

液体晃荡压力分布规律 OpenFOAM 模拟研究

陈奕超^{1,2}, 薛米安^{*1,2}, 彭天成^{1,2}, 苑晓丽³, 朱爱蒙^{1,2}

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学 理学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用振动台试验数据对基于开源程序 OpenFOAM 建立的液体晃荡模型进行了验证。利用验证后的数值模型研究了液体深度与液舱长度比为 0.15 和 0.33 两种工况下, 矩形液舱在不同频率下的液体晃荡压力分布规律。冲击压力最大值及其均方差对频率的响应曲线显示液体深度与液舱长度比为 0.33 时比 0.15 时更容易发生剧烈的晃荡现象。不同液体深度的晃荡冲击压力对频率的响应曲线呈现不同的规律: 对浅水晃荡来说, 压力最大值随着频率的增大先缓慢增大后快速减小; 对有限水深晃荡来说, 压力最大值随着频率的增大先快速增大后缓慢减小。晃荡压力沿舱壁的垂向分布规律表明最大冲击压力位于自由液面稍上处, 并且位于最大冲击压力位置之下的压力沿舱壁的分布规律均可以拟合为二次多项式形式。

关键词: 液体晃荡; OpenFOAM; 压力分布; 二次多项式

中图分类号: U661.7

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201904011

0 引言

近年来, 超大油轮、超大型浮式 LNG/LPG 船的广泛应用, 使得液舱晃荡问题一直被广泛关注。朱仁庆等^[1-2]采用 VOF 法对矩形液舱舱底中间增加隔板后的液体晃荡现象进行了数值研究, 同时他们还结合水弹性原理, 建立了黏性流体与弹性结构耦合作用的液体晃荡水弹性力学理论与分析方法。Lee 等^[3]模拟了流体黏度、密度比以及可压缩性对晃动荷载的影响。Liu 等^[4]以及 Xue 等^[5-6]开发了一套能够模拟波浪破碎的强非线性液体晃荡数值模型, 研究了不同结构挡板对黏性流体晃荡波的影响, 并结合模型试验给出了不同结构挡板的减晃效果, 分析了挡板的减晃机制。管延敏等^[7]运用边界元法 (BEM) 也对三维带挡板箱体内液体晃荡现象进行了数值研究。刘东喜等^[8]采用 CLSVOF 界面捕获法对两层液体晃荡问题进行了数值研究。Jena 等^[9]运用 MPS 研究了地震作用下的晃荡问题, 发现高频地震对晃荡的影响小于低频和中频的地震, 而且低频地震会

产生更高的晃荡冲击压力。

相比数值模拟而言, 模型试验能更真实地预测复杂的晃荡现象。Pistani 等^[10]开展了 LNG 液舱的正弦横荡试验, 以 39 kHz 的采样频率和 10 min 的采样时间分别在 19 个采集点获取了大量数据, 并结合高速图像采集技术分析了冲击压力与液体砰击舱壁形式之间的联系。刘戈等^[11]开展了 LNG 独立 C 型液舱的晃荡扫频试验, 研究了不同载液率下实际共振频率与理论固有频率的差异。薛米安等^[12-13]利用振动台试验开展了矩形液舱分别在随机与简谐激励下, 不同激励参数对液体晃荡的影响规律。但是鲜有关于流场特征与压力关联的报道。事实上, 晃荡流场的测量对了解液舱内部流动机理及压力分布规律十分重要, 但试验测量流场具有一定的挑战性。因此选择数值模拟与试验相结合的方式开展不同载液率下晃荡压力的分布规律研究十分必要。

开源程序 OpenFOAM 具有 C++ 面向对象设计的良好扩展性, 稳定而强大的底层类库, 丰富

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679079); 江苏省研究生科研创新计划资助项目(SJKY19_0528); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019B61014, 2018B12814, 2019B19314).

作者简介: 陈奕超(1995-), 男, 硕士生, E-mail: 981565058@qq.com; 薛米安*(1981-), 男, 副教授, E-mail: coexue@hhu.edu.cn.

的前后处理接口,并行化计算等诸多优点.查晶晶等^[14]基于 OpenFOAM 求解器 InterDyMFoam 实现了包括推板和摇板造波的数值水池及阻尼消波模型. Myrillas 等^[15]利用 OpenFOAM 程序分别计算了三维圆柱形液舱中水和水银对舱壁的冲击压力. Jin 等^[16]采用 OpenFOAM 模型研究了水平多孔板对液舱晃荡能量的耗散机制.但上述研究很少考虑液体深度对晃荡冲击压力分布的影响,尤其是在一个相对较宽的频率范围内,不同区域典型水深下的最大冲击压力对频率的响应规律仍然值得进一步深入研究^[17].为此,本研究借助基于 OpenFOAM 建立的液体晃荡数值模型,并结合振动台试验着重分析液体深度与液舱长度比分别为 0.15 和 0.33 时的浅水液体晃荡及有限水深晃荡现象,获得一阶共振频率附近不同水深下的最大冲击压力及其均方差对频率的响应规律、晃荡压力沿舱壁的垂向分布以及流场演化特征.

