

# 基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统 置信规则库的研究

钱虹<sup>1,2</sup>, 马萃萃<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院 自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072)

**摘要:**为提高核电站故障诊断的准确性和及时性,提出采用以核电站主要设备运行参数的报警状态为事件的触发机制对核电站设备故障进行诊断,利用核电站相关运行参数的信息集合建立事件触发下的核电站智能诊断专家系统置信规则库,而构建规则库采用故障机理模型与核电模型相结合的方式,即在故障引起的报警下进行描述故障的征兆集合提取、规则的表示和规则变量的设定。通过在核电模型中人为引入故障,利用基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统进行故障诊断。诊断结果表明,本系统诊断出的故障类型与在核电模型中引入的故障类型一致,验证了本系统诊断结果的准确性,证明了此规则库的有效性和可行性。

**关键词:**事件触发机制;报警状态;专家系统;故障诊断;置信规则库

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)03-0485-09

doi: 10.7538/yzk.2017.51.03.0485

## Research on Belief Rule Base of Intelligent Diagnosis Expert System Based on Event-triggering Mechanism in Nuclear Power Plant

QIAN Hong<sup>1,2</sup>, MA Cui-cui<sup>1</sup>

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Power Station Automation Technology Key Laboratory, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and timeliness of the fault diagnosis in nuclear power plant, a event-triggering mechanism regarding the alarm status of operating parameters of the main equipment as the triggering event was proposed for the fault diagnosis in this paper, and a belief rule base of intelligent diagnosis expert system based on event-triggering mechanism was established by using the set of information of the relevant operation parameters in nuclear power plant. The belief rule base was built by combining the failure mechanism model with the nuclear power plant model, namely extracting the symptoms which describe the faults, expressing rules and setting variables of rules under the alarms caused by the faults. The faults were artificially inserted into the nuclear power plant model and diagnosed by the diagnostic system researched above. The diagnostic results show that the type of fault obtained from the diagnostic

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-07-11

基金项目: 上海市电站自动化技术重点实验室资助项目(04DZ05901)

作者简介: 钱虹(1967—), 女, 上海人, 副教授, 博士, 从事核电站控制与智能诊断研究

system matches with that inserted into the nuclear power plant model, which verifies the accuracy of the diagnosis of this system and proves the validity and feasibility of this rule base.

**Key words:** event-triggering mechanism; alarm status; expert system; fault diagnosis; belief rule base

目前核电站设计中普遍采用单个运行参数的越限报警对核电站设备发生故障后的异常工况进行监测,但并没有利用报警等有效信息对运行参数发生异常的原因进行分析,因此有必要在核电站发生参数报警后采用故障诊断系统对核电站设备故障进行及时诊断和定位,以用于事故分析和应急措施指导。

核电站故障诊断系统有很多<sup>[1-3]</sup>,其中专家系统应用广泛,因此国内外学者对作为专家系统核心的规则库进行了大量的研究。文献[4]利用故障树的最小割集进行规则的构建,文献[5]基于数据驱动通过大量的实验数据生成故障诊断的置信规则库,文献[6]在此基础上引入了分布式置信度对置信规则的结构进行优化与改进。但以上规则库的建立均基于时间触发机制,没有考虑核电站参数报警等有效信息,这就导致故障诊断系统在核电站运行的整个过程中按照一定的固定周期频繁启动而无法针对核电站异常状态及时作出反应。

现阶段,事件触发机制多应用于网络控制<sup>[7]</sup>和微电网通信<sup>[8]</sup>等系统中以提高系统的准确性和及时性。本文提出将事件触发机制应用于核电站的故障诊断中,将报警信息与故障诊断相结合,以核电站主要设备运行参数的报警状态作为触发事件,利用相关运行参数的信息集合,建立基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统置信规则库,以提高故障诊断的准确性和及时性。

## 1 基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统置信规则库的机理

在核电站中,设备故障的发生会使运行参数偏离正常值而产生报警,即报警表示运行参数的异常,也反映了设备故障的发生。所以,可将报警信息与故障诊断相结合,以核电站主要设备运行参数的报警状态作为故障诊断系统的触发事件,并设置自定义报警值以实现微小程度故障

的及时诊断。在此事件触发机制下,核电站无运行参数报警时,核电站智能诊断专家系统不启动,一旦有报警发生,诊断系统即基于报警触发并根据可观测的相关征兆特征来判断唯一与之一对应的故障类型,故其置信规则库应体现“报警-故障-征兆”的三层逻辑关系,构建该置信规则库时应在故障引起的报警下提取故障相关征兆集合。基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统置信规则库的构建如图1所示。

