

DOI: 10.7652/xjtuxb201404007

改进型离线迭代在线重构算法的 电容层析成像技术研究

刘 晓, 王小鑫, 胡红利, 张 肖

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电容层析成像技术的逆问题中图像重构精度与速度的矛盾性,以 12 电极电容层析成像系统为对象,提出了一个改进型离线迭代在线重构(OIOR)算法。改进型 OIOR 算法是针对 OIOR 算法成像精度不高的问题加入了迭代滤波过程,既保证了成像速度,同时也提高了成像精度。以仿真电容值和实测电容值进行了图像重构的实验验证,从成像效果、相对误差、相关系数以及重构时间这 4 个方面对此算法进行了分析评估。仿真及实验结果表明:改进型 OIOR 算法通过迭代滤波 100 次即可在 20 ms 内有效提高传统 OIOR 算法重构图像的精度,使其相对误差降低约 20%;与传统迭代法相比,在获得相同精度图像的条件下,其重构时间约为传统迭代算法的 1/10。

关键词: 电容层析成像技术;图像重构;离线迭代;在线重构;迭代滤波

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0035-06

Improved Offline Iteration and Online Reconstruction Algorithm in Electrical Capacitance Tomography Imaging Technology

LIU Xiao, WANG Xiaoxin, HU Hongli, ZHANG Xiao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In inverse problem of electrical capacitance tomography (ECT), the image reconstruction precision contradicts the rate. For a 12-electrode ECT system, improved offline iteration online reconstruction (OIOR) is put forward to meet the requirement of image reconstruction. Iterative filtering process joins the existing OIOR to improve the imaging precision and to simultaneously ensure the reconstruction rate. The simulated and measured capacitances are evaluated and analyzed for imaging results, relative error, correlation coefficient and the reconstruction period. The simulation and experiments show that the improved OIOR method is able to improve the precision of reconstructed image and reduce the relative error by 20% via 100 recursive filterings within 20 ms. The reconstruction period can be reduced to 10% of the traditional iterative method under the same image precision requirement.

Keywords: electrical capacitance tomography; image reconstruction; offline iteration; online reconstruction; iterative filtering

在科技快速发展的今天,两相流广泛存在于石油、化工、冶金等国民经济生产领域之中,并且其流

型特征等参数在工艺流程的检测中发挥着相当重要的作用。由于两相流的复杂性,传统的检测技术难

收稿日期: 2013-11-14。 作者简介: 刘晓(1990—),男,硕士生;胡红利(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177120)。

网络出版时间: 2013-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131225.1701.003.html>

以准确测量及正确评估^[1-3]。电容层析成像(ECT)技术可以提供封闭管道或容器内部的可视化信息,并具有非侵入、响应速度快及成本低等优点,是一个新兴的研究热点^[4-5]。

ECT系统包含求解正问题和逆问题两部分:正问题是指通过管道内部介质空间分布推算出板极间电容值;逆问题是指根据测量或仿真电容值,通过ECT图像重构算法得到管道内介质分布的灰度图像^[6]。

ECT中的逆问题即图像重建算法,是一个典型的病态问题,且伴有非线性和半收敛等现象^[7-9]。离线迭代在线重构算法(OIOR)较之传统的迭代算法和代数重建算法有更快的收敛速度,但成像精度较低。因此,本文以12电极电容层析成像系统为对象,研究了离线迭代在线重构算法的电容层析成像技术,且针对OIOR算法成像精度较低的问题,采用了迭代滤波过程以提高成像精度。对层流、核心流、环形流和扇形流4种典型流型的仿真电容值与核心流和层流的实测电容值进行了图像重构,并与传统的OIOR算法和联立迭代重建法(SIRT)进行了比较。

1 图像重构算法

ECT技术的成功应用在一定程度上取决于图像重构算法的精度与速度,目前使用和研发的ECT图像重构算法主要有神经网络算法、线性反投影算法(LBP)、代数重建算法等。

LBP算法的本质是把所有电容值加权后投影回管道内部截面,但由于是把非线性的矩阵线性化,因而虽然简单、速度快,但有着较高的误差。神经网络算法需要大量的训练样本^[10],在实际工业过程中很难满足。传统的代数重建算法必须经过一定的迭代次数才能实现高质量的重建图像,无法实现实时性。OIOR算法是迭代算法中的一种,但区别于传统的迭代算法,其迭代过程是离线进行的,因而在得到电容数据以后,可以更快地得到较高精度的重构图像。本文所提出的改进型OIOR算法是在OIOR算法的基础上加入迭代滤波过程,进一步提高了成像精度。

