弹性变形对三维弹性液箱内晃荡波面的影响

任冰^{①*}, 李晨光^①, 蒋梅荣^②, 王国玉^①, 王永学^①

① 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

② 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300456

* 联系人, E-mail: bren@dlut.edu.cn

2015-02-27 收稿, 2015-04-17 修回, 2015-04-21 接受, 2015-06-01 网络版发表

国家自然科学基金(51179030, 51221961)资助

摘要 弹性液舱舱壁在大幅晃荡液体的作用下会发生弹性变形, 从而会对液舱内液体晃荡的水动力特性产生一定的影响. 文中通过物理模型实验研究了水弹性效应对弹性方形液舱内液面晃荡的影响. 实验水深比 h/L (h 为液深, L 为液舱长度)为0.167, 激励频率在最低阶自振频率附近. 由于液舱结构变形的影响, 弹性液舱内液体的最低阶自振频率与同尺寸的刚性液舱略有差别. 实验中分别对刚性和弹性两个方形液舱在不同频率的简谐纵向激励作用下的波动形态进行了分类分析, 并比较了对应不同二维行波、过渡状态和三维共振以及二阶次共振等不同波动形态时弹性液舱和刚性液舱内的波面高度.

关键词 液体晃荡, 弹性液舱, 波高, 共振, 次共振

航空、航天、船舶海洋以及能源化工领域的许多工程实际都涉及液体晃荡问题, 如行驶在公路上的油罐车, 航行中的液货船(如液化天然气船、液化石油气船及原油货轮等), 浮式海洋平台的储油系统, 飞行中的火箭液体推进剂贮箱等储液系统, 在外荷载的激励作用下, 液舱内的液体会产生大幅运动, 并对局部液舱壁产生强烈的冲击作用, 引起结构的局部破坏, 而且弹性舱壁结构的变形对于其舱内的液体晃荡的水动力特性也有一定的影响. 开展液体晃荡问题研究具有重要的科学意义和应用价值.

液体晃荡问题的研究始于20世纪50年代的航天领域, 早期的理论研究成果大部分是基于线性势流理论^[1]. 当液体在共振区晃荡, 运动幅值较大、非线性效应明显时, 线性理论将不再适用. 1958年, Moiseyev^[2]首次基于势流理论采用渐近法和模态法相结合的方法, 寻求液箱内液体晃荡问题的非线性近似解析解, 其方法是后来许多研究的基础. Miles^[3]提出了建立在Bateman-Luke变分原理基础上的多维模态

方法. 该方法不需假定模态函数间的任何阶次关系, 得到的模态系数是无穷维的, 能够包含液体响应的所有模态. Faltinsen等人^[4]进一步发展了多维模态方法, 研究了三维矩形液舱、圆柱形和椭圆形液舱在接近最低阶自振频率激励下的晃动问题. 由于上述各种理论研究成果均是基于势流理论, 适用于流体无黏、贮箱形状简单和无旋流动等情况, 对于涉及液面破碎、翻转和砰击以及气垫效应等复杂晃荡现象, 则需借助物理模型实验和数值模拟的手段来解决问题^[5~7].

自20世纪中期开始诸多学者针对不同激励下的液体晃荡问题开展一系列的物理模型实验(Faltinsen等人^[4], Verhagen等人^[8]). 根据不同的液深和激励模式, 液舱内通常会产生诸如驻波、行波、水跃、破碎波和孤波等各种不同形态的晃荡波^[9]. Faltinsen等人^[10,11]的方箱实验结果表明: 当 $h/L=0.508$, 在水平激励作用下, 当激励频率远离一阶自振频率时, 方箱内的液面将发生二维波动; 当激励频率逐渐接近一

引用格式: 任冰, 李晨光, 蒋梅荣, 等. 弹性变形对三维弹性液箱内晃荡波面的影响. 科学通报, 2016, 61: 543–552

Ren B, Li C G, Jiang M R, et al. Effects of the flexibility of the structure on sloshing waves in 3D elastic tanks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 543–552, doi: 10.1360/N972015-00095

阶自振频率时,则会发生非稳态的随机晃荡;当激励频率约等于一阶自振频率时,液面将会产生三维旋转波动.此外在特定的条件下,当水平激励接近方箱一阶自振频率时,在液舱内还有可能产生近乎稳态的对角波动.