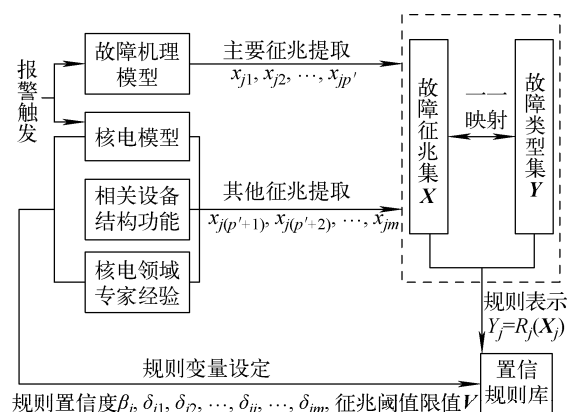


图1 基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统置信规则库的构建

Fig. 1 Construction for belief rule base of intelligent diagnosis expert system based on event-triggering mechanism in nuclear power plant

以上分析表明,因为核电站设备故障会导致相关的系统运行参数超过一定限值而产生报警,所以可根据报警发生时刻对应的一系列故障征兆构建规则库。为提高诊断的准确性,需实现故障类型集 $Y=[Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_n]$ 与故障征兆集 $X=[X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n]$ 之间的一一映射关系。以故障类型 $Y_j$ 为例,为准确诊断出该故障,除需构建故障机理模型提取报警触发下该故障的主要征兆 $[x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp'}]$ 外,还需通过核电模型、相关设备结构功能和核电领域专家经验相结合的方式尽可能多地提

取其他征兆 $[x_{j(p'+1)}, x_{j(p'+2)}, \dots, x_{jm}]$ ;然后将故障与征兆之间一一映射的关系通过规则进行表示,从而得到 $Y_j = R_j(X_j)$ ;规则中各规则置信度的集合 $[\beta_j, \delta_{j1}, \delta_{j2}, \dots, \delta_{ji}, \dots, \delta_{jm}]$ 和征兆阈值限值集合 $V=[V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m]$ 等规则变量通过核电模型实验数据和核电领域专家经验确定;最后将此报警触发下所有故障类型的诊断规则集合在一起就构成了基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统置信规则库。

### 1.1 基于报警触发的诊断专家系统置信规则库的结构

基于报警触发的置信规则库中,故障类型集与故障征兆集之间为一一映射关系,其表达可采用矩阵形式,故其置信规则库由 $Y$ 向量和 $X$ 矩阵构成。

假设系统可能发生 $n$ 种故障类型,则所有故障组成的集合称为故障集 $Y$ ,可描述为:

$$Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_n] \quad (1)$$

式中: $Y$ 为系统故障集; $Y_j$ 为集合中第 $j$ 个故障类型; $j=1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 为系统可能发生的故障类型的数量。

假设系统可能发生 $m$ 种故障征兆,则所有征兆组成的集合称为征兆集 $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2i} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j1} & x_{j2} & \cdots & x_{ji} & \cdots & x_{jm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{ni} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $X_j$ 为故障类型 $Y_j$ 下所有故障征兆的集合; $x_{ji}$ 为故障类型 $Y_j$ 下的第 $i$ 种故障征兆, $i=1, 2, \dots, m$ ,  $m$ 为故障征兆的数量。

而故障类型与故障征兆之间,存在一一映射关系,即:

$$Y_j \leftrightarrow X_j \quad (3)$$

式(3)表示第 $j$ 个故障类型 $Y_j$ 有唯一与之对应的 $X_j$ ,而 $X_j$ 有唯一与之对应的故障类型 $Y_j$ 。

### 1.2 基于报警触发的诊断专家系统置信规则库故障征兆的提取

为保证故障类型与故障征兆之间一一映射

的关系,需通过多种方式提取故障所对应的征兆,所以按照提取方式的不同将每个故障类型下的故障征兆分为主要征兆和其他征兆。

#### 1) 故障主要征兆的机理提取

故障的主要征兆通过构建报警触发下的故障机理模型进行提取。定义报警参数为 $Z$ ,则故障类型 $Y_j$ 的主要征兆提取过程如下。

首先,基于报警参数建立与其相关的系统机理模型,设模型集合为 $F$ :

$$F = [f_1, f_2, \dots, f_k, \dots, f_l] \quad (4)$$

式中: $f_k$ 为与报警参数有关的第 $k$ 个子系统的机理模型; $l$ 为模型集合中模型的数量。

模型集合 $F$ 下各模型的具体表达式可描述为:

$$\begin{cases} f_1(Z, w_1^1, w_2^1, \dots, w_{p_1}^1, \dots, w_{q_1}^1) = 0 \\ f_2(Z, w_1^2, w_2^2, \dots, w_{p_2}^2, \dots, w_{q_2}^2) = 0 \\ \vdots \\ f_k(Z, w_1^k, w_2^k, \dots, w_{p_k}^k, \dots, w_{q_k}^k) = 0 \\ \vdots \\ f_l(Z, w_1^l, w_2^l, \dots, w_{p_l}^l, \dots, w_{q_l}^l) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $w_{p_k}^k$ 为第 $k$ 个子系统机理模型中第 $p$ 个核电站其他运行参数; $q_k$ 为第 $k$ 个子系统机理模型中核电站其他运行参数的数量。

