

基于有限元网格的飞机燃油晃动等效建模^{*}

李斌 苗楠[†] 闫佳君 杜亚航 王森

(郑州航空工业管理学院 航空宇航学院, 郑州 450046)

摘要 飞机油箱内的燃油晃动会对油箱壁面产生显著的作用力与作用力矩,进而影响飞机的动力学特性。因此,为实现燃油晃动力和晃动力矩的准确、快速预测,本研究基于有限元网格建立单摆等效力学模型。针对副油箱和机翼油箱内充液比为 50% 的燃油为研究对象,通过该力学模型预测了油箱在俯仰、滚转和偏航三种典型飞行工况下燃油的晃动力、晃动力矩及质心运动特性。进一步将预测结果与计算流体动力学仿真结果进行对比,验证了该等效模型在燃油晃动动力学响应预测中的准确性。

关键词 燃油晃动, 等效力学模型, 副油箱, 机翼油箱

中图分类号: V212.1; O313.7

文献标志码: A

An Equivalent Mechanical Model for Aircraft Fuel Sloshing Based on Finite Element Mesh^{*}

Li Bin Miao Nan[†] Yan Jiajun Du Yahang Wang Sen

(School of Aerospace Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract Fuel sloshing within aircraft fuel tanks can generate significant forces and moments on the tank walls, thereby affecting the aircraft's dynamic characteristics. To enable accurate and efficient prediction of sloshing-induced forces and moments, this study develops an equivalent pendulum mechanical model based on the finite element method. The study focuses on fuel within auxiliary and wing tanks at a 50% fill ratio. Using this model, the sloshing forces, moments, and the motion of the fuel's center of mass are predicted under three typical flight conditions: pitch, roll, and yaw. The predicted results are further compared with those from computational fluid dynamics simulations, demonstrating the accuracy of the proposed model in capturing the dynamic response of fuel sloshing.

Key words fuel sloshing, equivalent mechanical model, auxiliary fuel tank, wing fuel tank

引言

21 世纪以来,随着飞行器在民用、商用等方面需求持续增加^[1],民众对飞行安全可靠性的关注度

不断提升。在这一背景下,燃油晃动引发的安全问题日益受到重视。飞机执行多自由度机动动作时^[2,3]会引起油箱内燃油做近似简谐^[4]运动,对飞行安全产生不可忽视的影响。因此,如何快速精确地描

2025-05-14 收到第 1 稿,2025-07-25 收到修改稿。

^{*} 中国科协青年人才托举工程(YESS20220545),河南省重点研发与推广专项(222102240124,232102220027,242102220052),河南省高等学校重点科研项目(23A590003),河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS113);Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (YESS20220545),Henan Provincial Key Research and Development Special Project (222102240124,232102220027,242102220052),Henan Provincial Key Research Projects for Higher Education Institutions (23A590003),Henan Provincial Young Backbone Teacher Training Program in Higher Education Institutions (2021GGJS113).

[†] 通信作者 E-mail:miaonan@zua.edu.cn

述飞机油箱内燃油晃动的动力学行为至关重要。

针对液体晃动动力学行为的研究主要分为三个方面:基于势流理论的理论分析^[5,6]、基于求解各种流体控制方程的数值分析^[7,8],以及基于尺度物理模型的实验测量^[9,10]。理论分析适用于忽略液体黏性、贮箱结构简单的问题,在解决复杂问题时存在局限性。数值方法适用范围更广,可以模拟液体剧烈晃动、自由液面变化范围大等强非线性的复杂情况,但该方法需要大量计算资源,在机载计算资源受限情况下难以实现。实验研究可验证理论分析与数值分析结果是否正确,但实验研究成本较高,检测难度较大。

燃油晃动等效力学模型将复杂的液体晃动问题用简单的刚体运动来代替^[11]。常用的等效力学模型有两种:单摆模型和弹簧—质量模型^[12]。陈易之等^[13]提出了基于静矩和惯量一致的变参数等效力学模型建模方法,并通过数值仿真验证了所提出方法的准确性。何家伟等^[14]采用单摆模型对深空探测器飞行过程中燃油不断消耗的工况下建立了燃油晃动等效力学模型,与计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)计算结果对比验证模型准确性。对于实际生产中复杂的贮箱结构,通常采用有限元方法获取等效力学模型参数。丁遂光等^[15]采用有限元方法构建数值求解任意三维油箱内燃油晃动固有频率、模态、动力特征参数的通用程序。李青等^[16]针对非对称贮箱的燃油晃动问题,采用有限元法计算燃油晃动等效模型参数。

值得注意的是,现有等效力学模型的应用范围多局限于轴对称或规则多面体贮箱简化工况下的研究^[17]。此类研究通常基于单腔室、刚性壁面假设建立,虽在圆柱形、长方体等标准构型中取得了较高预测精度,却难以准确表征复杂几何形状飞机油箱。

本文采用单摆模型,针对飞机副油箱及机翼油箱内燃油晃动产生对油箱壁面的作用力、作用力矩以及燃油质心位置进行计算。以飞机飞行姿态作为输入,探究飞机油箱内燃油在俯仰、滚转、偏航三种工况下的动力学行为。在此基础上,将等效模型应用于油箱加装防晃结构的特殊工况,进一步研究其适用性。同时,借助 CFD 软件 Flow-3d 的仿真结果,对等效力学模型进行验证,确保模型的准确性与可靠性。

