

Analysis on Sensitivity Field of Spiral Electrodes ECT Sensor*

SONG Feihu, ZHOU Bin, XU Chuanglong*, WANG Shimin

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In the ECT system, the sensitivity distributions is the advance data for inversion calculus which affects the measurement result so much. Uniform sensitivity field could improve the accuracy of concentration measurements effectively. The uneven degree of straight electrodes ECT sensor is obvious. Medium contributes to the capacitance of the pair of electrodes, which is near the medium, much more. While medium around the center of the pipe contributes to the capacitance of all pairs of electrodes less. So that it is difficult to distinguish the following two conditions: medium of high concentration around the center of the pipe and medium of low concentration in the circularity area near the electrodes. For the weakness that there is a big error in the actual measurement, three-dimensional finite element simulation of spiral electrodes ECT sensor is put up by Ansoft in this paper. The result shows that spiral electrodes ECT sensor has a more uniform sensitivity field, which has great significance to improve the measurement quality of ECT sensor.

Key words: electrical capacitance tomography; spiral electrodes; uniformity of sensitivity field; three-dimensional finite element simulation

EEACC: 7310K; 7230

螺旋极片 ECT 传感器灵敏场分析*

宋飞虎, 周 宾, 许传龙*, 王式民

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘 要: 电容层析成像系统(ECT)中,灵敏场分布作为反演计算的先验数据,对测量结果影响相当大,均匀的灵敏场能有效地提高浓度测量的准确性。直极片 ECT 传感器灵敏场不均匀程度较明显,靠近极片处介质对相应的极片对电容的贡献份额较大,而在靠近管道中心位置,对各极片对的贡献份额均较小。因此在实际测量中,对管道中心浓相分布和近管壁处环状稀相分布较难以区分。针对其在实际浓度测量中存在较大误差这一弱点,本文使用电磁场仿真软件 Ansoft 对螺旋极片 ECT 传感器进行三维有限元仿真研究。结果表明:螺旋极片 ECT 传感器这一理论模型,具有更为均匀的灵敏场。这一结论对提高 ECT 传感器的测量质量具有重大意义。

关键词: 电容层析成像;螺旋极片;灵敏场均匀程度;三维有限元仿真

中图分类号: TK39

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)04-0475-05

电容层析成像技术(Electrical Capacitance Tomography),是上世纪八十年代末发展起来的一种多相流检测技术,可用于输油管道中的气/油两相流、气力输送中的气/固两相流等连续相为电介质的工业过程成像^[1-3]。ECT 技术由于具有非侵入性、传感器结构简单、响应速度快、安全性能好、成本低等优点,通过测量布置在管道周围的阵列电极间的电容值,根据先

验敏感场数据,反演获取其内部介电常数分布 $\varepsilon(x, y)$ 信息,从而得到管内介质的浓度^[4-7]。

ECT 传感器的敏感场分布是作为先验知识引入到图像重建中去的,目前获取传感器敏感场分布信息有两种方法:实验法和有限元仿真法。实验法通过把实验介质放置在传感器的不同位置,测量各对电极间的电容相对变化量,从而确定各电极间的敏感场分

项目来源: 教育部博士点新教师基金资助(200802861005);国家自然科学基金项目资助(50836003,50906012);国家重点基础研究专项经费资助(2010CB227002)

收稿日期: 2009-11-09 **修改日期:** 2009-12-23

布,这种方法工作量大、受人为影响因素较大,精度较低;有限元法是一种以变分原理为基础的数值计算方法,通过建立有限元模型计算有关信息,能够较为精确地获得传感器敏感场分布数据,由于计算工作主要由计算机完成,数据的后期处理等都大为简化,是目前常用的方法^[8-10]。

