

## 推进剂供应系统增压过程仿真

晋晓伟, 孙亮, 马健, 李平  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 在大型液体火箭推进系统中, 推进剂供应系统对贮箱压力有着严格的要求, 增压系统作为可靠性环节的关键系统, 工作过程复杂, 需要进行仿真分析和试验验证, 以改进设计。应用系统仿真技术, 对某推进剂供应系统的增压过程进行了仿真, 仿真结果与试验情况基本吻合。仿真结果表明缓冲阀可以有效地抑制增压过程压力振荡。此外, 系统增压时间不能低于 17s。

**关键词:** 推进剂供应系统; 增压过程; 仿真

中图分类号: V430

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0030-05

## Simulation of the pressurizing process of propellant feed system

Jin Xiaowei, Sun Liang, Ma Jian, Li Ping  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In a liquid rocket propellant feed system, tank pressure is an important parameter which should be strictly ensured. The pressurization system becomes one of the key systems influencing the reliability target, therefore numerical simulation and ground test are needed in order to optimize its design. The pressurizing process of certain propellant feed system is simulated by AMESim. The result of the simulation has a good agreement with the test, and indicates the validity of the buffer. Besides above, the pressurizing time should be more than 17s.

**Key words:** propellant feed system; pressurizing process; simulation

收稿日期: 2008-12-30; 修回日期: 2009-02-12。基金项目: “863” 高技术项目。

作者简介: 晋晓伟 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭推进系统。

## 0 引言

在大型液体火箭推进系统中, 推进剂供应系统设计是推进系统设计的一个很重要的环节。相关统计资料显示导致导弹、火箭发射失败的系统故障中, 推进剂供应系统所占的比例最高。大多数大型液体推进系统采用泵压式推进剂供应系统, 这种系统泵的人口压力较低, 但是对贮箱压力有着严格的要求。增压系统作为可靠性环节的关键系统, 涉及众多阀门和管路, 工作过程复杂, 需要进行大量的仿真和试验验证工作, 不断地改进和完善设计。

应用 AMESim 系统仿真技术, 对推进剂供应系统的增压过程进行了仿真试验, 通过与地面试验结果进行对比, 验证了仿真模型的有效性, 并为系统工作时序的制定提供了重要依据。

## 1 推进剂供应系统增压过程仿真

### 1.1 推进剂供应系统及增压过程

推进剂供应系统是控制推进系统推进剂贮箱气枕压力, 按规定的压力、流量将推进剂输送到火箭发动机, 连接推进剂贮箱、发动机及其他设备的增压和输送系统的综合。

增压系统是推进剂供应系统的一个关键组成部分, 主要由气瓶、电爆阀、过滤器、缓冲阀、减压阀、稳压阀、止回阀、贮箱止回阀以及连接导管和其他附件组成。

推进剂供应系统增压过程: 控制系统发出增压指令, 给电爆管通电, 电爆阀打开, 高压气体通过缓冲阀, 经过减压阀和稳压阀两级减压, 之后分为两路经过止回阀和贮箱止回阀对两个贮箱分别增压。

### 1.2 仿真建模

增压系统采用的阀门数量多, 涉及的种类也较多, 限于篇幅, 下面仅对减压阀和缓冲阀的建模情况进行简单介绍。

#### 1.2.1 减压阀

减压阀是将高压气体经阀芯节流减压为恒定

的较低的输出压力, 当进口压力由高降低变化很大时或出口流量发生变化时, 要求出口压力在给定的精度范围内变化。其出口压力的稳定是通过阀芯的开度调节来实现的。

受力分析时, 取阀门活动部件为分离体, 设向上的力为正方向, 略去活动部分的摩擦力和气体动力产生的反作用力, 其活动部件受力见图 1。

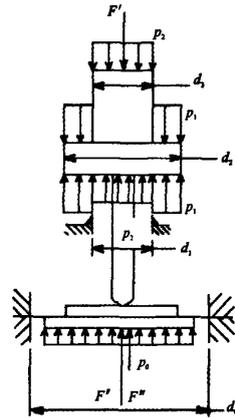


图 1 减压阀活动部件受力示意图

Fig.1 Sketch of forces acting on movement parts

图 1 中,  $p_0$  为大气压力;  $p_1$  为入口端高压气体压力;  $p_2$  出口端低压气体压力。

运动件的力学平衡方程为:

$$F' + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F'' + F_7 + F''' \quad (1)$$

