



CSTAM 2012-B03-0161

## 微重力下板式贮箱内推进剂流动的研究

张晨辉，段俐，康琦，李永强，刘玲

中国科学院力学研究所国家微重力实验室

东北大学理学院应用力学研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

# 微重力下板式贮箱内推进剂流动的研究<sup>1)</sup>

张晨辉<sup>\*\*、2)</sup>, 段俐<sup>\*</sup>, 康琦<sup>\*</sup>, 李永强<sup>\*</sup>, 刘玲<sup>\*</sup>

\* (中国科学院力学研究所实验流体力学实验室, 北京海淀区 100190)

+ (东北大学理学院应用力学研究所, 沈阳 110819)

**摘要** 在卫星平台中, 经常用液体推进剂贮箱为其提供能源保障, 与其它类型的液体推进剂贮箱相比, 第二代表面张力型推进剂贮箱, 即板式贮箱, 以其显著的性能优势和高可靠的特点成为了很多大型卫星推进剂贮箱的主流。板式贮箱的关键和核心部分是安装和布置在贮箱壳体内部的推进剂管理装置(PMD)。PMD功能的可靠实现, 对保证卫星推进系统在空间正常工作具有直接的、决定性的作用和影响。为此, 本文将对其进行研究, 用三维气液平衡界面计算程序surface evolver对无重力下的板式贮箱中的液体形态进行模拟分析, 为以后板式贮箱的设计提供参考。

**关键词** 板式贮箱, surface evolver, PMD

## 引言

推进剂贮箱是卫星上用来存储和管理推进剂的部件。推进剂贮箱的核心部分是推进剂管理装置(PMD), 它的作用是在卫星工作的各个阶段, 在规定的流量和加速度条件下, 为发动机或推力器提供无夹气的推进剂。

按飞行任务要求分: 小加速度; 不同加速度方向及组合; 惯性飞行<sup>[1]</sup>。

按推进剂种类分: 常温推进剂; 低温推进剂。

按使用次数分: 一次性使用(卫星用); 重复使用(航天飞机用)。

按性能分: 表面张力贮箱分为, 部分管理式, 全管理式, 联通管理式。

按推进剂管理装置(PMD)的类型分: 卫星推进剂贮箱可以分为自旋式贮箱、隔膜式贮箱和表面张力贮箱<sup>[2]</sup>。

其中, 自旋式贮箱是最早应用于卫星上的贮箱, 这类贮箱只能用于自旋卫星。目前, 自旋式卫星数量已经很少。隔膜式贮箱容积比较小, 橡胶隔膜与推进剂还存在相容性的问题。目前, 除了俄罗斯还一直使用这种贮箱之外, 其他国家在大中型卫星上已经很少使用该类型贮箱了。表面张力贮箱是世界上使用最为广泛的卫星推进剂贮箱, 它利用表面张力进行液体输送和气液分离, 从而为发动机或推力器提供

不夹气的推进剂。

表面张力贮箱可以分为, 第一代表面张力贮箱和第二代表面张力贮箱。第一代表面张力贮箱是筛网式结构的, 这种贮箱的推进剂管理装置使用了众多毛细筛网, 利用液体在筛网上的表面张力, 通过筛网来收集推进剂, 并通过筛网阻止气体进入管路通道, 为发动机或推力器提供不夹气的推进剂。该类型贮箱可以满足各种微重力加速度和流量的要求, 并可以进行地面环境下的挤出效率试验。第二代表面张力贮箱是以板式结构为主的, 尽量减少筛网的使用。它的工作原理是利用表面张力通过导流板来驱动推进剂。这种贮箱同样可以满足各种流量的要求, 并适应于不同的微重力环境, 尤其是微重力环境相对较低的大型卫星平台, 并且克服了第一代表面张力贮箱的不足。第二代表面张力贮箱是目前国际上大型卫星推进剂贮箱的主流, 已经成功应用于很多重要卫星平台, 它代表了当今表面张力贮箱发展的方向。

早在上个世纪中叶人们开始发展以落塔和飞机抛物线飞行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, 很多学者开始对微重力下液体形态和气液界面行为进行模拟, 常用的计算气液平衡界面的计算程序Surface Evolver<sup>[3]</sup>, 是以最小能量原理和有限元数值分析方法, 对给定约束条件下的液面进行能量最小化。

