微重力充液贮箱晃动刚-液耦合效应研究*

郭子漪[1]　相耀磊[1]　李凯[1,2]　张正川[1]

1（中国科学院力学研究所微重力重点实验室　北京　100190）

2（中国科学院大学工程科学学院　北京　100049）

摘要　航天器在执行姿态调整、交会对接及轨道机动等任务过程中，受到微重力环境以及横向、旋转等复合扰动作用，充液贮箱内推进剂发生显著晃动，并通过晃动力与航天器产生刚-液耦合运动，进而影响航天器姿态稳定性及高精度控制。本文基于开源计算流体力学平台OpenFOAM，开发了贮箱-推进剂系统六自由度刚-液耦合晃动求解器，系统研究了初始角速度、外力加载过程、流体-刚体质量比对系统动力学特性的影响。结果表明，刚-液耦合效应对系统稳定性的影响具有双重作用：一方面，流体晃动产生的能量耗散使耦合状态下流体振荡的衰减速度高于非耦合状态；另一方面，刚-液耦合引起的附加力和力矩使系统运动偏离预期目标状态，且系统六自由度运动、液体质心等受具体工况参数的显著影响。因此，在航天器姿态控制系统设计与稳定性评估中，应充分考虑刚-液耦合效应及其参数依赖性。

关键词　推进剂管理，微重力，刚-液耦合，贮箱晃动

中图分类号　O357

Rigid Body-Liquid Coupled Sloshing in Partially Filled Tank under Microgravity

GUO Ziyi[1]　XIANG Yaolei[1]　LI Kai[1, 2]　ZHANG Zhengchuan[1]

1 (*National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

2 (*School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149*)

Abstract During spacecraft operations such as attitude adjustment, rendezvous and docking, and orbital maneuvers, the propellant in partially filled tanks undergoes significant sloshing under microgravity conditions and combined disturbances, including lateral acceleration and rotational motion. The resulting sloshing-induced forces and moments interact with the spacecraft, leading to rigid body-liquid coupled motion and consequently affecting spacecraft attitude stability and high-precision control. In this study, a six-degree-of-freedom (6-DOF) rigid body-liquid coupled sloshing solver for tank–propellant systems was developed based on the open-source computational fluid dynamics platform OpenFOAM. The effects of initial angular velocity, external force loading process, , and fluid-to-rigid-body mass ratio on the dynamic characteristics of the coupled system were systematically investigated. The results demonstrate that rigid-body–liquid coupling has a dual

北京市科学技术协会 2024-2026 年度青年人才托举工程（证书编号：No.BYESS2024394），北京市自然科学基金-北京经济技术开发区创新联合基金（L258046）项目资助

2026-07-02 收到原稿，2026-11-09 收到修定稿

最新录用

effect on system stability. On the one hand, energy dissipation induced by fluid sloshing leads to a higher decay rate of fluid oscillations in the coupled state than in the uncoupled state. On the other hand, the additional forces and moments induced by rigid body-liquid coupling cause the system motion to deviate from the desired target state, while the 6-DOF motion of the system and the liquid center-of-mass dynamics are significantly affected by the specific operating conditions. Therefore, rigid body-liquid coupling and its dependence on system parameters should be adequately considered in the design of spacecraft attitude control systems and the assessment of their stability.

Key words Propellant management, Microgravity, Rigid body-fluid coupling, Tank sloshing

0 引言

随着深空探测成为空间科学领域的前沿热点以及世界航天强国的重要战略方向，发展可靠高效、低成本的航天器已成为航天技术发展的重要目标。推进系统作为航天器的关键子系统，其性能直接关系到空间飞行任务的可靠性和成败。航天器在轨运行过程中，推进剂贮箱长期处于微重力或低重力环境。在发动机二次启动、轨道机动及姿态调整等飞行阶段，航天器受到微重力环境以及横向、旋转等复合扰动作用，导致充液贮箱内推进剂发生显著晃动[1]。由于推进剂质量在航天器总质量中占比大[2,3]，推进剂晃动引起自由液面形态演化，同时对贮箱壁面等固体结构施加晃动力，诱发液体与航天器本体之间的耦合作用，不利于航天器姿态稳定、高精度控制及推进剂无夹气出流，甚至影响发动机正常工作。因此，揭示微重力下航天器贮箱推进剂晃动及其系统耦合刚-液耦合作用机理，对于推进系统性能优化和航天器总体设计具有重要的理论意义与工程应用价值。

尽管流-固/刚-液耦合方法已在船舶海洋工程与地面油罐车运输等领域得到广泛应用[4–8]，但其在航天领域，尤其是微重力下推进剂贮箱中的研究仍较为有限。微重力下流体界面形貌、气-液-固三相接触线演化规律及晃动特性与地面对应过程存在差异，增加了流体运动及其与贮箱结构之间耦合作用的复杂性，从而对微重力条件下流体行为预测与推进剂管理提出了更高要求[9,10]。NASA 在国际空间站开展了 SPHERES-Slosh Experiment (SSE) 实验[11]，积累了一批长时微重力下推进剂贮箱流体动态演化数据。荷兰国家航空航天实验室（NLR）利用 Sloshsat FLEVO 微型卫星开展了刚-液耦合动力学在轨实验[12–14]。目前，关于推进剂贮箱刚-液耦合动力学的空间及地基微重力实验仍十分匮乏，且现有数值与实验研究大多集中在受迫晃动及推进剂重定位过程[15–18]。

在理论分析与数值模拟方面，多数刚-液耦合研究主要基于解析方法或等效力学模型方法[19]，而针对真实三维流-固/刚-液耦合过程的数值模拟研究较少。Peterson 针对圆柱贮箱发展了理论与实验方法[20,21]。Miao 等[22]建立了适用于低重力下部分充液球形贮箱的大幅横向晃动问题的等效力学模型。Deng 和 Yue[23,24]改进了运动脉动球模型（MPBM），引入静态毛细力与有效质量因子。Huo 和 Lyu[25]提出了参数识别与神经网络误差修正相结合的复合 MPBM。Hassine 等[26]提出了模拟微重力下部分充液贮箱内推进剂动力学特性的力学模型，较为有效地捕捉了推进剂质心运动的随机特性。Luppes 等[27]基于 VOF 方法开展数值模拟。

Yu 和 Yue[28]采用等几何分析结合水平集方法追踪自由液面，模拟推进剂晃动过程。Zhou 和 Huang[29]利用三维约束面模型研究多贮箱航天器的大幅晃动问题。Song 等[30]开展了充液球形航天器贮箱刚-液耦合晃动数值模拟。上述研究较少采用对六自由度三维双向耦合，且未考虑真实航天器任务环境下的复杂变过载与大幅姿态变化，因而在实际工程适用性方面仍存在一定局限性。涉及贮箱流体管理的数值模拟中，针对刚-液耦合问题的探索相对有限，尤其在微重力条件下的相关研究更为稀缺；并且现有通用商业软件尚不具备专门的推进剂-贮箱系统耦合晃动模拟能力。以 ANSYS Fluent 为例，其六自由度运动模拟主要依赖动网格技术，主要针对浸没于流体域内的刚性结构（如浮体）运动问题，应用于推进剂贮箱内液体晃动等刚-液耦合场景时实现复杂、耦合接口和数值稳定性处理较困难。

