

基于案例模糊的无人机故障诊断系统^①

季文韬, 陈汶滨, 张平

(西南石油大学 计算机学院, 成都 610500)

摘要: 无人机是一个结构复杂的机电一体化系统, 为了满足故障诊断的需求, 以模糊数学理论为基础, 并将案例推理融合到模糊推理机中。重点论述如何确定模糊关系矩阵和案例式推理的原理, 详细介绍了案例匹配流程, 提出了一种新的模糊推理机制, 并最终设计实现系统功能, 提高了无人机故障诊断效率、准确度、可靠性。

关键词: 模糊推理; 案例式推理; 模糊关系矩阵

Case-Based Fuzzy Fault Diagnosis System for UAV

Ji Wen-Tao, Chen Wen-Bin, Zhang Ping

(School of Computer Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: UAV is a complex mechatronic system, in order to meet the needs of fault diagnosis, based on the theory of fuzzy mathematics, and integrate case-based reasoning into fuzzy inference machine. This paper focuses on how to determine the fuzzy relationship matrix and the principle of case-based reasoning, described in details of the case matching process, put over a new fuzzy inference mechanism, ultimately, design and implementation of system functions. It is shown from application results that this method improve the diagnostic process efficiency, accuracy and reliability.

Keywords: fuzzy reasoning; case-based reasoning; fuzzy relationship matrix

1 引言

无人机(UAV)是近年来重点发展的高技术装备。无人机系统是航空技术、电子技术等高新技术的机电一体化综合系统, 技术复杂、设计的知识面广, 引起故障的原因比较多, 而且这些原因和故障之间又相互影响, 使得这些故障的情况比较复杂。传统人工智能单纯的依靠模糊判别、故障树分析、人工神经网络等诊断方法, 不能有效地解决带有复杂性和模糊性的故障机理^[1]。因此, 基于案例相似以及模糊问题的推理越来越受到重视^[2]。根据无人机的具体特点和故障诊断方法的特点, 将案例式推理和模糊推理理论引入到经典的专家系统诊断方法中, 既充分应用了专家经验知识, 易于案例的扩充和修改, 又对解决故障所体现出现象的不确定性的问题得到了改进。案例模糊推理具有简化完善知识获取、提高问题求解效率、加速问

题求解、改善求解质量、完善求解结论和进行知识积累等优点。

2 模糊关系矩阵的知识表示

模糊集合可以有任意数量的归属函数, 因此模糊集合可应用于开发难以精确化、复杂的专家系统, 以提供更大的应用弹性及错误容忍性。本文通过隶属函数和模糊关系矩阵来描述故障原因与征兆之间的关系。

2.1 模糊集和模糊关系矩阵的数学表达^[3]

设有两个论域, 即故障征兆论域 U 和故障原因论域 V

$$U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$$

其中, m 为故障征兆总数。各元素 x_i 的隶属度组成的故障征兆向量

^① 收稿时间:2010-04-28;收到修改稿时间:2010-07-10

$$X = [\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_m}]$$

$$V = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

其中 n 为故障原因总数。各元素 y_i 的隶属度 μ_{y_i} 模糊故障原因向量

$$Y = [\mu_{y_1}, \mu_{y_2}, \dots, \mu_{y_n}]$$

两论域个之间存在着某种模糊关系，可由模糊关系矩阵 R 来表示

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

如果已知模糊关系矩阵 R 和故障征兆向量 X ，则可求出模糊原因向量 Y ，本系统采用的运算模型为：

$$Y = X \cdot R \Leftrightarrow \mu_{y_j} = \sum_{i=1}^m x_i r_{ij}, \quad j=1,2,3,\dots,n$$

其中， $\sum_{i=1}^m r_{ij} = 1, 0 \leq r_{ij} \leq 1, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

1.2 故障征兆向量的确定

对于采集到的无人机各性能参数，在数据转换为事实的过程中，采用对精确量进行模糊化^[4]。将语言变量分为以下五种：

very-high, high, normal, low, very-low

分别对应隶属度区间为：[1.0, 0.80], [0.80, 0.60], [0.60, 0.40], [0.40, 0.20], [0.20, 0]

例如，供油系统出现的故障征兆为：油路不畅、点火系统不正常、油量正常，根据系统以上表述，量化用户的模糊回答，则可得到征兆向量为(0.65, 0.80, 0)。

1.3 模糊矩阵元素的确定

模糊函数的隶属程度需要确定，对隶属函数的确定过程本质应是客观的，但也需要一定的专家经验，对于不同的情况和应用隶属函数的确定都有其特定的方法，而这就有赖于对具体问题的分析与研究，通过对该领域知识以及大量的定性信息确定隶属函数。每个故障参数对每个变量都设定一个模糊隶属度，表示参数和变量之间的模糊关系，本系统采取由经验数据和专家经验共同确定的方法^[5,6]，具体确定方法如下：

以故障征兆“发动机摆动加剧”故障原因之一“油温过高”为例。

1) 根据经验数据建立的对于变量 high 经验数据隶属函数为：

$$f(x) = \begin{cases} 0.0018x + 0.396 & x \in [0, 80] \\ 0.012x - 0.420 & x \in [80, 120] \\ 1 & x = 120 \end{cases}$$

