

简谐激励下大型低温贮箱防晃设计

晋永华¹, 厉彦忠^{1,2}, 王磊¹, 刘展¹, 李翠¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;
2. 中国人民解放军总装备部 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100028)

摘 要: 针对某大型低温贮箱,基于水平环形防晃板和竖直防晃板设计了一种布置于整个贮箱的固定结构防晃板,采用 CFD 软件 Flow-3D 数值模拟了一定简谐激励下,不同充注率时该结构的防晃效果.通过与液面水平环形防晃板对比发现:两种结构防晃效果相近,均可以显著抑制不同充注率下液体质量中心的波动范围.当充注率 50%时,两防晃结构甚至可以使波动范围减小 64%;在晃动过程中,相比于液面水平环形防晃板,固定结构中单层板的受力更小,但是贮箱受到的压力会有所增加;对比相同面积液面水平环形防晃板和竖直防晃板的防晃效果,液面水平环形防晃板优势更加明显;随着充注率的增大,液体在贮箱内晃动时质心波动范围逐渐减小.

关 键 词: 晃动; 低温贮箱; 简谐激励; 水平环形防晃板; 竖直防晃板

中图分类号: V434; TK121 **文献标志码:** A

Design of slosh baffle in large cryogenic tank under harmonic excitation

JIN Yong-hua¹, LI Yan-zhong^{1,2}, WANG Lei¹,
LIU Zhan¹, LI Cui¹

(1. School of Energy and Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants,
General Armament Department, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100028, China)

Abstract: A fixed construction slosh baffle arranged in the whole tank was designed for the large cryogenic tank based on the horizontal ring slosh baffle and vertical slosh baffle. The effects of this construction at different fill levels were simulated numerically, using CFD software Flow-3D under a harmonic excitation. Comparisons with a horizontal ring slosh baffle at the liquid surface show that the effects of these two baffles are similar, both of them can significantly reduce the vibrations of the center of liquid mass at different fill levels. The vibration can even be decreased by 64% when the fill level was 50%. During the slosh, the pressure imposed on the single board of the fixed construction baffle is smaller than that of a horizontal ring slosh baffle at the liquid surface, while the tank wall of the former undergoes higher pressure. The effect of a horizontal ring slosh baffle at the liquid surface is more obvious than the vertical slosh baffle when they have the same board areas. The vibration of the center of liquid mass in the tank decreases as the fill level increases.

Key words: slosh; cryogenic tank; harmonic excitation; horizontal ring slosh baffle; vertical slosh baffle

收稿日期:2014-01-20
基金项目:国家自然科学基金(51376142); 中国博士后科学基金(2013M532041);
航天低温推进剂技术国家重点实验室开放课题(SKLTSCP1312)
作者简介:晋永华(1991—),女,宁夏中宁人,硕士生,主要从事空间传热与换热研究.

液体推进剂的晃动影响着航天器的运动稳定性和姿轨控制系统的可靠性,是航天器动力学中一个备受关注的问题^[1]. 航天器空间对接中,液体推进剂的晃动易产生不可控附加位移,造成对接困难;飞行器引擎点火时,常靠旋转上面级来保持稳定,但液体的晃动可能与这一旋转的章回模式产生耦合,导致章回阻尼过早消耗;在轨期间,推进剂的晃动易导致低温推进剂过量蒸发^[2]. 因此,有必要就大型低温贮箱开展防晃设计,以确保航天探测任务顺利实现.

液体晃动的研究方法主要包括理论分析、数值模拟及实验研究. 理论分析主要适用于简单形状贮箱的小幅晃动研究,认为液体在晃动过程中,虽然液面会发生倾斜,但始终保持为一个平面^[3],该假设在很大程度上制约了这一方法的应用. 实验研究^[4-7]虽然不受晃动幅度限制,并且可以作为依据验证理论分析和数值模拟的结果,但是实验成本高、周期长,缺乏理论完备性,获取的结果不能直接用于实际分析,需要进一步总结,这些都限制着实验研究的应用. 数值模拟方法计算周期短、运行成本低,且对于计算对象尺寸没有限制,可以直接进行全尺寸仿真分析,还可以获取整个流体的流型及质心变化,提取需要的压力、波高和力矩等参数. 常用方法有任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)方法和 VOF(volume of fluid)方法等. ALE 方法^[8-9]可以准确描述自由液面形状,但对于液面破碎问题,自由液面追踪的连续性条件破坏,ALE 方法不再适用;VOF 方法^[10]发展比较成熟,计算精度高,是多种商业 CFD 软件内置算法. 不论常重力还是微重力,VOF 方法都能够得到可靠的计算结果^[2,4,6]. 以 VOF 方法为主要算法的商业软件 Flow-3D^[11]在计算液体晃动方面的精度得到了广泛认可,李青等^[12]曾使用该软件验证其改进等效力学模型的精度, Lazzarin 等^[13]研究 Euclid 贮箱的晃动现象时,将 Flow-3D 数值模拟结果与实验结果对比,发现计算结果可以准确预测晃动对贮箱产生的作用力和外加激励下气液相界面的分布.

