文章编号:2095-6134(2017)02-0186-05

三维电容层析成像多电极激励模式的稳定性分析*

毛明旭,叶佳敏†,王海刚,张娇龙

(中国科学院工程热物理研究所,北京 100190)

(2016 年 4 月 21 日收稿;2016 年 5 月 12 日收修改稿)

Mao M X, Ye J M, Wang H G, et al. Stability analysis of multi-electrode excitation strategies for 3D ECT[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017,34(2):186-190.

摘 要 三维电容层析成像(3D ECT)一般基于单电极测量模式。构建一个 3 层 ECT 传感器,研究多电极激励测量模式在 3D ECT 中的稳定性,包括单电极激励、同层相邻双电极激励和不同层双电极激励。利用 Landweber 迭代算法重建图像,以相关系数作为图像质量评价标准,研究在不同数据噪声水平下,激励测量方式对重建图像的质量和稳定性的影响。根据数据模拟结果,对 3 种激励测量模式的稳定性进行评价。

关键词 电容层析成像;三维重建;多电极激励;数据噪声

中图分类号:TP216 **文献标志码:**A **doi:**10.7523/j.issn.2095-6134.2017.02.010

Stability analysis of multi-electrode excitation strategies for 3D ECT

MAO Mingxu, YE Jiamin, WANG Haigang, ZHANG Jiaolong

(*Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract Generally, single-electrode excitation strategy is used for a 3D ECT (electrical capacitance tomography). In this study, the stability of multi-electrode excitation strategies is investigated by using a three-plane ECT sensor for the 3D image reconstruction. Three excitation strategies, including the single-electrode excitation, dual-electrode excitation in the same plane, and dual-electrode excitation in different planes, are considered for comparison. Landweber iteration algorithm is used for image reconstruction. The effect of excitation strategy on image quality and stability is investigated by using the noise-free and noisy data in terms of correlation coefficient. Based on the simulation results, the stability of the three excitation strategies is evaluated.

Keywords electrical capacitance tomography; 3D reconstruction; multi-electrode excitation; data noise

电容层析成像技术(ECT)由于其无辐射、非接触、非侵入、成像速度快且成本低等优点[1],目前已经广泛应用于不同领域的多相流动测量过程中[2-9],包括原油管道中的油/气两相流以及火焰、气力输送和循环流化床内的气固两相流等。

与单电极激励方式相比,多电极激励方式可增加独立测量数目,减小逆问题的不适定性。另外,还可提高测量信号的强度,增加测量电容值,有利于电容数据的采集。在传统的二维 ECT(2D ECT)测量过程中,多电极激励方式已经得到广泛关注,相关学者对其稳定性进行了研究。Ye 等[10]在一个矩形电容传感器中比较单电极激励、

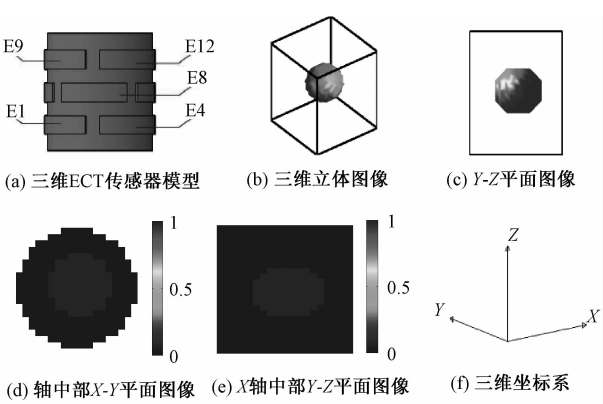
* 国家自然科学基金(61374018, 61320106004)资助
† 通信作者,E-mail:yejiamin@iet.cn

