

# 基于 MPS 方法模拟带水平隔板的液体晃荡

杨亚强, 张雨新, 唐振远, 万德成\*

**摘要:** 基于自主开发的无网格粒子方法求解器 MParticle-SJTU, 研究了带水平隔板的液体晃荡问题。首先, 对矩形液舱内的液体晃荡问题进行了数值模拟, 并将计算结果与实验结果进行比较, 验证了 MPS 方法的可靠性。其次, 对比了设置水平隔板前后液体晃荡的自由面变化情况, 定性分析了水平隔板的减晃效果。此外, 本文通过数值模拟得到了不同的隔板高度和开口宽度时液体晃荡对舱壁的拍击压力, 分析了隔板参数对减晃作用的影响规律。

**关键词:** 液体晃荡; MParticle-SJTU 求解器; 水平隔板; 拍击压力

## 1 引言

液体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, 纵摇等), 液舱内液体就会产生晃荡, 剧烈的晃荡压力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。因此, 研究液体晃荡及其抑制措施具有重要的工程意义。

液体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很大的挑战。近年来兴起无网格粒子法可以很好的模拟晃荡问题。与传统的网格类方法不同, 粒子法基于拉格朗日方法, 对处理一些大变形的自由面问题具有很大的灵活性, 其中 MPS (Moving Particle Semi-Implicit) 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。MParticle-SJTU 求解器正是基于 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, MParticle-SJTU 求解器做了一些改进: 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<sup>[1]</sup>。

目前针对晃荡现象的研究主要集中在如何减小液体内部的晃荡载荷, 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液体晃荡幅度的主要方式。本文基于我们自主开发的无网格粒子方法求解器 MParticle-SJTU, 研究了水平隔板对减晃作用的影响。首先, 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,对比了设置水平隔板前后液体晃荡的自由面变化情况,定性分析了水平隔板的减晃效果。此外,本文通过数值模拟得到了不同的隔板高度和开口宽度时液体晃荡对舱壁的拍击压力,分析了隔板参数对减晃作用的影响规律。

## 2 数值方法

### 2.1 控制方程

MLParticle-SJTU 所使用的控制方程包括连续性方程和方程,对不可压缩流体,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:  $\rho$  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,  $\nu$  是流体的运动黏性系数。式(1)和式(2)的时间导数项是以物质导数的形式给出的,因此不存在对流项,避免了对流项计算引起的数值耗散。

### 2.2 核函数

与传统的核函数不同,MLParticle-SJTU 求解器采用了核函数<sup>[2]</sup>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(3)是一种无奇点的核函数,可以保证计算的稳定性。

### 2.3 梯度模型

MPS 中梯度模型是通过作用域内粒子间的相对位置矢量的加权平均来获得。MLParticle-SJTU 求解器中所采用的梯度模型为:

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

式(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。

## 2.4 Laplacian 模型

在 MPS 法中, Laplacian 模型是由 Koshizuka<sup>[3]</sup>给出的, 如下式所示:

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

其中:  $D$  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,  $\lambda$  的引入是为了使数值结果与扩散方程的解析解相一致。

## 2.5 不可压缩条件

MLParticle-SJTU 求解器采用的压力 Poisson 方程是 Tanaka<sup>[4]</sup>提出一个混合源项法 (mixed source term method), 该方法结合了传统的速度散度和粒子数密度方法。混合源项法后来被 Lee<sup>[5]</sup>写成了更为合理的表达形式:

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

其中:  $\gamma$  是一系数, 可取 0~1 之间的数。

## 3 模型验证

为了验证 MlParticle-SJTU 求解器的可靠性, 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 Kim 的实验结果作对比。如图 1 所示, 液舱宽  $L=800\text{mm}$ , 高  $H=500\text{mm}$ , 水深  $d=250\text{mm}$ , 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, P1、P2 和 P3 的间距分别为  $h_1=52.5\text{mm}$ ,  $h_2=62.5\text{mm}$ ,  $h_3=135\text{mm}$ 。

液舱在外部激励作用下沿水平方向作简谐运动, 运动方程如下:

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

其中, 振幅  $A=20\text{mm}$ , 激励频率  $\omega$  为共振频率, 其值为  $5.39\text{rad/s}$ 。

计算所用的粒子总数为 14312, 其中水粒子为 12338, 对应粒子初始间距为  $0.004\text{m}$ 。水的密度取为  $\rho=1000\text{kg/m}^3$ , 运动粘性系数为  $\nu=1.01 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ , 重力加速度为  $g=9.81\text{m/s}^2$ , 时间步长取为  $\Delta t=1 \times 10^{-4}\text{s}$ 。

