111公式章 1 节 1部分充液贮箱内防晃板结构对液体防晃性能的影响研究

魏列，林海，郭子漪，刘宇，赵霄*

(中国科学院力学研究所微重力重点实验室 北京 100190)

摘　要　贮箱内液体推进剂的有效管理是保证航天器推进系统稳定工作的关键。流体管理装置（如防晃板）的研究，不仅加深了对液体晃动机理的认识，也为空间流体管理技术设计提供了重要支撑。对于地面常重力条件，在本研究中，通过数值仿真研究了不同防晃板构型贮箱内的液体晃动过程，并提取液体晃动频率及阻尼比。结果表明，通过对液体晃动力曲线进行衰减简谐振动拟合，获得了各构型的阻尼比。其中，双侧打孔的防晃板能够显著提升系统的阻尼比，有效加速晃动能量耗散；而单侧打孔会降低系统阻尼比，抑制液体晃动性能减弱。此外，防晃板晃动实验验证了数值获取的阻尼比具有较高可靠性。因此，在贮箱流体管理设计中，推荐采用双侧开孔防晃板构型。该构型不仅能有效抑制液体晃动，还可通过开孔减轻结构重量，具有显著的工程应用价值。

关键词　晃动，防晃板，数值模拟，贮箱，小波变换

中图分类号　V434

录稿录用

Research on the Sloshing Suppression Performance of Baffles in Partially Filled Liquid Storage Tanks

Lie WEI, Hai LIN, Zi-Yi GUO, Yu LIU, Xiao ZHAO*

(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract　Effective management of liquid propellants in spacecraft tanks is essential for ensuring the stable and reliable operation of propulsion systems. Under microgravity conditions, liquid sloshing can generate substantial disturbances to spacecraft attitude control and impose significant structural loads, rendering effective suppression strategies indispensable. Consequently, Research on fluid management devices-particularly anti-sloshing baffles-not only advances understanding of the fundamental mechanisms of liquid sloshing, but also provides critical technical guidance for the design of space fluid management systems. In this study, the sloshing behavior of partially filled tanks equipped with different anti-sloshing baffle configurations is investigated under terrestrial (normal gravity) conditions using high-fidelity numerical simulations. The gas–liquid interface was captured using the Volume of Fluid (VOF) method. The influence of tank sloshing on the internal flow field was modeled through a mesh motion approach, in which the tank was subjected to prescribed harmonic excitation. Key dynamic parameters, including the dominant sloshing frequency and damping ratio, are extracted to quantitatively characterize the liquid's oscillatory response under external excitation. The results indicate that the damping ratios of all configurations can be accurately identified by fitting the sloshing force time-history with decaying harmonic oscillation models. Among the configurations examined, the double-sided perforated baffle significantly increases the system damping ratio, thereby accelerating the dissipation of sloshing energy and providing superior suppression performance. In contrast, the single-sided perforated baffle reduces the damping ratio and consequently weakens the anti-sloshing effectiveness. Furthermore, dedicated sloshing experiments are conducted to validate the numerical results, and the close agreement between experimental and numerical damping ratios confirms the reliability of the proposed identification method. Based on these findings, the double-sided perforated baffle is recommended for propellant tank fluid management design. This configuration not only achieves effective sloshing suppression but also reduces structural mass through the use of perforations, offering substantial practical value for engineering applications.

Key words　Sloshing, slosh baffles, numerical simulation, storage tank, wavelet transform

本文得到中国科协青年人才托举工程（2022QNRC001）、国家自然科学基金（NO.12172363)和国家重点研发计划（NO.2022YFF0503501）资助

通讯作者：赵霄：xiaozhao@imech.ac.cn

0. 引言

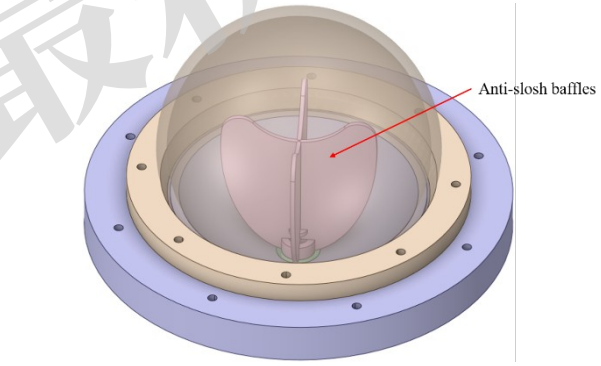
贮箱内液体晃动是航天器、火箭等推进系统设计中的关键挑战之一。在飞行过程中，推进剂贮箱内的液体因振动及姿态变化等因素产生的晃动，不仅会引发液体与贮箱壁的剧烈冲击，还可能通过流固耦合效应导致飞行器姿态失稳甚至控制系统失效。因此，研究抑制贮箱内液体晃动的有效防晃板结构就具有重要的现实指导意义。

