

载人潜器水动力性能研究

刘峰, 韩端锋, 王小波, 马勇

哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001

摘要 水动力性能是载人潜器的关键技术指标, 特别是在总体设计阶段针对载人潜器进行水动力计算具有重要意义。研究了数值计算的方法, 选取长细比为6:1的椭球体为研究对象, 开展了网格划分方式的研究, 得出了计算结果, 并将计算结果与实验值进行了对比。对比结果表明, 该方法具有一定的精度, 验证了数值计算方法的可行性。选取几个典型工况, 针对轻载作业型载人潜水器水动力进行数值预报, 得出了相关的水动力系数, 为该载人潜器的总体设计提供了理论依据。

关键词 载人潜器; 水动力性能; 数值计算; 水动力系数

中图分类号 U661.31

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.06.004

Hydrodynamic Performance of Human Occupied Vehicle

LIU Feng, HAN Duanfeng, WANG Xiaobo, MA Yong

College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract The hydrodynamic performance is one of the key technical indicator of human occupied vehicle (HOV), and hydrodynamic calculation is significant especially at the overall design stage. This paper studies the calculation method of the hydrodynamic performance of HOV. Ellipsoids with a slenderness ratio of 6:1 were selected as the study subject, and the way of meshing was studied. The calculation results were obtained and compared with the tested results, which showed that the method is fairly accurate, verifying the feasibility of the calculation method. Finally, several typical working conditions were selected to estimate the hydrodynamic performance of light load HOV. The related hydrodynamic coefficients were obtained, providing theoretical basis for the overall design of the HOV.

Keywords human occupied vehicle (HOV); hydrodynamic performance; numerical computation; hydrodynamic coefficients

水动力系数是研究潜水器性能的重要内容, 模型实验是确定潜水器水动力系数最直接最有效的方法, 但成本非常高。随着计算机水平的不断进步和计算流体力学的飞速发展, 数值模拟方法因为周期短、成本低而成为研究潜水器水动力性能的有效手段。胡志强等^[1]针对潜水器的黏性类水动力计算总结出一套数值方法, 分别采用 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 湍流模型计算水动力系数, 并将此方法应用于“CR-02”6000 m自治水下机器人, 所得到的计算结果精度很高^[1]; 周连第等^[2]利用Poisson方程耦合求解带附体潜艇的流场; 庞永杰等^[3]提出新的基于固体变形的多面体网格运动求解器; 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 and 比较; 赵金鑫^[5]对某型带吊舱潜器进行数值模拟, 并通过实验结果验证了计算方法的有效性。

本文针对数学船型椭球体数值模拟, 求解相关水动力系数, 并通过与理论值、实验值比较来检验计算精度, 验证计算方法的可靠性, 并以此为基础针对一型载人潜器的水动力进行数值模拟。

1 数值计算求解原理

利用RANS方法(雷诺时均化的 $N-S$ 方法)^[6]求解不可压缩流体, 这种方法是工程应用中使用最广泛的方法。RANS

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2014-01-07

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目(311034); 国家科技重大专项子课题(2011ZX05027-005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF130112); 国家自然科学基金项目(51309069)

作者简介: 刘峰, 讲师, 研究方向为载人潜器总体设计与性能, 电子邮箱: liufeng4338@163.com

引用格式: 刘峰, 韩端锋, 王小波, 等. 载人潜器水动力性能研究[J]. 科技导报, 2014, 32(6): 29-33.

