

基于证据理论的民机电源系统故障诊断方法

吴 英

(上海飞机设计研究院 上海 200436)

摘 要: D-S 证据理论在民用飞机电源系统的故障诊断中有着广泛的应用,但是处理高度冲突的数据依然存在困难。为了解决证据理论工程应用中的这一难题,提出了一种基于改进证据理论的民机电源系统故障诊断方法。新方法引入民机电源系统故障的历史数据,定义了修正因子的概念,并且用经典数据案例验证了这一诊断方法。数据案例验证的结果表明,新方法在数据融合的过程中更快更准确的识别出目标,提高了故障诊断结果的可靠性和精确性,而且增强了故障诊断系统的性能,是证据理论在工程应用中的一个突破。

关键词: 证据理论;故障诊断;民机电源系统;历史数据;修正因子

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Fault diagnosis of civil aircraft electrical power system based on evidence theory

Wu Ying

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436, China)

Abstract: Dempster-shafer evidence theory has been used widely in civil aircraft electrical system fault diagnosis. However the combination of highly conflicting remains a difficult problem in practical applications. In order to solve the problem, a new method is proposed in this paper. The proposed method in this paper introduces the historical data as modifying factor, modify the evidences, and verify the diagnosis method by classical data case. Data case validation results show that the new method can identify the target more quickly and accurately, and improve the reliability and accuracy of fault diagnosis results. This new method enhance the performance of the system and is a breakthrough in the engineering application of D-S evidence theory.

Keywords: evidence theory; fault diagnosis; civil aircraft electrical power system; historical data; modifying factor

0 引 言

飞机电源系统主要由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源和外接电源插座组成,给飞机上所有用电设备供电,比如通信、飞行控制、液压、防冰/防雨、起落架等系统输送电能。电源系统之于飞机,就像“血液”之于人体,是飞机飞行安全的基本保证之一。

电源系统的发展经历了低压直流、交流和高压直流的发展过程,而最基本的交流电源的发展经历了恒速恒频电源系统、变速恒频电源系统和变速变频电源系统。交流电源系统使电压提高、电源系统相关设备重量减轻、能满足高速、高空飞行的要求、容易转换成二次电源,在转换成二次电源时,飞机上采用晶体管调压,没有旋转部件、重量轻、体积小、效率高且提高了电源系统的工作可

靠性。

然而,交流电源的发电机本身结构复杂、集成度高、造价高,故障少,但是一旦发生故障,诊断和维修都很困难。交流电源系统的控制与保护设备原理复杂,且由于各种原因并不向设计和维修人员公开其内在控制逻辑。

随着“全电飞机”和“多电飞机”概念的提出和发展,电力驱动逐步代替了传统的液压、气压、机械系统以及飞机附件传动匣,机载用电设备也越来越多,对供电质量的要求也越来越高,对飞机电源系统的安全性、维护性、可靠性和测试性的要求也更高。

基于上述原因,飞机电源系统故障诊断难度越来越大,而民用飞机的市场化运营则对故障诊断的要求越来越高,要求针对民用飞机电源系统的故障征兆做出快速准确的故障诊断,并能根据电源系统故障给机上

用电设备造成的影响提出规范的故障排除方案。这就使得民用飞机电源系统故障诊断的研究变得非常重要且必要。

当前民用飞机电源系统故障诊断中很多方面还有待完善。考虑到电源系统故障诊断中的人为因素和环境因素等不确定因素以及电源系统故障本身具有复杂性和重复性的特点,会发生需要引用专家经验来解决的问题,而且民用飞机电源系统已经储备了比较完备的专家经验和技術手册,适合引用专家系统进行故障诊断。

