



融合边界条件的电阻抗图像重建仿真研究

陈晓艳, 黎 鸽

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 结合成像目标的边界结构信息, 提出一种新的改善电阻抗图像重建质量的方法. 在生物医学电阻抗断层成像中, 将传统采用圆形场域的重建模型改进为与人体胸腔边界近似的八边形场域, 建立正问题数学模型, 求解得到灵敏度系数矩阵, 经等位线滤波反投影算法获得感兴趣区域的仿真分布图像. 针对成像目标在场域中的不同分布情况, 采用面积占空比对两种重建模型下的成像效果进行评价. 图像及数据分析结果表明, 改进方法重建图像伪影明显减少, 面积占空比也更接近真实分布, 提高了图像空间分辨率, 达到了改善电阻抗重建图像质量的目的.

关键词: 电阻抗成像; 等位线滤波反投影; 伪影; 空间分辨率

中图分类号: TN911.73; R445.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2011)05-0061-05

Simulation Study of the Electrical Impedance Tomography Fused the Boundary Conditions

CHEN Xiao-yan, LI Ge

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: To improve the quality of the electrical impedance reconstructed image, an improved method that fused the boundary structure information to refine the reconstructed image was proposed. In biomedical impedance tomography, the conventional circular field was changed into the octagon field that approximate for the human chest, a mathematical model for solving the forward problem was established, and the sensitivity coefficient matrix was renewed, then used the equi-potential filtered back projection algorithm to realize the image reconstruction of the simulated distribution within the interesting region, the comparative effect was evaluated by the area ratio when the objects exist at different positions. The simulation results indicate that artifacts of the reconstructed images reduce significantly, and the ratio area is also closer to the real distribution, the spatial resolution is improved obviously, achieve the purpose of improving the quality of the electrical impedance tomography.

Keywords: electrical impedance tomography; equi-potential filtered back projection; artifacts; spatial resolution

电阻抗成像 (electrical impedance tomography, EIT) 作为新一代无损伤功能成像技术, 已成为生物医学工程学的重要研究课题之一^[1]. EIT 技术通过配置于人体体表的电极阵列, 施加一定频率的低幅值交变电流激励 (安全电流小于 5 mA), 并通过扫描阵列电极获取电压数据, 提取与人体生理、病理状态相关的组织或器官的电特性 (阻抗、导纳介电常数等) 信息, 经数据采集单元并行处理后送至重构计算机, 运

用求解被测物场电磁逆问题的图像重建算法, 重构被测组织或器官的断层二维/三维分布图像^[2-4].

由于电阻抗图像重建的软场“病态”特性, 图像分辨率较低, 限制了电阻抗断层成像技术在工业、医学等领域的应用, 所以如何提高 EIT 成像的分辨率、改善图像质量一直是国内外学者研究的热点课题^[5-7]. 目前, 虽已取得一定的改善效果^[8-9], 但是研究多是基于圆形场域非均匀分布的图像重建, 鲜见结合成像

收稿日期: 2011-03-28; 修回日期: 2011-06-03

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50937005); 天津市自然科学基金资助项目 (08JCYBJC03500)

作者简介: 陈晓艳 (1973—), 女, 副教授, 博士, 天津大学在站博士后, cxywxr@163.com.

目标断层结构进行图像改善研究的相关报道^[10].

本文从研究对象的边界结构入手,提出一种新的融合边界结构信息进行图像改进的方法.首先建立正问题数学模型,并进行有限元剖分,更新灵敏度系数矩阵,然后采用等位线滤波反投影算法对场域中不同位置和不同数量的目标进行成像,并采用面积占空比对两种重建模型下的成像效果进行评价.

1 正问题数学模型

人体胸腔的 CT 扫描图如图 1 所示,人体胸腔体表边界为不规则结构.若采用传统的圆形场进行重建图像,不能判断阻抗变化所在准确位置;所以,采用一种融合边界结构信息的方法来提高图像重建质量,将人体胸腔近似成一个八边形结构,并采用方形网格剖分,获得 1 824 个重建单元,如图 2 所示.图 1 中:a 段代表前胸,c 段代表左侧肋,e 段代表后背,g 段代表右侧肋;考虑到人体厚度,则 b、h 段代表上胸腔厚度,d、f 段代表下胸腔厚度.



