

凝汽器故障诊断的模糊交互熵算法

文孝强, 徐志明, 孙媛媛, 孙灵芳

(东北电力大学, 吉林省 吉林市 132012)

Condenser Fault Diagnosis Based on Fuzzy Cross Entropy Method

WEN Xiao-qiang, XU Zhi-ming, SUN Yuan-yuan, SUN Ling-fang

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Due to complexity and uncertainty of condenser fault diagnosis, symptoms and typical faults of condenser were modified. Based on the information theory, the fuzzy cross entropy method (FCEM) was introduced to measure the distance between the known and unknown fuzzy fault models. The accuracy of fault diagnosis was improved through the refinement and expansion of symptoms and typical faults. With the application on the 600 and 300 MW power plant simulator, the results show that the accuracy rate of recognition is 95% and easy to achieve in practice. The result also proves that the new method is reasonable and feasible.

KEY WORDS: power plant simulator; condenser; fault diagnosis; fuzzy cross entropy method; symptoms

摘要: 针对凝汽器故障诊断中的复杂性和不确定性, 对凝汽器故障征兆集与故障论域进行改进。基于信息论中模糊交互熵度(fuzzy cross entropy method, FCEM)的概念, 提出一种广义的距离测度, 计算凝汽器典型故障模糊模式与未知故障模糊模式之间的差异程度。通过对典型故障集的细化和扩充, 提高了故障诊断的准确率。最后, 将该方法用于 600 和 300 MW 火力发电厂汽轮机凝汽器故障诊断中, 结果表明该方法准确率达 95% 以上, 且易于工程实现, 证明了该方法的有效性。

关键词: 电站仿真机; 凝汽器; 故障诊断; 模糊交互熵算法; 征兆集

0 引言

凝汽器是火电机组的重要辅助设备之一, 运行状态直接影响机组的经济性和安全性。因而凝汽器运行状态的监测及故障诊断一直是发电厂致力解决的难题之一。凝汽器故障诊断实质是一种状态识

别与分类问题。传统的凝汽器故障诊断过程主要依靠运行人员的经验, 很难实现准确判别。同时, 由于运行中凝汽器运行工况的多样性, 干扰因素的复杂性, 使得故障集与征兆集之间并非简单的对应关系。

目前, 凝汽器故障诊断方法, 有神经网络法^[1-13]、模糊专家系统法^[14]、*D-S*规则方法^[15]和模糊模式识别方法^[16]以及其他方法^[17-21]等。它们不同程度地解决了凝汽器故障诊断中的不确定性问题。在此, 针对凝汽器故障诊断中的复杂性和不确定性, 对故障集与征兆集之间的关系进行细化, 同时在对信息模式相似性距离测度进行系统研究的基础上, 引入了对称模糊交互熵的概念, 提出了基于模糊交互熵测度的凝汽器故障诊断方法。

1 模糊交互熵测度

1.1 概述

模式识别是将观测模式(测试模式)与已知模式类相比较。若测试模式与某模式类相似度高, 则将其归入该模式类中, 以实现模式的分类识别。为了划分模式的类别, 必须首先定义模式相似性测度, 以刻画各模式之间的相似程度。常用的相似性测度有: 匹配测度、相似测度及距离测度。所谓距离测度是以 2 个模式向量矢端的距离为基础, 是 2 个向量各对应分量之差的函数。2 模式越相似, 距离测度值越小。具体算法有多种, 通常情况下, 2 模式向量的距离应满足以下 3 条公理。

设 x 和 y 为 2 个 n 维模式向量, 则 2 者之间的距离 $d(x,y)$ 满足:

公理 1(非负性) $d(x,y) \geq 0, d(x,y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ 。

公理 2(对称性) $d(x,y) = d(y,x)$ 。

公理 3(三角不等式) 设 z 为另一个 n 维模式向量,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2007CB206904); 吉林省科技发展规划项目(20070529)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB 206904).

