DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.010

三维ALE15翼型空化流动数值模拟*

谭　磊[1]　曹树良[2]　王玉明[1]　祝宝山[2]
（1.清华大学摩擦学国家重点实验室，北京 100084；2.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084）

【摘要】　在均相流假设下，考虑流体压力和速度湍流脉动、不可凝结性气体的影响，采用完全空化模型计算空化流场的相变，引入密度函数对RNG $k-\varepsilon$湍流模型的湍流粘性系数进行修正，提出了一种空化流动的数值模型和计算方法。根据试验条件给定的参数，采用提出的数值模型和计算方法，数值模拟了空化数为2.3时ALE15翼型定常空化流动。计算得到的不同剖面速度分布与试验数据吻合较好，验证了该数值模型和计算方法的一致性。不同剖面上，远离翼型表面的速度与主流区速度接近，沿着流动方向，远离翼型表面的速度逐渐减小，这与空泡形成的阻碍有关。空泡尾部出现较大的漩涡区，靠近翼型表面的速度为负值，这与反向射流的作用有关。

关键词：ALE15翼型　空化模型　湍流模型　数值模拟

中图分类号：TH312　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2012)09-0049-04

Numerical Simulation of Cavitation for 3-D ALE15 Hydrofoil

Tan Lei[1]　Cao Shuliang[2]　Wang Yuming[1]　Zhu Baoshan[2]
(1. *State Key Laboratory of Tribology*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*
2. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract

The phase transformation in cavitation flow field was calculated by the full cavitation model considering the pressure and velocity turbulent fluctuation of the fluid, as well as the influence of noncondensable gas based on the homogeneous flow assumption. The turbulence viscosity coefficient was modified by the density function. A computation model and calculation method was proposed for the steady cavitation. The steady cavitation flow field of ALE15 hydrofoil was numerical simulated for the cavitation numbers of 2.3 by using the computation model and calculation method according to the conditions in the experiment. The calculated velocity distributions on different profiles agreed well with the experiment data, which validated the reliability of this computation model and calculation method. The velocity far away from the hydrofoil section was close to the velocity in the main flow region, and gradually decreased along the flow direction for the reason that the cavity acted as an obstacle. There is a large vortex zone in the cavity rear, and the velocity near the hydrofoil section is negative, both caused by the re-entrant jet.

Key words　ALE15 hydrofoil, Cavitation model, Turbulence model, Numerical simulation

引言

空化是涉及相变的可压缩、非定常的复杂流动。为深入研究空化流动的机理，许多学者采用试验测量和数值模拟开展了一系列工作[1~11]。在均相流假设下，根据计算流体介质密度方法的不同，可将空化模型分为空泡动力学模型、状态方程模型和输运方程模型3类。Kubota[12]、Merkle[13]、Kunz[14]、

收稿日期：2011-09-26　修回日期：2011-11-10

*国家自然科学基金资助项目(51176088)和中国博士后科学基金面上资助项目(2011M500315)

作者简介：谭磊，博士后，主要从事流体机械设计研究，E-mail：tanlei@mail.tsinghua.edu.cn

通讯作者：曹树良，教授，博士生导师，主要从事流体机械研究，E-mail：caoshl@mail.tsinghua.edu.cn

Singhal[15]等给出了输运方程中源项的不同表达。湍流模型对空化数值计算中空泡的生成和溃灭有很大影响，Coutier[16]和Johansen[17]给出了空化流动中湍流模型的不同修正。

本文采用完全空化模型和密度修正的RNG $k-\varepsilon$湍流模型数值模拟ALE15翼型的空化流动，与试验数据对比分析数值模拟的结果。

1 数学模型及计算方法

1.1 流体的连续方程及运动方程

在均相流假设下，流场内的流体可视为均匀的可压缩气液混合相介质，气液混合相介质在流场中任一点的速度和压力相同。气液混合相介质的连续方程和运动方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m)+\nabla\cdot(\rho_m\boldsymbol{u})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\boldsymbol{u})+\nabla\cdot(\rho_m\boldsymbol{uu})=-\nabla p+\nabla\cdot[(\mu_m+\mu_t)\nabla\boldsymbol{u}]+\frac{1}{3}\nabla[(\mu_m+\mu_t)\nabla\cdot\boldsymbol{u}] \tag{2}$$

