

## 分段履带式水陆两栖车减阻增速试验及数值仿真\*

孙承亮<sup>1</sup>, 徐小军<sup>1</sup>, 唐源江<sup>1</sup>, 郝军<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 重庆长安工业(集团)有限责任公司, 重庆 401120)

**摘要:**为了研究分段履带式水陆两栖车的水动力性能,实现减阻增速,将尾翼板安装到水陆两栖车的方艏部,并开展了水池试验和仿真研究,两者的研究结果具有较好的一致性。通过仿真研究了车体的纵向重心位置、尾翼板的长度和角度对水陆两栖车阻力性能的影响,并分析了阻力成分的变化趋势。研究结果表明:车体纵向重心位置在540~560 mm时,车体所受水阻力最小;在速度为3~5 m/s时,长度为156 mm,与水平面夹角为10°的尾翼板减阻效果最明显,相比于原裸车体的阻力,减阻率达到34.3%;加装尾翼板可以增加车体的尾部中空区长度,相当于增加了水线长,增大了长宽比。该研究表明:适当调节重心位置和优化尾翼板参数,可以有效实现水陆两栖车的减阻增速。

**关键词:**水陆两栖车;尾翼板;减阻增速;拖曳水池试验;数值仿真

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)05-201-08

## Experimental and numerical simulation of reducing resistance and increasing speed for a segmented-track amphibious vehicle

SUN Chengliang<sup>1</sup>, XU Xiaojun<sup>1</sup>, TANG Yuanjiang<sup>1</sup>, HAO Jun<sup>2</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Chongqing Changan Industry (Group) Co., LTD, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** In order to study the hydrodynamic performance of a segmented-track amphibious vehicle, and realize resistance reduction to increase speed, stern flaps were applied to the transom stern. Model towed tests and numerical simulations were carried out and both the results agreed well with each other. The longitudinal position of the center of gravity, the length and angle of the stern flap were studied and the resistance components were analyzed. Research results show that with the longitudinal position of center of gravity between 540~560 mm, the vehicle suffered least resistance. At the velocity between 3~5 m/s, the stern flap with a length of 156 mm and an included angle of 10° with the horizontal plane has the most obvious drag reduction effect. Compared with the resistance of original naked vehicle body, the resistance reduction rate is 34.3%. The installation of the stern flap can increase the hollow area at the rear of the vehicle, which is equivalent to increasing the length of waterline, thus increasing the length-to-width ratio. This research method shows that the resistance reduction and speed increase of amphibious vehicle can be effectively realized by properly adjusting the center of gravity and optimizing the parameters of wave plate.

**Keywords:** segmented-track amphibious vehicle; stern flap; reduce resistance and increase speed; model towed tests; numerical simulation

水陆两栖车是一种既能在陆地上行驶又能在水上航行的特种车辆,传统的水陆两栖车通常采用轮式或履带式陆上行驶方式,并依靠螺旋桨或喷水推进实现水上航行,在登陆和跨海作战中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。考虑到水陆两栖车的陆上行驶性能和通过性,水陆两栖车的外形不会像船舶一样具有较好的线型,大多为方形的钝体结构,其流线型较差,水上航行阻力较大,是制约水上航速提高的重要因素。

水上快速性是评价水陆两栖车辆战技性能的

重要指标,而减阻增速是提高快速性最有效的途径之一。目前船舶上常用的减阻方法主要是船体线型优化和加装附件。Huang和Yang<sup>[2]</sup>通过定义目标函数和约束条件,构建了代理模型,得到了最优船体线型。而安装附件是在不改变船舶结构的情况下提高船舶阻力性能的一种简单方法,在高速船舶中广泛采用。

尾翼板是一块从艏部安装向后倾斜的平板,在船舶上得到广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。美国海军在进行了大量的试验研究后,将尾翼板应用在28艘驱逐舰

\* 收稿日期:2020-12-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675524)

作者简介:孙承亮(1990—),男,山东泰安人,博士研究生,E-mail:sclly11@163.com;

