

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107711

同心圆环区域电容层析成像传感器数目优化^{*}

刘再兴^{1,2}, 王海刚^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘要:针对同心圆环区域,设计了不同数目的组合电容层析成像传感器,以提高传感器在测量区域的空间分辨率。基于数值仿真,对内外径之比为0.2、0.3、0.4、0.5的4种同心圆环区域,采用了传统外层12电极和12-4、12-6、12-8 3种内外双层结构电极(IEE),研究了其成像特性。其中IEE传感器测量过程施行外部-对立-内部(EOI)和外部-对立(EO)两种激励策略,对几种典型的介质分布进行测量,并采用LBP、Tikhonov、Landweber算法开展图像重建。结合数值仿真和实验验证,结果显示内外双层电极测量随着同心圆环区域内外径比增大,内层电极数目存在最优值,12-4型电极结构在不同环形区域的重建图像质量和稳定性更好。采用LBP算法进行成像时,EOI激励策略相比于EO激励策略在成像精度上略有优势;采用Tikhonov算法和Landweber迭代算法时,EO激励策略能有效避免异常电容值的影响,与IEE电极组合时能在不同内外径比的同心圆环区域测量中提高成像质量。

关键词: 电容层析成像;激励策略;图像重建;相关系数

中图分类号: TH81 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.1040

Optimization of the number of electrical capacitance tomography sensors with concentric annulus structure

Liu Zaixing^{1,2}, Wang Haigang^{1,2}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the spatial resolution of ECT sensors in a concentric annulus measurement area, different number of combined electrodes ECT sensors are designed. For four types of concentric annulus area with inner and outer diameter ratios of 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5, traditional 12 external electrodes (EE) and 12-4, 12-6, 12-8 internal-external electrodes (IEE) are considered. The IEE sensors are implemented with external-opposite-internal (EOI) and external-opposite (EO) measuring strategies. The capacitance between different electrode pairs is calculated for typical permittivity distributions by numerical simulation approach. The obtained capacitances are used to reconstruct images using LBP, Tikhonov, and Landweber algorithms, respectively. Based on numerical simulation and experimental investigation, the main results are given as follows. As the ratio of the inner and outer diameters of the concentric annulus area increases, there is an optimal number of inner electrodes which the quality of reconstructed images with the 12-4 electrodes structure are higher in the measurement. When LBP algorithm is used, the EOI excitation strategy has a slight advantage over the EO excitation strategy in imaging accuracy. When the Tikhonov algorithm and Landweber iterative algorithm are used, the EO excitation strategy can effectively reduce the influence of abnormal capacitance, and effectively improve the quality of reconstructed images when combined with IEE sensors in the measurement of concentric annulus areas with different inner and outer diameter ratios.

Keywords: electrical capacitance tomography; excitation strategy; image reconstruction; correlation coefficient

收稿日期: 2021-04-02 Received Date: 2021-04-02

^{*} 基金项目: 科技部重大仪器专项(2018YFF01013801)资助

0 引言

电容层析成像 (electrical capacitance tomography, ECT) 作为一种可视化测试技术,具有非侵入、无辐射、成本低、设备简单、时间分辨率高等诸多优点^[1],适用于气、固输运系统和气固流化床等工业过程检测^[2-5]。

对于大尺度测量区域,由于电容层析成像系统固有的软场特性以及中心区域敏感度的降低,重建图像容易出现失真的现象^[6]。传统的 ECT 测量系统通过在测量区域外层布置电极来对内部进行成像,其中,电极数目是影响重建图像质量的主要因素,Peng 等^[7]认为 12 电极传感器适用于大多数的应用场景,Ye 等^[8]发现 16 电极在一般测量中能够提供最佳的成像质量,并建议电极的覆盖率保持在 0.6~0.8 之间。另一方面,对于循环流化床中常常出现的环-核浓度分布^[9](即靠近壁面的固体颗粒层浓度高,床中心浓度低),以及一些流动区域截面通常为环形的设备,如石油开采工业的钻井输油通道^[10]、旋转热换热器、核反应堆堆芯^[11]、Wurster 流化床^[12]等,传统的外层 ECT 电极 (external electrodes, EE) 测量很难获得高的对比度和空间分辨率来显示被测介质在同心环中的分布,通常表现为重建图像在中心区域模糊不清。相对而言,具有内-外组合结构的 ECT 传感器结构 (internal-external electrodes, IEE) 具有较为明显的优势,如方形 12-4 型电极结构^[13]、环形 12-4 型电极^[14-16]、内部交叉 8 电极^[17]等能有效地提高中心区域的敏感度和图像重建质量。

电极数目决定了用于图像重建的独立电容个数^[18],激励策略决定了测量信号的质量,这两个因素对 IEE 电极设计和测量具有重要影响。Ye 等^[15]研究了电极激励策略、同心圆环测量区域内外径比对 12-4 型 IEE 电极在线性反投影 (linear back projection, LBP) 算法下的成像质量的影响。Wu 等^[19]提出了 5 种双电极激励策略,并用于大尺寸的 12-4 型 IEE 电极的成像研究,Yang 等^[20]提出了非对称多电极激励策略,有效降低了电容测量的动态范围。

为了提高不同内外径比的同心圆环区域 ECT 传感器的空间分辨率和测量信号质量,本文基于 LBP 算法、Tikhonov 算法和 Landweber 迭代算法,探究了内外层电极数目和电极激励策略对环形区域 ECT 成像质量的影响,并与传统外层电极进行了比较,为不同内外径比的环形区域电极数目配置和激励策略选择提供了参考依据。

1 数值仿真设计

1.1 电极结构及激励策略

本文中 4 组同心圆环区域的外径为 500 mm,内径分别为:100、150、200、250 mm,即内外径比 (R_1/R_2) 分别为

0.2、0.3、0.4 和 0.5,并且每组环形区域分别采用传统外层 12 电极和 IEE 电极 12-4、12-6、12-8 进行测量,电极的覆盖率均为 85%。图 1 是 4 种不同结构的电极布置在同心圆环区域的示意图。

