

高炉计算机断层成象技术成象算法的研究*

邵富群 颜 华 王 师

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110005)

摘 要 提出用 MLRR 法对矿石、焦炭分布进行图象重建,该方法借助于有限元分析软件,利用多元线性回归实现 ECT 系统正向问题的求解,再利用正则化方法求解反向问题,获得成象矩阵。实验表明,在区域性分布对象的成象上,MLRR 法的成象质量远远好于 LBP 法。当矿石、焦炭的介电常数在 $\pm 20\%$ 变化时,对 MLRR 法所成图象质量影响不大,十分有利于热态下的高炉成象。

关键词 ECT, MLRR 法, 高炉成象, 矿石, 焦炭

分类号 TB 261.1

Image Reconstruction Algorithm for Blast Furnace Imaging

Shao Fuqun, Yan Hua, Wang Shi
(Northeastern University)

Abstract An algorithm, MLRR, for imaging the distribution of cokes and ore in a blast furnace is presented. The method used multi-linear regression to solve the forward problem and then regularized the solution of the forward problem to get the image reconstruction matrix. The experiment showed that using MLRR algorithm could get much better images than by LBP algorithm. Moreover, the quality of the images reconstructed by using MLRR algorithm is robust to the permittivity change of cokes and ore if the change is within $\pm 20\%$, which is very beneficial to blast furnace imaging in hot state.

Key words ECT, MLRR algorithm, blast furnace imaging, cokes, ore

1 引 言

利用 ECT 技术 (Electrical Capacitance, Tomography) 对高炉块状区物料实现可视化监测,除了对其传感器及电子检测线路进行研究外,还须针对高炉矿石、焦炭区域性分布特点及 ECT 传感器的软场特性等研究出响应速度快且图象重建质量好的 ECT 图象重建算法。

目前,ECT 研究中的图象重建算法主要有以下几种:线性反投影算法(LBP),基于模型的迭代算法(MOR),代数算法(ART),查表法以及人工神经网络法等。

LBP 算法、查表法及神经元法具有较快的响应速度,但其成象质量都存在较大的局限性。LBP 法没有考虑软场特性问题,图象质量差;查表法将电容

测量法与已知的流形一一对应,然后根据测量电容值查取所对应流型,然而电容测量值并非流型的单值函数,特别是电容传感器的软场特性使得这种对应关系更加复杂,难以利用电容测量值确定流型;人工神经网络法有克服软场效应的功能,但网络训练耗时大,对于复杂流型训练困难,并导致所成图形的分辨率降低;迭代算法(如MOR,ART等)的突出优点是针对电容传感器软场效应而设计,因此在成象质量上可获得较大的改进,但其缺点是响应速度慢。

基于上述考虑,针对高炉成象对象——矿石和焦炭,本文提出一种多元线性回归建模的正则化图象重建算法(简称MLRR法)。实验表明,该方法的成象质量远远好于LBP法。

2 MLRR 法原理

2.1 ECT 正问题的多元线性回归模型

* 国家自然科学基金项目(59674016)

1998-12-31 收稿,1999-11-01 修回

设传感器由在圆形管道外表面敷设的 N 个电极板构成, 成象区域内(即管道内截面)的象素数目为 n , 则利用有限元分析法可获得如下数据:

- 1) 管道内充满低介电常数 ϵ_1 时, 得 $N(N-1)/2$ 个电容测量值;
- 2) 第 k 个象素被 ϵ_k 所占据, 而其余 $k-1$ 个象素被 ϵ_1 占据时, 得 $N(N-1)/2$ 个电容测量值, 当 k 依次为 $1, 2, \dots, n$ 时, 共得 n 组电容测量值;
- 3) 管道内由 ϵ_n 充满时, 得 $N(N-1)/2$ 个电容测量值。

