



运载火箭动力学建模中液体推进剂模拟技术

潘忠文^{①②*}, 邢誉峰^①, 朱礼文^②, 董锴^②, 孙目^{①②}

① 北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 1000191;

② 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

* E-mail: zhwpan@sina.com

收稿日期: 2010-01-05; 接受日期: 2010-03-01

总装备部预先研究项目(批准号: 51320103)、航天支撑项目(批准号: 618010604-02)和中国运载火箭技术研究院创新基金项目资助

摘要 针对以往火箭结构动力学分析过程中, 横向采用梁模型、纵向采用弹簧-质量模型无法反映捆绑火箭纵向与横向、纵向与扭转模态之间耦合效应的问题, 提出了基于梁模型的推进剂模拟方法, 建立了以附加质量形式表示的液体推进剂耦合质量矩阵. 将此方法用于串联式贮箱结构的动力学建模和模态分析, 实现了基于梁模型的火箭纵向、横向和扭转一体化建模及动力学特性分析, 为研究捆绑火箭纵向-横向、纵向-扭转模态之间的耦合问题奠定了基础.

关键词

动力学特性
模态质量
一体化建模
推进剂模拟

1 引言

运载火箭中液体推进剂的质量占起飞质量的百分之九十左右, 推进剂质量对捆绑运载火箭结构动力学特性有重要影响. 因推进剂在火箭纵向、横向、扭转方向的质量效应不同, 其动力学模拟技术一直是火箭结构动力学建模的重点和难点^[1, 2].

航天器贮箱内液体动力学特性的研究成果主要集中在采用流固理论解决贮箱内液体晃动频率、晃动质量和晃动阻尼等液体自由表面的晃动问题^[3~5].

在运载火箭横向和扭转特性中推进剂模拟方面, 文献[6]从模态试验、仿真分析和模型修正三方面总结捆绑火箭动力学研究技术进展, 文献[7]采用集中质量方法模拟液体推进剂跟随相应节点一起作横向运动和无转动的特性. 经多个型号全箭模态试验验证, 火箭横向特性分析技术日趋成熟.

全箭纵向特性分析中推进剂模拟研究较少. NASA 借助充液贮箱模态试验, 得到充液贮箱的弹簧-

质量模型^[8], 该模型考虑液柱压力、增压压力作用于箱壁和箱底产生的变形对弹簧刚度的影响. 文献[9]采用轴对称壳单元、液体单元和弹簧质量组合模块对弹簧-质量模型进行了改进, 并应用于土星-V 等火箭纵向特性及其动响应分析. 为满足阿里安-V 纵向特性分析的需要, 法国宇航公司研制开发了一套专门用于全箭纵向特性分析的软件(PERMAS), 该软件通过流-固耦合分析, 建立了全箭三维有限元模型. 受多种因素影响, 在实际工程应用中, 火箭纵向、横向动力学特性分析仍然采用两种不同的分析模型. H-II 火箭采用边界元法建立了液体推进剂的附加质量矩阵, 模拟推进剂与贮箱壳体的相互作用并加入到结构有限元模型中, 避免了复杂繁琐的液体网格划分.

长征系列运载火箭从长征三号(CZ-3)开始进行火箭纵向特性的理论和试验研究. 纵向特性计算和动载荷分析采用弹簧-质量模型^[10], 横向和扭转特性分析采用梁模型, 如图 1 所示. 载人运载火箭在助推器分离前出现较为突出的振动, 分析和试验结果表明

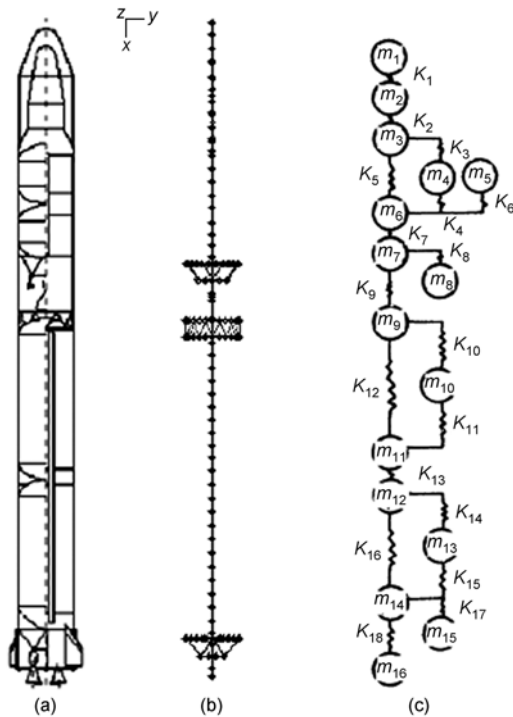


图1 火箭结构及其动力学分析模型

(a) 火箭结构; (b) 横向模型; (c) 纵向模型

该振动与火箭的纵向、横向、扭转耦合特性有关^[11]. 因此, 捆绑火箭纵向、横向和扭转一体化建模(以下简称纵横扭一体化建模)及其分析成为解决问题的关键.

