

## 基于模糊模型的发动机部件级故障隔离方法研究\*

李艳军, 彭小辉, 程玉强, 吴建军

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**发动机故障诊断与故障隔离是发动机健康监控领域的一大难题,但对发动机故障定位、预防灾难性事故发生及发动机维修意义重大。为了准确地确定故障发生的部位,本文针对某型液体火箭发动机,提出一种基于模糊模型的部件级故障隔离方法。首先对发动机系统进行部件的划分,然后建立各个部件的模糊模型并进行训练,最后按照设定的故障检测与隔离策略对故障进行诊断。利用两组发动机故障仿真数据对基于模糊模型部件级故障隔离方法进行验证,结果表明:本方法可以实现单一或多个部件故障隔离。

**关键词:**液体火箭发动机;模糊模型;故障隔离;部件级

**中图分类号:**V434.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)02-0022-05

## Research of fault component isolation algorithms for LRE base on fuzzy model

LI Yanjun, PENG Xiaohui, CHENG Yuqiang, WU Jianjun

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Fault detection and diagnosis is a difficult problem in liquid-propellant rocket engines (LRE) healthy monitoring, but it has important significance for locating an engine fault, preventing tragedy accident from occurring, and maintaining engines. So a fault isolation method in components level based on fuzzy model was proposed to confirm the position of the fault for certain Liquid-propellant rocket engines. Firstly, it divided the engine into several components; secondly the fuzzy model for each component was established and trained; finally the method performed fault diagnosis according to established strategy. The fault isolation algorithm based on fuzzy model was validated by two sets of simulation data. The results indicate that fault isolation algorithm can isolate single fault or multi-fault components effectively.

**Key words:** liquid propellant rocket engines; fuzzy model; fault isolation; components module

液体火箭发动机是运载火箭推进系统的主要组成部分。火箭发射期间,推进系统一旦发生故障,如果能够及时检测并诊断故障发生的部位与程度,给出恰当的控制指令,避免灾难性事故的发生,这对提高推进系统的可靠性和安全性具有重要意义,火箭发动机故障检测特别是隔离技术正是诊断故障发生部位的关键技术之一。

故障隔离一般包括传感器故障隔离<sup>[1-3]</sup>、作动器故障隔离<sup>[3-5]</sup>和系统本身故障的故障隔离<sup>[6-7]</sup>。本文着眼于研究发动机系统本身故障的故障隔离。故障隔离一般有如下几种方法,基于规则的推理<sup>[8-10]</sup>、基于模型的推理<sup>[11]</sup>、或者基于规则和模型的混合结构故障辨识与隔离<sup>[12]</sup>。由于大型泵压式液体火箭发动机故障模式极为复杂,发动机的精确数学模型难以得到,建立基于模型的检测与诊断算法在实现中具有较大困难。由于模糊理论具有嵌入先验知识的能力、重构非线性映射的能力,其得

到了特别关注。基于模糊模型的故障诊断方法首先要建立正常状态和故障状态的模糊模型,然后以系统实际参数输入模糊模型得到模型的模拟输出,再以系统的实际值和模型值之差作为残差,根据残差检测故障是否发生<sup>[13-14]</sup>。

由于大型液体火箭发动机结构复杂,故障发生的位置、种类繁多,按照上述方法直接隔离到某种故障在实现中有难度。在液体火箭发动机故障诊断中,当检测到故障的发生时,先定位故障发生的部位,再根据部件模型对故障种类进行辨识是一种可行的方法。本文提出的一种基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障隔离方法,着重于发动机部件级故障定位的故障隔离研究。故障隔离是故障诊断必不可少的重要部分,能为故障类型辨识与故障程度估计提供重要帮助,对故障控制也具有重要的意义。

\* 收稿日期:2012-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51206181)

作者简介:李艳军(1984—),男,湖南宁乡人,博士研究生,E-mail:83971749@qq.com;

吴建军(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:jjwu@nudt.edu.cn

# 1 基于模糊模型的故障隔离方法

基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障隔离方法首先要对发动机部件进行划分,然后对各个部件建立模糊模型,再按照一定的故障检测与故障隔离策略对发动机的故障进行检测与隔离。

