

文章编号:1005-9865(2018)02-0019-11

不同设计参数下对转桨水动力性能研究

何东亚^{1,2,3}, 万德成^{1,2,3}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 上海 200240; 2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 上海 200240; 3. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 由于前后桨的相互干扰, 对转桨的推力和扭矩呈现非常明显的非定常特点。一些主要的设计参数, 如前后桨叶数比、推力比以及桨盘面间距对对转桨的水动力性能皆有一定的影响。分别对它们进行系统的研究有助于减弱对转桨的不利干扰, 最大程度地回收周向动能。本文采用 CFD 方法首先分析了叶数比的影响, 推力和扭矩的预报结果与试验值吻合良好, 结果显示, 叶数比为 4:5 的对转桨拥有较好的稳定性。另外, 对转桨的效率比等效单桨高 8.73%~10.2% 左右。最后研究了前后桨不同间距和不同推力比的影响, 结果显示, 增加前后桨的间距可以有效减小前后桨的不利干扰, 但是在一定间距内或者推力比在 1 附近, 对转桨水动力均值变化影响不大。

关键词: 对转螺旋桨; 敞水性能; 船舶节能装置; 非定常受力

中图分类号: U617 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.003

Investigation of hydrodynamic performance of contra-rotating propellers with different design parameters

HE Dongya^{1,2,3}, WAN Decheng^{1,2,3}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: Thrust and torque of CRPs show evidently unsteady and periodic characteristics induced by strong interactions between front and rear propellers. Some crucial design parameters, such as blade ratio, clearance between front and rear propeller and thrust ratio, may exert influence on open water performance of CRPs. Systematical investigation of those design parameters may help us relieve adverse interaction and recover circumferential kinetic energy at utmost. This paper firstly investigates the influence of blade number ratio using CFD method, showing that thrust and torque agree well with their experimental counterparts, and CRPs with blade number ratio 4:5 is more stable. Moreover, propulsion efficiency of CRPs is 8.73%~10.2% higher than single propeller. Finally, influences of different clearances and thrust ratios are investigated in detail. Based on computational results, it can be found that bigger clearance can decrease undesired interactions. Meanwhile, under certain conditions, different clearances or thrust ratios, which are around 1, have little influence on average values of hydrodynamics of CRPs.

Keywords: CRPs; open water performance; ship energy-saving device; unsteady force

为了降低运营成本, 船舶朝着大型化、快速化发展。Kim 等^[1]指出, 由于主机功率、螺旋桨负荷、螺旋桨自身重力、船体振动及操纵性等方面的制约, 传统的柴油机轴式螺旋桨的推进性能已经无法再提高, 这种推进方式不满足当今船舶的发展趋势。另一方面, 船舶是耗能大户和污染排放大户, 国际海事组织(IMO)的研

收稿日期: 2017-10-19

作者简介: 何东亚(1991-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事基于 CFD 技术的船舶节能装置及特种推进器水动力研究。

通信作者: 万德成。E-mail: dewan@sjtu.edu.cn

究报告指出:2009年国际航运业对大气的CO₂排放值为9.65亿吨,预计到2030年此排放值会升至15.3亿吨。因此设计发展低能耗、高效率、拥有较高推进性能的绿色船舶成为船舶设计首先要考虑的因素。在此背景下,船舶水动力节能技术得到快速发展,它的出发点主要是为了减小船舶阻力以及提高推进效率。由于船舶节能装置投入成本低,适用于旧船改造,节能效果显著,备受船东的青睐。在设计船舶节能装置时,人们主要通过以下手段提高船舶的推进效率:1)增强桨盘面进流的均匀性。Emin^[2]指出,单桨船船尾伴流是不均匀的,例如螺旋桨上半盘面相对于下半盘面拥有较低的来流速度,通过提高船尾螺旋桨进流的均匀性可以提高螺旋桨的效率。2)减少梢涡、毂涡引起的漩涡阻力。3)减少螺旋桨尾流的旋转能量损失。孙涛等^[3]研究了前置伴流补偿导管不同设计参数对桨盘面进流的影响,研究发现合适的设计参数可以有效提高船舶推进效率。另外,作为一种新型推进器,对转桨得到快速的发展和应用。

对转桨是由前后两个转向相反的普通桨组成,主机直接驱动前桨,并在弹性联轴节处通过反转机构分一部分功率给后桨,如图1所示。相对于单桨,对转桨有以下优势:1)总推力由前后桨共同提供,因此前桨和后桨负荷相对单桨大大减小,这有利于降低空化、振动和噪声。2)后桨可大幅度回收前桨尾流中的旋转能量,取得良好的节能效果。3)对转桨所遭受的不平衡力矩较小,这有利于提高鱼雷等潜航器的航向稳定性。4)对转桨尾流场切向速度和径向速度较小,轴向速度较大,可增强舵效,提高操纵性。

