

文章编号: 1005-0523(2009)01-0062-05

电容层析成像技术中影响图像重建质量的因素分析

高彦丽

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 电容层析成像技术 (ECT) 作为一种多相流参数检测技术, 具有快速、非侵入、结构简单、无辐射、成本低等特点, 而图像重建质量和速度是阻碍电容层析成像技术工业应用的关键性问题, 本文讨论了影响图像重建的因素, 在采用线性反投影算法、正则化求逆算法以及迭代法的基础上, 研究了单元划分数目、有限元形状、极板数以及介电常数四种因素对成像质量的影响. 研究结果对获得最佳成像效果具有一定的指导意义.

关 键 词: 电容层析成像; 图像重建; 像素; 有限元分析

中图分类号: TP212

文献标识码: A

电容层析成像技术 (ECT) 是 20 世纪 80 年代发展起来的一种多相流参数检测技术. 其工作原理是依靠检测非导电物场内介质分布变化引起的电容值变化, 通过某种图像重建算法来反演物场内的介质分布, 从而实现多相流参数的测量. 该方法具有快速、不干扰流场、结构简单、无辐射、成本低的特点, 可以用来测量多相流尤其是气固两相流的流动分布^[1~4].

电容层析成像系统的结构如图 1 所示, 主要由三部分组成, 分别为电容传感器阵列、数据采集和信号处理电路以及控制和成像计算机系统. 电容传感器阵列把物场介质变化转化为对应的电容变化; 数据采集和信号处理系统负责电容的测量及其信号的传输处理; 控制和成像计算机系统依据反映物场特性参数的投影数据, 采用定性或定量的图像重建算法, 完成由投影数据到图像这一逆问题的求解, 并通过计算机显示出来. 常用的图像重建算法有线性反投影算法 (LBP)^[5]、正则化求逆算法^[6] (MLRR) 以及迭代法^[7]等.

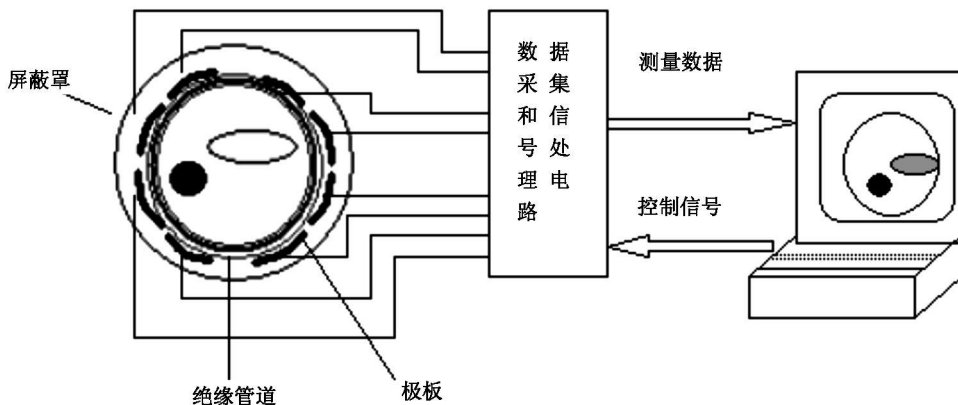


图 1 ECT 系统示意图

影响图像重建质量的因素很多, 除图像重建算法、投影数据的精确性等会直接从根本上影响图像质量

收稿日期: 2008-05-16

基金项目: 江西省科技攻关项目 (20061A0102220); 华东交通大学校立科研基金项目 (07DQ04)

作者简介: 高彦丽 (1978-), 女, 山西临汾人, 讲师, 从事电子信息、过程检测方面的研究.

外^[8],单元划分数目、有限元形状、极板数以及介电常数等其它因素也会影响图像质量,而这方面的研究却少有报道.本文在采用线性反投影算法、正则化求逆算法以及迭代法的基础上,研究了单元划分数目、有限元形状、极板数以及介电常数四种因素对成像质量的影响.研究结果对获得最佳成像效果具有一定的指导意义.

1 单元划分数目对成像质量的影响

单元划分数目即图像的像素个数,通常来讲,在传感器极板数一定的条件下,成像区域内像素个数划分得越多,会使得重建图像轮廓越平滑,从而越接近原始图像.如图 2 所示单元划分数为 800 的成像效果无论从图像轮廓还是占空比上都优于单元数为 500 的重建图像可见单元划分数目(像素)多,在一定程度上可提高成像质量.

