

多相流 MPS 方法数值模拟带隔板 分层液体晃荡

文 潇^{1,2}, 万德成^{*1,2}

(1. 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, 上海 200240;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 本文基于自主开发的多相流 MPS 求解器, 数值模拟了带垂直隔板的分层液体晃荡现象。首先, 在改进后 MPS 方法的基础上, 通过引入一系列相界面处理技术, 包括密度光滑、粒子相互作用粘度和表面张力模型, 成功将 MPS 方法扩展应用到复杂多相流问题的模拟。然后, 模拟了带不同高度垂直隔板的方形容容器内三层不同液体的晃荡现象, 并将计算结果与无隔板情况进行了比较。其中, 主要对比了不同隔板下, 晃荡过程中的两相界面变化以及壁面处相界面高度变化, 定性和定量验证了不同垂直隔板的减晃效果。结果表明, 垂直隔板能显著降低分层液体晃荡的剧烈程度和壁面处相界面高度, 使相界面更加稳定。其中, 高度 $h_b=0.225\text{ m}$ 和 $h_b=0.49\text{ m}$ 的垂直隔板对晃荡的抑制效果最好, 从兼顾经济性的原则考虑, 认为 $h_b=0.225\text{ m}$ 的垂直隔板在三种隔板中最优。

关键词: 无网格法; MPS; 多相流; 分层液体晃荡。

Numerical Simulation of the Layered Liquid Sloshing in Vertical Baffled Tank by Multiphase MPS Method¹

WEN Xiao^{1,2}, WAN Decheng^{*1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, numerical simulation of the layered liquid sloshing in vertical baffled tank is performed by our in-house multiphase MPS solver. Firstly, a series of two-phase interface treatments are introduced to extend the improved MPS method into multiphase problems. Then, the sloshing of three-layer-liquids in a square container with vertical baffles of different heights is simulated, and the calculated results are compared with the case without baffles. In particular, the shapes of interfaces and the elevations of interfaces near the wall are compared, and the anti-sway effect of different vertical baffles is qualitatively and quantitatively compared. The results show that the vertical baffles can significantly weaken the sloshing of the layered liquid and reduce the heights of the interfaces near the wall, making the interfaces more stable. Especially, the vertical baffle with a height of $h_b=0.225\text{m}$ or $h_b=0.49\text{m}$ has the best inhibitory effect on the sloshing. Considering the principle of economy, the vertical baffle with $h_b=0.225\text{m}$ is the best.

Key words: Mesh-less method; MPS; Multiphase; Layered Liquid sloshing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145); 长江学者奖励计划(T2014099); 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(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资助项目(K2015-11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09).

作者简介: 文潇 (1990-), 男, 博士研究生;

万德成* (1967-), 男, 博士, 教授. (E-mail: dechewan@sjtu.edu.cn);

1 引言

随着国内海上油田逐渐进入中后期开发阶段,原油含水率急剧升高,部分油田甚至可达 90%以上。如果将海上油田产出液体全部运回陆地再进行处理,会大幅增加运输成本。出于经济性的考虑,在 FPSO 船等海上结构物上常常会安装油水分离器或分离罐,对刚采出的含水原油进行初步分离,从而减少运输量,节约成本。但由于海洋工况复杂,结构物在风、浪、流等多种外界激励作用下可能会产生剧烈运动(如横摇),并进一步引起油水分离器的运动及其内部分层液体(油/水双层液体,或油/乳状液/水三层液体)的剧烈晃荡。一方面,内部分层液体的剧烈晃荡会引起油水两相界面的不稳定,甚至破坏,造成油和水的二次混合,极大降低分离效率。另一方面,晃荡会对分离器壁面产生强烈的拍击,导致分离器的结构破坏,同时拍击产生的力矩还会造成海上结构物稳性的损失。因此,研究分层液体的晃荡及其相应的抑制措施具有重要的工程意义。