1) 国家自然科学基金(11032011, 10972224)、三期创新方向性项目(KJCX2-YW-L08)、载人航天项目。

2) Email: zhangchenhui2011@126.com

Surface Evolver 作为三维气液平衡界面计算程序, 已经被广泛地应用于工程和生物领域, 包括液态金属、焊接、泡变学、细胞膜、弹性表面和空间飞行器贮箱等。并且得到了很好的验证。Collicott等<sup>[4]</sup>通过将Surface Evolver程序的计算结果与他们的实验结果进行对比, 使得Surface Evolver程序的准确性得到有效地证明。在本文中, 我将对板式贮箱中的液体进行模拟, 观察其现象, 为以后板式贮箱的设计提供参考。

## 1 基本原理与贮箱结构

### 1.1 微重力毛细流动的原理

首先, 引入描述毛细力、重力和无量纲的邦德数 (Bond 数)

$$B_o = \frac{\Delta\rho g d^2}{\sigma} \quad (1)$$

其中,  $\Delta\rho$  和  $\sigma$  分别是两流体相之间界面的密度差和表面张力,  $g$  是重力加速度,  $d$  是特征长度。当  $B_o \ll 1$  时, 就说明表面张力占主导地位, 此时的重力就可以忽略不计了。

获得的液面的情况可以很好的说明贮箱内 PMD 对液体的定位的好坏, 这样就能为合理的安排贮箱的装置提供依据。

### 1.2 Concus-Finn 条件

液体在微重力环境下在容器内是否有稳定的界面形貌取决于液体与壁面的接触角  $\theta$  以及容器内角的二分之一  $\alpha$  的大小。Concus 和 Finn 对其进行了充分的研究, 并提出了容器内液体界面是否有稳定构型的判据, 即 Concus-Finn 条件<sup>[5]</sup>

$$\theta + \alpha < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

其中  $\theta$  是液体与容器壁的接触角,  $\alpha$  是容器内角的二分之一。例如方形截面的容器  $\alpha = 45^\circ$ 。如果满足 Concus-Finn 条件, 容器内

## 2 建立模型

### 2.1 简化模型

为了简化计算, 我将模拟贮箱的 1/4 的部分, 初始的结构如下所示

部的流体将不断地爬升, 最后液体将都会附着在容器内壁或者溢出容器; 若不满足 Concus-Finn 条件, 容器内部的流体将会出现一个稳定的界面构型。

### 1.3 贮箱结构

在本文中, 我将模拟上下球壳、中间圆柱形的贮箱, 其中, 贮箱的横向直径是 2cm, 贮箱内壁有四个叶片, 中间安装有一个带有四个叶片的蓄液池, 在下面的球壳里分布垂直方向 0.5cm 高度的液体, 如下图 1 所示

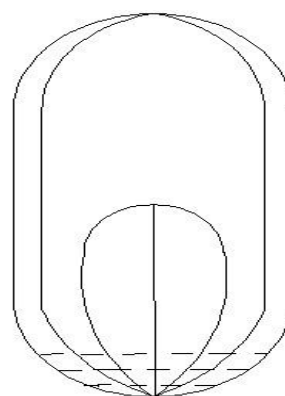


图 1 贮箱结构图

其中, 贮箱内壁的四个叶片与其垂直分布, 叶面的宽度是对应壁面到轴线距离的 1/4, 中间的蓄液池的叶片与贮箱内壁的叶片呈  $45^\circ$ , 如图 2 所示, 图中的虚线为假设的液体与液体之间的界面, 便于之后的模拟。

