

## 液氢液氧火箭发动机稳态数值仿真与故障分析<sup>\*</sup>

刘冰 张育林

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 根据发动机工作的物理过程建立了大型液氢液氧火箭发动机稳态故障的数学模型, 数学模型包含了70个工作参数和45个干扰因素, 采用了布罗伊登法求解。确立了各种故障的正确仿真机制, 对计算结果进行了分析, 并与试车结果相比较, 吻合良好。

**关键词** 液氢液氧推进剂, 液体火箭发动机, 故障仿真, 故障分析

**分类号** V434.1

---

## LH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Rocket Engine Steady Number Simulation and Fault Analysis

Liu Bing Zhang Yulin

(Department of astronautics technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** The steady fault mathematical mode of large LH and LO rocket engine is built according to the process of engine. This mathematical mode contains seventy capable parameters and forty five disturbing parameters, in which the Broyden method is adopted to find the solution. It has established the right way to simulate the fault. Finally we analyse the result of the simulation, at the same time, we compare it with the hot-test. They coincide well.

**Key words** LH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> propellant, Liquid rocket engine, fault simulation, fault analysis

---

大型液氢液氧火箭发动机的稳态特性的计算和分析, 采用小偏差线性化的计算方法, 当发动机工作状态偏离了额定点较远时, 此种方法的结果就会大大偏离实际结果。应用于为实现故障检测和诊断而进行的故障仿真时, 其结果是很不可靠的。作者对现有的大型液氢液氧发动机利用非线性分析的方法, 建立了一组描述发动机工作参数和内外干扰因素之间关系的非线性方程组, 采用解非线性方程组的布罗伊登仿真算法, 编写了相应

的 C 语言源程序。在微机上实现了对发动机额定工况和有故障发生时的仿真。

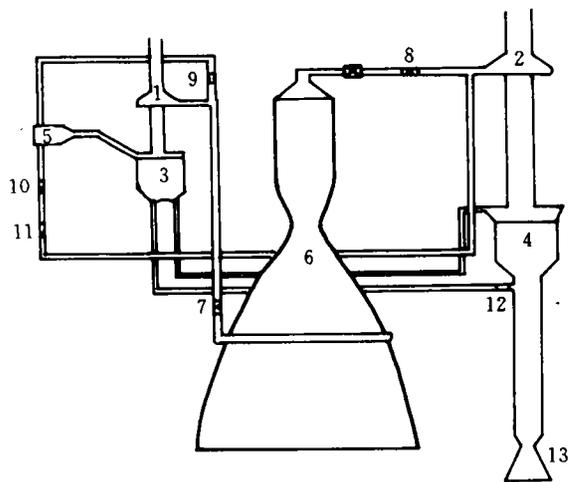


图 1

- 1—氢泵； 2—氧泵； 3—氢涡轮； 4—氧涡轮； 4—燃气发生器；  
6—推力室； 7—氢主文氏管； 8—氧主文氏管； 9—氢副文氏管；  
10—氧副文氏管； 11—氧稳压阀； 12—音速喷嘴； 13—拉瓦尔喷管

## 1 故障仿真数学模型

描述如图 1 所示的液氢液氧发动机稳态特性的数学模型，是一组反映发动机工作参数与内外干扰因素之间正确关系的非线性代数方程组（方程推导省略）。该方程组包含 70 个代数方程，其中有包括了 70 个发动机的工作参数和 45 个干扰因素。方程组可实现仿真发动机的稳态特性。在原方程组中添加相应的量或增加相应的故障方程，便可得到相应的故障仿真数学模型，以用于仿真在发动机实际工作过程中可能出现如：泄漏、堵塞、涡轮泵结构故障、燃烧室或发生器燃烧不正常等故障。

## 2 仿真算法

70 个非线性代数方程组可以表示为：

$$f_i(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{69}) = 0 \quad i = 0, 1, 2, \dots, 69$$

本文采用布罗伊登 (Broyden) 法求这一非线性方程组的实解。布罗伊登是拟 Newton 法的一种。它具有计算量少、效率高、稳定性好的特点。它区别于 Newton 法的地方在于用矩阵  $A_k$  近似替代  $F'(x_k)$ ，而  $A_{k+1}$  可在  $A_k$  的基础上用一个低秩矩阵来校正，每步的迭代只需计算  $n$  个分量函数值及  $O(n^2)$  次算术运算，大大降低了 Newton 法每一步的计算量。具体求解步骤如下：

