



全国中文核心期刊

Scopus 数据库: [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

中国知网: [www.cnki.net](http://www.cnki.net)

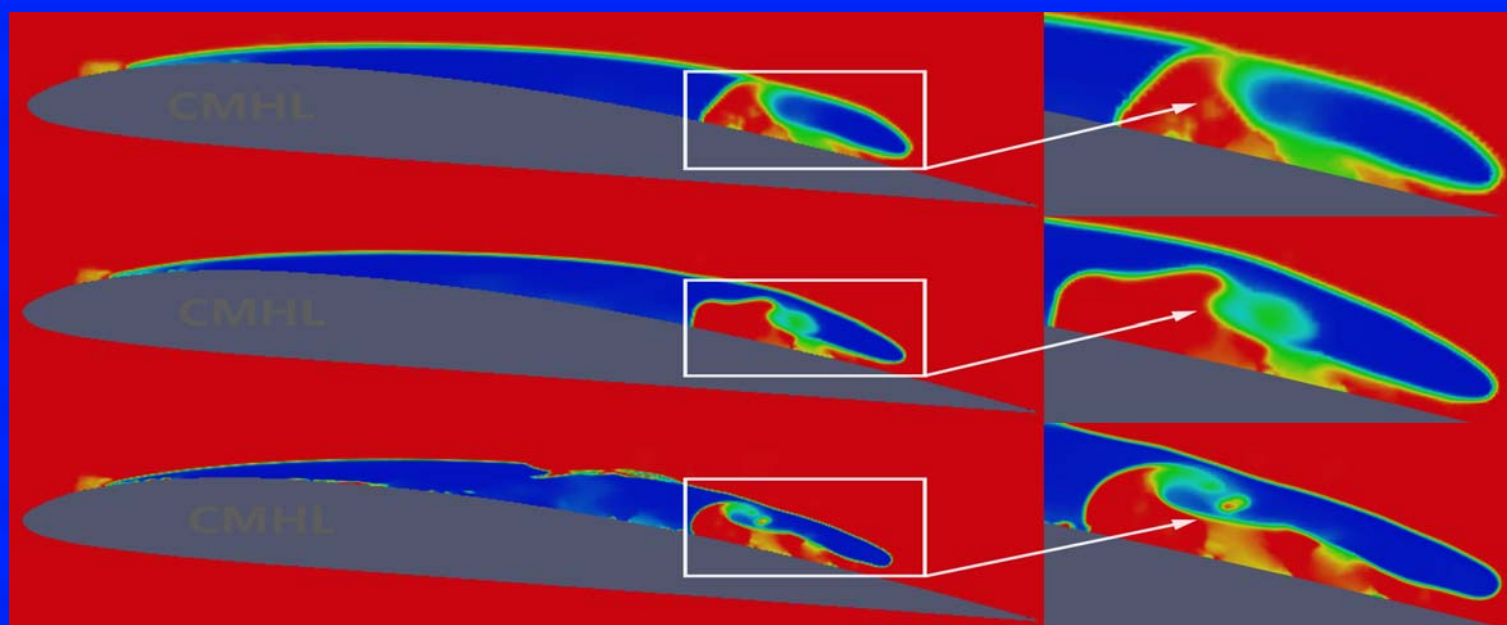


# 水动力学研究与进展

第 35 卷第 1 期 2020

CHINESE JOURNAL OF HYDRODYNAMICS

Vol.35 No.1 2020



DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.01.001

# 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 船海计算水动力学研究中心,  
上海 200240, E-mail: 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。该研究基于开源的 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和云空泡溃灭过程。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

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

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

LIANG Shang, LI Yong, WAN De-cheng

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

**Abstract:** The cavitation flow is highly unsteady, and the interface is blurred and constantly deformed. Based on the open source CFD platform OpenFOAM, in present study the interPhaseChangeDyMFOam solver is used to numerically simulate the cavitation flow of the Clark-Y hydrofoil, and the adaptive grid technique is used 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

