

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0014-04

姿控发动机脉冲工作的管路瞬变特性*

聂万胜¹, 陈新华¹, 赵文涛², 庄逢辰¹

(1. 装备指挥技术学院, 北京 101416; 2. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 采用有限差分格式的特征线方法, 对某姿控推进系统发动机真实推进剂管路在脉冲工作情况下的瞬变特性进行了数值研究, 对影响发动机多次脉冲启动的重要参数进行了定量计算, 对比分析了试验结果与计算结果的一致性。说明该方法可方便地对包括许多管路、阀门和推力室的复杂系统进行动态性能分析, 所得结果对于液体火箭发动机管路工程设计具有重要参考价值。

关键词: 瞬变流; 有限差分格式; 特征线方法; 脉冲工况

中图分类号: V434 文献标识码: A

Transient Characteristics During Pulse Operation of Liquid Feed Line for the Attitude Control Rocket Engine

NIE Wan-sheng¹, CHEN Xin-hua¹, ZHAO Wen-tao², ZHUANG Feng-chen¹

(1. Institute of Command and Technology of Equipment, Beijing 101416, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: By means of the finite difference scheme of characteristic method, the transient flows are simulated for the attitude control propulsion subsystem during the pulse operation. The effect of different conditions on dynamic behavior in pulse mode is investigated. The results are agreeable with the test process. The method can be used to analyze the dynamic performance of complex propulsion system consisting of numerous pipes, valves and thrusters. The results are valuable for designers.

Key words: transient flow; finite difference scheme; characteristic method; pulse mode

姿控发动机一般需要多次启动, 也就是能够在脉冲条件下正常工作。但在某姿控发动机 (MMH/NTO 推进剂) 的热试车过程中, 发生了氧化剂倒流而引起不能正常点火的情况。开机 60ms, 关机 60ms, 以这样的脉冲频率进行多次反复试车, 工作正常, 但以开机 30ms, 关机 50ms 的频率进行试车, 则不能点火, 出现了氧化剂回流的现象。针对发动机管路水击特性已有一些有益的探索工作^[1], 但针对复杂管路系统的脉冲瞬变特性研究尚未看到, 本文就是针对某飞船姿控系统脉冲工作时氧化剂和燃料管路的瞬变水击特性, 研究瞬变水击现象对发动机多次启动的影响。

1 管路系统模型及计算方法

文献 [2] 是分析计算瞬变过程的经典著作。本文引入体积流量 $Q = uA$, 来代替速度 u , 简化了方程的形式。得到简化的非定常瞬变流动方程如下:

$$\text{运动方程: } \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fQ}{2DA} |Q| - Ag \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$\text{连续方程: } \frac{1}{\rho} \left(\frac{Q}{A} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \frac{a^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

其中 f 为摩擦系数; A 为管路截面积; D 为管路直径; g 为重力加速度; θ 为管流轴线方向与加速度方向的夹角; a 为管流中的声速。

管路水击波传播过程可认为是等温、粘性不变的弱可压扰动过程, 则波的传播速度由下式给出

* 收稿日期: 2001-10-17
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50176054)
作者简介: 聂万胜 (1969—), 男, 副教授, 博士。

$$a^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{k/\rho}{1 + (k/E)(D/\delta)} \tag{3}$$

其中, k 为推进剂的体积弹性模量, Pa; E 为推进剂输送管路材料的弹性模量, Pa。摩擦系数采用分段的集中参数法, 各段不同, 每段采用集中参数处理。

对于式 (1)、(2) 组成的双曲型偏微分方程组, 本文采用有限差分形式的特征线方法来进行离散计算。

在数值计算过程中, 边界条件的处理非常重要, 这里略去推导过程, 直接给出两种类型的边界条件处理方法, 其它边界条件的处理可参考文献 [3]。

如图 1 所示的三通, x 管路分为 N_x 段, 那么同一时刻的压力、流量满足下列方程

$$P_{x, N_x} = P_{y, 1} = P_{z, 1} \tag{4}$$

$$Q_{x, N_x} = Q_{y, 1} + Q_{z, 1} \tag{5}$$

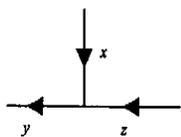


图 1 三通模型
Fig. 1 Pipe junction



图 2 两不同直径管路连接示意图
Fig. 2 Two different diameter pipes

如图 2 为 x 、 y 两管路相接, 因为管路内部液体流速比较小, 远低于声波速度, 管路直径突变的压力损失很小, 略掉这一很小的数值可简化问题。则同一时刻的压力、流量满足:

$$Q_{x, N_x} = Q_{y, 1} \tag{6}$$

$$P_{x, N_x} = P_{y, 1} \tag{7}$$

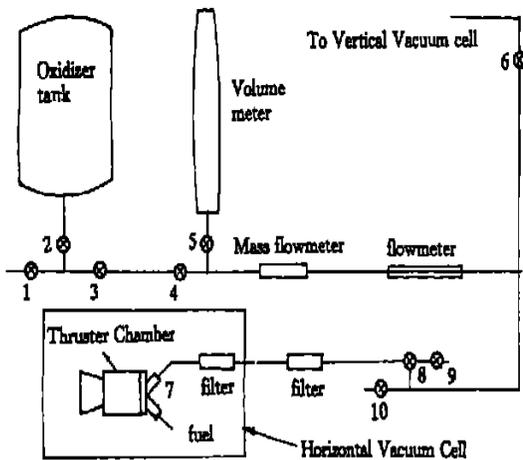


图 3 发动机系统示意图 (燃料管路类似, 略)
Fig. 3 Modular diagram of a thruster (fuel feedlines omitted)

图 3 为某姿控发动机系统的试验管路简化图, 系统中的阀门 1、5、6、9、10 常闭, 阀门 2、3、4、8 常开, 只有活门 7 的打开、关闭控制着发动机的启动和关机。计算中把此系统化为 21 段不同的管路, 如图 4 为管路的编号图, 第 21 段与氧化剂储箱相连, 第 1 段与推力室相连, 其它部分也一一对应。

另外, 由于本管路系统比较复杂, 长短不一, 在瞬变计算时, 时间步长 Δt 的选取必须满足 Courant 稳定性条件, 即 $\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a}$ 。

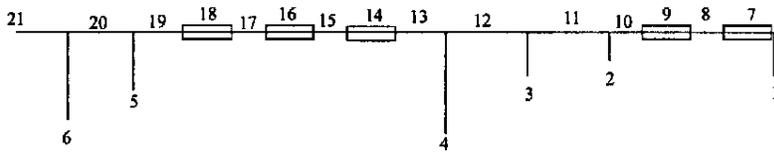


图4 对图3发动机系统进行计算时的管路编号

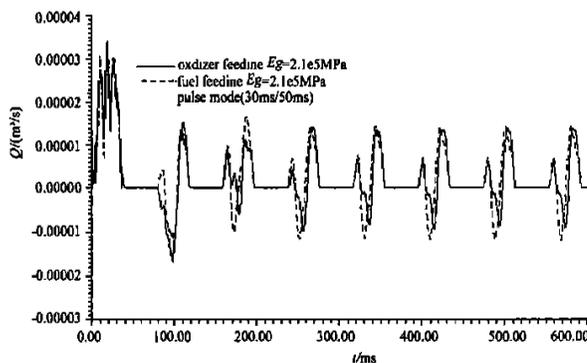
Fig. 4 Series numbers of the feedlines for Fig. 3

2 计算结果分析

由于燃料与氧化剂的供应管路完全相似，所以计算方法与上述完全一样。图5给出了氧化剂和燃料管路系统在活门7关闭时分别在喷注器处的体积流量脉冲瞬变过程，描述的是发动机系统以活门7打开30ms后，关闭50ms，以这样的打开、关闭频率进行多次脉冲启动的体积流量响应过程。活门完全打开、完全关闭所需的时间均为10ms。全系统管路都采用30CrMnSiA，弹性模量 $E_g = 2.1e5MPa$ ，从图5中可以发现，从80ms（一次脉冲周期）到90ms处氧化剂体积流量为负，而燃料体积流量为正，这时正好是发动机第二次脉冲启动时刻，与实际试车结果完全一致，这时发生了氧化剂在喷注器入口处倒流，所以第二次脉冲启动没有点火成功，图7给出了相应于图5情况下的氧化剂、燃料管路在喷注器入口处的压力瞬变过程，可以看出这时（80ms到90ms）的氧化剂管路压力明显低于燃料管路压力，也远低于燃烧室室压，所以氧化剂就会发生倒流。图6给出的是管路弹性模量 $E_g = 2.1e4MPa$ 的计算结果，其它条件与图5完全一样，这时可以在图6中发现从80ms（即与图5相同的第二次脉冲启动开始时刻）到90ms的启动过程，氧化剂和燃料的体积流量都为正，这一点已经在某研究所的试车中得到了验证（把系统管路换成一种弹性模量较小的管，脉冲启动、流量都很正常）。图8为相应于图6情况下的燃料和氧化剂压力瞬变时间历程，从80ms到90ms的第二次脉冲启动处，可以看到氧化剂管路和燃料管路压力非常接近，而且高于这时的燃烧室压力，这些验证了体积分量的分布。

