

基于熵权和多级物元分析的汽轮机 DEH 调节系统状态综合评价

冯利法, 杨新宇, 朱 誉, 徐治皋
(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 在构建汽轮机数字电液(DEH)调节系统状态评价指标体系的基础上, 提出了一种可拓评价方法。基于可拓学的物元理论, 建立了汽轮机 DEH 调节系统状态评价的多级物元模型, 对 DEH 调节系统状态进行定性和定量评价; 针对评价指标权重难以确定以及人为主观因素影响较大的问题, 引入熵值理论, 利用指标值的熵权确定权重, 尽量消除权重计算的人为干扰, 使评价结果更符合实际; 最后通过实例验证了该方法的可行性与实用性。研究结果表明, 该方法能快速而有效地识别汽轮机 DEH 调节系统的状态, 从而为状态维修决策提供科学的依据。

关 键 词: 汽轮机; 数字电液调节系统; 状态评价; 多级物元模型; 熵权

中图分类号: TK263.7; O242 文献标识码: A

引 言

汽轮机调节系统作为整个汽轮机组的一个子系统, 其运行状态的优劣直接关系到机组运行的安全性和经济性。由于我国采用传统的计划维修方式对 DEH 调节系统进行维修, 存在“维修不足”或者“维修过剩”的问题。“维修不足”将使 DEH 调节系统运行的可靠性降低, 增大了其发生故障的可能性, 降低了机组运行的安全性。“维修过剩”又将导致不必要的人力、物力的浪费, 降低了机组运行的经济性。因此, 从安全性和经济性两方面考虑, 改变传统的计划维修方式, 实行 DEH 调节系统的状态维修具有重要的现实意义。

实行 DEH 调节系统的状态维修的关键是实时、准确地评价其运行状态, 从而合理地安排维修时间和维修项目。文献[1]计算了 DEH 调节系统各子系统的相对劣化度, 文献[2]在对 DEH 调节系统进行设备故障模式及影响分析(FMEA)的基础上, 提出了变权模糊评价方法, 但由于描述汽轮机 DEH 调节系统状态优劣的语言是模糊的, 而实际运行系统所测得的参

数是客观的, 因此存在着主客观相互矛盾的问题, 很难对汽轮机 DEH 调节系统状态做出准确的评价。

可拓学相关理论为解决主客观矛盾问题于 1983 年所创立的理论^[3~4], 以物元理论和可拓集合理论为支柱, 能够同时研究“质”和“量”两者对所描述问题的影响程度, 从而完整地认识系统特征, 已广泛应用于各种实际领域^[5~6]。本研究提出的汽轮机 DEH 调节系统状态的可拓评价方法, 建立了状态等级的多级物元模型, 引入熵值理论, 利用评价指标值的熵权确定权重, 进而识别出汽轮机 DEH 调节系统的状态, 最后利用实例验证了该方法的实用性, 为汽轮机 DEH 调节系统状态评价提供了一种新的途径。

1 可拓学基本理论

1.1 物元基本理论

事物 N 具有特征 c , 其值为 v , 则由 N, c, v 构成有序的三元组 $R = (N, c, v)$ 作为描述事物的基本元, 简称物元。事物的名称 N , 特征 c 和量值称为物元 R 的三要素。

假设事物 N 具有多个特征, 可用 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 及相应的量值描述 v_1, v_2, \dots, v_n , 则称物元 R 为 n 维物元, 记为:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N, & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R_i = (N, c_i, v_i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 称为 R 的分物元; $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ —特征向量; $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ —特征向量的量值。

1.2 可拓集合理论

设论域 U 中的任一元素 u , 对应一实数 $K(u) \in (-\infty, +\infty)$, 则:

$$A = \{(u, y) | u \in U, y = K(u) \in (-\infty, +\infty)\}$$

为论域 U 的一个可拓集合。其中 $y = K(u)$ 为 A 的关联函数, $K(u)$ 为 u 关于可拓集合 A 的关联度。

设 x 为实域 $(-\infty, +\infty)$ 上的任意一点, 区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 和 $X = \langle c, d \rangle$ (符号 $\langle \rangle$ 只表示区间端点而不论开、闭性质) 为实域上任一区间 $X_0 \subset X$, 且无公共端点, 则初等关联函数为:

$$k(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \quad (2)$$

式中: $\rho(x, X_0)$ 一点 x 与区间 X_0 的距, 得:

