

Optimum Design of Interior Electrode Sensors for ECT System *

GUO Zhi-heng^{1*}, S HAO Fu-qun¹, LV De-cai²

1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. Department of Automation, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning 117022, China

Abstract : In electrical capacitance tomography (ECT) system, the reconstructed image quality greatly depends on the system observation matrix, that is sensitivity matrix, and its characteristic lies on the structure parameters of the sensor. In this paper, it is proposed that the condition number representing the sensitivity matrix characteristic is acted as a main optimum criterion, and the criterion, combining with the detected capacitance changes and adapting to measure scope, is used to perform synthetical optimization for the sensor design. By finite element method, we discussed the effect of the structure parameters of the sensor on measurement and reconstruction for ECT, made optimization of the sensor design, and finally obtained a set of optimum parameters for the interior-electrode sensor design.

Key words : electrical capacitance tomography; Interior capacitance sensor; parameter optimization
EEACC :7230

内置式电容层析成像系统传感器优化设计 *

郭志恒^{1*}, 邵富群¹, 律德才²

1. 东北大学信息科学与工程技术学院, 沈阳 110004;
2. 辽宁科技学院自动化系, 辽宁 本溪 117022

摘 要 : 电容层析成像系统重建图像的质量主要依赖于系统的观测矩阵, 即灵敏度矩阵, 灵敏度矩阵的特性又由传感器的结构参数所决定的。本文提出了采用反映灵敏度矩阵特性的条件数作为主要的电容传感器优化设计指标, 结合表示传感器电极总体灵敏程度的电容变化量指标, 兼顾最大、最小电容测量值满足测量范围的要求, 进行综合优化设计。通过有限元方法, 分析了内置式传感器电极结构参数对电容测量值和灵敏度矩阵的影响, 并利用综合指标进行了优化, 获得了一组内置式传感器的优化结构参数。

关键词 : 电容层析成像; 内置式电容传感器; 参数优化设计

中图分类号 : TP212.1

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)08-1472-05

电容层析成像 (Electrical Capacitance Tomography, 简称 ECT) 是新发展起来的一种工业过程层析成像技术^[1], 它是利用被成像物体内部多个物相介电常数的变化会引起安装在物体表面的阵列电极之间的电容值变化来对内部物相分布状况成像的。电容层析成像具有成像速度快, 非侵入性, 低成本, 健壮及易安装等突出优点, 其在工业过程, 特别是石油、化工和冶金等领域中具有极其广泛的应用前景。

电容层析成像的图像重建是“软场”下的重建问题, 系统本质是非线性的。经离散化、线性化后得到系统观测矩阵是病态的, 同时可获得的观测数据远少于重建图像的未知数 (图像像素)。传统的图像重建算法不能直接用于 ECT 的图像重建^[2]。目前, 比较常用的图像重建算法, 如线性反投影算法及 Landweber 迭代法等^[3]多以传感器敏感场为先验信息进行图像重建。重建图像的质量依赖于电容敏感场分布, 敏感场分布是极不均匀的, 主要表现在两方

基金项目 : 国家自然科学基金项目资助 (603740562)

收稿日期 : 2008-04-20 修改日期 : 2008-04-16

面:

(1) 幅值分布

靠近管壁处,敏感场的灵敏度高,而在中心区域灵敏度低;

(2) 正负区域分布

存在负灵敏区域,并且负灵敏区面积大于正灵敏区。

一些文献[4-5]在 ECT 传感器优化时,选择前者作为设计指标。在本文中,考虑这两方面都影响由敏感场内各单元(像素)的灵敏度构成的灵敏度矩阵的病态程度,即矩阵条件数大小,因此,其在很大程度上影响图像重建的质量。本文采用条件数作为主要优化设计指标,对传感器电极结构参数进行优化设计,以改善灵敏度矩阵特性,提高重建图像的质量。

电容传感器的参数优化需要考虑实际应用中传感器的结构形式。如常用的外置式传感器,其优点是可以避免管内流体对电极的污染、腐蚀以及管内介质可能携带的电荷对检测电极的影响。优化设计主要包括:管壁厚度;管壁到屏蔽罩距离;电极张角及长度;采用的径向保护电极插入深度和轴向保护电极长度。然而在特定应用场合需要采用内置式传感器,如应用在粮仓中谷物含水分的检测上,需要大尺寸传感器阵列,允许对谷物直接接触测量。因为内置式传感器在同样条件下能提供更高的灵敏度和线性度^[6],所以谷物含水量检测的 ECT 系统采用内置式电极传感器。设计采用轴向保护电极来减少电场的边缘效应,即在粮仓的不同高度等距地安装多层极板,其中一层极板工作时,其它层极板接地。为了便于现场安装、维护,不采用径向保护电极,利用粮仓的墙壁作为屏蔽,传感器为带有屏蔽罩和轴向保护极板的物理结构。粮食对仓壁存在侧压力和摩擦力,考虑抗拉性能,电极与仓壁之间的绝缘介质和极板需要有一定的强度和厚度。其安装结构示意图如图 1 所示。

