

# Cassini 贮箱防晃设计\*

邓林啸<sup>1,2</sup> 吕竹勇<sup>3</sup> 王天舒<sup>4</sup> 吕敬<sup>1†</sup>

(1.北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100191)(2.中国空气动力研究与发展中心,绵阳 621000)

(3.北京空天技术研究所,北京 100074)(4.清华大学 航空航天学院,北京 100084)

**摘要** 液体晃动会对飞行器动力学和控制系统造成影响,为了降低液体晃动带来的负面影响,本文从被动控制角度出发,对常见的 Cassini 贮箱提出几种防晃设计方案,并探索不同因素对贮箱防晃性能的影响.通过 Flow3d 商业流体软件对比分析环形挡板贮箱、扇叶挡板贮箱、环形浮板贮箱的性能后,给出了一种挡浮板复合结构贮箱,并通过对比验证了这种思路的可行性.

**关键词** 液体晃动, Cassini 贮箱, 防晃贮箱设计

中图分类号:V412.4

文献标志码:A

## 引言

在飞行器中,除了部分导弹和少数运载火箭使用固体燃料以外,其余大部分的飞行器包括航天器和航空器都使用液体燃料.而随着飞行器航程和任务复杂度的增加,液体燃料在飞行器整体质量上的占比越来越高,则自由液面所导致的液体晃动对飞行器的影响也越来越不可忽视<sup>[1]</sup>.所以如何通过贮箱结构设计的方法来抑制液体晃动显得尤为重要.

贮箱防晃的结构多种多样,包含隔板法、浮板法、隔膜法、泡沫法等多种结构<sup>[2]</sup>.从上世纪 60 年代起,国内外大量学者开始利用实验的方法对贮箱防晃展开了研究,并得到了一系列研究成果<sup>[3-6]</sup>.然而,实验方法对人力物力要求较高,且诸多实验条件环境较为苛刻.随着计算科学的发展,诸多数值算法相继提出,并被应用于液体晃动领域.Cho J R 和 Lee H W<sup>[7]</sup>用有限单元法分析了二维平面中含隔板储液箱内的液体晃动,通过数值方法得出了在二维矩形贮箱内晃动力和力矩在隔板的临界尺寸之下时会随着隔板高度和宽度的增大而均匀地减小,超过临界尺寸之后则不再改变,该研究为贮箱的防晃设计提供了值得借鉴的思路.但是该研究的对象是二维矩形贮箱内的理想流体,对于飞行器设计所要求的复杂三维贮箱以及黏性流体等意义不

大.Singal V, Bajaj J 和 Awalgaonkar N 等<sup>[8]</sup>使用 CFD 软件仿真了带隔板煤油贮箱内液体的晃动,提出在横向激励下,水平分布的纵向隔板能够极大地抑制贮箱内液体晃动的观点.在国内,岳宝增等研究了 Cassini 贮箱在微重环境下的液体晃动特征,得到了晃动的固有频率以及等效力学模型参数,并得出了周期脉冲激励下贮箱的晃动力和力矩的计算结果<sup>[9]</sup>.邓林啸等采用等效力学模型研究了飞行器的流固耦合问题,从频域的角度进行建模,分析了液体晃动对飞行器控制系统的影响,其认为液体晃动主要会使飞行器的纵向稳定性降低<sup>[10]</sup>.从以上研究可以发现,当前国外对于贮箱隔板防晃的研究大都局限于某一种形式的隔板,通过研究这种隔板的大小以及在贮箱内的安装位置等因素来探究防晃效果,缺乏不同隔板形式防晃效果的横向对比研究.而国内的研究则主要集中在液体晃动的特性以及晃动对控制系统产生的影响,较少涉及到对晃动抑制的讨论.

