

文章编号:1005-9865(2023)03-0037-11

# 浮筒辅助大型导管架结构整体拆除 上浮过程动力响应特征研究

吕泽宇<sup>1, 2</sup>, 车巨鹏<sup>1, 2</sup>, 王树青<sup>1, 2</sup>, 宋宪仓<sup>1, 2</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**浮筒辅助大型导管架结构整体拆除作业是一个连续过程,作业过程中拆除系统的动力荷载及动力参数均会发生显著变化,传统基于某一稳定状态的结构动力响应分析方法不能准确预测拆除系统上浮过程中的动力响应。通过建立浮筒辅助大型导管架结构整体拆除上浮过程动态分析模型,对拆除系统上浮过程的动力响应特性进行研究。结果表明,整体拆除动态分析模型可以准确描述拆除系统上浮过程中浮筒及导管架浮力变化对上浮高度的影响机制,拆除系统上浮高度约为不考虑浮筒和导管架浮力变化时的 90%。此外,浮筒辅助大型导管架整体拆除方法的动态稳定性较强,四级海况下拆除系统的最大偏移量仅为 4.2 m,有较好的工程应用前景。

**关键词:**大型导管架结构;浮筒辅助拆除;连续上浮过程;动力响应特征;结构受力特性

**中图分类号:**P744;TE92 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2023.03.004

## Study on the dynamic response characteristics of the pontoon-assisted large-scaled jacket platform removal

LYU Zeyu<sup>1, 2</sup>, CHE Jupeng<sup>1, 2</sup>, WANG Shuqing<sup>1, 2</sup>, SONG Xiancang<sup>1, 2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The pontoon-assisted jacket platform removal is a continuous process, and the dynamic load and the dynamic characteristics of the removal system therefore change significantly in the de-ballasting process of pontoons. The conventional method based on a specific stable state cannot predict the dynamic response of the removal system accurately. The time-varying mass point is adopted to characterize the de-ballasting process of the pontoons, and a numerical model of the pontoon-assisted large-scaled jacket platform removal is established, and the dynamic response characteristics of the removal system are investigated with the numerical model. The results show that the numerical model can describe the influence of the pontoon and jacket platform's buoyancy change on the floating height of the removal system, and the floating height of the removal system is about 90% compared with that when the buoyancy change of the buoy and jacket is not considered. In addition, the maximum offset of the removal system under the four-class sea conditions is just 4.2 m, and this indicates that the pontoon-assisted large-scaled jacket platform removal method has good environmental adaptability, which has excellent engineering application prospects.

**Keywords:** large-scaled jacket platform; pontoon assisted removal; continuous floating process; dynamic response characteristics; mechanical properties of structure

收稿日期:2022-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52088102, 51879249);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(2021CXGC010701);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE101)

作者简介:吕泽宇(1998—),男,河南济源人,硕士研究生,主要从事海洋浮式结构动力耦合研究。E-mail: Lvzeyu@stu.ouc.edu.cn

通信作者:宋宪仓。E-mail: songxiancang@ouc.edu.cn

浮吊船吊装拆除是目前最常用的导管架拆除方法<sup>[1]</sup>,但随着导管架平台集成化程度的增加,导管架平台的质量与体积也越来越大,受限于浮吊船的作业能力与租用工期,采用浮吊船拆除大型导管架平台的难度与费用均急剧增加<sup>[2]</sup>。浮筒辅助导管架平台整体拆除方法通过在导管架结构上安装大型浮筒,借助浮筒的浮力平衡导管架结构重力,将切割后的导管架结构重新浮起,利用驳船将浮起的导管架运输到近海进行拆解,整个拆除过程无需借助大型起重设备,可在短时间内完成拆除作业,整体拆除费用较低,在大型导管架整体拆除方面具有显著优势,得到了业内的广泛关注。

浮筒辅助大型导管架整体拆除方法最早由国外技术人员提出并应用于实际工程,后续国内外学者对此方法进行了深入研究。美国矿业管理局(US-MMS)提出了一种基于多用途垂向提升装置(MPU-HL)的超大型导管架结构整体拆除方法,该方法基本思路是采用U型浮筒结构对万吨级上部组块和导管架结构进行整体拆除<sup>[3-4]</sup>。Ludescher等<sup>[5]</sup>对MPU系统进行了强度分析并在原来方案的基础上进行了优化设计。Landbø等<sup>[6]</sup>对优化后的结构进行了500余个工况分析,计算结果表明优化后的结构在多种工况均能保证施工安全。Aker Solution公司率先将浮筒辅助拆除技术应用于挪威北海万吨级导管架拆除工程实践中,实践结果表明,浮筒结构的存在降低了导管架结构拆除的成本和难度,同时该方法受环境荷载的影响也更小<sup>[7-8]</sup>。出于技术保密的原因,MMS与Aker并未公开设计与拆除的具体细节,浮筒拆除的推广在一定程度上受到了阻碍。

鉴于浮筒辅助大型导管架结构整体拆除方法的广阔应用前景,李润培和韩继文<sup>[9]</sup>使用准静力法对浮筒浮运导管架结构进行了强度评估,结果表明,浮筒及导管架结构的强度均满足AISC规范要求,从理论上验证了浮筒辅助导管架起浮与运输的可行性。成学明<sup>[10]</sup>、冯铁城和俞湘三<sup>[11]</sup>对浮筒浮运导管架过程进行了模型试验研究,获得了恒定航速下波浪参数与拆除系统作用力之间的关系曲线。冯士伦等<sup>[12]</sup>对气囊拆除导管架后拆除系统的稳性进行了校核,结果表明,拆除系统上浮结束时的状态满足《海上拖航指南》对完整稳性的要求。张志远<sup>[13]</sup>使用ALE固流耦合算法就气囊辅助拆除导管架进行了模拟,获得了导管架上浮过程的运动轨迹。

浮筒辅助大型导管架结构拆除作业涉及浮筒安装、导管架切除、浮筒及导管架上浮、导管架结构逆滑移装船等多个过程,其中浮筒和导管架结构组成的拆除系统在上浮过程中,其所受到的风、浪、流等动力环境荷载和系统本身的重心、惯性矩等动力特性均会发生突变,而现有的分析方法均是针对上浮过程某一稳定状态进行分析,未能考虑拆除系统上浮过程中导管架浮力变化的影响,不能准确预测上浮过程中拆除系统的动力响应,无法为实际工程的实施提供科学指导。

