

# 竖管-叶片式表面张力管理装置的设计与分析

穆小强, 陈祖奎

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了一种推进剂管理装置 (PMD), 竖管-叶片式表面张力管理装置的方案和结构, 讨论了该管理装置设计中的竖管、叶片和收集通道的设计等方面问题, 并通过对该管理装置性能进行设计分析和计算, 验证了该管理装置蓄留和供应推进剂的性能。

**关键词:** 表面张力管理装置; 竖管; 叶片

**中图分类号:** V434\*.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0015-04

## Design and analysis for standpipe and its vane surface tension management device

MU Xiao-qiang, CHEN Zu-kui

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

**Abstract:** A design scheme and structure of a propellant management device (PMD) called standpipe with vane surface tension management device is introduced in this paper. The design issues of standpipe, vane and collection passageway in PMD design are discussed. The PMD performance to store and supply propellant was validated by the design analysis and performance calculation of PMD.

**Keywords:** surface tension management device; standpipe; vane

## 0 引言

表面张力贮箱以其相容性好、可靠性高、长寿命和推进剂排空效率高等优点, 在卫星、上面级、飞船、星际探测器、航天飞机以及空间站上得到广泛的应用。推进剂管理装置 (PMD) 作为表面张力贮箱的核心部件, 由筛网、通道、叶片、中心支柱、收集器、槽、海绵和气泡陷阱等元件通过不同的组合达到不同的设计目标, 适应

特定的飞行任务要求。

对于可贮存推进剂而言, 管理装置的主要功能为在任务周期内向发动机提供不夹气的推进剂和质心控制, 该类管理装置的设计和应用较为成熟。对于低温推进剂而言, 除了实现上述功能外, 还需考虑以下问题: 第一, 由于低温推进剂的沸点都很低, 对于密封的贮箱, 推进剂液体受热, 液面上方充满饱和蒸气, 这使贮箱压力不断上升。如果不采取措施, 可能会导致贮箱破裂。一般为避免此类问题发生, 在贮箱上要设计安全

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-11-20

基金项目: 总装备部预研项目 (2007AA705303)

作者简介: 穆小强 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为姿控发动机总装设计

放气阀,但在微重力条件下,推进剂可能会覆盖排气口,如果箱压过高时,就不能直接排气。因此需要通过管理装置限制气垫位置,避免排气口被液体覆盖的情况出现。第二,需要考虑由于温度梯度而引起的贮箱结构中的热应力和气液两相混合温度梯度所引起热应力。因此,针对低温推进剂管理装置的特殊要求,本文提出了竖管-叶片式表面张力管理装置方案,并进行了设计和分析。

## 1 设计基本条件

表1所示为管理装置的设计基本条件。管理装置的功能是在整个任务周期内,向发动机提供不夹气的推进剂;实现晃动和质心控制;实现将气垫定位于排气口处,有助于贮箱排气;排空效率不小于99%。

表1 设计基本条件

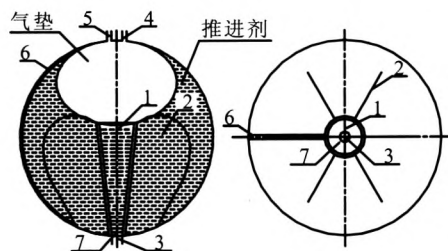
Tab. 1 Design condition of PMD

序号	项目	性能指标
1	推进剂	液氧
2	推进剂温度/K	55.56~100
3	推进剂流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.54
4	滑行时各向加速度	10 <sup>-4</sup> g
5	启动时轴向加速度	0.19~0.32 g
6	启动时侧向加速度	±5×10 <sup>-4</sup> g
7	关机时轴向加速度	-2×10 <sup>-4</sup> g
8	关机时侧向加速度	±1.4×10 <sup>-4</sup> g

## 2 管理装置方案

图1所示为管理装置方案。推进剂由叶片捕获并由竖管收集,从竖管下部通过底收集器供应发动机,贮箱排气和增压接口设置在竖管对应端。在微重力条件下,竖管内部充满液体,在贮箱出口形成蓄液池,同时由于叶片的捕获作用,液态推进剂始终存在于竖管周围,气垫位置则一

