

基于叠模方法的船后螺旋桨水动力噪声计算

秦佳佳, 庄 园, 万德成*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL), 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要

以 Navigator XXI 船为研究对象, 分别用叠模方法和 VOF 自由面捕捉方法研究自由面效应的影响。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对流场进行模拟, 通过剖面速度曲线和云图比较两种方法得到桨盘面流场, 它们在螺旋桨盘面附近的流场中表现出较高的一致性, 因此可采用叠模方法计算带桨船的噪声。采用 Ffowcs Williams-Hawkings 声比拟方程, 用可穿透面积分估计螺旋桨噪声, 并研究其频率特性。

关键词: 船后螺旋桨噪声; 叠模方法; Ffowcs Williams-Hawkings 方程

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

螺旋桨表面的压力脉动和尾流中的泄涡是船舶螺旋桨噪声的重要来源^[1-2]。非均匀伴流导致桨叶载荷变化, 引发强烈的涡脱落, 如梢涡、毂涡等。这些涡脱落是主要的低频线谱和宽带噪声源, 也称为四极子声源。本文主要考虑该声源项。

为了准确预测螺旋桨噪声, 必须尽可能准确地模拟桨盘面处由船体产生的伴流场。Li 等^[3]采用 VOF (volume of fluid) 界面捕捉方法模拟 KCS 船在弗劳德数 $Fr = 0.35$ 时的液面飞溅现象。Chen 等^[4]采用 VOF 方法模拟船体表面波浪的湍流效应, 并研究了尾流的水动力性能。于连杰等^[5]采用 VOF 方法模拟自由面气泡, 预测的气泡群声功率级与试验结果吻合良好, 另外还计算了 KCS 船的破波噪声。但是 VOF 方法需要在自由面处设置精细的网格, 计算资源消耗巨大^[6-7]。

叠模方法属于简化计算的策略, 它忽略了兴波等自由面动力学效应, 将自由面视为对称面, 也就是镜像边界, 从而将两相流简化为单相流, 显著降低了计算复杂度^[8-9]。Jiang 等^[8]的研究表明: 叠模算例和考虑自由面的算例在水面以下船体表面的动压分布基本相同; 对于低速船舶, 两者阻力计算结果相近; 对于高速船舶, 自由表面升降剧烈, 两者的计算结果呈现一定的差异。但是这两种方法对螺旋桨盘面附近伴流场的影响程度尚不清楚。

本文以 Navigator XXI 船为研究对象, 该船的螺旋桨为 CP469 型, 分别基于叠模方法以及 VOF 自由面捕捉方法, 计算船后伴流。Islam 等^[10]的研究表明, SST $k-\omega$ 模型对壁面效应具有良好的适应性, 可以较为准确地模拟船后伴流, 因此本文也采用该模型封闭控制方程, 用伴流分数云图直观展示两种方法的异同, 并提取速度场剖面曲线进行比较。然后将 CFD 流场模拟的结果作为声源的输入项, 结合 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 声比拟方程进行噪声预测。由于计算考虑四极子声源, 因此采用可

穿透积分面，截去积分面的出口，以避免端盖效应^[11]。

1 数值方法

1.1 雷诺平均方法

在不可压缩牛顿流体的假设下，采用雷诺平均方法求解控制方程，通过时间平均将湍流分解为时均流动成分和脉动成分。时间平均方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中，上标“-”表示物理量的时均值； t 为时间； x_i 和 x_j 分别为 i 方向和 j 方向的空间位置矢量的分量； u 为流场速度； u' 为速度脉动量； p 为流场压力； ρ 为流场密度； ν 为运动黏度。在时均操作中产生了额外的未知量，即雷诺应力项。Menter等^[12]融合 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型，得到SST $k-\omega$ 模型，用来封闭时均方程，如式(3)和式(4)所示：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中， k 为湍流动能， ω 为比耗散率， G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能， G_ω 为 ω 的生成量， Γ_k 和 Γ_ω 分别为 k 和 ω 的有效扩散率， Y_k 和 Y_ω 分别为湍流引起的 k 和 ω 的耗散项， D_ω 为交叉扩散项， S_k 和 S_ω 为自定义源项。

1.2 VOF 界面捕捉方法

采用VOF方法捕捉水气两相流的自由界面。输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中， α 为相分数， $\alpha=0$ 表示计算单元充满空气， $\alpha=1$ 则表示计算单元充满水，若 $0 < \alpha < 1$ ，则单元位于水与空气的交界面处^[13]。流体的密度 ρ 和黏度 ν 由下式计算：

$$\begin{cases} \rho = \rho_{\text{water}} \alpha + \rho_{\text{air}} (1 - \alpha) \\ \nu = \nu_{\text{water}} \alpha + \nu_{\text{air}} (1 - \alpha) \end{cases} \quad (6)$$

