

基于故障树的故障诊断 IDSS 的设计

刘 辉^{1,2}, 任 培¹, 周经伦¹

(1. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073;

2. 安徽工业大学, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 将智能决策支持技术引入故障诊断, 给出系统的总体设计, 并详细阐述基于故障树的知识库和推理机的设计。采用面向对象基于框架、规则、元知识集成的广义故障树知识表示方法, 同时给出了基于故障树最小割集和最小路集的故障快速推理算法, 实现了故障的迅速诊断。

关键词: 智能决策支持系统; 故障树; 故障诊断; 知识表示; 推理

中图分类号: TP182; TP206⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2006)06-0001-03

Design of Intelligent Decision Support System for Fault Diagnosis Based on Fault Tree

LIU Hui^{1,2}, REN Pei¹, ZHOU Jing-lun¹

(1. National Univ. of Defense Techn., Changsha 410073, China;

2. Anhui Univ. of Techn., Maanshan 243002, China)

Abstract: In this paper, a general design of the IDSS for fault diagnosis is introduced. It gives a detailed description of the design of knowledge base and inference engine based on the knowledge of fault tree. To design the knowledge base, the object-oriented fault rule, frame and meta-knowledge are integrated to obtain the knowledge that is based on fault tree. To design the inference engine, a fast inference method based on minimal cut sets and minimal path sets of fault tree is used to discover fault quickly.

Key words: IDSS; fault tree; fault diagnosis; knowledge representation; reasoning

1 系统总体设计

智能决策支持系统(IDSS)是在决策支持系统(DSS)的基础上集成人工智能的专家系统(ES)而形成的, 将人工智能中的知识表示与知识处理思想引入到 DSS^[1]。智能决策支持系统的引进, 为故障诊断领域开拓了新的天地, 采用智能决策支持系统进行复杂故障诊断已成为一个前景广阔的新方向^[2]。

故障树分析法是分析系统安全性和可靠性的一种重要方法, 在诸多领域得到广泛应用^[3]。基于故障树模型的诊断有很多优点, 与故障树相关信息可以用来解决智能诊断系统知识获取的瓶颈问题^[4]。文中先给出一个故障诊断智能决策支持系统总体设计图, 如图 1 所示。图 1 的故障诊断智能决策支持系统中, 知识库用于存放基于故障树的框架知识和规则知识, 还包含元知识和专家经验知识等; 知识库管理系统用于对知识库中的知识进行增加、删除、修改等操作; 推理机是整个智能决策支持系统的核心

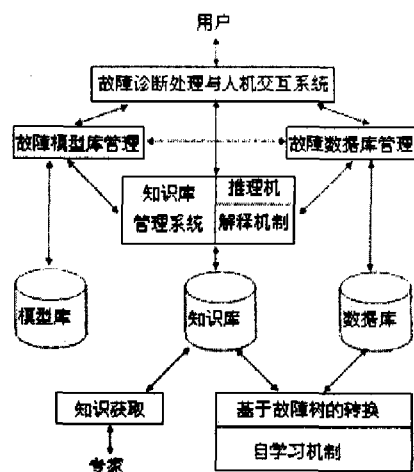


图 1 故障诊断智能决策支持系统

环节, 根据一定的推理算法和搜索策略完成推理; 数据库存放设备运行状况数据、初始故障树的数据、推理的中间过程和结果、最终结论等数据; 模型库用于存放设备运行的数学模型和各类故障诊断模型以及决策模型; 自学习机制通过系统自身的运行, 完成自动改错和自我完善, 不断更新和丰富知识库中的知识; 解释机制对规则、故障树以及推理的过程和各中间结果进行必要的解释; 故障诊断处理与人机交互系统通过对话的方式要求用户回答系统在

收稿日期: 2005-11-28

作者简介: 刘 辉(1979-), 男, 安徽桐城人, 硕士研究生, 研究方向为决策支持系统; 周经伦, 教授, 博士生导师, 研究方向为可靠性工程及质量管理、风险管理与决策支持。

推理过程中提出的问题,给出诊断结果并提供维修建议。

故障诊断智能决策支持系统的核心是知识库和推理机^[1]。下面具体阐述基于故障树的知识库和推理机的设计。

2 知识库设计

2.1 框架知识的获取与表示

框架是人工智能研究中较为广泛使用的一种知识表示模式^[5]。基于广义故障树的故障诊断系统,采用面向对象的框架和产生式规则表示知识,即把整个故障树作为一个对象,把故障树上所有父、子节点间形成的规则封装在独立的框架内。具体实现方法:先用框架将故障分类,将整个故障树用分层的树状框架结构来描述,针对不同故障采用规则来描述。框架和产生式规则两者结合,能全面描述复杂故障诊断知识。

