DOI：10.13245/j.hust.269999

预旋定子对轮缘推进器水动力性能影响研究

唐培瑞[1] 王 超[2] 胡益明[2] 桑腾蛟[1]
(1．中国特种飞行器研究所，湖北 荆门 448035；
2．哈尔滨工程大学船舶工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 基于雷诺平均纳维斯托克斯(RANS)与分离涡模拟(DES)方法，结合试验测试，分别建立了轮缘推进器(RDT)的定常与非定常数值模型，系统分析了一系列安装角下的RDT水动力性能与流场响应．结果表明：安装角α对RDT性能具有多维度调控作用，存在使综合效率最优的安装角区间；增大安装角可显著改善桨叶进流，增大切向速度与有效攻角，从而提升推力和扭矩，并且推力增幅在0.7R(桨叶半径)附近区域最为显著；非定常分析表明，安装角增大会强化定子与转子间的干涉效应，导致推力脉动增强，当α=11°时尤为剧烈，脉动能量集中于预旋定子特征频率(f_{PS})；流场结构在三个维度呈现明显变化，叶梢区域预旋作用最弱，速度分布最不规则；切向速度最为敏感，轴向次之．

关键词 预旋定子；轮缘推进器；数值仿真；流场响应；水动力性能
中图分类号 U661.1 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0103-07

Research on influence of pre-swirl stator on hydrodynamic performance of rim-driven thruster

TANG Peirui[1] *WANG Chao*[2] *HU Yiming*[2] *SANG Tengjiao*[1]
(1．China Special Vehicle Research Institute，Jingmen 448035，Hubei China；
2．College of Shipbuilding Engineering，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China)

Abstract Based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) and detached eddy simulation (DES) methods，combined with experimental testing，numerical models for steady and unsteady calculations of the rim-driven thruster (RDT) were respectively established．The hydrodynamic performance and flow field responses of the RDT at various pre-swirl angles were systematically analyzed．Results show that the multi-dimensional regulatory effect of the pre-swirl angle α on the RDT performance is present，and an pre-swirl angle range for optimizing the overall efficiency exists．As the pre-swirl angle increases，the propeller inflow is significantly improved，the tangential velocity and effective attack angle are increased，and thereby thrust and torque are enhanced，with the thrust increase being most significant in the region near 0.7 blade radius．It is shown by unsteady analysis that the interference between the stator and rotor is intensified as the pre-swirl angle increases，leading to enhanced thrust fluctuations，which are particularly severe at α=11°．The pulsation energy is concentrated at the characteristic frequency of the pre-swirl stator (f_{PS})．The flow field structure undergoes significant changes in three dimensions：the pre-swirl effect is weakest near the blade tip，where the velocity distribution is most irregular；the tangential velocity is the most sensitive，followed by the axial component．

Key words pre-swirl stator；rim-driven thruster；numerical simulation；flow field response；hydrodynamic performance

近几十年来，高效率、低噪声和模块化推进系统已成为潜艇推进的发展趋势[1]．轮缘推进器与传统螺旋桨相比，虽然结构设计更加复杂，但在水动力和噪声性能上具有至关重要的地位．

收稿日期 2025-12-10．
作者简介 唐培瑞(2001—)，男，硕士研究生；王 超(通信作者)，教授，E-mail：wangchao0104@hrbeu.edu.cn．
基金项目 黑龙江省自然科学基金资助项目(JQ2024E007)．

基于黏流的CFD方法逐渐应用于RDT的性能研究[2]，该方法在水动力计算、流动特征和噪声特性的研究上均具有重要地位[3]．韩承灶等[4]分别选取三种湍流模型计算RDT水动力性能，并与试验值比较评估了湍流模型对计算结果的影响．李鹏等[5]利用DES方法对三种不同的动静子域划分方式下轮缘的流场模拟精度进行了分析，研究区域划分类型对RDT性能预测的影响．Cai等[6]基于RANS求解器提出了一种改进的体积力方法用于RDT的模拟，采用三个虚拟圆盘来替代螺旋桨和轮缘转子，计算效率比传统的离散螺旋桨方法提高了59.9%．