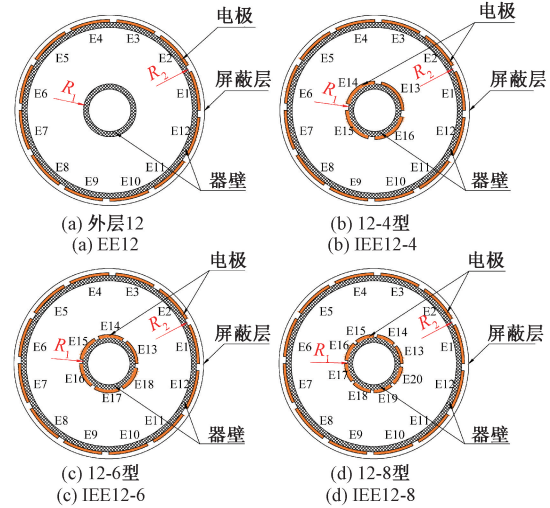


图 1 同心圆环区域电极结构

Fig. 1 Electrode structure with concentric annulus area

考虑到内部电极的存在,不同的电极激励策略下获得的独立测量电容值数目存在差异,本文采用了 2 种常用的单电极激励策略:外部-相对-内部 (external-opposite-internal, EOI) 和外部-相对 (external-opposite, EO)。EOI 激励策略测量所得的独立电容包含外部电极与外部电极、外部电极与内部电极和内部电极与内部电极间的电容;EO 激励策略测量所得的独立电容只包含外部电极与外部电极、外部电极与内部电极间的电容。在以往的研究中,两者相对于其他单电极激励策略存在一定的优势^[14]。EOI 和 EO 激励策略下所测得的电容数如下:

$$N_{EOI} = (N_E + N_I) \cdot (N_E + N_I - 1) / 2 \quad (1)$$

$$N_{EO} = N_E \cdot (N_E - 1) / 2 + N_E \cdot N_I \quad (2)$$

其中, N_E 表示外层电极的数目; N_I 表示内层电极的数目。本文研究的 4 种电极结构在 EOI 和 EO 激励策略下所测得的电容数目如表 1 所示。

表 1 测量电容数目
Table 1 Capacitance number

激励策略	12	12-4	12-6	12-8
EOI	66	120	153	190
EO		114	138	162

1.2 图像重构算法

本文采用了 3 种成像算法来求解逆问题,包括成像速度较快的 LBP 算法、Tikhonov 算法和成像质量更高的

Landweber 算法。

LBP 算法如下式(3)所示:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{S}^T \boldsymbol{\lambda}}{\mathbf{S}^T \mathbf{u}_\lambda} \quad \mathbf{u}_\lambda = [1, 1, \dots, 1] \quad (3)$$

其中, $\mathbf{g}$ 为归一化介电常数分布向量; $\boldsymbol{\lambda}$ 为归一化电容向量; $\mathbf{S}$ 为敏感场矩阵。

标准 Tikhonov 算法如下式(4)所示:

$$\mathbf{g} = (\mathbf{S}_{nor}^T \mathbf{S}_{nor} + u \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{S}_{nor}^T \boldsymbol{\lambda} \quad u = [1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-2}] \quad (4)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{S}_{nor}$ 为归一化敏感场; u 为正则化参数, 正则化参数的选取对重建图像结果影响很大, 本文的计算过程中 u 在 $[1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-2}]$ 之间取值, 以使式(12)所示的相关系数 CC 达到最大值。

Landweber 迭代算法如式(5)、(6)所示:

$$\mathbf{g}^0 = \mathbf{S}_{nor}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (5)$$

$$\mathbf{g}^n = f(\mathbf{g}^{n-1} + \alpha^n \mathbf{S}_{nor}^T (\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{S}_{nor} \mathbf{g}^{n-1})) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{g}^0$ 为初始值; $\mathbf{g}^n$ 和 $\mathbf{g}^{n-1}$ 分别为 n 次迭代和 $n-1$ 次迭代获得的介电常数分布; α 为迭代步长。

由于 Landweber 的半收敛特性, 计算过程存在最佳迭代步长, 以下是 Liu 给出的公式^[21]:

$$\alpha^n = \frac{\|\mathbf{S}_{nor}^T \mathbf{e}^{n-1}\|^2}{\|\mathbf{S}_{nor} \mathbf{S}_{nor}^T \mathbf{e}^{n-1}\|^2} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{e}^{n-1}$ 为第 $n-1$ 次迭代计算电容与测量电容之间的误差, $\mathbf{e}^{n-1}$ 的公式如式(8)所示。

$$\mathbf{e}^{n-1} = (\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{S}_{nor} \mathbf{g}^{n-1}) \quad (8)$$

则第 $n-1$ 次迭代计算电容与测量电容相对误差的平均值 MRE 如式(9)所示:

$$MRE = \frac{\sum_{k=1}^N |e_k^{n-1} / \lambda_k|}{N} \quad (9)$$

其中, N 为测得的电容数; e_k^{n-1} 为第 k 对电极对间第 $n-1$ 次迭代计算电容与测量电容相对误差; λ_k 为第 k 对电极对间的测量电容值。

f 为算子, 由下式给出:

$$f_g = \begin{cases} 1 & g > 1 \\ g & 0 \leq g \leq 1 \\ 0 & g < 0 \end{cases} \quad (10)$$

上述图像重建算法中敏感场矩阵计算如下:

$$S_{ij}(x, y) = - \iint_{p(x, y)} \frac{\nabla \phi_i(x, y)}{V_i} \cdot \frac{\nabla \phi_j(x, y)}{V_j} dx dy \quad (11)$$

式中: $S_{ij}(x, y)$ 为电极 i^{th} 与电极 j^{th} 之间在离散单元 $p(x, y)$ 处的敏感场; $\phi_i(x, y)$ 为在电极 i^{th} 上施加电压 V_i 时在离散单元 $p(x, y)$ 处的电势分布, 同理 $\phi_j(x, y)$ 为在电极 j^{th} 上施加电压 V_j 时在离散单元 $p(x, y)$ 处的电势分布。

1.3 测型设计及评价指标

在仿真过程中, 设置了3种典型的介质分布: 泡状、分层和环形, 其分布如图2所示。

同时为量化成像效果, 采用相关系数 (CC) 作为评价重建图像与实际介质分布图像之间相关程度的指标, CC 值越大代表重建图像质量越高, 其定义如式(12)所示:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2 (g_i - \bar{g})^2}} \quad (12)$$

式中: n 为敏感场区域内进行有限元离散后点的个数; $\hat{g}_i$ 为区域内 i 点的实际的介电常数; $\bar{\hat{g}}$ 为实际介电常数的平均值; g_i 为图像重建算法计算所得的 i 点的介电常数值; $\bar{g}$ 为计算所得的介电常数的平均值。

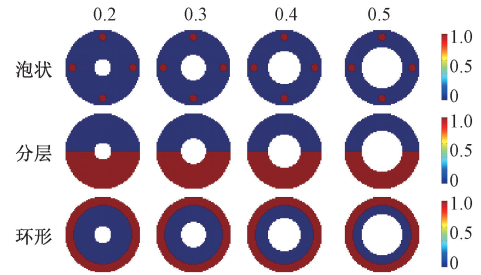


图2 介质分布图

Fig. 2 Permittivity distribution

2 计算结果与分析

2.1 敏感场分析

在内外径比为 0.2~0.5 的同心圆环区域内, 传统 12 电极和 IEE 电极中的 1 号和 7 号两个相对电极间的归一化敏感场如图 3 所示, 图 4 则展示了传统 12 电极和 IEE 电极在 2 种激励策略下的平均敏感场, 计算 EE 电极和 IEE 电极的敏感场矩阵的 2-范数条件数和敏感度最大值与最小值之比 ($S_{\max}/S_{\min}$) 并进行归一化后的结果如图 5 所示。

