

桨径比对串列螺旋桨水动力性能的影响^{*}

严睿雄¹, 张怀新², 姚慧岚¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266000;
2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 基于B系列和AU系列桨叶参数设计了22只不同桨径比的串列桨, 采用数值方法进行性能研究, 重点比较了后桨直径大和后桨直径小的串列桨的推力和效率, 在此基础上探讨桨径比变化对串列桨性能的影响, 最终从流场干扰角度对性能变化的原因进行分析。结果表明: 后桨直径大的串列桨的推力和效率均优于后桨直径小的串列桨。在中小进速系数下, 随着后桨直径增大, 串列桨的效率先增大后减小, 存在最佳值, 而在大进速系数时, 随着前桨径与后桨径比值的减小, 效率逐渐提升。较小的前桨对后桨入流的不利干扰减少, 是串列桨效率提高的根本原因。

关键词: 串列螺旋桨; 桨径比; 敞水性能; 桨间干扰; 数值模拟

中图分类号: U661.31 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 10-2207023-13

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2207023

Effects of Diameter Ratios on Hydrodynamic Performance of Tandem Propellers

YAN Rui-xiong¹, ZHANG Huai-xin², YAO Hui-lan¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;
2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on B series and AU series blade parameters, 22 tandem propellers of different diameter ratios were designed, and the hydrodynamic performance of these propellers was investigated by numerical simulation. Then, thrust and efficiency of the tandem propellers with larger aft propellers were compared with the tandem propellers with smaller aft propellers. The influence of diameter ratios on hydrodynamic performance of tandem propellers was investigated. And finally the cause of this influence was analyzed from the perspective of the flow field. Results show that tandem propellers with larger aft propellers have the higher thrust coefficient and efficiency than those with smaller aft propellers. At a low or moderate advance coefficient, the open water efficiency increases and then decreases as the diameter of the aft propeller is enlarged, which means there exists optimum efficiency. At a high advance coefficient, efficiency keeps growing as the ratio of the forward propeller diameter to the aft propeller diameter (D_f/D_a) increases. A root cause of the improvement in efficiency is that the interaction between the forward propeller and the aft propeller is weakened as the diameter of the forward propeller is reduced.

^{*} 收稿日期: 2022-07-06; 修订日期: 2022-09-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (52101335; 52171316); 山东省自然科学基金 (ZR2020QE293); 山东省博士后创新项目 (202002018)。

作者简介: 严睿雄, 硕士生, 研究领域为螺旋桨水动力。

通讯作者: 姚慧岚, 博士, 讲师, 研究领域为推进器水动力学。E-mail: yaohuian@ouc.edu.cn

引用格式: 严睿雄, 张怀新, 姚慧岚. 桨径比对串列螺旋桨水动力性能的影响[J]. 推进技术, 2023, 44(10): 2207023.
(YAN Rui-xiong, ZHANG Huai-xin, YAO Hui-lan. Effects of Diameter Ratios on Hydrodynamic Performance of Tandem Propellers[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(10): 2207023.)

Key words: Tandem propellers; Diameter ratio; Open water performance; Blade interaction; Numerical simulation

1 引言

为了满足海上运输、海洋开发和海洋工程建设的需要,船舶的尺寸和载重不断增加,这使得普通的单螺旋桨的荷载过大,更容易出现桨叶空化严重、船尾结构振动较大等问题。为了弥补这些缺陷,转螺旋桨、串列螺旋桨等特种推进器引起了研究者的关注。相比于其他特种推进器,串列螺旋桨的结构相对简单,加工、安装和维修成本都比较低^[1]。而且串列桨能够较好地吸收主机功率,降低桨叶载荷,从而在一定程度上改善桨叶表面的空化,减轻船尾结构振动^[2]。

早期对串列螺旋桨的认识较浅,相关研究也较少,串列螺旋桨的发展缓慢。直到大型船舶的出现对普通螺旋桨的负荷、振动、噪声等方面提出了新的要求。这些要求一方面使得普通螺旋桨向着多叶数、大侧斜等方向变化,另一方面也促进了串列螺旋桨的发展^[3]。在这期间学者专家对串列螺旋桨开展了大量的研究和模型试验^[4-5],并将串列桨运用于内河船舶上,进行了实船试验^[6-8]。结果表明,比起普通螺旋桨,串列螺旋桨的推进效率有所提高,空泡性能和船体激振情况也有一定程度的改善。此后随着对串列螺旋桨前后桨的桨距比、叶错角等组合参数研究的开展,人们对串列桨的认识进一步加深。孙勤等^[9]的研究表明通过调节前后桨的叶错角与桨距比,串列螺旋桨的效率得到提高,此时的桨距比一般为0.2~0.25倍螺旋桨直径,相关的最佳叶错角也可以通过公式估算。

但是上述研究主要基于前后桨等直径的串列桨,主要原因是研究者认为相同直径的前后桨以固定的叶错角转动时,前桨产生的梢涡以及收缩尾流不会对后桨的叶梢部分造成干扰^[10]。近年来,一些研究者设计了后桨桨径略小的串列螺旋桨,并展开了相关研究。Djahida等^[11]在桨距比为0.6的条件下对比了后桨与前桨直径之比 D_a/D_f 为0.5, 0.75, 1.0的Seiun-Marun HSP串列螺旋桨,模拟结果表明,前后桨等大的串列桨在转矩系数、推力系数和高进速系数下的效率都大于后桨直径小的串列桨,但在中低进速系数下,后桨小的串列桨在效率上略高于等径串列桨。Chavan等^[12]对后桨桨径减小的影响进行研究,设置了 $D_a/D_f=1.0, 0.975, 0.95$ 三组串列桨对比模

拟,发现转矩系数、推力系数和效率都随着后桨直径的减小而减小。Liu等^[13]基于KP458螺旋桨设置了 D_a/D_f 为0.97~0.92的五组串列螺旋桨,结果表明后桨能够较好地吸收前桨产生的尾流,在一定桨距比下,后桨直径小的串列螺旋桨敞水效率比等径串列桨更高。

在之前的研究中^[14-15],类比于在航空领域具有优越气动性能的鸭式布局机翼^[16],提出了一种鸭式布置的串列桨。这种串列桨的前桨直径略小于后桨。前桨直径较小,类似于飞机的鸭翼,而后桨直径较大,类似于飞机的主翼。这种串列桨能够更好地适应船尾处的空间结构,而且比起传统的等径串列桨,其敞水效率有所提高。

综上,在串列桨设计中,关于前、后桨直径的选取仍然存在争议。传统理论认为前、后桨直径相等时串列桨的性能最佳,但近来有研究发现,一定条件下,后桨直径略小时效率要高于等直径串列桨。而根据之前的研究发现,后桨直径略大时串列桨的性能也要优于等直径串列桨。因此,串列桨前后桨径比的选择需要进一步的探讨分析。

本研究基于B系列和AU系列翼型设计了22只串列桨,并根据桨径比不同将其分为三组。采用计算流体力学方法,运用动参考系模型(Moving Reference Frame),通过求解RANS方程和SST $k-\omega$ 湍流模型对敞水中的串列桨进行数值模拟,对各桨的性能进行预报。通过比较,明确后桨大和后桨小的串列桨性能特点和优势,分析了串列桨敞水性能与前后桨径比的变化规律,并从桨叶表面压力和轴向速度的角度探讨桨径比变化对串列桨性能的影响机理。

2 数值模拟方法

2.1 几何模型

为了让结果更具一般性,本文根据AU系列和B系列桨叶参数设计了两种串列桨,一共22只,一种是由两只四叶B系列螺旋桨组成,另一种是由两只三叶AU系列螺旋桨组成,具体的参数如表1所示。

各串列螺旋桨的参数如表2所示,图1对这些参数的定义进行了说明。B系列串列桨前后桨的直径基于参考直径 $D_r=0.22\text{m}$ 进行变化,叶错角为 18° ,桨距比为0.21,除了直径外其他参数均相同;AU系列串列桨前后桨的直径都基于参考直径 $D_r=0.25\text{m}$ 按照比

Table 1 Parameters of two propellers

Parameter	B series	AU series
Blade number	4	3
Diameter/m	0.22	0.25
Disk ratio	0.55	0.65
Pitch ratio	1.2	0.8
Boss ratio	0.182	0.18
Rake/(°)	0	10
Rotation rate/(r/s)	15	11

