

文章编号: 1000-8055(2006)02-0403-07

液体火箭发动机试验台气液管路 系统故障仿真及分析

张青松¹, 张振鹏¹, 杨 雪¹, 陈 锋²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;

2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 根据试验台和试验发动机的静态特性方程, 重点针对试验台进行稳态故障效应仿真; 采用一维不可压缩瞬变管流描述液路的流动过程, 用特征线法对试验台液路系统的突发性故障所引起的瞬变特征和过度效应进行仿真; 对储箱增压系统采用一维可压缩流的有限元状态变量模型描述气体管路的流动过程, 并建立减压器、储箱工作过程的数学模型, 用四阶龙格-库塔法对其进行故障仿真。仿真过程显示仿真模型和计算方法具有很好的适用性, 能有效地建立试验台较为完善的故障模式库, 通过分析仿真结果可以对现有试验台的改造、维护以及新试验台的改进设计进行指导。

关键词: 航空、航天推进系统; 试验台; 液体火箭发动机; 故障仿真; 故障模式; 减压器

中图分类号: V 434. 3

文献标识码: A

Fault Simulation and Analysis for the Fluid Systems of L PRE Test-Bed

ZHANG Qing-song¹, ZHANG Zhen-peng¹,
YANG Xue¹, CHEN Feng²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: According to the static characteristics of the test-bed and the testing L PRE, this paper simulated the main faults effect of the test-bed. Transient characteristics of abrupt faults of the fluid systems were also simulated with the method of characteristic for one-dimensional incompressible transient duct model. Simulation model of the reductor and the pressurized tank were established, and then the fault simulation for the tank pressurization system was carried out with the finite element state-variable model. The aim of this paper is to acquire the static and dynamic faults characteristics of the test-bed. The results indicate that the simulation models and methods are applicable and effective enough to achieve this purpose. The simulation results and analysis can also be used to provide guidance for the test-bed maintenance and amelioration.

Key words: aerospace propulsion system; test-bed; liquid propellant rocket engine; fault simulation; failure mode; reductor

收稿日期: 2005- 05- 17; **修订日期:** 2005- 09- 15

作者简介: 张青松(1981-), 男, 河南南阳人, 北京航空航天大学宇航学院硕士生, 主要从事液体火箭发动机故障检测与诊断的研究

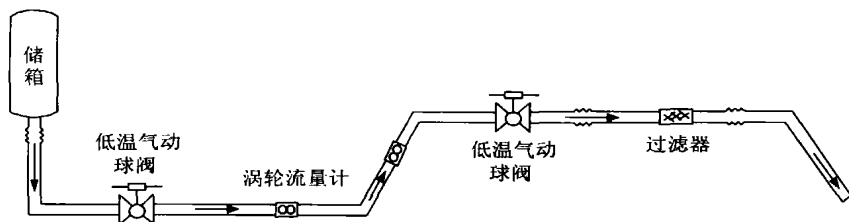


图1 试验台推进剂输送系统示意图

Fig 1 Schematic of the test-bed feeding system

用故障树分析法(FTA)对液体火箭发动机试验台进行故障诊断以及根据 FM ECA 分析结果开展系统的维护工作,都需要有完整的试验台故障模式为基础。为解决实际试车过程中不可能获得足够的故障数据并研究某些特定故障对实验系统的影响,需要对试验台系统进行故障仿真研究,同时这也是从理论上认识和把握故障的基本途径。目前已经开展了不少关于液体火箭发动机故障仿真的研究工作:文献[1,2]采用静态数学模型对发动机的稳态故障效应进行仿真,文献[3,4]用集中参数法对发动机的故障动态特性进行仿真研究,文献[5]也采用这种方法对发动机的泄漏故障进行了实时仿真。随着仿真模型和仿真方法的不断改进,所仿真的故障也越来越深入、细致,液体火箭发动机的故障模式库也随之在不断地丰富和完善。文献[6]用通用流体软件对一推进试验装置的氦气增压系统的工作特性进行了数值仿真和试验研究,但总体上针对液体火箭发动机试验台的故障仿真工作开展得还是较少,而且通常液体火箭发动机的故障仿真都把重心集中在涡轮泵及其以后的部件上,于是有不少仿真模型则直接从泵的入口开始建立,所以试验台储箱增压系统的故障仿真工作更是有待于继续深入。

