

基于 CFD 的水下实验平台升沉阻力研究

李 源, 王 盟, 刘金勇, 江兴隆

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘 要 为了选择出合适的水下实验平台的无动力下潜方向和预计出下潜时间, 用 CFD 方法对水下实验平台的无动力下潜工况进行了数值模拟。通过与常用的摩擦阻力系数公式计算结果对比, 选用了一组较为合适的网格进行 CFD 分析, 通过 FLUENT 计算结果拟合出阻力系数与速度的函数, 使用 Simulink 对水下实验平台无动力下潜的过程进行了仿真。最终选出以正向下潜为海试时的下潜方向, 并得到了下潜过程的时间, 通过与海试结果对比, 验证了 CFD 计算结果的准确性。

关键词 水下实验平台; CFD; 阻力系数; 无动力下潜

中图分类号 U661.1 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)02-0166-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.013

Research on Heave Resistance of Underwater Experimental Platform Based on CFD

LI Yuan, WANG Meng, LIU Jinyong, JIANG Xinglong

(NO.710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract In order to select the appropriate unpowered diving direction and estimated diving time of the underwater experimental platform, CFD method is used to simulate the underwater experimental platform under the working condition of no power submergence. Comparing to the calculation results of common friction resistance coefficient formula, a group of more appropriate grids are selected for CFD analysis, the function of resistance coefficient and velocity are fitted through the FLUENT calculation results, and the process of unpowered submergence of an underwater experimental platform is simulated by Simulink. Finally, the forward diving is selected as the diving direction during the sea trial, and the time of the diving process is obtained. Comparing to the sea trial results, the accuracy of the CFD calculation results is verified.

Key words underwater experimental platform; CFD; resistance coefficient; unpowered dive

0 引言

建设海洋强国离不开海洋信息的获取, 海洋信息的获取与传输离不开水下无线通信。为了完成某水下电磁波通信实验, 采用水下实验平台搭载磁性天线作为接收天线完成通讯。该水下实验平台利用气囊式浮力调节系统达到升沉运动的目的, 其升沉方向流体阻力影响着其无动力下潜与上升的运动过程, 因此对水下实验平台升沉方向流体阻力分析

有着重要的意义。

当前, 国内外使用 CFD 方法进行水动力性能研究的案例非常多。张洪彬等^[1]利用 AUV 模型, 使用 ANSYS CFX 软件在不同攻角下计算阻力系数, 证明了计算结果的可靠性和 CFD 方法的有效性。孙鹏飞^[2]以某全海深载人潜水器为研究对象, 进行直航工况下的数值模拟, 发现研究潜器前进方向进行数值模拟使用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型更加

合适, 后退方向使用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型。刘峰等^[3]针对椭球体进行数值模拟, 求解相关的水动力系数, 发现 CFD 方法可以用于水动力性能研究。张赫^[4]针对某长航程潜水器, 先后采用势流方法、数值模拟和模型实验计算水动力系数, 并进行了深入的分析和比较。孙丽^[5]采用不同的网格模型对 AUV 进行三维水动力仿真, 得出最佳网格模型与最佳湍流计算模型。Amiri 等^[6]则利用 STAR-CCM+ 对 SUBOFF 潜艇在不同水深、不同航速下直航运动时自由面对潜艇阻力、升力及力矩的影响进行了分析。Toxopeus^[7]从网格划分、不确定度分析、敏感度分析等方面对 Suboff 潜艇模型直航及偏航时的流场计算进行了详细讨论。

本文通过 CFD 与经验公式的计算结果对比, 对不同尺寸的网格进行计算分析, 选出一组与经验公式计算结果吻合度较高的网格作为后续分析的基础, 最终拟合出阻力系数与速度的函数, 从而对实验平台无动力下潜进行仿真, 通过与海试数据对比, 证明了 CFD 计算结果较为可靠。

