

研究论文

一种新的电容层析成像电极组合激励测量模式

张立峰¹, 王化祥²

(¹ 华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003; ² 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 电容层析成像图像重建为非线性不适定反问题, 其敏感场分布不均匀, 可获得的测量数据有限, 中心处物体的成像效果不佳。增加电极数目, 可获得更多的电容测量数据, 减小其不定性, 同时改善敏感场分布。但同时导致电容测量值变小, 测量精度下降。在保证电容测量精度的前提下, 提出了 24 电极组合式电容层析成像传感器结构, 研究了两种激励测量方案, 并与传统 12 电极电容层析成像传感器进行了对比分析, 包括电容测量值的大小及其动态测量范围、灵敏场分布的均匀性以及不同流型下的重建图像。仿真结果表明, 与 12 电极电容层析成像传感器相比, 采用 24 电极组合式电容层析成像传感器, 其电容测量值大, 可较好地保证测量精度, 其灵敏度分布更加均匀, 对中心处物体的成像质量明显提高。

关键词: 电容层析成像; 图像重建; 组合电极; 激励测量模式

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.03.026

中图分类号: TK 39

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 03-0860-06

A new combined-electrode exciting-measuring mode for electrical capacitance tomography

ZHANG Lifeng¹, WANG Huaxiang²

(¹ Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

² School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Electrical capacitance tomography (ECT) is a technique for two-phase flow measurement. The image reconstruction of ECT is a nonlinear and ill-posed inverse problem. The sensitivity distribution of ECT is inhomogeneous and only few measurements can be obtained, which causes the low quality of reconstructed images for the objects in the center. More measurements can be obtained by increasing the number of electrodes. But it will cause the decrease of measurement values and lower measurement accuracy. Under the condition of ensuring the measurement accuracy, the 24 combined-electrode sensor for ECT was proposed and two exciting-measuring modes were studied. The values and the dynamic range of measured capacitance values, the uniformity of sensitivity distribution and the reconstructed images of different flow regimes were compared with the conventional 12-electrode sensor. Simulation results showed that the sensitivity distribution was more uniform and the reconstructed images for the objects in the central locations were improved obviously by using 24 combined-electrode ECT sensor.

Key words: electrical capacitance tomography; image reconstruction; combined-electrode; exciting-measuring mode

2011-08-29 收到初稿, 2011-10-10 收到修改稿。

联系人及第一作者: 张立峰 (1979—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (11QG69); 国家自然科学基金项目 (60820106002)。

Received date: 2011-08-29.

Corresponding author: Dr. ZHANG Lifeng, hdlfzhang@126.com

Foundation item: supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (11QG69) and the National Natural Science Foundation of China (60820106002).

引言

电容层析成像 (electrical capacitance tomography, ECT) 技术由均布于管道外壁的阵列电极获取反映多相流分布的电容测量数据, 经数据采集系统进行信号处理, 送往计算机, 计算机根据一定的图像重建算法, 重建出被测对象某一截面的图像, 对重建图像作进一步分析处理, 提取特征参数, 以完成多相流其他参数的测量^[1-7]。

假设 ECT 系统有 M 个电极, 其独立测量值数目为 $M(M-1)/2$, 且由传感器管道的几何尺寸决定了电极数目 M 不能无限多, 因为一方面过多的电极将导致测量信号减小、信噪比下降, 极大地增加对数据采集系统的要求; 另一方面, 为获得较高精度的重建图像, 其像素数目远大于独立测量数, 导致 ECT 图像重建算法为严重的“欠定”问题^[8]。

有学者提出了旋转式电阻抗层析成像系统, 通过步进电机带动阵列电极旋转, 从而可极大增加投影数据, 提高重建图像的质量, 但该方法速度慢, 难以满足工业实时性要求^[9]。赵进创等^[10]、Peng 等^[11-12]对多电极激励测量模式均进行了相关研究。

ECT 的本质为利用电场的旋转对被测物场进行快速扫描, 可不采用步进电机旋转阵列电极, 而是通过改变激励及测量电极的位置, 既可有效增加投影数据, 又可保证成像快速性的要求。单独增加电极的数目可以增加投影数据, 但其作用有限, 因为过多的电极将导致其尺寸不断减小, 电容测量值变小, 在相同的数据采集精度下, 部分电容值无法测量。

