

冲击载荷下姿轨控贮箱流固耦合响应分析

张 轩¹, 王旭阳², 徐自力¹, 薛 杰², 王 珺²

(1. 西安交通大学 航天航空学院 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安航天动力研究所 航天液体动力全国重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要:含推进剂贮箱在高量级冲击载荷作用下会产生强烈的流固耦合振动,严重时可能引起结构破坏。为准确预示充液贮箱的冲击响应,揭示贮箱内流固耦合振动机理,采用光滑粒子流体力学(SPH)方法与结构有限元方法,建立了充液贮箱耦合动力学模型,计算了不同载荷量级与充液比的贮箱加速度时程,并与实验结果进行对比。结果表明:高量级、高充液比下贮箱的加速度响应发生剧烈波动;就计算贮箱而言,满充液比下,载荷量级达到 -3 dB时出现波动,峰值为 $5.33g$; 0 dB载荷量级下,充液比达到 75% 时出现波动,峰值为 $7.82g$; 0 dB载荷量级下满充液贮箱的波动最为剧烈,峰值计算值达到 $24.24g$,该值与实验结果对比,误差仅为 2.78% 。通过分析冲击过程中流体与结构的运动规律可知,冲击后加速度响应波动是由流体和贮箱壳体二者分离后产生的剧烈碰撞所引发。

关键词:推进剂贮箱; SPH方法; 半正弦冲击; 流固耦合; 动力学分析

中图分类号: V414.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)03-0019-09

Fluid-solid coupling response analysis of propellant tank in attitude-orbit control system under impact load

ZHANG Xuan¹, WANG Xuyang², XU Zili¹, XUE Jie², WANG Jun²

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,
School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A propellant tank will generate strong fluid-solid coupled vibration under the high-magnitude impact load, which may cause structural damage in severe cases. In order to precisely predict the impact response of liquid-filled tanks and reveal the mechanism of fluid-solid coupled vibration inside it, a coupled dynamics model of the liquid-filled tank was established by adopting smooth particle hydrodynamics (SPH) in combination with the structural finite element method. Acceleration results of

收稿日期: 2023-12-14 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 装备重大基础研究项目群资助项目

作者简介: 张轩(2000—), 男, 硕士, 研究领域为液体晃动与流固耦合。

通信作者: 徐自力(1967—) 男, 博士, 教授, 研究领域为动力与推进装备结构强度与振动。

引用格式: 张轩, 王旭阳, 徐自力, 等. 冲击载荷下姿轨控贮箱流固耦合响应分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(3): 19-27.

ZHANG X, WANG X Y, XU Z L, et al. Fluid-solid coupling response analysis of propellant tank in attitude-orbit control system under impact load[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(3): 19-27.

the tank with different loading magnitudes and filling ratios were calculated and compared with those obtained from experiments. The results show that the acceleration response of the tank fluctuates sharply under a high magnitude load with a high filling ratio. For the calculated tank, the fluctuation occurs when the magnitude reaches -3 dB at a full filling ratio, with a peak value of $5.33g$. The fluctuation also occurs when the filling ratio reaches 75% at 0 dB, with a peak value of $7.88g$, while the most obvious fluctuation appears at 0 dB with a full filling ratio, with the peak value of $24.24g$, which is only 2.7% off from the experimental results. By analyzing the motion pattern of fluid and structure during the impact period, it can be seen that the fluctuation of acceleration response after the impact is triggered by the violent collision of fluid and shell after the separation between them.

Keywords: propellant tank; SPH method; half-sine impact; fluid-solid interaction; dynamic analysis

0 引言

推进剂贮箱是航天器动力系统的重要组成部分,在航天器的运输、飞行过程中会受到恶劣力学环境载荷作用。冲击载荷作为一种典型的力学环境载荷,具有大幅值、高瞬态性的特点,作用在充液贮箱时会引发短暂而剧烈的流固耦合振动,严重时可能会为整个系统带来结构破坏或控制失效的风险^[1-2]。然而,目前针对冲击载荷下,贮箱流固耦合响应及振动机理的研究较少。因此,使用数值方法结合实验研究,准确预示冲击载荷作用下贮箱结构在耦合振动中的响应,解释充液贮箱的流固耦合振动机理,具有重要意义。

