

集成时间信息的液体火箭发动机故障诊断推理^{*}

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: 提出一种液体火箭发动机集成时间信息的定性建模和故障诊断推理方法。该方法以谓词逻辑公式和子句的形式对发动机定性特征和试车过程中的观测信息加以描述, 同时基于归结原理和假言推理规则的演绎推理方法进行诊断问题求解。结合实际试车数据的检验结果表明, 该方法为液体火箭发动机试车过程中动态诊断知识的表达和组织, 提供了一种简洁有效的方式, 计算量小, 检测速度快, 且具有较强的诊断能力。

关键词: 液体火箭发动机; 故障诊断; 知识库

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0097-05

Fault diagnosis reasoning for liquid-propellant rocket engines with integration of time information

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

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A qualitative modeling and diagnosis method was proposed with the integration of time information for the fault diagnosis of liquid-propellant rocket engines. The modeling method is based on the qualitative description of observation and characteristics of engines in the form of predication logic formulae and clauses, and the diagnosis method is based on the inference rules of resolution step and modus ponens. Results verified with the on-fire test data show that the method proposed provides an efficient way easy to represent the dynamic diagnostic knowledge of the test processes. It needs less computation and has better ability in the fault detection and diagnosis in contrast to normal methods.

Key words: Liquid-propellant rocket engine; Fault diagnosis; Knowledge base

1 引 言

系统诊断知识的如何表达和组织是对于象液体火箭发动机这样的复杂系统基于知识的诊断推理过程中必须解决的核心问题之一^[1]。基于逻辑的方法, 通过以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, 建立系统的定性诊断模型, 表达了系统的经验和行为等层次较浅的知识, 是结构和模型等深层次的知识在一定程度上的抽象和化简^[2]。

但是, 由于基于命题逻辑的表达形式对知识的表达能力有限^[3], 主要表现在不能结合系统的时间信息对发动机试车过程中的动态行为进行故障检测和诊

断。因此, 本文将根据被诊断对象液体火箭发动机的特性, 通过以谓词逻辑公式和子句的形式描述发动机的观测信息和定性特征, 从而建立液体火箭发动机集成时间信息的定性诊断模型, 并基于归结原理和假言推理规则发展和建立发动机基于动态诊断知识的故障检测和诊断的理论和方法。结合实际试车数据的检验结果表明, 该方法为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, 且具有较强的检测和诊断能力。

2 系统诊断知识的逻辑描述

谓词逻辑具有比命题逻辑更强的表达能力, 主要

* 收稿日期: 2002-11-20; 修订日期: 2003-09-05。

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, 研究领域为智能故障诊断系统。

表现在变量可以出现在谓词逻辑公式中, 因此, 若用包含时间变量 T 的谓词逻辑公式描述系统在时刻 t 的状态, 谓词逻辑将具有表达系统动态特性的能力。

集成时间信息的系统诊断知识描述, 主要包括如下两个方面的内容:

2.1 系统观测信息的定性描述

系统征兆 Symptom 在某一时刻点 T 的真值为 TRUE 或 FALSE 可用一个谓词公式来表示:

$$\text{Symptom}(T) \quad (1)$$

例如 highwater-level-1(8) 表土容器 1 中的水位偏高的征兆在时刻点 8 是存在的。

2.2 系统特征的定性描述

对于系统中包含的如下关系

$$a(T-1) \wedge b(T-2) \Rightarrow s(T) \quad (2)$$

表示征兆 a 在时刻 $T-1$ 和 b 在时刻 $T-2$ 的同时出现将导致征兆 s 在时刻 T 出现。

因此, 对于系统中包含的一般形式的关系, 将其转化为子句的形式有:

$$\{ \neg a(T_a) \vee \neg b(T_b) \vee \dots r(T_r) \vee \dots s(T_s), \\ C_1(T_a, T_b, \dots, T_r), C_2(T_a, T_b, \dots, T_s) \} \quad (3)$$

