

# Analysis on Load Project of Ocean Well Servicing Module

Peng Cheng<sup>1,2</sup>, Quanxing Li<sup>1,2</sup>, Gangqiang Liu<sup>2</sup>, Suina Yan<sup>1,2</sup>, Chenchen Lai<sup>1,2</sup>, Peng Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Oil and Gas Drilling Equipment Research Center, Baoji Shanxi

<sup>2</sup>Baoji Oilfield Machinery CO., LTD, Baoji Shanxi

Email: [cp\\_xyh@126.com](mailto:cp_xyh@126.com)

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2015; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

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



Open Access

---

## Abstract

Aiming at 2250kN ocean well drilling and servicing desktop module which is made during QHD32-6 project, the article analyzes working condition with ANSYS finite element calculation, explains the specifications and requirements which are involved in the analysis and calculation of each working condition, and construes the possible problems in calculation, then forms reliable and reasonable load case analysis lists that provide the core basis for the following finite element calculation.

## Keywords

Ocean Well Drilling and Servicing Module, ANSYS, Finite Element Analysis, Load Case Analysis

---

# 海洋钻修机模块载荷工况分析

程 鹏<sup>1,2</sup>, 李全星<sup>1,2</sup>, 刘刚强<sup>2</sup>, 颜岁娜<sup>1,2</sup>, 赖晨晨<sup>1,2</sup>, 杨 鹏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国家油气钻井装备工程技术研究中心, 陕西 宝鸡

<sup>2</sup>宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡

Email: [cp\\_xyh@126.com](mailto:cp_xyh@126.com)

收稿日期: 2015年6月4日; 录用日期: 2015年6月23日; 发布日期: 2015年6月29日

## 摘要

以QHD32-6项目中研制的2250KN海洋钻修机模块为例，ANSYS有限元计算进行工况分析。对各工况分析计算中涉及到的规范及要求进行详解，并对计算中可能出现的问题进行分析，并形成有效且合理的工况分析载荷列表，为有限元计算提供核心依据。

## 关键词

海洋钻修机模块，ANSYS，有限元分析，载荷工况分析

## 1. 前言

载荷工况分析是有限元分析的基础和依据。海洋钻修机模块的载荷工况分析，需综合分析钻修机的安装、作业以及移运等载荷工况，并考虑海洋平台作业区的特殊环境要求。其分析过程中要求遵循的标准较多，分析的工况类型也比较复杂。

本文以 QHD32-6 项目中研制的 2250KN 海洋钻修机模块为例，结合需遵循的行业标准和规范，对海洋钻修机在位作业的静力载荷、极限环境载荷、拖航载荷以及吊装载荷进行深入研究，总结并提出合理的载荷工况分析列表，为结构的有限元分析计算提供依据。

## 2. QHD32-6 钻修机模块简介

2250kN 海洋钻修机模块[1]是为中海油秦皇岛 32-6 油田设计的钻修机模块，用于其新增的 CEPI 和 CEPJ 固定式平台钻、修井作业。该钻修机模块总体设计时，井架采用自升式套装结构，底座采用大模块化的双层双向滑移结构形式，满足了 CEPI 和 CEPJ 平台钻机大移动跨距进行丛式钻井和修井作业的需求，钻修机结构示意图见图 1。

## 3. 基本工况分析

根据 2250KN 海洋钻修机吊装、钻修井作业和拖航的载荷工况分析要求，井架和钻台钢结构的计算分析，应包括以下内容：

- 1) 静力分析
- 2) 地震分析
- 3) 拖航分析
- 4) 吊装分析

本文以钻修机平台钻台面处井口中心点为坐标原点，X 轴正向指向井架正前方；Z 轴正向指向为面对井架时，左手方向；Y 轴正向指向井架正上方，建立全局直角坐标系及有限元模型如图 2 所示。

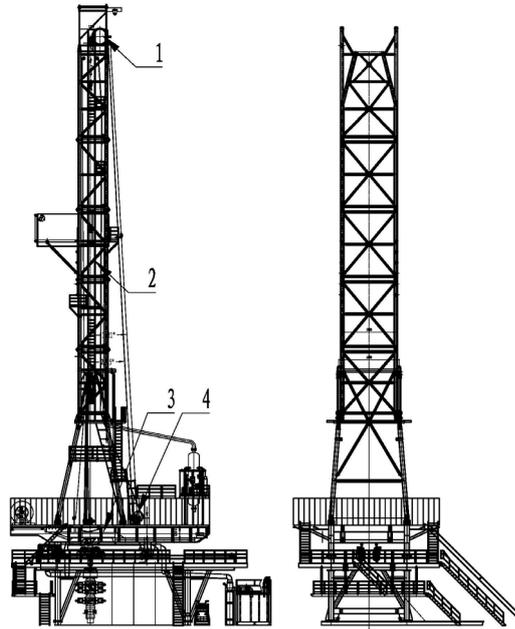
海洋钻修机模块工况分析时，需根据钻机和平台的设计制造所遵循标准规范、用户的要求确定钻修机静力分析时所需的工作载荷组合和各项载荷。

### 3.1. 静力分析

海洋钻修机静力分析时需根据相关规范确定工作载荷和环境载荷。

- 1) 工作载荷[2]