从图 3 可以看到, 与传统外层 12 电极相比, IEE 电极增强了内圆筒外壁附近的敏感场强度。图 4 中平均敏感场均呈现出在电极附近敏感度高, 远离电极附近区域敏感性迅速降低的特点, IEE 结构的 EO 和 EOI 激励策略增加了对内层电极的激励, 提高了内层电极和内外层电极之间的敏感场强度, 有效弥补了中心区域敏感度不足的缺陷。比较不同电极结构在 4 种不同内外径比的环形区域中平均敏感场可知, 12-4 型电极结构的效果最好。

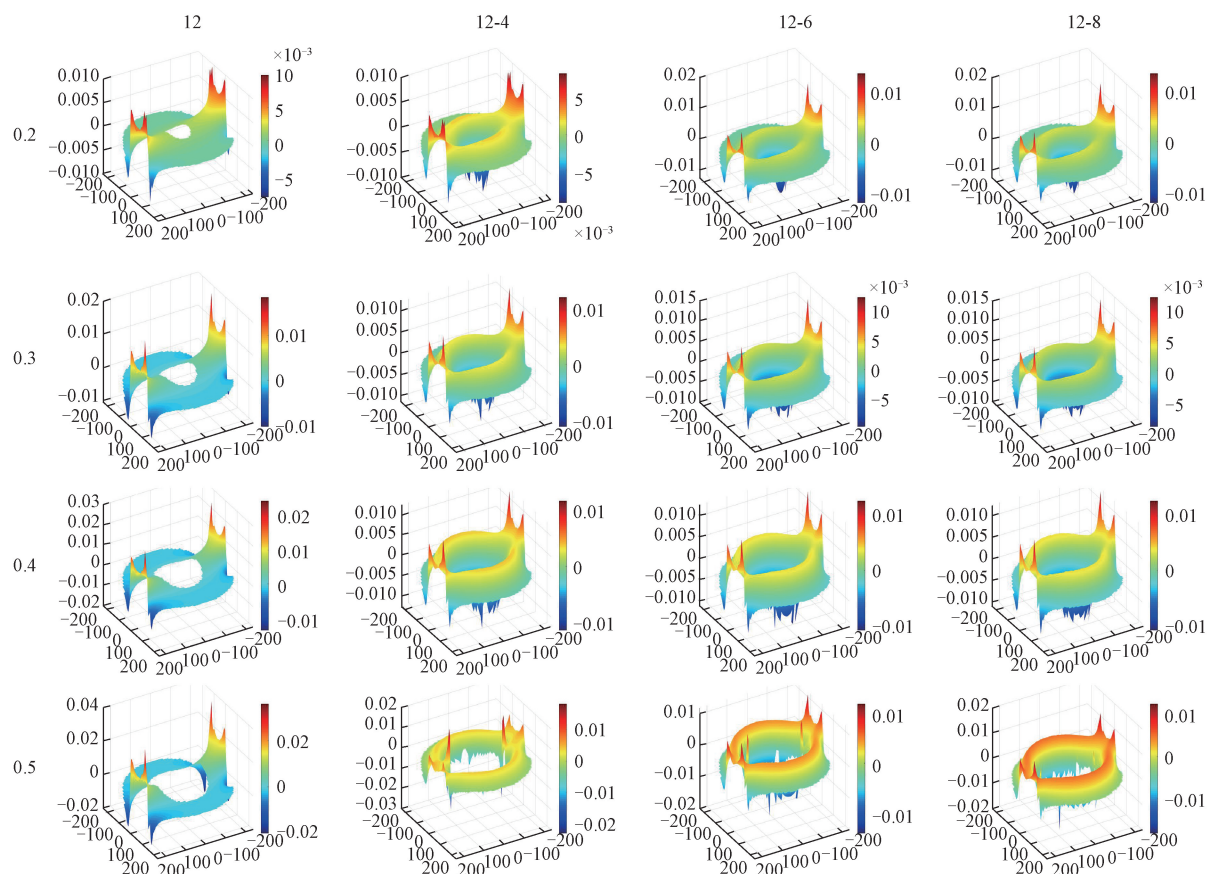


图 3 1 号和 7 号电极间的归一化敏感场

Fig. 3 Normalized sensitivity distribution between No. 1 and No. 7

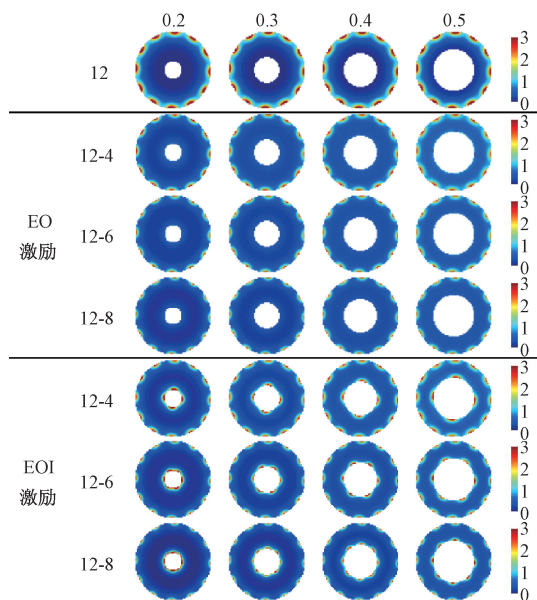


图 4 不同电极结构产生的平均敏感场

Fig. 4 Average sensitivity generated by different electrode structure

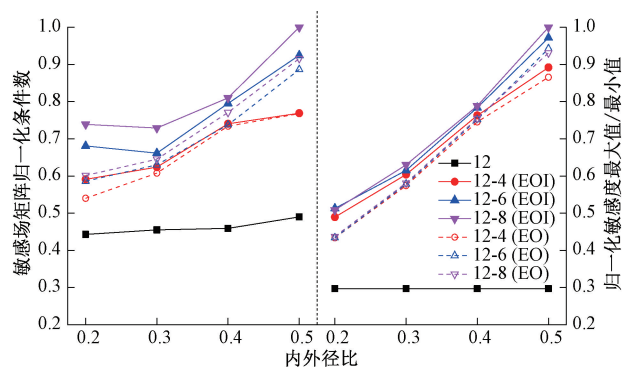
图 5 敏感场矩阵的归一化 2-范数条件数及归一化敏感场最大值与最小值之比 ($S_{\max}/S_{\min}$)

Fig. 5 Normalized L2-norm condition number of sensitivity matrix and ratio of the maximum to the minimum of the normalized sensitivities

由矩阵的 2-范数条件数的性质可知,敏感场矩阵的条件数和敏感场高、低峰值之比越小,则在图像重建计算过程中的数值稳定性越好。从图 5 可以看出传统外层 12 电极因敏感度分布受内圆筒影响较小,

其条件数和 $S_{\max}/S_{\min}$ 较小,且随内外径比增大而几乎保持不变;IEE 电极产生的敏感场矩阵条件数和 $S_{\max}/S_{\min}$ 均随同心圆环内外径比的增大、内层电极数的增加而显著增大,说明内外径比越大、内层电极数目越多,图像重建过程的数值稳定性越差,同时 IEE 电极在 EOI 激励策略下的条件数和 $S_{\max}/S_{\min}$ 较 EO 激励策略大。综上,传统外层 12 电极和 12-4 型电极采

