



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109493395 A
(43)申请公布日 2019.03.19

(21)申请号 201811286530.1

(22)申请日 2018.10.31

(71)申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 任尚杰 王语 董峰

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代
理事务所 12201

代理人 程毓英

(51)Int.Cl.

G06T 11/00(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

A61B 5/053(2006.01)

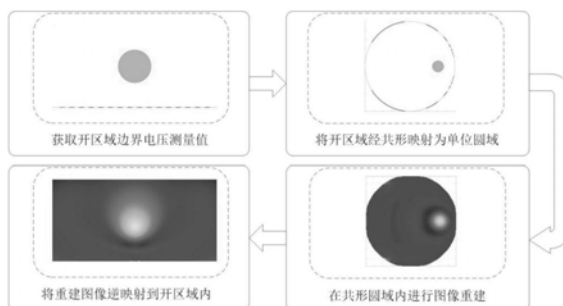
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法,该方法针对边界近似为平面的开区域,该开区域可简化为以水平方向为边界的上半平面,针对开区域内靠近电极的局部区域进行成像,包含以下步骤:构建线电极阵列,获取边界电压测量值;将被测开区域按照保形变换关系映射为封闭的单位圆域;在变换后的单位圆域内构建灵敏度矩阵,进行均匀的网格剖分,采用在开区域下获得的边界电压测量值,进行图像重建;将在单元圆域内的重建结果映射到被测开区域内实现对开区域内内含物的图像重建。



1. 一种基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法,该方法针对边界近似为平面的开区域,该开区域可简化为以水平方向为边界的上半平面,针对开区域内靠近电极的局部区域进行成像,包含以下步骤:

(1) 构建线电极阵列,获取边界电压测量值

构建平面线电极阵列,放置于被测开区域的部分边界上,以整个开区域作为测量区域,对开区域采用相邻电流激励相邻电压循环测量的激励测量模式,获取反映开区域内电导率分布的边界电压测量值;

(2) 将被测开区域按照保形变换关系映射为封闭的单位圆域

根据保形变换理论,将所测开区域映射为封闭的单位圆域,对于边界处的电极也根据映射关系进行变换,变换关系如下:

对于开区域 U 内的点 (x, y) 由下式变换为单位圆域 D 内的点 (u, v) :

$$w = \frac{(1+z)}{(1-z)}i$$

其中 $z = x+yi, w = u+vi$;

(3) 在变换后的单位圆域内构建灵敏度矩阵,进行均匀的网格剖分,采用在开区域下获得的边界电压测量值,进行图像重建;

(4) 将在单元圆域内的重建结果映射到被测开区域内实现对开区域内内含物的图像重建。

基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法

技术领域

[0001] 本发明属于电阻抗层析成像技术领域,涉及一种基于保形变换的开放区域电阻抗层析成像图像重建方法。

背景技术

[0002] 电阻抗层析成像(Electrical Impedance Tomography,简称EIT)是一种具有非侵入或非扰动特点的过程可视化在线监测技术。它通过安置在待测敏感场的阵列式传感器,向目标物场施加电学激励信号,并能够获得反映敏感场内电导率分布信息的电学响应信号,进而实现场内介质分布的二维/三维可视化。该技术具有便携、低成本和高时间分辨率等优点,在工业和生物医学方面具有广阔的应用价值。

[0003] 在很多应用情况中,观测区域并不具备完全闭合的边界,由此衍生出了开放式EIT技术。作为EIT技术的一个研究分支,开放式EIT通常采用固定的电极阵列并以边界不封闭的开放区域作为观测域进行测量。开放式EIT最早被应用于表层地球物理领域用于表层地质勘探,之后开放式EIT也被用于结构损伤检测等领域。近年来,开放式EIT在临床医学方面的研究受到了众多研究学者的关注。2001年,J.L.Mueller等人发表于《Physiological Measurement(生理学测量)》第22卷,第97-106页,题为《Reconstruction of conductivity changes due to ventilation and perfusion from EIT data collected on a rectangular electrode array(基于矩形电极阵列的通风和灌注过程的EIT电导率重建)》,开发了一种开放式EIT传感器,在人体胸部放置4x4平面电极阵列,用于检测通风和灌注过程中的电导率变化。2010年,A.Borsic等人发表于《Physiological Measurement(生理学测量)》第31卷,第S1-16页,题为《Electrical impedance tomography reconstruction for three-dimensional imaging of the prostate(对前列腺的EIT三维图像重建)》,将电极阵列连接到圆柱形探头的前表面,用于前列腺疾病的直肠电阻抗断层扫描。2014年,K.Y.Aristovich等人发表于《Physiological Measurement(生理学测量)》第35卷,第1095-1109页,题为《A method for reconstructing tomographic images of evoked neural activity with electrical impedance tomography using intracranial planar arrays(一种利用颅内平面阵列进行电阻抗层析重建诱发神经活动的EIT成像方法)》,采用30个电极的平面电极阵列重建大鼠大脑皮层快速神经诱发活动图像,提出了一种基于噪声t-test的图像处理技术,以提高重建的深度定位精度。

