

基于粗糙集理论的汽轮机组回热系统故障诊断模型

王伟杰, 黄文涛, 赵学增, 代礼周

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 在分析了汽轮机组回热系统现有故障诊断方法无法解决冗余征兆的不足之后, 提出了一种基于粗糙集理论的故障诊断模型。该模型从回热系统典型故障模式出发, 通过连续征兆属性的离散化建立了故障诊断决策表; 利用遗传算法实现了故障征兆属性约简, 并提出了结合领域知识的最小约简择优策略, 然后通过给出的决策规则约简的基本原则, 得到用于故障诊断的决策规则库。在应用该模型进行故障诊断时, 用待诊实例的离散化了的故障征兆属性与规则库中的诊断决策规则进行匹配, 对返回的诊断决策规则进行综合评价, 并得出诊断结论。利用电站仿真机模拟典型故障进行了故障诊断模型的验证, 实践表明, 该模型可以有效地约简冗余的故障征兆, 并具有较好的诊断效果和一定的容错能力。

关键词: 汽轮机组; 回热系统; 故障诊断; 粗糙集理论; 约简; 遗传算法

中图分类号: TK26; TP182 文献标识码: A

1 引言

随着火电机组容量的提高, 热力系统特别是回热系统对整个机组的安全性、经济性的影响越来越大, 回热系统作为汽轮机组热力系统中最重要、最复杂的系统之一, 一旦发生故障将造成巨大的经济损失, 因此应用先进的诊断技术及早发现回热系统的故障并及时采取相应措施维护, 使故障损失降低到最小程度, 是亟待解决的任务。由于回热系统的故障原因、故障过程和故障现象错综复杂, 而且关于其故障诊断的文献报道又不多, 因此对回热系统的故障诊断进行研究既具有工程价值又具有理论意义。文献[1~2]提出了模糊理论和神经网络技术相结合的回热系统故障诊断方法, 取得了较好的诊断效果。但是为了提高神经网络的诊断性能, 上述方法都提

取了大量的故障征兆参数作为神经网络的输入, 这些征兆参数在故障诊断过程中的重要性并不相同, 甚至其中某些征兆是冗余的。冗余征兆的存在, 一方面是对诊断资源的浪费(需要处理时间和存储空间); 另一方面, 直接影响生成简洁、高效的诊断决策规则, 影响了故障诊断的效率和实时性。另外, 大量的输入也会增加神经网络的训练时间, 影响其收敛速度。针对现有故障诊断方法无法解决冗余征兆的不足, 本文利用粗糙集理论在知识约简方面的优越性, 建立了汽轮机组回热系统的故障诊断模型, 为汽轮机组回热系统的故障诊断开辟了一条新的途径。

2 粗糙集理论的基本概念

波兰学者 Pawlak 于 1982 年创立的粗糙集理论(Rough Set Theory), 是一种新型的处理模糊和不确定知识的数学工具。为能更清晰地表达本文的研究, 简略介绍了由 Pawlak 教授提出的粗糙集的基本概念。有关粗糙集理论的详细介绍可以参见文献[3~5]。

定义 1: 一个故障诊断决策表可以用一个三元组来表示: $S = \langle U, C, D \rangle$, 其中:

- (1) U 为非空有限集, 称故障状态域;
- (2) C, D 均为非空有限集, 分别称为故障征兆属性集合与故障决策属性集合, 且 $C \cap D = \emptyset$;
- (3) 对每一个 $a \in C$, 有一个映射 $a: U \rightarrow V_a$, 这里 V_a 是故障征兆属性的值域。

定义 2: 令 $S = \langle U, C, D \rangle$ 是一个故障诊断决策表, $B \subseteq C$ 是故障征兆属性的子集, 称二元关系: $IND(B) = \{(x, y) \in U \times U : \forall a \in B, a(x) =$

$a(y)\}$ (1)

