

基于模型的故障诊断方法在 飞船推进系统中的应用*

宝音贺喜格 姜兴渭 黄文虎

(哈尔滨工业大学航天工程与力学系, 哈尔滨, 150001)

摘 要: 在飞船推进系统的物理和数学模型的基础上, 研究了基于模型的故障诊断方法在飞船推进系统中的应用。该方法是某飞船推进系统状态监测与故障诊断专家系统中的关键技术之一。仿真结果表明, 这项技术的提出和应用使得根据系统模型对推进系统的不可预知故障进行监测和诊断成为可能。

主题词: 飞船, 推进系统, 故障诊断, 故障预测, 模型

分类号: V430

APPLICATION OF MODEL-BASED FAULT DIAGNOSIS METHOD TO PROPULSION SYSTEM OF SPACECRAFT

Boyanheshig Jiang Xingwei Huang Wenhui

(Dept. of Astronautics and Mechanics, Harbin Inst. of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: Based on the physical and mathematical model of spacecraft propulsion system, the application of model-based fault diagnosis method to the propulsion system of spacecraft was studied. This method was one of the key technologies in state detection and fault diagnosis expert systems of the propulsion system of spacecraft. The simulation result indicates that the presentation and application of this method makes model-based detection and diagnosis of unexpected fault probable in the propulsion system of spacecraft.

Subject terms: Space ship, Propulsion system, Fault diagnosis, Failure forecasting, Model

1 引 言

推进系统是航天器上最关键的子系统之一, 一旦发生故障, 将对航天器任务的完成产生致命的影响。据美国发射各种运载火箭的统计资料表明, 推进系统发生的故障约占运载火箭总故障的 60% 以上。阿里亚娜火箭到 1990 年 2 月共发射 36 次, 失败 5 次, 全部是推进系统故障引起的^[1]。故障诊断是航天器系统不可缺少的组成部分, 在液体火箭推进系统健康监控技术的演变^[2]中, 基于模型的方法近年来取得了积极的进展^[3]。本文中以某飞船推进系统为例, 研究了基于模型的故障诊断方法在推进系统中的应用问题。该飞船采用挤压式推进系统, 其主要特点有: 推力小、工作时间长、精度要求高等。燃料为一甲基肼 (MMH)、氧化剂为四氧化二氮 (N_2O_4)、挤压气体为氦气 (He)。采用减压阀调节的双组元压力结构, 整个系统分气路、液路和燃烧室三大部分。

* 收稿日期: 1998-09-18, 修回日期: 1999-01-12, 本课题系国家“八六三”基金资助项目

2 数学模型

为了研究基于模型的诊断方法的应用, 这里不建立系统详细的物理模型, 只建立气路的简化模型。气路简化模型如图 1 所示。其工作方式, 当电磁爆阀打开后, 经减压器对贮箱增压, 达到额定值后减压器自动关闭, 贮箱初始气垫为 V_{T0} , 则气路工作模式可能出现四种情况, 建立相应的数学模型:

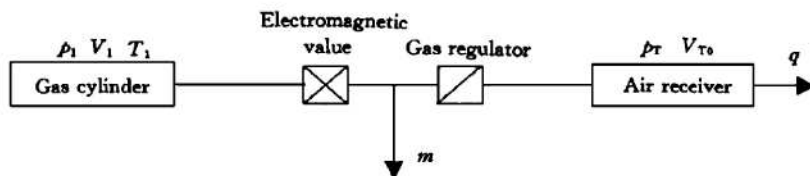


Fig. 1 Sketch of gas circuit

(1) 正常无泄漏增压过程 ($q = 0, m_{out} = 0$)

$$p_1 V (1 - \epsilon_p^{\frac{1}{n}}) \frac{d\epsilon_p}{dt} = p_T V_{T0} \epsilon_p^{\frac{1-n}{n}} \quad (1)$$

(2) 有泄漏增压过程 ($q = 0, m_{out} \neq 0$)

$$-\frac{p_1 V}{nRT_1} \left\{ \epsilon_p^{\frac{1-n}{n}} + \frac{p_T V_{T0}}{p_1 V} (1 - n) \epsilon_p^{\frac{1-2n}{n}} \right\} \frac{d\epsilon_p}{dt} = \frac{C_1 A_{out}}{\sqrt{R\tilde{K}}} \epsilon_p^{\frac{n+1}{2n}} \quad (2)$$

(3) 无泄漏发动机工作过程 ($q \neq 0, m_{out} = 0$)

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = -\frac{nq p_T}{p_1 V} \quad (3)$$

(4) 有泄漏发动机工作过程 ($q \neq 0, m_{out} \neq 0$)

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = -\frac{\frac{q p_T}{RT_1} \epsilon_p^{\frac{1-n}{n}} + \frac{C_1 A_{out}}{\sqrt{R\tilde{K}}} p_1^{\frac{n+1}{2n}} \epsilon_p^{\frac{n+1}{2n}}}{\frac{p_1 V}{nRT_1} \epsilon_p^{\frac{1-n}{n}}} \quad (4)$$

式中 $\epsilon_p = p/p_1$ (p 为任意时刻的气瓶压力, p_1 为初始充气压力); V 为气瓶容积; p_T 为贮箱额定压力; n 为多变指数; R 为 He 气体常数 ($= 2077.2$); T_1 为初始气瓶温度; V_{T0} 为贮箱初始气垫; A_{out} 为当量漏孔面积; $C_1 = 0.7266$; $\tilde{K} = T_1/p_1^{\frac{n-1}{n}}$; q 为贮箱推进剂排放气体流量 ($= Nq_F$); N 为同时工作发动机台数; q_F 为单个发动机工作排放流量。