为降低推进剂晃动对箭体控制的不利影响，常采用在贮箱内安装防晃板[1]，也即推进剂管理装置（PMDs），通过改变液体的流动路径、增加阻尼或调整贮箱自振频率，有效降低晃动能量。贮箱防晃板的研究始于上世纪 60 年代，研究者通过实验研究了地面重力条件下贮箱几何形状以及内部防晃板对液体晃动的阻尼影响[2]。Abramson 和 Garza[3]实验研究了圆柱形贮箱中壁面环形防晃板对横向液体晃动阻尼的影响，发现防晃板开孔能显著影响液体晃动阻尼，且阻尼随着开孔面积的增加而减少。Gligor 等[4]采用数值仿真研究了微重力条件下运动防晃板对液体晃动的影响，结果显示：与固定障板相比，移动防晃板可明显减缓液体晃动，在脉冲加速度激励下，液体晃动衰减时间最多可减少 48%，流体动能最多可减少 23%。Gligor 等[5]实验研究了充水贮箱中振动防晃板对液体晃动的抑制效果，发现移动防晃板的防晃效果优于固定防晃板。

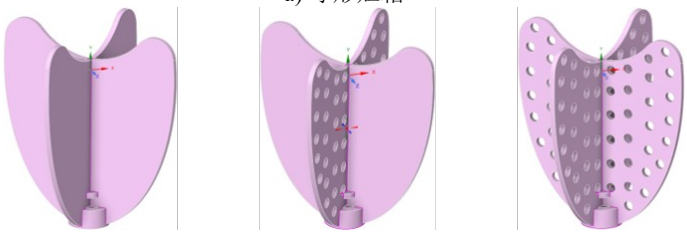
上述研究表明在火箭或者卫星燃料贮箱中，安装防晃板和近壁导流板能够有效减弱液体晃动的影响。因此，本文利用数值模拟和地面滑轨实验，以卫星中常用的球形缩比贮箱为对象，研究了不同防晃板构型对液体晃动的影响。研究结果可以为航天器推进剂贮箱内的防晃板结构设计提供基础指导。

1. 防晃板结构设计的数值仿真研究

卫星推进剂贮箱常为球形贮箱，当前研究贮箱形状以及三种防晃板结构如图 1 所示。打孔板的打孔率为 15.4%，孔径 4mm。



a) 球形贮箱



b) 防晃板结构：左（构型一：由十字交叉板组成）、中（构型二：十字交叉板单侧打孔）、右（构型三：十字交叉板双侧打孔）

图 1 球形贮箱及防晃板结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of spherical tank with anti-slosh baffles

1.1 数值计算模型

当前计算为三维全模型的数值仿真，采用 VOF 方法追踪贮箱内气液界面的运动，VOF 的界面重构方

最新录用

法为 Compressive，采用连续界面力模型处理气液界面上的表面张力作用，Mesh Motion 模型能够计算贮箱晃动下流体的运动，流体的晃动速度小，流动为层流，流体运动的控制方程如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{V})=0 \tag{22}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\boldsymbol{V}\right)=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu(\nabla\boldsymbol{V}+\nabla\boldsymbol{V}^{T}))+\rho\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F}_{\sigma} \tag{33}$$