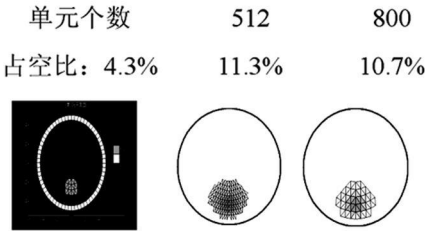


图 2 不同单元划分数目的成像效果

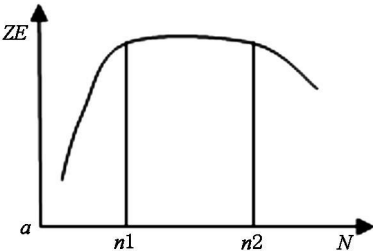


图 3 像数个数与成像质量关系

然而像素个数和成像时间呈近似线性的关系^[9],因此通过增大单元划分数目提高成像质量是以牺牲图像重建速率为代价的.而且,作者通过研究发现像素个数并非与成像质量成正比关系,如图 3 所示,图中 ZE 表示成像质量, N 表示像数个数. a~n1 段曲线呈上升趋势,说明像数越多,图像轮廓越平滑,越接近原始图像; n1~n2 段是平稳段,说明成像质量不再随像数个数的增加而提高; N>n2 段曲线呈下降趋势,说明像素过多,逆问题的求解变得更加困难,病态性加强,成像质量变差了.因此,像素个数并非越多越好,它只是在一定程度上影响成像质量.实际应用时,应根据成像速率以及成像的空间分辨率的要求,在 n1~n2 段确定像素个数.

2 有限元划分形状对成像质量的影响

目前 ECT 技术中有限元划分主要有两种形状,一种是五面体,一种是六面体^[3].为研究不同的有限元划分形状对成像质量的影响,本文研究了在 LBP 迭代法以及 MLRR 三种成像算法下,有限元划分形状分别为五面体和六面体时的成像效果,研究结果如表 1 所示.

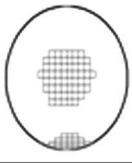
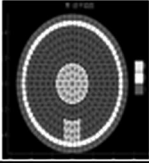
从表中可以看出,两幅不同占空比的原始图像分别在有限元划分为五面体、六面体下的成像效果与单元划分形状没有明显关系.现有文献报道中两种划分方式均有采用,各有优缺点.有限元划分为五面体形状可以利用对称性旋转快速获取物场灵敏度^[9],而有限元为六面体形状时,不具备对称性,因此灵敏度的获取速度慢,但六面体更具美观性.

3 传感器极板数对成像质量的影响

传感器极板数增加,独立电容测量值的数目增加,可以获取更多的信息,有望使成像质量得到改善,如图 4 所示.但是,在保持有限元剖分数不变的条件下,12 电极 ECT 系统的敏感场矩阵的条件数远远大于 8 电极 ECT 传感器的敏感场矩阵的条件数,这意味着 12 电极系统虽然比 8 电极系统能提供更多的测量值,但其病态性也比 8 电极系统较为严重^[10].测量电容值 C 的微小扰动会对图像灰度 G 的解产生很大影响;再者以增加极板数量以获取更多的信息,还要良好性能的硬件测量电路作为基础,因为极板数增多,极板的面积就要

减小,无论是静态电容还是动态电容值都将会减小的;并且极板数的增加也意味着成像速率的降低.因此,常用的以 8 和 12 极板的 ECT 系统居多.

表 1 像素形状与成像效果之间的关系

	原型	LBP	迭代法	MLRR
像素为六面体				
占空比	0.099	0.297 5	0.208 4	0.227 5
像素为五面体				
		0.265 1	0.234 8	0.157 4
像素为五面体				
占空比	0.186 0	0.268 3	0.205 8	0.229 1
像素为六面体				
		0.199 4	0.211 5	0.216

