

泵喷推进器水动力性能实验研究

秦登辉^{1,2}, 黄桥高^{1,2}, 潘光^{1,2}, 李福正^{1,2}, 韩鹏^{1,2}

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.西北工业大学 无人水下载技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:前置定子式泵喷推进器被广泛应用于世界各国的新一代安静型潜艇上,但其水动力性能实验研究目前还比较匮乏。在空泡水筒中,对一型九叶定子七叶转子的前置定子式泵喷推进器进行了实验测试。其中,使用测力装置对敞水状态下泵喷推进器的推力系数和扭矩系数等进行了测试,使用激光粒子测速系统对其尾流场进行了测试。实验结果表明,此型前置定子式泵喷推进器的转子推力系数、定子及导管推力系数、转子扭矩系数均随着进速系数 J 的增大而减小,但定子及导管的合扭矩系数的绝对值反而随着 J 的增大而增大。泵喷推进器的效率在 $J=1.0$ 处达到最大,为 61.91%。前置定子式泵喷推进器的推力主要由转子提供。此外,泵喷推进器的尾流场由喷流加速区、轮毂低速区、混合区组成,实验测试得到了不同工况下尾流场中的瞬态速度以及平均速度值。

关 键 词:前置定子式泵喷推进器;空泡水筒;激光粒子测速;实验测试

中图分类号:U661.31; U664.33

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)03-0601-11

泵喷推进器(pump jet propulsor, PJP)是近年发展起来的一种新型组合式水动力推进器,由转子(又叫叶轮、旋转叶栅)、定子(又叫导叶、静止叶栅)和导管三部分组成。转子是 PJP 的动力部件,定子和导管为辅助部件,转子和定子位于轴对称环形导管中。根据定子和转子的相对位置可以将 PJP 细分为 2 类:定子布置在转子的前面称为“前置定子式”;定子布置在转子的后面则称为“后置定子式”。前置定子可以预旋来流,改善转子的工作条件,从而提高转子推进效率,并有效降低辐射噪声。而后置定子可以回收转子尾流中的旋转能量,提高推进器总效率,但是其噪声也更高。目前鱼雷上通常采用“后置定子式”PJP^[1-2],而潜艇上大多采用“前置定子式”PJP^[3]。

近年来,随着声呐这一主要水下探测手段在高精度、远距离等方面能力的快速提升,潜艇在水下航行时被暴露和打击的可能性大大提升,严重威胁了潜艇的生存能力和战斗力。因此,前置定子式 PJP 以其优异的低噪声性能,广泛应用于潜艇,是当前海

军领域研究的热点。

实验测试是研究 PJP 流场特性的一项重要手段。Cormick 等^[4]在 Garfield Thomas Water Tunnel 对一型后置定子式 PJP 进行了实验测试,对不同进速系数下 PJP 的推力系数和扭矩进行了讨论。Suryanarayana 等^[5]在印度海军科学技术实验室的空泡水洞中对某型后置定子式 PJP 进行了不同工况下的空化临界系数测试。随后,其分别在风洞^[6]和水洞^[7]中,对其各项流体动力系数和速度场进行了测试。上述实验均是针对后置定子式 PJP,实验数据较少且模型的参数不详,无法进行进一步对比研究。而前置定子式 PJP 的水动力实验数据更为少见。秦登辉等^[8-11]对一型前置定子式 PJP 的空泡水筒实验数据进行了介绍和数值验证,但实验数据仅讨论了转子的力和力矩系数,数据稀少。舒礼伟等^[12]在中国船舶科学研究中心大型循环水槽中应用微型脉动压力传感器对某型前置定子式 PJP 的脉动压力进行了测量。受到测量条件的限制,主要对不同水速和桨叶参数下的导管脉动压力进行了测

收稿日期:2022-07-15

基金项目:国家自然科学基金(51979227,51979226,51709229)资助

作者简介:秦登辉(1993—),西北工业大学博士研究生,从事水下航行器流体力学、计算声学研究。

通信作者:黄桥高(1983—),西北工业大学教授,主要从事推进器水动力学、新型水中兵器和新概念水下航行器水动力关键技术及应用研究。e-mail:huangqiaogao@nwpu.edu.cn

量。孙小帅等^[13]在中国船舶科学研究中心的拖曳水池中对某型安装了2个后置定子式PJP的三体船进行了自航试验,对PJP的推力和扭矩系数进行了测量。

除了实验研究,近年来越来越多的学者使用数值模拟的方法来对PJP进行研究。在前置定子式PJP水动力性能研究方面,主要采用的研究方法有面元法和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)。王国强等^[14-15]、苏玉民等^[16]及刘业宝^[17]基于面元法和一些改进尾涡模型对PJP定常及非定常的水动力性能进行了预报。此外,更多的学者采用CFD方法来对PJP的流场进行模拟。饶志强等^[18-20]采用商用计算软件FLUENT对PJP的定常和非定常性能进行了数值预报,并对定子参数对推进器性能的影响进行了研究。张凯等^[21]基于SST $k-\omega$ 湍流模型和STAR-CCM+软件对某型九叶定子四叶转子PJP进行了数值模拟,对不同定子参数、导管攻角等对PJP水动力性能的影响进行了讨论。Yu等^[22-23]对不同转子叶梢间隙尺寸和不同定子参数对某型前置定子式PJP水动力性能、压力分布、流线等进行了对比。于丰宁等^[24]基于CFD方法对PJP在敞水/SUBOFF潜艇尾部件流状态这两种工况下叶片的非定常激励力进行了讨论。文献[25-32]均基于CFD,采用大涡模拟/分离涡等模型,对PJP空化性能、转子梢隙流场、各个部件非定常激励力、涡结构的三维形态和形成机理等进行了一系列研究。对于以上这些数值模拟研究来说,与实验值进行对比以验证数值模拟方法的准确性是必不可少的,因而业内急需较为精确和完善的PJP实验测试数据。

综上所述,PJP以其临界航速高、辐射噪声低的特点被应用于世界各国的新一代安静型潜艇和鱼雷上,其特殊的应用背景对其水动力、空化和噪声的实验研究提出了很大的需求。但目前对PJP,尤其是前置定子式PJP的水动力实验研究较为匮乏,数据较少,使得PJP水动力性能和流场特性等尚未得到充分的实验解释。

本文对一型前置定子式PJP,在空泡水筒中进行了水动力系数和流场PIV实验测试,以加深对PJP水动力性能和流场特性的理解,并可以为相关领域的研究人员提供一个基础模型及详细的实验数据,供学者们进行进一步研究。

