

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.01.011

大幅横摇激励下液舱晃荡冲击载荷特性*

龚 宸, 邹昶方, 傅振航, 杨 捷

(江苏海洋大学 海洋工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要:大型LNG(liquefied natural gas)船在非满载航行中可能引起强烈的砰击载荷,对结构安全造成威胁。基于数值模拟方法研究大幅横摇激励下晃荡压力与外激励的饱和非线性关系。采用基于有限体积法的CFD代码FLUENT求解器,通过动网格技术驱动液舱运动,并用VOF(volume of fluid)法追踪自由液面的非线性运动过程,数值预报典型装载率、大幅横摇激励下的晃荡压力特性及自由液面波形。研究表明,在小激励和中等激励范围内,随着横摇激励的增大,晃荡压力出现突然变大的现象;当横摇激励继续增大到某一阈值时,则随着横摇角增加,晃荡压力不再增大,而是呈现饱和现象;自由液面也呈现出非线性特征,液面振幅和激励幅值之间的关系不再成比例关系,而是出现复杂的响应形态;处于大幅横摇激励下的液舱,随着装载率提高,晃荡冲击压力会降低。

关键词:晃荡冲击压力;大幅横摇激励;压力饱和

中图分类号:U663.85 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-8248(2024)01-0082-09

引用格式:龚宸, 邹昶方, 傅振航, 等. 大幅横摇激励下液舱晃荡冲击载荷特性[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 82-90.

Study on the Characteristics of Impact Loads of Liquid Sloshing under Large Amplitude Rolling Excitation

GONG Chen, ZOU Changfang, FU Zhenhang, YANG Jie

(School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: A large LNG (liquefied natural gas) vessel may cause intense slamming loads during non-full load operation, posing a threat to structural safety. This paper presents a numerical simulation-based study on the saturated nonlinear relationship between sloshing pressure and external excitation under large roll excitations. The paper utilizes the CFD code FLUENT based on the finite volume method to solve the governing equations. The dynamic mesh technique is employed to drive the motion of the liquid cargo and the Volume of Fluid (VOF) method is utilized to track the nonlinear motion of the free surface. Numerical predictions are made for the characteristic sloshing pressure and free surface waveforms under typical loading conditions and large roll excitations. The numerical results demonstrate that there is a sudden increase for impact sloshing pressure as the roll excitation increases in the range of small and moderate excitations. The impact sloshing pressure ceases to increase and exhibits a saturation phenomenon when the rolling angle surpasses a certain threshold. The free surface also exhibits nonlinear characteris-

* 收稿日期:2023-07-16;修订日期:2023-10-13

基金项目:江苏海洋大学科研启动基金(KQ19045)

作者简介:龚宸(1996—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为液舱晃荡,(E-mail)gcjshy@163.com.

通信作者:邹昶方(1982—),男,安徽寿县人,讲师,博士,研究方向为流固耦合动力学,(E-mail)cfzou@jou.edu.cn.

tics, where the relationship between the liquid surface amplitude and excitation amplitude is no longer proportional, but rather displays complex response patterns. For a liquid tank subjected to large roll excitations, the sloshing impact pressure decreases as the filling rate increases.

Key words: sloshing impact pressure; large amplitude rolling excitation; pressure saturation

0 引言

当今国内外液舱晃荡(sloshing)方面的研究非常活跃。液舱晃荡是一种液体在容器内自由运动时产生的复杂动力学现象,涉及到流体动力学、结构动力学、振动控制等多个学科领域。液舱晃荡不仅会给船舶、航天器、储罐等工程结构带来安全隐患,还会对液体的贮存、运输、搅拌等过程产生影响。因此,研究液舱晃荡的特性及其影响因素,对于提高工程结构的安全性和工程效率具有重要意义。

最早准确预测作用在舱壁动压力的学者是Abramson^[1],此后,许多其他学者也对晃荡现象进行了大量研究,并发展了多种晃荡问题的研究方法,主要包括理论研究、数值模拟和实验方法等。在小幅度晃荡运动问题中,学者们最初采用线性势流理论进行晃荡问题研究,得到解析和半解析的晃荡压力预报公式。这些理论结果和实验结果相符合,证明了该方法的有效性^[2-4]。针对大幅度晃荡问题,液体自由表面的复杂非线性运动使得晃荡问题的分析变得更加困难。在此背景下,Faltinsen^[5]和Ibrahim^[6]针对不同形状的液舱展开了深入研究,包括晃荡问题的线性和非线性特性以及冲击压力等问题。他们的研究成果对于理解晃荡问题以及设计更稳定的液舱具有重要意义。在数值模拟方面,非线性自由液面追踪是解决晃荡现象数值模拟的关键点。VOF(volume of fluid)法经常用于捕捉大幅运动的非线性自由面。朱仁庆等^[7]使用VOF法对箱体进行了纵荡数值模拟,证实了VOF法能够很好地处理箱体自由液面的晃荡问题。蔡忠华^[8]基于VOF法对大型LNG船开展研究,针对船体内部不同结构和船体不同装载率,分析了晃荡压力规律,提出了优化船体内部结构的方式,并讨论了液体各类参数对晃荡压力的影响特性。对于晃荡冲击载荷的特性,众多学者也进行了大量研究。王德禹等^[9]阐述了晃荡非线性的许多特点,其中对于大幅度激励的液舱,晃荡

