

# 基于证据推理的汽轮机组状态评价方法

董玉亮<sup>1</sup>, 顾煜炯<sup>1</sup>, 马履翱<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网北京电力建设研究院, 北京市 宣武区 100055)

## Condition Evaluation on Steam Turbine Units Based on Evidential Reasoning

DONG Yu-liang<sup>1</sup>, GU Yu-jiong<sup>1</sup>, MA Lü-ao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. SG Electric Power Construction Research Institute, Xuanwu District, Beijing 100055, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problem that the condition information of large size steam turbine unit is complex and difficult to evaluate its condition accurately, an evaluation method based on evidential reasoning is proposed. The uncertainty and incompleteness of evaluation evidences are fully considered, qualitative and quantitative evidences are integrated and the acquisition and transformation methods are put forward based on constructing multiple-attribute decision-making tree for condition evaluation. Then a decision tree based condition evaluation model is established and the corresponding evidential reasoning algorithm is provided. The method is then used to evaluate the condition of 300MW steam turbine unit. It is proved that this method is feasible and effective, and can deal with the condition evaluation problem with uncertainty and incompleteness. The evaluation results can be used as a support for maintenance decisions.

**KEY WORDS:** steam turbine unit; evidential reasoning; decision tree; condition evaluation

**摘要:** 针对大型汽轮机组状态信息复杂, 运行状态难以准确评价的问题, 提出基于证据推理的状态评价方法。该方法充分考虑评价证据的不精确性和不完全性, 在构建汽轮机组状态评价多属性决策树的基础上, 提出定量和定性证据相结合的方法, 并分别给出定性和定量2种状态决策知识的获取和转化方法。建立基于决策树的状态评价模型, 给出证据推理算法, 并将该方法应用于某300MW汽轮机组的状态评价。结果表明, 该方法可行有效, 很好地解决了部分证据不精确和不完全的状态评价问题, 评价结果为维修决策提供依据。

**关键词:** 汽轮机组; 证据推理; 决策树; 状态评价

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目(2006AA04Z426); 华北电力大学博士学位教师科研基金课题项目(200622027)。

The National High Technology Research and Development Program of China (2006AA04Z426).

## 0 引言

大型汽轮机组具有系统复杂、故障率高的特点, 由汽轮机组故障引起的非计划停机占全部的28.73%, 仅次于锅炉<sup>[1]</sup>。在状态监测的基础上, 结合运行人员的经验对汽轮机组进行状态评价, 并根据评价结果进行维修决策, 对提高机组可靠性和可用率, 降低维修费用具有重要意义。

通常用于评价机组状态的方法有热力试验(用于通流部分和凝汽器的状态分析)、振动监测与诊断、调节系统试验等, 这些方法都是各自独立地用于汽轮机组的状态评价。然而, 汽轮机组作为一个庞大的复杂系统, 各设备间关联性强、运行时所处状态复杂, 很难用单一试验或监测参数准确确定。因此, 很有必要建立基于多状态特征参数的汽轮机组状态评价模型。文献[2-3]给出了汽轮机组多参数状态综合评价方法, 考虑了状态特征参数的模糊不确定性, 并引入了变权权重, 使评价结果的精确性有所提高。但是, 作为机组状态评价输入的试验或监测结果有时是不精确的甚至是不完全的, 因而需要更合理的方法加以综合。证据理论作为处理多证据信息融合问题的一种方法, 既能处理随机性导致的不确定性, 又能处理模糊性所导致的不确定性, 在故障诊断和模式识别领域得到了广泛应用<sup>[4-8]</sup>。如果把各种试验结果、监测与诊断结果作为评价机组状态的证据, 汽轮机组的状态评价则可视作多证据属性决策问题。因此, 本文利用层次分析法获得各决策因素的权重, 并采用基于D-S证据理论的证据推理方法来处理该多属性决策问题中存在的不同