工作载荷如表 1 所示。



1: 天车, 2: 井架, 3: 钻台钢结构总成, 4: 绞车

Figure 1. The structure sketch map of dirl

图 1. 钻修机结构示意图

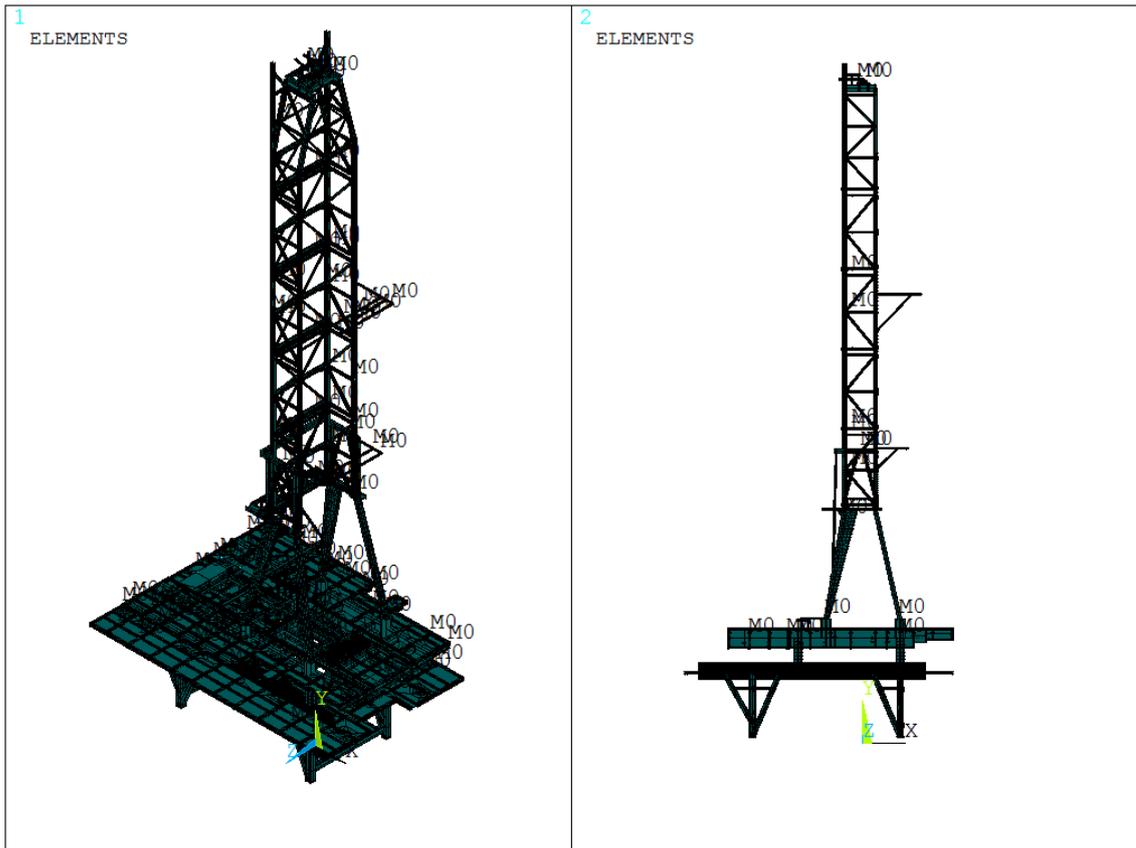


Figure 2. The finite element model of drill

图 2. 钻修机有限元模型

Table 1. Design loadings for drilling structures

表 1. 钻井结构设计载荷

状况	设计载荷条件	自重 (%)	钩载 (%)	转盘载荷 (%)	立根载荷 (%)	环境载荷
1a	工作	100	100	0	100	100%工作环境
1b	工作	100	TE	100	100	100%工作环境
2	预期	100	TE	100	0	100%预期风暴环境
3a	非预期	100	TE	100	100	100%非预期风暴环境
3b	非预期	100	适用时	适用时	适用时	100%地震
4	起升	100	适用时	适用时	0	100%起升环境

## 2) 设计参考风速

如果用户协议或者规格书有明确规定，应选取用户规定设计风速值，且保证所有选取的风速不应小于 API 4F (第四版)中表 5 规定风速。如果用户没有规定，则操作工况风荷载通常选取 1 年重现期，持续时间 3 s 的平均风速；极端风暴工况通常选取 100 年重现期，持续时间 3 s 的平均风速。

## 3) 设计参考风向

参考平台风媒图以及井架体受风面端面，确定风力方向应为典型的风力方向——即受风面积最大的方向。考虑钻修机结构对风的敏感程度，取井架主体部分横断面，并测量其对角线与背横梁之间夹角，该夹角即为危险风速角度。据此可以确定钻修机结构危险风速方向，见图 3。

## 4) 活荷载

根据 GB/T 29549.1-2013《海上石油固定平台模块钻机》规范中第 6.6.5.3 关于活荷载的规定：对于散货堆载及其它活荷载，应根据其所处位置及计算的需要，按照表 2 所列的值考虑。

根据 GB/T 29549.1-2013《海上石油固定平台模块钻机》规范中第 6.6.6 结构计算分析关于在位分析的规定，极端风暴工况活荷载取 75%。

## 5) 顶驱扭矩

顶驱扭矩分为钻井扭矩和卸扣扭矩两种。钻井扭矩由顶驱反扭矩梁承受，卸扣扭矩作业时，转盘卡瓦固定钻杆，利用顶驱进行卸扣，可视为钻修机内力。

顶驱扭矩加载方式根据顶驱导轨实际连接方式可分为两种：一是顶驱导轨顶部固定于天车底部，导轨下段通过反扭矩梁固定，则顶驱扭矩通过转化成力的形式加载在反扭矩梁上；二是顶驱导轨顶部固定于天车底部，导轨各段固定于井架背横梁上，则顶驱扭矩需分别在顶驱导轨行程的起始点和中点处分别加载以进行设计校核。

## 6) 许用应力

根据 API Spec 4F (第四版)规范中关于许用应力的规定：对于操作及井架起升工况，许用单位应力不应增加，非预期风暴工况和预期风暴工况，许用单位应力增加 1/3，即校核系数为 1.33。

## 3.2. 地震分析

根据钻机和平台的设计制造标准规范要求，地震载荷[4]分析可由以下方式确定：

1) 海洋平台上装置地震载荷的设计应遵循 API RP 2A-WSD 概述的强度水平分析指南，采用平台顶层甲板地震响应加速度，按照准静力法进行分析。

2) 地震工况下的井架钩载、转盘载荷以及立根载荷需根据作业条件以及环境特点与用户共同进行确定。

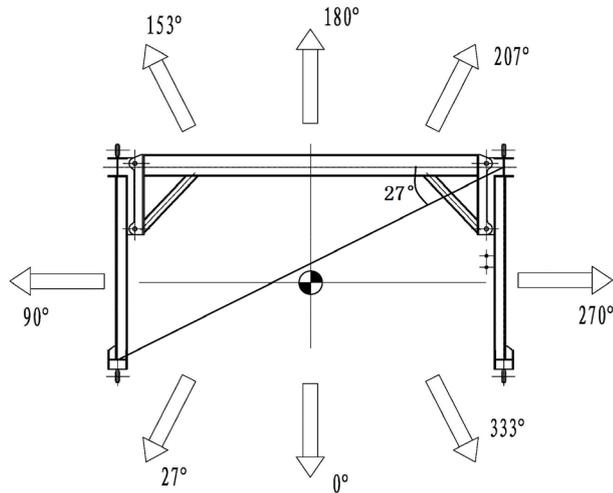


Figure 3. The direction sketch map of wind  
图 3. 风速方向确认图

Table 2. Live load  
表 2. 活荷载

位置	活荷载(kN/m <sup>2</sup> )	
	局部计算	整体计算
用于检查及维修的房顶/走道	3.0	1.5
走道, 楼梯	5.0	2.5
甲板非设备区	5.0	2.5
卸货区, 维修区, 储藏区	10.0	5.0
叉车活动区	10.0	5.0

