

使用 LS-DYNA 的 ICFD 进行液体燃料发动机的晃动流固耦合模拟

王强, 张永召, 袁志丹, 黎勇

(上海仿坤软件科技有限公司, 上海, 201102)

摘要: 随着运载火箭的运载能力的不断提高, 所携带液体燃料的重量占火箭总体质量越来越大, 某些型号甚至达到了 90% 以上。使得充液晃动对于整个航天器的影响已经不可忽视。传统的防晃板设计多采用实验方法或保守的静力仿真分析, 本文采用数值模拟方法针对航天器贮箱, 利用 LS-DYNA 中的 ICFD 双向流固耦合功能对贮箱液体晃动及水平环防晃板的防晃效果进行研究。模拟在一定简谐激励下, 水平环对液体晃动防晃影响。在流固耦合仿真的过程中, 通过一个模型可以同时获得液体三维晃动及防晃板的变形信息, 包括液体在晃动过程中的质心变化信息, 防晃板的应力、变形信息, 可用于指导防晃板的设计。结果表明: 使用 LS-DYNA 的 ICFD 双向流固耦合功能可以对航天器贮箱的防晃板设计提供一定的帮助。

关键词: LS-DYNA 流固耦合 防晃板 强度 航天器

引言

贮箱内液体推进剂在火箭飞行过程中可能会产生剧烈的晃动, 而对整体系统动力学造成显著的影响, 严重时甚至导致任务失败^[1]。1961 年土星 I 号发射, 由于液体大幅晃动造成某发动机提前关机, 1998 年 NASA 发射“爱神星”探测器 (NEAR) 在轨道修正中由于液体晃动导致姿态失稳, 最终任务延时 13 个月; 2007 年猎鹰 1 号在分离后, 二级火箭由于液体晃动发生不可控的滚转, 导致卫星未能精确入轨道。1997 年发射的 Cassini-Huygens 探测器, 携带液体燃料重量占总重的 60%, 有些运载火箭携带的燃料比重占到总重的 90% 以上, 因此对贮箱内液体晃动问题的研究一直是宇航工程中一个不可忽视的课题。

各国的学者对贮箱液体的晃动已展开了深入的研究^[2-4]。Abramson 等^[5-6]通过理论分析与实验论证相结合, 研究了不同贮箱内的液体晃动问题, 得出了液体晃动对贮箱结构的影响以及晃动频率和防晃板面积之间的关系。Arndt 等^[7]针对多种刚性圆柱贮箱, 研究了在不同的贮箱底板对液体晃动的阻尼特性的影响, 得出了圆柱贮箱的充液高度对晃动阻尼特性有很大的影响。VaibhavSingal 等^[8]利用 VOF 方法研究了部分充液油箱的晃动特性, 分析了在有隔板与无隔板下液体的晃动幅度, 但是很少有针对防晃板的强度分析进行成果发表, 而轻量化的趋势, 必须要关注防晃板的强度问题, 通过静力仿真分析或经验方法, 对轻量化中防晃板的强度研究显然是不够的。

本文采用数值模拟方法针对某航天器贮箱, 利用 LS-DYNA 中的 ICFD 双向流固耦合方法对贮箱液体晃动及水平环防晃板的防晃效果进行研究。模拟在一定简谐激励下, 水平环对液体晃动防晃影响, 可以在一个模型里同时获得液体燃料的晃动信息和防晃板的应力信息, 为液体燃料发动机安全性设计提供借鉴。

1 LS-DYNA 软件介绍

LS-DYNA 软件由 J. O. Hallquist 博士 1976 年在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室主持开发完成, 可用于分析爆炸与高速冲击等过程中的大变形动力响应问题, 能够对爆炸冲击波的生成、传播与耦合过程进行模拟仿真和数值计算, 已经广泛应用于国防、民用等领域^[9]。

LS-DYNA 的发展战略思想是使用一个程序来无缝地解决多种物理问题、多个分析阶段问题和多种尺度问题。LS-DYNA 程序具有 Lagrange、Euler、ALE、SPG、ICFD、CESE、EM 等算法^[10]。

LS-DYNA 非常重视其在流固耦合方面的分析能力, 开发了三个模块 ALE\FSI、ICFD\FSI、CESE\FSI 来进行流固耦合分析。基本上为工程中所有的流固耦合问题提供了解决方法。而且不需要借助第三方的软件就可以实现流体和固体的双向耦合。这三个模块的双向耦合都同时支持热耦合的计算。

LS-DYNA 流固耦合分析的特点:

- 1) 支持可压缩、不可压缩流体的流-固耦合;
- 2) 提供三种流固耦合模块供用户针对不同的问题进行选择;
- 3) 不需要第三方软件即可进行双向耦合;
- 4) 可利用 LS-DYNA 保持领先的并行计算能力。

