

# 大推力氢氧补燃循环发动机故障仿真

邓 晨, 薛 薇, 郑孟伟, 李子亮, 叶莺樱

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对大推力氢氧补燃循环发动机, 使用模块化故障仿真方法, 对发动机多种典型故障进行了仿真研究, 为建立液体火箭发动机健康监控系统奠定了基础; 首先, 介绍了大推力氢氧补燃循环发动机的系统组成结构以及工作过程; 其次, 利用 Matlab/Simulink 工具构建了发动机系统主要部件的模块库, 并根据发动机结构和工作过程, 建立了氢氧补燃循环发动机的整体仿真模型; 最后, 仿真分析了发动机的多种典型故障, 并利用 Matlab 的 GUI 工具搭建了可视化界面, 实现了操作和实现方式的人性化。

**关键词:** 氢氧补燃循环发动机; 模块化故障仿真; Matlab/Simulink 工具; 典型故障模式

## Fault Simulation for Heavy-lift LH2/LOX Staged Combustion Cycle Engine

Deng Chen, Xue Wei, Zheng Mengwei, Li Ziliang, Ye Yingying

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076)

**Abstract:** Aiming at the heavy-lift LH2/LOX staged combustion cycle engine, the modular fault simulation method is used to simulate a kinds of typical engine faults, which lays foundation for the establishment of health monitoring system of liquid rocket engine. Firstly, the system structure and working process of the typical LH2/LOX staged combustion cycle engine are introduced. Secondly, Matlab/Simulink tool is used to build the module library of the main components of the engine system, and according to the engine structure and working process, the overall simulation model of the LH2/LOX staged combustion cycle engine is established. At last, many typical engine faults are simulated and analyzed, and the visual interface is built by using Matlab GUI tools to realize the humanization of operation and implementation mode.

**Keywords:** LH2/LOX staged combustion cycle engine; modular fault simulation; Matlab/Simulink tools; typical fault modes

## 0 引言

液体火箭发动机由于长期处于高温、高压、强腐蚀、高密度能量释放的工作环境, 使得其成为了运载火箭中故障的敏感多发部位。据统计<sup>[1]</sup>, 在航天史上, 由于推进系统故障而导致的重大失败次数占总失败次数的 50% 以上。航天事故一旦发生, 不仅仅会带来巨大的经济损失, 而且往往会导致灾难性后果。近年来, 为满足我国未来载人登月、火星探测、空间站建设等航天发射任务的需求, 我国正在加紧研制氢氧补燃循环发动机。为了提高发动机的可靠性, 健康监控系统的研制迫在眉睫。

液体火箭发动机的故障模式是故障检测与诊断方法研究的基础<sup>[2]</sup>。因为大型泵压式液体火箭发动机试车代价极为昂贵, 并且进行专门的故障试车极端危险, 使得可以用于故障模式分析的试验数据极为稀少。因此, 故障仿真分析就成为了研究发动机典型故障模式的重要方法。

国内开展的故障仿真分析大多数针对液氧煤油发动机展开, 而对于氢氧补燃循环发动机的建模仿真研究却十分稀少。吴建军等<sup>[3]</sup>针对某大型泵压式液体火箭发动机, 建

立了非线性动态数学模型, 对一些典型故障进行了动态特征模拟, 得到了典型故障的动态特征; 蒲星星等<sup>[4]</sup>针对大推力液氧煤油高压补燃循环发动机, 建立了稳态故障仿真模型, 对可能危及发动机安全工作的故障模式进行了仿真分析, 获得了大推力液氧煤油高压补燃循环发动机 28 个检测参数对故障的敏感性排序; 党锋刚等<sup>[5]</sup>针对液氧煤油发动机建立了故障仿真数学模型, 并针对典型的几种故障模式进行仿真计算, 得到能够对泄漏、堵塞以及涡轮泵典型故障模式进行有效识别的 10 个缓变热力参数。本文以大推力氢氧补燃循环发动机为研究对象, 利用了模块化故障仿真方法, 建立了其稳态故障仿真模型并仿真分析了三种典型故障, 得到了故障特征参数的变化情况, 同时证明了该模型的适用性与有效性。

## 1 大推力氢氧补燃循环发动机系统组成与工作过程

### 1.1 系统组成

我国正在研制的氢氧补燃循环发动机, 它以低温液氢液氧作为推进剂, 采用单富氧预燃室, 燃气并联驱动氢氧涡轮泵的补燃循环方案。它主要由氢氧预压涡轮泵、氢氧主涡轮泵、氧预燃室、预燃室、推力室、管路和调节器等构成。发动机具备推力和混合比调节的能力, 可调部件为

