

文章编号: 1007-7294(2024)10-1496-11

浸没式喷水推进船模快速性 试验研究与推进性能分析

江佳炳^{1a, 1b}, 丁江明^{1a, 1b, 2}

(1. 武汉理工大学 a. 高性能舰船技术教育部重点实验室; b. 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 海南研究院, 海南 三亚 572000)

摘要: 本文针对一型浸没式喷水推进船模和一型螺旋桨对标母型船模, 开展推进器敞水试验、船体阻力试验与自航试验研究, 系统分析两种推进方式对应的推进器本体、“船体-推进器”系统推进性能的差异与变化特性。研究表明: (1) 浸没式喷水推进器模型尺度下的敞水效率与螺旋桨相当, 最高效率达到0.72, 且高效工况区范围更宽; (2) 相较螺旋桨推进船, 浸没式喷水推进船的艉部附体少、布置简洁, 显著减小了附体引起的船体阻力增加; (3) 浸没式喷水推进船模在 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 二种典型工况自航条件下的推进效率分别为64.7%和66.1%, 分别高出螺旋桨推进对标船模1.2和5.3个百分点, 对应于浸没式喷水推进器的主机功率较螺旋桨分别下降9.41%和15.4%, 浸没式喷水推进船具有更好的快速性与节能效果。该研究可为高效低噪的高速排水型船舶新型泵类推进器研制及“船体-推进器”一体化优化设计提供有益的技术参考。

关键词: 船舶; 浸没式喷水推进; 快速性; 模型试验

中图分类号: U661.31 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.10.004

Experimental investigation on resistance and propulsion of submerged waterjet propelled ship in model-scale

JIANG Jia-bing^{1a, 1b}, DING Jiang-ming^{1a, 1b, 2}

(1a. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education;
b. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Hainan Institute, Wuhan University of Technology, Sanya 572000, China)

Abstract: Propeller open water tests, hull resistance tests and self-propulsion tests were carried out on two ship models propelled by submerged waterjet and conventional propeller respectively. Detailed analysis was done on the variations of propulsive performances of the submerged waterjet, propeller as well as corresponding hull-propulsor systems. Results show that: (1) the propulsive efficiency of submerged waterjet in open water is equivalent to that of the propeller in model scale, with the maximum efficiency around 0.72, while the high-efficiency operation range of submerged waterjet is wider than that of propeller in open water; (2) compared with propeller ship, the simpler stern-appendage arrangement of submerged waterjet ship can effectively reduce additional hull resistance caused by stern appendages; (3) at $Fr = 0.20$ and $Fr = 0.26$, the overall propulsive efficiency of submerged waterjet ship model in self-propulsion is 64.7% and 66.1%, which is

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 十三五预研项目(41410030102); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023-JL-012)

作者简介: 江佳炳(1993-), 男, 博士研究生; 丁江明(1976-), 男, 博士, 副教授, 通讯作者,

E-mail: dingjiangming@whut.edu.cn。

1.2% and 5.3% higher than that of propeller ship respectively. The corresponding absorbed power of the submerged waterjet is 9.41% and 15.4% lower than that of the propeller at two speeds respectively. Generally, the submerged waterjet propelled ship shows a better performance of propulsion and energy saving. This study provides a meaningful reference for the integrated design and optimization of submerged waterjet and its corresponding hull geometry.

Key words: ship; submerged waterjet propulsion; resistance and propulsion; model test

0 引 言

目前大型高速排水型船舶主要采用螺旋桨推进,但该类船舶在高速航行时的振动噪声性能改善、安静航行工况的巡航速度提升等方面均面临一定瓶颈,将高效率、低振动、低噪声、轻量化新型泵类推进器应用于大型水面船舶,是提升该类船舶在较宽航速范围内的快速性和振动、噪声性能的有益尝试。大型高速排水型船舶通过装配泵类推进器来改善振动噪声性能的同时,如何根据泵类推进器的结构特点与工作特性来保证或进一步提升船舶整体快速性,仍是该类新型“船体-推进器”系统一体化设计的关键技术之一。

美国是国际上较早开展水面船舶浸没式喷水推进技术探索的国家,曾于上世纪中叶在一型驱逐舰和一型护卫舰上使用了泵喷推进器,但该尝试后续未得到推广应用。2010年,Roll-Royce公司为美国海军设计开发了一型浸没式喷水推进器AWJ-21,但AWJ-21在中低航速段的整体推进效率均低于50%,并未有效兑现浸没式喷水推进技术推进效率高、高效航速区域宽的性能潜力^[1-2]。

德国JAFO公司与汉堡波茨坦造船试验研究所在1994年合作开发了一型适用于平底高速船的浸没式喷水推进器Linear Jet^[3-4]。后续汉堡工业大学等科研院所对Linear Jet开展了优化设计研究,有效提升了该类推进器的整体水动力性能^[5-6]。2010年后,德国Voith公司针对航速在20~40 kn之间的高速排水型船设计开发了Linear Jet系列浸没式喷水推进器,相关产品表现出推进效率高、振动噪声性能好等优势。

