

# 基于故障树的远程故障诊断任务分解和决策方法

李俊杰<sup>1</sup>, 乔建军<sup>2</sup>, 王尧<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 尹志林<sup>3</sup>, 刘媛<sup>1</sup>

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 中国人民解放军 96901 部队, 北京 100094;  
3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要:** 远程故障诊断对提高飞机飞行安全、降低诊断和维护成本、建立更好的飞机维护环境具有重要作用, 在远程故障诊断过程中, 面对复杂的诊断任务和冗余、不确定的决策如何做出合理的任务分解和最优的诊断决策是个重要的研究课题; 为提高诊断效率和可靠性, 提出了一种基于故障树模型的任务分解与决策融合方法; 首先, 描述了多资源远程诊断任务分解问题; 其次, 建立了基于故障树最小割集的诊断任务分解机制; 最后, 提出了基于 D-S 证据理论的决策级信息融合方法, 并通过实际算例验证了任务分解和决策方法的可行性。

**关键词:** 远程故障诊断; 最小割集; D-S 证据理论; 信息融合

## Research on Remote Fault Diagnosis Task Decomposition and Decision Approach Based on Fault Tree

Li Junjie<sup>1</sup>, Qiao Jianjun<sup>2</sup>, Wang Yao<sup>1</sup>, Zhang Qiang<sup>1</sup>, Yin Zhilin<sup>3</sup>, Liu Yuan<sup>1</sup>

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China; 2. Troop 96901, Beijing 100094, China; 3. Beijing Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Remote fault diagnosis (RFD) is of great importance in improving the flight safety, reducing cost of diagnosis and maintenance and establishing a better environment for aircraft maintenance. During the process of remote fault diagnosis, how to make reasonable task decomposition towards complex diagnosis task and how to make the optimal diagnosis decision on redundant or uncertain decisions are vital research issues. To improve the diagnosis efficiency and reliability, the task decomposition and decision approach based on fault tree is proposed. First, RFD task decomposition of multi-resource is described in this paper. Then fault tree based minimal cut set is put forward to decompose the complicate RFD task into some smaller executable subtasks. Finally we present decision-level information fusion approach based on Dempster-Shafer (D-S) evidential theory. The examples analysis are given to demonstrate the effectiveness of our approach.

**Keywords:** remote fault diagnosis; minimal cut set; D-S evidence theory; information fusion

## 0 引言

空军是现代高技术战争中的主体力量, 具有举足轻重的地位。在战争中实时掌握飞机的状态, 让地面随时做好维修的准备, 对减少飞机系统的维修时间、提高作战效率具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。

由于飞机结构和功能的复杂性, 飞机的故障诊断和健康监测一直是国内外航空领域的重点。但是, 当前飞机维修和诊断方法仍然存在一些问题, 例如成本高, 故障定位不准确, 故障识别困难等。因此, 迫切需求为飞机提供更准确, 快速和有效的诊断服务。随着 Internet 技术和飞机故障诊断技术的发展, 为飞机维护的远程故障诊断提供了机会。高质量的远程故障诊断, 可显著减少飞机的维修时间。同时, 可以通过分享经验来改善维修人员技术水平, 降低培训成本。

但是, 目前的远程故障诊断系统仅一对一服务模式有

效, 即仅通过一种诊断资源即完成一项诊断任务。对于一个复杂的故障, 需要多个诊断资源, 因此诊断系统难以高效地完成诊断任务, 并且诊断结果可能是模糊的或不确定的<sup>[3]</sup>。为了提高诊断效率和可靠性, 对复杂故障的诊断任务分解和决策融合已经越来越成为完成远程故障诊断需要解决的关键问题。

在对远程故障诊断策略和系统框架的研究中, 贝叶斯网络作为一种概率模型, 可用于处理不确定知识, 在故障诊断任务分解中应用日趋广泛<sup>[4-6]</sup>, 但不能区分不知道和不确定信息, 而且要求先验概率已知, 因此在实际应用中不可取。文献 [5] 提出 Petri 网分解方法, 它对于不确定信息处理困难, 但在复杂系统中应用有待优化。由于复杂设备在结构和功能上具有层次性和分布性。在此模型基础上, 提出了一种基于故障树最小割集的诊断任务分解方法, 对复杂的诊断任务进行分解。在决策融合算法中, 模糊集理论可解决信息或决策冲突问题, 实现主客观的信息融合, 但其算法原理直观性不好且运算复杂, 在实践中难以实现。为了解决决策问题, 提出了一种基于 D-S 证据理论的决策融合方法, 为快速而又准确的实现远程维护提供技术手段

