

板式表面张力贮箱导流板的理论计算与试验验证

邱中华^{1,2}, 刘志杰^{1,2}, 朱文杰^{1,2}, 黄立钠^{1,2}, 陈志坚^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要:板式表面张力贮箱的PMD通常包括导流板与出口附近的蓄液器,导流板是影响板式贮箱性能的关键因素之一,由于地面没有失重环境无法直接进行导流板的工作原理地面验证。为了确认导流板的可用性,通过理论分析建立了导流板液体传输能力的计算方法,通过中性浮力试验对导流板的液体收集能力进行了试验验证。经过多次试验的试验结果与理论计算结果的对比分析,得到了一种可应用于工程设计的计算方法,利用该方法编程形成了一套计算软件,可指导板式表面张力贮箱内导流板的设计。

关键词:表面张力贮箱;导流板;理论计算;中性浮力试验;试验验证

中图分类号:V432 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)02-0021-08

Theoretical calculation and experimental verification of vanes using in vane type surface tension tank

QIU Zhonghua^{1,2}, LIU Zhijie^{1,2}, ZHU Wenjie^{1,2}, HUANG Lina^{1,2}, CHEN Zhijian^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: Vane type surface tension tank's PMD usually include vanes at wall and liquid reservoir at outlet. Vane is a critical component on liquid collecting capacity, but this cannot be verified at the ground condition because without microgravity condition. In order to verify the usability of vans, theoretical calculation method for liquid transportation ability of vane was built. Then neutral buoyancy test was conducted to validate liquid collection capacity of vane. The experimental verification result was contrasted with theoretical calculation result, and a calculation method suitable for engineering design was obtained. Finally a vane computing software was formed to direct the vanes design in vane type surface tension tank.

Keywords: surface tension tank; vane; theoretical calculation; neutral buoyancy test; experimental verification

0 引言

表面张力贮箱依靠推进剂管理装置 Propellant

Manage Devices(PMD)蓄留和传输推进剂,PMD由表面张力元件组成。按工作方式,表面张力元件可分为基于隔板形成楔角的开放式结构(包含导流

收稿日期:2019-04-18;修回日期:2019-08-13

基金项目:国家装备预先研究项目(30508040301)

作者简介:邱中华(1982—),男,硕士,高级工程师,研究领域为航天器用推进剂贮箱的设计

板^[1]、楔形海绵体^[2]、贮液槽装置^[3]等)和基于毛细网表面张力压差的封闭式结构(包含气泡陷阱^[3,4]、启动篮^[5]、复合通道^[6]、筛网收集器^[7]等)。板式表面张力贮箱(以下简称“板式贮箱”)的PMD构成以开放式表面张力元件为主,通常包括导流板与出口附近的蓄液器。

板式贮箱因为结构简单、零组件少、工艺性好、造价低、扩展性好等优点,在国外得到了大量应用。然而,由于地面环境不是微重力环境,板式贮箱不方便直接进行地面验证,其设计主要依赖于理论计算或仿真计算。

本文首先研究了微重力环境下导流板进行液体驱动的原理,然后据此原理进行了导流板的理论计算,之后进行了中性浮力试验,并将试验结果与理论计算的结果进行了对比。

1 导流板液体传输原理

在失重状态下,液体推进剂之间的主要作用力是分子引力,对于液面表面,则表现为表面张力。导流板就是依据导流板金属分子与液体分子的引力原理设计的。导流板是一种靠近贮箱内壁的结构,区别于传统筛网式PMD建立封闭的流动通道,导流板建立开放的流动通道,推进剂沿着通道流动。传统液体推进剂具有较好的浸润性,趋向于吸附在金属结构的夹角处,在导流板与贮箱壁交线周围形成液带。图1为沿着斜坡上导流板内液体流动的示意图^[1]。

