

# 基于自适应网格技术的 Clark-Y 水翼空泡数值模拟

梁尚, 李勇, 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, \*通讯作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 空化流动具有高度非定常性, 界面模糊而且处于不断地形变之中。本研究基于开源的 CFD 平台 OpenFOAM, 利用 interPhaseChangeDyMFoam 求解器对 Clark-Y 水翼的空泡流进行数值模拟, 并利用自适应网格技术对空化区域尤其是两相界面附近的网格进行了局部加密, 考察并分析了水翼的水动力性能和空泡形态。文中将模拟结果与试验结果相比较, 发现通过自适应网格加密可以有效捕捉空泡形态的变化尤其是片空泡脱落过程。研究表明, 针对空化区域的自适应网格加密能够在计算量一定的情况下有效提高空泡流模拟精度。

**关键词:** OpenFOAM; 空泡流; 自适应网格; Clark-Y 水翼

## 1 引言

空化作为一种复杂的水动力学现象, 具有明显的三维流动特征与剧烈的非定常性, 按照发展阶段可分为初生空化、片空化、云空化和超空化等<sup>[1]</sup>。水利机械表面发生空化后会产生剥蚀和噪声, 严重时会影响设备的水动力学性能。对空化现象和空泡流的非稳定特性的研究是目前水动力研究的热点和难点课题之一。

自适应网格方法 (AMR) 是指计算中, 对于某些物理解变化特别剧烈的区域, 如湍流区、激波面等, 网格在迭代过程中不断细化, 从而为重要区域的精确求解提供足够高的分辨率; 而在物理解变化平缓区域网格相对稀疏, 这样在保持计算高效率的同时可得到高精度的解<sup>[2]</sup>。近年来, 自适应网格方法的发展十分迅速, 已经成为网格方法研究的热点问题, 在诸多领域有非常好的应用前景。目前网格自适应算法主要分为两种类型: 一种在网格总数不变的情况下移动网格, 增加局部区域的网格密度从而提高解的精度; 另一种是基于生成树在局部区域细化或粗化网格, 加密区域具有更高的网格密度和更小的网格尺寸。还有

一些方法通过提高局部网格的插值精度来实现解的精度自适应调整。

对于气-液两相流动, 自适应网格和界面追踪相结合的方法已被广泛应用于复杂流动界面的精确求解, 例如波浪破碎, 激波, 气泡生长、聚并和破碎等问题<sup>[3]</sup>。然而对于同样包含复杂流动界面和质量传输特性的空化流模拟, 自适应网格技术的应用尚不充分。Lin-min Li 等<sup>[4]</sup>基于 OpenFOAM 平台应用自适应网格技术研究了圆柱形回转体表面的空泡流动, 成功捕捉到了片空泡的生长与脱落过程。Claes Eskilsson 等<sup>[5]</sup>将自适应网格技术应用于 NACA0015 水翼的空化流模拟, 并对比了采用不同误差参数的模拟结果。Thomas 等<sup>[6]</sup>使用自适应网格模拟螺旋桨梢涡空化, 结果表明通过自适应加密, 梢涡空泡上卷的细节特征得到更好的呈现。

本文选取了 Clark-Y 水翼, 利用开源平台 OpenFOAM 的动网格求解器 interPhaseChangeDyMFoam, 使用 SchnerrSauer 空泡模型和 SST k- $\omega$  湍流模型, 模拟了绕二维水翼的空泡流动。文中给出了不同自适应网格等级的加密对空泡模拟效果的比较, 并将计算结果与试验数据相比较, 验证了自适应网格技术对绕水翼空泡模拟精度的提高。

## 2 数学模型和研究方法

### 2.1 控制方程

根据单相均质假设, 将汽、液组成的混合介质看成一种变密度流体, 并引入空化模型用于描述汽、液间质量交换。连续性方程和动量方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mu \nabla \vec{U} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

其中,  $\vec{U}$  为绝对速度,  $p$  为静压,  $\rho \vec{g}$  和  $\vec{F}$  分别为重力体积力和外部体积力,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为分子黏性系数, 并由下式确定:

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_v \quad (3)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_v \quad (4)$$

