

喷水推进器气液两相起航过程瞬态流动特性

范煜¹, 潘中永¹, 陈嘉豪²

(1. 江苏大学 国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏镇江 212013; 2. 中国华电集团有限公司 衢州乌溪江分公司, 浙江衢州 324009)

摘要: [目的]为了研究喷水推进器在未完全浸没状态下起航过程中的气液两相流动特性, [方法]基于 Free Surface 两相流模型, 对喷水推进器气液两相起航过程进行数值模拟。[结果]研究结果表明: 在起航过程中, 喷水推进器内排气速率先快后慢, 起航初期进水流道下部弯管出现体积较大的气团, 进水流道出流面的涡核数量多于纯水工况, 气相的堆积导致进水流道流量较大, 流动不稳定; 叶轮与导叶内气相堆积现象严重, 叶轮进口处流动分离明显, 叶片载荷差相较于纯水工况大幅减小。随着气相逐渐排出, 进水流道出流面的涡核结构和叶轮载荷逐渐趋近于纯水工况。由此可知, 在气液两相起航过程中, 喷水推进器的叶轮流动稳定性和做功能力明显下降。[结论]研究结果可为喷水推进器在气液两相工况下的优化设计提供参考依据。

关键词: 喷水推进器; 起航; 气液两相; 内部流动; 数值模拟

中图分类号: U664.34 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2025.09.09

Transient Flow Characteristics of Water Jet Propulsion During Gas-Liquid Two-Phase Set Sail Process

FAN Yu¹, PAN Zhongyong¹, CHEN Jiahao²

(1. Nation Research Center of Pump, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Quzhou Wuxijiang Branch, China Huadian Group Co., Ltd., Quzhou 324009, Zhejiang, China)

Abstract: [Purpose] To study the gas-liquid two-phase flow characteristics of a water jet propulsion system during the initial stage of operation when it is not fully submerged. [Method] Based on the Free Surface two-phase flow model, numerical simulations are conducted on the gas-liquid two-phase start-up process of the water jet propulsion system. [Result] The research results show that during the start-up process, the exhaust gas velocity of the water jet propulsion system is fast at first and then slows down. A large volume of gas accumulates in the lower curved pipe of the intake flow channel at the initial stage of start-up. The number of vortex cores at the outflow surface of the intake flow channel is greater than that in the pure water condition. The accumulation of gas leads to a larger vorticity in the intake flow channel and unstable flow. The accumulation of gas in the impeller and guide vanes is severe, and the flow separation at the impeller inlet is obvious. The blade load difference is significantly reduced compared to the pure water condition. As the gas is gradually discharged, the vortex core structure at the outflow surface of the intake flow channel and the impeller load gradually approach the pure water condition. It can be concluded that during the gas-liquid two-phase start-up process, the flow stability and power generation capacity of the impeller in a water jet propulsion system are significantly reduced. [Conclusion] The research results can provide a reference basis for the optimization design of water jet propulsion systems under gas-liquid two-phase conditions.

Key words: water jet propulsion; set sail; gas-liquid two-phase; interior flow field; numerical simulation

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51879120)

作者简介: 范煜 (1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 流体机械内部流动。E-mail: fanyu_99718@163.com

0 引言

喷水推进器在20世纪已逐渐应用于各类商用船舶和军舰, 因此对其开展研究对我国船舶工业的发展具有重要意义^[1-2]。喷水推进器结构特殊, 内部流动复杂, 运行过程中出现的涡流与流动分离现象会降低其性能。为此, 国内外学者广泛采用数值模拟和实验分析的方法研究喷水推进器的内部流动。HUANG等^[3]通过粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry, PIV) 和数值模拟相结合的方法, 发现系泊条件下喷水推进器进水流道内的水力损失随着流量的增大而增大, 且在管道下壁面附近出现回流区域和回流涡; LUO等^[4]研究发现, 非均匀进流会导致进水流道与导叶内能量损失增大, 且在导叶后缘附近存在流动分离现象; XU等^[5]研究发现, 喷水推进器在反向射流条件下叶轮平面周围的静压最低, 叶轮容易发生空化; HUANG等^[6]分析了不同航速下喷水推进器内部的压力脉动, 发现叶轮内主频为叶轮旋转频率, 进水流道中主频分量由涡流变化产生, 导叶中主频分量则由叶轮和导叶的相互作用引起; 潘中永等^[7]研究了不同气相参数下喷水推进器的瞬态流动, 发现在相同航速下, 叶轮受到的径向力在两相流动中显著大于单相, 且径向力的变化与航速、进口含气量及气泡直径呈正相关。

在水力机械的启动过渡过程中, 转速、进口压力等参数的变化会引起复杂的瞬态流动, 从而加剧内部流场的不稳定性。GROVER等^[8]研究叶片泵瞬态启动过程时发现, 流体惯性的增加会提高瞬时扬程, 而叶轮转动惯量的增加会降低瞬时扬程; ZOU等^[9]研究双吸离心泵启动过程时发现, 径向力达到稳定的时间滞后于叶轮; FU等^[10]研究了轴流泵启动过程的瞬态特性, 发现当泵转速达到额定转速时, 瞬时冲击扬程达到最大值, 叶轮流道内流动分离严重; LONG等^[11]分析多级离心泵闭阀启动过程中泵轴的瞬态变形和振动速度, 结果表明当启动完成时, 泵轴振动速度与最大变形量均达到最大值; CHAI等^[12]研究离心泵作透平的气液两相起动过程, 发现气相会引发较强的涡流, 起动过程中叶片载荷波动剧烈, 产生周期性不平衡径向力; 张富毅等^[13]研究喷水推机器在起航过程中的空化流动, 发现无量纲空穴面积随转速的增加而增大; 在达到相同转速时, 启动时间越长, 空穴面积越小。

