

文章编号: 1001- 2486(2009) 01- 0114- 06

# 某两栖车绕流场数值模拟研究及外形优化分析\*

高富东, 姜乐华, 潘存云

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 运用多块混合网格, 采用 RNG 湍流模型、流体体积法 (VOF) 和 PISO 算法对某型两栖侦察车带自由表面的粘性绕流场进行了数值模拟研究, 数值方法采用相关试验数据进行了验证, 误差在 9% 以内。针对模拟结果显示的影响其水动力特性的主要结构部位和外形参数进行了优化, 并计算分析了轮穴、车体切角、车轮状态以及车首导流板对两栖车航行性能的影响。计算结果表明, 改进后的车体绕流场特性得到了较大的改善, 航速 10km/h 时减阻效果可达原车总阻力的 69.2%, 有效地提高了某型两栖侦察车的航行性能。

**关键词:** 两栖车; 自由表面; 数值模拟; 外形优化

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A

## Numerical Study of Flow Field around an Amphibious Vehicle and Its Improvement in Shape

GAO Fu-dong, JIANG Le-hua, PAN Cun-yun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Numerical simulation of an amphibious vehicle's ambient flow field which accounts free surface effect is made by using RNG-turbulence model, volume of fluid (VOF) model and Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO) method based on multi-block hybrid meshes. The computed total resistance less than 9% difference from corresponding experimental data, the agreement is good. Then primary research has been done on optimizing the geometrical characteristics of the amphibious vehicle which influence the hydrodynamic characteristics, including the cavity of the wheel, cut angle in the bodywork, the state of the wheel and the leading board in foreside. The computational results show that the hydrodynamic characteristics of the vehicle which has been improved is better than that of the original, which diminishes the total resistance 69.2% at the speed of 10km/h.

**Key words:** amphibious vehicle; free surface; numerical simulation; improvement for shape

研究两栖车辆的水上行驶性能, 关键在于准确把握其绕流场的流态和水上航行阻力。由于陆上性能的要求, 其车体常设计为长宽比很小的肥线型体, 且其裸露在水中的凹凸不平的附件较多, 使整个车体呈现为极不良的非流线型体。这些形状特征使其周围粘性绕流场产生大量的流动分离和兴波, 阻力系数的量级远超过一般船舶。目前应用的车形设计与分析方法, 基本上是参照船舶设计中的拖模试验方法。该方法虽然可靠性强, 但成本高、周期长。随着计算机硬件与计算流体力学 (CFD) 的迅猛发展, 使得采用数值计算方法设计两栖车辆外形成为可能。

近年来, 一些文献<sup>[1-4]</sup>采用数值计算方法对两栖车辆的绕流场进行了数值模拟研究。在这些计算中均对计算模型作了简化, 忽略了空气的影响, 假设流体在自由表面上是不可穿越的, 即不考虑车辆的兴波和喷溅影响。这种假设会使总阻力计算值随着航速的提高, 误差不断增大。本文对某型两栖侦察车计及自由表面的绕流场特性进行数值计算与分析, 提出了该车外形改进方案并对比分析了改进前后的水动力特性, 对某型两栖车辆外形优化方法进行了深入探讨。

\* 收稿日期: 2008- 03- 25

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 高富东 (1982-), 男, 博士生。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

两栖车辆的自由液面绕流是两相流动问题, 自由液面即为水和空气的交界面。水被认为是不可压缩牛顿流体, 此外, 由于速度比较低, 空气也可作为不可压缩流体处理。

引入 VOF 模型<sup>[5]</sup>, 建立气液两相流的守恒型连续性方程和流场的动量方程, 其中水或空气在每个控制单元中的体积分之和应为 1。湍流计算采用 RNG  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型<sup>[6]</sup>, 建立湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  方程组, 模型中的系数根据 RNG 理论确定。这样, 组成了一个封闭的非线性偏微分方程组<sup>[7]</sup>。

计算区域的边界包括: 入口、出口、壁面 and 对称面, 如图 1 所示, 具体设置如下( $L$  为车体长度):

