

# 基于最大熵电容成象图象重建算法的研究\*

夏靖波

魏颖 陆增喜

褚改霞

(空军工程大学电讯工程学院 710077) (东北大学信息科学与工程学院) (西宁钢厂计控处)

**摘要** 针对电容层析成象图象重建算法存在的不足,充分考虑灵敏度和介质分布不均匀对图象重建质量的影响,利用信息熵的概念提出最大熵图象重建算法。实验表明,图象重建模型是可靠的,最大熵图象重建算法重建精度优于反投影算法,它具有简单快捷、实时性好等优点,可实现图象的快速重建。

**关键词** 电容成象, 图象重建, 灵敏度分布, 最大熵

**分类号** TP 13

## Image Reconstruction Algorithm for Capacitance Tomography Based on Maximum Entropy

Xia Jingbo

Wei Ying, Lu Zengxi

Chu Gaixia

(Airforce University of Engineering) (Northeastern University) (Xining Steel-factory)

**Abstract** The general principles of capacitance tomography are explained. The non-homogeneity of sensitivity and medium distribution is considered. According to information theory, a new model based on maximum entropy for image reconstruction algorithm is proposed. Experiment results show that the image reconstruction model is much better and faster than the conventional back projection method.

**Key words** capacitance tomography, image reconstruction, sensitivity distribution, maximum entropy

### 1 引言<sup>[1~3]</sup>

电容层析成象(ECT)技术具有成本低、速度快、非侵入式、安全性能好等优点。ECT已在流化床、气/液搅拌反应器、液/固水力旋流分离器、固体粉料的气力输送系统以及两相流等实验装置上得到应用,获得了传统检测方法所不能得到而对过程机理研究极为有用的信息。但由于被测工业过程容器几何尺寸(如管径)的限制,安装测量电极数目有限,只能获取有限个测量电容值(理论上要求无限个投影数据),需对缺失的投影数据进行补偿。此外,由于电容测量的软场特性,即电容测量的灵敏度分布受被测多相流介质分布的影响,易引起测量误差。

针对上述问题,我们利用有限元方法对电容传感器进行优化设计,改进微弱测量方法和电路,对图象重建算法进行深入研究,提出了最大熵图象重建算法。该算法克服了现有电容流动成象系统存在的

测量误差大、图象重建质量不高等缺点。

### 2 电容层析成象基本原理<sup>[4~6]</sup>

电容层析成象系统如图 1 所示,它由三部分组成:1) 传感器系统;2) 数据采集系统;3) 成象计算机。传感器系统通常是由均匀安装在过程容器外壁的多对电容极板构成。对于一个  $N$  极板的成象系统,可得到独立的  $N(N-1)/2$  个测量值。由于这些测量值反映了过程容器内介电常数的分布情况,采用某种图象重建算法,便可给出被测对象介质分布的断层图。增加极板数目  $N$ ,可获得更多的扫描数据,从而提高重建图象的质量,但会出现信噪比降低,边缘效应增大等问题。

电容传感器的敏感场可作为静电场来处理。假定电容敏感场内无自由电荷分布,则该静电场可由拉氏方程描述为

$$\nabla(\epsilon(x, y, z) \nabla \mathcal{Q}(x, y, z)) = 0 \quad (1)$$

其中,  $\epsilon(x, y, z)$  为空间介电常数分布,  $\mathcal{Q}(x, y, z)$  为空间电位分布, 电场强度分布为

\* 国家重点科技项目(85-501-01-04-04)

