

# 铺管船在波浪中时域运动与仿真控制

邓林青<sup>1</sup>, 黄福祥<sup>2</sup>, 黄 焱<sup>3</sup>, 田立锋<sup>2</sup>, 阴炳钢<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>海洋石油工程股份有限公司, 天津

<sup>3</sup>哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨

Email: denglq3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年8月19日; 录用日期: 2020年9月4日; 发布日期: 2020年9月11日

## 摘 要

为了能够准确而有效的计算铺管船在波浪中的运动情况, 本文基于船舶时域运动学方程, 以Jonswap谱作为不规则波浪输入, 并应用PID控制器和Kalman滤波器相结合的动力定位系统, 对铺管船在波浪中的时域定位控制进行仿真模拟。通过对不同有义波高和不同谱峰周期下的铺管船时域运动的仿真结果进行分析发现, 本文仿真模型能够对铺管船运动进行有效控制, 但当谱峰周期过大时会影响铺管船纵荡运动的平衡位置, 因此在实际作业中需着重注意。

## 关键词

铺管船, 时域模拟, 动力定位系统, 数值仿真

# Simulation on Time-Domain Motion and Control of Pipe-Laying Vessel in Wave

Linqing Deng<sup>1</sup>, Fuxiang Huang<sup>2</sup>, Tian Huang<sup>3</sup>, Lifeng Tian<sup>2</sup>, Binggang Yin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNOOC Deep Sea Development Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin

<sup>3</sup>Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

Email: denglq3@cnooc.com.cn

Received: Aug. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In order to make precise and effective calculation on the motion of pipe-laying vessel in waves, the time-domain simulation for dynamic positioning of pipe-laying vessel in waves is carried out based on the time-domain ship-motion equation. The Jonswap spectrum is used as the irregular wave input, and the dynamic positioning system integrates the PID controller and Kalman filter. Through

analysis on the simulation results of the time-domain motion of the pipe-laying vessel under different significant wave heights and spectral peak periods, it is found that the model in this paper can effectively simulate control of the motion of the pipe-laying vessel. However, the equilibrium position of the surge motion of the pipe-laying vessel will be affected when the spectral peak period is too large. Therefore, special attention has to be paid on that in practical operations.

## Keywords

Pipe-Laying Vessel, Time Domain, Dynamic Positioning, Numerical Simulation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

随着世界油气资源的日渐枯竭,深水领域已成为油气资源主要采集区[1]。作为油气田运输生命线的海底管道,其铺设安装技术是亟待解决的难题。其中能否使船与管线触地点间的有效距离能够得到合理控制是铺管作业成功与否的关键。因此,对动力定位条件下船舶在波浪中的时域运动进行仿真分析是有必要的。

船舶在波浪中的运动作为船舶与海洋工程领域的经典问题,国内外很多学者都对其进行了深入研究。国外学者 Cummins [2]最早提出时域理论,把船舶运动在各时刻的响应看做相互叠加的脉冲相应作用,并由 Ogilvie [3]对时域理论进行了推广并将其应用于有航速船舶的计算中。此后,国内外大量学者将时域理论与仿真分析相结合进行研究,如国外的 Debabrata 等[4]三维有航速船舶大幅运动进行了时域仿真研究并对以往线性计算进行了优化。国内的陈京普[5]等也采用了计及非线性项影响的时域数值仿真方法对船舶的运动进行了仿真分析。同时大量学者对基于动力定位的海洋结构物运动进行了深入研究,如国外的 Holvik 和 Morgan [6]等研究了动力定位系统在深海半潜式平台的应用。国内的林峰[7]等采用了简易的 PID 动力定位系统,对 S 型铺管船的铺管工况进行了耦合运动分析。