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-09-29。

作者简介: 邓 晨(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事故障诊断技术方向的研究。

预燃室氧阀门和推力室氧阀门, 其中预燃室氧阀门调节推力, 推力室氧阀门调节混合比。

相比于以前的氢氧液体火箭发动机, 该型发动机多出了两个预压涡轮泵子系统, 其中预压氢涡轮由冷却夹套的气氢带动, 预压氧涡轮则由氧主泵增压后的液氧带动。

发动机系统各个部件之间既相互耦合, 在功能上又相互独立, 我们可以把液体火箭发动机看成是一个包含了很多子系统的复杂系统。从构成上, 液体火箭发动机可以分为发动机级、子系统级以及部件级等层次, 如图 1 所示。发动机结构层次化分解<sup>[6]</sup>是其模块化建模仿真的基础, 也是对其部件分解、模块化分类的基础。

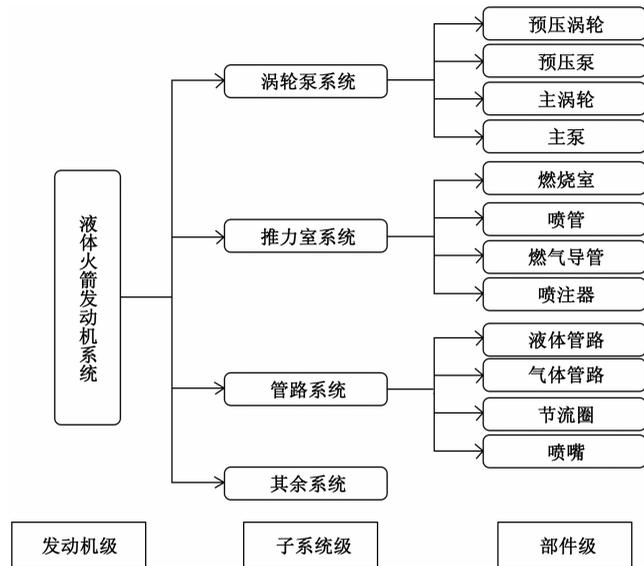


图 1 发动机组成结构层次分解图

## 1.2 工作过程

根据氢氧补燃循环发动机内部工质流动情况分析工作过程。氢路: 液态氢从氢贮箱出来之后进入氢预压泵, 经氢预压泵增压之后进入氢主泵, 经氢主泵增压之后分为两路, 一路进入预燃室燃烧, 另一路进入推力室冷却夹套, 用于冷却推力室。进入预燃室燃烧的液氢燃烧产生预燃室燃气, 燃气用于吹动氢主涡轮和氧主涡轮; 进入冷却夹套的液氢经过换热之后变成气氢, 之后流向氢预压涡轮用于吹动预压氢涡轮, 最后进入推力室进行燃烧。氧路: 液氧从氧贮箱出来之后进入氧预压泵, 经氧预压泵增压之后流向氧主泵, 经氧主泵增压之后分为三路, 一路流向预压涡轮, 另一路进入推力室燃烧, 最后一路经过预燃泵增压之后进入预燃室燃烧。

## 2 发动机故障模型

### 2.1 发动机典型故障分类

液体火箭发动机故障模式是指当发动机发生故障时的表现形式。故障模式分析是构建发动机健康监控系统的基础。在发动机稳态工作过程中, 主要会发生管路泄漏、阻塞故障以及涡轮泵故障等。本文对以往液体火箭发动机试

车过程中的故障进行分类统计, 归纳得到表 1 中的 4 种故障模式。

表 1 液体火箭发动机典型故障及发生部位

序号	故障模式	主要发生部位
1	泄漏故障	管路、接头、焊缝、密封件
2	堵塞故障	管路、小孔、导管、阀门
3	烧蚀故障	叶片、推力室喉部
4	磨损、脱落故障	轴承、叶片、燃烧室

据统计<sup>[1]</sup>, 在我国的所有泵压式发动机试车过程中, 推力室、涡轮泵和管路故障占据了发动机故障的 69%, 是故障的敏感多发部位。本位主要仿真分析了这些故障多发部位的典型故障。

### 2.2 发动机部件数学模型

液体火箭发动机作为一个具有强非线性, 时变、复杂的热力学系统, 其精确的发动机数学模型的建立十分困难。本文根据发动机层次分解方法, 将发动机分解为涡轮、泵、预燃室、推力室、管路等多个部件, 综合各部件的数学方程, 我们就得到液体火箭发动机的集中参数模型。这是一组非线性方程组, 通过迭代求解可以得到各部件的关键参数。

发动机各个部件当做一个具有一定输入和一定输出的基本元件模块, 则它的数学模型可以描述为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = T(X, U, D, t) \\ Y = Q(X, U, D, t) \end{cases}$$