为 S 的不可分辨关系。其中 $a(x)$ 表示故障状态域中的实例 x 在故障征兆属性 a 上的取值。

定义 3: 令 $S = \langle U, C, D \rangle$ 是一个故障诊断决策表, $B \subseteq C$ 是故障征兆属性的子集, 令 $r \in B$, 如果 $IND(B) = IND(B - \{r\})$, 则称 r 为“ B 中可缺的”, 否则, 称 r 为“ B 中不可缺的”。如果 B 中每一个 r 都是“不可缺的”, 则称子集 B 是“独立的”, 否则称 B 是“依赖的”。

定义 4: 令 $S = \langle U, C, D \rangle$ 是一个故障诊断决策表, 若 $B \subseteq C$ 是独立的, 并且 $IND(B) = IND(C)$, 则称 B 是 C 的一个约简。显然, C 可以有多个约简, 在 C 中, 所有不可缺的关系集合称为 C 的核, 记为 $CORE(C)$ 。

定义 5: 令 $S = \langle U, C, D \rangle$ 是一个故障诊断决策表, $U/IND(C)$ 表示根据故障征兆属性 C 将 U 上的对象进行划分而得到的所有等价类, 等价类的数量用 n 表示。 $a(x_j)$ 是样本 x_j 在属性 a 上的取值。称 $M = (c_{ij})_{n \times n}$ 为 S 的分辨矩阵, 即

$$c_{ij} = \begin{cases} \{a \in C: a(x_i) \neq a(x_j)\}, & D(x_i) \neq D(x_j) \\ 0, & D(x_i) = D(x_j) \\ \emptyset, & a(x_i) = a(x_j), D(x_i) \neq D(x_j) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

由式 (2) 可知, 分辨矩阵包含了决策表中所有的属性区分信息。

3 基于粗糙集理论的故障诊断模型

3.1 回热系统故障诊断决策表的建立及连续征兆属性的离散化

在汽轮机组回热系统的故障诊断过程中, 由于故障产生的机理不清楚, 故障的表现形式不惟一, 在提取描述故障特征的各种征兆时也常常带有一定的盲目性, 从而导致了故障状态之间是不分明的, 这正是粗糙集理论研究的对象。应用粗糙集理论对汽轮机组回热系统故障诊断问题进行描述, 可以从描述故障状态的原始数据出发, 确定故障征兆属性集合和故障决策属性集合, 选择各属性的值域, 进行数据预处理(包括连续数值型征兆属性的离散化, 语义型征兆属性的泛化处理等), 便可以生成故障诊断决策表。

粗糙集理论处理决策表用的是符号化的分析方法。而故障诊断中的征兆参数一般为连续量, 因此需要对其中的连续征兆属性进行离散化处理。目前, 已经提出了多种离散化方法, 如等距离法、等频率法^[6]和最小熵法^[7], 上述方法各有所长。本文根据粗糙集理论中的不可分辨关系, 采用 Naive Scaler 离散化方法^[8]对故障诊断决策表中的每一个属性 $a \in C$ 进行下面的过程:

(1) 根据 $a(x)$ 的值, 对决策表中的实例 $x \in U$ 进行升序排序;

(2) 从上到下依次扫描, 设 x_i 和 x_j 代表两个相邻的实例:

如果 $a(x_i) = a(x_j)$, 则扫描决策;

如果 $D(x_i) = D(x_j)$, 即决策相同, 则继续扫描;

否则得到一个断点 c , $c = (a(x_i) + a(x_j))/2$ 。

根据现场运行经验及文献[1 ~ 2], 对大型再热机组(125 ~ 600 MW)的回热系统进行总结归纳, 得到 13 种主要故障(将正常状态也作为一种模式)形式和 9 个运行参数作为加热器的故障征兆, 形成了回热加热器的典型故障模式^[4]。按照上述过程对其中的连续故障征兆进行处理, 便可以得到各个连续故障征兆属性的断点集, 给每个断点所划分的区间分别赋以 0, 1, ... 离散值, 便可以实现故障征兆的离散化, 得到离散化的故障诊断决策表, 如表 1 所示。

