

文章编号: 1000-8055(2002) 03-0377-04

基于定性定量知识集成 的液体火箭发动机故障诊断方法

刘洪刚, 吴建军, 陈启智
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 首先从知识表示和处理的角对 SDG 方法进行了简要的分析, 然后根据液体火箭发动机系统的特点, 提出了改进的途径, 通过建立只包含发动机测量变量的 SDG, 对故障模式进行初步诊断, 然后对不能区分的故障模式采取加入适当定量信息的办法来进行进一步诊断, 并对液体火箭发动机中出现的多故障模式建立了诊断方法。测试结果表明本文所提出的方法是可行的。

关键词: SDG; 故障诊断; 液体火箭发动机

中图分类号: V434

文献标识码: A

Liquid Rocket Engine Fault Diagnosis Method Based on the Integration of Qualitative and Quantitative Knowledge

LIU Hong-gang, WU Jian-jun, CHEN Qi-zhi

(National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper first analyzes the SDG method with a view of knowledge description and management, then presents an improved way according to the characteristics of the liquid rocket engine systems. That is, by constructing the SDG containing only the measured variables, the fault modes are diagnosed in advance, and then the modes that can not be distinguished are diagnosed by adding adequate quantitative information. In addition, multi-fault mode diagnosis method is proposed in this paper. The test result shows that the method is valid.

Key words: SDG; fault diagnosis; liquid rocket engine

1 引言

判断一种诊断方法是否有效的两个主要标准是快速和准确。SDG(Signed Directed Graph, 符号有向图)作为一种简捷方便的故障诊断方法, 具有计算量小和诊断速度快的特点, 因而在许多化工系统^[1]中得到了应用, 并显示出了优越性, 但同时也暴露出了许多缺点, 从而限制了它的应用。

本文首先从知识表示和处理的角对 SDG

方法进行了简要的分析。然后根据液体火箭发动机系统的特点, 提出了改进的途径:

(1) 针对 SDG 在故障诊断中如何结合系统的特点提高诊断的速度, 但又不失诊断的准确性作了一些探讨;

(2) 针对 SDG 在故障诊断中如何克服对知识处理的不完整性, 从而最终导致诊断的不完备性提出了一种改进的途径;

(3) 针对液体火箭发动机中出现的多故障模

式建立了诊断方法。

2 SDG 方法概述

SDG 是一种定性模型,它为系统的结构提供了一个直观的描述,具有系统化描述过程行为的能力。

从知识表示的层次来说:SDG 方法将系统变量之间的因果影响关系用带符号的图形方式来表示,是一种基于语义网络^[2]的知识表示形式。SDG 的这种由结点和弧组成的网络结构的知识表示形式是人工智能中一种重要的知识表示方法。但是,这种表示方法存在的两种过于简单的形式,使得它具有一定的局限性:

(1) SDG 试图用结点代表被诊断系统中的所有对象;

(2) SDG 试图用弧代表对象间的任何联系。

在 SDG 中,结点间的联系只局限于几种较典型的关系,而对对象间隐藏的许多其他联系难以表达,从而表达内容受到限制,同时,增加联系又会大大增加 SDG 的复杂度。

从知识处理的方法来说:

首先 SDG 是一种简单的定性模型,在它的建立过程中只使用了定性关系,而忽视了其他更深层次的关系,同时,将系统已知的一些定量知识简单地转化为定性知识,而舍弃了一些有用的信息。这两个方面最终都会导致诊断的不完备性,即除了真正的故障原因外,SDG 方法会提供更多的无效的故障解释。

其次,SDG 采用规则匹配的方法来进行故障诊断,是一种产生式^[2]的故障诊断系统。由于在诊断的过程中,要对被诊断的故障模式不断地用全部规则的相应部分进行模式匹配,因而,从原理上来说,必然会使得诊断的速度降低,而且规则数越多将越降低系统的诊断效率。

可以将 SDG 在知识表示和处理中所处的位置用图1来表示,外面的虚线矩形表示系统所有的知识,包括已知和未知的知识,椭圆代表系统的已知知识,阴影圆则代表 SDG 所能表示和处理的已知知识。在知识表示中,虚线箭头表示阴影圆试图向矩形扩张的方向,说明了 SDG 在知识表示上的缺陷;双箭头表示椭圆向阴影圆缩减的方向,说明了 SDG 在知识处理上的不完整性。

以文献[3,4]中的液体火箭发动机系统为例,为利用 SDG 方法完成对该系统的故障诊断,首先完成了如下工作:

(1) 建立静态模型中1一个部件的 SDG(包括氧路管道、燃路分支前管道、燃路分支至燃烧室通道、氧喷注器、氧化剂泵、燃料泵、冷却套及头部隔板通道、氧泵后至发生器喷前通道、燃路分支至发生器喷前通道、燃烧室、涡轮等);