1 OpenFOAM 模型及数值离散

OpenFOAM 中的两相流模型 InterDyMFoam 主要用于求解不可压、不混溶、等温的两相流动问题.该模型的控制方程为 Navier-Stokes (N-S) 方程,并在其中加入了动网格技术以及 VOF 法捕捉自由液面,具体控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu \tag{2}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) = 0 \tag{3}$$

式中: \mathbf{U} 表示速度场, ρ 表示流场的密度, p_d 表示压力场, \mathbf{x} 是从坐标原点测量的控制体中心的位置向量, μ 是动力黏度, α 为网格内流体的体积分数.求解器通过隐式求解方程(1)、(2)得到速度与压力值,通过运输方程(3)求解体积分数 α 并在速度确定后重建自由液面.

在求解时,水-气两种流体被当作一种流体来求解,它满足方程(1)和(2),其中该流体的物理属性密度 ρ 和动力黏度 μ 由两种流体各自的密度 (ρ_w, ρ_a)、动力黏度 (μ_w, μ_a) 和体积分数函数来计算:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \\ \mu &= \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \end{aligned} \tag{4}$$

求解前,需要对偏微分方程组进行离散,转化为线性代数方程组. OpenFOAM 采用了有限体积法对其控制方程进行离散.在每个控制体内对

N-S 方程进行求解,保证了物理量的守恒性. OpenFOAM 空间离散基于 polyMesh 方法,将计算过程中涉及的物理量分为 3 种类型分别存储于控制体中心(速度、体积分数等)、控制体表面(界面通量 φ 等)、网格节点(网格位移等),当所求解的方程中同时包含两种不同存储形式的变量时,可通过插值和重组两种方法将变量转换为同种存储形式后再做计算.对时间项采用欧拉隐式方法进行离散,见式(5),方程求解中各离散项及其离散格式见表 1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV = \frac{(\rho_p \varphi_p V)^n - (\rho_p \varphi_p V)}{\Delta t} \tag{5}$$

表 1 各离散项及其离散格式

Tab. 1 Discrete items and their discrete formats

离散项	离散格式
$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$	欧拉一阶,有界,隐式
$\nabla \mathbf{U}$	高斯线性
$\nabla \cdot (\mathbf{U} \mathbf{U})$	高斯 VanLeerV 二阶
$\nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha)$	高斯 VanLeer 二阶
$\nabla p_d \cdot \rho \cdot \mu$	高斯线性修正

模型边界条件的选择:宽度方向上的面设 empty 边界以忽略宽度方向的影响,求解二维问题;舱壁上的流体边界设置为 zeroGradient 无滑移边界,即 φ 在边界上的法向梯度为 0;压力边界为 fixedFluxPressure 固定压力通量边界,速度边界给定 movingWall 边界以对模型施加正弦外激励运动.

在压力速度耦合方式上采用 PIMPLE 算法,该算法结合了 SIMPLE 算法和 PISO 算法各自的优点.在每个时间步长内用 SIMPLE 稳态算法求解(也就是将每个时间步内看成稳态流动),时间步长的步进用 PISO 算法来完成,因此 PIMPLE 算法可以减少数值计算所需要的时间,更快地得到稳态解.具体的求解步骤如图 1 所示.

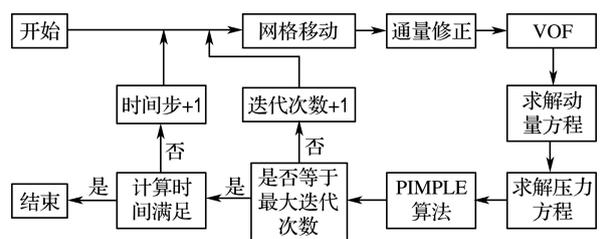


图 1 算法求解过程

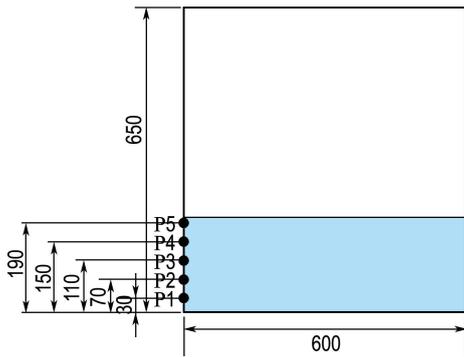
Fig. 1 The process of algorithm solving

2 试验装置及液舱模型

试验装置为如图 2(a) 所示的液体晃荡模拟装置, 该装置静态荷载为 1 t, 可沿 3 个方向分别作平动和转动运动. 实际运动位移可通过位移传感器和倾角传感器监测, 便于判断实际位移是否符合理论位移.