关于电子电气的诊断和预测等的研究已广泛开展^[1-5]。而国内现有的飞机故障诊断几乎都专注于如何根据故障征兆排除故障,而没有更多地去分析如何获取更完备的证据用于专家系统决策值的进一步研究。专家系统依据故障征兆得出证据从而进行判断。由于民用飞机电源系统故障征兆信息复杂多样,具有不确定性,且单次故障数据收集完备性欠缺,致使在许多情况下得出的诊断结果并不可靠。因此,只有综合利用专家系统依据传感器信息得出的故障征兆和民用飞机电气系统历史故障数据,增加模型的完备性,降低诊断的不确定性,才能实现对民用飞机电气系统全面而准确地诊断。

本文针对专家系统得出的证据高度冲突的问题,从如何获取更加完备证据的角度出发,提出了一种改进的基于证据理论的民用飞机电源系统故障诊断方法。新方法将民用飞机电源系统相同相关故障的历史数据引入,将专家系统依据故障征兆得出的证据和客观历史数据相结合,完善了证据的完备性,物理意义明显,使故障诊断更科学,对冲突证据的判断更准确快捷。

1 D-S 证据理论

证据理论由 Dempster 于 1967 年提出,他的学生 Shafer 将其进一步发展完善^[6-7],也被称为 D-S 证据理论(Dempster Shafer 证据理论)。最早应用于专家系统中,具有处理不确定信息的能力。而且,该理论中的组合规则满足交换率和结合率,为数据处理带来了许多便利,因此证据理论得到了较大的发展并广泛应用于各个领域^[8-13]。限于篇幅,本节简单地介绍 D-S 证据理论组合规则以及其不足和改进。

1.1 D-S 证据理论的基本定义

定义 1 设 Θ 为识别框架, Θ 的幂集构成命题集合 2^Θ , $\forall A \subset \Theta$,如果集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$,满足:

$$\sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1, \text{ 且 } m(\phi) = 0 \quad (1)$$

则 m 是 Θ 框架上的基本概率指派分配(Basic probability assignment, BPA)。BPA 即 $m(A)$, $m(A)$ 的数值大小反映了证据对辨识框架中的命题 A 的支持程度。D-S 证据理论还给出了一个多源信息的组合规则,即 Dempster 组

合规则,可以表述如下:

$$m(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j), \quad A \neq \phi \quad (2)$$

$$m(\phi) = 0, \quad A = \phi$$

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) \quad (3)$$

式中:系数 K 用来表示证据之间冲突程度, K 值大小正比于证据间冲突程度的大小。

1.2 D-S 证据理论的不足和发展

D-S 证据理论用于处理多源信息的 Dempster 组合规则在证据冲突较小时明显,在证据高度冲突时则无法应用。例如,将 Dempster 组合规则用于 Zadeh 悖论^[16],得出了完全与直觉相悖的结果。

例 1 设辨识框架 $\Theta = \{A, B, C\}$,有两个证据,基本概率指派如下:

$$m_1: m_1(A) = 0.99, m_1(B) = 0.01$$

$$m_2: m_2(B) = 0.01, m_2(C) = 0.99$$

由式(2)可以得到:

$$K = 0.99, m(A) = m(C) = 0, m(B) = 1$$

由例 1 中证据 m_1 和 m_2 的基本概率指派大小可以看出,两个证据对命题 B 的支持程度都较低,但融合结果却显示为命题 B 为真,D-S 证据理论的不足之处主要体现在两个方面:一是将全部的信任分配给可能性小的命题,得出的结果与直觉相悖;二是缺乏鲁棒性,高度冲突的证据对命题有一票否决权。

在设备复杂的民用飞机电源系统中,一个部件发生故障可能会引起系统中的相关部件表现出若干故障征兆。民用飞机电源系统故障的这种特点,使得有些故障和征兆之间的一一对应关系不明显,甚至有的故障征兆与实际情况相反。专家系统依据这些故障征兆得出的证据与从其他故障征兆得出的证据往往冲突较大。

如何解决证据理论实际应用中证据高度冲突情况下多元信息的有效融合非常迫切,研究人员为此提出了许多方法。总结近年来国内外针对 D-S 证据理论在冲突证据合成方面所做的改进工作,主要沿着两个途径开展。一种途径认为是 Dempster 组合规则本身出了问题,证据高度冲突下使用 D-S 证据理论组合规则产生不合理结论的原因是该规则的归一化步骤。另一个途径是对证据本身进行预处理,该途径认为 Dempster 组合规则本身没有错,在证据高度冲突时应该首先对证据进行预处理,然后再使用 D-S 证据理论的组合规则。

