

基于定性模型的液体火箭 发动机故障诊断*

黄卫东 王克昌

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 建立了液体火箭发动机各类部件在正常和故障状态下的定性工作模式库, 然后根据液体火箭发动机系统的拓扑结构和系统的定性故障特征寻找系统全局定性解, 并依据全局解中各个部件的状态来确定系统的故障部件。方法具有较好的解释性, 在计算机上实现只需少量的内存和执行时间。另外, 该方法用节点支路关联矩阵来表示系统的拓扑结构, 具有一定的通用性。

主题词: 液体推进剂火箭发动机, 发动机部件, 发动机故障, 故障分析, 故障诊断

分类号: V434.13

FAULT DIAGNOSIS OF LIQUID ROCKET ENGINE BASED ON A QUALITATIVE MODEL

Huang Weidong Wang Kechang

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: A qualitative method of fault diagnosis for liquid rocket engine is proposed, in which, qualitative patterns of components working in normal and abnormal condition are established. The fault components can be found according to the global qualitative solution of the system and the working condition of each component. It may take less memory and CPU-execute time to run the algorithm based on this method for the computation. Node-Branch relation matrix is used to describe the topologic construction of the engine system, which makes the method multi-applicable.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Engine component, Engine failure, Fault analysis, Fault diagnosis

1 引言

空间推进系统健康监控是当前十分活跃的研究领域, 监控和诊断所使用的方法很多。为了使诊断系统具有较好的解释能力, 需要开发诊断对象的深层模型, 应用定性模型及定性推理技术可以较好地解决这一问题。定性推理方法在人工智能领域中应用较广, 并且在机械、电子系统自动故障诊断中亦有应用, 但将这一技术应用到液体火箭发动机故障诊断则是近二、三年的事情, 如 NASA 刘易斯研究中心的 Willam Maul 等人^[1,2]应用定性模型技术诊断航天飞机主发动机高压泵的内部泄漏以及氧化剂供应系统的故障等等。本文利用以部件为中心的定性推理方法, 并结合图论知识, 提出一种基于定性模型的液体火箭发动机故障诊断方法。

* 本文 1995 年 6 月 20 日收到

2 定性诊断系统及部件模型模式库

图 1 是定性诊断系统组成框图, 其中系统拓扑结构是液体火箭发动机系统组成部件及其相互连接关系, 用节点关联矩阵来表示。部件定性模式库是部件正常工作或处于故障状态下的各种工作模式集。搜寻系统全部定性解模块是根据节点关联矩阵和各支路所包含的部件以及系统定性故障特征在部件模型模式库中寻找系统的全局定性解。

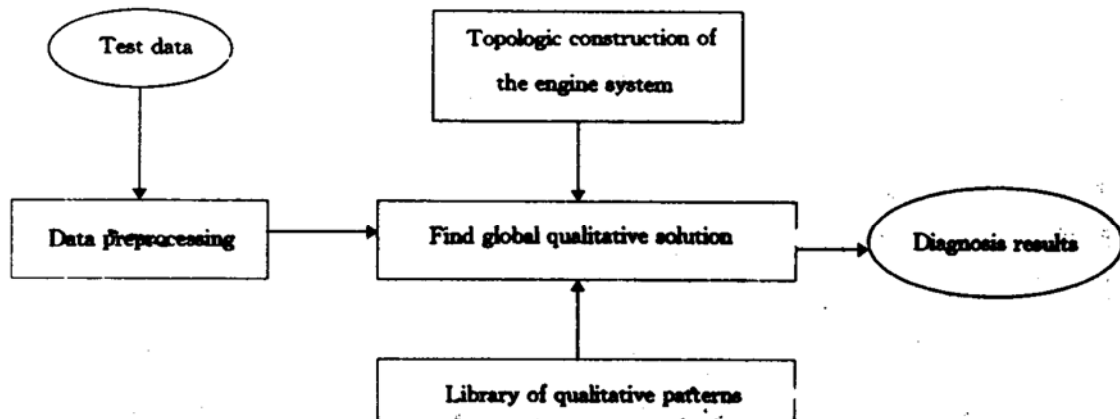


Fig. 1 Qualitative diagnosis system information flow

液体火箭发动机系统正常工作或出现故障, 都是由各个部件工作在正常或故障模式下而产生的结果, 所以只要找出全局定性解和各个部件的解, 就可以知道各个部件的状态 (正常或有故障), 由此而诊断出故障部件, 这就是本方法的基本出发点。