这里利用具有时变特性的质量点对浮筒排载过程进行等效表征,建立了复杂环境荷载下浮筒辅助大型导管架结构上浮过程动态分析模型,探究了环境荷载方向、环境荷载参数等对浮筒辅助大型导管架拆除上浮过程运动特性的影响规律以及导管架浮力变化对拆除系统上浮高度的影响,研究结果可为超大型导管架结构的整体拆除作业提供有益参考。

## 1 浮筒辅助大型导管架结构拆除过程

浮筒辅助大型导管架整体拆除过程可分为如图1所示的4个步骤:

a)浮筒结构安装及初次排水:通过对导管架水面以下的主导管结构进行探测,确定合适的浮筒辅助结构抱紧位置并清除相关附着物,借助辅助船舶和安装导缆将浮筒移动至预定位置。利用压载系统对浮筒结构进行压载,使浮筒下潜至指定深度,利用特种夹具将浮筒结构与导管结构进行连接。确定安装无误后,进行第一次排水,使浮筒结构的净浮力等于浮筒和导管架结构切割后的重力,以确保切割后的导管架结构能够顺利上浮,并不产生显著的加速度。

b)导管架结构水下切割:大型导管架整体拆除难度及费用极高,且整体拆除会在一定程度上破坏海底生态环境<sup>[14]</sup>,因此部分拆除是国际上通用的大型导管架拆除方式<sup>[15]</sup>,IMO要求大型深水导管架部分拆除时至少拆除至水面以下55 m<sup>[16]</sup>。按照预设的切割方案使用水下切割设备按照一定顺序对导管架结构进行切割,并使其在浮筒浮力的作用下产生上浮趋势,直至达到相对稳定状态后进行下一步拆除工作。

c)浮筒与导管架结构同步上浮:浮筒结构进一步缓慢排载,在浮筒浮力的作用下,浮筒与导管架组成的拆除系统逐渐上浮。在上浮过程中,受风、浪、流等复杂环境荷载的影响,拆除系统的姿态将不断变化,故需

要对整个上浮过程中拆除系统的动力响应进行准确的预测,以确定拆除系统的安全。

d) 导管架逆滑移装船、海上运输及近岸拆解: 运输驳船到达指定位置, 进行压载调整, 使船体倾斜一定角度, 主甲板尾部浸入水下 2~3 m, 并调整船尾摇臂初始角度, 对驳船系泊系统进行布置。将浮吊吊钩连接到拆除系统一侧, 使用浮吊调整拆除系统的倾斜角度与摇臂倾斜角度相同, 为上船做准备。将驳船上端的牵引设备与拆除导管架的上端相连, 通过牵引设备与浮吊的协同作用将拆除导管架逆滑移至运输驳船上。进一步利用拖轮将装载有拆除系统的驳船牵引至码头, 进行近岸拆解。

浮筒辅助大型导管架结构拆除过程共涉及两次排载作业, 初次排载时导管架结构处于完全约束状态, 施工条件安全; 但第二次排载时, 导管架结构已经完成切割且处于自由悬浮状态, 海洋动力环境对其运动响应应具有决定性的影响。这里将对第二次排载过程, 即拆除系统上浮过程中导管架运动响应进行研究。

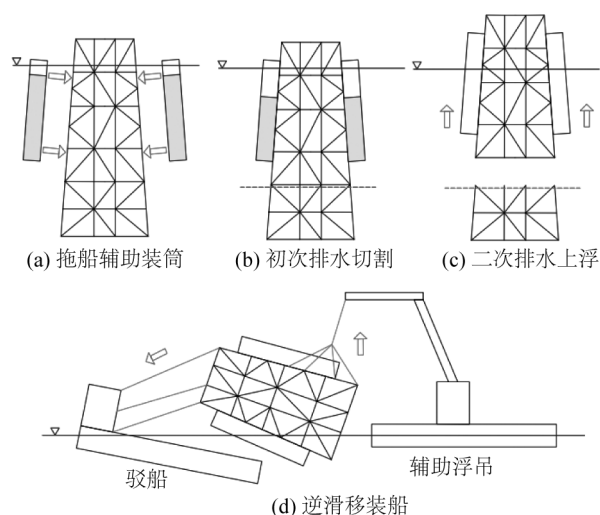


图1 拆除流程示意

Fig. 1 Flow-chart of the jacket platform removal

## 2 浮筒辅助导管架结构拆除模型及环境条件

### 2.1 浮筒辅助导管架结构整体拆除数值模型

以南海某万吨级导管架平台为研究对象来探究拆除系统上浮过程的动力响应, 如图2(a)所示, 目标平台为8腿16桩导管架平台, 平台作业水深为200 m, 平台高度为213 m。

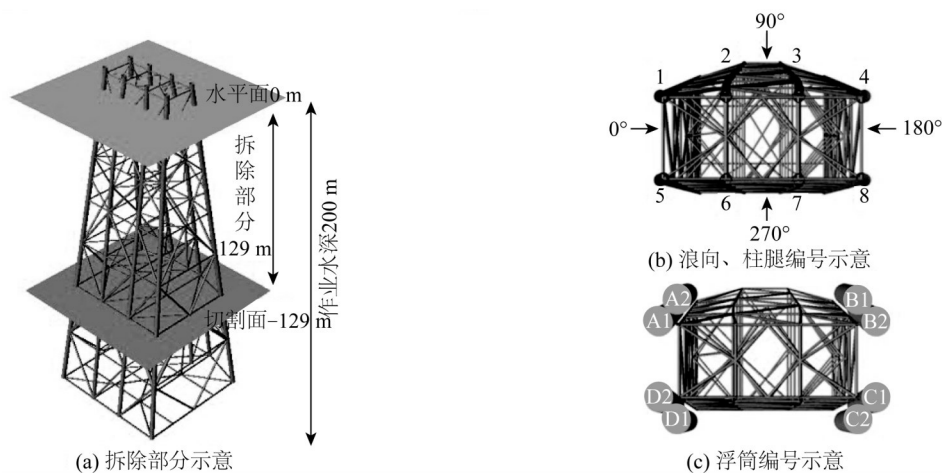


图2 导管架结构拆除系统示意

Fig. 2 The sketch of the removal system associated with the large-scaled jacket platform

