

三维 ECT 系统正问题仿真

李 岩, 李翔宇, 于道洋

(哈尔滨理工大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 电容层析成像具有非侵入、抗干扰、安全性好等一系列优点。但以往 ECT 系统仅能获得流体二维成像图形, 再通过二维截面累加形成三维图像, 并不是实际意义上的三维图像。针对这个问题, 从理论分析角度, 运用数值分析与泛函建立三维 ECT 数学模型, 利用 MATLAB 脚本程序对数学模型的结果进行计算, 并与 ANSYS 仿真结果进行比对。实验结果证明三维 ECT 数学模型计算结果能够满足工程应用的要求。

关键词: 电容层析成像; 三维 ECT 数学模型; 等价变分; 伽辽金加权余数法; 有限元分析

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.05.020

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2019)05-0122-06

Simulation of Positive Problems in Three Dimensional ECT System

LI Yan, LI Xiang-yu, YU Dao-yang

(School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Electrical capacitance tomography (ECT) has many advantages, such as non-invasion, anti-interference, and security. In the past, the ECT system can only obtain two-dimensional images of fluid, and the three-dimensional images formed by the accumulation of two-dimensional cross sections are not three-dimensional images in actual sense. To solve this problem, this paper from the view of theoretical analysis, used numerical analysis and functional to establish a 3D mathematical model of ECT. Meanwhile we utilized the MATLAB script to calculate the results of the mathematical model, and compared with the simulation results of ANSYS. The experimental results show that the 3D ECT model can meet the requirements of Engineering applications.

Keywords: electrical capacitance tomography; three dimensional ECT mathematical model; Galerkin weighted residual method; finite element analysis; singular value decomposition

0 引 言

通常将科学研究以及工程应用中的问题分成两大类: 正问题(也称正演问题)和逆问题(也称反问题或反演问题)^[1-3]。正问题(forward problem or di-

rect problem)是指对于某些物理过程或现象,若已知该物理过程的分布,可根据系统状态变量的某些特性条件(如初始条件或边界条件等)确定整个系统状态变量的变化规律;而逆问题(inverse problem)则是指依据观测数据和模型反演确定被研究对象的模型参数^[4]。

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2015038)。

作者简介: 李翔宇(1990—),男,硕士研究生;

于道洋(1989—),男,硕士研究生。

通信作者: 李 岩(1966—),男,博士,教授, E-mail: liyan@hrbust.edu.cn.

对于 ECT 正问题通常是指在采用狄利赫利 (Dirichlet) 第一类边界条件, 且已知空间内任意一点的介电常数分布函数 $\varepsilon(x, y, z)$ 的条件下, 利用有限元法及变分原理求解电势分布函数 $\phi(x, y, z)$ 的过程。

1 ECT 系统敏感场数学原理

由于 ECT 系统为敏感场, 测量值受多相流介电常数分布函数的影响^[9]。传感器的结构复杂性和被测场域内的介电常数部分不规则, 解析法和有限元差分法不适合 ECT 正问题的研究, 而有限元法既能求解非均匀线性电位场, 也可求解似稳场, 只要网格划分精细, 即可获得较精确的数值解, 进而从电位值求出电容的自容和互容值^[9]。

因此本文采用有限元法, 利用泛函的变分公式将电势分布函数 $\phi(x, y, z)$ 离散成适合计算机求解的矩阵形式, 并利用伽辽金法 (Galerkin) 在一定间隔内消除误差, 提高解的精度。

由麦克斯韦电磁场方程可知, ECT 为静电场模型, 且场域内不存在自由电荷, 即电位移矢量的散度处处为零, 敏感场内任一点满足^[7-8]:

$$E = -\nabla\phi \quad (1)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2)$$

式中: E 为电场强度, V/m ; D 为电位移矢量, C/m^2 。

ECT 场域内, 即敏感场内的三维数学模型为静电场的拉普拉斯方程:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = 0 \quad (3)$$

式中: $\varepsilon(x, y, z)$ 为在笛卡尔坐标系下, 介质分布函数; $\phi(x, y, z)$ 为电势分布函数。

2 三维 ECT 系统正问题的研究

在文 [6] 和文 [10] 中, 分别对 ECT 一维与二维的泛函变分问题和有限元法进行了详细的论述。本节即在两部专著的基础上, 针对 ECT 传感器正问题的三维数学模型进一步论述。

2.1 等价变分问题

先考虑一般情况, 下列二阶微分方程式:

$$\nabla \cdot [\alpha(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] + \beta\phi = f \quad (4)$$