双电极激励和四电极激励 3 种测量模式。结果表明:在无噪声干扰的情况下,单电极激励方式成像效果最佳;在施加噪声的情况下,双电极激励方式成像效果更加稳定。本文构建了一个包含 12 个电极(3 层,每层布置 4 个电极)的三维 ECT (3D ECT)传感器,并将多电极激励模式应用于 3D ECT 传感器,分别研究单电极激励模式、同层相邻双电极激励模式和不同层双电极激励模式。之后,对测量的电容数据施加噪声干扰,并进行相关分析,研究 3 种激励方式对噪声干扰的稳定性。

1　三维 ECT 模型及激励方式

1.1　3D ECT 模型

如图 1(a)所示,构建一个包含 12 电极的 3D ECT 模型。电极分 3 层布置,每层含 4 个电极,且中间层相较于其他两层旋转 45°。模型管道内径 40 mm,壁厚 2 mm,高 50 mm,被重建的球体直径为 10 mm。电极宽度设置为 8 mm,使得被测球体能在传感器的有效成像区域。为保证成像质量,电极覆盖率设计约为 80% ,电极长度 29.45 mm,径向距离 5.9 mm。为了与电极的径向距离保持一致,电极的轴向距离设置为 6 mm。



(a) 三维ECT传感器模型　(b) 三维立体图像　(c) Y-Z平面图像

(d) 轴中部X-Y平面图像　(e) X轴中部Y-Z平面图像　(f) 三维坐标系

图 1　仿真模型

Fig. 1　Simulation model

1.2　3D ECT 激励方式

传统的单电极激励方式可以描述为:电极 E1 施加激励,测量 E2 ~ E12 共 11 个电极上的电荷量;之后电极 E2 施加激励,测量 E3 ~ E12 共 10 个电极的电荷量;然后依次对其余电极施加激励,直至电极 E11 施加激励,测量 E12 电极上的电荷量,共可得到 66 个电容值。

多电极激励方式可以增加测量数目,且可以提高激励信号的强度。因此,本文对同层相邻双电极激励方式进行研究,在测量过程中对同层相邻电极进行激励,采集其余极板电荷量,这样共可得到 120 个电容值。

为改善敏感场均匀性,本文设置不同层双电极激励模式,即对位于不同层上的 2 个电极施加激励,测量其余极板电荷量。以 1、2 层平面为例,对 E1 ~ E5,E2 ~ E6,E3 ~ E7,E4 ~ E8 电极依次施加激励,测量其余电极电荷量。这种方式共可得到 120 个电容值。

本文研究的 3 种激励测量方式如表 1 所示。

表 1　激励测量方式

Table 1　Excitation strategies

激励测量方式	激励电极
单电极	E1, E2,…,E11
同层相邻双电极	第 1 层: E1E2, E2E3, E3E4, E4E1
	第 2 层: E5E6, E6E7, E7E8, E8E5
	第 3 层: E9E10, E10E11, E11E12, E12E9
不同层双电极	第 1、2 层: E1E5, E2E6, E3E7, E4E8
	第 2、3 层: E5E9, E6E10, E7E11, E8E12
	第 1、3 层: E1E9, E2E10, E3E11, E4E12

2　ECT 数学模型与算法

2.1　3D ECT 模型

ECT 的近似线性数学模型[11]可以表示为

$$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{g}, \tag{1}$$

其中:$\boldsymbol{\lambda}$ 为归一化电容向量,$\boldsymbol{S}$ 为归一化灵敏度矩阵,$\boldsymbol{g}$ 为归一化介电常数向量。

在 3D ECT 中,灵敏度矩阵元素由下式计算

$$S_{ij}(x,y,z) = -\iiint_p \frac{\nabla\varphi_i(x,y,z)}{V_i} \cdot \frac{\nabla\varphi_j(x,y,z)}{V_j}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z, \tag{2}$$

其中:$S_{ij}(x,y,z)$ 为电极 i 和 j 在区域 p 上的灵敏度,$\varphi_i(x,y,z)$ 为电极 i 施加电压 V_i 且其余电极接地时的电势分布。

