

文章编号: 1004-7182(2006)05-0045-05

# 减压阀充填过程动态特性仿真

陈晓琴

(北京航天动力研究所, 北京, 100076)

**摘要:**通过建立减压阀充填过程动态数学模型, 进行非线性仿真计算, 得出减压阀以及管路中各腔压力响应特性, 进而用过渡时间及超调量分析减压阀的稳定性, 给出减压阀结构参数和工作参数对动态特性的影响。

**关键词:**火箭发动机; 减压阀; 仿真; 稳定性

中图分类号: V43 文献标识码: A

## Dynamic Simulation of the Pressure Reducing Valve in Filling Conditions

Chen Xiaoqin

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing, 100076)

**Abstract:** A nonlinear simulating computation is performed by establishing a dynamic mathematical model of the pressure reducing valve in filling process, to characterize the pressure response in the valve and in piping of the system. The stability of the pressure reducing valve are analyzed by the transit time and the overshoot. The influences of several structure parameters and operating parameters on dynamic behavior of the valve are also given.

**Key Words:** Rocket engine; Pressure reducing valve; Simulating; Stability

### 1 前言

减压阀充填是将气源的高压减低并稳定到所需的压力, 在出口电磁阀打开时给下游的被控阀容腔提供操纵气, 其动态特性是当有外界干扰时(此处为出口电磁阀突然打开), 减压阀内部各腔压力的响应特性。当进出口压力高、流量大、介质为氦气时, 减压阀更容易发生振动, 进而激发整个系统发生强烈共振。目前减压阀动态特性没有成熟的理论计算方法, 工程设计中常靠经验估计, 参加试车的产品必须通过耗费大量资金进行氦气筛选。因此, 进行减压阀动态特性定量研究是急待解决的重要课题。

好坏的一个重要指标, 而动态特性与其结构、工作参数、试验系统密切相关。减压阀充填系统见图 1, 虚线框中为减压阀原理图。

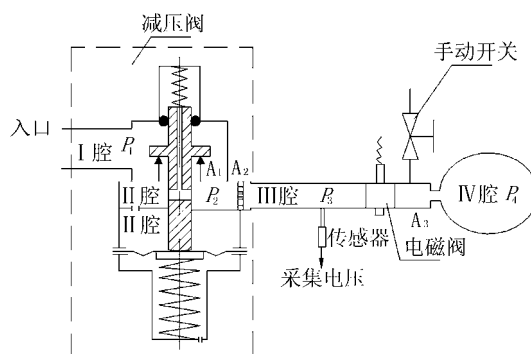


图 1 减压阀充填系统

### 2 动态特性分析

减压阀充填时的动态响应特性是衡量减压阀

收稿日期: 2005-08-09

作者简介: 陈晓琴(1974-), 女, 工程师, 主要从事液体火箭发动机阀门的研制工作

文中各参数的含义见表1。

表1 各参数含义

物理量	意义	物理量	意义	物理量	意义	物理量	意义
$A_2$	从II腔流入III腔的流通面积	$A_3$	从III腔流入IV腔的流通面积	$a_3$	III腔气体声速	$a_4$	IV腔气体声速
$a_1$	I腔气体声速	$a_2$	II腔气体声速	$m$	运动部件总质量	$R$	气体常数
$C_{d1}$	从I腔流入II腔的流量系数	$C_{d2}$	从II腔流入III腔的流量系数	$P_{10}$	额定状态时I腔气体压强	$P_{20}$	额定状态时II腔气体压强
$C_{d3}$	从III腔流入IV腔的流量系数	$C_{st}$	稳态流动等效刚度	$P_1$	I腔气体压强	$P_2$	II腔气体压强
$C_{st0}$	额定状态稳态流动等效刚度	$C$	总刚度	$P_3$	III腔气体压强	$P_4$	IV腔气体压强
$S_1$	阀座口径 $D_1$ 对应的面积	$S_2$	卸荷直径 $D_2$ 对应的面积	$D_1$ ( $A_1$ )	阀座口径 (节流面积)	$k$	气体绝热指数
$S_m$	膜片的有效面积	$x_0$	额定状态时阀芯开度	$V_3$	III腔容积	$V_4$	IV腔容积
$S_3$	阀芯下端直径 $D_3$ 对应的面积	$x$	阀芯开度	$\beta$	阻尼系数	$V_{20}$	额定状态时II腔容积