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (3)$$

$D(x, X_0, X)$ 一点 x 与区间 X_0, X 的位值, 则:

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0), & x \notin X_0 \\ -1, & x \in X_0 \end{cases} \quad (4)$$

关联函数可以计算 x 点与 X_0 的关联程度, $k(x) > 0$ 表示点 x 属于 X_0 的程度; $k(x) < 0$ 表示点 x 不属于 X_0 的程度; $-1 < k(x) < 0$ 表示当状态发生改变时, 点 x 有可能成为 X_0 的一部分, 且 $k(x)$ 的值越大可能性就越大。

2 熵值法确定权重系数

在确定评价指标的权重时, 往往采用主观确定权重的方法, 如专家评价法等。但在某些情况下, 无法得到专家的意见或是由于评价指标的复杂性, 无法给出各个指标恰当的权重, 这样势必造成评价结果由于人的主观因素影响而形成偏差。

一个系统有序程度越高, 则熵越低, 所含信息量就越大; 反之, 无序程度越高, 则熵就越大, 信息量就越小。熵的获得, 意味着信息的丢失; 信息和熵是互补的, 信息是负熵。1948 年, Shannon 从全新的角度对熵概念做了新定义, 将熵与信息相联系, 并把熵概念引入信息论中^[7]。

在信息论中, 熵值反映了信息无序化程度, 其值越小, 系统无序度越小, 故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及效用, 即由指标值构成的判断矩阵来确定指标权重, 尽量消除各指标权重计算的人为干扰, 使评价结果更符合实际。其步骤如下:

(1) 构建具有 m 个样本 n 个评价指标的判断矩阵:

$$R = (x_{ij})_{nm}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

(2) 将判断矩阵归一化处理, 得到归一化判断矩阵。

$$B = (b_{ij})_{nm}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; b_{ij} =$$

$$\frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中: x_{\max}, x_{\min} 一同指标下不同样本中最满意者和最不满意者。

(3) 根据熵的定义, 确定评级指标的熵:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

式中: $f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij}$

(4) 计算评价指标的熵权 W :

$$W = (w_i)_{1 \times n}$$

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)}, \text{ 且满足 } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (6)$$

利用熵值法计算各指标的权重, 其本质是利用了各指标所含信息有序度的差异性, 指标内样本值的差异性越大, 该指标权重越大。

3 DEH 调节系统状态评价的多级物元模型

3.1 DEH 调节系统状态评价指标体系的建立

对汽轮机 DEH 调节系统进行设备故障模式及影响分析(FMEA), 确定设备的主要故障^[2], 并提取主要故障的特征参数。按照功能相关的原则, 将 DEH 系统分为 EH 供油系统、电液伺服执行机构和保安系统 3 个子系统, 用 $C = (C_1, C_2, \dots, C_f)$ 表示, $f = 1, 2, 3$, 每个子系统 C_f 有 n_f 个评价指标, 即 $C_f = (c_{f1}, c_{f2}, \dots, c_{fn})$, c_{fi} 表示第 f 个子系统的第 i 个评价指标。在分析汽轮机 DEH 调节系统主要故障及故障相关参数可测性的基础上, 根据每个子系统的主要故障特征参数建立评价指标体系, 评价模型的层次划分及主要评价指标如表 1 所示。

表 1 评价指标体系

评价系统	子系统	评价指标
DEH 系统 C	EH 供油系统 C ₁	油泵振动幅值 c ₁₁
		油液温度 c ₁₂
		油泵电流 c ₁₃
		母管压力 c ₁₄
	电液伺服执行机构 C ₂	电液转换器颤幅值比 c ₂₁
		电液转换器进、出口压差 c ₂₂
		油动机油压 c ₂₃
	保安系统 C ₃	OPC 油压 c ₃₁
		AST 油压 c ₃₂

