

引用格式: 魏成柱, 李英辉, 易宏. 船艏及干舷压浪在高速艇上的应用对比[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(1): 14-20.
WEI C Z, LI Y H, YI H. Effect of bow spray strips and Ω -type freeboard on high-speed boats[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(1): 14-20.

船艏及干舷压浪在高速艇上的应用对比

魏成柱^{1,2}, 李英辉¹, 易宏²

1 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

2 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

摘要: 快艇在高速航行时会产生剧烈的船部兴波和干舷淹湿问题, 通常需要采用适当的压浪措施来控制这些不利因素。为进一步研究干舷压浪技术在高速艇上的应用效果并与船艏压浪技术进行对比, 基于某一细长高速穿浪船, 对比这2种压浪技术对船体兴波、淹湿、运动、稳性和高速下横倾回复力矩的影响。船体淹湿、阻力和船体运动通过求解 URANS 方程和使用动网格技术获得, 高速下的横倾回复力矩也通过求解 URANS 方程获得。计算结果表明, 2种压浪技术均能有效控制船体淹湿, 但干舷压浪设计能在船长范围内控制船体淹湿并具有更好的初稳性, 在高速下也有更大的横倾回复力矩。自航模试验也验证了压浪干舷的可行性和良好性能。

关键词: 高速艇; 干舷压浪; 船体淹湿; 稳性; 横倾回复力矩; 数值水池试验

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.01.003

Effect of bow spray strips and Ω -type freeboard on high-speed boats

WEI Chengzhu^{1,2}, LI Yinghui¹, YI Hong²

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

Abstract: A high-speed boat may encounter severe wave-making at the bow and become wetter at high speed. Some measures can be taken to overcome these disadvantages. In order to compare the effect of bow spray strips and Ω -type freeboards on a high-speed boat, hull wetness, resistance, hull motion, stability and the restoring moment of the heel at high speed of models with these two kinds of auxiliaries were calculated and measured. CFD methods and model tests were adopted. Both of these two auxiliaries can reduce hull wetness, and the model with a Ω -type freeboard has a better initial stability and larger restoring moment of the heel at high speed. A free running model test also indicates that the Ω -type freeboard has a fine performance.

Key words: high-speed boat; Ω -type freeboard; hull wetness; stability; restoring moment of heel; numerical tank test

0 引言

快艇在高速航行时会产生剧烈的船部兴波而

淹湿部分船艏, 且淹湿会随着速度的提高而向船体中、后部发展, 进而增加船体湿表面积和船体阻力。当快艇的速度超过某一临界值时, 摩擦阻力

收稿日期: 2016-07-14

网络出版时间: 2016-12-28 16:03

基金项目: 上海交通大学海洋工程国家重点实验室自主研究课题(GKZD010061)

作者简介: 魏成柱, 男, 1987年生, 博士生。

李英辉, 男, 1973年生, 博士, 讲师。研究方向: 新型船舶开发和数值计算

易宏(通信作者), 男, 1962年生, 教授, 博士生导师。

downloaded from www.ship-research.com



会重新主导船体阻力,此时,减小船体湿表面积是一种有效的减阻手段。为了控制船艏兴波以及干舷上浪与淹湿,可以采用在艏部或水线附近安装压浪条(或防溅条)^[1]的方法。安装压浪(防溅)条是一种非常简、易行的压浪措施,俄罗斯的1234型导弹艇就在艏部安装了防溅条以控制艏部兴波和淹湿。除艏部压浪以外,最近还兴起了带折角设计的干舷压浪式设计,其主要特征是干舷在水线附近向外折出,有时该设计也被称为“Ω船型”。该设计的优点是,除了压浪以外,还能增加船体容积,能在提高稳性的同时而不用加宽水线以下船体,特别适合于一些细长的高速快艇。Thompson^[2]在其专利中就采用了类似的技术,印尼的三体导弹艇的主船体也采用了类似的技术。采用带折角设计的干舷,将压浪附体融合到船体设计中逐渐成为一种广泛采用的技术。相比于安装压浪(防溅)条,干舷压浪设计需融入到整个船体设计周期中。