本文基于船舶时域运动方程,采用应用最为广泛的 PID 及 Kalman 滤波相结合的动力定位系统,对铺管船在波浪中的运动与控制进行分析与研究。

## 2. 铺管船时域运动方程

基于最经典的 Cummins 时域理论[2],即把船舶的六自由度运动看成连续的脉冲响应相互叠加的结果,时域方程的计算过程就是在频域下计算得到船舶的附加质量和阻尼系数,然后通过傅里叶变换将其转换为船舶时域运动方程的基本参数,建立船舶的时域运动响应分析方程。本文以海洋石油 201 船为研究对象,根据卡明斯理论在考虑波浪载荷的情况下,建立海洋石油 201 船的时域运动方程:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{A}_\infty) \ddot{\boldsymbol{\xi}}(t) + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) + \int_{-\infty}^t \mathbf{k}(t-\tau) \dot{\boldsymbol{\xi}}(\tau) d\tau + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

上式中  $\mathbf{M}$  为船舶质量矩阵,  $\mathbf{A}_\infty$  表示频率为无穷大时的附加质量,  $t$  为船舶运动时间,  $\mathbf{k}(t-\tau)$  为时延函数,  $\boldsymbol{\xi}(t)$  为船舶运动位移矩阵,  $\mathbf{B}$  为粘性阻尼系数矩阵,  $\tau$  和  $t$  为时刻之间的任意运动时间,  $\mathbf{C}$  为恢复力系数矩阵;  $\mathbf{F}(t)$  为外环境载荷矩阵。

## 3. 铺管船波浪力计算

波浪力包括一阶波浪力和二阶漂移力。一阶波浪力是由入射波引起的,包括由未受干扰的波浪场引

起的傅汝德 - 克雷洛夫力和由与船体结构有关的修正波场引起的绕射力。二阶波浪力由于其频率易与船体低频响应运动发生共振, 因此会对船体运动产生很大影响。船体在波浪中运动受到的波浪载荷的水平分量即为二阶漂移力, 在二阶漂移力的作用下, 无约束的漂浮船体会随波浪作低频漂移运动。本文将利用衍射分析和已定义的波谱密度函数求得频率传递函数, 进而计算一阶和二阶总波浪力及力矩。

为验证不规则波对铺管船运动的影响, 本文采用“北海联合海浪计划”中提出的 Jonswap 谱作为不规则波浪输入[8]。由系数 A、系数 B、谱峰周期  $T_p$  和有义波高  $H_s$  定义的 Jonswap 波谱密度可以表示为:

$$S(\omega) = Ag^2/\omega^2 \exp[-1.25(\omega_p/\omega)^4] B^q \tag{2}$$

式中指数  $q$  的计算公式为:

$$q = \exp\left[-(\omega - \omega_p)^2 / (2\sigma^2\omega_p^2)\right] \tag{3}$$

式(2)中  $S(\omega)$  为谱密度函数,  $A$  为广义菲利普斯常数,  $\omega$  为波浪分量的圆频率,  $\omega_p$  为谱峰处的圆频率。

菲利普斯常数  $A$  可以表示为:

$$A = \frac{5}{16} H_s^2 \frac{\omega_p^4}{g^2} [1 - 0.287 \ln(B)] \tag{4}$$

参数  $\sigma$  可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma = 0.07 & \omega < \omega_p \\ \sigma = 0.09 & \omega > \omega_p \end{cases} \tag{5}$$

峰值参数  $B$  可以定义为:

$$B = \begin{cases} 5 & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 3.6 \\ \exp\left[5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right] & 3.6 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \\ 1 & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 5 \end{cases} \tag{6}$$

本文选取了包括不同有义波高和谱峰周期在内的四种海况, 这四种海况与 Jonswap 谱的对应关系如图 1 所示。

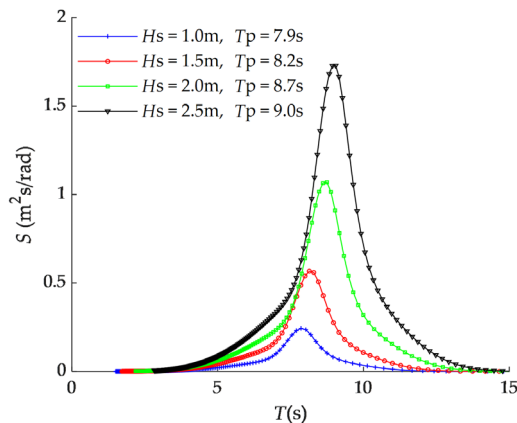


Figure 1. Jonswap spectrum for four sea states.  
图 1. 四种海况对应的 Jonswap 谱

不规则海况可以通过叠加原理来建立(叠加原理是一个问题可以分解成有各自解的不同子问题,且整个问题的解是各个子问题的解的总和),即不规则波可以通过将多个频率  $\omega_i$  和波幅  $\zeta_{ai}$  的波分量叠加得到。当波浪的整体运动具有  $n$  个波分量时,波浪的速度势可以表示为:

$$\Phi(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n \frac{\zeta_{ai}}{\omega_i} \frac{\cosh k_i(z+h)}{\cosh k_i h} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \beta_i - k_i y \sin \beta_i + \varepsilon_i) \quad (7)$$

式中  $h$  为水深,  $k_i$  代表波数,  $\beta_i$  代表主波浪的传播方向,  $\varepsilon_i$  代表波浪的相位角。

通过谱密度函数  $S(\omega)$  和波浪的传播函数  $D(\beta_i)$  能够求得波浪的波幅:

$$\zeta_{ai} = \sqrt{2S(\omega_i)D(\beta_i)d\omega d\beta} \quad (8)$$

则一阶波浪力在时域内的表达式为:

$$f_{wave1}(t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H^{(1)}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega d\zeta(t-\tau) d\tau \quad (9)$$

式中  $H^{(1)}(\omega)$  为波高和激振力之间的一阶传递函数,在本文中使用 WAMIT 软件进行计算[9]。

二阶传递函数(QTF)用于计算线性波浪漂移力,其表达式为:

$$f_{wave2}(t) = \int_0^{\infty} 2H^{(2)}(\omega)S(\omega)d\omega \quad (10)$$

上式中的  $H^{(2)}(\omega)$  即为二阶传递函数(QTF),同样由 WAMIT 软件求得。

#### 4. 铺管船控制模型

PID (比例 - 积分 - 微分) 控制器在工程中广泛应于模拟铺管船的位置。在动力定位的过程中, PID 控制器读取位置信号,将其与目标值作比较,通过运算,得到抵消位置偏差和外界干扰力所需要的推力,然后对推力器发出指令,以产生能够使船尽可能靠近预期位置的推力。PID 控制器的非线性水平位置反馈控制器为:

$$\begin{aligned} f_{dp} &= K_D \dot{\varepsilon}(t) + K_P \varepsilon(t) + K_I \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + f_w \\ \varepsilon(t) &= x_0(t) - x(t) \\ \dot{\varepsilon}(t) &= \dot{x}_0(t) - \dot{x}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $f_{dp}$  代表推进器所需推力,  $\varepsilon(t)$  表示位置误差,  $K_P$  为位置反馈增益,  $K_I$  为所需积分反馈增益,  $K_D$  为速度反馈增益,  $f_w$  为前馈风力,  $x_0(t)$  为目标位置,  $x(t)$  为所需滤波位置。

当船舶在波浪中运动时,其运动成分中含有低频分量(LF)和 高频分量(HF),推进器控制的是其中的低频分量部分。在实际中由于高频成分会经过放大并传到推进器,因此 DP 系统对速度和位置信号中的高频分量很敏感。为解决这一问题,使用卡尔曼滤波器对位置和速度进行修改。首先基于位置参考系对船舶运动进行定位并与目标位置进行比较,然后使用卡尔曼增益矩阵对先前预测的位置进行修改。其中卡尔曼增益矩阵与截止频率有关,截止频率是由运动的自然持续时间和波频运动决定的[10]。