1 实验模型和设备

1.1 实验模型

本文实验对象为一型前置定子式PJP,其是为某型水下航行器设计的。根据ITTC建议的实验准则及中国船舶研究中心的实验指导,对模型进行相似准则分析。原模型是为某大型水下航行体设计的前置定子式PJP,实际转子直径 $D_{\text{full}} = 3.328 \text{ m}$,根据实验段的尺寸限制,选择缩比比例为1:20,也就是实验模型转子直径 $D_{\text{exp}} = 0.1664 \text{ m}$ 。螺旋桨模型的几何形状保证了与全尺寸模型的几何相似准则。PJP实验模型如图1所示,主要由一个九叶定子(如图1a)所示),一个七叶转子(如图1b)所示),一个导管(如图1c)所示)组成。其中,定子和转子材质是铝合金,导管材质为有机玻璃。此外,需要指出,还加工了相应的定子轮毂、转子轮毂,以及尾流冒模型作为光轴模型,在实验测试中进行力的修正。

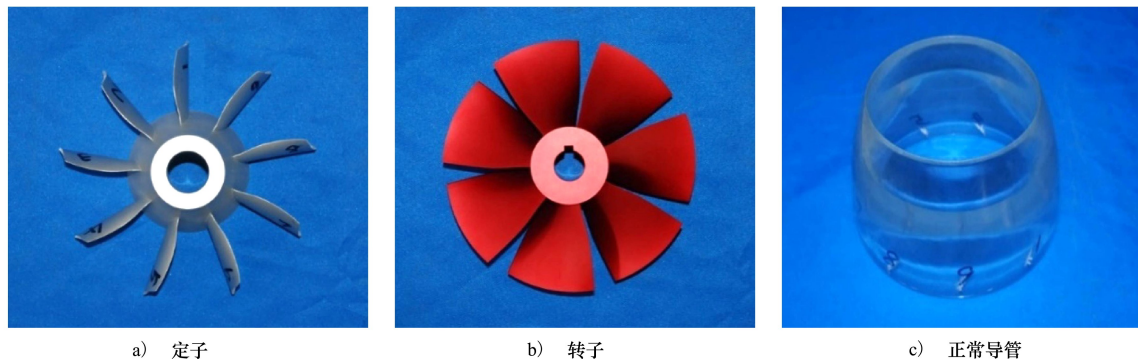


图1 泵喷推进器实验加工模型

此外,在其他的几个相似准则中,雷诺相似准则

比较重要,但是对于螺旋桨水洞实验来说,要严格保

证雷诺相似不现实,因而本文用螺旋桨临界雷诺数来衡量。对于此缩比模型,转子在 $0.75R$ 处的雷诺

数 $Re_{(0.75R)} = \frac{C_{0.75R} \sqrt{V_\infty^2 + (0.75\pi nD)^2}}{\nu} \approx 5.5 \times 10^5$

(在转速 $n = 20 \text{ r/s}$,来流速度 $V_\infty = 3.328 \text{ m/s}$ 时),大于临界雷诺数 5×10^5 ^[33]。当然,对于本实验,在流速较低的时候,转子在 $0.75R$ 处的雷诺数会略低于临界雷诺数 5×10^5 ,在一些实际水洞螺旋桨实验中,一般临界雷诺数也被取为 3×10^5 ^[34-35]。总的来说,可以视为实验模型的流动与全尺寸模型的流动相似。

为了后文讨论方便,对于 PJP,定义绝对坐标系:坐标原点选在转子的几何中心,其旋转轴方向作为 Z 轴,来流方向设定为 Z 轴正方向, Y 轴正方向为模型正上方,而 X 轴按照右手法则进行判定。

表 1 转子和定子参数表

模型	叶数	直径/mm	毂径比	盘面比	螺距比 p/D	叶宽比 $C_{0.7}/D$	最大厚度 比 $t_{0.7}/D$	后倾角/ ($^\circ$)
转子	7	166.400	0.300	0.800	1.134	0.311	0.019	0
定子	9	193.500	0.240	0.250	6.752	0.189	0.015	0

表 2 导管参数表

z/D	y_{inner}/D	y_{outer}/D	z/D	y_{inner}/D	y_{outer}/D
0	0.638 7	0.638 7	0.6	0.506 0	0.597 8
0.1	0.586 8	0.659 0	0.7	0.506 0	0.575 9
0.2	0.558 3	0.655 9	0.8	0.498 7	0.548 6
0.3	0.535 9	0.644 4	0.9	0.476 2	0.516 6
0.4	0.518 2	0.630 6	1.07	0.444 3	0.444 3
0.5	0.507 7	0.615 1			

1.2 实验设备

泵喷推进器的水动力测试实验在中国船舶舰船研究中心的空泡水筒中进行。空泡水筒的相关参数为:试验段长度为 3.20 m,直径为 0.80 m,空泡水筒的水流速度范围为 3.00~15.00 m/s,转速调节范围为正流下 700.00~4 000.00 N·m。空泡水筒装置如图 2 所示。

本实验中用到的设备主要有定子测力天平,螺旋桨动力仪和 PIV (particle image velocimetry) 流场测试系统。其中定子测力天平固定在定子之前,用来测试定子和导管的合力和合扭矩,而转子的力和

缩比后的模型转子叶片直径 $D = 166.40 \text{ mm}$ 。以下全文中均使用转子叶片直径 D 来进行归一化,例如:螺距比 P 可以归一化为 p/D 。定子叶片的平均直径比转子略大,为 193.50 mm。转子和定子叶片的详细参数如表 1 所示。其中,毂径比为转子和定子中点处的轮毂直径与转子直径 D 之比,盘面比为转子/定子叶片在来流方向的正投影面积与转子叶梢圆面积之比。而对于转子和定子,均选择在 0.7 倍的转子半径处剖面的叶宽和最大厚度作为特征值。2 个叶片的后倾角均为 0。导管直径 D 为 220.00 mm,长度 L_d 为 177.00 mm,转子叶顶与导管内壁的间隙为 1 mm。导管内表面和外表面的参数见表 2,其中, y_{inner} 为导管内表面的半径值,而 y_{outer} 为导管外表面的半径值。

扭矩通过螺旋桨动力仪输出。动力仪推力量程为 4 000 N,测量精度为 0.2%,扭矩量程为 200 N·m,



图 2 空泡水筒

测量精度为 0.2%, 转速量程 4 500 r/min, 精度 0.1%。定子天平推力量程为 500 N, 测量精度为 0.1%, 扭矩量程为 30 N · m, 测量精度为 0.1%。此外, 一套 2-D PIV 系统被用来测试流场。PIV 激光器的型号为中国镭宝公司的 Vlite-Hi-527, 高速相机的型号为 Phantom 公司的 LAB310。