3) 地震工况应参照 API Spec 4F (第四版)表 1 中关于操作工况的规定, 分别进行地震工况 1a (钩载载荷 + 立根载荷)和地震工况 1b (转盘载荷 + 立根载荷)分析计算。

4) 根据 GB/T 29549.1-2013《海上石油固定平台模块钻机》规范中第 6.6.6 结构计算分析关于在位分析的规定, 地震工况活荷载取 75%。

5) API Spec 4F(第四版)规范以及 AISC 335 第一篇中均有规定, 地震、重力和作业负荷联合作用时许用应力值增加 1/3。

6) ANSYS 计算采用等效静力分析时, 地震工况下, 以力的形式加载的设备需考虑地震的各向惯性力。

### 3.3. 拖航分析

2250KN 海洋钻修机模块拖航分析时, 需首先确定拖航时各结构和设备重心相对驳船浮心的位置和距离, 并以此计算拖航惯性力, 然后根据规范要求确定相应的载荷。

1) 拖航时钻修机结构及设备在驳船上位置的确定

2250KN 海洋钻修机模块的甲板设备以及驳船设备结构布置[5]如图 4、图 5 所示。

2) 确定结构件、设备重心坐标以及驳船浮心坐标。

结构件重心坐标由设计方提供, 设备重心坐标、驳船浮心坐标由用户提供。

3) 根据《GB 25428-2010-T 石油天然气工业钻井和采油设备钻井和修井井架、底座》钻机拖航惯性

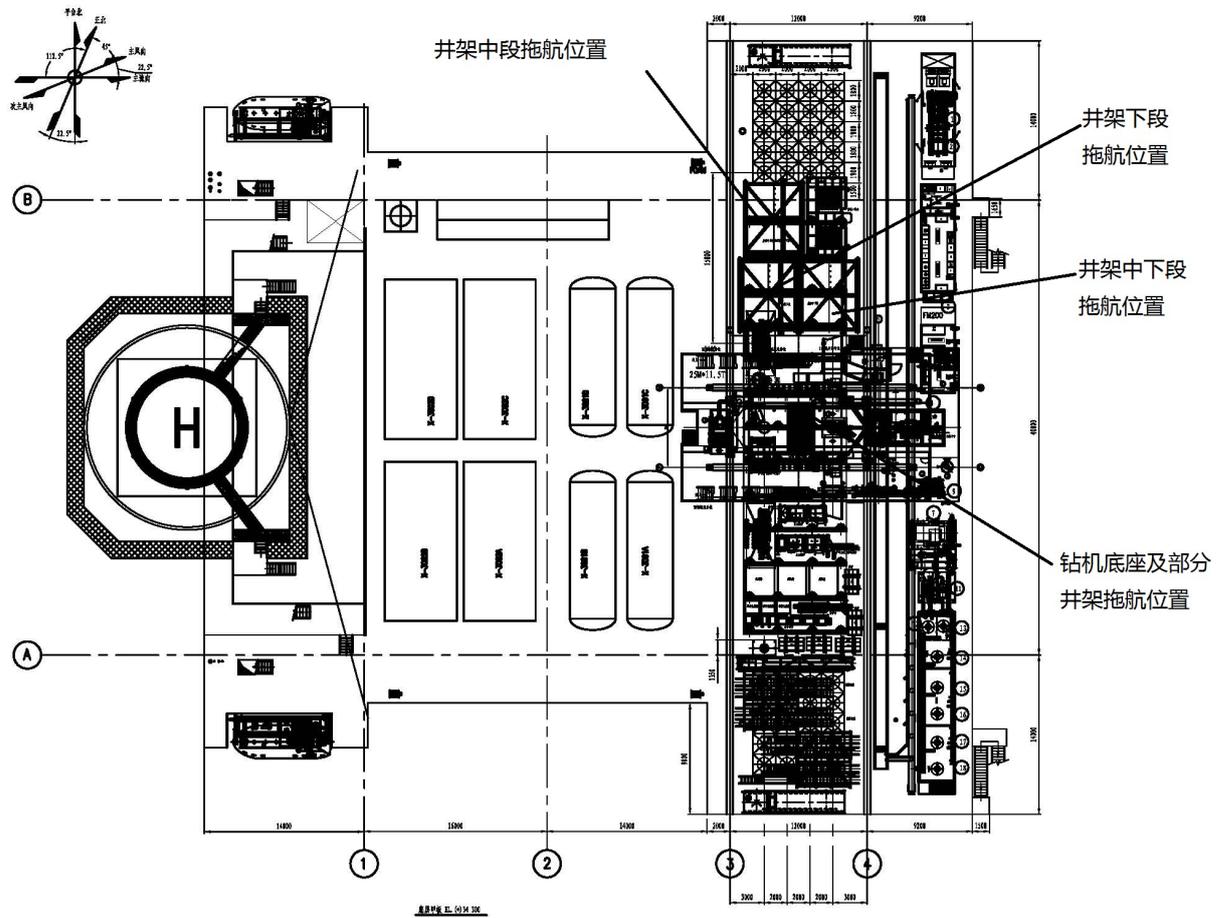


Figure 4. The towing sketch map of drilling equipments on board  
图 4. 钻修机拖航甲板设备位置示意图

