

航电设备故障诊断专家系统研究与实现

李洁, 沈士团, 陈星

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 对航电设备和故障诊断专家系统研究的基础上, 设计了“智能指引完备过程规则树”的知识表示方式和存储结构, 实现了完整表达和记录专家排故经验的功能, 给出了一种与规则树对应的诊断方法, 通过计算机操作即可自动、真实地模拟专家的思想进行排故, 该系统已成功应用于国家某重点项目中, 实践表明该系统能提高故障诊断的定位准确度和定位速度, 设计思想具有通用性, 可应用于其他领域的故障诊断专家系统。

关键词: 专家系统; 故障诊断; 过程诊断; 规则树

Research and Implementation of Fault Diagnosis Expert System for Aerial Electronic Instruments

LI Jie, SHEN Shituan, CHEN Xing

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

【Abstract】 The “intelligent guide completeness process rule tree” is put forward for knowledge expressing mode and storage structure based on thorough research on aerial electronic instruments and fault diagnosis expert system. It implements the function of completely recording the experience of expert troubleshooting, and a method of diagnosis supporting rule-tree is designed. The method can simulate expert thought truly and automatically by operating computer. It has been applied in an important national project successfully. It is proved that the system can improve the accuracy and rapidity of detecting faults; meanwhile, the method is general for some system fault diagnosis in other fields.

【Key words】 expert system; fault diagnosis; process diagnosis; rule tree

随着我军现代化建设的不断深入, 越来越多的高新技术应用到军队设备中, 在提高军队战斗力的同时, 也加大了军用电子设备的规模和复杂度, 对这些电子设备的维修和保障任务也变得越来越繁重和复杂, 自动测试系统(automatic test equipments, ATE)能显著缩短检测时间、减少维修人员数量, 因而迅速发展起来, 其中故障诊断专家系统是ATE的灵魂^[1], 本文针对某型号航电设备设计并实现了以Visual Basic 6.0为开发平台、SQL Server为数据库的故障诊断专家系统。

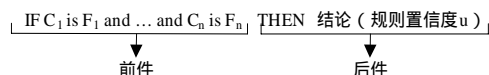
由于航电系统结构比较复杂, 在实际维修时, 无论是专家还是一般维修人员, 大多数情况下并不能一步检查出故障根源, 而是经过不断测试、不断排故, 才能最终找到故障根源, 因此航电系统的实际排故过程是: 测试——诊断——再测试——再诊断……, 这是一种过程性质的排故历程, 本文从中提炼出成功的排故经验, 将其视为一种过程性规则。

操作员依据此过程性规则可以真实地模拟专家排故过程, 减少人力消耗, 缩短维护保障时间, 提高维修工作的效率, 设计出一种既能完整表达、记录专家经验, 又能真实模拟专家排故过程的故障诊断专家系统将具有重要意义。

1 过程性规则的表达方法

为了实现支持过程的故障诊断专家系统, 必须在规则知识表示方式上满足记录过程性规则的要求。

规则由两部分组成: 条件部分和结论部分, 分别称为规则的前件和后件^[2], 通常表示为如下形式:



其中, C_i 为条件名称; F_i 为对条件 C_i 的描述; 规则置信度($u \in [0,1]$)表示: 当该规则所有条件 C_i 都满足其对应的描述形式 F_i 时, 其结论成立的可能性(即结论发生的概率)^[1]。

这种产生式规则的知识表达形式已广泛应用于各种专家系统中, 它的优点是表达清晰, 易于理解, 符合人们日常对故障现象和故障原因的习惯描述方式, 但是也有不足之处, 它只能描述对一组故障现象的一次诊断结果, 不具有关联性, 数据存储量庞大, 搜索时间比较长, 因此, 仅用这种规则形式并不能实现记录过程性经验的目的。

本文设计了“智能指引完备过程规则树”(intelligent guide completeness process rule tree, IGCPT), 用它来记录专家经验能满足记录过程性经验的要求。IGCPT与一般所说的故障树有本质区别, IGCPT以单根节点、多叉树为基本形式(如图1(a)), 每个节点的组成结构完全相同, 都是由1条或者多条规则组成。本文设计的规则由5部分构成: 测试条件, 测试方案, 故障征兆, 结论, 下一节点(图1(b)以节点A为例进行说明)。

