



海底采矿作业车螺旋桨推进器水动力特性研究

戴 瑜¹, 张晏仰¹, 卞家能¹, 马伟宾¹, 陈 曜¹

(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

摘要: 为掌握海底采矿作业车导管螺旋桨推进器水动力学性能影响因素, 有效提高水动力性能, 对 19A Ka-4-55 型号导管螺旋桨进行参数化建模, 采用 CFD 方法对其水动力性能进行仿真分析, 获得 19A Ka-4-55 导管螺旋桨在不同进速下的水动力系数。将结果与其试验经验值进行拟合, 并搭建试验平台验证仿真, 分析不同桨叶数以及斜流影响下的导管螺旋桨水动力性能。结果表明: CFD 数值仿真结果与导管螺旋桨试验图谱吻合, 在一定范围内较多桨叶数能提高推力, 但较少桨叶数效率更高, 螺旋桨力矩系数与其桨叶数成正比关系; 斜流作用下, 导管对螺旋桨的保护和导流作用可以减少螺旋桨压力参数, 降低螺旋桨空泡发生率, 导管螺旋桨水动力性能明显优于无导管螺旋桨的水动力性能。

关键词: 导管螺旋桨; CFD; 涌水效率; 桨叶数; 斜流

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2771-11

中图分类号: TD431

文献标志码: A

引文格式: 戴 瑜, 张晏仰, 卞家能, 等. 海底采矿作业车螺旋桨推进器水动力特性研究[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2771-2781. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37995

DAI Yu, ZHANG Yan-yang, BIAN Jia-neng, et al. Research of hydrodynamic characteristics of propeller of subsea mining vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2771-2781. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37995

丰富的水下有色金属资源将是人类目前与将来开发利用的首要目标^[1], 深海采矿作业车作为获取深海丰富资源的手段之一在现代海洋装备中显得尤为重要^[2-3]。采矿车利用有限搭载平台能多方面实施作业, 采集更多的信息及环境资源, 其性能高效与否成为挑战此项任务的关键一环。推进器作为作业车的动力来源, 其水动力性能直接影响了作业车的行进性能。螺旋桨推进器因其水动力性能优越、工作效率高是现代船舶和水下机器人的首选动力推进器结构^[4-5]。螺旋桨设计的好坏及其效率的高低直接影响船舰载体的航速、噪声及振动^[6]。而导管螺旋桨作为螺旋桨的一种, 在螺旋桨外围增加一层导流罩用来改变螺旋桨周围流场^[7-8], 通过改变导管形状使螺旋桨具有加速或者减速功能, 也可在军用舰艇上面减缓环流速度达到减速噪声及在

复杂的环境下保护主动力螺旋桨的功能, 在小型船舶的使用中还可以充当转舵的作用^[9]其独特的功能在海洋的制造装备中广泛应用。

学者 STIPA^[10]和 KORT^[11]对导管螺旋桨进行了优化与验证, 以在高速、大功率重载型轮船中有效增加推力。导管螺旋桨水动力性能分析方法主要分为三种: 升力线、升力面、面元法^[12-13], 国外学者中 LERBS^[14]采用诱导因子方法, 在理论上奠定了升力线的基础, KHATIB^[15]对升力面理论进行了研究, HESS 等^[16]基于速度的计算方法提出了面元密度法来求解导管水动力性能, MORINO 等^[17-18]基于速度势的计算方法来计算导管螺旋桨水动力, 其速度势理论在 20 世纪 90 年代后逐渐成为主流; 其中以 YAMAZAKI、KOYAMA、HOSHINO 为代表人物对螺旋桨面元法进一步推广使得更多的学者

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774324)

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-09-03

通信作者: 戴 瑜, 教授, 博士; 电话: 13755116953; E-mail: daiyu_6@aliyun.com

参与到了研究当中。国内学者苏玉民等^[19]对船舶螺旋桨非线性升力线理论进行了研究，谭延寿等^[20]采用面元法对螺旋桨定常水动力进行了预报。在螺旋桨的试验研究中最主要的方法还是淌水实验法，受场地及制造加工约束发展较为缓慢，随着 CFD 技术的发展，该方法将计算数学和流体力学融入计算机技术，利用现代计算机代替人工计算，保持效率的情况下对场地、模型等因素的依赖性大大降低^[21]。本文基于 CFD 技术，运用结构化网格与非结构化网格相结合的方法对 19A Ka-4-55 型导管螺旋桨展开水动力学研究，与船舶推进提供的实验图谱进行比较并进行了试验平台搭建，从而验证本数值方法的可行性，然后对螺旋桨桨叶数和斜流工况下的水动力特性展开研究。

1 螺旋桨淌水性能 CFD 数值仿真

1.1 计算基础理论

1.1.1 控制方程

采用 CFD 方法，得到流体动力系数，为后的运动仿真提供相关的理论基础。通过求解三维不可压缩的 Navier-Stokes 方程，得到导管螺旋桨周围的复杂流场，分析中设定流体为不可压缩流体，对于不可压缩的单相牛顿湍流，本文给出精简的质量方程和动量方程^[22]。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \operatorname{div}(u_i \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\nu \operatorname{grad} u_i) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中： u_i 是流体速度； ρ 是流体密度； p 是流体压力； ν 是运动黏度。

1.1.2 水动力特征系数

螺旋桨水动力性能是指在几何尺寸下改变周边流场，获得与流体相互作用力，通过改变不同的转速可以得到不同的进出速度之间的一种相互影响关系，通常指的都不是一定的具体数量而是以一种无量纲系数，避免几何尺寸及形状的拘束，更好体现出其性能。水动力特征参数计算公式分别如下。

1) 进速系数

$$J = \frac{v_A}{nD} \quad (3)$$

2) 螺旋桨推力系数

$$K_{T_p} = \frac{T_p}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

3) 导管推力系数

$$K_{T_D} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (5)$$

4) 转矩系数

$$K_{Q_p} = \frac{Q_p}{\rho n^2 D^5} \quad (6)$$

5) 总推力系数

$$K_T = \frac{T_p + T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (7)$$

6) 螺旋桨效率

$$\eta = \frac{K_T}{K_{Q_p}} \frac{J}{2\pi} \quad (8)$$

式中： T_p 为螺旋桨推力； Q_p 为螺旋桨转矩； T_D 为导管推力； T 为导管螺旋桨总推力； n 为螺旋桨转速； D 为螺旋桨直径； ρ 为液体水密度； v_A 为螺旋桨进速。