\* **收稿日期:** 2019-08-22(2019-10-28 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879159), 国家重点研发计划项目(2019YFB1704204), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)

**作者简介:** 梁尚(1995-), 男, 山东人, 硕士研究生。

**通信作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** August 22, 2019 (Revised October 28, 2019)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704204), Chang Jiang Scholars Program (T2014099), Shanghai Excellent Academic Leaders Program (17XD1402300)

**Biography:** LIANG Shang (1995-), Male, Master Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

refinement can effectively capture the change of cavitation morphology, especially the cavitation shedding process and cavity bubbles breaking 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

## 引言

由于压力的变化而导致的液体介质中气泡的生长、发展和溃灭过程以及由此产生的一系列物理变化称为空化。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。

对空化现象进行数值模拟的难点在于空化流包含了几乎所有复杂的流动现象,包括湍流、多相流、可压缩流和非定常特性等。长期以来,空化流的数值模拟方法主要集中在空化模型和湍流模型的讨论上。季斌等<sup>[1]</sup>总结了空化模拟方法的进展,目前主要发展了三种空化模型:两相流模型(欧拉-欧拉模型和欧拉-拉格朗日模型),均匀介质混合流模型和基于界面动力学的空化模型等。黄彪等<sup>[2]</sup>总结了湍流模型在空化模拟中的应用,包括LES方法、RANS模型及其混合模型等,都在空化计算方面取得了成功的应用。随着对空化现象的认识愈加深刻,研究发现对于非附着型空化(云空泡、梢涡空泡等)的数值模拟,使用静网格计算存在一定缺陷,有时用更高精度的空化模型和湍流模型也不足以有效提高数值模拟的精度,将自适应网格应用于这一类空化问题的要求愈发迫切。Yilmaz等<sup>[3]</sup>在螺旋桨梢涡空化的数值模拟中,首先使用静网格对螺旋桨桨叶叶梢进行加密,总体网格量已经达到1700万左右,但由于桨后流场的网格物理分辨率不足,仍然无法成功模拟出梢涡空化。Bertetta等<sup>[4]</sup>提供的一种解决方法是先通过面元法试算确定空化流场中梢涡的大致轨迹,再沿着梢涡轨迹对附近的静网格进行加密,最终用比较少的网格量捕捉到比较清晰的梢涡空泡,但是这种方案需要迭代多次才能最终确定梢涡的轨迹,换一种工况(比如更改螺旋桨进速系数或流场空化数)后梢涡轨迹发生变化,需要重新通过反复试算确定梢涡网格区域。自适应网格可以在流场中根据VOF体积分数自动捕捉梢涡空化的轨迹并自适应加密附近的网格,对于不同的工况选取同一套背景网格即可<sup>[5]</sup>。

自适应网格(Adaptive Mesh Refinement, 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>[6]</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<sup>[7]</sup>。

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>[8-10]</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等<sup>[11]</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,结论表明自适应网格加密后能够在空化区域捕捉到更多小尺度的涡结构,片空泡和云空泡的形态也更加破碎,提升自适应网格的加密等级后可以在不大幅增加计算成本的同时显著提升数值模拟的精度。Eskilsson等<sup>[12]</sup>将自适应网格技术应用于NACA0015水翼的空化流模拟,并使用了不同的加密准则,包括体积分数 $\alpha$ 、涡量Q和压强P等等,结果表面使用Q准则进行自适应加密的效果要优于体积分数 $\alpha$ 加密。Thomas Lloyd等<sup>[13]</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,而且使用高精度的湍流模型更能发挥自适应网格的优势。

本文选取了Clark-Y水翼,使用SchnerrSauer空泡模型和SST k- $\omega$ 湍流模型,基于VOF界面追踪方法,利用开源CFD平台OpenFOAM的动网格求解器interPhaseChangeDyMFoam,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。