本文重点针对液体火箭发动机试验台(包括液路系统和储箱增压系统)进行故障仿真,仿真的思路和内容如下:建立试验台和发动机的静态数学模型,对试验台常见的缓发型故障进行故障效应仿真,并根据仿真数据拟合出泵的入口流量和入口压力之间的函数关系,以此结果来处理液路系统动态分布参数模型的出口边界;建立试验台液路系统的一维不可压瞬变管流故障仿真模型,采用拟特征线方法进行求解^[7],对试验台液路系统的突发性故障所引起的瞬变特征和过度效应进行仿真并获得相应的故障模式;对储箱增压系统采用一维可压缩流的有限元状态变量模型^[8]描述

气体管路的流动过程,并进一步建立减压器、储箱工作过程的数学模型,用四阶龙格-库塔法对其进行故障仿真,根据仿真结果进行相应的故障模式分析,包括:减压器低压腔泄漏、操纵腔压力偏低、过滤器堵塞、调节阀开度异常。本文给出了仿真所用的方法,重点给出主要故障模式的仿真结果及其分析。

1 试验台液路系统稳态故障效应仿真

1.1 系统的静态数学模型

试验台液路系统(图1)由液体管道、阀门、涡轮流量计、过滤器等部件组成,试验发动机(图2)主要由液体管道、涡轮泵、燃气发生器、推力室以及阀门、文氏管、氧化剂稳压器等调节控制部件组成。整个试验台和发动机系统的数学模型可以由各部件的数学模型以及系统的参数平衡模型来描述^[6]。