压力不总随外部激励的加强而加强,呈现出“饱和特性”。邹昶方等^[10]通过晃荡实验研究,讨论了弹性支撑和刚性支撑对晃荡压力特性的影响,并考虑了不同的激励频率和装载率,对比了刚、弹性支撑的晃荡压力的变化特性。张会霞等^[11-12]通过数值模拟计算研究了多激励耦合下的二维矩形液舱晃荡问题,考虑了低装载液舱受到不同激励频率和不同激励工况,讨论了晃荡压力载荷的多种变化特性。Saravanan等^[13]通过一系列试验,分析了自由液面的变化状况,讨论了中、大激励幅值的阈值问题,探究了大幅横荡激励下的自由液面变化特征。卫志军等^[14]通过设计液舱壁面凸起结构来探究晃荡压力的变化,并考虑了三角形、梯形、正方形3种结构形式,结果表明合理布置凸起结构可以抑制晃荡现象,并讨论了具体工况下晃荡冲击载荷的变化特性。刘永涛等^[15]采用有限差分法研究液舱晃荡问题,发现自由液面对舱壁的冲击力与外部激励的频率和幅值存在较大关系,当外部激励周期性变化时,晃荡冲击载荷也呈周期性变化。唐忠时等^[16]通过在二维矩形液舱中布置竖直波纹板,考虑波纹板的各类参数,探讨了液舱在晃荡过程中的压力特性、自由液面波形变化特征和波纹板制荡的相关机理。

近年来,关于各类晃荡冲击载荷特性的研究较多,但针对大幅度激励的晃荡载荷特性的研究并不多见。因此,本文针对二维矩形液舱大幅横摇激励值下引起的晃荡问题,采用VOF法自由液面捕捉技术和基于FLUENT的数值模拟方法,建立了液舱晃荡数值计算模型,研究不同装载率下大幅激励对液舱晃荡冲击压力的影响特性及变化规律,以为液舱的结构安全设计提供参考。

1 数值模型及网格相关性分析

液舱晃荡涉及流体复杂运动和非线性响应,可通过验证网格独立性来评估数值模拟结果对网格的依赖性,以增加模拟结果的可靠性。若模拟结果相对不受网格数值干扰,则可确定最优网格尺寸。本

文研究采用了二维矩形液舱模型^[14],如图1所示,其横摇中心高度为0.85 m,液舱的装载率为20%,压力监测点 P 布置在液舱左舱壁自由液面处。

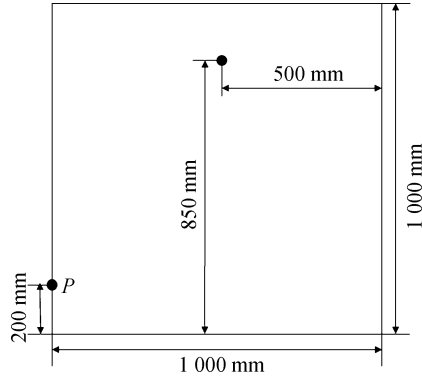


图1 液舱模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the liquid tank

在20%的装载高度下,设定时间步长为0.001 s,横摇角度为 10° ,外激励函数为正弦函数即 $\theta = A \sin(2\pi ft)$ (其中, A 为横摇角, f 为激励频率)。由式(1)知,矩形液舱一阶固有频率的理论值 $f_n = 0.66$ Hz。分别对1万、2.25万、4万、6.25万和9万个网格进行数值模拟计算,并对液舱自由液面处的晃荡冲击压力进行分析。晃荡压力计算结果如图2所示。当网格数量达到4万个后,其结果的浮动百分比已经控制在3%以内,表明随着网格数量的增加,模拟结果相对不受网格数量的影响,因此,本文的计算模型采用4万个网格数量。

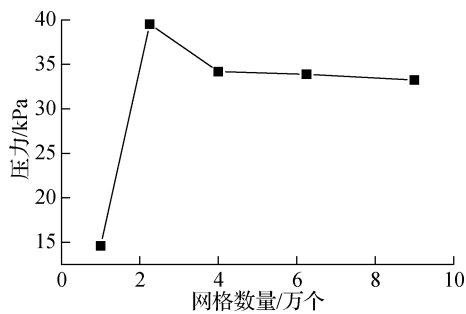


图2 不同网格数量下晃荡压力

Fig. 2 Sloshing pressure under different grid quantities

矩形液舱固有频率计算式为

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

式中, n 为阶数, g 为重力加速度, h 为载液高度, L

为自由液面宽度, f_n 为液体的固有频率。

2 各装载率下的固有频率计算及数值模拟工况

研究表明,当液体处于最低固有频率时,晃荡剧烈度最大,同时对舱壁的冲击力也最大。对于矩形液舱,其固有频率可以通过式(1)进行计算,表1为各装载率下液体固有频率理论值。