[0004] 与传统的封闭式EIT中电极环绕整个封闭的观测域不同,开放式EIT中的电极只能覆盖观测域的部分边界,这为图像重建问题的解决带来了额外的挑战。由于电流密度随着距离电极表面的距离增加而快速衰减,所以开放式EIT在深度方向的空间分辨率较低且图像重建质量相对较差。为了改善开放式EIT的这一缺陷,国内外研究人员从多方面对开放式EIT进行了研究改进。2006年,T.J.Kao等人发表于《Physiological Measurement(生理学测量)》第27卷,第S1-11页,题为《A 3D reconstruction algorithm for EIT using a handheld probe for breast cancer detection(一种利用手持探针进行乳腺癌检测的

EIT三维重建算法)》，采用了探针式电极阵列对开区域进行数据采集，同时提出了一种Tikhonov和NOSER正则化的组合算法，以及加权的网格剖分方法，以扩展开放式EIT在电极下方的成像深度。该算法可以在较远的距离内重建电极阵列下的物体，但探测深度仍然受到电流穿透的限制。2013年，J.Liu等人发表于《Physiological Measurement (生理学测量)》第34卷，第823-838页，题为《A novel combined regularization algorithm of total variation and Tikhonov regularization for open electrical impedance tomography (一种基于TV和Tikhonov正则化相结合的开放式EIT成像算法)》结合TV和Tikhonov正则化方法，提出了一种新的开放式EIT正则化算法。仿真结果表明，该算法能够锐化重建对象的边缘，对数据噪声具有较强的鲁棒性。2014年，X.Zhang等人发表于《IEEE Transactions On Medical Imaging (IEEE医疗影像处理)》第33卷，第2223-2241页，题为《An image reconstruction algorithm for 3-d electrical impedance mammography (一种用于三维乳房EIT成像的图像重建算法)》提出了一种基于双网格方法的增强图像重建算法，提高了开放式EIT的重建精度和垂直电极方向的分辨率。2015年，J.Liu等人发表于《Medical&Biological Engineering&Computing (医疗、生物工程与计算)》第53卷，第589-597页，题为《Evaluation of measurement and stimulation patterns in open electrical impedance tomography with scanning electrode (用扫描电极对开放式电阻抗层析成像测量和刺激模式的评价)》，采用了线性电极阵列对被测区域进行扫描式数据采集，并提出了一种新的激励测量模式，以提高开放式EIT成像质量。

[0005] 然而由于被测区域的开放性，不完备的边界条件加剧了开放式EIT图像重建问题病态性，导致了求解难度加大，求解精度降低，因此深度方向的空间分辨率较低仍然是开放式EIT的主要问题之一。而以往的许多研究都是基于简化的矩形模型进行成像，忽略了建模区域外的电场分布。同时，开放式EIT现阶段常用的成像方法是在开放的被测区域中构建虚拟边界，并假定在虚拟边界上电流密度为零，将被测区域转变为由真实边界和虚拟边界共同构成的封闭区域，然后进行直接的图像重建。这种直接成像方法依赖于虚拟边界的选取。由于虚拟边界的假设边界条件是真实情况的近似，因此虚拟边界的选择会不可避免的产生截断误差，从而降低图像重建质量和精度。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提出一种基于保形变换的开放式EIT图像重建方法，基于保形变换理论，将开区域映射为封闭的单位圆域，两区域具有相同的物理特性，可在圆域内进行图像重建之后映射到原开区域内。通过这种方式无需构建虚拟边界，同时可以有效减小近似误差与截断误差，从而提高开放式电阻抗层析成像的图像重建质量。技术方案如下：

[0007] 一种基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法，该方法针对边界近似为平面的开区域，该开区域可简化为以水平方向为边界的上半平面，针对开区域内靠近电极的局部区域进行成像，包含以下步骤：

[0008] (1) 构建线电极阵列，获取边界电压测量值

[0009] 构建平面线电极阵列，放置于被测开区域的部分边界上，以整个开区域作为测量区域，对开区域采用相邻电流激励相邻电压循环测量的激励测量模式，获取反映开区域内电导率分布的边界电压测量值；

[0010] (2) 将被测开区域按照保形变换关系映射为封闭的单位圆域

[0011] 根据保形变换理论,将所测开区域映射为封闭的单位圆域,对于边界处的电极也根据映射关系进行变换,变换关系如下:

