

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104247

基于 ECT 的气固两相流颗粒浓度在线无损检测*

王胜南 李敏艳

(扬州大学电气与能源动力工程学院 扬州 225127)

摘 要:颗粒浓度是描述气固两相流动状态的一个重要参数。推导了颗粒浓度与 ECT 传感器输出电容信号之间的关系,在此基础上开展了气固两相流颗粒浓度在线无损检测研究。在 COMSOL+MATLAB 环境下进行气固两相流颗粒浓度测量模拟实验,定量评估了图像法和电容法颗粒浓度测量精度。在循环湍动流化床冷模装置上进行了初步的颗粒浓度测量实验研究,实验结果显示,在 200、300 和 400 mm 床层测量高度处利用图像法测得的颗粒体积浓度值分别在 0.26~0.75、0.09~0.33、0.04~0.31 范围内上下波动,而电容法的颗粒体积浓度测量值波动范围为 0.27~0.68、0.09~0.47、0.04~0.26。

关键词:颗粒浓度;气固两相流;电容层析成像;在线无损检测

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

On-line nondestructive particle concentration measurement of gas-solid two-phase flow based on ECT

Wang Shengnan Li Minyan

(College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Particle concentration is an important parameter describing the flow state of gas-solid two-phase flow. In this paper, the relationship between the particle concentration and the output capacitance signals of the ECT sensor is derived, and the on-line nondestructive particle concentration measurement approach is studied to detect the two-phase flow. The simulation experiment of particle concentration measurement is performed using COMSOL and MATLAB, by which the accuracies of the image-based and capacitance-based particle concentration measurement approaches are quantitatively evaluated. A preliminary experimental study on particle concentration measurement of gas-solid two-phase flow is carried out in a circulating turbulent fluidized bed, and the experimental results show that the image-based particle volume concentration measured at the bed height of 200, 300 and 400 mm fluctuates in the range of 0.26~0.75, 0.09~0.33, 0.04~0.31, respectively, while the particle volume concentration measured by capacitance-based method is in the range of 0.27~0.68, 0.09~0.47, 0.04~0.26, respectively.

Keywords: particle concentration; gas-solid two-phase flow; electrical capacitance tomography; on-line nondestructive measurement

0 引 言

气固两相流广泛存在于能源、化工等工业领域。颗粒浓度是反应气固两相流动状况的一个重要参数,实现气固两相流颗粒浓度的在线准确测量对于研究两相流动特性、优化工业生产过程具有重要意义^[1-2]。例如在煤化工行业的甲醇制烯烃过程,气固流化床反应器中的颗粒浓度动态特性直接影响不同组分混合物的有效混合,进

而影响反应的转化率^[3]。因此需要研究有效的颗粒浓度测量方法对流化床流化工程进行实时监测。

目前,基于不同的测量原理衍生出了多种气固两相流颗粒浓度在线无损检测技术,如光学图像法^[4]、过程层析成像法^[5]、射线衰减法^[6]等。光学图像法要求测量部位采用透明材料,其测量系统结构简单,测量稳定性高,但测量范围受到颗粒浓度限制^[4];射线衰减法具有空间分辨率高、测量精准等特点,但使用及维护复杂,成本较高且安全性差^[5];与上述两种检测技术相比,过程层析成

收稿日期: 2021-05-04 Received Date: 2021-05-04

* 基金项目: 国家自然科学基金(51906209)、扬州市自然科学基金(YZ2019078)、扬州市市校合作专项(YZ2019130)资助

像法具有成本低、适应性强、安全、测量范围宽等优点,在工业应用方面有较大优势^[5]。根据信号获取方式的不同,过程层析成像又可分为微波层析成像(microwave tomography, MWT)^[7]、超声层析成像(ultrasonic tomography, UT)^[8]、电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)^[9]、核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)^[10]等,其中,ECT 发展最为成熟,可实现气固两相流相分布、浓度等流动参数在线测量,为工业领域提供了有效的两相流检测途径^[5]。国内外相继研发了滑动式、方形、锥形等不同类型的 ECT 系统在工业两相流领域开展应用性研究^[1,5,11-13]。