本文研究了多电极组合激励测量模式^[13-15], 激励电极或测量电极将不再是单一的电极, 而是将多个电极进行组合, 视为一个电极, 这样电极尺寸可以做得较小, 通过不同的组合方案, 既可有效增加投影数据, 又能保证一定的测量精度和成像的实时性要求。

1 ECT 电极组合激励测量方案

目前已见报道的 ECT 系统常使用 12 电极, 既可保证一定的测量精度, 又可获得较好的重建图像^[16]。以 12 电极所占面积为基准, 选取传统的 12 电极 ECT 及基于电极组合激励测量方案的 24 电极 ECT 作为研究对象, 两种传感器的结构如图 1 所示。

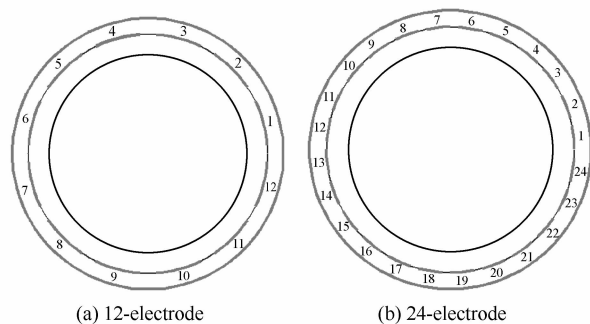


图 1 12 电极及 24 电极 ECT 传感器结构

Fig. 1 Structures of 12-electrode and 24-electrode sensors

相关的传感器参数: 管道内径为 125 mm, 管壁厚度为 12.5 mm, 外屏蔽层直径为 170 mm。图 1 中, 12 电极 ECT 传感器电极张角为 22.5° , 24 电极 ECT 传感器电极宽度为 12 电极 ECT 传感器电极的 $1/2$, 电极轴向长度相同, 两传感器所有电极的总面积一样, 并未额外增加电极用料。

对于图 1 中所示的传统 12 电极 ECT 传感器, 其激励测量模式为单电极激励单电极测量, 如电极 1 激励, 测量电极 1、2, 1、3, 直到 1、12 之间的电容。对于图 1 中的 24 电极 ECT 传感器, 本文研究了两种电极激励测量组合方案, 激励电极的组合分为两种方案: 第一种方案为每个电极只组合一次, 如 1、2 电极组合, 3、4 电极组合, 一直到 23、24 电极进行组合; 第二种方案为每个电极组合两次, 如 1、2 电极组合, 然后 2、3 电极组合, 3、4 电极组合, 直到 24、1 电极组合。两种激励方案使用相同的测量电极组合方案, 以 1、2 电极组合作为激励电极为例, 其测量电极组合方法为 3、4 电极组合, 4、5 电极组合, 5、6 电极组合, 直到 23、24 电极组合。

2 组合激励测量模式性能研究

2.1 独立测量数

对于图 1 中所示的传统 12 电极 ECT 传感器, 其独立测量数为 66。对于 24 电极 ECT 传感器的第一种组合方案, 经计算, 可得 186 个独立测量数, 为传统 12 电极 ECT 传感器的 2.82 倍; 而对于 24 电极 ECT 传感器的第二种组合方案, 其独立测量数为 252, 为传统 12 电极 ECT 传感器的 3.82 倍。

由此可见, 在总电极面积相同的情况下, 采用小尺寸电极进行组合的方案可有效增加传感器的独立测量数, 减小图像重建的欠定性。在总电极面积

相同及加工安装条件允许的情况下,若进一步采用更小尺寸的电极,如 36 电极、48 电极等,由于组合次数增加,必将进一步增加传感器的独立测量数。

2.2 电容测量值

对于传统的单电极激励单电极测量的 ECT 传感器,若增加电极数目,也可增加独立测量值,但过多的电极必将导致被测电容值减小,在相同的数据采集精度条件下,可能无法测量较小的电容值。因此综合管道尺寸及数据采集系统两方面的限制,只能增加较少的独立测量数。