式中，下标water和air分别指水和空气。

1.3 螺旋桨噪声预报方法

Ffowcs Williams和Hawkings将Curle方程推广到存在移动固体边界的情况，导得FW-H方程。将单极子项求得的厚度噪声和偶极子项求得的载荷噪声相加得到总声压。后来，控制面又由物面推广到可穿透积分面，得到如下方程：

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) p' = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 U_n \delta(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} (L_i \delta(f)) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (H(f) T_{ij}) \quad (7)$$

$$U_n = v_n + \frac{\rho}{\rho_0}(u_n - v_n) \quad (8)$$

$$L_i = p\delta_{ij}n_j + \rho u_i(u_n - v_n)$$

式中, p' 为声压, c 为远场声速, ρ_0 为远场未扰动的密度, v_n 为可穿透积分面的法向速度, u_n 为流体的法向速度, δ_{ij} 为克罗内克函数, n_i 为单位外法向量在 i 方向的分量, T_{ij} 为 Lighthill 应力张量, $\delta(f)$ 和 $H(f)$ 分别为狄利克雷函数和赫维赛德函数。本文采用式 (9) 所示的 Farassat 1A 公式作为 FW-H 方程的积分解。

$$\begin{aligned} p'(x, t) = & \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0(\dot{U}_n + U_n)}{r(1-M_r)^2} \right]_{\text{ret}} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 U_n (r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{\text{ret}} dS \\ & + \frac{1}{4\pi c} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_{\text{ret}} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{\text{ret}} dS \\ & + \frac{1}{4\pi c} \int_{f=0} \left[\frac{L_r (r\dot{M}_r + c(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{\text{ret}} dS \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $f(x, t) = 0$ 为积分曲面方程, dS 为积分微元; r 为声源到观测点矢量的模; M 为马赫数, $M = v/c$; M_r 为辐射方向的马赫数; L_r 为辐射方向通量矢量 \mathbf{L} 的分量; L_M 为一个与马赫数相关的修正项; \dot{U}_n 为 U_n 对时间的求导; 上标 “ \cdot ” 表示对时间的求导, 下标 “ret” 表示延迟时间。

2 算例设置与验证

算例采用的船体为 Navigator XXI 船型^[14], 配备一个可调螺距的 4 叶左旋螺旋桨, 设计号为 CP469, 如图 1 和图 2 所示, 船体以及螺旋桨的参数如表 1 所示, 模型的缩尺比 λ 为 1/7。螺旋桨敞水计算的计算域采用圆柱形计算域, 长度为 1.7 m, 直径为 0.9 m。以桨毂中轴线距离入口 0.34 m 处为坐标原点建立坐标系, y 轴指向流动反方向。计算域在 x, y, z 这 3 个方向被划分为 18, 34, 18 等分的背景网格。采用 SnappyHexMesh 软件进行网格划分, 尾流区在背景网格的基础上采用 3 级加密, 旋转域为 4 级加密, 螺旋桨桨叶处设置 4 层边界层, 总网格数为 286 万, 如图 3 所示。时间步长为 1×10^{-5} s, 取 0.3 ~ 0.5 s 时间段的稳定计算结果进行统计。



图 1 船体侧视图



图 2 螺旋桨几何图

表 1 Navigator XXI 及螺旋桨参数

参数	实船	模型
缩尺比 λ	1:1	1:7
全长 L_{OA} / m	60.3	8.614 3
船宽 / m	10.5	1.5
吃水(船/艇) / m	3.15 / 3.20	0.450 0 / 0.457 1
排水量 / t	1 150	3.35
船速 / (m/s)	6.173 3	2.333
螺旋桨直径 D / m	2.26	0.322 9

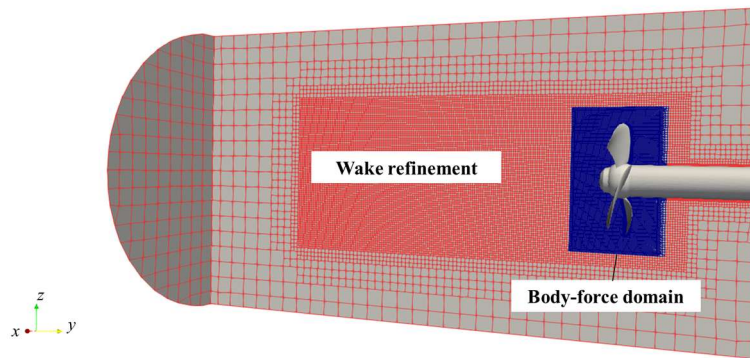


图3 螺旋桨敞水计算网格划分

螺旋桨转速恒定为 18.446 r/s, 改变来流速度, 计算得到不同进速系数下的敞水系数, 并将计算与试验结果比较^[15]。3 个参数的计算公式如式 (10) 所示。敞水系数计算结果如表 2 所示, 与试验数据吻合良好。

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \eta = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (10)$$

