

喷水推进装置进水干扰特性数值模拟分析

刘 浩, 吴如新, 庄家钦
(镇江经济技术开发区水利站, 江苏 镇江 212000)

摘要: 基于雷诺时均 N-S 方程和 SST 湍流模型, 采用 CFD 技术对喷水推进装置管路系统开展数值模拟研究, 分析不同流量和机组布置间距下喷水推进装置的进水流动特性。研究表明: 相同机组间距下, 随着流量的减小, 流速逐渐降低, 相邻机组之间流管逐渐收束, 相互影响减小, 深度干扰系数先减小后增大, 宽度和面积干扰系数逐渐减小; 相同流量工况下, 随着 2 台机组之间的间距不断变大, 流管之间的相互影响逐渐降低, 深度干扰系数变化逐渐减小, 变化幅度较小, 宽度和面积干扰系数都增大; 在同样的机组布置间距下, 随着流量的减小, 当间距 $L=2D$ 时, 机组的干扰系数变化幅度变小, 说明 2 台机组之间的相互干扰作用降低。为保证不易发生抢水现象并保证机组安全稳定的运行要求, 推荐采用机组布置间距 $L=2D$ 。

关键词: 喷水推进装置; 管路系统; 流管特性; 水力性能; 数值模拟

中图分类号: TV131.66 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2025)03-0053-0006

Numerical simulation and analysis on inlet flow interference characteristics of water jet propulsion device

LIU Hao, WU Ruxin, ZHAUNG Jiaqin

(Zhenjiang Economic and Technological Development Zone Water Conservancy Station, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Based on the Reynolds averaged Navier-Stokes equation and SST turbulence model, CFD technology was used to conduct numerical simulation research on the pipeline system of the water jet propulsion device, and to analyze the inlet flow characteristics of the water jet propulsion device under different flow rates and unit layout distances. The research results show that under the same unit spacing, as the flow rate decreases, the flow velocity gradually decreases, the flow tubes between adjacent units gradually converge, the mutual influence decreases, the depth interference coefficient first decreases and then increases, and the width and area interference coefficients gradually decrease; Under the same flow conditions, as the distance between the two units increases, the mutual influence between the flow pipes gradually decreases, the depth interference coefficient changes gradually, and the amplitude of the change is small. The width and area interference coefficients both increase; Under the same unit layout spacing, as the flow rate decreases, when the spacing $L=2D$, the variation amplitude of the interference coefficient of the units decreases, indicating that the mutual interference between the two units is reduced. To ensure that water grabbing is not likely to occur and to meet the requirements of safe and stable operation of the unit, it is recommended to use a unit layout spacing of $L=2D$.

Key words: water jet propulsion device; pipeline system; flow tube characteristics; hydraulic performance; numerical simulation

收稿日期: 2024-10-11

作者简介: 刘浩(1996—), 男, 硕士, 主要从事节约用水管理研究工作。E-mail: 965033584@qq.com

喷水推进装置是一种特殊的推进装置,一般由进水口、进水流道、喷水推进泵、喷嘴、操纵机构及其附属装置组成^[1-2]。喷水推进装置是通过将水流高速喷出产生的反作用力进行推进,将水流从船底引入,通过推进泵进行加速喷出,用动量变化获得推力。基于喷水推进装置特殊的工作原理,将直接提供动力的推进泵装于船体内,由此叶轮能得到很好的保护,且不易产生振动。相比于螺旋桨装置,喷水推进装置具有抗空化空蚀性能更好、机动性和操作便捷优越性好、适应不同变化运行工况能力强等优点^[3-6]。

针对喷水推进装置,国内外学者开展了大量的研究工作。数值模拟方面,孙存楼等^[7]研究了CFD在船舶喷水推进器优化设计与性能分析中的应用,利用CFD对喷水推进泵的流动特性进行分析,发现喷水推进泵设计过程中的不足并提出了优化改进方案,证明了CFD方法分析流动特性比传统理论方法更高效。这表明可以借助CFD仿真对喷水推进泵不同的设计方案进行性能预测,进而对比分析出最优方案。罗灿等^[8-9]基于CFX软件,通过对导叶式混流泵喷水推进泵装置展开数值模拟研究,得到装置的全流场数据,一方面分析流道内过水部件水力损失的比例构成,另一方面对推进泵水力性能、轴向力和内部流动特性进行分析。实验预报方面,刘承江等^[10-12]研究了喷水推进船快速性预报中船体与喷水推进器相互作用机理,借助于计算流体力学方法研究船与泵相互作用对喷水推进器推进性能的影响。Duccio Bonaiuti等^[13]借助于实验和CFD通过逆向设计的方法对整个装置进行参数化设计。

