

翼身融合航行体操纵特性研究

吴小翠^①, 王一伟^{①*}, 黄晨光^①, 胡志强^②, 衣瑞文^②, 于嫻嫻^①, 杜特专^①

① 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院沈阳自动化研究所自主水下机器人技术研究室, 沈阳 110016

* E-mail: wangyw@imech.ac.cn

收稿日期: 2014-07-15; 接受日期: 2014-11-15

中国科学院科技创新重点部署项目(编号: KGFZD-125-014)和国家自然科学基金(批准号: 11202215, 11332011)资助项目

摘要 翼身融合航行体以其独特的外形特征和机动性能成为未来海洋发展的重要方向, 而人们对这一类型的航行体操纵特点并不了解. 本文采用基于半相对坐标系的数值模拟方法对新型航行体操纵特性进行研究, 并且通过量纲分析对主要影响参数进行分析. 发现水平面回转时给定航速条件下, 航行体尾部漩涡会随着旋转半径的变化出现偏转现象, 进一步的数值模拟结果表明: 旋转半径越小, 左右漩涡的不对称性会越明显. 当旋转半径给定时, 不同航速条件下, 航行体尾涡的左右分离位置基本一致. 对比发现该类航行体的垂直面回转操纵性要优于水平面回转操纵性, 即这类航行体在改变航行深度机动方面具有更大优势.

关键词

操纵性
数值模拟
翼身融合航行体
量纲分析

1 引言

操纵性是航行体综合性能的重要组成部分, 是航行体安全航行和充分发挥其战技水平的重要保证, 因而也是其总体性能设计的重点之一. 传统操纵性预测主要依靠工程估算和母型修正方法, 其适用性和预报精度有限. 计算流体力学的发展及其在航行体操纵性水动力预报方面的应用为解决以上困难开辟了新途径.

潘子英等人^[1]探讨 CFD 在潜艇操纵性水动力预报方面的应用能力和预报精度, 通过数值模型试验和回归分析提出了潜艇主体操纵性水动力的估算公式. 孙铭泽等人^[2]通过求解瞬态雷诺时均方程和网格变形方程实现了全俯仰潜艇平面运动机构试验 PMM 的虚拟仿真. 王化明^[3]采用开源软件 OPENFOAM 完

成 SUBOFF 裸艇体的 PMM 试验, 但得到的水动力导数与试验值仍存在一定差距. 杨路春等人^[4]应用大规模并行计算机的庞大资源采用重叠网格技术成功求解了潜艇的所有水动力导数. Racine 和 Paterson^[5]利用非结构网格并通过添加动量源项的方法完成了水下自治机器人/SMAL010 的旋臂试验数值模拟. Hu 和 Li^[6]以结构化网格为计算背景, 采用添加动量源项的方法对旋转导数进行预报, 将潜艇旋臂试验的数值模拟转化为定常问题进行求解. 刘帅^[7]采用 FLUENT 软件对 SUBOFF 潜艇操纵运动进行数值方法研究, 比较了旋转坐标系方法和添加动量源项法在旋臂水池数值计算中的精度.

网格划分和湍流模式的选取对潜艇操纵性水动力数值计算精度有着重要影响. 曾广会和伍治海^[8]以 SUBOFF 潜艇模型为对象, 对不同网格分辨率的模

引用格式: 吴小翠, 王一伟, 黄晨光, 等. 翼身融合航行体操纵特性研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 415-422
Wu X C, Wang Y W, Huang C G, et al. Study on maneuvering characteristics of blended wing body vehicle (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 415-422, doi: 10.1360/N092014-00152

型进行了水动力计算, 对网格的收敛性进行了研究. 柏铁朝等人^[9]采用6种湍流模式计算了SUBOFF主艇体及主艇体加指挥室围壳两种模型在一定漂角范围内的潜艇操纵性水动力. 任晋宇^[10]对SUBOFF潜艇尾翼升力粘性流动进行了数值模拟, 并据此分析了尾翼流场特征和升力特性. 孙铭泽等人^[11]采用虚流体粘度和基于网格变形的动网格技术方法计算了不同量级雷诺数下潜艇的水动力系数, 分析了潜艇操纵性水动力计算中雷诺数的影响.