ALE\FSI 侧重于瞬态的流固耦合,可解决可压缩、不可压缩的流体问题、多用于水上迫降、鸟撞和爆炸问题上。ICFD\FSI 侧重于解决不可压缩流体问题,可加入湍流模型和动网格分析能力,对不可压缩流体问题,精度更高。CESE\FSI 侧重于解决可压缩流体问题,适用于解决超高速的流体问题、激波问题,相对于 ALE\FSI 精度更高,

2 ICFD 理论算法介绍

ICFD(Incompressible CFD Module)是 LS-DYNA 的非可压流体计算模块,其主要用来模拟汽车、航空、船舶等行业涉及到的非可压流体动力学问题。ICFD 既可以求解纯流体问题,亦可与 LSDYNA 的其他模块进行耦合求解。

LS-DYNA 中的 ICFD 模块一开始就被设计为一个可以提供准确性以及具有可扩展性之流体力学计算的多物理求解器,同时,可以简单地与 LS-DYNA 其他物理模块整合起来。ICFD 持续的发展重心放在了与新模块整合、耦合算法的改良、计算效率的增进以及考虑到非计算流体力学或固体力学背景的使用者,其耦合计算时,步骤也非常简单。

该功能模块求解不可压缩流体力学方程组,同时它在与固体结构进行耦合时使用的方法是强耦合方法,而且它可以根据具体问题的流固耦合强弱程度来选择不同的耦合策略,如当流固耦合较弱时可采用显式方法,而当流固耦合较强时则可采用隐式方式。该模块除了可以很容易地处理自由界面流之外,还通过采用守恒的欧拉水平集 (Eulerian level set) 界面追踪技术使其可以很方便地求解两相流。

该模块还提供了一些基本的湍流模型,供用户选择。此外,我们还将求解流体热传导方程的程序与 LS-DYNA 中的固体传热模块采用统一的方法耦合在了一起,从而可以用来求解复杂的共轭传热问题。

另外,该模块还首次在 LS-DYNA 中为用户提供了全自动三维体网格生成功能,这大大地简化了用户的前处理过程。对于流-固耦合问题,其每次网格的移动采用的是任意拉格朗日欧拉方法 (ALE),而在实际模拟计算过程中,一旦发现有大的位移发生时,模块会自动进行网格重构以便初步确保网格质量。并且,在不可压缩流自身的计算过程中,其网格也可以随着流场的变化来自动地进行调整。另外还有一个重要应用是用来生成边界层网格,这种各向异性网格自动生成技术在当需要计算流体近壁剪切应力时变得尤为重要。

LS-DYNA 中 ICFD 的特点:

- 1).自动划分流体网格(2D、3D),边界层网格也是自动划分;
- 2).网格自动优化&自适应网格;
- 3).FSI 流固耦合、流固热耦合;
- 4).自由表面流(水平集方法);
- 5).双相流模拟;
- 6).湍流问题模拟;
- 7).适用于牛顿流体、非牛顿流体;
- 8).适用于 SMP 和 MPP 并行运算。

3 有限元模型

3.1 结构说明

如图 1 所示,液体燃料发动机的总高是 2950mm,直径 1080mm。内部装有液态氢为燃料。图 1b 剖面图中的红色为一水平防晃板。

如图 2 所示为发动机内部水平防晃板的结构图,实际发动机内部有许多块防晃板,本文只是为了说明这

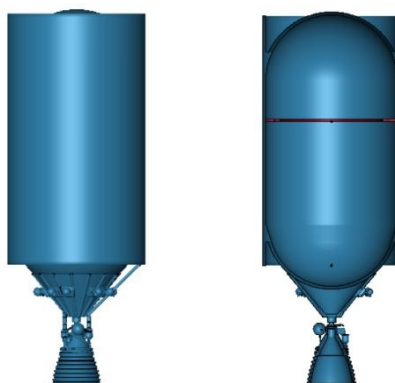
种方法的可行性，只建了一块防晃板，且防晃板的材质为弹性模量为 1Gpa 的柔性变形材料。防晃板的厚度为 20mm,外径为 1000mm,内径为 800mm.

