

减压阀启动振荡分析与抑制研究

徐登伟,朱建国

(西安航天动力研究所,陕西 西安 710100)

摘 要:为了解决某型姿控发动机减压阀压力振荡导致阀芯密封面损坏,进而影响调压功能的问题,对其启动过程出口压力振荡和抑制方法进行了研究。基于 AMESim 仿真平台建立了减压阀仿真模型,分析了阀芯行程和限流孔对减压阀启动特性的影响,结果表明:减小阀芯行程和增加限流圈均有利于抑制减压阀启动过程出口压力振荡。基于此优化了阀芯行程,并在入口增加限流圈,试验表明改进后的减压阀出口压力相对平稳,振荡现象得到有效抑制。

关键词:减压阀;启动振荡;机理分析;AMESim 振荡;抑制

中图分类号:V432 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)02-0076-05

Analysis and inhibition research on startup pressure oscillation of pressure reducing valve

XU Dengwei, ZHU Jianguo

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

Abstract: In order to prevent the damage of pressure oscillation on the sealing area of valve core, a pressure reducing valve in attitude control engine system was studied on the outlet pressure oscillation during start-up process and the inhibition approaches. Based on AMESim simulation platform, a simulation model of PRV was established to analyze the influence of valve spool opening degree and orifice on the starting characteristics. The simulation results show that adding orifice and reducing spool opening degree are beneficial to suppress the pressure oscillation during start-up process. Therefore, the valve spool opening degree is optimized and the flow limiting ring is added at the inlet. The test results indicate that the outlet pressure of the improved PRV is relatively stable and the oscillation phenomenon is effectively suppressed.

Keywords: pressure reducing valve (PRV); startup pressure oscillation; mechanism analysis; AMESim oscillation; inhibition

0 引言

减压阀是一种将入口高压气体调节至某一出口压力,并依靠自身反馈调节机构维持出口压力稳

定的阀门,被广泛应用于液体火箭、飞行器动力系统中,其出口压力精度直接影响动力系统的工作性能。为了防止减压阀超调时对低压系统结构造成破坏,减压阀通常集成安全阀^[1-2]。

收稿日期:2019-12-01;修回日期:2020-03-23

基金项目:装备预研联合基金(6141B06240601)

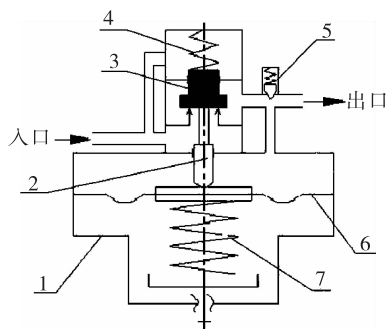
作者简介:徐登伟(1985—),男,硕士,高级工程师,研究领域为液体火箭发动机阀门设计。

某挤压式发动机试车过程中,减压阀出口压力出现启动振荡现象,振荡的压力将损坏阀芯密封面,影响减压阀的调压功能。此外,高压启动冲击导致该型减压阀所集成的安全阀有70%出现漏率超标的问题,虽然安全阀造成的耗气量很小,试车、飞行中气瓶气体余量较大,但当减压阀出口压力振幅较大时,对系统及减压阀结构安全存在隐患,同时也影响系统充气裕度。因此,必须采取控制措施抑制减压阀启动振荡,提高动力系统工作可靠性。

本文针对某减压阀启动振荡的问题,分析了启动振荡的机理,利用AMESim软件建立了减压阀的动态特性仿真模型,分析了不同结构参数对减压阀启动特性的影响,优化并确定了阀芯行程和限流孔径。通过减压阀高压冲击试验及整机试车考核,改进后的减压阀启动压力振荡现象得到有效抑制。

