

故障诊断专家系统的可拓知识表示和匹配研究

文天柱¹, 许爱强², 汪定国²

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001)

摘要: 知识表示和匹配是设计专家系统的核心问题; 首先通过引入基元理论, 实现了产生式、语义网络、框架和案例的基元表示, 建立了故障诊断专家系统的可拓知识表示模型, 该模型包括激励基元、测量基元和结论基元 3 个部分; 然后提出了先匹配激励基元再匹配测量基元的可拓知识匹配步骤, 并构建了属性精确值和区间值混合的匹配度计算公式; 最后以某型大气数据计算机的测试数据为例, 与建立的可拓知识进行匹配, 诊断结果与实际情况相符。

关键词: 可拓; 故障诊断; 专家系统; 知识表示; 知识匹配

Study on Extension Knowledge Representation and Matching of Fault Diagnosis Expert System

Wen Tianzhu¹, Xu Aiqiang², Wang Dingguo²

(1. Graduate Student's Brigade; 2. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Knowledge representation and matching are key problems of expert system. By inducting basic-element theory, the basic-element representation of production, semantic network, frame and case are fulfilled, and extension knowledge representation model of diagnostic expert system is set up, which contains source, test and result three basic-element. The matching process needs two steps, first match source basic-element, second match test basic-element. At last, the test data of an air data computer is used to match the extension knowledge. The results are consistent with the fact.

Key words: extension; fault diagnosis; expert system; knowledge representation; knowledge matching

0 引言

故障诊断专家系统 (Expert System, ES) 是利用维修保障专家的经验、技术和推理方法等知识, 解决某个 (些) 对象故障诊断方面问题的计算机程序, 具有持久性好、知识更新丰富和可靠性强等优点。主要包括知识库、推理机、解释器、人机交互接口 4 个部分, 其中知识库是整个专家系统的核心, 涉及数据采集、知识获取、知识表示和知识匹配等多个方面^[1]。

知识表示是对知识的一种描述或一种约定, 是计算机可以接受的用于描述知识的数据结构。在故障诊断专家系统中使用较多的知识表示方法有: 产生式表示法、语义网络表示法、框架表示法和案例表示法等。这些知识表示各有各的特点, 如产生式的自然性、语义网络的层次性、框架的通用性、案例的复用性等, 但它们也有各自的局限性, 如产生式表达深层知识非常困难, 语义网络的设计意图难以理解, 框架的固定性使许多表达结果与原型不符以及案例的检索效率低等。将基元理论与产生式、语义网络、框架和案例等经典知识表示方法相结合, 可以克服经典知识表示方法的某些缺点, 且较为规范、便于操作, 更重要的是利用基元的可拓性可以为专家系统知识库中深

层知识的获取和处理提供新的思路。

文献 [2-3] 分别研究了基于 Web 的可拓专家系统和基于可拓规则的故障诊断专家系统推理机, 但是都没有对可拓知识表示进行系统、深入的研究, 而且在知识匹配过程中没有考虑属性精确值和区间值混合的情况, 针对上述问题本文对故障诊断专家系统的可拓知识表示和匹配进行研究。

1 基元理论

基元是可拓学的逻辑细胞, 是物元、事元和关系元的统称^[4]。

定义 1: 物 O_m , n 个特征 $c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{mn}$ 及 O_m 关于 c_{mi} ($i = 1, 2, \dots, n$) 对应的量值 v_{mi} ($i = 1, 2, \dots, n$) 所构成的阵列

$$M = \begin{bmatrix} O_m, & c_{m1}, & v_{m1} \\ & c_{m2}, & v_{m2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{mn}, & v_{mn} \end{bmatrix} = (O_m, C_m, V_m)$$

称为 n 维物元。

定义 2: 动作 O_a , n 个特征 $c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{an}$ 及 O_a 关于 c_{ai} ($i = 1, 2, \dots, n$) 取得的量值 v_{ai} ($i = 1, 2, \dots, n$) 所构成的阵列

$$A = \begin{bmatrix} O_a, & c_{a1}, & v_{a1} \\ & c_{a2}, & v_{a2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{an}, & v_{an} \end{bmatrix} = (O_a, C_a, V_a)$$

