

DOI: 10.7652/xjtuxb201504018

# 一种 48 电极可配置电容层析成像系统模型

范优飞, 胡红利, 杨帆, 杨星月

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 针对已有电容层析成像(ECT)技术的独立电容较少、反问题方程数过少及其解不唯一的问题,提出了一种 48 电极的 ECT 系统模型及模型组合电极策略。首先,通过组合电极策略将多个临近电极组合成一个电极,使原 48 电极 ECT 系统配置为 8、12、16 或 24 电极 ECT 系统,从而获得绕管道轴心旋转不同角度的多个具有相同电极数 ECT 系统;然后,通过有限元仿真和图像重构算法成像。该模型可使 ECT 反问题的方程组中电容数成倍增加,从而改善了 ECT 反问题方程组因方程数过少而引起的解不唯一的不适定问题,解决了增加电极数而电极片面积却减小引起的电容值减小问题。仿真结果表明:所提出的 ECT 模型及其组合电极策略可重构图像,并能通过增加测量电容数提高重构图像质量;在系统加入 10% 标准差白噪声时,图像错误率下降约 6%。

**关键词:** 电容层析成像; 电容; 不适定问题; 图像重构

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)04-0110-06

## A Model of Electrical Capacitance Tomography System with Configurable 48 Electrodes

FAN Youfei, HU Hongli, YANG Fan, YANG Xingyue

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A model of electrical capacitance tomography (ECT) system with configurable 48 electrodes and a strategy to combine electrodes are proposed to increase the capacitances of the current ECT system and to solve the equations of the ECT inverse problem. The strategy combines some adjacent electrodes as one electrode so that the ECT system with 48 electrodes is reconfigured as a ECT system with less electrodes, such as 8 electrodes, 12 electrodes, 16 electrodes or 24 electrodes. Several ECT systems with the same number of electrodes and the different rotation angles around the pipeline are obtained. Then the finite-element modeling and an image reconstruction algorithm are adopted for imaging. The model increases the number of capacitances in the equations of the ECT inverse problem, thus the ill-posedness of the equations of the ECT inverse problem caused by less equations is improved. The model also solves the problem that the capacitance value will decrease when the number of electrodes increases. Simulation results show that the proposed model and strategy can reconstruct images and improve the fidelity of reconstructed images by increasing the number of capacitances, and the error rate of images decreases by about 6% when a white noise with a standard deviation of 10% is added into the system.

**Keywords:** electrical capacitance tomography; capacitance; ill-posedness; image reconstruction

收稿日期: 2014-10-28。 作者简介: 范优飞(1983—),男,硕士生;胡红利(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177120);国家“863 计划”资助项目(2009AA04Z130)。

网络出版时间: 2015-01-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150116.1510.005.html>

电容层析成像(ECT)技术是一种通过对横截面成像来显示截面内介质分布的测量技术,被应用于气力输送系统<sup>[1-2]</sup>。在过去的几十年里,对 ECT 的研究取得了较大进展<sup>[3-6]</sup>。为了提高成像质量,国内外研究者不仅提出了许多算法<sup>[2,6-9]</sup>,也试图通过获得更多独立电容数来改善 ECT 重构图像的质量。1989 年,Xie 等人设计了 8 电极 ECT 系统,进行了图像重构,并提出 16 电极 ECT 系统可提高重构图像分辨率和质量<sup>[7]</sup>。之后,Xie 和其他研究者又设计出 12 电极 ECT 系统,并研究了传感器结构参数对重构图像质量的影响<sup>[2]</sup>;王化祥等人研究了 16 电极 ECT 系统,并提出该系统重构图像具有高空间分辨率<sup>[10]</sup>;Yang 也提出较多电极的 ECT 传感器将产生更多的独立电容值,能提高重构图像的质量<sup>[11]</sup>;Peng 等人研究了 4、8、12、16、20、24 和 32 电极的 ECT 传感器,讨论了 ECT 传感器电极数对重构图像质量的影响,最后推荐 12 电极的 ECT 系统<sup>[12]</sup>。也有学者采用其他方法获得更多独立电容值。Liu 研究了一种用步进电机旋转 ECT 传感器来获得更多电容值的 16 电极 ECT 系统,并分析了此旋转传感器对抑制信噪比和提高重构图像质量的影响<sup>[13]</sup>;Yang 研究了一种 24 电极 ECT 系统,并提出了一种组合电极策略进行成像<sup>[14]</sup>。

