

基于模糊推理的物流车辆故障诊断专家系统^①

辛海奎, 李蜀瑜

(陕西师范大学 计算机科学学院, 西安 710062)

摘要: 物流车辆故障诊断专家系统可以对物流车辆的故障进行诊断和排除。为了提高该系统快速、准确诊断的能力, 在分析物流车辆的故障模式和故障机理的基础上, 建立故障树, 采用改进的 CLIPS 可以进行正向、反向两种模糊推理机制, 同时建立知识库管理系统对模糊规则和事实进行管理。研究表明: 改进的 CLIPS 与 VC++ 的结合, 使物流车辆故障诊断专家系统拥有模糊诊断故障的能力, 提高了物流车辆故障诊断的智能化水平。

关键词: 物流车辆; 故障诊断专家系统; CLIPS; 模糊诊断

Logistics Vehicle Fault Diagnosis Expert System Based on Fuzzy Reasoning

XIN Hai-Kui, LI Shu-Yu

(College of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The fault diagnosis expert system for logistics vehicle could diagnose and troubleshoot logistics vehicle. In order to improve the performance of the system, the fault tree had been built based on the failure mode and failure mechanism of logistics vehicle. Then, the improved CLIPS which could carry out forward and backward reasoning was used, and the knowledge base management system was established to manage the fuzzy rules and facts. The results showed that the improved CLIPS coupled with VC++ was able to enhance the capability of the fault diagnosis expert system for diagnosing fault from the logistics vehicle fuzzily (i.e. fuzzy diagnosis) and improve the intelligence level of the system.

Key words: logistics vehicle; fault diagnosis expert system; CLIPS; fuzzy diagnosis

物流车辆的内部结构复杂, 故障的发生呈现出多样性, 难于发现。在这种情况下, 维修人员迫切希望能有一个方便检测物流车辆故障的工具^[1]。同时国家对车辆故障诊断的检查与整修制定了严格的标准, 标准显示: 要通过科技进步来管理车辆技术, 管理方法的现代化, 努力实现既能准确判断其技术情况及运行状态和查清隐患和故障的原因和部位, 同时车辆不被解体, 不断使用先进的技术来实现车辆管理的现代化^[2]。这样, 维修专家的经验的收集、整理和使用, 并利用计算机学习维修专家在维修物流车辆过程中的思考过程和决策流程, 从而有利于精确并及时的排除故障。所以说, 模糊知识推理、机器学习、专家系统等新兴学科在汽车故障诊断技术中找到了新的用武之地。

专家系统有能力解决很多领域复杂的专业技术问

题, 因为它能通过推理和诊断学习出人类专家解决这类问题的思维过程, 其中推理和诊断过程需利用人类专家的知识。专家系统利用模糊知识推理, 按照模糊子集的知识表示方式把具有不确定性的专家经验存放在规则知识库中, 并利用模糊规则匹配的模糊推理过程, 完成不确定性的快速的模糊推理, 从而实现排除故障的速度更快、准确性更高。在物流车辆故障诊断过程中, 会存在不确定的诊断经验知识和模糊的故障发生, 从而只能得到不完整的信息^[3]。在这种情况下要得到物流车辆故障诊断的正确判断, 在本专家系统中, 将模糊数学和产生式规则相结合的模糊产生式来表示知识。这种规则能够将启发性知识很好地表达出来, 可信度因子的提取来自数据的可靠性, 故障的原因的推理过程中, 使用了模糊推理策略, 即运用正反

① 基金项目: 国家自然科学基金(41271387)

收稿时间: 2014-12-22; 收到修改稿时间: 2015-02-09

向混合推理策略. 先逐层搜索构造完成的故障树, 然后完成对所获取故障征兆的推理诊断^[4]. 同时增加了一个工作数据库, 用于存储推理过程中的中间结论和最终结论, 避免了重复推理过程, 提高了推理的效率.

1 物流车辆故障诊断专家系统的结构

知识库是故障智能诊断专家系统的核心组成部分, 是推理机完成推理和诊断的基础和前提. 该系统性能的优劣取决于以下两方面: 推理的方法、知识库中规则的数量与质量和系统采用的控制策略; 组织和管理知识库中知识的方式.

我们采用模块化的设计方案组织本专家系统的知识库, 模糊规则库和事实库共同构成知识库, 同时把模糊规则库按物流车辆故障诊断子系统分为电气设备系统规则库、机械设备系统规则库和其他设备系统规则库^[5].

