

垫气滑行艇静水面滑行数值模拟

陈枫¹、胡建祥²、石亚军¹、马丹萍¹

(1.中国船舶科学研究中心 2.陆装项目管理中心)

摘要：垫气滑行艇是一种空气推进的气垫与滑行复合的特种高性能船，运动过程中，船底气垫和水动升力共同支承船体重量。气垫对船体重力的支撑份额可调，形成低速气垫航行、低速排水航行、高速气垫航行和高速滑行四种航行状态。此船型兼具了动力气垫船和滑行艇的优势，特别适合滩涂、沼泽、流冰等特殊水域环境。由于受力和运动工况复杂，常规模型试验很难有效模拟。本文采用基于 RANS 方程和 VOF 方法的整体运动网格方法对垫气滑行艇静水面滑行过程进行 CFD 数值模拟，比较分析滑行艇在有无船底喷气作用下从静止状态加速至巡航状态过程中的受力及运动姿态变化规律与实船试验进行比较试图建立一个高效的评估方法。计算结果显示，在施加同样的发动机推力的情况下，船底喷气可使船体抬艏，纵倾角增大，同时抬升艇体使其吃水更小，滑行艇阻力峰较无喷气情况出现更晚且幅值更小；而无船底喷气情况下滑行艇则出现埋艏现象、吃水变大导致阻力较大无法加速至较大航速。

关键词：垫气滑行艇；RANS 方程；VOF 方法；整体运动网格方法

1 引言

垫气滑行艇作为一种新概念高性能船舶，其推进装置为空气桨，并通过气道将高速空气引流至船底空穴的喷气孔，向船底喷气，产生空气垫升效应抬升艇体，对其水面滑行性能研究具有一定工程应用背景。早期对于滑行艇水动力性能研究较为困难^[1]，通常采用模型试验及半理论半经验方法来估算完成^{[2]-[4]}，董文才等人采用试验方法对断阶滑行艇气层减阻的影响因素和机理进行了研究^{[5]-[6]}。随着计算机性能的提升及数值计算方法的发展，采用 CFD 方法研究滑行艇或者水上飞机的水动力性能成为如今较为普遍的方法，其中，整体运动网格方法对高速滑行物体的数值计算成为较为合适的研究方法，孙华伟^[7]采用运动域方法（原理与整体运动网格方法相同）研究了滑行面形状对滑行艇滑行阻力与航态的影响；卢昱锦等人^[8]采用该方法对高速平板入水问题进行研究，计算结果与试验值^[9]较为吻合；段旭鹏等人^[10]基于 OpenFoam 的整体运动网格方法模拟了某型水上飞机的起飞滑跑过程。垫气滑行艇的研究^[11]刚刚起步，此前未见相关数值计算。本文拟采用整体运动网格方法对该型垫气滑行艇静水面滑行过程进行数值计算。

2 数值计算方法及算例验证

对垫气滑行艇静水面滑行的数值计算方法主要包括以下几个方面：流体控制方程及求解算法、自由液面捕捉方法和整体运动网格方法。

2.1 流体控制方程及求解算法

针对垫气滑行艇静水面滑行工况，本文采用三维不可压雷诺平均 N-S 方程(RANS 方程)作为其数值求解的控制方程，其连续性方程和动量方程如式(1)、(2)所示：

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + S_i \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

本文采用的湍流模型为标准 $k-\omega$ 两方程模型, 采用 SIMPLE 算法求解压力与速度的耦合, 采用基于格点的格林高斯法构建流场梯度, 采用有限体积法 (FVM) 离散上述控制方程; 对于各项的离散格式, 压力项选用 PRESTO! 格式, 体积分数项采用几何重构方法, 其余项均采用二阶迎风格式。

2.2 自由液面捕捉方法

垫气滑行艇由空气桨推进, 控制舵面均受空气作用, 其静水面滑行过程不可忽略空气作用, 故是一个典型的两相流问题, 本文在模拟两相流问题时采用流体体积函数法 (即 VOF 方法) 捕捉自由液面。

