

超大型储液舱内晃荡载荷实验研究

卫志军¹, 阮诗伦¹, 岳前进¹, 谢彬²

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要 超大型浮式液化天然气船薄膜型液舱内液体晃荡载荷是一个关键问题。采用实验方法研究纵荡、横荡和横摇下储舱内晃荡荷载的分布规律, 具体包括冲击荷载的时程分析、最大冲击荷载分布规律和其对应的危险载液率。在室内开展大比尺八边形模型液体晃荡实验, 采用阵列式布置压力传感器监测冲击压力的变化及其分布特性。实验结果表明: 60%~70%为最危险载液率, 液舱外形曲率突变的位置冲击压力较大。研究结果可为液舱结构加强设计及分析提供依据。

关键词 晃荡载荷; 大比尺模型实验; 冲击压力; 激励; 危险载液率

中图分类号 TE8 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2014)01-0055-07

Experimental Investigation of Liquid Sloshing Impact Load in a Large-Scale Prismatic Tank

WEI Zhi-jun¹, RUAN Shi-lun¹, YUE Qian-jin¹, XIE Bin²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract Liquid sloshing load is one of the key issues in the design of the cargo container system of the very large-scale floating liquefied natural gas (FLNG) facility. Experimental investigation on liquid slamming in a large-scale prismatic tank under sway, surge, and roll excitations is performed, aiming at the time history of slamming pressure, the distribution of the largest impact pressure and the most serious filling rates. A series of experiments in a large-scale prismatic model is carried out. Pressure sensor array is employed to record the variation of impact pressure. The experimental results illustrate that the value between 60%~70% is the most serious filling rate. Furthermore, the position with change of curvature along the bulkhead is found to be the most serious position for tank structure. The results are useful for the research and design associated with slamming load in prismatic tank.

Key words sloshing load; large-scale model experiment; slamming pressure; excitation; the most serious filling rate

0 引言

液化天然气(LNG)储罐运载装备正在向大型化与超大型化发展, 液体发生晃荡引起的砰击问题更加显著^[1]。适用于深海、远海油气田开发的新型装备——浮式液化天然气储卸装置(FLNG)集开采、液化、储存与装卸天然气功能于一体, 需要超大型液化天然气储舱^[1]。为了增加储舱的容积和提高液化工艺系统的甲板利用率, 通常沿着内船壳设计

并建造具有直立侧壁的多边形液舱^[2-4]。该储舱储液容积大且无装载率限制^[1]。当船体运动频率与液舱内自由液面的固有频率接近时, 液体将产生剧烈的晃荡^[1-5]。液体晃荡引起的砰击载荷不仅会影响运载装备的运动姿态, 也会直接威胁储罐的结构安全^[1,4]。所以, 砰击载荷是舱壁加强结构设计中的控制载荷。

液体砰击发生时伴随的物理现象非常复杂^[6-7], 如波翻卷、波破碎和气泡效应等, 使得线性理论和非线性理论对大振幅激励下晃荡冲击载荷的

收稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05026-006-06)、国家自然科学基金创新研究群体项目(50921001)

作者简介: 卫志军(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事超大型储液舱内晃荡冲击载荷及其抑制研究。

预测均存在一定的局限性^[6,8]。基于这些理论开展的数值实验也未能充分地考虑真实的物理现象,因而不能很好地解释晃荡冲击载荷^[6,8-10]。室内液体晃荡模型实验能较真实地反映液舱内液体晃荡的复杂物理现象,因此可为晃荡载荷的评估提供设计依据^[1-5,11-12]。

许多室内晃荡模型实验采用小或窄的矩形液舱来研究冲击载荷的特性^[13-14]。由于在产生冲击压力的同时会产生气泡、气穴、噪声等复杂物理现象,迄今为止,尚没有一个合适的相似准则能够将晃荡模型实验中的物理量较准确地推算到原型结构中^[15-17]。砰击载荷在小尺度和大尺度模型中表现得明显不同^[8,13]。模型越大,其内流体运动越接近于真实液舱中的流体。但由于实验费用较高和运动激励平台的承载能力限制,已公布的关于大尺度八边形液舱中的晃荡载荷资料非常少^[18-21]。除此之外,由于 FLNG 没有载液率限制,所以研究不同运动激励和不同载液率下大尺度液舱内液体晃荡砰击载荷的变化对整个 FLNG 储液舱的设计及安全运行都是十分必要且有工程指导意义的。