其中:  $X (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  为模块的状态变量,  $U (u_1, u_2, \dots, u_p)^T$  为模块的输入变量,  $Y (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$  为模块的输出变量,  $D$  为组件数学模型参数,  $t$  为时间变量,  $T(\cdot)$  和  $Q(\cdot)$  为上述参数之间相互联系的函数关系。不同部件的数学模型决定了各自的输入变量  $U$ , 状态变量  $X$ , 以及输出变量  $Y$  之间的关系。

### 2.3 基于故障因子的发动机故障建模

发动机故障建模仿真时, 一般常用的主要有两种方法: 一种是改变原有的部件模型, 为故障模型重新设计新的数学模型; 另一种是故障部件的数学模型不发生改变, 只修改模型的参数  $D$ , 通过将模型参数乘以一个故障因子  $F$  来表征故障。而故障因子  $F$  的大小也反映了故障发生的程度。本文在考虑到易操作性和适用性的基础上, 选择了第二种方法来建立故障部件的数学模型, 当发动机部件发生故障时, 数学模型可以表述为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = T(X, U, F * D, t) \\ Y = Q(X, U, F * D, t) \end{cases}$$

基于上述方法, 本文分别建立了包括燃气涡轮模型、液涡轮模型、泵模型、预燃室和推力室模型、阀门模型、液体管路模型在内的发动机部件模块化数学模型和故障模型。

### 2.4 发动机故障模型库

在建立好发动机各部件的数学模型之后，使用 Matlab/Simulink 仿真建模软件，分别建立了液涡轮、燃气涡轮、泵、阀门、液体管路、推力室和预燃室等仿真模块，最后组成了发动机系统主要部件模块库，如图 2 所示。

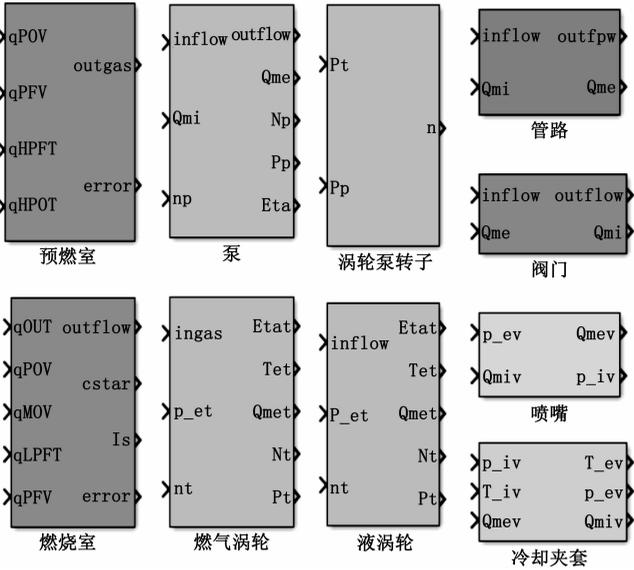


图 2 发动机系统主要部件模块库

发动机系统是一个极其复杂的系统，不同型号的发动机具有不同的结构，但是组成它们的基本部件都大体一致，通过建立发动机系统主要部件模块库，针对不同类型的发动机，只需要根据各自的具体结构，将各主要部件模块连接起来，就能搭建较为准确的仿真模型。

### 2.5 发动机故障模型 Simulink 实现

根据氢氧补燃循环发动机具体结构以及工作过程。我们使用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了它整体系统仿真模型，如图 3 所示。

仿真系统中许多参数采用了反馈的方法给定，比如说氢贮箱需要输出多少流量的氢，由预燃室氢阀门的氢流量和燃烧室氢阀门的氢流量共同决定。这样搭建的仿真系统，前后首尾都相互耦合，精度也更高，有利于后面工作的展开。

### 2.6 GUI 仿真界面设计

本文使用了 Matlab 里面的 GUI 工具设计了一个故障仿真的可视化界面，界面的具体布局如图 4 所示。

可视化界面主要分为故障部位选择、故障类型选择、故障因子设定以及监测参数选择四个主要部分。当需要模拟某一种典型故障时，首先需要选择相应部位的相应故障，设定故障因子，再将其余部位的故障类型设定为正常，故障因子也设定为正常值，接着选择相应的检测参数，即可仿真得到故障结果图。比如我们需要进行氧泵汽蚀的故障仿真，氧泵汽蚀的故障因子设置为 0.9，监测参数选择为氧涡轮泵转速，则界面设定就如图 5 所示。

## 3 典型故障仿真结果分析

### 3.1 监测参数选择

根据所归纳的发动机典型故障，本文仿真分析了预燃室氧阀门开度故障、氧主泵汽蚀故障和氧主涡轮叶片烧蚀故障这三种典型故障。针对每一种典型故障，都需要选择相应的多个监测参数。在选择监测参数时，需要考虑监测参

