

# 基于数据融合的球磨机最佳负荷工作点判断

田 亮, 曾德良, 刘鑫屏, 刘吉臻

(华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 在分析能够反映磨负荷的参量基础上, 提出利用数据融合技术判断磨运行状态的方法。根据磨的设计数据和历史运行数据给出各个参量对磨运行状态判断的可信度分配, 再利用 D-S 证据理论对其进行融合得到各个参量综合判断, 针对 D-S 证据理论可信度分配固定不变的缺点, 提出一种改进的原则。实际运行表明, 新方法具有可靠性高, 便于实现的优点。

**关 键 词:** 球磨机; 数据融合; D-S 证据理论; 负荷

中图分类号: TK223 文献标识码: B

## 1 引 言

球磨机的特点是其负荷同功耗不成比例关系, 特性如图 1 所示<sup>[1]</sup>。当实际负荷低于最佳负荷工作点时, 制粉单耗增加, 球磨机的运行不经济; 高于最佳负荷工作点时又容易发生堵磨的事故, 造成“跑粉”污染环境。由于缺乏有效测量球磨机负荷的手段, 为了避免堵磨事故发生, 运行人员经常使磨在低负荷下工作, 制粉单耗居高不下。

长期以来在控制中经常采用球磨机出入口的差压代表磨负荷, 实际运行情况并不理想。目前开发出利用磨振动信号通过频谱

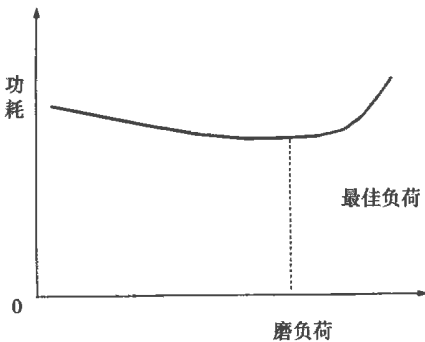


图 1 磨负荷与功耗关系

分析测量磨负荷的仪表, 但由于现场环境恶劣, 噪声干扰很严重, 其准确度不高。采用神经网络测量磨负荷的方法, 存在着训练样本的选取、神经网络泛化能力有限等问题, 而且用于神经网络训练的导师信号不能准确获得<sup>[2]</sup>。另外, 目前电厂过程控制广泛

应用 DCS (分散控制系统), 其主要功能是针对实时控制, 计算能力和计算精度都有限, 不适合进行复杂计算工作, 这些原因限制了此类方法在现场中的应用。如何准确判断磨是否工作在最佳负荷工作点附近, 仍是现场面临的实际困难。

数据融合技术自 20 世纪 70 年代末提出以来, 得到了迅速发展, 其定义概括为: 利用计算机技术对按时序获得的若干传感器的测量数据在一定准则下加以自动分析、综合以完成所需的决策和估计任务而进行数据处理的过程<sup>[3]</sup>。在目标模式识别方面, Dempster-Shafer 证据应用比较广泛, 其最大优点是可以综合利用各种对目标模式提供支持的信息, 提高判断的可靠性。

## 2 影响磨负荷因素分析

磨的负荷受很多因素影响, 文献[4]给出了磨负荷  $B_m$  的理论计算公式, 主要与以下变量有关: 磨出入口差压  $\Delta P_m$ ; 磨负压  $P_m$ ; 磨电流  $I_m$ ; 给煤量  $C_m$ ; 磨出口温度  $T_m$ ; 热风流量  $G_{lm}$ ; 循环风量  $G_{cm}$ , 在安装有振动式负荷传感器的情况下, 传感器输出的负荷信号为  $B_{sm}$ 。各个变量与关系如图 2 所示。当发生堵磨之前, 这些量都有征兆性变化, 这些变化可以用做数据融合的依据。

## 3 D-S 证据理论

利用以上各个因素可以判断磨负荷的状态, 但可信度都不是很高。D-S 证据的特点是可以综合利用各种有用信息, 具有更好的判断能力和更高的判断可信度。数据融合有分布式融合和集中式融合之分, D-S 证据理论融合过程一般属于分布式融合, 如图 3 所示。传感器输出首先经过预处理得到传感器所支持的目标模式及其可信度, 在融合中心采用

