

DOI: 10.7511/jslx201703010

MPS-FEM 数值分析带自由面的流固耦合问题

张友林, 邹璐, 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 20040)

摘要:随着计算科学的发展,研究人员为探索流固耦合问题的物理机理而提出了众多的数值方法。其中,耦合的移动粒子半隐式方法 MPS(Moving Particle Semi-Implicit method)和有限单元法 FEM(Finite Element method)为流固耦合问题的数值仿真工作提供了新的途径。本文所有流场的数值模拟工作均采用课题组自主开发的无网格法求解器MLParticle-SJTU来完成。该求解器在原始的 MPS 法基础上,对核函数、压力梯度模型、压力泊松方程的求解和自由面判断方式等方面进行了改进。此外,在该求解器框架内,基于 FEM 法拓展了针对结构场进行求解的功能。首先,对 MPS 和 FEM 方法的理论模型及其耦合策略进行了介绍。然后,采用该自研 MPS-FEM 耦合求解器,数值模拟了溃坝流动对弹性结构的冲击及其相互作用的标准问题。通过将结构变形及自由面波型变化等结果与已发表结果进行对比,验证了该求解器在处理带自由面剧烈变化的粘性流体和柔性变形结构的耦合作用问题上的可行性。

关键词:无网格法; MPS 方法; 有限元法; MPS-FEM; 流固耦合; 自由面流动; MLPparticle-SJTU 求解器

中图分类号: O353.4; O242.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2017)03-0330-06

1 引言

在船舶与海洋工程领域,流固耦合是普遍存在的现象之一。当伴随有剧烈的自由面演化时,此类问题将变得更加复杂。通常采用数值方法对流固耦合问题进行分析时,整个计算域分为流体场和结构场。采用合理的计算方法对流体场进行精确求解是分析整个流固耦合问题的关键之一。目前,流体计算方法可分为两大类,分别为网格类方法和无网格类方法。虽然以有限差分法和有限体积法为代表的网格类方法在流体场的计算中得到广泛应用,但是此类方法需要娴熟的网格生成技巧与复杂的动网格处理方法,且难以较好地模拟自由面大变形、翻卷及破碎等现象。相反,无网格类方法在应对上述挑战时具有明显优势。本文将采用一种典型的拉格朗日无网格方法——移动粒子半隐式方

法 MPS(Moving Particle Semi-Implicit method)进行流体场的数值分析。该方法自 Koshizuka 等^[1]首次提出并经过研究人员的不断改进,已经应用于多种带自由面的不可压水动力学问题。如溃坝流^[2-4]、入水冲击^[5]、波浪与浮体相互作用^[6,7]、液舱晃动^[8,9]和射流^[10]等问题。然而,该方法在流固耦合问题中的应用尚属少见。在对结构场进行分析时,有限单元法 FEM(Finite Element Method)作为一种稳定成熟的计算方法为本文所采用。

对于流固耦合数值仿真问题,流体场和结构场求解器间耦合策略的选取对计算精度和效率同样存在影响。依据是否将流体场和结构场的物理量建立于同一个控制方程系统中进行求解,可将流固耦合策略归纳为强耦合和弱耦合两类。其中,强耦合类方法需要较大的计算资源消耗且难以针对复杂的物理问题建立统一控制方程^[11],而弱耦合类方法的流体场和结构场基于各自的控制方程分离求解,通过显式的通信方式进行二者之间的数据传递以达到耦合的目的。可见,弱耦合类方法能够综合采用现有的多种流体和固体分析程序,在分析较复杂的流固耦合物理问题时更具灵活性。故而,本文采用弱耦合的策略进行流固耦合问题的分析。

本文在课题组现有的 MPS 方法求解器 MLPparticle-SJTU^[12]的基础上拓展开发了基于 FEM

收稿日期:2016-08-07;修改稿收到日期:2016-12-18.

基金项目:国家自然科学基金(51379125, 51490675, 11432009, 51579145);长江学者奖励计划(2014099);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);上海市船舶工程重点实验室基金(K2015-11);工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助项目。

作者简介:张友林(1985-),男,博士生;
邹璐(1983-),女,博士,讲师;
万德成*(1967-),男,博士,教授
(E-mail:dcwan@sjtu.edu.cn).

