

# 基于 D-S 证据理论的煤粉细度融合诊断

刘吉臻, 崔泽朋, 田 亮, 赵 征

(华北电力大学自动化系, 河北保定 071003)

**摘 要:** 针对电厂煤粉细度在线测量难的问题, 提出利用数据融合技术识别煤粉过细、煤粉正常、煤粉过粗。在分析与煤粉细度相关的多个运行状态参量基础上, 根据历史运行数据, 确定煤粉细度的典型样本, 然后对各状态参量应用 D-S 融合规则得到结果。而对于 D-S 证据理论应用中基本概率赋值难以确定问题, 应用正态分布曲线构造相似度函数, 继而得到基本概率赋值, 减少了方法的主观性。根据运行数据验证, 该方法能够有效诊断煤粉细度, 且具有较好的鲁棒性, 具有工程实用价值。

**关 键 词:** 数据融合; 证据理论; 基本概率赋值; 煤粉细度

中图分类号: TK223 文献标识码: A

## 1 引 言

当前电厂的煤粉细度测量基本上是采用取样法, 这种测量方法耗时长, 实际上不能实现通过随时控制磨煤机及煤粉分离装置的运行来获得最佳煤粉细度。虽然已开发出基于光脉动、静电等测量技术的仪表, 但由于现场环境恶劣, 噪声干扰等很严重, 其准确度不高。准确判断煤粉细度是否在正常范围, 仍是现场面临的困难。

在制粉系统中, 许多运行状态参量能够反映煤粉细度。通过数据融合技术, 根据这些状态参量可以很好判断煤粉细度的当前状况。D-S (Dempster-Shafer) 证据理论在多个领域已经得到了广泛应用, 其最大的优势在于可以综合利用各个传感器提供的信息, 提高判别的准确性和可信度。由于证据理论的融合规则是一定的, 所以融合结果主要取决于基本概率赋值, 但其获取是证据理论实际应用中最难的一步。当前基本概率赋值的获取主要分为基于目标类型数和环境加权系数、基于神经网络、基于模糊隶属度函数等方法<sup>[1~3]</sup>。这些方法由于存在很大的主观性影响其实际应用。文献[4]提出一种基

于典型样本的基本概率赋值的获取方法, 减少了主观性, 但其只适用目标模式数较少时。本文将在此基础上应用相似度得到基本概率赋值, 并应用到制粉系统煤粉细度诊断中。

## 2 煤粉细度相关因素

影响煤粉细度主要因素有煤种、制粉系统的通风量、磨煤机和分离器的运行工况及结构特征等。就中速磨正压直吹式系统煤粉细度的调整而言, 风煤比、磨煤机的出力、通风量、分离器挡板开度(或转速)和碾磨压力等对煤粉细度都有很大的影响。这些参数的变化能够直接导致煤粉细度发生变化。文献[5~6]做了大量煤粉细度优化试验研究, 得到了各变量在其它工况不变的情况下与煤粉细度的关系如图 1(a)、(b)、(c)、(d)所示。

在锅炉燃烧正常运行时, 若煤粉细度发生变化, 对锅炉的运行工况带来很大影响, 许多燃烧状态参量能够反映煤粉细度发生变化。例如煤粉变粗会使着火温度, 火焰强度变差, 导致不完全燃烧热损失增加。文献[7~9]通过试验, 研究了煤粉细度对燃烧状况的影响, 如图 1(e)、(f)、(g)、(h)所示。

## 3 基本概率赋值的获取

### 3.1 获取方法

作为证据理论实际应用中最难的一步, 基本概率赋值的获取一般依据专家经验, 带有一定主观性。文献[4]提出的基于典型样本的基本概率赋值的获取方法, 利用证据与各个目标模式典型样本之间的 Hamming 距离构造基本概率赋值, 满足基本概率赋值的定义并且减少了其主观性。但当目标模式的稍微增多时, 融合后得到的各目标模式的结果差异快

