

## 小水线面双体船横摇阻尼特性数值与试验研究\*

孙小帅,姚朝帮,叶青

(海军工程大学舰船工程系,湖北武汉 430033)

**摘要:**针对安装稳定鳍的小水线面双体船开展了零速静水自由横摇衰减数值与试验研究。通过不确定度分析验证数值计算方法的可靠性,进而对比船体的线性横摇阻尼和非线性横摇阻尼,并分析摩擦阻尼和稳定鳍对小水线面双体船横摇恢复力矩的影响规律。结果表明:由数值计算求得的自由横摇衰减曲线与试验结果吻合良好;在线性横摇运动假设下,线性横摇阻尼系数随着初始横倾角的增加而增大;将通过数值计算求得的非线性阻尼系数代入到非线性横摇运动方程中能准确地模拟船体的自由横摇衰减运动;摩擦阻尼和稳定鳍对小水线面双体船零速静水自由横摇时的横摇恢复力矩贡献很小。

**关键词:**小水线面双体船;横摇阻尼;自由横摇衰减

**中图分类号:** U661.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)06-071-08

## Numerical and experimental investigation on roll damping of small waterplane area twin hull

SUN Xiaoshuai, YAO Chaobang, YE Qing

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A SWATH (small waterplane area twin hull) installed with stabilizing fins rolling freely in calm water was investigated by both numerical approach and experimental method. Uncertainty analysis was made to verify and validate the numerical method. Both linear roll damping and nonlinear roll damping were obtained and the contributions of the frictional damping and the stabilizing fins to the roll restoring moment were analyzed. The results illustrate that: the numerical free roll decay curve agrees well with the experiment; under the assumption of linear roll mode, the linear roll damping coefficient sees an upward trend with the increase of initial heel angle; the computed free roll decay curves using nonlinear damping coefficients agree well with the experimental results; the frictional damping and the stabilizing fins make minimal contributions to the roll restoring moment for the free roll decay motion in still water.

**Key words:** small waterplane area twin hull; roll damping; free roll decay

船舶在波浪中的横摇运动相比其他自由度的运动呈现出更明显的非线性特征<sup>[1]</sup>,准确预报船舶横摇运动的关键在于求解船舶的非线性横摇阻尼。Ikeda<sup>[2]</sup>, Himeno<sup>[3]</sup>和 Chakrabarti<sup>[4]</sup>等学者对横摇阻尼的组成进行了研究。Chakrabarti<sup>[4]</sup>将横摇阻尼分为5个部分,分别为兴波阻尼、漩涡阻尼、摩擦阻尼、升力阻尼和舳龙骨阻尼。其中兴波阻尼是指由船体运动引起的辐射波所产生的阻尼,可通过势流理论进行求解;而漩涡阻尼、摩擦阻尼、升力阻尼和舳龙骨阻尼均与黏性相关,目前尚无严格的理论计算方法,主要通过经验或半经验公式求得。当仅采用通过势流理论求解得到的横摇阻尼进行横摇运动预报时,在共振区附近的预报结果偏大,预报精度较差。长期以来,通过模

型试验获取船舶横摇阻尼被认为是较为可靠的方法,Oliveira<sup>[5]</sup>、董文才<sup>[6]</sup>、李培勇<sup>[7]</sup>等分别针对不同船型开展了自由横摇衰减试验来获取横摇阻尼。

由于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)可以计入黏性和非线性的影响,适用于处理船舶水动力问题,众多学者开始采用基于RANS方程和动网格技术的数值方法研究船舶的横摇运动。黄昊<sup>[8]</sup>和杨春蕾<sup>[9]</sup>等数值模拟了S60船模的强迫横摇运动,Avalos<sup>[10]</sup>、Irvine<sup>[11]</sup>、Zhou<sup>[12]</sup>和Lugni<sup>[13]</sup>等开展了船舶自由横摇衰减试验的直接数值模拟,均取得了与模型试验一致的结果。

小水线面双体船(Small Waterplane Area Twin Hull, SWATH)作为一种特殊船型,在恶劣海况下的运动响应小、失速小,具有优良的耐波性<sup>[14-15]</sup>。

\* 收稿日期:2016-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879090,51509256);水动力重点基金资助项目(9140A1403071251311044)

作者简介:孙小帅(1990—),男,河南洛阳人,博士研究生,E-mail:hglastshadow@163.com;

姚朝帮(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:hgyeb2004111@163.com

然而针对其横摇阻尼特性的研究并不多见。本文针对安装有稳定鳍的 SWATH 船模开展静水自由横摇衰减数值与试验研究。通过不确定度分析验证数值计算方法的可靠性,进而对比船体的线性横摇阻尼和非线性横摇阻尼,并分析摩擦阻尼和稳定鳍对 SWATH 横摇恢复力矩的影响规律。

## 1 静水自由横摇运动方程

船舶静水中的线性横摇运动方程为:

$$(I+A)\ddot{\phi} + B_l\dot{\phi} + C\phi = 0 \quad (1)$$

船舶静水中的非线性横摇运动方程为:

$$(I+A)\ddot{\phi} + B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + C\phi = 0 \quad (2)$$

其中,  $\phi$  为横摇角,  $I$  为横向惯性矩,  $A$  为横向附加惯性矩,  $B_l$  为线性横摇运动时的线性横摇阻尼系数,  $B_1$  和  $B_2$  分别为非线性横摇运动时的线性、非线性横摇阻尼系数,  $C$  为横摇恢复力矩系数。一般地, 方程(1)适用于小角度的初始横倾角  $\phi_0$ , 方程(2)适用于较大角度的初始横倾角  $\phi_0$ 。

在获得船体的自由横摇衰减曲线后, 可分别采用方程(1)和方程(2)来分析船体的横摇阻尼。具体方法如下:

采用峰值处理法, 将自由横摇衰减曲线上的横摇角幅值按照正负分为  $\phi_p$  和  $\phi_n$  两组(如图 1 所示), 分别为  $\phi_{p1}, \phi_{p2}, \dots, \phi_{pn}$  和  $\phi_{n1}, \phi_{n2}, \dots, \phi_{nn}$ 。其中下标 p 表示正值, n 表示负值<sup>[1,16]</sup>。

