

文章编号: 1000-8055(2007)02-0323-04

卫星推进系统真空充填过程 数值仿真

薛 科¹, 张黎辉¹, 苏龙斐², 潘海林²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 以一维管道瞬变流理论为基础, 利用特征线有限差分法, 建立空间推进系统部件流体动力学模型和液头充填的计算模型, 瞬变管流运动方程摩擦阻力采用平均摩擦损失模型和动态摩擦损失模型, 考虑溶入气体后管流声速的变化, 对某卫星推进系统管路充填过程进行计算. 与实验结果对比表明: 计算模型较好地描述了发动机充填过程中的管路水击和管流振荡现象, 可为其它推进系统管路充填流动瞬变特性分析提供指导.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 数值仿真; 管路水击; 特征线法; 平均摩擦; 湍流摩擦
中图分类号: V474 **文献标识码:** A

Numerical simulation of the priming process of satellite propulsion system

XUE Ke¹, ZHANG Li-hui¹, SU Long-fei², PAN Hai-lin²

(1. School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Beijing Control Engineering Institute, Beijing 100080, China)

Abstract: An analytical model is developed using the water hammer and one-dimensional fluid transient theory. Based on the finite difference method of characteristics, the hydrokinetics models and model for the head of fluid are established. The average friction model and the frequency-dependent dynamic friction model are adopted to simulate the frictional resistance in the transient fluid equations. During the simulation of the priming process, the variation of sonic speed affected by the gas dissolved in the liquid is taken into account. The comparison with the experimental results shows: numerical models give reasonable descriptions for water hammer and flow oscillation, and could provide guidance for transient analysis of priming process in pipelines of other propulsion system.

Key words: aerospace propulsion system; numerical simulation; water hammer; characteristic method; average friction; frequency-dependent dynamic friction

空间飞行器绝大部分时间是在非稳态条件下工作的, 推进系统在管路充填过程中不可避免会在发动机电磁阀前形成水击, 并在管系中传播、反

射, 产生持续的流动振荡. 充填过程可能产生一系列的问题, 如使电磁阀结构遭到破坏, 功能受损, 造成推力器误点火, 引起其它相连部件的振动, 使

收稿日期: 2005-12-28; 修订日期: 2006-03-28

作者简介: 薛科(1981-), 男, 上海人, 北京航空航天大学宇航学院硕士生, 主要从事液体火箭发动机动态特性研究.

系统失稳等.由于卫星上推进系统故障而导致整个通讯卫星发射任务失败的事例,国内外都有发生.因此,为保证空间飞行器推进系统安全,需研究水击强度在管路中的空间分布和流动过程中的时间分布等动态特性及其影响因素,这对系统设计与分析具有非常重要的工程应用价值.本文正是针对卫星推进系统管网真空充填过程进行数值仿真研究.

1 系统动力学模型

1.1 液体管路动力学方程

假设管流是一维绝热流动,连续方程和运动方程如下^[1]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + f(v, t) = 0 \quad (2)$$

式中: v 为速度; p 为压强; c 为管流声速; ρ 为流体密度; $f(v, t)$ 为管壁摩擦阻力项.

运动方程与连续方程组成了一对非线性双曲线微分方程,可以用特征线方法把这两个偏微分方程变换为特殊的全微分方程,对全微分方程积分得到便于数值处理的有限差分方程^[2].

液体非稳态流动时的速度分布图及对应的壁面摩擦应力同稳态流动的特性有显著的差别.当振荡频率不高或液流参数随时间变化的梯度不大时,速度分布图同稳态流动的差别不大,因而可采用准稳态假设.但当振荡频率很高或参数随时间变化的梯度很大时,准稳态近似不能获得应力值的正确数据,也意味着不能获得液体流动的能量损耗值.因此,为了获得足够准确的非稳态流动模型,必须考虑壁面摩擦应力及其等效特性同频率以及参数随时间变化梯度之间的关系,本文针对运动方程摩擦阻力项采用平均摩擦损失模型和湍流频率相关摩擦损失模型^[3].

液头部分在充填过程中的大部分时间处于计算网格节点之间的空白区域,无法仅用网格节点上的参数来刻画它的运动,可以把网格节点间的液体团作为集中的质量来分析其运动^[4].

