

# 减压器开启过程内部流场的 动态仿真和特性研究

郑 丽<sup>1,2</sup>, 李清廉<sup>1</sup>, 罗泽明<sup>2</sup>, 沈赤兵<sup>1</sup>

(1 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙, 410073; 2 海军飞行学院, 辽宁 葫芦岛, 125001)

**摘 要:** 针对自主研制的大流量气体减压器, 以研究其开启过程内部流场的变化和动态特性为目的, 建立了减压器工作过程的二维数学模型, 采用动网格技术和流固耦合仿真技术, 将气体的流动和活动组件的运动耦合起来, 实现了减压器开启过程中内部流场的动态仿真。同时, 通过对流场中不同位置参数的监测, 进行了基于动态流场的开启过程动态特性研究。

**关键词:** 减压器; 内流场; 动态特性; 流固耦合

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 01-0036-05

## Simulation of transient flow field and dynamic characteristics of pressure reducing valve during start-up

Zheng Li<sup>1,2</sup>, Li Qinglian<sup>1</sup>, Luo Zeming<sup>2</sup>, Shen Chibing<sup>1</sup>

(1 Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology,  
Changsha 410073, China; 2 Naval Flying Academy, Huludao 125001, China)

**Abstract:** In order to learn the transient flow field and dynamic characteristics of pressure reducing valve during start-up process, a 2-D mathematical model for a large flux pressure reducing valve (PRV) is established and the dynamic mesh and fluid-solid coupling simulation technique is developed in this paper. The internal flow field and the movement of the valve core is coupled. The transient flow field of startup process is simulated. Based on the simulation the dynamic characteristics of the PRV are studied through inspecting the parameters of different positions.

**Key words:** pressure reducing valve; internal flow field; dynamic characteristics; fluid-solid coupling

收稿日期: 2008-09-26; 修回日期: 2008-11-04。

作者简介: 郑丽 (1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究领域为发动机教学与研究。

## 0 引言

在液体火箭发动机的地面试验中, 减压器主要用于推进剂供应系统, 为下游提供稳定的压力, 其性能的好坏直接影响试验的成功与否。但是, 减压器内流动是一个典型的流固耦合的问题, 由于流动和减压器结构的复杂性, 目前进行的研究都是将减压器各容腔当作一个整体进行零维研究<sup>[1-4]</sup>, 这就不能反映真实的流动状况。随着 CFD 的发展, 采用 CFD 方法对阀门的内流场进行可视化研究已经成为一种研究手段, 文献 [5~9] 用不同的数值方法对不同类型、不同使用场合的阀门内流场进行仿真, 但是还未见有对减压器流场的研究。另外, 研究大都是针对稳态流场。在进行动态研究时, 都是人为的给定阀门开启或关闭的速度, 且速度恒定, 不能真实的表现流场的非定常变化过程。本研究采用动网格技术和流固耦合仿真技术对自主研制的大流量气体减压器开启过程的内部流场演化过程进行仿真, 并基于此进行动态特性研究, 不仅得到了动态特性, 还揭示了呈现此特性的内在原因。

## 1 工作原理

为满足大流量的需求, 自主研制的减压器 (PRV) 采用气调式, 结构如图 1 所示。图 1 中, 1、3、4、5 和 6 统称为活动组件。控制腔内无控制气时, 减压器处于关闭状态。

当通入控制气, 控制腔 E 内压力升高, 膜片 4 向上变形, 通过顶杆 3 使阀芯 1 开启, 高压气体进入出口腔, 再经阻尼孔 d 使阻尼腔压力升高。如果减压器出口无气体消耗, 阀芯 1 将逐渐减小开度直到关闭。

当减压器出口输出流量时, 出口腔和阻尼腔压力将下降, 活动组件的受力平衡将打破, 阀芯 1 自动开启, 入口腔高压气体流入出口腔, 使出口腔和阻尼腔压力回升。当活动组件上的力达到新的平衡时, 减压器又处于静态平衡状态。

