

基于故障仿真的故障知识库应用研究

王 珉¹, 胡 芑庆¹, 杨思峰², 秦国军¹

(1. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073; 2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 制约故障知识库技术发展的主要瓶颈是知识的积累问题,故障仿真是更新故障知识的重要方法。以液体火箭发动机试验台推进剂供应系统为研究对象,对基于故障仿真的故障知识库展开应用研究。从知识的表现形式以及故障知识库的主体框架、故障仿真的基本思路、故障知识提取的若干技术等三个方面展开讨论,就故障知识的管理方式、故障的注入方法以及故障知识的验证与优化方法进行了探讨。最后通过一个实例验证了本文总结的故障知识库的应用方法。

关键词: 故障知识库; 故障仿真; 知识表示; 故障注入; 知识提取

中图分类号: TP392;V434.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2010)04-1253-06

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.050

0 引言

近年来,人工智能与计算机技术的飞速发展,为故障诊断技术提供了新的理论基础,产生了基于知识的故障诊断方法,此方法不需要对象的精确数学模型,而且具有某些“智能”特性,是一种很有生命力的方法^[1]。故障诊断知识库系统借鉴数据库技术存储与管理知识,运用有效的知识表示方式和推理机制,快速搜索并定位最终故障或最有可能的故障,是一种实用的基于知识的故障诊断方法^[2]。

制约故障知识库技术发展的主要瓶颈是知识的更新速度。随着机电系统自动化水平的不断提高,系统结构越来越复杂,为实现对故障原因的准确判断,必须要有足够的故障知识。故障知识的更新方式主要有:从领域专家获取知识,通过现场试验获取知识,通过仿真试验获取知识^[3]。通过计算机仿真获取知识,成本小,可靠性高,是故障知识库更新知识的重要手段。本文以液体火箭发动机地面试验台推进剂供应系统为研究对象,在知识库框架、故障仿真和知识提取等方面对基于故障仿真的故障知识库进行了应用研究。

1 故障知识库

故障知识库是一个集合的概念,它是某特定系统

或元件在故障模式下所表现出来的故障特征信息的集合。故障知识库借鉴了数据库的信息存储、信息共享、并发控制和数据恢复等技术,实现对故障知识的存储与管理,同时运用有效的知识表示和推理机制,实现对故障机理的诊断与定位,故障知识库是一个开放的系统,其主体框架必须满足知识更新的需要。

1.1 知识的表示形式

知识要存储在知识库中,必须首先转换为一种用符号表示的信息。知识的表示即是知识符号化和形式化的过程。知识的表示形式就是研究如何设计各种数据结构,以便将已获取的知识在知识库中进行合理的存储与描述。目前知识表示方式很多,有产生式规则,语义网络、框架、面向对象、事例以及谓词逻辑等知识表示方式^[2]。对推进剂供应系统,本文设计的故障知识库采用产生式规则来表示知识。

推进剂供应系统的故障知识库由故障模式、故障原因、故障检测方法、故障征兆、控制措施和影响程度组成,故障征兆是基于一组特定的特征向量,代表诊断故障所需的监控参数及其变化规律。基于产生式规则的故障知识表示,如表 1、表 2 所示。

表 2 的字段分别对应监控参数的变化规律,表中概率值、上下限阈值等均根据历史试车数据统计获得,表 1 的字段对应故障模式、故障原因、故障检

收稿日期:2009-06-15; 修回日期:2009-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50675219);高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200434);湖南省杰出青年科学基金项目(08JJ1088);国家 863 高技术课题(2006AA05Z141)

测方法、故障征兆、控制措施和影响程度。诊断时首先根据故障特征由表 2 确定异常的参数,然后在表 1 中根据故障征兆进行查询,找出故障机理、发生故障的原因等,实现故障诊断。产生式的知识表示接近故障诊断领域专家知识的结构,比较容易改进和在数据库中表示。可以非常方便地使用通用数据库软件(SQL Server, Access 等)实现。