基于广义故障树的框架知识的获取,可直接由广义故障树的存储数据结构直接转换而来,存入相应框架知识库中,从而实现了知识库的自动存储和动态更新。

图 2 表示火箭助推器保险信号灯不亮的故障树。

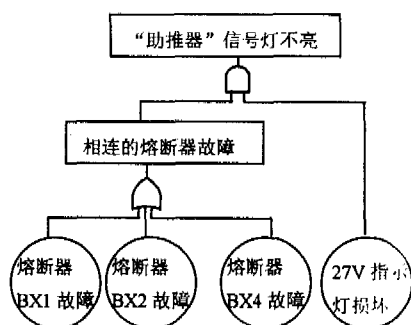


图 2 火箭助推器保险信号灯不亮的故障树表示

图 2 中火箭助推器保险信号灯不亮的故障树中每个故障事件结点就是一个诊断对象,每个诊断对象对应于一个描述框架。火箭助推器保险信号灯不亮的广义故障树描述框架如图 3 所示。

框架名:火箭助推器保险信号灯不亮
类型槽:(1)逻辑与门(or)(2)中间节点
父节点槽:火箭助推器故障
子节点槽:(相连的熔断器故障;27V 指示灯损坏)
规则槽:推理规则 rule15
方法槽:采集熔断器与指示灯信息
约束数据槽:(1)贡献因子:0.90;(2)重要性:0.85

图 3 火箭助推器信号灯不亮故障树的描述框架

2.2 产生式规则知识的获取与表示

2.2.1 产生式的定义和规则表示方法

产生式规则表示法又称为规则表示法,通常用于表示具有因果关系的知识,其基本形式是: $P \rightarrow Q$ 或者 if P then Q 。

其中 P 代表一组条件,如前提、状态、原因等; Q 代表结果,如若干个结论、动作、后果等。其含义是:如果前提 P 被满足,则可以推出结论 Q 或执行 Q 所规定的动作。

2.2.2 基于故障树的基本产生式规则知识的获取与表示

由图 4 的与门故障树产生以下规则:

$$(P_1) \wedge (P_2) \wedge (P_3) \wedge \cdots \wedge (P_n) \rightarrow Q \quad (1)$$

即:if P_1 and P_2 and P_3 and \cdots and P_n then Q

图 5 的或门故障树可形成以下规则:

$$(P_1) \vee (P_2) \vee (P_3) \vee \cdots \vee (P_n) \rightarrow Q \quad (2)$$

式(2)等价如下:

$$P_1 \rightarrow Q \quad \text{即 if } P_1 \text{ then } Q$$

$$P_2 \rightarrow Q \quad \text{即 if } P_2 \text{ then } Q$$

.....

上述图 3 描述框架的故障结点可自动生成下列诊断规则:

rule15: if(相连的熔断器故障)and(27V 指示灯损坏)
then 助推器保险信号灯不亮
if(熔断器 BX1 故障)、
then 相连的熔断器故障
.....

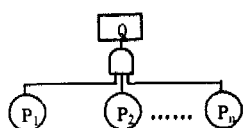


图 4 与门故障树

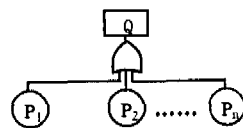


图 5 或门故障树

2.2.3 基于故障树的最小割集和最小路集规则知识的获取与表示

1) 基于故障树最小割集规则知识的获取与表示。

最小割集包含顶事件发生的最少数目而又最必需的底事件的集合,利用最小割集形成的知识规则,与传统方式相比,可以有效地进行故障源分析,对相关信息离线处理,大大减少实时故障发生时搜索的时间与空间。

采用基于布尔割集 BICS 法的鲁塞尔算法,应用计算机程序求出故障树的最小割集。求得如图 6 所示的示例故障树的最小割集为: $\{x_1, x_3\}$, $\{x_1, x_5\}$, $\{x_2, x_4, x_5\}$, $\{x_3, x_4\}$ 。相应规则:

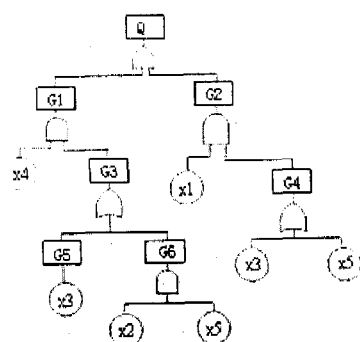


图 6 示例故障树

$$(x_2) \wedge (x_4) \wedge (x_5) \rightarrow Q$$

即:if x_2 and x_4 and x_5 then Q

$$(x_1) \wedge (x_3) \rightarrow Q$$

即:if x_1 and x_3 then Q

.....