VOF 方法的核心思想为流体体积分数函数 C , 该函数为一个标量函数, 定义为流体的特征函数在控制体中的积分, 即网格单元的体积。假设共存在 n 相流体, 若在某一个计算网格单元中不含有第 m 相的流体, 则第 m 相的流体体积分数 $C_m = 0$; 若该单元中被第 m 相流体充满, 则 $C_m = 1$; 若在该单元中存在第 m 相流体与其他流体的交界面时, 则 $0 < C_m < 1$ 。由于运用 VOF 方法时, 自由表面没有被明确地定义, 而只是在网格单元的高度方向上分布, 故为了获得更为精确的结果, 必须对流体交界面进行局部网格细化。

2.3 整体运动网格方法

在整体运动网格方法中, 整个流体计算域 (包括网格单元及边界) 具有和运动物体一样的运动规律, 与常规动网格相比, 由于不需要考虑网格的弹性变形和局部重构, 节省了大量的计算时间。该方法原理示意图如图 1 所示: 图右侧 t_0 时刻为初始时刻, 经过 Δt 后物体运动至如左侧姿态, 自由液面位置不变, 整个计算域随着物体一起运动, 其前行、升沉和俯仰运动的幅值分别为 Δx 、 Δz 、 $\Delta \theta$ 。同时, 边界在随物体运动的同时需要更新, 边界条件的变化使得自由液面发生振动, 这种振动会在边界处形成小波, 需要在边界上施加阻尼消波, 且需要对自由液面附近区域网格进行加密。

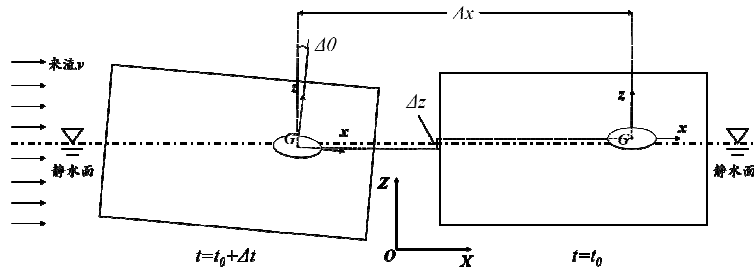
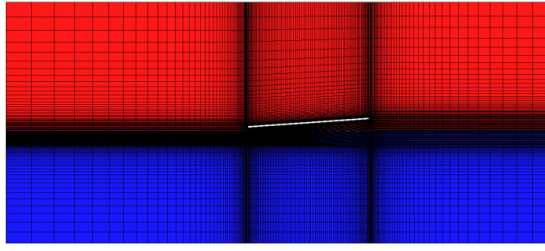


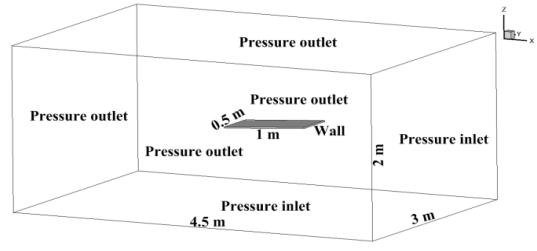
图 1 整体运动网格方法原理示意图

2.4 算例验证

为了验证上述数值计算方法对于模拟垫气滑行艇静水面滑行过程的有效性, 运用整体运动网格方法对平板高速入水问题进行算例验证, 计算网格及边界条件如图 2 所示。计算初始条件与试验工况相同, 入水时水平速度和下沉速度分别为 40m/s 和 1.5m/s, 入水俯仰角为 4° 和 10° 。