由于多相流问题的复杂性,目前针对晃荡现象的研究主要集中在单相液体的晃荡[1-3],而对分层液体的晃荡研究较少。Xue 等[4]通过实验和数值方法研究了方形容器中油/水双层液体的晃荡,通过两种方法得到的壁面处两相界面高度和压力分布基本吻合。La Rocca 等[5]针对带自由面和两相界面的分层液体晃荡问题,推导得到了一套势流理论方法,并通过相应实验进行了验证。Sciortino 等[6]利用一种新的哈密顿数学模型和实验方法研究了圆柱形容器中分层液体的晃荡,得到了两相界面在晃荡过程中的历时变化。Molin 等[7]率先利用实验方法研究了方形容器中三层不同液体的晃荡,并且基于线性势流理论和 VOF(Volume of Fluid)方法对该问题进行了分析和模拟。然而,由于实验条件的限制,以及理论方法对剧烈运动的不适用,上述研究主要是对小幅运动下的分层液体晃荡进行研究。由于海洋环境的复杂性,有必要对更加剧烈的分层液体晃荡作进一步研究。

本文将采用一种新的基于无网格 MPS(Moving Particle Semi-implicit)方法的多相流方法,对较剧烈

情况下的分层液体晃荡进行分析,并研究隔板对分层晃荡现象的抑制作用。与其他网格类方法相比,MPS 方法是在拉格朗日系统下进行计算,流体被离散为一个个粒子,通过计算粒子运动可以得到流体运动。并且在计算得到粒子的位置之后,可以自然地得到自由面和两相界面的形状,而不需要进行重构等特殊处理。因此,MPS 方法特别适合应用于两相界面有较大变形的剧烈多相流动问题中。

2 数值方法

2.1 改进的 MPS 方法

MPS 方法最先由 Koshizuka 和 Oka[8]在 1996 年提出,但由于数值格式的精度不高,原始 MPS 方法的计算结果呈现出较大的非物理压力振荡[9,10]。在多相流模拟中,非物理压力振荡可能引起粒子运动的计算错误,造成不同相粒子间的非物理穿透。因此,本文采用改进的 MPS 方法,该方法在原始方法的基础上进行了一系列改进,提高了数值精度,抑制了压力振荡。该方法的主要方程如下。

2.1.1 控制方程

拉格朗日描述下,粘性不可压缩流体运动的控制方程包括连续性方程和动量方程,可写成如下形式:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

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

式中 \mathbf{V} , t , ρ , P , μ and \mathbf{f} 分别代表速度向量,时间,流体密度,压力,运动粘性系数,以及体积力。可以注意到,控制方程的左侧时间导数项以物质导数形式给出,因此减少了对流耗散。

2.1.2 核函数

在 MPS 方法中,核函数反映粒子间距对粒子相互作用的权重模型。本文选用 Zhang 等[11]采用的核函数,其具有无奇点的特点,可保证计算的稳定性,形式如下:

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{0.85r + 0.15r_e} - 1 & 0 \leq r < r_e \\ 0 & r_e \leq r \end{cases} \quad (3)$$

式中 r 为粒子间距, r_e 表示粒子相互作用域的半径。

2.1.3 粒子相互作用模型

MPS 方法的控制方程中,所有的微分算子都需

要采用粒子相互作用模型进行离散，包括梯度模型(式 4)，散度模型(式 5)，以及拉普拉斯模型(式 6)：

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

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

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

式中 ϕ 为任意标量， $\boldsymbol{\Phi}$ 为任意向量， D 为空间维度， n^0 为初始粒子布置下的粒子数密度。需要注意的是，式 6 的推导源于非定常扩散方程，为了保证数值结果与扩散方程的解析解一致，需要引入定义如下的参数 λ ：

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \cdot |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (7)$$

此外，直接应用式 4 对压力梯度算子进行离散时易引起张力不稳定问题 [12]，本文采用 Koshizuka 等 [13] 提出的改进后的压力梯度模型：

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{P_j - P_{i,\min}}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (8)$$

式中 $P_{i,\min}$ 表示 i 粒子所有邻居粒子中的最小压力。可以看出，采用式 8 的压力梯度模型，可以保证粒子间压力梯度引起的力始终为排斥力，因此消除了张力不稳定。

2.1.4 不可压缩模型

MPS 方法采用半隐式求解策略，以保证流体的不可压缩性。每一个时间步都细分为两步：首先，显式求解粘性力和体积力，得到粒子的临时速度；然后，隐式求解泊松方程得到压力项，更新粒子的最终速度和位置。本文采用 Tanaka 和 Masunaga [14] 提出的混合源项的压力泊松方程，该方程同时考虑了散度为零和粒子数密度不变这两种不可压缩条件，提高了数值稳定性。其形式如下：

$$\langle \nabla^2 P^{n+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (9)$$

