

1-8-2019

Hydrodynamic Characteristics Study of Expendable Probe at Multi Cross Flow and Multi Attack Angle

Zhentaο Chen

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology., Nanjing 211101, China;

Liu Feng

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology., Nanjing 211101, China;

Xiaolei Wang

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology., Nanjing 211101, China;

Ye Song

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology., Nanjing 211101, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Hydrodynamic Characteristics Study of Expendable Probe at Multi Cross Flow and Multi Attack Angle

Abstract

Abstract: The cross flow and attack angle are the two main influencing factors in the process of expendable probe releasing and sinking. The numerical simulation model is developed based on the hybrid grid and $k-\epsilon$ turbulent model, and the hydrodynamic characteristics of five cross flows and five attack angles are analyzed. *The results show that the drag coefficient of the probe in the horizontal direction increases gradually, while the drag coefficient of the probe in the vertical direction increases slowly with the increase of the cross flow. The drag coefficient in the horizontal direction increases gradually with the increase of attack angle and turns to decrease nearby 45°, while the drag coefficient in the vertical direction increases continuously. The drag interpolation between probe head and tail is related with the larger attack angle, with 2m/s falling speed, which makes the attack angle change, and the probe sinking at a constant speed in a fixed attack angle ultimately.* The results can provide evidences to improve the depth measurement accuracy of probe.

Keywords

expendable probe, multi cross flow, multi attack angle, hydrodynamic characteristics

Recommended Citation

Chen Zhentao, Liu Feng, Wang Xiaolei, Ye Song. Hydrodynamic Characteristics Study of Expendable Probe at Multi Cross Flow and Multi Attack Angle[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3546-3551.

不同横流攻角时抛弃式探头水动力学特性研究

陈振涛, 刘凤, 王晓蕾, 叶松

(国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 抛弃式探头的下沉运动, 主要受横流和攻角影响。采用混合网格结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对下沉运动进行数值计算, 分析在 5 个不同攻角、5 个不同横流时的水动力学特性。结果表明: 探头在水平方向 C_d 随横流增大而显著增大, 垂直方向 C_d 增幅较小; 探头在水平方向 C_d 随攻角增大而逐渐增大, 45° 攻角附近后开始减小, 垂直方向 C_d 则持续增大; 设定 2 m/s 下落时, 探头头、尾部力矩不同, 使得探头姿态发生改变, 最终以一固定攻角匀速下落。可为进一步提高抛弃式探头的下沉数学模型的测深准确度提供依据。

关键词: 抛弃式探头; 不同横流; 不同攻角; 水动力学特性

中图分类号: P716.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3546-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809040

Hydrodynamic Characteristics Study of Expendable Probe at Multi Cross Flow and Multi Attack Angle

Chen Zhentao, Liu Feng, Wang Xiaolei, Ye Song

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology., Nanjing 211101, China)

Abstract: The cross flow and attack angle are the two main influencing factors in the process of expendable probe releasing and sinking. The numerical simulation model is developed based on the hybrid grid and $k-\varepsilon$ turbulent model, and the hydrodynamic characteristics of five cross flows and five attack angles are analyzed. *The results show that the drag coefficient of the probe in the horizontal direction increases gradually, while the drag coefficient of the probe in the vertical direction increases slowly with the increase of the cross flow. The drag coefficient in the horizontal direction increases gradually with the increase of attack angle and turns to decrease nearby 45° , while the drag coefficient in the vertical direction increases continuously. The drag interpolation between probe head and tail is related with the larger attack angle, with 2m/s falling speed, which makes the attack angle change, and the probe sinking at a constant speed in a fixed attack angle ultimately.* The results can provide evidences to improve the depth measurement accuracy of probe.