2) 基于故障树最小路集规则知识的获取与表示。

如果最小路集中全部基本故障事件不发生时,顶事件就不发生。最小路集给出了系统的安全模式描述。可通过求故障树对偶树的最小割集方法来编制程序,求出最小路集。求得图5示例故障树的最小路集为: $\{x_1, x_4\}$, $\{x_1, x_2, x_3\}$, $\{x_3, x_5\}$ 。下面的定义给出故障事件的判断规则。

定义:如果顶事件发生且一个含 n 个底事件的最小路集中有 $n-1$ 个正常事件,则另一个事件为故障事件。(反证法证明从略)

基于定义,由最小路集得出规则:

$Q \wedge \sim(x_1) \rightarrow x_4$ if Q and not(x_1) then x_4

$Q \wedge \sim(x_4) \rightarrow x_1$ if Q and not(x_4) then x_1

.....

3 推理机设计

推理机是整个专家系统处理问题的核心模块,它根据用户提供的故障征兆,利用知识库中存贮的知识,按一定的推理策略逐步求解问题。常用的推理策略有:正向推理,反向推理及正、反混合推理。为快速推断故障源,本系统采用正反混合推理策略并给出基于故障树最小割集和最小路集优化算法。

3.1 基于“框架—规则”复合知识库的整体推理机制

为便于基于上述知识库的推理,引入“元知识”。“元知识”就是“知识的知识”,即管理知识的知识。元知识表示为:

if [条件1] \wedge [条件2] \wedge ... \wedge [条件 n]

then [故障模块][框架知识库名]

“元知识”负责在故障发生后找到发生故障的功能模块,从而找到相应框架知识,最终由规则知识发现故障源,将故障源定位到某框架,启动该框架内的诊断规则知识库,进行基于故障树的规则知识推理,探明故障源,根据诊断结果启动故障诊断系统,给出排障对策。

3.2 基于故障树的规则知识库的推理机制

把底事件分为3类:正常事件集(NES),故障事件集(CES),可能故障事件集(PES)。

下面给出基于故障树最小割集和最小路集规则的推理算法^[6]:

(1)确定初始 NES, CES, PES。

(2)由规则库中最小路集规则,找出故障事件并加入CES,修改PES。

(3)利用NES缩小最小割集范围。

(4)如果最小割集仅剩一支,则为故障源;否则加入优先权最高的底事件进行测试,重复上述步骤,直到发现故障源。

底事件优先权值的设定,可根据故障树节点的重要度、设备重要度及故障紧急程度等因素,并结合领域专家

的经验,初步确定子故障树中各事件的优先级别,优先测试级别高的事件;通过系统的自学习功能来改变事件的优先级别。下面结合实例对图5故障树,说明当顶事件发生故障时的诊断推理策略。

例1: NES = $\{x_1, x_3\}$ CES = \emptyset PES = $\{x_2, x_4, x_5\}$

由步骤(3), CES = $\{x_2, x_4, x_5\}$, 此即为故障源 CES = \emptyset , 推理结束。

例2: NES = $\{x_1\}$ CES = $\{x_2\}$ PES = $\{x_3, x_4, x_5\}$

由步骤(2), CES = $\{x_2, x_4\}$ PES = $\{x_3, x_5\}$

由步骤(4), 加入测试事件 x_3 , ($w(x_3) > w(x_5)$)

if (x_3) then

NES = $\{x_1\}$ CES = $\{x_2, x_3, x_4\}$ PES = $\{x_5\}$

则 $\{x_3, x_4\}$ 为故障源,推理结束。

else 返回 NES = $\{x_1, x_3\}$

CES = $\{x_2, x_4\}$ PES = $\{x_5\}$

由步骤(2) NES = $\{x_1, x_3\}$

CES = $\{x_2, x_4, x_5\}$ PES = \emptyset

则 $\{x_2, x_4, x_5\}$ 为故障源,推理结束。

推理结束后,将启动解释机制对推理的过程和各中间结果进行解释;启动故障诊断处理系统,给出诊断结果并提供维修建议。

4 结论

将智能决策支持技术引入故障诊断是诊断技术的重要发展方向。文中采用面向对象基于框架、规则、元知识集成的广义故障树知识表示方法,较好地解决了知识自动获取的瓶颈问题,同时给出了基于故障树最小割集和最小路集的快速推理算法,实现了故障快速有效的诊断。在广义故障树各个不同层次利用相应的知识和处理方法来完成故障的信息获取、诊断分析、定位、故障原因分析和解释,以及应采取的具体处理措施。基于故障树的智能决策支持系统投入使用后,必将大幅度提高故障诊断维修效率。

参考文献:

- [1] 陈文伟. 决策支持系统及其开发[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [2] 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [3] 周经伦, 龚时雨, 颜兆林. 系统安全性分析[M]. 长沙:中南大学出版社, 2003.
- [4] Iverson D L, Patterson - Hine F A. A diagnosis system using object-oriented fault tree models[Z]. NA, SA: Ames Research Center, 1990.
- [5] Giarratano J, Riley G. Expert Systems: Principles and Programming[M]. Boston: PWS Publishing Company, 1998.
- [6] 王巍, 崔海英, 黄文虎. 基于故障树最小割集和最小路集的诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(1): 26-29.