基于 ECT 的气固两相流颗粒浓度测量一般采用图像法^[14],首先利用 ECT 重建测量区域的截面介电常数分布,然后经过浓度模型将介质分布信息转换为相应的颗粒浓度参数。尽管 ECT 成像速度较快,图像法由于涉及到图像重建以及浓度转换过程,一般需要线下处理才能获得较为准确结果。此外,ECT 系统本身存在传感器“软场”效应以及检测信息量有限等技术瓶颈,图像重建过程会带来不可避免误差^[15-19]。为此,本文深入分析了 ECT 传感器输出电容信号与颗粒浓度之间的关系,探索先进颗粒浓度在线无损检测方法,并开发了基于 ECT 的颗粒浓度测量系统,在中国科学院上海高等研究院低碳转化科学与工程中心搭建的循环湍动流化床(circulating turbulent fluidized bed, C-TFB)冷模装置上进行气固两相流颗粒浓度测量实验。

1 颗粒浓度测量原理

1.1 ECT 传感器

图 1 所示为典型的 8 电极 ECT 传感器结构示意图,该传感器主要由检测电极、防护电极、绝缘管道和屏蔽罩组成。检测电极顺序编号依次为 $E_1, E_2, \dots, E_8$ 。在测量过程中,检测电极加上激励电压时即为激励电极。

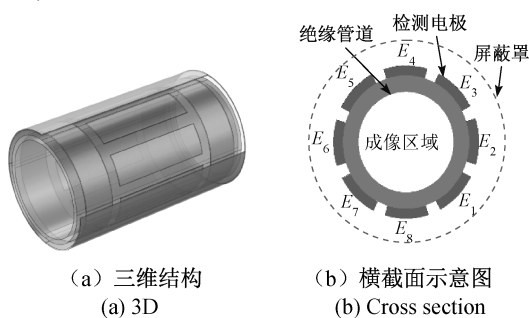


图 1 ECT 传感器几何结构

Fig. 1 Geometric structure of the ECT Sensor

当气固混合物流经传感器敏感空间范围内,气相和

固相分布不断发生的变化引起多相流混合体等价介电常数的变化,从而使电容传感器激励电极 E_i 与检测电极 E_j 间的电容值发生变化,这一过程可以描述为^[20]:

$$C_m = \frac{Q}{V} = - \frac{1}{V} \oint_A \varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z) dA \quad (1)$$

式中: C_m 为 E_i 与 E_j 间的电容值; Q 为 E_j 上的感应电量; V 为电极对间的压差; (x, y, z) 为传感器空间坐标系; $\varphi(x, y, z)$ 为空间相对介电常数分布; $\varphi(x, y, z)$ 为空间电势分布; A 为 E_j 的表面积。

1.2 图像法

在 ECT 完整的一次测量过程中,首先将 E_1 置为激励电极,其余电极为检测电极,测量 E_1 和 E_2, E_1 和 $E_3, \dots, E_1$ 和 E_8 之间的电容值;然后将 E_2 置为激励电极,测量 E_2 和 E_3, E_2 和 $E_4, \dots, E_2$ 和 E_8 之间的电容值;依次类推,最后测量 E_7 和 E_8 之间的电容值。因此,8 电极 ECT 传感器总共可以得到 28 个独立的电容测量值。将成像区域划分为 N 个像素点,ECT 成像本质上就是通过测量到的 28 个电容测量值,结合适当的图像重建算法计算出每个像素点的灰度值。本文涉及到的 ECT 图像重建均采用 LBP 算法。图像法就是利用浓度模型将像素灰度值转换为颗粒体积浓度参数。本文的浓度模型定义为:

$$\phi_{pic} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i) \quad (2)$$

式中: $g(i)$ 为第 i 个像素点的灰度值; ϕ_{pic} 为图像法颗粒体积浓度值。

1.3 电容法

利用串联电容归一化模型将测量电容值 C_m 进行归一化处理,得到^[14]:

$$C_n = \frac{1/C_m - 1/C_m^I}{1/C_m^h - 1/C_m^I} \quad (3)$$

式中: C_n 为归一化电容; C_m^h 和 C_m^I 分别为当传感器内部充满相对介电常数为 ε_h 物质(固相)和相对介电常数为 ε_l 物质(气相)时各电极对间的电容值。根据 ECT 传感器结构(图 1),电极对之间的实际电容包括管壁的有效电容 C_w 以及气固两相流的电容值 C_x ^[10],可表示为:

$$\begin{cases} 1/C_m = 1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_m) \\ 1/C_m^h = 1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_h) \\ 1/C_m^I = 1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_l) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_m 表示气固两相流的等价介电常数^[10]。

$$\varepsilon_m = \varepsilon_h \phi + \varepsilon_l(1 - \phi) \quad (5)$$

式中: ϕ 为两相流的颗粒体积浓度。

将式(4)代入式(3),得到:

$$C_n = \frac{[1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_m)] - [1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_l)]}{[1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_h)] - [1/C_w + 1/C_x(\varepsilon_l)]} =$$

$$\frac{1/C_x(\varepsilon_m) - 1/C_x(\varepsilon_l)}{1/C_x(\varepsilon_h) - 1/C_x(\varepsilon_l)} \quad (6)$$

气固两相流的电容值 C_x 与其相对介电常数 ε_m 成线性关系,可表示为^[14]:

$$C_x(\varepsilon_m) = k\varepsilon_m \quad (7)$$

对于纯固相和气固流体,同理可得:

$$C_x(\varepsilon_h) = k\varepsilon_h \quad (8)$$

$$C_x(\varepsilon_l) = k\varepsilon_l \quad (9)$$

将式(7)~(9)代入式(6),可以得到:

$$C_n = \frac{1/C_x(\varepsilon_m) - 1/C_x(\varepsilon_l)}{1/C_x(\varepsilon_h) - 1/C_x(\varepsilon_l)} =$$

$$\frac{1/\varepsilon_m - 1/\varepsilon_l}{1/\varepsilon_h - 1/\varepsilon_l} \quad (10)$$

可以将式(10)转化为:

$$\varepsilon_m = \frac{1}{C_n(1/\varepsilon_h - 1/\varepsilon_l) + 1/\varepsilon_l} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5),即可通过测量到的电容值计算出床内气固两相流的颗粒体积浓度。

2 模拟测量原理

为了定量评估 ECT 颗粒浓度测量算法的准确性,在 Comsol+MATLAB 环境下进行气固两相流颗粒浓度测量模拟实验。模拟实验参数设置为管径为 0.1 m,气相和固相介电常数分别为 1.0 和 4.0,ECT 传感器电极设置为紫铜材料,电极覆盖角为 31.87°,电极激励电压为 10 V。考虑到实际测量中两相流各相分布的随机性和复杂性,模拟测量对象是相随机分布且固相浓度从 1 到 0 逐渐减小的复杂混合流体,如图 2 所示。