则

$$d(x,y) \leq d(x,z) + d(z,y) \quad (1)$$

满足以上 3 条公理的距离, 称为可度量(metric)距离; 满足前 2 条公理而不满足三角不等式的距离, 称为半度量(semi-metric)距离或称为广义的(generalized)距离; 有更多公理不满足的距离, 称为非度量(non-metric)距离。常见的距离有欧氏(euclidean)距离、绝对值距离(或 manhattan 距离)、切氏(chebyshev)距离、明氏(minkowski)距离及马氏(mahalanobis)距离等。

1.2 交互熵理论

交互熵的概念在 Shannon 信息理论中占有重要的地位, 用于度量 2 个概率分布间的差异性信息。

对于 X 的 2 个概率分布向量 $P(p_1, p_2, \dots, p_n)$, $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$, P 对 Q 的交互熵为

$$H(P \parallel Q) = \sum_{i=1}^n p_i \lg \frac{p_i}{q_i} \quad (2)$$

定理 1(最小交互熵定理) 设离散型随机变量 X 的某一概率分布向量 Q 是已知的, 则当 P 受某些给定条件约束时, 应选取 P 使得 P 对于 Q 的交互熵最小。交互熵 $H(P \parallel Q)$ 有如下性质:

- 1) 非负性: $H(P \parallel Q) \geq 0$, $H(P \parallel Q) = 0 \Leftrightarrow P = Q$ 。
- 2) 最小交互熵定理与最大离散熵定理的一致性: 即

$$H(X) \leq \lg M \Leftrightarrow H(P \parallel Q) \geq 0 \quad (3)$$

其中等号成立的充要条件是 X 服从均匀分布, 即 $p_i = 1/M$, $i=1, 2, \dots, n$, M 为状态个数。

在此, P 对于 Q 的交互熵定义有个缺点, 即若 $q_i = 0$ 且 $p_i \neq 0$ ($i=1, 2, \dots, n$) 时, 交互熵无意义, 将其修正为

$$D(P \parallel Q) = \sum_{i=1}^n p_i \lg \frac{p_i}{(p_i/2) + (q_i/2)} \quad (4)$$

1.3 对称交互熵

定义 1 设 $P(p_1, p_2, \dots, p_n)$, $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 为离散型随机变量 X 的 2 个概率向量, $H(P \parallel Q)$ 和 $H(Q \parallel P)$ 分别为 P 对 Q 和 Q 对 P 的交互熵, 即

$$\begin{cases} H(P \parallel Q) = \sum_{i=1}^n p_i \lg \frac{p_i}{q_i} \\ H(Q \parallel P) = \sum_{i=1}^n q_i \lg \frac{q_i}{p_i} \end{cases} \quad (5)$$

令

$$D(P, Q) = H(P \parallel Q) + H(Q \parallel P) = \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i +$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \lg q_i - \sum_{i=1}^n p_i \lg q_i - \sum_{i=1}^n q_i \lg p_i \quad (6)$$

式中 $D(P, Q)$ 为 P 与 Q 的对称交互熵(symmetric cross entropy, SCE)。

定理 2 设 $D(P, Q)$ 为对称交互熵, 则满足:

- 1) 非负性: 即 $D(P, Q) \geq 0$ 。
- 2) 对称性: 即 $D(P, Q) = D(Q, P)$ 。
- 3) 三角不等式: 设 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 是离散型随机变量 X 的另一概率向量, 则

$$D(P, Q) \leq D(P, W) + D(W, Q)$$

式中 $D(P, Q)$ 是一种距离测度, 称之为交互距离测度(cross distance method, CDM)。

同样, 根据式(4), CDM 可以改进为

$$\begin{aligned} D(P \parallel Q) &= \sum_{i=1}^n p_i \lg \frac{p_i}{(p_i/2) + (q_i/2)} + \\ &\sum_{i=1}^n q_i \lg \frac{q_i}{(p_i/2) + (q_i/2)} = \\ &\sum_{i=1}^n p_i \lg \frac{2p_i}{p_i + q_i} + \sum_{i=1}^n q_i \lg \frac{2q_i}{p_i + q_i} \quad (7) \end{aligned}$$

