

微重力条件下上面级贮箱液体推进剂自由界面变形数值模拟研究

肖立明¹, 李欣¹, 胡声超¹, 刘畅¹, 周炳红²

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 上面级在滑行期间经历微重力环境, 其贮箱内的液体推进剂若管理失当, 将影响主发动机的再次启动。文章采用流体体积法对微重力条件下某上面级液氧贮箱内自由界面变形问题进行数值模拟, 并与理论分析值进行对比。研究表明, 数值模拟计算得到的液体爬升高度和表面张力波传播速度与流体力学理论符合较好, 证明该方法能够预示微重力条件下上面级液氧贮箱内的流体运动特性, 可为后续上面级推进剂管理技术方案的制定及相关试验验证提供参考。

关键词: 上面级; 微重力; 贮箱; 推进剂管理; 自由界面; 表面张力; 数值模拟

中图分类号: V475.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)02-0115-05

DOI: [10.12126/see.2020.02.002](https://doi.org/10.12126/see.2020.02.002)

Numerical simulation of free interface deformation of liquid propellant in upper stage tank under microgravity condition

XIAO Liming¹, LI Xin¹, HU Shengchao¹, LIU Chang¹, ZHOU Binghong²

(1. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The upper stage tank is in a microgravity environment during the inertial flight. If the liquid propellant in the tank is not well managed, the normal restart of the main engine would be affected. In this paper, the Volume of Fluid method is adopted to simulate the free interface deformation of the propellant in an upper stage tank under the microgravity condition, and the results are compared with the theoretical analysis results. It is shown that the liquid climbing height and the surface tension wave propagation velocity obtained by the numerical simulation are in good agreement with the values from the fluid mechanics theory, indicating that the calculation method can be used for predicting the fluid motion characteristics of the upper stage liquid oxygen tank under the microgravity condition, to provide a reference for the propellant management of the subsequent upper stage as well as a support for the related test verification work.

Keywords: upper stage; microgravity; tank; propellant management; free interface; surface tension; numerical simulation

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2020-03-08

引用格式: 肖立明, 李欣, 胡声超, 等. 微重力条件下上面级贮箱液体推进剂自由界面变形数值模拟研究[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(2): 115-119

XIAO L M, LI X, HU S C, et al. Numerical simulation of free interface deformation of liquid propellant in upper stage tank under microgravity condition[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(2): 115-119

0 引言

液体火箭上面级在飞行过程中,经常关闭主发动机进行空间惯性飞行(微重力滑行)。为保证滑行一段时间之后主发动机顺利再启动,一般在微重力滑行期间采取姿控发动机沉底或者推进剂管理装置等来解决推进剂管理问题^[1-2]。上面级贮箱内同时存在液体推进剂和增压气体,研究微重力条件下气液自由界面在不同加速度条件下的变形过程以分析贮箱内气液两相的运动状态,是推进剂管理涉及的关键内容之一。

微重力流体管理不仅应用在火箭上面级,也应用在卫星的变轨和调姿过程。落塔微重力试验是微重力流体管理研究的重要验证方法,可通过试验获取重定位过程中的推进剂沉底时间,进而确认推进剂管理方案是否可行^[3-5],但其存在周期长、成本高的不足^[6]。数值模拟研究可以自主加载边界条件,对比落塔试验更长的时间范围进行分析,因此日益得到重视。赵志建等^[7]和王毅等^[8]采用最小能量法对自由界面的平衡形态进行数值模拟,但未考虑自由界面变形的动力学过程,只计算了最终的自由界面平衡形态。刘春辉^[9]利用VOF-3D软件计算微重力条件下40%充液旋转贮箱中的液体再定位过程,再现了推进剂沉底过程中的喷泉现象,得到的流型与实验结果一致,显示了数值模拟方法的准确、有效。

上面级贮箱在尺寸、形式、材料、推进剂以及微重力条件等方面均与传统的卫星贮箱存在一定差异,导致其推进剂管理方案明显不同于卫星贮箱的。国内目前在微重力流体管理方面的研究主要集中在卫星贮箱应用上,对上面级贮箱的相关研究较少。陈健等^[10]近年来开展了关于火箭液氧贮箱缩比模型的实验研究和相应的数值模拟研究,但数值模拟采用的是二维有限元方法,未考虑表面张力效应的影响。

