

LI Guangyu, DAI Wei, HUANG Tianqi, LAI Tanghao, WU Zongyu. Design and Sloshing Suppression Simulation of 2.67 L Vane-type Surface Tension Tank (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 458–467. CSTR:32142.14.cjss.2024-0134. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0134

2.67 L 板式表面张力贮箱设计 及抗扰动性能仿真*

李光昱¹ 戴 炜¹ 黄天麒¹
赖堂豪¹ 吴宗谕²

1(南昌航空大学航空宇航学院 南昌 330063)

2(国防科技大学空天科学学院 长沙 410073)

摘 要 板式表面张力贮箱因结构简单、性能良好被广泛应用于各类卫星平台。本文针对微小卫星平台, 设计了一个 2.67 L 板式表面张力贮箱及其推进剂管理装置, 介绍了贮箱壳体、蓄液器、导流板和气泡筛网等主要部件的设计过程。根据平板间的蓄流原理完成了贮箱蓄液器的设计, 得到不同加速度扰动情况下的蓄液体积; 基于内角自流理论对导流板进行几何设计并确定了内外导流板数量; 对气泡筛网进行了选型, 复核了典型工况下气泡筛网泡破点的有效性; 通过 CFD 仿真, 分析了贮箱在不同填充率、不同加速度扰动情况下的质心变化。仿真结果表明, 当该贮箱受到 $10^{-3}g$ 量级加速度扰动时, 贮箱内推进剂质心变化小于 $10^{-2}m$, 证明本文所设计的 2.67 L 板式表面张力贮箱具有较强的抗扰动特性。

关键词 板式贮箱, 推进剂管理装置, 导流板, 蓄液器, 仿真分析

中图分类号 V432

Design and Sloshing Suppression Simulation of 2.67 L Vane-type Surface Tension Tank

LI Guangyu¹ DAI Wei¹ HUANG Tianqi¹
LAI Tanghao¹ WU Zongyu²

1(School of Aerospace Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

2(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Owing to its structural simplicity and superior performance, the vane-type surface tension tank has been widely applied in many satellites. In this paper, a 2.67 L vane-type propellant tank and its Propellant Management Device (PMD) were designed for micro satellites. The design process of key com-

* 国家自然科学基金项目 (52105290, 62373276) 资助

2024-10-22 收到原稿, 2024-12-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ponents, including the tank shell, propellant reservoir, vanes and bubble screen, was described in detail. Firstly, the design of the propellant reservoir was completed based on the principle of liquid accumulation between parallel plates, and the liquid volume under different acceleration disturbances was obtained. The outline and the number of internal and external vanes was carried out based on the theory of capillary flow in corners. Secondly, a bubble screen was selected and the effectiveness of the bubble screen in typical situation was checked. Finally, by CFD simulation, the centroid variation of the propellant in the tank under different fill levels and acceleration disturbances was analyzed. The simulation results demonstrate that when the tank is subjected to $10^{-3}g$ acceleration disturbances, the centroid variation of the propellant is less than 10^{-2} m, proving that the 2.67 L vane-type surface tension tank exhibits strong resistance to disturbances.

Key words Surface tension tank, PMD devices, Vane, Liquid reservoir, Simulation verification

0 引言

据统计,截至 2022 年底全球在轨卫星数量已达 7218 颗^[1],根据相关报道 SpaceX 公司计划在 2024 年底共部署 1.2 万颗互联网通信卫星,并最终实现部署约 4.2 万颗卫星的目标.中国星网计划建立包含约 1.3 万颗卫星的星座系统.迅猛增长的卫星数量考验着卫星性能.推进剂贮箱性能对于卫星长期在轨稳定运行起到关键作用.近年来,微小卫星因其较短的研发周期及较低的成本得到了广泛关注,针对微小卫星亟需研发一款结构简单且性能优良的贮箱.自 20 世纪 60 年代起,板式表面张力贮箱逐步应用于各类型航天器中.通过对叶片轮廓和数量进行设计, Viking 75 航天器贮箱在卫星机动过程中依然能够对气泡进行有效管理^[2].近几十年来,为提高卫星的在轨工作寿命,在轨加注技术应运而生.为此 NASA 提出了多种可重复加注的卫星贮箱方案,并通过落塔实验^[3]、微重力飞机^[4]和空间站飞行实验^[5,6]进行验证.在 FARE 实验中分别验证了筛网式和板式推进剂管理装置对推进剂的控制能力,实验表明板式贮箱的充放效率至少达到 98%^[5,6].早在 2003 年,中国就在东四平台开展了板式表面张力贮箱设计^[7],并利用落塔实验^[8]和空间站实验^[9]开展相关性能研究.地面实验及在轨测试表明,结构相对简单的板式表面张力贮箱具有良好的性能,并逐步成为研究的热点.

由于特殊工作条件,板式表面张力贮箱的设计及验证主要依靠理论计算以及后期仿真计算.20 世纪 60 年代,Concus 和 Finn^[10]研究了微重力条件下的内角流动,得到液体存在稳定边界的临界条件,即 Concus-Finn 条件.20 世纪 90 年代以来,随着板式表面

张力贮箱的兴起,Weislogel 等^[11]基于 N-S 方程建立内角流动理论,分析液体在内角中自流和过流过程中的界面变化,并在国际空间站进行了相关内角流动实验^[12].Dong 等^[13]对方形管的内角流动进行研究,得到了内角流动的解析解. Wei 等^[14]修正了 Dong 对于曲率半径的计算,寻找截面与曲率半径的关系,拓展了其应用范围. Li 等^[15]分析了对称内角上的毛细流动,对直导流板与弧形贮箱壁构成非对称内角上的毛细流动进行研究,并通过落塔实验^[16]进行了验证. Li 等^[17]建立了变内角的毛细流动方程,获得变内角流动的半解析解. Chen 等^[18,19]对微重力条件下平板间表面张力驱动流动过程进行了深入研究.