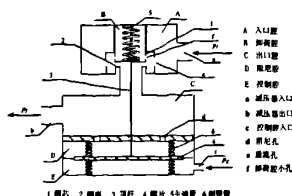


图 1 减压器原理图

Fig.1 Schematic diagram of PRV

## 2 计算模型和边界条件

### 2.1 计算模型及网格划分

根据减压器工作过程, 以减压器-管道-音速喷嘴的内流道为仿真计算域。减压器的结构示意图见图 1 和图 2。在假设工质氧气为可压缩的理想气体, 减压器节流边和内壁具有尖锐的棱边, 且根据节流面积对非对称部件进行面积折算的基础上, 建立了二维简化轴对称模型。减压器的阀芯和膜片是运动的, 故在运动区域采用非结构网格, 即阀芯与阀座之间节流处、阻尼腔、控制腔。其他区域采用结构网格, 且进行了加密处理。

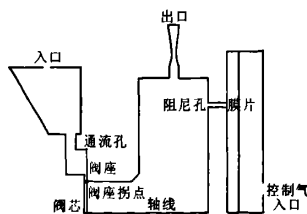


图 2 计算域二维结构示意图

Fig.2 2D sketch map of the simulation region

### 2.2 控制方程和定解条件

仿真采用  $k-\varepsilon$  模型。初始条件由计算条件决定。壁面边界条件为无滑移、绝热壁面, 减压器入口、控制气入口均采用压力入口条件, 音速喷嘴出口采用压力出口条件, 给定出口反压——大气压。

## 3 开启过程流场演化

在边界条件为减压器入口  $p_1=15\text{MPa}$ , 控制气

入口  $p_c=5\text{MPa}$  的条件下进行仿真, 初始条件根据充填结束的稳态状况设定, 此时, 入口腔压力  $15\text{MPa}$ , 出口腔和阻尼腔压力为  $4.4\text{MPa}$ , 控制腔压力为  $5\text{MPa}$ , 管道和喷嘴压力为大气压, 假设气体运动速度为 0。根据结果, 开启过程分成两个阶段, 延迟阶段和调整阶段。

### 3.1 延迟阶段

延迟阶段是减压阀保持开度为 0 的阶段。这一过程中, 出口腔和阻尼腔压力下降, 但减压阀仍未打开, 此过程时间很短。

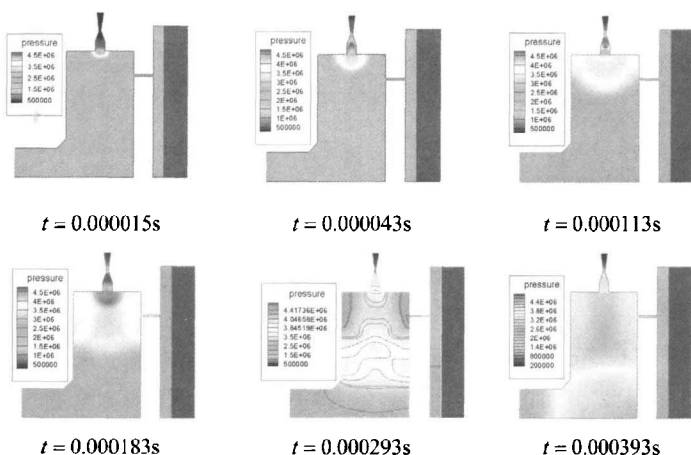


图 3 延迟阶段流场压力变化过程

Fig.3 Pressure evolution process in the delay phase

随着出口腔气体的流出, 出口腔内与管道连接处形成低压区, 且向上游移动。当低压区推进到阻尼孔处, 阻尼腔内气体开始通过阻尼孔流入出口腔, 阻尼腔压力降低, 活动组件受到的力发生改变, 最终将使减压阀打开。

### 3.2 调整阶段

调整阶段是减压阀开启, 阀芯开度由 0 逐渐增大, 到最终稳定在一定值的阶段。

图 4 是调整阶段流场的压力变化过程。气体流过阀芯流道后, 在阀座拐点产生膨胀波, 形成高压区附着在阀芯底部, 迫使气流转向, 再次在轴线上相遇, 形成激波串, 阀座拐点后和轴线附近为超音速流动。到达出口腔底部转向后沿底部