速减小,当差异足以被融合中的噪声淹没时,容易产生信息丢失现象。本文在此基础上讨论一种基本概率赋值获取方法,有效地延缓差异减小的速度,能够满足一般情况下的需要,同时使基本概率赋值的获取更加符合实际情况。

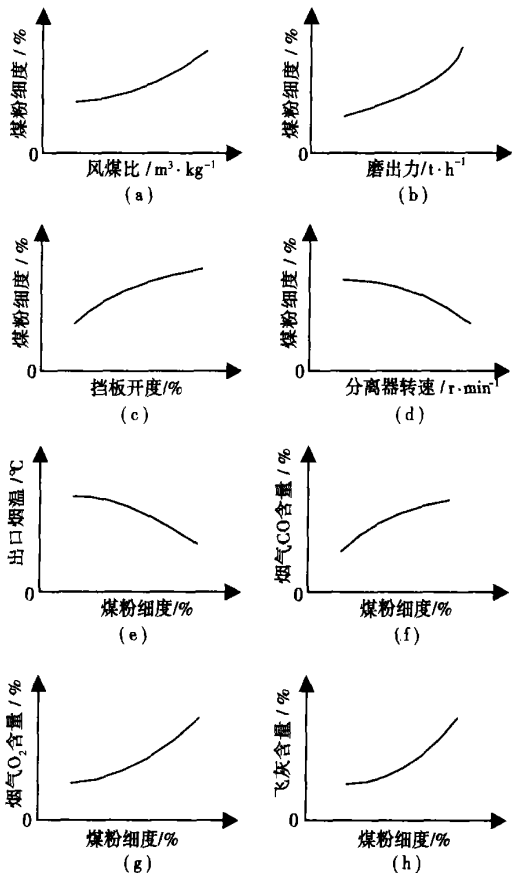


图 1 煤粉细度与相关参量的关系

设  $x_i$  为某一传感器输出值,待融合的一组证据为  $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ,称为检测样本;待识别的目标模式为  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  ( $n \geq 2$ ),对于目标模式  $A_j$  ( $j \in n$ )需要确定此模式下的各个证据的典型值  $\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}$ ,称为典型样本。任一证据在所有目标模式中对应的典型值  $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  ( $i \in m$ )必须不完全相等,否则不能作为证据。各目标模式的典型样本也应该互不相同。检测样本与各目标模式的典型样本之间存在不同的差异,这种差异可以通过证据间的距离描述。本文选取 Hamming 距离作为这种差异的描述。

对于任一证据  $x_i$  与目标模式  $A_j$  的典型样本中对应此条证据的典型值  $x_{ij}$  之间的 Hamming 距离为:

$$H_{ij} = |x_i - x_{ij}| \quad (1)$$

证据  $x_i$  与所有目标模式中对应典型值的距离  $H_{ij}$  的平均值为:

$$H_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_i - x_{ij}| \quad (2)$$

在文献[10]利用正态曲线定义相似度的基础上,定义证据  $x_i$  与目标模式  $A_j$  中对应典型值  $x_{ij}$  的相似度为:

$$P_{ij} = e^{-\alpha k^2} \quad (3)$$

其中  $k = H_{ij} / H_i$ ,根据式(2)可以知道  $k$  的取值范围为  $[0, n]$ ,同一证据对应的所有  $k$  的和为  $n$ ,可以看出  $k$  取得的最大值为目标模式数;  $\alpha$  为一大于 0 的系数,从式(3)可以看出  $P_{ij}$  的取值范围为  $[e^{-\alpha n^2}, 1]$ 。相似度函数与  $k$  的关系如图 2 所示。