依照在保证安全的前提下尽可能多拆除导管架结构的原则, 考虑到目标平台水下横撑分别位于水下15、41、69、98、128、164、200 m处, 后期运输驳船的长度为153 m, 为保证切割后导管架结构的强度能够满足要求, 同时切割后的导管架结构能够顺利装船, 最终将导管架结构的切割位置确定为第5层横撑下方1 m, 即

水面以下 129 m。浮筒组件由两个圆柱形浮筒结构组成,通过特制夹具安装在导管架结构 1、4、5、8 号桩腿上,桩腿编号如图 2(b)所示。安装浮筒后的拆除系统如图 2(c)所示,导管架结构及浮筒结构主要参数如表 1 所示,需要注意的是,表 1 中各参数值均为拆除导管架结构及浮筒结构组成的整体结构系统(简称拆除系统)空载时的参数,拆除系统排水过程中的质量、重心和惯性半径等参数会在 SIMA 每个时间步长计算后迭代更新。

表 1 拆除系统主要参数  
Tab. 1 Main particulars of removal system

| 参数         | 数值                                       |
|------------|------------------------------------------|
| 导管架质量/t    | 10 880.0                                 |
| 导管架尺寸/m    | 上部:18.0×44.0; 下部:54.0×65.0               |
| 导管架重心/m    | (−0.1, 0.8, −64.3)                       |
| 单个浮筒尺寸/m   | 19.2×72.0                                |
| 单个浮筒浮力/t   | 1 416.0                                  |
| 拆除系统总重/t   | 12 480.0                                 |
| 拆除系统总重心/m  | (−0.1, 0.7, −59.6)                       |
| 拆除系统惯性半径/m | $R_x$ : 44.8; $R_y$ : 46.9; $R_z$ : 26.9 |

2.2 浮筒压载舱室布置及模拟

为满足压排载和破舱稳性要求,将 8 个浮筒中的单个浮筒剩余压载空间分为 7 个舱室,每个舱室布置 1 台压排载泵,泵的流量为 0.488 m³/s(0.5 t/s),作业持续时间为 150 s,作业结束时可排载 75 t 压载水,在模拟过程中采用初始质量相同,可随时间连续变化的质量点对舱室连续排载过程进行等效模拟。按照从上到下的顺序对舱室压载水依次排载,当最上面舱室排载完成后,关闭该舱室水泵,并开启其下方舱室的水泵继续排载,直至 7 个舱室所有压载水全部排空。根据上述过程,压载水将以 0.488 m³/s 的恒定速率排载,即质量点以 0.5 t/s 的速率减少。以浮筒 A1 为例对时变质量点代替压载水的设置及各水泵排载时间进行简要说明,浮筒 A1 模拟质量点的重心坐标及变化规律如表 2 所示。其中质量点变化用于模拟第二次排水时浮筒压载水量变化,该部分压载水仅用于控制拆除系统的上浮,拆除系统漂浮的浮力由浮筒初次排水时的排水量所提供,故结构的剩余压载水的质量远小于拆除系统本身的质量。

表 2 舱室及模拟质量点分布  
Tab. 2 The arrangement of the de-ballasting tank and the mass points

| 质量点编号 | 质量点坐标/m             | 质量点初始质量/t | 质量点变化(各水泵工作)时间/s |
|-------|---------------------|-----------|------------------|
| A11   | (28.0, 16.0, −46.0) | 75        | 0~150            |
| A12   | (29.1, 17.1, −50.0) | 75        | 150~300          |
| A13   | (29.7, 17.7, −54.0) | 75        | 300~450          |
| A14   | (30.3, 18.3, −58.0) | 75        | 450~600          |
| A15   | (30.9, 18.9, −62.0) | 75        | 600~750          |
| A16   | (31.4, 19.4, −66.0) | 75        | 750~900          |
| A17   | (32.0, 20.0, −70.0) | 75        | 900~1 050        |

2.3 环境条件

为探究动力环境对拆除系统上浮过程响应特征的影响规律,根据目标导管架平台所处海域的水文资料,选取了 9 组不同的海况进行研究,如表 3 所示。其中 C1、B1、B2 和 B3 海况用于探究动力环境作用方向对拆除系统动力响应特征的影响;C1~C6 海况用于探究不同能级动力环境对拆除系统动力响应特征的影响,

其中C1~C3为三级海况,C4~C6为四级海况。数值分析过程中采用JONSWAP谱来描述随机波浪的能量分布,采用NPD谱来描述海风的能量分布,海流流速取0.5 m/s,假设风、浪、流同向作用。

表3 动力环境参数

Tab. 3 The parameters of the environmental conditions

| 工况 | 有效波高 $H/m$ | 波浪周期 $T/s$ | 风浪流方向 $/(^{\circ})$ | 风速 $v_{win}/(m \cdot s^{-1})$ | 海流 $v_{cur}/(m \cdot s^{-1})$ |
|----|------------|------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| C1 | 1.0        | 6.0        | 0                   | 20.0                          | 0.5                           |
| B1 | 1.0        | 6.0        | 45.0                | 20.0                          | 0.5                           |
| B2 | 1.0        | 6.0        | 90.0                | 20.0                          | 0.5                           |
| B3 | 1.0        | 6.0        | 225.0               | 20.0                          | 0.5                           |
| C2 | 1.0        | 8.0        | 0                   | 20.0                          | 0.5                           |
| C3 | 1.0        | 10.0       | 0                   | 20.0                          | 0.5                           |
| C4 | 2.0        | 6.0        | 0                   | 30.0                          | 0.5                           |
| C5 | 2.0        | 8.0        | 0                   | 30.0                          | 0.5                           |
| C6 | 2.0        | 10.0       | 0                   | 30.0                          | 0.5                           |