## 2.1 数学模型的建立

对研究的问题,作如下几点假设:

- 工作介质为理想气体;
- 气体在减压阀内的流动为等熵流动;
- 气体的节流过程为绝热过程;
- 忽略流体流动的沿程损失;
- 忽略重力对运动部件的影响;
- 比热比为常数;
- 同一时刻,各腔内的压力场和温度场均匀;
- 不计密封比压的影响,即开度 $x=0$ 时,流量 $G_1=0$ 。

在上述假设基础上,利用气体动力学和热力学的相关理论建立流量方程、状态方程、连续方程、能量方程和运动部件的运动方程,最后化简联立成两个方程组,通过仿真计算出动态响应特性,并对其进行分析。

为方便书写,记:

$$f_{ij} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \left[ \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_i}{P_j} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] & \left( \frac{P_i}{P_j} \right) > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\frac{k}{R}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} & \left( \frac{P_i}{P_j} \right) \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases};$$

$i=2, 3, 4; j=1, 2, 3$ 。

### 2.1.1 流量方程

- 阀口流量方程:  $G_1 = \frac{C_{d1} \pi D_1 x P_1}{\sqrt{T_1}} f_{21}$
- 出口流量方程:  $G_2 = \frac{C_{d2} A_2 P_2}{\sqrt{T_2}} f_{32}$
- 充填容器流量方程:  $G_3 = \frac{C_{d3} A_3 P_3}{\sqrt{T_3}} f_{43}$

### 2.1.2 状态方程

- II腔气体状态方程。

由于流动过程为绝热过程,则有:

$$a_2 = \sqrt{kRT_2}$$

理想气体的状态方程为

$$P_2 [V_{20} - x(S_2 + S_3 - S_1)] = M_2 RT_2$$

对上式进行微分,得:

$$\begin{aligned} \frac{dM_2}{dt} &= \frac{k[V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)]}{a_2^2} \frac{dP_2}{dt} - \\ &\quad \frac{2kP_2[V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)]}{a_2^3} \frac{da_2}{dt} - \\ &\quad \frac{kP_2}{a_2^2} (S_2 - S_1 + S_m) \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

b) III腔气体状态方程 ( $\frac{dV_3}{dt} = 0$ )。

$$\frac{dM_3}{dt} = \frac{kV_3}{a_3^2} \frac{dP_3}{dt} - \frac{2kP_3V_3}{a_3^3} \frac{da_3}{dt}$$

c) IV腔气体状态方程 ( $\frac{dV_4}{dt} = 0$ )。

$$\frac{dM_4}{dt} = \frac{kV_4}{a_4^2} \frac{dP_4}{dt} - \frac{2kP_4V_4}{a_4^3} \frac{da_4}{dt}$$

### 2.1.3 连续方程

II腔、III腔、IV腔连续方程分别为

$$\frac{dM_2}{dt} = G_1 - G_2; \quad \frac{dM_3}{dt} = G_2 - G_3; \quad \frac{dM_4}{dt} = G_3$$

### 2.1.4 能量方程

设研究的某容腔内气体容积为  $V_n$ 、压力为  $P_n$ 、温度为  $T_n$ 、流入(流出)气体的流量和温度为  $G_\lambda$ 、 $T_\lambda$  ( $G_\lambda$ ,  $T_\lambda$ )，则该研究对象的热力学第一定律方程为

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{k}{V_n} \left( RT_\lambda G_\lambda - RT_\lambda G_\lambda - P_n \frac{dV_n}{dt} + \frac{k-1}{k} \frac{dQ_T}{dt} \right)$$