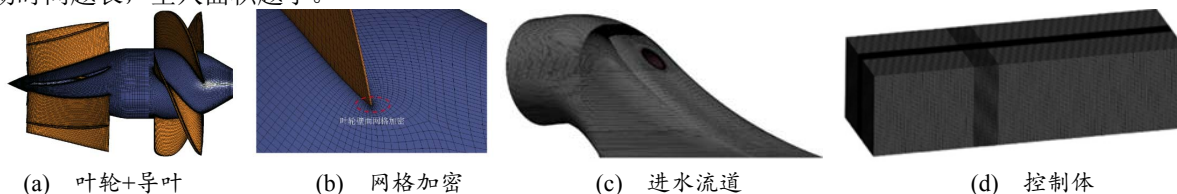


图2 计算域网格

Fig. 2 Computational Domain Grid

目前, 国内外学者针对喷水推进器气液两相流动的相关研究较少。鉴于此, 本文对喷水推进器在未完全浸没工况下进行数值模拟分析, 旨在探究起航工况下喷水推进器内部流场的差异, 并深入分析造成此现象的原因, 为喷水推进器在起航加速阶段的稳定运行提供理论依据。

1 数值计算方法

1.1 计算模型

以一台轴流式喷水推进器为研究对象, 额定流量 $Q=4\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, 扬程为30 m, 额定转速 $n=2\ 300\ \text{r/min}$, 比转速 $n_s=550$, 几何参数见表1。

表1 喷水推进器的几何参数

Tab. 1 Geometrical Parameters of Water Jet Propulsion

喷水推进泵		进水流道	
叶轮叶片数	4	斜坡曲率半径/mm	1 890
导叶叶片数	7	弯管曲率半径/mm	400
叶轮外径/mm	404	出水口直径/mm	405
叶顶间隙/mm	0.5	进水口宽度/mm	415

喷水推进器的进水流道、叶轮、导叶及喷嘴通过Creo三维软件建模, 为准确模拟航行过程的船底水域, 在进水流道下方添加控制体, 见图1, 其中 D 为叶轮直径, $D=405\ \text{mm}$ 。

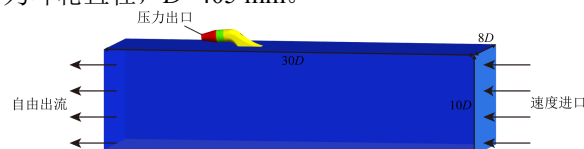


图1 喷水推进器计算域

Fig. 1 Calculation Domain of Water Jet Propulsion

1.2 网格划分

采用TurboGrid软件对叶轮和导叶进行结构化网格划分 (见图2), 并对叶轮叶顶和近壁面处进行局部加密, 其余过流部件则采用ICEM软件进行结构化网格划分, 驱动轴采用双O剖分法处理网格, 同样对边界层进行加密。为了满足湍流模型对第1层网格高度的要求, 调整网格高度, 保证叶轮 y^+ 控制在40以内。

采用5种不同网格数量方案进行无关性验证,见表2。对于网格方案4,喷水推进器的推力和出口流量相比方案5分别变化了0.09%和0.01%,变化量小于1%,说明网格数量已满足要求。综合考虑计算机性能,保证准确捕捉内部流动细节,选取方案4为最终网格划分方案。

表2 网格无关性验证

Tab. 2 Verification of Grid-Independence

网格方案	网格数量	推力/N	出口流量/(m ³ /h)
1	5 325 092	13 618.6	3 898.38
2	6 138 992	13 748.4	3 887.44
3	6 603 430	13 535.7	3 908.24
4	7 303 840	13 867.3	3 943.12
5	7 849 788	13 855.1	3 943.69

1.3 数值方法

两相流模型分为均相流模型与非均相流模型,其中均相流模型中的Free Surface模型支持自适应网格技术,可以根据流动变化自动调整网格,确保模拟的准确性;该模型还考虑了表面张力的影响,重点关注液体与气体之间的交互作用和自由表面的动态变化,适用于模拟具有明显、非固定的界面自由表面流动^[14]。因此,选择Free Surface模型来模拟喷水推进器在未完全浸没状态下的起航过程,以捕捉气液界面的变化。

控制方程为

$$\frac{\partial(r_a \rho_a)}{\partial t} + \frac{\partial(r_a \rho_a u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_a 和 r_a 分别为 α 相的密度和体积分数; u_i 为空间中每个点假设的单个速度场,每相都有一个连续性方程; t 为时间; x_i 为坐标分量, i 取值1、2、3。

动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho_m g_i + \frac{\partial \tau_{m,ji}}{\partial x_j} \\ \rho_m = \sum_{\alpha=1}^N r_a \rho_a \\ \tau_{m,ji} = \mu_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ \mu_m = \sum_{\alpha=1}^N r_a \mu_a \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_m 为混合物密度; u_j 为速度分量; P 为压力; g_i 为体积力的分量; $\tau_{m,ji}$ 为混合应力张量; x_j 为坐标分量, j 取值1、2、3; μ_m 为混合流体速度。

此外,体积连续性约束,即各相体积分数之和必须为1,表达式为

$$\sum_{\alpha=1}^N r_a = 1 \quad (3)$$

1.4 边界条件设置

本文以喷水推进器在10.0 s内起航加速至5 kn的工作为例,采用SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。对于边界条件的设置,整体流场参考压力设为0 atm,叶轮设为旋转域,其余均设为静止域,固体壁面均设为无滑移壁面。非定常计算的时间步长设置为0.000 1 s,每个时间步长内迭代50次,确保计算结果收敛。喷水推进器出口压力设置为1 atm (1 atm=101 325 Pa),船底出口设置为自由出流,进口设置为速度进口:

$$v_{in} = \begin{cases} v_s (y/\delta)^{\frac{1}{N}} & y \leq \delta \\ v_s & y > \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta_N = Cl_w Re^{-\frac{1}{6}} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: v_s 为航速, m/s; y 为距离船底的距离, m; δ 为船底边界层厚度, m; l_w 为船舶到进水流道进口的长度, m; C 为常数, $C=0.27$; Re 为相关雷诺数; N 为参数,由雷诺数确定, $N=9$ 。

