

改进 Landweber 电阻层析成像 图像重建算法*

肖理庆^{1,2}, 王化祥¹, 徐晓菊²

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 徐州工程学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221111)

摘要: 为了克服电阻层析成像系统不适定性的影响, 提高图像重建质量, 提出一种改进 Landweber 电阻层析成像图像重建算法。利用基于粒子群算法的改进遗传算法, 对敏感场均匀分布时灵敏度矩阵进行预处理, 降低其条件数, 改善其病态性, 并应用于两相流典型流型图像重建。仿真实验结果表明, 改进算法可将敏感场均匀分布时灵敏度矩阵条件数降低 98.15%, 有效提高了图像重建质量。

关键词: 电阻层析成像; 不适定性; 图像重建; 灵敏度矩阵; 条件数

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3157-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.094

Improved Landweber algorithm for image reconstruction in electrical resistance tomography system

XIAO Li-qing^{1,2}, WANG Hua-xiang¹, XU Xiao-ju²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Dept. of Information & Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou Jiangsu 221111, China)

Abstract: In order to overcome the influence of ill-posed characteristic in electrical resistance tomography system and improve the imaging quality, this paper proposed an advanced Landweber algorithm based on genetic algorithm modified by particle swarm algorithm. This novel algorithm effectively reduced the condition number by preprocessing the sensitivity matrix, and it was applied for image reconstruction. The experimental results show that the novel algorithm can reduce the condition number by 98.15% and improve the imaging quality effectively.

Key words: electrical resistance tomography; ill-posed characteristic; image reconstruction; sensitivity matrix; condition number

0 引言

电学层析成像是过程层析成像(process tomography, PT)技术的重要分支, 包括电阻层析成像(electrical resistance tomography, ERT)^[1,2]、电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)^[3,4]、电阻抗层析成像(electrical impedance tomography, EIT)^[5]、电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)^[6-8]等。

图像重建算法是电学层析成像研究的热点与难点, 其中比较常见的重建算法多基于灵敏度理论。由于电学层析成像问题是一个典型的不适定性问题, 灵敏度矩阵的条件数非常大, 严重影响了重建图像质量。一般采用的解决方法为正则化法, 虽然正则化参数存在理论最优值, 但如何合理选择是个难题。通常正则化参数的选择有三种策略: 先验策略、后验策略以及经验选择。其中, 先验策略便于理论分析, 但在实际中难以应用; 后验策略计算量较大, 较难满足实时性要求; 而经验选择具有一定的随机性和不确定性。文献[9]借鉴改进粒子群算法中惯性权重递减策略, 对修正牛顿—拉夫逊图像重建算法中正

则化因子进行了研究, 提高了图像重建精度, 但同时存在如下不足之处:

a) Hessian 矩阵在图像重建过程中随正则化因子的改变而改变, 在线优化正则化因子将导致算法无法满足系统对实时性的要求。

b) 在算法迭代后期, 随着正则化因子的减小, 矩阵病态改善程度降低。

本文提出的改进 Landweber 算法中灵敏度矩阵固定不变, 且矩阵条件数可降低 98.15%。

1 ERT 数学描述

1.1 正问题

根据恒定电场理论的麦克斯韦方程, 对于 ERT 敏感场内任意一点, 有

$$J = \sigma \cdot E \quad (1)$$

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

其中: $E = -\nabla \varphi$ (3)

J 为电流密度; σ 为电导率; E 为电场强度; φ 为场内电势分布。

收稿日期: 2011-11-18; **修回日期:** 2011-12-29 **基金项目:** 国家自然科学基金重大国际合作项目(60820106002); 国家自然科学基金重点基金资助项目(60532020, 50937005); “青蓝工程”; 天津市自然科学基金资助项目(11JCYBJC06900); 徐州市科技计划项目(XM12B078)

作者简介: 肖理庆(1981-), 男, 山东青岛人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电学层析成像(lqx1981@tju.edu.cn); 王化祥(1945-), 男, 教授, 博导, 硕士, 主要研究方向为检测技术与信号处理; 徐晓菊(1979-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能计算。

由式(1)~(3)可知 φ 满足:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (4)$$

ERT 满足第 2 类边界条件,其形式可表示为

$$\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} |_{\partial \Omega} = j \quad (5)$$

$$\varphi |_{\partial \Omega} = u_j^0 \quad (6)$$

其中: $\partial \Omega$ 为边界; j 为边界电流密度分布函数; n 为边界外法线方向; u_j^0 为边界电势分布函数^[10-12]。

1.2 逆问题

根据测量的边界电压,利用图像重建算法求解敏感场内介质电导率分布即 ERT 逆问题。目前常用图像重建算法多基于灵敏度理论,包括 Landweber 算法、灵敏度系数法及牛顿-拉夫逊类算法等^[13-17]。

2 改进 Landweber 图像重建算法

2.1 Landweber 图像重建算法

电阻层析成像图像重建中,测量电极所测量的边界电压值与敏感场内电导率分布为非线性函数关系,通过有限元剖分,可以近似为线性,用矩阵形式表示如下:

$$Z = SG \quad (7)$$

其中: Z 为 $n \times 1$ 阶边界电压矢量矩阵; G 为 $m \times 1$ 阶灰度矢量矩阵; S 为 $n \times m$ 阶灵敏度矩阵,按式(8)计算, n 为有效边界电压数目, m 为敏感场内剖分单元数目。

$$S_{m,n,x,y} = \int \frac{\nabla \varphi_m}{I_m} \cdot \frac{\nabla \varphi_n}{I_n} dx dy \quad (8)$$

如果用 S^T 近似代替 S^{-1} ,则方程(7)可写为

$$G = S^T Z \quad (9)$$

应用式(9)实现图像重建,即为一步灵敏度系数算法。由于是近似代替,重建图像质量较低,针对此问题,Yang 和 Sprink 提出了 Landweber 方法:

$$G_{k+1} = G_k + A_0 (Z - SG_k) \quad (10)$$

其中:

$$A_0 = \alpha S^T \quad (11)$$

α 为增益因子,用来控制算法收敛速度,且满足:

$$\|\alpha S^T S\|_2 < 2 \quad (12)$$

2.2 改进 Landweber 图像重建算法流程

改进 Landweber 电阻层析成像图像重建算法总体上分为两步:第一步为利用基于粒子群算法的改进遗传算法^[17],对敏感场均匀分布时灵敏度矩阵进行预处理,降低其条件数;第二步为在线成像。具体流程如下:

a) 设置有限元模型单元数目 n_{ele} ,电极所对圆心角 Δ ,管道半径 R ,电流强度 I ,敏感场均匀分布时电导率 σ ,两相流介质电导率 σ_1, σ_2 ,种群数目 n_{po} ,预处理最大迭代次数 n_1 ,在线成像最大迭代次数 n_2 ,交叉概率 P_c ,变异概率 P_m ,学习因子 c_1, c_2 ,最大惯性权重 ω_{max} ,最小惯性权重 ω_{min} ,参数 d 等。

b) 计算敏感场均匀分布时灵敏度矩阵 S ,并生成 $n \times n$ 阶单位阵 C 。

c) 随机生成初始种群。

d) 将种群中每个染色体生成 $n \times n$ 阶对角阵 M ,代入适应度函数中,计算每个染色体的适应值,所选取的适应度函数如

式(13)所示:

$$f = P / \text{cond}(M \cdot S) \quad (13)$$

其中: cond 表示条件数; P 为惩罚函数,表达式如式(14)所示:

$$P = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{cond}(M) \leq \text{cond}(M \cdot S) \\ 10^{-10} & \text{if } \text{cond}(M) > \text{cond}(M \cdot S) \end{cases} \quad (14)$$

e) 根据适应值大小实施选择操作,本文采用轮盘赌选择方式。

f) 根据交叉概率实施交叉操作。

g) 按式(15)实施变异操作:

$$x'_i = x_i \pm 0.5L \times \sum_{j=0}^m \frac{a(j)}{2^j} \quad (15)$$

其中: x_i, x'_i 分别为变异前后基因取值; $a(j)$ 以概率取 1 或 0; L 为基因取值范围。

h) 判断算法当前迭代次数是否等于 n_1 。若等于,进入 i); 否则返回 d)。

i) 按式(16)~(18)计算 e ,并更新矩阵 C 及 S :

$$e = \frac{\text{cond}(S) - \text{cond}(M_{best} \cdot S)}{\text{cond}(S)} \times 100\% \quad (16)$$

$$C = M_{best} \cdot C \quad (17)$$

$$S = M_{best} \cdot S \quad (18)$$

其中: M_{best} 为最大适应值染色体所对应的对角阵。

j) 判断是否满足 $e \leq d$,若满足,进入 k),否则返回 c)。

k) 根据边界测量电压 Z ,利用线性反投影算法计算 G_0 。

l) 按式(19)更新 Z :

$$Z = C \cdot Z \quad (19)$$

m) 代入式(10)计算 G_{k+1} ,直到算法当前迭代次数等于 n_2 时结束。

3 仿真实验与分析

3.1 仿真实验条件

本文仿真实验环境为 PentiumM 1.60 GHz CPU,760 MB RAM,MATLAB 7.0 版本,采用的有限元模型如图 1 所示^[11]。

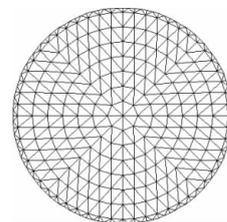


图 1 有限元模型示意图

电极数目为 16、 $n_{ele} = 560$ 、 $\Delta = 5.625^\circ$ 、 $R = 100.0 \text{ cm}$ 、 $I = 1 \text{ mA}$ 、 $\sigma = 1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $\sigma_1 = 2 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $\sigma_2 = 20 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $n_{po} = 300$ 、 $n_1 = 500$ 、 $n_2 = 200$ 、 $P_c = 0.80$ 、 $P_m = 0.01$ 、 $c_1 = c_2 = 2$ 、 $\omega_{max} = 0.90$ 、 $\omega_{min} = 0.10$ 、 $d = 0.5\%$,数据采集采取相邻激励模式。

3.2 仿真实验结果与分析

敏感场均匀分布时灵敏度矩阵 S 条件数为 3.42×10^6 ,改进算法优化过程如图 2 所示。

由图 2 可知,改进算法可将矩阵条件数从 3.42×10^6 降低为 6.34×10^4 ,总共降低了 98.15%,从而有利于提高算法图像重建质量。

为了验证改进 Landweber 算法性能,设置了两相流的四种典型流型——层状流、环状流、中心流、泡状流,如图 3 所示。

为了衡量算法重建图像质量,引入横截面图像误差 CSIE,如式(20)所示:

$$CSIE = \frac{\sum_{i=1}^{560} |G_B(i) - G_S(i)| \cdot A(i)}{\sum_{i=1}^{560} A(i)} \quad (20)$$

其中: G_B 和 G_S 分别对应着模型与重建图像。考虑到有限元网格划分时各单元的面积不同,引入第 i 个单元的面积 $A(i)$ 。

另外考虑到 ERT 逆问题多存在半收敛现象,理论上存在最优迭代次数,此时对应的重建图像质量最高。迭代次数过小或过大都会导致重建图像质量降低,简单通过算法停止迭代时比较重建图像结果并不合理,因此,本文将算法迭代过程中最优结果进行比较,如图 4、表 1 所示,并给出不同算法收敛曲线如图 5 所示。

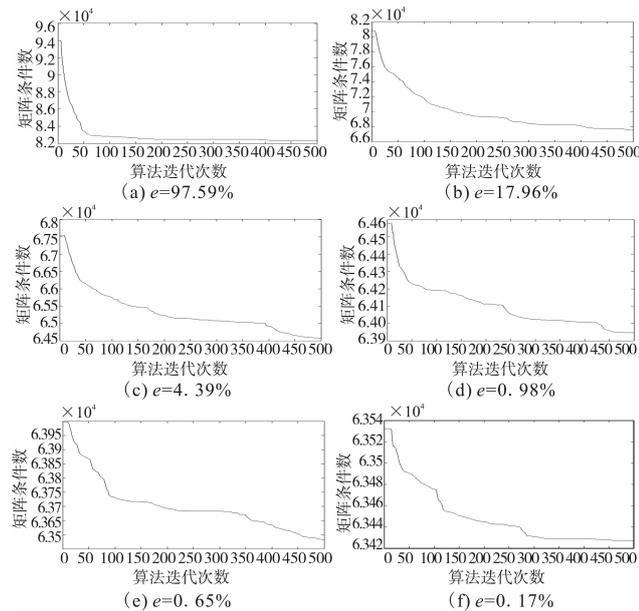


图2 条件数收敛曲线

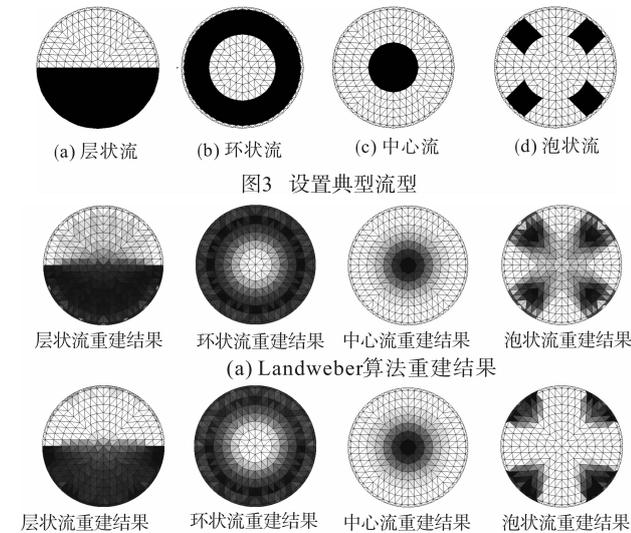


图3 设置典型流型

表1 不同算法对典型流型重建结果(CSIE)比较 /%

算 法	层状流	环状流	中心流	泡状流
Landweber 算法	14.98	27.10	12.40	25.72%
改进 Landweber 算法	9.70	26.60	10.07	15.69

由图 4、图 5、表 1 可知,对两相流典型流型—层状流、环状流、中心流、泡状流,改进 Landweber 算法相比 Landweber 算法,能有效去除伪影,提高算法重建质量。

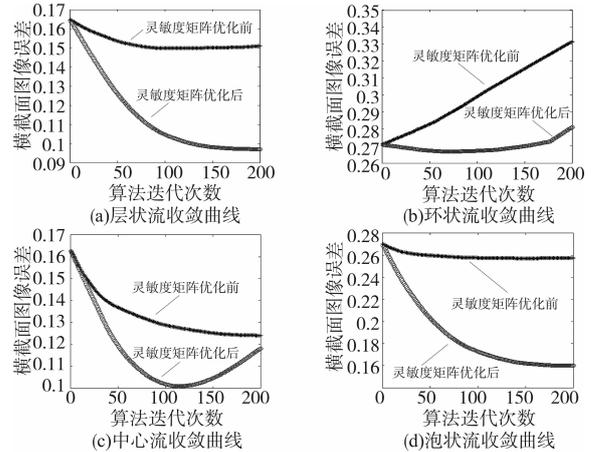


图5 对典型流型两种不同算法收敛曲线

4 结束语

为改善灵敏度矩阵病态程度,提高电阻层析成像图像重建质量,本文提出一种改进 Landweber 图像重建算法。通过利用基于粒子群算法的改进遗传算法,对敏感场均匀分布时灵敏度矩阵进行预处理,有效降低了矩阵条件数,提高了对两相流四种典型流型——层状流、环状流、中心流、泡状流的反演精度。

参考文献:

- [1] 张彦俊,陈宇,陈德运,等.电阻层析成像系统敏感场特性分析及图像重建[J].计算机学报,2010,37(8):257-261.
- [2] 张彦俊,陈德运.代数神经网络电阻层析成像图像重建算法[J].计算机工程与应用,2009,45(32):19-21.
- [3] 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):1588-1590.
- [4] 陈琪,刘石.电容层析成像对火焰的介电感应机制及实验验证[J].中国电机工程学报,2009,29(26):56-62.
- [5] 赵波,王化祥,胡理.基于 Walsh 函数的电阻抗层析成像激励模式[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(10):1598-1601.
- [6] 付妍,董峰,谭超.电磁层析成像系统敏感场激励特性仿真研究[J].中国电机工程学报,2011,31(8):73-79.
- [7] 徐凯,陈广,尹武良,等.基于场量提取法的电磁层析成像系统的灵敏度推算[J].传感技术学报,2011,24(4):543-547.
- [8] 李柳,邵富群.电磁层析成像图像重建中的修正共轭梯度算法[J].仪器仪表学报,2010,31(3):655-658.
- [9] 肖理庆,王化祥.MNR 图像重建算法中正则化因子研究[J].计算机工程与应用,2011,47(21):13-16.
- [10] 王化祥,汪婧,胡理,等.ERT/ECT 双模态敏感阵列电极优化设计[J].天津大学学报,2008,41(8):911-918.
- [11] 肖理庆,邵晓根,王琳琳,等.电阻层析成像有限元仿真模型分析与设计[J].仪器仪表学报,2008,29(2):354-360.
- [12] 崔自强,王化祥,许燕斌,等.双截面电阻层析成像系统设计[J].天津大学学报,2010,43(2):115-120.
- [13] 王化祥,汪婧,胡理,等.基于肺部先验知识的电阻抗成像重构算法[J].天津大学学报,2008,41(4):383-388.
- [14] 陈德运,陈宇,王莉莉,等.基于改进 Gauss-Newton 的电容层析成像图像重建算法[J].电子学报,2009,37(4):739-743.
- [15] 李柳,邵富群.电磁层析成像图像重建中的修正共轭梯度算法[J].仪器仪表学报,2010,31(3):655-658.
- [16] 陈宇,高宝庆,张立新,等.基于加权奇异值分解截断共轭梯度的电容层析图像重建[J].光学精密工程,2010,18(3):701-707.
- [17] 肖理庆,邵晓根,李子龙,等.基于遗传算法的组合 ERT 图像重建算法研究[J].仪器仪表学报,2010,32(2):305-311.