

电子部件故障诊断的 Dempster-Shafer 信息融合算法

朱大奇¹, 杨永清¹, 于盛林²

(1. 江南大学 工业自动化系, 江苏 无锡 243002; 2. 南京航空航天大学 测试工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对电路故障元件诊断的不确定性问题, 给出了光电雷达电子部件故障定位的多传感器 Dempster-Shafer (DS) 信息融合方法. 通过测试电路中的被诊断元件的工作温度和工作电压, 得出了 DS 证据理论中两传感器对各待诊断元件的信度函数分配. 再分别利用模糊规则和 DS 联合规则得到融合后的信度函数分配, 从而确定故障元件. 单传感器诊断与融合诊断的结果比较说明多传感器融合算法具有较高的准确性, 而模糊融合算法与 DS 算法的结果比较则说明 DS 算法在故障诊断方面更具有优越性.

关键词: 信度函数; 模糊信息融合; DS 信息融合; 故障诊断

中图分类号: TP18, TP274 **文献标识码:** A

Dempster-Shafer information fusion algorithm of electronic equipment fault diagnosis

ZHU Da-qi¹, YANG Yong-qing¹, YU Sheng-lin²

(1. Industrial Automation Department, Southern Yangtze University, Wuxi Jiangsu 214036, China;

2. Department of Measurement and Testing Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: In order to reduce uncertain problem of circuit fault diagnosis, an information fusion method, which is for photo-voltaic radar electronic equipment fault diagnosis based on Dempster-Shafer (DS) evidential theory and fuzzy logical theory, is presented. According to the measurement results of the temperature and the voltage of circuit component, the belief function assignment of two sensors to circuit component, and the fusion belief function assignment was obtained by using DS rule and fuzzy method respectively, then fault component was found. By comparing the diagnosis results based on separate original data and fused data respectively, the latter was proved more accurate; By comparing fuzzy fusion method with DS algorithm, the DS fusion algorithm is more accurate in the circuit fault recognition.

Key words: belief function; fuzzy information fusion; DS information fusion; fault diagnosis

1 引言 (Introduction)

电子部件故障诊断常规方法是线路切割法, 因为电路中某元器件出现故障后, 不仅其本身输出信号失真, 而且影响与之相连的其它正常元器件的功能, 使它们的相关信号失真, 也就是说电路中前后元件相互影响. 如果直接测试待诊断元件的电压或电流信号, 难以准确判断是否有故障, 这就是所谓的模拟电路故障诊断的不确定性问题. 解决此问题的一般方法是对怀疑元件割断其前后联系, 通电测试其关键点电压和电流信号, 来判断是否存在故障, 但这种方法不仅测试麻烦, 而且由于无法猜准哪个元件故障, 必须切割很多元件才能诊断出真正的故障元件. 而且很多情况下是不允许进行这种破坏性诊断

的, 特别是对一些重要仪器电路的故障搜寻, 如某型飞机光电雷达电子部件故障诊断系统^[1]就无法使用这种切割诊断法.

Dempster-Shafer 证据推理^[2,3] (简称 DS 方法) 在解决不确定信息的表达和合成方面有着独特的优势. 妨碍 DS 方法在信息融合领域广泛应用的最主要原因有两点: 一是证据理论中的“证据”难以获取; 二是该方法可能导致巨大的计算量. 对前者主要是将相关理论 (如模糊集理论^[4], 粗糙集理论^[5]等) 引入 DS 融合中. 本文中的故障诊断融合算法是在文献^[6]的基础上, 考虑目标模式数目的影响, 用目标隶属函数代替信度函数作为 DS 证据理论的“证据”. 关于 DS 方法计算量问题的解决方法主要有两

种策略:一是针对特殊的证据组织结构,构造相应的快速算法,如文献[7]提出的基本证据函数,文献[8]提出的层次假设空间和 G-S 算法及文献[9]给出的层次假设空间中冲突证据的合成方法等.这类算法的优点是完全体现 Dempster 合成规则的思想,计算结果精确,缺点是适用范围有限.另外一种策略是减少焦元的个数,如文献[10]提出的贝叶斯近似方法,文献[11]的一致性近似方法等.这种减少焦元个数的近似方法,在实际融合中应用广泛.本文故障诊断