式中, T 为推力; Q 为扭矩; n 为螺旋桨转速; J 为进速系数, $J = V_p / (nD)$, V_p 为螺旋桨的进速。

表2 螺旋桨敞水系数

进速系数 J	推力系数 K_T	K_T 误差 / %	扭矩系数 K_Q	K_Q 误差 / %	敞水系数 η	η 误差 / %
0.1	0.416	1.12	0.545	4.44	0.121	3.56
0.21	0.360	2.01	0.490	5.25	0.251	3.10
0.3	0.315	2.25	0.442	5.57	0.340	3.43
0.39	0.265	1.92	0.383	3.92	0.431	1.82
0.5	0.205	1.63	0.319	4.32	0.511	2.65
0.6	0.152	3.52	0.262	6.48	0.553	2.96
0.7	0.096	5.52	0.201	9.22	0.535	2.86
0.8	0.035	1.94	0.131	9.43	0.337	7.19

为了方便比对, 阻力试验使用缩尺为 1:10 的船模。来流速度为 1.952 m/s。设置叠模和考虑自由面两个算例, 叠模算例的计算域按照标模计算说明书对于 1:7 模型的要求进行缩放, 长度为 24 m, 宽

度为 12.6 m, 深度为 5.6 m, 如图 4 所示。计算域 x, y 方向被均匀分为 180 和 100 个网格, 在 z 方向分为 3 段, 采用不同加密方式。第 1 段为底部向上 6.54 m 的范围, 分为 30 个网格, 膨胀比为 1.03; 第 2 段为 x 轴下方 1 m 的范围, 分为 10 个网格, 膨胀比为 1.075; 第 3 段为 x 轴上方, 均匀分为 10 个网格。在背景网格的基础上采用 SnappyHexMesh 软件进行网格划分, 最高加密等级为 3 级。VOF 算例的计算域相较于叠模算例增加了水面以上的部分, 两个算例在水面以下的网格完全相同, 如图 5 和图 6 所示, 其中图 5 是叠模算例网格的俯视图, 图 6 是两个算例网格侧视图的对比。两个算例的网格信息及阻力计算结果如表 3 所示, 试验值为 70.411 N, VOF 算例考虑了兴波的影响, 误差较小, 为 2.8%, 而叠模算例阻力值偏小。通过以上讨论, 确定了螺旋桨和船体周围的网格, 得到带桨船的网格, 并在 x, y, z 这 3 个方向将网格放大 10/7 倍, 得到 1:7 带桨船模型的计算网格, 如图 7 所示。

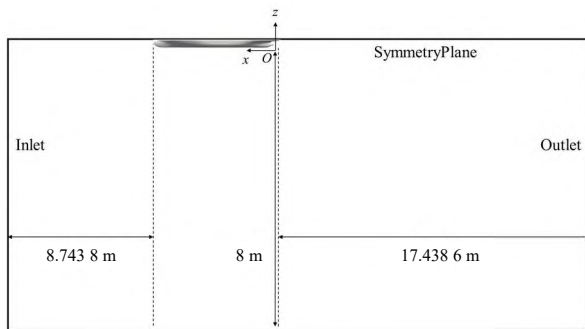


图 4 叠模算例计算域

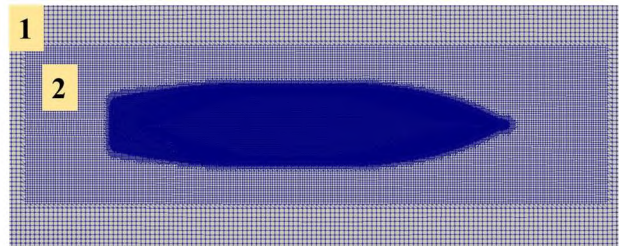
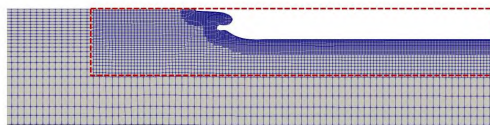
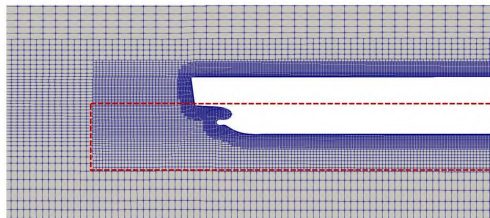


图 5 叠模算例网格俯视图



(a) 叠模



(b) VOF

图 6 叠模算例与 VOF 算例网格侧视对比图

表 3 叠模算例及 VOF 算例网格信息和阻力计算结果

参数	叠模算例	VOF 算例
网格总数/ 万	284	536
船体网格尺寸/ mm	14	14
y^+	90.58	47.06
阻力/ N	47.83	68.64

