 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5664

Research on Nonlinear Oscillation Characteristics Based on Liquid Oscillation Real-time Monitoring System

Lipeng Huang[1] Feng Liu[1,2] Datong Yang[1] Wenjun Wu[1,2*]

1. Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006, China
2. Key Laboratory of Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006, China

Abstract

The nonlinear sloshing of liquid fuel inside the propellant tanks of spacecraft significantly affects the stability of attitude and orbit control. To address this issue, a real-time liquid sloshing monitoring system has been designed and developed. This system utilizes multiple force sensors and accelerometers to collect dynamic signals, including sloshing forces, torques, and accelerations, under various conditions—different tank geometries (such as spherical and Cassini tanks), varying filling ratios, and different excitation parameters. Furthermore, the system analyzes the characteristics of nonlinear liquid sloshing to validate the feasibility of software-based data acquisition. The study found that the nonlinear effects of liquid sloshing vary significantly with changes in tank geometry, filling ratio, and excitation amplitude. Additionally, a non-planar sloshing experiment was conducted using a large spherical tank with a filling ratio of 0.5, and the measured sloshing forces and torques were compared with numerical simulations performed using commercial finite element software. Experimental results show that the liquid initially undergoes a planar sloshing phase along the excitation direction. As the excitation frequency and amplitude increase, this phase gradually shortens, causing the liquid to transition into a non-planar sloshing state more quickly. By comparing experimental results with numerical simulations, it was found that numerical modeling effectively captures the overall trend of liquid sloshing. However, real-time monitoring system data is still required for validation. The designed real-time monitoring system and research findings provide an effective experimental approach and theoretical guidance for optimizing the installation and arrangement of propellant tanks and implementing real-time control of liquid sloshing in practical aerospace applications.

Keywords

Liquid sloshing; Real-time monitoring; Nonlinear characteristics; Free oscillation; Non-planar oscillation

基于液体晃动实时监测系统的非线性晃动特性研究

黄礼鹏[1] 刘峰[1,2] 杨大同[1] 吴文军[1,2*]

1. 广西科技大学，中国 · 广西 柳州 545006
2. 广西汽车零部件与整车技术重点实验室，中国 · 广西 柳州 545006

摘 要

针对充液航天器贮箱内液体燃料的非线性晃动，对航天器姿态和轨道的稳定运行与精准控制产生重要的影响。设计并搭建了一套液体晃动实时监测系统，系统利用力传感器和加速度传感器，采集在不同形状的贮箱、不同充液比以及不同激励条件下充液贮箱内液体晃动力\力矩及加速度等动态信号，并进一步验证了液体非线性晃动特性和软件实时数据采集的可行性。此外，通过大球形贮存箱进行非平面晃动实验，将测得的液体晃动力\力矩数据与有限元仿真结果进行对比分析，表明了液体沿激励方向经历一个平面晃动阶段，随着增大激励频率\幅值，液体将快速进入非平面晃动阶段。通过实验与仿真的比较，数值仿真能够有效反映液体晃动状态，但仍需结合实时监测系统数据进行校验。

关键词

液体晃动；实时监测；非线性特性；自由晃动；非平面晃动

【基金项目】国家自然科学基金项目（12362006；12202044），广西科技大学博士基金项目资助（校科博24Z28）

【作者简介】黄礼鹏（1996–），男，硕士，从事液体晃动测试系统设计研究。

【通信作者】吴文军（1982–），男，博士，教授，从事复杂充液系统耦合动力学与控制研究。

1 引言

充液贮箱在外部激励作用下，液体发生非线性晃动后会导致推力偏差、附加动载荷增加、结构疲劳甚至安全事故。因此，建立基于传感器的数据采集实时监测系统，对航空航天 [1]、海洋工程 [2]、运输储液 [3] 和能源存储 [4] 等领域的系统稳定性和安全性具有重要研究价值和意义。

文献【5-7】采用 LabVIEW 与 MATLAB 联合进行数据采集，实现了对不同工况下机械系统的实时监测与分析。其

中，LabVIEW 负责传感器信号的采集、初步处理及数据传输，而 MATLAB 则用于数据的进一步分析及特征提取。基于 LabVIEW 和 MATLAB 软件的串口通讯与图形化联合编程技术设计的液体晃动系统，最大化利用各自的特点，形成高效的协同平台，扩展了研究与应用的空间。

