

文章编号: 1005-9865(2024)04-0141-09

不同航速下螺旋桨对船舶操纵水动力的影响研究

谭康力¹, 谢 伟¹, 刘祖源², 解学参¹, 王五桂¹, 刘 强¹

(1. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 通过数学模型进行船舶操纵性预报是常用的方法, 以往的约束模试验通常仅在设计航速下进行, 且 MMG 船舶操纵运动模型通常认为螺旋桨对船舶操纵水动力的影响可以忽略。但船舶在实际操纵运动的过程中航速会发生很大变化, 螺旋桨对船舶操纵水动力的影响可能变得不可忽略, 因此有必要开展相关船舶操纵水动力的研究。以 KVLCC2 为研究对象, 对其裸船体、船-舵、船-桨和船-桨-舵系统分别进行不同航速下的约束模试验数值模拟, 研究了不同航速下螺旋桨对船舶操纵水动力的影响。研究表明: 螺旋桨对船舶操纵水动力的影响不可忽略, 该影响随着船舶航速的减小而增大, 但舵的存在会减弱其影响; 螺旋桨对舵效有着较大影响, 该影响随着船舶航速的减小也会明显增大。因此在进行船舶操纵性研究时, 有必要进行非设计航速下的相关约束模试验。

关键词: 约束模试验; 螺旋桨影响; 船舶操纵; 设计航速; 船-桨-舵系统

中图分类号: U661.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2024.04.014

Research on the influence of propellers on ship maneuvering hydrodynamics under different speeds

TAN Kangli¹, XIE Wei¹, LIU Zuyuan², XIE Xueshen¹, WANG Wugui¹, LIU Qiang¹

(1. China Ship Development Design Center, Wuhan 430064, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Predicting ship maneuverability through mathematical models is a common approach. Previous captive model tests were typically conducted only at design speeds, and the MMG ship maneuvering motion models often assumed that the influence of propellers on ship maneuvering hydrodynamics could be neglected. However, in the actual process of ship maneuvering, ship speed can vary significantly, and the influence of propellers on ship maneuvering hydrodynamics may become significant. Therefore, it is necessary to conduct relevant research on ship maneuvering hydrodynamics. Taking the KVLCC2 as the research object, numerical simulations of captive model tests were conducted at different speeds for the bare hull, ship-rudder, ship-propeller, and ship-propeller-rudder systems, respectively, to study the influence of propellers on ship maneuvering hydrodynamics under different speeds. The research results indicate that the influence of propellers on ship maneuvering hydrodynamics cannot be ignored, and this influence increases as the ship's speed decreases, although the presence of the rudder mitigates this effect. Propellers have a significant impact on rudder effectiveness, which becomes more pronounced as the ship's speed decreases. Therefore, when conducting ship maneuverability studies, it is necessary to conduct relevant captive model tests at off-design speeds.

Keywords: captive model test; propeller influence; ship maneuvering; design speed; ship-propeller-rudder system

通过数学模型进行船舶操纵性预报是一种常用的方法^[1], 其预报结果的准确性主要取决于船舶操纵水动力导数(包括相关水动力干扰系数)的求取精度以及船舶操纵运动模型的合理性、准确性。近年来随着计

收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 军委科技委国防科技创新特区项目(17-H863-05-ZT-002-007-01)

作者简介: 谭康力(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事船舶操纵性预报研究。E-mail: tankangli7012020@126.com

算机水平的迅猛发展,数值方法(主要是RANS方法)被广泛应用在船舶约束模试验数值模拟上,国内外学者针对约束模试验数值模拟的计算精度和相关水动力导数的求取展开了一系列相关的研究。冯松波等^[2]对KVLCC2船-舵系统进行了斜拖试验的数值模拟,验证了数值方法的准确性。刘晨飞和刘亚东^[3]采用计算流体力学(CFD)方法对设计航速下KVLCC2进行了一系列约束模试验数值模拟并获取了相关线性水动力导数,并建立了KVLCC2船模的操纵性数学模型,完成了回转试验和Z形操舵试验的仿真。刘义等^[4]以全附体KCS为研究对象,对比了体积力法和实桨法在全附体船舶斜拖试验数值模拟中的计算成本和计算精度。胡芳琳等^[5]以SUBOFF为研究对象,针对已有PMM运动数值模拟在线性水动力导数处理方法上存在的问题,给出了详细获取线性水动力导数的途径。

以上的相关研究均在设计航速下进行,但船舶在实际操纵运动的过程中速度会有较大的变化,以KVLCC2^[6]为例,其在35°回转运动中速降会达到67%,在20°/20°Z形运动中其速降也会达到32%。此外,采用分离式船舶操纵运动模型进行船舶操纵性预报时通常认为螺旋桨对船舶操纵水动力的影响可以忽略,螺旋桨对船体水动力的影响仅体现在推力减额中。由于船舶速降较大,因此螺旋桨对船舶操纵水动力的影响可能也变得不可忽略。部分学者针对其中的一个问题进行了研究,庞永杰等^[7]在循环水槽中对无桨和带桨全附体潜艇模型完成了约束模试验,对比分析了螺旋桨的存在与否及其旋转对潜艇操纵性水动力导数的影响。夏召丹等^[8]开展了带喷水推进装置的船舶操纵性水动力模型试验和相同工况下的裸船体试验,对比各项操纵水动力导数的变化规律,总结出喷水推进装置对船舶航行稳定性的影响。Zhang等^[9]对ONRT进行了不同航速下的斜拖试验数值模拟,并给出了船舶操纵水动力导数和航速之间的关系。