仿生设计也是航行体外形设计的一个重要手段, 在以往的工作中人们对一些代表性生物的功能特性已有一定的研究^[12-14]. 同样的翼身融合体在飞行器设计方面引起各国的广泛关注, 在结构重量、气动特性、安全性方面具有明显优势^[15-20]. 因此翼身融合体以其独特的外形特征和机动性能也已成为未来海洋发展的重要方向, 而人们对这一类型的航行体操纵特点并不了解. 综上所述, CFD已成为操纵性计算的重要方法, 特别对于新概念航行体更具优势. 本文采用基于半相对坐标系的数值模拟方法对新型航行体操纵特性进行研究, 并且通过量纲分析获得主要参数的影响规律, 可为同类型的航行体计算提供一定的参考.

2 操纵性计算方法介绍及验证

旋臂水池实验是获取航行体旋转操纵性系数的主要方式, 目前最常用的旋臂水池数值计算方法是构建一圆环形状的旋臂水池计算域, 采用绝对坐标系或者相对坐标系法来实现操纵性计算. 绝对坐标系中航行体相对于地面静止, 采用MRF方法给流体赋予旋转角速度. 相对坐标系方法是在一非惯性系下求解, 流体相对航行体静止, 通过增加源项将来流设置为旋转形式. 绝对坐标系方法计算精度差, 相对坐标系方法精度较高, 但是计算网格随着旋臂水池半径、航行体状态改变而变化, 工作量较大. 本文在分析了两种计算方法机理基础上, 采用了基于相对坐标系的计算方法, 具体计算方法详见文献^[21].

为了验证本文中相对坐标系计算方法的可靠性, 特选取了具有完整实验数据的SUBOFF标模^[22]对其操纵性进行了计算, 结果见表1所示. 其中, Y'_r 为偏航力旋转导数, N'_r 为偏航力矩旋转导数. 采用基于相对坐标系的计算方法得到的结果与实验结果偏差

表1 SUBOFF标模操纵性计算结果比较

旋转导数	计算结果	实验结果 ^[22]	相对误差(%)
Y'_r	0.00604	0.006324	-4.49
N'_r	-0.00319	-0.003064	4.11

均在5%之内, 能够满足工程计算的要求.

3 边界条件设置

本文将计算区域的边界条件分为进口边界条件、出口边界条件、壁面边界条件; 流体区域分为内部流体区域和外部流体区域两部分, 如图1所示. 进口边界条件为速度进口, 速度大小为航行体线速度. 出口边界条件为压力出口, 表压为0. 壁面采用无滑移边界条件. 内部流体区域采用MRF方法, 旋转中心为航行体重心, 此外需要增加因为由于相对运动而产生的附加源项, $M_s = \rho\omega^2 R$, ρ 为流体密度, ω 为航行体转动角速度, $\omega = V/R$, R 为旋臂水池半径, 外部流体区域采用stationary方法.

考虑到航行体复杂的外形特点, 采用非结构化网格对计算区域进行划分, 总网格数量为550万. 在航行体表面和近壁面区域进行网格加密和划分边界层处理, 保证 y^+ 在1范围内. 湍流模型采用了SST $k-\omega$ 模型. 用有限体积法对控制方程进行离散. 压力-速度耦合迭代求解采用SIMPLE算法求解, 压力项采用标准离散格式, 动量、湍流动能和湍流耗散率采

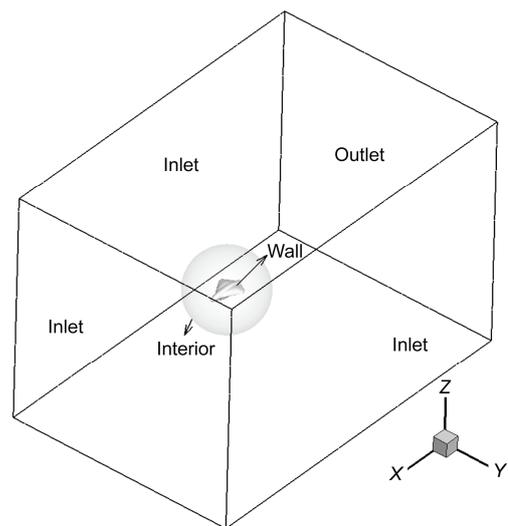


图1 计算域与边界条件设置

用二阶迎风格式, 亚松弛因子均采用默认值. 近壁处域采用增强型壁面函数法, 计算介质为温度18℃的海水. 分别计算在4和20 Kn 航速条件下航行体水平面回转与垂直面回转的水动力特性.