方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, 3$

式中, t 为流场中计算时间, s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u_i 为 i 方向速度, m/s ; u_j 为 j 方向速度, m/s ; x_i 为 i 方向坐标, m ; x_j 为 j 方向坐标, m ; μ 为湍动黏度, m^2/s ; p 为压力, Pa ; u_i' 为 i 方向脉动速度, m/s ; u_j' 为 j 方向脉动速度, m/s ; S_i 为源项。其中出现了新的关于湍流脉动值的未知量: Reynolds 应力项 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$, 需对 Reynolds 应力作出某种假定。目前使用最广泛的湍流模型是标准 $k-\varepsilon$ 模型, 湍动能 k 和湍动耗散率 ε 分别定义为

$$k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_j'}{\partial x_k} \right)$$

式中, u_k 为 k 方向速度, m/s ; x_k 为 k 方向坐标, m 。

此时与之相对应的输运方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k & \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon & \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, G_k 、 G_b 为湍动能 k 的产生项, 分别由平均速度梯度和 G_b 浮力引起, Y_M 为代表可压湍流中脉动扩张的贡献, σ_k 、 σ_ε 为 Prandtl 数, 分别与湍动能 k 和耗散率 ε 对应, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项。其余常用的湍流模型还有 RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 双方程模型和 SST $k-\omega$ 模型以及 Reynolds 应力模型(RSM)等^[7]。本文利用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散化处理^[8], 采用半隐式的 SIMPLEC 算法求解 Navier-Stokes 动量方程^[9]。

2 椭球体水动力性能数值计算

2.1 直航阻力计算

建立长细比为 6:1 的椭球体模型, 取半长轴 $a=750 \text{ mm}$, 半短轴 $b=c=125 \text{ mm}$ 。模拟无界流场中椭球体三维绕流, 控制域为长方体, 取艇前 2 倍艇长, 艇后 5 倍艇长, 长方体宽度取 4 倍艇长。对流场控制域分别应用结构和非结构两种网格方式, 分别如图 1 和图 2 所示。经过计算对比发现, 结构网格模型的收敛速度明显好于非结构网格模型。但是在边界层相同的条件下两种方式最终收敛值十分接近, 图 3 给出一阶和二阶两种迎风离散格式对结果的影响, 从中可以看出, 改变方程的离散格式对结果的影响是显著的。而且有研究指出迎风格式在精度上要明显高于一阶^[10]。

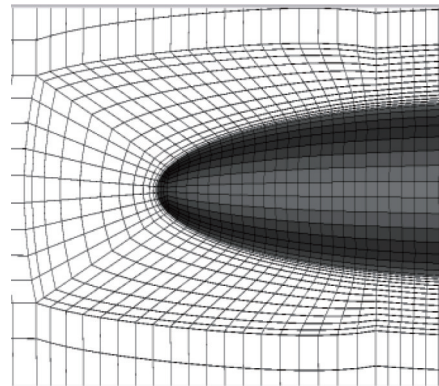


图1 结构化网格及边界层

Fig. 1 Structured mesh and boundary layer

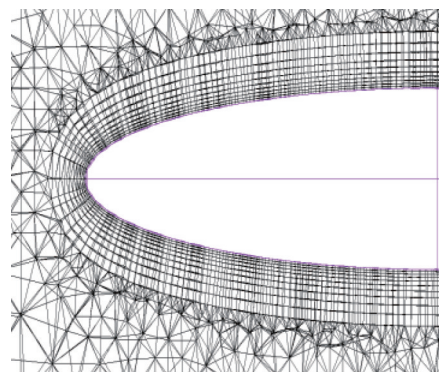


图2 非结构网格及边界层

Fig. 2 Unstructured mesh and boundary layer

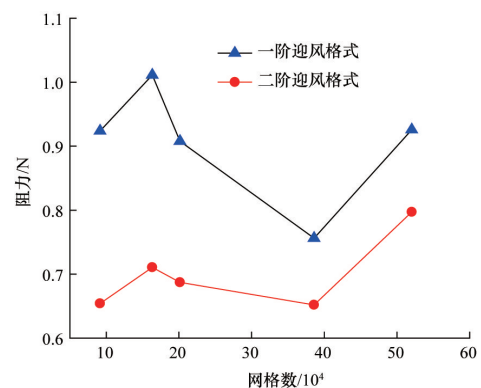


图3 离散格式对结果的影响

Fig. 3 Influence of discrete methods on calculation results

采用标准壁面函数处理潜器表面的流场, 这种方式要求无量纲参数 y^+ 应介于 30~500 之间^[11]。 y^+ 的表达式为

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

式中, Δy 为第一层网格高度, m ; u_τ 为壁面摩擦速度, m/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; τ_w 为壁面切应力, N ; ν 为黏性系数, m^2/s 。