流固耦合问题的主要研究方法有理论分析、实验研究和数值仿真这 3 种方法^[3]。充液容器中的液体晃动的理论分析模型主要为线性势流模型。Abramson^[4]首先对规则容器内的液体小幅晃动进行了建模。Isaacson 等^[5]研究了简谐与随机激励下任意截面的柱形贮箱的晃动特性。Gavrilyuk 等^[6]在 2006 年使用渐进模态法提出了带有环形挡板的圆柱贮箱中液体晃动的理论解。但是,理论分析模型仅适用于简单容器的有限幅晃动问题,对于复杂贮箱中的非线性晃动问题,仍需借助实验或数值方法进行研究^[3]。

利用实验研究充液容器的液体晃动特性是一种实际可靠的方法。吴文军等^[7]在 2021 年开展了球形贮箱的晃动实验,测量了贮箱内液体产生的非平衡力和力矩。王为等^[8]开展实验,研究了半球形容器中液体自由晃动的非线性现象。Green 等^[9]在 2007 年使用全尺寸航天器隔膜贮箱进行了实验,分析了飞行状态载荷下的贮箱晃动特性。

随着计算机的发展和计算力学的进步,使用数值仿真计算火箭发动机系统流固耦合响应逐渐成为一种高效而准确的分析途径^[10-11]。流体响应方面,岳宝增等^[12]使用任意欧拉-拉格朗日(ALE)方法对球形贮箱中液体大幅度晃动中的晃动力和波高问题进行了研究。周倩倩等^[13]使用流体体积(VOF)方法计算了圆柱形贮箱大幅晃动过程中自由液面与液体质心变化情况。袁雄飞^[14]根据真实工作载荷,利用 VOF 方法分析了不同油箱和燃油参数对液体晃动的影响。马骏骁等^[15]使用光滑粒子流体动力学(SPH)方法对球形贮箱的晃动问题进行了分析,得到了运动参数对晃动的影响规律。Rudman 等^[16]使用二维 SPH 方法,分析了高低液位的两种液化天然气(LNG)贮箱内液体的晃动响应。

结构响应方面, Yang 等^[17]通过实验与基于 ALE 的双向流固耦合模型,分析了直升机油箱跌落过程中不同参数对失效行为的影响。杨尚霖等^[18]针对机动行为下的飞机油箱,采用 VOF 方法联合结构有限元方法,计算了燃油的形态变化与油箱壳体结构的应力响应等结果,但未考虑结构变形对流体响应的影响。赵懿^[19]使用 SPH 方法分析了大型 LNG 储罐在地震环境下的动响应,研究了充液量、场地效应等参数的影响。

总结文献可知,目前已有较多研究采用流固耦合方法分析充液容器响应,但使用双向耦合进行结构响应的研究较少。由于冲击载荷会使贮箱结构产生较大位移,而单向耦合无法考虑结构位移对流场的影响,因此需要使用双向流固耦合方法进行贮箱的冲击响应分析^[20]。本文采用 SPH 方法与结构有限元方法组成的双向流固耦合方法,分析了姿轨控贮箱在冲击载荷下的加速度响应结果,并与实验结果进行了对比

验证。总结了不同载荷量级、不同充液高度比对加速度响应的影响,对偏差波动的产生机理进行了分析,为研究姿轨控贮箱的冲击响应提供参考。

1 充液贮箱液体分析的 SPH 方法

由于冲击载荷作用下贮箱结构会发生较大刚体位移,考虑双向耦合时,依赖于网格的流场分析方法需要大量动网格操作来保证流固耦合面之间不发生分离或侵入,计算稳定性和效率均无法保证。针对上述问题,本文使用不依赖于网格的 SPH 方法,避免了动网格过程中的网格畸变问题^[21]。

1.1 光滑核函数与粒子近似

在贮箱流场空间 Ω 内,任意的连续函数都可以用以下的积分形式表示。

$$f(x_i) = \int_{\Omega} f(x_j) \delta(x_i - x_j) dx_j \quad (1)$$

式中: $f(x_i)$ 为坐标向量 x 的函数; $\delta(x_i - x_j)$ 为狄拉克函数,其定义为

$$\delta(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & x_i = x_j \\ 0 & x_i \neq x_j \end{cases} \quad (2)$$

由于 $\delta(x_i - x_j)$ 在 $x_i = x_j$ 处不连续,不适合计算机计算,构造一种光滑核函数 $W(x_i - x_j, h)$ 代替 $\delta(x_i - x_j)$,如图 1 所示。则任意连续函数 $f(x_i)$ 可以近似表示为

$$f(x_i) \approx \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (3)$$

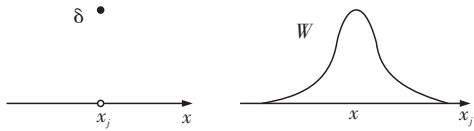


图 1 核近似

Fig. 1 Kernel approximation

将流场 Ω 离散为有限个粒子后,如图 2 所示,式(3)中的积分运算被离散为求和运算,即

$$\begin{aligned} f(x_i) &= \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \\ &\approx \sum_{j=1}^N f(x_j) W(x_i - x_j, h) \Delta V_j \\ &\approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$ 。