归一化电容值[12]可以表示为

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{\boldsymbol{C}^m - \boldsymbol{C}^l}{\boldsymbol{C}^h - \boldsymbol{C}^l}, \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{\lambda}$ 为归一化电容值,$\boldsymbol{C}^m$ 为测量所得电容值,$\boldsymbol{C}^h$ 和 $\boldsymbol{C}^l$ 分别为满场电容值和空场电容值。本文中,满场时内部相对介电常数为 3,空场时内部相对介电常数为 1。

2.2　图像重构算法

为解决 ECT 逆问题,计算测量区域的介电常

数值,研究人员提出多种重构算法。在迭代算法中,Landweber 迭代算法[11]应用最为广泛,其计算公式为

$$\boldsymbol{g}^{n} = \boldsymbol{g}^{n-1} + \alpha^{n}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{g}^{n-1}), \tag{4}$$

其中,α^{n} 为迭代步长[13]

$$\alpha^{n} = \frac{\| \boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}^{(n-1)} \|^{2}}{\| \boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}^{(n-1)} \|^{2}}, \tag{5}$$

$\boldsymbol{e}^{(n-1)}$ 表示测量电容与计算电容之间的误差[11]

$$\boldsymbol{e}^{(n-1)} = \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{g}^{(n-1)}. \tag{6}$$

本文应用上述算法重构,迭代步数统一为 20。

3 模拟条件设置

本文中,测量区域划分为 20 × 20 × 25,圆柱区域内共 7 900 个像素。如图 1(b) ~1(e)所示,本文在测量区域中心处设置一个半径为 10 mm 的球体,为高介电常数分布。

相关系数作为本文图像质量评价标准[11]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N_k}(g_i - \bar{g})(\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_k}(g_i - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^{N_k}(\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2}}, \tag{7}$$

其中:r 为相关系数,g_i 为真实分布中 i 点像素值,$\hat{g}_i$ 为重构图像中 i 点像素值,$\bar{g}$ 为真实分布中像素平均值,$\bar{\hat{g}}$为重构图像的像素平均值,N_k 为测量区域内像素总数。

4 模拟结果及分析

为研究噪声干扰对 3 种激励方式的影响,本文分别设置了无噪声干扰,振幅为 1 fF 的噪声干扰和振幅为 2 fF 的噪声干扰 3 种情况。

4.1 无噪声干扰

图 2 为无噪声干扰下 3 种测量方式所得结果。从图中可以看出:测量方式 1 所得图像更接近于真实分布,边界也更加明显;测量方式 3 重构效果次于测量方式 1,但优于测量方式 2。由表 2 相关系数数据可以得到:测量方式 1 相关系数最大,测量方式 2 相关系数最小。由以上结果可知,无噪声干扰情况下,测量方式 1 即单电极激励方式成像效果最佳。

