

文章编号: 1001- 2486(2008) 02- 0011- 05

空间推进系统工作过程故障仿真*

樊忠泽¹, 黄敏超²

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:以凝胶推进剂空间推进系统为研究对象, 对该系统异常工作的动态性能进行了分析和研究。为了获得空间推进系统故障模式, 把空间推进系统工作过程的故障特性方程与其正常数学模型相结合, 采用 Visual C++ 编程工具对导管泄漏故障、过滤网阻塞故障、电磁阀故障和喷管烧蚀故障进行了模拟, 从而为空间推进系统智能化故障诊断奠定了基础。

关键词:空间推进系统; 工作过程; 故障

中图分类号: V430 **文献标识码:** A

Fault Simulation of Space Power System in the Operation Process

FAN Zhong-ze¹, HUANG Min-chao²

(1. School of Electric and Information Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dynamic characteristics in the abnormal operation process of the gelled propellant space power system is dealt with in this paper. For the purpose of setting up the fault patterns of the space power system, the fault property equations and the normal mathematical models in the operation process were built. Then, four faults, including pipeline leak, filter jam, valve fault and nozzle ablation, were simulated by the visual C++ software. With an analysis of the results, some foundation for the intelligent fault diagnosis of the space power system in the future is provided.

Key words: space power system; operation process; fault

液体火箭发动机故障仿真与故障模式分析是建立液体火箭发动机健康监控系统和研制新型液体火箭发动机的重要基础。文献 [1- 3] 在建立动态数学模型之后对泵压式液体火箭发动机稳态过程故障进行了仿真研究, 文献 [4] 在建立静态数学模型基础之上对某液体火箭三级级发动机推迟关机进行了仿真分析, 这些研究工作促进了液体火箭发动机健康监控技术的发展。但是, 空间推进系统具有多个推力器, 它们的工作交叉进行, 并且脉冲周期很短, 即使在推力器正常工作情况下, 它们的供应系统管道工作参数也是随时间而剧烈变化的^[5- 6], 因此仅仅针对稳态过程研究空间推进系统故障特性是不全面的。本文通过建立能够反映空间推进系统异常工作过程的数学模型, 采用数值模拟的方法, 模拟推进系统在故障状态下性能参数的变化趋势, 以得到推进系统主要的故障模式, 从而给空间推进系统智能化故障诊断提供基本的依据。

1 空间推进系统故障数学模型

空间推进系统故障数学模型包括空间推进系统工作过程的正常数学模型和故障特性方程。有关液体火箭发动机正常过程的数学建模, 现已有大量的文献报道^[7- 8], 在此不再赘述。值得一提的是, 虽然我们采用集中参数方法建立正常数学模型, 但同时考虑了液体的惯性、粘性和压缩性, 而且按照预先确定的信号频率大小(可以提取 1~ 200Hz 的信息)进行合适的分段, 使得程序自动建立的常微分方程组能

* 收稿日期: 2007- 08- 30

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 樊忠泽(1968—), 男, 高级工程师, 博士生。

在一定程度上反映空间推进系统工作过程的分布特性,并且便于各部件模块化编程。

空间推进系统工作过程的故障特性方程按照不同的故障类型如下所示。

1.1 导管故障

1.1.1 导管工质泄漏

导管工质的泄漏取决于裂缝的面积和裂缝两边的压力差。对于液体推进剂,泄漏流量可表示为

$$q_l = \mu \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (1)$$

式中 q_l 为推进剂的泄漏流量, ρ 为推进剂密度, p_1 为被泄漏的推进剂的压力, p_2 为推进剂泄漏处的环境压力, μ 为裂缝的面积与流量系数的乘积。对于气体,泄漏流量可表示为

$$q_l = \begin{cases} \frac{\mu p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}, & \frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\mu p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right], & \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 RT_1 是被泄漏气体的作功能力, μ 为裂缝的面积与流量系数的乘积, γ 是被泄漏气体的比热比。

对于导管工质泄漏问题,故障效应可用裂缝面积的变化规律来描述,也即

$$A(t) = f(t) \cdot A_m \quad (3)$$

式中 $A(t)$ 是裂缝 t 时刻的面积, A_m 是裂缝的最大面积, $f(t)$ 是裂缝 t 时刻的故障因子,它可由下式确定

$$f(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_s \\ 1 - \exp[-k_f(t - t_s)], & t \geq t_s \end{cases} \quad (4)$$

