

基于改进符号有向图模型的发动机引气系统多故障诊断方法

刘君强, 王小磊, 张马兰, 谢吉伟, 左洪福
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘 要: 为了在符号有向图(SDG)模型中进行多故障诊断,提出了基于改进符号有向图(ISDG)模型的多故障诊断方法. ISDG模型满足了不完全信息条件下的多故障组合诊断的需求. 通过交互式方法构建不完全信息条件下的诊断过程,利用最大增益费用比确定了最优的测试序列,实现了在多故障诊断过程中效率的提高和成本的降低. 最后用交互式算法诊断某民用发动机引气系统多故障,ISDG模型能够诊断多故障,说明诊断多故障可以提高诊断效率;考虑组合逻辑后,最小费用比最大费用减小了7.25,增益费用比增大了32.2%,说明考虑组合逻辑可以减少32.2%的费用.

关 键 词: 多故障诊断; 符号有向图; 组合逻辑; 引气系统; 相容通路; 诊断树
中图分类号: V245.3; TP277 **文献标志码:** A

Multiple faults diagnosis method of engine bleed system based on improved signed directed graph

LIU Jun-qiang, WANG Xiao-lei, ZHANG Ma-lan,
XIE Ji-wei, ZUO Hong-fu
(College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To diagnose multiple faults in signed directed graph (SDG) model, an improved signed directed graph (ISDG) multiple fault diagnosis model was proposed. The proposed ISDG model can meet the requirements of multiple faults combinations diagnosis in incomplete information conditions. The diagnosis process in incomplete information conditions can be established by interactive method. The optimum test sequence was determined by the maximal gain-cost ratio. This model improved the efficiency and reduced the cost in the multiple fault diagnosis process. Finally, the multiple faults of an civil engine bleed system were diagnosed with the interactive algorithm. The multiple faults can be diagnosed by ISDG model, so the diagnostic efficiency was improved by diagnosing multiple faults. After using combinational logic, the minimum cost is reduced by 7.25 than the maximum cost, and gain-cost ratio increases by 32.2%. These results explain that the cost can be reduced by 32.2% by using combinational logic.

Key words: multiple faults diagnosis; signed directed graph; combinatorial logic; bleed system; consistent branch; diagnostic tree

收稿日期:2014-08-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61232002);国家自然科学基金委与中国民用航空总局联合项目(60939003);中国博士后面上基金(2012M521081);中国博士后基金特别资助(2013T60537)

作者简介:刘君强(1978—),男,山东威海人,讲师,博士,主要从事航空发动机故障诊断研究.

我国国产客机 ARJ-21, C919 的研制过程中, 有很多关键的研究问题, 故障诊断是其中的核心问题之一。在机队规模持续快速增长条件下保证客机适航要求, 对于民航业持续健康发展起着决定性作用。

系统处于故障状态时很多检测参数都会明显偏离其额定值, 这些参数的变化必定和一个或几个故障源有关。根据这一特点, 故障诊断可以采用基于深层知识的模型诊断推理方法^[1]。故障诊断技术分为 3 个发展阶段: 单纯定性分析, 单纯定量计算以及引入模糊数学的定性和定量相结合方法^[2]。其中, 引入模糊数学的定性和定量相结合方法在大型客机故障诊断中有许多应用。

Shiozaki 等人正式提出 SDG 模型, 并将每个节点不同状态分别表示, 使得节点状态得到定性表达^[3]。Lapp 和 Powers 使用 SDG 模型进行故障诊断, 建立 SDG 模型和诊断树^[4]。Umeda 等人提出了 SDG 模型分层的问题, 即把系统逐层分解, 将系统分为不同的子系统, 然后将子系统继续分层为部件, 通过不同的系统分层, 来解决不同故障诊断要求^[5]。Yang 等人将单层 SDG 模型转换成一个分层模型来提高搜索效率^[6]。很多 SDG 模型只限于单故障的诊断, 它的局限性也就是只能限制有一个故障源^[7]。Wang 等人优化了主元分析 (PCA)-SDG 模型, 使得故障诊断灵敏度得到提高^[8]。SDG 模型在国内航空航天领域也得到了不少应用^[9]。对飞机系统来说故障间的联系与故障发生时具有很大关系^[10]。Muarya 等人提出了基于 SDG 模型研究分析的系统框架及其诊断应用研究^[11]。枚举思想的缺点是组合爆炸的情况, 随着问题规模的扩大, 计算量增加巨大^[12]。许多学者关注基于模糊理论的 SDG 模型应用, 这可以在一定程度上提高诊断的精确度^[13]。Yang 等人使用过程数据和过程连接进行故障诊断, 后续使用信息融合进行评估^[14]。Yang 等人还提出了 SDG 模型过程数据连接的两种验证方法^[15]。Peng 等人提出了一种基于多种逻辑概率 SDG (MPSDG) 与贝叶斯推理的半定量故障诊断模型, 该 MPSDG 模型引入了逻辑门来描述过程变量之间的多个逻辑因果关系^[16]。

SDG 模型虽然得到很大的发展和改善, 但是, 依旧存在以下突出问题: SDG 模型是基于单故障诊断的, 很少考虑系统分层, 没有指出增益费用比优化的测试序列。因此, 面对这些实际应用问题, SDG 模型需要进行改进。

SDG 模型只体现了过程变量间的因果关系, 缺少系统结构组成描述, 不能清楚地反映部件间的连接关系和故障传播层次, 在大规模系统诊断推理中难以进行系统故障定位、确定故障范围。SDG 模型也没有考虑诊断中经济型的问题。这些方面制约了 SDG 模型在飞机故障诊断中的应用。

在发动机引气系统中, 系统状态不断变化, 会导致引气系统内部测量值以及输出量的变化。很多数据会随着引气系统状态变化而改变, 有些部位的参数是难以测试的。SDG 模型推理过程必须知道各节点状态值, 在研究过程中, 获得的数据样本往往因为是部分样本而使得 SDG 模型推理过程失效。航空公司在满足社会需求的前提下要争取公司盈利, 降低成本是盈利的一个重要方式。ISDG 模型中包括通过增益费用比最大来确定诊断序列, 在故障诊断中考虑成本因素, 对减少测试费用 (以下简称费用) 具有重要意义。

本文针对 SDG 模型没有进行系统分层、没有考虑多故障之间的逻辑关系以及不能处理不完全信息条件下的优化序列 3 个不足进行改进, 提出 ISDG 模型, 使多故障节点表达更完备, 有向图进一步简化, 实现多故障诊断; 在得出可能故障节点以后, 根据各节点故障概率和费用得出优化的节点测试序列, 使测试序列的增益费用比最高。利用 ISDG 模型来进行民用飞机的故障诊断, 满足了飞机故障诊断系统分层和最优经济性的要求。最后以诊断飞机发动机引气系统调节关断活门开关故障和风扇控制活门故障为例, 通过 ISDG 模型诊断故障, 得到可能的故障节点和增益费用比最大的测试序列。通过诊断发动机引气系统故障, 验证了该方法的有效性。