## 1 数学模型和研究方法

### 1.1 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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) =$$

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

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

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

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

### 1.2 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>[14]</sup>, 该模型将水和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

$$\dot{m}_c = C_c \frac{3 \rho_v \rho_l \partial_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \operatorname{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (5)$$

$$\dot{m}_v = -C_v \frac{3 \rho_v \rho_l \partial_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \operatorname{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (6)$$

式中: 气核半径  $R$  满足

$$\alpha_v = \frac{n_0 \frac{4}{3} \pi R^3}{n_0 \frac{4}{3} \pi R^3 + 1} \quad (7)$$

### 1.3 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>[15]</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- $\omega$  模型对于入口处湍流的大小过于敏感这一问题, 其主要方程如下

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \omega}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 P_k - \beta \rho \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (9)$$

式中:  $F_1$  为混合方程,  $y$  为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。

Rebound 等<sup>[16]</sup> 建议在湍流黏性系数中添加一个人工项可以更好地预测空化周期性脱落的频率, 基于此思路对湍流黏度系数做出了如下修正

$$\mu_t = f(\rho) C_\omega \frac{k}{\omega} \quad (10)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}}; n \gg 1 \quad (11)$$

### 1.4 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>[17-19]</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:  $\alpha = 0$  处的网格位于气相内,  $\alpha = 1$  处的网格位于液相内, 而当  $0 < \alpha < 1$  时相界面穿过该网格。处在相界面处的网格所占比例一般比较小。

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。

### 1.5 自适应网格

采用二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。自适应网格与二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。

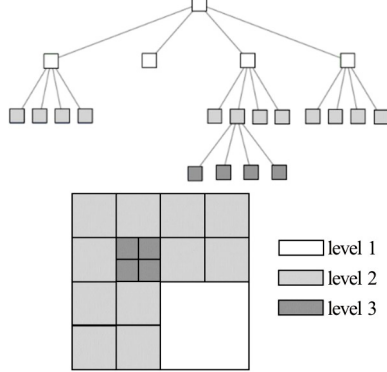


图1 自适应网格与四叉树  
Fig.1 Adaptive mesh and quadtree structure

## 2 数值计算及结果分析

### 2.1 计算模型

本文选取Clark-Y二维水翼作为研究对象，参照已有文献(WANG, 2001)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。

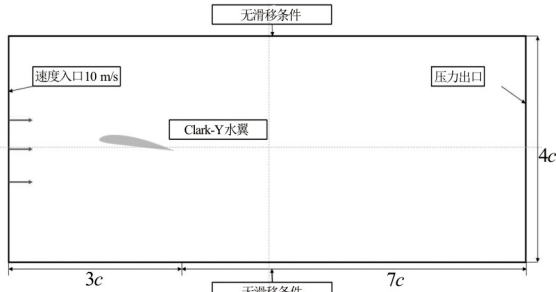


图2 计算域和边界条件设置  
Fig.2 Computational domain and boundary conditions

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

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (12)$$

式中： $P_v$ 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。

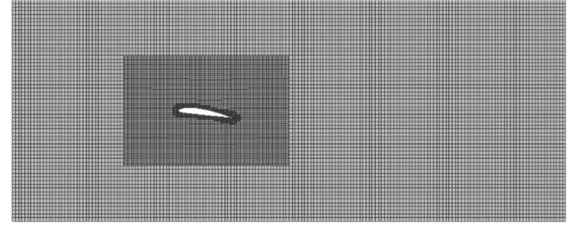


图3 网格划分  
Fig.3 CFD mesh

表1 加密等级和平均网格量

Table 1 Refinement level and mean number of cells

加密等级	平均网格量
Level 1	25 万
Level 2	60 万
Non-AMR	40 万

### 2.2 升阻力系数

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WANG等<sup>[20]</sup>给出的实验结果进行了对比。