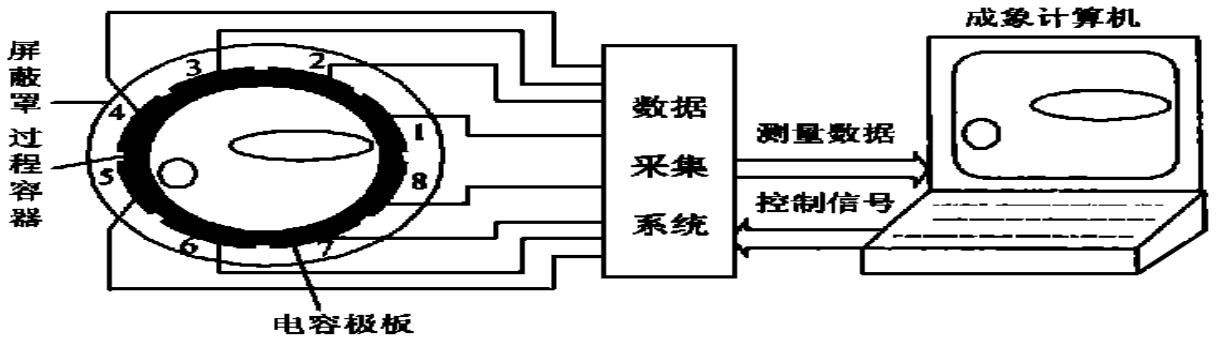


图1 电容层析成像系统

$$\vec{E} = -\nabla\varphi(x, y, z) \quad (2)$$

当极板*i*为源极板时,检测极板*j*上的感应电荷为

$$Q_{i,j} = \iint_A(x, y, z) \vec{E} dA \quad (3)$$

其中*A*是包围检测极板*j*的封闭曲面。极板*i, j*间的电容为

$$C_{i,j} = Q_{i,j} / U_{i,j} \quad (4)$$

其中*U<sub>i,j</sub>*为源极板*i*与检测极板*j*(地电位)间的电位差。

在给定空间介电常数分布 $\epsilon(x, y, z)$ 及相应边界条件(即各极板及屏蔽罩的电位值)后,电容值可由上述方法计算出来。通常,方程(1)的解析解是极难获得的,要用有限元法求其数值解。电容极板在过程容器断面存在一个非均匀的敏感场分布,尤其对于不同的流体,例如核心流、环状流和层流等。

研究表明,电容传感器的结构参数对电容敏感场灵敏度的分布有着重要影响。为了保证组分准确测量和重建图象的质量,希望能在过程容器内部的任何位置上,相同面积的微小区域内相同介电常数的变化所引起的传感器输出相等或趋于相等,即阵列传感器优化的主要目标是获得均匀的敏感场分布。这里采用有限元分析软件包计算敏感场的灵敏度分布,对传感器结构参数进行优化设计。

### 3 图象重建算法<sup>[3,7]</sup>

重建图象是由观测数据反演物理模型,即积分反演问题,称为逆问题或反问题。由于受电容传感器结构的限制,只能获取有限个投影数据,并且其检测场具有“软场”特性。图象重建就是由有限个电容测量值推断过程容器内介电常数分布,从而得知被测介质的分布情况。线性反投影算法是一种简单、快速的图象重建算法,但重建图象的质量较低,因此需进一步改进图象重建算法。在8极板电容层析成像系

统中,任意两个极板间的电容值*C<sub>ij</sub>*可表达为

$$C_{ij} = \iint_D S_{ij}(x, y, \epsilon(x, y)) \epsilon(x, y) dx dy \quad (5)$$

其中,*D*为管道成像区域面积, $\epsilon(x, y)$ 为两相流介质介电常数分布函数, $S_{ij}(x, y, \epsilon(x, y))$ 为该对极板间灵敏度分布函数, $i = 1, 2, \dots, 7, j = i + 1$ 。

假设两相流介质介电常数分布函数 $\epsilon(x, y)$ 对电容*C<sub>ij</sub>*灵敏度分布函数的影响很小,可以忽略,则

$$S_{ij}(x, y, \epsilon(x, y)) = S_{ij}(x, y) \quad (6)$$

$$C_{ij} = \iint_D S_{ij}(x, y) \epsilon(x, y) dx dy \quad (7)$$

对测量电容*C<sub>ij</sub>*进行归一化处理,得到*C<sub>ij</sub>*的归一化电容*C<sub>r<sub>ij</sub></sub>*