1 油箱及液体模型

1.1 副油箱模型

副油箱是飞机为提升航程通常采用的液体燃料贮箱,其简化建模通常采用轴对称几何结构。该模型由中段圆柱体与两端半椭球旋转构成,其中圆柱段长度 $l=2.4$ m,半径 $r=0.25$ m,椭圆段长、短半轴分别为 $a=1$ m、 $b=0.25$ m。为减小燃油晃动幅度,可在圆柱段内部装配环形挡板结构,该部件内径 $r_1=0.26$ m,厚度为 0.06 m,如图 1 所示。

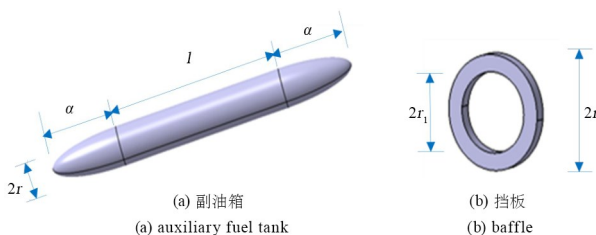


图 1 副油箱及挡板模型

Fig. 1 Model of the auxiliary fuel tank and baffles

本研究采用笛卡尔右手坐标系定义副油箱本体坐标系: x 轴沿纵向指向机头方向, z 轴竖直向上, y 轴依据右手法则,指向右翼为正。油箱注入航空煤油 RP-3,密度 $\rho=791.5$ kg/m³,动力黏度 $\mu=1.289 \times 10^{-3}$ (N·s)/m²。如图 2 所示,针对 50% 充液比副油箱,采用有限元软件 MSC. Patran 建立液体域模型,并划分网格。同时,在 CFD 软件中,采用立方体单元划分含有副油箱区域的矩形实体,立方体单元各边尺寸均为 0.025 m,网格数量为 $184 \times 22 \times 22$ 个,使其随飞机发生俯仰、滚转和偏航运动。在 CFD 数值模拟中, O_{xyz} 为机体坐标系,副油箱几何中心 O_a 的坐标表示为 $(0, 2, -0.5)$ m,故设置 50% 充液比即液面高度 $z_s = -0.5$ m。

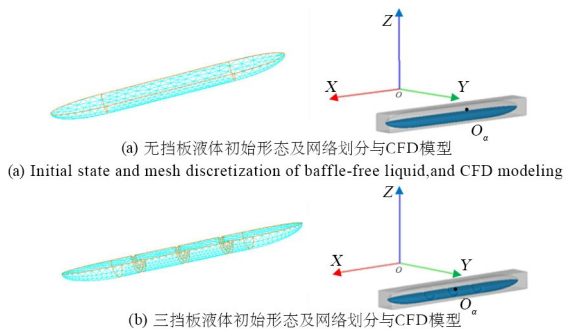


图 2 液体初始形态及网格划分与 CFD 模型

Fig. 2 Initial state of the fluid, mesh discretization, and CFD modeling

1.2 机翼油箱模型

本文针对 NACA-0018 标准对称翼型构建机翼油箱几何模型,如图 3 所示.基础翼型参数设置为弦长 $c=3$ m、最大厚度 $d=0.54$ m、展向延伸长度 $l=6$ m.翼肋采用翼型截面挖孔,其厚度为 0.08 m,孔径 $r_2=0.035$ m, $r_3=0.03$ m.

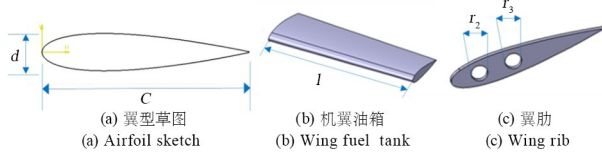


图 3 翼型草图、机翼油箱及翼肋模型

Fig. 3 Schematic of the airfoil, wing fuel tank, and rib model

油箱几何中心 O_b 在机体坐标系 $Oxyz$ 中坐标为 $(-1.237, 3.279, 0)$ m. x 轴沿纵向指向机头方向, z 轴为竖直向上方向, y 轴指向右翼方向为正.如图 4 所示,初始时刻油箱内燃料在重力作用下聚积于油箱底部,其范围为 $[-0.27, 0.27]$ m.利用 Patran 建立液体区域,分为有无翼肋两种情形.为验证所提出等效模型的准确性和有效性,在 CFD 软件中,采用立方体单元划分含有机翼油箱区域的矩形实体,网格数量为 $93 \times 183 \times 18$ 个,六面体单元各边尺寸设定为 0.033 m.沿 z 轴负方向设置充液条件,充液比为 50% .

