

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.02.004

## 对转桨叶数比对敞水性能影响的 CFD 分析\*

郑健<sup>1</sup>, 何东亚<sup>2</sup>, 万德成<sup>2</sup>

(1. 江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913, E-mail: tony\_zhj@163.com;  
2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室  
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 对转桨相比于单桨, 不仅具有较高的推进效率, 还具有较好的空泡性能和较低的振动噪声, 但由于前后桨的相互干扰, 其推力和扭矩呈现非常明显的非定常特点。在前后桨不同叶数比下, 对转桨的敞水性能具有不同的特征。目前, 基于 RANS 方程,  $SST k-\omega$  湍流模型和滑移网格方法的 CFD 方法已被广泛应用于螺旋桨敞水性能的研究中, 此方法不仅具有相对较高的计算精度和效率, 还可以获得较详细的流场, 这有助于我们更深入地认识对转桨的相互干扰及其节能机理。该文分析了前、后桨叶数比为 4:4 和 4:5 的对转桨的敞水性能, 推力和扭矩的预报结果与试验结果差别在 5% 以内, 但叶数比为 4:4 的对转桨的受力脉动幅值相对于 CRP4 较大, 脉动频率相对于 CRP4 较小, 两者的变化频率皆和轴频、叶数成一定的关系。计算结果显示, 对转桨的推进效率比单桨高 8.73%, 通过尾流场切向速度分布发现, 对转桨的后桨可大幅度回收前桨损失的周向涡动能。

**关键词:** 对转螺旋桨; 滑移网格法; 节能效果; 叶数比; 非定常受力

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## Numerical analysis of different blade number ratios influence on open water performance of CRPs based on CFD method

ZHENG Jian<sup>1</sup>, HE Dong-ya<sup>2</sup>, WAN De-cheng<sup>2</sup>

(1. Jiangnan Shipyard (Group) Co., LTD, Shanghai, 201913, China;  
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key

\* **收稿日期:** 2017-08-30(2018-02-07 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)和上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)

**作者简介:** 郑健(1978 - ), 男, 江苏江阴人, 高级工程师.

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** August 30, 2017 (Revised February 7, 2018)

**Project supported by foundation:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099), Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022) and Shanghai Excellent Academic Leaders Program (17XD1402300)

**Biography:** ZHENG Jian (1978-), Male, Senior Engineer.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** CRPs (Contra-rotating propellers) is superior to single propeller in propulsion efficiency. It can also relieve unpleasant cavitating and vibrating level. However, because of interaction between front and rear propellers, thrust and torque of CRPs show evidently different unsteady and periodic open water performance characteristics under different blade number ratios. Based on sliding mesh method by solving RANS functions and  $SST k-\omega$  turbulence model, the CFD method has proved to have relatively high efficiency and accuracy in computing hydrodynamics of propeller. Furthermore, detailed flow field information can help us investigate interaction and energy-saving mechanism of CRPs. This paper simulates CRPs with two blade number ratios individually. Thrust and torque at different advance coefficients agree well with their experimental counterparts. The difference of averages of suffered forces between CRP4 and CRP6 are not beyond 5%. But CRP6' amplitude of force variation is quite bigger than CRP4', while frequency is in contrast. Force frequency of variation has a relation with their blade number ratio and shaft frequency. Results show that propulsion efficiency of CRPs is 8.73% higher than single propeller, and the rear propeller has recycled tangential vortex kinetic energy drastically.

**Key words:** CRPs; sliding mesh method; energy-saving performance; blade number ratio; unsteady force

## 引言

随着船舶朝着大型化、快速化发展,桨径、桨重以及螺旋桨载荷都不断增大,导致船舶尾部伴流严重的不均匀性,空化和压力脉动日益严重,这极大地降低了螺旋桨推进效率和船舶的舒适性。Kim等<sup>[1]</sup>指出,传统的柴油机轴式螺旋桨推进方式效率低,造成大量的燃料消耗和严重的环境污染,由于主机功率的限制,这种推进方式必然不能满足要求。设计发展低能耗、高效率 and 较好空泡性能的绿色船舶成为未来船舶行业的发展方向。在此背景下,船舶水动力节能技术<sup>[2]</sup>得到了快速发展,其出发点主要为减小船舶阻力以及提高推进效率。