(a) 试验装置



(b) 液舱模型

图 2 液体晃荡试验装置及液舱模型

Fig. 2 Experimental setup of liquid sloshing and liquid tank model

试验中如图 2(b) 所示的矩形液舱采用 10 mm 厚的有机玻璃制作而成, 其长宽高分别为 600、300 和 660 mm. 运动方向沿液舱长度方向模拟迎浪纵荡的船体运动工况. 液体深度与液舱长度比 $h/L=0.2$ 一般作为浅水与有限水深的分界点^[15]. 为研究不同典型水深下的晃荡特性, 特选择 $h_1=90$ mm 和 $h_2=200$ mm 两种水深, 此时 $h_1/L=0.15 < 0.2$ 属于浅水晃荡的范畴, 而 $h_2/L=0.33 > 0.2$ 可以认为是有限水深晃荡.

5 支微型数字压力传感器沿液舱左壁中线依次安装, 距离液舱底部的高度分别为 30、70、110、150、190 mm, 5 支传感器由下而上依次被命名为 P1、P2、P3、P4、P5, 如图 2(b) 所示. 此外, 试验中还利用摄像机来记录液体晃荡过程中的自由液面变化.

试验中液舱的运动位移为 $x = -A \sin \omega t$, 其中 A 为运动幅度, ω 为外激励频率. 二维矩形液舱的固有频率由公式 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{gk_n \tanh(k_n h)}$ 来计算^[18], 其中 $k_n = (2n+1)\pi/L$, $n=0, 1, 2, \dots$, g 为重力加速度. 由此式可计算出水深为 90 mm 时, 矩形液舱的一阶固有频率为 0.755 9 Hz; 水深为 200 mm 时矩形液舱的一阶固有频率为 1.008 Hz. 试验中选择了 3、5 和 7 mm 3 个不同的振幅, 运动频率范围为 $0.3f_0 \sim 3f_0$ 并在一阶频率及二阶频率附近开展扫频试验. 每组试验时间为 240 s, 每个工况均进行两次重复试验, 用来对比分析试验数据的准确性和可重复性.

3 数值模型验证

3.1 网格收敛性分析

研究选取 2、5、8 mm 大小的均匀正方形网格对不同工况下的晃荡问题进行计算, 用于评估网格的大小对计算时间以及计算精度的影响. 7 mm 振幅, 90 mm 水深以及 f_0 频率激励下液舱内压力测点 P1 处的晃荡压力时程曲线如图 3 所示. 由图可知 2 与 5 mm 的网格计算结果基本重合, 2 mm 网格的计算时间为 5 mm 的 15 倍, 而 8 mm 网格的计算结果中, 波谷处的波形和更精细的网格有所区别. 综合考虑计算时间和精度因素, 模型的计算网格选取 5 mm 的正方形网格.

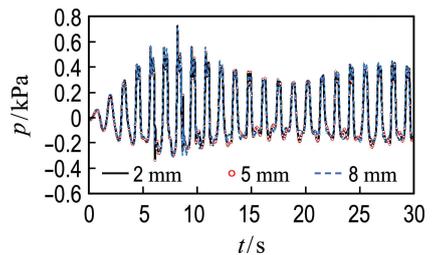


图 3 不同网格系统下 P1 处的压力时程曲线 ($f_0=0.7559$ Hz, $A=7$ mm)

Fig. 3 Pressure-time history curve at P1 with different mesh sizes ($f_0 = 0.7559$ Hz, $A = 7$ mm)

3.2 模型试验验证

为了验证数值模型的可靠性, 研究将不同外激励频率下的模拟结果与模型试验中压力传感器所测的数据进行了比较. 考虑到晃荡的剧烈程度

可能会对数值模型计算的准确性有所影响,因此振幅均为 7 mm,外激励频率分别为 $0.80f_0$ 和 f_0 .图 4 给出了在不同载液率(浅水 90 mm、有限水深 200 mm)下数值结果与试验结果压力时程曲线的比较关系.由图 4 可知不同载液率及外激

励频率下的模型计算结果与试验结果均能够较好的吻合,表明本研究建立的液体晃荡数值模型能够精确地预测晃荡压力分布,更多算例验证详见文献[19].

4 结果与讨论

4.1 不同载液率下冲击压力分布特征

图 5 为压力传感器 P1 处的最大冲击压力量纲一化处理后与外激励频率之间的关系曲线,分析共振模态附近浅水与有限水深晃荡的压力响应的区别.从图中可以发现:(1)有限水深晃荡对舱壁的冲击压力要大于浅水晃荡;(2)浅水晃荡最大冲击压力对应的频率不在 f_0 ,而是在稍大于 f_0 的频率处,曲线的趋势是先缓慢上升之后快速下落,而有限水深晃荡的表现正好相反,发生最大冲击压力对应的频率在稍小于 f_0 的频率处,曲线变化的趋势为先快速上升再缓慢下落.结合试验分析这种现象的原因可能是浅水下的晃荡发生自由液面破碎的剧烈程度在外激励频率靠近固有频率时是逐渐增加的,而有限水深条件下的晃荡从不破碎到剧烈破碎状态的转变较快,在小于 f_0 的频率下就较早地发生了剧烈破碎,这使压力曲线出现一个跃升.图 6 展示了不同载液率下振幅为 7 mm 共振模态下的自由液面破碎最剧烈的晃荡现象,图 6(a)是水深为 90 mm 时的晃荡现象,图 6(b)则是水深为 200 mm 时的晃荡现象.可见浅水时 $0.90f_0 \sim 1.04f_0$ 内的自由液面破碎程度呈缓慢增加趋势,在发生了水跃现象时仅有少量液体脱离自由液面,频率到达 $1.06f_0$ 时才有明显的破碎飞溅现象.而有限水深晃荡则是在达到

