

A Digitized Dual-Modal System Based on Single Electrode*

LIU Ya, WANG Huaxiang*, GAO Zhentao

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Huabei Petrochemical Branch Company, Renqiu Hebei 062552, China)

Abstract: Electrical resistance tomography (ERT) and electrical capacitance tomography (ECT) have different fields of application. In order to expand the measurement range, combining the both ECT and ERT array electrode modalities to form dual-modal structure is generally used. This paper presents a novel single electrode dual-modal sensor based on the study of traditional ECT sensor. It can eliminate the interaction between two sensitive fields effectively and can operate in either single ECT/ERT modality or dual-modality. A digital system is designed in this paper which makes full use of FPGA and DSP, and realizes the full digital quadrature demodulation. Both the systematic speed and precision are improved. Several Key modules in system, including the single electrode dual-modal sensor, excitation signal source module, resistor and capacitor switching circuit and phase sensitive demodulation are analyzed in this paper. Simulation and experiments show that the system can operate stably, flexibly, and expand the measurement range.

Key words: single electrode dual-modal; resistance/capacitance conversion; digital demodulation; image reconstruction

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.07.014

基于单电极双模态数字化系统设计*

刘亚, 王化祥*, 高振涛

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 华北石油采油工艺研究院, 河北 任丘 062552)

摘要: 由于电阻层析成像(ERT)和电容层析成像(ECT)具有不同的应用范围,为了拓宽测量范围,通常采用ECT和ERT阵列电极组合形成双模态结构。作者在传统ECT传感器研究基础上,提出了一种新颖的单电极双模态传感器结构,并有效消除了两模态的相互影响,实现单模态或双模态运行。本文设计的数字化系统,充分利用FPGA和DSP,实现了全数字正交序解调,系统的速度和精度都得到了提高。对系统中单电极双模态传感器、激励信号发生模块、电阻/电容转换电路及相敏解调单元等进行了分析。实验表明,该系统工作稳定、使用灵活,明显拓展测量范围。

关键词: 单电极双模态; 电阻/电容转换; 数字解调; 重建图像

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)07-0936-05

电阻/电容层析成像(ERT/ECT)是目前电学成像技术最为成熟的两种工作模态。通常双模态结构分别采用ECT和ERT两套阵列电极进行组合^[1]。然而,由于电阻及电容两模态分别独立运行,难以实现对多相流同一截面的同步测量,为此作者提出了一种单电极双模态阵列电极结构^[2-6],不仅简化双模态电极结构设计,增强鲁棒性,而且有效拓展测量范围。

传感器径向截面结构由三层构成:外层为金属管,起结构固定作用,同时用于减小外部环境的电磁干扰,防止外界物质的变化影响被测值;中间为薄的绝缘物质层;阵列电极等间距地附设在绝缘物质层的内径上。

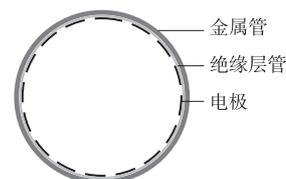


图1 单电极双模态传感器

1 ERT/ECT 双模态传感器设计

设计的单电极双模态阵列电极如图1所示。传

项目来源: 国家自然科学基金重点项目(60532020); 国家自然科学基金国际重大项目(60820106002); 天津市自然科学基金项目(11JCYBJC06900); 国家自然科学基金项目(61102096)

收稿日期: 2012-02-19 修改日期: 2012-03-07

$$\nabla \cdot [\nu(z) \nabla \varphi(z)] = 0 \quad (1)$$

其中, $\nu(z)$ 为被测介质的电导率或介电常数, $\varphi(z)$ 表示相应电势分布函数。

由于设定为似稳场,二者的耦合关系可忽略,当 $\nu(z)$ 视为常数时,方程(1)可简化为 Laplace 方程,

$$\Delta \varphi(z) = 0 \quad (2)$$

研究的区域为管道内部 ($\Omega = \{z \mid |z| \leq R\}$), R 为管道半径,激励电极上的电势为 $\varphi = V_0$,其余电极接地,即 $\varphi = 0$ 。在 k -by- k 激励模式(在 k 个相邻电极上施加激励电压,其余 $N-k$ 个电极与地同电位)^[7]中,设 γ_1 和 γ_2 分别为 k 相邻激励电极与其余 $N-k$ 接地(或虚地)电极对应的边界, θ_0 和 θ_1 分别为边界 γ_1 对应圆弧的起始角和终止角。对任一测量电极,设其对应的弧长的起始角和终止角分别为 α 和 β ,则单位长度电极上获取的电容值即电阻抗虚部的表达式为

