

概率因果网络在航电系统多故障诊断中的应用

朱亚光,马存宝,朱道德,周 伟

ZHU Ya-guang, MA Cun-bao, ZHU Dao-de, ZHOU Wei

西北工业大学 航空学院,西安 710072

College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

E-mail: zhyagu@126.com

ZHU Ya-guang, MA Cun-bao, ZHU Dao-de, et al. Applications of probabilistic causal network in multiple-fault diagnosis of avionic system. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(7): 242-244.

Abstract: Focused on an avionic system, the algorithm of multiple-fault diagnosis based on causal network is obtained and validated according to the reliability data and expert experience, while the fault diagnosis procedure and the reasoning method is given.

Key words: avionic system; multiple-fault diagnosis; causal network

摘 要: 以飞机航电系统为研究对象,以设备可靠性数据和专家经验为数据来源,建立了基于因果网络的航电系统多故障诊断体系,给出了诊断过程、推理思路和诊断算法并做了实例验证,成功提高了航电设备的故障诊断效率并缩短了维修周期。

关键词: 航电系统;多故障诊断;因果网络

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.07.074 **文章编号:** 1002-8331(2010)07-0242-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP306+3

1 引言

在传统飞机故障诊断和排故中,需要反复查阅和参照故障隔离手册和维修手册,当故障关联耦合情况较多,网络结构比较复杂时,采用传统故障诊断方式费时费力,不仅难以适应高效诊断的要求,而且多故障诊断效果不佳,没有很好地利用历史排故数据和专家经验,往往不能在故障一发生就指出故障多发部件,以指导排故,缩短维修周期。

在简约覆盖理论^[1]的指导下,依据因果网络模型给出所有的可能故障的解集合,在可靠性数据、历史排故数据和专家经验的基础上,将所有诊断解集合予以排序,从而实现多故障诊断结果的量化输出,迅速指明故障源,准确高效地完成诊断任务^[2]。

2 基于因果网络的航电系统多故障诊断方法

2.1 航电系统多故障诊断过程

航电系统多故障诊断的过程和内容分为两步:(1)根据已有的专家经验(包括飞机设计专家和维修专家)及系统的历史排除记录和可靠性数据,结合概率因果网络原理,构造以航电系统为对象的航电系统多故障诊断因果网络,建立依托于概率因果网络的诊断专家系统;(2)诊断人员通过检验设备或自身的观察,根据现场查验、系统自检等结果收集征兆资料,然后输入上述诊断专家系统对这些征兆进行分析和推理,按照因果网络的诊断求解算法,得出系统故障的传播路径和原发故障,指出正确高效的排故方法^[3-4]。图1指出了基于因果网络的航电系统多故障诊断过程。

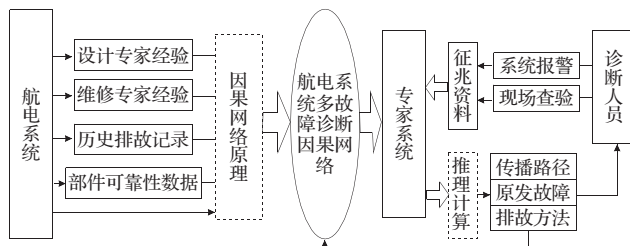


图1 基于因果网络的航电系统多故障诊断过程图

2.2 航电系统多故障诊断思路

航电系统多故障诊断的过程也就是诊断思维的推理过程,诊断推理往往都具有智能型,一定程度上反映诊断专家在诊断过程中一系列的思维活动,即从感性具体到思维抽象,再到思维具体的过程。这种思维过程在航电系统多故障诊断中表现为:获取诊断的输入信息(征兆),在诊断模型的基础之上,按照诊断策略,遵循诊断规则,依据诊断算法,完成推理过程,最终输出诊断结果,并将相关信息反馈系统以修正原有诊断模型^[5]。图2指出了航电系统多故障诊断的推理思路。

2.3 多层因果网络诊断算法

航电系统多故障诊断算法包括两部分:推理算法和评价算法。对于一个多层($N \geq 2$)概率因果网络,诊断的基本思想是层次化诊断思想,从低层到高层依次推理计算。首先采用 ICGS (Irredundant Covering of Generator-Sets) 的推理算法逐层推理,穷尽所有可能的覆盖解集合(相同的解集合要合并),推理直至第 N

作者简介: 朱亚光(1974-),男,硕士研究生,主要从事故障诊断、虚拟仿真等的研究;马存宝(1963-),男,教授,主要从事自动测试和故障诊断技术等研究;朱道德(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为测控与故障诊断技术;周伟(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为故障诊断与虚拟仿真技术。