定性问题，最终实现汽轮机组状态的准确评价。

## 1 汽轮机组状态评价决策树

### 1.1 多属性决策树状态评价过程

典型的汽轮机组多属性决策树状态评价过程如图 1 所示。

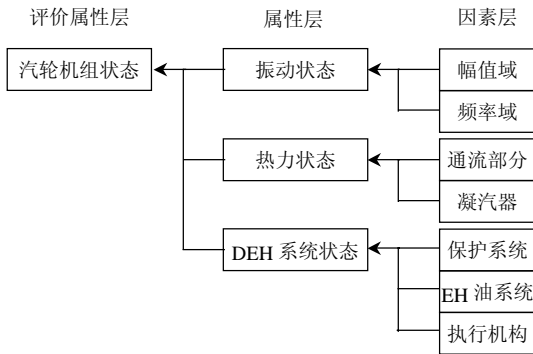


图 1 汽轮机组多属性决策树状态评价过程

Fig. 1 Multi-attribute decision tree-based condition evaluation process for steam turbine

图 1 中，处于树根位置的汽轮机组状态由处于树干位置的振动状态、热力状态属性值和 DEH 控制系统状态综合确定；而树干位置各状态由处于树枝位置各子系统状态或因素值确定；最后树枝位置各子系统或因素由处于树梢的各试验结果、监测参数、运行参数、运行人员定性判断等(图中未画出)来确定。

### 1.2 决策知识的获取

决策知识的获取是多属性决策的基础，为实现整个评价过程的一致性，这里定义一个表示系统健康状态的指标——健康指数  $H_i$ 。  $H_i$  为 0~1 之间的值，  $H_i$  越大表示系统的健康状态越好。

工程实际中经常定性地将机组状态划分为若干等级，且为了方便机组健康状态的证据推理评价，需要定义机组的状态空间，即

$$H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\} = \{\text{严重故障, 故障, 一般, 较好, 好}\} \quad (1)$$

各状态对应语义描述及相应维护措施如表 1 所示。

表 1 汽轮机组状态划分及相应处理措施

Tab. 1 Condition division and corresponding disposing measures of steam turbine

序号	状态	语义描述及相应措施
1	严重故障	不能运行，应打闸停机抢修
2	故障	无法长期运行，应在短时间内检修
3	一般	机组出现异常，有合适机会处理
4	较好	机组状态较好，适合长期运行
5	好	机组状态非常好

根据状态数据来源的性质不同，决策知识可分为定量知识和定性知识。通过试验、监测与诊断和运行监视等方法获得的知识一般为定量知识，利用定量知识可以通过建立定量数学模型来确定因素层各因素或子系统的健康指数；而利用运行经验得到的知识为一般定性知识，需建立模型实现从定性到定量的转化。

振动状态方面，多传感器幅值域表示的健康指数按下式计算：

$$H_i(A) = \min[H_i(A_1), H_i(A_2), \dots, H_i(A_m)] \quad (2)$$

式中  $H_i(A_m)$  表示第  $m$  个振动测量传感器反映的机组健康指数，其计算方法如下：

$$H_i(A_m) = \begin{cases} 0 & (A_m > A_m^{\max}) \\ \frac{A_m^{\max} - A_m}{A_m^{\max} - A_m^0} & (A_m^0 \leq A_m \leq A_m^{\max}) \\ 1 & (A_m < A_m^0) \end{cases} \quad (3)$$

式中：  $A_m^0$  为振动正常时的振幅阈值；  $A_m^{\max}$  为机组振动停机振幅阈值；  $A_m$  为机组振动振幅实际值。

多传感器频率域表示的健康指数按下式计算<sup>[9]</sup>：

$$H_i(\omega) = 1 - I_i \quad (4)$$

$$I_i = -100 \times \frac{\sum_{i=1}^p q_i \lg q_i}{\lg p} \quad (5)$$

式中：  $q_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^p \lambda_i$  为  $m$  个传感器测得的振动信号经主成分分析后选取的  $p$  个主成分中第  $k$  个主成分提取的信息占总信息的份额；  $I_i$  为时阀复杂度指标。