3.2 评价指标相对劣化度的计算

由于评价系统状态各特征参数具有不同的量纲, 指标属性缺乏统一的度量标准, 难以进行比较和运算, 必须对其进行归一化处理。本研究通过计算各评价指标的相对劣化度, 将评价指标值统一到 [0, 1] 区间上, 而且相对劣化度是反映设备(系统)劣化程度的指标, 具有实际的物理意义。根据各个特征参数的不同特定, 采用以下方法确定参数的相对劣化度。

(1) 对于停运参数为一上限值的状态特征参数, 其相对劣化度计算:

$$y_i = [(x_i - x_0) / (x_{\max} - x_0)]^k, x_0 \leq x_i \leq x_{\max} \quad (7)$$

式中: x_0 —该设备状态特征参数的正常值; x_{\max} —设备停运时的状态参数阈值; x_i —该状态参数的实际测量值; k —参数变化对设备的影响程度。

(2) 对于停运参数为一下限值的状态特征参数, 其相对劣化度计算:

$$y_i = [(x_0 - x_i) / (x_0 - x_{\min})]^k, x_{\min} \leq x_i \leq x_0 \quad (8)$$

式中: x_{\min} —设备停运时的状态参数阈值; 其余参数同式(7)。

(3) 对于状态特征参数阈值为某一范围的情况, 其相对劣化度计算^[8]:

$$y_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq x_0 \\ [(x_i - x_1) / (x_0 - x_1)]^k & x_0 < x_i < x_1 \\ 0 & x_1 \leq x_i \leq x_2 \\ [(x_i - x_2) / (x_3 - x_2)]^k & x_2 < x_i < x_3 \\ 1 & x_i \geq x_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_1, x_2 —特征参数正常值的下限和上限; x_0, x_3 —设备停运时状态特征参数值的上限和下限, k 意义与式(7)相同。

由于设备的劣化过程是非线性的, 其故障特征参数变化也并非全部符合线性规律。若采用线性模式将使得相对劣化度的计算发生偏差, 在式(7)~式(9)中引入调节系数, 使得相对劣化度的计算更加准确。

表 2 相对劣化度与设备(系统)状态对应关系

相对劣化度	设备状态等级	设备状态描述
0~0.2	好	设备状态良好, 可以继续运行
0.2~0.4	较好	设备偏离最佳状态, 应加强各项运行指标的监测
0.4~0.7	一般	设备状态劣化, 若无法及时找到故障, 应该做好停机的准备
0.7~1.0	差	设备状态已由劣化状态转移到故障状态, 应立即停机进行检查和维修, 以防止故障危害的进一步扩大

根据文献[9]的研究, 建立相对劣化度取值范围与设备(系统)状态之间的对应关系, 如表 2 所示。

3.3 DEH 调节系统状态的多级物元模型

运用可拓理论并结合表 2 中指标相对劣化度在各等级的数值区间, 确定 DEH 调节系统各子系统状态优劣的经典域(即给出 C_f 所属各指标关于各优劣等级的取值范围):

$$R_{f1} = (N_1, C_f, X_{f1}) = \begin{bmatrix} \text{好} & c_{f1} < 0, 0.2 > \\ & c_{f2} < 0, 0.2 > \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} < 0, 0.2 > \end{bmatrix}$$

$$R_{f2} = (N_2, C_f, X_{f2}) = \begin{bmatrix} \text{较好} & c_{f1} < 0.2, 0.4 > \\ & c_{f2} < 0.2, 0.4 > \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} < 0.2, 0.4 > \end{bmatrix}$$

$$R_{f3} = (N_3, C_f, X_{f3}) = \begin{bmatrix} \text{一般} & c_{f1} < 0.4, 0.7 > \\ & c_{f2} < 0.4, 0.7 > \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} < 0.4, 0.7 > \end{bmatrix}$$

$$R_{f4} = (N_4, C_f, X_{f4}) = \begin{bmatrix} \text{差} & c_{f1} < 0.7, 1 > \\ & c_{f2} < 0.7, 1 > \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} < 0.7, 1 > \end{bmatrix}$$