固相浓度是工业过程中气固两相流在线实时测量的一个重要参数,对提高生产效率、节约能源、降低污染具有重要的意义。直极片 ECT 传感器的灵敏场分布不均匀程度非常明显,给准确地测量介质的浓度造成了一定的困难。因此设计具有更为均匀的灵敏场的 ECT 传感器是非常有必要的。螺旋极片 ECT 传感器能很好地改善灵敏场的均匀程度。本文采用三维有限元仿真法,以八极片 ECT 传感器为例,使用电磁场计算软件 Ansoft 仿真计算,来比较螺旋极片 ECT 传感器和直极片 ECT 传感器的灵敏场分布特点。

1 三维有限元仿真

二维有限元仿真在研究传感器某一截面的灵敏场时是一种简单常用的方法。对于直极片传感器一般仅用二维仿真计算灵敏场的先验数据,而忽略极片轴向长度带来的影响。然而对于螺旋极片 ECT 传感器,某一截面上的介质对于这一极片截面之外部分的影响是非常显著的,此时仍采用二维有限元仿真必然无法得到准确的先验数据,会给反演带来一定的误差,因此本文采用三维有限元仿真。

图 1 为螺旋极片 ECT 传感器的示意图,传感器由螺旋极片、绝缘管道、橡胶圆柱体组成,螺旋极片轴向位置处于绝缘管中心部位,相邻极片间周向夹角为 45°。绝缘管外径为 20 mm、内径为 10 mm、长 400 mm,选用材料为石英玻璃,管内充满空气;螺旋极片(1~8)的厚度为 2 mm、长 100 mm、螺距为 100 mm,材料为铜,其中极片 1 上加激励电压 1 V、其余为 0 V;管道内的硬橡胶柱体长 400 mm、直径 1 mm,介电常数为 3,该柱体(可作为若干有限元网格的组合)相对于管道内部截面积足够小,表示在管内某处充满某种介电常数的介质且其余均为空气。

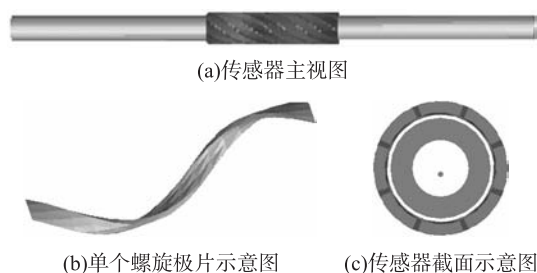


图 1 螺旋极片 ECT 传感器示意图

具有一定介电常数的微圆柱体在不同位置对于某一极片对的电容值的贡献份额是不同的,由此造成了灵敏场的不均匀。

图 2 为常规直极片 ECT 传感器的示意图,传感器极片选用 8 个 100 mm 长的直铜片,其余组成及边界条件与螺旋极片传感器模型一致。本文使用电磁场计算软件 Ansoft,通过三维有限元仿真,用计算结果来比较上述两种传感器的灵敏场分布的均匀程度。



图 2 直极片 ECT 传感器示意图

2 灵敏场的灵敏度系数分布

敏感场的灵敏度系数 $S_{i,j}(k)$ 定义为像素 k 中的物质的介电常数发生变化时引起的电极对 $i-j$ 间电容的变化率:

$$S_{i,j}(k) = \mu(k) \cdot \frac{C_{i,j}(k) - C_{i,j,gas}}{C_{i,j} - C_{i,j,gas}} \cdot \frac{1}{\epsilon_{solid} - \epsilon_{gas}} \quad (1)$$

式中, $C_{i,j}(k)$ 表示管道横截面上像素 k 中介电常数为 ϵ_{solid} 且其余单元介电常数均为 ϵ_{gas} ($\epsilon_{solid} > \epsilon_{gas}$) 时的电容值; $C_{i,j,solid}$ 及 $C_{i,j,gas}$ 分别为管内充满介电常数为 ϵ_{solid} 的介质和介电常数为 ϵ_{gas} 的介质时的电容值; $\mu(k)$ 为像素 k 的修正因子,定义为总截面积与该单元面积之比^[11-12]。