用 EO 激励策略的敏感场分布较为均匀,用于图像重建的数值稳定性更好。

2.2 图像重建结果

1) LBP 算法

图 6 和 7 展示了传统外层 12 电极和 IEE 电极采用 LBP 算法对 3 种介质分布的重建图像结果及其对应的相关系数。

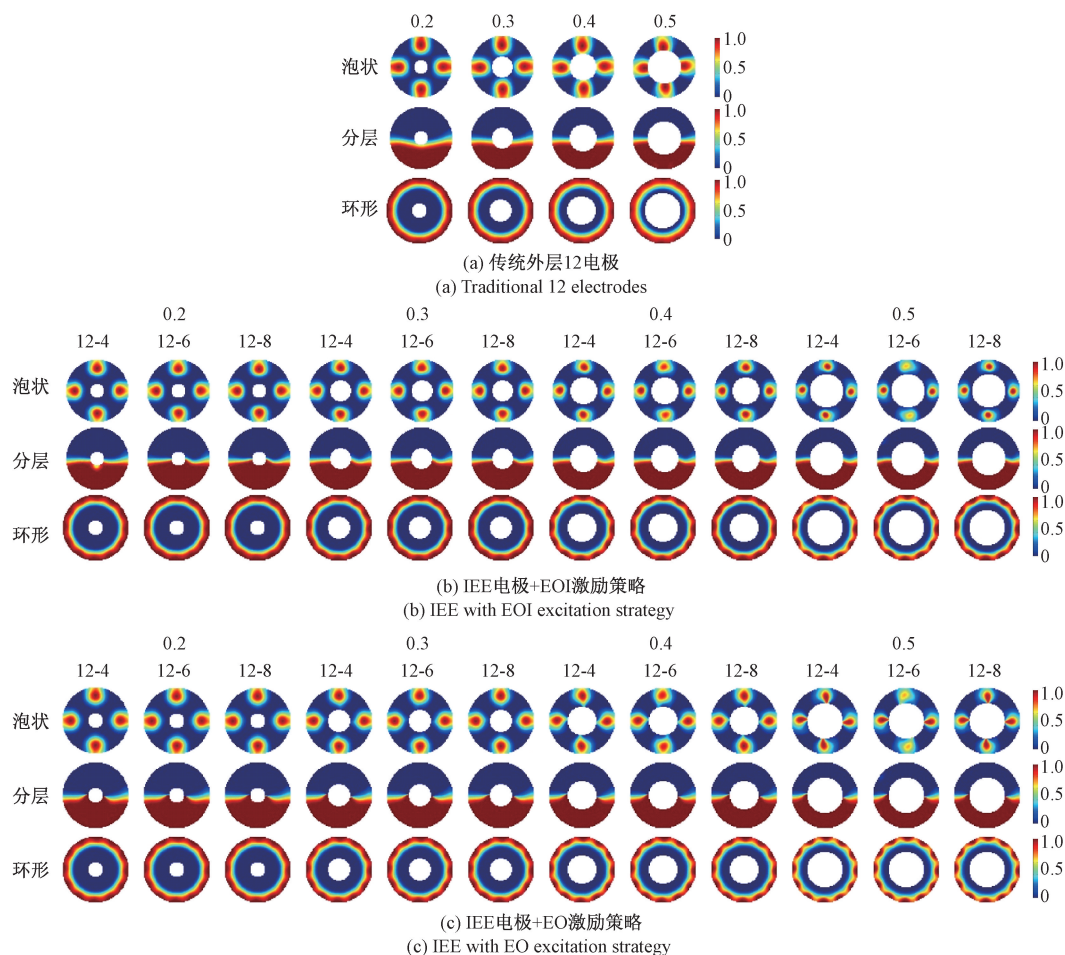


图6 LBP 算法成像结果

Fig. 6 Reconstructed images using LBP algorithm

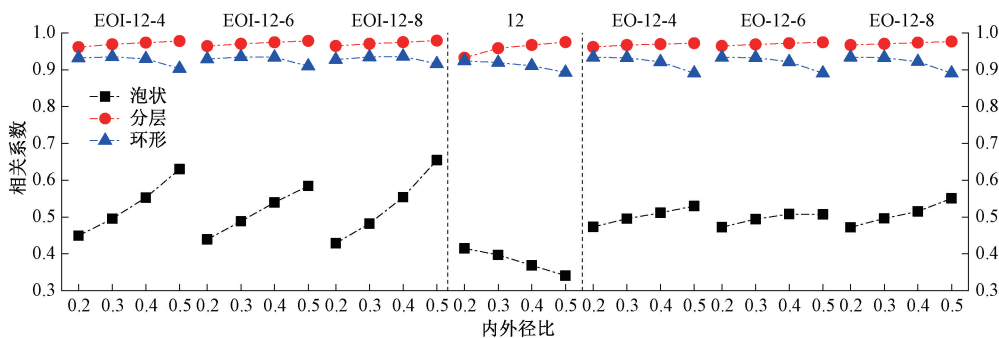


图7 LBP 算法重建图像相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients for reconstructed images using the LBP algorithm

从图 6 可以看出,IEE 电极的重建图像质量要高于传统外层 12 电极,具体表现为在泡状分布的重建图像与壁面粘连部分更少,更加接近于物体真实的圆形分布;在分层分布中,空气与介质间的界线更加清晰,尤其是在内圆筒附近,传统外层 12 电极在中心区域的敏感场强度较低,界线与真实情况不符;在环形分布中,IEE 电极的重建图像空气与介质的交界处过渡区域更窄。另外,随着同心圆环的内外径比增大,12-4 型电极结构和 12-8 型电极结构的测量稳定性要更好,12-6 型电极在内外径比为 0.5 时测量泡状分布出现了明显的模糊,IEE 电极重建图像的质量并不随内层电极数量的增加而提高。图 7 对相关系数的定量描述也显示在 4 种不同区域测量中,12-4 型电极重建图像质量最高。

对比图 6(b) 和 (c) 可以看到,EO 激励策略由于平均敏感度低于 EOI 激励策略,其分层分布重建图像两相边界不如采用 EOI 激励策略清晰;在环形区域内外径比较大时,EO 激励策略对泡状分布的重建图像与外层和内层边壁粘连的效应更加明显;在环形分布中,由于两种激励策略在外层附近的敏感场都很强,成像质量几乎相同。综合来看,使用 IEE 电极进行 LBP 快速成像时,采用 EOI 激励策略是更好的选择。

2) Tikhonov 算法

图 8 和 9 展示了传统外层 12 电极和 IEE 电极采用 Tikhonov 算法对 3 种介质分布的重建图像结果及其相关系数,成像计算中采用的正则化参数 u 的取值范围为 $[1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-2}]$,以使相关系数 CC 达到最大值。