自20世纪70年代以来,人们对对转桨开展了大量的研究。Miller^[4]在1976年开发了前后桨叶比为4:4和4:5的两组对转桨,并在空泡水筒中进行了对转桨敞水试验,研究了前后桨相互干扰下的非定常受力,Miller指出,非定常受力会带来严重的振动与噪声。Yang等^[5-6]于1991年和1992年通过升力面方法研究了对转桨的定常和非定常性能。模型试验结果相对可靠,但模型制作及试验设备比较昂贵,试验结果精度受测量设备影响较大,且试验周期较长,无法得到较详细的流场信息,由于忽略了流体固有的粘性和有旋性,计算精度依赖于人们较丰富的经验。随着计算方法和计算机性能的提高,大规模的并行计算得到快速发展,利用CFD方法研究螺旋桨性能的工作越来越多。盛立等^[7]在Miller的基础上建立了混合吊舱式CRP推进器,运用基于RANS方程,SST $k-\omega$ 湍流模型^[8]和滑移网格^[9-10]的CFD方法研究了该混合推进器的敞水性能,预报结果与试验值吻合良好。王展智等^[11]基于上述方法研究了Miller的对转桨模型,他还研究了主要设计参数^[12]对某一混合吊舱式CRP推进器敞水性能的影响以及该推进器的尺度效应^[13]。吴建威等^[14]基于多重参考系法,滑移网格法和重叠网格法^[15],研究了某四叶螺旋桨的敞水性能,通过与试验结果进行对比,验证了三种方法在螺旋桨敞水性能预报中的可靠性和有效性。作者指出多重参考系法适用于定常问题,计算量小,但精度不如其它两种方法,而滑移网格方法适用于非定常问题,计算量适中,且精度高于多重参考系法,能够展示梢涡和毂涡的生成与演化。重叠网格方法可取得与滑移网格方法相当的精度,但其计算量较大,该方法主要应用于船桨舱^[16-17]和海上风机全耦合^[18]等多自由度、多级物体运动的复杂问题。结合滑移网格方法,He等^[19]利用OpenFOAM单相流求解器pimpleDyMFoam,研究了CRP6对转桨的敞水性能,着重分析了对转桨的非定常受力,发现前桨推力系数和扭矩系数的变化幅值明显大于后桨,通过对推力系数进行幅频分析,发现由于前后桨的相互干扰,推力系数由8倍轴频(主频)、16倍轴频和24倍轴频组成,幅值大小依次递减。作者还和单桨进行了对比,计算结果显示,在相同的推力下,对转桨的推进效率比单桨提高了10.2%左右。作者详细分析了不同轴向位置处对转桨的各个速度分量的分布情况,发现对转桨尾流场的旋转动能能够被有效地回收。

本文采用CFD方法,详细分析了前后桨不同叶数比,前后桨桨盘面不同间距以及不同推力比对对转桨水动力性能的影响,特别是前后桨的相互干扰以及节能效果情况,对对转桨的设计有一定的指导意义。

1 数值方法

1.1 滑移网格方法

本文采用滑移网格方法,将计算域分成三部分,一部分是包围前桨的圆柱形小域,一部分是包围后桨的圆柱形小域,这两部分为动域,随前后螺旋桨以相反方向旋转。其余的计算域设为静域,动域和静域在交界面进行插值和信息交换。为了确保动静区域间通量传递与流场信息交换的精度,滑移网格法在交界面处采用带权重的插值方式,如图2所示。假设蓝色代表主面单元,红色代表从面单元,主面单元1对从面单元1的贡献权重等于主面单元1与从面单元1的重叠面积与从面单元1的面积之比。主从面单元的大小和个

数没必要完全相同,但保证权重之和约等于 1 有利于提高计算稳定性、计算精度和计算效率。

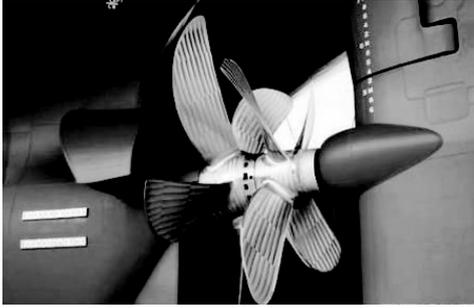


图 1 对转桨

Fig. 1 Arrangement of contra-rotating propellers

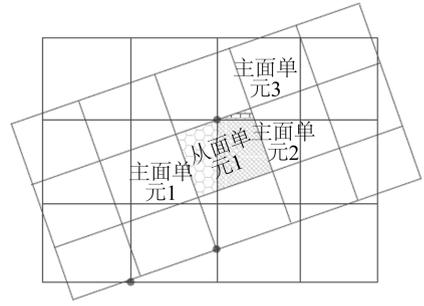


图 2 滑动网格

Fig. 2 Diagram of sliding mesh

1.2 控制方程

假设流体不可压缩,其连续性方程和动量方程可表达为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 u \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, u 为脉动平均速度, p 为压力, μ 为动力粘性系数, μ_t 为湍流粘性系数。为了使上述控制方程封闭,本文采用由 Menter 提出的 SST $k-\omega$ 湍流模型,该模型通过剪应力输运公式综合了 $k-\omega$ 湍流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型的优点,即在近壁面采用 $k-\omega$ 湍流模型,在远场的自由流动中采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。速度压力的解耦采用 PIMPLE 算法,它综合了 PISO 算法与 SIMPLE 算法的优点,即时间步内采用 SIMPLE 算法,时间步的步进采用 PISO 算法,这样可以在保证稳定性的前提下适当地加大时间步长。

2 计算模型

2.1 模型及工况

本文采用 Miller^[4] 研发的对转桨模型,其中一组为 CRP6,前后桨叶数比为 4:4,由 DTMB3686 和 DTMB3687 组成,另一组为 CRP4,前后桨叶数比为 4:5,由 DTMB3686 和 DTMB3849 组成,表 1 介绍了对转桨的主要设计参数,模型如图 3 所示。

表 1 对转桨模型主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of CRPs

变量	DTMB3686	DTMB3687	DTMB3849
直径/mm	305.2	299.1	299.3
叶数	4	4	5
$(P/D)_{0.7R}$	1.291	1.326	1.287
盘面比	0.303	0.324	0.379
旋向	左	右	右
剖面类型	NACA66mod/a=0.8	NACA66mod/a=0.8	NACA66mod/a=0.8

首先,为了研究前后桨的相互干扰,本文选用了 CRP6, CRP4 计算模型,并设定前后桨盘面间距为 0.043 2 m, 转速为 12 r/s。固定转速不变,通过改变来流速度来改变进速系数 J , 分别计算 J 在 0.7、0.8、0.9、1.0 和 1.1 时对转桨的推力和扭矩。其次,在进速系数为 0.9, 本文对比分析了桨盘面间距分别为 0.283 R_F , 0.483 R_F , 0.683 R_F 时的 CRP6 的水动力性能,其中 R_F 为前桨半径,轴向布置如图 4 所示。