横摇运动在船舶行驶中非常常见,而横摇角度过大是导致船体突然倾覆的常见原因^[17]。船舶的横摇幅值标准大多从使用者角度提出,一般认为超过 15° 会使人不适。因此对于实际工程和学术研究来说,研究更大角度横摇的晃荡冲击载荷特性很有必要。

表1 各装载率下液体固有频率值

Table 1 Values of natural frequencies of liquid under different loadings

装载率/%	固有频率/Hz
20	0.66
30	0.76
50	0.85
70	0.87
80	0.88

本文通过控制激励幅值法,来研究不同横摇角度对液舱自由液面处舱壁压力的影响。液舱的装载率分为低、中、高装载,本文选择20%、30%、50%、70%、80%的不同装载率作为研究对象。当外部激励频率与液舱液体固有频率接近时,液舱晃荡最为剧烈,此时对结构产生很大的破坏风险。因此,针对表2所示的工况进行数值模拟计算与分析。在液舱自由液面左侧设置压力监测点,设定时间步长为0.001 s,采用VOF法对自由液面进行捕捉,选择Standard $k-\epsilon$ 湍流模型。横摇中心位置如图1所示,横摇中心高度为0.85 m。

表2 数值计算工况

Table 2 Numerical calculation conditions

横摇中心高度/m	装载率/%	激励频率/Hz	横摇角度/ $^\circ$
0.85	20	0.66	2, 6, 10~40 (间隔 2°)
	30	0.76	
	50	0.85	
	70	0.87	
	80	0.88	

3 不同激励幅值下晃荡冲击压力特性

在横摇激励下,当液舱处于共振频率激励下,晃荡冲击压力随横摇角度的变化而产生不同的影响。图 3 给出了 20% 装载率下不同横摇角度晃荡冲击压力的时程图。可以看出,当横摇激励接近共振频率时,舱壁受到周期性激励,产生周期性压力变化。如图 3a, b 和图 4a, b 所示,在小、中等幅

度激励下,晃荡冲击压力平稳上升,液面表现为线性响应特征,液面的振幅与激励幅值大致成正比关系,振幅随着激励幅值的增大而逐渐增大,液体在液舱内来回摆动,呈现较为稳定的波动形态。如图 3c, d, e, f 和图 4c, d, e, f 所示,在大幅度激励下,晃荡冲击压力快速上升,然后在一定范围内上下波动,自由液面也呈现出非线性特征,液面振幅和激励幅值之间的关系不成正比例,而是出现复杂的响应形态。