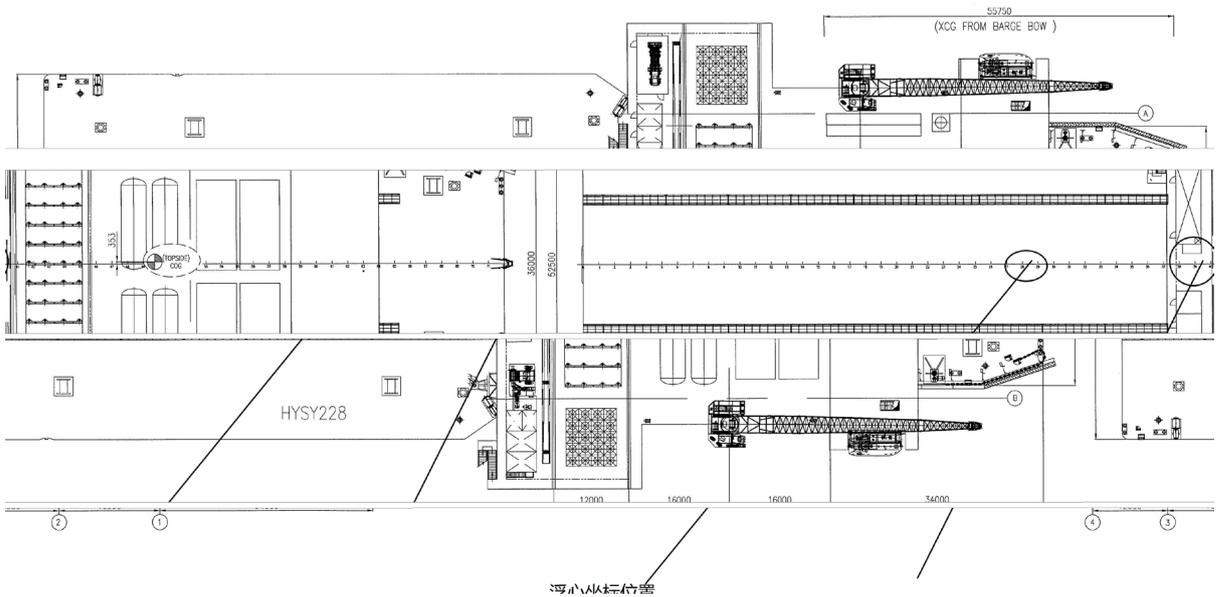


Figure 5. The towing sketch map of drilling equipments on barge  
图 5. 钻修机拖航驳船设备位置示意图

力的计算公式进行拖航惯性力计算。

$$F_p = \left( \frac{W \times L_1}{g} \times \frac{4 \times \pi^2}{T_p^2} \times \frac{\pi \times \phi}{180} \right) + W \times \sin \phi$$

$$F_R = \left( \frac{W \times L}{g} \times \frac{4 \times \pi^2}{T_r^2} \times \frac{\pi \times \theta}{180} \right) + W \times \sin \theta$$

$$F_H = W + \frac{2 \times \pi^2 \times W \times H}{T_p^2 \times g}$$

通常，将拖航参数代入惯性力的计算公式，可以求得拖航时钻机所承受的惯性载荷，然后将惯性载荷可以转化成惯性加速度的形式加载在有限元模型中进行求解。

4) 一般情况下，拖航分析可按照“10°~20°”法则进行考虑，运动值选取见表3。如模块钻机固定在平台组块顶层甲板上拖航或拖航路线远离海岸，则需按照驳船实际运动参数进行拖航分析。该参数由用户提供。

5) 拖航分析时，应选取拖航路线中最恶劣海域重现期为10年，持续时间3s的平均风速计算风荷载；风向至少应考虑0°，90°，180°和270°四个方向。如果用户没有明确数据，则根据API 4F(第四版)表5进行确定风速。

6) 根据API 4F中第8.1.2节规定：运输条件下，如果用户规定，许用单位应力可比基本许用应力增加三分之一(应力修改系数 = 1.33)。

7) 除非用户有特殊要求，否则拖航动力的组合应按照API 4F第8.4.1规定进行组合计算分析：

- ① 纵向动力，包括纵荡和纵摇，以及升沉；
- ② 横向动力，包括横荡和横摇，以及升沉；
- ③ 对角线动力与升沉组合。对角线动力应按纵向和横向力平方和的平方根确定，除非用户另有规定。

### 3.4. 吊装分析

2250KN海洋钻修机零部件从码头吊装上船，运至海洋平台组装场地分部组装，再吊至作业区完成组装成套。因吊装环节较多，风险较大，吊装分析至关重要。

1) 吊装分析应符合API RP 2A-WSD 2.4.2节要求，并与GB/T 29549.1-2013《海上石油固定平台模块钻机》第6.6.6节规定一致。

a) 对于在遮蔽海域(包括码头吊装卸船)进行的吊装，设计吊点以及与吊点直接相连的构件，动力放大系数取1.5，其余构件取1.15；

b) 在开敞海域进行的吊装，设计吊点以及与吊点直接相连的构件，动力放大系数取2.0，其余构件取1.35。

2) 2250KN海洋钻修机底座部件在陆上制成并安装，根据API RP 2A-WSD 2.4.2c“对吊机和被吊装的结构或部件均在陆地上的典型的制造场内操作，不要求动力荷载系数。对于可能产生少见的动力荷载的特殊吊装过程，可以考虑适当的荷载系数”的要求，我们将吊装过程中的动力放大系数选取为：1.25。

3) 吊装分析中基本许用应力应符合API RP 2A-WSD3.1节规定，不应使用AISC对吊装载荷容许应力增加的规定，即校核系数不增加。

4) 吊装分析计算采用静力分析法进行计算。对于吊点与重心错位较大的构件模型，需要对构件模型增加弹簧模块，以保证模型的自平衡。

5) 吊装部件主体的重量通过对密度调整进行加载。

**Table 3. The sportive parameter of barge**  
**表 3. 驳船运动参数**

运动	角度或加速度(半幅值)	周期(全幅值)
横摇	20°	10 s
纵摇	10°	10 s
升沉	0.2 g	-

- 6) 吊装部件附属设备的重量通过加载质量单元进行模拟。
- 7) 实际加载重量应包含质量系数。
- 8) 动载系数以重力加速度的形式进行加载。

## 4. 载荷列表

### 4.1. 静力载荷列表

2250KN 海洋钻修机静力分析中的载荷组合描述如表 4 所述。

### 4.2. 地震分析载荷列表

2250KN 海洋钻修机地震分析载荷工况组合描述如表 5 所述。

### 4.3. 拖航分析载荷列表

2250KN 海洋钻修机拖航分析中的载荷工况组合描述如表 6。

### 4.4. 吊装分析载荷列表

2250KN 海洋钻修机吊装分析中的载荷工况组合描述如表 7。

## 5. ANSYS 计算结果

### 5.1. 静力分析结果

根据 ANSYS 计算结果可知, 钻修机在满钩载 225 T, 满立根 135 T 操作工况中, 井架最大应力位于二层台连接处前立柱, 最大应力为 195.5 Mpa, 最大校核 Uc 值为 0.939 [3]。其应力云图如图 6 所示。

