

电容传感器成像敏感场若干影响因素探讨

王文亮, 田 沛

(华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 电容层析成像(ECT)是一项基于图像的过程检测技术, 具有实时性好, 非侵入性, 价格低廉的优点, 适用于多相流检测, 并已开始被引入两相流的测量中。在对电容传感器进行数学描述的基础上, 建立了电容敏感场分布的数学模型及其有限元模型, 介绍了敏感场的计算方法, 利用有限元法研究了敏感场电势的分布规律。仿真实验表明: 灵敏度分布函数受到介质分布的影响。

关键词: ECT; 两相流; 图像重建; 有限元分析; 敏感场

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** B

Influencing factors of capacitance transducer imaging sensitive field

WANG Wen Liang, TIAN Pei

(Department of Control Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Electrical capacitance Tomography (ECT) is a process of image-based detection techniques, with good real-time, non-invasive, low-cost advantages, applicable to multiphase flow testing, has begun to be introduced into the measurement of two-phase flow. In this paper, we establish a capacitance-sensitive field distribution in the mathematical model and its finite element model, introduce a sensitive method of calculation, and then use the finite element method to study electric field potential distribution-sensitive rule. The simulation results confirms that the sensitivity distribution function is influenced by the media distribution.

Key words: ECT; two-phase flow; image reconstruction; finite element analysis; sensitive field

电容层析成像 ECT(Electrical Capacitance Tomography) 是一种基于电容传感机理的 PT 技术, 具有非侵入、响应速度快、成本低、安全性能好等优点, 在两相流/多相流检测领域有良好的应用前景, 是 PT 技术的主流之一, 具有很高的研究价值。电容层析成像过程可概括为两个方面的数学问题: 正问题和逆问题。正问题是根据多相流体介电常数分布, 利用有限元法计算电容值, 以获得电容敏感场分布; 逆问题是基于测量的电容值来反演介电常数场分布, 即图像重建。可见, 电容层析系统进行图像重建时必须以灵敏度分布为先验知识^[1]。目前, 传感器敏感场数据的获取方法有两种: 实验法和有限元仿真法^[2]。实验法是通过把实验介质(如铁棒)放置在传感器内不同位置, 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布。但这种方法工作量大且繁杂, 受人为因素影响较大, 精度较低。而有限元仿真技术可以较为精确地获得在特定介质分布下

的响应值, 而且主要工作由计算机完成, 可以获得高准确度的多相流参数测量值和高质量的重建图像。

1 电容层析成像系统

1.1 电容层析成像系统组成及工作原理

一个典型的电容成像系统包括电容传感器阵列、测量及数据采集电路、成像计算机 3 大部分。其基本原理是沿流体流动管道外侧均匀地粘贴若干电容极板, 任意两个极板均可组成一个两端子电容。管道内两相流动介质的不同相分布会引起电容极板间介电常数变化, 从而改变电容值的大小。各对极板间的电容值包含了与相分布有关的信息, 通过测量不同极板组合间的电容值并将其送入计算机, 按一定的算法进行图像重建, 就可以得到管道截面上的相分布图像。

ECT 电容传感器的电极对用于测量被测物体的电容, 各个极板间的电容反映了介电常数(即物质浓度分布)的大小。根据所取的数据重建区域内的物质分布图

像,进一步得出被测物体的物质浓度分布。

1.2 电容传感器组成

以 12 电极的 ECT 系统传感器为例,其系统基本结构图如图 1 所示,其横截面图如图 2 所示。该系统由沿圆周对称地安装在管道外壁的 12 个极板组成,相邻两个电极之间有一个径向接地极板用于减小相邻电极之间的电容值,屏蔽罩也接地,用于屏蔽整个系统,使它不受杂散场的干扰,在这个屏蔽罩和管壁之间充满了绝缘材料。