式中: V 为任意体, $(x, y, z) \in V$; $\alpha(x, y, z)$ 为点 (x, y, z) 在 V 内的任意连续函数; β 为常数; f 为源或者激励函数。由此可见常用的拉普拉斯方程、泊松方程以及亥姆霍兹方程为式 (4) 的在不同参数下的特例。

在笛卡尔坐标系下, 微分方程的三维表达形

式为:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \beta\phi = f \quad (5)$$

式中: $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 分别为 $\alpha(x, y, z)$ 在 x, y, z 方向上分离变量。假设其满足边界条件:

$$\phi = p \quad (6)$$

$$\left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} + \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot \mathbf{n} + \gamma\phi = q \quad (7)$$

式中: S 为包围 V 体的面, 且 $S = S_1 + S_2$; 式 (6) 为点 (x, y, z) 在面 S_1 上, 式 (7) 为点 (x, y, z) 在面 S_2 上; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴方向的单位向量; $\mathbf{n}$ 为 S 面的外法线向量; p, γ, q 为任意常数。

引入变分公式, 上述边界条件等价于:

$$\left. \begin{aligned} \delta F(\phi) &= 0 \\ \phi &= p \text{ 在 } S_1 \text{ 上} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中

$$F(\phi) = \frac{1}{2} \iiint_V \left[\alpha_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \alpha_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 + \beta\phi^2 \right] dV + \iint_{S_2} \left(\frac{\gamma}{2} \phi^2 - q\phi \right) dS - \iint_V f\phi dV \quad (9)$$

最后整理得:

$$\begin{aligned} & \iiint_V \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \beta\phi - f \right] \delta\phi dV + \\ & \iint_{S_2} \left[\left(\alpha_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \alpha_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} + \alpha_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k} \right) \cdot \mathbf{n} + \frac{\gamma}{2} \phi - q \right] \delta\phi dS = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 若方程式等于 0, 则其中体积分与面积分必须分别等于零, 则式 (5) 满足三类边界条件, 可作为变分函数, 对已知方程进行等价变分。

2.2 有限单元法

针对其他形式单元格有限元计算结果精度低, 求解速度慢等问题, 本节论述了 10 节点四面体单元的有限元求解方法。对于 ECT 而言, 电势分布函数中的每个节点只有电势一个自由度^[11], 因此对于 ECT 用 10 节点四面体单元描述电势变化的插值函数可以表示为:

$$\phi = \phi_1(2S_1 - 1)S_1 + \phi_2(2S_2 - 1)S_2 + \phi_3(2S_3 - 1)S_3 + \phi_4(2S_4 - 1)S_4 + 4(\phi_5S_1S_2 + \phi_6S_2S_3 + \phi_7S_1S_3 + \phi_8S_1S_4 + \phi_9S_2S_4 + \phi_{10}S_3S_4) \quad (11)$$

式中 $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为与 x, y, z 相关的方程。

若用矩阵形式可表示为

$$\phi = N \cdot \varphi \quad (12)$$

其中 ϕ 为 V 体内任意一点的电势,

$$N = [(2S_1 - 1)S_1, (2S_2 - 1)S_2, (2S_3 - 1)S_3, (2S_4 - 1)S_4, 4S_1S_2, 4S_2S_3, 4S_1S_3, 4S_1S_4, 4S_2S_4, 4S_3S_4]$$

$$\varphi^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, \varphi_{10}]$$

亦可表示成插值函数的形式:

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{i=1}^M N_i \cdot \varphi_i \quad (13)$$

式中 M 为空间有限元单元节点的个数。

20 节点六面体单元插值函数推导过程及函数形式与 10 节点四面体单元相同^[11]。

简单来说,任何余差方法都要求余差在一定时间的间隔或某些节点上消失^[12-13]。由于所有 φ 解都是数值解而不是精确解,将数值解代入到微分方程就一定会产生误差。可采用伽辽金加权余数法进行推导,消除微分方程的误差。在笛卡尔坐标系下的余差,将式(13)代入式(10)中,整理得:

$$R_i = \sum_{j=1}^M \iiint_V \varphi_j \left(a_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + a_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + a_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} + \beta N_i N_j \right) dV - \iiint_V N_i f dV - \iint_S N_i \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS \quad (14)$$