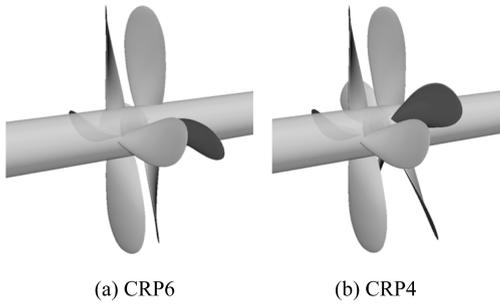


图 3 不同叶数比的对转桨模型

Fig. 3 CRPs with different blade ratios

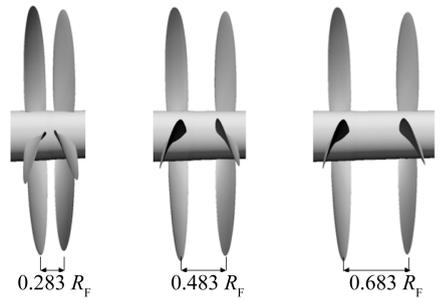


图 4 不同桨盘面间距的对转桨模型

Fig. 4 CRPs with different propeller disc clearances

最后,定义推力比为前桨产生推力与后桨产生推力的比值,这可以在保持来流速度相等时,通过调节前后桨的转速使两桨发出的推力之和等于定值,然后计算前后桨的推力之比来实现。本文研究了假定船舶在恒定航速下航行,所需推力在前后桨的不同分配,即不同推力比,对对转桨效率的影响。考虑到推力比过大或过小,都会造成较大的尾流场周向动能损失,因此本文研究了对转桨在来流速度为 3.296 2 m/s ,间距为 $0.283 R_F$ 时推力比为 0.890 、 1.006 、 1.269 、 1.651 时的水动力性能。

2.2 计算网格和边界条件

本文先由 ICEM 生成结构化背景网格,再由 OpenFOAM 的网格工具 snappyHexMesh 进行挖洞、贴合和添加边界层,最后抽取滑移面 (AMI1, AMI2),由于螺旋桨叶尖附近网格变形较大,为了提高滑移面的网格质量,此处滑移面的半径相对较大,取为前桨半径的 4 倍,即 0.61 m 。图 5 为 CRP6 在桨盘面间距为 0.043 2 m 时的网格布置,计算域是包围前后桨的从流体入口到出口的整个计算区域,它的半径为 0.9 m ,长为 2.6 m ,在物面附近, y^+ 取 40,添加 4 层边界层网格,总网格量有 291 万,其中包围桨附近网格有 261 万。边界条件为:入口 (inlet) 速度设为来流速度,压力梯度为 0,出口 (outlet) 速度设为 0 梯度,压力设为 0,桨表面为不可滑移条件,计算域外边界 (outercylinder) 除进口和出口外设为对称边界。

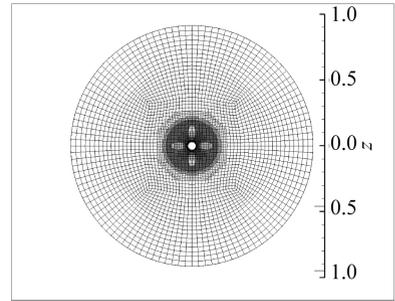
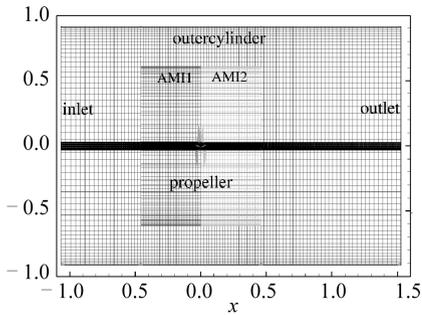


图 5 计算网格布置

Fig. 5 Arrangement of computational grids

3 计算结果与分析

3.1 对转桨水动力验证

为便于分析讨论对转桨的水动力性能,特定义以下系数:

$$J = \frac{U_0}{n D_F} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{T_F + T_A}{\rho n^2 D_F^4} \quad (4)$$

$$K_Q = \frac{Q_F + Q_A}{\rho n^2 D_F^5} \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (6)$$

式中: U_0 为来流速度, T_F 、 T_A 分别为前桨、后桨产生的推力, Q_F 、 Q_A 分别为前桨、后桨吸收的扭矩。

图 6 是前后桨叶数为 4:4 的 CRP6 的敞水性征曲线, 计算结果与试验值吻合良好, 推力和扭矩误差分别在 2%, 3.6% 左右, 皆略微高于试验值, 而效率误差在 -1.6%, 略微低于试验值。图 7 是前后桨叶数为 4:5 的 CRP4 的敞水性征曲线, 计算结果与试验值总体吻合良好, 推力和扭矩误差分别在 1%, 4% 左右, 皆略微高于试验值, 而效率误差在 -3.8%, 略微低于试验值。由以上计算结果可知, 本文的计算模型和计算方法具有较高的可靠性和可信度。