其中 $C_1(T_a, T_b, \dots, T_r) = \{ T_r = \Phi_1(T_a, T_b, \dots) \}$, $C_2(T_a, T_b, \dots, T_s) = \{ T_s = \Phi_2(T_a, T_b, \dots) \}$ 。

同时, 由于征兆 $r, \dots, s$ 被激活当且仅当其因被激活, 因此, 下面关系式成立

$$\{ \neg r(T_o), \dots, \neg s(T_o), T_o < \min(T_r, \dots, T_s) \} \quad (4)$$

此外, 若以发动机氧化剂流量 m_o 为例, 且 m_{oz} , m_{oh} 和 m_{ol} 分别表示发动机氧化剂流量处于正常状态、偏高和偏低, 则在流量偏低、偏高和处于正常状态三种状态描述中, 发动机氧化剂流量状态只可能是其中一种, 故又有如下子句形式的知识表示:

$$\{ m_{oh}(T) \vee m_{ol}(T) \vee m_{oz}(T), \neg m_{oh}(T) \vee \neg m_{ol}(T), \\ \neg m_{ol}(T) \vee \neg m_{oz}(T), \neg m_{oh}(T) \vee \neg m_{oz}(T) \} \quad (5)$$

3 基于谓词逻辑描述的系统诊断

基于谓词逻辑公式和子句等知识描述形式的发动机故障检测和诊断, 其基本思想是基于假言推理规则与归结原理进行推理求解。

定义 1 定义一元谓词 $X(T)$ 表示变量 X 在 T 时刻的状态。

定义 2 若记 $\text{DOM}(X)$ 为 $X(T)$ 的值域, 则 T 时刻发动机的状态为

$$\text{LRE}(T) = \{ \text{DOM}(v) \mid v \in V \} \quad (6)$$

T 时刻发动机的观测状态为

$$\text{OBS}(T) = \{ \text{DOM}(v) \mid v \in V_M \} \quad (7)$$

其中, V 和 V_M 分别表示发动机系统中的参数集和测量参数集。

对于诊断问题 DP, 假定观测信息为: $\text{OBS} = \{ \text{OBS}(T), \text{OBS}(T + \Delta T), \dots, \text{OBS}(T + N \Delta T) \}$, 其中 N 为观测点的个数, ΔT 为观测时间间隔。观测时间间隔可以相同也可以不同, 但为方便, 在本文中取观测时间间隔相同, 而对于不同的情形可依此类推。记

$$K \wedge \text{OBS}(T) \wedge \text{OBS}(T + \Delta T) \wedge \dots \wedge \text{OBS}(T + N \Delta T) = \{ P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K \} \quad (8)$$

定义 3 设 S 为诊断问题 DP 的解空间, 若 $\exists S_1 \subseteq S$ 及 $T_1 \leq T$, 使得 $S_1(T_1)$ 为 $K \wedge \text{OBS}$ 的逻辑结论,

$$P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K \rightarrow S_1(T_1) \quad (9)$$

成立, 则称 $S_1(T_1)$ 为 DP 的解。

若 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K) \wedge \neg S_1(T_1)$ 是不可满足的, 则 $S_1(T_1)$ 是 DP 的解^[3]。同时, 下述定理成立。

定理 1 若存在从子句集 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K)$ 到 $S_1(T_1)$ 的归结演绎, 则 $S_1(T_1)$ 是 DP 的解。

定理 2 构造 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K)$ 以及 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg S_1(T_1))$ 的子句集, 则 $S_1(T_1)$ 是 DP 的解当且仅当存在从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg S_1(T_1))$ 到空子句的归结演绎。

下面将在此基础上讨论 $|S_1| = 1$ 和 $|S_1| = 2$ 的情形 $(T_1 \leq T, T_2 \leq T)$ 。

由定理 1 和定理 2 容易有:

定理 3 下述命题成立:

(1) 假定 $s \in S$, 若存在从子句集 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K)$ 到 $s(T_1)$ 的归结演绎, 则 $\{s(T_1)\}$ 是 DP 的解;