称为 n 维事元。

定义 3: 关系 O_r , n 个特征 $c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rn}$ 及 O_r 关于 c_{ri} ($i = 1, 2, \dots, n$) 取得的量值 v_{ri} ($i = 1, 2, \dots, n$) 所构成的阵列

收稿日期: 2013-12-27; 修回日期: 2014-02-18。

基金项目: 总装武器装备预研基金项目 (9140A27020212JB14311)。

作者简介: 文天柱 (1987-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事复杂装备故障诊断和健康管理 (PHM) 方向的研究。

许爱强 (1963-), 男, 青岛即墨人, 博士生导师, 主要从事复杂装备自动测试集成和故障诊断方向的研究。

$$R = \begin{bmatrix} O_r, & c_{r1}, & v_{r1} \\ & c_{r2}, & v_{r2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m, & v_m \end{bmatrix} = (O_r, C_r, V_r)$$

称为 n 维关系元。

2 可拓知识表示

可拓知识表示是指将基元理论与经典的知识表示方法相结合, 提供统一、规范的知识描述方法。下面分别介绍产生式、语义网络、框架和案例的基元表示方法。

2.1 产生式的基元表示方法

产生式是专家系统中应用最多的一种知识表示方法, 基本形式为 $P \rightarrow Q$ 也可记为 $\text{if } P \text{ then } Q$, 其含义是如果前件 P 被满足, 则可推出结论 Q 或执行 Q 所规定的操作^[5-6]。如果将产生式规则中前件节点和后件节点换成基元, 就可以得到产生式的基元表示。

例如某型大气数据计算机电源组合诊断规则 R_1 用产生式为: $\text{If 提供 } 28 \text{ V 直流电源和 } 115 \text{ V、} 400 \text{ Hz 的交流电源, 并且测试点 REF1、REF2、REF3 电压幅度都大于 } 9.5 \text{ V 小于 } 10.5 \text{ V, then 电源组合正常。}$

采用基元理论将产生式用激励基元 M_1 , 测量基元 M_2 和诊断基元 M_3 表示, 得到诊断规则 R_1 产生式的基元表示为

$\text{if } M_1 \cap M_2 \text{ then } M_3,$

$$\text{其中: } M_1 = \begin{bmatrix} \text{激励, 直流幅度, } 28 \text{ V} \\ \text{交流幅度, } 115 \text{ V} \\ \text{交流频率, } 400 \text{ Hz} \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \text{测量, REF1 幅度, } (9.5, 10.5) \\ \text{REF2 幅度, } (9.5, 10.5) \\ \text{REF3 幅度, } (9.5, 10.5) \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \text{电源组合, 诊断结果, 正常} \\ \text{维修策略, 保养} \end{bmatrix}.$$

2.2 语义网络的基元表示方法

语义网络是用于表示命题信息的一种经典知识表示方法, 由节点和有向边组成的一种有向图, 其中节点表示事物、对象、概念、行为、性质和状态等; 有向边表示节点之间的某种联系, 边上的标记是边的语义。

例如某型大气数据计算机离散量的诊断规则 R_2 用语义网络表示如图 1 所示。

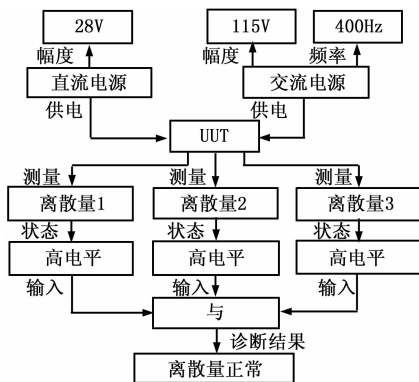


图 1 离散量测试语义网络

采用基元理论将语义网络用激励基元 M_4 , 测量基元 M_5 和

结论基元 M_6 表示, 得到诊断规则 R_2 语义网络的基元表示为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} \text{离散量, 激励, } M_4 \\ \text{测量, } M_5 \\ \text{结论, } M_6 \end{bmatrix},$$

