

MPS 方法模拟三维圆柱形液舱晃荡问题

田鑫, 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, *通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 基于改进 MPS 方法和 GPU 并行加速技术, 课题组自主开发了无网格粒子法求解器 MPSGPU-SJTU。本文将该求解器应用到三维圆柱形液舱的晃荡问题中, 研究了水平圆柱形液舱在单自由度横荡激励下, 激励频率对液舱晃荡现象的影响。首先模拟了 50% 充水率下, 激励频率为一阶固有频率时的晃荡现象, 通过对比试验结果, 验证了模拟的准确性。然后对不同激励频率下的晃荡现象进行了计算, 对比分析了不同激励频率下的液舱受力与流场情况, 分析了激励频率对于圆柱形液舱晃荡的影响。

关键词: 液舱晃荡; 圆柱形液舱; MPS 方法; MPSGPU-SJTU 求解器

Simulation of Sloshing in Three-dimensional Cylindrical Tank by MPS

Method

Xin Tian, Decheng Wan*

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

*Corresponding Author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstracts: Based on the improved MPS method and GPU parallel acceleration technology, our group developed the meshless particle method solver MPSGPU-SJTU. In this paper, the solver is applied to the sloshing problem in a three-dimensional cylindrical tank under horizontal excitation, and the influence of the excitation frequency on sloshing phenomenon is studied. At first, the sloshing phenomenon is simulated when the excitation frequency is first-order natural frequency at 50% water filling rate, and the accuracy of the simulation is verified by comparing the experimental results. Then, the sloshing phenomenon under different excitation frequencies is calculated. The force and flow field under different excitation frequencies are compared, and the influence of the excitation frequency on the sloshing in the cylindrical tank is analyzed.

Keywords: Liquid sloshing; Three-dimensional cylindrical tank; MPS method; MPSGPU-SJTU solver

0 引言

液舱晃荡是指在外激励作用下部分装载的舱室内液体所产生的波动及其与舱壁结构相互作用的现象。随着世界航运业的发展及对能源需求的不断提高, 大型原油货轮、液化石油气船及液化天然气船等载液货船相继被开发应用。这些容积巨大的船只装载着巨量的液体货物, 内部产生晃荡现象往往会对船只产生巨大的危害。因此, 晃荡现象成为了船舶与海洋工程研究中的热点问题。

晃荡过程中的流动现象十分复杂, 常带有自由面的翻卷、破碎、飞溅现象, 这对于传统网格方法模拟是一个很大的挑战。无网格粒子法由于使用无固定拓扑关系、能够自由移动的粒子来表达流场, 在处理大变形的流动问题中具有很大优势。MPS 作为

重要的无网格方法，在晃荡问题的研究中得到了广泛的应用。潘徐杰等^[1]应用 MPS 法模拟了半满液舱的横摇晃荡运动，提出了一种防止粒子穿透边界现象的方法。张雨新等^[2]基于 MPS 法对低装载共振频率下的液舱晃荡问题进行了数值模拟。Hu 等^[3]采用 MPS 方法对横摇激励下不同装载深度的二维矩形液舱晃荡现象进行了分析。Chikazawa 等^[4]使用 MPS 方法研究了弹性液舱的晃荡运动，发现由于舱壁弹性效应，导致晃荡运动响应峰值向低频迁移的现象。Lee 等^[5]利用 MPS 方法分析了结构大变形弹性液舱的流固耦合问题。张友林等^[6]研究了带隔板液舱晃荡的流固耦合问题，其中流场采用 MPS 方法求解，结构基于有限元方法。

本文基于课题组自主研发无网格粒子法求解器 MPSGPU-SJTU，对于横荡激励下圆柱形液舱中的晃荡现象进行了研究。首先模拟了 50% 充水率下，激励频率为一阶固有频率时的晃荡现象，通过对比试验结果，验证了模拟的准确性。然后对不同激励频率下的晃荡现象进行了计算，对比分析了不同激励频率下的液舱受力与流场情况，分析了激励频率对于圆柱形液舱晃荡的影响。