方法的结构场求解模块,致力于解决带剧烈变化自由面的流固耦合问题。通过数值模拟坍塌水体与弹性结构之间相互作用的标准算例,验证了本文提出的 MPS-FEM 耦合方法在流固耦合问题上的可行性。

2 数值方法

2.1 MPS 流场计算方法

对于粘性不可压缩流体,连续性方程和 N-S 方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度, P 为压力, \mathbf{V} 为速度向量, \mathbf{g} 为重力加速度向量, ν 为运动粘性系数。在粒子法中,粒子的位置和其他物理量都是基于拉格朗日描述法表达的,因此不需要计算对流项。

本文采用的粒子作用模型包括梯度模型、散度模型和 Laplacian 模型,分别定义为

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j + \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{W}(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{V} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (4)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (6)$$

式中 i 和 j 为粒子编号, D 为空间维数, \mathbf{r} 为粒子的位置矢量, n^0 为初始粒子数密度,其定义为

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (7)$$

流场的不可压缩条件用粒子数密度保持常量来表示。本文采用的不可压缩条件是由 Tanaka 等^[13]提出的混合源项法,表达形式为

$$\langle \nabla^2 P^{k+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^k \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (8)$$

式中 k 为时间步, γ 为粒子数密度在源项中的权重系数,取值于 0~1 之间。

在 MPS 方法中,自由液面的准确判断对计算的精度和稳定性十分重要。在本文采用的自由面判断方法^[8]中,首先定义表征粒子分布对称性的矢量

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (9)$$

再计算 F 的模 $|\mathbf{F}|$ 。当粒子满足

$$\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > 0.9 |\mathbf{F}|^0 \quad (10)$$

时即判定其为自由面粒子,其中, $|\mathbf{F}|^0$ 为初始时自由面粒子的 $|\mathbf{F}|$ 值。

2.2 FEM 结构场计算方法

本文基于有限元理论对结构场进行分析,控制结构单元运动变形的动力学方程为

$$M\ddot{\mathbf{y}} + C\dot{\mathbf{y}} + K\mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (11)$$

$$C = \alpha_1 M + \alpha_2 K \quad (12)$$

式中 M, C 和 K 分别为结构的质量矩阵、瑞利阻尼矩阵和结构刚度矩阵, \mathbf{F} 为施加在结构上的时域变化外力, \mathbf{y} 为结构单元节点的位移矢量,系数 α_1 和 α_2 与结构的固有频率及阻尼比相关。

在工程中,为得到结构单元节点的位移信息, Newmark- β 方法^[14]广泛应用于式(11)的求解。在 $t = t + \Delta t$ 时刻,由于式(11)同时包含了未知矢量 $\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}$ 和 $\ddot{\mathbf{y}}$, 故而尚需补充两组方程才能使上式方程组封闭。借助对结构单元节点的速度和位移进行泰勒展开,能够实现式(11)的求解。

$$\dot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{y}}_t + (1 - \gamma)\ddot{\mathbf{y}}_t \Delta t + \gamma\ddot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t} \Delta t \quad (0 < \gamma < 1) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_{t+\Delta t} = \mathbf{y}_t + \dot{\mathbf{y}}_t \Delta t + \frac{1 - 2\beta}{2} \ddot{\mathbf{y}}_t \Delta t^2 + \beta \ddot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t} \Delta t^2 \quad (0 < \beta < 1) \quad (14)$$

式中 权重参数 β 和 γ 与计算稳定性相关,本文分别取值 $\beta = 0.25, \gamma = 0.5$ 。

2.3 MPS-FEM 耦合方法

在流固耦合的数值分析方法中,流场和结构场求解器的耦合策略对计算的精度及稳定性同样十分重要。本文采用的弱耦合计算流程如图 1 所示。

由于采用 Newmark 方法进行结构场的隐式计算能够允许采纳较大的时间步长,故而在本文的耦合计算流程中,结构场计算的时间步长为流体场计算时间步长的 k 倍(k 为整数),即流体场每计算 k 次结构场将完成 1 次计算。计算流程可概括如下。