本文针对捆绑火箭纵横扭模态耦合问题, 在原有火箭横向和扭转特性分析使用的梁模型基础上, 采用耦合质量方法模拟了液体推进剂在火箭纵向、横向、扭转方向上不同的动力学效应, 实现了基于梁模型的火箭纵横扭一体化建模及动力学特性分析, 为火箭纵向与横向、纵向与扭转模态耦合及相关问题的研究奠定了基础.

2 流固耦合模型

流固耦合问题的重要特征是两相介质的交互作用, 即固体在流体载荷作用下会产生变形或运动, 而变形或运动反过来又影响流体载荷的大小和分布.

流固耦合问题可以分为两类: 第一类是两相域部分或全部重叠在一起, 很难明显地分开, 如渗流等问题. 第二类的特征是耦合作用仅发生在两相交界面上. 液体推进剂对火箭贮箱影响问题属于就第二

类.

运载火箭使用的常规液体推进剂和液氢液氧低温推进剂, 满足无粘性、不可压缩的理想流体假设. 对准静态流场、线弹性小变形结构, 流固耦合系统位移-压力格式的有限元方程如(1)式^[12]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ -\mathbf{Q}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \frac{1}{\rho_f} \mathbf{Q} \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{p}$ 为流体各结点压力向量, $\mathbf{u}$ 为固体结点位移向量, $\mathbf{Q}$ 为流固耦合矩阵, $\mathbf{M}_f$ 和 $\mathbf{K}_f$ 分别为流体质量矩阵和流体刚度矩阵, $\mathbf{M}_s$ 和 $\mathbf{K}_s$ 分别为固体质量矩阵和固体刚度矩阵, $\mathbf{F}_s$ 为固体外载荷向量, ρ_f 为液体密度.

如果不考虑液体的可压性和液面波动的影响, 流体质量矩阵 $\mathbf{M}_f=0$. 于是, (1)式可简化为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ -\mathbf{Q}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \frac{1}{\rho_f} \mathbf{Q} \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在(2)式中, 将第二个方程代入第一个方程, 消去 $\mathbf{p}$ 可以得到

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}'_s) \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = \mathbf{F}_s, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{M}'_s = \frac{1}{\rho_f} \mathbf{Q} \mathbf{K}_f^{-1} \mathbf{Q}^T$

$\mathbf{M}'_s$ 代表流体对固体的作用, 称之为附加质量矩阵. 这时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.

如果将结构部分视为固定不动的刚体, 即 $\mathbf{u}=0$, 只研究流体本身的运动, 则流固耦合方程(1)式退化为流体自由晃动方程:

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_f \mathbf{p} = 0. \quad (4)$$

在结构动特性分析时, 由(3)式可以得到如下自由振动方程:

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}'_s) \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = 0. \quad (5)$$

(5)式与固体结构的动特性方程差别在于流体引起的附加质量效应. 因此, 含有流体的结构动力学分析问题关键在于附加质量矩阵的处理问题.

3 火箭动力学模型中质量矩阵

3.1 集中质量矩阵

运载火箭所使用的液体推进剂可视为无粘性流

体, 即液体推进剂没有抗剪切能力, 其绕自身任意轴的转动惯量均为零. 就运载火箭而言, 其长细比(火箭长度与芯级直径之比)一般在 10 以上, 故可简化成多分支等效梁模型, 如图 1(b)所示. 模型中梁单元只考虑刚度而不考虑质量.

针对固体结构与液体推进剂质量特性不同, 在建模时将二者的质量分开处理, 结构的转动惯量按梁单元所在部段的结构质量均匀分布在圆柱壳段上计算, 并以集中质量形式作用在梁单元节点上, 其质量矩阵如(6)式.

$$\mathbf{M}_s^e = \begin{bmatrix} m_s^e & & & & \\ & m_s^e & & & \text{对称} \\ & & m_s^e & & \\ & & & I_{11}^e & \\ 0 & & & -I_{21}^e & I_{22}^e \\ & & & I_{31}^e & I_{32}^e & I_{33}^e \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} m_s^e &= \int_{V_s^e} \rho_s dV, \\ I_{11}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s (x_2^2 + x_3^2) dV, \\ I_{22}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s (x_3^2 + x_1^2) dV, \\ I_{33}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s (x_1^2 + x_2^2) dV, \\ I_{21}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s x_1 x_2 dV, \\ I_{31}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s x_3 x_1 dV, \\ I_{32}^e &= \int_{V_s^e} \rho_s x_2 x_3 dV. \end{aligned}$$