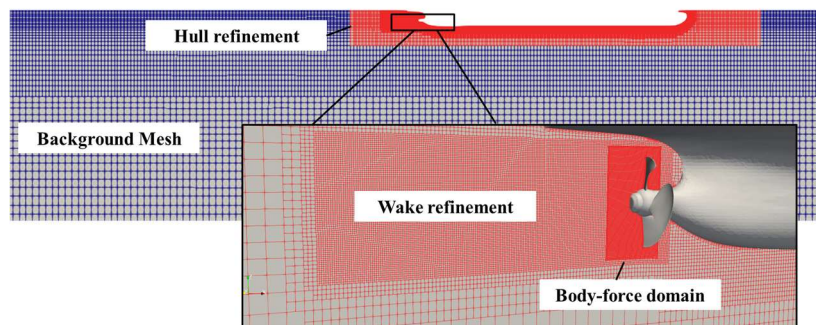


图 7 带桨船叠模算例网格

3 计算结果讨论

3.1 裸船后方流场对比

图 8 和图 9 展示了用 VOF 方法和叠模方法计算得到的水线面和螺旋桨中心水平剖面上的速度云图。叠模方法不考虑自由面效应, 所以不产生开尔文波。相较于水线面, 螺旋桨盘面受到自由面的影响较小。在 $y = 0$ 附近两者的速度分布接近, 只有在较远处 ($|y|$ 较大时) VOF 算例才展现一定的开尔文波分布特征。图 10 对比了 x 为 0, -0.2 和 -0.5 m 这 3 条线上的流场平均速度 (U_x, U_y, U_z)。在接近螺旋桨盘面处, 两个算例在 3 个方向的平均速度都比较接近, U_x 和 U_z 关于 y 轴对称, U_y 关于 y 轴反对称。随着采样点向下游移动, x 方向的平均速度展现一定的差异, 在螺旋桨叶面区域 ($0.1 \text{ m} < |y| < 0.15 \text{ m}$), 两者差异不大, 但是在桨毂处 ($|y| < 0.1 \text{ m}$) 以及叶梢向外区域 ($|y| > 0.15 \text{ m}$), 叠模算例的 U_x 普遍高于 VOF 算例。图 11 展示了两者在螺旋桨盘面前 $x = 0.328 57 \text{ m}$ 处的伴流分数云图。即使两个算例在阻力和水线面处的计算结果存在很大差异, 但在螺旋桨关键工作区域, 伴流场分布却呈现高度一致性。