图4给出了不同自适应加密等级的升阻力系数曲线，图4(b)的结果具有更高的加密等级，需要更小的计算时间步长，因此升阻力曲线包含的数据点更加密集。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实验结果的对比，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。

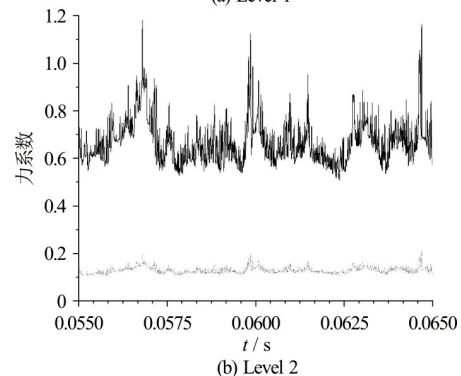
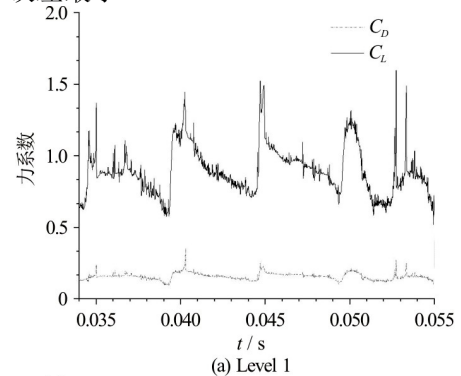


图4 水翼表面升阻力系数曲线  
Fig.4 Distributions of lift coefficient and drag coefficient around hydrofoil surface



表 2 升阻力系数计算结果  
Table 2 Results of lift / drag coefficient

	$C_L$	误差值/%	$C_D$	误差值/%
Non-AMR	0.754	7.9	0.133	10.8
Level 1	0.765	6.6	0.141	13.5
Level 2	0.764	5.3	0.131	9.2
Experiment	0.760	-	0.120	-

### 2.3 片空化脱落过程

回射流机制是导致片空泡从水翼表面脱落的机制之一(另一种是激波机制)。在回射流作用下,水翼表面的速度梯度和压力梯度很大,相界面变形十分迅速,此时传统的静网格往往无法提供足够的网格分辨率以反映片空化脱落瞬间的局部细节。这种情况下自适应网格的使用可以在不显著提高网格量的基础上模拟更为精细的片空泡形态。

图5给出了分别使用自适应网格和不使用自适应网格的空泡形态在同一时刻的对比。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;每一行的右侧图为左

侧的局部放大图。不进行自适应加密的算例在空泡脱落区域的界限比较模糊,局部网格的分辨率不足以很好地反映空泡脱落瞬间的流场细节;而进行1级加密后显著地提高了局部流场的物理分辨率,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,如第二张图所示。而通过2级加密得到数值模拟效果在三张图中最好,相比1级加密的结果,除了能观察到更清晰的空泡界面外,还能比较清晰的观察到回射流的产生,因此流场的物理分辨率也为最高。

图6给出了图5对应时刻的局部自适应加密网格的细节。图6(b)在图6(a)的加密网格的基础上,对相界面处的网格又进行了一次加密,因此能得到更为清晰的空泡界面。比较图6(a)和图6(b)可知,在片空泡即将脱落的局部区域,即片空泡纵剖面长度最小的区域,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,加密等级提升一级并没有造成计算成本的大幅提升,但带来的模拟精度的提升效果是比较显著的。