式中 t_s 是泄漏故障发生的时间, k_f 是分数指数,取 0.2~0.5。

工质泄漏故障将引起管网工质流动状态发生变化,此时在流量平衡方程中需加入泄漏流量的影响,也即

$$q_2 = q_1 - q_l \quad (5)$$

式中 q_2 为裂缝下游流量, q_1 为裂缝上游流量。

1.1.2 导管工质阻塞

导管的过滤网及小孔有可能在工质包含杂质的情况下发生阻塞。此外,在极端情况下,推进系统装配过程中遗留的异物也可能造成导管阻塞。导管阻塞的效应表现为工质流通面积的减少和流阻的增加。对于液体推进剂,导管流量与压降之间的关系可表示为

$$\Delta p_2 = \xi \frac{q^2}{\rho}, \quad \xi = \left[\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right] \frac{1}{2A^2} \quad (6)$$

式中 A 是工质流通面积, ξ 是导管阻力系数, λ 是沿程阻力系数, ζ 是局部阻力系数, l 是导管长度, d 是导管内径。对于气体,导管流量与压力之间的关系式为

$$q = \begin{cases} \frac{\mu p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}, & \frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\mu p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right], & \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 RT_1 是气体的做功能力, μ 为导管横截面积与流量系数的乘积, γ 是气体的比热比, p_1 是导管入口压力, p_2 是导管出口压力。

对于导管阻塞问题,故障效应可用导管横截面积的变化规律来描述,也即

$$A(t) = f(t) \cdot A_m \quad (8)$$

式中 $A(t)$ 是导管 t 时刻的流通面积, A_m 是导管正常工作时的流通面积, $f(t)$ 是导管阻塞时的故障因

子,它可由下式确定

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_s \\ f_m + (1 - f_m) \exp[-k_f(t - t_s)], & t \geq t_s \end{cases} \quad (9)$$

式中 t_s 是导管阻塞故障发生的时间, f_m 是导管阻塞最严重时的故障因子, k_f 是分数指数。

1.2 电磁阀故障

电磁阀故障主要表现为阀芯运动不到位,其故障效应相当于减少了流通面积和增加了流通阻力。因此可参照导管阻塞来描述电磁阀故障。对于液体推进剂,电磁阀流量与压降之间的关系可表示为

$$\Delta p_2 = \xi \frac{q^2}{\rho}, \quad \xi = \frac{1}{2 \left(\frac{\mu}{A} \right)^2}, \quad A = \pi \bar{d} h \quad (10)$$

式中 μ 是流量系数, A 是流通面积, ξ 是导管阻力系数, \bar{d} 是阀座平均直径, h 是阀芯行程。对于气体,电磁阀流量与压力之间的关系式为

$$q = \begin{cases} \frac{\mu A p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}, & \frac{p_2}{p_1} \leq \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\mu A p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_2}{p_1} > \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 RT_1 是气体的做功能力, μ 是流量系数, γ 是气体的比热比, p_1 是电磁阀入口压力, p_2 是电磁阀出口压力, $A = \pi \bar{d} h$ 是流通面积, \bar{d} 是阀座平均直径, h 是阀芯行程。

对于电磁阀故障问题,故障效应可用阀芯行程来描述,也即

$$h = f \cdot h_m \quad (12)$$

式中 h 是电磁阀发生故障时的阀芯行程, h_m 是电磁阀正常工作时的阀芯行程, f 是故障因子。

1.3 推力室故障

推力室故障主要包括喷注器阻塞、喷注器烧蚀、燃烧室壁烧蚀破坏和喷管喉部烧蚀等,其中阻塞或泄漏故障可参照导管阻塞或泄漏的特性方程进行描述。当喷管喉部烧蚀时,故障的效应是使喉部流通截面积增加,此时喷管流量为

$$q = \begin{cases} \frac{\mu A p_c}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\gamma} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}, & \frac{p_a}{p_c} \leq \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\mu A p_c}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_a}{p_c} > \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (13)$$