例进行缩放,叶错角为 48° ,桨距比为 0.24,除了直径外其他参数均相同。B 系列串列桨的转速为 15r/s, AU 系列串列桨的转速为 11r/s,两种串列桨的雷诺数范围分别是 $Re=5 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5$, $Re=4 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^5$,大于临界雷诺数 3×10^5 。

根据桨径比不同,将串列桨分为三组:后桨略小的串列桨、后桨与前桨等大的串列桨以及后桨略大的串列桨。为了更加科学地比较后桨大和后桨小的串列桨的性能,采用将前、后桨直径互换的形式得到两只串列桨进行直接比较,这样能保证两只串列桨除桨径比不同外的所有参数均相同。

图 2 和图 3 分别是 B 系列串列桨和 AU 系列串列桨模型,其中蓝色为前桨,橙色为后桨。

2.2 计算域与网格

图 4 为本研究所使用的计算域,整个计算域划分为两个子区域,一个是旋转域,另一个是静止域。旋转域通过动参考系方法 (Moving Reference Frame) 实现旋转,这两部分通过交界面来传输数据。整个计算域是一个直径为 $8D_r$,长度为 $13D_r$ 的圆柱体,旋转域的直径为 $1.4D_r$,长度为 $1.4D_r$ 。速度入口距离螺旋桨(原点) $3D_r$,压力出口距离原点 $10D_r$,圆柱面为可滑移的壁面。

采用 STAR-CCM+ 软件,通过数值求解稳态不可压的 N-S 方程,对串列螺旋桨的敞水性能进行模拟,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型。图 5 为计算域以及近壁面的网格划分结果。计算域的网格采用切割体网格,螺旋桨周围划有局部加密网格并且在桨叶处设置了 22 层边界层网格,边界层增长率为 1.15,壁面平均 Y^+ 值在 1 左右,采用近壁模型法直接求解近壁面流动。

Table 2 Varieties of three combination parameters of the tandem propeller

Tandem propellers	Reference diameter D_r /m	Angular spacing $\theta/(^{\circ})$	Axial spacing ratio L/D_r	Diameter difference D_r/D_a
CLB4-55	0.22	18	0.21	0.95/1.05, 0.96/1.04, 0.97/1.03, 0.98/1.02, 0.99/1.01, 1.00/1.00, 1.01/0.99, 1.02/0.98, 1.03/0.97, 1.04/0.96, 1.05/0.95
CLAU3-65	0.25	48	0.24	

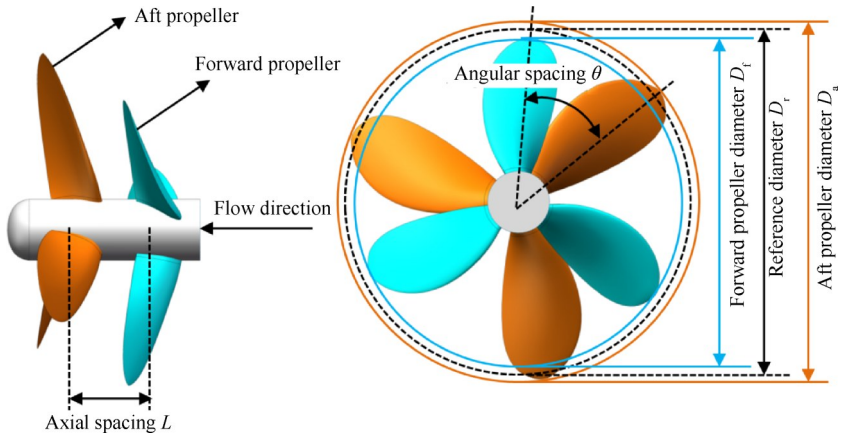


Fig. 1 Geometric description of the tandem propeller

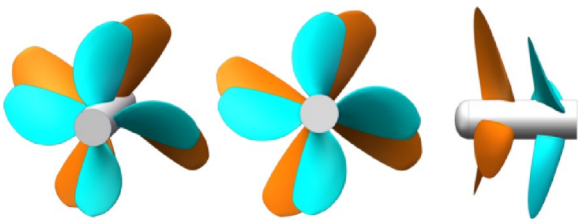


Fig. 2 Geometry of the CLB4-55 tandem propeller

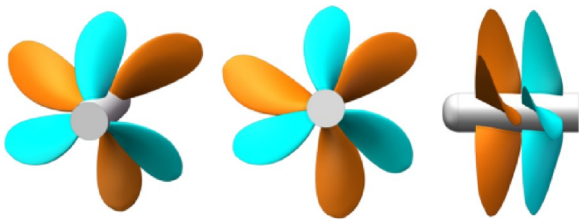


Fig. 3 Geometry of the CLAU3-56 tandem propeller

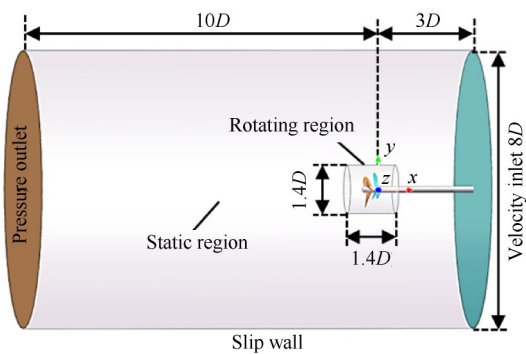


Fig. 4 Computational domain and boundary conditions

2.3 串联螺旋桨性能参数

为了对不同桨径比的串联桨性能进行比较,定义相关水力性能参数为

$$J = \frac{v_A}{nD_r} \quad (1)$$

$$K_T = \frac{T_f + T_a}{\rho n^2 D_r^4} \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{Q_f + Q_a}{\rho n^2 D_r^5} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{2p}{\rho v_A^2} \quad (5)$$

式中 J 为进速系数; v_A 和 n 为进速和转速; D_r 为参考直径; K_T 和 K_Q 为推力系数和转矩系数; T_f , T_a , Q_f 和 Q_a 分别为前桨和后桨的推力和转矩; ρ 是水的密度; η 是串联桨敞水效率; p 是压力; C_p 是压力系数。

2.4 网格无关性分析

数值方法的验证所使用的螺旋桨模型是 CLB4-55-2 串联桨。通过对网格基本尺寸按照 1:1.4 的比例进行缩小,本文共设置了精细程度分别为 Coarse, Middle, Fine 的 3 套网格,模拟的结果如表 3 所示。总

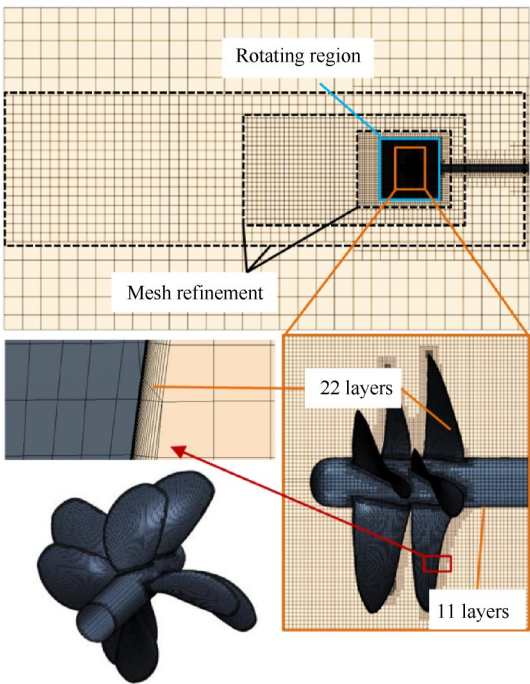


Fig. 5 Meshes generated in the computational domain

体来看,三套网格模拟结果之间的相对差值都在 1% 以内,且 Fine 与 Middle 之间的相对差值比 Middle 与 Coarse 之间的相对差值要更小,可以认为网格精细度对模拟结果并不构成大影响。因此,在保证足够计算精度的同时,为了节省计算资源,后续研究中的数值模拟都选择精细程度为 Middle 的网格。

2.5 准确性验证

CLB4-55-2 串联螺旋桨的数值模拟结果与试验结果^[17]下的比较如表 4 和图 6 所示。可以看出,模拟结果与试验数据基本吻合。当进速系数 $J=1.0$ 时, K_T 与实验值的误差相对较大,为 8.45%,主要原因是在大进速系数时螺旋桨的推力系数较小,导致准确预报变得更加困难。总体来说,本文的模拟结果是可靠的。

Table 3 Mesh independence analysis results ($J=0.6$)