(1) 质量入口: 为避免入口边界对车体绕流场的兴波造成干扰, 在距车体首部  $0.6L$  处, 根据车体模型运动速度和自由液面的位置给定水和空气的入口质量流量, 同时需要给定  $k$  和  $\varepsilon$  的入口条件。

(2) 压力出口: 出口边界距离车体足够远, 以使流动充分发展, 在距车体尾部  $1.4L$  处, 赋予静压强分布。

(3) 壁面: 考虑粘性影响, 车体表面定义为不可滑移壁面。忽略远场壁面对车体绕流场的影响, 使用自由滑移边界条件。其中上边界取自自由液面以上  $0.3L$  处, 下边界取自自由液面以下  $1.0L$  处, 侧边界取在距车体侧面  $0.8L$  处。

(4) 对称面: 由于求解的问题在物理上具有对称性, 将车体模型舢纵剖面的延展面定义为对称边界, 可使求解规模缩减一半。

为了捕捉自由液面, 加速模拟的收敛速度, 初始状态按平衡时的自由液面位置将计算域划分为空气和水两部分, 并赋予均匀流速。

### 1.2 数值计算方法

为便于对各控制方程进行分析, 并用同一源程序对其进行求解, 将控制方程表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中,  $\Gamma$  为扩散系数,  $S$  为广义源项;  $\phi$  为广义变量, 对应连续性方程、N-S 方程和湍流模型中的  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $k$ 、 $\varepsilon$ 。使用有限体积法离散通用控制方程(1), 对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式。用非定常分步隐式格式求解离散的代数方程。离散得到的差分方程组具有高度的非线性和耦合性, 采用 PISO 算法求解。计算时间步长取  $0.001\text{s}$ , 每个时间步长内的迭代次数为 20, 收敛判据设定为 0.001。

## 2 计算模型及网格划分

在前处理软件导入某型两栖侦察车车体和附属部件的 CAD 模型后, 经过布尔运算, 可得到计算分析用的物理模型。考虑到计算成本, 对该型两栖车底部、车头灯、门把手以及窗户等部位进行了必要的简化, 如图 2 所示。模型主尺度见表 1, 缩尺比为 1:10。

表 1 模型主尺度

Tab. 1 Principal particulars of the model

模型总长	模型宽	模型高	模型吃水	首端底切角	首端侧切角	尾端底切角
$L/\text{m}$	$B/\text{m}$	$H/\text{m}$	$T/\text{m}$	$\theta_H/(\text{°})$	$\beta_B/(\text{°})$	$\theta_J/(\text{°})$
0.51	0.18	0.1875	0.0825	40	12	45

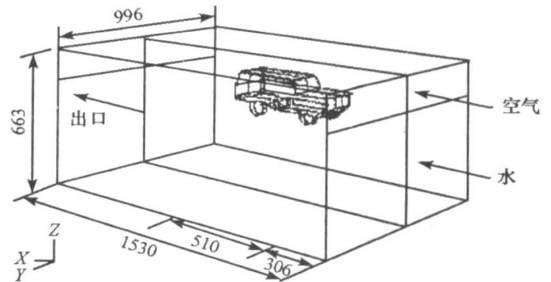


图 1 计算区域

Fig. 1 Computational domain

车体绕流场计算域的局部网格如图3所示。网格生成的难点主要在于车体外形复杂、求解域大和壁面边界层计算。采取分区网格生成方案,将求解域分成内外两区,内区采用非结构网格,车体表面采用半结构化网格(三棱柱组成的边界层),外区采用分块结构网格,用金字塔网格实现内外区网格的对接。采用尺寸函数控制网格的疏密布置,各子区域的网格过渡均匀。由于采用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型结合非平衡壁面函数的方式模拟流场,要求近壁面网格的  $y^+$  为30~60,通过比较不同的  $y^+$  后,选取  $y^+ = 40^{[8]}$ 。