图 1 人体胸腔 CT 扫描图
Fig.1 CT scanning photo of human chest

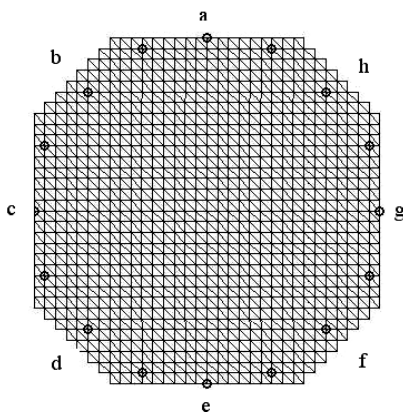


图 2 16 电极八边形场剖分图
Fig.2 Subdivision of octagon field with 16 electrodes

为了对比研究改进方法的成像效果,对圆形场域也进行剖分,获得 1 600 个单元,如图 3 所示.

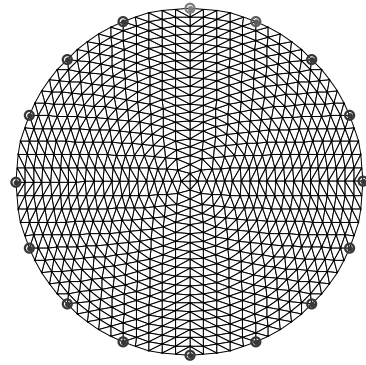


图 3 16 电极圆形场剖分图
Fig.3 Subdivision of circular field with 16 electrodes

在 COMSOL 仿真环境下对两种边界条件的模型进行了正问题求解,获得灵敏度系数矩阵.由于电阻成像系统的敏感场分布是非均匀的,靠近激励电极处,敏感场的灵敏度高,而在场域的中心区域灵敏度低.敏感场分布的不均匀程度、非线性程度与不稳定性密切相关,即:敏感场越均匀,非线性越弱,不稳定性也越弱,成像效果越理想^[11].因此,采用灵敏度的均值和标准差两项均匀性指标对图 2 和 3 中的均匀性进行研究.灵敏度的均值和标准差分别为

$$J_{i,j}^{avg} = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m J_{i,j}(e) \tag{1}$$

$$J_{i,j}^{dev} = \left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{e=1}^m [J_{i,j}(e) - J_{i,j}^{avg}]^2 \right\}^{1/2} \tag{2}$$

$$P_{i,j} = J_{i,j}^{dev} / J_{i,j}^{avg} \tag{3}$$

$$P = \sum_{i,j} |P_{i,j}| \tag{4}$$

式中: J 为灵敏度系数矩阵或 Jacobian 矩阵; P 为非均匀度,是衡量场域均匀性的指标, P 值越小,敏感场越均匀.

经计算,八边形场的非均匀度为 39.38,圆形场的非均匀度为 69.47,可知,八边形场更均匀.

2 等位线滤波反投影算法

等位线反投影算法是一种动态电阻抗成像算法^[12],本文采用矩阵的形式来描述等位线反投影算法的实现.引入灵敏度系数矩阵 B ,将边界电压变化沿等位线方向进行反投影.将 B 乘以边界电压的变化值,即:

$$c_m = B V_n \tag{5}$$

式中: c_m 表示电导率变化向量; m 是有限元模型的单元数; V_n 是经标准化处理的边界电压的变化值;灵敏

度系数矩阵 B 的元素表示第 j 个边界电压投影到第 i 个像素时的系数, 当该像素在等位线上时 B_{ij} 为 1, 否则为 0, 同时通过改变电流驱动模式进行反复的投影和叠加, 最后得到重建图像.

电压标准化过程如下:

$$V_n = \frac{V_p}{V_u} \quad (6)$$

$$V_u = \int_{\Omega} c_u \nabla \Phi_u \cdot \nabla \Psi dv \quad (7)$$

式中: V_u 是均匀电导率分布下或者某一初始电导率分布状态下的测量电压; V_p 是场域电导率变化后边界测量电压. c_u 表示均匀电导率分布或者某一初始电导率分布, 由式 (6) 和 (7) 得标准化的边界电压向量

$$V_n = \frac{G^{-1}V_p}{c_u} \quad (8)$$

式 (8) 中, G 是一对角矩阵, 其非零元素值为

$$G_u = \int_{\Omega} \nabla \Phi_u \cdot \nabla \Psi dv \quad (9)$$

这里, i 是指第 i 次电流激励时第 i 次电压测量.