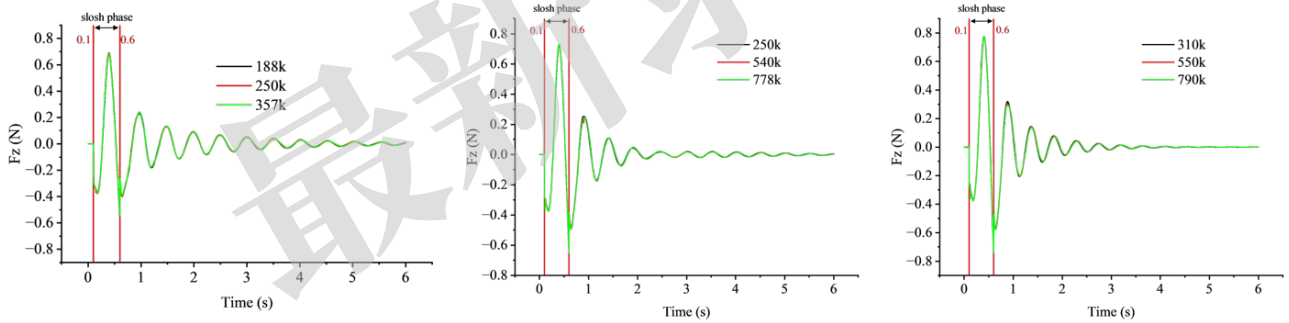
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\alpha=0 \tag{44}$$

$$\frac{d}{dt}\int_{V}\rho\phi dV+\int_{\partial V}\rho\phi(\boldsymbol{V}-\boldsymbol{V}_{m})\cdot d\boldsymbol{A}=\int_{\partial V}\Gamma\nabla\phi\cdot d\boldsymbol{A}+\int_{V}S_{\phi}dV \tag{55}$$

上述方程中，$\boldsymbol{V}$ 为流体运动速度，ρ 为流体密度，t 是流动时间，p 是流体压力，μ 是流体动力学黏性系数，$\boldsymbol{F}_{\sigma}$ 是采用连续表面张力模型计算的气液界面附近表面张力作用对应的等效体积力，$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，α 为第二相的体积分数，ϕ 表示一般标量，V 表示控制体积，V_m 表示运动网格的速度，Γ 表示扩散系数，S_{ϕ} 表示 ϕ 的源项。

计算采用的液体工质为日本信越 KF-96-10CS 硅油，气体为空气。硅油的壁面接触角为 0°。流体初始静止，液面水平，充液率为 50%，贮箱沿着 Z 轴晃动。

由于贮箱内部结构复杂，采用结构网格划分比较困难，因此采用非结构网格进行网格划分。非结构网格通过控制全局网格尺寸和局部区域网格尺寸来进行模型的网格划分。构型一、构型三和构型四的网格无关性检验结果如图 2 所示，可以看到不同网格数量下的晃动力基本一致，为了平衡计算精度和计算资源，构型一、构型三和构型四的网格数量分别约为 250k、540k 和 550k。构型二的网格划分的尺寸设置参照其余三种构型，划分的网格数量约为 2400k。时间步长采用自适应时间步长来控制。



a) 构型一　b) 构型三　c) 构型四

图 2 网格无关性检验

Fig. 2 Grid independence

1.2 数值仿真结果与分析

不同防晃结构的防晃性能可以通过贮箱内流体对贮箱作用力合力的振荡衰减曲线的阻尼比来表征，而阻尼比 ζ 可以通过对式 6 的衰减简谐振动方程的响应曲线进行拟合确定。

$$\begin{cases} F(t)=A\exp(-t/t_0)\sin(\pi t/w-\pi t_c/w) \\ 1/t_0=\zeta\omega_0,\quad \pi/w=\omega_d \\ \omega_d=\omega_0\sqrt{1-\zeta^2} \end{cases} \tag{66}$$