1 实验平台建模及网格划分

1.1 求解原理

CFD 数值模拟的核心思想为原来在时间域、空间域连续场(如压力场、速度场、密度场等)离散化, 通过一定的数学方法建立关于这些离散点场变量关系的方程组, 求解并获得场变量的近似值^[8]。一切流动传热问题都必须遵从物理守恒定律, 即三大守恒方程(质量守恒、动量守恒、能量守恒), 其中质量守恒方程又称连续性方程, 动量守恒方程又称 $N-S$ 方程。FLUENT 所求解的便有这三大方程, 利用计算机强大的计算能力揭示了流体的运动特性^[9]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 是密度; t 是时间; u 、 v 、 w 是速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 三方向上的分量。

$N-S$ 方程: 在 x 、 y 、 z 三方向的方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中: p 是作用在微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 是分子粘性应力的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 是作用在微元体上的体力。

对于不可压缩流, 如果热交换很小可忽略时, 可不考虑能量方程, 故在本文中, 可不考虑能量方程的影响。本文选用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10-11]进行分析。

1.2 实验平台几何建模

为提高网格划分质量与计算收敛, 本文对水下实验平台进行适当简化, 如图 1, 主要参数如表 1 所示。图 1 中第 3 部分为圆柱形的气囊保护罩, 平行于气囊保护罩母线方向为实验平台的升沉方向。后文中所研究阻力方向均为实验平台的升沉方向。

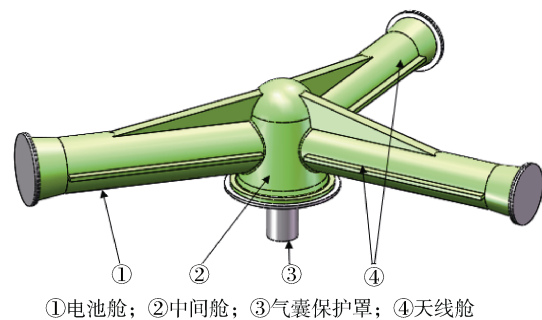


图 1 水下实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater experimental platform

表 1 水下实验平台主要参数

Table 1 Main parameters of underwater experimental platform

参数	数值/mm
中间舱高	559
中间舱盖直径	550
电池舱翼板间距	346
电池舱长	1 064
天线舱翼板间距	296
天线舱长	1 118
气囊保护罩长	258

1.3 网格尺寸对升沉阻力的分析

本文使用的前处理软件是 ICFM CFD。网格划分是影响水下实验平台模拟精度和计算效率的因素之一。在实际计算中,需要对网格进行加密以提高精度,在对水下设备进行 CFD 分析时,网格适当程度的加密会提高计算精度,但网格并不是越细越好,由于 CFD 软件分析时存在截断误差,任何一种网格划分,过粗或过细都会容易导致计算偏差甚至失败,所以对网格情况的研究是很有意义的,因此选取合适的网格是重要的环节。

考虑到本文中的水下实验平台形状不规则,本文对于外流场的划分采用非结构化四面体网格,四面体网格对于复杂不规则的物体有较好的适应性,网格划分如图 2 所示,计算域为 9.6 m*9.6 m*13.9 m 的矩形体。为了比较网格尺寸对计算结果的影响,现采用 5 种不同的网格尺寸进行计算,壁面网格尺寸与实验平台的表面网格尺寸如表 2 所示。

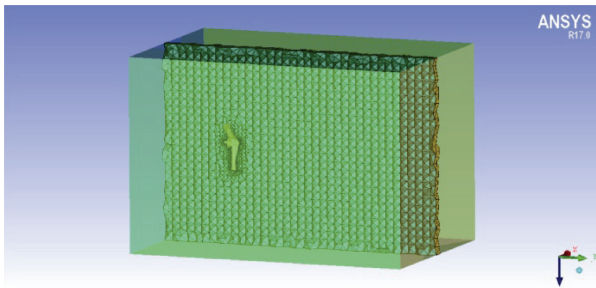


图 2 计算域网格划分
Fig. 2 Grid generation of computing domain

表 2 网格尺寸
Table 2 Grid size

网格类型	计算域整体网格尺寸	实验平台表面网格尺寸
	/mm	/mm
网格 1	300	60
网格 2	300	50
网格 3	200	50
网格 4	200	40
网格 5	150	40