目前常用薄膜型LNG船液舱的绝缘壳由金属薄膜和复合材料组成,是一种大尺寸的弹性结构.近年来随着水弹性力学的发展,有学者相继开展了弹性液舱内的液体晃荡研究.研究发现,结构的自振频率与冲击压力历时的比值对作用在舱壁上的冲击压力影响很大. Lee等人^[12]的二维物理模型实验结果表明,当载液率为25%时,当激励频率接近一阶共振频率时,弹性侧壁上静水面位置的冲击压力峰值明显较刚性侧壁大. Bunnik等人^[13]的二维大比尺LNG液舱模型晃荡实验发现,当装载率为10%时,弹性侧壁上的晃荡压力较刚性小10%. Jung等人^[14]的LNG液舱模型实验结果表明,当液舱内液体载液比为30%时,实验中的弹性液舱和刚性液舱上顶盖上的晃荡冲击压力差别不大,当装载率为95%时,弹性液舱上的冲击压力较刚性液舱小12%~19%. 朱仁庆等人^[15]通过有限元和有限体积法的复合数学模型模拟了三维长方体形弹性液舱的液体晃荡,数模计算结果表明舱壁的弹性缓和了液体的冲击作用,弹性液舱底部测点的液体压强较刚性液舱减小了约11.4%.

上述研究成果表明,由于水弹性效应的影响,弹性液舱内液体晃荡作用对液舱结构产生的晃荡压力的幅值和变化特性与刚性液舱有所不同.而关于弹性液舱内液面在外部激励作用下的波动形态及其与刚性液箱差别的研究还鲜有报道.本文旨在通过物理模型实验研究三维弹性方形液箱在不同频率的简

谐纵向激励作用下其内部液面波动的不同形态,分析其发生机制,并与刚性液舱内的波动形态和波面高度进行比较分析.

1 实验设计

1.1 液舱模型

实验中分别用有机玻璃制做了刚性和弹性两种内径尺寸相同的液舱,其内部尺寸均为48 cm×48 cm×48 cm. 其中刚性液箱采用厚度为12 mm的有机玻璃板制作,弹性液箱的顶板和底部也采用厚度为12 mm的有机玻璃板制作,四周侧壁则采用厚度为4 mm的有机玻璃制作. 由于这两种有机玻璃板的生产批次不一样,所以实验中测定的弹性模量不一样,4 mm厚的有机玻璃弹性模量为1.56 GPa,12 mm厚有机玻璃弹性模量为2.45 GPa. 厚度为4 mm的液舱侧壁抗弯刚度 EI_z 为4 N·m²,厚度为12 mm的液舱侧壁抗弯刚度 EI_z 为170 N·m²,约为4 mm厚侧壁的40倍,在本实验中视为刚性结构. 刚性液箱的空箱重量为18.7 kg,弹性液箱的空箱重量为10.8 kg. 液舱实验模型和坐标系示意图如图1所示.

1.2 仪器设备

实验设备包括低频电动振动台,振动位移反馈控制系统和CCD图像采集系统. 振动台台面尺寸为50 cm×50 cm,可以模拟3个不同自由度(纵荡、横荡与垂荡)的简谐运动和随机运动,振幅范围为0~24 mm,频率范围为0~1000 Hz. 实验中将液舱模型固定在振动台上,随振动台一起运动. 本实验对液舱沿 x 方向施加水平简谐激励,振动台的运动位移为 $X_e = A \sin 2\pi ft$,其中 A , f 分别是激励振幅和激励频率,

图1 (网络版彩色)液舱模型(a)和液舱坐标系(b)示意图(单位: cm)

Figure 1 (Color online) The model tank (a) and the sketch of the coordinate system (b) (Unit: cm)

液舱内水深 $h=8$ cm.

为了测量液舱内的液面高度变化情况,在液舱内不同位置布置了9个浪高仪,如图2所示.波面测量系统包括型号为DJ800型的32通道数据采集仪与型号为LG-50的浪高仪,浪高仪有效测量长度为48 cm,固定在液舱顶盖上,浪高仪底端距离液舱底面为3 cm.

