

文章编号: 2095-4980(2024)12-1383-05

## 基于 Sigmoid 函数的 ECT 灵敏度预处理

周广明, 王伊凡

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 电容层析成像(ECT)图像重建算法利用敏感度矩阵作为先验知识, 反演管道内介质的分布情况, 因此, 灵敏度矩阵对图像重建的质量起着至关重要的作用。由于 ECT 传感器具有软场特性, 场域内的灵敏度分布并不均匀, 传感器中心区域与边缘区域差异过大, 影响重建图像质量。本文提出一种基于 Sigmoid 函数的灵敏度预处理方法, 由仿真实验结果可知, 该方法能显著提高灵敏度矩阵的均匀性, 并大大提高重建图像的质量: 图像空间误差(ISE)降低 0.382 5; 图像相对误差(RE)降低 0.386 5; 相关系数(CC)提升 0.060 8, 验证了此方法在 ECT 图像重建中的可行性。

**关键词:** 两相流; 图像重建; 传感器; 灵敏度预处理; 电容层析成像(ECT)

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023072

## ECT sensitivity preprocessing based on Sigmoid function

ZHOU Guangming, WANG Yifan

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110000, China)

**Abstract:** Electrical Capacitance Tomography(ECT) image reconstruction algorithms utilize the sensitivity matrix as prior knowledge to invert the distribution of media within the pipeline, hence, the sensitivity matrix plays a crucial role in the quality of image reconstruction. Due to the soft-field characteristics of ECT sensors, the sensitivity distribution within the field is not uniform, with significant differences between the central and peripheral areas of the sensor, affecting the quality of the reconstructed images. This paper proposes a sensitivity preprocessing method based on the Sigmoid function. Simulation experimental results show that this method can significantly improve the uniformity of the sensitivity matrix and greatly enhance the quality of the reconstructed images: the Image Spatial Error(ISE) is reduced by 0.3825; the Relative Error(RE) is reduced by 0.386 5; and the Correlation Coefficient(CC) is increased by 0.0608, validating the feasibility of this method in ECT image reconstruction.

**Keywords:** two-phase flow; image reconstruction; sensor; sensitivity preprocessing; Electrical Capacitance Tomography(ECT)

电容层析成像(ECT)技术利用电容成像原理反演管道内部介质分布, 是一种成本低、实时性好等特点突出的技术。该技术已广泛用于工业过程中, 主要用于监测和可视化两相流参数<sup>[1-2]</sup>。ECT 在进行管道内介质分布反演的过程中通常以灵敏度矩阵作为先验知识, 因此灵敏度矩阵直接影响其成像质量<sup>[3]</sup>。ECT 传感器具有软场特性, 靠近极板的区域灵敏度高, 靠近管道中心的灵敏度低, 这种不均匀的灵敏度分布差异过大, 可能会导致在进行图像重建时产生伪迹或不能成像。近年来, 关于灵敏度预处理方法的研究文献很多, 但大多数研究集中在提高计算速度方面<sup>[4]</sup>; 而对于成像质量, 大多研究采用迭代更新灵敏度矩阵方式, 虽可以取得一定的效果, 但迭代更新过程比较耗时, 无法适应高速数据采集的需求。因此, 本文将 Sigmoid 函数处理技术用于 ECT 灵敏度矩阵预处理中。该方法过程简单、快速, 不仅能够改善灵敏度分布的不均匀性, 提高场域中心的灵敏度, 而且能够提升重建图像的质量。

### 1 ECT 成像原理

ECT 系统由 ECT 传感器系统、数据采集系统和图像成像系统 3 个主要部分组成, 其构成如图 1 所示。其中,

收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372154; 61071141); 辽宁省博士科研启动基金资助项目(201601157)

ECT 传感器负责测量管道内因介质变化而变化的电容值；数据采集系统将采集到的电容值进行处理，并将处理后的电容值导入图像成像系统；图像成像系统通过适当的重建算法重建出管道内的介质分布。