热力状态方面，需要通过分别建立汽轮机通流部分和凝汽器热力学模型获得其健康指数。

对通流部分而言，以其相对内效率  $\eta_i$  和调节级压力  $p_i$  作为反映其健康状态的指标。编制变工况计算程序，计算各工况下对应的调节级压力应达值  $p_{iy}$  和相对内效率应达值  $\eta_{iy}$ ，同时根据现场监测数据可得到调节级压力实际值  $p_{is}$ ，并通过计算得到各工况下对应的相对内效率实际值  $\eta_{is}$ 。通流部分的健康指数可按如下式计算：

$$H_i(F) = \min[1 - \frac{|\eta_{is} - \eta_{iy}|}{\eta_{iy}}, \frac{|p_{iy} - p_{is}|}{|p_{iy} - p_{iy}|}] \quad (6)$$

式中  $p_{iy}$  为调节级压力停机阈值。

对凝汽器而言，将凝汽器真空  $V$ 、凝结水过冷度  $\delta_c$  和凝结水含氧量  $C$  作为反映凝汽器热力状态的 3 个指标<sup>[10]</sup>，各指标对应健康指数分别表示如下：

$$H_i(V) = 1 - |V_s - V_y| / V_y \quad (7)$$

式中： $V_y$ 为凝汽器正常时，各工况对应的真空值，可通过变工况计算得到； $V_s$ 为实际运行中凝汽器真空，可通过测量得到。

$$H_i(\mu) = \begin{cases} 1 & (\mu < \mu^0) \\ \frac{\mu^{\max} - \mu}{\mu^{\max} - \mu^0} & (\mu^0 < \mu < \mu^{\max}) \\ 0 & (\mu > \mu^{\max}) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\mu$ 为凝结水过冷度 $\delta_c$ 或凝结水含氧量 $C$ 的实测值； $\mu^0$ 为凝汽器正常时 $\delta_c$ 或 $C$ 的值； $\mu^{\max}$ 为凝汽器故障时， $\delta_c$ 或 $C$ 的阈值。

整个凝汽器健康指数可表示如下：

$$H_i(CD) = \min[H_i(V), H_i(\delta_c), H_i(C)] \quad (9)$$

汽轮机控制系统状态方面，各子系统的状态很难用定量参数表示。这里先用定性的方法表示各因素表示的状态，然后再进行量化。各状态定性语义描述及其对应的量化结果如表2所示。

表2 定性评价量化表

Tab. 2 Quantify of qualitative evaluation

语义描述	量化结果				
	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
严重故障	1.0	0	0	0	0
故障	0.75	0.25	0	0	0
一般	0	0	0.5	0	0
较好	0	0	0	0.25	0.75
好	0	0	0	0	1.0

对保护系统而言，可通过将试验结果、AST油压和OPC油压的测量值与标准值的比较，可定性确定3个方面表示的保护系统状态分别为较好、一般和一般，对应3方面对应的定量表示为[0, 0, 0.5, 0.25, 0.75]、[0, 0, 0.5, 0, 0]和[0, 0, 0.5, 0, 0]。若3个方面权重各为1/3，则保护系统总的定量评价为[0, 0, 0.5, 0.08, 0.25]，并作为证据推理的输入。

同理，EH油系统可通过对油泵振动、油母管压力、油温、油位、油酸性值、蓄能器气压等方面的综合考虑进行定性评价和量化；执行机构方面则需要分析试验结果后评价及量化。

需要指出的是，当某一项指标不能获得时，如保护系统中没有试验结果，则不能定性评价其表征的状态。此时，试验结果的量化评价可以[0, 0, 0, 0, 0]表示，合并后作为证据推理的输入不会影响最终的评价结果。证据推理的这种处理不完全信息的能力可提高状态评价的适应性。

