

DOI: 10.7652/xjtuxb201407019

变质量矩形贮箱流固耦合系统动力学特性分析

马驰骋, 张希农, 罗亚军, 张春林

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究质量减小(燃料消耗)过程中矩形贮箱的动力学特性,提出了一种基于 PATRAN-NASTRAN-MATLAB 的建模仿真方法。根据虚拟质量法对变质量矩形贮箱流固耦合结构进行简化,建立了结构动力学有限元模型;结合 PATRAN-NASTRAN-MATLAB 对该动力学模型进行计算仿真,求得了系统的位移响应;鉴于傅里叶变换在处理非稳态信号时的不足,使用 Choi-Williams 时频分布处理变质量系统的动力学响应信号,得到了时频响应谱图。结果表明:系统质量的减小在引起系统振动频率增大的同时还产生了一个附加的负阻尼,使得系统的振动衰减减慢;系统质量减小引起的负阻尼与系统的质量变化率成正比,如果系统的质量变化较快,就会产生一个比较大的负阻尼,当负阻尼的作用超过结构阻尼的作用时,将使系统的振幅增大,甚至会超出贮箱结构的弹性范围,造成结构的破坏。

关键词: 液体火箭;变质量;矩形贮箱;流固耦合;Choi-Williams 时频分布;负阻尼

中图分类号: V214.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0109-08

Dynamic Analysis on a Fluid-Structure Coupling System with Variable Mass in a Rectangular Tank

MA Chicheng, ZHANG Xinong, LUO Yajun, ZHANG Chunlin

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the dynamic characteristics of a rectangular tank with decreasing mass (fuel consumption), a numerical approach is proposed to model and simulate the fluid-structure coupling system based on PATRAN-NASTRAN-MATLAB. Virtual mass method is utilized to simplify the model and to construct the finite element model, then free vibration states of the variable mass system are mainly analyzed. The displacement responses and frequency responses of the time varying mass system are obtained by using a PATRAN-NASTRAN-MATLAB program. Considering the deficiency of Fourier transformation, Choi-Williams transformation is adopted to process the non-stationary vibration signals of the time varying mass system. It indicates that the decrease in the mass of the system induces an increase in the vibration frequency of the system and generates an additional negative damping to slow up the vibration decay. The additional negative damping is proportional to the rate of mass variation, and it will result in larger vibration amplitude of the system if it plays a dominant role over the structural damping. Especially, once the increasing amplitude exceeds the elastic range, the tank structure may be damaged.

Keywords: liquid rocket; time varying mass; rectangular tank; fluid-structure coupling; Choi-Williams distribution; negative damping

为了提高液体推进火箭的运载性能,火箭需要携带的推进剂的质量占整体结构质量的比重将不断增大。现代运载火箭所携带的推进剂质量较大,晃动频率较低,与结构的低阶频率相近,而且随着燃料的消耗,系统的总体质量不断减小,从而会引起系统振动频率的改变,导致推进剂与贮箱的耦合振动对火箭正常运行的影响越来越大。对推进剂与贮箱结构之间的流固耦合振动进行研究,对于火箭飞行性能与飞行安全有着重要的意义。液体火箭的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是非常大的,而且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荡作用^[1],从而产生外界载荷与流固耦合作用的叠加效应。许多学者对充液容器的流固耦合问题进行了研究,例如:Moiseev 详述了有关充液容器问题的基本理论,利用摄动法和特征函数研究了任意形状贮箱中液体的大晃动问题^[2];Abramson 等人在含液容器耦合动力学方面进行了卓有成效的研究^[3];尹立中等人利用推广形式的驻定压力原理建立了刚-液耦合系统液体晃动的动力学方程,并研究了该系统的动力学特性^[4-5];傅衣铭等人建立了弹性底板矩形贮箱流固耦合系统的自由振动方程,采用 Galerkin 方法求解了系统的流固耦合自由振动频率,并讨论了弹性基底的材料弹性常数、结构几何参数、液体深度和密度对系统频率的影响^[6];Rebouillat 等人介绍了近年来部分含液容器动力学的建模方法和分析方法方面的进展^[7];Daneshmand 等人采用一个二维模型,使用有限单元法得到了一个薄底含液矩形容器的固有频率和振型^[8];Askari 等人采用瑞利展开和 Galerkin 方法分析了流体和结构之间的相互作用^[9];刘文一等人研究了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 2 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^[10];朱琳等人将表征液体运动的节点压力压缩聚到自由面,利用主坐标表征液体晃动,采用等效拉普拉斯方程的边值问题求解液固耦合方程组中的附加质量矩阵、附加刚度矩阵和耦合矩阵,获得了推进剂及贮箱的液固耦合振动特性^[11];高锁文等人重点分析了常重力下矩形贮箱类流固耦合系统的随机振动响应^[12];马钧等人采用流固耦合虚拟质量法计算分析了集装箱的流固耦合冲击响应谱^[13]。

