

【引用格式】马志刚, 邬明, 祝港. 水下航行体不规则波中波浪力计算方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 436-443.

# 水下航行体不规则波中波浪力计算方法研究

马志刚<sup>1, 2</sup>, 邬明<sup>3, 4</sup>, 祝港<sup>3, 4</sup>

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430034; 2. 海军装备部, 北京 100841; 3. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003; 4. 清江创新中心, 湖北 武汉 430200)

**摘要** 针对水下航行体不规则波中波浪力计算的问题, 基于三维边界元方法, 考虑有限水深的影响, 开展了不同航速、航行深度和海况等级下的波浪力特性研究。首先, 建立了适用于水下航行体波浪力计算的三维边界元模型。然后, 采用数值积分方法解算速度势, 并通过脉冲响应函数方法获得不规则波中航行体的波浪力和力矩时历数据。随后, 通过模型试验结果验证了该方法的有效性。最后, 对不同工况下的波浪力时历数据进行了统计分析。研究结果表明: 增加航行深度可以显著降低波浪力, 而恶劣的海况条件会显著增加波浪力。提出的基于三维边界元法的波浪力数值计算方法能够有效预测水下航行体在不同工况下的波浪力特性, 为优化水下航行体的设计与控制提供了重要的理论支持和实际应用价值。

**关键词** 水下航行体; 不规则波; 波浪力; 三维边界元方法; 数值计算; 时域分析

中图分类号 U661.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)04-0436-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.011

## Research on Wave Load Calculation Method for Underwater Vehicles in Irregular Waves

MA Zhigang<sup>1, 2</sup>, WU Ming<sup>3, 4</sup>, ZHU Gang<sup>3, 4</sup>

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430034, China; 2. Department of Naval Armament, Beijing 100841, China; 3. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China; 4. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430200, China)

**Abstract** This paper focuses on the issue of wave load calculation for underwater vehicles in irregular waves. Based on three-dimensional boundary element method, and considering the influence of finite water depth, the wave load characteristics under different speed, depth, and sea state conditions are studied. Firstly, a three-dimensional boundary element model for underwater vehicle wave load calculation is established. Then, the velocity potential is calculated by numerical integration method, and the time history data of wave loads and moments acting on the vehicle in irregular waves are obtained by impulse response function approach. Furthermore, the effectiveness of this method is verified by model test results. Finally, the time history data of wave loads under various operating conditions are analyzed. The results indicate that increasing the navigation depth can significantly reduce the wave loads, while adverse sea states can lead to a significant increase in wave loads. The three-dimensional boundary element method based numerical calculation method proposed in this paper can effectively predict the wave load characteristics of underwater vehicles under different conditions. The results provides important theoretical support and practical application value for optimizing the design and control of underwater vehicles.

**Key words** underwater vehicle; irregular wave; wave load; three-dimensional boundary element method; numerical computation; time domain analysis

收稿日期: 2024-06-06

作者简介: 马志刚 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事装备科研管理等工作。

基金项目: 科工局基础科研项目“虚实结合的\*\*\*多学科敏捷设计技术”(JCKY2021206B005)。

## 0 引言

水下航行体作为一种新兴的海洋探测手段,具有成本相对较低且能够提供直接有效的海洋信息等优势,在国内外均得到了迅速的发展。然而,在复杂的海洋环境中航行时,水下航行体的运动不可避免地会受到波浪的影响。因此,如何准确高效地预报波浪力成为了船舶与海洋工程领域关注的重要问题。

近年来,针对水下航行体在波浪中的运动特性,相关理论和计算方法得到了不断发展和完善。从二维切片理论<sup>[1-2]</sup>发展至三维边界元方法<sup>[3-4]</sup>、从零航速发展至有航速,从频域发展至时域,取得了一系列的进展。

切片理论是目前相关规范中建议的,用于预报水下航行器以中低航速航行时受到的波浪力的线性预报<sup>[5]</sup>。切片法由于其计算高效,在计算机性能不高时得到广泛应用。目前随着计算机性能的高速发展,三维面元法已应用于水下航行体和水面船舶波浪中水动力问题的研究。频域无航速无限水深自由面格林函数的数值计算方法已经较为成熟<sup>[6]</sup>。对于频域有航速问题,很多学者进行了大量的研究<sup>[7-9]</sup>。CUMMINS<sup>[10]</sup>提出脉冲响应函数的概念,把任一结构物运动的时间历程看作一系列瞬时脉冲运动所组成,波浪力也看作是一系列脉冲响应的线性叠加。林子<sup>[11]</sup>基于脉冲响应函数方法对小尺度圆柱上的波浪力进行了计算,结果表明:脉冲响应法求得的波浪力谱与线性谱分析法的波浪力谱较为接近。MICHEL<sup>[12]</sup>基于线性势流理论,将不规则波浪分解成多个规则波成分,并对每个成分的线性响应进行叠加,从而得到浮体的不规则波响应。QIN<sup>[13]</sup>研究了水下航行器在不同潜深和环境条件下,二阶差频波浪力对其运动的影响。结果表明:忽略二阶差频波浪力可能低估水下航行器的动力响应。现有研究大多集中于水面和近水面的温和海况,对于有限水深极端海况下水下航行体受波浪力的特性研究较少。