Keywords: expendable probe; multi cross flow; multi attack angle; hydrodynamic characteristics

引言

抛弃式探头(本文特指 NMOHEMS^[1]探头, 以



收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-05-05;

基金项目: 国家自然科学基金(41406107);

作者简介: 陈振涛(1983-), 男, 山东临朐, 博士, 讲师, 研究方向为海洋探测技术; 刘凤(1983-), 女, 重庆, 硕士, 讲师, 研究方向为海洋探测装备。

下同)装载在现场探测单元中, 由无人机运载至目标区域, 入水后漂浮于海面, 进入潜伏状态, 并通过流星余迹技术^[2]与流余主站保持联系; 收到探测指令后, 所有现场探测单元在规定时刻同时释放抛弃式探头; 探头自由下落过程中测量海水剖面温深等数据, 测量数据通过流星余迹技术传回流余主站, 能够实现多点和多区域海水剖面温度的同步探

<http://www.china-simulation.com>

• 3546 •

测。现场探测单元在海面漂浮过程中,在海面风浪作用下摆动,抛弃式探头释放时存在一定攻角,会导致测深结果存在误差。

抛弃式探头自由释放后,经历加速-匀速的下落过程,各类相似的抛弃式探头在低雷诺数运动时水动力学特性的数值计算方法,国内的相关研究已较为成熟。其中,肖鸿等^[3]采用时变雷诺方程结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型,模拟 AXBT 探头在下沉过程中的运动状态,确定出探头阻力系数与雷诺数的关系曲线。张瑞等^[4]对不同攻角下 XCP 探头的流体动力特性进行了数值计算,得到固定状态下探头周围的流场信息。陈振涛等^[5]采用混合网格技术结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立了 NMOHEMS 探头在雷诺数为 $10^4\sim 10^5$ 范围的数值计算方法,设计了水箱和水库实验进行验证,进而分析了导流腔、收缩段及尾翼对探头下沉运动的影响^[6]。

抛弃式探头在自由下沉过程中,不仅存在攻角问题,还存在横流的影响。本文利用 Fluent 软件,采用混合网格技术结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对抛弃式探头在不同横流、不同攻角条件下的水动力学特性进行研究,以分析探头攻角的影响程度,为提高抛弃式探头的测深准确度提供依据。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程

抛弃式探头工作环境为粘性、不可压缩非稳态流场,可以采用不可压缩流体的连续性方程及 Navier-Stokes 方程^[7]描述:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] - \rho g \quad (4)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 为流体的速度分量; ρ 为流体的密度; μ 为流体的粘性系数; P 为单位体积流体的压力; t 表示时间。

1.2 湍流模型

应用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行流场计算,其湍动能及其耗散率运输方程^[7]为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (6)$$

式中: $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$; $\eta = Sk / \varepsilon$; G_k 表示

由于平均速度梯度引起的湍动能; G_b 是由于浮力影响引起的湍动能; Y_M 是可压速湍流脉动膨胀对总耗散率; $C_{1\varepsilon}$ 和 C_2 是常数; $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.92$; σ_k , σ_ε 分别是湍动能及其耗散率的湍流普朗特数; $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.20$ 。

1.3 五个攻角探头模型及其计算域

实际应用时,探头在海面风浪作用下摆动,设定释放时的攻角变化范围为 $0\sim 60^\circ$,本文选取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 五种情况进行计算。此外,选取探头下落过程中的横流速度为 0m/s 、 0.05m/s 、 0.1m/s 、 0.15m/s 、 0.2m/s 五种情况,进行综合分析。

计算域的边界由进流边界、出流边界、壁面边界和控制域边界组成,以 30° 攻角为例,计算区域模型如图 1 所示。定义 L 为探头长度, R 为探头最大半径, x 为横流方向的反方向, y 为重力加速度的反方向,计算区域模型的边界设为开边界。

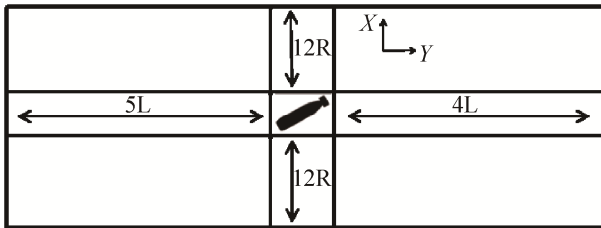


图1 探头模型计算域示意图

Fig. 1 Sketch map of the probe model domain

1.4 边界条件和网格划分方法

各边界条件如下：采用速度进口边界条件，入流断面为均匀来流；对于出流边界条件，认为湍流已经达到平衡，故采用压力出流边界条件，以加快收敛速度；模型表面和计算域外边界设为无滑移壁面；模型近壁采用标准壁面函数进行处理。