$$C = \frac{Q}{V_0} = \frac{\int_{\text{Re}^{i\alpha}}^{\text{Re}^{i\beta}} \varepsilon \frac{\partial \varphi(z) |dz|}{\partial n}}{V_0} = \frac{\varepsilon}{\pi} \text{Re} \left[\ln \left(\frac{e^{i\alpha} - e^{i\theta_1}}{e^{i\alpha} - e^{i\theta_0}} \right) - \ln \left(\frac{e^{i\beta} - e^{i\theta_1}}{e^{i\beta} - e^{i\theta_0}} \right) \right] \quad (3)$$

而单位长度电极上获取的电导值,即电阻抗实部的表达式为

$$G = \frac{I}{V_0} = \frac{\int_{\text{Re}^{i\alpha}}^{\text{Re}^{i\beta}} \sigma \frac{\partial \varphi(z) |dz|}{\partial n}}{V_0} = \frac{\sigma}{\pi} \text{Re} \left[\ln \left(\frac{e^{i\alpha} - e^{i\theta_1}}{e^{i\alpha} - e^{i\theta_0}} \right) - \ln \left(\frac{e^{i\beta} - e^{i\theta_1}}{e^{i\beta} - e^{i\theta_0}} \right) \right] \quad (4)$$

由式(3)和式(4)不难看出,同一电极上可以同步获得阻抗的虚部和实部信息,这种结构能够测量导电性和非导电性介质,且传感器的电学参数可由几何尺寸解析表达。传感器的半径 R 并不影响传感器的性能,传感器上获取的信号,除物质的性质外,仅与电极对应的圆心角和轴向长度相关。在多相流检测中,ERT 测量对象的电阻值约为 $10 \Omega \sim 10^4 \Omega$, ECT 测量对象的电容范围约为 $10^{-15} \text{ F} \sim 10^{-11} \text{ F}$ 。

设计的单电极双模态传感器,管道内径为 12.5 cm,外径为 15 cm,电极高 7.7 cm,宽 2 cm,16 电极均匀安装在管道内壁。

2 整体框架

数字化的 ERT/ECT 系统如图 2 所示,主要包括 4 个单元^[8]:敏感电极阵列;数据采集与信号处理单元;图像重建单元及图像显示单元。其中,数据采集与信号处理单元主要由 FPGA 和前端电路构成,图像重建单元由主控制器 DSP 实现。由于 ERT (ECT) 模态硬件系统具有一定相似性,仅仅激励测

量模式有所不同,因此可简化系统设计。

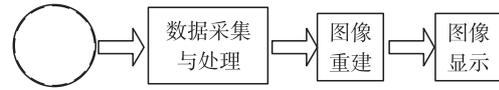


图2 双模态系统的结构框图

3 关键单元设计

3.1 逻辑控制单元

本文采用在 FPGA 内嵌入 8 bit 微控制器软核的方案,控制 ERT 和 ECT 系统多路选通单元、PGA 增益调节以及相敏解调开启等。由 DSP 启动数据的采集,ADC 采集的数据在 FPGA 内进行预处理后,先暂存到 FPGA 构建的 FIFO 中,然后由 DSP 通过扩展存储器接口读入 DSP 内存进一步处理,控制单元结构如图 3 所示。

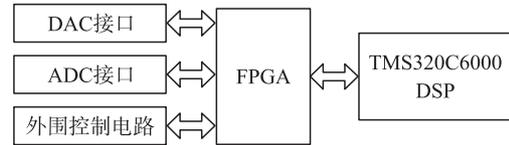


图3 逻辑控制单元

3.2 信号发生单元

ECT 系统采用正弦电压信号作为激励,单激励单测量模式,激励频率为 500 kHz。而 ERT 采用相邻电流激励/相邻电压测量的四电极工作模式,激励频率选为 100 kHz。考虑两种模态电极激励、选通灵活方便,作者设计了基于 FPGA 的电压和电流激励信号生成单元^[9],如图 4 所示。