本文的目的是采用实验方法在大尺度的八边形液舱中,分别研究纵荡、横荡和横摇激励下晃荡砰击载荷随载液率的变化规律。此外,根据液舱晃荡砰击载荷的分布规律,提出不同激励对应的最危险的载液工况和最易受到冲击的区域,为我国 FLNG 储液舱的设计提供参考。

1 实验设计

采用大比尺模型实验平台,通过 dSPACE 控制系统在室内实现船体运动。在真实海况下,对于 FLNG 船采用单点系泊,横摇、纵荡及横荡三种运动是最容易发生的。因此模型实验设计也分别在室内浮现这三种激励。实验平台如图 1 所示。

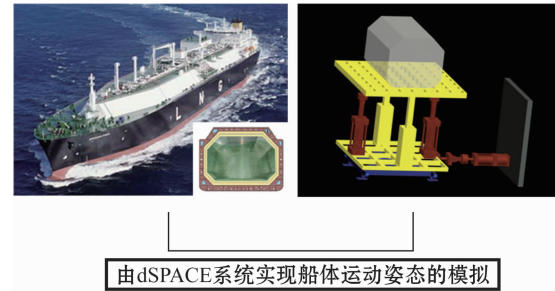


图 1 实验中控制系统模拟真实 LNG 船运动姿态的示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental simulation according to realistic LNG shipping

液舱原型为法国 GTT 公司薄膜型 NO 96 液舱。为尽可能真实地反映液舱内部晃荡冲击压力的变化及规律,模型实验中采用 1:20 的 GTT 三维模型。液舱材料为有机玻璃,长 1.864 m (L),宽 1.342 m (b),高 1.351 m (H),舱壁厚度 0.02 m,如图 2 所示。液舱可以视为刚性。

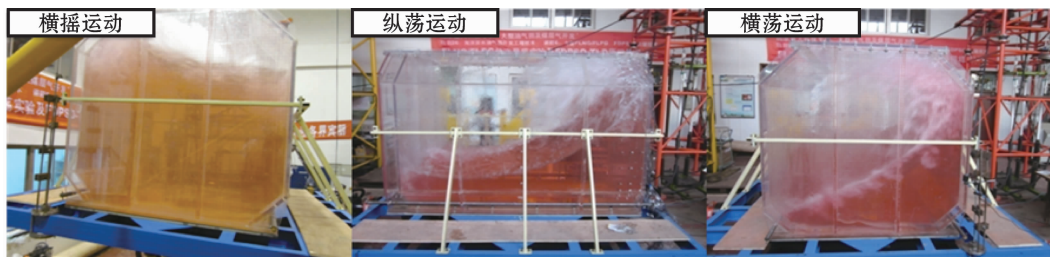


图 2 不同运动模式下液舱晃荡实验图

Fig. 2 Snapshots for different forced motions

采用阵列布点方式来监测关键位置的压力变化。压力传感器的直径为 5 mm,量程为 40 kPa。具体布点方式如图 3 和图 4 所示,通过多通道动态数据采集系统,实时记录晃荡冲击压力信息。

每种激励方式下分别在 9 个液深开展实验研究(每 10% H 为一个液深)。对每个液深,其一阶自振频率 f_0 将通过 Faltinsen 等^[8] 给出的修正公式计

算。修正前矩形液舱频率计算式和相应的八边形液舱修正系数分别为

$$\omega_{r,i} = \sqrt{g \frac{\pi^i}{B_T} \tanh\left(\frac{\pi^i h}{B_T}\right)}, \quad (1)$$

$$\frac{\omega_{r,i}'}{\omega_{r,i}^2} = 1 - \frac{\frac{\delta_1}{\delta_2} \sinh^2\left(\frac{\pi i \delta_2}{B_T}\right) - \frac{\delta_1}{\delta_2} \sin^2\left(\frac{\pi i \delta_1}{B_T}\right)}{\pi_i \sinh\left(\frac{2\pi_i h}{B_T}\right)}, \quad (2)$$

