

运载火箭圆柱形贮箱中推进剂大幅晃动的数值模拟^{*}

周倩倩¹, 谭永华², 徐自力¹, 王 珺³, 王 振³

(1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100;

3. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 运载火箭飞行过程中, 贮箱内推进剂晃动及波面破碎现象会对燃料贮箱产生较大的干扰力, 控制不当会影响飞行稳定性。为了研究推进剂大幅晃动对贮箱结构的影响, 建立了圆柱形贮箱内液体晃动非线性动力学模型, 利用流体体积函数与水平集法解决了大幅晃动过程中产生的破碎波的描述及自由液面的追踪问题, 并对三维圆柱形贮箱在多种含液状态下, 由俯仰运动产生的大幅晃动进行了数值计算, 得到了晃动过程中自由液面的变化、液体对壁面的作用力、液体的晃动速度以及液体质心变化情况。通过对含液率为30%, 50%, 70%三种含液状态下计算结果的对比, 发现飞行中运载火箭贮箱中液体会经历由线性晃动到非线性晃动的变化历程。含液率直接影响晃动的剧烈程度、对壁面的作用力, 以及液面破碎等非线性现象的产生, 其中含液率为50%的状态是一种相对危险的工作状态。

关键词: 液体火箭发动机; 贮箱; 晃动; 波面破碎; 非线性; 含液率

中图分类号: V511^{+.1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 05-200627-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200627

Numerical Simulation of Large Sloshing of Propellant in Cylinder Tank of Launch Vehicle

ZHOU Qian-qian¹, TAN Yong-hua², XU Zi-li¹, WANG Jun³, WANG Zhen³

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China;

3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: During the flight of the launch vehicle, the propellant sloshing and wave surface breaking in the fuel tank impose a large disturbance force to the fuel tank. The disturbance will affect the flight stability if it is not effectively controlled. To study the effects of propellant sloshing on the tank structure, a nonlinear dynamic model of liquid sloshing in a cylinder tank is established. The proposed model combining Fluid Volume Method and Level Set Method is used to describe the breaking wave. Besides, the numerical calculation is carried out for analyzing the large sloshing of a 3D cylinder tank under various liquid rates. Then the changes of the free surface area, the force of the liquid on the wall, the sloshing velocity of the liquid and the center of liquid mass are obtained. Through the comparison of the calculation results under three liquid rates of 30%, 50% and 70%, it is found that

^{*} 收稿日期: 2020-08-24; 修订日期: 2021-02-05。

基金项目: 国家自然科学基金 (51675406)。

作者简介: 周倩倩, 硕士生, 研究领域为液体推进剂非线性晃动分析。

通讯作者: 徐自力, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为推进与动力装备结构强度与振动分析。

引用格式: 周倩倩, 谭永华, 徐自力, 等. 运载火箭圆柱形贮箱中推进剂大幅晃动的数值模拟[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 200627. (ZHOU Qian-qian, TAN Yong-hua, XU Zi-li, et al. Numerical Simulation of Large Sloshing of Propellant in Cylinder Tank of Launch Vehicle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200627.)

the liquid in the launch vehicle tank changes from linear sloshing to nonlinear sloshing during the flight. Moreover, the liquid rate directly affects the sloshing intensity, the force on the wall, and the occurrence of nonlinear phenomena such as liquid wave breaking. The liquid rate of 50% is a relatively dangerous working condition.

Key words: Liquid rocket engine; Tank; Sloshing; Wave surface breaking; Nonlinear; Liquid rate

1 引言

推进剂晃动是影响运载火箭稳定性的潜在扰动源^[1]。推进剂在飞行过程中产生的较大晃动行为会对航天器产生较大的干扰力、干扰力矩以及冲击压力,一旦超过控制系统可调节或结构所能承受的上限,将造成控制系统不稳定或结构破坏^[2]。Space X公司开发的猎鹰一号运载火箭由于在分离过程中推进剂在燃料收集器附近晃动,造成第二级发动机燃料不足,导致发射任务失败^[3]。如果能够准确地预测晃动运动,及时对姿态控制系统(ACS)进行调整,则可能避免由于液体晃动对结构产生的不利影响^[4]。

充液航天器发射、空间交会对接与分离大角度机动以及轨道控制等,都会出现液体大幅晃动的强非线性特性^[5-6],尽管大幅晃动持续时间不太长,但可能造成严重的后果,这将关系到充液航天器的稳定性和液体发动机工作的可靠性。此外,由于航天器在飞行过程中推进剂处于不断地消耗过程中,其质量也在不断地减少,不同质量的推进剂晃动对贮箱产生的力与压强也不尽相同。因此,有必要对推进剂贮箱在多种含液状态下的大幅晃动问题展开研究。

一般情况下,当液体晃动幅度 $>25\%$ 时归为大幅晃动^[7]。NASA从20世纪60年代率先对液体晃动力学问题展开了理论研究,Abramson^[8]对包括矩形、圆柱形、圆环形、扇形等在内的几种特殊形状容器内液体横向小幅晃动的理论求解方法和结果进行了全面、系统的综述。但该理论方法主要适用于研究液面无破碎波的小幅晃动问题,对于液面有破碎的大幅晃动、流体粘性较大或液位较浅等问题,则只能借助数值方法或实验方法来研究。Marsell等^[9]利用ANSYS Fluent采用VOF法,通过给定贮箱速度激发液体晃动,验证了液体推进剂在球形罐内一次充液时的晃动频率和阻尼预测,但没有考虑推进剂质量改变时晃动频率和阻尼的变化。Yang和Peugeot^[10]使用CFD理论对各类贮箱在基本晃动模式下的晃动共振频率和晃动质量进行了参数估计。Yang和West^[11]采用高分辨率CFD模拟定义贮箱上圆顶附近挡板的阻尼特性,CFD模拟得到的阻尼值与实验值吻合较

好。张展博等^[12]研究了低频大幅晃动条件下水平多孔挡板不同浸没深度对液面晃动的影响,但没有对液面破碎进行考虑。杨唱等^[13]采用流体体积法对贮箱出流过程中液体晃动及防晃效果进行了研究。Hari等^[14]采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)法,对不同填充水平和罐体厚度的贮箱在动态载荷作用下的晃动进行了三维计算模拟,并与室内实验结果进行了对比,得到了由于填充水平的变化而造成的固有频率改变的结论。但是对于液面破碎的问题,跟踪自由液面的连续性条件被破坏,ALE尚无能为力。对于大幅晃动的强非线性系统的研究,目前没有恰当的等效力学模型,理论研究也较为困难,一般结合数值仿真与物理试验来进行相应的研究。

从公开发表的文献来看,对多种含液状态下的大幅晃动及自由液面的破碎问题鲜见相关文献的报道。本文针对圆柱形推进剂贮箱在多种含液状态下含有破碎波的大幅晃动问题,通过建立贮箱液体非线性晃动动力学模型,研究不同含液状态下,在侧向简谐激励情况下贮箱内液体的晃动、自由液面的变化、壁面受力、液体纵向运动速度以及液体质心随时间的变化情况。对不同仿真参数进行影响分析,并得到相应规律,从而为圆柱形贮箱的设计提供技术依据。

2 贮箱液体大幅晃动动力学模型

肼的密度、粘度与液态水十分相近^[15],考虑到肼的毒性不便于开展实验,实验中多用水来代替肼,故而在计算过程中也利用液态水代替肼,以便于与实验结果进行对比,贮箱中空气与液态水两相流体共存,即贮箱上方为空气,下方为晃动液体。在液体大幅晃动中,液体粘性很小,对晃动的影响可忽略不计^[5],故而本研究不考虑液体粘性。目前已有关于液体小幅晃动的动力学模型^[16-17],但不适用于大幅晃动、液面破碎等强非线性晃动。目前船舶流体动力学领域采用流体体积法与水平集方法相结合的方法已实现了船舶行驶过程中水面产生的破碎波的描述^[18],本文采用该碎波描述法对推进剂在大幅晃动过程中的破碎波进行了描述。

2.1 大幅晃动理论

在如图1所示的笛卡尔坐标系中进行基本晃动方程的推导。液体的晃动速度可以用速度势 Φ 来表示,当忽略粘性效应且无涡旋运动时,可利用速度势在 x, y, z 方向的空间导数来表示速度的分量 u, v, w ,即

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

连续性方程为

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

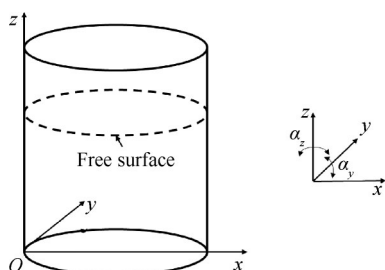


Fig. 1 Coordinate system for the derivation of basic slosh equation

非线性晃动与线性晃动的差别主要在于边界条件的不同,在线性理论中,自由液面的边界条件是在液面处于水平平衡位置时施加的,但是,当考虑大幅晃动时则需采用非线性动力学模型,此时必须在边界的实际位置施加边界条件。图2为幅值为 X_0 的横向激励作用下贮箱线性边界与非线性边界的区别, $z = \delta(x, t)$ 表示自由液面的位置。当贮箱静止且忽略液体表面张力时,假设重力 g 沿贮箱轴向向下,只需考虑 u 速度(x 方向)和 w 速度(z 方向),贮箱侧壁面与底面的边界条件为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = u = 0 \quad (x = 0, x = 2R) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = w = 0 \quad (z = 0) \quad (3)$$

对于线性晃动,自由液面附近液体仅做轴向小

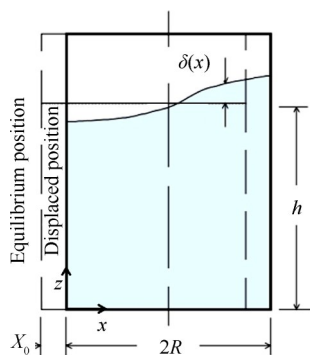


Fig. 2 Locations of boundaries for nonlinear slosh analysis (cylinder tank)

幅晃动,因此,自由液面的液体晃动速度等于垂直于自由液面波的速度。对于非线性晃动,液体存在轴向和径向大幅晃动行为。因此自由液面的非线性边界条件需要包含液体速度的所有分量。

线性晃动自由液面的边界条件

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (4)$$

非线性晃动自由液面的边界条件

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \delta}{\partial x} \quad (z = \delta(x, t)) \quad (5)$$

由于液面是运动的,如果气体密度远小于液体密度,那么自由液面的压强就等于气体静压,自由液面压力与波动关系的非线性边界条件为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -g\delta - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (z = \delta(x, t)) \quad (6)$$

2.2 最大波幅的估计及破碎波的描述

对于非线性晃动的液体,波向上达到晃动的最大幅值后,出现最为重要的非线性现象,即在圆周方向上出现不稳定晃动,液体晃动平面开始沿激励平面的一侧旋转,进而峰顶开始剧烈变形而破坏并出现碎波等更为严重的非线性现象^[8]。这种旋转现象是三维液体大幅晃动在三维空间中出现的典型分叉现象,其发生条件与激励频率、激励幅值以及液体粘性效应有密切关系。当频率远离基频或激励非常小的激励幅度或者粘性很大时不会出现非线性效应。在俯仰激励下,三维液体晃动具有非常明显的非对称现象,很容易出现碎波现象。

当不考虑液体表面张力时,液体自由表面的液团向下的最大加速度为^[19](即波向上达到峰值的时候)

$$a = g - \delta \omega^2 \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度, δ 为波幅, ω 为晃动的固有频率。

因为峰值高度上的最大加速度始终为正,否则液团将从液面撕裂,因此,最大波幅

$$\delta_{\max} \leq g/\omega^2 \quad (8)$$

对于液体深度远大于容器直径的圆柱形贮箱,晃动的固有频率为 $(1.841g/R_0)^{0.5}$,最大波幅 $\delta_{\max} \leq R_0/1.841 \approx 0.54R_0$,或大于约25%贮箱直径。

当液体晃动达到最大波幅之后,液面开始破碎,流体界面性质变为非连续性,需要通过确定界面位置来描述破碎波。定义 Γ 表示为自由液面,本研究利用流体体积函数 F 来描述破碎后的自由液面,对于自

由液面,体积函数 F 介于 $0 \sim 1$; 对于空气和液体, F 分别为 0 和 1 。对流方程在正交坐标系 (x_1, x_2, x_3) 中为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_1 \frac{\partial F}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial F}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial F}{\partial x_3} = 0 \quad (9)$$

式中 U_i 为速度分量

$$h_i^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \right)^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

液面破碎后,自由液面连续性边界条件破坏,变为跳跃性边界条件,但穿过界面 Γ 的速度是连续的,即

$$[u] = 0 \quad (11)$$

压力跳跃性条件为

$$[p] = p_L^I - p_G^I = \sigma \kappa \quad (12)$$

式中 $[u]$ 表示穿过自由液面的速度;下标 L 和 G 表示液相和气相,上标 I 表示界面 Interface, σ 表示表面张力系数, κ 表示局部曲率。

3 计算模型验证

为验证所提动力学模型是否可以有效模拟大幅晃动及波面破碎现象,采用该计算模型对矩形贮箱液体大幅晃动进行了数值模拟,并与文献[20]矩形贮箱内液体在常重力情况下的大幅晃动试验结果进行了对比。该试验中矩形贮箱长为 900mm,宽度为 62mm,高为 508mm,贮箱内液体为液态水,初始液位高度为 93mm,其几何尺寸如图 3 所示,试验采用俯仰运动过程中俯仰角的变化作为贮箱运动激励,贮箱运动激励施加于左侧短边位置,俯仰角的变化如图 4 所示,激励周期为 1.6295s。

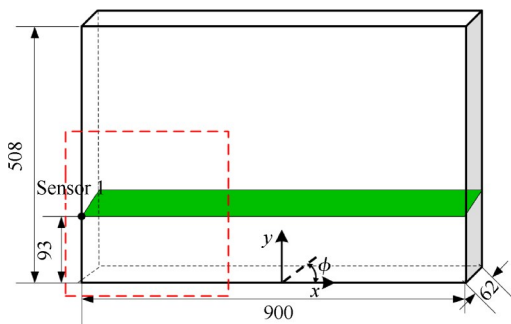


Fig. 3 Tank dimensions and sensor positions(mm)

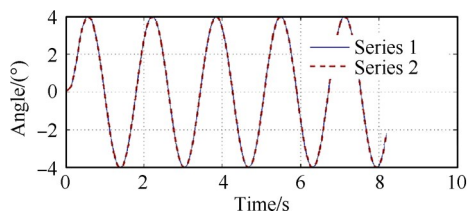


Fig. 4 Roll angle samples series^[20]

贮箱内液体前 3s 晃动情形计算结果与试验结果在左侧壁面监测点 1 附近局部放大图如图 5 所示,不难发现,从定性角度来看,仿真结果与试验结果的晃动情形是一致的,压力集中点位于左侧壁面监测点 1 附近。壁面监测点 1 处第一个压力峰值结果如图 6 所示,从定量角度来看,壁面处压力计算结果和试验结果的最大误差 < 5%。对于矩形贮箱,壁面处的压力峰值的出现具有一定随机性,壁面处压力的变化不会随着简谐激励呈现简谐变化,而对于圆柱形贮箱,壁面处压力的变化会随着简谐激励呈现简谐变化的态势。

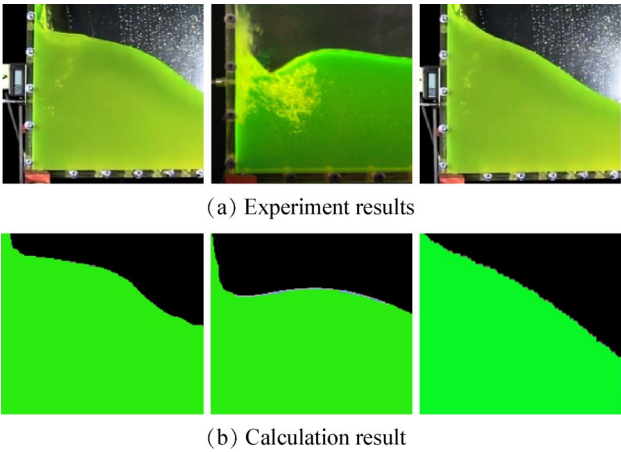


Fig. 5 Comparison of sloshing conditions at time=1s, 2s and 3s (from left to right)

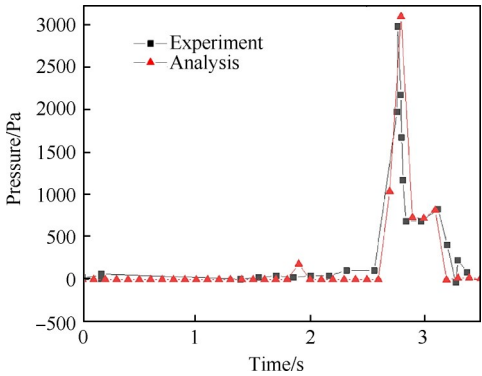


Fig. 6 Lateral impact with water: First peak pressure register

对于矩形贮箱,由于其左右两个平面平行,晃动被激发后晃动波会从左侧壁面同时到达右侧壁面,并来回往复,对于圆柱形贮箱则没有这一特性,但无论是矩形贮箱或是圆柱形贮箱,随着晃动幅度的不断加大,自由液面均可能产生破碎、飞溅,其边界条件并不会随着贮箱结构的变化而发生变化,均可以采用前述碎波描述法进行描述。故而可以根据晃动

情形与壁面压力的计算结果判断该计算模型可用于圆柱形贮箱液体大幅晃动的计算。

4 圆柱形贮箱大幅晃动数值模拟

4.1 研究对象

本文研究的对象为密封圆柱形贮箱,直径为251mm,高为300mm,壁厚5mm,贮箱示意图如图7所示。

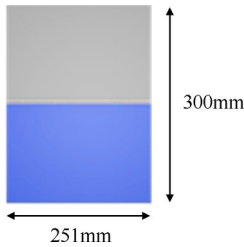
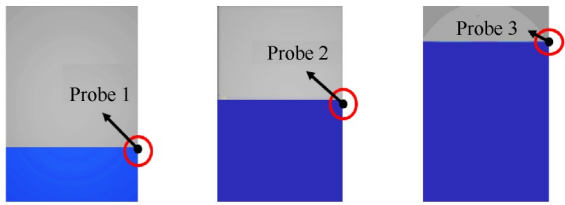


Fig. 7 Geometric model of cylindrical tank

采用前述贮箱液体非线性晃动动力学模型对圆柱形贮箱内液体大幅晃动进行数值计算,贮箱内的液体选择液态水,密度为 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$,运动粘性系数 $\nu = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。在含液率为30%,50%,80%三种状态下,对贮箱横向施加俯仰运动过程中产生的简谐激励 $s = -15.5\sin\pi t$,以激起液体的晃动^[7]。采用非惯性坐标系,边界条件选择刚性无滑移壁面,湍流模型选择RNG $k-\varepsilon$ 模型,不考虑流体粘性,总网格数为30万。在内壁面上分别布置三个监测点,监测点示意图如图8所示,用于提取内壁面所受的压力以及液体晃动速度,总计算时长为10s。



(a) Liquid rate 30% (b) Liquid rate 50% (c) Liquid rate 80%

Fig. 8 Layout diagram of probe points

4.2 晃动特性分析

贮箱在三种含液状态下,前5s内液体晃动压力云图如图9所示,液体在前1s内为线性晃动,晃动波形为反对称波形,主要产生侧向力,在1s时刻三种含液状态下的液体晃动均达到极限振幅,之后自由液面开始出现不连续的现象,产生破碎波,液体的晃动通过对比三种含液状态的极限振幅可以发现,含液率为50%状态下液体的极限振幅略大于其余两种含液率,因此可以初步断定含液50%状态下液体晃动产生的侧向力最大。在1s之后液体的晃动转为非线性晃动,自由液面开始出现不连续的现象,液面开始出现剧烈变形而破坏,自由液面的表面积开始呈现非线性增长的态势,图10为自由液面表面积随时间的变化情况,从液面表面积的变化来看,从1s开始自由液面逐渐出现波面破碎的情况,并且随着时间的推移,液面的破碎情况越来越剧烈。

三种含液状态下液体质心横向变化(x 方向)及纵向(z 方向)变化历程如图11所示。在初始时刻时,含液率为30%,50%,80%时液体质心坐标(x, z)分别

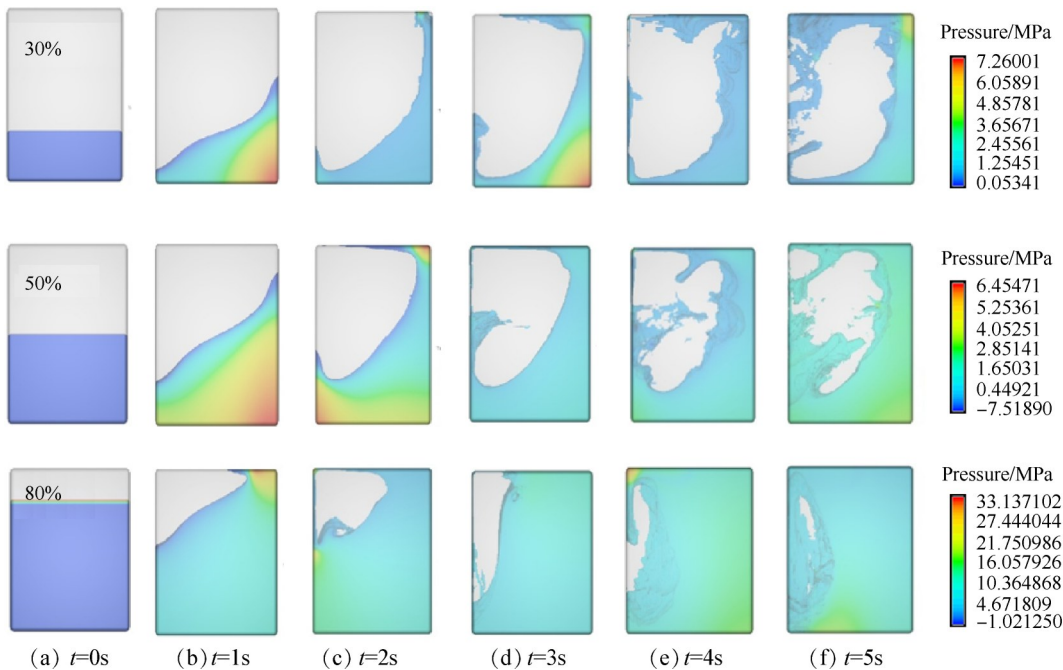


Fig. 9 Analysis results of liquid slosh pressure cloud image in the first 5s

为(125.5,47.5)(125.5,77.5)(125.5,122.5)。三种含液状态下,液体质心运动规律相近,含液率为30%时液体横向质心位移及纵向质心位移均最大,且当质心横向位移在3.5s左右时刻达到最大,之后液体横向位移逐渐减小直到回到初始位置;而质心纵向位移则在5.5s左右时刻达到最大,之后纵向位移逐渐减小直到回到初始位置。从计算结果可以看出,含液率的差异直接影响液体在晃动过程中质心的偏移情况,综合考虑两个方向质心偏移的情况,发现含液率为30%时液体晃动最为剧烈的一种含液状态。

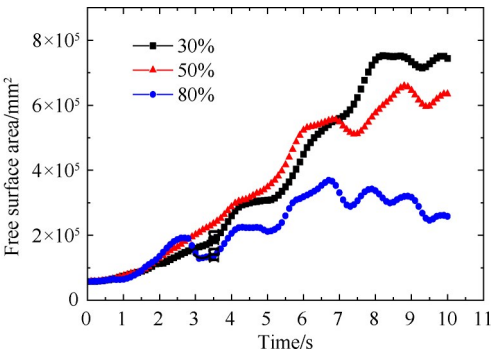
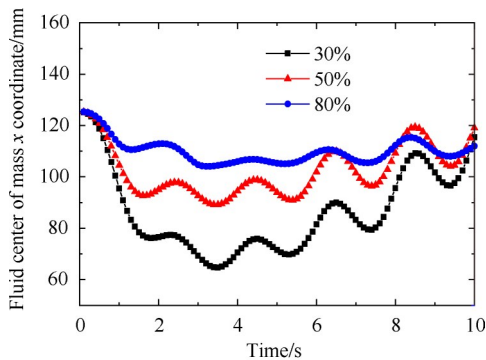
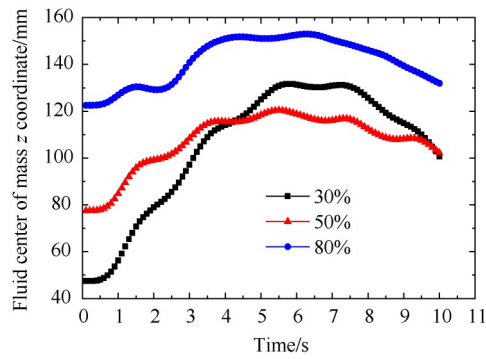


Fig. 10 Change in surface area of a free liquid



(a) Transverse change



(b) Longitudinal change

Fig. 11 Change of the liquid center of mass

贮箱内壁面监测点处所受压力与贮箱运动激励如图12所示。壁面所受的压力主要是由于液体的横向晃动所致,三种含液状态下壁面所受压力的变化

规律相近,壁面所受压力的变化周期与运动激励的周期相同,因此,壁面所受的侧向压力与贮箱运动激励有直接关系。从计算结果不难发现,含液率为80%时贮箱内壁面所受压力明显大于其余两种状态,这是由于含液率为80%时其液体质量明显大于其余两种状态。而对于其余两种含液状态,含液状态为50%壁面受到的压力略大于30%。

液体纵向晃动速度如图13所示。对于含液80%的状态,液体纵向晃动速度从0.8s时刻碰到贮箱上壁面后开始迅速衰减,到3s左右即达到相对稳定状态,故而含液状态为80%的状态晃动的持续时间相对较短,而其余两种状态液体纵向晃动衰减速度明显小于含液率为80%的衰减速度,因此可以初步推断,推进剂贮箱含液80%的状态为一种相对稳定的工作状态。对于含液率为50%和30%两种状态,前者的最大纵向晃动速度及壁面压力均略大于后者,因此,综合考虑多种参数的变化情况可以判断含液率为50%左右的工作状态为一种相对不稳定的状态。

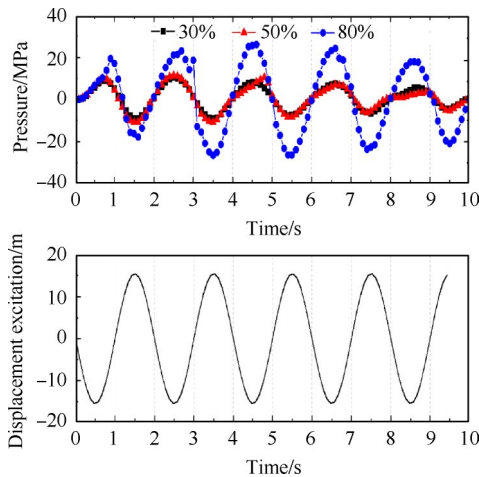


Fig. 12 Wall pressure of tank

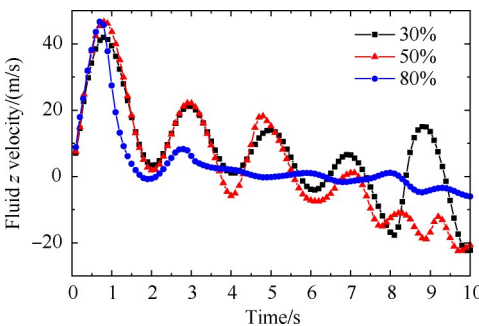


Fig. 13 Longitudinal sloshing velocity of liquid

5 结 论

本文通过建立贮箱液体大幅晃动动力学模型,

对圆柱形贮箱中推进剂大幅晃动进行了数值模拟,得到如下结论:

(1)采用穿界面体碎波描述法解释了推进剂在大幅晃动过程产生的液面破碎现象,通过数值仿真发现,圆柱形贮箱内液体在简谐激励下,其晃动行为将经历由线性晃动到达极限振幅后随即转为非线性晃动的变化过程。

(2)晃动过程中自由液面以反对称波的形式出现,液体晃动产生的局部侧向力对贮箱产生主要影响。波高的变化以及自由液面表面积的变化结果表明,当出现破碎波现象后,液面将出现剧烈变形,破碎程度迅速加深。

(3)贮箱含液率为50%附近时是一种相对危险的工作状态,在该状态下液体晃动较为剧烈,易发生震荡。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Yang H Q, West J. Validity of Miles Equation in Predicting Propellant Slosh Damping in Baffled Tanks at Variable Slosh Amplitude[C]. *Florida: 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018.
- [2] 尹立中, 赵 阳. 贮箱类液固耦合动力学研究[J]. *工程力学*, 2000, 17(5): 127-144.
- [3] Bjelde B, Vozoff M, Shotwell G. The Falcon 1 Launch Vehicle: Demonstration Flights, Status, Manifest, and Upgrade Path[C]. *Logan: 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2007.
- [4] Pei J, Puetz A, Duarte C, et al. Suppression of Nonlinear Rotary Slosh Dynamics Using the SLS Adaptive Augmenting Control System Demonstration on a Quadcopter Testbed [C]. *San Diego: AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019.
- [5] Veldman AEP, Gerrits J, Luppens R, et al. The Numerical Simulation of Liquid Sloshing on Board Spacecraft [J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, 224(1): 82-99.
- [6] Clark A, Walker M, Wetzlar K, et al. Rotating Fuel Tank Design to Attenuate Fluid Sloshing in Microgravity [C]. *Anaheim: AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition*, 2010.
- [7] Dodge F T. The New "Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers" [M]. *San Antonio: Southwest Research Institute*, 2000.
- [8] Abramson H N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers[R]. *NASA SP-106*, 1969.
- [9] Marsell B, Gangadharan S, Chatman Y, et al. A CFD Approach to Modeling Spacecraft Fuel Slosh[C]. *Orlando: 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009.
- [10] Yang H, Peugeot J. Propellant Sloshing Sarameter Extraction from Computational-Fluid-Dynamics Analysis [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(3): 908-916.
- [11] Yang H Q, West J. Validation of High-Resolution CFD Method for Slosh Damping Extraction of Baffled Tanks [C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.
- [12] 张展博, 李胜强. 圆柱水箱中水平多孔挡板对液面晃动影响的数值模拟研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(10): 934-940.
- [13] 杨 唱, 孙 冰, 方 杰. 航天器贮箱出流过程液体晃动及防晃[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12): 3065-3072.
- [14] Hari M, Sarigul-Klijn N. Predicting Sloshing Motion in Flexible Propellant Tanks Using Three-Dimensional Computational Simulation and Experimental Validation [C]. *San Diego: AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019.
- [15] Marsell B, Gangadharan S, Chatman Y, et al. Using CFD Techniques to Predict Slosh Sorce Frequency and Damping Rate [C]. *Palm Springs: 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2009.
- [16] Benson D J, Ng W. Validation of Slosh Modeling Approach Using STAR-CCM+ [M]. *Washington D C: NASA Center for Aerospace Information (CASI)*, 2018.
- [17] Beckman E A, Benson D J, Cataldo D, et al. Europa Clipper Preliminary Design Review Propellant Slosh Analysis [M]. *Washington D C: NASA Center for Aerospace Information (CASI)*, 2018.
- [18] Wang Z, Suh J, Yang J, et al. Sharp Interface LES of Breaking Waves by an Interface Piercing Body in Orthogonal Curvilinear Coordinates [C]. *Nashville: 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.
- [19] Braslow A L. Propellant Slosh Loads [R]. *NASA SP-8009*, 1968.
- [20] Souto-Iglesias A, Botia-Vera E, Bulian G. Repeatability and Two-Dimensionality of Model Scale Sloshing Impacts [C]. *Rhodes: The Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2012.

(编辑:梅 瑛)