2020年,伊朗Donyavizadeh等^[7-8]对导管桨进行改型设计得到了一型浸没式喷水推进器,但该推进器的推进效率并不出众。

曹玉良^[9]、彭云龙^[10]和易文斌等^[11]于2015~2017年相继开展了浸没式喷水推进器设计方法、水动力性能和模型试验等探索性工作。2019年,Jiang等^[12]依据AWJ-21设计了一型浸没式喷水推进器,并对其敞水性能进行了数值分析^[12]。2022年,孙小帅等针对一型浸没式喷水推进三体船模开展了数值与试验研究,该船模在 $Fr=0.442\sim 0.590$ 航速下推进效率约为 $0.567\sim 0.574$ ^[13]。2022年,Jiang等^[14]基于喷水推进动量通量分析方法,确立了自航工况下浸没式喷水推进器流场控制体抽吸进流面与喷射出流面速度分布特性等流场要素。国内虽有部分高校和科研院所先后开展了浸没式喷水推进船舶的探索性研究,但仍未有该类推进器实船应用案例,与美国、德国等发达国家存在一定技术差距。

浸没式喷水推进器在大型高速排水型船舶上具有较好的应用潜力,但该类推进方式对应的船艏构型和集成安装方式与常规螺旋桨、艏板式喷水推进器均存在显著差异,其推进泵抽吸喷射过程所处船体伴流环境、所引起的船艏流场变化特性也与其他推进方式不同。目前,国内外文献中鲜有系统报道螺旋桨推进船与浸没式喷水推进船在相同设计目标与应用背景下的推进器敞水性能、自航推进性能等快速性对比情况,开展浸没式喷水推进相关研究与设计时缺乏有效的数据支撑与参考。

本文针对一型浸没式喷水推进高速排水型船和一型螺旋桨对标母型船,采用模型试验分析方法,开展两种推进方式对应的推进器敞水性能试验、无附体船体阻力试验、全附体船体阻力试验与自航性能试验,并对试验结果进行系统分析。该研究可为适用于大型高速排水型船舶的浸没式喷水推进器和对新船型的一体化优化设计,提供一定的理论依据和技术支撑。

1 研究对象

本文选用的螺旋桨对标船模和设计的浸没式喷水推进船模,均以大型高速排水型船舶为应用对象来开展快速性试验研究和推进性能分析。其中,为保证本研究针对的浸没式喷水推进船型能够与参考的螺旋桨船型具有可比性,本文在综合考虑目标船航速工况与船型设计要求、浸没式喷水推进器结构特点与工作特性等影响因素的基础上,对螺旋桨母型船船艏线型开展修改设计,得到一型适用于浸没式喷水推进的船型方案。螺旋桨母型船与浸没式喷水推进船的船体总长、设计排水量、设计航速等主要设计参数均保持一致,两种推进方式对应船体的艏段、中段保持一致,船体艏段根据对应推进方式采用不同构型方案。

图1所示分别为螺旋桨推进母型船与浸没式喷水推进船,两船的艏部均分别安装有两套对称分布的螺旋桨和浸没式喷水推进器及其对应艏部附体。浸没式喷水推进器的导管采用嵌入方式集成安装于船艏槽道中,其叶轮与导叶的叶片数分别为5叶和7叶。螺旋桨船则采用内旋、5叶桨方案。

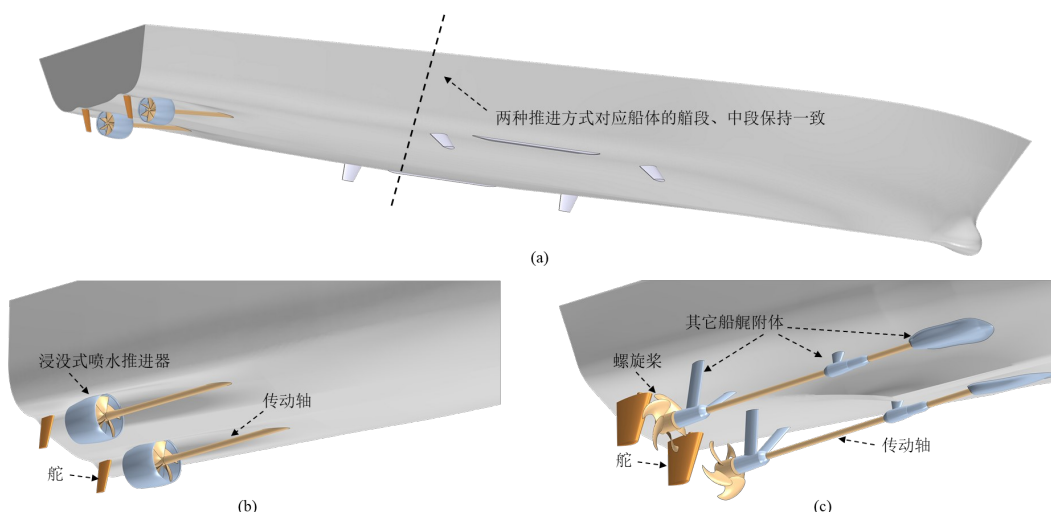


图1 螺旋桨推进母型船与浸没式喷水推进船几何与船艏布置方案

Fig.1 Geometries and stern arrangements of ships propelled by screw propeller and submerged waterjet respectively

综合考虑到船体阻力与自航试验中的拖曳水池池壁效应与有限水深影响、目标船设计航速工况、设计排水量与船模试验航速要求、对应推进器尺度效应与临界雷诺数要求、模型尺度下的船体及推进器生产及安装技术等多方面因素,本研究选定的拖曳水池试验船模及推进器缩尺比为1:17。此外,考虑到泵类推进器水动力性能受尺度效应影响更为显著,开展浸没式喷水推进器敞水试验的推进器模型缩尺比调整为1:13.5。用于螺旋桨敞水试验的桨模则沿用水池拖曳试验船模上所装配的螺旋桨模型。螺旋桨船与喷水推进船对应船模及推进器几何参数如表1所示。