常用防晃板主要有两种形式:竖直防晃板和水平防晃板,其他结构的防晃板都是以此为基础,通过不同的组合或者不同的安装方式来达到优化的防晃效果. 这两种防晃板的作用机理相似,主要是将垂直于板平面的流体动量转变为作用于板的冲量. Kotaro, Himeno 等^[14-15]分别针对可重复发射系统(reusable launch vehicle, RLV)液氢、液

氧贮箱内所发生的晃动现象,以水为工质,采用缩比模型开展了实验与仿真分析. 两低温贮箱均采用不同宽度的多层水平防晃板进行防晃. 文献[14-15]针对这一防晃结构,通过改变多层板的宽窄布局来研究其防晃效果. 结果显示,防晃板的添加对液体晃动具有显著抑制效果. Chintalapati 和 Kirk^[16]对一个直径为 4 m,高为 3.5 m 的椭球形贮箱进行了全尺寸模拟,研究了水平防晃板在不同重力水平下的防晃效果. 结果表明,相对于地面常重力,在轨微重力对应的流体晃动更加剧烈,水平防晃板在常重力与微重力下均具有较好防晃效果. Biswal 等^[17]也进行了相似研究,改变水平环形防晃板的板宽、安装高度和数量等参数,用有限元方法进行了一系列数值模拟,研究了非线性晃动下流体的响应,对比了不同工况下液高随时间变化情况,得出了相似结论. Strahan 等^[18]为了研究防晃板在液氧、液态甲烷贮箱内的作用,构造了一种水平防晃板和竖直开孔板组合的防晃结构. 该结构布置在贮箱下半部分,在低充注率下进行实验,获得了良好的防晃效果,但当流体液面超出防晃结构较多时,防晃板就无法对流体产生全面的防晃作用. 因此,有必要将防晃结构布置在整个贮箱内.

本文针对 Cassini 形^[19]液氧低温贮箱(下文简称贮箱),基于水平环形防晃板和竖直防晃板设计了一种布置于整个贮箱的防晃结构,采用基于 VOF 界面捕捉技术的 Flow-3D 软件,在外加简谐激励作用下,改变贮箱充注率,对该结构的防晃效果进行数值模拟,并与水平环形板进行对比. 本文还进一步研究了竖直防晃板的防晃效果. 最后,就充注率对晃动的影响进行了讨论分析.

1 物理模型

本文研究的贮箱由一个柱段和上下椭球封头组成,贮箱直径为 5 m. 防晃板结构有 3 种,一种是结合了水平防晃板和竖直防晃板的组合形式,简称其为固定结构防晃板. 该结构包含 5 层水平环形防晃板,安装在贮箱内充注率 10%, 30%, 50%, 70%和 90%对应位置. 4 条竖直防晃板相互成 90°夹角,紧贴壁面安装,如图 1 所示. 另外两种分别是安装在液面位置的水平环形防晃板和板平面垂直于激励方向的竖直防晃板. 根据文献[14-15]研究结果,防晃板宽取贮箱直径 0.1 倍时,其防晃效果与防晃板受力可以达到一个优化值. 因此,本文水平环形板和竖直防晃板的板宽均取贮

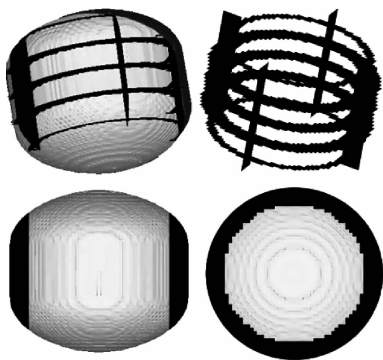


图 1 防晃板结构

Fig. 1 Construction of slosh baffle

箱直径的 0.1 倍,即 0.5 m.