而对于电极组合 ECT 传感器,小尺寸电极可以灵活地进行组合,从而决定其被测电容值,可以适应数据采集系统的测量精度。对所研究的两种激励测量方案所得电容测量值进行比较,由于 24 电极 ECT 传感器两种组合方案中只是激励电极的组合方式稍有差异,测量电极的组合方式相同,因此只比较 12 电极 ECT 传感器及采用第一种激励组合方式的 24 电极 ECT 传感器的电容测量值。

采用作者编制的仿真软件包^[17],仿真条件为管道充满空气(相对介电常数为 1),激励电压为 10 V。对于前者,当电极 1 激励时,可获得 11 个电容测量值;而后者当 1、2 组合电极激励时,可获得 21 个电容测量值,如图 2 所示。

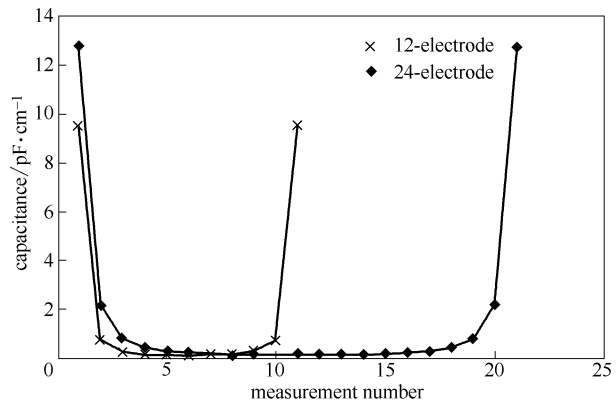


图 2 12 电极及 24 电极 ECT 传感器电容测量值
Fig. 2 Measured capacitances

两种 ECT 传感器仿真电容值的最小值、最大值及其动态范围(定义为最大测量值与最小测量值之比)见表 1。

由图 2 及表 1 可知,24 电极 ECT 传感器其最小及最大仿真电容值均比 12 电极 ECT 传感器大,而电容值的动态范围与 12 电极 ECT 传感器相差不多,因此,在有效增加独立测量数的情况下,未增

表 1 12 电极及 24 电极 ECT 传感器仿真电容值

Sensor	Minimum	Maximum	Dynamic range
	capacitance /pF·cm ⁻¹	capacitance /pF·cm ⁻¹	
12-electrode	0.1183	9.5154	80.4345
24-electrode	0.1307	12.7198	97.3206

加对数据采集系统的要求。

2.3 灵敏度分布的均匀性

对图 1 中两种传感器的敏感场灵敏度分布的均匀性进行了比较,定义灵敏度均匀性指标如下^[18]

$$P_{ij} = S_{ij}^{dev} / S_{ij}^{avg} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} S_{ij}^{avg} = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N S_{ij}(e) \\ S_{ij}^{dev} = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{e=1}^N [S_{ij}(e) - S_{ij}^{avg}]^2 \right\}^{1/2} \end{cases} \tag{2}$$

式中 S_{ij}^{avg} 及 S_{ij}^{dev} 分别为灵敏度矩阵的均值及标准差; N 为场域剖分单元数; S_{ij} 为电极对 i - j 的灵敏度,其定义为

$$S_{ij}(k) = \mu(k) \frac{C_{ij}^m(k) - C_{ij}^l}{C_{ij}^h - C_{ij}^l} \frac{1}{\epsilon_h - \epsilon_l} \tag{3}$$

其中, $\mu(k)$ 为由像素 k 面积决定的系数,并定义为总面积与该像素面积之比; C_{ij}^l 、 C_{ij}^h 分别为管内充满低介电常数相(介电常数为 ϵ_l)和高介电常数相(介电常数为 ϵ_h)时的电容值; C_{ij}^m 为管内充满两相混合介质时 i - j 电极对的测量电容值。

考虑到传感器的结构对称性,对于 12 电极 ECT 传感器,只需研究敏感场中 6 个位置的灵敏度分布,而对于 24 电极组合式 ECT 传感器,则需研究敏感场中 12 个位置的灵敏度分布,考虑综合效应,引入指标 P

$$P = \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k |P_{ij}| \right) / k \begin{cases} k = 6 & \text{12 电极} \\ k = 12 & \text{24 电极} \end{cases} \tag{4}$$

