

结构振动对空化流动的影响分析

杜特专, 王一伟, 黄晨光

(中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190
中国科学院大学, 工程科学学院, 北京, 100049)

摘要: 云状空化流动的非定常演化会造成结构的振动和变形, 而结构振动反过来又会影响空化流动。为了分析结构振动对于空化流动的影响机制及规律, 本研究以细长体为研究对象, 模拟了不同振幅和频率的结构振动对空泡演化的影响。计算结果表明, 航行体的振动变形会导致航行体头部局部攻角的变化, 从而影响空泡的生长和回射流的发展。迎水面空泡生长慢, 气泡厚度较薄, 回射流发展快。背水面空泡生长快, 气泡厚度较厚, 回射流发展较慢。局部攻角对空化流动的影响在时间上有延迟的现象。振动幅值较大时, 局部攻角的交替变化会影响回射流的发展, 导致空泡局部脱落。当无量纲振幅大于 0.05 时, 结构变形带来的局部攻角变化会改变空泡的脱落频率, 此时空泡的演化过程主要受结构振动频率控制。

关键词: 流固耦合; 空化流动; 结构振动; 数值模拟

1 引言

对于带空化的流固耦合问题来说, 空化现象带来了更多的困难和挑战。首先, 与气动弹性等常规的流固耦合不同, 空化流动包含着液态水和水蒸汽, 是多相、多界面的问题。除了气-固界面, 液-固界面之间的相互作用, 还需要处理气-液界面的问题。其次, 空化区内部压力为饱和蒸汽压, 空泡的非定常演化会带来载荷时空的变化^[1], 特别是空泡的溃灭通常会伴随高压脉冲, 在短时间内对结构的作用突出。反之, 结构形状的改变也会对空泡的演化造成影响^[2]。

当前针对包含空化的流固耦合问题, 主要集中于水下复合材料螺旋桨和水下高速航行体的研究。Young 等^[3-4]利用边界元方法模拟空化流动, 结合有限元分析结构的变形, 模拟了水轮机叶片的在空化和无空化条件下的耦合效应。Young 等^[5]利用二维欧拉-拉格朗日数值方法对复合材料结构在水下爆炸过程中的瞬态响应进行了研究。随着计算软件和硬件条件的不断发展, 商业软件和开源程序也逐渐成为重要的研究工具。Ducoin 和 Young^[6]运用商业软件 CFX 建立了 2 自由度的动网格模型来模拟柔性水翼的变形, 分析了柔性水翼动力

学的规律。任怀勋^[7]基于商业软件 ANSYS 及脚本控制对水翼空化问题进行了流固耦合计算, 分析了三维水翼在空化流动作用下的流体动力和结构载荷特性。Campbell 和 Paterson^[8] 采用开源软件 Open FOAM 对大变形的柔性叶片进行数值模拟, 计算结果得到了实验的验证。

在水下高速航行体方面, 王亚东等^[9]利用数值模拟获得了航行体多相流场、运动参数及受力的时间历程曲线。杨晓光^[10]利用 FLUENT 和刚体六自由度运动模块对航行体水下发射进行了模拟, 分析了发射条件以及波浪对弹道的影响。马庆鹏^[11]建立了二维轴对称模型, 利用 MPCCI 软件实现 FLUENT 和 ABAQUS 的数据交换和耦合迭代, 计算得到了航行体垂直出筒过程的结构响应。王一伟^[12]基于 FLUENT 和自编结构求解程序, 以二维模型为研究对象, 分析了水下发射过程中刚体运动和结构振动反馈对水动力的影响。现有的研究工作对水下发射进行了建模, 并获得了相应的水动力和航行体响应, 但是由于问题的复杂性, 关于结构振动对空化流动的影响规律仍未进行深入的分析。

本研究以轴对称细长体为研究对象, 模拟并分析了不同振幅和振动频率参数条件下结构振动对空化流动的影响, 获得了影响空化流动的主要无量纲参数及其影响规律。

2 控制方程

空化流动的控制方程包括混合物的 RANS 方程 (1) 和方程 (2), 水蒸汽质量分数的输运方程 (3), 以及修正的 RNG k-ε 湍流模式方程 (4) 和方程 (5)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \bar{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \bar{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{u}_m \bar{u}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{u}_m + \nabla \bar{u}_m^T)] + \nabla \cdot (-\rho_m \overline{u'_m u'_m}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f) + \nabla \cdot (\rho_m f \bar{u}_m) = \nabla \cdot (\gamma \nabla f) + Re - Rc \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{u}_m) = \nabla \cdot [(\alpha_k \mu_{eff}) \nabla k] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon \bar{u}_m) = \nabla \cdot [(\alpha_\epsilon \mu_{eff}) \nabla \epsilon] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (5)$$

