



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401914

引用格式:温喆然,徐自力,薛杰,等.基于高效流固耦合方法的自由表面流动问题分析[J].科学技术与工程,2025,25(4):1325-1331.

Wen Zheran, Xu Zili, Xue Jie, et al. Analysis of free surface flow problems based on an efficient fluid-structure coupling method[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1325-1331.

力学

基于高效流固耦合方法的自由表面流动问题分析

温喆然¹, 徐自力^{1*}, 薛杰², 王旭阳², 王珺²

(1. 西安交通大学航天航空学院复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安 710049;

2. 西安航天动力研究所航天液体动力全国重点实验室, 西安 710100)

摘要 针对自由表面流动与弹性结构的流固耦合计算效率低、计算耗时长的问题,将流体体积法与基于结构-虚拟弹性体的快速动网格方法相结合,发展了一种适用于自由表面流动的高效流固耦合方法。使用流体体积 (volume of fluid, VOF) 法对流体自由表面进行追踪;将流体域视为虚拟弹性体并构建结构-虚拟弹性体系统,以流固耦合界面的多相流体力为激励求解系统的动力学方程得到结构振动位移和流场网格变形;在每一个时间步内依次求解流体流动、结构变形和流场动网格,实现流固耦合计算。基于发展的方法计算了溃坝水流冲击下弹性挡板的流固耦合响应,得到了溃坝水流的自由液面和弹性挡板的运动行为,结果表明:自由液面演变和弹性挡板振动位移的计算结果与已有算法的结果吻合良好;在同等网格规模下,与已有算法相比本文方法可减少 33.3% 的计算时间;在水流冲击作用下,弹性挡板向冲击侧小幅弯曲。随后水流沿挡板左侧上升并形成射流,挡板向另一侧大幅弯曲。最后由于两侧流体的阻尼,挡板振幅逐渐衰减。

关键词 流固耦合;自由表面流动;流体体积 (VOF) 法;快速动网格方法;溃坝水流

中图分类号 O353.4;

文献标志码 A

Analysis of Free Surface Flow Problems Based on an Efficient Fluid-structure Coupling Method

WEN Zhe-ran¹, XU Zi-li^{1*}, XUE Jie², WANG Xu-yang², WANG Jun²

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

[Abstract] For the problems of low efficiency and long computational time in the fluid-structure interaction of free-surface flow and elastic structure, an efficient fluid-structure coupling method for free surface flow was developed by combining the volume of fluid method with the fast dynamic mesh method based on the structure-pseudo elastomer. The free surface of the fluid was tracked by volume of fluid (VOF) method. The fluid domain was regarded as a pseudo elastomer, then the structure-pseudo elastomer system was constructed. The multiphase fluid force at the fluid-solid interface was used as the excitation to solve the dynamical equations of the system to obtain the structural vibration displacements and the mesh deformations of the flow field. The fluid flow, structural deformation and the dynamic mesh were solved sequentially at each time step to solve the fluid-structure interaction problem. Based on the developed method, the fluid-structure coupling response of elastic baffle under the impact of dam-breaking flow was calculated. The motion behaviors of the free liquid surface of water and elastic baffle were obtained. The results show that the free liquid surface evolution and elastic baffle vibrational displacements are well in agreement with those of the existing algorithm, under the same mesh size, the method can reduce the computational time by 33.3% compared with the existing algorithms, under the impact of water flow, the elastic baffle is bent slightly to the impact side. Then the water rises along the left side of the baffle and forms a jet, and the baffle is bent greatly to another side. Finally, the amplitude of the baffle gradually decreases due to the damping of the fluid on both sides.

[Keywords] fluid-structure interaction; free surface flow; volume of fluid (VOF) method; fast dynamic mesh method; dam break flow

收稿日期: 2024-03-18; 修订日期: 2024-11-21

基金项目: 装备重大基础研究项目群资助项目(514010106-302)

第一作者: 温喆然(1998—),男,汉族,辽宁葫芦岛人,硕士研究生。研究方向:多相流及流固耦合。E-mail:wenzheran1998@163.com。

*通信作者: 徐自力(1967—),男,汉族,山西运城人,博士,教授。研究方向:流固耦合高效算法及应用。E-mail:zlxu@mail.xjtu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

自由表面流动与结构相互作用问题广泛存在于工程实际中,其中包括溃坝流动的流固耦合问题、液体晃动的流固耦合问题等。流体在流动过程中往往会伴随自由表面的破碎、翻卷、合并等强非线性现象^[1-2],并且弹性结构的大变形会导致流场几何形状发生明显变化,这些特点导致了自由表面流动和弹性结构的流固耦合计算往往需要耗费大量的计算资源。