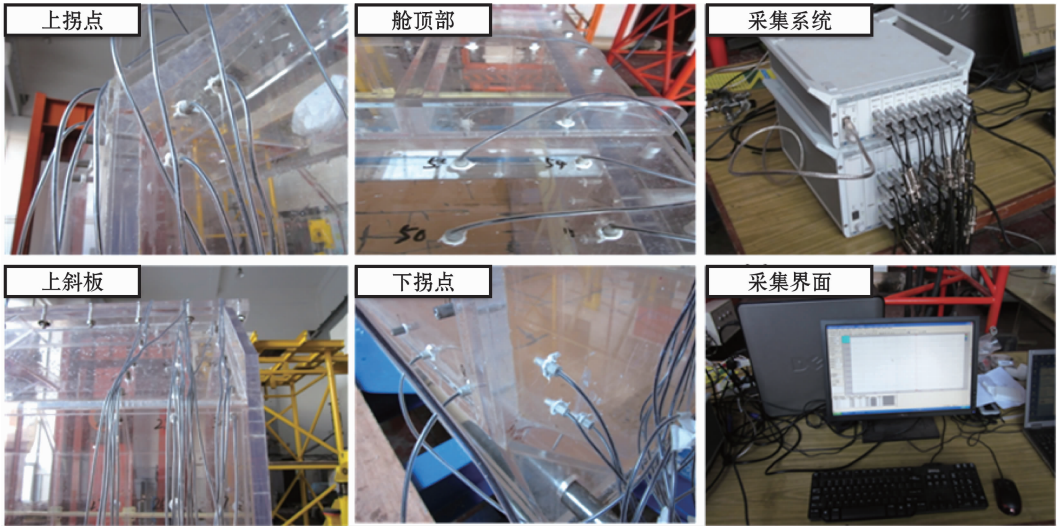


图 3 压力传感器布局与数据采集系统
Fig. 3 Pressure transducers' location and data acquisition system

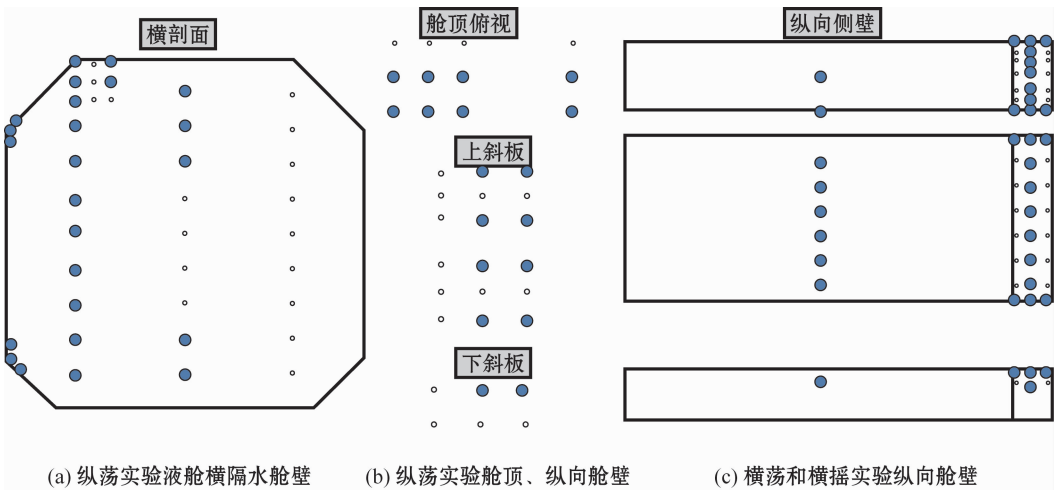


图 4 传感器布点示意图
Fig. 4 Sketch of pressure transducers' position

式中: i 为模态阶数; B_T 为液舱横向最大宽度; h 为载液深度; $\omega'_{r,i}$ 为修正后的第 i 阶横向自由晃荡频率; δ_1 为底斜面垂直投影长度; δ_2 为底斜面水平投影长度; π_i 表示第 i 阶对应的 π 值。不同液深的模型实验其激振频率范围为 $0.9f_o\sim1.15f_o$ 。整个模型实验共分析了 162 种工况,如表 1~3 所示。每种工况下,各测点的压力传感器采样频率为 2 kHz,采集时长为 3 min,实验激励均采用正弦激励。

表 1 各种实验工况具体参数表
Table 1 Experimental parameters for test condition

激励方式	实验载液率/%	激励振幅
横摇	10,20,30,40,50,60,70,80,90	1.5°
纵荡	10,20,30,40,50,60,70,80,90	30 mm
横荡	10,20,30,40,50,60,70,80,90	30 mm