## 2.4 拆除系统水动力系数选取

采用SIMA模块中细长结构(slender element)单元建立浮筒及导管架主体结构,依据SY/T 10050—2004与DNV-RP-C205<sup>[17-18]</sup>要求计算作用在拆除系统水上部分的风荷载,使用莫里森公式计算作用在拆除系统水下部分的波浪荷载,风荷载计算公式如式(1)所示。

$$F = CqS\sin\alpha \quad (1)$$

式中: $C$ 为形状系数,根据规范取浮筒形状系数为 $C = 0.6$ ,导管架形状系数为 $C = 0.8$ ;  $q$ 为基本风压,由 $q = 0.5\rho_a|U_{T,z} - v|(U_{T,z} - v)$ 计算得到, $\rho_a$ 为空气密度, $U_{T,z}$ 为高度 $z$ 处时间间隔 $T$ 内的平均风速, $v$ 为构件瞬时速度; $S$ 为垂直于风向结构的投影面积; $\alpha$ 为风向与构件轴线之间的夹角。

SIMA中将细长结构离散为 $n$ 个子单元( $n=20$ ),单独计算作用在每个离散单元上的风荷载,将各个离散单元上的荷载叠加后获取作用在每个细长结构上的总荷载,进而获取作用在拆除系统上总的风荷载<sup>[19]</sup>。因此拖曳力系数与附加质量系数的合理选取将影响到环境荷载作用的结果。结合浮筒及导管架的实际形状及粗糙度分别选取拖曳力系数与附加质量系数如表4所示。

表4 拆除系统水动力系数

Tab. 4 Hydrodynamic coefficients of removal system

| 拆除系统水动力系数 | 数值   |
|-----------|------|
| 浮筒拖曳力系数   | 0.65 |
| 浮筒附加质量系数  | 1.00 |
| 导管架拖曳力系数  | 1.05 |
| 导管架附加质量系数 | 0.85 |

## 3 动力环境作用下拆除系统上浮过程动力响应

采用SESAM软件SIMA模块中的细长结构单元建立具有重力、可变排水体积等属性的拆除系统模型,使用具有时变特性的质量点对浮筒排载过程进行等效表征,通过时变质量点质量的变化控制拆除系统的上浮,建立拆除系统连续上浮时域分析模型。在数值模拟过程中,拆除系统的质量、重心、惯性矩以及拆除系统受到的风、浪荷载均会在每个时间步内进行更新,时间步长为0.02 s,模拟时长为1 050 s,通过数值模拟得到拆除系统连续上浮过程中的动力响应,并对其响应特征进行深入分析。

3.1 拆除系统上浮过程动力响应分析

首先对 C1 基准工况下拆除系统的运动响应进行分析,随着浮筒排水拆除系统逐渐上浮,整个系统的质量、重心及惯性半径等参数均会发生变化,表 5 给出了拆除系统切割后上浮开始及结束状态下的质量、重心、惯性半径等参数,需要注意的是表 5 中重心高度均指重心相对于导管架顶端的距离。在动力环境作用下拆除系统上浮过程中六自由度的运动响应如图 3 所示。各个自由度位移均为拆除系统重心处的位移。

表 5 拆除系统上浮开始及结束时漂浮状态主要参数

| Tab. 5 The main particulars of the removal system at the beginning and ending of the floating procedure |                                          |                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 参数                                                                                                      | 初始状态                                     | 上浮结束状态                                   |
| 浮筒压载水量/%                                                                                                | 35                                       | 0                                        |
| 拆除系统总质量/t                                                                                               | 16 680                                   | 12 480                                   |
| 拆除系统重心/m                                                                                                | (-0.1, 0.5, -62.2)                       | (-0.1, 0.7, -59.6)                       |
| 拆除系统惯性半径/m                                                                                              | $R_x$ : 40.1; $R_y$ : 43.0; $R_z$ : 28.2 | $R_x$ : 44.8; $R_y$ : 46.9; $R_z$ : 26.9 |

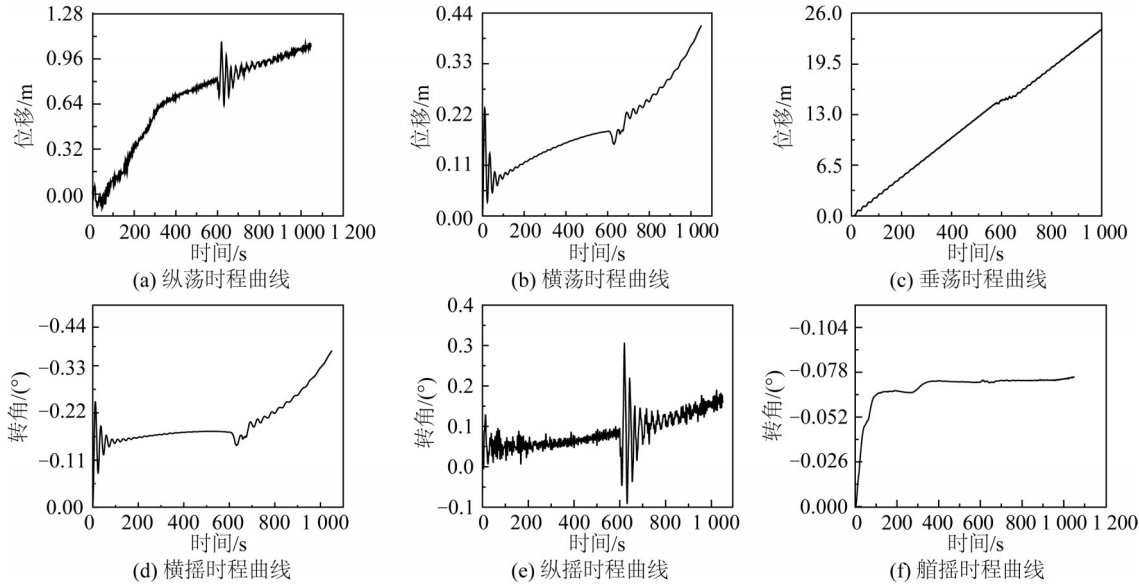


图 3 拆除系统上浮时域位移曲线

Fig. 3 Floating time domain displacement curve of removal system

按照拆除系统上浮时域位移曲线变化将其分为 0~100 s 的启动阶段、100~600 s 的稳定上升阶段、600 s 附近的横撑出水阶段以及 600~1 050 s 的二次平稳上升阶段 4 个阶段进行分析。