1.1 离线迭代在线重构算法

研究ECT方面的工作者一直在寻求能够达到实时性且精度高的算法,OIOR算法把Landweber迭代过程离线化,得到一个新的系数矩阵,再把此矩阵在线应用于LBP算法中的敏感场矩阵成像,因此

这种算法拥有Landweber算法的成像精度,并同时拥有LBP算法的计算速度^[11-12]。

离线迭代在线重构方式可由下面两个等式实现^[13]

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{v}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \\ \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{D}_{k+1} \mathbf{v} \end{cases}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}_k \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 、 $\mathbf{B}_k \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 、 $\mathbf{D}_k \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 是3个一般的矩阵; $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^m$,是 $\mathbf{R}^m$ 中的任意向量。令 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{D}_0 \mathbf{v}$,那么由式(1)、式(2)分别产生的 $\{\mathbf{x}_k\}$ 数列相同。

Landweber的迭代公式如下^[14]

$$\mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}_k + \alpha_k \mathbf{S}^T (\mathbf{C} - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \quad (3)$$

其可以改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{k+1} &= \mathbf{G}_k - \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{G}_k + \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{C} = \\ &(\mathbf{I} - \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{S}) \mathbf{G}_k + \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{C}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{G}$ 为灰度矩阵; $\mathbf{S}$ 为敏感场矩阵; $\mathbf{C}$ 为电容向量; α_k 为步长系数。此时,令 $\mathbf{I} - \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{S} = \mathbf{A}_k$, $\mathbf{S}^T \mathbf{C} = \mathbf{B}_k$,则有

$$\mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{G}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{C}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

令 $\mathbf{x}_k = \mathbf{G}_k$,并且 $\mathbf{v} = \mathbf{C}$,则通过式(1)、式(2),可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{k+1} &= \mathbf{A}_k \mathbf{D}_k + \mathbf{B}_k = (\mathbf{I} - \alpha_k \mathbf{S}^T \mathbf{S}) \mathbf{D}_k + \alpha_k \mathbf{S}^T, \\ k &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{C} \quad (7)$$

且令初始灰度值 $\mathbf{D}_0 = \mathbf{S}^T$ 。

通过式(6)和式(7)可以看出,Landweber算法的迭代过程与成像过程被分离了。这样就实现了离线迭代与在线测量,其中式(6)为离线过程,式(7)为在线过程。

在式(7)中,图像重构即为两个矩阵相乘,与LBP算法有着相同的重构形式,即在线重建图像的过程中,本文算法与LBP算法有相同的计算速度。式(6)与Landweber算法有相似的迭代过程,即此算法的精度与Landweber算法类似。 $\mathbf{D}_k$ 的迭代过程是离线完成的,这确保了 $\mathbf{D}_k$ 可以经过多次迭代达到一定的精度要求,不用考虑耗费长时间而影响图像重建的速度。

1.2 选择性步长

在Landweber算法中,步长系数 α 对于重构的时间和精度有重要的影响,同理 α 对于OIOR算法也存在较大的影响。在实际操作中, α 一般选定为一个固定的值,其范围是^[13]

$$0 < \alpha < 2 \|\mathbf{S}^T \mathbf{S}\|_2^{-1} \quad (8)$$

但是,实际经验表明,式(8)有迭代的半收敛现象,即

在一定的迭代次数后,图像会产生明显的扭曲。为了克服此类困难,在此使用选择性步长 α_k ,使每一次误差向量 $C-SG_k$ 为最小值的步长系数。通过使误差向量二范数的一阶导数为 0,可得

$$\alpha_k = \frac{\|S^T(C-SG_k)\|_2}{\|SS^T(C-SG_k)\|_2} \tag{9}$$

综上所述,可变化的 α_k 可以减少重构可靠图像的迭代次数。虽然在求解选择性步长时用到了电容向量 C ,但电容向量 C 对 OIOR 算法的影响和其对 Landweber 迭代算法的影响是不同的。在 Landweber 中,不同的电容向量 C 产生了不同的灰度向量 G ,在 OIOR 算法之中,电容向量仅仅影响步长,当序列 $\{D_k\}$ 收敛时,经过 n 次迭代后,将产生一个收敛矩阵 D_n 。换言之,不同的电容向量 C 应该产生一个几乎相同的 D_n 。如上所述,矩阵 D_n 是预先迭代出来的,对于在线重构环节, D_n 迭代所需要的时间不需要考虑。因此,可通过选择性步长 α_k 无限制地迭代来构建一个收敛且更精确的矩阵 $D_n^{[13]}$ 。