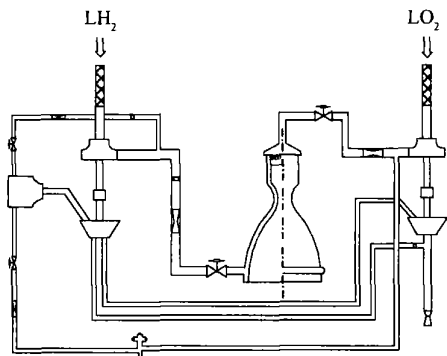


图2 试验发动机原理图

Fig 2 Schematic of the testing engine

描述试验台和发动机系统静态工作特性的数学方程是一非线性方程组,用Newton法对其进行求解,计算过程表明该方法收敛速度很快。

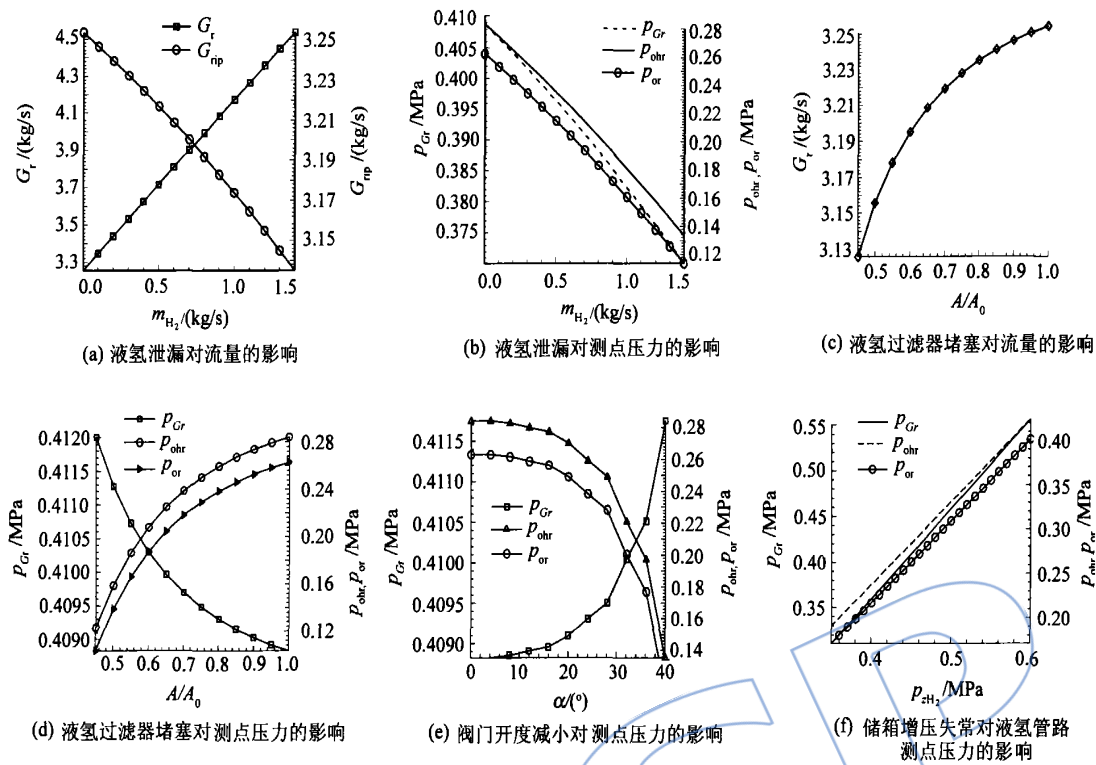


图3 试验台液氢输送系统稳态故障效应仿真结果

Fig 3 Simulation results of faults effect for LH₂ feeding system of the test-bde

1.2 故障的引入

这里所仿真的故障主要针对试验台液路部分,通过在静态数学模型中引入各相应故障(缓发型)的影响因子并改变其大小,就可以仿真出不同故障程度下试验台主要工作参数的变化情况。试验台工作过程中经常出现的主要故障及其数学描述如下。

1.2.1 推进剂泄漏

推进剂输送管路由于疲劳破坏或是振动等原因可能会在接头处或者焊缝处出现泄漏,试验台排放管路或者吹除管路上的阀门关闭不严也会引起推进剂的泄漏。推进剂泄漏量可按下式估算:

$$\dot{m}_l = \mu A \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (1)$$

式中: $\dot{m}_l$ 是泄漏量, ρ 是推进剂密度, p_1 为泄漏处附近管路内的压力, p_2 为环境压力, μA 为流量系数与泄漏面积的乘积。

泄漏的故障效应是引起输送管路内推进剂流量的不平衡,即:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_l \quad (2)$$

式中: $\dot{m}_2$ 为下游流量, $\dot{m}_1$ 为上游流量。

1.2.2 过滤器堵塞

过滤器中的过滤网以及小孔容易被推进剂中

的杂质堵塞。过滤器堵塞后导致流通面积减小,对管路流动的影响主要表现为流阻的增大,其数学描述为:

$$p_1 - p_2 = R \dot{m}^2 \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{2\rho \cdot (\mu A)^2} \quad (4)$$

1.2.3 阀门开度不够

其故障效应相当于改变了阀门的流通阻力 R , 此时阀门的流阻系数是阀门开度(活门转角)的函数,可由阀门的实验数据拟合得到。

$$R = f(\Theta) \quad (5)$$

1.3 故障仿真结果和分析

在试验台和发动机系统的稳态数学模型中引入各类故障的影响因子并改变其大小,通过大量的仿真计算,仿真出了相应故障对试验台监测参数的影响。根据仿真结果可对相关故障进行危害性评估以及进行故障模式分析。

试验台的监测参数为: G_r/G_y 为液氢/液氧的流量; P_{Gr}/P_{Gy} 为液氢流量计处/液氧流量计处的测点压力; P_{ohr}/P_{ohy} 为液氢管路/液氧管路出口压力; P_{or}/P_{oy} 为氢泵/氧泵入口压力。 G_{rp}/G_{yp} 为氢泵/氧泵入口流量,这两个是根据仿真结果而增加的

输出参数。这里给出试验台液氢输送管路的故障仿真结果如图3(a)~ (f), 涵盖了试验台液路系统常见的4种故障模式。

2 试验台液路系统故障特性
动态仿真

2.1 液路系统动态数学模型

由于试验台液路系统的工作压力不高(通常小于0.5 MPa), 并且试验之前对输送管路进行充分的预冷, 所以在数学模型中可以不考虑推进剂的可压缩性并且认为管流是等温的, 这样可以用一维不可压瞬变管流方程来描述管道内液体的流动。采用文献[7]中所提到的拟特征线法对该微分方程组进行差分离散化, 在此基础上对管路模块