Case	Cell number/million	$10K_Q$	K_T	η	Difference($10K_Q$)/%	Difference(K_T)/%	Difference(η)/%
Coarse	1.43	0.6852	0.3616	0.5039	—	—	—
Middle	2.73	0.6868	0.3643	0.5066	0.23	0.75	0.54
Fine	5.54	0.6882	0.3668	0.5090	0.20	0.69	0.47

Table 4 Comparison of numerical results with experimental data, open water performance of the CLB4-55-2 propeller

J	$10K_Q$	K_T	η	$10K_Q - \text{Exp}$	$K_T - \text{Exp}$	$\eta - \text{Exp}$	Error($10K_Q$)/%	Error(K_T)/%	Error(η)/%
0.2	0.9422	0.5644	0.1907	0.9600	0.5707	0.1892	1.85	1.10	-0.79
0.4	0.8113	0.4631	0.3634	0.8354	0.4753	0.3622	2.88	2.57	-0.33
0.6	0.6868	0.3643	0.5066	0.7114	0.3811	0.5115	3.46	4.41	0.96
0.8	0.5563	0.2652	0.6071	0.5731	0.2809	0.6241	2.93	5.59	2.72
1.0	0.3974	0.1539	0.6164	0.4061	0.1681	0.6587	2.14	8.45	6.42

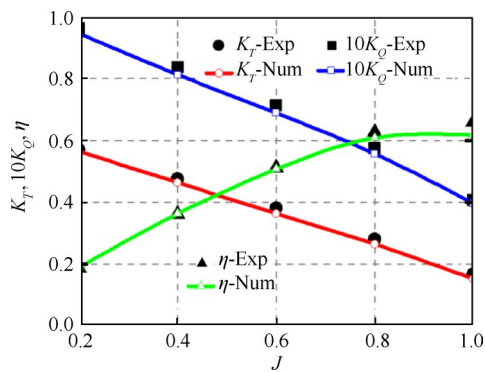


Fig. 6 Comparison of numerical results with experimental data

3 结果与讨论

3.1 后桨大和后桨小串列桨推进性能比较

图 7 给出了后桨直径大和后桨直径小的 CLB4-55 系列串列桨推力系数和效率的比较。从图中可以看出,在不同进速系数条件下,后桨大的串列桨的推

力系数和效率都优于后桨小的串列桨;在同一进速系数条件下,随着前后桨直径差异的增大,后桨大的串列桨的优势变得更加明显。比如,当进速系数为 0.6 时,前后桨径比 $D_f/D_a=0.99/1.01$ 与 $D_f/D_a=1.01/0.99$ 的串列桨相比,推力提升 4.87%,效率提升 0.61%,而当前后桨直径差异增大, $D_f/D_a=0.95/1.05$ 与 $D_f/D_a=1.05/0.95$ 的串列桨相比,推力提升 19.80%,效率提升了 2.67%。

为了让结论更具一般性,图 8 给出了后桨大和后桨小的两组 CLAU3-65 系列串列桨推力系数和效率比较,研究结果与图 7 中两组 CLB4-55 系列串列桨的比较结果一致。研究再一次说明,无论是推力还是效率,后桨大的串列桨性能要优于后桨小的串列桨。

3.2 桨径比变化对推进性能的影响

图 9 和图 10 分别展示了后桨直径略小的 CLB4-55 系列和 CLAU3-65 系列串列桨推力系数和敞水效率随桨径比的变化曲线。可以看出,当后桨直径小

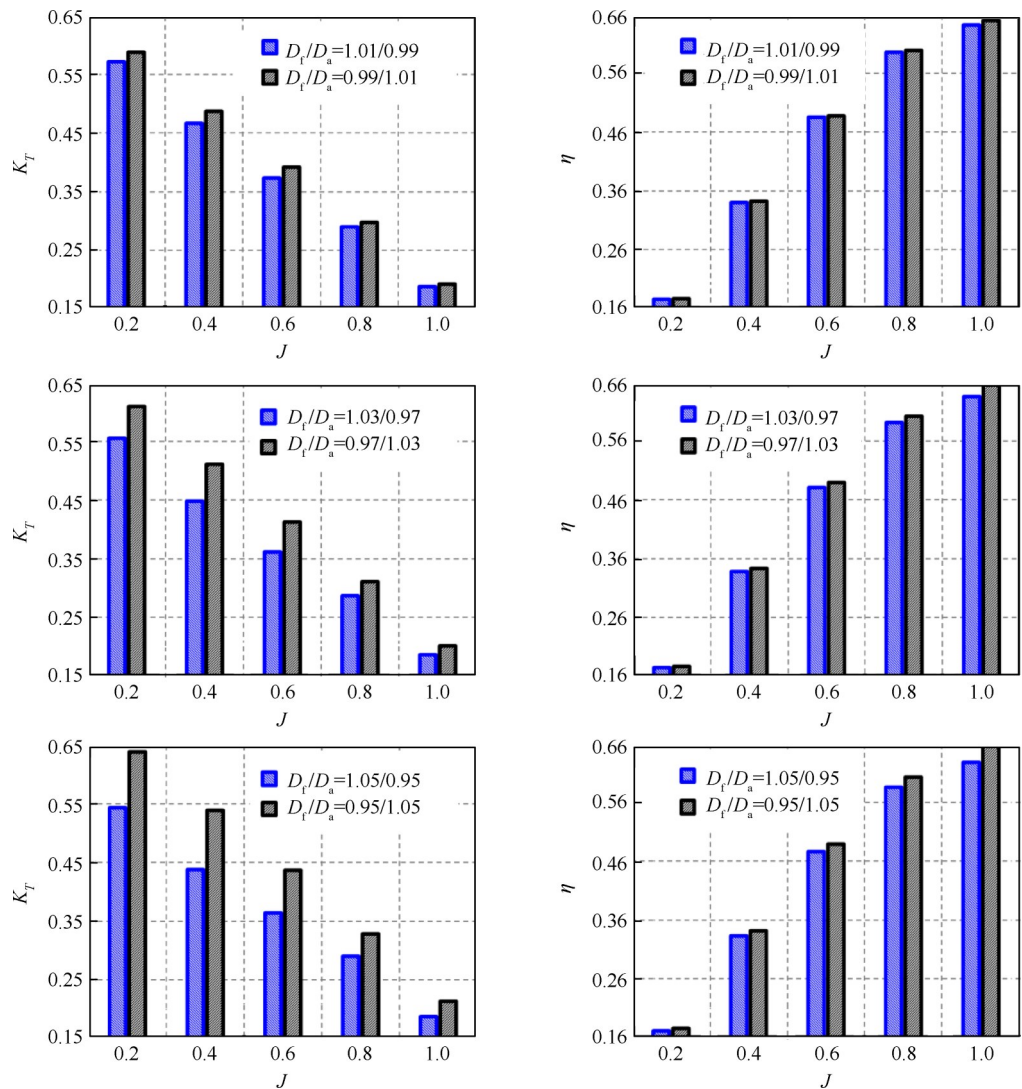


Fig. 7 Comparison of the thrust coefficient and efficiency of two groups of CLB4-55 tandem propellers

