

基于 LES 方法的 ROV 导管螺旋桨系泊状态 梢隙流动数值模拟

周彬，赵敏，万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心，上海 200240)

摘要：导管螺旋桨是一种低航速推力强、效率高的优良特种推进器，普遍应用于水下无人遥控潜水器 (ROV)。在桨叶与导管之间的梢隙中存在的流动情况非常复杂，本研究基于大涡模拟 (LES) 方法对某型导管螺旋桨的梢隙流动进行了数值模拟分析。通过对计算域网格数量和若干监测点压力的收敛性研究，建立基于 LES 的梢隙流动的数值模型。将水动力计算结果与试验数值进行比较，以确定 LES 方法在计算导管螺旋桨水动力性能问题上的准确性。并将 LES 方法模拟的梢隙流动细节与常用的 RANS 方法计算的梢隙流动细节相对比，结合对梢隙流场的原理分析，比较两种方法模拟在旋涡形态，旋涡强度，旋涡发展、脱落、耗散过程等的差异，探讨更适合梢隙流动模拟的数值模拟方法。

关键词：导管螺旋桨；梢隙流动；大涡模拟

1 引言

水下无人遥控潜水器 (Remotely Operated Vehicle, 简称 ROV) 是一种通过脐带缆进行供电和传输信息的深水探测器，其在水下进行升潜、水平移动、保持静止和调整姿态时，需要通过推进器提供动力，推进器设计的好坏直接影响到潜器的推进效率。ROV 的航速往往比较低，对稳定性和操纵性的要求比较高。近年来，特种推进器在 ROV 上得到了广泛的应用，主要包括导管螺旋桨、槽道推进器等形式，其中导管螺旋桨因其优良的性能和良好的稳定性，一般被用作 ROV 的主要推进器。导管螺旋桨是一类组合推进器，主要包含螺旋桨的转子部分和导管的定子部分，一些特定用途的导管螺旋桨还往往在转子前方加装定子，起到导流和预旋的作用。导管根据其形式不同，可以分为加速型导管 (导管口逐渐收窄) 和减速型导管 (导管口逐渐放大)，其中加速型导管可以显著改善推进器的推进效果，而减速型导管往往应用于潜艇上，用以改善空泡性能。深潜器对系泊推力有较高的要求，因此选用加速型导管能获得更好的效果^[1]。导管螺旋桨在推力上的主要优势体现在低进速下相

比于常规螺旋桨具有更强的推力,而且能够改善桨后尾流。导管螺旋桨的导管与叶梢之间存在的微小间隙称为梢隙,在螺旋桨作业时,桨叶前方形成吸力区,后方产生压力区,流体在压力差的作用下沿桨梢通过梢隙,向吸力区转移,进入吸力区后与低压流体发生相互作用,产生了高强度的旋涡,称为梢隙泄涡,这种流动称为梢隙流动(TLV)。

目前,导管螺旋桨不仅在水下航行器上得到了广泛应用,而且在一些新型的海洋工程、动力定位、潜艇降噪等领域也发挥了优良的效能。导管螺旋桨梢隙中存在复杂的流动,各种大小的旋涡交替脱落,这种不稳定的梢隙涡不仅会影响推进器的效率,而且对推进器本身也容易造成剥蚀损坏。此外,梢隙涡的存在容易在涡核低压区发生空化形成空泡。空泡产生以后会直接增大推进器工作时的噪声,这对于潜艇的隐蔽性是致命的。实验研究发现,梢隙涡空化的起始先于桨叶表面空化的起始^[2]。因此,研究导管螺旋桨的 TLV 对提高其性能、增强其可靠性以及降低噪声有重要意义。

导管螺旋桨的梢隙连接了吸力面和压力面,其中存在复杂的流动,主要是脱落涡的形态与常规螺旋桨有很大不同。目前学术界存在很多关于这方面的研究,其研究手段主要有试验研究和数值模拟两种。

