

液舱晃荡的载荷分布特点研究

李 师, 张会霞, 邹昶方

江苏海洋大学海洋工程学院, 江苏 连云港
Email: 2020221309@jou.edu.cn

收稿日期: 2021年5月13日; 录用日期: 2021年6月18日; 发布日期: 2021年6月25日

摘 要

本文使用Gambit建立二维矩形液舱晃荡模型, 采用VOF法追踪自由液面, 利用Fluent计算10%、25%、40%、50%、65%、75%、90%七种装载率下液舱舱壁的晃荡压力。通过数值计算结果, 分析不同装载率下舱壁自由液面附近的压力分布特点以及不同装载率下的共振频率, 所得砰击压力载荷随时间变化与实验结果吻合, 为液舱结构安全设计提供理论依据, 同时也为接下来对多种三维液舱进行研究作铺垫。

关键词

晃荡, 动压力, 共振, 装载率

Study of the Load Distribution Characteristics of Liquid Chamber Sloshing

Shi Li, Huixia Zhang, Changfang Zou

School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang Jiangsu
Email: 2020221309@jou.edu.cn

Received: May 13th, 2021; accepted: Jun. 18th, 2021; published: Jun. 25th, 2021

Abstract

In this paper, Gambit is used to establish a two-dimensional rectangular tank sloshing model, the VOF method is used to track the free liquid surface, and Fluent is used to calculate the sloshing pressure of the bulkhead under 10%, 25%, 40%, 50%, 65%, 75%, and 90% filling levels. Through the numerical calculation results, the pressure distribution characteristics near the free liquid surface of the bulkhead at different loading rates and the resonance frequencies at different loading rates are analysed. The obtained thump pressure load variation with time is consistent with the experimental results, which provides a theoretical basis for the structural safety design of the

liquid chamber, and also paves the way for the next research on a variety of three-dimensional liquid chambers.

Keywords

Sloshing, Pressure, Resonance, Filling Level

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

晃荡现象广泛存在于各类部分充满的液舱之中，是一种常见的流体运动。例如最近发射的长征五号 B 型运载火箭燃料舱、往返海上的巨型油轮、大型液化天然气船以及生活中常遇到的洒水车等。晃荡时舱内液体会对舱壁产生巨大的冲击力，对整体结构和材料都是一项考验。当晃荡发生时，舱内将产生自由液面，若此时液舱的运动频率接近或等于液体共振频率时，舱内液体会产生剧烈的大幅晃荡，这样的大幅晃荡会产生很高的局部压力。随着越来越多的大型液舱投入使用，对晃荡问题的研究就非常的迫切。

当前的晃荡研究方法有三种：数值模拟，实验研究和理论分析。宁德志[1]人通过 VOF 数值模拟的方法，对纵摇容器中液体晃荡进行非线性数值模拟，研究运动频率对液体晃荡的影响，探究共振发生时的晃荡剧烈程度。黄硕[2]等人通过单独液舱数值模拟，研究 LNG，FPSO 液舱晃荡及其与船舶耦合运动。蔡忠华[3]讨论了数值模拟液舱晃荡的基本控制方程以及相应数值方法，分析了装载率，激励频率对晃荡的冲击力大小的影响，并且用晃荡试验验证数值模拟结果。Faltinsen [4]首次使用边界元法研究水平激励下的二维矩形液舱非线性液体晃荡现象。当前对于三维液舱的研究方向主要是改进现有的数值模型，通过实验验证模型的可靠性，通过此模型对晃荡载荷对结构的影响有更深刻的认识。还有是将现有的数值模型与实际问题相结合，为结构设计提供依据。王硕[5]通过将 ANSYS 中多模块结合，以舱壁力矩的变化规律为依据，探究晃荡产生的水动力对舱壁载荷的影响；胡泰安[6]提出改进的光滑粒子流体动力学与光滑点插值耦合方法，通过对比计算数据验证了方法的有效性；丁仕风[7]对液化天然气船在冰区运动的耦合进行分析，建立船-冰-液的数值模型，探究三者的耦合影响并且给出冰区 LNG 船设计时的建议。本文对规则三维矩形液舱进行简化成二维液舱晃荡进行分析，能够更好的研究晃荡产生的波形变化，动水压力分布等，计算结果与实验数据对比趋于一致，具有一定的可靠性，便于后期对三维液舱晃荡的问题进一步探究。