式中 ρ_m——混合相的密度

p——压力 $\boldsymbol{u}$——速度矢量

μ_t——涡旋粘性系数

μ_m——混合相的动力粘性系数，按气、液两相体积分数加权平均后得到

1.2 空化模型方程

采用Singhal[15]提出的完全空化模型，混合相的密度ρ_m定义为

$$\frac{1}{\rho_m}=\frac{f_v}{\rho_v}+\frac{f_g}{\rho_g}+\frac{f_l}{\rho_l} \tag{3}$$

$$\begin{cases} f_v=\dfrac{\alpha_v\rho_v}{\rho_m} \\ f_g=\dfrac{\alpha_g\rho_g}{\rho_m} \\ f_l=\dfrac{\alpha_l\rho_l}{\rho_m}=1-f_v-f_g \end{cases} \tag{4}$$

式中 ρ_v、ρ_g、ρ_l——汽相、不可凝结气相、液相密度

f_v、f_g、f_l——各相对应的质量分数

α_v、α_g、α_l——各相对应的体积分数

气相组分输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v\rho_v)+\nabla\cdot(\alpha_v\rho_v\boldsymbol{u})=C_e\frac{\sqrt{k}}{\lambda}\rho_l\rho_v\left(\frac{2}{3}\frac{p_v-p}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}}(1-f_v-f_g)-C_c\frac{\sqrt{k}}{\lambda}\rho_l\rho_l\left(\frac{2}{3}\frac{p-p_v}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}f_v \tag{5}$$

其中 $f_g=1.5\times10^{-5}$

式中 C_e、C_c——经验常数，分别取0.02、0.01

p_v——汽化压强

k——湍动能

λ——液相表面张力系数，取0.0717 N/m

1.3 湍流模型方程

采用RNG $k-\varepsilon$双方程湍流模型，其中k和ε方程为

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i k)}{\partial x_i}=G_k+\rho_m\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_k(\mu_m+\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho_m\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_m u_i\varepsilon)}{\partial x_i}=C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho_m\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\varepsilon(\mu_m+\mu_t)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{7}$$

$$\mu_t=\rho_m c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

其中 $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$ $c_\mu=0.09$

式中 ε——湍动能耗散率

G_k——湍动能生成项

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$——经验常数

u_i——速度分量

x_i、x_j——张量形式坐标分量

α_k、α_ε、c_μ——经验常数，分别取1.39、1.39、0.09

考虑空泡流可压缩性的影响，引入函数$f(\rho_m)$对μ_t进行修正

$$\mu_t=f(\rho_m)c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

$f(\rho_m)$定义为

$$f(\rho_m)=\rho_v+[(\rho_m-\rho_v)/(\rho_l-\rho_v)]^n(\rho_l-\rho_v)$$

其中n为常数，当n取不同值时，$f(\rho_m)$与混合物密度ρ_m之间的关系如图1所示，增大n的取值可有效减少混合物的湍流粘性系数，本文计算中取$n=10$。

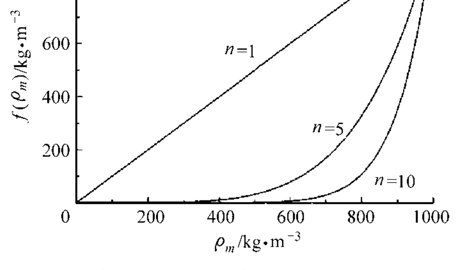

图1 修正函数与混合物密度的关系曲线

Fig. 1 Relationship curves of modified function and mixture density

1.4　计算区域及网格

采用文献[1]中的 ALE15 翼型进行数值模拟，其几何结构如下：翼型弦长 107.9 mm，宽度（z 方向）和厚度（y 方向）分别为 50 mm 和 16 mm，翼型进口边与 z 轴夹角为 15°。采用结构化六面体网格对计算域进行网格划分，翼型头、尾部距计算域进、出口分别为 10 倍弦长，如图 2 所示。

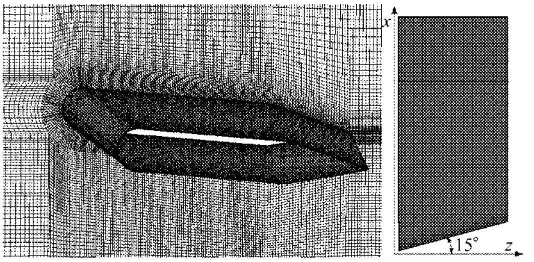

图 2　三维 ALE15 翼型计算域及网格

Fig. 2　Computational domain and grid of ALE15

1.5　数值方法及参数设置

雷诺（Reynolds）数 Re 和空化数 σ 分别定义为

$$Re=\rho_l v_\infty C/\mu_l \tag{10}$$

$$\sigma=(p_\infty-p_v)/(0.5\rho_l v_\infty^2) \tag{11}$$

式中　v_∞——来流速度

μ_l——液相动力粘性系数

p_∞——计算域参考压力

按文献[1]给定流体的物性参数和计算工况：液相和汽相密度分别为 998.2 kg/m^3 和 0.554 kg/m^3，翼型攻角为 5°，进口速度为 13 m/s，空化数 σ 为 2.3，雷诺数 Re 为 1.4×10^6。