式中 γ 为小于 1 的松弛系数。Lee 等 [9] 通过数值测试，认为 γ 取 0.01~0.05 之间时的数值稳定性最好。本文采用 $\gamma=0.01$ 。

2.1.5 自由面判断

MPS 方法中，为满足自由面动力学边界条件，需判断出所有的自由面粒子，并令其压力值等于 0。

如果将液体内部粒子错误判断为自由面粒子，则会对数值稳定性造成极大影响。本文采用 Zhang 和 Wan [15] 的自由面粒子判断方法，该方法首先定义一个表示粒子分布不对称性的矢量：

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (10)$$

由于自由表面粒子的邻居粒子均位于液体一侧，体现出较大的不对称性。因此，当粒子的 \mathbf{F} 满足：

$$\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > 0.9 |\mathbf{F}^0| \quad (11)$$

即可判定为自由面粒子，其中 $|\mathbf{F}^0|$ 为初始时刻自由面粒子的 $|\mathbf{F}|$ 。

2.2 相界面处理方法

为了将 MPS 方法扩展应用到多相流问题，本文在改进后 MPS 方法的基础上，引入了一系列相界面处理方法。主要包括密度光滑、粒子相互作用粘度和表面张力模型。

2.2.1 密度光滑

采用数值方法模拟多相流动时，相界面处从一相过渡到另一相时存在密度的不连续，其会引起流体压力场的不连续，并进一步引起流体加速度的不连续，使属于密度较小液体的粒子加速度过大，造成数值的不稳定。为了解决该问题，本文研究中对相界面附近粒子进行了密度光滑，使相界面处密度场达到了连续过渡。本文的密度光滑方法与 Shakibaeinia 和 Jin [16] 采用的方法相同，主要通过相界面附近粒子密度的空间平均实现，方程如下：

$$\langle \rho \rangle_i = \frac{\sum_{j \in I} \rho_j W(r_{ij}, r_e)}{\sum_{j \in I} W(r_{ij}, r_e)} \quad (12)$$

式中 I 包括粒子 i 及其所有的邻居粒子。

2.2.2 粒子相互作用粘度

与密度场类似，相界面处的粘度场同样存在着不连续过渡的问题。当粘度值不同的一对粒子相互作用时，如果采用粒子自身的粘度系数进行粘度项的计算，粘度项与实际情况相比会过大或过小。因此，本文进行粘度项的计算时，采用粒子相互作用粘度代替粒子的自身粘度。Shakibaeinia 和 Jin [16] 的数值测试表明，当粒子相互作用粘度取不同粒子粘度的调和平均数时，计算最准确。采用相互作用

粘度后的粘度项计算公式如下：

$$\langle \mu \nabla^2 \mathbf{V} \rangle_i = \frac{2D}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} \mu_{ij} (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (13)$$

其中， μ_{ij} 为相互作用粘度，定义为：

$$\mu_{ij} = \frac{2\mu_j \mu_i}{\mu_j + \mu_i} \quad (14)$$

可以看到，当粘度相同的两个粒子相互作用时，相应的 μ_{ij} 就变为了粒子本身的粘度。

2.2.3 表面张力模型

表面张力的存在对于保持相界面的光滑和稳定，防止不同相粒子的非物理穿透有重要作用。因此，虽然表面张力在分层液体的晃荡运动中并不占主导地位，但仍需要加以考虑。本文采用 Brackbill 等[17]提出的连续表面张力模型，将表面张力作为界面附近粒子所受的一种体积力进行计算，因此界面附近粒子的动量方程变为如下形式：

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{f} + \mathbf{f}_s \quad (15)$$

其与一般粒子的动量方程相比，方程右侧增加一项 \mathbf{f}_s ，即为表面张力引起的体积力，定义为

$$\mathbf{f}_s = \sigma \kappa \nabla C \quad (16)$$

式中 σ 为流体的表面张力系数，由流体自身性质决定。 C 是由粒子从属的相所决定的色函数，定义如下：

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{粒子 } i \text{ 属于指定的一相} \\ 1 & \text{粒子 } i \text{ 属于其他相} \end{cases} \quad (17)$$

