

# 远程高压大流量减压阀的研制

姬俊锋, 林 萌, 吴光中, 康淑婷  
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 研制一种远程、先导式高压大流量减压阀; 介绍了该减压阀特点, 建立了减压阀数学模型, 利用 Matlab 进行该减压阀动力学仿真, 研究各个参数对减压阀性能的影响。根据仿真结果, 加工了一台实物产品。搭建了减压阀性能测试试验台, 分析了压力、流量特性, 并和仿真做了比较。结果表明: 仿真和试验符合的比较好, 说明仿真对减压阀的研制与分析具有指导作用。该减压阀使用方便, 安全、可靠, 已经用于数个试验中。

**关键词:** 高压大流量减压阀; 动力学仿真; 数学模型

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 03-0056-07

## Development of remote high-pressure mass flow reducing valve

Ji Junfeng, Lin Meng, Wu Guangzhong, Kang Shuting  
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** A new kind of remote and pilot-operated type high-pressure mass flow reducing valve was developed. The characteristics of this reducing valve are introduced. A mathematical model of the reducing valve was built. Dynamic simulation of the reducing valve was done with Matlab. The effect of each parameter on the reducing valve performance was studied. According to the simulation result, a real reducing valve was manufactured. A reducing valve capability test bed was built. The pressure and flux characteristic were analyzed and compared with the simulation. The result demonstrates that the test result is coincident with simulation results quite well, which indicates that the simulation has guiding function for development and analysis of the reducing valve. The reducing valve is easy to use, safe and credible. It has been employed in a number of tests.

**Keywords:** high-pressure mass flow reducing valve; dynamics simulation; mathematic model

### 0 引言

减压阀是气动系统中的重要元件之一<sup>[1-2]</sup>。在液体火箭发动机系统中, 减压阀是重要的压力调

节部件。储存于高压气瓶内的气体经气体减压阀节流减压为较低且恒定的输出压力, 以压力损失为代价实现减压, 使整个发动机系统具有稳定的工作特性<sup>[3]</sup>。减压阀必须保持稳定的参数输出<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2016-01-31; 修回日期: 2016-03-16

作者简介: 姬俊锋 (1981—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机

通过仿真的方法研究特性, 可以为减压阀优化改进设计提供一定的依据, 并能减少试验次数, 降低研制成本<sup>[5-6]</sup>。

西安十一所在减压器研制方面做了大量工作。在仿真方面, 尤裕荣<sup>[4,7]</sup>对减压阀做了全面、深入的理论分析工作。他的动力学分析涉及了气体作用力、弹性力、阻尼力, 还有非线性因素, 诸如摩擦力, 气体稳态、瞬态作用力, 涵盖了减压阀的各项主要影响因素。国防科大研制了大流量减压阀。对自主研制的气体减压阀, 建立了数学模型, 研究了减压阀的静态特性、稳定性和响应特性<sup>[6]</sup>。北京航空航天大学大学的张雪梅等建立了液体火箭发动机常用的反向卸荷式减压阀的动态数学模型, 采用四阶龙格-库塔方法进行了数值仿真, 分析了减压阀在启动增压过程中的动态特性<sup>[5]</sup>。此外, 一些研究者利用 Matlab/Simulink 软件对平衡式气动减压阀动态特性、航空供氧减压阀进行数值仿真和研究, 获取了气动减压阀动、静态性能, 为减压阀的设计和改进行提供强有力的理论支撑<sup>[2,7-8]</sup>。

本文研究了一种先导式、高压大流量减压阀。通过仿真, 获得了各个参数对减压阀性能的影响, 继而研制一台高压、大流量减压阀。试验结果表明, 高压、大流量减压阀安全、性能可靠。该阀已用于多类试验中。