贮箱飞行过程中,容易受到外加激励影响,产生不规则晃动.这些外加激励都可以由不同频率不同振幅的简谐激励合成,因此本文就以最基本的简谐激励为研究对象.激励主要参数为振幅 A 和角速度 ω .模拟中,在 X 轴方向(见图 2)添加如下简谐激励:

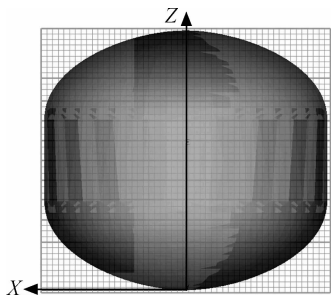


图 2 网格划分

Fig. 2 Grids generation

位移 S

$$S = A\sin(\omega t) \tag{1}$$

通过对位移求导,可以得到速度 v

$$v = A\omega \cos(\omega t) \tag{2}$$

加速度 a

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t) \tag{3}$$

简谐激励振幅取得太大或者太小,晃动过于激烈或者过于微弱的极端情况,都不利于防晃机理的研究.激励振幅一般取贮箱直径的 0.05~0.4 倍^[13-15,17-18],本文取振幅为贮箱直径的 0.1 倍,即 0.5 m.为了防止贮箱晃动过程中出现共振,晃动角速度 ω 取值 1 rad/s,对应频率为 0.159 Hz.随着充注率增加,贮箱固有频率会逐渐增大,而最小充注率下贮箱固有频率 1.34 Hz,远大于 0.159 Hz.将各参数代入式(3)可得加速度 $|a| = 0.5\sin t \text{ m/s}^2$.

2 数值方法

以液氧作为计算工质,选用不可压缩流体模型,锐利自由界面(sharp interface)追踪方法在常重力条件下进行模拟.取特征长度为贮箱直径,在晃动过程中部分流体处于湍流状态,因此采用 RNG(re-normalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型.数值计算的收敛条件使用软件默认设置,即时间步长控制条件是稳定和收敛(stability and convergence),压力控制采用隐性广义最小残量(generalized minimum residual,GMRES)算法.每个工况模拟时间为 50 s.本文的研究重点为防晃板对流体晃动的抑制作用,在短时间内,外界漏热对晃动的影响可以忽略,因此,不考虑液氧与外界的换热.

Flow-3D 软件自带网格划分模块,有两种网格坐标系,笛卡儿坐标系和圆柱坐标系.圆柱坐标系主要用于计算中心对称的工况,简谐激励作用下的晃动为非对称运动,使用笛卡儿坐标系计算更加准确,因此,本文选用笛卡儿坐标系进行三维模拟,网格大小取 0.1,如图 2 所示.网格对应的 6 个边界设置为对称(symmetry)边界条件.

3 精度验证

数值模拟之前,对 VOF 方法和 Flow-3D 软件进行精度验证.以文献[15]中的晃动实验为依据,参照实验中贮箱大小形状、外加激励及网格划分等进行建模,使用基于 VOF 方法的 Flow-3D 软件进行模拟.将结果与文献中实验结果和文献中基于 Level-Set 和 MARS(multi-interface advection and reconstruction solver)的 CIP-LSM(cubic-interpolated pseudo-partide)算法的模拟结果进行对比,如图 3 所示.由于晃动实验时间较短,贮箱中心的支撑杆又比较细,对晃动的影响可以忽略,因此使用 Flow-3D 建模时不考虑此杆.从图中可以看到,无论是流体的流型变化,还是液面曲线,Flow-3D 软件的结果都能较好的与实验结果吻合.

另外,对文献[15]中另一圆柱型贮箱晃动实验进行模拟,将计算所得的质心变化结果与文献中给出的计算结果进行对比,如图 4 所示.图中每组曲线上面是文献中给出的结果,下面是利用本文方法获得的质心位移情况,其中图 4(b)和图 4(c)中防晃板的总数相同.对比 3 种结果可以看到,在误差允许的范围内,Flow-3D 对质心的模拟

结果同样具有可靠的精度.

