

两种运动方式的直翼推进器水动力性能比较^{*}

刘文涛, 刘志华, 骆飞洋

(海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对直翼推进器在不同运动方式下水动力性能的变化, 进行直翼推进器的非定常摆动运动方式 (VSP) 与定常回转运动方式 (KBP) 的理论研究, 分别实现了推进器叶片随公转运动的同时进行匀速自转或变速自转的多叶片耦合运动。结合 VSP 实际应用的翼型与 KBP 特殊运动特性决定的翼型进行对比分析, 在充分发挥 VSP 水动力性能的基础上, 运用 CFD 方法对采用两种自转运动方式以及不同翼型的直翼推进器敞水状态下的水动力特性进行比较, 并对不同运动方式过程中推进器整体与单叶片的水动力脉动特征进行对比分析, 总结了非定常摆动与定常回转运动形式中的水动力性能差异。

关键词: 直翼推进器; 非定常摆动; 定常回转; 水动力性能; 脉动分析

中图分类号: U661.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200711-13

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200711

Comparison of Hydrodynamic Performance of Cycloidal Propeller with Two Motion Modes

LIU Wen-tao, LIU Zhi-hua, LUO Fei-yang

(College of Ship and Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In view of the changes in the hydrodynamic performance of the cycloidal propeller under different motion modes, the theoretical study of the unsteady oscillating motion mode (VSP) and the steady rotational motion mode (KBP) of the cycloidal propeller was carried out, the multi-blade coupling motion of the propeller blades moving with the revolution at a constant speed or at a variable speed is realized respectively. Combining the airfoil actually applied by VSP and the airfoil determined by KBP's special kinematic characteristics for comparative analysis, on the basis of giving full play to the hydrodynamic performance of VSP, the CFD method was used to compare the hydrodynamic characteristics of the cycloidal propeller with two rotation modes and different airfoil in the open water state, and the hydrodynamic pulsation characteristics of the propeller as a whole and the single blade during different motion modes are compared and analyzed, and the difference in hydrodynamic performance between the unsteady swing and the steady slewing motion are summarized.

Key words: Cycloidal propeller; Unsteady oscillation; Steady rotation; Hydrodynamic performance; Pulsation analysis

^{*} 收稿日期: 2020-09-13; 修订日期: 2020-11-16。

基金项目: 装备预研共用技术和领域基金 (61402070503)。

作者简介: 刘文涛, 硕士生, 研究领域为舰船水动力性能。

通讯作者: 刘志华, 博士, 副教授, 研究领域为舰船水动力性能。

引用格式: 刘文涛, 刘志华, 骆飞洋. 两种运动方式的直翼推进器水动力性能比较[J]. 推进技术, 2022, 43(5):200711.
(LIU Wen-tao, LIU Zhi-hua, LUO Fei-yang. Comparison of Hydrodynamic Performance of Cycloidal Propeller with Two Motion Modes[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200711.)

1 引言

直翼推进器是一种新型的船舶推进装置,由旋转的叶轮和从船体伸出的叶片连接组成,叶片垂直安装于叶轮上,并且在叶轮上均匀分布^[1],叶片在随叶轮做公转运动的同时绕自身轴线进行自转运动。对于安装螺旋桨的船舶需要船舵进行船舶运动的操纵,且螺旋桨转舵系统的操纵力主要取决于航行速度^[2],当船舶在低速航行时船舵的操纵力减小甚至失效^[3]。对于直翼推进器,其桨舵合一的特性可在提供船舶前进的推力前提下改变推力的大小和方向,所以直翼推进器的操纵力不受船舶航速的影响,只需要改变推进器叶片的运动规律就可以使推进器产生在水平面上 360° 变化的推力^[4],因此船舶在停航或低速状态下仍具有良好的操纵性。当采用两台以上的推进器时,通过调整和控制每台推进器的推力大小及方向,可使船舶进行复杂运动。

直翼推进器发展至今,可用于工程应用的直翼推进器大概可分为两种^[5-6],一种是 Voith-Schneider 推进器(VSP),由澳大利亚工程师 Ernst Schneider 于 1927 年在德国 Voith 公司发明了这种集推进与操纵于一体的新型推进器^[7],VSP 的叶片随推进器匀速公转的同时做变速自转运动。另一种是美国 Kirsten-Boeing^[8]推进器(KBP),KBP 的叶片随推进器匀速公转的同时做匀速自转运动。在两种自转运动方式下,直翼推进器都具备利用推进器自身直接改变推力方向的特点,但由于运动方式的不同,直翼推进器的水动力性能存在差异。

用于推进器水动力性能分析的主要方法有理论计算、试验研究和数值模拟^[9]。最早进行 VSP 理论方法研究的是 Just^[10],他用叶元体理论对 VSP 的水动力进行了计算,开始了对直翼推进器水动力研究的早期理论探索。1969 年,Ficken 等^[6]发表了关于 VSP 直翼推进器模型的专门试验报告,该试验报告详细给出了 VSP 的偏心率、方位角、叶数对水动力性能的影响规律。在数值模拟方面,随着基于求解 Navier-Stokes 方程的 CFD 数值模拟方法的发展^[11],运用 CFD 软件进行数值计算的方法得到广泛的应用。2007 年,Jurgens 等^[12]采用 CFD 方法,对 VSP 的叶片非定常运动过程中的流场形态进行了计算,并分析了叶片水动力载荷的时历变化曲线,开展叶片剖面形状的数值优化研究;2013 年,陈先进^[11]基于 CFD 方法,研究了叶数、叶型、叶弦长、叶片转轴位置等对 VSP 的敞水性能影响,取得比较好的结果。相比较而言,目前

关于 KBP 直翼推进器水动力性能的研究较为缺乏。

为对比分析由于叶片自转方式的不同对 VSP 和 KBP 造成的水动力性能差异,本文基于 CFD 方法,构建直翼推进器的多叶片耦合运动控制函数,并开展 VSP 和 KBP 的敞水水动力性能数值模拟计算,对比总结两种运动方式下直翼推进器水动力参数随不同工况的变化规律以及水动力脉动特性。

2 直翼叶片运动方式对比分析

直翼推进器主要由叶轮和 4~6 片叶片组成,多个叶片的耦合运动可以分解为公转运动与自转运动,即每个叶片分别绕各自轴心 O 做自转运动的同时绕叶轮垂直轴线做匀速公转运动。VSP 叶片在自转过程中遵循“法线相交定律”^[12]作非定常摆动运动,以保持叶片弦线始终垂直于叶片中心与某一点 N 的连线,而 KBP 叶片在自转过程中做定常回转运动。由此可得两者在运动机理上截然不同,为了进行两种运动方式下直翼推进器水动力性能的分析,要对多叶片耦合运动过程进行分析推导。

2.1 VSP 运动方式分析

图 1 中 V_A 为来流速度、 T 为推进器推力、 u 为叶轮的切向速度、 ω 为叶轮公转角速度、 W 为流经叶剖面的合速度、 N 点称为控制点、点 N 到 VSP 转轴 O 的距离称为偏心距 \overline{ON} 。在一个运转周期内,每个叶片上产生的流体作用力可以分解为两部分:叶片弦线方向上的阻力 Z 和垂直于弦线方向上的升力 S ^[13], R 为叶片弦线上的合力。当合成来流流入的方向和叶片弦线的夹角为 0° 时,VSP 处于零推力工况^[12],此时叶片上不产生升力,仅有微小的流动摩擦阻力。法线相交定律要求推进器在自转运动中保持叶片弦线始终垂直于叶片中心与某一点 N 的连线,所以为了使推进器产生推力,就要改变叶片的偏转角度使叶片弦