## 1 工作原理

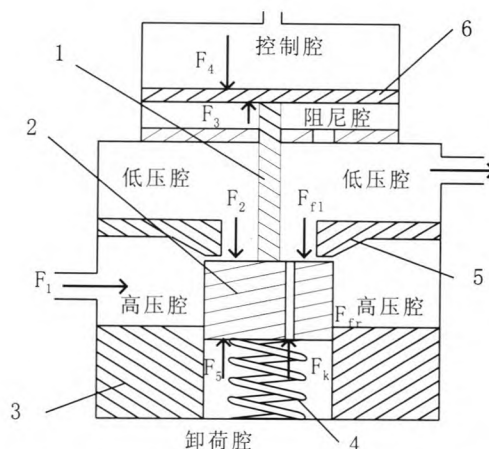
如图 1 所示, 所研制的减压阀是逆向、先导薄膜式减压阀。

该减压阀具有以下特点:

- 1) 远程通过先导阀为主阀控制腔注入控制气, 不需要人员去现场调压;
- 2) 高压气垂直于阀芯, 对阀芯轴向无作用力, 出口压力不受入口压力影响;
- 3) 非金属膜片, 膜片力可以忽略不计; 而且膜片预压缩, 阀门打开的方向是膜片解除压缩的方向;
- 4) 设计了保护膜片的压盘, 使膜片不至于受剪切力而失效。

考虑阀芯受力, 以向下为正:

$$F_{\text{合力}} = F_4 + F_2 - F_3 - F_5 - F_k \pm F_f + F_n \quad (1)$$



1-阀杆; 2-阀芯; 3-阀体; 4-弹簧; 5-阀座; 6-膜片;  
 $F_1$ -高压气源作用力;  $F_2$ -低压腔作用在阀芯上的力;  
 $F_3$ -阻尼腔作用力;  $F_4$ -控制腔力;  $F_5$ -卸荷腔作用在  
 阀芯上的力;  $F_k$ -弹簧力;  $F_f$ -摩擦力<sup>[6]</sup>, 与运动  
 方向相反;  $F_n$ -流体流动作用力<sup>[4]</sup>

图 1 减压阀原理图

Fig. 1 Principle diagram of reducing valve

## 2 数学模型

### 2.1 模型假设

- 1) 工作介质为理想气体, 满足理想气体状态方程;
- 2) 介质通过气动减压阀可以看成等效收缩喷嘴流动来计算;
- 3) 忽略工作过程的温度变化;
- 4) 忽略了活动部件的重力;
- 5) 阀腔内气体参数采用集中参数法来描述;
- 6) 气源压力保持不变。

### 2.2 流量方程

对于气体流过减压阀的节流口或限流孔时, 一般情况下, 可将孔口近似当作收缩喷嘴来处理, 因此可按文献 [11] 处理。

### 2.3 质量守恒方程

根据质量守恒定律, 在任何瞬时, 流出控制体的质量流量等于控制体内的质量对时间的减少量, 则控制体内的质量守恒方程为:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

式中:  $\dot{m}$  为气体质量流量;  $M_g$  为气体质量。

联立理想气体状态方程:

$$p_i = \frac{M_i}{V_i} R_g T \quad (3)$$

式中:  $p_i$  为各个腔的压力, Pa;  $M_i$  为各个腔的气体质量, kg;  $R_g$  为气体常数;  $T$  为气体温度, K。把 (3) 式代到 (2) 式中, 就得到各个腔体的质量守恒方程。

## 2.4 活动部件的运动方程

减压阀阀芯的运动微分方程:

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX = F_{\text{合力}} \quad (4)$$

式中:  $M$  为活动部件质量, kg;  $K$  为弹簧刚度, N/m;  $C$  为阻尼系数,  $C = \lambda \cdot K$ , N/m;  $\lambda$  为常数;  $X$  为阀芯行程, m。

## 3 仿真研究

以上述所建立的数学模型为基础, 采用四阶龙格-库塔数值方法, 运用 Matlab 编程进行仿真, 研究了各个参数对减压阀动态性能所产生的影响。气体介质采用氮气, 入口压力: 10 MPa; 出口压力: 5 MPa; 下游模拟串联孔板, 孔板喉径 16 mm。模拟 2 s 后, 下游阀门突然打开, 减压阀开始工作。

