

基于模糊建模的冷凝器污垢软测量

樊绍胜¹, 王耀南²

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410077; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种基于模糊建模的冷凝器污垢软测量方法. 该方法选取传热端差作为研究对象, 应用模糊建模技术分离出冷凝器污垢对端差的影响. 在模糊建模中, 采用 T-S 模型描述变工况传热端差, 研究了一种相似度判别法则以确定最优模型结构, 并采用实数编码的遗传算法同时优化模型前、后件参数, 从而获得了规则简化、精度较高的模糊模型. 根据此方法, 设计了试验系统, 并进行了现场试验. 试验结果表明: 该方法能有效地在线监测冷凝器污垢, 并在冷凝器出现堵管或空气漏入量较大时, 取得比热阻法、传热系数法更可靠的测量结果.

关键词: 冷凝器污垢; 软测量; 模糊建模; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Soft-sensing of fouling in condenser based on fuzzy modeling

FAN Shao-sheng¹, WANG Yao-nan²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410077, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: A novel approach based on fuzzy modeling for online soft-sensing of fouling in condenser is proposed. In the approach, terminal temperature difference is chosen to reflect fouling state, fuzzy modeling is applied to separate the influence imposed by fouling on terminal temperature difference. During fuzzy modeling, T-S model is employed to approximate off-design condition terminal temperature difference, a fuzzy clustering algorithm based on similarity assessing is proposed to determine the optimal structure of the model and real-coded genetic algorithm is adopted to optimize model parameters. All these techniques make the fuzzy model compact and accurate. Based on it, an experimental system is developed and the experiment on an actual condenser is carried out. The results show the approach measures the fouling correctly, and is more effective than thermal resistance method or heat transfer coefficient method under the condition of blocked tubes or excessive amount of air in condenser.

Key words: fouling in condenser; soft-sensing; fuzzy modeling; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

冷凝器是电力、化工等行业的大型换热设备,它在汽轮机组的热力循环中起冷源作用. 其性能好坏直接影响机组的循环效率.

冷凝器运行时,冷却水自换热管中流过,汽轮机做功后的乏汽则由进汽口进来,经过换热管之间的缝隙往下流动,向管壁放热后凝结为水. 在此过程中,由于冷却水质的不洁净,使得换热管内壁积聚了污垢,污垢的存在,降低了换热面的传热能力,使得汽轮机排气压力升高,输出功率减少,热耗率增加. 因此,必须进行清洗. 如何定量地测定冷凝器的污垢程度,以便为冷凝器的合理清洗及运行提供依据,是许多学者都在研究的问题. 目前,已提出了多种方法,但都存在一定局限. 热阻法^[1]须在换热管上埋设

铠装热偶以检测管壁温度,冷凝器换热管数量众多,工程上较难实现,而且,其测量结果极易受堵管现象影响;传热系数法^[2,3]未考虑空气漏入量对传热效果的影响,当空气漏入量较大时,误差显著增大;水流阻力法^[4]反映了污垢的数量,但没有体现出污垢的导热性质,用该方法确定冷凝器污垢显然不够准确.

软测量技术近年来得到很快发展和应用. 其核心是采用生产过程中比较容易检测的过程变量,运用机理分析、神经网络等建模方法,在线估计出那些难以测量或无法测量的关键工况参数^[5]. 本文根据冷凝器换热过程的特点,提出了基于模糊建模的冷凝器污垢软测量方法,准确实现冷凝器污垢程度的在线监测.

2 测量方法(Measurement approach)

传热端差是反映冷凝器热交换状况的重要性能指标,本文选用它来体现冷凝器的污垢状态.传热端差 δ_t 定义为

$$\delta_t = t_s - t_{w0}. \quad (1)$$

式中, t_s 为冷凝器压力所对应的饱和蒸汽温度; t_{w0} 为冷却水出口温度.

冷凝器的冷却面积一定时,分析换热过程,可知 δ_t 能表示为

$$\delta_t = f(D_c, D_w, C, \epsilon, t_{wi}). \quad (2)$$

式中: D_c 为蒸汽流量; D_w 为冷却水流量; C 为冷凝器的污垢系数; ϵ 为蒸汽中不凝结气体(空气)的含量; t_{wi} 为冷却水入口温度.