粒子 i 处的空间导数的近似值经推导可以表达为

$$\nabla_i \cdot f(x_i) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

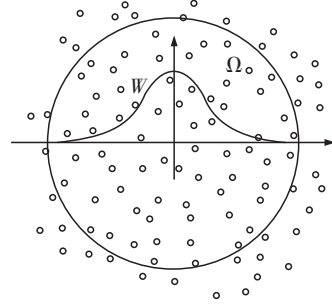


图 2 粒子近似

Fig. 2 Particle approximation

由此,SPH 方法可以将贮箱流场中的任意连续函数的运算近似转化为对有限个简单核函数的运算,降低了运算难度。

1.2 流体控制方程的离散形式

将流体的控制方程,即 Navier-Stokes 方程组使用核近似和粒子近似方法离散后,质量守恒方程可以表示为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (6)$$

动量守恒方程可表示为

$$\frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

能量守恒方程可表示为

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{P_i}{\rho_i^2} \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (8)$$

式中: $v_{ij} = v_i - v_j$ 。

SPH 方法将流体的控制方程离散为求和形式的方程组,每个时间步中仅需对所有粒子遍历求解,即可得到内部流场的整场响应。

1.3 人工黏性

分析液体晃动响应时,需要考虑黏性,SPH 方法采用最广泛的人工黏性是 Monaghan 形式,表达式为

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ij} \phi_{ij} + \beta \phi_{ij}^2}{\rho_{ij}} & v_{ij} x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\phi_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \phi^2}$; $\bar{c}_{ij} = \frac{1}{2}(c_i + c_j)$; $\rho_{ij} = \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)$; $h_{ij} = \frac{1}{2}(h_i + h_j)$ 。

2 基于试验的计算方法验证

本文试验中使用的贮箱整体呈椭球形、中间环绕着 6 个耳片,均由钛合金制成。实验时,通过贮箱耳片将贮箱与实验台上的夹具相连,使用与液体燃料性质相似的液态水作为填充液体。实验贮箱以及实验系统的组成示意图如图 3 所示。

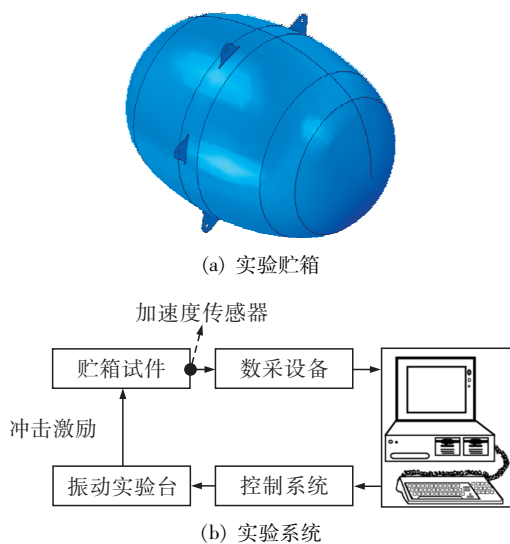


图 3 实验贮箱与实验系统

Fig. 3 Schematic diagram of the test tank and test system

实验在贮箱支耳处施加沿着贮箱长轴方向的半正弦加速度冲击载荷,峰值为 $30g$,如图 4 所示。

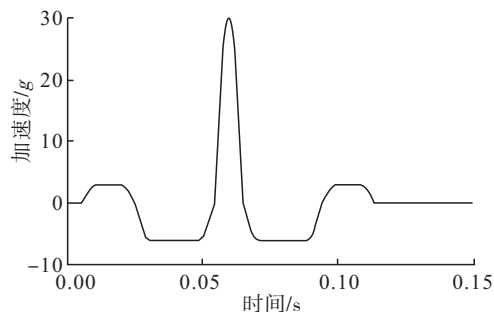


图 4 半正弦冲击载荷

Fig. 4 Half-sine impact load

实验使用的电磁振动台是通过调整输出力来实现对贮箱控制点加速度的间接控制。正式实验前需要进行多次 -21 dB 量级下的预实验来调整实验台输出力,使得贮箱控制点的加速度曲线满足实验加速度载荷的要求,随后将输出力线性放大,用