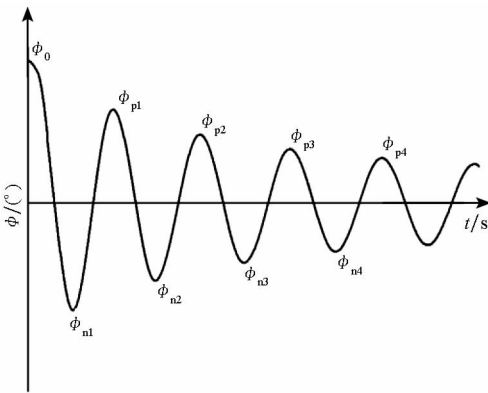


图 1 自由横摇衰减曲线

Fig. 1 Free roll decay curve

采用线性横摇运动方程(1)时, 若  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为自由横摇衰减曲线上两个连续的横摇角幅值, 则对数衰减率  $\delta = \ln(\phi_1/\phi_2)$ , 无因次阻尼系数  $\zeta = 1/\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}$ , 线性横摇阻尼系数  $B_l = 2(I+A)\zeta\omega_n$ 。其中, 横摇固有频率  $\omega_n = \sqrt{C/(I+A)} = 2\pi/T_n$ <sup>[17-18]</sup>,  $T_n$  为横摇固有周期。对于横摇运动, 横摇恢复力矩系数  $C = D \cdot GM$ , 其中  $D$  为模型排水量,  $GM$  为横稳性高。

采用非线性横摇运动方程(2)时, 横摇阻尼系数可采用 Faltinsen<sup>[19]</sup> 和 Chakrabarti<sup>[20]</sup> 提出的方法求解。对每一组横摇角幅值  $\phi_k (k=1, 2, \dots)$ , 可求得平均摇幅  $\phi_m^k = (\phi_k + \phi_{k+1})/2$ , 对数衰减率  $\delta_k = \ln(\phi_k/\phi_{k+1})$ , 无因次阻尼系数  $\zeta_t^k = 1/\sqrt{1+(2\pi/\delta_k)^2}$ , 横摇阻尼系数  $B_t^k = 2(I+A)\omega_n\zeta_t^k$ 。

对由  $\phi_p$  和  $\phi_n$  两组横摇角幅值分别求得的  $B_t^k$ , 以  $8\omega_n\phi_m^k/3\pi$  为横坐标、 $B_t^k$  为纵坐标作图, 进行线性回归处理, 可得直线:

$$B_t = B_1 + B_2 \cdot 8\omega_n\phi_m^k/3\pi \quad (3)$$

则直线斜率为非线性横摇阻尼系数  $B_2$ , 截距为线性横摇阻尼系数  $B_1$ 。其求解过程如图 2 所示。

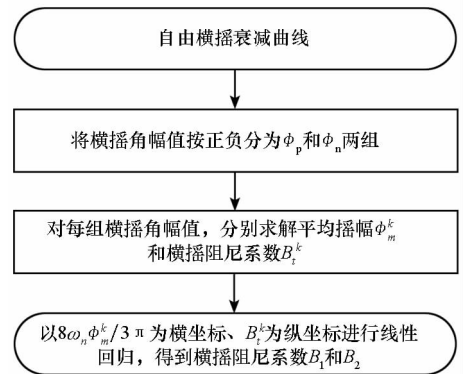


图 2 非线性横摇阻尼系数求解方法

Fig. 2 Process to obtain the nonlinear roll damping

## 2 试验研究

试验模型为木模, 由深置于水下的两个细长下体、连接上体和下体的小水线面支柱、宽敞的上船体三部分组成, 将其命名为 SWATH-M, 其主要参数见表 1。图 3 给出了模型设计水线以下部分的侧视图和横剖图。可以看出, 模型的支柱垂直且连续, 下体剖面为类似大象腿的形状。

表 1 SWATH-M 主要参数

Tab. 1 General properties of SWATH-M

主要参数	数值
排水量体积 $\Delta/m^3$	0.200
设计水线长 $L_{WL}/m$	2.867
下体长度 $L/m$	2.800
支柱水线宽 $B_S/m$	0.107
片体中心距 $D_y/m$	0.753
设计吃水 $T/m$	0.250
重心纵向位置到下体首端距离/m	1.433
重心垂向位置到基线距离/m	0.360
横向惯性半径 $K_{xx}/m$	0.390
纵向惯性半径 $K_{yy}/m$	0.830

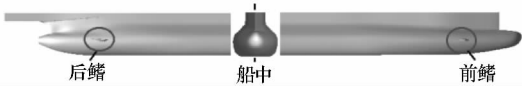


图3 模型示意图

Fig. 3 SWATH-M model

SWATH-M 首尾安装有稳定鳍,表 2 给出了稳定鳍的主要参数,其中纵向位置以船中为参考,+表示为船首方向。

表 2 稳定鳍主要参数

Tab. 2 General properties of stabilizing fins

主要参数	前鳍	后鳍
纵向位置/m	+1.233	-0.863
弦长/m	0.093	0.114
展长/m	0.089	0.110
最大厚度/m	0.015	0.018
水平面投影面积/m <sup>2</sup>	0.006 7	0.010 0

试验在中国特种飞行器研究所拖曳水池进行。开展试验时,首先给船体一个初始横倾角 $\phi_0$ ,分别为 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 和 $15^\circ$ ,之后释放模型进行自由横摇衰减试验。横摇角测量采用 WS601 姿态仪,采样频率为 100 Hz,测量分辨率小于 $0.01^\circ$ ,动态测量精度为 $0.1^\circ$ 。

### 3 数值研究

#### 3.1 数值方法

黏性流场控制方程包括连续性方程和动量方程,分别为:

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j + \rho\overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_i \quad (5)$$

其中: $\rho$ 为流体密度; $\mu$ 为流体黏度; $p$ 为静压; $f_i$ 为单位质量力; $\bar{u}_i$ 、 $\bar{u}_j$ 为平均速度分量。

