

代数重建和同步迭代重建在电容层析 成像中的比较研究

陈夏, 胡红利, 高享想, 方天驰

(西安交通大学电气绝缘与电力设备国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电容层析成像技术(ECT)中的逆问题——图像重建算法的非线性和病态性问题,以 12 电极电容层析成像系统为对象,研究了代数重建算法(ART)与同步迭代重建算法(SIRT). 分别对仿真电容值和实测电容值进行图像重建的实验验证,从成像效果、相对误差及重建时间 3 个方面对这两种算法进行了评估与分析. 结果表明,ART 算法和 SIRT 算法均能有效地实现 ECT 图像重建,其中 SIRT 算法能够在 100 次迭代内达到高精度,在收敛速度和成像效果上更具有优势.

关键词: 电容层析成像技术;图像重建;代数重建;同步迭代重建

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0025-05

Comparison of Algebraic Reconstruction Technique and Simultaneous Iterative Reconstruction Technique in Electrical Capacitance Tomography Image Reconstruction

CHEN Xia, HU Hongli, GAO Xiangxiang, FANG Tianchi

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

Abstract: To solve the nonlinear and ill-posed inverse problems in electrical capacitance tomography(ECT), algebraic reconstruction technique (ART) and simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) were put forward to meet the requirement of image reconstruction. 12-electrode ECT system was set up to acquire real measurement capacitances under annular flow and stratified flow. The imaging results of the two algorithms in simulated capacitances and measured capacitances were evaluated and analyzed respectively for the imaging quality, relative error and reconstruction time. The experiments indicated that ART and SIRT for the presented ECT system perform effectively. Compared with ART, the convergence rate and the quality of SIRT are more advantageous with higher accuracy within 100 iterations.

Keywords: electrical capacitance tomography; image reconstruction; algebraic reconstruction technique; simultaneous iterative reconstruction technique

两相流广泛存在于石油、化工、冶金等各种生产领域,但由于其流动机理复杂、随机性很大,采用传统的检测技术难以准确测量^[1]. 电容层析成像技术(ECT)是通过安置在物体表面电极之间的电容值来计算物体内部介电常数的空间分布,从而得到管道

中各介质的分布状况及图像的一种方法,具有结构简单、非侵入式、响应速度快、安全性能好等特点,是目前过程层析成像技术研究的热点.

图像重建算法作为 ECT 中的逆问题,具有非线性和病态性两方面的问题^[2]. 代数重建算法比传统

的反投影重建算法精度高,不像神经网络算法需要大量的训练样本,是很有前景的解决方案.因此,本文以12电极电容层析成像系统为对象,研究了基于代数重建算法(ART)与同步迭代重建算法(SIRT)的电容层析成像技术,并对核心流、环形流、层状流、扇形流4种典型流型的实测电容值进行了图像重构.

1 基于代数重建算法的 ECT 图像重构

ECT 逆问题是根据一组独立电容测量值反演出敏感场内各介质的空间分布,进而重构管道中的流型.但是,由于电容敏感场是软场且测量数据较少,使得重建出高质量图像成为难题,目前使用和开发的 ECT 图像重建算法主要有线性反投影算法(LBP)、神经网络法、代数重建法.

LBP 算法简单、速度快,其本质是把所有的电容测量值加权后投影回管道截面,图像重建质量较低.神经网络法是一种基于训练样本建立由被测电容值到图像像素间映射模型的算法,其对样本的大量需求是实际工业过程很难满足的.代数重建法以初始图像为基础,通过逐次迭代改进图像,与 LBP 相比其重建质量明显提高,与神经网络法相比则不需要大量的训练样本.综合比较,本文选择代数重建算法来实现 ECT 的逆问题——图像重建.

1.1 代数重建算法(ART)

ART 的基本思想:给定重建区域一个初值,再将所得投影值残差逐个沿其射线方向均匀地反投影回去,不断地对图像进行校正,直到满足要求.因此,ART 又称为沿着射线修正的迭代重建技术^[3].

首先,将欲重建的连续图像 $f(x, y)$ 划分为 N 个离散的小方格,每个小方格内部 $f(x, y)$ 被视为常数,称为像元,记作 f_i .然后,根据成像的物理过程和相应的数学模型,建立重建图像和投影数据之间关系的线性方程组^[3-4]

$$\left. \begin{aligned} w_{11}f_1 + w_{12}f_2 + \cdots + w_{1N}f_N &= p_1 \\ w_{21}f_1 + w_{22}f_2 + \cdots + w_{2N}f_N &= p_2 \\ &\vdots \\ w_{M1}f_1 + w_{M2}f_2 + \cdots + w_{MN}f_N &= p_M \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: M 为投影射线总数; w_{ij} 为权因子,反映了像元 f_j 对投影 p_i 的贡献; p_i 为第 i 号射线的射线和.