1.4 模糊交互熵

根据式(2), 当 $n=2$ 时, 令 $P = (p, 1-p)$, $Q = (q, 1-q)$, 则有

$$H(P \parallel Q) = p \lg(p/q) + (1-p) \lg(1-p)/(1-q) \quad (8)$$

由于模糊集合的隶属度函数与其补集的隶属度函数间的关系与式(6)类似, 可定义一种类似的熵, 称之为模糊交互熵, 以度量一个可能性分布与另一个可能性分布之间的息差异程度。设 $A = \{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots, \mu_A(x_n)\}$, $B = \{\mu_B(x_1), \mu_B(x_2), \dots, \mu_B(x_n)\}$ 为 2 个模糊向量, 对某 x_i , $\mu_A(x_i)$ 对 $\mu_B(x_i)$ 交互熵为

$$\begin{aligned} f[\mu_A(x_i) \parallel \mu_B(x_i)] &= \mu_A(x_i) \lg \frac{\mu_A(x_i)}{\mu_B(x_i)} + \\ &[1 - \mu_A(x_i)] \lg \frac{1 - \mu_A(x_i)}{1 - \mu_B(x_i)} \quad (9) \end{aligned}$$

则 A 对 B 的模糊交互熵为

$$\begin{aligned} F(A \parallel B) &= \sum_{i=1}^n \{ \mu_A(x_i) \lg \frac{\mu_A(x_i)}{\mu_B(x_i)} + \\ &[1 - \mu_A(x_i)] \lg \frac{1 - \mu_A(x_i)}{1 - \mu_B(x_i)} \} \quad (10) \end{aligned}$$

当 $\mu_B(x_i) \rightarrow 0$ 时, 值趋于无穷大, 因此依据交互熵的定义方法进行改进, 即

$$\begin{aligned} F(A \parallel B) &= \sum_{i=1}^n \{ \mu_A(x_i) \lg \frac{2\mu_A(x_i)}{\mu_A(x_i) + \mu_B(x_i)} + \\ &[1 - \mu_A(x_i)] \lg \frac{2[1 - \mu_A(x_i)]}{2 - \mu_B(x_i) - \mu_A(x_i)} \} \quad (11) \end{aligned}$$

对于所有的 $\mu_A(x_i)$ 和 $\mu_B(x_i)$ 都有定义,称之为模糊交互熵。

1.5 对称模糊交互熵测度

可以证明, $F(A \parallel B)$ 只满足非负性,不满足对称性,不是一种距离测度,因此构造了对称型模糊交互熵^[22]。

设 $A=\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \dots, \mu_A(x_n)\}$, $B=\{\mu_B(x_1), \mu_B(x_2), \dots, \mu_B(x_n)\}$,为2个模糊向量, $F(A \parallel B)$ 与 $F(B \parallel A)$ 分别为A对B和B对A的模糊交互熵,则

$$D(A \parallel B) = F(A \parallel B) + F(B \parallel A) \quad (12)$$

式中 $D(A \parallel B)$ 称为对称模糊交互熵(symmetric fuzzy cross entropy, SFCE)。

$D(A \parallel B)$ 满足以下性质:

- 1) 非负性: $D(A \parallel B) \geq 0$ 。
- 2) 对称性: $D(A \parallel B) = 0 \Leftrightarrow A = B$ 。
- 3) 有界性: $D(A \parallel B) \leq 2n \log 2$ 。

$D(A \parallel B)$ 是一种广义的距离测度,用以度量2个模糊集A与B之间的差异程度,作为2个模糊集之间的一种信息度量准则,称之为模糊交互熵测度。

2 凝汽器故障论域及故障征兆集的逻辑表达

2.1 凝汽器故障征兆论域及逻辑表达

在大多数情况下,故障征兆采用“0-1”的表达方式^[13,16-17],即“1”表示故障征兆存在,“0”表示故障征兆不存在。然而,仅通过“0”和“1”这2个数字很难对汽轮机侧凝汽器发生的具体故障做出准确描述。以“冷却水温升增加”为例,循环冷却水温度分别升高1和10℃,或循环冷却水温升率为1和10℃/min,在用“0-1”模式表述中,都应该视为“1”,而不为“0”,显然,二者之间有明显差别,不应等同。此处采用了一种新的逻辑表达方式。具体如下:

从现场运行实际出发,将每个征兆划分为5个缓急程度,即无征兆、微弱征兆、中等强度征兆、强征兆、故障征兆,依次用逻辑值表示为0、0.25、0.5、0.75、1.0。此处“故障征兆”是指必发生故障的征兆,当该征兆发生,不采用诊断模型,可以直接作出明确故障判断。依据运行经验和理论分析,在此归纳出32个典型故障征兆(如表1所示)。