2. 激励条件的计算

2.1. 固有频率

晃荡产生于部分充满的液舱中，当液舱运动频率与舱内液体固有频率相近时，会产生更加剧烈的晃荡现象，此时舱壁受到的砰击载荷较大。在矩形液舱中，固有频率与液舱运动方向的自由液面长度，液体装载高度有关。液体固有频率：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \frac{n\pi}{L} \tanh\left(\frac{n\pi}{L} H\right)} \quad (1)$$

式中, f_n 为 n 阶固有频率, 单位 Hz; g 为当地重力加速度, L 表示液舱运动方向自由液面长度; H 表示液舱内液体装载高度。液舱纵摇时, L 等于液舱长度; 本文研究的是液舱横摇状态, 故 L 等于液舱宽度。当 n 等于 1 时, 即液体的最低固有频率, 此时的频率最容易被激发, 且在此频率附近晃荡最剧烈, 对舱壁产生的冲击力也最大。

二维矩形液舱横摇运动下的几何模型尺寸见图 1, 宽 0.75 m, 高 0.71 m。

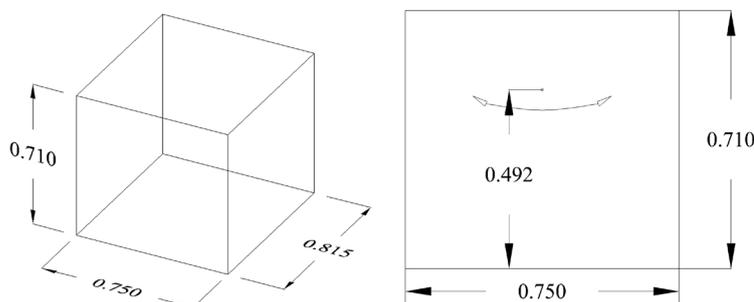


Figure 1. Simplified liquid chamber model (Unit: m)

图 1. 简化液舱模型(单位: m)

按照装载率不同, 压力传感器在舱壁的位置分别为 71 mm, 177.5 mm, 284 mm, 355 mm, 461.5 mm, 532.5 mm 和 639 mm 位置处。

根据式(1)计算出不同装载率下的液体共振频率见表 1。由于理论计算结果与实际频率会有一些的偏差, 所以在数值模拟时, 选取计算结果之上增减 0.05 Hz 与 0.1 Hz, 即每个装载率下选取 5 个频率, 见表 2。液舱内液体从静止到稳定晃荡需经历一定的时间, 所以记录的冲击荷载至少是 10~15 个周期长度。

Table 1. Theoretical inherent frequency at different loading rates

表 1. 不同装载率下的理论固有频率

装载率	频率(Hz)
10%H	0.55
25%H	0.81
40%H	0.93
50%H	0.97
65%H	1.00
75%H	1.01
90%H	1.01

Table 2. Selected external frequencies and transverse rocking parameters for each loading rate operating condition

表 2. 各装载率工况下选取的外部频率以及横摇参数

装载率	频率(Hz)					横摇中心	横摇角
10%	0.55	0.6	0.65	0.5	0.45		
25%	0.81	0.86	0.91	0.76	0.71		
40%	0.93	0.98	1.03	0.88	0.83		
50%	0.97	0.98	1.03	0.88	0.83	0.492 (m)	12°
65%	1.00	1.05	1.1	0.95	0.9		
75%	1.01	1.06	1.11	0.96	0.91		
90%	1.01	1.06	1.11	0.96	0.91		

2.2. 外部激励

横摇角激励: $\theta = \theta_0 \sin \omega t = \theta_0 \sin 2\pi f t$ 其中 θ_0 为横摇角, 取 12° , f 为选取的横摇激励频率。

3. 数值模拟

3.1. Gambit 建模

使用 Gambit 建模, 需遵循多点成线, 多线成面, 多面成体的规律, 模型建立后再进行网格的划分。

本文研究二维矩形液舱, 液舱模型宽 0.75 m, 高 0.71 m。因为网格划分的越是密集, 计算的精确度越高, 但是对计算机的性能要求就越高。所以模拟时划分的网格宽 0.0075 m, 高 0.0071 m。本文所研究的二维矩形液舱, 通过网格无关性分析, 采用结构化四边形网格, 数量 10,000 个, 在计算机承受范围内保证了数据的准确性。此时若传感器设为一个点, 因为网格划分的不够细致, 会大大影响数据的精度, 所以将传感器设置为单位网格的高度 0.0071 m, 即每个传感器的所在高度为 0.0781 m (10%H), 0.1846 m (25%H), 0.2911 m (40%H), 0.3621 m (50%H), 0.4686 m (65%H), 0.5396 m (75%H), 0.6461 m (90%H)。