$$\text{其中: } M_4 = \begin{bmatrix} \text{激励, 直流幅度, } 28 \text{ V} \\ \text{交流幅度, } 115 \text{ V} \\ \text{交流频率, } 400 \text{ Hz} \end{bmatrix},$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} \text{测量, 离散量 1, 高电平} \\ \text{离散量 2, 高电平} \\ \text{离散量 3, 高电平} \end{bmatrix},$$

$$M_6 = \begin{bmatrix} \text{离散量, 诊断结果, 正常} \\ \text{维修策略, 保养} \end{bmatrix}.$$

2.3 框架的基元表示方法

框架是一种模块化结构, 一个框架一般有若干个槽、一个槽有一个槽值或若干个侧面, 而一个侧面又有若干个侧面值。其中槽值和侧面值可以是数值、字符值、布尔值, 也可以是一个动作或过程, 甚至还可以是另一个框架的名字。

例如某型大气数据计算机数字量的诊断规则 R_3 用框架表示为:

框架名: <数字量故障诊断>

类属: <大气数据计算机故障诊断>

供电: 直流: 幅度: 28 V

交流: 幅度: 115 V

频率: 400 Hz

测量: 气压高度: 标称值: 1 200 m

范围: (11 980, 12 020) m

升降速度: 标称值: 50 m/s

范围: (52, 58) m

真空速: 标称值: 2 550 km/h

范围: (2 540, 2 560) km/h

诊断结果: 正常

采用基元理论将框架用激励基元 M_7 , 测量基元 M_8 和结论基元 M_9 表示, 得到诊断规则 R_3 框架的基元表示为:

$$R_3 = \begin{bmatrix} \text{数字量, 激励, } M_7 \\ \text{测量, } M_8 \\ \text{结论, } M_9 \end{bmatrix},$$

$$\text{其中: } M_7 = \begin{bmatrix} \text{激励, 直流幅度, } 28 \text{ V} \\ \text{交流幅度, } 115 \text{ V} \\ \text{交流频率, } 400 \text{ Hz} \end{bmatrix},$$

$$M_8 = \begin{bmatrix} \text{测量, 气压高度, } (11\ 980, 12\ 020) \text{ m} \\ \text{升降速度, } (52, 58) \text{ m/s} \\ \text{真空速, } (2\ 540, 2\ 560) \text{ km/h} \end{bmatrix},$$

$$M_9 = \begin{bmatrix} \text{数字量, 诊断结果, 正常} \\ \text{维修策略, 保养} \end{bmatrix}.$$

2.4 案例的基元表示方法

案例是形式问题求解结果的子案例的关联集合, 是能导致特定结果的一系列特征属性的集合。案例至少应该包括问题描述和解描述两个部分, 即表示成一个有序对的形式 (问题描述, 解描述), 在故障诊断专家系统中经常将故障案例表示成 (测试条件, 故障分析, 诊断结果, 维修策略) 4 元组^[7]。

例如某型大气数据计算机模拟量的诊断规则 R_4 用案例表示为:

【测试条件】给某型大气数据计算机输入 1 V 和 10 V 的电压，并将极限参数设为 ±11。

【故障分析】读取总线上的迎角和侧滑角输出值，要求迎角在区间 (-9, -8) 范围内，侧滑在 (13, 14) 范围内。

【诊断结果】模拟量正常。

【维修策略】保养。

采用基元理论将案例用激励基元 M_{10} ，测量基元 M_{11} 和结论基元 M_{12} 表示，得到诊断规则 R_4 框架的基元表示为：

$$R_4 = \begin{bmatrix} \text{模拟量, 激励, } M_{10} \\ \text{测量, } M_{11} \\ \text{结论, } M_{12} \end{bmatrix},$$