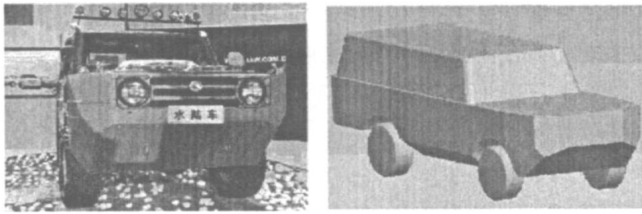


图2 某型两栖侦察车及几何模型

Fig. 2 An amphibious vehicle and geometrical model

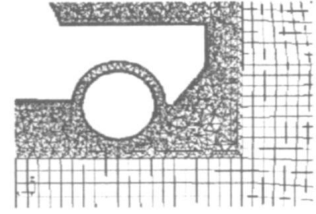


图3 局部网格拓扑分布

Fig. 3 Mesh topology distribution

### 3 某型两栖侦察车外形优化与分析

#### 3.1 原车模型绕流场数值模拟与分析

通过数值模拟得到了某型两栖侦察车绕流场的特性参数。阻力计算结果见表2(模型航速由流动相似原理的弗劳德准则得出,实车总阻力由模型-实车阻力弗劳德换算算法求得<sup>[9]</sup>),可提取任一区域进行压力、速度等分析。图4为该车在航速10km/h时车轮中心处的局部速度矢量图。由于车轮及轮穴形状的急剧变化而引起的突然去流,在车轮处发生大量流动分离现象并产生大尺度的旋涡,涡区的出现不仅改变了外部流线,且降低了该处的水流速度,使得该区域形成低压区,如图5静压分布(半吃水深处)所示,从而大幅度增加车体航行时的压差阻力。

表2 模型阻力计算结果

Tab. 2 Resistance calculation of the model

实车航速	模型航速	模型压差阻力	模型摩擦阻力	模型总阻力	实车总阻力
$V/(km/h)$	$\dot{V}/(m/s)$	$F_p/N$	$F_f/N$	$F/N$	$F_s/N$
8	0.703	1.528	0.107	1.635	1635
10	0.878	2.727	0.178	2.905	2905

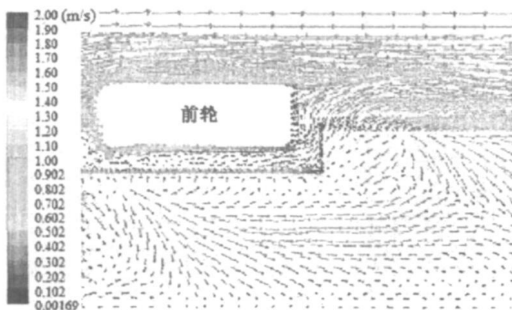


图4 车轮处速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector field of the wheel

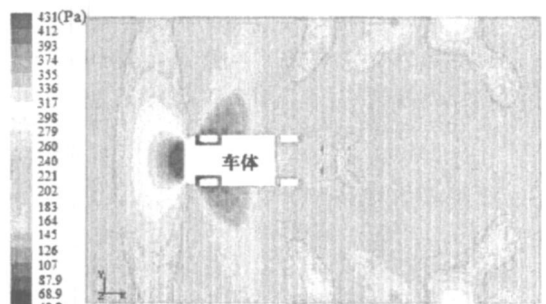


图5 静压分布云图

Fig. 5 Static pressure contour

图6显示了该车在航速10km/h时兴波轮廓的计算结果。由图可见,车体模型首部有一个较大的波峰(即为孤立波),尾部呈现一波谷,此现象具有与船舶类似的特点;由于前车轮两侧压强较低,在该处形成较大的波谷,其总体自由液面的波形刻画与相应试验符合较好。另外,由于车首为方形,造成水线进水角较大,在车体首部还有大量的被车体掀起后很快就破碎的破波。兴波阻力的大小与车体的形状、航

速有关, 在保证车辆性能的前提下, 对车体外形进行线型优化, 减小吃水可以有效减小兴波阻力。

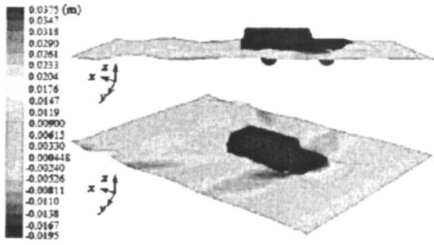


图 6 计算与试验得到的自由表面波形对比

Fig. 6 Free surface wave pattern comparison of the calculation and the experiment