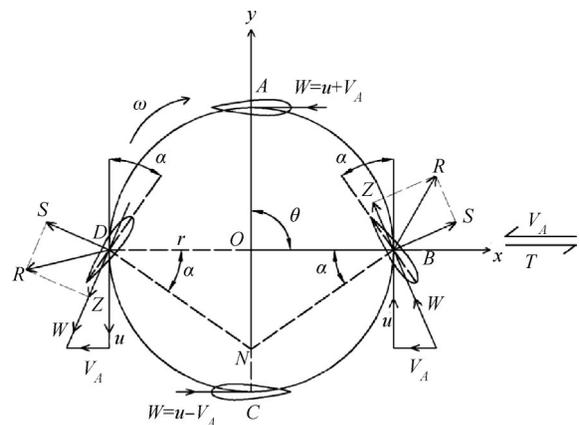


Fig. 1 Schematic illustration of VSP

线与来流之间产生一个夹角,即攻角。

VSP 通过改变控制点的位置来改变叶片绕自转轴心线的角度,从而改变叶片和来流之间的攻角,可以独立于转速来实现对叶片推力大小以及方向的调节^[14]。设推进器回转直径为 D ,则回转半径为 $r = D/2$,偏心距 \overline{ON} 与推进器回转半径 r 的比值称为 VSP 的偏心率 e ^[15]。

$$e = \frac{\overline{ON}}{r} \quad (1)$$

设公转角速度为 ω ,则 VSP 公转角度为 $\theta = \omega t$,叶片弦线与圆周切线的夹角为叶片作自转运动时周期性摆动的角度即偏转角 α ,其中叶片首部向远离圆心偏转为正方向,靠近圆心偏转为负方向。利用正弦定理推导叶片偏转角 α ,可得

$$\alpha = \arcsin \frac{e \cdot \sin \theta}{\sqrt{1 + 2e \cdot \cos \theta + e^2}} \quad (2)$$

设叶片自转角速度为 ω_e ,因叶片自转角速度为叶片自转偏转角度对时间 t 的导数,由式(2)对 t 求导得到自转角速度,即

$$\omega_e = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d \left(\arcsin \frac{e \cdot \sin \theta}{\sqrt{1 + 2e \cdot \cos \theta + e^2}} \right)}{dt} = \frac{\omega e \cdot \cos(\omega t) \cdot [1 + 2e \cdot \cos(\omega t) + e^2] + \omega e^2 \cdot [\sin(\omega t)]^2}{\sqrt{e^2 \cdot [\cos(\omega t)]^2 + 2e \cdot \cos(\omega t) + 1} \cdot [1 + 2e \cdot \cos(\omega t) + e^2]} \quad (3)$$

其中偏转角 α 绕 B 点逆时针旋转方向为正,顺时针旋转反向为负。根据式(2),(3)可得:当公转转速为 300r/min 时,叶片偏转角 α 及叶片自转角速度 ω_e 在偏心率 $e=0.5, 0.7, 0.9$ 工况下随公转角度的变化曲线,如图 2(a),(b) 所示。

2.2 KBP 运动方式分析

KBP 的叶片在随叶轮公转时绕着自身轴线作反向匀速回转运动,叶片的自转速度是公转速度的 1/2,

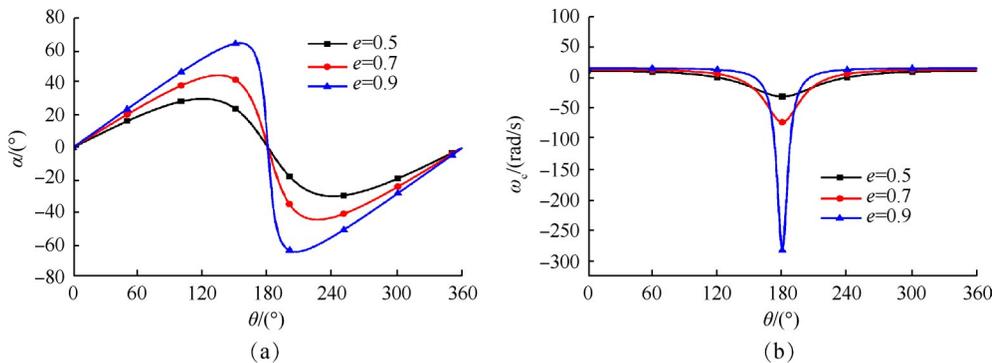


Fig. 2 VSP rotation deflection angle and angular velocity

所以自转周期是公转周期的 2 倍,因推进器的公转和叶片的自转都是匀速回转,所以每个叶片运动到特定位置时所成姿态相对推进器都是一样的^[16]。在 KBP 操纵运动时,与 VSP 通过改变控制点 N 与公转轴心的相对位置来改变推力方向的方式不同,KBP 通过对推进器叶片偏转角度的调节只能实现对推力方向的改变,推力的大小只能通过改变推进器公转转速实现,KBP 工作原理如图 3 所示。

根据 KBP 定常回转的自转运动方式可得,当公转速度为 300r/min 时,叶片偏转角 α 及叶片自转角速度 ω_e 随公转角度的变化曲线,如图 4(a),(b) 所示。

2.3 VSP 与 KBP 运动方式对比总结

以直翼推进器公转轴 O 为坐标系原点,来流速度 V_A 反方向为 x 轴正向建立坐标系 OXY ,叶片绕 O 点顺时针转动角速度为 ω ,控制点 N 位于 y 轴负方向上。因为 VSP 与 KBP 叶片运动轨迹由推进器的公转速度以及随船前进速度决定,且两种运动合成得到直翼推进器单个叶片的运动轨迹呈摆线,将合成速度分解到 X, Y 轴可得位移量对沿轴速度的积分方程,即

$$\begin{cases} x = \int_0^t (2 + \pi n D \cdot \cos \theta) dt \\ y = \int_0^t (-\pi n D \cdot \sin \theta) dt \end{cases} \quad (4)$$

对比直翼推进器不同运动方式特性可知,VSP 和 KBP 的公转均为匀速转动,所以叶片运动轨迹路线相同,但由于叶片的自转运动方式不同,所以叶片随公转运动到不同位置时,对应的叶片自转偏转角度不同,则叶片与合成来流速度的攻角也不同,由此可知不同的运动方式必然会导致水动力性能的差异。对积分方程(4)求解可得到叶片的运动轨迹,为便于对比不同自转运动方式的差异,反映通过 CFD 方法实现的模拟运动轨迹,绘制 KBP 与 VSP 叶片的运动轨迹示意图如图 5,6 所示。

如图 5 所示,结合 KBP 的匀速回转运动特性及工

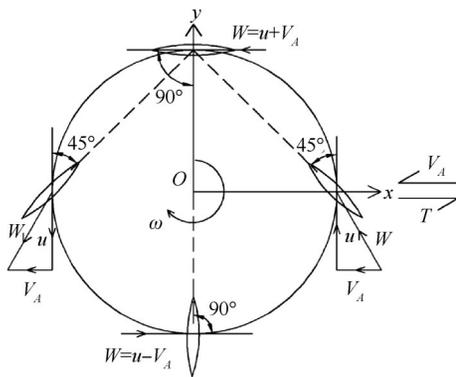


Fig. 3 Schematic illustration of KBP

作原理可知,当叶片随推进器公转一周时,叶片的回转自转运动只运动了半个周期,此时与初始状态相比叶片的导边和随边翻转,因此为保证 KBP 水动力性能在每个公转周期内的一致性,叶片要采用叶面与叶背对称、导边与随边对称的全对称翼型。

结合图 1,图 6 可知,当 VSP 叶片随推进器公转一周时,叶片的自转运动也完成一周,即 VSP 公转周期与自转周期相等。若 VSP 叶片采用叶面与叶背对称的翼型,叶片与来流的攻角在随公转运动的前半周期(从点 A 运动到点 C)与后半周期(从点 C 运动到点 A)大小相等方向相反。根据机翼中升力与阻力的产

生原理得,叶片与来流攻角相同时,产生的升力与阻力也相同,此时升力和阻力在推进器前进方向上的分力矢量和为推力,在垂直推进器前进方向上的分力大小相等,方向相反,即矢量和为 0,这种状态下的 VSP 特性以方位角 0° 为对称点,有利于 VSP 在船舶操纵上的拓展应用^[17]。