其中： $M_{10} = \begin{bmatrix} \text{激励, 电压 1, 1 V} \\ \text{电压 2, 10 V} \\ \text{极限参数, } \pm 11 \end{bmatrix},$

$$M_{11} = \begin{bmatrix} \text{测量, 迎角, } (-9, -8) \\ \text{侧滑角, } (13, 14) \end{bmatrix},$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} \text{模拟量, 诊断结果, 正常} \\ \text{维修策略, 保养} \end{bmatrix}。$$

综上所述，得到故障诊断专家系统可拓知识表示的一般模型为：

$$R = \begin{bmatrix} UUT, \text{激励, } M_s \\ \text{测量, } M_l \\ \text{结论, } M_r \end{bmatrix},$$

其中： M_s 表示激励基元， M_l 表示测量基元， M_r 表示结论基元。

3 可拓知识匹配

可拓知识的匹配是指将被测对象的测试特性与可拓知识进行比较，从而得出被测对象的诊断结果^[8-9]。

3.1 匹配步骤

根据故障诊断专家系统可拓知识的一般模型可知，可拓知识包括激励、测量和结论 3 个子基元，其中激励基元表示进行诊断所要进行的前提准备，在有些情况下可以省略；测量基元表示诊断过程中进行的测试活动；结论基元表示诊断的结果，并尽可能给出维修策略。激励基元和测量基元需要进行匹配，匹配的具体步骤为：

- (1) 初始化，将所有专家知识转化成基元表示形式；
- (2) 获得当前诊断对象的测试数据，即可拓知识中测量基元各属性的测量值；
- (3) 在知识库中的获取一条可拓知识，并用诊断对象的测试数据与其进行匹配；
- (4) 先匹配可拓知识的激励基元，如果匹配成功则进行下一步，否则返回 (3)；
- (5) 再匹配可拓知识的测量基元，如果匹配成功则进行下一步，否则返回 (4)；
- (6) 可拓知识匹配成功后，给出结论基元中的诊断结果和维修策略，并返回 (3)；
- (7) 遍历知识库中所有可拓知识后算法结束。

先对激励基元进行匹配，再对测试基元进行匹配，可以提高可拓知识的匹配效率，缩短诊断用时。

3.2 匹配度计算

激励基元和测量基元是否匹配成功需要通过计算匹配度确

定。匹配度是对激励基元和测量基元匹配结果的定量描述，根据基元中属性值的不同分别采用欧式距离和可拓距进行匹配，针对属性值是精确值的情况，采用欧式距离匹配，其计算表达式为：

$$d = |v - v'| \quad (1)$$

其中： v 和 v' 分别表示可拓知识和实际测量的精确属性值。如果 $d = 0$ 表示可拓知识中该属性匹配成功，否则匹配失败。

针对属性值是区间值的情况，采用可拓距匹配，其计算表达式为：

$$\rho(v', V) = \left| v' - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2}$$

其中： v' 表示实际测量的属性值， $V = \langle a, b \rangle$ 表示可拓知识中属性的区间值， $\langle a, b \rangle$ 即可以是开区间，也可以是闭区间，还可以是半开半闭区间。对可拓距的计算表达式进行化简得到

$$\rho(v', V) = \begin{cases} a - v', v' \leq \frac{a+b}{2} \\ v' - b, v' \geq \frac{a+b}{2} \end{cases} \quad (2)$$

根据公式 (2) 可以得到可拓距的 3 条性质：

- (1) 点 $v' \in V$ ，且 $v' \neq a, b$ 的充要条件是 $\rho(v', V) < 0$ ；
- (2) 点 $v' \notin V$ ，且 $v' \neq a, b$ 的充要条件是 $\rho(v', V) > 0$ ；
- (3) 点 $v' = a$ 或 $v' = b$ 的充要条件是 $\rho(v', V) = 0$ ；