3.2. Fluent 设置

3.2.1. 定义模型

定义 models solver 为一阶瞬态求解。模型定义为液体, VOF Scheme 选择 explicit, 这种求解方法保证自由液面更加清晰, 更加精确, 但消耗计算机资源较多。湍流模型选择标准型 k-epsilon 模型, 边界层计算模型采用 Standard-Wall-Functions, 此套计算满足当前网格密度的计算, 若加大网格的密集程度, 则应选取其他边界层计算模型。定义材料为液态水。Reference Pressure Location 应在计算区域外较远的位置, 参考模型的大小, 选择(0, 1)的位置。求解器选择一阶求解, 高阶的计算周期长, 增加了计算机消耗, 选择一阶求解足够解决二维动网格模型。

3.2.2. 动网格设置

外部激励使模型产生转动, 所以模型的转动周期等于外部激励周期。Fluent 求解器调用 Profile 文件, 可以实现模型按正弦波转动。文件格式为:

((moving transient 步数 1) (time 时间步) (theta_z 时间步对应的角度))

4. 结果分析

4.1. 各装载率在不同频率下动压力变化情况

从图 2 中可以看出曲线都呈现处明显的先递增, 再递减的变化, 说明不同装载率下液舱都具有一个共振频率, 且在此频率附近舱壁受到较大的砰击压力。当外部频率远离共振频率时, 砰击压力变化速度较慢, 越靠近共振频率, 砰击压力变化的速度越快, 并且随着装载率的增加, 抨击压力的变化速度逐渐减缓, 在高装载率时, 抨击压力趋于平稳, 共振与非共振下的砰击压力差异不大。图中表明了装载率与最大动压力关系, 共振频率下的舱壁所受最大压力是随装载率的增大而减小, 即同一矩形液舱, 在不同装载率下, 舱壁所受最大砰击载荷与装载率成反比。

由此可推测出结论, 对于矩形的液舱, 液体装载率越高, 当舱壁处于共振晃动时受到的最大砰击载荷越小, 装载率越低, 对舱壁结构与材料的强度就要求越高。需要在液舱的较低位置加装加强装置或增加低处部位的材料厚度来提高舱壁的安全性。

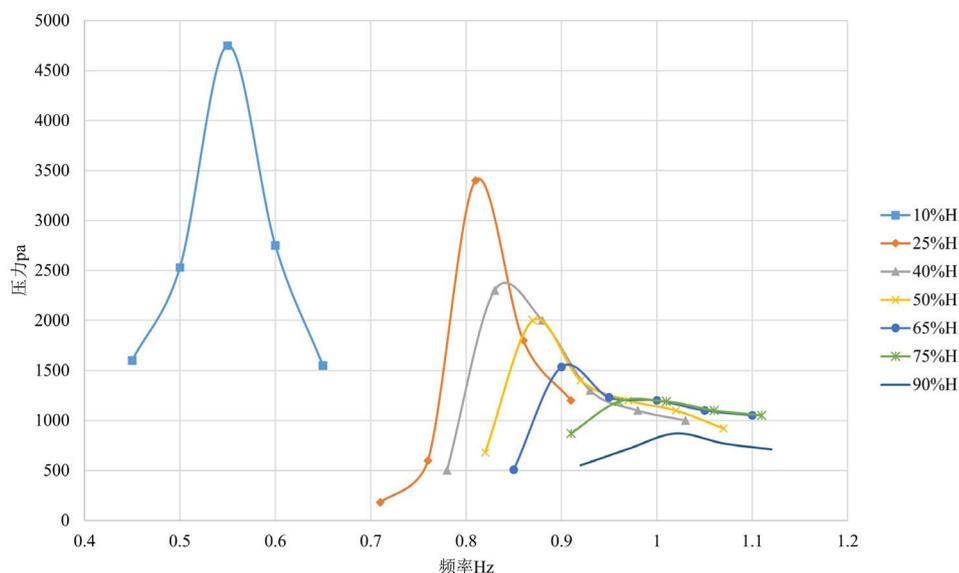
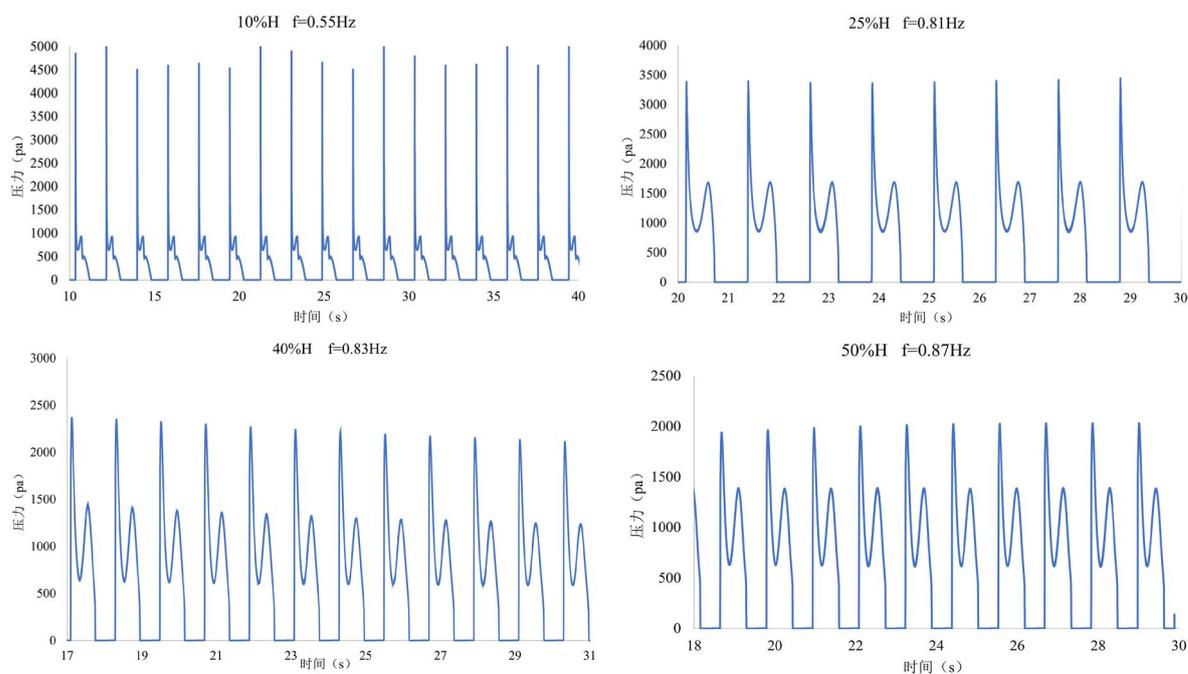


