



基于构型创新的水陆两栖无人平台减阻增速技术

徐海军*, 徐小军, 徐藜洋, 刘博龙

国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073

* E-mail: xuhaijun_1999@163.com

收稿日期: 2023-02-05; 接受日期: 2023-06-06; 网络版发表日期: 2023-08-02

军队技术基础研究项目(编号: 211XX55004)资助

摘要 水陆两栖无人平台的水上航速是其作战效能发挥的核心指标之一, 对于快速处置涉水险情, 提升航渡生存概率和抢滩登陆机动性具有重要意义. 本文梳理了典型轮式、履带式水陆两栖有人/无人平台构造原理和技术特性, 阐述了其航态特征和航行时水阻力成分, 剖析了高速水陆两栖平台水阻力与其构型的内在联系, 重点从可收放悬架创新设计、附件减阻创新布局、车体形状优化仿生、沟槽和气幕技术应用等角度总结归纳了减阻增速方法. 研究结论可作为新一代水陆两栖无人平台研制的技术参考, 也可为水陆两栖无人装备建设和规划发展提供参考.

关键词 水陆两栖, 无人平台, 构型, 减阻, 增速

1 引言

“非接触”和“零伤亡”等作战理念对未来高对抗条件下水陆两栖作战装备提出了新的更高要求, 一方面要求两栖装备性能不断提升, 另一方面催生两栖装备向无人化、智能化快速发展^[1-3]. 水陆两栖无人装备在具备陆上高机动行驶, 水上高速航行, 滩涂高效率通过等能力的同时, 以无人化、集群化的新模式运用, 将成为新型两栖作战中的主战装备, 成为克敌制胜的核心装备.

水陆两栖无人平台的水上航速是其作战效能发挥的核心指标之一, 低流阻、高航速的战技性能可大幅

增强两栖装备航渡、抢滩等阶段躲避岸火力打击能力, 提升处置涉水环境紧急事件能力^[4]. 有资料研究表明, 当水陆两栖车的航速从15 km/h提高到25 km/h后, 其被命中概率能够降低60%以上; 如果航速进一步提高到35 km/h, 则被命中概率能够降低80%, 这将极大地提高两栖登陆部队的生存能力^[5].

此外, 水陆两栖无人平台可进一步克服有人驾驶时的生理、心理限制, 达到更为突出的涉水战技性能指标, 包括更高航速航行、更高海况适应、拓展无人平台极限机动能力、提升快速反应能力.

自1805年世界上第一辆水陆两栖车诞生以来, 其性能随着科技的进步和需求的拓展而不断提升^[6]. 二

1) <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1683243659501567543&wfr=spider&for=pc>

引用格式: 徐海军, 徐小军, 徐藜洋, 等. 基于构型创新的水陆两栖无人平台减阻增速技术. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1272-1283
Xu H J, Xu X J, Xu L Y, et al. Sailing resistance reduction and speed raising for amphibious vehicles using novel configuration (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 1272-1283, doi: 10.1360/SST-2023-0049

战以后至20世纪70年代,两栖平台技术发展缓慢,20世纪80年代以后,随着世界形势变化发展,两栖平台技术逐渐受到重视,平台功能和性能不断完善.进入21世纪后,在新的军事作战理念、民用需求的推动下,水陆两栖有人平台的减阻增速能力获得大幅提升,以两栖有人平台技术为基础发展起来的两栖无人平台技术逐渐成为研究热点.

目前,军用先进水陆两栖有人平台的典型代表为美国军方履带式的AAV7、轮式的ACV两栖车²⁾[7,8]. AAV7采用履带作为陆上行驶系统,喷水推进器作为水上航行推进装置,车头设计为楔形以减阻,航速可达13 km/h.为进一步提升航速,美国军方于2003年研制了新构型的EFV两栖远征战车^{9,10)},水上航速已超过40 km/h.我国现役水陆两栖车ZBD/ZTD-05采用了与EFV类似的技术路线,航速较以往两栖装备有了质的提升.因一些原因,EFV远征战车项目已取消,但升级的AAV7为最新的AAV-SU,航速超过20 km/h. ACV采用车轮作为陆上行驶系统,车首设计防浪板减小兴波阻力,车尾采用导管螺旋桨作为水上航行推进装置,航速约12 km/h.

民用先进两栖有人平台的典型代表为英国GIBBS公司研制的Aquadra, Humdinga^{11,12)}和瑞士Rinspeed公司研制的Splash两栖车¹³⁾. GIBBS公司的两栖车采用流线型车身,可收放悬架和大功率喷水推进技术,航速超过45 km/h. Rinspeed公司的两栖车通过水翼产生浮力使车体离开水面,以减小航行阻力,最高航速达到50 km/h.

由于Humdinga两栖车突出的水上航行性能,美国军方以GIBBS公司技术为基础,将其发展为高航速两栖有人平台,如两栖远征战车(ACC-E)、两栖江河战车(ACC-R)和全地形战车(Terraquad)¹⁴⁾,其航速可超过60 km/h,最高可达到80 km/h,可满足美国军方提出的“立体登陆”、“超视距登陆”两栖作战需求.

随着科技的进步和战争样式的不断更新,水陆两栖平台也在向无人化方向发展,如图1所示.2013年,俄国研制了“暗语(RBTK)”两栖无人平台³⁾[15],采用低

压轮胎作为陆上、滩涂行驶系统,水上航行时采用车轮滑水推进,航速约5 km/h.2021年乌克兰研制了“风暴(The Storm)”两栖无人装甲平台⁴⁾,采用贯通履带行走系统和喷水推进,水上航速可达到30 km/h.美国2022年底展示了具备两栖能力的无人车“粗齿锯M3(Ripsaw M3)”,采用喷水推进,水上航速暂未公开⁵⁾.我国于2016年开始研制水陆两栖无人平台,采用分段三角履带确保岸滩通行能力,且分段履带采用可收放悬架以减小航行阻力,采用喷水推进方式和尾部滑板布局,航速较现役两栖有人装备有显著提升⁶⁾.

综上所述,受限于科技发展和两栖作战理念的不断更新,两栖无人平台技术发展明显晚于两栖有人平台,水上航速等主要指标也相对较低.军用两栖有人平台,因主战任务需求,以及需具备足够装甲抗打击能力,其尺寸重量均较大,航速较低,主要通过设计附件装置来改变航态,提升航速.民用两栖有人平台,尺寸、重量均较小,主要借鉴船舶设计理论对车体外形进行优化来减小航行阻力,结合高性能喷水推进装置实现高速航行.两栖无人平台尺寸、重量较小,且无需强防护,属于轻小型平台,定位于前出侦察、轻火力打击等非主战任务,图1(d)借鉴了GIBBS公司的两栖有人平台技术方案后航速提升明显,已达到军用两栖有人平台的同等水平,但离民用领域两栖有人平台的最高航速还有较大差距.