本文将首先设计出三种不同的结构贮箱:环形挡板贮箱、扇叶挡板贮箱、环形浮板贮箱.依据 Flow3d 数值仿真平台,在横向激励作用下,对比分析它们的防晃性能,其次探索充液比、结构尺寸、结构数量对贮箱防晃性能的影响.在综合分析、对比各种结构贮箱的优点和劣势后,提出了一种新型复

2020-12-30 收到第 1 稿,2021-04-17 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11572018)

† 通信作者 E-mail: lvjing@buaa.edu.cn

合结构的防晃贮箱,并对比验证了其防晃性能.为防晃贮箱结构设计提供了一种设计思路.

## 1 几种常见贮箱的防晃性能对比

Flow3d是由Flow Science公司所推出的一款拥有完整的CFD建模解决方案的软件,该软件可以精确地对多项流的自由液面进行追踪,非常适合于液体晃动的计算.它的计算全部采用结构化网格,其使用的FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation)技术使结构化网格也能够非常好地描述各种复杂的几何外形.Flow3d使用VOF技术来追踪流体表面的位置,并且使用非惯性参考系模块来实现对动边界问题的模拟,避免了动网格方法的使用,提高了计算的效率.本文依据Flow3d商业流体软件验证不同结构贮箱的防晃效果,选取挡板结构和浮板结构进行设计分析,其中Flow3d中关键参数如下:计算完成时间为10 s,时间步长为变步长,贮箱内液体为不可压缩粘性流体,湍流选项为RNG模式,采用非惯性参考系,表面张力系数设置为0.073,接触角为90度,设置输出步长为0.02 s,网格采用边长为0.01m的正方体网格,由Flow3d中的FAVOR功能自动去使网格贴合复杂的贮箱和隔板表面.针对Cassini贮箱,设计出不同防晃结构贮箱,见图1所示,左上到右上四幅图分别为贮箱外轮廓尺寸、环形挡板贮箱、扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱三维示意图,左下和右下分别为扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱结构示意图.上述贮箱直径均为1 m,高均为2 m,其中,防晃板厚度均取0.05 m.液体均取20 °C时的水,密度为1000 kg/m<sup>3</sup>.

在常重 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ( $-z$ 方向)、充液比50%的情况下,对贮箱施加沿 $x$ 方向的平动激励 $x=0.1\sin(2t)\text{m}$ 和转动激励 $\theta_x=0.01\sin(2t) \text{ rad}$ ,三种防晃贮箱及无防晃结构贮箱晃动力和晃动力矩见图2、图3所示.

从图2、图3中可以看出在 $x$ 方向平动激励下,主要产生了 $x$ 方向晃动力和绕 $y$ 轴晃动力矩(数值较大);在 $x$ 方向转动激励下,主要产生了 $y$ 方向晃动力和绕 $x$ 轴晃动力矩.相对于无防晃结构贮箱,环形挡板贮箱防晃效果降低了晃动力,然而晃动力矩却有所增加,这是因为环形挡板贮箱的环形板固定于贮箱内壁,在受到横向激励后,作用于环形板上 $z$ 方向的力引起的;扇叶挡板贮箱在横向平动激励和转动激励下,均能降低主要晃动力和晃动力矩,这是因为扇叶排布方向垂直于液体晃动方向,

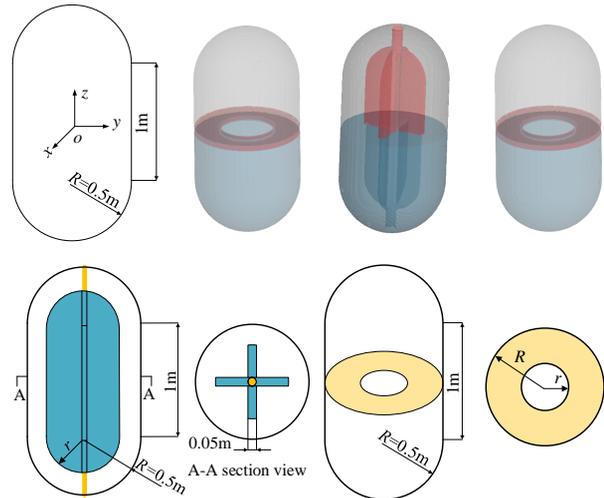


图1 外形尺寸及环形挡板、扇叶挡板和环形浮板贮箱示意图  
Fig.1 Outline dimension and schematic diagram of annular baffle, fan blade baffle and floating plate structure tank