从式(2)可知,传热端差除取决于换热面的污垢程度外,还与冷凝器的工况参数密切相关,因此,如何从众多参数中分离出换热面污垢对端差的影响,成为准确测定冷凝器污垢的关键.

设冷凝器被彻底清洗后,在某一给定的蒸汽流量 D_c 、冷却水流量 D_w 、冷却水入口温度 t_{wi} 、空气含量 ϵ 下,测得的端差为 δ_{td} , δ_{td} 可看作清洁状态下该工况对应的端差.工况改变后,测得的端差为 δ_{tf} .显然 δ_{td} , δ_{tf} 的差值 $\Delta\delta$ 既有由换热面污垢引起的,也有因工况参数变化而引起的,表示为

$$\Delta\delta = \Delta\delta_c + \Delta\delta_g. \quad (3)$$

式中: $\Delta\delta_c$ 为换热面污垢引起的端差变化,称之为污垢端差; $\Delta\delta_g$ 为变工况引起的端差变化,称之为变工况端差.定义污垢系数

$$C = \frac{\Delta\delta_c}{\delta_{td}} = \frac{\Delta\delta - \Delta\delta_g}{\delta_{td}}. \quad (4)$$

由上式可看出,要确定 C , 须求出 $\Delta\delta_g$. 但 $\Delta\delta_g = f(\Delta D_c, \Delta D_w, \Delta t_{wi}, \Delta \epsilon)$ 描述的是一非常复杂的传热过程,其精确数学模型很难获取.

T-S 模糊模型是基于输入、输出测量数据的建模方法,能在任意精度上逼近任意非线性函数,是实现软测量方法的理想选择.不同辨识算法获取的模糊模型在结构与精度等方面均有差异,为了构建规则简化、精度较高的变工况端差模型,本文提出了模糊聚类的相似度判别法则,并通过遗传算法优化模型参数,从而实现冷凝器污垢的精确测量.

3 模糊建模(Fuzzy modeling)

3.1 T-S 模型(T-S model)

变工况端差 $\Delta\delta_g = f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_4) = (\Delta D_c, \Delta D_w, \Delta t_{wi}, \Delta \epsilon)$, 可由 T-S 模糊模型^[6]来通

近,模糊模型的第 i 条规则形式为

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } x_4 \text{ is } A_{i4} \\ \text{then } \Delta\delta_g^i = p_{i1}x_1 + \dots + p_{i4}x_4 + p_{i5}. \quad (5)$$

式中, $A_{i1} \sim A_{i4}$ 为前件中的模糊集合, $p_{i1} \sim p_{i5}$ 为后件中的多项式系数, $i = 1, \dots, M$, M 为规则数,则总的输出为

$$\Delta\delta_g = \sum_{i=1}^M \beta_i \Delta\delta_g^i, \quad (6)$$

$$\beta_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^4 A_{ij}(x_j)}{\sum_{k=1}^M \prod_{j=1}^4 A_{kj}(x_j)}, \text{ 且 } 0 \leq \beta_i \leq 1. \quad (7)$$

3.2 基于相似度判别的模糊聚类(Fuzzy clustering based on similarity assessing)

定义

$$X = \begin{bmatrix} \dots \\ x(k) \\ \dots \\ x(N) \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} \dots \\ \Delta\delta_g(k) \\ \dots \\ \Delta\delta_g(N) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

则用于聚类的数据矩阵 Z 可由输入矩阵 X 和输出矢量 y 构成: $Z^T = [X \ y]$.

模糊聚类的目的是将 Z 划分为 M 个聚类组,并求出每组的聚类中心,使得非相似性指标的价值函数达到最小.聚类组由隶属矩阵 $U = [\mu_{ik}]_{M \times N}$ 表示, μ_{ik} 为第 k 个数据对聚类组 i 的隶属度,满足

$$\mu_{ik} \in [0, 1], \sum_{i=1}^M \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^N \mu_{ik} < N. \quad (9)$$

模糊聚类中,每一个聚类组产生一条模糊规则,因此,聚类组的数目直接影响模型的性能.常规的模糊聚类算法,在应用时均须预先设定聚类组数,聚类组过多,导致规则繁杂,计算量大,不利于实时应用.聚类组太少则会降低模型精度.为了消除这一现象,本文研究了模糊聚类的相似度判别法则.