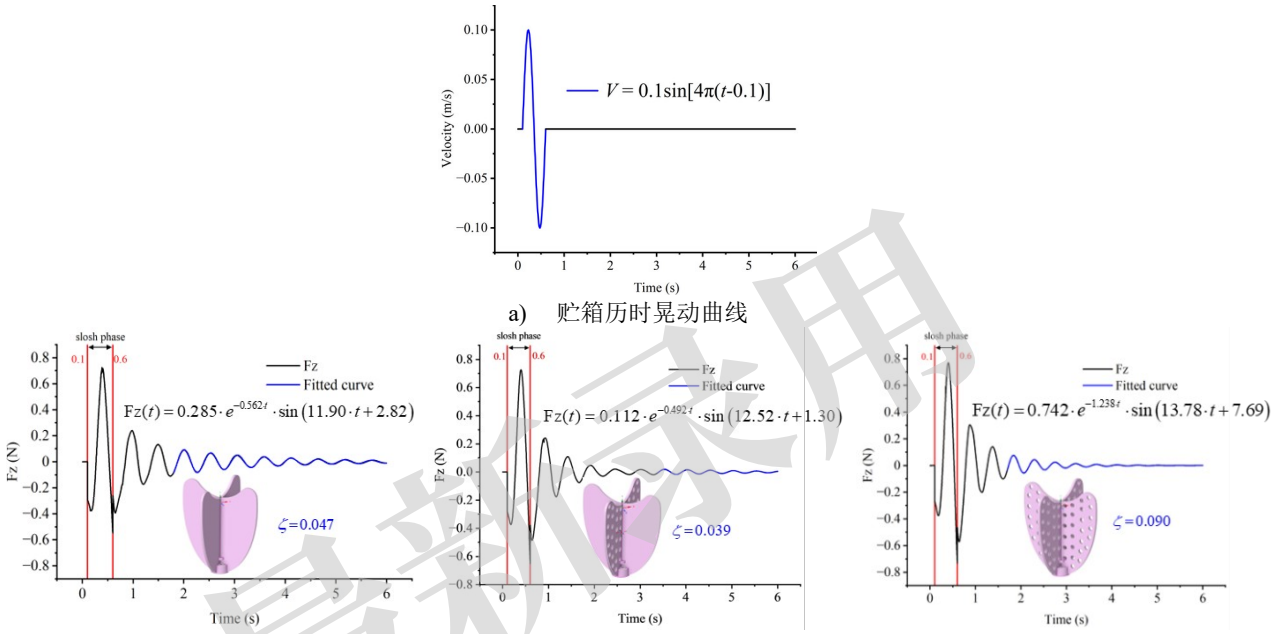
上式中，A 表示振幅，t_0 表示衰减时间常数，ω_0 无阻尼固有角频率，ω_d 表示阻尼振荡角频率。

在贮箱晃动过程中，贮箱只在 0.1s-0.6s 内沿着 z 轴方向运动，不同构型防晃板对液体晃动力的影响过程如图 3 所示，其中晃动力曲线中的蓝色曲线为正弦衰减拟合曲线。从晃动力的拟合曲线中可以得出构型一、二和三的振动频率分别为 1.89Hz、1.99Hz 和 2.19Hz，阻尼比分别为 0.047、0.039 和 0.090。由于

最新采用

构型二和三均对防晃板进行了开孔处理，使得液体在晃动过程中的整体迁移更快，因此加速了液体的振动频率，由于构型三的开孔面积更大，由此导致了一个更大的振动频率。构型二在构型一的基础上，对一侧的防晃板进行开孔处理，可以看到在停止晃动后的初期，晃动力因单侧打孔而存在比较明显的非线性振荡特征，使得单侧打孔防晃板的抑振防晃性能更差。构型三对十字防晃板均作打孔处理，计算得到当前构型的阻尼比为 0.090，将原初构型一的阻尼防晃性能提升 91%

通过对原初构型做不同的结构设计，并对不同结构的抑振防晃性能作比较，发现双侧打孔的十字交叉防晃板能够显著提升贮箱防晃板的防晃性能。据此，设计了三种不同结构的钛合金防晃板，通过实验进一步验证防晃板的阻尼防晃减振性能。



a) 贮箱历时晃动曲线

b) 构型一　　c) 构型二　　d) 构型三

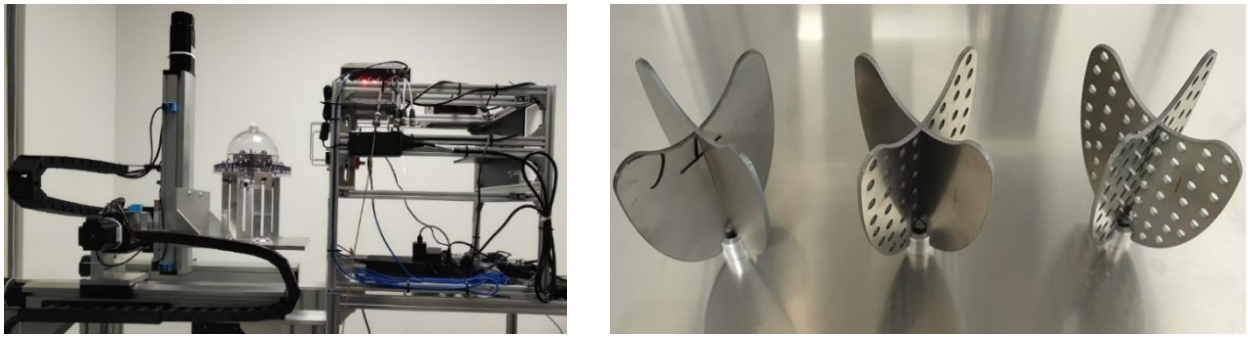
图 3 贮箱晃动过程及不同结构防晃板贮箱的晃动力曲线

Fig. 3 Sloshing process and sloshing force curves for tanks with various anti-sloshing baffle designs