在试验研究方面,以荷兰船模试验池的 No.19A+Ka 和 No.37+Ka 系列导管螺旋桨最为著名,其结果已绘成 $B_p - \delta$ 型设计图谱以供使用。Oweis 等^[3]使用平面粒子成像测速(PIV)技术研究了导管螺旋桨梢隙区域的瞬时和时均流场,发现两种流场中确定的平均涡流特性存在显著差异。Miorini 等^[4]通过 PIV 技术观察到瞬时 TLV 结构是由传播到叶梢区域的非稳定涡旋细丝组成的,这些细丝首先嵌入在吸力面卷起的涡旋片中,然后彼此缠绕进入梢隙中,并将 TLV 核心周围的不稳定性分解为来自交错旋涡和宽范围湍流两种不同来源。Kim 等^[5]认为梢隙尺度对螺旋桨的效率具有重要的影响,一般来说梢隙越小螺旋桨效率越高,而且模型试验与实船尺度之间的尺度效应对性能预报的影响不能忽略。Arndt 等^[6]认为水轮机尾水管中的空化轮毂涡流会导致浪涌和功率波动,而且涡流的起始机制与涡旋配对的过程有关,空化不仅在涡旋结构中被诱导,而且也是涡旋产生的机制。

数值模拟方面,目前已有许多结合不同数值模型对 TLV 进行研究的成果。Fangwen Hong 等^[7]利用 Fluent 软件分析了桨叶的环流分布。阮华等^[2]采用 RANS 方法对湍流模型进行了适用性研究,发现 3 种湍流模型 SST $k - \omega$, RNG $k - \epsilon$ 及 RSM 的计算结果基本一致,TLV 的主要驱动力是叶面与叶背之间的压差,并对梢隙涡形成和脱落的位置进行了研究。李超等^[8]使用 Rayleigh-Plesset 空化模型结合 3 种湍流模型对不同空化数条件下的导管螺旋桨空化性能进行了计算,认为 $k - \omega$ 模型计算更加稳定且精度更高,但是对空化数更加敏感。马艳等^[9]使用多块混合性网格和滑移网格技术对某潜水器的导管螺旋桨进行了 CFD 模拟,计算结果比较准确,得出了湍流参数采用公式计算比经验计算更准确结论,认为现阶段湍流模型还是两方程模型更为准确。胡健等^[10]使用 MRF 方法分析了 JD7704 + Ka4-55 导管桨的定常水动力性能,认为导管的存在能够显著减小螺旋桨在斜流工况下运作时的推力和扭矩脉动。Kawakita^[11]提出了一种考虑叶轮载荷效应的新型尾流模型,改善了面元法的预测结果。Wu 等^[12]分别使用 RANS 和 LES 两种方法对梢隙泄涡进行了研究,认为 LES 能够模

拟从平均流动到大尺度湍流的能流通量，更适合研究梢隙泄涡问题。

2 数值计算方法

TLV 存在于导管内壁和桨叶边缘，因此其流动受到壁面的强烈影响，黏性尤其是边界层的作用无法忽略，所以采用忽略黏性的势流方法是不合适的。近年来的导管螺旋桨研究也逐渐开始广泛使用 CFD 方法对考虑黏性影响的 TLV 进行研究。CFD 方法主要可以分为 3 种：直接数值模拟（DNS），大涡模拟（LES）以及雷诺平均方法（RANS），此外，近年来又有一种介于 LES 和 RANS 之间的方法：DES，即分离涡模型。其中，DNS 方法最为准确，但是对网格质量、数量和计算资源要求过于巨大，还无法应用于实际工程计算。RANS 方法应用最为广泛，但是由于对控制方程进行了时间平均，导致一些随机的和细小的涡无法捕捉到，对于梢隙泄涡的研究来说精度不足。而 LES 方法在一定尺度上滤去了小尺度涡并用一个总的量在动量方程中加以代替，而将大尺度的涡直接模拟出来，从而得以保留大部分涡的信息，对旋涡流动的模拟更加准确。导管螺旋桨梢隙的涡情况非常复杂，各种形状、尺度的涡交错出现，使用 RANS 方法会使得很多脉动量无法得到体现，从而难以模拟小尺度涡的随机行为，因此本研究选用 LES 方法对导管螺旋桨的 TLV 进行研究，并将计算结果与 RANS 计算的结果进行比较，寻找更适合导管螺旋桨梢隙泄涡的研究方法。