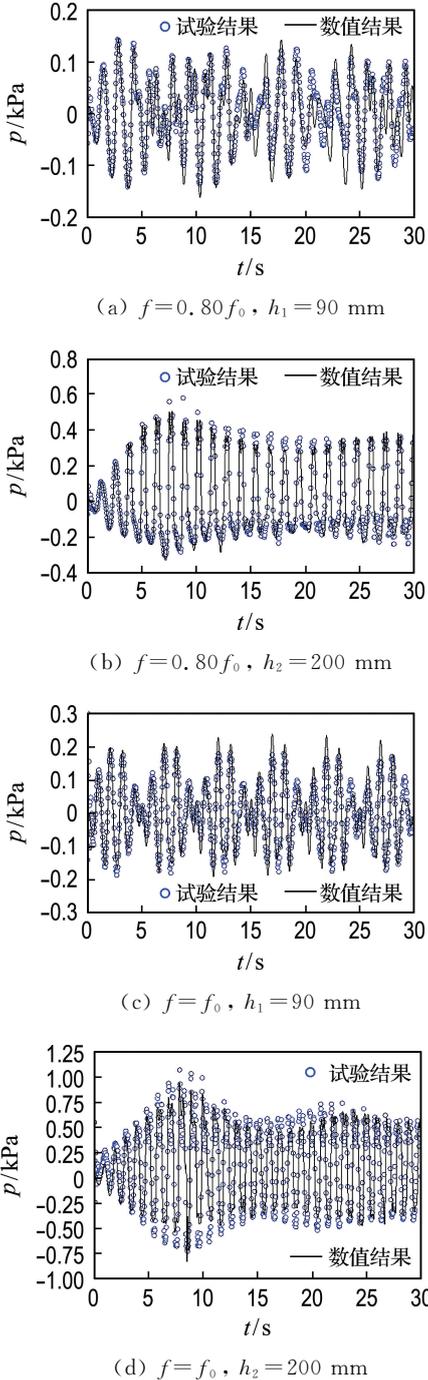


图 4 不同载液率及外激励频率下的数值结果与试验结果比较

Fig. 4 Comparison between numerical results and experimental data at different filling levels and excitation frequencies

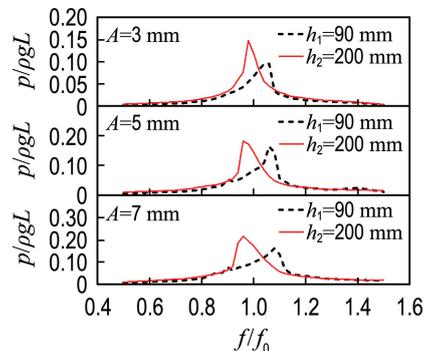


图 5 不同载液率下的冲击压力-频率响应

Fig. 5 Impact pressure-frequency response at different filling levels

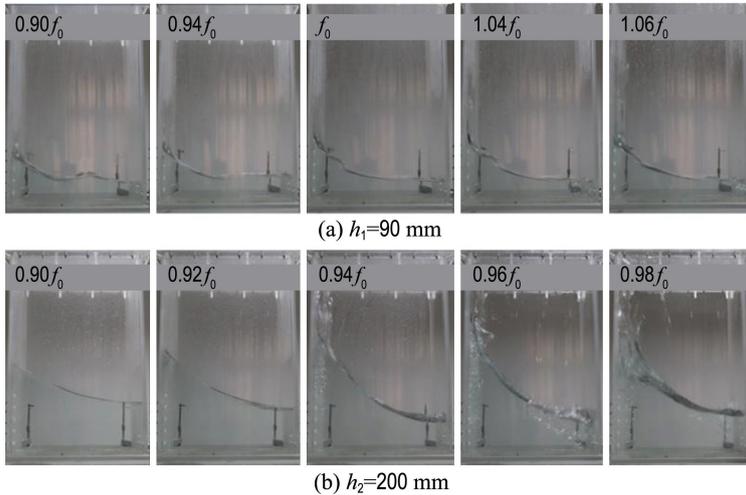


图 6 共振模态不同载液率下晃荡的自由液面破碎现象

Fig. 6 Free surface broken phenomena of sloshing at different filling levels under resonant mode

0.94 f_0 之前都没有破碎迹象,呈稳定的驻波晃荡,然而在 0.94 f_0 的频率处开始发生剧烈的破碎现象,射流飞溅,产生大量气泡.这些趋势对应着冲击压力的曲线趋势,能够说明造成浅水与有限水深的压力曲线差异的原因是自由液面从不破碎到剧烈破碎的转变过程的差异.