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。相对单桨,对转桨有以下优势:后桨可大部分回收前桨尾流中的旋转能量损失,提高推进效率;对转桨所遭受的不平衡力矩较小,可提高鱼雷等潜航器的航向稳定性;对转桨尾流场相对均匀,可提高舵效;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。

Miller等<sup>[3]</sup>在1976年开发了前后桨叶为4:4和4:5两组对转桨,通过敞水试验研究了前后桨相互干扰下的非定常受力,并指出非定常受力会带来严重的振动与噪声。盛立等<sup>[4]</sup>在Miller等的基础上建立了混合吊舱式CRP吊舱推进器,运用基于RANS方程、 $SST k-\omega$ 湍流模型和滑移网格方法<sup>[5]</sup>的CFD方法研究了该混合推进器不同进速下的推进性能,并与试验进行了对比,吻合良好。王展智等<sup>[6]</sup>利用该方法,研究了主要设计参数对某一混合吊舱式CRP推

进器敞水性能的影响等。吴建威等<sup>[7]</sup>基于多重参考系法,滑移网格法和重叠网格法研究了某一四叶螺旋桨的敞水性能,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。其指出多重参考系法计算量小,但精度不如其他两种方法,且此方法只能得到定常的流场结果;而滑移网格方法计算量适中,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舵多自由度、多级物体<sup>[8]</sup>的复杂运动问题。考虑到计算精度和计算效率,本文将采用滑移网格法来研究对转桨的水动力性能。

本文通过数值模拟,研究前后桨不同叶数比对对转桨的水动力性能的影响,将对对转桨设计具有一定的指导作用。

## 1 数值方法

### 1.1 滑移网格法

滑移网格法本质上采用的是Galerkin投影法<sup>[9]</sup>。由于Galerkin投影法是最小化插值误差的L2范数,所以它很自然地满足通量守恒定律,其次Galerkin投影法比较适合于非连续的计算域。本文将包围桨的圆柱形小域设为动域,随螺旋桨一起旋转,小圆柱以外的计算域设为静域,两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1所示。假设正格代表主面单元,斜格代表从面单元,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面积的比值。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。

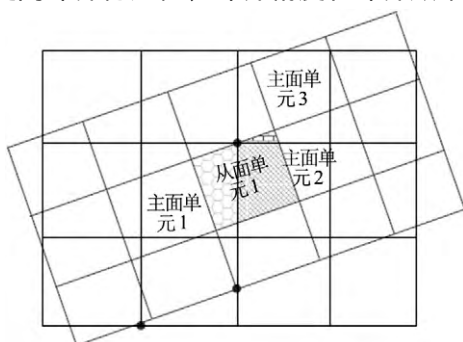


图1 滑移网格示意图  
Fig.1 Diagram of sliding mesh

### 1.2 控制方程

本文假设流体不可压缩, 其连续性方程和动量方程可表达为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \mathbf{u} \tag{2}$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\mathbf{u}$  为脉动平均速度,  $p$  为压力,  $\mu$  为动力黏性系数,  $\mu_t$  为湍流黏性系数。

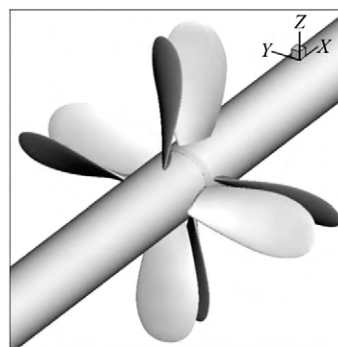
本文采用由Menter等提出的  $SST k-\omega$  湍流模型, 该模型通过剪应力输运公式综合了  $k-\omega$  湍流模型和标准  $k-\varepsilon$  模型的优点, 即在近壁面采用  $k-\omega$  湍流模型, 在远场的自由流动中采用  $k-\varepsilon$  湍流模型。速度压力的解耦采用PIMPLE算法, 其综合了PISO算法与SIMPLE算法的优点, 即时间步内采用SIMPLE算法, 时间步的步进采用PISO算法, 这样可以在保证稳定性的前提下适当地加大时间步长。