以上各式中: $\bar{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{u}_k}{\rho_m}$ 为质量加权平均速度; $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ 为混合物

密度; $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ 为混合物黏性; 其中 γ 为蒸汽相等效扩散系数。Re 和 Rc 代表空化率和凝结率, 本文采用的空化模型基于 Singhal 等提出的 “Full cavitation model”^[13]。

3 计算结果分析与讨论

以 90° 钝锥头航行体为研究对象, 航行体模型直径 $D=37.5\text{mm}$ 。细长体振动主要是一阶弯曲振动, 因此我们给定结构的振动形式为一阶弯曲振动。已知头部顶点的最大位移为 A , 航行体直径为 D , 结构振动频率为 f_s , 无振动条件下空泡脱落频率为 f_0 , 则可定义无量纲振幅为 A/D , 无量纲振动频率为 f_s/f_0 。本节主要分析无量纲振幅和振动频率对空化流动的影响。

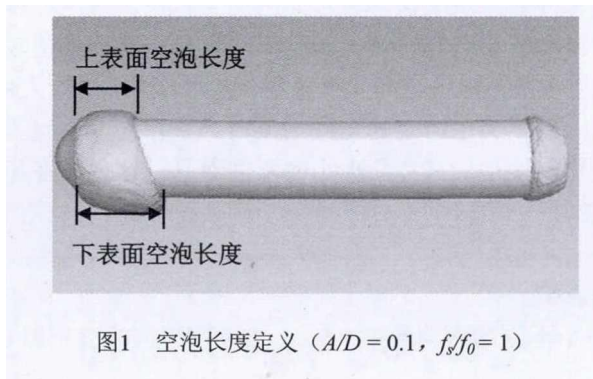
3.1 振幅对空化的影响

我们考虑三个不同的振幅 0.02, 0.05 和 0.1, 其中 0.1 可能大于当前工程实际中的最大振幅。具体的计算条件见表 1。

表1 计算条件

工况	空化数	雷诺数	无量纲振幅(A/D)	无量纲频率(f_s/f_0)
1	0.611	6.75×10^5	0.1	1
2	0.611	6.75×10^5	0.05	1
3	0.611	6.75×10^5	0.02	1

可以看出, 为了研究振动对空泡演化的影响, 首先选取上下表面空泡长度 (图 1) 作为研究对象。在给定的条件下, 结构振动对空泡的演化造成了较大的影响, 主要包括两个方面: 首先, 上下表面的空泡长度和厚度出现了差异; 其次, 上下表面空泡脱落情况也有差别。



从图 1 可以看出, 对于 $f_s/f_0=1$ 的情况, $A/D=0.02$ 时, 振幅对于空泡长度的影响较小, 虽然上下表面的空泡长度有所差别, 但是整体的空泡生长和脱落基本一致。当振幅较大, 即 $A/D=0.05, 0.1$ 时, 航行体的振动变形会导致航行体头部局部攻角的变化, 从而影响空泡的生长和回射流的发展。迎水面空泡生长慢, 气泡厚度较薄, 回射流发展快。背水面空泡生长快, 气泡厚度较厚, 回射流发展较慢。局部攻角对空化流动的影响在时间上有延迟的现象。振动幅值较大时, 局部攻角的交替变化会影响回射流的发展, 导致空泡局部脱落。