如果热量导入气体,  $Q_T$  为正值, 热量导出气体,  $Q_T$  为负值。

考虑  $Q_T=0$  时, II腔气体:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{k}{V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)} [RT_1 G_1 - RT_2 G_2 + P_2(S_2 - S_1 + S_m) \frac{dx}{dt}]$$

III腔气体:

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{k}{V_3} (RT_2 G_2 - RT_3 G_3)$$

IV腔气体:

$$\frac{dP_4}{dt} = \frac{k}{V_4} (RT_3 G_3 - P_4 \frac{dV_4}{dt}) = \frac{k}{V_4} RT_3 G_3$$

### 2.1.5 运动部件的运动方程

运动部件的运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + C(x - x_0) + (C_{st} x - C_{st0} x_0) + (P_1 - P_{10})(S_1 - S_2) - (P_2 - P_{20})(S_1 - S_2 - S_m) = 0$$

### 2.1.6 基本方程化简

将 2.1.1~2.1.5 节的方程化简成下列方程组:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + C(x - x_0) + (C_{st} x - C_{st0} x_0) + (P_1 - P_{10})(S_1 - S_2) - (P_2 - P_{20})(S_1 - S_2 - S_m) = 0 \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{k}{V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)} \left[ \frac{RC_{d1} \pi D_1 x P_1 a_1 f_{21}}{\sqrt{kR}} - \frac{RC_{d2} A_2 P_2 a_2 f_{32}}{\sqrt{kR}} + P_2(S_2 - S_1 + S_m) \frac{dx}{dt} \right] \\ \frac{k[V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)]}{a_2^2} \frac{dP_2}{dt} - \frac{2kP_2[V_{20} - x(S_2 - S_1 + S_m)]}{a_2^3} \frac{da_2}{dt} - \frac{kP_2}{a_2^2} (S_2 - S_1 + S_m) \frac{dx}{dt} = \frac{C_{d1} \pi D_1 x P_1 \sqrt{kR}}{a_1} f_{21} - \frac{C_{d2} A_2 P_2 \sqrt{kR}}{a_2} f_{32} \\ \frac{dP_3}{dt} = \frac{\sqrt{kR}}{V_3} (C_{d2} A_2 P_2 a_2 f_{32} - C_{d3} A_3 P_3 a_3 f_{43}) \\ \frac{kV_3}{a_3^2} \frac{dP_3}{dt} - \frac{2kP_3V_3}{a_3^3} \frac{da_3}{dt} = \frac{C_{d2} A_2 P_2 f_{32} \sqrt{kR}}{a_2} - \frac{C_{d3} A_3 P_3 f_{43} \sqrt{kR}}{a_3} \\ \frac{dP_4}{dt} = \frac{\sqrt{kR}}{V_4} C_{d3} A_3 P_3 a_3 f_{43} \\ \frac{kV_4}{a_4^2} \frac{dP_4}{dt} - \frac{2kP_4V_4}{a_4^3} \frac{da_4}{dt} = \frac{C_{d3} A_3 P_3 f_{43} \sqrt{kR}}{a_3} \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 非线性计算及验证

建立减压阀充填数学模型后, 进行非线性分析。利用计算机进行数值求解, 从而分析各变量响应的动态特性。在该过程中  $A_3$  是自变量, 其它变量为因变量, 且由于减压阀充填过程  $P_1$ ,  $a_1$  变化很

小, 所以可视为常量处理。用四阶龙格-库塔法求解式(1), 计算结果和试验结果对比如图2所示。图2显示计算结果与试验测量结果趋势一致, 充填过程中  $P_3$  下降的最低点、下降所需的时间以及从最低点恢复到平衡的时间等参数相差不多, 可见减压阀

充填的动态数学模型正确。但由于数据测量有一定误差、减压阀起始点的静特性值有漂移、容积  $V_3$  的计算误差等因素,导致了计算结果与试验结果不能完全重合。图中还显示空气的响应时间比氦气慢。

由于  $P_2$  难以测量,根据图 2 中  $P_3$  计算值与试验值趋势的一致性,可以认为用  $P_2$  的计算值来分析减压阀出口压力的响应是可信的,具体响应见图 3。图 3 显示氦气介质中  $P_2$  剧烈振荡,随着时间推移振荡幅度递减,而空气介质中  $P_2$  相对较稳定,这一点与实际试验情况相符。