采用混合网格技术^[8-9]划分计算域，在探头表面划分边界层，边界层网格为三棱柱形的半结构网格；探头附近区域划分非结构网格；远离探头区域采用六面体形的结构网格。将导流腔和尾翼处网格加密，以30°攻角为例，其模型总网格数为172万，计算域的对称面网格分布如图2所示。

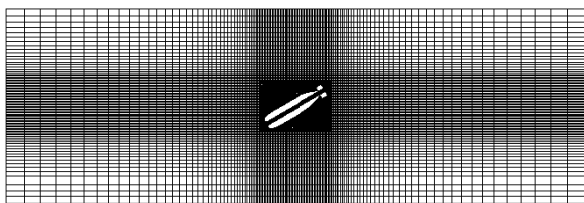


图2 计算域对称面网格分布图

Fig. 2 Histogram of symmetry mesh of computational domain

采用有限体积法离散控制方程和湍流模型，对于压力方程采用标准的离散格式进行离散，对于动量方程、湍流方程和雷诺应力方程均采用二阶迎风格式进行离散，压力和速度耦合迭代采用SIMPLEC算法。

1.5 阻力系数的数值计算

选取抛弃式探头的最大横截面直径 D_{max} 和均匀来流速度 v 作为特征长度和特征速度^[10]，则雷诺数表示为：

$$Re = \frac{v \cdot D_{max}}{\nu} \quad (7)$$

式中： ν 为运动学粘性系数。

阻力系数表示为：

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho \cdot S \cdot v^2} \quad (8)$$

式中： F_d 为探头受到的总阻力； ρ 为流体密度； S 为探头在来流方向的最大截面积。

对不同横流下，不同攻角探头周围的流场进行数值模拟，可以得到压力场和速度场的分布情况，然后利用计算结果积分，可以得出此时探头受到的阻力 F_d ，最后利用(8)式计算得到对应的阻力系数 C_d 。

2 多攻角水动力学特性分析

因为真实海洋环境中探头潜伏时随海浪漂浮，释放时的攻角主要受海水的横流影响，所以设定探头攻角与横流方向一致，且探头在 y 方向的极限运动速度为2 m/s，利用上述数值计算方法，分别对0 m/s、0.05 m/s、0.1 m/s、0.15 m/s、0.2 m/s五种横流条件下，0°、15°、30°、45°、60°五个攻角探头周围的流场进行了计算，得到 x 方向阻力系数与横流速度的变化关系，如图3所示。

y 方向阻力系数与横流速度的变化关系，如图4所示。

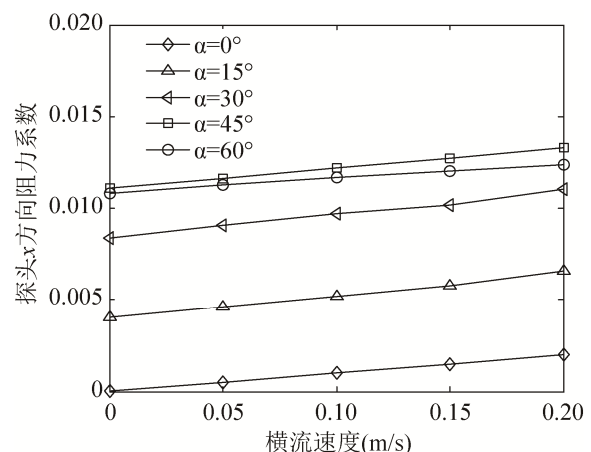


图3 多攻角探头x方向阻力系数与横流速度关系

Fig. 3 Relationship between x direction drag coefficient and cross velocity of multi attack angle probes

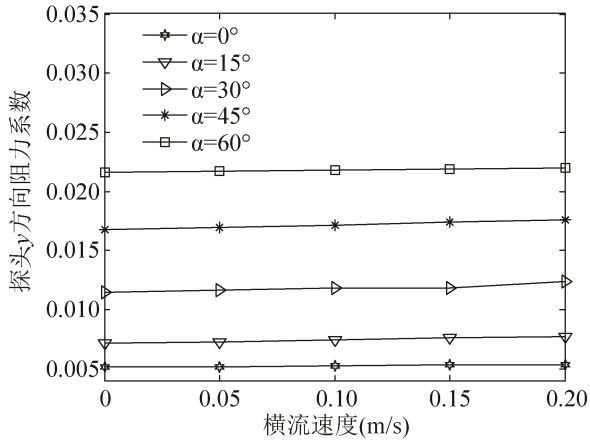


图 4 多攻角探头 y 方向阻力系数与横流速度关系
Fig. 4 Relationship between y direction drag coefficient and cross velocity of multi attack angle probes

