

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.004

基于 MPS 方法模拟带水平隔板的液舱晃荡*

杨亚强, 唐振远, 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 200240, Email: yangyaqiang2013@sina.com)

摘要: 该文基于自主开发的无网格粒子方法求解器 MLParticle-SJTU, 研究了二维晃荡问题中对称水平隔板的隔板宽度、高度等参数对减晃作用的影响。首先, 对矩形液舱内的晃荡问题进行了数值模拟, 通过与实验结果进行比较, 验证了 MLParticle-SJTU 的可靠性; 其次, 通过大量的数值计算, 分析了对称水平隔板的宽度和高度对减晃效果的影响。数值结果表明: 对称水平隔板具有较好的减晃作用; 对称水平隔板宽度和高度越大, 减晃效果越明显。

关键词: 液舱晃荡; MLParticle-SJTU 求解器; 对称水平隔板; 减晃; 拍击压力

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

Numerical study on liquid sloshing in horizontal baffled tank by MPS method

YANG Ya-qiang, TANG Zhen-yuan, WAN De-cheng

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

Abstract: In this paper, the self-developed meshfree particle method solver MLParticle-SJTU, which is based on MPS (Moving Particle Semi-implicit) method, is used to investigate the effects of the baffles on the liquid sloshing under horizontal excitation. Firstly, the numerical model is validated against the experimental data for 2D liquid sloshing in unbaffled tank. In addition, liquid sloshing with different baffle heights and widths is simulated. The impact pressure characteristics in these cases are parametrically investigated. Results show that the dimension and location of horizontal baffles significantly influence the hydrodynamic damping. Liquid sloshing displacement can be suppressed effectively as the baffle height and width increases.

Key words: liquid sloshing; MLParticle-SJTU solver; symmetrical horizontal baffle; impact pressure

* **收稿日期:** 2014-07-25(2014-12-22 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51411130131, 11432009, 51490675)、国家重点基础研究发展计划(973计划, 2013CB036103)、长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介: 杨亚强(1989 -), 男, 山东滕州人, 硕士研究生.

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: July 25, 2014 (**Revised** December 22, 2014)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51411130131, 11432009, 51490675), the Major State Basic Research Development Plan of China (973 Program, 2013CB036103), Chang Jiang Scholars Program (T2014099) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

Biography: YANG Ya-qiang (1989-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

引言

液舱晃荡是船舶海洋工程界一种常见的自由面流动现象。部分装载货物的液货船在海上航行时, 在外界激励作用下(如船舶的横荡、横摇和纵摇等), 液舱内液体就会产生晃荡。液体晃荡常伴随着驻波、行进波和水跃等现象, 剧烈时甚至带有液体的飞溅、自由面的翻卷, 使得晃荡呈现出强烈的非线性和随机性, 这给数值模拟晃荡问题带来了很大的挑战^[1]。

近年来兴起的无网格粒子法可以很好地模拟晃荡问题。与传统的网格类方法不同, 粒子法基于拉格朗日方法, 在处理一些大变形的自由面问题时具有很大的灵活性。其中 MPS 方法是一种常用的粒子法, 由于 MPS 方法粒子间没有固定的拓扑关系, 因此 MPS 法在处理复杂自由面问题时具有很大的优势^[2], 无网格粒子方法求解器 MLParticle-SJTU 正是基于 MPS 方法开发出来的。为了获得光滑的压力场, 在传统 MPS 方法的基础上, MLParticle-SJTU 求解器做了如下改进: 无奇点的核函数、动量守恒型的压力梯度模型、压力 Poisson 方程的混合源项法以及使用了改进的自由面判断方法^[3-7]。