在通用计算流体力学软件 Srar-CCM + 中采用有限体积法离散和求解上述方程。湍流模型选用 RNG  $k - \varepsilon$ , 自由液面捕捉采用流体体积 (Volume Of Fluid, VOF) 方法。使用六自由度运动求解器 DFBI (dynamic fluid body interaction) 和重叠网格 (overset mesh) 技术求解船体运动,释放船体的升沉和横摇两个自由度,约束其他自由度的运动。

作用在船体表面的力和力矩可以表示为:

$$\mathbf{f} = \sum_s (\mathbf{f}_s^{\text{pressure}} + \mathbf{f}_s^{\text{shear}}) \cdot \mathbf{n}_s \quad (6)$$

$$\mathbf{M} = \sum_s [\mathbf{r}_s \times (\mathbf{f}_s^{\text{pressure}} + \mathbf{f}_s^{\text{shear}})] \cdot \mathbf{a} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{f}_s^{\text{pressure}}$ 和 $\mathbf{f}_s^{\text{shear}}$ 分别表示作用在面元 $s$ 上的压力向量和摩擦力向量, $\mathbf{n}_s$ 表示指定的方向向量。当 $\mathbf{n}_s$ 沿 $x$ 轴,即 $\mathbf{n}_s = (1, 0, 0)$ 时,则可求解船体的阻力,并可分别计算出作用在船体表面的摩擦阻力和压差阻力。 $\mathbf{a}$ 为经过力矩作用点 $x_0$ 的方向向量, $\mathbf{r}_s$ 为面元 $s$ 相对力矩作用点 $x_0$ 的位置向量。

#### 3.2 网格和边界条件

计算模型和试验模型相同,模型示意图和主要参数分别如图 3 和表 1 所示。计算域分为背景网格域和重叠网格域,两者之间建立交界面传递数据。图 4 给出了计算域和边界条件。计算域的坐标范围为 $-3L_{\text{WL}} < x < 1.5L_{\text{WL}}$ ,  $-1.5L_{\text{WL}} < y < 1.5L_{\text{WL}}$ ,  $-1L_{\text{WL}} < z < 0.5L_{\text{WL}}$ 。船体重心为 CG, 船体表面设置为无滑移壁面,出口边界条件为压力出口,其他边界条件为速度入口。当来流速度不为 0 时,可数值模拟有航速下的船体自由横摇衰减试验。本文主要研究零航速时的船体自由横摇衰减,因此来流速度设置为 0。

网格划分采用非结构六面体剪切型网格,对船体、稳定鳍和自由液面附近区域进行加密,在船体表面和稳定鳍表面设置边界层,如图 5 所示。

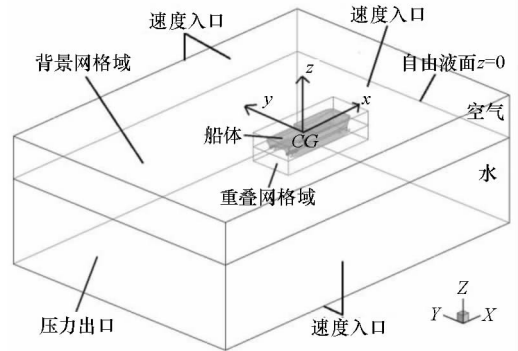
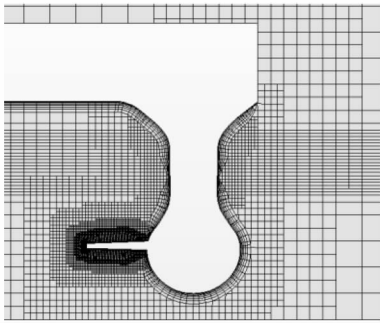


图4 计算域和边界条件

Fig. 4 Fluid domain and boundary conditions

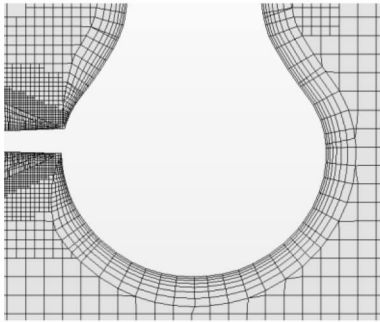
### 4 不确定性分析

采用 Stern 等<sup>[21]</sup>提出的不确定分析方法,评估数值计算结果的不确定度,验证数值计算方法的可靠性。不确定度分析分为验证和确认两个过程。验证过程主要是计算数值误差的不确定度 $U_{\text{SN}}$ ,数值误差来源主要为迭代次数、网格划分、时间步长等。确认过程是利用基准试验数据评估数



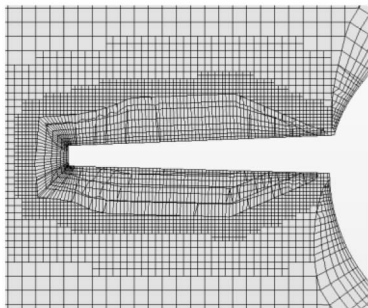
(a) 船体附近

(a) Meshes around the hull body



(b) 船体表面边界层

(b) Boundary layer



(c) 稳定鳍附近

(c) Meshes around the stabilizing fin

图 5 网格划分

Fig. 5 Mesh division

值模型的不确定度  $U_{SM}$ , 通过对比比较误差  $E$  和确认不确定度  $U_V$  来判定确认实现与否<sup>[22-23]</sup>。

#### 4.1 验证

对非定常数值计算, 验证过程包括对网格收敛性和时间步长收敛性的验证。下面对 SWATH 初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$  时的自由横摇衰减数值计算结果进行网格收敛性和时间步长收敛性分析。

进行网格收敛性分析时, 时间步长  $dt = 7.071 \times 10^{-3} \text{ s}$ , 按照网格加细比  $r_C = \sqrt{2}$  改变网格基本尺寸为 1, 1.414, 2, 得到密、中、疏三套网格。三套网格的具体信息如表 3 所示。进行时间步长收敛性分析时, 选取密网格, 按照时间步长加细比  $r_T = \sqrt{2}$  选取三个时间步长  $dt_1 = 7.071 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $dt_2 =$