以往的研究侧重于贮箱中液体的晃动对系统的影响,但是对于运载火箭而言,贮箱中的燃料消耗极

大地改变了系统的质量,而且运载火箭的推进剂质量占飞行器质量的比重甚至超过了 90%,而目前关于质量改变对贮箱系统动力学特性的影响方面的研究甚少。

本文主要研究了推进剂消耗过程中变质量贮箱结构的动力学特性,重点研究了变质量对贮箱结构动力学特性的影响。建模过程中着重考虑了质量变化对系统自由振动的影响,并且编制了 PATRAN-NASTRAN-MATLAB 仿真计算程序,精确、快速地得到了变质量液固耦合系统的模态频率、自由振动响应等动力学特性的结果,以期为变质量液固耦合系统的动力学分析提供一种新的计算方法。

1 贮箱类液固耦合系统的动力学方程

对工程中常见的矩形贮箱类充液结构进行简化,可以得到如图 1 所示的耦合动力学模型,图中 L 、 W 、 H 分别为矩形贮箱的长、宽、高,充液深度 $h(t)$ 是一个随时间减小的函数。假设液体为无黏、无旋、不可压缩的理想流体,则其运动的速度场有势。

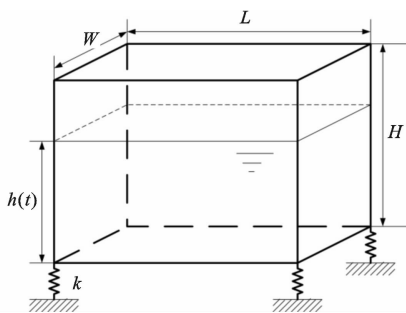


图 1 变质量贮箱耦合动力学模型

对于图 1 所示的结构,流体力学的运动学基本方程为

$$\nabla p + \rho \ddot{\mathbf{u}}_F = 0 \quad (1)$$

式中: p 为液体的压强; $\mathbf{u}_F$ 为流体的位移; ρ 为流体的密度。流体的连续性条件为

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} = -\frac{\dot{p}}{K} \quad (2)$$

式中: K 为流体的压缩模量。将式(2)代入式(1)可以得到

$$\nabla^2 p - \frac{\rho}{K} \ddot{p} = 0 \quad (3)$$

对于不可压缩的理想流体, $K \rightarrow \infty$,从而式(3)可以简化为

$$\nabla^2 p = 0 \quad (4)$$

流体的位移场可以通过一个势函数 φ 来描述

$$\mathbf{u}_F = \nabla \varphi \quad (5)$$

考虑到内流体是无旋的及不可压缩的,可以得到拉普拉斯方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_F = \nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

将方程(5)代入方程(1),并且对方程两边同时积分,可以得到

$$p = -\rho \ddot{\varphi} \quad (7)$$

对于波动液面,流体边界条件为

$$p = -\rho g \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_F \quad (8)$$

在结构流体交界面处,根据位移连续性有

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_F = \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_s \quad (9)$$

由于贮液箱中液体与箱体弹性结构的相互作用比较复杂,还要考虑变质量问题,更增加了该流固耦合系统动力学分析的难度。为解决这一问题,必须对相关的模型进行简化。本文采用虚拟质量法对模型进行简化,即将流体对固体的作用以固体的附加质量形式来体现(见文献[14-16])。用 Helmholtz 边界积分法求解拉普拉斯方程,可以得到流体边界上任意一点 $\mathbf{r}_i$ 处的速度向量

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \sum_j \int_{A_j} \frac{\sigma_j \mathbf{e}_{ij}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2} dA_j \quad (10)$$

式中: σ_j 为流场在点 $\mathbf{r}_j$ 处面元 A_j 上的流体通量; $\mathbf{e}_{ij}$ 为从点 j 到 i 的单位向量。

将式(5)和式(7)带入式(10),可以得到压力向量

$$\mathbf{p}_i = \sum_j \int_{A_j} \frac{\rho \dot{\sigma}_j \mathbf{e}_{ij}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} dA_j \quad (11)$$

对式(10)和式(11)在结构有限元表面进行积分,得到

$$\dot{\mathbf{u}} = \boldsymbol{\chi} \boldsymbol{\sigma} \quad (12)$$

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\Lambda} \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (13)$$

式中:矩阵 $\boldsymbol{\chi}$ 和 $\boldsymbol{\Lambda}$ 为积分系数矩阵; $\mathbf{F}$ 为流体作用在结构上的节点力。根据力向量、质量矩阵和加速度向量的关系,可得

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} \quad (14)$$

联立式(13)和式(14),得到虚拟质量法的附加质量矩阵

$$\mathbf{M}_s^f = \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\chi}^{-1} \quad (15)$$