通过上述流场特性的分析, 可知车轮和车首形状是影响两栖车辆水动力性能的主要因素。

### 3.2 模型改进及数值分析

#### 3.2.1 轮穴的影响

轮穴在两栖车辆的造涡与兴波中颇为重要。为了减轻其造涡与兴波, 对该车轮穴加装侧盖板和底板, 如图 7(模型 iv)。航行中轮穴的封闭缓解了流动分离现象, 从而减小一定的航行阻力。在航速 8km/h 时, 模型 iv 对应实车总阻力为 1473N; 航速 10km/h 时, 总阻力为 2741N, 分别比原车减少 9.9% 和 5.6%。

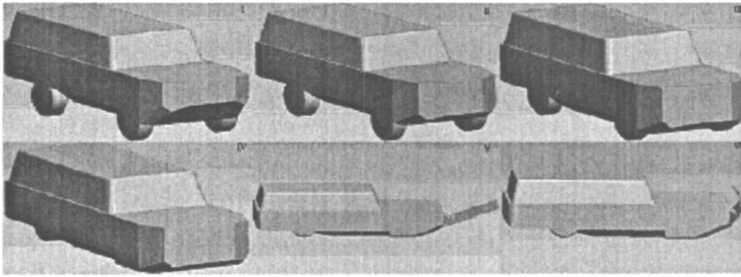


图 7 车体外形优化方案

Fig. 7 The design scheme of the shape

#### 3.2.2 首、尾端切角的影响

车体的首、尾端切角对于改善两栖车辆的绕流场特性非常重要。首端切角使整个首部获得一个小而均匀分布的压力, 减少流动分离和兴波; 尾端切角有助于改善流动, 降低尾部阻力。为检验本文数值方法的正确性, 采用与文献[10]中试验模型相同的尺度作为分析首、尾切角对阻力影响的计算模型, 将数值模拟结果与试验数据进行对比分析, 总阻力计算值略小于试验结果, 误差在 9% 以内, 较好地验证了本文数值方法的正确性<sup>[11]</sup>。

将车体模型首尾端切角  $\theta_b$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$  分别优化为  $23^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $16^\circ$ , 如图 7(模型 ㉔), 改进后实车总阻力在航速 8km/h、10km/h 时分别为 1399N、2593N, 比模型 iv 分别减少了 5% 和 5.4%。在航速 12km/h 时, 实车总阻力为 4512N, 比模型 iv(此航速下实车总阻力为 4605N) 仅减少了 2%, 减阻幅度的降低是由于在最高允许航速 12km/h 时, 模型 iv 车首上水, 如图 8 所示。因此, 航行中为避免埋首现象的发生, 必要时应在车首上部设置防浪板。

#### 3.2.3 车轮收、放状态的影响

由于某型两栖侦察车采用固定式悬架, 水上航行时车轮无法收放, 使车轮处产生严重的流动分离现象, 降低了其水上性能。若采用近年来发展成熟的油气弹簧悬架, 使车轮实现可收放, 航行中与轮穴互相弥合, 这样既减小了正面阻水面积, 又可缓解造涡和兴波, 从而大大减小航行阻力; 同时, 油气弹簧悬架的运用还可以改善其陆上行驶的平顺性。

在模型 ㉔的基础上, 车轮半收起(模型 ㉕)和全部收起(模型 ㉖), 航速 10km/h 时, 实车总阻力分别为

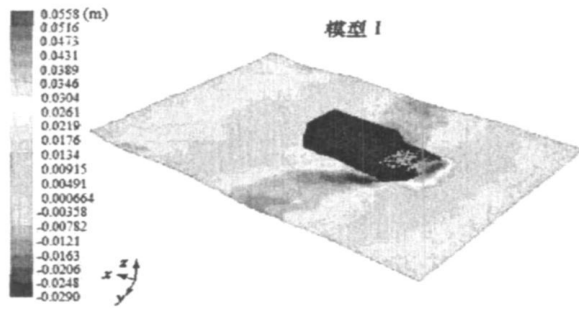


图8 航速 12km/h 时的波形图

Fig. 8 The wave pattern at 12km/h

1815N、1337N, 相对于车轮自由下垂时(即模型 ㉔)分别减阻 30%、48.4%; 航速 12km/h 时, 总阻力计算值分别为 3273N、2886N, 相对于车轮自由下垂时分别减阻 27.5%、36%, 减阻效果非常明显。

