

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0001-04

液体火箭发动机故障诊断的命题逻辑方法*

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: 为对液体火箭发动机诊断知识的表达和组织提供一种简洁有效和易于处理的方式, 通过以命题逻辑公式和子句的形式对系统观测信息和定性特征加以描述建立定性诊断模型, 同时诊断问题基于归结原理和假言推理规则的演绎推理方法求解。基于试车数据的诊断结果表明方法具有较强的诊断能力。

关键词: 命题逻辑; 故障诊断; 液体火箭发动机

中图分类号: V434 文献标识码: A

Propositional Logic-based Method of Liquid Rocket Engine Fault Diagnosis

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

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To provide an efficient way easy to express and organize the fault knowledge of liquid rocket engine, a qualitative model is first founded by the qualitative description of the observation and characteristic of the system in the form of propositional logic formulae and clauses, then fault diagnosis is continued based on the inference rules of resolution step and modus ponens, and diagnosis results with test data manifest that the provided method has better ability.

Key words: propositional logic; fault diagnosis; liquid rocket engine

系统诊断知识如何表达和组织是液体火箭发动机等复杂系统基于知识诊断推理过程中必须解决的核心问题^[1]。在基于定量模型的故障诊断方法中, 系统诊断知识以微分或差分方程的形式来表达^[2], 描述的是系统所需满足的物理定律等较深层次的结构知识。然而, 对于复杂系统, 难以建立完备的系统结构知识描述, 而且所建立的这种结构知识描述也是复杂和难以处理的, 因而通常采取近似的描述方法。命题逻辑公式和子句作为人工智能领域中一种被广泛应用的知识表示形式, 能有效地表达系统的经验和行为等层次较浅的知识。因此, 本文将以命题逻辑公式和子句作为诊断知识的表示形式, 同时基于归结原理和假言推理规则的演绎推理^[3]进行诊断问题求解, 建立液体火箭发动机基于知识的智能故障诊断方法。

1 系统诊断知识的命题逻辑描述

基于命题逻辑的系统诊断知识描述, 主要包括系统观测信息描述和系统特征描述两个方面的内容, 这两者构成了基于知识的系统定性诊断模型。

1.1 系统观测信息的命题逻辑描述

用征兆表示系统在某一时刻的状态或特征, 则一个征兆的存在与否可用一个原子命题公式来表示。例如用原子公式 $P_{oc,h}$ 表示燃烧室氧喷前压力偏高的征兆, 当观测到该征兆存在时, $P_{oc,h}$ 的真值为 True, 否则为 False。 $P_{oc,h}$ 的否定表示为: $\neg P_{oc,h}$ = “燃烧室氧喷前压力没有偏高”。

系统观测信息可通过表示征兆的原子公式的“ \wedge ”运算得到。因此, 对于如下观测到的系统定性行为:

$$u_1 \wedge \neg u_2 \wedge x_4 \wedge \neg x_5 \wedge y_1 \quad (1)$$

* 收稿日期: 2001-09-28
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59806014)
作者简介: 刘洪刚 (1975—), 男, 博士生。

式中, u_1, x_4, y_1 表示对应的征兆存在, u_2, x_5 表示对应的征兆不存在, 而对于其他未包含其中的原子公式, 其所对应的征兆是否存在为未知。

为诊断处理的方便, (1) 式可转化为如下文字的集合:

$$u_1 \wedge \neg u_2 \wedge x_4 \wedge \neg x_5 \wedge y_1 = \{u_1, \neg u_2, x_4, \neg x_5, y_1\}$$

1.2 系统特征的命题逻辑描述

系统特征的命题逻辑描述是指将系统变量之间的因果关系等用逻辑公式的形式来表示。如对于系统中包含的如下因果关系:

$$a \wedge b \Rightarrow s, c \Rightarrow s$$

表示征兆 a, b 的同时出现或 c 的出现将导致征兆 s 的出现。

将其用逻辑公式的形式表示有:

$$a \wedge b \rightarrow s, c \rightarrow s \quad (2)$$

利用 (3) 式中的逻辑运算规则, (2) 式可转化为 (4) 式的子句形式。

$$a \rightarrow b = b \vee \neg a, (a \wedge b) \vee c = (a \vee c) \wedge (b \vee c), a \leftarrow b = (b \vee \neg a) \wedge (a \vee \neg b) \quad (3)$$

$$(a \wedge b) \vee c \rightarrow s = (s \vee \neg a \vee \neg b) \wedge (s \vee \neg c) = \{(s \vee \neg a \vee \neg b), (s \vee \neg c)\} \quad (4)$$