直处于竖管上方,便于贮箱排气。采用竖管和叶片结合的管理装置,叶片可作为不同温度流体热传导的介质,使管理装置的流体温度梯度减小,保持贮箱内流体温度均匀。贮箱壁面附近布置收集通道,当少量推进剂处于贮箱顶部时,仍可以实现不夹气的供应。同时,可以采用将主动换热器置于管理装置的竖管中,叶片作为换热元件,或者将主动换热装置作为收集通道布置在贮箱壁面附近,结合压力控制技术,将不同温度分层的推进剂进行混合,达到控制温度分层的目的。



1-竖管; 2-叶片; 3-出口口; 4-增压口;  
5-排气口; 6-收集通道; 7-底收集器

图1 管理装置结构图

Fig. 1 PMD configuration

## 3 管理装置设计

管理装置的设计包括竖管、叶片和收集通道的设计,竖管的设计包括竖管直径、高度和锥度等设计参数的选择;叶片的设计包括叶片型面、数目、厚度和排列方式等设计参数的选择。

### 3.1 竖管的设计

管理装置应该具备将气垫定位在唯一位置的能力,才可以满足诸如排气、增压和质心控制等任务要求。首先,确定在不同气垫容积下,贮箱内的气液交界面分布情况;其次,根据初始气垫容积确定竖管的直径、高度和锥度等几何参数;最后,分析不同气垫容积下,竖管对贮箱内气液分布的影响。总之,通过合理选择竖管的几何参数,保证在不同情况下,气垫都可以处于平衡状态,且始终定位于贮箱壁面和竖管之间。另外,在竖管设计中还要考虑轴向和侧向稳定性的问

题, 重点研究在不同的气垫容积下, 在轴向加速度和侧向加速度作用下, 竖管对气泡的定心能力。

### 3.2 叶片的设计

#### 3.2.1 叶片型面选择

叶片型面设计的目标在于使中心位置成为气泡平衡时的唯一位置, 位于其它位置的气泡可以在毛细力的作用下运动到中心位置。图 2 所示为气泡位置和叶片长度的关系。叶片最小和最大临界长度  $L_{\min}$  和  $L_{\max}$  按照式(1)~(4)计算。当叶片的长度  $L$  (从贮箱的中心计算) 介于  $L_{\min}$  和  $L_{\max}$  之间时, 既可以保证气泡与与贮箱壁相切, 并刚好与叶片接触, 处于平衡位置, 还可以保证气泡不会破碎。但是, 在靠近出液口的叶片长度可以大于  $L_{\max}$ , 在微重力环境下, 该处可以迅速被液体充填, 因此不会影响气泡的定位。此外, 叶片型面选择时还要考虑叶片的蓄流能力及轴向和侧向稳定性的问题。

$$L_{\min} = (R-r) \cos \frac{\alpha}{2} - \sqrt{r^2 - \sin^2 \frac{\alpha}{2} (R-r)^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \theta \cos \Phi \quad (2)$$

$$r = \left( \frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$L_{\max} = \frac{R \cos \left( \frac{\theta}{2} \cos \Phi \right)}{\sin \left( \frac{\theta}{2} \cos \Phi \right) + 1} \quad (4)$$

式中:  $R$  为贮箱半径;  $\alpha$  为叶片数和  $\Phi$  的函数;  $r$  为气泡半径;  $\theta$  为叶片之间的夹角 (当  $\Phi=0$ );  $V$  为气泡的体积。

