

智能救生圈的阻力性能研究

申云磊,朱小俊,薛延华

(海军潜艇学院 防险救生系, 山东 青岛 266042)

摘要:基于 RANS 方法对 U 型智能救生圈进行了 1~7 m 航速下的数值计算。分析了不同航速下救生圈的姿态、阻力、流场变化规律。计算表明:智能救生圈在航速为 2 m/s、7 m/s 达到的阻力峰值为 29.0 N、30.6 N,姿态发生较大变化,最大纵倾角达到 6.9°,升沉 42 mm。

关键词:救生圈;阻力;姿态;CFD

本文引用格式:申云磊,朱小俊,薛延华. 智能救生圈的阻力性能研究[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(S2):206-209.

Citation format:SHEN Yunlei, ZHU Xiaojun, XUE Yanhua. Research on Resistance Performance of Intelligent Lifebuoy [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(S2):206-209.

中图分类号:U661.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-2304(2020)S2-0206-04

Research on Resistance Performance of Intelligent Lifebuoy

SHEN Yunlei, ZHU Xiaojun, XUE Yanhua

(Navel Submarine Academy, Department of Distress Prevention and Rescue Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Based on the RANS method, the U-shaped design of the intelligent lifebuoy had the numerical calculation of 1-7m/s speed. The changes of the attitude, resistance and flow field of the lifebuoy at different speeds were analyzed. Calculations show that: in the entire speed range, the intelligent lifebuoy reached the peak resistance of 29.0 N and 30.6 N at 2 m/s and 7 m/s, respectively, and the attitude changed greatly. The maximum pitch angle and heave reached 6.9 ° and 42 mm.

Key words: lifebuoy; resistance; attitude; CFD

海军部队在执行训练或作战任务时,相关人员可能会意外发生落水事故,若不能及时对落水人员进行施救,严重时会发生溺亡事故,严重影响部队战斗力。救生圈作为防险救生设备的一种,在落水人员救助中发挥着重要作用,但是存在反应缓慢,定位不准等问题,无法对溺水者进行有效的快速施救。随着无人技术和智能控制技术的快速发展,出现了一种自带动力的智能救生圈如图 1,该救生圈由葡萄牙某公司设计,采用电池供电,利用螺旋桨提供动力,加装 GOPRO 等光电设备,两侧设置有抓手。当发现落水险情时,可将智能救生圈抛入水中,采用自主或遥控的方式迅速到达落水者身边,落水者抓住救生圈后,快速自动返航,从而实施快速有效的救援。



图 1 智能救生圈

从智能救生圈的整体设计来看,可以将其看作是一条微型无人船,因此可以采用船舶领域的相关方法对其进行研

究。从救生圈的作业模式来看,在靠近救援目标和返回母船的过程都要求救生圈拥有较好的快速性,使得落水者能够尽快的转移到安全环境中对其进行救治。考虑到智能救生圈快速救援的作业模式和要求,有必要对影响其快速性的静水阻力性能进行研究。

对水面航行器阻力性能的预报方法主要包括利用经验公式、船模试验、系列图谱等。近年来随着计算机技术的发展,CFD 方法由于其经济性好,计算精度高,能够有效缩短产品设计周期,广泛运用于流动、传热、化学反应等领域^[1]。文献[2-8]利用 CFD 软件对船舶的阻力性能进行了预报,均验证了 CFD 方法的有效性。本文利用 CFD 软件 STAR-CCM+ 对采用 U 型设计的智能救生圈进行阻力性能计算,分析了不同速度下的阻力、姿态和流场变化规律,可为智能救生圈的外形和动力设计提供一定参考。

1 数值计算方法

1.1 计算模型

常规的救生圈是圆环型结构,作业时,由施救人员将救生圈抛向落水点,考虑到作业环境的风浪影响,救生圈很难精准的投放在落水者附近,难以实施救援。智能救生圈的最大特点在于自带动力系统,为了便于螺旋桨和电池的安装,需要在环形结构的基础上,进行一定的变形,将封闭的环形结构改型为开放式的 U 型结构。

该结构可分为 3 部分:一是救生圈两侧的圆柱型结构,内部分别用于安装螺旋桨,和锂电池,类比于三体船可称为侧体;二是救生圈前部用于连接 2 个侧体的连接部分,可称为主体,内部可安装控制电路等设备;三是附着在救生圈上的一些扶手之类的小结构。施救过程中,落水人员抓住住两侧的扶手,身体位于救生圈的 2 个侧体之间。