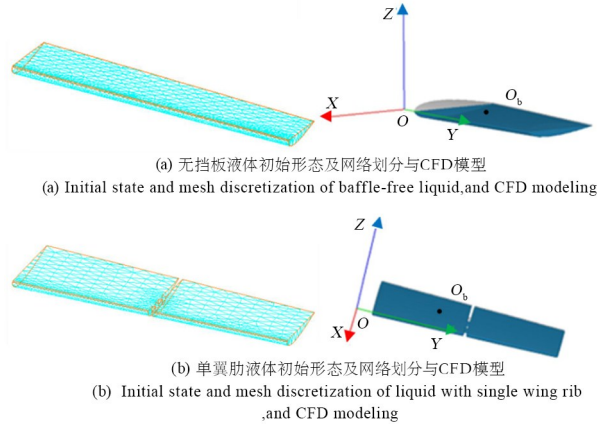


图 4 液体初始形态及网格划分与 CFD 模型

Fig. 4 Initial state of the fluid, mesh discretization, and CFD modeling

2 燃油晃动等效力学模型

2.1 燃油晃动建模

对于飞机油箱内的燃油,假定燃油理想、无旋和不可压缩.在小幅晃动条件下,基于势流理论得

场动压分布为

$$p_d = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

其中 ρ 为燃油密度, Φ 为速度势.液体对油箱的作用力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \int_{S_w + S_f} p_d \mathbf{n} dS \\ &= -m_{liq} \dot{\mathbf{v}}_0 + m_{liq} \mathbf{r}_c \times \dot{\boldsymbol{\omega}} - \sum_{i=1}^{\infty} C_{Ti} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中 m_{liq} 为液体总质量, $\mathbf{r}_c$ 为液体质心矢径, C_{Ti} 为第 i 阶燃油晃动对油箱的作用力系数矢量, $\mathbf{v}_0$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 分别为 O_b 点速度和油箱刚体角速度, q_i 为第 i 阶燃油晃动广义坐标.燃油对油箱关于原点 O_b 的作用力矩为

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \int_{S_w + S_f} p_d \mathbf{r} \times \mathbf{n} dS \\ &= -m_{liq} \mathbf{r}_c \times \dot{\mathbf{v}}_0 - \mathbf{J}_{liq} \times \dot{\boldsymbol{\omega}} - \sum_{i=1}^{\infty} C_{Ri} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{J}_{liq}$ 为燃油等效刚体关于 O_b 点的等效惯性张量, C_{Ri} 为第 i 阶燃油晃动对油箱的作用力矩系数矢量.油箱内燃油晃动的动能为

$$T_s = \int_V \frac{1}{2} \rho \mathbf{u} \times \mathbf{u} dV = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i \dot{q}_i^2 \quad (4)$$

其中 $\mathbf{u}$ 为液体质点相对油箱速度, μ_i 为第 i 阶液体晃动广义质量.

2.2 等效条件

飞机油箱燃油晃动单摆等效模型如图 5 所示,其中 O_0XYZ 为惯性坐标系, O_bxyz 为本体坐标系; $\mathbf{g}$ 为重力加速度,方向竖直向下; m_0 为燃油等效静止质量块, m_i 为第 i 阶燃油晃动等效单摆质量; $\mathbf{I}_0$ 为相对静止质量块 m_0 质心的惯性张量; $\mathbf{r}_0$ 、 $\mathbf{r}_i$ 分别为静止质量块 m_0 和等效单摆质量 m_i 相对 O_b 的矢径; l_i 、 h_i 分别为第 i 阶等效单摆摆长和悬挂点高度; α_i 为第 i 阶单摆摆动的角度.

对于单摆模型,在液体小幅晃动条件下,假定燃油晃动动能为

$$\begin{aligned} T_E &= \frac{1}{2} m_0 (\mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_0)^2 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_0 \times \boldsymbol{\omega} + \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} m_i (\mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + l_i \dot{\alpha}_i \boldsymbol{\tau}_i)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\boldsymbol{\tau}_i$ 为第 i 阶单摆的晃动方向单位矢量.由 Lagrange 方程得,油箱内燃油晃动对箱壁的作用力和作用力矩分别为

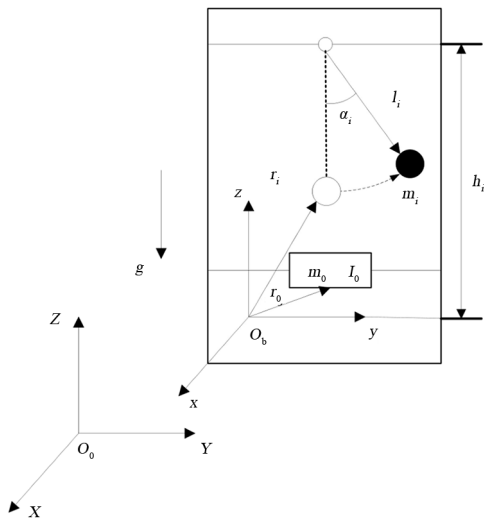


图 5 单摆等效模型
Fig. 5 Equivalent pendulum model

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_E = -\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_E}{\partial \mathbf{v}_0}\right) = & -(m_0 + \sum_{i=1}^{\infty} m_i) \dot{\mathbf{v}}_0 + \\ & (m_0 \mathbf{r}_0 + \sum_{i=1}^{\infty} m_i \mathbf{r}_i) \times \dot{\boldsymbol{\omega}} - \sum_{i=1}^{\infty} m_i l_i \ddot{\alpha}_i \boldsymbol{\tau}_i \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_E = -\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_E}{\partial \boldsymbol{\omega}}\right) = & -(m_0 \mathbf{r}_0 + \sum_{i=1}^{\infty} m_i \mathbf{r}_i) \times \dot{\mathbf{v}}_0 - \\ & (\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}'_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{I}_i) \times \dot{\boldsymbol{\omega}} - \sum_{i=1}^{\infty} m_i l_i \ddot{\alpha}_i \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\tau}_i \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{I}'_0$ 、 $\mathbf{I}_i$ 分别为 m_0 、 m_i 相对 O_b 的惯性张量. 根据等效原则, 模型所计算出的晃动力、晃动力矩、燃油质心、特征频率以及晃动动能与原系统的必须完全相等, 即 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_E$, $\mathbf{M} = \mathbf{M}_E$, $T_S = T_E$, 故综合式 (2)~(7) 得等效条件为

