

# 电厂送粉系统煤粉浓度和速度的在线测量技术研究

孙 猛<sup>1</sup>, 刘 石<sup>2</sup>, 雷 兢<sup>1</sup>, 李志宏<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080;

2. 华北电力大学 电站设备状态监与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘 要:** 锅炉燃烧过程中, 准确测量各风管中的煤粉浓度并指导调节对锅炉的安全、经济运行非常重要。采用电容层析成像技术(ECT), 对常温下稀疏气力输送的固体浓度及速度进行了测试研究。为克服电容传感器敏感场的不均匀性对成像造成的影响, 实验系统中装置了一旋风分离装置, 通过旋风分离作用将固体颗粒主要集中在壁面区域, 传感器电极布置在分离器直管上。利用单层 8 电极电容传感器通过迭代代的图像重建算法获得浓度分布。通过分析旋风分离装置内上下游流动的概率和频谱特性, 验证了其流动满足电容相关测试要求, 通过测量上下两层电极电容相关信号获得轴向速度, 切向速度由同一层传感器相邻电极对的电容相关信号获得。通过对管道截面体积分数、轴向速度及切向速度的测量与比较分析, 证明该方法可获得可靠的测量结果。

**关 键 词:** 电容层析成像; 煤粉浓度; 体积分数; 速度测量; 气固两相流

中图分类号: TK224. 1 文献标识码: A

## 引 言

输送管道中煤粉浓度检测是电站锅炉入炉煤量检测的一个重要组成部分。目前, 围绕这一问题, 国内外许多研究者进行了深入的研究, 提出了许多煤粉浓度及质量流量的测量方法<sup>[1~6]</sup>, 虽然各种测量方法都有自己的优点, 但不可避免地存在一定的缺点以及应用范围狭窄的问题。电容层析成像技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一项新的浓度测量技术<sup>[7]</sup>, 开始应用于气固、气液两相流测量中, 它不会对流场产生干扰, 不受固体浓度、加速度、透明度的限制, 是一种非侵入式和快速测量技术。电容层析成像技术在实际应用时存在下面两个问题: 其一, 两相流动过程十分复杂, 检测场内固相颗粒分布不均匀, 流型变化快; 其二, 电容传感器检测场属于“软场”, 有其固有的灵敏度分布不均匀性问题, 使测量结果不仅与固相浓度有关, 而且受固相分布及流型

变化的影响很大, 测量误差较大。近年来相关技术用于气固两相流的速度测量也越来越广泛, 相关的研究有电容、静电、光学和电阻相关等<sup>[8~11]</sup>。本文综合利用电容层析成像技术及相关分析方法, 采用双层电容传感器, 在线同时测量出固体颗粒的浓度、轴向速度和径向速度, 给出具体的实验结果。

## 1 电容层析成像测量原理

电容层析成像原理是利用一组电极从外部环绕被测区域, 利用被测区域内物质分布而导致的各电极之间的电容关系, 由测得的电容值重现被测区域内的物质分布。图 1 是一个圆形 8 电极电容层析传感器示意图。其中框架包围着被测区域, 由仪器巡回测量各个电极板之间的电容。由于物质分布的变化导致测量区域内电势分布的变化, 进而导致各个测量电极之间电容信号的相应变化。而通过数学的方法, 则可以将此信号的变化反推出物质的分布情况, 这一过程称为电容层析成像的逆过程, 最简单的成像过程是线性反投影算法(Linear Back Projection, LBP), 计算式为:

$$G = S^T C \quad (1)$$

线性反投影算法虽然速度快, 但是成像质量差; 迭代法虽然成像质量好但是耗时太长, 因此多用来进行离线分析。采用刘石等人提出的迭代的方法<sup>[12]</sup>, 大致思想是:

$$D_{k+1} = (I - \alpha_k S^T S) D_k + \alpha_k S^T \quad (k = 1, 2, \dots, z) \quad (2)$$

$$G = D_z C \quad (3)$$

算法分两步进行, 首先根据式(2)离线进行迭代计算得出一系数矩阵  $D_z$ , 然后用此系数矩阵进行在线成像测量, 如同 LBP 方法一样, 这样既提高了成

像质量又没有影响成像的速度。式中  $G$  为  $n$  阶图像向量。其中  $m$  为测量的电容个数, 12 电极 为 66, 8 电极 为 28,  $n$  为测量区域的像素个数。研究中使用 8 电极圆形传感器, 像素个数为  $81 \times 81$ 。  $C$  为  $m$  阶电容向量;  $S$  为  $m \times n$  阶矩阵, 反映电容值变化受物质分布的影响程度<sup>[13]</sup>, 也被称为敏感场。