物流车辆故障诊断专家系统主要依赖车辆维修人员经验性知识, 它们是在长期的维修实践中不断积累起来的, 而且这些经验性知识分为两类有确定性知识和模糊性知识^[6], 因此在本专家系统中, 我们采用故障树结构和模糊产生式规则来表示. 在本专家系统, 工作数据库, 模糊知识库、人机界面和一定数量的辅助模块共同帮助推理机完成自主的诊断推理. 该系统的体系架构和必要的组织模块间的关系如图 1 所示.

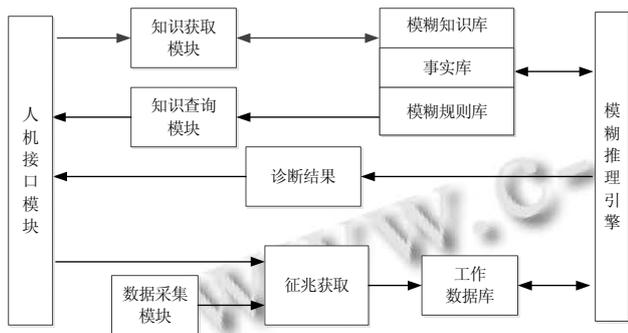


图 1 故障诊断专家系统的总体结构

2 物流车辆故障专家系统构建

2.1 模糊知识库的设计

2.1.1 设计知识库的方法和原则.

本专家系统最艰巨和最重要的任务就是知识库的设计和建立. 知识库的初始设计由问题的知识化、知识的概念化、概念的形式化、形式的规则化和规则的合法化组成.

首先我们要分析故障, 确定故障单元, 并定义故障特征结构体表示故障, 故障单元表示为一个结构数组, 数组表之间的联系依靠表间索引号关联^[7].

```
struct Fault_feature
{ int Fault_node; //fault number
char* Fault_name; //fault name
char* Fault_reason; //fault cause
float Fault_reliable // fault confidence: used to
represent the fault features that may lead to the failure
probability
char* Main_method; //Expert maintenance advice }
```

2.1.2 建立故障树.

故障树分析法(FAT) 是将相关车辆的故障按它们的因果关系和内在联系组织在一块, 进而构建一个完整的单向树状流程图, 它属于图形演绎方法. 在分析故障树时, 从总体至局部将故障树以树枝状逐层划分, 经过层层向下搜索, 找出全部可能的造成故障的原因, 最终搜索到故障树的最底层, 最终找到造成故障的根本原因^[8].

在故障树分析时, 这棵树的顶层事件是我们分析的目标, 中间事件是造成顶层事件故障发生的所有因素, 底事件一般在故障树的最底层, 它是造成中间事件发生的全部因素, 即造成车辆发生故障的原因. 这样, 分析结果中的全部事件是连在一起, 它们之间的逻辑关系存在一些细微的差别, 最后通过与之相应的逻辑门将这些事件组织在一起构成故障树, 从这棵树中, 我们能够得到故障和原因的对应关系^[9]. 物流车辆设备故障树如图 2.

故障树分析法既促进了故障诊断专家系统的知识库的构建, 又可帮助设计推理机的推理方法. 当物流车辆发生故障时, 专家系统会依照合适的推理策略, 并基于知识库中相应的事实, 最后推出产生故障的最终原因. 故障树能够产生知识库中的知识, 专家系统是根据该知识进行推理诊断的, 所以说专家系统推理诊断的依据是故障树的节点.

同样在故障树分析过程中, 树的搜索流程和专家系统的规则推理流程基本相同. 在树的搜索阶段, 搜索的任务或目标事件是中间事件节点, 搜索目标和任务最终获取的结果是底事件节点, 故障树节点采取专家系统描述语言来描述专家系统知识库中的知识, 因此专家系统的决策流程与故障树的搜索流程基本相同^[10].