两栖无人平台主要用于替代两栖有人平台完成恶劣环境和对抗条件下的高风险两栖作战任务,并提升两栖作战反应速度,其在平台操控方式上与两栖有人平台存在显著差异,使其水上性能指标可达到更高,但在两栖功能定位和构型布局、机动原理和水动力特性等方面均可充分借鉴两栖有人平台的研究成果进行设计.

以两栖有人平台减阻增速技术为基础,探索更为合理的构型布局方式,更为优化的外形设计,更为多样的减阻新技术应用,有望形成系统的两栖无人平台减阻增速优化设计原则和启示,推动先进两栖无人平台技术快速发展.

2) https://m.gmw.cn/2019-05/28/content_32873324.htm

3) <http://roll.sohu.com/20130813/n384046516.shtml>

4) <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693294596109352083&wfr=spider&for=pc>

5) https://mp.weixin.qq.com/s/?__biz=MzU5NTE3MjkzNA==&mid=2247508786&idx=2&sn=b9de5e1c742e35af3d0d22b8c07582a5&chksm=fe74e81bc903610de008d88ae0c20b091c8c50e928a033a9cc75d3ee46966aed33eb2693d922&scene=27

6) https://weibo.com/tv/show/1034:4831373882753075?from=old_pc_videoshow

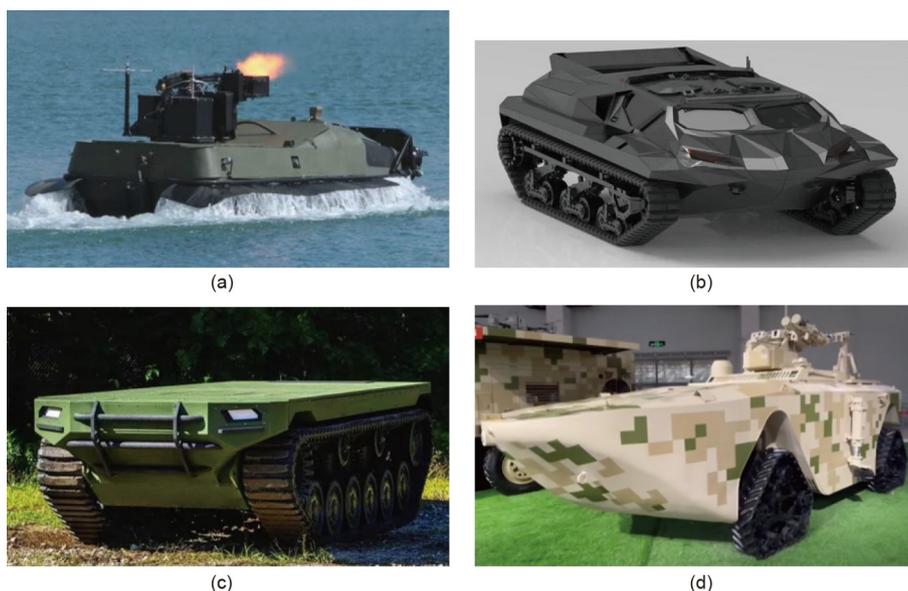


图1 典型水陆两栖无人平台。(a) 暗语(RBTK); (b) 风暴(The Storm); (c) 粗齿锯M3(Ripsaw M3); (d) 三角履带水陆两栖无人平台

Figure 1 Typical unmanned amphibious vehicles. (a) RBTK; (b) The Storm; (c) Ripsaw M3; (d) unmanned amphibious vehicle with triangular track.

2 水陆两栖无人平台水中航态和水阻力

水陆两栖无人平台一般采取“上岸为车，下水为船”的技术思路，但其为了兼顾水上和陆上行驶性能，致使车体与一般船舶的外形有较大的差异。目前，水陆两栖车水中航行时的航态和阻力特性一般借鉴相关船舶理论进行分析^[16,17]。

2.1 水陆两栖无人平台水中航态

根据体积弗汝德数 $Fr_V = v / \sqrt{gV^{1/3}}$ 的不同，水陆两栖无人平台的航态可分为三种^[16]。

(1) 排水型。当 $Fr_V < 1.0$ 时，车辆的全部重量主要由流体静压力(浮力)支撑。当流经车体周围水流流速增加时，车体周围水流压力下降而导致车体稍下沉，水阻力大但具有一定的抗风能力。一般航速 < 13 km/h。

(2) 过渡型。当 $1.0 \leq Fr_V < 3.0$ 时，随着航速增加，流体动升力逐渐增加，与车体浮力一起支撑车体浮出水面。一般航速在 $13 \sim 25$ km/h之间。

(3) 滑水型。当 $Fr_V \geq 3.0$ 时，流体动升力随航速增加而增大，成为支撑整个车辆浮出水面的主要作用力，车体与水平面成一定纵倾角沿水面向前滑行。此状态下

航速高、水阻力低，但抗风浪能力较低。一般航速 > 25 km/h。

两栖无人平台的高航速是其提升两栖作战效能的重要基础，也是相较两栖有人平台的显著优势之一，因此其目标航态一般按滑水型设定，以此为基础开展阻力和推力计算，以及整车构型和车体优化设计。

2.2 水陆两栖无人平台航行水阻力构成

水陆两栖无人平台在水中航行时，其航行阻力主要包括摩擦阻力、剩余阻力(兴波阻力、压差阻力)，其中摩擦阻力和压差阻力又称为黏性阻力^[17-20]，如图2所示。

提升水陆两栖无人平台航速一般有两种途径：增大推进系统功率，减小航行阻力。推进系统功率近似随航速三次方变化，增大推进系统功率可增大航行推进力，进而实现航速提升，但会造成动力和传动系统重量和尺寸过大，需要更大的推进功率来维持航速，容易陷入设计指标恶性循环。而航速与航行阻力成反比变化关系，减小航行阻力来增速本质上是减功耗增速，可以优化水陆两栖无人平台结构、重量，是突破航速提升瓶颈的有效途径。

通过减小航行水阻力来提升航速，主要是通过创

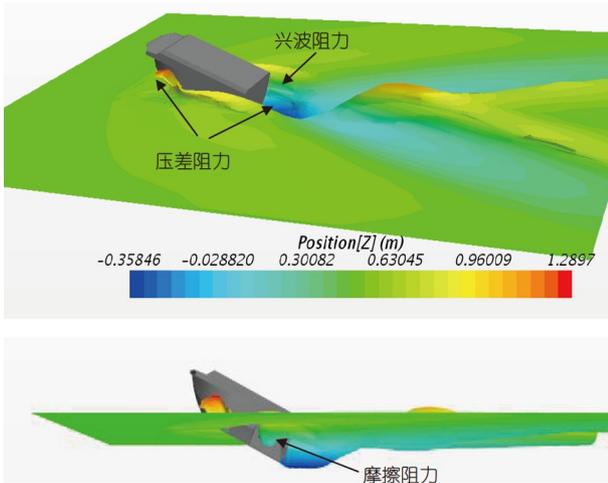


图 2 水陆两栖无人平台阻力构成
Figure 2 Water resistance composition for the unmanned amphibious vehicle.