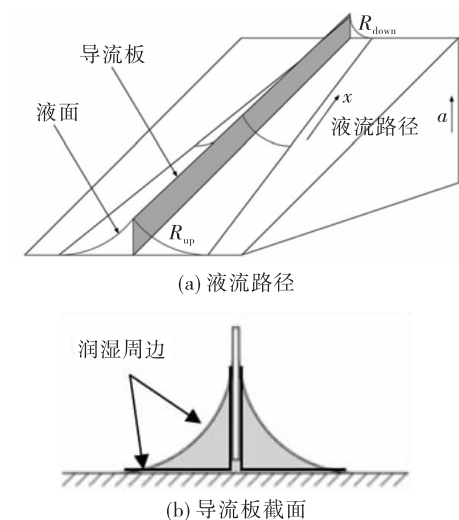


图1 位于斜坡上的导流板的液带分布

Fig.1 Fillet on the vane at the incline

根据Laplace方程,如果 $R_{up} > R_{down}$,会驱动液体向下游流动,驱动压差

$$\Delta p_{drive} = \sigma \left(\frac{1}{R_{down}} - \frac{1}{R_{up}} \right) = \frac{\sigma}{R_{down} R_{up}} (R_{up} - R_{down}) \quad (1)$$

式中: σ 为液体的表面张力系数; R_{up} 为上游液带表面的主曲率半径; R_{down} 为下游液带表面的主曲率半径,另一主曲率半径均可认为是无穷大。

考虑液体沿导流板的定常流动,将导流板简化为一维流动区域,液体应满足如下的控制方程:

1) 连续性方程

$$du = - \left(\frac{Q}{A^2} \right) dA \quad (2)$$

2) 动量方程

$$-Adp - \tau_w s dx - \rho A a dz = \rho A u du \quad (3)$$

3) 气液界面状态方程

$$dp = \frac{\sigma}{R^2} dR \quad (4)$$

式中: x 为沿导流板流动的路径长度; u 为液体的流动速度; A 为流动截面积; Q 为体积流量; p 为液体的静压力; τ_w 为液体沿壁面流动的黏性剪阻力; s 为润湿周边长度; a 为加速度大小; z 为沿加速度方向的液面高度坐标; R 为液体表面的主曲率半径(另一曲率半径为无穷大); ρ 为液体的密度。

液体沿导流板的流动一般为层流,可认为

$$\tau_w = \frac{8}{Re} \rho u^2 \quad (5)$$

式中: Re 为雷诺数, $Re = \frac{4Aup}{s\mu}$; μ 为液体的动力黏性系数。

将式(2)~式(5)进行整理可得

$$\frac{dR}{dx} = \frac{\frac{\mu}{\rho} \frac{2}{Q} s^2 + \frac{a}{Q^2} \frac{dz}{dx} A^3}{\frac{dA}{dR} - \frac{\sigma}{\rho} \frac{1}{Q^2} \frac{A^3}{R^2}} \quad (6)$$

2 导流板液体传输能力理论计算

导流板的截面可取为很多形状,比如单竖片式、双竖片式、三折横片式、复杂式等,目前应用最为广泛的就是单竖片式^[8,9],因为几种结构的液体供应能力差别不大,而单竖片式的结构最为简单,工艺性最好^[10-11]。单竖片式的截面形状如图2所示。

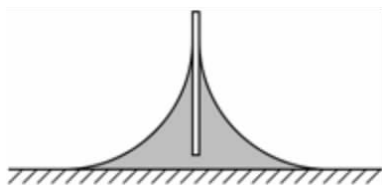


图2 单竖片式导流板截面形状

Fig. 2 Simple vane cross section

根据图2可以得到 s, A 与 R 的关系,针对贮箱内导流板的设置,可以得到 dz/dx 的值,应用四阶Runge-Kutta法,可对式(6)进行求解。

下面使用该方法对一种经典原理型板式贮箱内的导流板^[1]液体流动特性进行计算。该原理型贮箱为球柱形结构,PMD主要为导流板结构,带中心柱,贮箱形状如图3所示。贮箱的内径为 $\phi 762$ mm,柱段长度为381 mm,导流板宽度为51 mm。考虑侧向加速度大小为 $a = 0.000\ 5\ g$,贮箱总流量为 $Q = 5\ \text{ml/s}$,主要由侧面的一根导流板与中心柱供应,液体介质为肼推进剂,这与卫星在进行位保动作时的小推力工作状态相对应。主液池见图左侧。因为带有中心柱结构,所以液体供应的通道可认为有2条:一条是沿图中 $A \rightarrow B \rightarrow F$ 到达液口;另一条是沿图中 $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ 到达液口。