$0.010 \text{ s}$  和  $dt_3 = 0.014 \text{ s}$ 。

表 3 网格收敛性研究时的网格

Tab. 3 Grids for mesh convergence study

网格类型	基本尺寸	网格数量(万)		
		背景网格域	重叠网格域	总计
密	1	155.4	326.0	481.4
中	1.414	62.6	205.0	267.6
疏	2	24.5	120.1	144.6

表 4 和表 5 分别给出了横摇固有频率  $\omega_n$  和前三个横摇角幅值  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$  的网格收敛性结果和时间步长收敛性结果。表 4 中  $r_C$  为网格加细比,  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别代表网格收敛性研究中细网格、中网格和疏网格的数值计算结果,  $R_C$  为网格收敛性研究中数值计算结果的收敛因子 ( $0 < R_C < 1$  时表示计算结果单调收敛),  $\delta_C^*$  为带修正因子的误差,  $U_C$  为网格不确定度,  $U_{C_C}$  为修正值的不确定度,  $S_C$  为修正后的数值模拟结果基准值,  $D$  为试验结果。表 5 中  $r_T$  为时间步长加细比,  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别代表时间步长收敛性研究中小时间步长  $dt_1$ 、中等时间步长  $dt_2$  和大时间步长  $dt_3$  的数值计算结果,  $R_T$ 、 $\delta_T^*$ 、 $U_T$ 、 $U_{T_C}$  的含义与表 4 中的类似, 下标 T 表示时间步长收敛性研究。

综合表 4 和表 5 可知, 横摇固有频率和前三个横摇角幅值的数值计算结果随网格和时间步长的变化均满足单调收敛条件。横摇固有频率  $\omega_n$  的不确定度较小, 而第三个横摇角幅值  $\phi_3$  的不确定度较大。与网格不确定度  $U_C$  相比, 数值计算结果的时间步长不确定度  $U_T$  较大。

#### 4.2 确认

表 6 给出了横摇固有频率  $\omega_n$  和前三个横摇角幅值  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$  的确认结果, 其中数值计算结果的不确定度  $U_{SN} = \sqrt{U_C^2 + U_T^2}$ , 确认不确定度  $U_V = \sqrt{U_C^2 + U_T^2 + U_D^2}$ ,  $U_D$  为试验不确定度, 在此取为 2.5%。可以看出, 横摇固有频率  $\omega_n$  和前三个横摇角幅值与试验值的对比误差  $E$  均小于确认不确定度  $U_V$ , 因此数值计算结果均得到了确认, 确认水平分别为 2.523%、4.466%、3.076% 和 14.010%, 表明数值计算结果是可靠的。第三个横摇角幅值  $\phi_3$  的数值计算结果不确定度较大。

在数值计算方法得到确认的基础上, 开展其他工况的数值模拟。为了减小数值误差, 数值计算时采用密网格和最小的时间步长  $dt_1$ 。

表4 网格收敛性验证结果

Tab.4 Results of grid convergence study

参数	$r_G$	密网格 $S_1$	中网格 $S_2$	疏网格 $S_3$	$R_G$	$\delta_G^*/\%$ $S_1$	$U_G/\%$ $S_1$	$U_{Gc}/\%$ $S_1$	$S_C$	试验值 $D$
$\omega_n$	$\sqrt{2}$	1.959	1.962	1.967	0.600	0.153	0.230	0.077	1.956 rad/s	1.949 rad/s
$\phi_1$	$\sqrt{2}$	9.474	9.421	9.321	0.530	-0.559	0.631	0.071	9.527°	9.873°
$\phi_2$	$\sqrt{2}$	7.233	7.148	6.950	0.429	-1.175	1.466	0.291	7.318°	7.209°
$\phi_3$	$\sqrt{2}$	6.172	5.965	5.612	0.586	-3.354	4.755	1.401	6.379°	5.985°

表5 时间步长收敛性验证结果

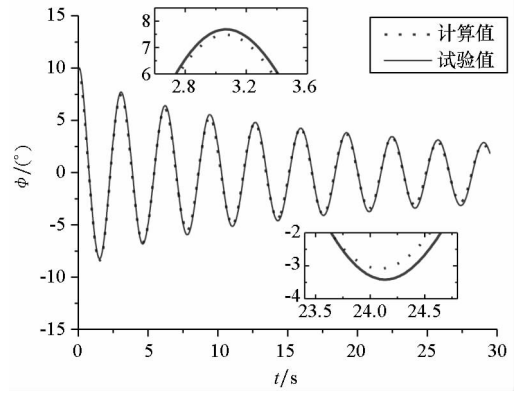
Tab.5 Results of time step convergence study

参数	$r_T$	$dt_1$ $S_1$	$dt_2$ $S_2$	$dt_3$ $S_3$	$R_T$	$\delta_T^*/\%$ $S_1$	$U_T/\%$ $S_1$	$U_{Tc}/\%$ $S_1$	$S_C$	试验值 $D$
$\omega_n$	$\sqrt{2}$	1.959	1.955	1.946	0.444	-0.204	0.245	0.041	1.963 rad/s	1.949 rad/s
$\phi_1$	$\sqrt{2}$	9.474	9.387	9.279	0.806	-0.918	3.804	2.886	9.561°	9.873°
$\phi_2$	$\sqrt{2}$	7.233	7.178	7.082	0.573	-0.760	1.020	0.260	7.288°	7.209°
$\phi_3$	$\sqrt{2}$	6.172	5.913	5.567	0.749	-4.196	12.493	8.296	6.431°	5.985°

