

线性复合激励下弹性侧壁液舱内低液深液体 晃荡冲击荷载特性试验研究

甄长文¹, 吴文锋², 张建伟², 涂骄阳¹, 张家阔², 高加林²

1. 浙江海洋大学 船舶与机电工程学院 浙江舟山 316022

2. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院 浙江舟山 316022

摘要: 低液深工况下舱内液体晃荡具有复杂的物理现象, 并且会产生巨大的冲击荷载, 是液舱结构设计的关键问题之一。通过物模实验, 在低液深工况下, 针对横摇与纵摇运动的前三阶固有频率, 研究线性复合激励频率下弹性液舱内液体晃荡冲击荷载特性, 运用统计学方法对晃荡冲击荷载进行分析。结果表明: 最剧烈的液体晃荡出现在横摇与纵摇均位于一阶固有频率附近, 其中横摇与纵摇的激励频率 ff_1 位于 0.98~1.113 之间时, 舱内液体出现冲顶现象, 最大冲击压力出现在 ff_1 为 1.09 附近。此外, 对冲击压力在左侧舱壁与顶部舱壁的空间分布进行了分析, 得出低液深工况下, 自由液面附近与液舱顶部受到较大的冲击荷载, 在近共振频率附近, 侧舱壁冲击位置随着频率的增加而上升。该研究可为 FPSO 船液舱结构与晃荡荷载测量提供有益参考。

关键词: 复合激励; 弹性液舱; 低液深; 冲击荷载; 物模实验

1 引言

FPSO (Floating Production Storage and Offloading), 作为“海上石油工厂”, 能够将海底开采出来的原油进行初步加工并存储, 其作业过程中液舱部分载液的情况不可避免。在其航行过程中, 当外界激励频率接近液舱内液体的固有频率时, 将导致舱内液体发生剧烈晃荡, 剧烈晃荡的液体会对液舱内部结构产生巨大的砰击荷载, 舱壁结构在砰击荷载作用下产生结构响应, 极端情况下舱壁结构发生弹性变形, 甚至会造成液舱结构破损, 对船舶的安全运营存在极大隐患。

目前, 国内外众多学者对弹性舱内液体晃荡问题进行了研究。由于计算机技术的深入发展, 数值模拟分析成为研究液体晃荡问题的主要手段。周上然等^[1]通过 system coupling 模块实现弹性液舱双向流固耦合, 分析不同板厚与不同材质对晃荡荷载的影响; 朱仁庆等^[2]基于 MSC.Dytran 对弹性舱内的耦合作用进行计算, 在纵荡激励下, 分析不同外界激励参数、载液率对液舱晃荡荷载的影响; Strand 等^[3]通过 2D 柔性侧舱壁晃动的数值研究, 分析舱壁

变形对舱壁线性压力的影响；陈星等^[4]运用 ANIDA 软件模拟弹性液舱内小幅度液体晃荡，并与刚性液舱作对比，得出弹性液舱舱壁对晃荡冲击具有一定的缓冲作用；Zhang 等^[5]基于 MPS 法开发了 MLParticles-SJTU 内部求解器，结合有限元法，模拟高载液率下晃动流体冲击弹性罐壁的行为，并给出冲击舱顶事件的特征。但是由于液体晃荡具有高度非线性因素的影响，其理论分析和数值模拟尚不完善^[6-7]，试验方法可以有效地弥补理论分析和数值模拟的缺陷。

蒋梅荣等^[8-9]开展物模实验，研究刚性舱与弹性舱内液体晃荡的共振与非共振问题，并与理论值相比较，得出非共振条件下弹性结果、刚性舱结果与理论值接近，在共振条件下弹性结果小于刚性结果；为进一步研究弹性液舱内液体共振问题，进一步开展实验，探究有限液深下弹性侧舱壁液舱内液体晃荡的共振问题，结果表明液舱顶部易受到较大的晃荡荷载。上述学者主要对单自由度下影响弹性液舱内液体晃荡荷载的因素进行分析，但实际海况下，船舶受风、浪、流等作用，产生复杂的运动，舱内液体受多自由度外界激励影响发生晃荡，而关于多自由度激励作用下的弹性舱内液体晃荡冲击荷载特性的研究少见报道。