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2020-04-28。

作者简介: 李俊杰(1986-), 女, 河南周口人, 硕士, 工程师, 主要从事测试与诊断、维修决策等方向研究。

和指导。

### 1 远程故障诊断系统

飞机系统是由很多复杂的机械和电气系统组成，故障信息非常复杂而且引起故障的原因也多种多样。因此需要分层设计故障诊断的过程。通常来说，飞机故障诊断有三种故障诊断层级，即在线故障诊断、地面故障诊断、远程故障诊断，如图 1 所示。对应飞机故障诊断的这三个层级，飞机远程故障诊断系统总体设计架构如图 2 所示。

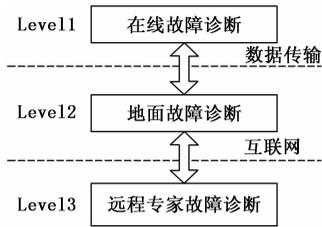


图 1 飞机故障诊断层级

在线故障诊断实时监控飞机的各项参数信息，当参数出现异常，在线诊断提取故障征兆，并向地面诊断协同中心提交采集的数据。地面诊断协同中心是整个系统的核心，负责协调保障整个系统的运行，比如接收飞机数据，处理、系统建模、资源调度和管理、提供远程专家诊断、诊断结果融合等。远程专家包括飞机研发中心，飞机维修部门和制造商。如果地面协同诊断中心无法给出故障解决方案，远程专家诊断将非常有帮助，特别是在情况紧急且故障复杂的情况下。

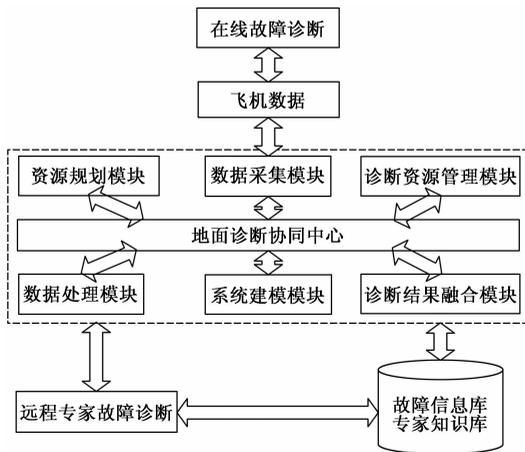


图 2 远程故障诊断系统总体架构

通过网络，把在线诊断数据、远程诊断专家、地面协同诊断系统结合为一体，实现对设备快速、及时、正确的诊断。

### 2 远程故障诊断任务分解

#### 2.1 问题描述

由于飞机故障诊断任务的复杂性和有限的诊断能力和资源，当前故障诊断是微不足道的并且诊断效率不能令人满意。为解决这一问题，远程故障诊断系统需要协同所有

的诊断资源对复杂的诊断任务进行分解。

通常，复杂设备在结构和功能上具有层次性和分布性。因此飞机系统可以分解成多个子系统的串联、并联或串并联，基本形式可以用以下结构表示，如图 3 所示。根据分级系统的这些特性，飞机故障可以分解成多个简单故障的串联、并联或串并联，对于一个复杂的飞机故障诊断任务在功能上可以分解成若干关联度较小的可执行子任务为许多在结构和功能上相对独立更容易诊断的子任务。通过资源调度，将各个子任务分配给匹配的本地/远程诊断资源，从而达到诊断资源的协同和重构。

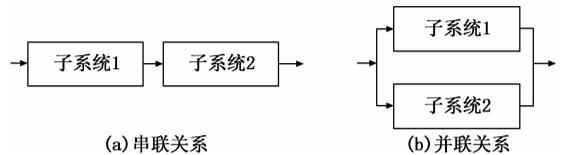


图 3 系统的基本关系

在飞机远程故障诊断过程中，诊断资源完成子任务诊断后返回局部诊断结果到地面诊断协同中心。但是，这些局部诊断结果可能是互补的、冗余的，甚至矛盾的。为了获得最终的诊断结果，需要融合所有局部诊断结果来进一步诊断，诊断融合问题将在第四部分中详细讨论。诊断任务分解的整个过程可以通过系统资源调度来实现，如图 4 所示。