在相关实验基础上^[20],本文针对微小卫星平台,设计了一个 2.67 L 板式表面张力贮箱.基于微重力环境下平板间的液体蓄留原理及内角流动理论,对蓄液器和导流板进行设计及优化选型;根据筛网泡破点对气泡筛网进行选型,计算典型工况下的筛网流阻并对气泡筛网进行有效性复核;通过 CFD 计算得到不同填充率和不同加速度扰动下贮箱质心的变化情况,以验证推进剂管理装置性能.

1 设计需求与方案设计

1.1 设计需求

针对微小卫星平台,设计容积为 2.67 L 的板式表面张力贮箱,推进剂为无水肼,要求填充率不小于 90%,工作压力为 1.7 MPa,流量 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.需保证推进剂管理装置能够在卫星推进器工作情况下提供不含气的推进剂;保证在卫星推进器不工作或者单/多个推力器工作条件下,能够稳定提供所需推进剂;

同时在卫星机动情况下能够保持对贮箱推进剂质心的有效管理。

1.2 方案设计

针对此次任务,为便于贮箱安装,贮箱外形选择为两端球冠加中间圆柱段。推进剂管理装置选择抗扰动性能较强的板式表面张力推进剂管理装置,并搭配叶片式蓄液器与气泡筛网。板式表面张力推进剂管理装置是一种被动式装置,对实际工作中推进剂的管理需求没有自主适应能力,在设计过程中必须针对卫星具体任务情况进行设计。

贮箱壳体及其推进剂管理装置 (Propellant Management Device, PMD) 如图 1 所示。贮箱壳体由两个内径为 120 mm 的半球与中间长度为 160 mm 的圆柱段焊接组成,顶部接有进气口,底部接有出液口,球冠段与圆柱段焊接处包有加强筋,在贮箱安装时起到限位作用。贮箱内部推进剂管理装置分别为 6 个中心导流板、6 个外导流板、底部蓄液器和气泡筛网,其全部焊接在贯穿贮箱的圆柱上。除气泡筛网选用 TA1 外,贮箱其余部分均选用 TC4 材料,钛合金部分力学性能见表 1^[21]。无水肼在 20℃ 时的化物特性见表 2^[22]。

1.2.1 壳体设计

由于贮箱地面加注时涉及地面人员安全,根据表 1 中的各项力学性能,选择验证试验和爆破系数分别为 1.25 和 1.5,贮箱壳体厚度设计过程如下^[23]:

$$S_w = \frac{\sigma_{0.2}}{1.25}, \quad (1)$$

或者

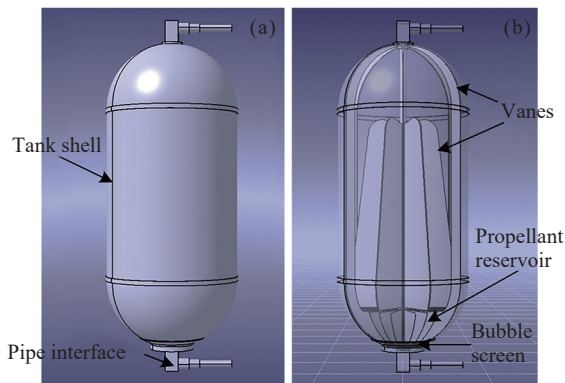


图 1 贮箱壳体 (a) 及其推进剂管理装置 (b)

Fig. 1 Tank shell (a) and its propellant management device (b)

$$S_w = \frac{\sigma_b}{1.5}. \quad (2)$$

经对比计算,最大许用应力 $S_w = 596.7$ MPa。贮箱设计压力 $P_t = 1.7$ MPa,安全系数取为低压压力容器常用系数 2.0,且焊缝效率为 100%,则贮箱球冠段最小壁厚为

$$t_q = \frac{P_t R}{2S_w}, \quad (3)$$

贮箱圆柱段最小壁厚为

$$t_z = \frac{P_t R}{S_w}. \quad (4)$$

计算得到最小壁厚为 0.1 mm。考虑贮箱可加工性,贮箱整体壁厚选取为 $t_b = 1$ mm,在过渡段考虑焊接工艺 (焊接系数取 0.9) 以及突跃应力,其过渡段壁厚为

$$t_j = 1.2t_b + 0.6t_b. \quad (5)$$

根据实际加工能力,实取球壳壁厚为 1.0 mm,公差为 (0, +0.05)。反推爆破压力为

$$P_e = 4S_w \varphi (t_b - C) / (R + t_b - C). \quad (6)$$

式中, P_e 单位为 MPa; φ 为焊接系数,此处取值为 0.9; C 表示贮箱的壁厚公差,为 0.05 mm。计算可得,贮箱爆破压力为 16.9 MPa,满足大于 3.4 MPa 的要求。

1.2.2 蓄液器设计

蓄液器作为 PMD 装置重要的部件之一,被广泛应用于各型号贮箱^[24]。贮箱通过蓄液器中蓄流的推进剂,保证卫星在机动过程中有足够的推进剂使用,其主要驱动力为蓄液器叶片表面张力。Jaekle^[25] 利用 Laplace 方程分析了由表面张力造成的气液交界面上的压力差。蓄液器工作原理如图 2 所示,通过叶片间

表 1 钛合金材料部分力学性能
Table 1 Partial mechanical properties of titanium alloy

材料牌号	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa
TC4	≥ 870	925~1150
TA1	≥ 250	370~530

表 2 无水肼化物特性
Table 2 Characteristics of hydrazine

密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度 / ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	表面张力 / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	接触角 /($^{\circ}$)
1008	0.971	0.0698	5

的液带曲率半径差产生表面张力, 克服外界扰动的影响, 即

$$\sigma \left(\frac{1}{R_{\text{up}}} - \frac{1}{R_{\text{low}}} \right) = \rho a (Z_{\text{up}} - Z_{\text{low}}). \quad (7)$$