剧烈的晃荡会对容器壁面产生强烈的冲击, 从而导致舱体结构的破坏和船舶稳性的损失, 危及船舶安全。目前针对晃荡现象的研究主要集中在如何减小液舱内部的晃荡载荷, 抑制晃荡现象的发生。其中, 在液舱内设置不同形式的隔板是减小晃荡幅度的主要方式^[8]。Biswal 等^[9]针对矩形和圆柱形容器中装置水平隔板的液体晃荡问题建立了时域有限元数学模型, 研究了隔板位置、尺寸和数量对液体晃荡的影响。Cho 等^[10]建立了二维矩形容器中液体共振运动响应的频域模型, 分析了容器加上隔板后固有频率的变化情况。Liu 等^[11]研究了三维两相流模型中隔板的减晃作用, 并指出垂直隔板在减小液体晃荡中的作用比水平隔板更为有效, 同时垂直隔板还能够有效地减小脉冲压力。尽管相关研究已有很多, 但目前隔板参数对容器减晃效果的系统研究还不多见。本文基于自主开发的无网格粒子法求解器 MLParticle-SJTU 研究了水平隔板对减晃作用的影响。首先, 本文通过对矩形液舱内的液体晃荡问题进行数值模拟, 并将计算结果与实验结果进行比较, 验证了 MLParticle-SJTU 的可靠性; 其次, 本文对比了不同高度和宽度的水平隔板时液体晃荡的流场变化情况, 分析了对称水平隔板对自由面和壁面拍击压力的影响。

1 计算方法

1.1 控制方程

对不可压缩流体, 流体运动的控制方程包括连续性方程和 N-S 方程, 可写成如下形式:

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

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

其中: ρ 为流体密度, P 为压力, \mathbf{V} 为速度向量, \mathbf{f} 是质量力, 一般为重力, ν 是运动黏性系数, t 为时间。式(1)和式(2)的时间导数项是以物质导数的形式给出的, 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。

1.2 核函数

在粒子法中, 控制方程将被写成粒子形式, 粒子间的相互影响是通过核函数来实现的, 与传统的核函数不同, MLParticle-SJTU 求解器采用的核函数为^[3-7,12,13]

$$W(r) = \frac{r_e}{0.85r + 0.15r_e} - 1, \quad 0 \leq r < r_e \quad (3a)$$

$$W(r) = 0, \quad r_e \leq r \quad (3b)$$

式中, r 表示两个粒子之间的距离, r_e 为粒子作用域的半径。

1.3 梯度模型

MLParticle-SJTU 求解器采用的动量守恒的梯度模型为^[14]

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

式中: D 为空间维数, n^0 为初始粒子数密度。式(4)既满足了动量守恒定律, 同时保证了任意两个粒子间的压力始终是排斥力。

1.4 Laplacian 模型

在 MPS 方法中, Laplacian 模型是由 Koshizuka^[15]给出的, 如下式所示

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

式中, D 为空间维数, n^0 为粒子的初始粒子数密度。

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

式 (5) 是一种守恒格式, 其推导源于非定常扩散问题, λ 的引入是为了使数值结果与扩散方程的解析解相一致。

1.5 不可压缩条件

MLParticle-SJTU 求解器采用的压力 Poisson 方程是 Tanaka^[15]提出的混合源项法 (mixed source term method), 该方法结合了速度散度和粒子数密度。混合源项法后来被 Lee^[16]写成了更为合理的表达形式

$$\langle \nabla^2 P^{n+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (7)$$

式中: γ 是一系数, 其值为 0 1 之间的数。

1.6 自由面的判断

在求解压力 Poisson 方程时, 自由面粒子被指定 0 压力边界条件, 因此自由面的判断精度对压力的计算有较大的影响。在单相流计算中, 空气中是没有粒子的, 自由面附近的粒子数密度一般会小于非自由面粒子的粒子数密度。基于该特点 Koshizuka^[2]提出了一种较为简单的自由面粒子判断方法,

但是该方法的判断精度较低。因此, MLParticle-SJTU 求解器采用了一种更为合理的自由面判断方法^[3-7]。定义如下矢量

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(\mathbf{r}_{ij}) \quad (8)$$

式中, 矢量 \mathbf{F} 表示粒子数密度的不对称度。对于自由面附近的粒子而言, 矢量 \mathbf{F} 的模 $|\mathbf{F}|$ 较大, 当粒子位于流体域内部时, $|\mathbf{F}|$ 则较小。因此当粒子满足

$$\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > \alpha \quad (9)$$

即被判定为自由面粒子。 α 为一参数, 本文取 $\alpha = 0.9 |\mathbf{F}^0|$, 其中 $|\mathbf{F}^0|$ 为一参考值, 等于初始时刻自由面粒子的 $|\mathbf{F}|$ 。