1 MPS 方法

1.1 控制方程

在 MPS 方法中，控制方程包括连续性方程和 N-S 方程，对不可压缩流体，其形式如下：

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

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

其中： ρ 为流体密度， P 为压力， \mathbf{V} 为速度向量， \mathbf{f} 为质量力，一般为重力， ν 是流体的运动粘性系数， t 为时间。

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，MPSGPU-SJTU 求解器采用的核函数为：

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

其中， r 表示两个粒子之间的距离， r_ϵ 是粒子作用域的半径。

1.3 梯度模型

MPSGPU-SJTU 求解器采用的动量守恒的梯度模型为：

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

式中： D 为空间维数， n^0 为初始粒子数密度。

1.4 Laplacian 模型

在 MPS 方法中, Laplacian 模型如下式所示:

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

式中, D 为空间维数, n^0 为粒子的初始粒子数密度。

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

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

MPSGPU-SJTU 求解器采用的压力 Poisson 方程是 Tanaka^[7] 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, 后来被 Lee^[8] 写成了更为合理的表达形式:

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

式中: k 是时间步, λ 是一系数, 其值为 0—1 之间的数。

1.6 自由面条件

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中, 首先定义矢量

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (8)$$

矢量 \mathbf{F} 表示粒子数密度的不确定度。计算 \mathbf{F} 的模 $|\mathbf{F}|$, 当粒子满足 $\langle |\mathbf{F}| \rangle_i > \alpha |\mathbf{F}|^0$ 时即被判定为自由面粒子, 其中 $\alpha=0.9$ 为一参数。本文取 $\alpha=0.9$ 。

2 模型验证

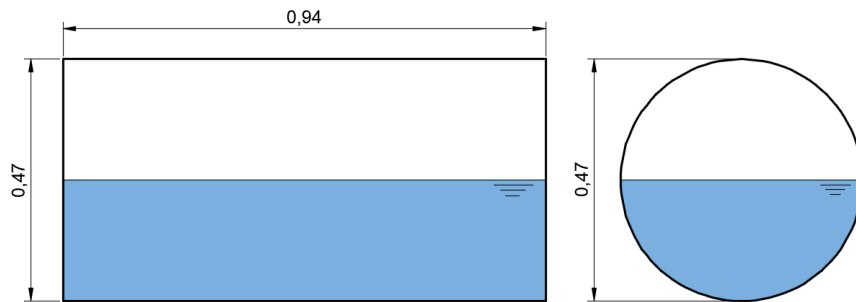


图 1 几何模型

本文构造的数值模型参考 Kobayashi^[9]的模型建立，其物理模型如图 1 所示，液舱为圆柱体，圆柱底面直径为 0.47 m，长 0.94 m，载液率为 50%。

液舱横荡激励的运动方程如下：

$$x = A_x \sin(2\pi f \cdot t) \tag{9}$$

式中， A_x 为激励幅值，其大小为 0.015 m，激励频率 f ，单位为 Hz。

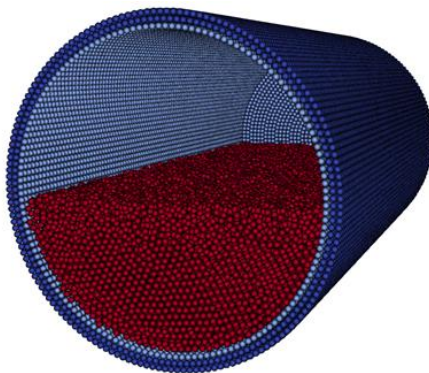


图 2 数值模型

构造的数值模型如图 2 所示。流体粒子数为 79258，总粒子数 137380，粒子间距为 0.01 m。水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，运动黏性系数 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ，时间步长 $dt = 0.0005 \text{ s}$ 。