当钻修机在满转盘 225 T, 满立根 135 T 非预期工况时, 底座应力最大值位于立根区域, 最大应力为 200.7 Mpa, 最大校核 Uc 值为 0.968。应力云图如图 7 所示。

根据本文第 3、4 节分析, 对钢结构杆件我们按 AISC《钢结构手册》中轴心压/拉弯组合的规定校核; 对壳单元计算按等效应力进行校核; 所有校核过程在 ANSYS 后处理模块中进行。结果表明, 2250kN 海洋模块钻机在静力分析中所有工况下所有杆件的强度、刚度和稳定性校核值均满足设计要求。

### 5.2. 地震分析结果

根据 ANSYS 计算结果可知, 钻修机在钩载 112.5 T, 立根 67.5 T 地震工况中, 井架最大应力位于二层台连接处前立柱, 最大应力为 190.6 Mpa, 最大校核 Uc 值为 1.308。其应力云图如图 8 所示。在其余工况中井架应力均小于该工况。

当钻修机在转盘 112.5 T, 立根 67.5 T 地震工况时, 底座应力最大值位于下层底座导轨连接梁, 最大应力为 178.2 Mpa, 最大校核 Uc 值为 0.999。应力云图如图 9 所示。其余工况中底座应力均小于该工况。

**Table 4. The combination of static load work**  
**表 4. 静力载荷工况组合**

载荷	操作工况 1a	操作工况 1b	非预期风暴工况	预期风暴工况	起升工况[6]
设计风向	0°~333°	0°~333°	0°~333°	0°~333°	0°~333°
井架固载	100%	100%	100%	100%	100%
钻台结构固载	100%	100%	100%	100%	100%
钻台结构活荷载	100%	100%	75%	75%	100%
转盘载荷	0	100% (2250 KN)	100% (2250 KN)	100% (2250 KN)	0
井架钩载	100% (2250 KN)	TE (150 KN)	TE (150 KN)	TE (150 KN)	TE (150 KN)
立根载荷	100% (1350 KN)	100% (1350 KN)	100% (1350 KN)	0	0
设计风载	100% (29.6 m/s)	100% (29.6 m/s)	100% (47.8 m/s)	100% (55 m/s)	100% (21.6 m/s)
顶驱载荷	100% (钻井扭矩)	0	0	0	0
AISC 校核系数	1.00	1.00	1.33	1.33	1.00

**Table 5. The combination of seismic load work**  
**表 5. 地震载荷工况组合**

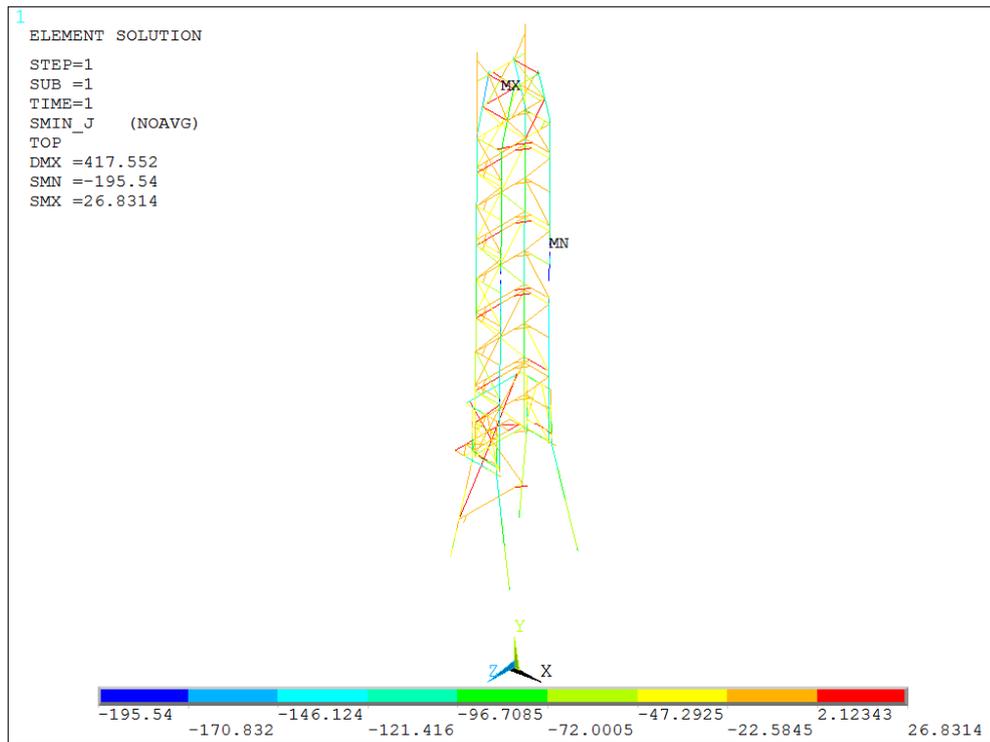
载荷	地震工况 1a	地震工况 1b
井架固载	100%	100%
钻台结构固载	100%	100%
钻台结构活荷载	75%	75%
转盘载荷	0	50% (1125 KN)
井架钩载	50% (1125 KN)	TE (150 KN)
立根载荷	50% (675 KN)	50% (675 KN)
地震载荷	100%	100%
AISC 校核系数	1.33	1.33

**Table 6. The combination of towing load work**  
**表 6. 拖航工况组合**

驳船运动组合	横摇 + 升沉	横摇 - 升沉	纵摇 + 升沉	纵摇 - 升沉
设计风向		0°、90°、180°、270°		
井架固载		仅包含基段、中上段、上段及天车		
钻台结构固载		100%		
转盘载荷		0		
钩载载荷		0		
立根载荷		0		
设计风载		100% (35 m/s)		
AISC 校核系数		1.33		

**Table 7.** The combination of suspending work  
**表 7.** 吊装工况组合

名称	重量(单位 KG)	质量系数	动载系数	AISC 校核系数
上底座主体	75,817	1.1	1.25	1.00
附属设备	76,520			
下底座主体	94,044	1.1	1.25	1.00
附属设备	18,643			
坡道	2708	1.1	1.5	1.00
右上底座	25,059	1.1	1.25	1.00
上中间座	23,680	1.1	1.25	1.00
右下座	28,562	1.1	1.25	1.00
下中间座	11,496	1.1	1.25	1.00
左后支腿	5934	1.1	1.25	1.00