进行求解。

液体阀门、涡轮流量计、过滤器等部件采用如下统一的集中参数模型:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\rho_0 a^2}{V_1} \left(Q_1 - \frac{q_m}{\rho_0} \right)$$
 (6)

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\rho_0 a^2}{V_2} \left(\frac{q_m}{\rho_0} - Q_2 \right)$$
 (7)

式中, V_1 和 V_2 分别为阀门入口和出口体积单元的体积; Q_1 和 Q_2 分别为流入和流出阀门进出口单元的体积流量, q_m 为阀门的质量流量, 由下式确定:

$$q_m = \tau \cdot C_d A \sqrt{2\rho_0(p_1 - p_2)}$$
 (8)

边界条件的处理:

进口压力为液氢(液氧)储箱增压压力: $P_{H2} = 0.45 \text{ MPa}$, $P_{O2} = 0.5 \text{ MPa}$ 。仿真的数学模型中加入泵前阀和泵前管路, 模型的出口物理边界为入口泵腔。针对每种故障模式, 根据前面相应的稳态故障仿真结果, 拟合出泵的入口流量和泵的入口压力之间的函数关系, 泵腔的出口流量由此函数关系和泵腔的压力确定, 泵腔的入口流量由其前端与之相连的管道模块确定。泵腔(液路系统的出口边界)的数学模型如下:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{a^2}{V_{ol}} (m_{in} - m_e)$$
 (9)

$$P < P_{min} \quad m_e = 0$$

$$P > P_{min} \quad m_e = f(p)$$

其中: P_{min} 可以认为是泵正常工作所要求的最低入口压力。

2.2 故障的引入

用分布参数描述的液路系统动态工作模型不仅可以仿真突发性故障所引起的工况转变过程,

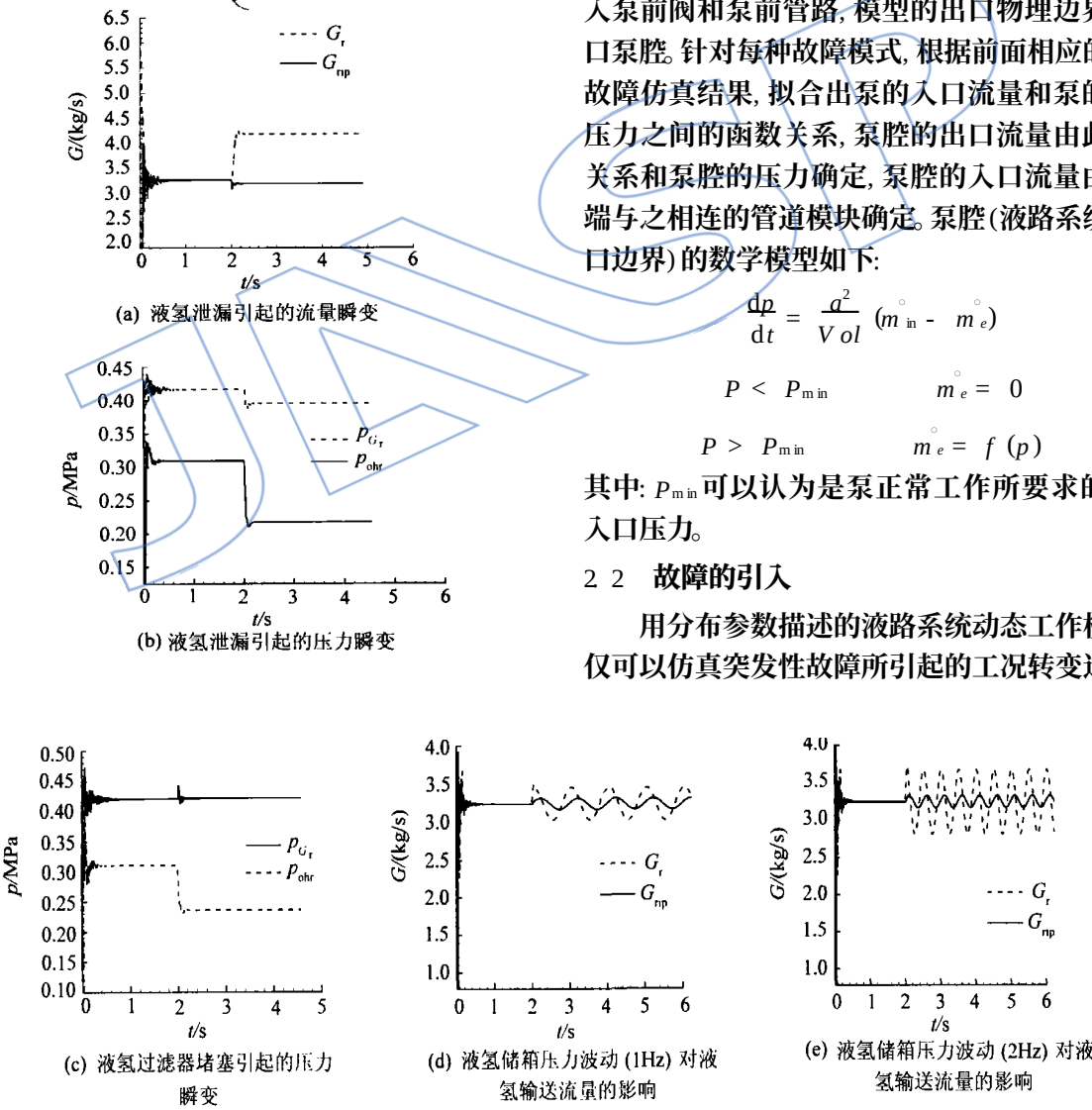
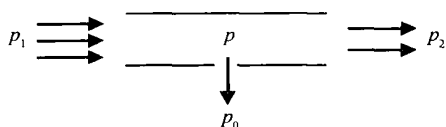