因此，表面张力模型的计算，关键在于曲率 κ 的计算。本文中，采用了 Duan 等[18]提出的基于色函数等值线的曲率求解方法。该方法的主要思想是利用色函数的等值线近似地表示相界面的轮廓。首先，对式 17 的色函数进行光滑。然后，经过推导得到色函数等值线方程，并利用下式对等值线在目标粒子处的曲率进行求解：

$$\kappa_i = \frac{y''}{(1+y_i')^{3/2}} = \frac{2f_{x,i}f_{y,i}f_{xy,i} - f_{x,i}^2f_{yy,i} - f_{y,i}^2f_{xx,i}}{(f_{x,i}^2 + f_{y,i}^2)^{3/2}} \quad (18)$$

其中， f 表示光滑后的色函数，下标 x 、 y 和 i 表示在粒子 i 处对 x 或 y 求偏导。上述方法虽然推导过程较为复杂，但编程比较简单，且易推广至三维问题，具体推导过程可参见文献[18]。

3 带竖直隔板的分层液体晃荡模拟

在对单相流液体晃荡的研究中发现，通过在容

器内部安装不同形式不同尺寸的隔板，包括水平隔板、竖直隔板、弹性隔板等，可以明显抑制剧烈晃荡现象的产生，但目前还没有隔板对分层液体晃荡的抑制作用方面的研究。因此，本节采用上述多相流 MPS 方法，将对带竖直隔板的分层液体晃荡进行二维数值模拟，分析隔板对分层液体晃荡的抑制作用，并研究不同隔板高度对抑制效果的影响。

3.1 计算模型与参数

本文的计算模型主要参照 Molin 等[7]完成的不带隔板的三层液体晃荡实验。如图 1 所示，宽 1.08 m，高 0.9 m 的方形容器中由上到下分布有高度为 0.38m 的环己烷，0.15m 的水和 0.15m 的二氯甲烷，各层液体的相关物理性质见表 1。由于容器内分布三层液体，因此除自由液面之外，还存在两个相界面，分别是环己烷-水两相界面（简称 CW 界面）以及水-二氯甲烷两相界面（简称 WD 界面）。模拟中记录了容器左侧壁面处自由液面和相界面的高度。

刚性竖直隔板安装于方形容器底部的中点位置，长度为 h_b ，在不同的算例中 h_b 的值可以取不同。需要注意，如果竖直隔板顶端离相界面过于接近，容易对相界面产生干扰，甚至引起界面的破坏。因此，本文在选择隔板高度时，尽量使隔板顶端位于某层液体的中间高度附近。本文考虑了高度 h_b 为 0.075 m，0.225 m，以及 0.49 m 的三种竖直隔板，对应的隔板顶端分别位于底层、中层、顶层液体中部。此外，为了进行对比，本文还计算了 $h_b=0$ m，也就是无隔板的情况。数值模拟中，容器、隔板和液体都采用粒子表示，粒子间距为 0.005m，容器顶部的空气部分对模拟结果影响较小，因此可视为真空。

数值模拟中，方形容器初始时刻处于静止状态，随后开始绕底部中心作单自由度横摇运动，运动方程如下：

$$\xi = A \sin(\omega t) \quad (19)$$

式中 ξ 为瞬时转动角度， $A=3^\circ$ 为最大转动幅度， ω 为转动频率。在 Molin[7]等的研究中，给出了三层液体的各阶自然频率，考虑到外界激励频率接近液体的一阶自然频率时对应的液体晃荡最剧烈，因此本文模拟中容器运动频率选为中间层（水层）的

一阶自然频率，即 $\omega=1.83 \text{ rad/s}$ 。

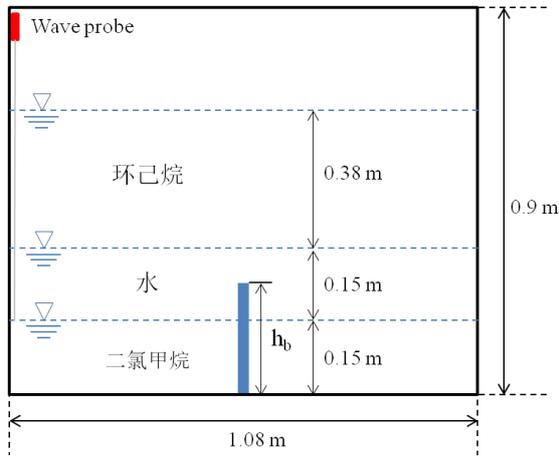


图1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic of computational model

表 1 各层液体的物理性质

Tab.1 Physical property of fluids

	密度	粘度系数	表面张力系数
环己烷	780 kg/m^3	$1.014 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	0.00247 N/m
水	1000 kg/m^3	$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	0.0727 N/m
二氯甲烷	1300 kg/m^3	$3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	0.0278 N/m

