

# 一种新的电容层析成像电容测量值归一化模型

张立峰<sup>1</sup>, 田沛<sup>1</sup>, 马平<sup>1</sup>, 王化祥<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学自动化系, 河北省 保定市 071003;

2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

## A New Capacitance Normalized Model Used in Electrical Capacitance Tomography

ZHANG Lifeng<sup>1</sup>, TIAN Pei<sup>1</sup>, MA Ping<sup>1</sup>, WANG Huaxiang<sup>2</sup>

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** During the image reconstruction of electrical capacitance tomography (ECT), the measured capacitances by ECT system are usually normalized at the high and low permittivity for image. Parallel normalization model is commonly used during normalization process, which assumes the distribution of materials in parallel. And thus, the normalized capacitance is a linear function of measured capacitance. The usage of series normalization model results in the normalized capacitance as a nonlinear function of measured capacitance. The reconstructed images are improved using series normalization model compared with parallel normalization model. The newest presented combined model is based on electrical field centre lines (EFCL), which is a mixture of two normalization models. The multi-threshold method for combined model was presented. Simulation and experimental results show that reconstructed images with higher quality can be obtained based on the combined model and presented multi-threshold method.

**KEY WORDS:** electrical capacitance tomography; image reconstruction; normalization model; multi-threshold

**摘要:** 在电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)图像重建中, 测量电容需根据高、低介电常数进行归一化处理。并联模型为常用的归一化模型, 其归一化电容值与测量电容值为线性关系。串联归一化模型, 其归一化电容值与测量电容值则为非线性关系, 与并联归一化模型相比, 重建图像有所改善。最新提出的基于电力中心线的混联模型为并联及串联归一化模型的混合, 该文针对混联归一化模型提出了确定模型因子的多阈值方法。仿真及实验结果表明,

基于多阈值的混联归一化模型, 其重建图像质量得到较大提高。

**关键词:** 电容层析成像; 图像重建; 归一化模型; 多阈值

## 0 引言

电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)技术是自20世纪80年代发展起来的一种用于工业管道多相流测量的过程层析成像技术<sup>[1-7]</sup>。

电容层析成像系统如图1所示, 敏感阵列电极布置在绝缘管道外壁, 数据采集系统测量不同电极对间的电容值, 获得不同观测角度下的“投影数据”, 通过图像重建算法即可获得管道截面介质的介电常数分布图像<sup>[8]</sup>, 对12电极ECT系统, 共可获得66个独立电容测量值<sup>[9]</sup>。

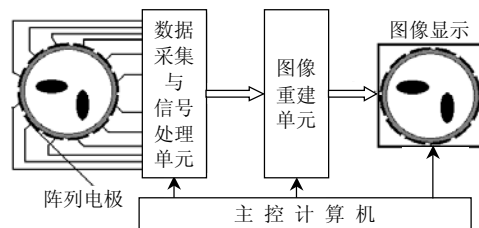


图1 12电极电容层析成像系统结构图

Fig. 1 Structure of the 12-electrode ECT system

经线性化及离散化处理, 测量电容值与介质的介电常数分布关系<sup>[10]</sup>如下:

$$\lambda_{M \times 1} = S_{M \times N} G_{N \times 1} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$ 为归一化后的电容值;  $G$ 为归一化后的图像灰度;  $M$ 为ECT系统的独立测量数;  $N$ 为分割网格单元数;  $S$ 为灵敏度矩阵, 其定义<sup>[11]</sup>为

$$S_{ij}(k) = \mu(k) \cdot \frac{C_{ij}^m(k) - C_{ij}^l}{C_{ij}^h - C_{ij}^l} \cdot \frac{1}{\varepsilon_h - \varepsilon_l} \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金项目(60820106002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60820106002).

式中： $\mu(k)$ 为由像素  $k$  面积决定的系数，并定义为总面积与该像素面积之比； $C_{ij}^l$ 、 $C_{ij}^h$  分别为管内充满低介电常数相(介电常数为  $\epsilon_l$ )和高介电常数相(介电常数为  $\epsilon_h$ )时的电容值； $C_{ij}^m$  为管内充满两相混合介质时  $i$ - $j$  电极对的测量电容值。

对于 ECT 系统,在实际测量中通常进行 2 点(空管及满管)标定,即分别用高介电常数相介质(如油/气两相流中的油相)和低介电常数相介质(如油/气两相流中的气相)充满传感器管道并测量相应的电容值  $C^h$  和  $C^l$ ,对于实际的两相混合介质,图像重建前要利用标定数据  $C^h$  和  $C^l$  对电容测量数据  $C^m$  进行归一化处理。