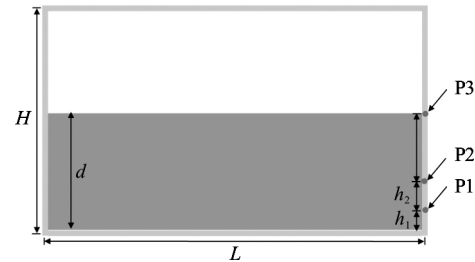


图 1 矩形液舱尺寸示意图
Fig.1 Schematic of the rectangular tank

2 数值结果

为了验证 MLParticle-SJTU 求解器的可靠性,

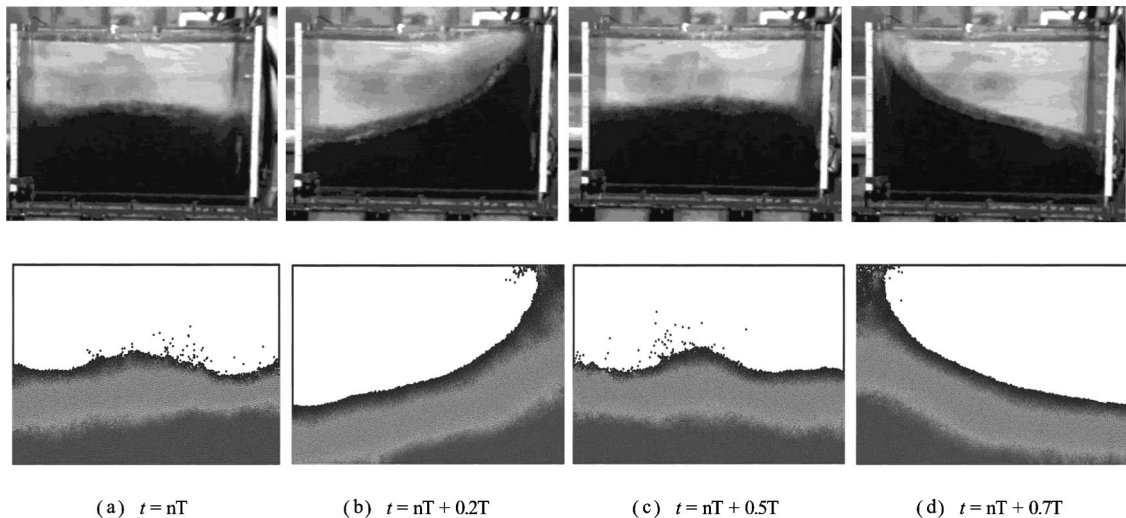


图 2 一个周期内不同时刻的自由面变化 (第一行为实验结果, 第二行为数值模拟结果)

Fig.2 Time sequences of the free surface deformation at regular intervals during one period

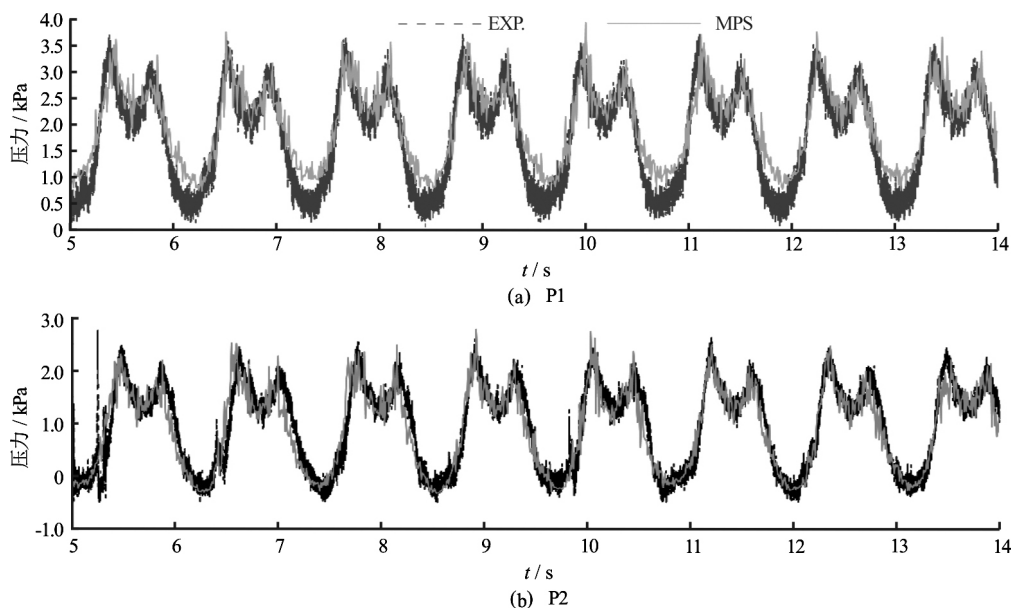


图3 不同检测点处拍击压力随时间的变化
Fig.3 Time histories of the pressure at different pressure probes

