

# 有限液深下弹性侧壁液舱内晃荡共振特性实验研究

蒋梅荣<sup>1</sup>, 任冰<sup>\*1</sup>, 李小超<sup>2</sup>, 王永学<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 对有限液深下, 弹性侧壁矩形液舱内液体晃荡的共振特性进行了物理模型实验研究. 通过扫频实验给出了不同液深和激励振幅下舱内液体的最低阶固有频率. 自由液面形状和高度经由影像采集与分析系统得到, 通过压力和应变采集系统分别得到作用在舱壁上的晃荡压力和舱壁的应变. 对有限液深下弹性侧壁液舱内自由液面波形进行了描述, 同时在时域和频域范围内对自由液面高度、晃荡压力和结构应变的共振变化特性进行了分析, 并且对弹性侧壁液舱内结构应变的时间变化特性和空间分布特性做了进一步的研究和讨论. 结果表明: 晃荡压力和结构应变波峰处均出现双峰, 压力和应变频谱受双峰的影响较大; 在顶盖舱壁上, 距顶角不远位置处更容易出现较大的应变.

**关键词:** 液体晃荡; 弹性侧壁液舱; 波高; 晃荡压力; 结构应变; 共振

**中图分类号:** U661.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201405012

## 0 引言

部分载液液舱受到外界激励作用, 舱内液体便会受迫晃动. 当外界激励频率接近舱内液体的固有频率时, 舱内液体就会发生共振晃荡. 剧烈晃荡的液体将在液舱壁面上产生极大的动水压力, 危及液舱安全, 同时大幅晃荡也会产生倾覆力矩, 对船舶的稳性造成影响<sup>[1-2]</sup>. 自20世纪50年代始, 液体晃荡在航空航天、造船、海洋工程和土木工程领域引起广泛的关注. Abramson<sup>[3]</sup>、Faltinsen等<sup>[4-6]</sup>、Kim<sup>[7]</sup>、Ibrahim<sup>[8]</sup>等学者在理论、实验和数值模拟等各方面对刚性液舱内液体晃荡及晃荡与船舶耦合运动进行了大量的研究, 取得了一系列的进展和成果.

然而, 在实际工程和应用中, 液舱是弹性结构, 在晃荡荷载作用下会产生一定的响应. 例如, 在液化天然气(LNG)船上, 膜式液舱的大尺度舱壁就是典型的弹性结构. 由于膜式液舱系统的弹性, 流固耦合效应在晃荡冲击荷载的作用过程中就显得非常重要. 与此同时, 液舱结构的动力响应, 如在极端荷载作用下液舱所产生的应变或者

位移, 对结构的安全性也是极大的考验. 20世纪90年代, 水弹性力学蓬勃发展, 国内外学者将其应用于弹性液舱内的晃荡研究. Nash等<sup>[9]</sup>、Zhou等<sup>[10]</sup>、Faltinsen等<sup>[11]</sup>学者从理论方面对该问题进行了初步研究. Hwang等<sup>[12]</sup>、Koh等<sup>[13]</sup>、Lee等<sup>[14]</sup>、朱仁庆等<sup>[15-17]</sup>采用数值模拟方法对液舱内水弹性效应进行了研究.

在晃荡机理的研究当中, 理论研究和数值模型均基于一定的假定或者作了简化, 大部分都是近似的. 相对而言, 实验才是最可靠的方法, 同时实验结果也可以作为理论研究和数值模拟的验证数据. 迄今为止, 关于弹性液舱内实验研究成果所知甚少. Bunnik等<sup>[18]</sup>进行了大比尺物理实验, 比较了作用在不同液舱面板上的峰值压力, 对于冲击压力在冲击持续时间内的冲量, 发现弹性面板上的较刚性面板上的要小. Jung等<sup>[19]</sup>考虑LNG液舱的不同弹性, 对于高液深时作用在舱壁上的冲击压力幅值, 发现弹性液舱的较刚性液舱的减小. 祁恩荣等<sup>[20]</sup>进行LNG刚性液舱实验, 研究了液舱上铜板格的结构动应变. 蒋梅荣等<sup>[21-22]</sup>对弹

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179030, 51309038); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51221961).

作者简介: 蒋梅荣(1983-), 男, 博士生, E-mail: meirongjiang@live.cn; 任冰\*(1972-), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: bren@dltu.edu.cn; 王永学(1953-), 男, 教授, 博士生导师.

性液舱内液体晃荡进行了系统性的实验研究,采用统计法对弹性液舱内自由液面波高和晃荡压力的水动力特性进行了分析,并与刚性液舱内实验结果和理论值进行了比较。

尽管在这些方面已经有了一些初步性的研究,但是关于弹性液舱内晃荡机理仍然所知甚少。基于此,本文结合前期弹性液舱内水动力学研究基础,对有限液深、共振情况下弹性侧壁矩形液舱内液体晃荡水动力和结构特性进行实验研究,在时域和频域范围内对自由液面高度、晃荡压力和结构应变的共振变化特性进行分析,并且对弹性侧壁液舱内结构应变的时间变化特性和空间分布特性作进一步的研究和讨论。

### 1 物理模型实验设置

#### 1.1 晃荡模型

晃荡实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室展开,激励型式为水平简谐。弹性侧壁矩形液舱采用有机玻璃板制作,顶盖和左、右两侧面板厚 2 mm,其他面板厚 12 mm。矩形液舱长×高×宽=500 mm×500 mm×100 mm(内部尺寸),液舱示意图及坐标系  $xOy$  如图 1 所示。为进行对比,同时制作了刚性侧壁模型,模型面板均采用 12 mm 厚的有机玻璃板,内部尺寸与弹性侧

壁模型相同。

采用常温下干净自来水作为实验液体,其密度和黏度分别为  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  和  $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。红色荧光染色剂罗丹明不影响水的密度和黏度,为实验拍摄需要加入少量。

#### 1.2 仪器设置

振动台采用北京航天希尔测试技术有限公司生产的低频电动振动台。实验中,令  $A$  与  $f$  分别为水平简谐激励的振幅和频率,则沿  $x$  方向的运动位移  $x_e = A \sin 2\pi ft$ 。