由图 3 可知:启动阶段拆除系统六自由度均会产生一个明显的振荡响应,该响应会随时间逐渐衰减并趋于稳定。稳定上升阶段以相对平缓的状态稳定上浮,纵荡位移受到环境荷载作用的影响逐渐增大,垂荡位移因排水量的增加稳定上升,其余四自由度上位移变化较小。横撑出水阶段,纵荡与纵摇位移出现一个明显增大的振荡,横荡与横摇则呈现出明显降低趋势,这是由于横荡与横摇所在方向为导管架短边所在方向,横撑出水时上浮速度降低,在惯性作用下会产生垂直于短边的晃荡从而产生了这种现象;垂荡在此阶段基本不随排水量的增加而改变,其原因是单位高度横撑排水体积相比斜撑大了许多,需要在单位时间内排出更多的水抵消这部分浮力。二次平稳上升阶段拆除系统六自由度运动情况与稳定上升阶段基本相同。

整个模拟过程中拆除系统垂荡运动响应随浮筒恒定排载线性增大,其余 5 个自由度上运动幅值始终在较小的范围内,最大水平位移为 1.21 m,最大转角为 0.43°,较小的运动幅值与相对稳定的上浮过程保证其不会与其他施工船舶发生碰撞,降低了拆除作业的风险。

3.2 拆除系统环境适应性分析

拆除作业需要明确适用的环境条件,通过对比 C1~C6 六个不同海况下拆除系统六自由度上的运动响应,以探究浮筒辅助大型导管架结构拆除方法对作业环境的敏感性,进一步明确实际工程中浮筒辅助大型

导管架结构整体拆除的作业条件。不同海况下拆除系统运动响应最大位移统计结果如图4所示。

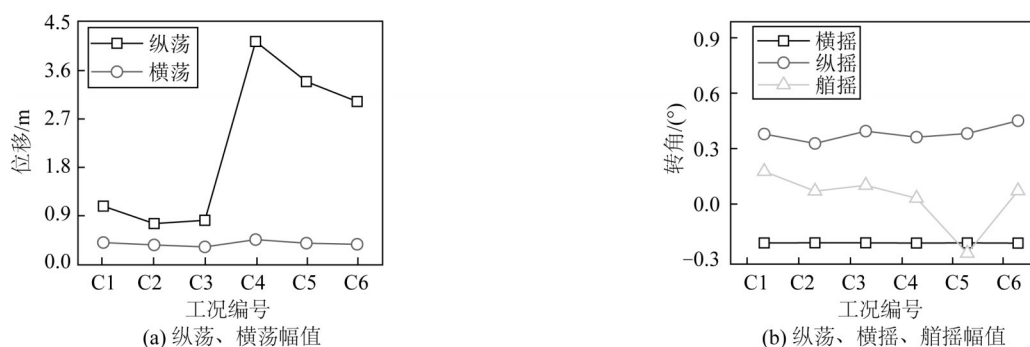


图4 拆除系统多种环境工况下最大运动响应

Fig. 4 Maximum motion response of removal system under various environmental conditions

由图4可知:在不同环境条件下,拆除系统横荡、纵摇、横摇以及艏摇4个自由度上运动响应均非常小,其最大运动幅值在 $-0.5 \sim 0.5$  m之间,由于迎浪导致纵荡较大,C4海况下最大幅值达4.2 m。拆除系统的运动响应随风浪的变化较为平缓,上浮过程中不会发生剧烈运动。纵荡在上浮过程中随风浪变化则较为明显,由C1、C2、C3与C4、C5、C6两组海况下的结果可知,当其他条件一定时,拆除系统纵荡运动最大运动幅值随波浪周期增大而缓慢降低。

其中C6工况已到达四级海况<sup>[20]</sup>的要求,远超吊装以及浮托拆除方法能够适用的二级海况条件,浮筒辅助大型导管架拆除方法具有更好的环境适应性和更长的作业窗口,作业效率更高,施工成本更低。

### 3.3 拆除系统环境作用方向敏感性分析

浮式结构在同一能级不同方向环境荷载作用下运动响应有较大的差异。通过对比C1、B1、B2和B3四个海况下拆除系统的运动响应以分析拆除系统对环境荷载作用方向的敏感性。不同海况下拆除系统时域位移曲线如图5所示,拆除系统不同自由度上的最大位移统计结果如图6所示。

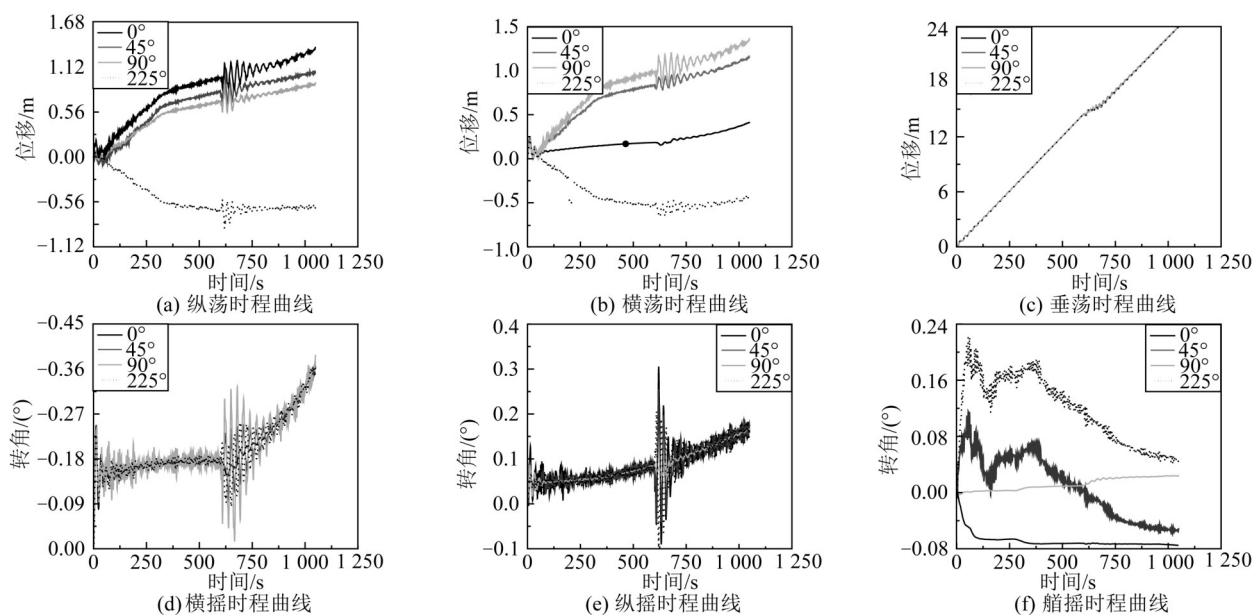


图5 环境荷载沿不同方向作用时拆除系统的动力响应时程

Fig. 5 Dynamic response of the removal system under the environmental loads incidented from different directions