从图 3 和图 4 中可以看出,不同横流速度和攻角时,由于 y 方向的流体运动速度远大于 x 方向流体运动速度,所以探头在 x 方向阻力系数均小于 y 方向阻力系数;当横流速度为 0m/s、攻角为 0°时,探头在 x 方向无运动,只在 y 方向运动,在 x 方向阻力系数约为 0,且在 y 方向阻力系数较小,但不为 0;随着横流速度的增大,探头 x 方向的阻力系数迅速增大,探头 y 方向的阻力系数也逐渐增大,但增幅明显小于 x 方向阻力系数。

攻角从 0°逐渐增大到 15°时,探头在 x 方向的运动阻力迅速增大,横截面积也稍有增加,x 方向阻力系数总体迅速增大;攻角从 15°增大到 30°探头在 x 方向的运动阻力继续增大,但横截面积稍有减小,x 方向阻力系数增大明显;攻角从 30°增大到 45°时,探头在 x 方向的运动阻力继续增大达到最大值,x 方向阻力系数继续增大,虽然横截面积继续减小,但 x 方向阻力系数的增大幅度总体有所变小;攻角从 45°增大到 60°时,探头在 x 方向的运动阻力开始减小,虽然横截面积达到最小值,但 x 方向阻力系数总体变小,并且横流速度越大,x 方向运动阻力减小越多,阻力系数减小的幅度也越大。

攻角从 0°增大到 15°时,探头在 y 方向的运动阻力增幅较小,同时横截面积迅速增大,阻力系数增大,但增幅稍小;攻角从 15°逐渐增大到 60°时,

探头在 y 方向的运动阻力增幅变大,横截面积继续增大,但增幅逐渐变小,所以阻力系数迅速增大,且增幅较明显。

横流速度为 0.1 m/s 时,不同攻角探头在 x 方向和 y 方向的运动阻力和横截面积,如表 1 所示,其中 f_x 为 x 方向运动阻力, f_y 为 y 方向运动阻力, S_x 为 x 方向横截面积, S_y 为 y 方向横截面积。

表 1 横流速度为 0.1 m/s 时不同攻角探头的运动阻力和横截面积

Tab. 1 Drag coefficient of multi attack angle probes while cross velocity is 0.1 m/s

探头攻角	$f_x(N)$	$S_x(cm^2)$	$f_y(N)$	$S_y(cm^2)$
0°	0.000 6	57.240 0	0.003 2	19.438 6
15°	0.003 2	60.318 8	0.004 6	33.589 5
30°	0.006 0	59.289 1	0.007 3	45.453 8
45°	0.007 5	54.219 4	0.010 5	54.219 4
60°	0.007 1	45.453 8	0.013 3	59.289 1

探头的流体动力学特性取决于其表面流体的压力场和速度场分布,不同攻角探头三维流场通过中心轴且平行于来流截面的压力和速度分布情况,分别如图 5 和图 6 所示,计算时设来流速度均为 2 m/s。

从图 5 和图 6 中可以看到,不同攻角时海水的流动都受到了探头的阻碍,在探头头部附近形成了一个局部静压高于来流静压的高压区,高压区内海水的压力和速度均迅速降低,海水沿探头逐渐出现流体分离现象,通过探头尾部后,又形成了一个低压区;随着探头攻角的增大,高压区和低压区的位置和形状也不同,高压区逐渐延伸到探头的头部和尾部边缘区域,低压区也从探头尾部逐渐扩展到探头头部的背风区域,探头的迎风面积的增大,导致运动阻力迅速增大,并且尾部的海水速度明显小于头部海水速度,说明尾部的阻力大于头部阻力,探头在头部和尾部会产生一个剪切力,使得探头攻角发生改变,最终在探头迎风面所受阻力一致时,以一个固定的攻角匀速下落,固定攻角与探头的极限下落速度和横流速度有关;此外,导流腔内海水压力由前至后迅速降低,说明导流腔内海水流动

