

考虑流固耦合的充压膜盒动力学特性分析

史淑娟¹ 朱礼文² 赫崇智² 蔡鹏²

(1 西北工业大学 2 北京宇航系统工程研究所)

摘要 在大型液体火箭中,经常会采用金属膜盒进行动密封和吸收管路系统脉动压力等。虽然金属膜盒在航天中应用较多,但由于其结构和所处环境的复杂性,在理论分析方面仍旧在探索阶段。型面为锯齿型的金属膜盒,其内部充有一定压力的气体,外部承受一定压力的液压,在充分考虑膜盒跟外界液体的流固耦合基础上,用 ANSYS 软件对该金属膜盒进行了特定状态下的动力学特性分析,并与试验数据进行了对比,结果较为接近。

关键词 充压膜盒 流固耦合 动力学特性

1 前言

由于膜盒刚度较同尺寸的波纹管小,且补偿行程大、灵敏度高,所以在液体火箭中,经常使用金属膜盒做密封元件或补偿元件等。在本文中,采用 ANSYS 软件的流固耦合分析,对内部充气,外部充液的金属膜盒进行了动力学特性分析,为火箭动力系统的设计提供必要的参考依据。

2 问题简介

金属膜盒内部分别充一定压力的空气,外部分别充一定压力的液体,膜盒在气压和液压的作用下保持平衡。膜盒膜片为锯齿型平膜片,其底部固定,上部自由,结构原理图见图 1。文中主要针对该种状态的膜盒进行了动力学特性的求解。

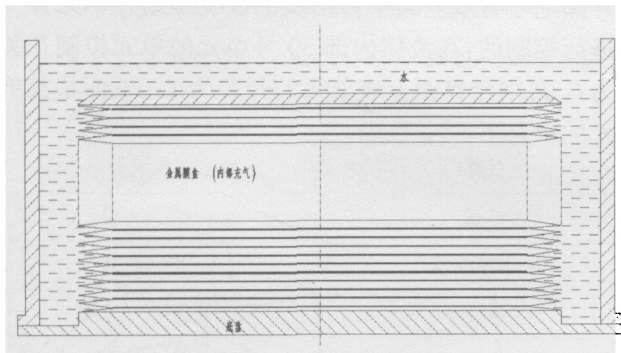


图 1 金属膜盒结构原理

3 有限元模型分析

3.1 简化与假设

在进行金属膜盒的动力学特性求解前,首先做

如下的假设:

- 认为膜盒内气体遵循理想气体状态方程;
- 认为外部液体无粘、不可压。

3.2 问题分析

由于该金属膜盒结构和所处环境较为复杂,故在建立模型前,对膜盒内部气体和膜盒外部液体的作用进行了简单分析,以进行模型的最终建立。

3.2.1 金属膜盒气体对膜盒系统的刚度影响很大

根据实际测试的结果发现,膜盒内的密闭气体将对膜盒的固有频率产生较大的影响,即在充压刚度测量中得到的刚度曲线斜率要远远大于不充压刚度的测试曲线斜率。同时,当外部液压加在膜盒上时,密闭气体的刚度将随膜盒容积的变化而变化,它在容积变化中显示出的非线性刚度是不能够为动力学特性求解所包括的,因为模态分析是线性系统的特征量。在工程中,如果一个非线性系统可以以某种方式进行线性化,所得到的线性化系统的模态参数能代表非线性系统的某些重要特征,那么,这种模态分析还是有意义的。在进行有限元计算中,假设在压力平衡后膜盒内部气体的容积不发生变化,膜盒处于静态,故可以用该压力点处的气体等效切线刚度进行求解。

3.2.2 计算应该考虑到膜盒外部液体的作用

膜盒外部的液体在计算充压膜盒的动力学特性中主要起液阻的作用,当充压膜盒振动时必将诱导周围流体的压力的改变,而流体对膜盒结构的反作用又施加到结构表面,影响膜盒的振动特性。所以膜盒的动力学特性求解问题是一个实际中需要加以解决的流固耦合问题。

3.2.3 ANSYS 进行耦合分析方法的选择

在 ANSYS 的流固耦合场分析问题上有两种方法可供选择:序贯耦合方法和直接耦合方法。由于序贯法需要多次重启动,反复计算流场的载荷,而模态分析无法进行重启动且不能包括不断变化的外载荷的作用,所以文中采用的是直接耦合的方法。另外文中只考虑了流体的静压作用,没有考虑流体的流动。

3.3 膜盒刚度的计算

在进行金属膜盒的动力学特性分析之前,对膜盒的充压刚度进行了计算。由于在生产、气密试验、运输和飞行过程中的特定时间点,膜盒内腔气体压力始终与外部液压保持一致,所以膜盒的刚度可以采用静力学分析。