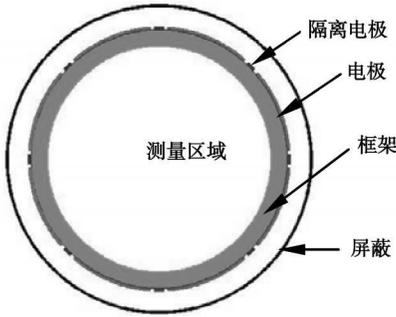


图1 传感器结构示意图

## 2 相关分析原理

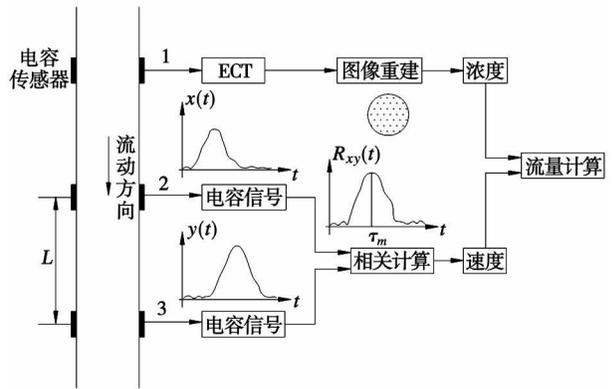
电容相关测速原理如图2所示, 图(b)中沿流体流动的方向上布置三层电容传感器, 一层传感器1用于固体颗粒浓度测量, 另外两层用于相关分析, 即传感器2作为上游, 传感器3作为下游。假设流体从截面1到截面3的流动结构保持不变, 这就是“凝固”图形流动, 虽然这种流动实际上是不存在的, 但只要保持上、下游传感器的间距足够小, 流体从上游流到下游的变化相对较小, 就可以近似认为系统满足“凝固”流动假设。根据这种假设, 流动由上游电容传感器检测得到的流动噪声信号经过一定时间将被下游传感器捕捉到, 其波形与经过上游的信号波形相似, 时间上相差一个延时时间  $\tau_m$ 。如果不考虑流体内部的粘性阻力、管道内壁对流体的摩擦作用, 则可以认为截面上各处的流体以相同的速度流动。设上游传感器检测得到的信号为  $x(t)$ , 下游得到的信号为  $y(t)$ , 经相关分析得到相关函数  $R_{xy}(\tau_m)$ , 该图形峰值对应的时间  $\tau_m$  就是流体截面从上游传感器到下游传感器的流动时间, 其相关计算式为:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{N} \sum x(i)y(i+j), j=0, 1, 2, \dots, M-1, M \quad (4)$$

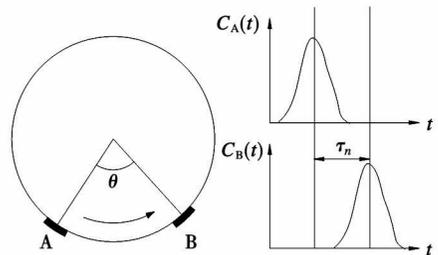
式中:  $x(i)$ —上游传感器测得的电容信号;  $y(i+j)$ —下游传感器得到的电容信号;  $i$ —相关取样个数;  $j$ —延迟时间对应的取样个数。延迟时间对应的计算式为:

$$\tau_m = j \Delta t \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$ —电容系统测量一组数据所用的时间, 由电容采集系统确定。



(a) 轴向相关示意图



(b) 径向相关示意图

图2 相关测量原理

当延迟时间  $\tau_m$  确定, 上下游传感器几何中心距离  $L$  已知, 则可以得出流体流动的相关速度, 计算式为:

$$V_s(t) = L / \tau_m \quad (6)$$

径向速度的相关测量原理与轴向相关速度的测量原理相似, 只是相关信号的获得是在同一层传感器的相邻电极之间, 当延迟时间  $\tau_n$  确定, 相邻电极的几何中心距离可以由直径  $D$  及夹角  $\theta$  计算得出, 进而可以得出流体流动的相关速度, 计算式为:

$$V_r = \theta D / \tau_n \quad (7)$$

## 3 实验装置

实验系统如图3所示, 空气通过抽风机的抽吸作用进入管道, 物料从贮煤仓由螺杆式给粉机送入煤粉混合器, 与空气混合后形成气固两相流, 然后经旋流作用进入实验段的竖直管, 最后进入除尘系统。物料选用电厂粉煤灰, 固体粉粒体平均粒径为  $50 \mu\text{m}$ , 物质密度为  $2350 \text{ kg/m}^3$ , 携带粉粒体的气体为常温空气。通过可调转速电机控制螺杆式给粉机的给粉量, 从而进行不同浓度的配制。物料与空气在