1.2 边界条件

空间推进系统是复杂的多管路、多元件系统,因此其边界条件也是非常复杂的,本文中采用的几种边界条件如下:

(1) 贮箱:空间发动机通常采用挤压式输送系统中恒压式系统,贮箱增压压强基本保持不变,液

柱静压和惯性压强的影响相对较小,当液体流出贮箱时,有部分能量损失,其局部损失系数为 k ,满足关系式:

$$p_0 = p_{1,1} + \frac{1+k}{2} \rho v_{1,1}^2 \quad (3)$$

式中: p_0 为贮箱压强; $p_{1,1}$ 为贮箱出口压强(即管道入口压强); $v_{1,1}$ 为管道出口流速.其中 p 、 v 等参数的第一个下标表示管路或部件编号,第二个下标表示网格编号,下面各方程中参数的下标含义与此相同.

当流体流入贮箱时,认为液体的动能全部损失,边界点压强为贮箱压强: $p_0 = p_{1,1}$.

(2) 阀门方程及边界条件:利用阀门方程和与之相连接的管路方程,即可确定阀门处边界点的参数.

$$Q_{i,j} = \tau Q_0 \sqrt{(p_{i,Ni} - p_{i+1,j}) / p_0} \quad (4)$$

式中: τ 为阀门开度的变化规律; Q_0 为稳态流动时通过阀门的流量; p_0 为稳态工作时阀门的额定压降; $p_{i,Ni}$ 为阀门前一段管路出口即阀门入口处的压强; $Q_{i,j}$ 为阀门入口流量; $p_{i+1,j}$ 为阀门充填过程中充填所到处的压强.

阀门处管段连续方程:

$$Q_{i,Ni} = Q_{i,j} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,Ni}$ 表示阀门前一段管路出口流量.由上述方程、特征线右传方程和经充填方程转化得到的有限差分方程联立求得充填过程中的阀门两端参数.

(3) 过滤器方程及边界条件:

$$p_{i,Ni} - p_{i+1,j} = \left[b_1 \frac{1}{Re} + b_2 \right] \rho \frac{(Q_{i,Ni})^2}{A_i^2} \quad (6)$$

式中: $p_{i,Ni}$ 、 $p_{i+1,j}$ 分别为连接过滤器的上游管路的出口和过滤器充填过程中充填处压强; ρ 为推进剂密度; Q 是流量; Re 是雷诺数; b_1 、 b_2 为实验测量数据.

充填过程中过滤器参数的确定方法与阀门相同.

(4) 管路分支

在空间发动机输送系统中,由于空间布局及多个发动机共用该系统,造成推进剂管路的转弯与分支,通常忽略分支处压强损失,采用分支点处各支路压强相等、流量平衡来计算,但这样会造成一定的误差.因此,在充填过程中对于流体在三通或弯管处流动引起的局部损失可以采用两种方法进行修正:其一,对于平均摩擦模型,可以选择一个适当的长度采用平滑措施对摩擦损失进行修

正;其二,对于湍流频率相关摩擦模型,采用调整管流的等效运动粘度的办法进行修正.

1.3 流体声速模型

文献[5]研究表明:当纯液体中溶入气体后,管流中的声速就会显著的下降,图 1 为美国学者进行实验所得的声速变化曲线,从图中可以看到当在水中溶入 5 % 的空气后,水中的声速呈明显下降的趋势,可见溶入气体对流体声速的影响.因此,仿真计算时必须考虑到实际试验环境和管路中流体的溶气情况,以此来确定流体声速,否则会造成很大的计算误差.

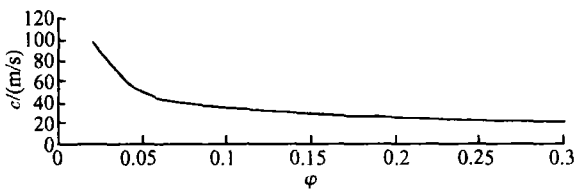


图 1 水中气体含量对声速的影响

Fig.1 Influence of volume concentration to the velocity of sound in water

含有气体的管流中声速计算如下:

$$c = \frac{c_{\infty}}{\sqrt{1 - \phi^2 + \frac{\phi(1 - \phi)\rho_{\infty}^2}{kp}}} \quad (7)$$

式中: c_{∞} 是纯液体中的声速; p 是流体压强; ϕ 是气相的体积密度; k 是绝热过程指数.