$$C_{r_{ij}} = \frac{C_{ij} - C_{ij}^g}{C_{ij}^g - C_{ij}^s} \quad (8)$$

其中, $C_{ij}^g$ 为被测过程容器充满连续相——气相时的测量电容值, $C_{ij}^s$ 为被测过程容器充满离散相——固相时的测量电容值, $\epsilon_g$ 为气相介质的介电常数 $\epsilon$ 是固相介质的介电常数。整理得

$$C_{r_{ij}} = \frac{\iint_D \frac{\epsilon(x, y) - \epsilon_g}{\epsilon - \epsilon_g} S_{ij}(x, y) dx dy}{\iint_D S_{ij}(x, y) dx dy} \quad (9)$$

将成像区域介质介电常数分布的变化 $\frac{\epsilon(x, y) - \epsilon_g}{\epsilon - \epsilon_g}$ 与图象灰度相联系,则有

$$f(x, y) = \frac{\epsilon(x, y) - \epsilon_g}{\epsilon - \epsilon_g} \quad (10)$$

$f(x, y)$ 可视为在整个成像区域内(即整个灵敏区内)的灰度分布,其物理意义为整个成像区域内的介质分布信息。根据电容成像检测灵敏度的要求,考虑到积分方程求解的困难,式(10)克服了反投影算法较多不合理的假设,仅做出一条假设,即介电常数分布函数 $\epsilon(x, y)$ 对电容*C<sub>ij</sub>*灵敏度分布函数的影响

很小, 可以忽略。另外, 将归一化技术引入模型, 既可消除各种干扰对测量数据的影响, 又可使测量数据无量纲化, 从而方便地与图象建立联系。

将成象区域图象  $f(x, y)$  离散化, 用有限元电磁场软件包将成象区域划分成 512 个象素。考虑误差的影响, 依据二重积分面积分割微元求和近似算法, 图象重建模型为

$$\tilde{P} = MF + \epsilon \quad (11)$$

其中,  $\tilde{P} = [\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_{512}]^T$  为实际测量投影数据矢量,  $\epsilon = [\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{512}]^T$  为投影数据误差矢量,  $F = [f_1, f_2, \dots, f_{512}]^T$  为离散化后图象灰度矢量,  $M$  为  $28 \times 512$  维权系数矩阵, 其权重系数  $M_{ij}$  由下式求得。

$$M_{ij}(k) = \mu_{ij}(k) S_{ij}(k) D_k \quad (12)$$

其中,  $\mu(k)$  为第  $k$  个象素的修正因子,  $S_{ij}(k)$  为第  $k$  个象素对应于第  $i$  和  $j$  极板间的灵敏度值(可预先算得),  $D_k$  为第  $k$  个象素对应的面积。

由投影数据重建图象这一逆问题为不适定问题。当测量数据有微小变化时, 相应的最小二乘解对其很敏感, 导致图象灰度波动较大。由于微小电容测量的困难, 实际投影数据含有较大的误差。因此, 采用最小二乘法不能解决图象重建问题, 需要寻求一种稳定的算法。图象重建过程的关键在于合理地利用先验知识, 构造一个由先验知识所决定的约束代价泛函, 从不唯一的可行解集合中选出所需要的唯一解。最大熵法在信号处理的许多领域得到了广泛应用, 并在多数情况下取得了较好的效果。图象的熵可表示为<sup>[8]</sup>

$$H(F) = - \sum_{i=1}^{512} f_i \ln f_i \quad (13)$$

如果投影误差  $\epsilon$  的最大方差为  $\sigma_{\max}^2$ , 设定约束条件为

$$\tilde{P} - MF \quad \text{var} = \sigma_{\max}^2 \quad (14)$$

则最大熵图象重建问题可表述为: 在满足约束条件(14)下, 求使  $H(F)$  为最大  $F$  问题。利用拉格朗日乘数法, 可转变成求如下的泛函极值

$$\begin{aligned} J(F, \lambda) &= \\ &F^T \ln F - \lambda (\tilde{P} - MF \quad \text{var} - \sigma_{\max}^2) = \\ &F^T \ln F - \lambda [(\tilde{P} - MF)(\tilde{P} - MF)^T - \sigma_{\max}^2] \end{aligned} \quad (15)$$