随着研究的深入，RDT相关的流体特性逐渐被挖掘出来．RDT在流体动力学上类似于导管螺旋桨[7]，导管对其水动力性能同样起着至关重要的作用．宋显成等[8]研究了导管主要参数对RDT水动力性能的影响，结果表明长径比的影响更有主导性．杨蕾等[9]聚焦于导管前缘和尾缘的高度，通过对不同几何形状导管的流体动力学特性进行分析，提出了导管初步设计方案．Liu等[10-11]在分析了对称/非对称导管设计下的RDT性能后，利用伴随方法结合管道曲线完成了对称导管的流线型设计，使RDT表现出更高的效率和更好的流动特性．曹庆明等[12-13]发现轮缘对RDT的水动力性能影响极大，并给出了关于轮缘的设计原则．李鹏等[14]在轮缘上周向布置多个凹槽，提高了RDT的整体效率，且推进效率的提高与凹槽的参数呈正相关．值得注意的是，泵喷推进器领域已有研究对定子的效能优化机理展开了探讨[15]，Yu等[16]和李福正等[17]对前置定子泵喷进行了稳态与非稳态仿真，研究了定子预旋角对泵喷推进性能的影响，结果表明泵喷的推力、扭矩和效率在一定范围内随预旋角增大而增大．

综上所述，当前对轮缘推进器的研究虽已涵盖水动力性能预报与优化，但其优化工作仍集中于轮缘与导管．为进一步提升RDT水动力与声学性能，引入并优化预旋定子成为必然趋势[18-19]．基于此，本研究采用RANS/DES(雷诺平均纳维斯托克斯/分离涡模拟)方法，系统研究了预旋定子安装角在3°～11°范围内RDT的水动力性能，旨在揭示定子安装角对RDT宏观性能与微观流场的影响规律．

1　数值模拟建模

1.1　理论基础

本研究的数值仿真是基于不可压缩定常RANS方法和非定常DES方法开展的，不可压缩牛顿流体的运动是根据连续性方程和动量守恒方程来描述的，其表达式为

$$\partial u_i/\partial x_i = 0;$$

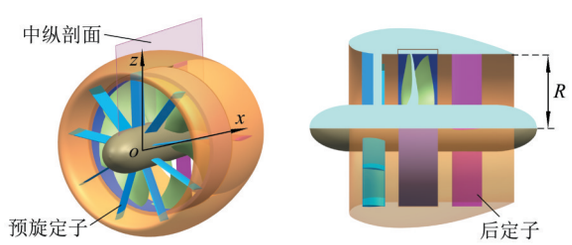
$$\partial(\rho u_i)/\partial t + \partial(\rho u_i u_j)/\partial x_j = -\partial p/\partial x_i + \partial[\mu(\partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i) - \rho u_i' u_j']/\partial x_j,$$

式中：u_i和u_j为流体速度分量的时均值(i，j=1，2，3)；u'为脉动量；p为压力的时均值；ρ为流体密度；μ为动力黏性系数；x_i与x_j为方向向量分量(i，j=1，2，3)；t为时间．

RANS方法湍流模型采用双方程SST k-ω模型，它构建了湍动能k和比耗散率ω的输运方程，该模型在边界层求解方面具有很强的稳定性．DES基于RANS方法，是一种混合RANS/LES模型，它通过修改k的耗散项实现在近壁区采用RANS方法，在分离区采用LES解析大尺度湍流结构．

1.2　几何模型

本研究选用的RDT几何模型如图1所示，该轮毂式RDT在7叶螺旋桨前后分别设有9叶预旋定子和4叶后置定子，毂径比为0.316，预旋定子安装角α=7°，图中R=105.5 mm为桨叶半径．



(a) 前视图　　(b) 部面图

图1　RDT几何模型

1.3　网格划分及边界条件

鉴于RDT外形的回转体特征，以与推进器同轴的圆柱形为计算域，如图2所示，图中：D为桨叶直径；V_{ref}为来流速度．计算域的坐标原点对应RDT桨盘面中心，计算域的边界条件指定如下：上游入口应用速度入口条件，在出口边界应用压力出口条件，圆柱包面应用自由滑移壁面条件，轮缘推进器表面均采用无滑移壁面条件．

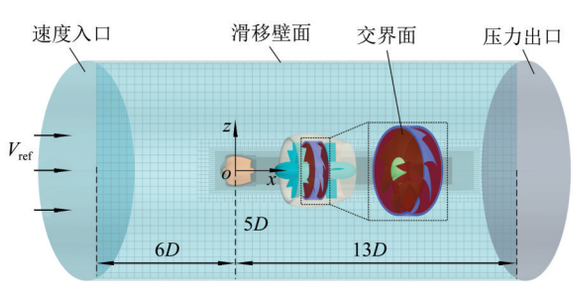


图2　计算域及边界条件

本研究结合多重参考系模型(MRF)和滑移网格方法(RBM)模拟旋转域的运动条件：在稳态计算中，采用MRF方法近似处理螺旋桨叶片的旋转；在非定常计算中，利用RBM方法模拟螺旋桨的旋转运动．考虑计算效率，本研究RDT的敞水性能采用定常计算，进速系数根据 $J = V_{\mathrm{ref}}/(nD)$ 来确定，其中固定转速 n=15 r/s，通过改变来流速度调节 J．为精确捕捉RDT运行过程中流场扰动，其非定常力、各物理量分布均采用非定常模拟．