设 (i, j) 为一聚类组对, j 包含于 i 的程度 I_{ij} 以及 i 包含于 j 的程度 I_{ji} 分别表示为

$$I_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N \min(\mu_{ik}, \mu_{jk})}{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}}, I_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N \min(\mu_{ik}, \mu_{jk})}{\sum_{k=1}^N \mu_{jk}}, \quad (10)$$

则该聚类组对的相似度 S_{ij} 定义为

$$S_{ij} = \max(I_{ij}, I_{ji}), S_{ij} \in [0, 1]. \quad (11)$$

若 $S_{ij} = 1$, 表示 j 完全包含于 i 中,反之亦然.聚类开始时,预先设定较多的聚类组数,在聚类

过程中,不断计算并选择具有最大相似度的聚类组对,当最大相似度超过某一阈值 α , 即将对应的聚类组合并,直至获得最佳聚类组数。

将相似度判别法则与模糊 C 均值聚类法结合,可求得对应的隶属矩阵。

3.3 基于遗传算法的模型参数辨识 (Parameters identification based on genetic algorithm)

模型结构确定后,即可进行参数辨识。常规的参数辨识方法分为 2 步:1) 将求得的隶属矩阵向输入变量逐点投影,并将投影所得到的曲线用分段指数函数、三角函数等参数函数逼近,即可获得对应的前件模糊集合的隶属函数^[7]; 2) 采用最小二乘法确定后件结论参数。

但上述方法存在以下不足:1) 聚类组向输入变量投影,对投影曲线的参数函数逼近,均可能引入一定的结构误差; 2) 由于模糊规则的前、后件联系非常紧密,前、后件参数的单独辨识必然导致辨识误差。

为此,本文采用遗传算法同时确定前、后件参数,以达到改善模型精度的目的。

遗传算法主要包括下面几方面的内容。

3.3.1 编码方案 (Coding method)

二进制编码是最常用的一种编码方案,但当应用于求解多变量且要求具有高精度的参数优化问题时,用于编码的二进制字符串很长,导致遗传算法训练的解空间过大,需要很长时间才能得到最优解,为此,本文采用实数编码方案^[8]。

模糊模型的各参数用染色体表示。本系统中,前件模糊子集的隶属函数选用梯形函数:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu(x, a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0)), \\ a < b \leq c < d. \end{array} \right. \quad (12)$$

第 l 条染色体的结构为

$$s_l = (\text{ant}_1, \dots, \text{ant}_M, \theta_1, \dots, \theta_M). \quad (13)$$

式中: $\text{ant}_i = (a_{i1}, b_{i1}, c_{i1}, d_{i1}, \dots, a_{i4}, b_{i4}, c_{i4}, d_{i4})$ 为第 i 条模糊规则的前件参数; $\theta_i = (p_{i1}, \dots, p_{i5})$ 为第 i 条模糊规则的结论参数,染色体长度为 $L = M(4 \times 4 + 5)$ 。

3.3.2 适应度函数 (Fitness function)

模型性能指标表示为

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k). \quad (14)$$

式中: y_k 为实际输出; $\hat{y}_k$ 为模型输出。

适应度函数定义为

$$f = \frac{1}{J^2}. \quad (15)$$

3.3.3 遗传算子 (Genetic operators)

1) 复制. 采用轮盘选择法选择复制个体,其选择概率为 $p_l = f_l / \sum_{k=1}^n f_k$. 其中 n 为群体规模,并采用精英原则保存一定数量的优良个体。

2) 交换. 采用轮盘选择法,按适应度大小选择被交换的个体,依次两两进行交换,交换概率为 $P_c = 0.6$. 设 (s_v, s_w) 为参与交换的染色体对,采用如下交换算子:

$$\begin{aligned} s_v^{t+1} &= r \cdot (s_v^t) + (1-r)s_w^t, \\ s_w^{t+1} &= r \cdot (s_w^t) + (1-r)s_v^t. \end{aligned} \quad (16)$$

式中: t 为遗传代数; r 为随机数, $r \in [0, 1]$ 。

3) 变异. 在染色体中任选一元素 v_k , 将其用随机数 v'_k 替代, $v'_k \in [v_k^{\min}, v_k^{\max}]$, $v_k^{\min}, v_k^{\max}$ 为该数的最小、最大值. 所得染色体为 $s_v^{t+1} = (v_1, \dots, v'_k, \dots, v_m)$. 变异概率为 $P_m = 0.05$ 。

3.3.4 终止条件 (Termination condition)