忽略扶手等小部件,利用建模软件 Rhino 对前文所示的 U 型智能救生圈进行建模如图 2 所示。坐标原点设置于救生圈尾部吃水处。该模型的技术参数如表 1。

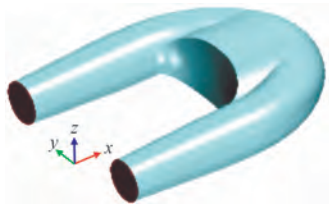


图 2 救生圈模型示意图

表 1 模型技术参数

参数	数值	参数	数值
长 L/m	1	排水体积 ∇/m^3	8.02×10^{-3}
宽 B/m	0.8	重心纵向位置/ m	0.55
高 D/m	0.26	初始纵倾角/ $(^\circ)$	-2.3

该救生圈在非载人工况的速度最高可达到 7m/s。考虑到救生圈的排水量较小,而速度又比较高,不同速度下的静水直航性能必然有很大区别。按照船舶的航态划分规则,以体积傅汝德数将水面船划分为三种航态:排水航行状态、过渡状态和滑行状态^[5]。具体的计算方法如下面公式所示。

$$Fr_{\nabla} = V / \sqrt{g \nabla^{1/3}} \tag{1}$$

式中: V 为模型航速(m/s); g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; ∇ 为静止时排水体积(m^3)。

经计算,救生圈的最大体积傅汝德数为 5.00,此时,航行器吃水变化很大,且会被托向水面“滑行”前进,静浮力很小,流体动力提供了大部分的升力支撑艇重,并且,航行器的阻力特性与姿态的关系十分密切。

1.2 控制方程

不可压缩粘性流体的控制方程包括连续性方程和 RANSE 方程,具体形式如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \tag{3}$$

式中: u_i 为流体平均速度分量; p 为平均压力; ρ 为流体质量密度; μ 为流体动力粘性系数。

1.3 计算域设置及网格划分

文献[10-15]对于中高速船的计算方法都有较详细的论述,并通过与模型试验的对比验证了方法的有效性,阻力预报误差最大不超过 10%,满足工程精度要求,结合前文对于救生圈的直航性能的基本判断,可用于救生圈的阻力性能研究。

由于模型关于中纵剖面对称,为减少计算量采用一半模型开展计算。计算域大小取 $6L \times 2L \times 3L$;其中入口距离艏部 1.5 倍船长,边界条件设置为速度入口;出口距离艉部 3.5 倍船长,边界条件设置为压力出口;计算域的上下边界分别距水准线 1 和 2 倍船长,边界条件设置为速度入口;左右边界设置为对称面;救生圈表面设置为无滑移壁面。具体划分情况如图 3。

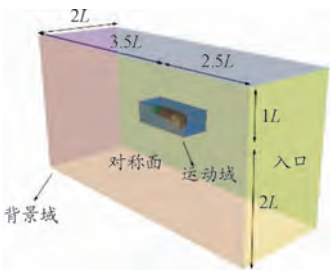


图 3 计算域设置示意图

采用有限体积法离散控制方程,湍流模式选用 SST $k-\varepsilon$ 模型,利用 VOF 方法捕捉自由液面。计算过程中释放救生圈 z 轴的平动和 y 轴的转动。考虑到不同速度下救生圈的姿

态变化较大,采用重叠网格方法可以有效避免自由液面加密网格偏移造成的液面发散。

利用切割体网格对计算域进行离散,网格划分如图 4 所示。对模型附近和自由液面的网格尺寸进行了细化,另外还要保证运动域与背景域重叠部分网格尺寸的一致性。船体表面网格划分取模型长度的 8%,采用棱柱层网格模拟边界层,使得壁面 y^+ 值在 30 ~ 300,网格量为 120w,为加快计算速度,采用分段减小时间步长的模式开展计算,最小时间步长取 0.005 s。

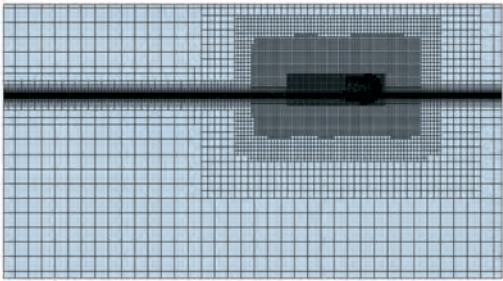


图 4 网格划分示意图

2 计算结果及分析

速度为 1 ~ 7 m/s 的姿态和阻力计算结果如表 2 所示,此处以救生圈发生艏倾为正值。

表 2 姿态及阻力计算结果

速度/(m · s ⁻¹)	阻力值/N	纵倾角/(°)	升沉/mm
1	4.3	-0.67	-6.4
2	29.0	3.55	-15.5
3	14.3	4.34	24.5
4	17.4	4.58	34.5
5	22.0	4.60	39.5
6	26.6	4.36	41.5
7	30.6	4.18	42.0