本文基于三维势流理论,以 Rankine 源为内核,建立了适用于水下航行体在有限水深不规则波中的波浪力数值计算方法。同时结合脉冲响应函数方

法,可更好地反映瞬态动力响应特性。根据本文计算方法计算得到水下航行体 6 个自由度方向上的波浪力和力矩时历数据。进一步通过统计分析,探讨了航行深度、航速以及海况等级对波浪力特性的影响规律。

## 1 物理模型

### 1.1 坐标系构建

在研究平台耐波性问题时,一般引入如图 1 所示的三维空间直角坐标系,分别是:空间固定坐标系  $O_0X_0Y_0Z_0$ 、空间平动坐标系  $Oxyz$  和空间随动坐标系  $O'x'y'z'$ 。其具体定义如下。

空间固定坐标系  $O_0X_0Y_0Z_0$ : 该坐标系始终固定于流场中,不随流体或平台运动。其原点  $O_0$  位于未受扰动的静水面上,平面  $O_0X_0Y_0$  与未受扰动时的静水面重合,  $O_0X_0$  轴正向与平台航行方向相同,  $O_0Z_0$  轴铅直向上。

空间平动坐标系  $Oxyz$ : 该坐标系位于平台的平衡位置上,以平台航速  $U$  随船平移。其原点  $O$  为平台重心在未受扰动的静水面上的投影点,平面  $Oxy$  与未受扰动时的静水面重合,  $Ox$  轴正向与平台航行方向相同,  $Oy$  轴正向指向平台左舷,  $Oz$  轴铅直向上。在  $t=0$  时刻,空间平动坐标系  $Oxyz$  与空间固定坐标系  $O_0X_0Y_0Z_0$  重合。

空间随动坐标系  $O'x'y'z'$ : 该坐标系与平台固联,随其一起作摇荡运动。在  $t=0$  时刻,空间随动坐标系  $O'x'y'z'$  与空间平动坐标系  $Oxyz$  重合。空间随动坐标系在空间平动坐标系  $Oxyz$  中的位置表示了平台的六自由度运动: 原点  $O'$  在平动坐标系  $Oxyz$  的位置  $\eta_1(t)$ ,  $\eta_2(t)$ ,  $\eta_3(t)$  分别表示平台的纵荡、横荡和垂荡运动; 随动坐标系绕平动坐标系  $Oxyz$  这 3 个坐标轴的转动  $\eta_4(t)$ ,  $\eta_5(t)$ ,  $\eta_6(t)$  分别表示平台的横摇、纵摇和艏摇运动。

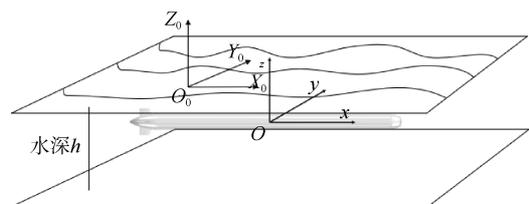


图1 三维空间直角坐标系

Fig. 1 Coordinate system in three dimensions

## 1.2 三维势流理论

假设流体为均匀、不可压缩和没有粘性的理想流体,忽略流体的表面张力,且流动无旋。假设入射波为平面微幅规则波,其传播方向与平台航向间的夹角为浪向角 $\beta$ 。 $\beta=180^\circ$ 时表示顶浪, $\beta=90^\circ$ 时表示横浪, $\beta=0^\circ$ 时表示顺浪。根据无限水深线性势流理论,入射波速度势 $\Phi_0$ 可以表示为

$$\Phi_0(x, y, z, t) = \phi_0 e^{-i\omega_e t} \quad (1)$$

$$\phi_0 = -\frac{ig\zeta_a}{\omega_0} e^{k_0 z} e^{ik_0(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (2)$$

式中: $\phi_0$ 为入射波速度势的空间部分; $\omega_e$ 为波浪遭遇频率; $k_0$ ( $k_0 = \omega_0^2/g$ )为波数; $\omega_0$ 为波浪频率, $g$ 为重力加速度; $\zeta_a$ 为波幅。