3 数值计算方法验证

从水动力角度来看,直翼推进器在工作状态下时,各叶片既要等速公转,又要绕各自旋转轴做自转运动,使得相对于叶片的合成来流速度大小与方向一直在变化,导致各叶片产生的水动力大小和方向也一直在变化,并且各叶片之间还存在水动力干扰,因此对于直翼推进器水动力性能的准确计算是进行 VSP 与 KBP 水动力性能比较的基础。

3.1 验证模型

1969 年 Ficken 开展了 VSP 在不同偏心率、不同叶片数以及不同雷诺数情况下的主推力系数、转矩系数以及推进效率等水动力系数的试验测试,可作为关于 VSP 实验数据最全面、准确的参考。本文为了将数值模拟结果与试验数据进行对比,验证数值计算方法的可行性,准确的对 VSP 及 KBP 的水动力性

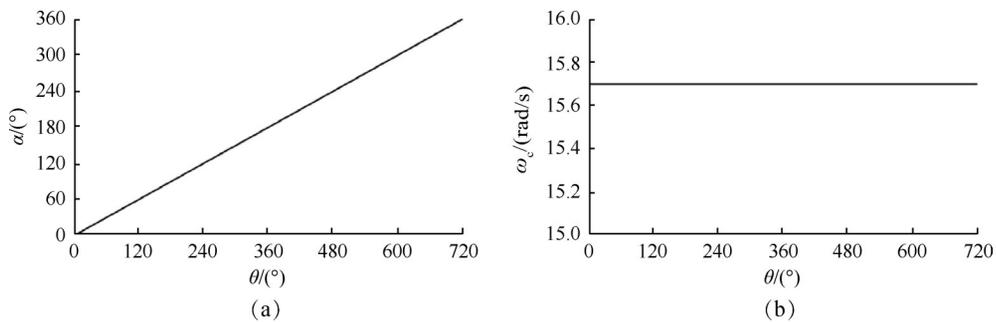


Fig. 4 KBP rotation deflection angle and angular velocity

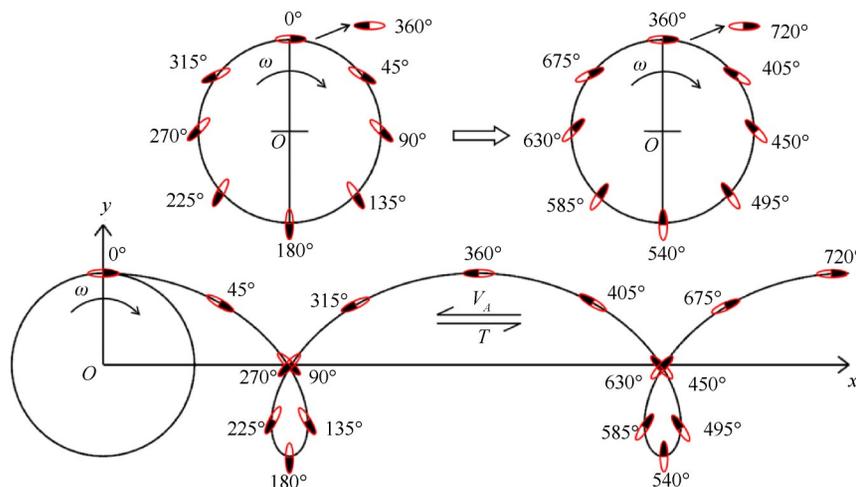


Fig. 5 Diagram of KBP trajectory

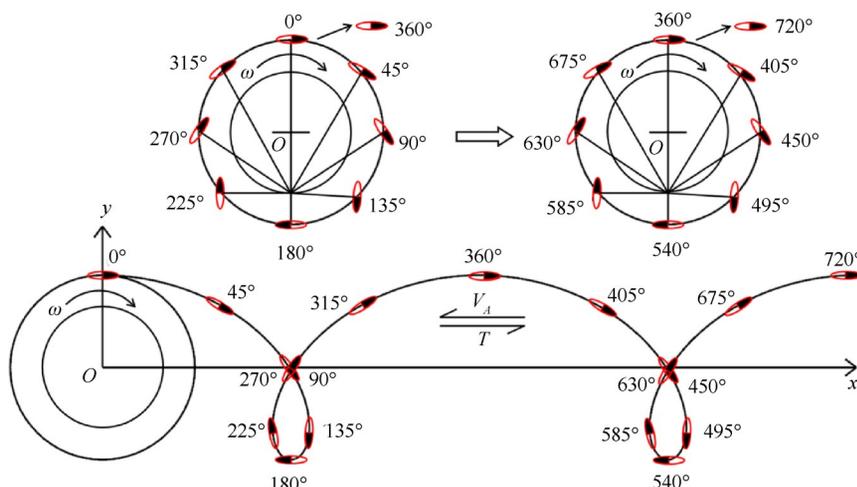


Fig. 6 Diagram of VSP trajectory

能进行分析,以该报告中实验模型数据作为参考进行数值模拟验证,试验中叶片自转旋转轴在距离叶片导边 50% 处,叶片参数与模型与如表 1,图 7 所示。

Table 1 Model parameter

Parameter	Value
Length B/m	1.3716
Max.chord C_{max}/m	0.5194
Avg.chord C_{avg}/m	0.4831
Orbit diameter D/m	2.7432
Blade area/cm ²	45.999



Fig. 7 VSP model for CFD

3.2 流动控制方程

用 CFD 方法进行直翼推进器水动力性能模拟计算,其本质是采用数值方法求解流体的基本控制方程,对于粘性不可压缩流体,可以使用流体运动的基本方程即连续性方程和动量方程(即 Navier-Stokes 方程)来描述流体的守恒定律^[18]。高雷诺数的流体运动处于湍流状态,因此采用时间平均的方法,建立时均形式的连续性方程和时均形式的 Navier-Stokes 方程。表达式见式(6),(7)。

时均连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

Reynolds-Averaged N-S 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + f_i \quad (7)$$

式中 p 为静压; ρ 为流体密度; t 为时间; x_i, x_j 为位移分量; u_i, u_j 为时间平均的速度分量; μ 为分子粘性系数; f_i 为单位质量的质量力; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为 Reynolds 应力项,需要通过引入湍流模型使方程组封闭。

3.3 计算域划分及边界条件

VSP 与 KBP 水动力性能计算中的难点在于对多叶片耦合运动的准确模拟,针对这一问题,通过先分别定义匀速公转运动与变速自转运动,然后再将自转运动附属于公转运动下,实现公转与自转耦合的复合运动。具体步骤是将叶片在一个运动周期内的自转角速度公式(3)写入 Starccm+ 提供的自定义函数(UDF)模块,并把此函数赋值给自转旋转运动中的角速度值,因为公转运动是匀速转动,所以可直接按照给定公转转速赋值。通过将叶片自转轴心处的自转坐标系附属于公转轴心处的公转坐标系来同时实现公转与自转运动,最终在商业软件 CFD 平台中实现直翼推进器多叶片耦合运动方式模拟。

本文通过采用滑移网格来模拟流场中不同区域的相对旋转运动,由 VSP 的运动特性得到计算流场可分为进行变速转动的自转域、匀速转动的公转域和包含推进器的一个连续且封闭的静止域。计算区域划分如图 8 所示。

为与对比试验保持参数一致,叶片自转轴设置在距离叶片导边 50% 处。以六个叶片各自的自转轴为中心,半径为 0.15m 创建六个小圆柱体,用小圆柱体与对应的叶片进行减运算得到自转域;以推进器