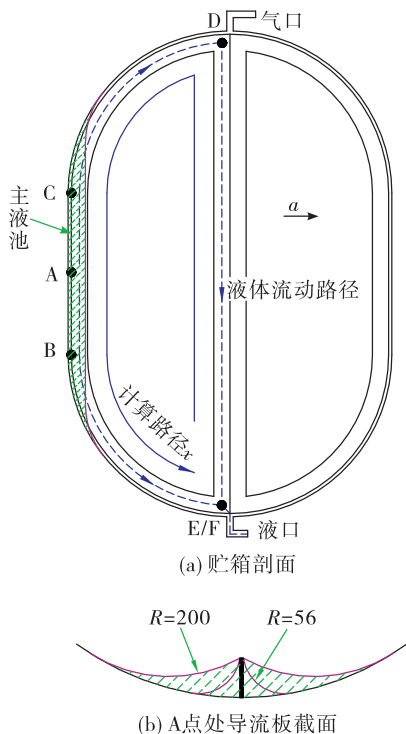


图3 原理型板式贮箱示意图

Fig. 3 A schematic diagram of vane type tank

计算时,取液口处E点的 x 坐标为 $x_E = 0$, x 坐标的取向沿中心柱进行,即中心柱顶端 $x_D = 1\ 143\ \text{mm}$,贮箱柱段中间部位 $x_A = 1\ 932\ \text{mm}$ ($381 \times 3 + 381\pi/2 + 381/2 = 1\ 932$),最终计算的终点F点(与E点重合)坐标为 $x_F = 2\ 721\ \text{mm}$ ($381 \times 3 + 381\pi + 381 = 2\ 721$)。

计算结果如图4所示。图中不同的曲线代表不同的初始主曲率半径。初始的主曲率半径指流动源头(主液池)处的主曲率半径。对图3而言,即为A处的主曲率半径。

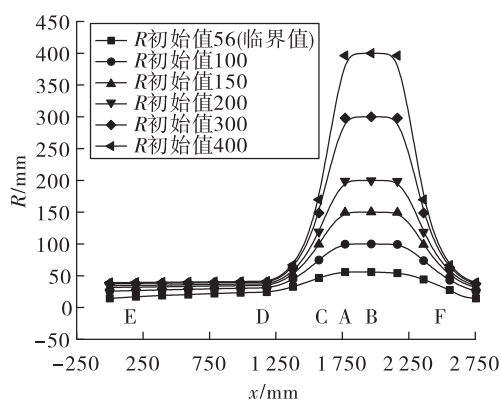


图4 原理型贮箱导流板理论计算结果

Fig. 4 Theoretical calculation result of a vane in a principle vane type tank

可见,在侧向加速度的条件下,液池内液体沿2条路径流向液口时,液面处的主曲率半径均逐渐减小。随着贮箱内推进剂剩余量的减少,可以提供的初始主曲率半径减小,导致液体流通路程的主曲率半径均减小,最终达到液体供应的临界点。这与实际的液体供应情况是一致的。不同的液体剩余量对应不同的 R 初始值,当 R 初始值达到56 mm时,达到了临界供应的情况,当初始主曲率半径小于该值时,无法保证液体供应到液口处。

理论计算方法能否应用到实际的工程设计中,还要考虑理论计算方法与实际试验结果的一致性。

3 针对导流板的中性浮力试验

地面环境不是微重力环境,重力是决定液体流动的主要因素,分子引力对液体作用的影响显现不出来。因此,采用导流板结构的板式贮箱在地面进行性能试验比较困难^[12]。目前常用的试验有落塔

