

液氧煤油发动机稳态故障仿真分析

党锋刚, 马红宇, 李春红, 宋 春

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 根据液氧煤油补燃循环发动机的特点, 建立了稳态工作过程故障仿真数学模型, 并针对比较典型的几种故障模式, 进行了仿真计算与效应分析, 最后进行了故障参数特征的初步提取。结果表明, 选定的 10 个缓变热力参数, 可对泄漏、堵塞及涡轮泵等典型故障模式进行有效识别和分离。

关键词: 补燃循环; 稳态故障; 仿真计算; 特征提取

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0027-05

Steady-state fault simulation and effect analysis of LOX/kerosene rocket engine

DANG Feng-gang, MA Hong-yu, LI Chun-hong, SONG Chun

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The simulation mathematical model of fault occurring in the steady-state working process is built and simulation software is designed according to the characteristics of LOX/kerosene staged combustion cycled rocket engine. Several typical failure modes are simulatively calculated. The effect of the fault is analyzed and characteristics of the fault modes are extracted. Ten slow variable thermal parameters were selected on the basis of the analysis result to identify the fault modes of leakage and jamming in the fuel pipe of engine.

Keywords: staged combustion cycle; steady-state fault; simulation calculation; characteristic extraction

0 引言

液氧煤油发动机采用富氧补燃循环方式^[1], 相比常规推进剂开式循环发动机, 其推力、流量

及工作压力均高出很多, 系统结构复杂, 组件工作环境恶劣, 发动机结构和部件均工作在高热流、大振动、强冲击的条件下, 大部分组件还工作在高富氧环境下, 一旦发生故障, 危害性极大。因此, 开展液氧煤油发动机的故障检测和诊

收稿日期: 2012-02-23; 修回日期: 2012-03-17

基金项目: 国家高技术项目 (2008AA705040)

作者简介: 党锋刚 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统设计

断技术研究非常重要,故障仿真技术作为其中的一项关键技术,可为检测参数选取、特征量提取及故障定位等提供重要的依据。

国内以往对开式循环发动机^[2-4]和姿控发动机^[5]故障仿真工作开展的较多,针对液氧煤油发动机,开展了初步的地面故障监控系统研究^[6],但尚未系统地开展故障仿真研究。本文以液氧煤油发动机为研究对象,建立其稳态故障数学模型,编制了仿真计算软件,设置可调整的故障影响因子,既可用于正常工况下评定性能参数随干扰因素的随机变化,进行发动机静态特性仿真,又可用于在故障状态下发动机性能参数衰减退化的计算,进行发动机稳态故障效应的仿真。

1 发动机数学模型

1.1 发动机系统

补燃循环是液体火箭发动机最先进的动力循环方式之一,其中富氧补燃循环发动机的系统简图如图1所示,包括推力室、燃气发生器(又称预燃室)、涡轮、氧化剂泵、燃料泵(包括一级泵和二级泵)、推力室燃料阀、预燃室燃料阀和预燃室氧化剂阀等。

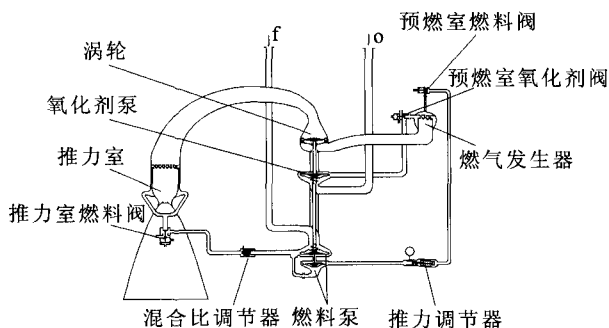


图1 补燃循环发动机系统简图

Fig. 1 Diagram of staged combustion cycle rocket engine

1.2 发动机稳态故障方程

描述液体火箭发动机稳态故障特性的数学模型是一组反映发动机工作参数、内外干扰因素及故障影响因子之间正确关系的非线性代数方程组。模型满足整个系统的流量平衡、压力平衡和功率平衡。液氧煤油发动机的稳态特性数学模型

包含了上百个代数方程,其故障的仿真通过在稳态特性模型中嵌入故障特性方程来实现。

典型的故障特性方程按照如下方法建立。

1.2.1 泄漏故障

发动机稳态工作无故障时,组件入口、出口流量为一定值,当出现推进剂或燃气泄漏故障时,需在稳态模型中补充一个新的流量方程:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{xl} + \dot{m}_{out}$$