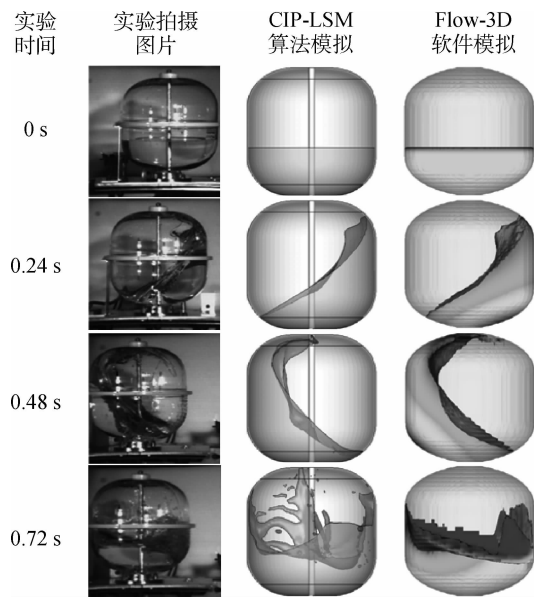
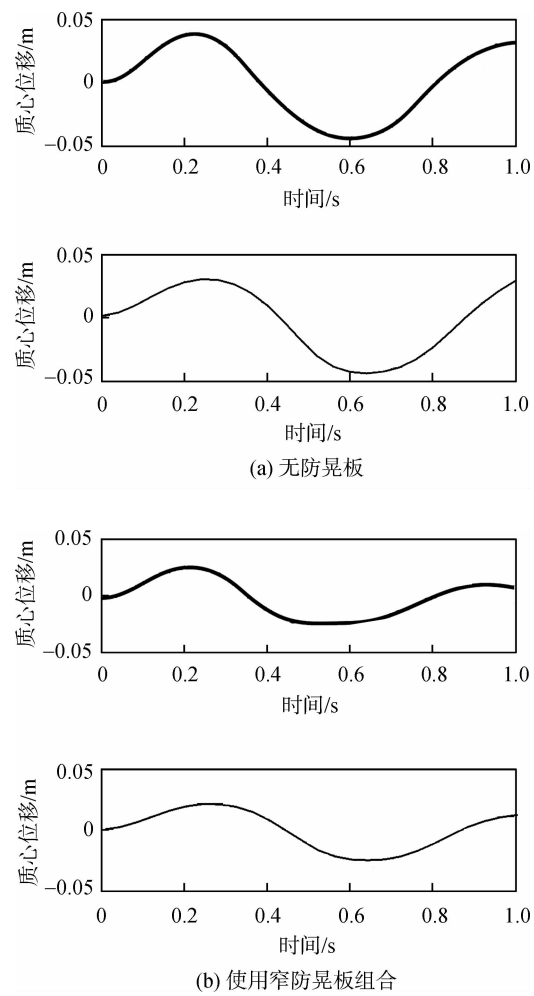


图 3 模拟结果与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulated results and the experiment results



(c) 宽防晃板和窄防晃板交错组合

图 4 3 种防晃结构效果对比

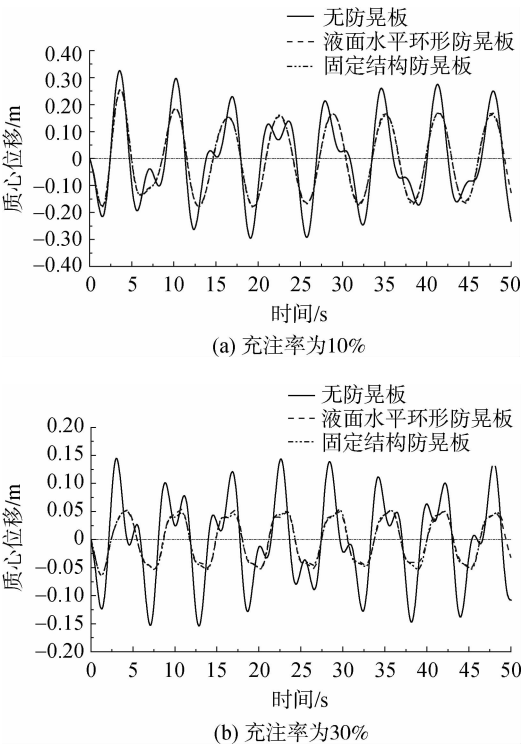
Fig. 4 Comparison of effect of three constructions

4 结果及分析

4.1 两种防晃结构对比

在前述简谐激励作用下,液面水平环形防晃板和固定结构防晃板在不同充注率下的质心位移情况如图 5 所示,图中还给出了无防晃板时质心变化作为对比.不同充注率下质心变化范围不同,各图质心位移坐标区间也不相同.