表 1 诊断知识表

Table 1 Table of diagnosis knowledge

字段	数据类型	描述
Name	vchar	故障模式
Phenomena	vchar	故障原因
DMethod	vchar	故障检测方法
PBehave	vchar	故障征兆
Method	vchar	故障控制措施
Significance	vchar	影响程度

表 2 特征知识表

Table 2 Table of character knowledge

字段	数据类型	描述
Parameter	vchar	参数名称
GValue	vchar	概率值
Ulimit	vchar	上限阈值
Llimit	vchar	下限阈值
ChangeRule	vchar	变化规律

1.2 知识库的主体框架

为实现知识的高效存储和快速检索,故障知识库需要对各种故障进行分类,需要考虑某一故障特征是哪一个小系统的哪一个元件在什么情况下的故障,因此,本文采用传统的层状结构构建故障知识库的主体框架。其结构如图 1 所示。

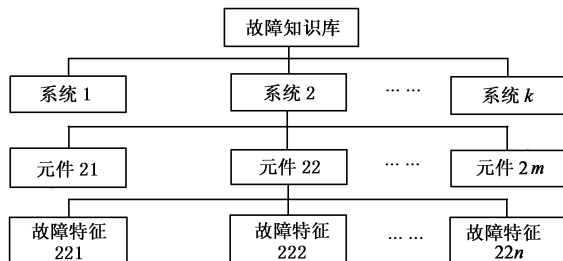


图 1 故障知识库框架图

Fig.1 Frame of fault-knowledge base

故障知识需要不断更新与积累,知识库必须是一个开放性的数据库,需要建立面向对象的知识库拓展接口与人机界面,对新获取的知识,进行一致性

检查,并最终决定是否存入知识库中。

2 故障仿真的基本思路

故障仿真的实质是基于对实际系统的结构动力学分析和工作机理分析,将实际系统进行结构分解,分析各个部件的动态特性,各子系统之间及其与整机之间的故障耦合关系,运用虚拟样机技术,在数学模型的基础上,通过计算机建模与仿真软件实现对实际系统正常功能与潜在故障的模拟。通过数值仿真得到实际系统在故障时可能出现的现象。故障仿真能够对系统中的任意环节提供虚拟故障重现^[4]。

故障注入是故障仿真的关键。文献[6]指出,所有的故障可以通过各种方式改变输入信号注入系统。这种思想体现了动态系统故障注入的一般形式,如图 2 所示。

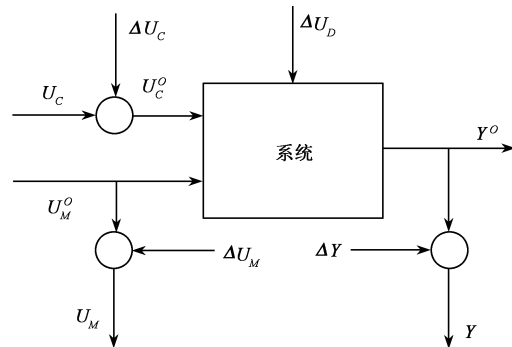


图 2 动态系统的故障注入

Fig.2 Injecting faults into dynamic system

图 2 中, U_M 是输入的测点值, U_M 是输入传感器故障, U_c 是受控输入的命令值, U_c 是执行机构故障, U_D 是设置的故障, Y 是输出的测定值, ΔY 是输出的传感器故障。 U_c^o, U_M^o, Y^o 是相应的“真实值”。

$$\text{设: } U = \begin{bmatrix} U_M \\ U_c \\ U_D \end{bmatrix}, \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_M \\ \Delta U_c \\ \Delta U_D \end{bmatrix}$$

故障模型可以写成如式(1)状态矩阵的形式:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + F\Delta U \\ Y &= CX + DU + \Delta Y \end{aligned} \quad (1)$$