流场中的总速度势 $\Phi_T(x, y, z, t)$ 可以表示为

$$\Phi_T(x, y, z, t) = -Ux + \phi_s(x, y, z) + \Phi(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中, $\phi_s$ 和 $\Phi$ 分别为定常速度势和非定常速度势。在一阶线性问题中,假定平台在波浪中的非定常运动为周期性的稳态运动,则非定常速度势 $\Phi$ 可表示为

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_R + \Phi_I + \Phi_0 = \left(\sum_{j=1}^6 \phi_j \eta_j + \phi_I + \phi_0\right) e^{-i\omega_e t} \quad (4)$$

式中: $\Phi_R$ 和 $\Phi_I$ 分别为辐射速度势和绕射速度势; $\phi_j$ 为平台在第 $j$ 模态以单位振幅振动时产生的辐射势幅值; $\eta_j$ ( $j=1\sim 6$ )为平台的六自由度运动幅值,下标1~6分别表示平台的纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇运动; $\phi_I$ 为绕射速度势的空间部分。

速度势 $\phi_j$ 应满足场内条件、自由面条件、物面条件、水底条件和远方辐射条件,其具体表达为场内条件[L]:

$$\nabla^2 \phi_j = 0 \quad (5)$$

线性自由面条件[F]:

$$-\omega_e^2 \phi_j - 2i\omega_e u_0 \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + u_0^2 \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

物面条件[S]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega_e n_j + m_j & j=1\sim 6 \\ \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} & j=7 \end{cases} \quad (7)$$

水底条件[B]:

$$\left. \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right|_{z=-h} = 0 \quad (8)$$

控制面条件[C]:

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} - ik_s \phi_j \cos\theta = 0 \quad (j=1,2,\dots,6) \quad (9)$$

式中: $U$ 为航行体航速; $h$ 为水深; $k$ 为辐射波的波数;场内条件为满足Laplace方程;物面条件在平台平均湿表面 $S$ 满足。 $(n_1, n_2, n_3) = \mathbf{n}$ ,  $(n_4, n_5, n_6) = \mathbf{r} \times \mathbf{n}$ 。 $\mathbf{n}$ 为物面单位外法线向量, $\mathbf{r}$ 为指向平台重心的方向向量。若忽略定常速度势对非定常速度势的干扰作用,则物面条件中的 $m_j$ 项可以简化为 $m_j = 0$ ( $j=1\sim 4$ ),  $m_5 = Un_3$ 及 $m_6 = -Un_2$ 。

## 2 数值计算方法

### 2.1 分布源方法

满足上述边界条件的速度势 $\phi_j$ 可以采用直接速度势法或分布源法<sup>[14]</sup>来求解。直接速度势法在物面上混合分布点源和点偶,分布源法在物面上仅分布点源。本文采用分布源法,在物面上分布合适的Rakine源来表达速度势,进而将定解条件中的微分方程转换为平台平均湿表面 $S$ 的边界积分方程,采用数值方法进行求解。物面以及自由面上的辐射势和绕射势可以表示为

$$\phi_j(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_H + S_F + S_C} \sigma_j(q) G(p, q) ds \quad (10)$$

式中: $\sigma_j(q)$ 为点源 $q(\xi, \eta, \zeta)$ 处的源强分布密度; $G(p, q)$ 为Rankine源格林函数。其具体表达式

$$G(\bar{x}, \bar{\xi}) = \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+2h+\zeta)^2}} \quad (11)$$

求解得到平台平均湿表面上的速度势 $\phi$ 后,代入伯努利方程即可得到平台表面的压力分布。忽略高阶项和静压,则非定常速度势 $\phi$ 对应的线性伯努利方程可以表示为

$$P = \rho i \omega_e \left(1 + \frac{U}{i \omega_e} \frac{\partial}{\partial x}\right) \phi e^{-i\omega_e t} \quad (12)$$

平台受到的波浪干扰力 $F_i$ 包括入射波作用力(傅汝德-克雷洛夫力)和绕射波作用力,可以

表示为

$$F_i = -\rho i \omega_e \iint_{S_H} \left( 1 + \frac{U}{i \omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) (\phi_0 + \phi_1) n_i dS \quad (13)$$

### 2.2 波浪力计算理论

不规则波可采用不同频率、不同幅值的规则波叠加而成, 如

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos[\omega_i t - k_i(x \cos \theta + y \sin \theta) + \varepsilon_i] \quad (14)$$

式中:  $A_i$  是第  $i$  个规则波的波幅;  $\omega_i$  是第  $i$  个规则波的圆频率;  $k_i$  为第  $i$  个规则波的波数;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  个规则波的相位角, 在  $[-\pi, \pi]$  区间上均匀分布的随机数。其中频率谱  $S(\omega)$  与波幅之间存在如下关系:

$$\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^2 \quad (15)$$

$$E_i = 2S(\omega_i) \Delta \omega_i \quad (16)$$

$$A_i = \sqrt{E_i} \quad (17)$$

频率的生成可以采用频率等分法<sup>[15]</sup>或能量等分法<sup>[16]</sup>, 在研究中选取能量等分法来获得组成不规则时选取的规则波频率。能量等分法生成不规则波具体步骤如图 2 所示。

