

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

王 毅, 常小庆

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 以部分管理表面张力贮箱的管理舱为研究对象, 利用三维气液平衡界面计算程序 Surface Evolver, 在无重力和微重力且几何边界条件比较复杂的环境下对管理舱内的气液平衡界面进行数值模拟; 计算结果与已经应用卫星的理论计算完全吻合。

关键词: 表面张力贮箱; Surface Evolver; 气液平衡界面; 数值模拟

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 03-0031-05

Numerical simulation of three-dimensional gas-liquid equilibrium interfaces in the propellant tank under microgravity condition

Wang Yi, Chang Xiaoqing

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Management cabin of a surface tension tank is used as an example in this study. By using Surface Evolver, a computer model being developed by the Geometry Supercomputer Project, fully three-dimensional gas-liquid equilibrium interfaces can be calculated under micro gravity. The method presented can be valuable for the physical design of propellant management device (PMD).

Key words: surface tension tank; Surface Evolver; gas-liquid equilibrium interfaces; numerical simulation

1 引言

在表面张力贮箱的设计中, 微重力环境下的

推进剂定位至关重要, 气液平衡界面的位置对推进剂管理装置的毛细元件的放置和尺寸具有重要影响。为研究微重力环境下的液体行为, 早在上个世纪中叶人们开始发展以落塔和飞机抛物线飞

收稿日期: 2006-08-11; 修回日期: 2006-11-06。

作者简介: 王毅 (1980—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机设计。

行为为主的地基微重力环境模拟试验,但试验费用昂贵、测量困难,因此开始对微重力环境下的液体行为和气液平衡界面进行数值模拟;常用的工具为计算气液平衡界面的计算程序 Surface Evolver,其实现方式是对给定约束条件下的气液界面进行能量最小化。

自1989年 Surface Evolver 作为公开程序发表以来,已经被广泛地应用于工程和生物领域,包括液态金属、泡变学、细胞膜、弹性表面和空间飞行器贮箱等。在空间飞行器领域, S·H·Collicott 研究了无重力工况下,给定管理装置和贮箱几何结构时,圆柱形叶片式表面张力贮箱中的推进剂分布, J·Tegart 计算了球形和圆柱形贮箱内加速度验证轴向和径向时推进剂分布, S·H·Collicott 研究了氮贮箱中气垫的稳定性。

本文利用 Surface Evolver 程序以某部分推进剂管理表面张力贮箱为研究对象,在无重力和微重力环境下,对贮箱管理舱内的推进剂液面进行预测,为贮箱推进剂管理装置设计提供参考。

2 微重力原理和贮箱结构

2.1 微重力原理

在很多液体推进系统的设计中都需要了解微重力环境下的液体行为。当毛细作用在主导地位时,液体表面高度弯曲,并且贮箱结构对液体定位的影响非常大。当邦德数 $Bo \leq 1$ 时,毛细力占主导地位,邦德数为惯性力与毛细力的比值:

$$Bo = \frac{\rho a R^2}{\sigma}$$

式中, ρ 为液体密度; σ 为液体表面张力; a 为加速度; R 为贮箱特征尺寸。

气液界面的形状反映了贮箱形状和内部管理结构对液体定位的影响,合理地布置内部的管理装置可以更好的控制液体的定位。

2.2 贮箱结构

某部分管理表面张力贮箱结构见图1。管理舱为安装管理装置对推进剂进行管理和控制的容腔,为确定管理装置的毛细元件的尺寸和安装位置,需要对管理舱内的推进剂进行准确定位。

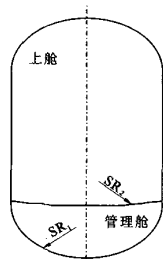


图1 贮箱结构示意图

Fig.1 Schematic of the tank structure

3 建立模型

3.1 结构模型

管理舱的结构如图2a所示,其壁面和中隔板均为球面,这样的形状给数学建模带来极大不便;鉴于图2a中中隔板 $SR_2 \gg SR_1$,几乎为平面,为此建图2b所示的简化模型,将其改为平面。