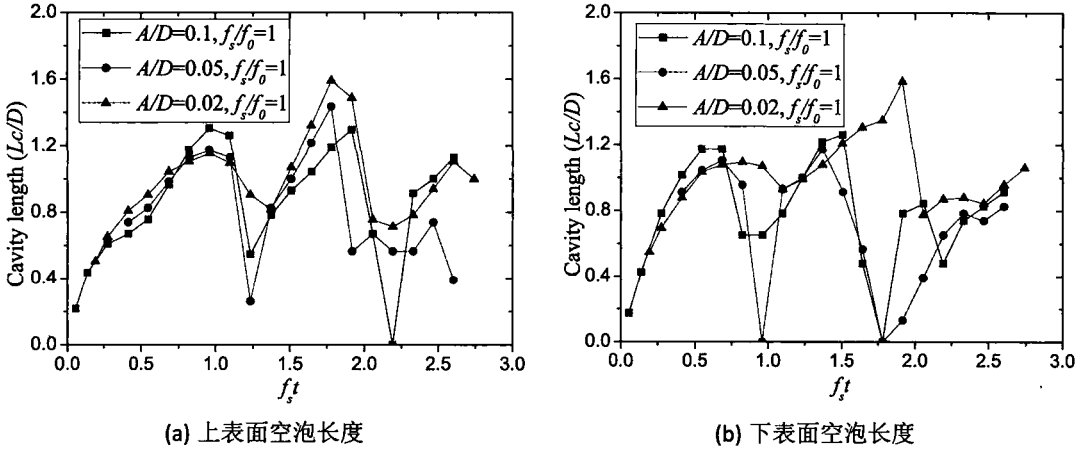


图2 不同振幅条件下振动对空泡演化的影响

图2给出了上下表面空泡长度随无量纲时间 $f_s t$ 的变化曲线。可以看出，对于 $f_s f_0=1$ 的情况， $A/D=0.02$ 时，振幅对于空泡长度的影响较小，虽然上下表面的空泡长度有所差别，但是整体的空泡生长和脱落基本一致。当振幅较大，即 $A/D=0.05, 0.1$ 时，航行体的振动变形会导致航行体头部局部攻角的变化，从而影响空泡的生长和回射流的发展。迎水面空泡生长慢，气泡厚度较薄，回射流发展快。背水面空泡生长快，气泡厚度较厚，回射流发展较慢。局部攻角对空化流动的影响在时间上有延迟的现象。振动幅值较大时，局部攻角的交替变化会影响回射流的发展，导致空泡局部脱落。因此，当振幅较大时($A/D=0.05, 0.1$)，空泡长度曲线特征基本一致。文中给定的无量纲振动频率相同，也就是说相同时刻结构的振动相位是一样的，差别仅仅是局部攻角大小的不同而已。这说明在振幅较大时，空泡长度的发展受到结构振动频的影响较大。为了进一步确认这一结论，我们需要进行不同振动频率的计算分析。

3.2 振动频率对空化的影响

在本小节中考虑三个不同的振动频率 0.5, 1, 2 和 4, 振幅分别取 0.1 和 0.02, 具体的计算条件见表 2。

表2 计算条件

工况	空化数	雷诺数	无量纲振幅(A/D)	无量纲频率(f_s/f_0)
1	0.611	6.75×10^5	0.1	0.5
2	0.611	6.75×10^5	0.1	1
3	0.611	6.75×10^5	0.1	2
4	0.611	6.75×10^5	0.02	1
5	0.611	6.75×10^5	0.02	2
6	0.611	6.75×10^5	0.02	4

图3给出上下表面空泡长度随无量纲时间 $f_s t$ 的变化曲线,可以看出:当 $A/D=0.1, f_s/f_0=0.5$ 和 1 时,空泡的长度主要受振动频率主导。也就是说,该条件下结构振动对空化流场的影响主要是局部变形导致的局部攻角的变化。当 $A/D=0.1, f_s/f_0=2$ 时,除了局部攻角的影响外,振动速度的影响也逐渐显著。在此条件下,来流速度 18m/s ,航行体头部顶点振动最大速度 1.2m/s 。由于横向振动速度导致头部出现了局部空化(图4),从而改变空泡长度的演化。

图5给出了无量纲振幅为 0.02 时,不同振动频率对空泡长度的影响。对于该小振幅条件来说,结构振动频率对于空泡的整体演化过程影响并不大,即空泡脱落频率基本相同,但是仍然会对空泡的长度有一定的影响。振动频率较高的条件下,在空泡生长阶段,空泡长度曲线会出现较多的峰值(图5 b)。