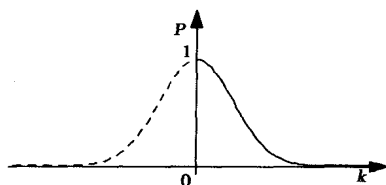


图 2 相似度函数曲线

定义为证据  $x_i$  对应目标模式  $A_j$  的基本概率赋值:

$$m_i(A_j) = P_{ij} / \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (4)$$

式中:  $i \in m; j \in n$ 。通过数学推理 得到  $m_i(A_j)$  的取值

$$\text{范围:} \left[ \frac{e^{-\alpha n^2}}{e^{-\alpha n^2} + (n-1)}, \frac{1}{1 + (n-1)e^{-\alpha(\frac{n}{n-1})^2}} \right]$$

可以验证,以上构造方法满足基本概率赋值的定义,并且只要能够确定所有目标模式的典型样本,就可以唯一确定任意一条证据的基本概率赋值。

### 3.2 方法分析

通过对图 2 分析可以看出,这种相似度的定义非常适宜样本高斯分布的情况,相似度  $P_{ij}$  随  $k$  的增大而减小。当  $k$  在零附近时,  $P_{ij}$  的变化率较小,即检测值稍偏离典型值时同样能够取得很大的相似度;当  $k$  较大时,  $P_{ij}$  随  $k$  的增大而急剧减小,表明相似度对检测值与典型值之间较大距离的敏感性;但当  $k$  增大到一定程度后,  $P_{ij}$  趋近于零,即检测值远离典型值时得到非常小的相似度。由于工业中存在很多干扰,实际检测值总是存在小范围的波动,采用正态曲线构造相似度,有效地减弱这种波动对基本

概率赋值的影响, 有很好的鲁棒性。

分析基本概率赋值  $m(A)$  取值范围, 其大小仍然随目标模式数目的增加而减小, 但对于目标模式数目较多时有了明显地改观, 随着  $\alpha$  的增大改观越明显, 如图 3 所示。

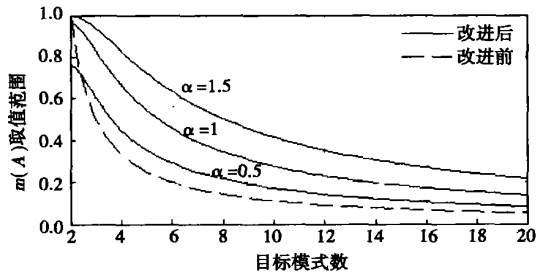


图 3  $m(A)$ 取值范围与目标模式数的关系

单个证据基本概率赋值的取值范围的增大会增大多个证据融合结果最大差异, 这是我们所期望的。可以通过分析说明, 选取目标模式数为  $n$ , 证据数为  $m$ ,  $\alpha=0.5$ , 假设极端情况下所有证据的检测值与同一目标模式的典型值均相等, 与其它  $(n-1)$  个目标模式的典型值的距离相同, 但不为零。根据证据理论融合规则进行证据融合, 计算融合结果中基本概率赋值最大值与其它值的差 (如表 1 所示)。当目标模式数目较多时, 证据数对融合结果最大差异有很大影响, 所以在证据理论实际应用中应尽可能的选取较多的证据。

表 1 融合后基本概率赋值最大差异

证据数	目标模式数				
	3	5	10	15	20
2	0.738 9	0.429 9	0.195 9	0.125 5	0.092 1
3	0.903 9	0.653 3	0.349 4	0.234 5	0.175 9
4	0.967 4	0.813 2	0.519 5	0.373 3	0.290 1
5	0.989 3	0.906 9	0.676 4	0.525 8	0.427 9
6	0.996 5	0.955 6	0.798 4	0.668 9	0.572 4
7	0.998 9	0.979 3	0.881 3	0.784 4	0.703 0
8	0.999 6	0.990 4	0.932 7	0.866 9	0.806 0
9	0.999 9	0.995 6	0.962 6	0.920 7	0.879 1