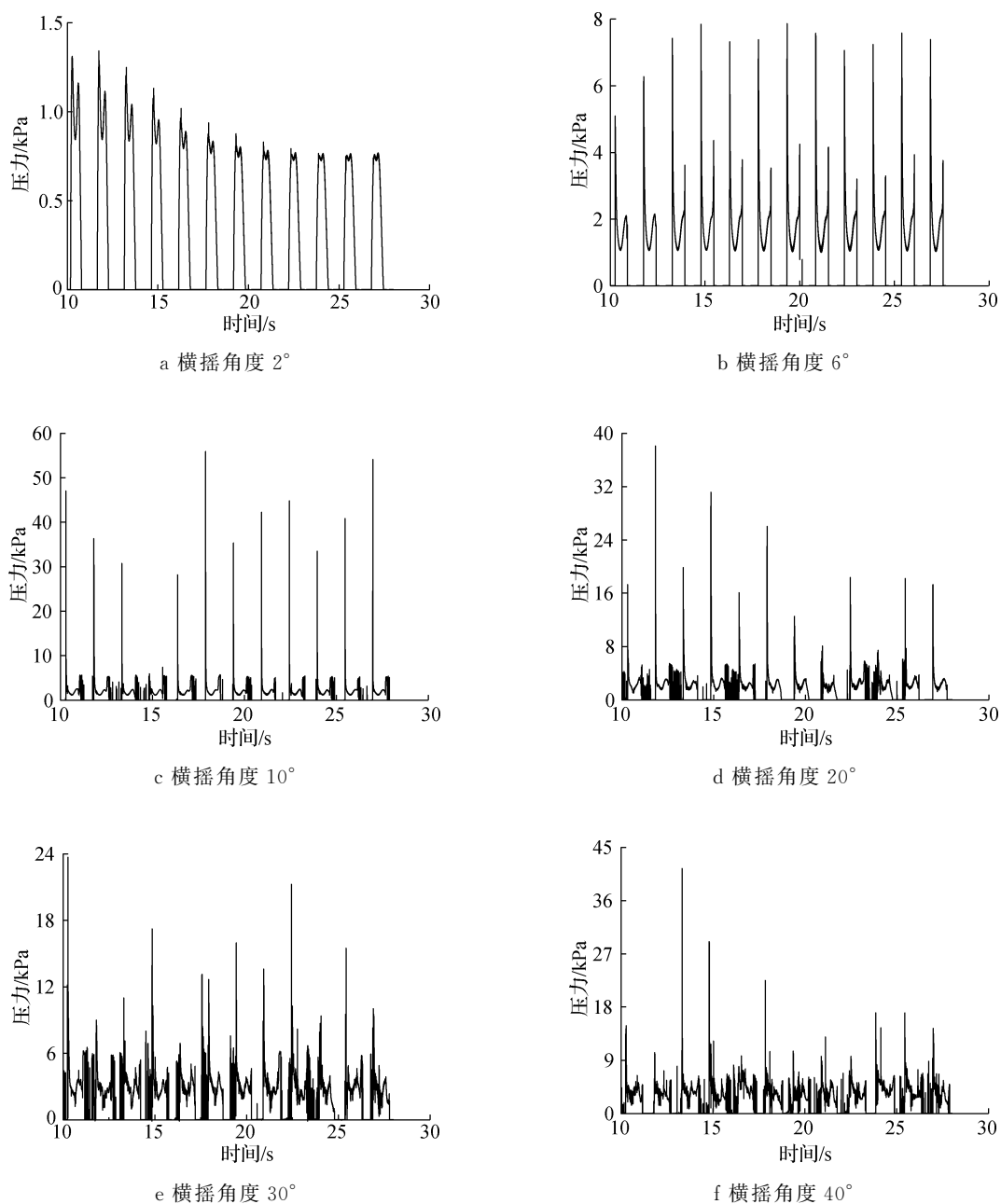


图 3 20% 装载率下不同横摇角度压力时程图

Fig. 3 Time history of pressure at different rolling angles at 20% loading rate

根据图4可知,随着横摇角度不断增大,液体会出现非常复杂的运动现象。图4a中,在共振频率下,即使横摇角度非常小,液体也会形成波长较小的行进波。图4b中,随着横摇角度增大到 6° ,液体向前传播的波长会增大,自由液面呈现驻波和行进波组合的组合波,并沿着壁面爬升到较高位置。图4c中,随着横摇角度增大到 10° ,出现液

体飞溅现象,液体迅速爬到液舱顶部,爬升速度非常快,对壁面造成的冲击压力也非常大。图4d, e, f中,随着横摇角度持续增大,当超出一定阈值时,自由液面出现破碎、翻卷和飞跃现象,这些复杂的运动响应使液体冲击液舱顶部,并且卷入大量空气,然后在重力作用重回下方液体,下方液体出现许多空气泡。