综上，本研究基于开源计算流体力学（CFD）平台 OpenFOAM 开发了贮箱-流体系统刚-液耦合六自由度晃动求解器，采用贮箱随体非惯性参考系开展数值模拟，从而避免了动网格方法中网格更新带来的计算负担。在此基础上，系统分析了微重力条件下部分充液贮箱在不同外力加载下的刚-液耦合动力学行为，进一步探讨了不同控制参数对系统稳定性的影响，上述问题在现有文献中尚缺乏系统研究。本文其余内容安排如下：第 1 章介绍物理模型与数值方法；第 2 章为不同工况下的模拟结果及规律分析；第 3 章为结论。

1 物理模型与数值方法

1.1 研究对象与物理模型

在卫星、轨道飞行器等航天器在轨机动、交会对接及姿态调整过程中，航天器受外力与外力矩作用，发生六自由度运动，推进剂贮箱内流体晃动产生的晃动力反作用于贮箱，进而影响航天器速度、姿态及其控制。考虑如图 1 所示的场景，将飞行器和贮箱壁面视为刚体部分，随着推进剂消耗，贮箱内流体呈气液两相混合状态，并存在明显气液界面。当航天器加速度或姿态变化时，一方面，充液贮箱内流体晃动与界面运动导致航天器系统质量分布改变；另一方面，粘性流体晃动产生能量耗散效应，进而影响系统能量演化特性[1]。贮箱-推进剂系统刚-液耦合晃动的数值模拟需同时求解推进剂流动方程与航天器刚体运动方程。流体晃动产生的晃动力作用于贮箱壁面，反馈至刚体运动方程，从而形成双向耦合；在数值方法上，该耦合作用表现为流体动量方程中的体积力项随刚体运动状态动态变化。与固定外力驱动的受迫晃动相比，刚-液耦合条件下流体的动力学响应特性存在显著差异。因此，有必要开展系统性研究，揭示航天器机动过程中充液贮箱系统刚-液耦合晃动响应、界面动态演化与能量耗散规律。

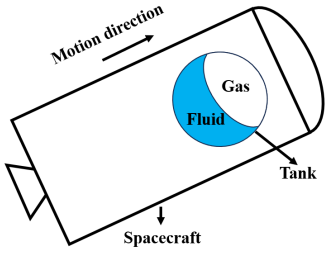


图 1 航天器推进剂贮箱示意图

Figure 1. Schematic of propellant tank in a spacecraft

录用稿

1.2 数值方法

流体运动由偏微分方程组（PDEs）描述，经空间离散后可转化为半离散常微分方程组（ODEs）；刚体动力学则由包含平动与转动自由度的六自由度常微分方程组描述。在强耦合求解框架下，流体方程与刚体方程构成统一的耦合系统，并需在时间尺度上同步推进求解，从而形成包含流体变量与刚体运动变量的耦合方程组。由于流体控制方程与刚体动力学方程来源不同，直接对整体耦合系统进行统一求解往往会导致数值不稳定，且计算成本较高，难以应用于针对实际工程问题的计算。

本文基于开源计算流体力学平台 OpenFOAM 开发贮箱-流体系统刚-液耦合晃动数值模拟程序，通过在每个时间步内分别迭代求解流体控制方程与刚体运动方程实现耦合。程序包括流体方程求解的主程序、刚体运动与姿态求解模块、输入输出与数据交换函数等组成，每个时间步内多次迭代交换晃动力和刚体运动信息。不同于仅在每个时间步内更新一次耦合信息，本程序迭代更新耦合变量直至时间步内收敛，以更好地逼近强耦合系统情况。耦合及数据交换的具体实现将在后文详述。如图 2 所示，在贮箱随体非惯性参考系中建立和求解流体方程。

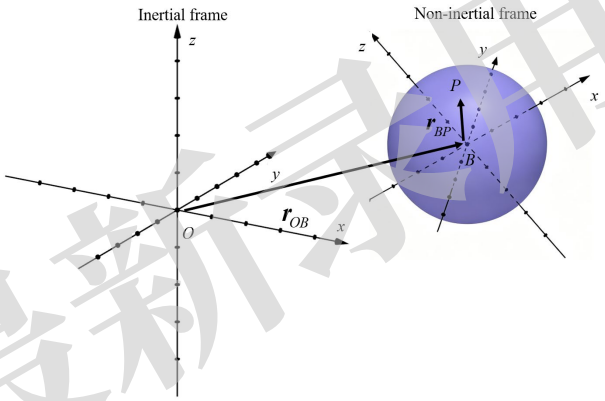


图 2 计算模型与坐标系

Figure 2. Geometric model and coordinate system

非惯性系中流体动量方程

$$\rho(\boldsymbol{a}_{OB}+\boldsymbol{\alpha}\times\boldsymbol{r}_{BP}+\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{BP})+2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}_{BP}+\boldsymbol{a}_{BP})+\nabla p-\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}=\rho\boldsymbol{f}_{\text{lout}} \tag{1}$$

其中，ρ 为流体密度，$\boldsymbol{a}_{OB}$ 为固连坐标系相对于全局（惯性）坐标系的平动加速度（O 为全局原点，B 为非惯性坐标系原点，位于贮箱几何中心），$\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 分别为角加速度和角速度，$\boldsymbol{r}_{BP}$ 为从 B 点到流体微元中心 P 点的矢径，$\boldsymbol{v}_{BP}$ 为流体相对于 B 点的速度，$\boldsymbol{a}_{BP}$ 为流体相对于 B 点的加速度，p 为压力，τ 为粘性应力张量，$\boldsymbol{f}_{\text{lout}}$ 为单位体积体积力，包括外加力、重力和表面张力。

流体作用于贮箱壁面的晃动力为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}_{\text{slosh}}&=\int_{\partial V_1}(p\boldsymbol{I}-\boldsymbol{\tau})\boldsymbol{n}\cdot d\boldsymbol{S}\\&=\int_{V_1}-\rho[(\boldsymbol{a}_{OB}+\boldsymbol{\alpha}\times\boldsymbol{r}_{BP}+\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{r}_{BP})+2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}_{BP}+\boldsymbol{a}_{BP})-\boldsymbol{f}_{\text{lout}}]dV\end{aligned} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{I}$ 为单位张量，$\boldsymbol{n}$ 为表面 S 上的单位法向量，第二个等号成立是因为根据散度定理，区域边界面积分可转换为区域体积分。

同理，晃动力矩为

最新录用

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_{\text{Bslosh}} &= \int_{\partial V_{\text{l}}} \boldsymbol{r}_{BP} \times (p\boldsymbol{I} - \boldsymbol{\tau})\boldsymbol{n} \cdot d\boldsymbol{S} \\ &= \int_{V_{\text{l}}} -\rho \boldsymbol{r}_{BP} \times (\frac{d\boldsymbol{v}_P}{dt} - \boldsymbol{f}_{\text{lout}}) dV \\ &= \int_{V_{\text{l}}} -\rho \boldsymbol{r}_{BP} \times [(2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}_{BP} + \boldsymbol{a}_{BP}) - \boldsymbol{f}_{\text{lout}}] dV - m_{\text{l}} \boldsymbol{r}_{BC_{\text{l}}} \times \boldsymbol{a}_{OB} - \boldsymbol{I}_{\text{l}B}\boldsymbol{\alpha} - \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{I}_{\text{l}B}\boldsymbol{\omega}\end{aligned} \tag{3}$$