2 基于命题逻辑描述的系统诊断

基于命题逻辑描述的故障诊断方法, 其基本思想是通过检测系统的实际行为 (观测输出) 与模型的预测输出是否一致来判断系统是否出现故障, 设 O_0 为系统的观测变量集合, R 为系统的定性模型, F_0 为系统故障的一个子集, 则诊断问题可描述为如下的二元组:

$$\langle O_0, R \rangle, \quad \text{且}$$

F_0 为诊断问题 $\langle O_0, R \rangle$ 的解 $\Leftrightarrow F_0 \cup O_0 \cup R$ 是一致的 $\Leftrightarrow \forall f_i \in F_0$, 都能对 O_0 作出解释

因此, 根据上述原理, 基于命题逻辑的故障诊断方法为:

(1) 根据归结原理, 将 R 转化为子句集 $S = \{S_i, i = 1, \dots, n\}$, 从子句集 S 中任意选出子句 S_i , 并与 O_0 组成新的子句集 $SS_i = O_0 \cup S_i \{i = 1, \dots, n\}$, 然后从 SS_i 中寻找含有互补文字的子句对, 按推理规则推出这一对子句的归结子句放入 SS_i , 如此反复, 而系统诊断问题的解即为直至最后得到只包含故障文字的归结子句。该方法需对 $SS_i \{i = 1, \dots, n\}$ 共 n 个子句集进行归结。

(2) 根据归结原理的完备性: 子句集 S 是不可满足的, 当且仅当存在从 S 到空子句的归结演绎。基于此, 将 R 转化为子句集 $S = \{S_i, i = 1, \dots, n\}$, 从子句集 S 中任意选出子句 S_i , 并与 O_0 组成新的子句集 $SS_i = O_0 \cup S_i \{i = 1, \dots, n\}$, 则原诊断问题可描述为:

对于系统的某个故障模式 f_i , f_i 为诊断问题的解 \Leftrightarrow 子句集 $\langle SS_i, \neg f_i \rangle$ 可归结为空子句。

设系统有 m 个故障模式, 则该方法需对 $n \times m$ 个子句集进行归结证明。

(3) 根据假言推理规则, 有:

如果公式 $p \rightarrow q$ 的真值为 True, 且 p 的真值为 True, 则 q 的真值为 True。

将 R 转化为 $p \rightarrow q$ 形式的公式集 $R = \{R_i, i = 1, \dots, n\}$, 从子句集 R 中任意选出公式 R_i , 判断公式 R_i 在 O_0 条件下的真值, 若为 True, 则为原诊断问题的解。该方法需对 n 个公式进行判断。

3 诊断实例

对于某大型液体火箭发动机, 将用 SDG 方法^[4, 5] 进行分析化简后得到的产生式规则转化为逻辑公式的形式表示有:

$$R = \{P_{oc1} \wedge m_{ol} \wedge m_{fh} \wedge nh \wedge P_{f1h} \rightarrow \text{Mode1}; m_{f1} \wedge P_{f1l} \wedge m_{oh} \wedge nh \wedge P_{och} \rightarrow \text{Mode2}; m_{ol} \wedge P_{f1l} \wedge P_{oc1} \wedge m_{fh} \wedge nh \rightarrow \text{Mode3}; m_{ol} \wedge P_{f1l} \wedge m_{f1} \wedge nh \wedge P_{oc1} \rightarrow \text{Mode4}; m_{f1} \wedge P_{f1l} \wedge nl \wedge m_{ol} \wedge P_{oc1} \rightarrow \text{Mode5}; (m_{ol} \wedge P_{f1l} \wedge m_{fh} \wedge nh \wedge P_{och}) \vee (m_{f1} \wedge P_{f1l} \wedge nl \wedge m_{ol}) \rightarrow \text{Mode6}; (m_{oh} \wedge P_{f1h} \wedge m_{fh} \wedge nh) \vee (m_{f1} \wedge P_{f1l} \wedge nl \wedge m_{oh} \wedge P_{oc1}) \rightarrow \text{Mode7}\}$$