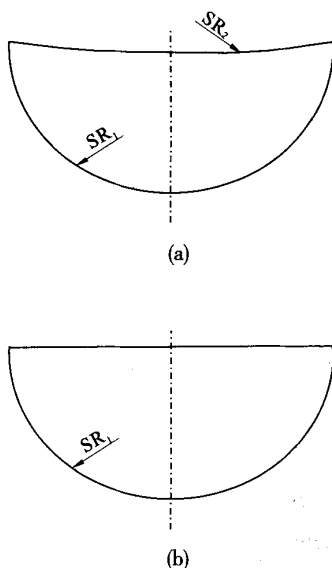


图2 管理舱结构及计算结构模型

Fig.2 Configuration of the management chamber and the calculated model

3.2 计算模型

Surface Evolver 是多维表面最小能量求解器,并对自由界面自动计算;计算中需要先设定大致的自由表面外形,然后对给定约束条件下的多维表面进行能量最小化。计算能量包括表面张力、重力等,约束条件包括固定于给定点的几何约

束, 或者一些是表面对区域的积分, 比如体积。

对于表面张力贮箱管理舱中的自由液面的形状, 受贮箱壁面和中隔板平面等几何边界、环境加速度、表面张力以及体积约束的影响, 下面详细地给出这些边界条件及相应的能量计算模型。

3.2.1 初始计算表面

在微重力环境下, 气液界面将在毛细作用下高度弯曲, 液体朝着曲率半径较小的区域运动, 即液体将保持在两曲面间的夹缝附近, 由此给出初始计算液面如图 3 所示。

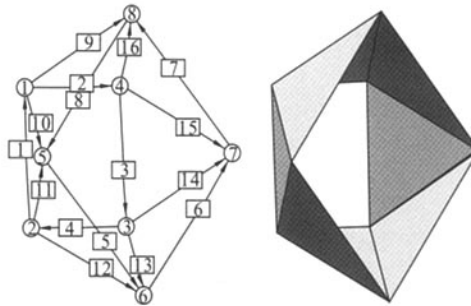


图 3 初始计算表面

Fig.3 Initially calculated surface

计算表面边界条件包括四个部分:

- (1) 点 1、2、3 和 4 在管理舱平面上, $z=0$;
- (2) 点 5、6、7 和 8 在管理舱的球面上, $x^2+y^2+z^2=(SR)^2, z \geq 0$;
- (3) 8 个点组成的 8 三角面为初始计算自表面;
- (4) 由点 5、6、7 和 8 构成的边与贮箱壁面 (管理舱的球面) 间的间隙表面也包括能量项; Surface Evolver 中定义, 在边界点上形成的间隙表面与其接触面垂直。

3.2.2 能量模型

(1) 表面能量模型

与表面边界条件一致, 表面能量包括相应的四个部分, 其中自由表面能量和间隙表面能量可为 Surface Evolver 自动计算, 现给出其余两部分的能量模型。

① 管理舱的中隔板平面

表面能量可以通过接触角来表述。设液体与平面的接触角为 θ_p , 则未被液体覆盖区域的表面

张力为 $T_p=\sigma\cos[\sigma(\theta_p)]$, 在此区域进行积分可得:

$$E=\int_{\text{plane}} T_p \vec{k} \cdot d\vec{A} \tag{1}$$

通过斯托克斯定理, 将曲面积分转换为曲线积分:

$$E=\oint_{\text{edges}} T_p x_j \cdot d\vec{s} \tag{2}$$

式中, dA 、 ds 分别为积分面积和曲线的微分单元。

实际的计算域应为液体覆盖的区域, 那么可得能量积分为:

$$E=\oint_{\text{edges}} -T_p x_j \cdot d\vec{s}$$

② 管理舱的球面

与中隔板一样, 设液体与球面的接触角为 θ_s , 未覆盖液体区域表面张力为 $T_s=\sigma\cos\sigma(\theta_s)$, 则能量积分为:

$$E=\int_{\text{sphere}} \vec{T}_s \cdot d\vec{A}=\int_{\text{sphere}} T_s \frac{1}{R} (x\vec{i}+y\vec{j}+z\vec{k}) \cdot d\vec{A} \tag{3}$$

为计算方便, 进行等量变换:

$$E=\int_{\text{sphere}} T_s \frac{R^2}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} (x\vec{i}+y\vec{j}+z\vec{k}) \cdot d\vec{A} \tag{4}$$

通过斯托克斯定理, 将曲面积分转换为曲线积分:

$$E=\oint_{\text{edges}} T_s \frac{R^2 z}{(x^2+y^2)(x^2+y^2+z^2)^{1/2}} (y\vec{i}-x\vec{j}) \cdot d\vec{s} \tag{5}$$

实际的计算域能量积分为:

$$E=\oint_{\text{edges}} -T_s \frac{R^2 z}{(x^2+y^2)(x^2+y^2+z^2)^{1/2}} (y\vec{i}-x\vec{j}) \cdot d\vec{s}$$