本文采用数值模拟方法,研究某上面级液氧贮箱在微重力滑行段自由界面的变形过程,预示液氧贮箱内的典型流体运动形式,并与理论值进行对比分析。

1 研究对象及数学模型

本文所研究的上面级液氧贮箱如图1所示,贮箱关于 z 轴呈旋转对称形状,中间柱段高0.8 m,半

径 r 为1.5 m;上、下底为椭球形,长轴长1.5 m。贮箱中上半部分增压气体为氦气,下半部分液体推进剂为液氧。液氧与贮箱壁面的接触角为 θ_c ,液氧表面张力系数为 σ ,受到的加速度为 \mathbf{a} 。

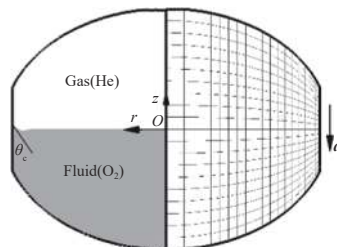


图1 液氧贮箱结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid oxygen tank

本文采用流体体积法(VOF方法)^[11-13]求解液氧贮箱内推进剂的运动及自由界面的变形。VOF方法由Hirt和Nichols于20世纪80年代提出,目前已成为研究自由界面问题最主要的方法,被引入到商业软件Fluent中,可以很好地解决自由界面的变形问题。李章国等^[14]已将该方法成功用于气液自由界面的数值模拟。

假设流动为不可压缩黏性层流流动(气体流速很低,可以考虑为不可压缩流体),则流体连续性方程、动量方程和流体体积函数的控制方程可以表示如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{V} + \rho \mathbf{a} + \mathbf{F}_\sigma; \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla f = 0. \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: \mathbf{V} 为流体运动速度; ρ 为流体密度; p 为流体压力; μ 为流体运动学黏性系数; \mathbf{F}_σ 为流体表面张力的等效体积力形式; f 为流体体积函数,定义为每个空间单元内流体所占体积与该单元可容纳流体体积之比。

本研究中,流体运动速度在贮箱壁面上满足无滑移条件,即

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_w, \quad (4)$$

其中 \mathbf{V}_w 为贮箱壁面的运动速度。

流体体积函数在壁面上满足接触角条件

$$\theta_c = \text{常数}. \quad (5)$$

本文需求解的问题是非定常问题,初始条件为流体静止,流体界面保持为平面。

2 理论分析

液体爬升和表面张力波是经典流体力学的重要内容,具体推导过程可参考流体力学教材^[15]。

1) 液体爬升高度

对于初始水平的液面,液体在表面张力作用下将沿容器壁面爬升一定高度,达到静力学平衡。在一个大的容器中,液体界面爬升高度 h 和特征毛细长度 d 之间的关系可表示为

$$\frac{h}{d} = \sqrt{2(1 - \sin\theta_c)}, \quad (6)$$

其中 $d = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho a}}$ 。需要特别注意的是,式(6)成立的条件为 $d \ll r$, r 为容器的半径。

2) 表面张力波的色散关系

考虑表面张力作用的线性浅水波色散关系可表示为

$$\omega^2 = k(a + \sigma k^2 / \rho) \text{th}(kH). \quad (7)$$

式中: ω 为圆频率, $\omega = 2\pi/T$, T 为波动周期; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; H 为水深。

由该色散关系可以求出波包传播的群速度 $U = d\omega/dk$ 。

3 数值模拟

采用流体体积法对控制方程进行离散处理,利用物理量守恒构建差分方程。鉴于研究对象本身的对称性,选用二维轴对称模型进行计算。采用适体坐标系网格,网格数为 160×160 。非定常项采用全隐式格式,对流项采用 QUICK 格式,扩散项采用中心差分格式。这样就保证了整个离散方法的二阶精度。

