

液-固两相系中超声层析成像实验研究

汪烈成, 苏明旭, 蔡小舒

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于几何声学原理,应用半柱面晶片超声换能器发射扇形束超声波,设计了环形超声换能器阵列,搭建了多通道同步数据采集系统,形成了一套透射式超声层析成像测试装置.研究了二值逻辑反投影图像重建算法,此算法和测试装置构成了透射式超声层析成像系统,对聚四氟乙烯隔板和圆柱体进行实验.图像重建结果表明,该系统能够定位成像物体的位置,确定其大小和形状.将单个圆柱体二值反投影算法的重建图像与设定值比较,成像误差小于6%.

关键词: 液-固两相系; 超声层析成像; 换能器阵列; 图像重建; 二值逻辑; 同步数据采集
中图分类号: TK 31 **文献标志码:** A

Experimental Study on Ultrasound Computerized Tomography on Liquid-solid Two-phase System

WANG Liecheng, SU Mingxu, CAI Xiaoshu

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on ultrasonic geometric acoustics principle, a circular ultrasonic transducer array was designed, where fan-shape beam ultrasonic transmitters were applied to emit ultrasonic pulses. Further, with a multi-channel synchronous data acquisition system, the whole transmission-mode ultrasound computerized tomography (UCT) device was developed. The basic principle of binary logical back projection reconstruction algorithm (BLBP) and its improvement were presented in detail, followed by experiments on a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate and rod. The results show that the system can be used to identify the size, shape and location of objects. Comparing the images reconstructed by BLBP with given values, their errors are within 6% in the case of a single circular rod.

Key words: liquid-solid two-phase system; ultrasound computerized tomography; transducer array; image reconstruction; two-value logic; synchronous data acquisition

以超声波为信息检测手段构成的计算机层析成像系统称为超声层析成像系统(UCT)^[1]. UCT 的发

展为医学工程提供了一种安全、无损、低成本、不需注射药物、对机体组织分辨率较高的诊断工具,易确

收稿日期: 2013-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176128, 51076106); 上海市教委重点学科资助项目(12ZZ142)

第一作者: 汪烈成(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 超声层析成像. E-mail: liechengw@gmail.com

通讯作者: 苏明旭(1973-), 男, 教授. 研究方向: 光散射和超声散射颗粒测量理论和技术. E-mail: sumxmail@163.com

定病变的位置、大小及性质^[2]. 在工业过程监测中, UCT 技术能提供流场二维/三维参数分布的有效信息, 以超声波为信息检测手段的过程层析成像技术得到迅速发展. 徐立军^[3]研制了一种基于扇形几何声束的透射式超声层析成像系统来判断气液两相流中的气相流型及其含气率. Utomo^[4]利用透射式超声层析成像原理和过滤迭代背向投影图像重建反演算法测量了空气、二氧化钛和水三相流中气相和颗粒相的流动状态. Rahim^[5]基于透射式超声层析成像原理, 设计了非侵入式超声换能器阵列, 并提出杂交二值反投影图像重建算法. Rahiman^[6]在圆形容器周围均匀布置了 13 个发射和接收超声换能器, 应用于高声阻抗的混合介质测量中.

对于实际工业应用场合, 对成像系统在精度、分辨率、实时性上要求均较高. 基于此, 本文以几何声学近似为理论基础, 运用透射模式 UCT 原理, 研制了环形的超声换能器阵列, 发展二值逻辑反投影图像重建算法, 形成一套透射模式超声层析成像系统, 实现液-固两相体系截面信息的实时测量.

1 超声层析成像系统研制

基于几何声学近似的超声层析成像技术是指根据声传播路径物体的几何投影, 结合相应的重建算法对物体成像, 并据此判定成像物体的位置、形状、大小及数目等参数^[7]. 超声传感器阵列是层析成像系统获取投影信息的单元, 其结构形式是决定系统独立检测参量数目、测量数据误差及其采集效率的关键. 其中, 数据采集效率反映测试系统的动态性能, 独立检测参量和数据误差则影响整个系统的静态成像性能^[8-9].