本节对 $f=1.2 \text{ Hz}$ ，横荡幅值 $dt = 0.0005 \text{ s}$ 的晃荡进行了模拟。

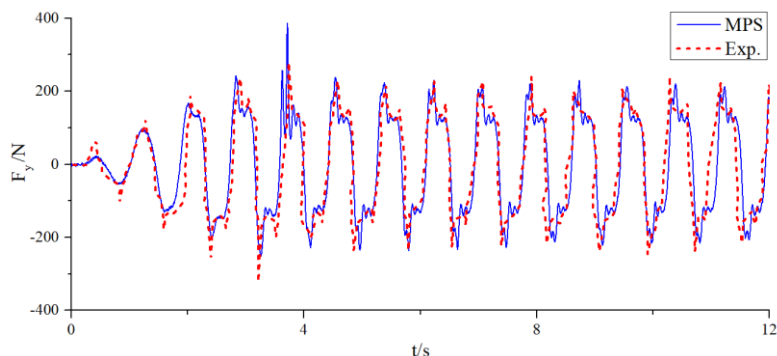
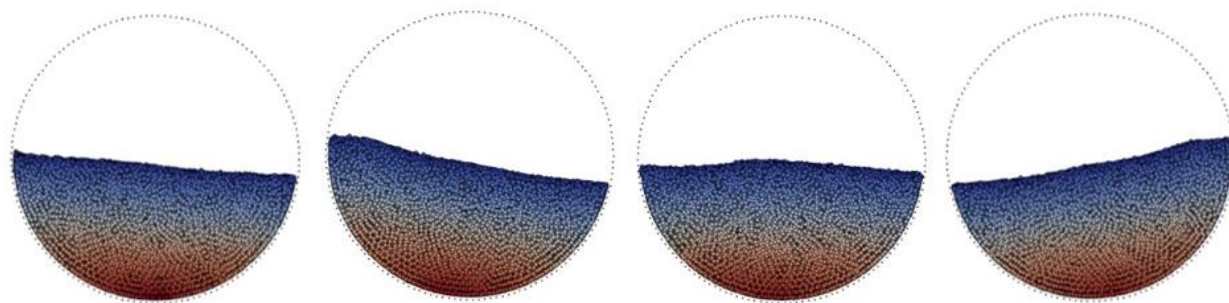
