

应用证据推理理论实现卫星故障 诊断信息的融合方法

杨天社^{1,2} 杨开忠² 曹雨平¹

¹(西安交通大学工业工程系 西安 710049)

²(中国西安卫星测控中心)

摘 要

针对卫星故障诊断中应用同一征兆域信息难以区分的故障,提出了一种基于证据推理理论的故障诊断新方法.该方法应用证据推理理论实现卫星故障不同征兆域信息的融合,从而获得更加准确的故障定位.文中分析了卫星故障诊断中应用证据推理理论进行信息融合的必要性和应用证据推理理论实现卫星故障不同征兆域信息融合的理论方法,给出了该方法的实际应用,讨论了应用该方法需注意的问题,最后给出了结论.

关键词 证据推理; 信息融合; 卫星; 故障诊断

1 引言

随着航天事业的发展,在轨运行卫星的数量越来越多,为了确保在轨运行卫星的正常运行,必须对其进行有效的管理,卫星故障诊断方法直接影响着卫星管理的效率和水平.现行的卫星故障诊断方法存在若干缺陷,其中之一就是不能合理地综合不同领域专家的经验 and 知识.

在卫星故障诊断实际中,经常会遇到故障机理不清楚的故障.这种情况下对于同一个故障现象,不同领域专家给出的判断往往不同,甚至相互矛盾,这类故障应用同一故障征兆域的信息很难诊断或者无法诊断.导致这种困境的原因有两个:一是定位这类故障和确定导致这类故障的因素比较困难,二是不同领域专家的经验 and 知识不同,他们给出的判断只是依据他们自己所掌握和拥有的经验和知识,而没有充分考虑其他领域专家的经验 and 知识.此时如何根据专家们给出的判断进行故障诊断的决策呢?现行的卫星故障诊断方法是难以自动得到合理而准确的决策结果.如果应用证据推理理论,该类故障的诊断问题就比较容易解决,因为证据推理理论可以进行不同征兆域信息的融合,实现不同领域专家判断的合理合成.

处理不确定性信息和数据是人工智能的一个重要研究领域,它在专家系统和信息融合方面显得尤为突出.专家对卫星同一故障现象给出不同的判断结论,从人工智能的角度分析,是属于卫星故障诊断中的“不确定性问题”,需要应用不确定性推理方法解决.证据推理理论是一种典型的不确定性推理理论,对不确定性信息有较好的处理能力.目前,国内外关于应用证据推理理论进行卫星故障诊断方法的研究还很少.

2002-11-07 收到原稿, 2003-03-15 收到修定稿

本文以卫星姿态的一种故障的诊断为例, 把应用证据推理理论进行信息融合的思想和方法引入到卫星故障的诊断中, 从理论和实际两方面解决了卫星故障诊断中的一个难题.

2 信息融合的证据推理方法

信息融合实质是在同一假设空间内将不同的证据合成为一个新证据的过程. 信息融合的方法有多种, 应用证据推理理论的合成规则进行信息融合就是其中的一种.

证据推理理论由 Dmpster 首先提出, Shafer 发展了该理论. 证据推理理论产生以来, 一直受到人们的普遍关注, 专家系统中也逐步使用证据推理代替了概率推理, 因为证据推理中所需的先验数据更直观、更容易获得, 特别是 Dmpster-Shafer 合成公式可以融合不同领域专家的知识, 使得证据推理在专家系统中得到了比较广泛的应用.

证据推理理论融合卫星故障不同征兆域信息 (不同领域专家知识) 的理论方法如下.

(1) 确定基本概率分配函数

专家们对卫星故障的判断是根据其经验、知识水平等多种因素主观给出的. 对于同一故障现象, 不同领域专家、同一领域的不同专家给出的判断结果可能差别较大. 专家对卫星故障的判断在证据推理理论中称为基本概率分配函数 (mass 函数). mass 函数在证据推理中作为假设的度量, 其数学定义为: 设 H 为故障诊断假设空间, $\Phi(H)$ 是 H 的全体子集, mass 函数 m 是 $\Phi(H)$ 到 $[0, 1]$ 的映射, 并且满足 $\sum_{A \subset H} m(A) = 1$. $m(A)$ 表示专家对 A 的确认程度.

(2) 融合 mass 函数

得到不同专家对故障现象的判断 (mass 函数值) 后, 对这些判断进行融合. 专家判断结果的融合即为证据推理理论中的 mass 函数的合成.

mass 函数合成规则如下:

故障诊断假设空间 H 上的 2 个 mass 函数的合成规则方法为

$$m(D) = \frac{1}{N} \sum_{A \cap B = D} m_1(A)m_2(B), (D \subset H).$$

其中,

$$m(\phi) = 0, \\ N = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A)m_2(B) > 0.$$

可见, $N = 0$ 时 2 个 mass 函数不能合成.