1 理论与方法

SDG 模型基本思想是对相容通路的穷举, 存在正向推理和反向推理两种模式。ISDG 模型为避免逐条分析正向路径合理性而产生的信息量巨大的问题, 在建立 ISDG 模型时, 使用 SDG 模型反向推理过程。ISDG 模型多故障诊断主要解决两方面的问题: ①根据相容通路确定故障节点; ②确定故障节点之间的逻辑关系, 为减少费用确定最佳诊断序列。ISDG 模型建模过程如下:

1) 对系统进行分层, 确定系统的顶层, 将系统根据不同工作状态划分子系统。

2) 将子系统划分为模块, 确定各模块、各内部部件之间的影响关系, 得出子系统内部的模块-

模块,部件-部件之间的相互影响关系。

3) 对各模块、各部件作用进行分析,明确每个模块、每个部件在系统中的作用。

4) 分别分析造成每个部件故障可能的故障原因。

ISDG 模型多故障诊断的优化目标是:优先检测发生概率大、测试成本低的节点,最终按照此序列,提出多故障诊断的最优路径。利用测试集中的有限测试节点判断故障状态,使得费用最小。优化目标函数如式(1)。

$$J = \min_B \left\{ \sum_{i=1}^m P(v_i) \left[\sum_{k=1}^{|B_i|} c_{B_i}(k) \right] \right\} \quad (1)$$

其中 J 代表既保证精度又使费用最小的最佳测试序列, B 为诊断树, v_i 是其中的节点, $|B_i|$ 是测试序列包含的测试数目, $c_{B_i}(k)$ 描述了测试序列 B_i 中第 k 个执行的费用, $P(v_i)$ 为节点 v_i 发生的概率, m 为节点数目。

1.1 ISDG 模型的定义

SDG 模型是一种因果定性描述方式,它根据参数变化、过程变量间的因果关系推理出故障传播路径、故障范围^[17]。根据系统中多故障之间的逻辑关系,提出了 ISDG 模型。

定义 1 ISDG 模型是有向图 G 与函数 Φ 和 Ψ 的组合 (G, Φ, Ψ) 。ISDG 模型的图形化表示如图 1。

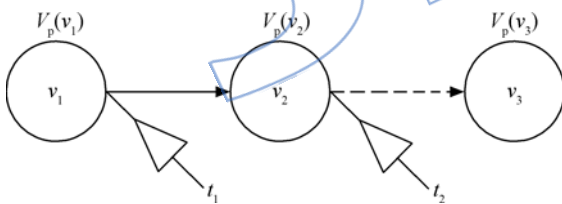


图 1 ISDG 模型的图形化表示

Fig. 1 Graph of ISDG model

1) 有向图 G 为三元组 (V, T, E) 。

① $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ 表示有限 n 节点状态参数集。每个 v_i 包含一个属性 $V_p, V_p(v_i)$ 描述 v_i 的状态发生偏差的先验概率。

② $T = [t_1, t_2, \dots, t_n]$ 表示可用测试集, t_n 表示有条件进行测量的测试节点。测试集是在可用的资源下能获得的测试量,包括装置或设备测量出的物理参数量、对系统的观察实现或直接替换等修复操作的结果。

③ 有向边集合 $E = V \times V$, 表示状态变量间的关系,反映了系统的信息流。“关系对”表示每一个

支路的起始节点和终止节点,记为

$\partial^+ : E \rightarrow V$ (支路的起始节点)

$\partial^- : E \rightarrow V$ (支路的终止节点)

④ 图 1 所示的节点图是简单的 ISDG 模型举例。在逻辑上说, v_1 和 v_2 是逻辑与的关系, v_2 和 v_3 是逻辑与非的关系。节点间的主要逻辑关系有或(+)、与($\cdot$)、非($\bar{}$)、异或($\oplus$)、同或($\odot$), 逻辑关系运算法则如式(2)。

$$\begin{cases} A + (B + C) = (A + B) + C \\ A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C \\ \overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B} \\ A \oplus B = \bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B} \\ A \odot B = \bar{A} \cdot \bar{B} + A \cdot B \\ A \oplus B = \overline{A \odot B} \\ A \oplus (B \oplus C) = (A \oplus B) \oplus C \\ A \odot (B \odot C) = (A \odot B) \odot C \end{cases} \quad (2)$$

2) 函数 $\Phi: E \rightarrow [+,-]$, 其中 $\Phi(e_k)$ ($e_k \in E$) 称为 e_k 的支路符号。实线表示正作用(增强), 虚线表示反作用(减弱)。

3) 函数 $\Psi = [-1, 0, 1, 2]$ 表示节点 v_i 所代表的故障模式或故障变量当前的状态, $\Psi(v_i | D)$ 称为节点 v_i 的符号。如式(3)。

$$\Psi(v_i | D) = \begin{cases} -1 & X - (\bar{X} | D) \leq \epsilon \\ 0 & |X - (\bar{X} | D)| < \epsilon \\ 1 & X - (\bar{X} | D) \geq \epsilon \\ 2 & X \text{ 节点值未测} \end{cases} \quad (3)$$

式中 X 为节点 v_i 对应变量的实际值; $(\bar{X} | D)$ 为节点 v_i 在工作状态 D 对应变量的期望值; ϵ 为节点 v_i 处于正常状态的阈值。

定义 2 设 $v_i \in V$ 是 ISDG 模型的任意节点, 则称 v_i 可达到的节点集合为 v_i 的可达集, 记为 $R(v_i)$ 。

定义 2 中 ISDG 模型继承了 SDG 模型对系统内部深层因果关系的描述, 包含节点逻辑关系。通过节点之间逻辑的判断, 减少测试节点, 减少诊断步骤, 节约费用。

诊断树的构建要利用二叉树的方法。在对测试节点进行测试之后, 有多种分类方法可以将故障节点分为两个对立部分, 我们需要选择获得信息增益(information gain)最多的测试节点。

定义 3 信息增益是指期望信息或者信息熵的有效减少量, 根据它能够在什么样的层次上选择什么样的变量来分类。信息增益可以作为系统有序化程度的度量。计算诊断树的增益 G_{inf} 和费用 C_i 的公式如式(4)。

$$G_{\text{inf}} = - \sum_{i=1}^n D'_i (\log_2 D'_i) \quad (4a)$$

$$D'_i = \frac{P(v_i)}{\sum_{i=1}^n P(v_i)} \quad (4b)$$

$$C_i = \min \left\{ \sum_{i=1}^m P(v_i) \left[\sum_{k=1}^{|B_i|} c_{B_i}(k) \right] \right\} \quad (4c)$$

式(4b)计算信息值, D' 代表工作状态。

1.2 ISDG 模型多故障诊断步骤

ISDG 模型进行了系统分层,根据工作状态分层使诊断过程更加细致,在诊断结果中可以明确多故障之间的组合关系。在分层建立 ISDG 模型之后,状态节点之间逻辑关系明确下来,各状态节点之间的关系定义如式(5)

$$F = f(A, B, \dots, W) \quad (5)$$

式中 f 表示状态节点之间可能的关系运算符。状态元素 $(A, B, \dots, W)$ 的逻辑关系运算法则如式(2)。

算法 1 ISDG 模型多故障诊断步骤

步骤 1 故障通过相容通路才能传播,在 ISDG 模型中如果 $\Psi(\partial^+ e_k)(e_k) \Psi(\partial^- e_k)$ 为正,则该支路 e_k 称为相容支路。由相容支路组成的路径称为相容通路。