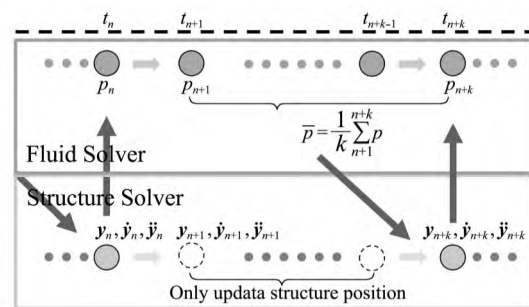


图 1 流体结构耦合求解示意图
Fig. 1 Fluid-structure coupling strategy

(1) 在每一流场时间步内,计算结构边界上所受到的流体压力 p 。

(2) 通过计算结构边界流体压力的均值 \bar{p} 确定结构所受外部流体力 $F = \bar{p}$ 。

$$\bar{p} = \frac{1}{k} \sum_{n+1}^{n+k} p \quad (15)$$

(3) 确定前一结构场时间步时 ($t = t_n$) 结构节点的位移、速度和加速度 (y_n, \dot{y}_n 和 \ddot{y}_n) 等信息。

(4) 将外部流体力和上述节点信息带入动力学方程,计算得到新的结构节点信息 (y_{n+k}, \dot{y}_{n+k} 和 \ddot{y}_{n+k})。

(5) 基于结构节点信息,更新结构和流体粒子模型的位置及速度等信息。需要注意的是,虽然在结构求解器的相邻时间步内 ($t = t_n \sim t_{n+k}$) 没有进行结构场的求解,但进行了结构和流体粒子位置及速度等信息的更新,这样处理能够避免因粒子位置信息更新时间间隔较大所导致的边界粒子穿透现象的发生。位置信息更新的准则是

$$\dot{y}_{n+i} = \dot{y}_{n+i-1} + \ddot{y}_{n+i-1} \times \Delta t_f \quad (i \in [1, k]) \quad (16)$$

3 MPS-FEM 求解器数值验证

3.1 算例

本文基于上述 MPS-FEM 耦合算法,数值模拟了溃坝冲击波对弹性窗体结构的水密性破坏过程。为了对该求解器的计算能力进行考核,本文采用了与文献[15]相同的计算域模型,布置如图2所示。弹性窗体结构(图中 Elastic structure 指示部分)安置于流场中部,窗体高为 3 m,厚为 0.15 m,下端固定于墙体,上端为自由端。数值计算时窗体结构视为弹性梁结构,流体和结构参数列入表1。其中,结构场的计算时间步长为流体场时间步长的 10 倍,粒子作用半径为粒子影响域半径与初始粒子间距的比值。

3.2 数值结果

图3展示了结构变形及波形演化过程,本文数值仿真结果与文献[15]的计算结果进行了对比。其中,图3(b1~b9)为本文计算结果。从图3(b2)

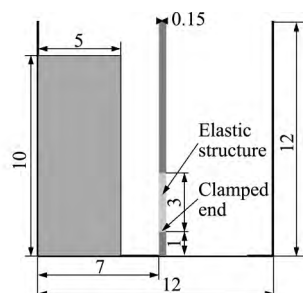


图2 计算域布置示意图(单位:m)
Fig. 2 Geometry(unit:m)

可以看出, $t = 0.5$ s 时水头到达了流场中部,并沿壁面爬升至弹性窗体的下部固定端。从图3(b3)可以看出, $t = 0.75$ s 时弹性窗体在水体压力作用下产生了变形,并与上部固定壁面之间产生泄流口;同时,从图中椭圆形标识区域可以看出,在前一时刻沿壁面爬升的水头继续向上运动,但因固壁的分割而与下部水体间断。从图3(b4)可以看出,在 $t = 1$ s 时前述间断水头继续向上飞溅至图中椭圆形区域1;同时,坍塌水体在区域2的壁面上形成新的水头并向上攀爬;在区域3,弹性窗体在较大的水体压力作用下形成大变形,水体经由泄流口形成射流。从图3(b5)可以看出,在 $t = 1.5$ s 时左侧坍塌水体的自由液面基本持平,区域1内的水头爬升至较高位置,区域2内的射流对区域3的壁面形成冲击作用并在壁面上分离成向上和向下运动两个部分。从图3(b6)可以看出,在 $t = 2.5$ s 时由于水头的下降,在区域1内形成了流体的聚集并与左侧自由液面形成明显的落差;同时,射流速度及区域2内向上运动的水柱速度均明显降低。从图3(b7)可以看出,在 $t = 3.75$ s 时因前述自由液面落差产生的波峰传递至流场左侧区域1;同时,由于射流液体的坠落及固壁的导流效果,在流场右侧的区域2内形成了顺时针的自由液面翻卷运动。从图3(b7,b8)可以看出,在 $t = 6.25$ s~10 s 阶段自由液面的变化逐渐趋于稳定,但在 $t = 10$ s 时弹性窗体右侧形成了一对反向旋转的涡对。总之,在 0~10 s 的整个仿真时间段,计算域左侧水体逐渐坍塌并对计算域中部的弹性窗体结构产生冲击载荷,进而引起结构变形与流体剧烈流动的耦合作用。从9组对比图可以看出,本文仿真得到的弹性窗体变形状态及自由面演化过程均与文献结果吻合良好。