(1)测试条件: 该节点中的结论成立的各项测试条件。

(2)测试方案: 对该节点包含的所有测试对象进行自动测试的所有指令的集合, 是与测试系统交互的重要参数。

(3)故障征兆: 由测试对象及其描述组成, 表示结论成立所需的各种现象。故障征兆分为感官和非感官两类。感官类

作者简介: 李洁(1979-), 女, 博士研究生, 主研方向: 故障诊断专家系统; 沈士团, 教授、博士生导师; 陈星, 副教授

收稿日期: 2006-07-30 **E-mail:** bluepoint_lijie@sina.com

故障征兆是指维修人员通过耳听、手摸、眼看可以直接得到的故障现象^[1]，电子设备的感官现象主要有故障部件不热、过热、冒烟、有糊味等^[3]，这些感官现象一般比较明显，使得维修人员能比较简单准确地定位一些故障。非感官类故障征兆是维修人员通过对测试对象进行各种测试得到的具体数值。感官和非感官故障征兆相结合，能达到全面描述故障现象的目的。

(4)结论：描述发生故障的原因，结论和下一节点相对应。

(5)下一节点：每个“下一节点”对应于一条结论，其中包含的测试对象即为该结论的下一步测试内容。在本系统中，把下一节点称为“子节点”，子节点对应的上一节点称为“父节点”。

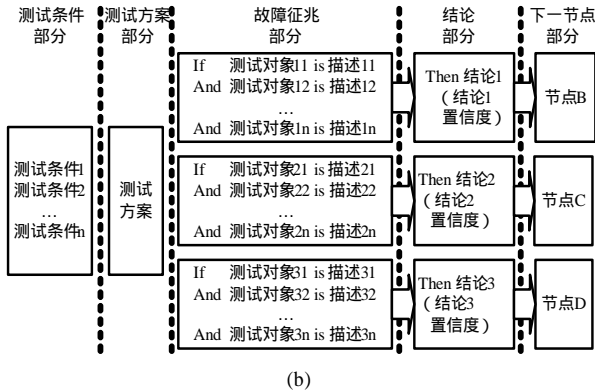
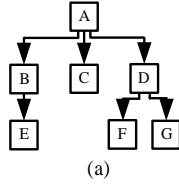


图1 IGCprt 结构

IGCprt 中的每个节点代表了一次测试要求和一次诊断，利用“树形”这种既有分步又有关联的组织形式，可以实现完整表达和记录专家分步诊断经验的目的，同时也使用户能够清晰直观地看到规则内容及诊断过程。可以说，IGCprt 是实现支持过程的故障诊断专家系统的前提，有了这种树形关联规则的体系结构和表示方式，就可以充分利用专家的经验，以专家的思想进行排故，准确有效地定位故障。

特殊情况下，如果一棵 IGCprt 中只有一个节点(即只有根节点)，且该节点只包含一条规则的话，那么这棵 IGCprt 就成了前面所说的通用规则的表达形式，在这种情况下，IGCprt 与通用规则的效果相同，由此可见，本文所提的算法从原理上兼容了通用规则。

2 故障诊断专家系统的体系结构

本文设计的故障诊断专家系统与测试系统构成了 ATE 系统的两大核心组成部分，二者通过接口管理模块进行交互。故障诊断专家系统体系结构如图 2 所示，它主要由规则知识管理和诊断两大模块组成。

其中规则知识管理模块实现知识获取、知识更新、知识检验和知识查询功能，本系统设计了相当友好的交互界面，用户可以方便地通过菜单进行添加根节点、添加子节点、修改节点、删除节点、保存树、更改父节点等各项操作，并对其内部各部分内容进行添加、修改、保存、删除等操作，这样，用户通过简单的操作就能构建出各种 IGCprt，把过程性的经验记录下来。同时知识查询功能提供了多种检索条件，

并可以任意组合，方便用户进行查询。

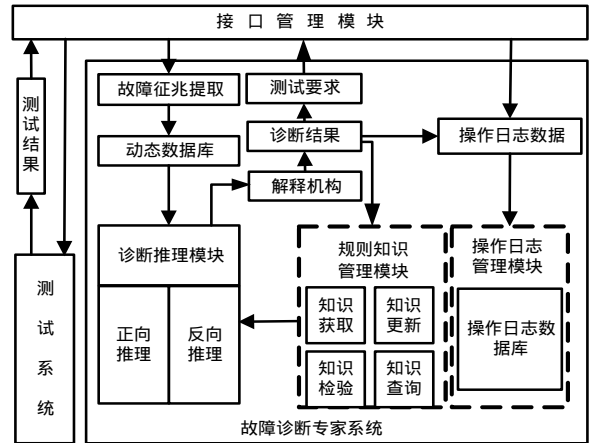


图2 故障诊断专家系统体系结构

诊断模块主要由故障征兆提取模块、诊断推理模块、解释机构、动态数据库、操作日志模块等组成。故障征兆提取模块从接口管理模块中获得测试结果，并从中提取有用的故障征兆信息。诊断推理模块提供了两种推理方式：正向推理和反向推理，正向推理是根据征兆信息直接对数据库中的 IGCprt 进行诊断推理，反向推理是由操作员先提出假设的故障根源，然后将故障根源对应的测试条件与测试结果进行诊断，反向推理方式在操作员对故障现象有比较明确的认识，需要验证自己假设的故障原因是否正确时，能够比较准确地定位故障。解释机构可以在进行诊断的同时给操作员一些说明信息，便于操作员明白诊断过程。动态数据库用来存放一些中间结果等信息。操作日志可以记录操作员操作过程，便于以后查询。