式中 p_c 是燃烧室压力, p_a 是环境压力, RT_c 是燃气的做功能力, μA_t 为喷管喉部截面积与流量系数的乘积, γ 是燃气的比热比。

对于喷管烧蚀问题,故障效应可用喉部截面积的变化规律来描述,也即

$$A(t) = f(t) \cdot A_m \quad (14)$$

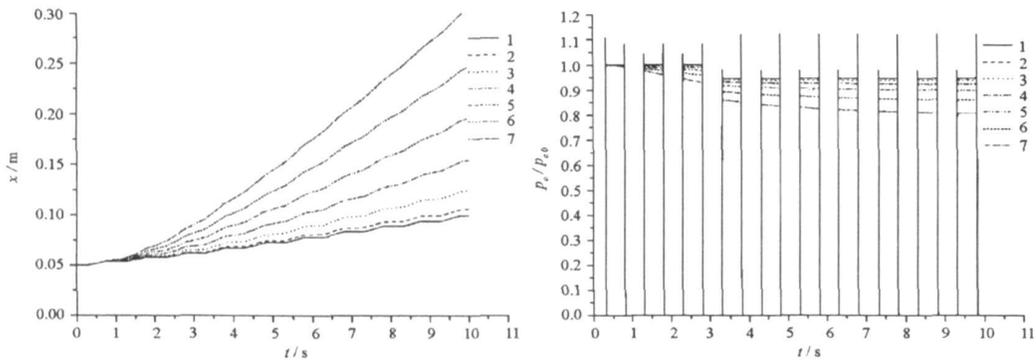
式中 $A(t)$ 是喷管喉部 t 时刻的截面积, A_m 是喷管正常工作时的喉部截面积, $f(t)$ 是喷管喉部烧蚀时的故障因子,它可由下式确定

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_s \\ 1 + (f_m - 1) \left\{ 1 - \exp[-k_f(t - t_s)] \right\}, & t \geq t_s \end{cases} \quad (15)$$

式中 t_s 是喷管喉部烧蚀发生的时间, f_m 是喷管烧蚀最严重时的故障因子, k_f 是分数指数。

2 故障特性分析

贮箱出口导管推进剂泄漏的故障特性如图 1 所示,随着裂缝面积 A_m 的变大,由于推进剂泄漏,使贮箱中推进剂液面下降速度变快,同时所有推力器的燃烧室压力降低。

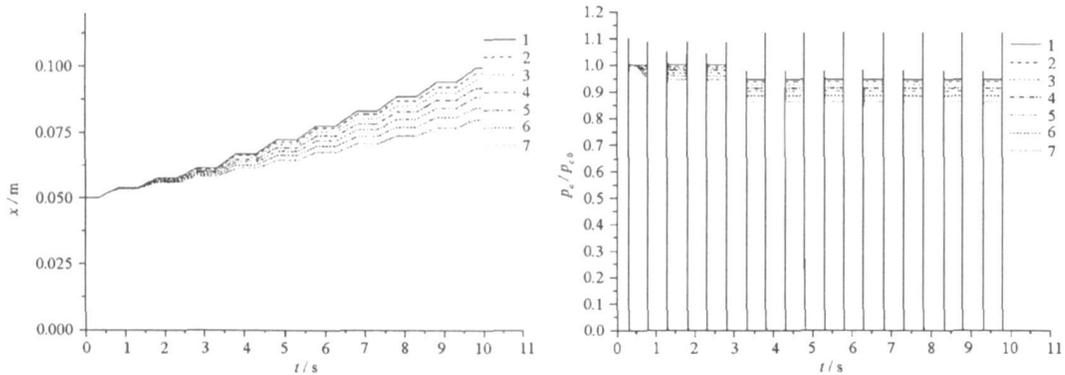


1- $A_m = 0.0\text{m}^2$, 2- $A_m = 7.854 \times 10^{-7}\text{m}^2$, 3- $A_m = 3.142 \times 10^{-6}\text{m}^2$, 4- $A_m = 7.069 \times 10^{-6}\text{m}^2$,
5- $A_m = 1.257 \times 10^{-5}\text{m}^2$, 6- $A_m = 1.964 \times 10^{-5}\text{m}^2$, 7- $A_m = 2.827 \times 10^{-5}\text{m}^2$

图1 贮箱气体高度和燃烧室压力曲线

Fig. 1 Curves of tank gas surface height and combustion chamber pressure

贮箱出口过滤网阻塞的故障特性如图2所示,随着阻塞故障因子 f_m 的变小,推进剂流通面积变小,引起贮箱中推进剂液面下降速度变慢,同时所有推力器的燃烧室压力降低。由此可知,贮箱出口过滤网阻塞与贮箱出口导管泄漏的故障效应都引起所有推力器燃烧室压力降低,但一个是推进剂消耗减少,另一个是推进剂消耗增加。



1- $f_m = 1$, 2- $f_m = 0.9$, 3- $f_m = 0.8$, 4- $f_m = 0.7$, 5- $f_m = 0.6$, 6- $f_m = 0.5$, 7- $f_m = 0.4$