本文对无隔板的矩形液舱在外部激励下的液体晃荡问题进行数值模拟, 并将计算结果与 Kang 等^[17]的实验结果作对比。如图 1 所示, 液舱宽 $L=800$ mm, 高 $H=500$ mm, 水深 $d=250$ mm, 对应的充水率为 50%。在舱壁右侧设有三个压力监测点 P1、P2 和 P3, 其间距分别为 $h_1=52.5$ mm, $h_2=62.5$ mm, $h_3=135$ mm。

液舱在外部激励作用下沿水平方向作简谐运动, 其运动方程为

$$x = -A \cos(\omega t) \quad (10)$$

式中, 振幅 $A=20$ mm, 激励频率 ω 为共振频率, 其值为 5.39 rad/s。

数值模拟中, 所用的粒子总数为 14312, 其中水粒子为 12338, 对应粒子初始间距为 0.004 m。水的密度取为 $\rho=1000$ kg/m³, 运动黏性系数为 $\nu=1.01 \times 10^{-6}$ m²/s, 重力加速度 $g=9.81$ m/s², 时间步长取为 $\Delta t=1 \times 10^{-4}$ s。

图 2 给出了数值模拟和实验在一个周期内不同时刻的流场瞬间, 图中可以看到液舱内液体晃荡比较剧烈。首先, 液舱在外部激励作用下向右运动, 并带动内部流体向右运动, 如图 2(a) 所示。当液舱到达最右侧位置时, 流体在惯性力作用下继续向右运动, 由于受到液舱的阻碍作用, 流体的动量方向发生瞬时转变, 从而对舱壁右侧产生较大的拍击作用。之后形成射流并沿着垂直壁面爬升至液舱顶部, 对液舱顶部产生拍击作用, 出现自由面破碎和液体飞溅(图 2(b))。此后, 上升的流体开始下降, 并且在液舱的作用下向左运动^[17]。从图中可以看