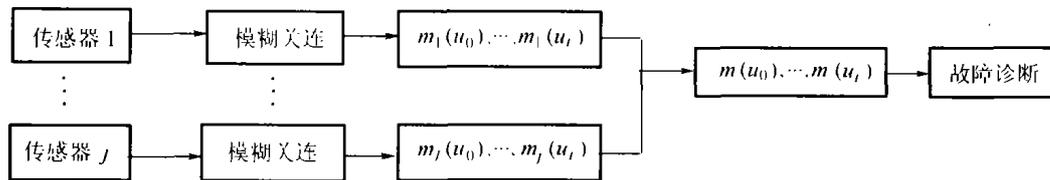


图1 多传感器信息融合的故障诊断框图

Fig.1 Schematic diagram of multi-sensor information fusion fault diagnosis

所谓多传感器信息融合就是通过 DS 联合规则联合几个证据组形成一个新的综合的证据组.从而为目标模式的决策提供综合准确的信息.图1为多传感器信息融合技术的故障模式识别框图.其中 u_0, u_1, \dots, u_i 为待识别的故障模式, $m_1(u_0), m_1(u_1), \dots, m_1(u_i)$ 是传感器1分配到各故障模式上的信度函数值, $m_j(u_0), m_j(u_1), \dots, m_j(u_i)$ 是传感器j分配到各故障模式上的信度函数值, $m(u_0), m(u_1), \dots, m(u_i)$ 是传感器融合后分配到各故障模式上的信度函数值.

2.1 信度函数(Belief function)

信度函数分配是表示人对目标模式假设的可信程度的一种推理,是一种人的判断.这种判断受各种因素的影响,不同的想法会构成不同的信度函数分配公式.此处考虑目标模式数目的影响,同时结合文献[6]决定信度函数分配

$$m_j(u_i) = C_j(u_i) / \left\{ \sum_{i=1}^{N_c} C_j(u_i) + N(1-R_j)(1-W_j\alpha_j\beta_j) \right\}. \quad (1)$$

其中 $C_j(u_i)$ 是传感器j对目标模式 u_i 的相关系数; N_c 为目标模式数目; N 是传感器总数; W_j 是传感器j的环境加权系数,其值域为 $[0, 1]$; α_j 是传感器j最大相关系数; β_j 是传感器j的相关分配值; R_j 是传感器j的可靠性系数.具体计算方法见文献[6].

传感器j的不确定性 θ 的信度函数为

$$m_j(\theta) = 1 - \sum_{i=1}^{N_c} m_j(u_i). \quad (2)$$

从式(1),(2)可以看出,除 W_j 由传感器特性及现场

融合算法中,由于待诊断的目标一般是有限适度的,它满足策略二的条件.

2 多传感器信息融合算法(Multi-sensor information fusion algorithm)

将 DS 证据理论应用于多传感器信息融合时,从传感器获得的相关数值就是该理论中的证据,它可构成待识别目标模式的信度函数分配,表示每一个目标模式假设的可信程度,每一传感器形成一个证据组.

经验而定,有一定的主观性外, N, N_c 对具体系统来说是定值,关键是传感器j对目标模式 u_i 的相关系数 $C_j(u_i)$ 如何确定,此处解决的方法是利用模糊集理论中的隶属度函数 μ_{ij} 来代替 $C_j(u_i)$. 因为这两个量在物理意义上都表示根据某一传感器测得值来评估被测目标模式隶属于某一目标类型的程度即两者之间的相关性.

2.2 隶属度函数(Membership function)

隶属度函数主要由传感器本身的工作特性及被测参数的特性而定,对本文中的电子电路系统某一特定元器件,当系统正常工作外部环境一定时,其关键点电压值应是稳定的,其温度值也是确定数值.当元器件出现故障时,一般地说其电压值会偏离正常范围,温度信号也会发生变化(无论是升高还是降低),偏差越大相对来说元器件出现故障的可能性会变大.为讨论方便,同时结合文献[6]的隶属度函数待定系数法及具体的实验结果,定义隶属度函数 μ_{ij} 的表达式为

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1, & x_j \leq 0, \\ -\alpha(x_j - x_{0ij} + e_{ij}) / (t_{ij} - e_{ij}), & 0 < x_j \leq x_{0ij}, \\ 0, & x_j = x_{0ij}, \\ \alpha(x_j - x_{0ij} - e_{ij}) / (t_{ij} - e_{ij}), & x_{0ij} < x_j \leq 2x_{0ij}, \\ 1, & x_j > 2x_{0ij}. \end{cases} \quad (3)$$

隶属函数 μ_{ij} 的分布见图2.其中 x_0 为电路工作正常时被测元件的标准参数值, α 为修正系数; e_{ij} 为待诊断元件参数的正常变化范围; t_{ij} 为待诊断元件参数