适应度计算,复制、交换、变异等步骤重复进行,直至最优个体的适应度变化量小于一足够小的值 η . 此时获得的即为最优的前、后件参数。

4 试验结果 (Experiment and results)

4.1 试验系统 (Experimental system)

为了验证上述测量方法,我们设计了试验系统,并在 N-3500-2 型冷凝器上进行了现场试验,试验系统结构如图 1 所示。

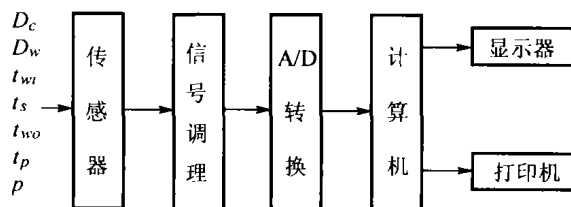


图 1 试验系统结构

Fig. 1 Structure of the experimental system

图中, t_p 为汽水混合物在测量处的温度, p 为汽水混合物在测量温度处的压力. 空气含量由如下方法求得。

在冷凝器抽气设备的出口处测量汽水混合物的压力,并同时测出汽水混合物的温度,则汽水混合物中的空气含量为

$$\epsilon = \frac{p - p_s}{p - 0.378p_s}. \quad (17)$$

式中 p_s 为汽水混合物出口温度相对应的水蒸气饱和压力,可查表求得。

4.2 模糊模型的获取(Acquisition of fuzzy model)

在保持冷凝器清洁的情况下,以 $D_c = 135 \text{ t/h}$, $D_w = 9400 \text{ t/h}$, $t_{wi} = 15^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0.015\%$ 作为设定工况,获取冷凝器在不同工况下的试验数据,构成聚类矩阵.共采集了 360 组样本数据用于模糊建模,另选 100 组数据用于模型检验,用平均误差和最大误差作为性能评判指标.应用上述建模算法,可得到由 5 条规则构成的模糊模型,如下所示:

R_1 : if ΔD_c is A_{11} and ΔD_w is A_{12} and

Δt_{wi} is A_{13} and $\Delta \epsilon$ is A_{14}

then $\Delta \delta_g^1 = 0.0334\Delta D_c + 0.00011\Delta D_w -$
 $0.228\Delta t_{wi} + 19.9\Delta \epsilon + 0.254;$

R_2 : if ΔD_c is A_{21} and ΔD_w is A_{22} and

Δt_{wi} is A_{23} and $\Delta \epsilon$ is A_{24}

then $\Delta \delta_g^2 = 0.041\Delta D_c + 0.00026\Delta D_w -$

$0.195\Delta t_{wi} + 30.2\Delta \epsilon - 0.136;$

R_3 : if ΔD_c is A_{31} and ΔD_w is A_{32} and

Δt_{wi} is A_{33} and $\Delta \epsilon$ is A_{34}

then $\Delta \delta_g^3 = 0.0445\Delta D_c + 0.00047\Delta D_w -$
 $0.132\Delta t_{wi} + 56.6\Delta \epsilon - 0.17;$

R_4 : if ΔD_c is A_{41} and ΔD_w is A_{42} and

Δt_{wi} is A_{43} and $\Delta \epsilon$ is A_{44}

then $\Delta \delta_g^4 = 0.0426\Delta D_c + 0.00061\Delta D_w -$
 $0.064\Delta t_{wi} + 103.2\Delta \epsilon + 0.51;$

R_5 : if ΔD_c is A_{51} and ΔD_w is A_{52} and

Δt_{wi} is A_{53} and $\Delta \epsilon$ is A_{54}

then $\Delta \delta_g^5 = 0.0346\Delta D_c + 0.00073\Delta D_w -$
 $0.023\Delta t_{wi} + 176.5\Delta \epsilon + 0.47.$

(18)