P 越小,传感器敏感场的均匀性越好,可提高中心区域物体重建图像的质量。

经计算得到 12 电极 ECT 传感器及 24 电极组合式 ECT 传感器敏感场均匀性指标 P 分别为 4.5693 及 3.6516。可见,24 电极组合式 ECT 传感器的敏感场分布更加均匀,有望提高重建图像质量。

2.4 重建图像

对传统 12 电极 ECT 传感器及 24 电极组合式

ECT 传感器的两种组合方案的成像效果进行了仿真研究。按以下原则选取仿真流型：①考察不同传感器对中心区域物体的成像效果；②多个物体分布时中心区域物体的成像效果。主要考察不同传感器对中心区域物体的重建效果、对多个物体的区分能力及重建图像对真实分布的形状保真度。

仿真实验中图像重建算法选取 Landweber 迭代算法，其算法如下^[19]

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}_k + \gamma \mathbf{S}^T (\boldsymbol{\lambda}^p - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \\ \mathbf{G}_0 = \mathbf{S}^T \boldsymbol{\lambda}^p \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{e}_k = \boldsymbol{\lambda}^p - \mathbf{S} \mathbf{G}_k$ ， γ 为迭代因子， $\mathbf{G}_k$ 为第 k 步迭代的图像灰度矩阵。

按上述原则选取的 8 种流型，其重建图像结果如图 3 所示。

为定量比较重建图像质量，同时计算图像相对误差（RE）及相关系数（CC），其定义见文献[8]。对图 3 中 3 种激励测量模式所得重建图像分别计算其图像相对误差及相关系数，结果见表 2。

表 2 图像相对误差及相关系数计算结果

Table 2 Numerical results of RE and CC

12-electrode		24-electrode(mode 1)		24-electrode(mode 2)	
RE	CC	RE	CC	RE	CC
5.9573	0.1350	1.0264	0.5699	1.0528	0.5496
1.1773	0.3310	0.3846	0.9335	0.3979	0.9291
0.8296	0.7564	0.8586	0.7445	0.8324	0.7688
0.7925	0.6879	0.6711	0.7733	0.5842	0.8355
0.7846	0.6384	0.6223	0.798	0.5764	0.8356
0.7515	0.7005	0.6533	0.8102	0.6421	0.8235
0.3734	0.8678	0.3865	0.8775	0.3912	0.8356
0.4424	0.7827	0.4876	0.7393	0.4720	0.7569

结合表 2 所得定量计算结果与图 3 所示重建图像，对 3 种激励测量模式进行分析，结果如下：由图 3 可知，对于流型 a、b、c，24 电极组合式 ECT 传感器所得重建图像明显优于 12 电极 ECT 传感器，尤其对于流型 a，12 电极 ECT 传感器所得重建图像明显失真，进一步显示灵敏度分布的不均匀性。对于 24 电极组合式 ECT 传感器，第一种组合方案与第二种组合方案相比，其重建图像质量相差不大，而对于流型 c，第二种组合方案所得重建图像对真实分布的形状保真度更好。

对于流型 d、e，24 电极组合式 ECT 传感器所得重建图像同样优于 12 电极 ECT 传感器。对于流型 d，12 电极 ECT 传感器所得重建图像中管壁处的物体对中心处物体影响较大，且两者存在相互影响，导致重建图像中两物体不能明显区分，且管壁处物体重建图像失真较大。而从 24 电极组合式 ECT 传感器所得重建图像中可以看出，中心处物体的成像效果较好，且可较明显区分两个物体，而对于 24 电极组合式 ECT 传感器第二种组合方案，其重建图像对真实分布的形状保真度优于第一种组合方案。对于流型 e，各传感器重建图像的对比情况与流型 d 相似。

对于流型 f，12 电极 ECT 传感器所得重建图像中，中心处物体的重建图像较差，且多个物体之间的相互影响较大，导致较大的伪影，多个物体不能很好地区分。24 电极组合式 ECT 传感器所得重建图像效果有较大提高，从重建图像中可清晰辨认中心处物体，成像效果较好，同时可观察到对于