由上述数据可得到 $n+2$ 种介电常数分布及相应的 $n+2$ 组电容测量值。这 $n+2$ 组电容测量值按下式进行归一化处理。

$$c_{i,j}^N = \frac{c_{i,j} - c_{i,j}^1}{c_{i,j}^n - c_{i,j}^1} \quad (1)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, \dots, n$ 。这样便得到 $n+2$ 组归一化电容测量值, 并由 $(n+2)N(N-1)/2$ 维矩阵表示, 记为 C 。对于每一种介电常数分布, 可构成一 520 维的图象数据向量。该向量中的元素由归一化电容值 0, 1 构成。即当第 k 个象素为 ϵ_1 时, 向量中的第 k 个元素为 0; 否则, 象素为 ϵ_k 时, 则元素为 1。将 522 个图象数据向量集成成一 522×520 维矩阵 M , M 为列满秩矩阵。

这样, 各极板对间的电容测量值与介电常数分布间的多元线性回归模型可表示为

$$C = MS + E \quad (2)$$

式中, S 为 520×28 维回归系数矩阵, E 为误差矩阵, S 的最小二乘估计为

$$\hat{S} = (M^T M)^{-1} M^T C \quad (3)$$

用多元线性回归方法建立的 ECT 系统正向模型可表示为

$$y = x\hat{S} + n \quad (4)$$

式中, x 为与介电常数分布有关的一 n 维行向量, 其元素由 0, 1 值构成; y 是由 $N(N-1)/2$ 个归一化电容测量值所构成的行向量; n 代表模化误差与测量误差, 为一与 y 维数相同的行向量。令

$$Y = y^T, X = x^T, A = \hat{S}^T, e = n^T \quad (5)$$

上式可改写成常见的矩阵算子形式, 即

$$Y = AX + e \quad (6)$$

其中 e 为误差向量, (6) 式即为利用多元线性回归 (MLR) 建立的 ECT 系统的正向模型。

2.2 ECT 系统逆问题的正则化解

(6) 式是由介电常数分布 X 估计电容测量值 Y 的 ECT 系统的正向模型。在 ECT 技术中, 如何从给

定的 A 及电容测量值 Y 来估计表征介电常数分布的图象向量 x , 即由 Y 求取 x 称为 ECT 系统的逆问题求解过程。使测量电容值 Y 与映射 AX 间的距离最小的解为最小二乘解, 即

$$X^+ = \arg \min_x [Y - AX]^T [Y - AX] \quad (7)$$

也可表示为

$$X^+ = A^+ Y = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (8)$$

式中 A^+ 为 A 的广义逆。

由于逆问题的不稳定性, 用广义估计 x^+ 将发生数值不稳定现象。测量电容值的相对摄动与最小二乘解的相对摄动 δ_{x^+} 间的关系可表示为

$$\frac{\delta_{x^+}}{x^+} = K(A) \frac{\delta Y}{Y} \quad (9)$$

$$K(A) = A^+ A = \lambda_1 / \lambda_n$$

式中, $K(A)$ 为系统条件数; λ_1, λ_n 分别为矩阵 A 的最大, 最小奇异值。当 $K(A) \gg 1$, 即 $\lambda_1 \ll \lambda_n$ 时, 测量电容值 Y 的微小变化将引起 x^+ 的极大变化。此即为 x^+ 解的不稳定性, 它将导致由 (8) 式求得的最小二乘解对 Y 的测量误差很敏感。在求解 ECT 系统的逆问题时, 需利用正则化法对该不稳定性加以消除。

