

# 流固耦合作用下某双层结构燃料贮箱动力学特性分析\*

刘文一<sup>1</sup>, 李玉龙<sup>1</sup>, 吴训涛<sup>1</sup>, 夏广庆<sup>2</sup>

(1 91550 部队, 辽宁大连 116023; 2 大连理工大学航空航天学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:**为了研究某姿控发动机双层结构燃料贮箱在升空过程中振动冲击对贮箱的影响,利用流固耦合理论对空载和充液两种条件下的贮箱进行了模态分析、频率响应分析和冲击响应分析。计算出了两种条件下贮箱的模态频率、模态振型;获得了两种条件下贮箱的频率响应特性;得到了两种条件下贮箱冲击响应曲线。

**关键词:**贮箱;流固耦合;模态;频率响应;冲击

**中图分类号:**V434 **文献标志码:**A

## Analysis of Dynamic Characteristic of Double-deck Propellant Tank under Liquid-solid Coupling Interaction

LIU Wenyi<sup>1</sup>, LI Yulong<sup>1</sup>, WU Xuntao<sup>1</sup>, XIA Guangqing<sup>2</sup>

(1 No. 91550 Unit, Liaoning Dalian 116023, China;

2 School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

**Abstract:** To predict influence of the rocket shock and vibration on the propellant tank of attitude control engine, modals, vibration response and shock response have been analyzed on two cases with liquid-solid coupling theory. Modal frequencies have been get on two cases, vibration response and impulse response characteristics have been obtain on two cases.

**Keywords:** tank; liquid-solid coupling; modal; vibration response; shock

### 0 引言

液体火箭发动机作为某飞行器的一部分,其燃料贮箱在火箭升空过程中受到主发动机工作产生的振动和冲击的影响。贮箱除了受到外界载荷的影响外,填充的液体燃料也会产生晃动作用,从而产生外界载荷与液体的流固耦合作用共同叠加的效应<sup>[1]</sup>。为了经受温度变化考验和便于燃料流动,贮箱为内外两层结构,外层为不锈钢材料,内层为钛合金材料,两层间通过磨焊联结。复杂的载荷和结构对贮箱强度提出了较高要求,因此有必要在贮箱载荷设计前对其进行动力学特性分析。

文中建立了燃料贮箱的有限元分析模型,利用流固耦合理论计算了空载和充液两种条件下贮箱的前十阶模态、激励频率为 5~800Hz 下的频率响应、正弦冲击载荷下的冲击响应。得到了两种条件下的模态振型和模态频率;振动载荷下的位移响应曲线、贮箱与外界激励共振时的频率和位移最大值;冲击载荷下的加速度响应曲线<sup>[2]</sup>。

### 1 有限元模型

贮箱为双层球壳型,外部直径为 40cm,不锈钢层厚度为 0.5cm,钛合金层厚度为 0.3cm。其底部有一喷嘴,用以与箭体连接(见图 1)。整个结构共划分 9532 个单元,5126 个节点,单元类型为四面体单元。

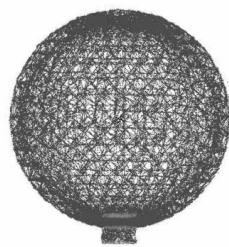


图 1 贮箱的有限元模型

### 2 材料模型

贮箱为双层球壳结构,外层为不锈钢材料,内层为钛合金材料。两种金属的力学性能参数见表 1。

### 3 计算模型

#### 3.1 流固耦合模型<sup>[3]</sup>

流固耦合理论的核心是虚拟质量法,虚拟质量法

\* 收稿日期:2010-08-21

作者简介:刘文一(1982-),男,甘肃甘谷人,助理工程师,硕士,研究方向:航天器结构分析。

表 1 两种金属性能参数

参数	不锈钢	钛合金
$(E_{11}/E_{22})/\text{Pa}$	$2.30 \times 10^{12}$	$1.02 \times 10^{11}$
$E_{33}/\text{Pa}$	$1.52 \times 10^{12}$	$0.65 \times 10^{11}$
$(G_{12}/G_{23})/\text{Pa}$	$0.98 \times 10^{12}$	$0.8 \times 10^{11}$
$G_{31}/\text{Pa}$	$0.86 \times 10^{12}$	$0.54 \times 10^{11}$
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	5632	4850
$\nu$	0.3	0.33