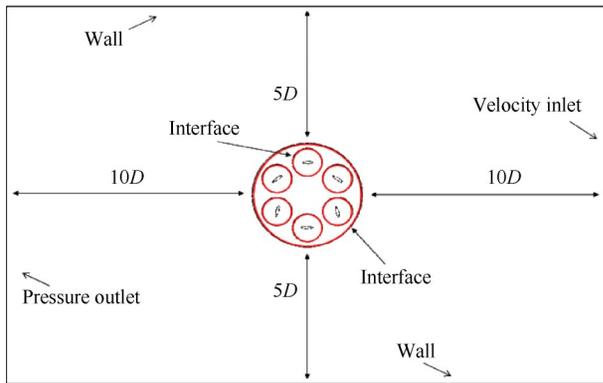


Fig. 8 Computational domain division

公转轴为中心,半径为 0.55m 创建大圆柱体,用大圆柱体与六个小圆柱体进行减运算得到公转域;最终创建长 6m、宽 4m 的矩形体与大圆柱体进行减运算得到静止域。每个计算域之间通过建立 Interface 进行信息交换,并沿该界面进行相对旋转运动,完成对直翼推进器多叶片耦合运动的数值模拟方法设定。

在敞水工况下,推进器的前进速度可以转换为流场内流体的流动速度,则在计算域边界条件设置中设定入口处的进流速度来模拟推进器与流体的相对速度。定义出口处为大气压力,其他面为壁面。由于计算中要模拟 VSP 的多叶片非定常耦合运动,所以选择采用 Implicit unsteady(隐式不定常)时间模型,速度进口根据不同的工况设定不同的进流速度,参考压力为标准大气压,已知试验中摆线直翼推进器公转速率为 150r/min,则 Time-step(时间步长)根据公转速率进行计算一步公转一度的设定,统一设置为 1ms。

3.4 网格量与湍流模型选取

在进行数值计算之前可通过进行不确定度分析来验证数值计算方法的可靠性,模拟计算中的数值误差来源有:网格尺寸、湍流模型、时间步长、迭代次数等其他参数的误差,本文主要研究对计算结果影响较大的网格尺寸及湍流模型。

3.4.1 网格收敛性分析

根据 ITTC 推荐的规程与范例可得,研究迭代和参数的收敛性一般使用参数系列加细的多重解,且至少需要三重解来研究迭代和评价参数的收敛性^[19-20]。本文中采用三套网格进行网格收敛性检验,第一套网格为 Fine grid,数量为 1.019×10^7 ;第二套网格为 Medium grid,数量为 8.02×10^6 ;第三套网格为 Coarse grid,数量为 5.07×10^6 。

为了进行网格收敛性分析,先以偏心率 $e=0.7$,叶片数为 6 工况下,采用 Realizable $k-\varepsilon$ Two-Layer 湍流

模型进行不同网格数量对计算影响的测试。一般认为 $k-\varepsilon$ 为高雷诺数模型, y^+ 通常要求在 30~300,则针对湍流模型对壁面网格的要求,在符合 y^+ 范围的基础上生成不同的网格数量,进行网格收敛性分析。 y^+ 值如图 9 所示。

不同进速系数下推力系数计算结果如表 2 所示。

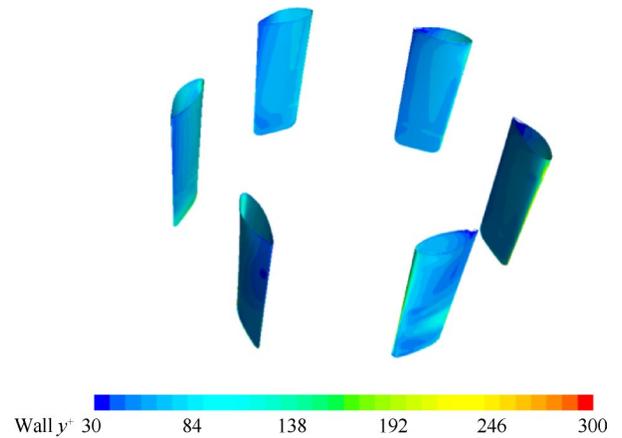


Fig. 9 Wall y^+ value

Table 2 Thrust coefficient under different grid numbers

Advance coefficient J	Mesh density	Number of cells in the domain	Thrust coefficient K_T
0.6	Fine	1.019×10^7	2.394142
	Medium	8.02×10^6	2.392783
	Coarse	5.07×10^6	2.402997
1.2	Fine	1.019×10^7	1.62373
	Medium	8.02×10^6	1.62385
	Coarse	5.07×10^6	1.61858
1.8	Fine	1.019×10^7	0.793377
	Medium	8.02×10^6	0.791126
	Coarse	5.07×10^6	0.782093

为了评价网格的收敛性,定义相邻两套网格对应的计算结果之差 ε_1 与下一组相邻网格计算结果之差 ε_2 的比值为收敛率 $R^{[19]}$ 。

$$R_{J=0.6} = 0.1331 \quad (8)$$

$$R_{J=1.2} = 0.0228 \quad (9)$$

$$R_{J=1.8} = 0.2492 \quad (10)$$

由于 $0 < R_{J=0.6}, R_{J=1.2}, R_{J=1.8} < 1$,所以三套网格为单调收敛,满足网格收敛性^[20]。因此根据上述网格收敛性分析结果以及基于计算成本与计算精度的需求,选取 Medium grid 进行直翼推进器敞水性能的数值模拟计算。

3.4.2 湍流模型选取

本文对两种运动方式的直翼推进器数值模拟为

三维非定常计算,对于推进器周围湍流流动的模拟一般采用求解雷诺平均法^[21],但RANS方程需要引入湍流模型使方程组封闭,在工程领域中基于涡粘模型的两方程模型已得到了广泛应用,例如Realizable $k-\varepsilon$ Two-Layer, Standard $k-\varepsilon$ Two-Layer, SST $k-\omega$ 模型。针对本文研究的VSP和KBP在运动过程中流场情况较为复杂,基于经网格收敛性分析确定的网格量,满足不同湍流模型对 y^+ 值的要求基础上,采用以上三种湍流模型对偏心率为0.7下的VSP非定常力特征计算结果进行研究,并与试验结果进行对比。计算结果如表3所示。

根据数值模拟计算结果与试验结果进行对比分析可得,Standard $k-\varepsilon$ Two-Layer湍流模型相比较另外两种湍流模型对于VSP敞水状态下的计算能够获得更加准确的计算结果,计算结果的相对误差在2%以内。

在使用SST $k-\omega$ 模型进行数值模拟计算时,要采用低 y^+ 壁面处理求解粘性底层,需要足够精细的网格,其近壁面网格单元的 $y^+ \approx 1$,此方法会增加近壁面网格量,计算开销非常大,又由于叶片的翼型曲率不一,所以不同位置上边界层网格距离叶片表面的距离也不一样,则在叶片作非定常运动时,很难保证在运动过程中始终保持 y^+ 满足 $k-\omega$ 湍流模型的要求。

因此出于计算精度与计算资源的考虑,本文采用Standard $k-\varepsilon$ Two-Layer湍流模型进行不同运动方式下直翼推进器的水动力性能数值模拟计算。

4 两种运动方式下直翼推进器水动力对比计算

4.1 VSP与KBP计算模型选取及参数

在进行对比验证时,要对变量进行严格的划分和控制,才能得到合理的结论。在VSP与KBP不同运动方式下的水动力性能对比中,除了运动方式为变量之外,影响水动力性能比较的还有叶片翼型。因为KBP定常回转运动的特殊性决定了其叶片只能采用全对称翼型,而VSP非定常摆动的运动特性决定其叶片要采用对称翼型,但一般来说,与其他对称翼

型相比,机翼形切面的叶型效率较高^[22],所以应在工程实际应用的条件下充分发挥出VSP的水动力性能再与KBP进行不同运动方式下水动力性能的对比。因此在对比分析中,为保持单一变量原则,先进行相同翼型下不同运动方式的对比,再进行不同翼型下不同运动方式的对比,两种翼型参数见表4。

选定了叶片翼型后,需要进一步确定直翼推进器的叶片数。因为叶片数的增多会减小叶片间距,导致叶片间的相互干扰,影响推进器内部流场的均匀性,进而影响推进效率^[23]。基于直翼推进器的实际工程应用情况及计算资源的考虑,本文采用4叶片数模型进行VSP与KBP的水动力性比较,叶片自转轴位置同样设置在距离叶片导边50%处,KBP与偏心率为0.7时VSP的4叶直翼推进器模型如图10所示。