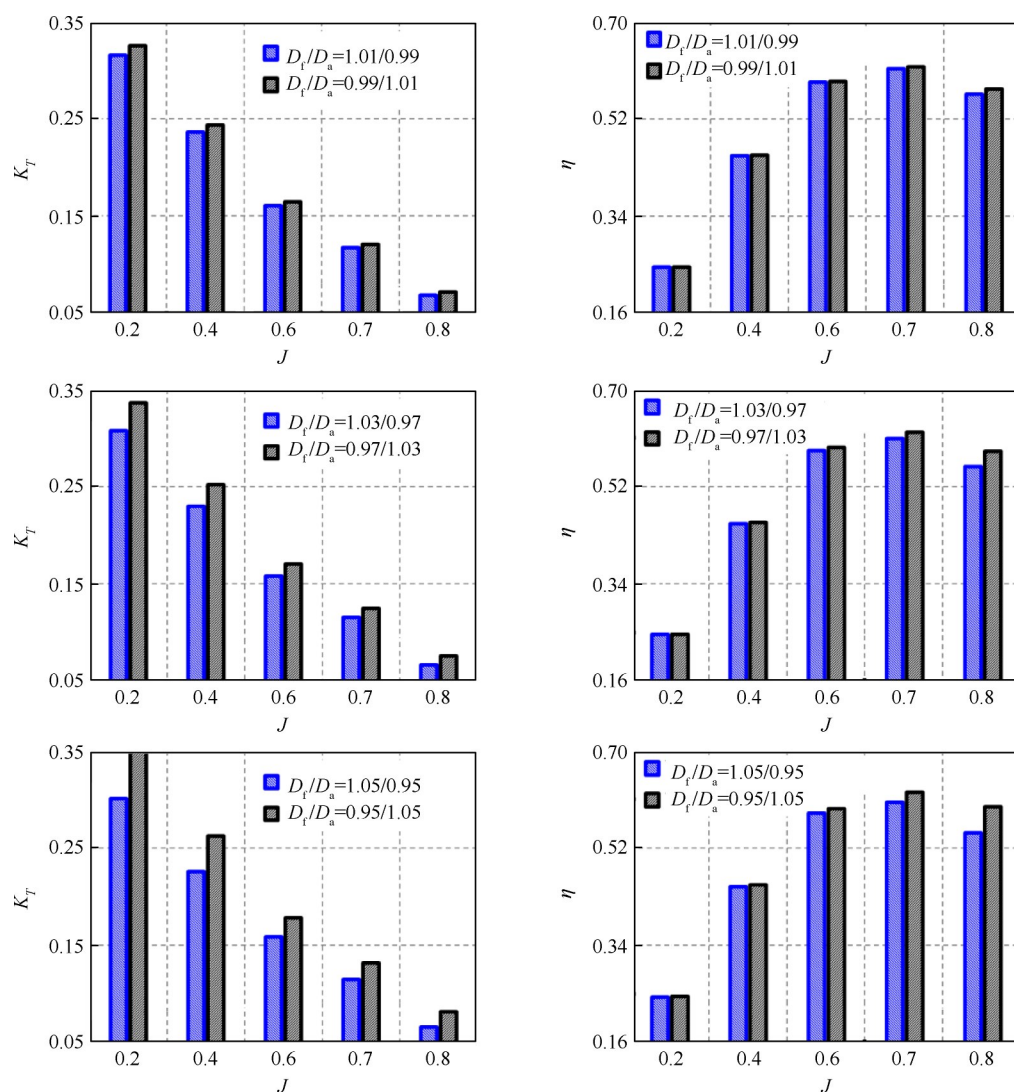


Fig. 8 Comparison of the thrust coefficient and efficiency of two groups of CLAU3-65 tandem propellers

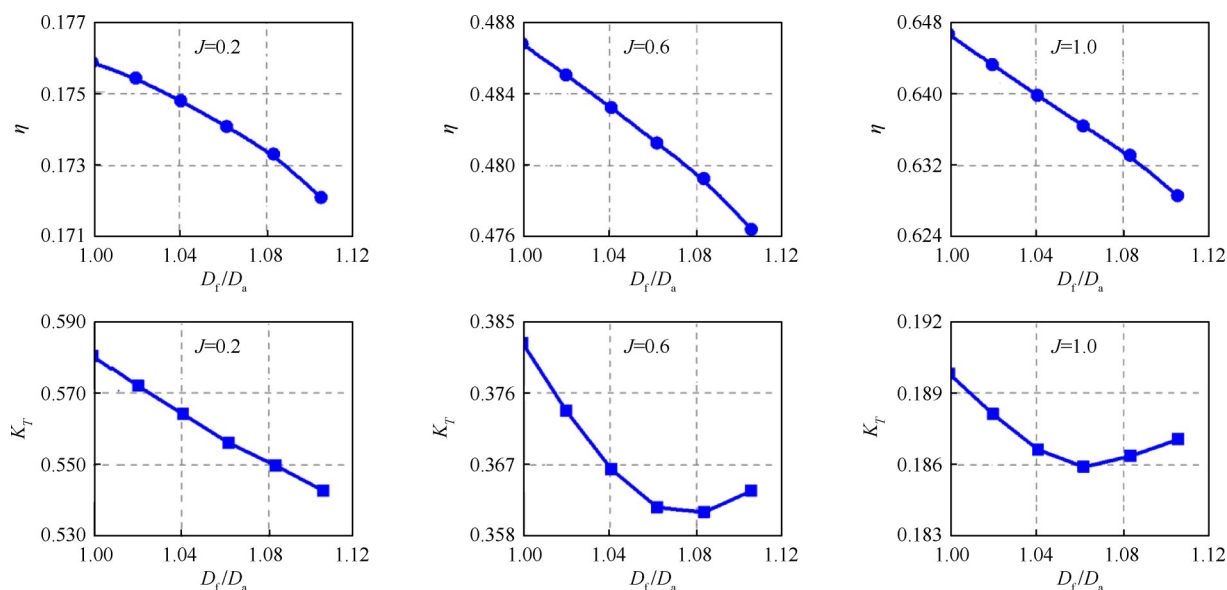


Fig. 9 Influence of diameter ratios on hydrodynamic performance of CLB4-55 tandem propellers with equal diameters and smaller aft propeller diameters

时,不管是 CLB4-55 系列还是 CLAU3-65 系列的串列桨,其推力系数和效率总体上随着后桨直径的减小而下降。但也可以观察到,在中高进速系数下,推力系数在桨径比上存在低峰值。比如图 9 中,当进速系数 $J=0.6$ 和 1.0 时,CLB4-55 系列串列桨的推力系数随着后桨直径减小先下降,而后分别在 $D_t/D_a=1.05/0.95$, $D_t/D_a=1.04/0.96$ 出现回升现象。同样的现象也可以在 CLAU3-65 系列串列桨 $J=0.6$ 和 1.0 时的推力系数图中看到。这说明在中高进速系数下,后桨直径过小的串列桨的总体推力主要受前桨直径变化的影响。

图 11 和图 12 展示了后桨直径略大的 CLB4-55 系列和 CLAU3-65 系列串列推力系数和敞水效率随

桨径比的变化曲线。同样的,当后桨略大时,不管是 CLB4-55 系列还是 CLAU3-65 系列的串列桨,总体上,其推力系数和效率随着后桨直径的增大而提升。换言之,后桨直径大的串列桨更具有优势。但是也应该注意到,在后桨直径大的情况里,随着后桨直径的增大,CLB4-55 系列串列桨效率在进速系数 $J=0.2$ 和 0.6 时出现了先升后降的现象,存在效率高峰值。进速系数 $J=0.2$ 时,CLAU3-65 系列串列桨效率也在 $D_t/D_a=1.00/1.00$ 时,达到高峰值 0.2476 。这意味着串列桨桨径布置并不是前桨直径越小后桨直径越大,效率就越高,而是存在一个最佳值。为提升串列桨的效率,前桨直径适度减小,后桨直径适度增大,前

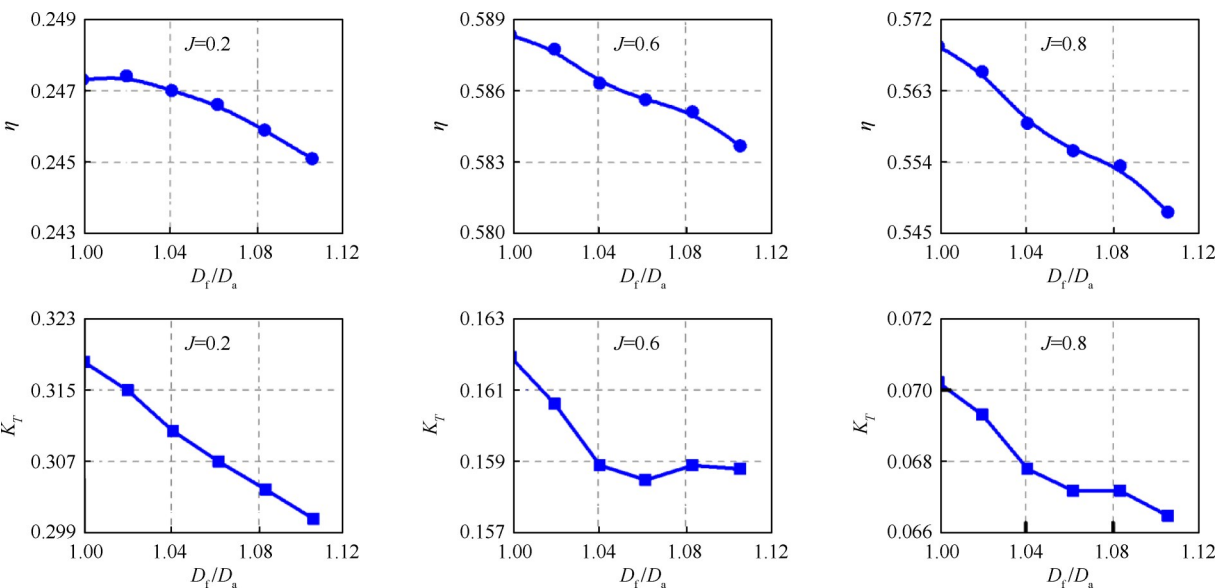


Fig. 10 Influence of diameter ratios on hydrodynamic performance of CLAU3-65 tandem propellers with equal diameters and smaller aft propeller diameters