图 5 给出了阻力随速度的变化曲线,从计算结果可以看出,在不同的速度下,U 型救生圈的阻力呈现出一定的变化规律:随着速度的增高,阻力先急剧增大后减小,然后又逐渐增大;在速度为 2 m/s 下阻力出现了一个峰值,达到了 29.0 N,并且远大于相邻其他航速下的阻力,在速度 3 m/s 时阻力下降,随着速度的继续增加,阻力又以一个较快的幅度继续增加,速度为 7 m/s 时,阻力最高,达到 30.6 N。从上述分析可以看出救生圈若要达到较高的速度进行搜救就必须需要有足够的动力跨过 2 m/s 时出现的阻力峰值,另外在实际作业中,要尽量避开这一速度范围,提高效率。

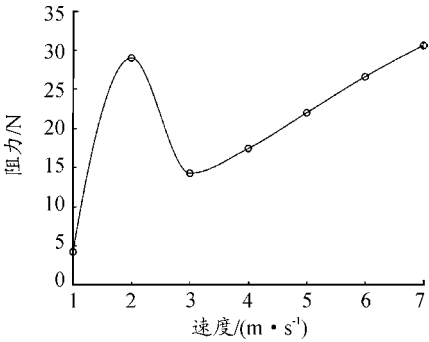
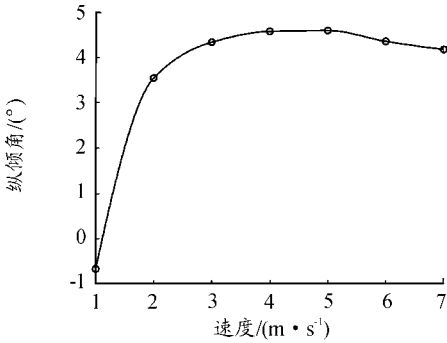


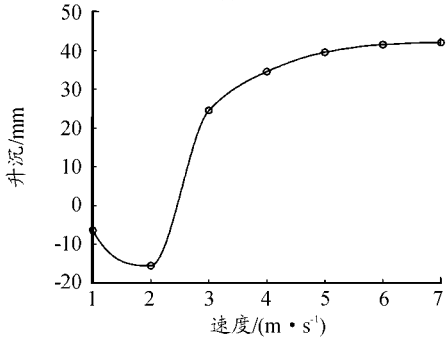
图 5 阻力 - 速度曲线

阻力的变化规律与救生圈的姿态变化关系密切。图 6 给出了救生圈的姿态变化曲线。在计算的航速范围内,救生圈的姿态发生了较大的变化:当速度为 1 m/s 时,救生圈发生了船倾,同时重心下沉;速度为 2 m/s 时,船倾变成艏倾,重心继续下沉;3 m/s 艏倾继续增加,但重心开始上升;随着速度的继续增大,艏倾也变大但变化幅度较小,速度达到 6 m/s、7 m/s,艏倾值又缓慢变小,重心的抬升则继续增加,变化幅度越来越小。整个阶段的艏倾绝对值最大达到 6.9°,升沉最大值达到 42 mm。

在速度较低的情况下,水动升力提供的支撑力较小,重心的大幅下沉会显著增加摩擦阻力,因此在速度为 2 m/s 时的阻力出现峰值,随着速度的增加,水动升力增大,逐渐使得救生圈的重心上移,湿表面积的减少使得救生圈的阻力下降。另外,由于纵倾角的存在,水动升力的纵向分量也贡献了一部分阻力增量。



(a) 纵倾角



(b) 升沉

图 6 姿态随速度变化曲线

图7为自由液面图,图8为救生圈底部的压力云图。不同的速度下流场兴波和压力云图呈现出完全不同的形式特点,速度为2 m/s时的流场为典型的排水航行状态下的流场形式,可以看到明显的凯尔文波系,在救生圈的艏部能看到速度驻点处存在明显的水丘,使得此处的压力非常大,另外在艏部靠后出现了一部分面积不小的负压力区域。速度为5 m/s时的流场为典型的滑行状态下的流场形式,整个波系变得狭长,救生圈的艏部已经基本抬出水面,整体湿表面积很小,在艏部有少量的水流漫上救生圈,模型底部能看到明显的驻点线高压区,正是由于这一高压区的存在使得救生圈发生较大的艏倾。