步骤 2 明确 ISDG 模型中状态节点的关系矩阵。 $D(G) = (d_{ij})$ 为单工作状态 SDG 模型中 G 的节点关系矩阵,用来描述各故障之间的传播规律。 D 矩阵中各元素根据式(6)得到。

$$d_{ij} = \begin{cases} \phi(e_{n_i \rightarrow n_j}) & n_j \in R(n_i) \\ 3 & n_j \notin R(n_i) \end{cases} \quad (6)$$

$\phi(e_{n_i \rightarrow n_j})$ 表示 n_i 到 n_j 之间带符号支路的符号乘积。

D 矩阵的含义为: d_{ij} 代表状态变量 n_i 对状态变量 n_j 的影响。若 n_i 能对 n_j 影响时, d_{ij} 的值是 n_i 的状态值乘以 n_j 的状态值;若 n_i 不能对 n_j 影响时, d_{ij} 的值为 3。

步骤 3 根据节点状态值的实际测量结果,由式(3)构造实测状态向量 T 。式(3)描述了实测状态向量 T 中的各矩阵元素的确定方法。

步骤 4 预先定义 ∞ 符号运算规则如式(7a)。然后根据节点关系矩阵 D , 实测状态向量 T 和 ∞ 符号运算规则,构造推理矩阵 L 。具体计算 L 的方法见式(7b)、式(7c)、式(7d)。

$$L = T \infty D = [l_{mn}] \quad (7a)$$

$$l_{mn} = t_m \infty d_n = t_m \cdot d_n \quad t_m \neq 2 \cap d_n = \pm 1 \quad (7b)$$

$$2 \infty d_n = 2 \quad d_n = \pm 1 \quad (7c)$$

$$t_m \infty 3 = 3 \quad (7d)$$

步骤 5 多故障通过相容通路才能进行传播^[18],相容通路搜索时按照可达性理论实现。如果某一节点为正常节点,则它必定不是相容树上的节点。同时,如果某些节点属于异常节点,那么这些异常节点到达同一节点的有效推算值应该相同,所以在推算过程中在同一行中出现矛盾的节点必然不是相容节点。相容树的计算过程符合式(8)。

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_n(m) = 3 & l_{mn} = 3 \\ C_n(m) = (l_{m1})\lambda(l_{m2})\lambda \cdots (l_{mk}) & l_{mn} \neq 3 \\ x\lambda y = y\lambda x \\ x\lambda y\lambda z = (x\lambda y)\lambda z = x\lambda(y\lambda z) \\ x\lambda 0 = 0 & x = 0, \pm 1, 2, 3 \\ x\lambda 2 = x & x = 0, \pm 1, 2 \\ x\lambda 3 = x & x = 0, \pm 1, 2, 3 \\ x\lambda y = (x+y)/2 & x, y = \pm 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

运算符为 λ ; x, y, z 均表示推理矩阵每一行的值。其中,如果得到的推算值对应于此故障节点,则得到相容性值即为 3;其他情况下,则通过计算每一行推算值的相容性,最后得到 $C_n(m)$;得到的 $C_n(m)$ 中,非 0,非 3 值均被认为是这一列的相容节点,即故障节点。通过寻找 ISDG 模型状态节点图中的相容通路进行故障诊断。从故障的状态节点出发沿相容通路逆向逐个节点诊断,直到找到故障节点,然后查找故障原因节点。

步骤 6 根据式(2)的逻辑关系运算法,输出多故障组合关系。

1.3 不完全测试信息条件下交互式诊断

每个异常节点发生故障的概率不同,各节点测试难易程度以及费用也不尽相同。所以,选择合适的测试路径,对于节省维修成本具有重要作用。

算法 2 不完全测试信息条件下交互式诊断

步骤 1 从算法 1 中输出的多故障组合关系开始分析,通过测试的可实现性和费用最小的原则简化测试节点,根据故障原因、故障概率和费用,确定多值属性表。在不完全测试信息条件下,某些测试节点的测试结果不易获取,但测试节点之间存在如式(2)所示的逻辑关系,可以通过测试节点间的逻辑关系确定或排除故障,节约对测试节点进行测试的费用。如图 2 示例, S_1, S_2, S_3 是故障节点, t_1, t_2 是测试节点, $t_1 + t_2$ 代表 t_1 和 t_2 是逻辑或的关系, $\neg \bigcirc$ 代表了可以先进行逻辑判

断再进行诊断的过程. 在图2的示例中, t_1 和 t_2 两个测试节点被压缩成 $t_1 + t_2$ 一个测试节点, 减少了诊断步骤. ISDG 模型通过明确故障原因节点之间的逻辑关系, 简化诊断流程.

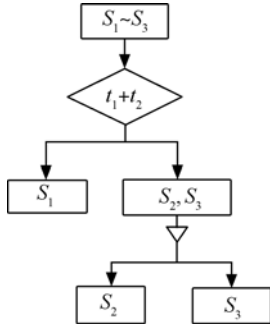


图2 交互式诊断过程举例

Fig. 2 Example of interactive diagnostic process

步骤2 根据潜在故障集 V_i 和测试节点之间的逻辑关系, 确定不完全测试信息条件下最优诊断序列. 搜索过程中具体的测试特征信息通过节点的增益 G_{inf} 来反映, 而测试节点的重要性则由增益费用比衡量.

1) 将根节点划分为两部分测试节点. 假设选择测试节点 t_1 作为起始测试节点, 诊断树如图3所示, 将图分为两部分, 一个为 S_0 , 一个为 S_1, S_2 . 由于 S_0 已经是端节点, 不需要继续测试; 继续对中间节点 S_1, S_2 进行测试, 重复上述计算步骤, 最后将根节点全部展开为只含端节点的诊断树.

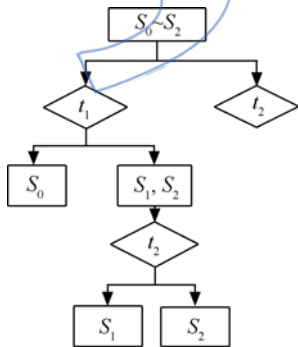


图3 诊断树举例

Fig. 3 Example of diagnostic tree

将根节点划分为两部分的测试节点. 假设 t_1 和 t_2 为两个测试节点, 计算测试节点 t 能提供的增益值 G_{inf} 的公式见式(9).

$$G_{inf} = -[Z_1(\log_2 Z_1) + Z_2(\log_2 Z_2)] \quad (9a)$$

$$Z_1 = \frac{\sum_{S_i \in x} (1 - |d_{ij}|) P(S_i)}{\sum_{S_i \in x} P(S_i)} \quad (9b)$$

$$Z_2 = 1 - Z_1 \quad (9c)$$

先计算 Z_1 和 Z_2 (根据式(9b)和式(9c)), 其中 S_i 是可能的故障节点, $P(S_i)$ 表示节点 S_i 的故障概率, 得出结果代入式(9a)得到 G_{inf} 值. 获得 t_1 的信息值 G_{inf1} , 获得 t_2 的信息值 G_{inf2} , 比较两者大小, 取较大的增益所对应的测试节点作为二叉树检测的结果.

计算诊断树的增益 G_{inf} 和诊断树的费用 C_t , 计算公式如式(4).