2.1 LES 求解模型

在 LES 计算中，第一步是要设定一个过滤临界量，用以将流动划分为大尺度和小尺度量，即所谓滤波过程。所以 LES 的控制方程相当于在普通的 N-S 方程的基础上进行滤波，以滤去比临界值更小的涡，而保留比临界值更大的涡，对于滤去的小涡，通过引入附加引力项加以弥补，从而得到 LES 满足的控制方程^[13]。

过滤临界量定义为：

$$\bar{\varphi}(\mathbf{x}) = \int_D \varphi(\mathbf{x}') G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (1)$$

其中， D 为流体区域， G 为权函数，也称滤波函数，其作用是滤去小尺度涡，决定了过滤临界值，其表达式为：

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} 1/V & (\mathbf{x}' \in V) \\ 0 & (\mathbf{x}' \notin V) \end{cases} \quad (2)$$

其中， V 为控制体所占几何空间的大小。则式（1）可以写成：

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{V} \int_D \varphi d\mathbf{x}' \quad (3)$$

在 LES 方法中，使用滤波函数处理不可压流体的 N-S 方程，可以得到方程（4）：

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (4)$$

方程(4)就是LES方法所满足的控制方程。

其中： σ_{ij} 为分子黏性引起的应力张量，由分子黏度定义为：

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5)$$

\bar{u}_i 和 \bar{u}_j 为沿不同方向的速度分量的时均值， τ_{ij} 为亚格子应力(SGS应力)，体现了小尺度涡的运动对所求解的运动方程的影响。 τ_{ij} 为：

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

上面所列公式中带有上划线的为滤波之后的变量。

2.2 研究对象

本研究的导管螺旋桨模型来自于上海交通大学水下工程实验室某型潜水器的推进器。导管螺旋桨的几何模型见图1。

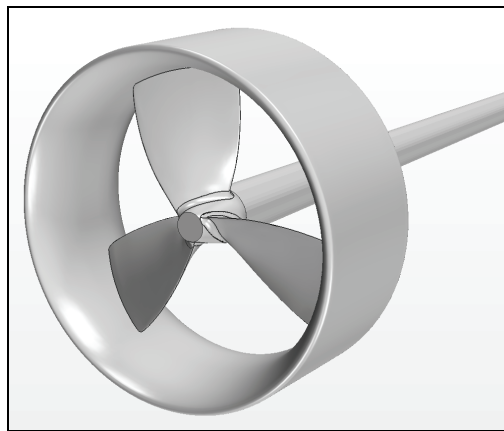


图1 导管螺旋桨几何模型

该桨的桨叶参数见表1。

表1 导管桨桨叶参数

叶数	直径	螺距比(桨叶0.7倍直径)	盘面比
3	0.385m	0.97	0.49

2.3 网格划分

考虑螺旋桨所处工况为系泊状态，以及准确性和计算量的要求，设置计算域为桨前

12.5D，桨后 12.5D，径向直径 8D，其中 D 为螺旋桨直径。

整体计算域划分为仅包含螺旋桨在内的旋转域和包含导管在内的外部流域，两个域之间通过贴合的交界面进行数据传递。由于导管内部几何形状复杂，本研究采用 Star-CCM+ 中的多面体网格进行导管内部旋转域的网格划分，以便更好地控制网格分布，平缓网格过渡，由于梢隙尺寸细小，形状较为复杂，对梢隙中进行了加密。外部流域几何形状相对简单，使用切割体网格进行网格划分以便节约计算资源。整个流域边界层均为模拟边界层流动的方法，壁面第一层网格高度要满足 Y^+ 约束，一般对边界层进行模拟时， Y^+ 的值应该介于 0~1 之间，本文选用的 Y^+ 为 0.3，符合计算要求。计算区域网格如图 2 和图 3 所示。