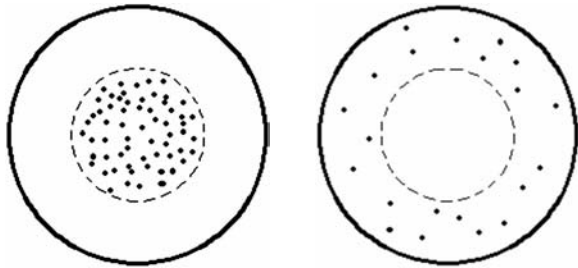
灵敏场分布情况可以说明每一个像素处充满某种介质时,对某一对极片的电容值的贡献情况。常规直极片 ECT 传感器在靠近极片处灵敏度系数较大,即对相应的电容值贡献份额较大,而介质距离极片对较远时对极片对电容值的贡献份额较小。所以当介质处于管子中心位置附近时,对各极片对电容的贡献均较小。由此对于以下两种情况(如图 3 所示)无法准确地区分,故给计算管内介质浓度带来了一定的误差:

(1) 在靠近壁面的环形区域内,固相介质以低浓度分布;

(2) 在管道中心区域,固相介质以较高浓度分布。

图 3(a) 中介质浓度较高,由于距离极片较远,对极片对电容值的贡献较小;图 3(b) 中介质浓度虽小,然而由于距离极片较近所以对极片对电容值贡献较大。由此无法准确反演计算介质浓度,使传感器的测量结果存在一定误差。更为均匀的灵敏场能

减小高介电常数介质在各个象素时对极片电容贡献份额的差距,若以更为均匀的灵敏场为先验数据进行反演计算,能够有效地改善上述问题,减小误差,得到更准确的浓度值。



(a)在中心区域介质高浓度分布 (b)靠近壁面处介质低浓度分布

图 3 固相介质在管道内的两种分布情况

3 仿真结果与分析

应用前文描述的三维仿真模型,分别对螺旋极片和直极片 ECT 传感器进行仿真。由于本文采用的三维有限元仿真模型的计算量相当大,故在此仅选取了四条较有代表性的直线(记为 1,2,3,4)上的一些特征点,如图 4 所示,通过分析由这四条直线上各特征点的灵

敏度系数 $S_{i,j}(k)$ 来比较两种传感器的灵敏场均匀程度。各直线上沿箭头方向选取特征点,距离中心分别为 4 mm、3 mm、2 mm、1 mm、0、-1 mm、-2 mm、-3 mm、-4 mm(负号表示从中心沿箭头位置移动)。

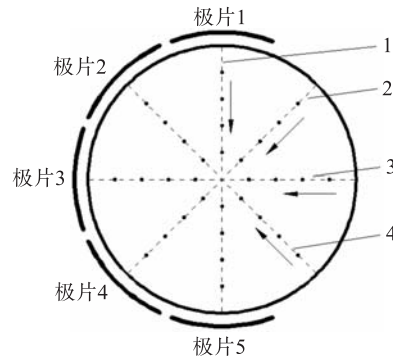
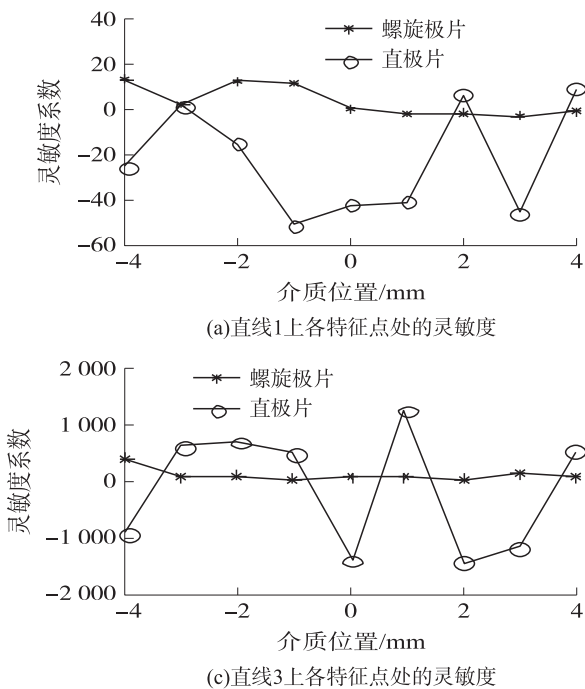