为了获得液舱内右半区域的自由液面波形和指定点的自由液面高度,实验中自行设计了一套影像采集与分析系统,其采集频率为 30 Hz。选取自由液面上  $x=0, 125 \text{ m}$  和  $0, 240 \text{ m}$  两处位置对自由液面高度进行分析,两处测点分别标注为 E01 和 E02,如图 1 所示。

采用交通运输部天津水运工程科学研究所生产的 DS30-MD14 型多点脉动压力测量系统对舱内晃荡压力进行测量。压力信号采集频率为 1 000 Hz,其量程和分辨率分别为 10 kPa 和 0.01 kPa。9 个压力传感器分别安装在液舱不同位置,其具体布置(编号 P01 至 P09)如图 1 所示。振动台、影像采集与分析系统和多点压力测量系统具体介绍见文献[21-22]。

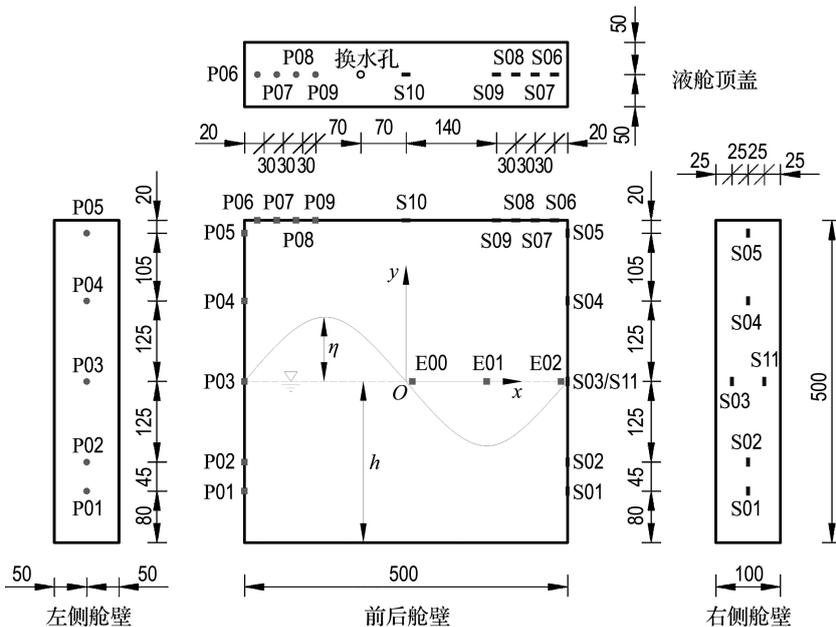
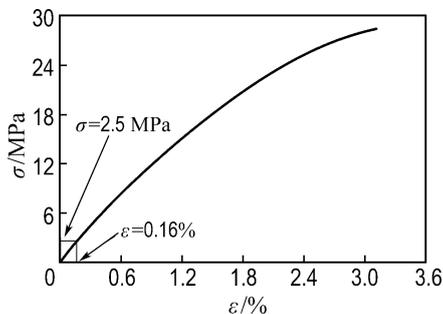
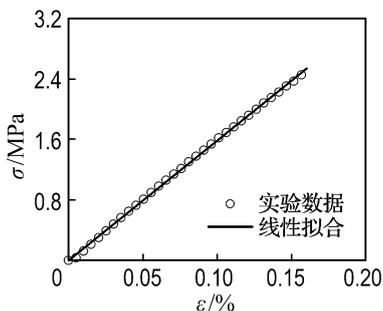


图 1 矩形液舱模型示意图及舱内波高、晃荡压力和结构应变测点布置图(单位:mm)  
 Fig. 1 The sketch of the rectangular tank and the setup of measuring points of the wave elevation, sloshing pressure and structural strain in the rectangular tank (unit: mm)

为研究弹性侧壁液舱在晃荡作用下的结构响应,对于在实验中所用到的有机玻璃材料,在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室结构分室对其进行了抗拉实验研究.实验在万能试验机上进行,共进行6次,每次实验中都采用相同规格的有机玻璃样品,样品与模型所用材料均来自同一块有机玻璃板,样品厚  $t = 2$  mm,长  $a = 300$  mm,宽  $b = 30$  mm.有机玻璃板抗拉实验中的应力-应变曲线如图2所示.



(a) 实验曲线



(b) 拟合曲线

图2 有机玻璃板抗拉实验中的应力-应变曲线

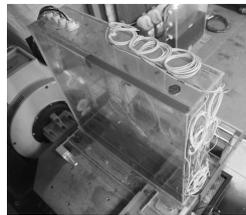
Fig. 2 The stress-strain curve of the organic glass plate in the tensile test

由于在本实验中作用在液舱舱壁上的晃荡压力不大,选取较小范围内应力-应变数据进行线性拟合.图2(b)为局部拟合的应力-应变曲线.由图可见,在实验允许的范围内,有机玻璃板的应力-应变曲线接近线性关系(曲线拟合优度  $R^2 = 99.93\%$ ).因此,在较小荷载( $\sigma < 2.5$  MPa)作用下,可近似认为该材料为线弹性材料.

采用大连理工大学结构健康监测与控制研究中心自主研发的光纤光栅应变传感器测量液舱结构的应变.光纤光栅应变传感器的工作原理是借助光纤光栅解调仪将液舱结构上的应变变化转化为光纤光栅的波长漂移,建立并标定光纤光栅中心波长的变化与结构应变的关系,由光纤布拉格

中心波长的变化获得液舱结构应变.光纤光栅应变传感器具有抗电磁干扰、体积小、灵敏度高、精度高、重量轻等诸多优点,对于在极大噪声与电磁干扰下的振动台液体晃荡实验,是最理想的应变测量仪器.目前光纤光栅应变传感器一般通过封装将其贴附于结构表面或埋设在结构内部直接监测应变,逐渐取代传统的应变片,已开始大量应用于土木工程、海洋工程、石油化工等领域的实验测量和现场观测.