- (1) 求初始迭代矩阵  $H_0$ 。（通常取作  $F'(x_k)^{-1}$ ）；
- (2)  $i=0$ ；
- (3) 计算  $F_i = F(X_i)$ ，其中

$$F(X_i) = \begin{bmatrix} f_0(x_0^{(i)}, x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}) \\ f_1(x_0^{(i)}, x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}) \\ \dots \\ f_n(x_0^{(i)}, x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}) \end{bmatrix}$$

- (4) 计算搜索方向  $P_i = -H_i F_i$ ;
- (5) 选择步长 (阻尼因子)  $t_i$ , 计算  $X_{i+1} = X_i + t_i P_i$ , 使  $\|F_{i+1}\| < \|F_i\|$ ;
- (6) 检验  $\|F_{i+1}\| < \epsilon$ ;
- (7) 计算  $Y_i = F_{i+1} - F_i$ ;
- (8) 计算  $H_{i+1} = H_i - (H_i Y_i - t_i P_i) P_i^T H_i / P_i^T H_i Y_i$ ;
- (9)  $i \leftarrow i+1$ , 转 (3)。

上面的阻尼因子  $t_i$  的选择不是唯一的, 任何可使范数减少的  $t$  均可使用。

### 3 计算结果分析

本文对发动机进行了稳态特性和故障特性的仿真, 稳态特性仿真的结果与某次发动机试车结果比较见表 1, 从仿真的结果可知, 发动机工作参数在故障情况下的变化符合发动机实际工作情况。

#### 3.1 稳态特性仿真

表 1 稳态特性仿真与某次发动机试车结果比较

工作参数名称	结果的相对偏差	工作参数名称	结果的相对偏差
发动机推力	0.0055	发生器氢喷前压力	0.0009
氢过泵流量	0.0068	发生器氧喷前压力	0.0073
氧过泵流量	0.0037	燃烧室压力	0.0038
氢泵后压力	0.0022	发生器压力	0.0032
氧泵后压力	0.0072	氢涡轮入口压力	0.0039
氢涡轮泵转速	0.0038	氢涡轮出口压力	0.0040
氧涡轮泵转速	0.0012	氧涡轮入口压力	0.0061
氢冷却套出口压力	0.0185	氧泵后温度	0.0001
燃烧室氧喷前压力	-0.0139	氢泵后温度	0.0006

#### 3.2 故障特性仿真

##### 3.2.1 氧泵后泄漏

由图 2 可知, 发生氧泵后泄漏的故障时, 泄漏量较少时各工作参数下降较缓慢, 而当泄漏故障程度加重导致图 1 中稳压阀 (11) 失去作用时, 各工作参数会开始急剧下降。泄漏主要使主系统的流量大幅度减少, 从而发动机燃烧室的压力降低, 推力下降。对这种故障, 氧泵后压力是最敏感。