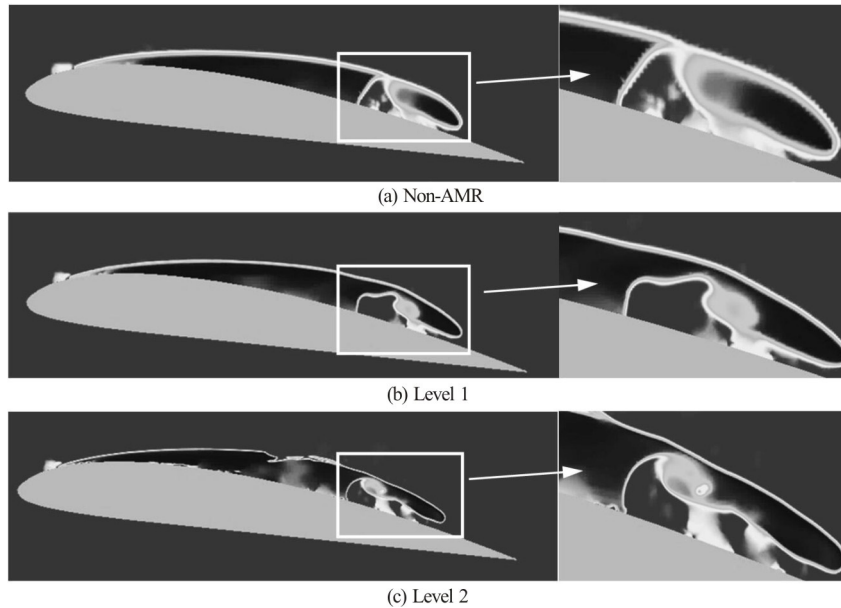
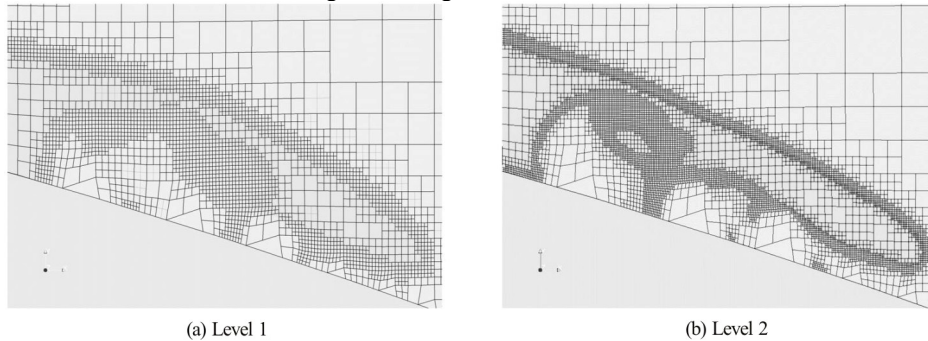


图 5 片空泡脱落时刻云图

Fig.5 Shedding of sheet cavitation



(a) Level 1

(b) Level 2

图 6 不同加密等级局部网格对比  
Fig.6 Local grid of two refinement level

图7给出了图5对应时刻在水翼表面的速度矢量分布图，可以发现由于水翼上表面流速更快，导致在水翼末端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，导致这一部分水流在逆压梯度的影响下紧靠水翼表面并向水翼前端移动，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泡，施加剪切作用从而形成云状空化。之后，回射流继续向水翼前端移动，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。水翼后端的速度梯度更大，速度矢量的分布也更加密集，通过自适应加密，也可以观察到更为清晰的涡结构和回射流。

### 2.4 云空泡界面追踪

传统的静网格一般在近壁面区域设置加密区域，可以对附着型空化进行高精度的模拟。云空泡从水翼表面脱落后，一般会在溃灭之前经历一段复

杂的形变过程。静网格算例若要捕捉云空泡的溃灭和形变过程，需要将网格加密区域延长到水翼后端相当长的一段距离，这也会导致计算成本的显著增加。通过自适应网格追踪云空泡界面的变形过程，不需要在水翼后端设置全局加密区域，自适应网格自动在粗网格区域对体积分数介于0与1之间的网格（即云空泡的模糊界面）进行加密，这样只需要在局部区域网格加密就能捕捉到比较清晰的云空泡形变过程，提高模拟精度的同时，计算成本也一般会比静网格算例更低。

图9展示了图8框选所示区域的空泡从脱离水翼表面到变形直至溃灭的整个过程。在空泡内部（气相）和空泡外部（液相），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的整个变形过程。从图9(a)到图9(c)显示，空泡离开水翼表面后进入高压区，在外界压力作用下发生形