其中, σ 为表面张力系数, ρ 为推进剂密度, a 为外部扰动的加速度, R_{up} 和 R_{low} 分别为叶片间液带对应的曲率半径, Z_{up} 和 Z_{low} 分别为叶片间液带在加速度方向相对于蓄液器中心点的距离. 定义 r_{up} 和 r_{low} 为叶片间液带表面到蓄液器中心的距离, ϕ_{up} 与 ϕ_{low} 分别为 r_{up} 和 r_{low} 与加速度方向的夹角, 当蓄液器叶片数量较多时, 可以认为 $Z_{\text{up}} = r_{\text{up}} \cos \phi_{\text{up}}$, $Z_{\text{low}} = r_{\text{low}} \cos \phi_{\text{low}}$, 则式 (7) 可改写为^[24]

$$\sigma \left(\frac{1}{R_{\text{up}}} - \frac{1}{R_{\text{low}}} \right) = \rho a (r_{\text{up}} \cos \phi_{\text{up}} - r_{\text{low}} \cos \phi_{\text{low}}). \quad (8)$$

由 Young-Laplace 公式可知, 若要将推进剂蓄留在蓄液器中, 则叶片间推进剂所受由于表面张力导致的界面压力差, 必须大于等于由微重力产生的静压力, 即

$$\sigma \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \Delta R} \right] \geq \rho a \Delta Z. \quad (9)$$

当 R_{up} 与 R_{low} , Z_{up} 与 Z_{low} 相差较小且蓄液器叶片足够密时, 可以认为 $\Delta R = R_{\text{up}} - R_{\text{low}}$, $\Delta Z = Z_{\text{up}} - Z_{\text{low}}$ 亦足够小, $R \approx e/2$, e 为液带所处叶片间距, $e = 2r \sin(\pi/N) - t$. r 为蓄液器半径, N 为叶片数量, t 为叶片厚度. 式 (9) 可近似为

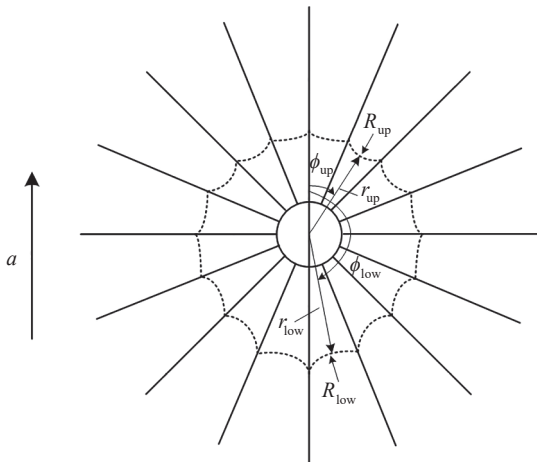


图 2 蓄液器工作原理

Fig. 2 Working principle of propellant reservoir

$$\sigma \frac{dR}{R^2} \geq \rho a dZ. \quad (10)$$

这样可以得到蓄液器临界微重力加速度为

$$a_{\text{lim}} = 2 \frac{\sigma de}{\rho e^2 dZ}. \quad (11)$$

通过求解式 (7), 可以得到蓄液器的最大蓄液量. 在求解时, 以扰动加速度为零时的液带半径和高度为基准, 这里定义为 R_0 和 Z_0 , 这样可将式 (7) 写为

$$\sigma \frac{1}{R} - \rho a Z = \sigma \frac{1}{R_0} - \rho a Z_0. \quad (12)$$

结合贮箱整体尺寸及蓄液器预期蓄液量, 设定蓄液器叶片顶部半径 $r_1 = 50$ mm, 叶片底部半径 $r_2 = 20$ mm, 叶片厚度 $t = 0.2$ mm, 叶片数量 $N = 24$. 由式 (11) 可得, 蓄液器有效工作的临界加速度 $a_{\text{lim}} = 0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

采用式 (12) 计算不同加速条件下蓄液器的蓄液能力. 由于蓄液器半径变化, 将蓄液器按高度离散, 计算不同高度处的蓄液面积, 积分获得蓄液器的蓄液能力. 结果列于表 3.

1.2.3 导流板设计

不同于第一代表面张力贮箱使用大面积的筛网, 来实现对推进剂的积蓄和气液分离, 第二代表面张力贮箱使用大面积导流板代替脆弱的筛网结构, 简化了贮箱的结构. 板式表面张力贮箱根据其导流板安装位置不同, 大致可分为内导流板式、外导流板式和内外组合式三种贮箱. 其中, 内导流板式贮箱具有较强的推进剂管理能力, 但由于其导流板远离壁面, 无法对壁面附近的推进剂形成有效管理; 外导流板式贮箱解决了内导流板式贮箱在壁面附近管理能力的不足, 却弱化了管理装置对贮箱中心处推进剂的管理、积蓄能力. 内外组合式贮箱继承了内导流板和外导流板式贮箱的优点, 具有良好的推进剂管理能力. 为获得最佳控制能力, 在实际使用中内外导流板间次排列 (见图 3). 在微重力环境下, 重力对贮箱内液体的影响急剧减小. 表面张力作为主要的控制力, 将推进剂约束在内导流板间及外导流板与壁面之间的内角流道内.