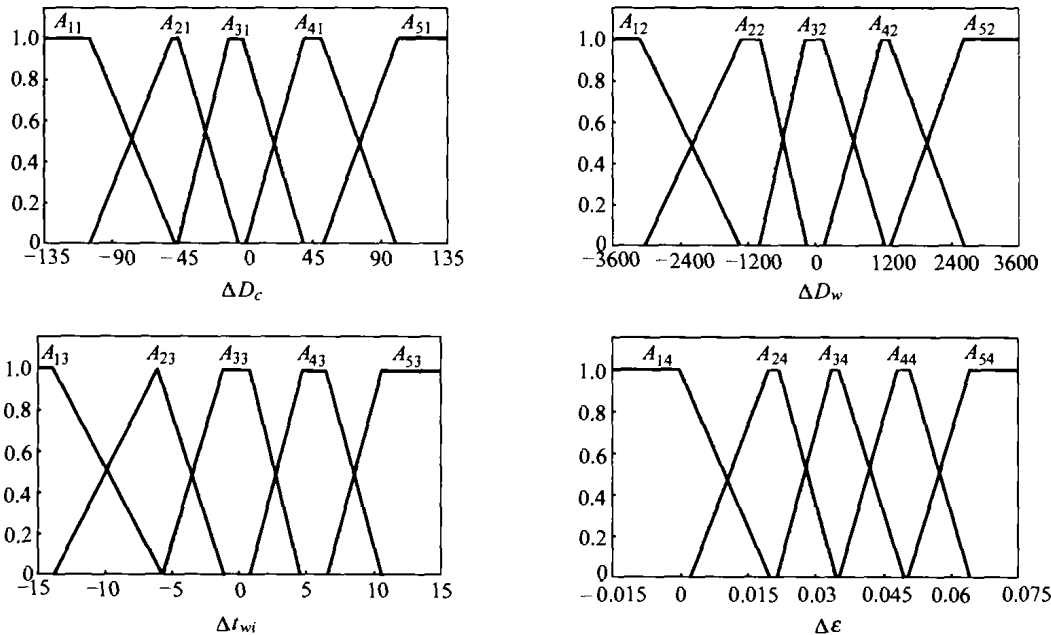


图 2 输入变量模糊集合的隶属函数

Fig. 2 Membership functions of fuzzy sets of input variables

输入变量模糊集合的隶属函数如图 2 所示.

模糊建模的平均误差为 0.0031, 最大误差 0.0135, 模型验证的平均误差为 0.0027, 最大误差 0.0129. 表明基于 T-S 模型的模糊建模技术能够获得规则简化的、具有较高精度的变工况端差模型.

4.3 污垢程度的在线监测(Fouling monitoring)

模糊模型确定后,即可进行在线监测.由于冷凝器污垢系数的变化直接影响汽轮机组的效率,本文采用机组热耗率作为评判指标来验证该方法的准确性.监测试验分为 2 个部分:

1) 将冷凝器彻底清洗,测取清洗后的污垢系数

变化.

2) 重新投运清洗装置,测取清洗时的污垢系数变化.

试验结果如表 1、表 2 所示. $D_w = 9400 \text{ t/h}$, $\epsilon = 0.015\%$ 在试验过程中保持不变.清洁状态时,在设定工况下测得的端差为 $\delta_{td} = 6.1^\circ\text{C}$.

从表 1、表 2 可以看出,由本文方法求得的污垢系数变化趋势符合冷凝器换热管污垢的积聚与清洗特性,而且机组热耗率随污垢系数的变化而改变,其趋势和幅度较好地反映了冷凝器污垢对汽轮机效率的影响,表明用该方法求得的污垢系数是可信的.

表1 停运清洗装置后,冷凝器的污垢系数变化情况

Table 1 Fouling state in condenser after cleaning device is not in operation

距清洗后 时间/h	蒸汽流量 $D_c/(t \cdot h^{-1})$	入口水温 $t_{wi}/^{\circ}C$	出口水温 $t_{wo}/^{\circ}C$	蒸汽温度 $t_s/^{\circ}C$	端差 $\delta_{ij}/^{\circ}C$	污后端差 $\Delta\delta_c/^{\circ}C$	污垢系数 C	热耗率增量 $\Delta HR/(kJ \cdot kW^{-1}h^{-1})$
0	129.8	13.3	25.1	31.5	6.4	0.01	0.002	0.00
2	129.8	13.0	24.8	31.6	6.8	0.48	0.079	13.67
4	129.8	12.7	24.3	31.8	7.5	0.99	0.162	28.04
6	129.1	12.3	23.8	31.6	7.8	1.31	0.215	36.38
8	129.8	12.0	23.5	31.7	8.2	1.58	0.260	43.31
10	128.8	11.6	23.1	31.5	8.4	1.70	0.278	46.91
12	129.8	11.1	22.5	31.1	8.6	1.75	0.287	48.52
14	130.0	10.7	22.1	30.9	8.8	1.87	0.307	52.15
16	129.8	10.7	22.1	31.0	8.9	1.90	0.311	53.22
20	134.5	12.2	23.5	32.2	8.7	1.96	0.321	54.85
24	134.5	13.9	25.2	33.5	8.3	2.01	0.329	56.63