网格划分如图3所示，在远壁面流动空间内采用切割体网格以更好地适应RDT复杂的几何构型；为保证尾流的完全演化，还须对尾流场区域进行加密．在RDT壁面采用棱柱层网格用于捕捉边界层精细流动，在桨叶表面布置10层棱柱层网格，导管等其他部件壁面设置6层棱柱层，膨胀率为1.2，保证RDT壁面 y+在1～10范围内．

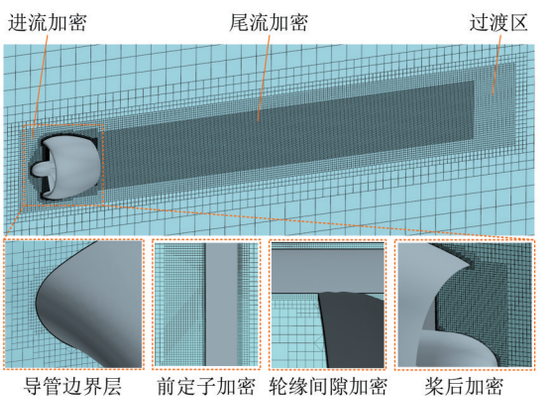


图3　计算域网格划分

2　数值模拟验证

为验证湍流模型和近壁面网格分辨率，采用上述网格划分策略，在三个方向上以 $\sqrt{2}$ 等比例调整基础尺寸生成三套系统加密的网格，均针对 J=0.9工况进行非定常计算，基于数值结果开展相关的网格收敛性分析．表1给出了3套网格的网格数量及计算得到的推力系数 K_T 与扭矩系数 $10K_Q$ 的结果，其分别定义为

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4};\quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5},$$

式中 T 和 Q 分别为RDT总推力和转子扭矩．

表1　不同网格的信息及计算结果

网格	数量/10^7	K_T	$10K_Q$
粗网格	0.625	0.449	1.227
中网格	1.112	0.438	1.217
细网格	2.101	0.432	1.191

采用网格收敛指数法(GCI)评估网格不确定性，该方法被广泛应用于轮缘、泵喷等复杂推进装置的网格收敛性评估中[5,14,20]．基于表1中数值计算结果进行不确定性分析后得到的评判因子如表2，表中：r 为网格加细比(下标1，2，3分别对应细、中、粗网格)，r_{21} 为细网格与中网格数量比值的1/3次方；P_{G} 为收敛阶；Ω_{GCI} 为网格收敛指数．可以看出：RDT载荷随网格密度呈单调收敛，且 Ω_{GCI} 分别为1.67%和2.17%，表明该网格划分具有较好的收敛性，故后续的数值计算均采用细网格完成．

表2　网格不确定度的评判因子

参数	r_{21}	r_{32}	P_{G}	Ω_{GCI}/%
K_T	1.236	1.212	3.437	1.67
$10K_Q$	1.236	1.212	3.833	2.17

进一步对非定常计算的时间步长 Δt 进行收敛性评估，分别以RDT桨叶旋转一定角度对应物理时间为时间步长，进行非定常计算，不同时间步长的计算结果如图4所示，图中 K_{Tr} 为转子推力系数，可以发现所选评估变量受时间步长影响甚微，这是因为库朗数 $C = (\Delta t)u/\Delta x$ 在 Δt_1(对应桨叶旋转4°所需时间)处为6.13，其中：u 简化为桨叶最大线速度；Δx 为网格分辨率．基于本研究采用的半隐式求解器，其基本足以满足水动力计算要求，而在 Δt_2(对应桨叶旋转1°所需时间)处结果趋于稳定，为保证精细的流场，后续采用桨叶旋转1°对应的时间步长．

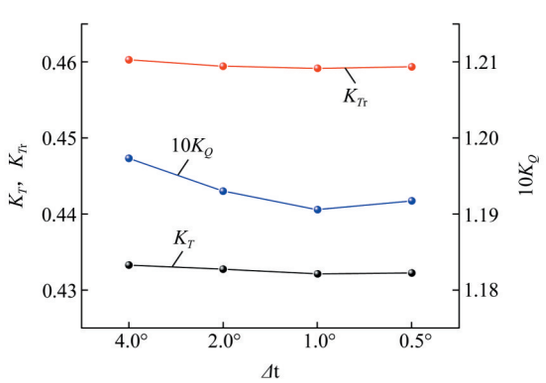


图4　时间步长收敛特性(J=0.9)