Figure 2. Variation of maximum dynamic pressure for each loading rate at different frequencies
图 2. 各装载率在不同频率下最大动压力变化情况

4.2. 共振频率附近动压力随时间历程

将图 3 压力图与甄长文[8]的刚性液舱横摇实验数据相对比, 在低装载都出现了双峰的现象, 并且前一波峰远远大于第二个波峰, 波形吻合。从图中可以看出各装载率下, 抨击压力曲线都呈现出双波峰的特征, 前面一个波峰是由于砰击压力的原因, 后一个波峰是自由液面的变化造成的。低装载率时, 在共振频率附近舱壁所受的砰击压力持续时间短, 压力值很大, 随着装载率的升高, 动压力的最大值逐渐减小。第二个波峰虽然比第一个波峰较低但持续时间大于第一波峰, 随着装载率的增加, 双波峰的差距逐渐减小, 一个周期内大部分时间舱壁受到较大的动压力。



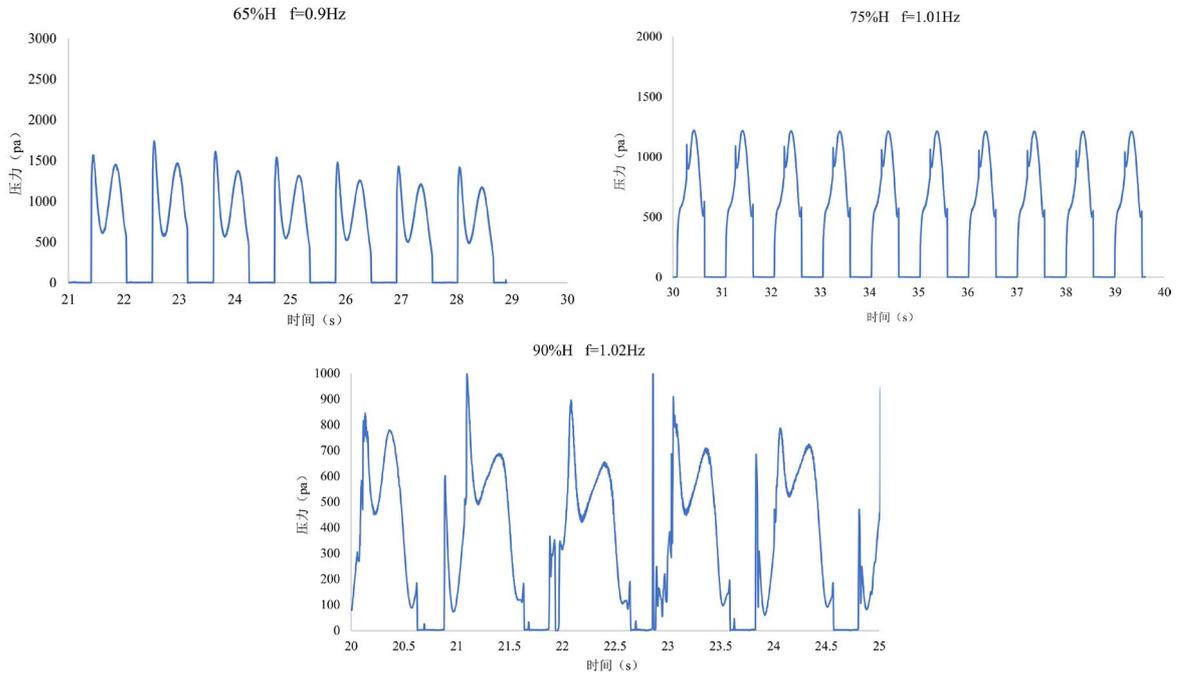


Figure 3. Dynamic pressure history over time at monitoring points near the resonance frequency for each loading rate
图 3. 各装载率在共振频率附近监测点处动压力随时间变化历程

4.3. 典型云图分析

图4~10表示不同装载率下液舱内气液两相分布与动压力分布。气液分布图中红色表示液体的状态，蓝色表示空气的状态。根据该图可以看出在晃荡的过程中液体沿着舱壁有明显的上行，自由液面变形较大。随着装载率的增高，晃荡的越来越剧烈，液体内部开始出现气泡，接着波浪破碎，出现破波。从图4~10的动压力分布云图中可以看出液体内大部分区域动压力较小，较大的动压力基本集中在液体内自由液面与舱壁接触的位置，并且从集中位置呈扇形向液体内部递减。随着装载率的增加，液舱底部舱角处也会受到较大的动压力，同时由于装载率较大，舱角处也受到很大的静压力载荷，所以高装载率的时候，舱角处的压力载荷非常大，对结构安全威胁较大。

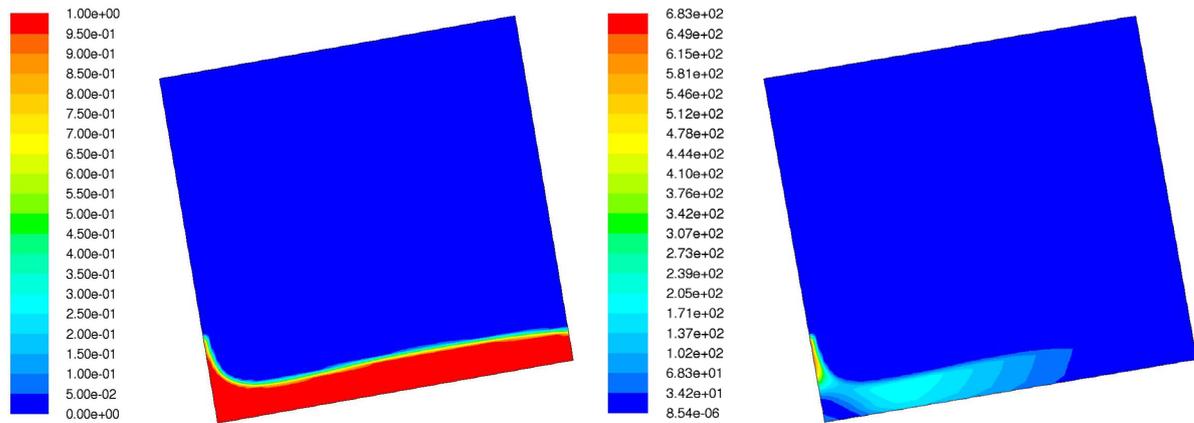


Figure 4. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 10% loading rate at $f = 0.55 \text{ Hz}$

