

基于定性和定量关系的 液体火箭发动机故障诊断

国防科技大学 黄卫东* 王克昌

【摘要】 针对定性故障诊断系统的固有缺陷, 利用模糊数学知识, 在符号有向图上加入定量信息, 形成定性定量模型, 通过计算和比较被诊断模式对已知故障类型的模式的隶属度来确定系统的故障。该方法比较充分地利用了系统被监测参数的数值资源, 对故障模式具有较强的识别和区分能力。

主题词: 液体推进剂火箭发动机 故障诊断 计算

分类号: V 434

1 引言

定性故障诊断系统在提取系统故障特征时, 将被监测参数的量化空间简单地划分为高、正常和低三个区间, 在进行故障诊断时并不使用具体的数量关系, 这使得它存在两个方面的缺陷。一是针对某一具体故障行为, 它可能给出多个符合系统定性故障特征的解, 究竟哪一个解对应真实故障需要作进一步的辨别; 二是它有可能对不同的故障模式提取的特征是一样的, 从而造成模式不可区分。要从根本上克服定性诊断系统的这些缺陷, 就必须在进行故障诊断时结合被监测参数的定量关系。本文通过改进符号有向图 SDG^[1,2], 将一定的定量信息和定性关系集成在一起, 形成定性定量模型, 在此基础上结合模糊数学知识来进行故障诊断。

2 定性定量模型的建立

在符号有向图中加入系统参数间的定量信息, 所采用的方法是用被影响因素和影响因素变化的比率(增益)来代替图中分支上的符号, 并通过计算需要诊断的模式对各种已知故障类型模式的隶属度, 来确定诊断模式的故障。

(1) 改进符号有向图。考虑用下述简单 SDG 来表示的纯定性模型: $A \xrightarrow{+} B$; A 为影响因素, B 为被影响因素, 只要模式中参数 A 和 B 的变化比率 $\Delta B / \Delta A$ 为正, 那么就认为这个模式满足上述定性模型, 即在 SDG 模型下, 真值为 1。如果用隶属函数 $\mu_{BA}(\Delta B / \Delta A)$ 来表示, 那么对于所有的 $\Delta B / \Delta A > 0$, $\mu_{BA} = 1$, 这样就可以构造隶属函数来代替 SDG 中分支上的符号以表示参数间的相互影响关系。如果参数 A 和 B 变化比率的数量关系是可知的, 那么就可以改变隶属函数 μ_{BA} 的形状, 以提供更加严格的约束。用隶属函数表示定量信息的好处是可以图形表示定量知识, 因而很容易将定量知识加到基于知识的系统中。

(2) 隶属函数的构造及应用范围。为计算简单, 根据不同情况构造如下形式的隶属函数:

①从根故障节点到与其直接相连的节点的隶属函数

$$\text{分支符号为正} \quad \mu(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}, \quad \text{分支符号为负} \quad \mu(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ 1 & x < 0 \end{cases}$$

②其它节点间定量关系的隶属函数。令相对变化比率 $\alpha = (x - x^*)/x^*$, 其中 x^* 为典型已知故障类型的模式的被影响参数与影响参数的变化比率(增益), x 表示待诊断模式相应节点值变化的比率, 则隶属函数的表达式如下:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \alpha \geq 0.3 \\ 1.5 - 5\alpha & 0.1 \leq \alpha \leq 0.3 \\ 1 & -0.1 \leq \alpha \leq 0.1 \\ 1.5 + 5\alpha & -0.3 \leq \alpha \leq -0.1 \\ 0 & \alpha \leq -0.3 \end{cases}$$

值得注意的是, 在一般情况下, 隶属函数的形状取决于定量信息的准确性以及系统过程的非线性。在定性定量模型中, 所使用的定量信息是从起始节点通过不同途径到终端节点的净影响, 因此在 SDG 基础上形成的定性定量模型必须是树状结构。

