

反向卸荷式减压阀动态建模与仿真

胡长喜

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 为获得减压阀动态特性, 建立了液体火箭发动机常用的反向卸荷式减压阀动态仿真模型。采用 AMESim 仿真技术进行了仿真, 重点分析了各种因素对减压阀动态特性的影响, 提出了改善减压阀动态特性的措施。试验结果表明, 改进措施合理可行。

关键词: 减压阀; 仿真; 动态特性; AMESim

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0060-05

Dynamic modeling and simulation for converse unloading pressure reducing valve

HU Chang-xi

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To achieve dynamic characteristics of the pressure reducing valve, a dynamic simulation model of the converse unloading pressure reducing valve that was usually applied in liquid rocket engine was built. The AMESim method is adopted for simulation. The influence of different factors on dynamic characteristics of the pressure reducing valve is analyzed emphatically. The measures of improving the dynamic characteristics of the pressure reducing valve are proposed. The test results show that the measures are reasonable and feasible.

Keywords: pressure reducing valve; simulation; dynamic characteristic; AMESim

0 引言

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工作要求的较低且恒定的输出压力, 使整个发动机系统具有稳定的工作特性。高压气体经过减压阀对贮箱增压的过程是一个非

定常的动态过程, 直接影响推进系统的启动性能。目前, 减压阀动态特性分析有两种方法: 理论分析法和试验分析法。前者根据相关理论建立阀芯阀座流量方程、限流孔流量方程、低压腔连续方程、等熵过程方程及平衡方程等, 从理论上推导出动态方程, 将某一稳态工作点线性化为小增量线性方程, 进行拉普拉斯变换, 建立开环和

收稿日期: 2013-08-06; 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2006JY02)

作者简介: 胡长喜 (1973—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

闭环传递函数, 然后由稳定性判据对其动态特性进行分析。而试验分析法是对减压阀输入阶跃信号, 测量出口压力曲线, 根据曲线对减压阀进行稳定性判断。理论分析法比较繁杂, 而试验分析法必须在有产品后才能进行, 这样不但设计周期长、成本高, 而且很难全面掌握减压阀动静态特性。

本文针对一般液体火箭发动机型号上用的反向卸荷式减压阀进行了贮箱增压过程和发动机工作过程等动态调节特性的仿真研究。以 AMESim 为设计平台建立了减压阀基于 AMESim 的仿真模型, 在建立 AMESim 仿真模型的基础上进行了动态仿真, 研究各种参数对减压阀动态特性的影响, 找到了提高减压阀动态稳定性的改进方向。

1 减压阀结构原理及研制中出现的问题

挤压式液体火箭发动机系统增压元件主要包括高压气瓶、电爆阀或电磁阀、减压阀、贮箱和下游执行阀门等。当电爆阀或电磁阀打开时, 气瓶内高压气体经过电爆阀或电磁阀、减压阀进入推进剂贮箱对其进行增压, 随着贮箱压力增高, 减压阀活门开度由初始全开位置逐渐减小, 当贮箱压力达到稳定工作压力时, 减压阀活门关闭, 系统启动增压过程完成。当发动机开始工作时, 随着贮箱推进剂的流出, 减压阀开始进行调节, 保证贮箱的增压压力在要求的压力范围内变化, 同时, 减压阀还可为下游的气动阀门提供恒定的控制气压。

反向卸荷式减压阀结构原理图如图 1 所示。减压阀主要由阀芯、阀座、主副弹簧和膜片等组成。高压气体进入减压阀高压腔, 在阀芯与阀座之间的环形缝隙处进行节流减压, 节流后的气体进入低压腔后, 分成三路: 一路进入卸荷腔, 一路进入膜片腔, 另一路流入出口管路。当出口压力偏高时, 膜片压缩主弹簧使阀芯组件下移, 阀门开度减小, 使出口压力降低; 反之, 阀门开度加大, 使出口压力升高。