在可拓学中, 节域表达了事物某性质对应的量值范围, 当量值在节域范围内变化时, 事物的性质保持稳定; 当量值的变化超出节域时, 就会使得该性质发生“质”的改变。DEH 调节系统各子系统的节域 R_{fp} (即所属各指标的值域):

$$R_{fp} = (N_{fp}, C_f, V_{fp}) = \begin{bmatrix} N_{fp} & c_{f1} < 0, 1 > \\ & c_{f2} < 0, 1 > \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} < 0, 1 > \end{bmatrix} \quad (10)$$

由评价指标的现场监测结果, 构成各子系统状态的待评物元(即现状物元) R_{fi} :

$$R_{fi} = (N_{fi}, C_f, V_{fi}) = \begin{bmatrix} N_{fi} & c_{f1} & v_{fi1} \\ & c_{f2} & v_{fi2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{fn} & v_{fin} \end{bmatrix} \quad (11)$$

计算待评物元与状态物元的关联函数值, 关联函数表示为:

$$K_{fij}(v_{fij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{fij}, V_{fij})}{|V_{fij}|}, v_{fij} \in v_{fij} \\ \frac{\rho(v_{fij}, V_{fij})}{\rho(v_{fij}, V_{fij}) - \rho(v_{fij}, V_{fij})}, v_{fij} \notin v_{fij} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\rho(v_{fj}, V_{fj})$ —待评物元与各经典域的距; $\rho(v_{fj}, V_{fj})$ —待评物元与节域的距; $|V_{fj}|$ —经典域的量值大小, $|V_{fj}| = \left| \frac{b_{fj} - a_{fj}}{2} \right|$ 。

3.4 DEH 调节系统状态的一级评价

根据熵值法确定各评价指标的权重, 并计算待评子系统状态等级 N_{fi} 关于等级 j 的关联度:

$$K_{fj}(N_{fi}) = \sum_{i=1}^{n_f} W_{fi} K_{fij}(v_{fij}) \quad (13)$$

式中: $K_{fj}(N_{fi})$ —待评子系统状态等级 N_{fi} 关于等级 j 的关联度; W_{fi} —第 f 个子系统第 i 个指标的熵权。

3.5 DEH 调节系统状态的二级评价

根据层次分析法(AHP)确定子系统的权重 $W_f^{[10]}$, 计算待评 DEH 调节系统各状态的综合关联度:

$$\lambda_j = K_f(N_t) = \sum_{f=1}^3 W_f K_{fj}(N_{fi}) \quad (14)$$

式中: $K_f(N_t)$ —待评 DEH 调节系统状态等级 N_{fi} 关于等级 j 的综合关联度; W_f —各子系统的权重。

3.6 评定 DEH 调节系统状态优劣等级

将综合关联度作归一化处理:

$$\lambda'_j = \frac{2\lambda_j - \lambda_{\min} - \lambda_{\max}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

式中: $\lambda_{\max} = \max_4(\lambda_j)$, $\lambda_{\min} = \min_4(\lambda_j)$ 。

根据最大化原则判断优劣等级:

$$\text{IF } (\lambda'_j = 1) \text{ THEN } (N_t = N_j) \quad (16)$$

若 $\lambda'_j = 1$, 则判断 DEH 调节系统状态等级为 N_j , 其它状态等级的可能性可依据其关联度的相对值大小决定, 一般关联度相对值越大, 则该状态等级出现的可能性越大。

4 应用实例分析

根据某汽轮机 DEH 调节系统现场监测数据, 计算各指标的相对劣化度后构成运行状态的待评物元 R_{fi} :

$$R_{1t} = \begin{bmatrix} N_{1t} & c_{11} & 0.15 \\ & c_{12} & 0.25 \\ & c_{13} & 0.50 \\ & c_{14} & 0.14 \end{bmatrix}$$

$$R_{2t} = \begin{bmatrix} N_{2t} & c_{21} & 0.32 \\ & c_{22} & 0.28 \\ & c_{23} & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$R_{3t} = \begin{bmatrix} N_{3t} & c_{31} & 0.17 \\ & c_{32} & 0.15 \end{bmatrix}$$

按照式(12)计算关联函数值, 根据熵值法确定各评价指标的权重, 利用层次分析法确定各子系统的权重, 最后通过式(13)和式(14)得到综合关联度, 具体计算结果如表 3 所示。