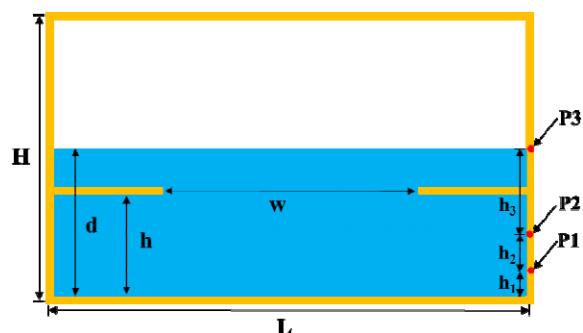
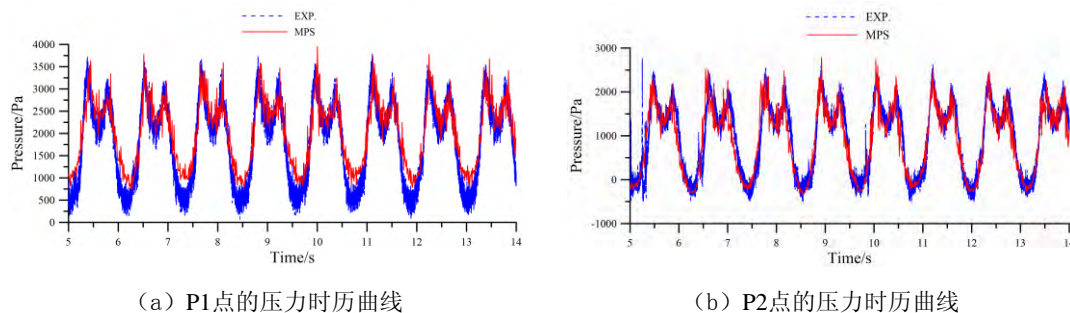


图1 矩形液舱尺寸示意图

图2给出了在P1点和P2点处拍击压力的数值模拟结果和实验结果的对比情况，从图2中可以看出，MLParticle-SJTU模拟出的拍击压力曲线能够较好地与实验结果相吻合。因此MLParticle-SJTU能够很好地预测晃荡产生的拍击压力。从图2中可以看出，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，并在重力作用下开始下落，从而对底部流体第二次拍击压力。



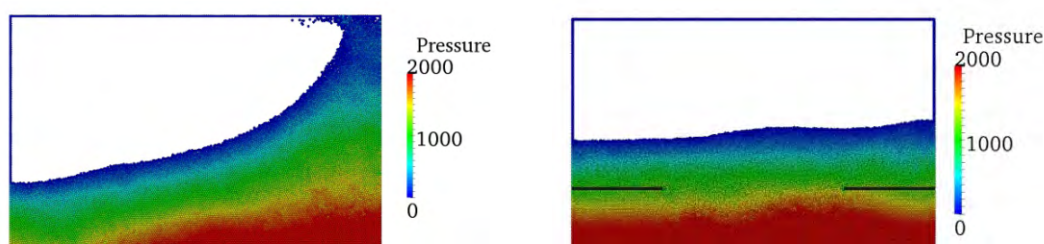
(a) P1点的压力时历曲线

(b) P2点的压力时历曲线

图2 数值模拟与实验得到的拍击压力时历曲线比较

#### 4 水平隔板对减晃作用的数值分析

为了分析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 $h$ ，隔板开口宽度为 $w$ 。本文分析讨论了水平隔板的相对高度( $h/d=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ )和相对开口宽度( $w/L=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ )变化对拍击压力的影响。图3给出了设置水平隔板前后晃荡液体的自由面变化情况。无隔板的液舱中，液体晃荡会产生冲顶现象，并伴随着液体发生破碎、飞溅等自由面大变形的情况。设置水平隔板以后，自由面升高很小，晃荡幅度大大降低。从图3中水平隔板前后晃荡液体的自由面形状对比情况看可以发现，对称水平隔板可以起到很好的减晃效果。