③建立液体火箭发动机系统的定性定量模型。在得到液体火箭发动机系统的 SDG 后^[3], 先将其变为树状结构, 然后再加入定量信息以形成定性定量模型。以氧化剂泵效率 η_p 下降和燃料泵效率 η_p 下降这两种故障为例, 假定 η_p 下降 15%, η_p 亦下降 15%, 相应的故障仿真参数值见表 1(以正常值为 100%)。

表 1 故障仿真结果表

被 监 测 参 数		n	$P_{op,out}$	$P_{fp,out}$	$\dot{m}_o$	$\dot{m}_f$	P_c	$\dot{m}_{o2}$	$\dot{m}_{f2}$
故障 模式	氧化剂泵效率下降	0.920	0.861	0.863	0.905	0.880	0.897	0.912	0.903
	燃料泵效率下降	0.950	0.917	0.918	0.934	0.938	0.940	0.949	0.943

首先将这两种故障的符号有向图变为树状结构, 变化的方法主要是根据仿真计算结果、实际试车数据或人的经验等去掉图中的次要分支, 然后利用仿真故障参数计算各个分支被影响因素和影响因素的变化比率, 例如在氧化剂泵效率下降的树状 SDG 上, $\Delta \dot{m}_f / \Delta n = 1.5$, $\Delta P_{fp,out} / \Delta n = 1.71$, 将其标注在 SDG 图上, 替代原先分支上的符号(从根故障节点出来的分支仍然保留符号), 形成含有定量信息的符号有向图, 如图 1 和图 2。

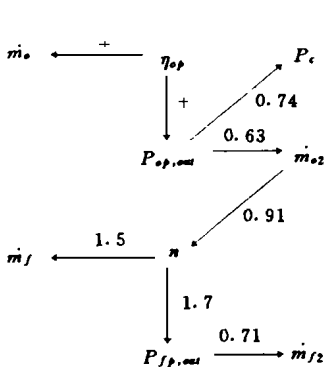


图 1 氧化剂泵效率下降时的定性定量模型

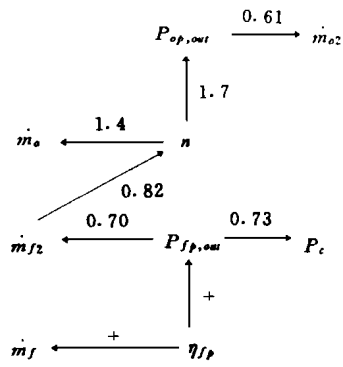


图 2 燃料泵效率下降时的定性定量模型

从图中可以看出,这两种故障分支间被影响因素和影响因素变化的比率是不一样的,纯定性模型是无法区分这两种故障的,然而可以在增加定量信息的基础上,通过计算和比较被诊断的模式对这两种故障模式的隶属度来确定该模式对哪一种故障模式更加接近,由此判定该模式的故障。计算和比较隶属度的大小必须给出所有已知故障类型的模式的定性定量模型,采用同样的方法可以建立另外 7 种故障模式的定性定量模型。

值得指出的是,由于液体火箭发动机系统是非线性的,因此对于同一类型的故障在故障严重程度不同时,分支间被影响因素和影响因素的变化比率是不同的,但它们会位于某一范围内,在分支上标注的变化比率都是具有代表性的。另外我们是根据参数间的变化比率来计算隶属度,前面已经提到,隶属函数的形状一般依据定量信息的准确性以及过程的非线性来确定,故可以通过修改隶属函数的形状使得同一种故障严重程度不同时参数的变化比对于该种类型的故障都具有较大的隶属度。

3 诊断方法、诊断结果

基于定性定量模型的诊断方法与基于符号有向图的诊断方法相类似,在基于符号有向图的诊断方法中,通过确定规则条件的真值来诊断故障,例如,对于图 1,只要条件 $(m_{\circ} \text{ } lt \text{ } 0)$ 、 $(P_{op,out} \text{ } lt \text{ } 0)$ 、 $(p_{P_{op,out}} \text{ } P_c)$ 、 $(p_{m_{o2}n})$ 、 $(p_{P_{op,out}m_{o2}})$ 、 (p_{nm_i}) 、 $(p_{nP_{fp,out}})$ 和 $(p_{P_{fp,out}m_{f2}})$ 均成立,即其真值为 1,那么就认为故障是氧化剂泵效率下降。