光纤光栅应变传感器以光信号为变换和传输的载体,利用光纤传输信号.实验信号采用 Micron Optics 公司生产的 SM130-700 型光纤光栅传感解调仪采集,其采样频率为 1 000 Hz.在液舱上不同位置一共安装 11 个光纤光栅应变传感器(编号 S01 至 S11),如图3所示.编号数字相同的压力和应变传感器分别对称布置于液舱顶盖或者左、右两侧面板的同一水平位置,具体布置如图1所示.此外,在全文中,传感器编号后缀 E 表征所分析物理量为弹性相关值.



(a) 光纤光栅应变传感器



(b) SM130-700 光学传感解调仪

图3 安装在液舱模型上的光纤光栅应变传感器和 SM130-700 光学传感解调仪

Fig. 3 The fiber Bragg grating strain sensors installed on the model tank and the SM130-700 optical sensing interrogator

## 2 时间和组次

选取浅液深( $h = 0.080$  m,  $h/l = 0.16$ )和一般液深( $h = 0.250$  m,  $h/l = 0.50$ )进行实验,其中  $l$  指的是激励方向液舱的特征长度,由于实验中对液舱沿长度即  $x$  方向施加水平简谐激励,在本文

中该  $l$  特指液舱的长度  $L$ . 实验激励振幅  $A = 4, 6, 10 \text{ mm}$ .

晃荡的随机性使其在较长时间内也很难得到稳定周期性的结果<sup>[5]</sup>, 因此根据激励周期、晃荡液体固有周期与实验观测情况, 每次实验时间至少为  $100 \text{ s}$ .

图 4 为液深  $h = 0.250 \text{ m}$ , 振幅  $A = 10 \text{ mm}$ , 频率  $f = 1.090 \text{ Hz}$  情况下 S01 处的结构应变. 如图所示, 一个完整的晃荡过程包括瞬态阶段和稳态阶段. 静止液舱在强迫激励下开始运动, 波动数据从零开始由小逐渐变大, 瞬态阶段一般开始于此, 直至达到一个比较稳定的阶段. 在瞬态阶段, 每个周期的波形相差较大, 其频率和峰值相差也较大, 数据的稳定性和统一性欠佳. 瞬态阶段之后波动数据比较稳定的阶段即为稳态阶段, 此时每个周期的波形相对比较接近, 其频率和峰值差别也不大, 数据的稳定性和统一性较好. 本研究主要目的在于对弹性液舱内液体晃荡水动力和结构特性进行初步分析, 为了得到一个比较稳定可靠的结果, 在进行数据处理时, 将前面瞬态阶段的数据去除, 采用稳态或者准稳态阶段的数据进行分析以及统计, 以保持数据的统一性和结果的可靠性.

由于液舱内液体晃荡具有很强的随机性与非

线性, 舱内液体的实际固有频率与理论固有频率会有所不同. 进行扫频实验, 对采得的晃荡压力数据进行快速傅里叶变换 (FFT), 从而可以得到液舱内液体实际最低阶固有频率  $f_{0,e}$ .

液舱内液体的最低阶固有频率如表 1 所示, 包括刚性侧壁和弹性侧壁液舱的频率实验值及刚性液舱频率的理论值<sup>[3]</sup>, 以及相互之间的比较情况. 分析发现, 刚性频率接近或者等于弹性频率, 但实验值与理论值有一定的偏差. 当液深较浅 ( $h/l = 0.16$ ) 时, 理论值比实验值约小  $5\%$ ; 而当液深变深 ( $h/l = 0.50$ ) 时, 理论值反而比实验值大  $5\% \sim 10\%$ . 分析表明, 舱内晃荡液体与液舱结构互相耦合作用, 使得晃荡共振频率产生了变化.

另外, 基于湿模态理论, 采用 ADINA 建立流固耦合模型, 对刚性侧壁和弹性侧壁液舱内晃荡液体固有频率进行了计算, 其最低阶固有频率列于表 1. 由 ADINA 计算所得自振频率和由势流理论计算所得自振频率有差异, 但这种偏差很小, 如表 1 所示, 仅为  $0.08\% \sim 0.35\%$ . 因此, 可以认为这些偏差是计算误差, 在误差范围之内.

基于表 1 结果, 选用了最低阶共振频率  $f_{0,e}$  附近比较宽的频率范围进行实验. 每次实验至少重复 3 次, 实验结果的取值为这 3 次实验的平均值.

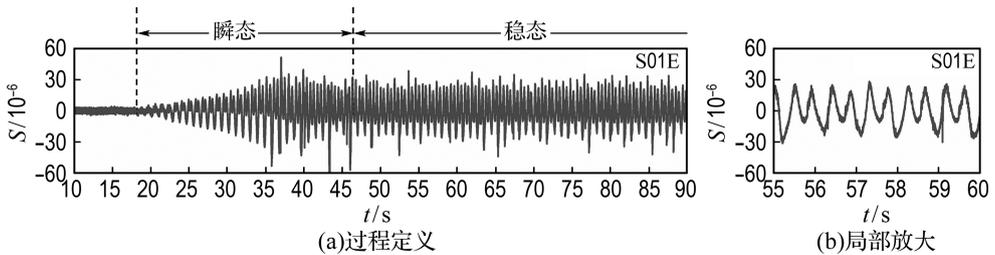


图 4 液体晃荡过程中瞬态和稳态过程定义 (结构应变,  $h = 0.250 \text{ m}$ ,  $A = 10 \text{ mm}$ ,  $f = 1.090 \text{ Hz}$ )  
 Fig. 4 The definition of the transient and steady state process during the liquid sloshing (The structural strain,  $h = 0.250 \text{ m}$ ,  $A = 10 \text{ mm}$ ,  $f = 1.090 \text{ Hz}$ )

表 1 液舱内液体实际最低阶固有频率 (液深  $h = 0.080 \text{ m}, 0.250 \text{ m}$ )

Tab. 1 The actual lowest-order natural frequency of the liquid in tanks (Depths  $h = 0.080 \text{ m}, 0.250 \text{ m}$ )