$$\tau_i = \frac{C_{Ti}}{|C_{Ti}|} \quad (8)$$

$$m_i = \frac{C_{Ti} \times C_{Ti}}{\mu_i} \quad (9)$$

$$m_0 = m_{liq} - \sum_{i=1}^{\infty} m_i \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{J}_{liq} - \mathbf{I}'_0 - \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{I}_i \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_0 = \frac{m_{liq} \mathbf{r}_c - \sum_{i=1}^{\infty} m_i \mathbf{r}_i}{m_0} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} \frac{C_{Txi}^2 x_c + C_{Txi} C_{Tyi} y_c - C_{Tyi} C_{Tzi}}{C_{Txi}^2 + C_{Tyi}^2} \\ \frac{C_{Txi} C_{Tyi} x_c + C_{Tyi}^2 y_c - C_{Txi} C_{Rzi}}{C_{Txi}^2 + C_{Tyi}^2} \\ \frac{C_{Ryi} C_{Txi} - C_{Rxi} C_{Tyi}}{C_{Txi}^2 + C_{Tyi}^2} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

其中燃油质心位置, $\mathbf{r}_{cm} = (x_c, y_c, z_c)$, C_{Txi} 、 C_{Tyi} 、 C_{Tzi} 、 C_{Rxi} 、 C_{Ryi} 、 C_{Rzi} 分别为 C_{Ti} 、 C_{Ri} 的分量.

由等效条件知, 等效力学模型参数与模态角频率、晃动模态函数以及斯托克斯矢势有关. 为求解参数, 将控制方程转化为 Galerkin 变分形式, 利用 Green 公式简化方程. 采用前处理软件 Patran 对燃油区域进行网格划分, 场函数在单元内通过插值函数表示, 而全局刚度矩阵和质量矩阵分别通过单元积分集成得到. 进而通过 Arnoldi 方法求解修正后的广义特征值问题, 并借助变换矩阵获取场函数的有限元数值解. 基于此编写 Matlab 等效力学模型参数计算程序.

以 50% 充液比的副油箱为例, 由图 2(a) 和图 2(c) 给出的燃油域网格划分, 根据有限元方法计算得出等效力学模型参数, 如表 1 所示. 有挡板与无挡板的副油箱相比, 其晃动质量有明显降低. 有挡板 x 轴向晃动质量降低 31.41%, y 向晃动质量降低 12.32%. 并且 x 、 y 两轴向上的阻尼有明显增大, 分别上升 66.08%、20.95%. 从增幅角度看, x 轴向增幅更大, 这是由于挡板是以与 y 轴平行的方向放置. 表明挡板的安装位置会对不同方向产生不同程度的影响, 符合预期.

表 1 副油箱等效力学模型主要参数
Table 1 Main parameters of equivalent mechanical model in the auxiliary fuel tank

Parameters	Unit	No baffle	Three baffles
Sloshing mass	m_x/kg	253.1	173.6
	m_y/kg	134.7	118.1
Suspension	h_x/m	7.62	11.24
	h_y/m	-0.50	-0.50
Pendulum length	l_x/m	8.332	11.93
Length	l_y/m	0.1824	0.1802
Static mass	m_0/kg	-97.79	-64.68
Damping ratio	ζ_x	4.590×10^{-3}	7.623×10^{-3}
	ζ_y	1.384×10^{-3}	1.674×10^{-3}
Center of static mass	$\mathbf{r}_0/\text{m}$	(0 2.00 -0.99)	(0 1.99 -2.69)
Inertia tensor of static mass	$\mathbf{I}_0/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	diag(13.10 360.1 340.3)	diag(52.26 395.7 339.4)

3 算例验证

针对固定充液比为 50% 的飞机油箱, 分别施加俯仰、滚转、偏航这三种激励, 分析所构建的燃油晃动等效力学模型的预测结果. 在这三种工况下, 探究该模型预测晃动力、晃动力矩以及质心位置的

准确性.同时,研究等效模型在面对油箱内部装有防晃结构时的适用性.

3.1 副油箱算例验证

以俯仰激励为例,油箱绕 y 轴转动的运动规律 $\theta_y = 0.01 \sin(0.067\pi t)$ rad,给出副油箱在 xz 对称面上部分时刻的燃油形态及压强分布,如图 6(a)所示.与之相应的晃动力、晃动力矩及质心位置(r_{cm})对比如图 7~9 所示.

由晃动力对比图 7 知,俯仰激励可引起 x 轴向单摆的晃动,并产生 x 轴向的晃动力,未引起 y 轴向单摆的晃动,符合理论,整体上等效力学模型预测结果与 CFD 软件吻合效果较好.而 F_z 初始值存在偏差,且由于误差累积,其数值不断减小,计算其在重力作用下的力 2842.98 N,与等效模型预测值吻合,故该误差由 Flow-3D 自身的精度造成.