2. 防晃板阻尼性能的实验研究

2.1 实验装置

实验平台由三轴滑轨平台、IOI FLARE 2M280CCX 高速摄像机、IOI DVR EXPRESS CORE2 便携式高速存储设备、球形贮箱、钛合金防晃板、L 型负载支撑铝板、L 型连接件和电脑。贮箱通过连接件与滑轨平台固结在一起。实验平台以及钛合金防晃板如图 4 所示。通过晃动实验来检验钛合金防晃板的防晃性能，并进一步验证数值仿真中对防晃板阻尼计算的可靠性。



a) 实验平台　　**b)** 钛合金防晃板

图 4 实验平台及防晃板

Fig. 4 Experimental platform and anti-slosh baffles

最新录用

三轴滑轨平台由三个步进电机提供三轴运动速度，由一个刹车电机提供断电保护，其电机的运动由程序控制，但单轴滑轨的运动速度不能随时间变化，只能在单次运动中设置一个恒定值，其最大运动速度为 0.08 m/s，三轴的运动可以自由组合。

实验采用的充液容器为聚碳酸酯材质的球形贮箱，由上下两个半球壳体组成，其内径为 0.126 m，容器壁厚 0.005 m。上下球壳采用螺钉连接，采用 O 型橡胶圈进行密封。

晃动实验在地面常重力条件下进行，对比使用了图 4 所示的三种不同构型的钛合金防晃板，防晃板卡固在球形贮箱底部的凹槽中。实验介质为日本信越 KF-96-10CS 硅油，晃动实验贮箱的充液率为 50%，初始液面水平静止，贮箱随着滑轨平台沿着固定方向水平晃动，其晃动曲线如图 5 所示，贮箱只在 0.1 s-1.1 s 内作往返晃动。

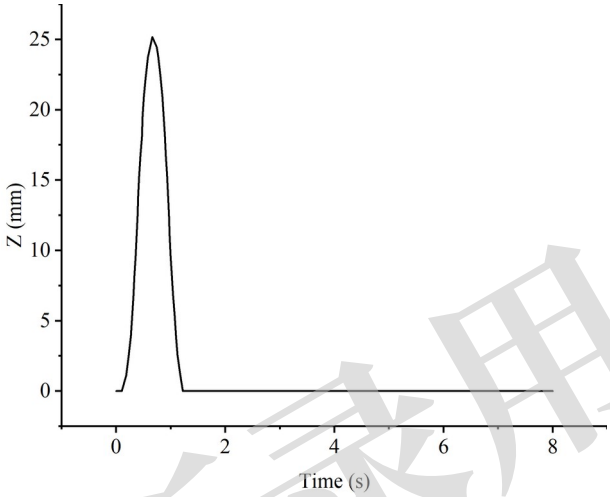


图 5 滑轨平台的运动

Fig. 5 The motion of the sliding rail device

最新录用

2.2 实验数据处理方法

小波变换是一种信号的时间-尺度(与信号频率相对应)分析方法,在时域和频域同时具有表征信号局部特性的能力，非常适合进行振动系统的参数识别，因此，国内外学者普遍采用了连续小波变换对非线性振动系统的阻尼进行了辨识[6–9]。

小波变换的含义就是把基本小波函数 $\psi(t)$ 伸缩平移后与待分析信号 $x(t)$ 做内积，结果称为小波系数。将小波函数 $\psi(t)$ 经过伸缩平移后得到一组函数：

$$\psi_{ab}(t)=|a|^{-\frac{1}{2}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\quad(a,b\in R)$$

77* MERGEFORMAT ()

上式中，a 为尺度参数，也即伸缩因子；b 为平移参数。信号 $x(t)$ 的连续小波变换表示为：

$$WT_x(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

88* MERGEFORMAT ()

上标*表示取共轭。

当系统的阻尼较小时，系统的解能用解析信号的形式给出，如下所示：

$$x(t)=A_0e^{-\zeta\omega_n t}e^{\pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t}=A(t)e^{j\phi(t)}$$