在数值时空收敛性分析的基础上，针对原型RDT开展均匀来流下的敞水性能测试，敞水试验采用固定转速 n=15 r/s，改变拖车速度来调节试验工况的方法．

同步开展同工况下定常及非定常计算，数值与试验结果的对比曲线如图5所示．对于RANS计算结果，各水动力系数误差基本控制在4%以内；DES计算值较RANS略低，且各水动力系数误差均

低于 5%．表明本研究对 RDT 水动力性能的定常及非定常计算方法具有足够的准确性和适用性．

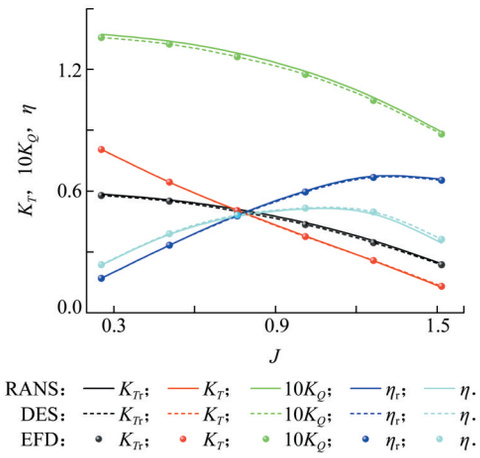


图 5　RDT 水动力性能对比曲线

3　结果与讨论

预旋定子的核心作用在于为螺旋桨提供预旋流动，从而改变其有效进流攻角．这一特性使得安装角成为影响 RDT 水动力性能的关键参数．为揭示其内在影响机理，在原始 RDT 模型基础上，系统分析不同安装角对 RDT 水动力性能的影响规律，预旋定子安装角对应几何特征如图 6 所示，桨叶旋转方向为−x 方向．

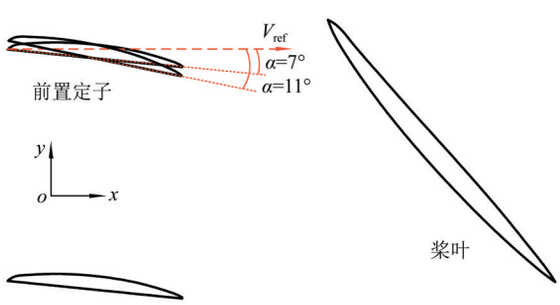


图 6　预旋定子与桨叶 0.7R 剖面几何示意图

3.1　水动力性能分析

图 7 展示了不同安装角下 RDT 的敞水性能曲线．结果表明：α 对系统性能具有显著的调控作用，随着 α 增大，RDT 能产生更大推力，其代价是转子扭矩也随之增加．该趋势在高进速系数工况下尤为显著，例如当 J=1.517 时，安装角从 7°增至 11°，K_T 提升 25.9%，K_Q 同步增长 14.9%；推进效率 η 与 α 之间存在复杂的非线性耦合关系，且该关系随工况不同而变化，在低进速系数条件下，较小安装角反而有利于效率提升；在中等载荷工况下，效率随安装角增大呈现先上升后下降的趋势；而在高进速系数下，效率随安装角增大显著提高，表明该

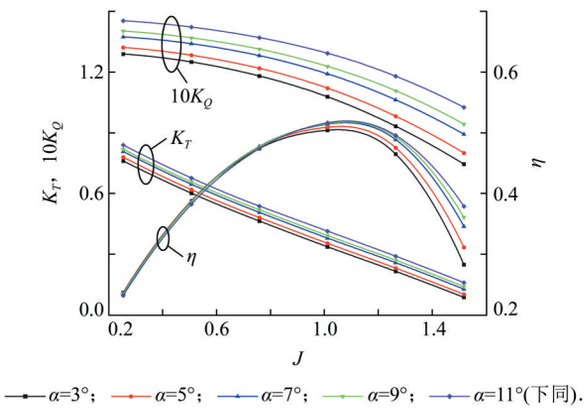


图 7　不同安装角 RDT 水动力系数对比

工况下安装角对效率的影响尤为突出．

为进一步揭示 α 对 RDT 部件性能的调控机制，图 8 给出了各部件水动力系数随进速系数的变化曲线，图中：K_{T1}，K_{T2}，K_{T3}，K_{T4}，K_{T5} 分别为桨叶、轮缘、导管、预旋定子及后定子的推力系数；K_{Q1} 和 K_{Q2} 分别为桨叶和轮缘的扭矩系数．安装角主要影响的部件有螺旋桨、预旋定子和导管．