目前,对喷水推进装置的研究主要集中于喷水推进装置本身以及泵桨问题^[14-15]。本文主要采用数值模拟计算方法,分析2台喷水推进装置同时运行时的流管干扰性,不仅为实船布置提供依据,还进一步拓展了喷水推进理论相关研究。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型及控制参数

基于UG9.0三维建模软件,构建了喷水推进装置及水体计算域,计算域包括管路系统及船底水体。受船体边界层的影响,流速沿壁面由零增加到航速。根据相关文献^[16],计算域的长、宽、高分别为 $30D$ 、 $10D$ 、 $8D$ (其中 D 为进水流道出口直径),计算域如图1所示。

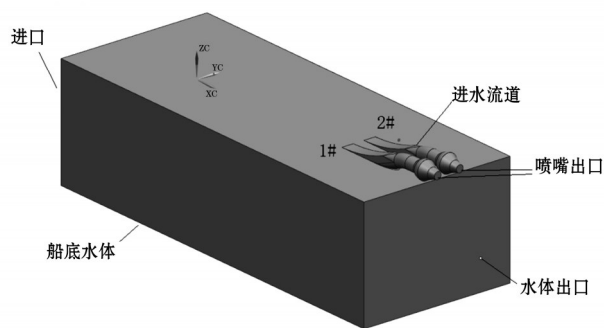


图1 计算域示意

1.2 数值模拟及边界条件

基于雷诺时均N-S控制方程和SST湍流模型,其控制方程包括连续性方程和动量守恒方程,计算式为

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

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中: u_i 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量; p 为压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; v 为水的运动黏性系数, v_i 为紊动黏性系数。

将水体进口作为整个计算域的进口,进口边界条件设置速度进口,取值为 8 m/s ;将水体出口作为整个计算域的出口,设为自由出流条件,参考压力为标准大气压;喷嘴出口设置为质量流量出口,设置流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$,记为 Q 。忽略液面和空气之间的热交换和热传导作用,对液面采取刚盖假定,自由表面设为对称边界条件;计算区域的固体边界均设为壁面边界条件,固体壁面处采取标准壁面函数处理,设为无滑移边界条件(x 、 y 、 z 方向上的速度分量均为0);采用一阶迎风格式,收敛精度为 1×10^{-4} 。

1.3 网格无关性分析

在ICEM中采用结构化网格分别对水体以及喷水推进装置进行网格划分,其中变化剧烈等局部网格加密。相关研究结果表明,网格数量直接会影响数值计算结果的准确性。为此剖分了7组网格进行网格无关性分析,网格数分别为 1.06×10^6 个、 1.62×10^6 个、 2.04×10^6 个、 2.61×10^6 个、 3.32×10^6 个、 3.82×10^6 个、 4.05×10^6 个。将管路系统水力损失作为网格无关性分析的特征参数计算总水力损失,计算式为

$$\Delta h = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \quad (3)$$

式中: Δh 为总水力损失,m; P_{in} 为管路系统进口处总压强,kPa; P_{out} 为喷嘴出口处总压强,kPa; ρ 为水的密

度,取 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

图2为网格划分示意图,图3显示的是不同网格数量时管路系统水力损失变化趋势。当网格数量超过 2.61×10^6 时,管路系统水力损失无明显变化,这表明在该网格数量级下,计算结果已趋于稳定,因此本文采用该网格开展数值模拟计算及分析。