然而,上述研究工作增加的独立电容数不多,可用于成像的测量电容数较少,且增加独立电容数的同时电容值一般会减小。因此,本文提出一种 48 电极可配置电容层析成像技术模型,通过组合电极策略和 2 种方案使测量电容数成倍增加,以解决测量电容数过少和增加电极数而电容值又会减小的问题。

# 1 48 电极 ECT 系统

## 1.1 系统简介

传统的 ECT 系统如图 1 所示,由多片电极围绕绝缘管道的传感器、调理电路和数据采集系统以及成像计算机组成。

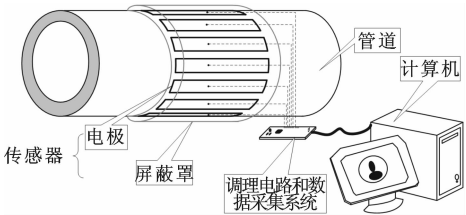


图 1 传统 ECT 系统

其测量原理是:当管道内介质分布变化时,管道周围的电极之间两两组成的电容对的电容值也会改

变。通过调理电路和数据采集系统测得电容值,然后,根据这些电极间的电容值反推出管道横截面上介质分布的变化。

## 1.2 48 电极 ECT 传感器模型的组合电极策略

文本采用的 ECT 系统类似传统 ECT 系统,仅电极数增加了,其传感器模型如图 2 所示。模型有 48 个电极,标号从 1 到 48。通过组合电极策略将多个临近电极组合成一个组合电极,从而将原 48 电极配置为传统的 8 电极、12 电极、16 电极和 24 电极 ECT 系统。

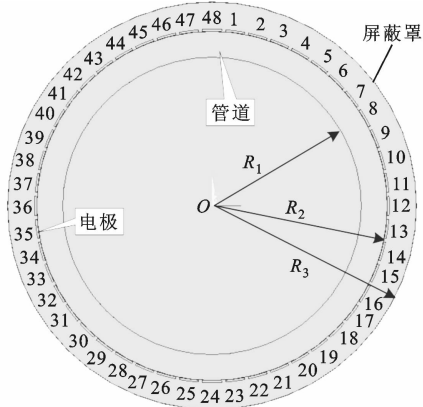


图 2 用 ANSYS 软件建立的 48 电极 ECT 传感器模型

图 2 中,如果将电极 1 到 3 相连,组成一个组合电极(即视为一个电极),将电极 4 到 6 相连,组成一个组合电极,依次类推就可以组成一个 16 电极的 ECT 系统。如果将电极 2 到 4 相连,组成一个组合电极,将电极 5 到 7 相连组成一个组合电极,依次类推又可以组成一个新的 16 电极的 ECT 系统。新的 16 电极 ECT 系统相当于将第一个 16 电极 ECT 系统围绕管道轴心旋转了一个电极的角度,这 2 个 ECT 系统测得的电容值是相互不同的。如果将新的 16 电极 ECT 系统再围绕管道中心旋转一个电极的角度,就可以再得到一个 16 电极 ECT 系统。这样就可得到 3 个 16 电极 ECT 系统,且这些系统的电容值都相互不同。如果再次旋转 ECT 系统一个电极的角度,该系统电容值与前 3 个系统的第一个 16 电极的 ECT 系统电容值一样。采用类似的组合电极策略还可以得到 4 个 12 电极 ECT 系统、6 个 8 电极 ECT 系统和 2 个 24 电极 ECT 系统。

根据 12 电极 ECT 测量系统的独立电容数的计算式<sup>[15]</sup>,对于 48 电极系统,由组合电极策略获得的所有 N 电极 ECT 系统的独立电容数为

$$M = \frac{N(N-1)}{2} \frac{48}{N} = 24(N-1) \quad (1)$$

式中:  $M$  为系统的独立电容数;  $N$  为电极数, 分别取 8、12、16、24。这样, 所获 24 电极 ECT 系统可以得到 552 个电容值, 16 电极 ECT 系统可得 360 个电容值, 12 电极 ECT 系统可得 264 个电容值, 8 电极 ECT 系统可得 168 个电容值。总共加起来就可以得到 1 344 个测量电容值。