为模拟喷水推进器的起航加速过程,叶轮转速的变化规律根据一般经验公式和统计规律得到^[15]。本文的喷水推进器转速采用直线加速规律,见式(6)。

$$N = \begin{cases} N_{max} (t/T_{total}) & t < T_{total} \\ N_{max} & t \geq T_{total} \end{cases} \quad (6)$$

式中: N_{max} 为喷水推进器额定转速, r/min; T_{total} 为起航加速过程所用时间, s。

本文喷水推进器起航加速过程中的航速变化规律由转速变化规律确定^[16-17],其表达式为

$$v_s = \begin{cases} v_k (t/T_{total}) & t < T_{total} \\ v_k & t \geq T_{total} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_k 为起航阶段的喷水推进器航速, m/s。

对于喷水推进器浸没高度液面的设置为以叶轮原点为中心,液面高度设置以0.2倍叶轮半径(0.2R)为例,模型中初始两相分布见图3,0.2R高度液面以下为液体,以上为气体。

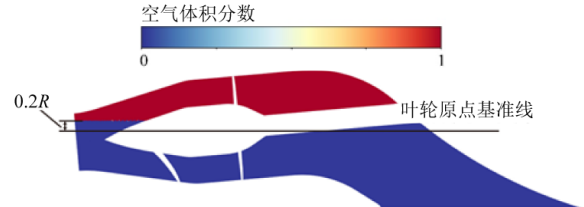


图3 喷水推进器初始状态

Fig. 3 Initial State of Water Jet Propulsion

1.5 推力试验

为验证数值模拟的可靠性,本文采用静水试验台对喷水推进器进行推力试验。由于试验在静水环境中完成,喷水推进器无法通过改变航速进行测试,因此通过改变叶轮转速来评估其推力性能,试验台

搭建见图4。将试验结果与数值模拟结果进行对比, 见图5。



图4 试验台搭建

Fig. 4 Testbed Setup

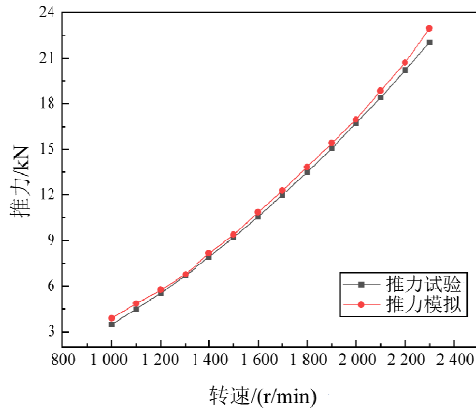


图5 试验与数值模拟对比

Fig. 5 Comparison Between Experimental and Numerical Simulation

从图4和图5可知: 数值模拟结果与试验结果较为接近, 在设计转速下误差为4.1%, 说明数值模拟方法可用于研究喷水推进器的内部流动。

2 计算结果及分析

2.1 气体排出过程分析

图6为喷水推进器气相体积随时间的变化。由图

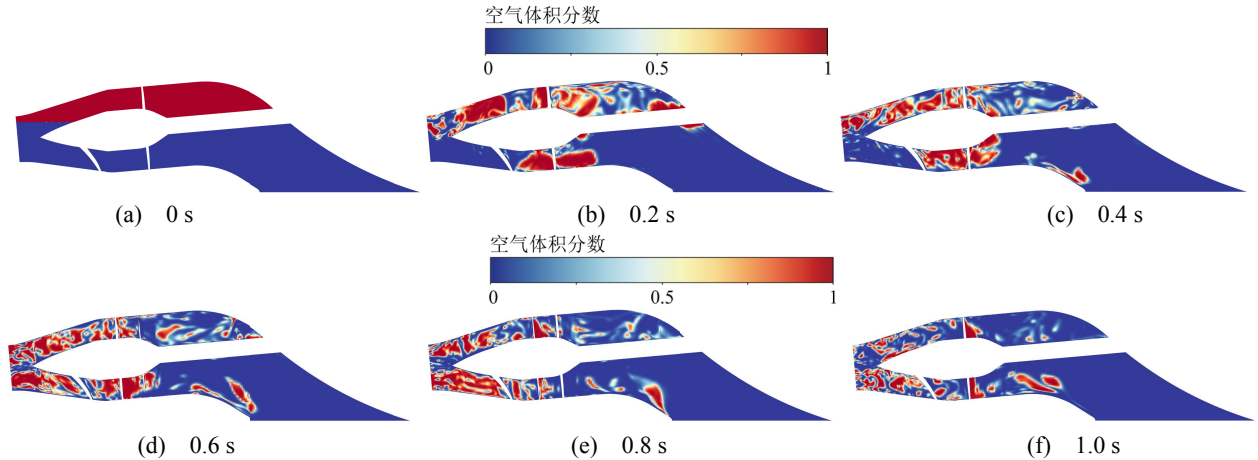


图7 推进器起航过程轴向中截面气液分布示意图

Fig. 7 Schematic Diagram of Gas-Liquid Distribution in the Axial Mid-Section During Water Jet Propulsion Set Sail

6可知: 喷水推进器整体排气速度在起航初始0.1 s前较大, 随后速度下降; 在0.45 s~1.20 s时气体体积排出较为平缓, 1.20 s后排气速度逐渐减慢。