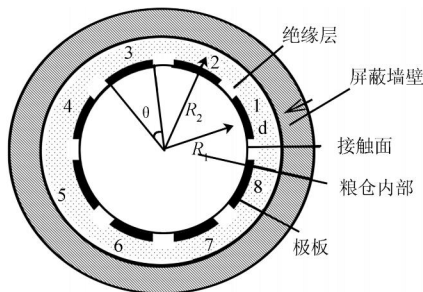


图 1 粮仓电容传感器安装结构示意图

针对上述的内置式传感器应用,传感器结构优化主要考虑的参数有:极板张角,极板与屏蔽墙间

绝缘层厚度 d ,绝缘层介质介电常数 ϵ ,极板厚度 t 。这里 d , t 为对内径的归一化值。本文以八极板内置式电容传感器为模型,通过采用有限元方法,仿真分析结构参数对优化指标的影响,以获取最佳的系统优化性能。

1 电容传感器有限元仿真模型

根据文献[7]所述,当传感器电极轴向长度与管道外径之比大于 1.5 时,传感器的边缘效应可忽略,即可被近似成二维场,本文中传感器的电极轴向长度与粮仓外径之比为 3,电容检测电路的工作频率小于 1 MHz,电容传感器模型可以视为二维静电场问题。假设管内没有自由电荷存在,则粮仓内电势分布为 Laplace 方程在特定边界条件下的解。

$$\nabla \cdot (\nabla \phi) = 0 \tag{1}$$

边界条件为

$$\begin{cases} \phi|_i = V & i = 1, 2, \dots, L \\ \phi|_j = 0 & j = 1, 2, \dots, L, j \neq i \end{cases} \tag{2}$$

式中 L 为测量极板数目, $i, j = 1, 2, \dots, L$ 分别表示 L 个测量极板的空间位置, s 表示屏蔽罩保护极板的空间位置。

实际中的两相流系统,由于介电常数分布不均匀,式(1)没有解析解,必须采用数值方法求解。需要对电容传感器敏感场域进行剖分,得到如图 2 所示的有限元网格。为了分析极板厚度对极板电容的影响,有限元网格需要围绕极板密集剖分。这里内部用三角元剖分,分为 10 层,绝缘层用四边形剖分,分为 3 层,极板设置在绝缘层的第一层上,总共单元数为 1360。网格如图 2 所示。

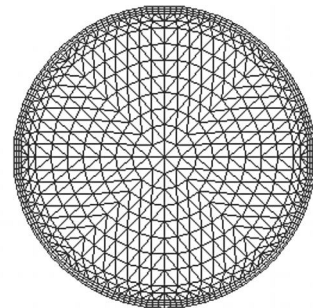


图 2 传感器有限元网格划分

通过求解强加边界条件的有限元方程,可以得到节点电位,采用颜华等提出的方法,计算内外极板面以及屏蔽罩内部表面的电荷量^[8],从而得到 ECT 系统电极间和电极与屏蔽的电容值,进一步计算介质分布改变的电容变化量和灵敏度分布。灵敏度反映极板电容对于内部介质分布变化的敏感程度,单元的灵敏度定义为^[9]:

$$S_{i,j}(k) = \mu(k) \frac{C_{i,j}(k) - C_{i,j}^h}{C_{i,j}^h - C_{i,j}^l} \cdot \frac{1}{h-l} \quad (3)$$

上式 i, j 为测量极板对, $C_{i,j}(k)$ 为极板测量电容, $C_{i,j}^h, C_{i,j}^l$ 为高低相介质满场电容, $\mu(k)$ 与单元面积有关因子, h, l 高低相介电常数。全部测量角度下, 全部单元灵敏度构成灵敏度矩阵。

2 优化目标函数

对于内置式传感器结构参数的优化, 本文以全面反映敏感场分布特性的综合指标 - 灵敏度矩阵条件数作为主要优化指标, 同时保证电极总体的灵敏程度指标及被测电容变化范围能够满足系统测量电路要求为准则进行优化设计。