本文计算中液氧与贮箱壁面接触角取为 10° ,表示液氧和贮箱壁面具有较好的浸润性。对邦德数 $Bo (Bo = \frac{\Delta\rho a d^2}{\sigma})$ 分别为 1.4×10^4 , 1.4×10^3 , 4.1×10^2 , 1.4×10^2 , 1.4×10^1 共 5 个工况进行了计算。液体爬升高度 h 随邦德数 Bo 的变化以及数值模拟与理论解(即式(6)计算结果)的对比如图 2 和表 1 所示,当 $Bo < 10^4$ 时,数值模拟得到的液体爬升高度和理论解的结果符合很好;在 $Bo = 1.4 \times 10^4$ 时,差异较大,理论解给出的爬升高度为 1.6 cm,数值模拟结果为 1.1 cm。考虑到 z 方向网格间距在自由界面和固壁

接触点附近为 0.5 cm,该差异值刚好为 1 个网格宽度,在数值方法的误差范围之内。故可认为本文的计算结果是可信的。

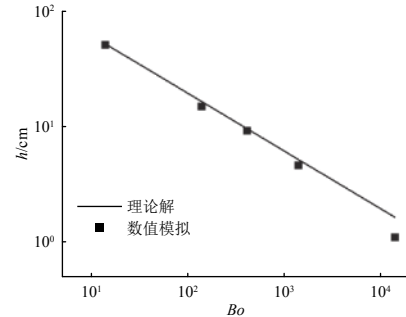


图 2 液体爬升高度 h 随邦德数 Bo 的变化

Fig. 2 The liquid climbing height h against the Bond number

表 1 液体爬升高度理论解与数值模拟对比

Table 1 Theoretical and numerical simulation results of liquid climbing height

邦德数 Bo	液体爬升高度 h/cm	
	理论解	数值模拟
1.4×10^4	1.6	1.1
1.4×10^3	5.2	4.6
4.1×10^2	9.5	9.0
1.4×10^2	16.4	14.8
1.4×10^1	51.5	50.9

4 数值模拟结果分析

数值模拟得到的 Bo 为 140、14 和 0 时的自由界面变形过程分别对应表面张力波、沃辛顿喷射和气泡形成 3 种不同的典型流体运动形式。

1) $Bo = 140$ (表面张力波)

当邦德数较大时,自由界面的变形过程表现为表面张力波形式。图 3 显示了邦德数为 140 时自由界面变形过程的主要特征。初始时刻 ($t = 0$ s) 液氧界面为平面,体积为容器容积的一半。之后,在表面张力作用下,液氧沿壁面往上爬升,形成对平整液面的扰动。该扰动包含有各种波长(波数)的模式, $t = 40$ s 时,之前的 1 个大波包发展成 2 个明显的波包。然后各波包由壁面向容器中心传播,波数较大(波长较小)的波包传播速度较快,这与式(7)和流体力学波动理论的结论相一致。小波长波包先到达中心位置,接着大波长波包于 $t = 120$ s 时到达中心;先形成一个小气泡,之后气泡消失,液体向上喷涌,但幅度不大,没有发生破碎现象;最后液面逐渐恢复平静。

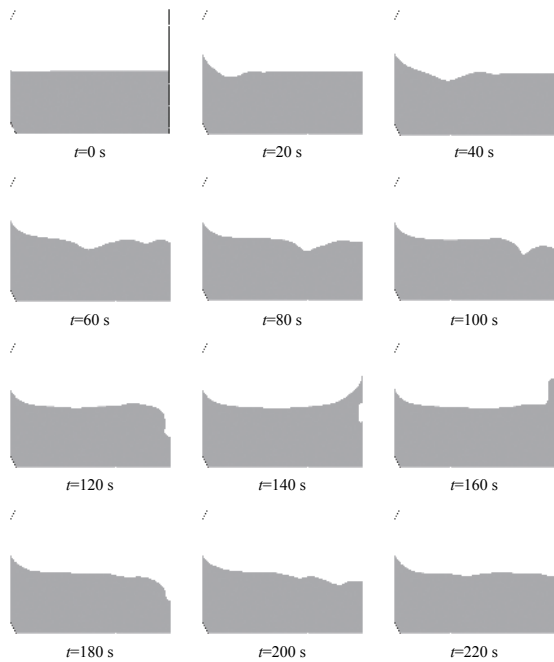


图 3 邦德数为 140 时的自由界面变形过程

Fig. 3 Free surface deformation process for a Bond number of 140

最终液面爬升高度稳定在 0.148 m 处, 图 3 中大波包的波数为 12.27/m, 群速度为 0.012 5 m/s。由流体力学理论可以算出液面爬升高度为 0.164 m, 群速度为 0.012 2 m/s。可见数值模拟结果和理论解比较接近, 说明本文的数值模拟结果正确。