在实际的数据采集过程中,证据高度冲突的情况经常遇到。Haenni 以 Smets 的 TBM 模型^[17]为例指出:TBM 模型正是模型不全面的一个例子,其中的开世界问题(open world)也是说明了模型不够完善。Haenni 在文中指出,当证据高度冲突时,应该修改模型,比如,原来的证据 m_1 和 m_2 在预处理后修改为 m'_1 和 m'_2 ,然后再利用 Dempster 组合规则进行融合,不应该修改规

则本身^[18]。

沿着第二个改进途径,近年来有一些比较典型的改进方法。Yage的方法^[19]首先突破原有的 Dempster 组合规则,将冲突较大的部分,分配给未知项 $m(X)$,孙全等^[20]在 Yager 方法上的做了改进,提出一种新的方法,Murphy 的方法^[21]是在原有改进方法的基础上提出的,首先对证据进行预处理,即将证据的基本概率指派进行平均,然后再利用 D-S 组合规则进行信息融合。Murphy 的平均方法是一个突破,但并没有从根本上解决这个问题,只是将多源信息进行简单的平均,该方法也存在不足。针对冲突证据融合的问题,从传感器可靠性的角度来处理高度冲突信息的融合问题^[22]得到了研究者的广泛认可,并将其不断发展推进^[23-25]。

本文重点比较了几个比较有突破意义的文献。文献^[25]改进了 Murphy 的方法,将证据权重引入,提出了一种基于证据距离的处理高度冲突证据的组合规则,具有突破意义。与其他方法比较,该方法由于考虑了证据之间的关联性,在系统证据高度冲突时仍然能够快速识别目标,但是该方法步骤较多,计算比较繁琐,不利于快速故障诊断中的应用。

本文提出的方法继承了 Murphy 方法为代表的对证据进行预处理的改进方法的优点 由于引用了历史数据,完善了辨识框架,丰富了证据,所以物理意义更清晰,而且计算步骤简单,具有更强的抗干扰能力,收敛速度也更快。

2 新的民机电源系统故障诊断方法

基于 D-S 证据理论的不足和改进,提出一种改进的 D-S 证据理论组合规则,这种新方法的核心是引入历史数据修正证据。在介绍新方法之前,首先介绍一下历史数据修正证据的方法:

定义 2 设 Θ 为一个包含 N 个不同命题的完备的辨识框架, m_1 和 m_2 是辨识框架 Θ 上的两个 BPA。历史上同类故障发生 w 次,每个命题发生的次数依次为 V_1, V_2, \dots, V_N ,将历史数据归一化,得出一组 BPA:

$$m_H : m_H(1) = \frac{V_1}{w}, m_H(2) = \frac{V_2}{w}, \dots, m_H(N) = \frac{V_N}{w} \quad (4)$$

对 m_1 和 m_2 进行修正的方法依据。

$$m'_n = \frac{m_n + m_L \times w}{1 + w} \quad (5)$$

得出修正后的数据 m'_1 和 m'_2 :

$$m'_1 = \frac{m_1 + m_H \times w}{1 + w}, m'_2 = \frac{m_2 + m_H \times w}{1 + w}$$

在此基础上,介绍本文新提出的民机电源系统故障诊断方法,如图 1 所示。

- 1) 专家系统依据故障征兆得出多组证据;
- 2) 分析证据的冲突程度;

- 3) 将历史数据引入,归一化为修正因子,利用修正因子修正从故障征兆得到的证据;
- 4) 用 D-S 组合规则融合修正后的证据;
- 5) 在数据融合的基础上得出结论,给出诊断结果。