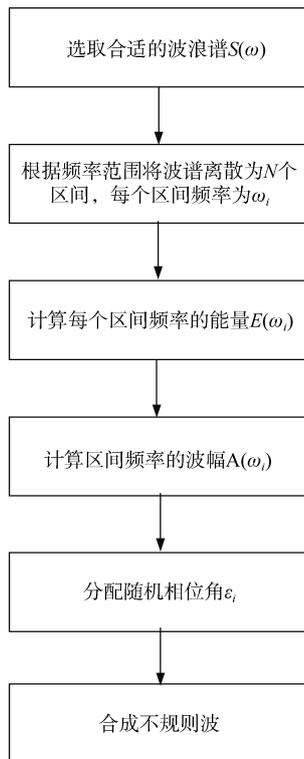


图 2 不规则波生成步骤  
Fig. 2 Irregular wave generation steps

采用上述方法对平台不同海况以及不同浪向角时的波浪力进行计算。计算过程中涉及到频域波浪力至时域波浪力的转换, 研究中采用脉冲响应函数方法<sup>[17]</sup>。

平台受到的时域波浪力  $F_i$  为

$$F_i(t) = \int_{-\infty}^t h_i(\tau) \zeta(t - \tau) d\tau \quad (18)$$

式中:  $h_i(\tau)$  为脉冲响应函数;  $\zeta$  为入射波面高度。

$$h_i(t) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F_i(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right\} \quad (19)$$

假设频域内的波浪力  $F_i(\omega) = R + iS$ , 则  $h_i(\tau)$  可表示为

$$h_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [R \cos \omega t - S \sin \omega t] d\omega \quad (20)$$

频域转时域的脉冲响应函数方法已经在船舶与海洋工程领域广泛采用, 并已被集成到商用软件 AQWA 中。本文的研究中, 进一步将其推广应用于水下航行体不规则波中时域波浪力的计算。

时域波浪力整体计算流程如图 3 所示。

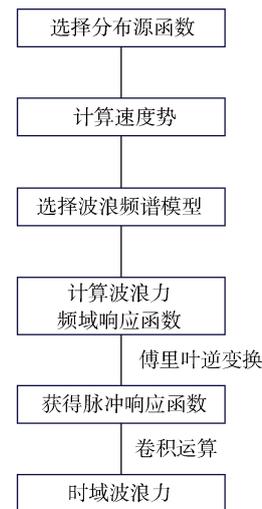


图 3 时域波浪力计算流程  
Fig. 3 Time domain wave load calculation process

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 数值方法验证

采用上述数值计算方法, 开展了一条模型船的波浪力计算。该模型船的波浪力试验来自于文献 [18]。模型实验时, 该模型通过六分力传感器与拖车平台固结, 以用于测量模型不同速度和波浪条件

下的入射力和绕射力。

图 4 中给出了采用本文方法开展模型波浪力计算时的网格离散, 主要包括自由面网格、控制面网格以及平均湿表面网格。图 5 和图 6 分别给出了不同航速时该船的纵荡波浪力、垂荡波浪力以及纵摇力矩的计算结果与试验结果的对比。从图 5 及图 6 的对比中可以看出: 在研究的波长段(  $\lambda/L < 3.5$  ) 和 2 个模型速度下 (  $F_n=0.15, F_n=0.17$  ), 本文数值方法计算得到的纵荡力、垂荡力以及纵摇力矩幅值在趋势上以及幅值上均与试验结果吻合较好, 其中无因次垂荡力及纵摇力矩随着波长增大而增大, 无