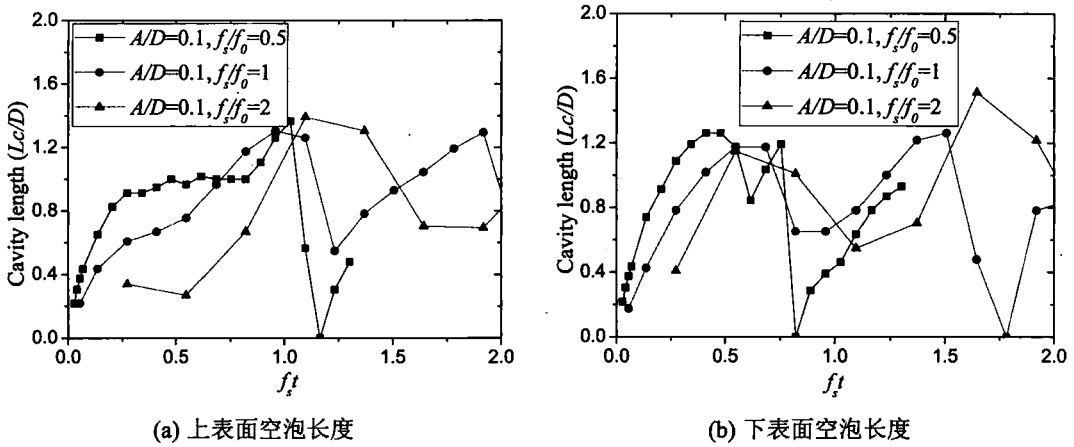


图3不同振动频率对空泡演化的影响

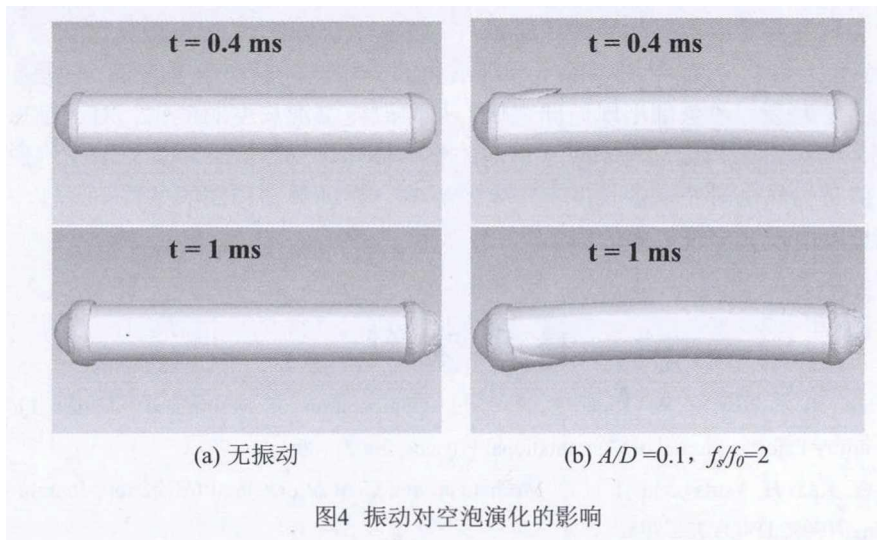


图4 振动对空泡演化的影响

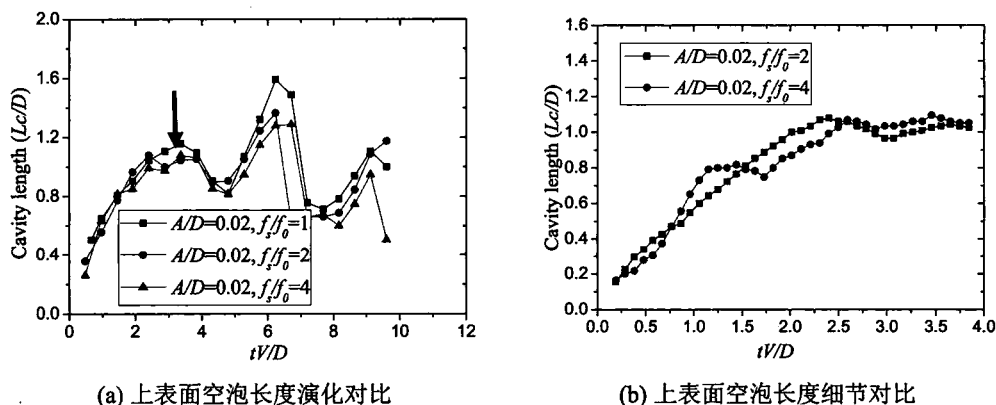


图5 振动频率对空泡长度的影响

4 结论

本研究以轴对称细长体为研究对象,模拟并分析了不同振幅和振动频率参数条件下结构振动对空化流动的影响。

(1) 航行体的振动变形会导致航行体头部局部攻角的变化,从而影响空泡的生长和回射流的发展。迎水面空泡生长慢,气泡厚度较薄,回射流发展快。背水面空泡生长快,气泡厚度较厚,回射流发展较慢。局部攻角对空化流动的影响在时间上有延迟的现象。振动幅值较大时,局部攻角的交替变化会影响回射流的发展,导致空泡局部脱落。计算结果表明当无量纲振幅大于 0.05 时,结构变形带来的局部攻角变化会改变空泡的脱落频率,此时空泡的演化过程主要受结构振动频率控制。

(2) 当 $A/D=0.1$, $f_s/f_0=2$ 时,除了局部攻角的影响外,振动速度的影响也逐渐显著。横向振动速度过大会导致头部出现局部空化,从而改变空泡长度的演化。对于小振幅条件 ($A/D=0.02$) 来说,结构振动频率对于空泡的整体演化过程影响并不大,即空泡脱落频率基本相同,但是仍然会对空泡的长度有一定的影响。振动频率较高的条件下,在空泡生长阶段,空泡长度曲线会出现较多的峰值。

参考文献

- 1 Venkateswaran S, Lindau J W, Kunz R F, et al. Computation of Multiphase Mixture Flows with Compressibility Effects, *Journal of Computational Physics*, 2002, 180(1):54-77.
- 2 Kawanami Y, Kato H, Yamaguchi H, et al. Mechanism and Control of Cloud Cavitation, *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119(4):788-794.

- 3 Young Y L. Time-dependent hydroelastic analysis of cavitating propulsors, *Journal of Fluids and Structures*, 2007, 23(2): 269-295.
- 4 Young Y L. Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers, *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(6): 799-818.
- 5 Young Y L, Liu Z, Xie W. Fluid-structure and shock-bubble interaction effects during underwater explosions near composite structures, *Journal of Applied Mechanics*, 2009, 76(5):911-914.
- 6 Ducoin A, Young Y L. Hydroelastic response and stability of a hydrofoil in viscous flow, *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 38(3):40-57.
- 7 任怀勋, 三维水翼空化的流体动力和结构载荷特性数值模拟研究, 哈尔滨工业大学, 2014.