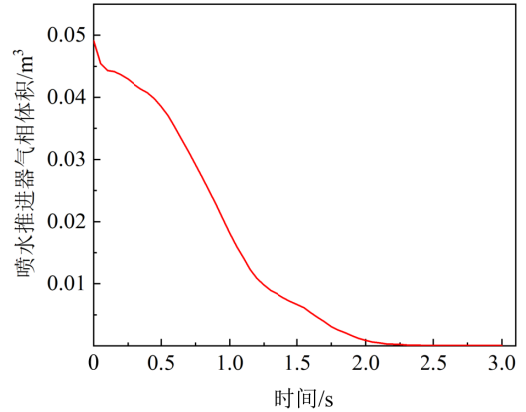


图6 喷水推进器气相体积随时间的变化

Fig. 6 Water Jet Propulsion Gas Phase Volume over Time

图7为推进器起航过程轴向中截面气液分布示意图。由图7可知: 在起航过程中, 随着叶轮转速和航速的增加, 喷水推进器内的气体逐渐减少; 在起航初期的0.2 s时, 叶轮和转轴的旋转促使气液界面上方的气体进入液相, 形成气液混合状态, 而喷嘴与导叶大部分区域仅上部存在气体。随着起航过程推进, 叶轮转速与航速升高, 气体逐渐被吸入导叶和喷嘴区域。但由于叶轮转速较低, 加之气液混合物的存在, 叶轮做功能力减弱, 进而影响了排气能力。在0.8 s后, 叶轮转速增加使得做功能力增强, 同时进水流道入口速度加快, 气体被快速挤压后排出, 逐渐以气液混合物的形式存在于流道内。2.6 s时, 气体被完全排出, 喷水推进器进入正常起航加速状态, 此时叶轮转速为598 r/min, 航速为1.3 kn。

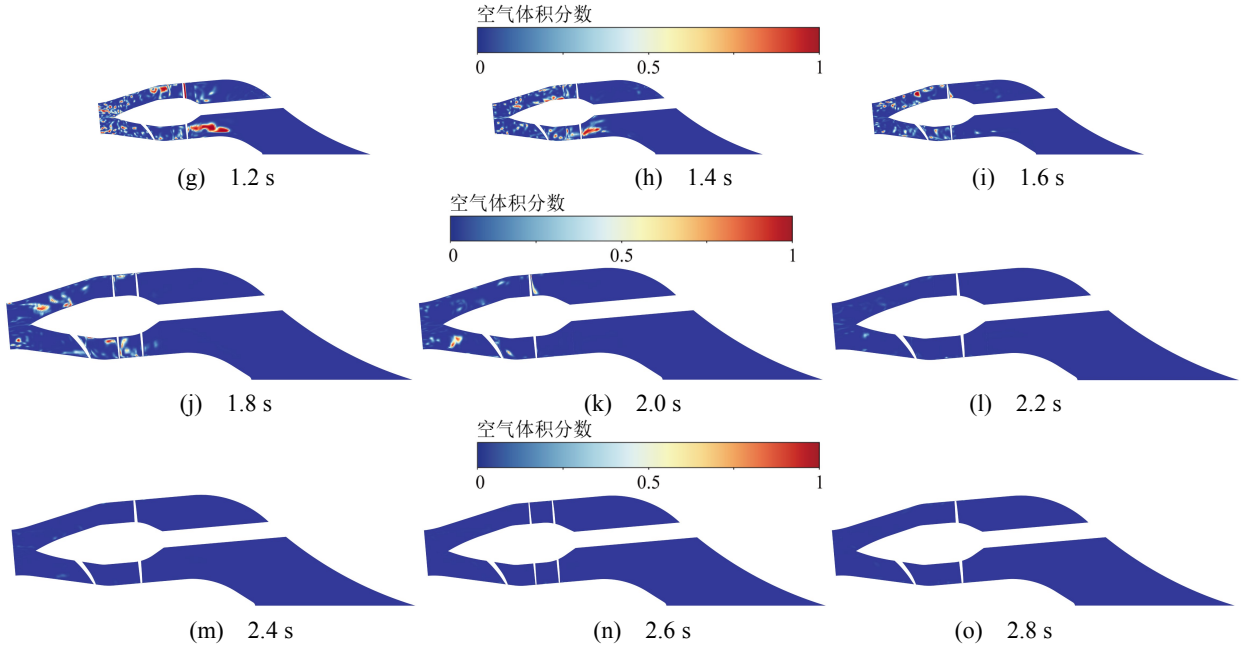


图7 推进器起航过程轴向中截面气液分布示意图（续）

Fig. 7 Schematic Diagram of Gas-Liquid Distribution in the Axial Mid-Section During Water Jet Propulsion Set Sail (Continued)