在一般情况下, 火箭各部段均为轴对称结构, $I_{21}^e = I_{31}^e = I_{32}^e = 0$. 因此, (6)式可进一步简化为下式:

$$\mathbf{M}_s^e = \begin{bmatrix} m_s^e & & & & \\ & m_s^e & & & \text{对称} \\ & & m_s^e & & \\ & & & I_{11}^e & \\ 0 & & & & I_{22}^e & I_{33}^e \end{bmatrix}. \quad (7)$$

贮箱内液体推进剂只计平动质量, 不计转动惯量, 并施加于贮箱梁单元的相应节点上^[7], 其质量矩阵如下式:

$$\mathbf{M}_s^e = \mathbf{M}_f^e = \begin{bmatrix} m_f^e & & & & \\ & m_f^e & & & 0 \\ & & m_f^e & & \\ & & & 0 & \\ 0 & & & & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\text{其中 } m_s^e = \int_{V_f^e} \rho_f dV.$$

(7)和(8)式分别表示的结构和液体推进剂质量模拟方法已经在多个运载火箭的横向和扭转动力学模型中应用, 并经过相关地面试验验证^[6, 7].

3.2 推进剂耦合质量矩阵

根据液体推进剂无粘性的特性, 贮箱横向弯曲变形时, 除自由液面附近的推进剂外, 其余大部分推进剂跟随箭体结构一起平动, 如图 2(b)所示. 在贮箱纵向变形时, 若忽略贮箱纵向变形对贮箱直径的影响, 推进剂仅跟随箱底运动, 如图 2(c)所示. 为反映推进剂对火箭纵向、横向模态的不同质量效应, (8)式需要进一步完善. 对图 3 所示坐标系, 贮箱柱段推进

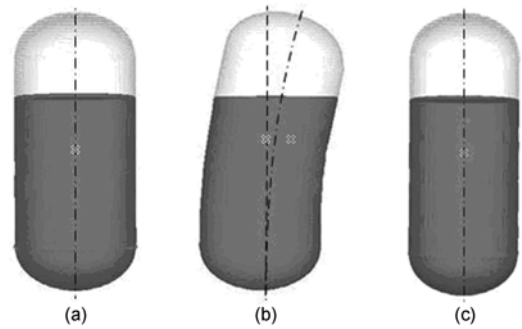


图 2 无粘性推进剂在贮箱横向不同变形的特点
(a) 贮箱变形前; (b) 横向变形; (c) 纵向变形

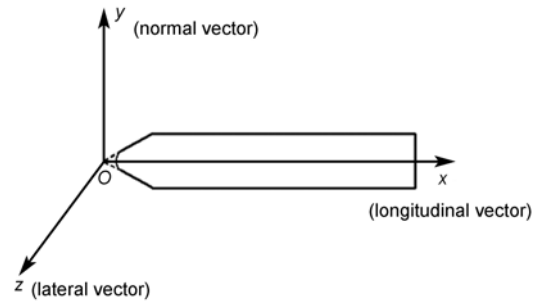


图 3 动特性箭体坐标

剂附加质量矩阵如(9)式、贮箱后底推进剂附加质量矩阵如(10)式,即在贮箱梁模单元中,耦合质量方法是将推进剂的横向质量效应均匀分布于贮箱柱段的节点上、推进剂的纵向质量效应集中施加在贮箱后底节点上.

$$\mathbf{M}_s^{re} = \mathbf{M}_f^e = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & m_f^e & & & \\ & & m_f^e & & \\ & & & 0 & \\ & 0 & & 0 & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 m_f^e 贮箱柱段节点周围的推进剂质量.

$$\mathbf{M}_s^{re} = \mathbf{M}_f^e = \begin{bmatrix} \sum m_f^e & & & & \\ & m_f^e & & & \\ & & m_f^e & & \\ & & & 0 & \\ & 0 & & 0 & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 $\sum m_f^e$ 贮箱内推进剂总质量, m_f^e 贮箱箱底节点周围的推进剂质量.

4 算例分析

4.1 四个串联贮箱

图 4 为由四个圆柱平底贮箱、箱间段、级间段组成的串联结构. 其直径 3.0 m, 厚 0.003 m, 材料弹性模量为 7000 MPa, 泊松比为 0.3. 氧化剂密度 1400 kg/m^3 , 燃烧剂密度 1000 kg/m^3 . 该结构全长 36 m, 长细比为 12, 可以采用梁模型分析, 结构有限元如图 5 所示. 坐标原点为二级氧箱前底, 纵轴(x 轴)由原点指向二级氧箱后底为正, 所有梁单元长度均为 0.5 m, 二级氧箱、二级燃箱、一级氧箱、一级燃箱后底坐标分别为 8, 14.5, 28.5 和 36 m. 梁单元的三维显示如图 6.