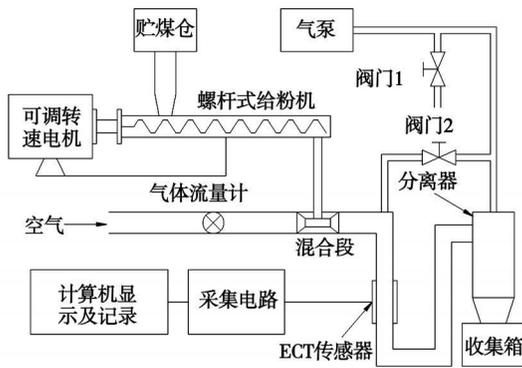


图 3 实验系统

混合段混合后进入旋流浓缩装置, ECT 传感装置系统布置在旋流浓缩装置的直管上, 最后混合流体经旋风分离器分离后粉粒体进入收集箱。阀门 1 的主要作用是调节从外部空气的吸入量, 从而进一步调节旋风分离系统的风量; 阀门 2 的开闭以及开启程度来研究分离器顶部抽吸作用对断面浓度分布的影响。

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 浓度测量结果

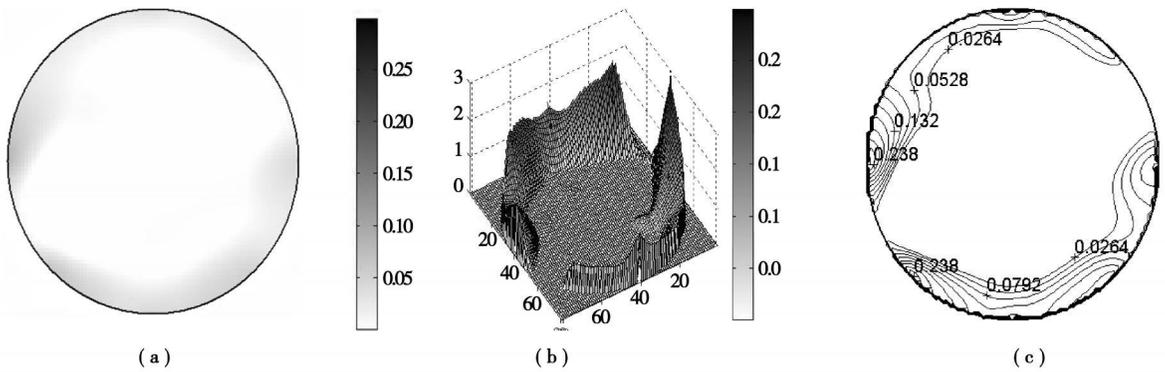


图 4 断面浓度分布

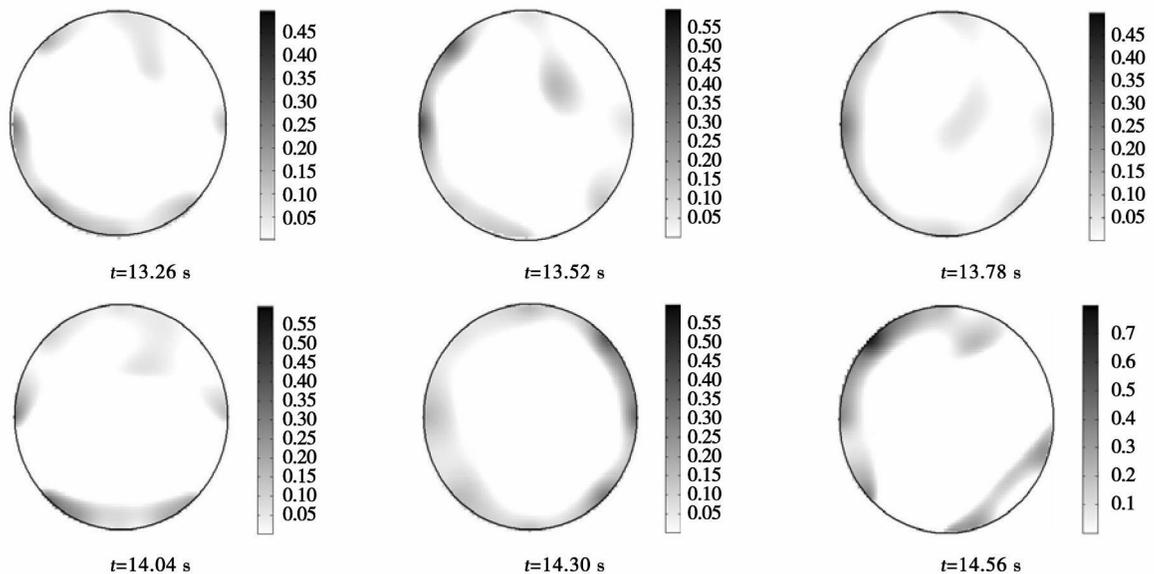


图 5 不同时刻的截面浓度变化

图 4 为电容传感器所在位置直管中固体颗粒的浓度分布, 图(a)为采用二维位图格式表示的浓度分布, 为操作人员提供管道内固体分布的直观图像; 图(b)为三维曲面表示, 可以更清晰的看到边缘固体颗

粒的分布; 图(c)为采用等值线表示的断面浓度分布, 能够清楚表示截面上浓度分布的具体数值。从上面的图示可以看出, 旋风分离器内的固体颗粒的分布是不对称的, 并且颗粒靠近壁面的浓度远远高