表1 船体与推进器模型几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the hull and propulsor models

对象	参数	符号/单位	数值	
			螺旋桨推进	浸没式喷水推进
船体模型	总长	L_{oa}/m	7.83	7.83
	总宽	B/m	0.93	0.93
	静浮湿面积/水线长 ²	S_{wet}/L_{wl}^2	0.94	0.92
推进器模型	直径	D/m	0.22	0.16(自航), 0.20(敞水)
	叶片弦长(0.7R)	$b_{0.7R}/m$	0.09	0.11(自航), 0.13(敞水)
	叶片数	$N/ -$	5	5(叶轮), 7(导叶)
	旋向	-	右旋/左旋	左旋/左旋(自航), 右旋(敞水)

2 推进器敞水性能试验与分析

2.1 试验设施与方法

敞水试验在上海船舶运输科学研究所(SSSRI)空泡水筒进行。水筒工作段长2.6 m,横截面呈方形带圆角,尺寸为0.6 m×0.6 m,该水筒工作时的最高水速为12 m/s。图2为上海船研所空泡水筒整体循环与工作段示意图。开展浸没式喷水推进器敞水性能试验时,分别采用五分量测力天平测量喷水推进器导管和后置导叶等静止部件的总体受力情况,采用动力仪来测量推进器旋转叶轮上的推力与扭矩。螺旋桨模型的总推力与扭矩直接采用动力仪来测量。图3所示为浸没式喷水推进器和螺旋桨模型实物装配图。

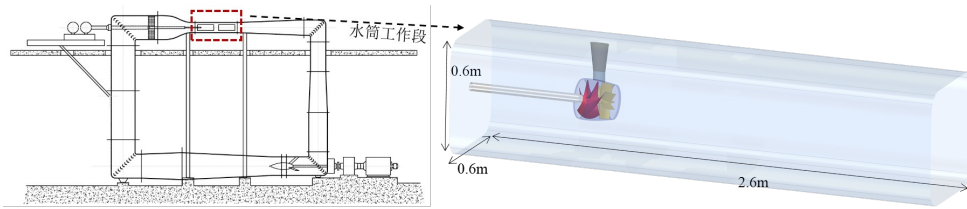


图2 SSSRI空泡水筒整体循环与工作段示意图

Fig.2 Overall circulation and working section of SSSRI cavitation tunnel

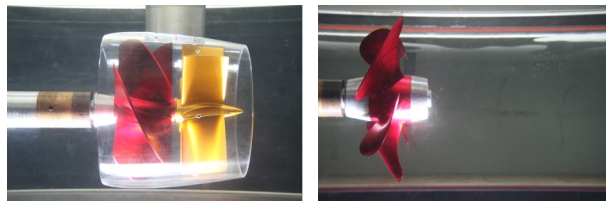


图3 浸没式喷水推进器和螺旋桨模型实物装配图

Fig.3 Pictures of submerged waterjet and propeller model to be tested

浸没式喷水推进器和螺旋桨敞水性能试验均依照ITTC推进器敞水性能试验规程^[15-17]来开展。试验采用定转速,改变来流速度以获得不同进速系数 J 对应的推进器推力系数 K_T 、扭矩系数 K_Q 等水动力数据。所有试验工况均在无空泡状态进行,且均满足临界雷诺数要求。试验时对应工况进速系数 J 、推力系数 K_T 、扭矩系数 K_Q 与敞水效率 η_0 通过式(1)、式(2)来计算:

$$J = \frac{V}{nD}, K_T = \frac{T_n}{\rho n^2 D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{1}$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \tag{2}$$

式中, V 为来流速度, n 为推进器对应转速, D 为螺旋桨或叶轮直径, Q 为螺旋桨或叶轮扭矩, ρ 为水的密度, T_n 表示对应推进器部件总推力,对于螺旋桨 T_n 为桨叶和桨毂推力之和,对于浸没式喷水推进器 T_n 为叶轮、导叶和导管推力之和。

2.2 敞水试验结果分析

浸没式喷水推进器和螺旋桨敞水性能试验结果如图4所示。浸没式喷水推进器模型在进速系数 $J = 1.34$ 时达到最高敞水效率 $\eta_0 = 0.72$,螺旋桨模型在进速系数 $J = 1.04$ 时达到最高敞水效率 $\eta_0 = 0.73$,模型尺度下,浸没式喷水推进器可达到与螺旋桨相当的敞水效率。本文所采用的螺旋桨在船后工作时的进速系数在 $J = 1.0$ 左右,而浸没式喷水推进器在船后工作时的进速系数在 $J = 1.2$ 左右。在相同的应用需求与设计目标下,浸没式喷水推进器设计工况对应的进速系数要高于螺旋桨对应的进速系数。

浸没式喷水推进器在进速系数 $J = 0.97 \sim 1.63$ 工况下的敞水效率均高于0.65,螺旋桨则在对应的进速系数 $J = 0.82 \sim 1.18$ 工况下的敞水效率高于0.65。敞水工况下,浸没式喷水推进器高效区对应的进速