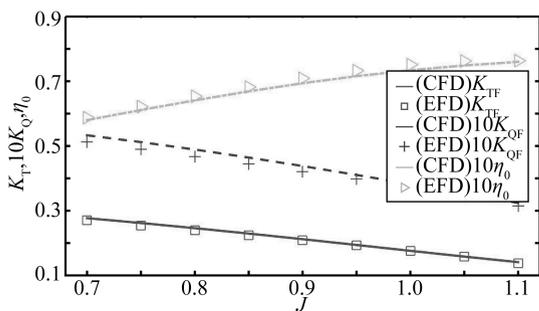


图 6 CRP6 敞水性征曲线

Fig. 6 Open water characteristic performance of CRP6

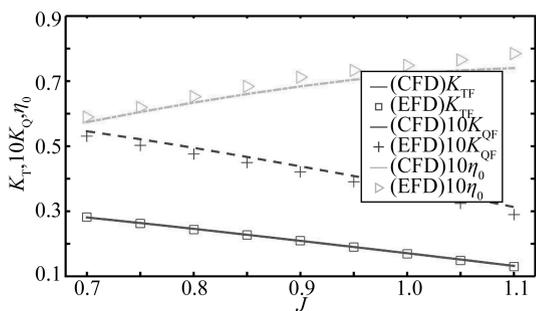


图 7 CRP4 敞水性征曲线

Fig. 7 Open water characteristic performance of CRP4

3.2 前后桨不同叶数比对对转桨水动力性能的影响

从试验数据和计算结果来看, CRP6 和 CRP4 的推力和扭矩时均值差别基本在 5% 以下, 但它们的时历曲线却有显著不同, 如图 8、图 9 所示。由于前后桨的干扰, CRP6 在桨旋转一周内有 8 个小周期, 即波动频率 f 为 8 倍的轴频 f_0 , 而 CRP4 有 40 个小周期, 即波动频率 f 为 40 倍的轴频 f_0 , 即两者的变化频率符合公式

$$f = f_0(m_F Z_F + m_A Z_A) \quad (7)$$

式中: Z_F 、 Z_A 为前后桨叶数, m_F 、 m_A 为常数, 并满足 $m_F Z_F = m_A Z_A$, f_0 为对转桨轴频 (12 r/s)。另外 CRP4 的水动力变化幅值明显低于 CRP6, 因此 CRP4 水动力性能较佳。对前桨的推力系数进行 FFT 变换, 结果如图 10、图 11 所示, CRP6 的主频为 8 倍的轴频, CRP4 的主频为 40 倍的轴频, 由于相互之间影响的叠加, 其它倍的轴频也会出现, 但幅值相对主频较小。另外 CRP6 由拥有低频 (8 倍轴频) 的高幅值 (0.024 28) 成分组成, CRP4 由拥有高频 (40 倍轴频) 的低幅值 (0.000 387 3) 成分组成, 幅值相差 62.7 倍左右。

从图 8 也可以看出, CRP6 前桨的变化幅值明显大于后桨。王展智也在其文章^[11]中指出, “前桨推力系数和扭矩系数的脉动幅值为时均值的 40%, 后桨的推力系数和扭矩系数是时均值的 14%。”。这是因为身处前桨尾流场的后桨所遭受的来流更加紊乱, 推力系数由多个频率的幅值组成, 非线性比较明显, 能量较为分散。而前桨所遭受的来流比较均匀, 推力系数由单个频率的幅值组成, 能量比较集中。另外从图 8 可以发现, 后桨所遭受的平均推力和扭矩要明显大于前桨, 这是由于前桨诱导的切向速度使后桨的有效来流攻角变大导致的。

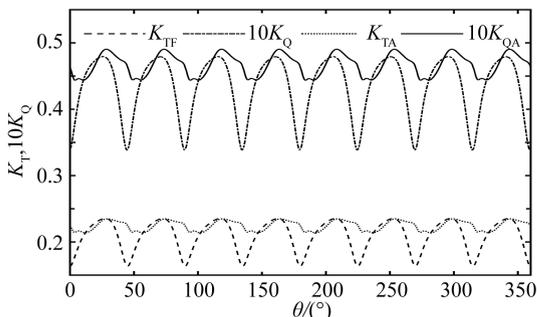


图 8 CRP6 推力扭矩系数变化曲线

Fig. 8 Time history of thrust and torque coefficients of CRP6

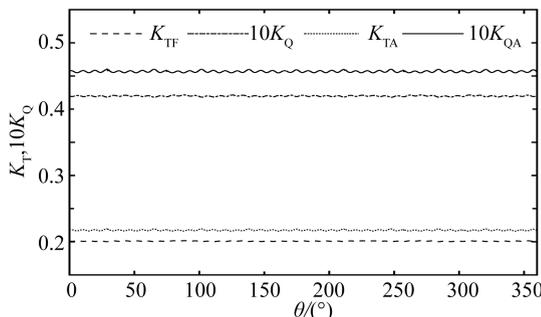


图 9 CRP4 推力扭矩系数变化曲线

Fig. 9 Time history of thrust and torque coefficients of CRP4

当对转桨之间的桨叶距离比较近时,推力达到最小值,当对转桨之间的桨叶距离比较远时,推力达到最大值。当推力达到最大值时对转桨前、后桨在 $0.7R$ 半径处的叶切面的压力系数分布如图 12、图 13 所示,压力系数定义为:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho(U_0^2 + (2\pi n0.7R)^2)} \quad (8)$$

式中: U_0 为来流速度, R 为前后桨半径。

结果显示,CRP6 的压力系数分布曲线所围面积稍大于 CRP4 的,原因一是图 12 和图 13 是单个桨叶 $0.7R$ 处的压力系数分布,CRP4 的后桨是五叶桨,CRP6 的后桨是四叶桨;原因二是 CRP6 的推力系数峰值点明显大于 CRP4 的推力系数峰值点。