(2) 假定 $s, t \in S$, 若存在从子句集 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K)$ 到 $s(T_1)$ 和 $t(T_2)$ 的归结演绎, 则 $\{s(T_1), t(T_2)\}$ 是 DP 的解。

定理 4 下述命题成立:

(1) 若 $s \in S$, 则 $\{s(T_1)\}$ 是 DP 的解当且仅当存在从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg s(T_1))$ 到空子句的归结演绎。

(2) 若 $s, t \in S$, 则 $\{s(T_1), t(T_2)\}$ 是 DP 的解当且仅当存在从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg s(T_1))$ 到空子句的归结演绎以及从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg t(T_2))$ 到空子句的归结演绎。

其次, 根据假言推理规则^[3], 有:

定理 5 若 $s \in S, T_1 \leq T, \text{OBS}(T) \wedge \text{OBS}(T + \Delta T) \wedge \dots \wedge \text{OBS}(T + N \Delta T) \xrightarrow{s} s(T_1)$ 及 $\text{OBS}(T) \wedge \text{OBS}(T + \Delta T) \wedge \dots \wedge \text{OBS}(T + N \Delta T)$ 为真, 则 $\{s(T_1)\}$ 为 DP 的解。

上述内容基于谓词逻辑公式及其子句的归结原理和假言推理规则, 建立了发动机基于时间信息的故障诊断理论, 并具有了对发动机试车过程进行故障检测和诊断的能力。但不难看出, 在定理 1 中, 对 $S_1(T_1)$ 的证明是构造性的, 而定理 2 则是基于反证思想。同时, 对于 $|S_1| = 1$ 和 $|S_1| = 2$ (分别对应于诊断解空间的维数为 1 和 2) 的情形, 在发动机诊断问题的求解过程中, 通过建立发动机诊断知识的谓词逻辑公式和子句描述, 即可基于定理 3, 定理 4 和定理 5 进行诊断。

4 集成时间信息的发动机诊断策略实现

设 $\text{OBS}(T, N, \Delta T) = \{\text{OBS}(T), \text{OBS}(T + \Delta T), \dots, \text{OBS}(T + (N - 1) \Delta T)\}$ 为发动机的观测信息, K 为根据知识策略所建立的发动机动态诊断知识库, $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 的子句表示形式为 $\{P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K\}$, $F_0 \subseteq S, |F_0| = 1$ 或 $|F_0| = 2$, 则根据定理 2, 构造 S 的基数为 1 和 2 的所有子集, 然后对任一子集中的每一个元素 f_i , 构造子句集 $\{P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg f_i(T_1)\}$, $T_1 \leq T$, 证明该子句集是否可归结为空子句, 若可, 则 $f_i(T_1)$ 为诊断问题的解。然而, 由分析不难得出, 该方法是基于反证思想, 而不是构造性的, 若要求解 DP 以及保证最终诊断解的完备性, 须证明 $\exists T_1 \in (0, T)$, 使得存在从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg S_1(T_1))$ 到空子句的归结演绎, 而对于 $T_2 \in (0, T)$, 若不存在从 $(P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg S_1(T_2))$ 到空子句的归结演绎, 则可排除 $S_1(T_2)$ 是解的可能性。因此, 需对观测时刻 T 以前的所有时刻进行遍历归结证明, 显然, 其效率将十分低下。

一种解决的途径是由观测时刻 T 往前以一定的步长 ΔT 进行前向搜索证明, 但是, 若设发动机某故障 M 发生时刻为 $T - \Delta T/8$, 且在 T 时刻观测到异常征兆的出现, 则若以步长 ΔT 从 T 时刻进行前向搜索, 即分别证明 $\{P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg f_i(T - \Delta T)\}$, $\{P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_K, \neg f_i(T - 2\Delta T)\}$, $\dots$ 是否可归结为空子句, 显然, 故障 $M(T - \Delta T/8)$ 不能被诊断出来, 而若缩小步长进行前向搜索, 则诊断推理的计算量将大幅度增加。因此, 如何选择合适的步长进行搜