系数范围较螺旋桨高效区显著加大,这是由于浸没式喷水推进器的导叶体和导管通过整流可有效回收叶轮旋转做功过程中出现的周向动能转换等能量损失,提高了推进器在较宽进速范围内的推进效率。上述结果表明,同一浸没式喷水推进器具有适配于不同设计工况、不同类型船舶的应用潜能。

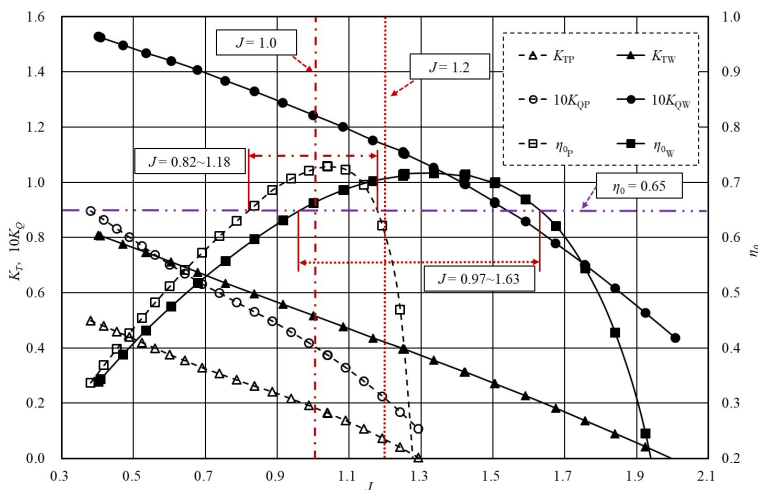


图4 浸没式喷水推进器(下标W)和螺旋桨(下标P)敞水性能曲线
Fig.4 Propulsive performances of submerged waterjet and propeller models in open water

3 船体阻力试验与分析

3.1 试验模型与方法

浸没式喷水推进船与螺旋桨推进船因推进器结构特点与工作特性不同而存在显著差异,这包括两种推进方式对应的船艏构型、船艏附体布置等。本文针对浸没式喷水推进和螺旋桨推进两种不同的推进方式,分别开展了对应船型的无附体船模与全附体船模宽航速范围的阻力试验,以分析不同船艏构型、不同船体附体布置对于船体阻力、船体航行姿态的影响。图5和图6分别为螺旋桨推进和浸没式喷水推进对应的无附体裸船体和全附体裸船体。浸没式喷水推进船艏部除舵体外无其它附体,其船艏未安装推进器导管与导叶等部件时泵轴无法较好地固定在船后。考虑到泵轴安装所引起的船体总阻力变化相对较小,因此船模阻力试验中浸没式喷水推进船对应的全附体船体未包含泵轴。

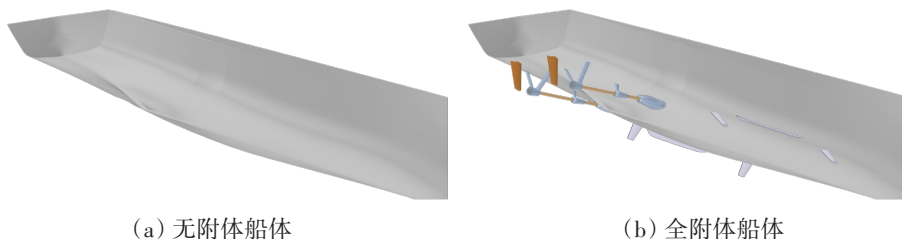


图5 螺旋桨推进对应船体
Fig.5 Hull drawing for propeller-driver ship

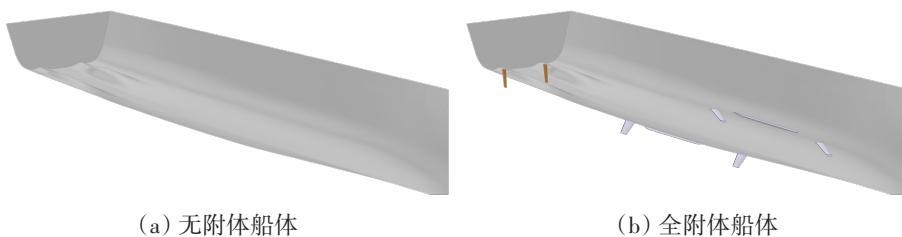


图6 浸没式喷水推进对应船体
Fig.6 Hull drawing for submerged waterjet propelled ship

船体阻力试验在中国特种飞行器研究所高速水动力实验室的拖曳水池进行。该水池长510 m,池宽6.5 m,池深6.8 m,测试时水深5.0 m。船体阻力性能试验均依照ITTC阻力试验规程^[16]来开展。船模试验航速工况为 $Fr = 0.12\sim 0.44$,其中试验所测纵倾角以船倾为正。试验时对应傅汝德数 Fr 和阻力系数 C_t 分别通过式(3)、式(4)来计算:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_{wl}}} \tag{3}$$

$$C_t = \frac{R_t}{0.5\rho S_{wet} V^2} \tag{4}$$

式中, V 为船模航速, R_t 为船模总阻力, ρ 为水的密度, S_{wet} 为船模湿表面积。

3.2 阻力试验结果分析

浸没式喷水推进船和螺旋桨船的阻力性能试验结果如图7所示。浸没式喷水推进对应的无附体船体阻力在 $Fr = 0.15\sim 0.35$ 航速范围内均大于螺旋桨对应的无附体船体阻力,但浸没式喷水推进对应的全附体船体阻力在 $Fr = 0.12\sim 0.44$ 全航速范围内均优于螺旋桨对应的全附体船体阻力,两种推进方式对应船型的全附体阻力性能对比结果与无附体阻力结果存在显著不同。