基于雷诺平均方法(RANS方法),采用商业软件STAR CCM+,对KVLCC2裸船体、船-舵、船-桨和船-桨-舵系统分别进行了不同航速下2种典型工况的约束模试验数值模拟。通过对比不同航速下有无螺旋桨时各系统操纵水动力的变化,分析了不同航速下螺旋桨对系统各部分水动力的影响,为后续建立更合理的船舶操纵运动模型以及设计约束模试验提供了依据。

1 数学模型和数值求解

1.1 研究对象和计算工况

选取KVLCC2为研究对象进行研究,SIMMAN会议^[10-12]公开了大量的该船约束模试验数据。为方便进行后续研究,选取的船模比例尺和MARIN水池采用的模型完全一致,船模的模型主要参数如表1所示,几何模型如图1所示。

表1 KVLCC2模型主要参数
Tab. 1 Main parameters of KVLCC2 model

船体参数	数值	螺旋桨参数	数值	舵参数	数值
垂线间长 L/m	7	桨叶数 Z	4	舵类型	半悬臂舵
船宽 B/m	1.27	螺旋桨直径 D_p/m	0.204	总面积 A_R/m^2	0.130 8
吃水 T/m	0.455	旋向	右旋	侧面积 A_L/m^2	0.065 4
方形系数 C_B	0.81	盘面比 A_e/A_0	0.448		

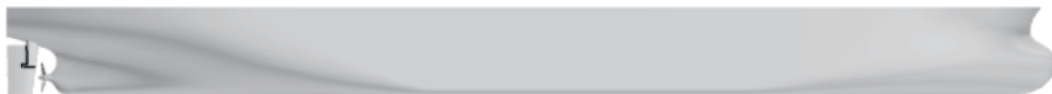


图1 KVLCC2船体模型
Fig. 1 KVLCC2 hull model

为系统深入地研究不同航速下螺旋桨对船舶操纵水动力性能的影响,对KVLCC2裸船体(记为H)、船-桨(记为HP)、船-舵(记为HR)和船-桨-舵(记为HPR)分别进行了2种典型工况($\beta = 9^\circ$ 的斜拖试验和 $r' = 0.4$ 的悬臂试验)的约束模试验数值模拟。计算涉及3个航速 U 、 $0.66U$ 和 $0.33U$ 。这3个航速涵盖了KVLCC2在常规操纵运动过程中涉及的所有航速,其中设计航速 U 的大小为1.18 m/s,对应的弗劳德数 Fr 为0.142。

1.2 坐标系和无量纲化表达

KVLCC2在进行操纵运动时横摇幅度很小,可以简化忽略不计^[9-11]。因此在研究时只研究其在水平面内的运动。如图2所示建立大地坐标系 $O-XYZ$ 和船体坐标系 $o-xyz$, O 为大地原点, o 为船中, Z 轴和 z 轴竖直向下。在船体坐标系中,纵向速度分量 u 指向船艏为正,横向分量 v 指向右舷为正,两者合速度为 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$; 船摇角速度 r 沿顺时针旋转为正; OX 轴沿顺时针旋转至 ox 轴的夹角为艏向角 ψ ; 漂角为 β , 其中 $\tan\beta = (-v/u)$; 无因次化角速度为 $r' = r(L/U)$ 。

为方便进行不同航速下的操纵水动力计算结果对比,将力和力矩表达为无量纲化形式,如式(1)所示:

$$F_i' = \frac{F_i}{0.5\rho U^2 L T}, \quad i = x, y, N; \quad M_z' = \frac{M_z}{0.5\rho U^2 L^2 T} \quad (1)$$

其中, F_x 、 F_y 和 M_z 为纵向力、横向力和转艏力矩, F_N 为舵法向力。 F_x 、 F_y 和 M_z 的正方向分别为船艏方向、船右舷方向和竖直向下。值得说明的是,文中由于舵没有偏转,因此对于舵来说 F_y 和 F_N 的物理含义一致。

1.3 螺旋桨模拟方法

虽然目前滑移网格技术和重叠网格技术均能比较精确地模拟螺旋桨,但在计算时需要采用很小的时间步长来确保计算精度,因此在进行船-桨-舵系统的水动力计算时会大量增加计算成本。采用体积力法模拟螺旋桨能够在保证一定计算精度的情况下极大降低计算成本^[4]。采用 H-O 体积力模型去近似表达螺旋桨的影响,其力源在螺旋桨区域内的轴向和周向分布形式如式(2)所示。

$$\begin{cases} f_{hx} = A_x r_c^* \sqrt{1 - r_c^*} \\ f_{h\theta} = A_\theta \frac{r_c^* \sqrt{1 - r_c^*}}{r_c^* (1 - r_h') + r_h'} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{hx} 和 $f_{h\theta}$ 为轴向力和切向力在螺旋桨区域的分布; r_c^* 为螺旋桨区域里任意一点到桨轴线距离。其他参数 r_h' 、 A_x 和 A_θ 为螺旋桨几何参数有关的常数,具体定义参考文献[4]。根据理想推进器的动量守恒原理^[13]来求取推力 T ,再根据螺旋桨的敞水性能曲线插值求出相应的扭矩 Q 和螺旋桨转速 n ,此时 f_{hx} 和 $f_{h\theta}$ 的具体大小可以确定。