整理式(5),将故障类型 $Y_j$ 下与报警参数 $Z$ 有关的核电站其他运行参数作为本系统中此报警触发下该故障对应的征兆特征参数,并以报警参数为因变量,以此报警触发下该故障对应的征兆特征参数为自变量,推得故障类型 $Y_j$ 下的报警参数机理模型,可描述为:

$$Z = g(w_1, w_2, \dots, w_p, \dots, w_{q'}) \quad (6)$$

式中: $w_p$ 为本系统中报警参数 $Z$ 下故障类型 $Y_j$ 对应的征兆特征参数; $q'$ 为征兆特征参数的数量。

式(6)满足:

$$\begin{aligned} \{w_p \mid 1 \leq p \leq q'\} \subseteq \\ \{w_{p_k}^k \mid 1 \leq p \leq q_k, 1 \leq k \leq l\} \end{aligned} \quad (7)$$

对式(6)中的自变量求偏导,得到此参数报警触发下的故障机理模型,可描述为:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \sum_{p=1}^{q'} c_p \Delta w_p = c_1 \Delta w_1 + c_2 \Delta w_2 + \dots + \\ &\quad c_p \Delta w_p + \dots + c_{q'} \Delta w_{q'} \quad (8) \\ c_1 &= \frac{\partial g(w_1, w_2, \dots, w_p, \dots, w_{q'})}{\partial w_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_2 &= \frac{\partial g(w_1, w_2, \dots, w_p, \dots, w_{q'})}{\partial w_2} \\
 &\vdots \\
 c_p &= \frac{\partial g(w_1, w_2, \dots, w_p, \dots, w_{q'})}{\partial w_p} \\
 &\vdots \\
 c_{q'} &= \frac{\partial g(w_1, w_2, \dots, w_p, \dots, w_{q'})}{\partial w_{q'}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中:  $c_p$  为常数, 其大小与设备结构和核电机组的容量有关, 可通过核电模型求解获得;  $\Delta Z$  为报警参数  $Z$  的增量, 可采用核电模型的实验方法获得;  $\Delta w_p$  为自变量  $w_p$  的增量, 可采用核电模型的实验方法获得。

最后, 根据各  $c_p$  的正负和  $\Delta w_p$  的大小即可得到对应于该故障的主要征兆向量, 可描述为:

$$\begin{aligned}
 [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}, \dots, x_{jq'}] = \\
 [\Delta w_1, \Delta w_2, \dots, \Delta w_p, \dots, \Delta w_{q'}] \quad (10)
 \end{aligned}$$

## 2) 故障其他征兆的提取

仅凭故障的主要征兆, 不能实现故障类型集与故障征兆集之间的一一映射关系, 所以还需尽可能多地提取该故障类型  $Y_j$  的其他征兆  $[x_{j(q'+1)}, x_{j(q'+2)}, \dots, x_{jm}]$ 。故障其他征兆的提取需结合故障相关设备的结构功能和核电领域专家经验, 同时基于核电模型进行多次实验得到从引入故障到报警发生时刻系统各运行参数的实时变化曲线, 然后根据曲线的变化情况得出在此报警触发下与该故障相关的其他征兆。其中, 基于核电模型进行实验时输入量为故障类型  $Y_j$ , 输出量为该故障下的各征兆向量  $X_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{jm}]$ 。

## 1.3 基于报警触发的诊断专家系统置信规则的表示

在规则库中, 故障集和征兆集以规则的形式存在。基本规则库由一系列简单的 IF-THEN 规则组成, 但由于核电系统的复杂性、故障征兆本身的模糊不确定性、故障类型与故障征兆之间关系的不确定性和非线性特征, 本系统采用基于分布式置信度的置信规则:

$$\begin{aligned}
 R: & \text{IF } A_1(\delta_1) \wedge A_2(\delta_2) \wedge \dots \\
 & \wedge A_i(\delta_i) \wedge \dots \wedge A_m(\delta_m) \\
 & \text{THEN } \{(D_1, \beta_1), (D_2, \beta_2), \dots, \\
 & (D_j, \beta_j), \dots, (D_n, \beta_n)\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中:  $A_i$  为该规则的第  $i$  个前提条件;  $\delta_i$  为第  $i$

个前提条件的置信度;  $m$  为前提条件的个数;  $D_j$  为第  $j$  个结论;  $\beta_j$  为第  $j$  个结论的置信度;  $n$  为结论的个数。

且式(11)满足如下约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 < \delta_i \leq 1 & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \beta_j = 1 \\ 0 < \beta_j \leq 1 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (12)$$