对于充液贮箱非线性晃动特性的研究，通过地面实验，可以测量晃动力与晃动力矩特性，并分析不同充液比、激励条件及贮箱结构对液体晃动行为的影响。文献 [8] 提出了三种不相互混合液体在矩形槽内受简谐水平激励的晃动实验，得出了当激励频率等于底部界面的第一模态固有频率且接近中间界面的第三模态固有频率时，底部界面和中间界面发生典型的共振现象。文献 [9] 采用了疏水和普通槽面在一阶固有频率的激励下，晃动液体对侧壁的冲击压力和自由表面变形实验，得到了固体表面特性对自由表面高程、波浪产生和压力分布有很强的影响，在共振频率作用下，疏水涂层使液体运动增加，峰值压力值降低。

综上所述，尽管液体晃动理论与实验研究已取得大量成果，但传统方法在实时性与动态捕捉能力方面仍存在不足，难以准确反映大幅非线性晃动下的液面复杂演变。为此，本文设计并实现了一套基于传感器与数据采集技术的液体晃动实时监测系统，能够在多种贮箱结构与激励条件下，连续获取液体晃动过程中的动力学响应数据，包括晃动力、晃动力矩及加速度信号等。结合频率特征提取与非线性分析方法，系统可有效识别晃动模式及其演化规律，为揭示非线性液体晃动机理、优化动力学建模与提升工程应用中的监测能力提供了实验支撑。

2 实验装置和数据采集系统

为了研究液体在非平面晃动条件下的动力学特性，并实现实时监测，实验系统需包括液体晃动实验装置和数据采集系统。实验装置需能够提供可控的单轴晃动激励，并确保液体容器内的液体自由面能够在不同激励条件下产生明显的非线性动力学行为。数据采集系统需能够实时监测晃动力 \ 力矩和加速度信号等，并提供数据处理能力，以支持后续信号分析和动力学建模。

实验装置主要包括晃动平台、液体容器、激励控制系统和传感器测量设备。晃动平台采用激振器驱动，提供可调幅度和频率的周期性激励，使液体容器沿单轴方向运动以模拟不同工况下的液体晃动行为。液体贮箱采用大球形贮箱、小球形贮箱和卡西尼贮箱，其中，大球形贮箱球内径为 0.154m；小球形贮箱球内径为 0.097m；双并联卡西尼贮箱，半球内径 0.097m，上下半球相距 0.1m。

为了实现不同坐标方向的力和力矩的完全解耦，依据动力学原理，参照文献 [10]，利用 6 个单轴力传感器、1 个三轴加速度传感器和安装夹具等搭建了用于测量液体晃动力、晃动力矩和加速度的实验平台。其中，力传感器的分布方式如图 1 所示。

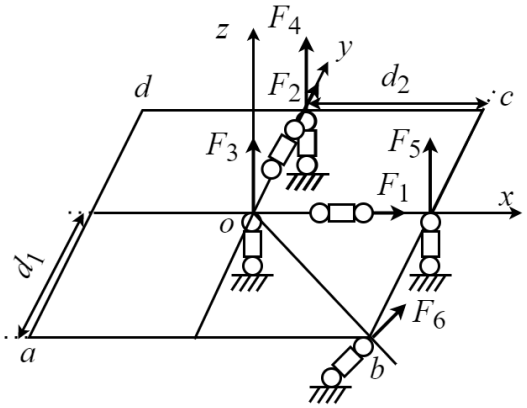


图 1 力传感器分布示意图

液体晃动实时监测系统通过 LabVIEW 图形化编程技术与 MATLAB 软件进行串口通讯，以实现数据采集、实时监测和信号分析。系统采用了多个力传感器、加速度传感器和压力传感器，用以采集液体晃动过程整个实验平台中晃动力、晃动力矩和加速度等动态信号。通过 LabVIEW 软件对液体晃动以及平台运动状态进行实时测量，并结合 MATLAB 的数据处理与分析功能，完成信号解耦、特征提取和非线性液体晃动分析，如图 2 所示原理图。在系统架构上，LabVIEW 主要负责传感器信号采集、数据传输和实时监控，通过多线程并行处理，确保多个传感器的数据同步采集并实时显示。MATLAB 主要负责信号处理与特征分析，以提取晃动信号的非线性特性。为了实现高效的数据交互，LabVIEW 通过串口通信协议，将实时采集的数据传输至 MATLAB 进行处理，并通过 LabVIEW 可视化界面实时展示液体晃动力 / 力矩和加速度变化曲线。