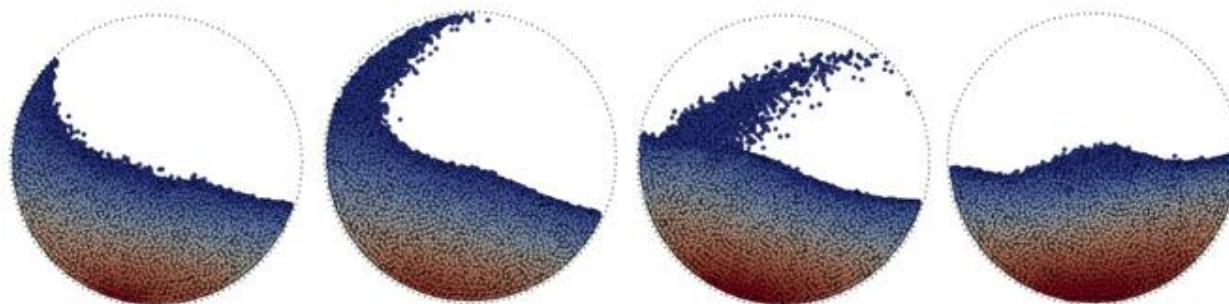
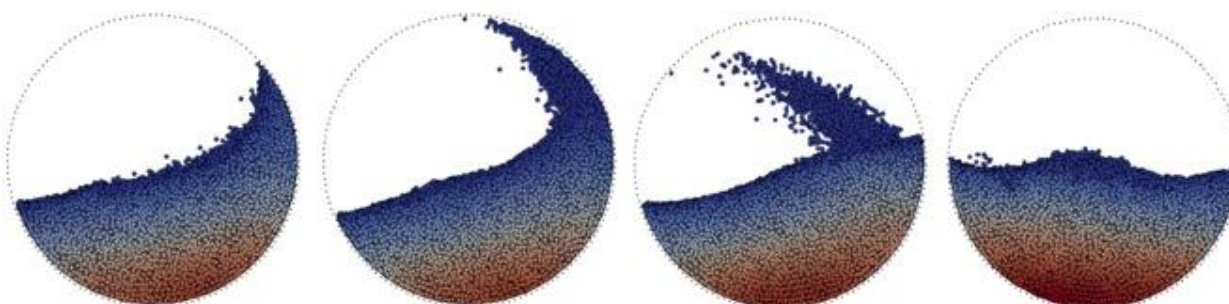
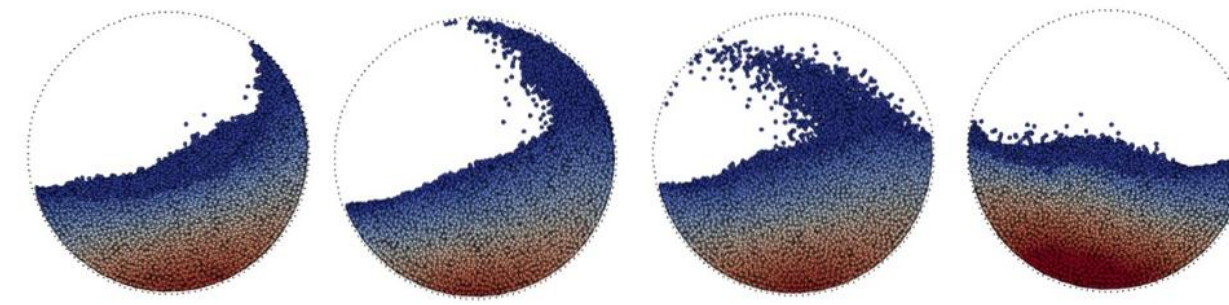
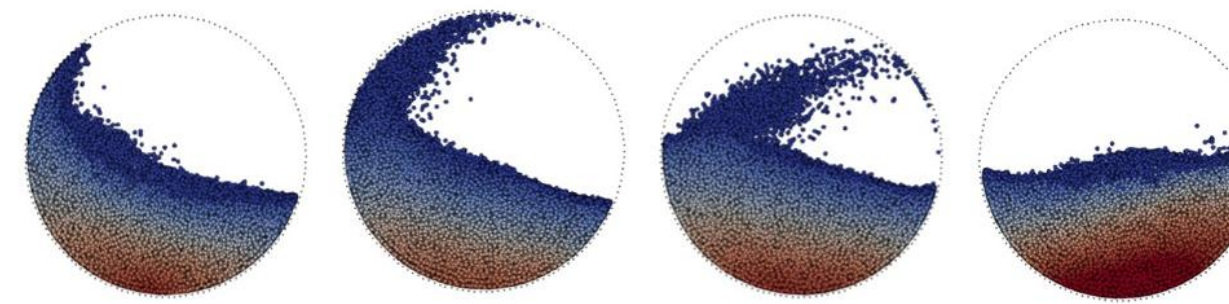