收稿日期: 2008-08-27 **修回日期:** 2008-12-10

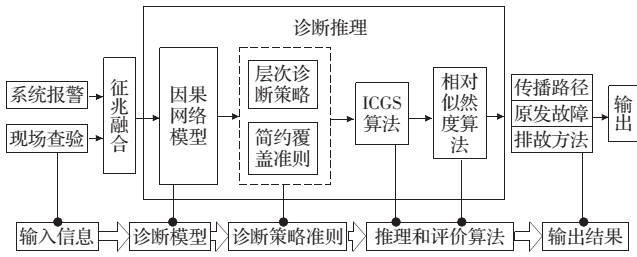


图2 航电系统多故障诊断推理思路图

层;然后采用相对似然度评价算法从第 N 层的众多解集中得到最优解,从而输出故障诊断结果^[9]。整个过程如图3所示。

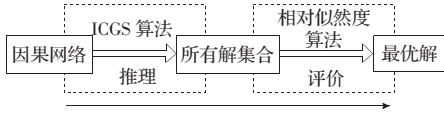


图3 航电多故障诊断算法图

2.3.1 ICGS 推理算法

ICGS 算法是一种以“假设-检验”循环为核心的逐步求精的诊断算法,算法的基本过程是在给定征兆的初始集合基础上,对这些征兆的原因构造一个试探性假设,然后在当前的假设引导下寻求进一步的假设集,得出一系列的假设故障源集合,接着依据简约覆盖理论的简约准则,判断这些集合是否满足该简约准则,最终得到合理的符合简约准则的解集合。具体步骤如下:先初始化因果网络,确定网络层级 N 、各节点值以及因果强度值,然后获取初始征兆 M^+ ,选择当前待诊断的概率因果网络模型,最后实施求解。对于多层次 $N>2$ 的情况,依据层次诊断策略,由初始层 $n=1$ 开始,依次使用 ICGS 算法,每次采纳低一层的解作为本层的输入值,顺次向上求解,最终推理至第 N 层,求得诊断结果。概要流程(初始状态为第一层)如图4所示。

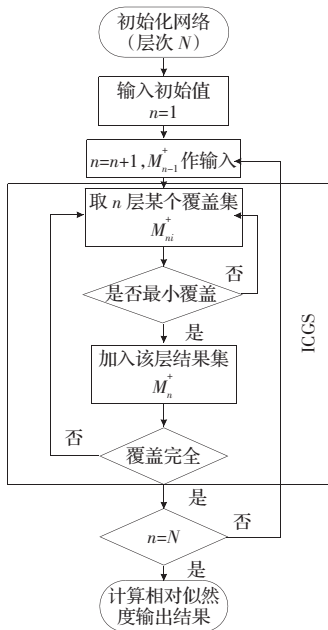


图4 ICGS 算法概要流程图

2.3.2 相对似然度评价算法

在给定 M^+ 时, D_i 的相对似然度被分子 $P(M^+|D_i)$ 和 $P(D_i)$ 所决定。由此可定义 D_i 的相对似然度为:

$$L(D_i, M^+) = P(M^+|D_i) \prod_{d_i \in D_i} \frac{p_i}{1-p_i}$$

在所有的 $D_i \subseteq D$ 中,有最高相对似然度的 D_i ,即可作为故障诊断问题的最优解。为清楚起见,将 $L(D_i, M^+)$ 分为三部分来考虑:

$$L(D_i, M^+) = L_1(D_i, M^+) L_2(D_i, M^+) L_3(D_i, M^+)$$

第一项: $L_1(D_i, M^+) = \prod_{m_j \in M^+} (1 - \prod_{d_i \in D_i} (1 - r_{ij}))$, 它反映了 D_i 引起 M^+ 发生的程度。

第二项: $L_2(D_i, M^+) = \prod_{m_j \in effects(d_i) - M^+} \prod_{d_i \in D_i} (1 - r_{ij})$, 它反映了 D_i 引起 M 发生的程度。

第三项: $L_3(D_i, M^+) = \prod_{d_i \in D_i} \frac{p_i}{1-p_i}$ 代表由 D_i 的先验概率组成的加权。

需要说明的是,对于 N 层因果网络,通过多层推理计算得到任意层 $H(2 < H < N)$ 的解集合后,对于该解集合的相对似然度评价方法采用下面的公式:

$$L^*(D_i^H, M^+) = L(C^2) L(C^3) \cdots L(C^H)$$

其中 $L^*(D_i^H, M^+)$ 表示 H 层的故障解集合 D_i^H 相对于 M^+ 的总相对似然度, $L(C^n)$ ($n=2, 3, \dots, H$) 表示第 $n-1$ 层向第 n 层推理时计算得到的相对似然度。通过该公式就可以在众多解集合中选出最优解,得到诊断结果。

