

引用格式: 田鑫, 万德成. MPS方法模拟三维圆柱形液舱晃荡问题[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 116-121.

Tian X, Wan D C. Simulation of sloshing in three-dimensional cylindrical tank by MPS method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(3): 116-121.

# MPS方法模拟三维圆柱形液舱晃荡问题



扫码阅读全文

田鑫<sup>1,2,3</sup>, 万德成<sup>\*1,2,3</sup>

1 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

2 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

3 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

**摘要:** [目的] 为了研究在单自由度横荡激励下, 激励频率对液舱晃荡现象的影响, 将移动粒子半隐式(MPS)方法应用于水平圆柱形液舱晃荡问题。[方法] 基于改进的MPS方法和GPU并行加速技术, 课题组将自主开发的无网格粒子法求解器MPSGPU-SJTU应用到三维圆柱形液舱晃荡问题中。首先, 进行模型验证, 对激励频率为一阶固有频率时的晃荡现象进行模拟。然后, 在此基础上进行不同激励频率下的晃荡现象计算, 并将激励频率在1.2 Hz的模拟结果与实验结果进行对比。最后, 在此基础上模拟不同激励频率下液舱的横荡运动。[结果] 结果显示, MPSGPU-SJTU求解器能够较好地模拟圆柱形液舱内的液体晃荡现象, 也能较为精确地计算液舱受力; 当激励频率在固有频率附近时, 晃荡现象十分剧烈, 当远离固有频率时, 晃荡会迅速变弱, 液舱受力也随之迅速减小。[结论] 所得模拟结果能够为圆柱形液舱的设计应用提供有效参考。

**关键词:** 液舱晃荡; 圆柱形液舱; 移动粒子半隐式方法; MPSGPU-SJTU求解器

中图分类号: U663.85

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01282

## Simulation of sloshing in three-dimensional cylindrical tank by MPS method

Tian Xin<sup>1,2,3</sup>, Wan Decheng<sup>\*1,2,3</sup>

1 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

**Abstract:** [Objectives] This paper applies Moving Particle Semi-implicit (MPS) method to solve the sloshing problem of horizontal cylindrical tank, so as to study the influence of excitation frequency on sloshing phenomenon under single freedom degree sloshing excitation. [Methods] Based on the improved MPS method and GPU parallel acceleration technology, our group developed the meshless particle method solver MPSGPU-SJTU and applied the solver to the sloshing problem in a three-dimensional cylindrical tank. Firstly, the model is verified and the sloshing phenomenon is simulated when the excitation frequency is the first order natural frequency. Based on this, the sloshing phenomenon under different excitation frequencies is calculated. The simulated excitation frequency of 1.2 Hz is compared to the test results. Finally, the sloshing movement of cylindrical tank is simulated under different excitation frequencies. [Results] The results show that MPSGPU-SJTU solver can excellently simulate the liquid sloshing phenomenon in the cylindrical tank, and can also accurately calculate the force on the tank. When the excitation frequency is near the natural frequency, the sloshing phenomenon is very severe. When the excitation frequency is far from the natural frequency, the sloshing will weaken rapidly and the force on the tank will decrease rapidly. [Conclusions] The simulation results can provide valuable reference for the design and application of cylindrical tanks.

**Key words:** tank sloshing; cylindrical liquid tank; Moving Particle Semi-implicit (MPS) method; MPSGPU-SJTU solver

收稿日期: 2018-05-06

网络首发时间: 2019-3-21 14:25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879159, 51490675, 11432009, 51579145); 长江学者奖励计划资助项目(T2014099); 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划资助项目(2013022); 上海市优秀学术带头人计划资助项目(17XD1402300)

作者简介: 田鑫, 男, 1992年生, 硕士生。研究方向: MPS无网格粒子法。E-mail: tianx16@163.com

万德成, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 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。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