### 3.2.4 车首导流板的影响

在车体首端底切角边缘加设折叠式导流板, 航行时使之具有与首端底切角相同的倾斜角度, 如图 7 (模型 ㉕) 所示; 陆上行驶时折叠置于车首, 收放装置采用液压机构实现(模型 v)。为使陆上行驶时导流板紧贴于车体, 可在车首设置放置液压柱的凹槽。由于在绕流场计算中, 液压机构对流场不产生影响, 所以在计算模型中省略该机构, 以便于网格模型的建立。

导流板的设置不仅可以减低车体前部的正面压阻力, 容易压住波浪, 减低壅水高度, 而且随航速的增加还会产生一定的动升力, 使首部有一个向上抬起的趋势, 缓和埋首现象。加设导流板的模型 ㉕在车轮全收状态下, 航速 10km/h 时实车总阻力为 896N, 航速 12km/h 时总阻力为 1240N, 与模型 ㉔相比分别减阻 33% 和 57%。总体看来, 最终改进模型 ㉕与原车模型相比, 在航速 10km/h 时, 实车总阻力减少 69.2%, 此减阻效果可使该车在相同功率下的水上航速显著提高。

图 9 为各车体模型在实车航速 10km/h 时阻力系数  $C_d$  的收敛曲线。计算追踪了 9.3s, 最后曲线微小的反复振荡是由于流场不断产生的耗散涡被流体粘性耗散掉的过程, 最终阻力值是曲线相对稳定阶段所对应的数值平均值。由图可见, 整个外形优化方案减阻效果比较明显。

车形经上述优化后, 流场特性得到明显改善, 流动分离现象大为减少。从图 10 中模型 ㉕与原车模型的总压计算值(对称面上半吃水深处)可见, 模型 ㉕前后总压差明显减小, 降低了航行时的压差阻力。

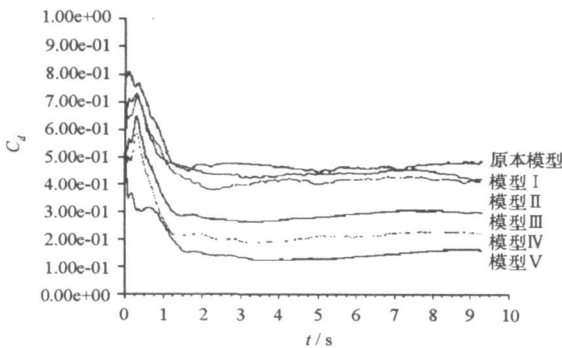


图9 阻力系数  $C_d$  的收敛曲线

Fig. 9 Resistance coefficient convergence history

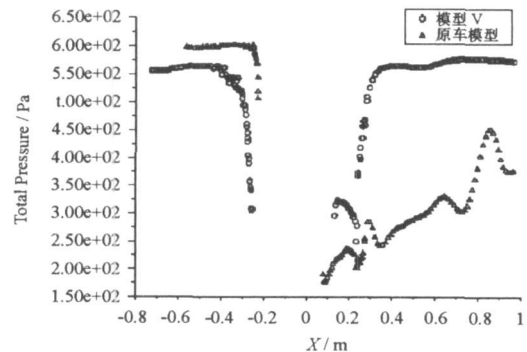


图10 总压计算值

Fig. 10 The calculation of total pressure

图 11(a) 为模型 ㉕在航速 10km/h 下的三维兴波轮廓计算结果, 与图 6 相比, 可见其兴波幅值明显减小, 从而降低车体航行中的兴波阻力。图 11(b) 为其在最高允许航速 12km/h 下的兴波轮廓计算结果, 由于导流板的加设, 其车首波峰幅值减小, 使得车首不再上水, 改善了其水动力性能, 减小了航行阻力。