由图5可知,不同风浪方向条件下拆除系统横摇、纵摇运动响应趋势与3.1节中C1工况下运动响应趋势基本相同,这是由于拆除系统上浮开始与结束时的初稳性高分别为21.2 m与17.6 m,远超常见船舶3 m的最大初稳性高,故拆除系统抵抗倾斜力矩的能力较强,进而导致横摇纵摇幅值受环境变化影响并不明显。不同方向的环境荷载对拆除系统纵荡、横荡水平方向偏移有较大影响,纵荡运动幅值随着风浪角度的增加逐渐降低,其中45°与225°为对角线方向,二者运动幅值刚好相反。横荡运动幅值随风浪角度增加而逐渐增

加,其中 $45^\circ$ 与 $225^\circ$ 运动幅值同样相反。结合图2(b)可知 $0^\circ$ 风浪方向垂直于拆除系统短边, $90^\circ$ 风浪方向垂直于拆除系统长边,拆除系统会沿着环境作用方向产生相应的水平偏移,因此纵荡与横荡运动幅值随环境方向从 $0^\circ$ 至 $90^\circ$ 呈现出此减彼增的现象。由图6(a)可知,纵荡和横荡位移随着环境荷载作用方向的改变呈现出此消彼长的趋势,即纵荡最大位移降低时,横荡最大位移会随之增加。由图6(b)可知,环境荷载作用方向对拆除系统的横摇、纵摇、艏摇这3个自由度上的运动影响很小,多个工况下艏摇运动响应均在0附近,原因在于拆除系统大部分在水面以下,上浮过程中基本未发生大角度的偏移,故可认为重心、浮心始终位于同一垂直线上,由初稳性公式可得出上浮开始与结束时的初稳性高分别为21.2 m与17.6 m,远超常见船舶3 m的最大初稳性高<sup>[21]</sup>,由于拆除系统稳性极好,3个转角自由度上的响应极小。

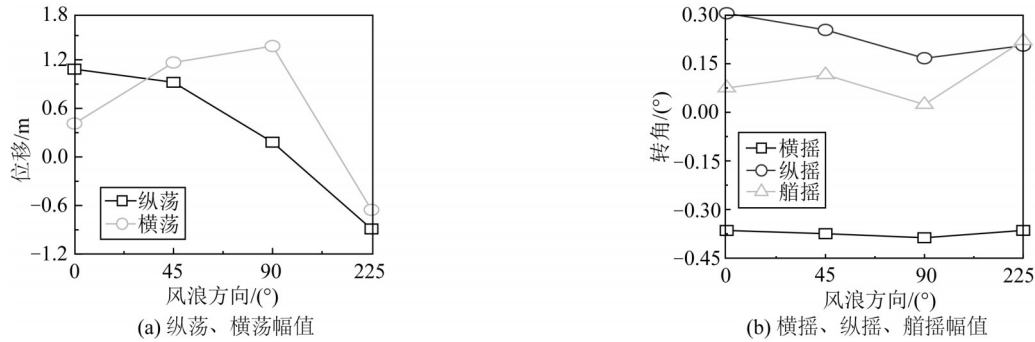


图6 拆除系统环境方向敏感性分析

Fig. 6 Environmental direction sensitivity analysis of removal system

### 3.4 浮筒及导管架浮力变化对拆除系统上浮高度的影响

拆除系统在上浮过程中导管架浮力会逐渐变化,该浮力变化存在于整个上浮过程之中,并将影响拆除系统的最终上浮状态,本节建立了导管架与浮筒变浮力模型,在此基础上深入研究导管架浮力变化对排水量与上浮高度、排水速率与上浮速率的影响。

#### 3.4.1 拆除系统变浮力模型建立

考虑到导管架构件较多且分布复杂,按照导管架实际结构进行排水体积计算将会导致拆除系统的排水体积模型更加复杂,为简化拆除系统的排水体积模型,在符合工程实际以及保证模型精度的前提下引入以下假设对导管架结构进行合理简化:

- 1) 相邻两层横撑之间斜撑的排水体积线性分布在这两层横撑之间;
- 2) 导管架浮力在每一层横撑所在高度处会发生突变,数值为横撑排水体积;
- 3) 导管架主柱腿由于切割进水而完全丧失浮力,在本模型中不考虑其浮力。

基于以上假设建立导管架结构变浮力模型,可表示为式(2)形式

$$F_j(h_s)/(\rho g) = a - b(h_s - c) \quad (2)$$

式中: $F_j$ 为导管架浮力, $a$ 为每层横撑下导管架体积, $b$ 为两层横撑间杆件体积折合系数, $c$ 为该层横撑所在水下深度, $h_s$ 为导管架上浮高度, $F_j(h_s)$ 为导管架上浮 $h_s$ 时导管架部分的排水体积。

对于所选导管架有:

$$\frac{F_j(h)}{\rho g} = \begin{cases} 5083.28 - 12.32h & 0 \leq h < 15 \\ 4734.35 - 14.31(h - 15) & 15 \leq h < 41 \\ 4004.14 - 17.75(h - 41) & 41 \leq h < 69 \\ 2898.32 - 20.45(h - 69) & 69 \leq h < 98 \\ 1645.92 - 16.07(h - 98) & 98 \leq h < 129 \end{cases} \quad (3)$$

根据以上三条假设及式(2)绘制如图7所示的导管架排水体积随上升高度变化图。

为进一步说明式(4)~(7)的推导过程,引入拆除系统初始状态与上浮 $h_s$ 高度后的状态(见图8)进行补充。图8中, $h_1$ 为浮筒初始压载水的高度, $h_2$ 为初始空载高度, $h_3$ 为上浮高度为 $h_s$ 时浮筒内剩余的压载水高度, $h_4$ 为上浮高度为 $h_s$ 时水下空载高度, $h_5$ 为任意时刻浮筒上浮高度。