(1) 敏感场灵敏度分布的均匀性

对于灵敏度分布的均匀性的衡量指标 (8 极板传感器), 根据相关文献[4]定义为:

$$P = \left(\sum_{j=2}^5 P_{1,j} \right) / 4 = \left(\sum_{j=2}^5 S_{1,j}^{dev} / S_{1,j}^{avg} \right) / 4$$

即 4 个典型极板对的网格单元灵敏度的标准差与均值的比值的平均值。比值越小反映灵敏场分布越均匀, 越有利于图像重建; 而另一个与敏感场分布有关的特性是正灵敏区面积与整个灵敏区面积比值, 正灵敏区越大, 重建时能够增加图像灰度的投影数据 (电容测量值对灵敏度的投影) 也越多, 越能改善成像质量。这两个因素不完全相关, 如极板张角为 22.5 度时, 极板对 1,2 与极板对 1,5 的指标 P 很接近, 而正灵敏区面积比值相差很大。综合起来, 比较小的 P 值与比较大的正灵敏区面积比值都能使灵敏度矩阵的病态程度减轻, 即条件数减小, 因此, 本文采用灵敏度矩阵条件数作为综合的优化指标, 用 C 表示。

(2) 电极电容相对增加幅度

这一指标是反映阵列电极对介质分布变化总体的敏感程度, 用充满高低介质的极板电容差值相对本体电容的变化 $= C / C_0$ 表示。

(3) 被测电容变化范围

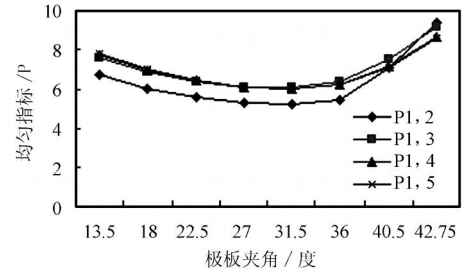
考虑到抗杂散电容 C/V 转换电路的设计与实现, 一般希望阵列电极最大电容值 C_{max} (充满高介质时相邻电极电容) 与最小电容值 C_{min} (充满低相介质时相对电极电容) 之比不宜过大, 该比值取为 $D = C_{max} / C_{min}$, 该参数主要用于考察测量电容是否处于测量电路的动态范围内, 即是否满足测量电路硬件限制条件。

3 阵列电极结构参数优化设计

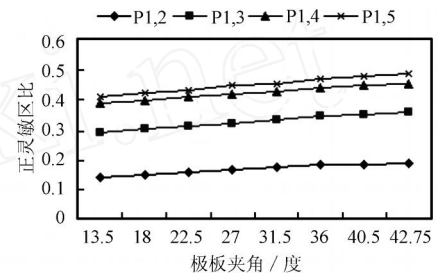
3.1 主要优化指标和优化参数的选取

根据 ECT 内置式传感器设计经验, 确定电极极

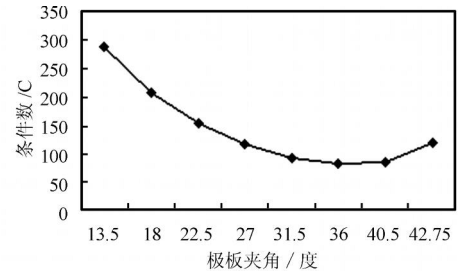
板张角是最主要的优化参数, 绝缘层的厚度影响要小一些。首先, 设定绝缘层的厚度为 0.03, 介电常数为 3, 经仿真得到均匀指标 P , 正灵敏区的面积比, 条件数 C 与极板张角函数关系, 相应的关系曲线如图 3(a), 3(b), 3(c) 所示。



(a)



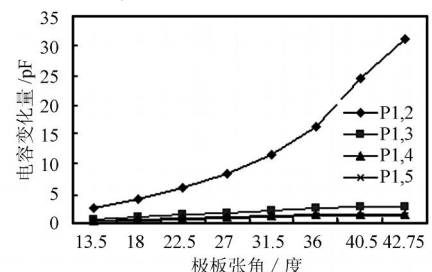
(b)



(c)

图 3 均匀指标 P , 正灵敏区的面积比, 灵敏度矩阵条件数随极板张角变化

从装满低介电常数介质 (标准水分的谷物, 介电常数为 5.3) 到装满高介电常数介质 (含超标水分谷物, 介电常数为 6.3) 变化, 对应电容变化量值反映了传感器的灵敏程度。电容变化量与极板张角关系曲线如图 4 所示。



(a)