1.2 导管螺旋桨模型构建

导管螺旋桨桨叶为不规则平面，无法通过常规方式建模。首先要建立螺旋桨桨叶切面坐标和螺旋桨全局坐标之间的转换关系^[23]。再将 Ka4-55 图谱中参数变换为螺旋桨全局坐标空间中的坐标点，最后将一系列坐标点导入三维建模软件中建立三维模型^[24]，同理再加入 19A 导管三维模型然后进行装配。图 1 和表 1 所示为导管螺旋桨几何参数。图 2 所示为深海作业车附上导管螺旋桨的整体模型示意图。

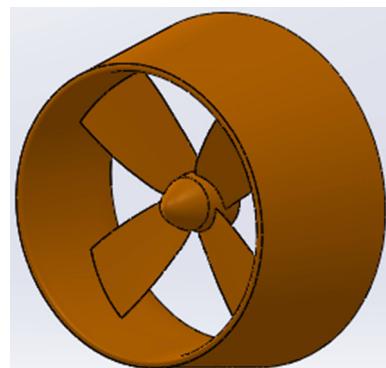


图 1 导管螺旋桨三维模型

Fig. 1 Geometric model of ducted propeller

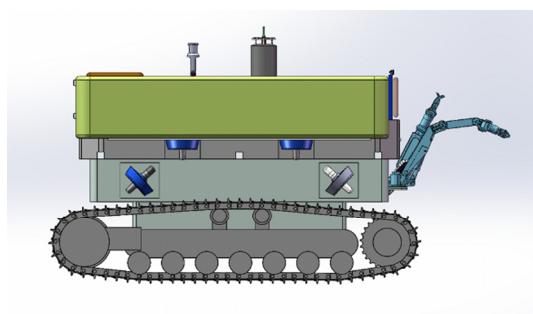


图 2 海底采矿作业车三维模型

Fig. 2 Geometric model of seabed mining operation vehicle

表 1 导管螺旋桨几何参数

Table 1 Geometric parameters of ducted propeller

Blade diameter/mm	Blade diameter/mm	Duct minor diameter/mm	Pitch ratio	Blade area ratio	Blade trim angle/(°)
130	168	134	0.8	0.55	8

1.3 CFD 计算域及网格划分

1.3.1 计算域的划分

对导管螺旋桨总体流场进行了数值模拟, 模拟了导管螺旋桨真实运行环境。下图 3 计算域为长方体中心与导管螺旋桨坐标中心重合且长轴与导管螺旋桨同轴, 长方体总长度为 $10D$, 宽度和高度均为 $6D$, 螺旋桨的直径为 D ; 入口边界为可变化的速度入口, 出口设为无压力出口, 边界条件设置为无滑移壁面。

为了模拟螺旋桨叶片在导管中旋转, 将流场分为两个计算域。包裹叶片内部区域是一个旋转区域, 其转速与叶片主轴相同, 外部区域为除开内部区域外的所有区域, 分为大域和小域模拟为静态流

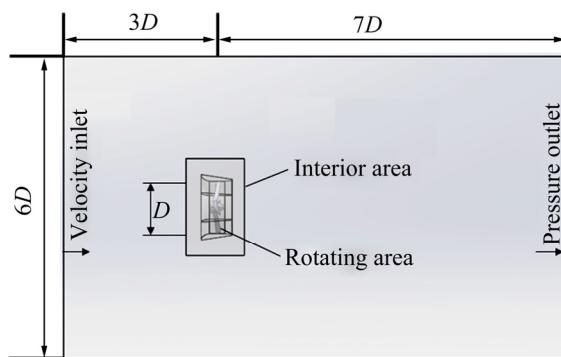


图 3 计算域的设计

Fig. 3 Design of model computing domain

场, 旋转流域与静止流域中间设置为交接面来传递数据。图 3 所示为导管螺旋桨所用计算域。

1.3.2 网格的划分

正确的网格划分技术对于精确求解 RANS 至关重要, 本次模拟中既有四叶桨对称网格也有非对称的三叶桨网格, 对旋转部分计算域考虑到导管螺旋桨的复杂性采用非结构网格划分, 对外部静止域划分为一个大域和一个小域, 小域和导管相接触也采用非机构网格划分, 外部大域采用结构化网格划分, 为了精确模拟低雷诺数边界层流动, 在轮毂、叶片叶尖及导管壁面局部进行加密网格处理, 网格细节如图 4 所示。

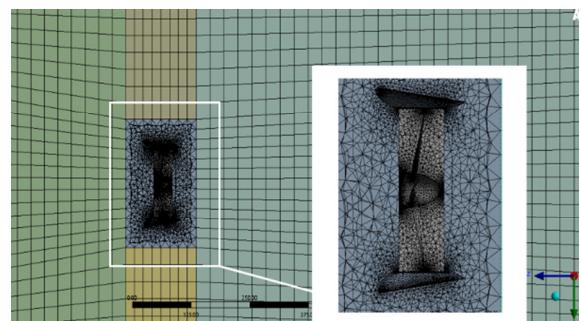


图 4 计算域网格划分

Fig. 4 Grid generation of computing domain

CFD 计算中, 网格质量的好坏对结果会产生直接影响, 网格偏斜率往往也是关注的焦点, 其偏斜度过大是众多不收敛的原因之一。原则上网格越稠密对计算结果较好, 越稀疏误差越大; 从计算机效率来看无论网格稠密还是稀疏都会对计算结果不利, 网格过密可能会出现计算机运算量过大, 消耗时间过长, 也有可能产生发散。过稀疏的网格由于网格连接不均匀对结果产生较大偏差影响。在进行 CFD 模拟之前对四种不同的网格数量进行评估, 表 2 所示为不同网格数量的对比。

表 2 不同网格数量的对比

Table 2 Comparison of different grid numbers

Parameter	5 million grids	3 million grids	2 million grids	1 million grids
K_T	0.2658	0.2547	0.2541	0.2447
K_Q	0.1931	0.1886	0.1864	0.2389
η	0.2181	0.2152	0.2150	0.1587