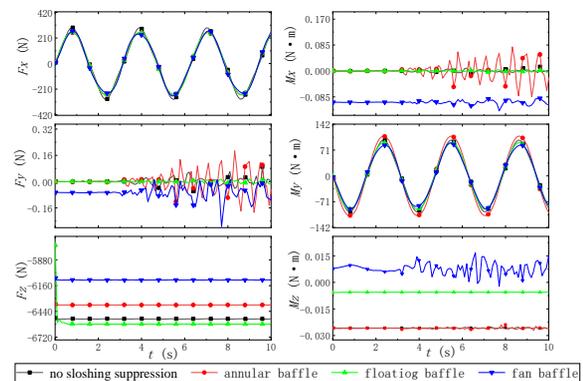


图2 平动激励时不同贮箱晃动力、力矩  
Fig. 2 Shaking force and moment of different tanks under translational excitation

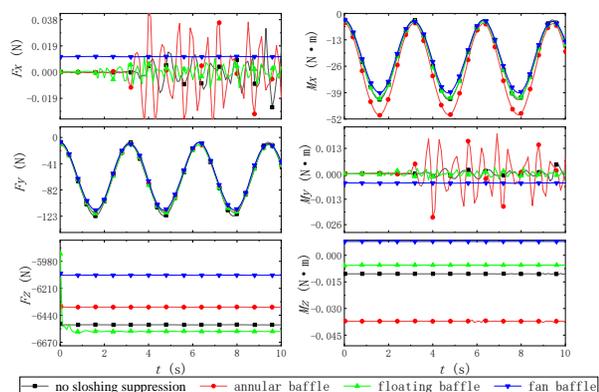


图3 转动激励时不同贮箱晃动力、力矩  
Fig. 3 Shaking force and moment of different tanks under rotational excitation

所以对液体晃动的抑制性好;环形浮板贮箱在横向平动和转动激励下,主要晃动力和晃动力矩也出现了降低,这是因为浮板能够跟随自由液面上下运动,相当于增加了液体阻尼,所以能够有效地抑制

液体晃动.这三种防晃贮箱中,扇叶挡板贮箱对主要晃动力、力矩抑制效果表现得最好,然而对其余方向上晃动力和晃动力矩抑制效果不是很好.

上述描述,扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱防晃效果表现得更好,故而本文选取这两种设计方案进行分析.

## 2 扇叶挡板贮箱

扇叶挡板贮箱尺寸和机构示意图如图 1 左下所示,其内部排列着竖直固定扇叶挡板,扇叶剖面与 Cassini 外壳形状一致,同时上下半圆与 Cassini 贮箱上下半球保持同心,扇叶叶片大小和数量均可调整,经过前面的对比分析可以看出这种贮箱对于横向激励具有很好的防晃效能,本文分析不同的扇叶尺寸和叶片数量对防晃性能的影响.

### 2.1 不同扇叶尺寸

扇叶尺寸可由扇叶半径进行调整,保持充液比 50% 和 Cassini 贮箱外壳尺寸不变,扇叶半径  $r$  分别取 0, 0.2, 0.3, 0.4 m 时,施加相同平动激励  $x=0.1\sin(2t)$  m 和转动激励  $\theta_x=0.01\sin(2t)$  rad,贮箱响应中主要晃动力和晃动力矩峰值响应如图 4 所示.