### 3.1 阻尼孔喉径对阀门动态特性的影响

图 2 为不同阻尼腔喉径对阀门动态特性的影响情况。

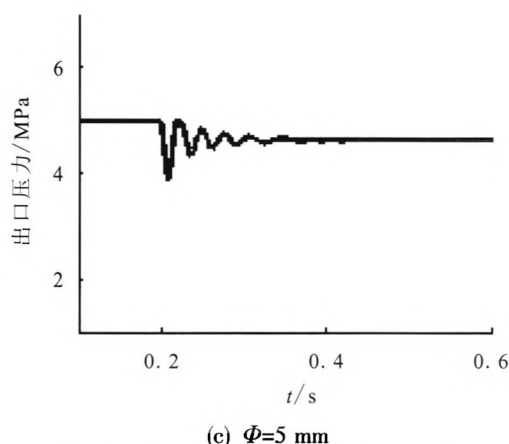
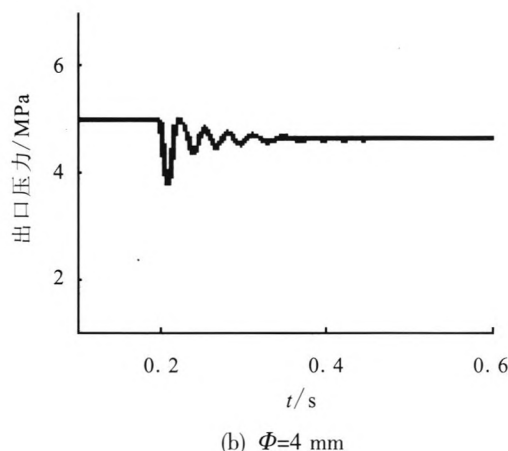
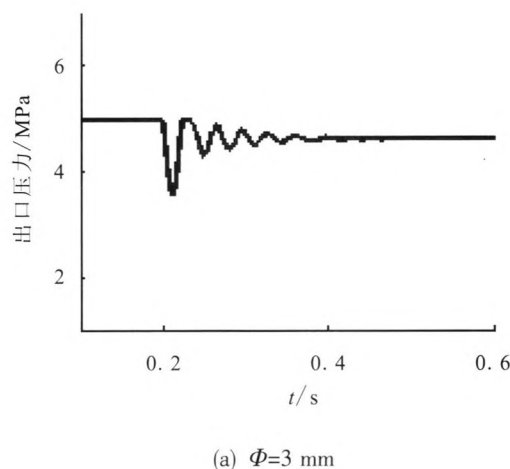


图 2 阻尼腔喉径对阀门动态特性的影响

Fig. 2 Effect of throat diameter of damp cavity on dynamic characteristics of reducing valve

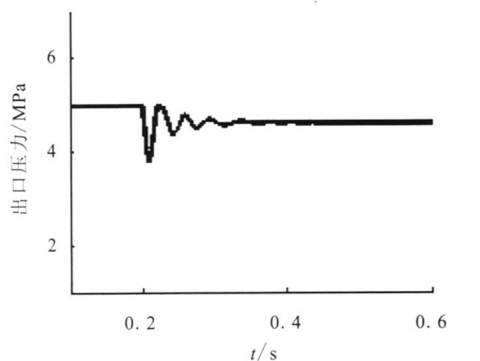
下游阀门打开到稳定的时间基本一样。但是超调量和频率不一样。尺寸越小, 超调量越大, 频率越低。当下游阀门打开的时候, 先是出口腔压力下降, 然后阻尼腔气体通过阻尼孔到出口腔, 阻尼腔喉径越小, 阻尼腔压力下降的越慢, 减压阀打开就越慢, 减压阀补气就越慢, 所以出口腔压力下降的幅度大。

图 2 设阻尼孔喉径符号  $\Phi$ , 单位 mm; 其他参数:  $K=20$  N/mm,  $M=0.5$  kg,  $\lambda=0.24$ 。

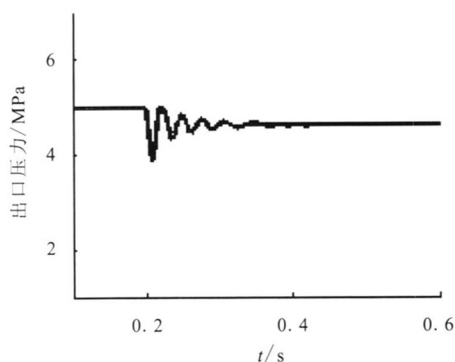
### 3.2 弹簧刚度对阀门动态特性的影响

图 3 为不同弹簧刚度对阀门动态特性的影响情况 (其他参数:  $\Phi=5$  mm,  $M=0.5$  kg,  $\lambda=0.24$ )。刚度越小, 震荡幅度减小, 震荡频率增加, 震荡时间加长。震荡幅度减小是因为弹簧刚度小会在阻尼腔压力下降不大时顶开阀芯, 阀门