表 3 关联函数值及关联度的计算

子系统	关联函数值				指标熵权	子系统权重	
	好	较好	一般	差			
EH 供油系统 C_1	c_{11}	0.50	-0.25	-0.63	-0.79	0.30	0.33
	c_{12}	-0.17	0.50	-0.38	-0.64	0.35	
	c_{13}	-0.38	-0.17	0.67	-0.29	0.07	
	c_{14}	0.60	-0.30	-0.65	-0.80	0.28	
电液伺服执行机构 C_2	c_{21}	-0.27	0.80	-0.20	-0.54	0.36	0.43
	c_{22}	-0.22	0.80	-0.30	-0.60	0.35	
保安系统 C_3	c_{31}	0.30	-0.15	-0.58	-0.76	0.67	0.24
	c_{32}	0.50	-0.25	-0.63	-0.79	0.33	
综合关联度		0.06	0.49	-0.60	-1.02		

将各综合关联度 λ_j 按式(15)作归一化处理, 得到 $\lambda'_j = [0.43, 1.0, -0.44, -1.0]$, 由式(16)最大化原则可知, $\lambda'_j = 1$, 汽轮机 DEH 调节系统状态等级 $N_1 = N_2$, 因此可认为汽轮机 DEH 调节系统目前的运行状态为“较好”, 应加强各项运行指标的监测。

5 结 论

(1) 物元分析方法可以有效地处理汽轮机 DEH 调节系统状态参数的多样性, 综合考虑各种主客观信息, 能够把“质”和“量”更好地结合, 是其它方法所不能比拟的。

(2) 汽轮机 DEH 调节系统状态的物元模型算法简单、计算速度快、评价结果直观; 可利用计算机编制应用程序, 快速判别运行状态, 是一种高效合理的评价方法。结合熵值法确定指标的权重, 即使在无法得到专家指导的情况下, 也能较合理地分配指标的权重。

(3) 该方法可广泛应用于电站设备的状态评价, 为实现设备的状态维修提供决策依据。在具体应用过程中可以根据不同问题的实际情况调整经典域, 方法灵活。

参考文献:

[1] 董玉亮, 顾煜炯, 王 清, 等. 汽轮机数字式电液调节系统的状

- 态评价方法研究[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(2): 84-86
- [2] 崔立明. 汽轮机数字电液控制系统(DEH)运行状态评价与维修决策方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [3] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [4] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [5] 卢绪祥, 李录平. 凝汽器运行状态的物元模型及可拓评价方法[J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 24-27.
- [6] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于物元模型的电力变压器故障的可拓诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 45-49
- [7] 徐章遂, 房立清. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [8] 董玉亮, 顾煜炯, 肖官和, 等. 大型汽轮机组变权综合评价模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(2): 46-49.
- [9] 卢绪祥, 李录平, 张晓玲, 等. 基于相对劣化度模型的大型汽轮机状态综合评价[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 507-510.
- [10] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988
- (编辑 刘伟)

新技术、新工艺

升级改进的 LM2500 船舶燃气轮机的燃油控制系统

据《Gas Turbine World》2009年1~2月号报道,美国海军已经给接近50台LM2500船舶燃气轮机更换GE的DFC(数字式燃油控制器),这标志着GE最先进的DFC技术取代LM2500发动机原来安装的液压—机械式燃油控制器。

DFC控制系统部件包括1个燃油计量阀和2个VSV(可转导叶)致动器,两者都具有冗余配置的电子反馈。DFC全套元件的集成要求安装升级改进的发动机控制器和选择性地修改船上的配线。

DFC技术提高了发动机的运行性能,表现为:

- °通过油致动VSV和燃油计量阀,改进了发动机耐燃油污染性;
- °通过电子反馈和闭路控制达到更精确的燃油/空气配比。此外,可以通过软件接口重新校准燃油特性和VSV的位置;
- °关于压气机出口压力、压气机进口温度和压力、燃气发生器速度、VSV位置和燃油计量阀位置的燃气轮机控制传感器的冗余配置;
- °借助于补充电力传感器和致动器反馈,改进了操作人员信号、报警和查找并排除故障;
- °改进了数据采集和状态监控的能力;
- °由于减少了在燃油控制改变后用于高功率检查和扭矩平衡所需要的时间,节省了燃油的消耗。