## 2 图像重构

对于一般的 ECT 传感器, 例如 12 电极 ECT 传感器<sup>[16]</sup>, 归一化的电容数据和归一化的介质分布数据之间近似的线性关系为

$$\lambda = Sg \quad (2)$$

式中:  $\lambda = \{\lambda_i | i=1, 2, \dots, h\}$  为归一化的电容向量;  $g = \{g_j | j=1, 2, \dots, l\}$  为归一化介质分布向量;  $S$  为  $h$  (ECT 系统独立电容个数) 行  $l$  (成像区域的像素个数) 列的灵敏度矩阵。

将  $N$  电极 ECT 系统的归一化电容数据和归一化介质分布数据的近似线性关系表示如下

$$\begin{bmatrix} \lambda_{1,N} \\ \lambda_{2,N} \\ \vdots \\ \lambda_{r,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,N} \\ S_{2,N} \\ \vdots \\ S_{r,N} \end{bmatrix} g \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{r,N}$  和  $S_{r,N}$  为通过组合电极策略配置的第  $r$  个  $N$  电极 ECT 系统的归一化电容向量和归一化灵敏度矩阵;  $g$  为归一化介质分布向量;  $r=1, 2, \dots, 48/N$ ;  $N$  分别取 8、12、16 和 24。这样, 所有 8 电极 ECT 系统的电容值被放在一个方程组内, 用于一次图像重构。12 电极、16 电极和 24 电极 ECT 系统的电容值也类似处理来进行图像重构。将式(3)左侧电容向量表示为  $C_N$ , 将右侧灵敏度组合矩阵表示为  $S_N$ , 则式(3)可重写为

$$C_N = S_N g \quad (4)$$

式中:  $N$  分别取 8、12、16 和 24。

将式(4)所表示的 8 电极、12 电极、16 电极和 24 电极的 ECT 系统电容向量和灵敏度矩阵放在同一个方程组内, 可得

$$\begin{bmatrix} C_8 \\ C_{12} \\ C_{16} \\ C_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_8 \\ S_{12} \\ S_{16} \\ S_{24} \end{bmatrix} g \quad (5)$$

由组合电极策略可计算出方程组所含的方程数为 1 344 个。

根据式(2)、(3)及式(5), 由仿真得到灵敏度矩阵和电容值来计算介质分布  $g$ 。为了比较这些 ECT

反问题求解方法的性能, 本文采用‘0/1’算法<sup>[2]</sup>、线性反投影 (linear back projection, LBP) 算法<sup>[6]</sup> 和 Landweber 算法<sup>[8]</sup> 重构图像, 其中‘0/1’算法为非迭代算法, 成像灰度值较大。LBP 算法成像速度快, Landweber 算法成像质量较好。

## 3 ECT 成像的质量

### 3.1 影响 ECT 成像质量的因素

Hadamard 在 1923 年提出, 同时满足 3 个条件的问题, 称为是适定问题。其中, 一个条件为问题的解唯一。对于 ECT 的反问题, 一般采用式(2)基于灵敏度理论的方法求解: 根据已知  $\lambda$  和  $S$  按照式(2)求出  $g$ 。在式(2)中, 此求解方法所用  $\lambda$  向量的元素个数远小于  $g$  向量的元素个数, 所以计算出来的  $g$  在理论上不唯一, 这是被广泛采用的基于灵敏度理论的 ECT 反问题不适定的原因之一, 也是影响 ECT 成像质量的第 1 个因素。第 2 个影响因素为: ECT 的静电场是软场, 在式(2)中,  $S$  实际会随  $g$  的变化而变化, 式(2)只能近似相等。第 3 个影响因素为: 式(2)中  $S$  的条件数很大, 致使求解 ECT 反问题转化为求解近似病态方程的问题。对于第 2 因素和第 3 因素的问题, 有很多学者提出不同的图像重构算法来提高成像质量加以解决。唯独第 1 因素的问题解决方法有限。按照现行的 ECT 系统, 虽可大量增加绕管道轴心电极数, 但这样会导致每个电极片的面积有较大减小。本文将试图增加电极数, 同时又不会较大幅度减小电极片面积, 即采用式(3)和式(5)所表示的方法成倍增加测量电容数。

### 3.2 仿真成像质量评价

假设  $g^*$  为图像重构后得到的介质分布向量, 其元素值在 0 和 1 之间,  $g$  为仿真设置的原型图的介质分布向量, 即归一化介质分布向量, 其元素值为 0 或 1, 对图像重构得到的图像质量可用下式<sup>[15]</sup>来评价