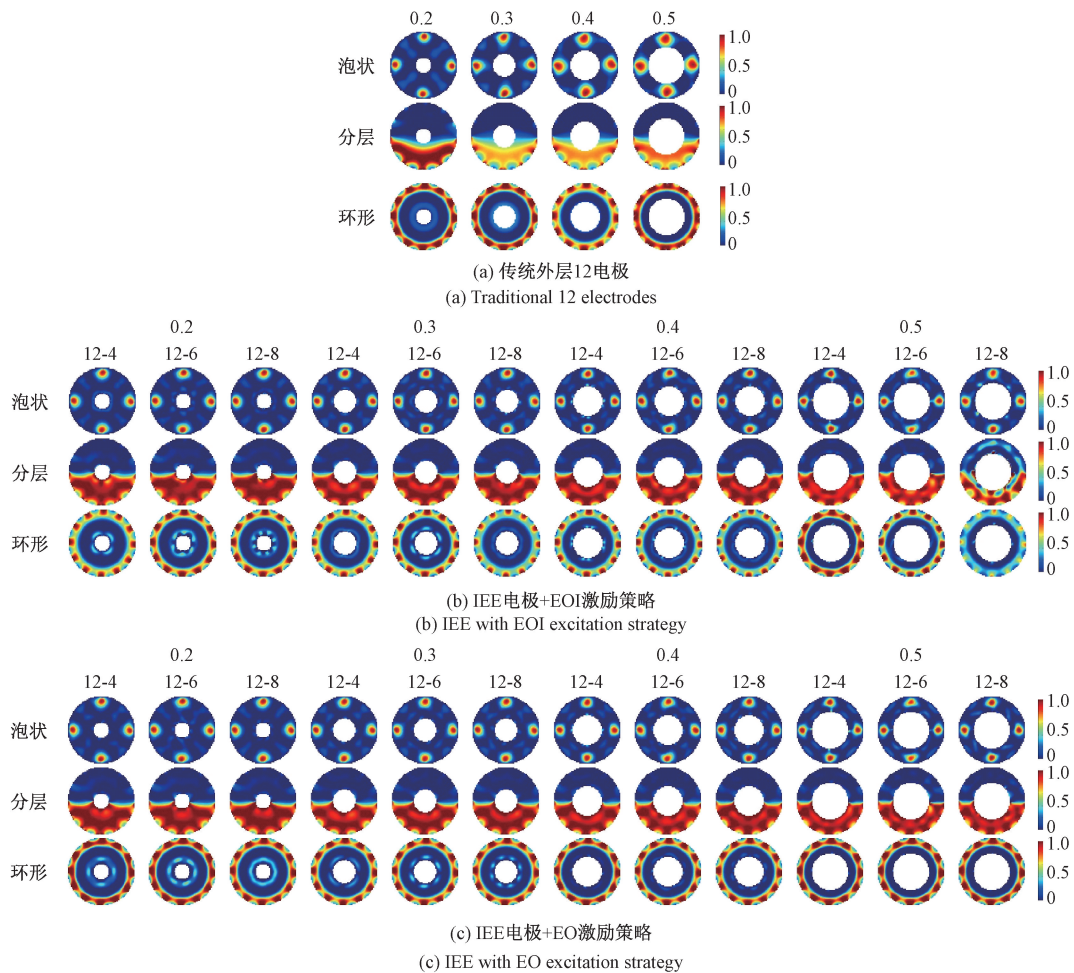


图 8 Tikhonov 算法成像结果

Fig. 8 Reconstructed images using the Tikhonov algorithm

从图 8 和 9 可以看出,采用 EOI 激励策略时,对于泡状分布和分层分布,由于 IEE 电极在中心区域的敏感场强度更高,其重建图像质量均高于传统外层 12 电极,泡状分布内 4 个圆形分布的大小更加接近真实,分层分布

在靠近中心圆筒附近的介质分界线更加分明;对于环形分布,IEE 电极结构并没有优势,反而在内层电极附近容易产生伪影,在远离外层电极的介质分布的区域图像灰度过低,与真实分布不相符,其中 12-4 型电极的成像质

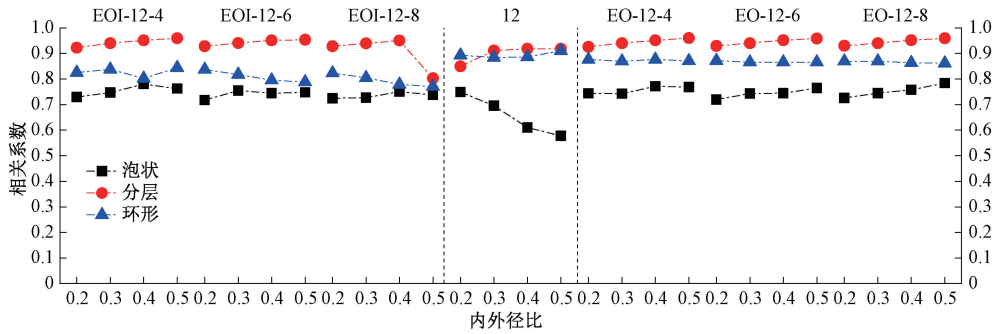


图9 Tikhonov 算法重建图像相关系数

Fig. 9 Correlation coefficients for reconstructed images using the Tikhonov algorithm

量高于其他两者,且 12-8 型电极在内外径比较大时,受到内层电极之间异常电容值的影响,重建图像质量较差。图 10 展示了 12-8 型电极测量泡状分布时的归一化电容值。