式中,  $F'$ 、 $F''$ 、 $F'''$  为副弹簧、主弹簧及弹簧作用力;  $F_2$  为低压气体作用在卸荷环上的力;  $F_3$  高压气体作用在阀芯上的力;  $F_4$  低压气体作用在阀芯上的力;  $F_5$  低压气体作用在薄膜上的力;  $F_7$  大气作用在薄膜上的力。

定义阀芯开度为  $h$ , 各弹性件刚度分别为  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ , 各受力面为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。

将各作用力代入公式 (1), 整理后得:

$$p_2 = \frac{k_2 x_2 - k_1 x_1 - k_\Sigma h - (A_1 - A_3) p_1 + A_0 p_0}{(A_0 - A_1 - A_3)} \quad (2)$$

其中

$$k_\Sigma = k_1 + k_2 + k_3$$

由公式 (2) 可以看出, 只有  $h$ ,  $p_1$  为变量, 若能保持  $k_\Sigma h - (A_1 - A_3) p_1$  为常数, 通过开度的变化来抵消  $p_1$  的变化, 就可以保持  $p_2$  大致稳定。

而  $p_2$  可以通过调节主副弹簧的预应力来确定。减压阀的工作参数见表 1。

表 1 减压阀工作参数

Tab.1 Operation parameter of the regulator	
名称	参数值
入口压力/MPa	0
出口压力/MPa	2
大气压力/MPa	0.1

设定副弹簧力  $F''=193\text{N}$ 。将上述参数代入公式(1)，则可以得到主弹簧预紧力为  $F'+F''=3210\text{N}$ 。

1.2.2 缓冲阀

缓冲阀是一种带有节流孔的常闭阀门。其主体部分，即阀芯部分，由于弹簧力作用而保持阀芯关闭。初始时刻，高压气体只能通过节流孔从高压腔流入低压腔，缓冲阀工作在小流量状态。之后，低压腔逐渐建压，直到克服弹簧力，此时阀芯开始打开，气流通过阀芯流至出口端，缓冲阀逐渐转入大流量工作状态。缓冲阀的这种工作特性，可以避免电爆阀打开时刻的压力冲击对下游减压阀造成损害，并改善减压阀的工作环境。受力分析时，取缓冲阀的阀芯组件为分离体，设向上的力为正方向，略去活动部分的摩擦力和气体动力产生的反作用力。

根据阀芯受力情况，可以得到阀芯运动件的力学平衡方程：

$$F_2 - F' - F_0 - F_1 = 0 \tag{3}$$

式中， $F'$  为作用在阀芯上的弹簧力； $F_0$  为大气作用在阀芯上的力； $F_1$  为高压气体作用在阀芯上的力； $F_2$  为低压气体作用在阀芯上的力。

缓冲阀模型由弹簧、质量块、阀芯、节流孔及入口腔和出口腔等模块组成。缓冲阀的工作参数见表 2。

表 2 缓冲阀工作参数

Tab.2 Operation parameter of the buffer	
名称	参数值
打开时刻入口压力/MPa	1.1
打开时刻出口压力/MPa	1.1
大气压力/MPa	0.1