为了模拟火箭一级飞行状态贮箱内推进剂随时间的变化, 取三种典型状态研究不同剩余推进剂对结构动特性的影响, 即:

状态 1: 一级、二级四个贮箱推进剂均为满状态;

状态 2: 一级两个贮箱推进剂消耗一半, 二级两个贮箱推进剂仍为满状态;

状态 3: 一级两个贮箱只剩少许推进剂, 二级两个贮箱推进剂仍为满状态.

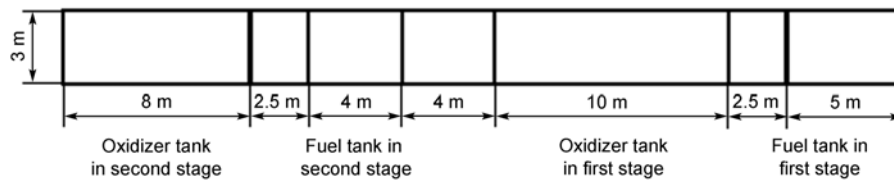


图 4 四个串联贮箱结构图

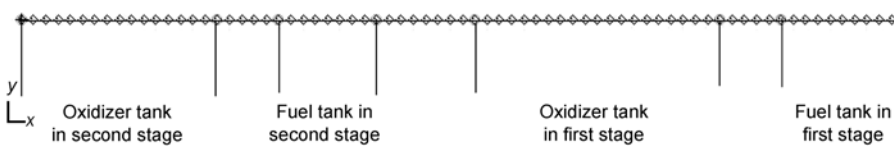


图 5 四个串联贮箱结构有限元模型



图 6 梁单元的三维显示

对应上述三种状态贮箱内剩余推进剂质量见表 1.

表 1 贮箱内剩余推进剂质量

状态	一级氧箱推进剂/kg	一级燃箱推进剂/kg	二级氧箱推进剂/kg	二级燃箱推进剂/kg
1	98960.2	35342.9	79168.1	28274.3
2	49480.1	17671.5	79168.1	28274.3
3	2474.0	1767.1	79168.1	28274.3

分别采用集中质量方法和耦合质量方法模拟推进剂的附加质量特性. 集中质量方法纵向质量与横向质量效应相同, 均匀分布贮箱柱段相应节点上, 耦合质量方法纵向质量分别施加在各个贮箱后底所在的节点上. 三种状态横向、纵向频率计算结果见表 2, 纵向振型比较如图 7 至图 9. 从表 2 中数据和纵向振型曲线可以看出.

1) 若纵向与横向不耦合, 则集中质量和耦合质量两种推进剂模拟方法计算得到的横向频率相同.

2) 两种推进剂模拟方法得到的纵向频率有一定差别, 贮箱内剩余推进剂不同, 其对纵向频率计算结果的影响不同.

3) 两种推进剂模拟方法对振型影响不同, 集中质量方法相对耦合质量方法得到的纵向振型变化较平滑, 而耦合质量方法因在箱后底质量发生突变, 二级氧箱、二级燃箱、一级氧后底(坐标分别为 8, 14.5, 28.5 m)出现纵向振形转折, 斜率不连续现象.

4) 除状态 3 外, 两种推进剂模拟方法, 对前三阶纵向频率的影响较小. 与状态 1 和状态 2 相比, 状态 3 中两种推进剂模拟方法的得到的纵向二阶频率和振型区别较大.

对于运载火箭主要关心的前两阶纵向模态, 两种推进剂模拟方法频率差异较小. 集中质量方法已经在载人运载火箭动力学分析中应用, 并经过地面

表 2 不同方法模态频率比较

状态	模态特征	集中质量方法 计算结果/Hz	耦合质量方法 计算结果/Hz	相对 变化
1	横向一阶	1.522	1.522	0.00%
	横向二阶	3.910	3.910	0.00%
	横向三阶	7.420	7.420	0.00%
	横向四阶	10.391	10.391	0.00%
	横向五阶	15.331	15.331	0.00%
	纵向一阶	7.134	6.684	6.73%
	纵向二阶	15.238	16.170	-5.77%
	纵向三阶	22.376	21.807	2.61%
	纵向四阶	29.514	28.945	1.93%
2	横向一阶	1.938	1.938	0.00%
	横向二阶	4.128	4.128	0.00%
	横向三阶	9.045	9.045	0.00%
	横向四阶	15.465	15.465	0.00%
	横向五阶	19.969	19.969	0.00%
	纵向一阶	7.975	7.974	0.02%
	纵向二阶	19.707	21.134	-6.75%
	纵向三阶	24.148	23.692	1.93%
	纵向四阶	31.286	30.730	1.81%
3	横向一阶	2.665	2.665	0.00%
	横向二阶	8.206	8.206	0.00%
	横向三阶	13.123	13.123	0.00%
	横向四阶	19.811	19.811	0.00%
	横向五阶	26.535	26.535	0.00%
	纵向一阶	15.737	17.140	-8.18%
	纵向二阶	26.494	28.606	-7.38%
	纵向三阶	33.632	32.145	4.42%
	纵向四阶	40.770	39.283	3.64%