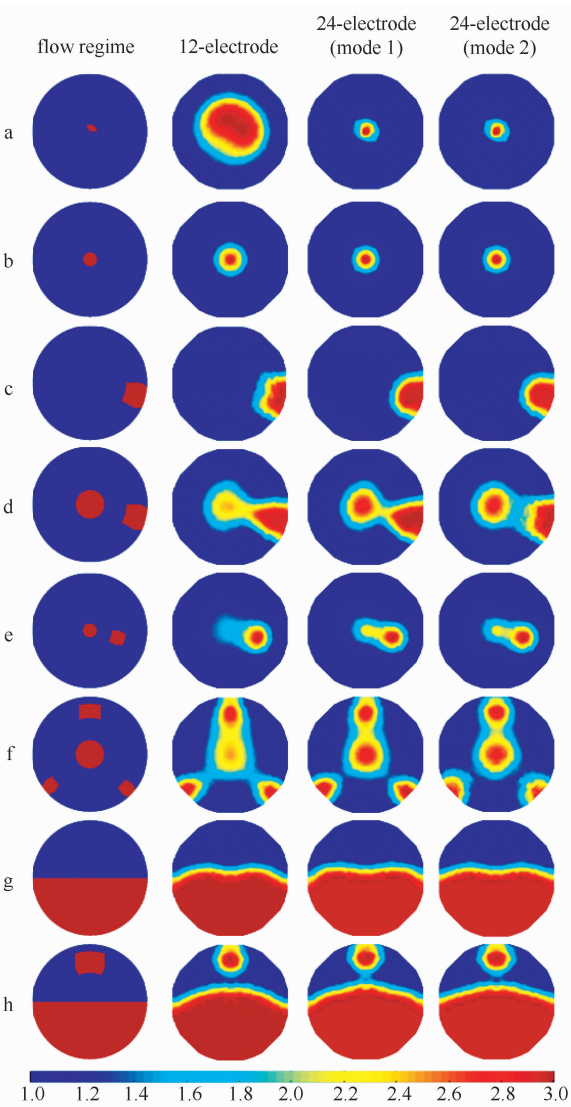


图 3 重建图像
Fig. 3 Reconstructed images

24 电极组合式 ECT 传感器第二种组合方案, 其对真实分布的形状保真度仍然优于第一种组合方案。

对于流型 g、h, 12 电极 ECT 传感器与 24 电极组合式 ECT 传感器所得重建图像相差不大。

综上所述, 24 电极组合式 ECT 传感器相对传统的 12 电极 ECT 传感器, 其图像重建质量可得到较大提高, 尤其是对中心区域物体的成像效果明显好转, 这归功于投影数据的增加及更为均匀的灵敏度分布。

经过对 24 电极组合式 ECT 传感器的两种组合方案的对比分析可知, 由于第二种组合方案所得投影数据多, 扫描角度更小, 其所得重建图像对真实分布的形状保真度更好, 但总体看来两种组合方案的图像重建质量相近, 然而投影数据相差较多, 若对图像重建的实时性有较高要求, 可考虑采用第一种组合方案。若采用 3 电极、4 电极以至更多电极进行组合, 则组合方案将增加, 需要从重建图像质量及图像重建的实时性两方面进行折中选取。

目前, 天津大学开发的基于 FPGA 的数字化电学层析成像系统, 其单截面数据采集速度可达 1000 幅/秒, 实时成像速度可达 300 幅/秒^[20], 其数据采集系统构建框图如图 4 所示。

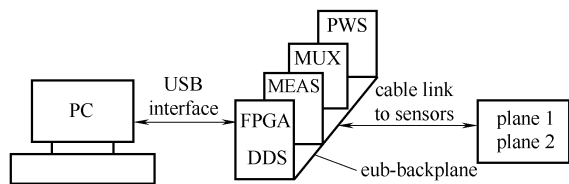


图 4 ECT 数据采集系统构架

Fig. 4 Platform of ECT data acquisition system

基于 FPGA 设计的激励电压 (FPGA DDS) 作用于电极, 通过测量模块 (MEAS) 获得电容测量值, 通过开关电路 (MUX) 选择激励及测量通道, 最后测量数据通过 USB 接口传至 PC 机。

采用组合电极激励测量方案后, 仅需对原有数据采集系统的开关电路 (MUX) 进行修改, 以实现不同的激励测量策略, 控制软件做相应调整, 而其他电路无须调整, 硬件实现方便。由于 ECT 数据采集速度可达 1000 幅/秒, 因此对本文研究的 24 电极组合激励测量模式, 粗步估算仍可达到较高的数据采集速度, 亦可达到实时成像的要求。