式中 $i, j = 1, 2, \dots, M$ 。

由式(14)可得出余差加权方程的矩阵形式:

$$[R_i] = [K_{ij}] [\varphi_j] - [b_i] - [g_i] \quad (15)$$

式中 $[R_i]$ 为余数加权矩阵;

$$K_{ij} = \iiint_V \left(a_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + a_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + a_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} + \beta N_i N_j \right) dV$$

$$[\varphi_j]^T = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M];$$

$$b_i = \iiint_V N_i f dV$$

$$g_i = \iint_S N_i \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS$$

对于余数加权矩阵的每一项都应该为零,所以

$$[R_i] = [K_{ij}] [\varphi_j] - [b_i] - [g_i] = 0 \quad (16)$$

即

$$[K_{ij}] [\varphi_j] = [b_i] + [g_i] \quad (17)$$

可以证明,列向量 $[g_i]$ 可以用 $[b_i]$ 与 $[K_{ij}]$ 表示。三维电势函数有限元求解矩阵为

$$[K_{ij}] [\varphi_j] = [b_i] \quad (18)$$

即

$$\mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{b} \quad (19)$$

2.3 区域离散法矩阵参数的确定

余差方法需要在一定范围内消除余差,因此在整个系统内,余差和应该为 0,则整理式(14)可得:

$$\sum_{e=1}^N R^e = \sum_{e=1}^N ([K_{ij}^e] [\varphi_i^e] - [b_i^e]) = 0 \quad (20)$$

式中,上角标 e 为有限元网格划分后的第 e 个单元格,其他符号同式(15)。

由于系统刚度矩阵 $\mathbf{K}$,电势向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 与加载向量 $\mathbf{b}$ 待定。需要引入二维区域离散划分中提出的局部编码和全局编码的概念^[14]。假设水放置在 $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$ 的立方体容器内,且容器壁厚度为 0。每个单元网格为 $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ 的立方体。在局部编号中,选择左下角的单元格编号为 1 的节点作为坐标原点。局部编号方式形如 $n(1, 1, 1)$, 其含义为单元格位置处在 i 轴方向第 1 个单元格, j 轴方向第 1 个单元格, k 轴方向第 1 个单元格的节点编号为 1 的节点。

全局编号中,选择左下角的点作为 1 号节点,根据 20 节点六面体单元的节点划分, i 轴上节点编号依次为 1, 2, $\dots$, 25, 剩下的编号以此类推。全局编号如图 1 所示。

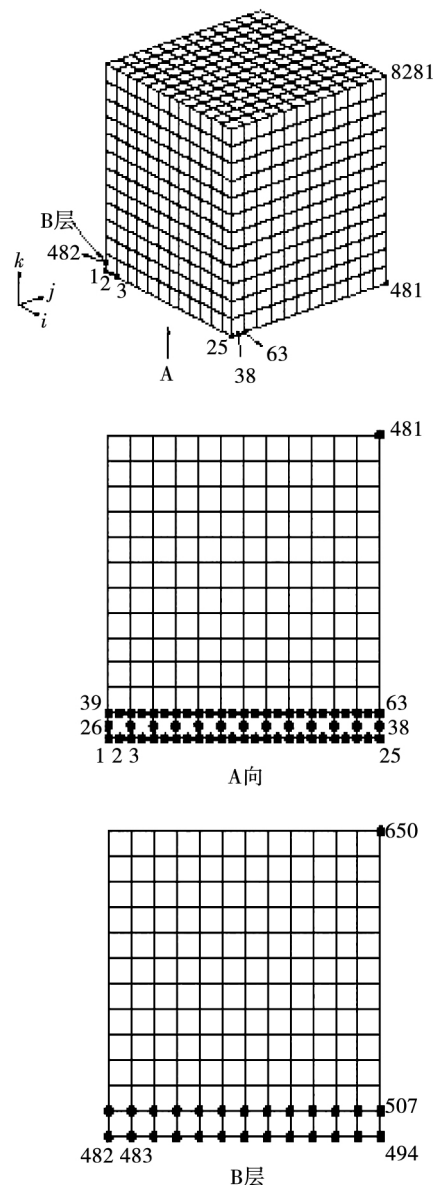


图1 立方体节点全局编号

Fig. 1 The global node number of cube

每个单元格中的刚度矩阵系数 K_{ij}^e , 在系统刚度矩阵的位置为 $K_{(i,e)(j,e)}$, 即将局部节点上的所对应的刚度矩阵系数加到相应全局节点所对应的系统刚度矩阵的位置上, 并整理得:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1i} & \cdots & K_{1M} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2i} & \cdots & K_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{i1} & K_{i2} & \cdots & K_{ii} & \cdots & K_{iM} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \cdots & K_{Mi} & \cdots & K_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_i \\ \vdots \\ \phi_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_i \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中

$$K_{ij} = \iiint_V \left(\varepsilon_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \varepsilon_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \varepsilon_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV$$