出, 数值模拟得到自由面形状能够与实验结果较好地吻合, 这说明 MlParticle-SJTU 能够较好地模拟自由面破碎、顶部拍击等大自由面变形的现象。

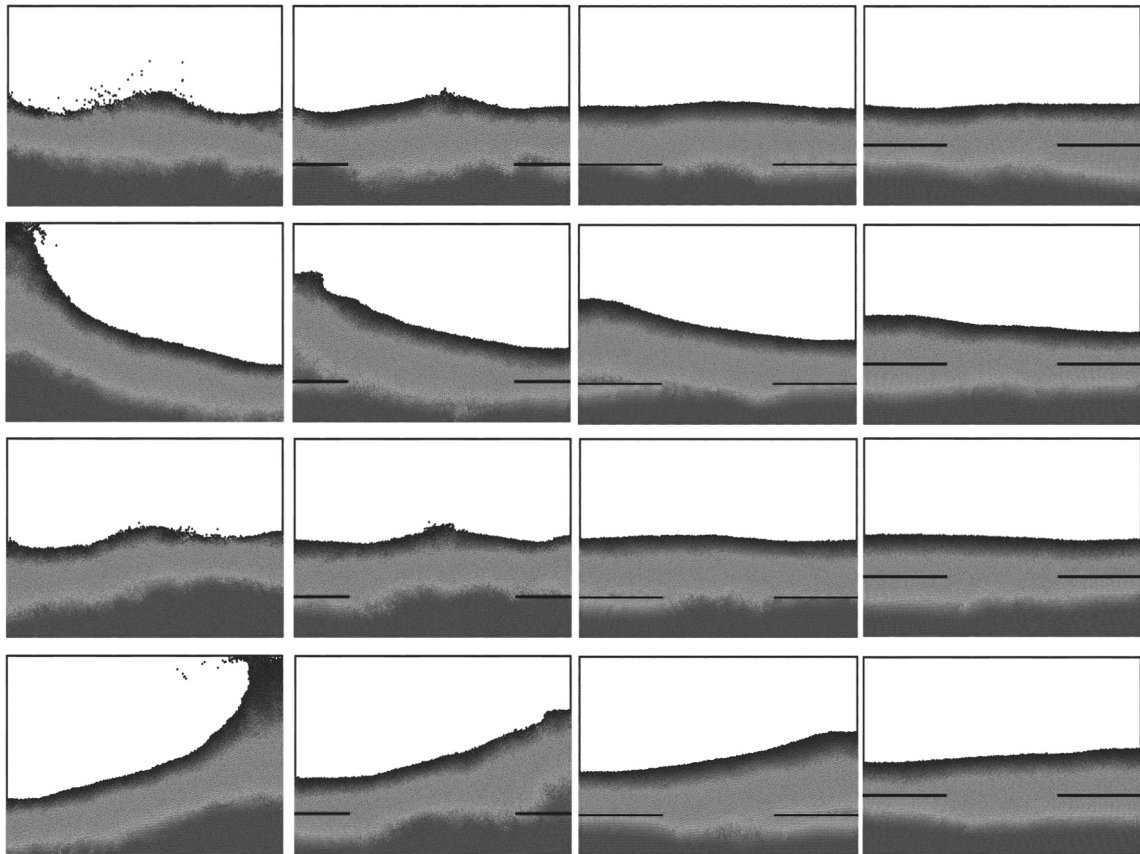
图 3 给出了不同检测点处的拍击压力随时间的变化曲线。从图中可以看出, MlParticle-SJTU 能够较好地预测晃荡产生的拍击压力, MPS 给出的压力曲线能够比较好地与实验值相吻合。此外, 晃荡产生的拍击压力呈现双峰特征。第一个压力峰值是由于舱壁阻碍液体的水平运动, 导致液体的动量方向发生瞬时改变造成的。此后液体沿着舱壁向上运动, 并在重力作用下回落, 拍击底部流体, 产生第二个压力峰值^[1,18]。

3 对称水平隔板对减晃作用的数值

为分析对称水平隔板对减晃作用的影响, 在图 1 中加入水平隔板, 隔板高度为 h , 隔板宽度为 w 。并对水平隔板的相对高度为 $h/d=0.2 \sim 0.8$ 和相对宽度为 $w/L=0.1 \sim 0.4$ 时的液体晃荡进行了数值模拟。

3.1 自由面变形

图 4 给出了一个周期内不同隔板高度和宽度时流场的变化情况。由图中可以看出, 对称水平隔板对液体晃荡具有很好的阻尼效果。当液舱内未设置隔板时, 液体晃荡比较剧烈, 产生冲顶现象, 晃荡液体对液舱顶部产生较大的拍击压力; 同时, 自由面的变形剧烈, 出现了波浪翻卷、自由面破碎和液体飞溅等复杂的流动现象^[19]。设置对称水平隔板以



(a) $h/d = 0, w/L = 0$ (b) $h/d = 0.4, w/L = 0.2$ (c) $h/d = 0.4, w/L = 0.4$ (d) $h/d = 0.6, w/L = 0.3$

图 4 一个周期内不同隔板高度和宽度时流场变化情况

Fig.4. Time sequences of the free surface deformation during one period for different baffle heights and widths