## 2 计算模型

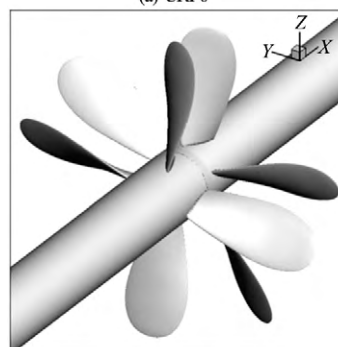
### 2.1 模型及工况

本文采用美国泰勒水池的Miller<sup>[3]</sup>研发的对转桨模型, 其中一组为CRP4, 其由DTMB3686和DTMB3687A组成, 前后桨叶数比为4:5, 另一组为

CRP6, 其由DTMB3686和DTMB3849组成, 前后桨叶数比为4:4, 模型主要参数如表1所示, 三维模型见图2所示。前后桨盘面间距都为0.0432 m, 转速皆为12 rad/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时对转桨的推力值和扭矩值。



(a) CRP6



(b) CRP4

图2 对转桨模型

Fig.2 Computational models of CRPs

### 2.2 计算网格与边界条件

计算域大小和网格布置见图3。由于计算网格在叶尖附近变形较大, 为了保证滑移面的质量, 本文将滑移面的半径取得稍大一些。整体计算域被分成三部分, 即包围前桨的较小的圆柱形动域和包围后桨的较小的圆柱形动域, 其余的为静域, “AMI1”、“AMI2”为滑移面, 每个滑移面又分为主面和从面两个面, “outercylinder”为计算域的外边界, 值得注意的是, 当前后桨间距比较小时, 在两桨之间同时制作出滑移面“AMI1”的右端面 and 滑移面“AMI2”的左端面比较困难, 经验证滑移面“AMI1”和滑移面“AMI2”在夹缝中共用一套主面和从面不会影响计算结果。边界条件设置如下: 外边界“outercylinder”设置为对称边界条件, 入口边界

表1 对转桨模型主要设计参数

Table 1. Main design parameters of CRPs

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

“inlet”速度大小设为来流速度，压力边界设为零梯度，出口边界“outlet”压力边界设为0，速度边界设为零梯度，滑移面“AMI1”、“AMI2”设置为周期性cyclicAMI边界条件，螺旋桨物面设为不可滑移条件，湍动能k在物面处设为kqRWallFunction，耗散率 $\omega$ 在物面处设为omegaWallFunction。总体网格量291万，其中螺旋桨附近网格为240万左右，边界层为5层网格，经反复计算比较，发现当 $y^+$ 等于40时误差最小，因此后续计算 $y^+$ 皆取40。

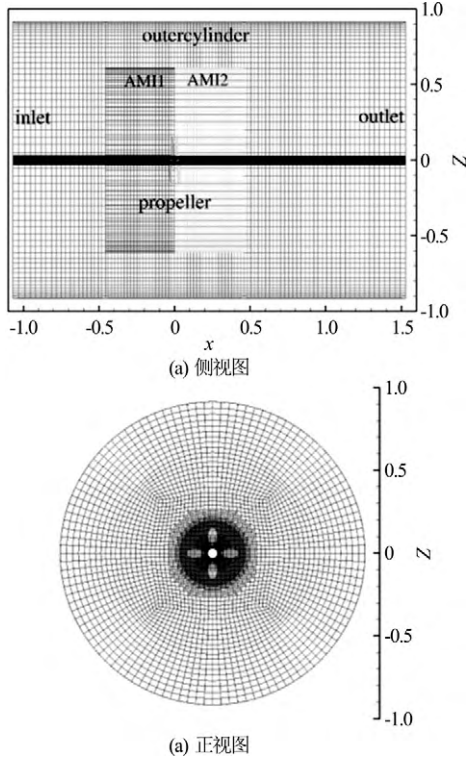


图3 计算域和网格布置

Fig.3 Computational region and grid arrangement

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 对转桨水动力时均值计算结果

为便于分析讨论对转桨的水动力性能，特定义以下系数：

$$J = \frac{V}{nD_F}, K_T = \frac{T_F + T_A}{\rho n^2 D_F^4}, K_Q = \frac{Q_F + Q_A}{\rho n^2 D_F^5} \quad (3)$$

式中： $V$ 为来流速度， $T_F$ 和 $T_A$ 分别为前桨和后桨产生的推力， $Q_F$ 和 $Q_A$ 分别为前桨和后桨吸收的扭矩。

图4(a)是CRP6对转桨的敞水性征曲线。由图中可知，计算结果与试验值吻合良好，推力和扭矩误差分别在2%和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4(b)是前后桨叶数为4:5的CRP4的敞水性征曲线和推力和扭矩误

