

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.017

船舶喷水推进器进水流道的参数化分析*

杨福芹,王学志,姜敬伟,何 燕*
(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:针对喷水推进中,不同进水流道管径和不同转速对进水流道流场及速度产生影响的问题,建立了三维模型,采用计算流体力学(CFD)技术,分别对某喷水推进器进水流道长度的1倍、4倍、8倍和管径的1倍、1.6倍、2倍,以“船+进水流道+喷水推进器”的流场进行了仿真计算分析,得到不同参数下该喷水推进器进水流道出口流场的不均匀度速度云图、叶片吸力面汽蚀云图及喷口速度云图。研究表明:进水流道长度对出口流场的不均匀度、叶片的汽蚀、喷口速度影响较小,但进水流道管径对出口流场的不均匀度、叶片的汽蚀、喷口速度影响较大;进水流道的优化改进应考虑进水流道管径,以提高其工况适应能力。

关键词:喷水推进器;进水流道;不均匀度;汽蚀;喷口速度;计算流体力学

中图分类号:TH69;U664

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1212-04

Parametric analysis of the inlet duct in the marine waterjet propulsor

YANG Fu-qin, WANG Xue-zhi, JIANG Jing-wei, HE Yan

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problem of how the waterjet propulsor affects the flow fields and velocities of the inlet ducts with different lengths and pipe diameters, the 3D models of the waterjet propulsors were established. The computational fluid mechanics (CFD) technology was used to simulate the flow fields of "boat + inlet channel + waterjet propulsor" with 1 time, 4times, 8times of the lengths and 1.6times, 2times of the diameters repectively. Then the velocity nephograms of non-uniformity of the outlet flow field in the inlet duct, the cavitation nephograms of the blade suction surface and the velocity nephograms of the nozzle were obtained. The results indicate that the non-uniformity of the outlet flow field, blade cavitation and nozzle velocity is affected little by the length of the inlet duct. However, it is affected more by the diameters of the inlet duct. To improve the adaptability of the inlet duct in working conditions, its diameter should be taken into consideration for its optimization.

Key words: the waterjet propulsor; inlet duct; unevenness; cavitation; spout speed; computational fluid mechanics (CFD)

0 引 言

近年来,随着计算机技术与计算流体力学的发展,业界对船舶喷水推进器的研究快速发展起来。喷水推进器具有效率高、空化性能好、静音效果好、变工况能力强等优点,在多个领域获得了广泛应用^[1-3]。

进水流道是船舶喷水推进器的一个重要结构,其主要功能是将水流传送给喷水推进泵。喷水推进器工

作时,在进水流道内会损失约7%~9%的轴功率,并且其与船体之间的相互作用对推进效率的影响甚至可以达到20%以上,而这一相互作用主要发生在进水口附近。因此,进水流道性能将直接影响到整个喷水推进器的效率,进水流道的能量利用率将直接影响着整个喷水推进系统效率^[4-7]。所以对进水流道进行研究很有必要。

丁聪^[8]对轴流式喷水推进泵进水流道的性能进

收稿日期:2019-03-28

基金项目:山东省重点研发计划项目(2018GGX103015)

作者简介:杨福芹(1972-),女,山东烟台人,博士,副教授,硕士生导师。主要从事机械传动设计理论及方法方面的研究。E-mail:y_f_q@163.com

通信联系人:何燕,女,教授,博士生导师。E-mail:heyansd@163.com

行了评估;李臣^[9]对喷水推进泵进水流道设计方法进行了研究;许慧丽^[10]研究了进流方向对流道内流场的影响;王永生等^[11]研究了格栅对喷水推进器进水流道流动和船舶推进性能的影响。

本文将以某双级轴流喷水推进器为研究对象,利用计算流体力学(CFD),研究进水流道长度和管径对流场及速度的影响。

1 控制方程

喷水推进器内的实际流场是复杂的粘性不可压湍流流动。本文基于 RANS 方程,对喷水推进器内流场进行分析。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho \mu_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \mu_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \left[(u + u_i) \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \right]}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

式中: x_i —坐标系的 i 方向分量; u_i —流体质点在 i 方向的平均速度分量; u_j —流体质点在 j 方向的平均速度分量; P —流体的平均压力; ρ —流体质量密度; u —动力黏度系数。

标准 $k - \varepsilon$ 模型:

$$\frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}{\partial x_j} + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (3)$$

式中: k —湍流动能; u_i —湍流粘度; G_k — k 的产生项; S_k —湍流能源项; σ_k — k 对应普朗特(Prandtl)数,一般取 $\sigma_k = 1$ 。