1 减压阀的工作原理

某卸荷式减压阀结构原理如图1所示,主要由阀体、顶杆、阀芯、弹簧、安全阀、膜片组件等组成,其依靠阀芯与阀座的动态节流实现减压和稳压功能。初始状态减压阀阀芯处于打开位置,随着低压腔逐步建压,出口压力作用在膜片组件上并与调节弹簧力比较,当作用于膜片组件上的介质力大于弹簧调整力时,膜片组件压缩调节弹簧向下运动,阀芯在复位弹簧力的作用下,向开度减小的方向运动,节流作用增大,出口压力随之减小;反之,阀芯向开度增大的方向运动,节流作用减小,出口压力随之增大;当阀芯上的作用力达到平衡时,出口压力稳定在设定的额定点附近^[2-3]。



1-阀体;2-顶杆;3-阀芯;4-复位弹簧;5-安全阀;
6-膜片组件;7-调节弹簧。

图1 卸荷式减压阀原理图

Fig. 1 Schematic diagram of unloading PRV

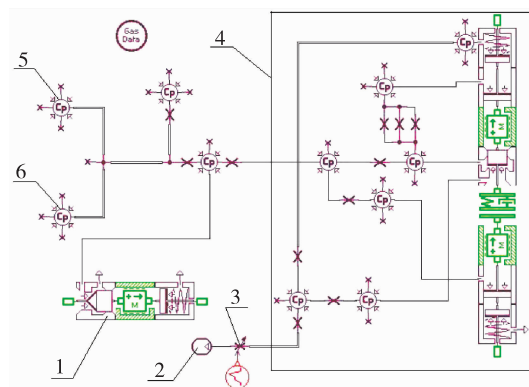
2 减压阀启动振荡机理分析

减压阀启动出口压力振荡主要发生在电爆阀打开高压气瓶系统充填增压的过程,系统启动时减压阀入口进气流量大于或远大于低压腔出口的排出流量,两者流量不匹配,使得多余流量介质作用于减压阀低压腔较大敏感面积上,产生瞬时远大于调节弹簧力的冲击力,冲击力使调节弹簧进一步压缩,阀芯开度同步减小,使得该冲击力持续的时间很短;当某一时刻作用于敏感面积上的介质力小于弹簧力时,调节弹簧伸长变形,调节弹簧力减小。如此往复形成了类似弹簧振子模型,弹簧带动阀芯使其在一定范围内往复运动,造成阀座节流口流通面积的不断变化,从而引起出口压力振荡。综合分析,减压阀启动振荡的根源是启动瞬间进气流量太大。因此,从控制入口瞬时流量突变的思路出发,可采用入口增加限流圈、减小阀芯行程等措施抑制减压阀启动压力的振荡^[3-7]。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真模型的建立

利用AMESim软件搭建了减压阀及发动机系统的仿真模型^[8-16],如图2所示,模型建立时主要进行了以下假设^[17-18]:①介质为理想气体;②工作过程为绝热流动;③节流口简化为收缩喷嘴;同时考虑安全阀的安全放气作用,仿真系统尽量模拟发动机实际管路系统^[19-20]。减压阀工作介质为氮气,出口压力 (1.8 ± 0.1) MPa。



1-安全阀;2-气瓶;3-电爆阀;4-减压阀;
5-氧化剂贮箱气垫;6-燃料贮箱气垫。

图2 减压阀仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of PRV

3.2 原状态减压阀启动过程仿真

为验证仿真模型的准确性,仿真前按原状态减压阀参数设置,阀芯安装行程 0.6 mm,阀芯可运动行程 1 mm;安全阀开启压力 2.3 MPa,最大行程 2.3 mm,模拟原状态减压阀的启动冲击过程。由图 3 可以看出,减压阀启动过程存在压力振荡,峰值压力 2.1 MPa、持续 1.8 s 左右,与试车结果峰值压力 2.1 MPa、持续 2 s 左右能够对应,验证了仿真模型的正确性。