魏成柱等^[3]研究了楔形压浪体在内倾式船艏上的应用效果,证实楔形压浪体可以有效控制高速下内倾式穿浪船的艏部上浪和船体淹湿。王健等^[4]在对无人自航模进行低速直航研究时发现,自航模的姿态与水池试验值存在差别,表现为自航模的艏倾角略大于拖曳水池试验测量值。同时,Wei等^[5]也通过数值水池试验研究了船体航行姿态对船体淹湿的影响。基于以上研究,本文拟在高速艇上采用干舷压浪的设计。文献[6]初步讨论了干舷压浪的纵向角度问题。

为进一步考察干舷压浪在快艇上的使用效果,并对比船艏压浪与干舷压浪的使用效果和差异,本文将以一艘细长的高速单体穿浪船为母型船,通过加装艏部楔形压浪条和采用干舷压浪来对比这2种技术措施对船体淹湿、阻力、运动、稳性及高速下横倾回复力矩的影响。由于尖舭滑行艇在高速航行时只有舭部折角线以下的船底接触水面,甚至是只有船艏一小部分接触水面,其湿表面积很小,故本文的研究将主要针对并适用于瘦长的非尖舭滑行艇设计的高速圆舭或近圆舭类快艇(船)。

为了完成本研究,本文将主要基于数值水池试验,通过求解URANS方程来研究2种技术对船体阻力、运动和高速下横倾回复力矩的影响。随着技术和学术水平的积累,数值计算的精度和可靠性得到了很大的提升,在科学研究和工程应用上得到越来越广泛的使用和认可^[7],成为除模型试验外船型优化设计非常有效的手段。当傅汝德

数 F_n 较高时,由于船体存在较大的纵向和垂向耦合运动,因此在数值计算中,为了更准确地预报船体性能,需要考虑船舶航行运动改变对预报结果的影响,而获取和模拟船体运动最为有效的方法是使用动网格。此外,本文也将进行简单的自航模测试来验证干舷压浪的使用效果。通过本次研究,进一步揭示干舷压浪的性能,证明其在高速艇上的实用价值。

1 压浪方案及计算原理

本文以一艘16 m长的高速穿浪快艇^[8]为母型船,分别采取在艏部安装楔形压浪条和将干舷改装成折角压浪式的设计来比较这2种压浪技术的影响,不过船体水线以下部分保持不变。带折角的干舷压浪式设计是在原有干舷的基础上,干舷在水线以上部分向船外凸出。干舷折角线连接艏柱和艉柱,分布于船长范围内。在本次研究中,干舷凸出的宽度为0.075倍水线宽。艏部安装压浪条和采用干舷压浪的实施方案如图1所示。图中还给出了船艏压浪方案和干舷压浪方案的船体横剖面及侧向轮廓线。

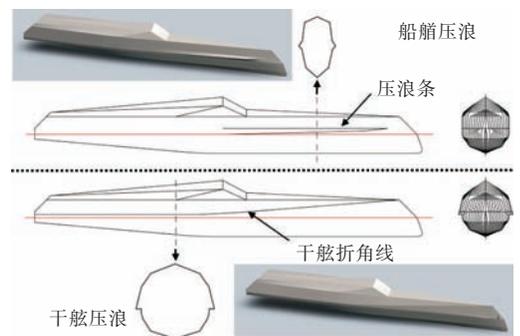


图1 2种压浪方案的船体横剖线和侧向轮廓线

Fig.1 Hull sections and side profiles of two methods

本文的研究除初稳性以外,均在模型尺度内进行,计算中所用到模型的主尺度如表1所示,其缩尺比为6。

表1 计算模型主尺度

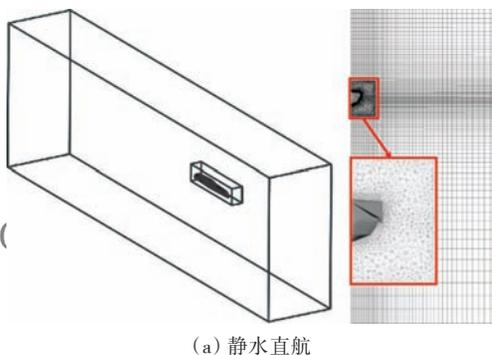
Table 1 Main dimensions of the hull model