4.2 网格生成

数值计算结果的精度与网格的质量相关,对于流动情况比较复杂的计算域中,不同的区域需要使用不同尺寸的网格。网格尺寸过大会导致计算结果精度达不到要求,计算出的结果误差较大,网格尺寸过小会导致计算量的增大,延长了计算时间并浪费计算资源。本文在进行VSP与KBP的敞水数值模拟计算时,针对不同的运动方式及翼型生成了不同尺寸的网格,如图11,12所示。

图11和图12分别是采用NACA0020翼型的VSP与采用全对称翼型的KBP的公转域及自转域网格生成情况,在直翼推进器运转时,由于叶片的耦合运动以及叶片之间的相互干扰,导致推进器内部流场流动复杂,因此要捕捉叶片边界层的流场信息,对推进器在一个运转周期内的水动力进行准确计算。本文基于3.4节分析中得到验证的网格量和湍流模型,分别对公转域网格和自转域网格采用同区域同网格尺寸、分级加密的网格划分方式进行机翼翼型和全对称翼型的适配,通过控制边界层网格底层厚度与边界层网格总厚度使边界层网格与外层主流网格正常过渡,保证了网格体积变化率不会过大,确保计算精度的同时减省了计算时间。

Table 3 Thrust coefficient under different turbulence models when $e=0.7$

Advance coefficient J	Test result	Realizable $k-\varepsilon$ Two-Layer	Error/%	Standard $k-\varepsilon$ Two-Layer	Error/%	SST $k-\omega$	Error/%
0.6	2.33219	2.39278	2.60	2.37485	1.83	2.42300	3.89
1.2	1.62492	1.62385	0.07	1.61910	0.36	1.63015	0.32
1.8	0.78668	0.79113	0.57	0.78437	0.29	0.78800	0.17

Table 4 Two types of propeller model parameters

Propeller name	KBP	VSP
Airfoil section	Full symmetry	Full symmetry/ NACA0020
Chord/m	0.056	0.056
Length/m	0.17	0.17
Rotation diameter/m	0.196	0.196
Revolution speed/(r/min)	300	300
Rotation speed/(r/min)	—	150
Time-step/s	5.55556×10^{-4}	5.55556×10^{-4}

4.3 同翼型下VSP与KBP敞水水动力性能比较

由VSP与KBP独特的运动方式可知,在推进器的公转与自转耦合运动中,VSP叶片持续作非定常摆动自转运动,而KBP持续作定常回转自转运动,在这两种运动方式中来流相对叶片的攻角以不同的幅值变化。为了对比分析两种不同的运动方式在直翼推进器运转时周围的流场和受力情况,本文基于CFD方法,对采用全对称翼型下偏心率 e 分别为0.7,0.9下

的VSP和KBP进行数值模拟,实现了两种不同运动方式的精准模拟。图13为VSP与KBP敞水水动力性能图,由图13中(a),(b)可知,VSP与KBP的推力系数 K_T 和转矩系数 K_Q 随进速系数 J 的增大而减小,这是因为随着进速系数的增大,推进器叶片与合成来流的攻角随之减小,从而推力和转矩也相应减小,这一特性与螺旋桨性能相似。同等进速系数下,对于不同偏心率 e :VSP的 K_T 和 K_Q 随 e 的增大而增大,验证了通过改变VSP的 e 可以进行推力大小的调节;对于不同运动方式:KBP发出的推力系数和转矩系数均大于 e 分别为0.7和0.9下的VSP,且KBP主推力系数 $K_T > 0$ 时的进速系数 J 范围也大于两种 e 下的VSP,即前者可产生的正推力的进速系数范围大于后者。

图13中(c)是采用相同翼型的不同 e 下的VSP与KBP在不同 J 下推进效率 η 的变化曲线。由图可得,两种运动方式下的 η 均随着 J 的增大呈现先增大后减小的趋势变化,可由推进器推进效率表达式(11)可知:

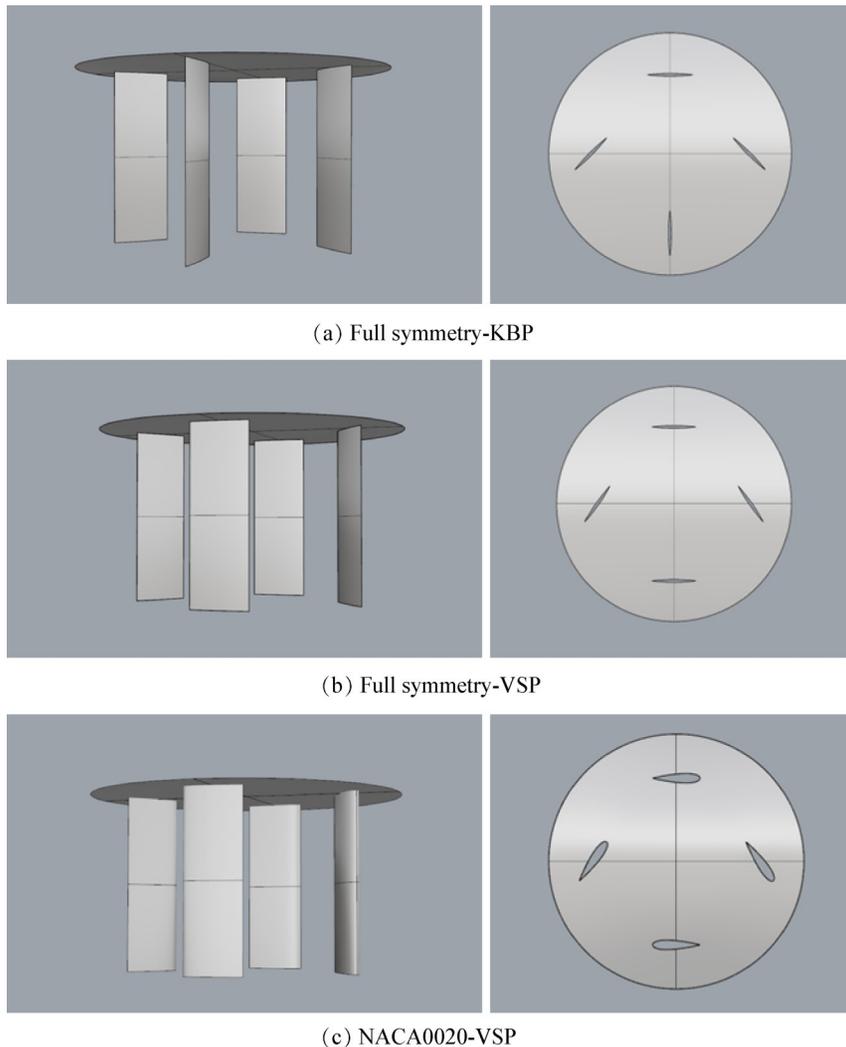


Fig. 10 Blade model for CFD

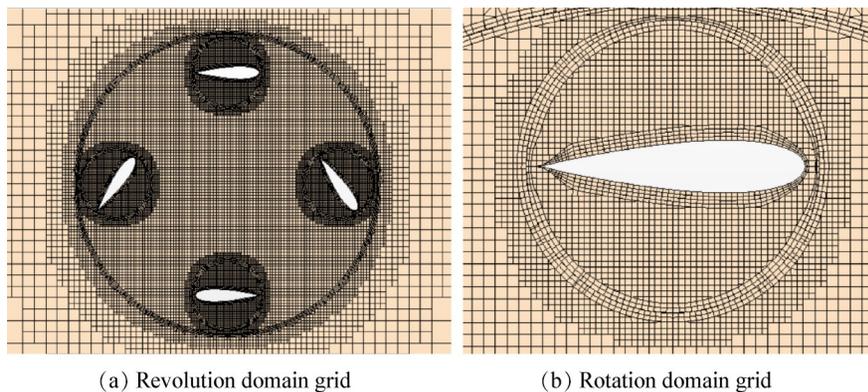


Fig. 11 Computational grid for VSP

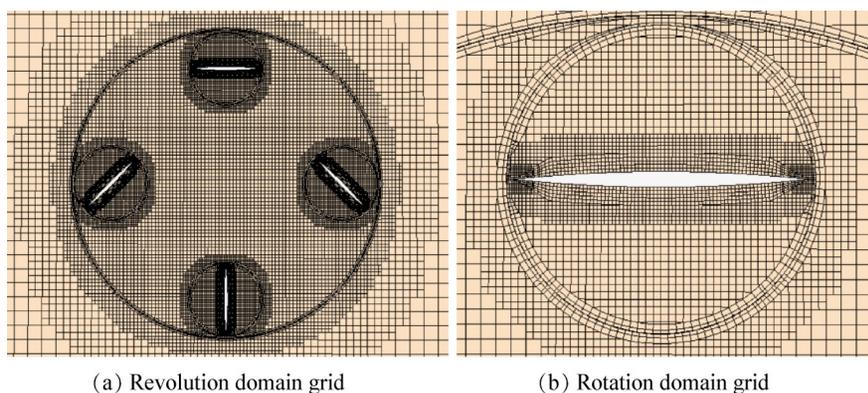


Fig. 12 Computational grid for KBP

$$\eta = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (11)$$

当 J 为 0 时, η 为 0, 又由图 13(a) 可知, 随着 J 的不断增大, 直翼推进器推力不断减小, 当推力减小到 0 时, 推进效率为 0, 所以随 J 不断增大, η 先增大后减小, 且有最大效率点。在相同进速系数下, 对于不同 e , 最高效率处对应的 η 和 J 随着 e 的增大而增大。对于不同运动方式: KBP 到达最大效率时, 对应的 J 大于 e 分别为 0.7 和 0.9 下的 VSP, 且前者的最大推进效率大于后者的最大推进效率。

4.4 不同翼型下 VSP 与 KBP 敞水水动力性能比较

因为 VSP 与 KBP 特殊的运动方式对其使用的叶片有特殊的要求, 在 4.3 节进行了直翼推进器全对称翼型下不同运动方式的对比, 但在工程实际应用中, VSP 采用机翼翼型的效率要高于全对称翼型, 因此要进行不同翼型的对比分析, 图 14 为不同翼型下 VSP 与 KBP 敞水水动力性能图。

由图 14(a), (b) 可知, 对于采用不同翼型的 VSP: 在低进速系数下, NACA0020 翼型的推力系数和转矩系数小于全对称翼型, 在中高进速系数下时, NACA0020 翼型的推力系数和转矩系数大于全对称翼型, 即与全对称翼型相比, 选用 NACA0020 翼

型减小了 VSP 的系桩拉力, 增加了中高航速下的推力, 但两种翼型下 VSP 的推力与转矩均小于 KBP。由图 14(c) 得, 采用 NACA0020 的 VSP 推进效率大于采用全对称翼型的 VSP, 证明了在 VSP 叶片选形时, 机翼形切面的叶型与其他对称翼型相比效率较高, 但两种翼型下 VSP 的最大效率与对应进速系数都小于 KBP。

由上述对不同翼型及不同运动方式下的直翼推进器水动力性能比较可得, 采用机翼形翼型的 VSP 与采用全对称翼型相比推进效率更大, 符合实际工程应用情况, 因此本文后续对于 VSP 与 KBP 的水动力性能比较中 VSP 只采用 NACA0020 翼型。结合图 13, 14 中 K_T, K_Q, η 曲线对比可得, 偏心率 e 的变化可明显改变 VSP 的推力、转矩和推进效率, 在低进速时, e 越小, 推进效率越高; 在高进速时, e 越大, 效率越高, 故在装配 VSP 的船舶操纵中, 可在不改变推进器转速的情况下, 根据实际要求通过调节 e 实现推力或效率的最大化。对于 KBP, 在同等进速系数下发出的推力、转矩和推进效率均大于两种翼型及两种 e 下的 VSP, 但 KBP 螺距不可调, 在实际船舶操纵中, 只能通过改变推进器转速进行推力和推进效率的调节。

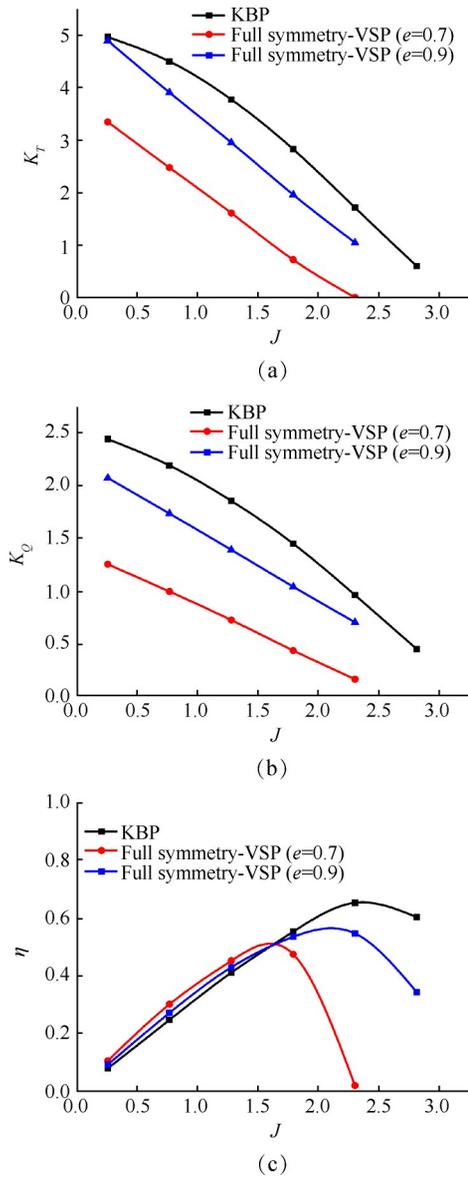


Fig. 13 Open water performance curves of VSP and KBP under the same airfoil section

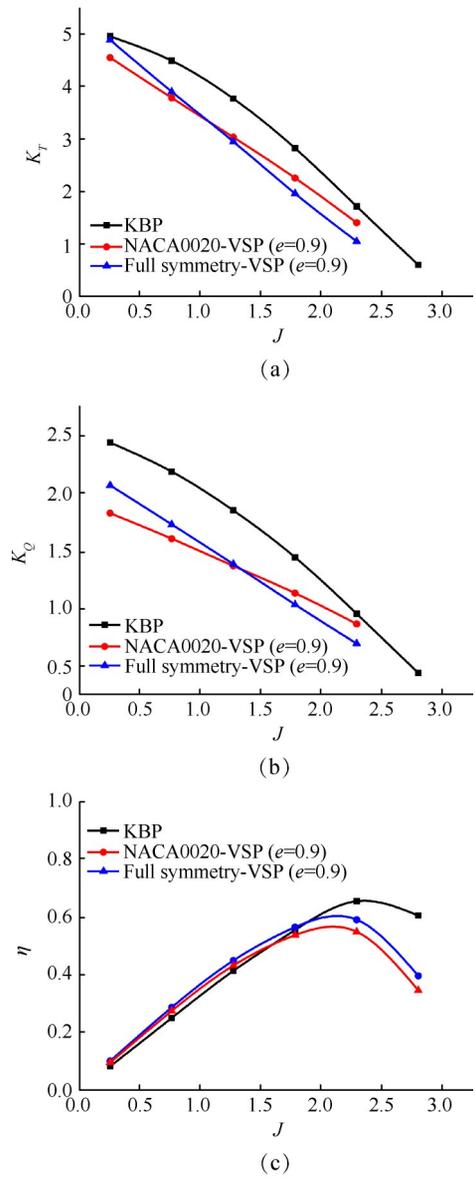


Fig. 14 Open water performance curve of VSP and KBP under different airfoil section