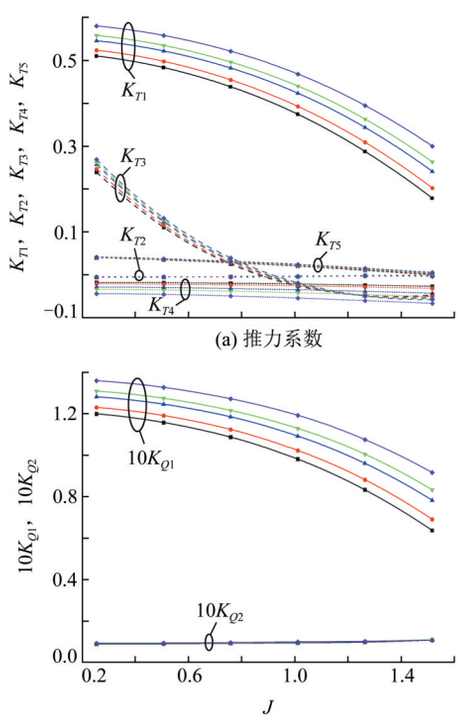


图 8　不同安装角 RDT 各部件水动力系数曲线

增大安装角会同步提升螺旋桨的推力和扭矩，α=11°构型相较原型：K_{T1} 和 K_{Q1} 的提升幅度分别为 6.3%～24.4% 和 6.1%～17.0%(均随 J 增大而增大)，推力对安装角的敏感性显著高于扭矩，因此螺旋桨的效率与安装角正相关，这从侧面反映了前定子预旋作用对螺旋桨的进流有明显的优化；安装角增大，螺旋桨水动力轴向分量增大，推进器内流场加

速，势必会导致预旋定子阻力增加，这种效应随着进速系数提升更为明显；对于导管而言，安装角的影响具有双重效应，该效应与导管自身推力的方向密切相关：当导管产生正推力时(J<1.264)，增大安装角可进一步提高导管推力，而当导管推力为负时，增大安装角则会使其阻力增大，因此增大安装角会增强导管受力的绝对值，但并不改变力的方向.

3.2　水动力脉动分析

表 3 统计了当 J=0.9 时不同安装角下 RDT 推力系数的脉动情况，用于定量分析安装角对水动力非定常特性的影响. 结果表明：随着安装角增大，K_T，K_{T1} 及 K_{T2} 的标准差均呈现显著的非线性增长趋势，并在 α=11°处出现临界现象，其脉动幅值相较更小安装角工况呈数量级跃升. 该现象说明：增大安装角会增强 RDT 推力的非定常脉动特征，且这种脉动主要来源于桨叶部分的贡献.

表 3　RDT 推力系数标准差 $\sigma(J$=0.9)　　10^{-3}

α/(°)	K_T	K_{T1}	K_{T2}
3	0.755	0.520	0.112
5	0.718	0.574	0.115
7	0.777	0.630	0.127
9	0.955	0.801	0.123
11	3.347	3.002	0.320

对单桨叶推力系数时域信号进行傅里叶变换，得到了其频谱图(见图 9). 频谱分析表明：脉动能量主要集中在一阶后置定子特征频率(f_{RS})及前三阶预旋定子特征频率(f_{PS}，$2f_{PS}$，$3f_{PS}$)处，表现为清晰的谱峰. 从幅值上看，二阶与三阶谐频的幅值衰减极快；而一阶预旋定子频率(f_{PS})的幅值则随安装角增大而显著增强，且在 α=11°处出现急剧增长.

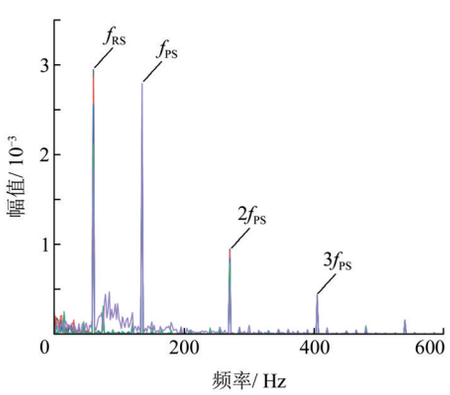


图 9　单桨叶推力系数的频谱特征(J=0.9)

3.3　流场特性分析

图 10 从流场速度分布的角度分析改变安装角 α 对 RDT 流场的影响，图中 V 为流场速度. 由图 10 可见：α 增大引起内外流场速度提升，桨叶表面的速度极值区轴向外扩，上游来流及下游尾流均明显加速，进而导致尾流的径向耗散减弱(表现为尾流外表面与轴线夹角减小)，导管尾缘流动分离加剧，桨毂后低速区反而得到一定控制. 值得注意的是：安装角增大虽然导致前定子与导管接触位置流动分离严重，但由于轮缘间隙出流的屏蔽作用，其几乎未向螺旋桨区域发展.