其中各参数的含义为: P_{och} 为燃烧室氧喷前压力高于正常值, P_{oc1} 为燃烧室氧喷前压力低于正常

值, m_{0h} 为发动机氧化剂流量高于正常值, m_{0l} 为发动机氧化剂流量低于正常值, m_{fh} 为发动机燃烧剂流量高于正常值, m_{fl} 为发动机燃烧剂流量低于正常值, P_f^{lh} 为燃料主导管分支处压力高于正常值, P_f^{ll} 为燃料主导管分支处压力低于正常值, nh 为涡轮泵转速高于正常值, nl 为涡轮泵转速低于正常值, Mode1 为氧化主活门故障, Mode2 为燃料主活门故障, Mode3 为两活门同时故障, Mode4 为燃气发生器氧化剂管路过滤网阻塞, Mode5 为燃气发生器入口处泄漏, Mode 6 为氧化剂喷注器阻塞, Mode 7 为推力室喉部烧蚀。

其子句的表示形式为:

$$S = \{ \neg P_{oc}l \vee \neg m_{0l} \vee \neg m_{fh} \vee \neg nh \vee \neg P_f^{lh} \vee \text{Mode}1, \neg m_{fl} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg m_{0h} \vee \neg nh \vee \neg P_{oc}h \vee \text{Mode}2, \neg m_{0h} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg P_{oc}l \vee \neg m_{fh} \vee \neg nh \vee \text{Mode}3, \neg m_{0l} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg m_{fl} \vee \neg nh \vee \neg P_{oc}l \vee \text{Mode}4, \neg m_{fl} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg nl \vee \neg m_{0l} \vee \neg P_{oc}l \vee \text{Mode}5, \neg m_{0l} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg m_{fh} \vee \neg nh \vee \neg P_{oc}h \vee \text{Mode}6, \neg m_{fl} \wedge \neg P_f^{ll} \wedge \neg nl \wedge \neg m_{0l} \vee \text{Mode}6, \neg m_{0h} \vee \neg P_f^{ll} \vee \neg m_{fl} \vee \neg nl \vee \neg P_{oc}l \vee \text{Mode}7, \neg m_{fh} \wedge \neg P_f^{lh} \wedge \neg nh \wedge \neg m_{0h} \vee \text{Mode}7 \}$$

系统的故障集合为 $F_0 = \{ \text{Mode}1, \text{Mode}2, \text{Mode}3, \text{Mode}4, \text{Mode}5, \text{Mode}6, \text{Mode}7 \}$, 因此,

根据方法 (3), 判断公式 R_i 在 O_0 条件下的真值 $\{i= 1, \dots, 7\}$ ($T = \text{True}, F = \text{False}$), 其结果为表 1;

根据方法 (1), 对 $S_i \cup O_0 \{i= 1, \dots, 9\}$ 进行归结, 其结果为表 2;

根据方法 (2), 证明结论 $\langle S_i \cup O_0, \neg f_j \rangle \{i= 1, \dots, 9, j= 1 \dots 7\}$, 其结果为表 3。 (\square 表示空子句, \exists 表示非空子句)

表 1 假言推理结果

Tab 1 Inference result of modus ponens

诊断序号	系统观测值 (O_0)	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
1	$P_{oc}l, m_{0l}, m_{fh}, P_f^{lh}, nh$	T	F	F	F	F	F	F
2	$P_{oc}h, m_{0h}, m_{fl}, P_f^{ll}, nh$	F	T	F	F	F	F	F
3	$P_{oc}l, m_{0l}, m_{fh}, P_f^{ll}, nh$	F	F	T	F	F	F	F
4	$P_{oc}l, m_{0l}, m_{fl}, P_f^{ll}, nh$	F	F	F	T	F	F	F
5	$P_{oc}l, m_{0l}, m_{fl}, P_f^{ll}, nl$	F	F	F	F	T	F	F
6	$P_{oc}h, m_{0l}, m_{fh}, P_f^{ll}, nh$	F	F	F	F	F	T	F
7	$P_{oc}l, m_{0h}, m_{fl}, P_f^{ll}, nl$	F	F	F	F	F	F	T

4 结论

通过以命题逻辑公式和子句的形式建立定性诊断模型, 然后利用演绎推理检测模型与系统实际行为的一致性的方法, 为液体火箭发动机诊断知识的表达和组织提供了一种简洁有效和易于处理的方式, 能用于系统故障诊断, 且具有较强的诊断能力。但由于命题逻辑对知识的表达能力有限, 因此, 为了能对系统的动态行为进行检测和诊断, 必须结合系统的时间信息来作进一步的诊断。同时, 对系统状态的定性描述中所包含的模糊概念进行处理, 这些都是液体火箭发动机逻辑故障诊断方法进一步研究所需要解决的问题。

参考文献:

[1] 杨叔子等. 基于知识的诊断推理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
 [2] 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.
 [3] 吴泉源, 刘江宁. 人工智能与专家系统[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 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).
 [5] 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.