差分别在1%和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。

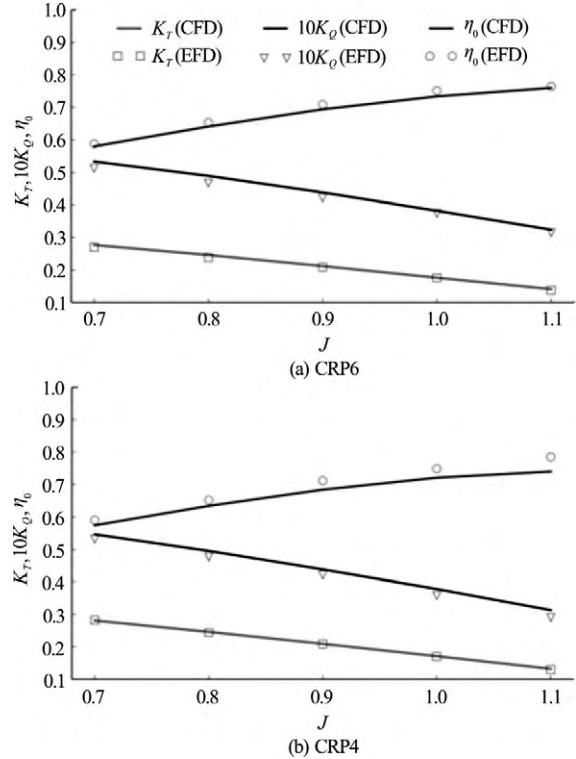


图4 对转桨水动力试验值与计算结果对比

Fig.4 Comparison between experimental and computational hydrodynamics of CRPs

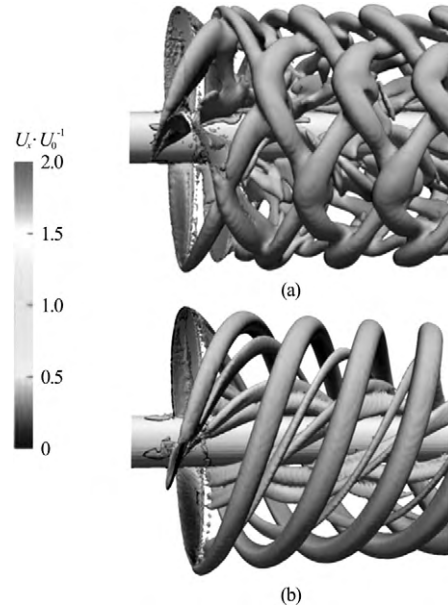


图5 CRP6 和等效单桨涡结构等值面

Fig.5 ISO-surface of vortex structure of CRP6 and equaling single propeller

#### 3.2 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，且极容易产生空化现象；而对转桨的前后

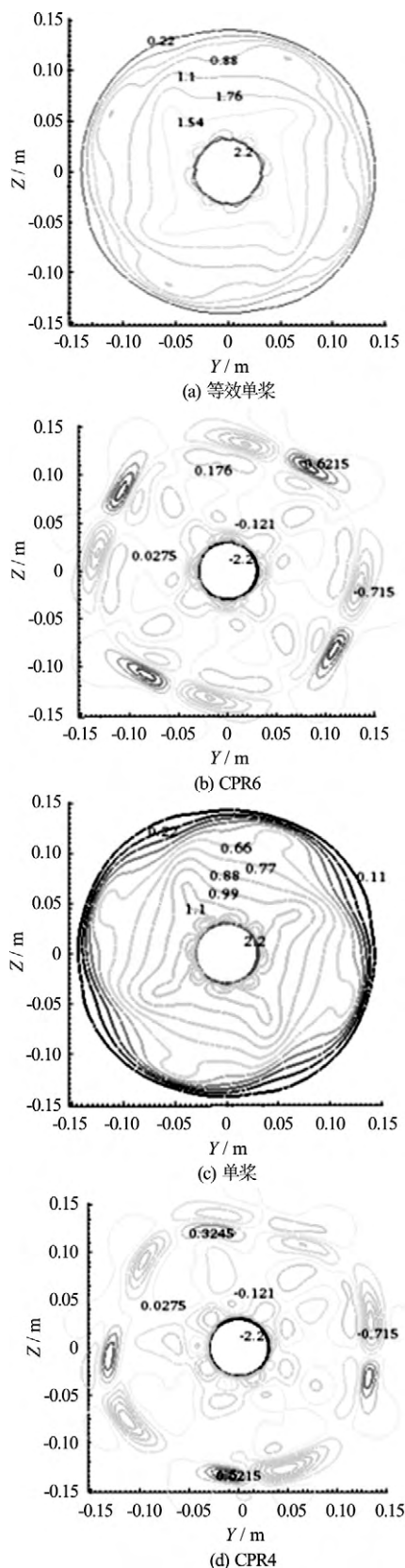


图 6 尾流场切向速度分布  
Fig.6 Tangential velocity distribution in wake flow fields

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, 此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是在来流速度为3.296 m/s, 对转桨在 $J$ 为0.9时, 等效单桨在0.7时的计算结果, 其中等效单桨为对转桨的前桨, 它保持与对转桨相同的来流速度, 通过改变转速, 获得与CRP6对转桨相当的推力。