式中, 下标  $l$  和  $v$  分别代表液相和气相,  $\alpha$  为液相体积分数。

## 2.2 空泡模型

本文采用的空泡模型为基于输运方程提出的 SchnerrSauer 模型<sup>[7]</sup>, 该模型将水、汽的混合物看做是包含大量球形蒸汽泡的混合物, 气相体积分数与气核密度和气核半径相关。代表汽化率和冷凝率的质量源项定义为:

$$\begin{aligned}\dot{m}_c &= C_c \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \text{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} \\ \dot{m}_v &= -C_v \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \text{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}}\end{aligned}\quad (5)$$

其中,  $R$  满足:

$$\alpha_v = \frac{n_o \frac{4}{3} \pi R^3}{n_o \frac{4}{3} \pi R^3 + 1} \quad (6)$$

## 2.3 湍流模型

本文采用的湍流模型为 SST k-omega 模型, 该模型由 Menter<sup>[8]</sup>提出, 用来模拟雷诺应力。这种模型在近壁面采用 k-omega 模型, 在远场使用 k-epsilon 模型, 从而可以有效地规避 k-omega 模型对于入口的湍流的大小过于敏感这一问题, 其主要方程如下:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \omega}{\partial x_i} &= \alpha \rho S^2 P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \\ &2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}\end{aligned}\quad (8)$$

式中,  $F_1$  是混合方程,  $y$  指的是边界层中最内层的厚度, 在边界层中,  $F_1$  趋向于 1, 此时表现为 k-omega 模型, 在远场区域,  $F_1$  的取值接近 0, 则该湍流模型表现为 k-epsilon 模型。

## 2.4 界面追踪方法

本文使用 VOF (Volume of Fluid) 方法处理气相与水相的动态界面。有关 VOF 方法的实现算法可在有关文献中找到, 在此不再赘述<sup>[9]</sup>。本文重点关注的是 VOF 方法与自适应网格的结合。在 VOF 方法中为每一个网格单元定义的一个变量——流体体积分数  $\alpha$ , 表示液相在网格中占据空间的比例, 从而实现自由面的跟踪; 对于空泡两相流,  $\alpha$  的定义如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0, \text{ 网格位于气相内} \\ \alpha = 1, \text{ 网格位于液相内} \\ 0 < \alpha < 1, \text{ 网格中含有相界面} \end{array} \right.$$

由流体体积分数的定义可知，对于两相界面急剧变化的区域，如片空化脱落及云空化溃灭的区域，必须适当地加密网格以保证对自由面追踪的精度，局部区域的网格太粗则会因为物理解析率的不足而导致模拟的“失真”。对 VOF 方法，自适应网格相比传统静网格的优势就在于，在需要提高物理分辨率的区域可进行网格的自动加密，而在物理量梯度较为平缓过渡的区域则适当使网格稀疏，这样在提高模拟精度的同时又保证整体网格数不会过大。

2.5 自适应网格

采用四叉树结构在原有网格的基础上生成子网格，对局部区域进行自适应加密。自适应网格与四叉树的对应关系如图 1 所示。在每一次迭代中，根据 VOF 方法中定义的体积分数的值决定是否对该区域进行加密，当体积分数 $\alpha=0$ 或 1 时，不进行加密；当 $\alpha$ 介于 0 与 1 之间时进行加密，也就是对相界面区域进行加密。加密等级每提升一级，都会在现有细化网格的基础上再生成一层子网格；生成子网格的工作量相对比较小，自适应网格的计算时间主要花费在网格间的插值和交换信息上。

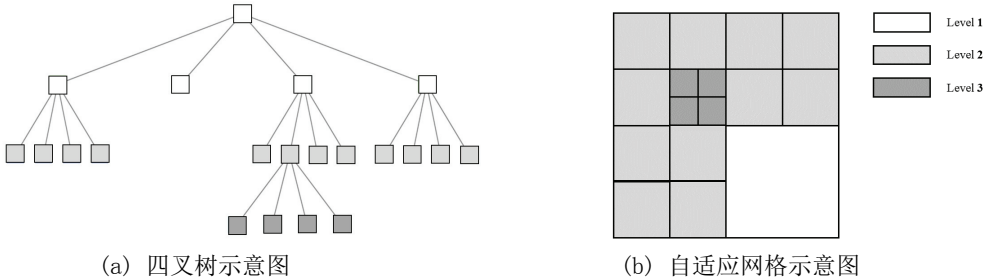


图 1 自适应网格与四叉树对应关系

3 数值方法

本文选取 Clark-Y 二维水翼作为研究对象，参照已有文献<sup>[10]</sup>的计算域设置，如图 2 所示，上游入口位于翼前 2 倍弦长处，下游位于翼后 7 倍弦长处。