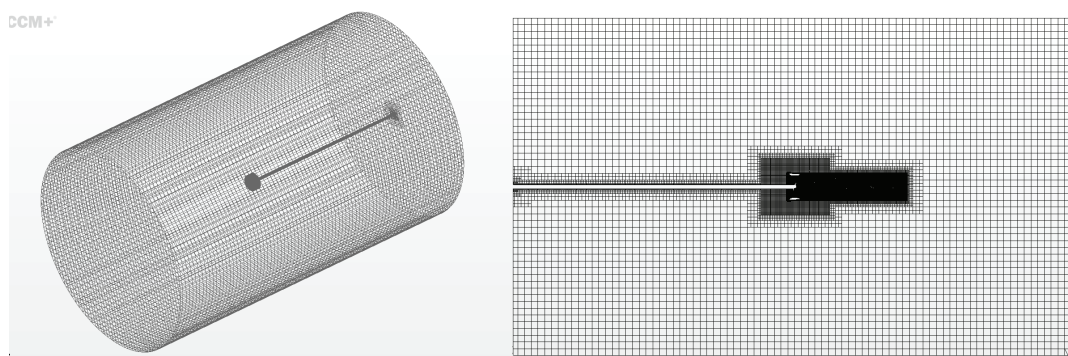


图 2 计算域网格区域划分

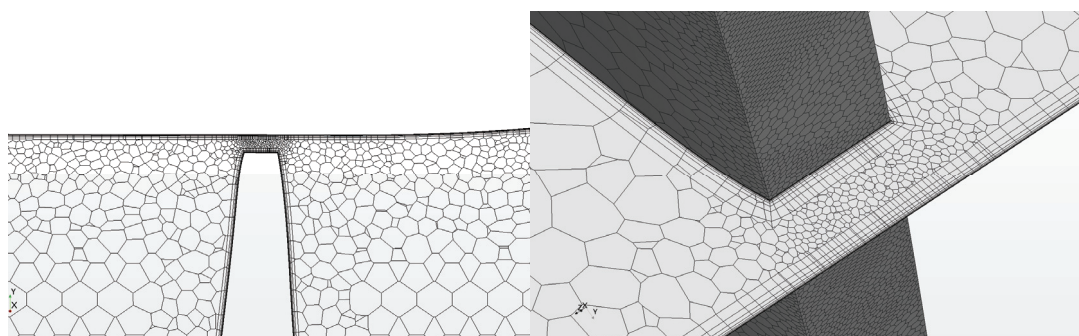


图 3 桨梢和梢隙中的网格划分

2.4 边界条件及其他参数设置

采用 Star-CCM+ 软件自带求解器对模型进行分析，应用滑移网格模型，数值方法采用大涡模拟 (LES) 非定常模型，压力速度耦合应用 SIMPLE 算法。

计算的边界条件设置如下：入口 (inlet) 条件设置为停滞进口，初始来流速度为 0，出口 (outlet) 条件为压力出口，杆轴、导管、桨叶、桨毂表面均设置为不可滑移壁面条件 (wall)，外部流域与内部旋转域之间贴合的面设为交界面 (interface)，在交界面上进行数据传递。

3 网格收敛性分析

网格收敛性检验要求至少有三套可供对比的网格^[14]，随着网格的增加，计算值应趋于稳定，在本研究中，采用三套密度不同的网格对模型进行计算，设定来流速度为 $U = 0\text{m/s}$ ，桨叶转速 $r = 820\text{rpm}$ ，并在流域中设置 3 个压力监测点，分别为：①梢隙监测点：置于梢隙中央，监测梢隙流的压力。②泄涡监测点：置于泄出涡中，监测泄出涡的压力。③扇叶监测点：置于扇面附近，监测扇叶附近的压力。