## 2 基于证据推理的状态评价模型

### 2.1 基于决策树的状态分析模型

混合多属性决策问题可以用下式表示<sup>[11-12]</sup>：

$$\text{opertimize } y(\alpha_r) =$$

$$\alpha_r \in \Omega$$

$$[y_1(\alpha_r), \dots, y_{k_1}(\alpha_r), y_{k_1+1}(\alpha_r), \dots, y_{k_1+k_2}(\alpha_r)] \quad (10)$$

其中  $\Omega = [\alpha_1, \dots, \alpha_r]$ ， $r = 1, \dots, R$ ， $\Omega$ 是备选方案离散集合； $y(\alpha_r)$ 是备选方案 $\alpha_r$ 的全局评价； $y_k(\alpha_r)$ 是对备选方案 $\alpha_r$ 的第 $k$ 个属性的评价。

考虑到决策属性有定量和定性2种，决策矩阵如表3。表中， $y_{rk}(r=1, \dots, R, k=1, \dots, k_1)$ 表示定量属性 $y_k$ 对应于备选方案 $\alpha_r$ 的数值； $z_{r,k}(r=1, \dots, R, k=k_1+1, \dots, k_1+k_2)$ 表示用于评价对应于备选方案 $\alpha_r$ 的定性属性 $y_k$ 的状态的主观判断。

表3 决策矩阵

Tab. 3 Decision matrix

备选	定量属性 ( $y_k$ )			定性属性 ( $y_k$ )		
	$y_1$	...	$y_{k_1}$	$y_{k_1+1}$	...	$y_{k_1+k_2}$
$\alpha_1$	$y_{11}$	...	$y_{k_11}$	$z_{11}$	...	$z_{1k_2}$
$\alpha_2$	$y_{21}$	...	$y_{2k_1}$	$z_{21}$	...	$z_{2k_2}$
...	...	...	...	...	...	...
$\alpha_R$	$y_{R1}$	...	$y_{Rk_1}$	$z_{R1}$	...	$z_{Rk_2}$

多属性决策模型中的属性评价层，对应每一备选方案需要评价的属性状态，简单的方法是定义若干评价等级，这样，各属性状态就可对应到其中的某一等级。

在评价等级层，称 $H_n(n=1, \dots, N)$ 为评价等级。属性 $y_k$ 的评价等级集合表示如下：

$$H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\} \quad (11)$$

其中  $N$ 表示评价等级数； $H_1$ 和 $H_N$ 分别表示最差和最好的评价等级，且 $H_{n+1}$ 好于 $H_n$ 。

为更清楚地评价系统状态，引入优先度的概念，其取值范围为[-1, 1]，优先度越大，则系统健康状态越好；反之，越差。评价等级集合可量化为

$$p\{H\} = [p(H_1), \dots, p(H_n), \dots, p(H_N)]^T \quad (12)$$

其中 $p(H_n)$ 是等级 $H_n$ 的度量，满足下面的关系：

$$\begin{cases} p(H_1) = -1 \\ p(H_N) = 1 \\ p(H_{n+1}) > p(H_n) \end{cases}, \quad n = 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

在基本因素层，与基本属性 $y_k$ 评价相联系的因素集表示如下：

$$E_k = \{e_k^1, e_k^2, \dots, e_k^{L_k}\} \quad (14)$$

其中  $e_k^i(i=1, \dots, L_k)$ 表示影响对 $y_k$ 评价的因素， $e_k^i$ 的状态可以根据备选方案直接评价， $e_k^i = e_k^i(\alpha)$ ，较大的优先度对应较高的评价等级。这样，属性 $y_k(\alpha)$ 状态的优先度可通过对相关因素 $e_k^i$ 的直接评价产生。典型的决策树评价分析模型如图2所示。

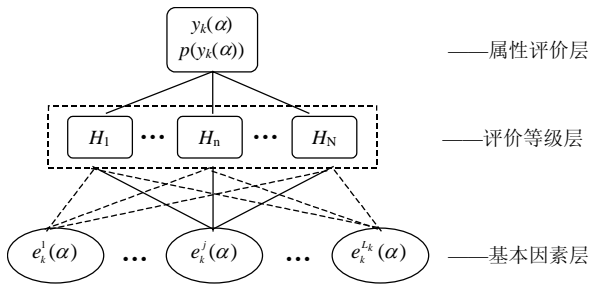


图 2 典型的决策树评价分析模型  
Fig. 2 A representative decision tree evaluation analysis model