计算域进、出口及壁面的边界条件：进口给定均匀来流速度，出口给定压力，其他变量给定充分发展条件，对流项采用二阶迎风格式离散，其他项采用中心差分格式离散。

2　计算结果及分析

为分析数值模拟结果，在 $z=45$ mm 的截面上，布置如图 3 所示的计算剖面。

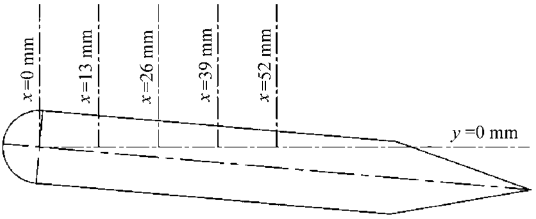

图 3　三维翼型 ALE15 计算剖面图

Fig. 3　Computational profile of 3-D ALE15 hydrofoil

2.1　空泡形状

图 4 给出了数值模拟得到的翼型吸力面空泡形状，沿 z 轴方向空泡形状不同，表现出较强的三维特征，空泡尾部在靠近翼型吸力面附近出现了回缩。

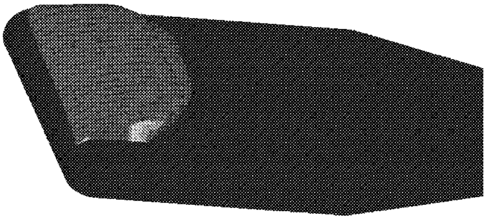

图 4　翼型表面空泡形状

Fig. 4　Cavity shape on hydrofoil section

2.2　不同剖面的速度分布

图 5 给出了 $z=45$ mm 截面上，5 个不同剖面

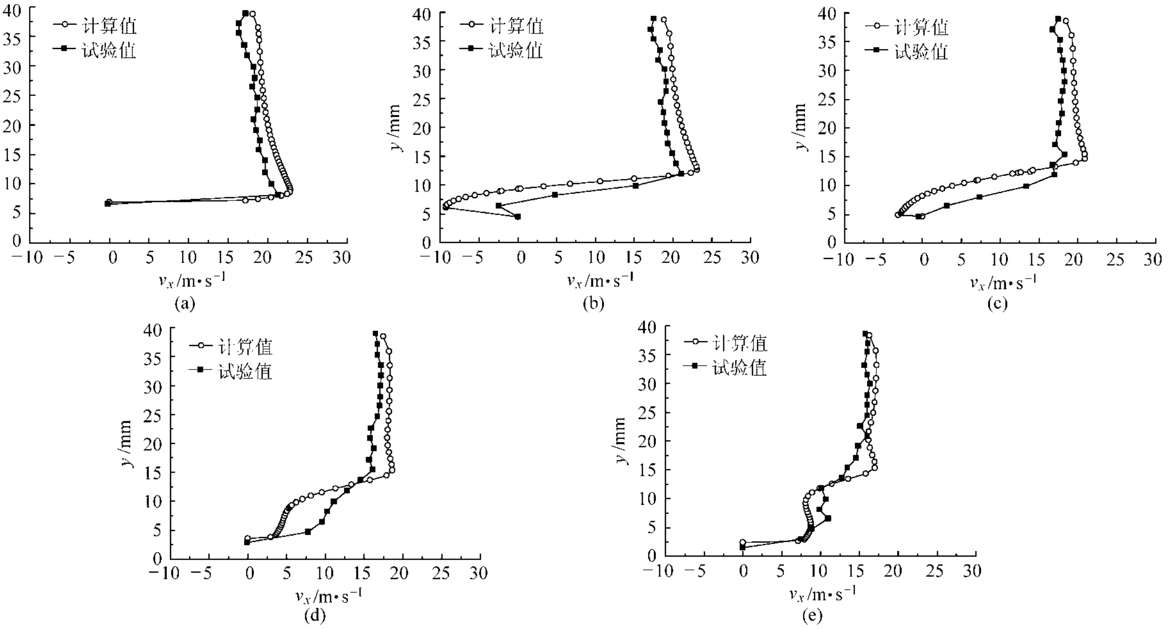

图 5　不同剖面的速度分布曲线

Fig. 5　Velocity distribution on profiles

（a）$x=0$ mm　（b）$x=13$ mm　（c）$x=26$ mm　（d）$x=39$ mm　（e）$x=52$ mm

$x=0$ mm、$x=13$ mm、$x=26$ mm、$x=39$ mm 和 $x=52$ mm上的速度分布。由图可知，采用本文数值模型和计算方法得到的计算结果与试验数据吻合较好。

在 $x=0$ mm 剖面上，空泡内部靠近翼型吸力面的速度接近零，由于空泡的头部很薄，随着 y 值增加，速度很快增大为主流区速度。在 $x=13$ mm 剖面上，靠近翼型吸力面的速度为负值，原因是此剖面接近空泡尾部，空泡尾部出现反向射流，导致速度为负值。沿着流动方向，随着 x 值的增大，$x=26$ mm、$x=39$ mm 和 $x=52$ mm 剖面上远离翼型表面的主流区速度逐渐减小，可能的原因是翼型吸力面上的空泡对流动形成了阻碍，导致速度减小。

2.3 翼型表面的速度分布

图 6 给出了 $z=45$ mm 截面上翼型表面的速度分布，等值线的数值为混合介质密度。由图可知，在空泡壁面上部，流线分布非常均匀，这与图 5 中不同剖面上 y 值较大时，流体速度与主流区速度相等是一致的。在空泡尾部出现了较大漩涡，靠近翼型吸力面的速度为负值，这是由于反向射流的作用。

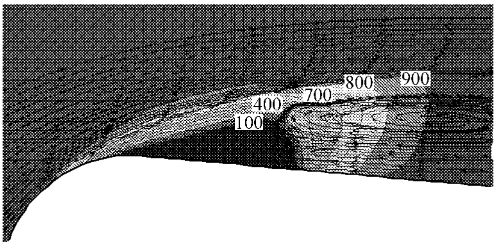

图 6 $z=45$ mm 截面速度分布

Fig. 6 Velocity distribution around foil on $z=45$ mm

3 结论

（1）在均相流假设下，采用完全空化模型计算空化流场的相变，采用密度函数对 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型中的湍流粘性系数进行了修正，发展了一种空化流场的数值模拟方法。

（2）数值模拟了三维 ALE15 翼型的定常空化流动，计算得到的空泡形状具有明显的三维特征，不同剖面上的速度与试验数据吻合较好，验证了本文提出的数值模型和计算方法的准确性。分析了翼型表面的速度分布，发现空泡尾部的反向射流是引起空泡尾部漩涡的原因。