图 7 中曲线反映了不同载液率下压力均方差与频率响应之间的关系,并且考虑了振幅大小对其的影响.压力均方差反映了液面对舱壁冲击压力相对于稳定值的偏离程度,可以从一定角度反映晃荡波破碎、液体飞溅等不稳定的物理现象.压

力均方差随频率的变化趋势也和压力响应曲线较为相似,可以进一步解释自由液面的剧烈破碎与否是导致有限水深和浅水晃荡压力曲线差异的主要原因.而另外在二阶共振模态下两条曲线特征也有区别:浅水晃荡下压力均方差靠近二阶共振点时出现一个较小的峰值并随后趋于平稳,而有限水深晃荡下压力均方差在二阶共振点则显示持续上升的趋势,这个现象的原因是浅水晃荡下晃荡能量不足,即使在较高的外激励频率下也很难发生破碎;而有限水深晃荡在高频下的晃荡比较容易发生破碎现象,而且其破碎剧烈程度随频率的增加而提升.

4.2 波形及流场特性分析

由上面的结果可以看出浅水晃荡与有限水深晃荡有着许多不同的特性.因此本研究将结合 OpenFOAM 数值计算结果分析共振频率下液舱内流体的流场随时间的演变规律,并重点考虑浅水及有限水深晃荡的区别.在研究中,选取的水深分别为 90 及 200 mm,两种工况下的振幅 7 mm,频率 f_0 保持不变.

由图 8 可以从流场角度分析浅水晃荡中液体对舱壁的砸击过程.晃荡流场显示晃荡波的最大速度位于自由液面处.晃荡初期波能处于积蓄阶段,此刻液舱中呈现孤立波来回运动的现象,即图 8(a)、(b)时刻的状态,由液体速度分布可以看出波面处波能比较密集.当晃荡波面的能量过大,在冲击舱壁过程中顶部的液体因速度过大而脱离波面,就发生了如图 8(c)、(d)所示的水跃现象.之

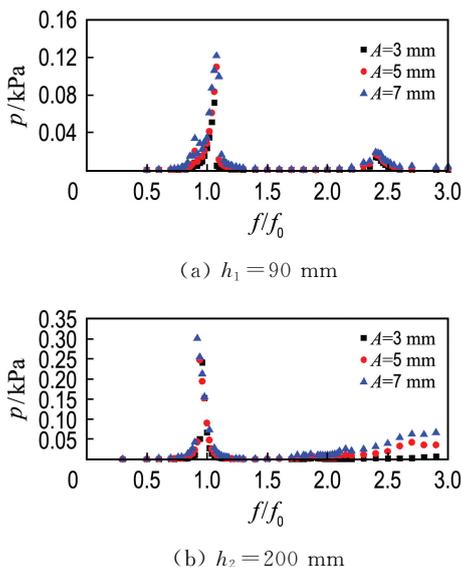


图 7 不同载液率下压力均方差-频率响应

Fig. 7 Pressure standard deviation-frequency response at different filling levels

后主波继续以行波的形式向液舱另一端传播, 而爬跃上舱壁的液体则垂直下落冲击液舱并形成一个个次波(图 8(e)、(f)、(g)), 主波与次波相互作用后会减小波速并形成新的波形如图 8(j). 而图 9 所示的有限水深共振工况下的晃荡则有许多不同的特性. 由于深水波的波长较大, 初始液舱内呈驻波现象(图 9(a)、(b)、(c)), 而伴随着波能增长, 破碎现象开始发生, 深水波的破碎现象比浅水波要更加剧烈(图 9(d)): 首先存在着大量的液体飞

溅现象(图 9(f)、(g)、(h)), 其次液体回落冲击液面时有明显的掺气现象(图 9(e)、(f)、(g)), 大量气泡被卷入水中, 并且可以看到顶盖冲击现象, 这些可以理解为因飞溅造成的液体质量减少, 因掺气造成的液体密度降低, 因顶盖冲击造成的动能耗散, 从而导致了有限水深晃荡的最大响应频率要小于理论计算所得值. 而且经过一段时间的能量耗散后, 顶盖冲击现象逐渐变弱, 波形发生新的演化(如图 9(i)、(j)所示).

