

文章编号: 1000-8055(2010)04-0852-05

火箭推进系统充液管路的流固耦合动响应分析

魏 鑫¹, 孙 冰¹, 于子文², 汤 波², 张青松²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 针对大型运载火箭推进系统中的液氧供应管路, 建立流固耦合作用的模型, 开展了动响应分析研究. 在二维平面管系中同时分析纵向和横向振动及其相互作用, 并考虑泊松耦合和连接耦合的影响, 对火箭贮箱出口的充液管段模型进行了计算. 结果表明: 相对于经典水锤理论, 考虑纵向横向振动的充液管路的流固耦合动响应形式相对复杂, 频率和幅值也有变化. 该研究工作为下一步的管路试验和振动抑制研究提供了参考.

关 键 词: 流固耦合; 充液管路; 振动; 纵向和横向

中图分类号: V414.3

文献标识码: A

Dynamic response analysis of fluid-structure interaction in liquid-filled pipes of rocket feed system

WEI Xin¹, SUN Bing¹, YU Zi-wen², TANG Bo², ZHANG Qing-song²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Considering the effect of fluid-structure interaction, the dynamic response study of liquid-filled pipes of rocket feed system was carried out in this paper. To set a model, the pipes were defined in a plane, which could vibrate axially and transversely under the influence by Poisson coupling and junction coupling. Numerical test on pipes between rocket tank and pump was then conducted. The reasonable results regarding frequencies and modes show the necessity of proposed model, as compared with the traditional water hammer model. This study could give a reference to the pipe test and further study on oscillation suppression.

Key words: fluid-structure interaction; liquid-filled pipes; vibration;
axial and lateral direction

流固耦合 (fluid-structure interaction, FSI) 问题属于应用力学范畴, 它是充液管路固有力学特性的体现. “耦合”是指流体与管路在运动中相互影响、相互作用. 1956 年, 流固耦合作用首先被 Skalak^[1] 提出; 他认为在充液管路中除了压力波外, 还相应地存在应力波; 这也就是所谓的“前驱

波”(precursor waves) 现象. 该现象后被 Thorley 实验所证实. 此后, 众多学者提出了各种流固耦合数学模型, 但是这些模型仅仅只考虑了流体在流经弯头或阀门等处时与管路的耦合作用. 直到上世纪 80 年代, Wiggert^[1] 和 Tijsseling^[2] 等人的研究 (尤其是耦合机理方面) 取得了较大突破. 他们

收稿日期: 2009-03-30; 修订日期: 2009-07-14

作者简介: 魏鑫 (1981 -), 男, 四川宜宾人, 博士生, 研究方向为火箭动力学、冲压以及火箭发动机热防护研究.

其中 $\dot{u}_y$ 为管路横向速度, Q_y 为横向剪切力, θ_x 为管路挠曲转角速度, M_x 为弯矩, I 为转动惯量, G 为管道剪切模量, 单位长度平移惯量 $\rho A = \rho A_t + \rho A_f$, 单位长度等效转动惯量 $\rho I = \rho I_t + \rho I_f$.

1.2 弯管单元

如图 2 所示,对于弯管单元,需要通过边界条件和连接条件来考虑连接耦合^[2]. 与直管单元相似,只考虑 y - z 平面运动;且忽略弯管质量,各力的改变只与液体运动有关. 根据守恒条件,可以得到以下的关系式:

$$A_{f1} \left(V_1 - \dot{u}_{z1} \right) = A_{f2} \left(V_2 - \dot{u}_{z2} \right) \tag{9}$$

$$p_1 = p_2 \tag{10}$$

$$\dot{u}_{z1} = \dot{u}_{z2} \cos \alpha + \dot{u}_{y2} \sin \alpha \tag{11}$$

$$A_{f1} p_1 - A_{p1} \sigma_{x1} = \left(A_{f2} p_2 - A_{t2} \sigma_{x2} \right) \cos \alpha + Q_{y2} \sin \alpha \tag{12}$$

