

文章编号: 1000-8055(2006) 02-0417-04

液体火箭发动机实验台液路系统 工作过程仿真

高 芳¹, 陈 阳¹, 张振鹏¹, 陈 峰²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;
2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 从一维可压缩液体的瞬变管流方程出发, 采用有限体积法, 对液体火箭发动机实验台液路系统工作过程进行了一维数值仿真, 并将计算结果与实验结果进行了比较与分析。结果表明, 该方法较好的描述了发动机实验台液路系统的工作过程, 能为实验台系统的设计、故障诊断、优化以及实验发动机的性能分析提供指导。

关键词: 航空、航天推进系统; 一维流; 可压缩流; 有限体积法; 液体火箭发动机实验台系统
中图分类号: V434.3 **文献标识码:** A

Fault Simulation and Analysis of the FLPRE Test-Bed Fluid Systems

GAO Fang¹, CHEN Yang¹, ZHANG Zhen-peng¹, CHEN Feng²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Starting from the transient pipe flow equation of one dimensional compressible fluid and using finite control volume method, the working process of the fluid piping system for liquid-propellant rocket engine testing was simulated. Through the comparison between calculated data and experimental data, the results illustrate that the method used in this paper describes preferably the working process of the fluid piping for the liquid-propellant rocket engine experiment system and can provide guidance for the design of experiment system, fault diagnosis, optimization and performance analysis of liquid-propellant rocket engine.

Key words: aerospace propulsion system; one dimensional flow; compressible flow; finite control volume method; liquid-propellant rocket engine experimental system

液体管路系统作为液体火箭发动机试验台系统的组成部分, 通常希望将管路的模型与系统其它部件的模型相耦合, 从而采用同一方法来对实验台系统和发动机系统进行分析与综合, 从而帮

助分析发动机实验的故障以及发动机性能。

文献[1]利用分段近似的方法建立了具有弱压缩性的液体管流的有限元状态空间模型; 文献[2]利用有限控制体积流体所遵循的守恒方程, 建

立了一维可压缩流的有限元状态空间模型及其键图(Bond Graph)表示,其单元边界条件用边界两边的单元参数的算术平均值来近似;文献[3]通过引入空间位置交错的两种有限控制体积(状态单元和速度单元),对其分别应用质量、能量和动量守恒方程,提出了一维可压缩瞬变流守恒形式的有限元状态变量模型,解决了以往同类模型的不足之处,一维可压缩瞬变流的有限元状态变量模型是通过有限体积离散得到的,实际上属于有限体积法。文献[3~8]分别采用了有限元方法、四阶龙格—库塔法和特征线方法等对某一发动机的瞬变过程进行了研究。

以上研究工作主要是针对发动机进行的,而对于实验台系统的动态过程仿真还只是停留在集中参数阶段,特别是关于实验台系统动态特性的

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A + p A)}{\partial x} = p \frac{\partial A}{\partial x} - \rho A(f_R + g \cos \theta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \left(e \rho A + \frac{u^2}{2} \rho A \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(e \rho u A + \frac{u^2}{2} \rho u A + p u A \right)}{\partial t} = \dot{q} C - \rho u A g \cos \theta \quad (3)$$

式中: $f_R = \lambda u |u| / 2D$; θ 为重力场与管流方向夹角。

补充流体的状态方程:

$$p = p(p, T), \quad e = e(p, T)$$

由于是低温推进剂,故还需要考虑流体和管壁的传热。假设:

(1) 管壁为薄管壁,其释热控制方程为一维的;

(2) 主要考虑管壁与流体之间的对流换热,忽略管壁轴向的热传导;

(3) 忽略环境对管壁的传热。

则管壁释热控制方程为:

$$\frac{dT_w}{dt} = - \frac{\dot{q} \cdot S}{c_w m_w} \quad (4)$$

式中: T_w 为管壁温度; S 为管壁内表面积; m_w 为管壁质量; c_w 为管壁材料比热容。

守恒方程的有限体积离散方程可以参照文献[3]来进行。本文采用了单根管道模块、液体阀门模块和恒压源模块。

2 物理模型及组合系统的求解

根据试验台的实际情况,整理出其液路系统仿真的物理模型如图1所示。

通用仿真研究更是微乎其微,此外,实验台系统的工作条件与发动机系统有很大不同,所以针对实验台系统工作过程进行仿真计算是很有必要的,仿真结果将能为实验台系统的设计、故障诊断、优化以及实验发动机的性能分析提供指导。本文正是针对液体火箭发动机实验台液体管路系统进行的动态仿真计算。