试验和飞行试验验证, 揭示了载人火箭(CZ-2F)在助推器发动机关机前出现的某特殊频率的纵向、横向、扭转耦合振动现象. 而耦合质量方法可以更合理模拟推进剂在纵向、横向、扭转特性中的不同作用效果.

4.2 捆绑火箭

正在研制的新一代大推力运载火箭采用无毒无污染的液氧煤油、液氢液氧推进剂. 火箭全长 63 m, 芯级直径 5 m, 助推器直径 3.35 m, 是长征系列运载火箭中运载能力最大、起飞质量最重的. 火箭结构有限元模型及其梁单元的三维显示如图 10 所示.

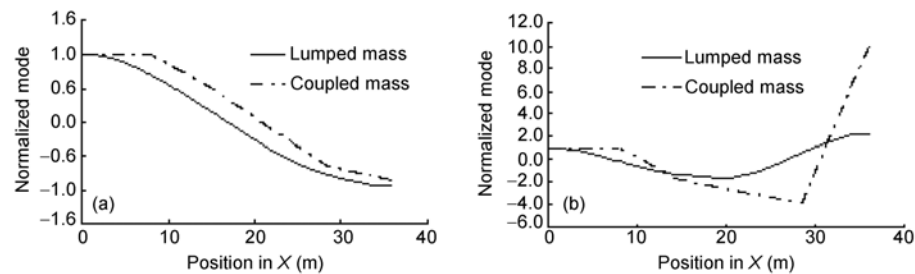


图 7 状态 1 不同分析方法纵向振型比较
(a) 纵向一阶; (b) 纵向二阶

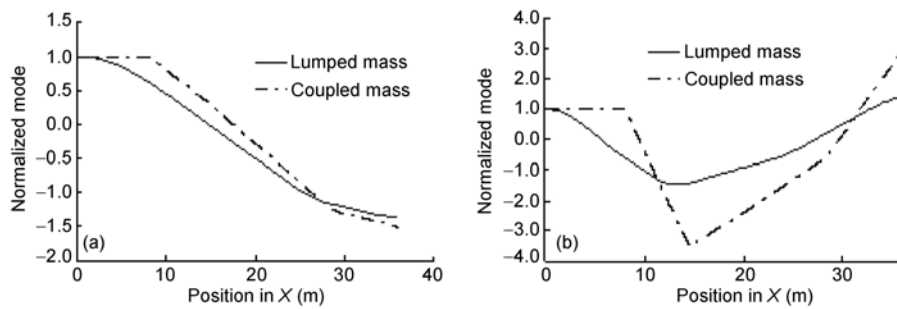


图 8 状态 2 不同分析方法纵向振型比较

(a) 纵向一阶; (b) 纵向二阶

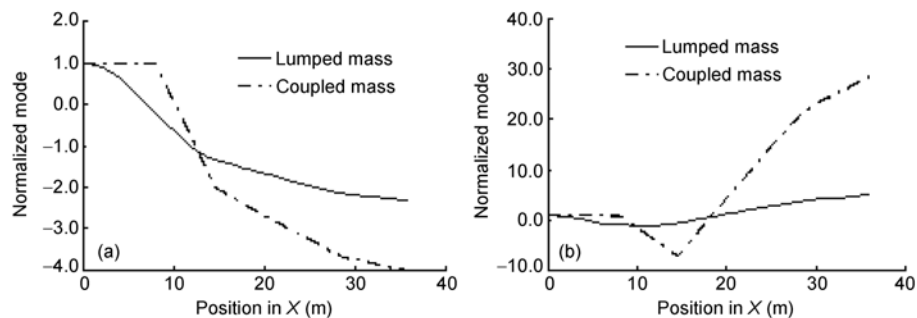


图 9 状态 3 不同分析方法纵向振型比较

(a) 纵向一阶; (b) 纵向二阶

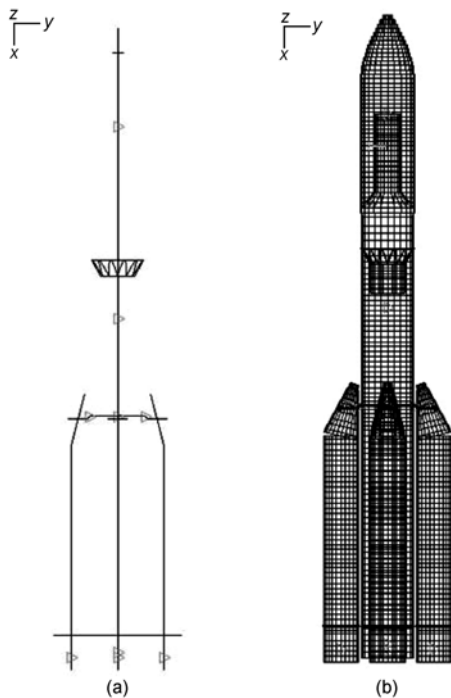


图 10 火箭结构有限元模型及其三维显示

(a) 梁模型; (b) 梁单元三维显示

由于该火箭助推器增长、前后捆绑点之间距离加大, 导致助推器横向刚度低, 火箭低频模态密集, 纵横扭问题比载人火箭(CZ-2F)更加严重。火箭的横向、纵向采用不同分析模型(横向采用梁模型、纵向采用弹簧-质量模型)已经不能满足结构动力学分析及与其相关的姿态稳定性和 POGO 稳定性分析的需要, 必须采用同一模型进行火箭纵向、横向、扭转模态分析。

在图 10 火箭梁模型中, 分别采用集中质量方法和耦合质量方法模拟推进剂质量特性, 计算起飞、跨音速、助推器发动机关机三种状态模态, 其纵向、横向、频率比较见表 3, 从表中频率数据可以看出:

1) 与串联状态不同, 对捆绑火箭, 集中质量和耦合质量两种推进剂模拟方法, 不仅对全箭纵向频率有影响, 而且对全箭横向、扭转频率也有一定影响, 横向、扭转模态中纵向参与程度愈强其影响越大;

2) 两种推进剂模拟方法, 对起飞和跨音速状态的频率影响程度较小, 对助推器关机状态频率影响较大, 但频率变化在 8% 以内。