考虑到液体对结构刚度的影响比较小,因此可以得到系统的运动方程为

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f) \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F}_s \quad (16)$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 和 $\mathbf{K}_s$ 分别为壳体结构的质量矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{F}_s$ 为固体的外载荷矩阵; $\mathbf{M}_s^f$ 代表流体对固体的作用,表现为固体附加质量的形式,称为附加质量矩阵。至此,流固耦合问题退化为考虑附加质量的固体动力学问题,从而大大简化了流固耦合系统的分析。

当燃料没有消耗,即系统的质量不发生改变时,系统的动能和弹性势能可以表示为

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f) \dot{\mathbf{u}} \quad (17)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K}_s \mathbf{u} \quad (18)$$

在飞行器飞行过程中,由于燃料的消耗使得附加质量成为一个随时间变化的函数,因此当系统的质量发生变化时,系统的动能可以写为

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{u}}^T (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f(t)) \dot{\mathbf{u}} \quad (19)$$

根据拉格朗日方程,有

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{u}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{F} \quad (20)$$

式中: $L = E_k - E_p$ 。由此可以得出燃料消耗过程中系统的运动方程

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f(t)) \ddot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{M}}_s^f(t) \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (21)$$

假设系统的结构阻尼是质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,即瑞利阻尼

$$\mathbf{C} = \alpha (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f(t)) + \beta \mathbf{K} \quad (22)$$

本文主要研究系统的横向自由振动,因此瑞利阻尼的比例系数 α 和 β 可以根据系统的前 2 阶横向振动固有频率 ω_1, ω_2 和模态阻尼比 ζ 求得

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\omega_2\zeta_1 - \omega_1\zeta_2)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}; \quad \beta = \frac{2(\omega_2\zeta_2 - \omega_1\zeta_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (23)$$

因此,系统的动力平衡方程可以写成如下形式(称为 Case I)

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f(t)) \ddot{\mathbf{u}} + (\dot{\mathbf{M}}_s^f(t) + \mathbf{C}) \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (24)$$

为了进行比较,本文还计算了不考虑质量变化引起的负阻尼时的系统响应(称为 Case II),即

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_s^f(t)) \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (25)$$

对得到的质量矩阵进行插值,可以得到 $t(t_1 \leq t \leq t_2)$ 时刻系统的总体质量矩阵

$$\mathbf{M}_s^f(t) = \left(1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}\right) \mathbf{M}_s^f(t_1) + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \mathbf{M}_s^f(t_2) \quad (26)$$

系统燃料质量的变化可以通过燃料高度的变化来衡量

$$M(t) = \frac{M_0}{H} h(t) \quad (27)$$

式中: M_0 为初始时刻的燃料质量。假设燃料的消耗速率是均匀的,则 $h(t)$ 是一个线性函数,可以表示为

$$h(t) = \frac{H}{T}(T - t) \tag{28}$$

2 数值仿真

使用有限元软件 PATRAN-NASTRAN 对图 1 所示的贮箱建立有限元模型,如图 2a 所示。这里采用的模型为一个两端封闭的矩形壳,壳体底面长、宽都为 0.4 m,壳体厚度为 0.003 m,高度为 1 m。有限元网格共有 196 个单元,198 个节点。弹簧的刚度系数为 2 MN/m;壳体材料的弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 700 kg/m³。贮箱结构的第 1 阶横向振动如图 2b 所示。支撑弹簧采用 Bush 两节点单元,壳体结构采用 Quad4 四节点单元。在 PATRAN-NASTRAN 虚拟质量法中,通过卡片 MFLUID 定义不可压缩流体的参数,并将液体以附加质量的形式作用于结构。从图 2b 可以看出,系统的第 1 阶横向振动为左右摆动。为了便于施加外激励和观察,选取节点 189 为载荷施加处和测量点。

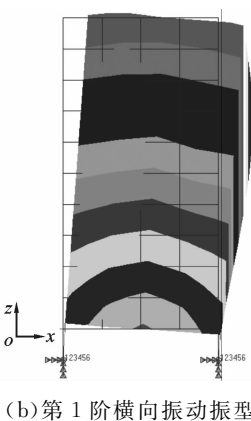
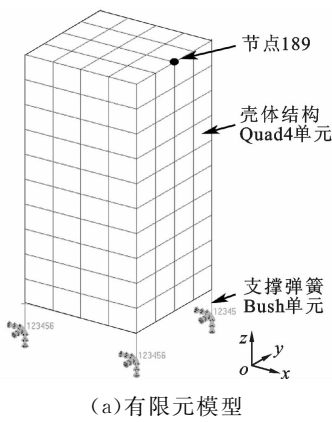