2.2 进水流道两相流特性

图8为进水流道中截面的轴向涡量矢量云图，其中 ω_z 为涡量矢量。由图8可知：在纯水流动初期（0.4 s和0.8 s），进水流道内流动状态稳定，高涡量区域

较少，流体流动一致性良好。气液两相流动工况下的0.4 s时，进水流道高涡量区域增多，流线紊乱，弯管与斜坡处产生回流。0.8 s时，涡量和各处回流面积均减少。

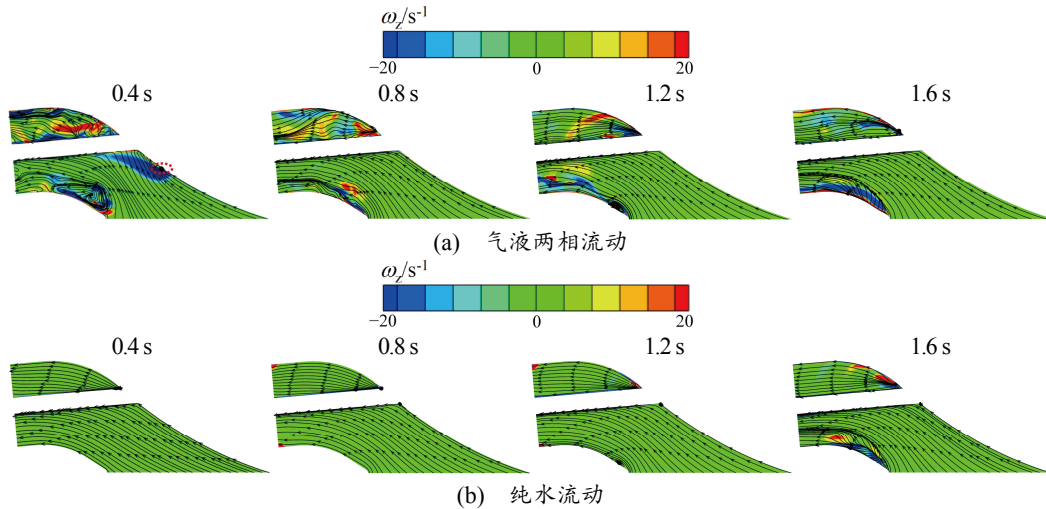


图8 起航工况进水流道中截面涡量分布

Fig. 8 Cross-Sectional Vortex Distribution in the Inlet Flow Channel at Launching Conditions

图9为关键时间点进水流道内气相体积分数0.5以上的空间分布云图。由图9可知：0.05 s时，大部分气体聚集在气液界面上方，仅有少量气体被转轴带入气液界面下方，形成气液混合物。随着喷水推进器运行至0.40 s时，整体气相体积分数出现显著下降，但下部斜坡弯管区域出现明显的气团堆积现象。这主要是由于低速航行时进流速度较小，液相裹挟气相出流的能力减弱，同时受弯管斜坡曲率影响，

易发生流动分离。随着航速的提升，进水流道内的气相含量逐渐减少，原本堆积在斜坡弯管处的气团开始向出口方向移动。1.6 s时，进水流道内气体大幅减少，仅微量气体附着于流道壁面。图10为起航过程进水流道气相体积分数变化情况。结合图10可以发现，在喷水推进器运行至1.73 s时，进水流道内的气体被完全排空。

图8结合图9分析可知，这是由于大量气体的存

在降低了流动能力, 下部弯管处出现回流; 随着气相含量的减少, 流线才逐渐平稳。1.20 s时, 2个工况弯管下部均因流速增加和曲率影响出现流动分离, 低速流体堆积形成回流涡。1.60 s时, 由图7可知中

截面中仅存在少量气体, 气液两相流动工况仅在气相存在区域与纯水流动工况有较大差异, 其余位置均相差较小。综上所述, 气体的聚集导致进水流动内涡量增大, 进而引发流动不稳定。

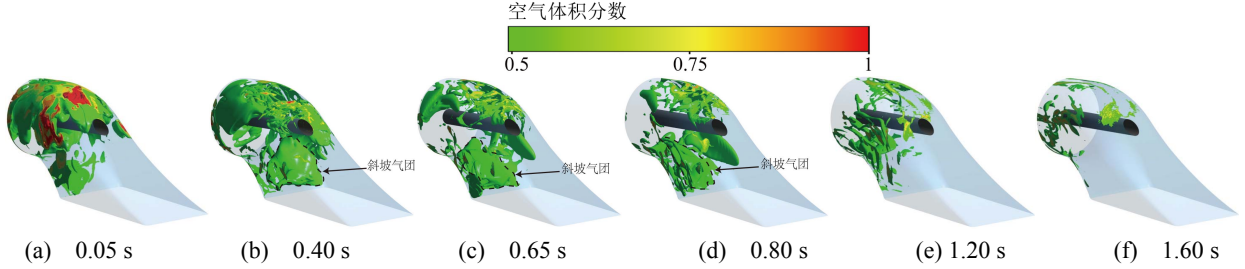


图9 进水流动内气相体积分布
Fig. 9 Distribution of Gas Phase Volume in Inlet Channel

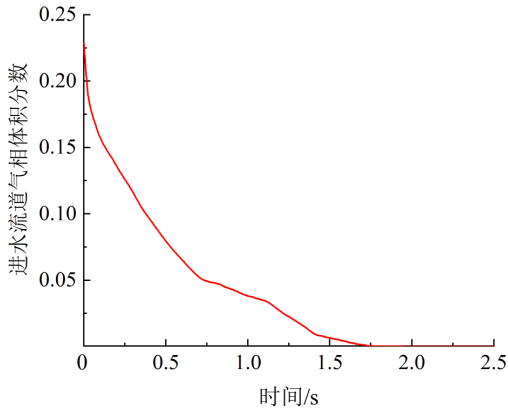


图10 起航过程进水流动气相体积分数变化
Fig. 10 Variation of Gas Phase Volume Fraction in Inlet Duct During Launching Process

2.3 进水流动出流面涡核分析

为了分析气液两相起航过程进水流动出流面流动结构的变化, 采用正则化螺旋度系数 H_n 定量表示, 计算公式为

$$H_n = \frac{\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}}{|\mathbf{v}| |\boldsymbol{\omega}|} \quad (8)$$

式中: H_n 为正则化螺旋度系数, 取值范围为 $[-1, 1]$; $\mathbf{v}$ 为速度矢量, m/s; $\boldsymbol{\omega}$ 为涡量矢量。

为了量化起航阶段进水流动出流面涡核数量, 计算 $H_n=1$ 的正向涡核与 $H_n=-1$ 的逆向涡核占出流面

面积的比值, 见图11。由图11可知: 整体涡核面积随着起航时间的延长而增加; 在气液两相起航工况下, 各时间点出流面涡旋面积均大于纯水起航工况; 但随着进水流动内气体的排出, 气体对出流面流体流动的影响减弱, 气液两相工况下的涡旋面积与纯水工况接近, 差值逐渐缩小。