下标 B 表示对 B 点取矩。

刚体平动和转动动量方程

$$\boldsymbol{F}_{\text{total}} = m_{\text{r}}\boldsymbol{a}_{OB} + m_{\text{r}}\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{r}_{BC_{\text{r}}} + m_{\text{r}}\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_{BC_{\text{r}}}) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{M}_{\text{Btotal}} = m_{\text{r}}\boldsymbol{r}_{BC_{\text{r}}} \times \boldsymbol{a}_{OB} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{I}_{\text{r}B}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{I}_{\text{r}B}\boldsymbol{\alpha} \tag{5}$$

其中 m_{r} 为刚体质量，C_{r} 为刚体质心，I_{rB} 为刚体关于 B 点的惯量张量。

在方程(4)和(5)中，等号左侧的总力与总力矩项分别包含了晃动力及其对应的晃动力矩。然而，根据文献中的数值计算经验，当流体质量远大于刚体质量时，直接采用原始形式的方程往往导致数值发散。改进方法为将流体质量项与刚体质量项合并，构成统一的惯性项，从而得到变换后的耦合系统动力学方程如下

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}_g + \boldsymbol{F}_{\text{ex}} &= m_{\text{s}}\boldsymbol{a}_{OB} + m_s\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{r}_{BC_{\text{s}}} + m_{\text{s}}\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_{BC_{\text{s}}}) \\ &\quad + \int_{V_{\text{l}}} \rho[(2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}_{BP} + \boldsymbol{a}_{BP}) - \boldsymbol{f}_{\text{lout}}] dV\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_g + \boldsymbol{M}_{\text{ex}} &= m_{\text{s}}\boldsymbol{r}_{BC_{\text{s}}} \times \boldsymbol{a}_{OB} + \boldsymbol{\omega} \times I_{\text{s}B}\boldsymbol{\omega} + I_{\text{s}B}\boldsymbol{\alpha} \\ &\quad + \int_{V_{\text{l}}} \rho \boldsymbol{r}_{BP} \times [(2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}_{BP} + \boldsymbol{a}_{BP}) - \boldsymbol{f}_{\text{lout}}] dV\end{aligned} \tag{7}$$

下标 s 表示整个系统，m_{s}为总质量（流体与刚体质量之和），$\boldsymbol{I}_{\text{sB}}$ 为系统关于 B 点的惯量张量，随之间推进迭代更新。

刚-液耦合求解实现流程如图 3 所示。流体运动的计算基于 OpenFOAM 平台中的 interFOAM 求解器，采用 VOF 方法模拟两相流动[31]。刚体运动通过自定义类嵌入 interFOAM 主程序，类中包含记录刚体六自由度运动状态并求解耦合系统方程的函数。在每个时间步内，耦合迭代过程如下：首先求解流体动量方程，计算流体作用于贮箱壁面的晃动力及晃动力矩，得到作用于耦合系统的总力与总力矩；其次，求解刚体运动方程，计算更新后的平动加速度与角加速度，数据反馈至流体求解器，通过修正流体动量方程中的体积力项实现双向耦合，反复迭代直至该时间步内流体方程收敛。在下一时间步的首次迭代中，更新刚体线速度、角速度以及平动位移与姿态信息，并将相关数据写入文件。其中，刚体姿态采用四元数微分方程进行求解。对于非耦合情形，首先根据外力矩、系统质心位置及系统转动惯量，通过刚体运动方程计算贮箱的转动响应，并采用四阶 Runge-Kutta（RK4）方法对刚体运动方程进行数值积分，获得贮箱的转动速度，并将所得转动速度作为给定输入。

录用录用

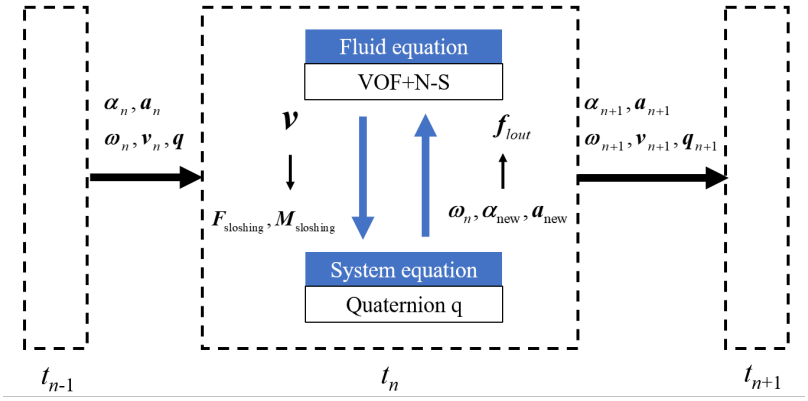


图 3 刚-液耦合迭代流程

Figure 3. Rigid body-liquid coupling iteration procedure

流动计算采用层流模型。压力-速度耦合采用 PISO 算法，对流项采用 TVD 格式离散，采用 MULES 方法保证体积分数输运方程的有界性与数值稳定性。刚体运动方程中四元数与角速度的耦合微分方程采用四阶 Runge-Kutta（RK4）法进行时间推进，时间步长采用自适应控制，初始时间步长设为 0.001 s，最大 Courant 数取 0.5，速度场、压力场、相分数收敛残差均为 10^{-5}。

1.3 数值验证

为验证数值方法的有效性，计算场景与参数设置与北京理工大学岳宝增等[32]的文章相同。球形贮箱模型半径 0.25 m，刚体质量 24 kg。航天器质心位于(0, 0, 1.5) m，主转动惯量分别为 I_{xx} = 58, I_{yy} = 60, I_{zz} = 5kg·m²，表 1 为流体物性参数。重力加速度为 0 m / s²，充液率为 40 %，贮箱内初始液体状态如图 4 所示。该工况旨在模拟卫星姿态调整过程，卫星初始绕 y 轴以角速度为$(0, 0.1, 0)$ rad·s^{-1} 稳定旋转，转轴通过航天器质心。施加于贮箱的外力矩为

$$T_y^E = \begin{cases} 0.5\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}, 2\mathrm{s} \le t \le 3\mathrm{s}, 10\mathrm{s} \le t \le 11\mathrm{s}, 30\mathrm{s} \le t \le 31\mathrm{s} \\ 0, others \end{cases} \tag{8}$$

表 1 流体物性参数

Table 1. Fluid properties

密度 / (kg • m^{-3})	运动粘性 / (m^2 • s^{-1})	表面张力 / (N • m^{-1})	接触角 / (°)
874.4	0.1	0.0339	60

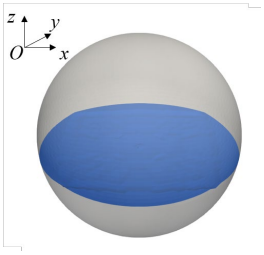


图 4 贮箱内初始液体状态

Figure 4. Initial liquid configuration in the tank

表 2 为贮箱绕 y 轴平均角速度的对比验证结果。图 5 为晃动力、晃动力矩以及绕 y 轴角速度随时间演化曲线。本文计算结果与文献参考数据吻合良好，绕 y 轴平均角速度的相对误

最新录用

差约为 3.55%。综上，本文所采用的数值方法具有较高的准确性与可靠性。

表 2 绕 y 轴的平均角速度与参考文献比较[32]

Table 2. Comparison of average angular velocity about the y-axis between this study and the reference[32]