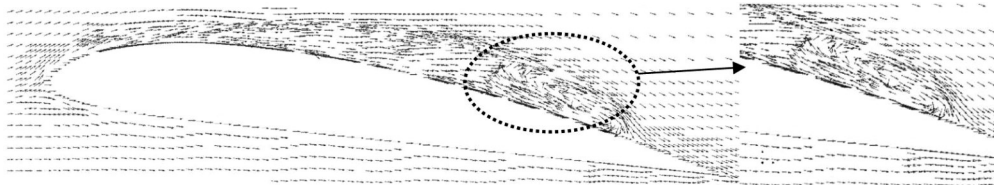


图7 水翼表面速度矢量分布  
Fig.7 Velocity vector distribution around hydrofoil surface

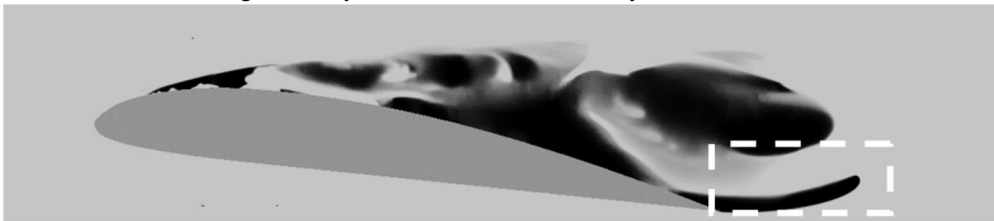


图8 空泡形态云图  
Fig.8 Contours of cavity bubbles

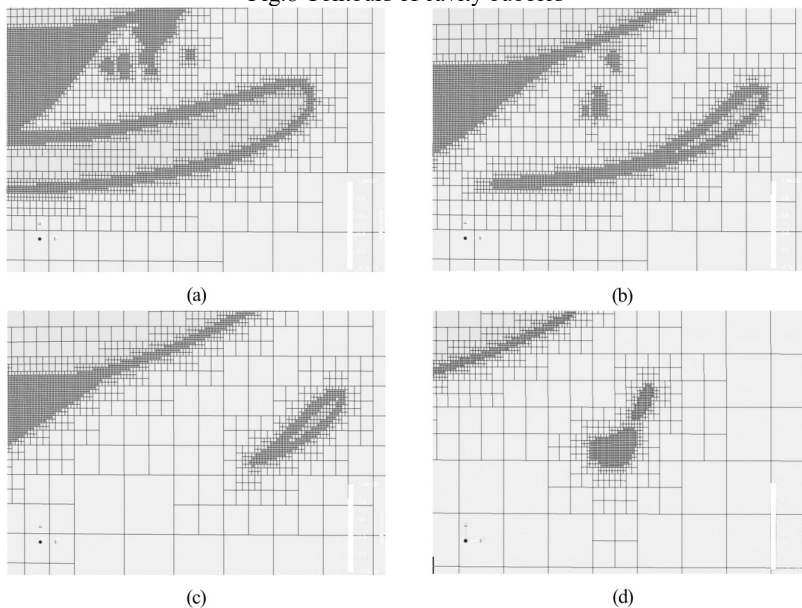


图9 空泡脱落过程界面追踪  
Fig.9 Interface tracking of cavity shedding

变, 空泡体积迅速减小; 图9(d)展示了空泡溃灭瞬间的局部网格, 从图9(c)到图9(d)显示空泡溃灭后已经无法区分两相界面, 变为水汽混合物, 自适应网格对这部分区域整体进行了加密。