表 2 无噪声干扰信号所得结果相关系数

Table 2 Correlation coefficients under noise-free data

测量方式 1	测量方式 2	测量方式 3
0.776 6	0.680 2	0.697 3

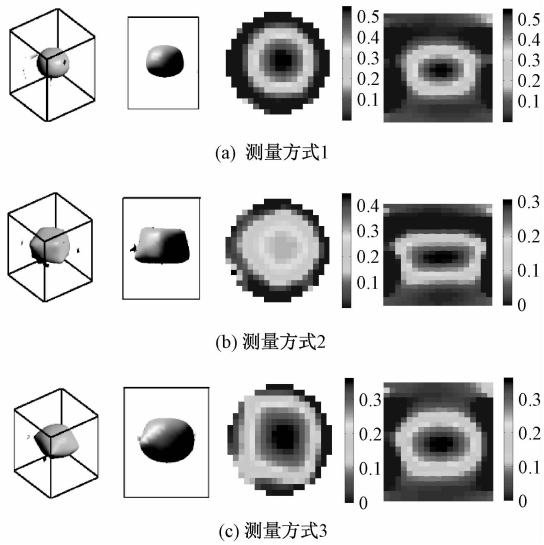


图 2 无噪声干扰信号所重构的图像

Fig. 2 Reconstructed images by using noise-free data

4.2 振幅为 1fF 的噪声干扰结果分析

为研究不同激励方式的测量稳定性,本文对原始电容数据施加了振幅为 1 fF 的噪声干扰,并得到 500 组含噪声数据。利用含噪声数据进行图像重建并计算所得图像的相关系数,如图 3 所示。从图中可以明显看出:测量方式 1 所得相关系数波动幅度最大,测量方式 3 波动幅度最小。

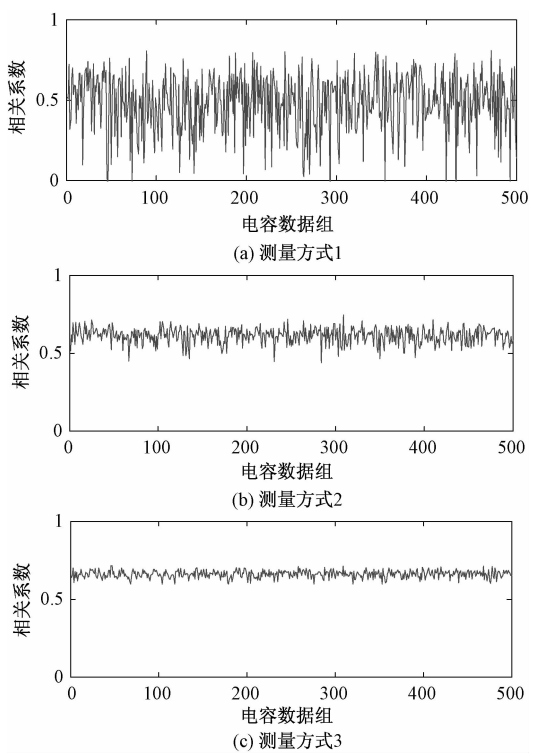


图 3 振幅为 1fF 的噪声干扰信号所得相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients under noisy data with 1fF amplitude

根据图 3 数据,表 3 对 3 种测量方式下各 500 组数据的相关系数进行数据分析,分别得到最大值、最小值、平均值及标准差。由表 3 可知,测量方式 3 所得相关系数的平均值最大且标准差最小,表明不同层双电极激励方式受噪声影响最小、稳定性最好。

表 3　振幅为 1fF 的噪声干扰信号所得结果相关系数分析

Table 3　Analysis of correlation coefficients under noisy data with 1fF amplitude

测量方式	最大值	最小值	平均值	标准差
1	0.809 0	-0.149 9	0.480 9	0.188 9
2	0.746 1	0.438 7	0.611 9	0.050 4
3	0.715 0	0.596 0	0.660 2	0.023 9

图 4 为取相关系数最大和最小情况所得图像。从图中可以看出,取相关系数最小的电容数据进行图像重构时,测量方式 1 和测量方式 2 所重构图像已经不能反映真实分布,而测量方式 3 所重构图像尽管质量下降,但仍能反映真实分布。