在本系统中, 前提条件为故障的征兆, 结论为系统可能发生的故障类型。征兆的置信度是对征兆特征参数偏离正常界限状态的表述, 反映了参数异常的程度, 故首先将征兆特征参数的状态表达成模糊语义, 即:

$$T_i \in \{L, N, H\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个征兆特征参数的状态; L(low)为征兆特征参数异常低; N(normal)为征兆特征参数正常; H(high)为征兆特征参数异常高。

但故障诊断系统中只考虑异常征兆, 即本系统置信规则库中征兆特征参数的状态满足:

$$T_i \in \{L, H\} \quad i = 1, 2, \dots, m', m' \leq m \quad (14)$$

式中,  $m'$  为本系统置信规则库中最终列出的各故障类型下的征兆数量。

同时, 本系统需为核电站操作人员提供可信度最大的唯一诊断结果, 故采用置信规则的不完整表示方法, 即在同一条规则中只考虑置信度最大的一种故障, 故障的置信度满足:

$$\beta = \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j, \dots, \beta_n\} \quad (15)$$

式中,  $\beta$  为规则结论的置信度。

此外, 为提高系统可靠性, 本系统设置所有置信度下限为 0.7。故本系统置信规则库中故障类型  $Y_j$  的诊断规则可描述为:

$$\begin{aligned}
 R_j: & \text{IF } x_{j1} \text{ is } T_1^j \wedge x_{j2} \text{ is } T_2^j \wedge \dots \\
 & \wedge x_{ji} \text{ is } T_i^j \wedge \dots \wedge x_{jm'} \text{ is } T_{m'}^j \\
 & \text{THEN } Y_j(\beta_j)
 \end{aligned}$$

$$\text{With attribute belief degree } \delta_1^j, \delta_2^j, \dots, \delta_i^j, \dots, \delta_{m'}^j \quad (16)$$

且满足如下约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.7 \leq \delta_i \leq 1 & i = 1, 2, \dots, m' \\ 0.7 \leq \beta \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

## 1.4 基于报警触发的诊断专家系统置信规则变量的设定

基于报警触发的诊断专家系统置信规则库

中,置信规则变量包括规则的置信度和征兆的阈值限值,其中规则置信度包括征兆置信度和故障置信度,征兆阈值限值影响置信度的大小并决定诊断结果的准确度和精确度。

### 1) 规则置信度的设定

置信度  $\beta$  是指报警下出现某故障的可能性,由核电领域专家根据经验设定。 $[\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_{m'}]$  为与该故障对应的各征兆的置信度向量,其大小参考基于核电模型得到的报警时刻对应征兆特征参数的值,遵循一定的置信度函数计算原则,并结合核电领域专家经验进行最终设定。其中,因为置信度函数同时影响到系统诊断结果的可信度和诊断过程的速度,故其应在满足系统诊断准确度的前提下尽可能计算简单,本系统采用文献[9]中的梯形隶属度函数。若设  $\delta_{Li}$ 、 $\delta_{Ni}$  和  $\delta_{Hi}$  分别为某故障下第  $i$  个征兆特征参数异常低、正常和异常高的置信度,则根据式(14)可得到本系统中该征兆的置信度参考的计算原则:

$$\delta_i \in \{\delta_{Li}, \delta_{Hi}\} \quad i = 1, 2, \dots, m' \quad (18)$$

### 2) 征兆阈值和限值设定

由梯形隶属度函数的计算公式<sup>[9]</sup>得,为设定征兆的置信度,需设定征兆的阈值和限值。因为征兆特征参数值到达限值认为故障 100% 发生,征兆特征参数值超过阈值则认为故障可能发生且征兆特征参数开始异常,所以可首先参考由核电模型实验数据得到的报警发生时刻对应征兆特征参数实时值设定故障诊断专家系统中故障征兆的限值,而故障征兆的阈值选取原则是按照正常和发生故障的变化点值设定,且带有一定的裕量。然后经过核电模型的多次实验反馈和核电领域专家的经验修正,即可最终设定各征兆的阈值限值。设  $v_{mini}$ 、 $v_{Li}$ 、 $v_{Hi}$  和  $v_{maxi}$  分别为某故障下第  $i$  个征兆特征参数的下限值、下阈值、上阈值和上限值,向量  $V_i$  为该故障征兆的阈值限值集合,矩阵  $V$  为该故障下所有征兆的阈值限值集合:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_{m'} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} v_{min1} & a_{12} v_{L1} & a_{13} v_{H1} & a_{14} v_{max1} \\ a_{21} v_{min2} & a_{22} v_{L2} & a_{23} v_{H2} & a_{24} v_{max2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} v_{mini} & a_{i2} v_{Li} & a_{i3} v_{Hi} & a_{i4} v_{maxi} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m'1} v_{minm'} & a_{m'2} v_{Lm'} & a_{m'3} v_{Hm'} & a_{m'4} v_{maxm'} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中,系数矩阵可描述为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m'1} & a_{m'2} & a_{m'3} & a_{m'4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

