

# 火箭发动机水击压力数值模拟分析

徐 峰, 刘英元, 陈海峰

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 依据水击理论, 以某液体火箭发动机为例, 采用特征线法建立推进剂供应系统一维流动数学模型, 实现了关机水击数值模拟。实例计算分析了测压导管对水击过程的影响。

**关键词:** 水击压力; 推进剂供应系统; 特征线法; 测压导管

**中图分类号:** V433-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 01-0072-04

## Numerical simulation analysis of water-hammer pressure of rocket engine

XU Feng, LIU Ying-yuan, CHEN Hai-feng

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Taking one liquid rocket engine as example, the characteristic method is adopted to establish a one-dimension mathematical model of the propellant feeding system on the basis of water-hammer pressure theory. The numerical simulation of water-hammer pressure as the engine is shut down. The effect of the manometry conduit on the water-hammer process is computed and analyzed with the example.

**Keywords:** water-hammer pressure; propellant feeding system; characteristic method; manometry conduit

## 0 引言

液体火箭发动机启动、关机过程是十分重要而复杂的瞬变过程。此过程中所有部件几乎都是从静止状态(或工作状态)迅速变为工作状态(或静止状态), 在很短的时间内各种参数都要发生剧烈变化。实践证明发动机的大部分故障是发生在启动和关机这样的瞬变过程中。开、关机过

程中的水击是造成液体推进剂泄漏或发动机出现故障、降低发动机可靠性的原因之一。

## 1 推进剂供应管路流动分析

如何建立数学模型, 理论模拟发动机热试车时的工作状态成为现今试验技术的研究课题。对于定型的发动机试验, 发动机构造基本固定, 相同型号的发动机热试车水击压力的数值变化不是

收稿日期: 2011-07-07; 修回日期: 2011-08-20

作者简介: 徐峰 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术

很大,但对于研制阶段的液体火箭发动机,发动机型号变化较大、管路复杂、接口较多,水击压力在开关机时的冲击很容易造成推进剂管路接口处的破裂、推进剂的泄露,从而影响发动机正常工作。目前获得水击压力的常用方法有分析法(能量法)、图解法和特征线法3种。目前发动机试验常采用图解法,用于判断开关机时泵前水击压力的峰值与谷值,这种方法软件处理响应时间短、图形清晰明了,但无法综合分析影响水击压力数值的全面因素。

结合现有计算机技术,经分析论证采用有限差分特征线法作为数值求解的主要方法。采用龙格库塔法动力学方程,能够获得发动机关机时水击产生的最高压力,分析发动机系统关机水击产生的压力和流量瞬变特性。

现以某液体火箭发动机为例,采用特征线法建立推进剂供应系统一维流动数学模型。液体火箭发动机推进剂输送管路总长度较短,但构成复杂,管路系统中有直管、弯管、异径管和3通等分支管。在同一系统中的管道材料、壁厚和直径可有不同,故水击波的传播速度沿管道而变,这造成了复杂的水击波反射和叠加。实际推进剂供应管路如图1所示,推进剂从恒定压力的储囊压入管道,流量采用阀门控制。因试验需要,引出一路测压导管,其中位置P为测压点。

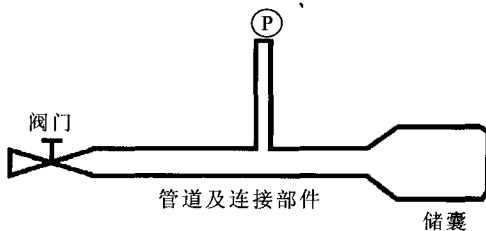


图1 推进剂供应管路

Fig. 1 Propellant feeding pipe

对于图1所示管路,水击一维不稳定流动的运动方程和连续方程分别为:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\lambda}{2D} v |v| = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + [(K/E)(D/\delta)]}} \quad (3)$$

式中:  $h$  为水头,表示压力;  $x$  为距离;  $t$  为时间;  $v$  为流速;  $g$  为重力加速度;  $\lambda$  为摩擦系数;  $D$  为管道直径;  $a$  为管道压力波的波速;  $E$  为管道材料弹性模量;  $K$  为流体体积弹性模量;  $\delta$  为管道壁厚;  $\rho$  为流体密度。

水击运动方程和连续方程是一阶线性偏微分方程,用特征线法转换为常微分方程,可得沿两条特征线的常微分方程组:

1) 沿  $c^+$  特征线

$$\frac{dh}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{a\lambda v |v|}{2gD} = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = +c \quad (4)$$

2) 沿  $c^-$  特征线

$$\frac{dh}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{a\lambda v |v|}{2gD} = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = -c \quad (5)$$