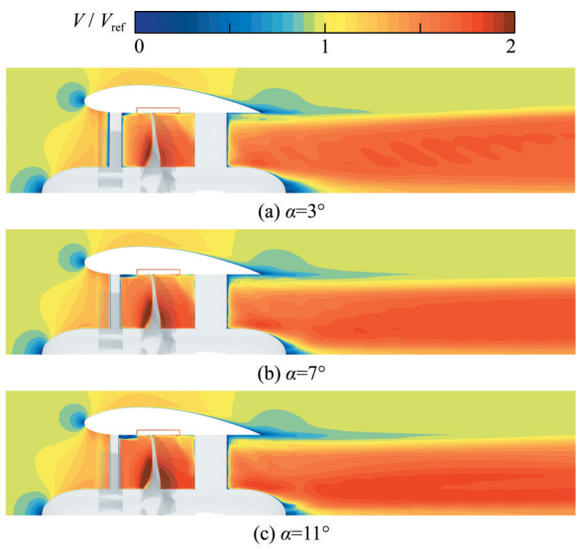


图 10　中纵剖面流场速度分布(J=0.9)

图 11 为 RDT 内流场及尾流场的涡结构分布，图中 ω_θ 为切向涡量，采用无量纲处理. 图 11 揭示了 K_{T1} 标准差受安装角影响的内在机理：安装角的增大会强化预旋定子梢涡(椭圆框)的非定常脱落特性，使其与螺旋桨叶片的相互作用加剧，桨叶尾流涡量显著增大，导管尾缘脱落涡(矩形框)持续向下游发展. 这种增强的涡-螺旋桨干涉易引发涡结构

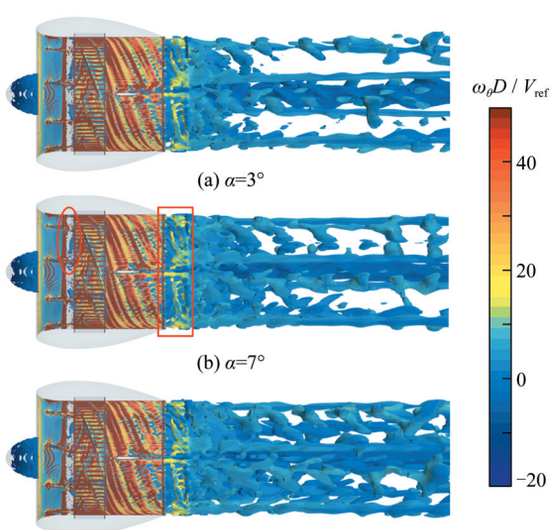


图 11　Q=100 s^{-2}涡结构(J=0.9)

的破裂，从而在特定频率(尤其是f_{PS})上激发出剧烈的推力脉动，导致桨叶推力脉动大幅提升．

图12阐明了预旋定子对桨前流场的预旋作用，图中：V_x为轴向速度；V_θ为切向速度．增大安装角，可以加强预旋定子的预旋作用，从而提升桨叶来流的切向速度，等同于加快螺旋桨转速从而加大螺旋桨有效攻角，提升了螺旋桨推力．

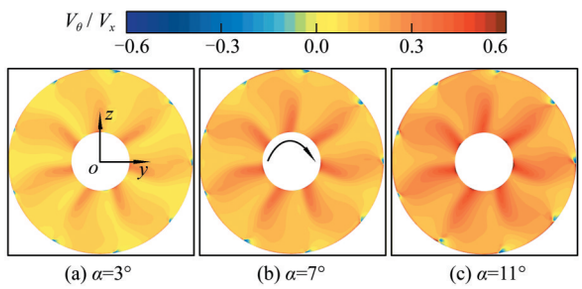


图12　桨前来流分布(J=0.9)