式中: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为介电常数 $\varepsilon(x, y, z)$ 在 x, y, z 方向上分离变量;

$$b_i = \iiint_V N_i f dV,$$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{当单元格在静电场内部时} \\ -\frac{\rho}{\varepsilon_0} & \text{当单元格任意部分在边界上时} \end{cases}$$

2.4 静电储能求解电容值

在工程上计算电容值总体来说有两种计算方法, 一种是矩量法, 另一种为集总电容法^[15-18]。但在 ECT 系统中, 一是无法确定带电极板的电荷量, 二是集总电容法相对于静电储能法计算精度较低^[9]。所以在计算 ECT 系统电容值时, 采用静电储能法。

对于无源静电场, 系统内的静电储能为

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d\Omega = \frac{\varepsilon}{2} \int_{\Omega} \nabla^2 \varphi d\Omega = \frac{\varepsilon}{2} \int_{\Omega} \left[\left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dy} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (22)$$

式中 W 为系统的静电储能; Ω 为系统的体积; φ 为电势插值函数。

特别是对于不同流型, 只需要在式(22)的基础上, 将 ε 替换成各单元格的介电常数值, 求和即可得出相应流型的静电储能。

3 三维 ECT 系统正问题仿真分析

为了进一步验证数学模型建立的空间电势函数是否与仿真结果相符, 设计如下实验: 利用 ANSYS 软件对管道内的流型进行数值模拟, 通过对比数学模型的 Matlab 计算结果, 证明数学模型是否正确。

3.1 ANSYS 正问题简化模型仿真

传感器方面则采用 3 组轴向极板组, 且每组轴向极板组中有 8 个径向电极, 每组中的两个电极放置在六面体的一个面上, 总计 3 组 24 个电极板。一个作为激励电极, 其余作为检测电极, 检测电极极板接地。

图 2 为 APDL 中的模型结构、网格划分和加载电压分布的示意图。模型边长为 $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$, 划分网格时每条边平均分成 12 份, 在 APDL 中映射体形成网格。3 组轴向电极组分布如下图所示, 其中极板长为 $4 \times 2 \text{ mm}^2$, 相邻极板间隔 2 mm, 激励极板电压为 24 V 其余检测极板电压为 0 V, 表示极板接地。同时假设理想水立方体绝对绝缘, 即立方体内不存在自由电荷。

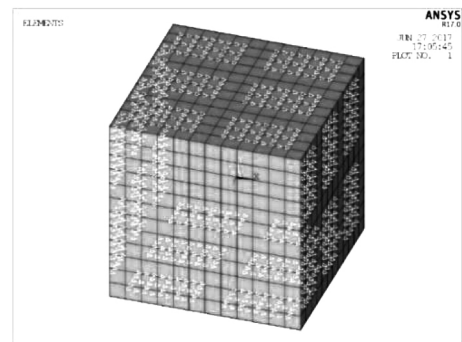


图 2 传感器模型结构、网格划分及加载电压分布示意图

Fig. 2 The distribution diagram of sensor model structure, mesh generation and applied voltage

ANSYS 模型仿真的简要步骤如下:

步骤 1: 设置求解环境与模型参数。设置电场仿真环境, 否则无法利用 CMATRIX 宏实现电容计算。

步骤 2: 建模与网格划分。网格模型采用 3D Brick 122 20 节点六面体网格单元。

步骤 3: 加载载荷, 设置边界条件, 进行计算。在 SOLVE 求解器中, 利用 CMATRIX 宏求解电容。

全水的条件下, 实验结果是沿中截面对称的, 因此实验提取 18 个特殊位置点的电势值。同时提取激励电极与其他检测电极的电容值, 共 23 组。图 3 为提取的电势编号 P、电场的节点编号 F 及各极板编号 B, 其中 B1 为激励电极。图中实线与实心点表示为立方体在此位置下所能观察到的节点与极板, 虚线与空心点表示立方体背面观察不到的节点与极板。

激励电极与各检测电极之间的互容如下表1所示,编号B1-BX($X=2,3,\dots,24$)表示激励极板与第X号检测极板之间的电容值记录1号激励极板与其他检测电极的电容值如表1所示。