\*通信作者: 万德成

## 0 引言

液舱晃荡是指在外激励作用下,舱内装载的部分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以及对能源需求的不断提高,相继开发应用了大型原油货轮、液化石油气船以及液化天然气船等载液货船。这些容积巨大的船装载着巨量的液体货物,其内部产生晃荡现象往往会对船舶产生巨大危害,因此晃荡现象成为船舶与海洋工程研究的热点问题。

船舶液舱的形状多种多样,以往对液舱晃荡的研究主要集中在矩形液舱及薄膜型液舱上,例如,张书谊和段文洋<sup>[1]</sup>就曾采用CFD软件Fluent对二维矩形液舱不同舱内水深、不同激振频率时的横荡进行过数值计算和对比分析。对于其他形状液舱的晃荡,国内外的研究则较少。Kobayashi等<sup>[2]</sup>通过实验方法,对水平圆柱形液舱的晃荡进行了研究,并对载液率、幅值、液舱长度等因素进行了分析探讨。Faltinsen等<sup>[3]</sup>对球形液舱中的液舱晃荡现象予以了研究,并对其中的线性晃荡进行了理论分析。Gavrilyuk等<sup>[4]</sup>对直立环形圆柱的晃荡进行了理论及实验研究,分析了环形挡板的减晃作用。刘戈等<sup>[5-6]</sup>通过实验,研究了独立C型液舱在纵摇激励下的晃荡,讨论并分析了其晃荡时自由液面的波形特征,并对该型液舱的频域共振特性进行了研究,发现0.5倍理论固有频率为晃荡起始频率,终止频率会随着液位的升高而下降。

本文将基于课题组自主研发的无网格粒子法求解器MPSGPU-SJTU,对横荡激励下圆柱形液舱中的晃荡现象进行研究。首先,模拟50%充水率下,激励频率为一阶固有频率时的晃荡现象,通过对比实验结果,验证模拟的准确性。然后,对不同激励频率下的晃荡现象进行计算,对比不同激励频率下的液舱受力与流场情况,以分析激励频率对圆柱形液舱晃荡的影响。

## 1 数值方法

MPSGPU-SJTU求解器是在本课题组之前开发的CPU并行求解器MLParticle-SJTU<sup>[7-9]</sup>的基础上,引入GPU(Graphics Process Unit)加速技术开发的新一代求解器,其数值方法为经张雨新<sup>[10]</sup>改进的移动粒子半隐式(Moving Particle Semi-implicit, MPS)方法,GPU加速基于CUDA平台实现。

### 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,对于不可压缩流体,其形式如下:

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

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F}_m \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $P$ 为压力; $\mathbf{V}$ 为速度向量; $\mathbf{F}_m$ 为质量力,一般为重力; $\nu$ 为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,两个粒子间的相互影响是通过核函数来实现的,其与传统的核函数不同。MPSGPU-SJTU求解器采用的核函数为

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

式中: $r$ 为两个粒子间的距离; $r_\epsilon$ 为粒子作用域的半径。

### 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; $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ 分别为粒子 $i$ 及其邻居粒子 $j$ 的坐标; $P_i, P_j$ 分别为粒子 $i$ 和 $j$ 的压力; $n^0$ 为初始粒子数密度。

### 1.4 拉普拉斯算子模型

在MPS方法中,拉普拉斯算子模型如下式所示:

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

式中, $\phi_i$ 和 $\phi_j$ 为物理量 $\phi$ 在 $i, j$ 处的值。

其中,

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

系数 $\lambda$ 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 压力泊松方程

MPSGPU-SJTU求解器采用的压力泊松方程是由Tanaka和Masunaga<sup>[11]</sup>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等<sup>[12]</sup>写成了更为合理的表达形式:

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

式中： $\nabla \cdot V_i^*$ 为粒子*i*处的速度散度，*k*为时间步；系数λ的取值为0~1。

### 1.6 自由面判断方法

在MPS方法中,对自由液面的准确判断对计算的精度和稳定性来说十分重要。在本文采用的自由面判断方法中,首先定义矢量

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

式中，*F*为粒子数密度的不确定度。计算*F*的模|*F*|,当粒子满足 $\langle |F| \rangle_i > \alpha |F|^0$ 时,即被判定为自由面粒子,其中α=0.9,为一参数。

### 1.7 GPU加速技术

GPU具有强大的计算能力,在并行计算中,应用GPU能获得显著的效果。NVIDIA公司推出的CUDA技术为GPU编程提供了方便的平台,MPSGPU-SJTU求解器即是基于此平台而开发。本研究对MPS方法的计算流程进行了合理的设计,实现了MPS方法主要计算过程的GPU加速。计算流程如图1所示。

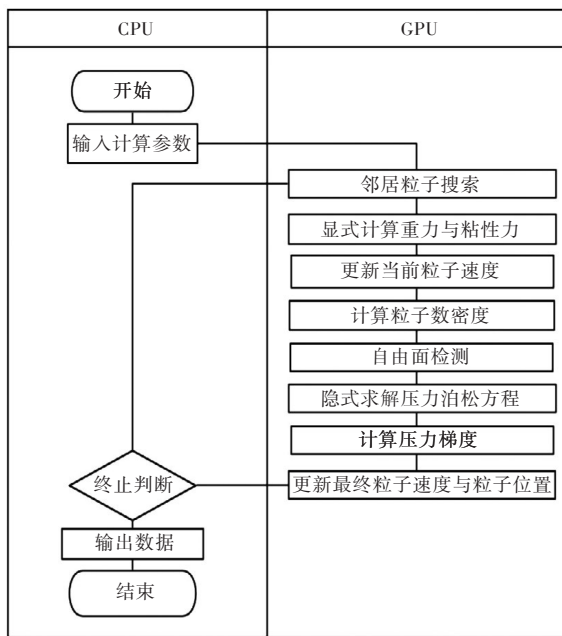


图1 MPSGPU-SJTU求解器计算流程图  
Fig.1 The flow chart of MPSGPU-SJTU solver

## 2 模型验证

本文构造的数值模型是参考Kobayashi等<sup>[2]</sup>的模型而建立,其物理模型如图2所示。液舱为圆柱体,圆柱底面直径0.47 m,长0.94 m,载液率为50%。

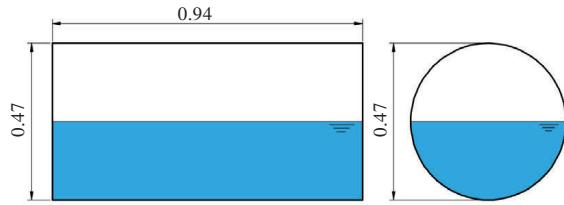


图2 几何模型  
Fig.2 Geometric model

液舱横荡激励的运动方程为

$$x = A_x \sin(2\pi f \cdot t) \quad (9)$$

式中：*A<sub>x</sub>*为激励幅值，*A<sub>x</sub>*=0.015 m；*f*为激励频率，Hz。

构造的数值模型如图3所示。流体粒子数为79 258,总粒子数为137 380,粒子间距0.01 m。水的密度ρ=1 000 kg/m<sup>3</sup>,运动粘性系数ν=10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s,重力加速度g=9.81 m/s<sup>2</sup>,时间步长dt=0.000 5 s。

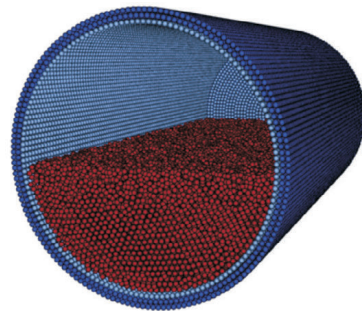


图3 数值模型  
Fig.3 Numerical model

本节对*f*=1.2 Hz、横荡激励幅值*A<sub>x</sub>*=0.015 m的晃荡进行了模拟。图4给出了横荡激励作用下,实验与模拟中液舱所受水平半径方向合力*F<sub>y</sub>*的时历曲线对比。从图中可以看出,数值模拟给出的合力曲线与实验结果吻合较好,两者的变化趋势、周期峰值基本一致。可见,采用求解器MPSGPU-SJTU能够很好地预测液舱所受合力。