2 实验测试

2.1 水动力测试

在水动力测试中, 光轴模型作为水动力的基线, 用来扣除基础的轮毂以及实验中的其他阻力。安装光轴后的测试系统如图 3a) 所示。而对于泵喷推进器, 定子测力天平位于定子正前方, 固定在螺旋桨动力仪外侧的轴套上, 外表装配有导流罩, 保证流线型过渡到定子模型, 以保证来流的均匀性。导管是由 9 个螺钉固定在定子上, 导管和定子的合力和合扭矩即由定子测力天平输出。PJP 模型在水洞实验段中的装配图如图 3b) 所示。此外, 需要提到, 实验模型在转子和定子根部处存在由于加工产生的根部圆角, 圆角尺寸为 $r=0.5\text{ mm}$ 。在实际实验测试中, 环境条件为: 水温为 19℃, 室温为 20.1℃, 空气相对湿度为 67%, 压力为 $1.02\times10^5\text{ Pa}$ 。

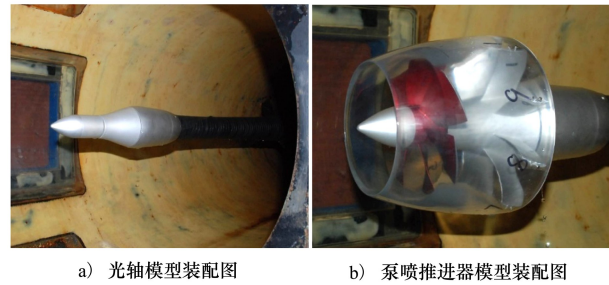


图 3 模型安装图

2.2 PIV 流场测试

PIV 测试系统图如图 4 所示。PIV 的激光源通过水洞底部平板玻璃照射螺旋桨尾部中截面平面 ($Y-Z$ 平面), PIV 拍摄的区域集中在导管之后 320 mm 内, 也就是约 $2D$ 之内的范围。需要提到, 在导管尾缘处, 由于有机玻璃对光的折射和反射, PIV 无法拍到导管内部和导管附近的流场, 但可以得到较为详细的尾流场数据。

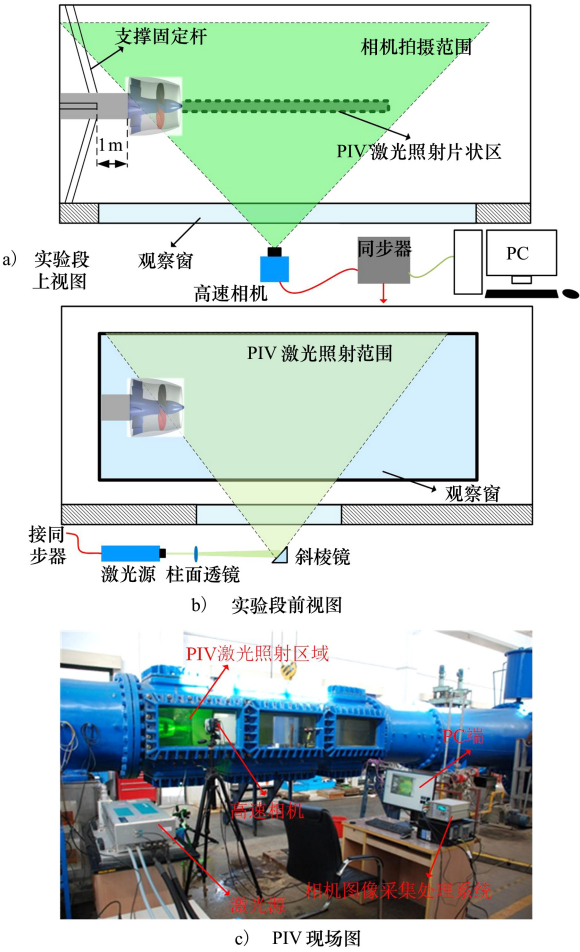


图 4 PIV 测试系统图

3 实验结果讨论

3.1 敞水性能

对于 PJP, 定义水动力系数如表 3 所示, 其中, T_r, T_s, T_d 分别为转子、定子和导管的推力; Q_r, Q_d 分别为转子、定子和导管的推力。在实验测试中, 定子和导管是通过螺钉固连的, 所以定子和导管的力或力矩无法被区分开。 n 是转子的转速 (r/s), V 是远场来流速度 (m/s), D 是转子叶片直径, ρ 是流体的密度 (kg/m^3), 实验工况: 固定转速为 1 200 r/min, 通过调节来流速度大小改变螺旋桨进速, 实验测试泵喷的工况范围为进速系数 $J = V/(nD) = 0.5 \sim 1.2$, $n = 20\text{ r/s}$ 。此外, 本文中的泵喷推进器实验模型和实验数据均可通过邮件方式与作者联系获得。

表3 泵喷水动力系数定义

物理量	定义	物理量	定义
进速系数 J	$J = \frac{V}{nD}$	定子导管系统	$K_{Q_d} = \frac{Q_d}{\rho n^2 D_r^5}$
转子推力系数 K_{T_r}	$K_{T_r} = \frac{T_r}{\rho n^2 D_r^4}$	总推力系数 K_T	$K_T = K_{T_r} + K_{T_s} + K_{T_d}$
定子推力系数 K_{T_s}	$K_{T_s} = \frac{T_s}{\rho n^2 D_r^4}$	总扭矩系数 K_Q	$K_Q = K_{Q_r}$
导管系统推力系数 K_{T_d}	$K_{T_d} = \frac{T_d}{\rho n^2 D_r^4}$	敞水效率	$\eta = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$
转子扭矩系数 K_{Q_r}	$K_{Q_r} = \frac{Q_r}{\rho n^2 D_r^5}$		