项目	数值
总长 L_{tot}/m	2.746
水线长 L/m	2.708
水线宽 B/m	0.333
吃水 T/m	0.133
质量 M/t	0.047

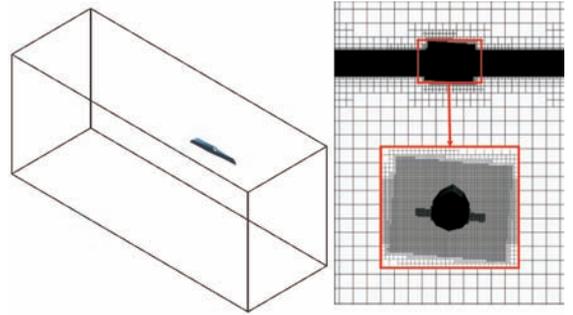
本文选用数值水池试验作为主要研究手段,求解URANS方程,考虑粘性。在粘性流理论中,对Navier-Stokes方程进行平均,得到雷诺平均的Navier-Stokes方程(RANS)。为了封闭RANS方程组,必须对雷诺应力张量进行模拟,因而产生了较

多的湍流模型。这里选择在船舶行业中应用较多的SST $k-\omega$ 模型来进行计算,对该模型的详细介绍可参见文献[9]。对自由面的捕捉则使用当前流行的流体体积(Volume of Fluid, VOF)法^[10],并通过设定水的体积分数为0.5而得到。

为了模拟船体运动,需要使用动网格来进行计算。通常,最直接的方式是使船模曲面运动,并配合以弹簧光顺法和局部网格重构。但是这种方法的缺点是对复杂模型进行网格重构时会出现负体积网格而导致计算失败,而且网格重构会产生额外的计算时间。另一种方法是将边界层网格作为一个区域或者将边界层网格及附近部分网格随船模曲面一起运动,并配合以弹簧光顺法,该方法对模型周围网格没有影响,有利于加入并保有边界层网格。本文用于计算船体阻力、兴波和运动的数值计算时将计算域分为了2部分,包括随船体运动的随体区域(Dynamic zone)和静止区域(Stationary zone),其中运动区域采用四面体网格来适应船体复杂曲面,静止区域则采用六面体网格,船体表面添加边界层网格。由于船体对称,故取一半船体创建计算域。计算域的划分与网格剖面如图2(a)所示。随体区域和静止区域之间的网格节点是连续的。当网格数量超过150万时,网格数量对计算结果的影响就会非常小^[11]。在求解船体阻力和运动时,所用到的网格数量大于200万,满足计算精度对网格数量的要求。为了验证计算方法的可靠性和有效性,将某排水型高速单体穿浪船基于该方法的计算结果与水池试验结果进行了对比,结果表明,该方法能够满足船型性能预测的要求,如图3所示。本文中的阻力、纵倾(艏倾为正)、升沉(向上为正)结果均做了无因次化处理。在研究压浪措施对高速下船体横倾回复力矩的影响时,由于模型存在横倾角,因此该部分计算采用整船;模型固定;速度节点选为8.4 m/s,对应的傅汝德数 $Fn=1.630$;初始艏倾角选取水池试验测量值 3.45° ,横倾角度分别设为左倾 5° , 10° 和 15° 。计算网格采用切割体网格,计算域与网格剖面如图2(b)所示。由于非对称的原因使用了整船进行计算,故网格数量大于380万。