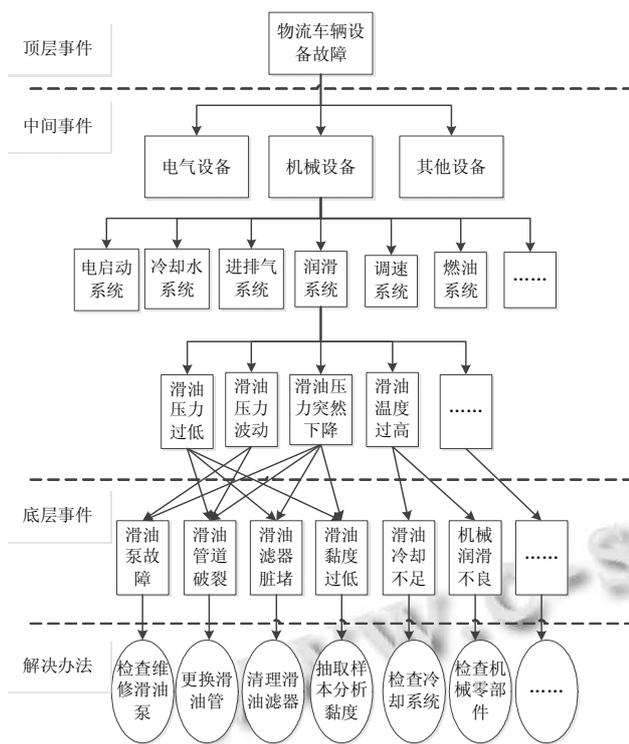


图 2 物流车辆设备故障树

2.2 知识的模糊表示

由物流车辆设备故障树可知，在物流车辆的故障诊断知识库中将知识模糊化，物流车辆故障诊断系统中规则的每个前提和结论都不可能完全是确定的，因此需要对规则进行模糊化处理，即对每条产生式规则都要进行模糊化描述。

基于模糊化的产生式规则用模糊数学可表示为：

$$[W_1, (P_1, \theta_1)] [W_2, (P_2, \theta_2)], \dots [W_n, (P_n, \theta_n)]$$

$$\rightarrow Q, CF, \lambda$$

θ_j : ($j=1,2,\dots,n$)子前提 P_j 的置信度，表示由该前提可能导致结论发生的概率。

W_j : $1 \geq W_j \geq 0$ ($j=1,2,\dots,n$)子前提 P_j 在规则中所占的权重称为子前提的权值。

Q : 规则的结论。

CF : 规则的置信度，表示该条规则由前提可以得出该结论的可信度。通过前提隶属度和置信度可以计算出该条规则所对应的结论的置信度。

λ : ($0 < \lambda \leq 1$)为激活该规则的阈值。

CF ($CF = \sum w_j * \theta_j$)为前提的可信度，当

$CF \geq \lambda$ 时，则该规则就可以被激活。激活完成后，可推导出结论 Q 及其置信度。

规则也可表示为： if <条件 1, 权值 1, 可信度 1> V <条件 2, 权值 2, 可信度 2> V <条件 m , 权值 m , 可信度 m > $then$ <结论, 可信度>, <规则触发阈值>。
规则的触发条件为：前提中存在条件 P_1 , 条件 P_2 , , 条件 P_m ；并且前提的加权综合可信度大于或等于规则的阈值^[1]。

该物流车辆故障诊断专家系统诊断知识产生式表示是基于加权模糊特征的，故障诊断知识规则可表示为：

if <001=滑油压力过低(0.3,1.0) > AND <002=滑油压力波动(0.3,1.0) > AND <003=滑油压力突然下降(0.4,1.0) > $then$ <001=滑油管道破裂(0.8)><<Value=0.6>

规则前提 1、规则前提 2 和规则前提 3 的权值分别为 0.3、0.3 和 0.4，所有前提的可信度为 1.0。规则的触发阈值为 0.6，可信度为 0.8。

在本专家系统中表示故障树节点的模板定义为：

(deftemplate node

(slot code)//fault number

(slot name)//fault name

(slot type)//fault type

(multislot featrue1)//fault cause 1

(multislot featrue2) //fault cause 2

(multislot)

(slot reliable1)//the fault reliable to fault cause 1

(slot reliable2)//the fault reliable to fault cause 2

(slot weight1)//fault weight 1

(slot weight2)//fault weight 2

其中，name 槽、type 槽、node 分别表示该故障的名称、节点故障的类型和故障的关系名；我们将中间节点故障类型 type 的值为 α ，将底事件节点故障类型当 type 的值为 β ，那么根据故障树其故障原因与故障置信度可为空；reliable 槽为故障的置信度即用来表示这些故障原因可能导致该故障发生的概率。

利用以上的描述方式来表示本专家系统知识库中的知识。首先将表示出故障树中所有节点，然后将数据存放在一个文件中，系统调用该文件来完成推理过程。

故障诊断的规则的结构的简单实例描述如下：

defrule rule_01

declare((CF 0.8))

```

declare((λ 0.7))
assert((node1(type α)(code 008)(name ?a1)
(reliable ?θ1)(weight ?w1)))
assert((node2(type α)(code 016)(name ?a2)
(reliable ?θ2)(weight ?w2)))
(have-answer ?c3)
=>
assert(node3(type β)(code ?c3)(name ?a3))
(result compute_reliable())
(dribble-on "out.txt")
(printout t"故障可能是: ""?a3";"此结论的可信度
为: ""compute_reliable()""!" crlf)
(dribble-off)
(halt)