99* MERGEFORMAT ()

其相应的 Morlet 小波变换的近似表达为：

$$WT_x(a,b)\approx A(b)e^{j\phi(b)}\hat{\psi}^*(a\phi(b))+o(|A'|,|\phi'|)$$

1010* MERGEFORMAT ()

上式右边第二项为高阶小量可忽略，小波系数的模为：

$$|(WT_x)(a,b)|\approx A(b)|\hat{\psi}^*(a\phi(b))|$$

1111* MERGEFORMAT ()

对于给定的尺度 a_0，小波系数的模可表达如下：

$$\left|(WT_x)(a_0,b)\right| \approx A_0 \mathrm{e}^{-\zeta\omega_n b}\left|\hat{\psi}^*(\pm a_0 \mathrm{j}\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})\right| \quad 1212\backslash* \text{ MERGEFORMAT ()}$$

对上式取对数，得到：

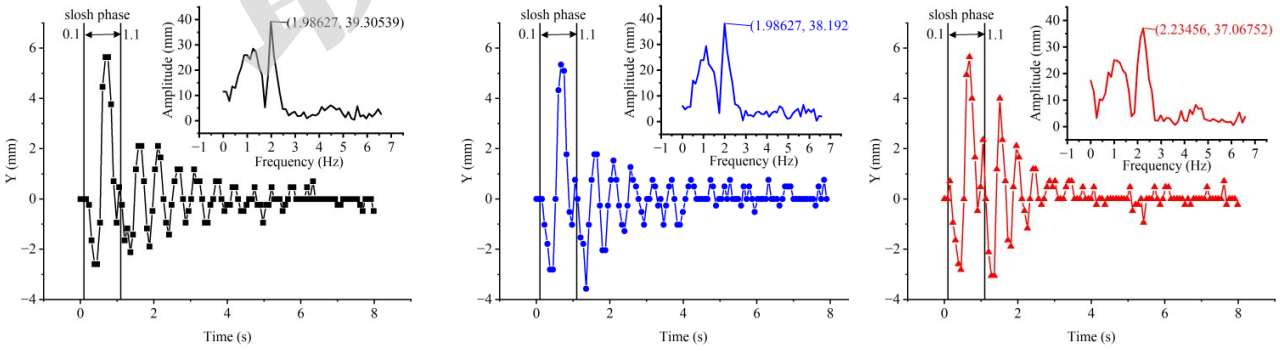
$$\ln\left|(WT_x)(a_0,b)\right| \approx -\zeta\omega_n b + \ln(A_0\left|\hat{\psi}^*(\pm \mathrm{j}a_0\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})\right|) \quad 1313\backslash* \text{ MERGEFORMAT ()}$$

因此，对于确定的尺度 a_0，在半对数坐标绘制的图中，系统的阻尼比 ζ 可以通过小波模量 $\left|(WT_x)(a_0,b)\right|$ 截面直线的斜率得出。

2.3 实验结果分析

利用图像处理提取了液面晃动过程中三相接触点的竖坐标，三相接触点在高度方向上的振荡衰减过程如图 6 所示。可以看到，在向 Z 轴正向晃动阶段（0.1s-0.6s），三相接触点先向 Y 轴负向运动随后迅速向 Y 轴正向运动，随后贮箱向 Z 轴负向运动，三相接触点进一步向 Y 轴正方向运动，然后在表面张力的作用下三相接触点开始回缩向 Y 轴负向运动。当停止晃动时，三相接触点在惯性力、黏性力和表面张力作用下先经过一个非线性的振荡，随后立即进入阻尼衰减运动。可以明显看出双侧打孔的构型三的阻尼衰减过程更加明显且迅速，有更好的抑制液体晃动的能力。从三相点的振动衰减过程可以很明显看到单侧打孔的阻尼衰减过程并没有得到改善，这主要是因为在晃动过程中单侧开孔使得部分液体得以轻松穿过防晃板，降低了局部流速的变化和冲击，减少了能量耗散作用。相反，双侧开孔的防晃板在停止晃动后使得更多的液体穿过防晃板，使得监测点有一个更大的正向峰值，随后液体反复穿过孔洞，增加了穿越过程中的摩擦和剪切耗散，使得监测点的运动更迅速的衰减，显著提高系统阻尼。