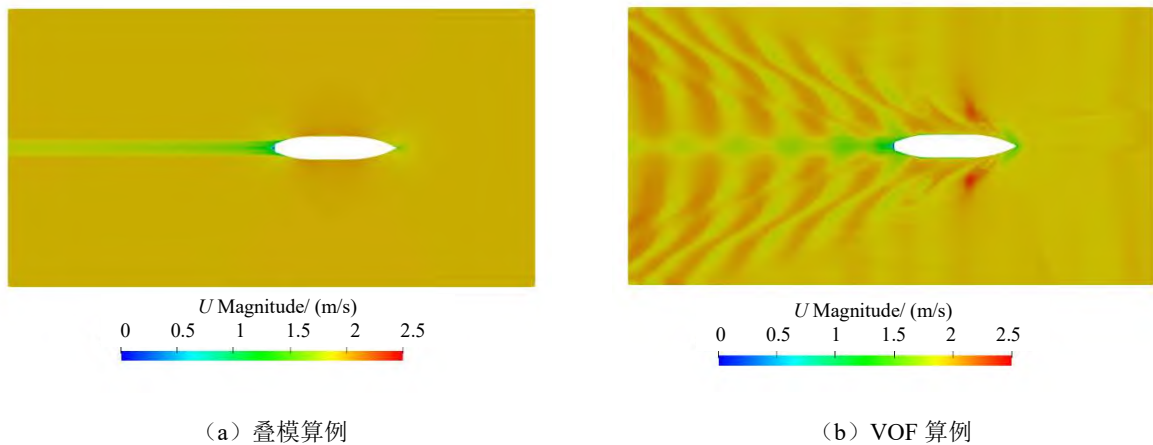


图 8 叠模算例与 VOF 算例水线面速度云图对比

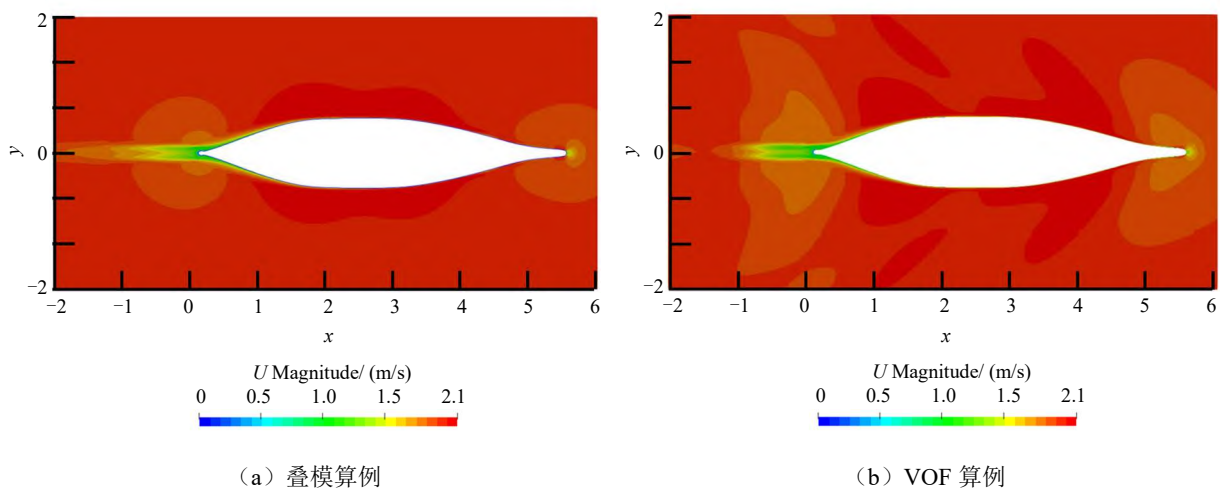


图 9 叠模算例与 VOF 算例螺旋桨中心水平剖面速度云图对比

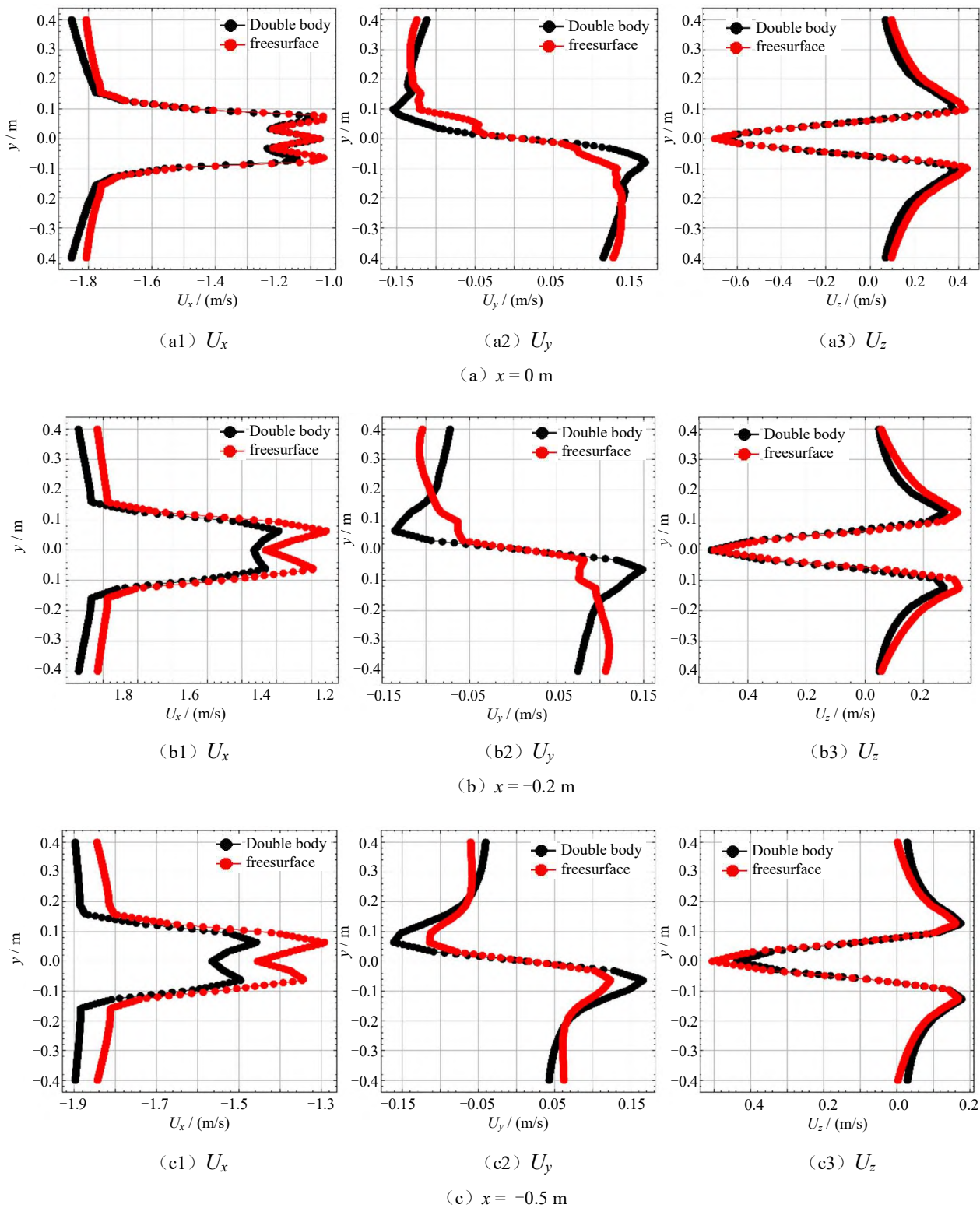


图 10 叠模算例与 VOF 算例速度对比

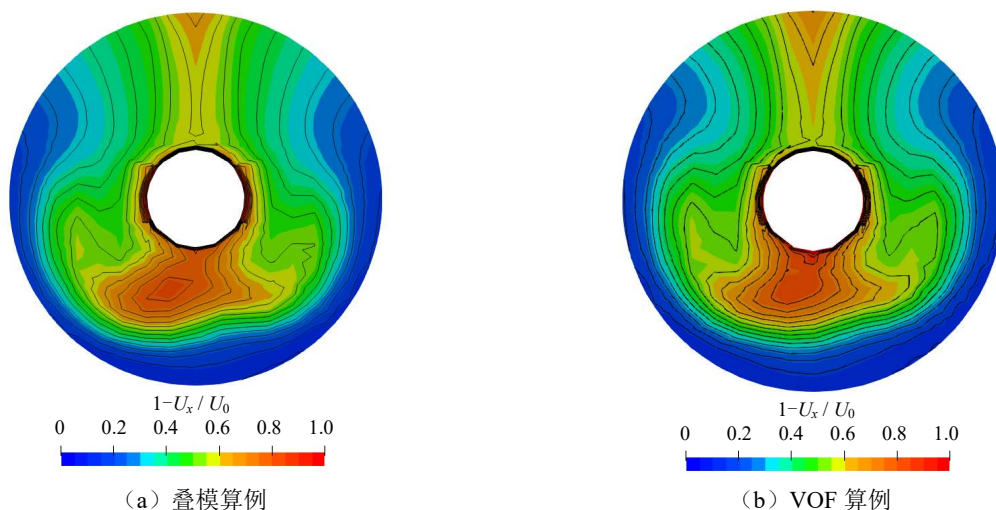
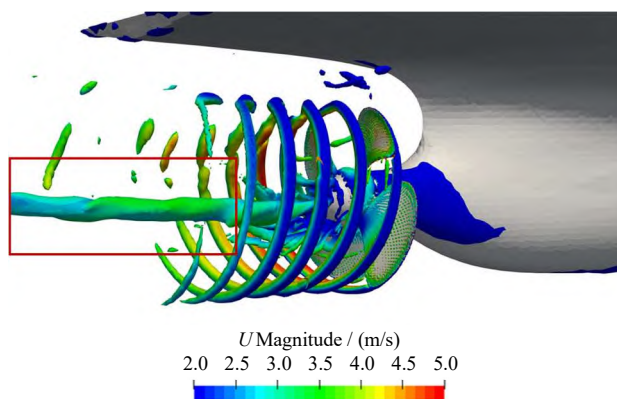


图 11 叠模算例与 VOF 算例桨盘面伴流分数对比

3.2 带桨船声场计算

叠模算例与 VOF 算例关于螺旋桨来流计算的差异不大, 现采用叠模算例的结果计算带桨船的噪声, 对螺旋桨泄涡产生的四极子声源展开讨论。采用可穿透积分面, 该积分面需要将泄涡包含在内。

图 12 所示为船尾螺旋桨泄涡 $Q = 3\ 000\ \text{s}^{-2}$ 的等值面; 设置的可穿透积分面如图 13 所示, 截去泄涡出口以避免端盖效应; 图 14 所示为船底视角。