1.3.3 边界条件及求解器的设定

利用 ANSYS 中 FLUENT 求解时需要对计算域的边界进行设定。由表 2 结果可知, 在 300 万网格数量下, 推理系数、力矩系数和效率的计算值与 500 万网格时的计算值偏差较小。由于本文仿真计算的工况较多, 故为保证计算效率最终确定网格数量为 280 万, 网格偏斜度平均值为 0.243 最大值为 0.85, 选定螺旋桨转速 $n=800$ r/min 不变, 通过改变入口来流速度来改变螺旋桨进速。对于螺旋桨及导管表面由于受到流体粘性的影响, 所以设置为不可滑移壁面, 计算模型由于计算域为转动与静止两个部分, 因此可用稳态 MRF 和瞬态滑移网格两种模型求解, 因滑移网格在求解速度及旋转面网格处理上有一定优越性, 本文选择滑移网格求解, 端流模型选择为 RNG $k-\varepsilon$, 对于流场控制方程, 对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 压力耦合方程使用 simple 算法。

1.3.4 模拟结果分析

分别对进速系数 $J=0.1\sim0.6$ 的总推力系数、力矩系数和螺旋桨效率进行计算和统计, 后与船舶推进中图谱进行对比^[9], 如图 5 所示。

由图 5 中的曲线可知, CFD 模拟试验值有一定的吻合度, 由于船舶推进中图谱所采用的螺旋桨型号与仿真中的型号规格有所差异, 且仿真时的水域等周围环境处于理想状态, 与实际有所差别, 所以计算值与图谱所示的试验值在不同的进速系数 J 下存在一定的误差, 但是总体趋势与经验数据相似, 因此仿真计算方法是可以作为研究参考。想要进一步提高准确度, 从导管螺旋桨选型, 计算校核, 建

模、网格类型选取、划分、参数设置等等都需要改进与完善。

2 桨叶数对水动力性能影响

螺旋桨的水动力影响因素很多, 从外部因素考虑有来流速度的大小和方向、是否有阻碍物影响、流体密度外部压强等; 从内部因素考虑如螺距比、桨叶形状、桨叶数目、桨叶倾角、导管形状、导管与螺旋桨长径比等诸多因素^[25~26]; 因此要想了解其水动力性能必须采用固定变量的方式计算, 本章拟对 19A Ka-4-55 型螺旋桨桨叶数对其水动力性能进行分析, 设定其转速为 800 r/min 不变, 改变来流速度取进速系数 J 分别为 0.1、0.3、0.5、0.6 时的推力系数、力矩系数和效率值进行比较分析。图 6~8 所示为不同桨叶数的推力系数、力矩系数和效率图对比。

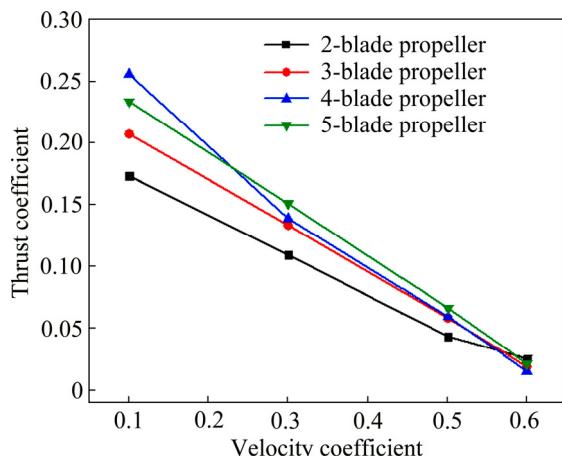


图 6 不同桨叶数推力系数

Fig. 6 Thrust coefficient of different blade numbers

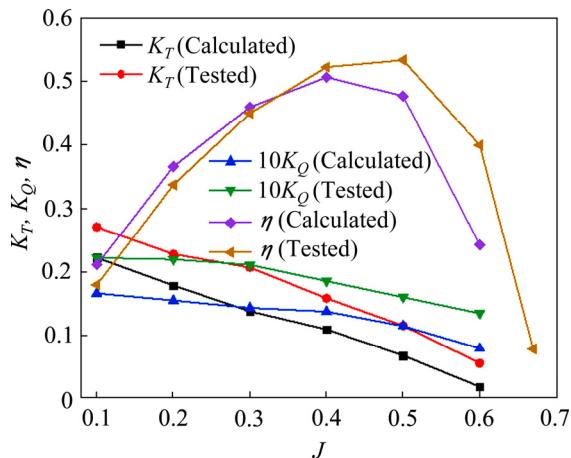


图 5 导管螺旋桨淌水性能

Fig. 5 Flow performance of ducted propeller

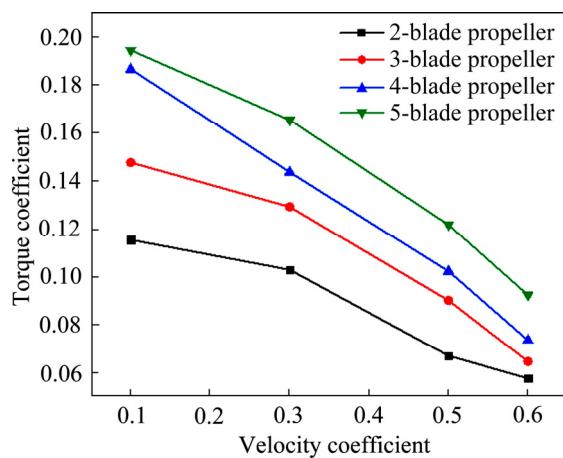


图 7 不同桨叶数力矩系数

Fig. 7 Torque coefficient of different blade numbers

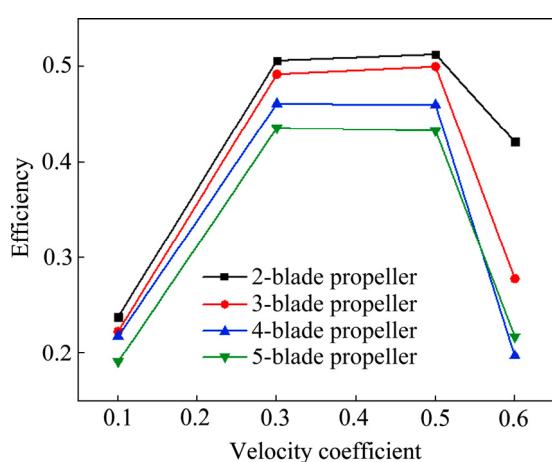


图 8 不同桨叶数效率

Fig. 8 Efficiency of different blade numbers

由图 6 可知, 在低进速系数下推力系数随着桨叶数增加值逐渐变大, 但并不是一直增加, 当桨叶数为 5 时推力系数降低, 说明推力系数是一个有峰值的曲线, 在高进速系数中桨叶的影响逐渐减弱。由图 7 可知, 桨叶的力矩系数在高中低进速下都是随着桨叶数增加而增加。由图 8 可知, 导管螺旋桨效率随着桨叶数的增多而减小。若单从流体力学观点考虑, 对于低黏度流体可以参考飞机的二叶大直径螺旋桨来提高效率, 但二叶螺旋桨会增大船舶吃水和伴随较大振动, 容易发走断裂, 过多桨叶又会增加转矩和降低效率。因此, 应从螺旋桨的功效、工作环境、工作条件等因素综合考量下选取桨叶数, 总体来说螺旋桨的桨叶数不宜过少或者过多, 这与船舶常用 3~6 页桨数理论相符。