算例	平均角速度 / (rad·s^{-1})	相对误差 / (%)
本文	0.138	3.55
参考文献[32]	0.133	-

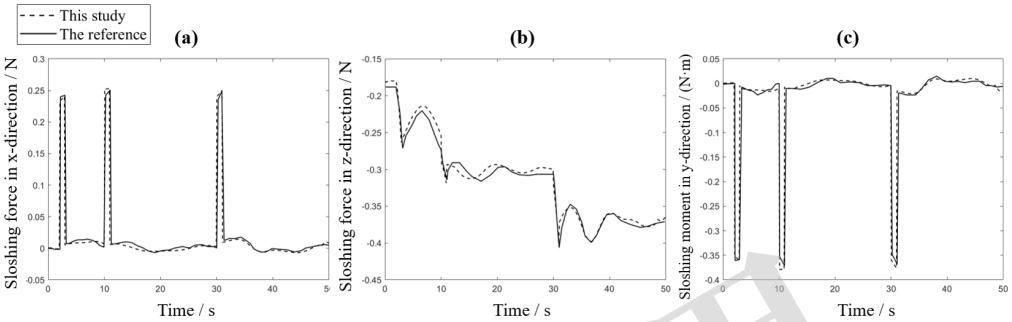


图 5　(a)晃动力和(b, c)力矩与参考文献[32]比较

Figure 5. Comparison of (a) sloshing force and (b, c) moment between this study and the reference[32]

为验证网格无关性，仍取上述设置，针对不同网格尺寸模型开展数值模拟。采用结构化网格，最大网格尺寸分别为 0.0157 m、0.0125 m、0.01 m、0.008 m、0.0063 m，对应网格数约 29,000、57,000、108,000、201,000 和 422,000。图 6 为流体质心 x 坐标随时间演化曲线及其相对于最小网格尺寸（网格数为 422,000）的相对误差。随网格尺寸减小，201,000 和 422,000 网格模型下的结果吻合良好，两者相对误差保持在 10 %以内。综合考虑精度与计算成本，后续所有计算均采用 201,000 网格模型。

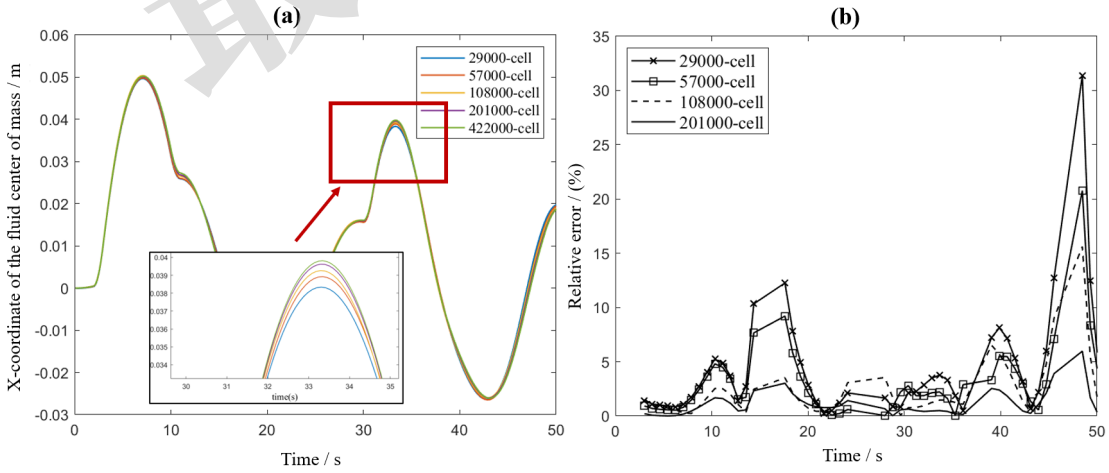


图 6 (a) 流体质心 x 坐标随时间变化曲线；(b) 流体质心 x 坐标相对于 422,000 网格模型相对误差

Figure 6. (a) x-coordinate of the center of mass of fluid (b) relative error of x-coordinate of the center of mass of fluid compared to the finest grid of 422,000 cells

最新录用

2. 数值结果

为揭示不同工况下刚-液耦合系统的动力学响应及其时间演化规律，以航天器初始旋转角速度、外力矩和流体与刚体质量比为控制变量，系统分析各参数对耦合运动特性的影响。

2.1 不同初始角速度下的刚-液耦合效应

首先研究绕 y 轴初始角速度对刚-液耦合晃动动力学的影响，角速度取值范围 0.1 ~ 0.5 rad·s^{-1}，间隔 0.1 rad·s^{-1}。外力矩变化为：第 2 ~ 3 s、20 ~ 21 s 和 30 ~ 31 s 时间段内施加沿 y 方向的力矩。下文称加载阶段为“机动阶段”。

图 7 为绕 y 轴无量纲角速度随时间的变化，其中，无量纲角速度定义为当前角速度减去初始值（0.1 ~ 0.5 rad·s^{-1}）后再除以该初始值；x 轴为无量纲时间，以初始角速度的倒数归一化，即 $\frac{1}{\omega_0}$。图中以“×”标记的曲线代表忽略刚-液耦合效应的计算结果。在每个机动阶段，外力矩作用下角速度突增；非耦合工况下，角速度在力矩施加结束后保持恒定；耦合工况下，由于推进剂晃动与刚体运动相互作用，角速度在初始阶段超过非耦合工况下的对应值，随后衰减，并最终趋近于非耦合下的角速度终值。

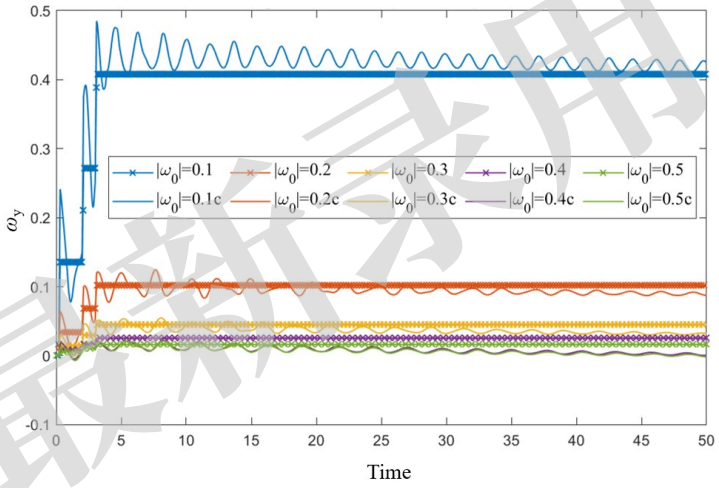


图 7 不同初始角速度下绕 y 轴无量纲角速度

Figure 7. Dimensionless angular velocity about the y-axis for different initial angular velocities

对于初始角速度 0.1 rad·s^{-1}，角速度在无量纲时间 50 之前始终高于非耦合终值。对于 0.2、0.3 和 0.4 rad·s^{-1}，外力矩施加停止后角速度首先围绕非耦合终值振荡，随后减小至小于非耦合下的角度度。而初始角速度 0.5 rad·s^{-1} 时，角速度在整个 0 ~ 50 无量纲时间区间内始终低于非耦合下的角速度终值。图 8 为耦合条件下角速度偏离非耦合终值的时间演化及相应的振荡频率。角速度时间曲线呈现衰减振荡趋势，振幅和频率均随时间逐渐减小。初始角速度较小时，耦合条件下角速度更加偏离非耦合条件下角速度终值，且随着初始角速度增加，偏离程度减小；但 0.4 rad·s^{-1} 和 0.5 rad·s^{-1} 工况下趋势逆转，其中 0.4 rad·s^{-1} 时偏离程度最小。增大初始角速度通常减小振荡幅值，通过计算图 8a 中振幅衰减曲线线性拟合的斜率计算阻尼比，发现各工况下阻尼比几乎相同。但角速度振荡幅值降低以随之间衰减至低于目标值为代价。角速度振荡频率也随初始角速度增加减小，但减小速率递减，0.3 ~ 0.5 rad·s^{-1} 工况下振荡频率几乎恒定。