3 结论

通过上述计算结果发现，系统管路的弹性模量对发动机系统的脉冲启动特性影响很大，在脉冲工作频率间隔无法改变的情况下，可以通过改变管路的弹性模量来调节发动机的关机和再启动性能。通过计算瞬变压力变化相对应的时间长短来研究脉冲工作情况下的特点，找到时间差改进设计，进而就可以避免再启动失败的情况发生，提高姿控发动机系统的可靠性。同时本文的计算方法还可以方便地推广到更加复杂的管路系统当中，还可以分析管路长短、粗细等系统结构参数对发动机瞬变特性的影响。

图5 脉冲工作时的推进剂体积流量变化（管路弹性模量 $E_g = 2.1e5MPa$ ）Fig. 5 Volume flow rate time history in pulse mode (flexibility of the pipes: $E_g = 2.1e5MPa$)

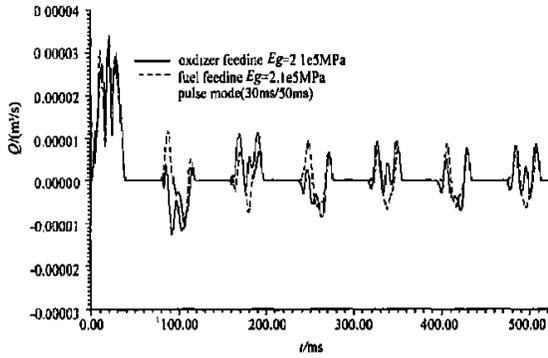


图 6 脉冲工作时的推进剂体积流量变化 (管路弹性模量 $E_g = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)

Fig. 6 Volume flow rate time history in pulse mode (flexibility of the pipes: $E_g = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)

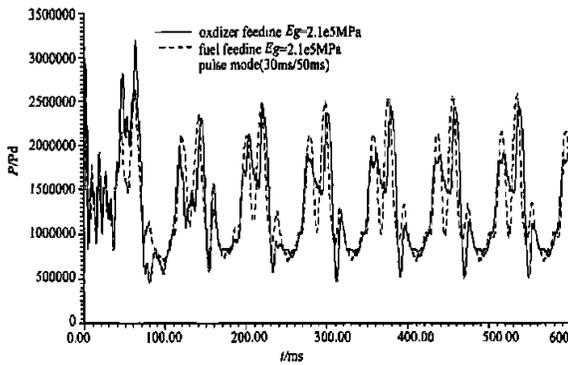


图 7 脉冲工作时的压力时间历程 (管路弹性模量 $E_g = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)

Fig. 7 Pressure time history in pulse mode (flexibility of the pipes: $E_g = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)

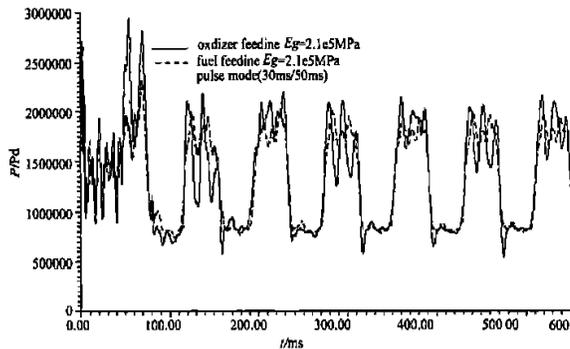


图 8 脉冲工作时的压力时间历程 (管路弹性模量 $E_g = 2.1 \times 10^4 \text{MPa}$)

Fig. 8 Pressure time history in pulse mode (flexibility of the pipes: $E_g = 2.1 \times 10^4 \text{MPa}$)

参考文献:

- [1] Pricatt R P, Mayer E, Hermel J. Water hammer in a spacecraft propellant feed system [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8 (3): 592 - 597.
- [2] 怀利 E B, 斯特里特 V L. 瞬变流 [M]. 清华大学流体传动与控制教研组译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [3] 王克昌, 吕志信. 液体火箭发动机系统原理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.