以下潜工况为例,采用 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型,来流速度 v 取为 0.1 m/s,用以上 5 种不同的网格尺寸通过 FLUENT 仿真软件对阻力性能进行分析,并用造船界常用的摩擦阻力公式桑海公式和普朗特-许立汀公式对摩擦阻力系数进行计算,将结果

进行对比,如表 3 所示。其中:

桑海公式为

$$C_{f1} = \frac{0.4631}{(\lg Re)^{2.6}} \quad (5)$$

普朗特-许立汀为

$$C_{f2} = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}} \quad (6)$$

表 3 Standard $k-\epsilon$ 模型下水下实验平台阻力计算表
Table 3 Resistance calculation table of underwater experimental platform based on standard $k-\epsilon$ model

网格	$C_p \times 10^3$	$C_f \times 10^3$	R_t/N	$C_{D1} \times 10^3$	$C_{D2} \times 10^3$
1	2 199.22	9.21	7.15		
2	2 169.68	9.26	7.18		
3	2 199.92	9.43	7.16	9.25	9.36
4	2 225.54	8.17	7.24		
5	2 291.88	7.01	7.45		

从表 3 中可以看出,在 Standard $k-\epsilon$ 模型下,采用网格 1 的划分方式计算出的摩擦阻力系数与经验公式的计算值相比偏小,网格 2 计算出的水下实验平台摩擦阻力系数在经验公式计算范围之内,而网格 3 计算出的水下实验平台摩擦阻力系数略大于经验公式计算值,网格 4、5 的划分方式计算出的摩擦阻力系数与经验公式的计算值相比偏小。可见不同的网格划分情况对实验平台阻力的计算是有影响的,任何一种网格划分,过粗或过细都会容易导致计算偏差甚至失败,所以对网格情况的研究是很有意义的。Standard $k-\epsilon$ 模型的计算中,通过比较可以得出,网格 2 是比较合适的网格类型,所以在本文的后续仿真中采用网格 2 进行分析。

2 计算结果与分析

雷诺数的物理意义为流体惯性力与粘性力的无因次比,其定义为 $Re = \rho V L / \mu$,其中 ρ 为流体密度, μ 为动力粘性系数,仿真中取 20℃海水的物理性质, ρ 为 1 024.7 kg/m³, μ 为 1.08×10⁻³ Pa·s, V 为流体运动速度, L 为特征长度,取电池舱与天线舱两翼板距离的平均值为 0.34 m。

对来流速度 0.01~0.19 m/s 的情况利用 FLUENT 进行了大量的计算,边界条件设置如下。

流体: 根据实验平台的工作环境, 设置流体材料的物理属性为 20℃海水的物理性质;

入口: 采用速度入口边界条件, 给定速度 $u=V$, 对于入口条件湍流定义方法的设置, 选取湍流强度 $I(I=0.16Re^{-0.125})$ 和湍流粘性比率 (取默认值 10);

出口: 采用 outflow 自由出流边界条件;

壁面边界: 采用无滑移边界条件。

最终计算结果如表 4 所示。

表 4 不同速度下水下实验平台的阻力及阻力系数表
Table 4 Resistance and resistance coefficient table of underwater experimental platform at different speeds

$V/(m/s)$	$Re \times 10^{-3}$	$C_p \times 10^3$	$C_f \times 10^3$	R_t/N
0.01	3.2	2 203.06	28.62	0.072
0.03	9.7	2 182.14	14.82	0.64
0.05	16	2 177.74	12.17	1.73
0.07	23	2 172.96	10.64	3.47
0.09	29	2 171.18	9.65	5.72
0.10	32	2 169.68	9.26	7.06
0.11	36	2 168.90	8.92	8.54
0.13	42	2 167.47	8.36	11.91
0.15	48	2 166.51	7.89	15.85
0.17	55	2 165.78	7.52	20.35
0.19	61	2 165.18	7.22	25.41