考虑到重建图象的灰度值是有界波动的, 图象能量是有限的这一特征, 本文在构造约束代价泛函时, 采用 $X^+ X$ 所表示的先验知识, 引入正则化参数 $\alpha > 0$, 并用如下的正则化解 X^R 作为 (6) 式的近似解。

$$X^R = \arg \min_x [(Y - AX)^T (Y - AX) + \alpha X^T X] \quad (10)$$

因此, 重建图象的灰度向量估计值为

$$X^R = (A^T A + \alpha I)^{-1} A^T Y = R Y \quad (11)$$

$$R = (A^T A + \alpha I)^{-1} A^T \quad (12)$$

其中, I 为单位矩阵, R 为重建矩阵。(8) 式对矩阵 $A^T A$ 求逆, 而 (11) 式对矩阵 $A^T A + \alpha I$ 求逆。由于 α 非负, 矩阵 $A^T A + \alpha I$ 的条件数比矩阵 $A^T A$ 的条件数好, 从而将不适定问题转化为适定问题, 即 (12) 式所描述的正则解是稳定的。

正则化因子 α 控制着正则解中先验知识与测量数据的权重。过小的 α 起不到有效的“镇定”作用, 而过大的 α 值又使正则解对测量数据的置信度过低。理论上确定 α 的大小很困难, 通常根据经验公式设定, 本文取 $\alpha = 0.0003$ 。当 α 值确定后, 重建矩阵 R 可预先计算出来, 所以 MLRR 法重建图象只需一次矩阵乘法, 计算量与 LBP 法相当, 速度非常快。

2.3 门限滤波

用上述 MLRR 法重建的图象存在两个问题: 一是图象的灰度值大小越界(即像素归一化灰度值大于 1 或小于 0 的现象); 二是图象的边缘存在着模糊的现象。为解决这两个问题, 需按式(13), (14) 依次对所得图象做门限滤波处理。

$$g_t(e) = \begin{cases} 1, & g(e) = 0 \\ g(e), & 1 > g(e) > 0 \\ 0, & g(e) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $e = 1, 2, \dots, np$, np 为象素的总数(共分 l 个灰度级), $g(e)$ 为象素 e 的原始灰度值, $g_t(e)$ 为滤波后的象素灰度值。

$$f_t(e) = \begin{cases} 0, & f(e) < t \\ f(e), & \text{其它} \end{cases}$$

其中 $f(e)$ 为(13) 式中与 $g_t(e)$ 最近的灰度值。

自适应门限滤波阈值 t 与重建图象灰度值的平均值及最大值有关。经数值实验, 由下列经验公式确定。

$$t = 0.5(1 - 0.1\alpha)\xi \quad (14)$$

其中, $\alpha = \text{AVG}[f(e)]$, $\xi = \text{MAX}[f(e)]$ ($e = 1, 2, \dots, np$), AVG, MAX 分别为象素灰度值平均值因子及最大值因子。

3 矿、焦介电常数的测定及分布图象的重建

3.1 矿、焦介电常数的实验测定

对矿焦的分布形态采用 ECT 技术实现可视化监测, 需对矿焦在冷态及热态下的介电常数进行实验测定。

3.1.1 冷态下矿、焦介电常数的估计

实验装置如图 1 所示。图中绝缘管道为高铝陶瓷管, 管长 285mm, 其内外半径分别为 33mm 和 38mm; 屏蔽罩半径为 82mm, 长度为 300mm; 电极板尺寸为 185mm × 40mm, 由纯铜薄板制做。

依次用烧结矿、焦炭、聚苯乙烯珠及无水酒精充满陶瓷管并测得相应的输出值, 所有输出值均用下式归一化值表示。

$$N_e = \frac{V_e - V_a}{V_e - V_e} \quad (15)$$

其中, V_e, N_e 分别为介电常数为 ϵ 的材料所对应的传感器输出值和归一化输出值; V_e, V_a 分别为空管和酒精满管时所对应的传感器输出值。

利用三维限元模型, 结合上述实验数据, 按下述步骤首先估计出陶瓷管介电常数, 继而估计出矿

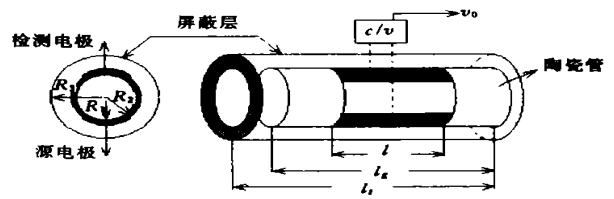


图 1 矿、焦介电常数实验装置
石和焦炭的介电常数。

1) 令陶瓷管介电常数在 4~ 11 范围内变化, 计算空管、聚苯乙烯珠以及酒精满管时传感器输出值, 计算结果与实验结果误差最小时所对应的管壁介电常数即为陶瓷管介电常数的估计值, 具体得到管壁介电常数为 5.5;