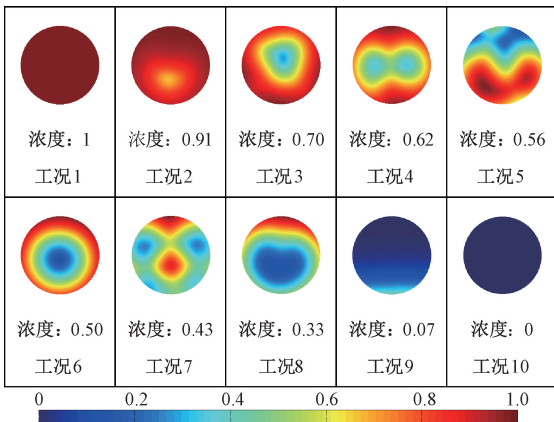


图 2 模拟气固两相流的真实相分布

Fig. 2 Real phase distribution of simulated gas-solid two-phase flow

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = 0 \quad (12)$$

式中: ε_0 为真空的介电常数; ε_r 为传感器内部的气固两相混合流体的相对介电常数分布。

在模拟测量过程中,为了实现 ECT 传感器 28 个独立电极对间的电容测量,依次在不同电极上施加激励电压,ECT 传感器敏感场内相应的电势分布如图 3 所示。

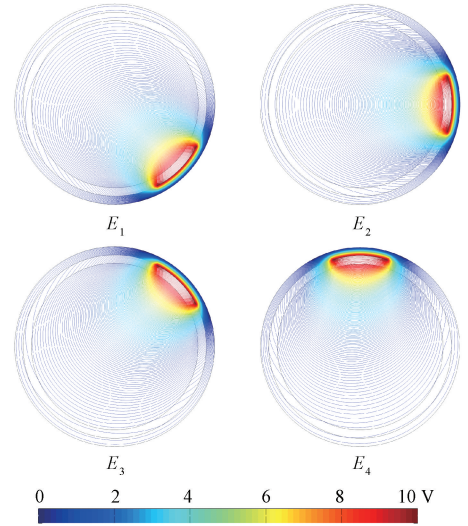


图 3 不同激励电极下的电势分布

Fig. 3 Contour of electrical potential with different excitation electrodes

图 4 所示为典型工况下 ECT 传感器测得的归一化电容测量值。从图 4 可以看出,传感器各电极对间的电容测量值整体上随着被测流体固相浓度的下降而下降;相邻电极对(如 E_1 和 E_2 、 E_2 和 E_3 、 E_3 和 E_4)之间的电容受固相浓度影响变化最为明显,而相对电极对(如 E_1 和 E_5 、 E_2 和 E_6 、 E_3 和 E_7)间的电容变化较为微弱,表明 ECT 传感器相邻电极对之间的灵敏度很高,而相对电极对之间的灵敏度较低。

在模拟实验中,各工况下的气固两相流真实相分布已知(图 2),即各像素点的灰度值已知,根据式(2)即可求出各工况下的颗粒体积浓度真实值。分别利用图像法和电容法对图 2 中各工况下的气固两相流进行固相体积浓度测量,测量结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,利用图像法和电容法测得的固相体积浓度均与真实值比较接近,且变化趋势一致,表明这两种算法均可实现气固两相流颗粒体积分浓度的准确有效测量;利用图像法测得的固相体积浓度均大于真实值,而利用电容法对固相体积浓度低于 0.5 流体的测量值偏高,对浓度高于 0.5 流体的测量值普遍偏低。为了定量评估两种浓度测量方法的准确性,引入满量程误差 γ 对计算结果进行分析:

$$\gamma = \frac{|\beta_t - \beta_m|}{\beta_h - \beta_l} \quad (13)$$

ECT 传感器内部的电势 V 可以描述为^[21]:

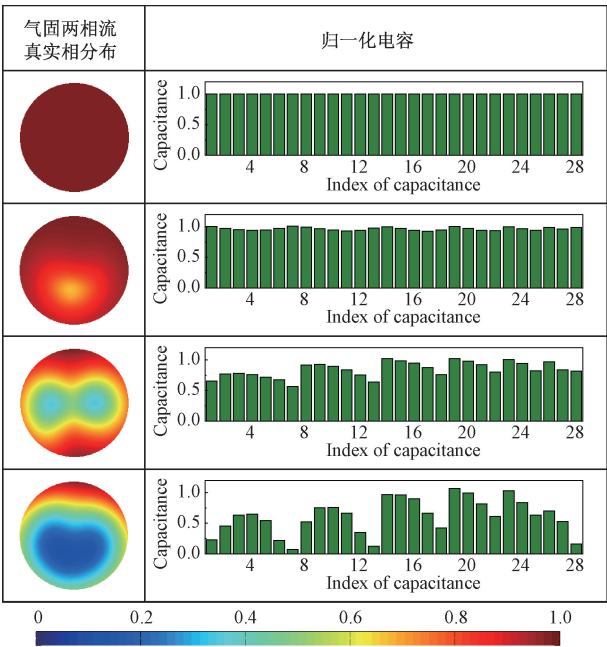


图 4 典型工况下 ECT 传感器归一化电容值
Fig. 4 Normalized capacitances of ECT sensor under typical working conditions

式中： β_i 和 β_m 分别为气固两相流固相体积分浓度的真实值和测量值； β_h 和 β_l 分别表示测量的最高固相体积分浓度和最低固相体积分浓度。

图像法和电容法在各工况下的测量满量程误差如图 6 所示。从图 6 可以看出,电容法得到的固相体积分浓度满量程误差小于 7.4%,而图像法则优于 5.3%。在本实验工况下的实验结果表明,与电容法相比,图像法需要经过相对复杂的图像重建过程,但在测量精度上略占优势。电容法由于不需要进行复杂的图像重建,算法相对简单,在实时性和稳定性上占有较大优势。

