

利用气浮技术进行贮箱晃动试验方法研究

程宏川^{1,2}, 吴 剑^{1,2}, 廖云龙^{1,2}, 张银勇^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要: 针对某型号大容积贮箱, 其晃动特性直接影响到整个系统的动力学特性及轨道控制系统。为了获得该贮箱不同工况下的一阶自由晃动频率, 首次提出利用气垫悬浮技术进行贮箱晃动试验的新方法, 利用该方法设计出一整套试验系统, 该系统包含试验件、激励系统、气浮控制系统、数据采集系统及加注排放系统等。使用试验系统开展不同工况条件下的液体晃动试验, 并用 CFD 软件对该贮箱进行时域分析, 结合傅立叶变换最终获得仿真结果。分析比较晃动试验结果、理论计算结果及 CFD 仿真计算结果, 结果显示 3 种结果一致吻合, 测试系统的可靠性和理论 CFD 仿真结果的正确性均得到验证。

关键词: 贮箱晃动试验; 气垫悬浮技术; CFD 仿真计算

中图分类号: V433.9-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0047-05

Research on new method of tank liquid sloshing test based on air flotation technology

CHENG Hongchuan^{1,2}, WU Jian^{1,2}, LIAO Yunlong^{1,2}, ZHANG Yinyong^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: The sloshing characteristics of a type of large volume tank affect the whole system dynamic characteristics and orbit control system directly. In order to get the free sloshing frequency of the tank under different working conditions, a new method of tank liquid sloshing test based on air cushion flotation technology is proposed. A set of experiment system, including tank, excitation system, air flotation control system, data acquisition system and filling & draining system, is designed by this method to solve the liquid sloshing problem under different working conditions. The final simulation results were achieved by Fourier transform and time domain simulation analysis results obtained by CFD software. The results indicate that the test result, theory result and the CFD simulation result are consistent, and prove that the test system is reliable and the simulation results of CFD are correct. The test results provide an important reference and supporting data for tank design optimization and launch vehicle attitude & orbit control system design optimization.

Keywords: tank liquid sloshing test; air cushion flotation technology; CFD simulation calculation

收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2016-12-16

作者简介: 程宏川 (1984—), 男, 工程师, 研究领域为结构仿真及应用

0 引言

在航天器众多部件产品中,贮箱承担着非常重要的作用。贮箱内液体的晃动特性,如晃动频率会直接影响到整个系统的性能。传统的贮箱晃动试验采用悬垂法,悬垂法的缺点是无法避免重力分量对于整个系统的影响。

气垫悬浮技术,是指在气垫片的气囊中充入压缩空气,空气将气囊鼓起,并与地面接触,在气囊中间形成密封气腔,随着空气压力增大,气囊内的压力也随之增加,当该压力值达到足以浮起气垫承载的相应负载后,气腔内的气体会通过气囊底部向大气泄出气体,此时气囊底部不与地面接触,气囊底部与地面之间存在 0.1~0.2 mm 气膜,空气从该气膜连续不断向外泄气,中间密封气腔也变成开放式气腔,气垫片处于动态稳定的悬浮状态。

本文利用气垫悬浮技术,提出一种全新的测试贮箱液体晃动参数的系统。

1 测试系统简介

晃动测试系统如图 1 所示,由试验件、试验系统、数据采集系统和加注排放系统等组成。试验件为贮箱,贮箱内液体为纯净水,贮箱满载 320 L。贮箱通过转接工装、力传感器安装于气浮台上部;试验系统由水平激励台、水平激励台控制系统、气浮台和气浮台控制系统组成,气浮台通气后悬浮于水平激励台上部;水平激励台一侧激励装置通过气动离合、力传感器与气浮台连接,可由激励台控制系统控制发出相应激励信号,完成强迫激励;加排系统由管路、抽真空装置、增压装置和压力表等组成。数据采集系统由力传感器、激光传感器及数据采集板卡组成。

试验状态:整个试验过程均为满载 80% 纯净水。

试验方法及过程:首先,利用气浮系统将气浮台浮起;其次,激励控制系统控制发出相应的激励信号,定频完成强迫激励,从而带动气浮台动作;再次,待贮箱晃动达到稳定状态(本次试验为定频连续激励 5 min)之后,关闭激励系统