实验的参数初始值如表 1 所示, 表 2, 3 列出某试验部分数据供参考。其中 $0 \text{ s} \sim 20 \text{ s}$ 为初始增压过程, 无发动机工作, 贮箱压力从 0 逐渐加压至额定值。时间 $52 \text{ s} \sim 2300 \text{ s}$ 为变工况发动机工作过程。

3 推进系统基于模型的诊断

这里采用的模型诊断的基本思想是, 系统进入工作状态后把在线测量数据与事先分析设计好的理论模型进行比较。为了适应各种工况, 我们采用了两种数学模型: 一种系统工作中

需要一部分系统参数；另一种系统工作时不再需要系统实时参数。第一种模型主要是针对可能发生设计阶段未能预料的情况考虑的。监测报警准则为当 $|y_d - y_m| \geq \sigma_y$ 时报警,其中 y_d 为所监测到的系统量; y_m 为相应的模型值; σ_y 为 y_d 的报警线,其值根据试验和经验,由专家决定。因此利用该方法时,在设计阶段详细分析系统数学模型和合理布置测点以及确定合理的 σ_y 值是很重要的。

Table 1 Initial values of parameters (from one test)

Parameters	Initial values	Parameters	Initial values
p_1/MPa	22.42	V_π/m^3	3×10^{-3}
V/m^3	7×10^{-3}	$A_{\text{out}}/\text{m}^2$	31.416×10^{-9}
n	1.67	$q_F/(\text{m}^3/\text{s})$	2.4×10^{-6}
R	2077.2	$\bar{K}$	0.3238
T_1/K	288	p_T/MPa	1.15

Table 2 Partial data of one test

t/s	p/MPa	p_T/MPa	t/s	p/MPa	p_T/MPa
0.0	22.42	0.242	12.5	20.35	1.145
2.5	21.33	0.984	15.0	20.23	1.158
5.0	21.00	1.023	17.5	20.17	1.168
7.5	20.72	1.091	19.0	20.14	1.173
10.0	20.53	1.128	20.0	20.08	1.116

Table 3 Partial data of gas cylinder

t/s	Number of engines	p/MPa	t/s	Number of engines	p/MPa
52	6	19.17	936	6	8.183
208	6	15.12	1040	8	7.794
364	6	12.60	1300	8	6.935
572	6	10.47	1800	8	5.522
728	6	9.261	2300	8	4.202

图 2 为利用本文中方法进行诊断的示意图。图 3 为某试验数据（增压过程中贮箱压力）模型值进行比较，(a) 为正常增压过程；(b) 为泄漏增压过程。从图中可知，正常增压和模型基本吻合，增压开始后 2 s~4 s 时可能有些误报（有关专家认为试验时其他干扰引起试验数据扰动较大），但很快就进入正常状态；当增压过程中泄漏时，增压开始后 2 s 就报警，并基本一直报警。其中若 σ_y 值定得较大，6 s~8 s 时也可能不报警。

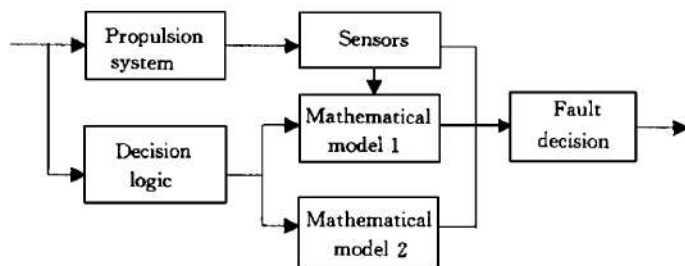


Fig. 2 Sketch of model based diagnosis

其中若 σ_y 值定得较大，6 s~8 s 时也可能不报警。

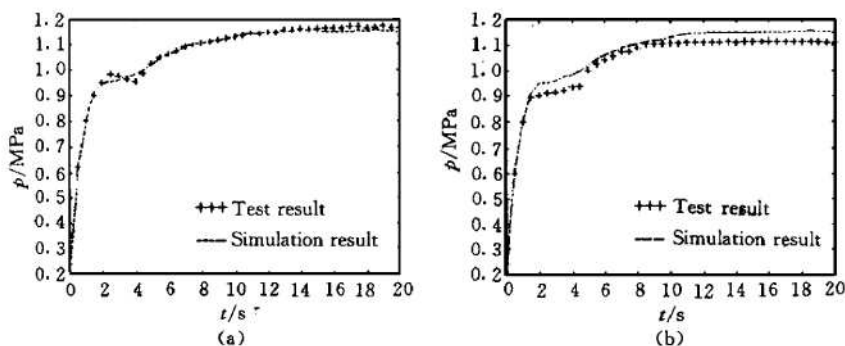


Fig. 3 Comparison of test and simulation results

(a) Normal process of increasing pressure

(b) Leak fault in increasing pressure process

4 结 论

仿真结果表明在推进系统状态监测与故障诊断中应用基于模型的方法是可行的，这样可以克服以往基于规则的诊断系统不能诊断不可预知故障、知识获取困难等缺点。而且在设计阶段，该方法还可以指导测点的优化和合理布置。

参 考 文 献

- 1 王之任. 近代大型液体火箭发动机的特点. 推进技术, 1991 (4)
- 2 陈启智. 液体火箭推进系统健康监控技术的演变. 推进技术, 1997, 18 (1)
- 3 颜子初. 液体火箭发动机状态监控与故障诊断技术的发展. 导弹与航天运载技术, 1994 (2)