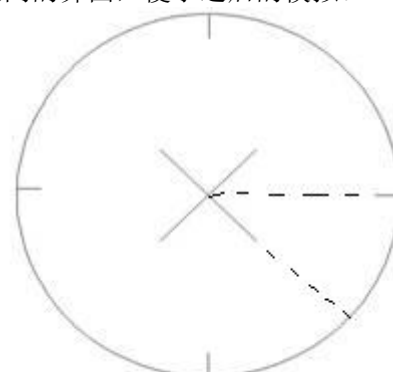


图 2 横截面图

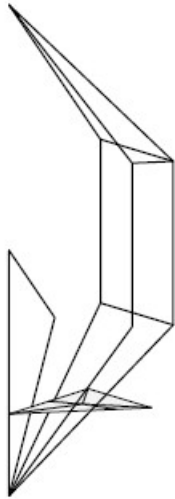
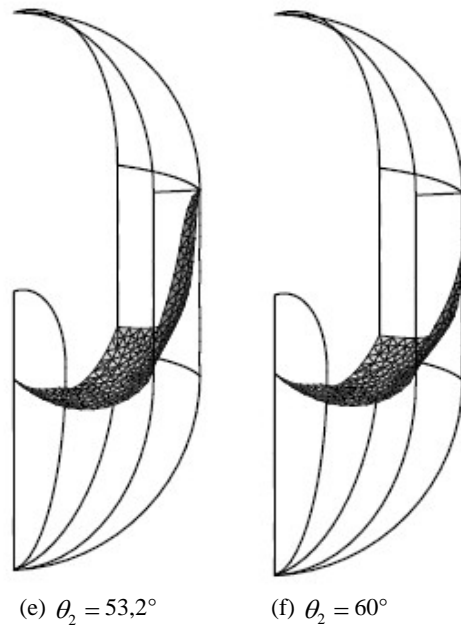
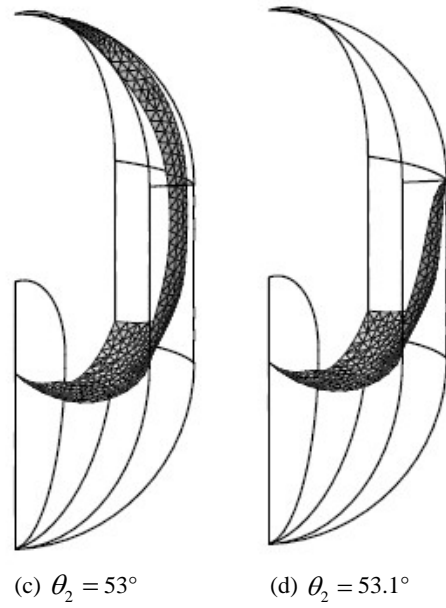
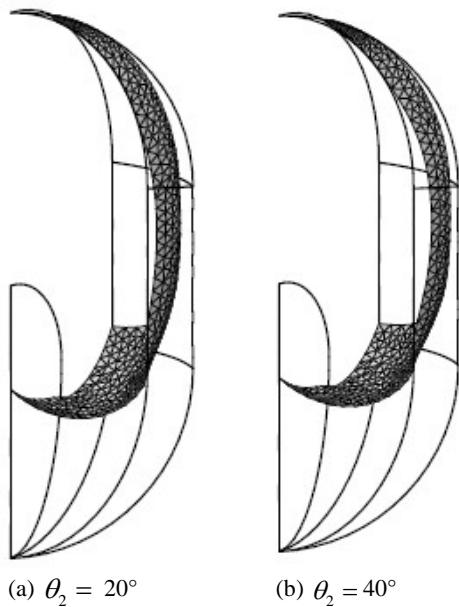
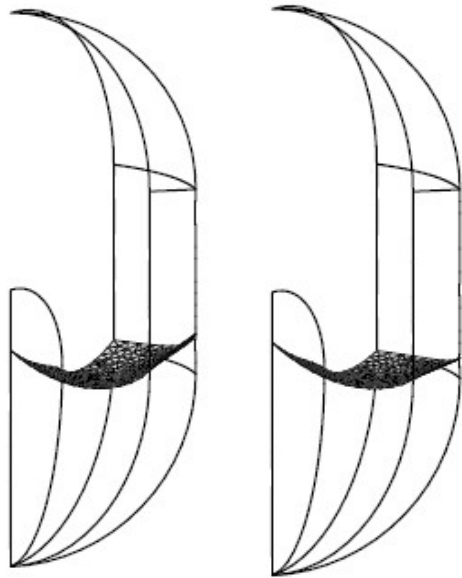


图3 初始的结构图

### 2.1 液面形态

在模拟的过程中，我们假设没有重力，由于液体与液体之间没有毛细爬升，所以我假设液体与液体之间存在界面，如图2中的虚线所示，它的接触角为 $90^\circ$ 。取液体与中间叶片的接触角为 $\theta_1 = 70^\circ$ ，然后通过改变液体与内壁叶片的接触角 $\theta_2$ 的大小，来观察对液面的形态的影响，如下图所示





(g)  $\theta_2 = 70^\circ$       (h)  $\theta_2 = 80^\circ$

图4 当 $\theta_1 = 70^\circ$ ，不同的 $\theta_2$ 的液面形状

为了更清晰的说明液体的前缘位置，即内壁叶片处液体的纵向位置，随着接触角 $\theta_2$ 的变化，以中间圆柱形的底部为xOy面，并取 $\theta_2$ 从 $0^\circ$ 到 $80^\circ$ ，给出了下面的图。