图4 试验台输送系统主要故障动态特性仿真结果

Fig 4 Simulation results of faults dynamic characteristic for test-bed feeding system

如短时间内出现较大程度的堵塞和泄露, 而且还可以仿真阀门关闭和关闭不严时不同程度的水击震荡, 同时也能仿真储箱压力波动对液路系统流动的影响。其中堵塞和阀门关闭的故障引入与前述稳态模型中的方法类似, 储箱压力波动的影响通过在模型的入口压力上叠加一波动方程即可。

对泄漏故障的处理则是通过在泄漏处增设一三通体积模块来刻画其影响, 其数学模型为:



$$\frac{dp}{dt} = \frac{a^2}{V_{ol}} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_e - \dot{m}_l) \quad (10)$$

式中: $\dot{m}_l$ 为泄漏量, 由公式(1)确定; $\dot{m}_{in}$ 和 $\dot{m}_e$ 由上下游管道模块确定。

2.3 故障仿真结果和分析

这里给出液氢管路出现 1.0 kg/s 的泄漏(泄漏位置在过滤器前方)时, 对液氢输送产生的影响及其所引起的故障过渡过程, 如图4(a), (b); 图4(c)显示了液氢过滤器出现堵塞时所引起的测点压力转变情况。

图4(d), (e)给出了液氢储箱压力出现波动时(波动幅度为 0.1 MPa , 波动频率分别为 1 Hz 和 2 Hz)的故障特性仿真结果。结果显示储箱压力波动对输送系统的影响要比相同幅度的储箱压力偏离的影响要大; 管路中前边的流量震荡幅度要比后边的流量震荡幅度大, 并且随着储箱压力波动频率的增大, 管路前端的流量震荡幅度也会随之增大。并且更详细的仿真结果表明, 储箱内不同频率的压力波动对管路内流动的影响也有不小的差别, 造成这种差别的原因应该与管路系统不同位置的固有频率和管路的流动阻尼有关, 这需要对管路系统的频率特性进行更深入地研究。