层析成像的理论依据为 Radon 变换和 Radon 反变换^[10], 由其定义, 只有在投影角无限多, 且每个投影角度下的投影线足够多的情况下才能获得对象的“精确重建”. 换言之, 超声换能器阵列的独立检测量必须足够多, 才能从硬件系统上确保对象的图像重建质量. 由于扇形束扫描方式数据采集效率较固定收发换能器方式更高, 因此, 本文按扇形束扫描方式设计了相应的换能器.

1.1 超声换能器阵列研制

设计了一种半圆柱形的压电晶片, 换能器结构如图 1 所示, 最大的特点是其声辐射角度范围近似 180°, 且具有较均匀的辐射特性, 接收特性也与此相似. 鉴于超声层析成像系统要求超声换能器中心频

率高、信号持续时间短(如窄脉冲)、双程插入损失低, 且工作于厚度方向, 采用了克里姆霍尔兹(KLM)等效电路来描述超声换能器的厚度振动模式^[11]. 前端声学端口阻抗匹配采用“四分之一波长匹配层”, 后端声学端口阻抗匹配采用钨粉和环氧树脂的混合物.

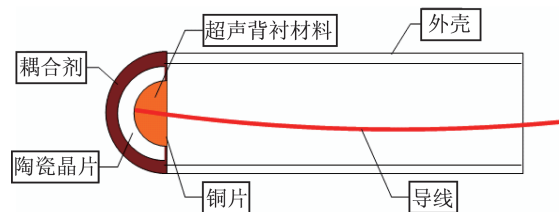


图 1 换能器结构示意图

Fig.1 Diagram of the transducer structure

制作了由 16 个频率均为 2.25 MHz 的超声换能器构成的换能器阵列, 如图 2 所示. 实验采用一发多收形式, 一次扫描可以获得 240 (16 × 15) 个独立声学信号(不考虑自发信号), 较文献^[12]采用了 42 个超声换能器(6 个发射, 36 个接收)得到 216 (6 × 36) 个独立信号而言, 在减少超声传感器数目的同时获得了更多的独立信号.

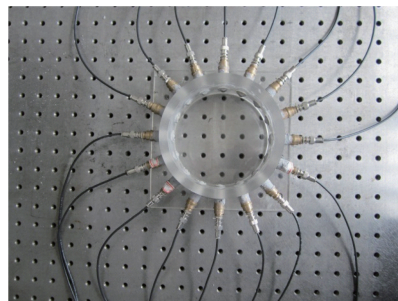


图 2 换能器阵列实物图

Fig.2 Diagram of transducer array

1.2 超声层析成像系统

在前述超声换能器阵列基础上, 建成了如图 3 所示的超声层析成像测试系统. 系统由超声波激励信号源、直径为 120 mm 的成像水槽、换能器阵列、前置信号放大器、基于 PCI 总线的 NI-5105 高速数据采集卡、发射切换电路及计算机等组成.

实验中, 发射切换电路控制信号源发射出一定强度的电脉冲, 逐个激发超声波, 其余的 15 个换能器接收信号. 信号源同时给出 1 个下降沿信号作为采集卡的同步采集信号. 换能器接收到信号后经 40 dB 同步放大电路后, 由高速数据采集卡 (60 M/s) 对其进行采集, 保存到计算机上. 通过 LabVIEW 编

程实现信号频谱分析和其它数据处理后获得1个 16×16 的信号矩阵(包含自发自收信号)。

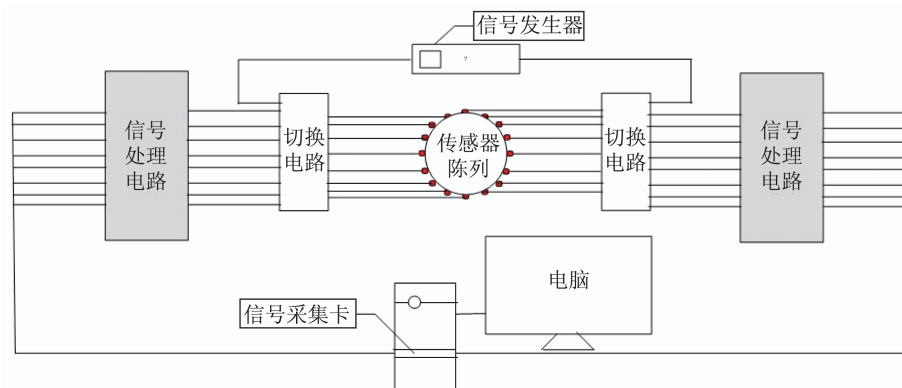


图3 超声层析成像系统示意图

Fig.3 Diagram of the ultrasound computerized tomography system

1.3 系统特性测试

图4给出了同一超声换能器在不同角度(以成像水槽圆心为原点,发射接收换能器所成角度)接收到的超声信号,不难看出,换能器在不同角度均能接收到声波信号.随着角度的增加,超声传播距离增大,信