表1 征兆集

Tab. 1 Symptoms of condenser faults

变量	描述	变量	描述
s_1	循环水泵马达电流下降程度或摆动幅度	s_{17}	凝结水中含氧量增加数值或速率
s_2	循环水泵出口压力下降程度或摆动幅度	s_{18}	凝汽器真空下降值或速率
s_3	冷却水出口压力上升值或速率	s_{19}	密封水回水箱水位异常程度
s_4	冷却水进口压力上升值或速率	s_{20}	真空泵马达电流下降程度或摆动幅度
s_5	冷却水进口压力下降值或速率	s_{21}	真空泵出口压力下降程度或摆动幅度
s_6	冷却水温升下降值或速率	s_{22}	轴封供汽压力升高值或速率
s_7	冷却水温升高值或速率	s_{23}	轴封冷却器汽侧真空至零速率
s_8	凝汽器端差增加程度	s_{24}	轴抽风机马达电流至零速率
s_9	凝结水过冷度增加程度	s_{25}	冷却水出口负压减少值或速率
s_{10}	同机组并列运行的凝汽器真空度存在差异程度	s_{26}	转子出现负差胀值或速率
s_{11}	凉水塔出口水温升高程度(闭式循环,排除环境温度影响)	s_{27}	凝结水泵出口压力增加值或速率
s_{12}	凝汽器水阻下降程度	s_{28}	凝结水泵出口压力下降值或速率
s_{13}	凝汽器水阻上升程度	s_{29}	凝结水泵马达电流增加值或速率
s_{14}	抽气器抽出的空气温度与冷却水进口温度差值增加程度	s_{30}	凝结水泵马达电流减少值或速率
s_{15}	凝汽器抽气口至抽气器进口间差压减少程度	s_{31}	凝结水泵导电度增加值或速率
s_{16}	凝汽器热水井水位上升值或速率	s_{32}	低加水位升高值或速率

2.2 凝汽器故障论域及逻辑表达

选取21个典型故障模糊模式作为凝汽器的故障论域(如表2所示)。为保持与故障论域一致,获得准确的诊断结果,将每一故障划分为4个等级:正常(无故障)、轻微(微弱)故障、中等(明显)故障、严重(强烈)故障。以“循环水泵故障程度”为例:当发生该故障时,一方面水泵的出口压力减小,另一方面电机电流的波动;以水泵出口压力正常值为参考点(0.2 MPa),当压力低于0.04 MPa,循

泵会故障跳闸,将(0.2~0.04)MPa 4等分,可得:0.16、0.12、0.08、0.04 MPa,当泵出口压力不大于此4个压力值时,则其故障程度分别为0.25、0.5、0.75、1.0,对应循环水泵的轻微故障、明显故障、严重故障;对于循泵电机电流的波动情况亦类似,区别在于有高低2种情况。就此故障而言,故障论域特征向量如表3所示。其余的故障依此类推^[9]。因此,可得到63个标准故障(正常情况排除在外)。

表 2 故障论域
Tab. 2 Typical faults of condenser

变量	描述	变量	描述
F_a	真空系统不严密或小机真空系统不严密程度(给水泵为汽动泵)	F_1	循环水泵入口管滤网堵塞, 冷却水管道上阀门卡涩程度或冷水塔低水位程度 (闭式循环)
F_b	抽气器工作异常程度	F_m	凝汽器出口水室存有空气体积或凝汽器冷却管板脏污程度
F_c	凝汽器冷却管脏污程度	F_n	凝汽器冷却管堵塞程度
F_d	冷水塔故障程度(闭式循环)	F_o	冷却水出口管上部虹吸破坏程度
F_e	凝汽器空冷区抽空管及疏水管堵塞程度	F_p	后轴封供汽中断可能性
F_f	给水泵密封水减少程度或中断时间	F_q	凝汽器满水程度
F_g	真空泵故障程度	F_r	低压加热器管道破裂程度
F_h	真空系统管路破裂程度	F_s	凝结水泵工作异常程度
F_i	轴抽风机跳闸可能性	F_t	凝汽器冷却管破裂程度
F_j	轴封间隙大或轴封系统运行不稳定程度	F_u	冷却水出口管闸门未全开, 喷水池喷水堵塞程度或冷却水回水沟水位升高程度(闭式循环)
F_k	循环水泵故障程度		