根据可拓距的性质可知，如果 $\rho(v', V) < 0$ 表示属性的测量值在要求区间值的范围内，该属性匹配成功；如果 $\rho(v', V) > 0$ 表示属性的测量值在要求区间值的范围外，该属性匹配失败；如果 $\rho(v', V) = 0$ 表示属性的测量值正好是要求区间值的边界，该属性勉强匹配成功。

给出可拓知识中激励基元或测试基元的一般形式：

$$\begin{bmatrix} O, & c_1, & v_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m, & v_m \\ & c_{m+1}, & V_{m+1} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{m+n}, & V_{m+n} \end{bmatrix}$$

其中： $v_i, i = 1, 2, \dots, m$ 表示属性的精确值， $V_i, i = m + 1, m + 2, \dots, m + n$ 表示属性的区间值。若实际测量的属性值是 $v'_i, i = 1, 2, \dots, m + n$ ，结合公式 (1)、(2)，得到可拓知识匹配度的一般计算公式为：

$$D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i + \frac{1}{n} \sum_{i=m+1}^{m+n} \rho_i \quad (3)$$

其中： $d_i, i = 1, 2, \dots, m$ 表示属性精确值的欧式距离， $\rho_i, i = m + 1, m + 2, \dots, m + n$ 表示属性区间值的可拓距。通过分析可知，如果 $D \leq 0$ 则可拓知识匹配成功；如果 $D > 0$ 则可拓知识匹配失败。

4 应用实例

大气数据计算机是经过解算装置或计算机的运算输出大气数据信息的系统，由传感器部分、计算机部分和知识部分组成。大气数据信息包括自由气流的静压、动压、静温、高度、高度偏差、高度变化率、指示空速、真空速、马赫数、马赫数变化率及大气密度等参数，它是飞机发动机、自动飞行控制系

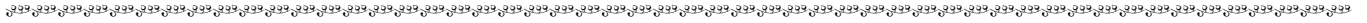
(下转第 1686 页)

5 结束语

本文结合云计算技术, 详细介绍了基于云计算的云测试系统的结构模型框架, 使用一种基于动态优先权的高优先权先调度算法实现了系统的调度子模块。通过 Matlab 中的测试实验可得, 与经典的 FCFS 调度算法相比该调度算法可以显著提高对软件系统的测试效率, 降低测试成本。在云测试系统中, 其他模块的实现以及系统的安全性是下一步工作的重点, 应对该技术进一步研究。

参考文献

[1] Whittaker J A. 探索式软件测试 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
 [2] Chan W K, Mei L J, Zhang Z Y. Modeling and testing of cloud applications [A]. Proceedings of Services Computing Conference [C]. Singapore: IEEE Press, 2009: 111 - 118.
 [3] Parveen T, Tilley S. When to migrate software testing to the Cloud [A]. Proceedings of Software Testing, Verification, and Validation Workshops [C]. Paris: IEEE Press, 2010: 424 - 427.
 [4] Banzai T, Koizumi H, Kanbayashi R. D- Cloud: design of a software testing environment for reliable distributed systems using cloud computing technology [A]. Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing [C]. Melbourne: IEEE Press, 2010. 631 - 636.



(上接第 1672 页)

统、导航系统、空中交通管制系统及飞行驾驶仪表显示、警告系统等不可缺少的信息。大气数据信息的准确性对提高飞行安全和降低寿命周期费用起着重要作用^[10]。运用某型自动测试系统 (Automatic Test System, ATS) 对某型大气数据计算机进行测试, 得到某次测试的部分测试结果如表 1 所示。

表 1 某型大气数据计算机的测试结果

序号	测试项目	测试结果
1	REF1	10.1 V
2	REF2	10.2 V
3	REF3	9.9 V
4	离散量 1	高电平
5	离散量 2	高电平
6	离散量 3	高电平
7	气压高度	12 018 m
8	升降速度	56 m/s
9	真空速	2 543 km/h
10	迎角	-10
11	侧滑角	12