$h/\text{m}$	$A/\text{mm}$	$f/\text{Hz}$	ADINA 值				实验值			
			刚性频率/Hz	偏差/%	弹性频率/Hz	偏差/%	刚性频率/Hz	偏差/%	弹性频率/Hz	偏差/%
0.080	4	0.851	0.852	0.12	0.854	0.35	0.900	5.77	0.890	4.58
0.080	6	0.851	0.852	0.12	0.854	0.35	0.916	7.64	0.890	4.58
0.080	10	0.851	0.852	0.12	0.854	0.35	0.890	4.58	0.890	4.58
0.250	4	1.197	1.196	-0.08	1.194	-0.25	1.134	-5.26	1.130	-5.60
0.250	6	1.197	1.196	-0.08	1.194	-0.25	1.113	-7.02	1.113	-7.02
0.250	10	1.197	1.196	-0.08	1.194	-0.25	1.090	-8.94	1.090	-8.94

### 3 共振晃动特性研究

本文对一般液深( $h=0.250\text{ m}$ )、较大振幅( $A=10\text{ mm}$ )和共振( $f=1.090\text{ Hz}$ )情况下弹性侧壁液舱内自由液面高度、晃动压力和结构应变在时域和频域内进行了分析。

#### 3.1 波形演变过程

在实验中得到了液舱右半区域的 CCD 图片,如 1.2 中所示. 在这里将其作为自由液面高度的瞬时图片对波形进行分析. 图 5 为共振情况下弹性侧壁液舱内自由液面波形的演变过程,其  $h=0.250\text{ m}$ ,  $A=10\text{ mm}$ ,  $f=1.090\text{ Hz}$ . 图中间的白色水平线和侧边凸起的黑色小方块分别代表静水

液面位置和模型上的应变传感器位置. 在图中,每个时刻的自由液面采用白色线条进行标记.

从图 5(a)~(d)可以看出,舱内液体自左向右传播. 图 5(a)显示,此时自由液面在静水液面位置以下,有上升的趋势. 随后,液体向右传播,且沿壁面开始上升,如图 5(b)所示. 液体传播逐渐加速,向右、向上传播,慢慢接近静止液面(图 5(c)和(d)). 之后,加速液体冲击竖直舱壁,并且在竖直壁面的阻碍作用下形成水跃,沿壁面向上爬升(图 5(e)). 由于顶盖的存在,水跃爬升到一定高度冲击顶盖(图 5(f)),沿顶盖形成射流并伴有液体飞溅(图 5(g)). 最后,在重力作用下,液体开始向下回落(图 5(h)).

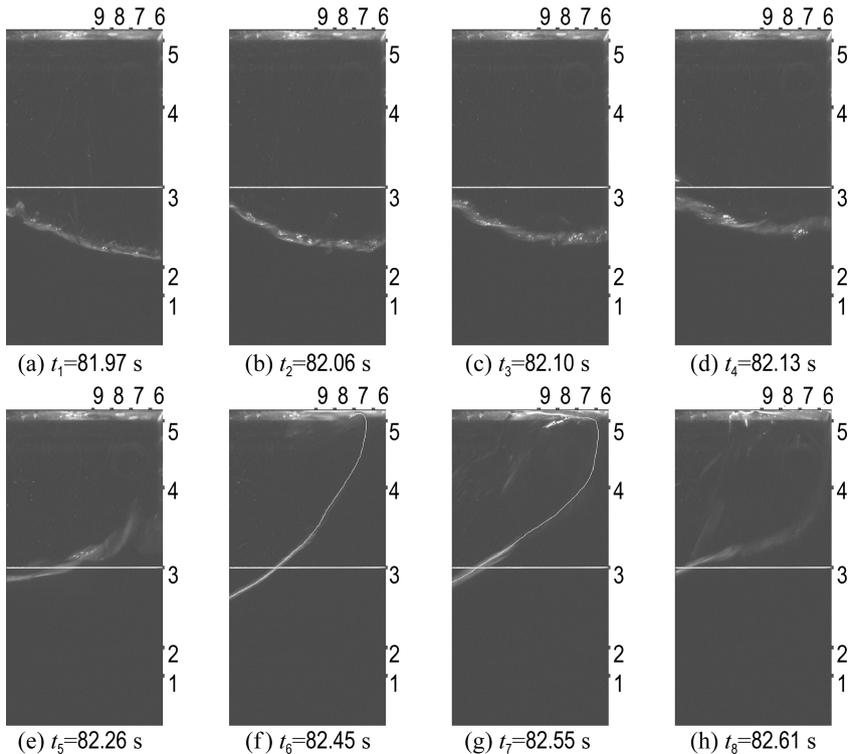


图 5 共振情况下液舱内自由液面波形的演变过程( $h=0.250\text{ m}$ ,  $A=10\text{ mm}$ ,  $f=1.090\text{ Hz}$ )

Fig. 5 Wave shape development of free liquid surface in tanks under resonance  
( $h=0.250\text{ m}$ ,  $A=10\text{ mm}$ ,  $f=1.090\text{ Hz}$ )

#### 3.2 历时曲线与频谱分析

对在实验中得到的采样记录分别进行时域和频域分析,频域分析中利用快速傅里叶变换把历时变化数据由时域变换到频域. 图 6~8 分别为共振情况下弹性侧壁液舱内不同位置处自由液面高度、晃动压力和结构应变的历时曲线及频谱. 另外,在本研究中,正应变规定为拉应变,而负应变则规定为压应变.