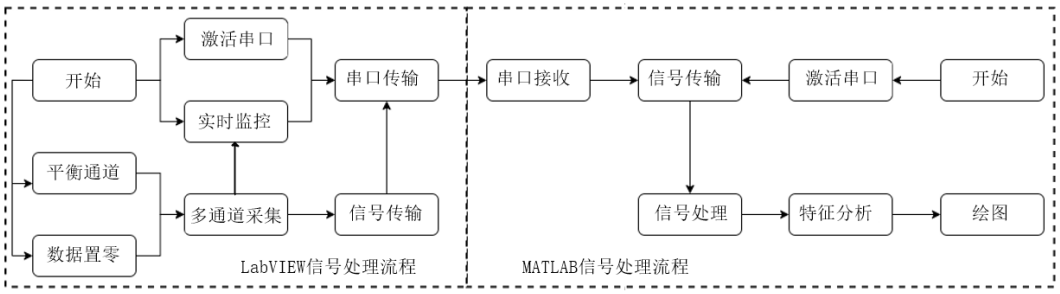


图 2 信号采集原理图

3 大幅平面晃动非线性特性实验研究

为验证实时监测系统的对于大幅平面晃动的准确性和可靠性，采用不同贮箱（大球形贮箱、小球形贮箱和卡西尼贮箱）及不同充液比，进行液体大幅自由晃动的响应测量实验。当液体在贮箱内晃动时，其一阶晃动模态通常占主导地位，而高阶模态的影响较弱。

根据液体线性晃动理论可知，充液贮箱液体内各阶固有频率的计算公式为

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\lambda_n \frac{g}{R}\tanh(\lambda_n \frac{h}{R})} \tag{1}$$

式 (1) 中：f_n 为液体晃动的 n 阶固有频率，Hz；g 为重力加速度，m/s^2；h 为自由液面高度，m；R 为自由液面处对应的贮箱半径，m；λ_n 为不同的模态下的常数，λ_1=1.841，λ_2=5.331，λ_3=8.536，……，$\lambda_{n+1}=\lambda_n+\pi$。

表 1 给出了一阶固有晃动频率理论值与系统采集的实验值，并以此验证液体的自由晃动响应特性。结果表明，实验与理论的数值基本吻合，液体晃动固有频率随着充液比的增大而增大，与文献 [10] 中给出结论保持一致。

在球形贮箱中，液体晃动受均匀的球形边界约束，液面运动趋于对称，呈现较为典型的一阶模态特征。在中高充液比条件下，实验测得的一阶固有频率与理论值较为接近。然而，在低充液比条件下，液体主要集中于球形底部，在大幅自由响应下，液面晃动呈现明显的非线性特征，导致晃动模式发生变化，使得实验值偏离理论计算结果。相比之下，卡西尼贮箱的形状介于球形和椭球形之间，其边界变化对液体自由晃动模式产生显著影响。在高充液比时，液面波动仍然以一阶模态为主，实验测得的固有频率较为接近理论值，但当充液比降低时，卡西尼贮箱的不规则边界约束会导致液体流动方向的不均匀性，使得液面波形可能出现局部聚集现象，进而影响固有频率的测量。此外，在不同尺寸的贮箱中，液体晃动的固有频率随贮箱尺寸的增大而降低。对于较小的球形贮箱，液体波动受边界约束更为显著，壁面效应可能导致局部能量集中，使得实验值与理论值的偏差相对明显。