2 仿真结果及分析

简化的卫星推进系统推进剂供应管网如图 2 所示,该系统为双组元推进系统,包括 1 台轨控发动机和十几台姿控发动机,试验时贮箱增压压强为 1.5 MPa,管路中真空度为 200 Pa,对管路的水击峰值影响甚微,考虑充填过程为真空充填.管网中粗管管路长径比为 100 : 1,细管为 68 : 1,粗细管径比为 2 : 1. 对该系统供应管网进行真空充填研究,得到的轨控发动机燃路阀门前的压强变化过程如图 3~图 6 所示,图中虚线为仿真计算结果,实线为该系统试验所得测量值.

从图中可以看到:(1)采用湍流摩擦模型与平均摩擦模型进行仿真的结果不同,前者压强峰值较大,管流振荡持续时间短,衰减较快.这是因为采用湍流摩擦模型,动态损失部分所占比重较大,而在模型的初始条件中摩擦损失项设为零,导致初始流量大;采用平均摩擦损失模型对动态摩擦中的粘性阻滞作用模拟程度不够.(2)采用湍流摩

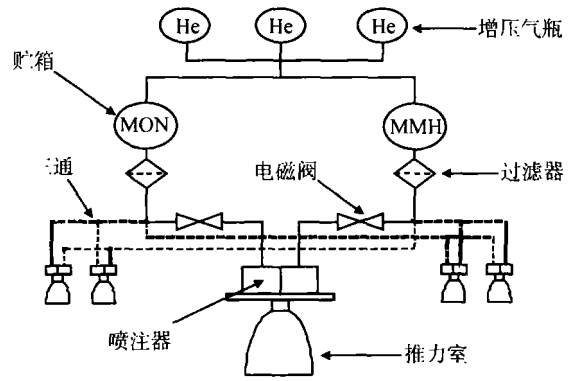


图 2 卫星推进系统示意图

Fig.2 Sketch of satellite propulsion system

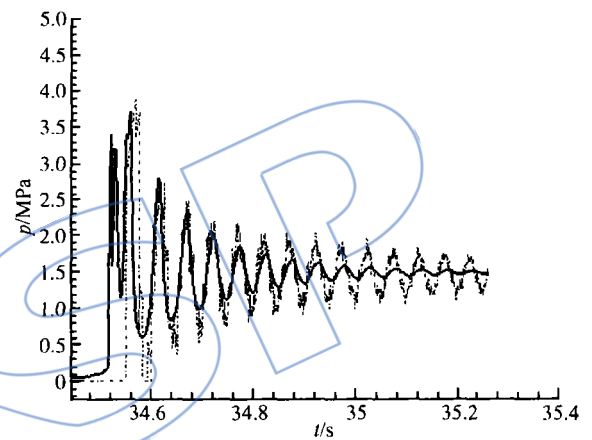


图 3 水击压强峰曲线(平均摩擦模型)

Fig.3 Curve of water hammer (Average friction model)

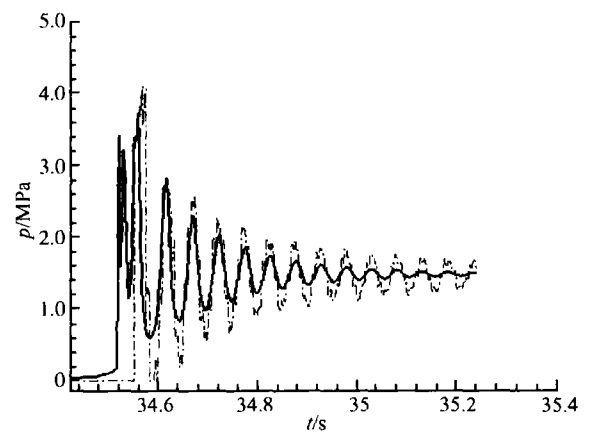


图 4 水击压强峰曲线(湍流摩擦模型)

Fig.4 Curve of water hammer (Frequency-dependent dynamic friction model)

擦模型及弯管模型产生的压强峰值略小,弯管更重要的作用是对压力振荡的影响,加入弯管后振荡过程衰减更快,收敛时间更短.说明弯管产生的局部压损在压力振荡来回往复的过程中产生了作用.仿真计算中只加入了几个弯管模型,实际系统