的极限偏差; μ_{ij} 为传感器 j 测定被诊断元件 i 属于故障的隶属度; X_j 为传感器 j 测定的实际数值。

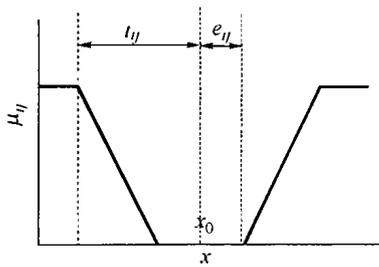


图 2 隶属函数分布

Fig. 2 Distribution map of fuzzy membership function

2.3 融合算法及故障判定规则(Fusion algorithm and fault judge rule)

2.3.1 模糊融合算法(Fuzzy fusion algorithm)

设 A 为故障诊断系统可能决策的集合(如待诊断的电子电路板故障元件集合), B 为传感器的集合(如前述的电压和温度). A 和 B 的关系矩阵 $R_{A \times B}$ 中的元素 m_{ji} 表示由传感器 j 推断决策为 i 的可能性即信度函数, W 表示各传感器判断的可信度, 经过模糊变换得到的 Y 是融合后各决策的可能性. 具体来说, 假设有 m 个传感器对被诊断系统进行测试, 而系统可能决策有 n 个, 则

$$A = \{y_1/\text{决策 } 1, y_2/\text{决策 } 2, \dots, y_n/\text{决策 } n\}, \quad (4)$$

$$B = \{w_1/\text{传感器 } 1, w_2/\text{传感器 } 2, \dots, w_m/\text{传感器 } m\}. \quad (5)$$

传感器对各可能决策的判断用定义在 A 上的信度函数表示. 设传感器 j 对待诊断系统的判断结果为

$$\begin{cases} [m_{j1}/\text{决策 } 1, m_{j2}/\text{决策 } 2, \dots, m_{jn}/\text{决策 } n], \\ 0 \leq m_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (6)$$

即认为结果为决策 i 的可能性为 m_{ji} , 对电路故障诊断来说, 就是各元件为故障元件的可能性, 记为向量 $(m_{j1}, m_{j2}, \dots, m_{jn})$. k 个传感器构成 $A \times B$ 的关系矩阵:

$$R_{A \times B} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{k1} & m_{k2} & \dots & m_{kn} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

将各传感器判断的可信度用 B 上的隶属度 $W = \{w_1/\text{传感器 } 1, w_2/\text{传感器 } 2, \dots, w_m/\text{传感器 } m\}$ 表示, 则由 $Y = W * R_{A \times B}$ 进行模糊变换, 就可得到融合后的诊断结果 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 即综合判断后的各故障决策的可能性集合. 由 Y 可诊断故障元件。

2.3.2 DS 融合算法(DS fusion algorithm)

根据 D-S 联合规则^[5], 设 m_1, m_2 分别对应同一识别框架 Θ 上的信度函数分配, 焦点分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_k , 设 $\sum_{\Phi=A_i \cap B_j} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$, 则由下式定义的函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 是联合后的信度函数分配:

$$m(A) = \begin{cases} \sum_{A=A_i \cap B_j} \{m_1(A_i)m_2(B_j)\} / (1 - C), & A \neq \Phi, \\ 0, & A = \Phi, \end{cases} \quad (8)$$

$$C = \sum_{\Phi=A_i \cap B_j} m_1(A_i)m_2(B_j). \quad (9)$$

式(9)中, C 是包含完全冲突假设 A_i 和 B_j 的所有信度函数乘积之和, 所谓冲突假设 A_i 和 B_j , 是指假设的目标模式 A_i 和 B_j 在 Θ 不可同时存在, 即相互排斥的. 此处 Φ 表示空集, 式(8)中 A 指假设的目标模式 A_i 和 B_j 布尔组合的一个综合命题, A 的信度函数值 $m(A)$ 是包含不冲突假设 A_i 和 B_j 的所有信度函数乘积之和. 在故障诊断中焦点 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_k 即为前面所指的待识别的故障模式 u_0, u_1, \dots, u_i , 对具体的电路故障诊断来说, 它是指待搜寻的各故障元件的集合, 而 $m(A)$ 是指融合后分配到各待诊断故障元件上的信度函数值。

2.3.3 目标模式判定规则(Object mode judge rule)

对目标模式的分类决策, 采用基于规则的方法:

- 1) 判定的故障元件应具有最大的信度函数值.
- 2) 故障元件信度函数值要大于某一阈值. 一般来说此阈值至少要大于 $1/n$ (n 为待诊断元件的个数), 阈值越大故障判断的准确率越高, 只是该值取得过大时, 测试得到的信度函数值无法满足要求. 因此必须针对实际情况, 选择一大于 $1/n$ 的适当数值. 如对光电雷达电子部件的诊断, 选取阈值为 0.35.
- 3) 不确定信度函数值必须小于某个门限(如 0.10).
- 4) 目标类型信度函数值要大于不确定信度函数值.