表 1 一阶固有晃动频率理论值与系统采集实验值

充液比		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
大球形贮箱	理论值 /Hz	1.4809	1.5252	1.5695	1.6259	1.7125
	实验值 /Hz	1.4187	1.484	1.5656	1.6225	1.6851
	相对误差	4.20%	2.70%	0.25%	0.21%	1.60%
小球形贮箱	理论值 /Hz	1.8659	1.9218	1.9776	2.0486	2.1578
	实验值 /Hz	1.7987	1.8853	1.9736	2.0449	2.141
	相对误差	3.60%	1.90%	0.20%	0.18%	0.78%
卡西尼贮箱	理论值 /Hz	2.0406	2.0972	2.1246	2.1379	2.1442
	实验值 /Hz	1.9631	2.0532	2.118	2.1321	2.1399
	相对误差	3.80%	2.10%	0.31%	0.27%	0.20%

4 非平面晃动的非线性特性实验研究

基于上节的分析，进一步对 0.5 充液比大球形贮箱沿 x 轴施加 1.56Hz，仪器幅值 0.8V 正弦激励条件下的非平面晃动实验。根据文献 [10]，当激励频率接近球形贮箱内液体一阶固有频率的 0.85~1.15 倍范围时，液面开始出现非对称波动。结合表 1 所示数据可知，当施加 1.56Hz 正弦激励，液体会出现非平面晃动。