号也相应延迟.对于超声信号通过FFT(fast Fourier transformation)变换获得最大频域幅值.由于换能器的制作差异,需要作归一化处理.将不含成像物体时换能器接收到的信号作为背景,与存在成像物体时的对应信号作比值,得到信号矩阵 $P(16,16)$.

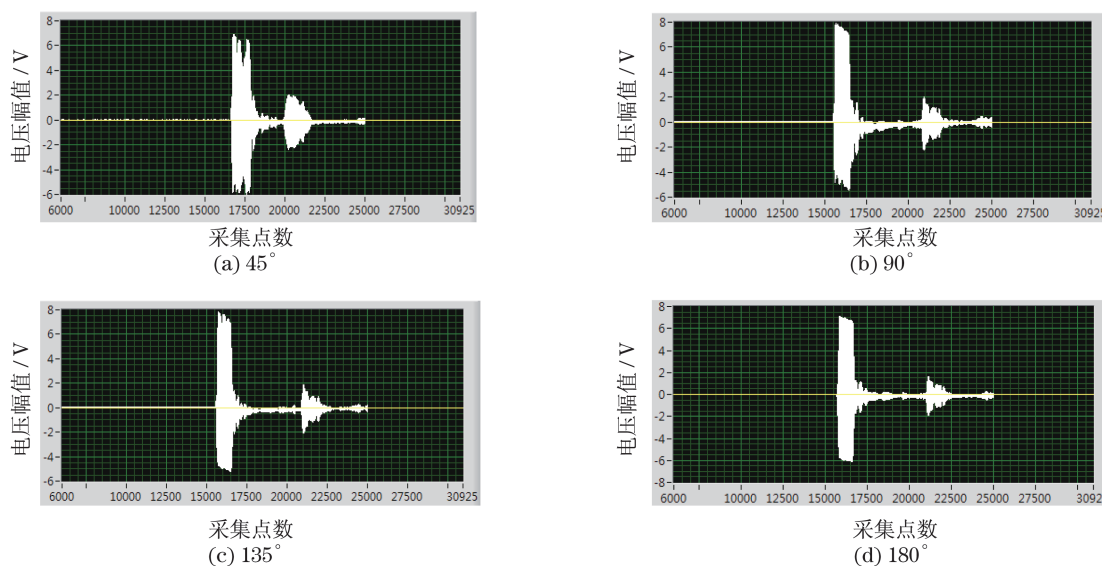


图4 换能器在不同角度上接收到的超声信号

Fig.4 Ultrasonic signals received by the transducers at different angles

2 图像重建算法

超声层析成像的实现包括正演和反演两个基本过程.正演是反演的基础,其模型选取与求解精度直接影响反演精度,而反演即为图像重建过程.由于本文研究对象(成像物体)的尺寸远大于水中超声波的波长($ka \gg 1$, $k = 2\pi/\lambda$, k 为角波数, a 为研究对象半径, λ 为波长),反演算法在

几何声学近似模型基础上设计,此时,二值逻辑反投影反演算法(BLBP)具有成像速度快、成像精度高的特点.

实际应用时考虑到物体边缘效应会带来误差,往往带来介于正常信号和零信号之间的弱信号影响成像效果,为此,在二值逻辑反投影图像重建算法中,引入逻辑值“2”,并采用双阈值处理,则可获取新的信号矩阵 $S(i,j)$,使得原物体成像更准确.该过程可表示为

$$S(i, j) = \begin{cases} 2, & \text{正常信号} \Leftrightarrow \text{没有颗粒} \\ 1, & \text{微弱信号} \Leftrightarrow \text{局部颗粒} \\ 0, & \text{没有信号} \Leftrightarrow \text{完全颗粒} \end{cases} \quad (1)$$