ECT 的图像重建即 ECT 逆问题，是在已知传感器的各结构参数、传感器各极板间的电容值及场域内灵敏度矩阵的分布情况下，利用重建算法反演管道内介质分布的过程。各个极板间的电容值与管道内介电常数分布并不是线性关系，其非线性表达式为：

$$C=f(\epsilon) \quad (1)$$

为方便计算，一般将非线性表达式转换为线性表达式：

$$C=SG \quad (2)$$

式中： $C$ 为各极板间的电容值； $S$ 为灵敏度系数矩阵； $G$ 为介电常数。

图像重建就是为得到管道内介电常数分布矩阵  $G$ ：

$$G=S^T C \quad (3)$$

灵敏度矩阵作为先验数据，对重建图像的质量起着决定性的作用。

## 2 灵敏度矩阵预处理技术

### 2.1 灵敏度矩阵计算

ECT 传感器的敏感区域内介电常数的变化会导致其极板间电容值发生变化。为评价 ECT 传感器的敏感程度，引入灵敏度这个概念，即用介电常数扰动引起的电容值变化量进行度量<sup>[5]</sup>。传统的灵敏度计算方法是通过有限元剖分将敏感场剖分成有限个小单元，通过改变每个小单元的介电常数值测量出 ECT 传感器各极板间的电容值，计算量大，耗时长。目前基于电场强度的灵敏度计算方法应用最为广泛，其计算公式为：

$$s_{ij}(e)=-\frac{1}{U^2} \int_{\Omega_e} \mathbf{E}_i(x,y) \mathbf{E}_j(x,y) dx dy \quad (4)$$

式中： $\mathbf{E}_i(x,y)$ 为将电压  $U$  施加于极板  $i$ ，而其他极板不施加电压时的场强分布； $\mathbf{E}_j(x,y)$ 为将电压  $U$  施加于极板  $j$ ，而其他极板不施加电压时的场强分布； $\Omega_e$ 为单元  $e$  所属的区域。由于剖分单元  $A_e$  的面积很小，因此灵敏度  $s_{ij}(e)$  的计算公式为：

$$s_{ij}(e)=-\frac{A_e}{U^2} \mathbf{E}_i(x_e,y_e) \mathbf{E}_j(x_e,y_e) \quad (5)$$

式中  $(x_e,y_e)$  为单元  $e$  中心点的坐标。

### 2.2 灵敏度矩阵均匀性指标

为更准确地评价灵敏度的均匀程度，定义灵敏度评价函数为：

$$P=\frac{1}{6} \left( \sum_{i=1}^7 \sum_{j=2}^7 |P_{ij}| \right) \quad (6)$$

式中  $P_{ij}=\frac{S_{dev}(i,j)}{S_{avg}(i,j)}$ 。 $P$  的值越小，表示各极板间的灵敏度均匀性越好。 $S_{avg}(i,j)$  为第  $i$  个电极板和第  $j$  个电极板之间整个敏感场的平均灵敏度， $S_{avg}(i,j)$  的值越大，灵敏度越高。

$$S_{avg}(i,j)=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_{ij}(k) \quad (7)$$

式中： $n$  为剖分的单元个数； $S_{ij}(k)$  为极板  $i$  和极板  $j$  之间第  $k$  个剖分单元对应的灵敏度值。

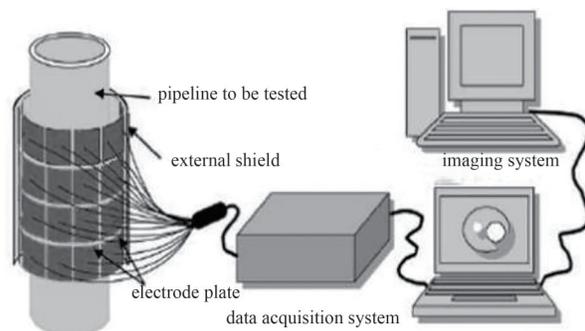


Fig.1 Composition of ECT system  
图 1 ECT 系统组成图

$S_{\text{dev}}(i, j)$  为第  $k$  个剖分单元的灵敏度值  $S_{i,j}(k)$  相对于平均灵敏度  $S_{\text{avg}}(i, j)$  的离散程度,  $S_{\text{dev}}(i, j)$  的值越小越好<sup>[6]</sup>。

$$S_{\text{dev}}(i, j) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S_{i,j}(k) - S_{\text{avg}}) \right]^2 \quad (8)$$