图 3 液舱所受 y 方向合力的时历曲线

图3给出了横荡激励作用下，试验与模拟中液舱所受y方向合力的时历曲线的对比。从图中可以看出，数值模拟给出的合力曲线能够较好地与试验结果相吻合。两者的变化趋势、周期峰值都基本一致。因此求解器MPSGPU-SJTU能够很好地预测液舱所受合力。

3 激励频率对晃荡的影响

本节分别对激励频率 $f=1.0 \text{ Hz}$ ， 1.1 Hz ， 1.2 Hz ， 1.3 Hz ， 1.4 Hz ，幅值 $A_x = 0.015 \text{ m}$ 的横荡激励进行了数值模拟。

(a) $f=1.0$ Hz(b) $f=1.1$ Hz(c) $f=1.2$ Hz

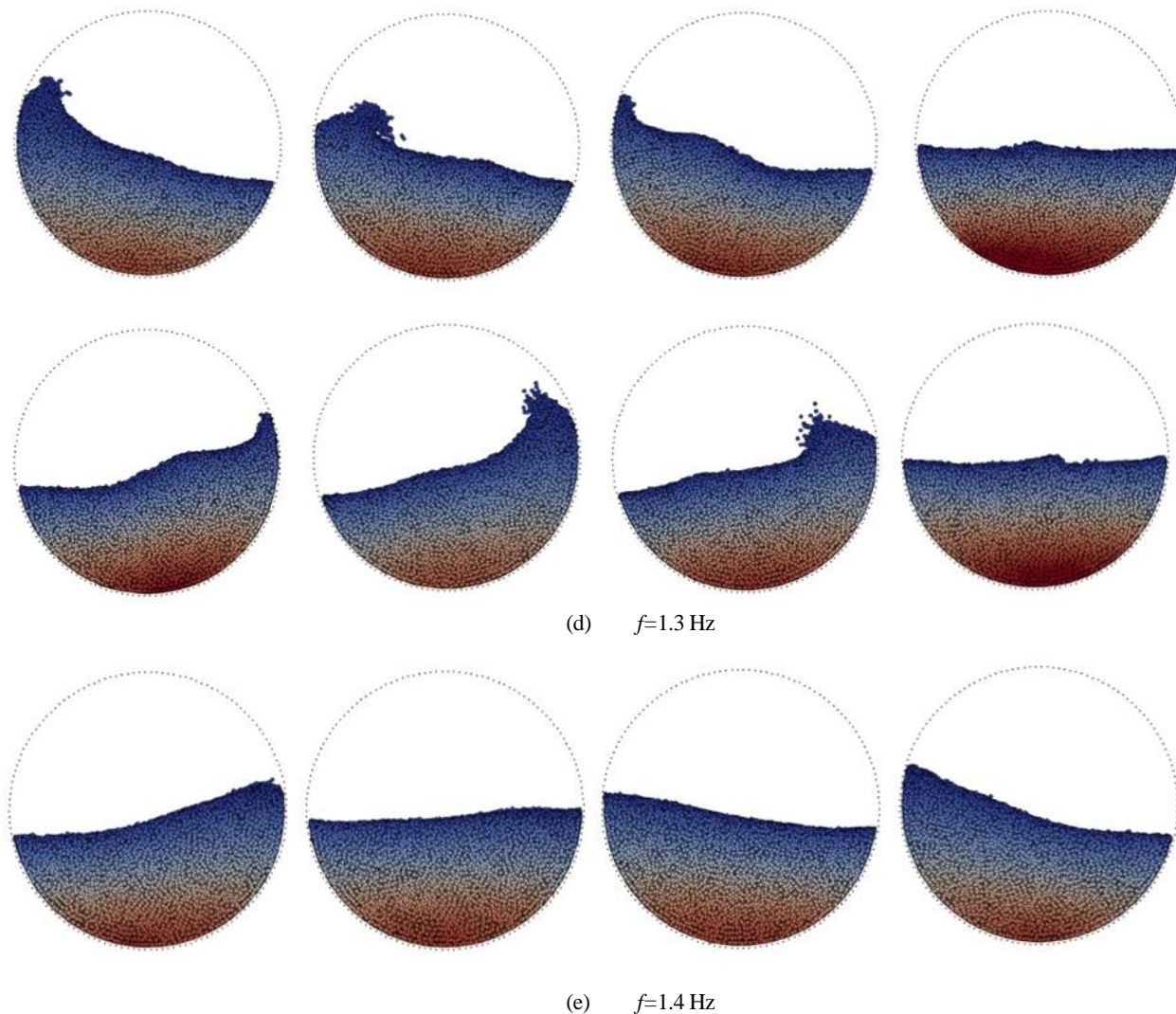


图4 不同激励频率下的流场

图4给出了不同激励频率下晃荡流体的运动情况。从图中可以看出，激励频率对晃荡流体的流动特征具有显著影响。流场随频率变化的过程可分为以下四个阶段：

(1) 如图4(a)所示，当激励频率 $f=1.0\text{ Hz}$ 时，晃荡幅度很小，自由面非常光滑，流体运动比较平稳。

(2) 随着激励频率增加，晃荡波的波陡迅速增大，现象十分剧烈。当 $f=1.1\text{ Hz}$ 与 1.2 Hz 时(图4(b)(c))，出现了冲顶现象，晃荡波沿壁面爬升至舱顶后下落，形成一股射流，猛烈拍击在自由面上，发生波面的破碎和液体的飞溅。整个晃荡过程非常剧烈，并伴随着一些复杂的流动现象，具有较强的非线性。其中激励频率为 1.2 Hz 时，晃荡波运动更加剧烈，沿舱壁爬升高度更高，并且流体动能更大，一部分液体飞溅到了另一侧舱壁。

(3) 激励频率继续增大时，晃荡波的波高和波陡迅速减小。当 $f=1.3\text{ Hz}$ 时(图4(d))，晃荡仍然较为剧烈，但晃荡波的动能已不足以支持其爬升至舱顶，波浪砰击壁面后，爬升很小的高度后波面翻卷冲击自由面，发生轻微的破波现象。在这一过程中，液体的运动幅度随着激励频率的增加而减小。