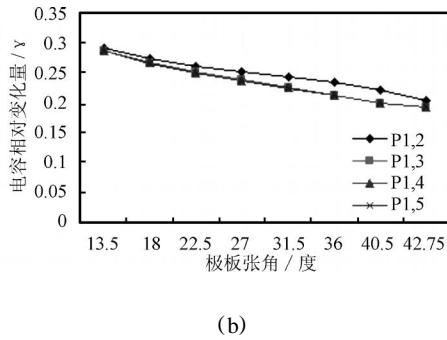


图 4 电容变化量随极板张角变化

由图 3(a)可以得到,张角大于 27 度时,灵敏度有最均匀的分布,由图 3(b)得到,正灵敏区面积比随极板张角增加而增大,这对提高重建图像质量有利;根据图 4(a)可以得到,极板电容变化量在除了相邻极板外,极板张角超过 36 度以后趋于平缓,而从图 4(b)得到,极板电容相对变化量是随着极板张角增加略微下降的,考虑到电路的动态范围限制,极板张角不能选择过大,因此,在满足硬件指标条件下,根据综合的优化原则,主要由灵敏度矩阵条件数确定极板张角的优化范围。从图 3(c)确定张角优化范围为 27~42.5 度。

3.2 电极结构参数优化设计

3.2.1 绝缘介质层厚度和介电常数选择

考虑到内置式电极,绝缘层的厚度对传感器灵敏度的影响相对较小,绝缘层的介电常数对条件数指标优化有一定影响,仿真结果也验证了这个结论。固定极板张角为 36 度,通过分别改变绝缘介质的厚度和介电常数,得到电容变化量和灵敏度矩阵条件数与这两因素的关系曲线,如图 5 所示。从图 5(a),5(b)可以看到当绝缘层厚度超过 0.03 后,各极板电容变化量随绝缘层厚度增加变化较小;而灵敏度矩阵条件数仅稍微减小。考虑到尽量减少占用粮仓容量,选择 0.03。图 5(c),5(d)是绝缘层的厚度为 0.03 时,改变绝缘层介电常数得到关系曲线。从图 5(c)得到,当介电常数为 7 左右时,灵敏度矩阵条件数有极小值,这表明在一定的极板张角下,由灵敏度矩阵条件数优化指标能够确定最优的绝缘层介电常数值。设计时应选择与被测物质介电常数相近的绝缘介质材料。

3.2.2 极板张角和绝缘层介电常数的优化

对于不同介电常数的绝缘介质,根据矩阵条件数优化指标优化,最佳的极板张角会有相应的变动。为了获得相应的优化极板张角参数,选取 $d = 0.03$,绝缘层介电常数 ϵ_i 分别为 3, 5, 7 和 9,计算优化张角范围内的灵敏度矩阵条件数,通过多项式回归得到优化曲线,如图 6 所示。

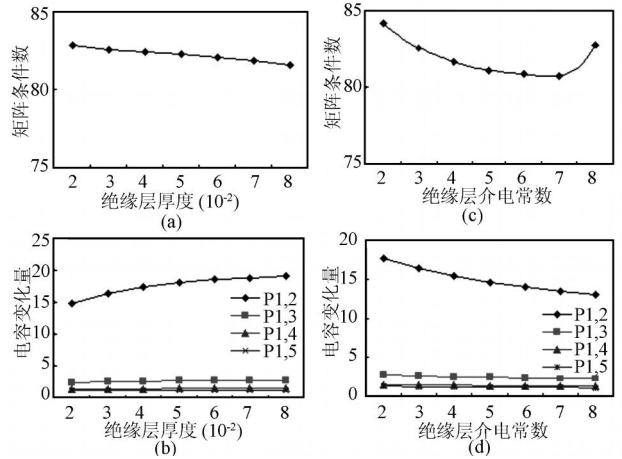


图 5 灵敏度矩阵条件数和电容变化量随绝缘层介电常数与厚度变化

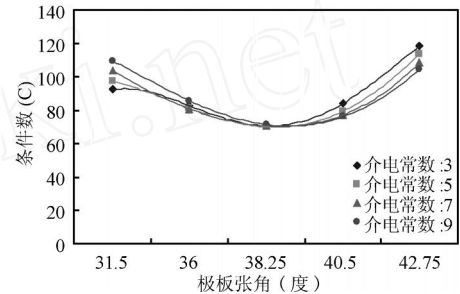


图 6 灵敏度矩阵条件数随极板张角关系曲线

因此,当 $d = 0.03$ 时,获取四组优化参数, $i = 3, \theta = 38.25; i = 5, \theta = 38.25; i = 7, \theta = 38.5; i = 9, \theta = 38.5$ 。经有限元仿真得到这四组参数对应的灵敏度矩阵条件数,都优于其它的参数值所对应的值,说明优化是合理有效的。优化结果见表 1。