4 计算结果及比较

4.1 水平面回转操纵性计算结果

图2为4 kn 航速条件下航行体水平面回转对应的偏航力系数和偏航力矩系数随角速度的变化. 图3为20 kn 航速条件下航行体水平面回转对应的偏航力系数和偏航力矩系数随角速度的变化. 图中, $Y' = Y/0.5\rho VL^3$, $N' = N/0.5\rho VL^4$, 操纵性系数的具体求解方法详见 CB-Z 268-2002 标准, 式中, Y 为偏航力, N 为偏航力矩, ρ 为流体密度, V 为航行体线速度, L 为航行体特征长度, ω 为航行体转动

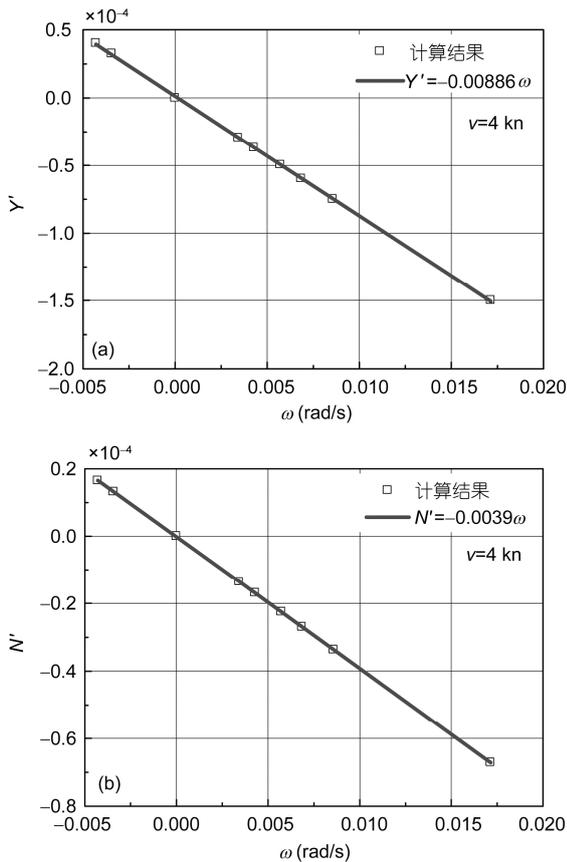


图2 航行体4 kn 航速下水平面回转偏航力(a)和力矩(b)旋转导数

角速度. 从图中可以看出, Y' 和 N' 与 ω 均成线性关系. 对图2和3中数据进行一次多项式拟合求出斜率即可得到相应的旋转导数 $Y'_r = (Y'/\omega) / 0.5\rho VL^3$ 和 $N'_r = (N'/\omega) / 0.5\rho VL^4$, 具体数值见表2所示.

从表2的计算结果可以看出, 4和20 kn 航速条件下, 航行体的旋转导数具有较好的一致性. 偏航力矩旋转导数与 SUBOFF 的实验结果相当, 可见该翼身融合航行体在水平面回转时操纵特性与传统潜艇具有相似性.