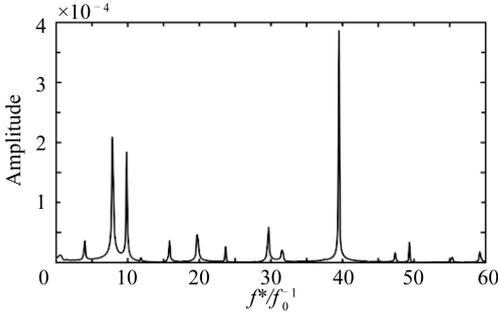


图 10 CRP4 前桨推力系数傅里叶展开

Fig. 10 Fourier expansion of thrust coefficient of front propeller of CRP4

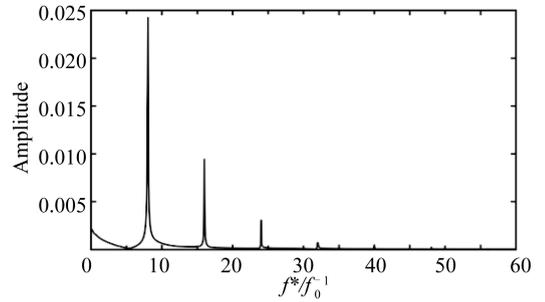


图 11 CRP6 前桨推力系数傅里叶展开

Fig. 11 Fourier expansion of thrust coefficient of front propeller of CRP6

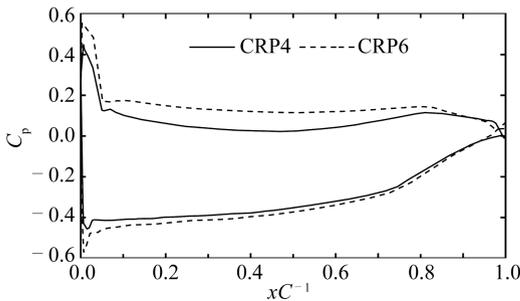


图 12 前桨叶切面压力系数分布

Fig. 12 Pressure coefficient distribution of blade section of front propeller

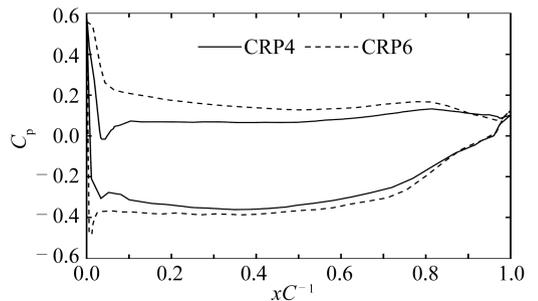


图 13 后桨叶切面压力系数分布

Fig. 13 Pressure coefficient distribution of blade section of rear propeller

3.3 对转桨节能效果分析

在产生相同的推力下,单桨负荷较重,推进效率较低,且极易产生空化现象,而对转桨的前后桨由于共同分担这部分推力,所以前后桨的负荷较低,推进效率较高,另外后桨可大幅度地回收前桨尾流的周向涡动能,达到节能的效果。表 2 中对转桨的计算结果是在来流速度为 3.2962 m/s ,前后桨转速为 12 r/s ,即 J 为 0.9 时的计算结果。等效单桨是指对转桨的前桨,它和对转桨有相同的来流速度,且通过调节转速产生与对转桨相同的推力,此时 J 为 0.7 。严格意义上,单桨和对转桨推进性能的比较应该是在船舶阻力性能和所能提供的主机功率相同的情况下,分别设计对转桨和单桨,比较两者的效率及所能达到的航速,但目前本文只是初步地研究对转桨的敞水性能。另外,由于本文采用的对转桨的前桨,设计有效工作进速系数在 $0.7 \sim 1.1$ 之间,从定性上考虑,用进速系数为 0.7 的单桨作对比有一定的合理性。计算结果表明此时对转桨相对单桨,效率提高了 $8.73\% \sim 10.2\%$,这一方面是因为在高负荷下,对转桨前后桨受力相对较小,水动力性能较好,另一方面是后桨回收了前桨损失的周向动能。图 14 比较了两个模型的涡结构图, U_x 为速度轴向分量, U_0 为来流速度,从图 14(a) 可以看出,后桨产生的反向涡结构与前桨的涡结构交叉形成了网状涡结构。图 15 至图 18 表示在前桨桨盘面之后轴向位置 $1R_f$ 处切向速度的分布, R_f 为前桨半径,其中单桨指去掉后桨的对转

桨的前桨,它与对转桨的前桨保持相同的来流速度和转速。可以发现,对转桨尾流场的切向速度大大减小,尾流场所含的周向动能较少。另外由表 2 可以发现,CRP6 与 CRP4 的效率相差 1%左右,说明叶数比对对转桨的效率影响不大,这是因为前后桨转速相同,后桨有效回收前桨损失的周向动能,两种对转桨尾流场的切向速度都比较小。

表 2 对转桨和单桨的水动力对比

Tab. 2 Comparison of hydrodynamics between CRPs and single propeller

	T/N	$Q/(N \cdot m)$	效率
等效单桨	529.12	30.31	0.630
CRP6	529.91	33.41	0.694
CRP4	523.65	33.40	0.685

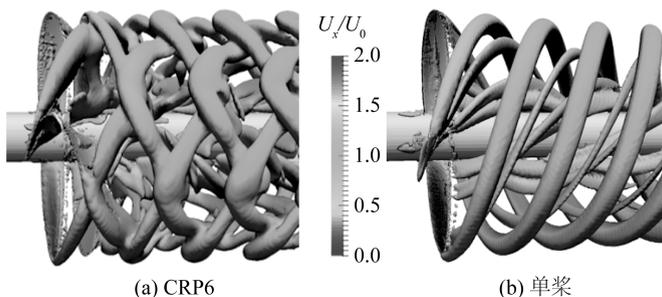


图 14 涡结构分布

Fig. 14 Vortex structure distribution

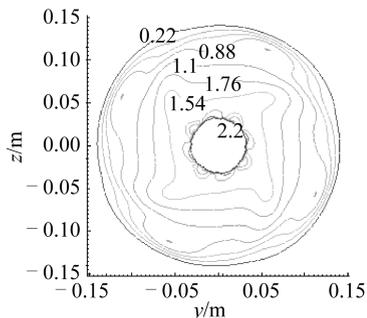


图 15 等效单桨尾流场切向速度等值线

Fig. 15 Tangential velocity contours of equaling single propeller in wake fluid fields