3.2 基于粗糙集理论的故障征兆约简

在原始的故障诊断决策表中的征兆属性并不是同等重要的, 甚至其中某些征兆属性是冗余的。因此, 在保持决策表分辨能力不变的前提下, 删除其中不必要的或不重要的征兆属性, 具有重要的研究价值。约简的目的是去掉多余的属性, 它是粗糙集理论中的重要内容。目前已有多种计算约简的方法, 如可辨识矩阵法、扩展法则法、动态约简法及基于属性重要性的启发式算法等^[9], 在故障诊断中, 为了得到形式简洁, 适应性强的诊断决策规则, 人们往往期望找到具有最少征兆属性的约简, 即最小约简。然而, 由于属性的组合爆炸问题, 已经证明求取最小约简是 NP-hard 问题。为了避免对故障模式空间进行盲目的随机搜索或穷举搜索, 本文利用遗传算法的全局寻优能力在辨识矩阵中求取最小约简。

表 1 故障诊断决策表

<i>U</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>k</i>
	抽汽流量	抽汽压力	进口压力	进口水温	出口水温	混合水温	出口端差	水位	疏水温度	故障原因
1	1	1	1	0	3	3	0	1	1	运行正常
2	0	0	0	0	2	2	0	1	0	抽气管道逆止阀卡涩
3	0	0	1	0	2	2	2	1	1	排气管道排气不畅
4	2	2	2	0	2	2	1	1	1	排气管道排气量过大
5	0	0	1	0	1	1	1	1	2	加热器管系污染、结垢
6	0	0	1	0	0	0	3	1	1	加热器内部进出水侧短路
7	2	2	2	0	1	1	2	3	0	加热器内部管系泄漏
8	0	0	1	0	3	1	0	1	1	加热器旁路阀故障
9	0	0	1	0	1	1	2	3	1	加热器满水
10	2	2	1	0	3	3	0	0	3	疏水阀故障
11	0	0	1	0	2	2	2	2	1	疏水不畅
12	1	1	1	0	3	3	0	3	1	除氧器排气带水
13	0	3	2	0	4	4	0	3	1	除氧器自身沸腾

设 M 为决策表的辨识矩阵, C 是决策表中所有征兆属性的集合, S 是 M 中所有属性组合的集合, 描述为 $B_i \in S, B_j \in S, B_i \neq B_j (i, j = 1, 2, \dots, s)$ 。这样, 从决策表中求取约简的问题转化为在辨识矩阵中求取组合数最小的约简, 其步骤如下:

(1) 将求取最小约简的解编码成 9 位二进制染色体。0 表示此征兆属性在最小约简中可忽略, 1 表示此属性与约简相关。

(2) 选取适应函数。本文中的适应函数定义如下^[10]:

$$f(R) = \frac{(1 - \alpha) \times \frac{\text{card}(C) - \text{card}(R)}{\text{card}(C)} + \alpha \times \text{card}(\{ B_i \mid B_i \in S \text{ 且 } B_i \cap R \neq \emptyset \})}{\text{card}(S)}$$

式中第 1 项是激励搜索策略朝 M 中属性组合数最小的约简方向搜索, 第 2 项是确保 R 为约简; 参数 α 为调节因子。 R 是以适应函数作为指导, 通过进化搜索而得到的最小约简。 $\text{card}(\cdot)$ 表示集合的基数。

(3) 遗传操作。以适应函数为目标函数, 通过选择、交叉和变异, 实现优化搜索。

(4) 收敛判据。当遗传操作一定的迭代次数后, 适应值没有明显改变, 算法结束。

应用上述算法求得汽轮机组回热系统故障诊断决策表的 18 个最小约简, 这些最小约简包含的故障征兆属性数目相同, 都为 4 个, 这就存在一个如何选择最优的最小约简的问题。针对出现的多个最小约简的属性数目相同的情况, 本文提出了一种结合领域知识的最小约简择优策略: 由领域专家分别从测量的难易程度、测量的代价两个方面对各个征兆参

数进行评价, 根据领域专家的评价分别计算各个最小约简的性能, 然后从中选出测量最容易、代价最小的最小约简。按照上述策略, 本文从 18 个最小约简中选择 $\{ a, c, e, h \}$ 作为最优的最小约简。