新水陆两栖无人平台构型设计来减小相应的水阻力成分。借鉴船舶设计理论和两栖有人平台设计方法, 两栖无人平台水阻力成分和减阻基本举措如图3所示。

因为流线型滑行车体是实现水陆两栖无人平台高速航行的前提, 因此可通过优化车身形状, 应用仿生/沟槽/气幕/气垫技术, 设计可收放悬架等方式实现黏性阻力和兴波阻力的减小, 即通过两栖平台车体自身构型优化来减阻。另一方面, 通过增加压浪板、滑水板等附件, 可以调节水陆两栖无人平台纵向姿态和深沉, 增加车体“虚长度”, 进而显著降低压差阻力、兴波阻力。因构型减阻和附件减阻都改变了水陆两栖平台原有固定形态, 因此统称为可变构型减阻增速技术。

3 水陆两栖无人平台可收放悬架减阻技术

水陆两栖无人平台需具备较强的滩涂通行和越野越障能力, 其悬架系统将使得车身外形设计无法充分向船体外形优化。水上航行时, 外露于车身之外的悬架、车轮等部件将形成较大的航行水阻力。两栖有人平台的研究表明, 其在水中航行时行驶系统产生的阻力占总阻力的25%~45%^[5,19], 采用可收放悬架技术是实现两栖无人平台高速航行的重要技术途径。

3.1 履带式水陆两栖无人平台悬架

贯通履带式水陆两栖有人平台的悬架一般为摇臂

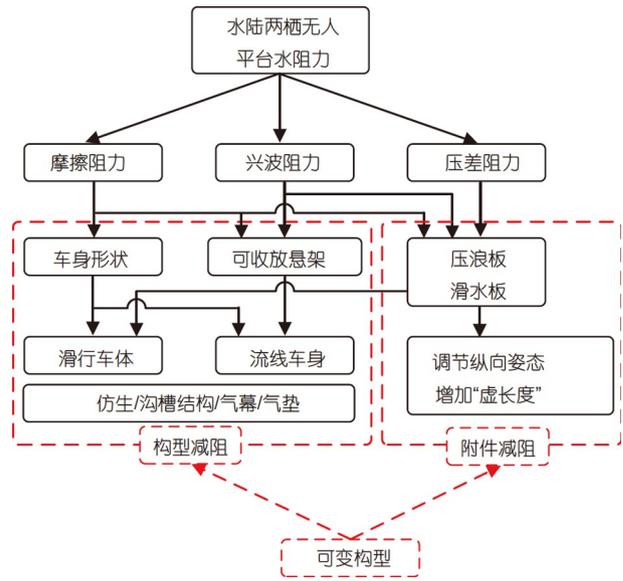


图 3 水陆两栖无人平台减阻措施
Figure 3 Drag reduction methods for the unmanned amphibious vehicle.

式(纵臂式)构型, 车体较为方正, 航行时水阻力较大。为减小水阻力, 一般采用悬架系统整体提升方式使履带全部或部分收回车体上的通槽内, 以减小履带黏性阻力, 必要时采用蒙板将履带系统包裹, 以减小履带通槽处的兴波阻力。如美国军方EFV远征车, 即采用了“提履封舱”原理。

对于采用贯穿履带行走系统的水陆两栖无人平台, 由于车体内无需预留驾驶人员空间, 可以利用该空间布置贯通履带的提升机构或翻转机构, 必要时在车体内布置履带蒙板系统, 用于航行时包裹履带系统。履带整体提升将对车体内部空间造成很大影响, 且提升幅度有限。另一种思路是将履带分段, 在确保两栖滩涂环境通行能力的前提下, 采用横臂式悬架将其翻转至车体侧面, 离开水面。图1(d)所示的水陆两栖无人平台, 即采用横臂式悬架将三角履带提升来减小航行时水阻力, 三角履带和履带空穴形状配合, 可以进一步减少水涡流和兴波阻力。

3.2 轮式水陆两栖无人平台悬架

轮式水陆两栖车辆为满足高强度越野越障行驶需求, 一般采用双横臂式悬架。双横臂式悬架本质上为一个双摇杆构型的平面四杆机构, 其中车体可看作四杆机构的机架, 上下横臂均为摇臂, 车轮轮毂为连杆, 原

理如图4所示。

在陆上行驶时, 油气弹簧的被动压缩行程可用于四杆机构构型变化时的运动缓冲和提供恢复力。在水上航行时, 油气弹簧的主动收缩作用可带动摇杆绕机架上的支点向上摆动, 进而带动连杆(轮毂支架)向上运动, 使车轮离开水面。

英国GIBBS研制的各种高速轮式水陆两栖车, 均采用该原理实现车轮离开水面, 使车体形成流线型滑水外形, 实现了水上高速航行。

文献[5,21,22]针对双横臂悬架支点位置、悬架结构参数和车轮翻转状态的不同, 采用计算流体动力学分析方法研究了车轮收放状态对航行阻力的影响。文献[5]部分结果如图5所示, 其中 θ 为车轮翻转角度, 可以看到可收放悬架在高傅汝德系数时降低两栖平台航行阻力效果更为显著, 可使车体更快进入滑水状态。

文献[23]研究了车轮收放状态对两栖平台阻力的影响。结果表明, 相对于车轮自由下垂完全浸没水中的阻力值, 车轮半收起和全收起状态下的水阻力分别减小30%和48.4%。

针对车轮收放状态对航行阻力的影响, 轮式水陆

两栖无人平台的车体内部可预留出更大的轮穴空间, 以便布置复杂的可收放悬架系统, 并实现更好的车轮翻转状态。此外, 因无需考虑人员乘坐的舒适性, 可收放悬架的收放行程、收放敏捷性, 以及陆上行驶性能等都可按更好满足车轮收放减阻需求进行设计和优化。

水陆两栖无人平台采用可收放悬架设计, 可以将履带或车轮等行走系统部分或全部抬离水面, 减小车体水下凸出部分, 有利于形成滑行车体形状, 进而显著减小航行水阻力。

4 水陆两栖无人平台附件减阻技术

为确保足够的浮力储备系数和一定的海况适应性, 中大型水陆两栖无人平台的吃水深度一般较大, 造成其低速航行时处于排水航行状态, 航行水阻力很大。另一方面, 两栖平台车体一般为固定外形, 车首迎流角度无法适应不同航速下流阻和升力特性。