因次纵荡力随着波长增大先增大后减小; 系列数据对比分析说明了本文数值算法的可靠性, 可进一步应用于本文水下航行体波浪力的计算。

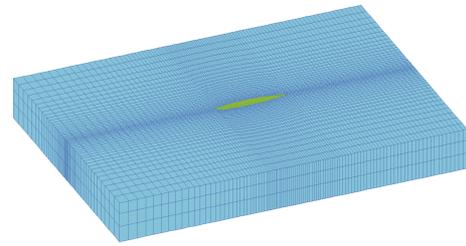


图 4 计算模型网格划分

Fig. 4 Computational model meshing

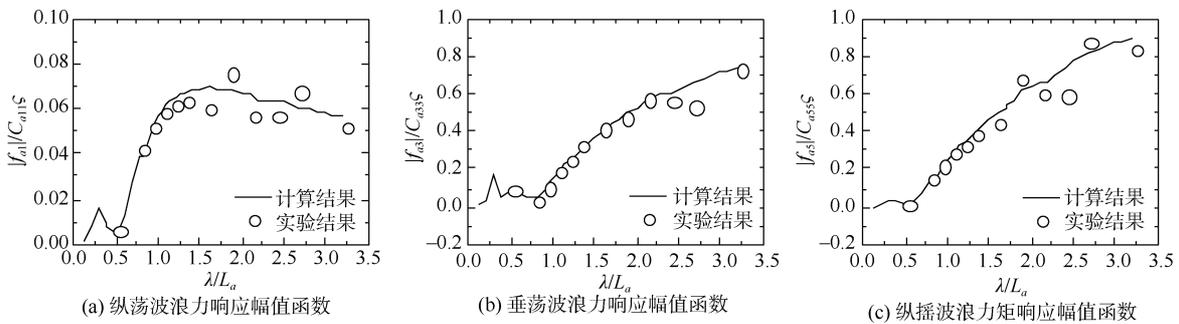


图 5 不同自由度下的波浪力响应幅值函数 (  $F_n=0.15$  )

Fig. 5 Wave load response amplitude operators (RAOs) for different degrees of freedom (  $F_n=0.15$  )

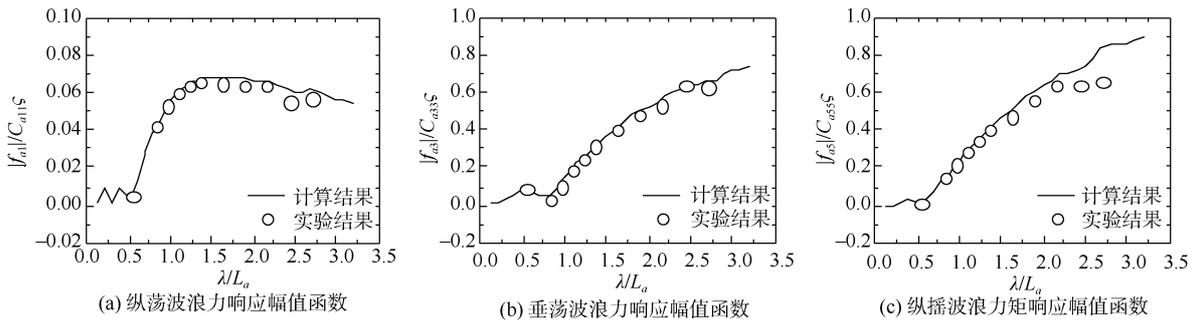


图 6 不同自由度下的波浪力响应幅值函数 (  $F_n=0.17$  )

Fig. 6 Wave load RAOs for different degrees of freedom (  $F_n=0.17$  )

### 3.2 水下航行体不规则波中波浪力数值结果

采用边界元方法计算时, 需要对平台表面进行网格离散, 如图 7 所示。不规则波中时域波浪力计算的工况如表 1 所示。

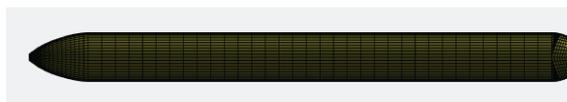


图 7 水下航行体网格离散

Fig. 7 Discretization of underwater vehicle

表 1 波浪力计算工况

Table 1 Wave load calculation conditions

工况	海况等级	海浪谱	水域深度/m	航行深度/m	航速/kn	浪向角 / (°)
1	4	JONSWAP	30	10	5	0,
2	4	JONSWAP	30	20	5	45,
3	8	JONSWAP	30	20	5	90,
4	8	JONSWAP	30	20	7	135,
5	8	JONSWAP	30	20	10	180

表 1 为 8 个计算工况, 研究了不同海况下、不同航行深度下、不同航速下、不同浪向角下平台所受波浪力时历变化情况。工况 1 中  $0^\circ$  浪向和  $135^\circ$  浪向下的六自由度波浪力/力矩的时历曲线如图 8 和图 9 所示。

如图 8 和图 9 所示, 航行体在 10 m 深度下航行时会受到波浪力的作用, 在迎浪作用下航行器

只受到纵荡、纵摇、垂荡 3 个自由度方向上的力, 当斜浪作用时航行体六自由度方向均会受到波浪力作用。为更清晰地分析不同浪向、海况、水深以及航行深度下波浪力变化, 对六自由度下波浪力, 取前 1/3 大幅值的波浪力进行统计, 取其平均幅值为有义幅值进行对比, 具体计算结果如表 2-4 所示。