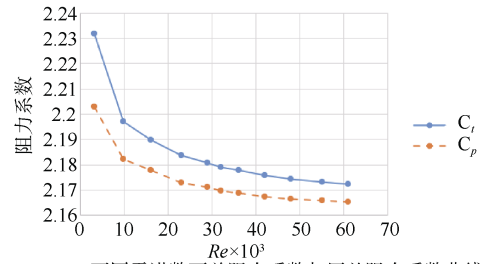
将表 4 中的数据整理分析, 得到压差阻力系数、摩擦阻力系数及总阻力系数随雷诺数变化的曲线图, 如图 3 所示。

图 3 分别给出了不同雷诺数下水下实验平台的总阻力系数、压差阻力系数和摩擦阻力系数的变化曲线图, 从图中可以看出阻力系数为压差阻力系数与摩擦阻力系数之和, 压差阻力系数项占总阻力系数的大部分, 摩擦阻力系数影响很小, 随着雷诺数的变大, 阻力系数都在变小, 变小的速度随雷诺数的增大而变慢, 阻力随雷诺数增大快速变大。

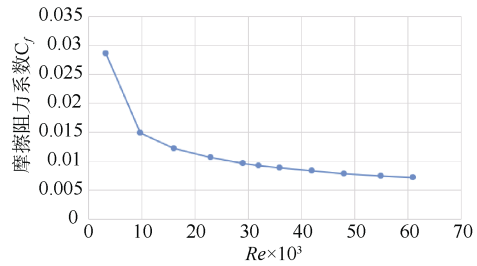
图 4 为不同速度下阻力系数变化图, 将已计算的点进行拟合, 拟合成的函数为

$$C_t = 412.73v^4 - 197.6v^3 + 33.886v^2 - 2.553v + 2.2525 \quad (7)$$

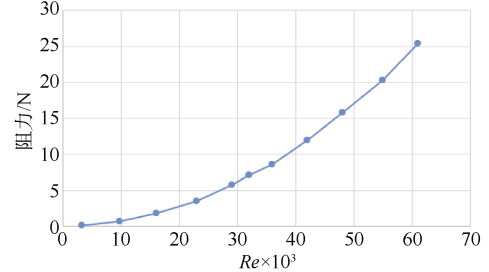
图 4 中, R^2 为 0.996, 拟合程度较好, 为后文仿真水下实验平台下潜时间做准备。



(a) 不同雷诺数下总阻力系数与压差阻力系数曲线



(b) 不同雷诺数下摩擦阻力系数曲线



(c) 不同雷诺数下阻力曲线

图 3 不同雷诺数阻力系数变化图

Fig. 3 Variation of drag coefficient at different Reynolds numbers

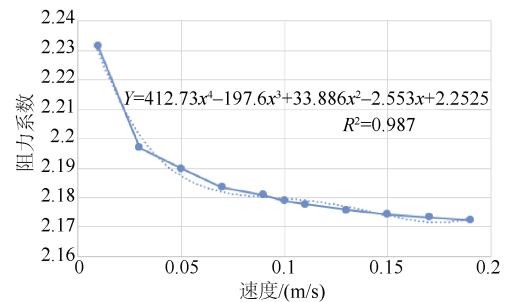


图 4 不同速度下阻力系数变化图

Fig. 4 Variation of resistance coefficient at different speeds

由于本文中水下实验平台只在升沉方向上运动, 对升沉方向上列微分方程有:

$$mg - f - R_t = m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (8)$$

$$R_t = \frac{1}{2} C_t \rho A \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \quad (9)$$

式中： f 为浮力，N； R_t 为实验平台下潜所受阻力，N； m 为总质量，kg； g 为重力加速度， m/s^2 ； y 为下潜深度，m； t 为时间，s； C_t 为阻力系数； A 为实验平台在垂直来流方向上投影面积， m^2 ； ρ 为海水的密度， kg/m^3 。