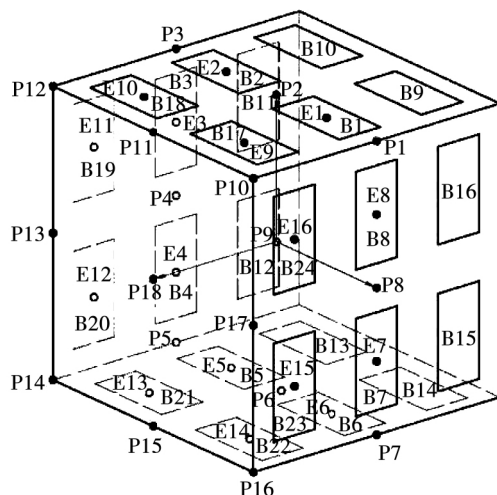


图3 电势、电场及极板编号示意图

Fig.3 The diagram of electric potential, electric field and polar plates number

表1 ANSYS 仿真计算的电容值

Tab.1 The capacitance value calculated by ANSYS simulation

极板编号	电容值/pF	极板编号	电容值/pF
B1-B2	0.54775	B1-B14	0.054308
B1-B3	0.10928	B1-B15	0.090138
B1-B4	0.056026	B1-B16	0.44669
B1-B5	0.047859	B1-B17	0.93764
B1-B6	0.058722	B1-B18	0.23356
B1-B7	0.10928	B1-B19	0.090138
B1-B8	1.5688	B1-B20	0.051758
B1-B9	0.93764	B1-B21	0.045191
B1-B10	0.23356	B1-B22	0.054308
B1-B11	0.090138	B1-B23	0.090138
B1-B12	0.051758	B1-B24	0.44669
B1-B13	0.045191		

3.2 MATLAB 数学模型的验证

采用 MATLAB 作为验证工具主要因为其强大的脚本语言、完备的符号微积分计算与稀疏矩阵存储方式和奇异值分解函数^[24]。

由于假设水立方绝缘,内部不存在自由电荷。真空介电常数 $\varepsilon_0 = 8.8541878 \text{ F/m}$, 水的相对介电常数为 $\varepsilon_w = 78.36$, 单元格边长为 1 mm 。根据电势

求解方程,编写 MATLAB 脚本语言, MATLAB 计算程序的流程如图4所示。利用静电储能法求解电容值,互容计算结果如表2所示。

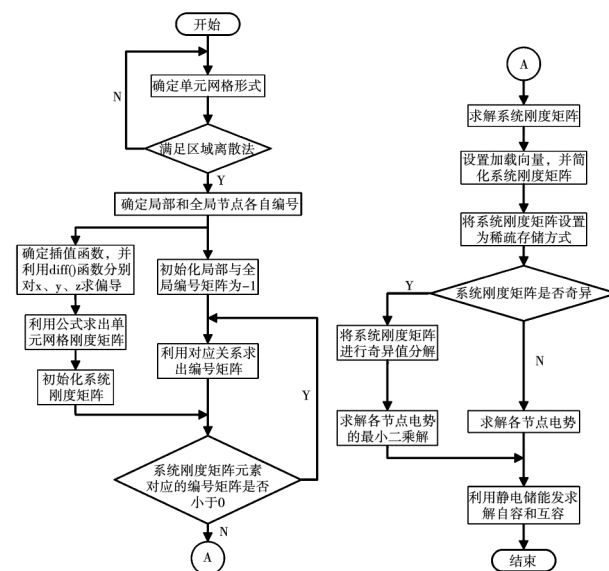


图4 MATLAB 计算程序的流程图

Fig.4 The flowchart of MATLAB calculation program

表2 MATLAB 计算的电容值

Tab.2 The capacitance value calculated by MATLAB

极板编号	电容值/pF	极板编号	电容值/pF
B1-B2	0.547245	B1-B14	0.054309
B1-B3	0.10918	B1-B15	0.090081
B1-B4	0.055996	B1-B16	0.445234
B1-B5	0.047849	B1-B17	0.937847
B1-B6	0.058722	B1-B18	0.232918
B1-B7	0.10918	B1-B19	0.090081
B1-B8	1.56293	B1-B20	0.051737
B1-B9	0.937847	B1-B21	0.045185
B1-B10	0.232918	B1-B22	0.054309
B1-B11	0.090081	B1-B23	0.090081
B1-B12	0.051737	B1-B24	0.445234
B1-B13	0.045185		