表6 横摇固有频率和前三个横摇角幅值确认结果

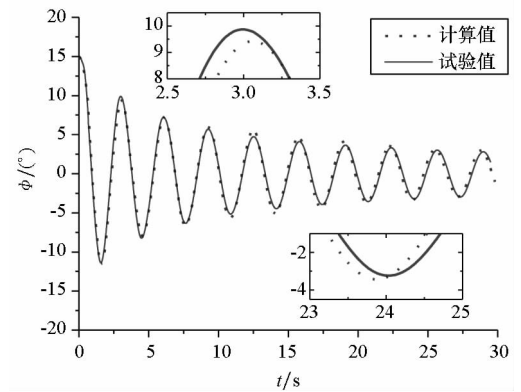
Tab.6 Validation of natural roll frequency and peak roll amplitudes

参数	$U_{SN}/\%D$	$U_D/\%D$	$U_V/\%D$	$E/\%D$
$\omega_n$	0.338	2.500	2.523	0.513
$\phi_1$	3.700	2.500	4.466	-4.041
$\phi_2$	1.792	2.500	3.076	0.333
$\phi_3$	13.785	2.500	14.010	3.124



(b) 初始横倾角  $\phi_0 = 10^\circ$

(b) Initial heel angle  $\phi_0 = 10^\circ$



(c) 初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$

(c) Initial heel angle  $\phi_0 = 15^\circ$

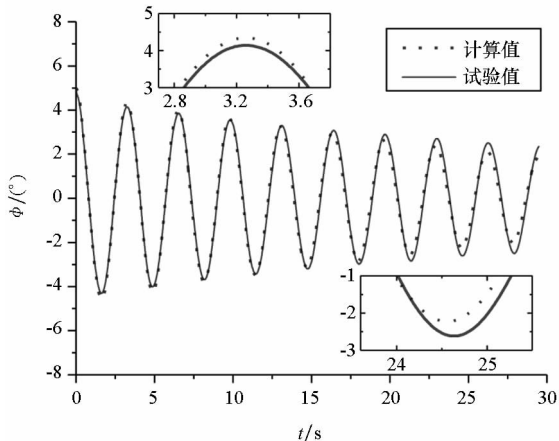
图6 自由横摇衰减曲线对比

Fig.6 Comparison of measured and simulated free roll decay

## 5 结果及分析

### 5.1 自由横摇衰减曲线

图6对比了不同初始横倾角下静水自由横摇衰减曲线的数值计算结果和试验结果。总体来看,



(a) 初始横倾角  $\phi_0 = 5^\circ$

(a) Initial heel angle  $\phi_0 = 5^\circ$

数值计算结果与试验结果反映的横摇角时历曲线吻合较好。从局部对比中可以看到,横摇幅值和横摇周期的计算值与试验值之间的偏差很小。

### 5.2 横摇阻尼

#### 5.2.1 线性横摇阻尼

表 7 给出了不同初始横倾角下,分别由数值计算和试验求得的线性阻尼系数  $B_l$ 、横摇固有周期  $T_n$  和无因次横摇附加惯性矩  $A'$  ( $A' = I/A$ )。其中,线性阻尼系数  $B_l$  由前 5 个横摇幅值  $\phi_1 \sim \phi_5$  求出。可以看出,在线性横摇运动假设下,线性阻尼系数  $B_l$ 、横摇固有周期  $T_n$  和无因次横摇附加惯性矩  $A'$  的数值计算值与试验值吻合较好。

表 7 线性横摇运动时的横摇参数对比

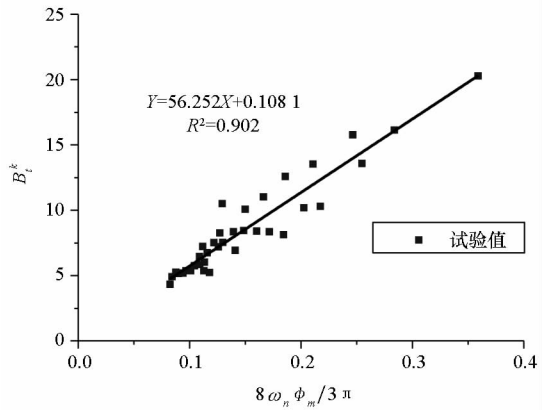
Tab. 7 Comparison of roll parameters in linear roll mode

$\phi_0$	$B_l$		$T_n/s$		$A'$	
	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值
5	3.616	3.303	3.278	3.288	1.387	1.402
10	6.270	6.521	3.227	3.232	1.314	1.321
15	8.027	8.748	3.206	3.224	1.283	1.309

线性阻尼系数  $B_l$  随着初始横倾角  $\phi_0$  的增加而增大, $\phi_0 = 15^\circ$  时的  $B_l$  约为  $\phi_0 = 5^\circ$  时的 2.2 倍(计算值)和 2.6 倍(试验值)。这主要是由于初始横倾角增大时,横摇恢复力矩和横摇角速度较大,使得船体与水之间的相对速度增加,导致横摇阻尼增大。横摇固有周期  $T_n$  和无因次横摇附加惯性矩  $A'$  随着初始横倾角  $\phi_0$  的增加基本保持不变。

#### 5.2.2 非线性横摇阻尼

图 7 给出了在非线性横摇运动假设下,分别由数值计算和试验得到的自由横摇衰减曲线求得的横摇阻尼回归曲线,并给出了线性回归得到的方程。方程中的  $X$  表示横坐标  $8\omega_n \phi_m^k / 3\pi$ ,  $Y$  表示



(b) 试验结果

(b) Experimental results

图 7 横摇阻尼回归曲线

Fig. 7 Linear fit to the roll damping

纵坐标  $B_l^k$ 。由数值计算结果和试验结果回归分析时的相关系数  $R^2$  分别为 0.821 和 0.902,表明方程的拟合效果较好。根据线性回归结果,数值计算结果与试验结果相差很小。由数值计算和试验求得的非线性阻尼系数  $B_2$  分别为 53.304 和 56.252,线性阻尼系数  $B_l$  分别为 0.114 5 和 0.108 1。