1.3 实验组次

方形液箱内液体自由晃动正交模态频率的线性理论解为

$$\omega_{mn}^2 = \left(g\pi\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \right) \tanh \left(\pi h\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \right),$$

其中 a 和 b 分别是矩形液舱的宽度和长度; m 和 n 是正整数,分别表示沿宽度方向及长度方向上的模态数; h 是液深.由该解得到实验液深 $h/L=0.167$ 时刚性液箱的前三阶自振频率的理论值,列于表1.由表1可知,理论一阶自振频率 $f_{0,1}$ 为0.884 Hz.由于高阶模态振动衰减很快,实验中测试的激励频率主要以最低阶自振频率为主,实验频率范围是0.680~1.050 Hz.实验发现,在此液深情况下刚性液舱的实测一阶自振频率 $f_{R,1,0}$ 为0.940 Hz,较刚性液箱的线性理论值约大6.8%,弹性液舱的实测一阶自振频率 $f_{E,1,0}$ 为0.920 Hz,较刚性液箱的线性理论值约大4.5%.参考Cox等人^[16]的实验结果可知,在液舱内液深较浅的情况下,由于受较强的非线性效应的影响,由线性理论解计算得到的一阶自振频率与实验值会有一定的偏差,在 $h/L=0.15$ 附近,其实验值与理论值的偏差在 $\pm 10\%$ 左右,且该偏差随着液深 h/L 的减小而增大.

实验中分别对两种液舱进行了不同激励频率和振幅(4, 6和8 mm)组合情况下的实验研究,每一实验组次的实验时间是3~5 min,重复实验3次.

2 实验结果分析

当振动台以某一频率做简谐运动时,置于其上

图2 液舱内浪高仪测点布置俯视图(单位: cm)
Figure 2 Top view of the tanks with wave gauges (Unit: cm)

的液舱内液体也随之晃动,随着激励频率的改变,液舱内的液体晃动形态也会发生改变.实验中将激励频率从0.680 Hz开始逐渐增大至液箱的最低阶自振频率,然后继续增大到1.050 Hz.以刚性液箱为例:实验中发现,当激励频率 $f=1.021$ Hz远离液舱内液体的理论最低阶自振频率 $f_{1,0}$ 时,刚性方箱中的液面呈左右反对称的二维晃动,如图3(a)所示.当激励频率 $f=0.851$ Hz逐渐靠近理论最低阶自振频率 $f_{1,0}$ 时,刚性方箱中液面在晃动前期($t<60$ s)呈反对称式二维晃动,但是当晃动后期($t>60$ s),液舱内波面晃动加剧,且呈现出明显的三维特性,此状态被称之为过渡状态,如图3(c)和(d)所示.当激励频率 $f=0.940$ Hz接近实测最低阶自振频率 $f_{R,1,0}$ 时,发生共振现象,液舱中液面波动明显增大,且发生剧烈破碎,如图3(b).实验中还发现,当激励频率 $f=0.800$ Hz约等于理论二阶自振频率 $f_{2,0}=1.593$ Hz的二分之一时,液舱内液面呈现出晃动比较剧烈且三维性很明显的次共振现象,如图3(e)和(f).对于弹性液箱,其各个阶段的波动状态与

表1 液舱各阶理论自振频率与实测一阶共振频率^{a)}

Table 1 The theoretical natural frequency and the experimental frequency of the liquid in the tank

液深 h/L	理论各阶自振频率			实测一阶自振频率
$h/L=0.167$	$f_{0,1}=0.884$ Hz	$f_{0,2}=1.593$ Hz	$f_{0,3}=2.115$ Hz	$f_{R,1,0}=0.940$ Hz $f_{E,1,0}=0.920$ Hz
	$f_{1,0}=0.884$ Hz	$f_{2,0}=1.593$ Hz	$f_{3,0}=2.115$ Hz	
	$f_{1,1}=1.203$ Hz	$f_{1,2}=1.731$ Hz	$f_{2,1}=1.731$ Hz	

a) $f_{m,n}$, m 为 x 方向的模态数, n 为 y 方向的模态数

图3 (网络版彩色)不同激励频率作用下刚性液舱内波面($h/L=0.167$). (a) 二维行波状态; (b) 一阶共振状态; (c) 过渡状态, 晃荡前期($t < 60$ s); (d) 过渡状态, 晃荡后期($t > 60$ s); (e), (f) 次共振; (g) 弹性液舱一阶共振($t < 60$ s); (h) 弹性液舱一阶共振(对角晃荡, $t > 60$ s)

Figure 3 (Color online) The wave pattern of different excitation frequency in the rigid tank($h/L=0.167$). (a) Two-dimensional traveling waves state; (b) resonance state of rigid tank; (c) transition state, early stage of sloshing($t < 60$ s); (d) transition state, later stage of sloshing($t > 60$ s); (e), (f) secondary resonance state; (g) resonance state of elastic tank($t < 60$ s); (h) resonance state of elastic tank(diagonal sloshing, $t > 60$ s)