$$\left\{ \dot{u}_y \right\}_1 = \left\{ \dot{u}_y \right\}_2 \cos \alpha - \left\{ \dot{u}_z \right\}_2 \sin \alpha \tag{13}$$

$$\left\{ Q_y \right\}_1 = \left\{ Q_y \right\}_2 \cos \alpha - \left\{ A_t p - A_t \sigma_x \right\}_2 \sin \alpha \tag{14}$$

$$\theta_{x1} = \theta_{x2} \tag{15}$$

$$M_{x1} = M_{x2} \tag{16}$$

其中 α 为弯管连接前后的 z 方向变化角度,以顺时针变化为正.

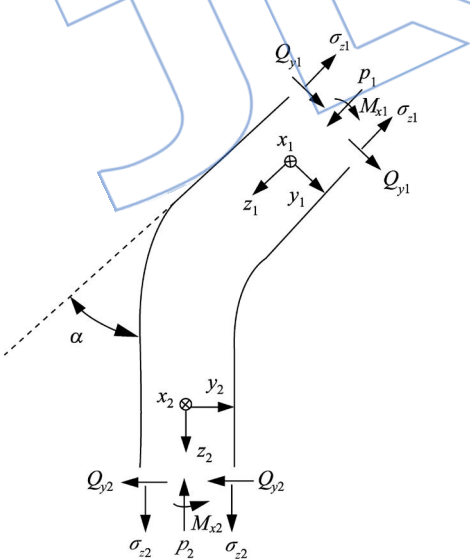


图 2 充液弯管单元示意

Fig. 2 Element of liquid-filled elbow pipe hint

1.3 特征线法求解

利用特征线法,将偏微分方程组(1)~(16)转化为常微分方程组,即可积分得到各状态变量与上一时层状态变量的关系. 表达式具有直观、物理

意义明确的特点,而且利于编程实现.

针对具体管路进行分析时,首先把对象模型按照设定的空间步长划分为若干节点,并根据 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件选择相应的时间步长. 在沿时间推进的计算过程中,需要判断节点类型:若为边界节点,则考虑特征线与节点交汇的方式,选取相应的特征线方程组,并结合边界条件求解;若为连接耦合节点,则结合连接耦合方程求解;其余节点,则直接利用特征线方程组求解.

按照上述过程进行编程计算,并对考虑流固耦合的关阀水锤算例^[3]和单弯管撞击试验结果^[2]进行了对比仿真计算,与文献符合较好,说明了流固耦合模型的合理性和计算程序的正确性,也为后续的仿真计算打好了基础.

2 贮箱出口至泵前管路计算

针对某火箭液氧贮箱出口的充液管段进行响应分析. 如图 3 所示,左侧的 pipe 1 为简化的充液管段模型,右侧的 pipe 2 为总长度与 pipe 1 相等的对比分析模型;管路长度单位为 m.

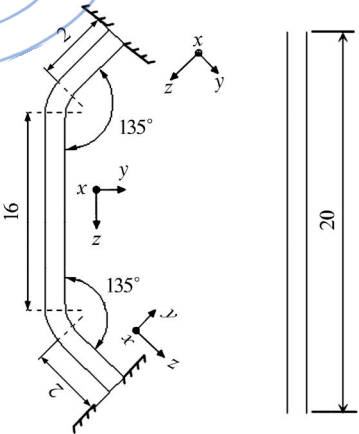


图 3 贮箱出口段管路 pipe 1 和等长直管 pipe 2 示意图

Fig. 3 Pipe 1 (outlet of storage) and straight pipe 2 (length as the pipe 1) hint

管路始端为贮箱出口,出口压力 $p_0 = 0.4 \text{ MPa}$,体积流量 $Q_0 = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$,有如下约束条件:

$$\begin{aligned} \dot{u}_z \left(0, t \right) &= 0, \quad p \left(0, t \right) = p_0, \\ Q_y \left(0, t \right) &= 0, \quad M_x \left(0, t \right) = 0 \end{aligned}$$

管路末端为固定端. 在此处设置一个阶跃型激励,假设末端在 0.01 s 内减少 1% 的流量,即扰动流量 $Q \left(t \right) = Q_0 - \left(Q_0/100 \right) \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{E_m}$, 其中 $\tau = \left(1 - t/t_c \right)^{E_m}$, t_c 为 0.01 s ,指数 E_m 为 1.5 .

