

# 动力系统大气垫容积启动充填仿真及试验研究

张雪梅, 朱佳春

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 应用 AMESim 系统建模和仿真软件并考虑减压阀出口不同节流孔板孔径节流能力, 建立了贮箱加注仅为满载加注量 40% 条件下的系统启动充填过程仿真模型。计算了电爆阀打开后贮箱出口压力变化曲线, 获得系统初始充填时间。依据仿真结果结合系统实际情况完成系统冷试验验证试验, 试验结果与仿真计算数据基本一致。

**关键词:** 系统充填; 仿真; 试验; AMESim

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2012) 06-0001-04

## Filling simulation and test research of power system with large ullage volume

ZHANG Xue-mei, ZHU Jia-chun

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** According to throttle ability of different orifice plate at exit of pressure reducing valve, the simulation model of start-up and filling process under the condition of 40% full-load filling quantity was built with the software AMESim. The curves of pressure history at the tank's exit were calculated after electric explosion valve was opened, and time of the start-up and filling process was obtained. Depending on the simulated results and actual condition of the system, cold test of the system was completed. The test results are coincident with the simulation results.

**Keywords:** filling of system; simulation; test; AMESim

## 0 引言

动力系统作为飞行器的主要产品, 以不小于  $1.5 \text{ m/s}^2$  的加速度起飞。但动力系统满载状态下整个飞行器产品重量约为其空载重量的 2 倍, 动力系统发动机地面状态推力无法实现满载起飞,

只能是降低加注量才能达到试验目的, 经系统核算最终将地面试验的加注量定位为满载加注量的 40%。

动力系统推进剂加注量为满载加注量的 40% 意味着贮箱气垫变为满载状态下气垫容积的 30 倍, 大气垫状态下系统启动后贮箱充填将为大流量充填, 为防止大流量充填可能对增压气体流动

收稿日期: 2011-09-28; 修回日期: 2012-10-11

基金项目: 国家 863 项目(2008AA702303)

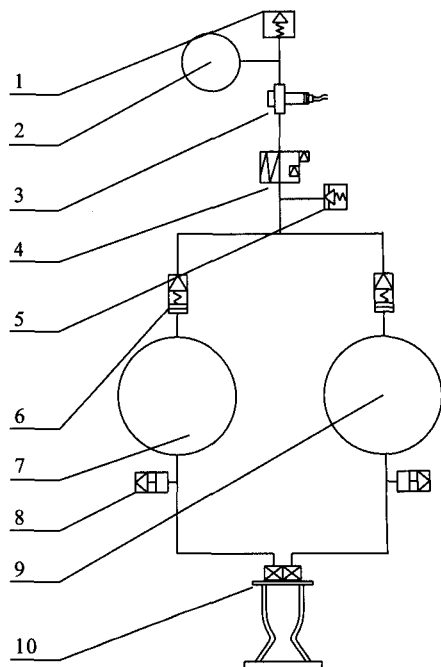
作者简介: 张雪梅 (1979—), 女, 高级工程师, 研究领域为姿轨控发动机系统

及贮箱组件产生结构影响, 决定在减压阀出口增加节流孔板以降低充填速度, 同时节流孔板的节流又不能影响发动机正常工况。

要解决上面的问题仅通过设计计算很难保证, 但要进行多次试验验证计算的准确性成本太高。因此, 决定采用 AMESim 软件进行建模和仿真分析, 根据仿真结果结合工程设计经验最终由系统冷试来验证, 既保证设计准确又减少试验成本。

## 1 系统简介

动力系统主要组件包括气瓶、减压阀、止回阀、贮箱、加注泄出阀、发动机、控制电缆等组成, 动力系统原理示意图见图 1。



1-充气阀; 2-气瓶; 3-电爆阀; 4-减压阀;  
5-安全阀; 6-止回阀; 7-燃料贮箱;  
8-加注泄出阀; 9-氧化剂贮箱; 10-发动机

图 1 动力系统原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of power system

## 2 仿真模型

利用 AMESim 软件, 建立了系统充填模型, 见图 2。在该模型中, 电爆阀和管路的通径相同

按管路计算, 并忽略电爆阀打开过程所用的时间。为了能够获取阀门和调节器等自动器组件的内部动态变化信息, 利用 AMESim 提供的液压、气动和电磁等元件设计库 (如 HCD Library, PCD Library), 根据阀门和调节器的实际物理结构布局选取对应的元件模块, 搭建出尽可能接近实际物理模型的仿真模型。本文中减压阀等组件的仿真模型都采用这种建模方法, 仿真中假设工作介质氦气为理想气体, 服从多变规律。