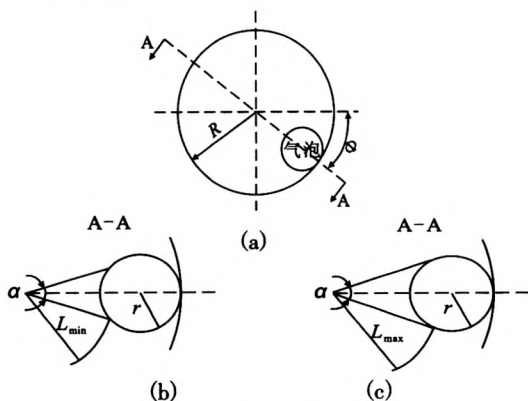


图 2 叶片型面选择

Fig. 2 Vane profile selection

#### 3.2.2 其他参数选择

叶片的数量、厚度和排列方式的选择需要考虑不同工况下, 气液界面的分布情况以及管理装置的蓄留能力。

### 3.3 收集通道设计

在任务周期中, 如果部分推进剂位于贮箱顶部, 在管理装置控制范围之外, 无外力作用这部分推进剂将无法进入管理装置。收集通道用于保证处于贮箱顶部的推进剂与管理装置蓄留的推进剂能够接触, 在发动机点火过程中, 将顶部推进剂输运到管理装置内部实现再充填, 用于发动机下一次点火。收集通道的横截面可以是圆形、三角形和“U”形等。在选取了收集通道的截面几何参数后, 根据几何参数和收集通道两端的压力差, 计算收集通道的输运流量  $Q$  和从贮箱顶部输运到贮箱出口处的输运时间  $t$ 。

## 4 性能验证

该类管理装置可以在微重力环境下对推进剂实行有效管理, 但在地面重力环境下无法对其性能进行充分验证, 故在管理装置设计中, 首先通过设计计算、分析和数值仿真验证管理装置的性能, 然后通过微重力试验 (如落塔试验或中性浮力试验) 对性能和仿真结果进行试验验证, 最后通过空间搭载试验完成各项性能验证。

对管理装置在微重力环境下推进剂管理能力的数值模拟, 计算采用 SIMPLEC 算法求解 N-S 方程, 通过多相组分体积模型 (VOF) 来处理气液两相的流动, 进而捕捉气液两相的分界面位置确定其变化规律。计算网格采用非结构化网格, 在近壁面处进行了局部加密, 计算模型和网格如图 3 所示。

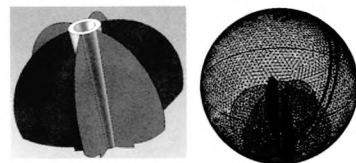


图 3 计算模型和网格

Fig. 3 Computation model and mesh of standpipe with vanes

图4所示为不同气垫容积(14%, 50%, 80%, 95%)下竖管对气垫定位的影响。从图4中可以看出, 竖管可以在贮箱出口处蓄留液体, 同时将气泡定位在贮箱顶端。当气泡进入竖管中时, 在表面张力作用下气泡可以排出, 实现竖管再充填, 如图5所示。

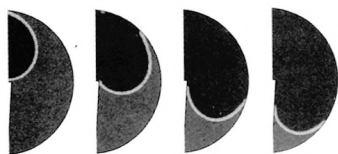


图4 不同气垫容积时气液界面

Fig. 4 Interface of air and liquid at different ullage volumes

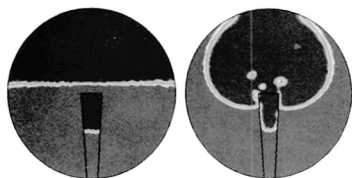
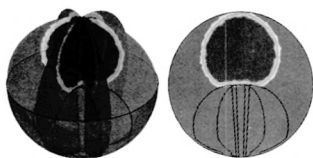


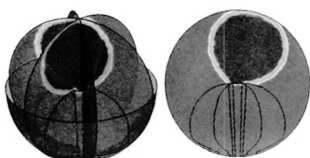
图5 竖管再充填

Fig. 5 Refilling in standpipe

图6为在微重力环境下贮箱(充液率为86%, 50%和5%)内推进剂分布的情况。



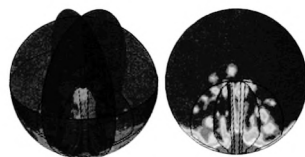
(a) 86%充液率



(b) 86%充液率



(c) 50%充液率



(d) 5%充液率

图6 不同阶段推进剂的位置

Fig. 6 Positions of propellant in different phases

图6中浅色部分代表推进剂, 深色部分代表增压气体。其中图6(a)为首次点火前的情况; 图6(b)为侧向加速度 $-5 \times 10^{-4} g$ 和轴向加速度 $-2 \times 10^{-4} g$ 共同作用下的情况; 图6(c)为发动机点火时的情况; 图6(d)为末次点火前的情况。从图6中可以看出, 在加速度作用下, 推进剂蓄留在管理装置内部和周围, 增压气体保持在贮箱上部, 可以保证贮箱提供不夹气的推进剂和排气。当侧向加速度消失后, 气垫可以重新定位在中心位置。