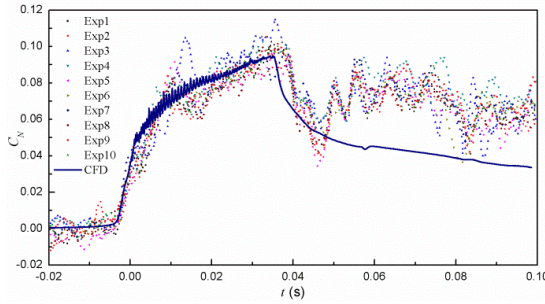
(a) 计算网格



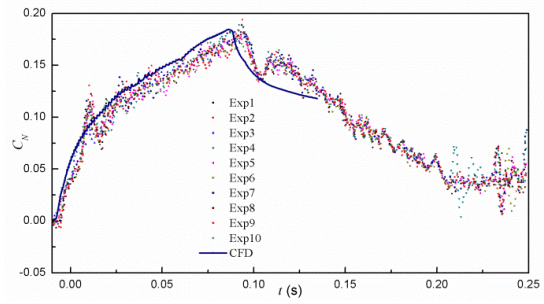
(b) 边界条件

图 2 计算网格与边界条件

图 3 为两个工况下平板法向力系数的数值计算结果与试验结果对比情况，由图可知，总体上数值计算结果落在试验结果区间内，说明整体运动网格方法能有效地模拟平板入水过程中的受力情况，故可运用上述数值模拟方法模拟垫气滑行艇静水面滑行过程。



(a) 4°俯仰角



(b) 10°俯仰角

图 3 平板法向力系数计算与试验值对比

3 垫气滑行艇静水面滑行数值模拟

3.1 计算模型及网格划分

本文计算模型为全尺度垫气滑行艇，总尺寸为 $8.48 \times 3.6 \times 2.84$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高，单位: m)，排水量约为 2 吨，在船底空穴处装有 4 个吹气孔，吹气孔长 0.3m，两端圆直径 0.12m，两孔距离 0.06m，模型示意图及吹气孔位置形状如图 4 所示。



(a) 计算模型示意图



(b) 吹气孔位置及形状

图 4 计算模型及吹气孔位置

由于计算模型及其流场均严格对称，故采用半模进行网格划分及计算，为细化自由液面附近的网格并考虑到网格总数，本文采用切割体网格，网格总数为 624 万，边界层共 12 层，边界层总高度为 0.08m，网格示意图如图 5 所示。

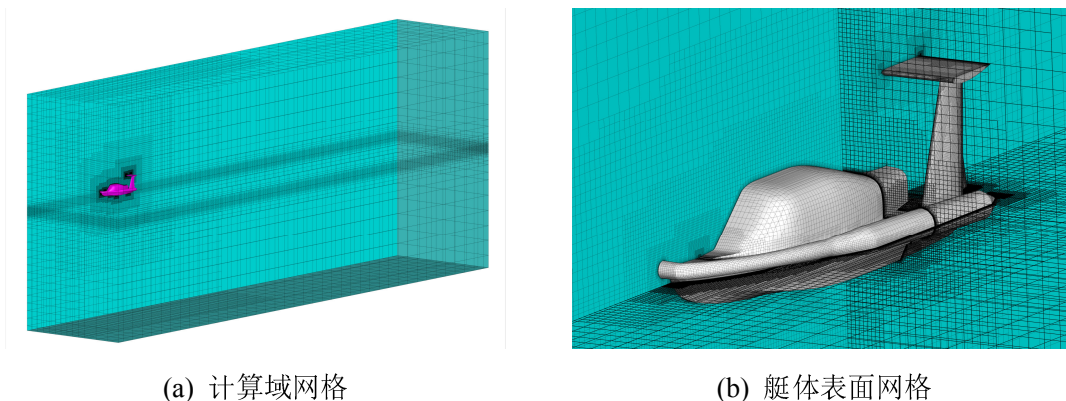


图 5 计算网格

3.2 边界条件与初始条件

本文采用一个长方体区域作为垫气滑行艇的计算域，计算域边界示意图如图 6 所示，速度入口边界距离艇艏 15m，压力出口边界距离艇艉 80m，侧边界为对称面边界条件，距离对称面 20m，上下边界均为速度入口边界，距离自由液面 20m，船底吹气口处为速度入口，吹气速度 5m/s，垂直艇底向外。对艇体施加一个大小为 4679N 的体积作为发动机推力。