由图 8、9 晃动力矩、质心位置对比图分析知,整体呈现出较高的吻合度.在 x 轴力矩方面,存在

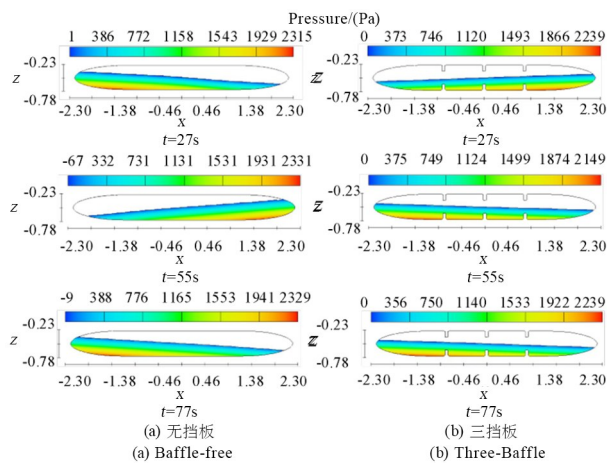


图 6 俯仰激励下部分时刻液体形态及压强分布
Fig. 6 Liquid configuration and pressure distribution at selected time steps under pitch excitation

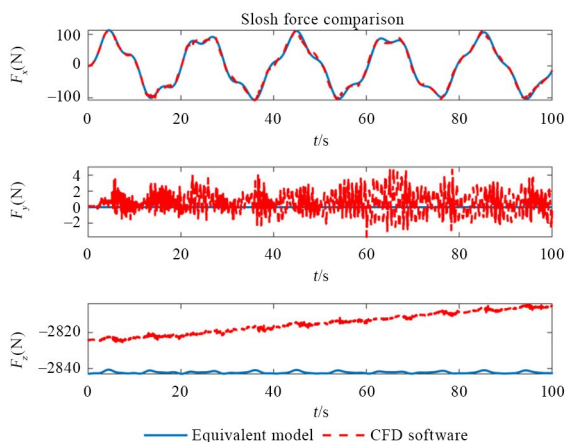


图 7 俯仰激励下晃动力对比
Fig. 7 Sloshing forces under pitch excitation

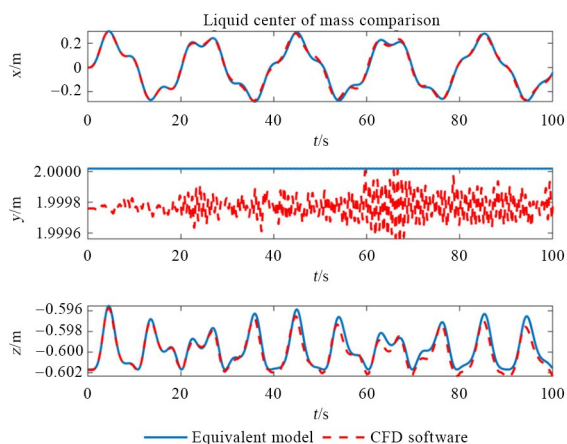


图 8 俯仰激励下质心位置对比
Fig. 8 Liquid center of mass under pitch excitation

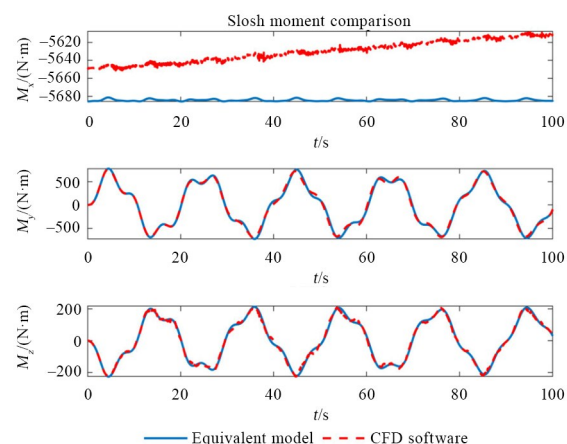


图 9 俯仰激励下晃动力矩对比
Fig. 9 Sloshing moments under pitch excitation

一定偏差,其主要原因在于 CFD 软件对重力的估算值偏小,进而影响了对 x 轴力矩的估算,不过该偏差仍处于预期范围之内.经检验,等效力学模型预测的各项动力学参数与 CFD 仿真数据在对应时刻幅值之间的误差均处于 1% 以内.故可以判定所建立的等效力学模型具有较高的准确性.

防晃结构算例:为进一步研究该等效模型在副油箱内装有环形挡板下的有效性,以副油箱在相同充液高度下,施加同一俯仰激励的燃油晃动为例.利用 CFD 软件进行 100 s 的仿真,期间三挡板副油箱在 xz 对称面上部分时刻的燃油形态及压强分布如图 6(b)所示.仅给出较为关心的 x 轴向晃动力、晃质质心、 y 轴向力矩(俯仰力矩)和 z 轴向力矩(偏航力矩)与 CFD 计算结果对比如图 10 所示.