(a) 无隔板液舱的自由面升高情况

(b) 带隔板液舱的自由面升高情况

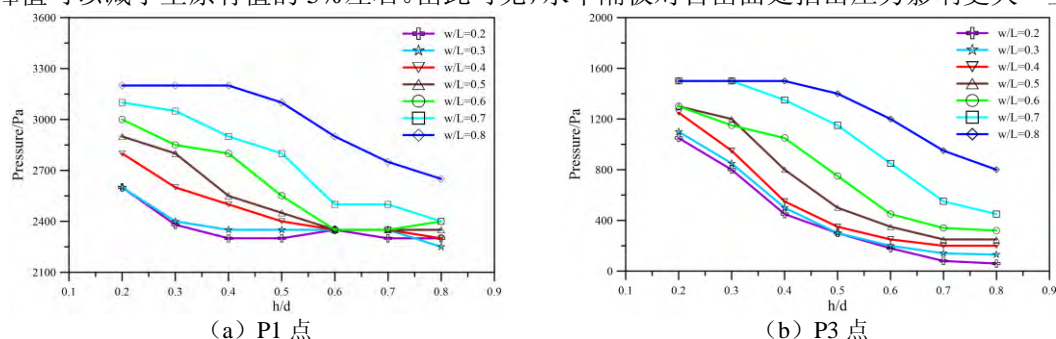
图3 设置隔板前后晃荡液体的自由面升高情况

图4为当隔板高度和开口宽度变化时，P1点和P3点拍击压力峰值的变化情况。从图中可以看出，随着开口宽度减小，隔板高度的增加，压力峰值曲线整体上呈下降趋势。

当相对高度小于0.6~0.7时，拍击压力峰值随隔板高度的变化幅度较大：当开口宽度（ $w/L=0.6\sim 0.8$ ）较大时，随着隔板高度的增加，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；当开口宽度的较小（ $w/L=0.2\sim 0.5$ ）时，压力峰值减小速率逐渐变小，压力变化曲线呈现凹型变化。当相对隔板高度超过0.6~0.7时，拍击压力峰值随隔板高度变化较小。

当开口宽度较大（ $w/L=0.6\sim 0.8$ ）时，随着开口宽度减小，拍击压力峰值减小幅度较大；当开口宽度较小（ $w/L=0.2\sim 0.5$ ）时，拍击压力峰值随隔板开口宽度变化较小。

对比图(a)和图(b)，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。由此可见，水平隔板对自由面处拍击压力影响更大一些。



(a) P1点

(b) P3点

图4 水平隔板参数对舱壁上不同点处拍击压力峰值的影响

## 5 结论

采用自主开发的无网格粒子方法求解器MLParticle-SJTU，将改进的MPS方法应用到液体晃荡问题中，探究水平隔板参数对减晃作用的影响。研究表明：随着开口宽度减小，隔板高度的增加，拍击压力峰值曲线整体上呈下降趋势；当隔板高度较小（ $h/d=0.2\sim 0.6$ ）时，随着隔板高度的增加，拍击压力峰值减小幅度较大；当隔板高度较大（ $h/d=0.6\sim 0.8$ ）

时, 拍击压力峰值随隔板高度变化较小。当开口宽度较大 ( $w/L=0.6\sim 0.8$ ) 时, 随着开口宽度减小, 拍击压力峰值减小幅度较大; 当开口宽度较小 ( $w/L=0.2\sim 0.5$ ) 时, 拍击压力峰值随隔板开口宽度变化较小。水平隔板对自由面附近处壁面的压力峰值可以减小至原有值的 5% 左右, 水平隔板具有很好的减晃效果。

### 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154, 51379125, 11272120), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103), 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 (HPC) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Yu-xin, Wan De-cheng. Numerical simulation of liquid sloshing in low-filling tank by MPS . Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(1): 100-107.
- 2 Zhang Yu-xin, Wan DC. Apply MPS method to simulate motion of floating body interacting with solitary wave . Proc 7th Int Workshop Ship Hydr, IWSH, 2011, 275-279.
- 3 Koshizuka, S, Obe, A, Oka, Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method . Int J Num Meth Fluids, 1998, 26: 751-769.
- 4 Tanaka Masayuki Masunaga, Takayuki. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by quasi-compressibility . Journal of Computational Physics, 2010, 229: 4279-4290.
- 5 Lee BH, Park JC, Kim MH, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads . Computer Meth App Mech Eng, 2011, 200: 1113-1125.

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

YANG Ya-qiang, ZHANG Yu-xin, Tang Zhen-yuan, WAN De-cheng \*

**Abstract:** In this paper we adopt the self-developed meshfree particle method solver MLParticle-SITU to apply the improved MPS method into liquid sloshing in baffled tanks. Firstly, the numerical model is validated against the experimental data for 2D liquid sloshing in rectangular tanks. Free surface elevation is then compared between baffled tanks and unbaffled tanks to study the damping effect of horizontal baffles qualitatively. In addition, through the numerical simulation performed by varying the installation height and the opening width of baffles, the impact pressure characteristics of the liquid sloshing are parametrically investigated.

**Key words:** Liquid sloshing; MLParticle-SJTU; Horizontal baffle; Impact pressure.