3 个监测点位置如图 4 所示。

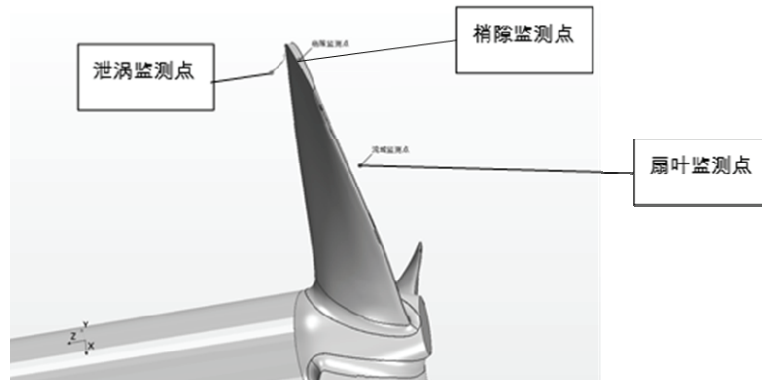


图 4 压力监测点位置

根据 ITTC 建议的方法^[15]，收敛比率 R_G 被定义为：

$$R_G = \varepsilon_{21} / \varepsilon_{32} \quad (6)$$

其中， $\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$ ， $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$ 。 S_1 、 S_2 、 S_3 分别表示粗糙、中等、精细网格的模拟结果。基于 R_G ，离散化收敛的状态可以分类为：①单调收敛： $0 < R_G < 1$ 。②震荡收敛： $R_G < 0, |R_G| < 1$ 。③单调发散： $R_G > 1$ 。④震荡发散： $R_G < 0, |R_G| > 1$

将推力计算结果与试验结果对比分析结果见表 2。

表 2 计算结果的对比

网格	推力/N	梢隙监测点压力/Pa	泄涡监测点压力/Pa	扇叶监测点压力/Pa
粗糙 (675 万)	1802.2	-24576	-33290	-2605
中等 (884 万)	1809.8	-30422	-35540	-3023
精细 (1094 万)	1810.3	-29930	-35744	-2962

计算推力的收敛比率为 $R_G = 0.066$ 位于单调收敛区域内，即随着网格数的增加，推力的计算值为收敛的。且 3 个监测点的压力变化也已经非常小。这说明网格数量超过 884 万后，网格数量再增加对计算结果的影响可以忽略，因此认为此时已经收敛，将采用 884 万

网格进行后续计算。

4 计算结果与分析

4.1 计算值与试验值对比

该型螺旋桨在上海交通大学拖曳水池完成了敞水试验，其系泊推力系数为 0.114，表 3 是基于该系泊系数的计算推力值与数值计算得到推力值的比较，转速介于 670~820rpm，在这些工况中每隔 20rpm 进行一次计算。

表 3 各工况计算值与试验值比较

转速/rpm	基于系泊推力系数的计算值/N	数值计算推力值/N	误差/%
590	871.05	928.10	6.55
610	931.10	991.45	6.48
630	993.16	1056.78	6.41
650	1057.22	1126.77	6.58
680	1157.06	1234.91	6.73
700	1226.12	1304.99	6.43
720	1297.19	1383.21	6.63
740	1370.26	1465.06	6.92
760	1445.33	1548.21	7.12
780	1522.40	1632.00	7.20
800	1601.47	1710.58	6.81
820	1682.54	1809.80	7.56