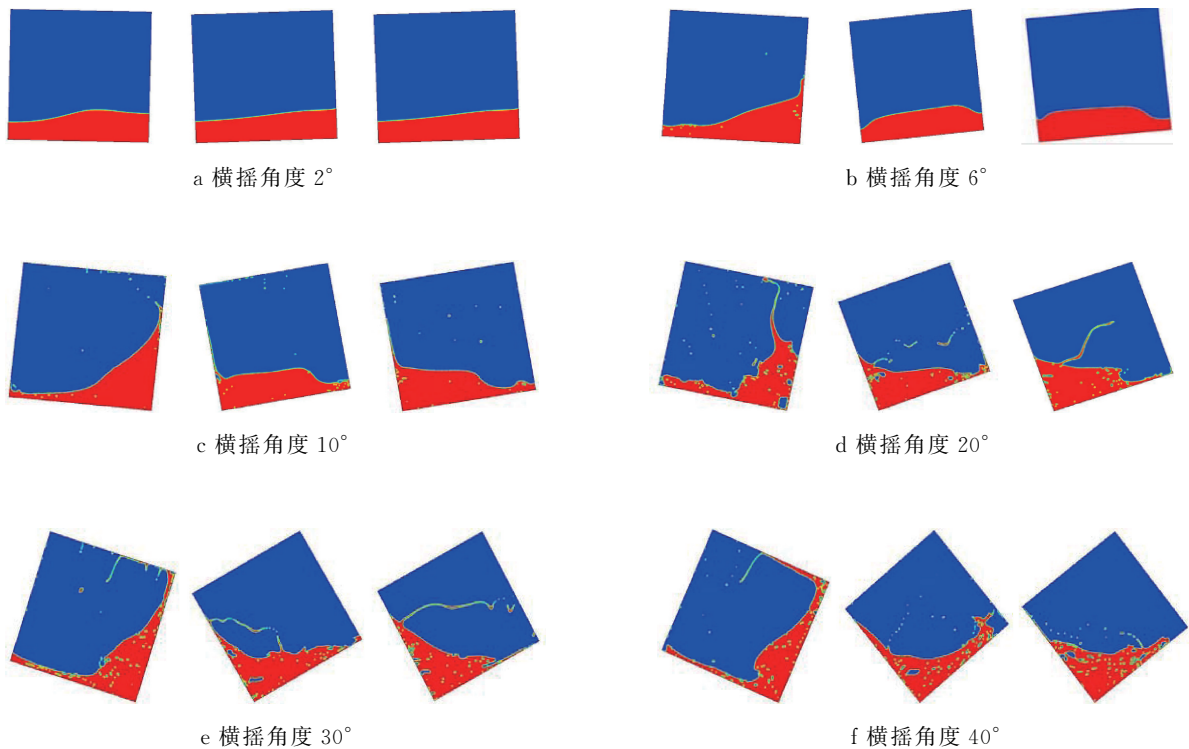


图4 20%装载率下不同横摇角度自由液面变化情况

Fig. 4 Variation of free surface at different rolling angles at 20% loading rate

结合图3和图4可知,液舱壁的压力会出现双峰现象。第一个峰值压力是由于液舱内液体受横摇作用,以很大速度撞击壁面,然后速度瞬间降为零所导致,其特点是时间短,速度快;第二个峰值是液体由于重力作用回落导致,其特点是较第一个峰值小,时间较长。当激励幅值超过一定阈值时,液体出现破碎、翻卷和飞跃现象,导致一部分能量在空气中耗散,从而减小了对壁面的晃荡冲击压力,此外,卷入的空气泡会影响液体的流动和传输,进一步减小对壁面的晃荡冲击压力,最后,由于自由液面的剧烈运动,压力分布也会发生改变,从而减小对壁面的晃荡冲击压力。因此,随着横摇角度的持续增大,液体对壁面的冲击压力不

会持续增大。

4 装载率和横摇角度对液舱晃荡冲击压力的影响

在横摇激励下,当处于共振频率时,对于处于小、中等幅度激励下的液舱,20%装载率下液舱会产生最大的晃荡冲击压力,如图5a所示。而随着装载率的增加,晃荡冲击压力逐渐减小,这与自由液面与回转中心距离变小有密切关系。该距离变小,则自由液面附近的液体绕着回转中心的最大角速度变小,所以晃荡压力会降下来。显然,自由液面位置的晃荡压力也与横摇角度有关。增大横摇角度,如果