图 2 贮箱结构的有限元模型及第 1 阶横向振动振型

图 3 是建模及仿真分析流程图。液体对贮箱结构的影响可以通过虚拟质量法在 PATRAN-NASTRAN 中直接计算得到,但是 PATRAN-NASTRAN

更加适用于求解线性系统的动力学响应,而对于变质量贮箱结构的动力学特性,使用 PATRAN-NASTRAN 进行计算则比较复杂,甚至难以实现。使用 MATLAB 编写程序,对 PATRAN-NASTRAN 中得到的数据进行二次开发处理,是一种快速而简便的方法。程序开发的难点在于构建变质量系统的质量变化函数,由于在计算迭代过程中涉及到变化的质量矩阵和刚度矩阵,因此计算量比较大,耗时长。使用 PATRAN-NASTRAN 得到系统在 $t_1, t_2, t_3, \dots$ 时刻的质量矩阵和刚度矩阵后,采用线性插值的方法得到系统在 t 时刻的质量矩阵和刚度矩阵,使用 Newmark 直接积分法计算系统的位移响应,然后使用快速傅里叶变换和 Choi-Williams 时频分布可以得到系统的频率响应曲线及时频响应谱图。

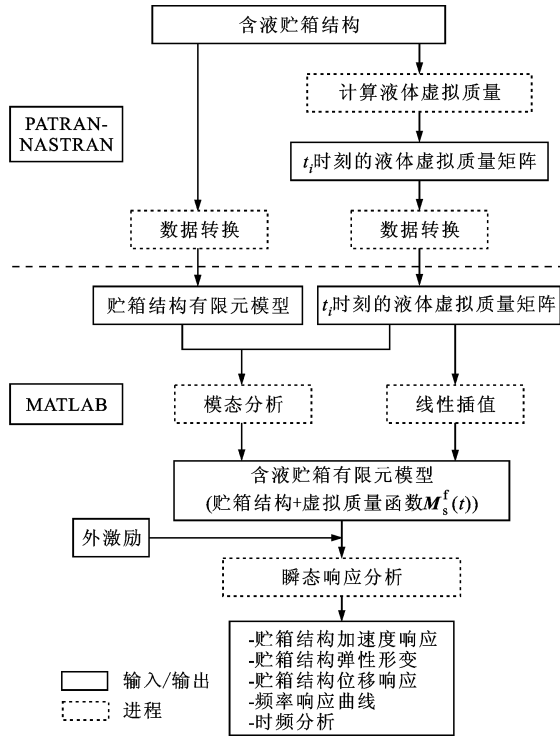


图 3 建模及仿真计算流程图

首先计算不同液面高度时系统的固有频率。使用虚拟质量法,在 PATRAN-NASTRAN 中直接计算得到系统的固有频率,然后根据 PATRAN-NASTRAN 中提取出的附加质量矩阵,在 MATLAB 程序中采用插值的方法计算任意时刻系统的固有频率,结果如图 4 所示。从图中可以看出,使用 MATLAB 和 PATRAN-NASTRAN 两种方法得到的结果是一致的,说明了自行编制的 MATLAB 程序的可行性。由于系统质量不断减小,而结构的刚度基本不发生变化,所以系统的固有频率随着液体燃料的减

少而增大,第 1 阶横向振动固有频率从 9.14 Hz 增大到 34.93 Hz。

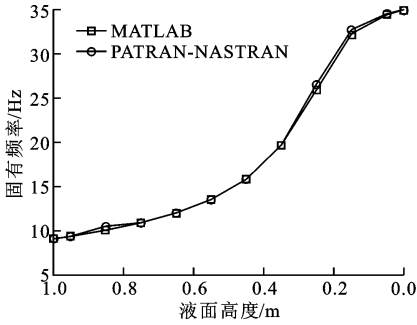


图 4 不同液面高度时系统的第 1 阶横向振动固有频率

本文主要研究系统的自由振动,通过系统的自由振动响应观察变质量对系统的影响。模态阻尼比在这里分别取为 1% 和 0.5%。根据贮箱空箱时的固有频率,可以求得贮箱空箱时的瑞利阻尼比例系数 $\alpha_0=0.67, \beta_0=1.732\times 10^{-5}$ 。这里定义系统空箱时的结构阻尼

$$C_{h=0} = \alpha_0 M_0 + \beta_0 K \tag{29}$$

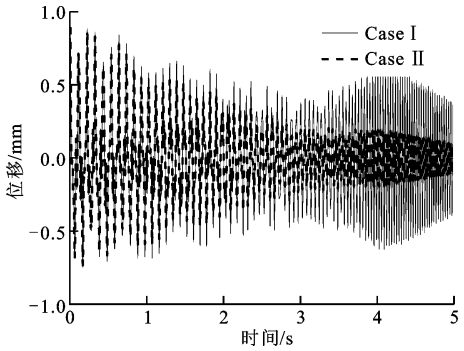
式中: $C_{h=0}$ 和 M_0 分别表示 $h(t)=0$ 时系统的结构阻尼矩阵和质量矩阵。