3 储箱增压系统故障仿真及分析

储箱增压系统的结构设计如示意图5所示。系统的工作原理: 高压气瓶内的增压气体($P = 14.0 \text{ MPa}$)经过减压器减压后对储箱进行增压; 在两集气管之间有两条增压支路, 上面的一条管径较小且阀门开度也较小, 为副增压系统, 下面的一条管径较大, 增压气体的流量也较大, 为主增压系统; 在初始增压阶段, 打开主增压系统的控制阀门对储箱进行充填增压, 在试验进行过程中, 关闭主增

压系统, 副增压系统在薄膜调节阀的控制下对储箱进行增压以维持所要求的储箱压力($P_{LH} = 0.45 \text{ MPa}$, $P_{LO} = 0.5 \text{ MPa}$)。

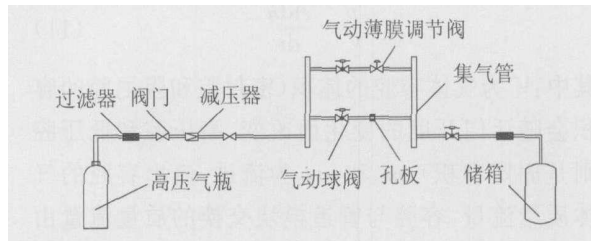


图5 储箱增压系统示意图

Fig 5 Schematic of the tank pressurization system

3.1 增压系统的动态数学模型

根据储箱增压系统的结构设计, 利用模块化仿真^[9]的思想将系统划分为以下几个模块: 气体管道、减压器、气体阀门(包括各类阀门、过滤器、孔板等)、气体容积、储箱。气体管道采用文献[8]所提出的一维可压缩流的有限元状态空间模型进行描述, 这里给出减压器的模型和储箱的简化模型。

3.1.1 减压器的模型

该增压系统所采用的减压器如图6所示。该减压器有五个气体容腔: 高压腔(P_1, V_1)、密封腔(P_m, V_m)、低压腔(P_2, V_2)、阻尼腔(P_z, V_z)和操纵腔(P_c)。操纵腔内控制气体压力 P_c 的大小对减压器出口压力起关键的调控作用。

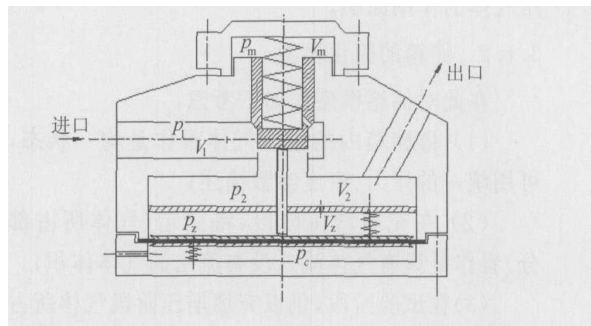


图6 减压器原理图

Fig 6 Schematic of the reductor

为方便建立减压器工作过程的数学模型, 做以下几点假设:

- (1) 流体为理想气体, 气体流动为一维流动;
- (2) 忽略减压器活门的阻尼, 工作过程中节流截面流量系数不变;
- (3) 减压器的整个工作过程为等温过程。

对理想气体状态方程进行求导和整理, 可得描述减压器各腔室压力变化(不包括操纵腔)的微

分方程:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \left(\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \right) - \frac{p}{V} \cdot \frac{A dh}{dt} \quad (11)$$

其中: V 为气体容腔的体积(密封腔和阻尼腔的容积会随活门开度的变化而改变, 高压腔和低压腔则是固定容积); $\dot{m}_{in}$ 和 $\dot{m}_{out}$ 为流进、流出容腔的气体质量流量, 容腔与管道模块交换的质量流量由管道模块计算确定, 容腔之间交换的质量流量按喷注器的质量公式计算; h 为活门的开度。正常工作时操纵腔内压力为定值, 与控制气瓶内的气体压力相同。减压器各腔室内的密度由状态方程确定。

取活门组件为分离体, 忽略活动部分的摩擦力和气体动力所产生的反作用力, 以向上为力的正方向(与活门开度方向一致), 得到活门的力平衡方程为:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = \sum F_i = S_1 - S_2 - S_3 - F_{mp} + p_c \cdot A_{mp} + p_2 \cdot A_h - p_m \cdot A_m - p_z \cdot A_{mp} \quad (12)$$