从图 6 可以看出,不对称性是此时自由液面高度历时曲线波峰与波谷之间的主要特性. E02E 中的点画线为液舱顶盖,其  $\eta=0.250\text{ mm}$ ,分析发现波峰与顶盖之间经常存在接触、冲击. 自由液面高度频谱构成比较单一,其主峰频率为激励频率  $f$ ,其他频率成分很小,可以忽略. 从图 7 分析发现,作用在弹性侧壁上的晃动压力包括非冲击型动水压力和冲击型压力,前者在液面以下位置

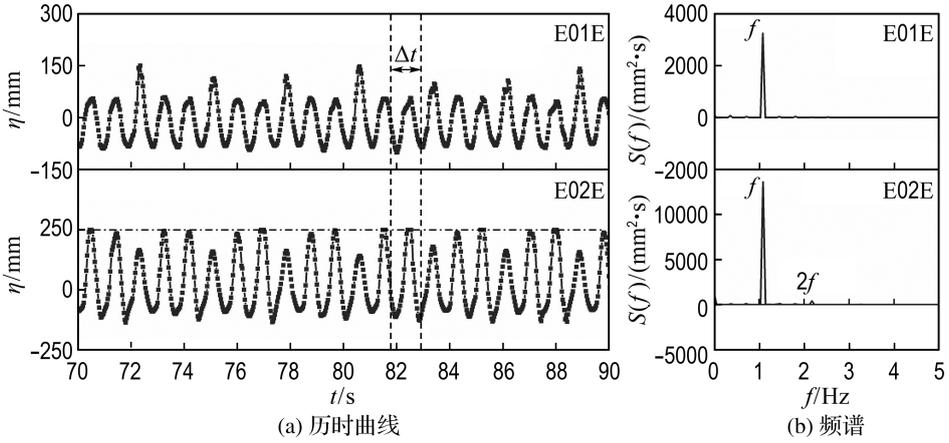


图 6 自由液面高度的历时曲线及频谱分析 ( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

Fig. 6 Time histories and spectrums of the wave elevation of free surface ( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

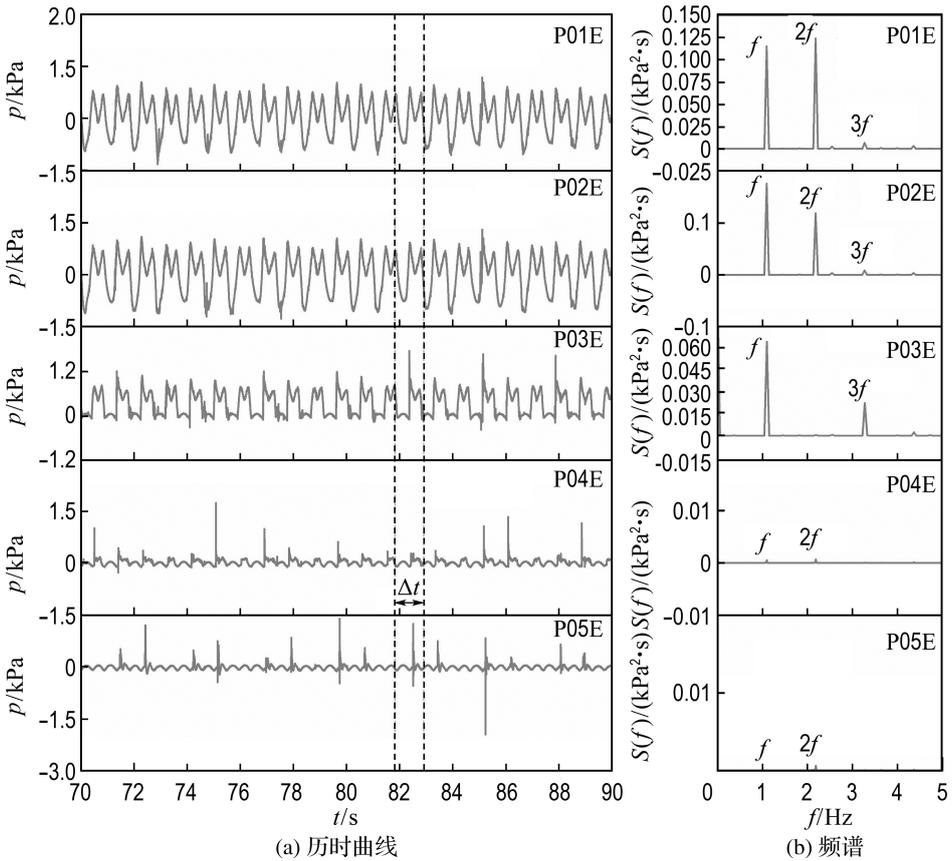


图 7 晃荡压力历时曲线及频谱分析 ( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

Fig. 7 Time histories and spectrums of sloshing pressure ( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

(P01 和 P02 处), 后者则在液面及液面以上位置 (P03 和 P04 处). 液体晃荡所产生的驻波作用以及流体在舱壁上回落时的重力作用, 使得波峰处产生了压力双峰现象. 晃荡压力频谱稍显复杂, 在 P01 处的频谱图中, 由于受到压力双峰的影响, 在微幅晃荡下应为主峰频率的激励频率  $f$  在此时退化成为次峰频率, 而二倍频  $2f$  则升级成为主

峰频率; 在 P02、P03 处, 主峰频率依然是激励频率  $f$ , 其他次峰频率则为激励频率的倍频  $kf$  ( $k=2, 3, 4, \dots$ ); 在液面以上位置 (P04、P05 处), 频率成分很小, 可以忽略. 从图 8 中可以看到, 由于晃荡波浪与液舱结构的相互作用, 由驻波和液体回落所引起的压力双峰作用在弹性侧壁液舱壁面上, 使得在结构应变中也出现了双峰现象. 在