液体没有严重的冲顶或自由液面发生严重的破碎等现象,以及约束自由液面的边界没有发生明显的变

化,则自由液面附近的液体绕着回转中心的最大角速度也增大。

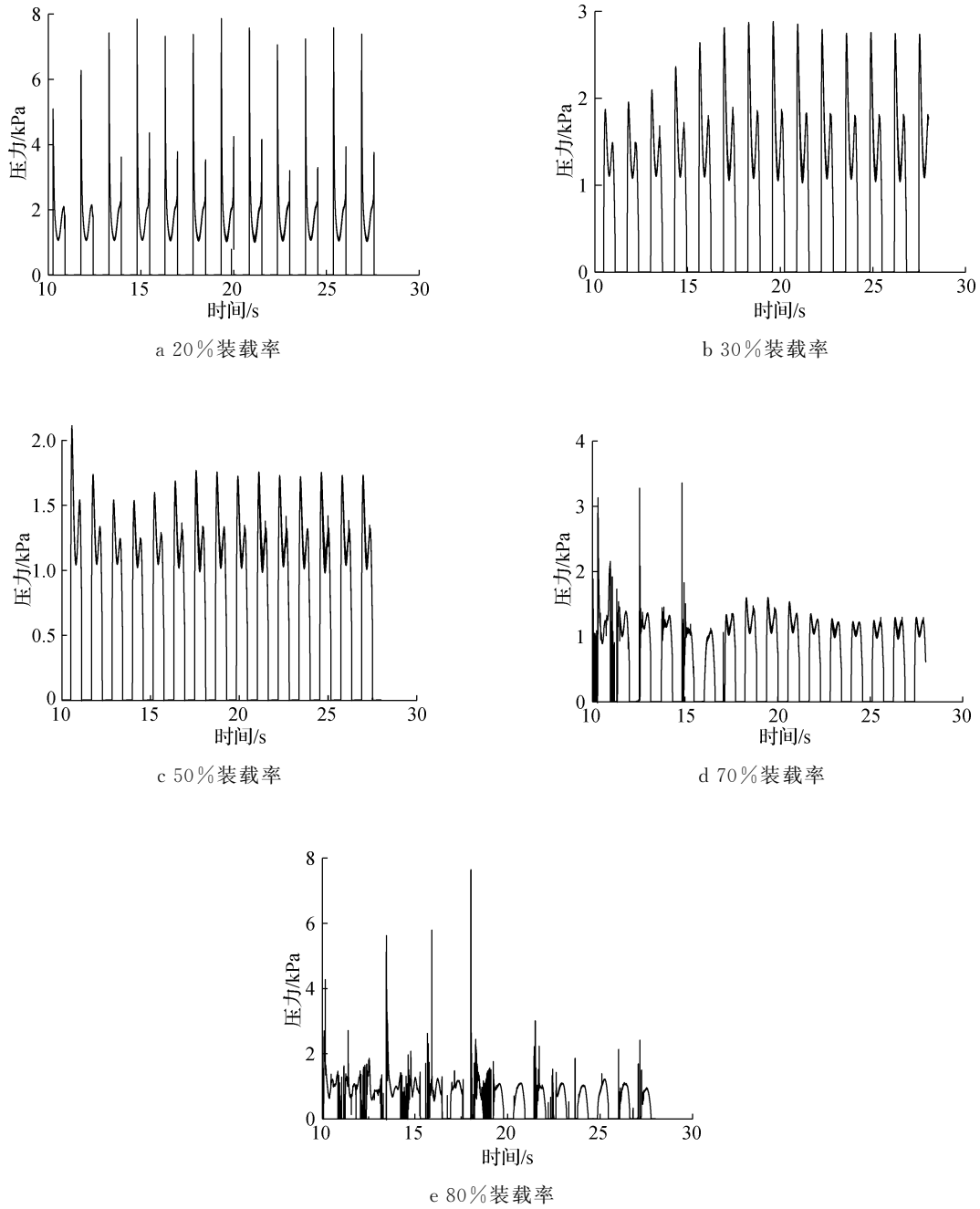


图 5 横摇角度 6°时不同装载率下压力时程图

Fig. 5 Pressure-time history graph of the roll angle of 6° under different loading rates

对于处于大激励幅值下的液舱来说,如图 6 所示,可以看出,随着装载率的提高,液舱内的晃荡冲击压力会减小。这是因为当激励幅值足够大时,液体会发生翻滚、破碎等现象,从而使液体动能转化为冲击压力,导致液舱内的冲击压力增大。

此时,液体中的空气比例较高,引起的压力波也会增大,导致晃荡的冲击压力进一步增大。但在高装载率下,液体的载荷比例更高,液体更加稳定,不容易发生破碎、翻滚等现象。此时,液体中的空气比例较低,空气泡相对于液体也更少,因此晃荡

的冲击压力会减小。另一个原因是,当液舱内的液体装载率较低时,相比高装载率,液体的体积较小,在晃动时可以产生更大的位移,导致对容器壁产生更强的冲击压力。而当液舱内的液体装载率