徐小军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xuxiaojunmail@sina.com

舰上来提高快速性<sup>[5]</sup>。Robin 等<sup>[6]</sup>通过仿真和试验研究,认为安装在驳船上的尾翼板可以将兴波能量降低一半,从而减少对河岸的破坏。Maki 等<sup>[7]</sup>通过模型试验和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)研究了压浪板对阻力和航行姿态(包括纵倾和升沉)的影响,结果表明安装压浪板后兴波阻力减小。Villa 等<sup>[8]</sup>通过数值仿真分别研究了安装尾翼板和截流板的滑艇水动力性能,并建立了尾翼板角度和截流板等效高度之间的关系。Tsai 等<sup>[9]</sup>采用试验方法研究了尾翼板及其与其他附件的组合对滑艇阻力性能的影响。结果表明,在体积弗劳德数大于 3 时,尾翼板比其他附件具有更好的减阻效果。Parsons 等<sup>[10]</sup>建立了舰船尾翼的设计模型,可以对尾翼的初步设计参数进行多准则优化。剧冬梅等<sup>[11-12]</sup>研究了纵倾角对轮式水陆两栖车的阻力特性影响,并设计可收放悬架来减小水上航行阻力,研究结果表明:适当控制水陆两栖车的纵倾角,并对可收放悬架进行参数优化,可以减小阻力。彭锬等<sup>[13-14]</sup>基于代理模型展开了水陆两栖车外形减阻优化方法研究,并得到了车体最优长宽比、最优航行倾角等水陆两栖车参数。赵彬等<sup>[15]</sup>采用混合耦合算法和重叠网格技术研究了水陆两栖车的航态变化,仿真结果与试验具有较好的一致性,随着车辆航速的增加,动升力所占比重增大,浮力减小。崔金一等<sup>[16-17]</sup>对水陆两栖车的结构参数进行了优化,并设计了可收放悬架机构,进行了水上陆上性能仿真,取得了较理想的试验结果。王少新等<sup>[18-19]</sup>设计了双车厢的水陆两栖车,通过数值仿真和重叠网格技术研究了两车厢各自的水动力特性和球铰链接的影响,并且还研究了不同航速下防浪板的受力特性。

综上所述,近年来国内外针对尾翼板和水陆两栖车的水动力性能展开了大量研究,并且已有部分学者将尾翼板应用在两栖车上的减阻增速上。以往的研究主要集中在尾翼板引起的阻力变化上,对尾翼板长度或安装角度的研究较少。此外,很少有研究从阻力成分和尾流场的角度解释减阻的机理。针对这些问题,本研究以某分段履带式水陆两栖车为研究目标,利用水池拖曳试验和数值仿真相结合的方法,首先通过适当调节重心的纵向位置来减小航行阻力,然后研究了尾翼板的长度和安装角度对车辆阻力的影响。通过分析阻力成分和尾流的变化趋势,解释了减阻机理。

## 1 几何模型及参数

水陆两栖车的几何模型如图 1 所示。当两栖车在水上航行时,为减小水阻力会将分段式履带收起,为了方便计算,这里将其简化为等体积的柱形。水陆两栖车的主要参数见表 1。

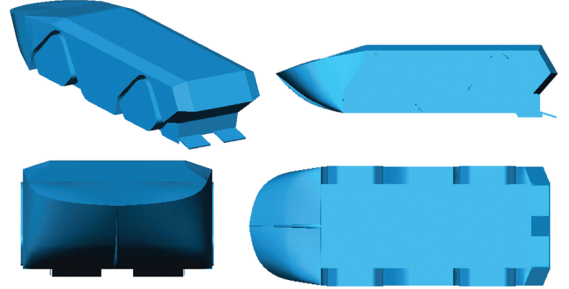


图 1 分段履带式水陆两栖车简化模型

Fig. 1 Simplified geometric model of the segmented-track amphibious vehicle

表 1 水陆两栖车主尺度参数

Tab. 1 Main parameters of the amphibious vehicle

物理量	符号	值
缩尺比	$\lambda$	2.500
垂线间长/m	$L_{pp}$	2.320
水线长/m	$L_{wl}$	2.320
型宽/m	$B$	0.840
型深/m	$T$	0.480
吃水/m	$D$	0.110
湿面积/m <sup>2</sup>	$S$	2.250
排水量/m <sup>3</sup>	$\nabla$	0.192

边界层厚度对尾翼板产生的升力有很大的影响。Day 和 Schlichting 等<sup>[20-21]</sup>提出了一种方法,将船体简化为相同长度的平板来计算边界层厚度:

$$\delta(x) = 0.37 \times Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (1)$$

$$Re_x = \frac{\rho V_0 L_{pp}}{\mu} \quad (2)$$

其中, $\delta(x)$ 是边界层厚度, $Re_x$ 是雷诺数, $\rho$ 为 20℃下水的密度, $V_0$ 是车辆的航行速度, $\mu$ 是 20℃下水的运动黏性系数。

## 2 数值计算方法

### 2.1 控制方程

对于不可压缩牛顿流体的运动,需要满足连续性方程及动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_j \quad (4)$$

式中:  $u_i$  和  $u_j$  是速度分量随时间变化的均值 ( $i, j = 1, 2, 3$ );  $x_i, x_j$  为位移分量;  $t$  为时间;  $p$  为压力随时间变化的均值;  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  是雷诺应力项;  $S_j$  为广义源项。

### 2.2 湍流模型及自由液面

目前工程计算中存在多种湍流模型,不同的模型针对的主要问题不同,因此在计算时需要选取合适的湍流模型。剪切应力传输 (shear stress transfer, SST)  $k-\omega$  模型两方程模型在近壁区保留了原始的  $k-\omega$  模型,在远离壁面的地方应用了  $k-\varepsilon$  模型,兼具两者的优势,能够较好地模拟黏性绕流场的细节<sup>[22-23]</sup>,因此这里选择该湍流模型进行计算。