(a) 静水直航



(b) 带横倾角的静水直航

图2 计算域设置和网格剖面

Fig.2 Computational domain settings and meshes

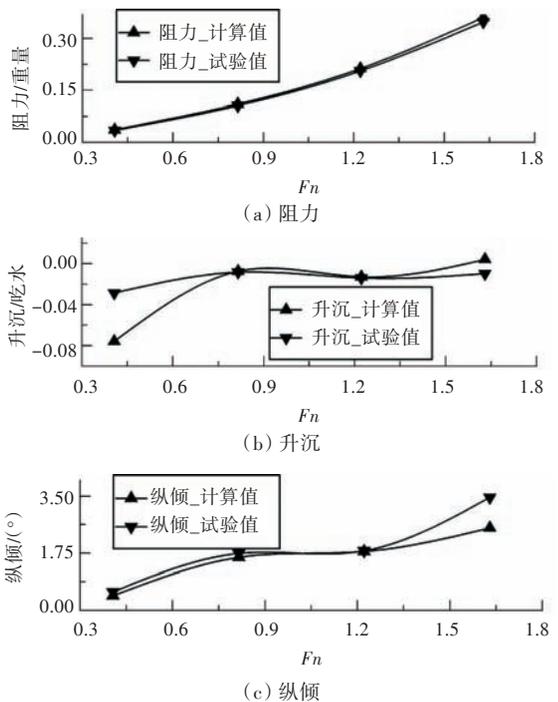


图3 计算方法验证

Fig.3 Experimental verification of the calculation method

2 兴波和船体淹湿

计算结果表明,2种压浪方式产生的船体兴波差异较大,如图4所示。总体来说,干舷压浪较船艏压浪在船体周围产生的兴波小,兴波更靠后;船艏压浪和干舷压浪相比其艏部兴波要明显些。当 $Fn=0.407$ 时,2种方案在船体周围产生的兴波差别不大。而当 $Fn=1.630$ 时,2种方案产生的兴波差异则主要体现在船体四周,原因分析如下:当航速提高时,艏部开始上浪并不断加强,此时采用外飘式设计的船艏压浪体的作用愈来愈明显,由此产生的兴波亦更加明显,因由船艏压浪体压浪而产生的兴波向船体中、后部扩散;而干舷压浪则对艏部的上浪限制较弱,允许船艏上浪发展至船中、前部,且因船艏是内倾的,上浪并没有在艏部被压出船艏,故其艏部兴波较小。

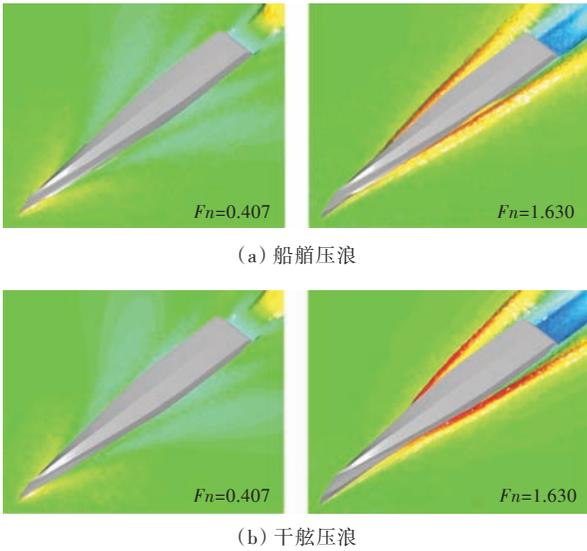


图4 2种方案下的船体兴波和飞溅对比
Fig.4 Comparison between wave-making and spray with two methods

对比2种方案的船体表面淹湿(图5)可以发现,船艏压浪和干舷压浪均能很好地控制船部和干舷的淹湿,但两者产生的结果却明显不同。在 $Fn=0.407$ 时,船艏上浪不明显,2种方案的作用几乎相同;当 $Fn=0.815$ 时,船艏压浪对船艏上浪进行了抑制,而干舷压浪则对船中、后的干舷淹湿进行了抑制;当 $Fn=1.222$ 时,船艏压浪已经不能有效压制船中、后的干舷淹湿,而干舷压浪则在一定程度上放任了船艏上浪,很好地限制了船中的干舷淹湿;当 $Fn=1.630$ 时,船艏压浪已经不能有效限制船中、后的干舷淹湿,而干舷压浪的船艏上浪则不明显,并能很好地限制船中的干舷淹湿。