当贮箱中装满燃料时,瑞利阻尼比例系数 $\alpha_H=0.175\ 9, \beta_H=8.240\ 9\times 10^{-5}$,满箱时系统的结构阻尼定义为

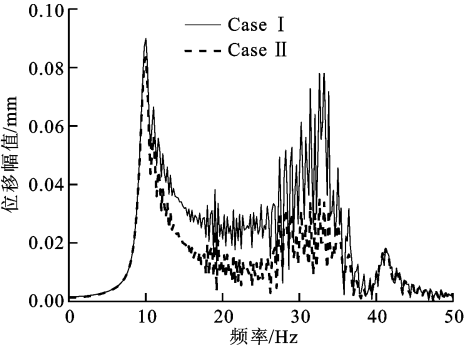
$$C_{h=H} = \alpha_H M_H + \beta_H K \tag{30}$$

式中: $C_{h=H}$ 和 M_H 分别表示 $h(t)=H$ 时系统的结构阻尼矩阵和质量矩阵。计算仿真过程中分别使用了这 2 组比例阻尼系数,得到了这 2 种阻尼状态下系统的响应。换句话说,这 2 组阻尼是系统的 2 个极值,因此通过对这 2 组阻尼状态下系统的仿真计算,可以确定系统振动响应的范围。

图 5 和图 6 分别给出了 $C_{h=0}$ 和 $C_{h=H}$ 2 种情况下系统的自由振动响应曲线,计算中假设在 5 s 内系统中的燃料完全消耗,即质量变化率约为 32 kg/s。对比图 5a 和图 6a 中的位移响应曲线可以看出, $C_{h=H}$ 对系统的影响更大,相应的系统振动衰减更加明显,这与实际测量的结果是一致的。对比 Case I 和 Case II 两种情况下系统的响应,可以明显看出负阻尼减缓了系统振动的衰减。特别是从图 5a 中可以发现,在 4 s 左右振动位移的幅值甚至出现了增大,这是因为负阻尼在系统的振动中起了主要作用,超过了结构阻尼的作用。由于系统的质量是变化的,所以系统的振动频率也是随时间变化的。从图 5b 和 6b 所示的频谱曲线上可以看出:与时不变系统的频



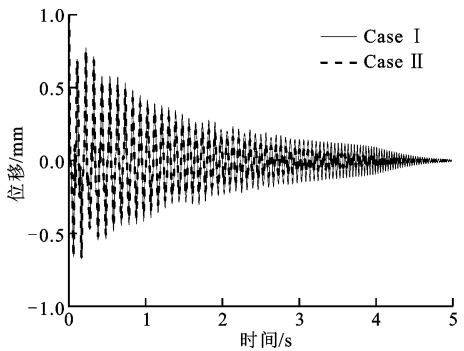
(a) 位移响应曲线



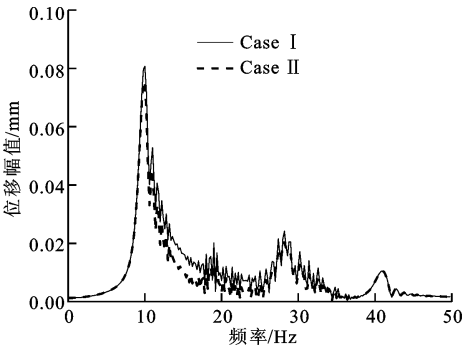
(b) 频率响应曲线

$$\alpha=0.67, \beta=1.732\times 10^{-5}$$

图 5 $C_{h=0}$ 情况下节点 189 处 x 方向的响应曲线 (燃料在 5 s 内完全消耗)



(a) 位移响应曲线



(b) 频率响应曲线

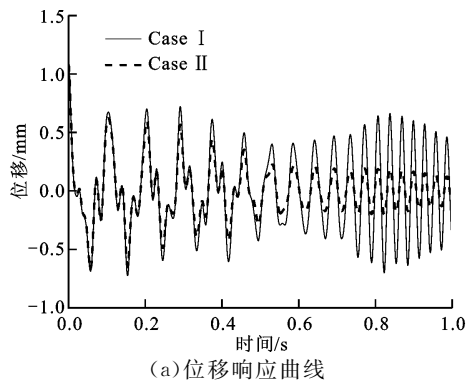
$$\alpha=0.175\ 9, \beta=8.240\ 9\times 10^{-5}$$

图 6 $C_{h=H}$ 情况下节点 189 处 x 方向的响应曲线 (燃料在 5 s 内完全消耗)