3.2 模拟结果

3.2.1 各层液体的晃荡现象

利用多相流 MPS 方法，我们模拟了不同隔板高度下的三层液体晃荡，模拟时间为 0~50 s。首先，给出了 10 s, 20 s, 30 s, 40 s, 50 s 五个典型时刻下的晃荡图像，如图 2 所示，图中不同颜色代表不同的流体。可以看到，无论是无隔板的情况，还是带不同高度隔板的情况，利用上述多相流 MPS 方法都能模拟得到光滑自然的相界面，而且不同相的粒子之间没有出现明显的非物理穿透，这证明了该方法在多相流模拟，特别是对多相流种复杂相界面捕捉的准确性。

图 2 (a) 中给出了无隔板情况下的模拟结果。可以看到，虽然自由液面的变形并不明显，但中层液体产生了剧烈的晃荡，并且同时带动了底层液体的晃荡。这说明由于各层液体的自然频率不同，当外界激励频率接近某一层液体的一阶自然频率时，可以单独引起该层液体的晃荡而不影响其他层。

图 2 (b) 中，竖直隔板的安装使液体晃荡的剧烈程度出现了明显降低，但由于隔板高度较低，只

能抑制下层液体的晃荡，而对中层液体晃荡的抑制作用有限，仍可以观察到中层液体比较剧烈的晃荡现象。此外，下层液体经过隔板时还会产生一定的水跃现象，使 WD 相界面产生比较明显的变形。图 2 (c) 和 (d) 中，随着竖直隔板高度的增加，各层液体的晃荡都得到了更好地抑制，自由液面和相界面在晃荡过程中几乎保持水平状态。

因此，可以初步确定，通过在容器底部安装竖直隔板，是可以对分层液体的晃荡现象进行有效抑制的，而隔板高度对抑制效果也有着十分明显的影响。

3.2.2 壁面处自由面和相界面高度

为了进一步说明竖直隔板对晃荡的抑制效果，还将模拟得到的壁面处自由液面和相界面高度进行了比较。图 3 (a) 给出了自由面高度变化的历史曲线。可以看到，和图 2 中现象一致，自由液面高度在 $0.04 \text{ m} \sim -0.04 \text{ m}$ 之间变化，远小于 CW 界面和 WD 界面（需要注意 (a) 中因为高度变化小，设置了更小的纵坐标），并且在两个周期之后就进入稳定状态，高度变化幅值基本不变。同时，由于自由面高度变化较小，隔板对其基本没有影响，只在模拟后期，观察到安装隔板时的自由面高度略低于无隔板情况。

图 3 (b) 中，给出了 CW 界面，即上层与中层液体界面的高度变化。无隔板时，CW 界面高度的变化幅值在晃荡初期不断增加，到 40s 之后才进入了比较稳定的状态，此时的最大变化幅值在 0.15m 左右。安装 $h_b=0.075 \text{ m}$ 的竖直隔板后，CW 界面的高度变化幅值明显降低，并且在 10s 之后很快进入到稳定状态，此时变化幅值约为 0.05m。而安装 $h_b=0.225 \text{ m}$ 和 $h_b=0.49 \text{ m}$ 的竖直隔板后，CW 界面十分稳定，模拟过程中几乎没有变化，说明晃荡得到了很好地抑制。

图 3 (c) 中，WD 界面的变化情况与 CW 界面类似，随着隔板高度的增加，WD 界面高度的变化幅值逐渐减小。不同的是， $h_b=0.225 \text{ m}$ 的竖直隔板下 WD 界面高度仍有比较稳定的小幅变化，而 $h_b=0.49 \text{ m}$ 的竖直隔板则几乎能完全抑制 WD 界面的变化，因此 $h_b=0.49 \text{ m}$ 的竖直隔板具有最好的减晃效果。