表2 重新投运清洗装置后冷凝器的污垢系数变化情况

Table 2 Fouling state in condenser when cleaning device is in operation

清洗 时间/h	蒸汽流量 $D_c/(t \cdot h^{-1})$	入口水温 $t_{wi}/^{\circ}C$	出口水温 $t_{wo}/^{\circ}C$	蒸汽温度 $t_s/^{\circ}C$	端差 $\delta_{ij}/^{\circ}C$	污后端差 $\Delta\delta_c/^{\circ}C$	污垢系数 C	热耗率增量 $\Delta HR/(kJ \cdot kW^{-1}h^{-1})$
0.0	134.5	13.9	25.2	33.5	8.3	2.01	0.329	56.63
0.5	135.0	14.0	25.5	33.0	7.5	1.22	0.20	34.12
1.0	135.0	14.2	25.9	32.9	7.0	0.71	0.116	18.46
1.5	135.0	14.0	25.8	32.4	6.6	0.33	0.054	9.55
2.0	134.8	14.0	25.8	32.3	6.5	0.15	0.025	4.95
2.5	135.0	14.0	25.8	32.2	6.4	0.05	0.008	2.79
3.0	134.5	13.5	25.3	31.7	6.4	0.04	0.007	2.52
3.5	135.0	13.1	25.0	31.4	6.4	0.02	0.003	2.28
4.0	135.0	12.8	24.8	31.2	6.4	0.02	0.003	2.24

4.4 与热阻法的比较(Comparison with thermal resistance method)

由热阻法测得的污垢系数较准确,但其前提条件是:埋设有热偶的换热管不堵塞.冷凝器运行时,由于污垢成份、换热管破损等原因,堵管现象时有发生,

生,若埋设有热偶的换热管发生堵塞,则会影响热阻法的测量效果.为了进一步验证本文方法的有效性,我们在冷凝器的不同位置埋设了12只铠装热偶,并进行堵管试验,比较这两种方法的优劣.试验结果如下表3、表4所示.

表3 埋设有热偶的换热管无堵塞时冷凝器的污垢系数变化情况

Table 3 Fouling state in condenser with thermal couplers, under the condition of no blocked tubes

距清洗后 时间/h	蒸汽流量 $D_c/(t \cdot h^{-1})$	入口水温 $t_{wi}/^{\circ}C$	出口水温 $t_{wo}/^{\circ}C$	蒸汽温度 $t_s/^{\circ}C$	端差 $\delta_{ij}/^{\circ}C$	污垢系数	
						本文方法	热阻法
0	108.2	15.5	25.5	30.7	5.2	0.002	0.011
2	109.6	15.5	25.4	31.1	5.7	0.071	0.068
4	108.2	14.7	24.5	30.9	6.4	0.166	0.151
6	108.2	14.3	21.1	30.9	6.8	0.233	0.219
8	108.5	13.6	23.3	30.4	7.1	0.261	0.255
10	108.3	13.7	23.4	30.7	7.3	0.278	0.282
12	108.2	13.7	23.3	30.8	7.5	0.289	0.282

表4 2根埋设有热偶的换热管发生堵塞后冷凝器的污垢系数变化情况

Table 4 Fouling state in condenser with thermal couplers, under the condition of two blocked tubes

距清洗后 时间/h	蒸汽流量 $D_c/(t \cdot h^{-1})$	入口水温 $t_{wi}/^{\circ}C$	出口水温 $t_{wo}/^{\circ}C$	蒸汽温度 $t_s/^{\circ}C$	端差 $\delta_{if}/^{\circ}C$	污垢系数	
						本文方法	热阻法
0.0	135.0	11.3	23.0	29.6	6.6	0.002	0.216
0.5	135.0	11.3	22.9	29.6	6.7	0.031	0.234
1.0	135.0	11.0	22.6	29.5	6.9	0.048	0.242
1.5	135.0	10.8	22.4	29.4	7.0	0.067	0.248
2.0	135.0	10.9	22.4	29.5	7.1	0.082	0.257