3 诊断实例

依据波音 777 飞机的故障隔离手册和维修手册^[7],采用基于故障树的航电系统概率因果网络构造方法,建成了如图5所示的机翼(部分)电子故障因果网络。

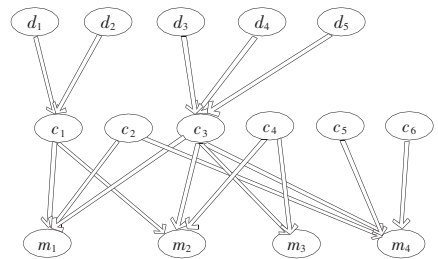


图5 777 机翼(部分)电子故障概率因果网络图

表1是各节点的说明及概率值。其中概率值由部件可靠性

表1 各节点说明及先验概率

节点	说明	先验概率($t=10\ 000$)
d_1	压力传感器信号错误	0.000 057 3
d_2	液压系统压力问题	0.000 127 0
d_3	中心激励控制组件故障	0.000 090 1
d_4	激励器/传感器故障	0.000 066 8
d_5	线路故障	0.000 209 2
c_1	液压系统控制问题	0.000 100 8
c_2	左副翼动力控制组件故障	0.000 013 3
c_3	中心激励控制组件传输故障	0.000 057 6
c_4	左襟副翼动力控制组件故障	0.000 090 9
c_5	中心电源供给组件故障	0.000 098 1
c_6	螺旋管操纵阀门线路故障	0.000 037 1
m_1	左副翼动力控制组件命令错误	
m_2	右襟副翼动力控制组件命令错误	
m_3	右襟副翼动力控制组件反馈问题	
m_4	左副翼动力控制组件螺旋管操纵阀门故障	

数据得到。

表 2 是节点之间的关联说明。

表 2 p_i 和 $effect(p_i)$

源节点	征兆节点	源节点	征兆节点
d_1, d_2	c_1	d_3, d_4, d_5	c_3
c_1	m_1, m_2	c_2	m_1, m_4
c_3	m_1, m_2, m_3, m_4	c_4	m_2, m_3
c_5	m_4	c_6	m_4

下面采用模糊多属性评判法求取因果强度(待求因果强度 17 个),选择 5 名飞机设计专家,5 名飞机维修专家以及一份历史排故记录。其中,权重 $W=(w_1, w_2, w_3)=(0.637, 0.258, 0.105)$, 权重值和模糊评判矩阵作变换就可得到待求因果强度值:

$$R=W \cdot R'=(w_1, w_2, w_3) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1,17} \\ r_{21} & \cdots & r_{2,17} \\ r_{31} & \cdots & r_{3,17} \end{pmatrix}=(0.637, 0.258, 0.105) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 0.700 & 0.540 & 0.820 & 0.300 & 0.540 & 0.380 & 0.420 & 0.740 & 0.700 & 0.500 & 0.540 & 0.420 & 0.420 & 0.100 & 0.540 & 0.100 & 0.780 \\ 0.609 & 0.377 & 0.838 & 0.513 & 0.601 & 0.331 & 0.458 & 0.696 & 0.684 & 0.516 & 0.480 & 0.368 & 0.419 & 0.203 & 0.491 & 0.077 & 0.661 \\ 0.620 & 0.540 & 0.780 & 0.300 & 0.500 & 0.460 & 0.500 & 0.700 & 0.660 & 0.540 & 0.540 & 0.300 & 0.420 & 0.140 & 0.500 & 0.140 & 0.700 \end{pmatrix} =$$

(0.668 122, 0.497 946, 0.820 444, 0.354 954, 0.551 538, 0.375 758, 0.438 204, 0.724 448, 0.691 672, 0.508 328, 0.524 52, 0.393 984, 0.419 742, 0.130 774, 0.523 158, 0.098 266, 0.740 898)

所以,因果矩阵如下:

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
m_1	0.375 8	0.724 4	0.508 3								
m_2	0.438 2		0.524 5	0.130 8							
m_3			0.394 0	0.523 2							
m_4		0.691 7	0.419 7		0.098 3	0.740 9					
c_1							0.668 1	0.497 9			
c_3									0.820 4	0.355 0	0.551 5

$M^*=\{m_1, m_3\}$,根据 ICGS 算法和最小覆盖的简约准则,计算到第二层时最小覆盖集为: $\{c_1\}, \{c_3\}$,分别求解它们的相对似然度。计算如下:

$$L_1(\{c_1\})=(1-(1-0.375 8)) \times (1-(1-0.438 2))=0.164 675 5$$

$$L_2(\{c_1\})=1$$

$$L_3(\{c_1\})=\frac{0.000 100 8}{1-0.000 100 8} \approx 0.000 100 8$$

$$L(\{c_1\})=L_1(\{c_1\}) \cdot L_2(\{c_1\}) \cdot L_3(\{c_1\}) \approx 1.66 \times 10^{-5}$$