在不增加推进系统功率的情况下, 通过增加附件来改变水陆两栖无人平台航行状态, 进而调节两栖无

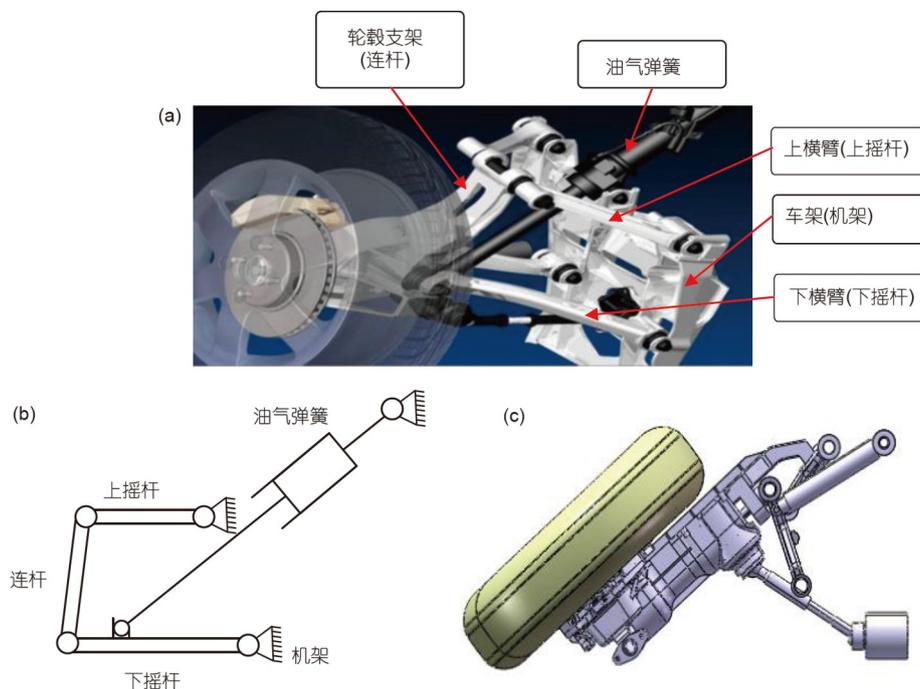


图4 双横臂悬架构型原理。(a) 工程结构; (b) 机构简图^[5]; (c) 车轮收起状态^[5]。Copyright©2022, by the authors

Figure 4 Mechanism of the foldable double arm suspension. (a) Engineering structure; (b) mechanism diagram [5]; (c) wheel state with suspension folded [5]. Copyright©2022, by the authors.

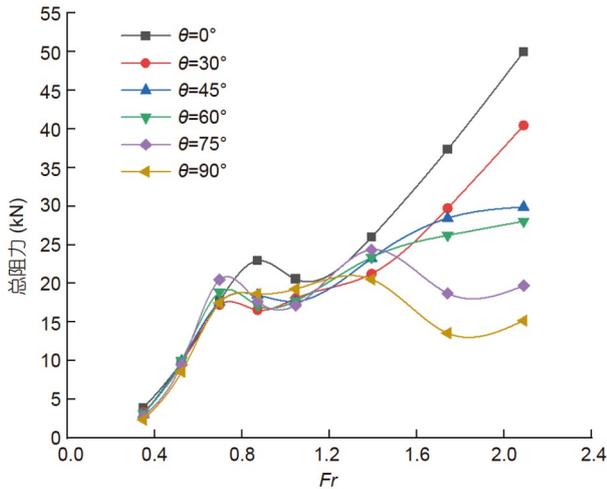


图5 车轮翻转时两栖车阻力随 Fr 变化曲线^[5]. Copyright©2022, by the authors

Figure 5 Resistances of amphibious vehicle under different Fr when the wheel is turned over [5]. Copyright©2022, by the authors.

人平台纵倾和深沉,可显著降低水阻力.可采用的附件包括车首压浪板、车尾滑板、车身侧边飞翼(水翼)等^[24-26].

4.1 车首压浪板减阻机理及特性剖析

两栖无人平台从静止状态到最高航速过程中,固定形状的车首产生水阻力随航速增加而近似成三次方关系迅速增加,甚至可能使得两栖无人平台无法克服最大水阻力峰值而无法达到设计最高航速.

根据有限宽平板滑行原理,流体相对于平板的冲角越小,其受阻力越小,升力越小;反之,则受阻力越大,升力越大.基于此原理,高速水陆两栖车可在车首设计倾角可调的压浪板,来调节车首阻力、升力变化,抬升车首,使车体更快进入过渡航行甚至滑水航行状态.如美国军方EFV、我国ZDB/ZTB-05等两栖有人平台,车体为常规形状,在车首设计有多段折叠式可调倾角压浪板.

如图6所示,文献^[27]针对折叠式压浪板开展了仿真分析和拖模试验研究,结果表明当航速大于20 km/h时,压浪板对两栖平台的纵倾控制和减阻效果显著.文献^[28]针对直板式压浪板展开了研究,解决了两栖平台车首甲板上浪和埋首现象,提高了航渡能力.

此外,车首压浪板在两栖车入水时可使车体底部压力更为均匀,在航行时起到压浪并减小兴波作用,提高航行安全性和稳定性.

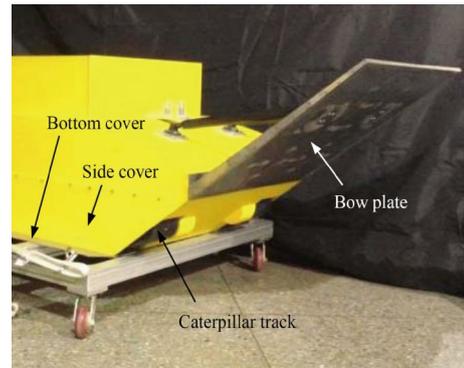


图6 两栖车车首压浪板构造^[27].

Figure 6 Bow flat plate of the amphibious vehicle [27].

基于上述分析,中大型两栖无人平台可利用车首压浪板来提升快速入水安全性,高速航行稳定性,因无需顾忌影响水上航渡时驾驶员视线,车首压浪板结构形式和参数设计可重点考虑车体形状、航行姿态、航行速度等因素,采用折叠式倾角可调压浪板方案.轻小型两栖无人平台受限于自身尺寸重量,较少应用车首压浪板方案.

4.2 车尾滑板减阻机理及特性剖析

水陆两栖无人平台的主要特征为“车”,为确保接近角、离去角、通过角等越野越障参数,车身高细比参数难以借鉴船舶设计方法来满足水上高速航行的要求,但可设计为方尾形状,使得车尾高速水流向后延伸一定距离,形成一段中空区,等效地增大了车辆的“虚长度”,如图7(a)所示.

在此基础上,通过在两栖无人平台方形车尾增加向后下方倾斜的滑板,可使得车尾受到滑板的升力作用,抬升车尾的同时产生力矩来缓解车首上倾现象,如图7(b)所示.

因两栖无人平台无需考虑人员从车体尾部出入,车尾滑板布局更为灵活,在目标航态下确定合适的车尾滑板位置和结构后,可重点研究滑板翼型、尺寸、安装角等参数间的匹配和优化,确保获得所需目标航态下的水动力和力矩^[29].