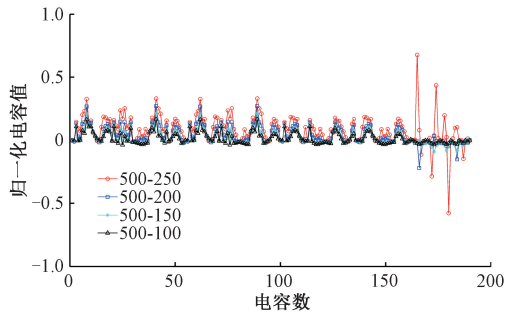


图 10 12-8 型电极测量泡状分布的归一化电容值

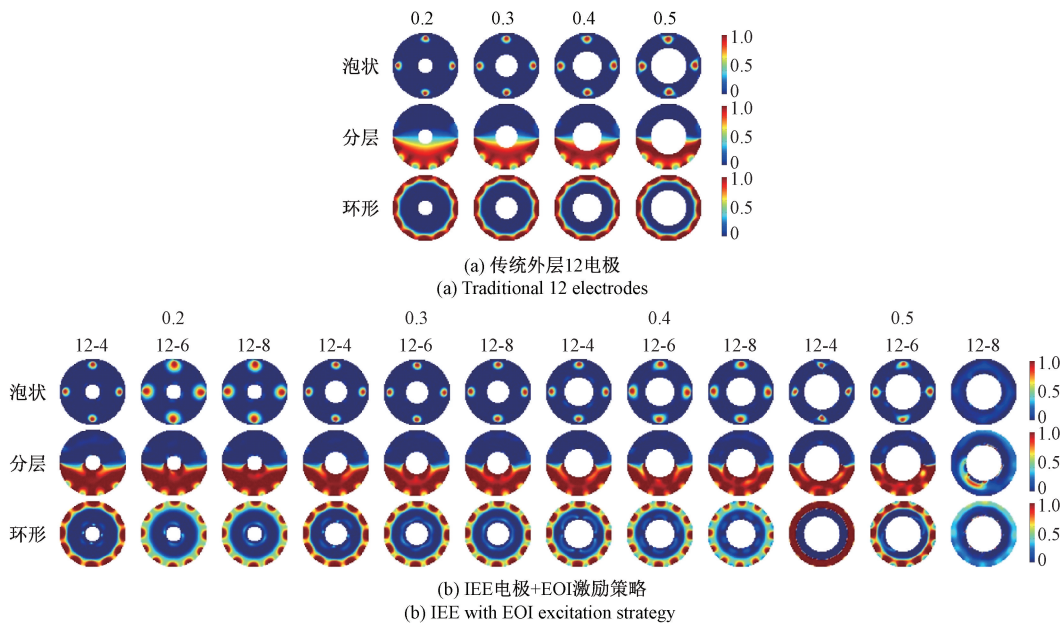
Fig. 10 Normalized capacitance of 12-8 electrode measuring bubble distribution

由图 10 可知,当同心圆环区域的内外径比扩大到 0.4、0.5 时,IEE 电极测量出现异常的归一化电容值,异常值集中出现在内层电极之间,且每相隔 2 个电极的电极对间的归一化电容值为绝对值极大的负值。

相对于 EOI 激励策略,EO 激励策略不包含内层电极之间产生的电容值,IEE 电极对于 3 种介质分布的重建图像相关系数的平均值更高;极大地改善了 12-8 型电极在环形区域内外径比较大时成像质量较差的问题,使得 3 种电极结构成像的稳定性更好,综合 3 种介质分布的测量,12-4 型电极的成像质量和稳定性略微占优。

3) Landweber 算法

图 11 和 12 展示了传统外层 12 电极和 IEE 电极采用 Landweber 算法对 3 种介质分布的重建图像结果及其相关系数,迭代步长采用式(7)计算的最佳迭代步长,迭代次数为 500。

(a) 传统外层12电极
(a) Traditional 12 electrodes(b) IEE电极+EOI激励策略
(b) IEE with EOI excitation strategy

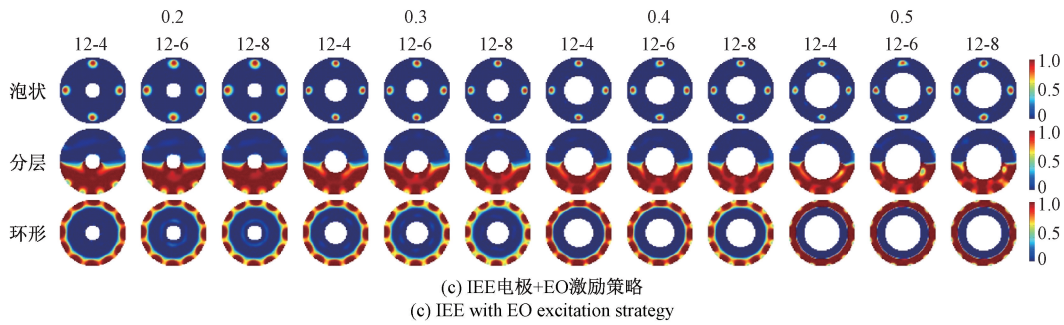


图 11 Landweber 算法成像结果

Fig. 11 Reconstructed images using the Landweber algorithm

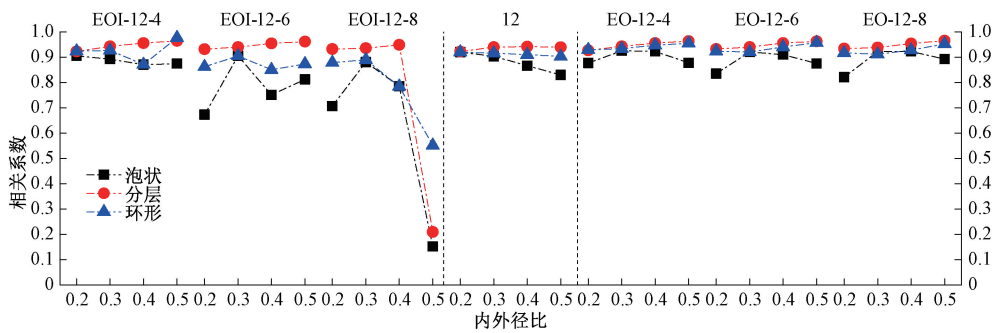


图 12 Landweber 算法重建图像相关系数

Fig. 12 Correlation coefficients for reconstructed images using the Landweber algorithm

从图 11(a) 和(b)、图 12 可以看出,采用 EOI 激励策略时,由于泡状、环形介质分布在外层电极附近,传统外层 12 电极使用 Landweber 算法已经能够实现高质量的图像重建,并且 12-6 型和 12-8 型电极在除环形区域内外径为 0.3 的情况下,其成像质量均与传统 12 电极测量结果有明显差距;在分层分布测量中,由于 IEE 电极结构在中心区域的敏感度较高,IEE 电极在对该介质分布的测量中均实现了较高的质量的成像,在靠近中心圆筒附近的两相分界线更加清晰。

如 2.2 节中 2) 分析所得,在环形区域内外径比为 0.5 并采用 12-8 型电极测量时,异常电容值同样对 Landweber 算法计算过程产生了很大的影响,以泡状分布为例,按照(9)式计算迭代过程电容值相对误差的平均值,其随迭代次数的变化如图 13 所示。

从图 13 可以看出异常电容值的出现极大地增加了迭代过程中电容值的相对误差,降低了迭代的收敛速度,且异常的电容值不能准确反映介质在测量区域分布的信息,严重影响了重建图像的质量。

从图 11(c) 可以看出,EO 激励策略进一步提高了重建图像的精度,具体表现在泡状分布成像晕影更少,更加接近真实的圆形分布,分层分布和环形分布

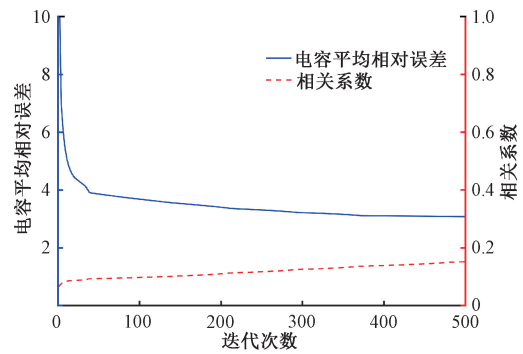


图 13 电容平均相对误差和相关系数变化图

Fig. 13 Variation of mean relative error of capacitance and correlation coefficient