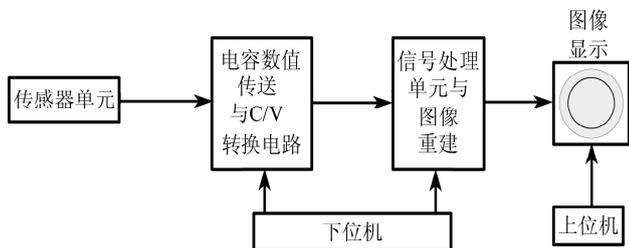


图 1 12 电极 ECT 系统基本结构图

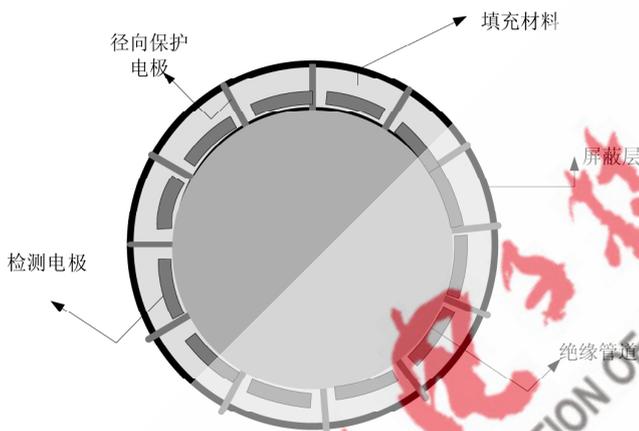


图 2 12 电极 ECT 传感器结构示意图

2 数学模型

测量时,每次给 1 个极板加某一正电压 V_0 ,其余极板接地。分别测量出正电位极板与其他极板间的电容 C ,称接正电位的电极之源电极,接地的电极为检测电极。对于 N 个电极的成像系统,可测量的独立电容值为 $N(N-1)/2$ 个。12 个电极的传感器系统就可得到 66 个电容测量值^[3]。由于管道内部无空间电荷,域中电位分布可用如下泊松方程来描述:

$$\nabla \cdot (\epsilon(x, y) \nabla \Phi(x, y)) = 0 \quad (1)$$

$$E(x, y) = -\nabla \Phi(x, y) \quad (2)$$

其中 $\Phi(x, y)$ 为电位分布函数, $E(x, y)$ 为电场强度分布函数,其相应的边界条件由测量技术构成,即当电极 $i (i=1, 2, 3 \dots 12)$ 为源电极(电势为 V_0)时,其相应的 Dirichle 边界条件为:

$$\Phi_i = \begin{cases} V_0, & \Phi_i \in \Gamma_i \\ 0, & \Phi_i \in \Gamma_k, k \neq i \end{cases} \quad (3)$$

很多文献通过扰动法来计算敏感场,其计算公式为:

$$S_{ij}(k) = \frac{C_{ij}(k) - C_{ij}^{empty}}{(C_{ij}^{full} - C_{ij}^{empty})} \times \frac{A}{A(k)} \quad (4)$$

其中, $C_{ij}(k)$ 是第 k 个单元的介质发生改变时; i 和 j 电极间电容的改变值, C_{ij}^{empty} 是当管内无煤粉时的 i 和 j 电极之间电容值, C_{ij}^{full} 是当管内充满煤粉时的 i 和 j 电极之间的电值, ϵ_m 和 ϵ_a 分别煤类和空气的介电常数, A 是管内横截总面积, $A(k)$ 为每个单元面积。但是采用扰动法还须计算管道内每个像素点介质变化所引起的电容值变化,而电容值还须用有限元法求出,计算量相当大。因为敏感场的定义为电容值对于某一像素区域介质变化的敏感程度,而由(1)式波松方程可知电势分布即可间接反映介质分布规律,即由电势分布即可反映出电容值对于某一像素区域介质变化的敏感程度。

3 有限元分析敏感场

3.1 场域剖分

根据有限元分析将成像区域进行三角剖分,之所以采用三角有限元划分像素是因为管道多为圆形,在像素个数较少的情况下采用三角形剖分相对于矩形网格能获得更高的精度,同时为提高剖分的精度采取两次剖分的方法^[4],初次剖分将成像区域剖分成 76 个像素,如图 3 所示。二次剖分结果如图 4 所示。

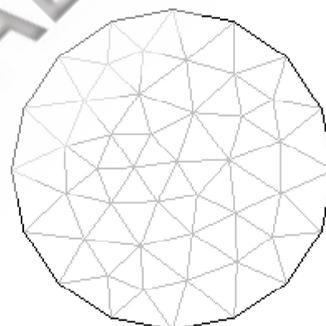


图 3 有限元初次剖分 76 像素图

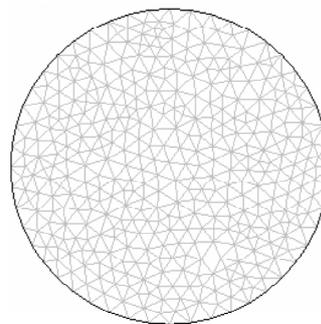


图 4 有限元二次剖分 760 像素图

3.2 仿真对比

为了研究方便,很多文献将介质分布对敏感场的影响忽略不计^[5],下面通过满管煤粉和空管仿真对比来表明敏感电势的分布规律以及介质分布对敏感场的影

响，仿真设定煤粉的介电常数为 3.5，空气的介电常数为 1，设置激励电极为 2 号电极，激励电压为 10 V，其余电极和屏蔽罩接地，仿真对比得到敏感电势的分布规律图片如图 5 和图 6 所示；介质分布对敏感场影响的仿真显示图片如图 7 和图 8 所示。