2) 代入管壁介电常数, 用有限元法计算出材料介电常数分别为 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 20 时所对应的满管输出值;

3) 用插值法计算出烧结矿及焦炭归一化输出值所对应的介电常数, 从而得到烧结矿及焦炭的相对介电常数值分别为 $\epsilon_0 = 5.8, \epsilon = 13.2$ 。

3.1.2 热态下矿、焦介电常数实验

物质的介电常数与温度有关, 随着温度的变化而变化。高温下, 矿石及焦炭介电常数的变化规律对成象算法的研究十分重要, 直接关系到算法研究的成败。

将矿石和焦炭分别加热至 400℃, 并分别放入图 1 所示的装置中, 随着温度的自然下降, 观测矿石、焦炭介电常数随温度变化的情况。实验结果证明, 温度从 400℃ 到室温间变化时, 焦炭的介电常数变化很小, 而矿石的介电常数则随着温度的上升有缓慢的上升。焦炭和矿石的介电常数始终保持着较大的差异。

3.2 矿石、焦炭分布图形的重建

在一内径为 20cm, 外径为 24cm 的陶瓷管道周围等间隔地粘贴 8 块 11.5cm × 7.3cm 的铜箔, 构成 8 个极板的电容传感器阵列。陶瓷管外部装有接地屏蔽罩, 屏蔽罩直径 33cm, 由铜网构成。计算机控制数据采集系统采集 8 个极板中两两不同组合下的电容值。

将烧结矿及焦炭按图 2 中(a)、(b) 两种情况放置, 黑为焦炭, 白为矿石, 分别模拟矿、焦的两种分布。利用满管烧结矿(低介电常数相) 所对应的 28 个电容值和满管焦炭(高介电常数相) 所对应的 28 个电容值, 对电容测量值做归一化处理, 可得到图象重建时所需要的归一化电容值。再借助有限元法计算