索将是该方法需进一步研究解决的首要问题。

而另一方面, 根据定理 1 和定理 5, 可形成如下的故障检测和诊断推理策略:

(1) 检测策略

将发动机诊断知识库 K 转化为公式集 $R = \{R_i, i = 1, \dots, K\}$, 并基于公式集建立发动机故障检测的逻辑知识, 然后对公式集 R 中所有的公式 R_i , 判断公式 R_i 在 $\text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 条件下的真值。该策略需对 K 个公式进行判断。

(2) 诊断策略

在检测结果的基础上, 将发动机诊断知识库 K 转化为子句集 $P = \{P_i, i = 1, \dots, K\}$, 对子句集 P 中的所有子句 P_i , 与 $\text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 组成新的子句集 $SS_i = \text{OBS}(T, N, \Delta T) \cup P_i \{i = 1, \dots, K\}$, 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, 直至最后得到只包含故障文字的归结子句。该策略需对 $SS_i \{i = 1, \dots, K\}$ 共 K 个子句集进行归结。

同时, 对于发动机诊断知识库 K 的公式集 R , 还可基于假言推理规则进行故障诊断推理。

文献[4]中基于涡轮泵故障、燃气发生器故障以及涡轮泵及燃气发生器故障的实际试车数据, 采用基于模型仿真计算的诊断方法, 对某大型液体火箭发动机进行了故障检测。因此, 为检验本文发动机故障检测与诊断策略的有效性, 下面将基于同样试车数据, 对发动机进行故障检测和诊断推理。已知其试车号及各次试车中的监测参数如表 1 (其中, m_f 为发动机燃料流量; n 为涡轮泵转速; m_o 为发动机氧化剂流量; p_{oc} 为燃烧室氧喷前压力; p_c 为燃烧室压力)。

Table 1 Test type and measured parameter of the engine

Test type	Fault origin	Measured parameters
Test (I)-39	Turbine and pump	m_f, n, m_o, p_c
Test (II)-6	Gas generator	m_f, n, m_o, p_{oc}
Test (II)-7	Turbine, pump and gas generator	m_f, n, m_o, p_{oc}

由对发动机故障的效应分析^[4-6]可得到时刻 T 发动机故障模式与征兆存在的关系, 将其转化为子句的形式有: (其中 M 表示故障, T_1 为检测开始时刻之后的某个检测时刻, ΔT 为检测步长)。

$$\begin{aligned}
 & M \vee \neg m_f l(T_1) \vee \neg n l(T_1) \vee \neg m_o l(T_1) \vee \neg p_c l(T_1) \\
 & \vee \neg p_{oc} l(T_1) \vee \neg m_f l(T_1 + \Delta T) \vee \neg n l(T_1 + \Delta T) \\
 & \vee \neg m_o l(T_1 + \Delta T) \vee \neg p_c l(T_1 + \Delta T) \\
 & \vee \neg p_{oc} l(T_1 + \Delta T) \vee \dots \vee m_f l(T_1 + (N - 1) \Delta T)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vee \neg p_{cl}(T_1 + (N-1)\Delta T) \vee \neg p_{ol}(T_1 + (N-1)\Delta T) \\ & \vee \neg p_{cl}(T_1 + (N-1)\Delta T) \vee \neg p_{oc}(T_1 + (N-1)\Delta T) \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 基于建立的发动机故障检测策略, 基于发动机试车数据进行故障检测, 判断 $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 和式(10)在试车数据条件下的真值。其中, 试车号 Test(II)-6 的检测结果为表 2, $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 在 101s, 102s 和 105s 以后出现真值 T , 式(10)在 109s 处出现真值 T , 故障报警时刻为 109s; 试车号 Test(II)-7 的检测结果为表 3, $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 在 99s 处出现真值 T , 式(10)在 103s 处出现真值 T , 故障报警时刻为 103s; 试车号 Test(I)-39 的检测结果为表 4, $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 在 371s 处出现真值 T , 式(10)在 375s 处出现真值 T , 故障报警时刻为 375s。($N=5$, $\Delta T=1$ s) 其中, 符号 z 表示观测参数的当前状态值处于正常; h 表示观测参数的当前状态值高于上限; l 表示观测参数的当前状态值低于下限; $\checkmark$ 表示观测参数的当前状态满足逻辑命题描述 z, h 或 l ; $\times$ 表示观测参数的当前状态不满足逻辑命题描述 z, h 或 l ; T 表示 $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 当前的真值为 True; F 表示 $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 当前的真值为 False; $R = K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 。