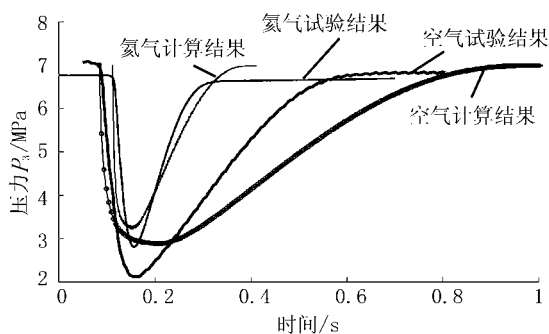


图 2 计算结果和试验结果对比

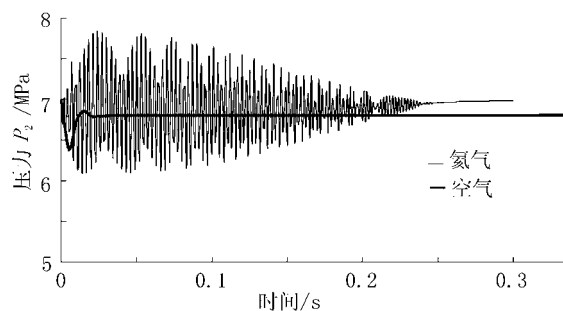


图 3  $P_2$  计算值

现定义最大超调量  $M_p$  为变量值与稳态值的最大差值相对于稳态值的百分比;定义调整时间  $t_s$  为变量达到稳定值经历的时间。根据  $M_p$  和  $t_s$  的大小可清晰判断减压阀响应的稳定性,  $M_p$  和  $t_s$  越大则稳定性越差。根据以上定义,氦气介质中  $P_2$  的  $M_p$  分别为 12%,  $t_s$  约 0.25 s。空气介质中  $P_2$  的  $M_p$  分别为 6%,  $t_s$  约为 0.025 s。

### 2.3 动态特性影响因素分析

根据建立的动态数学模型,以氦气介质为例分析影响减压阀响应性能的主要因素,非线性计算的结果见表 2。

表 2 各影响因素计算结果统计表

参数变化	$P_2$ 的 $M_p$ 值	$P_2$ 的 $t_s$ 值/s	参数变化	$P_2$ 的 $M_p$ 值	$P_2$ 的 $t_s$ 值/s
按现结构参数	12%	0.25	增加 $V_2$ , 使 $V_2=3 \times 10^{-7} \text{ m}^3$	1.4%	0.1s
增加 $C$ , 使 $C=3\ 500 \text{ N/mm}$	9.7%	0.2	减小 $V_2$ , 使 $V_2=1 \times 10^{-7} \text{ m}^3$	21.4%	0.25
减小 $C$ , 使 $C=2\ 000 \text{ N/mm}$	21.4%	0.25	增加 $P_1$ , 使 $P_1=30 \text{ MPa}$	18.8%	0.248
减小 $S_m$ , 使 $S_m=500 \text{ mm}^2$	9.7%	0.18	减小 $P_1$ , 使 $P_1=15 \text{ MPa}$	0.4%	0.02
增加 $S_m$ , 使 $S_m=1\ 000 \text{ mm}^2$	18.1%	0.25	增加 $P_{20}$ , 使 $P_{20}=12 \text{ MPa}$	11.94%	0.241
减小 $V_3$ , 使 $V_3=4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$	12%	0.25	减小 $P_{20}$ , 使 $P_{20}=4 \text{ MPa}$	12.9%	0.252
增加 $V_3$ , 使 $V_3=5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	12%	0.25	取消孔板(即 $A_2$ 为管道面积) $A_2=50 \text{ mm}^2$	见图 4	