于中心区域,从图(b)可以清楚看出这种变化趋势,图(c)的数字表示固体颗粒的浓度值,最大浓度为23.8%,中间逐渐过渡,即沿半径方向浓度逐渐升高,与引入旋风分离装置的目的相符。图5是不同时刻的截面浓度变化,从图中可以看出固体颗粒在壁面的分布不是均匀的,还不断地波动,体积分数值也在不断地变化,这与螺杆式给粉机的给料特性是相符的。

#### 4.2 轴向相关速度测量

图6为上、下游电容信号对应的概率密度分布及频谱分布。由图可以看出,上、下游的流动噪声信号十分相似,满足凝固流型假设。

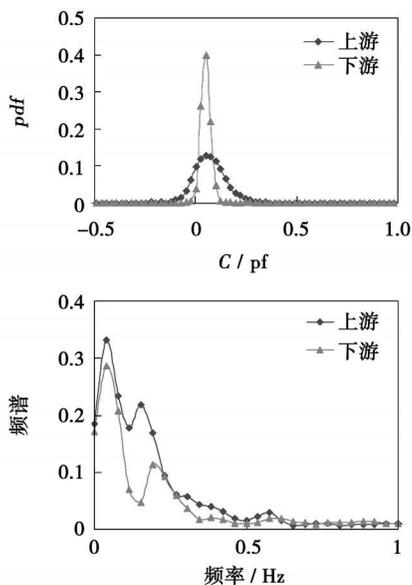


图6 上、下层电容概率和频谱分布

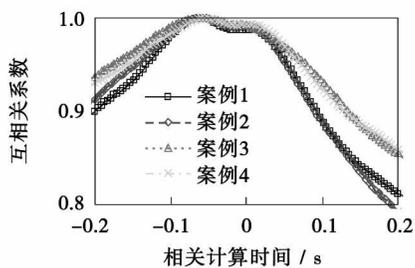


图7 轴向速度相关系数分布

表1 轴向相关计算速度

延迟幅数	延迟时间/s	速度/ $m \cdot s^{-1}$
12	0.051	1.373
13	0.055 25	1.267
13	0.055 25	1.267
14	0.059 5	1.176

图7为通过相关计算得出的上、下游流动信号的互相关系数,由图可以求出对应的信号延迟时间 $\tau_m$ ,采用式(6)计算得出速度,计算结果如表1所示。

#### 4.3 径向相关速度测量

径向速度的相关测量与轴向速度相似,图8为同层传感器相邻电极间电容信号对应的概率密度分布及频谱分布。由图可以看出,上、下游的流动噪声信号十分相似;图9为通过相关计算得出的相邻电极流动信号的互相关系数,由图可以求出对应的信号延迟时间 $\tau_n$ ,采用式(7)计算得出速度,计算结果如表2所示。