注:  $E$  为杨式模量;  $G$  为剪切模量;  $\rho$  为密度;  $\nu$  为泊松比; 1, 2, 3 分别代表 X、Y、Z 三个轴方向。

通过施加一个附加质量矩阵, 实现不可压缩流体对结构的作用。流体中结构的振动模态的有限元计算方程为:

$$[\mathbf{M} + \mathbf{M}_A] \cdot [\ddot{\mathbf{u}}] + [\mathbf{K} + \mathbf{K}_A] \cdot [\mathbf{u}] = \{0\} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为结构质量矩阵;  $\mathbf{M}_A$  为流体作用对结构产生的附加质量矩阵;  $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\mathbf{u}$  为加速度及位移向量。

从式(1)可看出, 一方面, 附加质量矩阵随流体流动状态的变化而变化, 因此, 结构的振动是整体流动状态的函数; 另一方面, 结构的振动以物面边界的形式对流体的流动产生影响, 改变流体的运动状态, 这种流体、结构之间构成一个封闭动力学系统。

假设各向同性、不可压缩的非黏性液体, 忽略结构体表面重力的影响, 且结构体运动速度很低。根据流体力学的连续方程、运动方程、能量方程, 求解 Laplace 方程可得到速度势以及压力场:

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \sum_j \int_{A_j} \frac{\boldsymbol{\sigma}_j \mathbf{e}_{ij}}{|r_i - r_j|^2} dA_j \quad (2)$$

$$p_i = \sum_j \int_{A_j} \frac{\rho \boldsymbol{\sigma}_j \mathbf{e}_{ij}}{|r_i - r_j|} dA_j \quad (3)$$

式中:  $\dot{\mathbf{u}}_i$  为任意节点  $r_i$  处速度向量;  $A_j$  为结构体表面上一微元的面积;  $\boldsymbol{\sigma}_j$  为  $j$  节点处的流速向量;  $\mathbf{e}_{ij}$  为从  $j$  点到  $i$  点的单位向量;  $p_i$  为任意面  $A_j$  上的压力;  $\rho$  为流体密度。

将式(2)及式(3)积分得到:

$$\{\dot{\mathbf{u}}\} = [\boldsymbol{\chi}] \cdot [\boldsymbol{\sigma}] \quad (4)$$

$$\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{A}] \cdot \{\boldsymbol{\sigma}\} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{F}$  为节点压力。

根据力矩阵、质量矩阵与加速度矩阵的关系式为:

$$\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{M}_a] \cdot \{\ddot{\mathbf{u}}\} \quad (6)$$

将式(4)及式(5)代入式(6)得到虚拟质量矩阵为:

$$[\mathbf{M}_A] = [\mathbf{A}][\boldsymbol{\chi}]^{-1} \quad (7)$$

### 3.2 充液贮箱振动模型

充液贮箱的液体自由振荡的微分方程的边值问题为:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (8)$$

$$\left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=0} = 0 \quad (9)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $t$  为时间;  $z$  为液面高度。

采用分离变量解法, 设速度势  $\phi(x, y, z, t)$  为  $R(r)\theta(\theta)Z(z) \cdot \exp(i\omega t)$ , 又设  $\theta(\theta)$  为  $\cos m\theta$  或  $\sin m\theta$ , 当轴对称时,  $m = 1$ , 于是设  $\phi$  为:

$$\phi(r, \theta, z, t) = R(r)Z(z)\cos\theta\exp(i\omega t) \quad (10)$$

可得到充液贮箱液体自由振荡的速度势为:

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} S_n \exp(i\omega_n t) \frac{\cos\left[\frac{\xi_n}{r_0}(z+h)\right]}{\cos\left(\xi_n \frac{h}{r_0}\right)} \cdot \frac{J_1\left(\xi_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_1\left(\xi_n\right)} \cos\theta \quad (11)$$

式中:  $r_0$  为贮箱半径;  $h$  为贮箱内液面高度;  $S_n$  为待定常数;  $\omega_n$  为液体晃动的固有频率;  $J_1$  是第一类一阶贝塞尔函数;  $\xi_n$  为  $J_1(\xi_n) = 0$  的根,  $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

可导出液体晃动的固有频率为:

$$\omega_n^2 = \frac{g\xi_n}{r_0} \tan\left(\xi_n \frac{h}{r_0}\right) \quad (12)$$

## 4 计算及结果分析

### 4.1 模态分析

计算得到了贮箱空载和充液两种条件下的前十阶模态, 表 2 是这两种条件下贮箱的前十阶模态频率。

表 2 两种条件下贮箱的模态频率

模态阶数	模态频率/Hz		模态阶数	模态频率/Hz	
	空载	充液		空载	充液
第一阶	53.325	19.326	第六阶	1485.3	702.26
第二阶	162.226	87.739	第七阶	2679.6	1232.6
第三阶	198.30	97.352	第八阶	2783.5	1251.5
第四阶	369.69	214.36	第九阶	2860.3	1273.3
第五阶	1508.3	698.58	第十阶	2938.8	1405.2

从模态分析结果看出, 充液贮箱的各阶模态频率要小于空载贮箱的各阶模态频率, 从振动理论可知, 物体的模态频率与它的质量相关, 质量越大, 模态频率越低。本次计算利用了流固耦合理论, Nastran 用附加质量法将流体质量体现在有限元模型中, 从一定意义上相当于放大了结构质量。

模态分析还得到了这两种条件下的前十阶模态振型, 两种条件下同阶模态振型变化较大。

### 4.2 频率响应分析

贮箱在加注满燃料后升空过程中, 火箭主发动机工作会产生振动, 假如充液贮箱与箭体振动发生共振, 并且振动强度较大, 超出贮箱材料的弹性范围, 贮箱就有可能被破坏。

贮箱为轴对称结构,计算中设定振动激励通过喷嘴传递给贮箱,因此喷嘴部分是振动最严重的地方。计算中设定火箭发射振动的频率范围为 5~800Hz,得到了贮箱在空载和充液两种条件下的振动位移响应曲线。

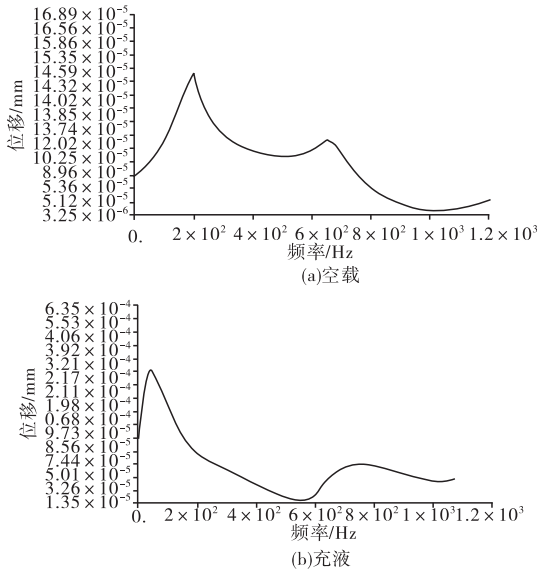


图 2 两种条件下贮箱接嘴部位的频率响应曲线

由图 2 可见,空载条件下贮箱接嘴部分频率响应的最大位移为  $14.46 \times 10^{-5}$  mm,对应的共振频率为 198Hz,充液条件下贮箱接嘴部分频率响应的最大位移为  $2.19 \times 10^{-4}$  mm,对应的共振频率为 87Hz。