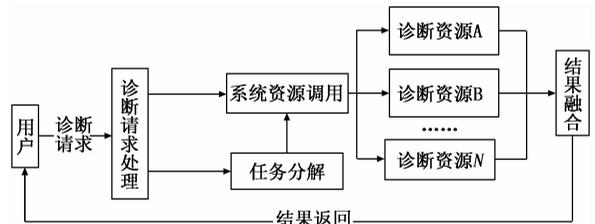


图 4 资源调度结构

普通用户向服务器请求诊断，输入相应的故障征兆，查询在线资源，并请求资源重构，服务器根据用户输入的征兆，进行资源的选择、重组，然后将诊断任务分配给诊断资源，再将诊断结果进行合理的融合，把诊断结果返回给用户。

#### 2.2 任务分解建模

为了建立一个有效的远程故障诊断解决机制，首先需要建立有效的任务分解模型。

对于一个复杂的诊断任务，在功能上分解成若干关联度较小的可执行子任务，并将各个子任务分配给相应的本地/远程诊断资源。故障树已广泛应用于在故障分析、预测和诊断，也是用于故障诊断任务分解的一种主要模型。在研究对象的结构和功能特征的基础上，故障树模型是使用逻辑门表示事件关系的定性因果模型，由构成它的全部底事件的逻辑关系连接而成，用结构函数建立故障树的数学表达式，对故障做出定性分析和定量计算。在故障树理论中，故障征兆是顶层事件，而导致顶层事件的其他事件是中间事件或底层事件。底层事件是仅导致其他事件发生的

故障原因<sup>[8]</sup>。

采用故障树理论对被诊断系统进行建模, 通过故障树的最小割集算法实现诊断任务的分解、分配及系统的重构。如图 5 所示。

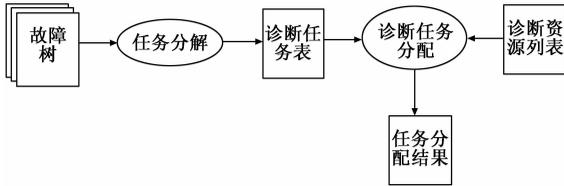


图 5 系统任务分解建模

### 2.3 基于最小割集的任务分解方法

根据故障树理论, 割集是一组底层事件, 当同时发生时肯定会导致顶层事件发生。最小割集是其底层事件无不能再减少的割集<sup>[7]</sup>。最小割集表示导致顶层事件的故障模式, 并指出系统最薄弱的环节。所有最小割集构成了所有可能的故障模式。

在远程故障诊断系统中, 顶层事件是诊断任务, 底层事件是彼此独立的诊断资源, 故障树的最小割集表现为诊断任务的分解和诊断资源的协作。

利用最小割集的性质, 本文提出了基于最小割集的任务分解方法。通过任务分解, 将复杂的诊断任务分解为最小割集形式的诊断子任务, 最小割集里的事件表现为子任务的协作方式。在飞机远程故障诊断中, 每个最小割集都构成一个诊断子任务, 并分配一个匹配的诊断资源进行诊断。通过诊断任务分解并协同调配不同的诊断资源, 可以提高诊断效率。

### 2.4 求解最小割集

本文采用素数上行法求故障树的最小割集, 主要思想是: 令割集总数为  $m$ , 割集中的每个底层事件依次对应一个素数, 记底层事件  $x_i$  对于素数  $n_i$ ; 每个割集对应一个数  $N_i$ ,  $N_i$  是割集所含底层事件对应素数之积。这样, 对  $m$  个割集可以得到一串数  $N_1, N_2, \dots, N_m$ , 假定这串数是由小到大排列的, 就可以把这些数两两相除, 如果  $N_i$  能除尽  $N_j$ , 则所对应的只是割集而不是最小割集, 可以把它删除。如此, 到最后剩下的  $N_i$  所对应割集就等于全部最小割集了。最小割集求解流程如图 6 所示。

以图 7 所示的故障树为例, 通过系统建模, 采取素数上行算法求解得出  $\{X_1\}, \{X_2X_3\}, \{X_4\}$  和  $\{X_5X_6\}$  即为该故障树的三个最小割集。最小割集结果如表 1 所示。

表 1 最小割集求解结果

1	2	3	最小割集
E	X1	X1	X1
	M1	X2X3	X2X3
	M2	X4	X4
		M3	X5X6

## 3 远程故障诊断决策

### 3.1 诊断决策融合问题描述

由于飞机复杂的工况和多种影响因素, 同一故障总是具有不同的表示形式。由不同诊断资源获得的诊断结论总是存在起互补、冗余、冲突和合作的逻辑关系, 这使得诊断决策很困难。在飞机维修的远程故障诊断中, 多源诊断信息的冲突问题解决不好, 则会导致诊断定位不准确、维修人员决策分歧以及不必要的零部件更换、虚高的操作成本等。因此, 有效的决策方法是远程故障诊断得以实用的关键。