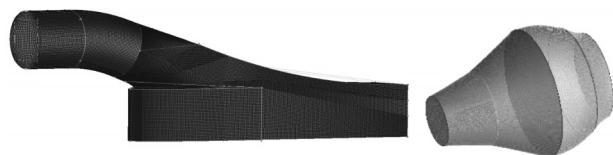


图2 网格划分示意

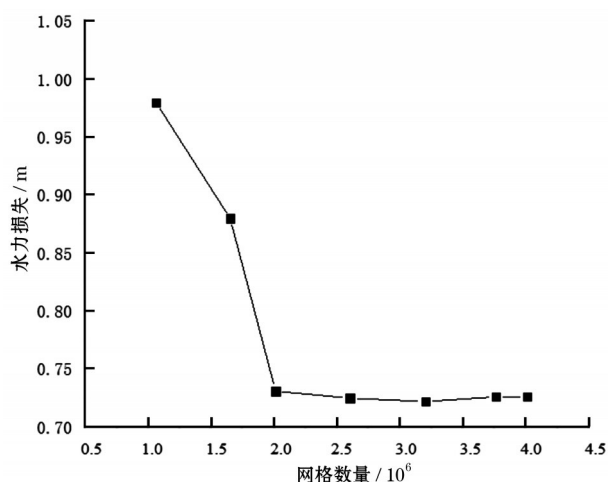


图3 不同网格方案时水力损失对比

2 研究方案设计

为研究机组布置间距对流管的影响,在不同流量工况下对不同间距的机组分布进行研究。通过控制机组间距 B 来改变机组的布置形式,同时保持机组与水体边壁距离 L 不变,在此基础上设定3组机组间距 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$,其中 D 为装置叶轮直径。分别设置单泵流量为 $0.5Q$ 、 Q 、 $1.5Q$,从而探究不同流量工况下,不同机组布置间距对喷水推进装置流管特性的影响。图4为机组布置示意,各方案参数如表1所示。

3 分析参数选取

为更好地分析喷水推进装置管路系统的流动特性,现引入流管干扰系数 s ,针对流管进水面几何特性变化进行分析。根据 ITTC 所推荐的试验及 CFD 的测试范围,选定进口速度剖面作为流管的计

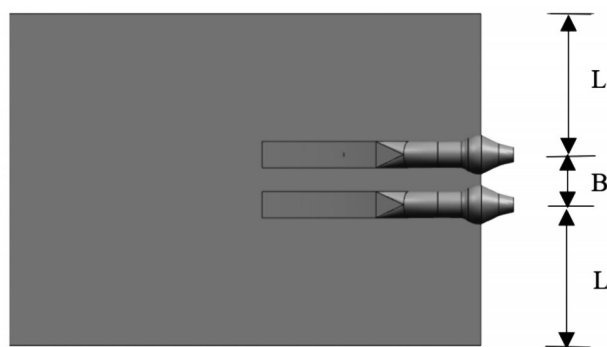


图4 机组布置示意

算断面。记流管深度为 h ,流管宽度为 W ,流管面积为 A ,分别计算出流管宽度、深度及面积的干扰系数 sh 、 sW 、 sA ,计算式分别为

$$sh = \frac{h_j}{2h_i} \quad (4)$$

$$sW = \frac{W_j}{2W_i} \quad (5)$$

$$sA = \frac{A_j}{2A_i} \quad (6)$$

式中: h_i 、 W_i 、 A_i 分别为单台机组运行时流管的深度、宽度及面积; h_j 、 W_j 、 A_j 为两台机组运行时机组流管的总深度、总宽度、总面积。

为进一步研究各方案对喷水推进装置水力损失和装置效率产生的影响,计算出设计工况下各方案进水流道的水力损失,计算式为

$$\Delta h = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \quad (7)$$

式中: Δh 为进水流道的水力损失, m ; P_{in} 为进水流道进口处压强, kPa ; P_{out} 为喷嘴处压强, kPa ; ρ 为水的密度,取 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

为了研究喷水推进装置的内流场性质,选取喷嘴出口断面为特征断面,计算出断面上的轴向流速分布均匀度和速度加权平均角。为评价各断面上的轴向速度分布均匀程度可推算出轴向速度分布均匀度,计算式为

$$V_{au} = \left[1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ai}/V_a - 1)^2}{n}} \right] \times 100\% \quad (8)$$