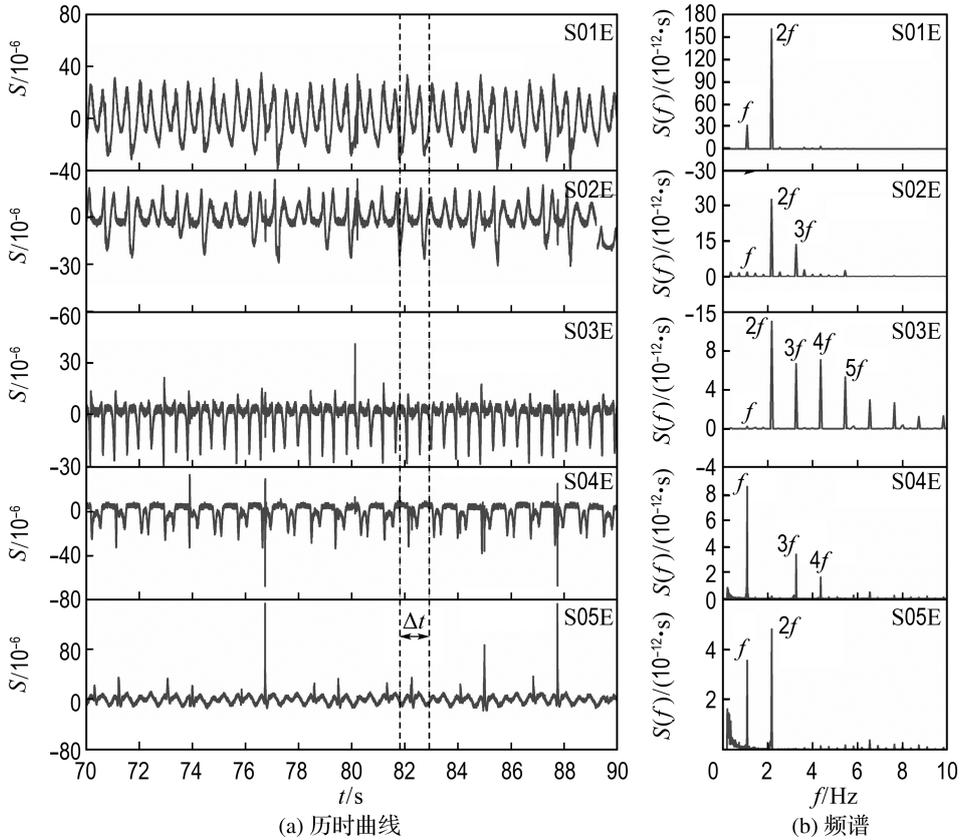


图8 结构应变的历时曲线及频谱分析( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

Fig. 8 Time histories and spectrums of structural strain ( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=1.090$  Hz)

S01 和 S02 位置处出现了拉应变双峰,而在 S03 位置处则出现了压应变双峰.在频谱图中可以发现,较之压力,结构应变频谱受压力双峰的影响更大,除 S04 位置处的主峰频率是激励频率  $f$  以外,所有其他位置处的主峰频率均为激励频率的二倍频  $2f$ ,激励频率及其他倍频则为次峰频率.

线性晃荡系统中,强迫激励持续作用下,波高、压力和应变频谱中主峰频率应为主共振的激励频率  $f$ .而非线性晃荡系统的动力反应则明显不同于线性系统,在激励频率或系统固有频率引起的主共振以外,另外还有一种由非线性引起的超谐共振.超谐共振为强迫振动时产生的频率为激励频率  $n$  倍的振动<sup>[23]</sup>.Colagrossi 等<sup>[24]</sup>在晃荡实验波高能量谱分析中指出,在稳态运动中存在频率为  $1/3$  倍激励频率的亚谐振动和频率为  $2f$  的超谐振动.在本文中,波高、压力和应变频谱中的激励频率  $f$  是外界强迫激励持续作用的结果;而激励频率  $f$  以外的频率主要是  $f$  的倍频  $2f, 3f, 4f, 5f, \dots$  因此,这些倍频可归结于非线性作用下晃荡系统超谐共振的结果.

在共振剧烈晃荡( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f$

$=1.090$  Hz)情况下,当水体不与传感器接触时,图7中本应为零的压力曲线存在连续的情形(P03、P04、P05处).为究其原因,将其与非共振小幅晃荡( $h=0.250$  m,  $A=10$  mm,  $f=0.763$  Hz)情况进行了对比,如图9所示,此时激励频率  $f=0.7f_{0,e}$ .对比发现,在非共振小幅晃荡情况下,当水体不与传感器接触时,各测点处压力大致为零.这两种实验工况的量测设备和方法一样,数据分析手段相同.由于实验中液舱是带顶盖的封闭液舱,在自由水面上部空间内封闭了一定数量的空气.对比共振和非共振情况下的实验现象发现,共振时液面晃荡剧烈,可能会对其上部空气产生较大扰动,从而导致相应测点位置处产生晃荡压力.而非共振状态下液面波动小,对其上部空气扰动也很小,所以相应测点位置处压力是零.据此分析,共振情况非淹没条件下 P03、P04、P05 处压力连续的振动可归结于舱内大幅剧烈晃荡的液体使得舱内封闭空气往复波动,导致其产生了连续的空气压力.

### 3.3 结构局部应变

为深入研究弹性侧壁液舱在晃荡压力作用下

的结构特性,对图6中  $\Delta t$  时段内局部应变进行放大以作进一步的研究.

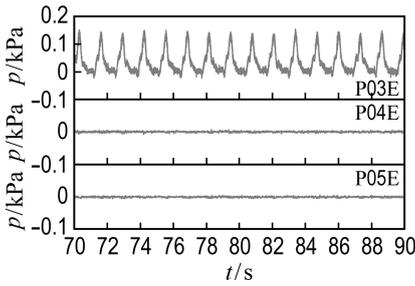


图9 非共振情况下弹性液舱内晃荡压力历时曲线 ( $h=0.250\text{ m}$ ,  $A=10\text{ mm}$ ,  $f=0.763\text{ Hz}$ )

Fig.9 Time histories of the non-resonant sloshing pressures in elastic liquid tank ( $h = 0.250\text{ m}$ ,  $A = 10\text{ mm}$ ,  $f = 0.763\text{ Hz}$ )

从  $t_1$  时刻开始,液体自左向右横向传播,作用在右侧舱壁上的液体在静止液面以下位置产生动水压力.在动水压力作用下,静止液面位置以下的S01和S02处应变逐渐增大.液体逐渐加速,横向冲击舱壁( $t_2$ 至 $t_4$ 时刻),在此作用下,于S01和S02号传感器处先后观察到两者的第一个拉应变峰值,与此对应的是在S03号传感器处的第一个压应变峰值( $t_3$ 时刻).之后,液体沿右侧竖直舱壁向上爬升,逐渐接近静止液面,此时在S04号传感器处观察到此处的第一个压应变峰值( $t_4$ 时刻).