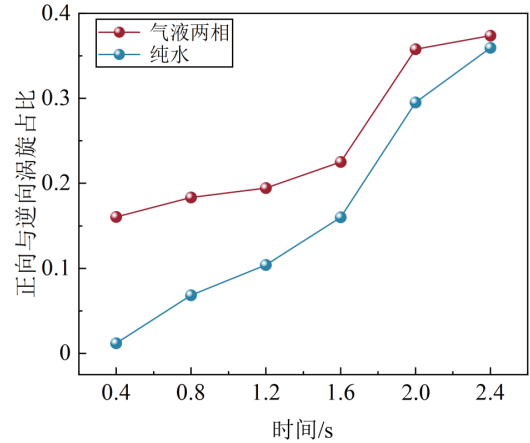


图11 $H_n=-1$ 与 $H_n=1$ 之和占进水流动出流面的比例
Fig. 11 Ratio of the Sum of $H_n=-1$ and $H_n=1$ to the Outflow Surface of the Inlet Runner

图12为各起航时刻气液两相工况与纯水工况的进水流动出流面正则螺旋度 H_n 云图, 图12(a)~图12(d)为气液两相工况, 图12(e)~图12(h)为纯水工况。

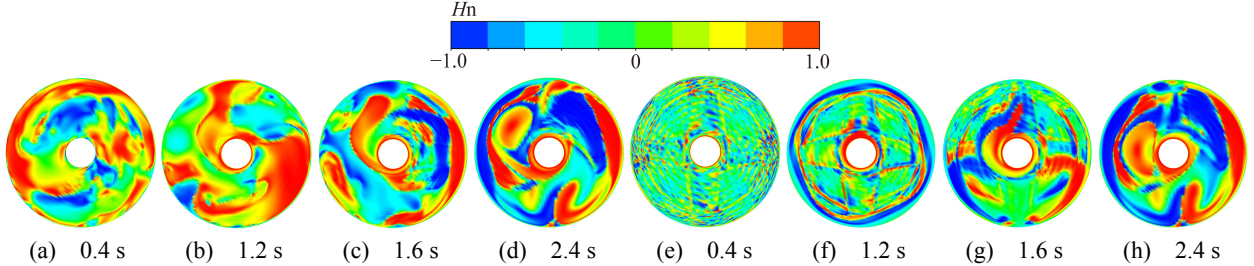


图12 进水流动出流面 H_n 云图
Fig. 12 Cloud View of H_n on the Outflow Surface of the Influent Flow Channel

0.4 s时,由于叶轮转速较低,气液两相工况下进水流道内存在大量气液混合物,气体的存在加剧了出流面的旋涡运动,正向涡与反向涡交替出现。1.2 s和1.6 s时,气液两相工况下的进水流道处于快速排气阶段,出流面气液运动更加剧烈,出现大面积的正向涡和反向涡,且与纯水工况下的涡核状态明显不同。2.4 s时,进水流道气体排空后,气液两相工况下的出流面涡旋结构才与纯水工况趋近。由此可知,气液两相工况下,气相的存在会降低进水流道出流面质量,对叶轮的进流质量产生较大影响。

2.4 叶轮与导叶内气相体积变化

为了进一步研究气液两相起航状态下喷水推进器内部气相的具体分布位置,选择不同时刻叶轮与导叶流道内0.1 span、0.5 span以及0.9 span等3种不同叶高截面上的气相分布情况。由图13可知,0.40 s

时,气相主要分布在叶轮进口处,叶轮各流道几乎充满气相,而导叶内的气相含量相对较小。这是由于此时叶轮转速较低,导叶中流体受上游叶轮不均匀出流的影响较小。0.8 s时,叶轮转速和航速提高,液相速度提升,液相裹挟气相的能力增强,气相堵塞流道的现象得到缓解。气相主要分布在叶片吸力面,且越靠近轮毂,气相分布越多。1.6 s时,叶轮转速进一步提高,叶轮进流面与出流面的压差增大,叶轮内气相向出口方向扩散,气团分布减少,仅在靠近轮毂的叶片吸力面存在少量气相堆积;在导叶中,各流道内仅存在均匀分布的气液混合物。2.4 s时,叶轮持续做功,液相速度增大,气相不断被排出,流道内仅存少量气液混合物,喷水推进器逐渐进入正常起航工作状态。