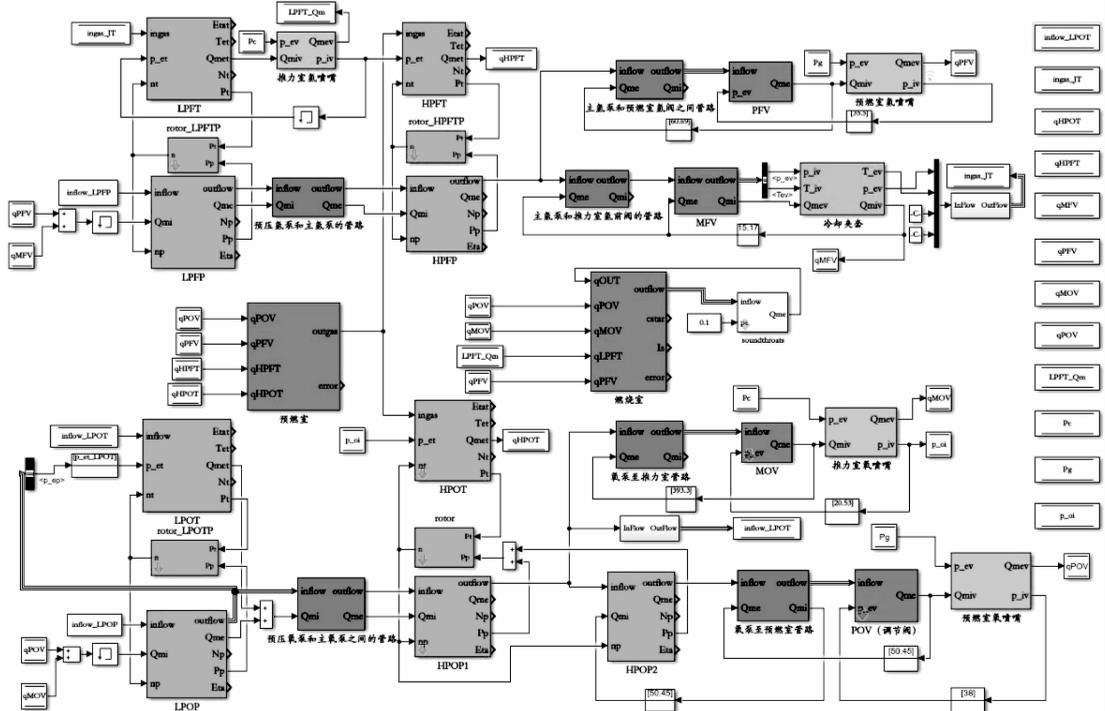


图 3 典型氢氧补燃循环发动机仿真系统图

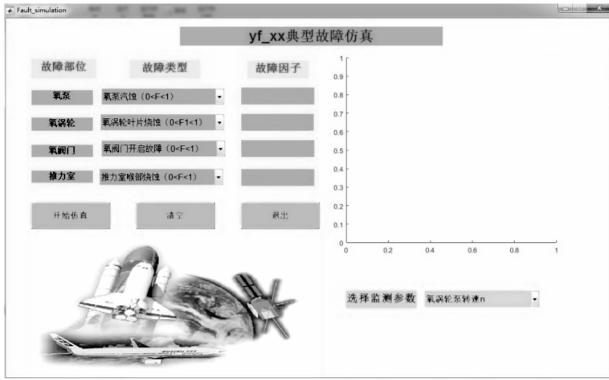


图 4 典型故障仿真可视化界面

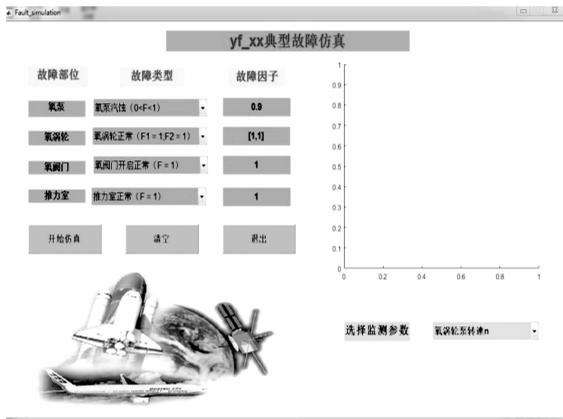


图 5 氧泵汽蚀故障界面图

数的可监控性、监测参数对故障的敏感性、监测参数对于监控算法的强鲁棒性等方面<sup>[8]</sup>。本文根据以上原则并结合专家经验选择了如表 2 所示的监测参数。