4 结论

本文基于多相流 MPS 方法，对带垂直隔板的分层液体晃荡进行了数值模拟。该方法在改进后 MPS 方法的基础上，通过引入一系列相界面处理技术，包括密度光滑、粒子相互作用粘度，以及表面张力模型，成功将 MPS 方法扩展应用到了多相流问题中。利用该方法模拟得到的相界面光滑自然，不同相粒子之间没有明显的非物理穿透，能很好地捕捉相界面变形。

同时，本文对带不同高度垂直隔板的三层液体晃荡进行了模拟，并将模拟结果与不带隔板的情况进行了对比。结果表明，垂直隔板能显著降低分层液体晃荡的剧烈程度，并且使相界面更稳定，壁面处相界面高度的变化幅度也明显减小。其中，高度为 0.225 m 和 0.49 m 的垂直隔板对晃荡的抑制效果最好，可以使相界面高度几乎保持不变。从兼顾经济性的原则考虑，认为高度为 0.225 m 的垂直隔板在三种隔板中最优。

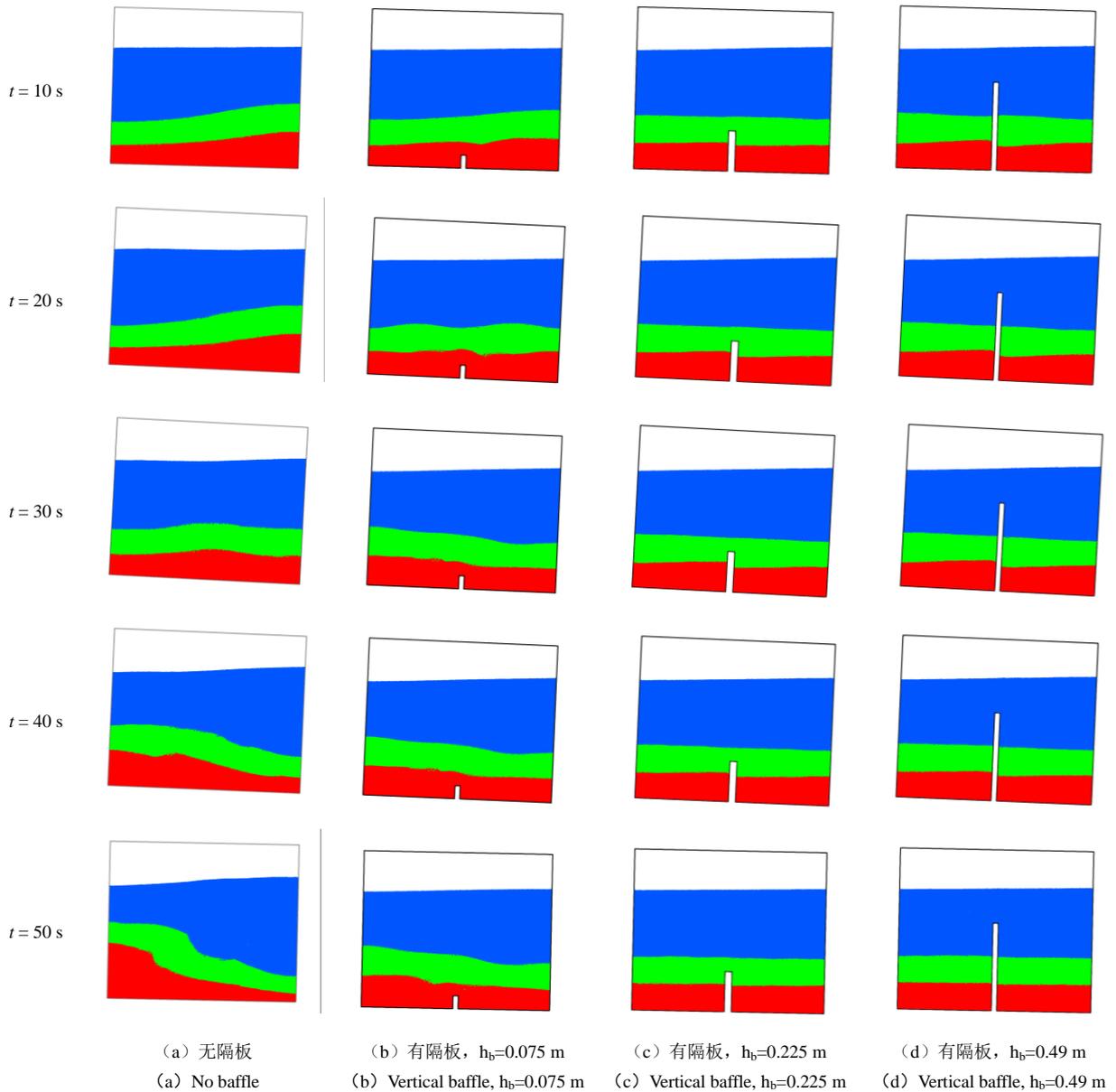


图2 不同时刻不同隔板高度下的三层液体晃荡 (蓝-环己烷; 绿-水; 红-二氯甲烷)

Fig.2 Snapshots of three-layer-liquid sloshing with different baffles at different instants.

(Blue-Cyclohexane; Green-Water; Red-Dichloromethane)