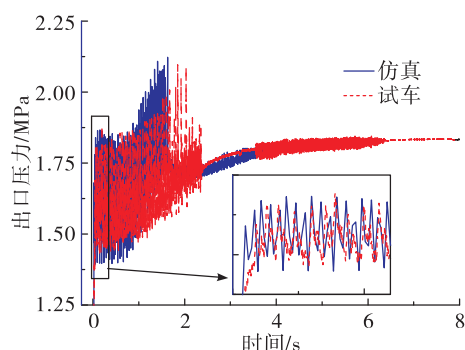


图 3 减压阀启动增压过程

Fig. 3 Startup and pressurization process of PRV

减压阀出口集成安全阀,压力振荡会导致安全阀开启泄压。因此,减压阀实际出口压力为安全阀开启泄压的同时下游系统的压力。启动过程安全阀阀芯运动仿真曲线如图 4 所示,阀芯最大开度 2.2 mm,且在前 1 s 内阀芯基本处于最大开度和关闭位置的频繁动作中,即阀芯存在快速启闭、撞击密封面的过程,安全阀为金属锥面对棱边的硬密封结构,频繁快速撞击阀座容易损坏密封面,回座后容易导致密封性变差,这就是减压阀高压启动冲击导致安全阀泄漏的主要原因。

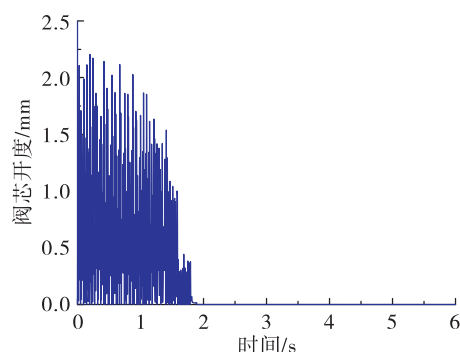


图 4 安全阀阀芯开度曲线

Fig. 4 Valve spool opening degree of safety valve

3.3 不同行程对减压阀启动特性的影响

减压阀理论设计安装行程为 0.43 ~ 1.0 mm,而实际所需要的最大行程为 0.104 mm,考虑到生产、装配环节对其行程控制的难度,初定阀芯行程为 1.0、0.6、0.45、0.35 mm,从而对比模拟减压阀不同行程的启动特性。由图 5 可以看出,随着减压阀初始安装行程的减小,其启动振荡压力峰减小;针对本系统减压阀行程减小至 0.35 mm 时,峰值压力 1.9 MPa、持续 2 s 左右,下游建压时间与原状态相当,若进一步减小行程,将增加系统的增压时间和装配难度。因此,本系统减压阀最佳行程为 0.35 mm,而此时安全阀因振荡压力阀芯行程由 2.2 mm 减小为 1.1 mm。

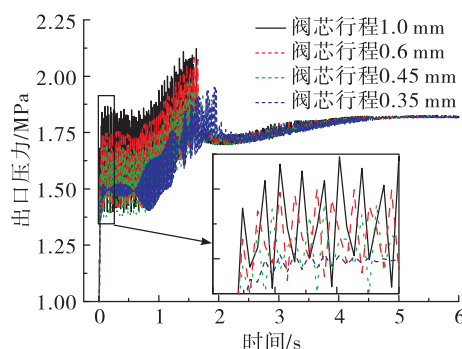


图 5 阀芯行程对出口压力的影响

Fig. 5 Influence of valve spool stroke on outlet pressure

3.4 不同入口限流圈对减压阀启动特性的影响

上述仿真结果表明,减小阀芯行程对抑制该系统减压阀启动振荡作用有限。需采取综合处理的方式,即在减小阀芯行程的基础上在入口增加限流圈。在不影响减压阀最大流量的前提下初定限流圈直径 4、3.2、2.1、1.7 mm。由图 6 可以看出,当入口增加 $\phi 2.1$ mm 的限流圈时,减压阀压力振荡现象基本消失,启动过程中安全阀也未开启;随着限流圈直径的减小至 $\phi 1.7$ mm,系统建压过程更加平稳,减压阀出口几乎没有振荡。若进一步减小限流圈直径,则在大流量工况时减压阀出口压力不满足设计要求。因此,考虑到高低温对减压阀流量的影响,确定限流圈最佳直径为 $\phi 1.7$ mm。

