup>[5]</sup>建立了相应的质量模型。质量模型确保与实际平台的总重、重心位置和惯性半径一致。

##### 3.2.2 临界阻尼修正

通过对目标平台水池模型试验数据结果<sup>[6]</sup>的分析,确定目标平台的垂荡临界阻尼为 6%。修正后目标平台垂荡、横摇和纵摇传递函数理论计算与模型试验结果的对比见图 2 ~ 图 3。

##### 3.2.3 设计波参数计算

分别对目标平台的水平分离力、扭矩、纵向剪力和垂向弯距的传递函数进行了预报,并根据按极限

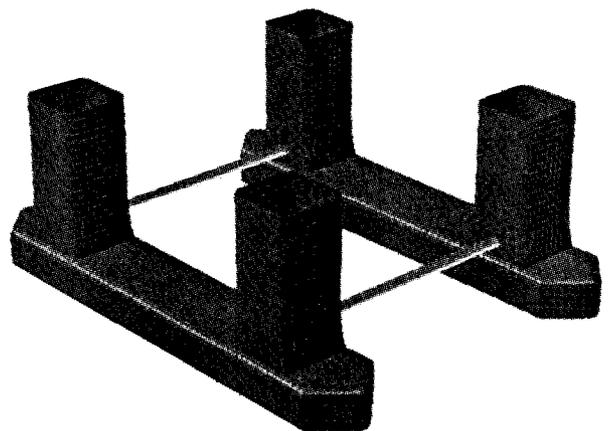


图 1 目标平台三维湿表面模型和莫里森模型

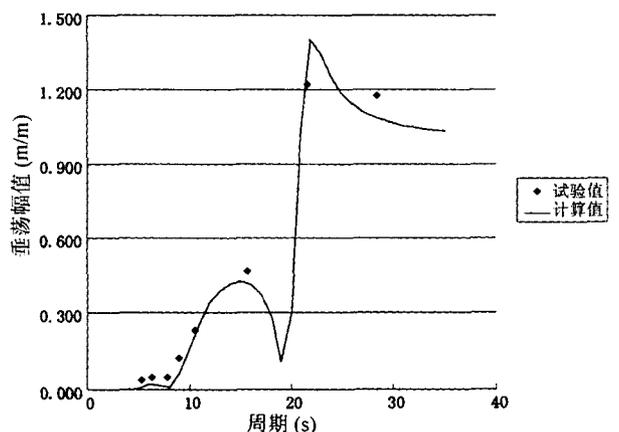


图 2 目标平台垂荡传递函数

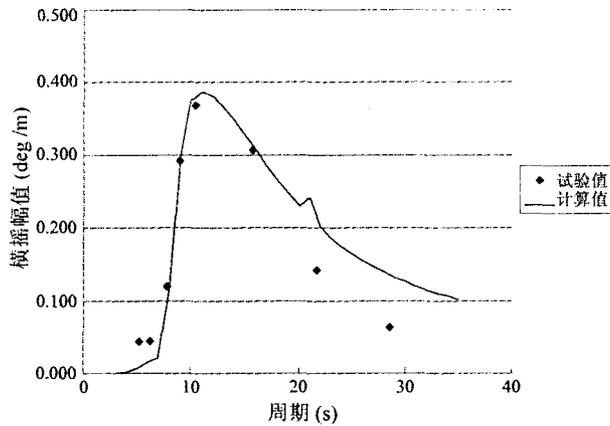


图3 目标平台横摇传递函数

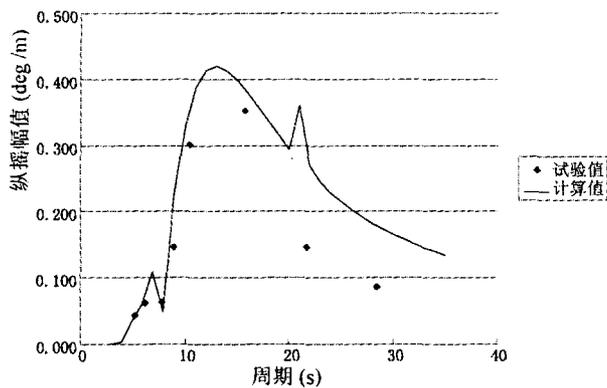


图4 目标平台纵摇传递函数

波陡 1/10 算得的波幅进一步计算了相应的响应载荷,进而确定了各典型波浪工况的设计波参数,见表 4。

表 4 设计波参数

典型波浪工况	波浪周期 (s)	浪向 (°)	波幅 (m)	相位 (°)
横向分离力	10.5	90	8.61	341.82
扭矩	9.5	135	7.05	172.85
纵向剪力	11.5	135	10.32	176.33
垂向弯距	10.0	180	7.81	158.94

### 3.3 目标平台结构强度评估

在确定了设计波参数之后,即可将平台在该设计波下的水动力压力和惯性加速度施加到平台结构有限元模型上,进行平台结构总强度的计算与评估。

#### 3.3.1 有限元模型的建立

采用 SESAM/PatranPre 建立了目标平台结构的空板梁组合力学模型,其中节点总数为 173 508 个,单元总数为 407 214 个,如图 5 所示。