式中: \dot{m}_{in} 为入口流量; \dot{m}_{xl} 为泄漏流量, \dot{m}_{out} 为出口流量。

1.2.2 堵塞故障

发动机气、液管路及各种过滤网、喷嘴堵塞,对应其通道截面积减小,压降增加,可通过增大流阻系数来模拟,方程如下:

$$\xi' = c \cdot \xi$$

式中: c 为大于1的常数。

1.2.3 阀门故障

阀门工作异常主要表现为阀门打开不到位或打不开,对应其流通截面积减小,压降增加,可通过增大流阻系数来模拟。但阀门流阻系数与阀门打开角度为非线性关系,需通过指数函数或三角函数来模拟,方程如下:

$$\xi' = e^{\alpha} \cdot \xi \text{ 或 } \xi' = f\left(\frac{1}{\cos^4 \alpha}\right) \cdot \xi$$

式中: α 为阀门打开的角度,假定零度时阀门完全打开。

1.2.4 喷嘴烧蚀故障

涡轮、燃烧组件(发生器、推力室)喷嘴发生烧蚀可通过喷嘴流通截面积的增大或流阻系数的减小来模拟,方程如下:

$$A' = c_1 \cdot A \text{ 或 } \xi' = c_2 \cdot \xi$$

式中: c_1 为大于1的常数; c_2 为小于1的常数。

1.2.5 涡轮泵故障

涡轮泵的故障主要表现为由于转子损坏、碰磨、泵汽蚀或泵叶片断裂导致的扬程或效率下降,可通过在扬程或效率方程前乘一系数来模拟,方程如下:

$$\eta' = c \cdot \eta \text{ 或 } \Delta P' = c \cdot \Delta P$$

式中: c 为小于1且大于0的常数。

2 计算方法与仿真结果验证

液氧煤油发动机稳态故障数学模型是由组件和推进剂特性方程以及故障特性方程组成的非线性方程组, 如下:

$$\begin{cases} f_1(X,A,C,S)=0 \\ f_2(X,A,C,S)=0 \\ \vdots \\ f_{n-1}(X,A,C,S)=0 \\ f_n(X,A,C,S)=0 \end{cases}$$

简写形式为: $F(X,A,C,S)=0$ 。
式中: X 为发动机状态参数, 如推力室压力、发生器混合比等; A 为发动机组件特性参数, 如管路流阻系数、泵特性方程系数等; C 为发动机入口参数和调节器参数, 如节流阀转角、氧化剂入口温度等; S 为故障影响因子。

表 1 仿真与实测结果对比
Tab. 1 comparison of simulation and test result

序号	名 称	(仿真-实测)/实测	
		正常	故障
1	发动机推力/kN	0	0.0 061
2	氧化剂流量/(kg·s ⁻¹)	-0.0 221	-0.0 042
3	燃料流量/(kg·s ⁻¹)	0.0 263	0.0 160
4	发生器氧喷前压力/MPa	-0.0 106	0.0 201
5	燃料一级泵出口压力/MPa	0.0 227	0.0 205
6	燃料二级泵出口压力/MPa	0.0 289	0.0 323
7	发生器燃料喷前压力/MPa	0.0 076	0.0 219
8	燃烧室压力/MPa	0.0 213	0.0 222
9	涡轮入口压力/MPa	0.0 033	0.0 189
10	涡轮出口压力/MPa	-0.0 015	-0.0 104
11	涡轮泵转速/(r·min ⁻¹)	0.0 030	0.0 047

以计算速度和精度为衡量算法的标准, 选择了线性化的牛顿迭代法, 为了改善迭代法对初值的要求, 在构造迭代模型时引入可变松弛因子, 在每一步迭代时, 应对松弛因子依次取 0.5, 0.25, 0.125 试探, 直至上式成立, 然后再进行下一步迭代。尽管选取松弛因子要消耗一定的计算时间, 但它保证了每一步都尽可能接近方

程组的解, 有效地减少了迭代次数, 而每次迭代时求 jacobian 矩阵及其逆阵计算量很大, 因而引入可变松弛因子从总体上大大节约了计算时间。
利用 Visual C++ 语言^[7]开发了补燃循环发动机稳态故障仿真软件, 并运用地面热试车实测数据进行了验证。表 1 为正常与故障试车仿真与实测结果的对比情况, 可以看出, 主要参数偏差很小, 说明模型准确有效, 仿真结果可以模拟发动机的实际工作情况。