其中: m 为减压器活动件的质量(kg); S_1 , S_2 和 S_3 分别为操纵腔内、阻尼腔内、密封腔内弹簧的作用力; F_{mp} 为膜片的作用力; A_{mp} 为膜片的作用面积; A_h 为活门下端面的横截面积; A_m 为密封腔内高压气体的作用面积。

3.1.2 储箱的简化模型

在此对储箱模型作如下考虑:

- (1) 将储箱内的增压气体看作是均一状态, 可用统一的压力、密度参数描述;
- (2) 在充填增压阶段, 将储箱(气体所占部分)看作是只有气体流入没有流出的气体体积;
- (3) 在试验阶段, 仍以充填增压阶段气体所占据的体积为控制容积, 这时既有气体流入又有因液面下降而带来的气体流出, 这部分流出的气体与储箱内气体具有相同的状态参数;
- (4) 气体流出控制容积的体积流量等于储箱内推进剂流出的体积流量, 储箱内压力的变化会影响推进剂流量的大小。

在以上简化处理的基础上整理出储箱的数学模型如下:

充填增压阶段:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma}{V_{ol_g}} \cdot p_{in} uA \quad (13)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V_{ol_g}} \cdot \rho_{in} uA \quad (14)$$

试验阶段:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma}{V_{ol_g}} \cdot (p_{in} uA - p \cdot Q_e) \quad (15)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V_{ol_g}} \cdot (\rho_{in} uA - \rho \cdot Q_e) \quad (16)$$

$$Q_e = \frac{\dot{m}_{pr}(p)}{\rho_{pr}} \quad (17)$$

其中: V_{ol_g} 为充填增压阶段气体所占据的体积(作为整个计算过程中的控制容积); Q_e 是试验阶段增压气体流出控制容积的体积流量, $\dot{m}_{pr}(p)$ 为推进剂(液氧或液氢)的质量流量, 它是储箱压力的函数, 可根据液路系统静态仿真模型计算出的数据拟合得到。

3.2 故障仿真结果和分析

根据试验台统计的故障资料, 对液氧储箱增压系统常见故障进行仿真: 减压器低压腔泄漏、减压器控制气体压力降低、过滤器堵塞、调节阀开度异常。

3.2.1 减压器低压腔泄漏

减压器低压腔的测压导管可能因焊缝脱落或断裂引起增压气体泄漏。低压腔少量的泄漏并不会对低压腔的出口压力造成影响, 因此也不会对储箱增压带来变化; 当泄漏量较大时, 低压腔压力将会增大(如图7(a))。

3.2.2 减压器控制气体压力偏低

减压器控制气体出现泄漏时将会导致操纵腔压力降低, 减压器出口压力对操纵腔压力的变化非常敏感。图7(b)给出了当操纵腔压力由正常时的2.5 MPa 降为2.0 MPa 时的仿真结果对比。

3.2.3 过滤器堵塞

仿真结果表明过滤器堵塞后将使储箱充填增压过程放慢, 因试验阶段所需的增压气体流量很小, 调节阀又有较大的调节范围, 所以一般程度的堵塞对试验阶段的储箱增压没有大的影响。

3.2.4 调节阀开度异常

调节阀在试验台工作过程中根据增压压力的变化调节阀门的开度, 以保证储箱所要求的压力, 在此简化了调节阀的调节过程: 调节阀开度根据储箱压力做两个阶跃变化。若该气动薄膜调节阀