在螺旋桨周围 x, y, z 这 3 个平面上设置一系列测点, 如图 15 所示。以与桨盘面位于同一平面且距离轴 1 m 的测点 P2 为中心, 分别在 x 方向前、后 0.6 m 布置测点 P1 和 P3; 在 z 方向, 上下相隔 0.18 m 布置测点 P6~P8; 在 y 方向, 左右相隔 0.5 m 布置测点 P4 和 P5。如图 16 所示, 在 0~1 000 Hz 范围内声压级总体上大幅下降, 但在超过 1 000 Hz 后逐渐上升, 并在 5 000 Hz 左右出现峰值。可以看到测点 z 坐标的变化对噪声的影响较小, 这和 Yu 等^[6]的结论基本一致。这是因为桨毂涡沿着与轴线垂直的方向发展, 梢涡呈水平环状分布。在 P1~P3 这 3 个测点中, P1 测点的声压级最高, 这可能是因为 P1 测点靠近船体, 而在船体线型变化的部位存在较强的泄涡。如图 14 所示, 船尾底部与螺旋桨毂之间的过渡区域存在陡峭的曲率变化, 出现流动分离, 产生强剪切层并有船体诱导涡脱落。船体诱导涡与螺旋桨的梢涡、毂涡相互作用, 形成涡-涡干涉, 显著增强了局部流场的脉动强度。而 P2, P4, P5 测点结果则是越靠近螺旋桨声压级越高。