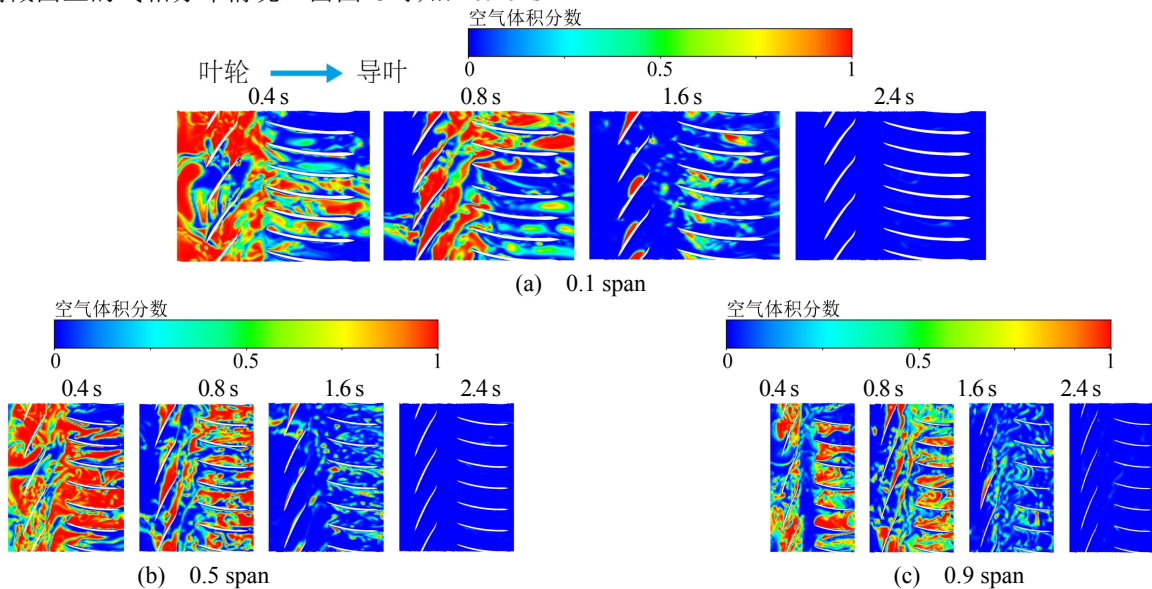


图 13 气液两相起航工况各时刻叶轮与导叶内气相分布

Fig. 13 Gas-Liquid Two-Phase Set Sail Condition at Each Moment of the Impeller and Guide Vane Gas Phase Distribution

2.5 叶轮叶片表面载荷分布

图14为叶片表面中间流线载荷分布。由图14可知:在气液两相起航工况初期,叶片表面载荷差相比纯水起航工况小得多,且叶片做功能力远低于纯水起航工况。随着起航时间的延长,叶片表面压力载荷逐渐增大,叶轮做功能力逐渐恢复。在气液两相起航工况初期,气体的存在会降低流体在叶片表

面的摩擦阻力,从而导致叶片表面的平均压力下降,削弱了叶轮有效做功能力。1.6 s时,气体对叶片表面的载荷分布影响减弱,吸力面与压力面的压力差值相比纯水起航工况下更为接近,叶轮做功能力逐渐恢复。当叶片表面几乎没有气体存在时,气液两相起航工况与纯水起航工况叶片表面载荷分布基本相同,叶轮进入正常工作状态。

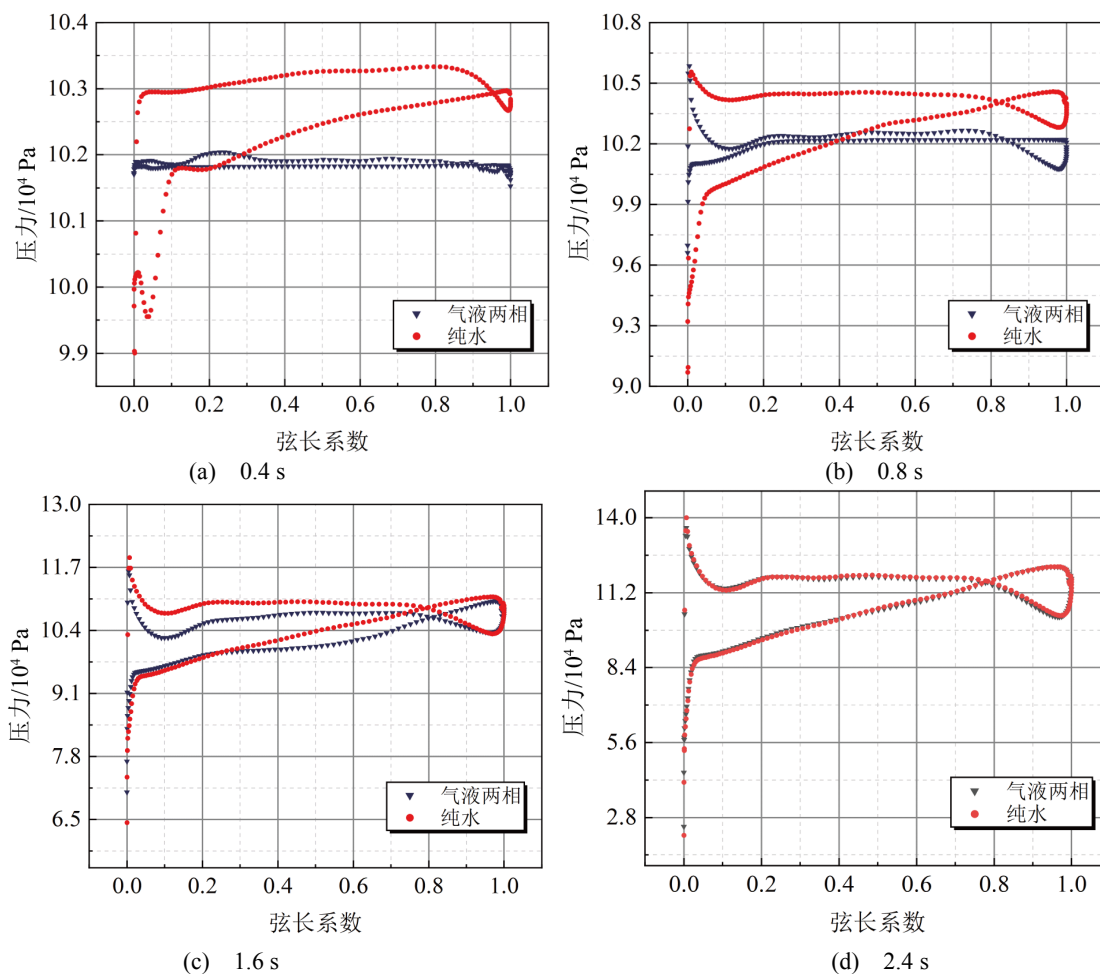


图 14 气液两相与纯水起航叶片表面中间流线载荷分布

Fig. 14 Intermediate Streamline Load Distribution on the Surface of Air-Liquid Two-Phase Versus Pure Water Setting Sail Blades