1.3 改进型 OIOR 算法的迭代滤波过程

通过离线迭代 n 次得到系数矩阵 D_n 后,为了得到一个更高精度的图像,给在线重构过程中加入了滤波环节^[13]

$$g_{k+1} = P\{g_k - \beta D_n(Sg_k - C)\} \tag{10}$$

其中

$$P[f(x)] = \begin{cases} 0, & f(x) < 0 \\ f(x), & 0 \leq f(x) \leq 1 \\ 1, & f(x) > 1 \end{cases} \tag{11}$$

由式(6)离线迭代而成 D_n ,松弛因子 β 的取值范围为

$$0 < \beta < \frac{2}{\|D_n S\|_2} \tag{12}$$

迭代滤波过程的主要作用是减少重构图像的残影,其运算量远远低于迭代算法的运算量,即每一次迭代耗时较短,因而经过少许的迭代时间,满足精度要求的图像即可被重建。

2 实验结果与分析

2.1 ECT 系统的构成

ECT 系统一般由 3 个基本单元构成:电容传感器单元、数据高速采集处理单元和图像重建单元(本文为计算机),如图 1 所示。在绝缘管道外壁对称且均匀地布置 12 个电极用于采集电容数据,并且在 12 个电极外部接上测量屏蔽罩来抗外部干扰^[3,15]。

由于管道内不同介质的介电常数不同,因而当

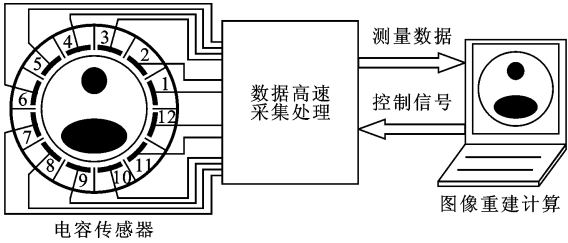


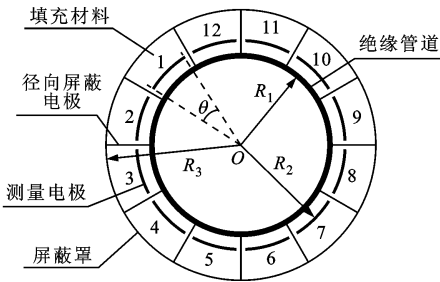
图 1 电容层析成像系统组成示意图

管道内部的两相流流型和浓度发生变化时,会引起介质的介电常数分布发生变化,导致各个极板间的测量电容值也随之产生变化,从而可以通过各个极板间电容值来反推出两相流介质的分布状况和浓度的高低。数据高速采集处理单元对系统中任意两个极板间的电容值进行测量,通过 AD 转换电路,将其数字量输入计算机。这些测量值可以反映传感器内部的介电常数分布情况,通过重建算法,便可以得到多相流的流型分布情况。

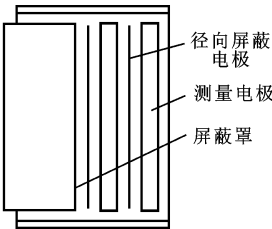
本文采用的电容传感器阵列如图 2 所示,其中各器件参数如表 1 所示。外部支撑钢管兼做外屏蔽层,两屏蔽层之间用跟随器相连形成等电位屏蔽,防止信号泄露和外部干扰^[16]。

2.2 实验平台的组成

搭建如图 3 所示气、固两相流实验平台用作 ECT 实测电容数据采集,其中主要包括 4 个环节:载气供应环节、给粉环节、测量段环节和节流装置环节。



(a)12 电极传感器截面图

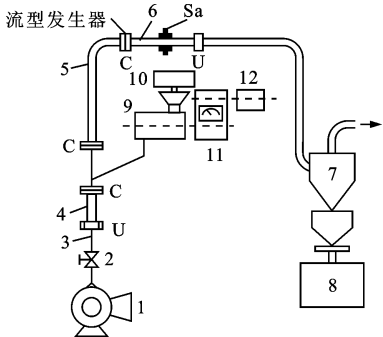


(b)12 电极传感器侧面图

图 2 电容层析成像系统传感器示意图

表 1 电容传感器阵列参数

参数	取值	参数	取值
管道材质	环氧化玻璃布	屏蔽电极宽/mm	26.8
管道长度/mm	1 200	电极数量	12
管道外径/mm	100	电极长度/mm	125
管道内径/mm	96	电极张角/(°)	26
管道介电常数	3.45	电极材质	铜
屏蔽电极长度/mm	135	屏蔽罩直径/mm	153.6