表 2 主要的监测参数

参数		符号	参数		符号
流量	氧主泵泵后流量	$q_{peo}$	压力	氧主泵泵后压力	$P_{peo}$
	氧主涡轮流量	$q_{teo}$		氧主泵泵前压力	$P_{pio}$
	氧预压泵流量	$q_{Lpeo}$		氢主泵泵前压力	$P_{pef}$
	氢预压泵流量	$q_{Lpef}$		氢主泵泵后压力	$P_{pef}$
	氢主泵泵后流量	$q_{pef}$		推力室室压	$P_c$
	推力室氧喷前流量	$q_{cio}$		推力室氧喷前压力	$p_{cio}$
	推力室喉部流量	$q_{throats}$		推力室氢喷前压力	$p_{cif}$
转速	氧预压涡轮泵转速	$n_{Lo}$	效率	氧主泵效率	$\eta_{po}$
	氧主涡轮泵转速	$n_{Ho}$		氧主涡轮效率	$\eta_{\omega}$
	氢预压涡轮泵转速	$n_{Lf}$		氢主泵效率	$\eta_{pf}$
	氢主涡轮泵转速	$n_{Hf}$		氢主涡轮效率	$\eta_{\omega f}$
温度	燃烧室温度	$T_c$			

### 3.2 发动机无故障仿真结果分析

发动机主级工况下, 通过将故障因子设置为正常值, 将发动机仿真模型进行仿真计算, 得到发动机正常工作时的结果, 并进行数据归一化处理, 得到如图 6 和表 3 的结果。

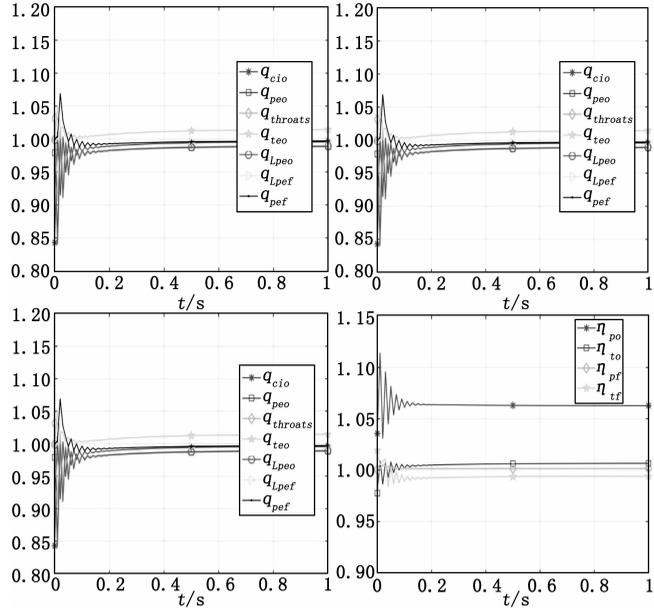


图 6 主要监测参数仿真结果图

表 3 部分监测参数仿真结果表

监测参数		设计值	仿真值	偏差	
1	氧主泵泵后流量	$q_{peo}$	1	0.989	-1.1%
2	氢主泵泵后流量	$q_{pef}$	1	0.997	-0.3%
3	推力室氧喷前流量		1	0.996	-0.4%
4	氧主涡轮泵转速	$n_{Ho}$	1	1.041	4.1%
5	氢主涡轮泵转速	$n_{Hf}$	1	0.974	-2.6%
6	氧主泵泵后压力	$P_{peo}$	1	1.037	3.7%
7	氢主泵泵后压力	$P_{pef}$	1	0.967	-3.3%
8	推力室室压	$P_c$	1	0.990	-1.0%
9	推力室氧喷前压力	$p_{cio}$	1	0.973	-2.7%
10	推力室氢喷前压力	$p_{cif}$	1	0.986	-1.4%
11	氧主涡轮效率	$\eta_{\omega}$	1	1.007	0.7%
12	氢主泵效率	$\eta_{pf}$	1	1.001	0.1%

发动机性能的关键参数, 如氢氧泵流量、压力、转速; 推力室压力、流量等, 本文比较了这些参数通过平衡计算得到的设计值和通过系统仿真得到的仿真值, 结果表明, 主要参数的仿真值和设计值基本吻合, 最大偏差为 4.1%, 其余偏差几乎都在 2% 左右, 说明模型精度较高, 并且仿真收敛时间都在 0.2 秒以内, 表明仿真速度快。证明搭建的大推力氢氧补燃循环发动机仿真模型能够较好的模拟发动机主级的工作过程, 可以用于进行故障模式的分析。

### 3.3 典型故障仿真结果与分析

#### 3.3.1 预燃室氧阀门 (POV) 开度故障

阀门是发动机中重要的调节元件, 它起着调节推进剂流量的作用。当阀门出现开度故障时, 意味着阀门不能准确的调节流量, 会导致流量降低, 从而引发一些列的故障和异常。