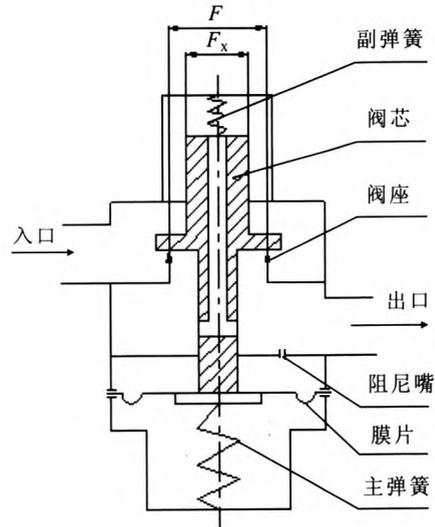


图 1 减压阀结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure reducing valve

减压阀设计出口额定压力为 5 MPa, 在研制初期, 减压阀在工作过程中是等幅振荡的, 试验结果如图 2 所示。

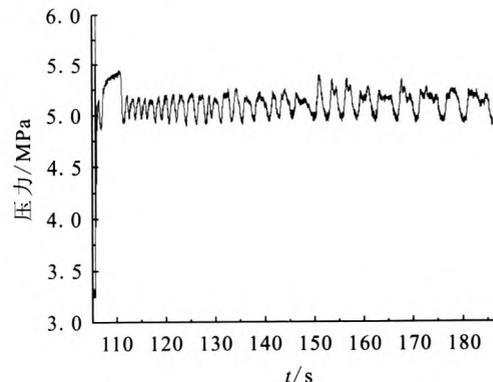


图 2 减压阀出口压力试验曲线

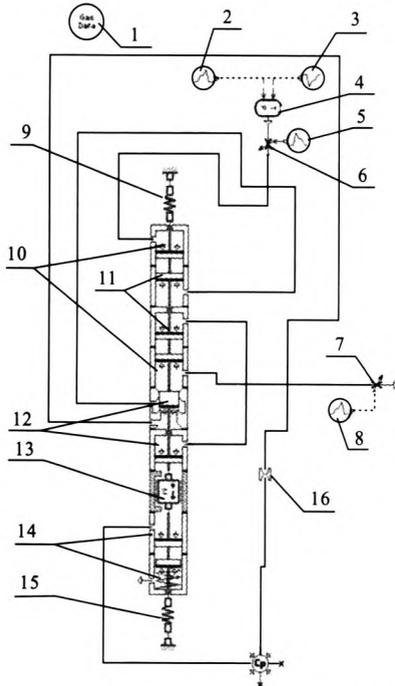
Fig. 2 Testing curve for outlet pressure of pressure reducing valve

2 减压阀 AMESim 仿真模型

AMESim 软件建模实用性强, 可以从 AMESim 元件库中直接得到流体元件的模型, 从中选择流体系统所需的元件。基于传统的流量连续性方程、力平衡构建的模型专门编制的软件更有针对性, 只是更麻烦。

根据减压阀的结构原理建立的减压阀 AMESim

模型如图3所示。此模型包括 AMESim 中的气压、机械、信号模型库中的子模型。根据减压阀的具体物理结构、工作原理和研究时关心的现象等选择合理的子模型。



- 1 - 气体性能参数集合; 2 - 压力控制信号;
- 3 - 温度控制信号; 4 - 由压力和温度组成的气源;
- 5 - 入口电磁阀控制信号; 6 - 入口电磁阀; 7 - 出口电磁阀;
- 8 - 出口电磁阀控制信号; 9 - 副弹簧; 10 - 阀座节流面;
- 11 - 卸荷面; 12 - 阀芯和阀座组合; 13 - 运动部件质量块;
- 14 - 膜片; 15 - 主弹簧; 16 - 阻尼嘴

图3 减压阀 AMESim 仿真模型

Fig. 3 AMESim simulation model of pressure reducing valve

3 各参数对减压阀动态特性的影响

将减压阀的实际物理参数（主弹簧刚度 K_1 、副弹簧刚度 K_2 、膜片刚度 K_m 、运动件质量 m 、膜片有效面积 F_m 、不平衡面积 df 、低压腔容积 V ）设置在图3的仿真模型中。设置气体介质为氦气。减压阀入口压力设置、电磁阀控制信号设置尽量与试验时的情况一致。减压阀入口压力范围为 36~10 MPa，工作时间为 80 s。电磁阀控制信号设置为 0~1 s 入口电磁阀打开，5 s 时出口电磁阀突然打开。

为使结果更清晰，仿真结果只显示了前 10 s

过程。

3.1 总刚度的影响

将刚度分别取为 $K_1'=K_1$, $K_2'=K_2$, $K_m'=3K_m$; $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$ 输入仿真模型，其它参数不变，仿真结果如图4。由图4可知，总刚度对减压阀动态特性影响较大，增大总刚度，减压阀振动幅值减小，但刚度太大导致减压阀出口额定压力降低（降低为 4.9 MPa）。因此，实际设计中在满足减压阀出口额定压力要求的情况下应尽量增大减压阀总刚度。

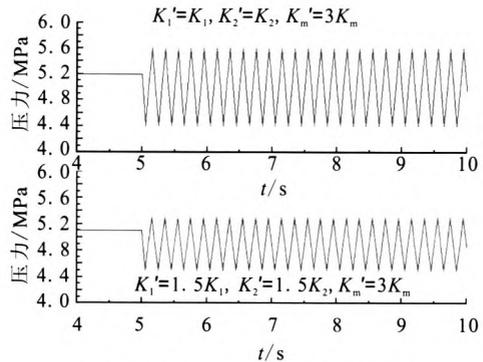


图4 总刚度对出口压力的影响

Fig. 4 Effect of general rigidity on outlet pressure

3.2 运动件质量的影响

在 $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$ 的情况下，将运动件质量分别取为 $m'=2/3m$ 和 $m'=1/3m$ 输入仿真模型中，其它参数不变，仿真结果如图5所示。