3 斜流中的水动力性能

螺旋桨设计理想情况为淌水中运动, 但在实际运用中螺旋桨非设计条件下水动力才是关注的焦点^[27~28], 比如在船舶斜航工况下, 船体紧急转向或遭遇斜向或者横向来流的复杂情况^[29], 斜流对螺旋桨影响各不相同, 极端情况会使螺旋桨推力和转矩特征曲线相对发生一定平移, 导致淌水效率降低, 增大发动机失效功率; 同时斜流进速会带来横向力或者与轴线交叉的斜力, 导致螺旋桨表面压力不同于正常工况下压力; 除此之外螺旋桨推力出现较大的偏心矩会使螺旋桨主轴承承受较大的弯矩, 严重时直接导致主轴轴承的破坏。导管桨由于有导管的保

护可以很好避免斜流带来的流场干扰, 减少不均匀来流对螺旋桨正常工作影响。在轴向来流中, 设定来流夹角, 及与导管进口方向有相对倾斜。由于导管是回转体, 该问题即可以用定常来模拟。

选取进速 $J=0.3$, 螺旋桨转速为 800 r/min, 来流速度为 0.524 m/s, 在进速轴方向有速度偏向角, 偏角度为 15°, 对四桨叶型螺旋桨在有无导管情况下进行比较。图 9~12 所示为螺旋桨叶面与叶背在有导管和无导管两种情况下压力分布图对比, 图 13 所示为导管压力的分布图。

由图 9 和 10 可看出, 在螺旋桨在叶背靠近叶根部位一侧会有较大压力, 这代表螺旋桨进水侧压力会较大, 带动水体转动, 桨叶正背面会产生较大负向压力; 若压力降至水温下的气化压力值时, 该