3.3 诊断决策规则的约简

诊断决策规则的约简是利用决策逻辑分别消去每个决策规则的不必要条件。它不同于上节的征兆属性约简, 而是针对每个诊断决策规则, 去掉表达该规则时的冗余征兆属性值, 以便进一步简化决策规则。

下面给出诊断决策规则简化原理。

设 $S = \langle U, C, D \rangle$ 是一个故障诊断决策表, $X_i \in U / \text{IND}(C), i = 1, 2, \dots, m; Y_j \in U / \text{IND}(D), j = 1, 2, \dots, n$ 。如果 $X_i \cap Y_j \neq \emptyset$, 则可以生成诊断决策规则 $R_{ij}: \text{Desc}(X_i) \rightarrow \text{Desc}(Y_j)$ 。简记为 $X_i \rightarrow Y_j$ 。 $\text{Desc}(X_i)$ 表示等价类 X_i 对于故障征兆属性的特定取值; $\text{Desc}(Y_j)$ 表示等价类 Y_j 对于故障决策属性的特定取值。令故障征兆属性 $r \in C$, 如果规则 $R_{ij}: \text{Desc}_{-r}(X_i) \rightarrow \text{Desc}(Y_j)$ 成立, 则称 r 在规则 R_{ij} 中是冗余的; 否则, 称 r 在规则 R_{ij} 中是必要的。如果对任一 $r \in C$ 在规则 R_{ij} 中都是必要的, 则称该规则是独立的。对于征兆属性子集 $B \subseteq C$, 若规则 $\text{Desc}_B(X_i) \rightarrow \text{Desc}(Y_j)$ 是独立的, 则称 B 是规则 R_{ij} 的一个约简。

按照上述原理对根据约简 $\{ a, c, e, h \}$ 形成的诊断决策规则集进行约简, 得到了 23 条最简诊断决策规则, 如表 2 所示。经过领域专家评判, 表中的征兆属性都是最容易测量和测量代价最小的属性, 经过依据上述原理对决策规则进一步简化, 从表 2 中

可以发现, 这些规则还可以进一步化简, 有的规则甚至只包含一个征兆属性(第 1、2、3、4 和 5 条规则), 包含征兆属性数目最多的规则也只有 3 个征兆属性, 而且这些决策规则与原始决策表具有相同的故障诊断能力, 毫无疑问, 这些规则在进一步的应用中会表现出较好的匹配效率和容错能力。

表 2 最简决策规则集合

序号	诊断决策规则	序号	诊断决策规则
1	$c = 0 \rightarrow k = 2$	13	$a = 2, e = 3 \rightarrow k = 10$
2	$e = 0 \rightarrow k = 6$	14	$a = 2, h = 1 \rightarrow k = 4$
3	$e = 4 \rightarrow k = 13$	15	$a = 2, h = 3 \rightarrow k = 7$
4	$h = 0 \rightarrow k = 10$	16	$c = 2, e = 1 \rightarrow k = 7$
5	$h = 2 \rightarrow k = 11$	17	$c = 2, e = 2 \rightarrow k = 4$
6	$a = 0, c = 2 \rightarrow k = 13$	18	$c = 2, h = 1 \rightarrow k = 4$
7	$a = 0, e = 3 \rightarrow k = 8$	19	$e = 1, h = 1 \rightarrow k = 5$
8	$a = 1, h = 1 \rightarrow k = 1$	20	$e = 3, h = 3 \rightarrow k = 12$
9	$a = 1, h = 3 \rightarrow k = 12$	21	$a = 0, c = 1, h = 3 \rightarrow k = 9$
10	$a = 2, c = 1 \rightarrow k = 10$	22	$c = 1, e = 1, h = 3 \rightarrow k = 9$
11	$a = 2, e = 2 \rightarrow k = 4$	23	$c = 1, e = 2, h = 1 \rightarrow k = 3$
12	$a = 2, e = 1 \rightarrow k = 7$		