由图5可知，运动件质量对减压阀动态特性影响较大，运动件质量越小，振动幅值越小。因此，在实际设计中应尽量减轻运动件质量以减小运动时的惯性力。

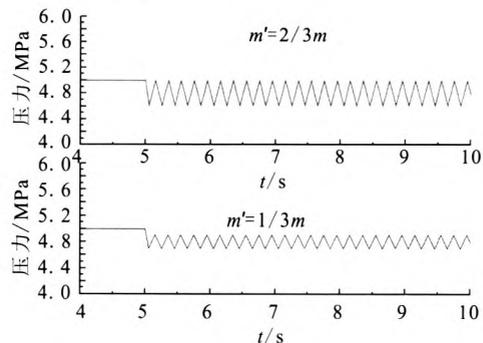


图5 运动件质量对出口压力的影响

Fig. 5 Effect of mobile mass on outlet pressure

3.3 膜片有效面积的影响

在 $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$ 的情况下, 将膜片有效面积分别取为 $F_m'=F_m$ 和 $F_m'=0.65F_m$ 输入仿真模型中, 其它参数不变, 仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知, 减小膜片有效面积, 减压阀振动减小, 但减压阀出口额定压力降低 (出口额定压力降低为 4.6 MPa)。因此, 实际设计中在满足减压阀出口额定压力要求的情况下应尽量减小膜片有效面积。

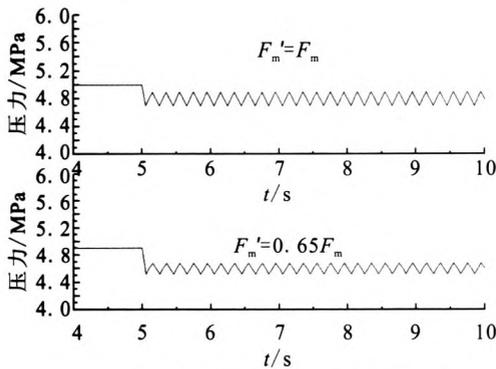


图 6 膜片有效面积对出口压力的影响

Fig. 6 Effect of effective diaphragm area on outlet pressure

3.4 不平衡面积的影响

在 $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$, $m'=1/3m$, $F_m'=0.65F_m$ 的情况下, 将不平衡面积分别取为 $df'=df$ 和 $df'=0.25df$ 输入仿真模型中, 其他参数不变, 仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 减小不平衡面积, 减压阀振动减小, 同时减压阀出口额定压力提高 (出口额定压力提高为 5 MPa)。因此, 实际设计中应尽量减小不平衡面积以减小由于入口压力变化范围大引起的冲击和振动。

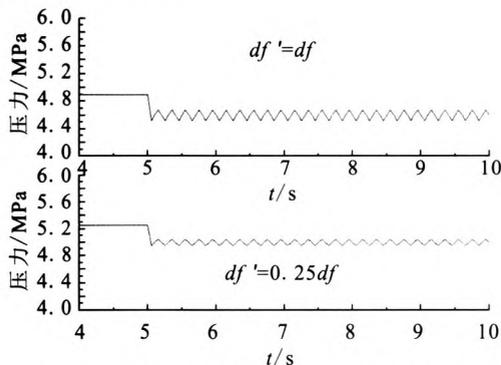


图 7 不平衡面积对出口压力的影响

Fig. 7 Effect of imbalance area on outlet pressure

3.5 低压腔容积的影响

在 $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$, $m'=1/3m$, $F_m'=0.65F_m$, $df'=0.25df$ 的情况下, 将低压腔容积分别取为 $V'=V$, $V'=2V$ 输入仿真模型中, 其他参数不变, 仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知, 低压腔容积对减压阀动态特性影响较大, 低压腔容积越大, 振动幅值越小。因此, 实际设计中应尽量增大低压腔容积。