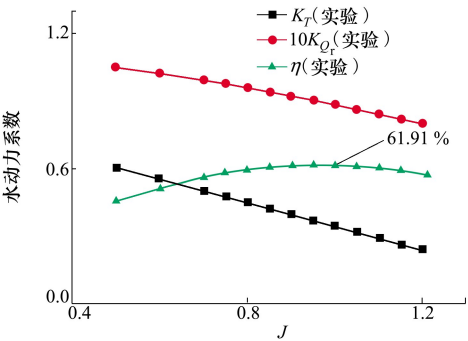


图5 泵喷推进器水动力系数测试结果

测试得到的水动力系数如图5所示。需要提到,图中的水动力系数结果均为水洞阻塞效应修正后的最终结果,推力和扭矩的测试值均取5次实验的平均值作为最终结果。本次实验中,推力系数的不确定度约在3%~5%,扭矩系数的不确定度约在1%~3%。可见,泵喷推进器的总推力系数 K_T 基本随着进速系数 J 的增大而线性减小,而转子的扭矩系数 $10K_{Q_r}$ 也随着 J 的增大而逐渐减小,只是其下降的斜率逐渐增大。泵喷推进器的效率随着 J 的增大先增大后减小,在 $J=1.0$ 处达到最大,为61.91%。

更进一步的,图6a)对比了泵喷推进器的推力组成。其中,可以看到,在实验测试的 $0.5 < J < 1.2$ 范围内,定子和导管的合推力 $K_{T_s} + K_{T_d}$ 随着 J 的增大而线性减小,但均小于0。

在这里,定义泵喷推进器的转子推力比 τ_p 为转子推力 T_r 与总推力 T 之比

$$\tau_p = \frac{T_r}{T} \tag{1}$$

当 $\tau_p < 1$ 时,说明此时导管/定子导管系统提供的是推力。此时,螺旋桨的部分推力转移到导管

上,螺旋桨的一部分尾涡变成了导管的附着涡,进而引起了导管上的环流,这也是导管推力的来源。

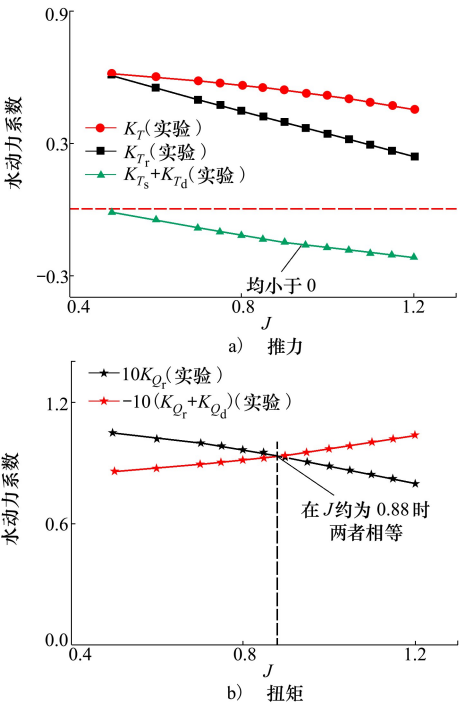


图6 转子、定子导管的推力和扭矩对比

对于本文测试的泵喷推进器,在 $J > 0.5$ 时,推力比 $\tau_p > 1$ (由图中数据计算得 $0.5 < J < 1.2$ 时的 $\tau_p = 1.02 \sim 1.90$),说明泵喷所有的推力均由转子来提供,定子-导管系统提供的均是阻力。此时,导管上的环流产生的推力比导管和定子的合阻力要小。

根据秦登辉等人的研究^[8],某型前置定子式泵喷推进器在 $J=0.6 \sim 1.4$ 范围内的 $\tau_p = 1.15 \sim 4.26$,而某型后置定子式泵喷推进器在 $J=0.6 \sim 1.4$ 范围

内的 $\tau_p = 0.60 \sim 0.78$ 。因此,从推力分布上来说,后置定子式泵喷推进器的推力分布更加均匀,而前置定子式泵喷推进器的推力基本上由转子提供,这也是前置定子式泵喷推进器的劣势之一。

图 6b) 对比泵喷推进器的扭矩组成,由于定子和导管的扭矩为负值,因此图中以 $-10(K_{Q_s} + K_{Q_d})$ 代替。如图所示,随着 J 的增大,转子扭矩系数值逐渐减小,而定子导管系统扭矩系数的绝对值反而逐渐增大,两者在 J 约为 0.88 时相等。

总的来说,在泵喷推进器最佳效率点处附近,此泵喷推进器的合扭矩基本接近 0,这也是泵喷推进器相比于传统单桨/导管桨的优势之一,即推进器的合扭矩接近 0,更有利于航行器的操纵性和稳定性。

3.2 流场测试结果

对泵喷推进器在 $J = 0.8$ 和 $J = 0.5$ ($N = 1\ 200\ \text{r/min}$) 这 2 种工况下的流场进行了 PIV 测试。 $J = 0.8$, 某一个瞬时时时刻时,泵喷推进器在 y - z 平面内的瞬态轴向速度和 y 方向速度的 PIV 测试结果如图 7 所示。

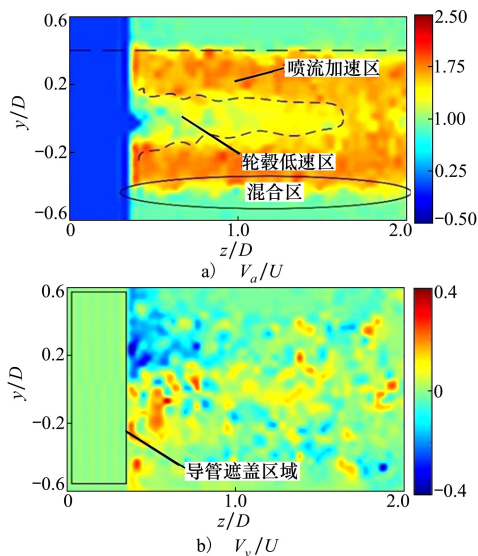


图 7 PJP 在 $J=0.8$ 时,瞬态速度云图实验测试结果

首先观察轴向速度云图,可以看到,在 $0 < z/D < 0.4$ 范围内的轴向速度 (V_a) 基本为 0,这是因为在此处,由于有机玻璃导管对激光的反射和折射作用,导管内部的流场无法被捕捉到。而在 $z/D > 0.4$ 的范围内,泵喷推进器的尾流场得到了很好的捕捉。如图 7a) 所示,可以看到,泵喷推进器的尾流场基本上分为三部分:喷流加速区、轮毂低速区、混合区。其中,

喷流加速区基本分布在 $r/D < 0.4$ 的范围内,且高速区域的分布比较混乱,没有明显的周期性,这是由于摄像机帧率较低导致的。而在 r/D 约为 0.4 处的环状区为泵喷尾部高速喷流区与周围远场来流的混合区。在混合区,会发生剧烈的流体交换,其也是转子叶梢泄涡在尾流场中的发展区域,是尾流场研究关注的焦点。而在轮毂尾部,是轮毂尾迹导致的低速区,其低速区域基本上维持到 $z/D = 1.5$ 才逐渐与喷流加速区相互混合,并逐渐消失。