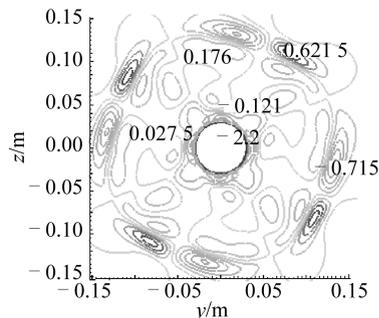


图 16 CRP6 尾流场切向速度等值线

Fig. 16 Tangential velocity contours of CRP6 in wake fluid fields

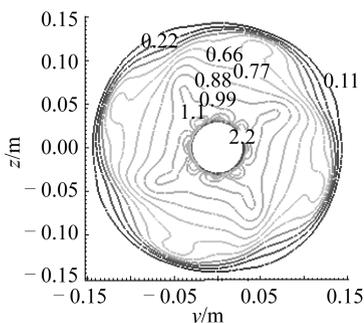


图 17 单桨尾流场切向速度等值线

Fig. 17 Tangential velocity contours of single propeller in wake fluid fields

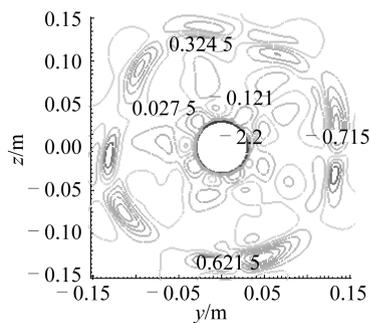


图 18 CRP6 尾流场切向速度等值线

Fig. 18 Tangential velocity contours of CRP6 in wake fluid fields

3.4 桨盘面间距对对转浆水动力性能的影响

本文只研究了 CRP6 在进速系数为 0.9 时盘面间距为 $0.283 R_F$ 、 $0.483 R_F$ 和 $0.683 R_F$ 的情况,单桨指去掉对转浆后桨的前桨,它保持与对转浆相同的来流速度和转速。从图 19 可以看出,单桨波动幅值最小,随着间距减小,前桨的推力系数时均值不断减小,但是变化幅值越来越大,干扰越来越严重,这会引起对转浆较剧烈的振动。时均值减小是因为桨盘面距离越近,后桨对前桨的抽吸作用越强,前桨的来流速度越大。图 21 和图 22 表示前桨盘面之前轴向速度分布,其中, U_x 为桨前来流速度, U_0 为入口处速度大小。当两桨距离较近时,如图 21 所示,最大速度达到来流的 1.25 倍,且 1.04 倍的来流速度分布较广。图 20 却反映出后桨的水动力系数时均值随间距减小而逐渐增大,这是因为后桨的来流速度随前后桨盘面间距的减小而减小所致,如图 23、图 24 所示。同时推力系数变化幅值也是随间距减小而增大。但是不同盘面间距下,对转浆总的推力、扭矩时均值的差别低于 2.5%,效率几乎没有变化,如表 3 所示。因此在所选的间距内,盘面间距对对转浆总的水动力系数时均值影响不大,但对它们的变化幅值,即非定常性影响很大。

另外,由图 15 至图 18 的对比可以看出,由于对转浆后方流场的周向速度为前后桨切向速度的叠加,它的量级很小,经比较发现盘面间距对对转浆尾流场的切向速度的大小改变不太明显,也就是说,盘面间距对后桨能量回收效果的影响不大。

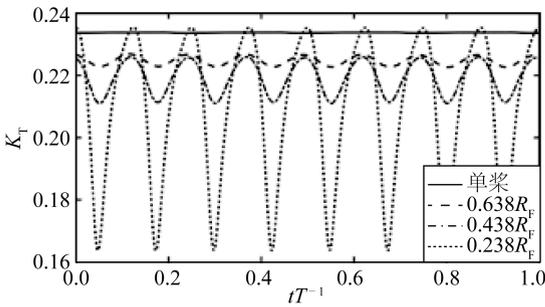


图 19 不同间距时前桨推力系数对比

Fig. 19 Comparison of thrust coefficient of front propeller with different propeller disc clearances

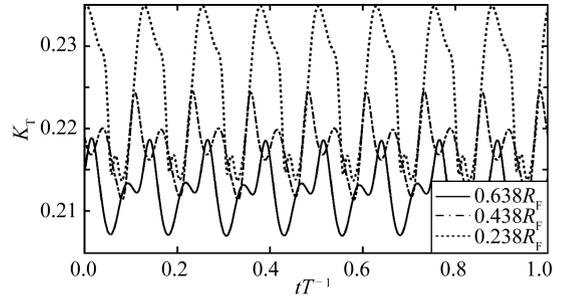


图 20 不同间距时后桨推力系数对比

Fig. 20 Comparison of thrust coefficient of rear propeller with different propeller disc clearances

表 3 不同盘面间距时的对转浆水动力性能对比

Tab. 3 Comparison of hydrodynamics of CRPs with different propeller disc clearances

盘面间距	K_T	$10K_Q$	效率
$0.283 R_F$	0.428	0.886	0.694
$0.483 R_F$	0.439	0.908	0.694
$0.683 R_F$	0.438	0.904	0.693

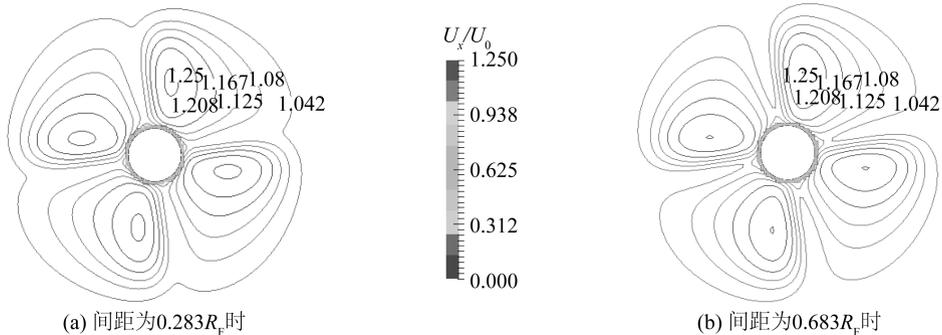


图 21 不同间距时前桨盘面之前轴向速度等值线

Fig. 21 Contours of axial velocity before disc of front propeller with different clearances