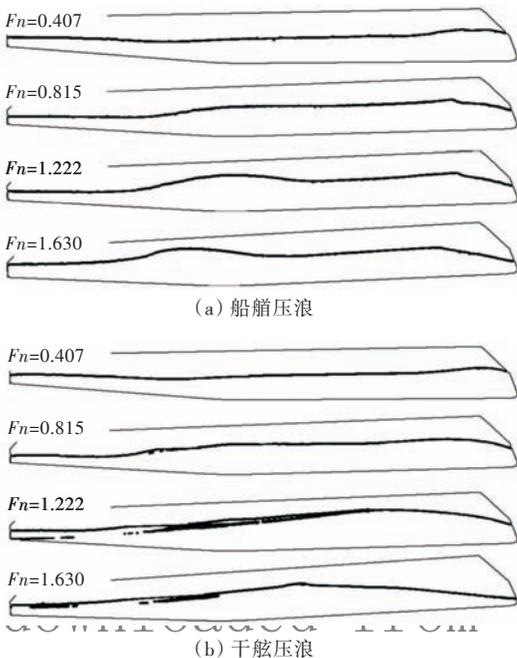


图5 2种方案下的船体表面淹湿对比
Fig.5 Comparison of the wetted hull surface with two methods

自航模试验与拖曳水池试验结果的对比也验证了数值水池试验的计算结果。图6展示了模型高速下的兴波和飞溅,其中采用船艏压浪的模型是由拖车高速拖行,采用干舷压浪的模型是由大功率无刷电机和螺旋桨推进。图6(a)显示,采用船艏压浪方案的模型产生的飞溅是由船艏向船艉发展;图6(b)显示,采用干舷压浪方案的模型产生的飞溅是由船艉向船艉发展。这与数值水池试验结果相符,自航模试验也进一步验证了干舷压浪的可行性。拖曳水池试验的拖点在船模中部,而自航模试验的推力因为由螺旋桨提供,故艉倾会更加剧烈,不过此时干舷压浪仍能发挥作用,但船部压浪条因船艏的抬升将无法发挥作用。



(a) 船艏压浪(水池拖曳速度 8.4 m/s)



(b) 干舷压浪(模型自航速度 9.2 m/s)

图6 2种方案在高速下的兴波及模型试验结果
Fig.6 Wave-making, spray and results of model test at high speed with two methods

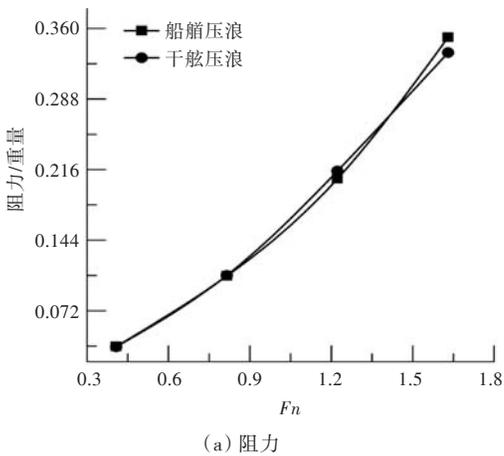
3 阻力及船体运动

在利用动网格获取航行运动的前提下,对船艏压浪和干舷压浪进行了对比分析,并对阻力、纵倾(艉倾为正)和升沉(向上为正)的结果做了无因次化处理。

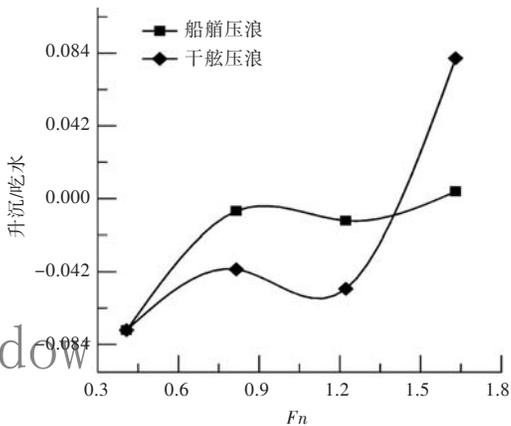
在船体阻力方面,2种压浪方式的差别主要体现在中、高速段,如图7(a)所示。在低速段,由于船体上浪不明显,因此2种压浪方式几乎没有差别。在中速段,和干舷压浪相比船艏压浪的效果稍好,这是由于干舷压浪和舷侧淹湿的位置相互作用的结果。在高速段,干舷压浪的减阻效果较船艏压浪有优势。总体来说,由压浪方式的不同而引起的航行阻力差异在本文所计算的速度范