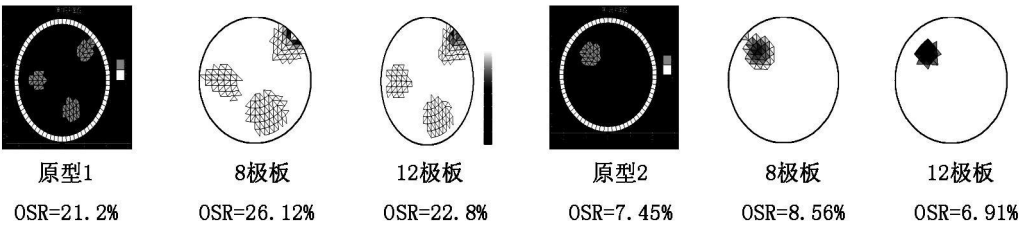


图4 传感器极板数和成像质量关系

4 介电常数变化对成像质量的影响

ECT系统使用前需要经过以下两个过程:(1)系统标定^[4,11],即确定高/低介电常数相分别充满管道时相应各极板对的电容值,测量数据归一化时用;(2)确定出给定高/低介电常数时所对应的重建图像矩阵(MLRR法)或灵敏度分布矩阵(LBP法).但 ECT 系统在实际应用中会碰到这样的问题:有些应用对象无法直接测得高/低介电常数相分别充满管道时相应各极板对的电容值;成像对象的介电常数在不同的工作条件下发生波动,成像对象的介电常数不易确定.文献[12]探讨了 ECT 系统对未知介电常数对象的图像重建方

法;文献 [9]总结了高介电常数相介电常数变化对成像质量的影响.

本文研究了不同介电常数的成像效果,仿真结果如图 5所示.总结图中结果可以得出以下结论:

(1) 不同的成像算法下,成像质量受介电常数变化的影响不同.图 5中,模型 1对象介电常数分别由 6波动为 1.8、3、10,模型 2对象介电常数由 1.8变为 5,当采用 MLRR时,模型 1和 2在不同的对象介电常数下的成像效果差别很大,而当采用 LBP和迭代算法时成像效果相差不大.结果表明 LBP法受到的介电常数变化影响最小;迭代法受到的影响较 LBP法大些,因其需要利用已知的灵敏度分布对图像进行修正;MLRR法的成像质量受到介电常数变化的影响较大,因为回归矩阵取决于介电常数.

(2) 对成像质量的影响起决定性作用的,并不是灵敏度矩阵而是归一化的电容值.因为一定的介电常数范围内相同的极板对形成的灵敏度分布图总体上具有相似的形状,并且灵敏度变化的方向和介电常数的变化方向一致^[7],这也是利用已知介电常数的灵敏度分布代替未知介电常数对象的灵敏度分布的依据.但是当有些应用对象无法直接侧得高/低介电常数相分别充满管道时相应各极板对的电容值,而利用已知介电常数的仿真值代替对测量值进行归一化,这是成像误差的一个来源.

(3) 仿真实验还表明介电常数在正负小范围内变化对成像质量几乎没有影响.

(4) 介电常数负波动对成像效果的影响比较大,而介电常数的正波动对成像效果影响不大,甚至会改善成像效果.见图 5模型 1.文献 [13]的报道也表明应用低介电参数的物质标定可以提高成像的效果和质量.