## 1.1 部件划分

液体火箭发动机是由多个部件,如管路、阀门、涡轮、泵、燃气发生器、燃烧室等相互连接而成。各部件参数紧密联系,一旦某个位置发生故障,各个部件的状态都会发生变化,这给故障隔离定位带来了很大的难度。液体火箭发动机基于部件的故障隔离的第一步就是部件的划分。部件划分的原则:(1)最大限度地隔离各个部件;(2)选择测量点作为前后部件的分割点;(3)对于多个部件构成回路的情况,要尽可能在前后联系参数较少的位置断开;(4)故障多发点应包含在部件内而不是分割点;(5)依照原有物理、功能结构划分。

按照上述划分原则,将发动机划分为多个部件,最后选择如下 10 个部件作为基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障隔离方法的研究对象:①氧化剂管 2、②氧化剂泵、③燃气发生器、④燃料管路 4、⑤燃料二级泵、⑥燃料管路 3、⑦燃料一级泵、⑧燃料管路 2、⑨氧化剂预压涡轮、⑩燃烧室。各部件选择输入输出参数选择如表 1 所示。

## 1.2 模糊模型建立

### 1) 建立部件仿真模型。

首先根据各部件的动态方程,以表 1 中的输

入输出参数建立各部件的仿真模型。下面以氧化剂管路 2 为例说明仿真模型的建立。先列出氧化剂管路 2 的动态方程,然后根据动态方程建立仿真模型。

$$L \cdot \frac{dq}{dt} = P_i - P_e - \alpha q^2 \quad (1)$$

$$\xi \cdot \frac{dP_e}{dt} = q_i - q_e \quad (2)$$

其中,  $\xi = \frac{V}{a}$ , 为液体管路流容系数,反映管路中液体的压缩性;  $L$  为液体的惯性流阻系数;  $\alpha$  为管路的流阻系数;  $q_i$  和  $q_e$  分别表示管路的入口和出口质量流量;  $P_i$  和  $P_e$  分别表示管路入口和出口的压力;  $V$  为管路体积;  $a$  表示液体中的声速。

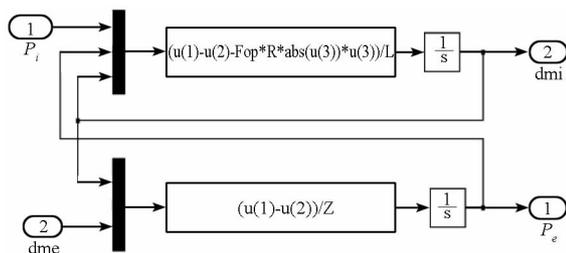


图 1 氧化剂管路 2 仿真模型

Fig. 1 Simulation model of oxidant pipeline 2

2) 计算部件模型的仿真输出,将其作为模糊模型的训练参数。对输入参数入口压力  $P_i$ 、出口流量  $q_e$  在额定工况附近取值,通过仿真模型计算稳定输出值作为一个输入输出的训练参数。如入口压力  $P_i$ 、出口流量  $q_e$  在额定工况时的  $\pm 20\%$  变化,间隔 1%,则可以分别计算得到 1681 组输入输出参数作为模糊模型的训练参数。