式中: V_{au} 为进水流道出口断面轴向速度分布均匀度; V_{ai} 为喷嘴出口断面各网格节点上的轴向速度; V_a 为喷嘴出口断面平均轴向速度; n 为节点的数目。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^m V_{ai} \left[90^\circ - \arctan \frac{V_{li}}{V_{ai}} \right]}{\sum_{i=1}^m V_{ai}} \quad (9)$$

表1 各方案主要参数

类别	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8	方案9
流量 Q	$1.5Q$	$1.5Q$	$1.5Q$	Q	Q	Q	$0.5Q$	$0.5Q$	$0.5Q$
间距 B	$1.5D$	$2.0D$	$2.5D$	$1.5D$	$2.0D$	$2.5D$	$1.5D$	$2.0D$	$2.5D$

式中: θ 为喷嘴出口断面速度加权平均角; $V_{\text{出}}$ 为喷嘴出口断面各计算单元的横向速度。

4 研究结果分析

4.1 间距对流管特性的影响

在相同流量工况下,随着间距的增大,流管之间的相互影响作用逐渐减弱,流管进流面积逐渐变小。方案6时2台机组的流管进流面明显分开,到方案7至方案9时,已经彻底分开,并逐渐减小,说明几乎不相互影响。同时对不同方案下的流管干

扰系数进行计算,可以看出在相同流量工况下,随着机组布置间距的增加,深度干扰系数 s_h 变化逐渐减小,变化幅度较小;宽度干扰系数 s_w 逐渐增大,说明随着机组布置间距的增大,流管之间的相互影响逐渐减小;面积干扰系数 s_A 逐渐增大,该系数趋近于1说明两机组之间的抢水问题几乎得到解决,随着机组布置间距的增大,该系数逐渐增大,在方案6时达到最大为0.993,说明此时流管之间的抢水问题基本得到解决。相同流量下流管干扰系数见图5。

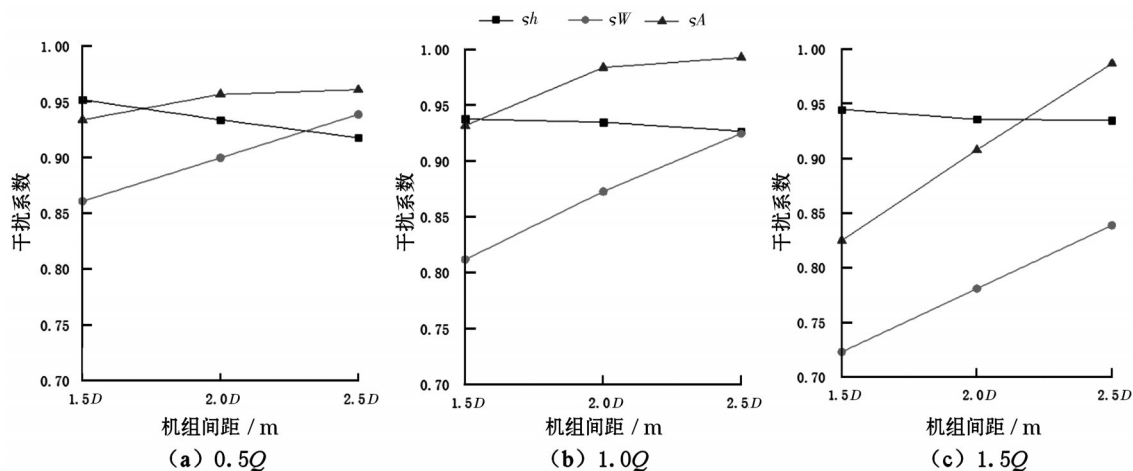


图5 相同流量下流管干扰系数

各方案主要水力性能参数计算结果见表2,可以看出各方案的速度加权平均角变化很小,随着机组布置间距 L 的不断扩大,水力损失逐渐减小。当间距 $L=2D$ 时,水力损失基本不再随着流量的减小而减小,说明了机组之间的抢水问题随着 L 的增大,影响逐渐降低,当 $L=2D$ 时其水力损失趋于稳定。对于相同流量工况下的方案,随着机组布置间距的变大,流速分布均匀度变化趋势一致,都是先变大,当 $L=2D$ 时达到最大,然后再变小,最大值为方案8时达到了96.73%。