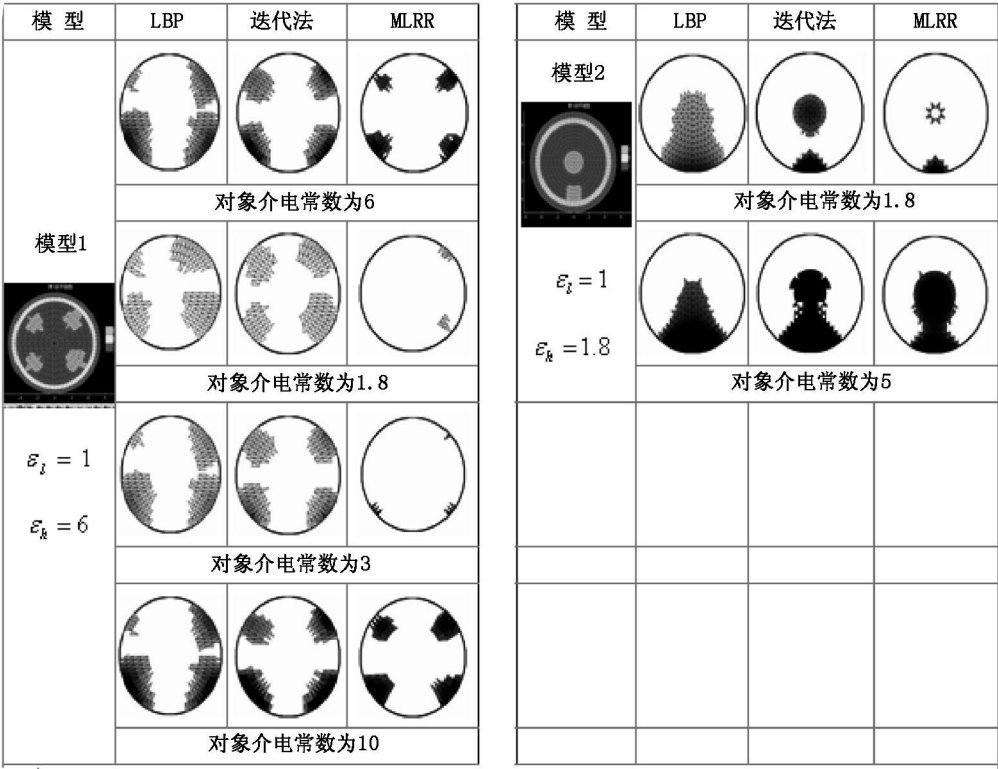


图 5 介电常数变化对成像质量的影响

综上, ECT系统在实际应用中,应尽可能准确的估计出高低介电常数相的介电常数,估计出它们的变化范围,选择合适的算法来进行图像重建.高低介电常数均变化的情况下,不同模型利用不同算法受到的影响程度的量化以及如何把影响减小到最小等还需要进一步的研究工作去做.

5 结束语

除了图像重建算法、电容投影数据直接决定重建图像的质量外,上述仿真研究表明,有限元像素的划分数、极板数以及介电常数的波动也在一定程度上与成像质量有关.将 ECT技术应用于工业现场时,为了设计

最优传感器结构,需要开展进一步的建模工作,包括研究最优电极数、最优剖分策略以及最优测量方案,可参考上述结果,设计好每个环节的参数,选择适当的图像重建算法以达到最好的测量结果。

参考文献:

- [1] 徐苓安,等.过程层析成像技术的研究现状和发展趋势[C].西安:中国仪器仪表学会过程检测控制分会第三届年会论文集(过程控制仪表及系统),1995:63—72.
- [2] 傅文利,赵进创.管路堵塞的电容层析成像可视化监测[J].微计算机信息,2006,12(1):113—114.
- [3] 赵进创.电容层析成像技术及在两相流可视化监测种的应用研究[D].沈阳:东北大学,2001.
- [4] Yang W Q. Calibration of capacitance tomography systems: a new method for setting system measurement range[J]. Meas Sci Technol 1996, 25(7): 863—867.
- [5] Bolton G T, Korchinsky W J, Waterfall R C. Calibration of capacitance tomography systems for liquid-liquid dispersions[J]. Meas Sci Technol 1998, 27(9): 1 797—1 800.
- [6] Xie C G. Review of image reconstruction methods for process tomography[C]. Proceedings of ECAPT '93, Karlsruhe Germany 1993: 115—119.
- [7] Yan H, Liu L J, Xu H, et al. Image reconstruction in electrical capacitance tomography using multiple linear regression and regularization[J]. Meas Sci Technol 2001, 30(12): 579—581.
- [8] 曹琳琳.电容层析成像系统图像重建算法的研究[J].微计算机信息,2007,6(3):272—274.
- [9] 颜 华.电容层析成像技术及在高炉块状区物料可视化检测中应用的基础研究[D].沈阳:东北大学,1999.
- [10] 五 强.电容成像图像重建算法原理及评价[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(4):478—484.
- [11] Yang W Q, D M Spink, T A York, et al. An image-reconstruction algorithm based on landweber's iteration method for electrical capacitance tomography[J]. Meas Sci Technol 1999, 28(10): 1 065—1 069.
- [12] 赵进创,王 师,等.ECT对未知介电常数对象的图像重建方法探讨[J].东北大学学报,2000,21(1):153—156.
- [13] 阎润生,刘 石,王海刚,等.ECT技术对成像的影响——用低介电参数物质标定[J].石油化工高等学校学报,2004,17(1):52—54.

An Analysis of Factors Affecting ECT Image Reconstruction

GAO Yan-li

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: As a measure technology for testing parameters of multi-phase flow, Electrical Capacitance Tomography (ECT) has the characteristics of non-intrusion, non-radiation, low cost, fast response, easy to implement. The quality and rate of image reconstruction are critical for application of ECT in practical industries. In this paper, ECT image reconstruction algorithms LBP, Landweber iteration, and MLRR are used to analyze the four factors that affect the reconstructed image quality including the number, the shape of pixel, the number of electrode sensor and the dielectric constant. Researching results are valuable for improving the image quality.

Key words: electrical capacitance tomography; image reconstruction; pixel; finite element analysis

(责任编辑:吴泽九)