2) 计算增益费用比 K

$$K = \frac{G_{inf}}{C_t} \quad (10)$$

比较所有起始测试节点的 K , 选择最大的增益费用比对应的测试序列作为最优测试序列. 如图3所示, 选择测试节点 t_1 作为起始测试节点, 这说明在所有测试节点中, t_1 作为起始测试节点的增益费用比最大.

步骤3 通过选择最大的增益确定二叉树, 直到得到全部单个故障节点. 遍历二叉树, 读取测试节点的测试属性, 找到最终的故障源.

该算法通过分析节点状态, 判断节点相容性, 确定可能的故障原因. 和 SDG 模型相比, ISDG 模型能提供相容通路上的故障节点状态信息, 根据故障节点状态信息和故障原因节点, 在 ISDG 模型中确定可能的多故障组合故障原因. 每个测试节点都可以作为起始测试节点, 在所有可以选择的起始测试节点中, ISDG 模型通过选择费用增益比最大的起始测试节点开始进行故障诊断, 减少了费用. 通过明确测试节点之间的逻辑关系, 减少了诊断树中的元素数量, 也简化了测试流程.

在故障诊断中, 某些测试节点测试结果不易获得, 但是测试节点之间存在逻辑关系, 这样可以简化测试序列; 在诊断树中, 可以使用组合逻辑的交互式诊断方法. 通过多故障组合逻辑的 ISDG 模型诊断过程, 实现不完全信息条件下的交互式诊断.

2 实例分析

2.1 构建发动机模型

引气系统的作用是在飞行及地面工作过程中, 控制和监控从发动机、辅助动力系统和地面高压气源的引气, 向各用户系统提供具有一定温度和压力的空气源. 包括: 发动机压气机、辅助动力装置、地面气源、引气控制和指示系统^[19].

通过发动机引气系统结构, 确定引气系统内

部各部件的逻辑关系,在此基础上,提出定性的有向 ISDG 模型.引气系统有两个工作状态:中压引气和高压引气.两者内部部件工作情况不完全相同,需要在发动机引气系统结构图的基础上进行进一步分层,引气系统下一层研究分为中压引气和高压引气两个部分,获得子系统 ISDG 模型.

对发动机引气系统进行系统分层的操作,分层之后的结果如图 4 所示.图中共有 4 类符号,白色节点代表状态节点,黑色节点代表典型故障原因节点.节点之间的连线代表函数 Φ ,有方向的实线代表正向影响指向节点结果,有方向的虚线代表反向影响指向节点结果.图 4 中的符号解释如表 1.

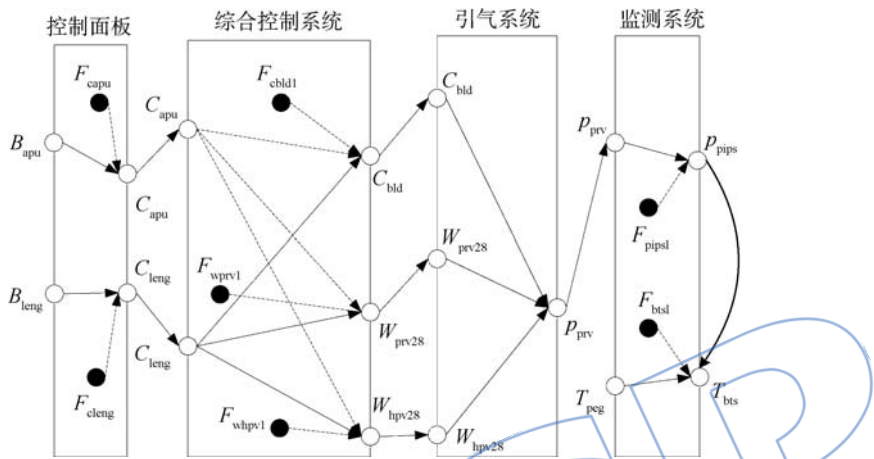


图 4 发动机引气系统 ISDG 模型
Fig. 4 ISDG model of engine bleed system

表 1 发动机引气系统 ISDG 模型符号含义
Table 1 Symbol meaning of ISDG model of engine bleed system

符号	含义
B_{leng}	发动机引气按钮选择
B_{apu}	APU 引气按钮选择
F_{cleng}	发动机引气按钮断路
F_{capu}	APU 引气按钮断路
C_{bld}	发动机引气选择命令
C_{apu}	APU 引气选择信号
C_{leng}	发动机引气选择信号
W_{prv28}	PRV 开关输出
W_{hvp28}	高压引气选择命令
F_{cbld1}	发动机引气信号断路
F_{wprv1}	PRV28 断路
F_{whpv1}	HPV28 断路
p_{prv}	发动机引气出口压力
T_{peg}	发动机引气出口温度
p_{pips}	引气系统出口压力
T_{bts}	引气系统出口温度
F_{pipsl}	发动机引气低压
F_{btstl}	发动机引气低温

注:PRV 为调节关断活门,APU 为飞机辅助动力装置,HPV 为高压活门.

下面根据图 4 给出一个 ISDG 模型有向诊断的例子. p_{pips} 的测量值偏低,这说明 p_{prv} 的测量值偏低,典型故障对应发动机引气压力过高.下一步,在检测 p_{prv} 无故障之后,导致 p_{prv} 测量值偏低的原因可能是 C_{bld} , W_{prv28} , W_{hvp28} 的测量值偏低.依次类推直到找到存在故障的状态节点,这就是 ISDG 模型反向推断模式的思想.

系统装有两个 PRV,以调节和关断引气压力.在引气系统左、右 PRV 下游各设有一套预冷器组件,用于冷却引气系统高温压缩空气.发动机引气经 PRV 后供入预冷却换热器(PCE).左、右 PCE 热边下游各设置有一个引气温度传感器(BTS),感受 PCE 下游管路内空气温度.

图 4 中的发动机引气系统根据工作状态可以细分为中压引气和高压引气,继续将中压引气子系统进行分层,建立中压引气的 ISDG 模型,如图 5 所示(IPCV 为单向控制活门,FAV 为风扇控制活门).

图 5 中符号的含义参见表 2,在 PCE 模块和 BTS 模块中,状态变量是各种温度.

引气系统从发动机 5 级引气,压力不足时自动切换到 9 级引气.5 级引气是中压引气工作状态,9 级引气是高压引气工作状态.高压引气和中压引气原理类似,起始阶段高压引气需要高压活门.高压引气子系统 ISDG 模型如图 6 所示.