##### 3.2.2 副系统氧文氏管堵塞

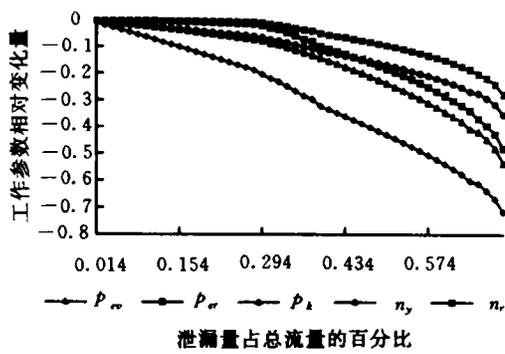


图 2

$p_{ox}$ —氧泵后压力；  $p_{h_2}$ —氢泵后压力；  $p_k$ —燃烧室压力；  
 $n_y$ —氧泵转速；  $n_r$ —氢泵转速

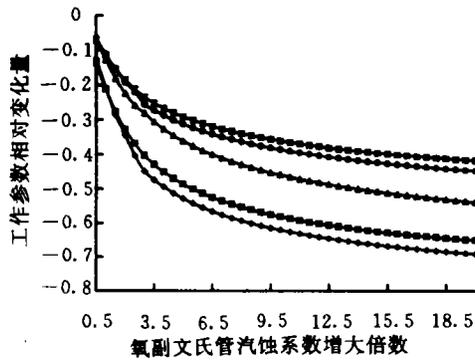


图 3

发生副系统氧文氏管堵塞故障时，由于发生器工作燃气做功能力对混合比很敏感的一段，因此发生器中的燃气做功能力会急剧下降，由图 3 可见，两泵后压力、两涡轮转速会大幅度降低，使得主系统的氢、氧流量迅速减少，燃烧室压力降低，推力变小，整个发动机进入新的低工况工作状态。在这种故障情形下，燃烧室压力、两泵后压力、转速均是敏感参数。在某次实际的发动机热试车中发生了该种故障，实际试车结果与仿真结果比较如表 2 所示。仿真结果是通过界定氢泵转速的试车数据得到的。由表可知两者的结果吻合较好。

表 2

工作参数	试车数据 (相对值)	计算数据 (相对值)
氧涡轮泵转速	-0.1347	-0.1649
氧泵后压力	-0.2545	-0.2617
氢泵后压力	-0.2817	-0.3003
燃烧室压力	-0.1629	-0.1466

### 3.2.3 氧主阀门打开不完全

由图 4 可知发生氧阀门打开不完全的故障时,各工作参数在故障程度较轻时变化很小,而当故障发展到使图 1 中 8 失去其控制流量的作用时,氧泵后压力和它的转速开始迅速增加,燃烧室压力则迅速减小。因为图 1 中 11 的存在,该故障不会导致发动机副系统大大偏离正常工作状态,所以氢泵后压力和它的转速变化依然较小。对于该故障燃烧室压力,氧泵后压力和它的转速是敏感参数。

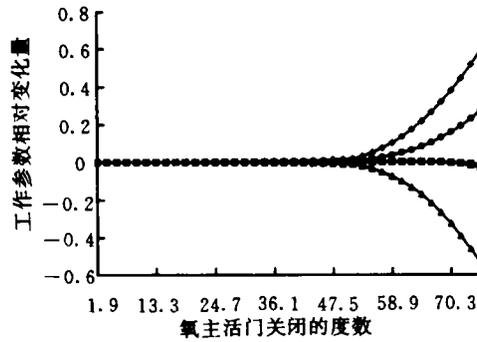


图 4

### 3.2.4 氢副控阀泄漏

由图 5 可知发生氢副控阀泄漏时,当泄漏量较小时,氧泵后压力和它的转速有所增加。这是因发生器中的混合比增大而使发生器燃气作功能力有所增强的缘故。随着泄漏量的增大,氧泵后的压力和转速也开始降低,当氧泵后压力降低到使图 1 中 11 失去作用时,工作参数便急剧下降。氢泵后压力是最敏感参数。

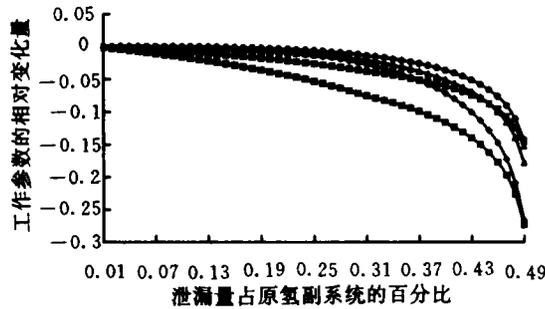


图 5

## 4 结论

### (1) 利用建立的稳态故障仿真

模型对液氢液氧发动机的特性进行仿真,所得到的结果,在稳态情况下同液氢液氧发动机正常试车的结果相一致,在故障情况下与试车结果吻合良好。

### (2) 可以了解液氢液氧发动机的各种工作参数在故障情况下的变化趋势和对故障的感性,

对在液氢液氧发动机实际试车中选择合适的监测参数提供可靠的依据。

## 参考文献

- 1 赵凤治. 线性规划计算方法. 北京: 科学出版社, 1981
- 2 谢如彪, 姜培庆. 非线性数值分析. 上海交通大学出版社, 1984
- 3 伏尔科夫等著. 火箭发动机可靠性理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1977

(责任编辑 石少平)