由图 6 对比分析知,装配环形挡板结构相较于无抑晃结构的副油箱,其油箱壁面压强载荷峰值在 $t = 55$ s 时,由 2331 Pa 降低至 2149 Pa,降幅约 8%,且各监测时刻的压强极值均低于无防晃装置

的副油箱,验证了防晃结构的有效性.由图 10 经计算可知,等效模型对晃动方向上的力、力矩和质心的预测结果与 CFD 软件计算结果在对应时刻上的相对误差均在 2% 以内,符合预期.因此,等效力学模型在副油箱内装有防晃装置的情况下,依然具备良好的适用性.

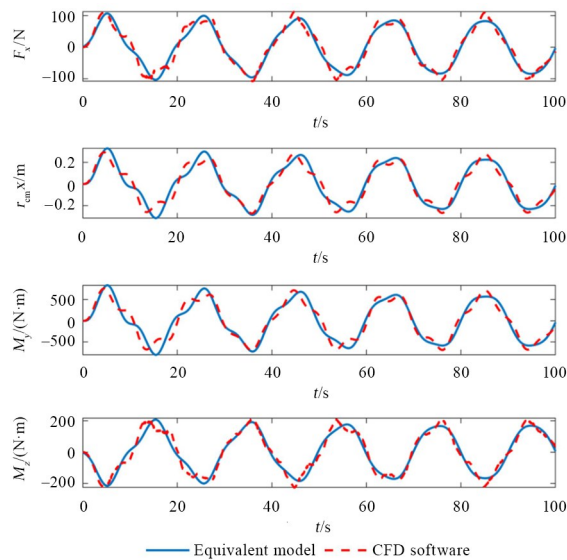


图 10 俯仰激励下动力学响应对比
Fig. 10 Liquid dynamic responses under pitch excitation

3.2 机翼油箱算例验证

基于 3.1 节中在副油箱验证中积累的经验与数据,将等效力学模型进一步应用到结构更为复杂的机翼油箱场景.同样利用流体仿真软件对 50% 充液比机翼油箱算例中的等效模型进行验证.

滚转算例:油箱绕 x 轴转动的运动规律为 $\theta_x = 0.01\sin(0.067\pi t)$ rad,周期 $T = 30$ s,进行 150 s 的仿真,期间机翼油箱在 yz 对称面上部分时刻的燃油形态及压强分布如图 11(a) 所示.对于滚转激励,关注 y 轴向力 F_y 与 x 轴向力矩 M_x ,因此给出相应机翼油箱内燃油晃动力和晃动力矩预测结果,与 Flow-3D 的预测结果对比如图 12 所示.

由图 12 可以看出,当 y 轴向作用力达到峰值 $F_y = 279$ N 时,经计算获得的滚转轴力矩 M_x 的量级仅为 10^2 N.然而实际数据显示,滚转轴力矩的量级达到 10^4 N,较理论值高出两个数量级.由此可知, M_x 的主要贡献源并非 y 轴向作用力,而应来源于 z 轴向作用力与 y 轴燃油质心偏移形成的力臂作用产生的力矩.这一推论与图 12 中展现的力学特性分布趋势相吻合,证明在本机翼油箱的力矩分析中, z 轴向作用力对滚转轴的影响占主导地位.

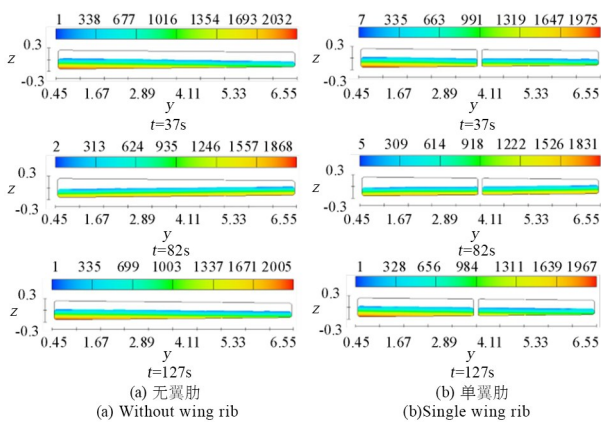


图 11 滚转激励下部分时刻液体形态及压强分布
Fig. 11 Liquid configuration and pressure distribution at selected time steps under pitch excitation

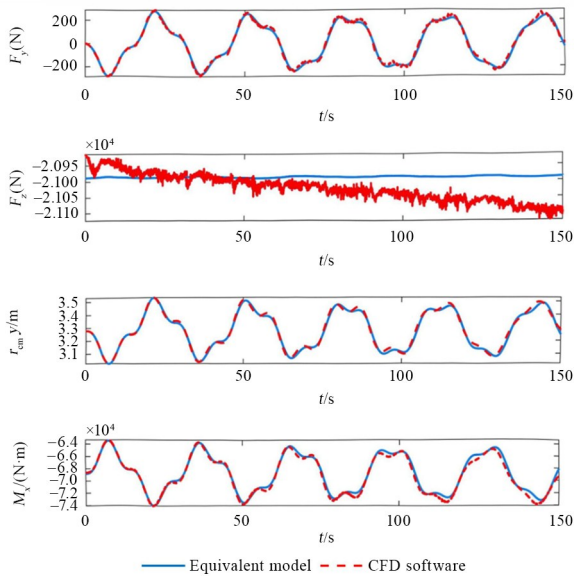


图 12 滚转激励下动力学响应对比
Fig. 12 Liquid dynamic responses under roll excitation

防晃结构算例:为进一步研究该等效模型在机翼油箱内装有翼肋条件下的有效性,以机翼油箱在相同充液高度下,施加滚转激励的燃油晃动为例.利用 CFD 软件进行 150 s 仿真,期间单翼肋机翼油箱在 yz 对称面上部分时刻的燃油形态及压强分布如图 11(b) 所示.油箱绕 x 轴转动的运动规律为 $\theta_x = 0.01\sin(0.067\pi t)$ rad,即周期 $T = 30$ s.给出 z 轴向作用力、 y 轴燃油质心以及力矩 M_x 的预测结果,与 Flow-3D 的预测结果对比如图 13 所示.