前两阶纵向、横向和扭转模态比较见图 11 至图

表 3 不同方法模态频率比较

状态	模态特征	集中质量方法 频率/Hz	耦合质量方法 频率/Hz	相对 变化
起飞	横向一阶	1.314	1.314	0.00%
	横向二阶	2.898	2.880	0.63%
	横向三阶	4.347	4.338	0.21%
	扭转一阶	3.726	3.744	-0.48%
	扭转二阶	6.039	6.192	-2.47%
	纵向一阶	2.196	2.205	-0.41%
	纵向二阶	7.020	6.939	1.17%
跨音速	横向一阶	1.422	1.422	0.00%
	横向二阶	3.402	3.384	0.53%
	横向三阶	4.437	4.437	0.00%
	扭转一阶	4.347	4.347	0.00%
	扭转二阶	7.758	7.740	0.23%
	纵向一阶	2.718	2.709	0.33%
	纵向二阶	7.794	7.758	0.46%
助推器发动 机关机	横向一阶	1.575	1.584	-0.57%
	横向二阶	4.212	4.437	-5.07%
	横向三阶	8.280	8.559	-3.26%
	扭转一阶	7.074	7.137	-0.88%
	扭转二阶	10.539	11.340	-7.06%
	纵向一阶	9.054	9.648	-6.16%
	纵向二阶	10.836	10.926	-0.82%

16. 从图中模态形状比较可以看出:

1) 两种推进剂模拟方法得到的纵向、横向、纵向和扭转模态相似;

2) 助推器增长、前后捆绑点间距离增大, 助推器横向刚度低, 火箭扭转模态表现为芯级以扭转变形为主、助推器以横向变形为主的横向与扭转耦合模态; 火箭纵向模态表现为芯级以纵向变形为主、助推器以横向变形为主的纵向与横向耦合模态。

耦合质量方法物理意义清晰, 可以同时处理推进剂纵向横向和扭转的不同作用效果, 为捆绑火箭纵向、横向和扭转耦合问题分析提供了有效手段, 实现了火箭纵横扭一体化建模与分析。若纵向和横向采用不同模型的分别进行火箭纵向、横向和扭转模态分析, 因弹簧-质量模型只能描述火箭纵向特性, 横向模型只能正确反映火箭的横向和扭转特性, 而无法准确研究火箭纵向与横向耦合、纵向与扭转耦合问题。

5 结论

根据小变形和推进剂无粘性假设, 提出了基于梁模型的耦合质量的推进剂模拟方法, 通过典型算例分析可以得出如下结论:

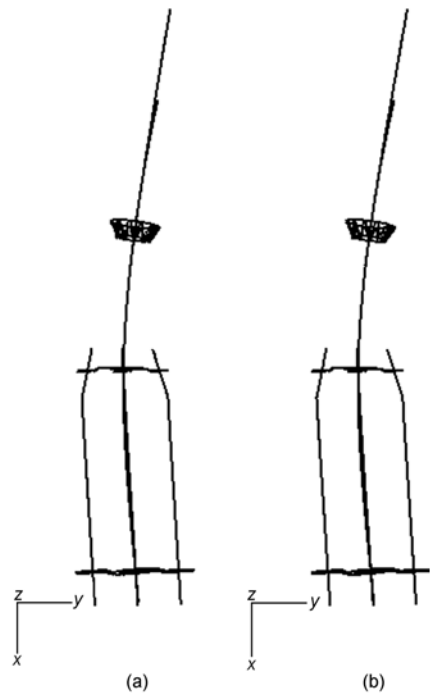


图 11 不同分析方法横向一阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

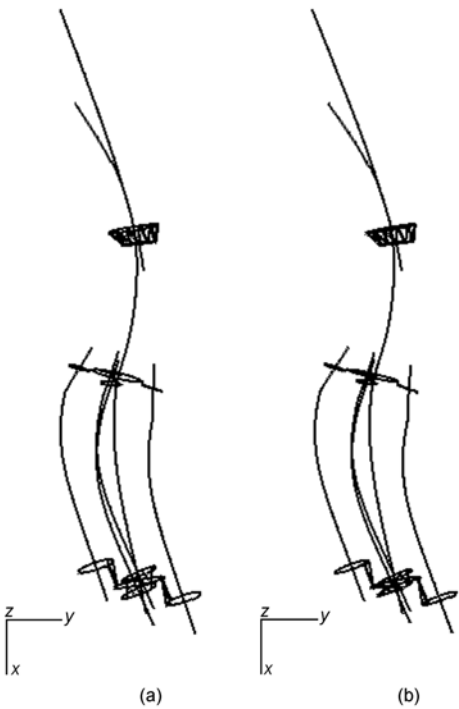


图 12 不同分析方法横向二阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

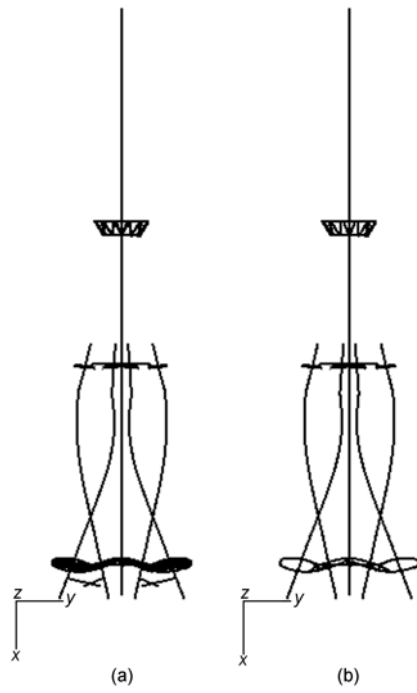


图 13 不同分析方法扭转一阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

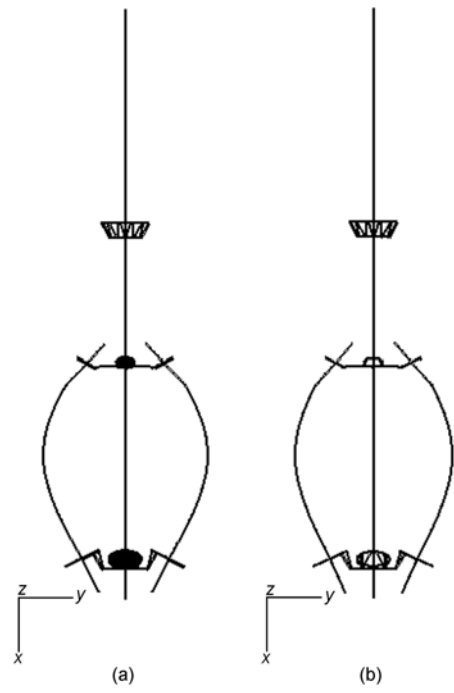


图 15 不同分析方法纵向一阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

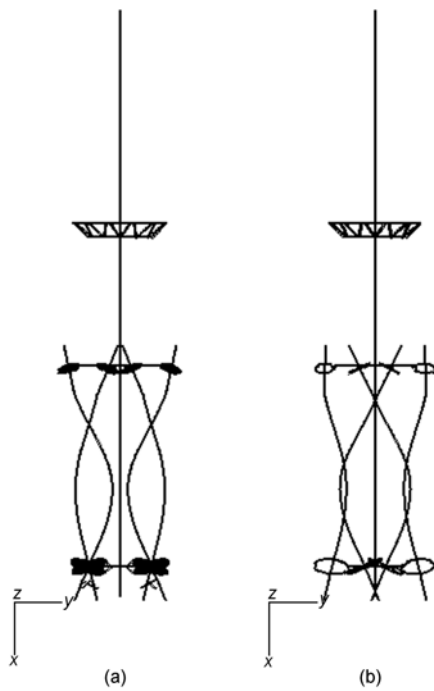


图 14 不同分析方法扭转二阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

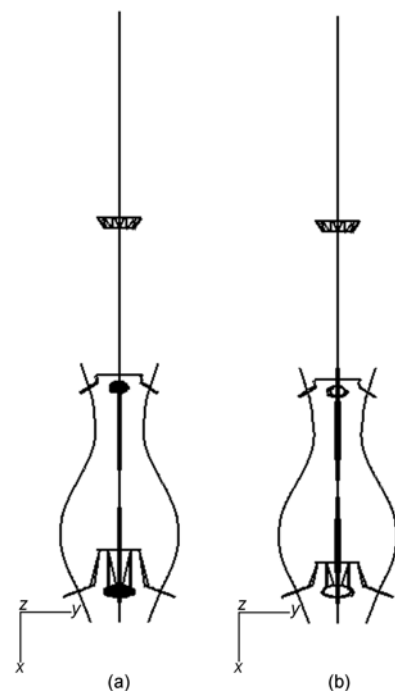


图 16 不同分析方法纵向二阶模态比较
(a) 集中质量方法; (b) 耦合质量方法

1) 对串联火箭, 梁模型不存在纵向与横向耦合问题时, 采用集中质量和耦合质量两种模拟推进剂方法, 计算得到的横向频率相同;

2) 与串联火箭不同, 对捆绑火箭采用两种推进剂模拟方法, 不仅对全箭纵向频率有影响, 而且对全箭横向、扭转频率也有一定影响, 横向、扭转模态中纵向参与程度愈强其影响越大;

3) 对捆绑火箭, 两种推进剂模拟方法, 计算得到的前两阶纵向、横向和扭转频率差别在 8% 以内;

4) 集中质量方法的物理意义是推进剂只跟随所在结构平动而不转动; 耦合质量方法是对集中质量方法的改进, 反映无粘性推进剂在纵向、横向和扭转

特性中的不同作用效果, 物理意义更清晰;