本研究以某 FPSO 的中货舱为原型，运用相似理论构建立物模实验台，通过模型实验的方法，考虑船体横摇运动伴随纵摇运动的复合激励作用，研究前三阶固有频率下低液深时舱内液体晃荡冲击问题，通过分析晃荡冲击荷载的频域及其空间特征得出晃荡冲击荷载特性，为船舶荷载计算及液舱结构设计提供理论参考。

2 实验系统

图 1 为整个弹性液舱复合晃荡的实验系统，其中 (a) 为晃荡平台系统；(b) 为模型液舱（其尺寸如图 2 所示）；(c) 为高速摄像机；(d) 为晃荡压力采集系统。

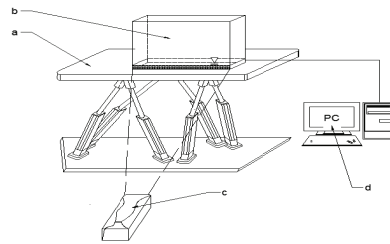


图 1 实验系统

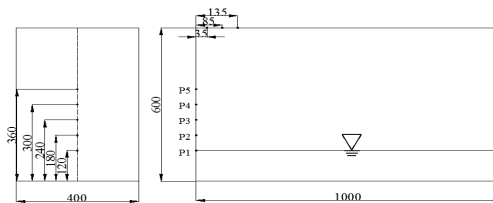


图 2 模型液舱示意图（单位：mm）

2.1 物模实验设置

本研究选用 FPSO 船其中一个中货舱(50m×20m×30m)作为原型舱,采用缩尺比为 1/50 建立模型舱(图 2)。模型液舱采用亚克力板制作,顶盖和左、右两侧面的面板厚度为 4.8mm,其余面的厚度均为 12 mm。

为了充分了解 FPSO 船运输原油的过程中舱内原油的晃荡冲击特性,应用相似准则原理^[10],在不考虑液体密度的条件下,实验选用夏季室温下黏度为 0.056Pa·s 润滑油作为液体介质。

2.2 仪器装置设置

外激振动平台由六自由度晃荡平台及其控制系统构成,平台最大载重量为 1 t,可模拟海上船舶横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡及这 6 种运动的耦合运动。

为采集模型液舱内液体晃荡过程中产生的晃荡冲击压力,分别在模型舱的左侧面、顶面上设置监测点^[11](图 2)。晃荡压力采集系统由型号为 CYB-301 的压阻式压力传感器和型号为 EM9636M 的 PLC 数据采集单元共同构成,采集单元可将压力传感器输出的电信号转换为数字信号,从而完成对压力的采集过程。压力传感器的量程为 10kPa,精度为 0.1%FS,数据采集单元的分辨率为 0.01kPa。

2.3 固有频率的确定

在外界激励作用下,舱内液体的固有频率为 f_n ,矩形舱内晃荡液体的固有频率可以由 Faltinsen^[14]给出的 n 阶自振频率表达式进行计算:

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

式中: L 表示运动方向的液舱长度, m; h 表示液面高度, m; g 表示重力加速度, m/s^2 ; n 表示模态数。本研究主要考虑 $n=1\sim 3$ 时的低阶模态下的舱内液体的固有频率,即共振频率。

3 冲击荷载特性分析

3.1 侧壁冲击荷载频域特征

晃荡冲击荷载具有高度随机性与离散性,本研究采用统计学的方法对荷载特征值进行分析。其中,晃荡冲击荷载是指同组实验中自由液面处晃荡冲击荷载峰值的最大值。利用布置在侧舱壁的压力传感器捕捉舱壁受到的晃荡冲击压力,并通过数据采集仪将数据导出,运用统计学方法,得出横纵摇复合激励作用下晃荡冲击荷载频率特征(图 3)。