3 智能指引的过程诊断方法

本文设计的诊断模块包括在线诊断和离线诊断：操作员直接进入故障诊断系统，可通过系统提供的 15 种检索条件任意组合，对以前的测试结果进行检索，并进行诊断，即离线诊断；操作员在进行测试之后，由测试系统直接进入故障诊断系统，对当前的测试结果进行诊断，即在线诊断。

本文设计的智能指引的过程诊断方法主要步骤如下(以在线诊断为例)：

- (1)故障诊断专家系统通过接口管理模块从测试系统中得到测试结果；
- (2)故障征兆提取模块从测试结果中获取征兆信息并传给诊断推理模块；
- (3)诊断推理模块根据征兆信息运用推理机算法进行决策；
- (4)如果诊断得到 IGCprt，则将推理得到的 IGCprt 按照冲突消解策略排序后进行显示，操作员可清楚地看到详细诊断结果、结论解释、下一步操作建议和指引线，转入(5)，否则诊断不成功；
- (5)如果推理得到 IGCprt，但未查到故障根源，操作员可根据 IGCprt 的指引选择节点进行下一步测试，这样就充分利用了专家的经验，减少了操作员个人思索时间，同时也避免了因操作员水平有限而造成的无用测试；
- (6)接口管理模块接到测试要求后，把测试要求传给测试系统；
- (7)测试系统根据测试方案指令自动地进行再次测试；
- (8)测试完毕后又一次进入故障诊断系统，与第(5)步操作员选择的节点直接进行再次推理，这样避免了再次对数据库进行大量搜索，可以明显地缩短诊断时间；
- (9)如果此时仍未诊断出故障根源，则转到第(5)步；

(10)如果诊断出故障根源,那么诊断成功。

对成功的诊断过程,本文设计了两种保存方式:一是保存在数据库中,以便查阅并提供给知识获取模块;二是保存成文本文件,以便整理打印等。

如果某棵 IGCPR T 在多次诊断中,被不断验证是正确的,那么系统将自动逐步增加其置信度,以及其内部相应的结论置信度,相反,如果某棵 IGCPR T 在多次诊断中,被不断验证是错误的,那么系统将自动逐步减小其置信度,直至剔除该 IGCPR T,这样,置信度这一参数就能在进行诊断时,参与发挥优胜劣汰的作用,把最有价值的 IGCPR T 优先提供给用户。

本系统以 Visual Basic 6.0 为开发平台,设计了友好方便的交互界面,用户通过界面指引即可一步步地诊断出故障根源。选取用户在实际应用时诊断成功的一个案例,截取了其中的 3 个界面概要说明 IGCPR T 的智能指引过程(节点为绿色表示推理成功,红色线为指引线):图 3(a1)为对测试结果进行初级诊断得到的诊断结果,根据排列顺序、红色指引线和详细诊断结果,可知节点“收发机壳体相关规则”的优先级最高,即执行该节点的测试任务,之后进行第 2 次诊断;图 3(b1)为第 2 次诊断结果,根据红色指引线和详细诊断结果,可知应执行节点“电源插件板相关规则”的测试任务,转入测试系统进行测试,测试之后进行第 3 次诊断;图 3(c1)为第 3 次诊断结果,从图中可看到,第 3 步诊断查出了故障根源,将故障定位到了板级:故障根源为“电源插件板三极管 T10 有故障”,诊断成功。图 3(a2)、图 3(b2)、图 3(c2)为各界面上 IGCPR T 部分的放大图。在实际使用中,类似于此的众多案例均由初级排故人员根据界面指引成功定位故障,无需高级工程师的任何指导,使用方便、故障定位准确快捷,因而获得了用户的高度评价。