4.2 垂直面回转操纵性计算结果

图4为4 kn 航速条件下航行体垂直面回转对

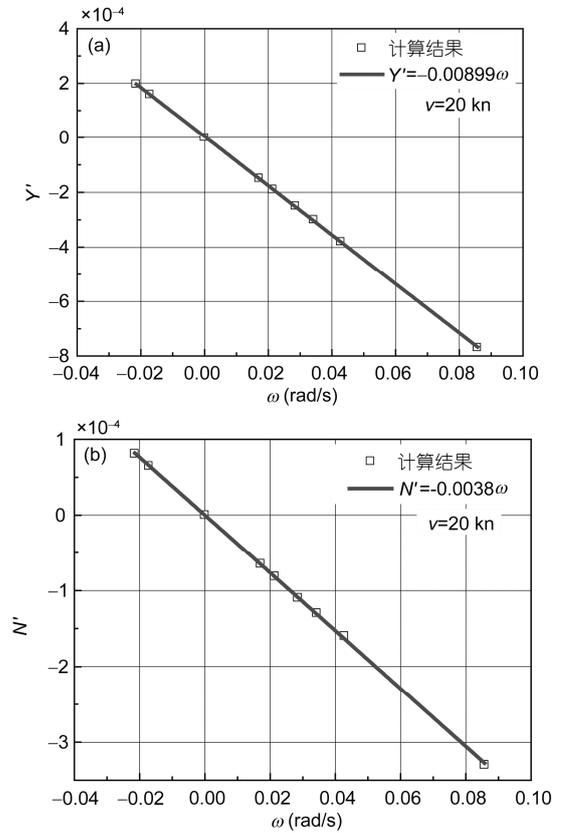


图3 航行体20 kn 航速下水平面回转偏航力(a)和力矩(b)旋转导数

表2 航行体旋转导数计算结果比较

旋转导数	4 kn	20 kn	相对误差(%)
Y'_r	-0.00886	-0.00899	1.5
N'_r	-0.0039	-0.0038	2.6

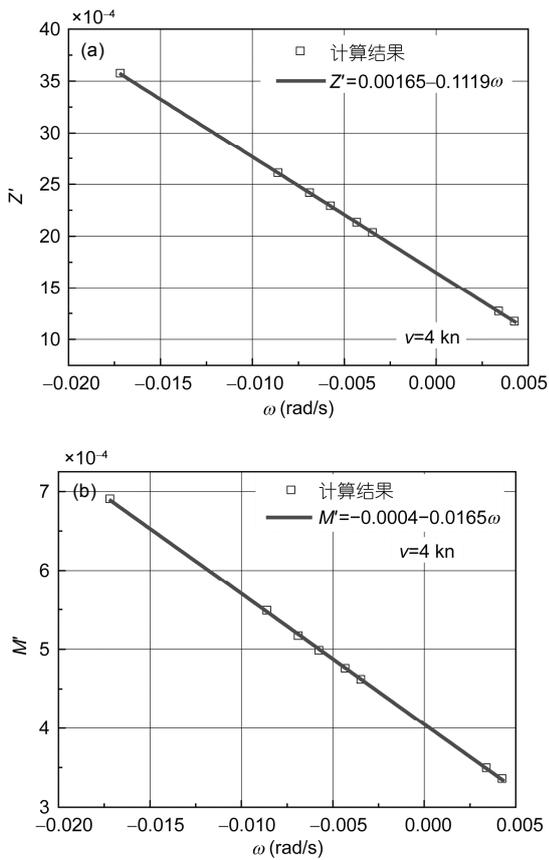


图 4 航行体 4 kn 航速下垂直面回转俯仰力(a)和力矩(b)旋转导数

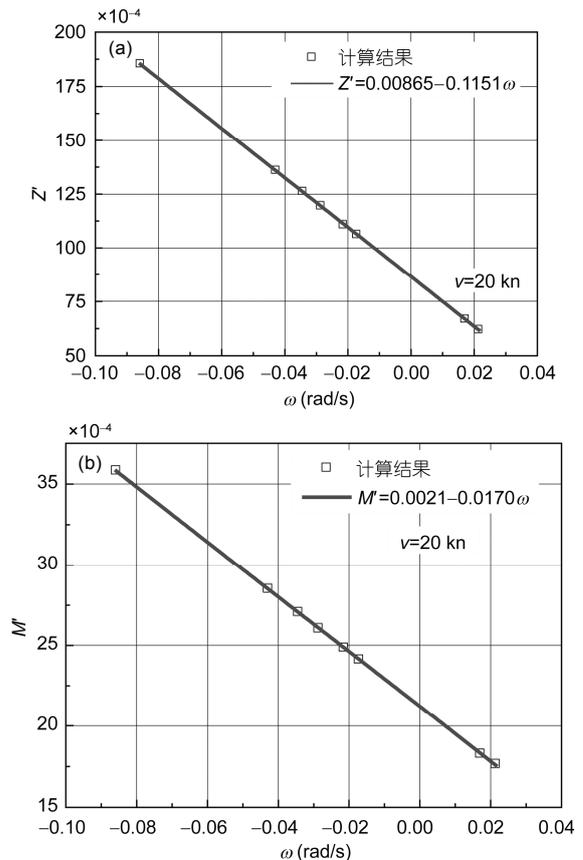


图 5 航行体 20 kn 航速下垂直面回转俯仰力(a)和力矩(b)旋转导数

应的俯仰力系数和俯仰力矩系数随角速度的变化. 图 5 为 20 kn 航速条件下航行体垂直面回转对应的俯仰力系数和俯仰力矩系数随角速度的变化. 其中, $Z' = Z/0.5\rho VL^3$, $M' = M/0.5\rho VL^4$, 式中, Z 为偏航力, M 为偏航力矩, ρ 为流体密度, V 为航行体线速度, L 为航行体特征长度, ω 为航行体转动角速度. 从图中可以看出, Z' 和 M' 与 ω 均成线性关系. 对图 4 和 5 中数据进行一次多项式拟合求出斜率即可得到相应的旋转导数 $Z'_r = (Z/\omega)/0.5\rho VL^3$ 和 $M'_r = (M/\omega)/0.5\rho VL^4$, 具体数值见表 3 所示.