2 喷水推进器的三维模型

船舶喷水推进器主要由喷水推进泵、进水流道、喷口等部件组成,如图 1 所示。



图 1 喷水推进器

本文以某公司二级轴流泵喷水推进器为参考,在改进进水流道结构情况下,建立 5 组不同参数下的喷水推进器模型,喷水推进器几何尺寸表如表 1 所示(计算流场设置为“船+进水流道+喷水推进器”)。

表 1 喷水推进器几何尺寸表

编号	叶轮直径/mm	进水流道长度/mm	进水流道管径/mm
HC01	320	2 000	348
HC02	320	4 000	348
HC03	320	8 000	348
HC04	320	4 000	522
HC05	320	4 000	696

本文对表 1 所示的 5 种不同尺寸的喷水推进器,分别采用计算流体力学(CFD)方法,分析其“船+进水流道+喷水推进器”流场。本文对喷水推进器整个计算域采用四面体网格,对叶轮在额定转速工况下的喷口速度进行网格无关性验证。叶轮网格至少需要 1 000 000,才能保证计算结果的准确性。因此,笔者选取网格单元数为 1 200 000,管道外壁部分设边界层,叶轮部位进行加密处理。

边界条件采用出口为压力出口,出口压力为环境压力,设置额定转速为 1 450 r/min,进流速度为 1.29 m/s,采用稳态 MRF 设置叶片、导叶片和流域的相对转动关系,来处理旋转叶片与流域的数据交换问题。设喷水推进器流道的壁面为无滑移壁面,采用有限体积离散控制方程和湍流方程,通过计算得到相应的数据,其中,收敛精度为 10^{-4} 。

3 计算结果及分析

3.1 流道出口不均匀度

由于进水流道出口的出流速度分布越不均匀,就越容易增加喷水推进泵做功的脉动。这不仅会使喷水推进器的耗功增大、效率下降,而且会引起强烈振动、剧烈噪声和较大汽蚀。可见进水流道出口的均匀程度是影响喷水推进器效率的一个重要指标。进水流道的设计目的是使出口横截面速度大小均匀,速度方向尽量与轴向平行。

通过仿真分析得出:相同叶轮直径和进水流道管径下,HC01、HC02 和 HC03 这 3 种不同长度的进水流道的出流速度分布层数较多,因此,对应的流道出口的均匀度均比较差,但相互之间的变化差别较小,这表明当喷水推进器的叶轮直径和进水流道管径一定的情况下,进水流道长度对出流均匀度影响不大;HC02、HC04、HC05 这 3 种管径的进水流道的出流速度分布

层数逐渐减少,表明当喷水推进器的叶轮直径和进水通道长度一定的情况下,进水通道管径越大,出流均匀度越好,进水通道管径对出流均匀度影响较大。

3.2 叶片汽蚀的对比

叶片汽蚀是一种非常有害的现象,空泡的产生和发展会改变喷水推进器通道内的速度分布,导致喷口速度下降、喷水推进器效率降低,引起机器剧烈振动。叶片汽蚀发展到一定程度,甚至可以使喷水推进器完全不能正常工作。叶片汽蚀部位一般在轴流泵叶片背部,因此,可以通过叶片吸力面的负压区范围大小,显示汽蚀的情况。