阀门的故障模型为:

$$q_{vm} = \mu_v A_v \sqrt{2\rho_o (P_{vi} - P_{ve}) \times 10^6} \cdot F_v$$

其中： $q_{vm}$  表示阀门的质量流量， $\mu_v$  表示阀门的流量系数， $A_v$  表示阀门的流通面积， $\rho_v$  表示通过阀门的工质密度， $P_{vi}$  和  $P_{ve}$  分别表示阀门的进出口压力。在下文中，相同的符号表示相同含义，不再赘述。 $F_v$  则为阀门的故障因子，可以表示如下故障或者异常：阀门堵塞导致流量减小时： $0 \leq F_v < 1$ ；阀门磨损导致流量增大时： $F_v > 1$ ；阀门正常时： $F_v = 1$ 。

本文仿真的是预燃室氧阀门开度故障，设定故障因子  $F_v$  为 0.8，故障发生时间为 2 s。进行归一化处理的仿真结果如图 7 所示。

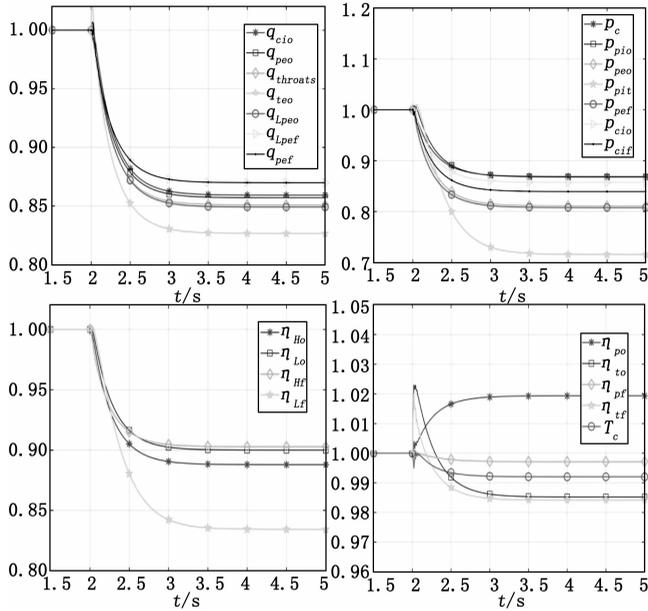


图 7 预燃室氧阀门开度故障仿真结果

从仿真结果来看，当预燃室氧阀门开度故障时，绝大部分参数都有明显的下降，这是因为预燃室氧阀门开度故障导致氧阀门出口流量降低，使得预燃室产生的燃气流量减少，从而导致氢氧主涡轮转速降低，效率下降，使得各部位的流量和压力也随之降低。由于氧泵的流量下降速度比氧涡轮泵转速和平均密度的乘积下降速度更慢一些，导致了氧主泵效率的略微上升。

通过仿真与实际工程的比较，下降幅度最大的为氢主泵前压力，其次是氢主泵泵后压力、氧主泵泵后压力、氢预压涡轮泵转速和氧主涡轮流量等，而氧主泵效率却有一点点的提高。这说明氢主泵前压力对该类型故障最为敏感，而当发生该型故障时，发动机系统整体性能就会有明显的降低。

### 3.3.2 氧泵汽蚀故障

由于泵长期工作在高压、高速、易燃、易腐蚀的工作环境中，极易发生故障，是故障易发部位。当泵汽蚀发生时，会使泵工作效率下降，流量和出口压力降低，导致泵结构发生破坏。

泵的故障模型主要为：

泵的扬程：

$$Dp_p = a_1 \left( \frac{10^3 \times q_{pm}}{\rho_p} \right)^2 + a_2 \left( \frac{10^3 \times q_{pm}}{\rho_p} \right) n_p \times 10^3 + a_3 (n_p \times 10^3)^2$$

$$\Delta p_p = Dp_p \cdot \bar{\rho}_p \cdot a_p \cdot F_{p1} \quad (4)$$

泵的效率：

$$\eta_p = v_p \left[ b_1 \left( \frac{10^3 \times q_{pm}}{\rho_p n_p} \right)^2 + b_2 \left( \frac{10^3 \times q_{pm}}{\rho_p n_p} \right) + b_3 \right]$$

泵的功率：

$$PP_p = \frac{10^3 \times q_{pm} (p_{pe} - p_{pi})}{\eta_p \rho_p}$$

其中： $a_1, a_2, a_3$  为泵扬程公式经验系数， $a_p$  为泵扬程修正系数， $b_1, b_2, b_3$  为泵效率公式经验系数， $v_p$  为泵效率修正系数。 $F_{p1}$  为泵故障因子，可以表示如下故障或者异常：泵汽蚀： $0 < F_{p1} < 1$ ；正常时： $F_{p1} = 1$ 。

在模拟仿真氧主泵汽蚀故障时，我们设定故障因子数  $F_{p1}$  为 0.9，故障发生时刻为 2 s，进行归一化处理后，得到氧泵汽蚀故障的仿真图形如图 8 所示。