解决流体与弹性结构的耦合求解数值方法主要可以分为两个大类,即整体耦合方法和分域耦合方法^[3]。整体耦合方法在同一组控制方程中求解流体域和固体域。Walhorn 等^[4]基于水平集方法(level set method, LSM),提出了整体时空有限元方法。Idelsohn 等^[5]基于粒子有限元法(particle finite element method, PFEM),实现了对多种形式的自由表面流动和弹性结构的流固耦合求解。Rafiee 等^[6]提出光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)投影方法,将流体和结构都通过粒子进行离散。然而对于复杂的流固耦合问题使用整体耦合方法很难同时收敛统一的控制方程^[7]。

分域耦合方法分别求解流体和结构,适用于通过并行算法解决复杂流固耦合问题,相比于整体耦合方法分域耦合方法的应用更加广泛^[8-9],其中基于动网格的分域耦合方法。Yang 等^[10]结合 SPH 和有限元法,通过耦合界面粒子将力传递到有限元节点,提出二维流固耦合计算模型。徐毅^[11]采用动网格方法模拟了矩形液舱晃动和水柱冲击弹性板的流固耦合问题。王春正等^[12]对比了代数流体体积(volume of fluid, VOF)法和几何流体体积法,发现几何 VOF 方法对于剧烈变化的自由液面的捕捉能力更好,并使用几何 VOF 方法建立基于动网格的双向流固耦合模型。

自由表面流动与弹性结构的流固耦合问题,由于需要对自由表面进行追踪往往网格庞大、结构的大变形会导致动网格计算效率低^[13-14]、分域流固耦合方法的每一时间步内需要对流场和结构进行反复迭代求解^[15],这些都使得计算的耗时问题突出。因此,研究自由表面流动与弹性结构的高效流固耦合算法,提高计算效率十分重要。

鉴于此,结合 VOF 方法与基于虚拟弹性的快速动网格方法^[16],将自由表面流动区域视为虚拟弹性体,构建结构-虚拟弹性体系统,通过流固耦合界面的两相流体力计算快速求解弹性结构变形和流场网格的节点位移。使用所提方法计算溃坝水流冲击弹性挡板的流固耦合响应,得到水流的自由表面演变与挡板位移趋势,并与现有文献研究结果进行对比,以验

证数值结果的正确性。通过所提方法,实现涉及自由表面流动的流固耦合问题的高效计算。

1 计算原理和方法

1.1 流体体积法

流体体积法由 Hirt 等^[17]提出并实现,该方法引入流体体积分,利用流体体积分的值代表网格单元内各相成分的占比,通过计算各单元的流体体积分及其梯度,就可以确定自由表面的形状和位置,从而实现对自由表面的追踪。

采用流体体积法,考虑流体黏性,忽略热量交换,气液两相自由表面流动控制方程如下所述。

(1) 连续性方程。

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

式(1)中: ρ 为混合物密度; \mathbf{V} 为两相流的公共速度矢量。

混合物密度在两相流动问题中可表示为

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (2)$$

式(2)中: α_1 、 α_2 分别为液体和气体的体积分; ρ_1 、 ρ_2 分别为液体和气体的密度。

(2) 动量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

式(3)中: p 为流体压强; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{F} 为外部体积力; μ 为混合物动力黏度。

混合物动力黏度在两相流动问题中可表示为

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (4)$$

式(4)中: μ_1 、 μ_2 分别为液体和气体的动力黏度。

(3) 体积分方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

式(5)中:液体体积分 α_i ($i=1,2$)由两相的体积分之和为1约束计算,即

$$\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1 \quad (6)$$

采用分段线性界面重构(PLIC)技术构建流体自由表面,该方法在单个网格内用线段近似自由表面。

自由表面单位法向量表达式为

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \alpha_1}{|\nabla \alpha_1|} \quad (7)$$

网格内自由表面经过的对称和翻转可以简化为4种情况,如图1所示。通过法向矢量和网格内体积分确定网格内自由表面所属类型,然后计算线段的斜率与位置,构造该网格内的自由表面。

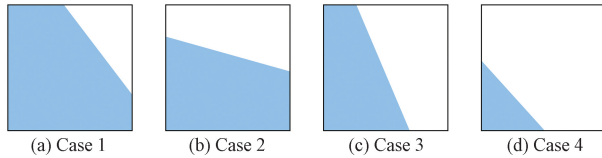


图1 PLIC方法的4种情况
Fig. 1 Four cases for the PLIC method

1.2 快速动网格方法

采用基于结构-虚拟弹性体的快速动网格方法,将自由表面流动区域视为虚拟弹性体^[18]。弹性结构和虚拟弹性体的节点可以分为流固耦合面节点和非流固耦合面节点。

结构的振动控制方程为

$$\begin{bmatrix} M_s^{11} & M_s^{12} \\ M_s^{21} & M_s^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{s-int} \\ \ddot{X}_{s-fsi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s^{11} & C_s^{12} \\ C_s^{21} & C_s^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_{s-int} \\ \dot{X}_{s-fsi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s^{11} & K_s^{12} \\ K_s^{21} & K_s^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{s-int} \\ X_{s-fsi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{fsi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