在信号矩阵中, i 代表发射传感器编号, j 代表接收传感器编号, 0 代表信号完全被物体遮挡, 1 代表信号部分被物体遮挡, 2 代表信号完全通过. 图像重建过程如图 5 所示, 当 1 号换能器发射超声波时, 9 号换能器被完全遮挡, 在图像矩阵上由 O, A, B 这 3 点构成的扇形区域权重加 1; 此时, 8 号换能器被部分遮挡, 那么, 由 O, B, C 构成的扇形区域权重加 0.5; 而不被遮挡的情形, 权重则加 0. 以此类推, 图像矩阵取决于其信号矩阵各个元素值的大小. 如此循环一周, 则图像矩阵上的每一个元素均获得不同程度的权重累加, 此时, 选取适当阈值, 即可反演获得重建图像.

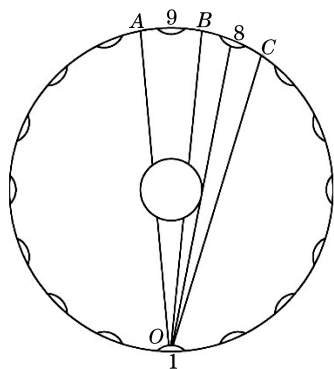


图 5 BLBP 反演算法示意图

Fig.5 Diagram of the BLBP reconstruction algorithm

3 层析成像的结果及分析

实验中, 以聚四氟乙烯圆柱(模拟柱状流动)和隔板(模拟半管流动)为层析成像研究对象, 包括以下 4 种工况: a. 在成像水槽正中插入一块隔板; b. 成像水槽中心处放置单个圆柱体, 半径为 10 mm; c. 成像水槽不同位置放置 2 个半径不同的圆柱体, 半径分别为 13, 10 mm; d. 成像水槽不同位置放置 3 个半径不同的圆柱体, 半径分别为 20, 13, 10 mm. 实验系统进行信号测试并获取实验数据, 运用二值逻辑反投影算法, 通过 Matlab 编程重建圆柱体和模拟流型图像. 为了便于比较, 同时进行了数值仿真, 将上述 4 种实验工况直接以图像形式模拟出来.

仿真结果和实验数据的图像重建如图 6 和图 7

所示, 成像截面的外切正方形划分为 256×256 的网格. 对于上述 4 种工况, 完成一次数据反演和图像重建时间均小于 0.02 s, 可满足实时性要求. 从图 7 可见, 实验数据的重建结果(几何轮廓)可能在面积、形状、位置(几何中心)上和真实轮廓存在差异. 为此定义一个空间成像误差来量化整个超声层析成像系统的成像精度.

空间成像误差为 $SIE^{[13]}$.

$$SIE = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \left| G_s(i, j) - G_r(i, j) \right| / \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L G_s(i, j) \quad (2)$$

$$G_s(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{颗粒模型所在像素} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$G_r(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{重建颗粒所在像素} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $G_s(i, j)$, $G_r(i, j)$ 分别定义为真实图像和重建图像; L 表示划分的网格个数.

按式(2)~(4)计算图 7 中重建图像的成像误差, 对于隔板情形, 图像重建 $SIE = 9.38\%$; 对于单圆柱体, 图像重建效果最好, $SIE = 5.60\%$, 表明该系统能够初步定位成像物体的位置、确定物体的大小和形状; 对于更为复杂的双圆柱体和三圆柱体, 误差分别为 37.29% 和 38.05%. 然而, UCT 技术应用于液-固两相流在线监测, 测试系统的进一步发展和应用还需特别注意考虑如下问题:

a. 声阻抗分布的强非均匀性.

本实验中, 实验对象为聚四氟乙烯圆柱, 其声阻抗($3.1 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$)和水较接近. 鉴于研究对象尺寸远大于超声波波长而作了几何声学近似假设. 在实际应用中, 固相和液相介质的声学特性差别可能会很大, 具有强非均匀性声阻抗, 此时, 由于两相界面的强声反射现象会导致测量声压信号偏离理论假设, 影响反演结果的准确性.

b. 超声波的低传播速度.

超声波属机械波, 与光相比传播速度很慢, 在水中约为 1 497 m/s (25 °C). 超声波的低传播速度原理限制了超声投影信号的获取速度. 如果液-固两相流流速达到每秒几十米以上, 两相流横截面上两相分布状况随时间快速变化, 要求超声成像系统必须在足够短的时间内完成从信号采集到图像重建所有步骤, 才能满足实时性要求.