归一化的目的<sup>[12]</sup>为:使测量数据无量纲化,便于数学处理并与数字图像相联系;同时亦可减少测量误差。对同一组电容测量值,不同的归一化模型将影响重建图像的质量。

最早使用的归一化模型为并联模型<sup>[9]</sup>;1999 年 Yang 和 Byars 研究了串联模型<sup>[13]</sup>,并通过反投影法得到基于串联模型的重建图像,效果优于并联模型;2002 年 McKeen 和 Pugsley 研究了并联、串联及 Maxwell 模型对图像重建的影响<sup>[14]</sup>;2007 年 Kim 等人结合基于电场线模型考虑了 2 种混联模型<sup>[15]</sup>;2008 年董向元和郭淑青研究了对并联模型和串联模型进行加权的混联模型<sup>[16]</sup>。

本文在分析已有的并联、串联及混联归一化模型的基础上,提出了结合电场线分布与混联归一化模型的灵敏度矩阵计算方法,导出了基于混联归一化模型的最优迭代因子 Landweber 迭代算法。仿真及静态实验结果均表明,基于混联归一化模型所得重建图像质量得到较大提高,可较好地区分多个物体,重建图像中物体边缘清晰。

## 1 电容测量值归一化模型

### 1.1 并联归一化模型

以平行板电容器为例,电容的并联模型如图 2(a)所示。斜线部分代表高介电常数相,白色为低介电常数相,相浓度(高介电常数相浓度)为  $c_1$ ,

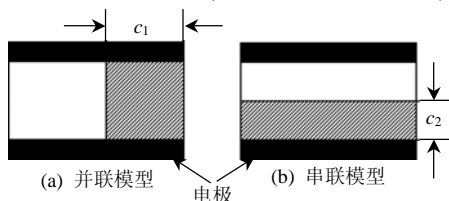


图 2 并联及串联模型示意图

Fig. 2 Parallel and series models

空管及满管标定电容值分别为  $C^l$  和  $C^h$ 。

对于并联模型,被测电容可表达为

$$C^m = (1 - c_1)C^l + C^h c_1 \quad (3)$$

则有

$$c_1 = \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} = \lambda^p \quad (4)$$

式中  $\lambda^p$  为归一化电容值,且与测量电容值  $C^m$  为线性关系。

并联归一化模型的灵敏度矩阵按式(2)计算。

### 1.2 串联归一化模型

电容的串联模型如图 2(b)所示。斜线部分代表高介电常数相,白色为低介电常数相,相浓度(高介电常数相浓度)为  $c_2$ ,对于串联模型,被测电容可表达为:

$$1/C^m = 1/[(1 - c_2)C^l] + 1/(c_2 C^h) \quad (5)$$

则有

$$c_2 = (1/C^m - 1/C^l)(1/C^h - 1/C^l) = \lambda^s \quad (6)$$

式中  $\lambda^s$  为归一化电容值,且与测量电容值  $C^m$  为非线性关系。

串联归一化模型的灵敏度矩阵按式(7)计算:

$$S_{ij}(k) = \mu(k) \cdot \frac{1/C_{ij}^m(k) - 1/C_{ij}^l}{1/C_{ij}^h - 1/C_{ij}^l} \cdot \frac{1}{\epsilon_h - \epsilon_l} \quad (7)$$

### 1.3 混联归一化模型

多相流型复杂多变,对于 ECT 阵列电极而言,任一对电极对之间的测量电容与介质的分布不能简单地用并联或串联模型表达,遂有学者提出用混联归一化模型近似表达,其表达式为

$$\lambda^c = (1 - \alpha)\lambda^p + \alpha\lambda^s = (1 - \alpha) \frac{C^m - C^l}{C^h - C^l} + \alpha \frac{1/C^m - 1/C^l}{1/C^h - 1/C^l} \quad (8)$$

式中： $\lambda^c$  为归一化电容值； $\alpha$  为模型加权因子，当  $\alpha=0$  时，混联归一化模型即为并联归一化模型，当  $\alpha=1$  时，混联归一化模型则为串联归一化模型。

混联归一化模型的灵敏度矩阵按下式计算：

$$S_{ij}(k) = \mu(k) \cdot [(1 - \alpha(k)) \left( \frac{C_{ij}^m(k) - C_{ij}^l}{C_{ij}^h - C_{ij}^l} \right) + \alpha(k) \left( \frac{1/C_{ij}^m(k) - 1/C_{ij}^l}{1/C_{ij}^h - 1/C_{ij}^l} \right)] \cdot \frac{1}{\epsilon_h - \epsilon_l} \quad (9)$$