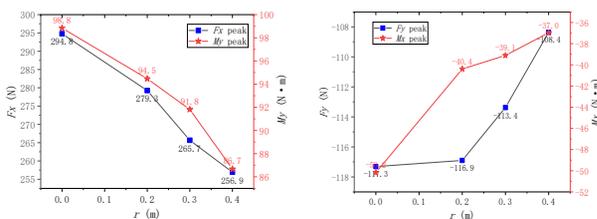


图 4 平动、转动激励下不同尺寸晃动力、力矩峰值对比

Fig. 4 Comparison of dynamic and torque peak values of different sizes under translational and rotational excitation

从图 4 可以看出,无论是对于平动激励还是转动激励,随着扇叶尺寸的增加,响应晃动力和晃动力矩峰值绝对值均减小,故而对于扇叶挡板贮箱,尺寸是越大越有助于抑制液体晃动,然而在实际设计中还需要考虑贮箱重量和充液量的指标.

### 2.2 不同扇叶片数

对于扇叶挡板结构,探究其扇叶片数对液体晃动的影响.保持贮箱充液比为 50%、每片扇叶尺寸不变,将扇叶片数分别取 4, 6, 8, 不同扇叶片数示意图如图 5 所示.对扇叶挡板结构 Cassini 贮箱施加平动激励  $x=0.1\sin(2t)$  m 和转动激励  $\theta_x=0.01\sin(2t)$  rad,分别分析其贮箱内液体晃动响应,其主要晃动力和晃动力矩峰值如图 6 所示.

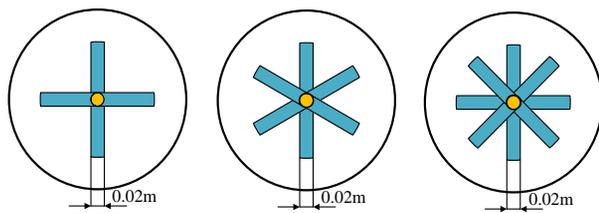


图 5 不同扇叶片数示意图

Fig. 5 Schematic diagram of different blade numbers

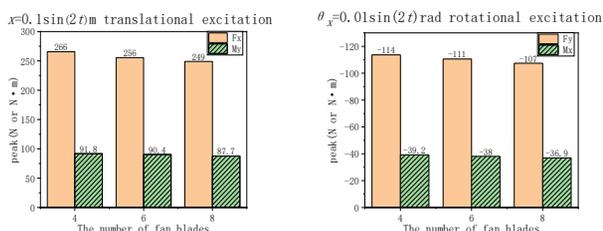


图 6 平动、转动激励下不同扇叶片数响应峰值

Fig. 6 Response peak value of different blade numbers under translational and rotational excitation

从图 6 可以看出,在横向平动激励和转动激励下,随着扇叶数量的增加,液体晃动力和晃动力矩振荡峰值均出现了明显下降,故而在实际设计中,可以通过增加扇叶数量来达到防晃效果,然而我们需要注意,在增加扇叶数量的同时贮箱重量增加,携带液体燃料比重下降.

## 3 环形浮板贮箱

环形浮板贮箱具有结构简单、重量轻等优点,其尺寸及结构示意图如图 1 右下所示,贮箱内部有一个轻型环形浮板,其密度为  $500\text{kg/m}^3$ ,静平衡时刚好一半体积浸入水中.浮板能够跟随自由液面上下运动,从而更好地抑制液体的晃动.可以看到其浮板尺寸由内径  $r$  决定.本文探究不同充液比及环形板尺寸对液体晃动的影响.

### 3.1 不同充液比

保持浮板内径为 0.5 m 不变,改变贮箱内液体充液比,以不同液面高度  $h$  来衡量充液比,下面在  $h/R=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$  的情况下,分别施加相同平动激励  $x=0.1\sin(2t)$  m 和转动激励  $\theta_x=0.01\sin(2t)$  rad,绘出其主要晃动力、力矩图如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,在平动激励下,随着充液比的增加,晃动力逐渐增大,然而晃动力矩在充液比 50% 的时候达到最大,其原因是此时液体质心相对贮箱中心偏移最大,故而激励力矩变相增大,从而导致最终的结果是此时晃动力矩最大;在转动激励下,随着充液比的增加,液体晃动力振幅增加,