对三种防晃板的液面振动曲线作傅里叶变换，从图 6 中的频谱插图中可以得到三种构型的液体晃动主频。构型一、构型二和构型三的主频分别为 1.98 Hz、1.98 Hz 和 2.23 Hz，可以看到双侧打孔的构型三使得液体晃动频率增加 13%。



a) 构型一　　b) 构型二　　c) 构型三

图 6 防晃板贮箱内三相接触点的振荡演化及频谱插图

Fig. 6 Evolution of oscillations and frequency spectrum of the three-phase contact point in a baffled tank

对三相点的振荡过程作小波变换分析，可以得到三个防晃板贮箱的晃动阻尼，如表 1 所示。可以看到，实验计算的阻尼比和数值模拟计算出的阻尼比的相对误差不超过 15%，相互验证了防晃板的阻尼计算的正确性。

表 1 防晃板的实验和数值阻尼计算对比

Tab. 1 Comparison of experimental and numerical damping calculations for baffles

防晃板构型	阻尼比(实验)	阻尼比(数值)	相对误差/ %
构型一	0.040	0.047	15
构型二	0.036	0.039	7.7
构型三	0.092	0.090	2.2

3. 结论

本文基于数值计算和实验研究了微小卫星板式表面张力贮箱内不同防晃板结构对液体防晃特性的影响。首先采用数值计算模拟了不同构型防晃板的晃动过程，通过对液体晃动力曲线进行衰减简谐振动拟合，得到了三种构型的防晃板的阻尼比，其中双侧打孔的防晃板能够显著提升系统的阻尼比；而单侧打孔会降低系统阻尼，使得防晃板的液体防晃性能变差。此外，通过实验进一步研究钛合金防晃板的实际防晃效果，通过小波变换提取阻尼比，发现实验和数值计算的系统阻尼比的相对差值不超过 15%，进一步验证了不同构型防晃板的阻尼计算的正确性。因此，在贮箱流体管理中应将防晃板设计成双侧打孔的构型以抑制液体的晃动，同时减轻了防晃板的重量。

参考文献(References)

[1] XUAN Chuanwei, WANG Jifei, WANG Yabo, *et al*. Numerical analysis on liquid sloshing of rocket tanks[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2023, **40**(S1): 47-53 (宣传伟, 王吉飞, 王亚博, 等. 火箭贮箱液体防晃特性数值分析[J]. 上海航天(中英文), 2023, **40**(S1): 47-53)

[2] ABRAMSON H N. The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, with Applications to Space Vehicle Technology[M]. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1966

[3] ABRAMSON H N, GARZA L R. Some measurements of the effects of ring baffles in cylindrical tanks[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1964, **1**(5): 560-562

[4] GLIGOR D, PEROMINGO C, SALGADO SÁNCHEZ P, *et al*. Sloshing mitigation in microgravity with moving baffles[J]. *Acta Astronautica*, 2024, **219**: 639-652

[5] GLIGOR D, MARQUES P A, SALGADO SÁNCHEZ P, *et al*. Experiments on sloshing mitigation using tuned oscillating baffles[J]. *Physics of Fluids*, 2024, **36**: 092122

[6] STASZEWSKI W J. Identification of damping in mdof systems using time-scale decomposition[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, **203**(2): 283-305

[7] SLAVIČ J, SIMONOVSKI I, BOLTEŽAR M. Damping identification using a continuous wavelet transform: application to real data[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, **262**(2): 291-307

[8] YAO Qianbin, YANG Zhichun, LI Bin. Damping identification of materials using wavelet transform[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2007, **26**(7): 850-855 (姚千斌, 杨智春, 李斌. 基于小波变换方法的材料小阻尼识别[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(7): 850-855)

[9] HUANG Dongmei, ZHOU Shi, REN Weixin. Identification for time-varying and typical nonlinear vibration system based on wavelet transform[J]. *Journal Of Vibration and Shock*, 2014, **33**(13): 123-129 (黄东梅, 周实, 任伟新. 基于小波变换的时变及典型非线性振动系统识别[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(13): 123-129)

录用录用

作者简介

第一作者：



魏列 男，1995 年 8 月出生于湖北省武汉市，现为中国科学院力学研究所博士生，主要研究方向为低温推进剂管路快速预冷机理研究以及贮箱流体管理等。

通讯作者：



赵霄 男，1991年2月出生于宁夏中卫市，现为中国科学院力学研究所副研究员，主要研究方向为空间微重力流体物理、相变强化传热等。

最新录用