5) 对助推器长、前后捆绑点跨度大的捆绑火箭, 助推器横向刚度低, 火箭低频模态密集, 纵横扭耦合现象十分突出. 基于梁模型的耦合质量方法可以同时反映推进剂在纵向、横向和扭转特性中的动力学行为. 与纵向和横向采用不同分析模型相比, 耦合质量方法能够实现火箭纵横扭一体化建模, 可以同时求解火箭纵向、横向、扭转模态及其相互耦合的复杂模态.

基于耦合质量方法的火箭纵横扭转一体化建模及动力学特性分析, 为捆绑火箭纵横扭模态耦合分析, 以及后续的姿态稳定性和 POGO 稳定性分析奠定了技术基础.

致谢 感谢刘竹生院士(原载人航天运载火箭总设计师)对本文提出的宝贵建议.

参考文献

- 1 王毅, 朱礼文. 大型运载火箭动力学关键技术及其进展综述. 导弹与航天运载技术, 2000, 1: 29—37
- 2 王龙生, 张德文. 火箭结构有限元分析的若干问题. 强度与环境, 1988, 3: 45—53
- 3 夏益林, 许婉丽. 椭球形贮箱内液体晃动特性试验研究. 宇航学报, 1991, 4: 70—76
- 4 杨蔓, 李俊峰. 带环形隔板的圆柱储箱内液体晃动阻尼分析. 力学学报, 2006, 5: 660—667
- 5 周宏, 李俊峰, 王天舒. 用于 ALE 有限元模拟网格更新方法. 力学学报, 2008, 3: 266—272
- 6 邱吉宝, 王建民. 运载火箭模态试验仿真分析技术研究进展. 宇航学报, 2007, 3: 515—521
- 7 潘忠文. 运载火箭动力学建模及振型斜率预示技术. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 3: 469—473
- 8 Larry D P. Longitudinal spring constants for liquid-propellant tanks with ellipsoidal ends. NASA TN D-2220, 1964
- 9 Archer J S, Rubin C P. Improved analytic longitudinal response analysis for axisymmetric launch vehicles. NASA CR-345, 1965
- 10 龙乐豪. 总体设计(上册). 北京: 宇航出版社, 1989. 469—475
- 11 王建民, 荣克林. 捆绑火箭全箭动力学特性研究. 宇航学报, 2009, 3: 821—826
- 12 王勖成. 有限单元法. 北京: 清华大学出版社, 2003. 523—531