刚性液箱相似, 不同之处是当液面发生一阶模态的共振晃动时, $f=f_{E,1,0}=0.920$ Hz, 在晃动的后期($t > 60$ s), 由于某种扰动的影响, 在液箱内激励起明显的对角晃动, 如图3(g)和(h)所示。

2.1 非共振情况

由实验现象可知, 对于液深 $h/L=0.167$ 的情形, 当激励频率远离液舱内液体的实测一阶自振频率($f_{R,1,0}=0.940$ Hz, $f_{E,1,0}=0.920$ Hz)时, 液舱内液面波动

为二维行波, 图4(a)给出了当激励频率 $f=1.021$ Hz $\approx 1.09f_{R,1,0}\approx 1.10f_{E,1,0}$, 激励振幅 $A=6$ mm时, 刚性液舱与弹性液舱内各测点的波面历时曲线的对比图。结合图3(a)和图4可以看出, 由于此时液舱内液体处于二维行波波动状态下, 液舱内左右侧边界处(#1和#7测点)液面历时曲线为规则的正弦曲线, 其中刚性液舱内#1测点最大液面高度和最低液面高度分别为1.6和-1.1 cm, 弹性液舱内最大液面高度和最低液面高度分别为1.5和-1.0 cm, 液舱中间#4测点处的液面

图4 (网络版彩色)刚性液舱与弹性液舱在非共振状态下#1、#4、#7测点波面历时曲线。(a) 二维行波状态;(b) 过渡状态

Figure 4 (Color online) Time histories of the free surface elevations in the rigid and elastic tanks under non-resonant conditions. (a) Two-dimensional traveling waves state; (b) transition state

波动几乎为0. 弹性液舱内液面高度和刚性液舱基本相同。

实验中发现, 当激励频率从0.680 Hz逐渐增大到实测最低阶自振频率的0.91倍时, 即: 对于刚性液舱, $f=0.851 \text{ Hz} \approx 0.91f_{R,1,0}$, 对于弹性液舱, $f=0.845 \text{ Hz} \approx 0.91f_{E,1,0}$, 液舱内波面处于过渡状态. 图4(b)给出了此过渡状态下刚性液舱与弹性液舱内部分测点的波高历时曲线的对比图. 结合图4与3(c)和(d)可以看出, 当 $t < 60 \text{ s}$, 液舱内左右侧边界处(#1和#7测点)液面历时曲线表现出明显的群性, 当 $t > 60 \text{ s}$ 时, 边界处波高明显变大, 其中刚性液箱内#1测点最大液面高度和最低液面高度分别为11.9和-3.6 cm, 弹性液箱内#1测点最大液面高度和最低液面高度分别为10.0和-3.7 cm, 结合实验现象可知, 此时液舱内二维晃动已转变为三维晃动. 液舱中间#4测点处液面出现了幅值较小的波动.

图5给出了液舱内不同位置处的平均波高分布图. 由图5可以看出, 当液舱内液体随激励呈二维行波波动时, 液舱在垂直于激励振动方向上各个测点

的波高相同, 弹性液舱与刚性液舱内的波面高度情况也基本相同. 而当 $f_R=0.851 \text{ Hz}$, $f_E=0.845 \text{ Hz}$ 时, 对于 $t > 60 \text{ s}$ 的时段, 液舱内则发生剧烈的三维晃动现象, 弹性液舱内多数测点的平均波高值略大于刚性液舱的情况.

2.2 共振情况

当激励频率非常接近液舱内液体的一阶自振频率时, 即 $f_R=0.940 \text{ Hz}$, $f_E=0.920 \text{ Hz}$ 时, 液舱内液体会产生剧烈的晃动现象, 发生共振. 同时, 实验发现, 当激励频率约等于理论二阶自振频率($f_{0,2}=f_{2,0}=1.593 \text{ Hz}$)的二分之一时, 即 $f_R=0.800 \text{ Hz}$, $f_E=0.790 \text{ Hz}$ 时, 液舱内液面不再是反对称的二维晃动, 而是产生左右对称的二阶晃动模式, 即次共振现象.

图6分别给出了共振和次共振状态下刚性液舱与弹性液舱内部分测点的波高历时曲线的对比图. 图7给出了相应情况下液舱内不同位置处的平均波高分布图.