通过表 3 和图 5 可以发现，使用 LES 方法计算的推力值误差均处于 10%以内，证明 LES 计算结果的有效性，可以使用该结果进行流场分析。

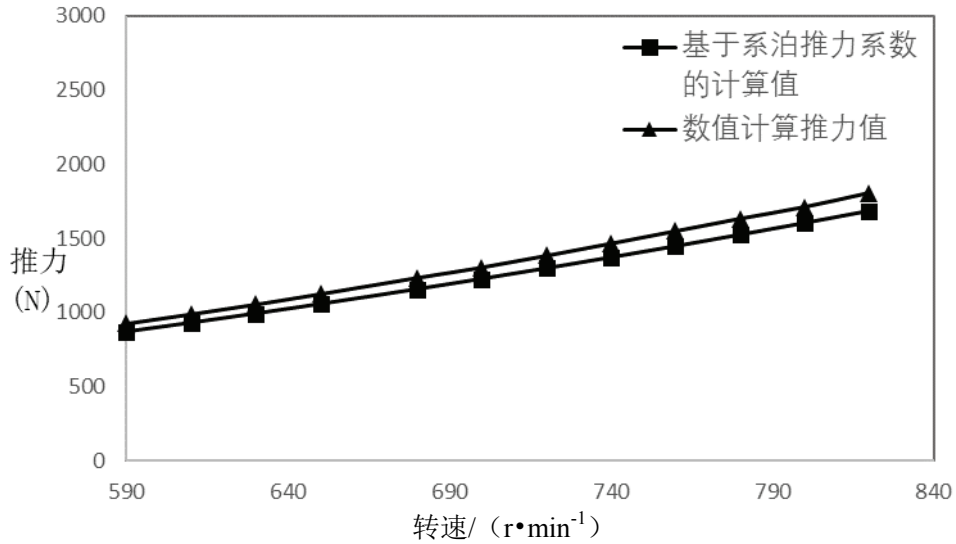


图5 计算值与试验值对比曲线

4.2 梢隙泄涡形成机理

图6 为沿着桨梢弦长方向的不同位置压力分布。

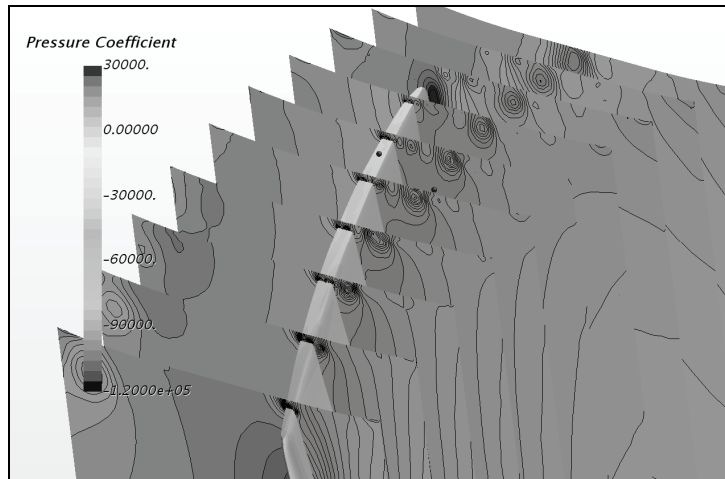


图6 沿桨梢弦长方向压力分布

从图6中可以看出,导管螺旋桨吸力面与压力面之间的压差是梢隙泄涡形成的驱动力,一条主要的泄涡是从桨梢临近导边位置泄出的,涡核的压力约在4/5弦长处达到最低,脱落后延伸至后方,与桨叶转过后吸力面与压力面的交界区域相混合,涡核压力自脱落后开始增大。泄涡的形成主要是由于桨叶两侧强烈的压差,驱动流体从高压区进入低压区。图

7 是 4/5 弦长处速度矢量图，揭示了泄涡起始时内部的流动机理。梢隙流体通过梢隙时，梢隙前方附近的流体径向运动进入梢隙，进入梢隙后流域突然缩窄，流体脱离桨叶后产生分离，在梢隙形成了旋涡。梢隙中的流体流出梢隙后，与吸力面的来流相互作用、混合，也卷起了旋涡。

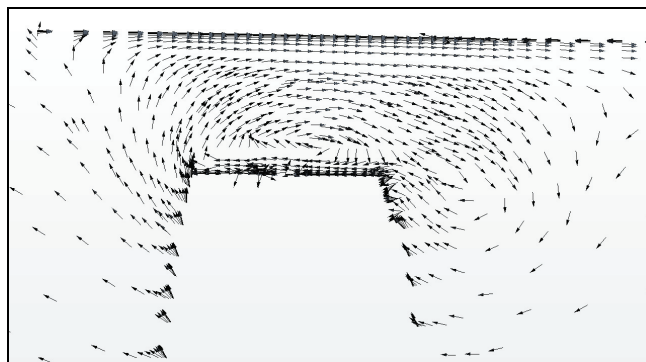


图 7 4/5 弦长处速度矢量图

4.3 与 RANS 计算结果的对比

上述计算采用的是 LES 方法对流场进行模拟，为了比较 RANS 与 LES 对 TLV 模拟的准确性，采用 RANS 对该导管螺旋桨进行计算。计算域划分方式和参数设置与前文相同，桨梢网格处理如图 8 所示。