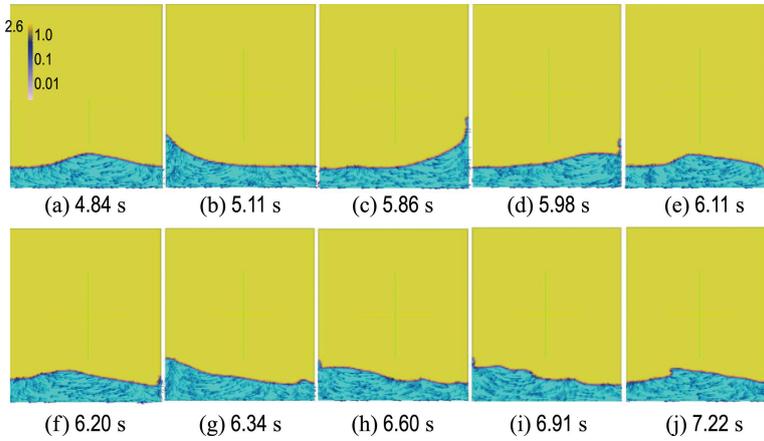


图 8 浅水工况下波形及流场变化

Fig. 8 Waveform and flow field variation for shallow water

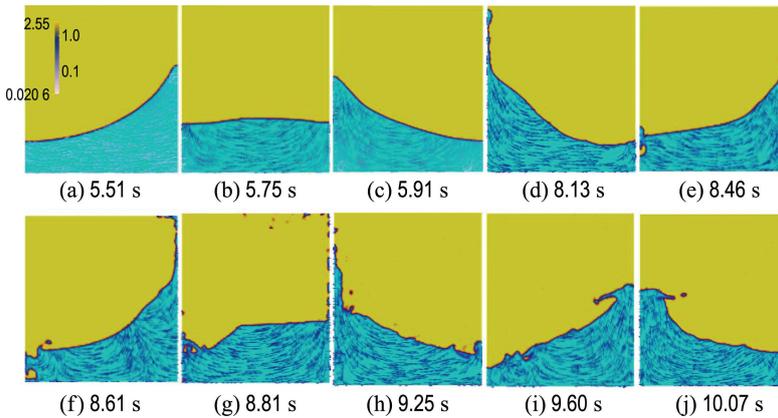


图 9 有限水深工况下波形及流场变化

Fig. 9 Waveform and flow field variation for finite water depth

4.3 冲击压力分布规律

液舱在外力作用下有时会发生剧烈的晃荡现象, 而剧烈的晃荡冲击压力可能会对液舱产生结构性的破坏, 因此本文将利用 OpenFOAM 的模拟结果对矩形舱壁上的冲击压力分布规律进行探讨.

考虑到频率和载液率会对冲击压力分布有明

显影响, 因此分别设置了浅水(水深 90 mm), 振幅 7 mm, 外激频率分别为 $0.50f_0$ 、 $0.70f_0$ 、 $0.80f_0$ 、 $0.90f_0$ 、 f_0 、 $1.06f_0$ (试验分析得出冲击压力最大的频率 $1.06f_0$), 有限水深(水深 200 mm), 振幅 7 mm, 外激频率分别为 $0.50f_0$ 、 $0.70f_0$ 、 $0.80f_0$ 、 $0.90f_0$ 、 $0.96f_0$ 、 f_0 (试验分析得

出冲击压力最大的频率 $0.96f_0$), 在其中舱壁上分别设置了若干个监测点 ($h_1=90\text{ mm}$, $0\sim 400\text{ mm}$ 共 32 个测点; $h_2=200\text{ mm}$, $0\sim 650\text{ mm}$ 共 38 个测点), 较为全面地分析舱壁上冲击压力的分布特征.

图 10 是将不同频率、载液率工况的晃荡模拟结果在液舱壁上的分布呈现出来. 从中可以看出无论是有限水深晃荡还是浅水晃荡, 从底部至顶部冲击压力最大值变化的趋势基本上都为先缓缓增大, 接近自由液面位置时开始迅速变大, 之后再逐渐减小, 其中最大值一般发生在比自由液面稍高一些的位置, 并且越接近固有频率(晃荡越剧烈)的工况, 最大冲击位置越高. 另外, 在有限水深晃荡中剧烈晃荡的工况在自由液面以上的冲击分布较为混乱无序, 而且对顶部会有一个较大的冲击, 其冲击大小接近液舱壁面上所有冲击压力的最大值, 储液舱的设计中应考虑到这点.

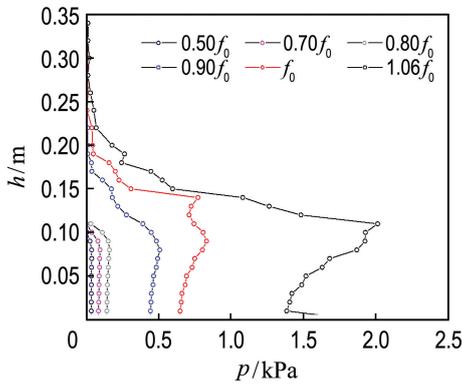
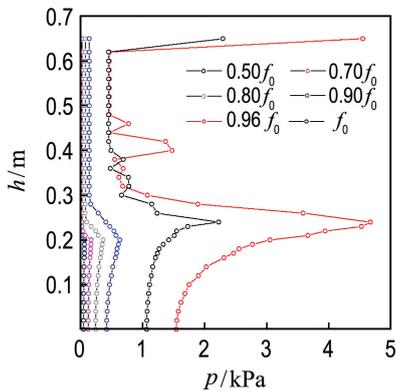
(a) $h_1=90\text{ mm}$ (b) $h_2=200\text{ mm}$