于正式实验。实验的流程如图 5 所示。载荷量级计算式为

$$n = 20\lg(A_n/A_0) \quad (10)$$

式中: n 为载荷量级; A_0 为原始载荷幅值; A_n 为目标载荷幅值。

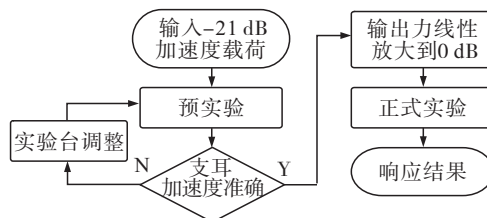


图 5 实验流程

Fig. 5 Test process

根据实验中使用的充液贮箱,建立贮箱的几何结构,使用壳单元划分贮箱壳体与支耳,网格总数为 4 405。在贮箱内部流体区域生成 SPH 粒子,粒子数为 40 585。根据实验中夹具形状建立一个刚体的夹具结构,用于模拟实验中实验台、支撑结构与充液贮箱的相互作用。充液贮箱模型如图 6 所示。

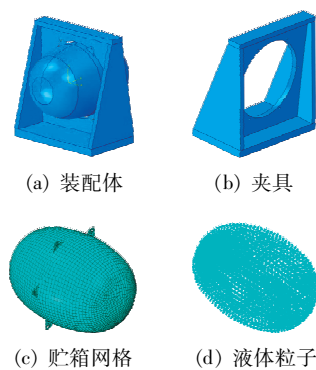


图 6 充液贮箱模型

Fig. 6 The liquid-filled tank model

实际实验中,低量级下振动台输出的力和贮箱控制点的加速度是线性对应的;而高量级下,由于流固耦合效应,贮箱控制点加速度与实验台的输出力之间不再是线性对应,控制点的加速度曲线产生了较大的波动,使用加速度作为仿真激励已经不再准确。

由于实验时贮箱本身受到的是力不是加速度,因此,为更准确模拟实验载荷,采用“加速度-力”的两段式载荷加载流程,时间历程与实验同为 0.15 s ,如图 7

所示。首先对夹具底面施加 -21 dB 的加速度冲击载荷,提取夹具底面受到的支反力,其近似等效于预实验中得到的输出力,随后将支反力放大到对应量级,施加在分析模型上,计算响应结果。

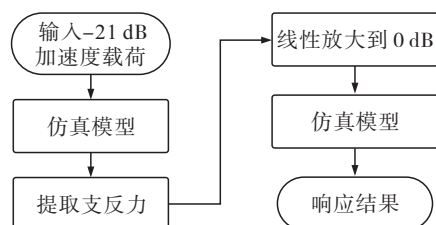
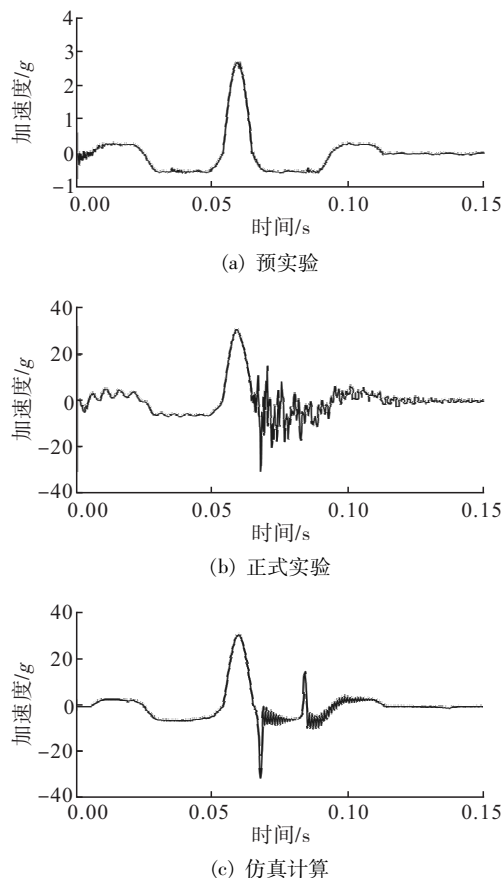


图 7 加载流程

Fig. 7 Loading process

姿轨控贮箱通过支耳与其余结构连接,分析支耳处的加速度响应可以用于表征贮箱对其他部件的影响。 -21 dB 量级预实验中、 0 dB 量级正式实验中以及 0 dB 量级仿真中贮箱支耳处的加速度响应结果对比如图 8 所示。