1:鼓风机;2:控制阀;3:皮托管;4,6:热敏电阻;5:弯型铝管;7:旋风除尘器;8:回收器;9:螺旋给粉机;10:增压器;11:变速箱;12:电机;Sa:电容传感器;U:连接器;C:耦合器;T:T 型混合器

图 3 气、固两相流实验平台结构图

实验平台为一个气、固两相流气力输送系统^[17],包括以下 4 部分。

(1)载气系统输送气体的速率由控制阀 2 控制,用 T 型混合器前的皮托管测量载气速率。

(2)输粉系统由匀速电机、速度可调变速箱、螺旋给粉机以及可调压力源(增压风扇)构成。输粉系统可以产生连续且平稳的气、固两相流,平台末端的回收器可测量实验的输粉量。

(3)测试段是 2.1 节所描述的环氧化玻璃布。电容传感器贴于绝缘管道外壁,并通过屏蔽双绞线连接至测量放大电路。

(4)在传感器阵列前加装形状与尺寸不同的异型节流装置,以分别产生实验所需的层流及核心流^[18]。

2.3 实验结果和分析

2.3.1 仿真图像重构比较 以 12 电极 ECT 系统为研究对象,在 MATLAB 实验平台上,采用改进的 OIOR 算法对工业管道中 4 种流型(层流、核心流、环流、扇形流)的仿真电容值进行图像重构,并与 SIRT 算法和 OIOR 算法从成像效果、相对误差、相关系数以及重建时间 4 个方面进行比较与分析。其中 SIRT 算法迭代 20 次即能在可接受的时间范围

内达到可分辨的图像精度;改进的 OIOR 算法取松弛因子为 1,迭代滤波 100 次,即可在较短时间内达到精度需求。本文也使用上述参数重构图像,并计算其相对误差和相关系数^[19],相对误差为

$$\delta = \| \hat{g} - g \| / \| g \| \times 100 \%$$

相关系数为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})(g_i - \bar{g})}{(\sum_{i=1}^n (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2)^{1/2}}$$

式中: $\hat{g}$ 是重建图像灰度值; $\bar{\hat{g}}$ 是重建图像的平均灰度值; g 是原始图像的灰度值; $\bar{g}$ 是原始图像的平均灰度值。不同算法下的仿真结果如图 4 所示。

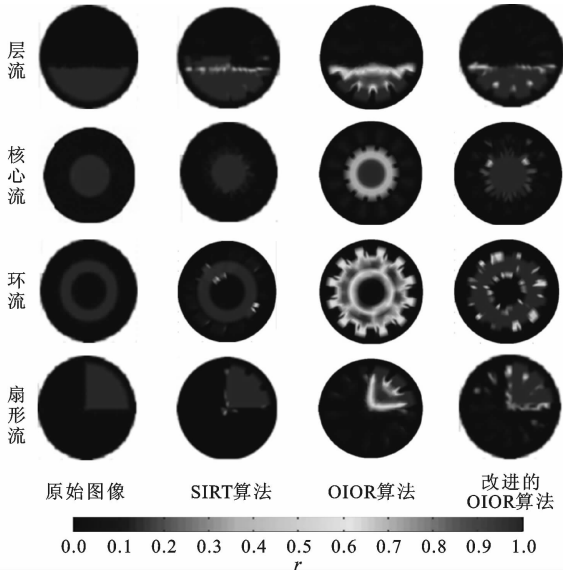


图 4 不同算法下的仿真重构图像

由图 4 可以看出,3 种算法均能重构出仿真图像,且对核心流和层流的重构图像质量较高,但对环流成像精度不足。相比之下,OIOR 算法的伪影较多,通过迭代滤波过程,改进的 OIOR 算法过滤掉部分伪影,从视觉方面成像精度接近于 SIRT 算法。由表 2 可以看出,改进的 OIOR 算法提高了 OIOR 算法的成像精度,使相对误差下降了约 20%,其精度接近于 SIRT 算法。由表 3 可以看出,改进的 OIOR 算法提高了 OIOR 算法的相关性,且无论是改进的 OIOR 算法还是 SIRT 算法,其相关系数均接近于 1,即两种算法的相关性都能满足需要。由表 4 可以看出,改进的 OIOR 算法与 OIOR 算法相比,重构时间略微增长,但所需要的重构时间仍大致是 SIRT 算法的 1/10。因而,改进的 OIOR 算法兼顾了成像的精度以及速度,对工业管道的实时测量提供了可能性。