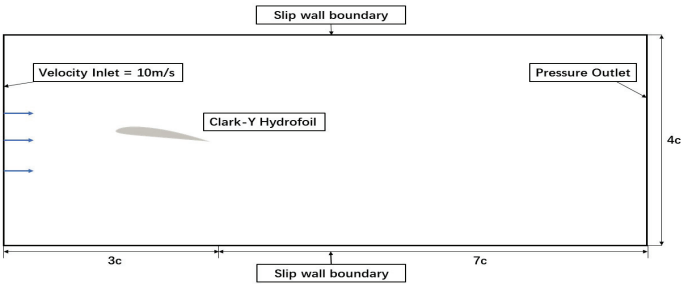


图2 计算域和边界条件设置

水翼攻角为 $8^\circ$ ,弦长 $c = 7\text{cm}$ , 入口的来流速度 $U = 10\text{m/s}$ , 对应雷诺数 $Re = 7 \times 10^5$ , 空化数 $\sigma = 0.8$ 。空化数的定义如下式所示:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2}\rho U^2} \tag{9}$$

其中,  $P_v$ 为试验温度下的饱和蒸汽压, 取 $2970\text{ Pa}$ 。

自适应网格方面, 背景网格划分如图3所示, 网格量为8万左右; 使用两个加密等级对背景网格进行自适应加密, 平均网格量如表1所示, 同时选取一套不使用自适应加密的网格作为对照, 即表1中的Non-AMR项, 背景网格量为40万左右。

| 表1 加密等级和平均网格量 |       |
|---------------|-------|
| 加密等级          | 平均网格量 |
| Level 1       | 20 万  |
| Level 2       | 40 万  |
| Non-AMR       | 40 万  |

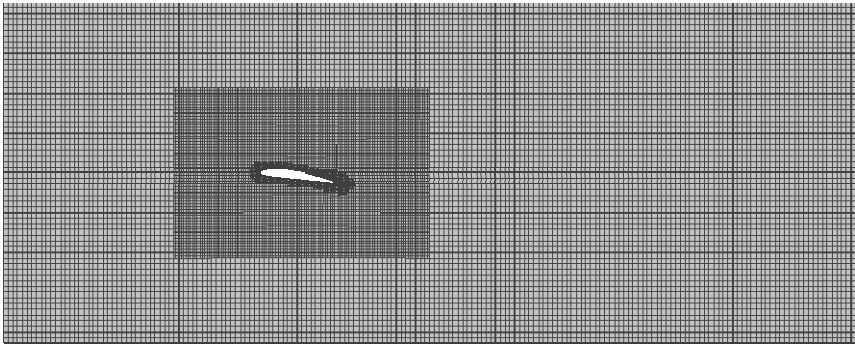


图3 网格划分

4 计算结果及分析

4.1 升阻力系数曲线

对于 Clark-Y 水翼空泡流在攻角为  $8^\circ$ ，空化数为 0.8 的工况下进行模拟，数值模拟的结果与 Guoyu Wang 等给出的试验结果<sup>[9]</sup>进行了对比。

图 4 给出了不同自适应加密等级的升阻力系数曲线，更高的加密等级需要更小的计算时间步长。升阻力系数曲线的周期性反映了空泡周期性脱落的频率特征。表 2 给出了升阻力系数的平均计算结果与试验结果的对比，可以看到在不同的加密等级下，阻力系数的计算误差值都要明显大于升力系数的误差值；加密等级为 2 级时，升力系数的计算误差最小。