对  $F$  求导, 并令其导数为零, 可得

$$\frac{\partial J(F, \lambda)}{\partial F} = 1 + \ln F + 2\lambda M^T (\tilde{P} - MF) = 0$$

解得

$$\tilde{F} = \exp\{-1 - 2\lambda M^T (\tilde{P} - MF)\} \quad (17)$$

其中  $I$  为单位矩阵。对于  $F$  而言, 方程所包含的指数函数保证了重建灰度信号总为正。实际应用时, 将式(17)用泰勒级数展开, 并取前两项近似得

$$\tilde{F} \approx I + (-I - 2\lambda M^T (\tilde{P} - MF)) \quad (18)$$

这时得到估值  $\tilde{F}$

$$\tilde{F} = W\tilde{P}, \quad W = (M^T M + N)^{-1} M^T \quad (19)$$

其中  $\lambda$  为拉格朗日乘子。象素的灰度阈值  $\eta$  由下式确定。

$$\eta = (1 - \alpha)\xi \quad (20)$$

式中

$$\alpha = \frac{1}{28} \sum_{i=1}^7 \sum_{j=i+1}^8 C_{r_{ij}}, \quad \xi = \frac{1}{512} \sum_{k=1}^{512} f(k) \quad (21)$$

这样, 最大熵图象重建算法可表述为: 首先由式(19)确定象素灰度值, 然后由式(20)进行阈值滤波, 最后用二值化灰度值来表征气相和固相的介质分布状况。矩阵  $M$  由式(12)用有限元算法预先求得; 拉格朗日乘子  $\lambda$  通过实验来确定, 它的合理选择是对噪声方差的正确估计。在实际成象过程中, 计算矩阵  $W$  与投影数据矢量之积, 最后进行阈值滤波。

## 4 图象重建结果

为验证最大熵图象重建算法, 在实际中用介电常数约为 3.2, 直径 3mm 的塑料颗粒, 放置在水平管道中的不同位置来模拟各种层流; 用直径不同的薄壁中空的玻璃管密封两端, 管道和玻璃管之间填充塑料颗粒, 形成各种环流; 用塑料颗粒填充直径不同的玻璃管插入管道形成各种核心流。图象重建结果与用塑料颗粒模拟的实际流型分布基本相符。在实际成象过程中, 式(12)中拉格朗日算子  $\lambda$  的选择对图象重建结果有很大影响, 经反复实验确定  $\lambda = 0.18$ 。

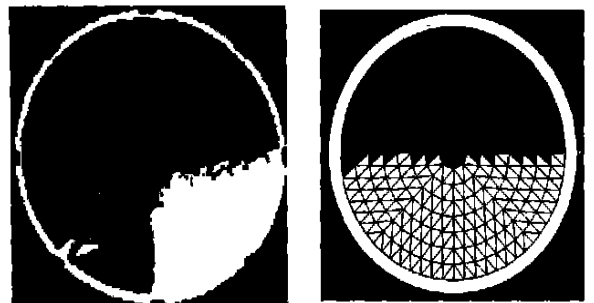


图 2 反投影算法和最大熵算法重建结果对比

(a) 反投影算法重建结果<sup>[1]</sup> (b) 最大熵算法重建结果

图 2(a) 为采用反投影算法, 以充满 1/2 管道静态水模拟层流的图象重建结果; 图 2(b) 为采用最大熵图象重建算法重建的结果 ( $\lambda = 0.26$ )。实验结果表明, 所建立的图象重建模型是可靠的, 图象重建结果明显优于反投影算法。