(2) 重力能量模型

本文仅研究重力沿着模型轴向的情形, 重力能量为:

$$E=\int_{\text{body}} z\rho GdV \tag{6}$$

通过高斯降维定理, 将上式转换为曲面积分:

$$E=\int_{\partial\text{body}} G\rho \frac{z^2}{2} \vec{k} \cdot d\vec{A} \tag{7}$$

式中, G 为重力加速度, ρ 为液体密度。

故重力能量包括三部分, 为液体接触面、自

由表面和间隙表面下实体重力能量, 其中自由表面为 Surface Evolver 自动计算, 现研究其他两个部分。

① 液体接触面

在液体接触球面上对式 (7) 进行等量变换:

$$E = \iint_{\partial \text{body}} G\rho \frac{R^4 z^3}{2(x^2+y^2+z^2)^3} (\vec{x}\vec{i} + \vec{y}\vec{j} + z\vec{k}) \cdot d\vec{A} \quad (8)$$

由斯托克斯定理, 将面积分进行降维处理:

$$E = \oint_{\text{edges}} G\rho \frac{R^4 z^4}{8(x^2+y^2)(x^2+y^2+z^2)^2} (y\vec{i} + x\vec{j}) \cdot d\vec{s} \quad (9)$$

② 间隙表面

间隙表面与球面垂直, 故球面的法向量在间隙表面的积分将为 0, 为此可在被积函数里加入球面法向量, 方便进行降维。

在式(7)的被积函数上加 $-G\rho(z/4)(x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k})$, 可得:

$$E = \iint_{\partial \text{body}} \frac{G\rho}{4} (-xz\vec{i} - yz\vec{j} + z^2\vec{k}) \cdot d\vec{A} \quad (10)$$

由斯托克斯定理, 将面积分进行降维处理:

$$E = \oint_{\text{edges}} \frac{G\rho z^2}{8} (y\vec{i} - x\vec{j}) \cdot d\vec{s} \quad (11)$$

3.2.3 约束条件

对于液体液面的计算, 约束条件一般取体积约束; 体积分:

$$V = \iiint dV \quad (12)$$

应用高斯定理对上式进行降维, 并考虑到结构模型是轴对称的, 取:

$$V = \frac{1}{3} \iint_{\text{body face}} (\vec{x}\vec{i} + \vec{y}\vec{j} + z\vec{k}) \cdot d\vec{A} \quad (13)$$

体积分包括三部分, 分别为液体接触面、自由表面和间隙表面与球心构成的体积。间隙表面为 Surface Evolver 自动计算, 现研究其他两部分体积。

① 液体接触面

在液体接触球面上对式 (13) 进行等量变换:

$$V = \frac{1}{3} \iint_{\text{body face}} \frac{R^3}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} (\vec{x}\vec{i} + \vec{y}\vec{j} + z\vec{k}) \cdot d\vec{A} \quad (14)$$

由斯托克斯定理, 将面积分进行降维处理:

$$V = \oint_{\text{edges}} \frac{R^3}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}} (y\vec{i} - x\vec{j}) \cdot d\vec{s} \quad (15)$$

② 间隙表面

由于被积函数为 $x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$, 与间隙表面平行, 故积分为 0。

4 计算结果及分析

本文利用 Surface Evolver 程序, 通过给定结构边界、体积约束, 以及边界和间隙面的能量方程, 对微重力环境下某预研型号表面张力贮箱管理舱的气液平衡界面进行数值模拟, 分别计算了无重力和微重力两种工况; 由于贮箱壁面都为钛合金, 几乎与所有的推进剂都完全浸润, 故在球面和平面上都取接触角为 0。

(1) 无重力工况

在此工况下, 邦德数为 0, 分别计算了剩余推进剂体积为 1L、3L 和 5L 时其液面在管理舱内的分布, 图 4 为气液界面的三维图, 图 5 直观给出了液面的二维位置。