若油温为 100 度，则经验隶属度为 0.78。

2) 采用专家优先序数法，油温为 100 度时，得出多名专家的专家经验隶属度为 $f(y)=0.90$

3) 设专家经验权重为 w_1 ，经验数据权重为 w_2 ，其中 $w_1, w_2 \geq 0$ ，且 $w_1 + w_2 = 1$ 。则由经验数据及专家经验的综合模糊隶属度为 $r = w_1 * f(x) + w_2 * f(y)$ 。若 $w_1=0.3, w_2=0.7$ ，则综合模糊隶属度为 0.816，油温异常，写入矩阵。

2 案例式推理

2.1 案例式推理的原理

案例式推理是故障诊断专家系统的核心。系统运行时，首先将案例库数据读取到综合数据区，当有故障现象产生时，系统接口捕获故障现象，将故障现象放入内存工作区。根据系统输入的初始不确定性信息，利用模糊综合知识库对用户输入的特征进行案例相似度匹配，匹配成功，将新案例加入案例库；匹配失败则根据已有事实进行模糊推理。

2.2 案例检索技术

案例检索技术是诊断系统的中心环节，本系统采取最近邻策略进行案例检索。从案例库中检查目标案例与案例库中的案例的匹配程度，找到一个或多个与目标案例最相似的案例。因此相似性匹配算法是案例检索的关键；用欧氏距离检测算法计算匹配程度的加权，依此决定最佳匹配案例，案例检索应达到两个目标^[6]：(1)检索出来的案例应尽可能少；(2)检索出来的案例应尽可能与当前案例相匹配。

3 系统的结构及工作流程

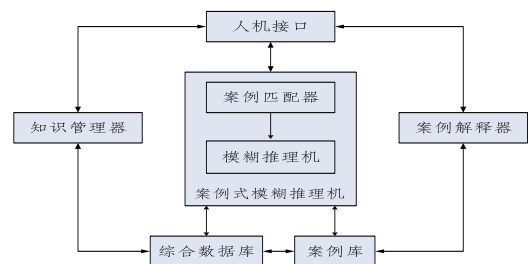


图 1 系统的结构模型

无人机故障诊断专家系统主要由案例匹配器、模糊推理器、知识管理器、案例解释器四大部件组成。(结构图参见图 1)。

3.1 案例匹配器

启动推理机，将案例库数据读取到综合数据库中。当有故障现象产生时，根据用户输入的信息，从案例库中取出已有的案例，进行案例匹配，选出所有满足用户阈值要求的成功匹配的案例。采用基于权值的案例相似度推理方法，将成功匹配的案例号及确信度传播值等信息传送给驱动解释部件，并添加新案例到案例库^[7]。案例匹配器的工作流程如图 2 所示。

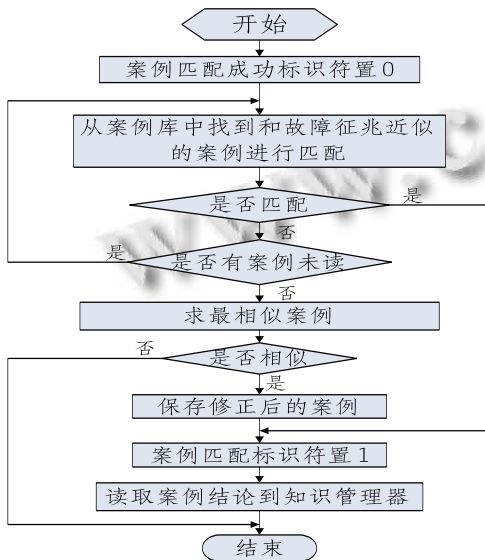


图 2 案例匹配器工作流程

3.2 模糊推理器

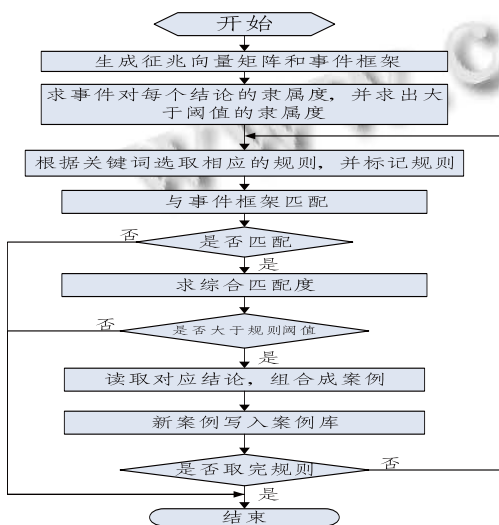


图 3 模糊推理器工作流程

对于在案例匹配中失败的事实，根据综合数据库中已有的事实从知识库中取出符合要求的规则，对已有事实进行模糊匹配，选出综合匹配度最大的事实，采用基于隶属度表示的不确定性推理方法和按匹配度排序的冲突消解策略，计算确信度传播值^[5]，将成功匹配的规则和匹配序号等标记及确信度传播值等信息传送给案例解释器、知识管理器，并把事实组织成案例保存在案例库中。模糊推理器的工作流程如图 3 所示。