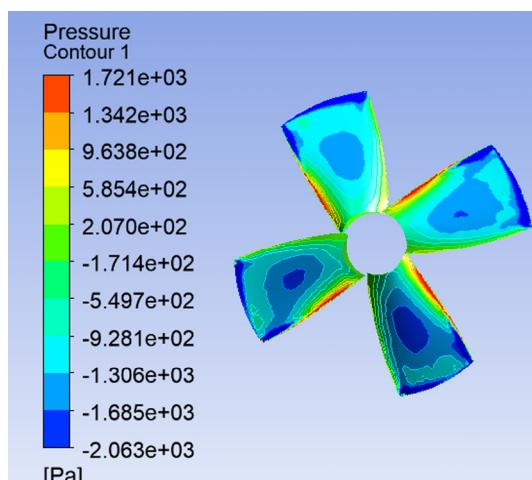


图 9 无导管桨叶背压力

Fig. 9 Backpressure of ductless blade

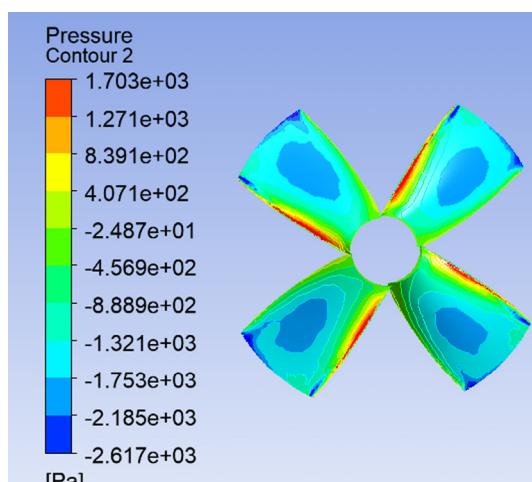


图 10 有导管桨叶背压力

Fig. 10 Blade back pressure with duct

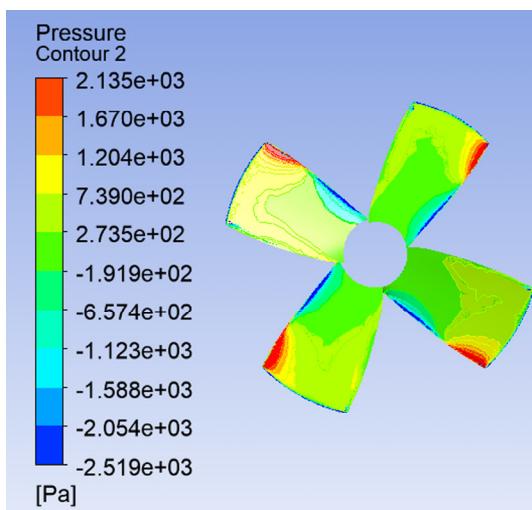


图 11 无导管桨叶面压力

Fig. 11 Blade pressure of ductless propeller

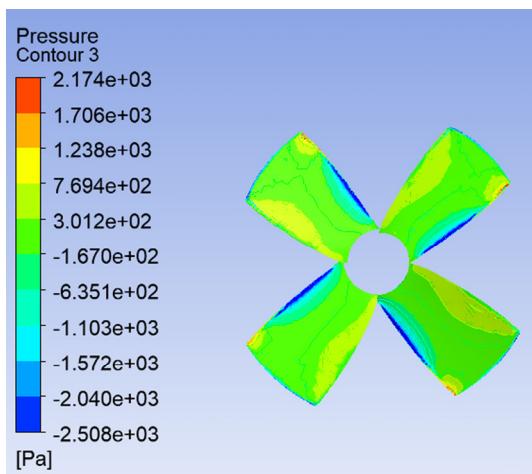


图 12 有导管桨叶面压力

Fig. 12 Blade pressure of ducted propeller

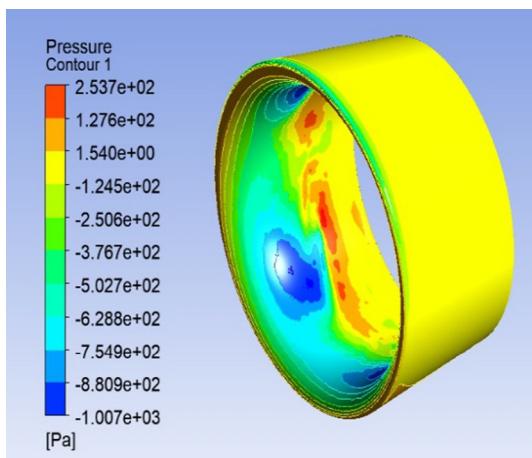


图 13 导管压力分布

Fig. 13 Pipe pressure distribution

处的水即可汽化形成空泡，从而对螺旋桨不利；由此可知，在有导管的情况下，叶背中心的压力负值明显低于无导管的值，且负压面积大大减少，叶尖的由于导管的导流，负向压力也比较明显较少。由图 11 和 12 可看出，在螺旋桨叶面无导管情况下，靠近叶尖进水一端压力值极其剧烈，压力分布严重集中化，但有导管情况下这一现象得到缓解，因为在无导管情况下桨叶导流作用将大部分流体导向叶尖，从而使叶尖压力增大。由图 13 可知，在与螺旋桨叶尖对应处，导管压力值较大，在进速方无桨叶的面积处有较大负压，而且是前段导管为负压区、后段导管为正压力区。这也从侧面说明，导管能减少部分螺旋桨径向压力，在导管进速口存在较大负压将水导流向螺旋桨，而在导管出口处有较大的正向压力，在导流同时产生了摩擦推力，进而分担了部分螺旋桨总推力，使螺旋桨部分压力转移给导管，从而减少桨叶压力集中，反映出导管存在的优越性。

图 14~17 所示为 4 页型导管螺旋桨在斜流的状态下单个桨叶和 4 个桨叶推力系数和转矩系数对比。

由图 14 和 15 可以看出，在斜流影响下，有无导管对单个桨叶推力系数均呈现出周期性变化现象，其变化周期两种情况基本相同。在有导管情况下，导管的存在改变了斜流带来的大部分冲击，从而改变来了进速的流场，推力系数变化幅度要低于没有导管的情况，且推力系数要小于无导管状态下的系数值；螺旋桨受到的反向作用力变小，可以反

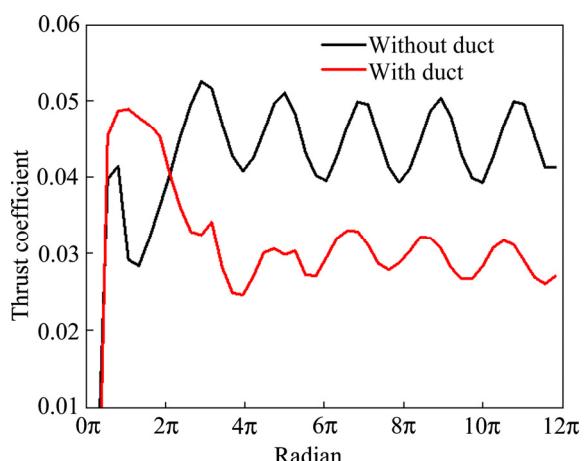


图 14 斜流中单个桨叶推力系数对比

Fig. 14 Comparison of thrust coefficients of single blade in oblique flow

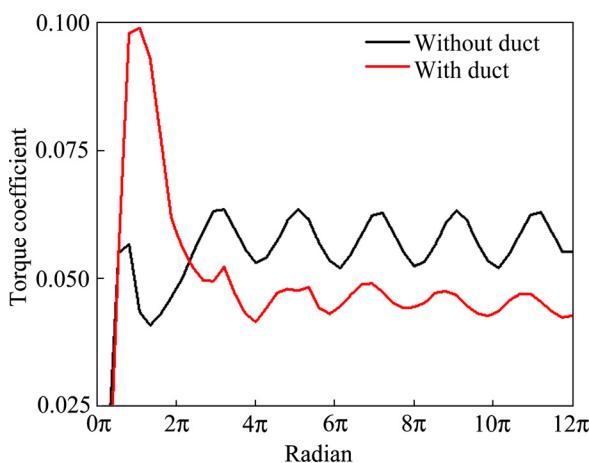


图 15 斜流中单个桨叶力矩系数对比

Fig. 15 Comparison of torque coefficients of single blade in oblique flow

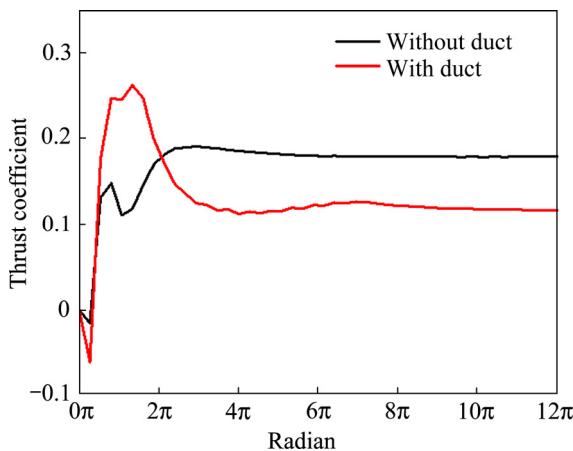


图 16 斜流中四桨叶推力系数

Fig. 16 Thrust coefficient of four blades in oblique flow

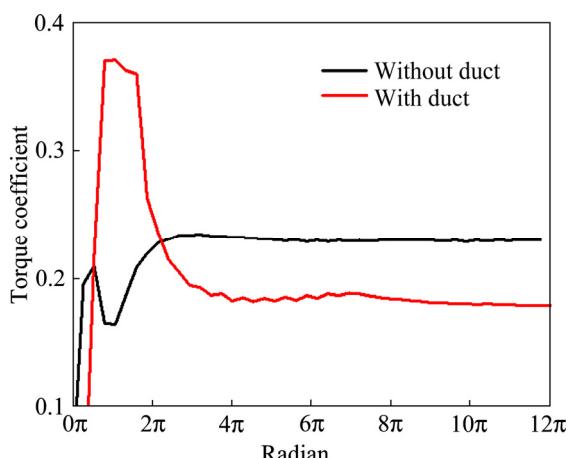


图 17 斜流中四桨叶力矩系数

Fig. 17 Torque coefficient of four blades in oblique flow

映出在重载大推力和有较大斜流的情况下, 有导管会比无导管更有优越的水动力性能。由图 16 和 17 可以看出, 四桨叶总体的转矩系数在开始时会有较大幅度变化, 然后会达到稳定值, 但有导管的转矩系数低于无导管的转矩系数。这说明有导管的情况会在改变的流场同时也会减少螺旋桨扭矩载荷, 因此导管螺旋桨的使用寿命也会大大增加。