表2 归结结果

Tab 2 Resolution result

诊断序号	系统观测值 (O_0)	归结子句集	归结结果是否只包含故障文字	归结结果 (只包含故障文字)
1	P_{oc1} m_{ol} m_{fh} P_f^{1h} nh	$\langle S_1, O_0 \rangle$	T	Mode1
		$\langle S_2, O_0 \rangle$	F	
		
		$\langle S_9, O_0 \rangle$	F	
2	P_{och} m_{oh} m_{fl} P_f^{1l} nh	$\langle S_1, O_0 \rangle$	F	Mode2
		$\langle S_2, O_0 \rangle$	T	
		$\langle S_3, O_0 \rangle$	F	
		
		$\langle S_9, O_0 \rangle$	F	
3	P_{oc1} m_{ol} m_{fh} P_f^{1l} nh	$\langle S_1, O_0 \rangle$	F	Mode3
		$\langle S_2, O_0 \rangle$	F	
		$\langle S_3, O_0 \rangle$	T	
		
		$\langle S_9, O_0 \rangle$	F	
4	P_{oc1} m_{ol} m_{fl} P_f^{1l} nh	Mode4
		$\langle S_3, O_0 \rangle$	F	
		$\langle S_4, O_0 \rangle$	T	
		$\langle S_5, O_0 \rangle$	F	
		
5	P_{oc1} m_{ol} m_{fl} P_f^{1l} nl	Mode5
		$\langle S_4, O_0 \rangle$	F	
		$\langle S_5, O_0 \rangle$	T	
		$\langle S_6, O_0 \rangle$	F	
		
6	P_{och} m_{ol} m_{fh} P_f^{1l} nh	Mode6
		$\langle S_5, O_0 \rangle$	F	
		$\langle S_6, O_0 \rangle$	T	
		$\langle S_7, O_0 \rangle$	F	
		
7	P_{oc1} m_{oh} m_{fl} P_f^{1l} nl	Mode7
		$\langle S_6, O_0 \rangle$	F	
		$\langle S_7, O_0 \rangle$	T	
		$\langle S_8, O_0 \rangle$	F	
		

表3 归结原理证明结果

Tab 3 Proof result of resolution

诊断序号	系统观测值 (O_0)	子句集	证明结果
1	P_{oc1} m_{ol} m_{fh} P_f^{1h} nh	$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	\square
		$\langle S_2 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
	
2	P_{och} m_{oh} m_{fl} P_f^{1l} nh	$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_2 \rangle$	Ξ
		$\langle S_2 \cup O_0, \neg f_2 \rangle$	\square
3	P_{oc1} m_{ol} m_{fh} P_f^{1l} nh	$\langle S_3 \cup O_0, \neg f_2 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
		$\langle S_2 \cup O_0, \neg f_3 \rangle$	Ξ
		$\langle S_3 \cup O_0, \neg f_3 \rangle$	\square
4	P_{oc1} m_{ol} m_{fl} P_f^{1l} nh	$\langle S_4 \cup O_0, \neg f_3 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
		$\langle S_3 \cup O_0, \neg f_4 \rangle$	Ξ
		$\langle S_4 \cup O_0, \neg f_4 \rangle$	\square
5	P_{oc1} m_{ol} m_{fl} P_f^{1l} nl	$\langle S_5 \cup O_0, \neg f_4 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
		$\langle S_4 \cup O_0, \neg f_5 \rangle$	Ξ
		$\langle S_5 \cup O_0, \neg f_5 \rangle$	\square
6	P_{och} m_{ol} m_{fh} P_f^{1l} nh	$\langle S_6 \cup O_0, \neg f_5 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
		$\langle S_5 \cup O_0, \neg f_6 \rangle$	Ξ
		$\langle S_6 \cup O_0, \neg f_6 \rangle$	\square
7	P_{oc1} m_{oh} m_{fl} P_f^{1l} nl	$\langle S_7 \cup O_0, \neg f_6 \rangle$	Ξ
	
		$\langle S_1 \cup O_0, \neg f_1 \rangle$	Ξ
		$\langle S_6 \cup O_0, \neg f_7 \rangle$	Ξ
		$\langle S_7 \cup O_0, \neg f_7 \rangle$	\square
7	P_{oc1} m_{oh} m_{fl} P_f^{1l} nl	$\langle S_8 \cup O_0, \neg f_7 \rangle$	Ξ
		$\langle S_9 \cup O_0, \neg f_7 \rangle$	Ξ
	