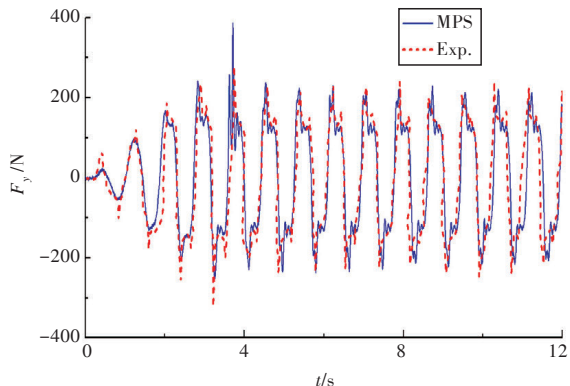


图4 液舱所受水平半径方向合力的时历曲线  
Fig.4 Time history curves of horizontal radial direction resultant force applied to tank

### 3 激励频率对晃荡的影响

本节分别对激励频率 $f=1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$  Hz, 幅值 $A_x=0.015$  m的横荡激励进行了数值模拟。图5给出了不同激励频率下晃荡流体的运动情况。

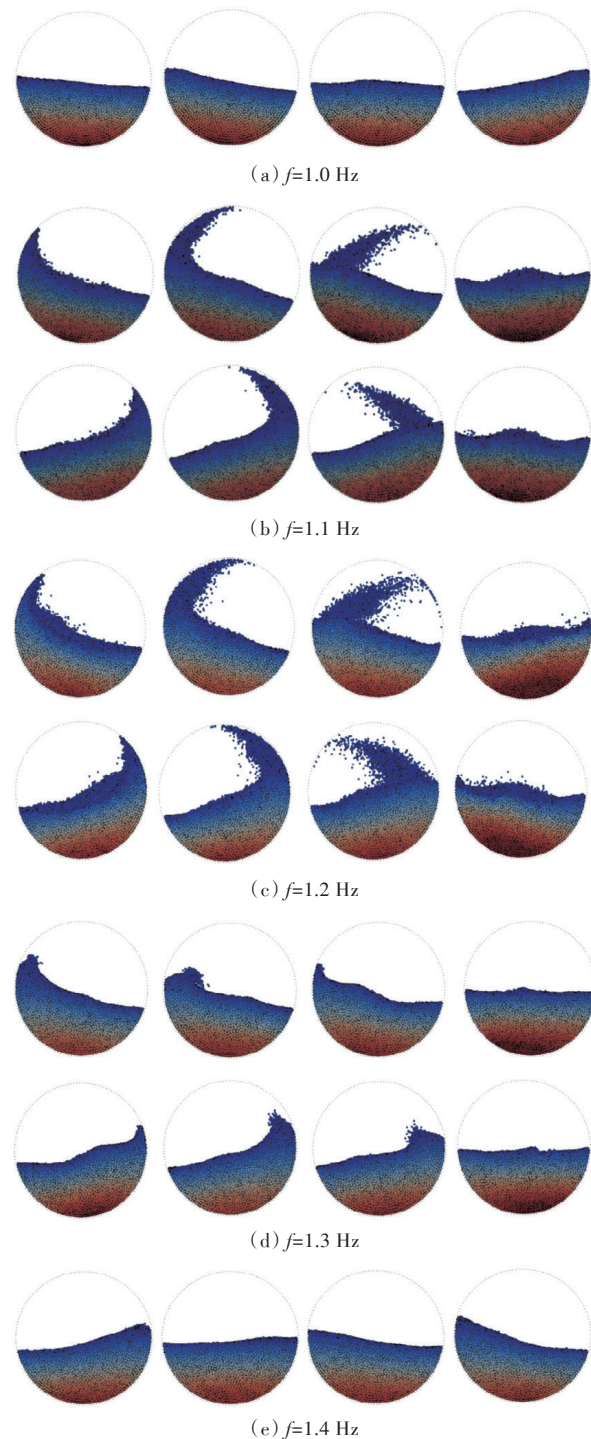


图5 不同激励频率下的流场  
Fig.5 Flow field at different frequencies

由图中可以看出,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4个阶段:

1) 如图5(a)所示,当激励频率 $f=1.0$  Hz时,晃

荡的幅度很小,自由面非常光滑,流体运动比较平稳。

2) 随着激励频率的增加,晃荡波的波陡迅速增大,反应十分剧烈。当 $f=1.1$ 和 $1.2$  Hz时(图5(b)和图5(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,从而发生了波面破碎和液体飞溅现象。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。其中当 $f=1.2$  Hz时晃荡波的运动更加剧烈,其沿舱壁爬升的高度更高,并且流体动能更大,一部分液体甚至飞溅到了另一侧舱壁。