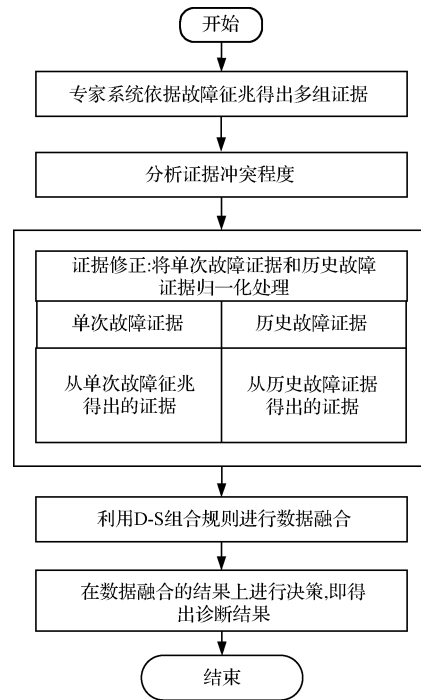


图 1 基于新融合规则的故障诊断流程

例 2 设识别框架 $\Theta = \{A, B, C\}$, 有两个证据,基本概率指派(BPA)如下:

$$m_1 : m_1(A) = 0.99, m_1(B) = 0.01$$

$$m_2 : m_2(B) = 0.01, m_2(C) = 0.99$$

引入历史数据,假设此类故障发生过 100 次,其中目标 A 发生 70 次,目标 B 发生 1 次,目标 C 发生 29 次。

将历史数据归一化,得出一组证据:

$$m_H(A) = 0.7, m_H(B) = 0.01, m_H(C) = 0.29$$

将 m_1, m_2 和 m_H 进行归一化处理:

$$m'_1 = \frac{m_1 + m_H \times 100}{1 + 100};$$

$$m'_2 = \frac{m_2 + m_H \times 100}{1 + 100};$$

得到:

$$m'_1 : m'_1(A) = 0.7, m'_1(B) = 0.01, m'_1(C) = 0.29;$$

$$m'_2 : m'_2(A) = 0.7, m'_2(B) = 0.01, m'_2(C) = 0.29$$

使用 D-S 组合规则,对 m'_1 和 m'_2 进行融合,得出结果是:

$$m(A) = 0.85, m(B) = 0, m(C) = 0.15$$

由 Zadeh 悖论的收敛情况可以看出,新提出的方法收敛效果很好,能更明确的识别出目标。收敛效果很好,能更明确的识别出目标。

3 实例验证

根据现有经验,在民用飞机的研制、批产和运营阶段,电气系统的故障具有多样性,也具有重复性。将已有的故障数据库中的历史数据应用于故障诊断,将能够加快民用飞机电源系统中常见故障的识别、定位和处理,从而节省人力和时间,提高研制、生产和运营期间的排故效率。