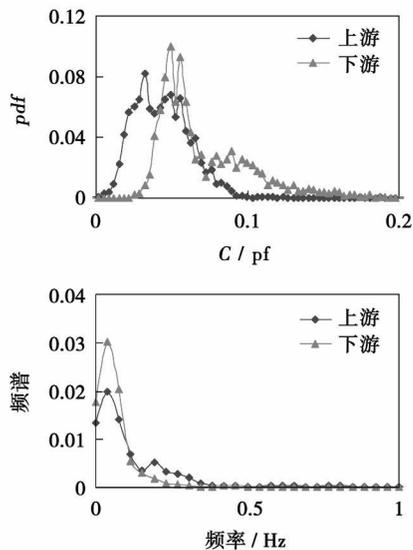


图8 同层相邻电极电容概率和频谱分布

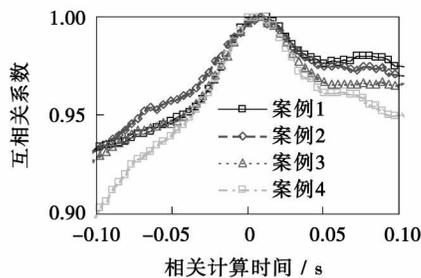


图9 径向速度相关系数分布

表2 径向相关计算速度

延迟幅数	延迟时间/s	速度/ $m \cdot s^{-1}$
2	0.008 5	5.647
2	0.008 5	5.647
2	0.008 5	5.647
2	0.008 5	5.647

## 5 结 论

针对电厂送粉系统煤粉浓度的测量, 提出了一种结合旋风分离装置的电容层析技术, 合理利用了电容敏感场的分布特性, 提高了测量精度, 能够在线显示图像为操作人员提供帮助。通过对浓度及速度的测量及分析, 证明了这种测量方法的可行性, 得出如下结论:

(1) 使用迭代图像重建算法能够获得良好的图像重建效果, 进而提高浓度测量的准确性。

(2) 旋风分离装置中的流动“满足凝固流型”假设, 适合电容相关测量, 故能获得准确的轴向和切向速度测量结果。

但是由于电容层析技术发展时间短, 许多技术和算法还不是很成熟, 因此应用到实际中还有一定的难度。随着电容层析成像和算法的不断成熟, 电容层析成像相关测试法仍具有广泛的应用前景和不可替代的作用。

### 参考文献:

[1] ZHENG YINGNA, LIU QIANG, LI YANG, et al. Investigation on concentration distribution and mass flow rate measurement for gravity chute conveyor by optical tomography system[J]. Measurement, 2006, 39: 643-654.

[2] ELLIS N, BRIENS L A, GRACE J R, et al. Characterization of dynamic behavior in gas-solid turbulent fluidized bed using chaos and wavelet analyses[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 196: 105-116.

[3] ZHENG YING, ZHANG QIKAI. Simultaneous measurement of gas and solid holdups in multiphase systems using ultrasonic technique[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59: 3505-3514.

[4] 刘 磊, 周芳德. 电厂送粉系统煤粉浓度测量的热探头方法研究[J]. 热能动力工程, 2002, 17(6): 572-575.

[5] 吴智群, 巨林仓. 电站锅炉输粉管道煤粉浓度动量法测量技术研究[J]. 热力发电, 2004(11): 28-31.

[6] 袁竹林, 卢作基. 用传热法测量燃煤锅炉气力输送中煤流量的研究[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 52-56.

[7] BECK M S, WILLIAMS R A. Process tomography: a european innovation and its applications[J]. Meas Sci and Technol, 1996(7): 215-224.

[8] 宋文卫, 周芳德. 多相流流量的电容相关测试技术研究[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(6): 57-62.

[9] YAN Y, BYRNET B. Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors[J]. Meas Sci Technol, 1995, 6: 515-537.

[10] 蔡小舒, 潘永志, 吴伟亮. 电厂煤粉粒径、浓度和速度的在线测量技术研究[J]. 动力工程, 1999, 19(6): 466-470.

[11] DENG X, DONG F. Measurement of the gas phase velocity in gas-liquid flows using a dual-plane ERT system // 2<sup>nd</sup> World Congress on Industrial Process Tomography[C]. Hannover: International Committee of World Industrial Process Tomography, 2001. 669-676.

[12] LIU S, FU L, YANG W Q. Optimization of iterative image reconstruction process for electrical capacitance tomography[J]. Meas Sci Technol, 1999, 10: L37-L39.