同理可得:

$$L_1(\{c_3\})=(1-(1-0.508 3)) \times (1-(1-0.524 5))=0.266 603 3$$

$$L_2(\{c_3\})=(1-(1-0.394 0))(1-0.419 7)=0.351 661 8$$

$$L_3(\{c_3\})=\frac{0.000 057 6}{1-0.000 057 6} \approx 0.000 057 6$$

$$L(\{c_3\})=L_1(\{c_3\}) \cdot L_2(\{c_3\}) \cdot L_3(\{c_3\}) \approx 5.400 2 \times 10^{-6}$$

很显然, $L(\{c_1\})$ 大,因此计算到第二层次时的最佳解是 $\{c_1\}$ 。

继续往第三层计算,由第二层的输入解集合为: $\{c_1\}, \{c_3\}$,经计算第三层的最小覆盖解集合为: $\{c_1\}$ 从推导得到 $\{d_1\}, \{d_3\}$,从 $\{c_3\}$ 推导出 $\{d_3\}, \{d_4\}, \{d_5\}$ 。分别计算这 5 个集合的相对似然度可得:

$$L(\{d_1\})=0.668 1 \times \frac{0.000 057 3}{1-0.000 057 3} = 3.83 \times 10^{-5}$$

$$L(\{d_2\})=(1-(1-0.497 9)) \times \frac{0.000 127 0}{1-0.000 127 0} = 6.32 \times 10^{-5}$$

$$L(\{d_3\})=(1-(1-0.820 4)) \times \frac{0.000 090 1}{1-0.000 090 1} = 7.39 \times 10^{-5}$$

$$L(\{d_4\})=(1-(1-0.355 0)) \times \frac{0.000 066 8}{1-0.000 066 8} = 2.37 \times 10^{-5}$$

$$L(\{d_5\})=(1-(1-0.551 5)) \times \frac{0.000 209 2}{1-0.000 209 2} = 1.15 \times 10^{-4}$$

对这 5 个解集合,计算全网络的总相对似然度可得:

$$L^*(\{d_1\})=L(\{d_1\}) \cdot L(\{c_1\})=6.357 8 \times 10^{-10}$$

$$L^*(\{d_2\})=L(\{d_2\}) \cdot L(\{c_1\})=1.049 1 \times 10^{-9}$$

$$L^*(\{d_3\})=L(\{d_3\}) \cdot L(\{c_3\})=3.990 7 \times 10^{-10}$$

$$L^*(\{d_4\})=L(\{d_4\}) \cdot L(\{c_3\})=1.279 8 \times 10^{-10}$$

$$L^*(\{d_5\})=L(\{d_5\}) \cdot L(\{c_3\})=6.210 2 \times 10^{-11}$$

由此可得,对于 $M^*=\{m_1, m_3\}$,遵循最小覆盖的简约准则,覆

盖集解按照可能性依次为: $\{d_2\} > \{d_1\} > \{d_3\} > \{d_4\} > \{d_5\}$ 。

4 结论

以航电系统为研究对象,以设备可靠性数据和专家经验为数据来源,提出了基于概率因果网络的航电多故障诊断方法,给出了多故障诊断 ICGS 算法和相对似然度评价算法,最后用 777 机翼电子故障做实例验证,实例验证表明,利用概率因果网络和简约覆盖理论能有效解决航电系统多故障诊断问题,提高航电设备的故障诊断效率,缩短维修周期。

参考文献:

- [1] Peng Y, Reggia J.A probabilistic causal model for diagnostic problem solving[C]//IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics Special Issue for Diagnosis, 1987, 17(2): 146-161.
- [2] Petrov N, Marinov B M. Methods for statistical valuation of the technical condition of aviation communication equipment [J]. Academic Open Internet Journal, 2000, 1.
- [3] 徐常胜, 曹立明. 一种基于集合覆盖和可信度因子的多故障诊断模型[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(2): 42-47.
- [4] 周晓. 复杂电子装备的智能故障诊断技术[J]. 兵工工业化, 2006, 25(5): 42-43.
- [5] 温继文, 傅泽田. 基于双层因果网络的鱼病诊断模型及其在应用[J]. 湖南农业大学学报, 2006, 32(2): 214-218.
- [6] Baig F. Model-based reasoning for fault diagnosis of win-spool turbfans[J]. Academic Open Internet Journal, 2000.
- [7] 波音公司. FIM, AMM[R]. 2004.