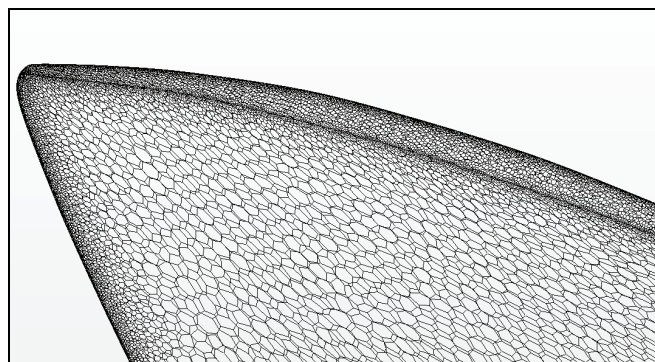


图 8 RANS 方法计算桨梢网格处理

图 9 是 RANS 方法计算的沿弦长方向不同位置的压力分布。

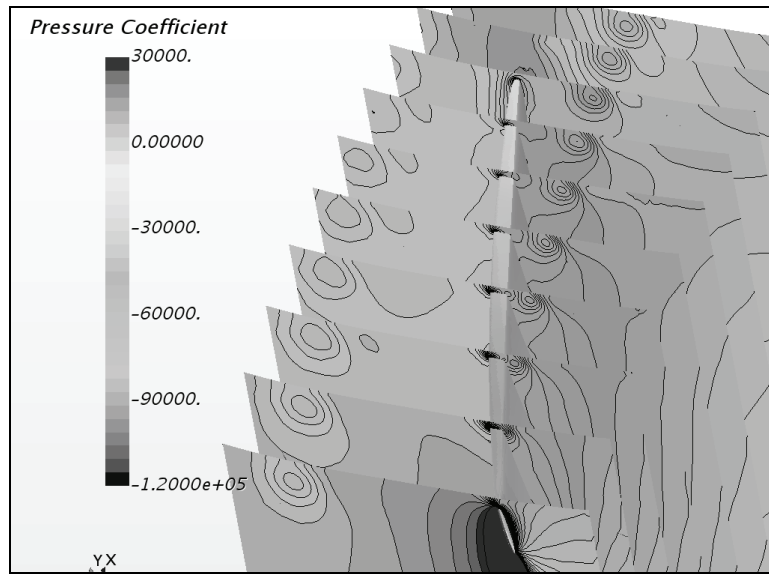


图 9 RANS 方法计算的沿弦长方向压力分布

图 10 是两种方法计算的梢隙涡和泄涡。



图 10 RANS 与 LES 方法计算的梢隙涡和泄涡 (左: RANS 右: LES)

由图 9 和图 10 可以看出, 桨叶的导边、桨梢压力面侧附着有较强的涡, 吸力面侧脱落区也存在较强的涡。两种计算方法对于脱落于约 4/5 弦长的一条最主要的涡, 和流体进入梢隙时分离形成的涡都能够较好地模拟, 但是 RANS 由于用时均量代替了脉动量, 未能捕捉到梢隙中随机脱落的小涡, 涡量计算偏小。而 LES 直接模拟了所有超过亚格子尺度的涡, 所以对随机脱落的小涡模拟较好。由以上分析可知, LES 能够对导管螺旋桨梢隙泄涡进行更全面精细的模拟, 相比于 RANS, 能得到更加丰富的涡结构和流场信息。