表 1 四组优化参数

优化的参数组	$i = 3,$	$i = 5,$	$i = 7,$	$i = 9,$
	$\theta = 38.25$	$\theta = 38.25$	$\theta = 38.5$	$\theta = 38.5$
灵敏度矩阵条件数	70.6652	70.0298	70.4315	71.3112

从表 1 可看到不同介电常数的优化参数组合,优化指标条件数相差不大,以接近被测谷物的介电常数时($i = 5$)最优。

3.2.3 电容变化范围对结构参数优化的限制

传感器能测出的最大和最小电容决定了传感器的动态范围。通常电容变化越灵敏,它的动态范围越大,电路实现越困难,需要从测量实际来折中考虑。图 7 为 $i = 3$ 时,最大最小电容比与极板张角关系曲线,当张角超过 36 度,要求电路的动态范围急剧增大,张角 40 度时,要求动态范围大于 20 倍。另外,实际中测试谷物中的水分比超标的低限值可能高很多,即高相介电常数很大,这些可能造成测量电路饱和,因此,张角的选择不宜超过 40 度。

3.2.4 极板厚度对参数优化的影响

在前面得到的优化参数下,分析极板厚度对参

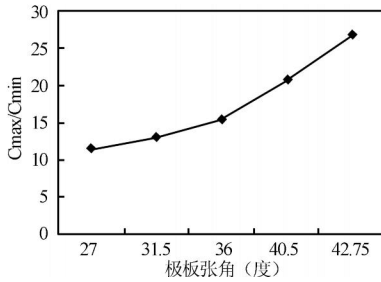


图7 Cmax/Cmin 随极板张角关系曲线

数优化的影响,得到结果见表2。可以看到极板厚度对于参数优化影响很小。

表2 极板厚度对优化的影响($\theta = 36^\circ, d = 0.03, i = 7$)

极板厚度	$\theta = 0.0005$	$\theta = 0.001$	$\theta = 0.0015$
灵敏度矩阵条件数	70.0321	70.0298	70.563
电容相对变化(%)	0.2072	0.2061	0.21203

4 结果与讨论

针对 ECT 技术在粮仓谷物水分检测的应用实例,采用有限元方法,对内置式八电极电容传感器进行优化设计。通过研究敏感场分布特性对图像重建的影响,提出了以灵敏度矩阵条件数作为综合反映敏感场分布特性的主要优化指标,全面考虑了电容变化灵敏程度和其它因素对传感器设计的影响,依靠计算机辅助设计,得到了不同参数组合的目标优化回归曲线,从而快速、准确地获得八电极内置式电容传感器设计的一组最优参数, $i = 5, \theta = 38.25, d = 0.03$ 。在工程优化设计中具有较大的实用意义,

根据此优化参数设计的电容传感器试验原型已获得了较为理想的重建图像。

参考文献:

- [1] Xie C G. 8-Electrode Capacitance System for Two-Component Flow Identification. Part1: Tomographic Flow Imaging [J]. IEE Proceedings2G, 1993, 140 (3) : 216-222.
- [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. IEE Proc G, 1992, 139 (1) : 89-98.
- [3] Yang Wuqiang, Peng Lihui. Image Reconstruction Algorithms for Electrical Capacitance Tomography[J]. Meas. Sci. Technol., 2003, 14 (1) : 1213
- [4] 郭红星,余胜生,冯纪先,等. 多电极电容传感器的参数优化设计[J]. 武汉大学学报, 2000, 46 (5) : 637-640.
- [5] 王化祥,张立峰,朱学明. 电容层析成像系统阵列电极的优化设计[J]. 天津大学学报, 2003, 36 (3) : 307-310.
- [6] Jaworski A J, Bolton G T. The Design of an Electrical Capacitance Tomography Sensor for Use with Media of High Dielectric Permittivity. Meas. Sci. Technol, 2000, 11(6) : 743-757.
- [7] 颜华,高静. 电容层析成像的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (11) : 1625-1627.
- [8] Yan Hua, Shao Fuqun, and Wang Shi. Fast Calculation of Sensitivity Distributions in Capacitance Tomography Sensor. Electronic letters, 1998, 34 (20) : 1936-1937.
- [9] Xie C G, Huang S M. Electrical Capacitance Tomography for Flow Imaging: System Model for Development of Image Reconstruction Algorithms and Design of Primary Sensors[J]. IEE Proc G, 1992, 139 (1) : 89-98.



郭志恒(1968-),东北大学博士研究生,主要研究方向为过程成像与测试技术等,guozhiheng2002@yahoo.com.cn