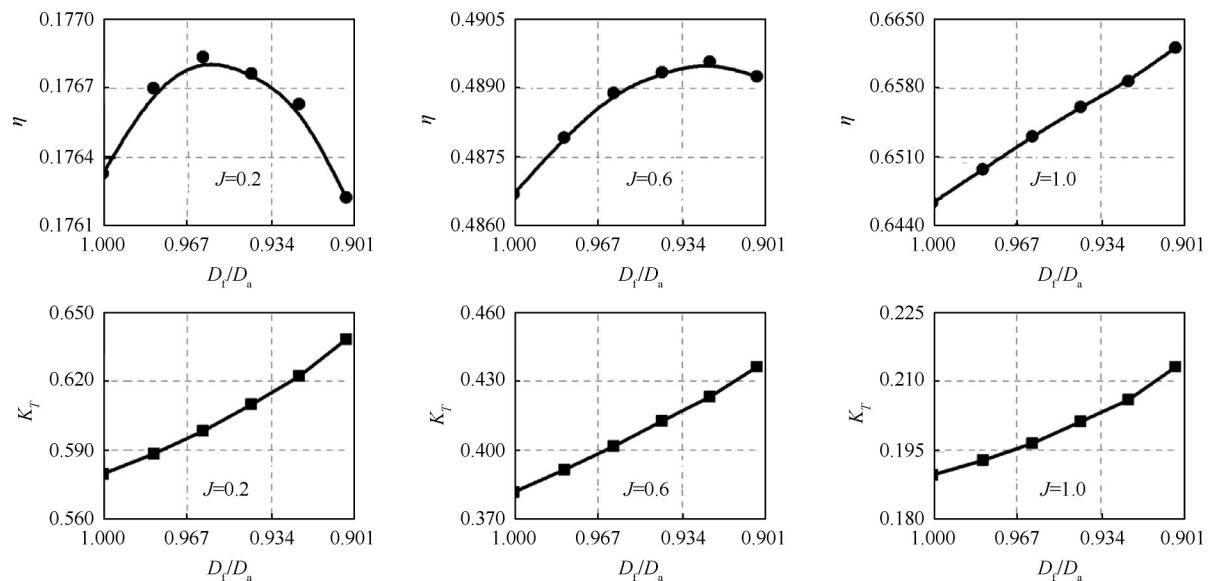


Fig. 11 Influence of diameter ratios on hydrodynamic performance of CLB4-55 tandem propellers with equal diameters and larger aft propeller diameters

后桨直径差异不能过大,否则效率会下降。

3.3 桨叶压力与推力系数

为了探明桨径比变化对串列桨推力和效率影响的原因,选取进速系数为0.6的CLB4-55和CLAU3-65串列桨桨叶的压力系数云图进行分析。

图13和图14分别展示了不同桨径比CLB4-55串列桨前桨叶和后桨叶的压力系数云图。从图13中可以看出,由于前桨来流均匀,不同桨径比的串列桨前桨叶吸力面侧的压力系数差别较小,而压力面侧由于受到后桨影响,压力系数等值线1.38~3.81之间的正压区随着前桨直径增大在桨叶 $0.6R\sim 0.8R$ (R 为参考半径,即参考直径的一半)区域逐渐由前桨导边向随边扩散,使得前桨桨叶压力面侧压力增加,前桨

推力系数提高。从图14中可以看出,不同桨径比的串列桨的后桨桨叶由于受前桨影响严重,两侧压力系数变化更加明显,后桨吸力面侧的导边和随边处出现了大面积逆压区,而负压区面积随着前桨直径的增大,逐渐向叶梢处压缩,后桨压力面侧也出现相同现象,正压区向随边缩小。这种逆压现象,将使得后桨的推力和效率大幅下降,而且随着前桨直径的增大,这种影响更加显著。

图15是不同桨径比的CLB4-55串列桨 $0.7R$ 处的流场切面在 $J=0.6$ 下的压力系数图。图像显示随前桨直径增大,前桨叶压力面侧正压区由导边向随边扩散的现象在空间上表现为:前桨压力面导边处产生局部高压区,向后桨桨叶的吸力面导边处蔓延,与

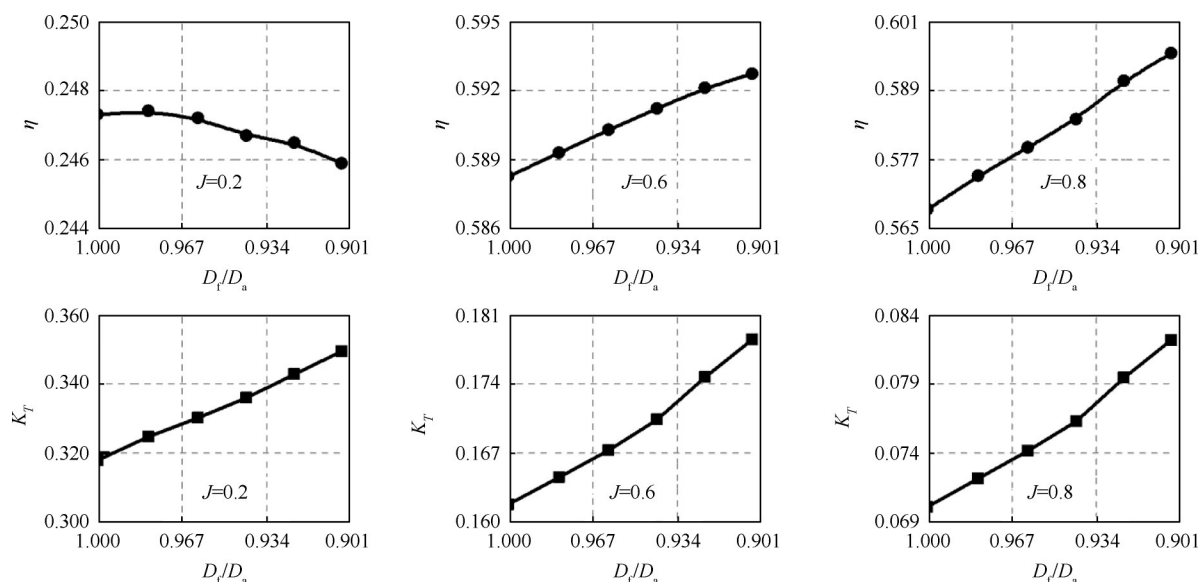


Fig. 12 Influence of diameter ratios on hydrodynamic performance of CLAU3-65 tandem propellers with equal diameters and larger aft propeller diameters

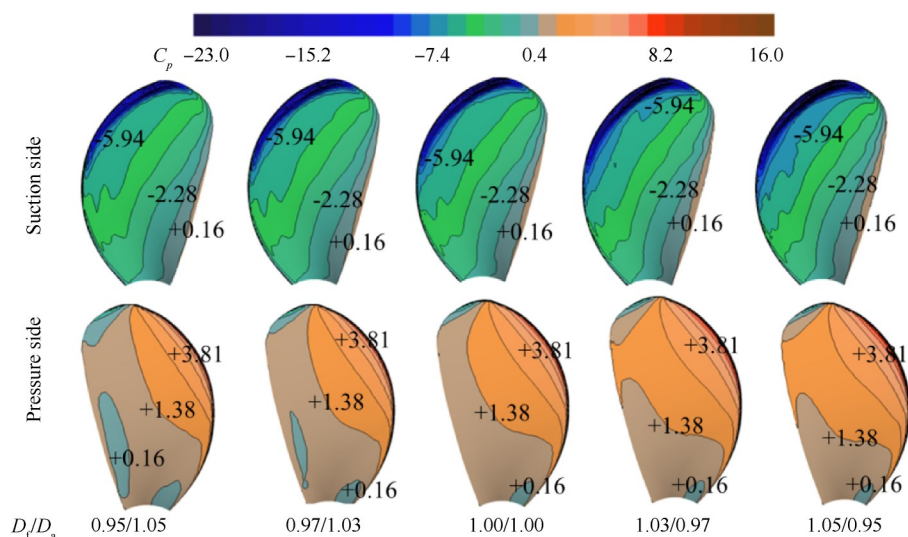


Fig. 13 Pressure coefficients on the blade of the forward propellers of CLB4-55 tandem propellers for different diameter ratios ($J=0.6$)