的介质分界区域更窄,尤其在环形区域内外径比为 0.3 和 0.4 时,EO 激励产生的敏感场在区域内分布较为均匀,3 种 IEE 电极结构均能获得高质量的重建图像。此外,由于 EO 激励策略避免了异常电容值的影响,在内外径比较大的区域、采用内层电极数目较多的 IEE 电极结构也能在较少的迭代步数下获得高质量的重建图像。

2.3 噪音、实验分析

在原始仿真数据上加入高斯白噪音可以模拟实验测量过程中受到外界环境噪音、振动的影响,因此以 LBP 算法为例进行噪音数据分析。

在原始测量数据加入噪音后电容信号的信噪比 (SNR) 为 50 dB,图 14 和图 15 是采用 LBP 算法对传统外层 12 电极和 IEE 电极在不同激励策略下 50 dB 噪音数据的重建图像结果及其相关系数。

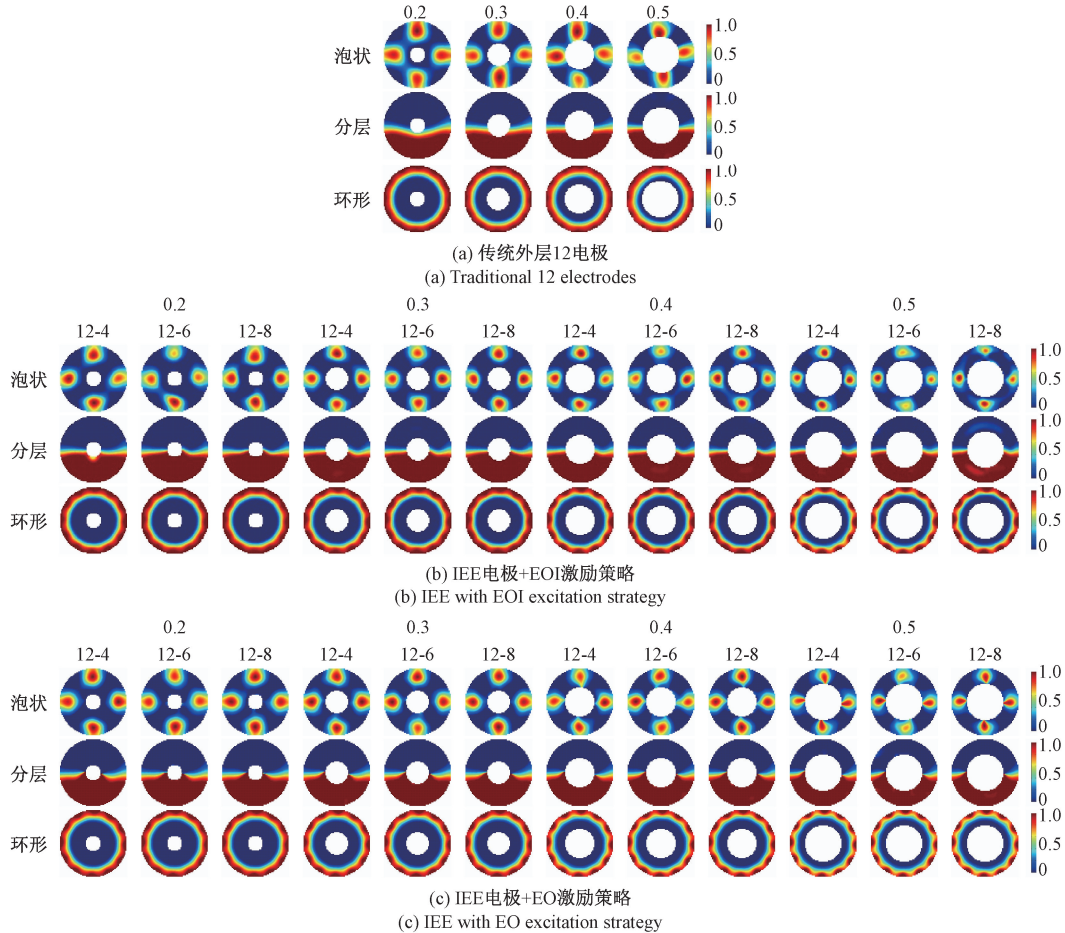


图 14 LBP 算法对 50 dB 噪音数据的重建图像

Fig. 14 Reconstructed images of 50 dB noise data using LBP algorithm

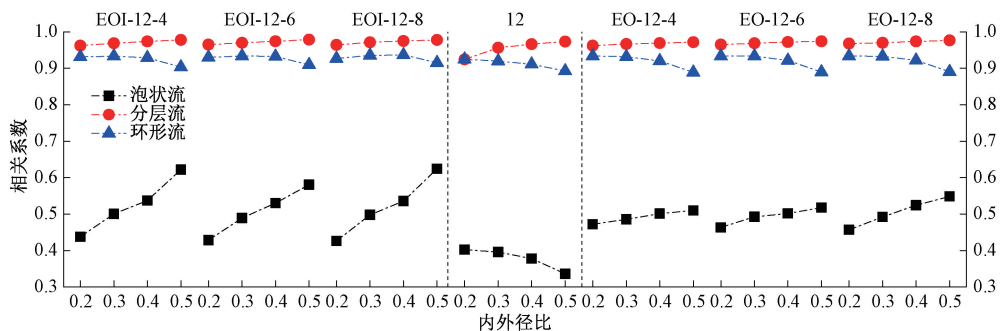


图 15 50 dB 噪音数据采用 LBP 算法重建图像的相关系数

Fig. 15 Correlation coefficients for reconstructed images of 50 dB noise data using LBP algorithm

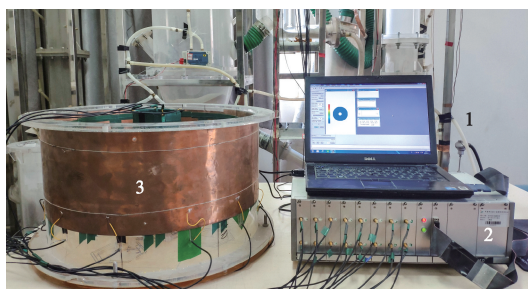
对比图 6 和图 14 可以看出噪音对图像重建产生了明显的影响,其中以泡状分布的重建图像失真现象最为

严重,在泡状分布的测量中,IEE 电极的成像质量的平均水平高于传统外层 12 电极;由于内部电极能增强中心区

域的敏感场强度,当环形区域的内外径比越大时,IEE 电极的重建图像晕影更小,更加接近真实大小,而传统外层 12 电极的情况恰恰相反。

IEE 电极采用 EO 激励时靠近内圆筒壁处敏感场强度低于 EOI 激励策略,因此在环形区域内外径比较大时,泡状分布的重建图像容易与内壁产生粘连而降低成像质量,因此当环形区域内外径比越大时,EOI 激励策略的优势越明显。从图 15 中可以看出当环形区域内外径比较小时,3 种 IEE 电极结构的测量结果相差不大,当内外径比增大时,12-4 型电极的成像稳定性最好,在噪音的影响下仍能保持较高的成像质量。