1.4 流动控制方程和湍流模型

操纵运动下的船舶绕流场问题可以看成三维不可压缩绕流场问题,采用雷诺平均方法求解该问题,其控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u'_i u'_j}) + f_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 和 $j=1, 2, 3$ 表征空间直角坐标系的分量; $\bar{u}_i$ 为流体时均速度; $\bar{p}$ 为时均动压力; ρ 为流体密度; μ 为流体的动力黏性系数; $\rho \bar{u'_i u'_j}$ 为雷诺平均应力; f_i 为体积力。因雷诺平均应力的存在,引入 Realizable k- ϵ 湍流模型对控制方程进行封闭。

1.5 计算域设置和网格划分

计算涉及裸船体、船-舵、船-桨和船-桨-舵4个不同的对象,网格划分差异仅在船尾比较小的范围内,故仅以船-桨-舵系统(HPR)为例进行说明。由于 KVLCC2 设计航速较低,因此在计算中自由液面对计算结果的影响很小,因此可采用叠模法进行计算^[14]。计算域的设置如图3所示,计算域上游距船艏 $1.5L$,计算域下游距船艉 $2.5L$,计算域两侧距船中纵剖面 $2.0L$,计算域顶部设在设计水线处,计算域底部距船基线 $1.0L$,除了

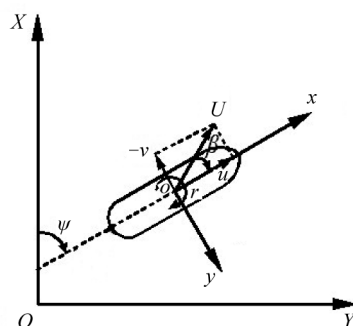


图2 坐标系

Fig. 2 Coordinate systems

计算域顶部设为对称边界以及计算域出口设为压力出口边界条件,其余4个边界均设为速度入口边界条件。网格划分如图4所示,采用切割体和棱柱层网格进行划分。壁面边界层的划分参考文献[15]给出的建议, y^+ 平均值控制在5以下,选用STAR CCM+提供的All y^+ 壁面处理方式求解壁面附近的流动。边界层网格具体设置有13层,增长率为1.4,总厚度为0.03 m。为保证一定的计算精度,需要在船艏艉、舵和螺旋桨体积力源处进行适当加密。