图 3 是延迟阶段减压阀内流场压力变化过程。 $t=0\text{s}$ , 气流流入管道后, 管道内产生激波为超音速流动。由管道流入喷嘴的收缩段时, 超音速流速度减小, 以亚音速向前推进。当气流流过喷嘴喉部时, 速度达到音速; 流入喷嘴扩张段时, 音速气流膨胀, 以超音速排入大气。当喷嘴喉部发生堵塞后, 收缩段压力升高, 形成高压区, 且随着上游气体的补充, 高压区扩大, 推进至出口腔。之后, 随着气体通过音速喷嘴的流出, 高压区逐渐变小, 直至消失。

向前运动, 遇拐角再转向, 出口腔底部和出口腔各转角处都会形成高压区; 出口腔内形成回流区, 流入出口管道的气流是流入出口腔气体的一部分。

图 5 是调整阶段内流场的流线图。减压阀开启后的一段时间内, 开度较小, 阀座后形成回流区, 且随着开度增加, 流入的气体量增多, 回流区范围减小, 压力升高, 移动到阀座后壁面处。

当开度较小时, 从阻尼孔流入出口腔的气体在出口腔内由于剪切也形成回流区, 随着开度的增大消失。出口腔内大回流区产生于底部轴线处, 沿出口腔内壁面运动, 最后稳定在中心位置。随着开度增加, 流量的增大, 入口腔和控制腔内有回流区产生并一直存在。

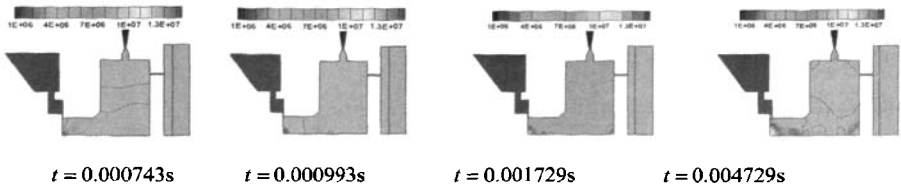


图 4 调整阶段流场压力变化过程  
Fig.4 Pressure evolution process in the regulation phase

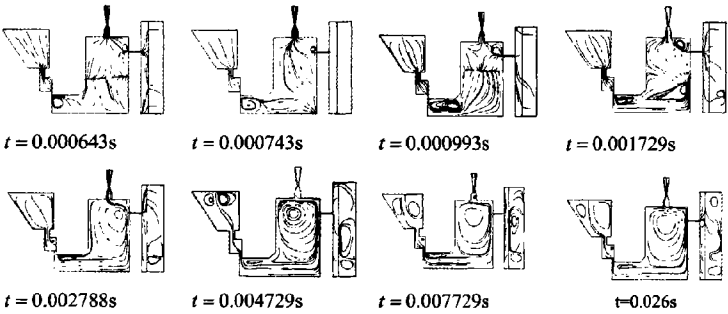


图 5 调整阶段流场流线变化过程  
Fig.5 Velocity vectors evolution process in the regulation phase

$t=0.026\text{s}$  时, 减压器达到平衡状态。此后, 阻尼腔气体和出口腔气体有少量交换, 压力稍有波动, 但振幅很小。

研究动态特性的不准确性。

4 开启过程动态特性分析

选取流场中一些点监控其压力变化, 其位置如图 6 所示。图 7 是开启过程中减压器开度变化曲线。 $t=0.000113\text{s}$ , 阻尼腔与出口腔连接处的压力开始降低, 阻尼腔内气体开始通过阻尼孔流入出口腔, 阻尼腔压力也降低。 $t=0.000411\text{s}$  是延迟和调整阶段的临界点。减压器的响应时间约为  $0.03\text{s}$ 。

图 8 是出口腔内不同点在减压器开启过程中的压力变化情况, 可以看出从阀芯至管道, 出口腔内压力不是依次降低。高压区和低压区的存在以及波系的结构都使得压力分布极度不均匀, 开启过程中靠近阀芯处的压力变化最明显。这也说明了利用零维方法将减压器各容腔作为一个整体

