

基于 CFD 方法的全垫升气垫船兴波波形及阻力计算研究

陈熙, 朱仁传, 顾孟潇

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海, 200240, chen.xi@sjtu.edu.cn)

摘要: 全垫升气垫船的兴波主要由气垫自身所引起, 是总阻力的主要成分。本研究基于 CFD 方法提出了气垫做匀速直线运动的兴波阻力计算方法, 建立简化模拟气室, 并采用质量源方法模拟风机供气以形成稳定的气垫, 计算得到兴波波形及阻力。基于该方法讨论了气垫长宽比、佛汝德数等因素对气垫兴波阻力的影响。研究表明该方法可以得到气垫兴波引起的水表面变形及直航中的兴波阻力, 是确定航行姿态、围裙变形的基础。

关键词: 气垫船; 兴波阻力; 质量源; CFD

1 引言

全垫升气垫船是一种完全靠空气垫托在水面上航行的特种高性能船, 具备优越的快速性和两栖性能。因此, 全垫升气垫船军事、民用运输领域都有着广泛的应用^[1]。兴波阻力是气垫船最主要的阻力成分, 占总阻力的百分比相当大, 揭示气垫兴波的实质, 建立求解兴波阻力的方法, 找出其与航速、主尺度、气垫压力等参数之间的关系, 对于改善气垫船阻力性能以及后续确定航行姿态和围裙变形等问题起到关键作用。

目前国内外对气垫船兴波阻力研究的方法主要有线性势流理论、非线性理论及 CFD 方法。Newman 和 Poole^[2]将气垫简化成一个压力均匀分布的矩形面, 提出了气垫兴波阻力计算方法, 并给出了相应工况下兴波阻力的系数图谱, 该图谱是后续研究的参照。Nikseresht 等^[3]利用 VOF 模型模拟了全垫升气垫船在自由液面上的空气流动, 以及流域内非线性自由面的黏性运动, 结果表明全垫升气垫船的兴波阻力与波形明显依赖于气垫的压力分布、佛汝德数和气垫下方的气体流动。Bhushan 等^[4]利用基于线性理论的自由面波形和兴波阻力计算软件 ACVPER 和基于 URANS 的兴波阻力计算软件 CFD-Ship-IowaV.4 两种工具, 研究了不同水深、压力分布和形状的气垫兴波阻力。Bhushan 等^[5]采用 URANS 水动力求解器

对侧壁式气垫船 (SES) 进行了模拟。

运用 CFD 软件建立了气垫船气室的简化模型和数值水池, 提出采用质量源模拟风机供气及计算其兴波阻力的方法, 对两种气垫船的气垫在静水中航行的兴波问题进行计算, 并对兴波波形进行了分析。

2 数值计算方法

本研究的数值模拟在一个三维数值水池中进行, 在出口处和远离船体的边界处设有人工阻尼消波区。其以多相流理论为基础, 自由面没有扰动时, 其上部为空气, 下部为水。

因气垫船系统复杂, 各部分耦合影响较大, 采用 CFD 方法计算气垫船的兴波问题时, 对计算模型作如下简化假定。

(1) 不考虑围裙变形影响, 视为刚性边界, 忽略围裙和气垫的耦合作用; 简化气垫船船身结构, 研究对象为对水面直接产生作用的类矩形气垫。

(2) 不考虑船体姿态的变化对气垫垫压的影响, 且垫升风机提供的气压足够大, 气垫压力分布达到稳态。本研究在气室部分加入质量源以模拟风机供气。

(3) 气垫船模型不与水直接接触, 摩擦阻力占比不大, 且主要研究对象为兴波阻力, 可假设流场不考虑黏性。Bhushan 等^[4]中采用不考虑黏性的方法和 RANS 方法计算气垫船兴波阻力, 结果较为吻合, 因此该方法具有可行性, 并能节约大量计算时间。

2.1 控制方程

根据前述讨论, 假定流场是三维不可压缩理想流体, 整个流场以连续性方程 (1) 和 Euler 方程 (2) 为控制方程:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g$$

其中 (u, v, w) 为流体质点速度; g 为重力加速度; p 为流体的压力。流体密度定义为

$\rho = \sum_{q=1}^2 a_q \rho_q$, 其中体积分数 a_q 表示单元内第 q 相流体占的体积与总体积的比例, 且有

$\sum_{q=1}^2 a_q = 1$, μ 为相体积分数平均的动力黏性系数, 与密度定义的形式一致。

2.2 质量源模拟风机系统

为模拟出气垫施加于水面的效果，采用三维质量源方法^[6]模拟风机不断给气室供气的情况。模拟气室区域内控制方程中的连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = q \quad (3)$$