信息融合是一种信息处理技术, 它充分利用多源信息来获得对同一对象的更多客观认识。根据融合对象的层次不同, 信息融合具有三种模式: 数据融合, 特征融合和决策融合。在本文, 重点讨论决策级融合。在远程故障诊断中, 决策融合是基于局部诊断结果的, 通过将所有局部决策融合到远程故障诊断系统的诊断结果融合中心中, 最终获得全局决策。

本文提出一种基于 D-S 证据理论的有效决策融合方法, 应用于飞机飞机远程故障诊断。

### 3.2 D-S 证据理论

D-S 理论是在 20 世纪 70 年代后期由 Dempster (由 Shafer 扩展) 引入。

与贝叶斯理论不同, D-S 理论该理论考虑了二值不确定性, 并具有无需先验概率、推理形式简单等优点。这两个优点使 D-S 理论可以更准确地对证据收集的自然推理过程进行建模, 使其逐渐流行, 尤其是处理不确定性问题<sup>[8-10]</sup>。

以下是 D-S 理论<sup>[11]</sup>中的基本定义和规则, 是决策融合所必需的。

#### 1) 识别框架:

识别框架是一组原始假设, 用  $\Theta$  表示。由一些互斥且穷举的元素组成。

#### 2) 质量函数:

质量函数或基本概率分配将一定的置信度分配给识别框架的元素。元素 A 的质量函数  $m(A)$  由 (1) 定义。

$$\begin{cases} m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1] \\ m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq 2^\Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

#### 3) 置信函数:

置信度函数衡量元素 A 作为正确答案的可信度。元素 A 的置信函数  $Bel(A)$  由 (2) 定义。

$$\begin{cases} Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1] \\ Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \end{cases} \quad (2)$$