表 1 某型液体火箭发动机部件划分及输入输出参数

Tab. 1 The components and in-out parameters of a certain LRE

部件名称	输入参数	输出参数
氧化剂管路 2	入口压力 $P_i$ 、出口流量 $q_e$	(1) 出口压力 $P_e$ 、入口流量 $q_i$
氧化剂泵	入口流量 $P_i$ 、流量 $q$ 、转速 $n$	(2) 出口压力 $P_e$ 、功率 $Np$
燃气发生器	燃料流量 $q_f$ 、氧化剂流量 $q_o$ 、出口压力 $P_e$	压力 $P$ 、(3) 出口流量 $q_e$
燃料管路 4	入口压力 $P_i$ 、出口压力 $P_e$	(4) 入口流量 $q_i$
燃料二级泵	入口压力 $P_i$ 、流量 $q$ 、转速 $n$	(5) 出口压力 $P_e$ 、功率 $Np$
燃料管路 3	入口压力 $P_i$ 、出口流量 $q_e$	(6) 出口压力 $P_e$ 、入口流量 $q_i$
燃料一级泵	入口压力 $P_i$ 、流量 $q$ 、转速 $n$	(7) 出口压力 $P_e$ 、功率 $Np$
燃料管路 2	入口压力 $P_i$ 、出口流量 $q_e$	(8) 出口压力 $P_e$ 、入口流量 $q_i$
氧化剂预压涡轮	入口压力 $P_i$ 、出口压力 $P_e$ 、 $RT$ ( $R$ 为燃气气体常数; $T$ 为燃气温度)、气体比热比 $\gamma$ 、功率 $Np$	功率 $Nt$ 、转速 $n$ 、(9) 出口流量 $q_e$
燃烧室	燃料流量 $q_f$ 、燃气流量 $q_g$ 、混合比 $Kmg$ 、出口压力 $P_e$	(10) 推力室压力 $P$

注:表中序号表示用于检测的参数,后面图中按此表序号。

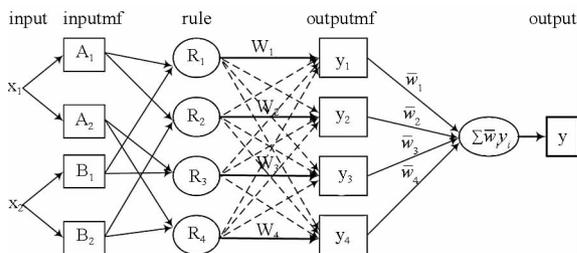


图 2 自适应神经网络模糊推理系统的典型结构图

Fig. 2 The framework of adaptive neuro-fuzzy inference system

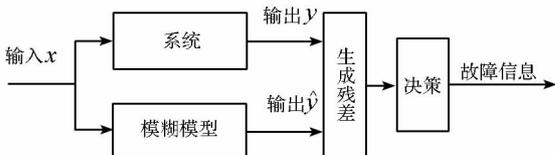


图 3 基于模糊模型的故障诊断

Fig. 3 The framework of fault diagnosis algorithm base on fuzzy model

3) 建立模糊模型,用各部件仿真数据进行训练,得到各部件的模糊模型。自适应神经网络模糊推理系统 (ANFIS): 此类系统最适合模糊建模, 它的典型结构图(两个输入、单输出系统)如图 2 所示。模糊模型为自适应神经网络模糊模型, 每个输入参数划分 5 个区间, 采用 gaussmf 隶属函数, 输出权重采用常值, 其中输入参数的区间中心、隶属函数、权值等都按照神经网络的误差反向传播原理训练来进行自适应的调节。然后将第二步中仿真模型得到的输入输出参数组合作为模糊模型的训练数据, 用自适应模糊神经网络训练模糊模型。

对于其他部件用同样的方法计算, 至此就可以得到用于检测的各个部件模糊模型。

在实际运用中, 我们可以用各个部件的试车实验数据来快速地得到部件的模糊模型。

### 1.3 故障检测与隔离策略

基于模糊模型的部件级故障检测与隔离算法将部件故障检测与故障的部件级隔离融为一体, 在对各个部件进行故障检测的同时, 也达到了部件级的故障隔离目的。

部件故障检测与隔离策略: 对各个部件进行检测, 测量得到的部件的参数, 输入为  $x$ , 输出  $y$ , 以输入参数  $x$  作为训练好的模糊模型的输入, 得到模糊模型的输出  $\hat{y}$ 。引入综合检测指标  $S_{ee}$ :