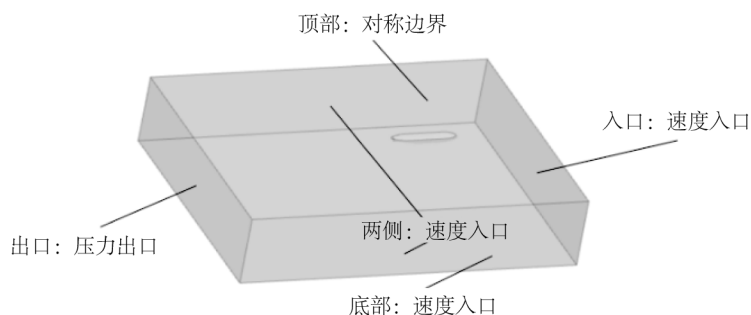


图3 计算域和边界条件

Fig. 3 Calculation domain and boundary conditions

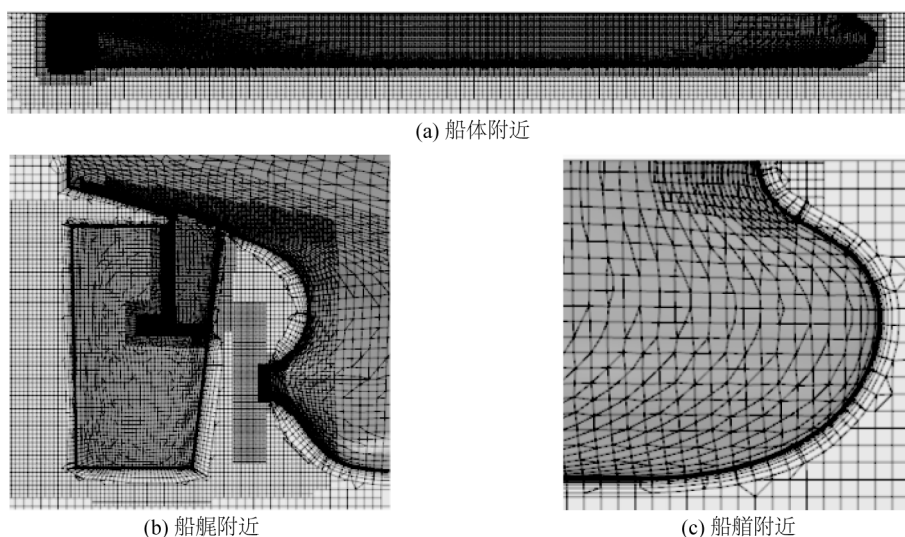


图4 船体周围网格

Fig. 4 Grids around the ship

2 数值方法验证

2.1 网格收敛性验证

为了确认文中所使用网格拓扑和尺寸对计算结果的影响,保证计算流体力学方法(CFD)数值计算结果的可靠性,以KVLCC2裸船体(H)为研究对象,选取设计航速 U 下的 $\beta = 9^\circ$ 的斜拖试验为研究工况进行网格收敛性分析。计算时间步长按照 ITTC 规程的建议取为 $0.002 5L/U^{[16]}$,共采用3组网格,网格的三向加密比为 $\sqrt{2}$ 。由细到粗3套网格对应的数值解分别记为 S_1 、 S_2 和 S_3 ,网格数量分别为216万、105万和54万,每相邻2个网格数值解之间的差值分别记为 $\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$ 和 $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$,收敛性参数 R_G 定义为 $R_G = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{32}$ 。通过 R_G 值可以判断收敛类型: $0 < R_G < 1$ 时,单调收敛; $R_G < 0$ 时,振荡收敛; $R_G > 1$ 时,发散。

根据表2中的计算结果可知,对于 $\beta = 9^\circ$ 的斜拖试验,随着网格密度增加,纵向力系数 F_x' 振荡收敛,横向力系数 F_y' 和转艏力矩系数 M_z' 单调收敛。将各网格密度的计算结果和试验对比可知,对于横向力系数 F_y' ,粗网格和试验中最为接近,但中、细网格计算结果和试验值相差并不大;对于转艏力矩系数 M_z' ,细网格的计算结果和试验值最为接近且吻合较好。因此综合考虑计算成本和精度,后续选用中网格尺寸进行进一

步研究。

表 2 网格收敛性分析
Tab. 2 Grid convergence analysis

水动力 系数	细网格 S_1	中网格 S_2	粗网格 S_3	R_G	试验值	细网格计算 和试验值的 误差/%	中网格计算 和试验值的 误差/%	粗网格计算 和试验值的 误差/%
F_x'	-0.016 25	-0.016 23	-0.016 38	-0.114	—	—	—	—
F_y'	0.044 69	0.045 11	0.045 74	0.671	0.045 53	-1.84	-0.92	0.46
M_z'	0.020 73	0.020 75	0.021 13	0.051	0.019 41	6.80	6.90	8.86

2.2 体积力法有效性验证

为兼顾计算效率和计算精度,采用体积力法(BF)和真实桨法(RP)对 KVLCC2 船-桨-舵(HPR)进行了设计航速 U 下 $\beta = 9^\circ$ 斜拖试验的约束模试验数值模拟,以证明体积力法的有效性。值得说明的是,文中模拟真实螺旋桨采用的是滑移网格方法,其计算时间步长为 0.000 5 s,约对应螺旋桨旋转 2° 的时间;而采用体积力法模拟螺旋桨时对应的时间步长参考 ITTC 的建议取为 $0.002\ 5L/U^{[16]}$ 。表 3 给出了 2 种方法的计算对比结果,分析可知,2 种方法对于船体水动力的计算结果比较一致,相差不超过 5.3%,但对于舵法向力的结果相差稍大,会达到 15.2%。这是因为体积力法不能精确描述实际螺旋桨的力源分布以及其不考虑螺旋桨实际几何形状。综合考虑计算精度和效率问题,采用螺旋桨体积力法研究船舶在操纵工况下的船-桨-舵相互作用问题是可取的。

表 3 不同螺旋桨模拟方法的力和力矩计算结果对比
Tab. 3 Comparison of force and moment calculation results using different propeller methods

力和力矩 系数	$\beta = 9^\circ$ 斜拖试验		
	RP	BF	BF 方法相对 RP 方法的误差/%
F_x'	-0.018 4	-0.018 6	1.1
F_y'	0.044 8	0.047 2	5.4
M_z'	0.018 5	0.019 2	3.8
F_N'	-0.004 74	-0.005 46	15.2

3 数值结果和分析

计算对象共有 4 个,分别为 KVLCC2 裸船体(H)、船-桨(HP)、船-舵(HR)和船-桨-舵(HPR)。考虑到船、桨、舵三者之间相互干扰的复杂性,首先从整体式模型的角度将系统视为一个整体进行分析,之后从分离式模型的角度将系统各部分分开单独进行分析。值得说明的是,由于水动力系数存在正负号问题,为方便进行说明,分析时对其绝对值的变化情况进行对比。此外,由于文中只进行了单一工况的计算而不能回归得到各系统的水动力导数,但线性水动力导数大小和文中计算的操纵水动力系数大小是成线性相关的,因此根据文中操纵水动力系数(指的是 F_y' 和 M_z')的计算结果可以判断出相应线性水动力导数的变化趋势。