及气浮系统,若干秒之后,采集 4 个力传感器信号(A1, A2, A3 及 A4)。

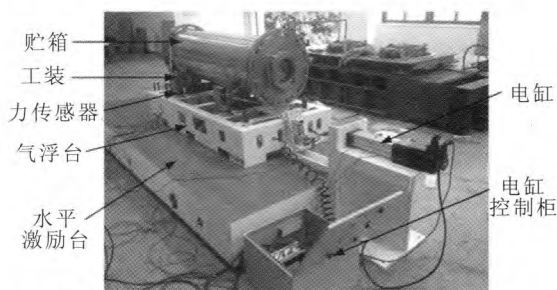


图 1 系统组成实物照片(贮箱水平轴向放置)

Fig. 1 Picture of the system (tank is axially placed)

2 竖直状态测试

2.1 现场试验结果

采用上述试验方法,进行了竖直状态晃动试验,现场试验照片如图 2 所示。



图 2 贮箱竖直状态现场试验照片

Fig. 2 Testing field picture of the tank in vertical state

试验过程中,电动缸的激振频率分别定在 1 Hz, 1.5 Hz 及 2 Hz 等频率下进行多次试验。将采集到的数据进行 FFT 变换之后,得到的曲线如图 3 所示,在此仅列举定频为 1 Hz 和 1.5 Hz 的 A1 传感器试验数据。

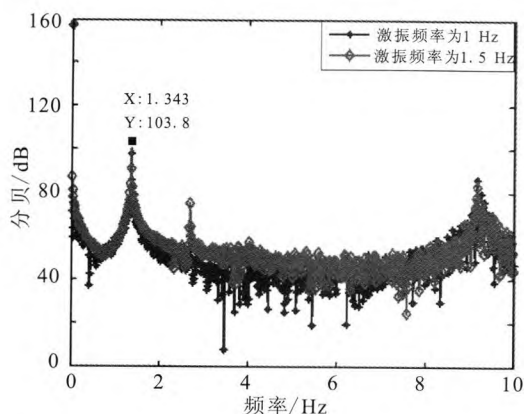


图 3 贮箱竖直状态不同激振频率下 A1 传感器曲线图

Fig. 3 Curves of A1 sensor under different excitation frequency when the tank is in vertical state

通过分析图 3 传感器曲线, 可以得到以下 2 点结论:

- 1) 竖直方向自由晃动的一阶频率为 1.343 Hz;
- 2) 该频率与电动缸激振的频率无关。

2.2 理论分析结果

根据文献 [9] 可知, 此状态下贮箱在竖直方向有解析公式。文献 [9] 第 6 章 6.1 节, 贮箱竖直状态晃动频率计算公式如下:

$$\omega_{mn}^2 = n_x g \frac{\xi_{mn}}{\alpha} \tanh\left(\frac{\xi_{mn}}{\alpha} h_d\right) \quad (1)$$

式中: ω_{mn} 为晃动圆频率; n_x 为轴向过载系数, $n_x = 1$; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; α 为贮箱横截面半径, $\alpha = 0.251 \text{ m}$; h_d 为自由液面高度, $h_d = 1.25 \text{ m}$ 。

根据该文献 [9] 可查得, $\xi_{mn} = 1.8412$ 。在此状态下, 获得贮箱竖直状态一阶晃动频率解析解为 1.350 Hz。

对比试验结果与解析解, 可以发现, 两者相对偏差仅约为 0.5%。

3 水平轴向状态测试

3.1 现场试验结果

采用上述试验方法, 进行了水平轴向状态晃动试验, 现场试验照片如图 1 所示。

将采集到的数据进行 FFT 变换之后, 得到的曲线如图 4 所示, 在此仅列举定频为 1 Hz 和 1.5 Hz

的 A1 传感器试验数据。分析图 4 可以得到水平轴向方向自由晃动的一阶频率为 0.534 Hz。

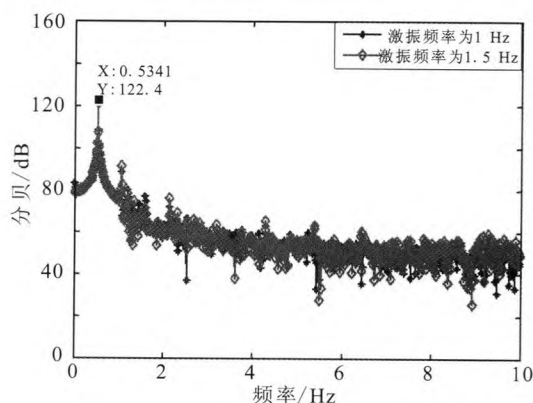


图 4 贮箱水平轴向状态不同激振频率下 A1 传感器曲线图

Fig. 4 Curves of A1 sensor under different excitation frequency when the tank is in axial state