由于波浪的传播与竖直舱壁的影响,液体在竖直舱壁处形成了水跃.高速运动的水跃对右侧舱壁和顶盖的冲击作用,造成了  $t_5$  时刻 S04 至

S08号传感器处应变的峰值和振荡.水跃作用到一定程度开始减速,并在重力作用下开始回落.在回落的过程中,依次观察到了由液体重力效应引起的S04和S03号传感器处的第二个压应变峰值以及S01和S02号传感器处的第二个拉应变峰值( $t_6$ 至 $t_8$ 时刻).

### 3.4 结构应变瞬时分布

针对图6中弹性侧壁液舱结构的局部应变,对  $t_1$  至  $t_8$  各个时刻结构应变的空间分布进行了研究.图10为共振情况下弹性侧壁液舱内顶盖和右侧舱壁上结构应变的瞬时分布.对于液舱顶盖(图10(a)), $x$ 和 $y$ 轴分别代表应变传感器到液舱中心的距离和瞬时应变;对于右侧舱壁(图10(b)), $x$ 和 $y$ 轴分别代表瞬时应变和应变传感器到静止液面的距离.由左至右,图10给出了应变分布随时间的演变过程( $t_1$ 到 $t_8$ 时刻).表2为  $t_1$  至  $t_8$  各时刻拉、压应变的最大值统计表.

从图10和表2可以看出,顶盖上的最大拉应变出现在  $t_5$  时刻的S07处( $+8.16 \times 10^{-6}$ ),从上述分析可发现其来自于水跃对顶盖的冲击;最大压应变出现在  $t_7$  时刻的S07处( $-3.67 \times 10^{-6}$ ).右侧舱壁上的最大压应变出现在  $t_2$  时刻的S03处( $-26.12 \times 10^{-6}$ ),最大拉应变出现在  $t_3$  时刻的S01处( $+28.24 \times 10^{-6}$ ),该应变来自于加速液体对竖直舱壁的冲击,该处的拉应变也是这个过程中整个液舱结构中的最大应变.从整个演变过程可以发现,在顶盖上,距顶角不远的S07处更容易出现较大的拉、压应变;而在右侧舱壁上,拉、压应变的极值在每个位置处出现的概率较为均衡.

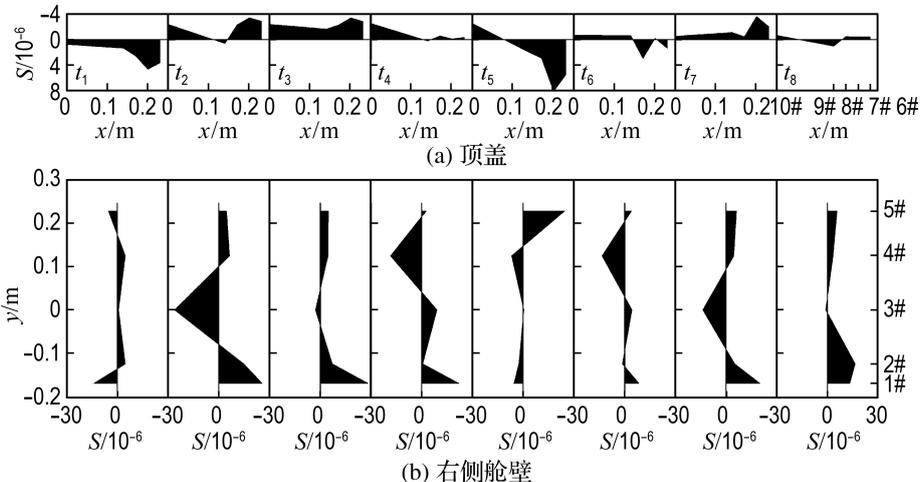


图10 弹性侧壁液舱内顶盖和右侧舱壁上结构应变的瞬时分布(对应于图5中  $t_1$  至  $t_8$ )

Fig.10 Instantaneous strain profiles both on ceiling and right horizontal bulkheads for time instants  $t_1$  to  $t_8$  in Fig. 5

表2  $t_1$  至  $t_8$  各时刻拉、压应变的最大值Tab.2 The maximum value of the tensile and compressive strain from  $t_1$  to  $t_8$ 

时刻	顶盖				右侧舱壁			
	拉应变/ $10^{-6}$	位置	压应变/ $10^{-6}$	位置	拉应变/ $10^{-6}$	位置	压应变/ $10^{-6}$	位置
$t_1$	+4.71	S07			+4.59	S04	-13.89	S01
$t_2$	+0.61	S09	-3.46	S07	+25.56	S01	-26.12	S03
$t_3$			-3.44	S07	+28.24	S01	-2.86	S03
$t_4$	+0.21	S09	-2.58	S10	+21.91	S01	-18.45	S04
$t_5$	+8.16	S07	-2.55	S10	+24.59	S05	-6.77	S04
$t_6$	+2.97	S08	-0.67	S10	+8.31	S01	-13.37	S04
$t_7$			-3.67	S07	+19.98	S01	-13.79	S03
$t_8$	+1.02	S09	-0.69	S10	+16.22	S02	-1.09	S03

## 4 结 论

(1)弹性和刚性侧壁液舱内晃荡共振频率实验值之间差别很小,但实验值与理论值有一定的偏差。当液深较浅( $h/l=0.16$ )时,理论值比实验值约小5%;而当液深变深( $h/l=0.50$ )时,理论值则反而比实验值大5%~10%。

(2)液体晃荡所产生的作用在舱壁上的驻波以及流体在舱壁上回落时的重力作用,引起压力双峰现象出现在晃荡压力和结构应变波峰处。由于双峰的影响,在P01处激励频率 $f$ 退化成为次峰频率,而二倍频 $2f$ 则升级成为主峰频率;结构应变频谱受双峰的影响更大,除S04位置处的主峰频率是激励频率 $f$ 以外,所有其他位置处的主峰频率均为激励频率的二倍频 $2f$ 。

(3)从结构应变瞬时分布演变过程可以发现,在顶盖上,距顶角不远的S07处更容易出现较大的拉、压应变;而在右侧舱壁上,拉、压应变的极值在每个位置处出现的概率较为均衡。

## 参 考 文 献:

[1] Gavory T, de Seze P E. Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective [C] // **Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**. Osaka:ISOPE, 2009:13-20.