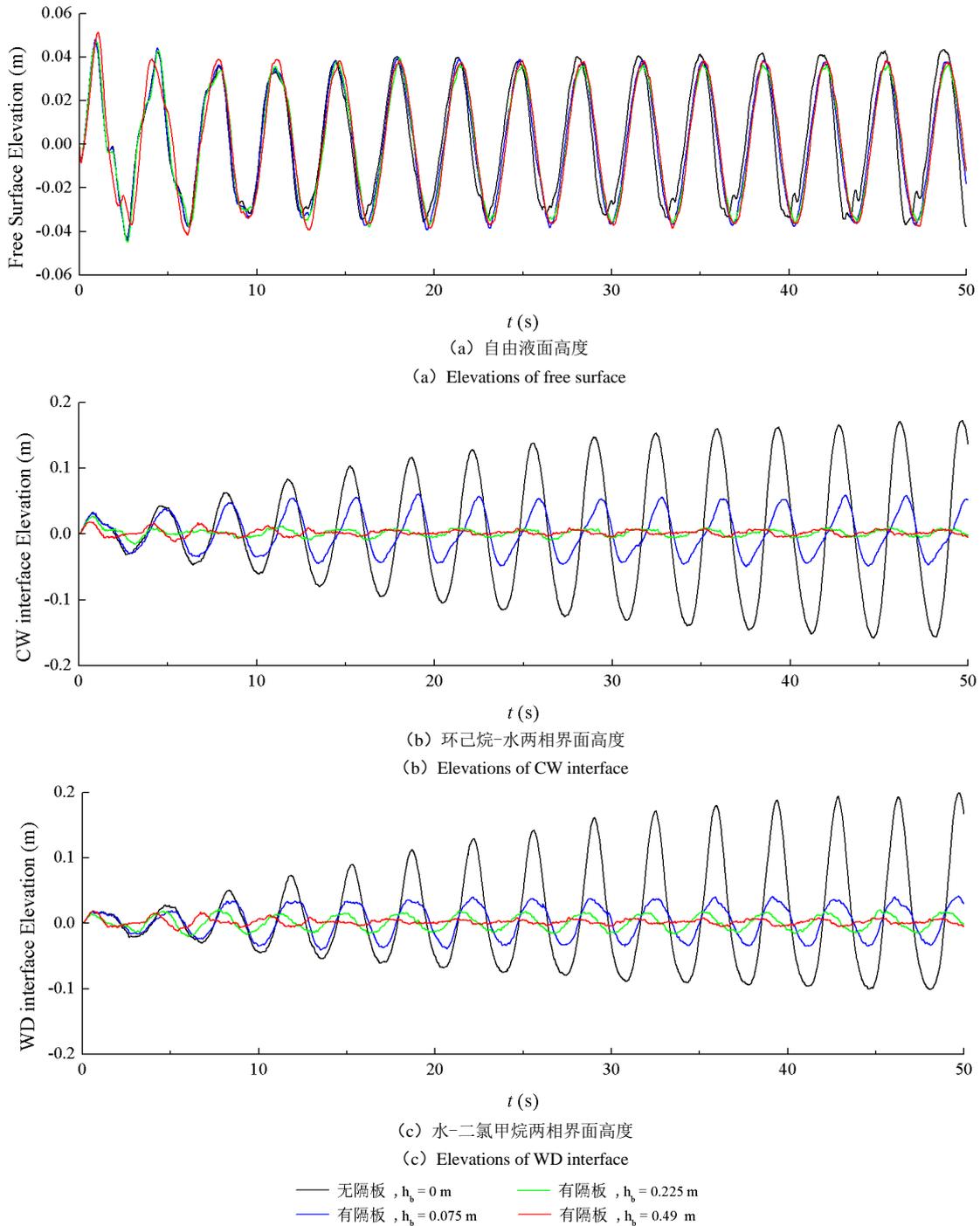


图3 不同隔板情况下容器壁面处自由液面和相界面高度的历时曲线

Fig.3 Time history of elevations of free surface and two-phase interfaces near the wall of tanks with different baffles

参考文献(References):

[1] 张雨新, 万德成. 用 MPS 方法数值模拟低充水液舱的晃荡[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(1): 100-107. (ZHANG Yuxin, WAN Decheng. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS[J]. *Chinese journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(1):

100-107. (in Chinese))

[2] 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.

[3] Wen X., Chen X, Wan D C. MPS simulation of sloshing flows in a tuned liquid damper[C]. Proceedings of the Twenty-Seventh (2017) International Ocean and Polar

-
- Engineering Conference, 2017, 1009–1016.
- [4] Xue M, Zheng J, Lin P, Ma Y and Yuan X. Experimental investigation on the layered liquid sloshing in a rectangular tank,” Proc 23rd Int Offshore and Polar Eng Conf, Anchorage, ISOPE, 2007:202–208.
- [5] La Rocca M, Sciortino G and Adduce C. Experimental and Theoretical Investigation on the Sloshing of a Two-liquid System with Free Surface. *Phys Fluids*, 2005, 17(6), 1–17.
- [6] Sciortino, G., Adduce, C., & La Rocca, M. (2009). Sloshing of a layered fluid with a free surface as a Hamiltonian system. *Physics of Fluids*, 21(5).
- [7] Molin B, Remy F, Audiffren C and Marcer R (2012). Experimental and Numerical Study of Liquid Sloshing in a Rectangular Tank with Three Fluids. Proc of the 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf, Rhodes, ISOPE, 331-340.
- [8] Koshizuka, S and Oka, Y (1996). “Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid,” *Nucl Sci Eng*, 123, 421–434.