### 2.3 灵敏度矩阵预处理技术

#### 2.3.1 基于均值滤波法的灵敏度预处理

均值滤波法是将当前像素值和它邻近的几个像素值相加, 将计算所得的像素的平均值替代原像素值<sup>[7]</sup>。均值滤波法使用模板计算方法, 通过应用邻域运算计算每个像素的值。这种邻域运算不仅取决于该像素本身的灰度, 还取决于其周围邻域点的像素值。邻域平均法是通过邻域内的灰度值进行平均减小它们之间的差异, 以达到平滑灰度的目的, 因此, 可用于灵敏度预处理中提高灵敏度的均匀性。邻域平均法的公式为:

$$g(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{(i, j) \in M} f(i, j) \quad (9)$$

式中:  $N$  为图像像素的行列值;  $f(i, j)$  为该像素邻域内的像素值;  $M$  为该邻域的集合。任一像素的灰度值  $g(i, j)$  都是通过该像素点及其周围像素点灰度值的平均值计算得出的。

#### 2.3.2 灵敏度系数变换法

灵敏度系数变换法<sup>[8]</sup>是在求取的灵敏度矩阵  $S$  中提取出相邻极板间的灵敏度, 然后将相邻极板间的灵敏度场  $S_1$  相加取其均值  $\bar{S}_1$ 。以 8 极板 ECT 传感器为例,  $\bar{S}_1$  的计算公式为:

$$\bar{S}_1 = \sum_{i=1}^8 S_1(i) / 8 \quad (10)$$

将计算得到的  $\bar{S}_1$  取倒数得到矩阵  $\overline{SS}_1$ , 对  $\overline{SS}_1$  进行归一化处理得到变换后的灵敏度矩阵  $\overline{SS}_2$ , 用  $\overline{SS}_2$  替换相邻极板间的灵敏度场:

$$\overline{SS}_2 = \frac{\overline{SS}_1 - \overline{SS}_{1,\min}}{\overline{SS}_{1,\max} - \overline{SS}_{1,\min}} \quad (11)$$

式中:  $\overline{SS}_{1,\min}$  为  $\overline{SS}_1$  中的最小值;  $\overline{SS}_{1,\max}$  为  $\overline{SS}_1$  中的最大值。

#### 2.3.3 基于 Sigmoid 函数的灵敏度预处理法

Sigmoid 函数是一种常见的 S 型函数, 在生物学中被称为 S 型生长曲线。在信息科学中, 由于 Sigmoid 函数具有单调递增和反函数单调递增等性质, 常作为激活函数用于神经网络中。Sigmoid 函数是可积分并可导<sup>[9]</sup>的:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (12)$$

Sigmoid 函数的图像如图 2 所示, 它的定义域为  $(-\infty, +\infty)$ , 取值范围为  $0 \sim 1$ 。此外, 该函数在  $x=0.5$  处具有中心对称性, 并在接近  $x=0$  时, 取值的变化速率更快。在接近正负无穷时, 取值的变化速率逐渐减小, 函数随着自变量的增加, 取值的变化缓慢。 $x$  越趋近于负无穷, 其取值越趋近于 0;  $x$  越趋近于正无穷, 其取值越趋近于 1。

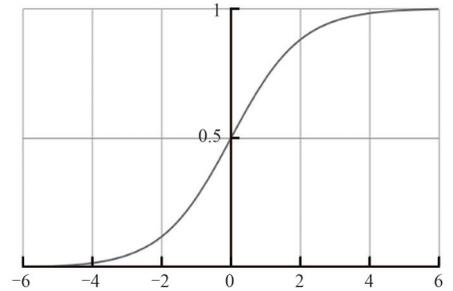


Fig.2 Sigmoid function diagram

图 2 Sigmoid 函数图

## 3 仿真分析

本文从重建误差、重建图像以及灵敏度矩阵均匀性等方面进行仿真分析。其中主要给出图像空间误差(ISE)、图像相对误差(RE)及相关系数(CC)3 种重建误差。

ISE 表示空间信息误差数据, 包含了重建物体的外形、空间方位和所占空间等方面的误差信息<sup>[10]</sup>。因此, ISE 的值越小, 表示图像重建质量越好。其计算公式为:

$$E_{\text{IS}} = \frac{\sum_{i=1}^n |g_s(i) - g_r(i)|}{\sum_{i=1}^n g_s(i)} \quad (13)$$