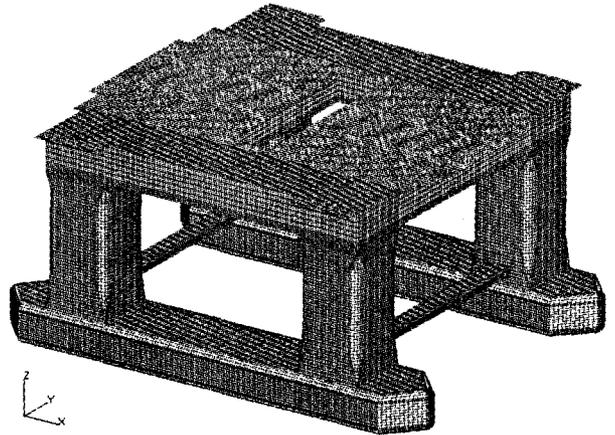


图5 目标平台整体有限元模型

#### 3.3.2 平台自重及外载荷的处理

由于有限元模型的简化所引起的模型重量和平台结构实际重量的差别通过调整材料密度来修正。设备和钻井材料等重量以质量单元的形式加在有限元模型中相应的位置上。货油和压载水载荷通过在有限元模型中定义液舱的形式实现,SESAM 程序可以自动将该液舱内液体的静载荷和由于运动引起的惯性载荷加在有限元模型上。

对于水动力压力载荷,SESAM 程序可以从三维水动力模型中读取数据自动施加到有限元模型上。并且,还将施加平台六个自由度的惯性加速度,以保证有限元模型的平衡。

#### 3.3.3 位移边界条件

在上甲板纵桁与横梁相交区域选取 3 个不共线的节点,每个节点按照前面介绍的规则施加位移约束。

#### 3.3.4 平台主体结构强度计算与评估

目标平台主体结构(沉垫、立柱、上甲板和横撑)采用 HS36 高强度钢,其屈服极限为 355 MPa,由式(3)和表 2 可以得到 Von Mises 应力的许用应力

如表 5:

表 5 Von Mises 应力许用应力

工 况	静水工况	波浪组合工况
Von Mises 应力	248 MPa	320 MPa

采用 SESAM/SESTRA 对目标平台主体结构进行了有限元分析。计算结果显示,平台主体结构应力分布较为均匀,结构设计合理,平台主体结构基本能够满足强度要求。然而,在最大纵向剪切状态下,横撑与立柱连接肘板处应力水平较高,稍稍超出许用应力标准,需要对结构适当加强,并进一步作精细网格有限元分析和疲劳寿命分析。

图 6 给出了目标平台结构各部位壳单元 Von Mises 应力在不同工况下的变化曲线,其中工况序号 1~5 分别代表静水工况、最大横向受力状态、最大扭转状态、最大纵向剪切状态和最大垂向弯曲状态,图 7 给出了目标平台在最大纵向剪切状态下横撑结构壳单元 Von Mises 应力云图。

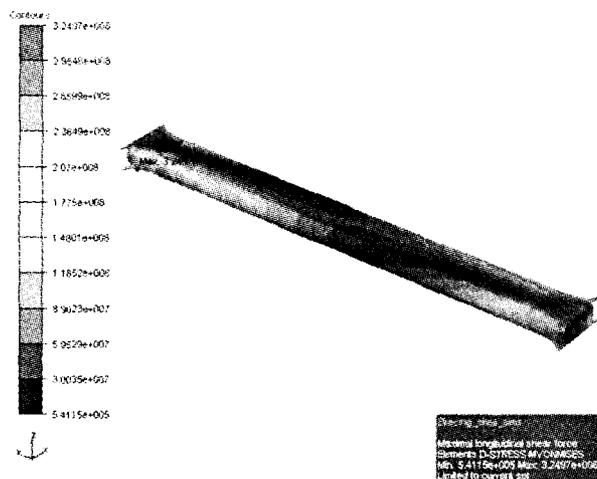


图 7 最大纵向剪切状态下横撑结构壳单元 Von Mises 应力云图

(1) 理论预报的平台垂荡运动与实际情况会有较大差别,需要结合模型试验手段对平台垂荡运动的临界阻尼进行修正;

(2) 对于具有本文目标平台类似结构形式的半潜式钻井平台而言,斜浪工况对平台主体结构强度的要求最大,其次是横浪工况,而迎浪工况和静水工况相对比较容易满足强度要求;

(3) 深水半潜式钻井平台主体结构的高应力区域主要分布在横撑与立柱连接处、立柱与上甲板及沉垫连接处等,需要在结构设计中特别关注。∞

[参考文献]

[1] ABS Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units[M]. 2001.  
 [2] Recommended Practice DNV-RP-C103, Column-stabilised Units, Feb. 2005.  
 [3] Wave Analysis by Diffraction and Morison Theory (Wadam), Sesam User's Manual, Det Norske Veritas, 2004.  
 [4] Superelement Structural Analysis (Sestra), Sesam User's Manual, Det Norske Veritas, 2004.  
 [5] Preprocessor for Generation of Finite Element Models (Prefem), Sesam User's Manual, Det Norske Veritas, 2003.  
 [6] 新型多功能半潜式钻井平台水动力性能开发模型试验报告及分析研究报告[R]. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 2005. 12.

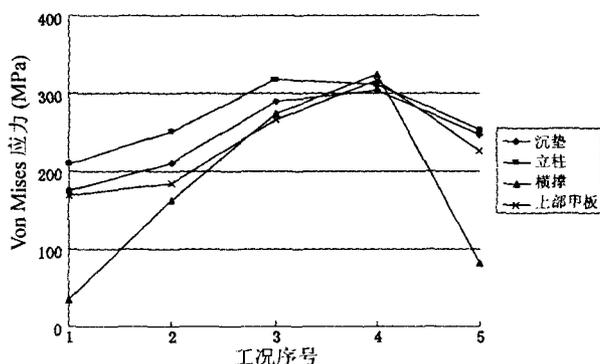


图 6 目标平台各部位壳单元 Von Mises 应力随工况变化曲线

4 结 论

本文结合分析实例,研究了深水半潜式钻井平台波浪载荷预报和结构强度评估的分析方法和流程,给出了一套适用于其主体结构直接强度分析与评估的解决方案。理论研究和数值分析可以得出以下结论: