·图形图像处理· 文章编号:1000-3428(2018)01-0268-06 文献标志码:A 中图分类号:TP391.41

基于修正隐式 Landweber 方法的 ECT 图像重建算法

陈 宇,李洪宇,夏宗基

(东北林业大学 信息与计算机工程学院,哈尔滨 150040)

摘 要: 针对电容层析成像(ECT)技术中存在的软场效应及病态问题,提出一种基于修正隐式 Landweber 的电容层析成像算法。在分析电容层析成像系统基本原理的基础上,给出隐式 Landweber 方法解决 ECT 图像重建问题的求解公式,并对该公式进行迭代修正。同时对修正后的隐式 Landweber 电容层析成像算法的收敛性进行分析。仿真实验结果表明,修正隐式 Landweber 方法在解决 ECT 图像重建问题上,其精度与速度均优于经典 Landerber、LBP 等方法,且实现简单、稳定性好。

关键词: 电容层析成像;Landweber 算法;图像重建;迭代算法;支持向量机

中文引用格式: 陈 宇,李洪宇,夏宗基. 基于修正隐式 Landweber 方法的 ECT 图像重建算法[J]. 计算机工程,2018,44(1):268-273.

英文引用格式: CHEN Yu,LI Hongyu,XIA Zongji. Electrical Capacitance Tomography Image Reconstruction Algorithm Based on Modified Implicit FormulaLandweber Method[J]. Computer Engineering,2018,44(1):268-273.

Electrical Capacitance Tomography Image Reconstruction Algorithm Based on Modified Implicit Formula Landweber Method

CHEN Yu,LI Hongyu,XIA Zongji

(College of Information and Computer Engineering,Northeast Forestry University,Harbin 150040,China)

【Abstract】 A modified implicit type Landweber image reconstruction algorithm is presented for solving the 'soft-field' nature and the ill-posed problem in Electrical Capacitance Tomography (ECT) technology. On analysis of the basic principles of the ECT system,the paper proposes a formula of the modified implicit type Landweber algorithm to solve the problem of electrical capacitance tomography,and finishes the iterative modification,and analyzes the convergence of the algorithm. Simulation experimental results show that compared with Landweber,LBP methods,both precision and speed of the modified implicit formula Landweber method are very good,and it is simple and stabilized.

【Key words】 Electrical Capacitance Tomography (ECT); Landweber algorithm; image reconstruction; iterative algorithm; Support Vector Machine(SVM)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2018.01.045

0 概述

过程层析成像(Process Tomography,PT)技术包括电容层析成像技术、电阻层析成像技术和电磁层析成像技术。它们分别依据测量不同的电学特性进行相关信息的重建工作。其中电容层板成像(ECT)技术就是利用传感器测量并得到电容信号后,将这些电容信号依照合适的算法进行介质内介电常数分布情况的重建工作。

ECT 技术作为 PT 技术的一种,相比其他 PT 技术而言,具有成本低、可靠性高、简单易实现等优点。另外 ECT 的非侵入性、高安全性和高速度性使其在解决连续相非导电物质的两相流以及多相流成像问题中产生很好的效果[1-3]。ECT 技术的适用范围广泛,现已在化工、石油和医药等众多两相流和多相流检测领域有相应的应用[4-5]。

自从 ECT 技术出现以后,大量的图像重建算法被国内外的众学者所提出。文献[6]在 1996 年就对 ECT 的各种图像重建算法进行过一次综合表述。近些年,Tikhonov 正则化方法[7]、正则化的 Gauss-Newton 方法[8]、快速模拟退火全局优化算法[9]、遗传算法[10]、支持向量机法等一系列新的 ECT 图像重建算法相继被提出。

目前,对于 ECT 图像重建最常用的几种方法有直

基金项目: 国家自然科学基金(61300098);中央高校基本科研业务费专项资金(2572015DY07);黑龙江省自然科学基金(F201347);哈尔滨市科技创新人才专项资金(2013RFQXJ100)。

作者简介: 陈 宇(1975—),男,副教授、博士后,主研方向为图像处理、探测与成像;李洪宇、夏宗基,硕士研究生。

收稿日期: 2016-10-31 **修回日期:** 2017-01-12 **E-mail:** nefu_chenyu@163.com

接算法中的 LBP 法[11]和 Tikhonov 正则化法以及迭代算法中的共轭梯度(CG)法[12]和 Landweber 迭代法[13]。

ECT 图像重建是一个高度非线性问题,因 ECT 技术具有的"软场"特性,该问题属于病态问题求解。采用针对与该非线性问题"邻近"的线性问题的解法不断逼近要得到的解的这样一种思想是简单而有效的。

ECT 技术是否可以成功应用关键取决于 ECT 反问题求解的精度与速度的优劣[14-15]。LBP 算法的成像速度较快,但其成像精度上却有很大的不足。CG 算法在复杂流型上的成像精度并不特别理想。模拟退火算法、遗传算法和支持向量机算法在某方面的优越性上有所强化,但却以牺牲其他性能作为代价,因此只能在特定领域中有所应用。

电容层析成像技术要实现满足工业实际应用需求的目标,依赖于 ECT 图像重建算法的效果,所以,寻找优秀的 ECT 图像重建算法是值得一直研究的目标。

本文提出一种修正隐式 Landweber 电容层析成像算法,并与采用 LBP、经典 Landweber、CG 以及 SD 方法的仿真实验的重建图像、误差率和迭代次数进行对比,目的是获得更好的电容层析成像图像重建效果。

1　电容层析成像系统及 ECT 技术原理

在 ECT 研究中,常用的有 6、8、12、16 电极的 ECT 系统。本文主要讨论典型 12 电极的 ECT 系统。12 电极 ECT 系统主要有三大组成部分,如图 1 所示[16-19]。

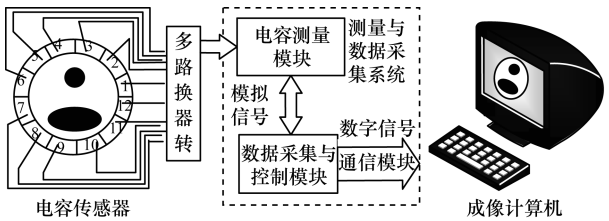

图 1　12 电极 ECT 系统的组成

ECT 技术的原理是根据不同相元素介电常数各不相同的特性,用电容传感器上的电极板对被测流体施加电压后,经数据采集系统测得的流体流动产生的变化的电容值,通过 ECT 图像重建算法,得到不同相元素的介电常数的分布及被测流体的截面重建图像。

通常,在一个 N 电极 ECT 系统中,独立电极对的总数 M 满足下式:

$$M = C_N^2 = N(N-1)/2 \tag{1}$$

首先从这 12 个极板的中某个极板出发,逆时针依序对这些极板分别做编号处理,把编号为 1 的电极板规定为源极板。然后为源极板加一固定电压值 U,再依次选取电极板 2、3、…、12 作为检测电极板,分别对 1-2、1-3、…、1-12 这些电极板对间的电容值进行测量。并且保证在每一次的测量过程中,闲置的其他电极都处于接地状态。接着继续依序规定编号为 2 的电极板作为源极板,同理测出 2-3、2-4、…、2-12 这些电极板对间的电容值。继续按编号进行类似上述操作,操作止于完成了 11-12 这一电极对的电容值测量工作。此时,共能得到 66 个独立的测量电容值[20]。

ECT 图像重建算法截至目前为止大部分都采用介电常数到电容映射这一线性模型。式(2)则表示离散化、线性化并且进行归一化过后的线性模型[21-25]。

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{SG} \tag{2}$$

其中,归一化后的电容向量表示为 $\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^m$,系数矩阵表示为 $\boldsymbol{S} \in \mathbb{R}^{m \times n}$,归一化后的介质分布图像向量则表示为 $\boldsymbol{G} \in \mathbb{R}^n$。由电容值 C 最终求解得到介电常数分布 $\boldsymbol{G}$ 则是 ECT 图像重建的主要工作任务。

2　电容层析成像反问题求解

本文首先分析一个隐式的 Landweber 方法:

$$x_{k+1}^{\delta} = x_k^{\delta} + hK(x_k^{\delta}, h) \tag{3}$$

$$K(x,h) = -F'\left(x + \frac{1}{2}hK(x,h)\right)^{*}(F(x) - y^{\delta}),$$
$$k = 0,1,\cdots \tag{4}$$

即:

$$x_{k+1}^{\delta} = x_k^{\delta} - hF'\left(\frac{1}{2}(x_k^{\delta} + x_{k+1}^{\delta})\right) * (F(x_k^{\delta}) - y^{\delta}),$$
$$k = 0,1,\cdots \tag{5}$$

来求解非线性算子方程:

$$F(x) = y, F: H \rightarrow H \tag{6}$$

其中,H 是 Hilbert 空间,F 是 Hilbert 空间上的一个非线性算子。

式(5)所示的隐式方法是由 3 阶中点 Newton 法变形而来,把 Newton 法中的 $F'(\cdot)^{-1}$ 改写为 $F'(\cdot)^{*}$[26]。

假设算子 F 在 x^{*} 的开邻域 $\Omega \subset D(F)$ 中满足如下的非线性条件。

1)存在 $0 < \eta < \frac{1}{2}$,使得:

$$\| F(x) - F(\tilde{x}) - F'(x)(x - \tilde{x}) \| \leqslant$$
$$\eta \| F(x) - F(\tilde{x}) \|, \forall x, \tilde{x} \in \Omega \tag{7}$$

对所有的 x、$\tilde{x} \in \Omega$ 都有:

$$\frac{1}{1+\eta} \| F'(x)(x - \tilde{x}) \| \leqslant \| F(x) - F(\tilde{x}) \| \leqslant$$
$$\frac{1}{1-\eta} \| F'(x)(x - \tilde{x}) \| \tag{8}$$

此外,假定 F 满足:

2)F' 在 Ω 内是一直 Lipschitz 连续的,Lipschitz 常数为 L。

3)存在 $M > 0$,使得对所有的 $x \in \Omega$, $\| F'(x) \| \leqslant M$(算子的有界性)。

在以上的假设条件下,且假定 x_0 足够接近于真解 x^{*},将证明当误差水平 $\delta = 0$ 时,序列 $\{x_k\}$ 收敛于真解 x^{*}。此外,当误差水平 $\delta \neq 0$ 时,在有限的迭代步数内,可以保证:

$$\| F(x_{k_*}^{\delta}) - y^{\delta} \| \leqslant \tau\delta \leqslant \| F(x_k^{\delta}) - y^{\delta} \|, \quad \forall k \leqslant k_* - 1 \tag{9}$$

$$\tau > \frac{1+\eta}{1-2\eta} > 2 \tag{10}$$

其中,τ 是一个依赖于条件 1)中的 η 的正数。且对于下式:

$$K(x,h) = -F'\left(x + \frac{1}{2}hK(x,h)\right)^{*}(F(x) - y) \tag{11}$$

令 F'是连续的,且满足 Lipshitz 条件(Lipschitz 常数为 L),由简单迭代法,式(11)存在唯一解。

此外,令 $K(x,0) = -F'(x)^{*}(F(x) - y)$,有:

$$\| K(x,h) \| \leqslant \frac{\| K(x,0) \|}{1 - \frac{hL}{2}\| F(x) - y \|}, x \in \Omega \tag{12}$$

当误差水平 $\delta \neq 0$ 时,该隐式 Landweber 方法具体计算时采用如下计算格式:

$$\begin{cases} x_{k+1}^{\delta} = x_k^{\delta} + h_k\tilde{K} \\ K^{j+1} = -F'\left(x_k^{\delta} + \frac{1}{2}h_kK^j\right)^{*}(F(x_k^{\delta}) - y^{\delta}), \\ \qquad j = 1,2,\cdots,m \\ \tilde{K}, = K^m, k = 0,1,\cdots \end{cases} \tag{13}$$

其中,$K^1 = -F'(x_k^{\delta})^{*}(F(x_k^{\delta}) - y^{\delta})$。

当 $m = 2$ 时:

$$x_{k+1}^{\delta} = x_k^{\delta} - h_kF'\left(x_k^{\delta} - \frac{1}{2}h_kF'(x_k^{\delta})^{*}(F(x_k^{\delta}) - y^{\delta})\right)^{*}(F(x_k^{\delta}) - y^{\delta}) \tag{14}$$

使该迭代式中的步长为自适应变步长,令:

$$h_k = \min\left\{\frac{1}{2\| F'(x_k^{\delta}) \|^2}, \frac{1}{\left(\| F'(x_k^{\delta}) \| + \frac{LR_0M}{4}\right)^2}\right\} \tag{15}$$

其中,$R_0 = \| x_0 - x^* \|$。

对于 ECT 反问题而言,有对应的非线性算子方程:

$$\boldsymbol{C} = F(\boldsymbol{G}) = \boldsymbol{SG} \tag{16}$$

其中,$\boldsymbol{C}$ 表示测量得到的电容向量,$\boldsymbol{S}$ 表示灵敏度矩阵,$\boldsymbol{G}$ 表示图像分布向量。

在 $\boldsymbol{C} = F(\boldsymbol{G})$ 中,以 $\boldsymbol{S}$ 代替 $F'(\boldsymbol{G})$,以 $\boldsymbol{SG}$ 替代 $F(\boldsymbol{G})$,所以将式(14)写为如下形式:

$$G_{k+1} = G_k - h_kF'\left(G_k - \frac{1}{2}h_kF'(G_k)^{*}(F(G_k) - \boldsymbol{C}))^{*}(\boldsymbol{S}G_k - \boldsymbol{C}\right) \tag{17}$$

式(17)中的 $F'\left(G_k - \frac{1}{2}h_kF'(G_k)^{*}(F(G_k) - C)\right)^{*}$ 应表示为:

$$\left(\boldsymbol{S} - \frac{1}{2}h_k\boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}\right)^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

所以,式(14)最终将改写为:

$$G_{k+1} = G_k - h_k\left(\boldsymbol{S} - \frac{1}{2}h_k\boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}\right)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{S}G_k - \boldsymbol{C}) \tag{19}$$

其中:

$$h_k = \min\left\{\frac{1}{2\| S \|^2}, \frac{1}{\left(\| S \| + \frac{LR_0M}{4}\right)^2}\right\} \tag{20}$$

且有 $R_0 = \| G_0 - G^* \|$,M 和 L 则源于条件 2)和条件 3)。

从原理上讲,Landweber 算法是最速下降法的一种变形,迭代的最开始收敛较快,但越靠近极小点收敛越慢。所以,可以在每次迭代时,先用经典 Landweber 算法进行搜索,然后以该搜索结果为初值,再用隐式 Landweber 方法进一步搜索,这样可以大大提高收敛速度,并得到更加精确的结果。同时,可以根据经验选取参数将方法进行优化,在其中加入参数 α、β,α、β 与 $\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}$ 的最大特征值相关联。

到此,对式(15)进行迭代修正后得到下式:

$$G_{k+1} = G_k - \alpha\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}(SG_k - \boldsymbol{C}) - \beta h_k(\boldsymbol{S} - h_k\boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{S}G_k - \boldsymbol{C}) \tag{21}$$

下面分析该算法的收敛性,由式(11)和式(16),有:

$$K(\boldsymbol{G},h) = -F'\left(\boldsymbol{G} + \frac{1}{2}hK(\boldsymbol{G},h)\right)^{*}(\boldsymbol{SG} - \boldsymbol{C}) \tag{22}$$

假设条件 2)和条件 3)当 $0 \leqslant k \leqslant k_*$ 时都满足,按照偏差原则式(9),迭代在 $k_*(\delta)$ 步终止。

定义下列公式:

$$e_k = G_k^{\delta} - G^* \tag{23}$$

$$Z_k^{\delta} = \phi(G_k^{\delta}) \tag{24}$$

其中:

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{G}) := \boldsymbol{G} + \frac{1}{2}hK(\boldsymbol{G},h) \tag{25}$$

由式(5),有:

$$\begin{aligned} \| e_{k+1} \|^2 &\leqslant \| e_k \|^2 - 2h(e_k, F'(Z_k^{\delta})^{*}(SG_k^{\delta} - C^{\delta})) + h^2M^2 \| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \|^2 \leqslant \\ &\| e_k \|^2 + 2h(SG_k^{\delta} - C^{\delta} - F'(Z_k^{\delta})e_k, SG_k^{\delta} - C^{\delta}) + (h^2M^2 - 2h)\| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \|^2 \end{aligned} \tag{26}$$

由式(12),可得:

$$\| K(G_k^{\delta},h) \| \leqslant \frac{M}{\gamma}\| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \| \tag{27}$$

其中:

$$\gamma = 1 - \frac{hL}{2}(\| \boldsymbol{S}G_0 - \boldsymbol{C} \| + 2MR_0) \tag{28}$$

又由假设条件 1)和条件 2),有:

$$\begin{aligned} \| SG_k^{\delta} - C^{\delta} - F'(Z_k^{\delta})e_k \| &\leqslant \| \boldsymbol{C} - C^{\delta} \| + \| SG_k^{\delta} - \boldsymbol{C} - F'(G_k^{\delta})e_k \| + \| (F'(Z_k^{\delta}) - F'(G_k^{\delta}))e_k \| \leqslant \\ \delta + \eta\| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \| + L\| Z_k^{\delta} - G_k^{\delta} \| \| e_k \| &\leqslant (1+\eta)\delta + \eta\| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \| + \frac{hLR_0}{2}\| K \| \leqslant \\ (1+\eta)\delta + \left(\eta + \frac{hLMR_0}{\gamma}\right)\| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \| \end{aligned} \tag{29}$$

$$\| e_{k+1} \|^2 \leqslant \| e_k \|^2 + h\left(hM^2 - 2 + 2\eta + \frac{2(1+\eta)}{\tau} + \frac{2hLMR_0}{\gamma}\right) \| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \|^2 \tag{30}$$

存在$h_1 > 0$,使得 $\gamma > 0$,且:

$$hM^2 + \frac{2hLMR_0}{\gamma} \leqslant 1, \forall\, h \leqslant h_1 \tag{31}$$

由停止准则式(9)和式(30),可知:

$$\| G_{k+1}^{\delta} - G^* \| \leqslant \| G_k^{\delta} - G^* \|^2 + \left(2\eta - 1 + \frac{2(\eta+1)}{\tau}\right) h \| SG_k^{\delta} - C^{\delta} \|^2 \tag{32}$$

又因为:

$$\tau > \frac{1+\eta}{1-2\eta} > 2$$

所以有对任意的满足 $0 \leqslant k \leqslant k_*$ 的 k,存在$h_1 > 0$,使得对任意的$h < h_1$,满足:

$$\| G_{k+1}^{\delta} - G^* \| \leqslant \| G_k^{\delta} - G^* \| \tag{33}$$

又对于经典 Landweber 的迭代公式,有:

$$\| G^* - G_{k+1} \|^2 - \| G^* - G_k \|^2 = 2(G_k - G^*, G_{k+1} - G^*) + \| G_{k+1} - G_k \|^2 = 2(\boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k, \boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k) - (\boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k, (I - \boldsymbol{S}\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}})(\boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k)) - \| \boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k \|^2 \leqslant \| \boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k \| \times ((2\eta - 1) \| \boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k \| + 2(1+\eta)\delta) \tag{34}$$

由 Morozov 偏差原则,有:

$$\| \boldsymbol{C} - \boldsymbol{S}G_k \| \geqslant \tau\delta \tag{35}$$

$$\tau > 2\,\frac{1+\eta}{1-2\eta} \tag{36}$$

则可知式(28)的不等式右边为负数,说明经典 Landweber 中的 G_{k+1}比 G_k 更单调收敛接近于真解。

综上,可知式(21)求解公式单调收敛,且逐渐向真解逼近。

该算法的效率分析如下:因修正的隐式 Landweber 算法迭代式(21)确定后,此算法执行的时间将仅依赖于迭代公式所进行的迭代修正次数,所以隐式 Landweber 算法的运算复杂度为 $O(N)$,N 为迭代公式的总迭代次数。在空间复杂度方面,该算法的执行在计算程序程序编写的过程中除本身需要的变量、常数以及输入数据外,不在需要额外的操作空间。从而,该算法具有较好的算法效率。

3　仿真与实验结果

基于以上理论,本文进行模拟仿真实验来验证算法求解 ECT 图像重建这一反问题的效果。针对极低位层流、低位层流、小半径核心流以及柱状流这 4 种流型进行预设置并采用 Matlab 配合 12 电极的 ECT 系统来进行仿真实验。实验环境设定在配置 Intel(R) Core(TM) i7-6700 @ 3.4 GHz 处理器,安装内存 4.0 GB,64 位操作系统的计算机上。

依据以上实验条件,根据本文中提出的该种修正隐式 Landweber 方法进行 ECT 图像重建,得到实验结果后,将其与线性反投影(LBP)法、经典 Landweber 法、共轭梯度(CG)法和最速下降(SD)法的图像重建结果进行对比。

ECT 反问题求解中良好的精度与合理的速度是 ECT 技术能够成功应用的关键。在该仿真实验中,实验精度的确定依靠空间图像误差来判定。误差计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{n} | \boldsymbol{g}_{i(img)} - \boldsymbol{g}_{i(init)} |}{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{g}_{i(init)}} \tag{37}$$

其中,n、$\boldsymbol{g}_{img}$、$\boldsymbol{g}_{init}$和 i 分别代表着成像区域单元总数、重建图像向量、介质分布原型图像向量以及成像区域剖分单元索引[27]。

实验速度则依照实验过程中的迭代次数来判定。迭代次数 N 越大,表示 ECT 图像重建的时间花销越大。设定实验产生的迭代误差满足式(38)即停止迭代。

$$\| SG_k - C \| < \xi \tag{38}$$

修正的隐式 Landweber 算法(简写为 XYLWB)成像结果与其他算法成像结果对比以及分析如图 2 所示。

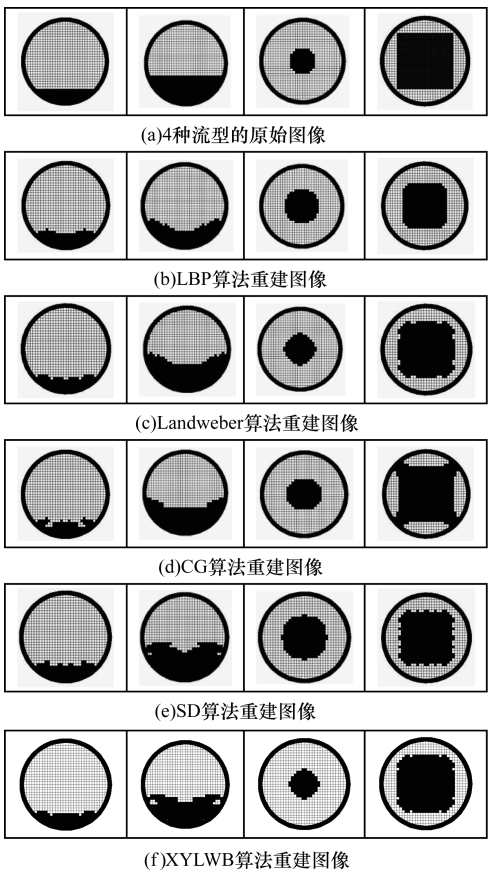

图 2　目标算法与其他算法重建图像结果对比

从图 2 的成像结果对比可以看出,这几种算法重建的图像在形状上均大体接近原始流型,但与标准原始图像对比上的视觉误差各不相同。其中,对于极低位层流,Landweber 方法和 XYLWB 方法的成像效果相对更好,且 XYLWB 方法的成像效果更佳。对于低位层流,XYLWB 方式最接近低位层流的原始图像。

表 1 展示了各种方法重建的图像与原始图像的误差百分比。I、II、III、IV 分别代表极低位层流、低位层流、核心流以及柱状流。从中可以看出,对于 I、II、III 这 3 种流型,采用 XYLWB 方法所成图像的误差率均为最低,与表 1 中所显示结果基本一致。

表 1 图像误差比较 %

算法	I	II	III	IV
LBP	34.15	40.32	86.38	59.64
Landweber	29.27	27.22	45.45	42.56
CG	48.78	26.61	63.63	33.51
SD	36.59	34.67	172.73	44.63
XYLWB	26.83	19.35	9.09	41.35

从表 2 可看出,对于 I、III 2 种流型,XYLWB 算法的成像迭代次数均明显少于 SD 算法。对于流型 II,经典 Landweber 算法、SD 算法和 XYLWB 算法的迭代次数差别微弱,但 XYLWB 算法所产生的误差率上却是这 3 种算法中最低的。XYLWB 算法与经典 Landweber 算法相比较,对于流型 I,迭代次数和误差率均有所下降;对于流型 II、III,迭代次数上有所增加,但在误差率上却明显下降。相比 CG 算法而言,XYLWB 算法对于各个流型的迭代次数有所增加,但对比表 2,会发现对于 I、II、III 这 3 种流型,误差率明显降低,所以这些迭代次数的增加是值得的。综合表 1、表 2 可以知道,对于流型 IV,采用 XYLWB 的成像效果,虽相比 CG 法略显不足,但却仍优于 LBP、经典 Landweber 算法和 SD 算法。

表 2 成像迭代次数

算法	I	II	III	IV
LBP	0	0	0	0
Landweber	21	21	15	37
CG	7	7	6	15
SD	26	19	24	40
XYLWB	10	22	17	50

表 3 列出的是以上 4 种算法经 20 步迭代后的范数残量误差值,从表 3 中可以看出,XYLWB 的范数残量误差值比较合理。

表 3 算法的范数残量误差值

算法	范数残量误差值			
	图 3(a)	图 3(b)	图 3(c)	图 3(d)
CG	2.274 1	4.055 9	0.031 8	2.198 2
SD	2.574 2	2.640 6	0.250 1	1.859 3
Landweber	3.736 9	2.260 5	0.067 6	2.508 5
XYLWB	3.326 2	2.089 2	0.307 7	2.395 7

目标算法与其他算法的范数残量误差比较如图 3所示。图 3 分别针对于以上实验的 4 种流型,来对经典 Land-weber、SD、CG 及 XYLWB 算法的第 0 步 ~ 第 20 步迭代的 2 范数残量误差进行比较。

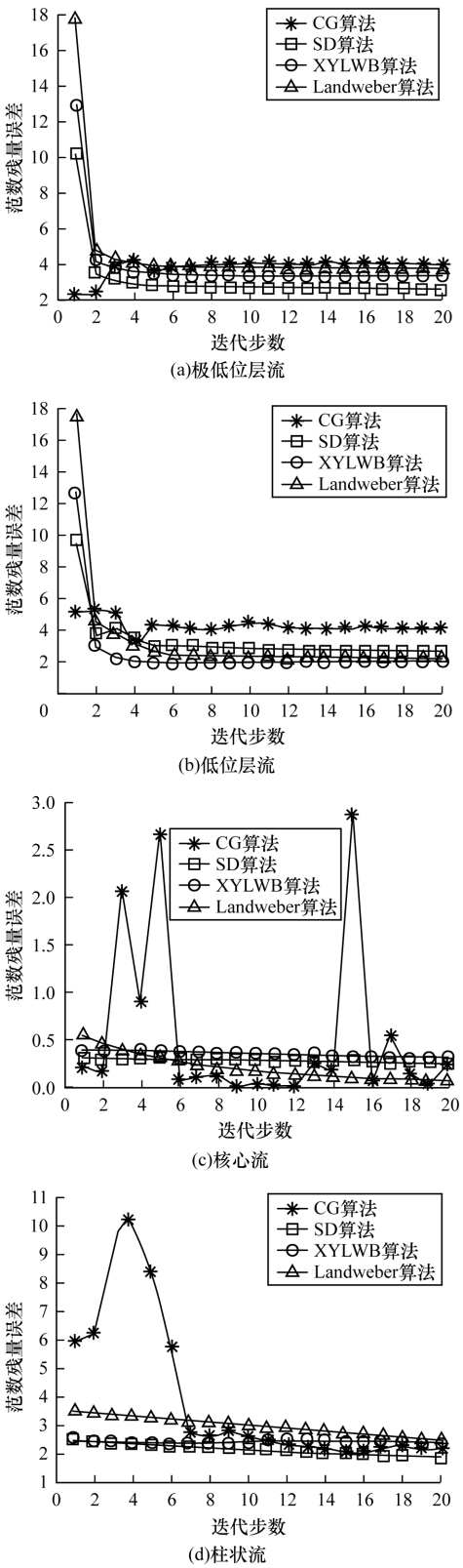

图 3 算法的范数残量误差对比

由图 3 中信息可得知,对于极低位层流、层流这 2 个流型,XYLWB 算法在迭代第 8 步的时候已经得到最好的范数残量误差,且对于极低位层流,整体上 XYLWB 算法的范数残量误差要小于经典 Landweber 算法和 CG 算法;对于低位层流,XYLWB 算法的范数残量误差在整体上是最小的。对于核心流,Landweber 算法、SD 算法以及 XYLWB 算法,范数残量误差均整体在 0.5 以下,明显要比 CG 算法稳定。对于柱状流,XYLWB 算法和 SD 算法在最开始拥有最小的范数残量误差,在第 8 步后 XYLWB 算法的范数残量误差逐渐接近于经典 Landweber 算法。

综合以上分析可知,采用该种修正隐式 Landweber 算法来进行 ECT 图像重建是一种值得考虑的算法。其在图像重建的精度与速度上均有其优势。

4　结束语

本文针对 ECT 图像重建中的病态性问题,提出一种修正隐式 Landweber 算法。给出了修正隐式 Landweber 算法在 ECT 图像重建这一反问题中的求解公式,同时对该算法的收敛性进行了分析。仿真实验结果证明了该修正隐式 Landweber 算法是有效的。通过与 LBP、经典 Landweber、CG 以及 SD 算法的重建图像、误差率和迭代次数的对比,修正隐式 Landweber 算法显示出了其自身精度和速度上的优势。该算法简单、高效,是一种解决 ECT 图像重建问题的有效算法。

参考文献

[1] 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):98-104.