且满足:

$$a_{i1} = a_{i2} = \begin{cases} 1, v_i < v_{iset} \\ 0, v_i \geq v_{iset} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m' \quad (21)$$

$$a_{i3} = a_{i4} = \begin{cases} 0, v_i \leq v_{iset} \\ 1, v_i > v_{iset} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m' \quad (22)$$

其中: $v_i$  为报警发生时刻故障第  $i$  个征兆特征参数的实时值; $v_{iset}$  为故障第  $i$  个征兆特征参数的正常设定值。 $a_{i1}$ 、 $a_{i2}$  和  $a_{i3}$ 、 $a_{i4}$  的不同取值体现了故障征兆的单侧性。

## 2 基于稳压器水位低报警触发的一回路主管道破裂的置信规则

因为一回路主管道破裂而引发的失水事故(LOCA)是核电站中的典型事故,且事故后果随故障程度的增大而不断加重,所以实现对此故障的及时诊断尤为重要。故以一回路主管道破裂为例进行基于事件触发机制的核电站智能故障诊断专家系统置信规则库的构建,即  $Y_j = \text{LOCA}$ 。

一回路主管道破裂会引起稳压器水位的迅速下降,并导致稳压器水位低报警,故以稳压器水位低报警作为其触发事件,即  $Z = H_z$ 。然后设定自定义报警值并基于此报警值构建稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的置信规则。

## 2.1 基于稳压器水位低报警触发的一回路主管道破裂故障征兆的提取

### 1) 故障主要征兆的机理提取

首先,基于报警参数  $H_Z$  对稳压器的运行机理进行分析,建立稳压器机理模型<sup>[9]</sup>的集合:

$$F = [f_1, f_2] \quad (23)$$

$$f_1: \frac{dH_Z}{dt} = \frac{1}{A} [W_{SU}\nu_{SU} + (W_{SP} + W_{SC} + W_{RO} + W_{WC} - W_{FL})\nu_f] + \frac{M_M}{A} \left( \frac{\partial \nu_M}{\partial h_M} \frac{dh_M}{dt} + \frac{\partial \nu_M}{\partial p_Z} \frac{dp_Z}{dt} \right) \quad (24)$$

$$f_2: k_1 \frac{dW_{SU}}{dt} = p_Z - p_{SG} + \rho_M g \Delta H_Z - k_2 W_{SU} \quad (25)$$

其中:  $H_Z$  为稳压器水位;  $p_Z$  为稳压器压力;  $p_{SG}$  为蒸汽发生器压力;  $W_{SU}$  为稳压器波动流量;  $A$  为稳压器截面积;  $\nu_{SU}$  为波动体积的比容;  $W_{SP}$  为喷淋流量;  $W_{SC}$  为喷淋冷凝流量;  $W_{RO}$  为蒸汽冷凝流量;  $W_{WC}$  为壁面冷凝流量;  $W_{FL}$  为闪蒸流量;  $\nu_f$  为饱和液体的比容;  $M_M$  为液体质量;  $\nu_M$  为液体区的比容;  $h_M$  为液体焓;  $\rho_M$  为液体密度;  $k_1$  和  $k_2$  为系统常数。

整理式(24)、(25),将 LOCA 下与稳压器水位有关的核电站其他运行参数作为稳压器水位低报警触发下 LOCA 对应的征兆特征参数,并以稳压器水位为因变量,以各征兆特征参数为自变量,推得 LOCA 下稳压器水位低报警的参数机理模型:

$$H_Z = g(p_Z, W_{SU}) \quad (26)$$

式中:  $p_Z$  和  $W_{SU}$  为稳压器水位低报警触发下 LOCA 对应的征兆特征参数。

再分别对式(26)中的两个自变量求偏导,得到稳压器水位低报警下的故障模型:

$$\Delta H_Z = c_1 \Delta p_Z + c_2 \Delta W_{SU} \quad (27)$$

$$c_1 = \frac{\partial g(p_Z, W_{SU})}{\partial p_Z} \quad (28)$$

$$c_2 = \frac{\partial g(p_Z, W_{SU})}{\partial W_{SU}}$$

其中:  $c_1$ 、 $c_2$  为常数,其大小与设备的结构和核电机组的容量相关;  $\Delta H_Z$  为稳压器水位报警的增量;  $\Delta p_Z$  为自变量  $p_Z$  的增量;  $\Delta W_{SU}$  为自变量  $W_{SU}$  的增量。