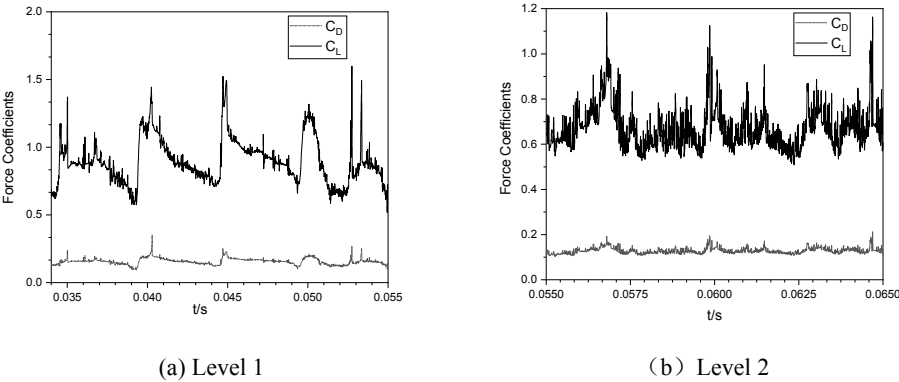


图 4 升阻力系数曲线

表 2 升阻力系数计算结果

|                           | $C_L$ | Error % | $C_D$ | Error % |
|---------------------------|-------|---------|-------|---------|
| Non - AMR                 | 0.754 | 7.9     | 0.133 | 10.8    |
| Level 1                   | 0.765 | 6.6     | 0.141 | 17.5    |
| Level 2                   | 0.764 | 5.3     | 0.131 | 9.2     |
| Experiment <sup>[7]</sup> | 0.760 | —       | 0.120 | —       |

4.2 片空泡脱落过程模拟

图 5 给出了使用自适应网格和不使用自适应网格在同一时刻的空泡形态。三张图自上而下分别是不进行自适应加密、加密等级为 1 级和加密等级为 2 级的模拟结果；每一行的右侧为左侧的局部放大图。不进行自适应加密的算例在空泡断裂区域的界限比较模糊，不能很好地反映空泡脱落的细节；而进行 1 级加密后带来的最直观的效果是空泡上部的界限比较清晰，即将断裂区域的模拟结果呈现了更多细节，这与加密网格提高了断裂处的物理分辨率有关，如图 6 (a) 所示。而通过 2 级加密得到空泡区域

的界面最为清晰，甚至能比较清晰的观察到回射流的产生，如图 6 (b) 所示。比较图 (a) 和 (b) 可知，在片空泡即将脱落的局部区域，空泡界面不仅形状复杂而且变化率很大，对网格尺度和疏密比较敏感，此时通过局部加密来捕捉变形过程尤为重要。