图 4. 10%装载率在 $f = 0.55 \text{ Hz}$ 时液舱内气液两相分布与动压力分布

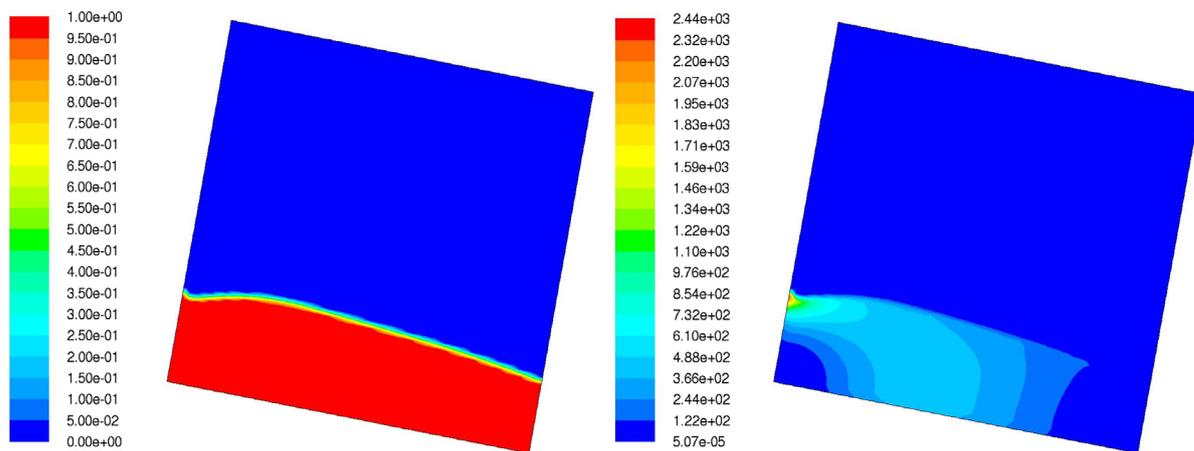


Figure 5. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 25% loading rate at $f = 0.81$ Hz

图 5. 25%装载率在 $f = 0.81$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

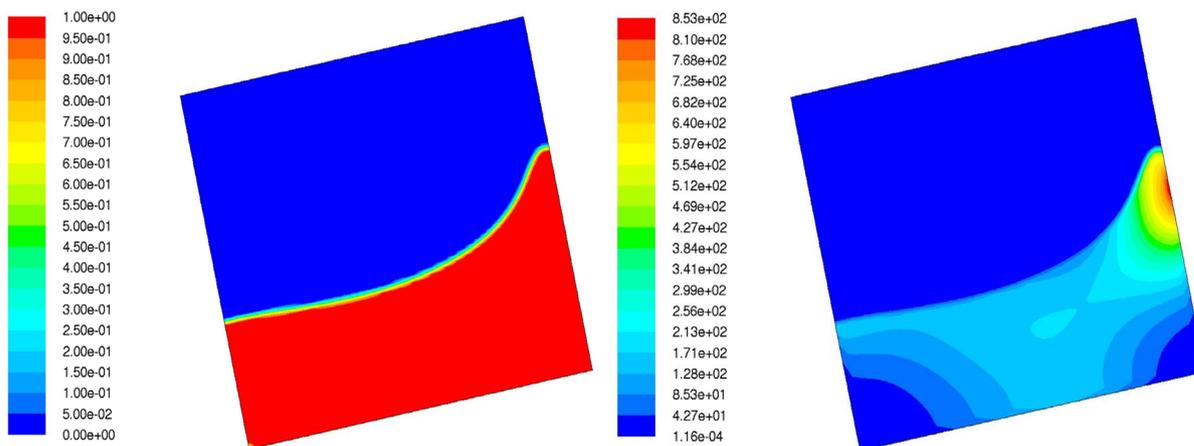


Figure 6. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 40% loading rate at $f = 0.83$ Hz