图 8 0 dB 载荷下仿真结果与实验结果Fig. 8 Simulation and test results under 0 dB load

从图 8 中可以看出, -21 dB 预实验的支耳加速度曲线平滑。在 0 dB 正式实验中,加速度响应前 0.06 s 内出现了幅值较小、频率较低的波动;在 0.06 s 后出现了幅值较大、频率较高的剧烈波动,并且最大的偏差峰值为 $23.73g$ 。

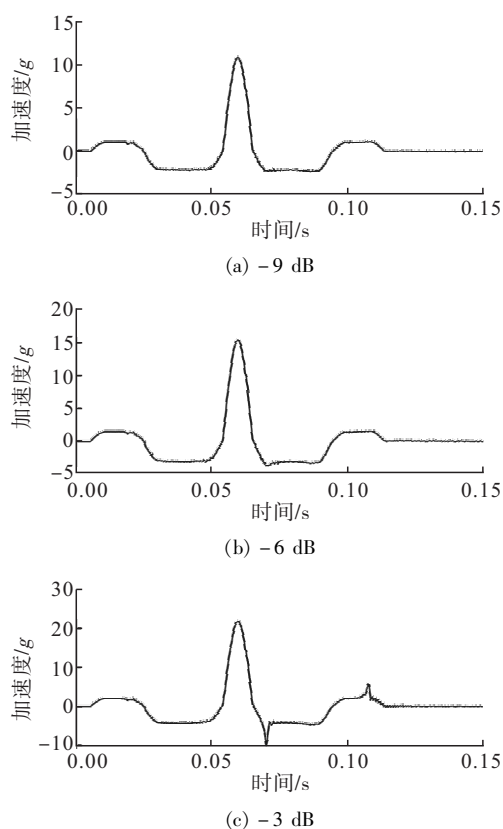
观察仿真结果与实验结果可知:数值分析得到的曲线在 0.06 s 后同样出现了幅值较大、频率较高的剧烈波动,与实验结果较为相似;仿真结果中最大偏差值为 $24.40g$,相比实验结果的误差仅有 2.78% 。这表明使用 SPH 方法建立的分析模型配合原实验设计的加载流程可以很好地还原实验中的加速度响应。

3 冲击载荷下充液贮箱响应计算

计算并对比不同载荷量级、不同充液高度比下的贮箱响应,总结不同工况对加速度响应的影响,最后研究贮箱结构与内部流体的运动趋势,分析加速度波动的产生原因。

3.1 不同载荷量级的影响

为探究不同载荷量级对充液贮箱响应结果的影响,分别将支反力放大到 -9 dB、 -6 dB、 -3 dB 与 0 dB 量级,计算贮箱支耳处响应结果,如图 9 所示。



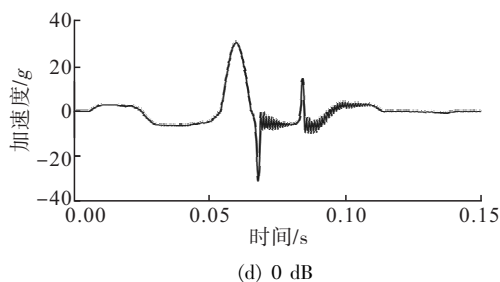


图 9 不同载荷量级的响应结果

Fig. 9 Results of different load level

从图 9 中可以看出:载荷量级小于 -6 dB 时,响应曲线与载荷曲线偏差很小,没有超出容差线的范围;载荷量级为 -3 dB 时,响应曲线出现了两个超出容差线的峰值,最大超出值为 $5.33g$;载荷量级达到 0 dB 时,偏差峰值进一步增大,最大超出值为 $24.40g$ 。

总体上看,随着载荷量级从 -9 dB 逐渐提高到 0 dB,加速度曲线的波动从无到有,偏差峰值逐渐提高。

3.2 不同充液比的影响

贮箱中的液体高度在短暂的冲击载荷作用时,可以近似认为处于稳定状态。为探究不同液面高度对充液贮箱响应结果的影响,设置了液面高度与贮箱高度比为 25%、50%、75% 和 100% 的 4 种较为典型的充液比工况,如图 10 所示。