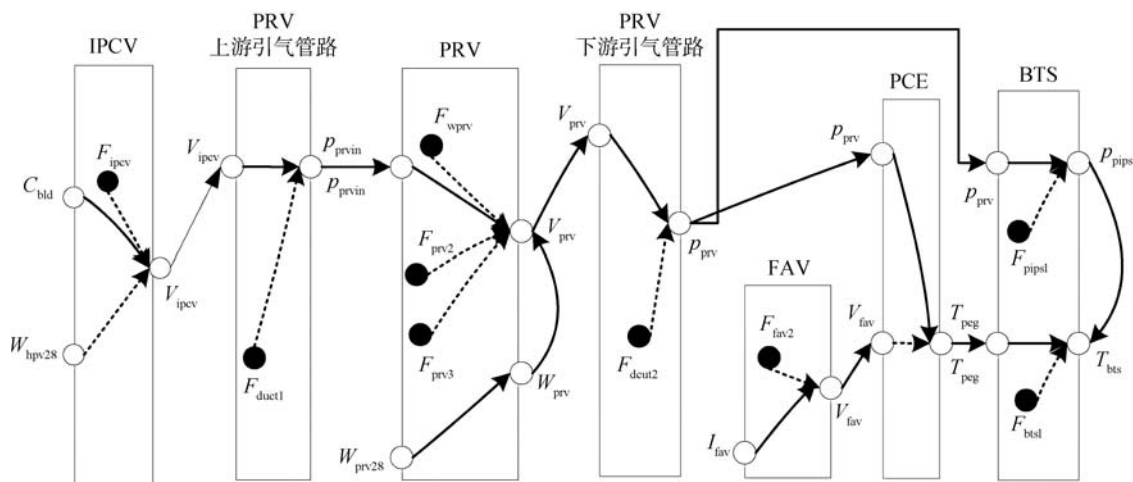


图 5 发动机中压引气子系统 ISDG 模型

Fig. 5 ISDG model of engine medium pressure bleed subsystem

表 2 发动机中压引气子系统 ISDG 模型符号含义

Table 2 Symbol meaning of ISDG model of engine medium pressure bleed subsystem

符号	含义
F_{ipcv}	IPCV 关位失效
p_{prvin}	PRV 入口压力
F_{duct1}	上游导管焊缝破裂
W_{prv}	PRV 开关信号
V_{prv}	PRV 开度
F_{wprv}	PRV 失去电子命令
V_{ipcv}	单向控制活门开度
F_{prv2}	PRV 关位失效状态 2
F_{prv3}	PRV 关位失效状态 3
F_{duct2}	下游导管焊缝破裂
I_{fav}	FAV 力矩电流
V_{fav}	FAV 阀门开度
F_{fav2}	FAV 关位失效

图 6 中的符号含义参见表 3.

2.2 用 ISDG 模型确定多故障节点的实例

本例中已知发动机引气系统输出的压力和温度均偏低,同时通过测量得到在 PRV 开关和 FAV 两处有电压故障,通过检查发现,PRV 开关处输入的电电压偏低,而 FAV 处输入的电电压偏高.参照表 1 中的节点符号,在本例中用符号表示故障就是 p_{pips} 和 T_{bts} 的测量值偏低.

在民用飞机的外场维修中,故障诊断过程并非一步到位,而是维修人员通过不断检测、观察或直接替换的方法对飞机部件逐个排查,即故障征兆的获得、诊断信息的处理、诊断结果的给出不是并行处理,这个过程具有串行性. SDG 模型缺少测试节点及其相关信息,不能有效支持交互式诊断.实例用 ISDG 模型进行多故障诊断,确定故障节点.

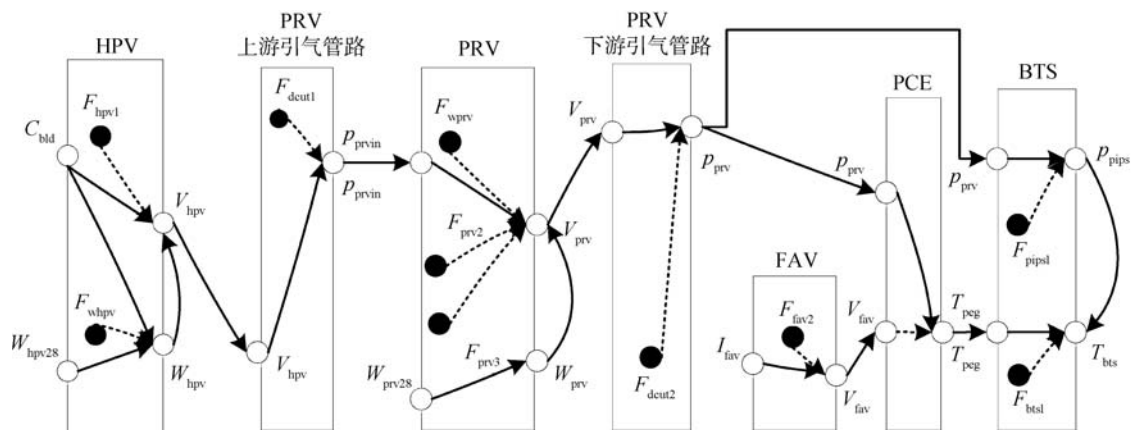


图 6 发动机高压引气子系统 ISDG 模型

Fig. 6 ISDG model of engine high pressure bleed subsystem

表3 发动机高压引气子系统 ISDG 模型符号含义

Table 3 Symbol meaning of ISDG model of engine high pressure bleed subsystem

符号	含义
W_{hprv}	HPV 开关测试
V_{hprv}	HPV 开度测试
F_{hprv1}	HPV 关位失效
F_{whprv}	HPV 失去电子命令

2.2.1 PRV 开关故障分析

PRV 开关处输入的电压偏低,导致开关工作效率降低,影响系统工作,故障样本如表4所示(按式(3)计算)。

表4 故障样本

Table 4 Fault samples

工作状态	C_{apu}	C_{leng}	W_{hprv}	W_{prv28}	W_{prv}	p_{pips}	T_{bts}
中压引气	0	0	0	-1	2	-1	-1
高压引气	0	0	0	-1	2	-1	-1

在这个多故障诊断的实例中,目的是为了得出基于多故障诊断 ISDG 模型的故障传播路径(相容树)和可能的故障原因节点。根据图4和算法1,在本节中计算故障原因节点。

计算 p_{pips} 节点和 T_{bts} 节点的相容性,即 C_{pips} 和 C_{bts} ,得到

$$C_{\text{pips}} = [0, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, -1, -1]$$

$$C_{\text{bts}} = [0, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, -1, 3]$$

求 p_{pips} 和 T_{bts} 相容性的交集,即 $C_{\text{pips}} \cap C_{\text{bts}}$,得到系统可能故障节点集合为 $F_e = [C_{\text{bld}}, W_{\text{hprv28}}, W_{\text{prv28}}, p_{\text{prv}}, p_{\text{pips}}]$ 。

根据图4可知, p_{prv} 在引气调节模块,继续计算中压引气、高压引气两个单独工作状态对应的故障。引气系统在中压引气工作状态的故障状态节点为 $F_m = [C_{\text{bld}}, W_{\text{hprv28}}, V_{\text{ipcv}}, p_{\text{prvin}}, W_{\text{prvin}}, W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}]$,引气系统在高压引气工作状态的故障状态节点为 $F_h = [V_{\text{hprv}}, p_{\text{prvin}}, W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}]$ 。

所以在中压引气工作状态下故障集合为 $F_{\text{m-total}} = F_m \cup F_e = [C_{\text{bld}}, W_{\text{hprv28}}, V_{\text{ipcv}}, p_{\text{prvin}}, W_{\text{prvin}}, W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}, p_{\text{pips}}]$ 。在高压引气工作状态下增加的正常节点是 $S_{\text{nn}} = [C_{\text{bld}}, W_{\text{hprv}}, W_{\text{hprv28}}]$,所以在高压引气工作状态下故障集合为 $F_{\text{h-total}} = F_h \cup F_e - S_{\text{nn}} = [V_{\text{hprv}}, p_{\text{prvin}},$