为了预测实验平台无动力下潜的时间，在 Simulink 中搭建出实验平台下潜时的模型，如图 5 所示。其中 MATLAB function 为上文拟合出的速度阻力系数的四次函数，将下潜的深度与速度用示波器输出。为方便表述，如图 1 所示气囊保护罩在舱体之下时沿纸面向下，为正向下潜，反之如图 8

所示，气囊保护罩在舱体之上沿纸面向下为反向下潜。同以上分析步骤，对反向下潜进行仿真，将速度时间图与正向下潜进行对比，如图 6 所示，正向下潜在 13 s 左右达到匀速状态，速度为 0.059 m/s，反向下潜在 15 s 左右达到匀速状态，速度为 0.063 m/s。由于本实验平台用于磁性天线通信实验，一方面为防止实验平台下潜速度过快对磁性天线通信实验有所影响。另一方面，由于配重块安装在气囊保护罩的底部，正向下潜有利于水下实验平台重心的降低，从而提高实验平台的稳性，所以在海试中选用正向下潜的方式。

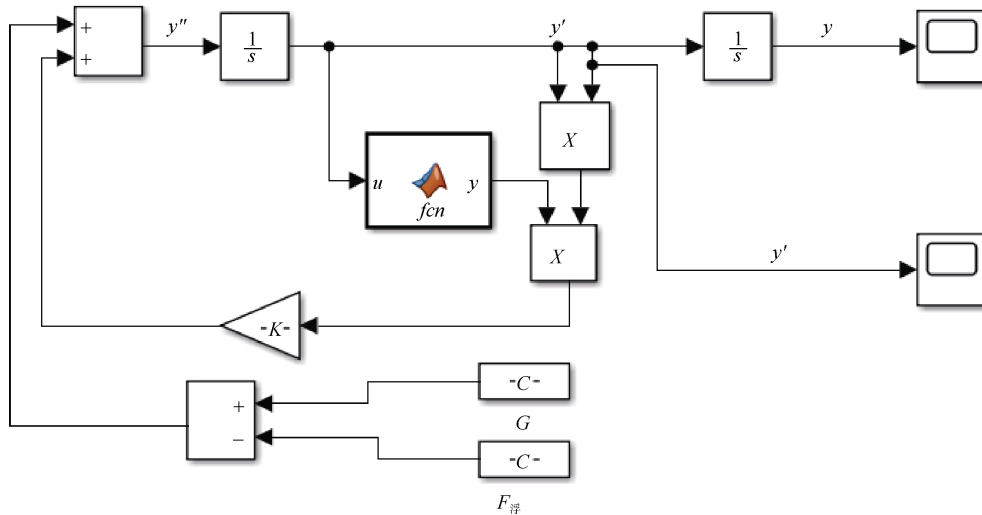


图 5 水下实验平台下潜 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of experimental platform during submergence

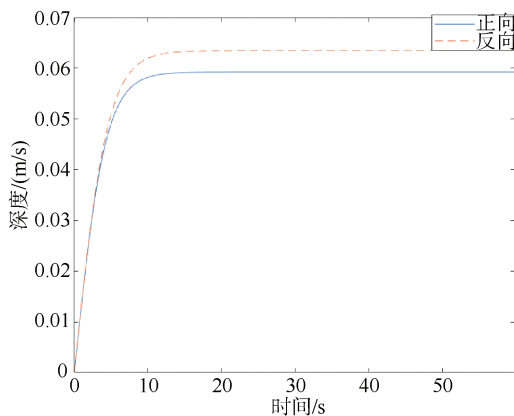


图 6 速度时间正反向下潜对比图

Fig. 6 Comparison chart of speed and time during forward and reverse diving

同拟合正向下潜阻力系数与速度的函数一样，

反向下潜的阻力系数与速度的拟合函数为

$$C_t = 201.23v^4 - 108.49v^3 + 22.147v^2 - 2.1401v + 2.1752 \quad (10)$$

与水下实验平台正向下潜 Simulink 搭建的模型类似，同样的可以对水下实验平台反向下潜进行仿真。

将水下实验平台正向下潜到 10 m 过程中的仿真与海试数据对比，如图 7 所示，Simulink 模型计算得出下潜到 10 m 水深需要 171 s，海试数据可以看出下潜到 10 m 水深为 173 s，仿真中达到匀速时为 0.059 m/s，海试中为 0.062 m/s，二者吻合度较高，从而也间接证明了不同速度下阻力系数计算的准确度较高。图 8 为实验平台的实物图，图 9 为实验平台的海试照片。