#### 4) 似然函数:

似然函数衡量元素 A 非假的可信度。元素 A 的似然函数  $Pl(A)$  由 (3) 定义, 并具有属性 (4) 和 (5)。

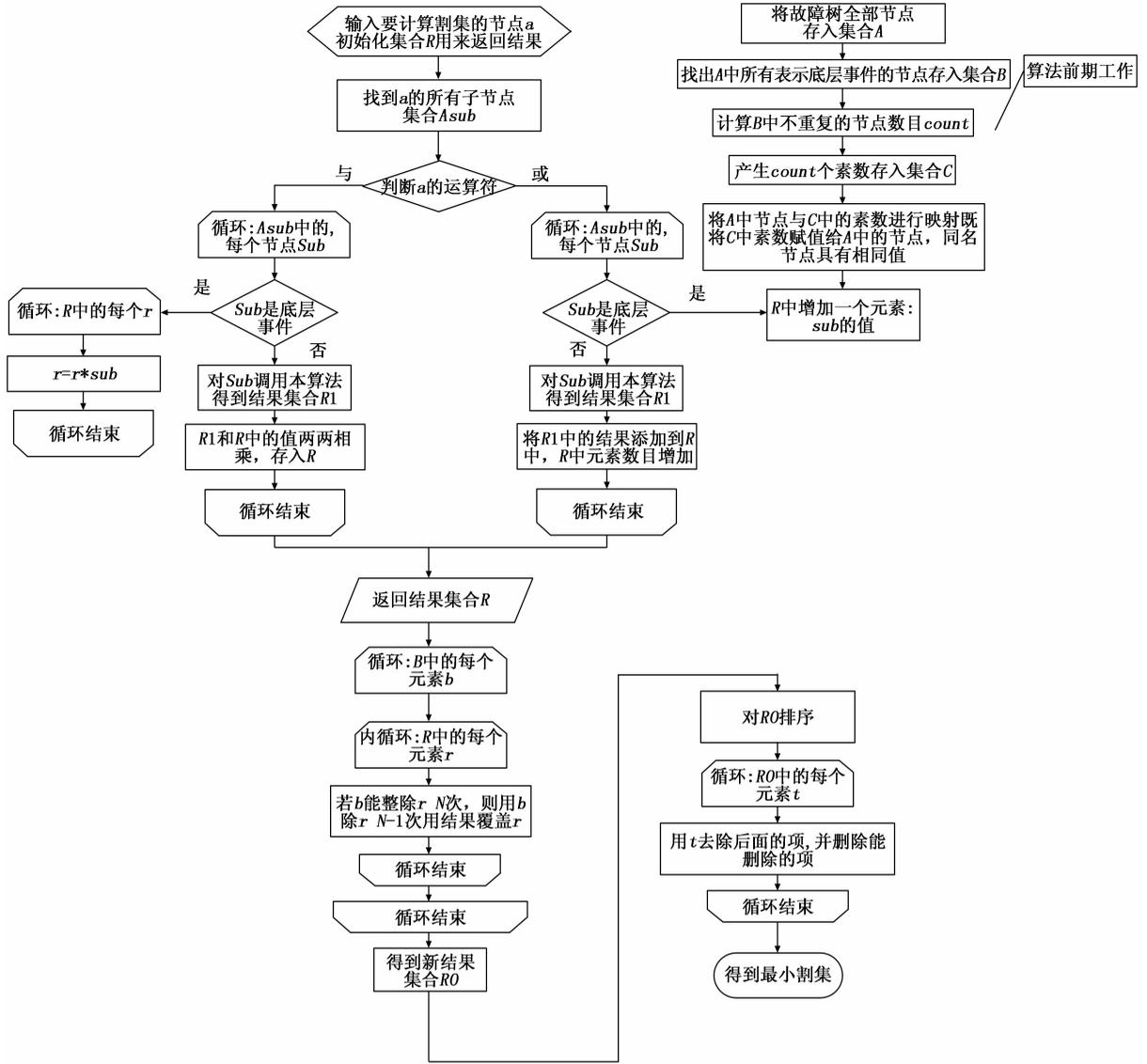


图 6 最小割集求解流程

$$\begin{cases} Pl: 2^\theta \rightarrow [0, 1] \\ Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \end{cases} \quad (3)$$

$$Bel(A) \leq Pl(A), A \subseteq \Theta \quad (4)$$

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (5)$$

5) 信任区间:

元素  $A$  的不确定性由  $[Bel(A), Pl(A)]$  表示。

6) Dempster 合成规则:

证据积累的推理过程将不同来源的依赖证据组合。通常用来合并证据的方法是 Dempster 合成规则, 由 (6) 表示。

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \phi \\ \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1 - K} & A \neq \phi \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$K = \sum_{\cap A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (7)$$

$k$  表示不同证据的冲突系数。如果  $k = 1$ , 则焦元  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 相互矛盾, 将无法通过 (6) 融合质量函数。

### 3.3 基于证据理论的决策融合

证据推理模型的应用过程如图 8 所示。在地面诊断结果融合中心, 有一个决策融合专家组, 可以根据本地诊断结果进行决策级融合。决策融合可以通过以下四个步骤完成。

1) 识别远程故障诊断系统的识别框架:

在飞机的远程故障诊断中, 识别框架包括从不同诊断资源返回的所有局部决策结论。所有可能的故障模式构成了诊断任务识别的框架。

2) 构建质量函数:

诊断专家根据所获取的数据或他们的故障诊断经验和

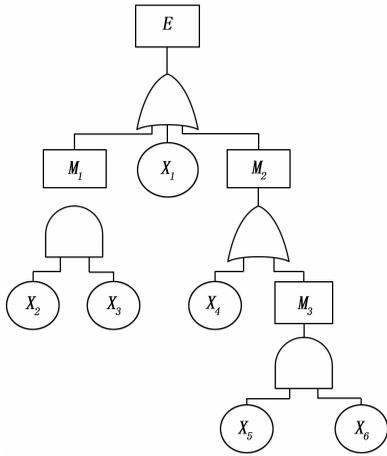


图 7 某故障树结构

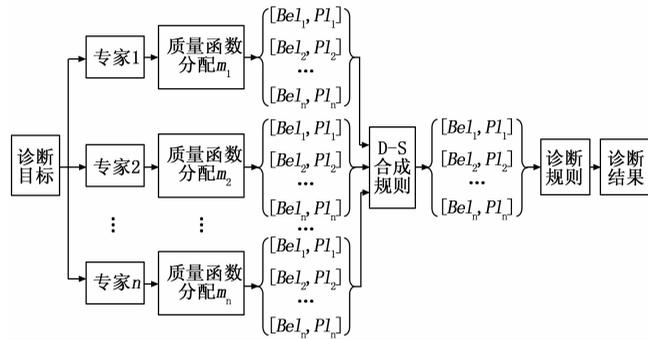


图 8 D-S 决策融合的诊断模型

知识, 在识别框架内为所有故障模式分配质量功能。另外, 将不确定部分的质量函数分配给  $m_i(\Theta)$ 。

3) 证据融合:

每个专家的决策都是一个证据, 使用 D-S 融合规则, 可以将不同专家的决策进行融合, 以此增加目标故障的置信度, 减少其他故障模式的置信度。

4) 诊断决策:

以下 (9) ~ (11) 是本文提出的基于证据理论的决策融合规则。

$$Bel(A) = \max_i \{Bel(A_i)\} \tag{9}$$

$$Bel(A) - Bel(A_i) > \epsilon, Bel(A) - m_i(\Theta) > \epsilon, \epsilon > 0 \tag{10}$$

$$m(\Theta) < \gamma, \gamma > 0 \tag{11}$$

规则 (9) 说明目标故障应具有最大置信度。规则 (10) 确保目标故障和其他故障的置信函数值之间的差异, 不确定性置信函数应大于指定阈值  $\epsilon$ 。规则 (11) 解释不确定性置信函数值应小于阈值  $\gamma$ 。阈值  $\epsilon$  和  $\gamma$  由工程实际经验定义。

在证据积累之后, 置信函数  $Bel(A_i)$  和不确定性置信函数  $m_i(\Theta)$  可以在同一识别框架中获得。根据以上规则, 可以得出诊断结论。

3.4 决策融合实例分析

为了验证所提方法的有效性, 基于航空电子系统的局部诊断结果, 进行了案例分析。识别框架为  $\Theta = \{A, B, C, D, E\}$ 。A 代表液压系统的故障, B 代表气动系统故障, C 代表无线电制导系统故障, D 代表电子飞行仪表系统 (EFIS) 故障, E 代表空中数据惯性参考系统故障 (ADIRS)。由三名专家在地面诊断结果融合中心融合本地诊断结果。质量函数值由专家计算, 如表 2 所示。根据经验, 令  $\epsilon = 0.3, \gamma = 0.1$ 。

表 2 质量函数分配

专家	$m(A)$	$m(B)$	$m(C)$	$m(D)$	$m(E)$	$m(\Theta)$	诊断结果
1	0.094	0.234	0.314	0.175	0.056	0.127	不确定
2	0.055	0.108	0.477	0.133	0.099	0.133	不确定
3	0.153	0.124	0.414	0.106	0.112	0.091	不确定

从表 2 中可以看出, 不同故障模式的置信函数值的差异并不总是大于  $\epsilon$ 。同时, 专家 1 和专家 2 给出的  $m(\Theta)$  大于  $\gamma$ 。因此, 诊断结果是不确定的。通过证据组合, 计算出故障模式的融合置信函数值, 如表 3 所示。从表中可以看出, C 的置信函数值最大, 并且随着不同证据的组合, 评估精度与可信度越高。相反, 其他故障和  $m(\Theta)$  的值越来越小, 融合结果完全满足诊断决策的基本规则。因此可以得出结论, 诊断系统的故障是 C, 即无线电导航系统的故障。

表 3 基于 D-S 证据理论的融合结果

专家	识别框架中诊断目标的置信区间 [ $Bel(i), Pl(i)$ ]					$m(\Theta)$	Diagnosis results
	$m(A)$	$m(B)$	$m(C)$	$m(D)$	$m(E)$	$m(\Theta)$	诊断结果
1&2	0.056 0.092	0.156 0.192	0.555 0.591	0.1400 0.176	0.057 0.094	0.036	C
2&3	0.074 0.095	0.084 0.105	0.648 0.670	0.097 0.119	0.075 0.096	0.021	C
1&3	0.106 0.128	0.159 0.182	0.521 0.543	0.129 0.151	0.063 0.085	0.022	C
1&2 &3	0.047 0.054	0.090 0.097	0.735 0.742	0.083 0.090	0.038 0.044	0.007	C

从表中结果可见, 基于 D-S 理论的融合方法提高了目标故障 C 的置信函数值, 同时降低了其他故障模式的置信值, 大大降低了诊断结果的不确定性, 从而提高远程故障诊断的可靠性。

4 结束语

以提高飞机维修远程故障诊断复杂诊断任务的诊断效率和可靠性为目的, 本文提出了一种基于故障树最小割集的任务分解方法和基于 D-S 证据理论的决策融合方法。还提供了飞机维修的远程故障诊断系统结构。通过求解故障树的最小割集的示例 (图 7) 以及航空电子系统的案例分析证明了所提出方法的有效性。