试验、抛物线飞行、空间搭载试验、中性浮力试验等^[13-14]。各种方法均有其适用性与限制条件。考虑到中性浮力试验观察时间不受限制的优点,采用中性浮力试验^[15-16]进行导流板在微重力条件下液体蓄留特性的试验验证。

3.1 应用于表面张力贮箱的中性浮力试验原理

中性浮力试验的基本原理是用浮力抵消重力,广泛应用于航天员微重力环境的适应性训练。

中性浮力试验设备应用于表面张力贮箱时,利用相似准则达到对微重力工况的模拟^[17-18]。通常利用一种液体模拟推进剂液体,另一种液体模拟增压气体。为了模拟微重力工况,需要两种液体的密度接近,且不相溶。另外,还要考虑液体推进剂与 PMD 材料的浸润性,通常液体推进剂与 PMD 具有较好的浸润性,而增压气体与 PMD 不浸润^[19-20]。考虑到液体密度是温度的函数,因此中性浮力试验作为表面张力贮箱模拟试验时,对温度要求较高。

中性浮力试验应用于液体微重力条件下的液位分布时,目前主要进行静平衡状态的稳态试验,需要考虑重力与表面张力的相似性,还要考虑几何相似。几何相似除了指定几何比尺外,还要考虑接触角的一致性。重力与表面张力的相似用密度差

$$Bo = \frac{\Delta \rho a l^2}{\sigma} \quad (7)$$

式中 l 为几何尺寸。应用相似准则时,主要涉及到 4 种介质:实际推进剂、实际增压气体、模拟推进剂的液体及模拟增压气体的液体。

在地面环境下, $a' = g$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 根据 BOND 数相等,可得

$$a = \frac{\rho_1' - \rho_g'}{\rho_1} \frac{\sigma'}{\sigma} \left(\frac{l'}{l} \right)^2 g \quad (8)$$

如果几何尺寸没有缩比,则上式可简化为

$$a = \frac{\rho_1' - \rho_g'}{\rho_1} \frac{\sigma'}{\sigma} g \quad (9)$$

式中:下标 1 为推进剂液体;下标 g 为增压气体;上标'为模型参数。由式(8)和式(9)可知,模拟的微重力加速度主要取决于如下几个量:2 种模拟介质的密度、推进剂的密度、模拟推进剂的液体的表面张力系数及推进剂的表面张力系数。考虑到介质参数随温度的变化,要求中性浮力试验过程中对温度的控制较为精确。实际推进剂与贮箱壁面是浸润

的,实际增压气体与壁面是不浸润的,为了模拟该接触角特性,需要采用与模拟增压气体的介质不浸润的材料制作贮箱壳体。本试验用水模拟增压气体氦气,采用超薄 F46 贮箱壳体,用二苯甲烷模拟推进剂肼,两者的密度随温度变化关系如图 5 所示。

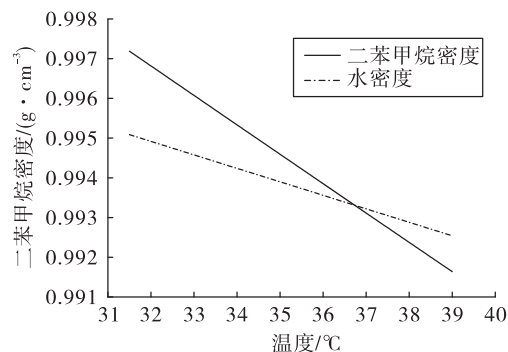


图 5 两种介质的密度关系

Fig. 5 Density relationship of two medium

现将模拟条件设定为:推进剂肼,增压气体氦气,推进剂温度 20 °C。可得模拟的重力加速度大小与温度的对应关系如表 1 所示。

表 1 模拟的加速度值与温度的关系

Tab. 1 Acceleration simulated by temperature

温度/°C	模拟微重力加速度/g
31.0	4.39×10^{-3}
32.0	3.63×10^{-3}
33.0	2.87×10^{-3}
34.0	2.11×10^{-3}
35.0	1.34×10^{-3}
36.0	5.69×10^{-4}
36.1	4.92×10^{-4}
36.2	4.15×10^{-4}
36.3	3.38×10^{-4}
36.4	2.61×10^{-4}
36.5	1.84×10^{-4}
36.6	1.07×10^{-4}
36.7	2.94×10^{-5}