顺畅。

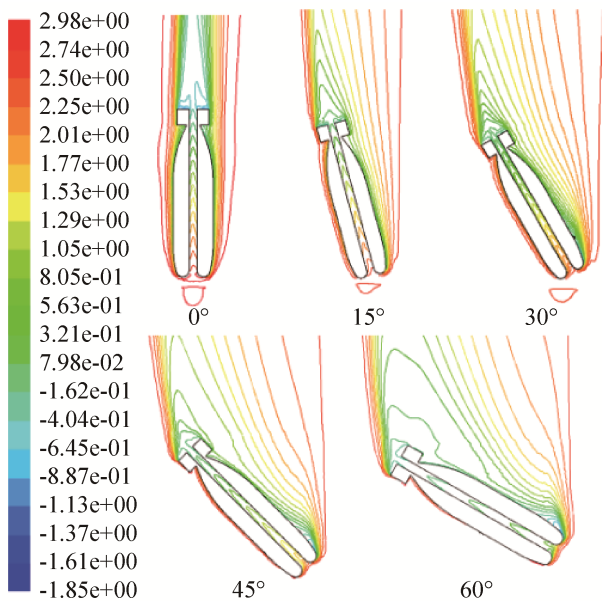


图5 横流为0.1m/s时不同攻角探头周围压力场分布图
Fig. 5 Distribution diagram of pressure field around multi attack angle probes while cross velocity is 0.1m/s

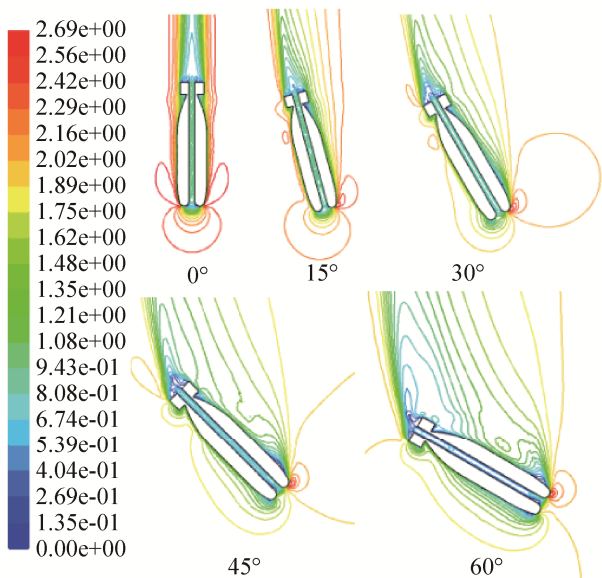


图6 横流为0.1 m/s时不同攻角探头周围速度场分布图
Fig.6 Distribution diagram of velocity field around multi attack angle probes while cross velocity is 0.1 m/s

3 结论

本文利用混合网格技术结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型，对抛弃式探头在不同横流、不同攻角且两者方向一致条件下的水动力学特性进行研究，得到主要结论

如下：

(1) 横流速度越大，探头在 x 方向的阻力系数越大；随着探头攻角的增大，运动阻力和截面积的变化不同，使得探头攻角从 0° 增加到 45° 范围， x 方向的阻力系数逐渐增大，从 45° 增加到 60° 时阻力系数反而减小；

(2) 横流速度越大，探头在 y 方向的阻力系数稍有增加；随着探头攻角的增加，运动阻力和截面积均逐渐增大，使得探头攻角从 0° 增加到 60° 范围， y 方向的阻力系数持续增大；

(3) 探头的攻角变化，会影响探头高头部压区和尾部低压区的位置和形状，相同下落速度时，攻角越大，探头的迎风面积越大，所受阻力也越大；头部和尾部阻力的不同，使得探头的攻角发生改变，最终以某一固定攻角匀速下落，固定攻角与探头的极限下落速度和横流速度有关。

此外，目前探头下沉运动的数值计算研究均是采用静态网格，基于准定常假设，且认为湍流已充分发展，实际探头下沉过程中，周围流场经历层流到湍流的发展过程，后续工作将利用三维动网格技术对其进行深入研究，并建立不同横流不同攻角下抛弃式探头下沉运动的三维仿真方法，对抛弃式探头的设计及获得理想的下沉特性均有重要意义。