基于定性定量模型的诊断方法是先计算被诊断模式对各种已知故障类型的模式的隶属度,然后再根据最大隶属度原则来确定该模式的故障类型。具体步骤如下:

(1) 根据定性定量模型给出计算被诊断模式对每个已知故障类型的模式的隶属度的公式:

$$\mu_i = \min[\mu(X_{i1}), \mu(X_{i2}), \dots, \mu(X_{ij})] \quad (1)$$

式中 i 为已知故障模式($i=1, 2, \dots, N$), $j=1, 2, \dots, J$ 为该模式的分支, X_{ij} 为第 i 种故障类型的模式的定性定量模型中对应分支 j 的被影响因素和影响因素的变化比率。例如,对于图 1,通过下式计算被诊断模式对故障类型为氧化剂泵效率下降的模式的隶属度:

$$\mu_1 = \min[\mu(\Delta m_{\circ}), \mu(\Delta P_{op,out}), \mu(\Delta m_{o2}/\Delta P_{op,out}), \mu(\Delta n/\Delta m_{o2}), \\ \mu(\Delta P_{op,out}/\Delta n), \mu(\Delta m_i/\Delta n), \mu(\Delta m_{f2}/\Delta P_{op,out})] \quad (2)$$

采用同样的办法可以得到计算被诊断模式对其它故障类型模式隶属度的计算式子。隶属函数 $\mu(X)$ 在前面已经定义,只要给出了被诊断模式的定量值,就可以计算出隶属度。隶属度的大小在 0 到 1 之间,而基于符号有向图的定性诊断方法使用的是二值逻辑,真值要么为 0,要么为 1。

(2) 计算出节点所对应参数的相对变化值,从而进一步确定 X_{ij} 。

(3) 算出 μ_i ($i=1, 2, \dots, N$), N 为已知故障种类,取最大的 μ_i 所对应的故障类型 i 为诊断结果。

计算区分在将定性量化空间划分为 -1, 0, +1 时定性特征相同的 5 种故障模式,即氧化剂泵效率下降、燃料泵效率下降、副系统氧化剂管路阻塞、副系统燃料管路阻塞、主系统燃料管路阻塞。从表 2 中可看出,这 5 种故障模式对与它们故障类型相同的典型模式的隶属度最大,其值为 1.0,而对与它们故障类型不相同的模式的隶属度较小,因此通过计算隶属度,这 5 种故障模式得到了有效的区分。另外,还用氧化剂泵效率下降 20% 这一故障情况的仿真计算值对此方法进行测试,同样可以算出,这一模式对故障类型为氧化剂泵效率下降的模式的隶属度

最大, 隶属度为 1.0, 对其它故障类型的模式的隶属度则较小, 因而诊断是成功的。

表 2 仿真故障模式对典型故障模式隶属度表

典 型 故 障 模 式		氧化剂泵 效率下降	燃料泵 效率下降	副系统氧化 剂管路阻塞	副系统燃 料管路阻塞	主系统氧化 剂管路阻塞
仿 真 故 障 模 式	氧化剂泵效率下降 (η_p 降低 15%)	1.0	0.74	0.0	0.0	0.0
	燃料泵效率下降 (η_b 降低 15%)	0.63	10	0.0	0.0	0.0
	副系统氧化剂管路阻塞 (ξ_3 增大 56%)	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
	副系统燃料管路阻塞 (ξ_6 增大 56%)	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
	主系统氧化剂管路阻塞 (ξ_4 增大 900%)	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

在这里再次强调指出, 由于液体火箭发动机系统的非线性, 在构造隶属度函数时, 必须使严重程度不同的同一种故障模式对该类型故障已知模式具有较大的隶属度, 即在根据变化比率确定隶属函数时要注意变化比率的范围, 使得比率在这一范围内时, 其隶属度都比较大, 否则有可能产生误判。