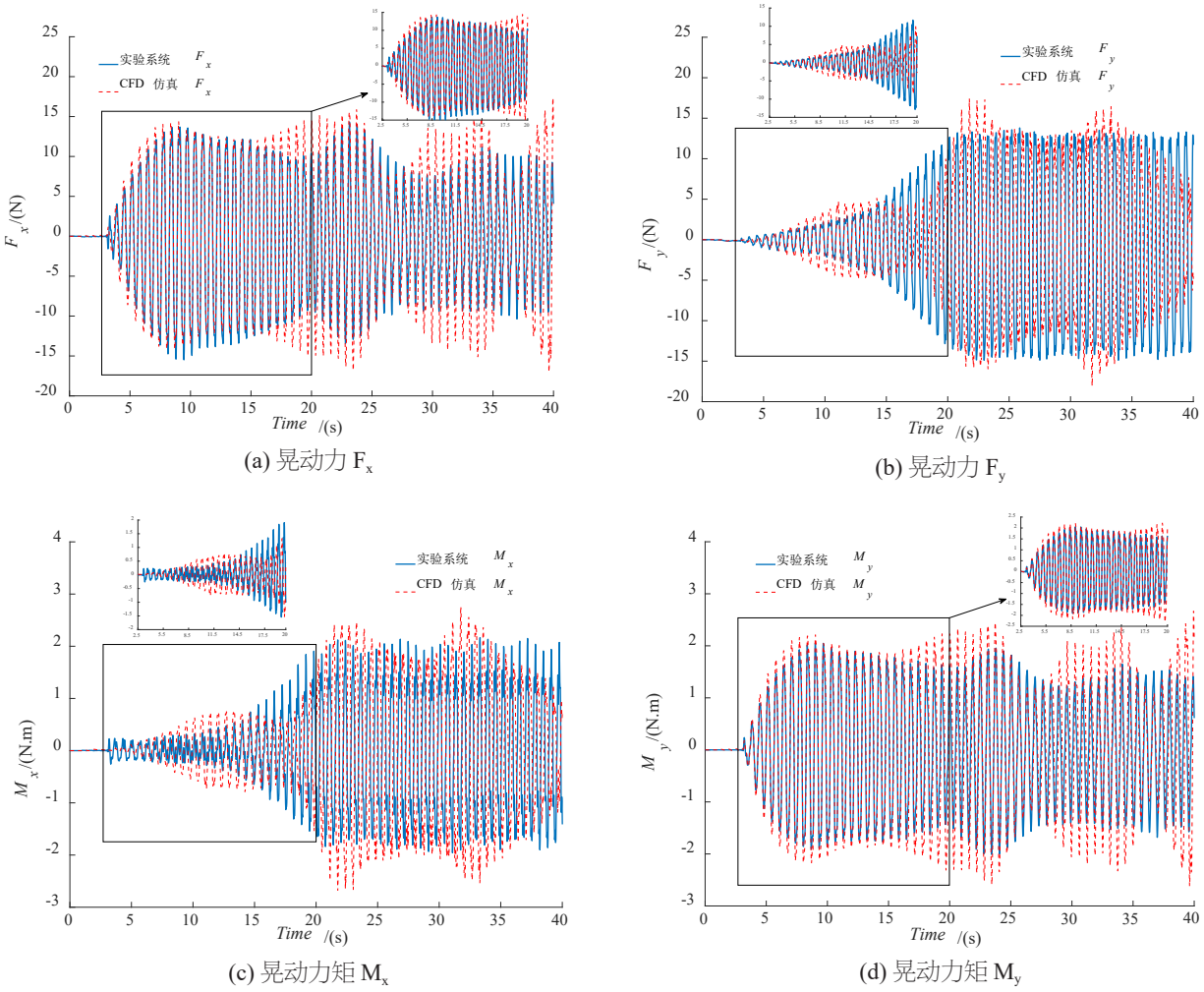
5 结论

针对充液航天器贮箱内液体燃料的非线性晃动现象易引起航天器姿态和轨道的稳定运行问题，设计并提出了基于 LabVIEW 图形化编程和 MATLAB 串口通信为一体的实时监测系统及数据采集方法。通过大量试验，研究了液体平面大幅晃动和非平面晃动与不同贮箱、不同充液比和不同初始晃动之间的规律，得到如下结论。

（1）通过对不同贮箱和不同充液比下大幅自由晃动响应特性测量，实时监测系统测得的一阶固有频率与理论计算值整体趋势一致，验证了系统在非线性晃动频率提取方面的有效性，但存在一定误差。此外，卡西尼贮箱的液体晃动受复杂边界影响，导致其固有频率的测量误差相对较大。较小贮箱实验值与理论值更为接近，而较大贮箱惯性主导作用增强，测量误差增大。

（2）对于非平面晃动的非线性特性实验，实时监测系统采集的数据与 CFD 仿真结果在早期阶段较为吻合，因为在发生非平面晃动时会经历一个大幅平面晃动的过度阶段，进一步验证了实验数据采集的准确性。随着非平面晃动的产生，CFD 仿真因未考虑粘性效应及边界约束，误差累积影响非线性晃动预测。

③激励频率接近液体一阶固有频率时，液体会出现明显的非线性晃动，逐步增大激励频率，过渡阶段会逐步缩减。在固定频率晃动中，为减弱液体的非平面晃动，需要降低晃动幅值，实验数据显示，不同幅值的激励会导致不同的演变路径，较大的激励幅值往往会导致更复杂的非线性行为。



(a) 晃动力 F_x　(b) 晃动力 F_y

(c) 晃动力矩 M_x　(d) 晃动力矩 M_y

图 3 0.5 充液比非平面晃动力和晃动力矩

参考文献

[1] Yu L , Baozeng Y , Bole M .Improved Moving Pulsating Ball Equivalent Model for Large-Amplitude Liquid Slosh[J].AIAA Journal, 2022, 60(8):8.

[2] 陈冬梅,赵思恒,魏承印,等.船舶柴油机状态监测及预测性维护研究及应用[J].中国机械工程,2022,33(10):1162-1168.

[3] 杨秀建,余间溪,张生斌,等.液罐车防波板对液体纵向晃动及车辆动力学的影响[J].机械设计与制造,2024,(08):287-293.

[4] 罗诒红,周中一,唐泽寰,等.大型混凝土储液罐考虑穹顶效应的动力响应研究[J].工程力学,2024, 41(12): 128- 137.

[5] Tie-Zhu Y , Xiao-Lei L , Qian-Xin L .Development of Wheatstone bridge and Kelvin bridge Simulation Experiment System Based on LabVIEW[J].Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1792(1):012083 (8pp).

[6] Bhatti S , Ohri J .Performance Study of LabVIEW Modelled PV Panel and Its Hardware Implementation[J].Wireless personal communications: An Internaional Journal, 2022(3):123.3: 2759-2774.

[7] Estrada L , Arau J , Sciubba E .Real-Time Hardware in the Loop Simulation Methodology for Power Converters Using LabVIEW FPGA[J].Energies, 2020, 13(2):373.

[8] Liu D X , Lu T , Cai W .Experimental Study on the Sloshing of a Three-Liquid System with Free Surface[J].SSRN Electronic Journal, 2023, 279: 114422.

[9] Korkmaz F ,B. Güzel.Insights from Sloshing Experiments in a Rectangular Hydrophobic Tank[J].Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 146: 110920.

[10] 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(06):849-859.