3.2 有限元模型

使用*ICFD_CONTROL_IMPOSED_MOVE 将晃动加载在贮箱上，贮箱及喷管由于变形较小，赋予其刚体材料，防晃板赋予其为弹性模量 1Gpa、泊松比 0.3、密度为 1100kg/m³ 的某种变形材料。

如图 3 所示，贮箱按照一定的强制正弦旋转速度进行加载，最大旋转速度为 0.16rad/s,绕 Z 轴左右晃动旋转（竖直方向为 Y 方向）。旋转中心在尾喷管的顶端位置。箱内充液高度如图 4 所示。

整体模型使用*LOAD_BODY_Y 进行重力加载。



a. 正视图 b.剖面图

图 1 液体燃料发动机结构模型图

Fig.1 liquid rocket motor structure model



图 2 防晃板结构图

Fig.2 anti-sloshing plate structure model

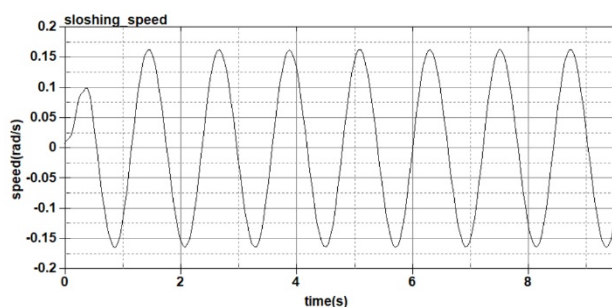


图 3 晃动加载曲线

Fig.3 sloshing load curve

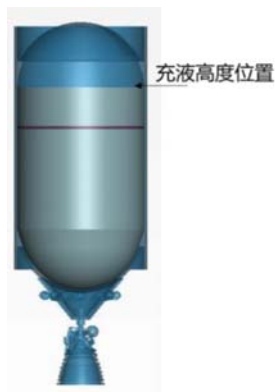


图 4 充液高度图

Fig.4 liquid height

使用*ICFD_BOUNDARY_FSI 定义液体与箱体、防晃板的双向流固耦合、同时定义箱体及防晃板为无滑动边界。

4 仿真结果

如图 5 所示，是贮箱内部的液体晃动、液体压力云图，液体压力最大为 $1.6e^4\text{Pa}$ 。由于有重力作用，ICFD 会在第一个时间布对液体受的重力进行压力初始化。液体的晃动随着晃动时间的累计，晃动幅度变大，自由面变大。同时可以获得晃动力和晃动力矩的变化，如图 7 所示，是防晃板受到液体的合力矩随时间的变化曲线，水平防晃板受到的合力矩随着晃动进行周期性变化，在 4.2s 内，其最大力矩为 $85\text{N}\cdot\text{M}$ 。图 8 为液体在竖直方向上的质心变化曲线，质心的高度越来越高，总的计算时间算到了 4.2s，最大达到了 0.126m。

图 6 为在晃动过程中，防晃板上的应力变化。可以得到晃动过程中任一时刻的应力变化信息，本例中，防晃板受到的最大应力为 $4e^4\text{pa}$ ，用户可以根据应力和变形值对防晃板的厚度进行优化，因此可以为防晃板的强度设计提供参考。