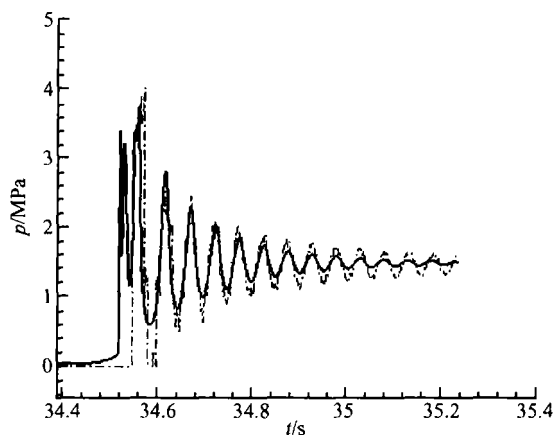


图5 水击压强峰曲线(湍流摩擦模型加弯管模型)

Fig. 5 Curve of water hammer (Frequency-dependent dynamic friction and syphon model)

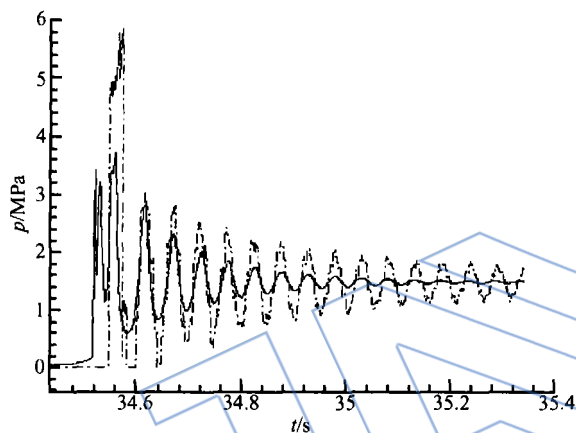


图6 水击压强峰曲线(不考虑液体中溶有气体)

Fig. 6 Curve of water hammer
(With no consideration of dissolved gas)

中却存在着数十个弯管。(3)不考虑溶气对流体音速的影响会导致计算结果有很大的压强峰值(如图6),与实验结果相差较大。(4)相比于文献[2]中的单管充填,管网可以显著降低管路中的压力峰值,同时对于改善压力振荡也有一定作用。(5)试验测得的压力振荡在第一个振荡周期内形态更复杂。有几点原因造成了这些差异:流体实际流动时,液头呈弧线型前进,仿真计算中,假设液头部分是以平面推进;实际试验中,管路中各阀门的打开需一段时间,而仿真计算中没有考虑这点,假设阀门的打开是瞬时完成的;仿真计算中没有考虑推进剂充填过程中产生的气泡生成和溃灭等因素

的影响。

3 结 论

在充填过程中弯管、三通等局部损失是管流振荡中重要的耗散源,考虑实际管流中的溶气特性及弯管影响的湍流摩擦损失模型的计算结果与试验结果基本相符,利用该模型能很好的反映一维管路充填过程中的水击和振荡现象。

实际管路系统异常复杂,仿真系统越接近实际系统,其压强峰值及压强振荡持续过程越接近试验,仿真精度越高。鉴于各方面原因,目前的仿真计算尚不能完全模拟实际过程,这也会造成仿真精度上的偏差。

综上所述,计算模型较好地模拟了管路充填过程中的水击现象,但现有的理论模型还不能全面反映实际过程中出现的气(汽)液混合、气(汽)泡团释出和崩溃、气(汽)液两相流等复杂的物理现象。因此,为提高仿真精度,还要结合实验进行深入的理论研究。

参考文献:

- [1] 程谋森,张育林. 航天器推进系统管路充填过程动态特性理论模型与仿真结果[J]. 推进技术, 2000, 21(2): 25-28.
CHEN Mousen, ZHANG Yulin. Dynamic characteristics of priming process in spacecraft propulsion system (I) theoretical model and simulation results[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(2): 25-28.
- [2] 苏龙斐. 小推力液体火箭发动机静态特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2005.
SU Longfei. Investigation on the static and dynamic characteristics of low-thrust liquid rocket engines[D]. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [3] 李明智,蔡耀志. 频率相关摩擦损失项的近似求解[J]. 浙江大学学报, 1990, 124(1): 120-126.
LI Mingzhi, CAI Yaozhi. An approximate algorithm of friction loss term of frequency relation[J]. Journal of Zhejiang University, 1990, 124(1): 120-126.
- [4] Pricatt R P, Mayer E, Hermel J. Water hammer in a spacecraft propellant feed system[J]. Journal Propulsion and Power, 1992, 8(3): 592-597.
- [5] Усов Г Л и др. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок [М]. Москва "МАШИНОСТРОЕНИЕ", 1982.