图13分别给出了叶根(0.4R)、环量最大(0.7R)位置处的速度分量沿周向的分布，V_r表示径向速度．预旋定子对桨叶的预旋作用有着以下三个维度的差异．**a**．在桨叶位置维度越靠近梢部，受到的预旋作用越弱，由图13可见：随着位置向梢部靠近，V_θ越来越小．**b**．在速度分量维度，受安装角的影响程度表现为$V_\theta > V_x > V_r$．以图13(b)为分析基准，径向速度几乎不受影响，安装角显著控制切向速度的数值而不改变其分布规律，轴向速度曲线则明显受到定子诱导的干扰，周期由桨叶周期特征(峰值数和桨叶数相等)叠加了预旋定子的叶频脉动．**c**．在安装角维度，安装角越大预旋作用越强．在任何桨叶位置，对于任何速度方向，安装角越大则该处的速度越大．

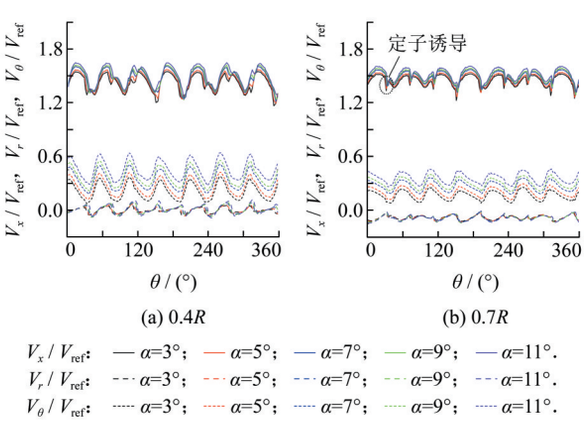


图13　不同径向位置处的无量纲速度分布(J=0.9)

3.4　预旋定子对螺旋桨推力贡献分析

沿径向将单个预旋定子和桨叶由根部至梢部均分为10个小单元，分别为S1～S10和B1～B10，将每个单元的推力数据提取出来，绘制成图14，图中K_{TB}和K_{TS}分别表示桨叶和预旋定子各单元的推力系数．定子的10个单位均表现为阻力，为方便比较，将K_{TS}取绝对值处理．各径向位置的桨叶推力和前定子阻力都随安装角增大同步增长，预旋定子阻力对安装角敏感度更高．桨叶推力在B5～B8范围内增幅最大，此处为桨叶最佳做功区域(0.7R左右)，该区域因线速度高、流动环境好、作用面积大等特点对推力贡献更大，推力收益更为显著，而前定子阻力沿径向各单元分布较均匀，这一差异证明安装角存在局部极值使RDT整体效率达到最大；不论桨叶还是前定子，都在叶片梢部和根部力更小，桨叶则沿径向推力分布梯度较大，在B6处推力达到最大．

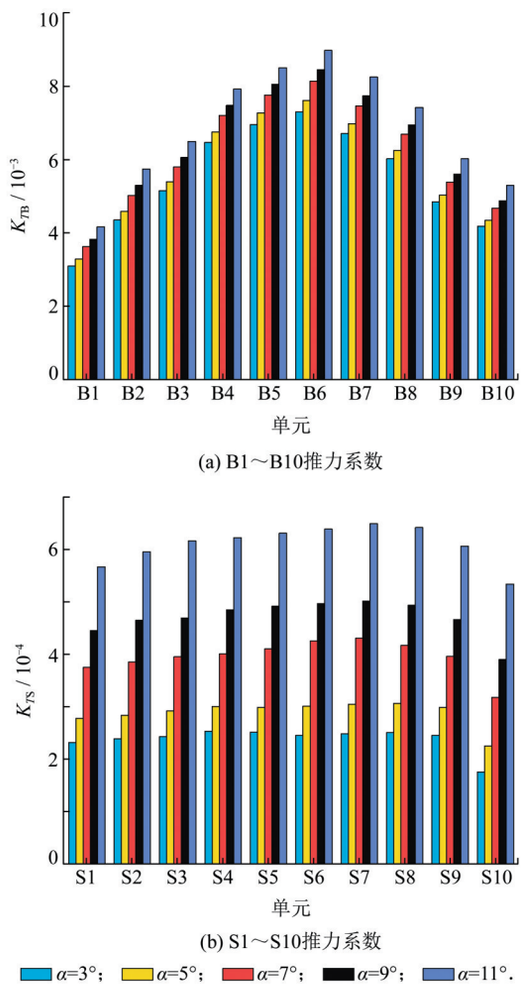


图14　桨叶和前定子单叶片推力系数分布

4　结论

a．预旋定子可有效优化螺旋桨进流场，且该优化效果随安装角增大而增强．随着安装角增大，RDT的推力和扭矩均显著提高，其中桨叶推力在最佳做功区域附近增幅最大，且推力增幅高于扭矩