由于 $V_p = Bc_p$, 式 (8) 可变为

$$V_n = \frac{G^{-1}Bc_p}{c_u} \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} F = G^{-1}B \\ c_m = \frac{c_p}{c_u} \end{cases} \quad (11)$$

则式 (10) 变为

$$V_n = Fc_m \quad (12)$$

其中, 矩阵 F 描述了标准化的边界电压变化与电导率变化间的灵敏度关系.

等位线滤波反投影算法^[13]是先对边界电压的变化数据进行转换, 再利用简单反投影算法进行图像重建. 假设边界电压变化的数据向量 V_n 转换后为 V'_n , 则利用直接反投影算法得到的重建图像为

$$c_m = BV'_n \quad (13)$$

由式 (12) 和式 (13), 得到

$$V'_n = (FB)^{-1}V_n \quad (14)$$

式 (14) 带入式 (1), 即可得到等位线滤波反投影算法

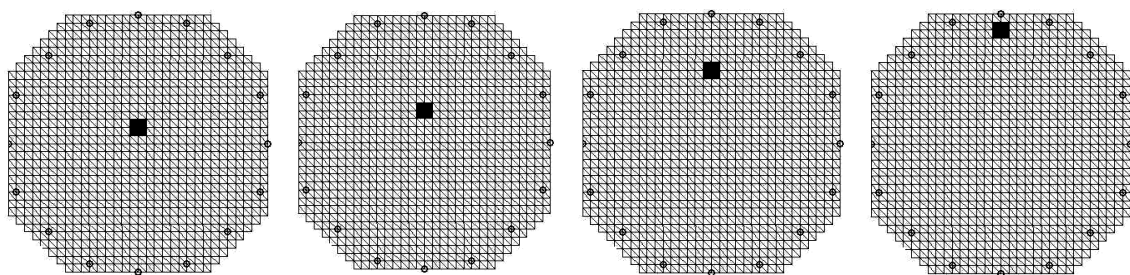
$$c_m = B(FB)^{-1}V_n \quad (15)$$

其中, $(FB)^{-1}$ 即为滤波矩阵.

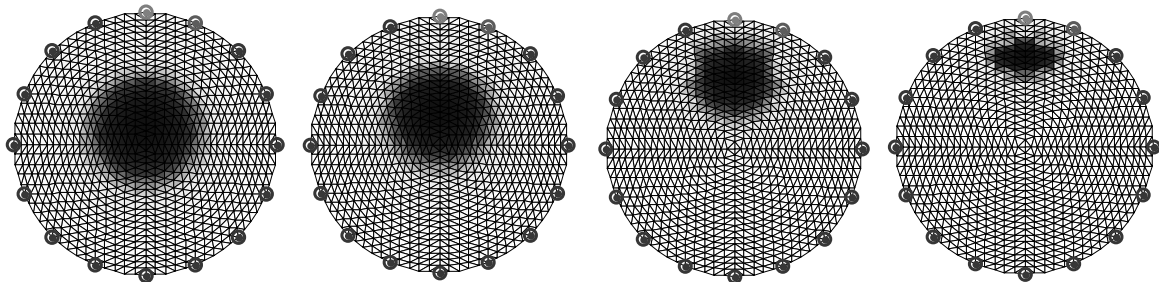
3 图像重建

在场域边界上等间距放置 16 个电极, 在 Matlab 环境中对图像进行重建, 并加入随机干扰信号, 以使仿真结果更加接近实际, 然后分别对场域中有单个目标和多个目标的情况进行了对比.

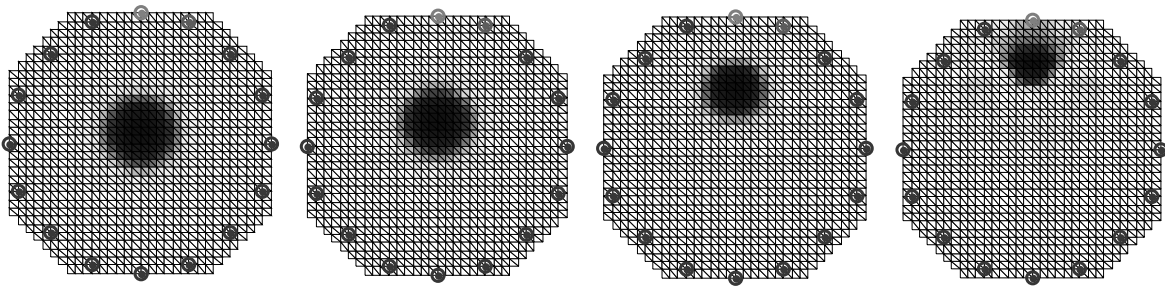
当场域内有单个目标, 且逐渐从场域中心向边界电极移动时, 圆形场和八边形场的图像重建效果比较, 如图 4 所示.