后桨叶导边处的高压区相互作用,一方面增大了前桨压力面的压力,但另一方面削弱了后桨整体的压力差,甚至出现逆压力差。

图 16 给出了上述几组不同桨径比的 CLB4-55 串列桨前后桨的推力系数。可以发现随着前桨径减小后桨径增大,串列桨后桨推力系数减小的额度大于前桨推力系数增加的额度,整体推力系数逐渐减小。

结合图 13,图 15 的压力系数分布图,CLB4-55 串列桨前桨压力面的高压区可以扩散的面积逐渐减小,表现为图 16(a)中前桨推力系数 K_T 随桨径比增大而增加的速率逐渐下降。而由于后桨压力面吸力面同时受到前桨影响,总体变化较为均匀,表现为 16(b)图中后桨推力系数 K_{Ta} 大致呈线性下降。

图 17,18 展示了不同桨径比的 CLAU3-65 串列

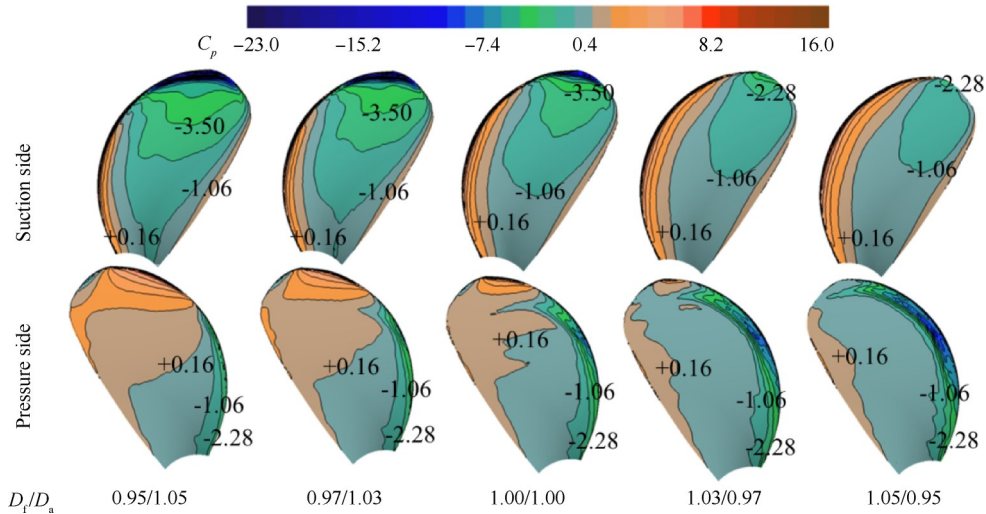


Fig. 14 Pressure coefficients on the blade of the aft propellers of CLB4-55 tandem propellers for different diameter ratios ($J=0.6$)

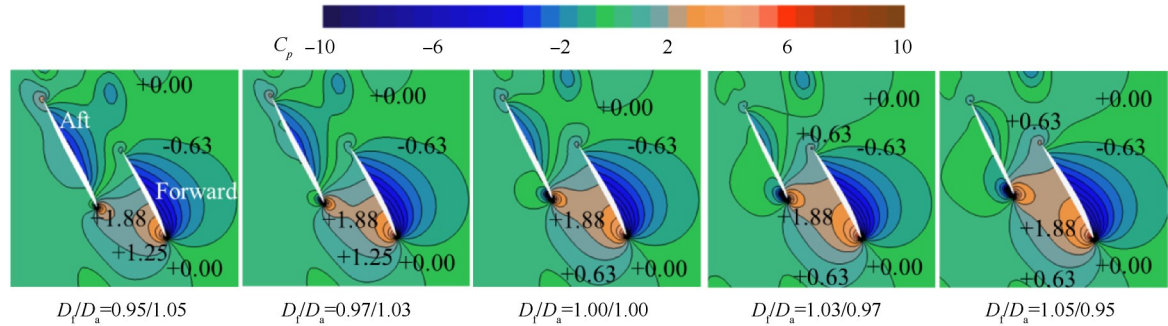


Fig. 15 Pressure coefficients around the 0.7R blade section of CLB4-55 tandem propellers ($J=0.6$)

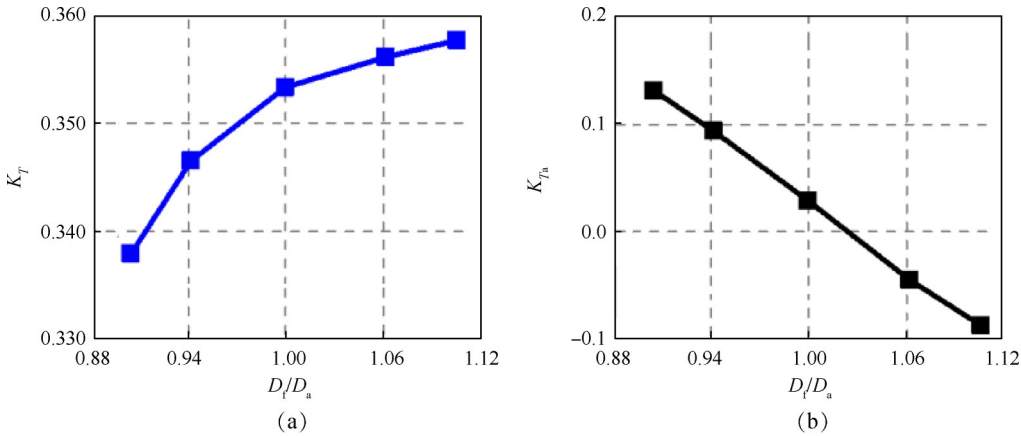


Fig. 16 Thrust coefficients of the forward and aft propellers of CLB4-55 tandem propellers with different diameter ratios ($J=0.6$)

桨前后桨叶的压力系数分布图。从图中可以发现和CLB4-55串列桨一样的规律,不同的是由于CLAU3-65串列桨桨叶较为细长且前后桨叶错角较大,前桨叶压力面上0.69~1.30压力系数等值线围成的正压区随着前桨直径增大是由前桨的随边向导边扩散。而且扩散面积沿随边在0.4R~0.9R呈带状分布,扩散速度更加均匀。

图19展示了不同桨径比的CLAU3-65串列桨0.7R处的流场切面在 $J=0.6$ 下的压力系数图。前桨压力面随边处产生的局部高压区在空间上与后桨桨叶

导边的高压区结合,并且在前桨压力侧进行扩散,有进一步与压力面导边处的局部高压区融合的趋势。

图20给出了上述几组不同桨径比的CLAU3-65串列桨前后桨推力系数,同样的,二者的变化规律与CLB4-55串列桨相似,后桨推力系数速度的减小与桨径比变化近似呈线性关系。不同的是,AU系列串列桨前桨压力面的局部高压区是从随边向导边扩散,可扩散的面积更大,扩散速度更加均匀,因此前桨推力系数增大速度也较为均匀。

通过以上对桨叶压力系数分布和推力系数图的

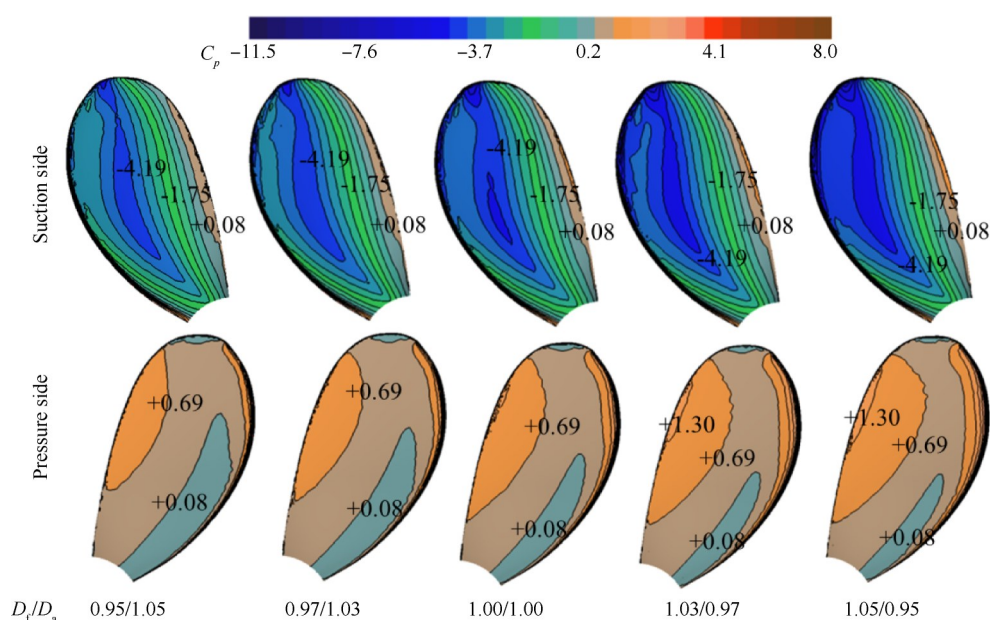


Fig. 17 Pressure coefficients on the blade of the forward propellers of CLAU3-65 tandem propellers for different diameter ratios ($J=0.6$)