对于初始角速度为 0.1 rad·s^{-1} 的工况，无量纲角速度在 50 之前始终高于非耦合条件下终值。当初始角速度为 0.2、0.3 及 0.4 rad·s^{-1} 时，角速度先围绕非耦合条件下终值振荡，随后衰减至该终值以下。而对于 0.5 rad·s^{-1} 的工况，角速度在整个无量纲区间 0～50 内始终低

最新录用

于非耦合条件下稳定终值。

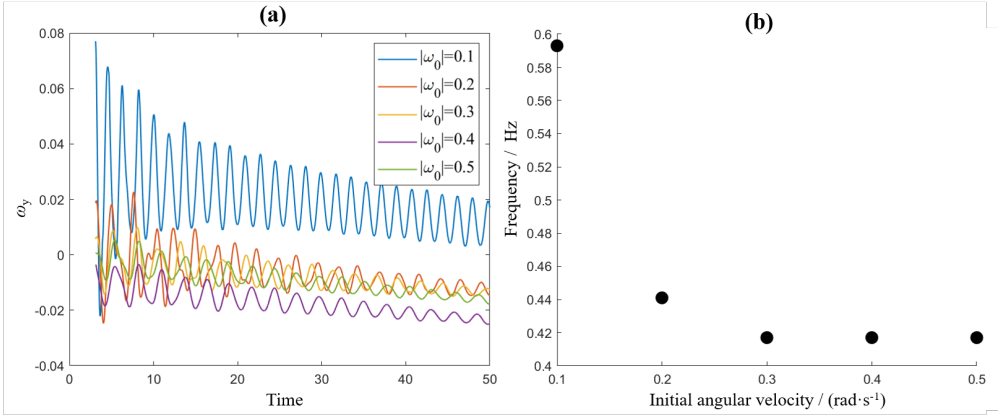


图 8 (a) 耦合工况下绕 y 轴角速度相对于非耦合工况的偏差；(b) 振荡频率

Figure 8. (a) Dimensionless angular velocity about the y-axis for the coupled cases deviated from the values of the uncoupled cases (b) The corresponding oscillation frequency

图 9 为以贮箱半径 R 无量纲化的流体质心 x 坐标幅值及振荡频率，幅值定义为振荡曲线相邻波峰与波谷之差。对于初始角速度 0.1 rad·s^{-1}，非耦合条件下流体质心振荡幅值先小于耦合条件下质心振荡幅值，但在无量纲时间约 40 之前反超，此后又降低到耦合条件下振荡幅值以下。对于 0.2 rad·s^{-1}，初始变化趋势与 0.1 rad·s^{-1} 工况类似，但随后非耦合条件下振荡幅值始终大于耦合条件下幅值。对于 0.3 rad·s^{-1} 工况，耦合与非耦合条件下幅值十分接近，两者大小关系随时间交错变化。对于 0.4 和 0.5 rad·s^{-1} 工况，耦合条件下振荡幅值始终大于非耦合条件下振荡幅值。流体质心 x 坐标振荡频率随初始角速度增大而减小，且非耦合条件下振荡频率始终高于耦合条件下振荡频率。0.3 ~ 0.5 rad·s^{-1} 初始角速度工况下，耦合条件下振荡频率几乎保持不变，而非耦合条件下振荡频率呈下降趋势。

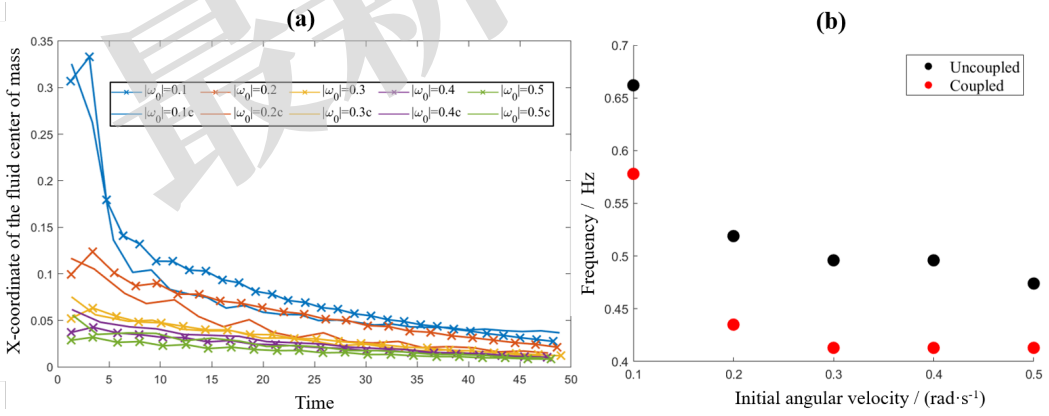


图 9 不同初始角速度下(a) 流体质心无量纲 x 坐标振荡幅值；(b) 振荡频率

Figure 9. (a) Oscillation amplitude of dimensionless x-coordinate of the fluid center of mass and (b) frequency of the oscillation for different initial angular velocities

图 10a 与 b 分别为不同初始角速度下耦合和非耦合条件下流体对贮箱 x 方向无量纲晃动力，为便于不同初始角速度条件下晃动力响应的对比，以初始转动角速度对应的离心力作为特征力对晃动力进行无量纲化处理 $F=m_s\omega_0^2R$。耦合条件下的晃动力整体显著低于非耦合条件。经过三次外力矩加载激励后，耦合条件下晃动力迅速衰减，说明贮箱受晃动力反作用产生的运动壁面了流体对贮箱壁面的持续作用。随着初始角速度的增加，耦合条件下晃动力的整体幅值呈减小趋势。相比之下，非耦合条件下晃动力的衰减过程相对缓慢，但其幅值同样随初始角速度的增加而减小。上述结果表明，刚-液耦合运动对流体晃动力的演化过程具

有显著影响，能够促进晃动力衰减。

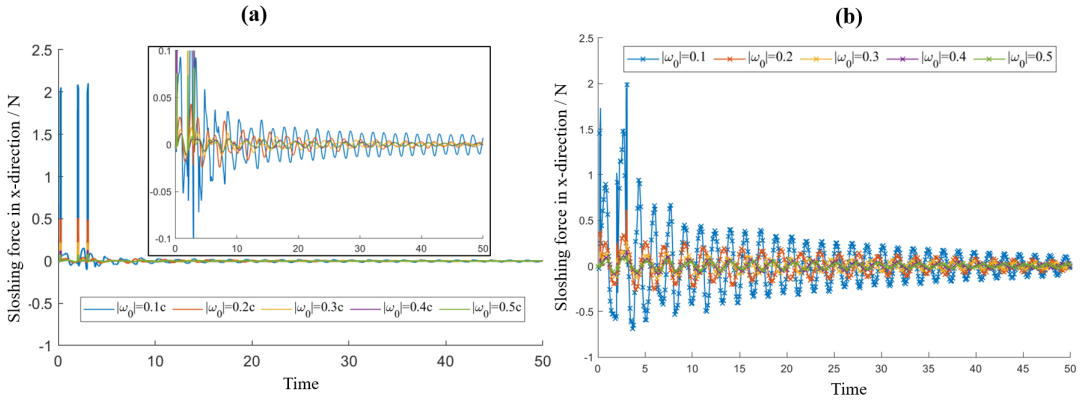


图 10 不同初始角速度下贮箱 (a) 耦合情况下与 (b) 非耦合情况下 x 方向受无量纲晃动力

Figure 10. Sloshing force at the tank wall along the x-direction for (a) coupled and (b) uncoupled cases for different initial angular velocities