3.3 知识管理器

知识管理器负责对匹配结果进行案例重构和案例保存等工作，对案例匹配器送来的匹配成功案例作为新的事实加入综合数据库和案例库中，并将事实的确信度等信息传送到案例库。否则，将案例以及确信度传播值等信息传送给数据库，并保存在综合数据库和案例库中。

3.4 案例解释器

案例解释器是对成功匹配的案例根据用户的要求进行案例解释。它通过黑板机制向用户反馈案例推理机匹配的过程，负责记录成功匹配的案例传送给案例解释器的规则模糊化部件和解释说明部件，并且向驱动故障征兆输入部件发送输入案例的消息驱动。

4 实例验证

某次故障有以下 3 个故障征兆分别为： x_1 (升降舵机位置反馈异常)， x_2 (飞控器 AD 采样结果异常)， x_3 (升降舵机左右摆动加剧)。可能由以下 4 个主要原因引起： y_1 (升降舵机位置反馈对应通道信号调理电路故障)， y_2 (升降舵机机械故障)， y_3 (升降舵机驱动电路故障)， y_4 (升降舵机信号同步器故障)。

根据无人机的实际运行经验资料和专家经验及无人机运行机理进行分析，确定每一征兆 x_i 分别对于每个原因 y_j 的隶属度 $\mu_{y_j}(x_i)$ ， $i = 1, 2, 3$ ； $j = 1, 2, 3, 4$ 。可得到模糊关系矩阵如表 1 所示。

表 1 故障诊断模糊关系矩阵

故障征兆 i	故障原因 j			
	升降舵机位置反馈对应通道信号调理电路故障	升降舵机机械故障	升降舵机驱动电路故障	升降舵机信号同步器故障
升降舵机位置反馈异常	0.60	0.35	0	0.15
飞控器 AD 采样结果异常	0	0.70	0.30	0
升降舵机左右摆动加剧	0.24	0.75	0	0

设某无人机出现故障的征兆有 2 个： x_1, x_3 ，即升降舵机位置反馈异常，升降舵机左右摆动加剧。

首先，将两个故障征兆输入，和案例库中未匹配成功的案例进行相近性匹配，发现案例库中没有满足阈值要求的相似案例，匹配不成功，系统进入模糊匹配环节。

根据确定征兆向量的方法确定：此时征兆向量取 $X = (0.60, 0, 0.85)$

其次，运用模糊运算 $Y = X \cdot R$ 可得到故障原因向量

$$Y = X \cdot R = (0.60, 0, 0.85) \begin{bmatrix} 0.60 & 0.35 & 0 & 0.15 \\ 0 & 0.70 & 0.30 & 0 \\ 0.24 & 0.75 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.56, 0.85, 0, 0.09)$$

然后，根据诊断规则，本系统采用的分级取阈值向量为 $\lambda = (0.30, 0.60, 0.05, 0.15)$ 通过与阈值向量比较^[8]，得出 $\mu_{y_1} = 0.56 > \lambda_1$ ， $\mu_{y_2} = 0.85 > \lambda_2$ ， $\mu_{y_3} = 0 < \lambda_3$ ， $\mu_{y_4} = 0.09 < \lambda_4$

即在无人机运行过程中，可认为出现上述故障征兆的原因为 y_1, y_2 。即升降舵机位置反馈对应通道信号调理电路故障、升降舵机机械故障。与实际诊断结果基本相符。



图 4 实例的诊断结果

5 结论

为了解决结构复杂的无人机系统，采用案例推理与模糊推理技术相结合的推理机制，构建了基于案例和模糊推理的混合推理模型，提出了一种新的推理机制，并实现了故障诊断专家系统的功能，可以对无人机出现的故障进行高效快速的故障诊断，上述思想方法和推理机制发展了模糊推理技术，为了把案例推理和模糊技术更好的融合，还需要对案例模糊的知识检索方法进行更进一步的优化。

参考文献

- 1 尹朝庆,尹浩.人工智能专家系统.北京:水利水电出版社, 2002. 151-167.
- 2 吴今培,肖建华.智能故障与专家系统.北京:科学出版社, 1997.
- 3 李士勇.工程模糊数学及应用.哈尔滨:哈尔滨工业出版社, 2004.
- 4 张养利.模糊故障诊断技术及其在液压系统中的应用.机车车辆工艺, 1999,(6):31-33.
- 5 Sun B, Xu LD. Scenario-based knowledge representation in case-based reasoning systems. Expert Systems, 2003,20(2): 92-99.
- 6 刘有才,刘增良.模糊专家系统原理与设计.北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- 7 张欢,邓志良.基于模糊推理的摊铺机故障诊断专家系统.微计算机信息,2007,(4):221-223.
- 8 李鸣,李辉.某武器装备故障诊断专家系统的设计与实现.计算机工程,2004,30(23):121-122.