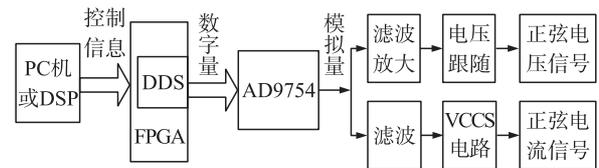


图4 激励信号生成单元

VCCS 电路将电压激励信号转换成电流激励信号。测试表明,当输出频率为 1 MHz 时,输出阻抗可达 200 k Ω ,可以且满足 ERT 对电流源的要求。

3.3 测量单元

3.3.1 电阻测量电路

ERT 系统采用相邻电流激励/相邻电压测量的四电极方式,如图 5 所示。电极对(2,3)到(16,1)共 15 个电阻为敏感场相邻电极之间的等效电阻。电极 2 具有最高电位,电极 1 电位最低。测量电极对从(2,3)到(16,1),差分放大电路的共模输入电压由最大变化到最小,要求放大电路具有高的共模抑制比,本系统只测量其中 13 个,对两端的(2,3)

和(16,1)电极对不测量。设由放大器获得的被测电阻两端的电压为 U_x , 则被测电阻为 $R_x = U_x/I_x = U_x/I_s$ 。被测电阻两端的电压信号经过差分放大后进入信号预处理单元。

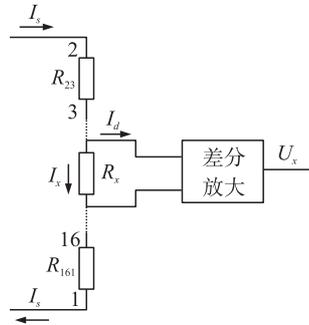


图5 电流激励/电压测量模式电路

3.3.2 电容测量电路

电容测量电路的核心为 C/V 转换^[10-11]电路, 采用具有抗杂散电容能力的交流法, 如图6所示。

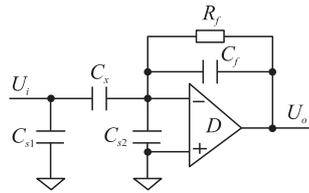


图6 交流法 C/V 转换电路

C/V 转换电路输出电压为

$$U_o = -\frac{j\omega C_x R_f}{1+j\omega C_f R_f} U_i \quad (5)$$

幅值响应为

$$|G(C_x)| = \frac{\omega C_x R_f}{\sqrt{1+(\omega C_f R_f)^2}} \quad (6)$$

相位响应

$$\varphi(C_x) = -90^\circ - \arctan(\omega C_f R_f) = \text{const}$$

系统设计选取适当的 R_f, C_f , 使之满足 $\omega C_f R_f \ll 1$ 条件, 输出电压为

$$U_o = -j\omega C_x R_f U_i \quad (7)$$

3.4 相敏解调

由 R/V 或 C/V 转换电路输出的交流电压信号, 经过可编程增益放大器后, 经 A/D 转换为数字量, 由 FPGA 完成相敏解调^[12]。

常用的数字解调方法有 FFT 解调和正交序列解调^[11]。本系统采用正交序列解调,

设被解调信号 $u(n)$ 为

$$u(n) = A \cos\left(\frac{2\pi}{N}n + \theta\right) \quad (8)$$

同相参考信号 $i(n)$ 和正交参考信号 $q(n)$ 分别为

$$i(n) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \quad (9)$$

$$q(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \quad 1 \leq n \leq N-1 \quad (10)$$

其中 N 为每个激励信号周期的采样点数, θ 为由介质或电路引起的相移。当 N 为偶数时, 同相分量(实部)和正交分量(虚部)分别为

$$R = \sum_{n=0}^{N-1} i(n)u(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \cdot A \cos\left(\frac{2\pi}{N}n + \theta\right) = \frac{1}{2}NA \cos\theta \quad (11)$$

$$I = \sum_{n=0}^{N-1} q(n)u(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \cdot A \cos\left(\frac{2\pi}{N}n + \theta\right) = \frac{1}{2}NA \sin\theta \quad (12)$$