从表 3 的计算结果可以看出, 4 和 20 kn 航速条件下, 航行体的旋转导数具有较好的一致性. 与水平面回转力矩系数相比, 垂直面力矩系数要大 4 倍, 即该类翼身融合航行体在垂面的操纵性要优于水平面的操纵性, 这类航行体在改变航行深度机动方面具有更大优势.

表 3 计算结果比较

旋转导数	4 kn	20 kn	相对误差(%)
Z'_r	-0.1119	-0.1151	2.9
M'_r	-0.0165	-0.0170	3.0

5 计算结果与流场分析

为了更好地分析计算结果, 特对航行体受力进行量纲分析.

在航行体运动过程中, 自变量为航行体运行速度 V , 攻角 α , 漂角 β , 特征长度 L , 航行体最大直径 D ; 流体密度 ρ , 流体黏度 μ ; 旋臂水池半径 R , 因变量为航行体表面压力 P .

则航行体表面压力可以表示为自变量的一个函数, 如下式所示:

$$P = f(V, \alpha, \beta, L, D; \rho, \mu; R),$$

取 V, L, ρ 为基本量, 对上式进行无量纲化可以得到

$$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2} = f(Re, \alpha, \beta, D/L, R/L).$$

当航行体运行状态及外形尺寸确定后, 则无量纲参数最终简化为

$$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2} = f(R/L, Re),$$

即航行体表面压力系数分布与旋臂水池旋转半径倍数 R/L 和来流雷诺数 Re 相关.

5.1 给定航速条件下, 旋转半径对操纵性影响-水平面回转

图 6 为 4 kn 航速条件下, $-50L$, $50L$ 和 $10L$ 旋转半径条件下滞止压力分布云图. 图 6(a)与(b)相比, 航行体尾部漩涡形式相同, 但漩涡分离点位置相反. 图 6(c)与(b)相比, 漩涡分离点位置相同, 但左右漩涡的不对称性更加明显. 即航行体尾部漩涡会随着旋转半径的变化出现明显的偏转现象, 而且旋转半径越小, 左右漩涡的不对称性会越明显.

为了更直观地得到旋转半径对航行体受力的影响, 取沿航行体轴向分布 $x/L=0.83$ 和径向分布 $y/L=0.17$ 的曲线(图 7), 比较不同旋转半径条件下该曲线上的压力系数变化.

图 9(a)为航行体水平面回转时 $x/L=0.83$ 曲线上压力系数分布与旋转半径的关系. 随着旋转半径的变化, 压力系数会出现明显的差异, 与量纲分析结果相符.

5.2 给定旋转半径条件下航速对操纵性影响-水平面回转

图 6(c)和 8(a)为旋臂水池半径为 $R=10L$, 4 与 20 kn 航速下滞止压力分布云图. 两种航速条件下, 航行体尾涡的左右分离位置基本一致.

图 9(b)为两种航速条件下航行体表面 $x/L=0.83$ 曲线上的压力系数分布, 可见航速变化对航行体表面压力系数的影响很小, 这是因为在给定的航行体运行速度下, 已经到达湍流的自模拟区, Re 的影响可以忽略,