式中： $g_s(i)$ 为原型对应的剖分单元*i*处的灰度值； $g_r(i)$ 为重建图像对应的剖分单元*i*处的灰度值。

RE表示物体实分布情况与重建结果介电常数的差值，RE值越小，证明图像重建结果越好<sup>[10]</sup>。RE的计算公式为：

$$E_R = \frac{\|\hat{\sigma} - \sigma\|}{\sigma} \quad (14)$$

式中： $\sigma$ 为原型对应的归一化介电常数值； $\hat{\sigma}$ 为重建图像对应的归一化介电常数值。

CC用于描述重建图像与真实物体之间的相似度，相关系数的值越接近1，表示两者的吻合程度越高。因此相关系数越接近1越好<sup>[10]</sup>。其计算公式为：

$$C_C = \frac{\sum_{e=1}^M [\hat{G}(e) - \bar{\hat{G}}(e)][G(e) - \bar{G}(e)]}{\sqrt{\sum_{e=1}^M [\hat{G}(e) - \bar{\hat{G}}(e)]^2 \sum_{e=1}^M [G(e) - \bar{G}(e)]^2}} \quad (15)$$

式中： $G(e)$ 为原型介电常数*G*的第*e*个元素； $\hat{G}(e)$ 为重建图像介电常数 $\hat{G}$ 的第*e*个元素； $\bar{G}(e)$ 为原型介电常数的均值； $\bar{\hat{G}}(e)$ 为重建图像介电常数的均值。

表1给出了分别采用未预处理、均值滤波法预处理、系数变换法预处理和Sigmoid函数法预处理的4种灵敏度矩阵进行图像重建时的重建误差值。

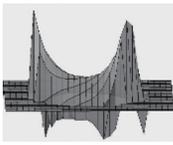
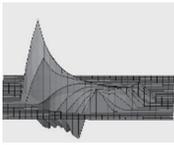
表1 不同预处理方法的重建误差  
Table1 Reconstruction errors of different pretreatment methods

	ISE	RE	CC
unprocessed	0.415 2	0.479 9	0.913 1
mean filter pretreatment	0.251 6	0.387 6	0.924 7
coefficient transformation method preprocessing	0.042 0	0.154 0	0.965 6
Sigmoid function method preprocessing	0.032 7	0.093 4	0.973 9

由表1可知，采用均值滤波法、系数变换法和Sigmoid函数法预处理的灵敏度矩阵获得的重建图像误差均好于未预处理；而采用Sigmoid函数法预处理的灵敏度重建图像误差明显低于均值滤波法预处理和系数变换法预处理。

为进一步验证基于Sigmoid函数法预处理方法的效果，表2给出了未预处理、均值滤波法预处理、系数变换法预处理和Sigmoid函数法预处理所得到的灵敏度均匀性评价指标及1-5极板之间的灵敏度分布图。

表2 不同预处理方法的灵敏度均匀性评价指标及1-5极板间的灵敏度分布图  
Table2 Sensitivity homogeneity evaluation indexes for different pretreatment methods and sensitivity distribution of 1-5 plates

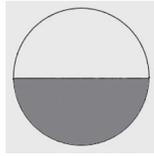
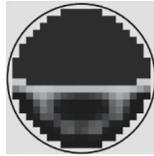
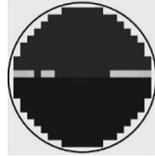
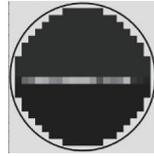
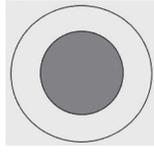
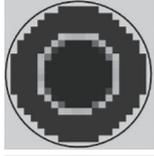
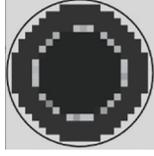
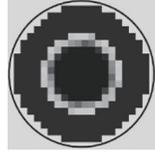
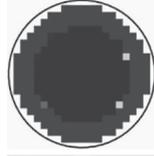
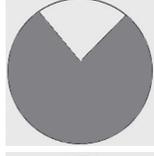
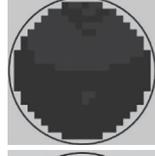
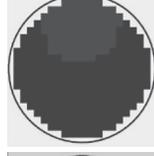
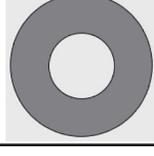
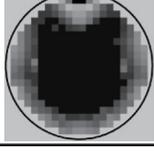
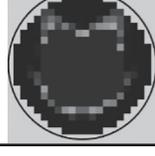
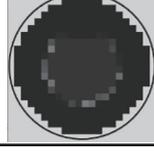
	unprocessed	mean filter pretreatment	coefficient transformation method preprocessing	Sigmoid function method preprocessing
sensitivity profile				
sensitivity homogeneity evaluation function value	4.171 2	2.473 1	0.700 1	0.069 4