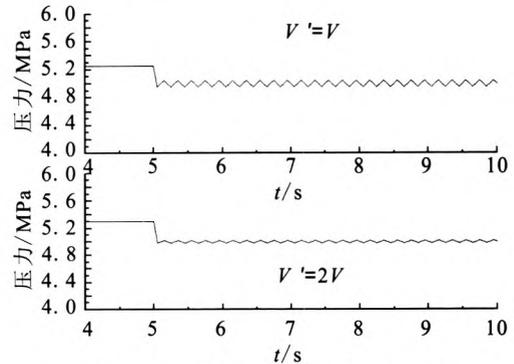


图 8 低压腔容积对出口压力的影响

Fig. 8 Effect of low-pressure antrum cubage on outlet pressure

4 结构改进及试验验证

由仿真结果可知, 总刚度、运动件质量、低压腔容积对减压阀动态特性影响较大。在找出了减小减压阀振动和提高减压阀动态稳定性的主要因素后, 采取了下列措施将减压阀加以改进, 即将总刚度增大为 $K_1'=1.5K_1$, $K_2'=1.5K_2$, $K_m'=3K_m$, 运动件质量减小为 $m'=1/3m$, 低压腔容积增大为 $V'=2V$ 。改进后的减压阀试验结果如图 9 所示。

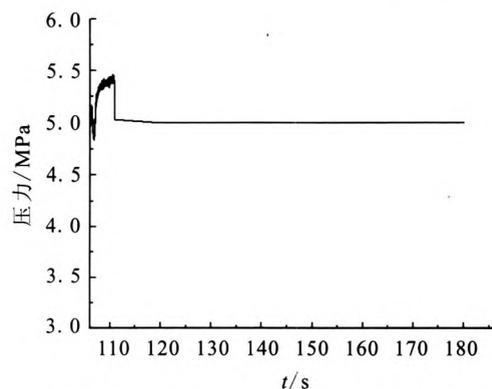


图 9 改进后的减压阀出口压力试验曲线

Fig. 9 Testing curve for outlet pressure of improved pressure reducing valve

由图9可以看出,改进后的减压阀动态特性稳定,没有振动现象,说明改进措施是正确的。

5 结论

本文针对反向卸荷式减压阀研制过程中的振动问题,建立了减压阀的AMESim仿真模型,重点分析了各种因素对减压阀动态特性的影响。试验证明该仿真模型是有效的,改进措施是合理可行的。从仿真结果得出如下结论:

1) 总刚度对减压阀动态特性影响较大。增大总刚度,振动幅值减小,但刚度太大导致减压阀出口额定压力降低。因此,实际设计中在满足减压阀出口额定压力要求的情况下应尽量增大减压阀总刚度。

2) 运动件质量对减压阀动态特性影响较大。运动件质量越小,振动幅值越小。因此,在实际设计中应尽量减轻运动件质量以减小运动时的惯性力。

3) 减小膜片有效面积,振动幅值减小,但减压阀出口额定压力有所降低。因此,实际设计中在满足减压阀出口额定压力要求的情况下应尽量减小膜片有效面积。

4) 减小不平衡面积,振动幅值减小,同时减压阀出口额定压力提高。因此,实际设计中应尽量减小不平衡面积以减小由于入口压力变化范围大引起的冲击和振动。

5) 低压腔容积对减压阀动态特性影响较大,低压腔容积越大,振动幅值越小。因此,实际设计中应尽量增大低压腔容积。

参考文献:

[1] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
[2] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京:中国宇航出版

社,1993.

- [3] 秦家升,游善兰. AMESim 软件的特征及其应用[J]. 工程机械,2004(12):6-8.
[4] 张雪梅,张黎辉,金广明,等. 减压器动态过程的数值仿真[J]. 航空动力学报,2004,19(4):542-545.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 何德胜,郭正,鲍福廷,等. 采用流固耦合方法数值分析减压器动态响应[J]. 固体火箭技术,2010,33(6):713-717.
[8] 戴梧叶,马彬,张国舟,等. 减压器特性实验研究[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(6):711-713.
[9] 夏芳,金广明. 减压器启动过程动态特性数值仿真[R]. 上海:上海机电工程科技情报研究所,1998.
[10] YANG Roger. CFD simulation of oil flow and flow induced forces internal hydraulic valves[M]. USA: National Fluid Power Association and Society of Automotive Engineers,2002.
[11] JIA Guang-zheng, WANG Xuan-yin, TAO Guo-liang, 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. Hong Kong, China: [s.n.], 2002: 171-177.
[12] SALVADOR Guillermo Palau, VALVERDE Jaime Arviza. Three-dimensional control valve with complex geometry: CFD modeling and experimental validation, AIAA 2004-2422[R]. USA: AIAA, 2004.
[13] FEJTEK I, WALLER G, WONG R. Computational study of the flowfield of an aircraft outflow valve, AIAA 2005-4843[R]. USA: AIAA, 2005.
[14] AHUJA V, HOSANGADI A, SHIPMAN J, et al. Simulations of in-stabilities in complex valve and feed systems, AIAA 2006-4758[R]. USA: AIAA, 2006.
[15] CAVALLO P A, HOSANGADIA, AHUJA V. Transient simulations of valve motion in cryogenic systems, AIAA 2005-5152[R]. USA: AIAA, 2005.

(编辑:王建喜)