3) 随着激励频率的继续增大,晃荡波的波高和波陡迅速减小。当 $f=1.3$  Hz时(图5(d)),晃荡虽然仍较剧烈,但晃荡波的动能已不足以支撑其爬升至舱顶。波浪在砰击壁面并爬升很小的高度后,波面翻卷冲击自由面,发生了轻微的破波现象。在这一过程中,液体的运动幅度是随着激励频率的增加而减小的。

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

图6所示为不同激励频率下的液舱受力时历曲线。从整体上看,其呈现出与激励频率一致的周期性。但从细节上可以看到,液舱受力曲线的形状和峰值也随着不同激励频率而发生变化。当激励频率 $f=1.0$  Hz时,受力曲线为单峰特征(图6(a)),受力的峰值相对较小,其大小约为 $100$  N,此时晃荡现象较为平稳,没有发生拍击现象。当激励频率增大至 $1.1$ 或 $1.2$  Hz时,晃荡产生共振现象,受力曲线出现了双峰现象。其中第1个波峰达到了 $250$  N甚至是 $300$  N以上,这是流体直接冲击壁面形成;而第2个受力峰值大小约为 $100\sim 150$  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2个峰值已经非常接近,此时,流场仍然存在明显的非线性流动。当激励频率增大至 $1.4$  Hz时,只在一些周期内出现了第2个受力峰值,这是由舱壁附近微弱的破波现象所致。

图7给出了受力峰值随激励频率的变化规律。从图中可以看出,随着激励频率的增加,受力峰值是先增大后减小。

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,晃荡较为平缓,液舱的受力幅值在 $100$  N左右。随着激励频率的增大,受力峰值增大,在 $1.1\sim 1.2$  Hz时达