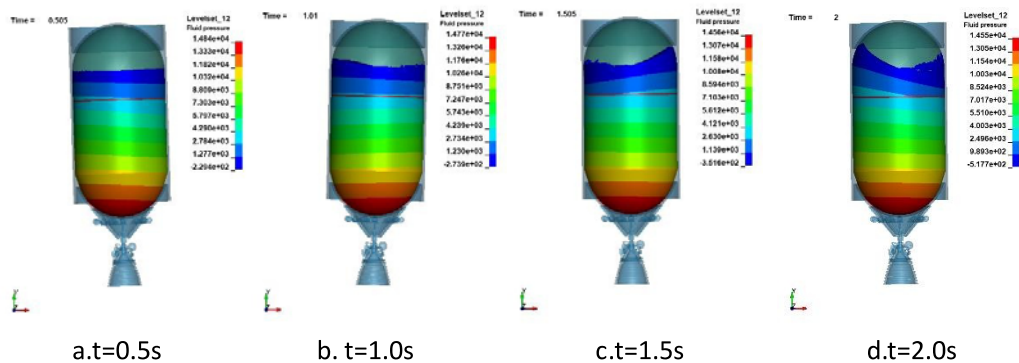


图 5 晃动和液体压力云图

Fig.5 sloshing and liquid pressure fringe

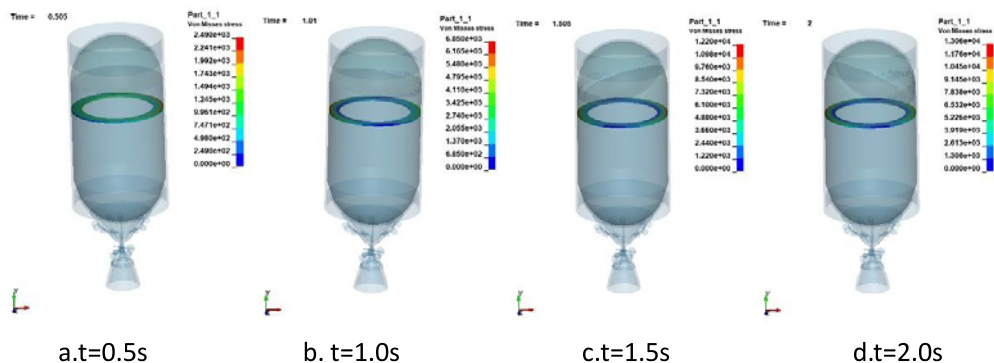


图 6 防晃板应力云图

Fig.6 anti-sloshing plate stress fringe

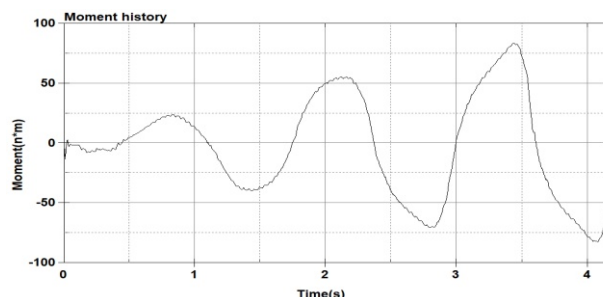


图 7 防晃板受到的力矩变化曲线

Fig.7 moment history curve on plate

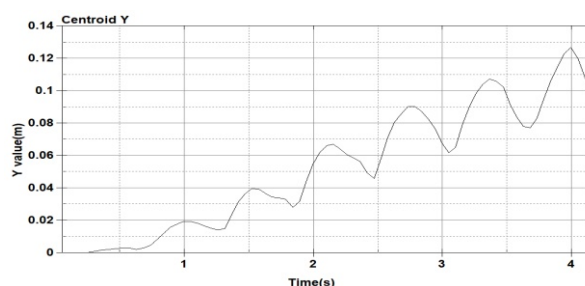


图 8 液体燃料质心变化曲线

Fig.8 liquid centroid change history curve

5 结论

采用数值模拟方法针对航天器贮箱，利用 LS-DYNA 中的 ICFD 双向流固耦合方法对贮箱液体晃动及水平环防晃板的防晃效果进行研究。模拟在一定简谐激励下，水平环对液体晃动防晃影响，在一个模型里同时获得液体燃料的晃动信息和防晃板的应力信息，为液体燃料发动机安全性设计提供借鉴，后续工作：

后续可以更改防晃板的结构参数并采用多层防晃板进行晃动比较。并结合实际产品的工作工况进行加载。ICFD 可以输出每一步的液体对固体的加载信息，如果结构变化不大的话，在进行一次流固耦合分析后，可以利用输出的液体对固体的载荷信息，用 LS-DYNA 隐式静力功能做纯结构的快速计算。

6 参考文献：

- [1] BAYLE O,HULLIER VL,GANET M,etal.Influence of the ATV propellant sloshing of the GNC performance[R].AIAA-2002-4845,2002.
- [2] 宋辰宁,周国良,李小军,等.非规则环形圆柱水箱液体晃动动力特性试验[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(1): 187-192.
- [3] SANAPALA V S,RAJKUMAR M,VELUSAMY K,et al.Numerical simulation of parametric liquid sloshing in a horizontally baffled rectangular container[J].Journal of Fluids and Structures,2018,76:229-250.
- [4] CHOI H,CHOI J S,KIM M H.Sloshing reduction in a swaying rectangular tank by an horizontal porous baffle[J].Ocean Engineering,2017,138:23-34.
- [5] ABRAMSON H N.The dynamic behavior of liquid in moving containers.NASASP-106[J].Nasa Special Publication,1966,106(7).
- [6] ABRAMSON H N,GARZA L R.Some measurements of the effects of ring baffle in cylindrical tanks[J].Journal of Spacecraft & Rockets,2015,1(5):560-562.
- [7] ARNDT T O,DREYER M E.Damping behavior of sloshing liquid in laterally excited cylindrical propellant vessels[J].Journal of Spacecraft & Rockets,2008,45(5):1085-1088.
- [8] SINGAL V,BAJAJ J,AWALGAONKAR N,et al.CFD analysis of a kerosene fuel tank to reduce liquid

sloshing[J].Procedia Engineering,2014,69 (1): 1365-1371.

[9] 尚晓江, 苏建宇, 王化峰. 基于 LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008:1-3.

[10] 陆慧莲. 基于 LS-DYNA 和 HyperMesh 的某型飞机垂尾前缘鸟撞分析[J]. 航空工程进展, 2013, 4(4):498-502.