(a) 真实分布



(b) 圆形场重建图像



(c) 八边形场重建图像

图4 单个目标在不同位置的重建图像

Fig.4 Reconstructed image of a single target at different positions

由图4仿真结果可看出,八边形场重建图像效果明显优于圆形场,而且重建目标距场域中心越远,伪影越少,重建效果越好.

为了客观评价改进算法的成像效果,对单个目标情况下圆形场和八边形场的重建图像的面积占空比进行分析.记真实分布中目标所占单元数为 A ,重建后圆形场和八边形场所占单元数分别为 B_1, B_2 ,圆形场总单元数为 S_1 (1600个),八边形场为 S_2 (1824个),分别计算真实分布中成像目标的面积占空比 A/S_2 、圆形场重建图像的面积占空比 B_1/S_1 和八边形场重建图像的面积占空比 B_2/S_2 ,结果见表1.

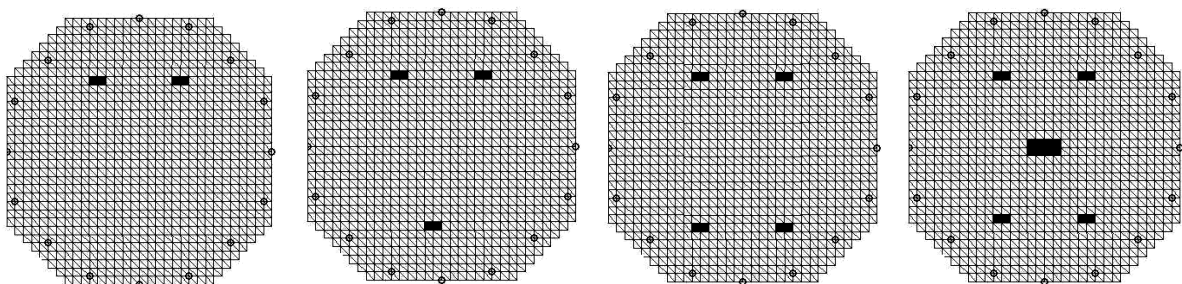
由表1可知,随着成像目标与激励电极的距离越近,八边形场成像目标的面积占空比 B_2/S_2 就逐渐接近原始目标的占空比 A/S_2 ,相比圆形场,图像空间分辨率提高了近一倍.

表1 单个目标所占单元数和面积占空比统计表

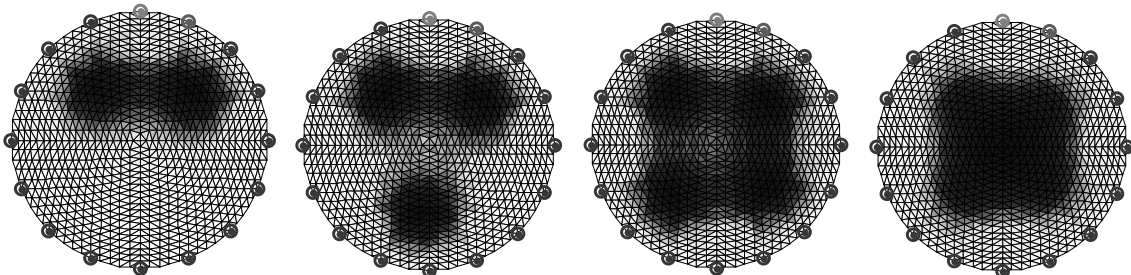
Tab.1 Statistical table of element number and the area ratio of single target

项目	目标位置			
	位置1	位置2	位置3	位置4
A	8	8	8	8
B_1	228	186	130	44
B_2	104	96	72	40
S_1	1600	1600	1600	1600
S_2	1824	1824	1824	1824
A/S_2	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044
B_1/S_1	0.1425	0.1163	0.0813	0.0275
B_2/S_2	0.0570	0.0526	0.0395	0.0219