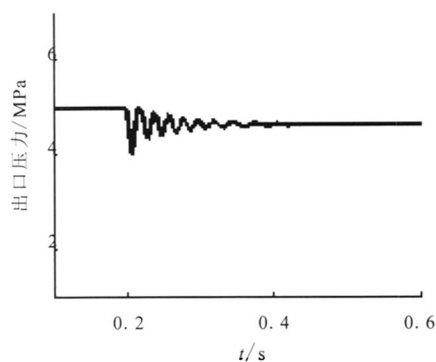
打开, 补气迅速, 出口腔压力迅速恢复。但是, 刚度小又会造成稳定时间长的问题。



(a)  $K=30$  N/mm



(b)  $K=20$  N/mm



(c)  $K=10$  N/mm

图 3 弹簧刚度对阀门动态特性的影响

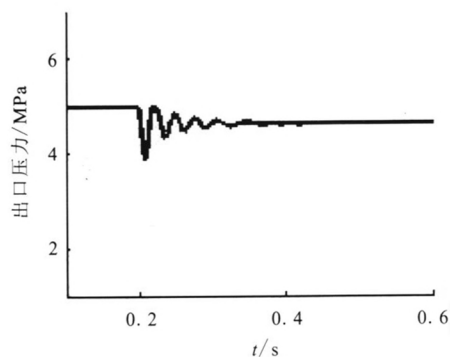
Fig. 3 Effect of spring stiffness on dynamic characteristics of reducing valve

### 3.3 活动部件质量对阀门动态特性的影响

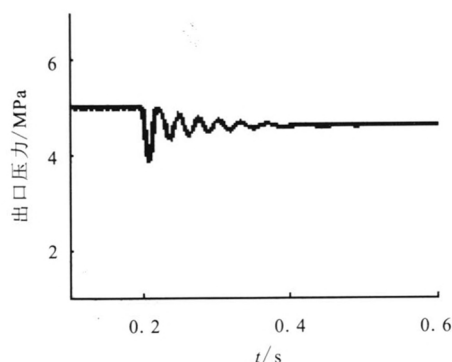
图 4 为不同活动部件质量对阀门动态特性影响的情况 (其他参数:  $\Phi=5$  mm,  $K=20$  N/mm,  $\lambda=0.24$ )。

如图 4 所示, 震荡频率基本一样, 活动部件

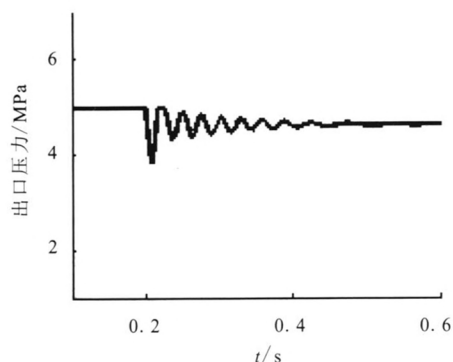
质量越小, 震荡幅度越大, 震荡时间也缩短。活动部件质量小, 根据公式 (4), 相当于弹簧刚度和阻尼系数变大。



(a)  $M=0.5$  kg



(b)  $M=1$  kg



(c)  $M=1.5$  kg

图 4 活动部件质量对阀门动态特性的影响

Fig. 4 Effect of quality of moving part on dynamic characteristics of reducing valve

### 3.4 阻尼系数对阀门动态特性的影响

图 5 所示为阻尼系数对阀门动态特性影响 (其他参数:  $\Phi=5$  mm,  $K=20$  N/mm,  $M=0.5$  kg)。如图 5 所示, 阻尼系数越大, 稳定性越好, 振荡