将上述参数代入公式 (3)，则可以得到弹簧预紧力为  $F'=153.94\text{N}$ 。

1.2.3 系统仿真模型

图 2 所示为 AMESim 软件建立的系统仿真模型。主要模块包括气瓶、缓冲阀、减压阀、稳压阀、止回阀及贮箱等。

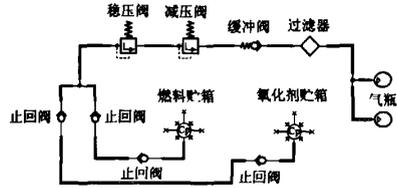


图 2 增压系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of pressurization system

1.3 仿真计算

增压系统气瓶工作气体为氮气，比热比为 1.40。单个气瓶为 20L，初始压力为 30.5MPa。管路中初始压力均为 0.1MPa。系统温度为 293.15K。缓冲阀节流孔为  $\Phi 0.6\text{mm}$ 。氧化剂贮箱气垫容积为 58.5L，燃料贮箱气垫容积为 39.5L，且两箱均预先充入 0.2MPa（表压）的背压。

仿真计算中，以气瓶电爆阀打开时刻为时间零点，仿真时间为 20s，时间步长为 1ms。

减压阀出口压力、稳压阀出口压力及燃料贮箱和氧化剂贮箱的压力变化的仿真曲线见图 3。

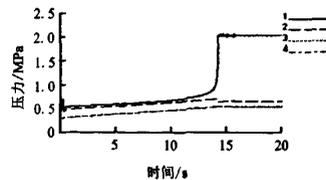


图 3 增压仿真曲线

Fig.3 Pressure variations of simulation

注：曲线 1 为减压阀后压力；曲线 2 为稳压阀后压力；曲线 3 为燃料贮箱压力；曲线 4 为氧化剂贮箱压力

为了验证缓冲阀的作用，去掉缓冲阀节流圈（相当于取消了缓冲阀），对增压过程进行仿真，仿真结果见图 4。

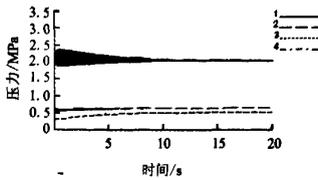


图 4 无缓冲阀时增压仿真曲线

Fig.4 Pressure variations of simulation without buffer

注: 曲线 1 为减压阀后压力; 曲线 2 为稳压阀后压力; 曲线 3 为燃料贮箱压力; 曲线 4 为氧化剂贮箱压力

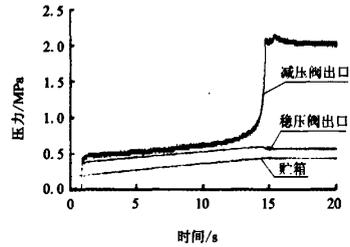


图 6 增压试验图 (0~20s)

Fig.6 Pressure variations of the test

注: 地面试验中, 0.9s 电爆阀打开, 增压开始

### 1.4 结果分析

由图 3 可以看出, 14s 之前, 缓冲阀阀芯是关闭的, 减压阀入口 (缓冲阀出口) 逐渐建压。电爆阀打开约 14s 后, 缓冲阀阀后建压至一定值, 其阀芯开始迅速打开, 此时由于增压气体流量的迅速增大, 引起了减压阀和稳压阀出口压力的小幅波动, 但很快就能够收敛并稳定下来。总的来看, 系统增压过程比较平稳, 没有出现较大的压力振荡现象。

由图 4 可以看出, 在去掉稳压阀的情况下, 气瓶电爆阀打开后, 减压阀出口压力出现了比较明显的压力振荡现象。此振荡过程持续大约 8s 左右, 振荡幅度在 0.2~0.3MPa, 与没有缓冲阀时增压系统地面试验的现象一致。稳压阀出口压力也存在较为明显的振荡。较大幅度的振荡持续大约 7s, 之后小幅度压力振荡也在持续。