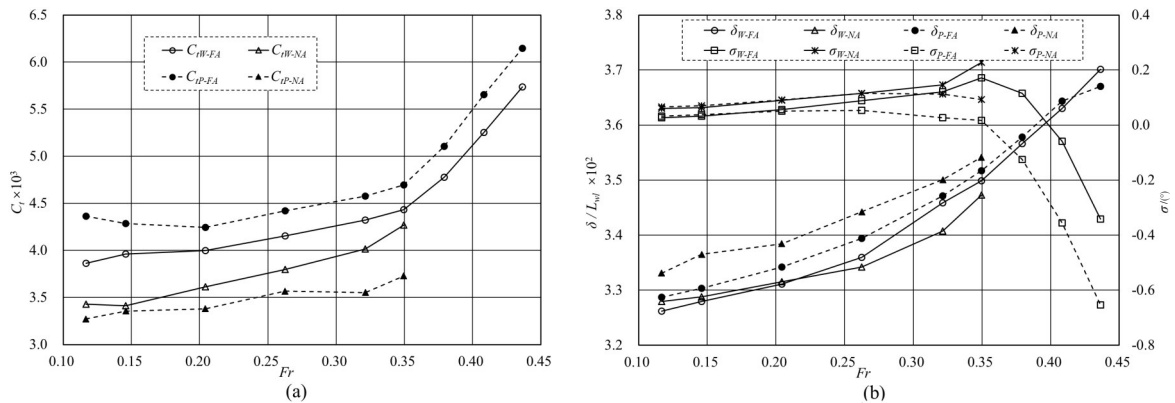


图7 浸没式喷水推进和螺旋桨对应无附体船体(NA)、全附体船体(FA)的阻力(C_t)、吃水(δ)与纵倾角(σ)变化曲线

Fig.7 Variations of hull resistance (C_t), draft (δ) and trim angle(σ) of ship hull with and without appendages for two different propulsion modes

分析可得,螺旋桨船在船体中段与艉段布置的舭龙骨、减摇水翼、舵、轴支架等附体会显著增加其船体阻力。浸没式喷水推进船在艉部除舵体外未布置其他附体,其对应附体所引起的船体阻力增幅相较螺旋桨船显著降低。本文通过定义附体阻力增额系数 r_{AP} 来评估附体所引起的阻力增长影响,该系数通过式(5)来计算:

$$r_{AP} = 1 - R_{NA}/R_{FA} \tag{5}$$

式中, R_{NA} 和 R_{FA} 分别对应无附体船体阻力与全附体船体阻力。

表2所示为浸没式喷水推进和螺旋桨推进对应船型附体布置所引起的阻力增额系数 r_{AP} 随航速变化特性。螺旋桨对应船型的附体阻力增额系数在 $Fr = 0.12\sim 0.35$ 航速范围内基本保持在0.20以上。在相同航速范围内,浸没式喷水推进对应船型的附体阻力增额系数峰值为0.139,且随着傅汝德数的

表2 浸没式喷水推进和螺旋桨对应船型附体布置所引起的阻力增额系数随航速变化特性

Tab.2 Increased resistance due to appendages for two different propulsion modes

Fr	附体阻力增额系数 r_{AP}		Fr	附体阻力增额系数 r_{AP}	
	螺旋桨推进	浸没式喷水推进		螺旋桨推进	浸没式喷水推进
0.12	0.250	0.112	0.26	0.193	0.085
0.15	0.217	0.139	0.32	0.224	0.071
0.20	0.204	0.097	0.35	0.206	0.038

增加而显著降低。上述试验结果表明,采用浸没式喷水推进这一推进方式时,其更为简洁的船艉附体布置方案可较好地改善船体阻力性能,有利于船舶节能。

由图7(b)可见,浸没式喷水推进船模与螺旋桨船模在 $Fr = 0.15 \sim 0.35$ 航速范围内的船体深沉与纵倾变化趋势基本保持一致,随着航速增大,两个船模的船中吃水均不断增大,纵倾角则基本保持不变。在 $Fr = 0.35 \sim 0.44$ 航速工况下,螺旋桨船的艉倾角相对更大且变化趋势更为剧烈,浸没式喷水推进船模的艉倾角变化相对较小,其姿态变化较螺旋桨船模更小。

4 自航推进性能试验

4.1 试验设计与方案

自航推进性能试验在中国特种飞行器研究所高速水动力实验室的拖曳水池进行,对应船模沿用阻力性能试验中的全附体船体模型,并分别装对应应的浸没式喷水推进器与螺旋桨。浸没式喷水推进船模的工装示意图如图8所示。图9所示为用于自航试验测量的浸没式喷水推进和螺旋桨推进自航船模船艉推进器安装实物图。本文中的船体自航性能试验采用强制自航法,具体流程依照ITTC自航推进性能试验规程^[17]来开展。自航试验时,船模自航运动的各航速工况与阻力试验对应,自航船模排水量、重心位置以及静浮姿态均与对应的船模阻力试验保持一致。本文船模自航试验均针对船模自航平衡点来开展,阻力仪所测强制力为零时即对应船模自航平衡点。