上述结果表明，刚-液耦合效应显著依赖于初始角速度，且初始角速度同时影响瞬态振荡衰减过程与稳定终值。刚-液耦合作用使系统在机动过程中产生角速度振荡，并导致角速度最终稳定值低于非耦合条件下目标值。另一方面，耦合条件下流体质心振荡的阻尼作用强于非耦合条件，有利于推进剂晃动抑制。晃动力时间演化与贮箱角速度及流体质心运动演化趋势具有较好的一致性，即在考虑刚-液耦合作用时，流体振荡幅度明显减小，晃动程度显著降低。

2.2 不同外力矩变化下的刚-液耦合效应

为提高系统稳定性并抑制扰动，采用分段施加外力矩的机动策略。取分段数、控制力矩大小以及每段力矩施加持续时间为控制参数，表 3 为不同外力加载组合的工况表。

表 3 外力矩变化

Table 3. External acceleration

外力矩 /(N•m)	力矩加载时间 / s
0.375	2 ~ 3, 10 ~ 11, 20 ~ 21, 30 ~ 31
0.5	2 ~ 3, 20 ~ 11, 30 ~ 31
0.75	2 ~ 3, 30 ~ 31
1.5	2~3
0.375	2~6
0.5	2~5
0.75	2~4

图 11 为不同机动策略及耦合条件下绕 y 轴角速度的演化曲线，图中角速度以初始角速度 0.1 rad·s^{-1} 进行归一化处理。图中“M0.375x4”表示 0.375 N·m 力矩分 4 步施加;“M0.375t4”表示 0.375 N·m 力矩单步持续 4 秒施加。后缀“c”表示刚-液耦合条件，其余算例命名规则与之相同。

多步加载下的角速度通常在目标终值上方振荡，而单步加载下的角速度则在目标值之下。在所有工况下，2 步加载情况的角速度最大，而单步加载且持续时间为 3 s 情况的角速度最

最新录用

小。这表明采用较小力矩并分多步施加有助于维持角速度的稳定性，且可使系统达到甚至超过目标终值。总体而言，多步加载下的角速度高于单步加载。在多步情形中，当分段数由 2 增加至 4 时，角速度随分段数增加而减小。在单步情形中，持续时间为 2 s 时角速度最高，而持续 3 s 与 4 s 的结果较为接近，其中 4 s 持续时间下略高，说明角速度与力矩持续时间之间呈现非单调关系。

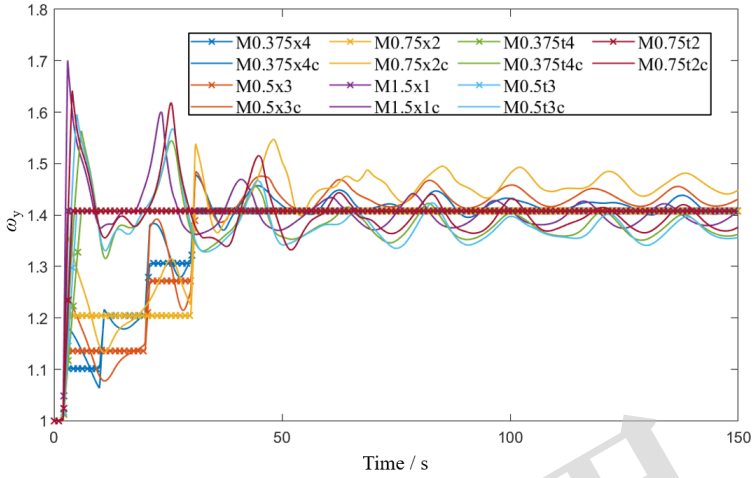


图 11 不同外力加载组合下绕 y 轴无量纲角速度

Figure 11. Dimensionless angular velocity about the y-axis for different external acceleration

图 12 和图 13 为以贮箱半径 R 归一化的流体质心 x 坐标及其振荡幅值。在单步加载下，初始阶段（即第二个振荡峰值之前），耦合条件下流体质心 x 坐标及其振荡幅值均大于非耦合条件；而后，非耦合条件下的量值反超。随着时间演化，耦合与非耦合条件下的角速度响应之间逐渐呈现相位偏移。随着力矩施加持续时间增加，耦合与非耦合条件下的质心振荡幅值均呈总体减小趋势。

在多步加载下，前几个周期内耦合条件下的流体质心 x 坐标及其振荡幅值先大于非耦合条件；随着时间演化，两者逐渐趋于一致，大小关系呈现交错特征。值得注意的是，多步情形中未观察到明显的相位偏移。随着加载步数增加，耦合条件下的质心振荡幅值持续减小；而非耦合条件下的质心振荡幅值变化呈非单调特征。特别地，采用 1.5 N·m 最大力矩单步加载的工况表现出独特的动态行为，既不同于其他单步加载工况，也有别于多步加载工况的特征。该工况下出现明显的相位偏移，且非耦合条件下的幅值大于耦合条件，这与其余多步工况的趋势相反。此外，该情形下的质心振荡幅值为所有单步加载工况中最小，且未随力矩施加持续时间减少而呈现预期中的增大趋势。此异常行为可能源于大力矩与单步加载方式的共同作用。

单步加载工况下的振荡幅值通常大于多步加载工况，呈现出的变化趋势与角速度响应趋势相一致。在所有外力加载策略中，流体质心振荡幅值的最大值对应于大力矩（1.5 N·m）单步加载工况，而最小值则出现在 4 步加载条件，两者均与角速度振荡特性的变化规律相符。尽管单步加载工况下耦合与非耦合条件的流体质心 x 坐标的相位及幅值差异更为显著，但不同加载持续时间对应的振荡曲线仍具有可区分性。相比之下，多步加载下耦合与非耦合条件的振荡曲线更加接近，但不同步数之间的差异更为明显。这一现象可能由于多步加载下在长达 30 s 的时间内多次施加外部激励，使得外部扰动始终存在，从而抑制了耦合效应的影响；而在单步加载工况下，机动阶段的持续外力作用则为耦合效应的演化提供了足够的时间，使其对系统响应的贡献更为显著。

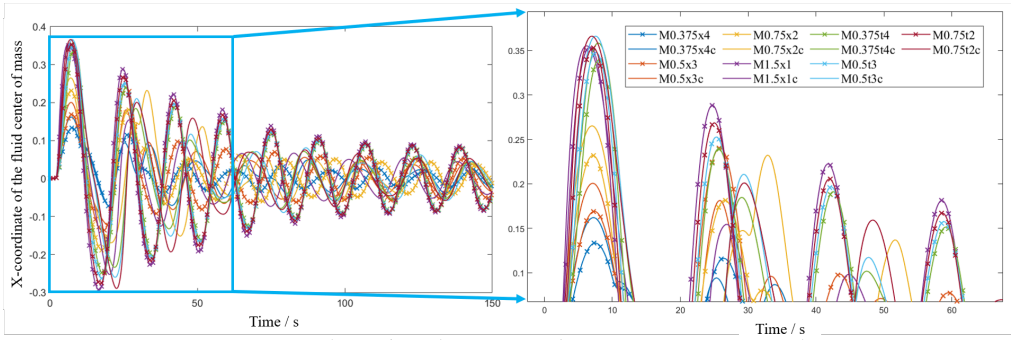


图 12 不同角速度增加策略下流体质心无量纲 x 坐标

Figure 12. Dimensionless x-coordinates of the center of mass of fluid for different external acceleration