图 10 不同频率下冲击压力最大值在舱壁上的分布

Fig. 10 Distribution of maximum impact pressure at different frequencies over the tank wall

无论是有限水深或浅水的压力分布曲线, 从下往上在达到最大值后的曲线都比较混乱无序, 而之前曲线形状都与二次函数的曲线形状相似, 在对其进行曲线拟合分析后发现在最大冲击位置之下区域的压力都满足二次函数的关系式. 如图 11,

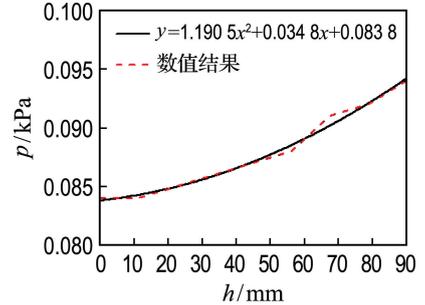
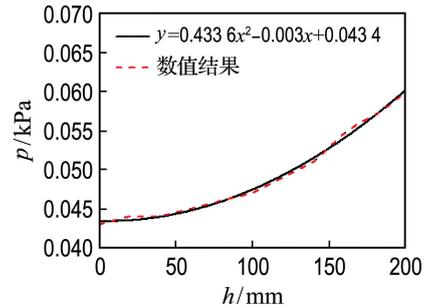
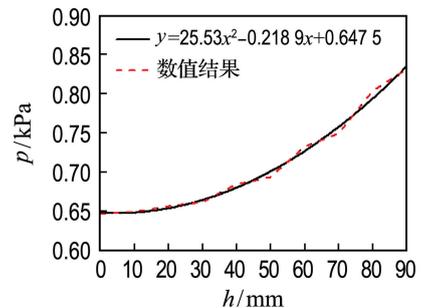
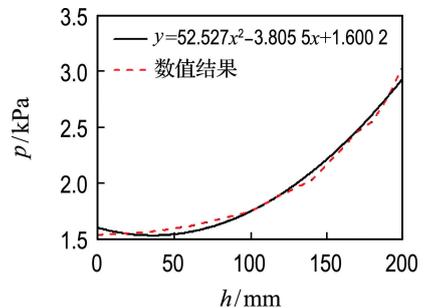
(a) $f=0.70f_0, h_1=90\text{ mm}$ (b) $f=0.50f_0, h_2=200\text{ mm}$ (c) $f=f_0, h_1=90\text{ mm}$ (d) $f=0.96f_0, h_2=200\text{ mm}$

图 11 压力分布的二次多项式曲线拟合

Fig. 11 Quadratic polynomial curve fitting of pressure distribution

列举了两个水深、两组频率下的拟合曲线与数据曲线的对比,可以看出不同载液率与频率的情况下都能找到一个二次函数来拟合压力-高度曲线,最终建立了液舱内壁垂向点压力分布与压力测点高度的关系。

5 结 论

(1)有限水深更容易发生剧烈的晃荡,并且会造成比浅水晃荡更大的冲击压力,尤其是在共振模式下差异会更加明显。

(2)浅水晃荡最大冲击压力对应的频率不在 f_0 ,而是在稍大于 f_0 的频率处,曲线的趋势是先缓慢上升然后快速下落;而有限水深晃荡最大冲击压力对应的频率在稍小于 f_0 的频率处,曲线的趋势为先快速上升再缓慢下落.其原因为自由液面从不破碎到剧烈破碎的转变过程有差异。

(3)晃荡流场显示晃荡波的最大速度位于自由液面处,并明显地俘获了水跃现象,说明有限水深晃荡中大量液体爬升、掺气及顶盖冲击现象可能对最大激励频率有影响。

(4)有限水深晃荡和浅水晃荡中,压力分布均从底部至顶部先缓缓增大,接近自由液面位置时开始迅速变大,之后再逐渐减小,其中最大值一般发生在比自由液面稍高一些的位置.同时发现在最大冲击位置之下区域的压力最大值-距底部距离的曲线关系均能拟合为二次多项式形式的经验公式。

参 考 文 献:

- [1] 朱仁庆,吴有生.液舱内流体晃荡特性数值研究[J].中国造船,2002,43(2):17-23.
ZHU Renqing, WU Yousheng. Numerical study on sloshing phenomena in a liquid tank [J]. **Ship Building of China**, 2002, 43 (2): 17-23. (in Chinese)
- [2] 朱仁庆.液体晃荡及其与结构的相互作用[D].无锡:中国船舶科学研究中心,2001.
ZHU Renqing. Time domain simulation of liquid sloshing and its interaction with flexible structure [D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2001. (in Chinese)
- [3] LEE D H, KIM M H, KWON S H, *et al.* A parametric sensitivity study on LNG tank sloshing loads by numerical simulations [J]. **Ocean**