[13] XIE C G, HUANG S M, HOYLE B S, et al. Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors[J]. IEE Proc G, 1992. 139(1): 89-97.

(编辑 滨)

### 新技术、新产品

## 英国海军选择先进的推进系统

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2008年9月号报道, 英国皇家海军已为它未来的航母选定了先进的主动力装置。

两台 Rolls-Royce MT30 燃气轮机驱动的发电机组在 IFEP(综合全电力推进)系统中与 4 台 Waertsilae 中速柴油机驱动的发电机组相结合, 发出的总输出功率达到 110 MW, 可使航母的速度超过 25 节。

两艘航空母舰—HMS Queen Elizabeth 和 HMS Prince of Wales 计划分别于今后的 6 年和 8 年服役, 并且将是英国海军迄今为止建造的最强大的战舰。每艘航母的排水量为 65 000 t, 长度为 284 m。被设计成搭载 30 多架 F-35 联合战斗机, 外加直升机和空中预警机。

Rolls-Royce MT30 燃气轮机是 Trent 800 航空发动机的船用化改型, 额定输出功率为 36 MW。它有 80% 部件与 Trent 系列发动机通用, 并已被接受用于美国海军的濒海战斗舰、美国海军前两艘 DDG Zumwalt 级驱逐舰。

(吉桂明 供稿)

and fuel, promoted, thus enhancing the combustion efficiency of the CFB boiler burning low-volatile coals. **Key words:** CFB (circulating fluidized bed) boiler, secondary air distribution, mixing of gas and fuel in a furnace, boiler combustion condition

电厂送粉系统煤粉浓度和速度的在线测量技术研究 = **Study of the Technology of On-line Pulverized-coal Concentration and Velocity Measurement for Power Plant Pulverized-coal Conveyance Systems** [刊, 汉] / SUN Meng, LEI Jing (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LIU Shi, LI Zhi-hong (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 211 ~ 215

The accurate measurement of pulverized coal concentration in each air pipe and its guidance role for regulation during a combustion process are very important to the safe and cost-effective operation of a boiler. By using capacitance tomography, tested and studied were the concentration and velocity of solids conveyed by a dilute-phase pneumatic force at a normal temperature. To overcome the impact of the nonuniformity of the sensitive field of a capacitance sensor on image formation, a cyclone separator was set up in the test system. The role of the cyclone separator is to concentrate the solid particles mainly in the wall-surface zone with the electrodes of the sensor being located on the straight pipe of the separator. The concentration distribution was obtained by using a single-layer 8-pole capacitance sensor and adopting a pre-iterative image reconstruction algorithm. An analysis of the probability and frequency spectrum characteristics of flows at the upstream and downstream of the cyclone separator has verified that the flows can meet relevant requirements for capacitance measurement. In this connection, the axial velocity was obtained by measuring relevant capacitance signals from the poles in the upper and lower layers, and the tangential velocity was ascertained by measuring the relevant capacitance signals from a pair of adjacent poles in the same layer of the sensor. The measurement and contrast analysis of the volume fraction, axial and tangential velocity in the pipe section have proven that the method under discussion can ensure reliable measurement results. **Key words:** capacitance tomography, pulverized coal concentration, volume fraction, velocity measurement, gas-solid two-phase flow

非预混燃烧中喷嘴结构布局影响火焰长度的变化 = **Influence of Nozzle Structure Layout on the Change of Flame Length in a Non-premixed Combustion Process** [刊, 汉] / XU Qiong-hui, ZHAN Jie-min (Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510275) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 216 ~ 221

Verified was the reliability of numerical methods on the study of turbulent combustion. Under the condition of the gas flow rate and the total area of spouts being kept unchanged, by adjusting the number and spacing of spouts, several burner spout layout versions were determined. The influence of the number and spacing of spouts on the flame length in a non-premixed combustion process was discussed. It is believed that the change in the number and spacing of the spouts will cause not only a change of the air and gas mixing degree but also make the disturbance degrees between various gas streams different. Hence, the spout layout should be properly adjusted to change the burner flame configuration and temperature distribution and make the high-temperature combustion zone more centralized, thus enhancing the thermal efficiency of a gas-fired boiler. **Key words:** non-premixed combustion, number of spouts, spout spacing, flame length

空冷机组协调控制系统鲁棒性分析 = **Robustness Analysis of a Coordinated Control System for Air-cooled Units** [刊, 汉] / TIAN Liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 222 ~