计算结果表明, 此时CRP6对转桨相对等效单桨, 效率提高了10.2%, CRP4对转桨相对等效单桨, 效率提高了8.73%。图5比较了CRP6对转桨和等效单桨的涡结构图,  $U_x$ 为速度轴向分量,  $U_0$ 为来流速度。从图中可以看出, 后桨产生的反向涡结构与前桨交叉形成网状涡结构。图6表示在前桨桨盘面之后轴向位置 $1 R_f$ 处, 切向速度(m/s)的分布, 可以发现除了叶梢区域, 后桨可大幅度回收前桨损失的周向涡动能。

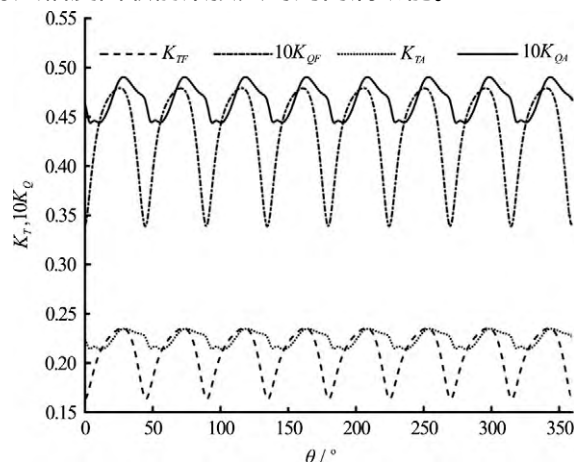


图 7 CRP6 推力扭矩系数时历曲线

Fig.7 Time history of thrust coefficient of CRP6

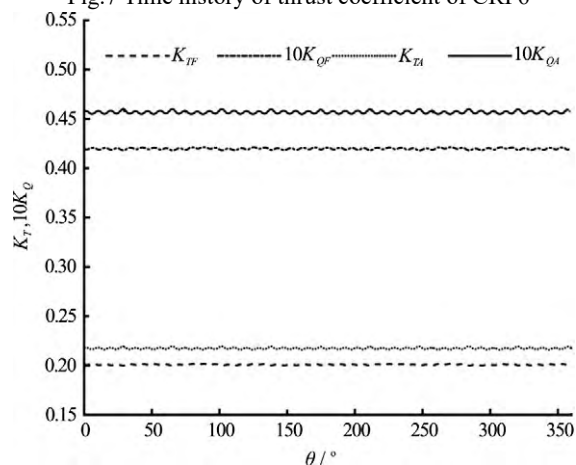


图 8 CRP4 推力扭矩系数时历曲线

Fig.8 Time history of thrust coefficient of CRP4

### 3.3 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的推力和扭矩平均值的差别基本在5%以下, 但他们的时历曲线却有着显著不同, 由如图7和图8所示的对转桨受力的时历曲线可以看出, CRP6的脉动幅值明显大于CRP4的脉动幅值, 但是CRP6的脉动频率明显小于CRP4的脉动频率。对前桨的推力系数进行