2.2 基于证据推理的状态评价算法

D-S证据理论是一种基于统计的信息融合分类算法，结合多源信息的Dempster准则如下<sup>[13]</sup>：

设 $M_1$ 和 $M_2$ 是 $2^{\Omega}$ 上的两相互独立的证据的基本概率赋值，可以根据下面的公式确定组合后的基本概率赋值，归一化的形式为

$$\begin{cases} M(C) = M_1 \oplus M_2 = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} M_1(A_i)M_2(B_j)}{1 - K} \\ K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} M_1(A_i)M_2(B_j) \end{cases} \quad (15)$$

上述求和运算称为 $M_1$ 和 $M_2$ 的“直和”， $K$ 代表证据间的冲突程度， $K$ 越大，说明证据间的冲突越大。若 $K=1$ ，则认为 $M_1$ 和 $M_2$ 完全矛盾，此时公式无法使用。系数 $1/(1-K)$ 称为归一化因子，其作用是在证据合成时避免将非 0 的概率赋给空集 $\emptyset$ 。

在评价分析模型中，评价等级 $H_N$ 可看作D-S证据理论一基本假设，因素 $e_k^i$ 可看作一条证据，基本概率分配可通过信任度获得， $H$ 中的评价等级独立且包含所有可能的等级，这样鉴别框架可定义为

$$\Theta = H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\} \quad (16)$$

令 $M(H_n / e_k^i(\alpha))$ 表示证据 $e_k^i$ 支持属性 $y_k$ 的状态为 $H_n$ 这一假设的基本概率赋值；同时令 $\beta(e_k^i(\alpha))$ 表示决策者考虑对于备选方案 $\alpha_r$ 的证据 $e_k^i$ ，属性 $y_k$ 的状态为确定的确信度。

如果在因素集 $E_k$ 中只有一个因素 $e_k^i$ ，则 $m(H_n / e_k^i(\alpha))$ 应该等于 $\beta(e_k^i(\alpha))$ ；如果在因素集 $E_k$ 中有多个因素，则有：

$$M(H_n / e_k^i(\alpha)) = \lambda_k^i \beta(e_k^i(\alpha)) \quad (17)$$

式中 $\lambda_k^i$ 为 $E_k$ 中各因素 $e_k^i$ 的相对权重。

在获得基本概率赋值后，可利用下面的证据推理算法计算全局概率分配。

分别按式(18)、(19)定义因素子集 $e_{L_k(i)}(\alpha)$ 和合

并概率分配 $M_{Mr,i}^C(\alpha)$ ：

$$e_{L_k(i)}(\alpha) = \{e_k^1(\alpha), \dots, e_k^i(\alpha)\}, \quad 1 \leq i \leq L_k \quad (18)$$

$$M_{Mr,i}^C(\alpha) = M\left(\frac{C}{e_{L_k(i)}(\alpha)}\right) = M_{ri}^C(\alpha) \quad (19)$$

则有迭代算法：

$$\begin{cases} M_{Mr,1}^n = M_{r,1}^n; \quad M_{Mr,1}^H = M_{r,1}^H \\ \begin{cases} M_{Mr,i+1}^n = K_{r,i+1} (M_{Mr,i}^n M_{r,i+1}^n + M_{Mr,i}^n M_{r,i+1}^H + M_{Mr,i}^H M_{r,i+1}^n), n=1, \dots, N \\ M_{Mr,i+1}^H = K_{r,i+1} M_{Mr,i}^H M_{r,i+1}^H \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

式中 $K_{r,i+1} = [1 - \sum_{t=1}^N \sum_{s=1, s \neq t}^N M_{Mr,i}^t M_{r,i+1}^s]^{-1}$ ,  $i=1, \dots, L_k - 1$ ,