虚拟弹性体的静力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} K_f^{11} & K_f^{12} \\ K_f^{21} & K_f^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{f-fsi} \\ X_{f-int} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; X 为节点的位移向量; F 为结构受到的多相流体力;下标s为结构;下标f为虚拟弹性体;下标int为节点位于结构或虚拟弹性体内部;下标fsi为节点位于流固耦合面。

由于结构有限元节点和虚拟弹性体网格节点通常不重合,在流固耦合面上虚拟弹性体与结构之间的位移插值关系可表示为

$$X_{f-fsi} = NX_{s-fsi} \quad (10)$$

式(10)中: N 为插值系数矩阵。

利用式(10),联立式(8)和式(9)构建结构-虚拟弹性体系统动力学方程,即

$$\begin{bmatrix} M_s^{11} & M_s^{12} & 0 \\ M_s^{21} & M_s^{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{s-int} \\ \ddot{X}_{s-fsi} \\ \ddot{X}_{f-int} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s^{11} & C_s^{12} & 0 \\ C_s^{21} & C_s^{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_{s-int} \\ \dot{X}_{s-fsi} \\ \dot{X}_{f-int} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s^{11} & K_s^{12} & 0 \\ K_s^{21} & K_s^{22} + K_f^{11}N & K_f^{12} \\ 0 & K_f^{21}N & K_f^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{s-int} \\ X_{s-fsi} \\ X_{f-int} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{fsi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将结构-虚拟弹性体系统的固有频率和正则振型分别记为 ω 和 Ψ 。对结构-虚拟弹性体系统动力学方程式(11)进行坐标变换。

$$I\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\dot{\xi} + \omega^2\xi = Q \quad (12)$$

式(12)中: I 为单位矩阵; ξ 为正则坐标; ζ 为模态阻尼比; Q 为正则坐标下的流体力。

将式(12)写为分量形式,即

$$\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\xi}_i + \omega_i^2\xi_i = Q_i \quad (13)$$

式(13)中: ζ_i 为第*i*阶模态阻尼; ω_i 为第*i*阶固有频率; ξ_i 为第*i*阶模态位移; Q_i 为第*i*阶模态力。

对于实际的流固耦合问题不是所有模态都会参与振动,高阶模态对振动响应的影响通常较小,因此使用前*n*阶模态可以完成流固耦合振动分析。采用Wilson- θ 法对式(13)求解得到前*n*阶模态位移,通过模态叠加法得到结构位移和流场变形,可表示为

$$\begin{bmatrix} X_s \\ X_f \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \psi_i \xi_i \quad (14)$$

式(14)中: ψ_i 为结构-虚拟弹性体系统第*i*阶正则振型。

1.3 高效流固耦合方法

将流固耦合计算分为预处理阶段和流固耦合计算阶段,具体分析步骤如下,预处理阶段包括:①网格划分;②完成虚拟弹性体的弹性模量分布;③对结构-虚拟弹性体系统进行模态分析。

预处理阶段完成后进入流固耦合计算阶段。该阶段包括:①基于RANS方程,在流场网格域中完成流场的计算;②采用VOF方法追踪自由表面并得到流固耦合面上的两相流体力 F_{fsi} ;③求解结构-虚拟弹性体系统的前*n*阶模态位移,通过模态叠加法得到弹性结构位移和流场网格变形;④使用虚拟弹性体节点的位移更新流场网格;⑤如果残差未达到收敛条件,返回步骤①,如果满足收敛条件则进入下一个时间步。高效流固耦合方法的详细流程图如图2所示。

2 计算结果与分析

2.1 研究对象

为验证本文方法在解决自由表面流动与弹性结构相互作用问题时的准确性,以溃坝水流冲击弹性挡板为例开展数值计算。初始时刻使用外部刚性支撑将宽度为146 mm,高度为292 mm的水柱固定在尺寸为584 mm×365 mm水箱的左侧。水箱底部中间位置固定一个宽度为12 mm,高度为80 mm的弹性挡板,水箱壁面为无滑移壁面,如图3所示。当水箱中的水处于静水状态时移除刚性支撑,则水柱在重力 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 作用下坍塌,从而冲击弹性挡板。空气的密度为 1 kg/m^3 ,动力黏度为 $1 \times$