```

其中结论的可信度计算函数为外部函数
 $compute_reliable() : T = \sum w_j * \theta_j \quad (j=1,2).$

2.3 知识的获取策略

在目前的专家系统中，获取知识的方法仍主要是非自动方式，本故障诊断专家系统的知识获取方式具体可描述成如下形式：首先物流车辆故障知识工程师把知识用模糊产生式表示方法表示出来，再将模糊产生式规则用计算机的数据结构存储在磁盘中。为了实现知识获取的功能，为本系统设计出获取物流车辆故障诊断知识的流程如下图3所示。

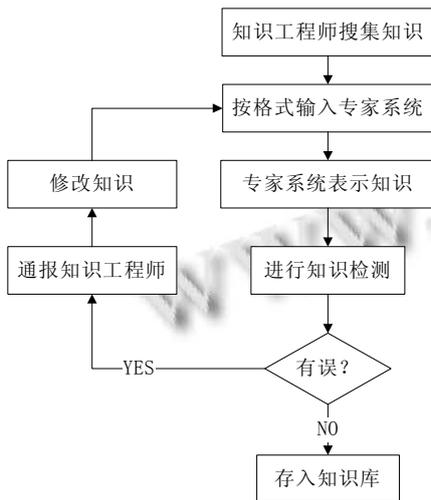


图3 知识获取流程图

3 故障诊断专家系统推理机制

3.1 构建模糊规则冲突消解策略

解决冲突是冲突消解策略的主要任务，在正向推

理过程中，它从已知故障事实中选取合适的一组来激活相应的模糊产生式规则，实现后件规定的操作或得到后件规定的结论。然后利用辅助故障事实来进行反向推理去证实该目标或提高其可信度^[12]。

目前已存在多种用于冲突消解的策略，譬如：根据深度优先搜索策略、广度优先搜索策略、按不同领域问题的特征排序、按匹配度排序等方法；其基本思想都是对知识先进行排序。由于本系统的推理具有不确定性，这决定本专家系统冲突消解的策略是采用按匹配度排序的方法来完成。其根本依据是：在不确定性匹配中，要判断两个知识模式是否能够匹配，首先计算这两个模式的相似程度，它们若是可匹配的，需满足其相似度大于或等于某一给定的值。通过相似程度的计算我们可以得到两条规则的可信度，该可信度既可作为确定两个知识模式是否可匹配的依据，又可用于消解模糊规则的冲突^[13]。如果有多条匹配成功，系统将按照它们的匹配度确定优先使哪一个模糊产生式规则，即优先使用匹配度大的。

3.2 专家系统推理机设计

为了减少推理的步骤和保证推理的效率，本专家系统的推理机制采用 RETE 匹配算法，采用混合推理的方法，同时利用工作数据库来存储由模糊规则推理得到的中间结论或推理结果。如果推理过程中没有推理所需的中间结论时，就借助反向推理来求解出所需的中间结论。

该智能诊断系统的推理流程如图4、5所示。

物流车辆故障诊断推理详细流程如下：

- (1) 根据前面故障特征事实的表示方法，将故障特征事实存入事实库。
- (2) 规则匹配：在知识库中采用 RETE 匹配算法对系统中的规则进行匹配，判断在规则库中是否有适用的知识，若有则跳入下一步；否则跳转到(4)；
- (3) 冲突检查：若多条规则匹配成功则按照冲突消解策略消除冲突；否则跳转到(5)；
- (4) 检查在工作数据库中是否存在解，若有则退出并生成诊断结果，否则进入反向分支推理。
- (5) 与知识进行匹配，根据公式计算结论的置信度： $T = \sum w_i * \theta_i \quad (i = 1,2,...,n)$