- [9] Lee, BH, Park, JC, Kim, MH and Hwang, SC (2011). “Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads,” *Comput Meth Appl Mech Eng*, 200(9), 1113-1125.
- [10] Khayyer, A and Gotoh, H (2011). “Enhancement of Stability and Accuracy of the Moving Particle Semi-implicit Method,” *J Comput Phys*, 230(8), 3093–3118.
- [11] Zhang Yuxin, Wan Decheng. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank . Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, 2012: 381-391
- [12] Gotoh, H., & Khayyer, A. (2016). Current achievements and future perspectives for projection-based particle methods with applications in ocean engineering. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2(3), 1–28.
- [13] Koshizuka, S, Nobe, A and Oka, Y (1998). “Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method.” *Int J for Numer Methods Fluids*, 26(7), 751-769.
- [14] Tanaka, M and Masunaga, T (2010). “Stabilization and Smoothing of Pressure in MPS Method by Quasi-Compressibility,” *J Comput Phys*, 229(11), 4279–4290.
- [15] Zhang, YX and Wan, DC (2012). “Apply MPS Method to Simulate Liquid Sloshing in LNG Tank,” Proc of the 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf, Rhodes, ISOPE, 381-391.
- [16] Shakibaeinia, A and Jin, Y (2012). “MPS Mesh-free Particle Method for Multiphase Flow.” *Comput Methods Appl Mech Eng*, 229-232, 13-26.
- [17] Brackbill, J. U., Kothe, D. B., & Zemach, C. (1992). A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 100(2), 335–354.
- [18] Duan, G, Koshizuka, S and Chen, B (2015). “A Contoured Continuum Surface Force Model for Particle Methods,” *J Comput Phys*, 298, 280–304.