$W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}, p_{\text{pips}}]$ 。

中压引气可能的故障节点为 $C_{\text{bld}}, W_{\text{hprv28}}, V_{\text{ipcv}}, p_{\text{prvin}}, W_{\text{prvin}}, W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}, p_{\text{pips}}$ 。高压引气可能的故障节点为 $V_{\text{hprv}}, p_{\text{prvin}}, W_{\text{prv28}}, W_{\text{prv}}, V_{\text{prv}}, p_{\text{prv}}, p_{\text{pips}}$ 。根据图5和图6,中压引气和高压引气共用 W_{hprv28} 和 C_{bld} ,所以中压引气情况下不可能存在相容通路 $W_{\text{hprv28}} \rightarrow V_{\text{ipcv}} \rightarrow p_{\text{prvin}} \rightarrow V_{\text{prv}} \rightarrow p_{\text{prv}}$ 和 $C_{\text{bld}} \rightarrow V_{\text{ipcv}} \rightarrow p_{\text{prvin}} \rightarrow V_{\text{prv}} \rightarrow p_{\text{prv}}$ 。

根据图5和图6中标出的故障原因节点,和以上步骤中求得的故障状态节点,得到中压引气和高压引气 PRV 开关可能的故障原因如表5。表5中符号的具体含义参见表2和表3。

表5 PRV 开关的故障原因

Table 5 Fault causes of PRV switch

中压引气故障原因	高压引气故障原因
F_{pipsl}	F_{pipsl}
F_{duct2}	F_{duct2}
$F_{\text{wprv}}, F_{\text{prv2}}, F_{\text{prv3}}$	$F_{\text{wprv}}, F_{\text{prv2}}, F_{\text{prv3}}$
W_{prv28} 开关电压偏低	W_{prv28} 开关电压偏低
F_{duct1}	F_{duct1}
F_{ipcv}	F_{hprv1}

2.2.2 FAV 故障分析

FAV 电压偏高,导致 FAV 力矩电流 I_{fav} 过大。最终的故障也是 p_{pips} 和 T_{bts} 偏低。

根据算法1的步骤确定 FAV 故障的相容通路,确定故障状态节点之后找到可能的故障原因节点。计算方法和2.2.1节相同,得到 FAV 故障原因如表6所示。表6中符号的具体含义参见表2和表3。

表6 FAV 的故障原因

Table 6 Fault causes of FAV

中压引气故障原因	高压引气故障原因
F_{pipsl}	F_{pipsl}
F_{btsl}	F_{btsl}
F_{prv2}	F_{prv2}
I_{fav} 偏大	I_{fav} 偏大

2.2.3 确认多故障节点的逻辑关系

综合表5和表6,可知发动机引气系统中压工作阶段和高压工作阶段输出的压力和温度均偏低可能的故障原因有8类,故障原因总结如表7

所示.

从计算过程中我们还可以得知,逆向推理的 ISDG 模型具有明确的指向性,得出的结果冗余值很少,提高了诊断效率.通过相容通路很快得到多个故障状态节点. ISDG 模型可以进行多故障诊断,可以确定多个可能的多故障原因节点.

通过以上计算,我们得到了多故障诊断 ISDG 模型的相容通路和可能的故障节点.我们发现引气系统的故障可能由内部故障和外部故障同时引起. ISDG 模型多故障逻辑关系如图 7 所示.

图 7 可以明确表 7 中多故障的逻辑关系,因为引气系统根据自身需要工作中压引气和高压引气两个工作状态,所以也需要区分故障节点的工作状态.中压引气故障和高压引气故障之间是

表 7 故障原因总结

Table 7 Summary of causes of fault

故障原因编号	故障原因节点	故障原因	故障位置
S_1	F_{hprv1}	HPV 关位失效	内部
S_2	F_{ipcv}	IPCV 关位失效	内部
S_3	F_{duct1}	上游导管焊缝破裂	内部
S_4	W_{prv28}	PRV 开关电压偏低	外部
S_5	F_{wprv}	PRV 失去电子命令	内部
S_6	F_{duct2}	下游导管焊缝破裂	内部
S_7	I_{fav}	FAV 力矩电流偏大	外部
S_8	V_{fav}	FAV 阀门卡在开位	外部

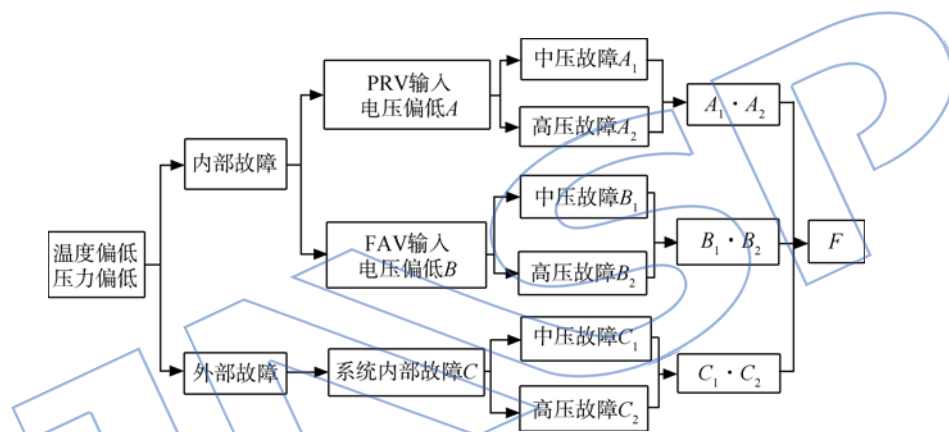


图 7 多故障逻辑关系

Fig. 7 Multiple fault logical relationship

逻辑与的关系,各部件之间的故障是逻辑或的关系.用逻辑运算表达式说明最后的引气系统故障是 $F = A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot B_2 + C_1 \cdot C_2$.

凡是故障原因节点,都会反向影响对应的状态节点,导致状态节点工作不正常.对 F_{wprv} , F_{prv2} , F_{prv3} 三个故障原因来说,它们存在逻辑或(逻辑运算符“+”)的逻辑关系,也就是它们中的任何一个故障都会导致 V_{prv} 状态节点的不正常.

以上实例中多故障表现为发动机引气系统输出的压力和温度均偏低.运用 ISDG 模型,根据图 4 进行 ISDG 模型反向推理,故障原因可能是 PRV 开关故障和 FAV 故障,再利用相容通路诊断具体的多故障原因.这体现了 ISDG 模型多故障组合诊断的优势.利用多故障原因之间的逻辑关系可以简化诊断步骤、节约费用.这是 SDG 模型不能做到的.下一节中,我们通过实例分析节点之间的逻辑关系,达到费用最小的目标.