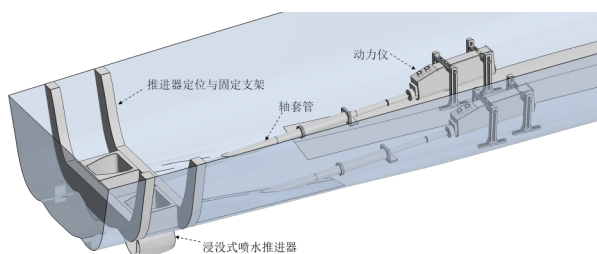


图8 浸没式喷水推进自航船模的船艉设备布置示意图

Fig.8 Stern arrangement for the submerged waterjet propulsion ship



(a) 螺旋桨推进自航船模



(b) 浸没式喷水推进自航船模

图9 螺旋桨和浸没式喷水推进式自航船模

Fig.9 Self-propulsion models with propellers and with submerged waterjets

浸没式喷水推进器半集成式安装于船艉,浸没式喷水推进器导管与船体直接相连,自航试验中无法直接进行推进器导管、导叶这两个推进器部件的受力测量。本文在开展浸没式喷水推进船模自航试验时,只通过泵轴测量叶轮对应推力,未对导管与导叶体推力进行测量。在对应试验过程中,浸没式喷水推进器的叶轮、导叶体与导管的合力仍正常作用于船体,只是无法通过泵轴另一端的动力仪来整体测量船后推进器总推力(即自航船体阻力)。对应的浸没式喷水推进船模自航平衡点仍可通过阻力仪数据变化来进行判定和求取。在对应的船模自航平衡点下,可通过泵轴端的动力仪测量得到叶轮转速、叶轮轴向推力和扭矩。结合前文所述的推进器敞水性能与裸船体阻力性能试验结果,本文浸没式喷水推进船模自航试验可开展对应的船后叶轮推力系数、船后叶轮扭矩系数、推进器进速系数、推进器功率以及船模整体推进效率 $\eta_D = (R_t \times V) / (2\pi n Q_R)$ 等推进因子分析,但推力减额等其他推进因子无法在试验中进行测量分析。

根据自航试验结果,本文对比分析了浸没式喷水推进船模和螺旋桨船模对应的船后推进器转速、推进器进速系数、推进器功率和整体推进效率等推进性能差异。图 10 和图 11 分别为浸没式喷水推进自航船模与螺旋桨推进自航船模的试验现场图。

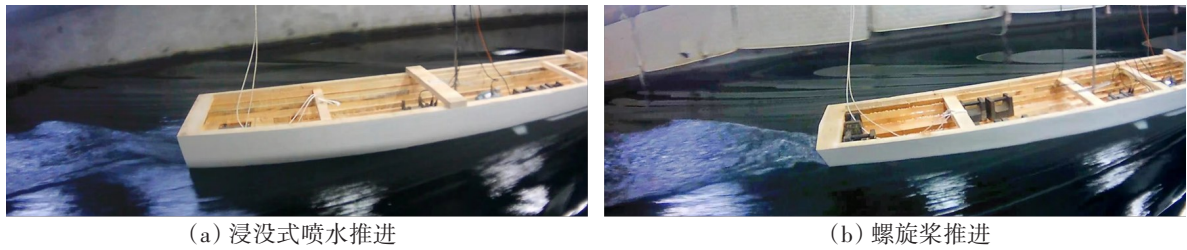


图 10 $Fr = 0.26$ 速度工况船模自航试验

Fig.10 Ship models in self-propulsion tests ($Fr = 0.26$)

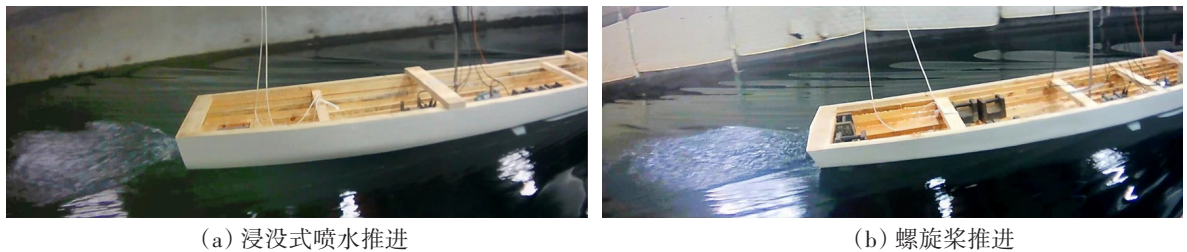


图 11 $Fr = 0.20$ 速度工况船模自航试验

Fig.11 Ship models in self-propulsion tests ($Fr = 0.20$)

4.2 自航试验结果分析

自航性能试验重点考察了 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 两个典型速度工况下浸没式喷水推进船模和螺旋桨船模各自的推进性能,对应试验结果如表 3 所示。其中, K_{TR} 为浸没式喷水推进器叶轮推力。

表 3 浸没式喷水推进船模(SWM)和螺旋桨推进船模(PM)自航性能试验结果

Tab.3 Results of self-propulsion tests for ships propelled by submerged waterjet and screw propeller