参考文献

1 Dular M, Bachert R, Stoffel B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2005, 24(4): 522 ~ 538.

2 Shen Y T, Dimotakis P E. The influence of surface cavitation on hydrodynamic forces[C] // Proc. 22nd American Towing Tank Conference, St. John's, Canada, 1989: 44 ~ 52.

3 Leroux J, Astolfi J, Billard Y. An experimental study of unsteady partial cavitation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 94 ~ 101.

4 Zhou L J, Wang Z W. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG $k-\varepsilon$ model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(11): 11 302 ~ 11 307.

5 谭磊，曹树良. 基于滤波器湍流模型的水翼空化数值模拟[J]. 江苏大学学报：自然科学版，2010，31(6)：683 ~ 686.
Tan Lei, Cao Shuliang. Numerical simulation of hydrofoil cavitation based on filter-based model [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(6): 683 ~ 686. (in Chinese)

6 谭磊，曹树良，桂绍波，等. 绕水翼空化流动的数值模拟[J]. 清华大学学报：自然科学版，2010，50(7)：1 058 ~ 1 062.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Numerical simulation of cavity flow around a hydrofoil [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(7): 1 058 ~ 1 062. (in Chinese)

7 王国玉，张淑丽，张博，等. FBM 模型在栅中翼型云状空化流动数值计算中的应用[J]. 北京理工大学学报，2009，29(8)：672 ~ 675.
Wang Guoyu, Zhang Shuli, Zhang Bo, et al. Application of afilter-based turbulence model for cloud cavitating flows around a cascade hydrofoil [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(8): 672 ~ 675. (in Chinese)