表 2 1:20 GTT 横摇及横荡实验频率表

Table2 1:20 GTT experimental forced frequencies under roll and sway motion

Hz

载液率/%	$0.90f_0$	$0.95f_0$	f_0	$1.05f_0$	$1.10f_0$	$1.15f_0$
10	0.359	0.379	0.399	0.419	0.439	0.459
20	0.489	0.516	0.543	0.570	0.597	0.624
30	0.564	0.595	0.627	0.658	0.690	0.721
40	0.608	0.642	0.676	0.709	0.744	0.777
50	0.633	0.668	0.703	0.738	0.773	0.808
60	0.647	0.683	0.719	0.755	0.791	0.827
70	0.655	0.691	0.728	0.764	0.801	0.837
80	0.659	0.696	0.732	0.769	0.805	0.842
90	0.662	0.698	0.735	0.772	0.808	0.845

表 3 1:20 GTT 纵荡实验频率表

Table3 1:20 GTT experimental forced frequencies under surge motion

Hz

载液率/%	$0.90f_0$	$0.95f_0$	f_0	$1.05f_0$	$1.10f_0$	$1.15f_0$
10	0.266	0.280	0.295	0.310	0.324	0.339
20	0.366	0.387	0.407	0.428	0.448	0.448
30	0.433	0.457	0.481	0.505	0.529	0.553
40	0.479	0.505	0.532	0.558	0.585	0.612
50	0.509	0.537	0.565	0.594	0.622	0.650
60	0.529	0.559	0.588	0.617	0.647	0.676
70	0.543	0.573	0.603	0.633	0.663	0.693
80	0.552	0.582	0.613	0.643	0.674	0.704
90	0.557	0.588	0.619	0.650	0.681	0.712

2 实验结果及分析

2.1 实际共振频率分析

由于八边形液舱理论固有频率目前并没有较为准确的计算公式,因此实验是依据 Faltinsen 修正公式计算的.但是其只对液舱下斜板进行了修正,而上斜板仍按照矩形舱公式计算,因而在实验中实际晃动最剧烈时的频率与理论计算会有偏差.对此,选择横荡运动下的数据进行分析,可知当载液率为 10%~20%或 90%时,实际共振频率比理论计算的共振频率偏大,约为 $1.10f_0$;而当载液率为 30%~70%时,实际共振频率比理论固有频率偏小,约为 $0.95f_0$,如图 5 所示。

分析原因:当载液率低于 20%时,液舱处于下斜板以下,沿着运动方向(横向)上的长度减小,频率就会偏大;当载液率高于 80%时,液舱处于上斜板以上,横向长度减小,频率偏大;中载液率时,因其特有的八边形液舱结构形式,流体到达上斜板时,大量波破碎,降低晃动剧烈程度,实际共振频率也有所降低.通过分析可见,八边形的储舱设计可以有效避开共振频率从而起到抑制砰击的作用。

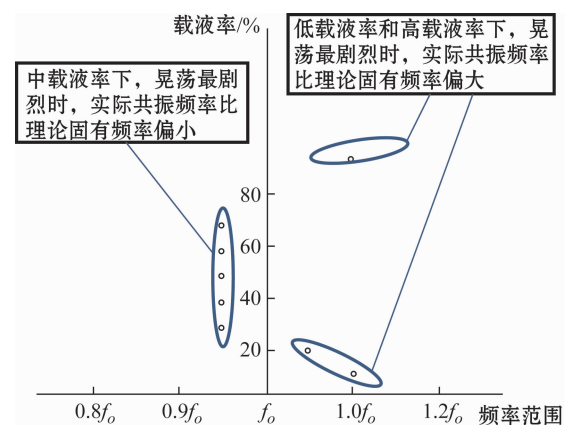


图 5 横荡激励下,实际晃动最剧烈时的频率与理论计算的固有频率之间的对比

Fig 5 Comparison between experimental and theoretical resonance frequencies under forced sway motion