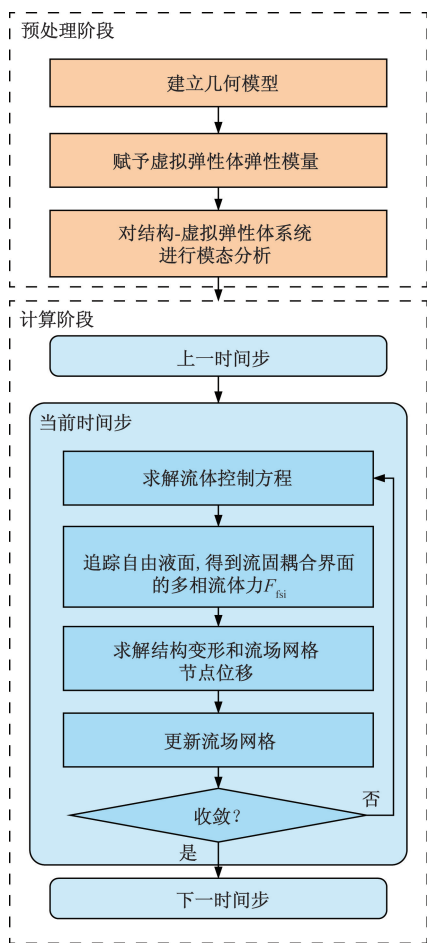
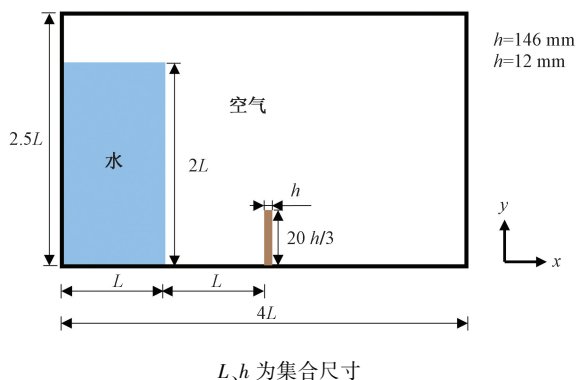


图2 基于快速动网格的高效流固耦合计算流程
Fig.2 Calculation procedure of efficient fluid-structure coupling method based on fast dynamic mesh



L, h 为集合尺寸
图3 水柱和弹性挡板的初始几何模型

Fig.3 Initial geometry of the water column with an elastic baffle

$10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 液体的密度为 $1\ 000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 动力黏度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。挡板的密度为 $2\ 500 \text{ kg}/\text{m}^3$, 杨氏模量为 1 MPa , 泊松比为 0。由于几何尺度较大, 表面张力效应可忽略。

2.2 结构-虚拟弹性体的模态分析

采用空间分布弹性模量的方法削弱虚拟弹性体对结构固有振动特性的影响, 确保结构-虚拟弹性

体系统的频率和模态振型由结构振动主导。基于空间分布弹性模量法^[19], 虚拟弹性体弹性模量值的表达式为

$$E_i^i = \frac{E_s}{10^6} \left(\frac{V_{\min}}{V_i} \right)^{2.5} \quad (15)$$

式(15)中: E_i^i 为虚拟弹性体第 i 个单元的弹性模量; E_s 为弹性结构弹性模量; V_{\min} 为虚拟弹性体的最小网格的体积; V_i 为第 i 个单元的体积。

分别对弹性挡板和结构-虚拟弹性体系统进行模态分析, 得到前 5 阶固有频率对比如表 1 所示, 以及前 3 阶模态振型对比如图 4 所示, 发现采用空间分布弹性模量方法, 弹性挡板与结构-虚拟弹性体系统的固有频率和模态振型基本一致, 结构-虚拟弹性体系统的振动特性由弹性挡板主导。弹性挡板前 3 阶模态下的流场网格变形如图 5 所示, 可以看出, 采用空间分布弹性模量的方法, 流场变形主要集中在网格体积较大的区域, 可以有效避免网格畸变并且有利追踪得到更加精细的液体自由表面。因此该结构-虚拟弹性体系统的模态以及对模态下的流场网格变形满足双向流固耦合计算的前提条件。

表 1 前 5 阶固有频率对比

Table 1 Comparison of the first 5 natural frequencies

阶数	挡板固有频率/ Hz	结构-虚拟弹性体系统的固有频率/ Hz
1	6.02	6.02
2	34.98	34.98
3	62.51	62.51
4	89.07	89.07
5	156.83	156.83