2) $Bo=14$ (沃辛顿喷射)

当邦德数减小时, 液面爬升高度增加, 表面波的振幅加大。图 4 显示了邦德数为 14 时自由界面的变形过程。表面波传播规律与邦德数为 140 时基本相同, 大波包在大约 $t=180$ s 时传到中心位置, 比邦德数为 140 时要晚。这是由于邦德数较小时, 液面爬升高, 扰动强, 波数小, 所以波包群速度也更小, 传播时间就更长。与邦德数为 140 时情况不同的是, 在 $t=300$ s 时波包在反弹之后发生了破碎, 形成了流体力学中的沃辛顿喷射现象。

3) $Bo=0$ (气泡形成)

当邦德数为 0 (此时加速度也为 0), 即上面级作自由滑行时, 自由界面变形进一步加大 (见图 5)。 $t=360$ s 时开始, 液面在贮箱内形成一个完整的气泡。这是由于表面张力作用下, 液面不断收缩, 表面能不断减小, 最终达到一个表面能最低的平衡状态。

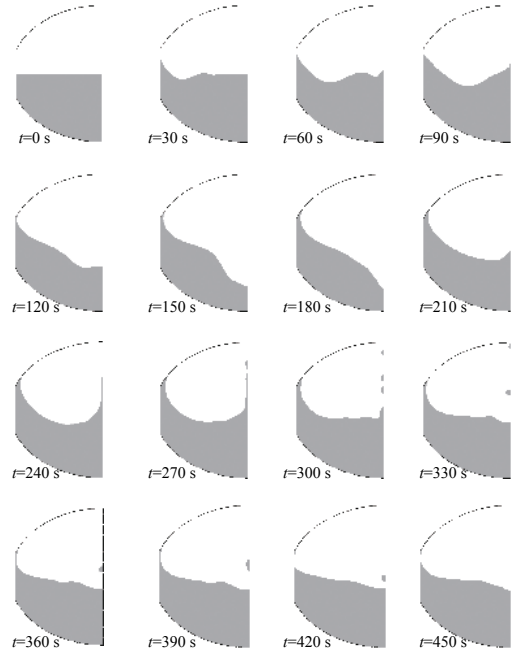


图 4 邦德数为 14 时的自由界面变形过程

Fig. 4 Free surface deformation process for a Bond number of 14

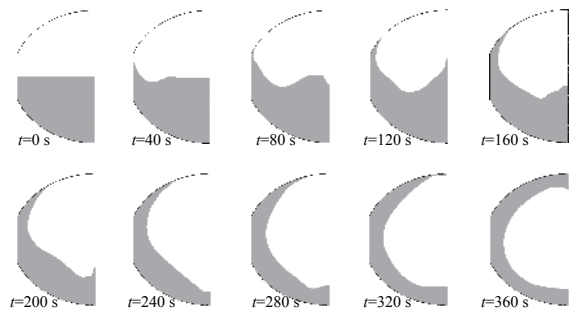


图 5 邦德数为 0 时的自由界面变形过程

Fig. 5 Free surface deformation process for a Bond number of 0

贮箱内的液氧液面形成完整的气泡将直接威胁到主发动机二次点火的成功。不过, 由于完整气泡的形成需要长达 360 s 的时间, 故可以考虑在 100~200 s 时施加沉底推力, 使液面重新恢复平整, 然后再撤除沉底推力, 即采用脉冲式流体管理。

从以上计算结果来看, 脉冲式流体管理技术具备可行性, 但是, 具体参数还需相应的数值模拟和试验来确定。

5 结束语

本文采用流体体积法对微重力条件下上面级贮箱内液氧推进剂自由界面变形过程建立了完整的数学模型, 针对不同邦德数条件进行了数值模拟, 得到的液体爬升高度和表面张力波传播速度与流体力学理论符合较好, 证明该数值模拟方法可