图6中部分测点的波面历时曲线可以看出, 当激

图5 (网络版彩色)液舱内各测点在非共振状态下平均波高分布柱状图。(a) 二维行波状态; (b) 过渡状态

Figure 5 (Color online) Histograms of the average wave heights in the tanks under non-resonant condition. (a) Two-dimensional traveling waves state; (b) transition state

图6 (网络版彩色)刚性液舱与弹性液舱在共振和次共振状态下#1, #4, #7点浪高过程线对比。(a) 一阶共振状态; (b) 次共振状态

Figure 6 (Color online) Time histories of the free surface elevations in the rigid and elastic tanks under resonant conditions. (a) Resonance state; (b) secondary resonance state

励频率达到各自共振频率, 即 $f_R=0.940$ Hz, $f_E=0.920$ Hz时, 液舱内左右侧边界处(#1和#7测点)液面历时曲线表现出很强的随机性, 其中刚性液舱最大液面

高度达到15.8 cm, 弹性液舱最大液面高度达到23.0 cm, 而液舱中心处(#4测点)液面波动则相对较小。需要说明的是, 由于弹性液箱在晃动后期, 斜对角振动

模态被激励起来,此时液箱内角点位置#1和#9点的波高明显大于其他测点的波高,而同一实验条件下刚性液箱内的对角振动模态则没有被激励出来。

当激励频率约等于理论二阶自振频率的二分之一时,即 $f_R=0.800$ Hz, $f_E=0.790$ Hz时,液舱内液体发生次共振,此时液舱内左右侧边界处(#1和#7测点)液面历时曲线表现出很强的随机性,但是其最大液面高度较一阶共振时的情况要小,其中#1测点刚性液舱最大液面高度和最低液面高度分别为11.2和-3.4 cm,弹性液舱最大液面高度和最低液面高度分别为9.3和-3.5 cm。由于此时的液面波动是属于二阶振动模态,其波面左右对称,所以其液舱中心处(#4测点)液面波动也较大,其中#4测点刚性液舱最大液面高度和最低液面高度分别是4.0和-2.4 cm,弹性液舱最大液面高度和最低液面高度分别是4.6和-2.8 cm。

由图7可以看出,在共振和次共振情况下,液舱内液体呈现出明显的三维晃动状态。液舱在垂直于激励振动方向上各个测点的波高有一定的差别,特别是在弹性液舱的一阶共振情况下,由于在振动后期激励起的对角晃动模态的影响,导致#1测点和#9测点的波高明显大于其他测点,其中#1测点比#3测点的值大约40%,#9测点比#7测点大约60%。而刚性液舱由于没有激励出对角晃动的模态,其在垂直激励振动方向上波高最大值比最小值大约10%。

2.3 晃动波高频率响应曲线

由于液舱内各点波面高度差别很大,取不同测

点的波高值分析液舱内波面高度与激励频率的关系,其变化规律将有可能不同。这里分别取液舱内某点的瞬时最大波高值以及#1、#4和#8测点的平均波高值为代表。图8给出了当激励振幅 $A=6$ mm、激励频率从0.5~1.0 Hz的变化过程中,弹性液舱和刚性液舱内波高的变化情况。由图8可以看出,液箱内波高随激励频率的变化出现两个明显的峰值,第一个峰值位置在 $f_R=0.800$ Hz, $f_E=0.790$ Hz,对照前文分析,此时液舱内液体处于次共振状态,其对应的波动模态为二阶模态。第二个峰值位置在 $f_R=0.940$ Hz, $f_E=0.920$ Hz,此时液舱内液体发生共振,其对应的振动模态为一阶模态。对比刚性液箱和弹性液箱的实验结果可见,在共振和次共振状态下,弹性液舱内的波高值明显大于刚性液舱的情况。在一阶共振频率处,弹性液舱内的某瞬时的最大波高较刚性液舱大约17%,#1测点的平均波高弹性液舱较刚性液舱大约20%,#4号测点的平均波高弹性液舱较刚性液舱大约26%,#8号测点的平均波高弹性液舱较刚性液舱大14%。由上述实验结果分析来看,对于弹性液箱的一阶共振情况,由于在晃动后期,激励起了对角晃动模态,导致其角点的波高明显大于刚性液舱的情况。在其他情况下,由于水弹性效应的影响,弹性液舱内的波高值也较刚性情况略大。