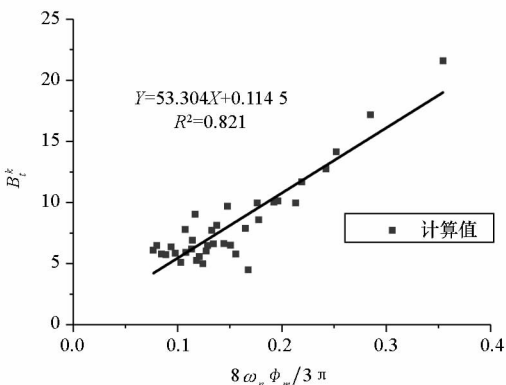
### 5.3 横摇运动模拟

将由数值计算结果求得的横摇阻尼系数代入到横摇运动方程中,采用四阶 Runge-Kutta 法求解横摇运动方程可得到船体的自由横摇衰减曲线。图 8 给出了初始横倾角  $\phi_0$  分别为  $5^\circ$  和  $15^\circ$  时,按照线性横摇运动、非线性横摇运动模拟的自由横摇衰减曲线与试验结果的对比。

由图 8 可以看出,初始横倾角  $\phi_0 = 5^\circ$  时,按照线性运动方程和非线性运动方程求解的自由横摇衰减曲线均与试验结果吻合较好。初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$  时,按照线性运动方程求解的自由横摇衰减曲线与试验结果差别较大,所得横摇幅值大于试验结果;按照非线性横摇运动方程求解的自由横摇衰减曲线与试验结果吻合较好。这表明线性横摇运动方程不适合用于大角度的自由横摇运动模拟,而将通过数值计算求得的非线性阻尼系数  $B_2$  和线性阻尼系数  $B_l$  代入到非线性横摇运动方程,无论初始横倾角大小,均能准确地模拟船体的自由横摇衰减运动。

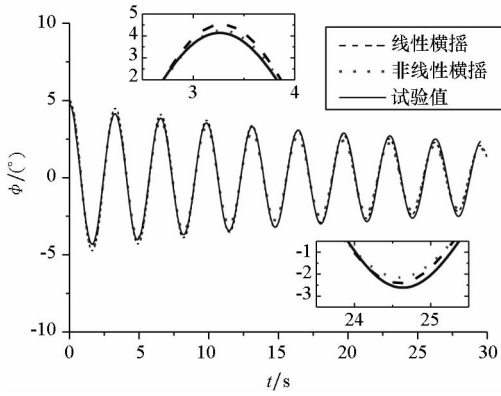
### 5.4 摩擦阻尼与稳定鳍的影响

图 9 对比了初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$  时,由数值计算求得的船体自由横摇衰减过程中的摩擦横摇恢复力矩和压差横摇恢复力矩。可以看出,与压差横摇恢复力矩幅值相比,摩擦横摇恢复力矩幅

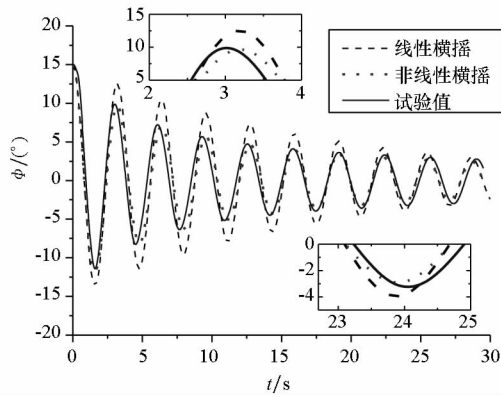


(a) 数值计算结果

(a) Numerical results



(a) 初始横倾角  $\phi_0 = 5^\circ$   
 (a) Initial heel angle  $\phi_0 = 5^\circ$



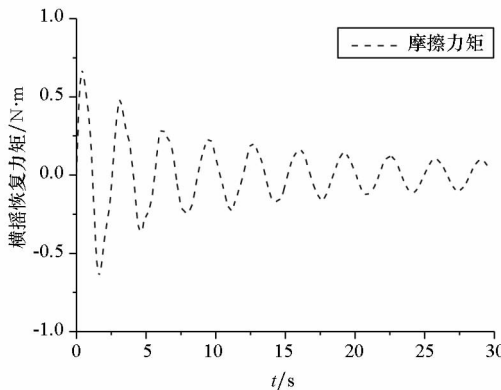
(b) 初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$   
 (b) Initial heel angle  $\phi_0 = 15^\circ$

图8 自由横摇衰减曲线对比

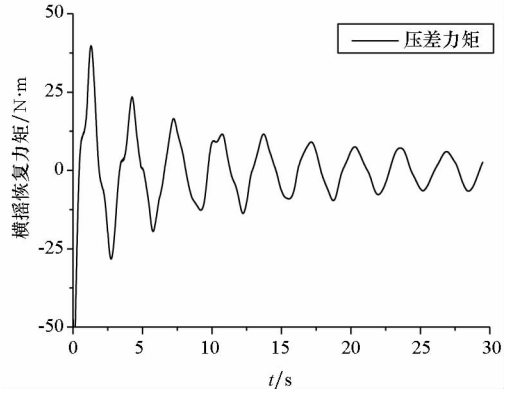
Fig.8 Comparison of free roll decay curves

值很小,约为前者的1.2%。这表明船体在零速静水自由横摇时,摩擦阻尼对船体横摇恢复力矩的贡献很小。

图10给出了初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$ 时,船体自由横摇衰减过程中主船体横摇恢复力矩和稳定鳍横摇恢复力矩的数值计算结果。由图10可知,SWATH在零速静水自由横摇时,由稳定鳍产生的横摇恢复力矩很小,可以忽略不计。产生此现象的原因:一是



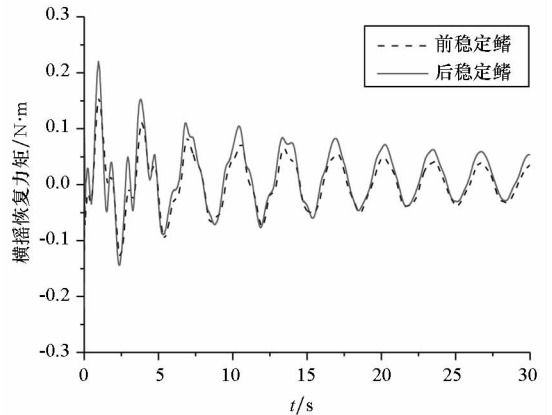
(a) 摩擦横摇恢复力矩  
 (a) Frictional roll restoring moment