从图 5 中可以看到,固定结构防晃板与液面水平环形防晃板的防晃效果很接近,两者的质心变化曲线几乎重合.由此可以得出结论,固定结构中,起主要作用的是位于液面处的那层防晃板.



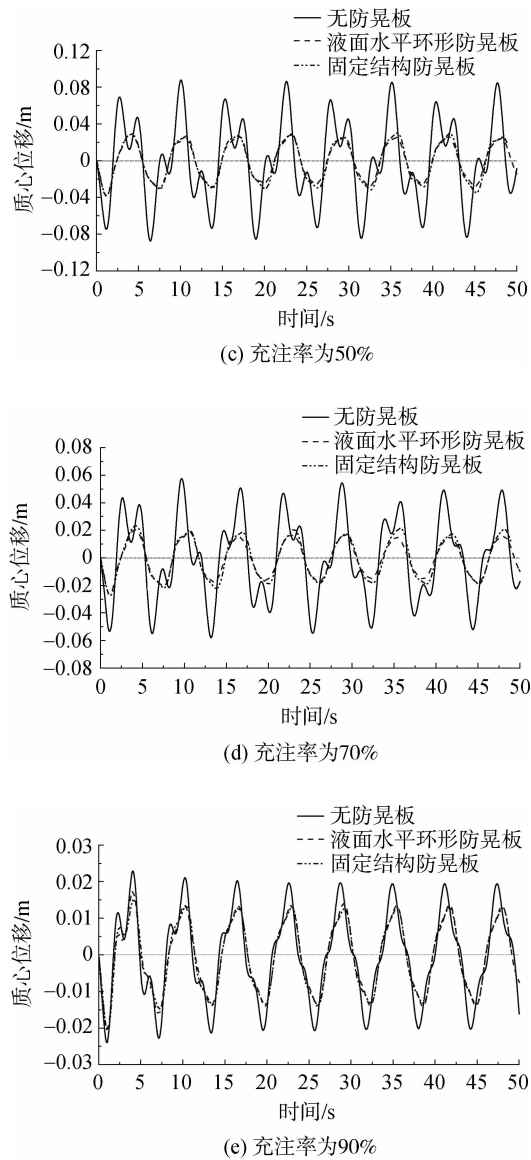


图 5 不同充注率下两种防晃结构效果对比
Fig. 5 Comparison of effects of two constructions at different fill levels

对比图 5(b)~图 5(d)和图 5(a)、图 5(e)两组图,可以看到,前者两种防晃结构作用下的质心位移范围相对无防晃板时有了明显的减小,并且曲线更加平滑,晃动波的次波大量减少,说明充注率为 30%,50%和 70%下的防晃效果明显优于充注率为 10%和 90%的情况.其中充注率为 50%时,两种防晃结构作用下的质心波动范围相比无防晃板时都下降了 64%.充注率为 10%时,液面位于贮箱的椭球封头里,这部分为圆弧形,晃动时液体会以平行于所处壁面切向的速度发生运动,此时垂直于板平面的速度分量所占比例比较小,因此防晃作用相对比较微弱.充注率增加到 30%到 70%之间,液面位于柱段,液体因晃动产生的运动速度垂直于板平面,该晃动动量绝大部分会

受到防晃板的直接抑制.充注率达到 90%时,液面位于上椭球封头内,一方面垂直于板平面的速度分量减小;另一方面在圆弧形的封头内,剩余空间比较小,没有防晃板时,液体也会受到一定的抑制.可以看出,此时的最大位移在 0.02 m 左右,大概是 70%充注率下防晃板作用后的最大位移.

防晃板在转化晃动液体的动量时,会承受一个持续的冲击力.图 6 展示了充注率为 50%时,液面水平环形防晃板和固定结构防晃板中处于同一位置的防晃板在竖直方向(Z 轴正向)受力情况.从图中可以看到,晃动开始时,两板受力比较接近.随着晃动的进行两者开始显现出差异.15 s 之后拥有多层水平环形防晃板的固定结构中,同一位置的板受力要小于只有一层液面水平环形防晃板的工况,并且这一差值有增大的趋势.可见,虽然多层板下液体晃动质心没有明显的优化,但每层板的受力却有所减小.