### 2.5 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, 选取了一个周期中的四个典型时刻与实验对比, 分别为 $0.1T$ ,  $0.5T$ ,  $0.7T$ 和 $0.9T$ 。在 $0.1T$ 的时刻, 两个加密等级预测的最大稳定片空泡长度都与实验比较接近; 在 $0.5T$ 时刻和 $0.7T$ 时刻, 两个加密等级预测的云空泡形态比较接近, 都能反映出空化流场的比较多的细节; 在 $0.9T$ 的时刻, 图10(c)对应的2级自适应加密预测的结果与实验更为接近, 而图10(b)的预测结果与实验差别比较大, 这是由于云空泡的形态相比片空泡更加不稳定, 需要尽可能多的网格量来提高流场的物理分辨率。图11给出了使用静网格和自适应网格在同一时刻得到的空泡形态云图, 可以看到相比静网格的结果, 自适应网格计算得到的空泡形态更为破碎, 同时由于足够的网格分辨率, 能够捕捉到一些体积较小的空泡, 因此也更接近真实空化流场的情况。

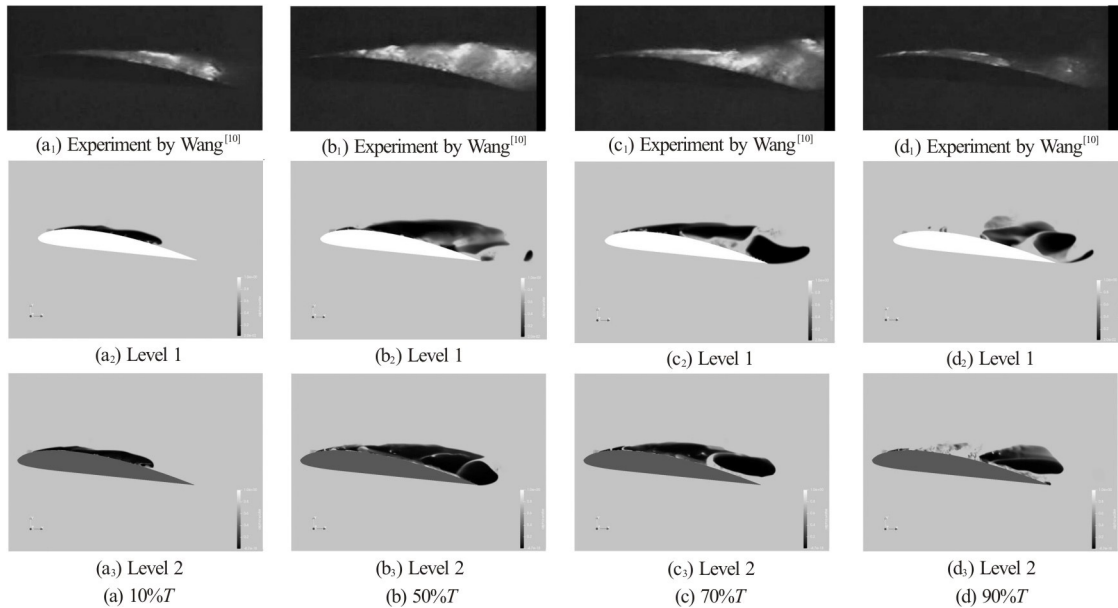


图 10 空泡形态模拟结果与试验结果对比图

Fig.10 Comparison of the experimental and simulation results of cavity contours

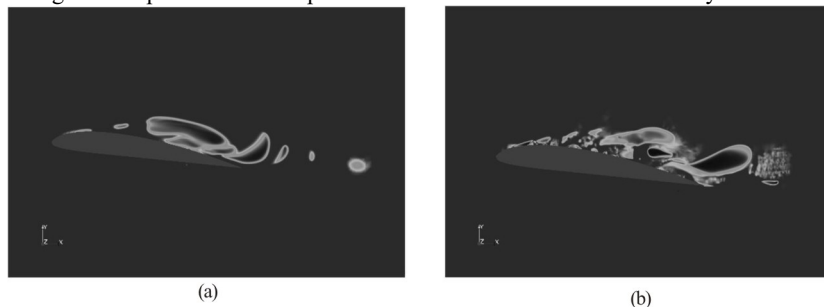


图 11 静网格和自适应网格空泡形态对比图

Fig.11 Comparison of cavity contours in AMR and static mesh

## 3 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与实验结果对比分析, 给出了升阻力系数的计算结果, 并重点考察了空泡形态。

(1) 通过自适应网格技术可以显著提高流场局部区域的物理分辨率, 从而实现在片空化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, 网格自适应加密的效果尤为显著。