仿真分析结果表明,该减压阀采取阀芯行程减小至 0.35 mm、入口增加 $\phi 1.7$ mm 限流圈的措施对系统增压过程和压力特性影响最小,且能够有效抑

制启动压力振荡,对改进后的减压阀进行单机和整机试验考核。

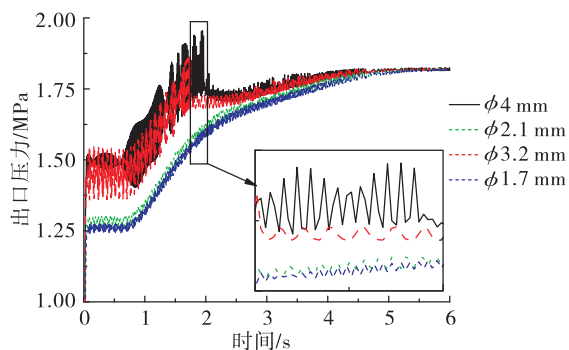


图6 限流圈直径对出口压力的影响

Fig. 6 Influence of orifice diameter on outlet pressure

4 试验考核

4.1 减压阀高压冲击试验

试验系统尽可能模拟发动机系统,真实考核改进后减压阀的启动特性。试验时,气瓶压力为26 MPa,瞬间打开气瓶后的电磁阀,实时采集减压阀出口压力曲线。如图7所示,10次高压冲击减压阀出口压力无明显振荡现象,且压力峰值不到1.58 MPa,小于安全阀开启压力,相对于改进前大幅减小。冲击试验后分解检查,减压阀阀芯密封面压痕均匀且无损坏,安全阀泄漏量无变化。

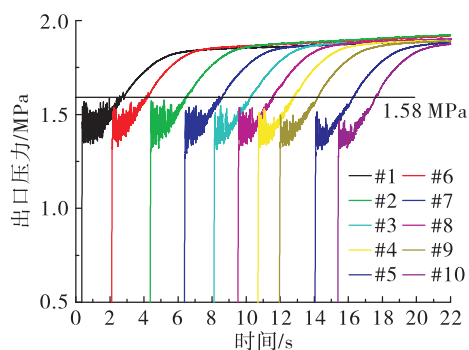


图7 改进后减压阀高压冲击试验曲线

Fig. 7 Test curves of improved PRV under high pressure impact

4.2 整机试车验证

整机试车减压阀曲线如图8所示,改进后减压阀启动过程平稳,振荡幅值0.15 MPa,相比改进前振荡幅值0.44 MPa,降低66%;改进后减压阀启动

过程最高出口压力为1.82 MPa,相比改进前振荡峰值2.1 MPa(安全阀开启排气后的结果),至少降低22%;系统增压时间相当,均为7 s左右。试车结果表明,减压阀改进措施有效,减小了启动冲击振荡,提高了系统工作的可靠性,对系统的其他工作特性无影响。