FFT(Fast Fourier Transformation)变换,结果如图9所示,CRP6的主频为8倍的轴频,CRP4的主频为40倍的轴频,两者的变化频率符合公式4。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(0.02428)成分组成,CRP4由拥有高频(40倍轴频)的低幅值(0.0003873)成分组成,幅值相差62.7倍左右。

$$f = f_0(m_F Z_F + m_A Z_A) \quad (4)$$

式中:  $Z_F$  和  $Z_A$  为前、后桨叶数;  $m_F$  和  $m_A$  为常数,并满足  $m_F Z_F = m_A Z_A$ ;  $f_0$  为对转桨轴频。此外CRP4的变化幅值明显低于CRP6,表明其相对比较稳定,适合于工程应用。

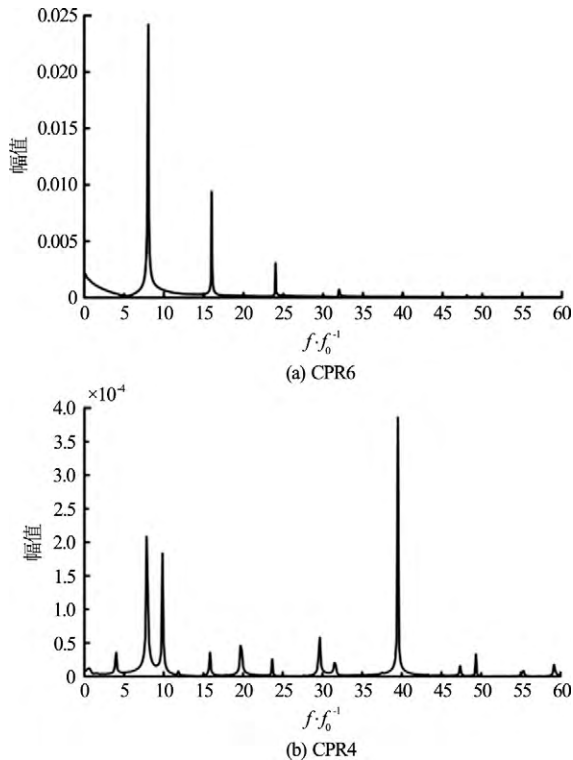


图9 前桨推力系数频谱分析

Fig.9 Frequency spectrum analysis of thrust coefficient of front propeller

## 4 总结

本文采用CFD方法,研究了美国泰勒水池的前后桨叶比为4:4和4:5的两组对转桨的水动力性能,计算结果与试验值吻合良好,基于大量的计算结果,可得出以下结论:

(1) 基于RANS方程,  $SST k-\omega$  湍流模型和滑移网格方法的CFD方法不仅效率高,且具有较高的计算精度,可以满足工程需要。

(2) 两种叶数比对对转桨水动力的平均值影响不大,但桨叶比为4:4的对转桨的水动力比4:5的变化幅值要大,因此后者的稳定性比前者要好。

(3) 相对于单桨,在相同载荷下,对转桨的前、后桨载荷相对较低,水动力性能较好,另外后桨可回收一部分周向动能,提高推进效率效率。

(4) 对转桨载荷的变化周期与轴频和叶数比有直接关系,应被考虑到初步设计之中。

## 致谢

本文工作得到工信部数值水池创新专项VIV/VIM项目(2016-23/09)的资助。在此表示衷心感谢。

## 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.
- [2] 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, A 辑, 2016, 31(6): 651-658.  
SUN Tao, WAN De-cheng. Study of energy saving effect for product[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(6): 651-658.
- [3] MILLER M. Experimental determination of unsteady forces on contra-rotating propellers in uniform flow[R]. David W Taylor Naval Ship R&D Center, 1976.
- [4] 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. 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 hydrodynamics performance on hybrid CRP podded propulsion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2): 184-190.
- [5] 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, A 辑, 2014, 29(4): 444-453.  
ZHOU Hu, WAN De-cheng. Numerical simulation of the unsteady flow around wind turbines with different blades numbers [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(4): 444-453.
- [6] 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 Zhan-zhi, 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.
- [7] 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, A 辑, 2016, 31(2): 177-187.
- WU Jian-wei, YIN Chong-hong, WAN De-cheng. Numerical prediction of the propeller open water performance based on three three numerical methods[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2): 177-187.
- [8] WANG J H, WAN D C. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1345-1358.
- [9] Farrel P E, Maddison, J R. Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2011, 200: 89-100.