围内并不明显,若航速继续提高,则干舷压浪方案或能表现出更大的快速性优势。

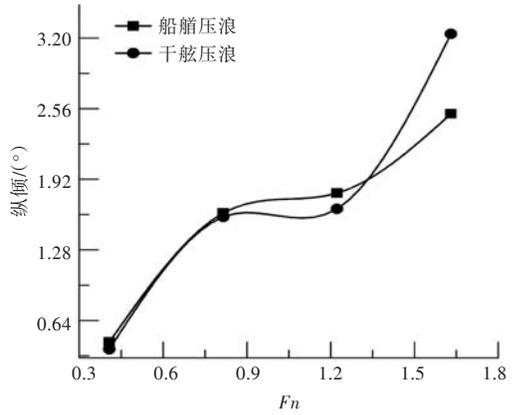
如图7(b)和图7(c)所示,2种压浪方式对船体在静水中的航行运动的改变不同。在最低速度点,水动力不明显,此时2种方案的航行运动几乎相同。但随着航速的升高,2种方案产生的水动力和水动力作用点也在变化,因而其航行运动也有所不同。当 $F_n < 1.4$ 时,干舷压浪的重心下沉量要大于船艙压浪,而当 $F_n > 1.4$ 时,干舷压浪的重心抬升明显,该现象是由压浪式干舷产生的动升力所导致。在低速段,2种方式产生的艏倾相差较小;在中速段,船艙压浪产生的艏倾角较大;在高速段,干舷压浪产生的艏倾角较大,分析认为,该差别是由压浪式干舷产生的动升力所导致。对比2种方案在升沉和艏倾上的变化趋势可以发现,这2种方案在升沉和艏倾随 F_n 变化的趋势上是一致的,应该是由主船体的水动力特性决定的。由以上可见,除压浪作用外,干舷压浪还可以产生额外的动升力,通过改变干舷压浪在纵向的曲率变化可以改变船体的航行运动。若通过控制算法实现干舷压浪的分段自控,则可根据所需的航行运动来调整其纵向曲率。



(a) 阻力



(b) 升沉



(c) 纵倾

图7 2种方案下的阻力和运动对比

Fig.7 Comparison of hull drag and motion with two methods

此外,当 $F_n=1.630$ 时,采用干舷压浪设计的船体阻力要小于采用船艙压浪设计的阻力,这是由于船体发生了较大的抬升和纵倾所致。同时也可以发现,此时船体湿表面积减小了,这也是其阻力降低的直接原因。通过分析速度节点 $F_n=1.630$ 下的2种压浪方式的船体阻力成分可知:船艙压浪下,单位重量的压阻力为0.123,单位重量的粘性阻力为0.229;干舷压浪下,单位重量的压阻力为0.122,单位重量的粘性阻力为0.214。由此可见,干舷压浪方案下的船体阻力下降是由摩擦面积减小所导致。

4 初稳性及储备浮力

由于干舷压浪设计增加了水线以上船体的宽度,所以在一定吃水范围内其初稳性会有所增加,但随着船体宽度的向上收缩,其初稳性半径也将随着水线面的减小和排水体积的增加而减小。该结论已得到稳性计算结果的验证,如图8所示。由图8可见,由于水线以下的形状相同,2个模型在设计水线处及水线以下的初稳性半径相同。但越过设计水线以后,采用干舷压浪方案快艇的稳性半径明显大于采用船艙压浪技术快艇的稳性半径,这对于细长的船型来说非常有益。由图9可见,采用干舷压浪方案快艇的储备浮力要大于采用船艙压浪措施快艇的储备浮力,这就意味着采用干舷压浪方案的快艇具有一定的载重和安全性优势。

5 高速下的横倾回复力矩

图10对比了采用2种压浪方案的模型在 $F_n=1.630$ 时的横倾回复力矩。当模型高速航行时,干舷压浪方案在不同横倾角下产生的横倾回复力矩均大于船艙压浪方案产生的回复力矩,增