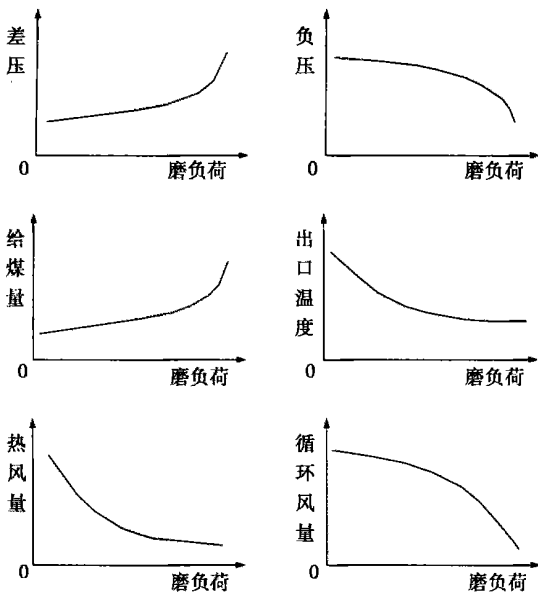


图 2 磨负荷与  $\Delta P_m$ 、 $P_m$ 、 $C_m$ 、 $T_m$ 、 $G_{lm}$ 、 $G_{cm}$  关系

D-S 证据理论对所有传感器输出信息进行综合, 给出最终判断结果及其可信度。

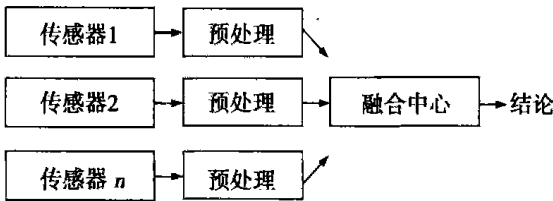


图 3 D-S 证据理论数据融合流程

### 3.1 基本理论

证据理论的论域称为识别框架, 记为  $\Theta$ , 包含有限个基本命题, 记为  $\{u_0, u_1, \dots, u_n\}$ , 对应概率论中的基本事件, 称为基元, 在目标识别中,  $\Theta$  中的事件是互斥的。

如果存在集函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ , 满足

$$m(\Phi) = 0;$$

$$\sum_n m(u_i) = 1 \quad u_i \in \Theta \quad (1)$$

称  $m$  为  $\Theta$  上的信度函数分配,  $m(u_i)$  为  $u_i$  的可信度, 如果  $m(u_i) \neq 0$ , 则称  $u_i$  为信度函数分配上的焦元。

根据 D-S 联合规则, 设  $m_1, m_2$  分别对应同一识别框架  $\Theta$  上的信度函数分配, 焦元分别为:  $u_{11}, u_{21}, \dots, u_{1n}, u_{12}, u_{22}, \dots, u_{j2}$ , 设:

$\sum_{u_{i1} \cap u_{j2} = \Phi} \{m_1(u_{i1})m_2(u_{j2})\} < 1$ , 则由下式定义的函数:

$$m(u_k) = \sum_{u_{i1} \cap u_{j2} = u_k} \frac{\{m_1(u_{i1})m_2(u_{j2})\}}{1 - C} \quad (2)$$

其中:  $i, k = 1, 2, \dots, n$

$$C = \sum_{u_{i1} \cap u_{j2} = \Phi} \{m_1(u_{i1})m_2(u_{j2})\} \text{ (当 } u_k = \Phi \text{ 时,}$$

$m(u_k) = 0$ ), 为联合后的信度函数分配。C 是表示完全冲突假设  $u_{i1}$  和  $u_{j2}$  所有信度函数乘积之和。对于 D-S 证据理论, 其结果不受证据组合次序先后的影响<sup>[9]</sup>。

### 3.2 可信度分配的给出

信度函数分配是表示人对目标模式假设可信度的一种判断, 这种判断受各种因素影响, 具有一定主观性。一般采用模糊数学中隶属度函数的方法给出。在磨最佳负荷工作点判断中, 目标模式(基元)有 4 个, 分别为“不经济状态”、“最佳工作状态”、“堵磨状态”和“不确定状态”。各个传感器对目标模式判断的可信度函数示意图 4, 包括 3 条曲线, 分别为“不经济工作区 -  $u_1$ ”曲线, “最佳工作区 -  $u_2$ ”曲线和“堵磨区 -  $u_3$ ”曲线。按照可信度分配函数的规则, 对于任何一点, 应该有  $\sum_n m(u_i) = 1$ , 则“不确定区 -  $u_4$ ”曲线可以由  $1 - \sum_3 m(u_i)$  确定。