**Figure 6.** The static stress drawing of derrick  
**图 6.** 井架静力分析应力分布图

结果表明，2250kN 海洋模块钻机在地震分析中所有工况下所有杆件的强度、刚度和稳定性校核值均满足设计要求。

### 5.3. 拖航分析结果

根据 ANSYSY 计算结果可知，钻修机在拖航工况中，最大应力位于井架基段前腿处，最大应力为 235 Mpa，最大校核 Uc 值为 1.316。其应力云图如图 10 所示。

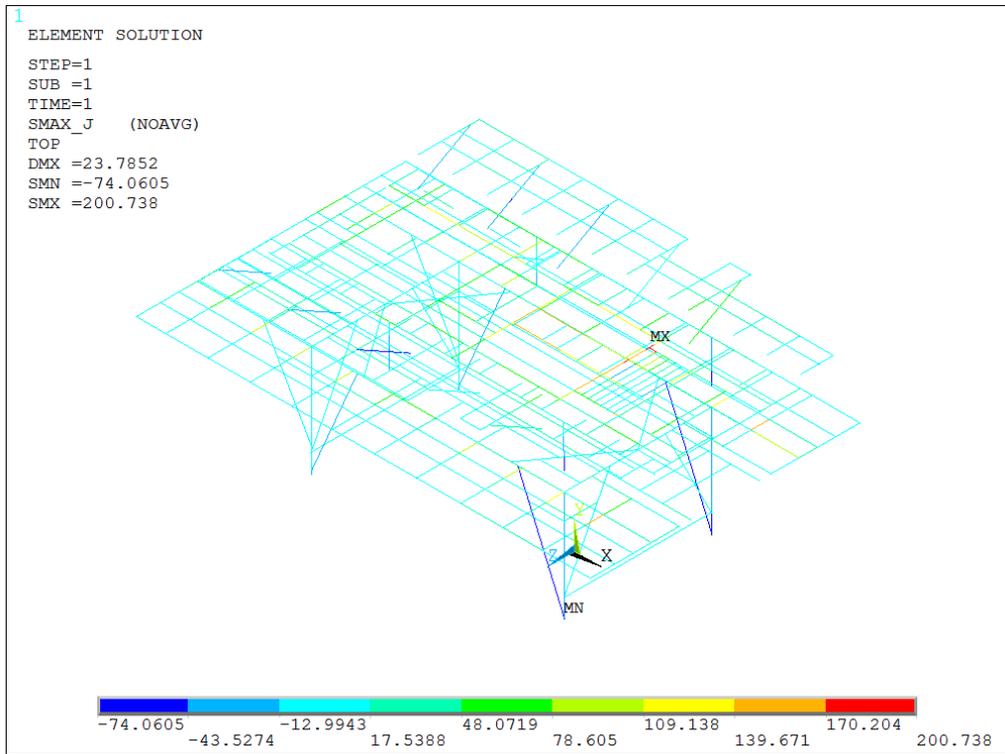


Figure 7. The static stress drawing of foundation  
图 7. 底座静力分析应力分布图

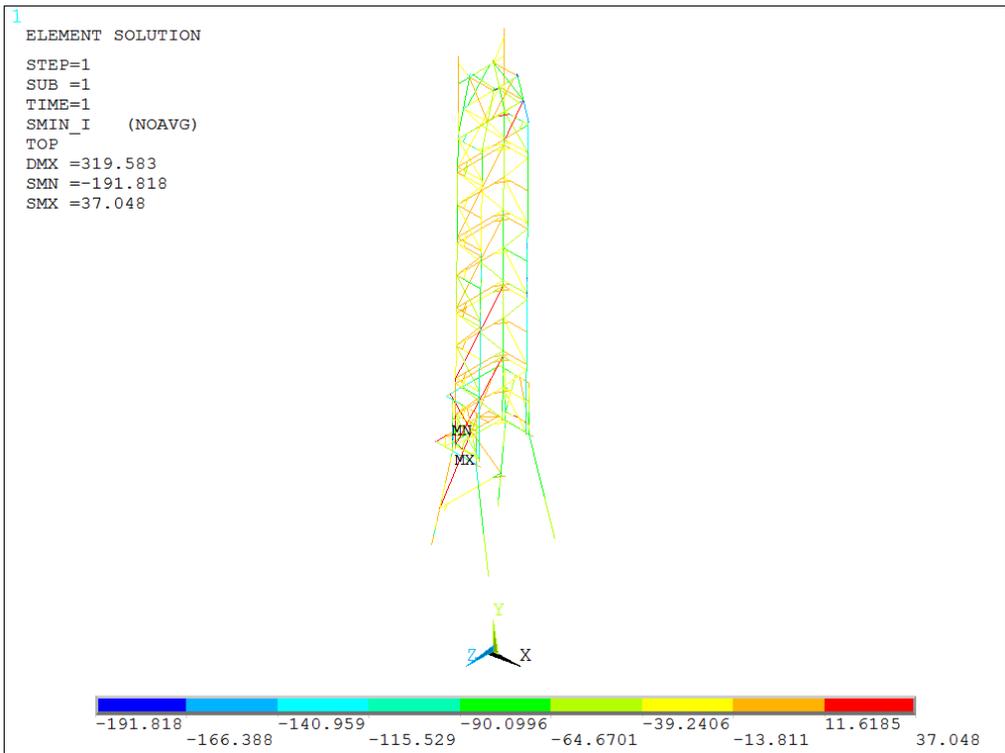


Figure 8. The seismic stress drawing of derrick  