$r=1, \dots, R$ 。

可以推出，由因素集 $E_k(\alpha_r)$ 确定的对 $C(\subseteq H)$ 的全局概率分配为 $M_{Mr,L_k}^C$ ，且 $M_{Mr,L_k}^C = 0$  ( $C \subseteq H$ ,  $C = H_n$ 和 $H$ 除外)。

针对备选方案 $\alpha_r$ 的全局优先度可按式计算：

$$p_{rk} = p(y_k(\alpha_r)) = \sum_{n=1}^N M_{Mr,L_k}^n p(H_n) + M_{Mr,L_k}^H p(H) \quad (21)$$

式中 $p(H) = \sum_{n=1}^N \frac{p(H_n)}{N}$ 。

2.3 权重的确定

各因素权重分配的合理与否直接影响状态评价结果的准确性，这里采用层次分析(AHP)方法获得各因素的权重。假设因素集 $E_k$ 有 $L_k$ 个因素组成，则各因素的权重按下列步骤确定：

首先，构造判断矩阵

$$D = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1L_k} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2L_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{L_k1} & u_{L_k2} & \dots & u_{L_kL_k} \end{bmatrix}$$

式中： $u_{ij}$ 为第 $i$ 个评价因素对第 $j$ 个评价因素的相对重要度； $u_{ji}$ 为第 $j$ 个评价因素对第 $i$ 个评价因素的相对重要度，其取值为 $u_{ij}$ 的倒数。

然后，计算判断矩阵 $D$ 的最大特征根 $\lambda_{\max}$ ，代入对应齐次线性方程组<sup>[14]</sup>解出 $\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^{L_k}$ ，得到最大特征根 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量 $\mathfrak{R}=(\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^{L_k})$ 即为各因素的权重。

最后，按式 $C_R = C_l / R_l$ 进行一致性检<sup>[15]</sup>。当 $C_R < 0.1$ 时，认为判断矩阵具有满意的一致性，否则需调整判断矩阵。

3 汽轮机组状态评价实例分析

以某国产 N300-165/550/550 型 300MW 机组

2006年的2个相同负荷运行工况为例进行分析。通过振动监测装置(采用8个转轴位移传感器信号)、DAS系统以及运行维护人员的经验得到各定量描述系统状态的特征参数数据如表4所示。

表4 汽轮机组状态特征参数  
Tab. 4 Condition characteristic parameters of steam turbine

特征参数	应达值/阈值	实际值	
		8月份	10月份
振动幅值/ $\mu\text{m}$	5/75	15*	18*
融合信息熵	—	0.22	0.28
调节级压力/MPa	12.5/13.2	12.7	12.95
相对内效率	0.86/—	0.78	0.69
凝汽器真空/ $\text{kPa}$	96/—	92	91.5
凝结水过冷度/ $^{\circ}\text{C}$	0.5/3.5	1.0	1.1
凝结水含氧量/ $(\mu\text{g/L})$	7/40	10	10

注：“\*”表示所有测点测量值中，与应达值相比较相对差距最大的测点的实际值。

对于采用定性描述的汽轮机组控制系统，则由运行人员根据运行、试验数据结合经验定性给出表各因素层状态的特征参数的定性评价，然后利用1.2节的方法转化为定量描述。

用表4中数据评价系统状态需进行转化。首先利用1.2节的方法得到因素层各因素或子系统的健康指数，如表5所示。

表5 各因素或子系统健康指数  
Tab. 5 Health indexes of factors or subsystems

因素层	健康指数	
	8月份	10月份
幅值域	0.857	0.814
频率域	0.798	0.785
通流部分	0.714	0.314
凝汽器	0.833	0.800