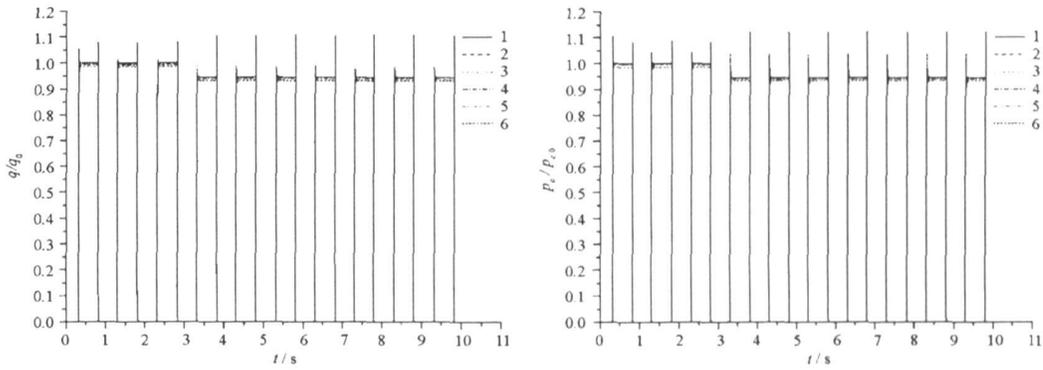
图2 贮箱气体高度和燃烧室压力曲线

Fig. 2 Curves of tank gas surface height and combustion chamber pressure

当控制推力器的电磁阀出现故障时,由图3可知,随着故障因子 f 的变小,喷管流量和燃烧室压力稍微变小。而当推力器的喷管出现烧蚀故障时,由图4可知,随着烧蚀故障因子 f_m 的变大,喷管流量变大,燃烧室压力降低。由此可知,阀故障与喷管烧蚀的故障效应都引起推力器燃烧室压力降低,但一个是喷管流量变小,另一个是喷管流量变大。

3 结论

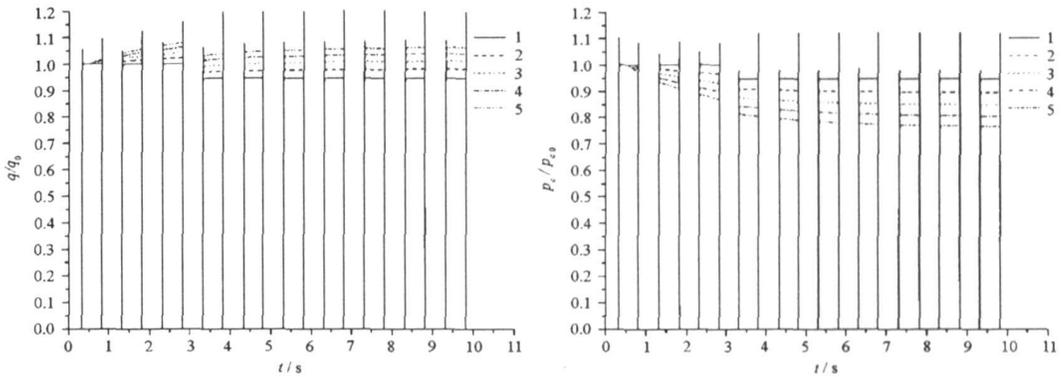
在空间推进系统正常工作过程的数学模型基础之上添加故障特性方程,对推进剂泄漏、过滤网阻塞、电磁阀故障和喷管喉部烧蚀进行了模拟研究,其结果为研制空间推进系统智能化故障诊断系统奠定了基础。空间推进系统与泵压式液体火箭发动机的工作形态不一样,它在工作过程具有多次启动与关机过程,使得供应系统的正常工作信号具有时变性的特点,这为开展空间推进系统故障检测与诊断技术工作增加了难度,这也将是研制空间推进系统健康监控系统必须重点解决的技术问题。



1- $f = 1$, 2- $f = 0.9$, 3- $f = 0.8$, 4- $f = 0.7$, 5- $f = 0.6$, 6- $f = 0.5$

图3 喷管流量和燃烧室压力曲线

Fig. 3 Curves of nozzle flux and combustion chamber pressure



1- $f_m = 1$, 2- $f_m = 1.1$, 3- $f_m = 1.2$, 4- $f_m = 1.3$, 5- $f_m = 1.4$

图4 喷管流量和燃烧室压力曲线

Fig. 4 Curves of nozzle flux and combustion chamber pressure

参考文献:

- 1] 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.
- 2] 刘冰. 液体火箭发动机智能化故障诊断与健康评估系统研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 1999.
- 3] 张育林. 液体火箭发动机健康监控——故障分析与仿真 [J]. 推进技术, 1997, 18(1): 8-12.
- 4] 蔡益飞. 某液体火箭发动机故障仿真分析 [J]. 上海航天, 2004(5): 34-38.
- 5] Yang A S, Kuo T C. Numerical Simulation for the Satellite Hydrazine Propulsion System [J]. AIAA-2001-3829, 2001.
- 6] Hsieh W H, Lin C Y. Blowdown and Waterhammer Behavior of Monopropellant Feed Systems for Satellite Attitude and Reaction Control [R]. AIAA-97-3224, 1997.
- 7] 杨晶晶, 等. 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.
- 8] 戴佳, 等. 双组元液体挤压推进系统启动过程时序分析 [J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 16-22.