

# 核电厂实时故障诊断专家系统的设计与实现

张燕, 周志伟, 董秀臣

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:**为进一步减少核电厂中出现故障后的误操作, 本文研究设计并实现核电厂实时故障诊断的专家系统。系统用专家系统理论将故障诊断的专家知识转化为存储于数据库的规则, 实现了计算机自动异常征兆检测、实时提示、故障实时诊断, 以及提出故障操作建议等功能。研究结果表明, 开发的实时故障诊断专家系统能够为正确诊断压水堆核电厂多个典型事故提供有效的诊断结果和运行帮助信息。

**关键词:**核电厂; 实时故障诊断; 专家系统

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)04-0420-04

## Design and Implementation of Real-Time Diagnostic Expert System in Nuclear Power Plant

ZHANG Yan, ZHOU Zhi-wei, DONG Xiu-chen

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to decrease the probability of malfunctions in nuclear power plant, a real-time expert system to be applied to malfunction diagnosis was designed. Based on the expert system theory the system converts the expert knowledge for diagnosing failures into the rules stored in database, and it can display real-time information of the abnormal symptoms, perform real-time diagnosis of malfunctions and suggest the operation actions related to malfunctions, etc. The results indicate that several typical malfunctions in nuclear power plant are diagnosed automatically and the corresponding operation schedules are given out by present expert system.

**Key words:** nuclear power plant; real-time malfunction diagnosis; expert system

核电厂的安全是倍受瞩目的焦点。故障诊断技术在核电厂中受到高度重视。研究和开发核电厂故障监视和诊断系统目前被普遍关注<sup>[1]</sup>。作为人工智能的分支, 专家系统以其高效率、高准确性在诸多领域得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。在核电厂的运行中, 利用基于专家系统技术的

故障诊断系统可给电厂运行人员提供实时在线帮助, 使操纵员能够快速准确判断核电厂可能发生的事故的征兆和进程状态, 并采取正确动作中止事故的进程或缓解事故的后果。本工作研究实时故障诊断与操作帮助的专家系统的设计与实现方法。

## 1 系统功能和系统结构

### 1.1 系统功能

核电厂实时故障诊断专家系统的主要功能包括:运行状态参数的实时监视与参数变化趋势的观察;提示事故早期征兆,预报事件后果;诊断故障类别,并给出相应的操作建议;实时跟踪操作状态,对操作员操作的有效性给出提示,辅助操作员尽快进行正确操作。

采用有效方法对核电厂进行状态监测是核电厂安全运行的重要保证。运行参数的变化趋势可为操作员提供直观判断核电厂运行状态的辅助信息。采用传统的阈值方法进行状态监测时,一旦检测出异常情况,事故进程可能已发展到难以处理的地步。操作员将在较大心理压力下工作,容易出现误操作。本工作研究的故障诊断专家系统的目标是:能在事故进程早期阶段检测出异常情况的征兆,从而给操纵员提供更多的时间决定应该采取的正确操作;利用专家的知识诊断出故障,提供专家性的操作建议,从而进一步减少操作员误操作的可能性。

### 1.2 系统结构

系统结构示于图 1。

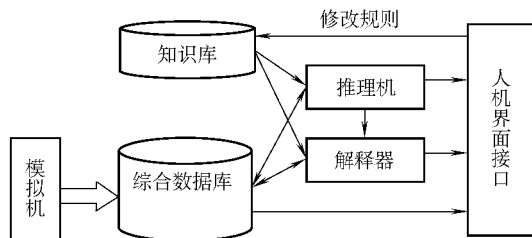


图 1 系统整体框架

Fig. 1 System structure

#### 1) 知识库

该库包括诊断规则库、故障事例库和故障后操作指示库。其中,诊断规则库是专家系统核心之一,它存储与故障诊断有关的原理性知识和专家经验,为推理机提供推理所需知识;事例库包含各个具体故障实例对应的规则集;发生故障后的操作帮助信息则存放在操作指示库,系统诊断出故障后,可给出相应的参考操作序列。知识库设计采用树状框架结构。框架是一种结构化表示法,通常由描述事物的各个方

面的槽组成,每个槽可拥有若干个侧面,每个侧面又可拥有若干个值。核电厂故障诊断专家系统知识库框架示于图 2。

#### 2) 综合数据库

从模拟机获得的有关参数值直接存入综合数据库,诸如安全壳压力、稳压器水位、压力和堆芯出入口温度等。另外,推理机输出的实时异常信息、中间结果、诊断结果以及解释器得出的推理解释也存于综合数据库。所以,综合数据库亦称为动态数据库,而知识库则称为静态数据库。