会在短时间之内停止。下游开阀相当于流量突然变化,之后振荡减弱并逐渐稳定下来,就是由于有阻尼的作用。阻尼系数的大小对减压阀稳定性是至关重要的<sup>[12]</sup>。对本文来说,选择合适的阻尼系数即选择合适的阀门弹簧。阻尼系数需要依靠实验确定。本文仅对阻尼系数的大小对减压阀动态特性的影响进行了定性的分析研究。

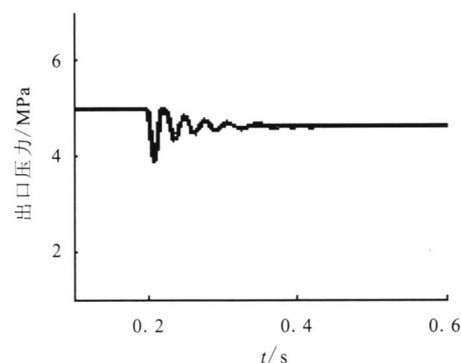
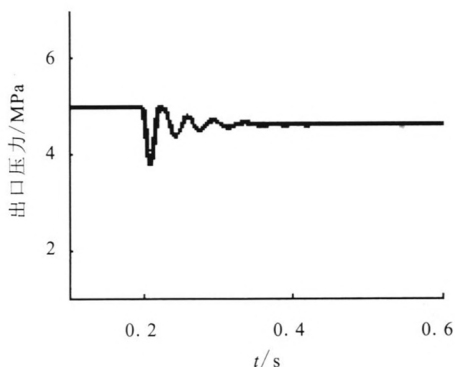
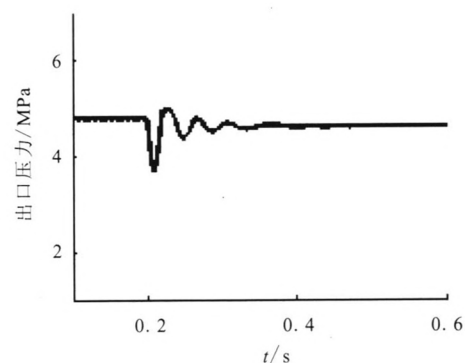
(a)  $\lambda=0.24$ (b)  $\lambda=0.36$ (c)  $\lambda=0.48$ 

图5 阻尼系数对阀门动态特性的影响

Fig. 5 Effect of damping coefficient on dynamic characteristics of reducing valve

## 4 试验研究

根据以上仿真结果,结合阀门强度、密封设计研制高压大流量减压阀,并搭建一个减压阀性能测试试验台,原理图如图6所示。介质采用氮气。孔板经过标定,可以测量流量。

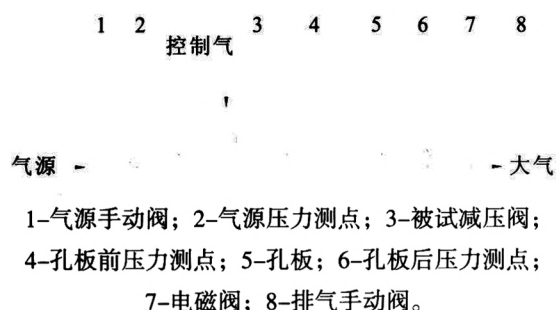
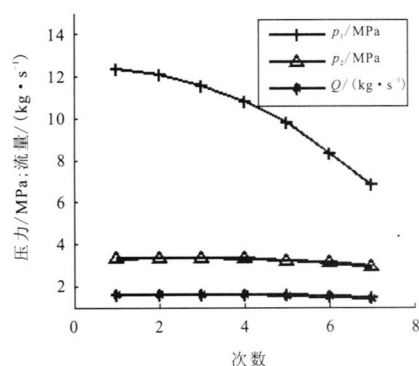


图6 减压阀性能测试原理简图

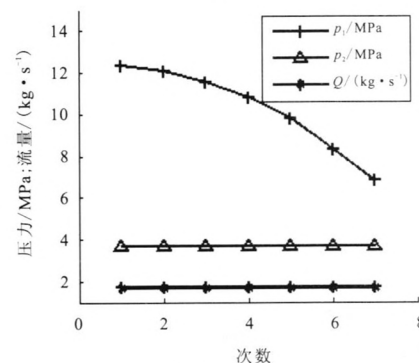
Fig. 6 Test principle diagram for performance of reducing valve