3.2 CFD 仿真分析结果

贮箱在水平放置时介质轴向自由晃动频率没有解析公式。

为了获得贮箱在水平放置时介质轴向自由晃动一阶频率的理论解, 本文采用 CFD 仿真并结合傅立叶变换的方法。

具体计算过程如下:

- 1) 在贮箱轴向或横向方向施加如下加速度与时间关系的正弦激励, 频率为 1 Hz:

$$\alpha = 0.39 \sin(2\pi t) \quad (2)$$

式中: α 为重力加速度, mm/s^2 ; t 为时间, s 。

- 2) 在经过 2 个周期的激励后, 撤去该激励, 采集后续时刻囊内自由液面对贮箱内壁的作用力随时间的变化关系。

- 3) 依据采集的力与时间变化关系, 通过傅立叶转换获取一阶频率。

图 5 给出了经过轴向加速激励后 1.3 s 和 2 s 时刻, 贮箱中间截面自由液面分布云图。从图 5 可知, 液面由于受到外界的扰动, 液面变化较为剧烈。

采集激励停止后自由液面对贮箱轴向方向的作用力随时间变化关系曲线, 对该曲线进行傅立叶变换, 如图 6 所示, 从中可知, 该状态下自由液面一阶频率为 0.600 Hz。

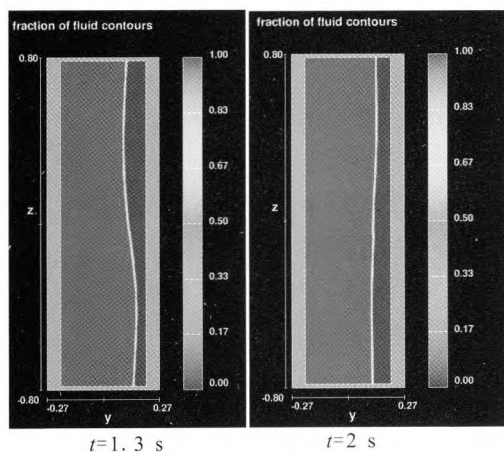


图5 贮箱在受到轴向方向激励后自由液面的分布云图

Fig. 5 Distribution nephogram of free liquid surface in the tank when the tank is excited in axial direction

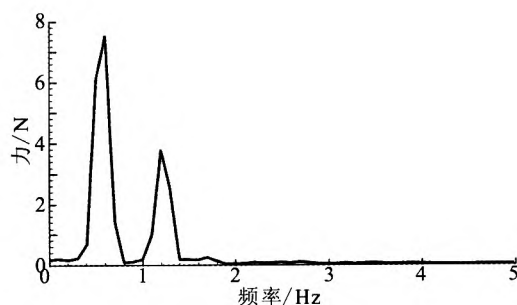


图6 傅立叶转换后作用力与频率变化曲线

Fig. 6 Curve of force and frequency changing after Fourier transform

综上所述,通过力传感器实测一阶自由晃动频率为 0.534 Hz,理论仿真计算的相应值是 0.600 Hz。

4 水平横向状态测试

4.1 现场试验结果

采用与竖直状态试验相同的试验方法,进行了水平横向状态晃动试验,水平横向状态与图1呈 90°。

试验过程中,电动缸的激振频率分别定在 1 Hz, 1.5 Hz 及 2 Hz 等频率下进行了多次试验。将采集到的数据进行 FFT 变换之后。在此仅列举了激振频率为 1 Hz 和 2 Hz 的 A1 传感器试验数据,曲线如 7 所示。

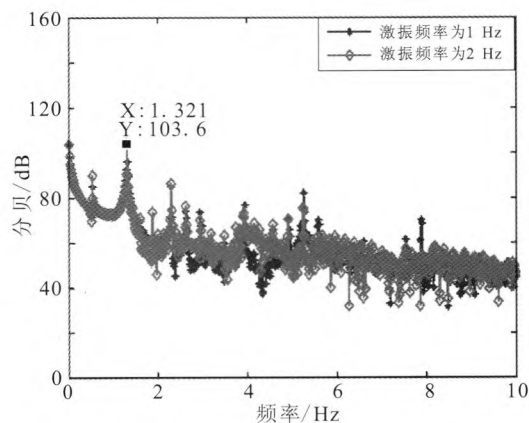


图7 贮箱水平横向状态不同激振频率下 A1 传感器曲线图

Fig. 7 Curves of A1 sensor at different excitation frequency when the tank is in horizontal state