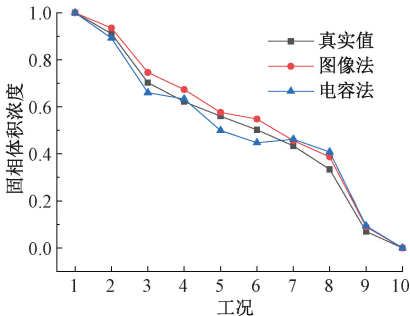


图 5 颗粒体积分浓度测量值
Fig. 5 Measured particle volume concentration

3 流化床测量实验

在中国科学院上海高等研究院低碳转化科学与工程

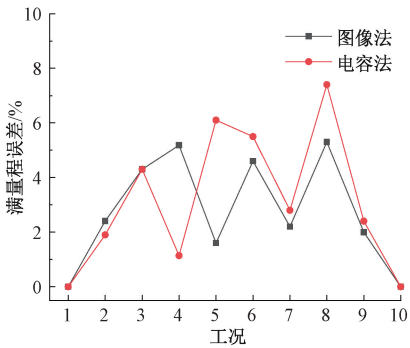


图 6 测量结果满量程误差
Fig. 6 Full scale error of the measurements

中心搭建的 C-TFB 冷模装置上进行气固两相流颗粒体积分浓度测量实验。

该 C-TFB 冷模装置采用有机玻璃材料制造,其结构如图 7 所示。装置主要由流化段、扩大段、气固旋风分离器、储料罐以及 U 型返料器构成。流化段管径和高分别为 0.1 和 1 m;扩大段管径和高分别为 0.2 和 1.8 m。实验流化风采用压缩空气,并由开孔率为 0.5% 的不锈钢分布板进行布气。流化颗粒为玻璃珠(颗粒特性如表 1),粒径范围为 60~181 μm ,平均粒径为 112.65 μm ,颗粒密度为 2 621 kg/m^3 。依据 Geldart 的颗粒分类方法,本实验的颗粒属于 B 类颗粒。颗粒在 C-TFB 内流化过程中,首先从 U 型返料器流入流化段底部,与流化风混合形成气固混合流体进入扩大段;在扩大段经过二级气体加速后流入气固旋风分离器;经气固分离后颗粒最后返回到 U 型返料器,准备进入下一个循环。

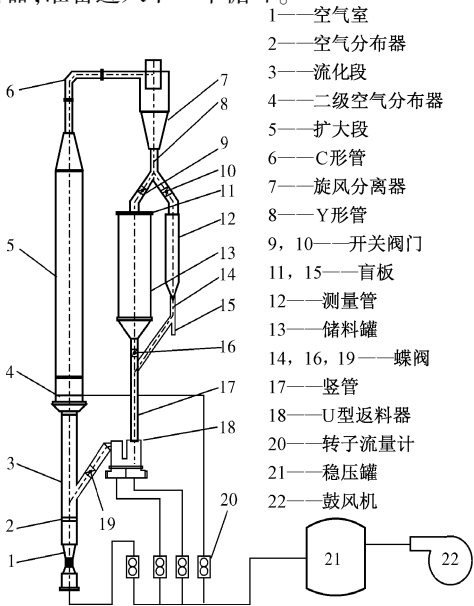


图 7 C-TFB 冷模装置结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the cold model C-TFB

表 1 实验颗粒的物理特性

Table 1 Physical properties of particles

材料	粒径范围/ μm	平均粒径/ μm	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	颗粒类型
玻璃	60~181	112.65	2621	B 类

图 8(a) 所示为本文系统实物图。ECT 传感器安装在流化段,如图 8(b) 所示,具体实验操作参数如表 2 所示。ECT 传感器电极采用紫铜材料,电极覆盖角为 31.87° ,电极轴向长度为 0.1 m。

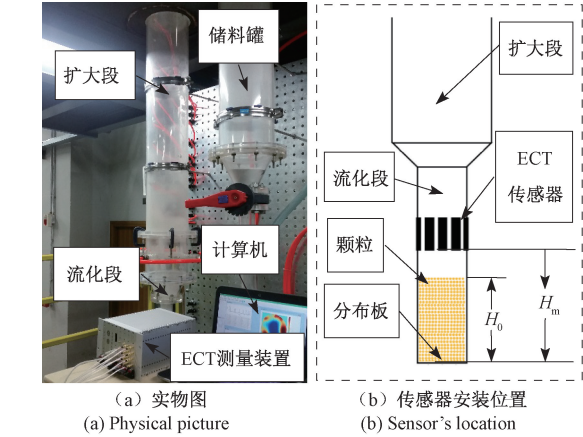


图 8 C-TFB 测量装置
Fig. 8 C-TFB measuring device

表 2 操作条件

Table 2 Operation conditions

二级气体风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5
测量高度 H_m/mm	200, 300, 400
床高 H_0/mm	168
进气量 $Q_{\text{gas}}/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	17.5