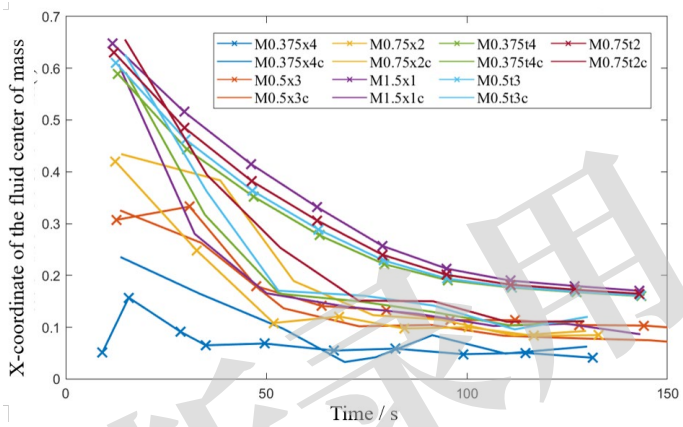


图 13 不同角速度增加策略下流体质心无量纲 x 坐标的幅值

Figure 13. Amplitudes of dimensionless x-coordinate of the center of mass of fluid for different external acceleration

2.3 不同流体质量比下的刚-液耦合效应

未来深空探测任务对推进剂容量和效率提出更高的要求，航天器通常有较大的推进剂-结构质量比。然而，较高的流体质量分数会显著加剧刚-液耦合效应及晃动响应，进而危及启动、调姿等过程的稳定性。针对流体-刚体质量比分别为 0.25、0.5、1、2、5、10 和 20 七种工况开展数值模拟，其中系统总质量不变保持不变。为维持充液率一致，流体质量区别通过改变流体密度实现，运动粘度、刚体质量与惯量张量也对应修改。

图 13 为不同流体-刚体质量比下考虑耦合时绕 y 轴角速度的时间演化曲线，图中角速度以初始值 0.1 rad·s^{-1} 进行归一化处理。结果表明，随着流体-刚体质量比增大，角速度的振荡幅值逐渐增大。对于质量比小于等于 2 的工况，各角速度曲线整体较为接近，且振荡幅值均随时间逐渐衰减。尽管质量比为 0.25 时的最终稳定角速度高于质量比为 2、1 和 0.5 时的对应值，但其振荡衰减速度最快。上述结果表明，较大的流体-刚体质量比在力矩施加过程中会引入更显著的不稳定性，并放大耦合效应对系统动态行为的影响。

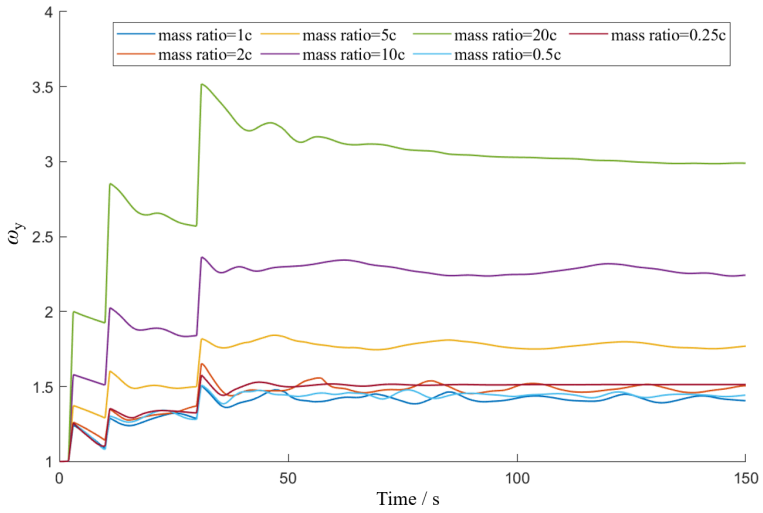


图 13 不同流体质量比下绕 y 轴无量纲角速度

Figure 13. Dimensionless angular velocity about the y-axis for different fluid mass ratios

图 14 为耦合条件下贮箱半径 R 归一化的流体质心 x 坐标及其对应的振荡频率。初始阶段，随着流体-刚体质量比的增加，流体质心 x 坐标的振荡幅值逐渐增大；然而，随着振荡过程的发展，质量比为 20、10 和 5 时的质心振荡幅值在第二个波峰处即已降低至质量比为 2 及以下工况的对应水平以下，表明较大质量比条件下流体质心振荡衰减更快。振荡频率随质量比的变化呈现不同规律：当质量比小于 1 时，振荡频率随质量比的增加而升高；当质量比大于 1 时，振荡频率总体随质量比的增加而降低，但质量比为 20 时表现出一定偏离。

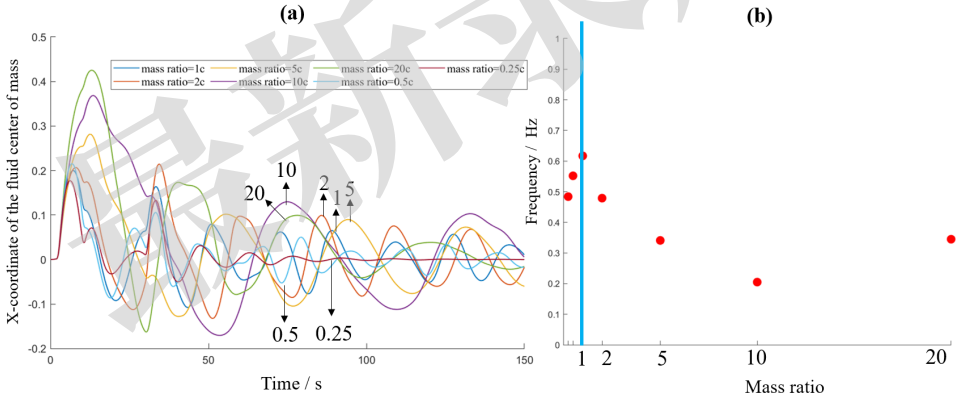


图 14 (a) 不同流体质量比下流体质心无量纲 x 坐标；(b) 相应振荡频率

Figure 14. (a) Dimensionless x-coordinates of the center of mass of fluid for different fluid mass ratios (b) The corresponding oscillation frequencies

3 结论

本研究针对微重力下推进剂-贮箱系统刚-液耦合晃动问题，分析了初始角速度、外力加载过程及流体-刚体质量比三个关键参数对系统耦合晃动动力学行为的影响，主要结论如下：

(1) 刚-液耦合效应引入显著振荡，尤其在初始阶段，延缓了系统达到目标角速度的进程，并导致终态角速度偏离目标值。然而，另一方面：尽管耦合效应导致刚体运动失稳，但同时也加速了流体质心振荡的长期耗散，使其衰减速率高于非耦合状态。