式中:  $c$  为特征值,  $d$  为合定段长度。对公式(4)、(5),分别令  $dh = h_{pi} - h_{i-1}$ ,  $dv = v_{pi} - v_{i-1}$  和  $dh = h_{i+1} - h_{pi}$ ,  $dv = v_{i+1} - v_{pi}$ , 差分离散化可得沿  $c^+$ 、 $c^-$  特征线的单一管路瞬时压力计算式分别为:

$$(h_{pi} - h_{i-1}) + \frac{a}{g} (v_{pi} - v_{i-1}) + \frac{\lambda \Delta x}{2gD} v_{i-1} |v_{i-1}| = 0 \quad (6)$$

$$(h_{pi} - h_{i-1}) - \frac{a}{g} (v_{pi} - v_{i-1}) + \frac{\lambda \Delta x}{2gD} v_{i-1} |v_{i-1}| = 0 \quad (7)$$

式中:  $\Delta x$  为距离步长,且  $\Delta t = \Delta x/c$ ; 下标  $i-1$ 、 $i+1$  分别表示第  $i-1$  和  $i+1$  个节点; 下标  $pi$  表示节点  $i$  在下一个时间步长时的变量。此处  $\Delta t$  为时间步长。

当管道包括端点  $N+1$  个分点的  $v$ ,  $h$  的初值已知时,用公式(5)、(6)可求得网格内部结点的  $h_{pi}$ ,  $v_{pi}$ , 管道两端的  $h_p$ ,  $v_p$ , 则需由公式(5)、(6)及管道两端的边界条件确定。管道两端的基本边界条件如下:

- 1) 上游水击压力  $h_{p1}$  恒定为  $h_0$ ;
- 2) 管道封闭端流量为零,有  $v$  恒等于0;
- 3) 下游阀门  $v_{p(N+1)} = \frac{v_{\max}}{\sqrt{h_1}} \tau_t \sqrt{h_{p(N+1)}}$ ;

此处的  $\tau_i$  为阀门相对开度随时间变化、 $v_{\max}$  为全开时恒定流动时阀门处最大流速、 $h_i$  为此时阀门两端压力差。

分析管道内剧烈的压力瞬变造成的液柱分离, 假设液体中无空气释放, 当管道中某个计算截面的压力低于液体汽化压力时, 液体汽化形成蒸汽穴; 截面保持恒定的蒸汽压力, 截面积为  $A$ 。当空穴存在时, 令  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$  分别为  $\Delta t$  内的平均流入和流出截面的流量, 则空穴体积由  $\Sigma(Q_{out}-Q_{in})$  给定 (求和自汽穴开始出现后进行)。空穴消失时, 由两液柱接触形成的压头增加量用下式表示:

$$\Delta H = \frac{a}{2gA} (Q_{in} - Q_{out})$$

## 2 水击压力数值模拟

采用 Flowmaster 仿真软件对实际推进剂供应系统的管道、阀门、3 通及异径管等各部件建立数学模型。在相应的模块计算中, 管道、弯管及异径管等常规部件的流动阻力从数据库提取, 下游处的电磁阀和 5 通连接管的过流特性数据则用流体模拟通用软件 CFD 获得。取物性参数 20 °C 时推进剂的粘度  $\mu=0.419 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\rho=1445 \text{ kg/m}^3$ , 饱和压力  $p_s=0.102 \text{ MPa}$ ,  $K=1.33 \text{ GPa}$ , 不同材料管道杨氏弹性模量分别为  $E_1=70 \text{ GPa}$ ,  $E_2=115 \text{ GPa}$ 。不同管段的  $a$  根据管道直径和壁厚由公式 (3) 给出, 计算条件为:

- 1) 储囊出口处恒定压力  $p=6 \text{ MPa}$ ;
- 2) 稳态工作推进剂体积流量  $Q=1.8 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- 3) 阀门全开至全关时间  $T=0.3 \text{ ms}$ 。

因管路分段多, 取瞬态计算的  $\Delta t=0.001 \text{ ms}$ , 使时间步长满足瞬态 Courant 在基于 CFD 软件群的思想设计的 FLUENT 流动计算软件下, Courant 是指时间步长和空间步长的相对关系。一般来说, 随着 Courant 的越小, 收敛速度越快, 但稳定性越差。在实际设置的时候, 先设置较小 Courant, 如果稳定性越好, 则适当增加 Courant) 的稳定性条件  $\Delta t/\Delta x \leq 1/a$ 。对不同时间测压点和阀门处水击压力进行试验计算, 计算的压力波传

递周期和最高压力值及其出现时刻与试验结果均吻合; 试验和计算结果都出现了明显的汽穴现象, 水击最小压力为  $0.102 \text{ MPa}$ 。受实际条件和现有设备的影响, 实际结果还需以后进行验证。