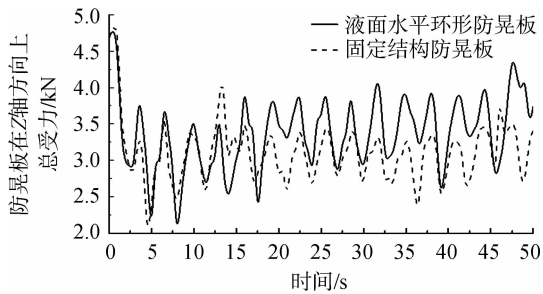


图 6 充注率为 50%时两种结构中同一位置的板
受力对比

Fig. 6 Comparison of forces acting on the slosh baffles at the same elevation at 50% fill level

另外,在 50%充注率工况下,分别监测两种结构中 10%充注率位置处(测点)的压力变化情况,研究液体晃动时对贮箱壁的作用力,如图 7 所示.从图中可以看到,无防晃板时,压力的波动范围是最大的,从 14.1~18.0 kPa,液面水平环形防晃板和固定结构防晃板的波动范围相近,分别是 14.8~17.4 kPa 和 15.3~17.9 kPa,变动范围都是 2.6 kPa,相比无防晃板时减小 33%.多层防晃板结构中,液面与监测点之间另有两层防晃板,当流体大量涌向测点上方时,防晃板起到了阻挡流体运动的作用,同时对测点产生了额外的反作用力,该力在一定程度上超过了自由晃动时波高增加产生的压力.当流体向测点相反方向晃动时,防晃板又起到了阻止流体波高降低的作用,使得此时的压力也比其他两种防晃板高.因此,导致

固定结构防晃板的压力始终大于其他两种防晃板下的压力. 由此可见, 增加防晃板有利也有弊, 在抑制贮箱受力波动的同时, 也增加了受力大小.

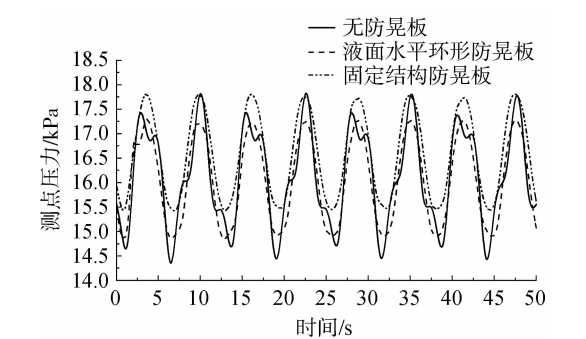


图 7 充注率为 50% 时两种结构在测点处压力变化
Fig. 7 Pressure variation of measure points in two constructions at 50% fill level

4.2 竖直防晃板的防晃效果

固定结构防晃板中, 使用了 4 条竖直防晃板, 但是通过对比, 这类防晃板的作用却没有显现出来, 因此, 这一节专门对竖直防晃板的防晃效果进行研究. 图 8 展示了充注率 50% 时两条竖直防晃板在贮箱内的安装结构, 两板都紧贴壁面, 如图中圆圈标示, 防晃板平面垂直于激励方向. 通过对前述 5 种充注率工况的模拟, 发现贮箱安装竖直防晃板后, 其质心的运动并无太大改变. 相对来说, 50% 充注率时竖直防晃板的作用最明显, 如图 9. 对比图 5(c) 中液面水平环形防晃板和固定结构防晃板的防晃效果, 竖直防晃板的防晃作用显得非常微弱. 从图中可以看到, 开始时两条曲线接近重合, 说明竖直防晃板对流体晃动几乎没有产生任何影响; 随后该防晃板的作用才逐渐突显, 两条曲线显示出差异, 并且有不断增大的趋势.

在壁面处安装的竖直防晃板, 晃动时流经该

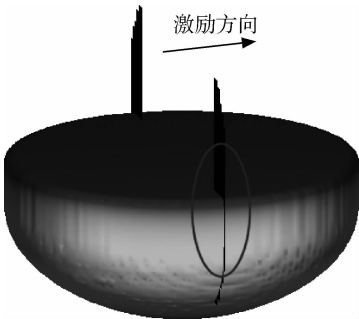


图 8 充注率为 50% 时竖直防晃板结构
Fig. 8 Construction of vertical slosh baffles at 50% fill level