(2) 云空泡进入流场高压区后迅速形变直至溃灭, 静网格通过扩大加密区域的方式捕捉云空泡的溃灭过程, 自适应网格通过对云空泡的界面进行加密追踪, 可以在不显著增加网格量的基础上较好地捕捉到云空泡从变形到溃灭的整个过程。

(3) 与静网格的计算结果相比, 自适应网格计



算得到的片空泡和云空泡的形态更为破碎,空泡数量也更多。网格自适应加密能捕捉到一些体积较小的空泡,因此也能反映空化流场的更多细节。

## 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,2019,49:201900.  
JI Bin, CHENG Huai-yu, HUANG Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamical characteristics for cavitation [J]. Advance in Mechanics, 2019, 49: 201900.
- [2] 黄彪,吴钦,王国玉.非定常空化流动研究现状与进展[J].排灌机械工程学报,2018,36(1):1-14.  
HUANG Biao, WU Qin, WANG Guo-yu. Progress and prospects of investigation into unsteady cavitating flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1): 1-14.
- [3] YILMAZ N, ATLAR M, KHORASANCHI M. An improved mesh adaption and refinement approach to cavitation simulation (MARCS) of propellers[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 139-150.
- [4] BERTETTA D, BRIZZOLARA S, GAGGERO S, et al. CPP propeller cavitation and noise optimization at different pitches with panel code and validation by cavitation tunnel measurements[J]. Ocean Engineering, 2012, 53: 177-195.
- [5] BERGER M J, OLIGER J. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 53(3): 484-512.
- [6] 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.
- [7] THEODORAKAKOS A, BERGELES G. Simulation of sharp gas-liquid interface using VOF method and adaptive grid local refinement around the interface[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 45(4): 421-439.
- [8] GEEAVES D. A quadtree adaptive method for simulating fluid flows with moving interfaces[J]. Journal of Computational Physics, 2004, 194(1): 35-56.
- [9] 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.
- [10] BERGER M J, COLELLA P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1989, 82(1): 64-84.
- [11] LI L M, HU D Q, LIU Y C, et al. Large eddy simulation of cavitating flows with dynamic adaptive mesh refinement using OpenFOAM[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018.
- [12] ESKILSSON C, BENSOW R E. A mesh adaptive compressible Euler model for the simulation of cavitating flow[C]. IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Lisbon, Portugal, 2011.
- [13] LLOYD T, VAZ G, RIJPKENMA D, et al. Computational fluid dynamics prediction of marine propeller cavitation including solution verification[C]. 5th International Symposium on Marine Propulsors, Helsinki, Finland, 2017.
- [14] SCHNERRGH, SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]. Proceedings of 4th international Conference on Multi-Phase Flow, New Orleans, USA, 2011.
- [15] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [16] REBOUD J L, STUTZ B, COUTIER-DELGOSHA O. Two phase flow structure of cavitation experiment and modeling of unsteady effects[C]. Proc. 3rd Int. Sym. Cavitation, Grenoble, France, 1998.
- [17] GAO D, MORLEY N B, DHIR V. Numerical simulation of wavy falling film flow using VOF method[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 192(2): 624-642.
- [18] ROOHI E, ZAHIRI A P, PASSANDIDEH-FARD M. 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.
- [19] HIRT C W, NICHOLES B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [20] WANG G, SENOCAK I, SHYY W, et al. Dynamics of attached turbulent cavitating flows[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(6): 551-581.