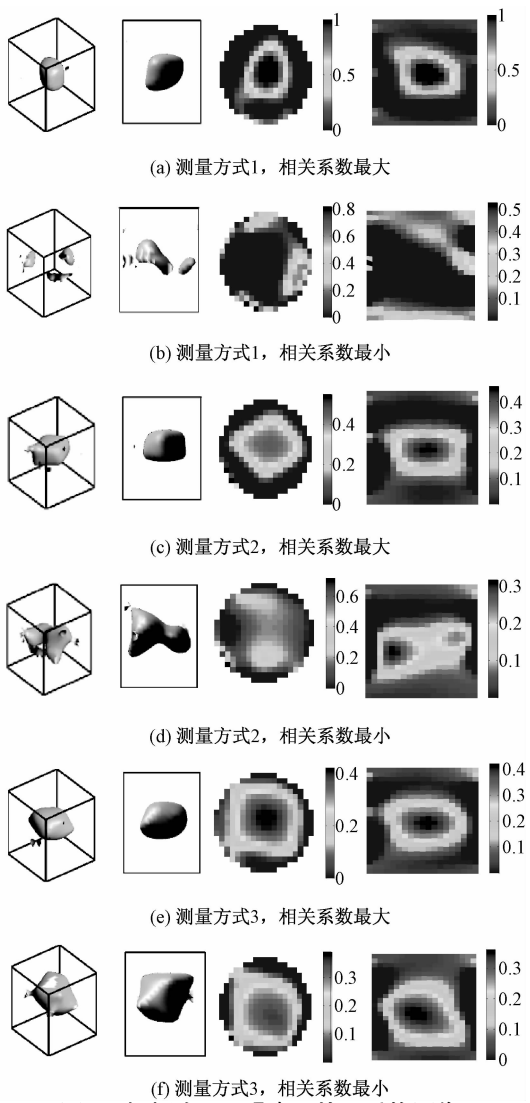


图 4　振幅为 1fF 噪声干扰下重构图像

Fig. 4　Reconstructed images by using noisy data with 1fF amplitude

4.3　振幅为 2fF 的噪声干扰结果分析

对原始电容数据施加振幅为 2fF 的噪声干扰,得到 500 组含噪声数据。对上述数据继续做相关性分析,结果见图 5。与振幅为 1fF 的噪声干扰结果相同,测量方式 1 相关系数波动幅度最大,测量方式 3 相关系数波动幅度最小。

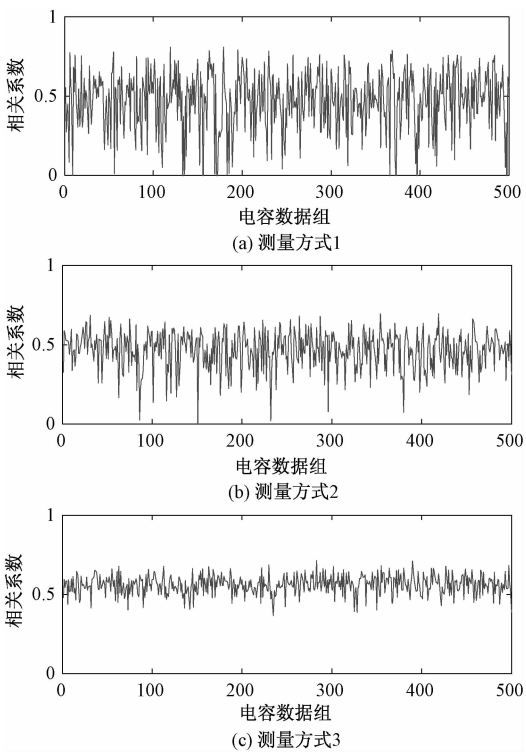


图 5　振幅为 2fF 的噪声干扰信号所得相关系数

Fig. 5　Correlation coefficients under noisy data with 2fF amplitude

根据图 5 数据,表 4 对 3 种测量方式下各 500 组数据的相关系数进行数据分析,分别得到最大值、最小值、平均值及标准差。由表 4 可知,测量方式 3 所得相关系数的平均值最大且标准差最小,表明不同层双电极激励方式受噪声影响最小、稳定性最好。