根据静力平衡条件,可以分析得到各点初始时刻的应力、剪力和弯矩值。

对于直管 pipe 2,我们首先利用经典水锤理论模型进行计算,得到管路末端的压力变化如图4中的曲线1。因为该模型只针对管内流体进行分析,所以对阶跃信号的压力响应为方波形式的曲线;而且,曲线的变化规律可以用类似关阀水锤的分析^[7]进行解释,压力波完成一个传播循环,其周期为 $T = 4(L/\alpha) \approx 0.1008\text{ s}$,相应的频率为9.92 Hz。

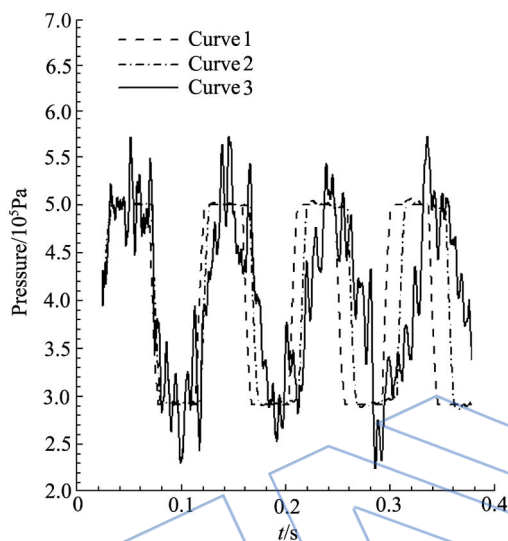


图4 阶跃激励下管路末端的压力变化曲线

Fig. 4 Curve of pressure at the end of pipe (spring disturbance)

若考虑流固耦合作用,直管 pipe 2 末端的压力变化如图4中的曲线2,与曲线1相比较,前者出现了很多锯齿形状的波动,这反映了管路应力波的存在;而且曲线2压力变化的幅度也有所增大。从图5的频谱曲线可以看到,此时 pipe 2 系统的基频为9.44 Hz。

对于贮箱出口充液管段 pipe 1,末端压力变化曲线如图4中的曲线3,其振动形式相对最复杂,幅度也有所不同;从图6的频谱图可以看到,pipe 1 系统的基频为9.13 Hz。分析原因如下:如果不考虑弯管连接耦合,pipe 1 管路就等效于等长直管 pipe 2;如果考虑弯管连接耦合,充液管路纵向和横向振动之间的相互影响就会显现;纵向和横向的运动状态量在各处平衡关系制约下,会发生振动形式的改变,从而使单纯的纵向扰动转变为纵横弯多种形式混合的扰动;因此,压力响应曲线也就变得更加复杂。