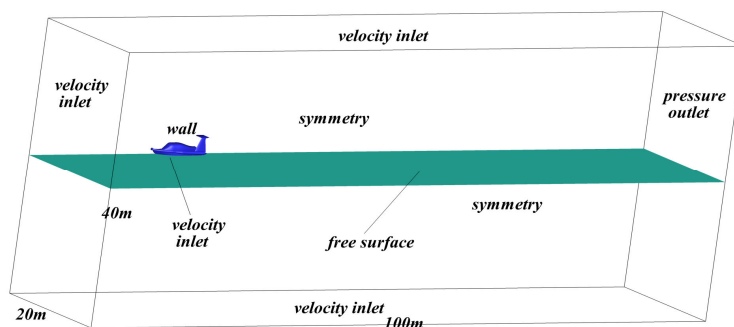


图 6 边界条件示意图

3.3 计算结果分析

对垫气滑行艇在有无船底喷气的工况下进行水面滑行的数值模拟，得到其从零航速状态到巡航状态的运动姿态及受力情况，以下为计算结果及分析。

图 7 为滑行艇滑行过程中的运动姿态及受力曲线，本文分别监测滑行艇在有无船底喷气的工况下的航速、吃水深度、纵倾角的时历曲线以及滑行总阻力随航速的变化曲线。

图(a)和图(b)分别为滑行艇滑行时的航速随时间变化曲线及滑行总阻力随航速的变化曲线，由图可知，在相同的推力作用下，船底有喷气作用时，滑行艇航速增加较快，在 9m/s 时越过阻力峰，且能达到最大航速 18m/s(约 65km/h)；而不在船底施加喷气作用，滑行艇阻力远远大于有喷气作用工况，滑行 7s 后阻力几乎与推力相等，最大航速不超过 8m/s，远小于航速 30 节的设计指标。故在船底喷气可大大减小滑行艇的滑行阻力，使加速过程更为顺畅，在给定推力下可达到最大航速。

图(c)和图(d)分别为滑行艇滑行过程中的纵倾角及吃水深度时历曲线，由图 c 可知，两种不同工况下，前 3.5s（即排水航行阶段）垫气滑行艇的纵倾角变化趋势类似，船艏在推力作用下低头，当到达阻力峰后，两种工况下艇体纵倾角变化趋势基本相反，船体有喷气时，纵倾角增大，当航速达到 14m/s 后出现小幅振荡，航速达到 17m/s 后振荡幅度增大，总的来说，船底喷气使得艇体保持较小的正纵倾角滑行；而船底没有喷气时，在滑行艇出现第一个阻力峰值后纵倾角迅速减小，且保持着较大的负纵倾角滑行。由图 d 知，滑行艇吃水深度变化与纵倾角变化相似，在船底有喷气时，越过阻力峰后船体吃水迅速减小至 0.02m 并保持该