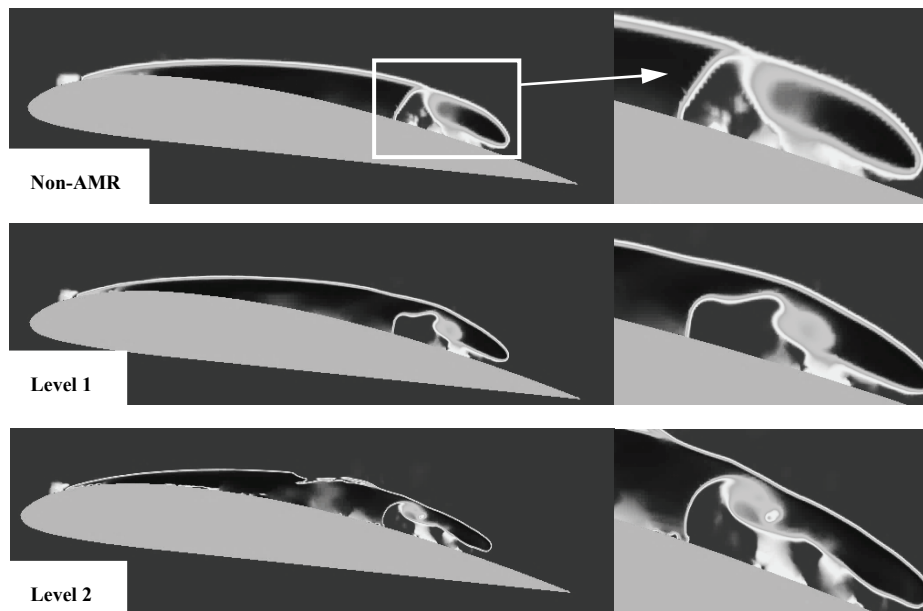


图 5 片空泡脱落时刻云图对比

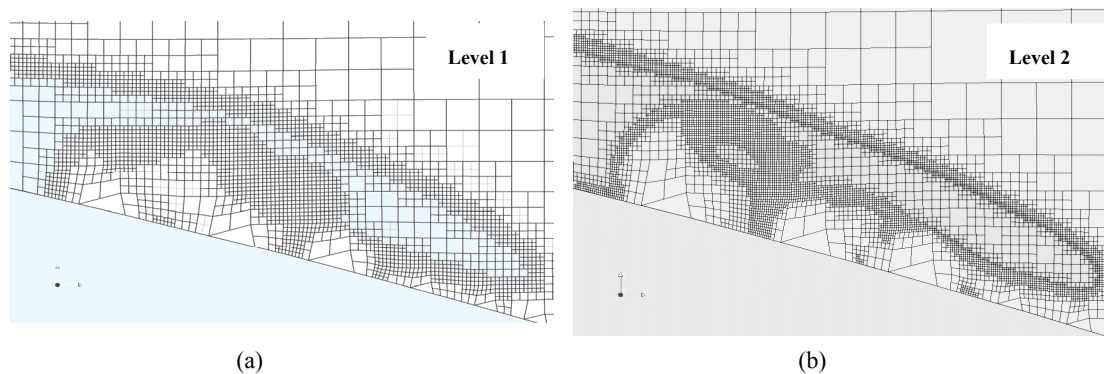


图 6 不同加密等级局部网格对比

图 7 给出了图 5 对应时刻的速度矢量图，可以发现由于水翼上下表面流体运动速度不同，导致流体到达水翼末端时会在尾部形成一个顺时针旋转的涡结构。该涡结构在靠近水翼表面处的速度恰好与来流方向相反，这一部分水流在逆压梯度的影响下紧贴水翼表面向前端移动，遭遇到片空化后将其截断，并与来流一起作用于脱落下来的空化片段，施加剪切作用从而形成云状空化。之后，回射流继续向前端移动，直至片空化缩小至最短。因此，

可以认为尾部回射流是造成本算例中空化脱落的主要原因。

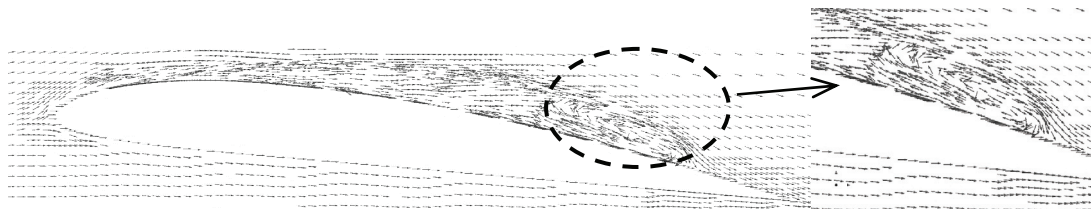


图7 速度矢量图

#### 4.3 云空泡界面追踪

图9展示了自适应网格对图8黑框所示区域的空泡从脱落到溃灭的追踪过程。空泡内部（气相）和空泡外部（水相），没有进行网格的加密，网格相对比较稀疏；而在空泡表面即两相的相界面，体积分数介于0和1之间，自适应网格对这部分区域进行了加密，可以较好地捕捉空泡在脱落后整个变形过程。空泡在离开水翼表面一段距离后一般也离开了传统静网格的加密区域，此时自适应网格对其跟踪加密会使计算成本有所增加，但也避免了云空泡在粗网格区域过早耗散掉，同样可以提高数值模拟的精度。