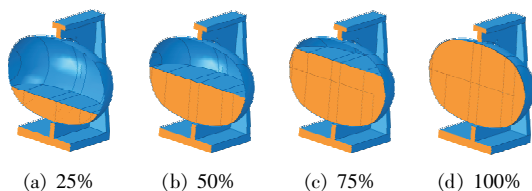


图 10 4 种充液比贮箱模型

Fig. 10 Geometric models of 4 liquid filling ratios

4 种工况均施加 0 dB 量级的载荷,得到的加速度响应曲线如图 11 所示。

从图 11 中可以看出:充液比在 50% 以下时,贮箱响应结果并没有出现明显的非线性现象;高度比为 75% 时,仅有一个波动峰值超出了容差线,超出值为 $7.82g$;满充液时,最大超出值上升到 $24.40g$ 。

总体上看,随着充液比从 25% 逐渐增加到 100%,加速度曲线的波动从无到有,偏差峰值逐渐提高。

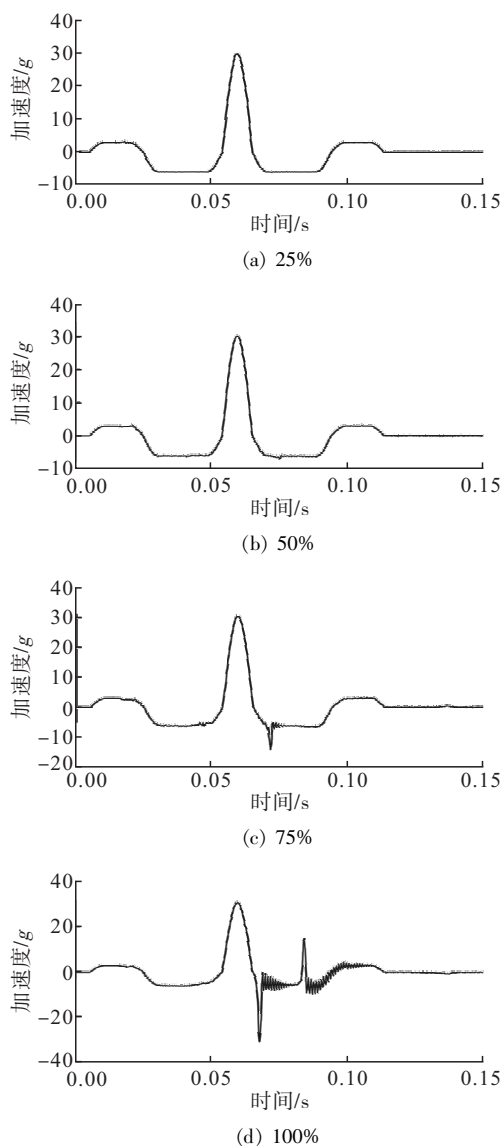


图 11 不同充液高度的响应结果

Fig. 11 Results of different liquid height ratio

3.3 偏差波动机理分析

为了验证液体对充液贮箱的液体-结构耦合系统的影响,在贮箱两侧端点设置监测点,如图 12 所示。

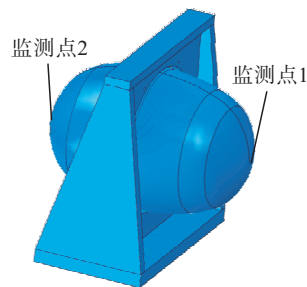


图 12 监测点位置

Fig. 12 Locations of measurement points

提取了 0 dB 量级的载荷下,满充液贮箱长轴两侧顶点附近的液体位移、壳体位移与 Mises 应力响应曲线,监测点位置如图 12 所示,两点的响应曲线与贮箱加速度曲线对比如图 13 所示。