为对计算方法进行验证, 选取雷诺数为 1.42×10^6 (速度为 1.0 m/s)、 2.13×10^6 (速度为 1.5 m/s) 分别进行计算, 计算结果与实验对比如图 4 所示。

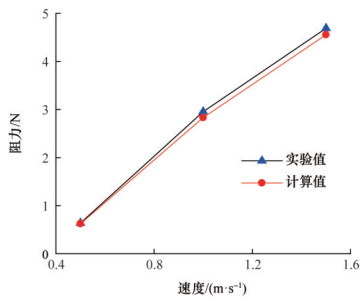


图4 计算值与实验值的比较

Fig. 4 Comparison between calculated and tested results

从图4可以看出,计算值与文献[12]的实验值吻合程度很高,误差也都很小,满足工程应用的要求,验证了方法的可行性。

2.2 升沉运动数值模拟

通过模拟升沉运动可以获得相应的水动力系数:加速度系数 Z_w' 和速度系数 Z_w'' ,如表1所示。

由表1结果比较可知,数值模拟的精度是有效可信的,数值方法可以为后续的研究提供依据。

表1 升沉运动实验值与计算值对比

Table 1 Comparison between tested and calculated results of the heaving motion

流速/(m·s ⁻¹)	Z_w'			Z_w''		
	实验值	计算值	误差/%	实验值	计算值	误差/%
0.8	-0.02965	-0.03102	4.62	-0.01164	-0.01201	3.18
1.1	-0.02588	-0.02701	4.37	-0.01088	-0.01124	3.31

3 深水轻载作业载人潜水器(HOV)水动力性能预报

在利用椭球体验证CFD计算水下航行器的可靠性基础上,对深水轻载作业型HOV的水动力性能进行预报。

3.1 HOV几何建模及控制域网格划分

深水轻载作业型HOV艇体长度为7 m,艇宽为2.7 m,艇高3.19 m,艇重14.4 t,最大作业深度为1500 m,其作业时巡航航速为1.2861 m/s,最大航速为1.954 m/s。建立HOV的数学模型时,主要建立主艇体、尾翼和推进器,略去了指挥台及机械手等尺度较小的附体,HOV表面网格见图5,HOV模型及控制域见图6。