表 2 不同重构算法下的相对误差

重构算法	相对误差/%			
	层流	核心流	环形流	扇形流
SIRT 算法	13.08	4.25	44.03	9.77
OIOR 算法	39.97	33.11	89.65	38.73
改进的 OIOR 算法	13.29	4.81	60.92	14.13

表 3 不同重构算法下的相关系数

重构算法	<i>r</i>			
	层流	核心流	环形流	扇形流
SIRT 算法	0.926 5	0.998 4	0.794 3	0.955 4
OIOR 算法	0.834 0	0.945 7	0.570 3	0.862 7
改进的 OIOR 算法	0.924 4	0.995 1	0.682 9	0.943 2

表 4 不同算法下的重构时间

重构算法	重构时间/ms			
	层流	核心流	环形流	扇形流
SIRT 算法	1 496	1 530	1 450	1 451
OIOR 算法	99	107	103	102
改进的 OIOR 算法	109	124	124	125

2.3.2 迭代次数以及松弛因子对图像精度的影响

以层流为例,当松弛因子 β 分别为 0.5、1.0、1.5 时,不同迭代滤波次数对重构图像精度的影响见图 5。由图 5 和表 5 可以看出:迭代滤波是在线成像的过程,只需少量几次迭代,图像就能达到精度要求,不同于传统的代数迭代算法需要大量的迭代次数才能满足精度要求;迭代滤波有良好的收敛性,且不存在半收敛现象;不同于 SIRT 算法的并行迭代,改进型 OIOR 算法每次滤波迭代过程耗时不多,因而改进型 OIOR 算法进行多次迭代耗时较少。松弛因子增大有助于加快图像的收敛,但过大的松弛因子会使重构无法完成,因而重构松弛因子的选择应遵循式(12)。

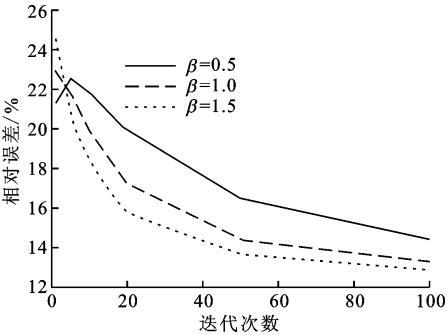


图 5 不同 β 下改进的 OIOR 算法的收敛情况

表 5 不同的松弛因子对改进的 OIOR 算法重构时间的影响

迭代次数	重构时间/ms		
	$\beta=0.5$	$\beta=1.0$	$\beta=1.5$
1	33	35	37
5	38	41	38
10	47	42	43
20	55	55	55
50	83	85	83
100	142	141	144

2.3.3 实测重构图像比较

搭建如图 3 所示的实验平台。调节控制阀 2 使气力输送速率达到 25 m/s,同时以平均粒径为 50 μm 的煤粉颗粒作为实验煤质,调整异型阀^[17]分别获取了层流和核心流的实测电容值,并进行了归一化处理。处理后的数据分别用改进的 OIOR 算法、OIOR 算法以及 SIRT 算法进行实测重构,重构结果如图 6 所示。

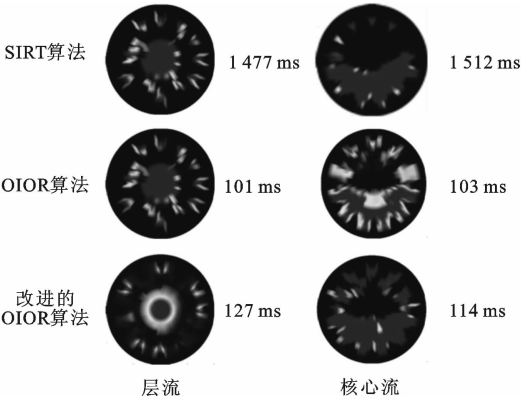


图 6 不同算法下的实测重构图像

由图 6 可以看出,改进的 OIOR 算法的伪影比 OIOR 算法的有明显减少,在视觉角度下更为优秀,且与 SIRT 算法相比有着更快的成像速度。所以,改进的 OIOR 算法的成像精度与重构时间更满足于工业需求。