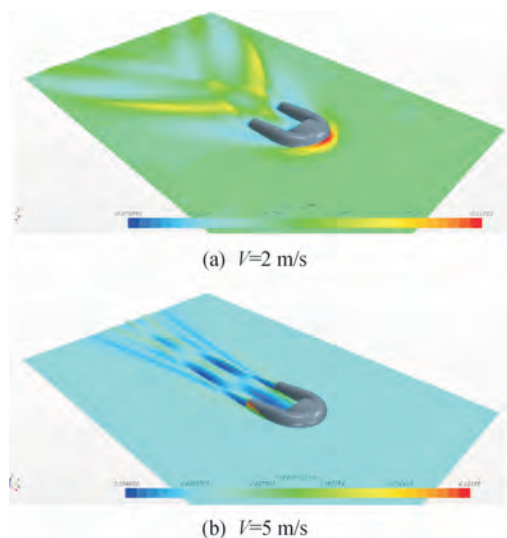


图7 自由液面图

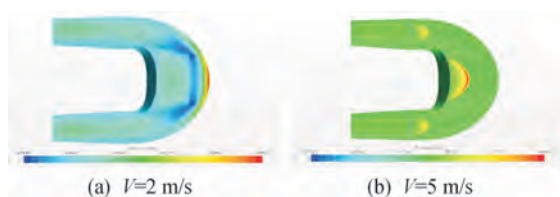


图8 救生圈底部的压力云图

从上文中的分析可以看出,救生圈的阻力性能与滑行艇类似,不同速度下的姿态发生较大变化,阻力在起滑之后增幅下降。对于影响滑行艇阻力性能的一些其他因素,比如重心纵向位置、排水量,两侧体宽度等在设计中均需要进一步考虑。滑行艇的阻力性能优化的一些方法,比如采用折角型底面,增加对水动升力的利用率,通过添加尾板控制纵倾角进一步改善阻力性能等措施,对智能救生圈而言也可以借鉴进行设计。

在恶劣的风浪环境中,船舶的耐波性能好坏对船舶的正常行驶起着关键作用,对救生圈这种“微型船舶”是否能够克服波浪的干扰顺利到达落水者附近,以及救生圈搭载落水者返程过程中,落水者的重量、阻力和在救生圈上着力点的位置等因素对救生圈航行性能的影响等问题,需要进一步的研究。

3 结论

利用 CFD 方法对 U 型智能救生圈的阻力性能进行了研究,得到的一定速度下的阻力和姿态变化规律,可为智能救生圈的总体设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 郑小龙,黄胜,尚秀敏. 基于 CFD 的船舶阻力预报方法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2014,28(2).
- [3] 熊一超,袁成清. 基于 Fluent 的船体界面阻力分析[J]. 舰船科学技术,2016,38(5).
- [4] 张恒,詹成胜. 基于 CFD 的船舶阻力尺度效应研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(2).
- [5] 李志君,高霄鹏,霍聪. 高速内倾穿浪无人三体船净水阻力性能优化[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(5).
- [6] SON C H, SAHOO P K. CFD simulation of resistance of high-speed trimaran hull forms [C]//Proceedings of 13th International Conference on Fast Sea Transportation. Washington DC:FAST,2016:1-8.
- [7] LOTFI P, ASHRAFIZAADEH M, EEFAHAN R. Numerical investigation of a stepped planning hull in calm water[J]. Ocean Engineering,2015,84:103-110.
- [8] 邓锐,黄德波,于雷,等. 影响双体船阻力计算的流场 CFD 因素探讨[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011(2).
- [9] 董祖舜. 快艇动力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1985.
- [10] 周广礼,欧勇鹏. 中高速船航行姿态及阻力数值预报方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(4).
- [11] 王硕,苏玉民,杜欣. 滑行艇静水直航及波浪中运动的数值模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(4).
- [12] 孙华伟,马佳伟,朱江波. 影响滑行艇阻力数值计算的网格因素研究[J]. 中国造船,2015,56(2).
- [13] 易文彬,王永生,刘承江,等. CFD 在高速滑行表面性能预报中的应用[J]. 海军工程大学学报,2017,29(3).
- [14] 孙志远,邹劲,谈果戈,等. 基于 STAR-CCM+ 的滑行艇阻力研究[J]. 船舶,2017,28(3).
- [15] 邵文勃,马山,段文洋,等. 基于 CFD 技术的滑行艇静水阻力计算[J]. 船舶工程,2019(9).