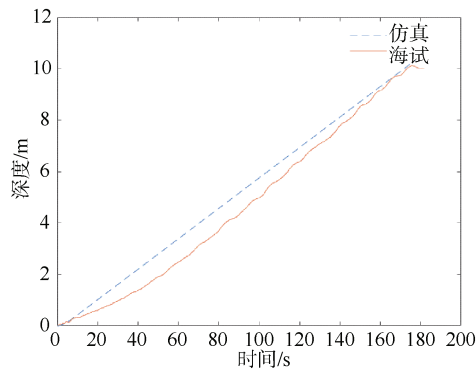


图 7 深度时间海试仿真对比图

Fig. 7 Comparison of depth and time in sea trial simulation



图 8 实验平台实物

Fig. 8 Physical object of experimental platform



图 9 实验平台海试照片

Fig. 9 Sea trial photo of experimental platform

3 结束语

本文以水下实验平台为研究对象, 通过 CFD 方法对实验平台下潜工况进行数值模拟, 得出主要结论如下。

1) 对本文中的水下实验平台进行五组网格的计算分析, 通过与经验公式计算的摩擦阻力系数对比, 选出第 2 种网格为较为合适的网格, 作为后续

分析的条件。

2) 通过 FLUENT 计算, 得到该水下实验平台速度从 0.01~0.19 m/s 的阻力与阻力系数, 绘制出阻力与阻力系数在对应雷诺数范围内的变化图。

3) 通过不同速度下阻力系数变化图拟合出阻力系数与速度的函数, 根据拟合出的函数与水下实验平台升沉方向的微分方程搭建出 Simulink 模型, 得到了正向下潜与反向下潜的速度时间图, 为水下实验平台海试的下潜方式提供了依据。最终将正向下潜的深度时间图与海试结果进行了对比, 水下实验平台无动力下潜到 10 m 的仿真与海试结果的水深分别为 171 s 和 173 s, 仿真与实验结果吻合度较高, 从而也证明了 CFD 计算结果与拟合出的速度阻力系数函数较为可靠。

参考文献

- [1] 张洪彬, 徐会希, 陈仲, 等. 6000 m 级探测型 AUV 优化设计与阻力分析[J]. 海洋技术学报, 2017, 36 (1): 47-51.
- [2] 孙鹏飞, 姜哲, 崔维成, 等. 基于 CFD 的全海深载人潜水器直航阻力性能研究[J]. 中国造船, 2019, 60 (2): 77-87.
- [3] 刘峰, 韩端锋, 王小波, 等. 载人潜水器水动力性能研究[J]. 科技导报, 2014, 32 (6): 29-33.
- [4] 张赫. 长航程潜水器操纵性能与运动仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [5] 孙丽. 自治水下机器人 (AUV) 三维结构设计及仿真分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [6] AMIRI M, ESPERANÇA P, VITOLA M, et al. How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine?[J]. Applied Ocean Research, 2018, 76: 34-50.
- [7] TOXOPEUS S. Viscous-flow calculations for bare hull DARPA SUBOFF submarine at incidence[J]. International Shipbuilding Progress, 2008, 55 (3): 227-251.
- [8] 周俊杰, 徐国权, 张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] 闫岱峻. 微小型水下航行器在非均匀流场中的运动性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [10] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [11] Fluent A. FLUENT user's guide[M]. US: Fluent Inc., 2003.

(责任编辑: 肖楚楚)