根据描述各类部件行为的数学方程分别建立了管道、泵、涡轮和燃气发生器组件、燃烧室等部件的定性工作模式, 各模式均用部件的出入口参数的定性值来表征。定性量化空间为高、正常、低, 分别用 +1, 0, -1 表示。

$$[x] = \begin{cases} +1 & x > x_a \\ 0 & x_b \leq x \leq x_a \\ -1 & x < x_b \end{cases}$$

$[x]$ 为表示变量 x 的定性量化值, x_a, x_b 为路标值。以管道类部件 (包括活门、节流圈、冷却套、喷注器等) 为例, 部件方程为:

$$\Delta p = \xi \dot{m}^2 / \rho \quad p_{in} = p_{out} + \Delta p$$

用 p_{in}, p_{out} 和 $\dot{m}$ 的定性值来表征管道的工作模式, 所有的模式都应满足部件方程。当管道无故障时 (ξ, ρ 不变), 共有 13 种模式。当管道阻塞时 (ξ 增大, $\dot{m}$ 减小), 共有 9 种工作模式。为节省搜寻系统全局定性解的时间, 应对这 22 种模式进行编号排序。

3 诊断方法及应用示例

3.1 建立液体火箭发动机系统拓扑结构

画出液体火箭发动机系统 (图 2) 的有向图, 如图 3, 并给节点和支路编号, 然后写出其

节点支路关联矩阵 Aa 。

$$Aa = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

设立支路属性数组 $attrb$ [Sides] 来表示各支路所包含的部件。设立数组 pro [Sides] 来表示各支路所流动的物质, 以区分氧化剂管路和燃料路。

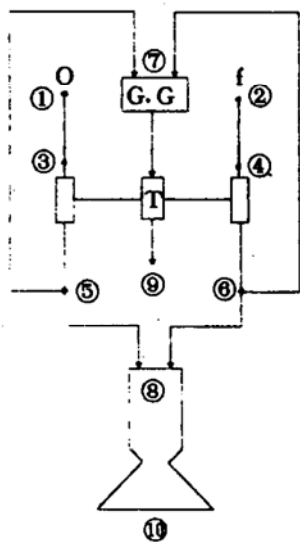


Fig. 2 Scheme of the engine system

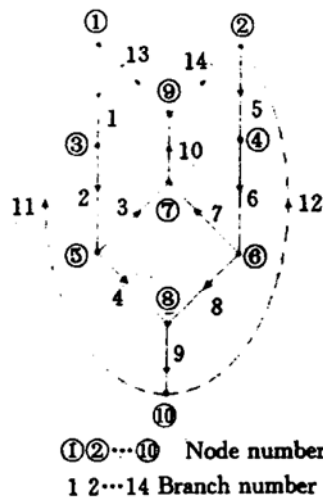


Fig. 3 Digraph of the engine system

3.2 搜寻系统全局定性解

将系统被监测参数定性化, 利用 $A_a \vec{m} = 0$ 计算出其它流量的定性值, 此外 $\vec{m} = (\vec{m}(1)\vec{m}(2)\cdots\vec{m}(14))^T$ 为流量矢量。

搜寻全局解时, 从节点 1 和支路 1 开始, 对节点关联矩阵按列进行搜索, 找出支路 1 的出、入口节点, 入口节点 $a_{ij}=1$, 出口节点 $a_{ij}=-1$, 然后根据支路属性到部件模型模式库中去寻找满足已知条件的模式, 将这个模式中的模式特征向量值作为已知值, 继续对支路 2 等支路搜寻局部解, 如果遇到抵触, 即在部件模型模式库中找不到相应的模式, 或者与已知值相