图 6. 40%装载率在 $f = 0.83$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

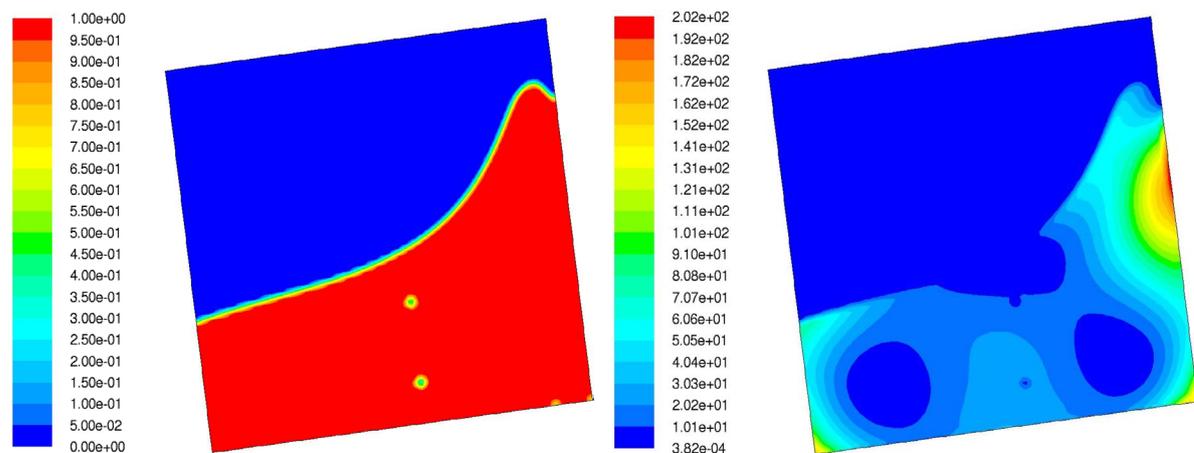


Figure 7. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 50% loading rate at $f = 0.87$ Hz

图 7. 50%装载率在 $f = 0.87$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

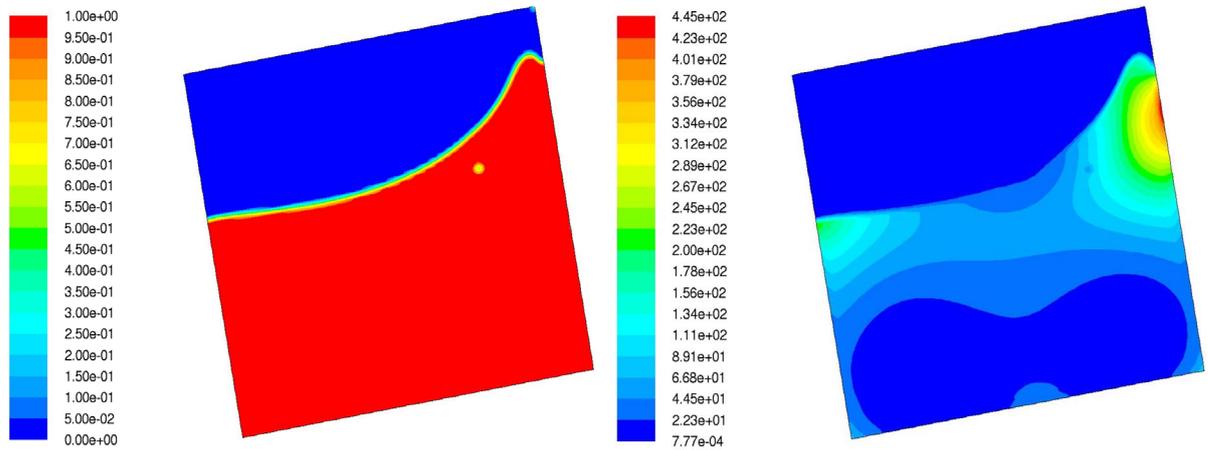


Figure 8. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 65% loading rate at $f = 0.9$ Hz

图 8. 65%装载率在 $f = 0.9$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

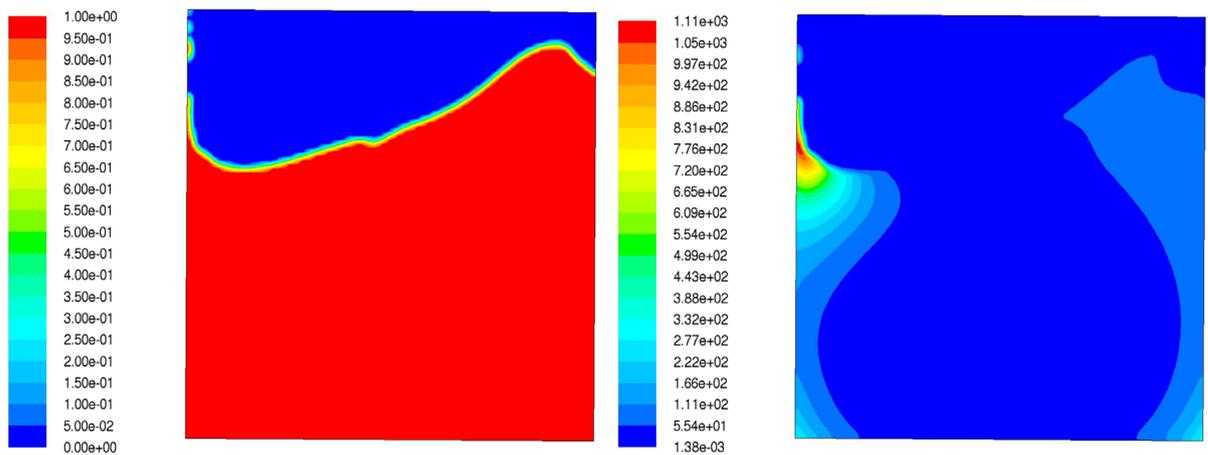


Figure 9. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 75% loading rate at $f = 1.01$ Hz