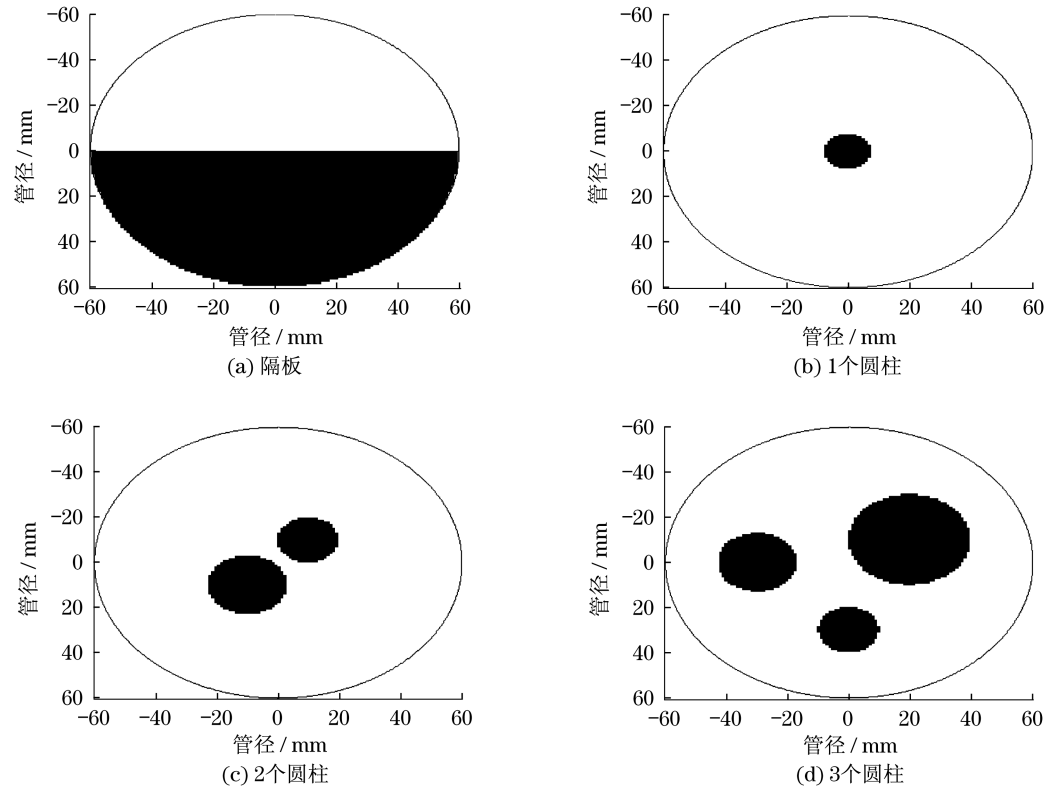


图 6 仿真图像

Fig.6 Simulation results

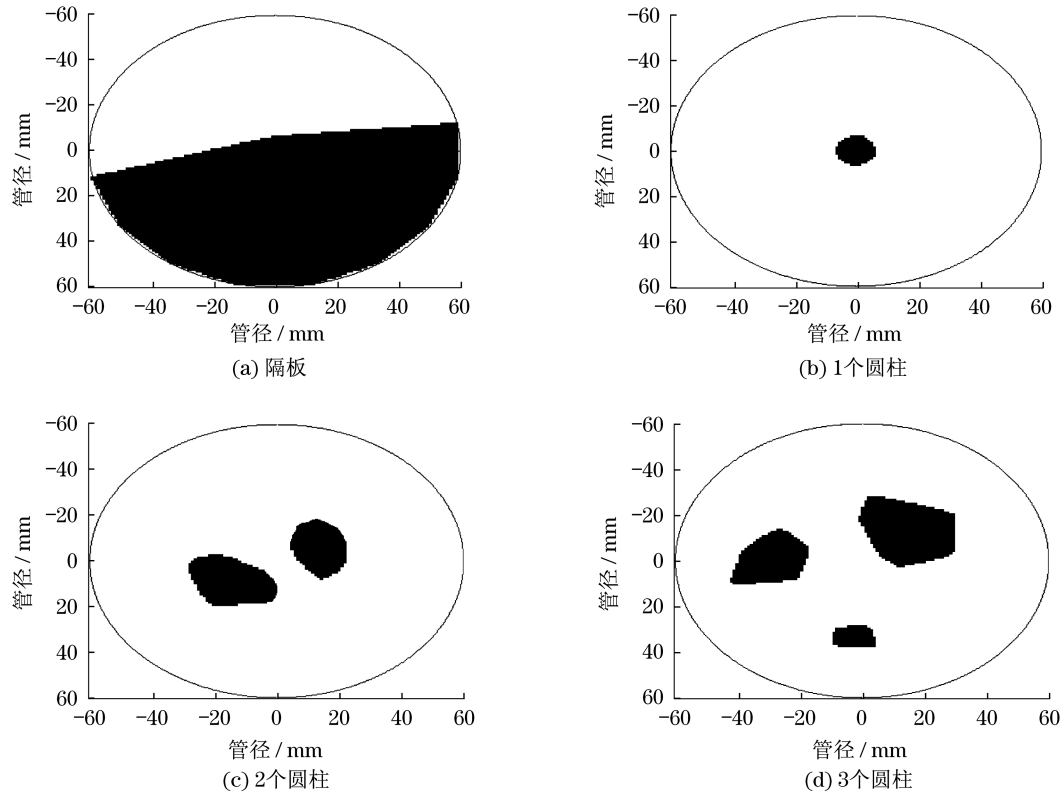


图 7 实验数据重建图像

Fig.7 BLBP reconstruction algorithms results

4 结 论

a. 本文提出的阵列检测方法,采用声辐射角度范围近似 180° 的晶片和一发多收的扇形束扫描方式,具有较宽的投影角,且单个投影角度下的投影线多,在较少的探头数目(16个)条件下,获得较好的实验信号矩阵,有利于提高对象图像重建的质量。

b. 改进 BLBP 反演算法重建一幅图像的时间小于 0.02 s,同时具有一定的成像精度,系统能够定位成像物体的位置,确定物体大小和形状,单个圆柱成像误差小于 6%。在此基础上,进一步研究传感器系统和快速精确的图像重建算法将有利于提高系统的分辨率、改善动态性能。

参考文献:

- [1] Dong X J, Su M X, Cai X S, et al. Improved binary back projection algorithm for image reconstruction used in ultrasound computed tomography [C] // 6th World Congress on Industrial Process Tomography, 2010: 57 - 63.
- [2] 丁希发,王浩全. 超声层析成像检测系统的研究与实现[J]. 电子设计工程, 2009, 17(11): 74 - 78.
- [3] Xu L J, Han Y T, Xu L A, et al. Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52 (13): 2171 - 2183.
- [4] Utomo M B, Warsito W, Sakai T, et al. Analysis of distributions of gas and TiO_2 particles in slurry bubble column using ultrasonic computed tomography [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (21): 6073 - 6079.