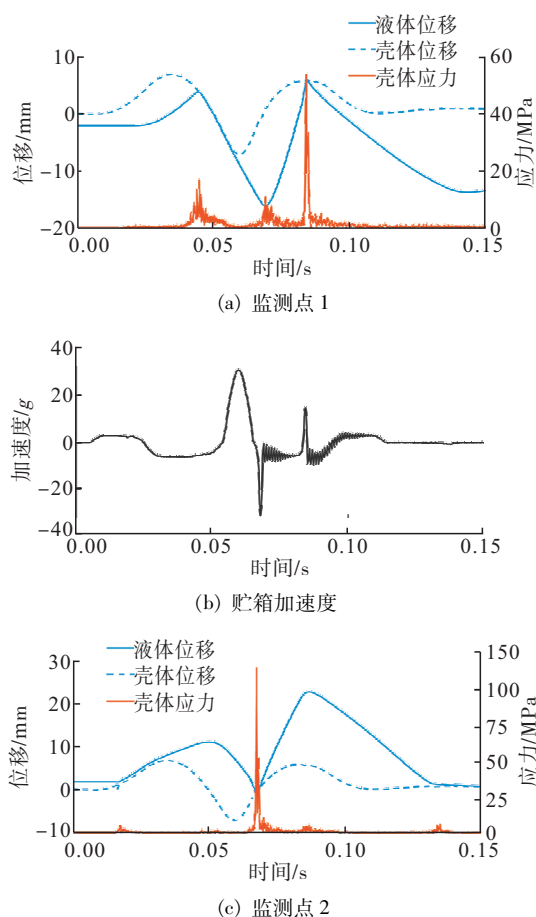


图 13 监测点的响应与贮箱加速度对比

Fig. 13 Comparison of vertices responses and tank acceleration

从图 13 中可以看出:液体与结构的运动并不同步,在壳体受到冲击载荷作用下反复运动的过程中,液体与壁面间会发生分离和碰撞。液体与壳体的位移曲线显示,在半正弦峰值过后,监测点 2 和监测点 1 附近的液体先后与壳体发生剧烈地碰撞。壳体应力曲线中,这两次冲击产生的应力远高于其余时段,表明这两次冲击对结构响应影响最大。监测点 1 和监测点 2 响应曲线与加速度曲线的对比表明两次剧烈的冲击就是贮箱加速度曲线波动发生的主要原因。

对比满充液贮箱在不同载荷量级下的液体与贮箱间的冲击情况, $-9 \sim 0$ dB 载荷下,贮箱长轴两

端点的液固速度差曲线如图 14 所示。

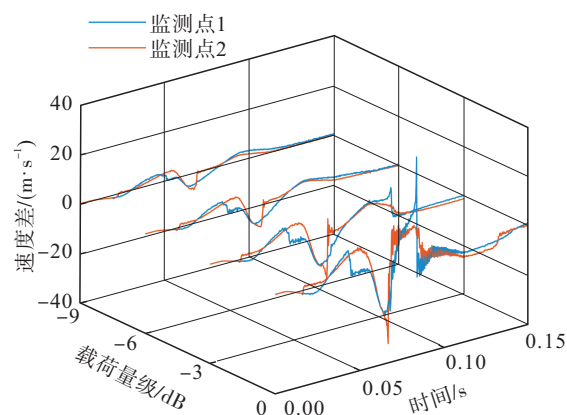


图 14 不同载荷量级下两顶点速度差曲线

Fig. 14 Velocity gap curve between two vertices at different load levels

从图 14 中可以看出,随着载荷量级增加,两个监测点的液固速度差曲线的突变更加明显,并且最大值也从 -9 dB 下的 6.91 m/s 提高到 0 dB 下的 40.02 m/s 。这表明随着载荷量级增加,液体与结构冲击前的速度差会随之增加,进而导致更为剧烈的冲击,产生峰值更高的波动。

4 结论

1) 实验结果表明,充入大量液体的推进剂贮箱在受到高量级的冲击载荷时,贮箱支耳处的加速度响应曲线会发生剧烈波动。

2) 在冲击载荷逐渐增加到 -3 dB 时,满充液贮箱的加速度曲线出现波动,其峰值为 $5.33g$; 0 dB 量级载荷作用下,在液位逐渐上升到 75% 时贮箱的加速度曲线出现波动,其峰值为 $7.82g$ 。

3) 0 dB 量级满充液贮箱的加速度曲线波动最大,其峰值为 $24.40g$,与对应实验结果间的误差仅为 2.78% 。

4) 冲击过程中,贮箱中的液体与贮箱壳体的运动并不同步。二者分离后又产生的剧烈冲击是冲击后响应波动产生的原因。

参考文献

- [1] 尹立中, 赵阳, 王本利, 等. 贮箱类液固耦合动力学研究[J]. 工程力学, 2000, 17(5): 127-130.
YIN L Z, ZHAO Y, WANG B L, et al. On the dynamics