采用正交序列解调所需的乘法次数少, 例如用 FFT 解调时需要 $\frac{1}{2}N \log_2 N$ 次乘法, 而正交序列解调仅需 $2N$ 次乘法。

FPGA 实现正交解调的具体框图如图7所示。设计中采用 DDS IP 核产生的正弦和余弦序列作为解调的参考信号, 保证了参考信号与激励信号、测量信号在频率上的完全一致性, 进而保证了解调结果的准确性。

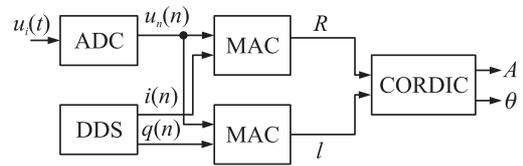
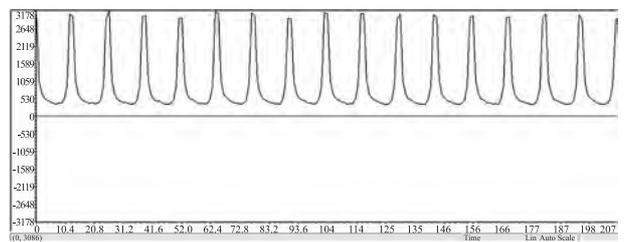
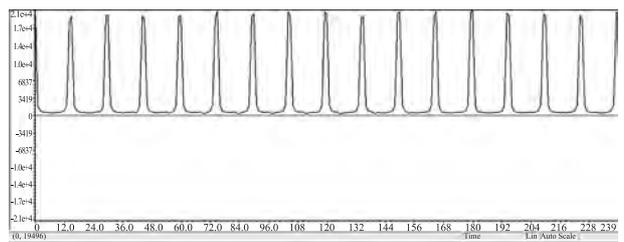


图7 FPGA 实现正交解调的具体框图

图8为利用 FPGA 进行正交序列解调, 分别获得的 ERT/ECT 模态测量电压 U 形曲线。



(a)ERT模态



(b)ECT模态

图8 FPGA 正交序列解调结果

图9为 ERT/ECT 双模态系统总体框图。

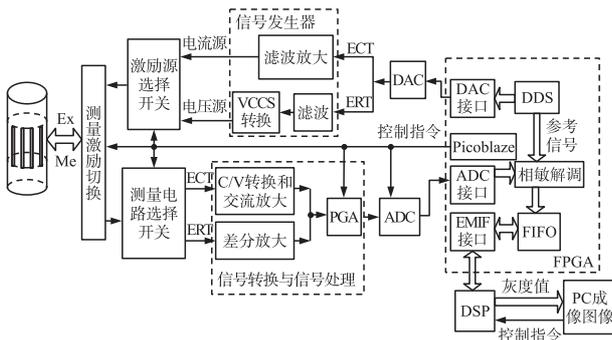


图 9 ERT/ECT 双模态系统结构

4 系统性能实验研究

4.1 系统重复性测试

系统对电容或电阻进行重复测量,连续记录 n 个数据,其结果为 x_1, x_2, \dots, x_n ,其标准差可由 Bessel 公式^[13] 计算

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (13)$$

n 为重复测量示值的数目,这里取为 50。

对仪器示值重复性以扩展不确定度 ks 表征^[14],即仪器的示值重复性数值为

$$U_p = ks = k \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (14)$$

系数 k 与一定的置信概率 P 相对应。一般认为重复条件下多次测量的结果服从正态分布,取 $P=95\%$ 时,通过查表可知 $k=2$ 。

对 ERT 系统的评价,被测电阻以精密电阻箱作为标准,被测阻值分别取 200 Ω , 400 Ω , 800 Ω 和 1 000 Ω , ERT 系统测量获得的测量结果如图 10 所示。