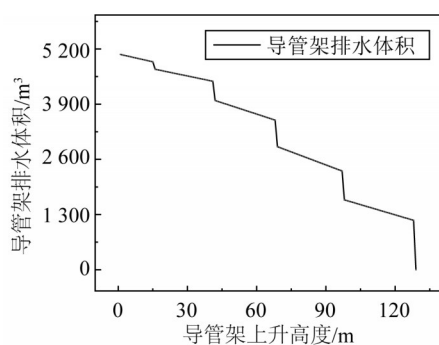


图7 导管架排水体积

Fig. 7 Jacket drainage volume

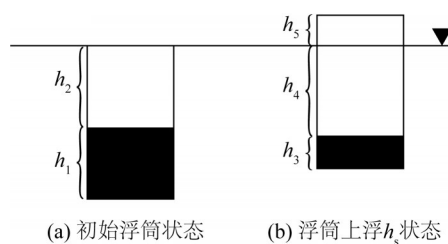


图8 浮筒上浮示意

Fig. 8 Schematic diagram of floating pontoon

由于拆除系统上浮过程中加速度很小,在忽略加速度的条件下,可认为浮筒初始状态与上浮 $h_5$ 状态下浮力与重力存在如下关系式。

$$F_j + F_f = G_j + G_f + G_w \quad (4)$$

式中:脚标j、f、w分别代表导管架、浮筒、压载水。

将式(2)代入式(4)建立等式可得上浮高度 $h_5$ 与浮筒剩余压载水高度 $h_3$ 之间的关系式:

$$h_5 = \left[ h_1 - h_3 - \frac{F_j(0)}{8\rho g A} + \frac{bc - a}{8A} \right] \frac{8A}{b + 8A} \quad (5)$$

式中: $A$ 为单个浮筒横截面积。

式(5)为拆除系统上浮过程中竖直方向上浮高度方程。

浮筒排水速度与排水量有以下关系

$$h_1 - h_3 = \frac{v_d t}{8A} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),两边同时对时间求导可得

$$v = \frac{v_d}{b + 8A} \quad (7)$$

式中: $v_d$ 为单筒排水速度。

式(7)即为排水速度控制上浮速度的方程。

### 3.4.2 拆除系统上浮方程有效性验证

以C1工况下,单筒排水速率为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,拆除系统上升25 m这一阶段连续上浮过程为例进行时域动态模拟,将式(5)计算得出的上浮高度以及式(7)计算得出的上浮速度与相同条件下SESAM的SIMA模块计算得到的上浮高度与上浮速度进行对比,结果分别如图9和10所示。

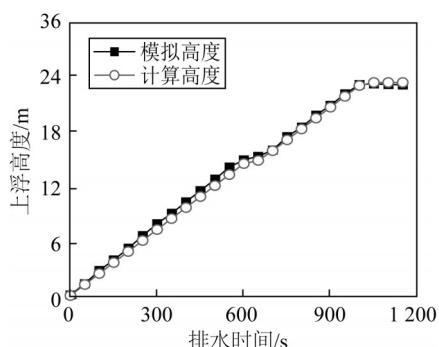


图9 高度方程验证

Fig. 9 Height equation verification

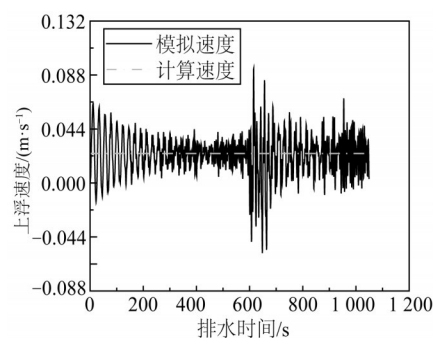


图10 速度方程验证

Fig. 10 Velocity equation verification

由图9可知,基于上浮高度方程式(5)得到的上升高度与商业软件计算得到的结果吻合较好。在整个上浮过程中,二者仅存在极小的差异,其相对于整个上浮高度可以忽略不计,因此认为拆除系统上浮高度方程的准确性能够得到保证,导管架模型的简化是合理可行的。

由图10可知,基于方程式(7)得出的拆除系统上浮速度在恒定排水速率下为定值,这与商业软件计算结果是不吻合的,但从整个上浮过程上来看,商业软件计算得到的拆除系统上浮速度始终以简化模型计算得到的拆除系统上浮速度为中心振荡,简化模型仍然能够反应一段时间内拆除系统平均上浮速度,可以满足工程上的应用需求。

### 3.4.3 导管架浮力变化对上浮影响分析

本节将在变浮力模型基础上深入研究导管架排水体积变化对拆除系统上浮过程的影响。考虑与不考虑变浮力影响下,拆除系统上浮高度如图11所示。

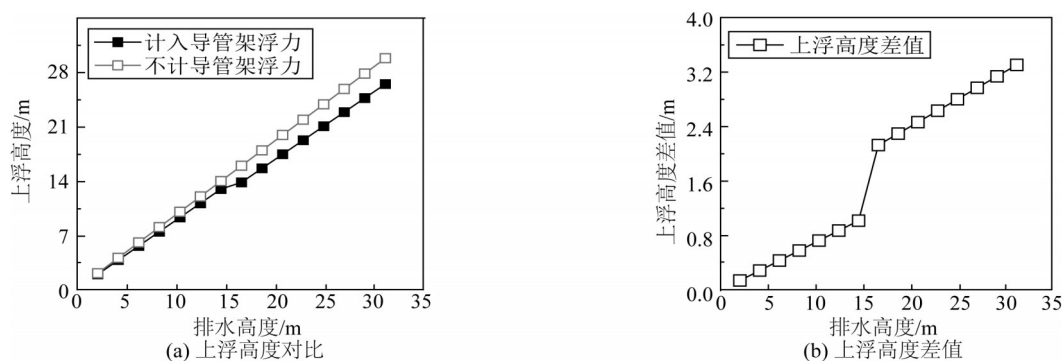


图11 导管架浮力变化影响

Fig. 11 Influence of jacket buoyancy change

由图11(a)可知:当不计导管架结构浮力变化时,拆除系统上浮高度随着浮筒排水高度的增加呈现线性增长趋势;当计入浮力变化时,拆除系统任意时刻上浮高度相对前者均会有一定程度下降,结合图11(b)可知该差值会随排水高度增加而逐渐增大,拆除系统上升到15 m时该差值急剧增大,结合导管架结构图可知15 m为第一层横撑出水高度,由于横撑排水体积较大,导致浮筒需要排更多水才能使拆除系统继续上浮。不考虑导管架浮力变化时,拆除系统最大上浮高度为29.6 m,考虑导管架浮力变化时,拆除系统最大上浮高度为26.4 m,两者的差异值为3.2 m,排水高度为25 m时计入导管架浮力变化的上浮高度仅为不计导管架浮力变化的90%,导管架浮力变化对于上浮过程的影响不可忽略。