吃水深度，而船底无喷气时，船体吃水深度逐渐增大，导致阻力持续增大，航速难以增加。

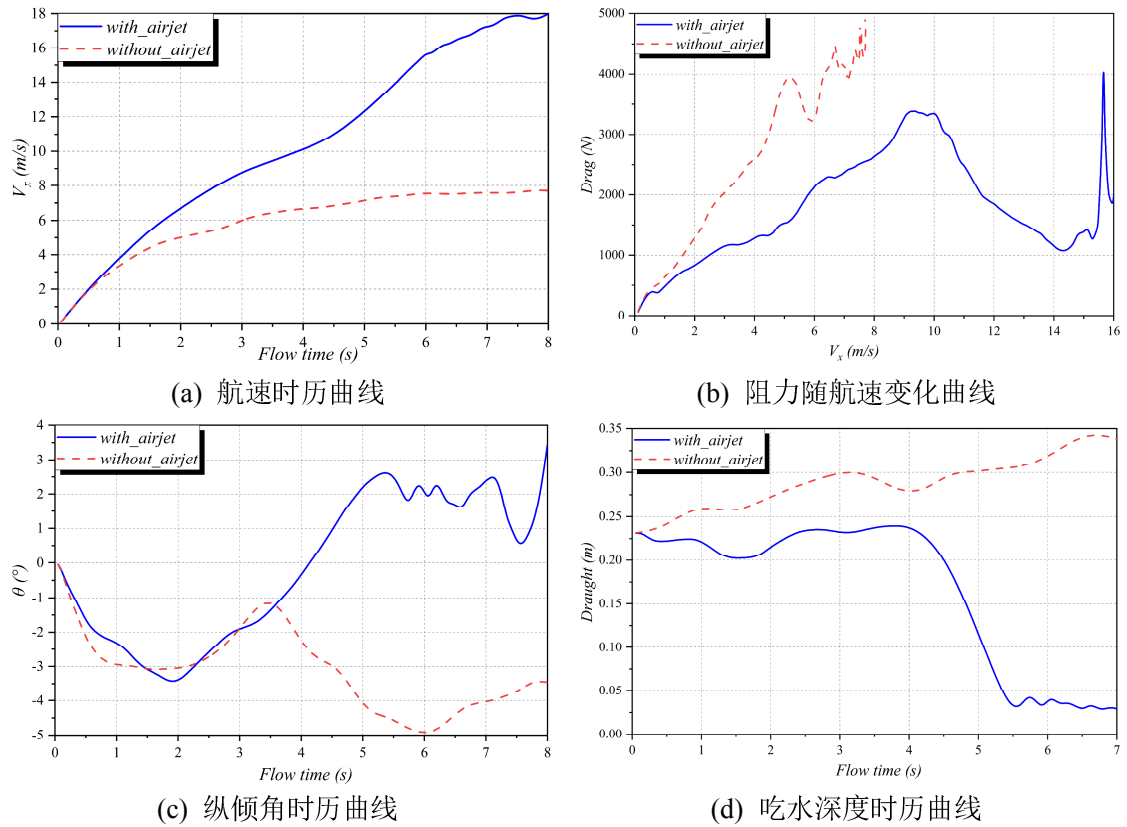


图 7 滑翔艇运动姿态及受力曲线

图 8 为航速为 7m/s(25.2km/h)下两种工况滑翔艇底部空气相体积分数分布情况对比图，左图为无船底喷气工况，右图为有船底喷气工况。由图可知，在相同航速下，无船底喷气工况滑翔艇主滑行面均与水面接触，船底空穴中湿润面积较大，空气相体积分数小；增加船底喷气后，滑翔艇部分主滑行面不与水面接触，船底空穴中无湿润面积，空气体积分数较大，喷气垫升效应明显。

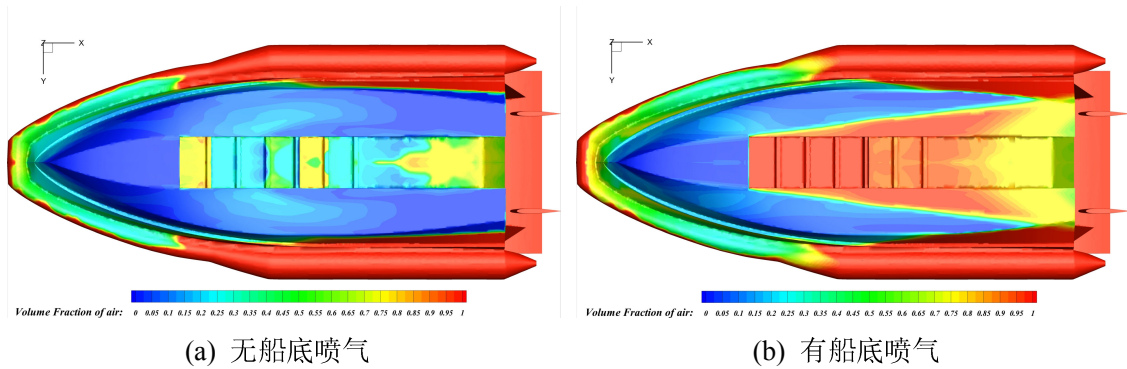


图 8 滑翔艇底部空气相体积分数分布情况对比

3.4 计算与试航试验结果对比

图 9 为计算不同航速下垫气滑翔艇数值计算结果与实船试验结果对比，如图可知，在低、中、高三种航速下数值计算结的滑翔艇滑行姿态及自由液面形态与实船试航试验结果较为吻合，说明该数值计算方法能有效地模拟垫气滑翔艇的静水滑行过程，计算结果较为准确。