[2] Hamlin N A, Lou Y K, MacLean W M, *et al.* Liquid sloshing in slack ship tanks-Theory, observations, and experiments [J]. **SNAME Transactions**, 1986, **94**:159-195.

[3] Abramson H N. The dynamic behavior of liquids in moving containers [R] // **NASA Report SP 106**. Washington D C:NASA, 1966.

[4] Faltinsen O M. A numerical nonlinear method of

sloshing in tanks with two-dimensional flow [J]. **Journal of Ship Research**, 1978, **22**(3):193-202.

[5] Faltinsen O M, Rognebakke O F, Lukovsky I A, *et al.* Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2000, **407**:201-234.

[6] Faltinsen O M, Rognebakke O F, Timokha A N. Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2003, **487**:1-42.

[7] Kim Y. Numerical simulation of sloshing flows with impact load [J]. **Applied Ocean Research**, 2001, **23**:53-62.

[8] Ibrahim R I. **Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications** [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

[9] Nash W A, Yu B Q, Kirchhoff R H. Structural behavior of liquid-elastic solid systems [C] // **ASME Pressure Vessel Piping Conference**. Honolulu: ASME, 1989:89-94.

[10] Zhou D, Liu W. Hydroelastic vibrations of flexible rectangular tanks partially filled with liquid [J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2007, **71**:149-174.

[11] Faltinsen O M, Timokha A N. **Sloshing** [M]. New York:Cambridge University Press, 2009.

[12] Hwang I T, Ting K. Boundary element method for fluid-structure interaction problems in liquid storage tanks [J]. **Journal of Pressure Vessel Technology**, 1989, **111**(11):435-440.

[13] Koh H M, Kim J K, Park J H. Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1998, **27**:109-124.

[14] Lee D Y, Choi H S. Study on sloshing in cargo tanks including hydroelastic effects [J]. **Journal of Marine Science and Technology**, 1999, **4**(1):27-34.

[15] 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 Ren-qing. Time domain simulation of liquid sloshing and its interaction with flexible structure [D]. Wuxi:China Ship Scientific Research Center, 2001. (in Chinese)

[16] Cho J R, Park S W, Kim H, *et al.* Hydroelastic analysis of insulation containment of LNG carrier by global-local approach [J]. **International Journal for Numerical methods in Engineering**, 2008, **76**:749-774.

[17] 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.  
ZHU Ren-qing, LIU Yan-min. Numerical

- simulation of liquid sloshing in 3D elastic tanks [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, **16**(10): 1144-1151. (in Chinese)
- [18] Bunnik T, Huijsmans R. Large scale LNG sloshing model tests [C] // *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Lisbon:ISOPE, 2007:1893-1899.
- [19] Jung J J, Lee H H, Park T H, *et al.* Experimental and numerical investigation into the effects of fluid-structure interaction on the sloshing impact loads in membrane LNG carrier [C] // *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril: ASME, 2008:1-7.
- [20] 祁恩荣, 庞建华, 徐春, 等. 薄膜型 LNG 液舱晃荡冲击压力与结构动响应试验研究[J]. 舰船科学技术, 2011, **33**(4):29-38.  
 QI En-rong, PANG Jian-hua, XU Chun, *et al.* Experimental study of sloshing pressure and structural response in membrane LNG tanks [J]. *Ship Science and Technology*, 2011, **33**(4):29-38 (in Chinese).
- [21] 蒋梅荣, 任冰, 温鸿杰, 等. 弹性液舱内液体晃荡实验研究[J]. 海洋工程, 2013, **31**(5):1-10.  
 JIANG Mei-rong, REN Bing, WEN Hong-jie, *et al.* Experimental study on sloshing in elastic tanks [J]. *The Ocean Engineering*, 2013, **31**(5):1-10. (in Chinese)
- [22] Jiang M R, Ren B, Wang G Y, *et al.* Laboratory study on the hydrodynamic and structural characteristic of violent sloshing in elastic tanks [C] // *Proceedings of the 7th International Conference on Thin-Walled Structures*. Busan:ICTWS, 2014.
- [23] 姜忻良, 骆兰月. 考虑非对称效应的非线性结构超谐共振与亚谐共振[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(5):50-56.  
 JIANG Xin-liang, LUO Lan-yue. Superharmonic resonance and subharmonic resonance of nonlinear structures considering nonsymmetrical effect [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, **23**(5):50-56. (in Chinese)
- [24] Colagrossi A, Palladino F, Greco M, *et al.* Experimental and numerical investigation of 2D sloshing: scenarios near the critical filling depth [C] // *Proceedings of the 21st International Workshop on Water Waves and Floating Body*. Loughborough:IWWF, 2006:1-5.

## Experimental study of resonant behavior of sloshing in elastic bulkhead tanks under finite depth

JIANG Mei-rong<sup>1</sup>, REN Bing<sup>\*1</sup>, LI Xiao-chao<sup>2</sup>, WANG Yong-xue<sup>1</sup>

- ( 1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
 2. Hunan Province Key Laboratory of Water, Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China )

**Abstract:** A physical model test is conducted to study the resonant behavior of liquid sloshing in elastic bulkhead rectangular tanks under the finite depth. The lowest-order natural frequencies of the liquid in the tanks are determined by frequency sweep experiment under different liquid depths and excitation amplitudes. The wave shape and the elevation are obtained by an image acquisition and data analysis system. The sloshing pressure on tank wall and structural strain of tank wall are obtained by the pressure and the strain acquisition system. The wave shape in the elastic bulkhead tank under the finite depth is described, and the resonant variational characteristics of the elevation, the pressure and the strain are analyzed in the time domain and the frequency domain. The time variation and the space distribution characteristics of the structural strain are further discussed and dissected. The experimental analyses indicate that, the double-peak phenomenon is observed at the crest of the pressure and the strain, and the spectrums of the pressure and the strain are greatly influenced by the double peak. On the tank ceiling, larger strains are more likely to appear in the place near the corner.

**Key words:** liquid sloshing; elastic bulkhead tank; wave elevation; sloshing pressure; structural strain; resonance