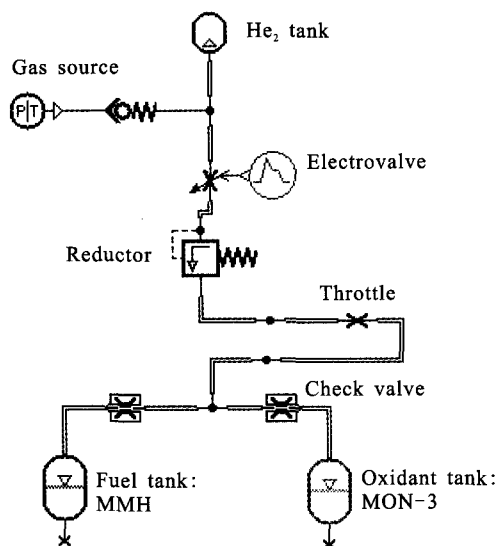


图 2 气路系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of gas path

## 3 仿真结果

利用 AMESim 仿真软件建立的数学模型与产品气路系统一致, 只是在减压阀出口安装了节流孔板。为了能够更真实地模拟系统工作情况, 仿真过程中主要考虑两方面的因素, 包括:

1) 在保证气路系统启动过程充填稳定又不影响动力系统正常工作的前提下, 模拟减压阀出口不同节流孔板孔径情况下的启动充填性能, 以选择最优的孔板来匹配动力系统;

2) 在未完成系统调整计算的前提下, 配套用减压阀出口压力值不确定, 为了能覆盖系统启动充填过程中可能出现的情况, 对不同的减压阀出口压力进行仿真。

考虑上述两方面因素对系统启动充填过程进行仿真, 仿真结果见图 3~图 6。

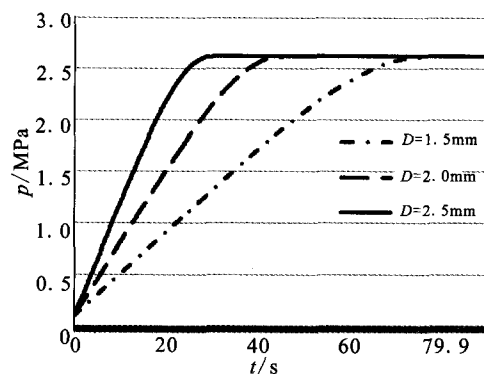


图 3 不同孔径时系统建压仿真曲线 ( $p_i=2.65\text{ MPa}$ )

Fig. 3 System pressure simulation curves of different aperture ( $p_i=2.65\text{ MPa}$ )

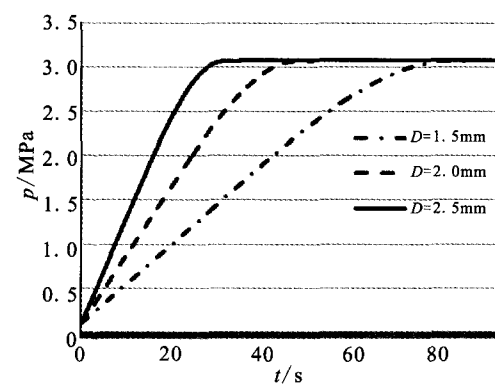


图 4 不同孔径时系统建压仿真曲线 ( $p_i=3.05\text{ MPa}$ )

Fig. 4 System pressure simulation curves of different aperture ( $p_i=3.05\text{ MPa}$ )

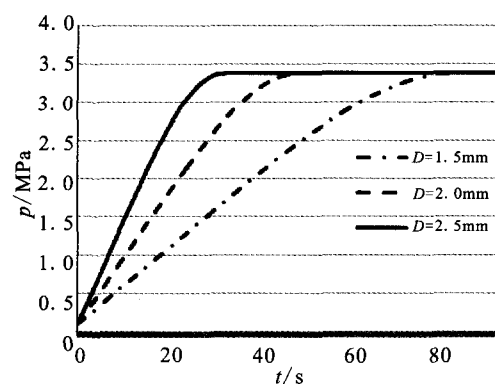


图 5 不同孔径时系统建压仿真曲线 ( $p_i=3.40\text{ MPa}$ )

Fig. 5 System pressure simulation curves of different aperture ( $p_i=3.40\text{ MPa}$ )

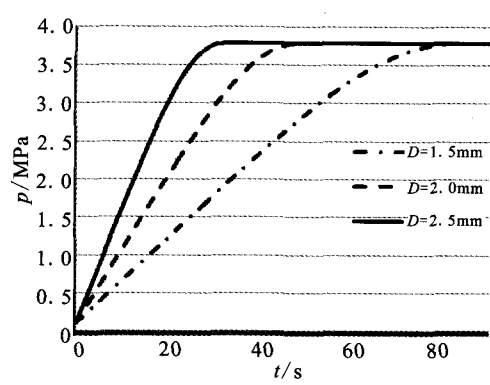


图 6 不同孔径时系统建压仿真曲线 ( $p_i=3.80\text{ MPa}$ )

Fig.6 System pressure simulation curves of different aperture ( $p_i=3.80\text{ MPa}$ )