## 4 实际应用

### 4.1 典型样本选取

典型样本的确定可以综合历史故障数据、设备性能参数和专家经验确定。

某电厂 600 MW 机组采用正压直吹式制粉系统, 配置 6 台由北京电力设备总厂生产的 ZGM-123

型中速辊式磨煤机, 5 台磨煤机可带 MCR 负荷, 一台备用。根据多年运行经验, 把煤粉细度分为 3 种状态  $\{A_1, A_2, A_3\}$ , 分别是:  $A_1$ —煤粉过细;  $A_2$ —煤粉正常;  $A_3$ —煤粉过粗。由于受到电厂信号检测点的限制, 应尽可能选取在 DCS 中存在的信号, 同时, 个别参数量受到负荷的影响, 在应对其进行信号重构。此处, 判定证据选择 5 个信号  $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ , 分别是:  $x_1$ —磨一次风量与燃料量的比值;  $x_2$ —磨煤机电流与燃料量的比值;  $x_3$ —空气预热器入口烟温;  $x_4$ —烟气含  $O_2$  量;  $x_5$ —烟气含 CO 量。

根据该机组往年运行数据和设备性能参数, 结合专家经验得到目标模式的典型样本 (见表 2)。在  $\alpha=0.5$  的情况下计算基本概率赋值。

表 2 目标模式的典型样本

证据	目标模式		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$x_1 / (m^3 \cdot s^{-1}) \cdot (kg \cdot s^{-1})^{-1}$	1.20	1.54	1.83
$x_2 / A \cdot (kg \cdot s^{-1})^{-1}$	1.50	1.22	1.05
$x_3 / ^\circ C$	338	320	297
$x_4 / \%$	2.20	4.47	6.85
$x_5 / mL \cdot m^{-3}$	170	220	300

### 4.2 实例

根据电厂 2003 年的运行数据进行验证, 表 3 是一组煤粉正常时的实际数据与融合结果。从融合结果可以看出, 煤粉正常模式具有最大基本概率赋值。图 4 是制粉系统 B 正常运行时煤粉细度一天的监测曲线, 可以看出煤粉正常模式的基本概率赋值曲线波动较小, 说明了方法具有很好的鲁棒性。

表 3 煤粉正常时数据融合结果

证据	实际数据	目标模式		
		$A_1$	$A_2$	$A_3$
$x_1 / (m^3 \cdot s^{-1}) \cdot (kg \cdot s^{-1})^{-1}$	1.62	0.113 4	0.517 2	0.369 4
$x_2 / A \cdot (kg \cdot s^{-1})^{-1}$	1.18	0.079 5	0.525 8	0.394 7
$x_3 / ^\circ C$	328	0.440 7	0.471 5	0.087 8
$x_4 / \%$	3.01	0.553 5	0.393 9	0.052 6
$x_5 / mL \cdot m^{-3}$	216	0.335 3	0.567 5	0.097 2
融合结果		0.025 0	0.972 8	0.097 2

由于正常运行时煤粉细度的变化不易觉察, 选取制粉系统设备发生故障, 煤粉细度受到影响时的数据检验方法的可行性。2003 年 6 月 6 日 23:57, 监视曲线出现微小抖动, 到次日 00:58 煤粉正常模式基本概率赋值开始快速下降, 而煤粉过粗模式基本概率赋值快速升高, 标志着煤粉细度变差, 到 1:14

煤粉细度到达最粗(如表 4 所示),随后在 1:19 制粉系统 B 退出运行。根据故障分析报告得知,当时 B 给煤机发生跳闸,但 B 磨煤机未跳,导致了制粉系统 B 退出运行,随后手动停止 B 磨煤机。整个过程煤粉细度变化的监视曲线如图 5 所示,可以明显的看到煤粉细度变化的过程。