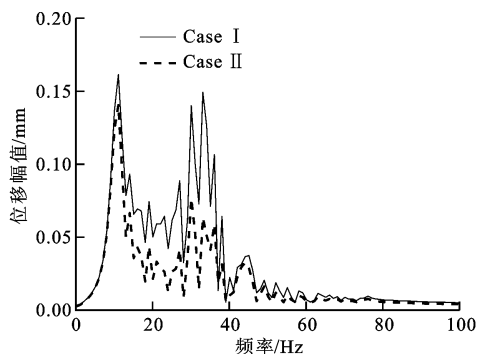
响曲线不同,质量时变系统的频率是由一系列的振动频率组成的,形成了一个频率带;系统的第1阶横向振动的频率范围与图4中所示的振动频率范围是一致的,即系统的振动频率变化范围可以通过系统质量的变化范围确定。另外,由于系统的前几阶频率较低,所以在频谱图上可以观察到多阶频率。

从式(21)中可以看出,变质量引起的阻尼与质量变化率有直接的关系,因此如果系统的质量迅速减小,就会产生一个比较大的负阻尼。这里假设系统的质量变化过程只有1 s,质量变化率约为160 kg/s,相比上一节的仿真参数,质量变化率增大了5倍,变质量引起的负阻尼也增大了5倍。图7a和图8a中分别给出了质量变化过程只有1 s、在 $C_{h=0}$ 和 $C_{h=H}$ 两种阻尼情况下系统的自由振动响应曲线。对比Case I和Case II两种情况下的位移响应曲线,可以发现质量减小引起的负阻尼对系统的影响显著,特别需要注意的是,在0.6~0.8 s时间内,负阻尼的作用超过了系统结构阻尼的作用,使得系统的振幅增大。也就是说,当质量减小产生的负阻尼的作用超过了系统本身结构阻尼的作用时,会引起系统振幅的增大,如果振幅超出了结构的弹性范围,甚至

会造成系统的破坏。从频响曲线上,也可以看出系统振动频率的变化范围。综上所述,在变质量贮箱类流固耦合系统的动力学响应计算中,不应该忽略质量减小引起的负阻尼对系统的影响。



(a) 位移响应曲线



(b) 频率响应曲线

$$\alpha = 0.1759, \beta = 8.2409 \times 10^{-5}$$

图8 $C_{h=H}$ 情况下节点189处 x 方向的响应曲线
(燃料在1 s内完全消耗)

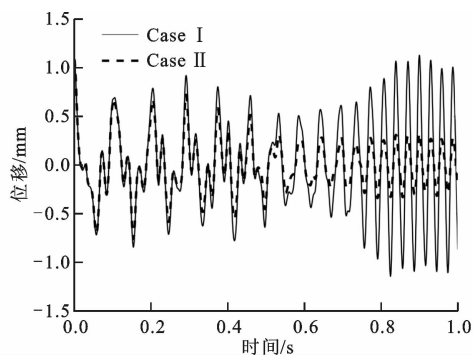
3 时频响应分析

傅里叶变换缺乏时间和频率的定位功能,在分辨率以及对非平稳信号分析方面有局限性。Choi-Williams时频分布(CWD)凭借其优良的时变特性和较高的时频分辨率,一直被应用于信号的分析 and 处理领域。CWD是Cohen类分布的一种^[14],可以在整个时频域显示信号的能量分布,是一种双线性的表示时频分布的函数。CWD的表达式如下

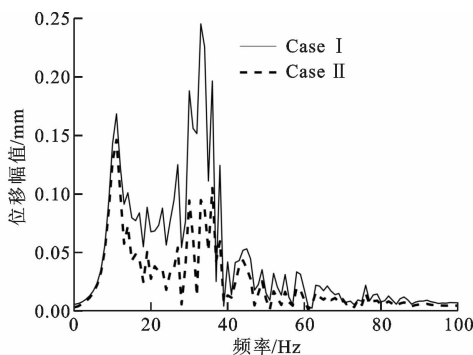
$$\text{CWD}_x(t, \omega) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma}{|\tau|} e^{-2\sigma^2(s-\tau)^2/\tau^2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\omega\tau} ds d\tau \quad (31)$$

式中: $x(s+\tau/2)$ 为真实的时域信号; $*$ 表示函数的复共轭; $\sigma>0$ 为尺度因子,控制整体的平滑度。相比其他Cohen类时频分布,CWD可以更好地揭示非平稳信号的时变信息^[17]。

对图7a中的位移响应曲线做CWD,得到 $C_{h=0}$



(a) 位移响应曲线

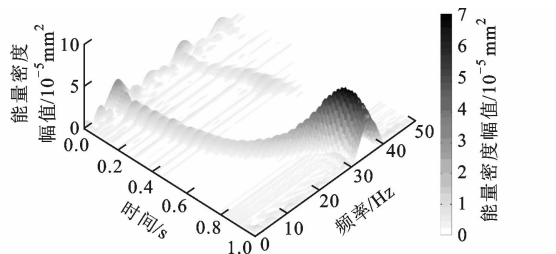


(b) 频率响应曲线

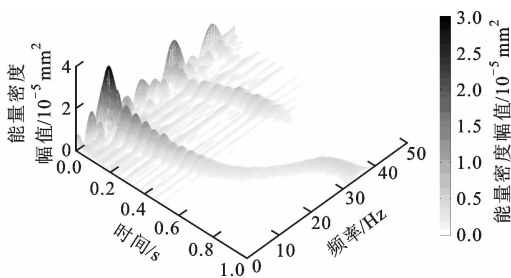
$$\alpha = 0.67, \beta = 1.732 \times 10^{-5}$$