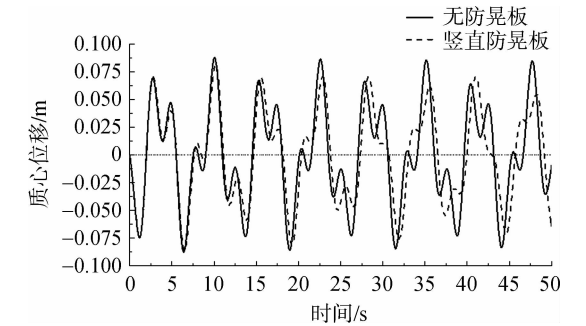
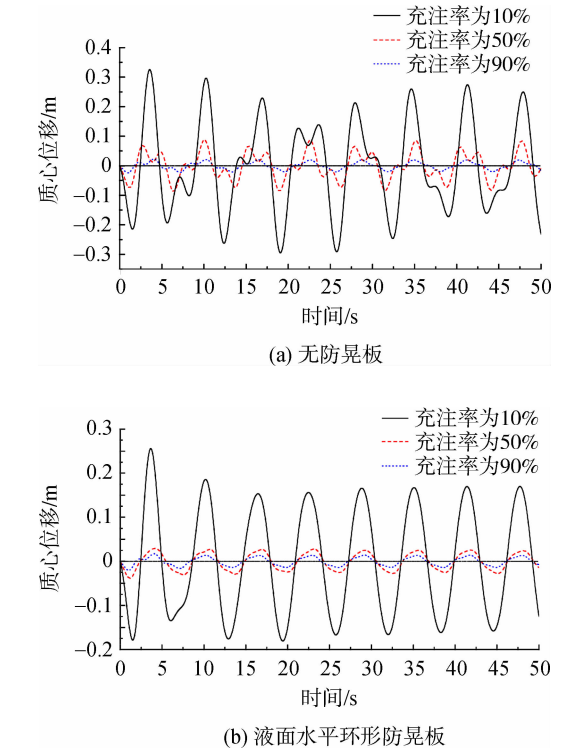


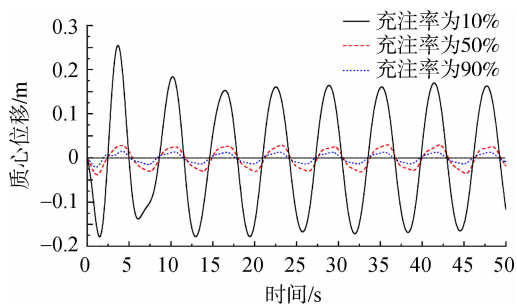
图 9 充注率为 50% 时竖直防晃板与无防晃板结构效果对比
Fig. 9 Comparison of effects of constructions with vertical slosh baffles and without slosh baffles at 50% fill level

板的液体只占全部的很小一部分, 而竖直防晃板只能对此部分液体产生抑制作用. 除非这一位置的竖直防晃板足够宽大, 使其作用区域可以影响更大范围的液体, 防晃效果才可显现; 而在与液面水平环形板宽度相同时, 竖直防晃板的防晃效率远比液面水平环形防晃板低. 因此, 在选择防晃板时应首选液面水平环形防晃板.

4.3 充注率对晃动的影响

图 10 展示了不同结构防晃板, 防晃效果随充注率的变化情况, 为了利于对比, 选取充注率分别为 10%, 50% 和 90% 三种工况. 对比图 10(b) 与图 10(c) 发现两者曲线形状非常相似, 说明液面





(c) 固定结构防晃板

图10 不同充注率下不同防晃结构效果对比

Fig. 10 Comparison of effect of different constructions at different fill levels

水平环形防晃板和固定结构防晃板的作用效果很接近,这与前面得出的结论一致.与图10(a)对比发现变化最大的是50%充注率工况,质心位移振幅被大幅减小,并且曲线的次波也全部消失,晃动曲线更加平滑;10%充注率工况下,振幅也有所减小,除了第2个波谷还有一点微弱波动,次波也全部消失;变化最不明显的是90%充注率工况,除了曲线更加平滑以外,振幅只有微小变化.

从图10还可以看到,随着充注率增加,质心波动幅值不断减小.一方面,随着液体质量的增大,液体体积与贮箱气体体积的比值减小,液体质心在贮箱内的波动范围缩小;另一方面,液体的惯性力也不断增大,对外加激励的耗散也越快.

5 结 论

本文结合水平环形防晃板和竖直防晃板,设计了一种固定结构防晃板,在大型Cassini形液氧低温贮箱中,对比了该结构与一层置于液面的水平环形防晃板在不同充注率下的防晃效果,并探讨了竖直防晃板的防晃作用,得出如下结论:

1) 当外加简谐激励频率远小于贮箱晃动固有频率时,液面水平环形防晃板与固定结构防晃板的防晃效果比较接近,说明固定结构防晃板中起主要作用的是位于液面处的水平环形板.但是,固定结构防晃板中起主要作用的水平环形板受力要小于液面水平环表防晃板.