ART 图像重建的任务即是由 w 、 p 求取 f ,通常包含以下 3 个主要步骤^[4].

(1) 设定图像初始值.初始值会影响收敛速度(迭代次数),不会影响最终解,理论上初值应当按照

先验知识来选取,但是通常没有先验知识,习惯取 $f^{(0)} = (f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \cdots, f_N^{(0)}) = (0, 0, \cdots, 0)^T$.

(2) 根据下式计算图像的修正值

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \lambda \frac{\left(p_i - \sum_{n=1}^N f_n^{(k)} w_{in}\right)}{\sum_{n=1}^N w_{in}^2} w_{ij} \quad (2)$$

式中: k 为迭代次数; $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$; λ 为松弛因子($0 < \lambda < 2$).当所有的投影数据都被使用完之后,就完成了了一次完整的迭代.

(3) 反复进行第(2)步骤中的运算,对图像进行修正.

(4) 检验是否满足收敛准则.

通常只能采用有限的迭代次数,因此必须选定收敛准则.常用的收敛标准是:取 $U^{(k)} = \sum_{i=1}^N (p_i - f_i^{(k)} w_i)^2$, 当 $(U^{(k)} N)^{1/2} < e$ ($0 < e < 1$) 时,停止迭代.

1.2 同步迭代重建算法(SIRT)

式(2)还可以采用数值计算中的 Jacobi 迭代法来求解,与 ART 迭代法不同, Jacobi 迭代法采用的是并行迭代,即仅当所有投影数据都计算完以后,才对图像值进行更新.具体来说,采用

$$\Delta f_j^{k+1} = f_j^{(k+1)} - f_j^{(k)} = \frac{\left(p_i - \sum_{k=1}^N f_k^{i-1} w_{ik}\right)}{\sum_{k=1}^N w_{ik}^2} w_{ij} \quad (3)$$

计算 Δf_j^{k+1} , 但 f_j 的值并不立即改变,在经历完所有的等式计算后,才修正 f_j 的值.由此可以看出,这种修正是每个像素对应于所有迭代变化的平均值,即同步迭代.

SIRT 的具体步骤为:

(1) 设定图像初始值,一般情况下取 $f^{(0)} = (f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \cdots, f_N^{(0)}) = (0, 0, \cdots, 0)^T$;

(2) 迭代公式

$$f^{(k)} = f^{(k-1)} + \sum_{i=1}^M \frac{(p_i - f^{(k-1)} w_i)}{w_i^2} w_i \quad (4)$$

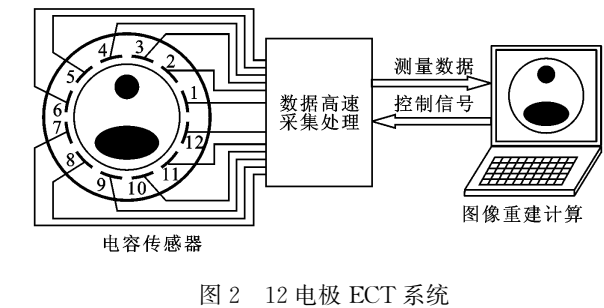
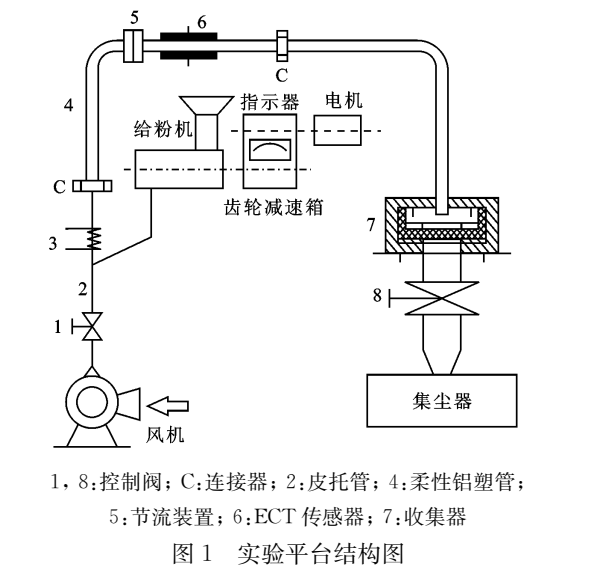
(3) 反复进行步骤(2)的运算,对图像进行修正;

(4) 检验是否满足收敛准则.

2 实验结果及分析

2.1 实验平台

搭建如图 1 所示 ECT 数据采集实验平台,主要包括载气供应系统、给粉系统、测量段和节流装置 4 部分^[5].