## 2 地面试验结果

为了验证仿真模型, 下面给出了推进系统地面试验的试验结果。气瓶压力、减压阀出口压力、稳压阀出口压力及燃料贮箱和氧化剂贮箱压力变化曲线见图 5 和图 6。

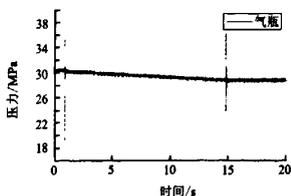


图 5 气瓶压力变化

Fig.5 Pressure variation of the gas vessel

## 3 仿真与试验数据

表 3 给出了对推进剂供应子系统的增压系统中气瓶压力、减压阀出口压力、稳压阀出口压力及贮箱压力的仿真计算结果和地面试验结果。

由表中各数据比较可见, 仿真计算的缓冲阀的打开时间以及各压力点稳定压力与试验结果基本一致, 说明了仿真模型和计算结果的正确性。

表 3 仿真与试验数据对比

Tab.3 Data comparison of simulation and test

名称	项目	仿真数据	试验数据
气瓶	压力转变/s	14.3~14.5	14.1
	稳定压力/MPa	29.5	28.9
减压阀	压力转变/s	13.8~14.2	13.2~13.7
	稳定压力/MPa	2.048	2.05±0.05
稳压阀	稳定压力/MPa	0.665	0.66±0.005
R 贮箱	稳定压力/MPa	0.544	0.54±0.01
Y 贮箱	稳定压力/MPa	0.541	0.54±0.01

## 4 结论

运用仿真技术对某液体火箭推进系统推进剂供应系统的增压过程进行了仿真, 并且与地面试验的试验结果进行了比较。通过这些工作可以得出以下结论:

(1) 仿真结果与地面试验的试验结果基本吻合, 证明仿真模型是可靠的。

(下转第 46 页)

## 4 系统达到的效果

(1) 根据专家经验和偏差及偏差变化率实现压力闭环控制。

(2) 数据测量和记录能为专家规则库的完善和优化提供实际参考。

(3) 手动按钮和强制按钮能保证增压的可靠性,并能弥补调试初期规则的不完善。

## 5 结论

在模型未知或变化较大的发动机地面试验增压系统中,基于专家思想的控制是完全可行的。

专家控制不但能使压力闭环控制的调试更为简单和可靠,而且控制系统的鲁棒性能使系统的适应性更广。

### 参考文献:

- [1] 蒋慰孙,俞金寿.过程控制工程[M].北京:中国石化出版社,1998.
- [2] 王顺晃,舒迪前.智能控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 邵惠鹤.工业过程高级控制[M].上海:上海交通大学出版社,1997.
- [4] 李异河,丁问司,孙海平.液压与气动技术[M].北京:国防工业出版社,2006.

(编辑:王建喜)

(上接第33页)

(2) 增加缓冲阀,并合理选择节流孔面积,对于消除增压过程中压力振荡是有效的。

(3) 缓冲阀的打开时间至少为15s,17s之后压力才能趋于稳定,因此系统工作时序中增压时间不能低于17s。

仿真技术在推进剂供应系统增压过程的分析中,取得了良好的效果。仿真技术的应用可以缩短产品研发周期,简化、减少物理试验,代替部分物理试验。随着数字化技术的发展,仿真技术将会在包括设计改进和系统试验等工程领域有着广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 廖少英.液体火箭推进增压输送系统[M].国防工业出版社,2007.
- [2] 付永领,祁晓野.AMESim系统建模和仿真—从入门到精通[M].北京:航空航天大学出版社,1989.
- [3] 费祥麟.高等流体力学[M].西安交通大学出版社,1989.
- [4] 曾维亮.航天姿控发动机减压阀的研究[J].火箭推进,2001,27(5):6-11.
- [5] 秦家升,游善兰.AMESim软件的特征及应用[J].工程机械,2004,35(12):6-8.
- [6] 王定军.贮箱充填过程仿真和分析[J].火箭推进,2008,34(1):23-25.

(编辑:马杰)