$$S_{ee} = \frac{|y - \hat{y}|}{y} \times 100\% \quad (3)$$

其中  $\bar{y}$  为发动机额定工况正常工作时的部件输出

状态。

设定故障检测阈值为 3%, 参照连续性判断准则, 当综合检测指标  $S_{ee}$  连续 3 次超出阈值时, 检测算法认为部件发生故障, 给出故障信号。

对于发动机整体的故障检测是通过各个部件的故障检测结果来判断, 只要有一个部件发生故障, 则认为发动机发生故障。同时将故障定位到故障部件。

1) 单故障的故障检测与隔离: 只有一个部件检测到故障, 其他部件都没有检测到故障, 认为此部件故障。

2) 多故障的故障检测与隔离: 多个部件检测到故障, 其他部件都没有检测到故障, 认为多个部件故障。

3) 整体故障检测检测到故障, 各个划分部件没有检测到故障, 则为其他部分发生故障。可能是由于划分的部件没有覆盖到整个发动机, 其余部分发生故障。

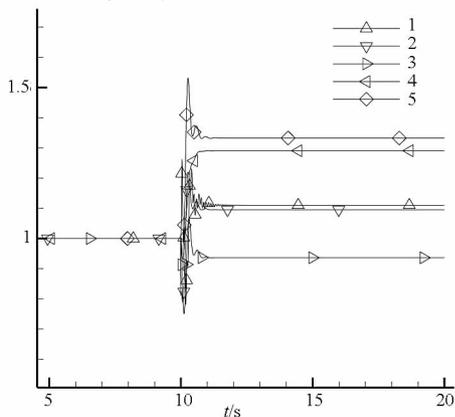
## 2 故障仿真结果

运用某型液体火箭发动机故障仿真软件 Lrefaultsim<sup>[15]</sup> 仿真如下两种故障, 得到上述 10 部件的输入输出参数, 其中 10 个输出参数的变化趋势如图 4、图 5 所示。图 4、图 5 为参数经过了归一化处理后的示意图, 表示相对于稳态工况值的变化。其中横坐标为时间值, 纵坐标为相对于稳态工况的比例值。

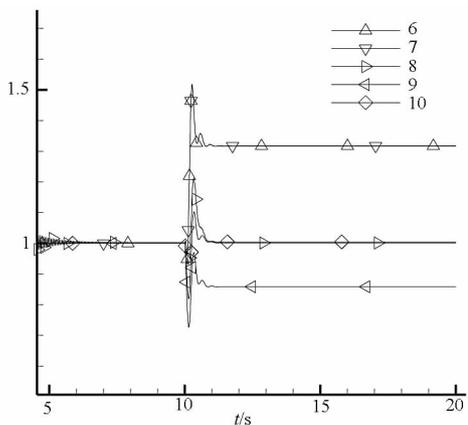
故障一: 氧化剂泵扬程下降, 故障发生时间 10s, 各参数变化趋势如图 4 所示。

故障二: 氧化剂泵扬程下降和燃气发生器泄漏故障两故障同时发生, 故障发生时间 10s, 各参数变化趋势如图 5 所示。

上述两图的参数经过了归一化处理, 表示相对于稳态工况值的变化。从图 4、图 5 可以看出,



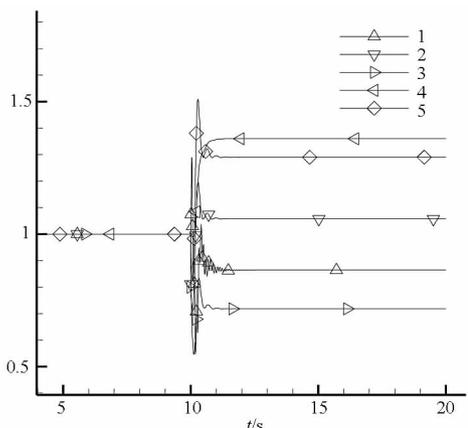
(a)



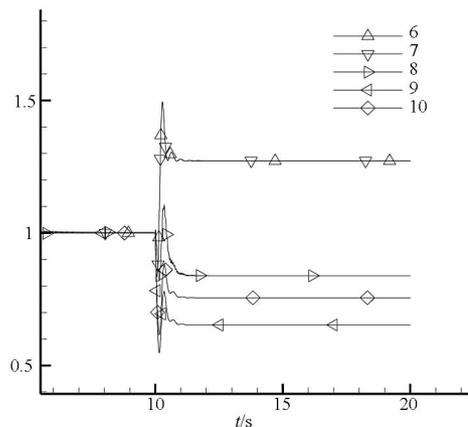
(b)