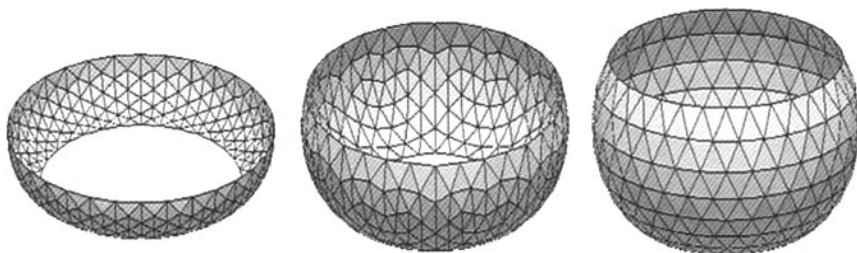


图 4 无重力环境下剩余推进剂体积分别为 1L、3L、5L 的气液平衡界面三维图

Fig.4 3D pictures of the 1L、3L、5L gas-liquid equilibrium interface of the residual propellant at under zero gravity condition

由图 5 可以清楚看出, 随着推进剂体积的减小, 推进剂液面朝着夹缝移动, 且液面的曲率半径减小, 表面张力增大, 这与已经应用卫星的理论计算完全吻合; 另外还有一个重要的现象, 随着液面的移动, 推进剂与球面的接触面积锐减, 而与平面的接触面积的减少要缓慢的多, 即使在剩余推进剂体积为 1L 的情形下, 平面与推进剂接触的圆环面的宽度达 57mm; 可考虑将无重力工况下推进剂的收集重点放在此平面上。

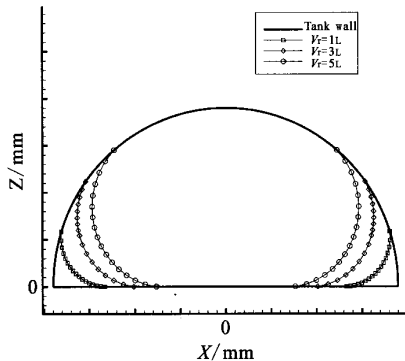


图 5 无重力工况下推进剂体积分别为 1L、3L、5L 的气液平衡界面位置

Fig.5 Positions of the 1L、3L、5L gas-liquid equilibrium interface of the residual propellant at zero gravity condition

(2) 微重力工况

在贮箱的实际飞行应用中, 由于姿控或滑翔等因素都会给导弹带来微重力工况, 为此本文继续研究了邦德数为 0.5 和 1.0 两种情形, 每种情形又对应着加速度方向分别沿着 Z 轴正向和负向两种情况。

图 6 给出了这四种工况时剩余推进剂体积为 5L 的液面, 同时作为参考给出了无重力时的液面 (图中 a 表示加速度方向沿着 Z 轴负方向, -a 表示沿着 Z 轴正方向)。图 6 清晰表明, 微重力工况下, 加速度对推进剂与贮箱球面的接触面积的影响非常大, 并且沿着 Z 轴正向的加速影响要剧烈一些; 而对于推进剂与平面的接触面积, 受加速度的影响很小, 再次显示出中隔板平面在放置推进剂收集装置方面的优势。

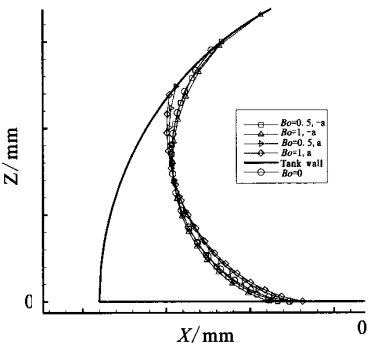


图 6 微重力环境下 5L 推进剂的定位

Fig.6 Positioning of the propellant with the volume of 5L under microgravity condition

5 结论

在微重力和一定的壁面边界条件下, 邦德数和加速度方向对液面都有影响, 尤以邦德数的影响明显。给定沿着贮箱轴向的加速度, 在邦德数为 0、0.5 和 1 时, 夹缝附近始终附着大量推进剂; 相对于球面, 推进剂与中隔板平板的接触面积变化缓慢, 是放置推进剂管理装置毛细元件的合理位置。在加速度方向上, 本文仅研究了重力沿着贮箱轴向的情形, 为进一步完善贮箱设计, 还需要研究径向加速度时贮箱内的三维液面。

参考文献:

[1] Collicott S H. Convergence behavior of surface evolver applied to a generic propellant management device [R]. AIAA 1999-0846.

[2] Tegart J. Three-dimensional fluid interface in cylindrical containers[R]. AIAA 1991-2174.

[3] Collicott S H. Ullage bubble stability in the gravity probe-B helium tank [R]. AIAA 1994-3026.

[4] 杨亚龙 译. 表面张力推进剂贮箱在印度 INSAT 卫星上的应用[J]. 火箭推进, 1989, (4): 1-15.

(编辑: 陈红霞)