1 控制方程

对可压缩管流,假设:

- (1) 管流为一维流动;
- (2) 管壁摩擦采取唯象的准稳态描述方式;
- (3) 忽略管流中的轴向热传导。

则一维可压缩管流的守恒方程为:

以图1所示实验台液路管道系统为例,其模块化分解方法为:贮箱视为体积模块,即恒压源源模块;阀门3和阀门6视为组合体积模块,即液体阀门模块;三段管道则视为管道类模块,即液体管道模块。如图2所示。

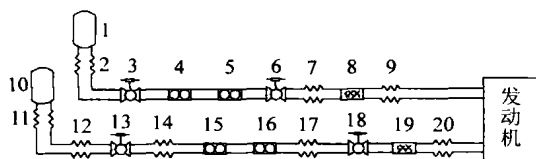


图1 实验台液路输送系统

Fig. 1 Liquid pipeline of experiment system

1. 液氢贮箱 2. 波纹管 3. 液体阀门 4. 流量计
5. 流量计 6. 液体阀门 7. 波纹管 8. 过滤器
9. 波纹管 10. 液氧贮箱 11. 波纹管 12. 波纹管
13. 液体阀门 14. 波纹管 15. 流量计 16. 流量计
17. 波纹管 18. 液体阀门 19. 过滤器 20. 波纹管

如图2所示,组合系统的模型是由各组成模块元件的模型组合而成的一个非线性微分方程组,采用四阶龙格—库塔(Runge-Kutta)法对组合系统进行数值积分。

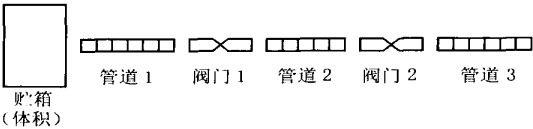


图2 液体管道系统模块化分解示意图

Fig. 2 The modularization analysis sketch map of liquid pipe system

3 计算结果与分析

图1所示液氢管路和液氧管路中,液氢管路的测量点是流量计4和管路出口处,液氧管路的测量点是流量计15和管路出口处液氢管路的贮箱压力 $P_T=0.35\text{ MPa}$,液氧管路的贮箱压力 $P_T=0.45\text{ MPa}$ 。

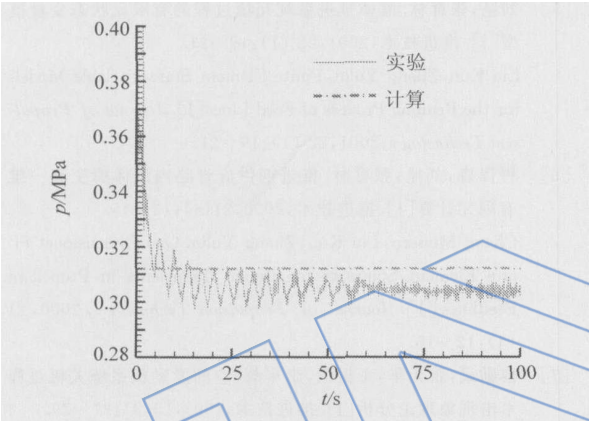


图3 液氢压强变化曲线 (流量计4)

Fig. 3 The pressure of liquid hydrogen pipe system (flow meter 4)