图4为弹性窗体上部自由端的运动轨迹时历曲线。可以看出,弹性窗体在 $t = 1.0$ s 时的变形量达到最大值,此后在结构弹性恢复力的作用下变形量降低并呈现短暂的稳定状态。在 $t = 4.0$ s 左右时,弹性窗体的变形量明显减少至接近初始位

表1 流体及结构计算参数
Tab. 1 Simulation parameters

流体参数	值	结构参数	值
流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000	结构密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2700
重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.8	杨氏模量/Pa	1e9
运动粘性系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1e-6	梁结构单元数量	60
粒子间距/m	0.05	瑞利阻尼系数 α_1	0
粒子作用半径	2.1	瑞利阻尼系数 α_2	0.025
计算时间步长/s	0.0002	计算时间步长/s	0.002

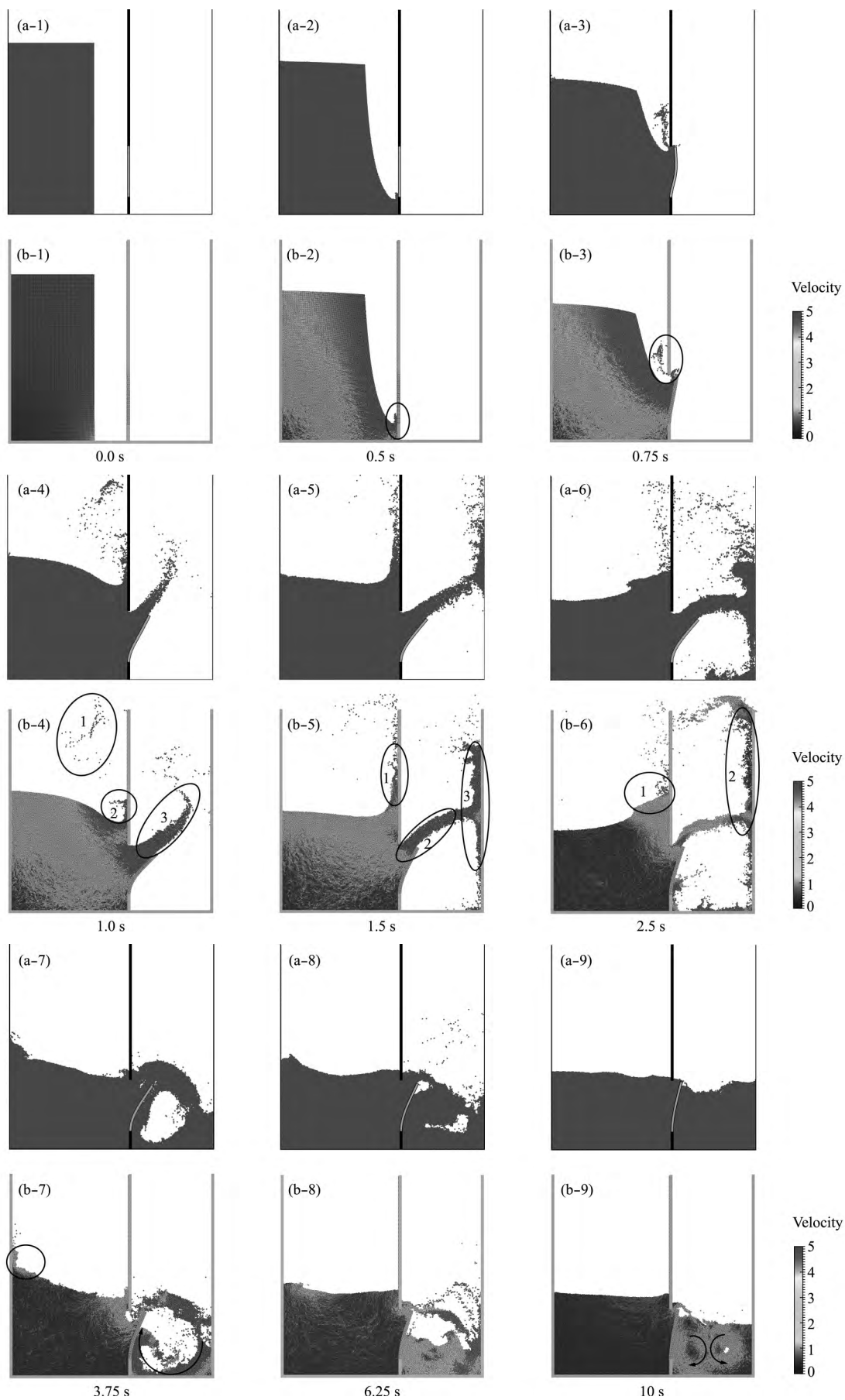


图3 结构变形及波形演化对比(a为文献[15]结果,b为本文结果)

Fig. 3 Comparison of structural deformation and evolution of free surface (a, results of Ref. [15]; b, present simulation)

置,这是由于自由面波峰传递到了流场左侧,导致窗体所受的流体压力迅速降低。在 $t = 6.5 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$ 阶段,窗体的变形量趋于稳定,弹性窗体在 x 和 y 方向的变形量呈现比例对称状态。