由图 11 可以看出,翼肋结构显著降低了油箱壁面压强载荷,各监测时刻的压强极值均低于无翼肋构型,验证了防晃结构的有效性.由图 13 分析对比,结合已有算例结果知, z 轴向力的偏差主要由 Flow-3D 对燃油体积估算偏大引起.由 y 轴向质心对比图以及 x 轴向力矩对比图皆可得出两者周期与幅度基本匹配,波动趋势高度一致,也表明 z 轴

向力的误差可忽略。综合来看,等效力学模型的预测结果与 CFD 软件仿真结果在各物理量的变化趋势上保持良好一致性,偏差处于可接受范围,充分验证了等效力学模型在机翼油箱内装有翼肋的情况下,依然具备良好的适用性。

在已验证等效模型的基础上,进一步研究机翼油箱内燃油在俯仰和偏航激励两工况下动力学响应的预测结果。

俯仰算例:油箱绕 y 轴转动的运动规律为 $\theta_y = 0.05\sin(0.1\pi t)$ rad,即周期 $T = 20$ s。给出 z 轴向作用力、 x 轴燃油质心以及力矩 M_y 的预测结果,与 Flow-3D 的预测结果对比如图 14 所示。

偏航算例:油箱绕 z 轴转动的运动规律为 $\theta_z = 0.8\sin(0.067\pi t)$ rad,即周期 $T = 30$ s,旋转角度为 $\pm 22.9^\circ$ 。给出 y 轴向作用力、燃油质心位置和 z 轴向力矩的预测结果,与 Flow-3D 的预测结果对比如图 15 所示。