3.2 中性浮力试验结果

中性浮力试验用贮箱为直径 $\phi 200$ 系列的透明贮箱,分为球形与球柱形 2 种,2 种贮箱对应的导流板结构如图 6 所示。

分别进行了多种温度工况的中性浮力静平衡

试验,试验结果如下所示。

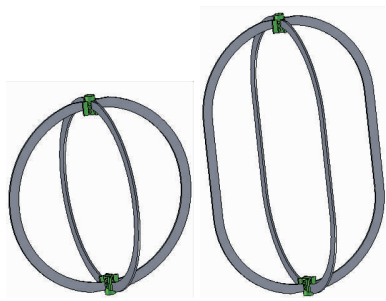


图 6 试验用导流板结构形式
Fig. 6 Vane structure for the experiment

1)球形贮箱,轴向加速度 0.0275 m/s^2 。
试验平衡温度 $33.085\text{ }^{\circ}\text{C}$,不考虑几何缩比,根据式(9)计算可以得到对应的加速度值 0.0275 m/s^2 。试验实物如图 7 所示(为了便于观察,二苯甲烷添加了微量的染色剂)。



图 7 中性浮力试验贮箱实物图 (0.0275 m/s^2)
Fig. 7 The tank used in buoyancy experiment
(0.0275 m/s^2)

根据液位宽度 b (指在导流板外侧测量的液位横向宽度,如图 8 所示)的实测值与导流板高度,计算得到了对应位置(对应于计算位置坐标 x 处)的液位的主曲率半径 R ,如表 2 所示。

表 2 试验数据表 Tab. 2 Experiment data			单位:mm
液位宽度 b 实测值	对应位置 x	R 计算值	
30	64	15.7	
10	157	5.0	
5	280	2.5	

根据已知的 x 坐标与主曲率半径 R 值,可得到 R 的拟合曲线,同时根据理论计算方法可以得到 R 的变化规律(理论计算时各量的关系如图 8 所示),两者的对比如图 9 所示。图 9 中给出了一种试验曲线与两种计算曲线,2 种计算曲线对应不同的加速度值。

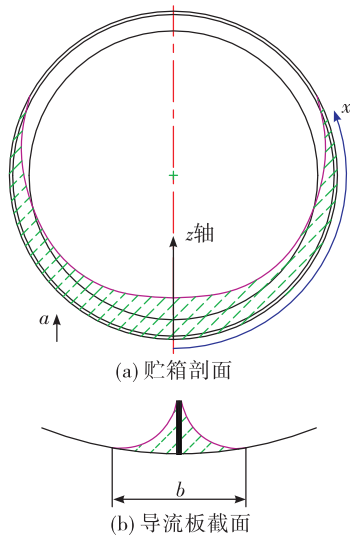


图 8 理论计算各物理量关系示意图
Fig. 8 The relationship of parameters for the calculation

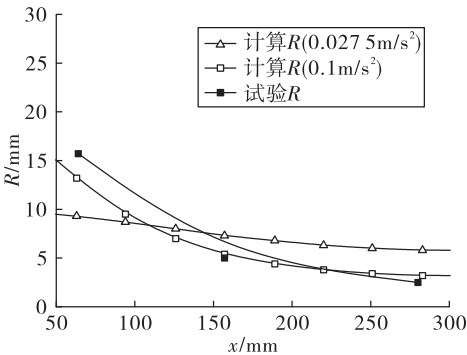


图 9 试验结果与计算结果对比 (0.0275 m/s^2)
Fig. 9 Contrast of experiment and calculation
results (0.0275 m/s^2)

2)球形贮箱,轴向加速度 0.007 m/s^2 。
试验平衡温度 $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据式(9)可求得对应的加速度值 0.007 m/s^2 。试验实物如图 10 所示。
试验结果与计算结果对比如图 11 所示。图 11 给出了一种试验曲线与两种计算曲线,两种计算曲线对应不同的加速度值。