图7 $C_{h=0}$ 情况下节点189处 x 方向的响应曲线
(燃料在1 s内完全消耗)

情况下系统的振动信号在时频域上的能量密度谱图,如图 9 所示。从图 9 所示的能量密度谱图中可以得出任意时间、任意频率点系统的振动能量密度,也可以看出系统的多阶振动频率随时间的变化规律,这是使用傅里叶变换无法得到的。在 CWD 中得到的系统第 1 阶横向振动频率变化趋势与图 4 中系统的频率变化曲线是一致的。对比图 9a 和 9b 中的能量密度谱图可以明显看出,变质量引起的负阻尼使得系统的能量增大,因此在变质量贮箱的动力学计算仿真中,不能忽略变质量引起的负阻尼对系统振动的影响。



(a) Case I, $\alpha=0.67$, $\beta=1.732 \times 10^{-5}$



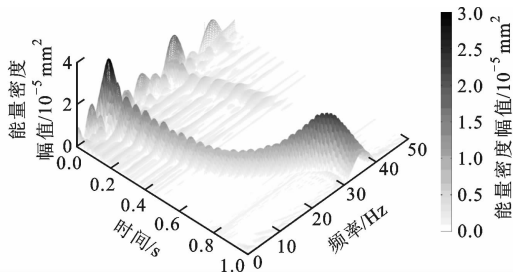
(b) Case II, $\alpha=0.67$, $\beta=1.732 \times 10^{-5}$

图 9 $C_h=0$ 情况下结构振动响应的 CWD 能量密度谱图

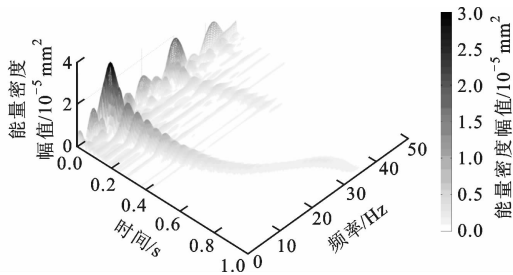
类似地,对图 8a 中的位移响应曲线做 CWD,得到 $C_h=H$ 情况下系统的振动信号在时频域上的能量密度谱图,如图 10 所示。由图 10 也可以得出与上述结论类似的结论。另外,对比图 9a 和图 10a 中的能量密度谱图可以发现,图 9a 的能量密度最大幅值约为 $7 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$,而图 10a 的能量密度最大幅值约为 $3 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$,说明贮箱中装满液体时的结构阻尼比系统空箱时的阻尼大,从而使系统的振动能量(振幅)衰减较快。

4 结 论

本文对变质量矩形贮箱流固耦合系统的自由振动进行了较为深入的分析,根据虚拟质量法建立了系统的自由振动有限元方程,对 PATRAN-NASTRAN 进行了二次开发,通过自行编制的 MAT-



(a) Case I, $\alpha=0.1759$, $\beta=8.240 \times 10^{-5}$



(b) Case II, $\alpha=0.1759$, $\beta=8.240 \times 10^{-5}$

图 10 $C_h=H$ 情况下结构振动响应的 CWD 能量密度谱图

LAB 计算程序精确、快速地得到了变质量液固耦合系统的模态频率、自由振动响应和时频特性等动力学特性的结果。这项研究有望为工程上的变质量液固耦合系统动力学分析提供一种新的高效计算方法。根据计算结果可以得到以下结论。

(1) 使用 MATLAB 与使用 PATRAN-NASTRAN 计算的结果是一致的,证明了本文所编写的 MATLAB 程序的可行性。本文通过一个附加质量矩阵来表征流体对固体结构的影响,该附加质量矩阵与流体的液面高度有很大的关系。由于系统的质量是随时间变化的,因此系统的振动频率也是随时间变化的。

(2) 变化的质量对系统的另外一个影响主要体现在产生了一个附加的阻尼。变质量引起的阻尼与系统的质量变化率有直接的关系,也就是说,系统质量变化越快,产生的负阻尼就越大。特别需要注意的是,如果产生的负阻尼的作用超过了系统本身结构阻尼的作用,可能会引起系统振幅的增大,如果振幅超出了结构的弹性范围,甚至会造成系统的破坏。因此,在变质量贮箱类流固耦合系统的动力学响应计算中,不可忽略质量减小引起的负阻尼对系统的影响。