较高时,由于液体的体积较大,在晃动时位移较小,从而对容器壁产生的冲击压力也较小。因此,低装载率下的晃动冲击压力大于高装载率下的晃动冲击压力。

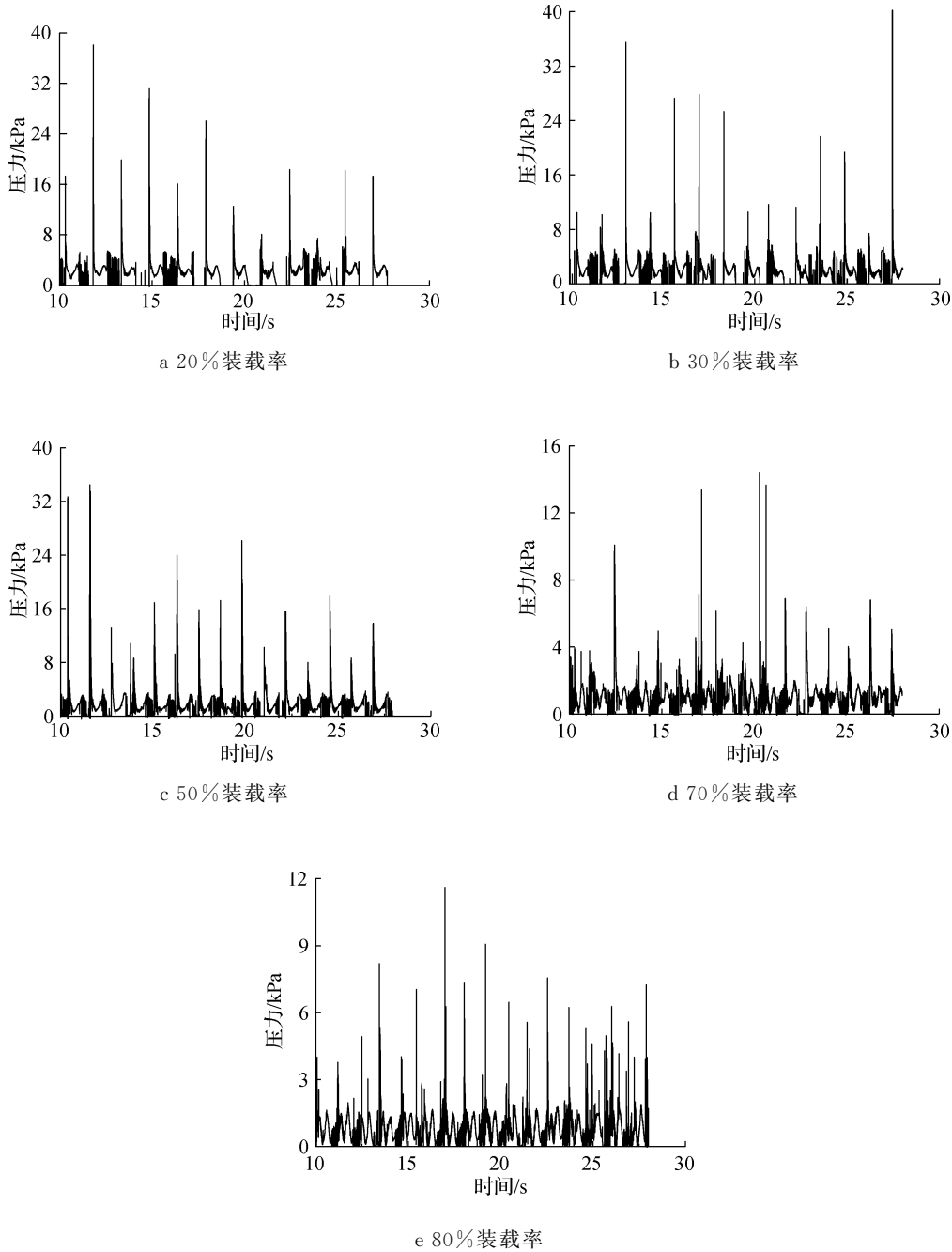


图6 横摇角度 20° 时不同装载率下压力时程图

Fig. 6 Pressure-time history graph of the roll angle of 20° under different loading rates

比较液舱在不同装载率和不同横摇角度下的晃动冲击压力特性,结果如图7所示。当液舱处于共振频率下时,如图7a所示,在20%装载率和横摇角度 6° 时,液舱进入大幅度晃动状态,导致晃动冲击

压力快速增大,轻微的外部激励都会导致里面的液体产生强烈的晃动冲击压力,并且迅速达到峰值。随着横摇角度增大,晃动冲击压力并不会持续增大,而是呈压力饱和特性。如图7b所示,当装载率增大

到 30% 时,液舱仍处于低装载工况。在此种情况下,液舱需要更大的横摇角度才能进入大幅度晃荡,而随着横摇角度不断增大,晃荡冲击压力呈线性增大的趋势;当横摇角度达到 14° 时,晃荡冲击压力会快速增大,并在之后达到压力峰值。由图 7c 可知,当液舱装载率达到 50% 时,液舱进入大幅度晃荡所需的横摇角度为 12°, 与 30% 装载率下大致相同,即装载率的增大没有影响液舱进入大幅度晃荡的阈

值。根据图 7d 和 e 的结果可知,当液舱的装载率达到高装载率时,即在 70% 和 80% 装载率下,液舱进入大幅度晃荡所需的横摇角度分别为 18° 和 14°, 这表明大幅度晃荡所需的横摇角度与装载率没有直接相关性。此外,晃荡压力趋于饱和特性的原因是,随着横摇角度增大,自由液面发生严重破碎而耗散大量能量;液体严重冲顶,使得自由面运动边界发生改变。