3.1 系统整体分析

船舶在操纵运动过程中是船-桨-舵相互作用问题,因此从系统整体分析来看,分析 HPR 系统更具有实际意义。图 5 给出了 HPR 系统在不同航速下、不同工况下的整体水动力变化情况。首先分析 $\beta = 9^\circ$ 斜拖试验的结果,可以看到对于系统纵向力系数 F_x' ,在设计航速下其值很小,因为在直航情况下船体纵向力和螺旋桨推力接近,这时螺旋桨推力和船舵纵向力系数 F_x' 大小十分接近,而随着航速的降低,螺旋桨推力会显著大

于船舵的纵向力系数 F'_x ; 对于系统横向力系数 F'_y , 其大小随着船舶航速的降低有所提升, 低速 $0.33U$ 下相比设计航速 U 下增加约 8%; 对于系统转舵力矩系数 M'_z , 其大小随着航速的降低有所降低, 低速 $0.33U$ 下相比设计航速 U 下减少约 8%。

接着分析 $r' = 0.4$ 悬臂试验的结果, 可以看到各方向的水动力在不同航速下均有所变化。其中系统纵向力系数 F'_x 的变化规律和 $\beta = 9^\circ$ 斜拖试验基本一致, 而系统横向力系数 F'_y 和系统转舵力矩系数 M'_z 随着航速的减小均有所增大, 低速 $0.33U$ 下相比设计航速 U 下增加约 15% 左右。

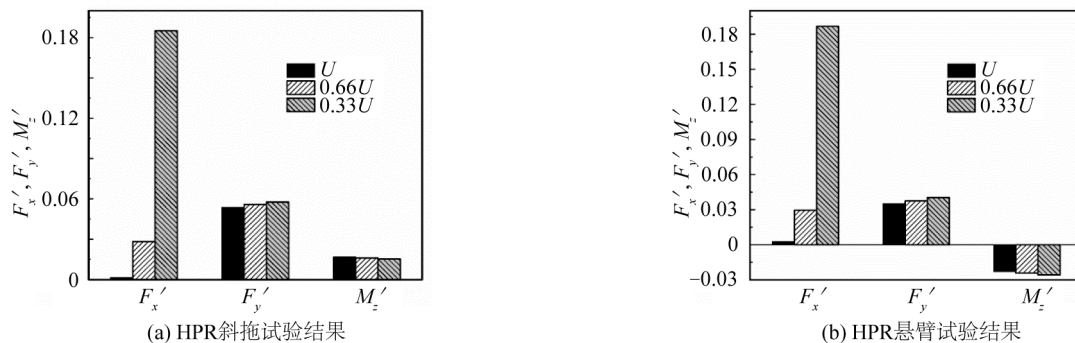


图 5 不同航速下 HPR 的水动力

Fig. 5 Hydrodynamics of HPR at different speeds

综合来看, 从系统总体的操纵水动力分析, 对于 2 种典型的约束模试验, 系统整体横向力系数和转舵力矩系数在不同航速下并不是一个定值, 变化幅度在 8% 至 15%, 相对的线性水动力导数也会有类似变化。因此在船舶操纵性建模的过程中需要考虑相应线性水动力导数随航速的变化。

3.2 系统各部分单独分析

图 6 给出了 $\beta = 9^\circ$ 斜拖试验下不同系统各自部分 (如 HR(hull) 表示船舵系统中的船体受力) 在不同航速下的水动力系数。首先研究船体水动力。分析纵向力系数 F'_x , 对比 H、HP 以及 HR、HPR 可知, 不同航速下螺旋桨对船体纵向力系数的影响有着较为明显的差异, 由于螺旋桨的抽吸作用, 在设计航速 U 下螺旋桨的存在使得船体纵向力系数 F'_x 增幅约为 18%, 在低速 $0.33U$ 下增幅达 107%。分析横向力系数 F'_y , 对比 H、HP、HR 可知, 螺旋桨对船体横向力系数的影响较为明显且该变化随着航速的降低增大明显, 在设计航速 U 下约为 9%, 在低速 $0.33U$ 下可达 23%, 该影响已经比较显著。而舵对船体横向力系数影响相对很小, 该微小变化来自于舵的横向力在船体上产生的诱导横向力。进一步对比 HPR 和 H 发现, 在螺旋桨和舵的作用下船体横向力系数 F'_y 增量反而不如 HP 相比于 H 的增量, 例如在航速 $0.33U$ 下从 23% 下降到 7%, 这说明舵的存在会显著减弱螺旋桨对船体横向力系数 F'_y 的影响。分析转舵力矩系数 M'_z , 对比 H、HP、HR 可知, 螺旋桨对船体转舵力矩系数影响较为明显且该变化随着航速的降低减小明显, 在低速 $0.33U$ 下可达 21%。 F'_y 与 M'_z 变化趋势相反的原因在于螺旋桨只对船艏流场分布有较大的影响, 系统艏部横向力的增加会引起船体转舵力矩的减小。进一步对比 HPR 和 H 发现, 在螺旋桨和舵的作用下船体转舵力矩系数 M'_z 减少量反而不如 HP 相比于 H 的减少量, 这说明舵的存在会减弱螺旋桨对船体转舵力矩的影响。