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^l |g'_j - g_j|}{\sum_{j=1}^l g_j} \quad (6)$$

$$g'_j = \begin{cases} 1, & g_j^* > \eta \\ 0, & g_j^* \leq \eta \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为图像错误率;  $g_j^*$  为向量  $g^*$  的第  $j$  个元素;  $g_j$  为向量  $g$  的第  $j$  个元素;  $\eta$  取 0 至 1 之间的值。

## 4 仿真及结果

仿真先采用 ANSYS10.0 软件来计算电容值和

灵敏度矩阵所需的相关数据,然后采用 Matlab 2010a 软件计算灵敏度矩阵并重构图像。

4.1 传感器模型

传感器模型采用 ANSYS10.0 软件建立,该软件可以进行多种方式的网格划分,其有限元的计算方法相比于其他同类软件较成熟。采用 ANSYS10.0 软件建立的 48 电极 ECT 系统传感器模型如图 2 所示,其电容传感器阵列参数如表 1 所示。由于该模型没有文献[11]模型的轴向屏蔽,所以考虑到管道壁厚介质对成像质量的影响,设置了管道内壁到电极之间的介质填充(本文将管道内壁到电极之间的空间统称为管道壁)。

表 1 电容传感器阵列参数

| 参数              | 数值    | 参数             | 数值   |
|-----------------|-------|----------------|------|
| $R_1/\text{mm}$ | 76.7  | 电极厚度/mm        | 1.0  |
| $R_2/\text{mm}$ | 90.0  | 屏蔽罩厚度/mm       | 0.1  |
| $R_3/\text{mm}$ | 105.0 | 电极张角/ $^\circ$ | 6.24 |

4.2 实验模拟仿真

为了便于比较结果,将所有传感器模型剖分成相同网格,将管道内剖分为 1 148 个网格单元,并且给管道内加相同的流型介质及其分布。模型的网格剖分图如图 3 所示。在本文仿真采用的 3 种算法重构的图像中,最高介电常数的像素点对应的  $g_j^*$  值可能小于 1,而最低介电常数的像素点对应的  $g_j^*$  值可能大于 0。本文先将所有像素点的值减去最低介电常数的像素点对应的  $g_j^*$  值得到一个差值向量,然后再将这差值向量乘以这个差值向量中最大值的倒数,从而将介质分布数据换算至 0 至 1 之间进行成像(这种换算方法为 Matlab 默认的成像方式)。但是,在计算相对图像错误率时,按照换算前介质分布数据计算,这样更能体现未经过处理的原本图像重构算法的成像效果。事实上,不同的流形的图像重构得到的介质分布  $g^*$  在未经过上述处理或其他图像处理的情况下都有可能出现最小介质对应的  $g_j^*$  大于 0,而最大介质对应的  $g_j^*$  小于 1 的情况。仿真方案分为如下 3 个方案。

**方案 1** 在 ANSYS10.0 建立的 48 电极传感器模型上,按照组合电极策略将其配置为 6 个 8 电极、4 个 12 电极、3 个 16 电极和 2 个 24 电极的 ECT 系统。首先,分别给这 4 类系统的传感器模型的组合电极加激励,给管道内部加不同流形的介质,介质为相对介电常数为 3 的煤粉。给管道内部其他区域加相对介电常数为 1 的空气介质。管道为相对介电常数为

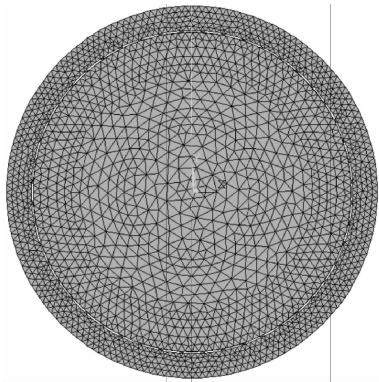


图 3 传感器模型网格剖分图

3.4 的玻璃或填充物质。然后,求管道外围的电极间的电容值和计算灵敏度用的静电场电势分布数据。最后,分别计算出 13 个灵敏度矩阵,再根据式(2)用 Matlab2010a 按‘0/1’算法、LBP 算法和 Landweber 算法重构图像。由于仿真图像太多,无法全部显示,因此在 6 个 8 电极、4 个 12 电极、3 个 16 电极和 2 个 24 电极这 4 种 ECT 系统仿真结果中,分别挑选其中 1 个 ECT 系统仿真结果。