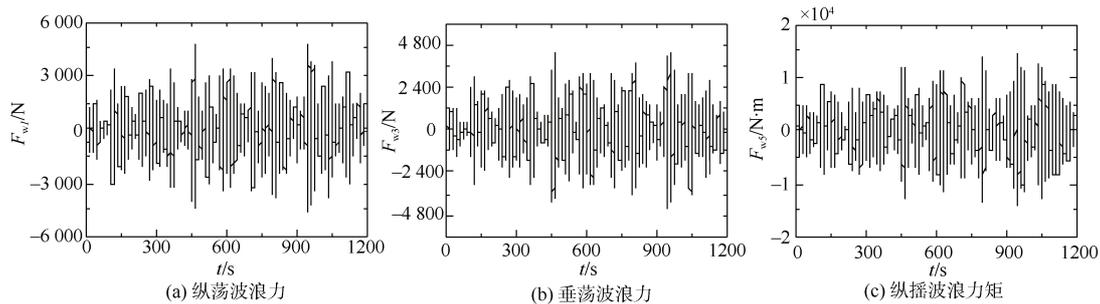


图 8  $0^\circ$  浪向下六自由度波浪力/力矩时历曲线

Fig. 8 Time history curve of six-degree-of-freedom wave loads/moments for  $0^\circ$  wave direction

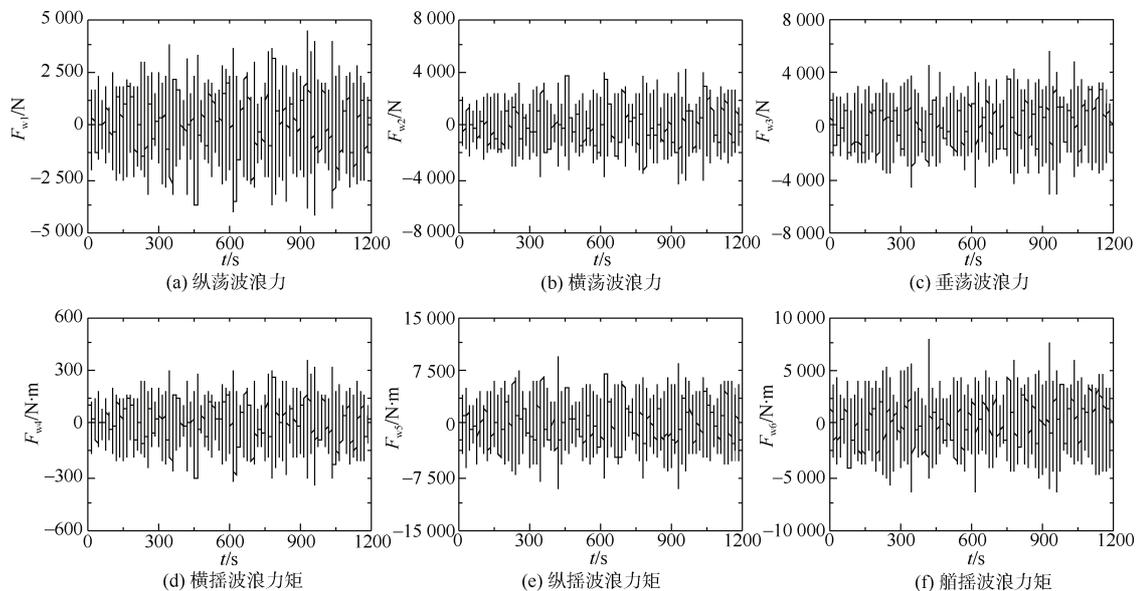


图 9  $135^\circ$  浪向下六自由度波浪力/力矩时历曲线

Fig. 9 Time history curve of six-degree-of-freedom wave loads/moments for a  $135^\circ$  wave direction

表 2 为 4 级海况下, 30 m 水域深度, 5 kn 航速, 10 m 和 20 m 航行深度下波浪力有义幅值对比。如表 2 所示, 随着波浪浪向不同, 航行体所受波浪力会发生改变, 纵荡最大有义值发生在  $180^\circ$  浪向下; 当  $90^\circ$  浪向时, 横荡、垂荡、横摇 3 个自由度方向上所受波浪力达到最大;  $0^\circ$  浪向时, 纵摇波浪力矩达到最大; 在  $45^\circ$  浪向时, 艏摇方向上的波浪力/矩达到最大。随航行深度的增加, 波浪在垂直

方向的衰减更快, 航行体受到的动荡能量也相应减小。此外, 较大深度下航行体周围的流体动压力也会较小, 从而减小各自由度方向上的波浪力。10 m 和 20 m 航行深度下受到的纵荡波浪力最大有义值分别为 3 602.1 N 和 2 451.0 N, 随着航行深度下降其波浪力减少了 31.9%。横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇方向上的最大波浪力/力矩分别减少 33.9%、63.8%、41.1%、72.7%、63.2%。