$$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2} = f(R/L).$$

5.3 垂直面回转操纵性分析

图 8(b)为旋臂水池半径为 $R=10L$, 4 kn 航速下垂

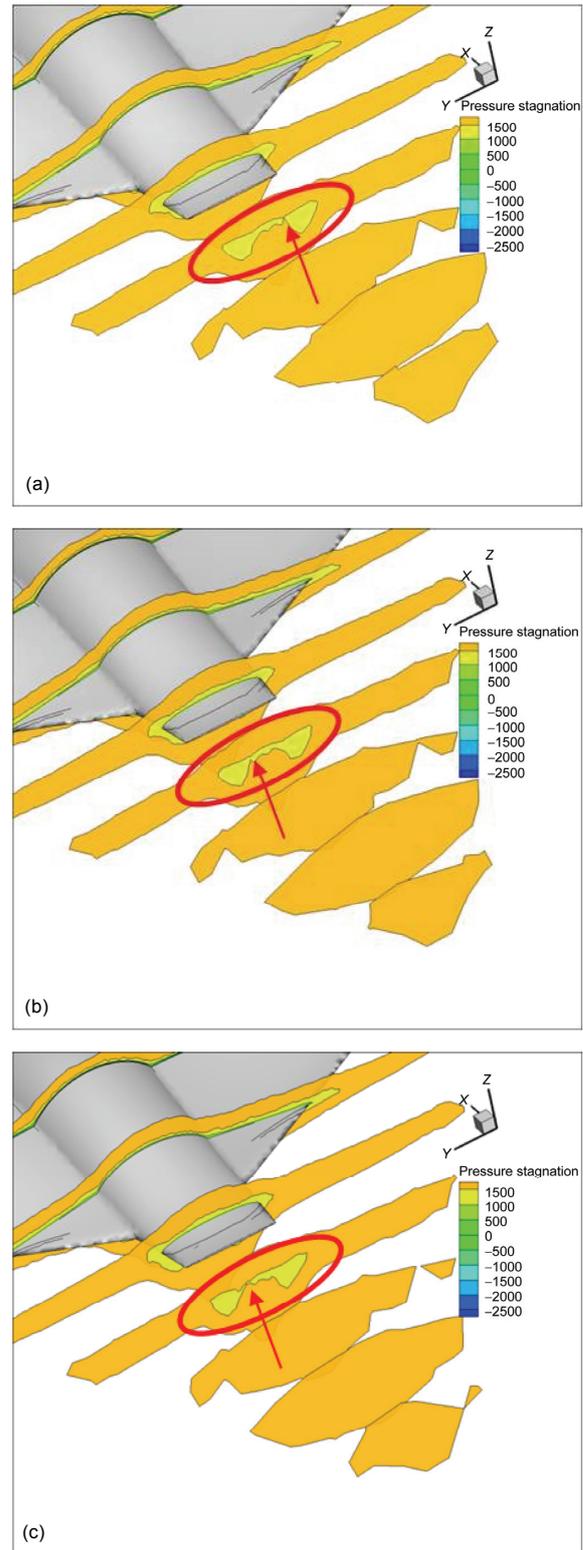


图 6 水平面回转滞止压力云图
(a) $v=4$ kn, $R=-50L$; (b) $v=4$ kn, $R=50L$; (c) $v=4$ kn, $R=10L$