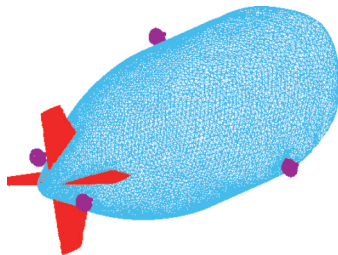


图5 HOV表面网格

Fig. 5 Surface mesh of HOV

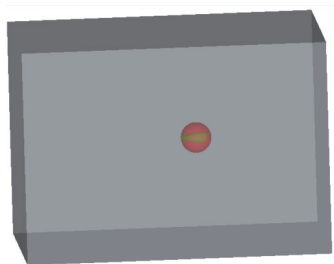


图6 HOV模型及控制域模型

Fig. 6 Model of HOV and the control domain

3.2 计算结果

给定来流速度 V 为 0.2572、0.5144、1.0289、1.2861、1.6462、1.9549 m/s,计算艇体受到的阻力,计算结果如图7所示。

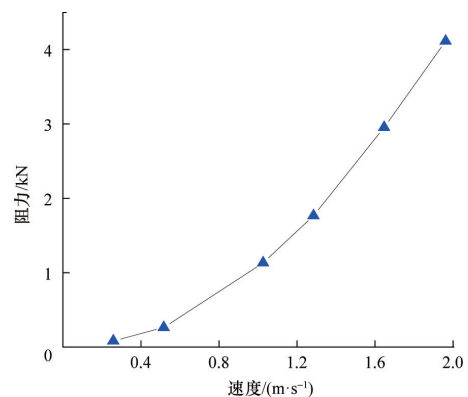


图7 HOV纵向阻力计算结果

Fig.7 Calculation results of HOV longitudinal resistance

通过最小二乘法拟合即得到无因次阻力系数。选择 V 为 0.5144、1.0289、1.2861、1.6462 m/s,每个速度对应漂角变化 β 为 -10° 、 -8° 、 -6° 、 -4° 、 -2° 、 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 。得到 Y' 随漂角 β 变化曲线,如图8所示。同样选择 V 为 0.5144、1.0289、1.2861、1.6462 m/s,每个速度对应攻角变化 α 为 -10° 、 -8° 、 -6° 、 -4° 、 -2° 、 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 工况。得到的垂向力系数随速度的变化曲线如图9所示。测速分别取 V 为 0.2572、0.5144、1.0289、1.2861、1.6462、1.9549 m/s,每个速度依次模拟了漂角 β 为 -90° 、 -60° 、 -30° 、 -10° 、 10° 、 30° 、 60° 、 90° 共8个大漂角工况。图10给出了不同漂角时横向力随速度变化的曲线。

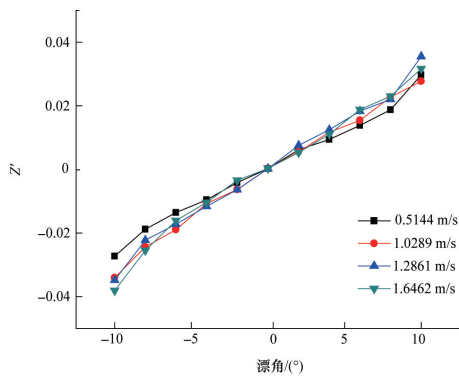


图8 横向力系数随漂角变化的曲线
Fig. 8 Curve of lateral force coefficient changing with the drift angle variation

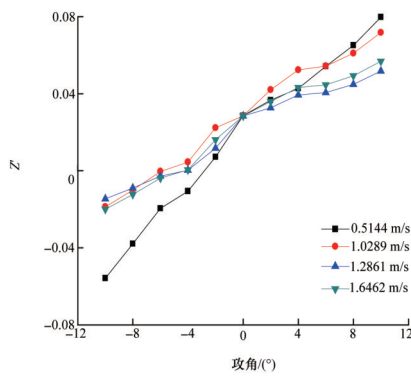


图9 垂向力系数随攻角变化的曲线
Fig. 9 Curve of vertical force coefficient changing with variation of angle of attack

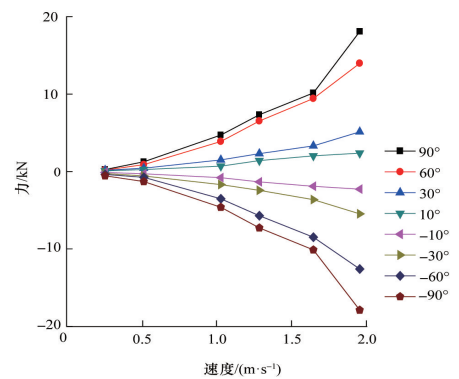
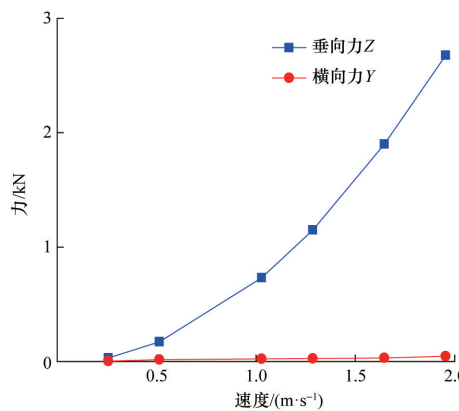