相比于轴向速度,泵喷尾部 y 方向速度的 PIV 测试结果显得更加混乱。其主要原因是,泵喷推进器尾流的轴向速度较大,而 y 方向速度值较小,因而 PIV 系统对于 y 方向速度值的分辨率较差。因此,数值模拟结果与实验对比时,建议选取轴向速度作为定量对比对象。大体趋势上,在 y 轴正方向一侧的 V_y 速度分量值为负,而 y 轴负方向一侧的 V_y 值则为正值。

而对泵喷在 20 个旋转周期的 PIV 结果进行平均之后可以得到泵喷推进器尾流场周期平均速度云图,如图 8 所示。从轴向速度云图(见图 8a)) 可以看到,泵喷尾流场中的喷流加速区和轮毂低速区的分布范围更加明显,轮毂尾部的圆锥状低速区基本上在 $z/D = 1.2 \sim 1.3$ 处逐渐闭合。同样地, y 方向的平均速度云图也基本与瞬态值分布相吻合,上半部分的值为负,下半部分的值为正,这是由于导管存在导致尾迹径向向内流动的分量。

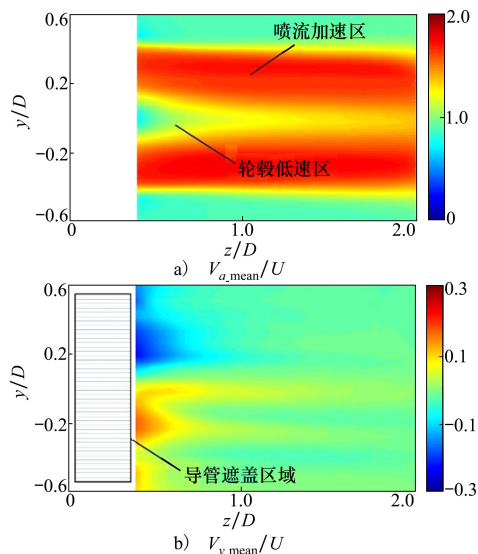


图 8 PJP 在 $J=0.8$ 时,周期平均速度云图实验测试结果

定量地,对泵喷推进器在尾部不同轴向位置处

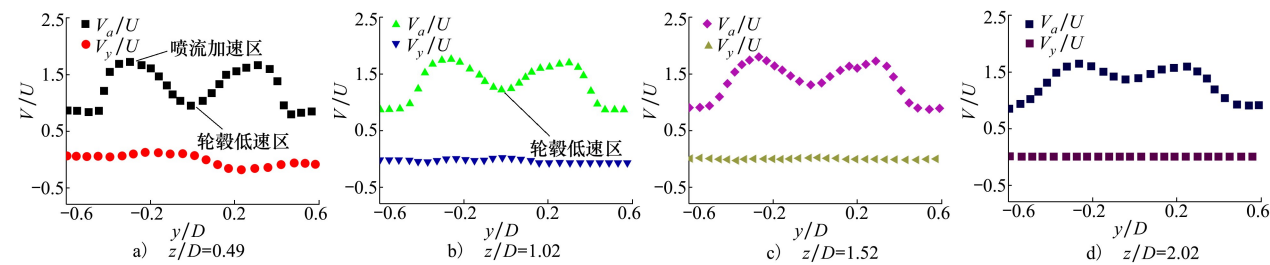


图9 $J=0.8$,PJP 尾部不同轴向位置处的时间平均速度实验结果

的时间平均速度进行对比,如图9所示,以便于后续研究者进行实验和数值模拟验证。选取4个轴向位置,分别是:A) $z/D=0.49$;B) $z/D=1.02$;C) $z/D=1.52$;D) $z/D=2.02$ 。

可见, $J=0.8$ 时,在导管尾部 $z/D=0.49$ 处,泵喷尾流的轴向平均速度峰值在 $r/D \approx 0.3$ 处,约为 $V_a/U=1.75$,而轮毂低速区的峰值 V_w/U 略小于1。随着流体向下游移动,喷流加速区的峰值略微下降,而轮毂低速区的值逐渐增大,伴随着上文讨论的轮毂低速区的闭合。在远场 $z/D=2.02$ 处,喷流加速区的峰值已经很不明显。

对泵喷推进器轴向速度的脉动量进行统计,如图10所示。在此,PIV 系统时间分辨率为0.001 s,采样周期 T 取20个旋转周期($T=1$ s,即采样步数 $N=1\,000$), u_i 为某点处第 i 步的轴向速度值,轴向

速度的脉动量 $u'_i=u_i-u_{\text{mean}}$ (第 N 步的轴向速度脉动量瞬时值如图中黑色曲线所示)。其中, u_{mean} 为轴向速度平均值,而脉动量均方根值为 $u_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{\text{mean}})^2}$ ($T=1$ s 周期内轴向速度脉动量均方根值如图中红色曲线所示)。

如图所示,在导管尾部 $z/D=0.49$ 处,轴向速度脉动量比较大,速度脉动的均方根值在 $r/D \approx 0$ 和 $r/D \approx 0.4$ 处出现2个明显的峰值。而随着流动向下游移动,在 $z/D=1.52$ 处,轴向速度脉动量明显降低,脉动均方根在 $r/D \approx 0$ 的峰值出现明显下降,对应于云图中轮毂低速区区域的闭合。而 $r/D \approx 0.4$ 处的峰值依旧较高 (u_{RMSE}/U 约为0.22),对应于云图中喷流加速区与周围自由来流的交界区域。

此外,对泵喷推进器尾部的速度场进行进一步处理。由于测试得到的是二维速度,因此给出泵喷推进器尾部截面上 x 方向上的涡量分量,归一化为 $w_x D/U$,如图11所示。