3 结 论

本文将 OIOR 算法进行改进,在保证良好重构时间的基础上,加入了迭代滤波,使重构图像精度进一步提高。实验结果表明,改进的 OIOR 算法对于不同流型的两相流有着良好的重构成像结果,相较于原始的 OIOR 算法,其成像精度得到了一定的提高,且与传统的代数迭代方法相比,在同等的成像精度条件下,有着更快的成像速度。改进的 OIOR 算法迭代滤波过程收敛较快且此迭代运算量较小,

能够在100次迭代内实现高精度的图像重构,有效地减少了重构图像的相对误差。改进的OIOR算法显著提高了重构速度与精度,为工业实时性检测提供了一条有效途径。

参考文献:

- [1] HUANG S M, PLASKOWSKI A B, XIE C G, et al. Capacitance-based tomographic flow imaging system [J]. *Electrics Letters*, 1988, 22(7): 173-177.
- [2] HU Hongli, ZHANG Juan, DONG Jun, et al. Identification of gas-solid two-phase flow regimes using Hilbert-Huang transform and neural-network techniques [J]. *Instrumentation Science and Technology*, 2011, 39(2): 198-210.
- [3] CHEN Xia, HU Hongli, ZHANG Juan, et al. An ECT system based on improved RBF network and adaptive wavelet image enhancement for solid/gas two-phase flow [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(2): 359-367.
- [4] DICLIN F J, BECK M S. Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications [J]. *IEE Proceeding: G*, 1992, 139(1): 72-82.
- [5] WANG Hongmei, HU Hongli, WANG Lijuan, et al. Image reconstruction for an electrical capacitance tomography (ECT) system based on a least squares support vector machine and bacterial colony chemotaxis algorithm [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 27(5): 59-66.
- [6] YANG W Q. Modeling of capacitance tomography sensors [J]. *IEE Proc Sci Meas Technol*, 1997, 144: 203-220.
- [7] QU Gangrong, JIANG Ming. Landweber iterative methods for angle-limited image reconstruction [J]. *Acta Mathematica Applicata Sinica*, 2009, 25(2): 327-334.
- [8] QU Gangrong, WANG Caifang, JIANG Min. Necessary and sufficient convergence conditions for algebraic image reconstruction algorithms: research announcement [J]. *Advances in Mathematics*, 2007, 36(3): 379-381.
- [9] LI Liangchao, YANG Jianyu, CUI Guolong. Super-resolution processing of passive millimeter-wave images based on conjugate-gradient algorithm [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(4): 762-767.
- [10] YI Jianqiang, WANG Qian, ZHAO Dongbin, et al. BP neural network prediction-based variable-period sampling approach for networked [J]. *Control Systems*, 2007, 185(2): 976-988.
- [11] WANG Huaxiang, WANG Chao, YIN Wuliang. A pre-iteration method for the inverse problem in electrical impedance tomography [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(4): 1093-1096.
- [12] YANG Wuqiang, PENG Lihui. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(1): 1-13.
- [13] LIU Shi, YANG Wuqiang. Prior-online iteration for image reconstruction with electrical capacitance tomography [J]. *IEE Proc-Sci Meas Technol*, 2004, 151(3): 195-200.
- [14] YANG W Q, SPINK D M, YORK T A. An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical capacitance tomography [J]. *Meas Sci Technol*, 1999, 10: 1065-1069.
- [15] WANG Xiaoxin, YAN Jiebing, HU Hongli, et al. An ECT flow regime identification technology for gas/solid two-phase flow phase concentration measurement [C]//*Proceedings of the Second International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1318-1321.
- [16] 颜华. 电容层析成像系统中微小电容测量法 [J]. *仪表技术与传感器*, 1998, 4(2): 15-19.
YAN Hua. The measurement of low value capacitance in electrical capacitance tomography system [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1998, 4(2): 15-19.
- [17] 陈夏, 胡红利, 高享想, 等. 代数重建和同步迭代重建在电容层析成像中的比较研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(4): 25-29.
CHEN Xia, HU Hongli, GAO Xiangxiang, et al. Comparison of algebraic reconstruction technique and simultaneous iterative reconstruction technique in electrical capacitance tomography image reconstruction [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(4): 25-29.
- [18] HU Hongli, XU Tongmo. A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, 17: 87-92.
- [19] HAO Jianna, YIN Wuliang, ZHAO Qian, et al. Pre-conditioning of projected SIRT algorithm for electromagnetic tomography [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 29: 39-44.

(编辑 杜秀杰)