表 3 水泵故障特征向量
Tab. 3 Typical faults of water circulating pump

故障等级	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}	s_{16}
F_{k1} (水泵正常)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F_{k2} (水泵有轻微故障)	0.25	0.25	0.0	0.0	0.25	0.0	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25	0.0	0.25	0.0	0.0
F_{k3} (水泵有明显故障)	0.50	0.50	0.0	0.0	0.50	0.0	0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.50	0.0	0.50	0.0	0.0
F_{k4} (水泵有严重故障)	0.75	0.75	0.0	0.0	0.75	0.0	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0.0	0.75	0.0	0.0

故障等级	s_{17}	s_{18}	s_{19}	s_{20}	s_{21}	s_{22}	s_{23}	s_{24}	s_{25}	s_{26}	s_{27}	s_{28}	s_{29}	s_{30}	s_{31}	s_{32}
F_{k1} (水泵正常)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F_{k2} (水泵有轻微故障)	0.0	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F_{k3} (水泵有明显故障)	0.0	0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F_{k4} (水泵有严重故障)	0.0	0.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3 基于模糊交互熵测度的凝汽器故障诊断模型

设 $\Omega_{\alpha\beta} = \{x_{a1}, x_{a2}, x_{a3}, x_{b1}, \dots, x_{u1}, x_{u2}, x_{u3}\}$, 其中, $\alpha = a, b, c, \dots, u$, 表示典型故障类集, $\beta = 1, 2, 3$, 表示对应的每类故障的故障等级: 1 为轻微故障, 2 为明显故障, 3 为严重故障。其共同构成了标准故障-等级样本集。用 $x_{\alpha\beta}(i)$ 表示第 α 类故障样本第 β 个故障等级的第 i 个征兆特征向量, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 32$ 。设待识别样本为集为 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{32}\}$, 其中 x_i 为第 i 个待辨识样本的征兆特征向量。则 $\Omega_{\alpha\beta}$ 和 \mathbf{X} 可用矩阵形式表示为

$$\begin{cases} \Omega_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} x_{a1}(1) & x_{a1}(2) & \dots & x_{a1}(32) \\ x_{a2}(1) & x_{a2}(2) & \dots & x_{a2}(32) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{u3}(1) & x_{u3}(2) & \dots & x_{u3}(32) \end{bmatrix} \\ \mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{32}] \end{cases} \quad (13)$$

由对待识别故障征兆进行模糊化后结果及凝汽器标准故障-等级样本可知, 待诊断故障样本与标准故障-等级样本均为模糊向量, 因此可用对称模糊交互熵 $D(x_{\alpha\beta}|\mathbf{X})$ 来度量 $x_{\alpha\beta}$ 与 \mathbf{X} 之间的差异性信息。设 \mathbf{X} 与 $x_{\alpha\beta}$ 在第 j 个点上的对称模糊交互熵为

$$\begin{aligned} f[x_{\alpha\beta}(j) | x_j] &= x_j \log \frac{2x_j}{x_j + x_{\alpha\beta}(j)} + (1 - x_j) \log \frac{2(1 - x_j)}{2 - x_j - x_{\alpha\beta}(j)} + x_{\alpha\beta}(j) \log \frac{2x_{\alpha\beta}(j)}{x_j + x_{\alpha\beta}(j)} \\ &+ [1 - x_{\alpha\beta}(j)] \log \frac{2[1 - x_{\alpha\beta}(j)]}{2 - x_j - x_{\alpha\beta}(j)} \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $D(x_{\alpha\beta}|\mathbf{X})$ 表示的是 \mathbf{X} 与 $x_{\alpha\beta}$ 的差异性信息, 对此计算公式进行如下处理, 即

$$F(j) = f[x_j | x_{\alpha\beta}(j)] / \max\{f[x_j | x_{\alpha\beta}(j)]\} \quad (15)$$

式中 $\max\{f[x_j | x_{\alpha\beta}(j)]\}$ 为所有 $f[x_j | x_{\alpha\beta}(j)]$ ($j = 1, 2, 3, \dots, 32$) 中最大者。经过式(15)处理后, $f[x_j | x_{\alpha\beta}(j)]$ 位于 $[0, 1]$ 范围内。