增幅．

b．非定常分析显示，安装角增大引起定子与螺旋桨干涉效应增强，桨叶总推力系数标准差非线性增长，临界状态为α=11°，主要源于特定频率(尤其是f_{PS})上激发出剧烈的推力脉动．

c．增大安装角可显著改变RDT流场结构，优化桨叶进流，增大切向速度与有效攻角，提高尾流轴向速度，减弱径向耗散．其影响主要体现在三个维度：径向位置越靠近叶梢，预旋作用越弱，速度分布越不规则；速度分量中切向速度受影响最大，轴向次之，径向最小；安装角越大，各位置、各方向速度均显著增大．

参　考　文　献

[1] 闫大海，张晗，苗金林，等．潜艇隐身技术分析[J]．舰船科学技术，2020，42(21)：128-133．

[2] LIU B，VANIERSCHOT M，BUYSSCHAERT F．Numerical study of scale effects on the open water performance of a rim-driven thruster[J]．Applied Ocean Research，2023，138：103667．

[3] 孙聪，岳启辉，王文全，等．均匀流中泵喷推进器噪声特性数值模拟研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2023，51(12)：130-136．

[4] 韩承灶，阮华，洪方文，等．不同工况下无轴泵喷推进器间隙流动损耗特性数值分析[J]．水动力学研究与进展(A辑)，2022，37(1)：1-9．

[5] LI P，SUN C，YAO H D，et al．The effects of domain division types on the performance prediction of a rim-driven thruster[J]．Ocean Engineering，2023，287：115809．

[6] CAI B A，TIAN B B，QIU L Y，et al．Application of the body force method in the rim driven thruster[J]．International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering，2022，14：100476．

[7] LIU B，VANIERSCHOT M．Numerical study of the hydrodynamic characteristics comparison between a ducted propeller and a rim-driven thruster[J]．Applied Sciences，2021，11(11)：4919．

[8] 宋显成，赵国平，苑利维，等．轮缘推进器水动力性能影响因素数值研究[J]．船舶工程，2020，42(7)：67-71，163．

[9] 杨蕾，周军伟，闫文辉，等．轮缘驱动推进器导管的初步设计及分析[J]．中国造船，2020，61(S2)：323-329．

[10] LIU B，VANIERSCHOT M，BUYSSCHAERT F．Effects of transition turbulence modeling on the hydrodynamic performance prediction of a rim-driven thruster under different duct designs[J]．Ocean Engineering，2022，256：111142．

[11] LIU B，VANIERSCHOT M，BUYSSCHAERT F．Optimization design of the duct of a rim-driven thruster using the adjoint approach[J]．Ocean Engineering，2023，278：114293．

[12] 曹庆明，胡芳琳，唐登海，等．轮缘推进器的轮缘摩擦损耗评估方法研究[C]// 2013年船舶水动力学学术会议．西安：《中国造船》编辑部，2013：456-464.

[13] 曹庆明，韦喜忠，唐登海，等．间隙流动对轮缘推进器性能影响研究[C]//第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会．青岛：海洋出版社，2014：108-117.

[14] LI P，YAO H D，WANG C，et al．Improved efficiency with concave cavities on S3 surface of a rim-driven thruster[J]．Physics of Fluids，2023，35(10)：107102．

[15] PENG H H，GUO J M，SUN Y，et al．Numerical analysis of hydrodynamic force of front- and rear-stator pump-jet propulsion systems behind a submarine under oblique sailing[J]．Ocean Engineering，2022，266：112565．

[16] YU H T，DUAN N Y，HUA H X，et al．Propulsion performance and unsteady forces of a pump-jet propulsor with different pre-swirl stator parameters[J]．Applied Ocean Research，2020，100：102184．

[17] 李福正，黄桥高，潘光，等．定子预旋角对泵喷推进器敞水脉动特性影响[J]．哈尔滨工业大学学报，2022，54(12)：46-54．

[18] 胡益明，隆贤秋，范永鹏，等．毂帽鳍对泵喷水动力性能特性影响研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2025，53(10)：70-76．

[19] 王超，胡益明，孙聪，等．基于面元法的毂帽鳍式导管桨水动力性能研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(12)：119-126．

[20] WENG K Q，SUN C，HAN K，et al．Experimental/numerical investigation on the hydrodynamic and noise characteristics of pump-jet propulsion[J]．Ocean Engineering，2024，307：117995．