2.4 晃动波面波谱分析

图9分别给出了在二维行波状态、过渡状态、共振状态和次共振状态下,弹性液舱和刚性液舱内某点的波面历时曲线的FFT分析结果。

图7 (网络版彩色)液舱内各测点在一阶共振和次共振状态下平均波高柱状分布图。(a) 一阶共振状态;(b) 次共振状态

Figure 7 (Color online) Histograms of the average wave heights in the tanks under the resonant conditions. (a) Resonance state; (b) secondary resonance state

图8 (网络版彩色)部分测点频率波高响应曲线

Figure 8 (Color online) Wave heights versus the excitation frequency in the elastic and rigid tank with $A = 6$ mm

由图9(a)和(b)所示,当液舱内液体呈现二维行波波动状态时,即 $f_R=f_E=1.021$ Hz, #2测点波谱在激励频率处($f=1.021$ Hz)有一个较小的主峰,刚性和弹性液舱情况基本相同;当液舱内液体处于在过渡波动状态时(图9(c)和(d)所示),即 $f_R=0.851$ Hz, $f_E=0.845$ Hz, #2点的波谱主峰值出现在激励频率处($f_R=0.851$ Hz, $f_E=0.845$ Hz),同时在2倍频处($f_R=1.702$ Hz, $f_E=1.690$ Hz),有一个较大的次峰值.刚性液舱的主峰谱峰密度值明显大于其次峰值,而弹性液舱的主峰谱峰密度值与次峰值几乎相同,且弹性液舱的主峰谱峰密度较刚性液舱的情况略大.

共振状态下(图9(e)和(f)),即 $f_R=0.940$ Hz, $f_E=0.92$ Hz, #1测点的波谱主峰值出现在最低阶自振频率处,即 $f_{R,1,0}=0.940$ Hz, $f_{E,1,0}=0.920$ Hz. 同时在2倍频处,有一个很小的次峰值,其谱密度值小于主峰谱密度值的三分之一,且弹性液舱的谱峰值明显大于刚性液舱的情况.在次共振状态下(图9(g)和(h)),即 $f_R=0.800$ Hz, $f_E=0.790$ Hz, 对应前文的波面分析可知,此时液舱内发生了二阶模态的次共振, #1测点波谱的主峰值出现在激励频率的2倍频处($f_R=1.600$ Hz, $f_E=1.580$ Hz),波谱的次峰值出现在激励频率处,其谱峰密度值较小.弹性液舱的主峰值稍大于刚性液舱的情况.

3 结论

本文通过物理模型实验研究了水弹性效应对简谐纵向激励作用下的弹性方形液舱内液面晃动的影响.实验结果如下所述.

(1) 对于实验水深 h/L 为0.167的情况,方箱的实测最低阶自振频率较线性理论值有大约5%的偏差,弹性液舱的最低阶自振频率与同尺寸的刚性液舱接近.

(2) 当激励频率远离液舱内液体的最低阶自振频率时,液舱内液体呈二维行波波动;当激励频率等于一阶自振频率的0.91倍,即 $f \approx 0.91f_{1,0}$ 时,液舱内液体呈现出先是二维晃动后转变为三维晃动的过渡状态;当激励频率约等于理论二阶自振频率的二分之一时,即 $f \approx 0.5f_{2,0}$,液舱内液体发生二阶模态的次共振;当激励频率等于一阶自振频率时,液舱内发生一阶模态的共振.

(3) 在相同激励作用下,当液舱内液面呈现二维行波波动时,弹性液舱和刚性液舱内的波面高度基本相同.当液舱内液面处于三维波动状态时,弹性液舱内的波面高度明显大于刚性液舱的情况,在一阶共振情况下,弹性液舱内角点处#1测点平均波高比刚性液舱大约20%.