统计不同压力和孔板孔径下系统启动充填时间, 统计结果见表 1。

表 1 启动充填时间统计

Tab. 1 Statistics of start filling time

$D/\text{mm}$	$p_i/\text{MPa}$			
	2.65	3.05	3.40	3.80
	$t/\text{s}$			
1.5	75.0	76.5	78.5	80.5
2.0	44.4	46.0	47.5	48.3
2.5	30.2	32.5	34.0	33.9

注:  $p_i$  表示贮箱增压压力,  $D$  表示孔板的孔径。

根据仿真结果可以看出:

- 1) 相同节流孔板孔径条件下, 达到不同系统工作压力所需的启动充填时间相差不大;
- 2) 不同节流孔板孔径条件下, 达到某一系统工作压力时所需时间差距较大。仿真结果显示减压阀出口节流孔板孔径  $D$  为 2.5 mm, 2.0 mm 和 1.5 mm 时, 仿真结果显示系统建压时间约需 32.0 s, 46.0 s 和 77.5 s。

依据仿真结果结合系统实际工作情况, 最终确定选择  $D=2.0\text{ mm}$  的孔板配套动力系统并且通过系统冷试验验证启动充填过程。

4 试验验证

在改变系统加注量的条件下, 为保证系统工

作的协调性并验证减压阀出口增加节流孔板措施的有效性,制定了系统冷试试验方案。

系统冷试试验产品配套减压阀出口额定工作压力约为 3.1 MPa,出口节流孔板孔径为 2.0 mm,贮箱加注量为满载加注的 40%,根据试验测试数据给出贮箱出口压力曲线如图 7 所示,可以看出贮箱出口压力达到额定压力 3.0 MPa(表压)所需时间与仿真结果基本一致。

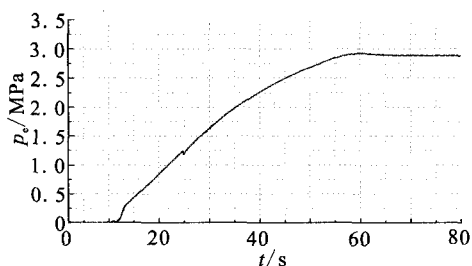


图 7 40%加注量启动时贮箱出口压力曲线

Fig. 7 Pressure curve of tank outlet as startup with 40% filling-up

## 5 对控制时序的影响

对比满载加注且减压阀出口不安装节流孔板条件下,系统启动所需时间约为 1.2 s。40%加注量试验状态下系统启动充填时间约为 50.5 s,对控制时序有较大的影响,在姿态验证试验时需对控制时序进行调整,以保证达到系统所需的工作压力。

## 6 结论

通过 AMESim 建模和仿真动力系统 40%加注量条件下的启动充填性能与试验结果一致,证明数学模型较好地模拟了系统启动充填过程。

通过对动力系统启动充填过程的仿真,确认 40%加注状态下系统充填时间约为满载状态的 42 倍,对控制时序有较大影响,需做出相应调整。

利用 AMESim 软件对动力系统启动充填过程进行动态特性仿真快速、准确,且可减少人力、物力成本,缩短研制周期。

### 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] 白晓瑞. 液体火箭推进系统动态特性仿真研究[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
- [3] 张金荣,汪亮. 液体火箭发动机启动过程的动态仿真计算[J]. 低温工程,2008(2): 22-27.
- [4] 晋晓伟,孙亮,马健,等. 推进剂供应系统增压过程仿真[J]. 火箭推进,2009,35(3): 30-34.
- [5] 王定军. 贮箱充填过程仿真和分析[J]. 火箭推进,2008,34(1): 23-25.
- [6] 杨晶,杨凯,黄敏超. 空间发动机启动过程的仿真[J]. 动力学与控制学报,2006,4(2): 187-192.
- [7] 张小平,丁丰年. 富氧补燃循环发动机启动过程[J]. 推进技术,2004,25(1): 83-86.
- [8] 刘洪坤,王维斌. 发动机启动燃气返腔仿真与影响分析[J]. 火箭推进,2011,37(2): 30-38.
- [9] 高明,胡芑庆,秦国军. 面对对象的推进剂加注系统建模与故障仿真[J]. 机床与液压,2009,37(9): 223-226.
- [10] 李锦江. 一种低温发动机系统动态仿真的快捷方法[J]. 导弹与航天运载技术,2012(1): 13-17.
- [11] 汪小卫,金平,张国舟,等. 全流量补燃循环试验发动机启动过程[J]. 推进技术,2008,29(4): 407-411.
- [12] 汪小卫,金平,俞南嘉,等. 富氧预燃室试验启动过程研究[J]. 航空动力学报,2007,22(12): 2119-2123.
- [13] 张育林,刘昆,程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [14] 刘红军,张恩昭,董锡鉴. 补燃循环发动机启动特性仿真研究[J]. 推进技术,1999,20(3): 5-9.
- [15] 刘昆,张育林,程谋森. 液体火箭发动机系统瞬变过程模块化建模与仿真[J]. 推进技术,2003,24(5): 18-22.

(编辑:陈红霞)