图 9 所示为不同测量高度下得到的 ECT 管道横截面和径向截面相分布图。从图 9 明显可以看出,气固两相流在 $H_m=200, 300, 400\text{ mm}$ 处的颗粒分布均呈现环核状;在 300 和 400 mm 床层测量高度处的颗粒浓度比较低,而在 200 mm 处的颗粒浓度比较高。分别用图像法和电容法对 C-TFB 内气固两相流颗粒体积浓度进行连续测量,其测量结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,两种算法得到的测量结果比较接近,图像法测量数据显示, C-TFB 内气固两相流体流经 $H_m=200, 300, 400\text{ mm}$ 处的固相体积浓度分别在 $0.26\sim 0.75, 0.09\sim 0.33, 0.04\sim 0.31$ 范围内上下波动,而电容法测得的流体颗粒体积浓度波动范围分别为 $0.27\sim 0.68, 0.09\sim 0.47, 0.04\sim 0.26$ 。

为了更直观地显示图像法和电容法颗粒体积浓度测量差异情况,对图 10 各测量高度下的测量数据做均值比较,结果如图 11 所示。从图 11 可见,颗粒平均浓度随着

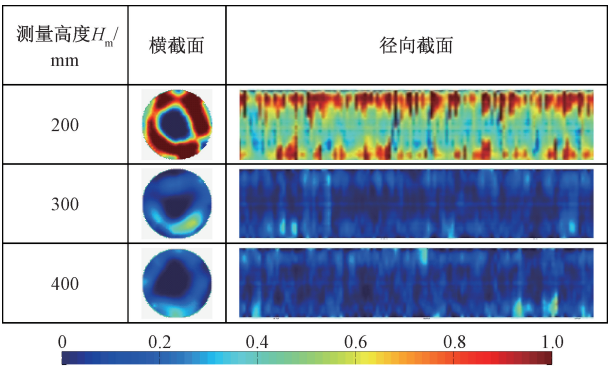


图 9 ECT 横截面及径向截面成像
Fig. 9 Cross and longitudinal sectional images reconstructed by ECT

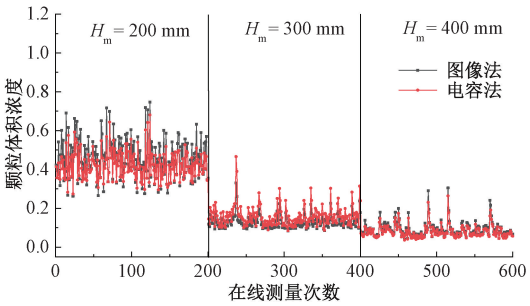


图 10 颗粒体积浓度测量值
Fig. 10 Measured particle volume concentration

测量高度的增加而下降;在 200 和 400 mm 测量高度,图像法测量值略高于电容法测量值,而在 300 mm 测量高度,图像法测量值低于电容法测量值。

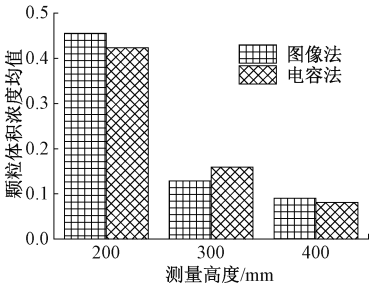


图 11 图像法和电容法颗粒浓度均值比较
Fig. 11 Comparisons of image-based and capacitance-based results

4 结 论

本文分析了颗粒浓度与 ECT 传感器输出电容信号之间的关系,研究了图像法和电容法气固两相流颗粒浓度在线无损检测方法,并在 Comsol+MATLAB 环境下这对两种检测方法进行定量评估。模拟结果显示,电容法