2.3 流固耦合响应分析

采用所发展的流固耦合方法模拟得到液体自由表面追踪和弹性挡板变形情况与 Walhorn 等^[4]采用时空有限元方法的计算结果对比, 如图 6 所示。当时间 $t = 0.15 \text{ s}$ 时, 水流接触弹性挡板底部, 在水流冲击作用下挡板顶部向左偏转; 当 $t = 0.185 \text{ s}$ 时, 水流与挡板左侧完全接触并开始脱离挡板左侧边界, 挡板开始呈现向右弯曲的趋势; 当 $t = 0.25 \text{ s}$ 时, 挡板向右大幅度弯曲, 水流沿着挡板弯曲方向继续进行形成射流; 当 $t = 0.3 \text{ s}$ 时, 水流继续向右上方延伸同时弹性挡板略向左回弹; 当 $t = 0.375 \text{ s}$ 时, 水流开始冲击右侧壁面, 弹性挡板继续向左回弹。对比发现, 所提的流固耦合方法与时空有限元方法所得的液体自由表面演变趋势一致, 验证了本文方法在模拟涉及自由表面流动的流固耦合问题时的准确性。

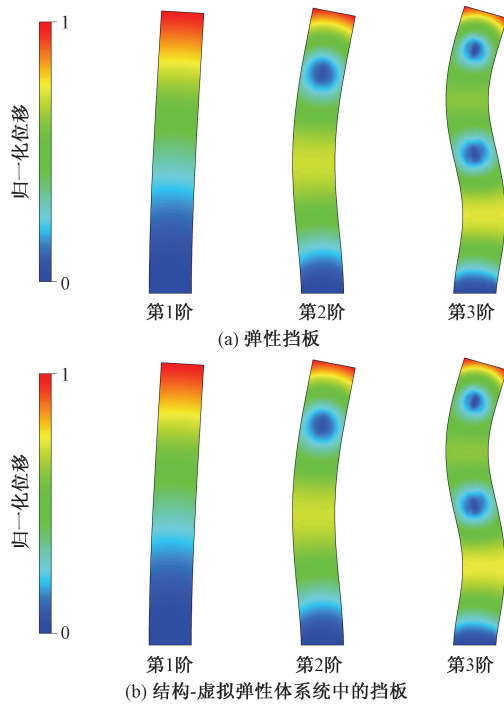


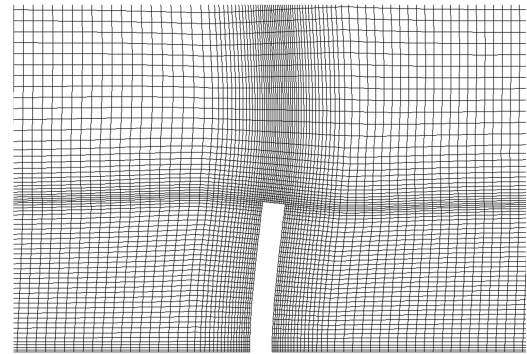
图4 前3阶模态振型对比

Fig. 4 Comparison of the first 3 mode shapes

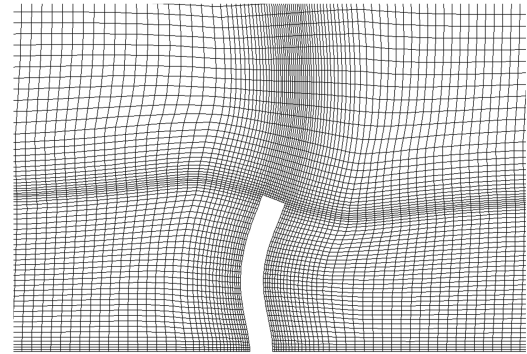
所提出的流固耦合方法计算得到的弹性挡板左上角位移时程曲线与 Wallhorn 等^[4]、王春正等^[12]的数值计算结果对比如图7所示。可以看出,当 $t = 0.145$ s 时挡板略向左弯曲,位移计算结果为 0.52 mm;水流在挡板左侧爬升挡板开始向右弯曲,当 $t = 0.24$ s 时挡板左上角向右位移达到最大值,位移计算结果为 44.1 mm;挡板在水流的冲击作用下开始振荡,当 $t = 0.7$ s 时向右位移达到峰值,位移计算结果为 21.2 mm;随后水流逐渐流入挡板右侧空间,弹性挡板的振荡受到两侧流体的黏性阻尼,振幅逐渐衰减。位移曲线的变化趋势与文献计算结果基本一致,对比结果验证了所提出的高效流固耦合方法计算结构振动位移的准确性。