- 8 Campbell R L, Paterson E G. Fluid-structure interaction analysis of flexible turbo-machinery, *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(8): 1376-1391.
- 9 王亚东, 袁绪龙. 气泡弹性对同心筒水下发射影响研究, *船舶工程*, 2013, (2):313-318.
- 10 杨晓光. 潜射导弹水下发射及出水过程三维数值研究, 哈尔滨工业大学, 2009.
- 11 马庆鹏. 潜射航行体出筒过程载荷特性的数值模拟研究, 哈尔滨工业大学, 2011.
- 12 王一伟. 高速航行体水动力载荷特征与机理研究, 中国科学院大学, 2013.
- 13 Singhal A K, Athavale M M, Li H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model, *Journal of Fluids Engineering*, 124(3): 617-624, 2002.

A study on influence of structural vibration on cavitating flow

DU Te-zhuan, WANG Yi-wei, HUANG Chen-guang

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Beijing 100190,
School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Unsteady evolution of cavitation may result in structural vibration and deformation. Conversely, the cavitating flow is affected by structural vibration. Cavitating flows around slender body are simulated to analyze the influence of structural vibration on evolution of cavitation. Simulation results show that structural deformation changes the local angle of attack around vehicle's head. Evolution of cavitation and re-entrant jet are affected by local angle of attack with a time delay. Cavitation on pressure side grows slower than that on suction side. Alternation of angle of attack will influence the re-entrant jet and result in local detachment of cavitation under large structural deformation. Evolution of cavitation mainly depends on the frequency of structural vibration while non-dimensional vibration amplitude exceeds 0.05.

Key words: Fluid-structure coupling; Cavitating flow; Structural vibration; Numerical simulation.