图 9. 75%装载率在 $f = 1.01$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

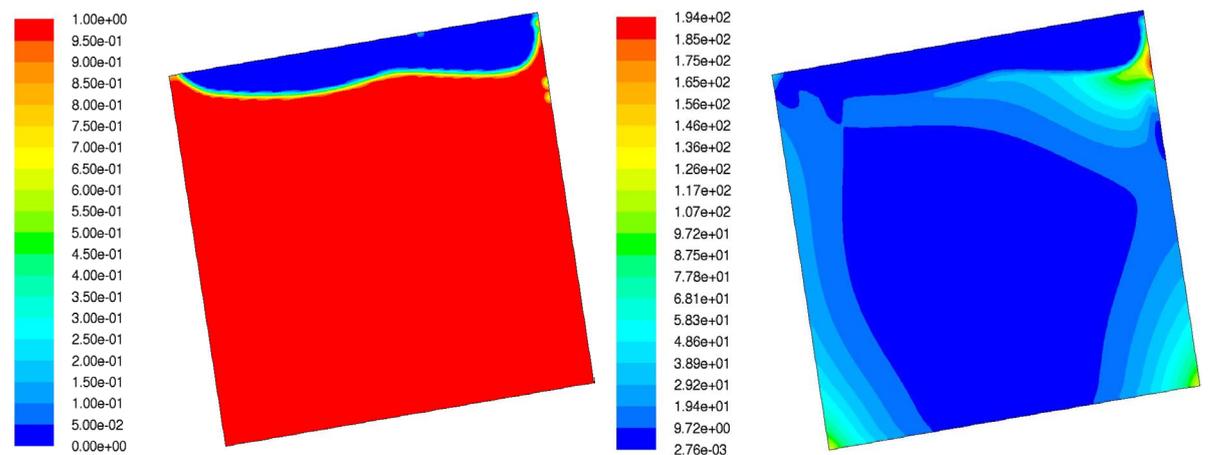


Figure 10. Gas-liquid two-phase distribution and dynamic pressure distribution in the liquid chamber at 90% loading rate at $f = 1.02$ Hz

图 10. 90%装载率在 $f = 1.02$ Hz 时液舱内气液两相分布与动压力分布

5. 结论

- 1) 在所研究的装载率下发生共振时, 液舱的自由液面位置会产生较大的集中力载荷。
- 2) 随着外部频率的增加, 舱壁的动压力载荷逐渐增加, 达到共振频率后动压力载荷逐渐减小, 而且增加速度快, 减小的速度慢。
- 3) 矩形液舱发生共振时的频率与通过计算得到的固有频率不相等, 其产生的主要原因是计算的时候没有考虑液体的粘度和大横摇角产生的非线性流动。
- 4) 在最小装载时舱壁受到的砰击压力最大, 随着装载率的增加砰击压力逐渐减小且减小的速度逐渐变小。

在工程设计中给与一些建议: 横截面为矩形液舱的设计时应考虑低载荷时液舱的结构安全性, 提高舱壁低位置区域的结构强度, 也可以限制液舱的最低装载率, 提高经济性的同时保证安全性。对于更多舱型的晃荡载荷分布问题, 还需要做进一步的研究。

基金项目

江苏省海洋资源开发研究院开放基金。

参考文献

- [1] 宁德志, 宋伟华, 滕斌. 纵摇容器中液体晃荡的非线性数值模拟[J]. 船舶力学, 2017, 21(1): 15-22.
- [2] 黄硕, 段文洋, 马庆位, 朱鑫, 吴海涛. 液舱晃荡及其与船舶耦合运动问题的研究进展[J]. 船舶力学, 2013, 17(10): 1209-1220.
- [3] 蔡忠华. 液货舱晃荡问题研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [4] Faltisen, O.M. (1974) A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Containers. *Journal of Ship Research*, **18**, 224-241. <https://doi.org/10.5957/jsr.1974.18.4.224>
- [5] 王硕. LNG 燃料舱晃荡水动力特性和载荷传递研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [6] 胡泰安. 基于光滑粒子流体动力学与光滑点插值耦合方法模拟液舱晃荡问题[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [7] 丁仕风, 周利, 周亚军. 液化天然气船晃荡与冰区运动的耦合分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1136-1142.
- [8] 甄长文. 复合激励下弹性侧壁液舱内液体晃荡特性研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.