## 5 结 论

本文针对电容层析成像图象重建算法存在的不足, 对由投影数据重建图象这一逆问题提出了最大熵图象重建算法。该方法利用信息熵的概念, 用重建图象灰度信号去构造约束代价泛函, 从不唯一的可行解的集合中选出所需要的唯一解, 从而克服了诸如重建图象局部光滑性, 重建图象能量有限等一些人为假设, 并隐含实现了这些约束。实验结果表明, 图象重建模型是可靠的, 最大熵图象重建算法重建精度优于反投影算法。该方法具有简单快捷、实时性强等优点, 可实现图象的快速重建。但最大熵图象重建算法还不能完全消除不合理假设带来的误差, 这有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 S M Huang, Green R G, M S Beckl. Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors. *J Phys E: Sci Instrum*, 1989, 22: 173~177
- 2 C G Xie, S M Huang, B S Hoyle. Electrical capacitance

tomography for flow imaging: System mode for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors. *IEE Proc G*, 1992, 139: 89~98

- 3 N Reinecke, D Mewes. Recent development and industrial/research applications of capacitance tomography. *Meas Sci Tec*, 1996, 7: 233~246
- 4 S H Kan, F Abdullah. Finite element modeling of multi-electrode capacitive systems for flow imaging. *IEE Proc G*, 1993, 140(3): 216~222
- 5 C G Xie, S M Huang. Experimental evaluation of capacitance tomographic flow imaging systems using physical models. *IEE Proc Circ Dev Syst*, 1995, (141): 357~368
- 6 W Q Yang. Modeling of capacitance tomography sensors. *IEE Proc Sci Meas Tec*, 1997, (144): 203~208
- 7 王国荣. 矩阵与算子广义逆. 北京: 科学出版社, 1994
- 8 王延平. 信号复原与重建. 南京: 东南大学出版社, 1992

## 作 者 简 介

夏靖波 男, 1963年生。空军工程大学电讯工程学院副教授, 博士后。研究方向为工业过程成象。

魏 颖 女, 1968年生。东北大学信息科学与工程学院博士生。研究方向为工业过程成象。

陆增喜 男, 1968年生。东北大学信息科学与工程学院工程师。研究方向为多相流参数检测。

褚改霞 女, 1973年生。1995年毕业于东北大学自控系, 现在西宁钢厂计控处工作。

(上接第 430 页)

## 参 考 文 献

- 1 华宏鸣. “传统企业”向“现代企业”过渡的途径——“现代化集成”管理. *管理工程学报*, 1997, 11(4): 251~258
- 2 白英彩. 计算机集成制造系统——CIMS. 北京: 学苑出版社, 1994
- 3 史忠植. 高级人工智能. 北京: 科学出版社, 1998
- 4 J Y C Pan, J M Tenebaum. An intelligent agent framework for enterprise integration. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1991, 21(6): 1391~1408
- 5 J Y C Pan, J M Tenebaum, J Glicksman. A framework for knowledge-based computer-integrated manufacturing. *IEEE Trans on Semicond Manufact*, 1989, 2: 33~46
- 6 J Glicksman, J B L Hitson, Y C Pan *et al.* MKS: A conceptually centralized knowledge service for distributed CIM environments. *J of Intelligent Manufacturing*, 1991, 2(1): 27~42
- 7 龚报钧, 张泉灵, 王树青. 基于 Broadcast 模板的交互系统. *计算机工程与应用*, 1998, 34(5): 34~37

8 Yoav Shoham. Agent-oriented programming. *Artificial Intelligence*, 1993, 60: 51~92

9 P Coad, E Yourdon. 邵维忠译. 面向对象分析. 北京: 北京大学出版社, 1992

10 S Bailin. An object-oriented requirements specification method communications of ACM, 1989, 32(5): 608~623

11 朱军, 华庆一, 郝克刚. 一个基于 CORBA 的图形用户界面体系结构及实例. *计算机学报*, 1999, 21(1): 79~85

## 作 者 简 介

龚报钧 男, 1969年生。南昌大学教师, 浙江大学工业控制技术研究所博士生。主要研究方向为企业综合自动化, 管理信息系统, 智能控制理论及应用等。

王树青 男, 1939年生。浙江大学工业控制技术国家重点实验室主任, 教授, 博士生导师。主要研究方向为自动控制理论及应用, 工业生产过程模型化与优化控制, 计算机控制和集成生产系统。