从表3,表4可看出,无堵管时,热阻法与本文方法求得的污垢系数基本一致。堵管出现后,刚清洗完的冷凝器,由热阻法测得污垢系数即为0.216,显然与实际不符。究其原因,是换热管堵塞后,该管热偶所测得的管壁温度不能体现冷凝器的真实换热情况,从而导致大的误差。而本文方法通过测量冷凝器的整体工况参数

来计算污垢系数,其结果不受堵管影响。

4.5 与传热系数法的比较 (Comparison with heat transfer coefficient method)

传热系数法的测量精度容易受到空气漏入量的影响,当空气漏入量较大时,误差显著增大。表5为本文方法和传热系数法在某工况下的测量结果。

表5 空气漏入量较大时,冷凝器的污垢系数变化情况

Table 5 Fouling state in condenser under the condition of excessive amount of air

距清洗后 时间/h	蒸汽流量 $D_c/(t \cdot h^{-1})$	入口水温 $t_{wi}/^{\circ}C$	出口水温 $t_{wo}/^{\circ}C$	空气含量 $\varepsilon/\%$	蒸汽温度 $t_s/^{\circ}C$	端差 $\delta_{if}/^{\circ}C$	污垢系数	
							本文方法	热阻法
0	128.2	15.7	27.2	0.045	34.3	7.1	0.003	0.166
1	128.2	15.5	27.0	0.045	34.2	7.2	0.029	0.185
2	128.2	15.2	26.6	0.045	34.1	7.5	0.071	0.21
3	129.1	14.7	26.0	0.041	33.8	7.8	0.119	0.235
4	129.1	14.5	25.8	0.041	34.0	8.2	0.158	0.254

从表5可看出,由于冷凝器的不密封,使得蒸汽中的空气含量增大,从而导致端差增大。本文方法充分考虑空气漏入量对端差的影响,取得了好的测量效果。而传热系数法未能有效地处理这一变化,对于刚清洗完的冷凝器,测得的污垢系数为0.166,误差明显增大。

5 结论 (Conclusions)

本文提出了一种在线测量污垢程度的新方法。根据此方法,设计了试验系统,并进行了现场试验。从试验结果可得出如下结论:

- 1) 基于模糊建模的软测量方法能较准确地在线监测冷凝器污垢;
- 2) 在冷凝器出现堵管或空气漏入量较大时,取得比热阻法、传热系数法更可靠的测量结果;
- 3) 该方法所涉及的许多测量信号现场已具备,可直接或以通信方式引入,因此,该方法容易实现,具有良好的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 杨善让. 换热设备的污垢与对策[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 82-92.
(YANG Shanrang. *Fouling and Prevention in Heat Transfer Equipment* [M]. Beijing: Science Press, 1997: 82-92.)

- [2] 李勇, 曹祖庆. 凝汽器清洁率的概念及测试方法[J]. 汽轮机技术, 1995, 37(2): 73-76.
(LI Yong, CAO Zuqing. Concept and measurement of cleanliness in steam condenser [J]. *Turbine Technology*, 1995, 37(2): 73-76.)
- [3] 樊绍胜, 王耀南. 冷凝器污垢在线测量方法及装置: 中国专利, 03124598.6 [P]. 2004-08.
(FAN Shaosheng, WANG Yaonan. *Measurement method and apparatus of fouling in condenser*: China, 03124598.6 [P]. 2004-08.)
- [4] WARCH P. New techniques for monitoring condenser fouling [J]. *Power*, 1991, 13(2): 34-39.
- [5] 王旭东, 邵惠鹤. 基于神经网络的通用软测量技术[J]. 自动化学报, 1998, 24(5): 702-706.
(WANG Xudong, XIAO Huihe. The general soft sensor based on neural networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(5): 702-706.)
- [6] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. *IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116-132.
- [7] ROUBOS J A, MOLLOV S, BABUSKA R, et al. Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models [J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 1999, 22(2): 3-30.
- [8] MICHALEWICZ Z. *Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs* [M]. New York: Springer-Verlag, 1994: 242-263.

作者简介:

樊绍胜 (1967—), 男, 长沙理工大学副教授, 博士研究生, 研究方向为智能计算、热工建模与控制, E-mail: fss008@163.com;

王耀南 (1957—), 男, 湖南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、图象处理, E-mail: yaonan@mail.hunnu.edu.cn.