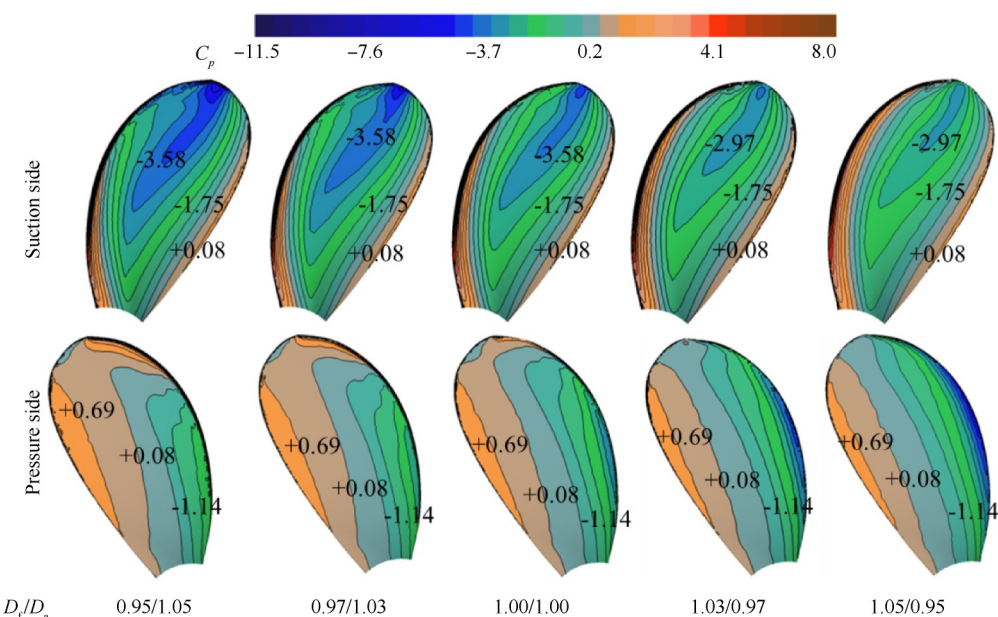


Fig. 18 Pressure coefficients on the blade of the aft propellers of CLAU3-65 tandem propellers for different diameter ratios ($J=0.6$)

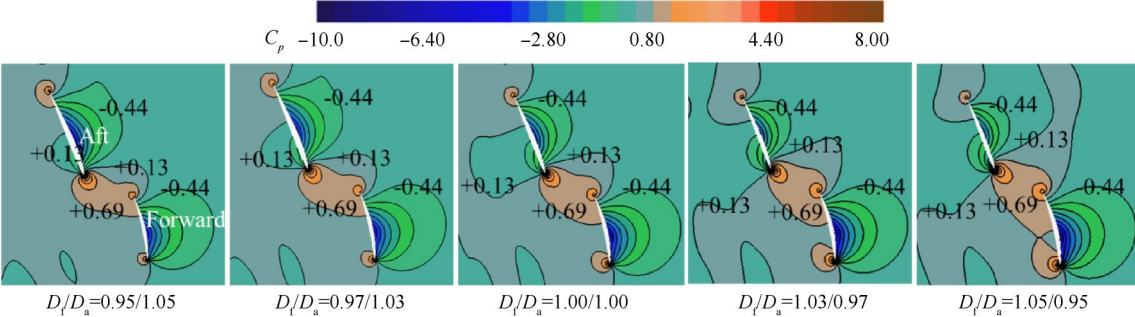


Fig. 19 Pressure coefficients around the 0.7R blade section of CLAU3-65 tandem propellers ($J=0.6$)

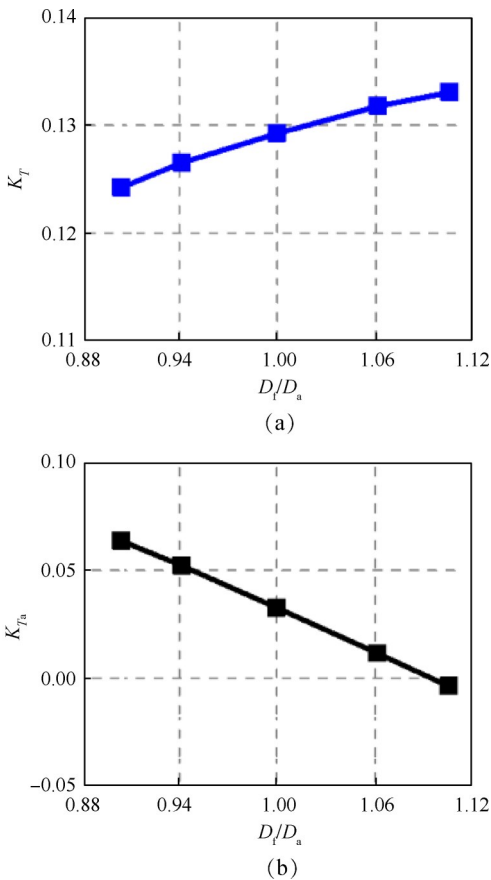


Fig. 20 Thrust coefficients of the forward and aft propellers of CLAU3-65 tandem propellers with different diameter ratios ($J=0.6$)

分析,可以看出串列桨后桨对前桨的推力具有提升作用,主要体现在对前桨压力面的影响上。但是串列桨前桨对后桨的干扰更加显著,随前桨直径增大,后桨推力系数下降明显,甚至产生负推力,导致整体推力系数和敞水效率下降。因此后桨直径大于前桨,可以改善前后桨负荷分布,减少前桨对后桨的不利影响。进一步来说,如果能够综合叶错角、桨距比、桨径比等组合参数,利用这种干扰更加合理地配置前后桨的推力,则可以提高串列桨整体推力系数和效率。

3.4 轴向速度分析

为分析前后桨叶的干扰,在距离原点 $0.12D$ 处选取一个平面,如图 21 所示,该平面处于前后桨之间。

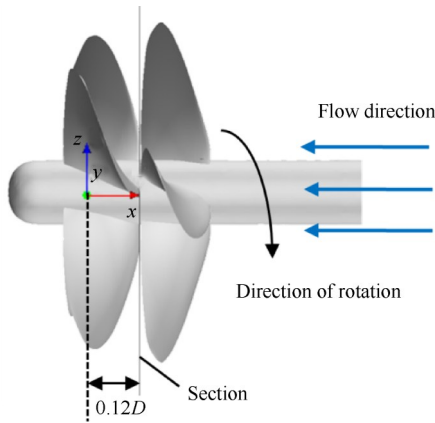


Fig. 21 A section in velocity fraction scalar field

图 22 展现了不同桨径比的 CLB4-55 螺旋桨在该平面上的轴向速度系数分布图。图中的青色圆弧线表示前桨桨盘面范围,白色圆弧线标识后桨桨盘面范围。总体来看,两桨间的轴向速度主要在前桨桨盘面 $0.7R \sim 1R$ 的区域范围内较高,该区域内的来流速度为 $1.6 \sim 2.0$ 倍的进速。 $D_f/D_a=0.95/1.05, 0.97/1.03$ 时,直径较小的前桨并未对后桨叶梢附近区域的入流造成较大影响,前桨桨盘面范围外的轴向速度系数接近 1 (图中等值线 $+0.96$ 与 $+1.10$ 围成的青绿色区域)。随着 D_f/D_a 的增大,前桨尾流收缩加剧,其桨盘面范围外的轴向速度系数小于 1,青绿色区域变为等值线 $+0.83$ 与 $+0.96$ 围成的蓝绿色区域,高速尾流区覆盖后桨,进速过大,后桨推力系数和效率下降。