参考文献：

- [1] 叶松, 王晓蕾, 焦冰, 等. NMOHEMS 的概念与设计[J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 28-31.
YE Song, WANG Xiaolei, JIAO Bing, et al. Concept and design of NMOHEMS[J]. Ocean technology, 2010, 29(1): 28-31.
- [2] 周延年, 叶松, 郑君杰, 等. 利用流星余迹通信系统传输海洋数据[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 486-489.
ZHOU Yannian, YE Song, ZHENG Junjie, et al. Discussion on Transmitting Oceanographic Data by Meteor Burst Communication System[J]. Chinese Journal of scientific instrument, 2008, 29(8): 486-489.
- [3] 肖鸿, 刘长根, 陶建华. 抛弃式温盐探头阻力系数的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 35-37.
XIAO Hong, LIU Changgen, TAO Jianhua. Numerical Simulation of Drag Coefficient for CTD Probes and its

- Experimental Verification[J]. *Ocean Technology*, 2006, 25(3): 35-37.
- [4] 刘宁, 张瑞, 陈文义, 等. XCP 抛弃式海洋探头阻力系数数值计算及试验研究[J]. *海洋技术*, 2010, 29(4): 12-14.
LIU Ning, ZHANG Rui, CHEN Wenyi, et al. A Numerical Study on Drag Coefficient of XCP Probe[J]. *Ocean Technology*, 2010, 29(4): 12-14.
- [5] 陈振涛, 叶松, 王晓蕾, 等. NMOHEMS 剖面探头阻力系数数值计算与实验研究[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 13(3): 219-225.
CHEN Zhentao, YE Song, WANG Xiaolei, et al. Numerical study on drag coefficient and experiment methods of NMOHEMS' profile probe[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 13(3): 219-225.
- [6] 陈振涛, 叶松, 王晓蕾, 等. NMOHEMS 探头外形对其下沉运动的影响分析[J]. *海洋通报*, 2012, 31(4): 449-453.
CHEN Zhentao, YE Song, WANG Xiaolei, et al. Influence analysis of shape to numerical simulation for NMOHEMS probe[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(4): 449-453.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. *Computational Fluid Dynamics Analysis-Principle and Application of CFD Software*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] ZHOU L J, WANG Z W. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG k-e model[J]. *Journal of Fluids Engineering* (S0098-2202), 2008, 130: 1-7.
- [9] 何晓聪, 曹红松, 赵捍东, 等. 弹箭外部绕流数值仿真中网格的选择[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(2): 191-194.
HE Xiaocong, CAO Hongsong, ZHAO Handong, et al. The Grid Choice of Exterior Circumferential Flow of Rocket /Projectile in Numerical Simulation[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 191-194.
- [10] 李云波. 船舶阻力[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
Li Yunbo. *Ship Resistance*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
- [10] 刘延华, 陈国龙, 吴瑞芬. 基于云模型和 AHP 的网络信息系统可生存性评估[J]. *通信学报*, 2014, 35(8): 108-115.
LIU Yanhua, CHEN Guolong, WU Ruifen. Survivability evaluation of network information system based on the cloud model and analytic hierarchy process[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(8): 108-115.
- [11] 戴朝华, 朱云芳, 陈维荣, 等. 云遗传算法及其应用[J]. *电子学报*, 2007, 35(7): 1419-1426.
DAI Chaohua, ZHU Yunfang, CHEN Weirong, et al. Cloud Model Based Genetic Algorithm and Its Applications[J]. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 2007, 35(7): 1419-1426.
- [12] 李庆, 董庆宽, 赵蕾. 云模型中正向云算法的修正[J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40(5): 169-174.
LI Qing, DONG Qingkuan, ZHAO Lei. Modified forward cloud generator in the cloud model[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(5): 169-174.
- [13] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in genetic algorithms[J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667.
- [14] 姜明佐. 基于云模型改进的遗传算法研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
JIANG Mingzuo. *Research on Improved Genetic Algorithm Based on Cloud Model*[D]. Dalian: Liaoning Normal University Press: Liaoning Normal University, 2013.
- [15] 付学文. 基于云模型的遗传算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
FU Xuewen. *Research on Genetic Algorithm Based on Cloud Model*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [16] 陶英歌, 郭乃林, 罗红英. 基于遗传算法的目标分配优化模型研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 31(7): 817-819.
TAO Yingge, GUO Nailin, Luo Hongying. Research on the optimization model of target assignment based on GA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 31(7): 817-819.

(上接第 3537 页)