图 5 为弹性结构自由端相对固定端的距离 R 以及相对水平位置的角度 θ 变化的时历曲线。通过与图 4 比较可以看出,图 5 中相对距离 R 及相对角度 θ 的整体变化趋势均与上述弹性体在平面内的位移时历曲线相似。其中,弹性窗体在 $t = 1.0 \text{ s}$ 时自由端相对固定端的距离变化最为显著,相对初始距离减少了 4.54%。同时,角度 θ 由初始的 90°

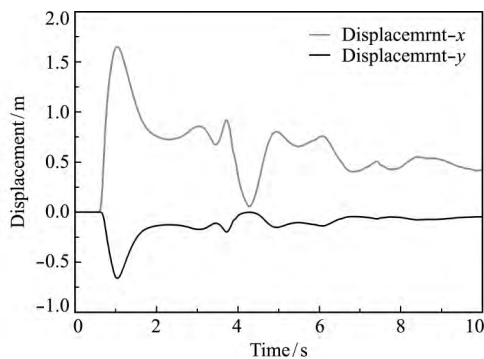


图 4 弹性窗体上端点运动轨迹时历曲线

Fig. 4 Time histories of displacements of the free-end of elastic structure

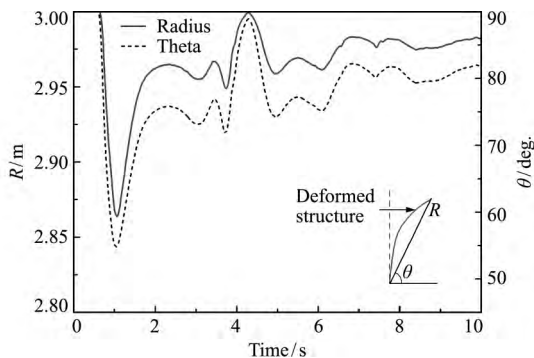


图 5 自由端相对距离及相对角度时历曲线

Fig. 5 Time histories of the relative distances and angles of the free-end of elastic structure

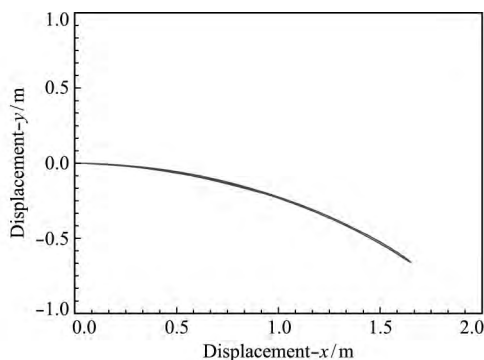


图 6 弹性体上端点运动轨迹

Fig. 6 Trajectory of the free-end of elastic structure

变化为 54.81° 。结合图 6 可以看出,弹性窗体的变形过程虽然在时间历程上存在波动,但其上部自由端的运动轨迹保持为弧线状态,符合真实的物理现象。

4 结 论

本文基于 MPS-FEM 耦合方法,针对船舶与海洋工程领域的热点问题——流固耦合问题进行了数值研究。介绍了基于改进的 MPS 方法的流体场计算模型和有限元方法的结构场计算模型,并提出了一种弱耦合形式的流固耦合策略。在自研求解器 MLParticle-SJTU 框架下开发了 FEM 结构场求解模块,数值模拟了坍塌水体与弹性结构之间相互作用的标准算例。本文弹性结构的变形状态及自由液面演化过程能够与已公开发表的文献结果较好地吻合,可见本文的 MPS-FEM 耦合方法能够有效应用于带自由面剧烈流动的流固耦合问题。