若计算出的结论置信度大于或等于规则的阈值，则检查该结论是否是中间结论，若不是查找故障结论知识表，得到故障原因、维修方案以及专家建议，此次

诊断结束。否则将结论存入工作数据库中，再跳转到(2)，若结论置信度小于规则的阈值，则正向推理失败，转向方向分支推理。

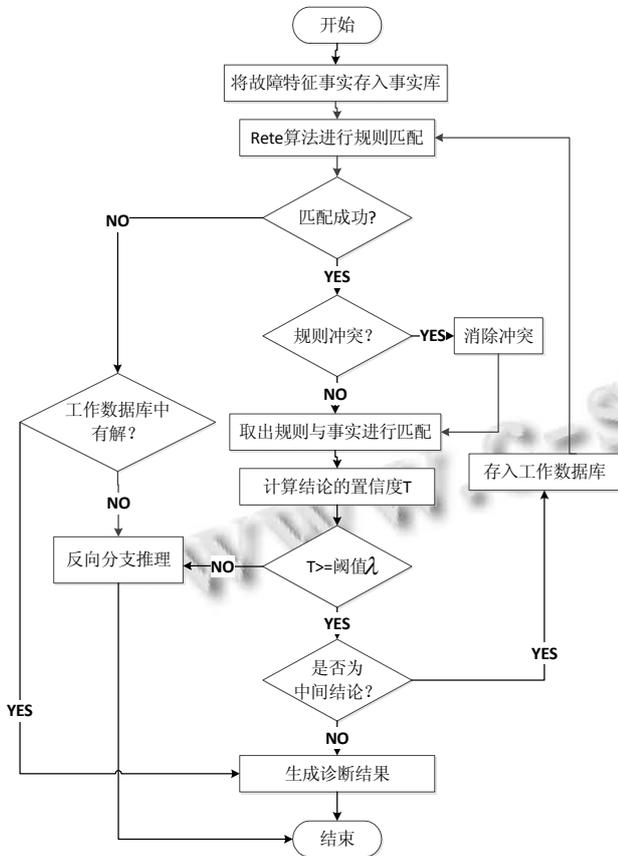


图 4 物流车辆故障专家系统模糊推理流程

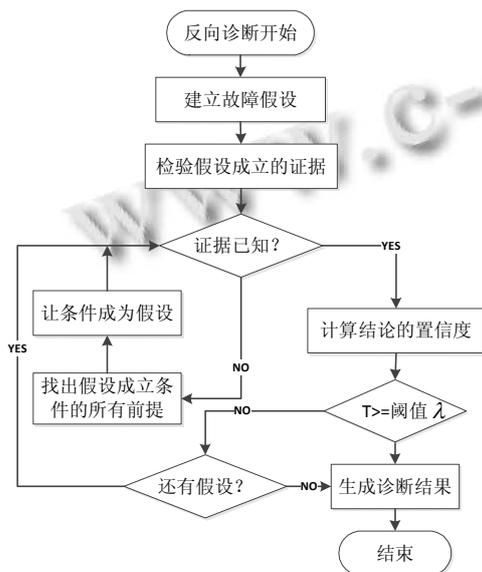


图 5 反向分支推理流程图

反向分支推流流程:

- (1) 首先建立故障假设: 假设该故障已经发生。
- (2) 检验规则前件: 判断与假设成立有关的前提是否已知, 若规则前题已知则跳入下一步, 否则跳转到(4)。
- (3) 已知事实与规则进行匹配, 匹配成功则根据公式: $T = \sum w_i * \theta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 计算结论的置信度, 置信度大于等于阈值, 则查找故障结论表, 输出故障原因及维修方案, 此次诊断成功; 若置信度小于阈值则判断是否还有假设, 还有假设就跳转到(2); 否则跳出此次诊断, 诊断失败。
- (4) 如果前提条件未知(表示该前提条件是一个中间条件)就需要对前提进行验证, 则将找出假设成立的所有前提条件, 并让所有条件都成为假设, 跳转到(2)。

该智能诊断专家系统使用了不同的推理方式使得推理的效率得到了提高, 正向推理方式失败的情况下, 再选择反向分支推理方式进行推理, 使该方式具有较强的针对性。

3.3 系统验证测试及效果

首先进入物流车辆诊断专家系统人机界面如图 6, 当一物流车辆在启动时出现柴油机动不足和排气管冒黑烟等现象, 即车辆启动存在故障。



图 6 物流车辆故障诊断专家系统启动界面

故障诊断过程为: 将故障征兆和伴有现象事实写入事实库, 激活规则: $if(\text{柴油机动不足 } 0.7, 1)then(\text{喷油雾化不良})CF=0.8, \lambda = 0.7$. 通过计算我们发现阈值大于结论的置信度, 即 $0.7 > 0.7 * 1 * 0.8$, 需要对导致该结论的另一前提, 检查排气管是否有黑烟, 于是进入反向推理, 激活规则 $if(\text{排气管有黑烟 } 0.5 \ 1)then(\text{喷气管雾化不良})CF=0.9 \ \lambda = 0.4$ 计算结论的置信度为 $0.5 * 1 * 0.9 > 0.4$; 激活排气管有黑烟和柴油动力不足的规则, 于是再计算喷油雾化不良的

结论置信度为 $0.7 \times 0.8 + 0.3 \times 0.9 > 0.7$, 推理得到柴油动力是由喷油器雾化不良引起的的可信度为 0.83. 诊断结果报告如图 7.