4.5 VSP与KBP水动力脉动对比分析

数值模拟计算过程表明,VSP与KBP的水动力曲线呈现周期性脉动变化,并且在不同的进速系数下脉动现象各不相同。图15是不同 J 下采用NACA0020翼型及 e 分别为0.7和0.9的VSP与采用全对称翼型的KBP一个运转周期内推力和转矩的时历曲线。

由图15可知,VSP与KBP在一个运转周期内推力与转矩具有相似的变化规律,因为虽然运动方式不同但都是多个叶片的耦合运动,在推进器实际运动中的一个转动周期内,每个叶片与来流的攻角随叶片自身转动以及来流的速度大小和方向的变化而时刻变化,所以每个叶片在不同的时刻对推进器推力、转矩的贡献大小不同,导致在一个转动周期中推

进器发出的推力、转矩呈周期性变化^[24]。本文采用的两种计算模型中四个叶片之间相位角相差 90° ,根据直翼推进器两种运动方式的特殊性可知,各个叶片的水动力性能周期性变化规律完全一致并且在时间上呈现延后性,因此VSP和KBP的整体脉动是因为叶片在周期性运动中产生的力的大小和方向的周期性变化导致。

叶片所受推力的周期性脉动提高了对动力设备所受载荷的要求,影响了推进器的性能,所以需要控制脉动的幅值予以控制。直翼推进器的水动力脉动幅值是评价直翼推进器性能的重要参数,由不同 J 、不同运动方式下的直翼推进器推力和转矩时历曲线图可得, J 相同时,KBP在一个运转周期内发出的推力

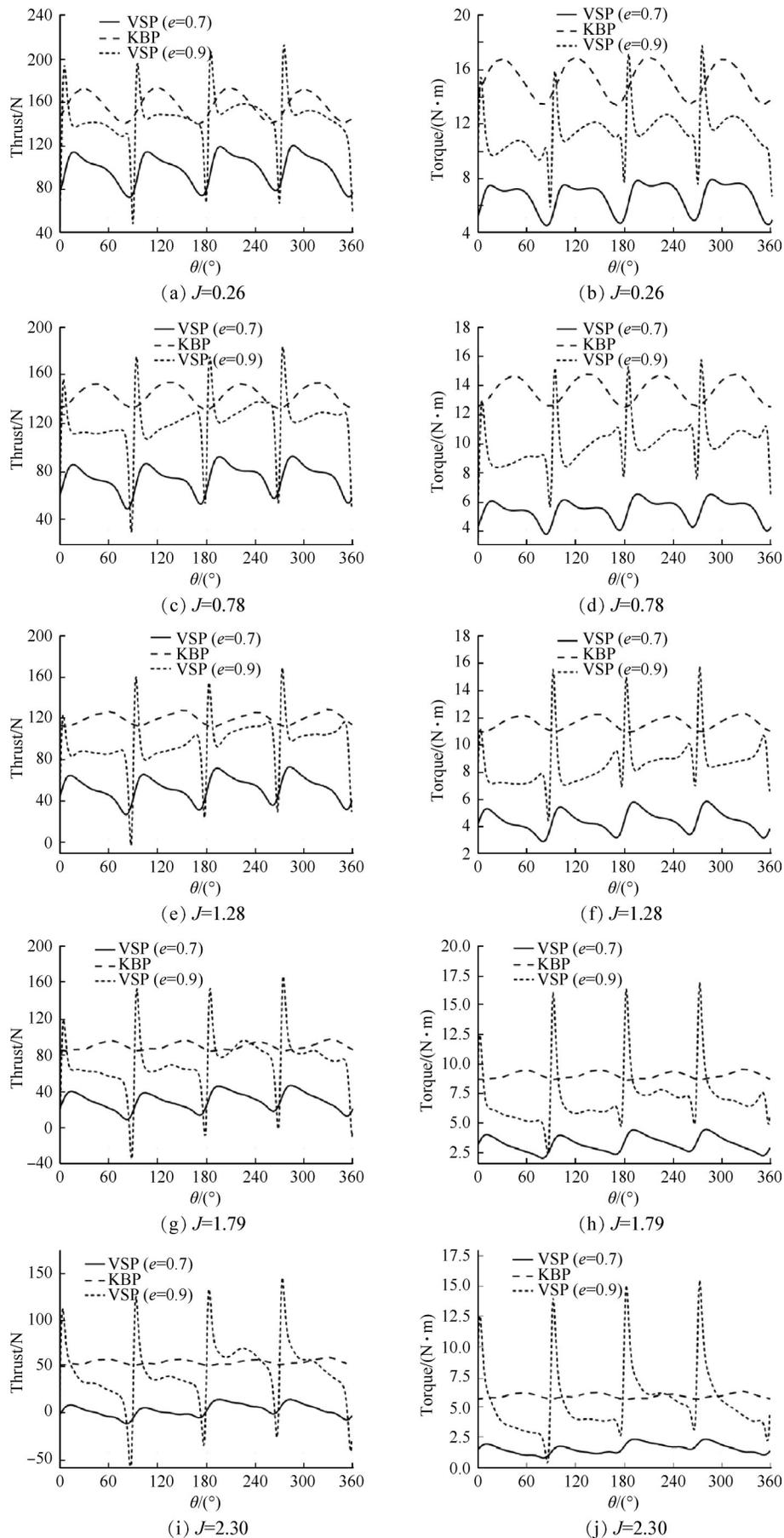


Fig. 15 Thrust and torque curves of two propellers under different advance coefficients

和转矩脉动幅值均小于 e 为 0.7 和 0.9 下的 VSP, 且随着 J 的增大, 两种运动方式下的推进器脉动幅值均在减小。对于 VSP, 在同一 J 下, e 越大则推力和转矩的脉动幅值越大, 由图 2 可知, 这是因为非定常回转运动中叶片的自转偏转角和自转角速度随 e 增大而增大, 且自转角速度随 e 的增大变化剧烈。根据水动力曲线脉动情况来看, KBP 的推力及转矩脉动幅值均小于 VSP, 这说明 KBP 定常回转的自转运动方式与 VSP 非定常摆动相比, 在简化运动控制机构的同时也减小了由于叶片的非定常摆动对推进器造成的冲击。

4.6 VSP 与 KBP 自转消耗功率脉动对比分析

推进效率是推进器有效功率与吸收功率的比值, 直翼推进器消耗的功率一部分用于驱动直翼叶片公转运动, 另一部分用于驱动叶片自转运动。由于 VSP 与 KBP 在运动过程中自转运动的转矩周期性变化, 并且 VSP 的自转运动是变速非定常周期运动, 所以驱动叶片自转的功率也会周期性变化。针对直翼推进器消耗功率的脉动情况, 对两种运动方式下直翼推进器的单个叶片自转运动所消耗的功率进行计算, 图 16 是 J 为 1.28 时, VSP 和 KBP 的单个叶片在一个运转周期内自转运动消耗功率和单叶片的推力曲线以及不同 e 下 VSP 一个周期内自转偏转角度与自转角速度变化曲线。

由图 16(a), (b), (c) 可知, VSP 的单个叶片自转运动消耗功率随 e 的增大而增大, 且随着 e 的增大, 当自转角速度最大时, 单个叶片的自转消耗功率达到最大值, 此时单个叶片的推力最小且为负推力, 导致推进器总推力曲线处于波谷。从不同 e 下功率消耗曲线的对比来看, 随着 e 的增大, 自转消耗功率急剧增加而且自转功耗曲线和推力曲线脉动幅值也增大, 这是因为 VSP 叶片随推进器叶轮匀速公转的同时作变速自转的复杂运动特性导致。如图 16(d) 所示, 若严格按照“叶片法线相交”法则运动, 当 e 为 0.7 时, 叶片最大自转角速度为公转转速的 2 倍, 而 e 为 0.9 时, 叶片最大自转角速度为公转转速的 9 倍, 所以在非定常运动中除攻角产生的力矩之外还包括角速度带来的附加阻尼力矩和角加速度带来的附加惯性矩, 在公转运动一周内叶片达到最大自转角速度时, 推力最小且对自转机构产生脉冲式冲击, 这一特性降低了 VSP 的整体水动力性能且有损于转动机构的使用寿命并导致推进器只能在中低速下运转。由图 16(c) 可得, 对于 KBP, 单个叶片的推力和自转运动消耗功率在一个运转周期内与 VSP 相比变化平稳, 是因为 KBP 的单叶片作匀速回转运动, 所以在一个运转周期中角速度保持匀速, 不会像 VSP 因叶片的变速摆动而对转动机构造成冲击并消耗大量功率。与 VSP