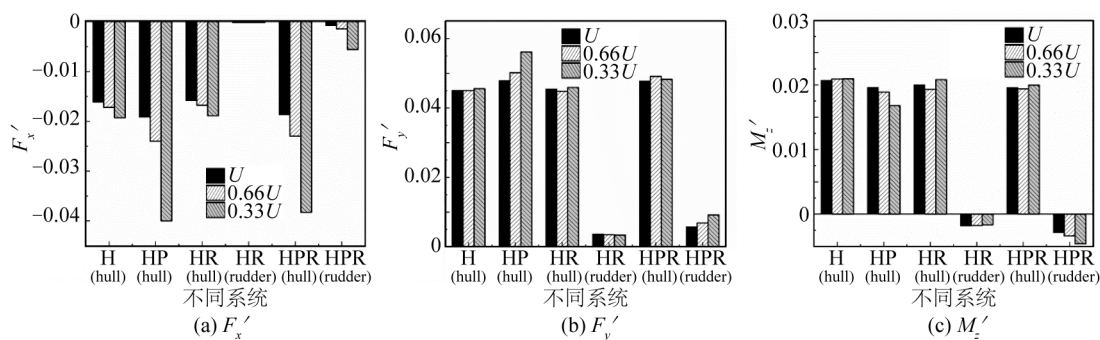


图 6 斜拖试验操纵水动力计算结果比较

Fig. 6 Comparison of hydrodynamic calculation results for oblique towing test manipulations

接着分析舵水动力。对比HR和HPR,对于舵纵向力系数 F_x' ,其在螺旋桨不存在时相比船体力可以忽略不计,当螺旋桨存在时随着航速的降低,其大小明显增大,船体纵向力系数不可完全忽略。对于舵横向力系数 F_y' ,在没有螺旋桨时的舵横向力系数较小,且随着船速的变化几乎不变;但存在螺旋桨时,HPR的舵横向力系数相比HR明显增大,且随着船速的减小会明显增大。在 $0.33U$ 下的舵横向力系数约为 U 下的舵横向力系数的1.77倍,说明螺旋桨在不同航速下对舵效的影响显著不同,其大小相比船体力也不再是个小量。至于舵产生的转艏力矩系数 M_z' ,其变化规律和舵横向力系数 F_y' 类似。

图7给出了 $r' = 0.4$ 悬臂试验下不同系统各自部分在不同航速下的各方向水动力系数。相比于 $\beta = 9^\circ$ 斜拖试验,螺旋桨对船体水动力系数的影响更加明显。首先研究船体水动力。对于纵向力系数 F_x' ,船体水动力变化情况和斜拖试验变化基本一致。分析横向力系数 F_y' ,对比H以及HP、HR可知,在 $0.33U$ 下,舵的存在使得船体横向力系数增加了约10%,而螺旋桨的存在使得船体横向力系数增加了约58.5%;而对比HPR和H发现,在 $0.33U$ 下,螺旋桨和舵同时影响时船体横向力系数仅增加了约34.5%,船体横向力系数 F_y' 的增量同样不如HP和H之间的增量,这和斜拖试验的结果类似,同样说明了舵的存在会减弱螺旋桨对船体水动力的影响。对于转艏力矩系数 M_z' ,和横向力系数 F_y' 的变化规律类似,只是具体变化大小有所差异,不再进一步说明。

接着分析舵水动力。对比HR和HPR可知,在没有螺旋桨时的舵横向力系数几乎为定值,其大小约为船体横向力系数的24%;而存在螺旋桨时,HPR的舵横向力系数相比HR明显增大,且随着船速的减小会明显增大,甚至达到了船体横向力系数的50%,其变化规律和斜拖试验总体一致。舵产生的转艏力矩系数 M_z' ,其变化规律同样和舵横向力系数 F_y' 类似。

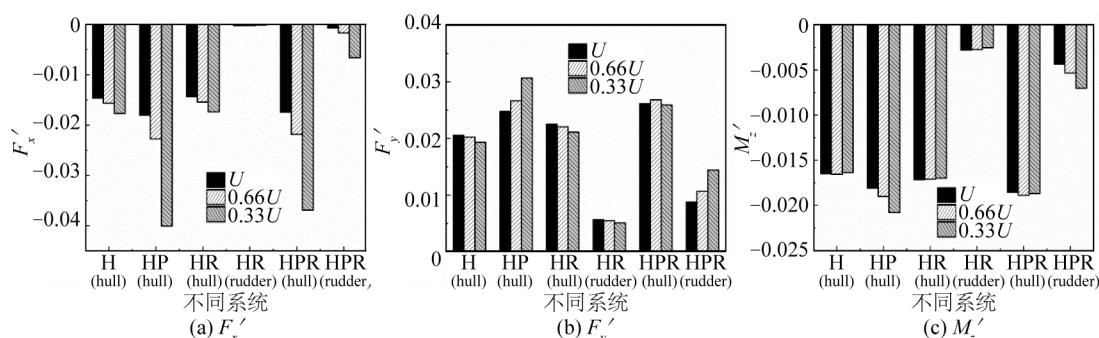


图7 悬臂试验操纵水动力计算结果比较

Fig. 7 Comparison of hydrodynamic calculation results for cantilever test manipulations