将本文提出的方法用于某型号民用飞机电源系统的故障诊断中。一个电源系统左右发电机不能互联的故障发生,则利用本文所提出的诊断方法,流程如图2所示。

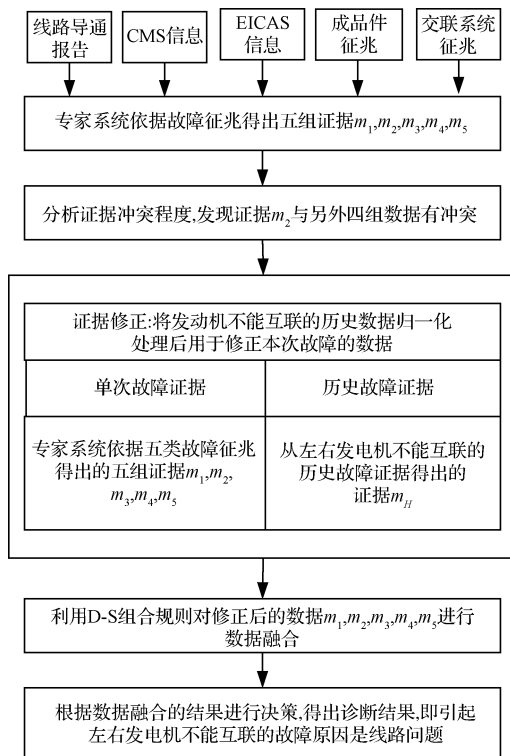


图2 基于新融合规则的电源故障诊断流程

根据民用飞机电源系统故障排除的一般流程和经验,电源系统的故障一般从3个方面来诊断,即线路问题(目标A)、成品件(目标B)和左右发电机交联的成品件和线路(目标C)。专家系统依据电源系统中左右发电机不能互联故障相关的线路导通报告、CMS信息、EICAS信息、成品件故障征兆和左右发电机交联的成品件和线路故障征兆得出证据如下:

$$m_1 : m_1(A) = 0.5, m_1(B) = 0.2, m_1(C) = 0.3$$

$$m_2 : m_2(A) = 0, m_2(B) = 0.9, m_2(C) = 0.1$$

$$m_3 : m_3(A) = 0.55, m_3(B) = 0.1, m_3(C) = 0.35$$

$$m_4 : m_4(A) = 0.55, m_4(B) = 0.1, m_4(AC) = 0.35$$

$$m_5 : m_5(A) = 0.6, m_5(B) = 0.1, m_5(AC) = 0.3$$

在该型号飞机的故障数据库中,左右发电机互联故障

发生10次,线路问题(目标A)引发故障5次,成品件(目标B)引发故障1次,与左右发电机交联的成品件和线路(目标C)引发故障4次。

利用本文提出的方法,首先根据式(3)将历史数据归一化,得出一组证据,即修正因子 m_H :

$$m_H(A) = 0.5, m_H(B) = 0.1, m_H(C) = 0.4$$

然后依据式(4)对 m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 进行修正得到 $m'_1, m'_2, m'_3, m'_4, m'_5$,如下所示:

$$m'_1 : m'_1(A) = 0.5, m'_1(B) = 0.11, m'_1(C) = 0.39;$$

$$m'_2 : m'_2(A) = 0.46, m'_2(B) = 0.17, m'_2(C) = 0.37;$$

$$m'_3 : m'_3(A) = 0.5, m'_3(B) = 0.1, m'_3(C) = 0.4;$$

$$m'_4 : m'_4(A) = 0.51, m'_4(B) = 0.1, m'_4(C) = 0.36, m'_4(AC) = 0.03;$$

$$m'_5 : m'_5(A) = 0.51, m'_5(B) = 0.1, m'_5(C) = 0.36, m'_5(AC) = 0.03$$

在修正证据之后,利用D-S组合规则将 $m'_1, m'_2, m'_3, m'_4, m'_5$ 进行4次融合,并将融合结果与几种典型的方法相比较,结果如表1所示。

从表1中可以看出,Dempster组合规则在证据高度冲突时无法应用,将100%的信任分配给了小可能的命题,而且鲁棒性差,尽管5个证据中有4个支持目标A,由于证据 m_2 否定了目标A,系统就不认为被识别的目标是A。Yager方法的融合结果是随着证据的增多,分配给未知项 $m(X)$ 的数值也越大。这个方法改进效果是不会识别出一个与直觉或其他证据明显相悖的结果,但是也不能识别出真正的目标。文献[23]是在Yager方法上的改进,随着支持目标A的证据数量增多, $m(A)$ 的数值有所变大,但是 $m(A)$ 的数值变大速度很慢,而且未知项 $m(X)$ 的数值也没有明显变小,融合结果收敛很慢。随着证据的增多,Murphy的方法、邓勇的方法和本文的方法都能正确的识别出目标。Murphy的方法对证据关联性的考虑比较简单,使用将所有证据的基本概率指派进行平均的方法来预处理证据,收敛的也比较慢,4个证据时才识别出目标A。邓勇的方法是在Murphy方法上的改进,考虑了不同证据相互关联的特性,考虑了各个证据的权重,用更加合理方式表达了证据之间的关系,并将其用于对证据的预处理,有效地降低了冲突证据对最终融合结果的影响,使得在比较少的证据下就能使结果收敛为正确的目标。而本文所提的方法,也是一种对证据预处理的方法,是在Murphy方法和邓勇方法上的改进,考虑到单次故障所收集故障信息的不确定性和不完整性,引入了故障历史数据修正专家系统证据,相当于丰富了证据,完善了识别框架,有效消除了“高度冲突证据”对最终融合结果的影响。改进了Dempster组合规则用于证据高度冲突情况下信息融合的两个典型不足,使得将全部的信任分配给可能性小的命题和缺乏鲁棒性两个问题得到了解决。本文提出的方法,两个证据时就可以明确识别出目标A,而且基本概率指派较