如果用“核”描述, 则 2 个 mass 函数不能合成的限制条件为 m_1 和 m_2 的“核”不相交, 即

$$C_1 \cap C_2 = \left(\bigcup_{m_1(A_1) > 0} A_1 \right) \cap \left(\bigcup_{m_2(A_2) > 0} A_2 \right) = \emptyset,$$

C_1 表示 m_1 的核, C_2 表示 m_2 的核.

证据推理理论对“核”的数学定义为: 设 H 为故障诊断假设空间, m 是 H 上的 mass 函数, 若 $A \subset H, m(A) > 0$, 则 A 为 m 的“核”元素, $C = \bigcup_{m(A) > 0} A$ 为 m 的“核”.

表 1 为 mass 函数合成的一般数学描述.

表 1 mass 函数合成的一般数学描述
Table 1 General mathematic description
of mass function combination

$m_1 \backslash m_2$	B_1	$\dots$	B_k
	$m_2(B_1)$	$\dots$	$m_2(B_k)$
A_1	$A_1 \cap B_1$	$\dots$	$A_1 \cap B_k$
$m_1(A_1)$	$m_1(A_1)$	$\dots$	$m_1(A_1)$
	$m_2(B_1)$	$\dots$	$m_2(B_k)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
A_n	$A_n \cap B_1$	$\dots$	$A_n \cap B_k$
$m_1(A_n)$	$m_1(A_n)$	$\dots$	$m_1(A_n)$
	$m_2(B_1)$	$\dots$	$m_2(B_k)$

$$E = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j),$$

$$N = 1 - E,$$

$$m(A) = \frac{1}{N} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j).$$

(3) 计算判断的置信区间

根据专家判断信息的融合结果, 计算各种判断的置信区间, 也就是证据推理理论中信任区间的计算. 信任区间表示为 (B, L) , B 为信任测度, L 为似然测度. 信任测度与似然测度分别表示对判断信任程度估计的下限估计 (悲观估计) 与上限估计 (乐观估计).

信任测度 B 和似然测度 L 根据 mass 函数计算, 数学描述如下:

$$B(A) = \sum_{D \subset A} m(D), \quad (D \subset X);$$

$$L(A) = \sum_{D \cap A \neq \emptyset} m(D), \quad (D \subset X).$$

(4) 卫星故障诊断结果

根据置信区间的精度 μ 确定卫星故障诊断结果, μ 最大的判断即为卫星故障诊断的最终结果. μ 的数学描述如下: $\mu = B(A)/L(A)$.

3 证据推理理论信息融合方法在卫星故障诊断中的实际应用

3.1 卫星故障诊断实际问题

以卫星姿态部件故障导致的卫星姿态故障为例. 假设导致卫星姿态故障的部件有动量轮 (P_1)、推力器 (P_2)、姿态敏感器 (P_3).

不同领域专家对姿态故障给出的判断 (基本概率分配函数值) 为

$$\begin{aligned} m_1(nP_1) &= 0.6, & m_2(nP_1) &= 0.2, \\ m_3(yP_2) &= 0.4, & m_4(nP_3) &= 0.8, \\ m_5(yP_2) &= 0.3, & m_6(nP_1) &= 0.5, \\ m_7(yP_1) &= 0.3, & m_8(yP_3) &= 0.7. \end{aligned}$$

其中, yP_j 表示是该部件导致姿态故障, nP_j 表示不是该部件导致姿态故障.

3.2 故障不同征兆域信息的融合

对于上述的实际问题, 应用证据推理理论进行信息融合的方法如下.

(1) 合成 m_1 与 m_2 , 结果为 m_9

$$\begin{aligned} m_1(nP_1) &= 0.6, & m_1(H) &= 1 - 0.6 = 0.4, \\ m_2(nP_1) &= 0.2, & m_2(H) &= 1 - 0.2 = 0.8. \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} m_9(H) &= (m_1 \oplus m_2)(H) = 0.4 \times 0.8 = 0.32, \\ m_9(nP_1) &= 1 - 0.32 = 0.68. \end{aligned}$$

(2) 合成 m_9 与 m_6 , 结果为 m_{10}

$$\begin{aligned} m_{10}(H) &= (m_9 \oplus m_6)(H) = 0.5 \times 0.32 = 0.16, \\ m_{10}(nP_1) &= (m_9 \oplus m_6)(nP_1) = 1 - 0.16 = 0.84. \end{aligned}$$