为实现机组状态的综合评价，需将表5中的健康指数向状态空间转化。转化按图3所示的隶属函数关系进行，该关系图根据领域专家经验获得。

将表5中健康指数转化的结果和控制系统定性评价的转化结果列于表6，作为状态评价输入数据。

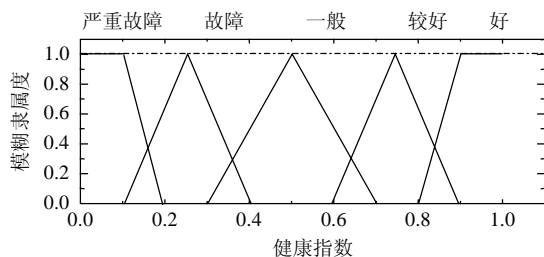


图3 健康指数转化隶属关系图  
Fig. 3 Fuzzy membership relationship map for health index transforming

表6 机组状态评价输入数据  
Tab. 6 Input data for condition evaluation of steam turbine

因素层	权重	转化结果(8月份)					转化结果(10月份)				
		$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
幅值域	0.416	0	0	0	0.29	0.57	0	0	0	0.57	0.14
频率域	0.584	0	0	0	0.68	0	0	0	0	0.77	0
通流部分	0.578	0	0	0	0.76	0	0	0	0.57	0.07	0
凝汽器	0.422	0	0	0	0.45	0.33	0	0	0	0.67	0
保护系统	0.223	0	0	0.5	0.08	0.25	0	0	0.52	0	0.16
EH油系统	0.345	0	0	0	0.26	0.65	0	0	0	0.24	0.69
执行机构	0.432	0	0	0	0.45	0.71	0	0	0	0.48	0.62

将表6中的数据输入编制的迭代计算程序，得到属性层振动状态、热力状态和DEH控制系统状态及整机状态的评价结果，如表7所示。

表7 汽轮机组状态评价结果  
Tab. 7 The results of condition evaluation for steam turbine

属性层	常权重	评价结果(8月份)					评价结果(10月份)				
		$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
振动状态	0.435	0	0	0	0.41	0.16	0	0	0	0.57	0.03
热力状态	0.335	0	0	0	0.52	0.1	0	0.25	0.03	0.22	0
DEH状态	0.230	0	0	0.05	0.20	0.43	0	0	0.05	0.19	0.40
机组状态	—	0	0	0.01	0.32	0.15	0	0.06	0.01	0.3	0.07

令 $p[H_n] = [-1, -0.4, 0, 0.4, 1]$ ，则利用式(21)可分别计算出属性层各属性的优先度 $p$ ，如表8所示。

表8 汽轮机组状态评价优先度  
Tab. 8 The preference degrees of condition evaluation for steam turbine

因素层	优先度	
	8月份	10月份
振动状态	0.324	0.258
热力状态	0.308	-0.012
DEH状态	0.510	0.476
机组状态	0.278	0.166

分析表7和表8的计算结果可以看出，机组10月份整体健康状态和8月份相比有所下降，主要原因是其热力状态严重劣化。由评价结果可以看出机组热力状态已经处于“故障”状态，应该在短时间内消除。引起热力状态退化的原因是通流部分健康状态的退化，分析通流部分特征参数——调节级压力大幅度增大这一征兆，可以确定引起该机组热力状态退化的原因是通流部分结垢。该机组在随后11月份的揭缸检修中发现通流部分严重结垢。

## 4 结论

(1) 本文考虑状态特征信息的复杂性和不确定性，采用定性和定量特征相结合的思想，使评价结果既包含实时数据提供的信息，又包含运行、维

修人员的经验信息。

(2) 状态评价特征信息经常是不精确的, 甚至是不完全的, 证据推理可以很好地合并这些来自各种监测、诊断、试验系统和运行经验的状态特征证据, 实现对机组状态的准确评价。