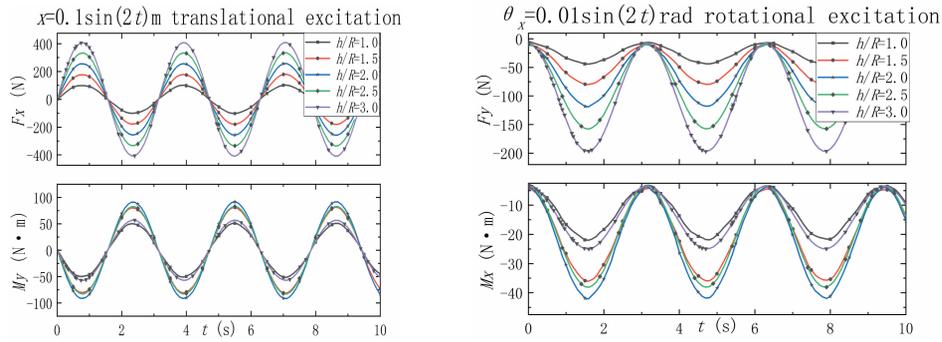


图7 平动、转动激励下不同充液比晃动力、力矩

Fig. 7 Shaking force and torque with different filling ratios under translational and rotational excitation

晃动力矩峰值在充液比50%的时候达到最大。

### 3.2 不同浮板尺寸

贮箱内液体保持50%充液比不变,浮板外径R为0.5 m.在r分别取0,0.125,0.25,0.375,0.5 m的情

况下,分别施加相同平动激励 $x=0.1\sin(2t)$  m和转动激励 $\theta_x=0.01\sin(2t)$  rad,其主要晃动力、力矩峰值如图8所示。

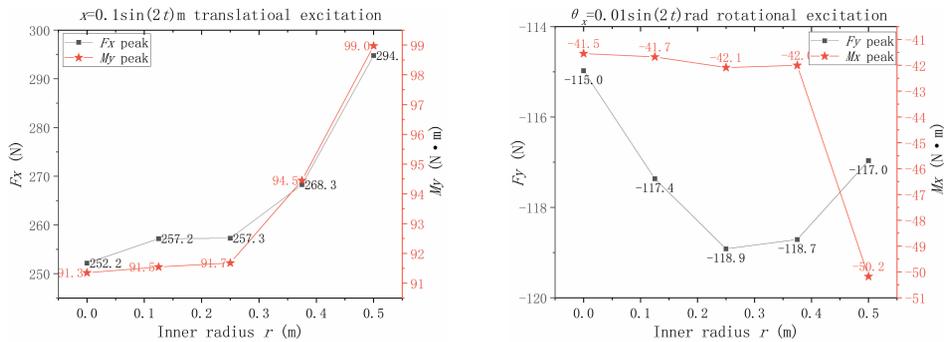


图8 平动、转动激励下不同浮板主要晃动力、力矩峰值

Fig. 8 Peak value of main shaking force and moment of different floating plates under translational and rotational excitation

从图8中可以看出,在横向平动激励下,随着浮板内径的增加,即随着浮板面积的减少,晃动力和晃动力矩峰值均增加.所以环形浮板贮箱在横向平动激励作用时,浮板面积愈大,晃动力和晃动力矩下降愈明显,防晃效果愈好;在横向转动激励下,随着浮板内径的增加(浮板面积减少),晃动力峰值变化很小,晃动力矩峰值逐渐降低,且在有无浮板存在时差值明显,而晃动力变化规律不明显的原因是转动时液体和浮板重力分量的参与。

### 4 档浮板复合结构贮箱

根据上述对扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱的分析,扇叶挡板贮箱能够很好地抑制横向激励下的液体晃动,然而其具有结构重量大的缺点;浮板贮箱也能够抑制横向激励下的液体晃动,然而其抑制效果没有扇叶挡板贮箱好.本节综合浮板和扇形挡板优点,提出档浮板复合结构贮箱,示意图如图9