4.3 车身飞翼减阻机理及特性剖析

文献^[30]基于水翼艇原理,对带车首压浪板、车尾滑板的滑行车体增加了车身平板飞翼(水翼),用

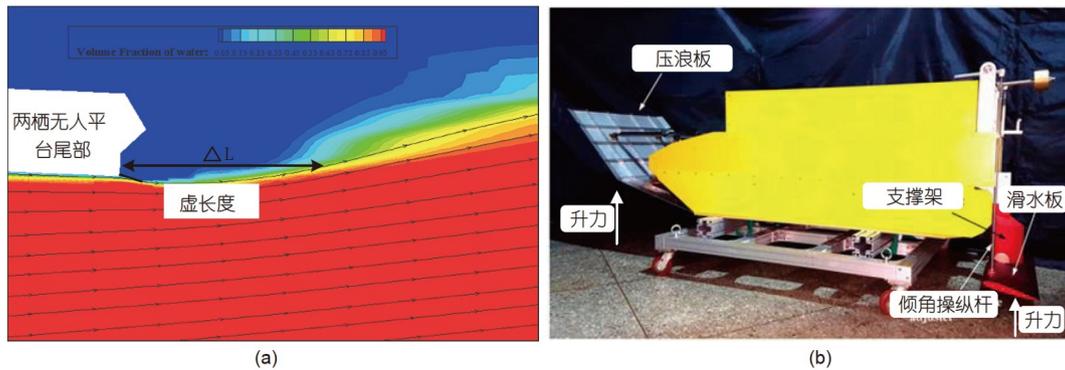


图7 车尾滑水板减阻机理. (a) 方形车尾虚长度效应^[29]; (b) 滑水板构造及特性^[16]
 Figure 7 Drag reduction mechanism of the stern flap. (a) Virtual length effect of the square tailed vehicle [29]; (b) stern flap construction [16].

以调节车辆航行时的纵倾姿态, 抑制车体滑行过程中的流体喷溅. 研究结果显示, 有飞翼的两栖车受到动升力远大于无飞翼方案, 降低了车头离水速度, 间接减小了阻力, 使得车体更快进入滑行状态.

文献[31]针对一种履带式水陆两栖无人平台设计了飞翼(水翼), 研究了飞翼不同攻角和在车体上不同位置时产生的动力升力对航行阻力、动力节能方面的影响, 结果表明在 $Fr_V < 1.43$ 时航行阻力最大可减小25.7%.

飞翼的主要作用是提供额外动升力, 辅助调节两栖无人平台车体纵倾姿态和深沉, 同时起到一定的压浪作用, 可有效改善两栖无人平台高速航行时的稳定性. 但飞翼翼型和收放机构都额外增加了整体的重量和系统复杂度.

5 水陆两栖无人平台车体优化减阻技术

滑行车体对于实现水陆两栖无人平台高速航行至关重要, 其核心是使水陆两栖无人平台底部呈密闭的“前尖后方”流线型船体形状, 以减小水陆两栖无人平台在水下车体部分受到的黏性阻力.

5.1 车首线型优化减阻特性

水陆两栖无人平台在航行时, 车首形状与其产生的黏性阻力密切相关, 可借鉴两栖有人平台的导流角和入流角等参数描述车首形状. 车首导流角设计不合理, 将造成两栖无人平台车头“堵水”情况, 导致车体首尾压力差增大, 黏压阻力增大; 车首入流角主要影响破浪性, 进而减小车首堵水现象, 减小黏压阻力.

文献[32]基于线型优化的方法对一种两栖有人平台车首流体动力特性进行了减阻增速研究. 研究结果表明, U型车首的减阻效果最好, 其次为V型车首, 两者相对平车首的减阻率分别为20.3%和13.6%. 研究结论可用于两栖无人平台车首线型设计参考.

对于车首形状优化, 重点是车首线型和车首折角线优化问题, 需要通过优化迭代得到目标航速下最优车首导流角、入流角等参数. 由于两栖无人平台车首部分没有驾驶舱人员空间限制, 其车首线型和车首折角线优化设计在借鉴两栖有人平台设计和船舶设计理论的基础上, 可瞄准更高的航速和更好的航行稳定性进行优化, 如图1(d)所示两栖无人平台车首导流角、入流角设计, 充分考虑了高航速航态下的车首压浪和劈浪功效.

随着仿生学研究的不断拓展深入, 也有学者借鉴生物形体来设计两栖无人平台的车体头部, 以期降低水中航行阻力. 文献[33]借鉴锤头双髻鲨头部形状、胸鳍和尾鳍布置特点, 优化设计了一种履带滑水推进的两栖机器人外形整流罩. 通过开展不同速度下的流体动力对比分析发现, 优化设计的外形整流罩最大试验减阻可达22%. 文献[34]详细研究了锤头双髻鲨头部形状在改善操控性能、动升力和阻力等方面的流体特性, 可用于指导两栖无人平台车首的仿生学外形设计.

考虑水陆两栖无人平台陆上越野行驶时接近角需求, 当目标航速下车首导流角无法设计较小时, 可借鉴美国军方EFV、我国ZBD/ZTD05等履带式两栖有人平台, 通过车首压浪板调节车首导流角, 避免车首上浪和堵水现象. 为增强破浪作用, 还可借鉴美国军方EFV两栖有人平台在压浪板上设计劈浪楔角.

5.2 车身主体优化减阻特性

为实现滑水高速航行状态, 水陆两栖无人平台的车身主体底部应尽量平滑且呈流线型, 减小轮穴开口处的水流阻塞现象, 确保车身主体底部的压力分布较为均匀^[35].

文献[36]以一种两栖无人平台车身底流体压力分布为优化对象, 通过添加分流楔角, 光滑过渡折角线, 轮穴后缘倒圆设计等措施, 得到优化的车身主体形状, 水阻力下降幅度超过40%, 为两栖无人平台的滑水高速航行奠定了基础, 如图8所示.

文献[16]针对图8所示两栖无人平台轮穴处产生的涡流现象, 创新性地提出了可收放轮穴挡板机构, 采用流体动力方法分析了轮穴挡板对涡流的抑制作用, 进而分析了轮穴挡板对航行阻力、航行姿态的影响, 如图9所示. 该轮穴挡板的主要作用是对车体轮穴处进行修形, 以形成更为规则的车体外形.

通过车体形状优化来减阻增速, 除了车首、车身主体形状优化外, 车体参数优化也可带来水阻力降低, 如选取较大的车体长宽比, 较小的宽度吃水比, 较大的车高等参数, 可有效降低水阻力, 提高航向稳定性. 但

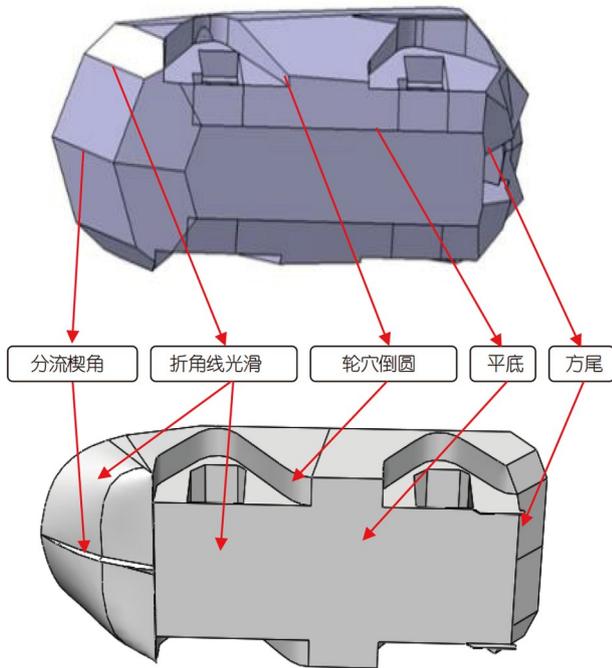


图8 车身线型优化^[36]. Copyright©2021, by the authors
Figure 8 Hull line optimization [36]. Copyright©2021, by the authors.