**方案 2** 将方案 1 计算出的 15 个敏度矩阵和 15 组电容数据,按式(3)用上述 3 种算法分别计算 8 电极、12 电极、16 电极和 24 电极 ECT 测量系统的各 1 个总灵敏度矩阵(共计 4 个总灵敏度矩阵)和它们的重构图像。

**方案 3** 将方案 1 得到的所有电容数据和 13 个灵敏度矩阵,按式(5)也用上述 3 种算法分别计算出 15 个 ECT 系统的 1 个总灵敏度矩阵和重构图像。

方案 1 至方案 3 的原流型图和部分仿真结果图对比如表 2~表 4 所示。

表 5 的数据为 3 种方案下的 3 种介质分布在采用 3 种算法时,不同电极数系统成像得到的图像错误率。其中,电极数代表配置得到的 ECT 系统电极数;电极数为 48 的一栏是按方案 3 仿真得到的图像错误率。在表 5 中计算图像错误率时, $\eta$  在‘0/1’算法中取 0,在 LBP 算法中取 0.5,在 Landweber 算法中取 0.3。

从表 2 至表 4 的重构图像来看,方案 2 要比方案 1 的成像质量好,特别是电极位置对成像效果的影响减小了(‘0/1’算法成像质量的这个结论最明显);在表 2 和表 3 中,LBP 算法成像质量也可以得到同样的结论;在表 2 中,Landweber 算法在 2 个方案中虽然不是特别明显,但也可以得到同样的结论。另外,对比表 5 中方案 2 和方案 1 对应的相同电极数、介质分布和算法的图像错误率,可以看出方案 2

表 2 3 种算法下的层流仿真重构图像

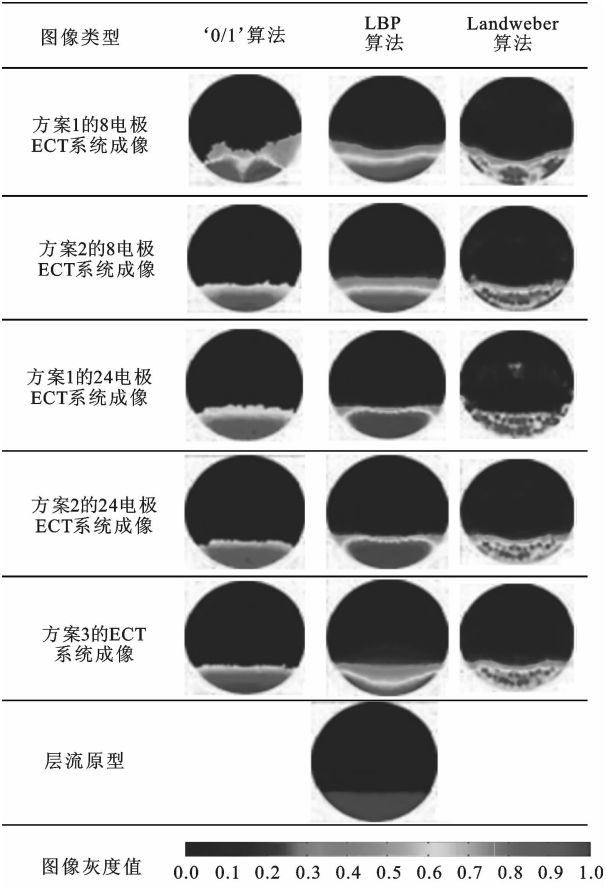
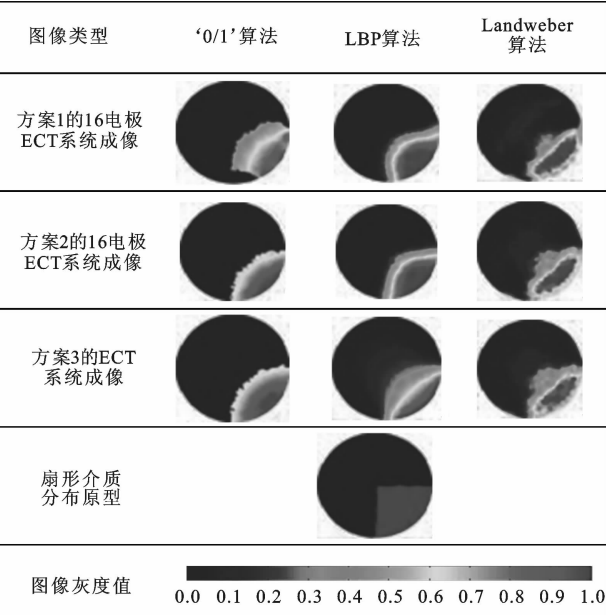