- [5] Rahim R A, Rahiman M H F, Chan K S, et al. Non-invasive imaging of liquid/gas flow using ultrasonic transmission-mode tomography [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 337 - 345.
- [6] Rahiman M H F, Rahim R, Zakaria Z. Design and modelling of ultrasonic tomography for two-component high-acoustic impedance mixture [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2): 409 - 414.
- [7] Muller R K, Mostafa K, Wade G. Reconstructive tomography and applications to ultrasonics [J]. Proceeding of IEEE, 1979, 67(4): 567 - 587.
- [8] 汪丽莉,蔡小舒. 汽轮机湿蒸汽两相流中水滴尺寸研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(4): 307 - 312.
- [9] Yang W Q, Peng L H. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(5): 1 - 13.
- [10] 程勇,汪军,蔡小舒. 旋流燃烧室中 NO 排放的数值计算[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6): 524 - 528.
- [11] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [12] 徐立军,徐苓安. 超声层析成像监测气-液两相泡状流体分布[J]. 天津大学学报, 1995, 28(2): 129 - 135.
- [13] Xie C G, Huang S M, Lenn C P, et al. Experimental evaluation of capacitance tomographic flow imaging systems using physical models [J]. IEE Proceedings: Circuits, Devices and Systems, 1994, 141(5): 357 - 368.

(编辑:石 瑛)