3 结 论

本文针对传统的 12 电极 ECT 传感器投影数据

量少的情况, 研究了 24 电极组合式 ECT 传感器, 讨论了两种组合方案, 均可有效增加投影数据。对 24 电极组合式 ECT 传感器的电场分布、电容测量值、灵敏度分布的均匀性进行了分析。最后选取 8 种流型, 对不同的传感器进行了图像重建, 仿真结果表明, 24 电极组合式 ECT 传感器的两种组合方案所得重建图像质量较 12 电极 ECT 传感器有较大提高, 且第二种组合方案对真实分布的形状保真度更好。在目前的硬件水平下, 可从重建图像质量及图像重建的实时性两方面进行折中选取组合电极方案。

References

- [1] Yang W Q, Beck M S, Byars M. Electrical capacitance tomography—from design to applications [J]. *Meas. & Control*, 1995, **28**: 261-266
- [2] Beck M S, Williams R A. Process tomography: a European innovation and its applications [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**: 215-224
- [3] Xie C G, Huang S M, Holy B S, Thorn R, Lenn C, Snowden D, Beck M S. 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**: 89-98
- [4] Liu S, Yang W Q, Wang H, Jiang F, Su Y. Investigations of square fluidized beds using capacitance tomography: preliminary results [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 1120-1125
- [5] York T. Status of electrical tomography in industrial applications [J]. *J. Electron. Imaging*, 2001, **55**: 608-619
- [6] Huang Zhiyao (黄志尧), Wang Baoliang (王保良), Li Haiqing (李海青). Applications of electrical capacitance tomography technique to flow pattern display and voidage measurement of two-phase flow [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2001, **52** (11): 1035-1038
- [7] Lei Jing (雷兢), Liu Shi (刘石), Li Zhihong (李志宏), Sun Meng (孙猛), Liu Jing (刘靖). An image reconstruction algorithm applicable to on-line electrical capacitance tomography [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (6): 1421-1425
- [8] Yang W Q, Peng L H. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**: R1-R13
- [9] Huang C N, Yu F M, Chung H Y. Rotational electrical impedance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**: 2958-2966
- [10] Zhao Jinchuang (赵进创), Fu Wenli (傅文利), Zhang Jinxiong (张锦雄), Liang Jiarong (梁家荣). A new method to design sensors for use with electrical capacitance

- tomography [J]. *Industrial Instrumentation & Automation* (工业仪表与自动化装置), 2004 (2): 3-5, 23
- [11] Peng L H, Xue P, Lu G. Modelling of electrical capacitance tomography sensor with asymmetric electrode configuration [C]. Tokyo, Japan, 2009: 1-7
- [12] Xue P, Peng L H. A 36-electrode electrical capacitance tomography system using asymmetric electrode strategy [C]. Beijing, China, 2010: 807-814
- [13] Polydorides N, McCann H. Electrode configurations for improved spatial resolution in electrical impedance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**: 1862-1870
- [14] Martínez Olmos A, Carvajal M A, Morales D P, García A, Palma A J. Development of an electrical capacitance tomography system using four rotating electrodes [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2008, **148**: 366-375
- [15] Kjell J A, Saba M. Comparison of different measurement protocols in electrical capacitance tomography using simulations [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, **56**: 2119-2130
- [16] Yang W Q, York T A. New AC-based capacitance tomography system [J]. *IEE Proc. Sci. Meas. Tech.*, 1999, **146**: 47-53
- [17] Zhang Lifeng (张立峰), Wang Huaxiang (王化祥). Image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on wavelet neural networks [J]. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, **28** (35): 39-43
- [18] Wang Huaxiang (王化祥), Zhang Lifeng (张立峰), Zhu Xueming (朱学明). Optimum design of array electrode of ECT system [J]. *Journal of Tianjin University* (天津大学学报), 2003, **36** (3): 307-310
- [19] Yang W Q, Spink D M, York T A, McCann H. An image-reconstruction iteration method for electrical-capacitance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**: 1065-1069
- [20] Wang H X, Zhang L F. Identification of two-phase flow regimes based on support vector machine and electrical capacitance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**: 114007