## 2 混联归一化模型的模型加权因子计算

本文提出基于电场线及多阈值的混联归一化模型加权因子计算方法,基于电场线的方法最早由 Loser 等人于 2001 年提出<sup>[17]</sup>。

以电极 1 和电极 5 为例,定义其中心电场线为

连接两电极中点的电场线,如图3所示。

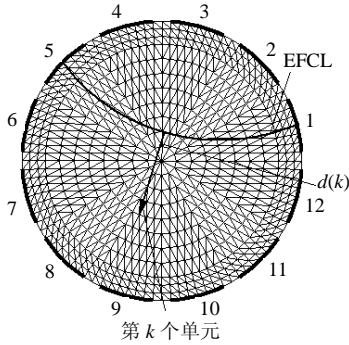


图3 电极1及电极5的中心电场线

Fig. 3 Electrical field centre line between electrode 1 and electrode 5

图3中给出了电极1及电极5之间的中心电场线,并示出了第 $k$ 个单元到中心电场线的距离 $d(k)$ ,使用该距离并按图4中所示的多阈值确定模型加权因子。

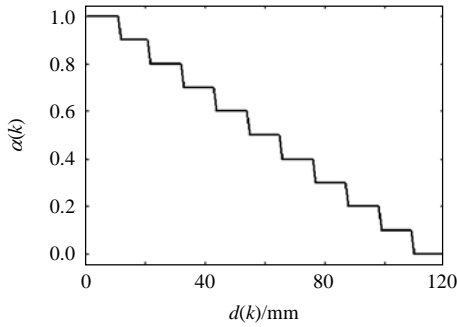


图4 多阈值曲线图

Fig. 4 Curve of multi-threshold

$$\alpha(k) = f(d(k)) = 1 - 0.1i \quad \text{if } 11i \leq d(k) < 11(i+1) \\ (i=0,1,\dots,10; k=1,2,\dots,768) \quad (10)$$

### 3 混联归一化模型的Landweber迭代算法

ECT的Landweber迭代算法最早由Yang等人于1999年提出<sup>[18]</sup>,随后,Liu等人对该算法的迭代因子进行了优化,加快了迭代速度,重建图像精度有所提高,以并联归一化模型为例,该算法如式(11)<sup>[19]</sup>所示:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}_k + \eta_k \mathbf{S}^T (\boldsymbol{\lambda}^P - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \\ \mathbf{G}_0 = \mathbf{S}^T \boldsymbol{\lambda}^P \\ \eta_k = \frac{\|\mathbf{S}^T \mathbf{e}_k\|^2}{\|\mathbf{S} \mathbf{S}^T \mathbf{e}_k\|^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{e}_k = \boldsymbol{\lambda}^P - \mathbf{S} \mathbf{G}_k$ ;  $\eta_k$ 为第 $k$ 步的迭代因子;  $\mathbf{G}_k$ 为第 $k$ 步迭代的图像灰度矩阵。

对于串联模型,只需将式(11)中的 $\boldsymbol{\lambda}^P$ 改成 $\boldsymbol{\lambda}^S$ ,且灵敏度矩阵采用式(7)计算的灵敏度矩阵即可,在此不再列出。对于混联归一化模型,由于归一化的

电容值与模型加权因子有关,因此需确定最佳模型加权因子,同时又要得到最佳迭代因子,此时,Landweber迭代算法如下:

$$\mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}_k + \eta_k \mathbf{S}^T (\boldsymbol{\lambda}^C - \mathbf{S} \mathbf{G}_k) \quad (12)$$

$$\mathbf{e}_{k+1} = \boldsymbol{\lambda}^C - \mathbf{S} \mathbf{G}_{k+1} = \boldsymbol{\lambda}^C - \mathbf{S} (\mathbf{G}_k + \eta_k \mathbf{S}^T \mathbf{e}_k) =$$

$$\mathbf{e}_k - \eta_k \mathbf{S} \mathbf{S}^T \mathbf{e}_k = (\mathbf{I}_M - \eta_k \mathbf{S} \mathbf{S}^T) \cdot$$

$$[(1 - \alpha_k) \boldsymbol{\lambda}^P + \alpha_k \boldsymbol{\lambda}^S - \mathbf{S} \mathbf{G}_k] \quad (13)$$

$\mathbf{e}_{k+1}$ 的范数平方为

$$J(\eta, \alpha) = \|\mathbf{e}_{k+1}\|^2 = \|(\mathbf{I}_M - \eta_k \mathbf{S} \mathbf{S}^T) [\boldsymbol{\lambda}^P + \alpha_k (\boldsymbol{\lambda}^S - \boldsymbol{\lambda}^P) - \mathbf{S} \mathbf{G}_k]\|^2 \quad (14)$$