在舰船现代化改造的过程中,迄今已在LM2500燃气轮机驱动的美国海军CG-47提康德罗加级导弹巡洋舰和DDG-51阿里·伯克级导弹驱逐舰上更换DFC系统。更换后的DFC全套系统到目前为止累计的工作时间已超过100000h。

此后,GE结合有DFC系统的LM2500和LM2500+燃气轮机已被指定用于若干舰船生产计划,包括Makin Island LHD8两栖攻击舰和最新一代的濒海战斗舰。

GE LM2500燃气轮机在ISO条件下的额定连续功率为24618kW,耗油率为0.2262kg/(kW·h)。

GE LM2500+燃气轮机在ISO条件下的额定连续功率为30213kW,耗油率为0.2152kg/(kW·h)。

(吉桂明 摘译)

基于 BP 神经网络和分解技术的汽轮机叶片可靠性反求设计 = A Reliability Reverse-solution-seeking Design of Steam Turbine Blades Based on BP (Back Propagation) Neural Network and Decomposition Techniques [刊, 汉] / DUAN Wei, WANG Zhang-qi, WAN Shu-ting (Department of Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24 (5). — 577 ~ 582

The reliability reverse-solution-seeking design of steam turbine blades aims at determining the design parameters of blades with unknown probability to meet a given reliability requirement. In the light of the blade function being a random variable implicit function, a reliability reverse-solution-seeking design method was presented based on finite element method, BP neural network and decomposition techniques. It combined the finite element method with BP neural network to establish an approximate analytic expression showing the relationship between the performance function and the random input variables. By employing the decomposition techniques, the overall optimization problem involving the solution-seeking of random design parameters was decomposed into a main problem and sub-problems. By way of the sub-problems, the standard optimization toolbox was used directly to obtain the reliability indexes, and the decomposition and iterative techniques were employed to seek solutions to the main problem, thus obtaining the sensitivity of the random design parameters and target reliability indexes to various random variables. With the equal and straight blades of a steam turbine on a test rig serving as an example, the concrete application process of the method was expounded. The method features a simple mathematical expression and can be directly used in standard optimization programs. It successfully solved the reliability reverse-solution-seeking design problem of blades under an implicit function, thus enjoying a relatively good application value for engineering projects. **Key words:** blade, reliability reverse-solution-seeking design, finite element, BP neural network, decomposition technique

基于熵权和多级物元分析的汽轮机 DEH 调节系统状态综合评价 = An Overall Evaluation of the Status of a Steam Turbine DEH (Digital Electro-hydraulic) Control System Based on Entropy Weights and a Multistage Physical Element Analysis [刊, 汉] / FENG Li-fa, YANG Xin-yu, ZHU Yu, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 583 ~ 587

On the basis of establishing a status evaluation index system of steam turbine DEH (digital electro-hydraulic) control system, proposed was an extensible evaluation method. Based on the physical element theory in topology, the authors have presented a multistage physical element model for evaluating qualitatively and quantitatively the status of a steam turbine DEH control system. In the light of the evaluation index weighting being difficult to determine and the relatively big influence of subjective factors, an entropy value theory was introduced and the entropy weight of the index value was employed to determine the weighting to eliminate to a maximally possible extent the human interference from the weighting calculation and make the evaluation results more close to practical conditions. Finally, through a practical example, the feasibility and practicability of the method in question was verified. The research results show that the method can quickly and effectively identify the status of a steam turbine DEH control system, thus providing a scientific basis for decision-making of status maintenance. **Key words:** steam turbine, digital electro-hydraulic control system, status evaluation, multistage physical element model, entropy weight

燃气轮机进气雾化式蒸发冷却控制技术研究 = A Study of the Control Technology of Inlet Atomized Air Evaporation Cooling for Gas Turbines [刊, 汉] / MA Kun-lin (Naval Representative Office Resident at CSIC (China Shipbuilding Industrial Corporation) Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HAO Liang (Guodian Group Tianjin Binhai Electric Power Co. Ltd., Tianjin, China, Post Code: 300452), LIU Rui, ZHAO Ai-jun (CSIC (China Shipbuilding Industrial Corporation) Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) //