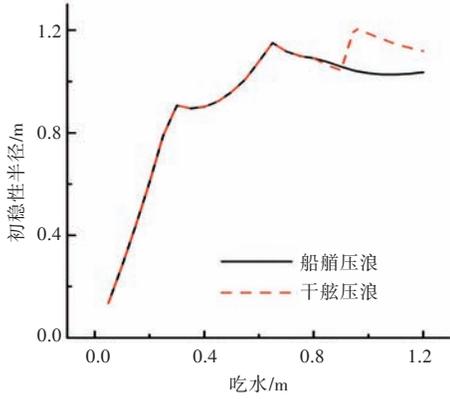


图8 2种方案下的初稳性对比

Fig.8 Comparison of initial stability with two methods

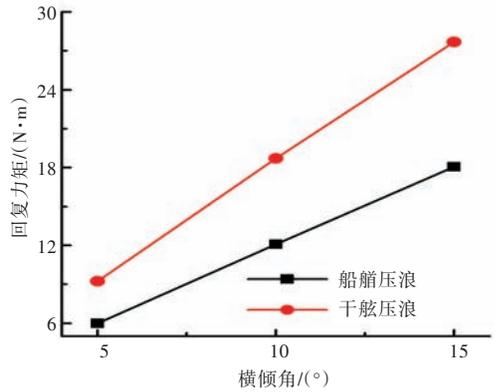


图10 2种方案在高速下的横倾回复力矩对比($F_n=1.630$)

Fig.10 Comparison of hull restoring moment of heel at high speed with two methods($F_n=1.630$)

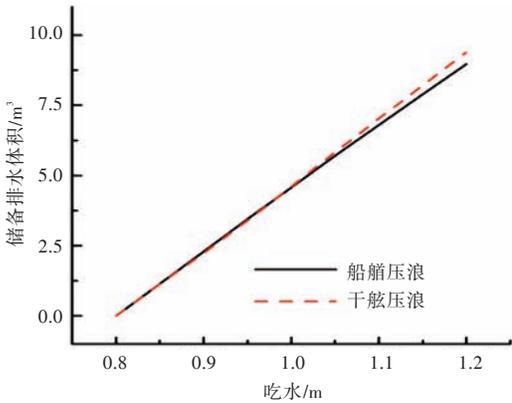


图9 2种方案下的储备浮力对比

Fig.9 Comparison of reserve buoyancy with two methods

额在 53%~55%之间。更大的回复力矩则意味着高速转弯时船体横倾角更小。增加横倾回复力矩对提高快艇,尤其是一些细长快艇的机动性和安全性无疑是有利的。因此,干舷压浪设计在提高快艇动稳性和安全性方面明显优于船艏压浪设计。但较大的横倾回复力矩不是通过较大的储备浮力获得,而是由干舷压浪产生的水动力提供。对比2种方案在高速、存在横倾时的兴波和船体淹湿可以发现,干舷压浪设计对控制横倾时的船体淹湿帮助很大。由图11可见,当横倾角为 15° 时,船艏压浪设计模型的船中、后部淹湿几乎接近于甲板边线,而干舷压浪设计模型则将淹湿很好地控制在了干舷折角线以下。图12显示了自航模在高速回转时的船体横倾运动。试验中发现,自航模能够迅速由横倾转为正浮状态。