通过对比表1与表2的各组数据, MATLAB 的程序自容和互容的计算结果与 ANSYS 的计算结果基本一致,最大误差在 0.375% 。

4 结 语

本文中完成了对三维 ECT 系统正问题的研究,主要完成了对以下几个方面的探讨:

1) 数学模型的建立。利用麦克斯韦电磁方程组、有限单元法、泛函中的等价变分问题以及数值分析中的伽辽金加权余数法等一系列数学方法, 求解出三维 ECT 系统的数学模型。

2) 重要参数的求解方法。利用区域离散法, 以及静电储能法给出电势、电容等参数的求解方法。为下一步样本的自动计算提供基础。

3) 数学模型的验证。首先利用 ANSYS 对简化的三维 ECT 模型进行求解, 求出电势以及各极板之间的电容值。然后编写 MATLAB 脚本程序对数学模型进行验证, 结果能够证明 ANSYS 与 MATLAB 计算结果的相符。优化数学模型, 提高运算效率是下一步研究的重点

参考文献:

- [1] YU Daoyang, LI Yan, LI Yuehua, et al. Research and Application of NSSN Meural Network in Electrical Capacitance Tomography Image Reconstruction [J]. Science and Engineering Research Support Society, 2016, 9(9): 243.
- [2] PARK H C, HANG S C, LEE B K. Study on the Hydrodynamic Characteristics of a Biomass Fast Pyrolysis Conical Spouted Bed Reactor using the Pressure Fluctuations Analysis [J]. Journal of Korea Society of Waste Management, 2015, 32(5): 444.
- [3] WONDRAK T, SOLEIMANI M. A Novel Metal Flow Imaging Using Electrical Capacitance Tomography [J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(6): 064001.
- [4] 李海青, 黄志尧. 特种检测技术及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000: 14.
- [5] 许闻楷. 电容层析成像三维传感器结构设计与图像重建 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [6] 王化祥. 电学层析成像 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] GUO Q, MENG S, WANG D, et al. Investigation of Gas-solid Bubbling Fluidized Beds Using ECT with a Modified Tikhonov Regularization Technique [J]. Aiche Journal, 2018, 64(1): 29.
- [8] 李岩, 杜永斌, 崔浩鑫. 轮换对称分块 SVM 图像重建算法及硬件实现 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 204.
- [9] 李岩. 电容层析成像系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- [10] 吴新杰, 何在刚, 李惠强, 等. 利用多准则 Hopfield 网络对 ECT 进行图像重建 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8): 98.
- [11] 陈德运, 高明, 李伟, 等. 新型 ECT 数据采集系统设计与实现 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5): 87.
- [12] 金建铭, 王建国. 电磁场有限元方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [13] ROHMADI, PRAWITO, SAPUTRA A, et al. Rotary Sensor System for Imaging Improvement in Electrical Capacitance Volume Tomography [C] // International Conference on Information Technology and Electrical Engineering. IEEE, 2017: 1.
- [14] Saeed Moaveni. 有限元分析: ANSYS 理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 501.
- [15] ALLAM A K, DEABES W A. Electrical Capacitance Tomography Digital Processing Platform (ECT-DPU) [C] // IECON 2016 - , Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016: 4767.
- [16] WEN Y, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Redundancy Analysis of Capacitance Data of a Coplanar Electrode Array for Fast and Stable Imaging Processing. [J]. Sensors, 2017, 18(1): 31.
- [17] BANAEI M, ANNALAND M V S, KUIPERS J A M, et al. On the Accuracy of Landweber and Tikhonov Reconstruction Techniques in Gas-solid Fluidized Bed Applications [J]. Aiche Journal, 2015, 61(12): 4102.
- [18] HARYONO D, HARJANTO S, NUGRAHA H, et al. Column Flotation Monitoring Based on Electrical Capacitance Volume Tomography: A Preliminary Study [C] // International Process Metallurgy Conference, Ipmc. 1st International Process Metallurgy Conference, IPMC 2016, 2017: 050005.
- [19] MAO M, YE J, WANG H, et al. Evaluation of Excitation Strategies for 3D ECT in Gas-Solids Flow Measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8523.
- [20] WU M, YE J, WANG H, et al. Evaluation of Excitation Strategy for a Large Scale ECT Sensor with Internal-External Electrodes [J]. IEEE Sensors Journal, 2017(99): 1.

(编辑: 温泽宇)