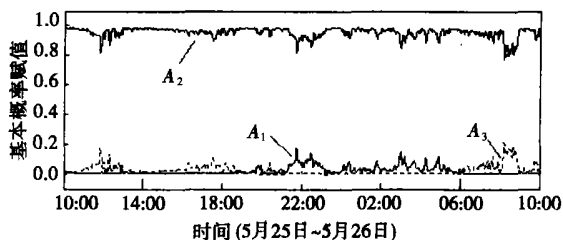


图 4 煤粉细度正常时监视曲线

表 4 煤粉过粗时数据融合结果

证 据	实际数据	目标模式		
		$A_1$	$A_2$	$A_3$
$x_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$	1.69	0.090 0	0.450 1	0.459 9
$x_2 / \text{A} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	1.19	0.084 2	0.540 6	0.375 2
$x_3 / ^\circ\text{C}$	307	0.122 4	0.415 5	0.462 1
$x_4 / \%$	5.87	0.141 5	0.394 3	0.464 2
$x_5 / \text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$	265	0.144 0	0.402 9	0.453 1
融合结果		0.000 6	0.488 9	0.510 6

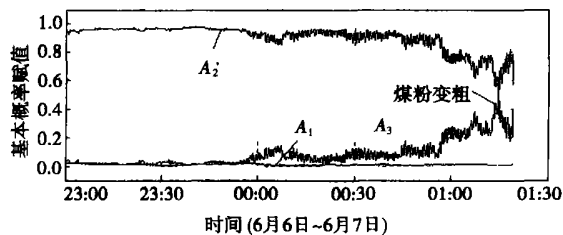


图 5 煤粉细度异常时监视曲线

## 5 结 论

(1) 通过正态曲线构造相似度函数,得到更加符合实际的基本概率赋值方法,增强了数据融合过程的鲁棒性,同时提高了融合结果的可信度。

(2) 煤粉细度受到很多运行工况的影响,同时煤粉细度的变化也会影响到锅炉的燃烧。应用 D-S 证据理论融合多个与煤粉细度相关的变量,得到可信度较高的煤粉细度判定结果。对指导磨煤机运行,提高经济性有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 尚 勇,闫春江.基于信息融合的大型油浸电力变压器故障诊断[J].中国电机工程学报,2002,22(7):115-118.
- [3] 李伟生,王宝树.基于模糊逻辑和 D-S 证据理论的一种态势估计方法[J].系统工程与电子技术,2003,25(10):1278-1280.
- [4] 田 亮,常太华,曾德良,等.基于典型样本数据融合方法的锅炉制粉系统故障诊断[J].热能动力工程,2005,20(2):163-166.
- [5] 吴东垠,盛宏至,魏小林,等.燃煤锅炉制粉系统的优化运行试验[J].中国电机工程学报,2004,24(12):218-221.
- [6] 施慧烈,俞自涛,洪荣华,等.电厂制粉系统调整试验及分析[J].能源工程,2002(6):43-46.
- [7] 华 峰.浅谈煤粉细度对锅炉运行的影响[J].山东电力技术,1997,93(1):9-1.
- [8] 陈炳华,张 颖,孙 锐,等.运行参数对锅炉煤粉着火燃烧和飞灰含碳量影响的数值研究[J].动力工程,2004,24(4):470-476.
- [9] 叶学民,彭 波.燃煤电站锅炉飞灰含碳量偏高的原因分析与解决措施[J].锅炉技术,2004,35(3):49-51.
- [10] DENOEUXT. A k-nearest neighbor classification rule based on Dempster-Shafer theory[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1995, 25(5):804-813.