表 3 蓄液器的蓄液能力

Table 3 Liquid storage capacity of propellant reservoir

扰动量级 / g	0.01	0.005	0.001
蓄液能力 / mL	74.6	87.4	102.6

在无外界扰动情况下, 贮箱内形成稳定的气液分界面。

内导流板整体为轴对称结构, 取其中任意一个内角为研究对象 (见图 4), Wu^[26] 将液体在内角中的流动简化为黏性且不可压缩的层流, 通过求解不同截面处在微重力下内角自流的连续性方程及液体所受压力, 得到内角自流流量公式, 并得到单个内角流量为

$$Q_{\text{inner}} = 0.349 F_A \sqrt{\frac{GH^5}{t'}}. \quad (13)$$

式中, F_A 为横截面的几何函数^[26], G 为流动系数^[26], H 为液柱的特征高度^[26], t' 为时间. 结合 Lazzer 等^[27] 提出的平均曲率半径计算公式, 对液面平均曲率半径 R 和内导流板宽度 V_1 进行无量纲化, 得到内导流板单位尺寸传输流量为

$$q = 100 \frac{q}{0.349 \sqrt{\sigma F_i r^2}} = 100 F_A \frac{\sin \alpha}{V' f^3} \sqrt{R'^5}. \quad (14)$$

式中, $f = \sin \alpha / (\cos \theta - \sin \alpha)$ 为液面的曲率, r 为贮箱的半径, θ 为接触角; F_i 为流阻函数, V' 为无量纲化导流板尺寸, R' 为无量纲化液面曲率半径。

不同于内导流板间的对称流道, 外导流板与壁面间构成非对称内角流道. Li 等^[28] 从液面曲率半径入手, 引入虚拟内角及等效内角的概念, 通过曲率半径推导出对应的虚拟内角 α' , 继而得到虚拟内角 α 对应的虚拟特征高度. 根据虚拟内角角度和虚拟特征高度得到不对称圆弧内角的液面特征高度 H , 进而通过液面特征高度 H 求得等效内角 α . 最终将非对称流道的内角流动转化为基于等效内角的对称内角流动. 基于以上方法, 引入贮箱的曲率系数 ψ 和参数 λ ^[26], 对内角

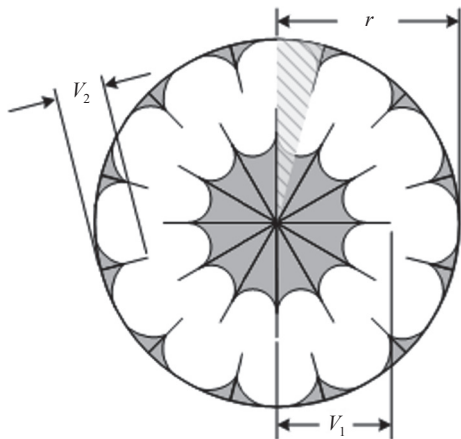


图 3 内外导流板贮箱截面

Fig. 3 Cross section of inner and outer vanes

自流流量公式及相关参数进行如下修正:

$$Q_{\text{outer}} = 0.349 F_B \sqrt{(1-\lambda)^5 (1-\psi) \frac{GH^5}{t'}}. \quad (15)$$

式中, F_B 为横截面几何函数^[26]. 通过无量纲化处理后, 得到单位尺寸外导流板传输流量为

$$q = 100 \frac{q}{0.349 \sqrt{\sigma F_i r^2}} = \frac{200 F_B \frac{\sin \alpha}{V' f^3} \sqrt{(1-\lambda)^5 (1+0.7\psi) R'^5}}{100} \quad (16)$$

由内外导流板单位尺寸流量计算公式可知, 导流板传输流量由内外导流板的个数 N 、内导流板尺寸 V_1 、外导流板尺寸 V_2 、曲率系数 ψ 以及推进剂与导流板间的接触角 θ 共同决定. 以无水肼推进剂为例, 结合贮箱的半径以及任务对推进剂流量的需求, 综合分析内外导流板单位尺寸的传输量, 通过最大值寻优可求得, 当 $N=4$, $V_1=0.25r$, $V_2=0.31r$ 时, 无量纲化单位尺寸导流板传输流量 q 有最大值 1.237, 重定位时间预估为 1.3431 s; 当 $N=6$, $V_1=0.37r$, $V_2=0.23r$ 时, 无量纲化单位尺寸导流板传输流量 q 有最大值 1.675, 重定位时间预估为 2.0492 s; 当 $N=8$, $V_1=0.44r$, $V_2=0.19r$ 时, 无量纲化单位尺寸导流板传输流量 q 有最大值 2.02. 考虑导流板组装的难易程度, 最终选择采用 6 片内导流板和 6 块外导流板间次安装的结构。

1.2.4 气泡筛网选型

气泡筛网设计准则是, PMD 中所有流阻之和小于毛细网的泡破点^[29], 即

$$\Delta P_c \geq \Delta P_f + \Delta P_v + \Delta P_h + \Delta P_e + \Delta P_t. \quad (17)$$

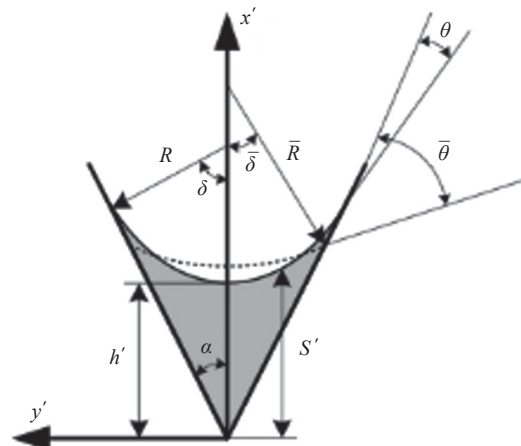


图 4 内导流板内角

Fig. 4 Interior corner created by inner vanes

其中, ΔP_c 为筛网泡破点.

ΔP_f 为推进剂沿管道流动的摩擦损失, 其计算公式为

$$\Delta P_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (18)$$

式中, λ 为摩擦系数, l 和 d 分别为管道长度与内径, v 为流速.

ΔP_v 为动压损失, 其计算公式为

$$\Delta P_v = \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (19)$$

ΔP_h 为静压损失, 其计算公式为

$$\Delta P_h = \rho gh. \quad (20)$$

ΔP_e 为推进剂通过筛网的压力损失, 其计算公式为

$$\Delta P_e = A\mu v + B\rho v^2. \quad (21)$$

其中, A 和 B 为与筛网相关的经验系数, μ 为推进剂黏度.