表 1 几种典型证据融合规则的融合结果

	m_1, m_2	m_1, m_2, m_3	m_1, m_2, m_3, m_4	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
D-S 组合规则 ^[6]	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$
	$m(B)=0.857\ 1$	$m(B)=0.631\ 6$	$m(B)=0.322\ 8$	$m(B)=0.122\ 8$
	$m(C)=0.142\ 9$	$m(C)=0.368\ 4$	$m(C)=0.677\ 2$	$m(C)=0.877\ 2$
Yager 的融合规则 ^[19]	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$	$m(A)=0$
	$m(B)=0.18$	$m(B)=0.001\ 8$	$m(B)=0.002$	$m(B)=0.000\ 2$
	$m(C)=0.03$	$m(C)=0.010\ 5$	$m(C)=0.003\ 68$	$m(C)=0.001\ 29$
孙全等的融合规则 ^[20]	$m(X)=0.79$	$m(X)=0.971\ 5$	$m(X)=0.994\ 52$	$m(X)=0.998\ 53$
	$m(A)=0.090$	$m(A)=0.160$	$m(A)=0.194$	$m(A)=0.211$
	$m(B)=0.377$	$m(B)=0.201$	$m(B)=0.160$	$m(B)=0.138$
Murph 平均融合规则 ^[21]	$m(C)=0.102$	$m(C)=0.125$	$m(C)=0.137$	$m(C)=0.144$
	$m(X)=0.431$	$m(X)=0.486$	$m(X)=0.509$	$m(X)=0.507$
	$m(A)=0.154\ 3$	$m(A)=0.350\ 0$	$m(A)=0.602\ 7$	$m(A)=0.795\ 8$
邓勇的改进型平均融合规则 ^[22]	$m(B)=0.746\ 9$	$m(B)=0.522\ 4$	$m(B)=0.262\ 7$	$m(B)=0.093\ 2$
	$m(C)=0.098\ 8$	$m(C)=0.127\ 6$	$m(C)=0.134\ 6$	$m(C)=0.111\ 0$
	$m(A)=0.154\ 3$	$m(A)=0.581\ 6$	$m(A)=0.806\ 0$	$m(A)=0.890\ 9$
本文提出的新融合规则	$m(B)=0.746\ 9$	$m(B)=0.243\ 9$	$m(B)=0.048\ 2$	$m(B)=0.008\ 6$
	$m(C)=0.098\ 8$	$m(C)=0.174\ 5$	$m(C)=0.145\ 8$	$m(C)=0.100\ 5$
	$m(A)=0.585\ 2$	$m(A)=0.658\ 7$	$m(A)=0.732\ 3$	$m(A)=0.792\ 2$
本文提出的新融合规则	$m(B)=0.047\ 6$	$m(B)=0.010\ 7$	$m(B)=0.002\ 2$	$m(B)=0.000\ 4$
	$m(C)=0.367\ 2$	$m(C)=0.330\ 6$	$m(C)=0.265\ 5$	$m(C)=0.207\ 4$