表 2 不同航行深度下波浪力对比

Table 2 Comparison of wave loads at different navigation depths

浪向角/(°)	航行深度/m	$F_{w1}/N$	$F_{w2}/N$	$F_{w3}/N$	$F_{w4}/N\cdot m$	$F_{w5}/N\cdot m$	$F_{w6}/N\cdot m$
0	10	2 983.1	0.0	2 785.5	0.0	9 132.4	0.0
	20	1 481.5	0.0	932.9	0.0	2 492.6	0.0
45	10	2 528.6	2 549.6	3 270.7	203.9	7 353.3	5 531.3
	20	1 331.8	1 343.2	1 133.1	107.4	1 921.5	2 034.5
90	10	56.8	4 106.3	3 602.8	328.4	86.3	102.1
	20	40.6	2 416.8	1 301.9	193.3	30.0	60.1
135	10	2 691.2	2 713.4	3 157.4	217.0	5 267.9	4 199.4
	20	1 753.0	1 767.0	1 223.4	141.3	1 611.8	2 044.5
180	10	3 602.1	0.0	2 887.0	0.0	6 405.7	0.0
	20	2 451.0	0.0	1 150.3	0.0	2 056.8	0.0

表 3 不同海况下波浪力对比

Table 3 Comparison of wave loads under different sea states

浪向角/(°)	海况等级	$F_{w1}/N$	$F_{w2}/N$	$F_{w3}/N$	$F_{w4}/N\cdot m$	$F_{w5}/N\cdot m$	$F_{w6}/N\cdot m$
0	8	17 605.0	0.0	6 259.4	0.0	8 930.8	0.0
	4	1 481.5	0.0	932.9	0.0	2 492.6	0.0
45	8	12 425.8	12 522.7	5 854.2	1 001.6	5 982.3	9 201.0
	4	1 331.8	1 343.2	1 133.1	107.4	1 921.5	2 034.5
90	8	659.3	16 672.1	5 154.2	1 333.4	103.4	414.8
	4	40.6	2 416.8	1 301.9	193.3	30.0	60.1
135	8	10 789.4	10 864.6	4 376.8	869.0	3 961.2	6 748.4
	4	1 753.0	1 767.0	1 223.4	141.3	1 611.8	2 044.5
180	8	14 662.3	0.0	4 066.8	0.0	5 045.3	0.0
	4	2 451.0	0.0	1 150.3	0.0	2 056.8	0.0

表 4 不同航速下波浪力对比

Table 4 Comparison of wave loads at different navigation speeds

浪向角/(°)	航速/kn	$F_{w1}/N$	$F_{w2}/N$	$F_{w3}/N$	$F_{w4}/N\cdot m$	$F_{w5}/N\cdot m$	$F_{w6}/N\cdot m$
0	5	17 605.0	0.0	6 259.4	0.0	8 930.8	0.0
	7	17 402.7	0.0	6 099.9	0.0	8 374.2	0.0
	10	14 840.6	0.0	5 288.5	0.0	7 073.7	0.0
45	5	12 425.8	12 522.7	5 854.2	1 001.6	5 982.3	9 201.0
	7	12 614.4	12 710.4	6 332.5	1 016.6	6 527.0	9 927.1
	10	12 515.2	12 616.2	6 984.2	1 009.1	7 627.6	11 165.8
90	5	659.3	16 672.1	5 154.2	1 333.4	103.4	414.8
	7	659.3	16 672.1	5 154.2	1 333.4	103.4	414.8
	10	659.3	16 672.1	5 154.2	1 333.4	103.4	414.8
135	5	10 789.4	10 864.6	4 376.8	869.0	3 961.2	6 748.4
	7	10 438.8	10 477.4	4 168.1	838.0	3 707.2	6 431.0
	10	9 903.5	9 995.7	3 939.6	799.5	3 309.9	6 068.2
180	5	14 662.3	0.0	4 066.8	0.0	5 045.3	0.0
	7	13 984.6	0.0	3 865.8	0.0	4 541.2	0.0
	10	12 890.3	0.0	3 437.9	0.0	4 051.9	0.0

表 3 为 4 级和 8 级海况, 30 m 水域深度, 5 kn 航速, 20 m 航行深度下波浪力有义幅值对比。如表 3 所示, 随着海况等级的增加, 波浪振幅和频率都会增大, 导致航行体受到更大的扰动, 使航行体在各自由度方

向上受到的惯性力和流体动压力都大幅增加, 从而使波浪力显著升高, 尤其是在纵荡方向上。其中, 纵荡方向上波浪力最大有义值从 1 481.5 N 增加至 17 605.0 N, 增加了 10.89 倍。横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇方向