4.2 流量对流管特性的影响

随着流量减小,流管进流面积大小逐渐减小,形状从半椭圆逐渐分为2个小的不规则椭圆,当机

表2 各方案主要水力性能参数计算结果

方案编号	流速分布均匀度/%	速度加权平均角/(°)	水力损失/m
方案1	95.840	78.187	0.742
方案2	96.410	78.185	0.736
方案3	94.250	78.179	0.721
方案4	95.840	78.187	0.735
方案5	96.570	78.186	0.726
方案6	94.300	78.181	0.719
方案7	96.510	78.188	0.736
方案8	96.730	78.187	0.721
方案9	96.010	78.181	0.718

组间距为 $2.5D$ 时,进流面形状变化更为明显,流管分开越迅速,相互影响作用减小最快。面积干扰系数 s_A 随着流量的减小逐渐增大,说明流管之间的相互影响作用逐渐降低。宽度干扰系数 s_W 都呈先增大后减小的变化趋势,深度干扰系数 s_h 随着流量的变化变化幅度较小。同间距下各方案流管干扰系数见图6。

由布置2台机组时喷水推进装置的流管趋势可知,在相同流量工况下,随着机组布置间距不断增大,2台机组流管之间的相互影响作用逐渐减弱,2根流管从开始相互影响到逐渐分开,形成2根单独的流管,相互基本不影响。在相同机组布置间距下,随着流量减小,流管越发收束,从方案1、4、7,方案2、5、8,方案3、6、9流管的变化情况可以看出,随

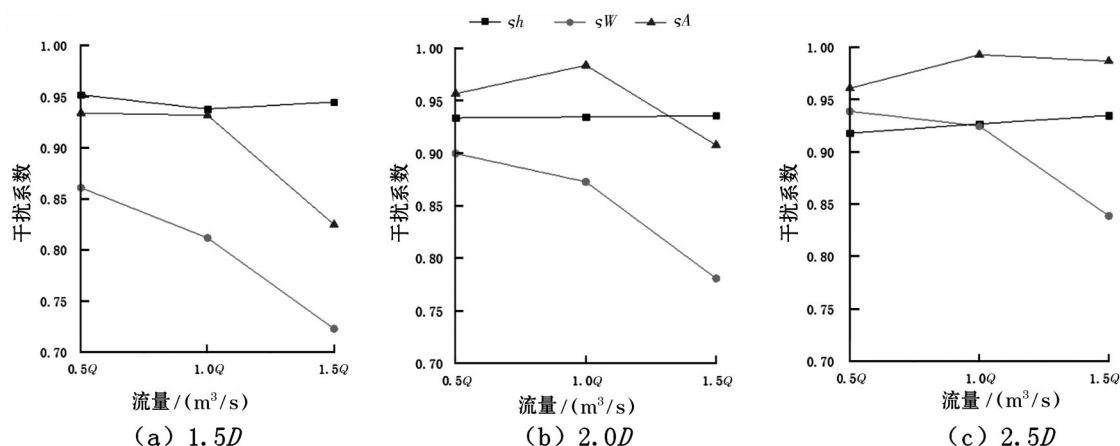


图6 同间距下流管干扰系数

着流量减小,2台机组之间的流管逐渐各自收束。

从表2中可以看出各方案的速度加权平均角变化很小,基本保持不变;对于相同机组布置间距下的方案,随着流量减小其流速分布均匀度逐渐增大,方案8时达到最大96.73%;水力损失整体上随着流量的减小,逐渐降低,但是变化幅度不明显,水力损失最小的方案为方案9,水力损失为0.718 m。

5 结 论

(1)数值模拟单台机组运行时的工况,发现布置单台机组时随着流量减小,单台机组所产生的流管逐渐收束,其流管的宽度和深度均随着流量的减小而减小。

(2)布置2台机组时随着流量的减小,机组管内流速逐渐降低,同时2台机组之间流管逐渐收束,相互影响减小,随着2台机组之间的间距不断变大,流管之间的相互影响也逐渐降低。

(3)对比各方案的水力性能参数,发现随着机组布置间距 L 的不断扩大,水力损失逐渐减小,当间距 $L=2D$ 时,水力损失基本不再随着流量的减小而减小;随着流量和机组布置间距的变化,各方案的速度加权平均角变化很小,基本保持不变;流速分