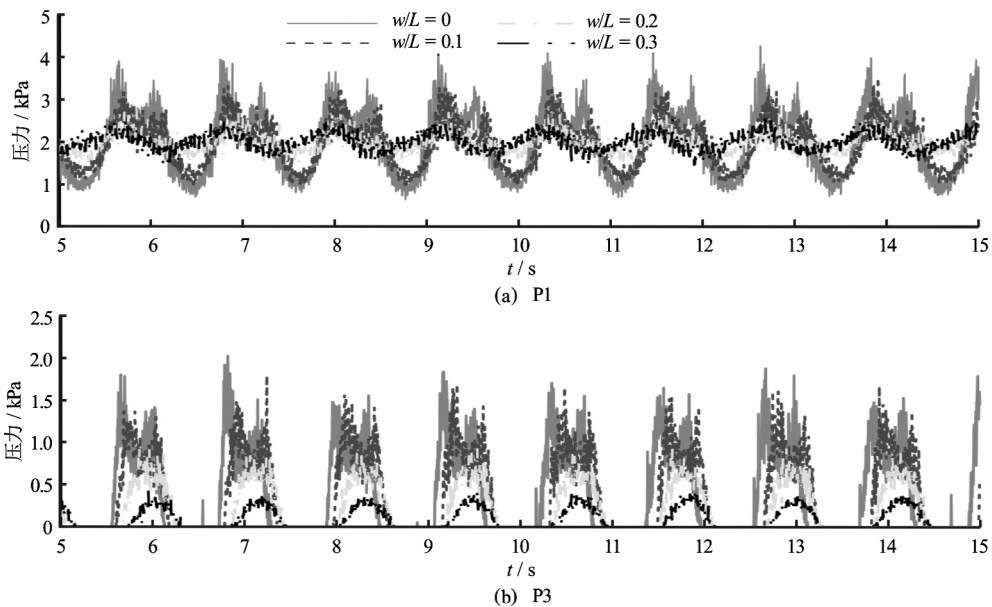


图 5 隔板高度 $h/d = 0.5$ 时的压力历时曲线随隔板宽度的变化情况

Fig.5 Time histories of the pressure for different baffle widths with the baffle height $h/d = 0.5$

后,液体晃荡的幅度明显减小,不再出现冲顶现象,自由面形状比较平滑。这是由于对称水平隔板对液体的垂直运动产生了阻碍作用,导致液体的动能减

小,从而液体的惯性力不足以推动液体到达液舱顶部。图 4 (b) 和图 4 (c) 为隔板宽度改变时晃荡幅度的对比情况,图 4 (c) 和图 4 (d) 为隔板设

置高度对晃荡幅度的影响。从图中可以看出, 随着隔板高度和隔板宽度的增加, 自由面升高会逐渐减小, 这表明隔板的阻尼效果越来越明显。

力随隔板宽度的变化情况。图 6 为隔板宽度为 $w/L = 0.2$ 时不同检测点处压力随隔板高度的变化情况。从图中可以看出: 对称水平隔板的隔板宽度和

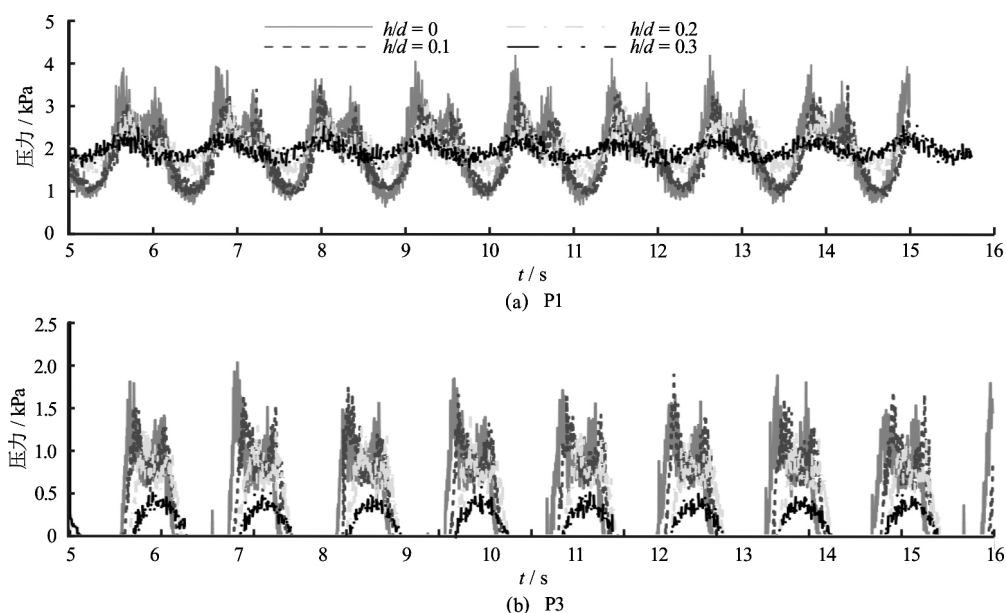


图 6 隔板宽度 $w/L = 0.2$ 时不同检测点处的压力历时曲线随隔板高度的变化情况
Fig.6 Time histories of the pressure for different baffle heights with the baffle width $w/L = 0.2$