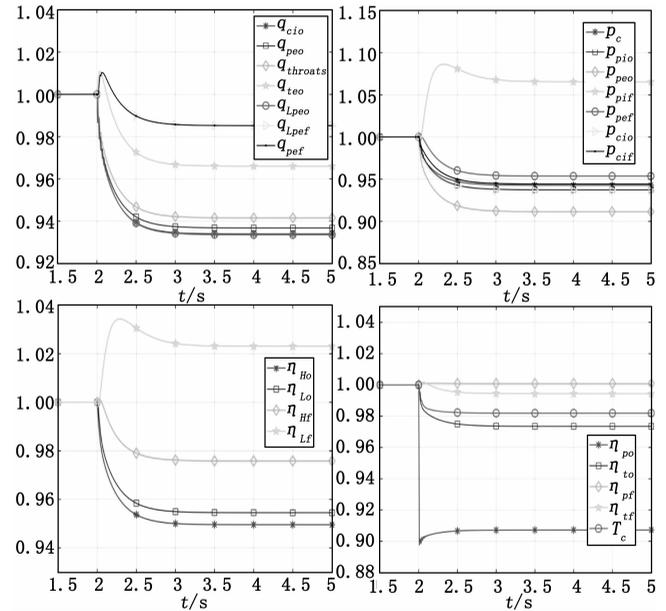


图 8 主氧泵汽蚀故障仿真结果

从仿真结果来看，当主氧泵发生汽蚀故障时，主氧泵的转速、效率、出口压力以及出口流量都明显降低。由于主氧泵的流量来自于氧预压泵，并流向预燃室、推力室和氧预压泵，所以导致了氧预压泵、推力室氧喷前流量、推力室喉部流量都有明显的降低；而主氧泵出口压力的降低，也会导致推力室氧喷前压力和主氧泵泵前压力的降低，而氢主泵前压力的上升，来源于氢预压泵的出口压力的上升，因为氢预压泵的转速上升导致了扬程上升，使得氢预压泵的泵后压力随之上升；因为各参数变化的幅度不一样，导致了它们的比值的變化有上升，也有下降，使得氢预压涡轮泵的转速略微上升，而其余都略微下降，这和实际情况一致。

通过仿真与实际工程的比较，主氧泵的工作效率和主

氧泵的出口压力对主氧泵汽蚀故障最为敏感, 变化最大, 可以作为判断该型故障的一个重要参考依据。

### 3.3.3 氧主涡轮叶片烧蚀故障

氧主涡轮为燃气涡轮, 长时间受到预燃室高温燃气吹动, 又难以冷却, 导致涡轮内温度分布不均匀, 容易出现超温, 所以极容易发生涡轮叶片烧蚀故障<sup>[9]</sup>。一旦发生涡轮叶片烧蚀故障, 会导致涡轮的转动惯量降低, 从而导致涡轮功率下降, 引发一系列故障和异常。

氧主涡轮为燃气涡轮, 燃气涡轮的故障模型主要为:

燃气涡轮流量:

$$q_{Htm} = \begin{cases} \frac{\mu_{Ht} A_{Ht} P_{Ht} F_{Ht1}}{\sqrt{RT_{Ht}}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k}}} \times \\ 10^6 \frac{P_{Hte}}{P_{Hti}} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k}} \\ \frac{\mu_{Ht} A_{Ht} P_{Ht} F_{Ht1}}{\sqrt{RT_{Ht}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left(\frac{P_{Hte}}{P_{Hti}}\right)^{\frac{1}{k}} - \left(\frac{P_{Hte}}{P_{Hti}}\right)^{\frac{1}{k}} \right]} \times \\ 10^6 \frac{P_{Hte}}{P_{Hti}} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k}} \end{cases}$$

燃气涡轮效率:

$$\eta_{Ht} = \left[ c_1 \left(\frac{u_{Ht}}{C_{Ht}}\right)^3 + c_2 \left(\frac{u_{Ht}}{C_{Ht}}\right)^2 + c_3 \left(\frac{u_{Ht}}{C_{Ht}}\right) + c_4 \right] * a_{Ht}$$

$$C_{Ht} = \sqrt{2W_{Ht}} u_{Ht} = \pi D_{Ht} n_{Ht} * 10^3 / 60$$

燃气涡轮功率:

$$PP_{Ht} = q_{Htm} W_{Ht} \eta_{Ht} * 10^{-3} * F_{Ht2}$$

其中:  $W_{Ht}$  为燃气涡轮单位工质等熵膨胀功,  $C_{Ht}$  和  $u_{Ht}$  分别表示涡轮特征速度和涡轮叶尖轮周速度。  $F_{Ht1}$  和  $F_{Ht2}$  为燃气涡轮故障因子, 可以表示如下故障类型或异常: 1) 涡轮转子破坏、涡轮流道堵塞和涡轮叶片烧蚀:  $0 \leq F_{Ht1} < 1$ ; 正常时  $F_{Ht1} = 1$ ; 2) 涡轮轴承卡住和涡轮转子卡住:  $F_{Ht2} > 1$ ; 正常时:  $F_{Ht2} = 1$ 。