对象	Fr	转速 n	船后 K_{TR} (SWM) $/K_{TP}$ (PM)	船后 $10K_{TQ}$	船后 J	单推进器 功率 P	推进效率 η_D	吃水 $\delta/L_{wl} \times 10^2$	纵倾角 $\sigma/(\circ)$
浸没式 喷水推 进	0.20	$1.21N_{p0.2}$	0.4293	1.145	1.231	$0.91P_{p0.2}$	0.647	3.283	0.027
	0.26	$1.56N_{p0.2}$	0.4264	1.147	1.239	$1.95P_{p0.2}$	0.661	3.379	0.052
螺旋桨 推进	0.20	$N_{p0.2}$	0.1660	0.423	1.022	$P_{p0.2}$	0.635	3.373	0.000
	0.26	$1.31N_{p0.2}$	0.1643	0.433	1.025	$2.31P_{p0.2}$	0.608	3.441	-0.005

由表 3 可见,在 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 两个巡航速度工况下,浸没式喷水推进船模的整体推进效率分别为 64.7% 和 66.1%,分别高出螺旋桨推进船模整体推进效率 1.2 和 5.3 个百分点。此外,浸没式喷水推进船舶在相同航速的船模自航工况点下,其推进器功率较对应航速工况下螺旋桨功率显著下降,其中, $Fr = 0.20$ 对应自航工况下单个浸没式喷水推进器功率较螺旋桨下降 9.41%,在 $Fr = 0.26$ 自航工况下的单推进器功率相应下降 15.4%。

图12所示为自航工况下两种推进器转速与功率的柱状比较图。相同傅汝德数工况下,浸没式喷水推进船在达到模型自航工况点时的转速均高于螺旋桨船。实船上推进器转速较高时可选配体积更小的主机减速齿轮箱,有助于船舶减重。

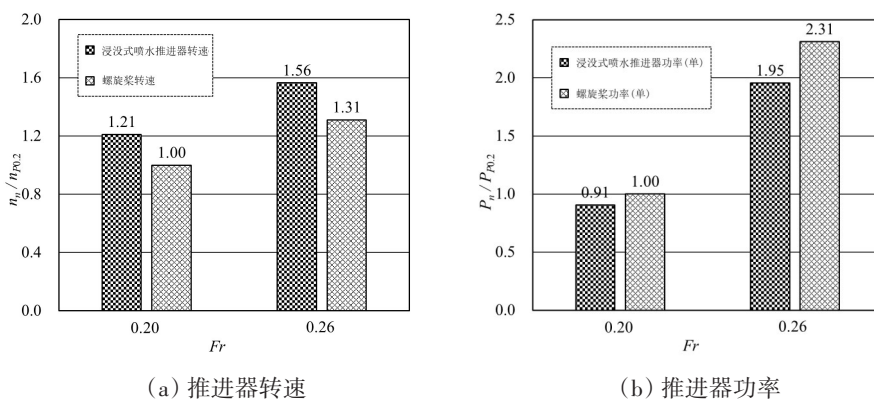


图12 自航工况下两种推进器转速与功率柱状比较图

Fig.12 Rotational speed and power of submerged waterjet and propeller in self-propulsion state

模型试验中,螺旋桨艏部附体布置相对复杂,轴系加工与模型安装的精度要求更高,装配误差与机械摩擦等外在因素也易引起试验测量所得的螺旋桨船模推进性能偏低。但就浸没式喷水推进船模自身而言,在 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 两个中等巡航速度工况下,浸没式喷水推进船模的推进效率与推进器功率相较螺旋桨船模均占优,表现出高效推进和较优的节能效果。

图13所示为浸没式喷水推进船模和螺旋桨船模在船体阻力与自航试验中对应的船体吃水变化。两船在对应工况下的纵倾角变化均较小,未作柱状图进行比较。在 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 两个速度工况下,浸没式喷水推进器在船后工作时不会显著改变船体航行姿态,该特性与对应航速工况下的螺旋桨船模相近。

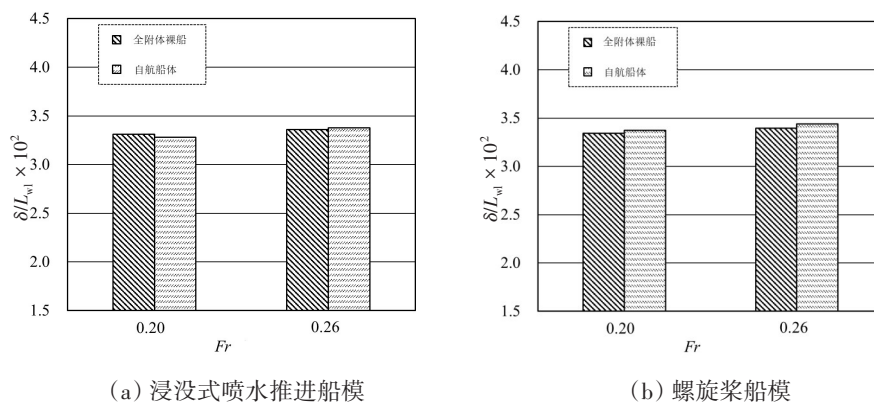


图13 阻力试验与自航试验中的船体吃水变化

Fig.13 Variation of ship's draft in resistance and self-propulsion tests

5 结 论

本文针对一型浸没式喷水推进船模和一型螺旋桨推进船模,采用模型试验对比研究方法,分析了两种推进方式对应的推进器敞水性能、无附体船体阻力性能、全附体船体阻力性能与自航推进性能,得到如下结论:

(1) 浸没式喷水推进器在模型尺度下可达到与螺旋桨相当的敞水效率,但浸没式喷水推进器可实现更宽进速系数范围内的高效敞水性能。相较常规螺旋桨,同一浸没式喷水推进器应具有适配于不同设计工况、不同类型船舶的应用潜能。

(2) 采用平底方艏船型来优先适配浸没式喷水推进器时, 该类船体方案的无附体船体阻力性能相较螺旋桨对应船型并不出众。但该类浸没式喷水推进船体方案的艏部附体布置需求更加简洁, 其全附体船体的阻力较螺旋桨对应的全附体船体阻力在较宽航速范围内均有明显改善, 有利于船舶节能。

(3) 模型尺度下, 浸没式喷水推进船模在 $Fr = 0.20$ 与 $Fr = 0.26$ 工况下的推进效率较螺旋桨船模推进效率分别提升 1.2 和 5.3 个百分点, 单个浸没式喷水推进器功率较螺旋桨分别下降 9.41% 和 15.4%。浸没式喷水推进船模在中等巡航速度工况下表现出较好的快速性与节能效果。

本文后续还将在如下两方面开展相关研究工作: (1) 浸没式喷水推进器无法通过常规的桨轴推力测量方法来直接测量推进器整体推力, 本文后续将探索自航工况下的浸没式喷水推进器流量测量方法, 并应用动量定理来间接得到浸没式喷水推进器整体推力, 以期基于自航试验开展更为详实的浸没式喷水推进船模自航推进因子分析等工作; (2) 本文基于模型试验研究对浸没式喷水推进船模和螺旋桨对标船模的宏观推进性能进行了系统分析与比较, 后续将针对不同推进方式对应的“船体-推进器”流场干扰与利用机制开展进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] Giles W, Peren T D, Amaratunga S, et al. The advanced waterjet: Propulsor performance and effect on ship design[C]//The 10th International Naval Engineering Conference, 2010.
- [2] Peren T D. CFD and submerged waterjets[J]. Naval Architect, 2010, 7/8: 33–36.
- [3] Thieme C, Jürgen S, Delius K. Antriebssysteme für flachgehende hochgeschwindigkeitsfahrzeuge[R]. Hamburg: JAFO-Technologie, 1994.
- [4] Bohm M, Jürgens D. Linear-Jet: A propulsion system for fast ships[C]//7th International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, Hague, Netherlands, September 20–25, 1998.
- [5] Jürgens D, Heinke H J. Untersuchung tief getauchter waterjets[C]//The Annual Meeting of STG 100, Hamburg, Germany, 2006.
- [6] Steden M, Hundemer J, Abdel-Maksoud M. Optimisation of a linear jet[C]//First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, June, 2009.
- [7] Donyavizadeh N, Ghadimi P. Efficacy analysis of thickness and camber size of cross section of the stator on hydrodynamic parameters in linear jet propulsion system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(1): 5861948.
- [8] Donyavizadeh N, Ghadimi P. Transient analysis of the influence of gap size of the rotor from stator on hydrodynamic performance of the linear jet propulsion system[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 17(5): 1087–1098.
- [9] 曹玉良, 王永生, 易文彬, 等. 喷速比对浸没式喷水推进器推进性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(7): 894–898.
Cao Y L, Wang Y S, Yi W B, et al. Effects of the jet velocity ratio on the propulsion performance of a submerged waterjet[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(7): 894–898. (in Chinese)
- [10] 彭云龙, 王永生, 曹玉良, 等. 实尺度浸没式推进器泵设计参数旋转与性能分析[J]. 船舶力学, 2016, 20(8): 947–953.
Peng Y L, Wang Y S, Cao Y L, et al. Full scale submerged waterjet pump parameters selection and numerical evaluation of a propulsive performance[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(8): 947–953. (in Chinese)
- [11] 易文彬, 王永生, 刘承江, 等. 浸没式喷水推进自航试验及数值模拟[J]. 船舶力学, 2017, 21(4): 407–412.
Yi W B, Wang Y S, Liu C J, et al. Submerged waterjet self-propulsion test and numerical simulation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(4): 407–412. (in Chinese)
- [12] Jiang, J W, Huang W X. Hydrodynamic design of an advanced submerged propulsion[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(18): 6367–6382.
- [13] 孙小帅, 马 骋, 钱正芳, 等. 水面泵喷推进自航因子数值与试验研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(5): 609–616.
Sun X S, Ma C, Qian Z F, et al. Numerical and experimental investigation on self-propulsion factors of surface pumpjet[J].

Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(5): 609–616. (in Chinese)

- [14] Jiang J B, Ding J M, Lü N, et al. Control volume determination for submerged waterjet system in self-propulsion[J]. Ocean Engineering, 2022, 265: 112594.
- [15] ITTC. Recommended procedures and guidelines of open water test[C]//The 27th International Towing Tank Conference, Copenhagen, Denmark, 2014.
- [16] ITTC. Recommended procedures and guidelines of resistance test[C]//The 26th International Towing Tank Conference, Rio, Brazil, 2011.
- [17] ITTC. Recommended procedures and guidelines of propulsion test[C]//The 28th International Towing Tank Conference, Wuxi, China, 2017.