3.4 诊断模型的结构

在上述基础上, 作者建立了汽轮机组回热系统的粗糙集诊断模型, 诊断模型的总体结构如图 1 所示。

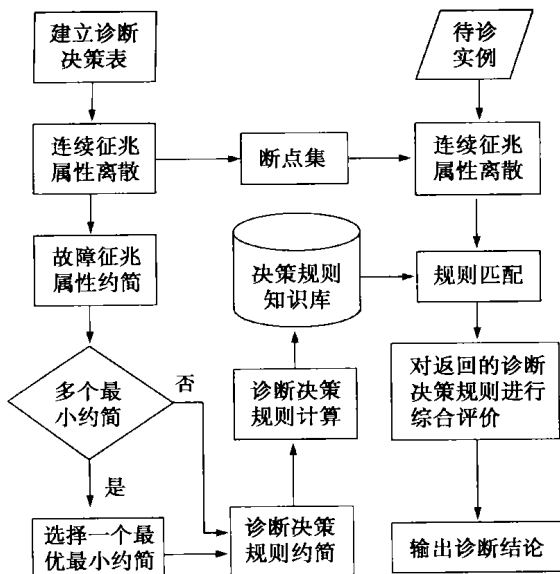


图 1 诊断模型结构

诊断模型由两部分构成: 第一部分通过对故障诊断的决策表进行离散化、征兆属性约简、选择最小

约简和决策规则约简等操作, 形成精简的故障诊断规则库。第二部分为模型的应用流程。对于汽轮机组回热系统的待诊实例, 利用第一分离散化算法产生的断点集对其连续征兆属性进行离散化, 然后用待诊实例的故障征兆属性与诊断规则库中的规则进行匹配, 对返回的诊断决策规则进行综合评价, 并得出最后的诊断结论。

3.5 诊断决策规则的综合评价

在将待诊实例与规则库中的决策规则进行匹配后, 返回的诊断决策规则集可以分为下面几种情况:

- (1) 规则集为空;
- (2) 规则集中有一条规则;
- (3) 规则集中有多条规则, 且结论一致;
- (4) 规则集中有多条规则, 且结论不一致。

对于第 (1) 种情况, 说明根据现有的对故障问题的认识程度, 还不能够对该待诊实例做出足够可信的故障决策; 对于第 (2) 和第 (3) 种各情况, 只需要把结论输出即可; 对于第 (4) 种情况, 需要对所有的结论进行综合评价。假设与待诊实例相匹配的诊断决策规则共有 d_1, d_2, \dots, d_r 个不同的诊断结论, 其中支持 d_i 的决策规则为 r_1, r_2, \dots, r_m , 定义 d_i 的综合评价函数:

$$v(d_i) = \frac{\sum_{j=1}^m cov_j}{\sum_{j=1}^m cer_j} \quad (3)$$

其中: $cov_j = \text{card}(X_i \cap Y_j) / \text{card}(X_i)$, $cer_j = \text{card}(X_i \cap Y_j) / \text{card}(Y_j)$ 分别为决策规则 r_j 的覆盖度和置信度。依据上式计算出 $v(d_1), v(d_2), \dots, v(d_r)$, 选取综合评价函数值最大的诊断决策规则的结论作为待诊状态的最后诊断结论。

4 实例仿真

为了验证所建立的诊断模型的有效性, 采用 STAR-90-300/600 MW 机组仿真机模拟典型故障进行试验^[2]。下面给出几个实例, 简述利用该诊断模型进行故障诊断的过程。

实例 1, 一待诊实例的故障征兆参数如下: 抽汽流量=0.589, 抽汽压力=0.495, 进口压力=0.658, 进口水温=0.503 6, 出口水温=0.817 5, 混合水温=0.75, 出口端差=0.25, 水位=0.931, 疏水温度=0.5。

按照图 1 中对待诊实例的诊断流程, 首先利用

诊断模型中离散化算法所获取的断点集对上述征兆参数进行离散化, 然后与决策规则库中的规则进行逐条匹配, 返回规则库中的第 9 条规则, 根据诊断决策规则的综合评价, 其诊断结果为除氧器排气带水。实际检查结果证实了诊断的正确性。

实例 2, 一待诊实例的故障征兆参数如下: 抽汽流量 = 0.758 2, 进口压力 = 0.486, 出口水温 = 0.773, 水位 = 0.132 6。

对该实例进行与实例 1 相同的诊断流程, 可知返回的相匹配规则共 3 条(分别为第 4、10 和 13 条), 三条规则的结论一致, 其诊断结果为疏水阀故障。实际检查结果证实了诊断的正确性。