所示.该结构包含三个部分,外壳、扇形挡板和环形浮板,扇形挡板通过中间的连接杆竖直固定在外壳上,浮板能够沿着内壁上下运动,从而集成两种结构贮箱优点。

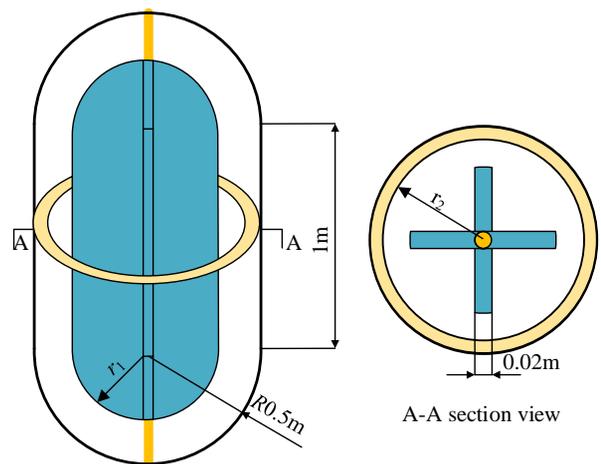


图9 档浮板复合结构贮箱

Fig. 9 Composite structure tank with baffle floating plate

取扇形挡板半径  $r_1=0.25$  m, 浮板内径  $r_2=0.375$  m 的档浮板复合结构贮箱, 与相同尺寸的扇叶挡板贮箱和浮板贮箱对比其防晃性能. 贮箱内液体保持

50% 充液比不变, 对上述三种贮箱分别施加相同平动激励  $x=0.1\sin(2t)$  m 和转动激励  $\theta_x=0.01\sin(2t)$  rad, 其主要晃动力、力矩响应如图 10 所示.

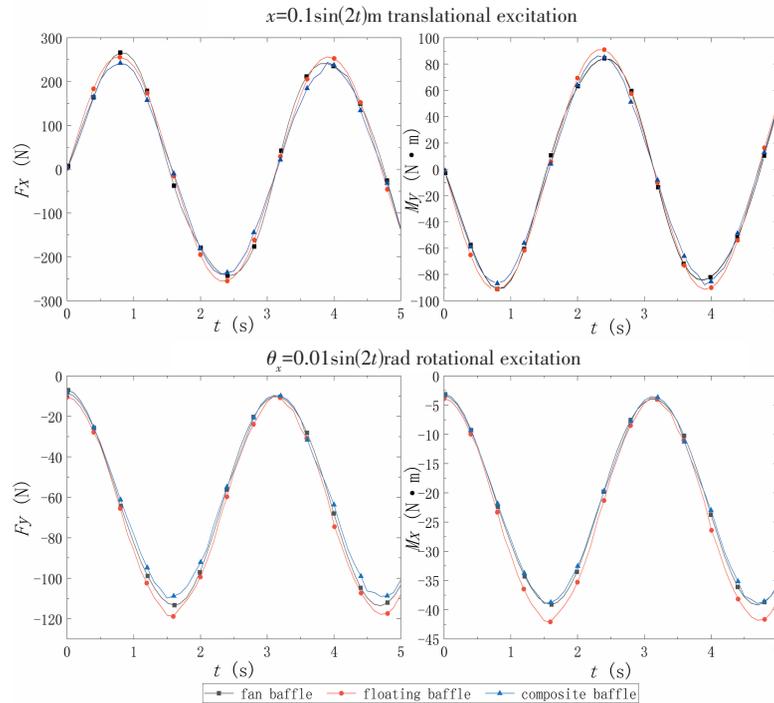


图 10 平动、转动激励下几种结构贮箱防晃性能对比

Fig. 10 Comparison of anti sway performance of tanks with different structures under translational and rotational excitation

从图 10 可以看出, 在相同的横向平动激励和转动激励下, 本文设计的档浮板复合结构贮箱的晃动力和晃动力矩更小, 即相对于扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱而言, 档浮板复合结构贮箱的防晃性能更加优异.