由表2中的灵敏度分布图可以看出，经过Sigmoid函数预处理后，靠近极板处的灵敏度与管道中间的灵敏度差值明显降低。从灵敏度均匀性评价指标可以得出，经过Sigmoid函数法预处理后的灵敏度均匀性指标数值最小，灵敏度矩阵的均匀性明显提升。可见，采用Sigmoid函数法对该灵敏度矩阵进行预处理，不仅处理过程简单、快速，而且为后续提高重建图像质量提供了可靠保障。

为更加直观地对比不同灵敏度预处理方法的效果，本文采用传统的Landweber重建算法，对1/2层流、核心流、扇状流及环流进行重建，重建结果如表3所示。

由表3可以看出，经过Sigmoid函数法预处理后的重建图像效果无论是在流型的形状还是与原型介电常数值接近程度上都要优于未经预处理、均值滤波法预处理及系数变化法预处理。

表 3 重建图像  
Table3 Reconstructed image

prototype	unprocessed	mean filter pretreatment	coefficient transformation method preprocessing	Sigmoid function method preprocessing
				
				
				
				

#### 4 结论

在 ECT 系统中由于传感器的面积有限，因此安装的电极板数量也有限，导致管道内的灵敏度分布不均，从而进一步影响重建图像的质量。因此对灵敏度进行预处理以提高灵敏度的均匀性非常关键。由于传统的基于均值滤波法的灵敏度预处理方法以及灵敏度系数变换法对重建质量的提高不明显，本文提出了一种基于 Sigmoid 函数的灵敏度预处理方法，分别从灵敏度矩阵均匀性、图像重建误差以及图像重建效果 3 个不同方面进行仿真分析。仿真结果显示，本文提出的基于 Sigmoid 函数法预处理获得的灵敏度矩阵在灵敏度均匀性、重建图像误差以及重建效果方面均优于未经处理的灵敏度矩阵以及其他两种预处理方法。表明基于 Sigmoid 函数的灵敏度预处理方法对重建图像的各项指标及灵敏度均匀性有较大改善。因此，证明采用灵敏度矩阵预处理方式提高 ECT 重建效果是可行的、有效的。

#### 参考文献：

- [ 1 ] JING Ningbo,LI Mingqiao,LIU Lang,et al. Visualization detection of solid-liquid two-phase flow in filling pipeline by electrical capacitance tomography technology[J]. Computer Modeling in Engineering and Science, 2022,131(1):465-476. doi:10.32604/cmcs.2022.018965.
- [ 2 ] 马敏,郭鑫. 基于改进 SR3 模型算法的 ECT 图像重建研究[J]. 计量学报, 2023,44(1):95-102. (MA Min,GUO Xin. Research on ECT image reconstruction based on improved algorithm of SR3 model[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023,44(1):95-102.) doi:10.3969/j.issn.1000-1158.2023.01.14.
- [ 3 ] WAJMAN R,BANASIAK R. Tunnel-based method of sensitivity matrix calculation for 3D-ECT imaging[J]. Sensor Review, 2014,34(3):273-283. doi:10.1108/SR-06-2013-692.
- [ 4 ] WAJMAN R. The concept of 3D ECT system with increased border area sensitivity for crystallization processes diagnosis[J]. Sensor Review, 2021,41(1):35-45. doi:10.1108/SR-10-2019-0254.
- [ 5 ] PARK J W,HA J M,SEUNG H M,et al. Thickness evaluation of Cr coating fuel rod using encircling ECT sensor[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022,54(9):3272-3282. doi:10.1016/j.net.2022.03.035.
- [ 6 ] 张晋荣. ECT 系统传感器场域剖分及结构参数优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020. (ZHANG Jinrong. Field division and structural parameter optimization of ECT sensor[D]. Harbin,China:Harbin University of Science and Technology, 2020.)