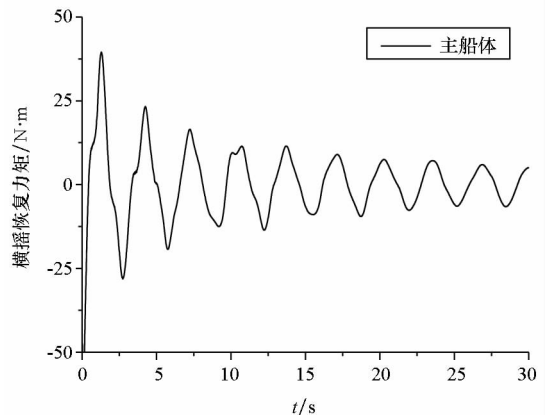
(b) 压差横摇恢复力矩  
 (b) Pressure roll restoring moment

图9 摩擦阻尼对横摇恢复力矩的贡献  
 Fig.9 Contribution of frictional damping to roll restoring moment

稳定鳍安装在两个下体的内侧,因此鳍升力对船体作用的横向力臂并不大;二是由于静水自由横摇时,并无来流速度,因此鳍产生的升力较小。两者综合导致稳定鳍产生的横摇恢复力矩较小。



(a) 稳定鳍横摇恢复力矩  
 (a) Roll restoring moment of stabilizing fins



(b) 船体横摇恢复力矩  
 (b) Roll restoring moment of hull body

图10 横摇恢复力矩组成对比  
 Fig.10 Comparison of roll restoring moment

图 11 给出了初始横倾角  $\phi_0 = 15^\circ$ 、船体自由横摇衰减试验时,  $t = 1.6 \text{ s}$ 、 $t = 2.4 \text{ s}$  和  $t = 3.2 \text{ s}$  三个时刻的船体周围涡量分布图。图中三个时刻船体的横摇角度分别为第一个负横摇角幅值、0 和第一个正横摇角幅值。可以看出, 在 SWATH 下体周围和稳定鳍端部周围的涡量较大; 随着时间增加, 船体的横摇角幅值变小, 船体周围的涡量逐渐降低, 对船体的阻尼作用也逐渐减小。稳定鳍周围仅在端部产生了较为明显的涡, 因而对船体横摇阻尼的贡献较小。

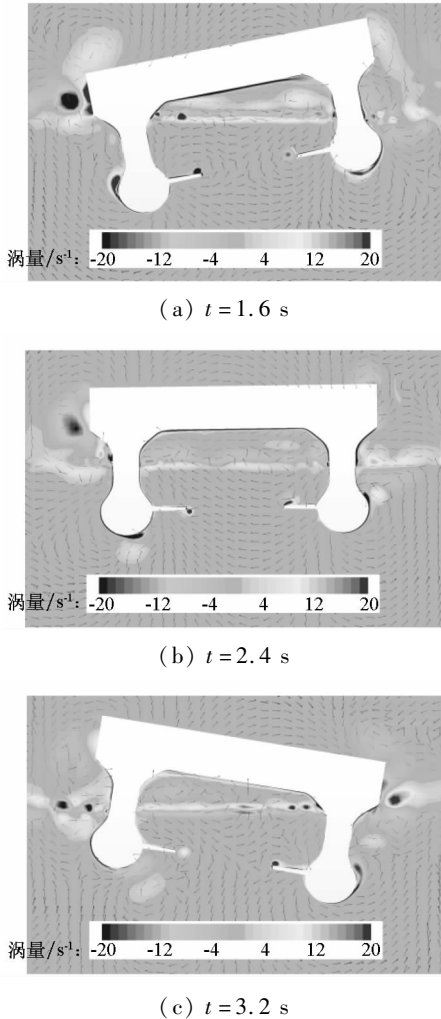


图 11 船体周围涡量分布

Fig. 11 Vortices field around the SWATH

## 6 结论

针对安装有稳定鳍的 SWATH 船模, 开展了静水自由横摇衰减数值与试验研究。通过不确定性分析验证了数值方法的可靠性, 对比了船体的线性横摇阻尼和非线性横摇阻尼, 并分析了摩擦阻尼和稳定鳍对 SWATH 横摇恢复力矩的影响, 主要得到以下结论:

1) 与网格不确定性相比, 数值计算结果的时

间步长不确定性较大。

2) 在线性横摇运动假设下, 线性横摇阻尼系数  $B_l$  随着初始横倾角  $\phi_0$  的增加而增大, 而横摇固有周期  $T_n$  和无因次横摇附加惯性矩  $A'$  随着初始横倾角  $\phi_0$  的增加基本保持不变。

3) 无论初始横倾角大小, 将通过数值计算求得的非线性阻尼系数  $B_2$  和线性阻尼系数  $B_1$  代入到非线性横摇运动方程中, 均能准确地模拟船体的自由横摇衰减运动。