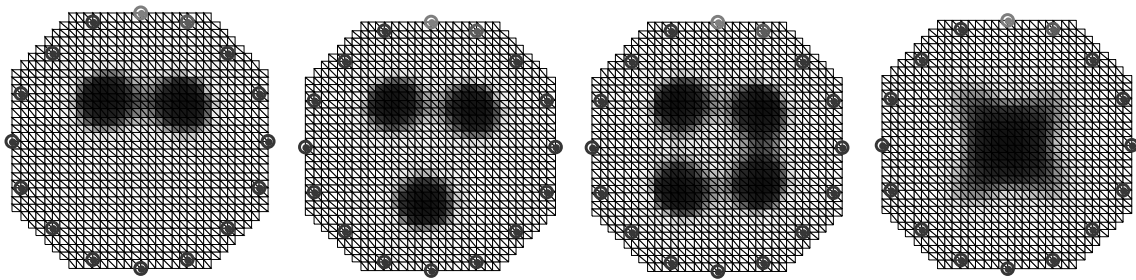
当场域内有多个重建目标时,圆形场和八边形场的图像重建效果比较如图5所示.同样,通过面积占空比指标对两种场域图像进行对比,计算结果见表2.



(a) 真实分布



(b) 圆形场重建图像



(c) 八边形场重建图像

图 5 多个目标的真实分布和重建图像

Fig.5 Original image and reconstructed image of multiple targets

表 2 多个目标所占单元数和面积占空比统计表

Tab.2 Statistical table of element number and the area ratio of multiple targets

项目	目标个数			
	2个	3个	4个	5个
A	8	12	16	32
B_1	222	320	524	468
B_2	110	158	228	110
S_1	1 600	1 600	1 600	1 600
S_2	1 824	1 824	1 824	1 824
A/S_2	0.004 4	0.006 6	0.008 8	0.017 5
B_1/S_1	0.138 8	0.200 0	0.327 5	0.292 5
B_2/S_2	0.060 3	0.086 6	0.125 0	0.060 3

分析表 2 和图 5, 当场域内有多个重建目标时, 八边形场重建的图像伪影明显少于圆形场的重建图像, 且面积占空比也更接近真实分布, 但随着成像目标逐渐增加且多个目标相对接近时, 图像的空间分辨率都有所下降。

4 结 语

经上述仿真和数据分析结果可以看出, 本文提出的融合边界结构信息改善图像重建质量的方法, 经等位线滤波反投影算法成像后, 八边形模型与圆形场模型相比, 重建的图像伪影明显减少, 空间分辨率也得到显著提高。由此可见, 该方法是有效的, 可为电阻抗成像技术的实际应用提供理论依据。

参考文献:

[1] Holder D S. Electrical impedance tomography methods, history and applications[M]. Bristol and Philadelphia:

IoP Publishing, 2004.
 [2] 徐桂芝, 杨硕, 李颖, 等. 电阻抗断层成像技术综述[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(2): 35-39.
 [3] 马磊, 严碧歌, 孙渭玲. 电阻抗断层成像技术进展[J]. 现代生物医学进展, 2007, 7(5): 780-782.
 [4] 董秀珍. 生物电阻抗成像研究的现状与挑战[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(5): 641-643.
 [5] 刘鑫, 任超世. 几种发展中的生物电阻抗成像方法和系统[J]. 医疗卫生装备, 2008, 29(10): 33-35.
 [6] 汤孟兴, 秦明新. 一种用于电阻抗断层成像的图像重建新方法[J]. 第四军医大学学报, 1998, 19(3): 1-3.
 [7] 朱学明, 王化祥, 何世钧, 等. 基于 RBF 网络和遗传算法的电阻抗图像重建算法[J]. 天津大学学报, 2002, 35(6): 686-690.
 [8] 徐管鑫, 何为, Singer H. 一种改进的动态电阻抗断层成像反投影算法[J]. 生物医学工程杂志, 2004, 21(5): 761-765.
 [9] Isaacson D, Mueller J L, Newell J C, et al. Imaging cardiac activity by the D-bar method for electrical impedance tomography[J]. Physiological Measurement, 2006, 27: S43-S50.
 [10] 陈晓艳, 王化祥, 石小累, 等. 人体肺功能生物电阻抗成像技术[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(5): 664-668.
 [11] 王化祥, 胡理. 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.
 [12] Holder D S. Biomedical applications of electrical impedance tomography[J]. Physiological Measurement, 2002, 23(1): 3-5.
 [13] 董秀珍, 秦明新. 一种实用的动态电阻抗断层成像算法[J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 19(3): 348-352.