弹性挡板向左小幅弯曲、向右大幅弯曲以及向右弯曲后回弹时流体的压强云图如图8所示。当 $t = 0.145$ s 时挡板左上角向左位移值最大,挡板左侧底部的流体压强最大,最大值为 3.70 kPa;当 $t = 0.24$ s 时挡板左上角向右位移值最大,水流冲击整个挡板,挡板底部的流体最大压强为 2.34 kPa;当 $t = 0.54$ s 时挡板大幅回弹,挡板左侧压强分布接近流体静压强分布。

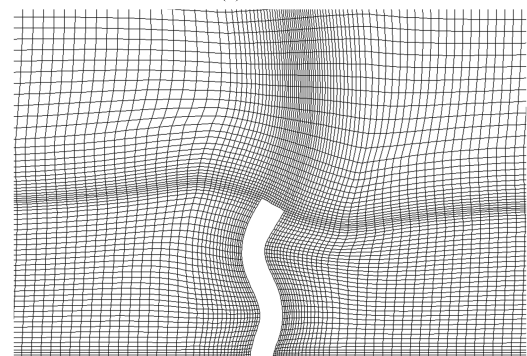
采用所发展的流固耦合方法与 Idelsohn 等^[5]采用粒子有限元法的计算结果对比如图9所示。对比发现,本文方法计算得到 $t = 0.42$ s 时的射流水体高度相对更高,这是由于此时水流接触右侧壁面并形成分流,一部分液体向上翻卷并出现液滴飞溅,



(a) 第1阶模态



(b) 第2阶模态



(c) 第3阶模态

图5 前3阶模态下的流场网格变形

Fig. 5 Fluid mesh deformation of the first 3 order modes

另一部分液体在重力作用下沿壁面下滑,右下形成密闭空间,密闭空间内的空气对射流水体起到一定的支撑作用。而流体体积法可以同时考虑气液两相流体,因此所提出的流固耦合方法能够更加准确地描述两相流体共存时的流固耦合响应。

2.4 计算效率分析

使用 CPU 主频为 3.5 GHz 的计算机在同等网格规模下分别使用本文方法与时空有限元方法对溃坝水流冲击弹性结构问题进行流固耦合计算。本文算法完成一个时间步流固耦合计算平均需要 76.49 s,时空有限元方法完成一个时间步平均需要 114.68 s,本文算法相比于时空有限元方法计算减少 33.30% 的计算时间。原因是本文算法通过对结构-虚拟弹性体系统使用振型叠加法能够快速获取流场网格节点的位移,并且在每一个流固耦合迭代

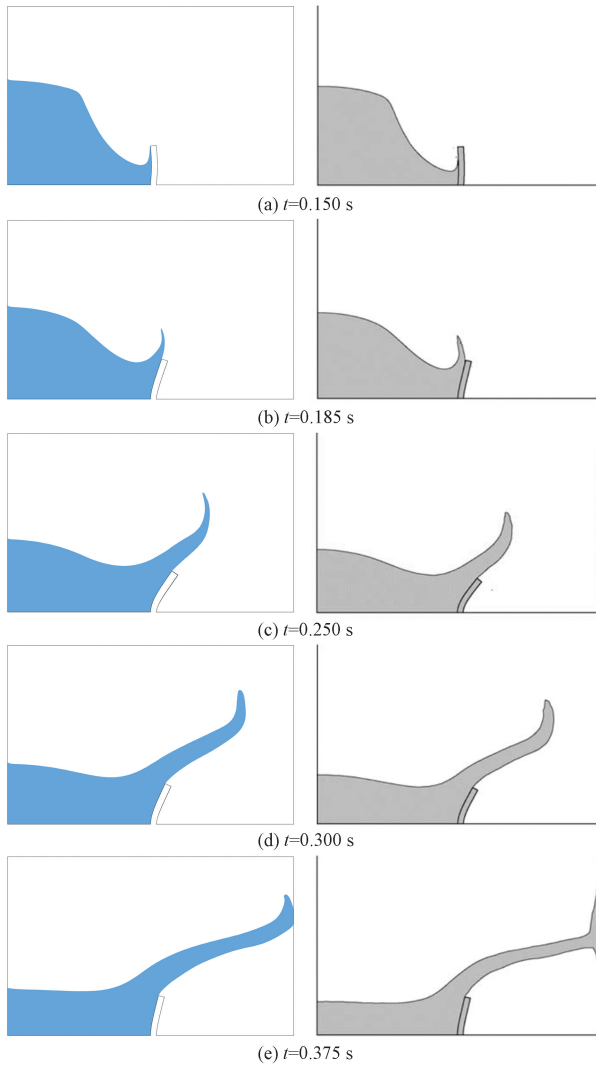


图6 高效流固耦合方法(左)与时空有限元方法(右)在不同时刻的液体分布和挡板变形模拟结果对比
Fig. 6 Comparison between efficient fluid-structure coupling method (left) with space-time finite element method (right) simulation results for liquid distribution and baffle deformation at various moments