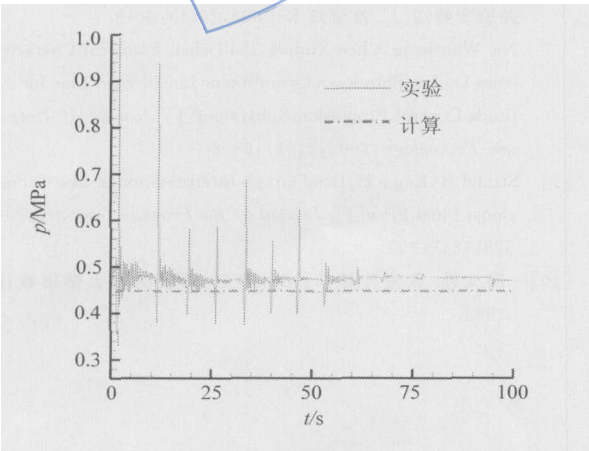


图4 液氧压强变化曲线 (流量计15)

Fig. 4 The pressure of liquid oxygen pipe system (flow meter 15)

态工作过程的压力及流量随时间变化的实验结

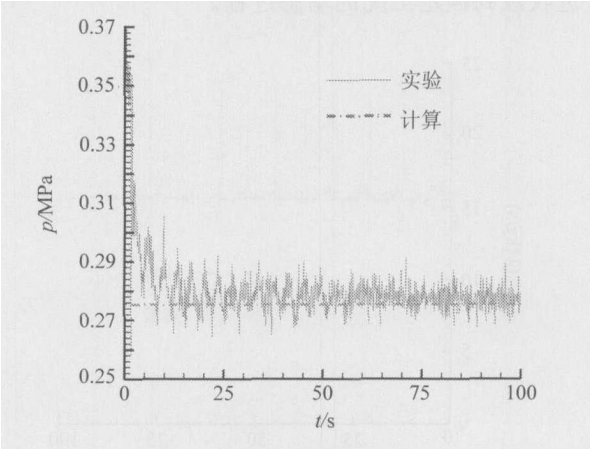


图5 液氢压强变化曲线 (液氢管路出口处)

Fig. 5 The outlet pressure of liquid hydrogen

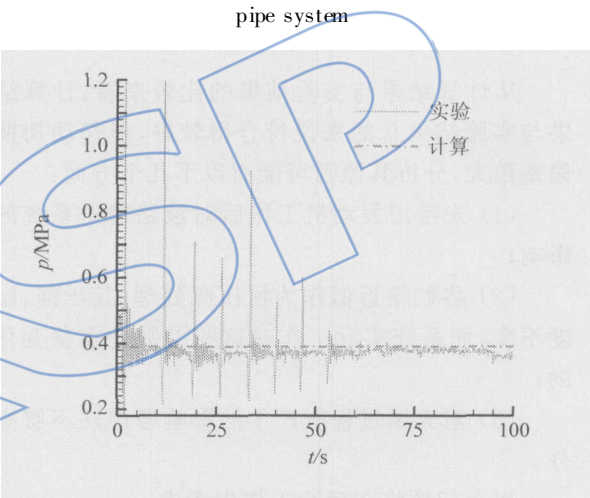


图6 液氧压强变化曲线 (液氧管路出口处)

Fig. 6 The outlet pressure of liquid oxygen pipe system

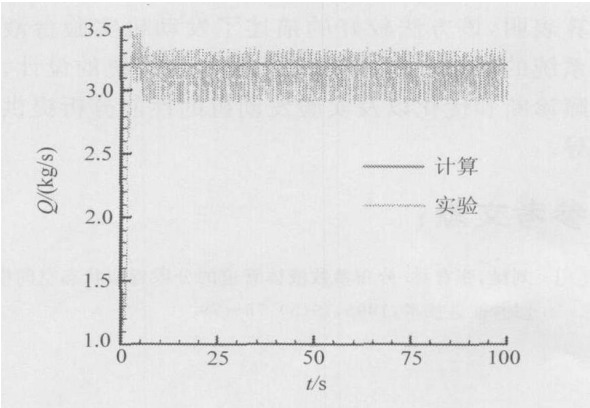


图7 液氢流量变化曲线 (流量计4)

Fig. 7 The flux of liquid hydrogen pipe system (flow meter 4)