因气室内均为空气，上述变量均为空气的密度与速度。该方程与原始的 N-S 方程相比，其后多了一个质量源项 q ，其单位为 $/s$ 。通过在指定区域添加与速度有关的质量源项，以对水面产生压力效果。

以下介绍确定质量源项的方法，因已知气垫压长比，则可得目标气垫压强 p_c ，单位 N/m^2 ，其为气垫与水接触面上大于标准大气压的部分压强。Bhushan 等^[5]给出了由伯努利方程得到的流量公式：

$$Q = C_d A_i \sqrt{\frac{2p_c}{\rho_{air}}} \quad (4)$$

式中， Q 为风机流量，单位为 m^3/s ， C_d 为泄漏系数，Faltinen 建议取为 0.6~1.0。 A_i 为气室四周与水面的间隙总面积， ρ_{air} 为空气密度。质量源项可通过式 $q = Q/V_\Omega$ 求出。其中 V_Ω 为量源区域的体积。

2.3 兴波阻力计算方法

由于气垫船的特性，与水面接触的仅为气垫，因此无法通过对船体表面的压力分布进行积分求出阻力。本研究对气垫下方的内水面上的压力分布和波形进行处理得到兴波阻力。

内水面是指压力分布区域内的水面，区域外则称为外水面。考虑内水面上—矩形微元面，其长为 dL ，宽为 dB （图 1）。

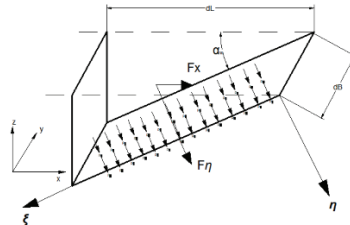


图 1 矩形微元面

该微元体与水平面夹角为 α_w ，取直角坐标系 $\xi O\eta$ ，其原点置于前端点 O ， $O\xi$ 轴顺着航行方向向后， $O\eta$ 轴垂直于 $O\xi$ 轴，向下为正。则该微元面上的压力作用值为：

$$F_\eta = p_c(x, y) dB dL \quad (5)$$

则将该力沿水平方向和竖直方向分解，得到沿船舶方向航行的分力为：

$$F_x = F_\eta \sin \alpha_w = p_c(x, y) \frac{d\xi_w(x, y)}{dx} dB dL \quad (6)$$

其中, $d\xi_w$ 为该微元面的波高; dx 为该微元面水平面投影的 x 方向距离, 将沿船舶航行方向水面受到的分力在整个内水面上进行积分可得总分力:

$$F_x = \iint p_c(x, y) \frac{\partial \xi_w(x, y)}{\partial x} dS \quad (9)$$

由牛顿第三定律可得, 船体受到的兴波阻力即该分力的反作用力, 可得兴波阻力为:

$$R_w = -F_x = -\iint p_c(x, y) \frac{\partial \xi_w(x, y)}{\partial x} dS \quad (10)$$

3 气垫船的兴波阻力及波形计算

3.1 计算域及边界条件

许多学者对不同平面形状的压力分布在水面上运动的兴波阻力进行了广泛研究, 其中较为广泛对照的是纽曼—波尔给出的图谱, 其研究对象是不同长宽比的矩形平面上的均布压力的兴波阻力。本文将对两个不同长宽比的矩形气垫进行计算。气垫参数如表 1。

表 1 气垫参数

编号	气垫长 L_c/m	气垫宽 B_c/m	气垫平均压强
A	3	2	$0.0127 \rho g L_c$
B	3	1.5	$0.0127 \rho g L_c$

以下以气垫 A 为例详述。如图 2 左图所示, 创建一个连续且封闭的虚拟拖曳试验池。计算域坐标原点位于气垫的纵向中心线和静水面的交点处, x 轴正向指向船首, y 轴为船宽方向, z 轴向上为正。计算域的范围为: $-7L_c < x < 3L_c$, $-3L_c < y < 3L_c$ 。气室如图 2 右图所示, 其为一个四周及顶部围合的区域, 下底面为开口, 且与静止的自由面有一定距离, 图中阴影为质量源区域。

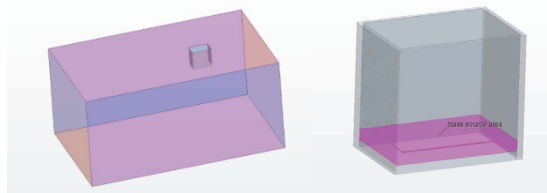


图 2 计算域区域及气室

计算域边界条件设定如下: 前端及上下面均为速度入口条件, 左右为对称边界条件, 尾端为压力出口条件, 气室除底面外均为壁面条件。为了消除边界造成的波反射, 在出口处和远离船体的边界处设有人工阻尼消波区。