大,较之邓勇的方法收敛更快,且运算比较简单,更适合于证据理论在工程中的应用。

4 结 论

目前,在民用飞机的电源系统故障诊断中,故障征兆多由机务维修人员现场观察,机组报告或者通过某些特殊设备检测得到。然而飞机的故障具有复杂性和隐蔽性,单单靠这些形式往往不能发现许多故障。而且,现有的飞机故障诊断几乎都专注于如何根据故障征兆排除故障,而没有更多地去分析如何获取更多、更加详实的故障征兆。因此,如何丰富飞机系统的故障征兆来源对于飞机故障诊断来说意义重大。本文通过引入历史数据的方法,丰富了故障诊断的数据基础,利用 D-S 证据理论组着规则融合专家系统通过故障征兆得出的数据,很好的从不确定性较大的证据中得出诊断结果。

新方法是对 D-S 证据理论的一个改进,也是 D-S 证据理论在工程应用中的一个创新,后续的课题中还会继续完善和丰富 D-S 证据理论在工程实践中的应用。

参 考 文 献

- [1] 丁超,唐力伟,邓士杰.故障装备检测任务分解模型评估[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1433-1440.
- [2] 李猛,王友仁.电力电子电路软故障诊断方法研究[J].电子测量技术,2015,38(7):109-114.
- [3] 胡梅,樊敏.一种模拟电路功能模块故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):676-684.
- [4] 毛健美,王莉,杨善用.飞机电源系统多导体电缆故障在线诊断方法与研究[J].仪器仪表学报,2016,37(9):1962-1970.
- [5] 石荣德,赵廷弟,屠庆慈,等.故障诊断专家系统.北京航空航天大学学报,1995,21(4):7-12
- [6] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping [J]. Annual Math Statist, 1967, 38(4): 325- 339.
- [7] S HAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [8] 刘娟,胡敏,黄忠.基于最优支持度的证据融合表情识

- 别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 714-721.
- [9] 吴英, 蒋雯, 王栋. 一种最优冲突证据组合方法[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 180-181.
- [10] TANG Y, ZHOU D, JIANG W. A new fuzzy-evidential controller for stabilization of the planar inverted pendulum system[J]. Plos One, 2016, 11(8): e0160416.
- [11] ZHOU D, TANG Y, JIANG W. A modified model of failure mode and effects analysis based on generalized evidence theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(6): 1-11.
- [12] ZHOU D, TANG Y, JIANG W. An improved belief entropy and its application in decision-making [J]. Complexity, 2017; 1-15.
- [13] ZHANG X, MAHADEVAN S, DENG X. Reliability analysis with linguistic data: An evidential network approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 162: 111-121.
- [14] ZHANG X, MAHADEVAN S. Aircraft rerouting optimization and performance assessment under uncertainty[J]. Decision Support Systems, 2017, in press.
- [15] HAN D Q, HAN C Z, YANG Y. Multi-class SVM classifiers fusion based on evidence combination[C]. In Proceedings of the International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2008: 579-584.
- [16] ZADEH L A. A simple view of the dempster-shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination[J]. AI Magazin, 1986, 7(2): 85-90.
- [17] SMETS P. The combination of evidence in the transferable belief model[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1990, 12(5): 447-458.
- [18] HAENNI R. An aternative to Dempster's rule of combination real alternative?: Comments on "About the belief function combination and the conflict management problem"[J]. Infor mation Fusion, 2002, 3(3): 237-239.
- [19] YAGER R R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules[J]. Informtion Sciences, 1987, 41(2): 93-137.
- [20] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 117-119.
- [21] MURPHY C K. Combining belief function when evidence conflicts[J]. Decision Support System s, 2000, 29(1): 1- 9.
- [22] 邓勇, 施文康, 朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合规则[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 27-32.
- [23] 吴英. 基于遗传算法的冲突证据融合研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [24] 王栋, 李齐, 蒋雯, 等. 基于 pignistic 概率距离的冲突证据合成方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 149-154.
- [25] 韩峰, 杨万海, 袁晓光. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 电光与控制, 2010, 17(4): 5-8.

作者简介

吴英, 1982年出生, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为民用飞机电源系统和 EWIS 的设计、联络工程和故障诊断等。

E-mail: wuying2@comac. cc