利用式(16)计算 \mathbf{X} 与 $x_{\alpha\beta}$ 的相似度, 即

$$D[x_j, x_{\alpha\beta}(j)] = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{32} [\omega_j \times F(j)]^p}{\sum_{j=1}^{32} \{\omega_j \times [1 - F(j)]^p\}} \right\}^{2/p}} \quad (16)$$

式中 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{32})$ 为所选 32 个特征参量模糊相对权重, 在此特征参量相互之间是均等的^[7]。

由式(16)可知, $D[x_j, x_{\alpha\beta}(j)]$ 反映了 X 与 $x_{\alpha\beta}$ 之间的相似度, 可作为判别故障征兆样本 X 归属于典型故障 $x_{\alpha\beta}$ 的依据。

4 诊断实例及系统开发

为验证本方法, 将已知故障程度的凝汽器侧故障通过仿真机的工程师站施加于火力发电厂 300 和 600 MW 2 个单元机组的操作员站, 由运行人员依

据所提供的征兆缓急程度判定故障征兆等级, 所施加的故障征兆及评判的结果如表 4 所示。同时利用 delphi 语言开发了相应的故障诊断系统。

具体的评判过程是: 1) 将一定故障程度的凝汽器侧典型故障通过工程师站施加至操作员站; 2) 在操作员站, 由数名单元长对系统全程监测, 故障发生后, 各自将观察所得的故障现象及运行参数记录在案; 3) 汇总记录至运行值长; 4) 由值长

表 4 待诊断故障征兆集及诊断结果对比

Tab. 4 Comparison of diagnosis results and symptoms of condenser faults

故障编号	征兆集($s_1, s_2, s_3, \dots, s_{32}$)	诊断结果	实际所加故障
1	(0,0,0,0,0,0.5,0,0.5,0.75,0,0,0,0,0,0.5,0,0.5,0.25,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)	抽气器工作有明显异常	抽气器故障程度(55%)
2	(0,0,0,0,0,0.25,0,0.25,0.5,0,0,0,0,0,0,0,0.75,0.5,0.25,0,0,0,0,0,0.75,0,0,0,0,0,0)	轴封间隙较大或后轴封供汽中断	后轴封供汽中断(85%)
3	(0,0,0,0,0.5,0,0.75,0,0.5,0,0,0,0,0,0,0.75,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)	冷水塔中等故障	冷水塔故障程度(60%)
4	(0,0,0,0,0.75,0,0.75,0,0,0,0,0,0,0.5,0,0,0.5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)	凝汽器冷却管脏污严重	凝汽器冷却管结垢程度(75%)
5	(0,0,0,0,0.25,0.25,0,0.75,0.75,0,0,0,0,0,0,0,0,0.75,0.75,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)	真空管路严重破裂或真空系统很不严密	真空管路泄露程度(80%)
6	(0,0,0,0,0,0,0.5,0.5,0,0,0,0,0.5,0,0.5,0.25,0.25,0,0,0,0,0,0,0,0,0.25,0,0,0,0,0,0)	凝汽器轻微满水	凝汽器满水程度(30%)
7	(0,0,0,0,0,0,0.5,0,0,0,0,0,0,0.25,0.5,0.25,0,0,0,0,0,0,0.5,0,0.25,0,0,0.25)	低压加热器管道有轻微泄露	低压加热器管道破裂程度(30%)
8	(0.25,0.25,0,0,0.25,0,0.25,0,0,0,0,0,0,0.25,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)	循泵轻微故障	循泵故障程度(30%)

依据上报记录和所划分故障等级对故障征兆进行评判; 5) 将 4) 中所得数据结果输入诊断系统, 进行故障诊断; 6) 将所得诊断结果与所施加故障比较和准确率的统计。需要说明一点, 评判系统对步骤 4) 所得数据结果的处理过程如下: 数据结果输入模糊交互熵测度诊断模型, 分别计算与 63 个故障样本数据的距离测度; 同一故障类只输出距离测度最大者, 由此可得 21 个距离测度值, 取其最大者作为诊断结果。