实例 3, 一待诊实例的故障征兆参数如下: 仅测得进口压力 = 0.276 2。

对该实例进行与实例 1 相同的诊断流程, 可知返回的相匹配规则为第 1 条, 其诊断结果为抽气管道逆止阀卡涩。实际检查结果证实了诊断的正确性。

在实例 1 中, 获得了全部的 9 个故障征兆参数, 得到了正确的诊断结果; 在实例 2 中, 只获得了用于建立规则库的最小约简的 4 个参数, 根据粗糙集理论可知, 最小约简与约简前的故障征兆属性集具有相同的故障区分能力, 诊断结果也很好验证了这一点。另外, 与实例 2 相比, 实例 3 获得的可用于故障诊断的征兆信息更少, 在这种故障信息不完备的情况下, 本文建立的故障诊断模型依然能够得出正确的诊断结果, 这是由于经过决策规则的约简, 规则库中的诊断决策规则仅包含那些在决策时所必需的征兆属性值, 但它与原始故障诊断决策表具有相同的故障诊断能力, 因而具有更强的适应性和泛化能力。

5 结 论

结合现场经验及有关文献, 基于粗糙集理论中有关约简的概念, 建立了汽轮机组回热系统故障诊断模型, 该模型具有以下特点:

(1)模型的第一部分为构造流程。针对汽轮机组回热系统的典型故障模式, 在利用 Naive Scaler 离散化方法实现连续征兆属性离散化的基础上, 建立了故障诊断决策表; 利用遗传算法的全局优化能力, 实现了故障征兆属性的约简, 并提出了结合领域知

识的最小约简择优策略; 给出了决策规则约简的基本原则, 得到了具有较强的适应性和泛化能力的诊断决策规则, 形成了用于故障诊断的决策规则库。

(2)模型的第二部分为应用流程。对于汽轮机组回热系统的待诊实例, 利用第一分离散化算法产生的断点集对其连续征兆属性进行离散化; 然后用待诊实例的故障征兆属性与诊断规则库中的规则进行匹配; 对返回的诊断决策规则依据提出的规则进行综合评价, 并得出最后的诊断结论。

(3)通过电站仿真机模拟典型故障进行了故障诊断模型的验证, 实例诊断结果表明: 基于粗糙集理论中约简的概念, 在进行了故障征兆属性约简和诊断决策规则约简之后, 形成的故障诊断决策规则库具有较强的适应性和泛化能力, 能够对待诊实例给出正确的诊断结果, 即使在故障信息不完备的情况下, 也能获得比较满意的诊断结果。

参考文献:

- [1] 胡 勇, 巨林仓, 范伊波, 等. 基于神经网络及模糊理论建立回热系统故障诊断层次模型[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(11): 53-57.
- [2] 卢绪祥, 李录平, 胡念芬. 汽轮机组回热系统故障诊断知识的模糊处理及诊断研究[J]. 热能动力工程, 2003 18(1): 13-16.
- [3] PAWLAK Z. Rough sets [J]. *International Journal of Information and Computer Science* 1982, 11(5): 341-356.
- [4] PAWLAK Z, GRZYMALA BUSSE J, SLOWINSKI R, et al. Rough sets [J]. *Communications of the ACM*, 1995, 38(11): 89-95.
- [5] PAWLAK Z. Rough sets and intelligent data analysis [J]. *Information Sciences*, 2002, 147(1-4): 1-12.
- [6] SHAN N, HAMILTON H J, ZIARKO W, et al. Discretization of continuous valued attributes in classification systems [A]. *Proceedings of the Fourth International Workshop on Rough Sets, Fuzzy Sets and Machine Discovery RFSM'96* [C]. Japan: The University of Tokyo, 1996. 74-81.
- [7] FAYYAD USAMA M, IRANI KEKI B. Technical note, on the handling of continuous-valued attributes in decision tree generation [J]. *Machine Learning*, 1992, 8(1): 87-102.
- [8] 王国胤. 粗糙集理论与知识获取 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [9] 胡可云, 陆玉昌, 石纯一. 粗糙集理论及其应用进展 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(1): 64-68.
- [10] HRN A. Discernibility and rough sets in medicine: tools and applications [D]. Norway, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 1999. 50-55.