## 3 测压导管对水击压力测量的影响

目前常温压力传感器用于低温测量时用测压导管引出, 测压导管的长度在  $0.6 \sim 2 \text{ m}$ 、内径  $6 \sim 8 \text{ mm}$  范围内。通过水击计算, 可以发现测压导管端点的最高压力大于阀门处的最高压力。由图 2~3 可知: 测压点处水击压力最大为  $18.5 \text{ MPa}$ , 关闭阀处水击压力最大为  $16.1 \text{ MPa}$ , 且压力波周期也不一致, 在  $12.5 \text{ ms}$  的计算时间内两者相差 1 个周期。试验测量压力最大为约  $19 \text{ MPa}$ , 压力波的周期与支管端点的计算周期一致。实验结果说明实测压力数据反映的是测压导管端部的压力瞬变特性, 与发动机实际工作时管路内压力瞬变特性有差异。因该系统尺寸相对较小 (管路直径为毫米级, 总长度小于  $300 \text{ mm}$ ) 以及发动机空间结构的限制, 无法直接测量阀门处的压力, 因此若根据测压导管端部压力瞬变数据设计推进剂供应管路, 则存在较大误差。为此, 用实例计算分析测压导管端点压力与阀前压力的关系。

为简化计算, 在推进剂管路实验基础上构建简单分支管计算模型, 如图 2 所示。

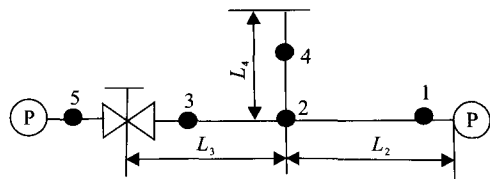


图 2 简单分支管路

Fig. 2 Simple branch pipeline

图中节点 3 和 4 分别为阀门和支管封闭端。计算时流体为推进剂  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $Q=1.28 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ , 上游恒定工作压力  $p=6 \text{ MPa}$ , 主管总长  $L=L_2+L_3=600 \text{ mm}$ , 取波速  $a=920 \text{ m/s}$ , 使用电磁阀, 关闭时间  $T=0.3 \text{ ms}$ 。

经过试验验证: 与无支管相比, 有支管时因

封闭端压力波反射会使阀门处水击压力的升高; 总体来说, 支管越短, 对阀门处水击压力的影响就越小, 且支管端部压力越接近阀门处的真实水击压力; 支管内的流体汽化对支管封闭端压力的影响较大, 使之明显异于阀门处压力, 且支管直径越小, 发生汽化的可能性和强度也大。

由图 2 可知: 当  $L_4/L_3=0.5$ ,  $d_4/d_3=1$  时分支管对阀门处水击压力影响最大, 产生的最高水击压力为 12 MPa, 较无支管时最高水击压力 (9.4 MPa) 增加了 28%。分析表明: 测压导管对原管路水击压力的影响较大, 且附加测压导管后最高压力测量值均大于实际最高压力; 当主管路无汽化时, 测压导管端部也可能出现汽化, 使压力瞬变复杂化, 增大测量压力与实际压力偏差; 对小尺寸管路系统, 应尽可能避免使用小直径长测压导管, 如确有需要, 应合理选择长度和直径, 尽可能减小测量值与真实值的偏差。

## 4 结束语

本文利用特征线法对推进剂供应系统一维流动的理论数学模型, 用 Flowmaster 模拟软件进行关机水击数值模拟, 并通过理论分析测压导管不

同点的水击压力, 确定出测压导管对原管路水击压力的影响。由于流体计算的复杂性和发动机管路结构的多样性, 本文仅对一种实例进行了简单的理论分析, 是否对各种发动机管路均有好的模拟结果, 还需要对此法进一步考核和研究。

### 参考文献:

- [1] 胡平信, 刘国球. 液体火箭发动机的技术发展和展望[J]. 导弹与航天运载技术, 1998, 27(2): 12-17.
- [2] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(10): 23-26.
- [3] 黎勤武, 张为华, 王振国, 等. 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): 27-30.
- [4] 聂万胜, 戴德海, 夏鹏. 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): 628-630.
- [5] WYLIE E B, STREETER V L. Fluidtransients [M]. New York: McGraw2Hill Inc., 1978.
- [6] JENNINGS P C, PEDDIESON J, MUNUKUTLA S. New exact solution for fluid transients [J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32(3): 59-72.
- [7] 侯咏梅. 水头损失对水击计算的影响分析[J]. 河南科学, 2003, 21(3): 304-307.
- [8] 李治勤. 流速及管道特性对水击的影响[J]. 太原理工大学学报, 2000, 3(2): 156-158.

(编辑: 马 杰)

(上接第 71 页)

- [2] 蒋焕文, 孙续. 电子测量(第二版)[M]. 北京: 中国计量出版社, 1988.
- [3] 刘仁普. 摩托罗拉线性与接口电路手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994, 12.
- [5] 王宁, 姚焯道. 单片机控制的 PWM 斩波式交流稳压电源[J]. 电子技术应用, 2002 (6): 25-26.
- [6] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源使用技术-设计与应用(第二版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

(编辑: 王建喜)