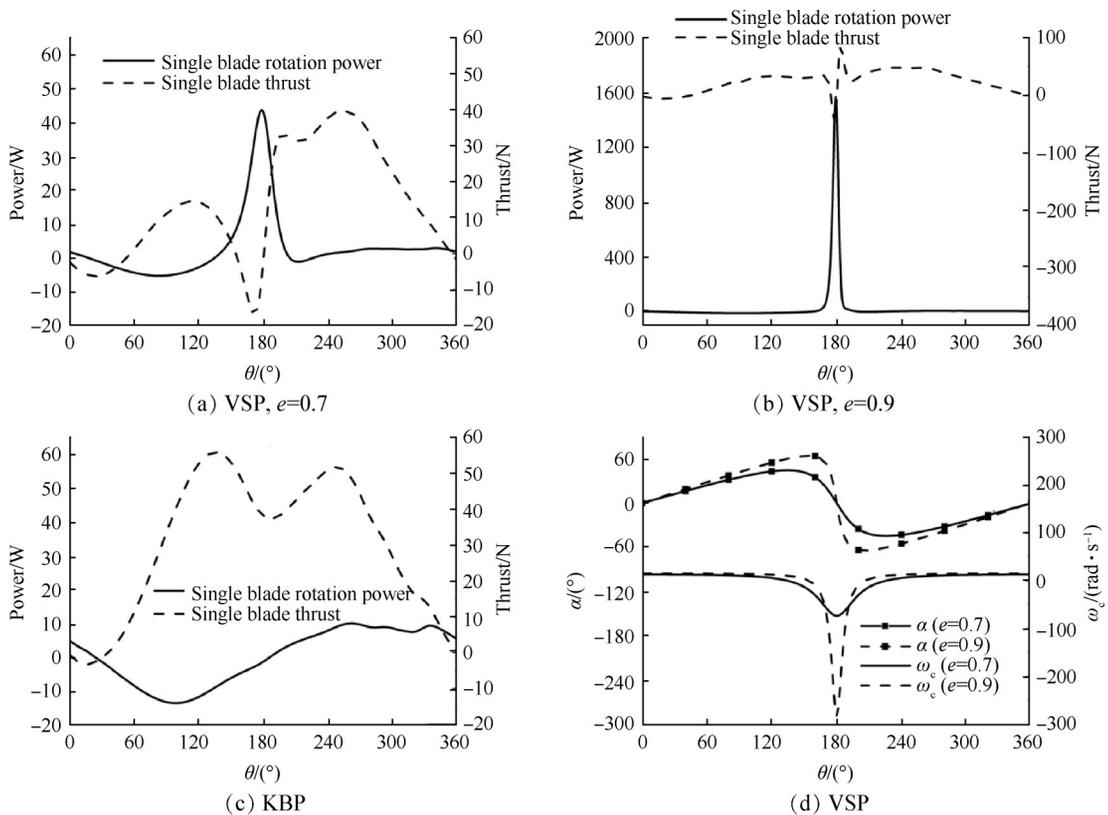


Fig. 16 Power analysis

相比, KBP自转消耗功率低、单个叶片产生的推力大, 叶片发出推力的平稳变化有利于推进器的稳定工作。

5 结论

通过本文研究, 得到以下结论:

(1) VSP在机翼翼型下效率更高, 以及具有可通过控制偏心率在不改变推进器转速的情况下进行推力大小和方向的调节, 根据实际要求实现推力或效率最大化的特性。但在大偏心率下自转角速度变化剧烈导致水动力脉动幅值大, 增大了推进器转动机构的损耗, 不利于推进器的使用寿命和稳定工作。

(2) KBP与VSP相比, 在相同进速系数下可发出更大的推力、更高的推进效率, 且工作状态平稳, 对转动机构的冲击小, 但只能通过改变推进器转速进行推力大小的调节、改变推进器叶片偏转角度进行推力方向的调节。

本文对两种不同运动方式下直翼推进器水动力性能的研究得到的结论, 可用于船舶推进与操纵中根据实际需求与用途进行两种不同运动方式的直翼推进器选型, 以及结合两种运动方式各自的运动特性与对应的水动力性能, 进行后续直翼推进器船后复合运动的实现和船桨干扰及船后操纵运动中的船后直翼推进器水动力性能研究。

致谢: 感谢装备预研共用技术和领域基金的资助。

参考文献

- [1] Richards M A. Cycloidal Propulsion of Submersibles[J]. *Journal of Hydronautics*, 2015, 4(2): 66-72.
- [2] 欧礼坚. 船舶螺旋桨及推进装置故障诊断关键技术研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [3] Bui V P, Kawai H, Kim Y B, et al. A Ship Berthing System Design with Four Tug Boats[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2011, 25(5): 1257-1264.
- [4] Plam M, Jürgens D. Voith Schneider Propeller: An Efficient Propulsion System for DP Controlled Vessels[C]. *Houston: Dynamic Positioning Conference*, 2009.
- [5] Esmailian E, Ghassemi H, Heidary A S. Numerical Investigation of the Performance of Voith Schneider Propulsion[J]. *American Journal of Marine Science*, 2014, 2(3).
- [6] Ficken N L, Dickerson M C. Experimental Performance and Steering Characteristics of Cycloidal Propellers[R]. *Washington D C: NSRDC Report 2983*, 1969.
- [7] 王永生. 舰船新型推进系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [8] 刘舒雨. 基于直翼全向推进器的新型船舶油电自混合动力系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [9] 柳叶. 特种舵水动力性能研究及桨舵系统数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [10] 黄胜. 船舶推进节能技术与特种推进器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [11] 陈先进. 摆线推进器结构及性能优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] Jurgens Birgit, Fork Werner. Faszination Voith-Schneider-Propeller: History and Engineering[M]. *Hamburg: Geschichte und Technik*, 2002.
- [13] 朱典明. 摆线推进器的理论计算方法[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1982(1): 4-30.
- [14] Pasetto P, Barnabà L, Miletto Bracco M, et al. A New Proposal of a Vertical Axis Propeller[C]. *Amazonia: International Conference IDS 2013*, 2013.
- [15] 施科益, 杨世锡. 一种新型摆线推进器控制系统的设计[J]. 机电工程, 2008, 25(10): 91-94.
- [16] Gu X, Zhang D, Leng J, et al. Research on the Hydrodynamic Characteristic of a Vertical Axis Propeller[C]. *Genova: OCEANS 2015*, 2015.
- [17] 施科益. 基于步进电机的新型直翼摆线推进器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [18] Zhang X W, Zhang L, Wang F, et al. Research on the Unsteady Hydrodynamic Characteristics of Vertical Axis Tidal Turbine[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(1): 95-103.
- [19] 张楠, 沈泓萃, 姚惠之. 阻力和流场的CFD不确定度分析探讨[J]. 船舶力学, 2008, 12(2): 211-224.
- [20] 朱德祥, 张志荣, 吴乘胜, 等. 船舶CFD不确定度分析及ITTC临时规程的初步应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(3): 363-370.
- [21] 陈铁军. 贯流式水轮机CAD/CFD设计平台研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [22] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [23] Liu Wen-tao, Liu Zhi-hua, Luo Fei-yang, et al. Research on Hydrodynamic Performance of Cycloidal Propeller[C]. *Shanghai: 30th International Offshore Polar Engineering Conference*, 2020.
- [24] 张洪雨, 刘杨, 冀楠. 摆线推进器水动力性能的数值模拟[C]. 西安: 2013年船舶水动力学学术会议论文集, 2013.

(编辑: 朱立影)