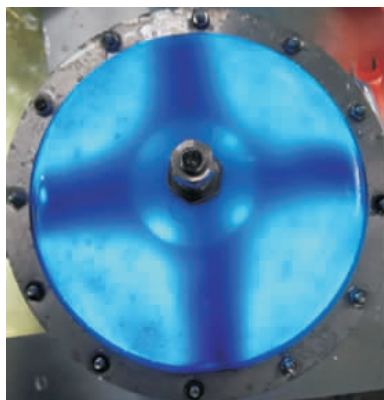


图 10 中性浮力试验贮箱实物图 (0.007 m/s^2)

Fig. 10 The tank used in buoyancy experiment (0.007 m/s^2)

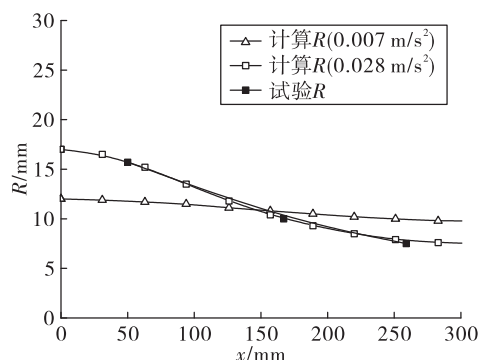


图 11 试验结果与计算结果对比 (0.007 m/s^2)

Fig. 11 Contrast of experiment and calculation results (0.007 m/s^2)

3) 球形贮箱, 轴向加速度 0.0367 m/s^2 。

试验平衡温度 31.855°C , 根据式(9)可求得对应的加速度值 0.0367 m/s^2 。试验实物如图 12 所示。



图 12 中性浮力试验贮箱实物图 (0.0367 m/s^2)

Fig. 12 The tank used in buoyancy experiment (0.0367 m/s^2)

试验结果与计算结果对比如图 13 所示。图 13 给出了一种试验曲线与 2 种计算曲线, 2 种计算曲线对应不同的加速度值。

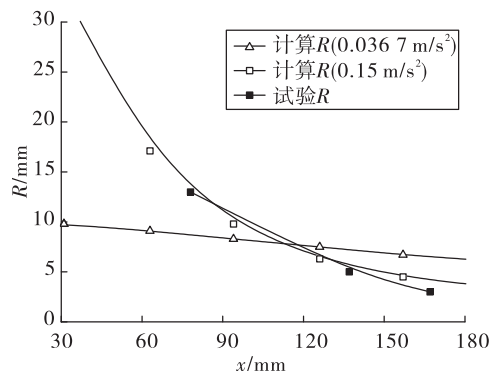


图 13 试验结果与计算结果对比 (0.0367 m/s^2)

Fig. 13 Contrast of experiment and calculation results (0.0367 m/s^2)

4) 球柱形贮箱, 轴向加速度 0.0394 m/s^2 。

试验平衡温度 31.49°C , 根据式(9)可求得对应的加速度值 0.0394 m/s^2 。试验实物如图 14 所示。



图 14 中性浮力试验贮箱实物图 (0.0394 m/s^2)

Fig. 14 The tank used in buoyancy experiment (0.0394 m/s^2)

试验结果与计算结果对比如图 15 所示。图 15 中给出了一种试验曲线与 2 种计算曲线, 2 种计算曲线对应不同的加速度值。

5) 球柱形贮箱, 侧向加速度 0.0404 m/s^2 。

试验平衡温度 31.35°C , 根据式(9)可求得对应的加速度值 0.0404 m/s^2 。试验实物如图 16 所示。

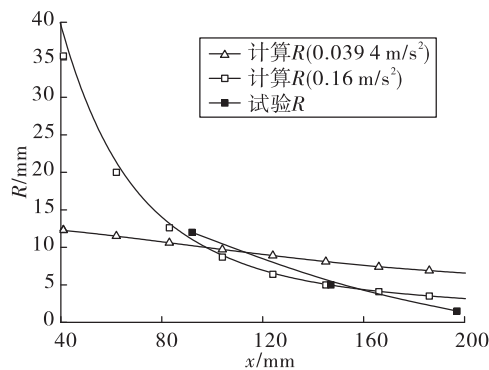


图 15 试验结果与计算结果对比 (0.039 4 m/s²)
Fig. 15 Contrast of experiment and calculation results (0.039 4 m/s²)