从上述仿真结果可见,12-4 型电极结构的成像质量最佳,以下对其进行实验验证。在内外径比为 0.2 的同心圆环区域中搭建了 16 通道的 ACECT 测量系统,ECT 测量系统如图 16 所示,测量区域外径为 500 mm,内径 100 mm,设计了 12-4 型、传统外层 12 电极两种传感器结构,电极覆盖率为 85%。两种传感器对 3 种典型介质分布的实验测量结果如图 17 所示。



1. 图像重建软件; 2. 数据采集箱; 3. ECT 传感器

图 16 ECT 测量系统

Fig. 16 ECT measurement system

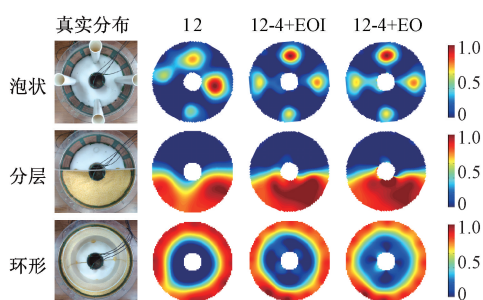


图 17 实验测量结果

Fig. 17 Experimental results

从图 17 可以看出,实验测量结果与仿真模拟结果基本一致。12-4 型电极增强了同心圆环区域内部空间分辨率,在对 3 种典型分布的测量中有效减少重建图像的晕影和与壁面粘连,同时也验证了在采用 LBP 算法时,EOI 激励策略相比于 EO 激励策略具有优势。

3 结 论

本文基于数值仿真和实验,探究了采用内外双层电极传感器对不同内外径比的同心圆环区域进行 ECT 成像时电极数目和电极激励策略的优化问题,同时对比了不同算法的成像效果,得到的相关结论如下:

当同心圆环区域内外径比较大,IEE 电极结构内层电极数较多时,内层电极相互激励得到电容值过小,容易产生异常归一化电容值,从而影响图像重建结果。

对同心圆环区域采用 IEE 电极结构进行电容层析成像测量时,随着区域内外径比增大,增多内层电极数目对于提高重建图像质量作用较小。相反,12-4 型电极在不同内外径比的同心圆环区域中的成像质量和稳定性最好,相比传统外层 12 电极、12-6、12-8 型电极的具有一定的优势。

在采用 LBP 算法进行快速成像时,采用 EOI 激励策略能获得更高的重建图像质量;由于受内层电极之间产生的异常电容值的影响,采用 Tikhonov 算法和 Landweber 迭代算法时,IEE 电极采用 EO 激励策略是更好的选择。

参考文献

- [1] ZHANG W B, WANG C, YANG W Q, et al. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement-A review[J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(1): 174-188.
- [2] HUANG S M, PLASKOWSKI A B, XIE C G, et al. Capacitance-based tomographic flow imaging-system[J]. Electronics Letters, 1988, 24(7): 418-419.
- [3] XIE C G, HUANG S M, HOYLE B S, et al. Electrical capacitance tomography for flow imaging-system model for development of image-reconstruction algorithms and design of primary sensors [J]. IEE Proceedings-G Circuits Devices and Systems, 1992, 139(1): 89-98.
- [4] WARSITO W, FAN L S. Measurement of real-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography (ECT) [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (21-22): 6455-6462.
- [5] FASCHING G E, SMITH N S. A capacitive system for 3-dimensional imaging of fluidized-beds [J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(9): 2243-2251.
- [6] YANG W Q, SPINK D M, YORK T A, et al. An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical-capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(11): 1065-1069.

- [7] PENG L H, YE J M, LU G, et al. Evaluation of effect of number of electrodes in ECT sensors on image quality[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12 (5): 1554-1565.
- [8] YE J, WANG H, YANG W. Evaluation of electrical capacitance tomography sensor based on the coupling of fluid field and electrostatic field [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(7): 074003.
- [9] 王海刚, 刘石, 燕桂章, 等. 内—外置电极 ECT 传感器两相流成像仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(2): 122-124.
WANG H G, LIU SH, YAN G ZH, et al. A simulation study of image reconstruction of squire ECT with internal electrodes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(2): 122-124.
- [10] NYGAARD G, NAEVDAL G. Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling[J]. Journal of Process Control, 2006, 16(7): 719-732.
- [11] LIU N S, LU X Y. Large eddy simulation of turbulent flows in a rotating concentric annular channel [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(3): 378-392.
- [12] CHE H Q, WANG H G, YE J M, et al. Control of pellets coating in a Wurster fluidised bed by means of electrical capacitance tomography[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 42 (4): 729-742.
- [13] LIU S, YANG W Q, WANG H. An electrical capacitance tomography sensor with internal-external electrodes[J]. Process Imaging for Automatic Control, 2001, 4188: 300-307.
- [14] YE J M, YANG W Q. Evaluation of electrical capacitance tomography sensors for concentric annulus[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13 (2): 446-456.
- [15] YE J, LI Y, WANG H, et al. Concentric-annulus electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24 (9): 095403.
- [16] REZVANPOUR A, WANG C H, LIANG Y C, et al. Investigation of droplet distribution in electrohydrodynamic atomization (EHDA) using an ac-based electrical capacitance tomography (ECT) system with an internal-external electrode sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2012, DOI: 10.1088/0957-0233/23/1/015301.
- [17] CUI Z Q, XIA Z H, WANG H X. Electrical capacitance tomography sensor using internal electrodes [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(6): 3207-3216.
- [18] 王莉莉, 陈德运, 于晓洋, 等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 515-522.
WANG L L, CHEN D Y, YU X Y, et al. Sensor optimization design in electrical capacitance tomography system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 515-522.
- [19] WU M, YE J, WANG H, et al. Evaluation of excitation strategy for a large-scale ECT sensor with internal-external electrodes [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8091-8098.
- [20] YANG Y J, PENG L H, JIA J B. A novel multi-electrode sensing strategy for electrical capacitance tomography with ultra-low dynamic range [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 53: 67-79.
- [21] LIU S, FU L, YANG W Q. Optimization of an iterative image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(7): L37-L39.

作者简介



刘再兴, 2018 年于湘潭大学获得学士学位, 现为中科院工程热物理研究所博士研究生, 主要研究方向为流态化颗粒制备过程多模态层析成像监测与优化。

E-mail: liuzaixing@iet.cn

Liu Zaixing received his B. Sc. degree from Xiangtan University in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at the Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include multi-modal tomography and fluidization process monitoring.



王海刚 (通信作者), 1996 年于哈尔滨工程大学获学士学位, 1999 年于大连理工大学获硕士学位, 2003 年于中国科学院工程热物理研究所获博士学位, 现为中科院工程热物理研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为多相流反应过程(气-固、气-液)数值计算和测量; 过程层析成像和三维图形软件开发。

E-mail: wanghaigang@iet.cn

Wang Haigang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 1996, received his M. Sc. degree from Dalin University of Technology in 1999, and received his Ph. D. degree from the Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences in 2003. He is currently a professor at the Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include multi-phase flow measurement and CFD simulation.