式中 F 是故障输入矩阵。

式(1)中,故障矩阵 F 恒定,故障模型是一个非时变的系统,没有考虑引起故障的参数变化情况。实际上,许多故障是由于系统在运行的过程中,一些

元件的参数逐渐变化产生的,故障征兆是随时间积累出现的,因邓,故障模型的更一般的表达应当如式(2)所示:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(t)X + B(t)U + F(t)\Delta U \\ Y &= C(t)X + D(t)U + \Delta Y \end{aligned} \quad (2)$$

将上述的故障模型转换为计算机可执行的计算机码,是计算机辅助建模与仿真中的重要问题。Hilding Elmqvist 于 20 世纪 70 年代后期提出的用微分和代数方程式描述不同物理系统的面向对象的建模方法,已成为当前计算机辅助建模的主要方法^[5]。面向对象的建模方法具有继承和封装的特点,方法直观,结构清晰,易于实现模型和子模型的重用。利用该方法进行故障建模,易于根据各个元件的结构特点建立故障模块库,可以根据故障仿真的需要在正常模型的基础上通过添加故障模块或删除模块实现对故障的模拟。目前比较常用的面向对象建模与仿真软件有基于 Modelica 语言的 Dymola 等。

3 故障知识提取

对于故障仿真的结果,仿真软件多以图形或数据文件的形式提供,由于采用虚拟传感器,对任意一个故障,仿真软件都可以提供海量的数据或图形。为防止知识库出现“数据爆炸,知识贫乏”的现象,需要通过数据挖掘,从海量的故障现象中提取有用的故障特征样本。提取故障知识主要通过以下两个环节:选择合适的测试节点(参数),故障征兆集优化。

3.1 测试节点(参数)选择

系统发生故障后,并非所有的元件都是故障源,通常那些与异常输出端连通的元件才有可能是故障源,因此故障仿真的过程中对测试节点的筛选是非常重要的,节点与节点间的相互关系利用图论中的可达矩阵来描述。

首先根据推进剂供应系统的工作机理确定诊断粒度,在诊断粒度的基础上对供应系统进行结构分解,将粒度表示为节点,画出系统的结构图。根据图论的理论计算可达矩阵,确定系统的分层结构图,如图 3 所示。层次结构反应了系统各部件之间的故障传播关系,是优选节点的重要依据。在图 3 中,为简化模型,根据历史试验记录只列出了供应系统的几个关键部件。

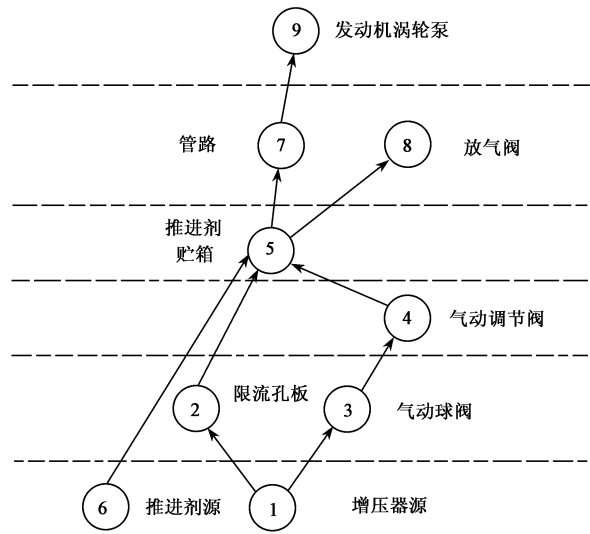


图 3 系统分层结构图

Fig.3 Hierarchical structure of system

从图 3 的分层结构可以看出,供应系统在工作过程中,各节点间没有反馈,根据图论的原理,该系统的节点数 $m = 9$,可达矩阵为式(3):

$$D = [d_{ij}]_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在式(3)中,可达矩阵的元素 d_{ij} 具有以下意义:
 $d_{ij} = 1$ 表示信号从节点 i 可以到达节点 j , $d_{ij} = 0$ 表示信号从节点 i 不能到达节点 j , 因此当某节点发生故障时,与之连通的输出节点将为 0,与之不连通的输出节点将为 1。因此根据(4)式可以确定当检测到节点 i 的输出信号 s_i^{out} 出现异常时可疑的故障节点集:

$$\begin{aligned} &\{s_i \mid (s_i^{out} = 0 \text{ and } d_{ij} = 1) \cup \\ &(s_i^{out} = 1 \text{ and } d_{ij} = 0)\} \end{aligned} \quad (4)$$