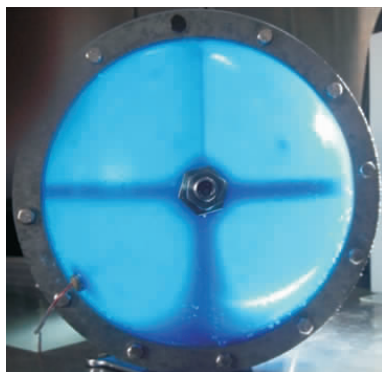


图 16 中性浮力试验贮箱实物图 (0.040 4 m/s²侧向)
Fig. 16 The tank used in buoyancy experiment (0.040 4 m/s² lateral)

试验结果与计算结果对比如图 17 所示。图中给出了一种试验曲线与 2 种计算曲线,2 种计算曲线对应不同的加速度值。

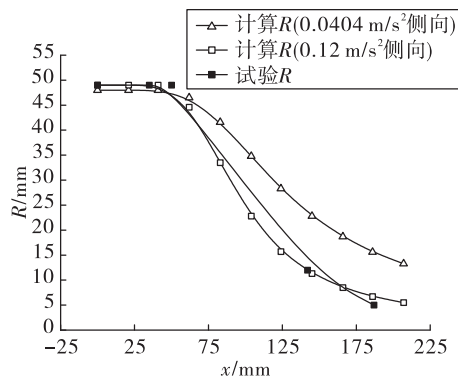


图 17 试验结果与计算结果对比 (0.040 4 m/s²侧向)
Fig. 17 Contrast of experiment and calculation results (0.040 4 m/s² lateral)

3.3 中性浮力试验分析

通过多种微重力工况的静平衡中性浮力试验,得到了试验曲线与计算曲线的对比关系。根据上述各条曲线的对比可以发现,中性浮力试验的结果与计算程序的结果具有一定的偏差,但对微重力加速度取一定的系数后,试验结果与计算程度结果的一致性较好。文中所列曲线的系数统计如表 3 所示。

表 3 试验结果统计表
Tab. 3 Experiment results

工况/(m · s ⁻²)	与试验曲线一 致性较好的加 速度值/(m · s ⁻²)	系数
球形贮箱,轴向加速度 0.007	0.028	4.0
球形贮箱,轴向加速度 0.027 5	0.100	3.6
球形贮箱,轴向加速度 0.036 7	0.150	4.1
球柱形贮箱,轴向加速度 0.039 4	0.160	4.1
球柱形贮箱,侧向加速度 0.040 4	0.120	3.0

板式表面张力贮箱中的导流板结构通常应用于 10⁻² ~ 10⁻⁴ m/s²微重力加速度下,而上表所列加速度已经达到了 10⁻¹ m/s²,是因为本次计算针对直径 200 mm 的贮箱。根据相似准则,中性浮力试验基于 Bond 数相等,根据式(7),200 mm 贮箱直径下 10⁻¹ m/s²时的导流板蓄留能力相当于 1 000 mm 贮箱直径下 4 × 10⁻³ m/s²时的导流板蓄留能力。

可见,对试验结果对应的加速度取 3 ~ 4 倍系数后,试验结果与计算结果的一致性较好。关于 3 ~ 4 倍系数,可以从如下 2 个方面理解:①理论计算有一定的简化;②中性浮力试验是相似试验,主要考虑了 Bond 数相似,无法考虑其它的相似条件。基于上述两方面的原因,造成了该系数的存在。