4 螺旋桨试验

4.1 试验平台方案

螺旋桨的水动力系数由于场地及条件限制一般很难用试验进行验证, 传统方式一般用计算数据和船舶图谱数据进行对比, 但这种情况不适用于非标状态及多工况变化状态, 本次螺旋桨所处环境及工况均为非常规状态, 因此为了验证本文所采取的 CFD 计算方法的正确性, 本文拟对某船型原螺旋桨进行试验验证, 其螺旋桨桨叶数为 3, 盘面直径为 160 mm, 盘面比为 0.8, 螺距比为 0.786, 最大厚度为 1.38 mm, 旋向为右旋, 强度满足基本要求, 其三维模型如下图 18 所示。

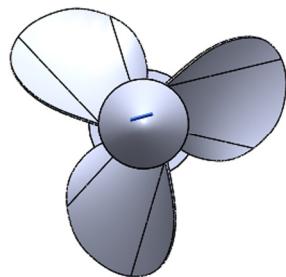


图 18 螺旋桨试验三维模型

Fig. 18 Geometric model of propeller test

现在拟用力矩平衡原理, 将螺旋桨与力矩一侧进行连接, 螺旋桨运转时将会产生与排水相反方向的推力, 通过中间铰链的连接将力传递到力矩另一侧的弹簧测力器, 通过测力计反馈的数值根据力矩计算出螺旋桨产生的推力。此试验考虑到场地及设备条件限制将模拟水域的水槽设计为长为 1.2 m, 宽为 0.6 m, 高为 0.6 m, 即长宽高分别为 $6.7D$ 、 $3.34D$ 、 $3.34D$ 。在计算机端口采用同样的计算域方式进行计算, 网格划分及计算方法均采取和本章前节所用方式相同。

4.2 试验平台搭建

本次试验搭建主场地在室内搭建，因螺旋桨旋转为电机驱动，试验搭建模块可分为电路部分和结构部分，在电路方面采取电瓶转接电源转换器，然后供给控制箱体 12 V 电压，输入电流为 12 A，控制箱通过改变电动机频率来改变电机的输出转速。在结构部分，型材采用铝合金 4040L 型材搭建，搭建按照三维模型设计，连接各部分型材，将螺旋桨和型材通过卡箍固定连接，最终搭建的试验平台方案如下图 19 所示。

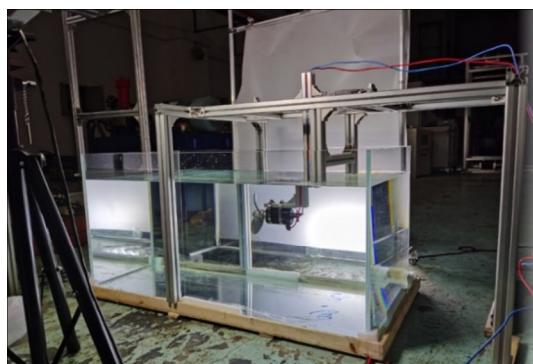


图 19 螺旋桨试验平台

Fig. 19 Propeller test assembly

4.3 试验结果分析

本次试验开始，测试了螺旋桨在 2000 r/min 时的正反转工况，记录了工况下的螺旋桨前端的水流扰动情况，其结果如图 21 所示。

由图 21 可知，螺旋桨在正转过程中扰流较为明显，流水在桨叶的轮毂形状压迫下被推向前方从而使螺旋桨获得推力。螺旋桨反转过程中相对正转推力较小，但对后方电机上方有明显的导流影像。

本节试验数据采取改变电机转速来测算不同转速下的推力情况。本次设定的电机转速为 800 r/min、1000 r/min、1500 r/min、2000 r/min，通过 12 A 直流调速器调速，得到不同转速下正转桨叶推力数值及反转桨叶推力数值如图 22 所示。

由图 21 结果可知，本次试验值和 CFD 仿真计算值基本相符，正转试验值在低转速时差别不大，在高转速时略小于计算值，在低转速情况下差别不大，高转速时体现较为明显，反转时在低转速时较实验值偏大，高转速低于试验值。这是由于在试验过程中螺旋桨重心位置与计算拉力值未能完全重合产生了偏移分力，考虑到反转时推力较小，试验