- of liquid/structure coupling of containers [J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(5): 127-130.
- [2] BJELDE B, VOZOFF M, SHOTWELL G. The falcon 1 launch vehicle: demonstration flights, status, manifest, and upgrade path [EB/OL]. [2023-07-17]. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Falcon-1-Launch-Vehicle%3A-Demonstration-Flights%2C-Bjelde-Vozoff/e2e0c55949043314307b1a466689946449949e47>, 2007.
- [3] 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应用[J]. *力学进展*, 2012, 42(4): 472-481.
- LI Q, WANG T S, MA X R. Reviews on liquid sloshing dynamics and liquid-structure coupling dynamics in liquid-filled spacecrafts [J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(4): 472-481.
- [4] ABRAMSON H. The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology [EB/OL]. [2023-07-17]. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Dynamic-Behavior-of-Liquids-in-Moving-with-to-Abramson/77655df1317daf96d480b5e49494e60d139c2315>, 1966.
- [5] ISAACSON M, RYU C S. Earthquake-induced sloshing in vertical container of arbitrary section [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(2): 158-166.
- [6] GAVRILYUK I, LUKOVSKY I, TROTSSENKO Y, et al. Sloshing in a vertical circular cylindrical tank with an annular baffle (part 1): linear fundamental solutions [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2006, 54(1): 71-88.
- [7] 吴文军, 李超, 高超南. 球形贮箱内液体晃动实验及动力学特性研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(6): 849-859.
- WU W J, LI C, GAO C N. Experimental and dynamic characteristics studies for liquid sloshing in a spherical tank [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(6): 849-859.
- [8] 王为, 夏恒新, 李俊峰, 等. 半球形容器中液体自由晃动非线性现象的实验研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(11): 2009-2012.
- WANG W, XIA H X, LI J F, et al. Experimental investigation of nonlinear liquid sloshing in a hemispherical container [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(11): 2009-2012.
- [9] GREEN S, BURKEY R, VIANA F, et al. Fluid sloshing characteristics in spacecraft propellant tanks with diaphragms [C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [10] 李康迪, 王珺, 徐自力, 等. 某型液体火箭发动机部分进气涡轮盘振动分析及改型设计[J]. *火箭推进*, 2023, 49(1): 80-86.
- LI K D, WANG J, XU Z L, et al. Vibration analysis and modification design of partial admission turbine disk for a liquid rocket engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2023, 49(1): 80-86.
- [11] 薛杰, 何尚龙, 杜大华, 等. 充液容器流固耦合模态仿真分析研究[J]. *火箭推进*, 2015, 41(1): 90-97.
- XUE J, HE S L, DU D H, et al. Study on fluid-structure coupling modal simulation of liquid filling container [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2015, 41(1): 90-97.
- [12] 岳宝增, 唐勇. 球形贮箱中三维液体大幅晃动数值模拟[J]. *宇航学报*, 2016, 37(12): 1279-1284.
- YUE B Z, TANG Y. Numerical simulation of three dimensional large-amplitude liquid sloshing in spherical containers [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(12): 1279-1284.
- [13] 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): 358-364.
- ZHOU Q Q, TAN Y H, XU Z L, et al. Numerical simulation of large sloshing of propellant in cylinder tank of launch vehicle [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 358-364.
- [14] 袁雄飞. 基于 VOF 方法的机翼油箱燃油晃动分析与防晃研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- YUAN X F. Research of fuel sloshing in aircraft wing tank based on vof method and sloshing suppression [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] 马骏骁, 马亮, 魏承, 等. 基于 SPH 方法的球形贮箱液体晃动动力学分析[J]. *中国空间科学技术*, 2020, 40(1): 7-18.
- MA J X, MA L, WEI C, et al. Dynamic analysis of liquid sloshing in spherical tank based on SPH method [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(1): 7-18.
- [16] RUDMAN M, CLEARY P, PRAKASH M. Simulation of liquid sloshing in model LNG tank using smoothed particle hydrodynamics [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2009, 19(4): 286-294.
- [17] YANG X F, ZHANG Z Q, YANG J L, et al. Fluid-struc-

- ture interaction analysis of the drop impact test for helicopter fuel tank [J]. Springer Plus, 2016, 5(1): 1573.
- [18] 杨尚霖,陈晓峰,杜发喜,等. 机动行为下飞机油箱晃动流固耦合动力学分析[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 222471.
- YANG S L, CHEN X F, DU F X, et al. Dynamic analysis of fluid-structure interaction on aircraft fuel tank sloshing during maneuver [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 222471.
- [19] 赵懿. 液化天然气储罐的抗震与减震研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- ZHAO Y. Study on seismic performance and response reduction of liquefied natural gas storage tanks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [20] 吴作伟,梁闯,郭海霞. 基于双向流固耦合的动车组水箱强度分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(6): 42-46.
- WU Z W, LIANG C, GUO H X. Strength analysis of EMU tank based on two-way fluid-solid interaction [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(6): 42-46.
- [21] 张锁春. 光滑质点流体动力学(SPH)方法[J]. 计算物理, 1996, 13(4): 385-397.
- ZHANG S C. Smooth particle hydrodynamics (SPH) method [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1996, 13(4): 385-397.