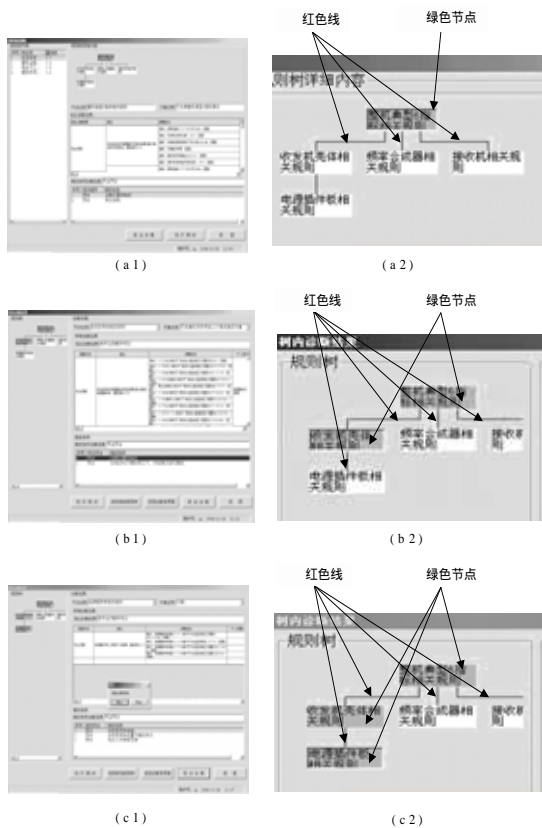


图 3 案例图

4 推理机算法

当接口管理模块将测试结果传递给故障诊断专家系统后,诊断推理模块根据征兆信息运用推理机算法进行决策,本文针对航电设备的实际维修情况设计了一套推理机算法,下面对其核心部分进行说明:

定义某对象 M(故障征兆、结论、测试条件、节点等)的匹配度为

$$MD(M) = \begin{cases} 1 & \text{完全匹配} \\ (0,1) & \text{部分匹配} \\ 0 & \text{不匹配} \end{cases} \quad (1)$$

则结论的匹配度 MD(R)可由式(2)得到

$$MD(R) = \frac{\sum_{i=1}^n MD(F_i)}{n} \quad (2)$$

其中, MD(F₁),...,MD(F_n)为结论对应的 n 个故障征兆匹配度。

测试条件的匹配度 MD(T)可由式(3)得到

$$MD(T) = \frac{\sum_{i=1}^m MD(T_i)}{m} \quad (3)$$

其中, MD(T₁),...,MD(T_m)为节点包含的 m 个测试条件匹配度。

节点的结论总匹配度 MD(PR)可由式(4)得到

$$MD(PR) = \text{MAX} \{ MD(R_1), MD(R_2), \dots, MD(R_k) \} \quad (4)$$

其中, MD(R₁),...,MD(R_k)为节点包含的 k 个结论的匹配度。

节点匹配度 MD(P)可由式(5)得到

$$MD(P) = \frac{MD(PR) + MD(T)}{2} \quad (5)$$

IGCPR T 的匹配度 MD(RT)可由式(6)得到

$$MD(RT) = \text{MAX} \{ MD(P_1), MD(P_2), \dots, MD(P_j) \} \quad (6)$$

其中, MD(P₁),...,MD(P_j)为 IGCPR T 包含的 j 个节点的匹配度。

系统在得到测试结果之后,根据以上公式可逐步计算出各 IGCPR T 的匹配度 MD(RT),如果遇到多个 IGCPR T 匹配度相同的情况,则结合最大匹配次数和置信度进行冲突消解,最终将得到推理结果和各 IGCPR T 的优先级别。

5 数据库设计

本系统采用 SQL Server^[4]实现数据库设计,为记录过程性规则知识即 IGCPR T 的内容,设计了 TreeRuleMainTab(记录 IGCPR T 的整体信息)、ctlTree(记录 IGCPR T 的节点信息)、ProcessTestConTab(记录测试条件信息)、ProcessResultTab(记录结论信息)、ProcessFaultInResultTab(记录故障征兆信息)等表格。

为记录过程性的诊断历程,设计了 ToDiagInfoTab(记录诊断历程的整体信息)、ToDiagTestConResultTab(记录测试结果的全部内容)、MatchTreeRuleTab(记录初级诊断结果 IGCPR T 的整体信息)、DiagCourseResultFaultTab(记录初级诊断结果的故障诊断信息)、DiagTestConTab(记录测试条件的诊断结果)、DiagCourseTab(记录树内诊断结果)等表格。

6 结论

本文设计的航电设备故障诊断专家系统,已应用于某国家重点项目中,在实际应用中,即使是初级排故人员在该系统的逐步指引下也能快速准确地定位故障,因而获得了用户的高度称赞。该系统以 IGCPR T 的形式完整地表示并记录专家的排故经验,使得用户能够充分利用这些经验真实地模拟专家排故过程,提高了故障诊断的定位深度、定位准确度和定位速度,且具有通用性,同样适用于其他领域的故障诊断专家系统,无论从技术角度还是从实用角度来说,都具有一定的意义。

(下转第 173 页)