3 结论

本文基于Free Surface两相流模型对喷水推进器在系泊时未完全浸没状态下的起航加速过程进行数值模拟, 得到以下结论。

1) 喷水推进器内气相整体随着起航时间的延长而减少, 2.6 s时气相全部被排出, 此时叶轮转速为598 r/min, 航速为1.3 kn。在起航初期, 进水流道下部存在体积较大的气团, 导致涡量增多; 随着进流速度增加, 液相裹挟气相出流的能力增强, 进水流道内气相逐渐排出, 并于1.73 s时排空。进水流道出流面在起航初始流动较为混乱, 与纯水工况相比正反向涡核较多, 出流不均匀; 随着起航时间的延长, 气相排出后, 出流面涡核结构与纯水工况一致。

2) 起航初期, 气相大量存在于叶轮进口, 叶轮与导叶流道内气相堆积严重, 形成气团, 产生较为明显的流动分离现象, 且越靠近叶轮轮毂处气相聚集区域越大。随着起航时间的延长, 叶轮流道内气相逐渐消失, 气相主要集中于叶片吸力面。2.4 s时, 叶轮与导叶内仅存少量气液混合物, 流动趋于稳定。

3) 在气液两相起航工况初期的0.4 s时, 叶片表面载荷差相比纯水起航工况下小得多, 叶轮做功能力较差; 随着起航时间的延长, 载荷差趋于纯水起航工况, 叶轮逐渐进入正常工作状态。

参考文献:

- [1] 刘承江, 王永生, 丁江明. 喷水推进研究综述[J]. 船舶工程, 2006, 28(4): 49-52.
LIU C J, WANG Y S, DING J M. Overview of Study of Waterjet Propulsion[J]. Ship Engineering, 2006, 28(4): 49-52.
- [2] 王永生. 喷水推进和泵喷推进的概念: 共性、特性及区别[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 1-9.
WANG Y S. Concepts of Waterjet Propulsion and Pumpjet Propulsion: Their Common Characteristics, Special Characteristics and Differences[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(5): 1-9.
- [3] HUANG R F, ZHANG R Z, WANG Y W, et al. Experimental and Numerical Investigations into Flow

- Features in an Intake Duct for the Waterjet Propulsion under Mooring Conditions[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(5): 826-843.
- [4] LUO X W, YE W X, HUANG R F, et al. Numerical Investigations of the Energy Performance and Pressure Fluctuations for a Waterjet Pump in a Non-Uniform Inflow[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 1042-1052.
- [5] XU H L, ZOU Z J. Numerical Simulation of the Flow in a Waterjet Intake under Different Motion Conditions[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2022, 27(3): 356-364.
- [6] HUANG R F, YE W X, DAI Y X, et al. Investigations into the Unsteady Internal Flow Characteristics for a Waterjet Propulsion System at Different Cruising Speeds[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 203: 107218.
- [7] 潘中永, 张哲轩, 刘月伟. 来流含气下喷水推进器瞬态流动特性分析[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(1): 24-30.
- PAN Z Y, ZHANG Z X, LIU Y W. Analysis of Transient Flow Characteristics of Water Jet Propulsion with Air in the Inlet Flow[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(1): 24-30.
- [8] GROVER R B, KORANNE S M. Analysis of Pump Start-Up Transients[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1981, 67(1): 137-141.
- [9] ZOU Z C, WANG F J, YAO Z F, et al. Impeller Radial Force Evolution in a Large Double-Suction Centrifugal Pump During Startup at the Shut-Off Condition[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 310: 410-417.
- [10] FU S F, ZHENG Y, KAN K, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Transient Characteristics in an Axial Flow Pump During Start-up[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 1879-1887.
- [11] LONG Y, LIN B, FANG J, et al. Research on the Pump Shaft Stability Analysis of Multistage Centrifugal Pump during Closed-Valve Start-Up Process[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 186.
- [12] CHAI B D, YANG J H, WANG X H. Force Characteristics of Centrifugal Pump as Turbine During Start-up Process Under Gas-Liquid Two-Phase Conditions[J]. *Actuators*, 2022, 11(12): 370.
- [13] 张富毅, 鲁航, 陈泰然, 等. 轴流式喷水推进器启动过程的瞬态特性[J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1592-1603.
- ZHANG F Y, LU H, CHEN T R, et al. Transient Characteristics of Start-Up Process of an Axial Flow Water-Jet Propeller[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1592-1603.
- [14] KLAIJ C M, HOEKSTRA M, VAZ G. Design, Analysis and Verification of a Volume-of-Fluid Model with Interface-Capturing Scheme[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 170: 324-340.
- [15] CHALGHOUM I, ELAOU D S, AKROUT M, et al. Transient Behavior of a Centrifugal Pump During Starting Period[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 109: 82-89.
- [16] WU X F, LI M H, LIU H L, et al. Performance of Water-Jet Pump Under Acceleration[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, 13: 794-803.
- [17] LI K, LI W H. Study on the Acceleration Process of Water-Jet Propulsion Ship[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 263: 756-761.

应用 VCR 技术、安装于 LNG 船, “全球首款” 发动机交付

韩华发动机 (Hanwha Engine) 已成功研制并生产出全球首款应用可变压缩比 (Variable Compression Ratio, VCR) 技术的用于液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 运输船的下一代船用发动机, 为全球造船业的环保转型进程注入了新动力。

该型发动机是中船集团旗下瑞士主机商 WinGD 历经十余年技术验证开发的 VCR 技术首次应用于 LNG 运输船的实例, 预计将安装于三星重工正在建造的卡塔尔项目 LNG 运输船上, 该项目是全球规模最大的 LNG 运输项目之一。

VCR 技术是一种根据航行条件实时调节发动机压缩比, 从而提升燃油效率并减少二氧化碳排放的下一代环保技术。其最大优势在于, 可将 LNG 燃料使用过程中未完全燃烧的甲烷排放 (即 “甲烷逃逸”) 减少 30% 至 50%。

(来源: 龙 de 船人)