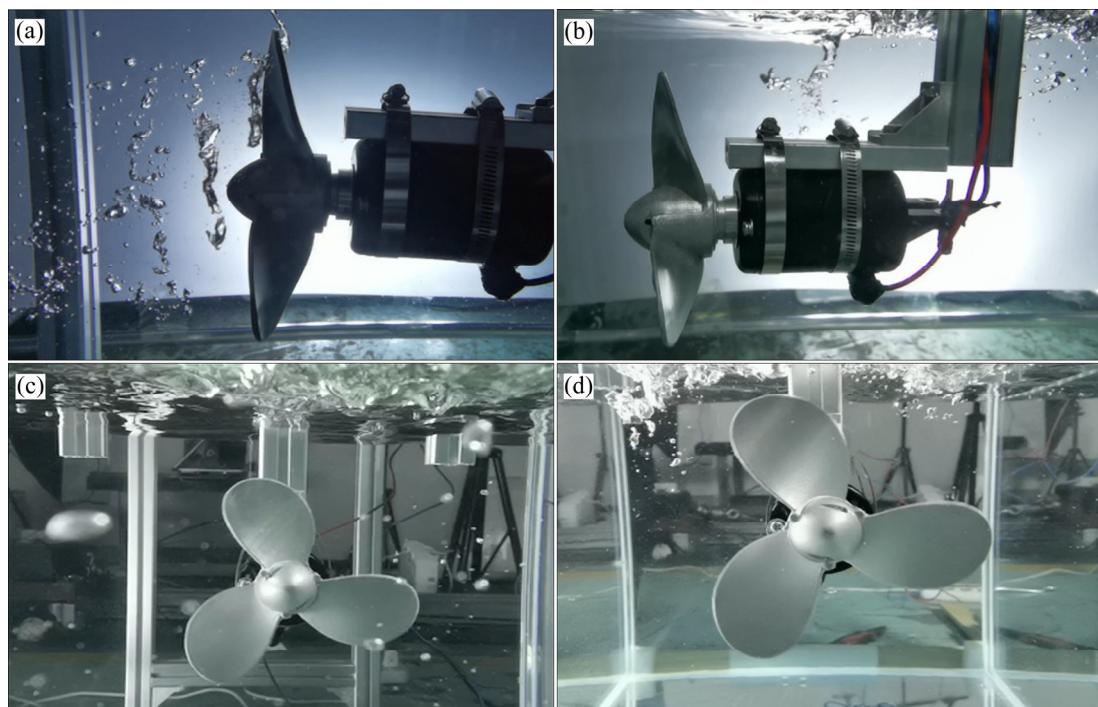


图 20 螺旋桨试水流扰动图：(a) 正转主视；(b) 反转主视；(c) 正转左视；(d) 反转左视

Fig. 20 Propeller test water flow disturbance diagram: (a) Forward view; (b) Reverse view; (c) Forward view; (d) Reverse left view

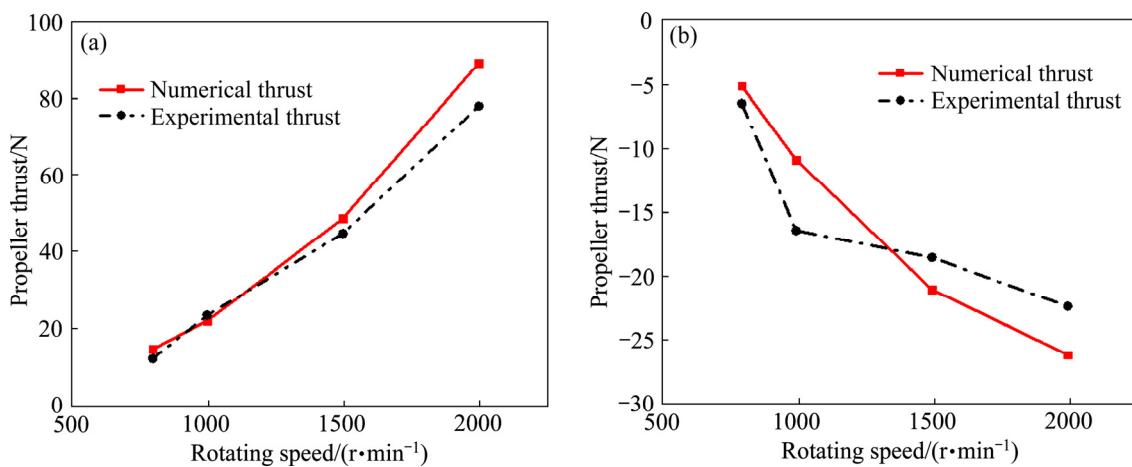


图 21 螺旋桨试验与 CFD 仿真对比: (a) 正转; (b) 反转

Fig. 21 Comparison of propeller test and CFD simulation: (a) Forward thrust; (b) Reverse thrust

场地有限难免会出现部分回流现象, 对结果准确性有一定的偏差。但本文是对螺旋桨 CFD 方法展开对比验证, 因此有一定的参考价值。

5 结论

通过研究 19A Ka-4-55 导管螺旋桨水动力性能, 获得如下结论:

1) 运用 CFD 对导管螺旋桨水动力性能进行不同进速系数的无量纲水动力系数计算, 所获得的计算数据与其标准图谱吻合。搭建了螺旋桨试验平台, 验证了该数值计算方法的可靠性。

2) 在低进速系数下, 螺旋桨推力系数会随着桨叶数增加而增加, 但到达 4 叶螺旋桨的推力系数值后减小, 呈现出最佳峰值趋势, 说明中间值螺旋桨叶数会增大导管螺旋桨推力系数; 在高进速系数下螺旋桨推力系数差别不大。

3) 螺旋桨的力矩系数随着导管螺旋桨的桨叶数的增加而增大, 对力矩有限制时应减少桨叶数。

4) 螺旋桨效率随着桨叶数的增加而减小, 在不考虑其他因素影响下降低桨叶数对螺旋桨效率有一定的提升。

5) 在斜流倾角 15°影响下, 导管螺旋桨比普通螺旋桨具有更加优秀的水动力性能, 能使桨叶页面的压力分布更加均匀, 叶背的负压值区间减少, 可以延后空泡现象的产生。

REFERENCES

- [1] 蒋训雄, 蒋伟. 深海矿产资源选冶加工研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2861–2880.
JIANG Xun-xiong, JIANG Wei, et al. Research status and prospects of deep-sea mineral resources processing and smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2861–2880.
- [2] 黄牧, 石学法, 毕东杰, 等. 深海稀土资源勘查开发研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2665–2681.
HANG Mu, SHI Xue-fa, BI Dong-jie, et al. Advances on the study of exploration and development of deep-sea rare earth[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2665–2681.
- [3] 封锡盛, 李一平, 徐会希, 等. 深海自主水下机器人发展及其在资源调查中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2746–2756.
FENG Xi-sheng, LI Yi-ping, XU Hui-xi, et al. The development of deep-sea autonomous underwater robots and its application in resource survey[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2746–2756.
- [4] 罗阳, 李战东, 陶建国, 等. 类空化效应下的水下螺旋桨推进器推力预测[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 1–11.
LUO Yang, LI Zhan-dong, TAO Jian-guo, et al. Thrust prediction of underwater blade-propeller-type thrusters under quasi-cavitation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17): 1–11.
- [5] 秦智. 水下机器人导管螺旋桨设计与优化[D]. 南昌:

- 江西理工大学, 2020: 1–2.
- QIN Zhi. Design and optimization of pipe propeller for underwater robot[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2020: 1–2.
- [6] 马艳. 导管螺旋桨的水动力性能分析与设计优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 3–4.
- MA Yan. Hydrodynamic performance analysis and design optimization of ducted propeller[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 3–4.
- [7] 张弘, 邹义, 王涛, 等. 导管参数对导管桨水动力性能的影响研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(S1): 71–75.
- ZHANG Hong, ZOU Yi, WANG Tao, et al. Investigation of influence of duct parameters on hydrodynamic performance of ducted propeller[J]. Ship Engineering, 2015, 37(S1): 71–75.
- [8] 陆军, 陈万, 张玉. 基于CFD的螺旋桨水动力性能研究[J]. 声学与电子工程, 2018(4): 53–57.
- LU Jun, CHEN Wan, ZHANG Yu. Research on propeller hydrodynamic performance based on CFD[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2018(4): 53–57.
- [9] 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, 1998: 28–34.
- HUANG Sheng. Ship propulsion energy-saving technology and special propulsion[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1998: 28–34.
- [10] STIPA L. Experiments with intubed propellers[R/OL]. UNT Digital Library. 1932. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc63603/m1/1/>
- [11] KORT L. Der neue düsenschrauben-antrieb[J]. Werft, Reederei und Hafen, 1934, 15(4): 41–43.
- [12] 王楠. 导管桨水动力性能的数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 2–5.
- WANG Nan. Numerical analysis of the hydrodynamic performance of duct propeller[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 2–5.
- [13] 李福正. 导管螺旋桨匹配性及动态性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LI Fu-zheng. Study on matching and dynamic performance of ducted propeller[D]. Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] LERBS H W. Moderately loaded propellers with finite number blades and an arbitrary distribution of circulation circulation[J]. Trans. SNAME, 1952, 60: 73–123.
- [15] KHATIB M. Sensor-based motion control for mobile robots[D]. Toulouse: Automation and Systems Analysis Laboratory, 1996: 45–53.
- [16] HESS J L, SMITH A M O. Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimentional bodies[J]. Journal of Ship Research, 1964, 8(4): 22–44.
- [17] MORINO L, KUO C C. Subsonic potential aerodynamics for complex configurations: A general theory[J]. AIAA Journal, 1974, 12(2): 191–197.
- [18] MORINO L, CHEN L T, SUCIU E O. Steady and oscillatory subsonic and supersonic aerodynamics around complex configurations[J]. AIAA Journal, 1975, 13(3): 368–374.
- [19] 苏玉民, 黄胜. 用面元法预报船舶螺旋桨的定常水动力性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(2): 1–5.
- SU Yu-min, HUANG Sheng. Prediction of hydrodynamic performance of marine propellers by surface panel method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(2): 1–5.
- [20] 谭廷寿. 螺旋桨面元法数值库塔条件的改进[J]. 船舶力学, 2000, 4(2): 12–18.
- TAN Ting-shou. Improvement of numerical Kutta condition of propeller panel method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2000, 4(2): 12–18.
- [21] 陶国君, 黄志平, 张代龙. 三维螺旋桨 CFD 数值模拟[J]. 中国水运: 下半月, 2016, 16(3): 84–85.
- TAO Guo-jun, HUANG Zhi-ping, ZHANG Dai-long. CFD numerical simulation of three-dimensional propeller[J]. China Water Transport: Second Half Month, 2016, 16(3): 84–85.
- [22] XIA H, WANG P, JIN Z, et al. Maneuverability analysis of thrust vectoring ducted propeller with deflector[J]. Ocean Engineering, 2020, 213: 107614.
- [23] 张宏伟, 王树新, 侯巍, 等. 螺旋桨三维建模方法研究[J]. 机床与液压, 2006(5): 60–62.
- ZHANG Hong-wei, WANG Shu-xin, HOU Wei, et al. Research on 3D modeling method of propeller[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2006(5): 60–62.
- [24] PARK J H, CHUNG K N, CHANG B J, et al. A study of hydraulic design of a ducted azimuth thruster[C]//ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting Collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012: 551–557.
- [25] LI C, CHEN Z X. Comparison of hydrodynamic performance of ducted propeller and ordinary propeller on trawler[J]. Advanced Materials Research, 2014, 908:

- 249–255.
- [26] 宋科, 王文全, 闫妍. 导管螺旋桨水动力学性能的影响因素[J]. 船舶工程, 2018, 11(2): 43–48.
SONG Ke, WANG Wen-quan, YAN Yan. Factors influencing the hydrodynamic performance of ducted propellers[J]. Ship Engineering, 2018, 11(2): 43–48.
- [27] 赵强. 导管螺旋桨水动力性能和船尾伴流场的CFD模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 34–53.
ZHAO Qiang. CFD simulation of performance for duct propeller and ship wake[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011: 34–53.
- [28] 郭春雨, 徐佩, 张海鹏. 冰对螺旋桨水动力性能影响的试验研究[J]. 船舶力学, 2018, 27(7): 797–806.
GUO Chun-yu, XU Pei, ZHANG Hai-peng. Experimental study on the effect of ice on the hydrodynamic performance of propeller[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018(7): 797–806.
- [29] 马娟, 赖明雁, 魏斌. 斜流中船后螺旋桨水动力数值分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(8): 31–36.
MA Juan, LAI Ming-yan, WEI Bin. Numerical analysis of hydrodynamics of propeller behind ship in oblique flow[J]. Ship Engineering, 2019, 41(8): 31–36.

Hydrodynamic characteristics of propeller of subsea mining vehicle

DAI Yu¹, ZHANG Yan-yang¹, BIAN Jia-neng¹, MA Wei-bin¹, CHEN Xi¹

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to grasp the influencing factors of the hydrodynamic performance of the ducted propeller of the submarine operating vehicle, and effectively improve the hydrodynamic performance, the 19A Ka-4-55 ducted propeller was modeled parametrically, and its hydrodynamic performance was simulated and analyzed by the CFD method. The hydrodynamic coefficients of the 19A Ka-4-55 ducted propeller at different advance speeds were obtained. The results were fitted with experimental experience values, and a test platform was built to verify the simulation, and the hydrodynamic performance of the ducted propeller under the influence of different numbers of blades and diagonal flow was analyzed. The results show that the CFD numerical simulation results are consistent with the ducted propeller test chart. In a certain range, more blades can increase thrust, but fewer blades are more efficient, and the propeller moment coefficient is proportional to the number of blades; Under the diagonal flow action, the protection and diversion effect of the duct on the propeller can reduce the propeller pressure parameters and reduce the incidence of propeller cavitation. The hydrodynamic performance of the ducted propeller is significantly better than that of the ductless propeller.

Key words: ducted propeller; CFD; flowing efficiency; number of blades; oblique flow

Foundation item: Project(51774324) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-07-20; **Accepted date:** 2021-09-03

Corresponding author: DAI Yu; Tel: +86-13755116953; E-mail: daiyu_6@aliyun.com

(编辑 何学锋)