结合模态分析结果来看,空载条件下贮箱在第三阶模态处与外界振动激励发生共振;充液条件下贮箱在第二阶模态处与外界振动激励发生共振。充液贮箱频率响应位移幅值增大,同阶的模态频率充液贮箱大约是空载贮箱的一半。

### 4.3 冲击响应分析

火箭在飞行过程中,主发动机启动、级间分离等动作会产生强烈的冲击力作用,冲击力传递到贮箱上,会产生严重的冲击载荷。利用模态加速度法进行了冲击响应分析,考虑到冲击力的频率范围和响应计算精度,计算时模态频率截止到 3000Hz,时间步长取 0.5ms,阻尼系数取 0.03。冲击力为正弦函数  $F(t) = F \cdot \sin(2\pi ft)$ 。其中  $F = J_0 \cdot \frac{\pi \Delta v}{2c^2 T}$ ,  $\Delta v = (1 - k)v$ ,  $v$  为速度最大值,  $k$  为不锈钢对钛合金的弹性恢复系数,取 0.42,  $J_0$  为相对贮箱接嘴的转动惯量。

由冲击响应分析的结果看出,空载条件下贮箱接嘴部分加速度响应最大值为 22g,而充液条件下贮箱接嘴部分加速度响应最大值为 30g。

贮箱中填充满燃料后,在流固耦合作用下冲击载荷变大,使得贮箱要经受更为复杂和剧烈的力学环境

考验。

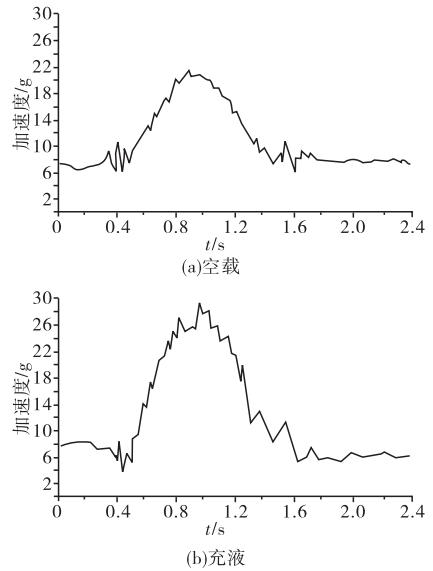


图 3 两种条件下贮箱接嘴部位的冲击加速度响应曲线

## 5 结论

文中完成了双层结构姿控发动机贮箱的动力学特性分析,计算中考虑了流固耦合效应。利用流固耦合理论分析了贮箱在空载和充液两种条件下模态、频率响应和冲击响应,得出以下结论:

- 1) 充液条件下各阶模态频率小于空载条件下的模态频率,两种条件下相同阶的模态振型变化较大。
- 2) 在 5~800Hz 的激振条件下,空载贮箱在第三阶模态处与外界发生共振,频率响应的位移最大值为  $14.46 \times 10^{-5}$  mm;充液贮箱在第二阶模态处与外界发生共振,频率响应的位移最大值为  $2.19 \times 10^{-4}$  mm。充液使贮箱振幅变大,而且使贮箱容易与外界低频振动发生共振。
- 3) 在正弦冲击载荷作用下,充液贮箱的加速度响应最大值为 30g,而空载贮箱的加速度响应最大值为 22g,液体的晃荡加剧了贮箱受到的冲击载荷。
- 4) 充液使贮箱受到的载荷更为复杂,载荷的数值也有所增加,意味着贮箱要经受比火箭更严重的力学环境考验,因此在进行贮箱载荷设计的时候不能忽略流固耦合效应。

### 参考文献:

[1] 韩增尧. 航天器贮箱的动强度分析[G]//北京 MSC Software 中国用户论文集,2002.  
 [2] 马爱军,周传月,王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.  
 [3] 杨剑,张璞,陈火红. 新编 MD Nastran 有限元实例教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.