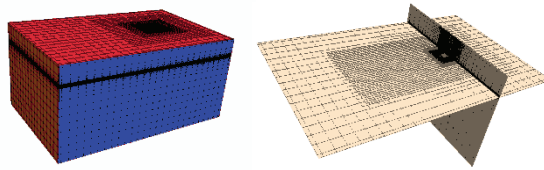


图3 计算域网格划分

网格划分如图3所示，沿波浪船舶方向要保证足够数量的网格，以避免数值耗散引起的波浪幅值的衰减；自由面附近垂向方向进行加密，以精准捕捉自由面；为准确捕捉尾迹，在凯尔文波系范围内进行适当网格加密；在气室内部加密网格以确保气体流场信息精确。

3.2 结果与分析

对气垫 A、B 分别进行 5 个佛汝德数下的静水航行计算，得到稳定的兴波波形，应用 2.3 节中的方法计算各航速下的兴波阻力。纽曼-波尔气垫兴波阻力系数公式为：

$$C_w = R_w \frac{\rho_w g}{\rho_c^2 B_c} \quad (12)$$

气垫 A、B 计算得出的兴波阻力及系数如表 2 所示。并将表转化为曲线（图 4）。

表 2 两种气垫兴波阻力及系数

Fr	气垫 A		气垫 B	
	Rw/N	C_w	Rw/N	C_w
0.2	7.814	0.807	4.659	0.642
0.4	8.481	0.876	4.024	0.554
0.6	10.997	1.136	5.475	0.754
0.8	13.064	1.350	6.731	0.927
1.0	11.418	1.180	4.684	0.645

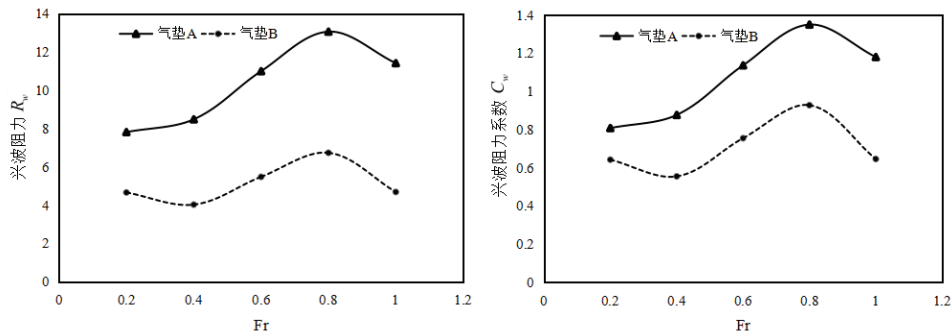


图 4 气垫 A、B 兴波阻力及兴波阻力系数随航速变化曲线

由图 4 可知，随着航速增加，两气垫兴波阻力及系数曲线变化趋势较为一致。长宽比为 3/2 的气垫 A，在 Fr 为 0.2~0.8 时兴波阻力随航速增加，而长宽比为 2 的气垫 B，在该速度期间兴波阻力先降后升，在 Fr 为 0.4 附近兴波阻力达到极小值。两种气垫均在 Fr 为

0.8 左右兴波阻力达到极大值，随后阻力会随着航速增加而下降。气垫 A 因其宽度更大，兴波阻力及其系数在各航速下都要大于气垫 B。

对于该现象的解释是，气垫船是以气垫，即气室内不高的压力分布作用于水面，该压力一般是指超出大气压力的相对压力，仅为大气压力的 2%~6%。所以气垫对于水面的作用较为微弱，这与排水型出船体运动产生的压力冲量有根本差异，即气垫压力的强度与航速关系不密切。因为不会出现随航速而急剧增加的兴波阻力，相反，兴波阻力甚至可能随航速的增加而减弱。这也是气垫船具有高速性能的基本原因之一。