上的最大波浪力/力矩分别增加了 5.9 倍、5.7 倍、5.9 倍、2.58 倍和 3.52 倍。

表 4 为 8 级海况, 30 m 水域深度, 20 m 航行深度, 5 kn、7 kn 和 10 kn 航速下波浪力有义幅值对比。如表 4 所示, 随着航速的变化, 航行体在横荡、横摇方向上所受波浪力/力矩有义值变化很小。在 0°浪向下, 随着航速的增加, 纵荡、垂荡、纵摇 3 个自由度方向波浪力/力矩逐渐减小, 当航速从 5 kn 增长至 10 kn 时, 纵荡、垂荡、纵摇 3 个方向上的波浪力/力矩分别减小 15.7%、15.5%、20.8%。

#### 4 结束语

本文首先建立了适用于水下航行体有限水深航行时波浪力计算的边界元方法, 并采用已有模型试验结果对数值算法的有效性进行了验证。进一步采用该数值方法开展了水下航行体不同航速、航行深度以及海况等级等对其波浪力的影响规律, 通过研究得到以下结论:

1) 在有限水深下, 随着航行深度增加, 水下航行体在六自由度方向上所受到的波浪力/力矩均会大幅减小。当航行深度从 10 m 增加至 20 m 时, 航行体在纵摇方向上所受波浪力矩有义值减小了 72.7%。合理选择较大航行深度对于降低波浪对航行体的影响很有帮助。

2) 随着海况增加, 航行体在同一航行深度下所受波浪力/力矩会大幅增加。当海况从 4 级变为 8 级时, 纵荡方向上波浪力最大有义值从 1 481.5 N 增加至 17 605.0 N, 增加了 10.89 倍。

3) 航速对横荡和横摇 2 个自由度方向上所受波浪力/力矩影响较小, 在迎浪和随浪状态下, 纵荡、垂荡、纵摇 3 个方向上所受波浪力/力矩会随航速增加而减小。航速从 5 kn 增长至 10 kn 时纵摇方向所受波浪力矩减小了 20.8%。在定深航行时, 适当提高航速也能在一定程度上减小波浪力, 但需谨慎平衡不同自由度方向的影响。

#### 参考文献

- [1] OGILVIE T F, TUCK E O. A rational strip theory of ship motions: part I[R]. Michigan: Technical University of Michigan, 1969.
- [2] VASSILOPOULOS L, MANDEL P. A new appraisal of strip theory[J]. Ship Motions and Drag Reduction,

1966, 1: 253-1153.

- [3] CHEN X, ZHU R C, MA C, et al. Computations of linear and nonlinear ship waves by higher-order boundary element method[J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 142-153.
- [4] RIESNER M, MOCTAR O. A time domain boundary element method for wave added resistance of ships taking into account viscous effects[J]. Ocean Engineering, 2018, 162: 290-303.
- [5] FALTINSEN O. Sea Loads on Ships and Offshore Structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [6] TELSTE J G, NOBLESSE F. Numerical evaluation of the green function of water-wave radiation and diffraction[J]. Journal of Ship Research, 1986, 30 (2): 69-84.
- [7] XU Y, DONG W C. Study on characteristics of 3-D translating-pulsating source green function of deep-water Havelock form and its fast integration method[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25 (3): 365-380.
- [8] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986.
- [9] 杜双兴, 吴有生. Bessho 型移动脉动源格林函数快速数值积分方法[J]. 中国造船, 1998, 39 (2): 40-48.
- [10] CUMMINS W E. The impulse response function and ship motions[R]. Washington: David Taylor Model Basin, 1962.
- [11] 林子, 滕斌, 宁德志, 等. 基于脉冲响应函数法计算小尺度圆柱上的不规则波浪力[J]. 水运工程, 2011 (2): 11-15.
- [12] MICHELE S, ZHENG S M, BURIANI F, et al. Floating hydroelastic circular plate in regular and irregular waves[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2023, 99: 148-162.
- [13] QIN R, LU H, CHEN J. The effect of the second-order difference-frequency wave force on the motions of an underwater vehicle near the surface[J]. Journal of Ship Research, 2023, 67 (3).
- [14] 宋竟正, 段文洋, 邹元杰, 等. 三维分布源法中面元流体力积分[J]. 船舶力学, 2002, 5 (4): 24-32.
- [15] 许景波, 边信黔, 付明玉. 长峰波海浪的数值模拟仿真与频谱估计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15 (4): 30-33.
- [16] 施伟, 侯海平. 三维随机海浪模拟研究[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2006, 12 (4): 410-413.
- [17] 汪小佳. 基于脉冲响应函数法的参数横摇数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [18] YAO C B, SUN X S, WANG W, et al. Numerical and experimental study on seakeeping performance of ship in finite water depth[J]. Applied Ocean Research, 2017, 67: 59-77.

(责任编辑: 曹晓霖)