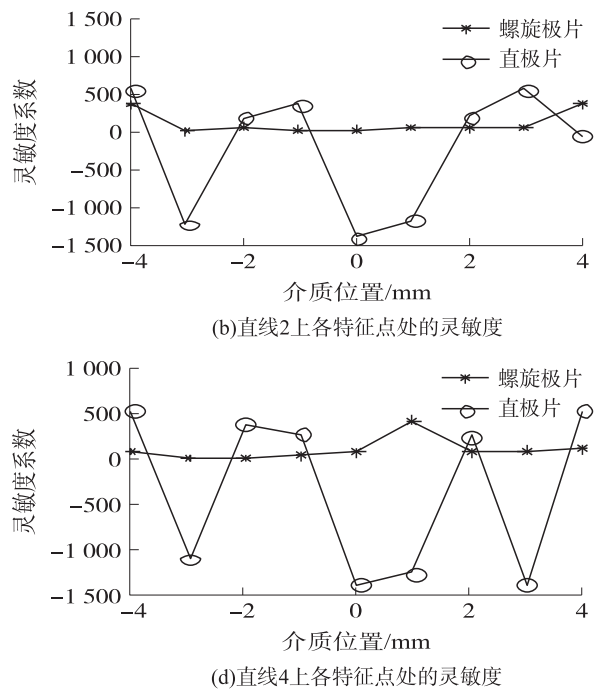
图 4 管道内特征点取法

8 极片 ECT 传感器的极片能构成 28 个不同的电容对,每个电容形成一个灵敏场。由于传感器结构的对称性,只需考查 4 个典型极片对下的灵敏度系数的分布情况(1-2,1-3,1-4,1-5),如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。



(a)直线1上各特征点处的灵敏度

(c)直线3上各特征点处的灵敏度



(b)直线2上各特征点处的灵敏度

(d)直线4上各特征点处的灵敏度

图 5 1-2 极片对灵敏场分布

从图 5、图 6、图 7、图 8 中可以看出螺旋极片传感器较直极片传感器的灵敏度分布更为均匀。螺旋极片传感器在管道中的 33 个特征点处的灵敏度基本相近,本文选用标准差来表示某一极片对灵敏场的均匀程度,如式(2)所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{33} (x_i - \bar{x})^2}{33 - 1}} \quad (2)$$

式中, x_i 表示各个灵敏度系数, \bar{x} 为 33 个灵敏度系数的均值。1-2、1-3、1-4、1-5 极片对各特征点处的灵敏度系数的标准差分别为 4.91、2.00、1.67、1.40;相应地,直极片传感器的 1-2、1-3、1-4、1-5 极片对各特征点处的灵敏度系数的标准差分别为 26.83、8.19、2.98、11.09。由此可以说明本文提出的螺旋极片 ECT 传感器的灵敏度系分