(3) Choi-Williams 时频分布是分析非稳态信号的一种有效工具。使用 Choi-Williams 时频分布对变质量贮箱流固耦合系统的振动信号进行分析,获得了振动信号的时频响应谱,并在时频域上研究了

非稳态信号的时频特性,通过时频谱图上的能量密度分布,可以观察系统在特定时间、特定频率时的振动特性。

(4)本文的计算模型及其分析结果可为相关的变质量燃料贮箱设计提供参考,同时也为变质量燃料贮箱的振动预测研究提供了一种思路。

参考文献:

- [1] IBRAHIM R A, PILIPCHUK V N, IKEDA T. Recent advances in liquid sloshing dynamics [J]. *Applied Mechanics Review*, 2001, 54(2): 133-199.
- [2] MOISEEV N. Introduction to the theory of oscillations of liquid-containing bodies [J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1964, 8: 233-289.
- [3] ABRAMSON H N. The dynamic behavior of liquids in moving containers, NASA/SP-106 [R]. Washington, DC, USA: NASA Special Publication, 1966.
- [4] 苟兴宇, 尹立中, 马兴瑞, 等. 窄长方形贮箱中液体的强迫晃动 [J]. *力学与实践*, 1998, 20(4): 20-22.
GOU Xingyu, YIN Lizhong, MA Xingrui, et al. Forced sloshing of liquid in a narrow rectangular container [J]. *Mechanics in Engineering*, 1998, 20(4): 20-22.
- [5] 高索文, 尹立中, 王本利, 等. 矩形贮箱类液固耦合系统转动特性分析 [J]. *振动与冲击*, 2000, 19(3): 17-20.
GAO Suowen, YIN Lizhong, WANG Benli, et al. Analysis on dynamic characteristics of the liquid-solid coupling system with liquid in a rectangular container under pitching excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2000, 19(3): 17-20.
- [6] 傅衣铭, 徐晓贤. 弹性底板矩形贮箱流固耦合系统的自由振动分析 [J]. *湖南大学学报: 自然科学*, 2006, 33(1): 33-37.
FU Yi-ming, XU Xiao-xian. Free vibrations of solid-fluid interaction rectangular containers with elastic bottoms [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2006, 33(1): 33-37.
- [7] REBOUILLAT S, LIKSONOV D. Fluid-structure interaction in partially filled liquid containers: a comparative review of numerical approaches [J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(5): 739-746.
- [8] DANESHMAND F, GHAVANLOO E. Coupled free vibration analysis of a fluid-filled rectangular container with a sagged bottom membrane [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(2): 236-252.
- [9] ASKARI E, DANESHMAND F, AMABILI M. Coupled vibrations of a partially fluid-filled cylindrical container with an internal body including the effect of free surface waves [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(7): 1049-1067.
- [10] 刘文一, 李玉龙, 吴训涛, 等. 流固耦合作用下某双层结构燃料贮箱动力学特性分析 [J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(5): 132-134.
LIU Wenyi, LI Yulong, WU Xuntao, et al. Analysis of dynamic characteristic of double-deck propellant tank under liquid-solid coupling interaction [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(5): 132-134.
- [11] 朱琳, 唐国安, 柳征勇, 等. 推进剂与贮箱液固耦合振动的动力学分析 [J]. *振动与冲击*, 2012, 21(5): 139-143.
ZHU Lin, TANG Guo'an, LIU Zhengyong, et al. Dynamic analysis for fluid-structure coupled vibration of propellants and fuel tank [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 21(5): 139-143.
- [12] 高锁文, 吴孟恒, 柴东红. 矩形贮箱类液固耦合系统的随机响应 [J]. *振动与冲击*, 2012, 21(1): 92-94.
GAO Suowen, WU Mengheng, CHAI Donghong. Random responses of the liquid/structure coupling system with the liquid in a rectangular container [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 21(1): 92-94.
- [13] 马钧, 孟庆国, 罗永欣. 罐式集装箱流固耦合冲击响应谱分析计算 [J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(1): 37-40.
MA Jun, MENG Qingguo, LUO Yongxin. Impact response spectrum analysis on fluid-structure coupling of tank container [J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(1): 37-40.
- [14] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 523-542.
- [15] MSC. Software Corporation. MSC. NASTRAN: advanced dynamic analysis user's guide [M]. Santa Ana, CA, USA: MSC. Software Corporation, 2004.
- [16] 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: 315-335.
- [17] 姜鸣, 陈进, 汪慰军. 几种 Cohen 类时频分布的比较及应用 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(8): 129-134
JIANG Ming, CHEN Jin, WANG Weijun. Comparison and applications of some time frequency distributions belong to Cohen [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(8): 129-134.

(编辑 葛赵青)