步中,流场每一次子步迭代后进行动网格更新,减少了迭代层次的同时加快收敛速度,从而提高了流固耦合的计算效率。

3 结论

结合流体体积法和基于结构-虚拟弹性体的快速动网格方法实现了对涉及自由表面流动的流固耦合问题的高效数值计算,得到以下结论。

(1)通过在每一个流固耦合时间步内使用VOF方法追踪自由表面并获取流固耦合界面的多相流流体力,对结构-虚拟弹性体系统使用模态叠加法同时得到弹性结构的变形和流场网格节点的位移,从而实现了高效流固耦合求解。

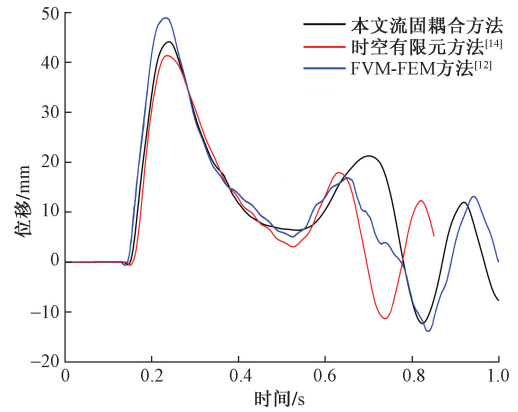


图7 挡板左上角位移时程数值结果
Fig. 7 Numerical results for time history of the displacement of the upper left corner of the baffle

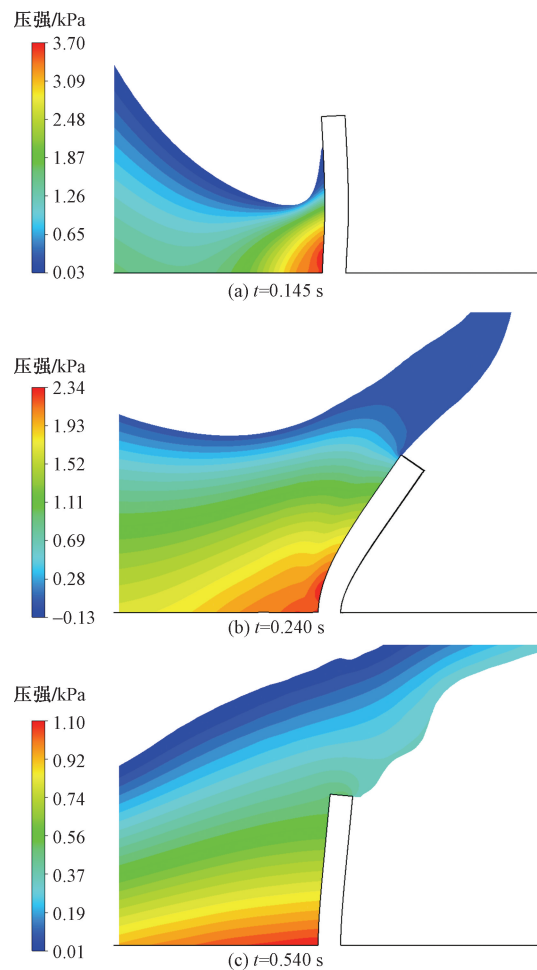


图8 不同时刻挡板附近的流体压强
Fig. 8 Pressure of the fluid near the baffle at various moments

(2)基于所提出的流固耦合方法,计算溃坝水流冲击弹性挡板的流固耦合响应,得到溃坝水流自由表面演变和挡板左上角点的位移时程,数值计算结果与现有数值计算结果基本一致,验证了本文方法的准确性。