在模拟氧主涡轮叶片烧蚀故障时, 我们设定故障因子  $F_{Ht1}$  为 0.8, 故障发生时刻为 2 s, 进行归一化处理之后, 得到氧主涡轮叶片烧蚀故障的仿真图如图 9 所示。

从仿真结果来看, 当发生氧主涡轮叶片烧蚀故障时, 由于涡轮转动惯量的降低, 直接导致了氧主涡轮效率、氧主涡轮出口流量和氧主涡轮泵转速下降。就氧路而言, 由于带动氧主涡轮的燃气来自于预燃室, 并流向推力室, 所以使得推力室喉部流量和预燃室流量降低, 而预燃室流量又来自于氧主泵, 所以使得氧主泵的流量也有所下降, 随之导致氧预压泵流量也降低, 其余参数也因为发动机部件的耦合作用, 有了相应的变化。

通过仿真与实际工程的比较, 氢主泵泵前压力对氧主涡轮叶片烧蚀故障最为敏感, 其次为氢预压涡轮泵转速和氧主涡轮的出口温度。由此可见, 当发生氧主涡轮叶片烧蚀时, 变化最为明显的参数却为氢主泵泵前压力, 所以, 在进行故障诊断过程中, 因为发动机系统是一个耦合程度非常高的系统, 各部位之间联系极为紧密, 某一个部位的参数变化, 可能是其余部位的故障引起, 我们需要明确各

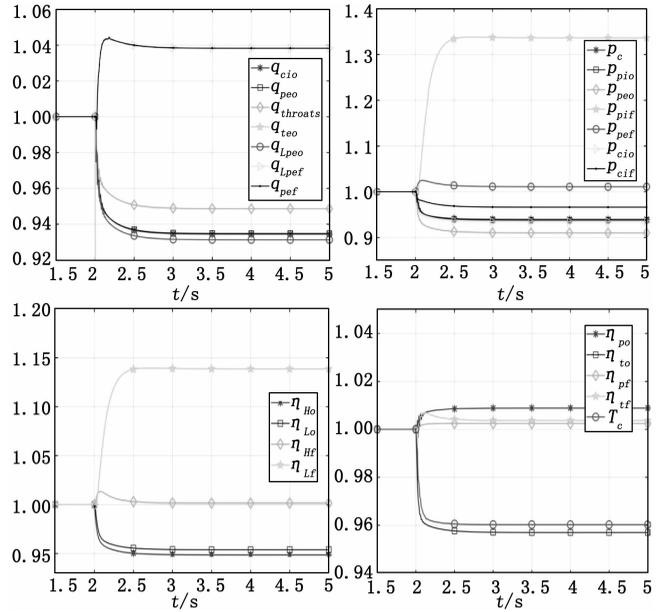


图 9 氧主涡轮叶片烧蚀故障仿真结果

种典型故障的故障模式。

## 4 结论

本文针对大推力的氢氧补燃循环发动机, 首先通过发动机层次分解方法, 将发动机分解为燃气涡轮、液涡轮、泵、推力室、预燃室、阀门等众多子部件; 接着根据各部件的数学模型, 使用 Matlab/Simulink 工具搭建了各个部件正常工作和故障时的仿真模型, 并根据发动机部件具体连接结构和工作过程, 将各个部件连接为一个仿真整体; 最后, 分析历史试车故障数据, 总结归纳了 4 种典型故障类型, 并使用 Matlab/GUI 工具搭建了大推力氢氧补燃循环发动机典型故障仿真界面, 仿真分析了发动机主级工况下预燃室氧阀门开度故障、氧主泵汽蚀和氧主涡轮叶片烧蚀三种典型故障。

结果表明所搭建的大推力氢氧补燃循环发动机仿真模型具有精度高、仿真速度快等优点, 能够较好的模拟发动机主级的工作过程, 可以用于进行故障模式的分析; 并且得到的三种典型故障模式和实际工程相符合, 对以后的氢氧补燃循环发动机健康监控平台的设计有着积极的意义。

## 参考文献:

[1] 杨尔辅, 张振鹏, 崔定军. 液发推力室和涡轮泵故障监测与诊断技术研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25 (5): 619-622.

[2] Hawman M W. Health Monitoring System for the SSME—Program Overview [R]. AIAA 90-1987, 1990.

[3] 吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机故障特征动态模拟 [J]. 航空动力学报, 1994, 9 (4): 361-365.

[4] 蒲星星, 王建设, 高玉闪, 等. 液氧煤油发动机故障监控特征参数提取研究 [J]. 火箭推进, 2017, 43 (6): 26-31.