由表 4 所示评判结果, 其故障诊断准确率达 95% 以上, 可见, 该方法的是合理可行的。

在此, 利用 delphi 语言开发了相应的故障诊断系统。利用此系统可以对各征兆缓急程度对诊断结果的影响做出分析。

5 结论

1) 将凝汽器故障征兆和故障论域进行细化, 不但获得了故障现象准确的描述, 也获得了故障的准确缓急程度。

2) 通过对模糊集和信息论的研究, 针对凝汽器故障诊断过程的复杂性和不确定性, 引入了对称

模糊交互熵的概念, 以度量未知凝汽器故障样本与标准故障模式二间的相似度。通过在 300 和 600 MW 仿真机验证, 结果表明, 该方法能够较好地实现凝汽器故障诊断之目的, 识别结果与实际所加故障保持一致, 表明此方法的合理性和可行性。

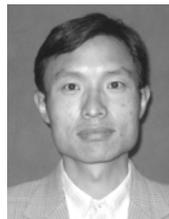
3) 开发的 FCEM 诊断系统, 具有界面友好, 操作简洁, 应用方便等特点, 可服务于火力发电厂的运行现场, 同时提高了故障诊断的效率和可靠性, 为电厂带来了收益。

此外, 受现场实际所限, 很多故障难以直接施加至实际运行设备, 与此同时, 计算机技术在不断发展, 使得火电机组仿真机的仿真技术不断完善, 因此采用仿真系统进行一些破坏性的科学研究将成为今后发展的方向之一。

参考文献

- [1] 侯国莲, 孙晓刚, 张建华, 等. 基于非线性主元分析和概率神经网络的凝汽器故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 104-108.
Hou Guolian, Sun Xiaogang, Zhang Jianhua, et al. Research on fault diagnosis of condenser via nonlinear principal component analysis and probabilistic neural networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 104-108(in Chinese).