2.2 冲击压力时程分析

晃动过程中,自由液面以下与以上两部分的冲击物理现象有所区别.图 6 所示为液舱不同位置的冲击压力时程曲线.在自由液面以下,主要为规则

的双峰形式,前一个波峰为冲击所致,峰值较大,后一个波峰为惯性所致,峰值较小;而在自由液面以上,主要为瞬间的冲击峰,作用时间短,瞬时冲击峰值较大,且具有强随机性。

对9种不同载液率下的晃荡物理现象分析可知,各载液率下,冲击压力较大的位置分布是有规律

的:对于低载液率(10%~20%),液体在下斜板附近形成行波,主要对下斜板上缘和侧壁产生冲击;中载液率(30%~60%),水波首先冲击自由液面稍高位置,随后沿着侧壁上爬,冲击上斜板;高载液率(70%~90%),液体对舱壁的作用主要是沿着上斜板,直接冲击上斜板上棱边和舱顶,对舱顶处的冲击力较大。

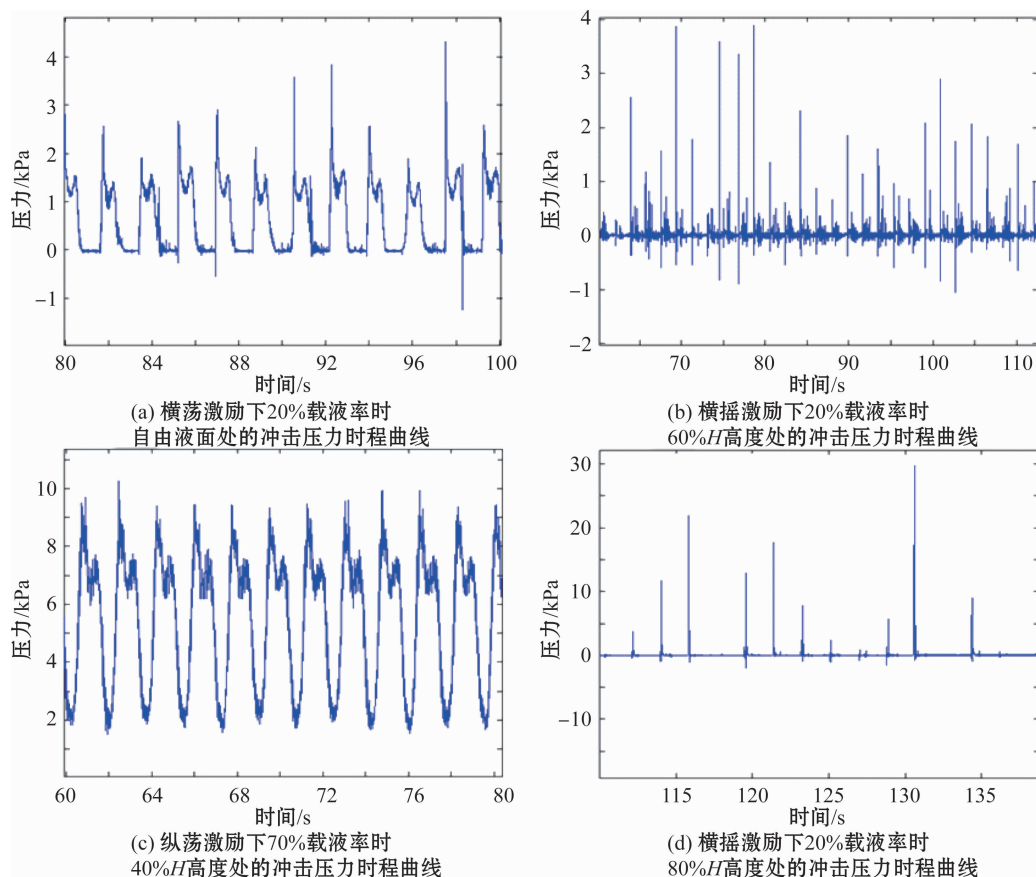


图6 三种激励方式下典型的冲击压力时程曲线图

Fig 6 Pressure time traces under three forced motions

2.3 最危险载液率估计

分析每个测点采集到的冲击压力时程曲线,将每个周期的峰值压力作统计可以得到该监测点的最大冲击压力和平均冲击压力。对比不同工况下最大冲击压力值以确定不同激励下的最危险载液工况,从而为液舱安全运行提供参考。

考虑到晃荡载荷具有强随机性,所以通过统计每个周期最大冲击载荷,取该序列的前1/10的平均值作为研究对象($p_{1/10}$),进行对比分析。晃荡冲击压力随载液率变化的关系曲线如图7所示。实验结果表明:在横摇激励下,载液率为60%时,冲击压力