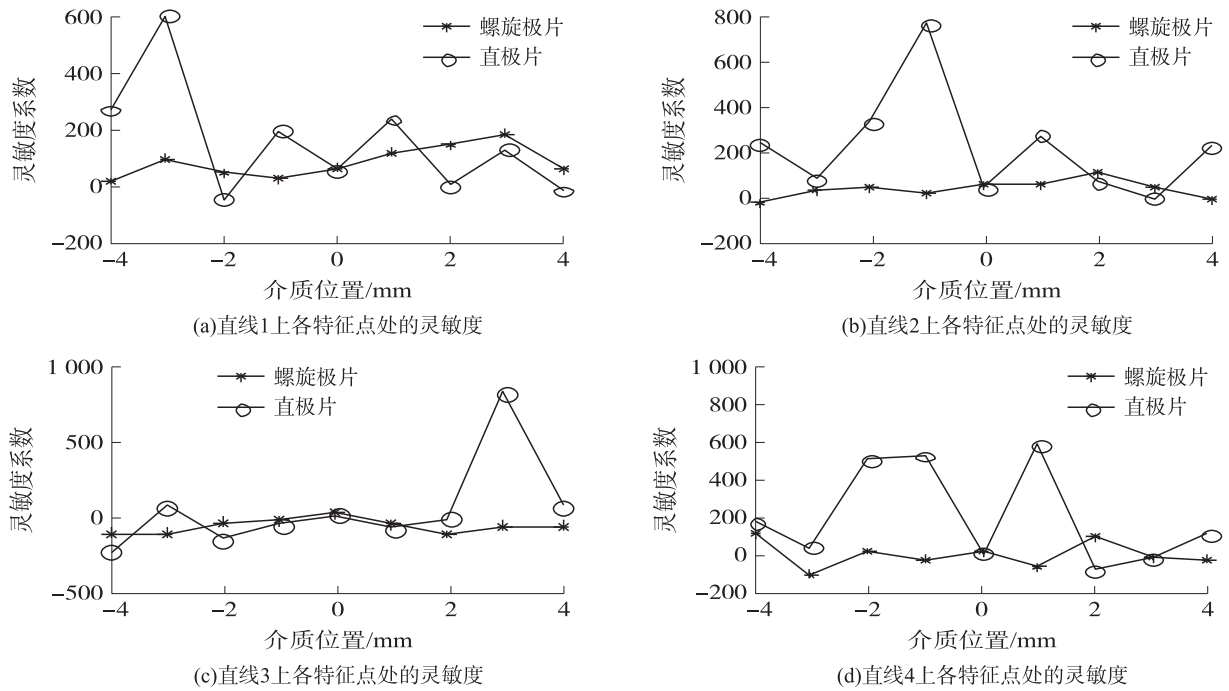


图6 1-3极片对灵敏场分布

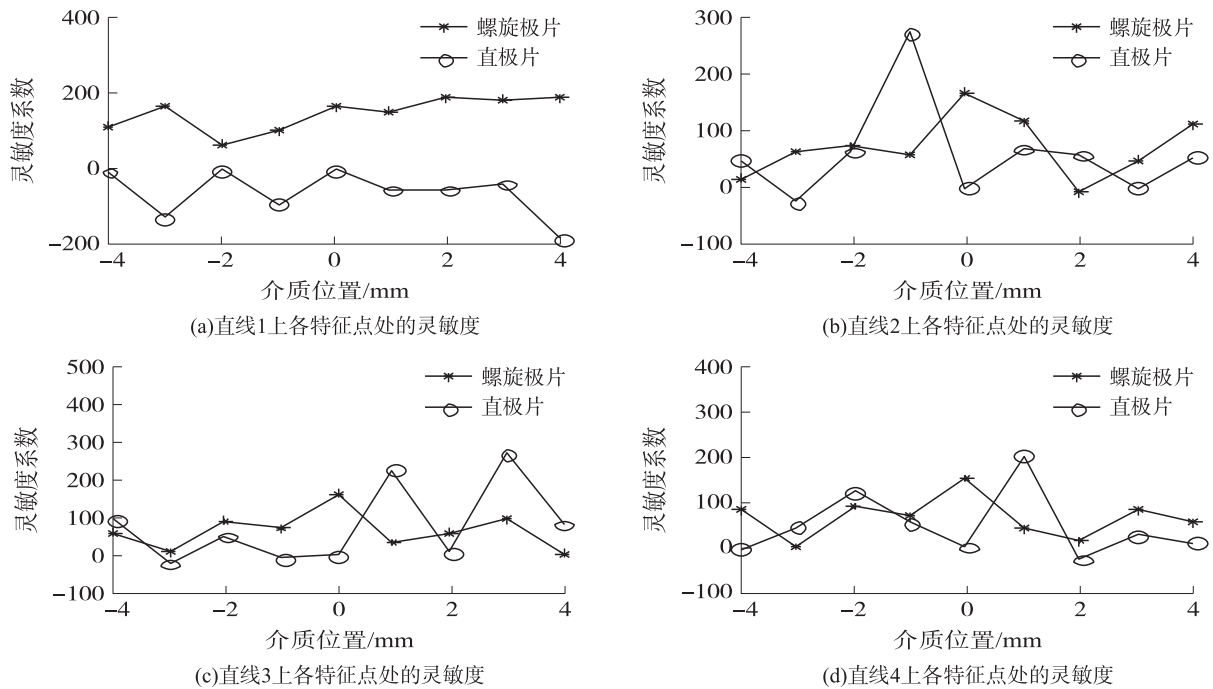


图7 1-4极片对灵敏场分布

布较传统直极片 ECT 传感器更为均匀。究其原因,螺旋极片 ECT 传感器中,各极片沿轴向螺旋一周,固相介质沿传感器轴向运动时,在各个轴向截面,介质对某一极片对的电容的贡献程度是不同的,如图 9 所示。介质连续地沿轴向流经传感器时,对某一极片对电容的贡献份额近似相当于极片位置不动,而介质保持半径不变绕中心旋转一圈过程中,所在各位置的贡献份额平均,即把靠近极片对的较大值与远离极片对的较小值进行平均,而对于中心处的

点,本身介于上述的较大、较小值之间,所以螺旋极片 ECT 传感器能具有更为平均的灵敏场。另外在电容层析成像图像重建时,均匀的灵敏场能有效地减小介质位置带来的影响,改善管道中心区域成像的精度,提高测试质量。对仿真结果进行研究还可以发现,图 5、图 6、图 7、图 8 中螺旋极片传感器的灵敏度系数的幅值较直极片传感器有所减小,由此造成了信噪比和灵敏度的降低,这是螺旋极片 ECT 传感器的不足之处。