故提取到稳压器水位低报警下一回路主管道破裂可能的主要征兆向量:

$$[x_{j1}, x_{j2}] = [\Delta p_Z, \Delta W_{SU}] \quad (29)$$

其中,  $\Delta p_Z < 0$ ,  $\Delta W_{SU} > 0$ 。

### 2) 故障其他征兆的提取

在提取了一回路主管道破裂的主要征兆的基础上,对该故障相关的设备进行结构与功能上的分析。一回路主管道破裂引发失水事故发生时,一回路冷却剂迅速从破口喷放流失,一回路压力迅速下降,稳压器压力  $p_Z$  和水位  $H_Z$  也相应下降;当稳压器水位继续下降时,为维持稳压器水位,上充流量  $W_{up}$  会增加以弥补流失的冷却剂,从而使波动管流量增加;堆芯冷却剂减少,冷却不足,致使反应堆安全壳内温度  $T_c$  升高;从破口喷放出的高温高压冷却剂一部分被汽化变成蒸汽,一部分凝结成水流到安全壳底部的地坑中,所以安全壳内压力  $p_c$  升高,地坑水位  $H_c$  也会升高。所以,提取到稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的其他征兆向量为:

$$[x_{j3}, x_{j4}, x_{j5}, x_{j6}] = [\Delta W_{up}, \Delta T_c, \Delta p_c, \Delta H_c] \quad (30)$$

其中,  $\Delta W_{up} > 0$ ,  $\Delta T_c > 0$ ,  $\Delta p_c > 0$ ,  $\Delta H_c > 0$ 。

最后,利用核电模型的故障引入机制进行多次实验,根据测得的报警触发时刻各征兆特征参数值,同时结合核电领域专家经验对征兆向量进行约简,最终确定本系统中用于诊断稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的征兆向量:

$$X_j = [x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}, x_{j4}] = [\Delta p_Z, \Delta W_{up}, \Delta T_c, \Delta H_c] \quad (31)$$

其中,  $\Delta p_Z < 0$ ,  $\Delta W_{up} > 0$ ,  $\Delta T_c > 0$ ,  $\Delta H_c > 0$ 。

## 2.2 基于稳压器水位低报警触发的一回路主管道破裂置信规则的表示和规则变量的设定

根据提取的稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的对应征兆可将其诊断规则描述为:

$$R_j: \text{IF } p_Z \text{ is L} \wedge W_{up} \text{ is H} \wedge T_c \text{ is H} \wedge H_c \text{ is H} \\ \text{THEN LOCA}(\beta_j)$$

$$\text{With attribute belief degree } \delta_1^j, \delta_2^j, \delta_3^j, \delta_4^j \quad (32)$$

为设定诊断规则中各规则置信度及各征兆的阈值限值,需利用核电模型在不同故障程度下进行多次故障引入实验。首先,以故障程度为 20% 这一极限为例,在核电模型中按 100%

工况运行 10 s 后引入该故障,引入故障后约 80 s 发生稳压器水位低报警,由此得到的此段时间内故障对应相关征兆特征参数的实时变化曲线如图 2 所示。其中,核电模型采用以 M310 为参考堆芯的 1 000 MW 福清核电机组。

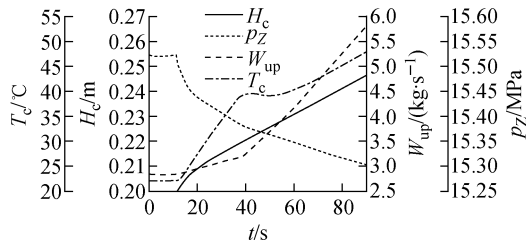


图 2 稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的相关征兆特征参数变化曲线

Fig. 2 Variation curve of symptom characteristic parameter related to LOCA based on pressurizer low water level alarm

根据图 2 将各征兆特征参数在报警发生时刻的实时值与其对应的正常设定值进行比较,可得此规则中征兆阈值限值矩阵的系数矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

然后,基于核电模型在不同故障程度下的多次实验反馈,并通过专家的经验修正,最终设定此规则中各征兆的阈值限值:

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\min 1} & v_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_{H2} & v_{\max 2} \\ 0 & 0 & v_{H3} & v_{\max 3} \\ 0 & 0 & v_{H4} & v_{\max 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.353 & 15.493 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.986 & 3.226 \\ 0 & 0 & 22.168 & 32.488 \\ 0 & 0 & 0.200 & 0.233 \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中: $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  分别为  $p_z$ 、 $W_{up}$ 、 $T_c$  和  $H_c$  的阈值限值集合,各集合中规则变量的单位分别为 MPa、kg/s、 $^{\circ}\text{C}$  和 m;0 表示该变量与此规则无关。

之后,在此基础上遵循模糊隶属度函数的

计算原则,得到此规则中各规则置信度的领域专家值:

$$\beta_j = 0.9 \quad (35)$$

$$[\delta_1', \delta_2', \delta_3', \delta_4'] = [0.9, 0.9, 0.8, 0.8] \quad (36)$$

则稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的诊断规则可描述为:

$$R_j: \text{IF } p_z \text{ is L} \wedge W_{up} \text{ is H} \wedge T_c \text{ is H} \wedge H_c \text{ is H} \\ \text{THEN LOCA}(0.9)$$

With attribute belief degree 0.9, 0.9, 0.8, 0.8 (37)

### 3 基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统的故障诊断

本次设计的基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统中,置信规则库采用 Access 关系数据库构建;实时征兆来源于核电模型,通过 OPC 访问的形式获取;故障诊断采用故障诊断模块实现,通过 Visual C++ 编程进行诊断程序的开发;诊断结果及其置信度通过用户画面进行显示,整个诊断系统基于 NetControl 监控平台实现。

本系统的软件组成如图 3 所示。

以故障程度为 20% 的一回路主管道破裂为例,当核电模型运行在 100% FP 工况时,通过故障列表引入此故障,如图 4 所示。

引入故障一段时间后,稳压器水位到达其自定义报警值,使故障诊断系统发生稳压器水位低报警,此时从实时数据库中读取相关故障征兆特征参数的实时值如下式:

$$[v_1, v_2, v_3, v_4] = [15.324, 3.290, 30.421, 0.223] \quad (38)$$

同时,在置信规则库中读取稳压器水位低报警下一回路主管道破裂的故障信息,得故障类型  $Y_j = \text{LOCA}$ ,且故障置信度  $\beta_j = 0.9$ ;再读取一回路主管道破裂所对应的各征兆信息,得各征兆的阈值限值和征兆置信度(式(34)和式(36))。

然后根据式(34)和式(38),采用梯形隶属度函数计算公式<sup>[9]</sup>计算得到各实时征兆转换成证据后的证据置信度,如下式所示。

$$[\delta_1', \delta_2', \delta_3', \delta_4'] = [1, 1, 0.7997, 0.6970] \quad (39)$$

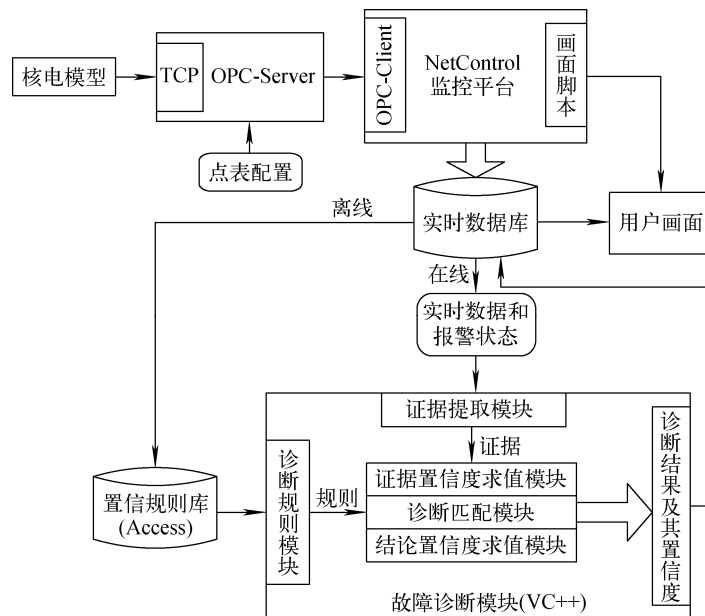


图3 基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统的软件组成

Fig. 3 Software structure of nuclear power plant intelligent diagnosis expert system based on event-triggering mechanism