(3)本文算法通过构建结构-虚拟弹性体系统,加

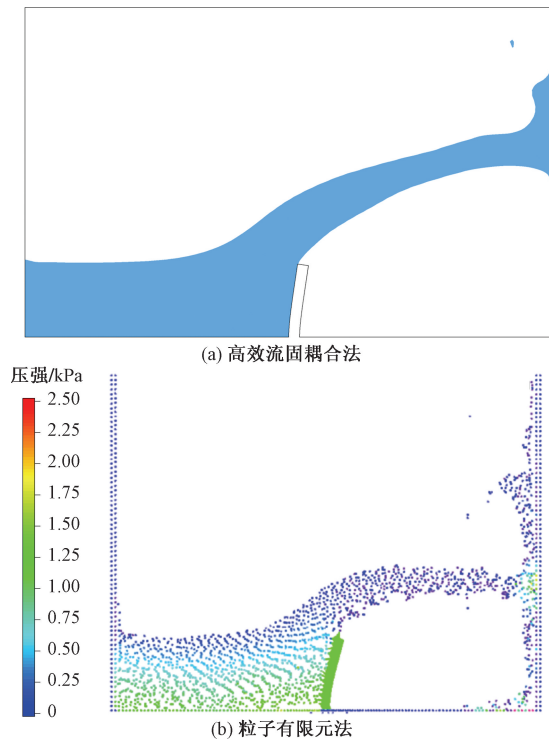


图9 $t = 0.42$ s 时自由表面模拟结果对比
Fig. 9 Comparison of free surface simulation results at 0.42 s

快结构位移求解和流场动网格的计算速度,减少流固耦合的迭代层次,从而提高了计算效率。与时空有限元方法相比,本文算法减少了33.3%的计算时间。

参 考 文 献

- [1] 李梅娥,周进雄. 不可压流体自由表面流动的 SPH 数值模拟[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 5-9.
Li Meie, Zhou Jinxiong. Modeling free surface flow of incompressible fluid using SPH[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(3): 5-9.
- [2] 张大朋,严谨,赵博文,等. 二维溃坝的数值模拟及其自由液面大变形流动研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(12): 120-133.
Zhang Dapeng, Yan Jin, Zhao Bowen, et al. Numerical simulation of two-dimensional dam break and research on large deformation flow on free surface[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(12): 120-133.
- [3] Hou G, Wang J, Layton A. Numerical methods for fluid-structure interaction: a review[J]. Communications in Computational Physics, 2015, 12(2): 337-377.
- [4] Walhorn E, Kölke A, Hübner B, et al. Fluid-structure coupling within a monolithic model involving free surface flows[J]. Computers & Structures, 2005, 83(25): 2100-2111.
- [5] Idelsohn S R, Marti J, Limache A, et al. Unified lagrangian formulation for elastic solids and incompressible fluids: application to fluid-structure interaction problems via the PFEM [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197(19): 1762-1776.
- [6] Rafee A, Thiagarajan K P. An SPH projection method for simulating fluid-hypoeastic structure interaction [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(33): 2785-2795.
- [7] Kamakoti R, Shyy W. Fluid-structure interaction for aeroelastic applications[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2004, 40(8): 535-558.
- [8] Ha S T, Choi H G. Semi-monolithic formulation based on a projection method for simulating fluid-structure interaction problems[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2023, 134: 207-224.
- [9] 徐敏,安效民,陈士槽. 一种 CFD/CSD 耦合计算方法[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 33-37.
Xu Min, An Xiaomin, Chen Shilu. CFD/CSD coupling numerical computational methodology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 33-37.
- [10] Yang Q, Jones V, Mccue L. Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH-FEM model[J]. Ocean Engineering, 2012, 55: 136-147.
- [11] 徐毅. 储罐液体晃荡与弹性防晃结构的流固耦合作用特性分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
Xu Yi. Analysis of the coupling effect between tank liquid sloshing and flexible anti-sloshing structure [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [12] 王春正,孙亮,黄玲玲,等. 基于双向流固耦合模型的溃坝水流数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11090-11097.
Wang Chunzheng, Sun Liang, Huang Lingling, et al. Numerical simulations of dam break flow based on two-way coupling model for fluid structure interactions [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11090-11097.
- [13] Zhang Z L, Long T, Chang J Z, et al. A smoothed particle element method (SPEM) for modeling fluid-structure interaction problems with large fluid deformations [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 356: 261-293.
- [14] Dutta S, Agrawal M, Jog C S. A monolithic, ALE finite-element-based strategy for partially submerged solids in an incompressible fluid flow using the mortar method [J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 115: 103780.
- [15] Liao K, Hu C. A coupled FDM-FEM method for free surface flow interaction with thin elastic plate [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2013, 18(1): 1-11.
- [16] 仲继泽,徐自力,陶磊. 基于虚拟弹性体的快速动网格方法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 132-138.
Zhong Jize, Xu Zili, Tao Lei. An efficient dynamic mesh method based on pseudo elastic solid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 132-138.
- [17] 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.
- [18] Zhong J, Xu Z. A reduced mesh movement method based on pseudo elastic solid for fluid-structure interaction [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232: 973-986.
- [19] 仲继泽,谢志强,沈渡,等. 基于空间分布弹性模量的快速动网格方法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 136-139.
Zhong Jize, Xie Zhiqiang, Shen Du, et al. A fast dynamic mesh method based on spatially distributed elasticity modulus [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 136-139.