图7所示为顶部推进剂通过收集通道实现管理装置再充填的情况, 从图7中可以看出, 通道结合叶片可以实现将顶部推进剂输运到出口口。



图7 管理装置再充填

Fig. 7 Refilling by PMD

## 5 结论

竖管-叶片式表面张力管理装置是一种利用竖管、叶片和收集通道的共同作用, 蓄留和供应推进剂的装置。该装置可以为发动机启动提供不夹气推进剂, 可以控制推进剂的晃动和质心偏移; 可以将气垫定位于排气口处, 便于贮箱排气。通过设计分析和数值模拟, 验证了管理装置的性能, 可以为微重力试验和管理装置的优化设计提供参考。

(下转第28页)

直角构型对助燃稳燃更为有利, 后缘则易采用圆弧过渡构型。更细化地改变圆弧半径时, 得到  $R=0.5\text{ mm}$  左右这样一个适当的后缘圆弧半径范围。

#### 参考文献:

- [1] MATHUR T, GRUBER M, JACKSON K, et al. Supersonic combustion experiments with a cavity-based fuel injector [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 17 (1): 146–155.
- [2] MATHUR T, LIN K C, KENNEDY P, et al. Liquid JP-7 combustion in a scramjet combustor, AIAA 2000-3581 [R]. USA: AIAA, 2001.
- [3] BAURLE R A, TAM C J, DASGUPTA S. Analysis of unsteady flows for scramjet applications, AIAA 2000-3617 [R]. USA: AIAA, 2000.
- [4] GRUBER M R. Fundamental investigations of an integrated fuel injector/flame-holder concept for supersonic combustion, ADA356336[R]. [S.l.]: ADA, 1998.
- [5] 钟萍, 苏冯念. 超燃冲压发动机发展与地面试验研究综述[J]. *靶场试验与管理*, 2003, 7(5): 2–5.
- [6] 翁世修, 吴振华. 机械制造技术基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [7] SETTLES G S, WILLIAMS D R, BACA B K, et al. Reattachment of a compressible turbulent free shear layer[J]. *AIAA Journal*, 1982, 20(1): 60–67.
- [8] 潘余. 超燃冲压发动机多凹腔燃烧室燃烧与流动过程研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2007.
- [9] 吴子牛. 空气动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [10] 韩省思. 超声速燃烧中湍流模型的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [11] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598–1605.

(编辑: 王建喜)

(上接第 18 页)

#### 参考文献:

- [1] DOWDY M W, HISE R E, PETERSON R G, et al. Surface tension propellant control for Viking 75 orbiter, AIAA 76-596 [R]. USA: AIAA, 1976.
- [2] TAM W, BALLINGER I, JAEKLE D E. Surface tension PMD tank for on orbit fluid transfer, AIAA 2008-5105 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [3] 李永, 赵春章, 潘海林, 等. 蓄液器在板式贮箱中的应用及性能分析[J]. *宇航学报*, 2008, 29(1): 24–28.
- [4] TEGART J R, UNEY P E, ANDERSON J E, et al. Space storable propellant acquisition system NASA-CR-114493 [R]. USA: NASA, 1972.
- [5] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: vanes, AIAA 91-2172 [R]. USA: AIAA, 1991.
- [6] ROLLINS J R, GROVER K, JAEKLE J. Twenty three years of surface tension propellant management system design, development manufacture test and operation, AIAA 85-1199 [R]. USA: AIAA, 1985.
- [7] 薛国宇, 陈志坚, 王德忠. 低温表面张力贮箱研究[J]. *火箭推进*, 2005, 31(3): 26–29.
- [8] TEGART J. A vane-type propellant management device, AIAA 97-3028[R]. USA: AIAA, 1997.
- [9] TAM W, TAYLOR J R. Design and manufacture of a propellant tank assembly, AIAA 97-2813[R]. USA: AIAA, 1997.
- [10] TAM W, BALLINGER I, JAEKLE D E. Propellant tank with surface tension PMD for tight center-of-mass propellant control, AIAA 2008-4942[R]. USA: AIAA, 2008.
- [11] 李治. 卫星用表面张力贮箱设计研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
- [12] 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(编辑: 张永秀)