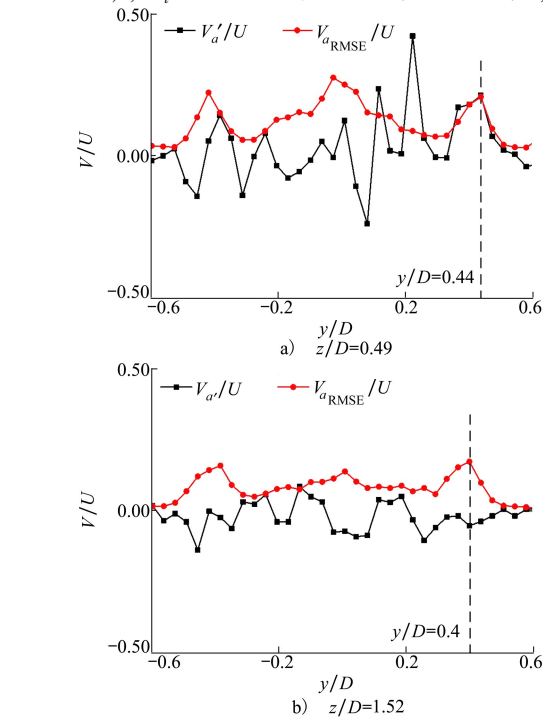


图10 $J=0.8$,PJP 尾部不同轴向位置处的速度脉动量实验结果

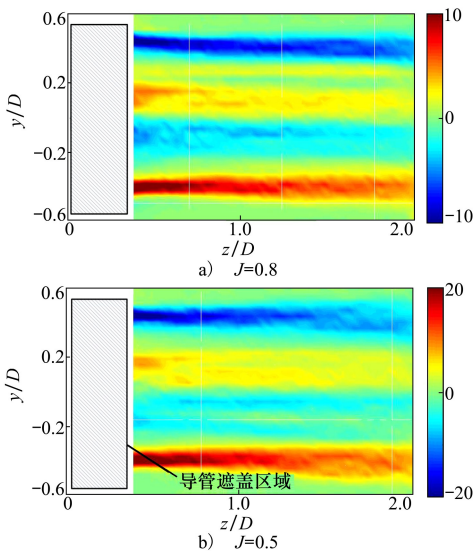


图11 PJP 在 x 方向上的涡量分量平均值的结果实验测试(图中采用 $w_x D/U$ 来进行归一化)

可以看到,在导管尾部 $r/D \approx -0.4$ 和 $r/D \approx 0.4$ 位置处出现了明显的高涡量条带。随着向下游移动,高涡量区域逐渐出现数值上的减小和径向方向上的扩散。对比图 7 可以看到,这些高涡量区域正是环状混合区的位置,也是泵喷推进器尾部叶梢涡的空间发展轨迹区域。对比图 10a) ~ 10b) 可以看到,在低 J 时,此区域的涡量更高,且径向扩散区域更大。低 J 时的流场在下面进行分析。

同样地,给出泵喷推进器在 $J=0.5$ 时的瞬态速度和周期平均速度云图,如图 12~13 所示。与 $J=0.8$ 相比,低进速系数下的泵喷尾流的轴向速度更

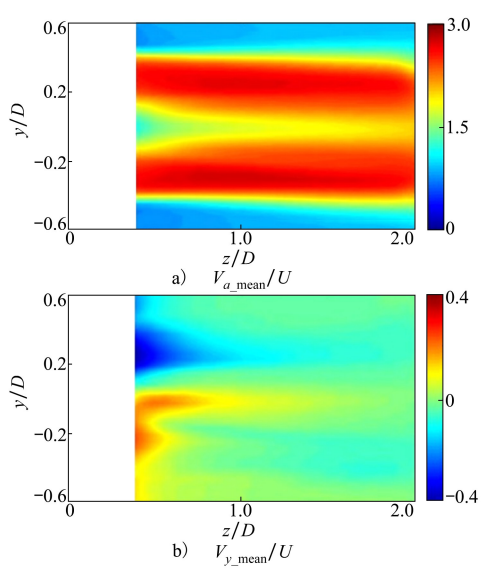


图 13 PJP 在 $J=0.5$ 时,周期平均速度云图实验测试结果

大,而 y 轴方向上的速度交换也更明显。对比二者的轴向速度(见图 8a)和图 13a))可见,低进速系数下,泵喷尾部喷流加速区的核心值更大,有明显的分层。这种差别在图 14 中表现更为明显,在 $J=0.5$, $z/D=0.49$ 处,尾流轴向平均速度峰值约为 $V_a/U=2.7$,且喷流加速区的峰值更陡峭。此外,由于轴向速度的增大,低进速系数下的泵喷轮毂低速区的轴向速度也有明显增大,其向下游的延续距离也越长。二者 y 轴方向上的速度分布趋势基本相同, $J=0.5$ 工况下的数值略大。

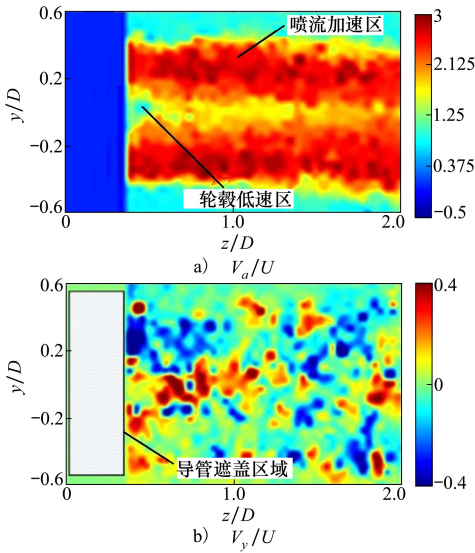


图 12 PJP 在 $J=0.5$ 时,瞬态速度云图实验测试结果

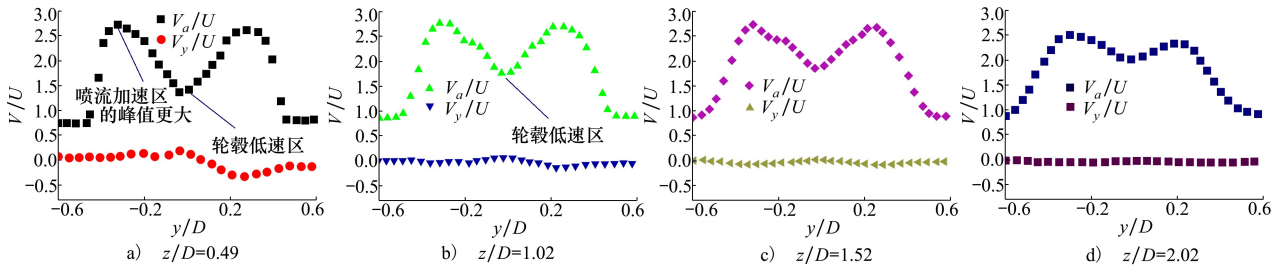


图 14 $J=0.5$,PJP 尾部不同轴向位置处的时间平均速度实验结果

4 结 论

本文对一型九叶定子七叶转子的泵喷推进器,在空泡水筒中进行了水动力性能和 PIV 流场测试,得到了泵喷推进器的敞水性能和流场特性,结果表明:

- 1) 此型前置定子式泵喷推进器的转子推力系数、定子和导管的推力系数均随着 J 的增大而减小,转子的扭矩系数也随着 J 的增大而减小,但定子和导管的扭矩系数绝对值反而随着 J 的增大而增大。泵喷推进器的效率随着 J 的增大先增大后减小,在 $J=1.0$ 处达到最大,为 61.91%。
- 2) 前置定子式泵喷推进器的推力主要由转子

提供,实验测试泵喷模型在 $0.5 < J < 1.2$ 范围内,定子和导管的合推力均小于 0,即均为阻力。

3) 泵喷推进器的尾流场基本上分为三部分:喷流加速区、轮毂低速区、混合区。实验测试得到了不

同工况下的泵喷推进器尾流场中的瞬态速度、平均速度值。低速重载工况下,泵喷推进器尾部喷流加速区的峰值更大,轮毂低速区的持续长度也 longer。

参考文献:

- [1] QIN D, PAN G, HUANG Q, et al. Numerical investigation of different tip clearances effect on the hydrodynamic performance of pumpjet propulsor[J]. International Journal of Computational Methods, 2018, 15(5): 1850037
- [2] QIN D, PAN G, LEE S, et al. Underwater radiated noise reduction technology using sawtooth duct for pumpjet propulsor[J]. Ocean Engineering, 2019, 188: 106228
- [3] 王天奎, 唐登海. 泵喷推进器——低噪声的核潜艇推进方式[J]. 现代军事, 2006, 7: 52-54
WANG Tiankui, TANG Denghai. Pump jet propulsion-a low noise nuclear submarine propulsion method[J]. Modern Military, 2006, 7: 52-54 (in Chinese)
- [4] EISENHUTH J, MC CORMICK B W. Design and performance of propellers and pumpjets for underwater propulsion[J]. AIAA Journal, 2012, 1(10): 2348-2354
- [5] SURYANARAYANA C, SATYANARAYANA B, RAMJI K, et al. Cavitation studies on axi-symmetric underwater body with pumpjet propulsor in cavitation tunnel[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2010, 2(4): 185-194
- [6] SURYANARAYANA C, SATYANARAYANA B, RAMJI K, et al. Experimental evaluation of pumpjet propulsor for an axisymmetric body in wind tunnel[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2010, 2(1): 24-33
- [7] SURYANARAYANA CH, ROY S P, SATEESH KUMAR M. Hydrodynamic performance evaluation of an underwater body by model testing in cavitation tunnel [C] // International Conference in Marine Hydrodynamics, NSTL, Visakhapatnam, India, 2006
- [8] QIN Denghui, HUANG Qiaogao, SHI Yao, et al. Comparison of hydrodynamic performance and wake vortices of two typical types of pumpjet propulsor[J]. Ocean Engineering, 2021, 224: 108700
- [9] QIN D, HUANG Q, PAN G, et al. Numerical simulation of vortex instabilities in the wake of a preswirl pumpjet propulsor[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(5): 055119
- [10] QIN D, HUANG Q, PAN G, et al. Effect of the duct and the pre-swirl stator on the wake dynamics of a pre-swirl pumpjet propulsor[J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109620
- [11] QIN D, HUANG Q, PAN G, et al. Effect of the odd and even number of blades on the hydrodynamic performance of a pre-swirl pumpjet propulsor[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(3): 035120
- [12] 舒礼伟, 李亮, 刘登成. 带前置支撑导管桨导管脉动压力特性试验研究[J]. 中国造船, 2017, 58(2): 1-9
SHU Liwei, LI Liang, LIU Dengcheng. Experimental investigation of pressure fluctuation on duct for a ducted propeller with pre-strut[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(2): 1-9 (in Chinese)
- [13] 孙小帅, 马骋, 钱正芳, 等. 水面泵喷推进自航因子数值与试验研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(5): 609-616
SUN Xiaoshuai, MA Cheng, QIAN Zhengfang, et al. Numerical and experimental investigation on self-propulsion factors of surface pumpjet[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(5): 609-616 (in Chinese)
- [14] 王国强, 杨晨俊. 带前置或后置定子导管桨性能理论预报[J]. 船舶力学, 1999(3): 1-7
WANG Guoqiang, YANG Chenjun. Hydrodynamic performance prediction of ducted propeller with stators[J]. Journal of Ship Mechanics, 1999(3): 1-7 (in Chinese)
- [15] 王国强, 刘小龙. 带定子导管螺旋桨定常和非定常性能预估的基于速度势的面元法[J]. 船舶力学, 2007(3): 333-340
WANG Guoqiang, LIU Xiaolong. A potential based panel method for prediction of steady and unsteady performances of ducted propeller with stators[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007(3): 333-340 (in Chinese)
- [16] 苏玉民, 刘业宝, 沈海龙, 等. 基于面元法预报带定子的导管螺旋桨的一种新方法[J]. 船舶力学, 2012, 16(9): 999-1004