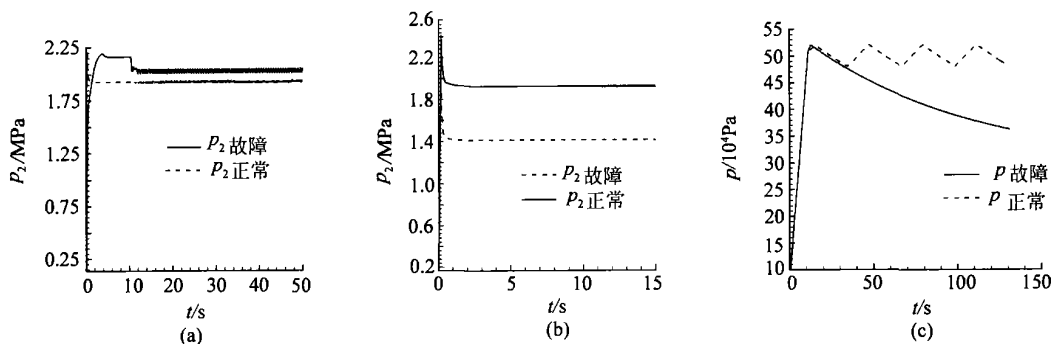


图7 储箱增压系统主要故障仿真结果

Fig 7 Results of main faults simulation for tank pressurization system

控制气部位或是活门的动作部位出现故障则会导致调节阀的开度不能按正常的调节规律进行变化,这就会引起储箱压力的变化进而影响到试验过程的进行。在此仿真了由于故障而使调节阀丧失了调节功能——始终维持在一较小开度时的工作过程,仿真结果如图7(c)所示:因增压气体流量较小,在试验阶段储箱压力处于不断减小的过程中,当储箱压力降低到一定程度时就不能保证试验的正常进行。

4 结 论

所进行的试验台气液路系统故障仿真工作克服了实际试车过程中无法收集到足够故障数据的局限,仿真过程也表明本文所建立的三种试验台故障仿真模型和采用的计算方法是行之有效的,基本上可以对试验台气液路系统的全部主要故障进行仿真,而且仿真模型具有对新型故障的解释能力;根据故障仿真结果能建立试验台系统较为完善的故障模式库,并且在此基础上的 FMECA 分析可对试验台的维护工作以及新试验台的改进设计进行有效的指导。

参考文献

- [1] 吴建军,张育林,陈启智 液体火箭发动机稳态故障仿真及分析[J]. 推进技术, 1994, 15(3): 6~13
Wu Jianjun, Zhang Yulin, Chen Qizhi Steady Fault Simulation and Analysis of Liquid Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1994, 15(3): 6~13
- [2] 尘军,范军,张楠,等 YF-75 氢氧发动机故障仿真与诊断研究[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 31~35
Chen Jun, Fan Jun, Zhang Nan, etc A Study on Fault Simulation and Diagnosis for YF-75 LH2/LOX Rocket

- Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(1): 31~35
- [3] 吴建军,张育林,陈启智 液体火箭发动机故障特性动态模拟[J]. 航空动力学报, 1994, 9(4): 361~365
Wu Jianjun, Zhang Yulin, Chen Qizhi Transient Performance Simulation of A Large Liquid Rocket Engine Under Fault Conditions[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 9(4): 361~365
- [4] 杨尔辅,徐用燃,张振鹏,刘国球 液体火箭推进系统故障过程建模与仿真研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3): 104~108
Yang Erfu, Xu Yongmao, Zhang Zhenpeng, etc Modeling and Simulations of the Failure Process for Liquid Propellant Rocket Propulsion Systems[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2001, 41(3): 104~108
- [5] 王建波,于达仁,王广雄 液体火箭发动机泄漏故障实时仿真[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 1~5
Wang Jianbo, Yu Daren, Wang Guangxiong Real-Time Simulation of Leak Fault of Liquid Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(5): 1~5
- [6] Kimberly Holt, Abk Majumdar Numerical Modeling and Test Data Comparison of Propulsion Test Article Helium Pressurization System[C]. AIAA 2000-3719
- [7] 程谋森,刘昆,张育林 推进剂供应管路内液体瞬变流一维有限元计算[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 12~15
Cheng Mousen, Liu Kun, Zhang Yulin One-Dimensional Finite Element Solutions for Liquid Transients in Propellant Feedlines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(4): 12~15
- [8] 刘昆,张育林 一维可压缩流的有限元状态空间模型[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 62~66
Liu Kun, Zhang Yulin Finite Elements State-Space Model for One-dimensional Compressible Fluid Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(5): 62~66
- [9] Liu Kun, Zhang Yulin A Study on Versatile Simulation of Liquid Propellant Rocket Engine Systems Transients[C]. AIAA 2000-3771