ΔP_t 为瞬时压力损失, 主要是贮箱转场以及卫星机动过程中引起的瞬间过载, 此处过载加速度采用车辆制动过载 $1.5g$, 则

$$\Delta P_t = 1.5\rho gh. \quad (22)$$

选取 150×950 目钛合金筛网作为贮箱内的气泡筛网, 筛网原材料为 TA1, 其在无水乙醇介质中的最小泡破点压力 $\Delta P_{cc} = 1200$ Pa, 对于无水肼介质中的泡破点压力 ΔP_{cj} , 可由以下公式近似计算得到:

$$\Delta P_{cj} = \frac{\gamma_j}{\gamma_e} \Delta P_{cc}. \quad (23)$$

其中, γ_e 和 γ_j 分别为无水乙醇和无水肼的表面张力, 计算得到筛网在无水肼中的最小泡破点压力为 3775 Pa.

建立仿真模型, 分析当微重力水平为 $10^{-4}g$ 时, 无水肼在不同流量下通过贮箱的流阻. 考虑到筛网因杂质等原因部分失效, 验证时分别选用全尺寸筛网、1/2 面积筛网和 1/10 面积筛网. 结果显示, 当出口流量为 $0 \sim 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 推进剂通过 1/10 面积筛网时的流阻小于 3700 Pa, 符合设计要求.

2 贮箱性能仿真

由于微重力落塔实验^[30-32]和抛物线飞行^[33]存在微重力时间较短及成本高昂的制约因素, 迫切需要采用一种较为便捷的方式进行气液自由界面分析. 随着

计算机技术和计算流体力学的发展, 为研究微重力流体科学引入了新的工具. Ballereau 等^[34]利用相关物理和数学模型编写了 AGRO 仿真软件, 模拟微重力下贮箱内推进剂的流动. Wu 等^[35]利用 FLOW-3D 软件分析了叶片形态对贮箱推进剂管理性能的影响, 并对贮箱内推进剂重定位过程进行仿真分析. Jiang 等^[36]基于 Surface Evolver 软件对推进剂贮箱的气液界面进行了分析. Huang 等^[37]、Wang 等^[38]和 Liu 等^[39]分别利用 Fluent 软件分析了扰动状态下 PMD 的性能. 本文采用 Fluent 软件内置的 VOF 方法, 对贮箱在不同外部环境下的推进剂保持能力进行仿真分析. VOF 方法的控制方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (24)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \mathbf{f}, \quad (25)$$

$$\mathbf{f} = -\sigma \left(\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \varepsilon}{|\nabla \varepsilon|} \right) \nabla \varepsilon, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = 0. \quad (27)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为流动速度, ρ 为各相的密度, μ 为黏度, ε 为各相的体积分数, $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\mathbf{f}$ 为界面力源项.

2.1 仿真模型

将所设计贮箱模型导入 ICEM 进行非结构网格划分, 并进行网格无关性分析^[40]. 参考推进剂在导流板内的流动规律^[41], 仿真过程中选择层流模型, 利用显式方程求解体积分数. 将壁面设为固定、无滑移的边界条件, 动量项和体积分数采用 QUICK 方法离散, 压力项采用 Body Force Weighted 方法进行离散. 计算域分为两个区域, 第一项为氮气, 其密度为 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 黏度为 $1.663 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 第二项为无水肼, 无水肼和氮气接触面的表面张力为 $0.0698 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. 仿真过程中分别选择贮箱的充液率为 50%, 80%, 90%, 参考卫星脉冲的典型工况^[37], 分别对比受到不同扰动时的质心变化情况 (见表 4), 用以判断贮箱具有良好的推进剂管理能力, 适用于对质心要求高的任务. 同时, 沿垂直于轴向扰动的方向建立监测面, 记录通过监测面的推进剂流量.

2.2 结果分析

图 5 和图 6 分别显示了贮箱在 50% 和 90% 充液率, 受到侧向 $a_x = -0.0141 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、轴向 $a_z =$

表 4 仿真工况
Table 4 Conditions for simulation

序号	充液率/(%)	扰动大小/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	扰动持续时间/s
1	50	无扰动	4
2	50	$a_x=-0.014$	4
3	50	$a_x=-0.00141$	4
4	50	$a_z=-0.00141$	4
5	50	$a_z=-0.0141$	4
6	80	$a_x=-0.00141$	8.8
7	90	无扰动	1
8	90	$a_x=-0.014$	1
9	90	$a_x=-0.00141$	1
10	90	$a_z=-0.00141$	1
11	90	$a_z=-0.0141$	1

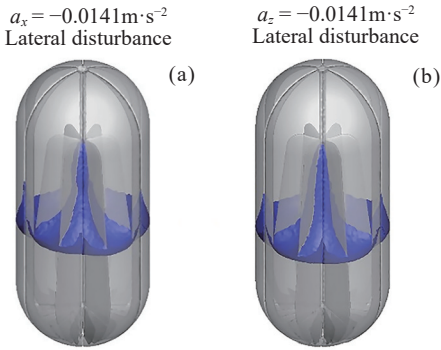


图 5 50% 充液量受扰动时的液面

Fig. 5 Surface of the liquid under 50% filling rate

$-0.0141\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 加速度扰动时的液面分布情况. 从图中可以看出, 不同充液率下, 贮箱内气垫仍保持在贮箱顶部, 与出口气接触, 推进剂被蓄留在贮箱底部, 气液界面稳定, 边界清晰, 并未因受到较大加速度扰动而导致气液混合. 仿真结果反映了推进剂管理装置较好的管理性能.