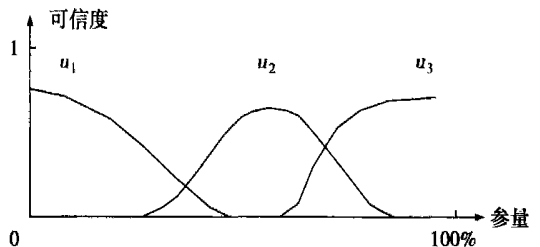


图 4 参量可信度分配示意图

### 3.3 目标模式判别规则

基本规则有:

- (1) 判定目标类型应具有最大的信度函数值;
  - (2) 判定目标类型的信度函数值与其它类型的信度函数值之差应大于某一阈值;
  - (3) 判定目标类型的信度函数值与不确定信度函数值之差应大于某一阈值;
  - (4) 不确定信度函数值应小于某一值<sup>[9]</sup>。
- 规则中的阈值需要根据实际情况选取。

### 3.4 可信度修正

对于 D-S 证据理论, 当融合方法一定时, 实际的结果只取决于传感器对目标模式的可信度函数分配。在传统的 D-S 理论中, 可信度是固定不变的。同概率论中先验概率类似, 当实验结果同先验概率表

达不一致时,就有理由怀疑先验概率的正确性。同样,如果目标实际模式同数据融合得到的结果不一致,就有理由怀疑传感器对目标模式判断的可信度函数分配的正确性。根据一般经验,这一次判断结果的后验结论,往往可以做为下一次判断的先验估计。可信度修正的原则是:

(1) 如果实际目标类型与判断目标类型一致,并且判断目标以大可信度出现,则传感器可信度分配保持不变;

(2) 如果实际目标类型与判断目标类型一致,并且判断目标以小可信度出现,则增加支持目标模式的传感器的可信度分配;

(3) 如果实际目标类型与判断目标类型不一致,并且判断目标以小可信度出现,则减小反对目标模式的传感器的可信度分配;

(4) 如果实际目标类型与判断目标类型不一致,并且判断目标又大可信度出现,则减小反对目标模式的传感器的可信度分配和增加支持目标模式的传感器的可信度分配。

在实际应用中,可信度分配的调整步距应当合适选择,步距过小,调整不明显;步距过大,会矫枉过正,造成对其它目标模式的误判。

#### 4 设计与应用

采用数据融合判断磨最佳负荷工作点,可以利用以下参量:磨出入口差压  $\Delta P_m$ ; 磨负压  $P_m$ ; 磨电流  $I_m$ ; 给煤量  $C_m$ ; 磨出口温度  $T_m$ ; 热风流量  $G_{hm}$ ; 循环风量  $G_{cm}$ , 振动式负荷输出信号为  $B_{sm}$ 。经过预处理后每一个参量包含 2 个输出,一个是参量本身对目标模式的判断及其可信度分配,另一个是参量变化的时间序列对目标模式的判断及其可信度分配。这样共有 16 条证据,可信度的给出如前所述。数据融合待判断的目标模式为:“不经济状态”、“最佳工作状态”、“堵磨状态”、“不确定状态”,融合方法采用 D-S 联合方法。

为了减小计算工作量和资源占用率,在 DCS 上实现以上逻辑简化。①可信度函数用折线拟合。②D-S 联合过程计算量很大,采用查表插值计算的方法。D-S 联合过程与联合顺序无关,利用这一特性,将 16 条证据每 2 条证据分为一组进行查表融合,得到 8 条综合证据,再依次类推分组计算得到最终结果。计算用表预先计算好,做为参数输入到 DCS 中。

利用 INFI-90 实现以上逻辑,占用功能码约 150 个,执行时间约 10 ms。

为了检验数据融合的效果,针对某电厂一台球磨机,采用其设计数据并结合运行人员的经验确定了数据融合参量的可信度分配,然后利用磨运行的历史数据进行验证。表 1 为磨工作于最佳负荷工作区的可信度分配及数据融合结果,表 2 为增加给煤机煤量后发生堵磨前 30 s 时的可信度分配及数据融合结果。表中:  $u_1$ —不经济;  $u_2$ —最佳;  $u_3$ —堵磨;  $u_4$ —不确定。可以看出,数据融合可以降低判断的不确定度,有效地指示磨的工作状态并能及时对堵磨现象做出预报。另外 D-S 证据理论可以剔除掉个别不良信号对判断的影响,算法本身具有很好的鲁棒性。