在不考虑膜片的贴合时,作用在膜盒上的载荷由膜片组和内部气体共同承担,于是膜盒的刚度即为二者之和。在线性范围内,膜盒的机械刚度较易计算,可以通过 ANSYS 的静力学分析得到对应不同加载力下的位移,从而得到其刚度;气体刚度的计算可利用气体的特性求得。

在推进剂输送过程中,可近似将充压膜盒的反应过程看作等温过程,即 $PV=常数$ 。又由于忽略膜片贴合,故可将膜盒平均截面积视为不变,这样在某特定压力点的范围内,膜盒内部气压近似可以认为与膜盒的压缩量成反比。再利用压强与作用力的关系,便可求得该压力点处充气膜盒内部气体的等效切线刚度。充气膜盒整体刚度的具体计算方法如图 2 所示。

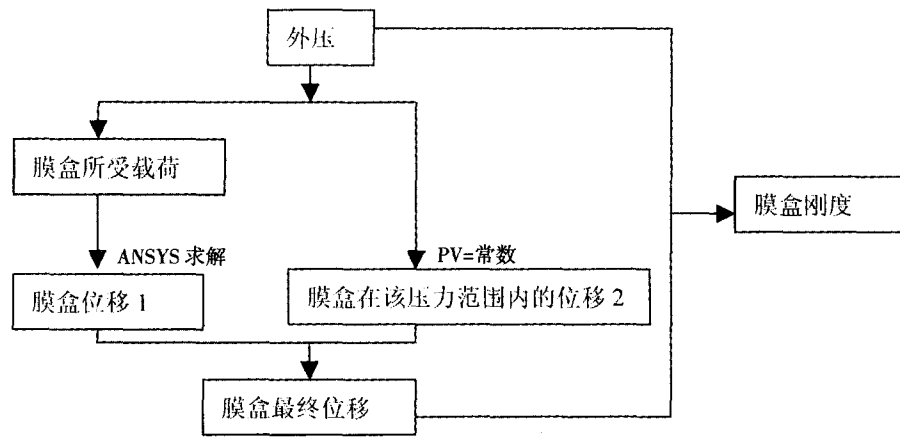


图 2 充气膜盒刚度计算方法

3.4 ANSYS 直接法进行流固耦合分析的理论基础

ANSYS 中是通过在流固界面,流体的压力给结构一个力,同时结构的位移又对流体产生影响来分析流固耦合作用的。其主导方程为:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_0 R^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix}$$

其中 M_s 和 M_f 分别为结构和流体的质量矩阵, K_s 和 K_f 分别为结构的刚度矩阵, R 为耦合矩阵, U 为结构位移矩阵, P 为流体的压力矩阵, F_s 和 F_f 分别为作用在结构和流体上的外力, ρ_0 为流体密度。

从方程中可以看出流固耦合界面的节点同时具有位移和压力的自由度。ANSYS 中的直接耦合方法是通过选用耦合单元并在流体和固体的交界面施加 FSI 标记子,从而将流体的压力和固体的变形直接联系起来进行流固耦合分析的。在本文中选用的是三维流体单元-30 号流体单元,30 号三维声学流体单

元用于模拟流体介质和流体/结构相互作用的界面。该单元有 8 个节点,每个节点有 4 个自由度: x, y, z 方向的平动和压力,但平动自由度只有在流固耦合界面上才有效。其中自由度的改变是通过单元开关进行控制的:在流体内部 30 号单元的单元控制开关为 0,在耦合界面上该单元的开关为 1。下面是其单元的示意图:

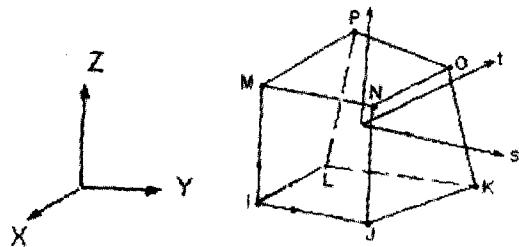


图 3 30 号单元示意图

4 有限元求解过程

4.1 三维几何模型的建立

虽然膜盒本身具有对称性,但考虑到蓄压器的模态中包含非对称模态,所以模型采用三维实体模型。首先分别对金属膜盒的膜片组、上盖、外筒和膜盒周围的液体以及膜盒上部的特定高度液体(通道到上盖间的那部分液体)进行几何模型的建立,建立的几何模型的截面见图 4。

4.2 单元的选择

在金属膜盒的动力学特性计算中分别采用 45 号单元与 30 号声流-结构耦合单元进行结构和流体单元的离散;膜盒内部气体采用 14 号弹簧单元模拟其等效刚度;试验管路内的液体惯性采用液体附加质量法进行模拟,用 21 号质量单元离散。