4 结 论

在定性模型(符号有向图)的基础上, 并入一定的定量信息, 形成定性定量模型, 根据模型中被影响因素和影响因素的比率以及所构造的隶属函数来计算被诊断模式对已知故障类型的模式的隶属度, 再根据最大隶属度原则来判定被诊断模式的故障, 这一方法可以进行有效的诊断, 它能区分纯定性模式所不能分辨的定性特征相同的故障模式, 它既具有定性方法的快速、简洁的特点, 又使用了定量信息, 提高了诊断的能力与准确性。但采用这一方法必须注意模式参数变化比率的范围, 构造好隶属函数, 以避免产生误判。

参 考 文 献

1 O layiwola O,Oyeleye, Kramer Mark A. Qualitative Simulation of Chemical Process System: Steady- State Analysis A IChE Journal, 1988, 34(9)

2 Yu Chengching, Chyuan Lee Fault Diagnosis Based on Qualitative/Quantitative Process Knowledge A IChE Journal, 1991, 37(4)

3 Huang Weidong,W ang Kechang Rocket Engine Diagnostics U sing the Signed Directed Graph. A IAA - 95- 2436, 1995

(责任编辑 杨再荣)

LIQUID ROCKET ENGINE FAULT DIAGNOSIS BASED ON QUALITATIVE/QUANTITATIVE MODEL

Huang Weidong and Wang Kechang

(1st Dept. National University of Defense Technology, Changsha 412002)

ABSTRACT In order to eliminate the inherent drawbacks of qualitative fault diagnosis method, it is necessary to use quantitative information. The signed direct graph (SDG) of liquid rocket engine system lacks quantitative information. Therefore, it is improved by replacing the sign on the branches by the ratio between deviations of the effect and cause variables. The membership function of fuzzy set theory is used to integrate quantitative process knowledge into the SDG model, thus a qualitative/quantitative model is formed. After the membership function has been defined, it is easy to get the membership between the engine system and the patterns whose fault origins are known by this model, the fault of the engine system can be found according to the principle of maximum membership. This method utilizes enough available numerical resource of variables monitored in the system, it is shown by the diagnosis results that the method has a better identification and resolution capability for the fault patterns with identical qualitative features and can also identify the fault quickly.

Key Words Liquid propellant rocket engine Fault detection Calculation

NUMERICAL SIMULATION OF STEADY PROCESS FOR THRUST MODULATED SRM

Zhang Weihua, Guo Jian, Hou Zhongxi, Fang Dingyou, Xia Zhixun

(1st Dept. National University of Defense Technology, Changsha 412002)

ABSTRACT The steady process of solid rocket motor modulated by the vortex valve is investigated theoretically. The design of structural parameters for the vortex valve is considered with the method of steady analysis, and some useful conclusions are drawn. The modulation effect is much better if we have better heat-insulating situation. Reduction of the pressure exponent of the main chamber grain helps increasing the modulation effect.

Key Words Solid propellant rocket engines Numerical simulation Stationary random processes

A REAL TIME ON- LINE FAULT DETECTION ALGORITHM BASED ON TIME SERIES ANALYSIS FOR LIQUID ROCKET ENGINE

Wu Jianjun, Zhang Yuling, Chen Qizhi

(1st Dept. National University, of Defence Technology, Changsha 410073)

ABSTRACT A real time on-line fault detection algorithm is set up and realized, which mainly employs the theory of time series analysis. A key concept for fault detection is a whiteness test on the computing residual vector over the evolution time window. A standard autocorrelation whiteness test is used, where the residuals are assumed to be white, and a 99% confidence interval threshold is adopted in the autocorrelation domain. The off-nominal test then is reduced to a thresholding technique performed on the lag terms of the residuals autocorrelation. Therefrom a fault detection scheme is designed, which includes two steps, the first is to declare an event for any model whenever the first ten lags of its residuals autocorrelation exceeding a 99% confidence interval, the second is to declare a fault condition if at least M individual ARMA models declared an event in N measured parameters ($M \leq N$). Verification with a number of fire-test data of real engines shows that the algorithm is