(4) 当 $f=1.4\text{ Hz}$ 时，液舱运动较快，但晃荡波波幅继续减小，流动变得平缓，不再出现波浪的翻卷破碎现象。

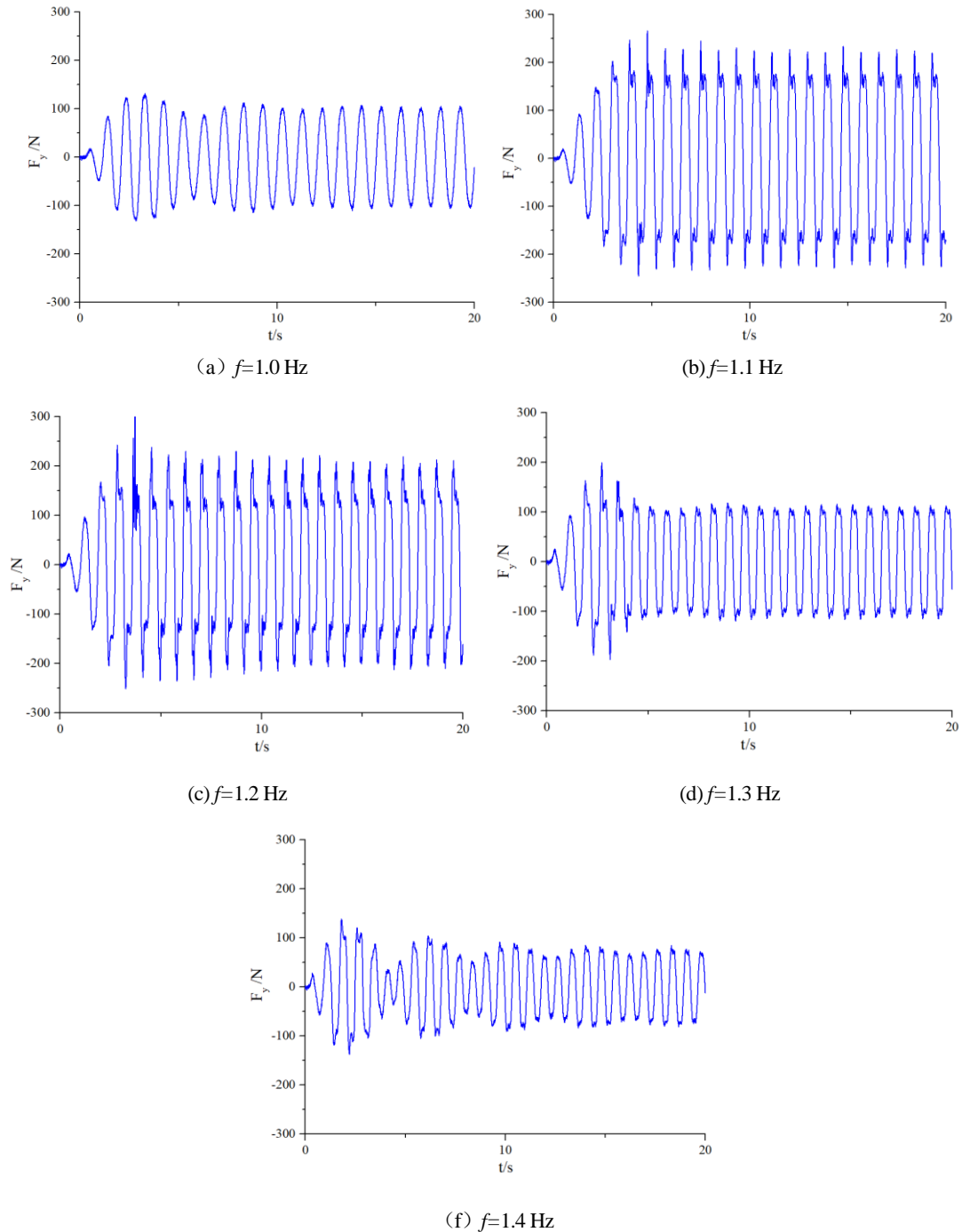


图5 不同激励频率下的液舱受力

图5给出了不同激励频率下的液舱受力时历曲线。从整体上看，呈现与激励频率一致的周期性。从细节上可以看到，液舱受力曲线的形状和峰值也随着激励频率发生变化。当激励频率 $f=1.0\text{ Hz}$ 时，受力曲线为单峰特征（图5(a)），受力的峰值相对较小，其大小约为 100 N ，此时晃动现象较为平稳，没有发生拍击现象。当激励频率增大到 1.1 Hz 或 1.2 Hz 时，晃动产生共振现象，受力曲线出现了双峰现象。其中第一个波峰达到了 250 N 甚至 300 N 以上，这是流体直接冲击壁面形成，而第二个受力峰值大小约为 100 N 到 150 N ，是由爬升的流体回落，对底部流体产生拍击作用所致。随着激励频率继续增大，受力峰值开始下降，当 $f=1.3$

Hz 时, 受力曲线仍然存在双峰特征, 但两个峰值已经非常接近, 此时流场仍存在明显的非线性流动。当激励频率增大到 1.4Hz 时, 只在一些周期内出现了第二个受力峰值, 这是由于在舱壁附近微弱的破波现象所致。