### 4.1 压力特性

以一组入口压力(6~14 MPa)为例,出口设4 MPa,观察该减压阀的压力特性(图7)。



(a) 试验数据



(b) 仿真数据

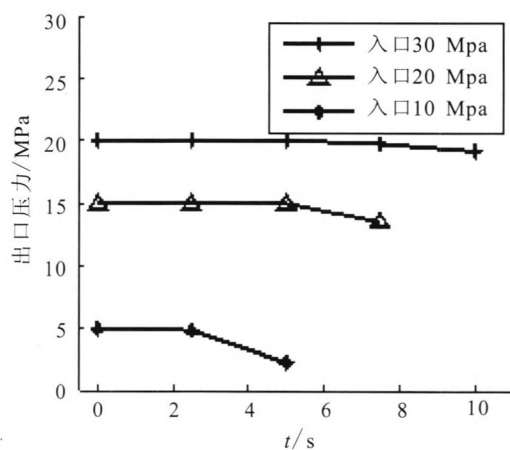
图7 出口压力4 MPa 压力特性

Fig. 7 Characteristic of 4 MPa pressure at outlet

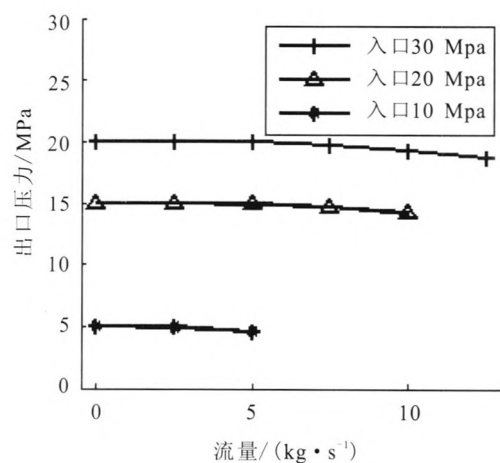
图 7 中  $p_1$  为入口压力,  $p_2$  为出口压力。可以看到, 两者的出口压力、流量都是非常稳定。试验中减压阀出口压力从 3.34 MPa 至 3.22 MPa 之间变化, 出口压力最大偏差为 3.7%, 减压阀的压力特性较好, 输出压力稳定。

#### 4.2 流量特性

选定 3 个入口压力, 分别做了流量特性试验, 结果如图 8 所示。



(a) 试验数据



(b) 仿真数据

图 8 流量特性

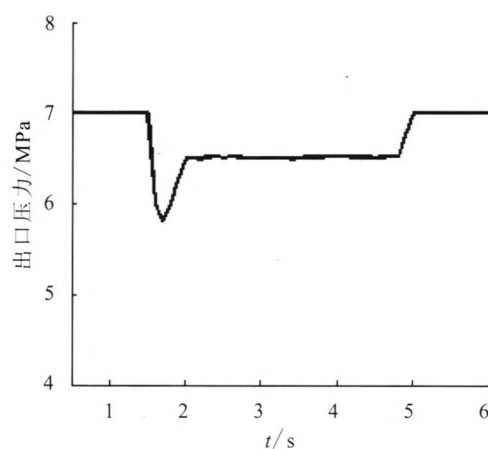
Fig. 8 Flux characteristic

从图 8 可以看出, 不同入口、出口压力, 覆盖的流量是不一样的。当入口为 30 MPa, 出口 20 MPa 时, 减压阀流量能够达到 10 kg/s。从图 8 还可以看出, 随着流量增大, 出口压力在逐渐降低。这是因为, 流量增大, 阀芯开度越大, 出口压力逐级降低; 当阀芯开度到达极限之后, 流量