矛盾,或者不满足流量约束,则说明上一个支路的局部解错误,这时应返回上一个支路,找出下一个合适的解,然后继续进行搜索匹配,直至遍历所有的支路,找到全局解为止。

3.3 根据各个支路部件的状态来确定故障的部件

对图 2 所示的简单液体火箭发动机系统设计了一个定性诊断系统,并用静态故障仿真结果对它进行了测试。测试输入量共有 10 个,即主系统氧化剂流量 $\dot{m}(1)$,主系统燃料流量 $\dot{m}(5)$,副系统氧化剂流量 $\dot{m}(3)$,副系统燃料流量 $\dot{m}(7)$ (括号内的数字为支路号),氧化剂贮箱压力 $p(1)$,燃料贮箱压力 $p(2)$,氧化剂泵后压力 $p(5)$,燃料泵后压力 $p(6)$,燃烧室压力 $p(8)$ (括号内数字为节点号),以及泵的转速 n 。表 1 是氧化剂喷注腔阻塞时的静态仿真结果,以正常值为 100%,其它参数均用相对值来表示。将 10 个输入量定性化,作为程序的输入,诊断输出结果如表 2。

从输出结果可看出,只有支路 4 工作在故障状态下,其工作模式为管道类的第 15 号模式。由系统拓扑结果可知 (见图 2,图 3),支路 4 就是包含氧化剂喷注腔在内的管道类部件,而其它各部件的状态正常,工作在各自的正常模式下,由此可见,诊断结果是正确的。

Table 1 Simulation result of oxidizer injector obstruction

Fault pattern	Oxidizer injector obstruction									
Input parameter	$p(1)$	$p(2)$	$p(5)$	$p(6)$	$p(8)$	$\dot{m}(1)$	$\dot{m}(3)$	$\dot{m}(5)$	$\dot{m}(7)$	n
Simulation result	1.00	1.00	1.25	1.06	0.91	0.79	1.20	1.17	1.03	1.00
Qualitative value	0	0	1	1	-1	-1	1	1	1	1

Table 2 Diagnosis results

Branch no.	Component type	Working pattern no.	Working condition
1	Pipe	6	Normal
2	Pump	9	Normal
3	Pipe	1	Normal
4	Pipe	15	Obstruction
5	Pipe	5	Normal
6	Pump	8	Normal
7	Pipe	1	Normal
8	Pipe	9	Normal
9	Combustion chamber	1	Normal
10	Gas generator	1	Normal

利用静态故障仿真结果对定性诊断系统进行了多次测试,其诊断结论归结如表 3。从表中可以看出,定性诊断系统所给出的诊断结果是正确的。值得注意的是,在将定性量化空间划分为三个时,从氧化剂泵和燃料泵效率下降仿真计算结果所提取的两者的定性特征是一样的。因而用纯定性关系来进行诊断时,无法区分这两种故障,必须结合定量值才能作进一步的辨

识。

Table 3 Diagnosis results of five fault patterns

Fault pattern	Input variables and its qualitative value										Diagnosis results
	$p(1)$	$p(2)$	$p(5)$	$p(6)$	$p(8)$	$\dot{m}(1)$	$\dot{m}(3)$	$\dot{m}(5)$	$\dot{m}(7)$	n	
Oxidizer injector obstruction	0	0	1	1	-1	-1	1	1	1	1	Oxidizer injector obstruction
Fuel injector obstruction	0	0	1	1	0	1	1	-1	1	1	Fuel injector obstruction
Combustion efficiency decrease	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	1	1	Combustion efficiency decrease
Oxidizer pump efficiency decrease	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Oxidizer or fuel pump efficiency decrease
Fuel pump efficiency decrease	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Oxidizer or fuel pump efficiency decrease

4 结 论

定性故障诊断系统可以快速、简洁地给出正确的诊断结果,而且具有较好的解释能力,易于理解。但由于它只用到定性关系,因而其诊断结果并不精确,需要与定量关系相结合才能使诊断趋于精确、完善。我们建议使用模糊数学知识在定性模式中加入定量信息,进行模糊式识别。

参 考 文 献

- 1 Michal Binder, et al. Rocket engine diagnostics using qualitative modeling techniques. AIAA-92-2104
- 2 William Maul, et al. Qualitative model-based diagnostics for rocket system. AIAA-93-1779
- 3 Martin O Hofmann. Enhancement to the engine data interpretation system (EDIS). NASA-CR-193363, 1993. 4