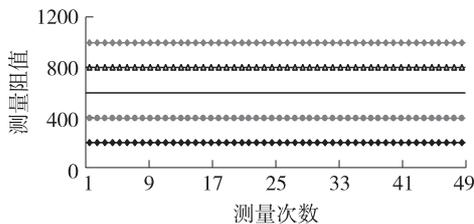


图 10 ERT 单通道电阻测量值

示值重复性分别为: 0.591 217, 0.470 315, 0.141 258, 0.069 944。

对 ECT 系统的评价,将一个 2.0 pF 的瓷片电容接入测量通道,在正弦激励信号幅值为 13.50 V 情况下,以标准电容箱为基准,进行重复测量 50 次,测量结果如图 11 所示,示值重复性为:0.000 44。其

信噪比 $SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i)^2}$, 计算为

78.93 dB。

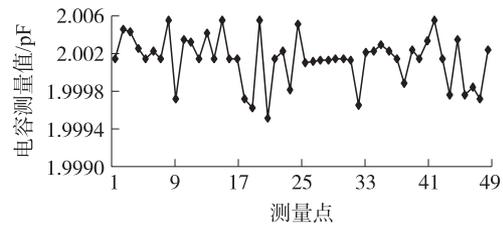


图 11 激励电压幅值为 $V_{pp}=13.50$ V

4.2 系统实时性测试

在工业生产过程中,过程成像要求系统具有较高的实时性。影响过程成像系统整体速度的因素:①数据采集速度;②算法实现速度;③数据传输速度;④图像显示速度。对于 ECT/ERT 硬件系统,只讨论前三个方面的因素。

以 ECT 系统为例,重建一幅图像需要 $16 \times 15 = 240$ 个电压幅值数据,由于测量数据的互易性,系统只需测量 120 个独立测量数即可重建一幅图像。FPGA 采集一帧数据所需时间 $t_1 = 16 \times [15 \times (NT + t_m) + t_e] / 2$,本系统采用 500 kHz 正弦信号作为激励,激励信号的周期 $T = 2 \mu s$; N 为获得一个电压幅值数字相敏解调所需的 A/D 采样周期数, N 的取值会影响到系统的解调精度和数据采集速度,当 N 值越大,系统的解调精度越高,而数据采集速度相对降低,综合考虑,本系统中 N 值取为 20,即每 20 个激励信号周期获得一个电压幅值数据; t_e 为激励电极切换以及激励电极切换后被测区域电场稳定所需时间; t_m 为测量电极切换以及 PGA 增益设置所需时间。其中, t_e, t_m 仅为几十 ns,此时, $t_1 = 4 800 \mu s$ 。

图像重建算法主要涉及矩阵运算,通过大量乘法和加法运算实现。本系统选用的 TMS320C6416 DSP 内部集成有两个硬件乘法器,完成 4 个 16 bit (16 bit 的乘法运算只需一个时钟周期。DSP 的系统工作时钟为 600 MHz,每秒钟可以实现 2400MMAC (百万次乘累加) 运算。如果每幅图像用有限元剖分为 812 个单元,每 120 个测量数据重建一幅图像,则在重建算法实现过程中需要进行 $812 \times 120 = 97 440$ 次 MAC 运算。利用该款 DSP 完成以上运算只需 $t_2 = 40.6 \mu s$ 。

DSP 实现重建算法后,获得代表一幅图像的 812 个灰度值,每个灰度值由一 16 bit 数据构成,这样每幅图像由 812 个 16 bit 数据构成,数据通过一个 32 bit/33 MHz 的 PCI 总线传送给上位机,该总线的带宽为 132 MB/s,所以,传送一幅图像的灰度值数据所需时间为 $t_3 = 12.3 \mu s$ 。因此,重建一幅图像所需时间为 $t = t_1 + t_2 + t_3 = 4852.9 \mu s$,系统的实时成像速度可达 200 幅/s。

4.3 静态实验

采用设计的单电极传感器对两种典型分布进行测试,并用共轭梯度迭代算法^[15]进行图像重建,分别为(1)有机玻璃管在空气中模拟的环状流,如图12(a)所示;(2)有机玻璃管在水中模拟的环状流,如图13(a)所示,与实验室已有的双模态成像系统(ERT/ECT电极交叉放置于同一个截面)所得的成像效果12(b)和13(b)所示,成像质量略有改善,而成像速度明显改善。