行。并通过数值模拟再现了上面级液氧贮箱内自由界面变形的3种典型形式,对后续上面级的推进剂管理技术方案制定及试验验证工作具有参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 刘楨, 褚桂敏, 李红, 等. 运载火箭上面级微重力环境下的推进剂管理[J]. *导弹与航天运载技术*, 2012(4): 20-26
LIU Z, CHU G M, LI H, et al. Propellant management of rocket upper stage in microgravity environment[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2012(4): 20-26
- [2] 李佳超, 梁国柱. 运载火箭低温推进剂热管理技术及应用进展分析[J]. *宇航总体技术*, 2017, 1(2): 59-70
LI J C, LIANG G Z. Analysis of thermal management technology and its application progress for launch vehicle cryogenic propellants[J]. *Aerospace Systems Engineering Technology*, 2017, 1(2): 59-70
- [3] 顾方. 微重力环境下半球形贮箱液体重定位试验研究[J]. *空间科学学报*, 1991, 11(1): 24-32
GU F. Experimental investigation of liquid reorientation in semispheres under microgravity conditions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1991, 11(1): 24-32
- [4] 张景芳. 球锥贮箱微重力试验研究[J]. *强度与环境*, 1996(4): 37-45
ZHANG J F. Research on microgravity test of ball cone tank[J]. *Structure & Environment Engineering*, 1996(4): 37-45
- [5] 魏延明, 潘海林. 表面张力贮箱的微重力实验验证——静平衡与重定位[J]. *航天控制*, 1998(3): 23-29
WEI Y M, PAN H L. The microgravity drop tower verification of surface tension tank: static equilibrium and reset of propellant[J]. *Aerospace Control*, 1998(3): 23-29
- [6] 赵婷婷, 刘赵淼, 申峰. 微重力下飞行器推进剂自由界面形貌的数值模拟[C]//北京力学学会. 北京力学学会第20届学术年会论文集, 2014: 122-123
- [7] 赵志建, 王锦瑜. 微重状态下带隔板球形贮箱中静液面形状优化算法[J]. *国防科技大学学报*, 1991, 13(3): 18-22
ZHAO Z J, WANG J Y. An optical algorithm for equilibrium interfaces of low-gravity liquids in the sphere tank with space[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1991, 13(3): 18-22
- [8] 王毅, 常小庆. 微重力环境下推进剂贮箱中三维气液平衡界面的数值模拟[J]. *火箭推进*, 2007, 33(3): 31-35
WANG Y, CHANG X Q. Numerical simulation of three-dimensional gas-liquid equilibrium interfaces in the propellant tank under microgravity condition[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2007, 33(3): 31-35
- [9] 刘春辉. 微重力条件下40%充液旋转贮箱中液体再定位的计算[J]. *导弹与航天运载技术*, 1994(1): 49-54
LIU C H. Calculation of liquid relocation in a 40% liquid-filled rotary tank under microgravity[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 1994(1): 49-54
- [10] 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*, 2004, 21(3): 15-19
CHEN J, FAN Q Y. Finite element analysis and experiment technology of propellants slosh in tank under micro gravity[J]. *Aerospace Shanghai*, 2004, 21(3): 15-19
- [11] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39: 201-225
- [12] 周炳红, 胡炜, 蔡世界, 等. 微重力条件下火箭液氢贮箱重定位过程的数值模拟[C]//中国力学学会. 中国力学学会学术大会'2009 论文摘要集, 2009: 1-6
- [13] 张铠, 潘雁频, 冶文莲, 等. 微重力环境下低温流体的数值模拟与特性研究[J]. *真空与低温*, 2016, 22(2): 85-89
ZHANG K, PAN Y P, YE W L, et al. Numerical simulation and characteristic research of cryogenic fluid under microgravity environment[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2016, 22(2): 85-89
- [14] 李章国, 刘秋生, 纪岩. 航天器贮箱气液自由界面追踪数值模拟[J]. *空间科学学报*, 2008, 28(1): 69-73
LI Z G, LIU Q S, JI Y. Numerical simulation of liquid-vapor interface tracking in tank of spacecraft[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, 28(1): 69-73
- [15] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. *流体力学*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991: 298-302

(编辑: 张艳艳)