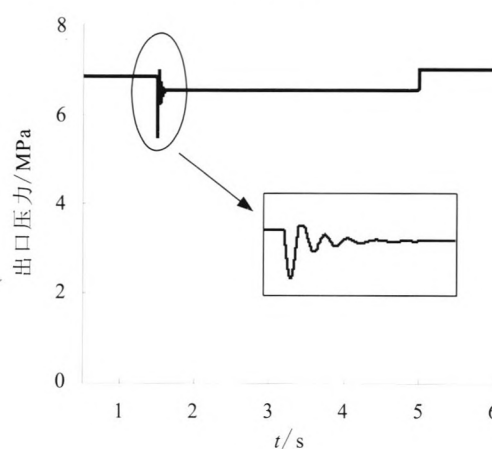
再想增大, 就只能以牺牲出口压力作为代价。

#### 4.3 动态特性

如图 9 所示, 在 1.5 s 打开阀门, 试验数据是先下降, 然后上升, 最后稳定在 6.5 MPa 左右, 稳定时间 1 s 左右。而仿真 1.5 s 打开阀门后, 经过 0.2 s 左右的震荡, 然后才稳定, 稳定值 6.53 MPa。试验和仿真比较, 主要是振荡段存在很大差异, 仿真有一个明显的振荡然后衰减最后稳定的过程。仿真结果在理论上能够解释, 而实际过程中, 减压阀的工作过程比较复杂。此外, 试验的压力测量频率、精度都对结果有影响。这些都使得仿真不能完全反应真实试验的情况。但是, 比较曲线可以看出, 仿真能够反映出口压力的变化趋势, 误差也在允许范围内, 说明所建模型是正确的。



(a) 试验数据



(b) 仿真数据

图 9 出口压力 7 MPa 动态数据

Fig. 9 Dynamic data of 7 MPa pressure at outlet

## 5 结论

利用 Matlab 软件建立先导式减压阀仿真模型, 分析各个参数对减压阀性能的影响, 根据仿真结果, 研制出高压大流量减压阀。研制结果表明:

1) 仿真缩短了阀门研发周期, 节约了设计制造成本。

2) 研制的减压阀可以承压 30 MPa, 流量达到了 10 kg/s 以上。

该阀已用于数个试验中, 工作安全、可靠, 达到了设计指标。

### 参考文献:

- [1] 王祖温, 包钢, 王建宇. 精密减压阀振动现象的仿真分析[J]. 机床与液压, 2001(2): 34-35+55.
- [2] 吴榕, 唐雯, 林文祥. 减压阀动态性能仿真分析与测试[J]. 厦门大学学报, 2011, 50(5): 847-851.
- [3] 胡长喜. 反向卸荷式减压阀动态建模与仿真[J]. 火箭推进, 2014, 40(1): 60-64.  
HU Changxi. Dynamic modeling and simulation for converse unloading pressure reducing valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(1): 60-64.
- [4] 尤裕荣, 曾维亮. 逆向卸荷式气体减压阀的动态特性仿真[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 34-30.  
YOU Yurong, ZENG Weiliang. Simulation on reverse balanced pneumatic pressure reducing valve dynamic characteristic [J]. Journal of rocket propulsion, 2006, 32(3): 34-30.
- [5] 张雪梅, 张黎辉, 金广明, 魏彦祥. 减压器动态过程的数值仿真[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 541-545.
- [6] 郑丽, 李清廉, 沈赤兵. 大流量气体减压器响应特性的仿真研究[J]. 火箭推进, 2008, 34(2): 18-23.  
ZHENG LI, LI Qinglian, SHEN Chibing. Analysis on responding characteristics of large flux pressure reducing valve [J]. Journal of rocket propulsion, 2008, 34(2): 18-23.
- [7] 尤裕荣, 曾维亮. 气体减压阀的稳定性分析 [J]. 火箭推进, 2009, 35(5): 34-38, 55.  
YOU Yurong, ZENG Weiliang. Analysis on pneumatic pressure reducing valve stability [J]. Journal of rocket propulsion, 2009, 35(5): 34-38, 55.
- [8] 张远深, 张春, 肖璐, 等. 平衡式气动减压阀动态特性仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(9): 135-137.
- [9] 贾光政, 王宣银, 吴根茂. 超高压大流量气动开关阀的原理和动态特性研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 77-81.
- [10] 俞笑, 孙兵, 林贵平, 等. 逆向式氧气减压器的性能分析与仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 89-93.
- [11] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [12] 余中军, 赵竞全. 航空氧气减压器性能仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(11): 1379-1383.

(编辑: 王建喜)