## 5 结论

为了降低液体晃动对飞行器的负面影响, 本文从被动控制的角度出发, 分析对比了常见两种隔板贮箱和浮板贮箱在横向激励作用下的防晃性能, 同时从充液比和挡板结构尺寸、数量等角度深入探讨了扇叶挡板贮箱和环形浮板贮箱的防晃效果, 最终在上述分析基础上, 提出了档浮板复合结构贮箱. 最后, 通过不同贮箱对比分析了档浮板复合结构贮箱在横向激励下的防晃性能. 本文为飞行器贮箱防晃设计领域提供了一定的设计思路.

## 参 考 文 献

- 1 苗楠, 王天舒, 李俊峰. 微重环境下液体晃动研究进展. 力学与实践, 2016, 38(3): 229~236 (Miao N, Wang T S, Li J F. Research progress of liquid sloshing in micro

- gravity environment. *Mechanics and Practice*, 2016, 38(3): 229~236 (in Chinese))
- 2 潘恺. 运载火箭芯一级贮箱浮板式防晃结构设计及性能分析 [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015 (Pan K. Design and performance analysis of floating plate anti sway structure for primary core tank of launch vehicle [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese))
- 3 Maleki A, Ziyaeifar M. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 311(1): 372~385
- 4 Alan S, Humberto H. Slosh baffle design and test for spherical liquid oxygen and liquid methane propellant tank for a lander. *NASA Technical Reports*, 2010: 28~31
- 5 Hasheminejad S M, Mohammadi M M. Effect of anti-slosh baffles on free liquid oscillations in partially filled horizontal circular tanks. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 49~62
- 6 Hasheminejad S M, Mohammadi M M, Jarrahi M. Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited circular tanks equipped with baffles. *Journal of Fluids and Structures*, 2014(44): 97~114
- 7 Cho J R, Lee H W. Numerical study on liquid sloshing in baffled tank by nonlinear finite element method. *Computer*

- Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2004, 193 (23/26): 2581~2598
- 8 Singal V, Bajaj J, Awalgaonkar N, et al. CFD Analysis of a kerosene fuel tank to reduce liquid sloshing. *Procedia Engineering*, 2014, 69: 1365~1371
- 9 岳宝增, 于丹. 微重环境下 Cassini 贮液腔中液体晃动特性研究. *动力学与控制学报*, 2012, 10(1): 76~80 (Yue B Z, Yu D. Research on liquid sloshing characteristics in Cassini container in micro-gravity environment. *Journal of Dynamics and Control*, 2012, 10(1): 76~80 (in Chinese))
- 10 邓林啸, 吕竹勇, 王天舒, 等. 液体晃动对飞行器控制系统影响分析. *动力学与控制学报*: 1-8, 2021, 19(5): 69~79 (Deng L X, Lv Z Y, Wang T S, et al. Influence of liquid sloshing on aircraft control system. *Journal of Dynamics and Control*: , 2021, 19(5): 69~79 (in Chinese))

## DESIGN OF SLOSHING SUPPRESSION FOR CASSINI TANKS \*

Deng Linxiao<sup>1,2</sup> Lü Zhuyong<sup>3</sup> Wang Tianshu<sup>4</sup> Lü Jing<sup>1†</sup>

(1. *Beihang University, Beijing 100191, China*)

(2. *China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China*)

(3. *Beijing institute of aerospace technology, Beijing 100074, China*)

(4. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract** Liquid sloshing will affect dynamics and control of aircraft. In order to reduce the negative impact of liquid sloshing, this paper proposes several sloshing suppression design schemes for common Cassini tanks from the perspective of passive control, and explores influences of different factors on the sloshing suppression performance. After comparing and analyzing the performance of annular baffle tank, fan baffle tank and annular floating plate tank by FLOW3D, a compound structure tank with baffle plate is proposed, and the feasibility is verified by a comparative study.

**Key words** liquid sloshing, Cassini tank, sloshing suppression design

Received 30 December 2020, revised 17 April 2021.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11572018)

† Corresponding author E-mail: lvjing@buaa.edu.cn