仿真得到不同参数进水通道下的喷水推进器轴流泵叶片吸力面的压力云图,如图(2,3)所示。

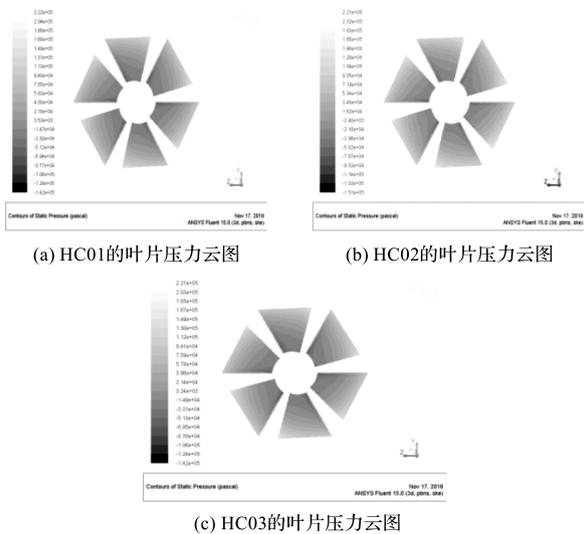


图 2 进水通道不同长度下叶片吸力面压力云图

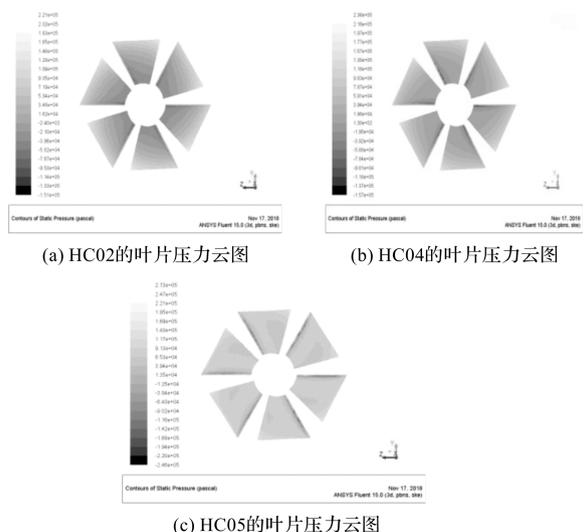


图 3 进水通道不同管径下叶片吸力面压力云图

从图(2,3)可以看出:叶片吸力面的负压范围主要集中在叶片的边缘部位。由表 1 和图 2 可以看出:

相同叶轮直径和进水通道管径下,在 HC01、HC02 和 HC03 这 3 种不同进水通道长度情况下,叶片吸力面的负压范围均较大,因此,对应的喷水推进器工作时有可能产生较严重的汽蚀现象。但图 2 中各云图之间的变化差别较小,这表明当喷水推进器的叶轮直径和进水通道管径一定时,进水通道长度的变化对汽蚀影响较小。

从图 3 还可以看出:HC02、HC04、HC05 这 3 种不同进水通道管径情况下,叶片吸力面边缘部位的负压范围逐渐减小,表明在喷水推进器叶轮直径和进水通道长度保持不变时,进水通道管径越大,喷水推进器的汽蚀越小,进水通道管径的改变对汽蚀的影响越大。

3.3 喷口速度对比

喷水推进器的喷口将水流的旋转运动变成轴线运动,并通过渐缩通道把水流压能转化为动能。理想状态时,喷口出流应完全没有旋转,只有轴向高速流部分^[12],所以喷口的速度分布与喷水推进器推力紧密相关。

以编号 HC02 时的喷口速度(记为 v)为基准单位,在其他参数相同的情况下,利用软件计算出编号 HC01-HC05 进水通道的喷口平均速度,如表 2 所示。

表 2 喷口速度计算表

编号	喷口速度
HC01	0.965 1 v
HC02	1.000 0 v
HC03	1.007 5 v
HC04	1.037 2 v
HC05	1.271 1 v