(2) 采用多步加载策略并辅以较小幅值的外力矩，可有效降低系统振荡幅值及能量水平，有利于提升姿态机动过程的稳定性，且该策略亦在一定程度上减缓了能量耗散速率。

(3) 随流体-刚体质量比增大，耦合效应显著增强，并在外力矩施加期间引入更大的系统不稳定性。

综上，本研究基于 OpenFOAM 平台开发求解器，采用随体非惯性参考系有效规避了动网格方法的局限性，为微重力下充液贮箱刚-液耦合晃动提供了可靠的数值分析工具。研究结果表明，在航天器姿态控制系统设计与稳定性评估中，须充分考虑刚-液耦合效应及其参数依赖特性。未来工作将扩展至更复杂的贮箱几何构型（如胶囊形贮箱）及更广泛的机动场景（如涉及多轴加速度的回收或着陆过程），以进一步提升模型的工程适用性。

参考文献

[1] SHEN Y F, SHI H X, FAN Z W, *et al*. The hybrid attitude maneuver control of the three-axis stable liquid-filled spacecraft with large-deformation appendage[J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2024, **12**(2): 440-451

[2] SMITHERMAN D, WOODCOCK G. Space transportation infrastructure supported by propellant depots[C]//AIAA SPACE 2011 Conference and Exposition. Long Beach: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011

[3] SIMONINI A, DREYER M, URBANO A, *et al*. Cryogenic propellant management in space: open challenges and perspectives[J]. *npj Microgravity*, 2024, **10**(1): 34

[4] CAI Z M, TOPA A, DJUKIC L P, *et al*. Evaluation of rigid body force in liquid sloshing problems of a partially filled tank: traditional CFD/SPH/ALE comparative study[J]. *Ocean Engineering*, 2021, **236**: 109556

[5] KONAR T, DAS A. A review of numerical modelling of liquid sloshing in partially filled containers[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2025: 1-26

[6] QI Y, SÖDING H, STÖCKER J, *et al*. Prediction of waves in tanks excited by ship motion and moving walls with a three-dimensional fully linear finite difference approach[J]. *Ocean Engineering*, 2024, **310**: 118648

[7] QIAN Z H, YANG T M, LIU M B. An overview of coupled Lagrangian-Eulerian methods for ocean engineering[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2024, **23**(2): 366-397

[8] VINEESH P, SRIRAM V. Numerical investigation of wave interaction with two closely spaced floating boxes using particle method[J]. *Ocean Engineering*, 2023, **268**: 113465

[9] VELDMAN A E P, GERRITS J, LUPPES R, *et al*. The numerical simulation of liquid sloshing on board spacecraft[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, **224**(1): 82-99

[10] FISHER M F, SCHMIDT G R, MARTIN J J. Analysis of cryogenic propellant behaviour in microgravity and low thrust environments[J]. *Cryogenics*, 1992, **32**(2): 230-235

[11] LAPILLI G, KIRK D R, GUTIERREZ H, *et al*. Results of microgravity fluid dynamics captured with the spheres-slosh experiment[C]//International Astronautical Congress. Jerusalem: International Astronautical Federation, 2015

[12] BAETEN A. Prediction of spacecraft fuel dynamics in microgravity[C]//Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009

[13] DELGADO J. History of fuel sloshing[C]//2023 Regional Student Conferences. Buffalo: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2023

[14] VREEBURG J P B. Measured states of sloshsat FLEVO[C]//Proceedings of the 56th

International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation. Fukuoka: International Astronautical Federation, 2005

[15] LAZZARIN M, BIOLO M, BETTELLA A, *et al*. EUCLID satellite: sloshing model development through computational fluid dynamics[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, **36**: 44-54

[16] NADEEM S, BOSCA P, STRAMENGA M, *et al*. An experimental investigation of slat-screens to mitigate fluid sloshing in microgravity[J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2022, **9**(3): 319-327

[17] STOREY J M, KIRK D R. Experimental investigation of spherical tank slosh dynamics with water and liquid nitrogen[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, **57**(5): 930-944

[18] ZHENG Z Q, XU A Y, JIANG W B, *et al*. Simulation of sloshing and settling behavior of liquid hydrogen in an insulated tank during coastal period[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, **97**: 117-129

[19] LI Y C, GOU H L. Modeling problem of equivalent mechanical models of a sloshing fluid[J]. *Shock and Vibration*, 2018, **2018**(1): 2350716

[20] PETERSON L D, CRAWLEY E F, HANSMAN R J. Nonlinear fluid slosh coupled to the dynamics of a spacecraft[J]. *AIAA Journal*, 1989, **27**(9): 1230-1240

[21] PETERSON L D. The Nonlinear Coupled Dynamics of Fluids and Spacecraft in Low Gravity[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1987

[22] MIAO N, LI J F, WANG T S. Equivalent mechanical model of large-amplitude liquid sloshing under time-dependent lateral excitations in low-gravity conditions[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, **386**: 421-432

[23] DENG M L, YUE B Z. Attitude dynamics and control of liquid filled spacecraft with large amplitude fuel slosh[J]. *Journal of Mechanics*, 2017, **33**(1): 125-136

[24] DENG M L, YUE B Z. Attitude dynamics and control of spacecraft with multiple liquid propellant tanks[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2016, **29**(6): 04016042

[25] HUO J W, LYU J. A Data-driven equivalent modeling approach for large-amplitude liquid sloshing under microgravity environment[J]. *Advances in Astronautics*, 2025, **8**(1): 47-59

[26] BEN HASSINE C, CHIHI M, LU Y, *et al*. Elastic mass model approach for fuel dynamics in microgravity environments[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2025, **62**(5): 1584-1595

[27] LUPPES R, HELDER J A, VELDMAN A E P. The numerical simulation of liquid sloshing in microgravity[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Fluid Dynamics 2006. Ghent: Springer, 2009: 607-612

[28] YU J R, YUE B Z. Study on the coupled dynamics of rigid-liquid-flexible spacecraft by using isogeometric analysis for liquid sloshing[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, **113**: 88-108

[29] ZHOU Z C, HUANG H. Constraint surface model for large amplitude sloshing of the spacecraft with multiple tanks[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **111**: 222-229

[30] SONG Zhijun, CHEN Zongyu, LÜ Jing, *et al*. Rigid-liquid coupling simulation of liquid-filled spacecraft based on OpenFOAM[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, **34**(8): 1789-1798 (宋志军, 陈宗宇, 吕敬, 等. 基于 OpenFOAM 的充液航天器刚-液耦合仿真[J].

系统仿真学报, 2022, **34**(8): 1789-1798)

[31] HEYNS J A, OXTOBY O F. Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach[C]//Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics, 5th European Conference on Computational Mechanics, 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2014: 7082-7090

[32] YUE Baozeng, MA Bole, TANG Yong, *et al*. Dynamic simulation and analysis of rigid-liquid coupling spacecraft with large-amplitude liquid sloshing[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, **43**(2): 173-182 (岳宝增, 马伯乐, 唐勇, 等. 液体大幅晃动情形的航天器刚液耦合动响应仿真分析[J]. 宇航学报, 2022, **43**(2): 173-182)

作者简介



郭子漪 女，中国科学院力学研究所博士后，主要研究方向为复杂力热环境下空间流体管理基础理论及其应用。



张正川 女，通讯作者，中国科学院力学研究所助理研究员，入选北京市科学技术协会 2024-2026 年度青年人才托举工程，主要研究方向为流固耦合数值计算。

E-mail：zhangzhengchuan@kaiquan.com.cn

最新录用