图 8. 井架地震分析应力分布图

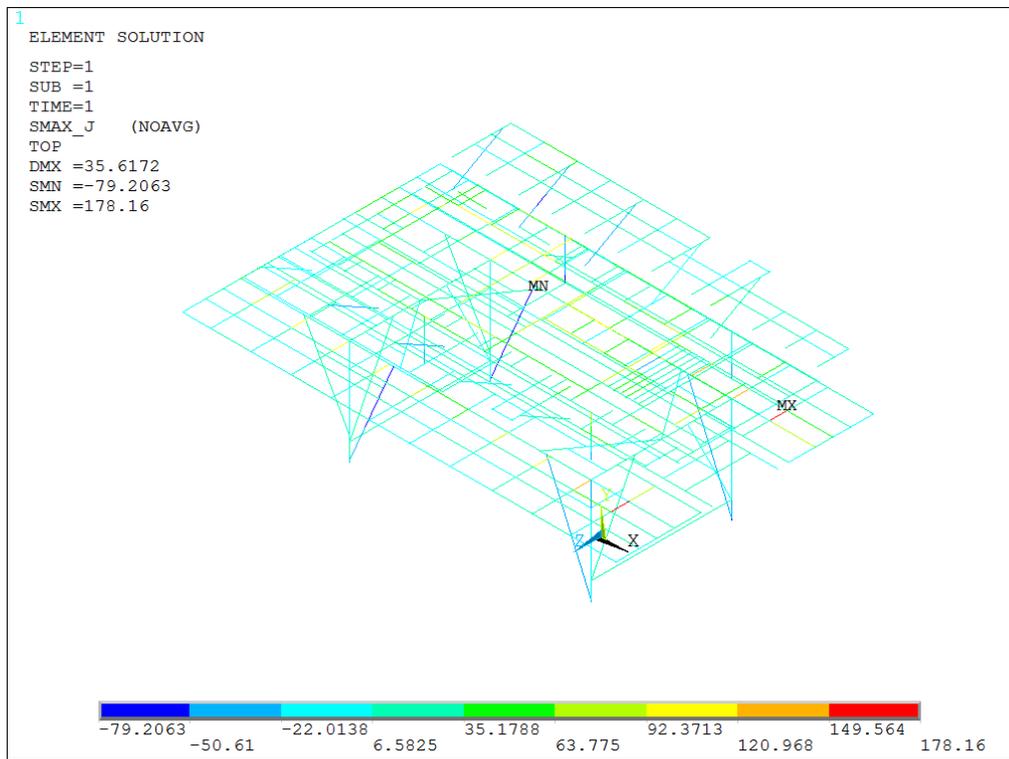


Figure 9. The seismic stress drawing of foundation  
图 9. 底座地震分析应力分布图

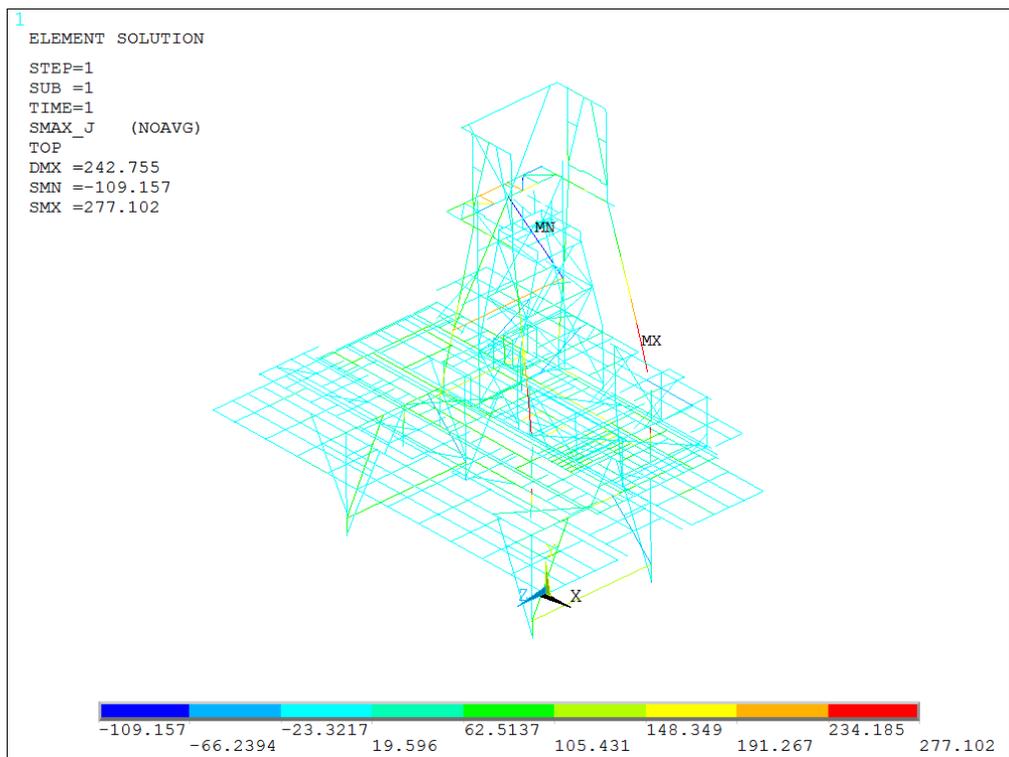


Figure 10. The stress drawing of towing  
图 10. 拖航应力分布图

结果表明，2250kN 海洋模块钻机在拖航分析中所有工况下所有杆件的强度、刚度和稳定性校核值均满足设计要求，拖航位移分布图如图 11 所示。

#### 5.4. 吊装分析结果

以钻台钢结构总成左后支腿吊装为例，吊装示意图如图 12 所示。根据 ANSYS 计算结果可知，下支腿吊装最大应力位于连接横撑处，最大应力为 40.4 Mpa，最大校核 Uc 值为 0.163。其应力云图如图 13 所示。