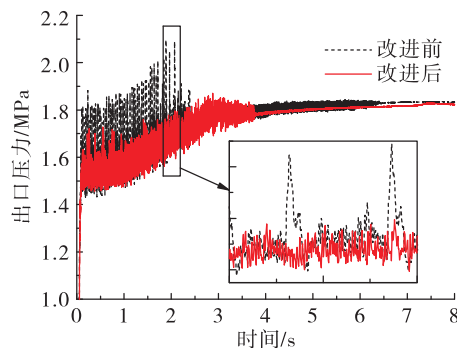


图8 整机试车减压阀出口压力曲线

Fig. 8 Outlet pressure of improved PRV in overall system test

5 结论

本文针对某减压阀启动过程出口压力振荡的问题,分析了其启动振荡的机理,仿真优化确定了减压阀阀芯行程和限流圈直径,改进后的减压阀通过各项试验考核,启动过程出口压力相对平稳,振荡现象得到有效抑制。多次高压冲击后安全阀漏率几乎保持不变,彻底解决了系统启动过程高压冲击导致安全阀漏率超标的问题。研究结果表明,采取入口增加限流圈、减小阀芯行程的限流措施,有利于抑制减压阀的启动振荡,为高压减压阀的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京:中国宇航出版社,1994.
 - [2] 张利成. 气动减压阀流量特性的仿真研究[D]. 大连:大连海事大学,2011.
 - [3] 朱建国,魏学峰,孙亮. 某减压阀高压冲击超调问题仿真分析与试验研究[J]. 火箭推进,2015,41(5):72-76.
- ZHU J G, WEI X F, SUN L. Simulation and experiment

- research on high-pressure shock overshoot phenomenon of pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(5): 72-76.
- [4] SEKITA R, MATSUDA M, NAKAMURA R. Pressure oscillation analyses of the pressure regulator for the H-IIA propulsion system[R]. AIAA 2003-4600.
- [5] 陈文曲, 李路路, 陈健. 一种金属膜片式气体减压阀研制[J]. 火箭推进, 2011, 37(6): 30-33.
- CHEN W Q, LI L L, CHEN J. Development of pneumatic pressure regulator with metal diaphragm[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(6): 30-33.
- [6] 杨林涛, 沈赤兵. 基于 AMESim 的姿控发动机压力振荡传递特性研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(3): 26-32.
- YANG L T, SHEN C B. Research on pressure oscillation transmission characteristics of attitude control engine based on AMESim[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(3): 26-32.
- [7] 谭建国, 江燕平, 王振国. 减压器增压过程中的振荡抑制措施[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 124-128.
- [8] 刘君, 董海波, 徐春光. 减压阀动态特性的数值模拟及故障分析[J]. 振动工程学报, 2015, 28(6): 990-997.
- [9] 徐登伟, 尤裕荣, 袁洪滨, 等. 基于 AMESim 的先导膜片式电磁阀动态特性仿真[J]. 火箭推进, 2017, 43(4): 41-45.
- XU D W, YOU Y R, YUAN H B, et al. AMESim-based simulation analysis on dynamic characteristics of pilot-operated diaphragm solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(4): 41-45.
- [10] 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 C X. Dynamic modeling and simulation for converse unloading pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(1): 60-64.
- [11] 王春民, 魏学峰, 董万峰, 等. 抑制氮气减压阀启动超调的仿真研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(17): 176-181.
- [12] 郭珣, 樊蕾. 气体减压阀动静压差研究[J]. 液压与气动, 2019(5): 87-91.
- [13] 邓攀, 陈一鸣, 高云, 等. 基于 AMESim 的先导式比例减压阀建模与仿真[J]. 液压与气动, 2015(2): 116-119.
- [14] 彭育辉, 吴智洲. 基于 AMESim 的 CNG 双级减压阀动态特性的研究[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(1): 14-19.
- [15] 贾一平, 黄运华. 基于 AMESim 的气动减压阀建模与仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2018(2): 60-62.
- [16] 滕浩, 石玉鹏, 张亮, 等. 基于 AMESim 减压阀动态特性仿真与试验研究[J]. 上海航天, 2015, 32(1): 48-53.
- [17] 张远深, 薛飞, 柳志姣, 等. 基于 AMESim 的高压气动减压阀的稳定特性[J]. 液压与气动, 2015(9): 68-72.
- [18] 姬俊锋, 林萌, 吴光中, 等. 远程高压大流量减压阀的研制[J]. 火箭推进, 2016, 42(3): 56-62.
- JI J F, LIN M, WU G Z, et al. Development of remote high-pressure mass flow reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(3): 56-62.
- [19] 葛友明, 肖体兵, 洪永, 等. 带有限压保护作用的减压阀建模与仿真分析[J]. 液压与气动, 2015(1): 35-38.
- [20] 郭嘉博, 肖敏. 带安全阀功能的减压阀动态特性仿真与分析[J]. 机械工程与自动化, 2016(3): 58-60.