参考文献(References):

- [1] Koshizuka S, Oka Y. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, **123**(3): 421-434.
- [2] 张雨新, 万德成. MPS 方法在三维溃坝问题中的应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, **41**(2): 140-154. (ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Application of MPS in 3D dam breaking flows[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2011, **41**(2): 140-154. (in Chinese))
- [3] Tang Z Y, Zhang Y L, Wan D C. Multi-resolution MPS method for free surface flows[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2016, **13**(4): 1641018.
- [4] Tang Z Y, Zhang Y L, Wan D C. Numerical simulation of 3D free surface flows by overlapping MPS[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, **28**(2): 306-312.
- [5] Lee B H, Park J C, Kim M H, et al. Numerical simulation of impact loads using a particle method[J]. *Ocean Engineering*, 2010, **37**(2): 164-173.
- [6] Zhang Y L, Tang Z Y, Wan D C. Numerical investigations of waves interacting with free rolling body by modified MPS method[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2016, **13**(4): 1641013.
- [7] Koshizuka S, Shibata K, Tanaka M, et al. Numerical analysis of fluid-structure and fluid-rigid body interactions using a particle method[A]. *Proceedings of*

- 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference [C]. San Diego, California, USA, 2007.
- [8] Zhang Y X, Wan D C. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank[A]. Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. Rhodes, Greece, 2012, 381-391.
- [9] Zhang Y X, Wan D C, Hino T. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, **26**(4): 577-585.
- [10] Tang Z Y, Wan D C. Numerical simulation of impinging jet flows by modified MPS method[J]. *Engineering Computations*, 2015, **32**(4): 1153-1171.
- [11] Heil M, Hazel A L, Boyle J. Solvers for large-displacement fluid-structure interaction problems: segregated versus monolithic approaches[J]. *Computational Mechanics*, 2008, **43**(1): 91-101.
- [12] Zhang Y X, Wan D C. The Manual of Meshless Particle Method Solver: MLParticle-SJTU[R]. Technical Report, Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [13] Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi-Compressibility [J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, **229**(11): 4279-4290.
- [14] Newmark N M. A method of computation for structural dynamics[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, **85**(3): 67-94.
- [15] Mitsume N, Yoshimura S, Murotani K, et al. MPS-FEM partitioned coupling approach for fluid-structure interaction with free surface flow[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2014, **11**(4): 1350101.

Simulation of fluid-structure interaction with violent free surface by MPS-FEM coupled method

ZHANG You-lin, ZOU Lu, WAN De-cheng*

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of computational science, various kinds of numerical methods are proposed for the analysis of fluid-structure interaction problems. Recently, a coupled Moving Particle Semi-implicit(MPS) method and Finite Element Method(FEM) is developed as a new approach for FSI problems. In the present study, simulation of fluid fields is carried out by the mesh-free method solver MLParticle-SJTU. The solver is implemented based on the MPS method with improvements on the kernel function, free surface detection, gradient model and Possion's equation of pressure. Furthermore, the module for calculation of structural deformation is developed base on the FEM in the framework of MLParticle-SJTU. In this paper, both MPS and FEM are introduced firstly. Then, the benchmark of the interact between the dam-break flow and the elastic structure is numerically investigated with the help of the presented MPS-FEM coupled solver. Deformation of the elastic structure and evolution of the violent free surface are found to be in good agreement with published results, which shows that the proposed MPS-FEM coupled method is capable of dealing with structural deformation interacting with violent free surface flow.

Key words: particle method; Moving Particle Semi-implicit method (MPS); Finite Element Method (FEM); MPS-FEM coupled method; Fluid Structure Interaction(FSI); free surface flow; MLParticle-SJTU

引用本文/Cite this paper:

张友林, 邹璐, 万德成. MPS-FEM 数值分析带自由面的流固耦合问题[J]. 计算力学学报, 2017, **34**(3): 330-335.

ZHANG You-lin, ZOU Lu, WAN De-cheng. Simulation of fluid-structure interaction with violent free surface by MPS-FEM coupled method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, **34**(3): 330-335.