Table 2 Fault detection for the test of test(II)-6

Time/s	m_f			n			m_o			p_{oc}			R
	l	h	z	l	h	z	l	h	z	l	h	z	
< 90	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	F
90	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	F
.....													
100	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
101	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
102	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
103	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
104	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
105	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
106	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
107	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
108	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
109	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
> 109	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T

在上述检测结果的基础上, 基于诊断推理策略, 对发动机试车数据进行故障诊断, 即对 $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$ 的子句表示形式分别基于归结原理进行归结和基于假言推理规则进行推理, 结果为表 5, 并与文献[4]中基于模型的仿真方法进行比较后的结果为图 1。其中, o 表示数学模型方法的故障报警时刻; $*$ 表示本文策略检测出故障的时刻; $+$ 表示本文策略的故

障诊断结果。1, 2, 3 分别表示试车号 Test(I)-39, Test(II)-6 和 Test(II)-7。

Table 3 Fault detection for the test of test(II)-7

Time/s	m_f			n			m_o			p_{oc}			R
	l	h	z	l	h	z	l	h	z	l	h	z	
≤ 64	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	F
(65, 80]	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
81	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
.....													
98	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	F
99	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
100	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
101	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
102	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
103	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
> 103	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T

Table 4 Fault detection for the test of test(I)-39

Time/s	m_f			n			m_o			p_c			R
	l	h	z	l	h	z	l	h	z	l	h	z	
< 360	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	F
360	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	F
.....													
370	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	F
371	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
372	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
373	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
374	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
375	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T
> 375	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	T

Table 5 Diagnosis result of the on-line tests

Test type	Inference result of $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$	Resolution result of $K \wedge \text{OBS}(T, N, \Delta T)$
Test(I)-39	$M_1(370.6)$	$M_1(371)$
Test(II)-6	$M_2(104.5)$	$M_2(105)$
Test(II)-7	$M_1 \wedge M_2(98.5)$	$M_1 \wedge M_2(99)$

由图 1 可以看出, 本文所建立的发动机故障检测与诊断策略, 既能有效和准确地检测发动机试车过程中的故障, 同时又具有较强的诊断能力, 且计算量小。

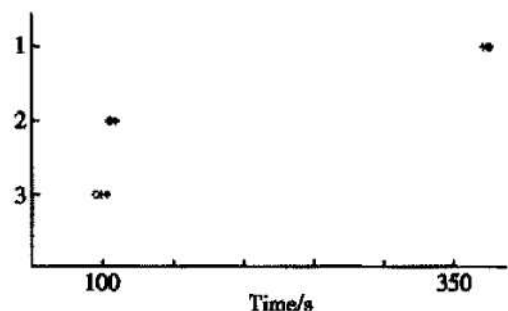


Fig. 1 Comparison to the model based diagnosis method

(下转第 129 页)

(2) 叶片前缘逆主流喷气对栅内流场结构有明显影响, 前缘正对主流喷气和吸力面前缘逆主流喷气使通道涡的尺度和强度增加, 压力面前缘喷气时流场结构变化不如前两者明显;

(3) 前缘逆主流喷气增加损失机理不同, 损失增加量级也有所不同, 正对来流喷气时的掺混过程在流道内基本完成, 以均匀混合流体形式向下游发展, 吸力面前缘喷气由于流道内不同压力梯度的影响而存在“二次掺混”, 导致较大的掺混损失, 压力面前缘喷射的冷气同时与附面层和主流中的流体发生掺混, 然后在顺压力梯度作用下, 均匀的混合流体向下游发展, 冷气对附面层的影响是损失增加的主要原因。