利用流体体积函数 (volume of fluid, VOF) 模型追踪自由液面的变化。该方法将每个控制单元中水 (或空气) 的体积分数表示为  $\alpha_w$  (或  $\alpha_a$ ),对于该体积分数,存在 3 种情况:

- 1)  $\alpha_w = 0$ , 该控制单元中没有水 (只有空气);
- 2)  $\alpha_w = 1$ , 该控制单元中只有水 (没有空气);
- 3)  $0 < \alpha_w < 1$ , 该控制单元中存在自由液面,

它们之间满足下列方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u \cdot \nabla \alpha_w = 0 \\ \alpha_w + \alpha_a = 1 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 边界条件和网格划分

考虑到模型的对称性,取一半进行计算,建立如图 2 所示计算域。计算域大小设置为:入口距离车首  $L$  ( $L$  为垂线间长  $L_{pp}$ ), 出口距离车尾  $3L$ , 中纵剖面距离侧边  $1.5L$ , 高为  $3L$ 。入口、顶部、底部及侧边界设置为速度入口 (速度大小为两栖车的航行速度), 出口为压力出口, 中纵剖面为对称

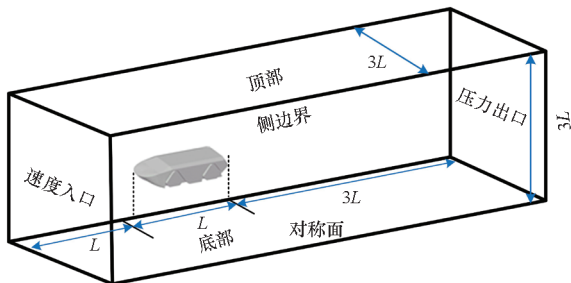
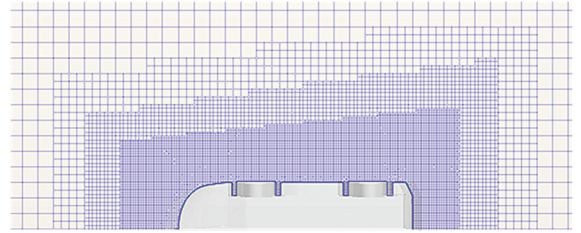


图 2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

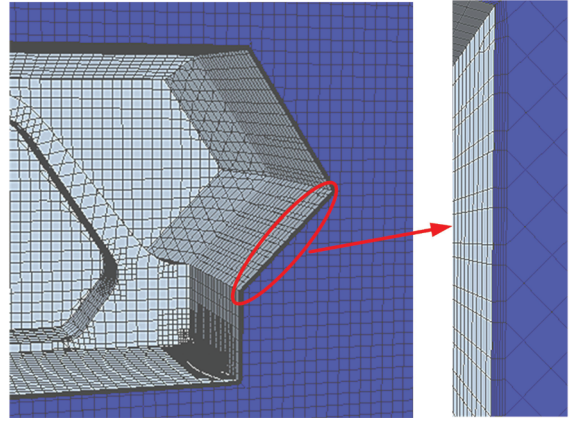
平面,两栖车表面为非滑移壁面。

利用 CFD 商用软件 STAR-CCM+ 13.02.011 进行网格划分,并对开尔文波区、船艏等区域加密,生成高质量的切割体网格和棱柱层网格,边界层厚度通过方程(1)计算得到。网格划分总体效果如图 3 所示。



(a) 开尔文波系

(a) Kevin wave system



(b) 艏部边界层网格

(b) Boundary layer grid of stern

图 3 两栖车网格划分效果

Fig. 3 Effect drawing of amphibious vehicle mesh

为了模拟水陆两栖车的真实运动,需要释放 2 个自由度 (2 degree of freedom, 2DOF): 即纵摇和垂荡,两者的大小分别用纵倾值和升沉值表示。另外 4 个自由度即纵荡、横荡、横摇和首摇需要锁定。为达到上述目标,应用流水-刚体相互作用 (dynamic fluid body interaction, DFBI) 旋转平移模型,将沿  $Z$  轴平移和绕  $Y$  轴旋转分别释放,限制沿  $X$  轴平移、 $Y$  轴平移、绕  $X$  轴旋转和  $Y$  轴旋转。

### 3 水池拖曳试验

按照 1/2.5 的缩尺比制作了水陆两栖车的模型,模型实物图如图 4 所示。模型表面经防水、喷漆处理,符合“CB/Z 244-88 滑艇模型阻力测试方法”中规定的允许误差标准。拖曳试验在某标准化拖曳试验中进行 (见图 5), 该水池长 510 m, 宽 6.5 m, 水深 5 m, 采用数字化直流调速