最大,压力可达39.06 kPa;在横荡激励下,载液率为70%时,冲击压力最大,可达28.72 kPa;在纵荡激励下,载液率为60%时,冲击压力最大,可达44.02 kPa。实验结果表明,60%~70%是该液舱最危险的载液工况,应该尽量避免在该载液率装载。

2.4 结构加强设计建议

在最危险载液工况下,通过研究平均冲击压力与对应空间位置的关系,可以得到晃荡冲击压力的空间分布,从而可以找到发生最大冲击压力的空间位置。

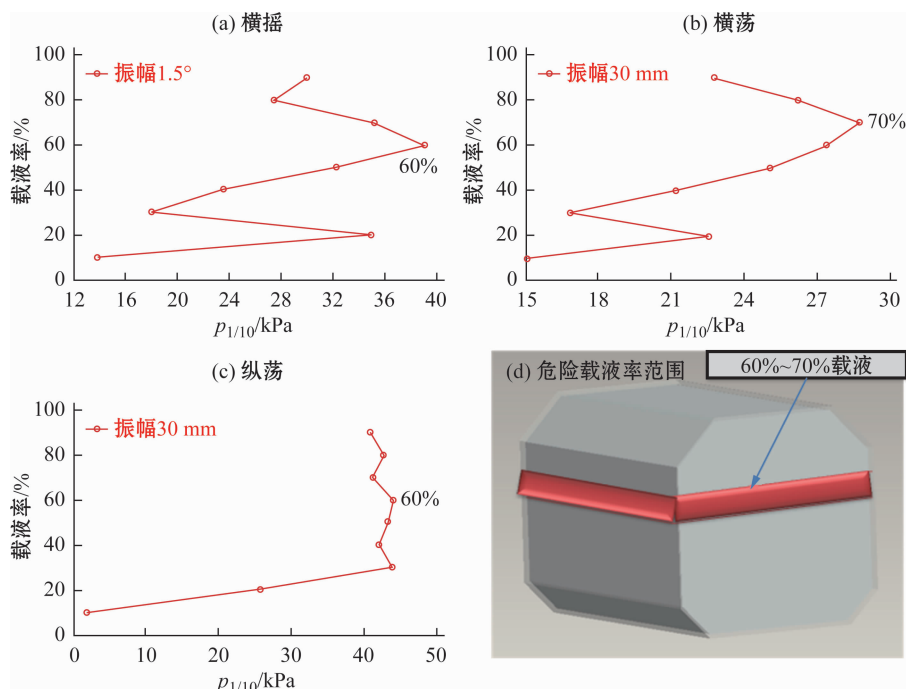


图 7 三种激励,不同载液工况下,晃荡冲击压力随载液率的分布关系曲线及危险载液率范围示意图

Fig 7 Impact pressure versus filling level under three forced motions and the most serious filling rate

由于储舱特殊的八边形形状,大部分危险工况产生的最大晃荡冲击压力多集中于上下斜板棱边处及舱顶边缘处,如图 8 所示。模型舱在 15% H 和 80% H 处是液舱上下斜板的拐点,几何形状发生突变,容易产生应力集中。因此,在液舱结构设计中,应该考虑在这些危险区域进行相应的结构加强设计,防止液舱局部受到过大冲击而产生结构失效。

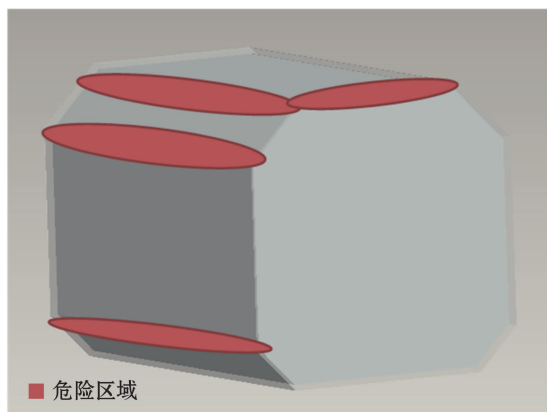


图 8 三种激励,不同载液工况下,液舱舱壁结构危险区域空间分布示意图

Fig 8 Distribution of the most severe areas for impact versus filling level under three forced motions