此方法只能判断磨是否工作在最佳负荷区,还不能产生负荷模拟量信号用于控制,但可以为运行人员提供操作指导。

表 1 最佳工作点时数据

信号	$u_1$	$u_2$	$u_3$	结论
$\Delta P_m$	0.23	0.45	0.00	$u_2$
$d\Delta P_m/dt$	0.11	0.05	0.00	$u_4$
$P_m$	0.00	0.50	0.12	$u_2$
$dP_m/dt$	0.21	0.10	0.00	$u_4$
$I_m$	0.00	0.35	0.26	$u_2$
$dI_m/dt$	0.00	0.12	0.01	$u_4$
$C_m$	0.24	0.64	0.00	$u_2$
$dC_m/dt$	0.11	0.00	0.00	$u_4$
$T_m$	0.46	0.29	0.00	$u_1$
$dT_m/dt$	0.00	0.08	0.14	$u_4$
$G_{hm}$	0.34	0.32	0.12	$u_4$
$dG_{hm}/dt$	0.00	0.04	0.01	$u_4$
$G_{cm}$	0.24	0.12	0.00	$u_4$
$dG_{cm}/dt$	0.01	0.00	0.00	$u_4$
$B_{sm}$	0.15	0.55	0.00	$u_2$
$dB_{sm}/dt$	0.02	0.11	0.00	$u_4$
融合结果	0.05	0.95	0.00	$u_2$

表 2 堵磨 30 s 前数据

信号	$u_1$	$u_2$	$u_3$	结论
$\Delta P_m$	0.00	0.45	0.44	$u_4$
$d\Delta P_m/dt$	0.00	0.15	0.75	$u_3$
$P_m$	0.30	0.44	0.00	$u_2$
$dP_m/dt$	0.00	0.10	0.56	$u_3$
$I_m$	0.00	0.12	0.34	$u_4$
$dI_m/dt$	0.00	0.21	0.01	$u_4$
$C_m$	0.04	0.75	0.00	$u_2$
$dC_m/dt$	0.00	0.06	0.59	$u_3$
$T_m$	0.26	0.39	0.00	$u_4$
$dT_m/dt$	0.00	0.09	0.41	$u_4$
$G_{hm}$	0.00	0.12	0.12	$u_4$
$dG_{hm}/dt$	0.00	0.04	0.09	$u_4$
$G_{cm}$	0.05	0.35	0.00	$u_4$
$dG_{cm}/dt$	0.00	0.13	0.21	$u_4$
$B_{sm}$	0.00	0.44	0.46	$u_4$
$dB_{sm}/dt$	0.00	0.22	0.67	$u_3$
融合结果	0.00	0.38	0.62	$u_3$

## 5 结 语

在对能够反映球磨机负荷变量分析的基础上, 应用 D-S 证据理论对各种与磨负荷相关的变量提供的证据进行融合, 得到了可信度较高的磨运行状态的判断, 对指导磨的运行, 降低事故率, 提高经济性具有很大价值。

### 参考文献:

[1] 范丛振. 锅炉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

- [2] 王东风, 宋之平. 基于神经网络的制粉系统球磨机负荷软测量[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 97-99
- [3] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998
- [4] 王东风. 多变量智能控制在电厂制粉系统中应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2000
- [5] 黄 瑛, 陶云刚, 周洁敏, 等. D-S 证据理论在多传感器数据融合中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(2): 172-177
- [6] 朱大奇, 于盛林. 基于 D-S 证据理论的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用[J]. 电子学报, 2002, 30(2): 153-155.

(渠 源 编辑)

## 循环流化床锅炉布风板的改进

在 260 t/h 以下的 CFB 锅炉中, 布风板中膜式水冷壁的布置通常选取约  $5^\circ$  的倾角, 管子规格的选取通常与炉膛中蒸发受热面用管相同, 管节距比之增加一倍。因为该位置膜式水冷壁上下表面均覆盖着隔热层, 上表面最薄处约为 120~150 mm, 最厚处可达 250~360 mm, 膜式水冷壁工作环境趋于绝热状态, 在锅炉的启动与正常运行中吸热量均较小, 很大程度上避免了汽水分层。同时, 由于布风板跨度较小, 膜式水冷壁与较厚隔热层之间的膨胀量很小, 布风板性能十分稳定, 但隔热层载荷较大是不足取的, 如图 1 所示。随着 CFB 锅炉的大型化, 布风板跨度越来越大。就 450 t/h CFB 锅炉而言, 若布风板中膜式水冷壁仍保持约  $5^\circ$  的倾角, 隔热层的厚度由 150 mm 逐渐增加到约 460 mm, 与保持 150 mm 厚度的水平面而言, 隔热层的消耗量过大, 对布风板的刚性提出更高的要求, 在一定程度上增加了设计的难度。