5 结论

本研究基于 LES 方法开展了导管螺旋桨系泊工况 TLV 的数值模拟, 以推力值以及若干监测点压力变化为指标, 对网格数量进行了收敛性分析, 并与 RANS 计算结果进行了对比, 主要得出如下结论: ①通过与试验值的对比, 验证了 LES 计算导管螺旋桨性能的可行性。②导管螺旋桨梢隙存在的涡主要包括分布在压力面与梢隙的交界区域的分离涡, 以及吸力面侧脱落的泄涡。③通过计算分析, 获得了 TLV 起始、发展直至脱落的变化过程。④梢隙涡的驱动力是吸力面、压力面之间的压差, 该压差促使压力面的流体进入梢隙并形成分离涡, 梢隙流体进入吸力面并与吸力面流体相互作用, 形成泄涡。吸力面侧梢隙的泄涡起始位置约在弦长方向约 4/5 位置。⑤泄涡主要由起始于弦长 4/5 位置的一条粗壮的涡以及沿弦长随机产生的细小泄涡组成。LES 方法相比 RANS 方法能获得更多梢隙涡结构的信息, 对随机脱落的小涡能够较好地模拟, 说明 LES 方法更适合导管螺旋桨 TLV 的模拟。

致谢

本工作得到了国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 刘可峰, 姚宝恒, 连琏. 深潜器等厚导管螺旋桨敞水性能计算分析. 船舶工程, 2014, 36(1): 37-40
- 2 阮华, 张志荣, 辛公正. 基于 RANS 方法的导管推进器梢隙流动数值模拟. 中国舰船研究, 2015, 10(5): 83-91
- 3 OWEIS G F, CECCIO S L. Instantaneous and time-averaged flow fields of multiple vortices in the tip region of a ducted propulsor. Experiments in Fluids, 2005, 38(5): 615-636
- 4 MIORINI R L, WU H X, KATZ J. The internal structure of the tip leakage vortex within the rotor of an axial waterjet pump. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(3): 031018-1-031018-12
- 5 KIM M C, CHUN H H. Experimental investigation into the performance of the axial-flow-type waterjet according to the variation of impeller tip clearance. Ocean Engineering, 2007, 34(2): 275-283

- 6 Arndt REA. Cavitation in vortical flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002, 34: 143–175
- 7 Fangwen Hong, Shitang Dong. Numerical Analysis for Circulation Distribution of Propeller Blade. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22: 488-493
- 8 李超, 周其斗, 潘雨村, 等. 三种湍流模型对导管螺旋桨空化性能计算的比较. *中国舰船研究*, 2013, 8(2): 73-79
- 9 马艳. 导管螺旋桨的水动力性能分析与设计优化. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 76-78
- 10 胡健, 王楠, 胡洋. 导管桨水动力特性的数值研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(6): 815-821
- 11 KAWAKITA C. A surface panel method for ducted propellers with new wake model based on velocity measurements. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1992, 1992(172): 187–202
- 12 WU H X, MIORINI R L, KATZ J. Analysis of turbulence in the tip region of a waterjet pump rotor. *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers*, 2010, 1: 699-711
- 13 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2013
- 14 Xiaoyi Liu, Qingqing Yuan, Min Zhao, Weicheng Cui, Tong Ge. Multiple objective multidisciplinary design optimization of heavier-than-water underwater vehicle using CFD and approximation model. *Journal of Marine Science and Technology*, 2017, 22: 135-148
- 15 ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-01-01(2008) Uncertainty Analysis in CFD-verification and Validation Methodology and Procedures

Numerical simulation of the tip leakage flow in a ROV ducted propeller in moored condition based on the LES method

ZHOU Bin, ZHAO Min, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai, China, 200240)

Abstract: Ducted propeller is a kind of special propeller with strong thrust and high efficiency at low speed, which is widely used in Remote Operated Vehicle (ROV). The flow between the blade and the duct is very complex, and in this study large eddy simulation (LES) is used to study the tip leakage flow (TLV). A numerical model based on LES is established by studying the convergence of grid number and pressure at several monitoring points. The hydrodynamic results

are compared with the experimental data to determine the accuracy of LES method in calculating the hydrodynamic performance of the ducted propeller. Details of TLV calculated by LES method are compared with that calculated by RANS method. Combined with analysis of the principle of the tip leakage flow field, the differences of the intensity of vortex and vortex development, fall off and the dissipation process are compared to explore more suitable method for tip leakage flow simulation.

Key words: ducted propeller; tip leakage flow; large-eddy simulation