(3) 基于决策树的机组状态评价, 按层次由低向高逐层推理评价, 既可得到整体状态也可得到各子系统的状态, 便于故障定位和查找, 并为维修决策提供支持。

## 参考文献

- [1] 林振坤, 史进渊, 何新土, 等. 大型火电机组可靠性的分析和改进[J]. 动力工程, 1992, 12(4): 46-52.  
Lin Zhenkun, Shi Jinyuan, He Xintu, et al. Reliability analysis and improvement for large-scale fossil fired sets [J]. Power Engineering, 1992, 12(4): 46-52(in Chinese).
- [2] 顾煜炯, 董玉亮, 杨昆. 基于模糊评判和 RCM 分析的发电设备状态综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 189-192.  
Gu Yujiong, Dong Yuliang, Yang Kun. Synthetic evaluation on conditions of equipment in power plant based on fuzzy judgment and RCM analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 189-192(in Chinese).
- [3] 董玉亮, 顾煜炯, 肖官和, 等. 大型汽轮机组变权综合状态评价模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 112(2): 46-49.  
Dong Yuliang, Gu Yujiong, Xiao Guanhe, et al. Research on variable weight synthesizing model for condition evaluating on large steam turbine[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 112(2): 46-49(in Chinese).
- [4] 张淑清, 邓红, 王艳玲. D-S 证据理论在数据融合中的应用及改进[J]. 传感技术学报, 2003, 16(1): 78-81.  
Zhang Shuqing, Deng Hong, Wang Yanling. Application and improvement of D-S evidential reasoning theory in data fusion [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 16(1): 78-81(in Chinese).
- [5] 戴冠中, 潘泉, 张山鹰, 等. 证据推理的进展及存在的问题[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(4): 465-469.  
Dai Guanzhong, Pan Quan, Zhang Shanying, et al. The developments and problems in evidence reasoning[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(4): 465-469(in Chinese).
- [6] 蔡兴国, 马平. 基于信息融合技术的并发故障诊断的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 112-115.  
Cai Xingguo, Ma Ping. Study on simultaneous fault diagnosis based information fusion technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 112-115(in Chinese).
- [7] 廖瑞金, 廖玉祥, 杨丽君, 等. 多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 119-124.  
Liao Ruijin, Liao Yuxiang, Yang Lijun, et al. Study on synthetic diagnosis method of transformer fault using multi-neural network and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 119-124(in Chinese).
- [8] Parikh C R, Pont M J, Jones N B. Application of dempster-shafer theory in condition monitoring applications: a case study[J]. Pattern Recognition Letter, 2001, 22: 777-785.
- [9] 李录平, 邹新元, 晋风华, 等. 基于融合信息熵的大型旋转机械振动状态的评价方法[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 153-158  
Li Luping, Zou Xinyuan, Jin Fenghua, et al. The method based on fusion information entropy for quantitative assessing vibration state in large capacity rotary machinery[J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 153-158(in Chinese).
- [10] 李勇, 曹丽华, 张欣刚. 汽轮机凝汽器真空应达值的确定方法及应[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(4): 207-209.  
Li Yong, Chao Lihua, Zhang Xingang. The determining method of normal vacuum of condenser for steam turbine and its application [J]. Turbine Technology, 2002, 44(4): 207-209(in Chinese).
- [11] Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 1-18.
- [12] Yang J B, Sen P A. A general multi-level evaluation process for hybrid MAMD with uncertainty[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(10): 1458-1473.
- [13] 高隽. 智能信息处理方法导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 董玉亮, 顾煜炯, 杨昆. 基于蒙特卡洛模拟的发电厂设备重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 201-205.  
Dong Yuliang, Gu Yujiong, Yang Kun. Criticality analysis on equipment in power plant based on Monte Carlo simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 201-205(in Chinese).
- [15] Triantaphyllou E, Kovalerchuk B, Mann L, et al. Determining the most important criteria in maintenance decision making [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1997, 3(1): 16-24.

收稿日期: 2007-03-25。

作者简介:

董玉亮(1973—), 男, 工学博士, 讲师, 研究方向为电站设备状态监测、故障诊断和维修决策, 0313dongyl@sohu.com;

顾煜炯(1968—), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为电站设备状态监测、故障诊断和维修管理。

(编辑 车德竞)