- [2] 王晋权, 李磊, 唐国瑞. 基于 RBF 神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 电力科学与工程, 2007, 23(4): 27-31.
Wang Jinquan, Li Lei, Tang Guorui. Study on fault diagnosis of condenser base on RBF neural net work[J]. Electric Power Science and Engineering, 2007, 23(4): 27-31(in Chinese).
- [3] 孙晓刚, 张建华, 侯国莲, 等. 基于概率神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 现代电力, 2005(3): 58-60.
Sun Xiaogang, Zhang Jianhua, Hou Guolian, et al. Condenser fault diagnosis using probabilistic neural networks[J]. Modern Electric Power, 2005(3): 58-60(in Chinese).
- [4] 吴立锋, 郭世利, 衡世权, 等. 基于遗传-神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 电站辅机, 2004, 25(3): 8-11.
Wu Lifeng, Guo Shili, Heng Shiquan, et al. Study on fault diagnosis of the steam condenser based on genetic-neural network[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2004, 25(3): 8-11(in Chinese).
- [5] 陈正潮, 胥建群. 基于 Elman 型网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 华东电力, 2007, 35(9): 70-72.
Chen Zhengchao, Xu Jianqun. Condenser fault diagnosis based on Elman networks[J]. East China Electric Power, 2007, 35(9): 70-72(in Chinese).
- [6] 汪健, 倪维斗. 基于模糊神经网络的凝汽器故障诊断系统研究[J]. 动力工程, 1997, 17(1): 55-59(in Chinese).
Wang Jian, Ni Weidou. Research on fuzzy nerve network based fault diagnosis systems for condensers[J]. Power Engineering, 1997, 17(1): 55-59(in Chinese).
- [7] 贾淑洁, 丁福光. 基于模糊神经网络的凝汽器故障诊断[J]. 应用科技, 2004, 31(8): 65-67.
Jian Shujie, Ding Fuguang. Fault diagnosis for condensers based on fuzzy BP neural network[J]. Applied Science and Technology, 2004, 31(8): 65-67(in Chinese).
- [8] 刘克非, 何祖威. 基于蚁群神经网络的凝汽设备故障诊断[J]. 计算机仿真, 2008, 25(5): 214-217.
Liu Kefei, He Zuwei. Fault diagnosis of condensing equipment based on ant colony neural network[J]. Computer Simulation, 2008, 25(5): 214-217(in Chinese).
- [9] 吴志钢, 林中达. 运用模糊神经网络的凝汽器故障诊断系统[J]. 发电设备, 2008, 22(1): 70-73.
Wu Zhigang, Lin Zhongda. A fault diagnosis system for condensers based on fuzzy neural network[J]. Power Generation Equipment, 2008, 22(1): 70-73(in Chinese).
- [10] 赵洪宇, 李蔚, 盛德仁, 等. 基于 BP 神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 电站系统工程, 2004, 20(6): 32-34.
Zhao Hongyu, Li Wei, Sheng Deren, et al. Study on fault diagnosis of condenser based on BP neural network[J]. Power System Engineering, 2004, 20(6): 32-34(in Chinese).
- [11] 马永光, 殷喆, 马良玉. 基于 SOM 神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(4): 5-8.
Ma Yongguang, Yin Zhe, Ma Liangyu. Study on fault diagnosis of condenser based on SOM neural network[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(4): 5-8(in Chinese).
- [12] 马良玉, 王兵树, 范海红, 等. 对分式凝汽器典型故障模式及其神经网络诊断[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(2): 40-45.
Ma Liangyu, Wang Bingshu, Fan Haihong, et al. Investigation on typical fault pattern of the halving-style condenser and its fault diagnosis with bp neural neork[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28(2): 40-45(in Chinese).
- [13] 周洪煜, 彭其润, 周爱红. 基于单片机和 BP 神经网络的凝汽器故障诊断系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003(5): 33-35.
Zhou Hongyu, Peng Qirun, Zhou Aihong. A microcontroller & BP-network-based fault diagnosis system designed for condensers [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2003(5): 33-35(in Chinese).
- [14] 梁娜. 基于模糊专家系统的凝汽器故障诊断[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(1): 8-11.
Liang Na. Research of fuzzy expert system for fault diagnosis of condenser[J]. Instrumentation Users, 2008, 15(1): 8-11(in Chinese).
- [15] 侯炜, 田沛, 徐桂成, 等. D-S 证据理论在凝汽器故障诊断中的应用[J]. 电力科学与工程, 2003(4): 65-67.
Hou Wei, Tian Pei, Xu Guicheng, et al. Application of D-S evidence theory to fault diagnosis of condensers[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003(4): 65-67(in Chinese).
- [16] 王培红, 朱玉娜, 贾俊颖, 等. 模糊模式识别在凝汽器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 46-49.
Wang Peihong, Zhu Yuna, Jia Junying, et al. Application of fuzzy pattern recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 46-49(in Chinese).
- [17] 马良玉, 王兵树, 佟振声, 等. 大型电站对分式凝汽器故障的征兆提取和模糊诊断研究[J]. 动力工程, 2001, 21(3): 1246-1255.
Ma Liangyu, Wang Bingshu, Tong Zhensheng, et al. Research on faults symptoms abstraction and faults fuzzy diagnosis for large power-station halving-style condenser[J]. Power Engineering, 2001, 21(3): 1246-1255(in Chinese).
- [18] 侯炜, 田沛. 基于两级信息融合的凝汽器故障诊断方法[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(6): 392-394.
Hou Wei, Tian Pei. An approach to condenser fault diagnosis based on hierarchical information fusion[J]. Turbine Technology, 2003, 45(6): 392-394(in Chinese).
- [19] 张艾萍, 张卫红, 曹丽华, 等. 汽轮机冷端系统运行优化及故障诊断系统[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 383-385.
Zhang Aiping, Zhang Weihong, Cao Lihua, et al. Running optimization and fault diagnosis system forturbine cold junction system[J]. Turbine Technology, 2006, 48(5): 383-385(in Chinese).
- [20] 张建华, 侯国莲, 张巍, 等. 一种基于模糊规则和遗传算法的凝汽器故障诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 205-209.
Zhang Jianhua, Hou Guolian, Zhang Wei, et al. A Research on fuzzy rules and genetic algorithm based method for a condenser fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 205-209(in Chinese).
- [21] 司丽丽, 陈荣生, 滕丕忠, 等. 电站凝汽器运行状态监测智能决策系统研究[J]. 能源研究与信息, 2007, 23(2): 96-99.
Si Lili, Chen Rongsheng, Teng Pizhong, et al. Research on the intelligence decision-making system for monitoring of condenser running state in power plants[J]. Energy Research and Information, 2007, 23(2): 96-99(in Chinese).
- [22] 丁世飞. 基于信息理论的数字模式识别及应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.



文孝强

收稿日期: 2009-01-08.

作者简介:

文孝强(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事数值传热及节能与测控方面的研究, wenzhaoqiang@mail.nedu.edu.cn.

(编辑 张媛媛)