系统,拖车速度为 0.1 ~ 22.0 m/s,车速稳定精度优于 0.2%。

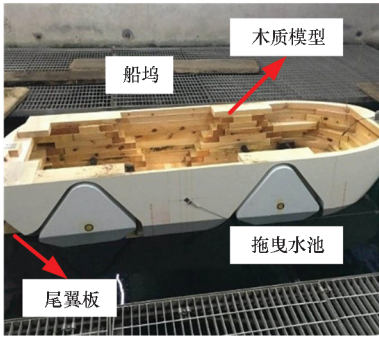


图 4 水陆两栖车缩比模型

Fig. 4 Scaled model of amphibious vehicle



图 5 水陆两栖车拖曳试验

Fig. 5 Model towed test of amphibious vehicle

### 4 结果验证与分析

#### 4.1 网格不确定性验证

在黏性不可压缩流的数值计算中,需要对网格不确定性进行验证,这里选取车速  $V = 2 \text{ m/s}$  的阻力系数计算结果进行验证,阻力系数  $C_t$  的试验值为  $4.742 \times 10^{-2}$ ,设置 4 种不同尺寸的网格,结果如表 2 所示。

表 2 网格不确定性验证

Tab. 2 Grid uncertainty verification

网格尺寸	网格数量	$C_t$	误差
细	$6.31 \times 10^6$	$4.621 \times 10^{-2}$	-2.55
中	$4.59 \times 10^6$	$4.596 \times 10^{-2}$	-3.08
粗	$2.15 \times 10^6$	$4.527 \times 10^{-2}$	-4.53
较粗	$1.48 \times 10^6$	$4.421 \times 10^{-2}$	-6.76

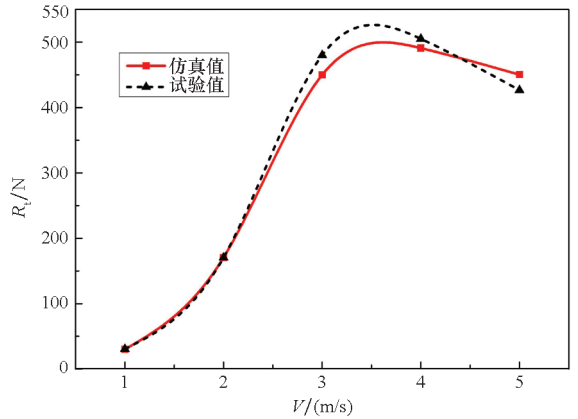
阻力系数的表达式为:

$$C_t = R_t / (0.5\rho SV_0^2) \quad (6)$$

式中,  $R_t$  为两栖车的总阻力。从表 2 中可以看出,对于中网格,网格数量和计算精度都可以接受,因此这里选择该网格尺寸进行后续计算。

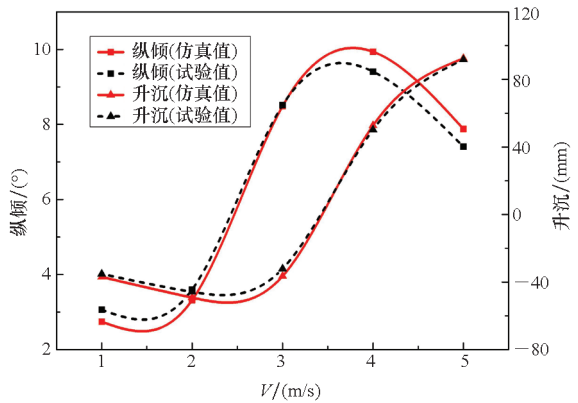
图 6 给出了试验和数值计算得到的阻力、纵倾和升沉结果。从图 6 中可以看出,在  $1 \text{ m/s} < V <$

$5 \text{ m/s}$  的速度范围内,数值计算与试验值的变化趋势一致,且两者吻合较好,这说明仿真采用的网格参数和模型具有较高的可信度。



(a) 阻力变化曲线

(a) Change curve of resistance



(b) 姿态变化曲线

(b) Change curve of attitude

图 6 试验和数值计算结果比较

( $L = 136 \text{ mm}, \theta = 10^\circ$ )

Fig. 6 Result comparison of experiment and simulation

( $L = 136 \text{ mm}, \theta = 10^\circ$ )

#### 4.2 车辆纵向重心位置对阻力的影响

以车辆前轴的中点为原点,指向车尾位置为定义纵向坐标轴,研究重心的  $X$  轴坐标值变化对两栖车阻力性能的影响。通过拖曳试验测得了重心在  $X = 480 \text{ mm}$ 、 $508 \text{ mm}$ 、 $540 \text{ mm}$  处的两栖车阻力和姿态变化,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当速度达到  $3.5 \text{ m/s}$  左右时,阻力开始下降,这是因为随着速度的提高,动升力逐渐增大,车体被抬升开始进入滑行状态,湿面积减小,从而所受阻力减小。比较 3 条曲线可以发现:当  $V < 4 \text{ m/s}$  时,前置重心的车辆,阻力最小;当  $V > 4 \text{ m/s}$  时,情况正好相反。