#### 5. 铺管船控制模型

##### 5.1. 模型参数

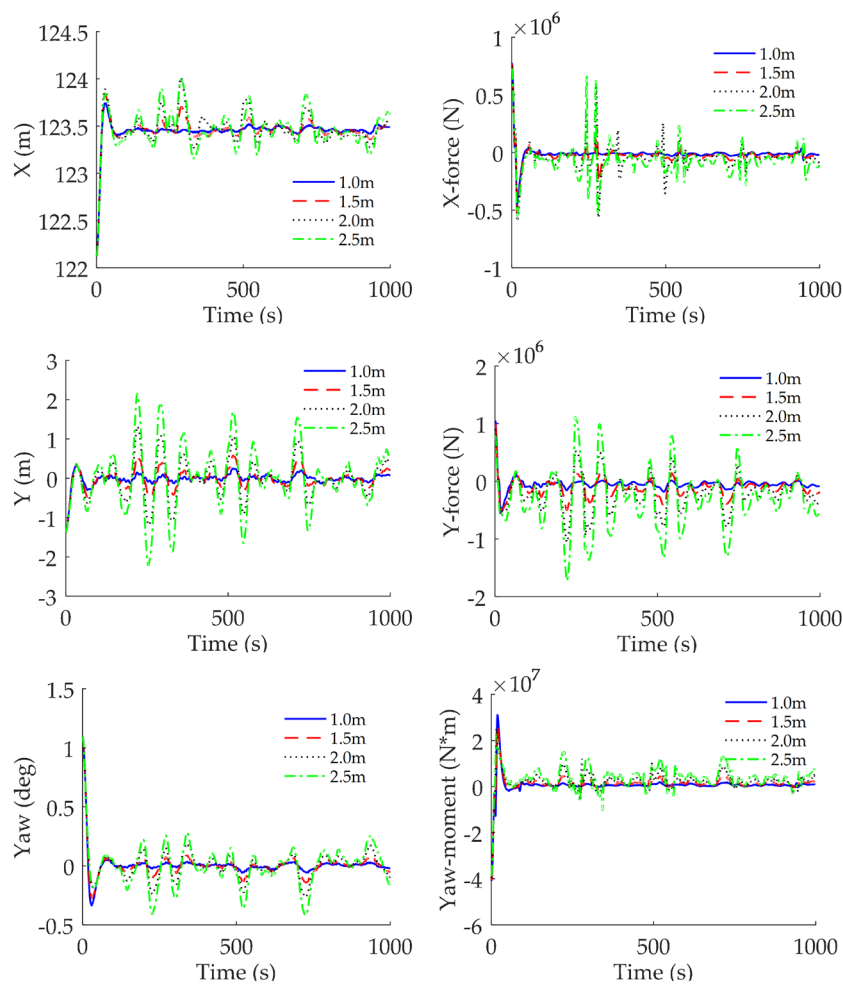
本文的研究对象是海洋石油 201 船主要参数如表 1 所示。

**Table 1.** The parameters of the HYSY201  
**表 1.** 海洋石油 201 船主要参数

名称	值
船体总长/m	204.7
垂线间长/m	185.0
型宽/m	39.2
型深/m	14.0
作业吃水/m	8.0
排水量/t	47,886.7

### 5.2. 不同有义波高下铺管船时域运动仿真分析

为了仅探讨不同有义波高对船体运动的影响, 本文忽略海流对船体运动的影响并采用 Jonswap 谱模拟随机波浪载荷, 本节中所用的波浪与船舶横剖面夹角为 45°, 谱峰周期 5 s。考虑到可以进行作业的浪级, 有义波高分别取 1 m, 1.5 m, 2 m 和 2.5 m。本节四种工况下铺管船运动与推力曲线如图 2 所示。