布均匀度随着机组布置间距的变大,先变大再变小,流量减小其流速分布均匀度逐渐增大,其中方案8的流速分布均匀度最大达到了96.73%。

(4)随着机组布置间距的增大,深度干扰系数变化逐渐减小,变化幅度较小;宽度和面积干扰系数都在增大,在方案6时达到最大0.993;在同样的机组布置间距下,随着流量的减小,当间距 $L=2D$ 时,机组的干扰系数变化幅度变小,说明2台机组之间的相互干扰作用降低。

(5)通过数值模拟布置2台机组的运行工况,为保证不易发生抢水现象并保证机组安全稳定的运行要求,推荐采用机组布置间距 $L=2D$ 。

参考文献:

- [1] 陈康,黄德波. CFD技术在三体船阻力性能研究中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(3):362-363.
- [2] 胡彬彬,程涛,程哲. 船体与喷水推进装置相互作用的仿真分析[J]. 航海工程,2015,44(1):60-63.
- [3] 王永生,常广晖,丁江明. 船-泵-机匹配方法研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(5):623-626.
- [4] Allison J. Marine water-jet propulsion[J]. SNAME Transactions,1993(101):275-335.

- [5] ANAGNOSTOPOULOS J S. A fast numerical method for flow analysis and blade design in centrifugal pump impellers[J]. *Computer and Fluids*, 2009, 38(2): 284–289.
- [6] 陈志明, 伍斯杰, 黄晓恒. DTMB5415 船绕流场数值模拟研究[J]. *广东造船*, 2012(3): 17–21.
- [7] 孙存楼, 王永生, 徐文珊. 喷水推进船负推力减额机理研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(2): 177–185.
- [8] 罗灿, 成立, 刘超, 等. 船用喷水推进泵装置水力特性数值模拟研究[J]. *排管机械工程学报*, 2015, 33(5): 374–379.
- [9] 罗灿, 成立, 刘超. 格栅安装角对喷水推进泵装置性能影响的CFD研究[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2015, 18(2): 65–69.
- [10] 刘承江, 王永生, 古成中. 船-泵相互作用对喷水推进器推进性能的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(1): 91–97.
- [11] 刘承江, 王永生, 张志宏, 等. 喷水推进器推力的CFD计算方法研究[J]. *计算力学学报*, 2008, 25(6): 927–931.
- [12] 刘承江, 王永生. 流场控制体对喷水推进器性能预报影响的研究[J]. *船舶力学*, 2010, 14(10): 1117–1124.
- [13] DUCCIO B, MEHRDAD Z, REIMA A, 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): 1–15.
- [14] 李忠华. 喷水推进系统在高速船上的应用[J]. *世界海运*, 1997(1): 53–60.
- [15] 易文彬, 王永生, 靳栓宝, 等. 雷诺数相似喷水推进船模预报实船推进性能[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2014, 38(5): 1074–1078.
- [16] 常书平, 王永生, 庞之洋, 等. 进速比对喷水推进器进水流道性能影响研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2010, 34(8): 721–724.

(上接第33页)

- 应用与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1713–1735.
- [2] GUSEV V A, ZHARKOV D A. Acoustic Fields and Radiation Forces Induced by a Standing Surface Wave in Layered Viscous Media[J]. *Acoustical Physics*, 2022, 68(6): 549–563.
- [3] WANG Z J, CHEN F, KUI W, et al. Guided wave propagation along surface of vertical solid partially submerged in horizontal liquid layer[J]. *Ultrasonics*, 2023(129): 106893.
- [4] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. *声学技术*, 2000(4): 212–214, 219.
- [5] 徐凯. 超声Lamb波信号传播特性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [6] 张海燕, 周全, 吕东辉, 等. 各向同性薄板中横穿孔缺陷的超声兰姆波层析成像[J]. *声学学报(中文版)*, 2007, (1): 83–90.
- [7] 王高平, 吴明丽, 郭瑞, 等. 超声lamb波在缺陷铝板中的有限元模拟[J]. *内燃机与配件*, 2017(1): 148–149.
- [8] 刘安康. 基于非接触空气耦合超声波的板状结构检测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.