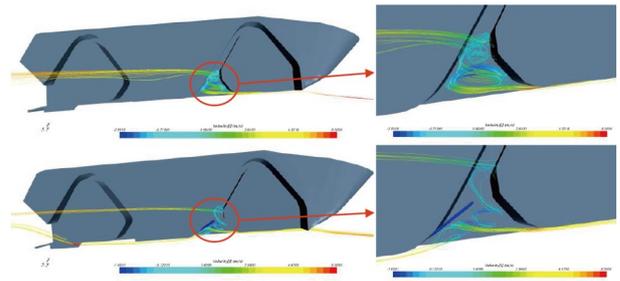


图9 轮穴挡板对涡流抑制作用^[16]. Copyright©2021, by the authors

Figure 9 Eddy-current suppression mechanism of the concave groove flank [16]. Copyright©2021, by the authors.

较小的宽度吃水比会影响两栖无人平台横向稳定性, 需要综合考虑.

6 水陆两栖无人平台水下壁面减阻技术

水陆两栖无人平台航行时的摩擦阻力主要来源于高速航行时车底壁面浸湿部分受到的切应力, 与湿水面积和壁面黏性系数状态有关. 通过可收放悬架、水翼附件作用和滑行车体优化设计等方式, 可以减小浸湿面积进而减小摩擦阻力, 而改变壁面湍流状态的减阻技术则为水陆两栖无人平台进一步减小摩擦阻力提供了新的思路, 包括基于非光滑表面减阻理论的沟槽减阻技术、气幕(气泡)/气垫减阻技术.

6.1 沟槽减阻技术

沟槽减阻主要是通过影响水陆两栖无人平台水下部分近壁区湍流猝发过程来获得减阻效果, 可以用“第二涡群”、“突出高度”等理论解释. 文献[37]受仿生学研究启发, 分析了V型、三角型、半圆形沟槽结构在不同来流速度下的流体阻力特性和减阻机理. 文献[20]利用沟槽减阻理论, 在一种贯通履带式水陆两栖车尾翼、壳体底部、履带护板处设计了连续V型沟槽结构, 通过数值模拟仿真方法研究了七种不同特征尺寸的连续V型沟槽结构在不同来流速度下的减阻性能, 结果表明三个位置添加沟槽均有减阻效果, 其中在尾部添加沟槽的减阻效果最好, 在1.5 m/s的来流速度下, 最大可获得4.225%的阻力系数减小效果.

受上述研究启示, 在设计两栖无人平台时, 可在车体底部和尾部滑板底部表面设计出凸或凹的微小沟

槽特征, 来改变车体底部和滑水板底部壁面边界层流场结构, 降低湍流猝发频率和强度, 实现两栖无人平台滑水状态下的摩擦阻力减小和高速航行运动。

6.2 气幕(气泡)/气垫减阻技术

气幕减阻又称气泡减阻, 其机理是利用水与空气的密度和黏度的差别, 在船底通入空气而形成一层薄的气液两相混合流, 通过混合流密度、黏度以及流动模式的改变, 减少船体的摩擦阻力^[38]。若进一步加大气体流量, 并在船体车体周围设置柔性隔墙, 则在船体底部和水面之间形成气垫, 可进一步减小船体底部浸湿面积的摩擦阻力。

受船舶领域气幕(气泡)/气垫减阻技术启发, 文献[39]通过在水陆两栖车的头部、车体底部设置气泡喷射孔来形成车体水下部分壁面空气层, 减小了车体浸湿面积和摩擦阻力。

文献[40]利用CFD方法进一步分析了不同航速下气幕对两栖车航行姿态和航行阻力的影响, 结果表明在两栖车航速11.11 km/h, 空气体积流量0.2 L/s, 浪高0.5 m时, 最大减阻效果可达到10.89%, 如图10所示。

近些年, 也有学者提出在两栖平台底部喷涂特殊合金材料, 通过合金涂层与水的化学反应产生气泡来减阻。由于该技术还处于探索研究阶段, 短期内难以

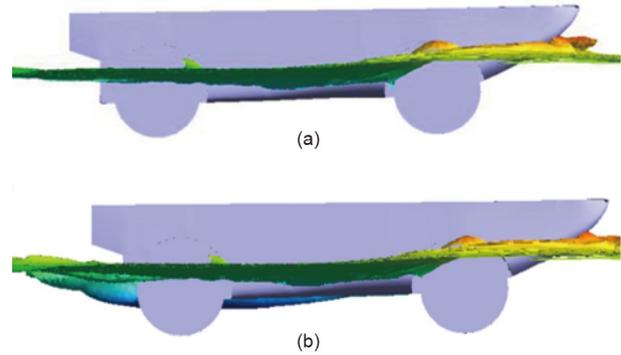


图10 气幕对两栖车航行姿态影响与减阻作用。(a) 无气幕作用; (b) 有气幕作用

Figure 10 The effect of air cushion on attitude and drag reduction of amphibious vehicle. (a) Without air cushion; (b) with air cushion.

在两栖无人平台上得到应用。

7 结论

“零伤亡”、“非接触”等新型两栖作战理念和作战样式对新一代水陆两栖无人平台特别是其高航速核心指标提出了更高需求。通过系统梳理不同构型水陆两栖平台航行时水阻力构成和影响因素, 归纳总结了采用构型创新设计实现两栖无人平台减阻增速的主要方法, 如表1所示。

表1 两栖无人平台减阻方法

Table 1 Drag reduction methods for the unmanned amphibious vehicle

减阻方法	减阻机理	优点	缺点
可收放悬架	减少两栖平台在水下浸湿部分, 形成更规则车体外形	减小兴波阻力作用显著	收放机构复杂, 轮穴占用较大车体空间
车首线型优化(含仿生设计)	设计合理的导流角、入流角, 避免两栖平台头部堵水、上浪	减小黏压阻力作用显著	可能影响越野行驶的接近角设计
车身主体优化	形成流线型滑行车体	可减小摩擦阻力、压差阻力	需考虑整体构型, 设计难度大
压浪板	利用压浪板动浮力调节车首阻力、升力变化, 抬升车首	车体更快进入过渡航行甚至滑水航行状态, 减小压差阻力	额外设计压浪板收放和调节机构
滑水板	利用滑水板动浮力抬升车尾, 缓解车首上倾过度现象	稳定车体航行纵倾, 减小压差阻力	额外设计滑水板收放和调节机构
飞翼/水翼	利用飞翼/水翼额外提供的动浮力抬升车体, 调节车体纵倾和深沉	减小压差阻力、摩擦阻力	额外设计飞翼/水翼收放和调节机构, 飞翼/水翼姿态控制复杂
沟槽减阻	沟槽结构影响车体结构水下部分近壁区湍流猝发过程, 来获得减阻效果	减小摩擦阻力、压差阻力	沟槽设计和制造复杂, 减阻作用受来流速度和外界条件影响大
气幕/气泡/气垫减阻	在车底通入空气而形成一层薄的气液两相混合流, 改变混合流密度、黏度以及流动模式, 减少摩擦阻力	减小摩擦阻力	气体喷射结构复杂, 喷射参数控制复杂