图 12 $Q = 3\ 000\ \text{s}^{-2}$ 等值面图

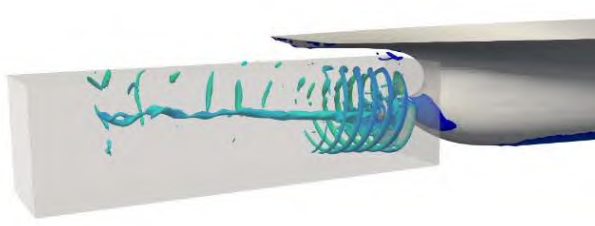


图 13 可穿透积分面示意图

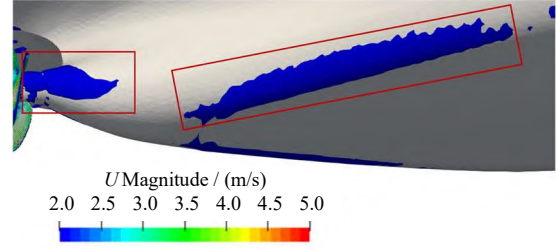
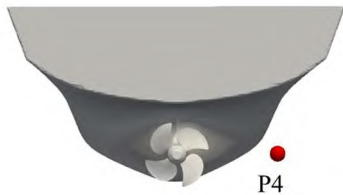
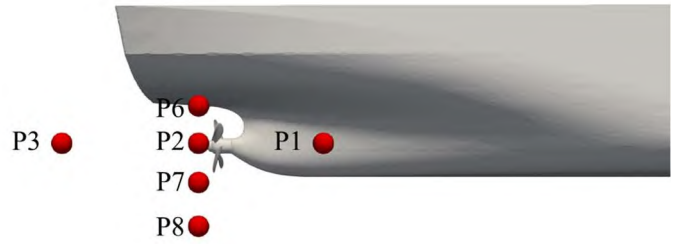


图 14 叠模算例 $Q = 3000 \text{ s}^{-2}$ 等值面: 船底视角

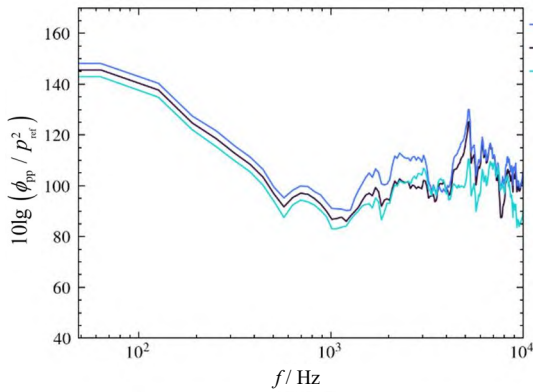


(a) y 方向分布

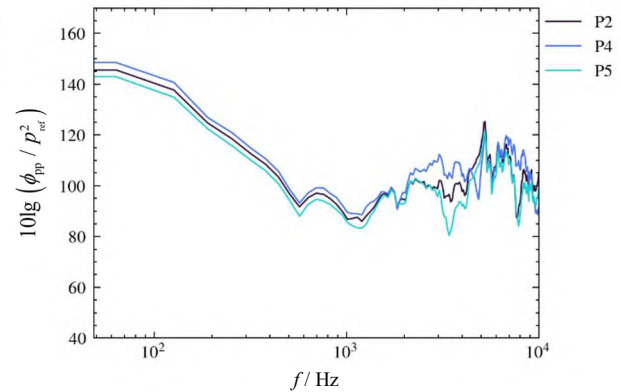


(b) x 和 z 方向分布

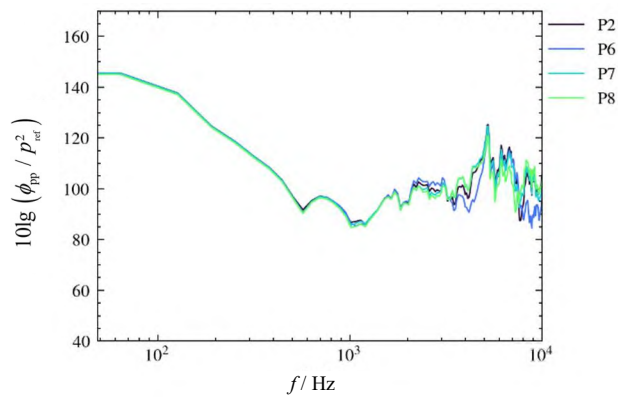
图 15 不同平面声学测点



(a) P1, P2, P3 测点



(b) P2, P4, P5 测点



(c) P2, P6, P7, P8 测点

图 16 叠模算例不同位置测点声压频谱图

4 结 论

本文对 Navigator XXI 船后螺旋桨盘面处的流场分别用叠模方法和 VOF 自由面捕捉方法进行模拟并对比, 采用叠模方法的计算结果预测噪声, 得到结论如下:

(1) 在螺旋桨叶面区域 ($0.1 \text{ m} < |y| < 0.15 \text{ m}$), 叠模算例与 VOF 算例尾流速度剖面的差异不大。在桨毂处 ($|y| < 0.1 \text{ m}$) 以及叶梢向外区域 ($|y| > 0.15 \text{ m}$), 叠模算例的速度 U_x 普遍高于 VOF 算例。但在螺旋桨关键工作区域, 两种方法得到的伴流场分布呈现高度一致。

(2) 对于叠模算例, 测点深度的变化对噪声数据的影响较小。船体线型变化部位存在较强的泄涡, 因此靠近船体的测点声压级较高。

参 考 文 献

- [1] TESTA C, PORCACCHIA F, MUSCARI R, et al. Noise field properties of marine propellers in open water[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 288: 116194.
- [2] VAN WIJNGAARDEN E, BOSSCHERS J, KUIPER G. Aspects of the cavitating propeller tip vortex as a source of inboard noise and vibration[C]// *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Houston, Texas, USA, 2005: 539-544.
- [3] LI X, BAO F, WANG J, et al. Spectral and statistical analysis of bow wave breaking characteristics of KCS ship[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2024, 36(4): 593-608.
- [4] CHEN S T, ZHONG J J, PENG S. Numerical simulation of the stokes wave for the flow around a ship hull coupled with the VOF model[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2015, 14(2): 163-169.
- [5] 于连杰, 王建华, 万德成. KCS 船模静水航行破波噪声数值预报[J]. *中国造船*, 65(3): 234-243.
- [6] KETABDARI M J. Free surface flow simulation using VOF method[M]// *Numerical Simulation: From Brain Imaging to Turbulent Flows*, 2016: 365-398.
- [7] YIN Z, SHI B, ZHANG T, et al. The VOF method based on refined grids partition of partial domain[C]// *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*. Berlin, Heidelberg, 2009: 1823-1828.
- [8] JIANG L, YAO J, LIU Z. Comparison between the RANS Simulations of double-body flow and water-air flow around a ship in static drift and circle motions[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 970-994.
- [9] ZHANG X, BANDYK P, BECK R F. Seakeeping computations using double-body basis flows[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32(4): 471-482.
- [10] ISLAM H, SUTULO S, GUEDES S C. Aerodynamic load prediction on a patrol vessel using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 935-957.
- [11] 张楠, 王星, 谢华, 等. 流激噪声数值计算方法及声学积分面影响性研究[J]. *船舶力学*, 2016, 20(7): 892-908.
- [12] 于连杰, 王建华, 万德成. KCS 船模静水航行破波噪声数值预报[J]. *中国造船*, 65(3): 234-243.
- [13] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, 4(1): 625-632.
- [14] BUGALSKI T. Basic model test results for the training/research vessel, Navigator XXI (No. D2.3, CTO RH-2005/T-133E)[R]. *European Full-Scale Flow Research and Technology (EFFORT)*. CTO S.A., Gdansk, Poland, 2005.
- [15] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [16] YU L, WU J, WAN D. Correlation analysis between underwater noise and Liutex for DTMB4119 propeller[J]. *Journal of*

Hydrodynamics, 2022, 34(4): 585-595.

Numerical Simulation of Hydrodynamic Noise of Propellers behind the Ships Based on Double Body Method

QIN Jiajia, ZHUANG Yuan, WAN Decheng*

(Computational Marine Hydrodynamics Laboratory (CMHL), School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

Conventional full-domain free-surface simulation methods require substantial computational resources to capture the ship wake for propeller noise prediction. To address this, the double body method is introduced. This study investigates the Nawigator XXI ship and evaluates the applicability of the double body method compared with the Volume of Fluid (VOF) free-surface capturing method for predicting propeller noise. The flow field is simulated using the SST $k-\omega$ turbulence model. Comparisons of velocity profiles and contour plots at the propeller disk plane show that the flow fields obtained from the double body method and the VOF method are in close agreement. Consequently, the double body method is adopted to predict the noise of the ship with propeller. The Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) equation is applied with permeable surface integration to obtain the propeller noise, and its frequency characteristics are analyzed.

Key words: propeller noise behind ship; double body method; Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) equation

作者简介

秦佳佳 女, 2002 年生, 硕士研究生。主要从事水动力噪声等研究。

庄园 女, 1993 年生, 博士, 助理研究员。主要从事计算水动力学、势-黏流耦合和流噪声等研究。

万德成 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事船舶计算水动力学、海上新能源开发与利用、无网格粒子法、船型优化和流固耦合等研究。

*通讯作者: 万德成