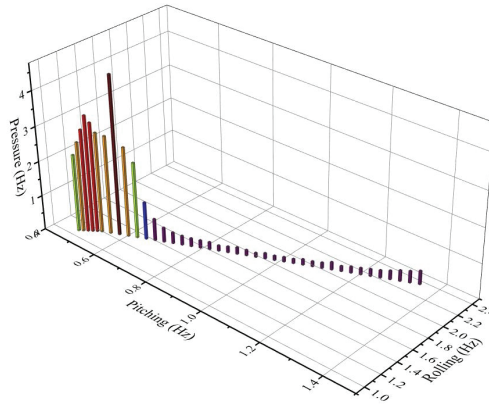


图3 复合激励下冲击压力频域分布

如图3所示,随着横摇与纵摇运动的外激频率逐渐接近舱内液体的一阶固有频率,自由液面处晃荡冲击荷载也在逐渐增大,并在 $0.96f$ 时达到第一个峰值;外激频率进一步增大至舱内液体的一阶固有频率甚至略大于一阶固有频率,即在 $0.96\sim 1.09f$ 阶段,此时晃荡冲击荷载先减小后陡增至第二个峰值;而后继续增大横摇与纵摇运动的外激频率,晃荡冲击荷载迅速减小,并在 $1.36f$ 之后,晃荡冲击荷载呈小幅度波动变化的状态。

分析原因,在横摇与纵摇运动的外激频率逐渐接近舱内液体的一阶固有频率时,此时横摇运动起主导作用,舱内液体运动的速度越来越大,累积的动能增大,故晃荡冲击荷载逐渐增大;在 $0.96\sim 1.09$ 阶段,随着纵摇运动接近一阶共振频率,纵摇运动会削弱横摇运动的作用,晃荡冲击荷载开始降低,但在外激频率为 1.09 时,晃荡冲击荷载突然增大,结合自由液面波形变化可知,此时横摇与纵摇运动共同影响,舱内液体晃荡剧烈,舱内液体累积的动能再次增大,故晃荡冲击荷载陡增;外激频率进一步增大,此时外激频率超过舱内液体的一阶固有频率,舱内液体的运动速度小于液舱的运动速度,对侧壁的冲击荷载减小,故晃荡冲击荷载逐渐减小,并在 1.36 之后,结合实验波形变化可知,舱内液体运动波形趋于稳定,呈小幅度行进波状态,故晃荡冲击荷载小幅度波动变化。

3.2 冲击荷载空间分布特征

由晃荡冲击荷载的频域分析可知,随着外激频率逐渐接近舱内液体的一阶固有频率,晃荡冲击荷载也随之增大,故选取横摇与纵摇运动的外激频率为 $0.96\sim 1.18f$ 阶段时晃荡冲击荷载的空间分布进行分析,其中1~5代表的是左侧舱壁上的P1~P5监测点,6~8代表的是舱顶P6~P8监测点。

由图4可知,在低载液率($h/H=20\%$)工况条件下,横摇与纵摇运动的外激频率逐接近舱内液体的一阶固有频率时,左侧舱壁晃荡冲击荷载集中在自由液面处,即P1处;然而在外激频率大于一阶共振频率时,液体冲击舱壁的位置具有差异性,可能出现在P2与P3处,同时液舱顶部也受到较大的冲击荷载。出现此现象的原因是外激频率逐渐增大至一阶

共振频率时,舱内液体的晃荡程度加剧,舱内液体累积的动能增大,舱内液体主要冲击 P1 处,液体沿舱壁爬升,冲击舱顶,靠近左侧舱壁的液舱顶部同时受到较大晃荡冲击荷载;外激频率继续增大,超过一阶共振频率时,在横摇运动外激频率分别为 0.554Hz、0.602Hz、0.626Hz,纵摇运动外激频率分别为 1.234Hz、1.302Hz、1.336Hz 时,此时液体冲击舱壁的位置在 P2 与 P3 处,分析原因,在外激频率大于共振频率时,舱内液体的晃荡剧烈,累积的动能增大,且横摇与纵摇运动共同存在,舱内液体随机冲击舱壁,故晃荡冲击荷载峰值出现在 P2 与 P3 处,因此液体冲击舱壁的位置具有差异性。