式中 $M$ 为独立测量数。

$$\text{令 } \frac{\partial J(\eta, \alpha)}{\partial \eta} = 0 \text{ 及 } \frac{\partial J(\eta, \alpha)}{\partial \alpha} = 0, \text{ 则有}$$

$$\eta_k = \frac{\|\mathbf{S}^T [\boldsymbol{\lambda}^P + \alpha_k (\boldsymbol{\lambda}^S - \boldsymbol{\lambda}^P) - \mathbf{S} \mathbf{G}_k]\|^2}{\|\mathbf{S} \mathbf{S}^T [\boldsymbol{\lambda}^P + \alpha_k (\boldsymbol{\lambda}^S - \boldsymbol{\lambda}^P) - \mathbf{S} \mathbf{G}_k]\|^2} \quad (15)$$

$$\alpha_k = [\mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{S} \mathbf{G}_k + (\mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{S} \mathbf{G}_k)^T - \mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \boldsymbol{\lambda}^P - (\mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \boldsymbol{\lambda}^P)^T] / (2 \mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{A}) \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{A} = \boldsymbol{\lambda}^S - \boldsymbol{\lambda}^P$ ;  $\mathbf{B} = \mathbf{I}_M - \eta_k \mathbf{S} \mathbf{S}^T$ 。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 仿真实验

12电极ECT系统,管道内径为120mm,以空气/油两相流系统为研究对象,空气和油的相对介电常数设为1和2.6,选取的物体分布如图5所示。

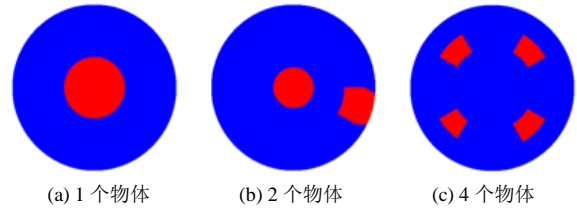


图5 仿真分布模型

Fig. 5 Simulated permittivity distribution

3种分布的重建图像如图6所示,基于并联归一化模型的重建图像,边缘不清晰,尤其对于2个物体的分布,中心物体成像效果差且与靠近管壁物体的图像连成一体,不易区分,而基于串联及混联归一化模型的重建图像优于并联归一化模型,其中,混联归一化模型所得重建图像边缘清晰,更接近真实分布,易于区分多个物体。

为定量比较重建图像质量,按式(17)计算其图像相对误差:

$$r = \|\hat{\mathbf{G}} - \mathbf{G}\|_2 / \|\mathbf{G}\|_2 \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{G}$ 为真实介电常数分布;  $\hat{\mathbf{G}}$ 为由重建图像得

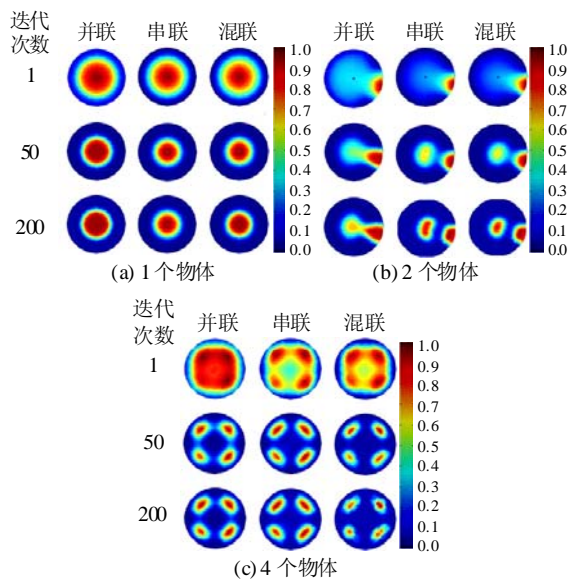


图 6 重建图像结果

Fig. 6 Reconstructed images

到的估计介电常数分布。

3 种归一化模型 200 次迭代的图像相对误差如表 1 所示。

由表 1 可知，基于混联归一化模型的重建图像，其图像相对误差均小于并联及串联归一化模型。

表 1 200 次迭代的图像相对误差

Tab. 1 Image relative error at 200th iteration

仿真分布	并联模型	串联模型	混联模型
1 个物体	0.728 5	0.397 3	0.213 4
2 个物体	0.769 8	0.601 3	0.510 7
4 个物体	0.647 3	0.750 3	0.501 7