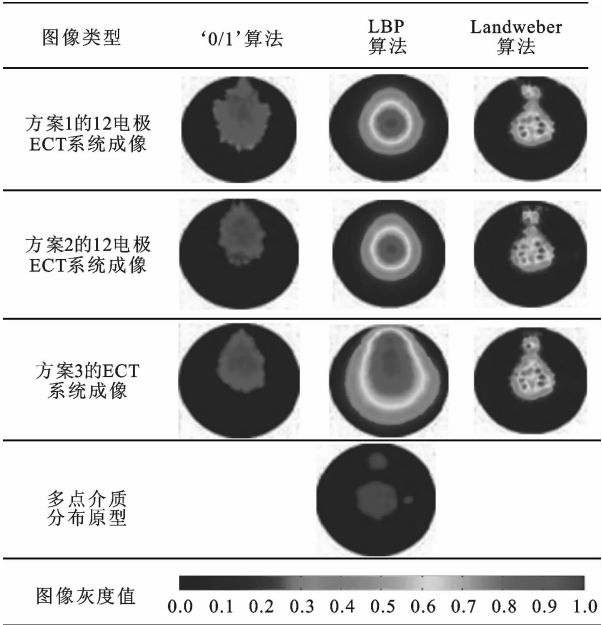
表 3 3 种算法下的扇形分布介质仿真重构图像



要比方案 1 的大部分图像错误率低,成像质量好。

表 5 中,比较了方案 2 对应的相同电极数、介质分布和算法的图像错误率,容易看出在组合电极策略中,12 电极和 24 电极系统要比 8 电极和 16 电极系统的图像错误率低,成像效果好。

表 4 3 种算法下的多点分布介质仿真重构图像



另外,对方案 1 及方案 2 的 12 电极和 24 电极系统加入了仿真电容值的 10% 标准差白噪声来模拟实际系统运行环境的噪声。采用 Landweber 算法仿真 3 种介质分布的图像错误率如表 6 所示。

表 6 的数据为方案 1 和 2 的 12 电极和 24 电极系统在加噪声前后不同介质分布采用 Landweber 算法所得的图像错误率。从表 6 中可以看出,方案 2 的抗噪声能力要比方案 1 好,图像错误率下降约 6%,甚至更多。虽然表 6 的数据说明 12 电极系统和 24 电极系统的抗噪声能力相当,但是 24 电极系统更复杂。如果在未来的工作中深入研究,可能会发现随着电极数的增加,ECT 系统的病态特性会加强。因此,可得到结论:组合电极策略产生的 12 电极 ECT 系统为最佳。

对于方案 3 的成像质量,从表 2 至表 4 的重构图像来看,除了 LBP 算法的部分重构图像质量比方案 1 好,却不能最终得出比方案 2 好的结论。相反,从表 5 的对比结果来看,方案 3 不如方案 2 效果好。其原因和前面 3.1 部分中所述的第 2 和第 3 个因素有关。在方案 3 的方程组中,电容值有 1 344 个,即方程的数量为 1 344,而待求介质分布的单元有 1 148 个,即待求解未知数的数量为 1 148。此方程组成为超定方程,存在唯一的最小二乘法解。此超定方程的系数矩阵(即灵敏度矩阵)秩为 1 148。然而,采用最小二乘法并没有得到正确的介质分布。因此,方案 3 解决了测量电容过少引起的 ECT 反问题的不适定问题后,3.1 节剩下的 2 个因素成为图像质量提高的制约因素。在未来的研究中,如果能