图 7 和图 8 分别给出充液率为 50% 和 90% 时不同方向加速度扰动下的质心对比, 从图中可以看出, 在受到外部轴向扰动时, 贮箱质心整体变化幅度有限且随着扰动强度的增加, 质心的偏移量逐渐增大, 但各轴的偏移量均小于 10^{-3} m , 且 x, y 轴的变化幅度远小于 z 轴. 在受到 $-x$ 方向的侧向扰动时, 推进剂在外部扰动的作用下向一侧堆积, 受此影响贮箱 x 向和 z 向的质心发生了较大幅度的偏移, 且偏移幅度随着

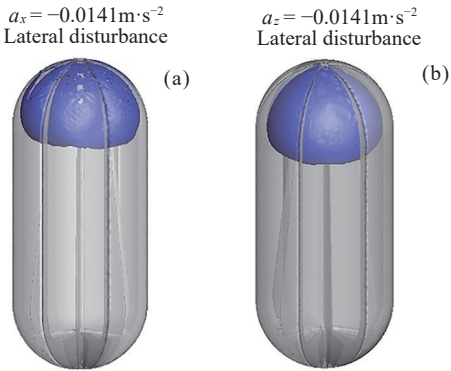


图 6 90% 充液量受扰动时的液面

Fig. 6 Surface of the liquid under 90% filling rate

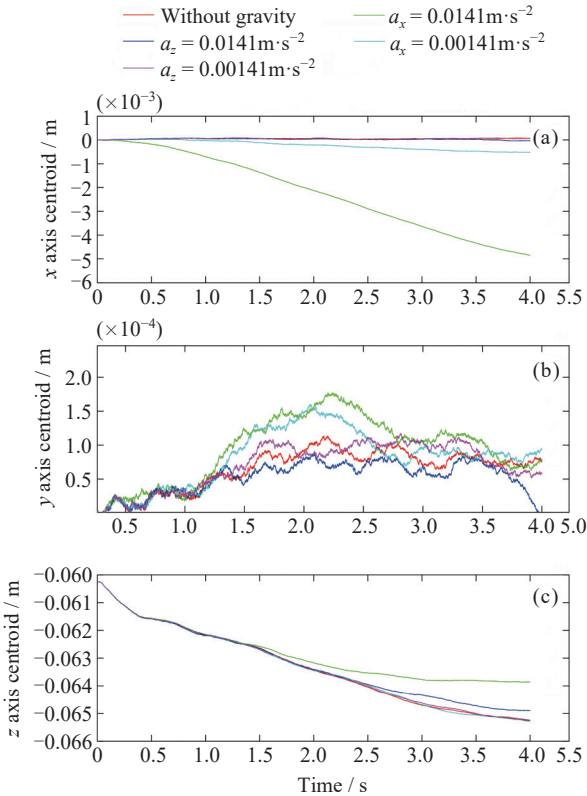


图 7 50% 充液量时的质心变化

Fig. 7 Centroid change under 50% filling rate

外部扰动的增强而不断加大. 但整体偏离幅度均在 10^{-2} m 内. 当取消外部扰动后, 贮箱整体的质心偏移量逐渐减小至未施加扰动的水平.

细分不同填充率下推进剂的初始液面分布: 当充液率为 50% 时, 初始分界面横跨内外导流板; 当充液率为 80% 时, 初始分界面横跨外导流板且与内导流板最高点基本持平; 当充液率为 90% 时, 初始分

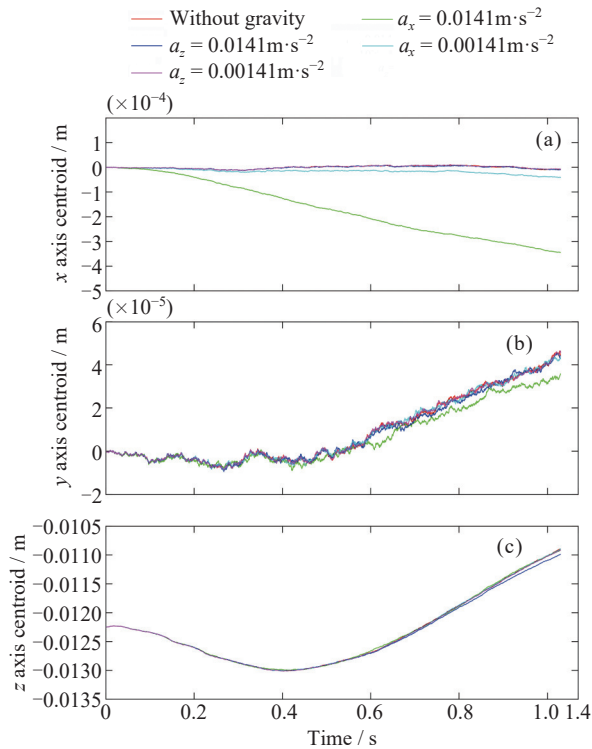


图 8 90% 充液量时的质心变化

Fig. 8 Centroid change under 90% filling rate

界液面仅与外倒流板接触. 由仿真结果可知, 相比轴向扰动, 周向扰动对贮箱质心的影响更大, 但影响有限. 并且在扰动过程中气液分解面完整. 证明该贮箱具有良好的推进剂管理能力.

图 9 为 80% 充液量下受到 $a_x = -0.00141 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的侧向扰动时通过监测面的质量流率. 与质心变化曲线类似, 质量流率存在稳定的增长期, 此时贮箱的质心偏移趋势与轴向扰动情况下基本一致. 随后质量流率长期保持在较高水平, 此时质心偏移量逐渐增大. 最后通过贮箱对称面的质量流量逐渐减小, 此时贮箱液面处于动态稳定的阶段, 各轴的质心位置达到新的稳定值.