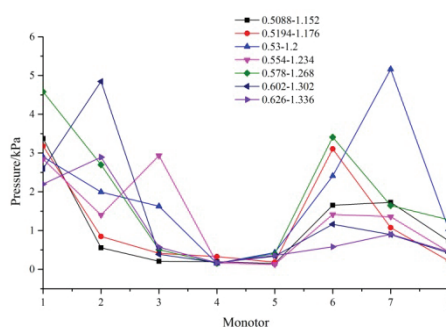


图 4 冲击压力的空间分布

4 结论

本研究主要通过物理模型实验,研究低载液率时复合激励下弹性液舱内液体晃荡冲击荷载特性,通过分析自由液面处晃荡冲击荷载频域特性,得出在横摇与纵摇复合激励下,外激频率为 $1.09f_1$ 时自由液面处晃荡冲击荷载最大;由晃荡冲击荷载的空间分布可得,在一阶共振频率附近,自由液面处与液舱顶部受到较大的晃荡冲击荷载,外激频率超过一阶固有频率且近共振频率时,舱内液体冲击侧壁的位置会上升,但整体上来说低载液率工况下,舱内液体主要冲击自由液面处的侧壁。

参 考 文 献

- 1 周上然,朱仁庆. 弹性液舱液体晃荡数值模拟[J]. 江苏船舶, 2014, 31(4):1-5.
- 2 朱仁庆,刘艳敏. 三维弹性液舱晃荡数值模拟[J]. 船舶力学, 2012, 16(10):1144-1151.
- 3 Strand I M, Faltinsen O M. Linear sloshing in a 2D rectangular tank with a flexible sidewall[J]. Journal of Fluids & Structures, 2017, 73:70-81.
- 4 陈星, 蒋梅荣. 三维矩形弹性液舱内液体晃荡数值模拟研究[J]. 船海工程, 2013, 42(5):99-104.
- 5 Zhang Y, Chen X, Wan D. Sloshing Flows in an Elastic Tank with High Filling Liquid by MPS-FEM Coupled Method[C] The Twenty-Seventh. 2017.

- 6 王德禹. 液化天然气船液舱的晃荡[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 1-4.
- 7 Yung TW, Ding y J, He H, et al. LNG sloshing: Characteristics and scaling, laws[C]. Proceedings of the Nine-teenth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Osaka, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2009.
- 8 蒋梅荣, 任冰, 王国玉, 等. Laboratory investigation of the hydroelastic effect on liquid sloshing in rectangular tanks[J]. 水动力学研究与进展, B辑, 2014, 26(5):751-761.
- 9 蒋梅荣, 任冰, 李小超, 等. 有限液深下弹性侧壁液舱内晃荡共振特性实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2014(5):558-567.
- 10 吴豪霄. 双壳油船水下破舱原油泄漏缩尺效应及全尺度预测模型研究[D]. 41-42.
- 11 卫志军, 岳前进, 张文首, 等. 大尺度储舱液体晃荡砰击压力测量方法研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014(7):746-758.

Experimental study on impact load characteristic of sloshing in elastic bulkhead tank with low and partial filling under linear rolling coupled pitching

ZHEN Chang-wen¹, WU Wen-feng², ZHANG Jian-wei², TU Jiao-yang¹, ZHANG Jia-kuo², GAO Jia-lin²

1. School of Naval Architecture and Mechanical-electrical Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022

2. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022

Abstract: Liquid sloshing in tank with low liquid depth present complex physical phenomena, and the dramatic impact load will be produced, which is one of the key problems in the tank structure design. The sloshing experiment covering lowest three natural frequencies of rolling coupled pitching were conducted, and the impact load characteristics of liquid sloshing in the elastic tank under the coupled excitation frequency were studied under the low liquid depth by the statistical method. The test results show that the most violent liquid sloshing occurs when the rolling and pitching are located near the first-order natural frequency. When the excitation frequency f/f_1 of the roll and pitch is between 0.98 and 1.113, the liquid in the tank appears to be topping. The maximum impact pressure occurs around f/f_1 of 1.09. In addition, the spatial distribution of the impact pressure on the left bulkhead and the top bulkhead were analyzed. It is concluded that under low carrier liquid conditions, the impact near the free liquid surface and the top of the tank is subject to a large impact load near the near resonant frequency. The side bulkhead impact position increases as the frequency increases. This study can provide a useful reference for FPSO ship tank structure design and sloshing load measurement.

Key words: Coupled excitation; Elastic tank; Low liquid depth; Impact load; Model experiment