- Engineering**, 2007, 34(1):3-9.
- [4] LIU Dongming, LIN Pengzhi. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks [J]. **Journal of Computational Physics**, 2008, 227(8): 3921-3939.
- [5] XUE Mi'an, LIN Pengzhi. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing [J]. **Computers and Fluids**, 2011, 52(1):116-129.
- [6] XUE Mi'an, ZHENG Jinhai, LIN Pengzhi, *et al.* Violent transient sloshing-wave interaction with a baffle in a three-dimensional numerical tank [J]. **Journal of Ocean University of China**, 2017, 16(4): 661-673.
- [7] 管延敏,叶恒奎,陈庆任,等.三维带挡板箱体液体晃荡数值模拟[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(4):102-104,112.
GUAN Yanmin, YE Hengkui, CHEN Qingren, *et al.* Numerical simulating liquid sloshing in 3D tanks with baffles based boundary element method [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2010, 38(4):102-104,112. (in Chinese)
- [8] 刘东喜,庄宿国,王晋,等.基于CLSVOF方法的两层液体晃荡数值模拟[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(8):116-121.
LIU Dongxi, ZHUANG Suguo, WANG Jin, *et al.* Numerical simulation of two-layer liquid sloshing using CLSVOF method [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2018, 46 (8): 116-121. (in Chinese)
- [9] JENA D, BISWAL K C. Violent sloshing and wave impact in a seismically excited liquid-filled tank: Meshfree particle approach [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2018, 144(3):04017182.
- [10] PISTANI F, THIAGARAJAN K. Experimental measurements and data analysis of the impact pressures in a sloshing experiment [J]. **Ocean Engineering**, 2012, 52:60-74.
- [11] 刘戈,林焰,管官,等.LNG独立C型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 Ge, LIN Yan, GUAN Guan, *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)

- [12] 薛米安,陈奕超,苑晓丽,等. 不同海浪谱激励下矩形液舱内液体晃荡试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2018, **58**(3):261-268.
XUE Mi'an, CHEN Yichao, YUAN Xiaoli, *et al.* Experimental study of liquid sloshing in rectangular tank excited by sea-wave spectrum [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2018, **58**(3):261-268. (in Chinese)
- [13] 薛米安,邢建建,陈奕超,等. 基于振动台实验的液体晃荡激励参数敏感性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2019, **59**(2):162-171.
XUE Mi'an, XING Jianjian, CHEN Yichao, *et al.* Excitation parameters sensitivity study of liquid sloshing based on shaking table experiment [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2019, **59**(2):162-171. (in Chinese)
- [14] 查晶晶,万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波 [J]. 海洋工程, 2011, **29**(3):1-12.
CHA Jingjing, WAN Decheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM [J]. **The Ocean Engineering**, 2011, **29**(3):1-12. (in Chinese)
- [15] MYRILLAS K, PLANQUART P, BUCHLIN J M, *et al.* CFD and experimental investigation of sloshing parameters for the safety assessment of HLM reactors [J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2017, **312**:317-326.
- [16] JIN Heng, LIU Yong, LI Huajun, *et al.* Numerical analysis of the flow field in a sloshing tank with a horizontal perforated plate [J]. **Journal of Ocean University of China**, 2017, **16**(4):575-584.
- [17] FALTINSEN M O, TIMOKHA A N. **Sloshing** [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [18] XUE Mi'an, ZHENG Jinhai, LIN Pengzhi, *et al.* Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure [J]. **Ocean Engineering**, 2017, **136**:178-189.
- [19] CHEN Yichao, XUE Mi'an. Numerical simulation of liquid sloshing with different filling levels using OpenFOAM and experimental validation [J]. **Water (Switzerland)**, 2018, **10**(12):1752.

Study of sloshing pressure distribution rules simulation using OpenFOAM

CHEN Yichao^{1,2}, XUE Mi'an^{*1,2}, PENG Tiancheng^{1,2}, YUAN Xiaoli³, ZHU Aimeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A developed sloshing model based on open source code OpenFOAM is validated against with shaking table experimental data. The sloshing pressure distribution rules in rectangular tank at different frequencies under the conditions of 0.15 and 0.33 of liquid depth to tank length ratio are studied by using the developed numerical model. The response curve of the maximum impact pressure and its mean square deviation to frequency shows that 0.33 of liquid depth to tank length ratio is more likely to cause violent sloshing than 0.15 of liquid depth to tank length ratio. There are different rules for response curve of sloshing pressure to frequency under different liquid depths. The maximum pressure increases slowly first and then decreases rapidly with increasing frequency for shallow water sloshing. However, the maximum pressure increases rapidly first and then decreases slowly with the increase of frequency for finite water depth. The vertical distribution of the sloshing pressure along the bulkhead shows that the maximum impact pressure is located slightly above the free surface and the pressure distribution rule along the bulkhead below the location of the maximum impact pressure satisfies the quadratic polynomial form.

Key words: liquid sloshing; OpenFOAM; pressure distribution; quadratic polynomial