3 光电雷达电子部件故障诊断(Photovoltaic radar electronic equipment fault diagnosis)

3.1 故障诊断分析(Fault diagnosis analysis)

在已研制的某型飞机光电雷达电子部件故障诊断系统^[1]中, 主要是通过测试具体电路板待诊断元件的电压信号, 并与正常信号比较, 来判断故障元件. 此种方法虽然简单方便, 但诊断的准确率比较低. 分析原因是由于电路中某元器件出现故障后, 不

仅其本身输出信号失真,而且影响与之相连的其它正常元器件的功能,使它们的相关信号失真,也就是说电路中前后元件相互影响.如果直接测试待诊断元件的电压,难以准确判断是否有故障.对此将 DS 证据理论引入故障元件的搜寻之中,具体做法是:先利用热像仪(Inframetrics 600)测试出电路板正常工作,各待诊断元件的标准温度值,当电路板某元件出现故障后,再测试出各元件的新的温度值,按前述的隶属度函数公式计算出 DS 证据理论中的温度对各待诊断元件的信度函数分配.另外,利用探针测出各待诊断元件关键点电压值,同样可计算出电压参量对各待诊断元件故障的信度函数分配,然后利用 DS 联合规则和模糊方法进行融合决策,搜寻出故障元件.

图 3 为实验用待诊断电路原理图,此电路为光电雷达电子部件的匹配电路板电路.它的主要功能是将一模拟电压转换为对应的一组数字信号.根据实际情况分析,其中有 4 个待诊断集成元件分别为通道转换器 u_0 ,比较器 u_1 ,基准电压转换器 u_2 ,电流-电压转换器 u_3 .取 U_0, U_1, U_2, U_3 分别为元件 u_0 ,

u_1, u_2, u_3 的电压测试点,此处以基准转换器 u_2 故障为例,分别利用模糊算法和 DS 证据理论进行双传感器信息融合.在模糊融合时,将各传感器的可靠性系数用权函数 $W = (w_1, w_2)$ 表示,其中 $0 \leq w_1, w_2 \leq 1, w_1 + w_2 = 1$,本例中取 $w_1 = w_2 = 0.5$.计算出关系矩阵 R ,然后利用 $Y = W * R_{A * B}$ 得到模糊融合结果.对 DS 融合,在计算出各传感器对待识别元件的信度函数后,利用前述的式(8),(9)即可计算出 DS 融合数据.融合结果如表 1 所示.

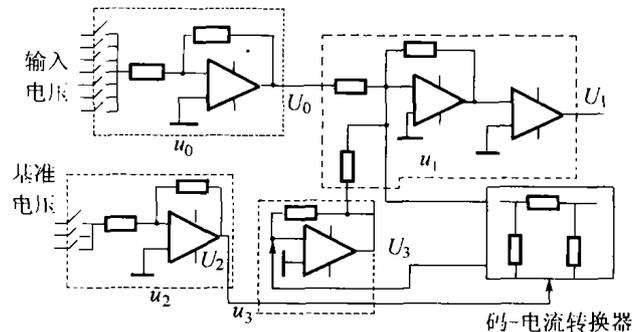


图 3 匹配电路板原理图

Fig. 3 Theory picture of match changing circuit

表 1 信息融合故障识别结果

Table 1 Information fusion fault recognition results

传感器	待诊断元件					诊断结果
	u_0	u_1	u_2	u_3	θ	
电压 m_1	0.0327	0.2172	0.3022	0.2943	0.1536	不定
温度 m_2	0.1647	0.1957	0.2771	0.1565	0.2060	不定
模糊融合 m	0.0987	0.2065	0.2896	0.2254	0.1798	不定
DS 融合 m	0.0740	0.2320	0.3729	0.2585	0.0626	u_2 故障

3.2 实验结果分析与讨论(Analysis and discussion of experiment results)

1) 单传感器诊断结果与融合诊断结果比较:实验时发现本系统被诊断的 4 个故障元件中,两种传感器单独提取的信度函数值有的很相近,如果只用一种传感器的信度函数分配来识别故障元件,有时会出现无法确定故障元件的状况.表 1 为利用热像仪和探针测试出的信度函数分配表及双传感器信息融合故障识别结果.其中第一、二两项为电压和温度所测得的各元件信度函数值和不确定信度函数值,第三、四两项分别为模糊融合和 DS 融合后的各元件信度函数值和不确定信度函数值.从表中可以明显看出,DS 融合后信度函数值与单传感器的信度函数值相比,大大增加了实际目标的信度函数值,相对

减少了其它类型的信度函数值.同时,不确定性信度函数值大为减小,从而使系统的不确定性大幅度降低.对两种传感器单独识别时,无法判定的故障元件,融合后,能准确识别出来.也就是说,和单传感器诊断相比,基于 DS 证据理论的信息融合算法增加了系统的可分析性,有效地提高了故障模式的识别能力,使故障元件定位的准确率得以提高.