8 时素果，王国玉，王复峰，等. 绕三维水翼云状空化现象的实验研究[J]. 应用力学学报，2011，28(2)：105 ~ 110.
Shi Suguo, Wang Guoyu, Wang Fufeng, et al. Experimental study on unsteady cavitation flows around three-dimensional hydrofoil [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(2): 105 ~ 110. (in Chinese)

9 苏永生，王永生，段向阳. 离心泵空化试验研究[J]. 农业机械学报，2010，41(3)：77 ~ 80.
Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Duan Xiangyang. Cavitation experimental research on centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 77 ~ 80. (in Chinese)

（下转第 48 页）

[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 421 ~ 423. (in Chinese)

2 齐学义,孔源,田亚斌,等. 基于 CFD 技术的超低比转速离心泵叶轮的优化设计[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(4): 52 ~ 55.
Qi Xueyi, Kong Yuan, Tian Yabin, et al. Optimization design of impeller for centrifugal pumps with super-low specific-speed by means of CFD technology [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(4): 52 ~ 55. (in Chinese)

3 李凤超, 樊红刚, 陈乃祥. 水泵水轮机双向流动控制优化设计[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 223 ~ 228.
Li Fengchao, Fan Honggang, Chen Naixiang. Optimum design of pump-turbine for bidirectional flow control [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):223 ~ 228. (in Chinese)

4 Zangeneh M, Daneshkhah K. A fast 3d inverse design based multi objective optimization strategy for deign of pumps[C] // Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Colorado, 2009.

5 杨魏,王福军,王宏. 离心风机叶片三维反问题优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(8):105 ~ 109.
Yang Wei, Wang Fujun, Wang Hong. Aerodynamic optimization design of centrifugal fan blades based on 3-D inverse design method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):105 ~ 109. (in Chinese)

6 Bonaiuti D, Zangeneh M. On the coupling of inverse design and optimization techniques for the multi-objective, multipoint design of turbomachinery blades [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131(2): 1 014 ~ 1 029.

7 Bonaiuti D, Zangeneh M, Aartojarvi R, et al. Parametric design of a water-jet pump by means of inverse design, CFD calculations and experimental analyses [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(3): 031104 - 1 ~ 15.

8 Okamoto H, Goto A. Suppression of cavitation in a Francis turbine runner by application of 3D inverse design method [C] // Proceedings of FEDSM02: The 2002 Joint US ASME-European Fluids Engineering Summer Conference. Montreal, 2002.

9 Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 723 ~ 735.

10 Zangeneh M. A compressible 3D design method for radial and mixed flow turbomachinery blades [J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 1991, 13(5): 599 ~ 624.

11 邴浩,曹树良,谭磊. 混流泵叶轮设计正反问题迭代方法[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):277 ~ 281,302.
Bing Hao, Cao Shuliang, Tan Lei. Iteration method of direct inverse problem of mixed-flow pump impeller design [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4):277 ~ 281,302. (in Chinese)

12 谭磊,曹树良,桂绍波,等. 离心泵叶轮正反问题迭代设计方法[J]. 农业机械学报,2010,41(7):30 ~ 35,10.
Tan Lei, Cao Shuliang, Gui Shaobo, et al. Centrifugal pump impeller design by using direct inverse problem iteration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):30 ~ 35,10. (in Chinese)

13 Ghaly W S. A parametric study of radial turbomachinery blade design in three-dimensional subsonic flow [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(3): 338 ~ 345.

* * *

(上接第 52 页)

10 曹卫东, 张晓娣, 高一, 等. 径向回流平衡孔低比转数离心泵空化性能研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 37 ~ 41.
Cao Weidong, Zhang Xiaodi, Gao Yi, et al. Cavitation performance of the low specific-speed centrifugal pump with radial reflux balance hole [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 37 ~ 41. (in Chinese)

11 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 99 ~ 103.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 99 ~ 103. (in Chinese)

12 Kubota A, Kato H, Yamaguchi H. A new modeling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 240: 59 ~ 96.

13 Merkle C L, Feng J, Peo B. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation [C] // Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France: 1998.

14 Kunz R F, Boger D A, Stinebring D R, et al. A preconditioned Navier - Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction [J]. Computers & Fluids, 2000, 29(8): 849 ~ 875.

15 Singhal A K, Athavale M M, Li H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617 ~ 624.

16 Coutier D O, Fortes P R, Reboud J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38 ~ 45.

17 Johansen S T, Wu J, Shyy W. Filter-based unsteady RANS computations [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(1): 10 ~ 21.