表2显示 $M_P$ ,  $t_s$ 有明显变化的是:

a) 增加 $C$ 使 $P_2$ 的 $M_P$ 减小为9.7%, 反之使 $P_2$ 的 $M_P$ 增为21.4%。

b) 减小 $S_m$ 使 $P_2$ 的 $M_P$ 减小为9.7%,  $t_s$ 缩短为0.18 s; 反之使 $P_2$ 的 $M_P$ 增加为18.1%。

c) 增加 $V_2$ 使 $P_2$ 的 $M_P$ 减小为1.4%,  $t_s$ 缩短为0.1 s; 反之使 $P_2$ 的 $M_P$ 增加为21.4%。

d) 增加 $P_1$ 使 $P_2$ 的 $M_P$ 增加为18.8%, 反之使 $P_2$ 的 $M_P$ 减小为0.4%,  $t_s$ 缩短为0.02 s;

e) 取消孔板(面积 $A_2$ )可使 $P_2$ 的响应曲线很光滑。

### 3 结 论

本文建立减压阀充填的动态数学模型, 计算减压阀及管路中各腔压力响应, 并与试验结果进行比较。试验结果验证了计算模型的合理性, 并分析单独改变某一参数对各压力的影响, 从中得出如下结论:

a) 空气比氦气稳定;

b) 增加刚度、减小敏感面积以及增加低压腔容积均能减小低压腔压力的振动幅度, 有利于稳定;

c) 降低入口压力有利于稳定, 反之不利于稳定, 且影响幅度较大;

d) 增加出口压力即减小压比 $\frac{P_1}{P_2}$ 有利于稳定,

反之不利于稳定, 但影响程度较小;

e) 节流孔板尽量远离减压阀, 则大大增加低压腔容积, 减小压力振荡, 缩短调整时间, 有利于稳定(见图4)。

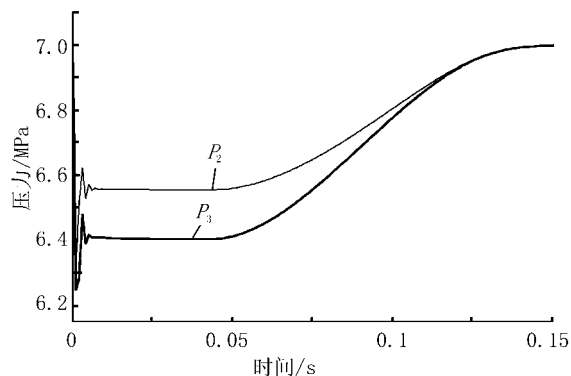


图4 取消孔板响应曲线

### 参 考 文 献

- 1 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.
- 2 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 长沙: 国防工业大学出版社, 1992.
- 3 吴重光. 仿真技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- 4 张圣华. C语言数值算法[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- 5 冯康. 数值计算方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- 6 邢耀国. 火箭发动机控制工程[M]. 大连: 海军航空工程学院, 1997.

## 俄罗斯第聂伯运载火箭坠毁

北京时间2006年07月27日3时43分。俄罗斯的第聂伯运载火箭从哈萨克斯坦拜科努尔发射场点火升空, 不久后发生故障坠毁。火箭载有的18颗卫星全部报废。

第1级火箭在升空74 s后出现了问题, 86 s时, 应在升空后96 s关机的第1级发动机提前关机。导致火箭坠毁在哈萨克斯坦与乌兹别克斯坦的边境地区。

事后, 有关部门成立了事故调查组, 对发射失败原因进行调查。负责调查第聂伯火箭坠毁原因的俄罗斯跨部门委员会8月30日公布了事故最终调查结果: 火箭发动机内的1

个液压作动装置发生故障是导致火箭坠毁的根本原因。

跨部门委员会认为, 液压作动装置发生故障很可能是因为火箭表面隔热层被破坏, 导致发动机燃料温度过高, 而引起液压作动装置失灵。委员会因此建议, 今后在发射第聂伯火箭前必须先对火箭隔热层进行检查。

第聂伯运载火箭是一种三级运载火箭, 长约34 m, 由退役的RS-20洲际弹道导弹(SS-18撒旦)改装而成。此次发射之前一直保持着良好的飞行成功记录。

(尚 辉 供稿)