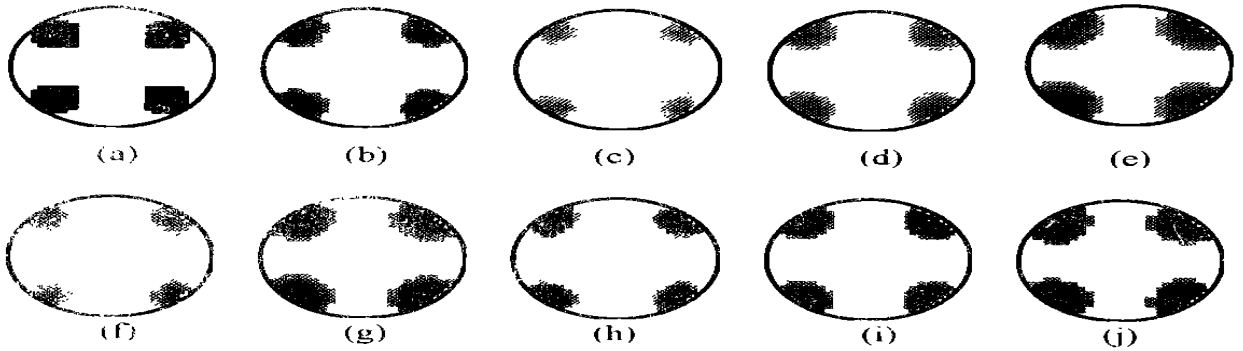


图2 Phantom (黑为焦炭,白为矿石)及相应的重建图象

- (a) phantom (b) $\epsilon_r = 13.2, \epsilon_i = 5.8$ (c) $\epsilon_r = 10.56, \epsilon_i = 4.64$ (d) $\epsilon_r = 10.56, \epsilon_i = 5.8$
 (e) $\epsilon_r = 10.56, \epsilon_i = 6.96$ (f) $\epsilon_r = 13.2, \epsilon_i = 4.64$ (g) $\epsilon_r = 13.2, \epsilon_i = 6.96$
 (h) $\epsilon_r = 15.84, \epsilon_i = 4.64$ (i) $\epsilon_r = 15.84, \epsilon_i = 5.8$ (j) $\epsilon_r = 15.84, \epsilon_i = 6.96$

出的 $\epsilon_i = 5.8, \epsilon_r = 13.2$ 及 MLRR 重建算法所需要的图象重建矩阵 R 便可重建图象。

重建的图象如图 2 中的 (c)、(d) 所示。可以看出, 烧结矿及焦炭分布的基本形态完全可以确定。图 2 中重建图象与原始物料分布间的差别主要由 3 个因素形成: 测量电路分辨率限制微弱信息的提取; 检测电路噪声的存在; 有限元法计算图象重建矩阵 R 时, 所设定的传感器结构与实际传感器在管道圆度半径、极板粘贴位置以及材料介电常数上的差异等。

为考察 MLRR 法对于烧结矿及焦炭介电常数变化时图象重建的适应能力, 从而考察热态下 MLRR 法对烧结矿及焦炭分布形态的重建能力, 令烧结矿及焦炭的介电常数在 $\pm 20\%$ 内波动, 并仍用在 $\epsilon_i = 5.8$ 及 $\epsilon_r = 13.2$ 条件下获得的图象重建矩阵 R 进行成象。图 2 为以矿石为背景的成象结果。实验结果表明, 无论是矿石、还是焦炭, 其分布的基本形态不受影响, 成象效果不变。

4 结 论

本文通过对烧结矿及焦炭冷、热态下介电常数实验, MLRR 算法的研究及对矿、焦分布形态进行图象重建的结果, 可得如下结论:

1) 烧结矿与焦炭的介电常数, 无论在冷态下还是在热态下都具有较大的差异, 这对利用 ECT 对矿、焦分布进行成象是十分有利的;

2) 利用 MLRR 法对矿、焦分布的成象实验表明, MLRR 法具有重建图象清晰及重建速度快的优

点, 并且对介电常数的变化不敏感, 这些特点也十分有利于矿、焦的分布成象。

参 考 文 献

- 1 颜华 电容成象技术及在高炉块状区物料可视化监测中应用的基础研究 东北大学博士学位论文, 1999
- 2 邵富群, 颜华, 王师 高炉块状区物料可视化监测的前期研究 东北大学学报, 1999, 20(1): 37- 39
- 3 Tapp H S, Kemsley E K, Wilson R *et al.* Image improvement in soft-field tomography through the use of chemometrics Measurement Science and Technology, 1998, 9(4): 592- 598
- 4 戴敬 电容成象系统传感器检测线路及数据采集系统的研制 东北大学硕士学位论文, 1999
- 5 Reinecke N, Mewes D. Recent development and industry/research application of capacitance tomography. Measurement Science and Technology, 1996, 7(3): 247 - 260

作 者 简 介

邵富群 男, 1945 年生。1969 年毕业于东北工学院, 现为东北大学信息科学与工程学院副教授。长期从事流量测量、二相流测量及过程成象技术研究。

颜华 男, 1964 年生。1985 年毕业于沈阳大学电子工程系, 1988 年在沈阳工业大学获硕士学位, 现为东北大学博士研究生, 副教授。主要从事过程成象研究。

王师 男, 1933 年生。1955 年毕业于东北工学院, 现为东北大学教授, 博士生导师。主要研究方向为流量检测与过程控制。