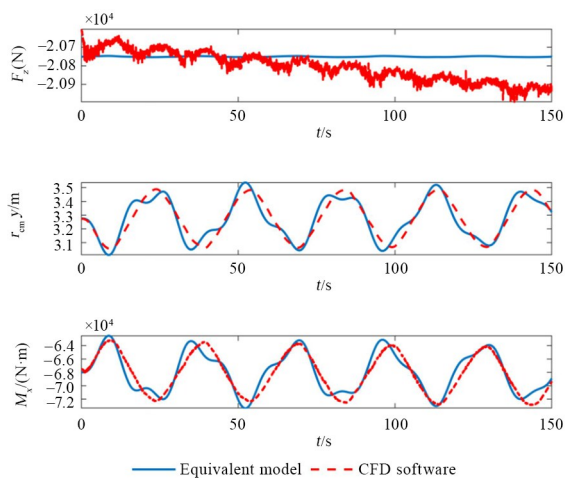


图 13 滚转激励下动力学响应对比

Fig. 13 Liquid dynamic responses under roll excitation

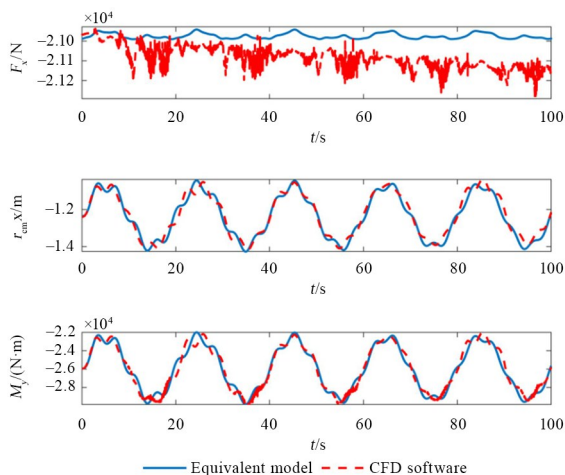


图 14 俯仰激励下动力学响应对比

Fig. 14 Liquid dynamic responses under pitch excitation

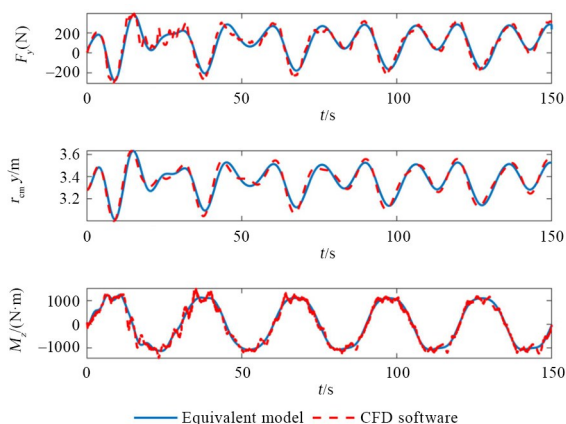


图 15 偏航激励下动力学响应对比

Fig. 15 Liquid dynamic responses under yaw excitation

由图 14 对比分析可知,等效力学模型预测 z 轴向力与 Flow-3D 结果有所偏差。经验证得出初始时刻 $F_z = -20\,983.5$ N 的计算值与理论值完全吻合,验证了模型在 $t = 0$ 时刻的准确性。同时由于误差累积,Flow-3D 仿真得出的力 F_z 呈增大趋势,但其数量级仅为 10^{-2} N,故可忽略其对力矩的影响,从其力矩对比图也可验证该点。由图 15 可知,对 z 轴向施加激励,其产生的晃动频率与激励频率保持一致,由于等效模型在计算动力学响应时忽略了晃动过程中的非线性现象,而 Flow-3D 在计算过程中, y 方向会产生些许非线性晃动,因此产生一定误差,经验证该误差处于 1% 内,符合工程需求。故等效力学模型的预测结果较为准确。

4 结束语

本文基于有限元方法构建燃油晃动等效力学模型。首先针对轴对称几何形状的副油箱建立等效力学模型,通过仿真计算验证模型的可靠性。在此基础上,进一步将模型拓展至结构复杂的机翼油箱场景,重点研究俯仰、滚转和偏航三种典型飞行姿态下燃油晃动的动力学响应特性。通过将仿真结果与商业 CFD 软件的数值解进行对比分析,验证了该等效力学模型适用于结构复杂的油箱内燃油晃动动力学特性的预测,且在对应时刻处的幅值预测误差均在 2% 内。针对油箱内部设置防晃板等抑制装置的特殊工况,研究发现所建模型仍能准确表征受限流动状态下的液体晃动特征。针对本文研究的机翼油箱结构,基于燃油动力学响应分析,建议在设计优化时应重点考察 z 轴向力的传递路径及其对转动轴的作用效应,其他方向作用力对旋转轴的

影响可做次要因素考虑。本文的建模方法为后续研究不同防晃结构的晃动抑制效果及涉及复杂结构油箱的飞行器设计提供了重要参考。

参考文献

- [1] 韩霞, 韩学影. 科技创新驱动航空制造业发展的路径及政策研究[J]. 中国科技论坛, 2025(3): 77—85.
- [2] 刘晨卉, 丁煜轩, 孙光鑫, 等. 三轴载人离心机加速度过载模拟算法开发与验证[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(6): 42—49.
- [3] 林裕杰, 韩艳铎. 一种高超声速飞行器上升段燃耗最优控制方法[J]. 动力学与控制学报, 2025, 23(2): 47—54.
- [4] 张国策, 聂磊, 陈云. 简谐振动初相位之唯一性浅谈[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(3): 88—92.
- [5] GURUSAMY S, KUMAR D. Frequency-bounds of sloshing wave systems in a square-base liquid tank [J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108478.
- [6] HUANG P. A comprehensive investigation on liquid sloshing of rectangular water tank with vertical baffles [J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116126.
- [7] 严晓芳, 柴明明, 陆晓霞, 等. 液体非线性晃动实验与数值模拟[J]. 防化研究, 2024(3): 56—62.
- [8] 曹凯, 尤伟, 李海洋, 等. 基于 SPH 的充液柔性航天器耦合特性分析[J]. 动力学与控制学报, 2025, 23(4): 16—28.
- [9] KIM G J, RHEE H, JEON W H, et al. Lateral sloshing analysis by CFD and experiment for a spherical tank [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 21(3): 816—825.
- [10] MA B L, YUE B Z, LIU F, et al. Study on the dynamical characteristics and experimental validation for liquid sloshing in a common bulkhead tank [J]. Acta Mechanica Sinica, 2023, 39(12): 523127.
- [11] 李遇春. 液体晃动动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [12] BUSECK R, BENAROYA H. Mechanical models for slosh of liquid fuel [C]//Aerospace Design Conference. Irvine, CA, USA. AIAA, 1993.
- [13] 陈易之, 于强, 吕敬, 等. 高轨大型航天器液体晃动等效建模方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50(5): 77—83.
- [14] 何家伟, 吕敬, 王天舒, 等. 变推力、变充液比、贮箱倾斜状态下液体晃动分析[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024: 1—14. (2024-09-27)[2025-03-19]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0286>.
- [15] 丁遂亮, 包光伟. 任意三维贮箱内液体晃动的模态分析及其等效力学模型[J]. 力学季刊, 2004, 25(1): 62—68.
- [16] DING S L, BAO G W. Modal analysis and equivalent mechanical model of liquid sloshing in arbitrary nese)
- [17] CAO K, YOU W, LI H Y, et al. The analysis of coupling behaviors of fluid-filled flexible spacecraft based on the SPH method [J]. Journal of Dynamics and Control, 2025, 23(4): 16—28. (in Chinese)

3D container [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004, 25(1): 62—68. (in Chinese)

[16] 李青, 马兴瑞, 王天舒. 非轴对称贮箱液体晃动的等效力学模型[J]. 宇航学报, 2011, 32(2): 242—249.

LI Q, MA X R, WANG T S. Equivalent mechanical model for liquid sloshing in non-axisymmetric

tanks [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2): 242—249. (in Chinese)

[17] LU Y, YUE B Z, MA B L, et al. A universal non-linear equivalent model and its stability analysis for large amplitude liquid sloshing in rotationally symmetric tanks [J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(7): 6031—6047.