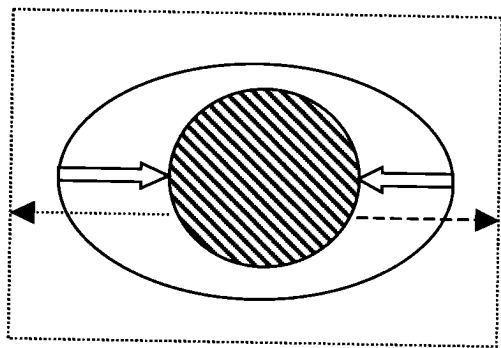


图1 SDG 在知识表示和处理中所处的位置

(2) 由各个部件的 SDG 组建系统模型的 SDG(图略);

(3) 由系统 SDG 简化得到氧化剂泵效率下降、燃料泵效率下降、氧路管道阻塞、燃路分支前管道阻塞、喉部烧蚀、氧喷注器阻塞、燃烧室效率下降、燃料泄漏等8种故障模式的 SDG 表示,并在此基础上形成相应的 if-then 形式的诊断规则。

3 基于 SDG 定性模型的故障诊断

如前所述,SDG 是一种产生式的故障诊断系统,采用规则匹配的方法来进行故障诊断,即对被诊断的故障模式用全部规则的相应部分进行模式匹配。若匹配成功,则被诊断的故障模式为诊断结果;否则舍弃。然而,在诊断过程,发现存在如下的问题:

问题1:用 SDG 方法进行故障诊断一般存在单故障假设,即假设单个故障是系统所有变量发生故障的原因,但是,在利用文献[4]中的故障模式数据进行诊断时,存在多故障诊断的问题:燃料主活门和氧化主活门同时有故障;

问题2:如文献[5]中数据所示,故障数据中的测量参数集 $A = (m_o, m_f, P_{oc}, P_f^1, n)$, SDG 中的测量参数集 $B = (m_o, m_f, P_{fp, out}, P_{op, out}, P_{fp, in}, P_{op, in}, P_{oc}, P_f^1, n)$, $A \subseteq B$, 存在故障数据中参数个数小于 SDG 中测量参数个数的问题。其中,各参数含义为: m_o 为氧化剂流量, m_f 为燃料流量, P_{oc} 为燃烧室氧喷前压力, P_f^1 为燃料主导管分支处压力, n 为涡轮泵转速, $P_{op, out}$ 为氧化剂泵出口压力, $P_{op, in}$ 为氧

表1 顺向法故障诊断结果

故障模式	能够诊断的层次	诊断规则	诊断结果
1	全部(轻微、中等、严重)	Rule1	Mode1
2	全部	Rule2	Mode2
3	全部	Rule3	Mode3
4	部分(中等)	Rule 4, 5, 8	Mode4, 5, 8
5	全部	Rule 4, 5, 8	Mode4, 5, 8
6	部分(轻微、中等)	Rule6	Mode6
7	部分(轻微)	Rule7	Mode7
8	全部	Rule 4, 5, 8	Mode4, 5, 8

化剂泵入口压力, $P_{fp, out}$ 为燃料泵出口压力, $P_{fp, in}$ 为燃料泵入口压力。

针对上述存在的问题, 提出如下的解决对策:

对策1: 提出如下的多故障诊断方法:

假设对于一个发动机系统, 需诊断的多个故障模式为 $M_r, \cdots, M_s$, 则基于 SDG 的多故障诊断方法的一般步骤为:

- (1) 建立发动机系统的 SDG;
- (2) 化简得到需诊断的多故障模式中的每个单故障模式对应的 SDG;
- (3) 对每个单故障模式的 SDG, 分别建立诊断规则 $r_r, \cdots, r_s$;
- (4) 对每个单故障模式的诊断规则作逻辑与运算, $\bigcap_{r \leq j \leq s} r_j$ 得到最终的多故障模式的诊断规则。

对策2:

显然, 集合 B 的维数 $\dim(B)$ 越大, 诊断的数据就越多, 诊断结果就会越精确。因此, 需要在诊断的精确度和测量的困难度之间作出一个权衡。

途径有2:

(1) 顺向法: 即利用 SDG 化简的其中一条原则——删除非测量节点——建立只包含集合 A 中元素的诊断规则库。优点是诊断速度快。缺点是诊断的精确度不高, 由于 $\dim(A) = 5$, 而且, 每一个元素只取1、0、-1三个定性值, 因此最多能诊断出 3^5 种定性特征不同的故障, 从而导致不同类型的故障由于定性特征区分不明显, 得到的诊断结果相同。

(2) 逆向法: 即利用模型的知识, 将集合 A 中元素的定性值通过模型求解出 $B - A$ 中元素的定性值, 再利用包含 B 中元素的诊断规则库进行诊断。相对于方法1, 其优点是诊断的精确度高, 由于 $\dim(B) = 9$, 因此最多能诊断出 3^9 种定性特征不同的故障。缺点是诊断速度较慢。

用文献[5]中的模式作为故障数据, 先建立只包含 A 中元素各模式对应的 SDG 以及规则, 最后得到诊断结果如表1所示。

由表1中可以归纳出如下几点结论:

(1) 故障模式 Mode1, 2, 3, 6, 7可以由规则 Rule1, 2, 3, 6, 7唯一确定。

(2) 模式4, 5, 8虽然可以分别由规则4, 5, 8进行诊断, 但同时也会被诊断为另外2种故障。即故障模式4既可被诊断为模式4对应的故障, 也可以被诊断为模式5, 8对应的故障, 诊断的准确度不高, 这主要是由于模式4, 5, 8的定性特征相同, 导致规则4, 5, 8不能加以区分。

(3) 模式4, 6, 7所对应的规则只能诊断出部分的故障现象, 而其他的故障现象则诊断不出来。如模式6对应的规则6只能对相应故障在轻微和中等程度时尚能诊断出来, 在严重程度时就显得无能为力了。

从结论(1)和(2)可以得出如下的关系式:

$$\{ \text{定性故障诊断方法的结果集} \} \supseteq \{ \text{实际故障的集合} \}$$

因此, 定性故障诊断方法可能会产生误诊的情况, 但不会产生漏诊。

同时, 结论(2)和(3)中所指出的问题正如前所说, 是 SDG 方法的本质缺陷, 而解决的唯一方法只有在诊断时加入更多的信息, 从而对不能区分的故障进一步加以区分。

为了提高 SDG 方法的诊断准确度, 减少误诊次数的发生, 可以对方法进行如下改进:

(1) 建立只包含集合 A 中元素的 SDG 和诊断规则库;

(2) 利用方法(1)进行诊断, 得到初步的诊断结果;

(3) 对诊断结果中不能唯一确定的故障, 通

过采取加入其他信息的方法进行进一步诊断,得到最终的诊断结果。

仍以文献[5] 中的故障数据为例:
步骤(1) 和步骤(2) 的结果如上所示;
在步骤(3) 中, 为了唯一区分故障模式4, 5, 8, 考虑加入变量:

Rule9: if ($\overline{r_b} < 1$) and ($0.904 \leq \overline{r_b} \leq 0.912$) then Mode4 是一个故障。
Rule10: if ($\overline{r_b} > 1$) and ($1.10 \leq \overline{r_b} \leq 1.12$) then Mode5 是一个故障。
Rule11: if ($\overline{r_b} \cong 1$) and ($0.996 \leq \overline{r_b} \leq 1.006$) then Mode8 是一个故障。

最终得到诊断结果如表2所示。

表2 集成定量信息的诊断结果

故障模式	诊断规则1	诊断结果1	诊断规则2	诊断结果2
4	Rule 4, 5, 8	Mode 4, 5, 8	Rule 4, 5, 8, 9	Mode4
5	Rule 4, 5, 8	Mode 4, 5, 8	Rule 4, 5, 8, 10	Mode5
8	Rule 4, 5, 8	Mode 4, 5, 8	Rule 4, 5, 8, 11	Mode8

通过加入 Rule9, 10, 11到规则库中, 最终得到的诊断结果为唯一确定。

4 结 论

由于 SDG 方法使用的仅仅是系统的定性特征, 而舍弃了一些有用的信息, 因而对于一些定性特征相同而定量特征不同的故障模式并不能准确地加以区分。因此, 为了提高诊断的速度, 采用结合诊断对象的特点来建立 SDG 和诊断规则, 同时为了提高诊断的准确性, 采用结合系统的定量信息^[6]来作进一步的诊断, 文章对 SDG 方法所作的讨论以及改进方法的测试结果都表明了这两种途径是有效的。但也应该看到, 在所诊断的8种故障模式中, 并不是所有程度的故障都能被诊断出来, 这是因为某些测量变量的定性特征会随着故障模式发生程度的变化而变化, 因此, 还必须结合系统已知的其余信息(如专家的经验) 才能进一步提高

$$\overline{r_b} = \frac{r_b}{r_b^*}$$
其中: r_b 为燃气发生器中推进剂组元比的瞬态值, r_b^* 为燃气发生器中推进剂组元比的额定值。
并根据该变量的特性^[1]形成如下的用语言描述的规则:

SDG 方法的诊断能力。

参考文献:

[1] YU Cheng-ching, Chyuan Lee. Fault Diagnosis Based on Qualitative/Quantitative Process Knowledge [J]. AICHE Journal, 1991, 37(4) : 617- 628.
[2] 吴泉源, 刘江宁. 人工智能与专家系统[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1995.
[3] HUANG Wei-dong, WANG Ke-chang. Rocket Engine Diagnostics Using the Signed Directed Graph[R]. AIAA- 95- 2436, 1995.
[4] 黄卫东, 王克昌. 基于深层知识规则的液体火箭发动机故障诊断[J]. 宇航学报, 1997, 18(4) : 61- 65.
[5] 吴建军. 液体火箭发动机故障检测与诊断研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1995.
[6] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(责任编辑 杨再荣)