3.3 数据对比分析

从以上的仿真图形对比可以看出在空管和满管情况下，电势云图和电场强度分布都存在显著的差异，下面从数据方面进行对比，由于数据量太大，所以仅截取

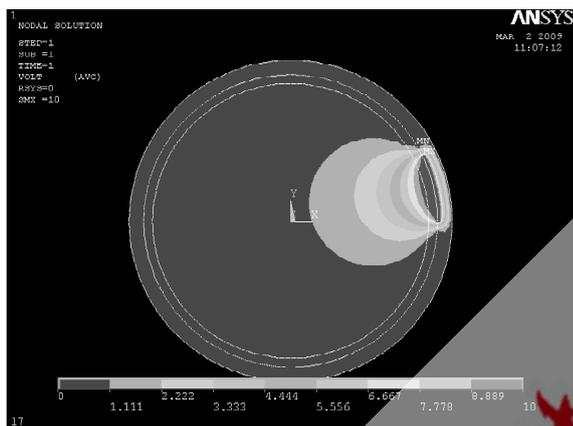


图 5 空管节点电位等值云图

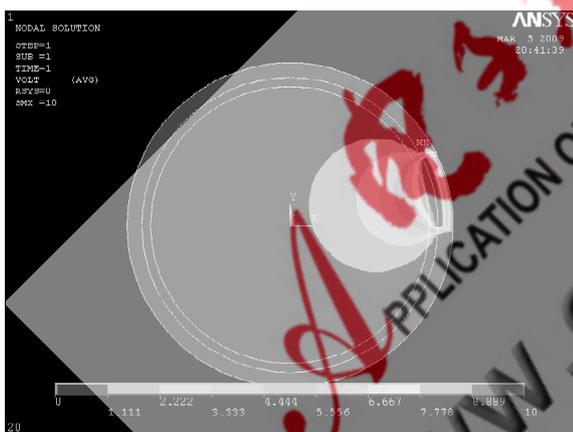


图 6 满管煤粉节点电位等值云图

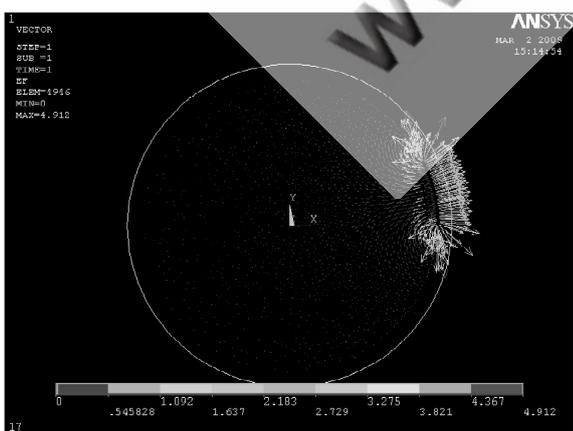


图 7 空管电场强度图

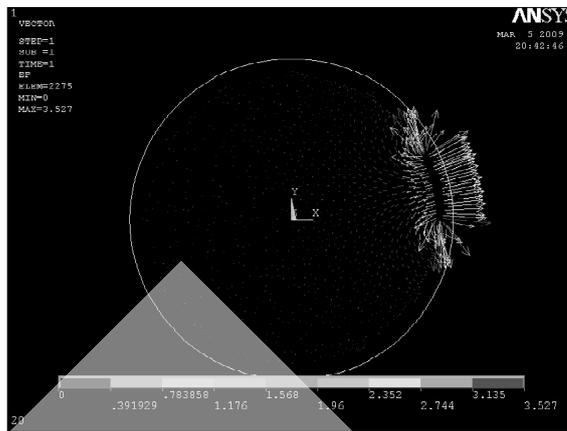


图 8 满管煤粉电场强度图

部分典型节点电势如下：

空管		满管	
NODE	VOLT	NODE	VOLT
1	0.41722E-01	1	0.12350E-01
2	6.1339	2	6.8309
3	0.25667E-01	3	0.75777E-02
4	0.67368E-01	4	0.20083E-01
5	0.0000	5	0.0000
6	0.0000	6	0.0000
7	0.0000	7	0.0000
8	0.0000	8	0.0000
9	10.000	9	10.000
10	10.000	10	10.000
11	10.000	11	10.000
12	0.0000	12	0.0000

电容层析成像的敏感场分布对成像图像的质量有很大的影响，而电势分布间接反映了敏感场的分布情况，本文从两种介质分布仿真对比入手，表征了介质变化与电势变化之间的本质关系，证实了电容层析成像系统成像效果要受到介质分布的影响。

参考文献

- [1] 李海青. 两相流参数检测及应用[M]. 杭州 浙江大学出版社, 1991: 1-30.
- [2] 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.
- [3] 吴新杰. 两相流流型辨识方法的研究[J]. 计量学报, 2000, 21(4): 286-291
- [4] YANG Wu Qiang. An improved normalisation approach for electrical capacitance tomography[M]. in Proc: 1st World Congress on Industrial Proe. Tomography, Buxton, UK PP 215-218. 1999.
- [5] PROF L. Capacitance based tomography for industrial applications [D]. Sharath Subash Donthi(04307905).

(收稿日期: 2009-03-19)