**Figure 2.** Dynamic response and thruster force of HYSY201

**图 2.** 海洋石油 201 船运动与推力曲线

计算结果表明,在动力定位条件下,铺管船在到达目标位置过程中的运动和推进器输出的推力会瞬间增大,在经过一段时间运动后趋于动态的稳定状态,并且在较小的范围内运动,可以看出船舶在稳定后能够保持较好的定位;船舶的运动趋于动态的稳定时,动力定位系统对船舶的推力(矩)也趋于稳定。达到动态稳定后,当有义波高分别为 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 和 2.5 m 时,纵荡运动最大值分别为 123.52 m, 123.7 m, 124.01 m 和 123.98 m;横荡运动绝对值最大值分别为 0.3437 m, 0.5796 m, 1.32 m 和 2.147 m;首摇运动绝对值最大值分别为 0.0584 deg, 0.1433 deg, 0.2633 deg 和 0.4199 deg。达到稳定状态后,纵向推力绝对值分别为  $6.94 \times 10^4$  N,  $2.28 \times 10^5$  N,  $5.65 \times 10^5$  N 和  $6.64 \times 10^5$  N;横向推力绝对值分别为  $1.82 \times 10^5$  N,  $5.02 \times 10^5$  N,  $1.05 \times 10^6$  N 和  $1.72 \times 10^6$  N。结合图像能够看出达到动态稳定状态后,有义波高的改变对铺管船运动的动态平衡位置没有影响,但会影响铺管船在平衡位置附近的振动幅度且随着有义波高的增大运动会更为剧烈。推进器输出推力会随着有义波高的增大而增大,且在同一工况下推进器输出推力的变化趋势与船舶运动响应变化趋势大体相符。

### 5.3. 不同谱峰周期下铺管船时域运动仿真分析

本节中采用的波浪与船舶横剖面夹角为  $45^\circ$ ,有义波高 2 m。考虑到可以进行作业的浪级,分别选取谱峰周期为 5 s, 6 s, 7 s 和 8 s。本节四种工况下铺管船运动与推力曲线如图 3 所示。