2) 模糊融合算法与 DS 算法结果比较:从表 1 的模糊融合数据可以看出,虽然根据故障判定准则第一条可得出 u_2 故障的结论,但与 DS 融合结果相比,实际目标的信度函数值仍然偏小,不确定性信度函数值仍然过大,在故障判据要求较高时,无法识别真正的故障元件.

另外,对模糊融合来说,此处选取两种传感器的

可靠性系数 $w_1 = w_2 = 0.5$, 是一种平均的融合效果分析, 如果将两种传感器的可靠性系数作以修改(如增大电压传感器的的可靠性系数使 $w_1 > 0.5, w_2 < 0.5$), 虽然可以使模糊融合实际目标 u_2 的信度函数值增大, 但最大也只能是 0.3022, 仍然小于 DS 融合得到的实际目标 u_2 的信度函数值 0.3729.

从表 1 中不确定信度函数值 θ 可见, 无论如何修改两种传感器的可靠性系数, 模糊融合得到的不确定信度函数值 θ , 仍将远大于 DS 融合后不确定信度函数值 θ . 可见, DS 融合算法在电子元件故障识别时明显优于模糊融合算法.

4 结束语(Conclusion)

本文将基于 DS 证据理论的信息融合算法与简单模糊融合算法及单传感器诊断结果进行了分析比较, 发现在电子部件故障诊断中, DS 信息融合算法较能好地解决由于电路元件相互影响而产生的故障诊断不确定性问题, 对提高电路系统故障定位的准确率是实用而有效的.

致谢 感谢南京航空航天大学田玉鹏老师在热像仪温度测试实验中给与作者的帮助!

参考文献(References):

[1] 朱大奇, 于盛林, 陈小平. 基于故障树及虚拟仪器的电子部件故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 16(1): 16 - 19.
(ZHU Daqi, YU Shenglin, CHEN Xiaoping. The studies of electronic component fault diagnosis based on the fault trees analysis and virtual instruments [J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2002, 16(1): 16 - 19.)

- [2] DEMPSTER A P. A generalization of Bayesian inference [J]. *J of the Royal Statistical Society, Series B*, 1968, 30(2): 205 - 245.
- [3] SAFER G A. *Mathematical Theory of Evidence* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [4] SMETS P. The degree of belief in a fuzzy event [J]. *Information Science*, 1981, 25(1): 1 - 19.
- [5] PAWLAK Z. Rough sets [J]. *Int J of computer Information Science*, 1982, 11(5): 341 - 356.
- [6] 朱大奇, 于盛林. 基于 DS 证据理论的多传感器数据融合算法及其在故障诊断中应用[J]. 电子学报, 2002, 30(2): 221 - 223.
(ZHU Daqi, YU Shenglin. Data fusion algorithm based on DS theory and its application for circuit fault diagnosis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(2): 221 - 223.)
- [7] BAMETT J A. Computational methods for a mathematical theory of evidence [C]// *Proc of Inter, Joint Conf on Artificial Intelligence*. Vancouver, BC Canada: Int J of Computer, 1981, 25: 1 - 19.
- [8] GORDON J. SHORTLIFFE E H. A method of managing evidential reasoning in a hierarchical hypothesis space [J]. *Artificial Intelligence*, 1985, 26(2): 323 - 357.
- [9] SHAFER G, LOGAN R. Implementing Dempster's rule for hierarchical evidence [J]. *Artificial Intelligence*, 1987, 28(2): 271 - 298.
- [10] VOORBRAAK F. A computational efficient approximation of Dempster-Shafer theory [J]. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 1989, 30(4): 525 - 536.
- [11] DUBOIS D, PRADE H. Consonant approximations of belief functions [J]. *Int J of Approximation Reasoning*, 1990, 4(3): 419 - 449.

作者简介:

朱大奇 (1964 —), 男, 博士, 教授, 研究方向为神经网络与信息融合、故障诊断与容错控制, e-mail: zdq367@yahoo.com.cn;

杨永清 (1964 —), 男, 博士生, 副教授, 研究方向: 神经网络与模式识别;

于盛林 (1942 —), 男, 博士生导师, 研究方向: 故障诊断、进化计算、计算机测控等.