表 4　振幅为 2fF 的噪声干扰信号所得结果相关系数分析

Table 4　Analysis of correlation coefficients under noisy data with 2fF amplitude

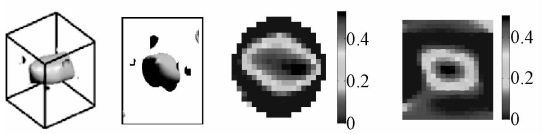
测量方式	最大值	最小值	平均值	标准差
1	0.808 3	-0.113 4	0.469 7	0.190 6
2	0.694 2	-0.006 7	0.463 9	0.119 8
3	0.712 2	0.365 7	0.560 4	0.060 5

图 6 为取相关系数最大和最小情况所得图

像。从图中可以看出,取相关系数最小的电容数据进行图像重构时,测量方式 1 和测量方式 2 所重构图像已经不能反映真实分布,而测量方式 3 所重构图像仍能大致反映真实分布。

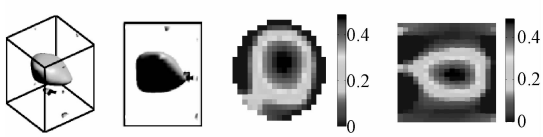
(a) 测量方式1，相关系数最大

(b) 测量方式1，相关系数最小



(c) 测量方式2，相关系数最大

(d) 测量方式2，相关系数最小



(e) 测量方式3，相关系数最大

(f) 测量方式3，相关系数最小

图 6 振幅为 2fF 噪声干扰下重构图像

Fig. 6 Reconstructed images by using noisy data with 2fF amplitude

5 结论

本文研究 3 种激励测量模式,即单电极激励、同层相邻双电极激励和不同层双电极激励,在三维 ECT 测量中的性能。通过对原始测量数据施加不同程度的噪声干扰,对结果稳定性进行分析。针对本文中设置的流型,得到下述结论,

1)无噪声干扰时,单电极激励方式成像效果最佳;

2)存在噪声干扰时,不同层双电极激励方式成像效果最稳定,单电极激励方式波动幅度最大。

此外,本文只设置了中心区域为高介电常数的流型,对其他流型仍需要进一步研究。

参考文献

[1] Yang W Q. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4):042001.

[2] Sun J T, Yang W Q. A dual-modality electrical tomography sensor for measurement of gas-oil-water stratified flows [J]. Measurement, 2015, 66(1):150-160.

[3] 孙猛,刘石,雷兢,等. 利用电容层析成像法测量气力输送中的煤粉流量 [J]. 动力工程, 2008, 28(3):411-414.

[4] Wang X X, Hu H L, Liu X, et al. Concentration measurement of dilute pulverized fuel flow by electrical capacitance tomography [J]. Instrumentation Science & Technology, 2015,43(1):89-106.

[5] 王海刚,赵国荣,邱桂芝. 循环流化床多旋风分离器入口电容层析成像测量 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(1): 109-113.

[6] Zhang R H, Wang Q, Wang H X, et al. Data fusion in dual-mode tomography for imaging qil-gas two-phase flow [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 37(1):1-11.

[7] Zhao T, Liu K, Murata H, et al. Experimental and numerical investigation of particle distribution behaviors in a rolling circulating fluidized Bed [J]. Powder Technology, 2014, 258(1):38-48.

[8] Andrew H. Weighing without touching: applying electrical capacitance tomography to mass flowrate measurement in multiphase flows [J]. Measurement & Control, 2014, 47 (1):19-25.

[9] Eso A A, Zhao Y B, Yeung H. Comparison of electrical capacitance tomography & gamma densitometer measurement in viscous oil-gas flows [C]//8th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows. Guangzhou, China: AIP Conf Proc. 2014:81-89.

[10] Ye J M, Ge R H, Qiu G Z, et al. Measurement strategy for rectangular electrical capacitance tomography sensor[C]//8th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows. Guangzhou, China: AIP Conf Proc. 2014: 37-42.

[11] Yang W Q, Peng L H. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(1):R1-R13.

[12] Ye J M, Wang H G, Yang W Q. A sparsity reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on modified landweber iteration [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(11):115 402.

[13] 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): 37-39.