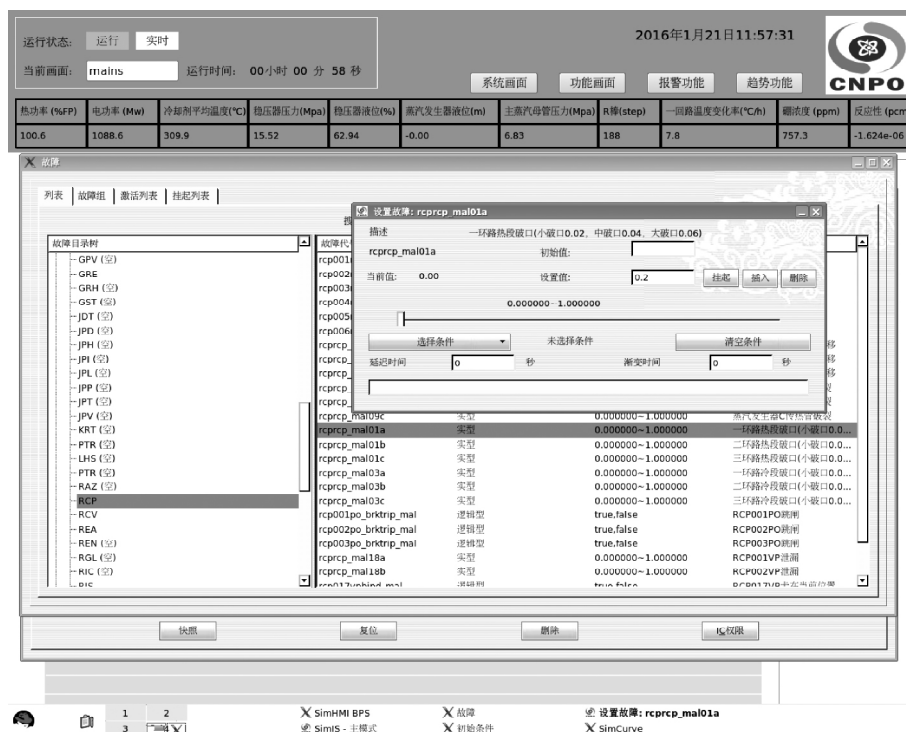


图4 破口程度为20%的一回路主管道破裂的故障引入操作

Fig. 4 Interposition of LOCA with 20% leakage

再将规则与证据的置信度按照一般匹配算法<sup>[10]</sup>进行推理匹配,其中匹配指数取0.2。经计算 $\theta=0.103\ 3<0.2$ ,即匹配度小于匹配指

数,证据与规则匹配成功,此诊断结果为真,并经过计算得此诊断结果的置信度 $\beta'_i=0.896\ 7$ 。

故本系统在稳压器水位低报警触发下根据



核电模型实验的实时数据得出的诊断结果为一回路主管道破裂,其置信度约为 0.896 7,该诊断结果及其置信度将在用户画面中进行显示。

以上诊断结果表明,利用基于事件触发机制的核电站智能诊断专家系统诊断出的故障类型与在核电模型中实际引入的故障类型(如图4)一致,证明本系统的诊断准确、有效。

#### 4 结束语

本文提出了一套在报警触发下构建核电站智能诊断专家系统置信规则库的理论方法,采用模型与经验相结合的方式在报警触发下提取故障征兆集合,并设定规则变量。诊断结果表明基于此规则库的诊断系统能对核电站设备故障进行准确、及时的诊断。

实际应用中,为达到对核电站设备故障的准确诊断,需通过与核电站相对应的核电模型获取其初始规则库,并在此基础上根据核电站实际运行情况进行不断的修正。其中,因故障程度影响参数的响应特性,故深入研究故障程度对诊断规则的影响可进一步提高诊断系统的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 周刚,杨立. 核电厂智能诊断方法研究的进展[J]. 原子能科学技术,2008,42(1):93-99.  
ZHOU Gang, YANG Li. Advance in study of intelligent diagnostic method for nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(1): 93-99(in Chinese).
- [2] 刘永阔,谢春丽,成守宇,等. 核电站分布式智能故障诊断系统研究与设计[J]. 原子能科学技术,2011,45(6):688-694.  
LIU Yongkuo, XIE Chunli, CHENG Shouyu, et al. Research and design of distributed intelligence fault diagnosis system in nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(6): 688-694(in Chinese).
- [3] 冯彦科. 核电站智能故障诊断专家系统的研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [4] 刘冰. 基于故障树的安注系统故障诊断专家系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [5] 余瑞银,杨隆浩,傅仰耿. 数据驱动的置信规则库构建与推理方法[J]. 计算机应用,2014,34(8):2155-2160,2169.  
YU Ruiyin, YANG Longhao, FU Yanggeng. Data driven construction and inference methodology of belief rule-base[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(8): 2155-2160, 2169(in Chinese).
- [6] 苏群,杨隆浩,傅仰耿,等. 基于BK树的扩展置信规则库结构优化框架[J]. 计算机科学与探索,2016,10(2):257-267.  
SU Qun, YANG Longhao, FU Yanggeng, et al. Structure optimization framework of extended belief rule based on BK-tree[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2016, 10(2): 257-267(in Chinese).
- [7] 胡松林. 基于事件触发机制的网络化控制系统的分析与综合[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [8] 曹慧子. 事件触发与TCP/IP在微电网通信系统中的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [9] 钱虹,骆建波,金蔚霄,等. 报警触发式蒸汽发生器传热管破裂事故诊断系统的研究[J]. 核动力工程,2015,36(1):98-103.  
QIAN Hong, LUO Jianbo, JIN Weixiao, et al. Research on alarm triggered fault-diagnosis expert system for U-shaped tube breaking accident of steam generators[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(1): 98-103(in Chinese).
- [10] 马华杰,王金梅,朱瑜红. 模糊专家系统在循环流化床锅炉运行诊断中的应用研究[J]. 自动化与信息工程,2012(4):20-22.  
MA Huajie, WANG Jinmei, ZHU Yuhong. Research on application of operational fault diagnosis for circulating fluidized bed boiler based on fuzzy expert system[J]. Automation & Information Engineering, 2012(4): 20-22(in Chinese).