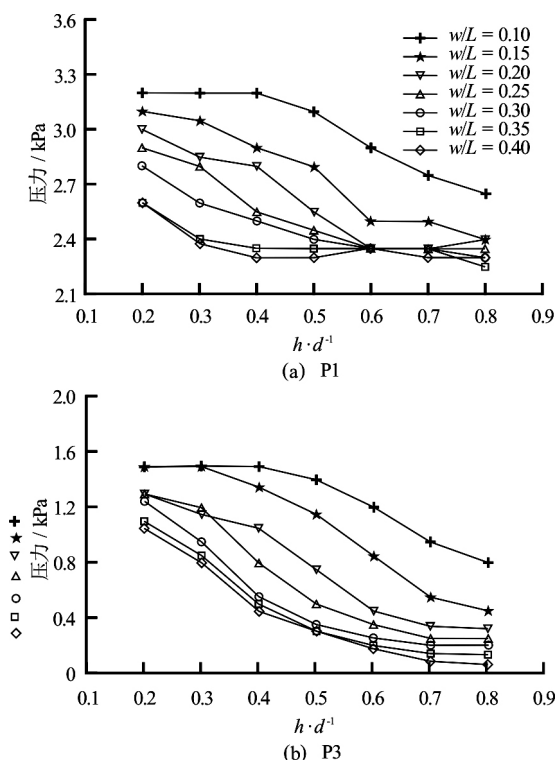


图 7 水平隔板高度和宽度对舱壁上不同点处拍击压力峰值的影响
Fig.7 Maximum pressure variation as a function of the baffle height and width for different pressure probes

3.2 壁面拍击压力

图 5 为隔板高度 $h/d = 0.5$ 时不同检测点处压

高度对检测点处的拍击压力影响较大; 拍击压力的幅值随着隔板高度和宽度的增大而减小, 同时隔板参数对拍击压力的相位关系也会产生一定的影响。

对于没有隔板的情况而言, 不同检测点处的压力值均表现为周期性, 同时呈现双峰特征。如上所述, 第一个压力峰值是液体动量方向发生瞬时改变所致, 第二个压力峰值是液体下落拍击下面的液体所致。当设置对称水平隔板后, 两个检测点的压力均有所减小, 这是由于水平对称隔板可以减小晃荡流体的垂向速度, 进而使流体的动能减小, 从而减小了晃荡流体对壁面的拍击压力^[20]。随着隔板高度和宽度的增大, 压力历时曲线由双峰逐渐变为单峰特征, 趋近于正弦曲线, 这是由于隔板的阻尼作用使得液面最大升高减小, 从而导致下落的液体对底部液体的拍击作用减弱。

图 7 为当隔板高度和宽度变化时, P1 点和 P3 点拍击压力峰值的变化情况。从图中可以看出, 随着隔板宽度和高度的增大, 压力峰值曲线整体上呈下降趋势。

当相对高度 $h/d \leq 0.6 \sim 0.7$ 时, 拍击压力峰值随隔板高度的变化幅度较大; 当隔板宽度较小时 ($w/L = 0.1 \sim 0.2$), 随着隔板高度的增大, 压力峰值减小速率逐渐增加, 压力峰值变化曲线呈现凸型变化; 当隔板宽度较大时 ($w/L = 0.25 \sim 0.4$), 压力峰值减小速率逐渐变小, 压力变化曲线呈现凹型变化。当相对隔板高度 $h/d \geq 0.6 \sim 0.7$ 时, 拍击压力峰值随隔板高度的变化较小。

当隔板宽度较小时 ($w/L=0.1 \sim 0.2$), 随着隔板宽度增大, 拍击压力峰值减小的幅度较大; 当隔板宽度较大时 ($w/L=0.25 \sim 0.4$), 拍击压力峰值随隔板宽度的变化较小。