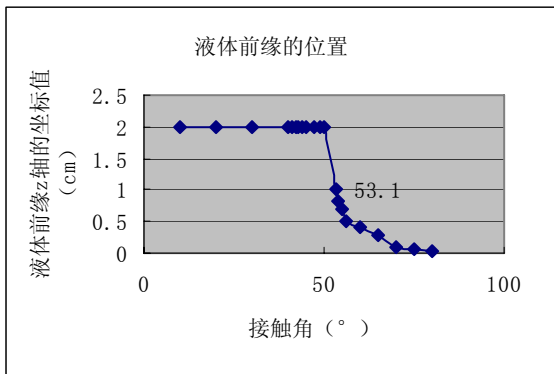


图5 液体前缘位置随接触角 $\theta_2$ 的变化

观察图4中内壁叶片与贮箱之间液体的毛细爬升以及图5中液体前缘位置随接触角 $\theta_2$ 的变化，结合式(2)可得， $\theta_2 = 53.1^\circ$ 是临界接触角，内壁叶片与贮箱的内角是 $73.8^\circ$ ，这与根据文献[6]的非对称内角中推导出来的内角是一致的。此外，由图5可得，随着接触角的增大，毛细爬升的高度降低，说明，较小的接触角有利于毛细爬升。同理，由于中间蓄液池叶片之间的夹角是 $90^\circ$ ，所以它的临界接触角是 $\theta_1 = 45^\circ$ 。

在此，给出整体的稳定形态，也就是说，当 $\theta_1 = 45^\circ$ ， $\theta_2 = 53.1^\circ$ 时，通过对称得到的整体的液面形态。

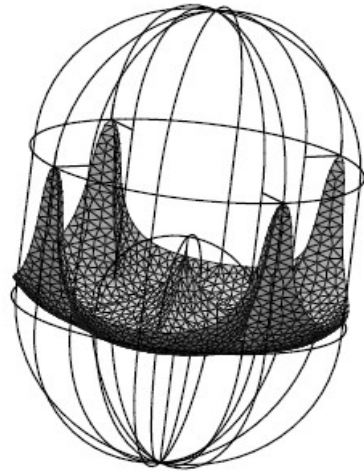


图6 当 $\theta_1 = 45^\circ$ ， $\theta_2 = 53.1^\circ$ 时的整体液面的形态

### 3 结论

(1) 通过上面的模拟分析，进一步验证了微重力毛细流动的原理和 Concus-Finn 条件。

(2) 通过将模拟得出的结果（比如内壁叶片与贮箱的内角大小）与实际对比，可以知道，进一步说明用 surface evolver 来研究三维气液界面平衡状态是可行的，并且检验了结果的正确性。

(3) 用 surface evolver 对无重力下的板式贮箱中的液体形态进行模拟分析，为以后板式贮箱的设计提供参考。

### 参考文献

- 1 李治. 卫星用表面张力贮箱设计研究[D]. 国防科技大学研究生院, 2002:1-64.
- 2 李永, 潘海林, 魏延明, 第二代表面张力贮箱的研究与应用进展, 宇航学报, 2007-3, 28(2): 504-507
- 3 K. A. Brakke, "TheSurfaceEvolver", Experimental Mathematics, 1, 141(1992)
- 4 S.H. Collicott, R.L. Bayt and S.D. Courtney, "Ullage bubble stability in the Gravity Probe-Bhelium tank," In 30th AIAA Joint Propulsion Conference, Indianapolis, IN, June 1994, AIAA-94-3026
- 5 P. Concus and R. Finn, "On Capillary Free Surfaces in the Absence of Gravity," Acta Math., 132, 177(1974)
- 6 李京浩, 陈小前, 黄奕勇, 白玉铸, 微重力环境下不对称内角毛细流动研究, 中国科技, 2012(08)

# THE STUDY OF PROPELLANT FLOW IN THE PLATE STORAGE BOX UNDER MICROGRAVITY

ZHANG ChenHui<sup>2</sup>, DUAN Li<sup>1</sup>, KANG Qi<sup>1</sup>, LI YongQiang<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>

(1 Experimental fluid Mechanics Laboratory of the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

(2 Applied Mechanics Research Institute of the College of Science, Northeastern University, Shengyan 110819, China

**Abstract** In satellite platform, people often use the liquid propellant storage box to provide the energy security, and compared with other types of liquid propellant storage box, the second generation surface tension storage box, namely plate storage box, become the mainstream of many large satellite propellant storage box with its significant performance advantages and high reliable characteristics. The core and key part of plate storage box is the installation and propellant management device (PMD) arranged in the storage box. The reliable implementation of the PMD function have the direct and decisive influence to ensure normal work of satellite propulsion system in space. Therefore, in this paper, i will use the three dimensional gas-liquid equilibrium interface calculation program surface evolver to simulate the liquid flow in the plate storage box without gravity, and provide reference for the design of the plate storage box in future.

**Key words** plate storage box, surface evolver, PMD

1) 国家自然科学基金 (11032011, 10972224)、三期创新方向性项目(KJCX2-YW-L08)、载人航天项目。

2) Email: zhangchenhui2011@126.com