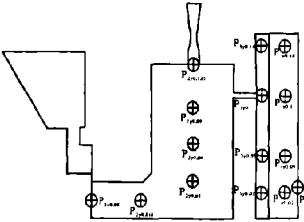


图 6 监测点的位置示意图  
Fig.6 Different monitoring positions in output cavity

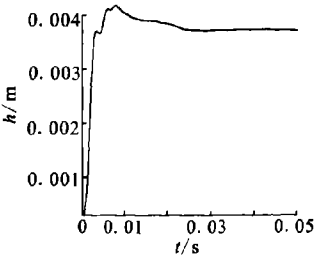


图 7 开启过程开度曲线  
Fig.7 Lift curve during start-up process

图9是开启过程中阀芯底部压力分布随时间变化曲线,可看出在延迟阶段,此力基本不变,但是一旦减压阀开启,阀芯底部受力迅速增大,且分布不均匀,正是此力使得减压阀迅速打开。同时,从这个力的变化上也可看出阀芯底部高压区的产生和发展。减压阀达到平衡的过程正是阀芯开度变化引起作用在阀芯上的力的变化、阻尼腔和控制腔体积变化引起压力变化的平衡过程。

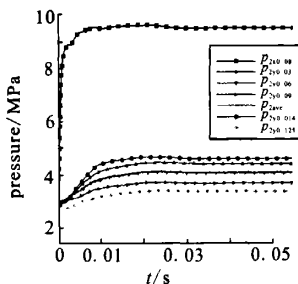


图8 开启过程出口腔监控点压力曲线

Fig.8 Pressure of different positions in output cavity

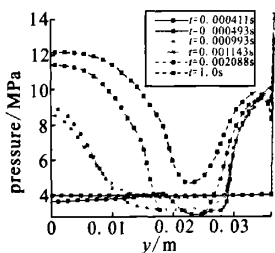


图9 开启过程作用在阀芯上的力

Fig.9 Force on the valve core during start-up process

## 5 结论

采用动网格技术和流固耦合仿真技术,进行了开启过程减压阀内部流场的动态演化和动态特性研究,得出以下结论:

减压阀开启的过程分成两个阶段:延迟阶段和调整阶段。延迟阶段内,管道和喷嘴建立了压力,出口腔内形成低压区,且低压区逐渐向上游

运动。喷嘴收缩段形成高压区推进至出口腔后消失。调整阶段内,随着开度的增加,阀座拐点后回流区的范围减小,压力升高,移动到阀座后壁面处。出口腔内回流区产生于出口腔底部中心位置,沿着出口腔壁面移动,最后回流区的中心停在出口腔中心位置。入口腔内和控制腔内也形成回流区。

出口腔内存在的高压区、低压区和波系使得其内压力分布极不均匀。延迟阶段,阀芯底部受力基本不变,调整阶段阀芯底部受力迅速增大,且分布不均匀,正是此力使得减压阀迅速打开。

## 参考文献:

- [1] 张雪梅,张黎辉,金广明,等.减压阀动态过程的数值仿真[J].航空动力学报,2004,19(4):110-114.
- [2] 尤裕荣.气体瞬态力对减压阀动态特性的影响分析[J].机床与液压,2006,(5):86-87.
- [3] 陈阳,高芳,张振鹏,等.气动薄膜调节阀控制系统工作过程的动态仿真[J].火箭推进,2006,32(6):32-38.
- [4] 陈晓琴.减压阀充填过程动态特性仿真[J].导弹与航天运载技术,2006,(5):48-52.
- [5] 张智辉,陈军,王树宗.液压锥阀内部运动流场的数值模拟[J].机床与液压,2006,(8):122-124.
- [6] Yang Roger. CFD Simulation of Oil Flow and Flow Induced Forces Internal Hydraulic Valves[M]. National Fluid Power Association and Society of Automotive Engineers, 2002.
- [7] Jia Guangzheng, Wang Xuanyin, Tao Guoliang, et al. Study on Dynamic Property of Extra-high Pressure Pneumatic of Control Valve [C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Fluid Power Transmission and Control, 2003.
- [8] Guillermo Palau Salvador, Jaime Arvizu Valverde. Three-dimensional Control Valve with Complex Geometry: CFD Modeling and Experimental Validation [M]. 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2004.
- [9] 鲍文,牛文玉,陈林泉,等.固体火箭冲压发动机燃气流量调节特性[J].推进技术,2007,28(4):99-102.

(编辑:陈红霞)