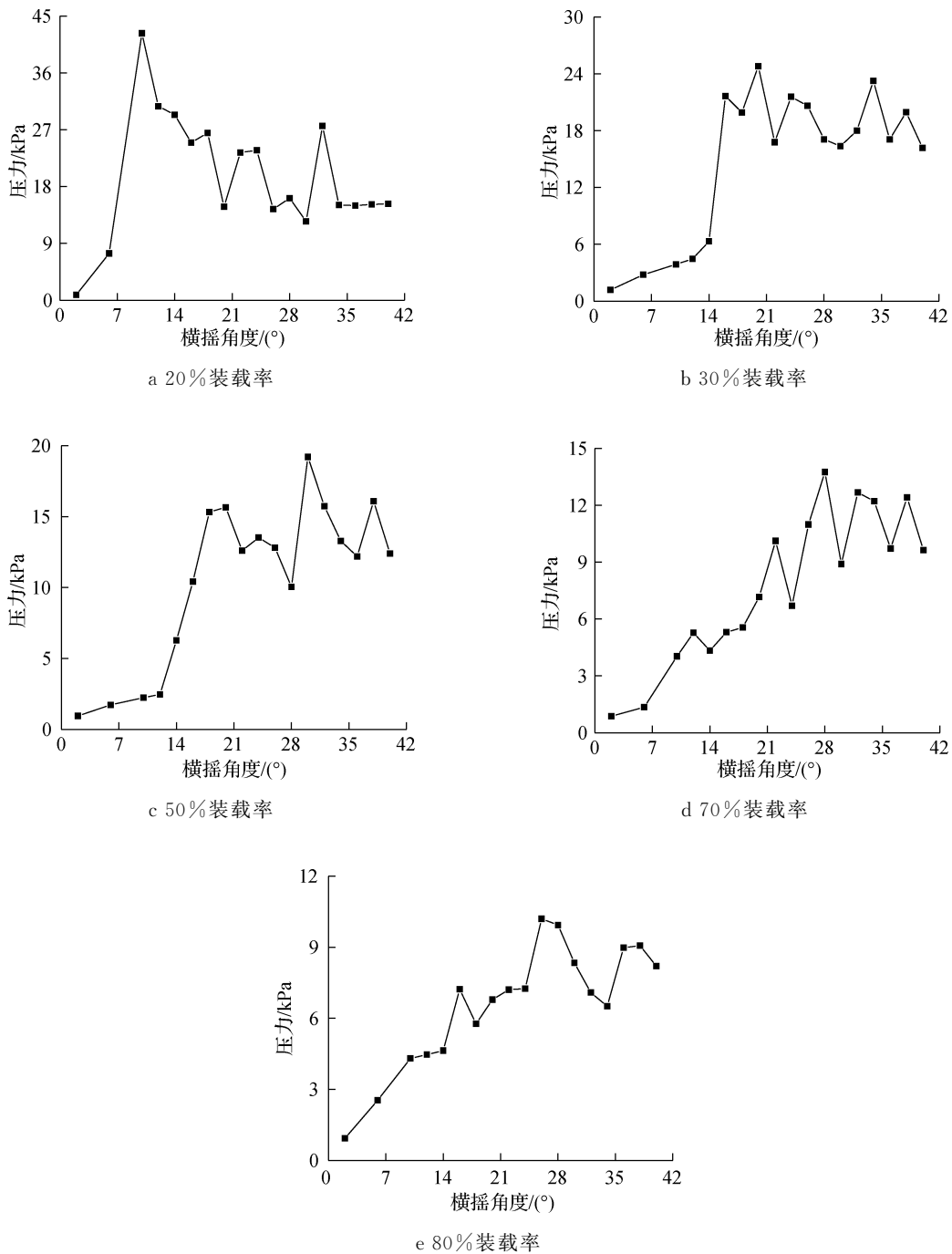


图 7 不同装载率下横摇角度与晃荡压力关系

Fig. 7 Relationship between roll angle and sloshing pressure at different loading rates

5 结论

本文通过数值模拟研究液舱在横摇、共振频率激励下液舱晃荡冲击压力问题,并考虑了不同的装载率和激励幅值,得到以下结论。

(1) 晃荡冲击压力随横摇角度的变化而产生不同的影响。在小激励到中等幅值激励的范围内,晃荡冲击压力呈现迅速增大的非线性现象。当横摇角度超过一定阈值时,晃荡冲击压力不会继续增加,与横摇角度之间没有相关性,而呈现出压力“饱和”现象,且液体会出现非常复杂的运动现象,包括行进波、驻波和飞溅破碎等现象,导致液体冲击液舱顶部,并且卷入大量空气,形成许多空气泡。

(2) 对于小、中等幅值激励下的液舱,在20%装载率下产生最大的晃荡冲击压力,并随着装载率的提升逐渐减小。当液舱的装载率达到中、高装载时,例如70%或80%装载率,晃荡冲击压力的增加与液舱装载的增加的相关性不太明显。对于大激励幅值下的液舱,随着液体装载率的提高,液舱内的晃荡冲击压力会降低。

参考文献:

- [1] ABRAMSON H N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers[M]. Washington D C: NASA SP-106, 1966: 467.
- [2] 管廷敏. 箱体中非线性液体晃荡现象的数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [3] 高志龙,娜日萨,金咸定. VLCC液舱晃荡仿真及结构强度评估[C]. 上海市国际工业博览会暨第三届上海市“工程与振动”科技论坛,2005.
- [4] 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,2002.
- [5] FALTINSEN O M. A nonlinear theory of sloshing in rectangular containers[J]. Journal of Ship Research, 1974, 18(4): 224-241.
- [6] IBRAHIM R A. Liquid Sloshing Dynamics—Theory and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [7] 朱仁庆,颜开. 盛液容器内液体二维晃荡的数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),1998,12(2): 14-21.
- [8] 蔡忠华. 液货船液舱晃荡问题研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [9] 王德禹,金咸定,李龙渊. 液舱流体晃荡的模型试验[J]. 上海交通大学学报,1998(11):116-119.
- [10] 邹昶方,蔡忠华,王德禹. 液舱在弹性支撑下的晃荡载荷试验研究[J]. 船舶力学,2021,25(1):37-42.
- [11] 张会霞,李师,邹昶方. 横摇-垂荡复合激励下液舱晃荡的压力特性研究[J]. 舰船科学技术,2022,44(19): 22-27.
- [12] 张会霞,李师,邹昶方,等. 横摇-横荡复合激励下液舱晃荡的压力特性[J]. 广东海洋大学学报,2023,43(1):111-118.
- [13] SARAVANAN G, SANAPALA V S, DEEPAK K, et al. Sloshing dynamics of shallow water tanks: modal characteristics of hydraulic jumps[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 104: 103322.
- [14] 卫志军,杜祥璞,邹国良,等. 壁面结构形状对流体晃荡影响的数值研究[J]. 船舶力学,2021,25(9):1189-1202.
- [15] 刘永涛,马宁,顾解仲. 各种激励作用下液舱内液体晃荡的计算与分析[J]. 船海工程,2009,38(5):7-12.
- [16] 唐忠时,邹昶方. 波纹板舱壁制荡方法研究[J]. 船舶,2022,33(5):73-81.
- [17] 李浩. 船舶横摇运动特性研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)