图3~图8是某型号发动机实验台液路系统动

果和理论计算结果的对比图。图3~图8给出的结

果曲线,描述了系统由初始流场随着时间的推进收敛到额定工况的动态过程。

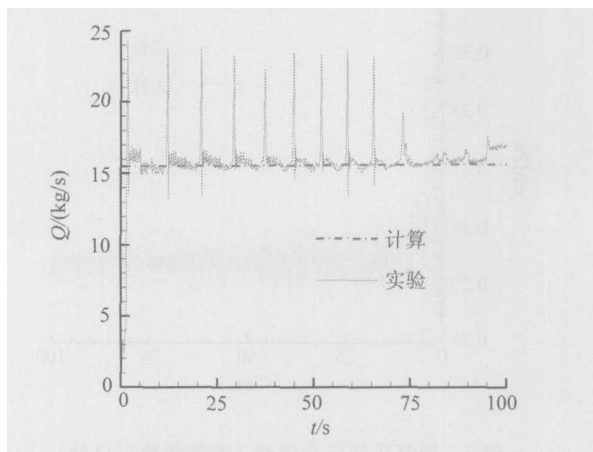


图8 液氧流量变化曲线 (流量计15)

Fig. 8 The flux of liquid oxygen pipe system (flowmeter 15)

从计算结果与实验结果比较来看,计算结果与实验结果总的来说符合得较好,但起动初期偏差稍大,分析其原因可能有以下几个方面:

(1) 未考虑发动机工作后对液路输送系统的影响;

(2) 将贮箱近似作为恒压源处理,其压强、温度不变,而系统实际工作时这些参数是震荡变化的;

(3) 对充填过程所产生的影响考虑还不够充分。

以上问题将在后续工作中考虑。

4 结 论

针对某氢氧发动机实验台液路系统的仿真计算表明,该方法较好的描述了发动机实验台液路系统的动态工作过程,能为实验台系统的设计、故障诊断和优化以及实验发动机的性能分析提供指导。

参考文献:

[1] 刘昆,张育林.分布参数液体管道的分段近似状态空间模型[J].推进技术,1998,19(5):75-79.

Liu Kun, Zhang Yulin. Piecewise Approximation State-Space Models of Distributed Parameter Liquid Pipes[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(5): 75~79.

[2] Margolis D L. Bond Graph Fluid Line Models for Inclusion with Dynamic Systems Simulations [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1979, 308: 255~268.

[3] 刘昆,张育林.一维可压缩流的有限元状态空间模型[J].推进技术,1999,20(5):62~66.

Liu Kun, Zhang Yulin. Finite Elements State-Space Model for One-Dimensional Compressible Fluid Flow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(5): 62~66.

[4] 程谋森,张育林.航天器推进系统管道充填过程动态特性研究(I)理论模型与仿真结果[J].推进技术,2000,21(2):25-28.

Cheng Mousen, Zhang Yulin. Dynamic Characteristics of Priming Process in Spacecraft Propulsion System (I) Theoretical Model and Simulation Result [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(2): 25~28.

[5] 刘昆,张育林.液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J].推进技术,2001,22(1):19~21.

Liu Kun, Zhang Yulin. Finite Element State-Variable Models for the Priming Process of Feed Lines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(1): 19~21.

[6] 程谋森,刘昆,张育林.推进剂供应管路内液体瞬变流一维有限元计算[J].推进技术,2000,21(4):12~15.

Cheng Mousen, Liu Kun, Zhang Yulin. One-Dimensional Finite Element Solutions for Liquid Transients in Propellant Feedlines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(4): 12~15.

[7] 黎勤武,张为华,王振国,李军辉.空间发动机系统关机过程水击现象理论分析[J].推进技术,1998,19(3):27~29.

Li Qinqu, Zhang Weihua, Wang Zhenguo. Theoretical Analyses of Water-Hammering in Shutting Space Engine System [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(3): 27~29.

[8] 聂万胜,陈新华,戴德海等.姿控推进系统发动机关机的管路瞬变特性[J].推进技术,2003,24(1):6~8.

Nie Wansheng, Chen Xinhua, Dai Dehai. Transient Characteristics During Shutdown Operation or Liquid Feed Line for Attitude Control Propulsion Subsystem [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(1): 6~8.

[9] Strand K, Engja H. Bond Graph Interpretation of One-Dimensional Fluid Flow [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1991, 328: 781~793.

[10] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.