图 4 氧化剂泵扬程下降故障仿真结果

Fig. 4 The simulation result of oxidizer pump fault



(a)



(b)

图 5 两种故障同时发生故障仿真结果

Fig. 5 The simulation result of two concurrence fault

液体火箭发动机由于各个部件之间的强耦合,在一个或多个部件发生故障时,其他未发生故障的部件的状态也发生了变化。如果简单地根据参数变化来进行故障隔离,很难得到正确的结论。基于模糊模型的故障隔离方法对发动机各个部件分别建立模糊模型,然后用模糊模型的输出检测各

个部件,可以很好地解决部件状态变化带来的故障隔离的难题。

### 3 仿真数据故障隔离

按照 1.3 节的故障检测与隔离策略,对第 2 节仿真的两种情况的故障进行隔离。具体步骤如下:

1) 将从仿真软件 Lrefaultsim 得到的仿真数据按照表 1 中的输入参数组合,运用各个部件的模糊模型,计算各个部件的模糊模型输出  $\hat{y}$ 。

2) 根据(3)式计算各部件的检测指标,设定故障检测阈值为 0.03。

得到故障检测与隔离结果如下:

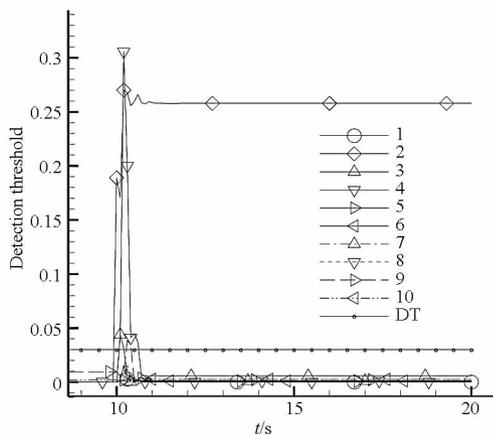


图 6 故障一检测结果

Fig. 6 The fault detection result of fault 1

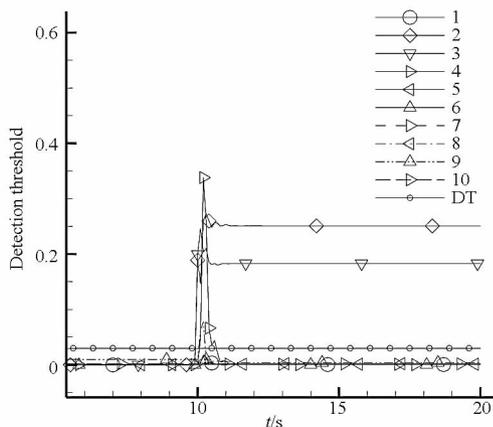


图 7 故障二检测结果

Fig. 7 The fault detection result of fault 2

依照本文提出的基于模糊模型的故障检测与隔离方法对仿真数据进行了故障的检测,从图 6 可以看到,氧化剂泵出口压力参数的检测指标超出阈值,则可以认为其发生了故障。推力室压力参数的检测指标有一段超出了阈值,在发生故障之后一定时间稳定后,检测指标又降到阈值以下,可能是燃烧室部件的模糊模型训练不够充分,难

以在各参数变化时准确地计算推力室压力。但在故障到达稳定时,只有氧化剂泵出口压力检测指标超出阈值,可以知道是氧化剂泵发生了故障。

图7为氧化剂泵扬程下降和燃气发生器泄漏故障两故障同时发生的故障检测结果。从图中可以看到:氧化剂泵出口压力和燃气发生器出口流量检测指标超出故障检测阈值,燃烧室压力在故障稳定之后检测指标又回到了检测阈值之下,其他部件检测指标值一直小于阈值,按照前述的故障检测策略,可以得到氧化剂泵和燃气发生器发生故障。