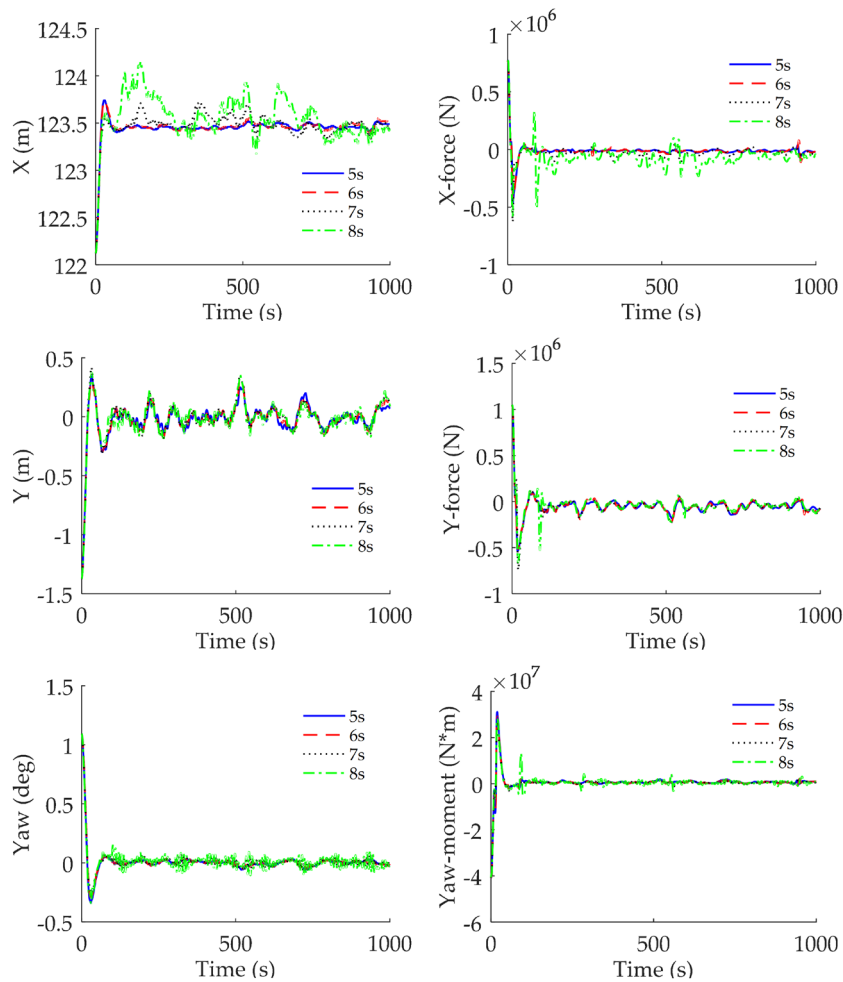


Figure 3. Dynamic response and thruster force of HYSY201

图 3. 海洋石油 201 船运动与推力曲线

从图中能够看出,不同周期下铺管船的运动在到达目标位置后,均有趋于动态稳定的趋势。达到动态稳定后,当谱峰周期分别为 5 s, 6 s, 7 s 和 8 s 时,纵荡运动最大值分别为 123.52 m, 123.55 m, 123.711 m 和 154.6 m; 横荡运动绝对值最大值分别为 0.23 m, 0.3087 m, 0.344 m 和 0.352 m; 首摇运动绝对值最大值分别为 0.0341 deg, 0.0409 deg, 0.0744 deg 和 0.1505 deg。达到稳定状态后,纵向推力绝对值分别为  $3.2 \times 10^4$  N,  $5.33 \times 10^4$  N,  $9.31 \times 10^4$  N 和  $1.08 \times 10^5$  N; 横向推力绝对值分别为  $1.82 \times 10^5$  N,  $2.15 \times 10^5$  N,  $2.22 \times 10^6$  N 和  $2.33 \times 10^6$  N。可见在本节四种工况下随着谱峰周期的增大,铺管船在平衡位置附近的振荡幅度和推进器输出的推力均会变大。需要注意的是铺管船的纵荡运动,在波浪方向为  $45^\circ$  的情况下,从图中能够看出当周期增大到一定程度时,铺管船的纵荡运动会稍微偏离正常轨迹,推进器输出的推力也会大幅增加,因此在实际作业中应尽量规避在谱峰周期过大的海况下作业。

## 6. 结论

针对铺管船在波浪中的时域运动,建立了由状态空间模型来近似代替卷积分项的铺管船时域运动方程,并采用 PID 及 Kalman 滤波相结合的动力定位系统,对铺管船在波浪中的时域动力定位进行仿真模拟。分别对不同有义波高和不同谱峰周期下的铺管船运动响应及推力分配进行了计算分析,得到结论: 1) 在本文工况下,动力定位系统对船舶的运动能起到很好的控制作用,铺管船在稳定位置附近振动幅度很小,有较好的作业工况适应性; 2) 在动力定位条件下,一定范围内有义波高的改变不会影响铺管船的平衡位置,但铺管船在平衡位置的振荡幅度和推进器输出的推力会随有义波高的增大而增大; 3) 谱峰周期对铺管船运动的影响与有义波高相似,但当谱峰周期增大到一定程度时,会对船舶纵荡运动的平衡位置产生一定影响。

## 基金项目

国家科技重大专项(2016ZX05057020),深圳市“十三五”海洋经济创新发展示范项目(3818),中国海洋石油集团有限公司科技项目(CNOOC-KJ 135 GJJS 07 GC 2020-02)。

## 参考文献

- [1] 刘义坤,杨二龙. 浅谈开设海洋油气工程专业的必要性[J]. 中国科教创新导刊, 2013(11): 181-182.
- [2] Cummins W.E. (1962) The Impulse Response Function and Ship Motions. *Schiffstechnik*, **9**, 101-109.
- [3] Ogilvie, T.F. (1964) Recent Progress toward the Understanding and Prediction of Ship Motions. *Proc. 5<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, Bergen, Norway, 3-79.
- [4] Debabrata, S. (2002) Time-Domain Computation of Large Amplitude 3D Ship Motions with Forward Speed. *Ocean Engineering*, **29**, 973-1002. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00041-5)
- [5] 陈京普,朱德祥. 船舶在波浪中运动的非线性时域数值模型[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(6): 830-836.
- [6] Holvik, J. (1998) Basics of Dynamic Positioning. *Marine Technology Society, Dynamic Positioning Conference*, 47-50.
- [7] 林峰,孙丽萍,王德军. 深水 S 型铺管托管架 - 船体 - 管线耦合分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013(4): 415-433.
- [8] Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H. and Hasselmann, D. (1973) Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institute, Heidelberg, Germany.
- [9] Lee, C.-H. and Newman, J.N. (2006) WAMIT User Manual. WAMIT, Inc.
- [10] 孙丽萍,朱建勋,艾尚茂,等. 全耦合 S 型铺管动力定位时域分析[J]. 海洋工程, 2015(4): 1-10.