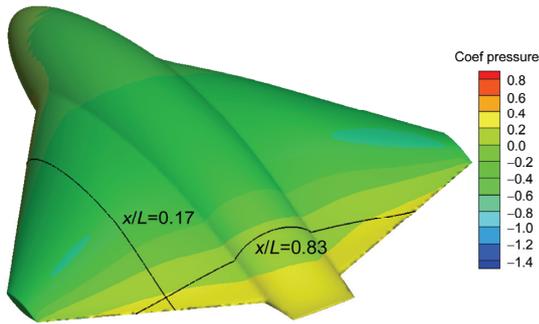


图7 $v=4 \text{ kn}$, $R=10L$ 水平面回转航行体表面压力系数云图

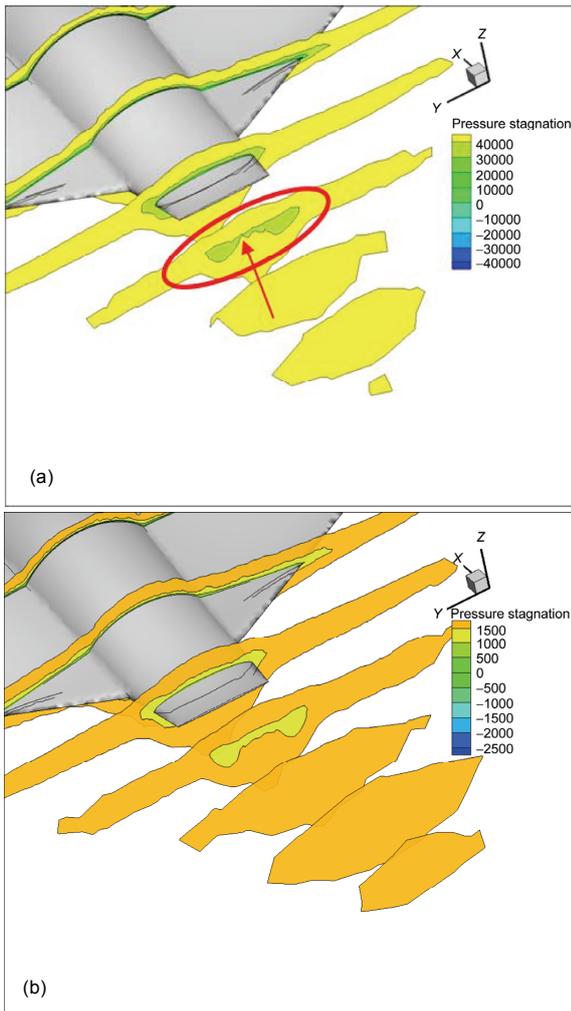


图8 (a) $v=20 \text{ kn}$, $R=10L$ 水平面回转滞止压力云图; (b) $v=4 \text{ kn}$, $R=10L$ 垂直面回转滞止压力云图

直面回转时滞止压力分布云图. 和水平面回转(图6(c))相比, 航行体尾部的漩涡呈对称分布.

图10(a)为垂直面回转时给定航速, 三种不同旋

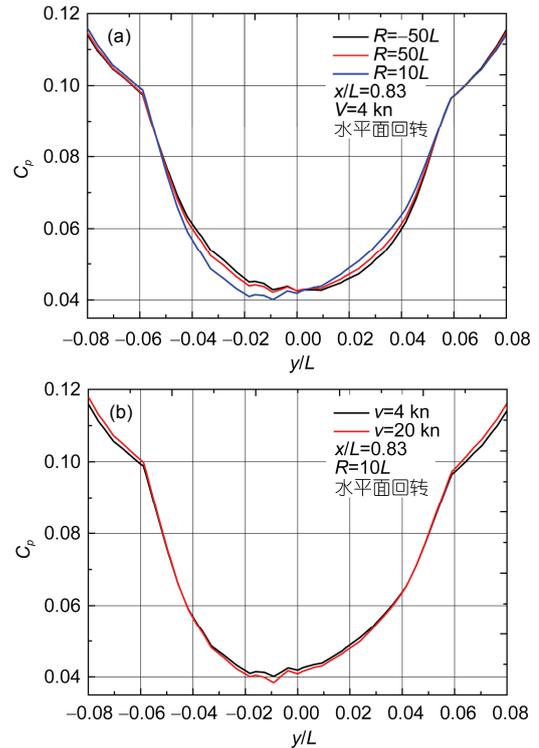


图9 不同水平面回转的压力系数分布

(a) 旋转半径; (b) 航速

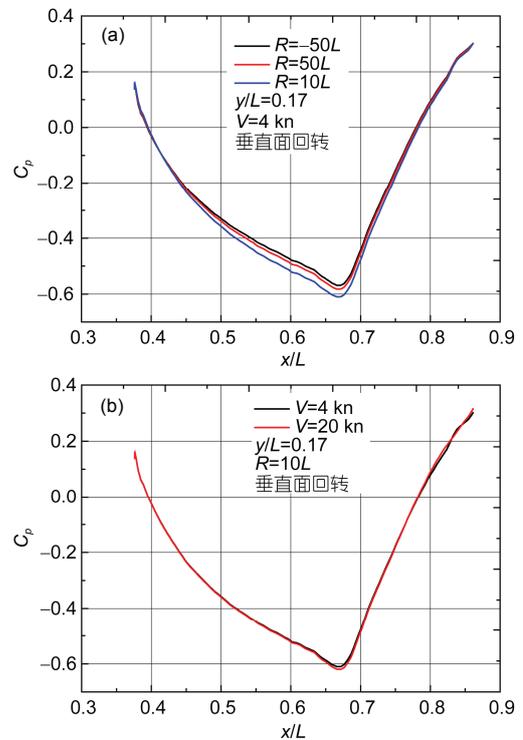


图10 不同垂直面回转的压力系数分布

(a) 旋转半径; (b) 航速

转半径条件下航行体表面 $y/L=0.17$ 曲线上的压力系数分布. 图 10(b)为给定旋转半径, 两种不同航速条件下 $y/L=0.17$ 曲线上压力系数分布. 可见在垂直面旋转条件下, 计算结果同样满足量纲分析所得结论.