2) 通过对贮箱同一位置测点压力的监测,发现液面水平环形防晃板和固定结构防晃板均能有效抑制贮箱压力波动.

3) 对竖直防晃板的防晃研究表明,在柱型贮箱中,有限宽度的竖直防晃板防晃效果相比同样面积的液面水平环形防晃板非常微弱.

4) 对比不同充注率下液体晃动情况,发现充

注率越大,质心的波动幅值越小.一方面因为充注率越大,液体质心在贮箱内波动范围越小.另一方面由于液体质量增大,液体的惯性力随之增大,对外加的耗散也越快.

参考文献:

- [1] 李青,王天舒,马兴瑞.充液航天器液体晃动和液固耦合动力学的研究和应用[J].力学进展,2012,42(4):472-481.
LI Qing, WANG Tianshu, MA Xingrui. Reviews on liquid sloshing dynamics and liquid-structure coupling dynamics in liquid-filled spacecrafts [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(4): 472-481. (in Chinese)
- [2] Sunil C, Charles A H, Richard E S, et al. Design of an experimental platform for acquisition of liquid slosh data aboard the International Space Station [R]. AIAA-2012-4297, 2012.
- [3] Dodge F T. The new "dynamic behavior of liquids in moving containers" [M]. San Antonio: Southwest Research Institution, 2000.
- [4] Zhou R, Vergalla M, Chintalapati S, et al. Experimental and numerical investigation of liquid slosh behavior using ground-based platforms [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2012, 49(6): 1194-1204.
- [5] Vreeburg J P B, Chato D J. Models for liquid impact on board slosh sat FLEVO [R]. NASA/TM-2000-210475, 2000.
- [6] Veldman A E P, Gerrits J, Luppens R, et al. The numerical simulation of liquid sloshing on board spacecraft [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 24(1): 82-99.
- [7] 黄华,周志成,杨雷,等.充液航天器大幅晃动耦合动力学建模仿真研究[J].航天器工程,2009,18(5):37-41.
HUANG Hua, ZHOU Zhicheng, YANG Lei, et al. Coupled dynamic modeling and simulation for spacecraft with large amplitude liquid sloshing [J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(5): 37-41. (in Chinese)
- [8] 岳宝增.俯仰激励下三维液体大幅晃动问题研究[J].力学学报,2005,37(2):199-203.
YUE Baozeng. Three dimensional large amplitude liquid sloshing under pitching excitation [J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 37(2): 199-203. (in Chinese)
- [9] 岳宝增.液体大幅晃动物理学[M].北京:科学出版社,2011.
- [10] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [11] Hirt C W. CFD-101: the basics of computational fluid dynamics modeling [EB/OL]. [2014-01-14]. Http://www.flow3d.com/cfd-101/cfd-101-primer.html.
- [12] 李青,马兴瑞,王天舒.非轴对称贮箱液体晃动的等效力学模型[J].宇航学报,2011,32(2):242-249.
LI Qing, MA Xingrui, WANG Tianshu. Equivalent mechanical model for liquid sloshing in non-axisymmetric

tanks[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2): 242-249. (in Chinese)

[13] Lazzarin M, Biolo M, Bettella A, et al. EUCLID mission; theoretical sloshing model and CFD comparison[J]. AIAA-2012-4296, 2012.

[14] Kotaro A, Takashi N, Iwao I, et al. Experimental investigation of baffle effectiveness on nonlinear propellant sloshing in RLV[J]. AIAA-2007-5556, 2007.

[15] Himeno T, Watanabe T, Nonaka S, et al. Numerical and experimental investigation sloshing in rocket tanks with damping devices[J]. AIAA-2007-5557, 2007.

[16] Chintalapati S, Kirk D R. Parametric study of a propellant tank slosh baffle[J]. AIAA-2008-4750, 2008.

[17] Biswal K C, Bhattacharyya S K, Sinha P K. Non-linear sloshing in partially liquid filled containers with baffles[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 68(3): 317-337.

[18] Strahan A, Hernandez H, Jr. Slosh baffle design and test for spherical liquid oxygen and liquid methane propellant tank for a lander[J]. AIAA-2011-5633, 2011.

[19] Enright P J, Wong E C. Propellant slosh models for the Cassini spacecraft[J]. AIAA 94-3730, 1994.