4.3 物理属性

膜盒有限元离散的单元物理属性见表 1,膜盒内

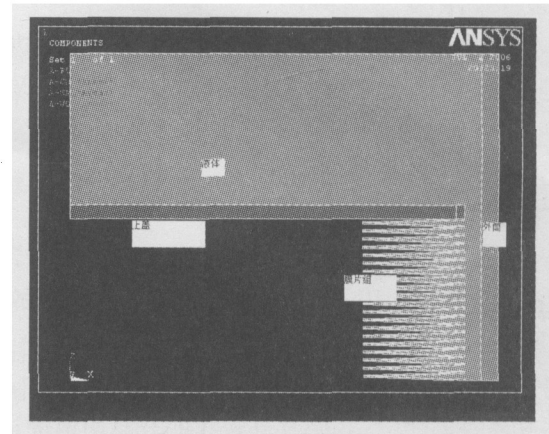


图 4 金属膜盒流固耦合动力学特性分析几何模型的截面

气体的等效刚度见表 2。从表 2 中可以看出,当膜盒外压增加时,刚度增大,主要因为膜盒外压增加时,膜盒为了保持平衡,内压也相应增加,充压膜盒刚度便增大。

表 1 充压膜盒有限元单元物理属性

结构	离散单元	弹性模量(Pa)	密度(kg/m ³)	声速(m/s)
膜片	45号实体单元(共 17344 个)	2×10 ¹¹	7800	
上盖			7500	
与固体接触的流体	30号流固耦合单元(6816 个)	2×10 ⁹	1000	1414
不与固体接触的流体	30号流固耦合单元(4048 个)			
气体	14号弹簧单元(7 个)	K见表 2		
液体等效质量	21号质量单元(1 个)	m=100kg		

表 2 不同内压和外压下膜盒的等效气体刚度

膜盒内气压(MPa)	低压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
膜盒高度(mm)	28.36	25.4	21.8
膜片高度(mm)	0.709	0.63447	0.544
膜盒等效刚度(N/m)	6.45×10 ⁶	8.06×10 ⁶	1.096×10 ⁶
膜盒内气压(MPa)	高压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
膜盒高度(mm)	52.5	46.9	40.3
膜片高度(mm)	1.3	1.2	1.0
膜盒等效刚度(N/m)	3.49×10 ⁶	4.36×10 ⁶	5.92×10 ⁶

4.4 边界条件

在模型中,采用膜盒底部固支,上部自由的边界处理。在流固耦合界面(即膜片和液体接触处以及外筒和液体接触处)加标记子 FSI,从而使固体的位移和流体的压力在此耦合。

4.5 求解器

采用 ANSYS 的非对称(Unsymmetric)模态提取方法,在计算机上用了 3 小时 15 分钟得到最后的结果,见表 3。有限元模型见图 5。从结果可以看出,膜盒外液压不变时,频率随膜盒内压的升高而增加;膜盒内压不变时,频率随膜盒外液压的升高而增加。

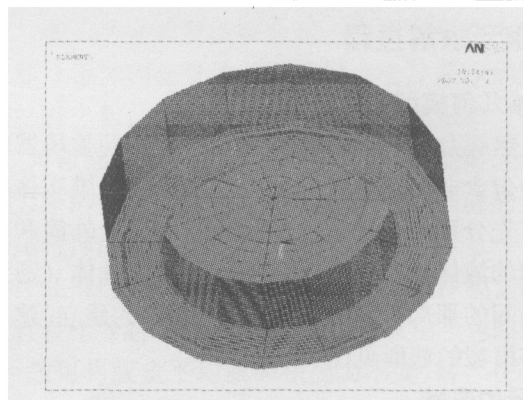


图 5 三维有限元流固耦合模型

表 3 采用三维有限元求解的膜盒固有频率

气压(MPa)	液压(MPa)	膜盒固有频率(Hz)	振型描述
P ₀ =低压	P=低压	18.162	轴向有一个疏密波,周向波为零
	P=中压	18.365	轴向有一个疏密波,周向波为零
	P=高压	18.533	轴向有一个疏密波,周向波为零
P ₀ =高压	P=低压	15.847	轴向有一个疏密波,周向波为零
	P=中压	16.342	轴向有一个疏密波,周向波为零
	P=高压	17.183	轴向有一个疏密波,周向波为零

5 试验介绍

膜盒的自振频率试验是考虑在一定脉动压力下测试膜盒的响应而实现的。试验中,通过振动台带动活塞给膜盒施加一定的流体脉动,同时测得膜盒附近的流体压力脉动,从而获得膜盒的自振频率。在活塞作动筒和膜盒上各安装一个脉动压力传感器。试验图见图 6,结果见表 4。