同样地,图 23 展示了不同桨径比的 CLAU3-65 螺旋桨在该平面上的轴向速度系数分布图。其轴向速度的分布规律与 CLB4-55 螺旋桨相似。CLAU3-65 螺旋桨的前后桨叶错角较大,前桨的高速尾流在空间上延展,因此在截面上较高的轴向流速呈现带

状分布。随着前桨直径增大,尾流收缩加剧,产生更大的高速轴向尾流面积,如图中红色区域所示,直径较小的后桨将完全处于该加速流场范围内,导致

后桨进速系数增加,性能受到较大影响,而后桨直径大于前桨的情况,这种不利影响得以减小,从而提高性能。

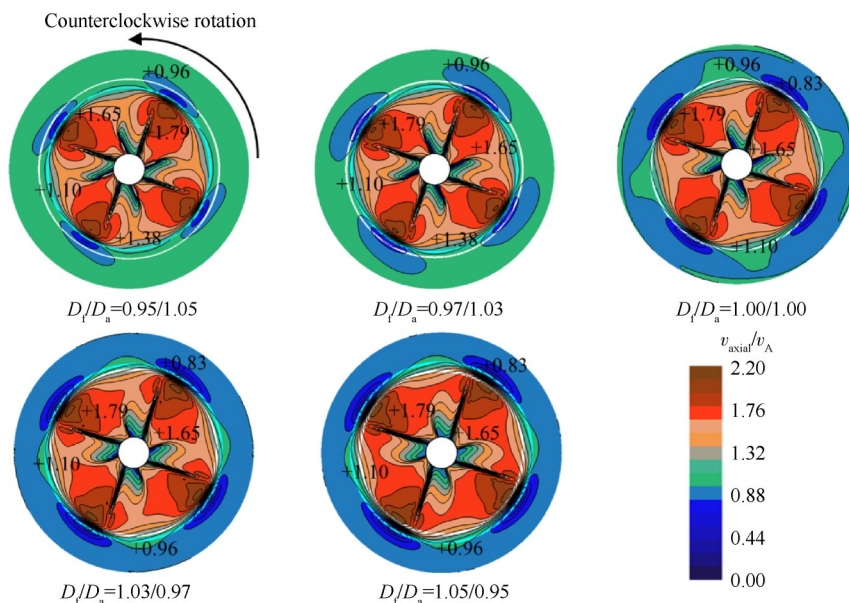


Fig. 22 Axial velocity fraction at the section, CLB4-55 tandem propellers ($J=0.6$)

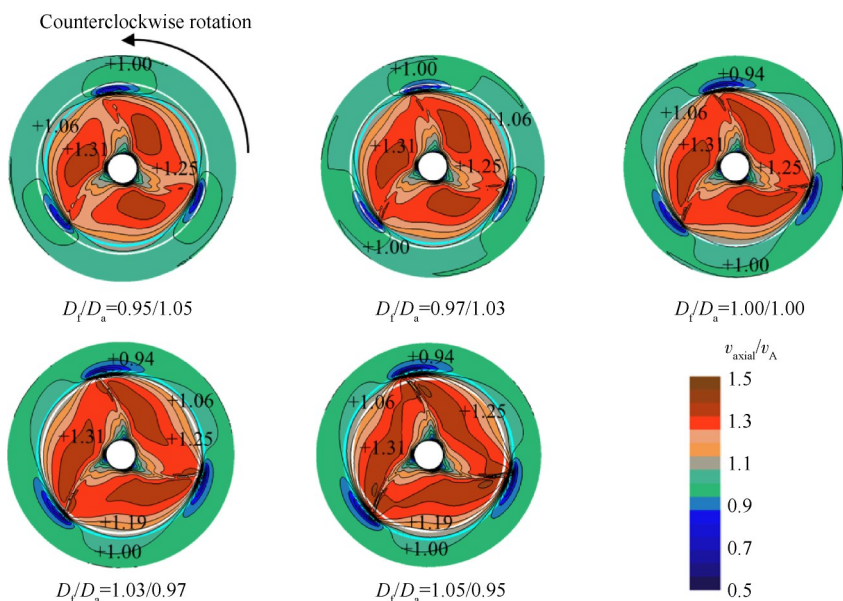


Fig. 23 Axial velocity fraction at the section, CLAU3-65 tandem propellers ($J=0.6$)

4 结 论

本文采用数值模拟方法对不同桨径比的串列桨敞水性能进行了模拟,重点比较了后桨小和后桨大两类串列桨的性能,得到如下结论:

(1)对后桨直径小和后桨直径大的串列桨性能比较结果表明,在桨径比 $D_f/D_a=0.95/1.05\sim1.05/0.95$ 的范围内,后桨直径大的串列桨的推力系数和敞水效率都优于后桨直径小的串列桨。

(2)桨径比变化对串列桨推进性能影响的研究结果表明,在中高进速系数下,串列桨的敞水效率和推力系数总体上随着前桨直径减小、后桨直径增大,呈现增大趋势,但在小进速系数下,为获得较高的敞水效率,串列桨的前后桨直径比可以在 $D_f/D_a=0.98/1.02\sim1.00/1.00$ 的范围内选取。

(3)对桨叶表面压力、流场压力和轴向速度的分析表明,串列桨的前后桨径比增加时,前后桨的桨间压力场和速度场的相互作用有利于提高前桨推力;

但另一方面后桨桨叶逆压区面积增大,进速系数增加,导致后桨推力和效率严重下降。

综上,在串列桨设计中,后桨直径应该略大于前桨,这样不仅能提高串列桨的推力和效率,并且前后桨负荷分布更加均匀,也可在一定程度上缓解桨叶空化现象。至于最佳桨径比,还需要根据具体情况来设计,后续将进行更加深入的研究。

致谢:感谢国家自然科学基金、山东省自然科学基金和山东省博士后创新项目的资助。

参考文献

- [1] 盛振邦,刘应中. 船舶原理[M]. 上海:上海交通大学,2004.
- [2] 孙勤,顾蕴德,张家龙. 不均匀流场中串列螺旋桨的空泡、激振力分析[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报,1986(1): 65-79.
- [3] 胡志安. 特种推进器[M]. 广州:华南理工大学出版社,1996.
- [4] Jacques B H, William B M, Kenneth A M. Advanced Propeller Propulsion for High Powered Single-Screw Ships[J]. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 1964, 72: 231-293.
- [5] Marlin L M. Experimental Determination of Unsteady Propeller Forces[C]. *Rome: 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1968.
- [6] Sinclair L, Emerson A. The Design and Development of Propellers for High-Powered Merchant Vessels[J]. *Shipbuilding and Shipping Record*, 1968, 56: 161-166.
- [7] 王德恂,杨万柏. 串列螺旋桨在内河船上的初步应用[J]. 武汉水运工程学院学报,1980(3): 71-81.
- [8] 柴杨业,孙勤,顾蕴德. 串列螺旋桨与节能和减振[C]. 苏州:第三届船舶推进器及空泡学术讨论会,1985.
- [9] 孙勤,顾蕴德,郑淑珍. 串列螺旋桨的模型系列试验和图谱设计方法[J]. 中国造船,1979,20(3): 3-20.
- [10] 孙勤,顾蕴德,郑淑珍. 串列螺旋桨及其设计方法[M]. 北京:人民交通出版社,1983.
- [11] Djahida B, Omar I. Impact of Some Geometrical Aspects on the Tandem Co-Rotating Propeller Hydrodynamic Characteristics [J]. *Brodogradnja Shipbuilding*, 2017, 68(1): 107-123.
- [12] Chavan S A, Bhattacharyya A, Sha O P. Open Water Performance of B-Series Marine Propellers in Tandem Configurations[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 242: 110158.
- [13] Liu Y, Gong Q W. Numerical Investigation on the Flow Characteristics and Hydrodynamic Performance of Tandem Propeller[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102292.
- [14] Yao H L, Liu Y, Zhang H X, et al. Comparative Study on Hydrodynamic Performance and Induced Pressure of New Canard Tandem Propellers and Conventional Propellers[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 221: 108566.
- [15] Yao H L, Liu Y, Zhang H X, et al. Numerical Investigation on Hydrodynamic Performance of New Canard Configuration Tandem Propellers [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 104: 102374.
- [16] 杨威,杜军. 飞机气动布局设计与飞行性能品质[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
- [17] 盛振邦,杨家盛,柴杨业. 中国船用螺旋桨系列试验图谱集[M]. 上海:中国造船编辑部,1983.

(编辑:白鹭)