可疑故障节点集的确定对于检测故障时选择测试参数具有重大意义。在工程应用当中,还需要考虑各节点故障发生的概率分布问题及元件的可靠性

和测试成本等方面的问题,进行综合评判,选择最优的故障节点集。

3.2 故障征兆集优化

在故障模型仿真的过程中,故障原因是预先设定的,对于仿真得到的结果,可以认为是一些实例,即故障的征兆。一种故障模式一般会在多个参数上有故障征兆,而不同的故障模式也可能在相同的参数上有相同或类似的征兆,因此,故障集与征兆集之间是一个复杂的对应关系,存在比较严重的交叉与耦合。故障征兆集优化就是对故障集与征兆集的解耦,解耦对于防止知识库的数据膨胀具有重大意义。

首先确定故障集与征兆集之间的逻辑关系,根据供应系统的历史故障记录,将故障模式与征兆之间的关系分为充要条件关系和必要条件关系,定义如下:

(1) 充要条件关系:如果一个征兆出现,则必然可推断出是由某种故障造成的,同时,如果该故障出现,必然会产生这种征兆。

(2) 必要条件关系:如果一个征兆出现,不能必然推断出是由哪个故障造成的,但是,某种故障出现却必然导致该征兆。

满足充要条件关系的故障集与征兆集之间关系非常简单,不存在严重的交叉与耦合,而由仿真得到的故障征兆与故障模式只能确定其满足必要条件关系。因此,解耦就归结为提取仿真结果中满足充要条件关系的征兆。

一般来说,要证明某个征兆的出现必然是由某个故障造成的比较困难,目前尚无比较成熟的逆推理算法,本文从故障集与征兆集之间关系遵循的逻辑原则提出了以下解耦策略:

(1) 在故障集中不存在没有征兆与之对应的故障,在征兆集中也不存在没有故障与之对应的征兆。

(2) 一个征兆要单独作为某个故障的充要条件,必须满足和相应故障模式一一对应,该征兆不会作为其他故障模式的充要条件。因此,将仿真得到的故障征兆集在知识库中进行推理演算,排除单独作为某个故障充要条件的征兆。

(3) 对于故障与征兆存在“多对多”映射的情况,可以通过征兆集的重组,得到某个故障的最小征兆集,即多个征兆组成该故障的组合充要条件的情

况。因此,在对故障集进行仿真,得到多个故障仿真结果的基础上,对征兆集进行规则重组,将征兆集与故障集的逻辑关系用如下规则形式描述:

IF {征兆 X }

THEN {故障 1} OR {故障 2} OR ... OR {故障 n }

将上述规则做如下变换:

IF X

THEN F_1 OR F_2 ... OR F_n

将规则写成集合的表达形式: $X = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$

在相同的测试节点上产生的规则可以构成集合 A , $A = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 可以肯定,同一个故障不可能在同一个测点测试参数上产生两种不同的征兆,因此, A 中的子集合 X_1, X_2, \dots, X_n 是没有交集的,整个征兆集可以表示为 $Q = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 用文式图表示,如图 4 所示。

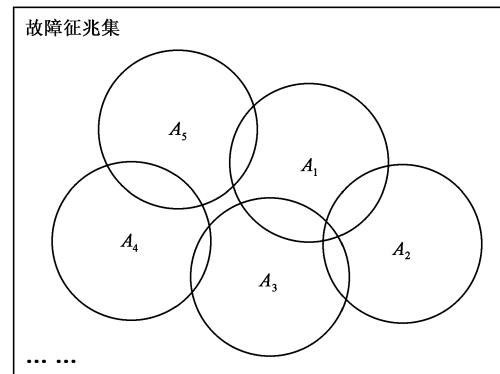


图 4 故障征兆集文式图

Fig.4 Venn diagram of fault symptom

所以,规则重组可以通过对集合求最小交集来实现,例如若 A_1 中的 X_1 , A_2 中的 Y_1 , A_3 中的 Z_1 的交集为 F_1 , 即 $\{F_1\} = \{X_1 \cap Y_1 \cap Z_1\}$, 产生新的规则如下:

IF $\{X_1\}$ AND $\{Y_1\}$ AND $\{Z_1\}$

THEN F_1

在实际工程应用中,上述推理随着故障集的增加是一个不断重复的过程。

4 应用实例

本文用 LabWindows/CVI 编写了一个故障知识库演示程序。可以对推进剂供应系统的典型故障模式进行仿真,自动提取故障特征,并与用户进行信息

交互,修正知识库中的故障知识。图 5 给出了演示程序的结构图。

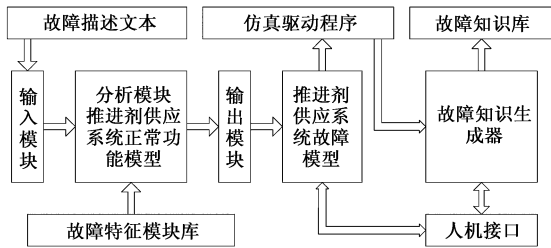


图 5 软件结构图

Fig.5 Structure of software

以推进剂输送管路泄露为例进行说明。注入的故障描述如下:仿真 40 s 时,在内径为(8.0 × 10⁻²) m 的输送管路中出现一个直径为(2.0 × 10⁻³) m 的泄露孔。

输入模块读入故障描述文本,分析模块选择合适的故障特征模块,作为输入源注入正常功能模型中,输出模块生成管路泄露的故障模型,并进行仿真。

仿真中记录下各个节点的压强、流速、温度等数据,与正常情况下的仿真数据进行对比,确定异常的测试参数。限于篇幅,本文仅列举部分关键节点在故障发生后的稳态仿真数据,如表 3 所示。

表 3 部分节点的仿真数据

Table 3 Simulation data of several test point

测试参数	故障模式	
	正常工作	管路泄露
管路流速/(L/s)	3.475	3.292
管路液压/Pa	3.02 × 10 ⁵	2.79 × 10 ⁵
贮箱液压/Pa	3.04 × 10 ⁵	3.04 × 10 ⁵
涡轮泵入口液压/Pa	2.89 × 10 ⁵	2.74 × 10 ⁵

得到的故障征兆表示如下:

故障名:推进剂输送管路泄露
征兆 1:节点 1(管路流速)减小
征兆 2:节点 2(管路液压)减小
征兆 3:节点 3(贮箱液压)正常
征兆 4:节点 4(涡轮泵入口压力)减小
.....
<结论>

图 6 初始故障征兆集

Fig.6 Initial fault symptom set

接下来就是测试节点的选择与征兆集的优化,在图 3 中,管路位于节点 7,选择节点 7(管路液压、管路流量)、节点 9(发动机涡轮泵入口液压)作为可

疑故障节点集。然后通过综合分析,得到表征管路泄露故障的最小故障征兆集,如图 7 所示。

故障名:推进剂输送管路泄露
征兆 1:管路流速减小
征兆 2:管路液压减小
征兆 3:涡轮泵入口液压减小
<结论>

图 7 优化后的故障征兆集

Fig.7 Optimized fault symptom set

通过人机接口进行信息交互,获得故障的其它相关信息并检验知识的完整性,故障知识生成器按照知识表示的要求和知识库的结构,对知识进行必要的分析整理,并最终形成新知识。

5 小结

本文以液体火箭发动机试验台推进剂供应系统为对象,从知识表示和知识库主体框架、故障建模与仿真的基本思路、故障知识提取技术等方面,对基于故障仿真的故障知识库在故障诊断中的应用进行了研究,本文总结的一些方法在实际的工程应用中被证明是可行的,并可推广应用到整个试验台以及其它复杂机械系统的故障诊断知识库系统中。

参考文献:

[1] 朱大奇,于盛林.基于知识的故障诊断方法综述[J].安徽工业大学学报,2002,19(3):107 - 204.[ZHU Da-qi, YU Sheng-lin. Survey of knowledge-based fault diagnosis methods[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2002,19(3):107 - 204.]