图 6 展示了气垫 A 在静水中航行时的自由表面兴波图。从图 6 可以看出，随着航速增加，兴波波长逐渐增大，凯尔文波系角逐渐减小，且气垫压力中心逐渐后移。

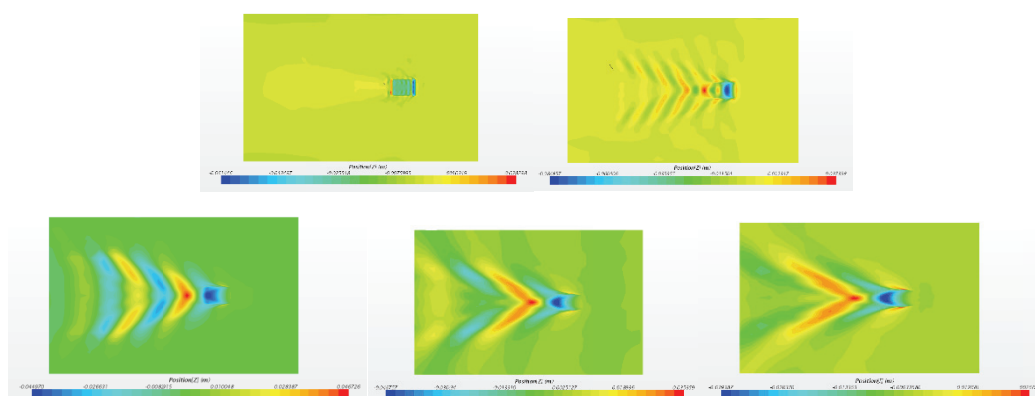


图 6 气垫 A 各航速下自由面兴波

图 7 给出了各航速下气垫船中纵剖面上的自由面升高曲线，其横坐标为纵向长度和气垫长的比值，可以看出，随着航速增大，气垫区域第一个波谷的位置，也可看做气垫区域水面的最低点，不断后移，当 $Fr > 0.6$ 时其位置已经处于船体范围之外。气垫深度在 $Fr = 0.4$ 左右最大，当航速越大或越小于该值，气垫深度有减小的趋势。

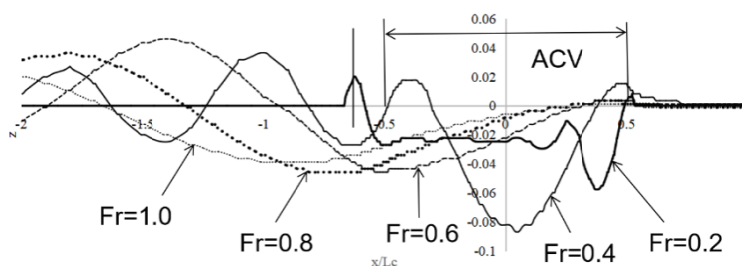


图 7 气垫 A 各航速下中纵剖面自由面升高曲线

4 结论

本文基于计算流体力学,提出了计算全垫升气垫船兴波阻力的一种方法,运用质量源模拟气室风机系统,基于理想流体理论求解 Euler 方程以获得兴波波形,进而根据波形计算求得兴波阻力。文中讨论了两种不同长宽比的气垫兴波阻力、波形随航速的变化情况,结果表明气垫船兴波阻力不会类似一般排水型船舶随航速而急剧增加,而甚至可能随航速增加而减弱。研究表明该方法可以得到气垫兴波引起的水表面变形及直航中的兴波阻力,能反映真实中气垫船的特性,是后续确定航行姿态、围裙变形的的基础。

参 考 文 献

- 1 连恩. 高性能船舶水动力原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009
- 2 Newman J N, Poole F A P. The wave resistance of a moving pressure distribution in a canal[J]. Schiffstechnik. 1962, 9(45): 21-26.
- 3 Nikseresht A H, Alishahi M M, Emdad H. Complete flow field computation around an ACV (air-cushion vehicle) using 3D VOF with Lagrangian propagation in computational domain[J]. Computers & Structures. 2008, 86(7-8): 627-641.
- 4 Bhushan S, Stern F, Doctors L J. Verification and Validation of URANS Wave Resistance for Air Cushion Vehicles, and Comparison With Linear Theory[J]. Journal of Ship Research. 2011, 55(4): 249-267.
- 5 Shanti Bhushan, Maysam Mousaviraad, Frederick Sternb. Assessment of URANS surface effect ship models for calm water and head waves[J]. Applied Ocean Research,.,2017:248-262.
- 6 杨云涛,朱仁传,蒋银,等.三维无反射数值波浪水池及波浪与结构物相互作用的模拟[J].上海交通大学学报,2018,52(03):253-260.

Research on waveform and wave-making resistance calculation of air cushion vehicles based on CFD method

CHEN Xi, ZHU Ren-chuan, GU Meng-xiao

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering; State Key Laboratory of Ocean Engineering; Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China. Email: chen.xi@sjtu.edu.cn)

Abstract: The wave induced by air-cushion vehicle is mainly caused by the air cushion itself and is the main component of the total resistance. The paper proposes the method of calculating wave-making resistance of air cushion in uniform linear motion based on CFD. The simplified

simulation for air chamber is established. The mass source method is used to simulate the air supply of the fan to form a stable air cushion. The waveform and resistance are calculated. Based on this method, the influence of length-to-width ratio for air cushion and Froude number on the wave-making resistance are discussed. The research shows that the method can obtain the deformation of the water surface caused by the air cushion and the resistance in the direct navigation, which is the basis for determining the attitude of the navigation and the deformation of the apron.

Key words: Air cushion vehicle; Wave-making resistance; Mass source method; CFD