3 结 论

本文对超大型 FLNG 船液舱中的晃荡砰击问题开展了实验研究。在大尺度八边形液舱中分别研究了横荡、纵荡和横摇激励下晃荡载荷的分布规律。实验结果表明,晃荡冲击压力具有明显的双峰性质,在自由液面以下由惯性载荷主导,在自由液面以上由冲击载荷主导;模型液舱在给定三种激励下最危险的载液率为 60%~70%;对舱壁冲击最大的危险位置分别为上下斜板棱边及舱顶棱边等舱形曲率变化较大的位置。超大型储舱在实际运营过程中,应避免在该危险的载液工况下装载。研究结果为结构设计提供了加强设计的依据。

参 考 文 献

- [1] American Bureau of Shipping. Floating offshore liquefied gas terminals[S]. Houston: American Bureau of Shipping, 2010.
- [2] Bureau Veritas. Design sloshing loads for LNG membrane tanks. Guidance Note NI 554 [S]. Paris: Bureau Veritas, 2011.
- [3] Det Norske Veritas. Sloshing analysis of LNG membrane tanks. Guidance Notes No. 309 [S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2006.
- [4] Kuo J F, Campbell R B, Ding Z, et al. LNG tank sloshing assessment methodology: the new generation[C]. ISOPE

- Conference, 2009.
- [5] Lloyd's Register. Sloshing assessment guidance document for membrane tank LNG operations. Guidance Notes Version 2.0[S]. London: Lloyd's Register, 2009.
- [6] 岳宝增, 祝乐梅, 于丹. 储液罐动力学与控制研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(1): 79.
- [7] 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.
- [8] Faltinsen O M, Timokha A N. Sloshing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 484—488, 548—550.
- [9] 卫志军, 岳前进, 阮诗伦, 等. 矩形液舱晃荡冲击载荷的试验机理研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(8): 885.
- [10] 朱仁庆, 吴有生, Incecik A. 液体晃荡数值模拟研究综述[J]. 中国造船, 2004, 45(2): 14.
- [11] Graczyk M, Moan T. A probabilistic assessment of design sloshing pressure time histories in LNG tanks[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(8-9): 834.
- [12] Pistani F, Thiagarajan K. Set-up of a sloshing laboratory at the University of Western Australia[C]. ISOPE Conference, 2010.
- [13] Kim K H, Kim Y, Kim S Y, et al. Comparative study on model-scale sloshing tests[C]. ISOPE Conference, 2011.
- [14] Lugni C, Brocchini M, Faltinsen O M. Wave impact loads: the role of the flip-through[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(12): 122101.
- [15] Bass R L, Bowels E B, Endo S, et al. Modeling criteria for scaled LNG sloshing experiments[J]. J Fluids Engineering, 1985, 107(2): 272.
- [16] Bogaert H, Léonard S L, Brosset L, et al. Sloshing and scaling: results from the Sloshe project [C]. ISOPE Conference, 2012.
- [17] Pasquier R, Berthon C F, Chevreuse S R L. Model scale test vs. full scale measurement: findings from the full scale measurement of sloshing project[C]. ISOPE Conference, 2012.
- [18] Akyildiz H, Unal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing [J]. Ocean Engineering, 2005, 32(11-12): 1503.
- [19] Bunnik T, Huijsmans R. Large scale LNG sloshing model tests[C]. ISOPE Conference, 2007.
- [20] Lafeber W, Brosset L, Bogaert H. Comparison of wave impact tests at large and full scale: results from the Sloshe project[C]. ISOPE Conference, 2012.
- [21] Wei Z J, Yue Q J, Ruan S L. An experimental investigation of liquid sloshing impact load in a rectangular tank [C]. ISOPE Conference, 2012.

• 书讯 •

《水弹性力学》简介

程贯一, 王宝寿, 张效慈 编著

上海交通大学出版社出版

定价: 68.00 元

内容提要:

本书从水弹性力学基本理论和运动方程式推导出, 阐述了梁、杆、板壳的水弹性力学问题; 讨论了板、壳振动辐射噪声问题; 水中兵器发射时的水弹性响应; 石油工业中输液管道和深海采油立管的涡激振动; 极大型浮体在海浪和海流联合作用下的水弹性响应, 是一本从基本理论到各个工程领域应用内容较为丰富的专著。

本书适用于船舶、水中兵器、石油管道等工程领域的本科生、研究生以及从事水弹性力学研究的工作者。



上海科技出版集团资助

国家十二·五重点图书

水弹性力学: 基本原理与工程应用

HYDROELASTICITY: THE BASICS WITH APPLICATIONS