3 故障模式仿真与效应分析

选取了 10 个参数进行故障影响效应分析及故障的识别与分离。定义如下:
 A 为发动机推力净变量/正常的发动机推力;
 B 为发动机氧化剂流量净变量/正常的发动机氧化剂流量;
 C 为发动机燃料流量净变量/正常的发动机燃料流量;
 D 为氧化剂泵出口压力净变量/正常的氧化剂泵出口压力;
 E 为燃料一级泵出口压力净变量/正常的燃料一级泵出口压力;
 F 为燃料二级泵出口压力净变量/正常的燃料二级泵出口压力;
 G 为发生器压力净变量/正常的发生器压力;
 H 为涡轮出口压力净变量/正常涡轮出口压力;
 I 为发生器温度净变量/正常的发生器温度;
 J 为主涡轮泵转速净变量/正常主涡轮泵转速。
参数的故障敏感性定义为:

$$f(x)=\begin{cases} 1 & \Delta a\%>1\% \\ 0 & -1\%\leq\Delta a\%\leq 1\% \\ -1 & \Delta a\%<-1\% \end{cases}$$

式中: $\Delta a\%$ 为参数相对变化量。

3.1 泄漏故障

发生器燃料外泄漏的故障效应见图 2。当发生器燃料外泄漏时, 进入发生器的燃料流量减少, 混合比升高, 燃气温度降低, 做功能力下降, 使发动机整个工况降低, 各参数均下降。其中氧化剂泵出口压力、发生器压力、燃料一级泵

出口压力及燃料二级泵出口压力下降趋势相对较为明显。

主涡轮出口燃气外泄漏的故障效应见图3。当涡轮出口燃气发生外泄漏时,涡轮出口压力降低;同时由于进入推力室的燃气流量减少,燃烧室压力降低,发动机推力下降;涡轮出口压力降低使涡轮压比增大,做功能力增加,进而涡轮泵转速、泵后压力升高。泵后压力升高,发生器氧流量增大,由于调节器作用燃料流量基本不变,使得发生器温度降低。

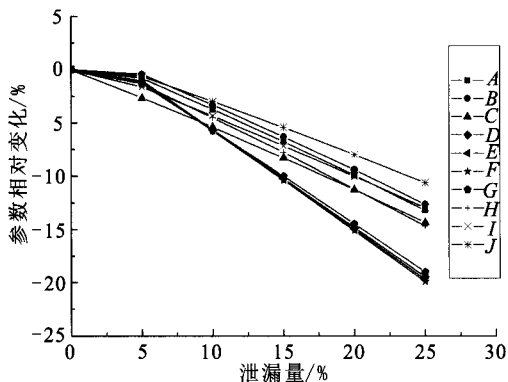


图2 发生器燃料管路泄漏影响图

Fig. 2 Influence of fuel pipeline leakage of gas generator on performance parameter

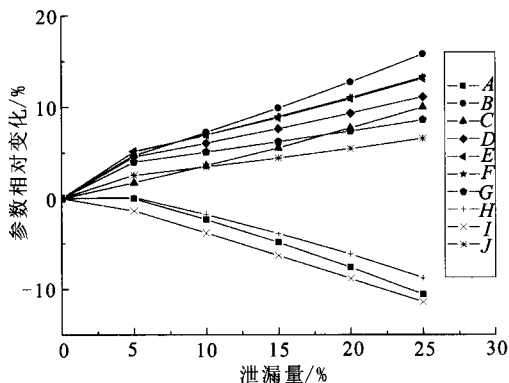


图3 涡轮出口燃气泄漏影响图

Fig. 3 Influence of gas leakage at turbine outlet on performance parameter

如果由上述10个参数形成故障效应,可表示为向量(推力、氧流量、燃料流量、氧泵出口压力、煤油一级泵出口压力、煤油泵二级泵出口

压力、发生器压力、涡轮出口压力、发生器温度及涡轮泵转速),根据参数的故障敏感性定义,正影响记为1,负影响记为-1,无影响或弱影响记为0,则上述泄漏故障效应可分别表示为(-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1)、(-1, 1, 0, 0, 0, 0, -1, -1, 1, 0),可以看出,通过这10个参数可识别出发生器燃料外泄漏与涡轮出口燃气外泄漏故障,达到对故障进行分离的效果。

3.2 堵塞故障

推力室或发生器供应系统管路、过滤器、喷嘴、冷却套堵塞及阀门工作异常均可归为一类,区别在于不同模式对参数的影响程度不同,但趋势是一致的。

推力室冷却套堵塞的故障效应见图4。冷却套堵塞使燃料一级泵负载变化,燃料流量减少,扬程增加,泵后压力升高,发生器压力升高。由于燃料流量减少,燃料泵功率减小,涡轮负载减小,转速升高,氧泵扬程及流量增加,使发生器混合比升高,燃气温度降低。燃料流量的大幅减小使得发动机推力降低。

发生器氧主阀堵塞的故障效应见图5。氧主阀堵塞使氧泵负载发生变化,氧化剂流量减小,因此发生器混合比减小,燃气温度升高,转速升高,燃料泵出口压力增大。由于氧化剂流量减少,使发生器压力减小,燃气流量减小,发动机推力降低。