2.3 不完全信息条件下交互式诊断过程实例分析

已知 W_{prv28} 和 I_{fav} 两个节点已经进行简单测试,发现存在外部电压问题,但仍需进行进一步测试.在可能的故障节点添加测试节点如图 8. 图 8 是图 5 和图 6 的结合,图 8 中以“1 支路”为起点是中压引气工作状态,以“2 支路”为起点是高压引气工作状态.图 8 中 $\blacktriangle$ 代表故障测试节点.故障可能发生在每个状态节点,由于技术原因,不是每个状态节点都能够被测量.而且根据实际测试条件和测试节点之间的逻辑关系,可以简化测试节点.图 8 中用 $\blacktriangle$ 标出了能够进行测量的状态节点.

根据图 8 测试节点图可知测试节点 t_1 和 t_2 相互独立并同时作用于 p_{prvin} 节点,两个节点取一个节点 t_1 或 t_2 即可,具体选择哪一个测试节点要通过费用判断,为了达到费用最小的目标,判断逻辑关系后选择费用较小的测试节点进行测试.假

设选择 t_1 作为测试节点,若 t_1 故障,则可以判断 t_2 正常;若 t_1 正常,则 t_2 故障;根据图 8 我们可以知道 V_{prv} 和 p_{prv} 两个节点直接相关,它们的测试节点分别是 t_4 和 t_8 ,假设选择 t_4 作为测试节点,测试得到 t_4 故障,那么测试节点 t_8 也肯定得到测试

结果是故障.所以在 t_4 和 t_8 中选择一个费用较小的测试节点进行测试即可.

图 8 是 ISDG 模型中不完全信息条件下的测试节点的情况,我们将讨论这种条件下的最优诊断树生成方法.

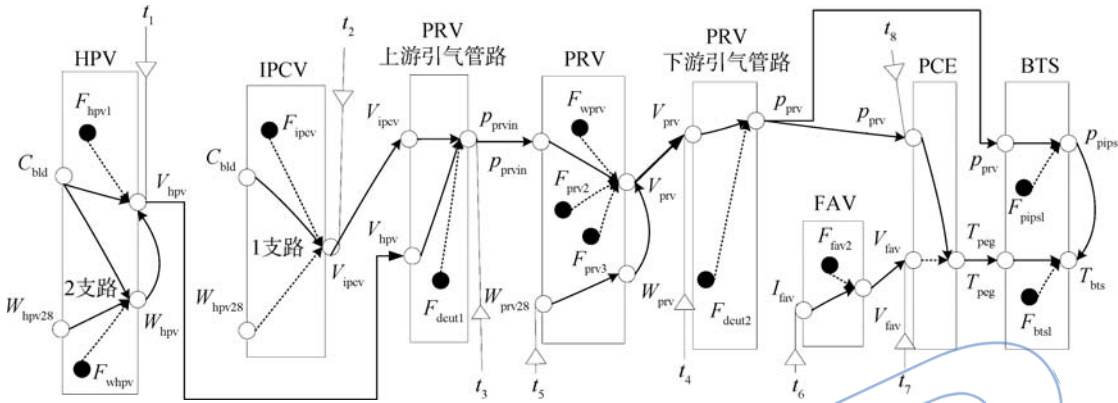


图 8 测试节点图

Fig. 8 Test node graph

不完全信息条件下的发动机引气系统多值属性如表 8,表格中故障原因能导致测试节点测量值偏低对应数值-1,故障原因对测试节点测量值正常对应数值 0,故障原因导致测试节点测量值偏高对应数值 1,它们构成了 S 和 t 之间的相关性矩阵.关位失效对应测量值偏低,开位失效对应测量值偏高.

表 8 不完全信息条件下的发动机引气系统多值属性

Table 8 Multi-valued attribute of engine bleed system in incomplete information conditions

故障原因编号	测试节点							故障概率
	$t_1 + t_2$	t_3	$t_4 \bullet t_8$		t_5	t_6	t_7	
	费用							
	15	10	5		10	5	15	
S_1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0.10
S_2	0	-1	-1	-1	0	0	0	0.15
S_3	0	-1	-1	-1	0	0	0	0.20
S_4	0	0	-1	-1	-1	0	0	0.15
S_5	0	0	-1	-1	0	0	0	0.05
S_6	0	0	0	-1	0	0	0	0.05
S_7	0	0	0	0	0	1	1	0.20
S_8	0	0	0	0	0	0	1	0.10

根据图 8 测试节点图可知测试节点 t_1 和 t_2

两节点相互独立并且同时作用于 p_{prv} 节点,所以选择 t_1 和 t_2 中费用较小的节点进行测试即可, t_1 和 t_2 的费用是 15;根据图 8 我们可以知道 V_{prv} 和 p_{prv} 两个节点直接相关,所以选择费用较小的 t_4 ,费用是 5.表 8 中, t_4 和 t_8 存在逻辑与 $t_4 \cdot t_8$ 的关系, t_4 和 t_8 代表的实质上还是两个节点,所以相关性矩阵中 t_4 列的值说明 t_4 和 S 的关系, t_8 列的值说明 t_8 和 S 的关系. t_1 和 t_2 存在逻辑或 $t_1 + t_2$ 的关系,所以实质上 t_1 和 t_2 可以合并为一个测试节点.

根据算法 2 中的步骤,确定每个测试节点为诊断起点的增益费用比,结果如表 9 所示.

表 9 增益费用比总结

Table 9 Summary of gain-cost ratio

诊断起点	增益	费用	增益费用比
$t_1 + t_2$	2.846	31.50	0.090
t_3	2.846	26.00	0.110
$t_4 \cdot t_8$	2.846	24.75	0.116
t_5	2.846	26.00	0.110
t_6	2.846	24.25	0.119
t_7	2.846	28.10	0.102

根据表 9 中的增益费用比,结果是以 t_6 为起始测试节点的增益费用比最大,所以以 t_6 为起始测试节点的诊断树为最优诊断树.以 t_6 为起始测

试节点的不完全信息诊断树见图9,图9是通过不完全信息条件下的逻辑诊断方法进行多故障诊断的诊断树。

如图9所示, t_6 为起始测试节点,得出两个节点集合 $[S_1 \sim S_6, S_8], [S_7]$; $[S_1 \sim S_6, S_8]$ 用 $t_4 \cdot t_8$ 进行测试,得出3个节点集合 $[S_1 \sim S_5], [S_6], [S_8]$;由于 $[S_6], [S_8]$ 两节点是结果不可区分,需要继续添加交互式测试节点,最终得到可区分的两个节点; $[S_1 \sim S_5]$ 用 t_3 进行测试,得出两个节点集合 $[S_4, S_5], [S_1 \sim S_3]$; $[S_4, S_5]$ 用 t_5 进行测试,得出两个节点集合 $[S_4], [S_5]$;同理,用 $t_1 + t_2$ 来划分 $[S_1 \sim S_3]$,得到节点 $[S_1]$ 和 $[S_2, S_3]$, $[S_2, S_3]$ 由于缺少测试资源而不可区分,需要继续添加交互式测试节点,最终得到8个节点。其中用 $t_4 \cdot t_8$ 节点和 $t_1 + t_2$ 节点进行测试,就体现了组合逻辑的关系。

最终得到不完全信息条件下的发动机引气系统诊断树为图10。图10是图9对应的具体诊断项目。

ISDG模型中不完全信息条件下起始测试节点数量减少,需要测试的节点数量也随之减少。根据表7中所列的多故障原因,在交互式诊断过程中,利用多故障组合逻辑,如图10所示的过程进