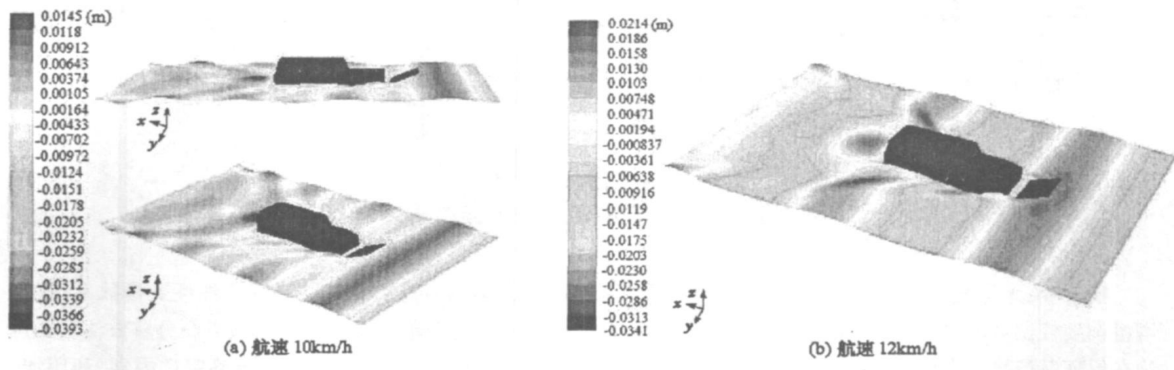


图 11 模型 (b) 的自由表面波形图

Fig. 11 The free surface wave pattern of model (b)

## 4 结论

运用计算流体动力学软件 Fluent 对某型两栖侦察车模型的粘性绕流场进行了三维瞬态数值模拟, 获得了该车绕流场的流动特性, 如速度分布、压力分布, 兴波轮廓和阻力系数等。计算中考虑了兴波的影响, 捕捉到自由液面的波形, 与实际情况相符。由于计及了兴波阻力, 保证了车体航行时总阻力的计算精度, 解决了以往由于忽略兴波特性导致数值模拟结果随航速提高误差不断增大的问题。

在流场特性的基础上, 分析了影响车体水动力性能的主要因素, 并据此对该车外形优化方案进行了探索研究。结果表明, 车体改进后的绕流场特性得到了较大改善, 有效地降低了航行阻力, 为今后新型两栖车辆的研制提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 韩占忠, 王国玉, 闫为革. 两栖车辆航行粘性阻力数值分析[J]. 车辆与动力技术, 2003, 90(2): 6-10.
- [2] 李莉, 毕小平, 贾小平. 履带式两栖车辆航驶阻力的数值模拟[J]. 船舶, 2003, 8(4): 47-50.
- [3] 徐国英, 王涛, 郭齐胜. 基于 CFD(计算流体动力学)的两栖车绕流场模拟[J]. 船舶, 2005, 4(2): 20-23.
- [4] 陈长秋. WZ501 步兵战车水上性能改进研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [5] Versteeg H K, Malasekerkera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method[M]. Wiley, New York, 1995.
- [6] Speziale C G, Thangam S. Analysis of an RNG Based Turbulence Model for Separated Flows[J]. Int. J. Engng. Sci., 1992, 30(10): 1379-1388.
- [7] 刘堂红, 田红旗, 王承尧. 不同磁浮列车外形的气动性能比较[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(6): 94-98.
- [8] Filipiak M. Mesh Generation Technology Watch Report[R]. 1996.
- [9] 吕懋章. 水陆两用车模型阻力换算及结果的表述[J]. 工兵装备研究, 1986, 5(2): 9-18.
- [10] 吕懋章. 水陆两用车的水动力性能研究[J]. 工兵装备研究, 1986, 5(1): 1-16.
- [11] 高富东, 姜乐华. 两栖工程车航行阻力数值分析[J]. 工兵装备研究, 2007, 26(6): 5-9.