图9 (网络版彩色)不同晃动模式下液舱内的波面谱。(a) 刚性液舱二维行波状态;(b) 弹性液舱二维行波状态;(c) 刚性液舱过渡状态;(d) 弹性液舱过渡状态;(e) 刚性液舱共振状态;(f) 弹性液舱共振状态;(g) 刚性液舱次共振状态;(h) 弹性液舱次共振状态

Figure 9 (Color online) Spectral analyses of the waves under different resonant wave regimes. (a) Two-dimensional traveling waves state of rigid tank; (b) two-dimensional traveling waves state of elastic tank; (c) transition state of rigid tank; (d) transition state of elastic tank; (e) resonance state of rigid tank; (f) resonance state of elastic tank; (g) secondary resonance state of rigid tank; (h) secondary resonance state of elastic tank

参考文献

- 1 Abramson H N. The dynamic behavior of liquids in moving containers. Report No. SP-106. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1966
- 2 Moiseyev N N. On the theory of nonlinear oscillations of a liquid of finite volume. J Appl Math Mech (Prikl Math Mech), 1958, 22: 612–621

- 3 Miles J W. Nonlinear surface waves in closed basins. *J Fluid Mech*, 1976, 75: 419–448
- 4 Faltinsen O M, Rognnebakke O F, Lukovsky I A, et al. Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth. *J Fluid Mech*, 2000, 407: 201–234
- 5 Guo X Y, Wang B L, Liu H. Numerical investigation of air cushion effects on low filling sloshing impacts (in Chinese). *Chin J Hydrodyn*, 2011, 26: 623–630 [郭晓宇, 王本龙, 刘桦. 低充水液舱晃荡气垫效应的数值分析. *水动力学研究与进展*, 2011, 26: 623–630]
- 6 Kim Y. Numerical simulation of sloshing flows with impact load. *Appl Ocean Res*, 2001, 23: 53–62
- 7 Nasar T, Sannasiraj S A, Sundar V. Experimental study of liquid sloshing dynamics in a barge carrying tank. *Fluid Dyn Res*, 2008, 40: 427–458
- 8 Verhagen J H G, Wijngaarden L V. Non-linear oscillations of fluid in a container. *J Fluid Mech*, 1965, 22: 737–751
- 9 Hamlin N A, Lou Y K, Maclean W M, et al. Liquid sloshing in slack ship tanks-theory, observations and experiments. *SNAME Trans*, 1986, 94: 159–195
- 10 Faltinsen O M, Rognnebakke O F, Timokha A N. Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin. *J Fluid Mech*, 2003, 487: 1–42
- 11 Faltinsen O M, Rognnebakke O F, Timokha A N. Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin. Part 2. Effect of higher modes. *J Fluid Mech*, 2005, 523: 199–218
- 12 Lee D Y, Choi H S. Study on sloshing in cargo tanks including hydroelastic effects. *J Mar Sci Tech*, 1999, 4: 27–34
- 13 Bunnik T, Huijsmans R. Large scale LNG sloshing model tests. In: *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Lisbon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007. 1893–1899
- 14 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 member LNG carrier. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril: The American Society of Mechanical Engineers, 2008. 1–7
- 15 Zhu R Q, Liu Y M. Numerical simulation of liquid sloshing in 3D elastic tanks (in Chinese). *J Ship Mech*, 2012, 16: 1144–1151 [朱仁庆, 刘艳敏. 三维弹性液舱晃荡数值模拟. *船舶力学*, 2012, 16: 1144–1151]
- 16 Cox P A, Bowles E B, Bass R L. Evaluation of liquid dynamic loads in slack LNG cargo tanks. Southwest Research Institute Report No.SR-1251, EI Paso, 1979

Effects of the flexibility of the structure on sloshing waves in 3D elastic tanks

REN Bing¹, LI ChenGuang¹, JIANG MeiRong², WANG GuoYu¹ & WANG YongXue¹

¹ State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

² Offshore Oil Engineering Company Limited, Tianjin 300456, China

The flexible walls of the liquid container will deform under the sloshing loads. The deformation has a significant influence on the hydrodynamic behavior of the sloshing in the tank. A model test is conducted to study the hydro-elastic effect on the sloshing waves in the elastic square tank. The experimental liquid depth h/L is 0.167. The model tanks are excited in 1D harmonic longitudinal motion and the excitation frequency is close to the lowest natural frequency of the liquid. Due to the influence of the fluid-structure interaction, the lowest natural frequency of the liquid in the elastic tank slightly deviates from that in the rigid tank of the same size. The wave shapes and amplitudes in the rigid and elastic square tanks are classified and analyzed under the 1D harmonic longitudinal excitation with different excitation frequencies. Corresponding to the different wave regimes of the two-dimensional traveling waves, transition state, three-dimensional resonance and the secondary resonance, the free surface elevations are compared between the rigid tank and the elastic tank to investigate the effect of fluid-structure interaction.

liquid sloshing, elastic tank, wave elevation, resonance, secondary resonance

doi: 10.1360/N972015-00095