综合来看螺旋桨对船体的操纵水动力有着不可忽略的影响,但在船、桨、舵相互作用下,舵的存在会明显减弱螺旋桨对船体横向力和转艏力矩的影响,相应的船体线性水动力导数也会近似的影响。在基于MMG模型的操纵性建模时,通常采用裸船体的约束模试验来获取船体的水动力导数。而实际上因为螺旋桨对船体水动力是有一定影响的,因此上述求取相应的水动力导数的方法并不十分合理。但舵的存在会减弱该影响,因此通过该方法求得的水动力导数所受到的影响也会偏小。此外,螺旋桨对舵力的影响在不同航速下也有着十分明显的差异,不同航速下的水动力干扰也存在差异。因此从MMG模型的角度来看,亦有必要进行不同航速下的约束模试验,进而求取不同航速下的相关船体水动力导数和船、桨、舵水动力干扰系数,从而建立更合理的船舶操纵运动模型。

3.3 流场结果分析

图8给出了 $r' = 0.4$ 悬臂试验中HP在 U 和 $0.33U$ 航速下的船艏表面压力系数 c_p 分布情况。从图8中可以看出,低速时船艏表面受到的影响更大,范围也会更大。在靠近艏轴的位置附近会形成更加明显的负压,船艏两侧的压力差也更大。

图9给出了 $r' = 0.4$ 悬臂试验中HP和HPR在 $0.33U$ 航速下的中纵剖面无因次轴向速度 u/U 。从图9中可以看到,舵的存在明显改变了船舶尾流场的分布。由于舵的“整流作用”使得螺旋桨在船尾附近产生的高速低压区范围有一定减小,因此在一定程度上舵的存在减弱了螺旋桨对船体水动力的影响。

图10给出了 $r' = 0.4$ 悬臂试验中HPR在 U 和 $0.33U$ 航速下 $z=0.3T$ 处截面的无因次轴向速度 u/U 。可以看到低速时 $0.33U$ 螺旋桨对舵附近的流场影响相比设计航速 U 下更为明显,舵附近的轴向流速明显增大,说

明在低速下,船艏处的舵效会有所增大。



图 8 船艏表面压力比较

Fig. 8 Comparison of stern surface pressures

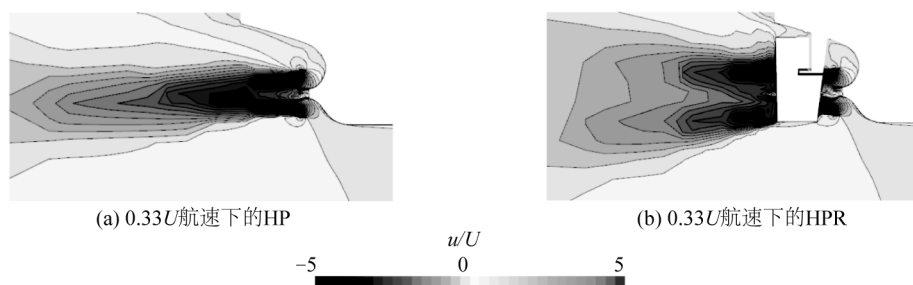


图 9 中纵剖面轴向速度比较

Fig. 9 Comparison of axial velocities at midship section

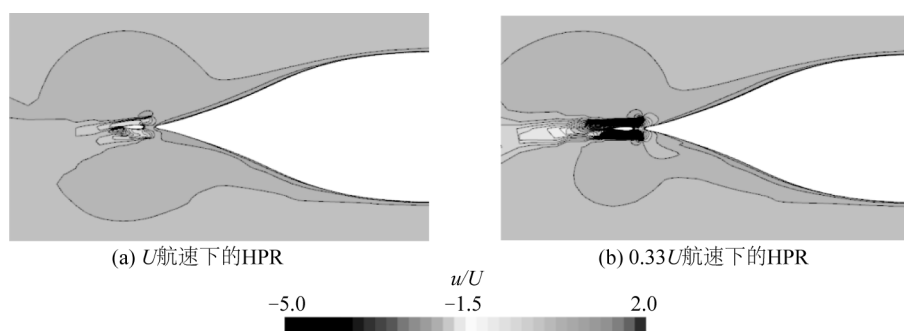


图 10 $z=0.3T$ 处截面的轴向速度比较

Fig. 10 Comparison of axial velocities at section $z=0.3T$

4 结 语

对 KVLCC2 裸船体、船-舵、船-桨和船-桨-舵分别进行了 2 种典型工况下不同航速的约束模试验数值模拟。通过对比不同航速下系统整体以及各部分的水动力大小,分析了不同航速下螺旋桨对于船舶操纵水动力性能的影响,得出以下结论:

1) 从整体式模型的角度分析各系统整体操纵水动力,对于同样的漂角和无因次角速度工况,HPR 系统的操纵水动力(横向力系数 F_y' 和转艏力矩系数 M_z')在不同航速下不是一个定值,变化在 8% 至 15% 左右,对应的线性水动力导数也会有类似的变化。因此在操纵性建模时应该考虑相应水动力导数随航速的变化。