HC01-HC05 的喷口速度云图如图(4,5)所示。

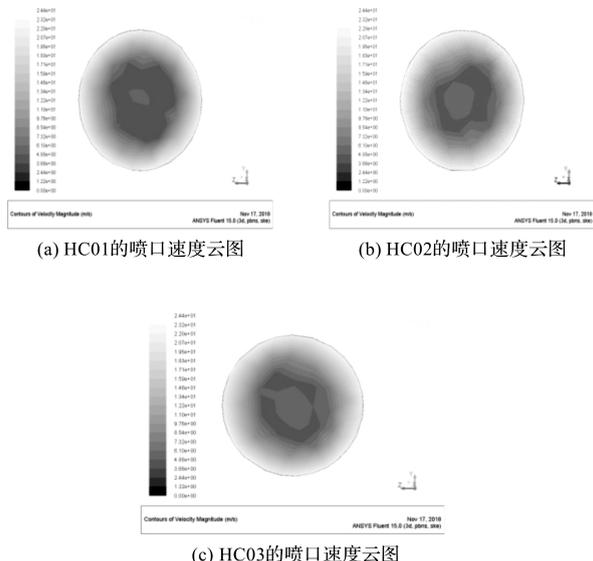


图 4 进水通道不同长度下喷口速度分部云图

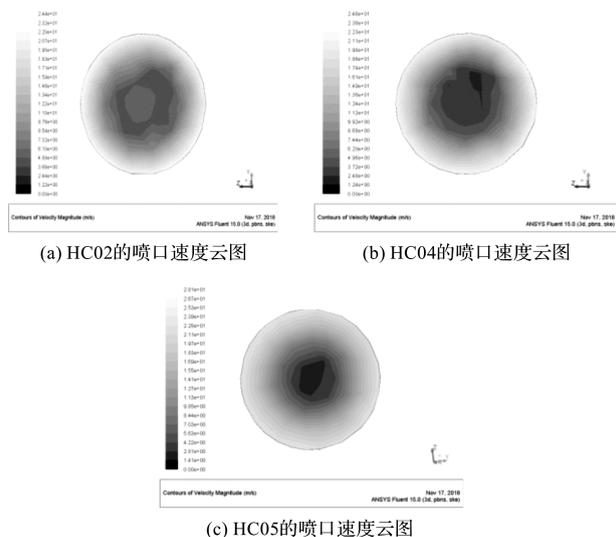


图 5 进水流道不同管径下喷口速度分部云图

从图 4 和表 2 可以看出:在额定工况下,当喷水推进器其他几何尺寸保持不变时,随着进水流道长度的增大,喷水推进器喷口速度逐渐变大,增大幅度较小,喷口出流的旋转流场差别不大,表明对推力的影响差别不大。

从图 5 还可以看出:随着进水流道管径的增大,喷水推进器的喷口速度逐渐变大,增大幅度较大,喷口出流的旋转流场逐渐减小,趋于均匀,表明对推力影响较大。因此,进水流道管径的变化对喷口速度的影响比进水流道长度的变化显著。

4 结束语

基于 RANS 方程,本文仿真分析了不同参数下喷水推进器进水流道的流场,分析得出以下结论:

(1) 喷水推进器进水流道在不同长度和管径下,其流场特征和喷水性能会随之发生改变,其中流道长度影响较小,流道管径影响较大;

(2) 在额定工况下,随着进水流道长度的增大,进水流道的出流不均匀度基本不变;随着进水流道管径的增大,进水流道的出流不均匀度变小;

(3) 随着进水流道长度的增大,叶片吸力面的负压范围变化不大,汽蚀部分基本不变;随着进水流道管径的增大,叶片吸力面的负压范围变小,汽蚀部分逐渐变小;

(4) 随着进水流道长度的增大,喷口平均速度逐渐增大,但增大幅度较小,喷口出流的旋转流场差别不

大;进水流道的管径变化对喷口速度有显著影响,管径越大,喷口平均速度越大,喷口出流的旋转流场逐渐减小,趋于均匀。

因此,进水流道的优化改进应适当考虑进水流道管径的影响,以提高其工况适应能力。

参考文献 (References):

- [1] PARHA W, JANGA J, CHUNB H, et al. Numerical flow and performance analysis of waterjet propulsion system[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(14):1740-1761.
- [2] 戴原星,张志远,刘建国,等. 喷水推进三体船阻力与自航数值模拟研究[J]. *船舶*, 2019, 30(1):105-111.
- [3] 于乐. 无人艇的喷水推进与航行控制设计研究[D]. 浙江:浙江大学船舶与海洋学院, 2019.
- [4] BONAIUTI D, ZANGENEH M, AARTOJARVI R, et al. Parametric design of a waterjet pump by means of inverse design, CFD calculations and experimental analyses[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(3):1-15.
- [5] OH H W, YOON E S, KIM K S, et al. A practical approach to the hydraulic design and performance analysis of a mixed-flow pump for marine waterjet propulsion[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2003, 217(6):659-664.
- [6] KEEGAN D, MARTIN D. Use of RANS for waterjet analysis of a high-speed sealift concept vessel[C]. First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim: SMP, 2009.
- [7] BULTEN N, VERBEEK R. Design of optimal inlet duct geometry based on vessel operational profile[C]. Proceedings of the Seventh International Conference on Fast Sea Transportation Conference, Ischia: University of Naples, 2003.
- [8] 丁聪,原维杰. 轴流式喷水推进泵进水流道的设计与性能评估[J]. *科学技术创新*, 2018(8):176-177.
- [9] 李臣,汤明. 喷水推进泵进水流道设计方法的研究[J]. *科学技术创新*, 2017(29):31-32.
- [10] 许慧丽,邹建. 喷水推进器进流方向对进流场内流场的影响数值研究[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2018, 33(2):181-187.
- [11] 王绍增,王永生,靳栓宝,等. 格栅对喷水推进器进水流道流动和船舶推进性能影响[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(14):164-169.
- [12] 杨琼方,王永生,张志宏,等. 叶片数对喷水推进器性能影响的计算流体动力学分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(6):222-228.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

杨福芹,王学志,姜敬伟,等. 船舶喷水推进器进水流道的参数化分析[J]. *机电工程*, 2019, 36(11):1212-1215.

YANG Fu-qin, WANG Xue-zhi, JIANG Jing-wei, et al. Parametric analysis of the inlet duct in the marine waterjet propulsor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(11):1212-1215.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>