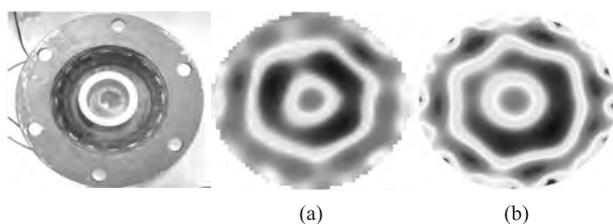


图12 中心流的图像重建

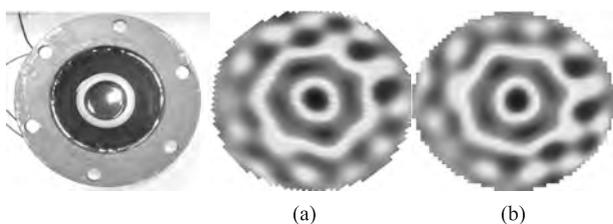


图13 环状流的图像重建

5 结束语

本系统采用DSP+FPGA的设计方案,结构灵活,便于模块化设计、通用性强和实时信号处理能力强,既发挥了DSP的实时信号处理的优势,又充分发挥了FPGA的逻辑控制和硬件可编程的优势,实现两种控制器的优势互补,在不降低成像质量的前提下,提高了系统的成像速度,简化系统设计,增强鲁棒性。初步试验证明,

作者设计的单电极双模态成像系统有效简化双模态系统设计,通过实验及重建图像证明其可行性,并且具有工作稳定、使用灵活、可有效拓展测量范围等优点。

参考文献:

- [1] 潘卫国,李杨,曹锋敏,等.过程层析成像技术的现状与展望[J].仪器仪表学报,2004,25(4):1035-1036.
- [2] 何永勃.电阻抗(ECT/ERT)双模态成像技术研究[D].天津大学,2006.
- [3] Johansen G A, Fr T, Hjertakery B T, et al. A Dual Sensor Flow Imaging Tomographic System [J]. Meas. Sci. Technol., 1996, 7: 297-307.
- [4] Marashdeh Q, Warsito W, Fan L S, et al. A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(3):426-433.
- [5] 王化祥,王超,陈磊. EIT系统复合电极结构性能分析及优化设计[J].仪器仪表学报,2002,23(2):189-191.
- [6] 张凌峰,王化祥.基于FPGA和DSP的电阻层析成像数据采集系统[J].传感器技术学报,2011,7(24):1-6.
- [7] 曹章.电学层析成像系统模型_算法研究[D].天津大学,2007.
- [8] 张学辉,王化祥.电容层析成像数字化系统设计[J].传感器技术学报,2007,20(8):1826-1830.
- [9] 王化祥,崔自强.基于FPGA的电阻抗成像系统激励信号源[J].电子器件,2007,30(1):90-96.
- [10] 高彦丽,杨蓓,邵富群,等.用于ECT系统的低成本、宽带微小电容测量电路[J].电测与仪表,2004,9(41):29-32.
- [11] 赵霞,于晓洋,陈德运,等.电容层析成像系统的电容测量电路[J].电测与仪表,2002,1:22-25.
- [12] 朱学明,王化祥,张立峰.低通滤波器对电容成像系统实时性影响研究[J].仪器仪表学报,2004,6(25):816-819.
- [13] 欧俊豪,王家生,徐漪萍,等.应用概率统计[M].天津:天津大学出版社,1999.
- [14] 王化祥.自动检测技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [15] 陈宇,孙帆,张健.三项共轭梯度的电容层析成像图像重建算法[J].哈尔滨理工大学学报,2009,6(14):42-46.



刘亚(1987-),女,硕士研究生,现就读于天津大学电气与自动化工程学院,主要研究方向为电学层析成像技术,liuya4939@163.com;



王化祥(1945-),男,教授,博士生导师,天津电气与自动化工程学院,主要研究方向为多相流层析成像技术,hxwang@tju.edu.cn。