2) 从分离式模型的角度分析,对比 H 和 HP 可知,螺旋桨对于船体操纵水动力系数(横向力系数 F_y' 和转艏力矩系数 M_z')存在着一定影响,该影响随着船速的减小会明显增大,在低速 0.33U 时达到了 20% 以上,其影响不可忽略。但再进一步对比 HPR、H 可知,舵的存在会减弱螺旋桨对船体横向力系数 F_y' 和转艏力矩系数 M_z' 的影响。由于线性水动力导数大小和文中计算的操纵水动力系数大小是成线性相关的,因此相应的船体水动力导数会受到近似影响。

3) 从分离式模型的角度分析舵效,由于螺旋桨的抽吸作用,船艏的舵横向力系数会增大,在不同航速下该增量有着明显的差异,在低速 0.33U 下的舵效相比设计航速 U 下的舵效增量更大,因此船、桨、舵干扰在不

同航速下也存在着差异。综合来看,在基于分离式模型进行相关操纵性建模时,有必要进行不同航速下的约束模试验,进而求取不同航速下的相关船体水动力导数和船、桨、舵水动力干扰系数,从而建立更合理的船舶操纵运动模型。

参考文献:

- [1] 王建华, 万德成. 船舶操纵运动CFD数值模拟研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 813-824. (WANG J H, WAN D C. CFD simulations of ship maneuvering motion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(5): 813-824. (in Chinese))
- [2] 冯松波, 邹早建, 邹璐. KVLCC2船-舵系统斜航水动力数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 470-474. (FENG S B, ZOU Z J, ZOU L. Numerical calculation of hydrodynamic forces on a KVLCC2 hull-rudder system in oblique motion[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(4): 470-474. (in Chinese))
- [3] 刘晨飞, 刘亚东. 基于CFD船舶操纵性预报方法研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(6): 109-115. (LIU C F, LIU Y D. A CFD-based research on the method of predicting ship maneuverability[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(6): 109-115. (in Chinese))
- [4] 刘义, 邹早建, 郭海鹏. 基于两种螺旋桨建模方法的全附体船模斜拖试验数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(4): 423-430. (LIU Y, ZOU Z J, GUO H P. Numerical simulation of oblique-towing test for a fully appended ship model based on two propeller modelling methods[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(4): 423-430. (in Chinese))
- [5] 胡芳琳, 冯康佳, 马向能. 动态PMM实验的数值模拟及线性导数获取方法[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2021, 36(2): 192-200. (HU F L, FENG K J, MA X N. Numerical simulation of dynamic PMM test and method of obtaining linear derivatives[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(2): 192-200. (in Chinese))
- [6] YASUKAWA H, YOSHIMURA Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(1): 37-52.
- [7] 庞永杰, 王庆云, 李伟坡, 等. 螺旋桨及其运行对潜艇操纵性水动力影响的模型试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 109-114. (PANG Y J, WANG Q Y, LI W P, et al. Model test study of influence of propeller and its rotation on hydrodynamics of submarine maneuverability[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 109-114. (in Chinese))
- [8] 夏召丹, 王大建, 封培元, 等. 喷水推进船舶航向稳定性分析[J]. 中国造船, 2018, 59(4): 69-74. (XIA Z D, WANG D J, FENG P Y, et al. Analysis of yaw stability for waterjet-propelled vessel[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(4): 69-74. (in Chinese))
- [9] ZHANG C L, LIU X J, WAN D C, et al. Experimental and numerical investigations of advancing speed effects on hydrodynamic derivatives in MMG model, part I: X_{vv} , Y_v , N_v [J]. Ocean Engineering, 2019, 179: 67-75.
- [10] SIMMAN 2008. Workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods[DB/OL]. [2023-06-28]. <http://www.simman2008.dk>.
- [11] SIMMAN 2014. Workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods[DB/OL]. [2023-06-28]. <http://simman2014.dk>.
- [12] SIMMAN 2020. Workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods[DB/OL]. [2023-06-28]. <http://simman2020.kr>.
- [13] 吴召华, 陈作钢, 代焱. 基于体积力法的船体自航性能数值预报[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 943-949. (WU Z H, CHEN Z G, DAI Y. Numerical prediction of self-propulsion with a body-force propeller model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(6): 943-949. (in Chinese))
- [14] JIANG L, YAO J X, LIU Z Y. Comparison between the RANS simulations of double-body flow and water-air flow around a ship in static drift and circle motions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 970.
- [15] 伍海华, 邹早建. 船舶大漂角斜航运动水动力数值预报[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(3): 339-345. (WU H H, ZOU Z J. Numerical prediction of hydrodynamic forces on a ship in oblique motion with large drift angle[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(3): 339-345. (in Chinese))
- [16] 苏玉民, 林健峰, 赵大刚, 等. 实尺度船舶快速性数值模拟方法综述[J]. 中国造船, 2020, 61(2): 229-239. (SU Y M, LIN J F, ZHAO D G, et al. Review of numerical simulation methods for full-scale ship resistance and propulsion performance[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(2): 229-239. (in Chinese))