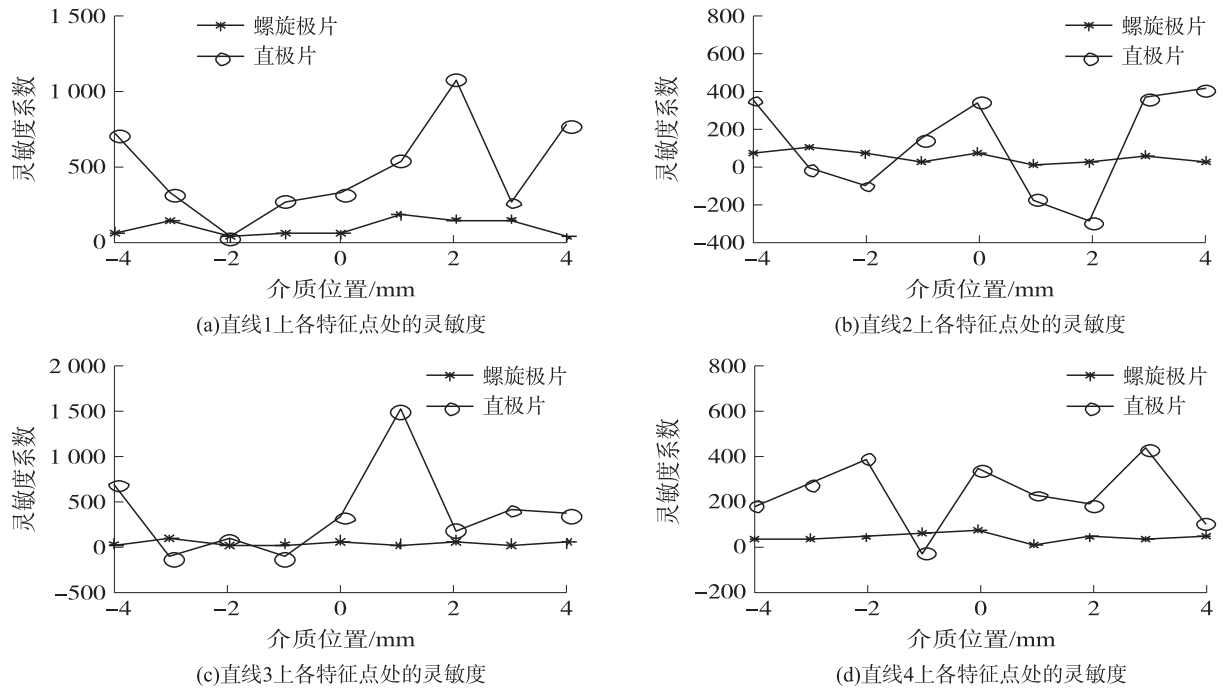


图8 1-5 极片对灵敏场分布

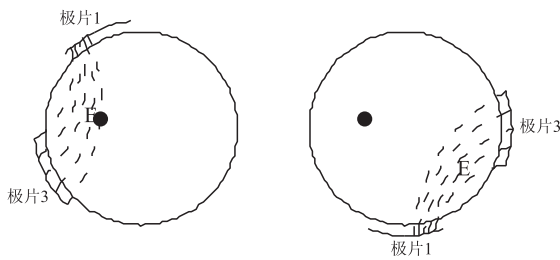


图9 在任意两个轴向截面介质对1-3极片对电容的贡献情况

4 结论

针对直极片 ECT 传感器灵敏场分布不均匀的特点,本文构建了螺旋极片 ECT 传感器模型,并使用 Ansoft 进行了三维仿真研究,比较了两种传感器的灵敏场分布特点,发现螺旋极片传感器有明显的改善,这一结论对提高 ECT 传感器的测量质量具有重大意义。

参考文献:

[1] Liu S, Wang H G, Jiang F, et al. A New Image Reconstruction Method for Tomographic Investigation of Fluidized Beds [J]. AIChE Journal, 2002, 48(8): 1631 - 1638.

[2] York T A, Phua T N, Reichelt L, et al. A Miniature Electrical

Capacitance Tomography [J]. Meas Sci Technol, 2006, 17 (8): 2119 - 2129.

[3] 周宾,杨道业,汤光华. ECT 传感器电势测量方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,8(1):130 - 135.

[4] 陈阳,陈德运,郑贵滨,等. 电容层析成像系统径向电极对传感器性能及敏感场分布的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(21):149 - 155.

[5] 曹章,王化祥. 气固两相流固相浓度电容式传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报,2007,28(11):1956 - 1959.

[6] 张立峰,王化祥. 多相流电容层析成像系统的仿真研究[J]. 电力科学与工程,2005(1):5 - 7.

[7] 杨道业,周宾,许传龙. 管道厚度对电容层析成像的影响[J]. 仪器仪表学报,2008,29(7):1392 - 1397.

[8] 邵秀凤,杨鼎才. 循环流化床上 ECT 传感器灵敏场的有限元分析[J]. 工业仪表与自动化装置,2005(5):66 - 68.

[9] 王志春,李文涛,胡晓丽. 电容层析成像系统(ECT)软场特性研究[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):404 - 406.

[10] 王化祥,唐磊,崔自强. 油/气两相流高速电容层析成像可视化系统[J]. 中国电机工程学报,2009,29(5):61 - 65.

[11] 问雪宁,王化祥,胡理. 基于 ANSYS 的 ECT 阵列电极三维优化设计[J]. 传感技术学报,2007,20(7):1639 - 1643.

[12] 郭志恒,邵富群,律德才. 内置式电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 传感技术学报,2008,21(8):1472 - 1476.



宋飞虎(1986 -),男,2008 年于南京理工大学获得学士学位,现为东南大学能源与环境学院硕士研究生,研究方向为多相流测试、燃烧诊断方面的研究,ssongfh@sina.com;



许传龙(1978 -),男,2001 年于东北电力大学获得学士学位,2003 年于东南大学获得硕士学位,2006 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学副研究员,主要研究方向为多相流测试和燃烧诊断技,chuanlongxu@seu.edu.cn.