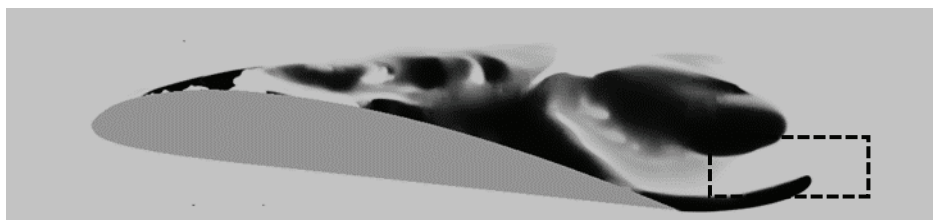


图8 空泡形态云图

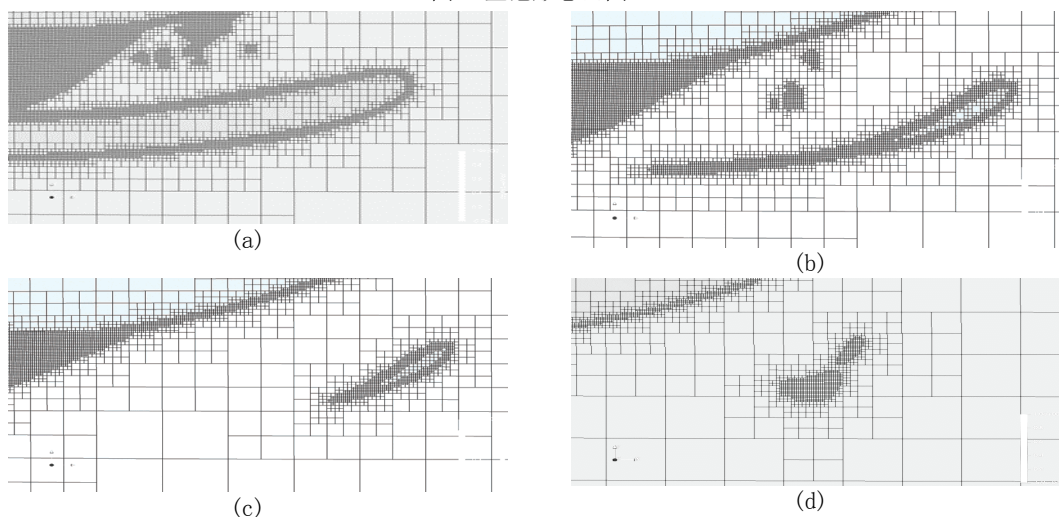


图9 空泡脱落过程追踪

#### 4.4 空泡形态周期性云图

图 10 给出了不同自适应加密等级的空泡形态云图，选取了四个典型时刻与试验对比，分别为  $0.1T$ ， $0.5T$ ， $0.7T$  和  $0.9T$ 。图 (b) 与图 (c) 预测得最大稳定片空泡长度都与试验比较接近，然而对于云空化时的形态，图 (c) 对应的 2 级加密预测的结果与试验更为接近，这一结论也与前文已有的分析一致。