3 结语

针对微小卫星需求设计了一个 2.67 L 板式表面张力贮箱, 详细描述了贮箱内外导流板组件、蓄液器、气泡筛网推进剂管理装置的设计过程, 并通过典型工况下的理论计算, 对蓄液器、气泡筛网的推进剂管理性能进行复核, 结果表明以上管理装置均满足需求. 另外, 建立了 CFD 仿真模型, 对推进剂管理装置

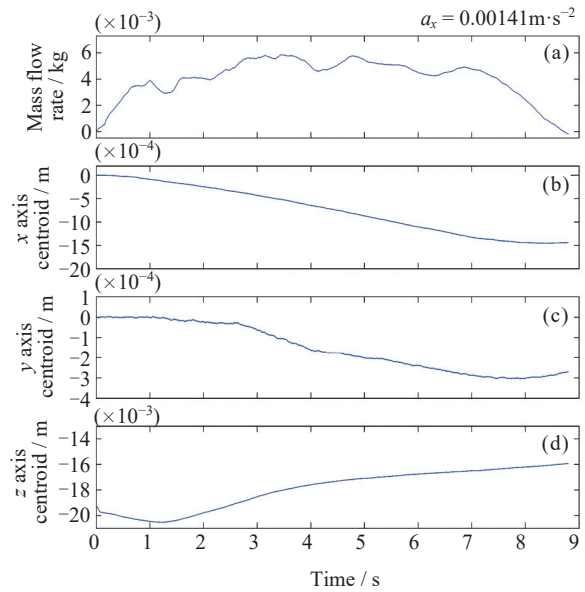
图 9 80% 充液量时通过 xy 平面的质量流率及质心偏移

Fig. 9 Mass flow rate and centroid change under

80% filling rate in xy plane

的性能, 特别是抗扰动能力进行仿真验证. 仿真结果表明, 所设计的 2.67 L 板式表面张力贮箱及其推进剂管理装置具有良好的推进剂管理能力, 在受到外部 $10^{-3}g$ 量级的加速度扰动时, 能够有效抑制液面晃动, 贮箱内推进剂质心变化小于 10^{-2} m .

参考文献

- [1] China Aerospace Science and Technology Corporation. Blue Book of China Aerospace Science and Technology Activities[M]. 2022 (中国航天科技集团有限公司. 中国航天科技活动蓝皮书 (2022 年)[M]. 北京: 中国航天科技集团, 2022)
- [2] DOWDY M W, DEBROCK S C. Selection of a surface-tension propellant management system for the Viking 75 orbiter[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1973, **10**(9): 549-558
- [3] DOMINICK S, TEGART J. Low-g propellant transfer using capillary devices[C]//Proceedings of the AIAA/SAE/ASME 17th Joint Propulsion Conference. Colorado: AIAA, 1981
- [4] BICKNELL B A, CZYSZ P M. Low-g venting tests to support on-orbit fluid resupply systems[C]//Proceedings of the AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference. Orlando: AIAA, 1990
- [5] DOMINICK S M, DRISCOLL S L. Fluid acquisition and resupply experiment (FARE-I) flight results[C]//Proceedings of the 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey: AIAA, 1993

- [6] DOMINICK S M, TEGART J R. Orbital test results of a vanned liquid acquisition device[C]//Proceedings of the AIAA/ASME/SAE/ASEE 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indianapolis: AIAA, 1994
- [7] 唐飞, 姚灿, 丁凤林, 等. 某飞行器板式表面张力贮箱液体晃动分析 [C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集——S02 液体推进及相关技术. 北京: 北京控制工程研究所, 2019: 6. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.036062
- [8] ZHUANG Baotang, LI Yong, PAN Hailin, *et al.* Experiment investigation on transportation velocity of the fluid on propellant acquisition vanes under microgravity environment[J]. *Aerospace Control and Application*, 2012, **38**(6): 1-5 (庄保堂, 李永, 潘海林, 等. 微重力环境下导流叶片流体传输速度的试验研究 [J]. *空间控制技术与应用*, 2012, **38**(6): 1-5)
- [9] CHEN Shuyang, ZHANG Pu, HU Liang, *et al.* On-orbit experimental and numerical study on the emptying process of tank models[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, **56**(11): 3351-3358 (陈舒扬, 张璞, 胡良, 等. 板式贮箱排空过程的在轨实验和仿真研究 [J]. *力学学报*, 2024, **56**(11): 3351-3358)
- [10] CONCUS P, FINN R. On the behavior of a capillary surface in a wedge[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences the United States of America*, 1969, **63**(2): 292-299
- [11] WEISLOGEL M M, LICHTER S. Capillary flow in an interior corner[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, **373**: 349-378
- [12] WEISLOGEL M M, JENSON R, CHEN Y K, *et al.* The capillary flow experiments aboard the international space station: status[J]. *Acta Astronautica*, 2009, **65**(5/6): 861-869
- [13] DONG M, CHATZIS I. The imbibition and flow of a wetting liquid along the corners of a square capillary tube[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, **172**(2): 278-288
- [14] WEI Y X, CHEN X Q, HUANG Y Y. Interior corner flow theory and its application to the satellite propellant management device design[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**(7): 1849-1854
- [15] LI J H, CHEN X Q, HUANG Y Y. The review of the interior corner flow research in microgravity[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **31**: 331-336
- [16] LI J H, CHEN X Q, HUANG Y Y. Capillary flow in the vane-type surface tension tank: drop tower test results[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **224**: 325-328
- [17] LI Yongqiang, LIU Ling, ZHANG Chenhui, *et al.* Analytical approximations for capillary flow in interior corners of infinite long cylinder under microgravity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(2): 024701 (李永强, 刘玲, 张晨辉, 等. 微重力环境下无限长柱体内角毛细流动解析近似解研究 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(2): 024701)
- [18] CHEN Shangdong, WU Di, WANG Jia, *et al.* Capillary rise of liquid between plates with a certain angle under microgravity[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, **54**(2): 326-335 (陈上通, 吴笛, 王佳, 等. 微重力下成一定夹角平板间的表面张力驱动流动的研究 [J]. *力学学报*, 2022, **54**(2): 326-335)
- [19] CHEN S T, DUAN L, KANG Q. Study on propellant management device in plate surface tension tanks[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, **37**(10): 1498-1508
- [20] LI G Y, HUANG Y Y, HAN W, *et al.* Space liquid transport experiments in Tianyuan-1[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(5): 100
- [21] State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 3621-2002 Titanium and Titanium Alloy Plate and Sheet[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022 (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 3621-2002 钛及钛合金板材 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022)
- [22] LI Yaye. Liquid Propellant[M]. Beijing: China Spaceflight Publishing House. 2011 (李亚裕. 液体推进剂 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011)
- [23] HUZEL D K. Modern Engineering For Design of Liquid-Propellant Rocket Engines[M]. ZHU Ningchang, trans. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003: 362-370 (HUZEL D K. 液体火箭发动机现代工程设计 [M]. 朱宁昌, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 362-370)
- [24] LI Yong, ZHAO Chunzhang, PAN Hailin, *et al.* The applications in the vane type tank and performance analysis for the sponge[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, **29**(1): 24-28 (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)
- [25] JAEKLE JR D E. Propellant management device conceptual design and analysis: sponges[C]//Proceedings of the AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey: AIAA, 1993
- [26] WU Zongyu. Investigation and Application of Free Surface Flow in Curved Channels Under Microgravity[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019 (吴宗谕. 微重力条件下弯曲通道自由界面流动机理及其应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019)
- [27] DE LAZZER A, LANGBEIN D, DREYER M, *et al.* Mean curvature of liquid surfaces in cylindrical containers of arbitrary cross-section[J]. *Microgravity Science and Technology*, 1996, **9**(3): 208-219
- [28] LI J H, CHEN X Q, HUANG Y Y, *et al.* Study on asymmetric interior corner flow in microgravity condition[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(8): 2332-2337
- [29] HARTWIG J W, DARR S R, MCQUILLEN J B, *et al.* A steady state pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices[J]. *Cryogenics*, 2014, **64**: 260-271
- [30] MIAO Nan, WANG Jing, LIU Zhanhe, *et al.* Simulation and analysis of liquid behavior in micro-gravitational drop tower experiments[J]. *Chinese Journal of Applied Mechan-*