对比图 7(a) 和图 7(b) 可以看出, P1 点压力峰值可以减小至原有值的 60% 左右, 而 P3 点压力峰值可以减小至原有值的 5% 左右。这是由于 P1 点位于液面以下, 相对于 P3 点而言, 其静水压力占总压力的比值较大, 而水平隔板减小的是动压力, 因此设置水平隔板以后, P1 点拍击压力的减小幅度较小。

4 结论

本文基于自主开发的无网格粒子方法求解器 MlParticle-SJTU, 将 MPS 方法应用到二维液舱晃荡中, 探究隔板参数对水平隔板减晃作用的影响。研究表明, 数值计算得到的拍击压力和流场与实验结果吻合良好, 这表明 MPS 方法能够较好地模拟二维矩形液舱的液体晃荡问题。本文得出以下主要结论:

(1) 对称水平隔板能起到很好的减晃作用。随着隔板高度和宽度的增大, 液体晃荡幅度减小, 隔板的阻尼效果会更加显著。

(2) 对于没有隔板的液舱, 剧烈的晃荡现象往往会引起冲顶现象, 随着隔板高度和宽度的增大, 冲顶现象消失, 自由面的变化变小。当 $h/d \geq 0.6$, $w/L \geq 0.3$ 时, 自由面形状趋近于直线, 晃荡幅度很小, 可以忽略。

(3) 液舱侧壁不同检测点处的压力值具有周期性, 且具有双峰特征。随着隔板高度和宽度的增大, 压力峰值减小, 第二个压力峰值逐渐消失, 压力历时曲线由双峰逐渐变为单峰。

(4) 水平隔板对自由面附近的壁面压力峰值可以减小至原有值的 5% 左右。

致谢

本文工作得到了工信部高技术船舶科研项目以及上海交通大学高性能计算中心的资助, 在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献:

[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 Yu-xin, WAN De-cheng. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 7(1): 100-107.

[2] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-Particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. Nuclear Science and Engineering, 1996, 123: 421-434.

[3] ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparison investigations of incompressible viscous flows by SPH method and MPS method[C]. Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2010, 2010, Shanghai, China, No. OMAE2010-20843.

[4] ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Apply MPS method to simulate motion of floating body interacting with solitary wave[C]. Proceeding of 7th International Workshop Ship Hydrodynamics, IWSH2011, Shanghai, China, 2011.

[5] ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 577-585.

[6] 张驰, 张雨新, 万德成. SPH 方法和 MPS 方法模拟溃坝问题的比较分析[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2011, 26(6): 736-746.

ZHANG Chi, ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparative study of SPH and MPS methods for numerical simulations of dam breaking problems[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(6): 736-745.

[7] 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 Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 41(2): 140-154.

[8] HU C H, YANG K K, KIM Y H. 3-D numerical simulations of violent sloshing by CIP-based method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5): 253-258.

[9] BISWAL K C, BHATTACHARYYA S K, SINHA P K. Non-linear sloshing in partially liquid filled containers with baffles[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 68(3): 317-337.

[10] CHO J R, LEE H W, HA S Y. Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffled tank[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288: 829-845.

[11] LIU D, LIN P. Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles[J]. Ocean Engineering, 2009, 36: 202-212.

[12] TANG Zhen-yuan, ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng.

- Overlapping MPS method for 2D free surface flows[C]. Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014.
- [13] YANG Ya-qiang, TANG Zhen-yuan, WAN De-cheng. Numerical simulations of 3D liquid sloshing flows by MPS method[C]. Proceedings of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014), Shanghai, China, 2014.
- [14] TANAKA M, MASUNAGA T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by quasi-compressibility[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229: 4279-4290.
- [15] KOSHIZUKA S, OBE A, OKA Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 26: 751-769.
- [16] LEE B H, PARK J C, KIM M H, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(9-12): 1113-1125.
- [17] KANG D H, LEE Y B. Summary report of sloshing model test for rectangular model[J]. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., South Korea, Technical Report, 2011.
- [18] ZHANG Yu-xin, YANG Ya-qiang, TANG Zhen-yuan, et al. Parallel MPS method for three-dimensional liquid sloshing[C]. Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014.
- [19] JUNG J H, YOON H S, LEE C Y, et al. Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank[J]. Ocean Engineering, 2012, 44(2012): 79-89.
- [20] XUE Mi-an, LIN Peng-zhi. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing[J]. Computers & Fluids, 2011, 52: 116-129.