- SU Yumin, LIU Yebao, SHEN Hailong, et al. A new method for predicting the steady performance of ducted propeller with stators[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(9): 999-1004 (in Chinese)
- [17] 刘业宝. 水下航行器泵喷推进器设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013
LIU Yebao. Study on design method of pump jet thruster for underwater vehicles[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013 (in Chinese)
- [18] 饶志强. 泵喷推进器水动力性能数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2012
RAO Zhiqiang. Numerical simulation of hydrodynamical performance of pump jet propulsor[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012 (in Chinese)
- [19] 饶志强, 李巍, 杨晨俊. 定子参数变化对前置定子导管桨性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(2): 269-273
RAO Zhiqiang, LI Wei, YANG Chenjun. The effect of stator parameters on performance of ducted propeller with pre-swirl stators [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(2): 269-273 (in Chinese)
- [20] 饶志强, 李巍, 杨晨俊. 前置定子导管桨非定常干扰力的理论分析与数值模拟[J]. 船舶力学, 2014(1): 45-53
RAO Zhiqiang, LI Wei, YANG Chenjun. Theoretical analysis and numerical simulation of unsteady interaction forces on ducted propeller with pre-swirl stators[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014(1): 45-53 (in Chinese)
- [21] 张凯, 叶金铭, 于安斌. 基于分块结构网格的泵喷推进器敞水性能模拟[J]. 船舶工程, 2018, 40(11): 52-57
ZHANG Kai, YE Jinming, YU Anbin. Simulation of open performance of pumpjet propeller based on block structured mesh[J]. Ship Engineering, 2018, 40(11): 52-57 (in Chinese)
- [22] YU H, ZHANG Z, HUA H. Numerical investigation of tip clearance effects on propulsion performance and pressure fluctuation of a pump-jet propulsor[J]. Ocean Engineering, 2019, 192(15): 106500.1-106500.13
- [23] HYA B, NDA B, HHA B, et al. Propulsion performance and unsteady forces of a pump-jet propulsor with different pre-swirl stator parameters-science direct[J]. Applied Ocean Research, 2020, 100: 102184
- [24] 于丰宁, 邹冬林, 饶柱石, 等. 泵喷推进器在敞水与艇后的激励力计算分析[J]. 船海工程, 2019, 48(4): 96-101
YU Fengning, ZOU Donglin, Rao Zhushi, et al. Analysis on exciting force of open water pump-jet and submarine with pump-jet [J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(4): 96-101 (in Chinese)
- [25] 孙明宇, 董小倩, 杨晨俊. 泵喷推进器水动力尺度效应数值仿真与分析[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(5): 538-546
SUN Mingyu, DONG Xiaoqian, YANG Chenjun. Numerical simulation and analysis of hydrodynamic scale effect of pump-jet propulsor[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(5): 538-546 (in Chinese)
- [26] 徐顺, 季斌, 龙新平, 等. 不同来流工况下泵喷推进器外流场特性分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2020, 35(4): 411-419
XU Shun, JI Bin, LONG Xinping, et al. Analysis of the flow characteristics of pump-jet propeller under different inflow conditions[J]. Chinese Journal of hydrodynamics, 2020, 35(4): 411-419 (in Chinese)
- [27] 董新国, 林辉, 严鹏, 等. 导管剖面倾角和拱度对泵喷与艇体相互作用影响的数值分析[J]. 船舶, 2020, 31(5): 11-20
DONG Xinguo, LIN Hui, YAN Peng, et al. Numerical analysis of influence of duct inclination angle and camber on interaction between pump jet and hull[J]. Ship, 2020, 31(5): 11-20 (in Chinese)
- [28] 李福正, 黄桥高, 潘光, 等. 定子叶片数对泵喷推进器空化性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 56-64
LI Fuzheng, HUANG Qiaogao, PAN Guang, et al. Effect of stator blade number on cavitation performance of pump-jet propulsor [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 56-64 (in Chinese)
- [29] 李福正, 黄桥高, 潘光, 等. 不同转速下前置泵喷推进器性能对比[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(5): 945-953
LI Fuzheng, HUANG Qiaogao, PAN Guang, et al. Comparative analysis of the hydrodynamic performance of pre-swirl stator pump-jet propulsor under different rotational speeds[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(5): 945-953 (in Chinese)
- [30] 孙大鹏, 叶金铭, 史宝雍. 基于大涡模拟的泵喷推进器梢隙流场特性研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(6): 95-101
SUN Dapeng, YE Jinming, SHI Baoyong. Research on the flow field characteristic in tip gap of pump-jet propeller based on large eddy simulation[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(6): 95-101 (in Chinese)
- [31] 师帅康, 黄修长, 饶志强, 等. 湍流入流下泵喷推进器力谱特性研究[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 1-10
SHI Shuaikang, HUANG Xiuchang, RAO Zhiqiang, et al. Study on force spectrum characteristics of a pump-jet under inflow turbulence[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 1-10 (in Chinese)

[32] 秦登辉, 黄桥高, 潘光, 等. 单桨、导管桨和泵喷推进器的水动力性能和流场对比研究[J]. 中国造船, 2022, 63(2): 52-65
QIN Denghui, HUANG Qiaogao, PAN Guang, et al. Comparison of hydrodynamic performance and flow field between single propeller, ducted propeller and pumpjet propulsor[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(2): 52-65 (in Chinese)

[33] 冯源, 陶然. 加速旋转螺旋桨脉动噪声干扰特性及抑制方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 710-715
FENG Yuan, TAO Ran. Research on characteristics and suppression of fluctuation noise disturbance of accelerative propeller[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(6): 710-715 (in Chinese)

[34] 宋晗, 王睿, 熊鹰. Kappel 桨与传统螺旋桨噪声对比试验[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(5): 92-98
SONG Han, WANG Rui, XIONG Ying. Contrast experiments on the propeller noise of the Kappel propeller and the conventional propeller[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(5): 92-98 (in Chinese)

[35] 吕晓军, 周其斗, 潘雨村. 导管螺旋桨水洞试验洞壁影响研究[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(5): 62-66
LYU Xiaojun, ZHOU Qidou, PAN Yucun. Wall effect on ducted propellers in water tunnel test[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(5): 62-66 (in Chinese)

Experimental study of hydrodynamic performances of
pre-swirl pumpjet propeller

QIN Denghui^{1,2}, HUANG Qiaogao^{1,2}, PAN Guang^{1,2}, LI Fuzheng^{1,2}, HAN Peng^{1,2}

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Key Laboratory of Unmanned Underwater Vehicle Technology of Ministry of Industry and
Information Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: A pre-swirl pumpjet propeller(PJP) is widely used in the new generation of quiet submarines all over the world, although the experimental study of its hydrodynamic performances is still rare. This paper carries out experimental tests of the pre-swirl PJP with a 9-blade stator and a 7-blade rotor in a cavitation water tunnel. The thrust coefficient and torque coefficient of the pre-swirl PJP in open water are tested with a force measurement device, and the wake flow field of the pre-swirl PJP is tested with a laser particle velocimetry system. The experimental results show that the rotor thrust coefficient, stator-duct thrust coefficient and rotor torque coefficient of the pre-swirl PJP decrease with increasing the advance coefficient J , but the absolute value of the torque coefficient of the stator-duct thrust increases with increasing J . The open water efficiency of the pre-swirl PJP reaches the maximum when $J = 1.0$, being 61.91%. The thrust of the pre-swirl PJP is mainly provided by the rotor. In addition, the wake flow field of the pre-swirl PJP is composed of jet acceleration zone, hub low-speed zone and mixed zone. The transient velocity and average velocity in the wake flow field under different working conditions are obtained.

Keywords: pre-swirl pumpjet propeller; cavitation water tunnel; particle image velocimetry; experimental test

引用格式: 秦登辉, 黄桥高, 潘光, 等. 泵喷推进器水动力性能实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(3): 601-611
QIN Denghui, HUANG Qiaogao, PAN Guang, et al. Experimental study of hydrodynamic performances of pre-swirl pumpjet propeller[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(3): 601-611 (in Chinese)