#### 3) 推理机

通过对综合数据库中模拟机数据的分析推理,与知识库规则进行匹配,进而给出专家性诊断意见。推理机是系统的核心模块。

#### 4) 解释器

根据诊断结果提供相应的操作帮助,并给出整个推理过程的解释,增加推理结果的可信度。

#### 5) 人机界面

将综合数据库的模拟机参数值、推理机结论、解释器输出结果等通过友好的界面设计输出给操作员。专家也可通过界面修改知识库。

## 2 系统实现

### 2.1 知识库的设计与实现

**2.1.1 知识获取与表示** 对核电厂的大多数典型故障,诸如蒸发器 U 型管破口、主冷却剂系统失水、主蒸汽管道破口等,由专家根据经验整理抽取故障对应的特征。使用过程中,也可根据使用情况对知识库更新。这样的孤立事实在系统中以(特性-对象-取值)三元组表示。例如(low\_warning, waterLevel, 325)表示下限报警-水位-阈值。

**2.1.2 规则的表示** 核电厂故障诊断专家系统采用产生式作为规则的表示方法。产生式规则以 if(条件)then(结论)的形式表示。这种表示方法接近人的思维,易于理解,是许多专家系统的主要知识表示手段。由于不确定度的存在,往往需要加上置信度因子(CF),即 if(条件)then(结论)CF 形式。置信度因子根据故障树的风险值确定。

**2.1.3 故障事例的表示** 将核电专家在诊断故障的过程中积累的经验作为事例输入事例库中。本系统中,1个故障与其对应的诊断项目作为1个事例。表示结构设计为:  $FAULT_i = \{Name, Para_1, value_1, \dots, Para_i, value_i, Result, AdviceHelp\}$  即,对第  $i$  种故障, Name 表示故障类别名称;  $Para_i$  代表第  $i$  个参数;  $value_i$  代表第  $i$  个参数的值,对于确定的故障为布尔值,不确定的故障其值为  $0 \sim 1$  之间的小数,表示故障可能性; Result 为诊断结论; Advice-Help 为操作提示帮助。同时,在操作过程中,操作员可将具体诊断的故障作为新事例存储起来。这样,在使用过程中可不断扩大和完善事例库,使得核电厂故障诊断专家系统逐渐趋于完善。

## 2.2 动态综合数据库设计

采用 Microsoft SQL 2000 作为数据库,数据存储主要由两个数据表完成。表 1 (Para Value) 每 1 行记录采集数据的时间以及对应该时间的各参数值。这样,每采集 1 次数据(本文使用的采集时间间隔为 2 s),表 1 (Para Value) 的行数增加 1 行,从而将整个过程中参数的情况记录下来;表 2 (Para Propety) 记录参数的名字对应的意义,以及参数在界面显示的位置。两个表直接通过一致的 ParaName 建立查询连接。

将采集的数据先存入综合数据库,保留其过程记录。这样做有重要的实际意义,包括为某些规则的判定奠定基础,为故障的追踪分析提供可能,另外,操作员通过这些记录的故障数据进行自我训练,而不用每次都开启模拟机等。

## 2.3 推理机实现方法

对输入的运行参数,推理机模块调用知识库中的诊断规则或事例,通过对异常的推理得出诊断结果。推理方式可分为正向推理、反向推理和混合推理 3 种。对于从 if 部分向 then 部分推理的过程叫做正向推理<sup>[3]</sup>。正向推理是从事实或状况向目标或动作进行操作的。反之,对于从 then 部分向 if 部分推理的过程,叫做逆向推理,即从目标或动作向事实或状况进行求证。

应考虑核电厂的实际情况选用合适的推理方法。在实现推理的过程中,本系统首先将故障类别按发生的概率分成两类,发生概率较大的故障类别采用正向推理,概率较小的采用反向推理和混合推理。本系统正向推理算法循环示于图 3。直到匹配到了最后 1 条规则,最后将所有检测的异常标示与知识库中各种故障的特征集进行取交集。如果交集等于某故障特征集,即判定发生了该故障;否则,即交集为空,则无诊断结论,但仍由解释器提供异常信息解释。