- ics*, 2020, **37**(4): 1763-1769 (苗楠, 王菁, 刘战合, 等. 微重力落塔实验中的流体行为仿真与分析 [J]. *应用力学学报*, 2020, **37**(4): 1763-1769)
- [31] LIU J T, LI Y, LI W, *et al.* Experimental study on liquid sloshing of a vane-type surface tension tank for satellite[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(5): 83
- [32] LIU J T, LI Y, LI W, *et al.* Experimental investigation of liquid transport in a vane type tank of satellite with micro-gravity[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, **105**: 106007
- [33] SMIRNOVA M N, NIKITIN V F, SKRYLEVA E I, *et al.* Capillary driven fluid flows in microgravity[J]. *Acta Astronautica*, 2023, **204**: 892-899
- [34] BALLEREAU P, GELAS C, SALAÜN M, *et al.* Numerical simulation of the influence of vibrations on a free surface flow under microgravity[J]. *Aerospace Science and Technology*, 1997, **1**(3): 191-202
- [35] WU Z Y, LI K, HAN W, *et al.* Simulation analysis of liquid flow in a vane-type surface tension tank[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(5): 80.
- [36] JIANG Zhijie, WU Zongyu, LIU Changqing, *et al.* Liquid-gas interface analysis of propellant tank based on surface Evolver[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(6): 1066-1073 (姜志杰, 吴宗谕, 刘常青, 等. 基于 Surface Evolver 的推进剂贮箱气液界面分析 [J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(6): 1066-1073)
- [37] HUANG Bin, WANG Lu, CHEN Lei, *et al.* Analysis of propellant sloshing behavior in vane-type surface tension tank in lateral microgravity environment[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, **47**(1): 63-69 (黄滨, 王璐, 陈磊, 等. 侧向微重力环境下板式表面张力贮箱内推进剂晃动行为分析 [J]. *空间控制技术与应用*, 2021, **47**(1): 63-69)
- [38] WANG L, ZHANG X Y, YUN Y Y, *et al.* Numerical simulation of the reorientation process under different conditions in a vane-type surface tension propellant tank[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2022, **34**(3): 37
- [39] LIU Jintao, LI Yong, LI Wen, *et al.* Numerical simulation of the flow in a vertical vane type tank with micro downward acceleration[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, **793**(1): 012055
- [40] DAI Wei, ZHANG Zhongyuan, LI Guangyu, *et al.* Grid convergence analysis for numerical simulation of propellant reposition process in vane-type surface tension tank[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, **43**(4): 85-92 (戴伟, 张钟元, 李光昱, 等. 板式表面张力贮箱推进剂重定位过程数值仿真的网格收敛性分析 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, **43**(4): 85-92)
- [41] QIU Zhonghua, LIU Zhijie, ZHU Wenjie, *et al.* Theoretical calculation and experimental verification of vanes using in vane type surface tension tank[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2020, **46**(2): 21-28 (邱中华, 刘志杰, 朱文杰, 等. 板式表面张力贮箱导流板的理论计算与试验验证 [J]. *火箭推进*, 2020, **46**(2): 21-28)

作者简介



李光昱 男, 1988 年 6 月出生于江西省赣州市, 现为南昌航空大学航空宇航学院讲师, 主要研究方向为微重力流体力学、卫星在轨加注技术等。
E-mail: lgynudt@sina.com



吴宗谕 (通信作者) 男, 1991 年 3 月出生于河南省周口市, 现为国防科技大学空天科学学院副教授, 主要研究方向为微重力流体力学、卫星在轨服务技术等。
E-mail: wuzongyu@nudt.edu.cn