## 4 结论

为了对液体火箭发动机故障发生部位进行隔离,本文设计实现了基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障检测与隔离算法。基于模糊模型故障检测与隔离算法首先对液体火箭发动机进行部件划分,然后对各个部件建立正常情况下的模糊模型,最后按照设定的故障检测与隔离策略进行故障隔离。算法用一个故障或多个故障的仿真数据进行了验证,结果显示,基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障检测与隔离算法可以很好地隔离出发生故障的部件。

基于模糊模型的液体火箭发动机部件级故障隔离算法,在液体火箭发动机发生故障是能够比较容易地确定发生故障的部件,这对液体火箭发动机健康监控中故障类型和故障程度的辨识具有重要的意义,对于进一步的故障控制也很有帮助。基于模糊模型的故障隔离算法对液体火箭发动机健康监控系统的发展具有一定的参考价值。

## 参考文献 (References)

- [1] Li W H, Shah S. Structured residual vector-based approach to sensor fault detection and isolation [J]. *Journal of Process Control*, 2002, 12: 429 - 443
- [2] 荣吉利. 基于模型的航天器在轨传感器故障诊断方法[J]. *兵工学报*, 2002, 23(2).  
RONG Jili. A model-based onboard fault diagnosis for spacecraft sensors [J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(2). (in Chinese)
- [3] Chilin D, et al, Detection, isolation and handling of actuator faults in distributed model predictive control systems [J]. *Journal of Process Control*, 2010, 20: 1059 - 1075.
- [4] 和卫星, 陈晓平. 传感器和执行器故障检测与隔离方法 [J], *江苏大学学报*, 2008, 29(4).  
HE Weixing, CHEN Xiaoping. Method of fault detection and isolation for sensors and actuators [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2008, 29(4). (in Chinese)
- [5] ZHU F L, Cen F. Full-order observer-based actuator fault detection and reduced-order observer-based fault reconstruction for a class of uncertain nonlinear systems [J]. *Journal of Process Control*, 2010, 20: 1141 - 1149.
- [6] Horak D T. System failure isolation in dynamic systems [J]. *AIAA*, 1990, 13(6).
- [7] 蒋荣华, 王厚军, 龙兵. 大型复杂系统故障隔离智能优化策略 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3).  
JIANG Ronghua, WANG houjun, LONG bing. Large-scale complex system fault isolation intelligent optimal strategy [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3). (in Chinese)
- [8] Bickmore T, et al, A qualitative approach to systemic diagnosis of the SSM [J]. *AIAA - 93 - 0405*, 31st Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 11 - 14, 1993.
- [9] 刘洪刚, 吴建军, 陈启智. 液体火箭发动机故障诊断的命题逻辑方法 [J]. *国防科技大学学报*, 2002, 24(1).  
LIU Honggang, WU Jianjun, CHEN Qizhi. Propositional logic-based method of liquid rocket engine fault diagnosis [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2002, 24(1). (in Chinese)
- [10] 胡小平, 等. 液体火箭发动机故障检测和诊断中数据挖掘策略的分析 [J]. *国防科技大学学报*, 2005, 27(3).  
HU Xiaoping, et al, The analysis of data mining strategy in fault detection and diagnosis of the liquid rocket engine [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(3). (in Chinese)
- [11] Maul W, et al, Sensor selection and optimization for health assessment of aerospace systems [J]. *AIAA Infotech @ Aerospace 2007*, Rohnert Park, California, May, 2007.
- [12] Merrill W, et al. Integrated health monitoring and controls for rocket engines, NASA TM - 105763, 1992.
- [13] Ayoubi M. Fault diagnosis with dynamic neural structure and application to a turbocharger [C] // Proceedings of 1st IFAC Symposium SAFEPROCESS '94, Espoo, Finland, 1994, 2: 618 - 623.
- [14] Balle P, Spreitzer K. A multi-model approach for detection and Isolation of sensor and process faults for a heat exchanger, fuzzy systems [C] // Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference on, Volume: 2, 1998: 1476 - 148.
- [15] 程玉强. 可重复使用液体火箭发动机关键部件损伤动力学与减损控制方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
CHENG Yuqiang. Key Components' damage dynamics and damage-mitigating control techniques for reusable liquid-propellant rocket engines [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)