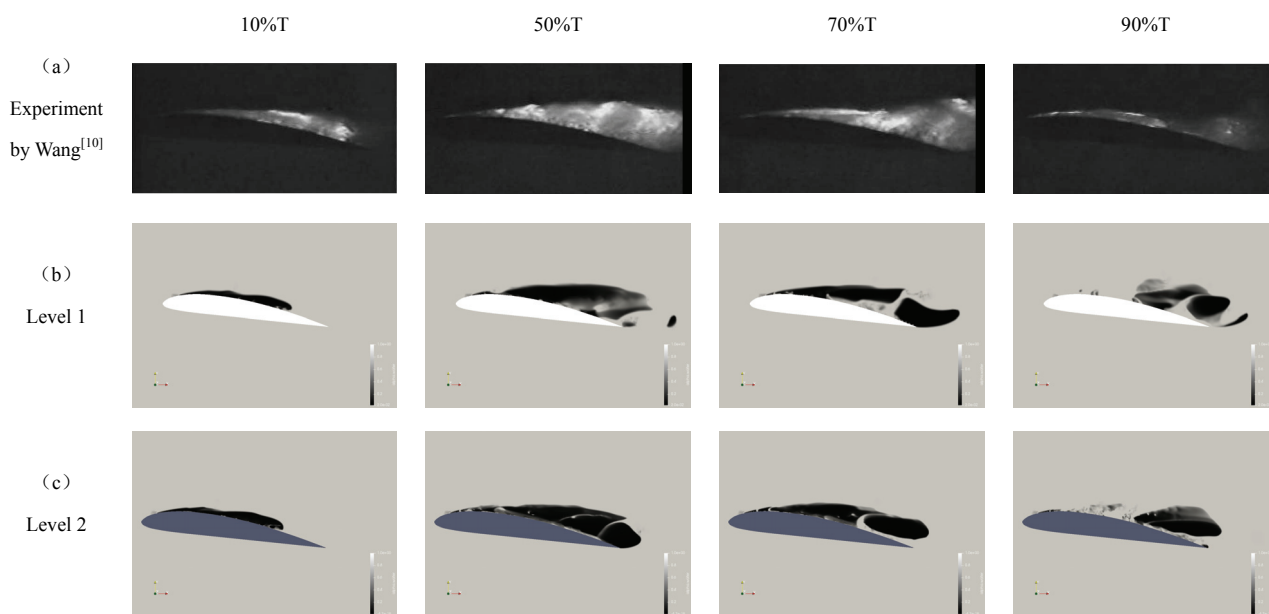


图 10 空泡形态对比

## 5 结论

本文基于 CFD 平台 OpenFOAM 中动网格空化求解器 `interPhaseChangeDyMFoam` 对 Clark-Y 水翼空化进行了数值模拟。通过 VOF 方法与自适应网格相结合，选取了静网格和两个加密等级的自适应网格的算例计算并与试验结果对比分析，并重点考察了升阻力系数的计算结果和空泡形态。

通过自适应网格技术可以显著提高局部区域的物理分辨率，从而实现在片空化从发展到脱落的整个过程中对不断变动的相界面的精确捕捉，尤其是片空化脱落的瞬间，此时由于回射流的作用导致相界面的变形十分剧烈，自适应网格加密的效果尤为显著。对脱离水翼表面的云空泡同时进行网格加密追踪，也可以较好地捕捉到从变形到溃灭的整个过程。

## 致谢

本文得到国家自然科学基金 (51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)、上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目。在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 1 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J]. 力学进展, 2019, 49(1): 201906-201906.
- 2 Kamkar S J , Wissink A M , Sankaran V , et al. Feature-driven Cartesian adaptive mesh refinement for vortex-dominated flows[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230(16):6271-6298.
- 3 Tan H. An adaptive mesh refinement based flow simulation for free-surfaces in thermal inkjet technology [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 82:1-16
- 4 Li Linmin, Hu Daiqing, Liu Yucheng, Wang Bitao, Shi Chen, Shi Junjie, Xu Chang, Large eddy simulation of cavitating flows with dynamic adaptive mesh refinement using OpenFOAM[J], Journal of Hydrodynamics, 2018.
- 5 C. Eskilsson and R.E. Bensow (2011). A mesh adaptive compressible Euler model for the simulation of cavitating flow. 5<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2011.
- 6 T. Lloyd, G. Vaz, D. Rijpkema, A. Reverberi (2017). Computational fluid dynamics prediction of marine propeller cavitation including solution verification. 5th International Symposium on Marine Propulsors, SMP 2017.
- 7 Schnerr G H, Sauer J. 2001. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. Proceedings of 4th international Conference on Multi-Phase Flow, New Orleans.
- 8 Roohi, Ehsan, Zahiri, et al. Numerical Simulation of Cavitation around a Two-Dimensional Hydrofoil Using VOF Method and LES Turbulence Model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(9):6469-6488.
- 9 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.
- 10 Wang G , Senocak I , Shyy W , et al. Dynamics of attached turbulent cavitating flows[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(6):551-581.

## **Numerical simulation of cavitation around Clark-Y hydrofoil based on adaptive mesh refinement**

LIANG Shang, LI Yong, 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 200240.

Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

**Abstract:** The cavitation flow is highly unsteady, and the interface is blurred and is constantly deformed. Based on the open source CFD platform OpenFOAM, this study uses the interPhaseChangeDyMFoam solver to numerically simulate the cavitation flow of the Clark-Y hydrofoil, and uses the adaptive grid technique to localize the cavitation region, especially the mesh near the two-phase interface. Investigation and analysis of the hydrodynamic performance and cavitation morphology of the hydrofoil are carried out. Comparing the simulation results with the experimental results, it is found that the adaptive mesh refinement can effectively capture the change of cavitation morphology, especially the cavitation shedding process. Research shows that adaptive mesh refinement for cavitation regions can effectively improve the simulation accuracy of cavitation flow with a certain amount of computation.

**Key words:** OpenFOAM; Cavitation flow; Adaptive mesh refinement; Clark-Y hydrofoil.