(3) 合成 m_3 与 m_5 , 结果为 m_{11}

$$\begin{aligned} m_{11}(H) &= (m_3 \oplus m_5)(H) = 0.6 \times 0.7 = 0.42, \\ m_{11}(nP_1) &= (m_3 \oplus m_5)(yP_2) = 1 - 0.42 = 0.58. \end{aligned}$$

(4) 合成 m_7 与 m_{10} , 结果为 m_{12}

$$\begin{aligned} N &= 1 - 0.84 \times 0.3 = 0.254 \\ m_{12}(yP_1) &= (0.16 \times 0.3) / 0.254 = 0.064, \\ m_{12}(nP_1) &= (0.84 \times 0.7) / 0.254 = 0.768, \\ m_{12}(H) &= (0.16 \times 0.7) / 0.254 = 0.150. \end{aligned}$$

(5) 合成 m_4 与 m_8 , 结果为 m_{13}

$$m_{13}(yP_3) = 0.318, \quad m_{13}(nP_3) = 0.545, \quad m_{13}(H) = 0.136.$$

(6) 合成 m_1 — m_8 , 结果为 m

$$\begin{aligned} m &= m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5 \oplus m_6 \oplus m_7 \oplus m_8, \\ m(yP_1) &= 0.0263, \quad m(nP_1) = 0.058, \\ m(yP_2) &= 0.704, \quad m(yP_3) = 0.160, \end{aligned}$$

$$m(nP_3) = 0.044, \quad m(H) = 0.011.$$

3.3 卫星故障诊断结果

通过计算可得:

$$\mu_{\max} = \mu(yP_2) = B(yP_2)/L(yP_2) = 0.8617.$$

所以, 最终诊断结果为“推理器故障导致姿态故障”.

4 讨论

应用本文提出的方法进行卫星故障诊断时应注意以下问题:

(1) 证据推理理论要求导致卫星故障的各因素满足“相互排斥”的条件, 如果不满足该条件, 则不适合应用此方法.

(2) 为使故障诊断结果更为合理, 对不同专家的判断 (mass 函数值) 可给出不同的权重 (w), 权重与原始 mass 函数值相乘, 得到进行故障诊断的实际 mass 函数值.

(3) 应用证据推理理论进行卫星故障诊断时, 如果专家直接对故障现象给出其判断 (mass 函数值), 则证据在判断中是隐含的, 专家把证据综合到他们的判断中, 为了使证据推理理论在卫星故障诊断中的应用更加深入, 可以考虑在不同证据下对故障的判断. 若存在 n 个证据, 对于每个证据 $e_j (j \leq n)$, $m(\bullet/e_j)$ 故障诊断空间的 mass 函数, $P(e_j)$ 为 e_j 的概率, 则

$$m(A) = \sum_{j=1}^n m(A/e_j)P(e_j)$$

为故障证据 e_j 下的实际 mass 函数.

(4) 应注意一种故障可能由多种因素 (即复合因素) 同时引起的问题, 应启发专家考虑引发故障的多种可能因素.

(5) 要考虑置信区间精度 μ 比较接近的情况. 若导致卫星故障的各因素的 μ 比较接近, 则故障可能是由于多种因素共同作用的结果.

(6) 要考虑非显著因素 (精度 μ 值相对较小) 的综合效果. 若非显著因素的 μ 值之和远大于某个显著因素的 μ , 在进行故障诊断时应慎重, 必要时应该用另外一种方法诊断故障, 其结果可与证据推理理论结果相互比较、相互佐证.

5 结论

本文研究应用证据推理理论实现卫星故障不同征兆域信息的融合方法, 通过研究得到以下结论:

(1) 推理方法分为确定性推理和不确定性推理两大类, 每一类都包括多种具体方法. 卫星在结构、工作原理、运行环境、测量、控制等方面较地面设备复杂, 其故障的诊断相应地也较困难, 在进行卫星的故障诊断时更有必要同时考虑确定性推理方法和不确定性

推理方法的应用. 证据推理理论作为一种重要的不确定性推理方法, 在卫星故障诊断中有着广阔的应用前景.

(2) 证据推理比概率推理更适合卫星故障的诊断, 因为证据推理比概率推理所需的先验数据更直观、更容易获得, 并且为了保证卫星的安全运行, 一般不允许人为复现已发生的故障, 所以概率推理所需的“一定数量故障样本”的要求难以满足.

(3) 由于卫星故障现象的复杂和人们对卫星实际运行环境不十分了解, 卫星发生故障机理不清楚的故障时, 众多卫星专家给出的判断往往差异较大, 如何综合专家们的判断得出一个合理的、令人信服的诊断结论一直是卫星管理中的一个难题. 证据推理为解决此问题提供了比较严密的理论和方法.