为了得到高速航行下的重心最佳位置,在上述试验的基础上,利用 CFD 研究了  $X = 480 \sim$



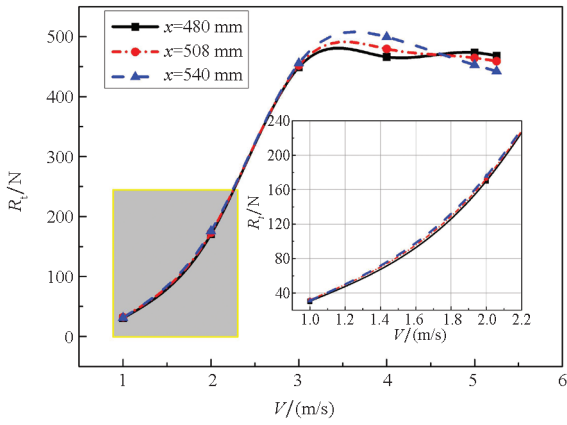


图7 不同重心的两栖车阻力变化曲线

Fig.7 Resistance curve of amphibious vehicle with different center of gravity

600 mm之间变化(间隔 20 mm)时,两栖车的阻力变化情况,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在 5.25 m/s 速度下,随着重心的后移,阻力先减小后增加,在  $X = 540 \sim 560$  mm 之间时,阻力最小。

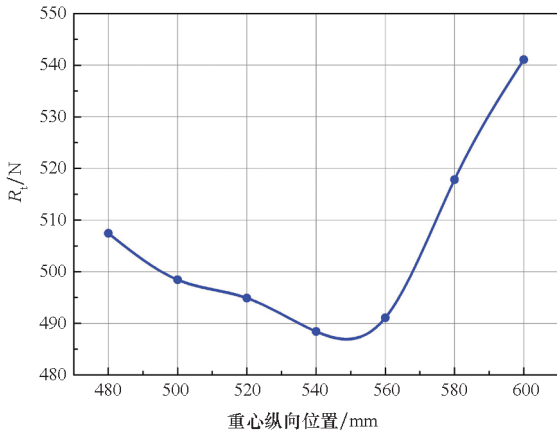


图8 阻力随重心位置变化趋势( $V = 5.25$  m/s)

Fig.8 Change trend of resistance with the position of center of gravity ( $V = 5.25$  m/s)

### 4.3 尾翼板参数对阻力的影响

#### 4.3.1 尾翼板角度

尾翼板与水平面之间的夹角  $\theta$  会影响两栖车的阻力性能。本文利用 CFD 研究了尾翼板长度为  $L = 136$  mm,  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  时阻力系数随速度的变化趋势,如图 9 所示。从图 9 中可以看出:当  $V = 3$  m/s 左右时,相比裸车体, $\theta = 10^\circ$  和  $\theta = 15^\circ$  的尾翼板减阻率最大,在 30% 左右;当  $V = 1$  m/s 时,尾翼板并不能起到减阻的效果,反而会增大阻力。这说明水陆两栖车在低速航行时,摩擦阻力占比较大。

由图 9 可知,当  $2$  m/s  $< V < 4$  m/s 时, $\theta = 10^\circ$  和  $\theta = 15^\circ$  的尾翼板减阻效果比较显著,但当  $V =$

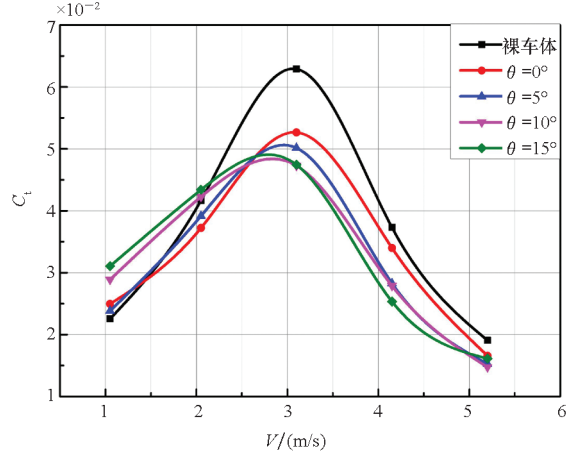


图9 不同尾翼板角度下两栖车阻力曲线

Fig.9 Resistance curve of amphibious vehicle with different stern angle

5 m/s 时, $\theta = 10^\circ$  的尾翼板减阻效果更明显。因此,尾翼板角度越大,不一定有利于两栖车减阻。

图 10 所示为总阻力、摩擦阻力和剩余阻力的减阻率分析。其中, $E_t$  表示总阻力的减阻率, $E_f$  和  $E_r$  分别表示摩擦阻力和剩余阻力的减阻率,其表达式分别为:

$$\begin{cases} E_t = \Delta R_t / R_t \\ E_f = \Delta R_f / R_t \\ E_r = \Delta R_r / R_t \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta R_t$ 、 $\Delta R_f$ 、 $\Delta R_r$  分别为总阻力、摩擦阻力、剩余阻力相对裸车的减小值。从图 10 中可以看出,当  $3$  m/s  $< V < 5$  m/s 时,摩擦阻力的减阻率为  $-1.03\% \sim 0.6\%$ ,这表明随着速度的增加,摩擦阻力由增阻变为减阻,但是在总减阻率中所占比例较小。剩余阻力(包括兴波阻力和压差阻力)的减阻率对减阻的贡献在 90% 以上,在减阻中起主导作用。