参考文献:

- [1] Hay N, Lampard D. Discharge coefficient of turbine cooling hole: a review [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 314~319.
- [2] Ligrani P M, Ramsey A E. Film cooling from a single row of holes oriented in spanwise/normal planes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 11(3) 9: 770~775.
- [3] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 锥形排孔气膜冷却实验研

究[J]. 推进技术, 1998, 19(3): 65~69. (ZHU Hui ren, XU Du chun, LIU Song ling, et al. Film cooling experimental investigation of a row of cone-shaped holes [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(3).)

- [4] 徐红洲, 王尚锦, 刘松龄, 等. 气膜冷却流场的实验研究和数值模拟分析[J]. 推进技术, 1998, 19(2): 47~53. (XU Hong zhou, WANG Shang jin, LIU Song ling, et al. Experimental study and analysis of numerical computation in the flow field of film cooling [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(2).)
- [5] Chen Fu, Yang Hong. An experimental investigation on the aerodynamic performance and flowfield structure of a film-cooled turbine cascade [R]. *ASME paper 99-GT-280*.
- [6] 谭春青, 王仲奇, 韩万今. 大转角透平叶栅叶片正弯曲的实验研究[J]. 航空动力学报, 1994, 9(4): 413~415.
- [7] 陈 浮, 宋彦萍, 王仲奇, 等. 前缘逆主流喷气时涡轮叶栅流场性能研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(2): 176~180.
- [8] 陈 浮. 气冷涡轮叶栅内三维流场的实验研究与数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997: 36~37.

(编辑: 梅 瑛)

(上接第100页)

5 结 论

液体火箭发动机知识的描述和表达是发动机故障诊断过程中面临的首要问题, 有效的知识表达形式将直接决定着诊断方法的效率^[7,8]。而目前所发展的故障诊断方法大多采用基于模型的知识表示形式, 故障仿真量大, 计算复杂^[9]。因此, 本文通过集成时间信息, 以谓词逻辑公式和子句的形式对发动机试车过程中的动态行为进行描述, 建立发动机基于时间信息的动态诊断知识策略, 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, 进行故障检测和诊断。仿真结果表明该方法计算量小, 检测速度快, 且具有较强的诊断能力。但是, 该方法仅利用了发动机中层次相对较浅的定性因果知识, 因此诊断的准确度尚需进一步提高, 而这需要在发动机定性定量知识的集成, 以及发动机状态定性描述中所包含的模糊概念的处理等方面作更深入的研究。

参考文献:

- [1] 刘洪刚. 液体火箭发动机智能故障诊断理论与策略研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.

- [2] 吴建军, 刘洪刚, 陈启智. 基于命题逻辑的液体火箭发动机故障诊断方法研究[C]. 中国航空学会动力分会火箭发动机专业委员会等八单位 2001 年联合学术会议论文集(航空宇航分册), 2001.
- [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] 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.
- [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, 1995.
- [6] Vittorio B, et al. A spectrum of definitions for temporal model-based diagnosis [J]. *Artificial Intelligence*. 1998, 102: 39~79.
- [7] 王道平, 马少平. 故障诊断系统中深浅知识集成表示方法的研究[J]. 小型微型计算机系统. 2001, 22(9).
- [8] 刘洪刚, 吴建军, 陈启智. 基于混合知识模型和混合推理策略的液体火箭发动机智能故障诊断[J]. 推进技术, 2003, 24(3). (LIU Hong-gang, WU Jian-jun, CHEN Qi-zhi. Hybrid knowledge model and reasoning strategy based on intelligent fault diagnosis for liquid-propellant rocket engines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(3).)
- [9] Stefano Chessa, Paolo Santi. Operative diagnosis of graph-based systems with multiple faults [J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*. 2001, 31(2). (编辑: 朱立影)