分析图7可以得到水平放置时横向方向自由晃动的频率为 1.312 Hz。

4.2 CFD 仿真分析结果

贮箱在水平放置时介质横向自由晃动频率没有解析公式。

图8给出了经过横向加速激励后 1.3 s 和 2 s 时刻贮箱中间截面自由液面分布云图。从图8可知,液面由于受到外界扰动,液面变化较为剧烈。

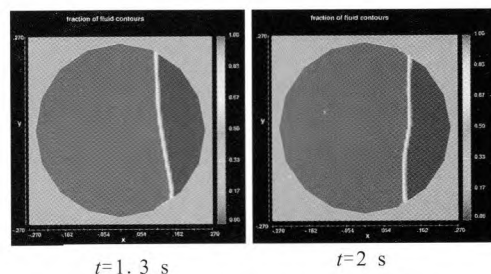


图8 贮箱在受到横向方向激励后自由液面的分布云图

Fig. 8 Distribution nephogram of free liquid surface in tank when the tank is excited in horizontal direction

采集激励停止后自由液面对贮箱横向方向的作用力随时间变化关系曲线,对该曲线进行傅立叶变换,如图9所示,从中可知,该状态下自由液面一阶频率为 1.350 Hz。

综上所述,通过力传感器实测一阶自由晃动频率为 1.312 Hz,理论仿真计算的相应值是 1.350 Hz。

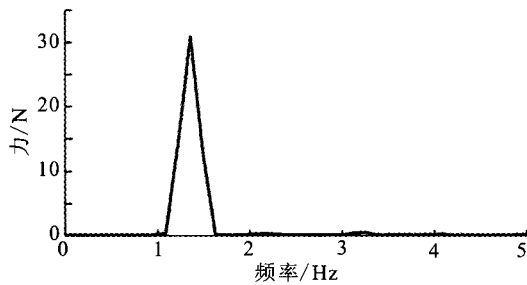


图 9 傅立叶转换后作用力与频率变化曲线

Fig. 9 Curve of force and frequency changing after Fourier transform

5 结论

晃动结果汇总如表 1 所示。

表 1 液体晃动结果汇总

Tab. 1 Summary of liquid sloshing results

	Hz		
	试验结果	理论解析解	CFD 仿真结果
竖直状态	1.343	1.350	无
轴向状态	0.534	无解析解	0.600
横向状态	1.312	无解析解	1.350

综合以上试验和理论结果, 可以得到以下结论:

1) 通过对比试验获得的晃动频率、理论解析算出的频率及 CFD 仿真计算的结果, 三者非常接近, 晃动频率比较容易识别。

2) 采用本文设计的试验系统测量贮箱中介

质晃动频率是行之有效的。

本系统对于不同规格、不同型式的贮箱均有很好的适应性, 每次测试仅需要设计转接工装及更换对应规格的气垫片即可。

参考文献:

- [1] 胡齐, 李永, 姚灿, 等. 大容积推进剂贮箱液体晃动性能试验[J]. 空间控制技术及应用, 2016, 42(3): 44-48.
- [2] 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及应用[J]. 力学进展, 2012, 42(4): 472-480.
- [3] 黄愉太, 杜发喜, 刘海, 等. 基于 SPH 方法的弹性体贮箱内液体晃动特性分析 [J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(2): 36-41.
- [4] 闫锦, 于洪亮, 宋玉超. 矩形液箱内液体晃动分析计算 [J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(1): 74-77.
- [5] 李松, 高芳清, 杨翊仁, 等. 液体晃动有限元模型分析及试验研究[J]. 核动力工程, 2007, 28(4): 54-57.
- [6] 陈健, 范晴云. 贮箱内推进剂微重力下晃动的有限元模拟及试验[J]. 上海航天, 2003 (4): 15-19.
- [7] 林宏, 彭慧, 董锴. 推进剂贮箱液体晃动的仿真研究与验证[J]. 强度与环境, 2011, 38(5): 25-30.
- [8] WU Nanjing, HSIAO Shih-Chun, WU Hanlun. Mesh-free simulation of liquid sloshing subjected to harmonic excitations [J]. Engineering analysis with boundary element, 2016, (64): 90-100.
- [9] QJ 2117-91. 地 - 地导弹、运载火箭液体推进剂晃动设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国航空航天工业部, 1991.

(编辑: 马 杰)