(渠 源 编 辑)

## 书 讯

### 强化传热新技术及其应用

本书介绍了强化传热技术的基础理论、国内外近年来的一些研究成果和最新进展,详细地介绍了强化传热技术,螺旋模纹管、旋流管、波纹管、内插物及其他新型强化新技术的强化传热机理及应用,凝结换热的强化传热方法,强化传热在车辆冷却传热、动力工程、化工工程和其他工程中的应用等内容。全书内容新颖,并附有工程实例,实用性强。

读者对象:相关工程技术人员及设计人员,相关专业本科生、研究生

2006 年 1 月出版

**Using Different Oil-film Force Models**[刊, 汉] / JIAO Ying-hou, CHEN Zhao-bo, LI Ming-zhang (Electromechanical College under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 418 ~ 422

The nonlinear oil-film force obtained by using several kinds of elliptic-bearing nonlinear oil-film models currently available is analyzed and compared with that derived by directly using a finite-difference numerical method for solving a Reynold equation. Meanwhile, the relative errors, calculation speed and dynamic characteristics of the response of an actual rotor-elliptic bearing system obtained under different elliptic-bearing non-linear oil-film force models have also been analyzed and compared. With the calculation accuracy, computation speed and dynamic characteristics of the above system being taken into account in a comprehensive way, research results show that a database method should be an oil-film force model to be recommended as a first priority, followed by a database fitting-expression and variation method model as a second choice. The foregoing provides a basis for the selection of oil-film force model during the nonlinear dynamic analysis and design of an actual rotating mechanical rotor-elliptic bearing system. **Key words:** non-linear oil film force, elliptic bearing, rotor system

**基于 D-S 证据理论的煤粉细度融合诊断 = Fusion Diagnosis of Pulverized-coal Fineness Based on a D-S Evidence Theory**[刊, 汉] / LIU Ji-zhen, CUI Ze-peng, TIAN Liang, et al (Automation Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 423 ~ 426

With regard to the difficult problem of performing an on-line measurement of pulverized coal fineness at power plants, a datum fusion technology is proposed to discriminate whether the pulverized coal is over-fine, normal and excessively coarse. On the basis of analyzing several operation-status parameters relating to pulverized coal fineness and according to historical operational data, typical samples of pulverized coal fineness have been identified. Thereafter, the results of various status parameters can be ascertained by use of D-S fusion rules. Concerning the problem that it is difficult to determine the basic probability assignment during the use of D-S evidence theory, a normal distribution curve was utilized to construct a similarity function followed by the acquisition of the basic probability assignment, thus reducing subjectivity. As verified by the operational data, the above method could effectively diagnose the fineness of pulverized coal and is characterized by relatively good robustness and practical value in engineering applications. **Key words:** data fusion, evidence theory, basic probability assignment, pulverized coal fineness

**中压参数热电厂高压迭置的改造分析 = An Analysis of the Modification of a Thermal Power Plant of Medium-pressure Parameters by HP (High Pressure) Superimposition** = [刊, 汉] / WANG Bin, HE Wan-guo, HOU Jun-suo (Wuxi Subsidiary of Harbin No. 703 Research Institute, Wuxi, China, Post Code: 214151), YE Wen (Wuxi Huaguang Boiler Co. Ltd., Wuxi, China, Post Code: 214028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 427 ~ 430

In 1980s of the 20th century, several district thermal power plants were built in southern China, which had played an extremely important role in easing the contradiction between electric power supply and demand, enhancing environment protection and energy savings as well as promoting local economic development. As the initial steam parameters of thermal machines are excessively low, their thermal efficiency is not high and coal consumption for power generation and heat supply comparatively high. Enterprises experienced difficulties in maintaining their normal operation when coal price continuously went up. In view of this, Wuxi City Thermal Power Plant has underwent a modification and expansion construction based on a HP superimposition and an energy-saving design version. The above project was put into operation in July 2005, resulting in the attainment of sizable economic benefits with the thermification power generation rate being increased by 46% and the coal consumption for heat and power supply lowered by 20%. Thereafter, the said thermal power plant has ceased to suffer operating losses and embarked on the path of sustainable development. The above-mentioned design version can serve as a guide during the modification of district thermal power plants to enhance the initial steam parameters of thermal machines. **Key words:** HP superimposition, energy saving, modification analysis