(何静芳 编辑)

基于粗糙集理论的汽轮机组回热系统故障诊断模型= **Fault Diagnosis Model for the Regenerative Heating System of a Steam Turbine Unit Based on a Rough Set Theory** [刊, 汉] / WANG Wei-jie, HUANG Wen-tao, ZHAO Xue-zeng, et al (College of Mechanical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 618 ~ 622

After an analysis of the insufficiency of current fault diagnostic methods used for the regenerative heating system of a steam turbine to resolve the problem of redundant fault symptoms the authors have proposed a new fault diagnosis model based on a rough set theory. With the typical fault modes of a regenerating heating system being taken into account a fault diagnostic decision table was established through a discretization of continuous fault symptom attributes. A reduction of the fault symptom attributes was realized by making use of a genetic algorithm. An optimal selection stratagem of minimal reduction is proposed based on domain knowledge. Then, a decision rules base for fault diagnosis was set up through the basic principle of decreasing the given decision rules. When the proposed model is employed for fault diagnosis the discretized fault symptom attributes to be diagnosed are first matched with the diagnostic decision rules in the rules base. The returned diagnostic decision rules will undergo a comprehensive evaluation with a diagnostic conclusion being reached. The simulation of typical faults by a power plant simulator was performed to verify the fault diagnosis model. Engineering practice shows that the proposed model is highly effective in reducing redundant fault symptoms and credited with a good fault-diagnosis effect as well as a fair fault-tolerant capability. **Key words:** steam turbine unit, regenerative heating system, fault diagnosis, rough set theory, genetic algorithm

新型喷雾光学测量仪的研制= **Development of an Innovative Mist-spray Optical Measuring Device** [刊, 汉] / WU Wei-liang, CHEN Han-ping, JIN Hao, et al (College of Machine and Power Engineering under the Shanghai Jiao-tong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 623 ~ 626

To measure the water droplet diameter and concentration as well as their variation in a humidifier, the key element of a humid air turbine (HAT) cycle, has long been an intractable problem during relevant experimental tests. In view of this the authors have developed an innovative mist-spray optical system for measuring the water droplet diameter and its changes at various locations during the mist-spray process of a dual-fluid nozzle in air. Meanwhile, at proper locations and under identical operating conditions a contrast measurement of mist-spray characteristics was conducted with the use of a phase Doppler anemometer. The measurement results indicate that the recommended system can be used for measuring nozzle mist-spray particle diameter and is well suited for the measurement of water droplet parameters in a humidifier.

Key words: mist-spray characteristics, mist spray measurement, humid air turbine cycle, humidifier, phase Doppler anemometer

直吹式制粉系统满足等离子点火浓度技术的应用= **Technical Version of a Direct-fired System for Attaining the Pulverized-coal Concentration as Required by Plasma Ignition** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-yong, ZHANG Yong-cai, ZHANG Shi-kai, et al (Yantai Longyuan Electric Power Technology Co. Ltd., Yantai, Shandong Province, China, Post Code: 264006), // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 627 ~ 629

Plasma ignition technology is applied to a dual-in dual-out direct-fired system, which satisfied pulverized-coal concentration requirements and practical operating conditions. The selection of a rational layout for a plasma burner and the proper adjustment of coal-mill operating mode have met the requirements of the temperature-rise and pressure-rise characteristics for the plasma ignition of a boiler. A detailed description is given of the use of an impact-type centrifugal separation-based concentration device for achieving the pulverized-coal concentration required by the plasma ignition. **Key words:** plasma burner, pulverized-coal concentration, ignition

直控式液粘调速器的开发= **Research and Development of a Direct-controlled Hydro-viscous Variable Speed Driver** [刊, 汉] / LI Fu-shang (Shandong Electrical Power Research Institute, Jinan, China, Post Code: 250002),