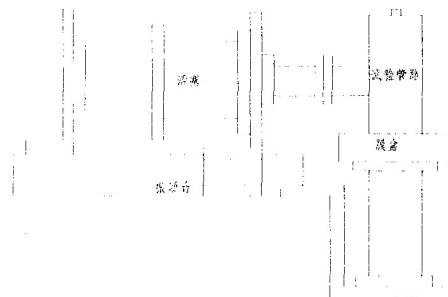


图 6 充液膜盒自振频率测试布局

表 4 充液膜盒的自振频率试验结果

膜盒内气压(MPa)	低压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
自振频率(Hz)	26.25	29	31.25
膜盒内气压(MPa)	高压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
自振频率(Hz)	22.25	24.5	26.75

6 计算结果和试验结果的对比分析

膜盒充水后,由于液体对膜盒系统质量、刚度和阻尼阵的影响,膜盒系统的固有频率将不同于不注水情况下的固有频率。三维实体模型与试验结果的对比见表 5:

表 5 三维实体模型的充液膜盒固有频率对比

膜盒内气压(MPa)	低压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
试验自振频率(Hz)	26.25	29	31.25
采用实体单元的频率结果(Hz)	18.162	18.365	18.533
膜盒内气压(MPa)	高压		
膜盒外液压(MPa)	低压	中压	高压
试验自振频率(Hz)	22.25	24.5	26.75
采用实体单元的频率结果(Hz)	15.847	16.342	17.183

从结果的对比中可以看出,用实体单元进行求解的膜盒固有频率结果与试验比较接近,且变化规律相同。但计算结果较试验要偏低,这一方面是由于直接耦合方法在处理流固耦合界面时将界面上的全部自由度均进行了耦合,没有考虑到流体流动的作用;另一方面由于在试验过程中,管路布局的限制,造成了在试验系统中不可避免地封闭了一定体积的空气,从而导致膜盒周围液体的附加质量由于空气的存在而有所降低,最终导致试验频率的升高。但在计算中尚没有考虑到这部分空气的影响,所以试验数据要比计算数据偏大。

另外通过 ANSYS 的直接耦合法计算结果,我们发现计算与试验的膜盒频率变化规律是一致的:

(上接第 4 页)

由表 1 及其他大量的模拟计算结果显示:

- (1) 当控制段初速度具有逾越控制边界趋势时,所需速度增量较大;
- (2) 若设定的控制段时间较长,则所需的总的速度增量相应减小;
- (3) 应尽可能提高姿态控制精度,减小制导加速度偏差,以减小相对位移控制的动力消耗;
- (4) 对相同控制时间,双冲量机动所需速度增量最小。

4 结论

在空间交会的最终逼近段,为克服初始状态偏

差与制导机动加速度偏差量的影响,满足飞行时间、轨迹安全性以及对接初始状态等技术要求,确保安全逼近与成功对接,须设定逼近速度与相对位移控制边界,对达到控制边界的追踪航天器施加机动,使其回到标称位置。双冲量机动所需的速度增量最小,适合交会对接工程实际应用。

• 在膜盒外压不变时,内压升高,频率增大。分析原因主要是由于内压升高时,根据表 2 膜盒等效刚度计算结果,膜盒的等效刚度增大,故膜盒的固有频率增加;同时膜盒在工作状态的压缩量降低,膜盒周围液体的附加质量减少,也导致膜盒的固有频率增加。

• 当膜盒内压不变时,外压升高,膜盒频率下降。分析原因主要是由于外压升高时,根据表 2 膜盒等效刚度计算结果,膜盒的等效刚度减小,故膜盒的固有频率下降;同时外压升高时,膜盒压缩量增大,膜盒外部的液体附加质量增大,也导致膜盒的固有频率下降。

7 结论

本文对金属膜盒进行的流固耦合分析,结果与试验结果比较接近,说明流固耦合分析对于膜盒的固有频率计算是极为必要的。另外通过进行膜盒的流固耦合计算发现计算结果相对试验结果来说比较低,通过查找原因,发现试验管路中膜盒周围封有一定量的气体,为指导试验的改进提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 王心清. 结构设计. 宇航出版社, 1994.
- [2] ANSYS 手册.
- [3] 李东旭. 高等结构动力学. 国防科技大学出版社, 1997.10
- [4] Bathe K. J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982

参考文献

- [1] 朱仁璋, 汤溢, 尹艳. 空间交会最终平移轨迹安全模式设计[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 443-448
- [2] 朱仁璋, 林彦. 航天器交会最终逼近段相对姿态估计与控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5)