的浓度测量满量程误差小于 7.4%, 而图像法则优于 5.3%。建立了气固两相流颗粒浓度测量系统, 并在循环湍动流化床冷模装置上实现了床内流动颗粒体积浓度的在线无损测量。

参考文献

- [1] WANG H G, YANG W Q. Application of electrical capacitance tomography in circulating fluidized beds: A review [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115311.
- [2] WANG X X, HU Y Z, HU H L, et al. Evaluation of the performance of capacitance sensor for concentration measurement of gas/solid particles flow by coupled fields[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(12): 3754-3764.
- [3] LU B N, ZHANG J Y, LUO H, et al. Numerical simulation of scale-up effects of methanol-to-olefins fluidized bed reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 171: 244-255.
- [4] CARTER R M, YAN Y, LEE P. On-line nonintrusive measurement of particle size distribution through digital imaging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6): 2034-2038.
- [5] SUN J Y, YAN Y. Non-intrusive measurement and hydrodynamics characterization of gas-solid fluidized beds: A review [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(11): 112001.
- [6] MORGAN T B, HEINDEL T J. Sensitivity of X-ray computed tomography measurements of a gas-solid flow to variations in acquisition parameters [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 55: 82-90.
- [7] ZOU J, LIU C G, WANG H G, et al. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave doppler methods[J]. Powder Technology, 2020, 360: 112-119.
- [8] BROWN G, REILLY D, MILLS D. Development of an ultrasonic tomography system for application in pneumatic conveying[J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(3): 396-405.
- [9] 马敏, 吴轲, 胡亚峰, 等. 三角波激励 ECT 测量电路[J]. 计量学报, 2020, 41(11): 1410-1415.
MA M, WU K, HU Y F, et al. Triangular-wave signal driven measuring circuit in ECT[J]. ACTA Metrologica Sinica, 2020, 41(11): 1410-1415.
- [10] GLADDEN L F, SEDERMAN A J. Magnetic resonance imaging and velocity mapping in chemical engineering applications [J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2017(8): 227-247.
- [11] 张立峰, 朱炎峰. 极限学习机在电容层析成像中的应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 146-152.
- [12] ZHANG L F, ZHU Y F. Application of extreme learning machine in electrical capacitance tomography [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 146-152.
杨道业, 施源, 徐铎铎. 基于双截面 ECT 的气/固两相流参数检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 1968-1974.
YANG D Y, SHI Y, XU X F. Parameter measurement system for gas/solid two phase flow based on twin-plane electrical capacitance tomography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 1968-1974.
- [13] 马闻博, 孙衍山, 曾周末. 滑油磨粒大小的电容层析成像分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1984-1990.
MA W B, SUN Y SH, ZENG ZH M. Analysis of different size wear debris in oil by electrical capacitance tomography[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(12): 1984-1990.
- [14] LI Y, YANG W Q, XIE C G, et al. Gas/oil/water flow measurement by electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(7): 074001.
- [15] 孙先亮, 李健, 韩哲哲, 等. 基于数据驱动的卷积神经网络电容层析成像图像重建[J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2004-2016.
SUN X L, LI J, HAN ZH ZH, et al. Data-driven image reconstruction of electrical capacitance tomography based on convolutional neural network [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2004-2016.
- [16] CAO Z, XU L J, FAN W R. Electrical capacitance tomography for sensors of square cross sections using Calderon's method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 900-907.
- [17] ZHANG W B, WANG C, YANG W Q, et al. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement: A review [J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25: 174-188.
- [18] RAO S M, ZHU K W, WANG C H, et al. Electrical capacitance tomography measurements on the pneumatic conveying of solids [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, 40(20): 4216-4226.
- [19] LIU S, CHEN Q, WANG H G, et al. electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16: 135-144.

- [20] 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]. IEEE Proceedings-G Circuits Devices and Systems, 1992, 139(1): 89-98.
- [21] YE J M, WANG H G, LI Y. Coupling of fluid field and electrostatic field for electrical capacitance tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(12): 3334-3353.

作者简介



王胜南, 2017 年于东南大学获得博士学位, 现为扬州大学讲师, 主要研究方向为多相流检测技术。

E-mail: wangshengnan@yzu.edu.cn

Wang Shengnan received his Ph. D. degree from Southeast University in 2017. He is currently a lecturer at Yangzhou University. His main research interest includes multiphase flow measurement technology.