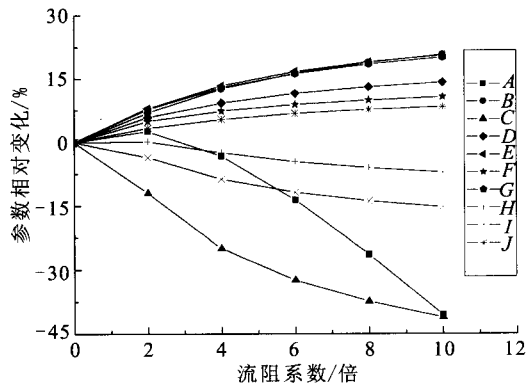


图4 推力室冷却套堵塞影响图

Fig. 4 Influence of coolant jacket of thrust chamber on performance parameter

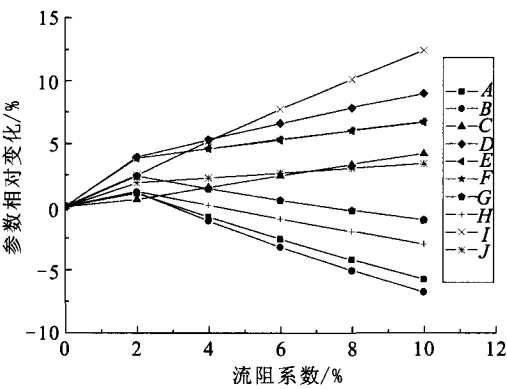


图 5 发生器氧主阀堵塞影响图

Fig. 5 Influence of blocking of oxygen main valve of gas generator on performance parameter

上述堵塞故障效应可分别表示为 $(-1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1)$ 和 $(-1, -1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1)$ 。可以看出, 这 10 个参数可有效识别和分离推力室冷却套堵塞与发生器氧主阀堵塞及泄漏故障模式。

3.3 涡轮泵故障

当泵轴承损坏或转动件发生摩擦时, 机械损失增加, 效率下降。当叶片断裂时, 水力损失增大, 效率下降。当泵发生气蚀时, 表现为效率和扬程下降, 流量减小。上述故障模式均可表征为涡轮泵效率下降。

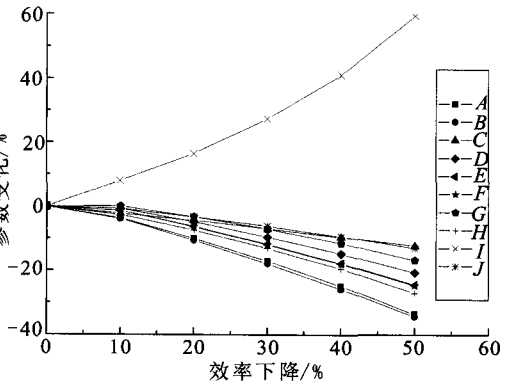


图 6 涡轮效率下降影响图

Fig. 6 Influence of turbine efficiency falling on performance parameter

涡轮效率下降故障的效应见图 6。参数均表现为发生器燃气温度升高, 其他参数下降。因为: 涡轮效率下降导致其做功能力下降, 转速下降, 而主涡轮与氧主泵、燃料一级泵及燃料二级泵同轴, 涡轮泵转速下降使泵扬程下降, 因此泵后压力等参数下降, 氧化剂流量减少, 由于调节器作用, 燃料流量基本不变, 因此发生器的混合比减小, 燃气温度升高。故障效应表示为 $(-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, -1)$, 可以看出, 这 10 个参数对泄漏、堵塞与涡轮泵等典型故障模式可进行有效识别与分离。

4 结论

通过仿真计算模拟了发动机较为典型的泄漏、堵塞、涡轮泵故障等几种故障模式, 并从发动机工作机理层面分析了其参数影响效应。参数变化特征提取结果表明, 选择的 10 个参数可以对泄漏、堵塞与涡轮泵故障等典型故障模式进行有效识别与分离。

参考文献:

[1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社. 2005.

[2] 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]. 火箭推进, 1994, 15(3): 6-13.

[3] 刘冰, 张育林. 液氢液氧火箭发动机稳态数值仿真与故障分析[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(6): 15-19.

[4] HAWMAN M W. Health monitoring system for the SSME-program overview, AIAA 90-1987[R]. USA: AIAA, 1990.

[5] 肖明杰. 姿控发动机稳态故障效应分析[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 79-83.

[6] 马红宇, 徐浩海, 李斌. 液氧煤油发动机地面试车故障监控系统研制. 火箭推进, 2008, 34(1): 46-48.

[7] 王正军. VISUAL C++6.0 程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

(编辑: 马 杰)