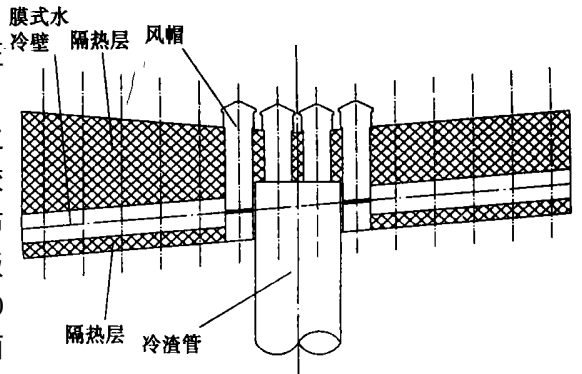


图 1 倾斜的膜式水冷壁布风装置结构

为了消除其不利因素, 又能很好地利用膜式水冷壁布风板成功的设计经验, 选择膜式水冷壁水平布置的方案, 此结构完全消除了隔热层用料过多带来的困扰, 如图 2 所示。但是, 水平管内是否会产生汽水分层却是不容忽视的问题。由于水冷壁蒸发段较高, 水循环中产生的有效压头较大, 且此段离水冷下集箱较近, 在向火侧均覆盖隔热层, 该段吸热量很小。在布风板中膜式水冷壁的设计上应考虑以下几个方面: ①选用管材的规格应超出上升管, 管内径较大, 建议在 60~70 mm 之间选取并具有足够的刚性; ②布风板的膜式水冷壁流量分配适当的增大, 管内流速适当提高; ③布风板的膜式水冷壁管间距选取适当, 建议在 120~160 mm 之间选取; ④布风板的膜式水冷壁水平段与距下集箱距离的比值在 0.8~1.2 之间选取, 确保锅炉启动过程中的安全性。

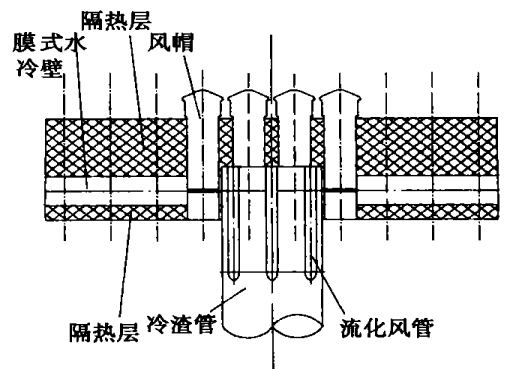


图 2 水平的膜式水冷壁布风装置结构

(刘长浩 供稿)

火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法 = **Multi-model Robust Forecast Control of Thermal Power Plant Loads** [刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Jiong, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), XUE Jing-yan (China Power Complete Equipment Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100011) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 186 ~ 190

A multi-model robust forecast control method is presented for the load control of thermal power plants. Under this method at first the fuzzy division of a load zone is conducted. Then, in each fuzzy sub-zone a corresponding structural-parameter perturbation model is set up, and a controller designed by using a robust forecast control method. The total control quantity is a weighted average of the output of these individual sub-controllers. Simulation results indicate that the above method makes it possible to let the load system obtain a good overall control performance. **Key words:** multi-model control, guaranteed performance control, forecast control, linear matrix inequalities

叶片数量和一次风率对双调风旋流燃烧器流场的影响 = **The Impact of the Blade Quantity and Primary-air Flow Rate on the Flow Field of a Dual-register Vortex Burner** [刊, 汉] / CHEN Zhi-chao, LI Zheng-Qi, SUN Rui (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), GAI Jian-yong (Xibaipao Power Generation Co. Ltd., Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 191 ~ 194

On a cold-state test rig and two 1025t/h boilers a cold-state test was conducted of the aerodynamic characteristics of a dual-register vortex burner with the use of a isothermal modeling method. The results of the test indicate that the ratio between the maximum diameter and length of the recirculation zone of the above-mentioned burner (which has 12 inner secondary air blades) on the one side and the outermost layer diameter on the other side is respectively higher than 1.38 and 1.48. The expansion angle is found to be greater than  $80^\circ$ . This results in a suction of sufficient high-temperature gas essential for the ignition of pulverized coal. When the burner is fitted with 8 inner secondary air blades, there is no recirculation zone and the expansion angle is between  $61.9^\circ$  and  $69.5^\circ$ . This condition is unfavorable to the achievement of a stable combustion. The adoption of a lower primary-air flow rate will result in a relatively large recirculation zone, which can be conducive to achieving a stable combustion. **Key words:** dual-register vortex burner, blade, primary-air flow rate, aerodynamic characteristics