## 4 结 语

1)典型拆除动力环境条件下,拆除系统上浮过程中垂荡以外的5个自由度运动幅值较小,各自由度运动变化较为平缓,四级海况下其运动性能仍能满足施工要求。浮筒辅助大型导管架拆除方法的环境适用性远超传统的吊装拆除,可在更恶劣的海况下实施拆除作业,施工窗口期的选择更多。

2)导管架对于动力环境方向的变化不敏感,各自由度上的最大位移受风浪方向的影响较小,对动力环境作用方向的适应性良好,能够应用于更加复杂的海况。

3)导管架浮力变化对拆除系统上浮高度的影响不可忽略。建立的导管架变浮力模型在不考虑动力环境作用的条件下可以准确描述拆除系统上浮过程中浮力变化影响,可在一定程度上为浮筒辅助大型导管架整体拆除方法的工程化应用提供指导。

## 参考文献:

- [1] 李新仲, 徐本和. 海上油气田的废弃处置[J]. 中国海上油气(工程), 2003, 15(1): 46-49. (LI X Z, XU B H. Waste disposal of offshore oil and gas fields[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2003, 15(1): 46-49. (in Chinese))
- [2] MARTINS I D, MORAES F F, TAVORA G, et al. A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 184: 105000.
- [3] BERGER J C. Introduction to the frigg cessation project[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston, 2011: OTC-21694-MS.
- [4] 李迅科, 杜庆贵, 冯玮. 典型 Single-Lift 起重系统浅析[J]. 中国造船, 2013, 54(增刊2): 53-60. (LI X K, DU Q G, FENG W. Introduction of typical single-lift system[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(Suppl2) 53-60. (in Chinese))
- [5] LUDESCHER H, HAUGERUD S A, FERNANDEZ RUIZ M. Detail design of the MPU heavy lifter[C]//SPE Symposium. FIB

- Symposium Amsterdam 2008. 2008: 931-937.
- [6] LANDBØ T, HOLM E B, LUDESCHER H. MPU Heavy lifter-A lightweight concrete vessel for heavy offshore lifting operations [J]. *Tailor Made Concrete Structures*, 2008: 925-929.
- [7] BERGER J C. The frigg cessation project [C]//*Proceedings of the SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition*. Aberdeen, UK, 2011: SPE-148626-MS.
- [8] MOLTU U E, AAVIK G. Developing key performance indicators (KPIs) for energy consumption and air emissions versus material recovery and removal methods applied for the Frigg & Mcp01 cessation project in the North Sea [C]//*SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production*. One Petro, 2010: SPE-126825-MS.
- [9] 李润培, 韩继文. 导管架浮筒浮运强度分析[J]. *海洋工程*, 1985, 3(1): 24-35. (LI R P, HAN J W. The strength analysis of jackets in floating transportation condition [J]. *The Ocean Engineering*, 1985, 3(1): 24-35. (in Chinese))
- [10] 成学明. 在拖航中海洋工程结构物和浮筒相互作用力的试验研究[J]. *海洋工程*, 1986, 4(3): 83-90. (CHENG X M. The experimental study of the interaction force between offshore structure and floatation tanks in towing condition [J]. *The Ocean Engineering*, 1986, 4(3): 83-90. (in Chinese))
- [11] 冯铁城, 俞湘三. 海洋固定平台导管架浮运过程分析[J]. *上海交通大学学报*, 1985(3): 19-29. (FENG T C, YU X S. An analysis of process of transporting jackets with a float [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*. 1985(3): 19-29. (in Chinese))
- [12] 冯士伦, 朱晓宇, 李焱, 等. 柔性气囊助浮法拆除导管架技术研究[J]. *海洋工程*, 2022, 40(2): 36-43. (FENG S L, ZHU X Y, LI Y, et al. Research on the technology of removing jacket by flexible air-bag-assisted floating method [J]. *The Ocean Engineering*, 2022, 40(2): 36-43. (in Chinese))
- [13] 张志远. 气囊助浮法在导管架拆除过程中的关键技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. (ZHANG Z Y. The key technology research of airbag-assisted floatation in the removal of the jacket [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017. (in Chinese))
- [14] SCHROEDER D M, LOVE M S. Ecological and political issues surrounding decommissioning of offshore oil facilities in the Southern California Bight [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2004, 47(1/2): 21-48.
- [15] SMITH J B, BYRD R C. Estimated air emissions savings from partially removing and reefing the jacket of a large California oil and gas platform [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 211(4): 105741.
- [16] IMO. Guidelines and standards for the removal of offshore installations and structures on the continental shelf and in the exclusive economic zone [S]. Braunschweig: IMO, 1989.
- [17] DNV. SIMO-user-manual [M]. Oslo: Det Norske Veritas, 2018.
- [18] DNV. Environmental conditions and environmental loads: DNV-RP-C205 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010.
- [19] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国石油天然气行业标准: SY/T 10050-2004 [S]. 北京: 海洋石油工程专业标准化技术委员会, 2004. (National Development and Reform Commission. Oil and gas industry standard of the People's Republic of China: SY/T 10050-2004 [S]. Beijing: Technical Committee for Standardization of Offshore Oil Engineering, 2004. (in Chinese))
- [20] 马令琪, 杨家轩, 简俊. 恶劣天气和恶劣海况的学术含义分析[J]. *中国航海*, 2021, 44(1): 14-20. (MA L Q, YANG J X, JIAN J. On academic meaning of severe weather and severe sea condition [J]. *Navigation of China*, 2021, 44(1): 14-20. (in Chinese))
- [21] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上册) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003. (SHENG Z B, LIU Y Z. Principle of ship (first volume) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. (in Chinese))