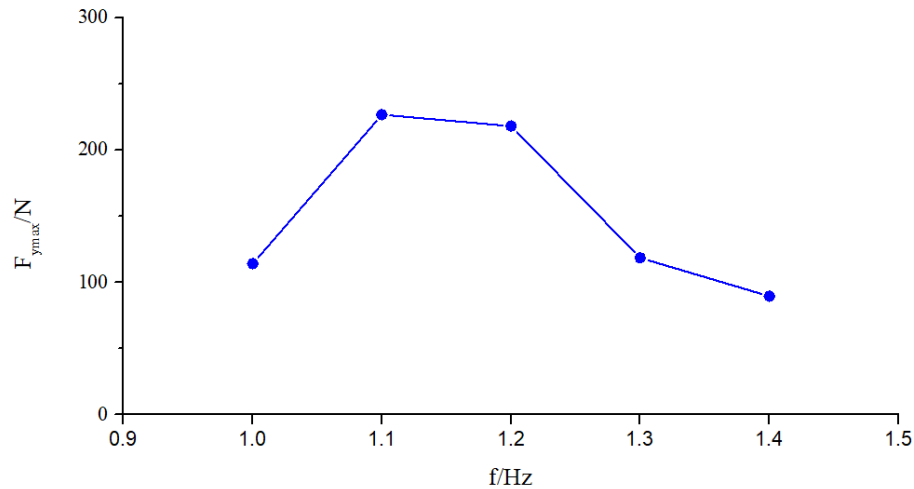


图6 液舱受力峰值随激励频率的变化

图6给出了受力峰值随激励频率的变化规律, 从图中可以看出, 随着激励频率增加, 受力峰值先增大后减小。

当 $f < 1.1$ Hz 时, 受力峰值与激励频率呈正相关。当 $f = 1.0$ Hz 时, 流体的运动幅度较小, 晃动较为缓和, 液舱受力幅值在 100 N 左右。随着激励频率的增大, 受力峰值增大, 在 1.1 Hz~1.2 Hz 达到峰值此时为 220 N 左右, 晃动最为剧烈, 说明此时处于共振频率。

当 $f > 1.2$ Hz 时, 受力峰值与激励频率呈负相关。液舱所受 y 方向合力的峰值随激励频率的增大而减小, 晃动幅度减小。当 $f = 1.3$ Hz 时, 受力的幅值降至 120 N 左右, $f = 1.4$ Hz 时受力幅值降到了 90 N。

4 结论

本文用课题组自主开发的 MPSGPU-SJTU 求解器, 研究了圆柱形液舱横荡运动中激励频率对于液舱受力的影响。研究表明: 求解器能够较好地模拟圆柱形液舱内的液体晃动现象, 对晃动现象中的液体飞溅, 波浪翻卷破碎等现象能很好地捕捉, 并且可以较为准确地计算液舱受力。此外, 当激励频率在固有频率附近时, 晃动最为激烈, 液舱受力幅值最大, 随着激励频率远离固有频率, 晃动逐渐减弱。

致谢

本文工作国家自然科学基金项目(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), 以及工信部数值水池创新专项VIV/VIM项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 潘徐杰, 张怀新. 用移动粒子半隐式法模拟液舱横摇晃荡现象[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11):1904-1907.
- [2] 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, 2012, 27(1):100-107.
- [3] Hu C, Sueyoshi M, Miyake R, et al. A Validation Study of Applying the CIP Method and the MPS Method to 2-D Tank Sloshing[C]. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009:198-204.
- [4] Chikazawa Y, Koshizuka S, Oka Y. Numerical Analysis of Sloshing with Large Deformation of Elastic Walls and Free Surfaces Using MPS method[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B, 1999, 65(637):2954-2960.
- [5] Lee C J K, Noguchi H, Koshizuka S. Fluid-shell structure interaction analysis by coupled particle and finite element method[J]. Computers & Structures, 2007, 85: 688-697.
- [6] 张友林, 陈翔, 万德成. 基于 MPS-FEM 耦合方法对比研究刚性与弹性挡板对液舱晃荡的抑制作用[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(12):1359-1377.
- [7] 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.
- [8] 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 & Engineering, 2011, 200(9):1113-1125.
- [9] Kabayashi N, Mieda T, Shibata H. A study of the Liquid Slosh response in horizontal cylindrical tanks[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1986, 111(1):32-38.

作者简介:

田鑫, 男, 1992 年 7 月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 硕士研究生, 主要从事无网格粒子法 MPS 方向研究;

通讯地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学闵行校区木兰船建大楼 A608, 邮编: 200240, 电话: 15921231330, Email:tianx16@163.com

万德成, 男, 1967 年 9 月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 长江学者特聘教授, 上海交通大学特聘教授, 博士生导师, 主要从事计算船舶水动力学、无网格粒子法、船型优化、浮式风机、流固耦合、涡激振动/运动等方面的研究。

通讯地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学木兰船建大楼, 邮编: 200240, 电话: 021-34205697
Email: dcwan@sjtu.edu.cn