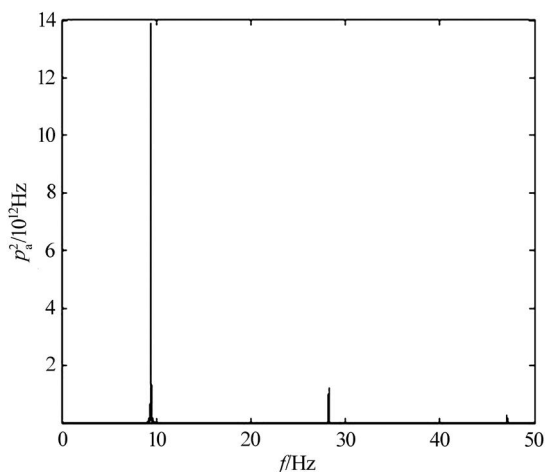


图5 Pipe 2 管路末端压力变化的功率谱

Fig. 5 Power spectrum of pipe 2

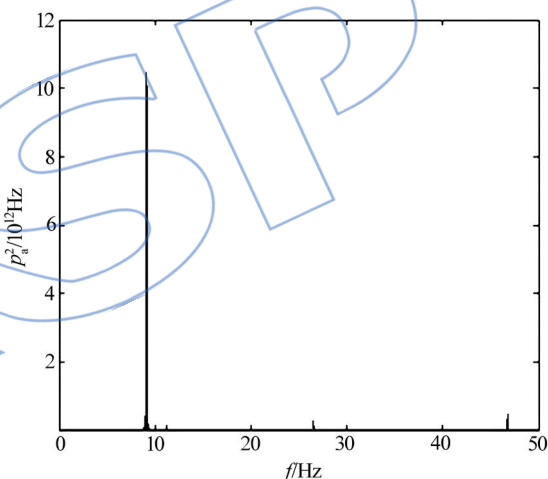


图6 Pipe 1 管路末端压力变化的功率谱

Fig. 6 Power spectrum of pipe 1

3 结 论

1) 对于两端固定、入口定压出口流量变化的充液直管,由于考虑流固耦合作用受到应力波的影响,相对于只对管内流体进行分析的经典水锤理论模型,其压力响应曲线出现了锯齿型变化,计算得到的系统的固有频率减小。

2) 对于弯管,由于考虑了弯管连接耦合,管路纵向和横向振动相互影响,纵向扰动形成了纵横弯多种形式叠加的复杂响应曲线,计算得到系统频率相对不考虑弯管效应(即等长的直管)的系统频率有所减小。

3) 对考虑流固耦合、以及纵向和横向振动相互影响的充液管路模型进行动响应分析,其频率和幅值通常都会发生较大变化。因此,对于以往根

据经典水锤理论模型开展动响应分析而得到的一些安全情况,就可能会存在潜在危险,有必要进行重新分析确认.

4) 本文的计算模型及其分析结果,为相关的管路试验设计和实施提供了参考,同时也为充液管路的振动预测及抑制研究提供了思路.另外计算结果的准确性也需要通过试验进一步来验证.

参考文献:

[1] Wiggert D C , Hatfield F J . Analysis of liquid and structure transients in piping by the method of characteristics[J] . ASME Journal Fluids Engineering ,1987 ,109 :161-165 .
[2] Tijsseling A S , Vardy A E , Fan D . Fluid-structure interaction and cavitation in a single-elbow pipe system[J] . Journal of Fluids and Structures ,1996 ,10 :395-420 .
[3] 张智勇 ,沈荣瀛 ,王强 . 充液管系轴向振动响应计算研究

[J] . 噪声与振动控制 ,1999 ,10(5) :5-8 .
ZHANG Zhiyong , SHEN Rongying , WANG Qiang . Study and calculation of axial response of liquid-filled piping system[J] . Noise and Vibration Control ,1999 ,10(5) :5-8 . (in Chinese)
[4] 孙玉东 ,刘忠族 ,刘建湖 ,等 . 水锤冲击时管路系统流固耦合响应的特征线分析方法研究[J] . 船舶力学 ,2005 ,9(4) :130-137 .
SUN Yudong ,LIU Zhongzu ,LIU Jianhu ,et al . Application of MOC to calculation of fluid-structural coupling response of piping system under impact of waterhammer[J] . Journal of Ship Mechanics ,2005 ,9(4) :130-137 . (in Chinese)
[5] 王其政 . 结构耦合动力学[M] . 北京 :宇航出版社 ,1997 .
[6] Timoshenko S , Young D H , Weaver W , Jr . Vibration problems in engineering[M] . New York :Wiley ,1974 .
[7] Wylie E B ,Streeter W L . Fluid transients[M] . New York : McGraw-Hill International Book Co . ,1978 .