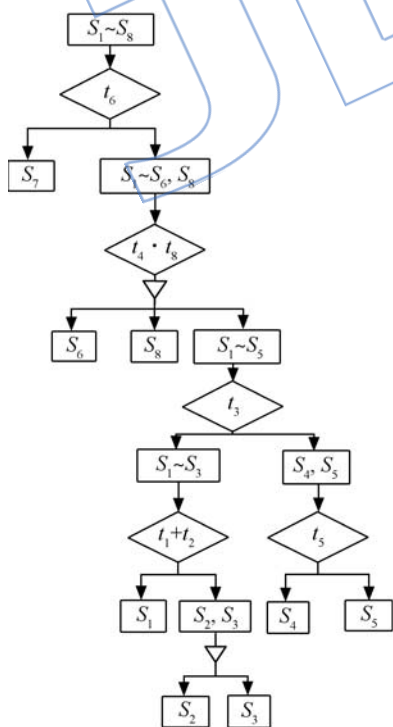


图9 t_6 为起始测试节点的不完全信息诊断树

Fig. 9 Diagnostic tree when t_6 is initialized node in incomplete information conditions

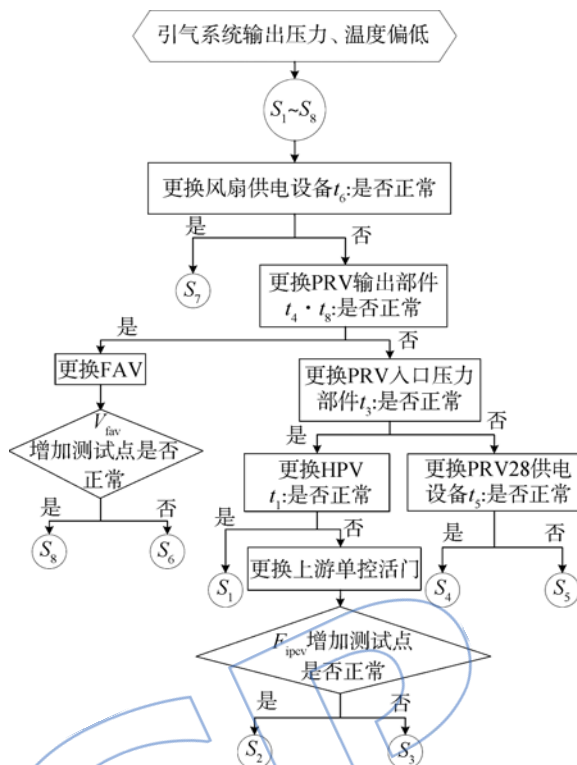


图10 不完全信息条件下的诊断树

Fig. 10 Diagnosis tree in incomplete information conditions

行诊断。

通过本实例可以得知,在ISDG模型中使用不完全信息条件下的交互式诊断,可以获得更大的增益费用比,实现了费用最小的目标。

3 结 论

本文提供了一种基于ISDG模型的故障诊断模型。采用ISDG模型进行故障诊断,改善了SDG模型只能找出单故障源的不足。飞机日益成熟的各种检测技术能够为诊断过程提供大量状态参数,使得各节点的状态参数能够被获得。这对ISDG模型的使用提供了有利条件。ISDG模型可以进行多故障寻源,使多故障诊断更为准确。ISDG模型对系统进行了分层分析,得出可能的故障原因节点以及故障传播路径。在交互式诊断过程中,运用测试节点之间的组合逻辑,分析了在不完全信息条件下的诊断方法。下一步,将进一步建立ISDG模型与进程代数相结合的多故障诊断模型,分析更加复杂的多故障问题。

参考文献:

- [1] 王文辉,周东华.基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术[J].控制理论与应用,2002,19(5):653-666.

- WANG Wenhui, ZHOU Donghua. Survey on qualitative/semi-qualitative based fault detection and diagnostics techniques[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(5): 653-666. (in Chinese)
- [2] 周虹, 左洪福, 苏艳, 等. 多工况过程动态 SDG 故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(11): 2539-2546.
- ZHOU Hong, ZUO Hongfu, SU Yan, et al. Fault diagnosis for multistage dynamic processes based on signed directed graph[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(11): 2539-2546. (in Chinese)
- [3] Shiozaki J, Matsuyama H. Feasibility study of a fault-diagnosis system for chemical plants[J]. *International Chemical Engineering*, 1985, 25(4): 651-659.
- [4] Lapp S A, Powers G J. Computer-aided synthesis of fault-trees[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1977, 26(1): 2-13.
- [5] Umeda T, Kuriyama T. A graphical approach to cause and effect analysis of chemical processing systems[J]. *Chemical Engineering Science*, 1980, 35(12): 237-240.
- [6] Yang F, Xiao D, Shah S L. Signed directed graph-based hierarchical modelling and fault propagation analysis for large-scale systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 7(4): 537-550.
- [7] Iri M, Aoki K, O'Shima E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1979, 3(1): 489-493.
- [8] Wang H, Song Z, Wang H. Statistical process monitoring using improved PCA with optimized sensor locations[J]. *Journal of Process Control*, 2002, 12(6): 735-744.
- [9] 宋其江, 徐敏强, 王日新. 基于分层有向图的航天器故障诊断[J]. *航空学报*, 2009, 30(6): 1058-1062.
- SONG Qijiang, XU Mingqiang, WANG Rixin. Spacecraft fault diagnosis based on hierarchical digraphs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1058-1062. (in Chinese)
- [10] 王伟, 于达仁, 赵辉, 等. 基于符号有向图模型的故障诊断方法[J]. *动力工程*, 2007, 27(5): 736-741.
- WANG Wei, YU Daren, ZHAO Hui, et al. Fault diagnosis method based on sign directed graph models[J]. *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(5): 736-741. (in Chinese)
- [11] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A signed directed graph-based systematic framework for steady-state malfunction diagnosis inside control loops[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(6): 1790-1810.
- [12] 梅启智, 廖炯生, 孙惠中. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [13] Shih R F, Lee L S. Use of fuzzy cause-effect digraph for resolution fault diagnosis for process plants: 1 fuzzy cause-effect digraph[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(5): 1688-1702.
- [14] Yang F, Shah S, Xiao D. Signed directed graph based modeling and its validation from process knowledge and process data[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, 22(1): 41-53.
- [15] Yang F, Sirish L S, Xiao D. Signed directed graph modeling of industrial processes and their validation by data-based methods[R]. Nice, UK: Control and Fault-Tolerant Systems 2010 Conference, 2010.
- [16] Peng D, Geng Z, Zhu Q. A multi-logic probabilistic signed directed graph fault diagnosis approach based on bayesian inference[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(23): 9792-9804.
- [17] 杨帆, 萧德云. SDG 建模及其应用的进展[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(5): 767-774.
- YANG Fan, XIAO Deyun. Review of SDG modeling and its application[J]. *Control Theory & Application*, 2005, 22(5): 767-774. (in Chinese)
- [18] Shiozaki J, Matsuyama H, O'shima E, et al. An improved algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1985, 9(3): 285-293.
- [19] Rios H, González E, Rodríguez C, et al. A mobile solution to enhance training and execution of trouble shooting techniques of the engine air bleed system on Boeing 737[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 25: 161-170.