[2] 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):87-92.

[3] 赵玉磊,郭宝龙,吴宪祥,等. 基于双粒子群协同优化的 ECT 图像重建算法[J]. 计算机研究与发展,2014,51(9):2094-2100.

[4] 田海军,周云龙. 电容层析成像技术研究进展[J]. 化工自动化及仪表,2012,39(11):1387-1392.

[5] 李　岩,冯　莉,朱艳丹,等. 类支集神经网络在 ECT 图像重建中的研究与应用[J]. 计算机工程与应用,2011,47(25):205-211.

[6] ISAKSEN O. A Review of Reconstruction Techniques for Capacitance Tomography[J]. Measurement Science and Technology,1996,7(3):325-337.

[7] FANG W,CUNBERBATCH E. Matrix Properties of Data from Electrical Capacitance Tomography[J]. Journal of Engineering Mathematics,2005,51(2):127-146.

[8] SOLEIMANI M,LIONHEART W R B. Nonlinear Image Reconstruction for Electrical Capacitance Tomography Using Experimental Data[J]. Measurement Science and Technology,2005,16(10):1987-1996.

[9] ORTIZ C, MARTIN R, GAMIO J C, et al. Reconstruction of Permittivity Images from Capacitance Tomography Data by Using Very Fast Simulated Annealing[J]. Measurement Science and Technology, 2004,15(7):1382-1390.

[10] 陈德运,郑贵滨,于晓洋,等. 基于遗传算法电容层析成像图像重建算法的研究[J]. 电机与控制学报,2003,7(3):207-211.

[11] XI Shaolin, ZHAO Fengzhi. Computation Methods for Optimization[M]. Shanghai, China: Shanghai Scientifie & Technical Publishers,1983.

[12] 周云龙,衣得武,高云鹏. 基于 INGA 的电容层析成像图像重建算法的研究[J]. 制造业自动化,2012,34(11):81-86.

[13] YANG W Q,PENG L H. Image Reconstruction Algorithms for Electrical Capacitance Tomography[J]. Measurement Science and Technology,2003,14(1):1-3.

[14] 陈德运,钟　陈,王莉莉,等. 基于局部能量的电容层析成像图像融合方法[J]. 计算机应用研究,2012,29(5):1947-1950.

[15] 陈　宇,张立新,陈德运,等. 一种具有迭代约束的最小二乘 ECT 图像重建算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(4):1588-1593.

[16] 王莉莉,陈德运,于晓洋,等. 电容层析成像系统传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(3):515-522.

[17] 孙犇渊,王化祥,王丕涛. 基于内部阵列电极的电容层析成像系统[J]. 传感技术学报,2013,26(6):820-824.

[18] 赵进创,傅文利,李陶深,等. 电容层析成像图像重建的新算法[J]. 计算机工程,2004,30(8):54-56.

[19] 曹海燕,王化祥. 电容层析成像系统传感器仿真研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(15):207-211.

[20] 陈　宇,孙　帆,张　健. 三项共轭梯度的电容层析成像图像重建算法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2009,14(6):42-46.

[21] 郭志恒. 两约束条件正则化的 ECT 图像重建算法[J]. 计算机仿真,2012,29(4):297-300.

[22] 陈　宇,陈德运. 基于改进 Runge-Kutta 型 landweber 的电容层析成像图像重建算法[J]. 电机与控制学报,2014,18(7):107-112.

[23] 赵进创,刘金花,黎志刚,等. 改进敏感场的电容层析成像图像重建算法[J]. 计算机工程与应用,2012,48(4):167-169.

[24] 陈　宇,陈德云,王莉莉,等. 基于非线性最小二乘的电容层析成像图像重建算法[J]. 高技术通讯,2010,20(2):163-167.

[25] 陈　宇. 电容层析成像反问题求解及图像重建算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.

[26] 韩　波,李　莉. 非线性不适定问题的求解方法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011.

[27] 高宝庆. 基于迭代法的电容层析成像图像重建算法[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.

编辑　索书志