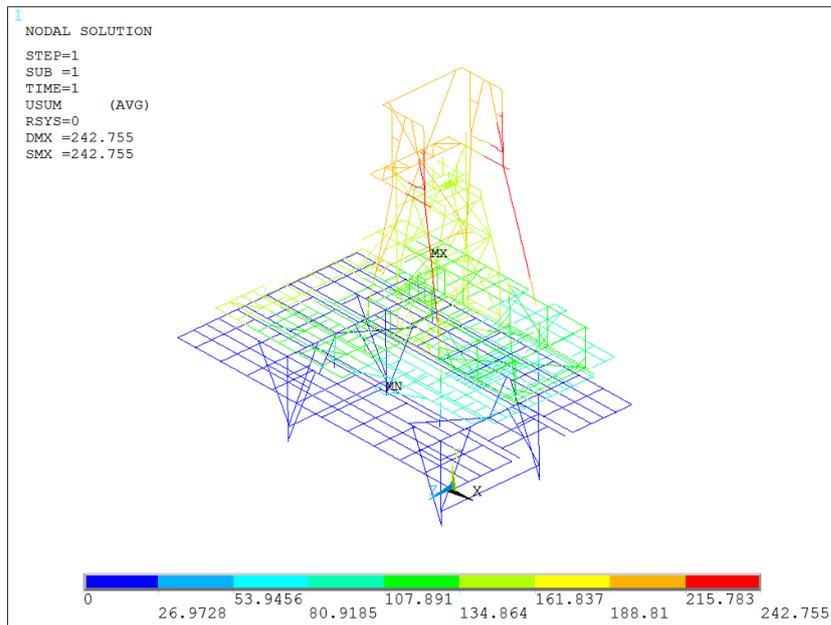


Figure 11. The displacement drawing of towing  
图 11. 拖航位移分布图

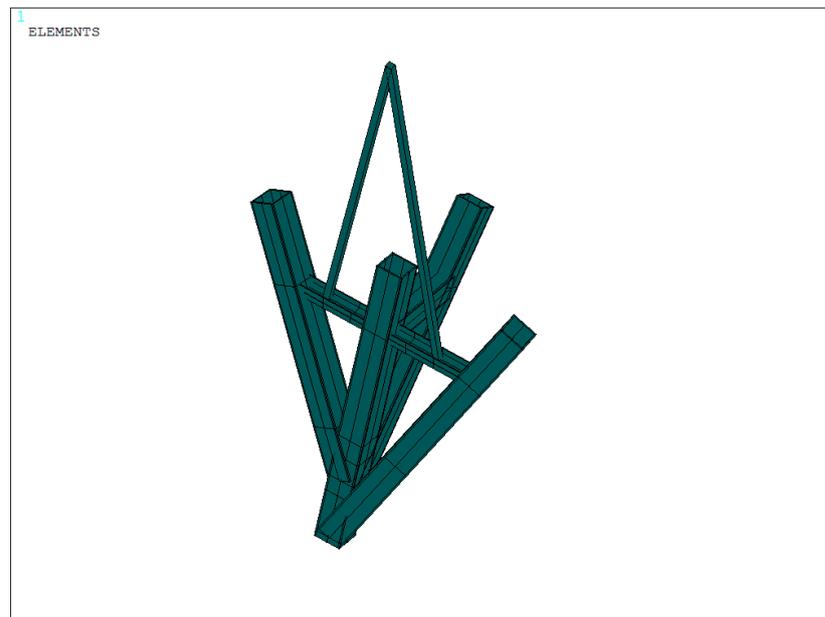


Figure 12. The sketch map of suspending  
图 12. 吊装示意图

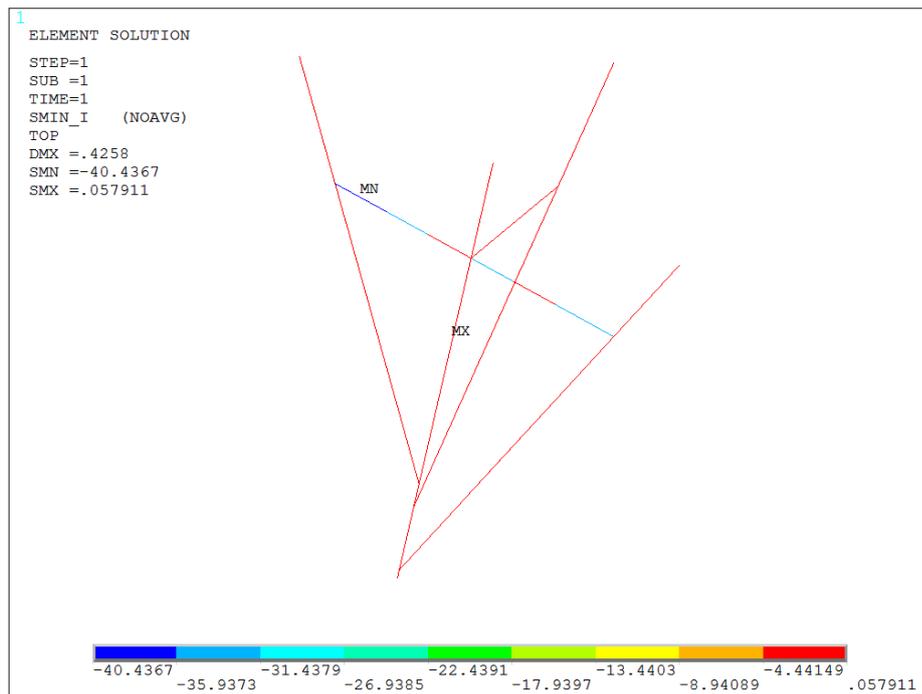


Figure 13. The stress drawing of suspending  
图 13. 吊装应力分布图

结果表明, 2250kN 海洋模块钻机在吊装分析中所有工况下所有杆件的强度、刚度和稳定性校核值均满足设计要求。

## 6. 结论

本文以 QHD32-6 项目 2250KN 海洋钻修机模块钻机为例, 通过对设计标准、规范及用户要求的贯彻, 深入研究海洋钻修机载荷工况, 提出合理的载荷列表及分析方法。2250KN 海洋钻修机各工况中, 操作工况、起升工况以及吊装工况中校核值不超过 1.0, 地震工况和拖航工况中校核值均不超过 1.33。海洋钻修机模块载荷工况分析为有限元计算和结构优化设计提供了充分且有力的计算依据, 并通过 CCS 及现场作业验证, 有效保证了钻修机的设计安全, 并为海洋钻修机设计提供了成功案例。

## 参考文献 (References)

- [1] 毕小钧, 程鹏, 杨秀菊, 等 (2014) 2250kN 海洋钻修机模块设计. *石油机械*, **11**, 155-158.
- [2] 周莉莉, 黄亮, 徐晓磊, 等 (2013) HXJ158C 型海洋修井机有限元计算与分析. *石油机械*, **6**, 63-67.
- [3] 周宁, 等 (2007) APDL 高级工程应用实例分析与二次开发. 第一版, 中国水利水电出版社, 北京.
- [4] 张辉, 冯利杰, 王泽, 等 (2014) HJJ675/52-T 型海洋井架在风暴自存下的特性分析. *石油机械*, **12**, 48-51.
- [5] 李清斌 (2014) 海洋工程船舶直升机甲板模块设计计算. *石油矿场机械*, **9**, 33-36.
- [6] 胡晶磊, 祁秀芳 (2014) JJ675/48-K 型井架起升过程力学分析. *石油矿场机械*, **10**, 97-99.