#### 4.2 静态实验

静态实验采用天津大学最新研制的基于现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)的双模态(电容/电阻)成像系统，相关技术指标见文献[20]，重建图像如图 7 所示。

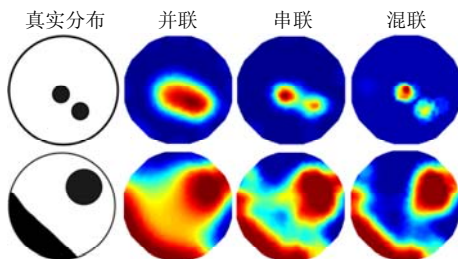


图 7 静态实验结果

Fig. 7 Results of static test

对于第 1 种分布，两有机玻璃棒相距很近且其中一根靠近管道中心，并联模型的重建图像不能将其分开，串联归一化模型的重建图像效果优于并联模型，大体能区分两个棒，但图像边缘不清晰，混

联归一化模型的重建图像可清楚地区分 2 个棒，重建图像边缘清晰；对于第 2 种分布，基于混联归一化模型的重建图像边缘清晰，棒的重建图像与层流部分分割明显。

#### 5 结论

本文比较了 3 种归一化模型的成像效果，结果表明，混联归一化模型的成像效果最优，可较好地区分多个物体，所得图像中物体边缘清晰，串联归一化模型效果次之，并联归一化模型效果较差，可见，对本文研究的几种分布模型，混联归一化模型可作为对物体分布更好的等效模型。

#### 参考文献

- [1] Williams R A, Beck M S. Process tomography—principles techniques and application [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [2] Yang W Q, Beck M S, Byars M. Electrical capacitance tomography—from design to applications[J]. Measurement & Control, 1995, 28(9): 261-266.
- [3] Beck M S, Williams R A. Process tomography: a European innovation and its applications[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(3): 215-224.
- [4] Huang S M, Plaskowski A, Xie C G, et al. Capacitance-based tomographic imaging system[J]. Electronic Letters, 1998, 24(7): 418-419.
- [5] Liu S, Yang W Q, Wang H, et al. Investigations of square fluidized beds using capacitance tomography : preliminary results [J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(8): 1120-1125.
- [6] Liu S, Chen Q, Wang H G, et al. Electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(1): 135-144.
- [7] 陈琪, 刘石. 多孔介质内燃烧的电容层析成像可视化测量及数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 62-67.  
Chen Qi, Liu Shi. Electrical capacitance tomography visualization and numerical analysis of combustion in porous media[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 62-67(in Chinese) .
- [8] 张立峰, 王化祥. 基于小波神经网络的电容层析成像图像重建算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 39-43.  
Zhang Lifeng, Wang Huaxiang. Image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on wavelet neural networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 39-43(in Chinese).
- [9] Yang W Q, Peng L H. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science & Technology, 2003, 14(1): R1-R13.
- [10] Wang H X, Tang L. An image reconstruction algorithm based on total variation with adaptive mesh refinement for ECT[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(5-6): 262-267.
- [11] Dyakowski T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(3):

- 343-353.
- [12] Guo Z H, Shao F Q, Lü D. Sensitivity matrix construction for electrical capacitance tomography based on the different model [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2009, 20(3): 95-102.
- [13] Yang W Q, Byars M. An improved normalization approach for electrical capacitance tomography[C]//Proceedings of 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, UK, 1999.
- [14] McKeen T R, Pugsley T S. The influence of permittivity models on phantom images obtained from electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(12): 1822-1830.
- [15] Kim Y S, Lee S H, Ijaz U Z, et al. Sensitivity map generation in electrical capacitance tomography using mixed normalization models [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(7): 2092-2102.
- [16] Dong X Y, Guo S Q. Image reconstruction method for electrical capacitance tomography based on the combined series and parallel normalization model[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(4): 045502.
- [17] Loser T, Wajman R, Mewes D. Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines[J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(8): 1083-1091.
- [18] Yang W Q, Spink D M, York T A, et al. An image-reconstruction iteration method for electrical-capacitance tomography[J]. Measurement Science & Technology, 1999, 10(11): 1065-1069.
- [19] Liu S, Fu L, Yang W Q. Optimization of iterative reconstruction process for electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science & Technology, 1999, 10(7): L37-L39.
- [20] Zhang L F, Wang H X. Identification of oil-gas two-phase flow pattern based on SVM and electrical capacitance tomography technique [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(1): 20-24.



张立峰

收稿日期: 2010-09-06。

作者简介:

张立峰(1979), 男, 博士, 讲师, 主要从事多相流检测及电学层析成像技术方面的研究工作, zhanglf@tju.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)