载气由风机提供;给粉系统由电机、一个带有指示器的连续可调的齿轮减速箱、一个精密的线性螺旋加料器以及一个压力可调的增压风扇组成,以实现连续地产生气固两相流;测试段为 ECT 电容传感器阵列.在靠近传感器处加装不同结构的异型节流装置(定制的),以分别产生环状流及扇形流,用来模拟冲击板和角阀后的过渡流型,节流装置的前端面被设计为流线型以避免积尘,其等效孔径约为流型发生装置长度的 1/10~1/15.另外,当固、气质量比约为 10 : 1 且载气输送速度大于 15 m/s 时,由引风机或空气压缩机同样可以获得稳定的流型.流型发生装置参数如表 1 所示.

表 1 流型发生装置参数

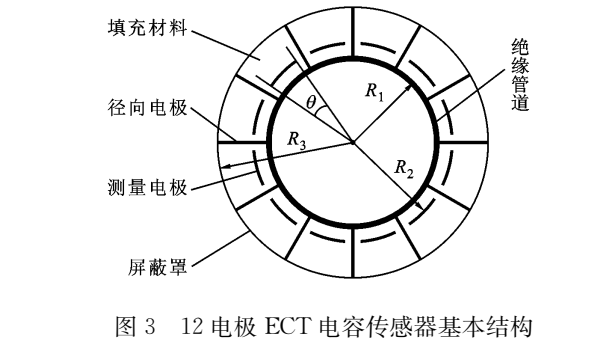
测试段	环状流	扇形流
管道内径为 96 mm	内环直径为 20 mm 外环直径为 55 mm	张角为 140°

2.2 ECT 系统

一个完整的 ECT 系统是由电容传感器阵列、数据采集与处理单元、图像重建单元组成的.其物理基础是:当管道内的各介质分布改变时,多相流混合体的等价介电常数会发生变化,从而引起电极板间的测量电容值变化,即通过测量各极板间的电容值,就能得到管道内的介质分布状况.

本文采用的 12 电极 ECT 系统如图 2 所示.其组成如下:介电常数为 3.45 的环氧玻璃管作为绝缘管道(内径为 96 mm,外径为 100 mm,长为 400 mm);12 段铜质电极板(长为 125 mm,宽为 23 mm)均匀

对称地粘贴在绝缘管道外壁(张角为 26°,间隔为 4°)上;屏蔽电极由屏蔽罩(直径为 153.6 mm)和径向电极(长为 135 mm,宽为 26.8 mm)组成.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,防止信号泄漏和外部干扰.这一结构还能改善传感器敏感场分布^[5-6],如图 3 所示.



ECT 数据采集处理单元主要包括电极阵列的选通控制模块、电容测量电路、放大滤波模块、AD 转换模块、DSP 模块、通讯模块.本文采用的采集系统见文献[5],其中 DSP 除了进行信号数据处理外,还负责整个采集电路的控制,且电容测量电路是核心和难点,成像的准确性在很大程度上依赖于该模块的准确性^[7].

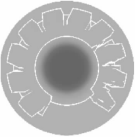
2.3 图像重构的实验结果及分析

以 12 电极 ECT 系统为对象,采用 ART 和 SIRT 重建图像,并从成像效果、相对误差及重建时间 3 个方面对这两种算法进行评估与分析.

(1)成像效果图.在 Matlab 平台上,对工业管道中的 4 种典型流型(核心流、环流、层流和扇形流)进行仿真,得到其对应的电容值,归一化处理后分别采用 ART(迭代 100 次,取 λ=1)和 SIRT(迭代 100 次)重建图像,结果如表 2 所示.

在 2.1 节介绍的实验平台上,采用平均粒径为 50 μm 的煤粉作为实验样本,在气力输送速度为 25 m/s 的条件下,分别获取了环流和扇形流下的实际测量电容值.

表 2 仿真电容值的图像重建结果

流型	原图	ART	SIRT
核心流			
环流			
层流			
扇形流			

采用 ART(迭代 100 次,取 $\lambda=1$)和 SIRT(迭代 100 次)重建图像,结果如表 3 所示.

表 3 实测电容值的图像重建结果

流型	ART	SIRT
环流		
扇形流		

从视觉角度来看,综合表 2 和表 3,ART 与 SIRT 均可获得良好的图像重建结果,尤其对核心流识别度较高.

(2)相对误差. 以核心流为例,采用不同迭代次数的 ART 和 SIRT 重建图像,结果如表 4 所示,不同迭代次数下的相对误差如表 5 和表 6 所示,ART 与 SIRT 的收敛情况如图 4 所示.