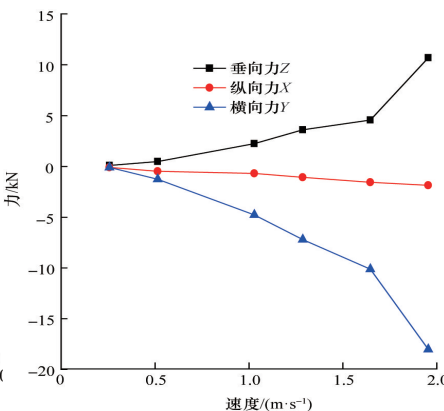
图10 不同漂角时的横向力
Fig. 10 Lateral force with different drift angles

根据HOV的外形特点,潜器基本呈左右对称,前后和上下均不对称,因此在纵向航行中,除了产生较为明显的纵向阻力外,垂向力也不可忽略,横向力则由于左右对称而较小。测速 V 为 0.2572、0.5144、1.0289、1.2861、1.6462、1.954 m/s,横向力 Y 和垂向力 Z 的计算结果见图 11(a)。潜器在作业时,不可避免地会出现横向移动情况,考虑到HOV的对称性,横向运动除引起横向力 Y 外,也会产生纵

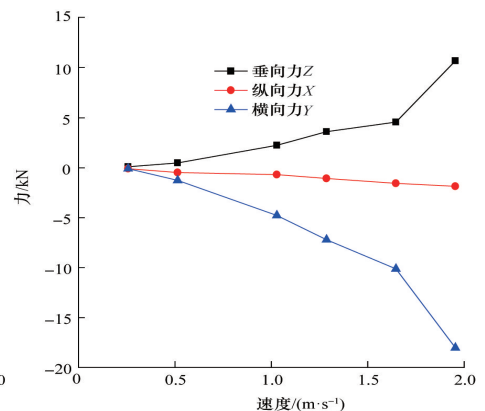
向力 X 以及垂向力 Z 。仍然考察测速 V 为 0.2572、0.5144、1.0289、1.2861、1.6462、1.954 m/s,计算得到的各向受力如图 11(b)所示。潜器的上浮下潜运动是较为常规的运动,也是垂向的主要运动,垂向运动时也会引起各向受力及力矩,模拟计算时仍然考察测速 V 为 0.2572、0.5144、1.0289、1.2861、1.6462、1.954 m/s,计算得到的上浮时各向受力如图 11(c)。



(a) 纵向速度引起的横向力与垂向力



(b) 横向拖曳时各向受力



(c) 垂向上浮时各向受力

图11 典型工况水动力数值计算

Fig. 11 Hydrodynamic numerical calculation under typical working conditions

4 结论

以载人潜水器为研究对象,利用数值计算等手段对潜水器的水动力性能展开研究,通过对主要约束船模物理实验的模拟,获得了相应的水动力系数并总结出适用的数值计算方法,并通过与实验值或理论值比较验证了计算值的精度,间接验证了计算方法的正确性。

1) 从直航阻力计算入手,总结出一套较为完整的计算方法用于水下航行器的水动力性能模拟与计算,得出相应的水

动力系数,取得了较为满意的计算结果。

2) 从常规的直航阻力计算入手,对轻载作业型HOV的漂角与横向力,攻角与垂向力的关系进行了研究,最后根据HOV实际作业要求,模拟了纵向、横向以及垂向的直航拖曳,获得了载人潜水器的水动力性能。

参考文献(References)