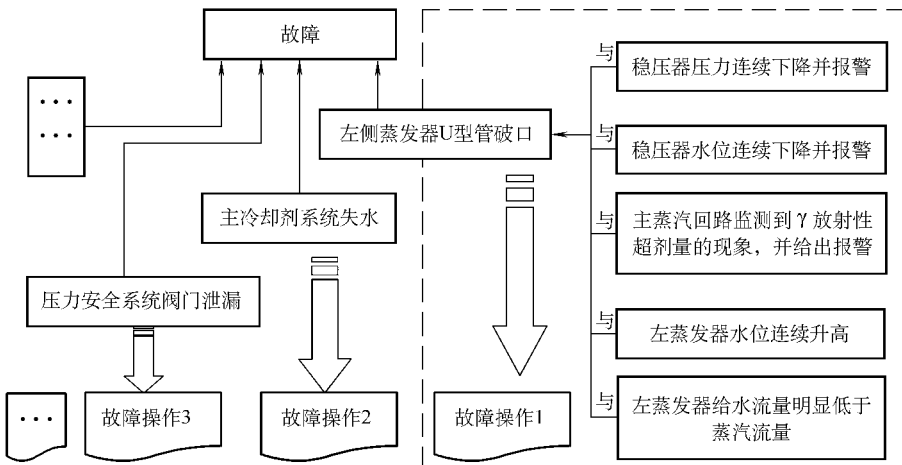


图 2 知识库框架系统

Fig.2 Framework of knowledge database

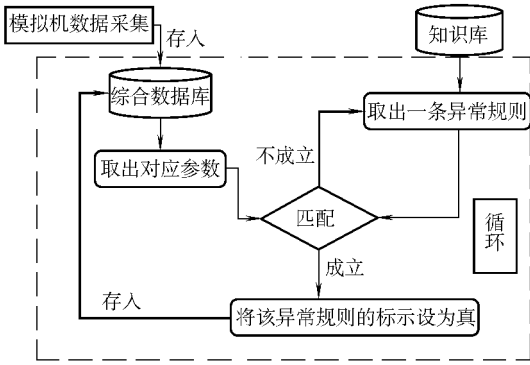


图3 规则推理循环

Fig. 3 Rule-based rational circulation

### 2.4 解释器

在推理结束后,解释器根据推理过程中记录的匹配的规则及匹配的故障类别说明整个推理过程的推理路径,给出推理依据,并给出诊断的参考结果和专家的操作建议。操作员可根据这些信息了解整个推理过程,增加了结果的可信度;操作员参考专家的针对性操作建议,可减少误操作。

### 3 应用实例

在 Windows 操作环境下,系统的诊断应用示例描述(使用正向推理)如下。

分析数据的相关异常:稳压器压力连续下降,稳压器水位连续下降,警告:稳压器水位低于下限报警值,1号蒸发器水位连续升高,2号蒸发器水位连续升高,1号蒸发器的给水流量明显低于蒸汽流量,主蒸汽回路监测到 $\gamma$ 放射性超剂量的现象,警告:稳压器压力低于下限报警值。将数据库相应列值分别设置为1。

推理结论:确认发生了1号蒸发器U型管破口事故。根据得出的数据异常矩阵  $C_i = [1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, \dots, 0, 1]^T$ ,与知识库故障事例表匹配,得出与Name为1号蒸发器U型管破口的故障列完全匹配,故诊断为发生了1号蒸发器U型管破口。

推理结果的解释(规则匹配路径):将  $C_i = [1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, \dots, 0, 1]^T$  值为1

的项查找对应的解释表,翻译出异常现象进行显示。

诊断操作意见:从故障操作表查找对应1号蒸发器U型管破口事故的操作意见,得出1号SGU型管破口后应该采取的操作。1)发生了1号SGU型管破损事故,立即向值班班长报告;2)根据命令关闭事故(1号SG)隔离阀,将发生事故的蒸汽发生器隔离;3)关闭事故(1号SG)给水调节阀,停止该蒸发器的给水;4)通知一回路隔离事故侧反应堆冷却剂系统;5)关闭1号SG泄放水排放阀和取样阀。

### 4 结论

本工作研究开发的核电厂实时故障诊断专家系统可将核电厂已有的故障诊断专家知识通过计算机人工智能技术自动表达。该系统充分利用专家知识,辅助操作员尽早、准确地发现并处理事故,为进一步提高核电厂的安全性提供有力的支持。

开发故障诊断专家系统的关键在于知识库的建立。真正实现全面的故障诊断,还需做很多努力。在最大限度地利用现有丰富的核电厂故障诊断专家知识基础上实现计算机辅助诊断仍然是很有实际工程应用价值的研究课题。

### 参考文献:

[1] 陈浩,郑明光. 核电厂故障检测与报警系统的发展概况[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(6): 563-568.  
CHEN Hao, ZHENG Mingguang. Development of NPP's fault diagnosis and alarm system[J]. At Energy Sci Technol, 2000, 34(6):563-568(in Chinese).

[2] 蔡自兴,徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996:1-153.

[3] 张华,王崇骏,叶玉坤,等. SARSSES:SARS医疗辅助诊断专家系统的设计和实现[J]. 计算机工程与应用,2004,(18):217-219.  
ZHANG Hua, WANG Chongjun, YE Yukun, et al. SARSSES: Design and implementation of an expert system for diagnosis SARS[J]. Comp Eng Appl, 2004, (18):217-219(in Chinese).