[2] 黎洪生,黄玉娟,樊金荣.基于数据库的故障诊断知识库的创建[J].计算机辅助工程,2002(4):24 - 27.[LI Hong-sheng, HUANG Yu-juan, FAN Jin-rong. Creation of knowledge base for fault diagnosis based on the database[J]. Computer Aided Engineering, 2002(4):24 - 27.]

[3] 黄考利,连光耀,魏忠林.基于仿真技术的故障知识获取方法研究[J].兵工学报,2005,26(4):573 - 576.[HUANG Kao-li, LIAN Guang-yao, WEI Zhong-lin. Study on fault knowledge acquisition based on simulation[J]. ACTA ARMAMENTARII, 2005,26(4):573 - 576.]

[4] 赵守伟,马飒飒,吴国庆.基于故障仿真的诊断知识获取关键技术研究[J].计算机仿真,2008,25(1):31 - 35.[ZHAO Shou-wei, MA Sa-sa, WU Guo-qing. Key technologies for acquiring diagnosis knowledge based on fault simulation[J]. Computer Simulation, 2008,25(1):31 - 35.]

[5] 田永利,邹慧君,郭为忠,叶志刚.机电一体化系统建模技术与

- 仿真软件的研究与分析[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(4): 15 - 18. [TIAN Yong-li, ZHOU Hui-jun, GUO Wei-zhong, YE Zhi-gang. Study and analysis on modeling technology and simulation software of mechatronics system [J]. Machine Design and Research, 2003, 19(4): 15 - 18.]
- [6] Gertler J. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation[C]. IFAC Symposia, 1991: 9 - 21.
- [7] Teo C Y, Gooi H B. Application of knowledge-based systems for fault diagnosis and supply restoration[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1997, 10(6): 631 - 638.
- [8] Dressler Oskar, Puppe Frank. Knowledge-based diagnosis-survey and future directions[C]//Proc. XPS - 99, Springer, Wurzburg Germany, 1999: 24 - 46.
- [9] GAO Ming, HU Niao-qing, QIN Guo-jun, XIA Lu-rui. Modeling and fault simulation of propellant filling system based on modelica/dymola [C]. 2nd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [10] Anup K Ghosh. A methodology and application of fault simulation in the design process of large-scale systems[D]. Virginia University, 1996.
- 作者简介: 王珉(1980 -), 男, 博士生, 机械电子工程专业, 研究方向为机器状态监控与故障诊断。
通信地址: 湖南长沙国防科技大学机电工程与自动化学院机电工程研究所监控与诊断实验室(410073)
电话: 15084829754
E-mail: wm198063@yahoo.com.cn

Study on Application of Fault-Simulation-Based Fault-Knowledge Base

WANG Min¹, HU Niao-qing¹, YANG Si-feng², QIN Guo-jun¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The main restriction that restricts the development of fault-knowledge base is how to accumulate knowledge. Fault-simulation is an important way to update fault-knowledge. Aiming at the LRE test-bed propellant filling system, this paper studied the application of fault-simulation-based fault-knowledge base. The way of knowledge representation and the main frame of fault-knowledge base, the basic method of fault simulation, several techniques of fault-knowledge acquisition were discussed. The manner of managing fault-knowledge, the way of injecting fault, the method of validating and optimizing fault-knowledge were studied. Finally, methods this paper gets to apply fault-knowledge base are validated through an example.

Key words: Fault-knowledge base; Fault-simulation; Knowledge representation; Fault injecting; Knowledge acquisition