4 工程可用的导流板计算方法

本文针对板式贮箱导流板不便进行地面验证的问题,一方面建立了一种理论计算方法,另一方面利用中性浮力试验进行了地面验证。通过计算结果与试验结果的对比,发现设置一定的系数后,2 种结果的一致性较好。考虑到中性浮力试验的特点,本文所述 3 ~ 4 倍系数是偏保守的。从工程保守的角度,可以认为,对理论加速度值取 3 倍系数后,可用于导流板的工程设计与计算。

基于上述认识,编制了一套适用于导流板计算的工程软件,可直接用于导流板的设计,软件界面如图 18 所示。



图 18 软件界面

Fig. 18 The software interface

5 结语

1) 针对板式贮箱导流板不便进行地面验证的问题,进行了理论计算研究与中性浮力试验研究,通过计算结果与试验结果的对比迭代,形成了一种经过修正的导流板液体传输能力计算方法。

2) 将导流板液体传输能力计算方法进行了程序化,形成了一种工程可用的便捷的导流板计算软件。

3) 通过本文研究,促进了板式表面张力贮箱设计技术的发展,加深了从业人员对于导流板性能的认识。

参考文献:

- [1] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: vanes [R]. AIAA 1991-2172.
- [2] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: sponges [R]. AIAA 1993-1970.
- [3] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: traps and troughs [R]. AIAA 1995-2531.
- [4] ROLLINS J R, GROVE R K, JAEKLE D E. Twenty three years of surface tension propellant management system design, development manufacture test and operation [R]. AIAA 1985-1199.
- [5] 宁继荣,陈祖奎,马键,等. 可再充填启动篮表面张力推进剂管理装置设计及试验研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(2): 25-29.
NING J R, CHEN Z K, MA J, et al. Design and test of refillable start-basket surface tension PMD [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(2): 25-29.
- [6] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: galleries [R]. AIAA 1997-2811.
- [7] 宁继荣,苏志一,张涛. 多孔板泡破点试验研究[J]. 火箭推进, 2017, 43(6): 48-53.
NING J R, SU Z Y, ZHANG T. Test research on bubble point of perforated plate [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(6): 48-53.
- [8] 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[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 503-507.
- [9] 穆小强,陈祖奎. 竖管-叶片式表面管理装置的设计与分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(1): 15-18.
MU X Q, CHEN Z K. Design and analysis for standpipe and its vane surface tension management device [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(1): 15-18.
- [10] DEBRECENI M J, KUO T K, JAEKLE D E. Development of a composite wrapped propellant tank [R]. AIAA 2004-3505.
- [11] DEBRECENI M J, LAY W D, KUO T K, et al. Propellant tank for an advanced communications satellite [R]. AIAA 2001-3826.
- [12] 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.
- [13] 李乐. 推进剂微重力加注稳定性仿真分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 41-45.
LI L. Simulation and analysis of propellant refueling stability under low-gravity condition [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 41-45.
- [14] 穆小强,陈祖奎,宁继荣,等. 海绵表面张力管理装置的设计与分析[J]. 火箭推进, 2010, 36(5): 13-16.
MU X Q, CHEN Z K, NING J R, et al. Design and analysis for the sponge surface tension propellant management device [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(5): 13-16.
- [15] DUCRET E, MOULLEC L Le, SPENCER B, et al. Propellant management device studies computational methods and neutral buoyancy tests [R]. AIAA 1992-3611.
- [16] 孟庆平,陈志坚,简小刚,等. 表面张力贮箱设计中的中性浮力试验方法[J]. 上海航天, 2000, 4: 48-51.
- [17] BENTZ M D, KNOLL R H, LIN C S. Low-g fluid mixing: further results from the tank pressure control experiment [R]. AIAA 1993-2423.
- [18] CHATO D J. Technologies for refueling spacecraft on orbit [R]. AIAA 2000-5107.
- [19] TAM W, BEHRUZI P, JAEKLE D E, et al. The evolutionary forces and the design and development of propellant management devices for space flight in europe and the united states [Z]. SP2016_3124615.
- [20] COLLICOTT S H. Convergence behavior of surface evolver applied to a generic propellant management device [R]. AIAA 1999-0846.