表 5 3 种方案下不同介质分布类型对 3 种算法的图像错误率

| 方案号 | 电极数 | 图像错误率/% |      |            |       |      |            |       |      |            |
|-----|-----|---------|------|------------|-------|------|------------|-------|------|------------|
|     |     | 层流      |      |            | 扇形分布  |      |            | 多点分布  |      |            |
|     |     | ‘0/1’   | LBP  | Land-weber | ‘0/1’ | LBP  | Land-weber | ‘0/1’ | LBP  | Land-weber |
| 1   | 8   | 44.4    | 13.5 | 23.0       | 17.0  | 21.6 | 18.8       | 102.4 | 65.4 | 42.5       |
|     | 12  | 34.1    | 8.7  | 13.5       | 16.3  | 19.1 | 17.0       | 100.0 | 57.5 | 37.8       |
|     | 16  | 34.9    | 8.3  | 18.7       | 21.6  | 21.3 | 22.7       | 101.6 | 53.5 | 44.9       |
|     | 24  | 23.8    | 11.1 | 22.2       | 11.0  | 8.5  | 26.2       | 74.8  | 63.0 | 40.9       |
| 2   | 8   | 6.0     | 5.5  | 7.9        | 21.3  | 15.2 | 15.6       | 102.0 | 64.6 | 44.9       |
|     | 12  | 3.6     | 4.0  | 7.5        | 14.9  | 16.0 | 13.5       | 94.5  | 57.5 | 36.2       |
|     | 16  | 5.2     | 7.1  | 10.0       | 14.9  | 16.3 | 16.7       | 111.0 | 53.5 | 33.9       |
|     | 24  | 8.0     | 10.3 | 9.1        | 12.1  | 8.5  | 12.7       | 72.4  | 63.0 | 33.1       |
| 3   | 48  | 4.4     | 22.2 | 9.1        | 14.5  | 31.2 | 14.5       | 81.9  | 222  | 31.5       |

表 6 加噪声前后的图像错误率对比

| 图像类型   | 加噪声情况 | 图像错误率/% |      |      |
|--------|-------|---------|------|------|
|        |       | 层流      | 扇形分布 | 多点分布 |
| 方案 1 的 | 加噪前   | 13.5    | 17.0 | 37.8 |
| 12 电极  | 加噪后   | 14.3    | 20.6 | 50.4 |
| 方案 2 的 | 加噪前   | 7.5     | 13.5 | 36.2 |
| 12 电极  | 加噪后   | 8.7     | 14.5 | 49.6 |
| 方案 1 的 | 加噪前   | 22.2    | 26.2 | 40.9 |
| 24 电极  | 加噪后   | 23.0    | 35.1 | 50.4 |
| 方案 2 的 | 加噪前   | 9.1     | 12.8 | 33.1 |
| 24 电极  | 加噪后   | 9.5     | 13.8 | 40.9 |

解决 ECT 静电场软场特性所引起的灵敏度矩阵不准确问题,使灵敏度矩阵随介质分布变化而适当变化,就有可能进一步提高成像质量,从而拓展 ECT 的应用范围。

5 结 论

本文通过组合电极策略配置将原 48 电极配置为 8 电极、12 电极、16 电极和 24 电极 ECT 系统,采用了 2 种重构图像的方案既改善了 ECT 反问题方程组方程数过少引起的解不唯一的不适定问题,又解决了由于增加电极数使电极片面积减小而引起的电容值减小问题。同时,配置的相同电极数的 ECT 系统具有绕管道轴心旋转电极至不同位置的效果。仿真结果表明:本文的 ECT 模型及其组合电极策略不仅可以重构图像,而且还可以通过增加测量电容数来有效提高重构图像的质量。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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, 1992, 139(1): 89-98.

[3] ISAKSEN O. A review of reconstruction techniques for capacitance tomography [J]. Measurement Science Technology, 1996, 7(3): 325-337.

[4] DYAKOWSKI T, JEANMEURE L F C, JAWORSKI A J. Applications of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows: a review [J]. Power Technology, 2000, 112(3): 174-192.

[5] BERNIERI A, BETTA G, FERRIGNO L, et al. Crack depth estimation by using a multi-frequency ECT method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(3): 544-552.

[6] 彭黎辉,陆耿,杨五强. 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.

PENG lihui, LU Geng, YANG Wuqiang. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography state of the art [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2004,44(4):478-484.

[7] XIE C G, PLASKOWSKI A, BECK M S. 8-electrode capacitance system for two-component flow identification: part 1 Tomographic flow imaging [J]. IEE Proceeding, 1989, 136(4): 173-183.

[8] 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

(下转第 122 页)