4) 对零速时的 SWATH 静水自由横摇衰减运动, 摩擦阻尼和稳定鳍对横摇恢复力矩的贡献很小。

## 参考文献 (References)

- [1] Irkal M A R, Nallayarasu S, Bhattacharyya S K. CFD approach to roll damping of ship with bilge keel with experimental validation[J]. Applied Ocean Research, 2016, 55: 1-17.
- [2] Ikeda Y, Komatsu K, Himeno Y, et al. On roll damping force of ship; effect of hull surface pressure created by bilge keels[J]. Journal of Kansai Society of Naval Architects, 1977, 165: 31-40.
- [3] Himeno Y. Prediction of ship roll damping-state of art; report no. 239[R]. University of Michigan, USA, 1981.
- [4] Chakrabarti S. Empirical calculation of roll damping for ships and barges[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(7): 915-932.
- [5] de Oliveira A C, Fernandes A C. The nonlinear roll damping of a FPSO hull[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(1): 011106.
- [6] 董文才, 黄祥兵, 刘志华. 深 V 型滑翔艇横摇阻尼的实验确定[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(4): 26-29. DONG Wencai, HUANG Xiangbing, LIU Zhihua. Experimental determination of roll damping of deep-Vee planning craft [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2004, 16(4): 26-29. (in Chinese)
- [7] 李培勇, 冯铁城, 裘泳铭. 三体船横摇运动[J]. 中国造船, 2003, 44(1): 24-30. LI Peiyong, FENG Tiecheng, QIU Yongming. Investigation of trimaran roll motion characteristic[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(1): 24-30. (in Chinese)
- [8] 黄昊, 郭海强, 朱仁传, 等. 粘(黏)性流中船舶横摇阻尼计算[J]. 船舶力学, 2008, 12(4): 568-573. HUANG Hao, GUO Haiqiang, ZHU Renchuan, et al. Computations of ship roll damping in viscous flow[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(4): 568-573. (in Chinese)
- [9] 杨春蕾, 朱仁传, 缪国平, 等. 一种基于计算流体力学的三维船舶横摇阻尼预报方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(8): 1190-1195. YANG Chunlei, ZHU Renchuan, MIAO Guoping, et al. A roll damping prediction method of three-dimensional ships based on CFD computation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(8): 1190-1195. (in Chinese)

(下转第 142 页)



## 参考文献 (References)

- [1] International Civil Aviation Organization. Global air traffic management operational concept; doc 9854[R]. USA, 2005.
- [2] Gravio G, Mancini M, Patriarca R, et al. Overall safety performance of the air traffic management system: indicators and analysis [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2015, 44/45: 65–69.
- [3] Ahna Y H, Minb H. Evaluating the multi-period operating efficiency of international airports using data envelopment analysis and malmquist productivity index [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 39: 12–22.
- [4] Cheng Y H, Solak S, Clarke J P, et al. Models for single-sector stochastic air traffic flow management under reduced airspace capacity [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2016, 67(1): 54–67.
- [5] Reynolds T G. Air traffic management performance assessment using flight inefficiency metrics[J]. *Transport Policy*, 2014, 34: 63–74.
- [6] 丛玮, 胡明华, 谢华, 等. 基于指标体系的扇区复杂性评估方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 136–141.  
CONG Wei, HU Minghua, XIE Hua, et al. An evaluation method of sector complexity based on metrics system [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 136–141. (in Chinese)
- [7] EUROCONTROL & FAA. U. S./Europe comparison of ATM-related operational performance [C]//Proceedings of 8th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2013.
- [8] Yu R C, Tzeng G. A soft computing method for multi-criteria decision making with dependence and feedback[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 180(1): 63–75.
- [9] Saaty T. Decision making with dependence and feedback: the analytic network process [M]. USA: RWS Publications, 1996.
- [10] Li C H, Sun Y H, Du Y W. An improved analytic network process based on fuzzy decision maps [C]//Proceedings of Control and Decision Conference, 2008: 2100–2105.
- [11] 石福丽, 方志刚, 杨峰, 等. 基于仿真的潜艇装备作战能力 ANP 幂指数评估方法[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(4): 168–174.  
SHI Fuli, FANG Zhigang, YANG Feng, et al. ANP power index evaluation method for operational capability of submarine equipment based on simulation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(4): 168–174. (in Chinese)
- [12] Tzeng G H, Chen W H, Yu R C, et al. Fuzzy decision maps: a generalization of the DEMATEL methods [J]. *Soft Computing*, 2010, 14(11): 1141–1150.
- [13] Saaty T L, Vargas L G. Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process [J]. *European Journal of Operational Research*, 1987, 32(1): 107–117.
- [14] Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgments [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 134(3): 365–385.
- [15] Vahdani B, Mousavi S, Tavakkoli-Moghaddam R. Group decision making based on novel fuzzy modified TOPSIS method [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(9): 4257–4269.
- 
- (上接第 78 页)
- [10] Avalos G O G, Wanderley J B V, Fernandes A C, et al. Roll damping decay of a FPSO with bilge keel [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 87: 111–120.
- [11] Irvine M, Longo J, Stern F. Forward speed calm water roll decay for surface combatant 5415: global and local flow measurements[J]. *Journal of Ship Research*, 2013, 57(4): 202–219.
- [12] Zhou Y H, Ma N, Shi X, et al. Direct calculation method of roll damping based on three-dimensional CFD approach[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2015, 27(2): 176–186.
- [13] Lugni C, Greco M, Faltinsen O M. Influence of yaw-roll coupling on the behavior of a FPSO: an experimental and numerical investigation[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 51: 25–37.
- [14] Brizzolara S, Vernengo G. Automatic optimization computational method for unconventional SWATH ships resistance[J]. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2011, 5(5): 882–889.
- [15] Qian P, Yi H, Li Y. Numerical and experimental studies on hydrodynamic performance of a small-waterplane-area-twin-hull (SWATH) vehicle with inclined struts [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 96: 181–191.
- [16] Wassermann S, Feder D F, Abdel-Maksoud M. Estimation of ship roll damping—a comparison of the decay and the harmonic excited roll motion technique for a post panamax container ship[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 120: 371–382.
- [17] Kim Y, Park M J. Identification of the nonlinear roll damping and restoring moment of a FPSO using Hilbert transform[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 381–388.
- [18] Avalos G O G, Wanderley J B V, Fernandes A C, et al. Roll damping decay of a FPSO with bilge keel [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 87: 111–120.
- [19] Faltinsen O. Sea loads on ships and offshore structures[M]. USA: Cambridge University Press, 1993.
- [20] Chakrabarti S K. Offshore structure modeling [M]. USA: World Scientific, 1994.
- [21] Stern F, Wilson R, Shao J. Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2006, 50(11): 1335–1355.
- [22] Tezdogan T, Demirel Y K, Kellett P, et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behavior and performance in head seas due to slow steaming[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 97: 186–206.
- [23] Castiglione T, Stern F, Bova S, et al. Numerical investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(16): 1806–1822.