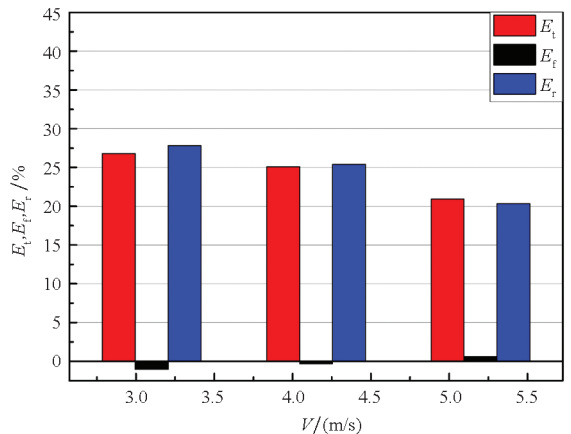


图10 阻力成分减阻率分析( $\theta = 10^\circ$ ,  $L = 136$  mm)

Fig.10 Component analysis of resistance reduction rate ( $\theta = 10^\circ$ ,  $L = 136$  mm)

### 4.3.2 尾翼板长度

根据上述分析结果,取  $\theta = 10^\circ$ ,尾翼板长度  $L$  为 116 mm、136 mm、156 mm、176 mm 来研究两栖车阻力的变化规律。图 11 所示为安装有不同长度尾翼板的两栖车阻力变化图。从图 11 中可以看出,当  $V > 2$  m/s 时,尾翼板才起到减阻的效果,这与 4.3.1 节的结论是一致的。当  $3$  m/s  $< V < 5$  m/s 时,4 种不同长度的尾翼板减阻率均大于 20%, $L = 156$  mm 的尾翼板减阻效果最好,最大减阻率可达 33.2%,其他 3 种尺寸的尾翼板减阻率都在 20% ~ 25% 之间,减阻效果差别不大。

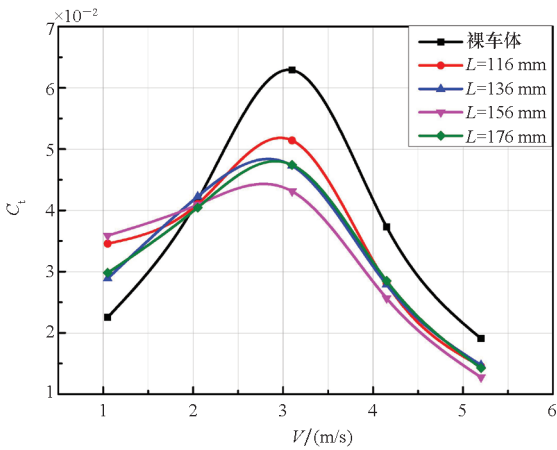


图 11 不同尾翼板长度下两栖车阻力曲线

Fig. 11 Resistance curve of amphibious vehicle with different length

图 12 给出了各阻力成分的减阻率分析,可以看到  $3$  m/s  $< V < 5$  m/s 时,摩擦阻力的减阻率为  $-0.98\% \sim 0.57\%$ ,剩余阻力的减阻率为  $33.2\% \sim 34.1\%$ ,总阻力减阻率为  $32.7\% \sim 34.3\%$ 。剩余阻力在减阻贡献中起主导作用,这与 4.3.1 节的分析相一致。

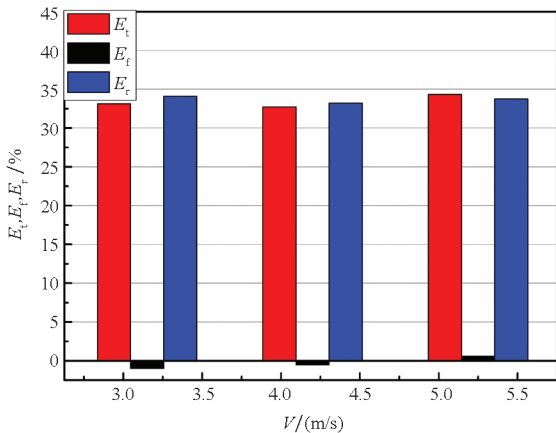


图 12 阻力成分减阻率分析 ( $\theta = 10^\circ, L = 156$  mm)

Fig. 12 Component analysis of resistance reduction rate ( $\theta = 10^\circ, L = 156$  mm)