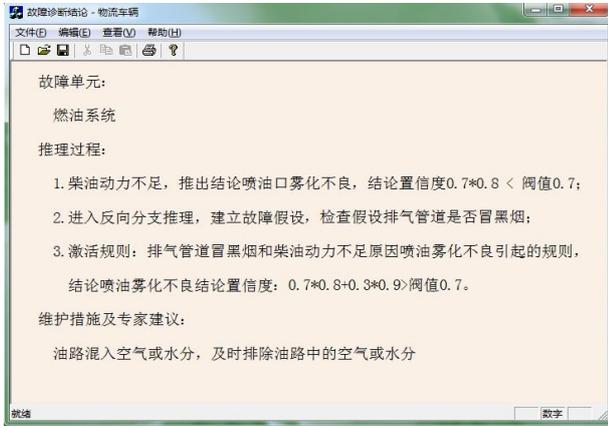


图 7 诊断结果报告

专家系统基本能根据车辆出现的故障特征做出准确地诊断, 但也有不准确与不能诊断出结果的情况, 智能专家系统的构建是一个不断测试和完善的过程, 仍需要对系统进行改进和完善.

4 结语

本系统结合改进的 CLIPS 和 Visual C++6.0 各自在专家系统开发上的优点, 建立了物流车辆故障诊断专家系统. 在对物流车辆维修保障中引入模糊故障诊断技术, 提高了物流车辆故障诊断技术保障水平. 目前, 我们要努力做到故障诊断需要更加智能化, 同时需要通过实现监测过程在线化使得监测更加及时, 同时亟需不断完善专家系统本身的功能. 各种设备的 I/O 接口和物流车辆设备底层传感器与该专家系统之间的通信技术需不断完善, 使得获得车辆的故障信息更加精确和迅速. 此外对于 CLIPS 拥有的网络应用方面的能力, 还有待进一步的去研究和应用.

参考文献

- 1 田明才.物流车辆监控平台中智能车辆调度的应用研究[学位论文].北京:中国科学院研究生院,2010.
- 2 徐寅生.军用车辆故障诊断专家系统[学位论文].合肥:合肥工业大学,2008.
- 3 薛寒,谢利理,叶留义.基于模糊推理的电机故障诊断专家系统研究.计算机测量与控制,2010,18(1):8-10.
- 4 Wu JD, Wang Y, Mingsian R.B. Development of an expert system for fault diagnosis in scooter engine platform using fuzzy-logic inference. Expert Systems with Applications, 2007, 33: 1063-1075.
- 5 余瑞.无人机飞行控制系统故障智能诊断专家系统的设计[学位论文].成都:电子科技大学,2011.
- 6 张崇刚,郭旭辉,黄昭婷,黄智刚.模糊理论在故障诊断专家系统中的应用.中国测试技术,2008,34(5):122-125.
- 7 温国谊,查光东,张翔.基于 CLIPS 的某型飞机故障诊断专家系统的设计与实现.中南大学学报(自然科学版),2013, 44(1): 157-161.
- 8 苏建,陈玉强,陈军伟.基于故障树分析的火控系统故障诊断专家系统设计.计算机测量与控制,2013,21(11):3008-3011.
- 9 杨家涛.基于 CLIPS 的船舶机舱设备故障诊断专家系统研究[学位论文].武汉:武汉理工大学,2012.
- 10 叶伯生,黄增双,李斌.故障树分析法在数控机床故障诊断系统中的应用.机械设计与制造,2006(8):135-137.
- 11 尹朝庆,尹浩.人工智能专家系统.北京:水利水电出版社,2002.
- 12 Harry KH, Chow KLC, Lee WB. Design of a RFID case-base resource management system for warehouse operations. Expert Systems with Applications, 2006, 30: 561-576.
- 13 田增华.汽轮机组振动故障诊断及专家系统研究[学位论文].北京:华北电力大学,2007.