6 结论

本文采用基于相对坐标系的数值模拟方法得到了翼身融合航行体这类新型航行体的操纵特性. 通

过量纲分析确定了航行体受力的主要影响参数, 并对数值计算得到的不同旋转半径和航行速度条件下航行体受力进行分析与比较. 水平面回转时给定航速条件下, 航行体尾部漩涡会随着旋转半径的变化出现明显的偏转现象, 而且旋转半径越小, 左右漩涡的不对称性会越明显. 当旋转半径给定时, 不同航速条件下, 航行体尾涡的左右分离位置基本一致. 此外发现该类航行体的垂直面回转操纵性要优于水平面回转操纵性, 即这类航行体在改变航行深度机动方面具有更大优势.

参考文献

- 1 潘子英, 吴宝山, 沈泓萃. CFD在潜艇操纵性水动力工程预报中的应用研究. 船舶力学, 2005, 8: 42-51
- 2 孙铭泽, 王永生, 张志宏, 等. 基于网格变形技术的全附体潜艇操纵性计算. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013, 2: 420-424
- 3 王化明. 限制水域操纵运动船舶粘性流场及水动力数值研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2009
- 4 杨路春, 庞永杰, 黄利华, 等. 潜艇PMM实验的CFD仿真技术研究. 舰船科学技术, 2009, 31: 12-17
- 5 Racine B J, Paterson E G. CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering. 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Toronto, 2005
- 6 Hu Z Q, Lin Y. Computing the hydrodynamic coefficients of underwater vehicles based on added momentum sources. 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, 2008
- 7 刘帅. 潜艇操纵运动水动力数值研究. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2010
- 8 曾广会, 伍治海. 潜艇操纵水动力数值预报网格与湍流模型选取研究. 造船技术, 2012, 2: 22-25
- 9 柏铁朝, 梁中刚, 周铁美, 等. 潜艇操纵性水动力数值计算中湍流模式的比较与运用. 中国舰船研究, 2010, 5: 22-28
- 10 任晋宇. 潜艇操纵运动粘性绕流数值模拟. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2009
- 11 孙铭泽, 王永生, 杨琼方. 潜艇操纵性数值模拟中雷诺数的影响分析. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 33: 1334-1340
- 12 Li J, Bi S S, Gao J, et al. Development and hydrodynamics experiments of robotic manta ray BH-RAY3. Control Eng China, 2010, 17: 127-130
- 13 Gao J, Bi S, Xu Y, et al. Development and design of a robotic manta ray featuring flexible pectoral fins. In: Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on. IEEE, 2007. 519-523
- 14 任露泉, 李秀娟. 蜻蜓翅膀功能特性及其仿生研究进展. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 353-367
- 15 Liebeck R H. Blended wing body design challenges. AIAA 2003-2659. 1-5
- 16 Liebeck R H. Design of the blended-wing-body subsonic transport. AIAA 2002-0002. 1-2
- 17 Potsdam M A, Page M A, Liebeck R H. Blended wing body analysis and design. AIAA 1997-2317
- 18 何政道. 浅谈未来民机的一种新布局—翼身融合体. 民用飞机设计与研究, 2013, B11: 1-4
- 19 朱自强, 王晓璐, 吴宗成, 等. 民机的一种新型布局形式—翼身融合体飞机. 航空学报, 2008, 29: 49-59
- 20 贾子安, 张陈安, 王柯穆, 等. 乘波布局高超声速飞行器纵向静稳定特性分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1114-1122
- 21 Wu X C, Huang C G, Yang L T, et al. A semi-relative reference frame method for manoeuvring simulation in hydrodynamics. The 14th Asia Congress of Fluid Mechanics. Hanoi and Halong, 2013
- 22 Roddy R F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC MODEL 5470) from captive model experiments. Ship Hydromechanics Department Departmental Report. 1990

Study on maneuvering characteristics of blended wing body vehicle

WU XiaoCui¹, WANG YiWei¹, HUANG ChenGuang¹, HU ZhiQiang², YI RuiWen², YU XianXian¹ & DU TeZhuan¹

¹Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Blended wing body vehicle with its unique shape and mobility has become an important direction of future development of the ocean, but people do not know much about sailing characteristics of it. In this paper, semi-relative method is adopted to calculate the maneuvering characteristics of blended wing body vehicle, the main influence parameters are got based on dimensional analysis. The tail vortex will change with the rotation radius at in a horizontal turning at given speed. The asymmetric of vortex is greater when the rotating radius is small. The vortex separation position is same with the constant rotating radius. The maneuvering characteristics in vertical turning is better than in horizontal turing, which means than the blended wing body vehicle has more advantages in changing depth maneuver operation.

maneuvering characteristics, numerical simulation, blended wing body vehicle, dimensional analysis

doi: 10.1360/N092014-00152