图 13 所示为水陆两栖车周围水面兴波高度图。从图中可以看出,经过重心调节、尾翼板参数优化后,车体中部、艉部的兴波高度明显减小,说明加装尾翼板后,两栖车的兴波阻力减小了。这与上述阻力成分的分析结论是一致的。

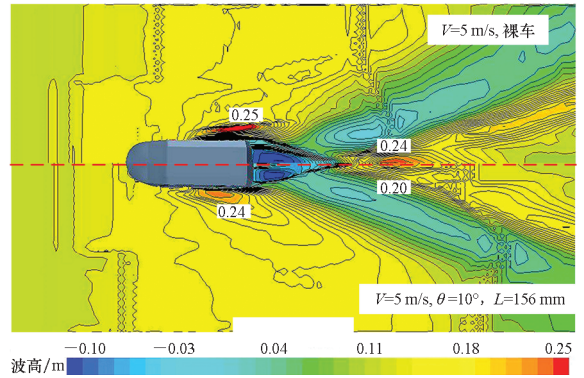


图 13 自由液面兴波高度

Fig. 13 Wave height of free surface

方艏是水面高速舰船普遍采用的结构形式,它可以减少高速水流的扭转和弯曲程度,从而减少能量损失,改善阻力性能。如图 14 所示,高速水流一直延伸到艉部后一段距离处,形成一个中空区,其作用相当于增加了车体的有效长度,但未增加摩擦力,该效应称为虚长度效应。

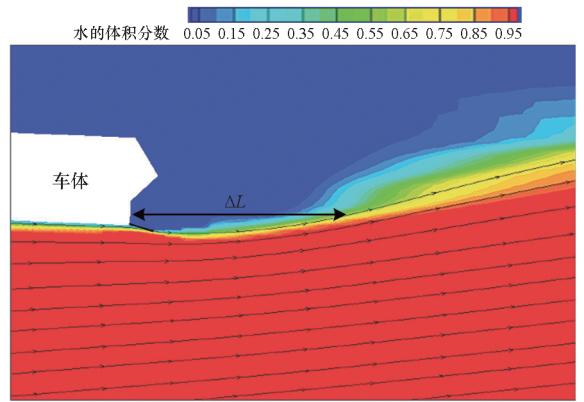


图 14 虚长度示意

Fig. 14 Virtual length diagram

本研究采用“方艏 + 尾翼板”相结合的方法,目的在于吸取两者的优点,在更大程度上实现减阻增速。如图 15 所示,相比原裸车体,加装尾翼板后的两栖车“鸡尾酒”现象得到明显的改善,且增强了虚长度效应,从而实现了减阻。

## 5 结论

本文基于水池拖曳试验和数值仿真相结合的方法,针对某分段履带式水陆两栖车的减阻增速,研究了车体重心纵向位置和尾翼板角度、长度对

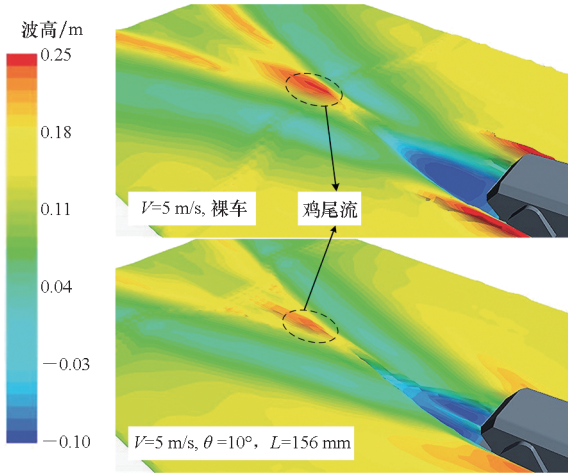


图 15 有无尾翼板的方艉处波浪情况

Fig. 15 Wave condition at stern with or without stern flap

阻力性能的影响。得出如下主要结论:

1) 适当调节重心纵向位置可以实现水陆两栖车的减阻,在模型最高速度  $V = 5.25 \text{ m/s}$  (实车  $V = 30 \text{ km/h}$ ) 下,最佳重心位置为  $X = 540 \sim 560 \text{ mm}$ 。

2) 尾翼板的安装可以实现较明显的减阻效果,在  $\theta = 10^\circ, L = 156 \text{ mm}$  时,减阻效果最显著,最大减阻率为 34.3%。