水煤浆燃烧飞灰含碳量的影响因素及控制 = **Factors Having an Influence on Carbon Content in Fly Ash During the Combustion of Coal-water Slurry and Their Control** [刊, 汉] / YU Hai-miao, ZHAO Xiang, CAO Xin-yu (Education Ministry Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Environmental Engineering, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 195 ~ 197

Coal-water slurry is a kind of clean fuel with promising market demand. During its combustion the control of carbon content in fly ash remains a problem calling for due attention. Through a combustion test of coal-water slurry in Boiler No. 2 of Maoming Thermal Power Plant the authors have analyzed the various factors, which are believed to have an impact on the carbon content in fly ash. Such factors include concentration of coal-water slurry, atomization conditions, fuel characteristics, combustion modes, boiler load, excess air factor, etc. **Key words:** coal-water slurry, fly ash, carbon content, combustion, atomization

基于数据融合的球磨机最佳负荷工作点判断 = **Data Merging-based Determination of the Optimal-load Operating Point of a Ball Mill** [刊, 汉] / TIAN Liang, ZENG De-liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department,

North China University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 198 ~ 201

In a power plant it is rather difficult to judge whether a ball mill is operating near its optimal load point. Based on the analysis of parameters which can reflect mill load conditions, the authors have come up with a method for judging the operating condition of ball mills by using data merging techniques. In accordance with ball mill design data and historical operating ones presented is a credibility distribution for judging the mill running condition as contributed by each parameter. Then, by using D-S evidence theory the credibility distribution undergoes a data merging process, resulting in a comprehensive evaluation of each parameter. To cope with the deficiency of immutability of the credibility distribution of the D-S evidence theory an improved principle is put forward. Practical operation indicates that the new approach based on the data-merging technology features a high reliability and ease of implementation. **Key words:** ball mill, data merging, D-S evidence theory, load

300 MW 机组引风机振动在线监测系统研究 = **A Study of an On-line Monitoring System of Induced-draft Fan Vibrations for a 300MW Power Plant** [刊, 汉] / XIAO Han-cai, WANG Yun-min (College of Energy and Power Engineering under the Changsha Electric Power Institute, Changsha, China, Post Code: 410077), HU Rong-jin (Xinya Science and Technology Co. Ltd., Chengdu, China, Post Code: 610051), ZHAO Shi-chang (Hunan Shimen Power Plant, Shimen, China, Post Code: 415300), ZHANG Guo-zhong (Hunan Electric Power Testing Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 202 ~ 205

To eliminate the frequent failures of induced-draft fans installed at Shimen Power Plant due to serious vibrations an on-line vibration monitoring system has been developed for the above fans. A brief account is given of the composition, working principles, characteristic features and technical indexes of the monitoring system. The excellent results obtained from the use of the system are given. In addition, it is also noted there is a real necessity of installing an on-line vibration monitoring system for the main machines and auxiliaries of large-sized power generation plants. **Key words:** axial flow fan, vibration, sensor, monitoring system

凝汽机组低品位化供热改造及其应用前景 = **Reconstruction of a Condensing Turbine Unit for Low-grade Heat Supply and Potential Application Prospects** [刊, 汉] / ZHOU Shao-Xiang, HU San-gao (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), Qi Ge-jun (Baotou No.2 Thermal Power Plant, Baotou, China, Post Code: 014030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 206 ~ 208

A brief analysis is conducted of the issue of minimum theoretical specific fuel consumption. Discussed in detail are the issue of the heating and heat supply temperature matching as required by a conventional natural convection radiator and the countermeasures being taken to resolve the issue. Moreover, on the basis of a unified performance evaluation of electrical supply load the performance indexes of the condensing turbine to be reconstructed for low-grade heat supply are analyzed and calculated. Also expounded is the energy-saving effectiveness derived from the temperature matching of a high-efficiency last-stage radiator with the last-stage radiator of the heat end-user. Finally, an exposition from the viewpoint of a total energy system is given and the specific features and implementation of this reconstruction work are analyzed. **Key words:** cogeneration of electric power and process steam, reconstruction for low-grade heat supply, low-grade heat supply