假定在自动测试过程中所有的激励条件都能够得到满足, 即可拓知识的激励基元都匹配成功, 故只需对可拓知识的测试基元进行匹配。将 ATS 得到的测试数据与可拓知识 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 进行匹配, 代入公式 (3) 得到 $D_1 = -0.367$, $D_2 = 0$, $D_3 = -2.33$ 和 $D_4 = 1$, 所以可拓知识 R_1 、 R_2 、 R_3 匹配成功, 即大气数据计算机的电源组合正常、离散量正常、数字量正常; 可拓知识 R_4 匹配失败, 即无法确认模拟量正常, 还需要其它知识对模拟量状态进行进一步诊断。

[5] Ciortea L, Zamfir C, Bucur S. Cloud9: A Software Testing Service [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2010, 43(4): 5 - 10.
 [6] Oriol M, Ullah F. YETI on the cloud [EB/OL]. Proceedings of the International Workshop on Software Testing in the Cloud; Paris: IEEE Press, 2010: 434 - 437.
 [7] 方锦明. 云计算中虚拟资源调度的决策系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 3145 - 3148.
 [8] Wikipedia. Cloud testing [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_testing. 2013. 8.
 [9] Priyanka, Chana I, Rana A. Empirical evaluation of cloud-based testing techniques: a systematic review [Z]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2012; 37 (3) .1 - 4.
 [10] Gao J, Bai X Y, Tsai W T. Cloud Testing— Issues, Challenges, Needs and Practice [EB/OL]. Software Engineering: An International Journal (SEIJ), 2011, 1 (1): 9 - 23.
 [11] Tilley S, Parveen T. Software testing in the cloud: migration and execution [M]. Springer, 2012.
 [12] 李 乔, 柯栋梁, 王小林. 云测试研究现状综述 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (12): 4401 - 4406.
 [13] Gao J, Bai X Y, Tsai W T. Testing as a service (TaaS) on clouds [EB/OL]. Proceedings of Service - Oriented System Engineering. IEEE press, 2013: 212 - 223.
 [14] Pinedo M L. Scheduling: theory, algorithms and systems [M]. Third Edition. Springer, 2008. 118 - 130.

5 结论

为克服经典知识表示方法的缺点, 将基元理论与经典知识表示方法相结合, 实现了可拓知识表示; 针对故障诊断专家系统知识的共性, 提出了故障诊断专家系统可拓知识的一般模型, 通过对模型的分析得出了可拓知识匹配的一般步骤, 并构建了属性精确值和区间值混合的匹配度计算公式; 最后以 ATS 的测试数据为例对某型大气数据计算机的可拓知识进行匹配, 结果表明该方法匹配速度快、匹配效率高、操作简便易行。

参考文献:

[1] Yang C Y, Cai W. Knowledge representations based on extension rules [A]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Chongqing: 2008, 1455 - 1459.
 [2] 周德新, 谢晓敏. 基于可拓规则的故障诊断专家系统推理机的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (2): 266 - 272.
 [3] 张海涛, 董春游. 基于 Web 的可拓专家系统研究 [J]. 智能系统学报, 2009, 4 (2): 175 - 179.
 [4] 赵燕伟, 苏 楠. 可拓设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
 [5] 王玉刚, 杨建新. 航电设备故障诊断专家系统 [J]. 计算机系统应用, 2012, 21 (12): 26 - 28.
 [6] 李 欣, 乔 颖, 李 想, 等. 基于 ECA 规则推理的故障诊断技术 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (3): 1023 - 1028.
 [7] 曹立军, 王兴贵, 秦俊奇, 等. 融合案例与规则推理的故障预测专家系统 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (1): 208 - 210.
 [8] Yang C Y, Wang G H, Li Y, et al. Study on knowledge Reasoning based on extended formulas [A]. International Conference on AIAI [C], New York: Springer Verlag, 2005.
 [9] 吴明强, 李霁红, 曹爱东, 等. 故障诊断专家系统综合智能推理技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (10): 932 - 934.
 [10] 马银才, 张兴媛. 航空机载电子设备 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.