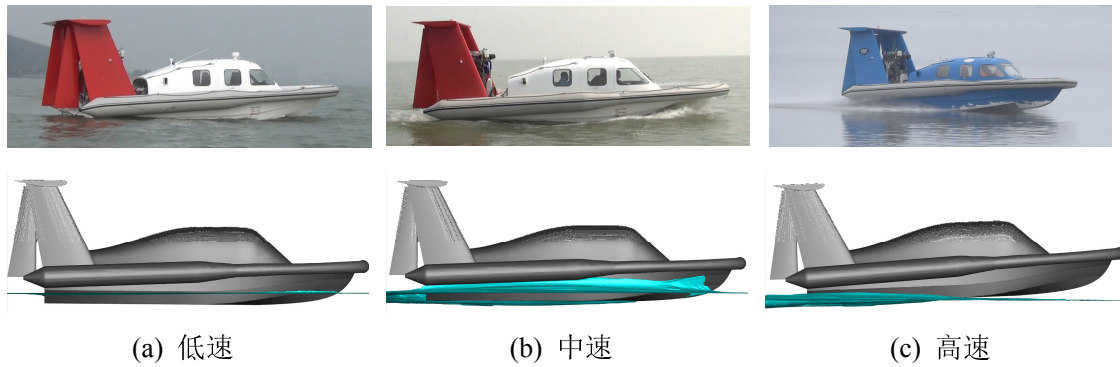


图9 计算结果与试航结果对比

4 结论

针对垫气滑行艇的静水面滑行过程,采用基于整体运动网格及VOF模型的数值计算方法对有无船底喷气两种工况进行静水面滑行数值模拟,并将计算结果与试航试验结果进行对比,得到以下相关结论,为该型垫气滑行艇的滑行水动力性能优化提供基础。

(1) 数值计算结果与实船试航试验结果进行对比,计算得到的船体姿态与自由液面状态与实船试验现象较为吻合,该数值方法适用于滑行艇静水面滑行计算;

(2) 相比无船底喷气的构型,船底喷气产生的气动垫升效应能使垫气滑行艇更快地从静浮状态加速到最快航速,同时能保持较小的吃水深度和较小的正纵倾角,因此,船底喷气能有效降低滑行艇滑行阻力,使其加速过程更为顺畅;

(3) 计算结果与试航试验结果较为吻合,故整体运动网格方法适用于模拟垫气滑行艇静水面滑行过程。

参考文献

- [1] Faltinsen O, 崔维成. 海上高速船水动力学[M]. 国防工业出版社, 2007.
- [2] Holling H D, Hubble E N. Model Resistance Data of Series 65 Hull Forms Applicable to Hydrofoils and Planing Craft[J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1974, 75.
- [3] Clement E P, Pope J D. Stepless and stepped planing hulls-graphs for performance prediction and design[J]. International Shipbuilding Progress, 1961, 8(84):344-360.
- [4] 许蕴蕾, 由丹丹. 基于水动力分析的高速滑行艇阻力估算[J]. 船舶, 2009, 20(4):4-7.
- [5] 董文才, 郭日修, 刘希武. 喷气方式对断阶滑行艇阻力的影响[J]. 中国造船, 2000, 41(2):8-14.
- [6] 董文才, 郭日修, 陈小玲, et al. 断阶滑行艇喷气减阻机理研究[J]. 船舶力学, 2002, 6(6):55-61.
- [7] 孙华伟. 滑行面形状对滑行艇阻力与航态影响数值分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- [8] 卢昱锦, 肖天航, 李正洲. 高速平板着水数值模拟[J]. 航空学报, 2017, 38(S1).
- [9] IAFRATI A, SIEMANN M H, MONTAÉS L B. Experimental study of high speed plate ditching[C]//29th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 2014.
- [10] 段旭鹏, 孙卫平, 魏猛, et al. 基于 OpenFOAM 的水陆两栖飞机水面高速滑行研究[J]. 航空学报, 2018, 40(1).
- [11] 石亚军, 周谦, et al. 超浅吃水垫气滑行艇研究[C]. 第十八届船艇发展与水系旅游学术交流会, 2017.