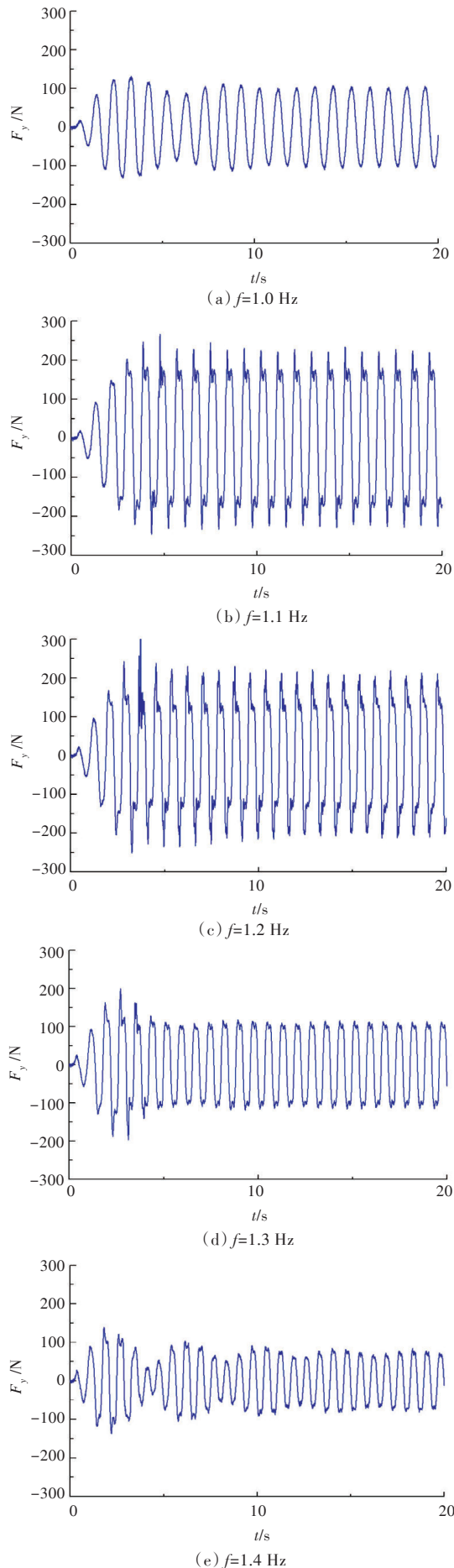


图6 不同激励频率下的液舱受力

Fig.6 Forces acting on tanks at different excitation frequencies

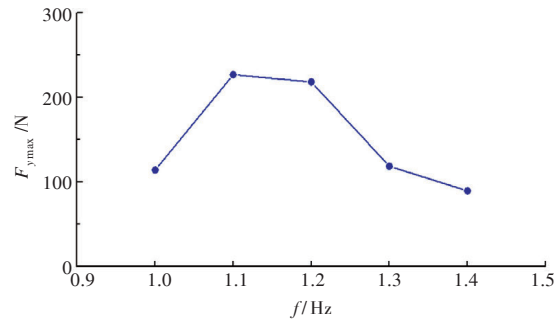


图7 液舱受力峰值随激励频率的变化

Fig.7 Variation of peak force in tank with excitation frequency

到峰值,约为220 N,此时晃动最剧烈,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。随着激励频率的增大,液舱所受水平半径方向合力的峰值减小,晃动幅度减小。当 $f = 1.3$  Hz时,受力的幅值降至120 N左右。当 $f = 1.4$  Hz时,受力幅值降至90 N。

## 4 结论

本文采用课题组自主开发的MPSGPU-SJTU求解器,研究了圆柱形液舱在横荡运动中激励频率对液舱受力的影响,主要得到以下结论:

1) MPSGPU-SJTU求解器能够较好地模拟圆柱形液舱内的液体晃动现象,能很好地捕捉晃动现象中的液体飞溅和波浪翻卷破碎等现象,并且也可以较为准确地计算液舱受力。

2) 不同激励频率下,晃动的波形区别很大。当 $f = 1.1$ 与1.2 Hz时,有冲顶现象出现;当 $f = 1.3$  Hz时,有轻微的破波现象出现;当 $f = 1.1$ 和1.4 Hz时,流动较平缓。

3) 当激励频率在固有频率附近时,晃动最为激烈,液舱的受力幅值最大,但随着激励频率远离固有频率,晃动逐渐减弱。

4) 在船舶运营中,要避免在液舱固有频率附近产生激励振动。

本文研究了激励频率对圆柱形液舱晃动的影响,给出了液舱整体受力的结果,可为圆柱形液舱的设计应用提供有效依据。在实际液舱晃动问题中,由于很多破坏是由于局部应力过大所造成,所以在今后的研究中,会计算液舱的局部压力,对液舱晃动中的现象与载荷进行更为细致的研究。