[1] 胡志强, 林杨, 谷海涛. 水下机器人黏性类水动力数值计算方法研究

- [J]. 机器人, 2007, 29(2): 145-150.
- Hu Zhiqiang, Lin Yang, Gu Haitao. On numerical computation of viscous hydrodynamics of unmanned underwater vehicle[J]. Robot, 2007, 29(2): 145-150.
- [2] 周连第, 赵峰, 唐登海. CSSRC 在船舶粘流场计算流体力学领域中的研究与进展[J]. 船舶力学, 1997, 1(2): 71-79.
- Zhou Liandi, Zhao Feng, Tang Denghai. Progress of ship CFD in CSSRC—a review[J]. Journal of Ship Mechanics, 1997, 1(2): 71-79.
- [3] 庞永杰, 杨路春, 李宏伟. 潜艇水动力导数的 CFD 计算方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(8): 1-6.
- Pang Yongjie, Yang Luchun, Li Hongwei. Approaches for predicting hydrodynamic characteristics of submarine objects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(8): 1-6.
- [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.
- Zhang He. Research on maneuverability and motion simulation of a long-endurance underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [5] 赵金鑫. 某潜器水动力性能计算及运动仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- Zhao Jinxin. The hydrodynamic performance calculation and motion simulation of an AUV with appendages[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [6] 齐川. 单体复合船型水动力数值计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- Qi Chuan. Hydrodynamic numerical computation of hybrid mono hull[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [7] 马峥, 黄少锋, 朱德祥. 湍流模型在船舶计算流体力学中的适用性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24 (2): 207-216.
- Ma Zheng, Huang Shaofeng, Zhu Dexiang. Study on applicability of turbulence model in ship computational fluid dynamics[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24 (2): 207-216.
- [8] 鲁嘉华. 计算流体力学与求解方法在叶轮机械中的应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2003, 17(1): 16-21.
- Lu Jiahua. Application of computational fluid dynamics and its solution in turbo machinery[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2003, 17(1): 16-21.
- [9] 王昆, 金生, 马志强, 等. 三棱柱形网格下自由表面流的三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 490-494.
- Wang Kun, Jin Sheng, Ma Zhiqiang, et al. 3D numerical simulation of free surface flow on tri-prism grids[J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (4): 490-494.
- [10] 胡洪, 黄虎, 宋倩倩. 不同对流项离散格式对流场计算的影响[J]. 数值计算与计算机应用, 2010, 31(2): 153-160.
- Hu Hong, Huang Hu, Song Qianqian. The influence of different discrete scheme of the convective term on fluid field calculation[J]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications, 2010, 31(2): 153-160.
- [11] 何漫丽. 水下自航器水动力学特性数值计算与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- He Manli. Study on hydrodynamic characteristic of AUV with numerical model and experiments[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [12] 哈尔滨工程大学水平循环水槽实验室. 椭球体水动力实验报告[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- Levels of Circulating Water Channel Laboratory of Harbin Engineering University. Experiment report of ellipsoid hydrodynamic[R]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003.

(编辑 季超)

· 学术动态 ·



第12届全国博士生学术年会征集论文

2014年5月,第12届全国博士生学术年会将在云南昆明举办,特向在读高年级博士生征集参会论文。

本届年会共设4个专题:

- 1) 物理学(由中国物理学会承办);
- 2) 化学与化工(由中国化学会承办);
- 3) 现代生物技术(由中国生物物理学会承办);
- 4) 计算机科学与技术(由中国计算机学会承办)。

拟参会的博士生请于2014年3月28日前,登陆全国博士生学术年会登记系统(<http://bssnh.cast.org.cn>),注册报名信息,提交第12届全国博士生学术年会报名表和论文全文。

中国科协常委会青年工作专门委员会自2002年起,面向在读高年级博士生,每年举办一次全国博士生学术年会。2005年,国务院学位委员会办公室参与主办。截至目前,全国博士生学术年会已成功举办11届,成为促进青年学生成长成才、创新创业的品牌活动。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/15403888.html>。