表 4 不同迭代次数下的重建图像(核心流)

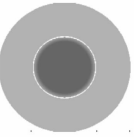
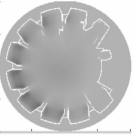
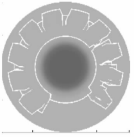
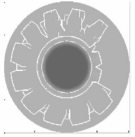
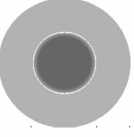
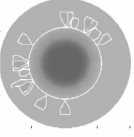
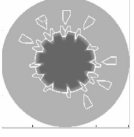
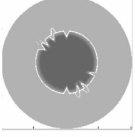
算法	原图	1次迭代	100次迭代	1 000次迭代
ART				
SIRT				

表 5 ART 在不同迭代次数下的相对误差

迭代次数	相对误差		
	$\lambda=0.5$	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.5$
1	0.916 9	0.903 3	0.909 9
5	0.655 7	0.570 0	0.615 2
10	0.504 6	0.403 8	0.445 0
20	0.390 6	0.310 0	0.308 1
40	0.328 0	0.263 2	0.219 2
60	0.201 2	0.239 7	0.181 4
80	0.285 1	0.220 1	0.160 1
100	0.272 4	0.203 4	0.147 1

由表 5 可以看出,相对误差随着迭代次数的增加而减小,即重建图像更接近实际图像,重建算法精度增加. 松弛因子越大,ART 收敛越快,因此可通过调整松弛因子的大小来改善重建图像的质量.

由表 6 和图 4 可知,在不到 10 次迭代的情况下,SIRT 就可以获得小于10%的相对误差,而

表 6 SIRT 在不同迭代次数下的相对误差

迭代次数	1	2	5	10
相对误差	0.239 2	0.189 7	0.130 1	0.084 6
迭代次数	20	50	80	100
相对误差	0.040 2	0.012 5	0.007 6	0.004 5

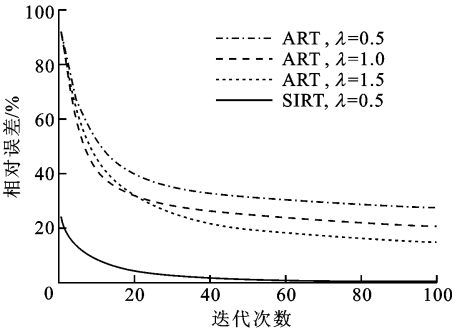


图 4 ART 与 SIRT 的收敛情况比较

ART 要进行几十次的迭代,相对误差才能下降到 20%以下。因此,SIRT 可以使用较少的迭代次数实现图像重构,更可取。

(3)重建时间. ART 与 SIRT 分别在 100 次与 1 000 次迭代下重建时间如表 7 所示。

表 7 ART 与 SIRT 的重建时间对比

算法	迭代次数	重建时间/s
ART	100	2
	1 000	11
SIRT	100	15
	1 000	141

虽然 SIRT 在相同的迭代次数下要花费更长的时间,但其的迭代次数较多(如迭代 1 000 次)时可以更好地逼近原图像,而 ART 却没有 SIRT 那么精确。

3 结 论

本文将代数重建算法引入到 ECT 图像重建中,分别得到了基于 ART 与 SIRT 的图像重建迭代算法。实验结果表明,这两种算法对于不同介质分布的两相流均具有良好的成像结果,且比起 ART,SIRT 能够在 100 次迭代内达到高精度,大大提高了算法的重建速度,为 ECT 图像重建问题提供了一条新的有效途径。

参考文献:

[1] 胡红利,陈夏,白涛. 基于径向基网络和小波变换的 ECT 图像重构算法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44 (2): 1-5.
HU Hongli, CHEN Xia, BAI Tao. ECT image reconstruction algorithm by RBF network and wavelet transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44 (2): 1-5.

[2] LI Y, YANG W Q. Image reconstruction by nonlinear Landweber iteration for complicated distributions[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19 (9): 094014-094021.

[3] 胡小舟,孔斌,成二康,等. 一种基于 POCS 约束的图像代数重建算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22 (5):763-768.
HU Xiaozhou, KONG Bin, CHENG Erkang, et al. An image algebraic reconstruction technique based on POCS restriction [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(5):763-768.

[4] 张顺利,张定华,黄魁东,等. 锥束 ART 算法快速图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(4):887-892.
ZHANG Shunli, ZHANG Dinghua, HUANG Kuidong, et al. Fast image reconstruction with cone-beam ART algorithm [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2009,30(4):887-892.

[5] HU H L, XU T M. 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.

[6] WARSITO W, FAN L S. Measurement of real-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Science, 2001,56:6455-6462.

[7] 颜华,王师. 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. WANG Shi. The measurement of low value capacitance in electrical capacitance tomography system [J]. Instrument Technique and Sensor, 1998, 4(2):15-19.

(编辑 杜秀杰)