(4) 应用证据推理理论进行卫星故障诊断时, 要注意其前提条件和限制条件. 如果前提条件和限制条件不满足, 则应用证据推理进行卫星故障诊断得出的诊断结果可能与实际情况不符.

(5) 证据推理理论中的 mass 函数值是专家根据其经验、知识水平等因素主观给出的, 与实际情况可能有差距. 因此, 在能用精确的数学模型进行故障诊断的情况下, 可以不应用证据推理理论方法.

(6) 目前国内外关于应用证据推理理论进行故障诊断的实用研究尚不多, 本文探讨了应用证据推理理论进行卫星故障诊断的方法, 尽管有些技术问题尚需进一步研究, 但为卫星故障的诊断开辟了一条新途径.

参 考 文 献

- [1] Duan Xinsheng. Evidence Reasoning Theory, Decision and Artificial Intelligence. Beijing: Chinese People University Press, 1993, 58—109. in Chinese (段新生. 证据推理与决策、人工智能. 北京: 中国人民大学出版社, 1993, 58—109)
- [2] Liang Guangxi, Liang Yi. Evidence theory of relation database. *J. Eng. Math.*, 1994, 15(3):46—52. in Chinese (梁广锡, 梁怡. 关系数据库上的证据理论. 工程数学学报, 1994, 15(3):46—52)
- [3] Zhang Yaoting, Zhang Nengsheng. Uncertainty Methodology of Expert System. Nanning: Guangxi Normal University Press, 1994, 76—148. in Chinese (张尧庭, 张能胜. 专家系统中的不确定性方法学. 南宁: 广西师范大学出版社, 1994, 76—148)
- [4] Zhang Wenxiu, Liang Yi. Principle of Uncertainty Reasoning Theory. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1996, 168—206. in Chinese (张文修, 梁怡. 不确定性推理原理. 西安: 西安交通大学出版社, 1996, 168—206)
- [5] Geng Li'en, Pan Xufeng. Application of evidence reasoning theory for data merging. *J. Beijing Sci. Eng. Univ.*, 1997, 17(2):198—203. in Chinese (耿立恩, 潘旭峰. 证据推理在数据融合中的应用. 北京理工大学学报, 1997, 17(2):198—203)
- [6] Xu Min, Huang Shaoyi. Handbook of Fault Diagnosis of Equipment. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1998, 87—162. in Chinese (徐敏, 黄昭毅. 设备故障诊断手册. 西安: 西安交通大学出版社, 1998, 87—162)
- [7] Dai Guanzhong, Pan Quan. Development and problems of evidence reasoning theory. *J. Cont. Theo. Its App.*, 1999, 16(3):465—469. in Chinese (戴冠中, 潘全. 证据理论的进展及存在的问题. 控制理论与应用, 1999, 16(3):465—469)
- [8] Zhou Donghua, Ye Yinzong. Modern Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Beijing: Tsinghua University Press, 2000, 158—190. in Chinese (周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000, 158—190)

- [9] Gao Hongtao, Wang Min. Application of evidence reasoning theory for synthetically fault diagnosis of rotating mechanism. *J. Dalian Sci. Eng. Univ.*, 2001, 41(4):459—462. in Chinese (高洪涛, 王敏. 证据理论在旋转机械综合故障诊断中的应用. 大连理工大学学报, 2001, 41(4): 459—462)
- [10] Julia Breed. Spacecraft Emergency Response System for Autonomous Mission Operation. In: NASA Goddard Space Flight Center. NASA, 2001, 75—102

METHOD OF SATELLITE FAULT DIAGNOSIS APPLYING EVIDENCE REASONING THEORY TO MERGE INFORMATION

YANG Tianshe^{1,2} YANG Kaizhong² CAO Yuping¹

¹(Department of Industrial Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

²(Xian Satellite Control Center of China)

Abstract

It is difficult to diagnose some faults of satellites using the knowledge of only one symptom field. Based on Evidence Reasoning Theory, this paper introduces a new method to diagnose the faults. Information of different symptom field of satellite faults is merged by use the new method, thus the faults can be located more accurately. Firstly, the necessity of applying Evidence Reasoning Theory to merge the information in satellite fault diagnosis is analyzed. Secondly, the theoretical method of applying Evidence Reasoning Theory to merge information of different symptom field of satellite fault is studied. Thirdly, the practical application of the method is given. Fourthly, the notations that should be paid more attention to are analyzed. Finally, the conclusions of this paper are given.

Key words Evidence reasoning, Information merging, Satellite, Fault and diagnosis