## 参考文献:

- [1] 张书谊,段文洋. 矩形液舱横荡流体载荷的Fluent数值模拟[J]. 中国舰船研究,2011,6(5):73-77.  
Zhang S Y, Duan W Y. Numerical simulation of sloshing loads on rectangular tank based on Fluent[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(5): 73-77 (in

- Chinese).
- [2] Kabayashi N, Mieda T, Shibata H, et al. A study of the liquid slosh response in horizontal cylindrical tanks [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1989, 111(1):32-38.
- [3] Faltinsen O M, Timokha A N. Analytically approximate natural sloshing modes for a spherical tank shape [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 703:391-401.
- [4] Gavriluk I, Lukovsky I, Trotsenko Y, et al. Sloshing in a vertical circular cylindrical tank with an annular baffle. Part 1: Linear fundamental solutions [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2006, 54(1):71-88.
- [5] 刘戈, 林焰, 管官, 等. LNG独立C型液舱晃荡特性试验研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2017, 57(5):467-475.
- Liu G, Lin Y, Guan G, et al. Experimental study of sloshing pattern on LNG independent C type tank [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(5):467-475 (in Chinese).
- [6] 刘戈, 林焰, 管官, 等. LNG独立C型液舱晃荡的频域共振特性试验研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(12):2392-2398.
- Liu G, Lin Y, Guan G, et al. Experimental study on frequency domain resonant characteristic of sloshing in LNG independent type C tank [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(12):2392-2398 (in Chinese).
- [7] Zhang Y X, Wan D C. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(4):577-585.
- [8] 张雨新, 万德成, 日野孝则. MPS方法数值模拟液舱晃荡问题 [J]. *海洋工程*, 2014, 32(4):24-32.
- Zhang Y X, Wan D C, Hino T. Application of MPS method in liquid sloshing [J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4):24-32 (in Chinese).
- [9] 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 C, Zhang Y X, Wan D C. Comparative study of SPH and MPS methods for numerical simulations of dam breaking problems [J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 2011, 26(6):736-746 (in Chinese).
- [10] 张雨新. 改进的MPS方法及其三维并行计算研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- Zhang Y X. Improved MPS method and its 3D parallel computation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (in Chinese).
- [11] 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.
- [12] 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(9/10/11/12):1113-1125.



### (上接第98页)

- stern flaps for improved powering—U.S. navy experience [J]. *SNAME Transactions*, 1999(107):67-99.
- [10] 周熊. 舰船尾板的节能效果 [J]. *船舶节能*, 1995(4):48-51.
- Zhou X. Energy saving effect of the stern flap on warship [J]. *Marine Energy Saving*, 1995(4):48-51 (in Chinese).
- [11] 张大友, 张艳. 尾板对高速双体船阻力性能影响的研究 [J]. *船海工程*, 2016(6):20-23.
- Zhang D Y, Zhang Y. On the effect of stern plate upon resistance performance of the high-speed catamaran [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2016(6):20-23 (in Chinese).
- [12] 张志荣, 李百齐, 赵峰. 船舶粘性流动计算中湍流模式应用的比较 [J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2004, 19(5):637-642.
- Zhang Z R, Li B Q, Zhao F. The comparison of turbulence models applied to viscous ship flow computation [J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 2004, 19(5):637-642 (in Chinese).
- [13] 徐杰, 俞汲, 黄少锋, 等. 散货船阻力预报中湍流模型的应用 [J]. *中国造船*, 2011, 52(增刊1):53-58.
- Xu J, Yu J, Huang S F, et al. Application of turbulence models to prediction of powering performance for ship [J]. *Shipbuilding of China*, 2011, 52(Supp 1):53-58 (in Chinese).
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- Wang F J. CFD analysis—principle and application of CFD software [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004 (in Chinese).
- [15] 张师帅. 计算流体动力学及其应用——CFD软件的原理与应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- Zhang S S. CFD and its application—principle and application of CFD software [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2011 (in Chinese).