3) 剩余阻力在总阻力中占比较大,摩擦阻力占比较小。剩余阻力在减阻中起主导作用,其减阻率占总阻力减阻率的 90% 以上。

## 参考文献 (References)

- [1] 贾小平, 马骏, 于魁龙, 等. 超高速水陆两栖车技术研究[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(5): 46-49.  
JIA X P, MA J, YU K L, et al. Technology research on ultra high speed amphibious vehicle[J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28(5): 46-49. (in Chinese)
- [2] HUANG F X, YANG C. Hull form optimization of a cargo ship for reduced drag[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(2): 173-183.
- [3] KARAFIATH G. Stern end bulb for energy enhancement and speed improvement [J]. Journal of Ship Production and Design, 2012, 28(4): 172-181.
- [4] KARIMI M H, SEIF M S, ABBASPOOR M. An experimental study of interceptor's effectiveness on hydrodynamic performance of high-speed planing crafts[J]. Polish Maritime Research, 2013, 20(2): 21-29.
- [5] CUSANELLI D S, KARAFIATH G. Hydrodynamic energy saving enhancements for DDG 51 class ships [J]. Naval Engineers Journal, 2012, 124(2): 123-138.
- [6] ROBIN A, COHEN L T, MICHAEL P, et al. Wave-reducing stern flap on ship convoys to protect riverbanks [J]. Naval Engineers Journal, 2015, 127(1): 95-102.
- [7] MAKI A, ARAI J, TSUTSUMOTO T, et al. Fundamental

research on resistance reduction of surface combatants due to stern flaps [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(2): 344-358.

- [8] Villa D, Brizzolara S. A systematic analysis of flap/interceptors hydrodynamic performance [C]//Proceedings of International Conference on Fast Sea Transportation FAST2009, 2009.
- [9] TSAI J F, HWANG J L. Study on the compound effects of interceptor with stern flap for two fast monohulls [C]//Proceedings of Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04, 2004: 1023-1028.
- [10] PARSONS M G, SINGER D J, GAAL C M. Multicriterion optimization of stern flap design [J]. Marine Technology and SNAME News, 2006, 43(1): 42-54.
- [11] 剧冬梅, 项昌乐, 周鹏飞, 等. 纵倾角对轻型轮式两栖车辆的阻力特性影响研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 19-26.  
JU D M, XIANG C L, ZHOU P F, et al. Analysis of the effect of trim angle on the resistance characteristics for wheeled amphibious vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 19-26. (in Chinese)
- [12] 剧冬梅, 项昌乐, 陶溢, 等. 电驱动差速转向轮式水陆两栖车辆可收放悬架机构运动学分析与参数优化 [J]. 兵工学报, 2019, 40(8): 1580-1586.  
JU D M, XIANG C L, TAO Y, et al. Kinematic analysis and optimization of key parameters of suspension for electric differential steering wheeled amphibious vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(8): 1580-1586. (in Chinese)
- [13] 彭银. 基于代理模型的轮式两栖车辆外形减阻优化方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
PENG K. Surrogate based optimization of resistance reduction of the amphibious vehicle [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 彭银, 刘影. 尾翼板对轮式两栖车辆航行阻力特性影响的研究 [J]. 车辆与动力技术, 2014(4): 15-19, 24.  
PENG K, LIU Y. Influence of empennage on resistance characteristics of a wheeled amphibious vehicle [J]. Vehicle & Power Technology, 2014(4): 15-19, 24. (in Chinese)
- [15] 赵彬, 张敏弟, 剧冬梅. 基于动网格的两栖车航行姿态数值模拟 [J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 412-420.  
ZHAO B, ZHANG M D, JU D M. Numerical simulation of navigating pose for amphibious vehicle based on dynamic-mesh model [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 412-420. (in Chinese)
- [16] 崔金一, 赵又群, 阮米庆. 过渡型两栖车辆造型设计及水上性能数值分析 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(8): 989-993.  
CUI J Y, ZHAO Y Q, RUAN M Q. Transitional amphibious vehicle shape-designing and numerical analysis of its water performance [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(8): 989-993. (in Chinese)
- [17] 崔金一. 基于车轮收放的高速水陆两栖车虚拟样机研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
CUI J Y. Research on high speed amphibious vehicle's virtual prototype technology based on wheel's retracted and

- deployed[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [18] 王少新, 金国庆, 王涵, 等. 双车厢两栖车静水直航下的水动力性能研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 434-441.  
WANG S X, JIN G Q, WANG H, et al. Research on the hydrodynamic performance of a double-carriage amphibious vehicle sailing in still water[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 434-441. (in Chinese)
- [19] 王少新, 王涵, 金国庆, 等. 水陆两栖车水动力性能与防浪板受力特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 1-6.  
WANG S X, WANG H, JIN G Q, et al. Study on hydrodynamic performance of amphibious vehicle and mechanical characteristics of wave board[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(1): 1-6. (in Chinese)
- [20] DAY A H, COOPER C. An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(8/9): 983-994.
- [21] SCHLICHTING H, GERSTEN K. Boundary-layer theory[M]. New York: Springer, 2017: 497.
- [22] FERZIGER J H, PERI M, STREET R L. Computational methods for fluid dynamics[M]. Berlin: Springer, 2002: 292-296.
- [23] 高富东, 姜乐华, 潘存云. 某两栖车绕流场数值模拟研究及外形优化分析[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(1): 114-119.  
GAO F D, JIANG L H, PAN C Y. Numerical study of flow field around an amphibious vehicle and its improvement in shape[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(1): 114-119. (in Chinese)