单一航态和构型的水陆两栖无人平台将难以兼顾高航速、高海况等水上性能需求。未来具有高航速特征的两栖无人平台将成为两栖技术领域研究的热点和重点, 主要结论和研究建议包括:

(1) 高航速是先进水陆两栖无人平台核心指标之一, 需要创新水陆两栖无人平台构型设计, 借鉴船舶设计新理论新方法减小航行水阻力, 实现航态优化和航速提升;

(2) 悬架及车轮/履带在水中产生的阻力占总阻力较大成分, 需要创新设计悬架机构构型和优化硬点位置、杆长参数, 实现悬架系统的大角度翻转, 使车体底部形成平整流线滑水车体;

(3) 为便于水陆两栖无人平台快速进入滑水航态, 且具有适当的稳定性, 可在车头、车尾分别增加压浪板、滑水板附件, 通过车首、车尾流体动压力和力矩调整航行纵姿和车体深沉, 并确保航行稳定;

(4) 合理设计车首导流角、入流角, 并优化车体底部形体各部分连接处折角线、轮穴过渡结构, 以及开展仿生外形设计, 可减小车体黏压阻力并形成滑行车体外形, 为水陆两栖无人平台高速滑水航行奠定基础;

(5) 基于非光滑表面减阻理论的沟槽减阻技术, 气幕(气泡)/气垫减阻技术可用于优化两栖无人平台水下浸湿部分壁面湍流状态, 降低摩擦阻力。

参考文献

- 1 Wu H H. Planning and evaluation of amphibious landing operations (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. 1–14 [吴航海. 两栖登陆作战方案的规划与评估分析. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2017. 1–14]
- 2 Zhang G B. The latest developments in the U.S. marine corps amphibious fighting vehicles (in Chinese). Tank Armoured Vehicle, 2018, 501: 17–20 [张国斌. 美国海军陆战队两栖战车的最新进展. 坦克装甲车辆, 2018, 501: 17–20]
- 3 Sun X G, Qiu S C, Li Z, et al. Application prospect of intelligent unmanned equipment in future amphibious operations (in Chinese). J Ordnance Equip Eng, 2022, A1: 7–10 [孙旭光, 邱思聪, 李钊, 等. 未来两栖作战中智能化无人装备的应用展望. 兵器装备工程学报, 2022, A1: 7–10]
- 4 Jia X P, Ma J, Yu K L, et al. Technology research on ultra high speed amphibious vehicle (in Chinese). Mech Research Appl, 2015, 28: 46–49 [贾小平, 马骏, 于魁龙, 等. 超高速水陆两栖车技术研究. 机械研究与应用, 2015, 28: 46–49]
- 5 Xu L Y. Research on design of retractable suspensions and resistance reduction characteristics for high-speed amphibious vehicles (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2022. 1–18 [徐黎洋. 高速轮式水陆两栖车可收放悬架设计与减阻特性研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2022. 1–18]
- 6 Zhou S Q, Guo B Q, Zhu J X, et al. Research status and development trend of key technologies for amphibious armored vehicle (in Chinese). J Gun Launch Control, 2023, 44: 89–102 [周世琪, 郭保全, 朱家萱, 等. 两栖装甲车关键技术研究现状及发展趋势分析. 火炮发射与控制学报, 2023, 44: 89–102]
- 7 Martin G. Amphibious combat vehicle making waves in the Asia-Pacific. Asia-Pacific Defence Reporter, 2022, 48: 60–63
- 8 Guo Z X. Japan plans to equip AAV7 amphibious armoured vehicles (in Chinese). Foreign Tank, 2014, 5: 5 [郭正祥. 日本计划装备AAV7两栖装甲车. 国外坦克, 2014, 5: 5]
- 9 Abdulov S, Trusevich I, Volkov A. Ensuring the amphibious capabilities of the amphibious vehicle based on the hydrodynamic buoyancy principle. Matec Web Conf, 2018, 224: 02030
- 10 Tang C L, Zhao X J, Yu K Y, et al. On US amphibious wheeled vehicles development trends and its enlightenments (in Chinese). J Military Transportation Univ, 2012, 14: 88–91 [唐陈亮, 赵祥君, 于坤炎, 等. 美军水陆两栖轮式车辆发展趋势及启示. 军事交通学院学报, 2012, 14: 88–91]
- 11 Wang Y B. High speed amphibious vehicle (in Chinese). Friend Sci Amateurs, 2003, 12: 17 [王一波. 高速水陆两用车. 科学之友, 2003, 12: 17]
- 12 Ning W X. Amphibious vehicles extend to trucks, the U.S. Gibbs launched a new amphibious truck (in Chinese). Special Purpose Vehicle, 2012, 3: 50–52 [宁文祥. 水陆两用车延伸到卡车领域美国Gibbs公司新推出水陆两用卡车. 专用汽车, 2012, 3: 50–52]
- 13 Gu J. "SPLASH" amphibious vehicle (in Chinese). Aerospace Technol Civil Products, 2004, 3: 13 [谷江. "SPLASH"水陆两用车. 军民两用技术与产品, 2004, 3: 13]
- 14 Wu L. U.S. military high speed amphibious vehicle (in Chinese). Foreign Tank, 2008, 9: 40–41 [吴磊. 美国军用高速两栖车. 国外坦克, 2008, 9:

- 40–41]
- 15 Anonymity. Unmanned amphibious vehicle (in Chinese). *Mech Engr*, 2014, 3: 8 [佚名. 水陆两栖无人战车. 机械工程师, 2014, 3: 8]
 - 16 Pan D B. Drag reduction design and hydrodynamic performance optimization of flanks on amphibious vehicles (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. 27–35 [潘迪博. 水陆两栖无人平台侧翼减阻设计与性能优化. 硕士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2021. 27–35]
 - 17 Wang T, Xu G Y, Guo Q S. A Numerical Simulation Method for Dynamic Performance of Amphibious Vehicle on Water and Its Application (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 4–8 [王涛, 徐国英, 郭齐胜. 两栖车辆水上动态性能数值模拟方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2009. 4–8]
 - 18 Sun X G, Li Y, Wei T, et al. Analysis of resistance ingredient for amphibious vehicles based on calculation method of improved multiple model (in Chinese). *Vehicle Power Technol*, 2019, 153: 56–59 [孙旭光, 李勇, 韦韬, 等. 基于改进叠模方法的两栖车航行阻力成分研究. 车辆与动力技术, 2019, 153: 56–59]
 - 19 Song G X. Main question research on reducing resistance and increasing speed for amphibious vehicle (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. 12–14 [宋桂霞. 水陆两栖车辆减阻增速关键问题研究. 博士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2008. 12–14]
 - 20 Peng S W. Study on underwater drag reduction of amphibious vehicles (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Changchun: Jilin University, 2021. 1–6 [彭胜伟. 水陆两栖车水下减阻研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2021. 1–6]
 - 21 Chen H, Zhao L J, Chen M. Optimization on folding double wishbone suspension of amphibious vehicle (in Chinese). *J Mach Des*, 2015, 32: 73–77 [陈欢, 赵立杰, 陈默. 水陆两用车折叠式双横臂悬架的优化. 机械设计, 2015, 32: 73–77]
 - 22 Li W. Structure design and simulation analysis of rear suspension of amphibious vehicle (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2021. 9–18 [厉伟. 水陆两用车后悬架结构与仿真分析. 硕士学位论文. 济南: 山东交通学院, 2021. 9–18]
 - 23 Gao F D, Jiang L H, Pan C Y. Numerical calculation on hydrodynamic characteristics for the amphibious vehicle based on computational fluid dynamics (in Chinese). *J Mech Eng*, 2009, 45: 134–139 [高富东, 姜乐华, 潘存云. 基于计算流体动力学的水陆两栖车辆水动力特性数值计算. 机械工程学报, 2009, 45: 134–139]
 - 24 Wang S X, Wang H, Jin G Q, et al. Study on hydrodynamic performance of amphibious vehicle and mechanical characteristics of wave board (in Chinese). *J Ordnance Equip Eng*, 2020, 41: 1–6 [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. 兵器装备工程学报, 2020, 41: 1–6]
 - 25 Sun C, Xu X, Wang L, et al. Research on hydrodynamic performance of a blended wheel-track amphibious truck using experimental and simulation approaches. *Ocean Eng*, 2021, 228: 108969
 - 26 Peng K, Liu Y. Influence of empennage on resistance characteristics of a wheeled amphibious vehicle (in Chinese). *Vehicle Power Tech*, 2014, 4: 15–19 [彭锬, 刘影. 尾翼板对轮式两栖车辆航行阻力特性影响的研究. 车辆与动力技术, 2014, 4: 15–19]
 - 27 Lee S J, Lee T I, Lee J J, et al. Experimental study on resistance and running attitude of an amphibious assault vehicle with a hydrofoil as a trim-control device. *J Society Naval Architects Korea*, 2017, 54: 96–101
 - 28 Helvacioğlu S, Helvacioğlu I H, Tuncer B. Improving the river crossing capability of an amphibious vehicle. *Ocean Eng*, 2011, 38: 2201–2207
 - 29 Sun C L, Xu X J, Tang Y J, et al. Experimental and numerical simulation of reducing resistance and increasing speed for a segmented-track amphibious vehicle (in Chinese). *J National Univ Defense Tech*, 2022, 44: 201–208 [孙承亮, 徐小军, 唐源江, 等. 分段履带式水陆两栖车减阻增速试验及数值仿真. 国防科技大学学报, 2022, 44: 201–208]
 - 30 Li Y L, Pan S X. Research on amphibious vehicle body design concepts for raising its navigation speed (in Chinese). *Acta Armamentar*, 2007, 28: 1116–1121 [李玉良, 潘双夏. 提高两栖车辆水上行驶速度的车体设计方案研究. 兵工学报, 2007, 28: 1116–1121]
 - 31 Liu B, Xu X, Pan D, et al. Research on shipping energy-saving technology: Hydrofoil amphibious vehicle driven by waterjet propulsion. *J Cleaner Production*, 2023, 382: 135257
 - 32 Nakisa M, Maimun A, Ahmed Y M, et al. Hydrodynamic resistance analysis of new hull design for multipurpose amphibious vehicle applying with finite volume method. *J Teknol*, 2015, 74: 73–76
 - 33 Yan Z, Li M, Du Z, et al. Study on a tracked amphibious robot bionic fairing for drag reduction. *Ocean Eng*, 2023, 267: 113223
 - 34 Gaylord M K, Blades E L, Parsons G R. A hydrodynamics assessment of the hammerhead shark cephalofoil. *Sci Rep*, 2020, 10: 14495
 - 35 Jia X P, Xing J W, Yu K L. The resistance analysis and realized form of the sliding bodywork for the high speed amphibious vehicle (in Chinese). *Vehicle Power Technol*, 2001, 1: 15–22 [贾小平, 邢俊文, 于奎龙. 高速两栖车滑行车体阻力分析与可实现形式. 车辆与动力技术, 2001, 1:

15–22]

- 36 Liu B L, Xu X J, Pan D B. Drag reduction configuration analysis of the grooves on amphibious vehicles walking mechanism. *Proc Inst Mech Eng Part C*, 2022, 236: 5994–6006
- 37 Qiu H, Chauhan K, Lei C. A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures. *Ocean Eng*, 2020, 217: 107916
- 38 Dong W C, Guo R X. Research progress of air injection drag reduction (in Chinese). *J Sh Mech*, 1998, 2: 73–78 [董文才, 郭日修. 气幕减阻研究进展. *船舶力学*, 1998, 2: 73–78]
- 39 Nakisa M, Maimun A, Ahmed Y M, et al. Air lubrication influence on frictional resistance reduction of multi-purpose amphibious vehicle. *J Teknol*, 2015, 74: 1–3
- 40 Ain Abd Rahman N, Abd. Malik A M, Nakisa M, et al. Numerical prediction on resistance reduction of multi-purpose amphibious vehicle (MAV) due to air-cushion effect in a regular wave. *J Phys-Conf Ser*, 2020, 1432: 012047

Sailing resistance reduction and speed raising for amphibious vehicles using novel configuration

XU HaiJun, XU XiaoJun, XU LiYang & LIU BoLong

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

The sailing speed of an amphibious unmanned vehicle is one of the key indicators for its combating function, which is critical for tackling urgent amphibious events rapidly, improving the survival probability of navigational crossings, and improving the maneuverability of beachfront landing. By tweaking both the construction principle and technical characteristics of typical wheeled and tracked amphibious manned/unmanned platforms, this paper expounded the navigational gesture characteristics and water resistance components during navigation and subsequently evaluates the internal connection between water resistance and configuration of high-speed amphibious vehicles. The proposed methods for reducing drag and increasing speed were as follows: the innovative design of retractable suspension, the innovative layout of drag-reducing accessories, optimization of vehicle shape, implementation of the bionic fairing, surface microstructure, and air cushion. The paper's conclusions can be used as a technical reference for developing a new generation of amphibious unmanned platforms, as well as for building, planning, and developing unmanned amphibious vehicles.

amphibious, unmanned vehicle, construction, resistance reduction, speed raising

doi: [10.1360/SST-2023-0049](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0049)