6 结 语

通过研究发现,船艏压浪和干舷压浪均可控制船艏和干舷的淹湿,但这2种方式也表现出了不同的特点和效果。

船艏压浪对艏部上浪和淹湿的控制效果显

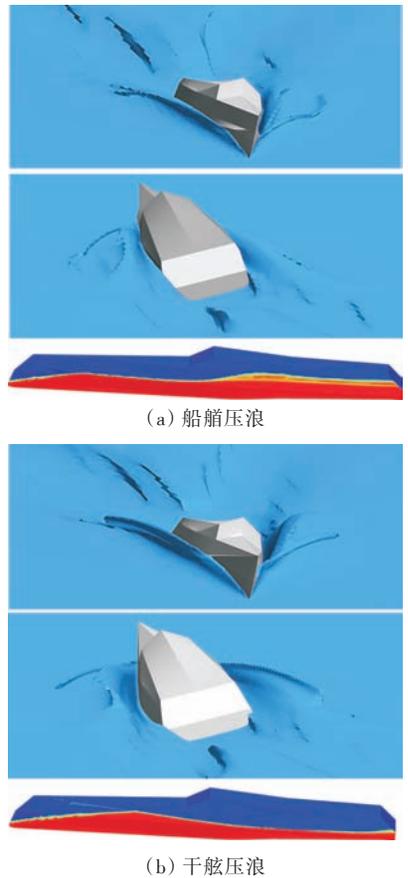


图11 2种方案下船体兴波和淹湿对比(横倾 15°)

Fig.11 Comparison between wave-making, spray and hull wetness with two methods (heel angle is 15°)



图12 自航模高速转弯

Fig.12 A free-running model turning at high speed

著,但随着速度的不断提高,楔形压浪体在船艏末端终止后,水流会冲出压浪体而淹没干舷。干舷压浪设计则可以在船长范围内对干舷淹没和上浪进行控制,尤其是当船体存在较大艏倾角时,艏部上浪将不明显,此时干舷压浪将起最主要的作用。

总体来说,由压浪方式的不同而引起的航行阻力差异在本文所计算的速度范围内并不明显,若航速继续提高,干舷压浪方案或能表现出更大的快速性优势。2种压浪方式对船体在静水中运动的影响不同,但分别采用2种方案的模型在沉和艏倾角随 F_n 变化的趋势上是一致的。

同船艏压浪相比,干舷压浪设计可以在不改变水线以下船体的基础上增加舱容和储备浮力,进而提高细长快艇的稳性与安全性。

采用干舷压浪设计的快艇在高速下产生的横倾回复力矩大于采用船艏压浪设计的快艇,这对提高快艇,尤其是一些细长快艇的机动性和安全性有利。

参考文献:

- [1] 邵世明,王云才,陈良权. 首压浪条对高速排水型艇航行性能的影响[J]. 上海交通大学学报,1980(3):83-91.
SHAO S M, WANG Y C, CHEN L Q. The effects of bow spray strips on resistance and seakeeping qualities of high-speed displacement hull[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1980(3):83-91 (in Chinese).
- [2] THOMPSON A. Boat:6116180A[P]. 2000-09-12.
- [3] 魏成柱,李英辉,易宏. 楔形压浪体在内倾式船首中的应用研究[J]. 船舶工程,2013,35(1):9-12.
WEI C Z, LI Y H, YI H. Application research of anti-green-water wedge to intilted bow[J]. Ship Engineering, 2013, 35(1):9-12 (in Chinese).
- [4] 王健,刘旌扬,魏成柱,等. 新概念穿梭艇自航模操控系统试验研究[J]. 中国舰船研究,2016,11(1):95-101.
WANG J, LIU J Y, WEI C Z, et al. Experimental study on the control system for the free-running model test of a new concept shuttle vessel[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1):95-101 (in Chinese).
- [5] WEI C Z, LI Y H, YI H. CFD and EFD based studies of hull wetness of fast Mono-WPC[C]//36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016). Busan, South Korea, 2016.
- [6] 魏成柱,毛立夫,李英辉,等. 单体半滑行穿浪船船型与静水航行性能[J]. 中国舰船研究,2015,10(5):16-21.
WEI C Z, MAO L F, LI Y H, et al. Analysis of the hull form and sailing characters in calm water of a semi-planing wave-piercing boat[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(5):16-21 (in Chinese).
- [7] LARSSON L, STERN F, VISONNEAU M. Numerical ship hydrodynamics: an assessment of the Gothenburg 2010 workshop[M]. Netherlands:Springer, 2014.
- [8] 魏成柱. 穿梭艇性能特征与船型优化[D]. 上海:上海交通大学,2013.
WEI C Z. The shuttle vessel performance characteristics and hull form optimization[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013 (in Chinese).
- [9] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.
- [10] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [11] YOUSEFI R, SHAFAGHAT R, SHAKERI M. High-speed planing hull drag reduction using tunnels [J]. Ocean Engineering, 2014, 84:54-60.