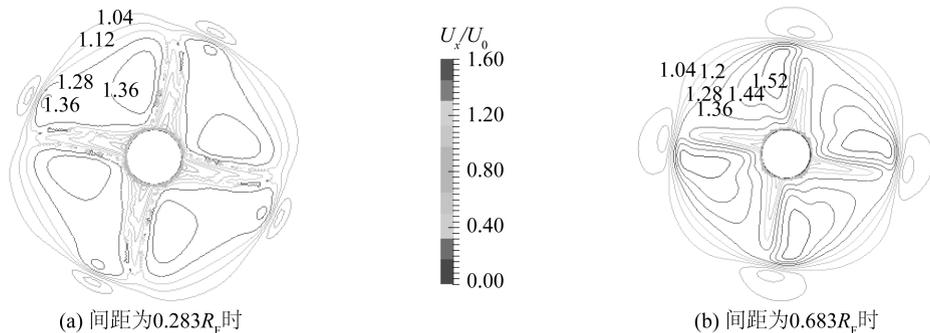


图 22 不同间距时后桨盘面之前轴向速度等值线

Fig. 22 Contours of axial velocity before disc of rear propeller with different clearances

3.5 前后桨推力比对对转浆水动力性能的影响

前桨作为主桨,一般要承受更大的负荷,本文在对转浆产生相同推力的基础上,比较了来流速度为 3.296 2 m/s,推力比为 1.651、1.269、1.006、0.890 时的对转浆水动力性能,不同的推力比可以通过调节前后桨转速,使前后桨总的推力保持定值,然后计算前后桨的推力比来实现,推力比与转速比正相关。定义对转浆效率为:

$$\eta_0 = \frac{(T_F + T_A) U_0}{2\pi (n_F Q_F + n_A Q_A)} \tag{9}$$

式中: T_F 为前桨产生的推力, T_A 为后桨产生的推力, U_0 为来流速度, n_F 、 Q_F 代表前桨的转速和扭矩, n_A 、 Q_A 代表后桨的转速和扭矩, η_0 代表对转浆的效率。

图 23 反映了在前桨桨盘面之后轴向位置 $1 R_F$ 处对转浆尾流场切向速度的分布,可以发现,在最大半径处,速度变化剧烈,将导致梢涡的产生,增加一部分阻力。随着推力比的减小,前桨诱导的正的切向速度会不断减小,而后桨诱导的负的切向速度逐渐增加,在推力比为 1.006 时,后桨尾流场切向速度接近于 0,因此,在推力比为 1 左右时,本文的对转浆节能效果最好。

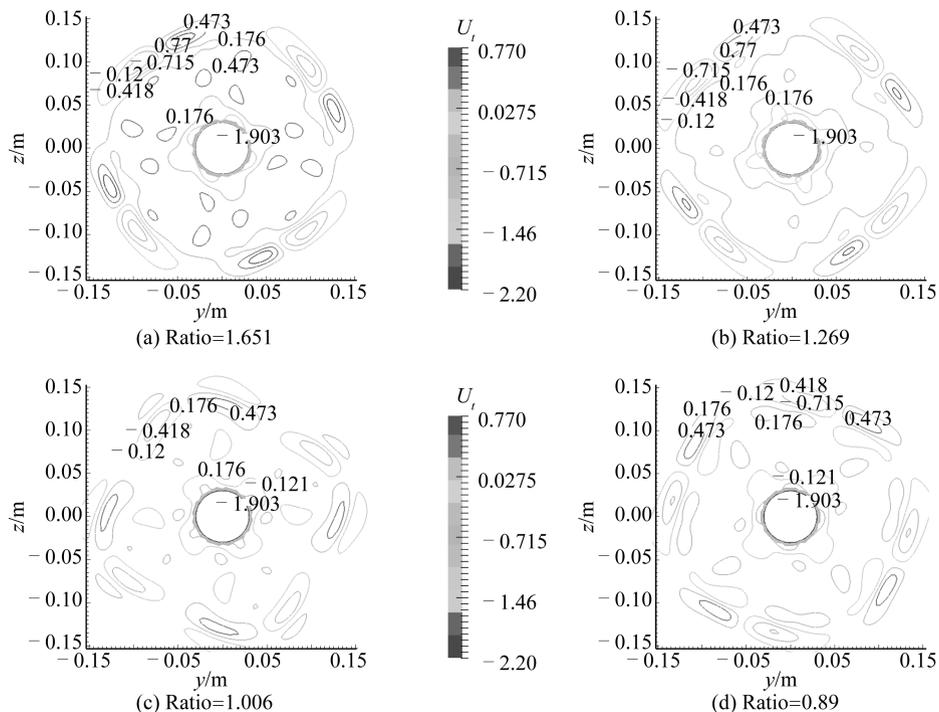


图 23 Ratio 不同时切向速度等值线

Fig. 23 Contours of tangential velocity with different ratios

表 4 为不同推力比下对转桨的水动力性能,结果显示,在产生几乎相同的推力时,本文计算的前后桨推力比对敞水效率影响不大。由于本文所取的推力比在 1 左右,区间不是很大,所以在公式(8)右端项的分子保持基本相等的情况下,随着推力比的增大, n_F 、 Q_F 都将增大,而 n_A 、 Q_A 都将减小,它们的乘积之和变化不大,所以造成对转桨的敞水效率变化不大的结果。若推力比过小或过大,即前后桨转速差别较大,尾流场将损失较多的周向动能,此时公式(8)右端项的分母将会增大,从而降低对转桨的推进效率。

表 4 不同推力比下对转桨水动力性能对比

Tab. 4 Comparison of hydrodynamics of CRPs with different thrust ratio

推力比	T/N	$Q/(N \cdot m)$	效率
1.651	528.185	33.240	0.690
1.269	527.105	33.257	0.693
1.006	533.486	33.643	0.692
0.890	529.905	33.410	0.693

4 结 语

采用 CFD 方法,深入分析了前后桨桨叶比、前后桨不同盘面间距和不同推力比对对转桨水动力性能,特别是非定常性能和节能效果的影响,并和单桨进行了对比,得出以下结论:

1) 基于 RANS 方程, SST $k-\omega$ 湍流模型和滑移网格方法的 CFD 方法,本文预报了美国泰勒水池设计的前后桨桨叶比为 4:4 和 4:5 的两组对转桨的水动力,计算结果与试验值吻合良好,说明本文采用的计算模型和计算方法有一定的可靠性和可信度。

2) 前后桨不同叶数比对对转桨水动力的时均值影响不大,两种对转桨节能效果大抵相同,但桨叶比为 4:4 的对转桨的水动力时历曲线具有低频高幅值的特征,而桨叶比为 4:5 的对转桨的水动力时历曲线具有高频低幅值的特征,因此后者稳定性比前者要好。

3) 在相同高负载下,对转桨的效率比单桨高 8.73% 至 10.2% 左右,一方面是因为在高负荷下,对转桨前后桨受力相对较小,水动力性能较好,另一方面是后桨大幅度回收了前桨损失的周向动能。

4) 在桨盘面间距为 0.283、0.483 和 0.683 R_F 时,随着距离的减小,前后桨相互干扰增强,水动力脉动幅值不断增大,另外,由于后桨的抽吸作用增强,前桨水动力时均值随间距减小而不断减小,而后桨的水动力时均值却不断增大,最终对转桨的水动力时均值几乎没有影响。对转桨桨后切向和径向速度较小,轴向速度较大,有利于增加舵效,提高操纵性。

5) 在产生相同推力下,前后桨推力比为 1.269、1.651、1.006、0.89 时,对转桨的效率在 0.692 左右,比单桨效率高 9.84% 左右,但不同推力比的对转桨的水动力时均值几乎没有变化,这是因为本文所选的推力比在 1 左右,若推力比过大或过小,即前后桨拥有较大转速比,都会损失过大的周向动能。所以在推力比为 1 左右时,本文的对转桨节能效果最好。

致谢: 本文得到国家自然科学基金(51490675, 11432009, 515791455, 1379125,), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助,在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] KIM S E, CHOI S H. Model tests on propulsion systems for ultra large container vessel[C]//Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan, 2002, 520-524.
- [2] EMIN K. A case study for the effect of a flow improvement device (a partial wake equalizing duct) on ship powering characteristics[J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 205-208.
- [3] 孙涛, 万德成. 前置导管节能效果数值计算与分析[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(6): 651-658. (SUN Tao, WAN Decheng. Study of energy saving effect for preduct[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(6): 651-628. (in Chinese))

- [4] MILLER M L. Experimental determination of unsteady forces on contra-rotating propellers in uniform flow[R]. Technical Report No. AD-A032337, David W Taylor Naval Ship R&D Center, 1976.
- [5] YANG C J, TAMASHIMA M, WANG G. Prediction of the steady performance of contra-rotating propellers by lifting surface theory[J]. Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, 1992, 17-31.
- [6] YANG C J, TAMASHIMA M, WANG G, et al. Prediction of the unsteady performance of contra-rotating propellers by lifting surface theory[J]. Key Engineering Materials, 1992, 273-278.
- [7] 盛立, 熊鹰. 混合式 CRP 吊舱推进器水动力性能数值模拟及试验[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(2): 184-190. (SHENG Li, XIONG Ying. Numerical simulation and experimental investigation on hydrodynamic performance of hybrid CRP podded propulsion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2): 184-190. (in Chinese))
- [8] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4: 625-632.
- [9] 张凌新, 胡龙兵, 邵雪明. 滑移网格下泵内流场的非定常流计算[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(1): 10-16. (ZHANG Lingxin, HU Longbing, SHAO Xueming. Computation of unsteady flow fields in a pump using sliding mesh method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(1): 10-16 (in Chinese))
- [10] 周胡, 万德成. 不同叶片数的风力机绕流场的非定常流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29(4): 444-453. (ZHOU Hu, WAN Decheng. Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blade numbers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4): 444-453. (in Chinese))
- [11] 王展智, 熊鹰, 齐万江. 对转螺旋桨敞水性能数值预报[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 77-80. (WANG Zhanzhi, XIONG Ying, QI Wanjiang. Numerical prediction of contra-rotating propellers' open water performance[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(11): 77-80. (in Chinese))
- [12] 王展智, 熊鹰, 王睿. 主要设计参数对混合式 CRP 推进器敞水性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 98-103. (WANG Zhanzhi, XIONG Ying, WANG Rui. Effect of the main design parameters on the open water performance of a hybrid CRP podded propulsion system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(1): 98-103. (in Chinese))
- [13] WANG Zhanzhi, XIONG Ying, Wang Rui, et al. Numerical investigation of the scale effect of hydrodynamic performance of the hybrid CRP pod propulsion system[J]. Applied Ocean Research, 2016, 54: 26-38.
- [14] 吴建威, 尹崇宏, 万德成. 基于三种方法的螺旋桨敞水性能数值预报[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(2): 177-187. (WU Jianwei, YIN Chonghong, WAN Decheng. Numerical prediction of the propeller open water performance based on three methods[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2): 177-187. (in Chinese))
- [15] SHEN Zhirong, WAN Decheng, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [16] WANG Jianhua, WAN Decheng. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1 345-1 358.
- [17] WANG Jianhua, WAN Decheng. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1 345-1 358.
- [18] 程萍, 万德成. 基于重叠网格法数值分析塔架对风机气动性能的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(1): 32-39. (CHENG Ping, WAN Decheng. Analysis of wind turbine blade-tower interactions using overset grid method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(1): 32-39. (in Chinese))
- [19] HE Dongya, WAN Decheng. Numerical Investigation of the Open-water Performance of Contra-Rotating Propellers[C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA, 2017.