[0012] 对于开区域U内的点(x,y)由下式变换为单位圆域D内的点(u,v):

$$[0013] \quad w = \frac{(1+z)}{(1-z)}i$$

[0014] 其中 $z=x+yi$, $w=u+vi$;

[0015] (3) 在变换后的单位圆域内构建灵敏度矩阵,进行均匀的网格剖分,采用在开区域下获得的边界电压测量值,进行图像重建;

[0016] (4) 将在单元圆域内的重建结果映射到被测开区域内实现对开区域内内含物的图像重建。

[0017] 本发明的有益效果是

[0018] (1) 与传统的开放式电阻抗层析成像方法相比,本发明提出了基于保形变换思想的图像重建方法,无需构建虚拟边界,减少了截断误差的引入。

[0019] (2) 本发明采用映射后的区域构建灵敏度矩阵进行图像重建,解决了传统开区域图像重建方法边界约束不完备,加重逆问题求解病态性的缺点,有效减小了截断误差,从而提高了图像重建的精度。

[0020] (3) 本发明采用非均匀的逆问题网格进行图像重建,有利于提高近电极区域的图像重建质量。

[0021] (4) 本发明改善了传统开区域成像成像深度较浅的局限,扩展了可以取得较好成像质量的成像区域范围。

附图说明

[0022] 以下附图描述了本发明所选择的实施例,均为示例性附图而非穷举或限制性,其中:

[0023] 图1为本发明所提方法的图像重建流程;

[0024] 图2为开放式EIT的测试模型;

[0025] 图3为将开区域映射为封闭单位圆域的保形变换的映射结果;

[0026] 图4为基于本发明方法的仿真重建结果与传统方法重建结果的对比图;

[0027] 图5为基于本发明方法与传统方法在不同重建算法下仿真重建结果的对比图;

[0028] 图6为基于本发明方法的实验重建结果与传统方法重建结果的对比图;

[0029] 图7为基于本发明方法与传统方法在不同重建算法下实验重建结果的对比图。

具体实施方式

[0030] 下面结合附图及实施例对本发明的基于保形变换的开区域EIT成像方法加以说明,旨在作为本发明的实施例描述,并非是可被制造或利用的唯一形式,对其他可实现相同功能的实施例也应包括在本发明的范围内。

[0031] 本发明基于开区域EIT成像系统主要由三部分构成:(1)获取被测物场信息的离散空间敏感阵列。它在电流激励下,通过物场内部介质分布或者结构的变化对敏感场产生的

调制作用,输出相应的电压信号。(2)数据采集与处理单元。它的任务是快速实时地采集空间敏感阵列输出的反映被测物场介质分布状态的测量数据,完成相应的解调、滤波处理,以获得直接反映物场变化的信息。(3)图像重建单元。它的任务是运用图像重建方法,根据处理后的数据,获得被测物场的二维图像。基于保形变换的开区域EIT成像方法的图像重建流程如图1所示,该方法针对边界可近似为平面的开区域,以整个开区域作为测量区域,并对开区域内靠近电极的局部区域进行成像,大概可以分为以下几个步骤:

[0032] (1) 构建线电极阵列,获取边界电压测量值。

[0033] 开放式EIT的测试模型如图2所示,该测试模型特点为测试区域边界开放,且边界可近似为平面,该模型可模拟地球表层,大面积金属或建筑物表层等区域边界可近似为平面的情况。本具体实施例中针对图2所示的开区域进行描述,该区域可简化为以水平方向(x轴)为边界的上半平面。本发明方式适用于所有排布的平面线电极阵列,在本具体实施例中采用16个相同大小的电极均匀排列组成平面线电极阵列,并放置在被测开区域的部分边界上。系统采用电流激励电压测量且激励电极不测量的模式,采集循环激励循环测量下各个电极上的边界电压构成边界测量值向量。对于图1所示模型,其场内电势分布函数 $\varphi(x, y)$ 与电导率分布函数 $\sigma(x, y)$ 满足拉普拉斯方程:

$$[0034] \quad \nabla \cdot [\sigma(x, y) \nabla \varphi(x, y)] = 0, \quad \{(x, y) | x \in (-\infty, +\infty), y \in (0, +\infty)\}$$

[0035] 其边界条件采用全电极模型满足以下条件:

$$[0036] \quad \sigma(x, y) \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad x \in \Gamma \setminus \bigcup_{l=1}^L E_l$$

$$[0037] \quad \varphi(x, y) + \rho_l \sigma(x, y) \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = U_l, \quad x \in E_l, l = 1, 2, \dots, L$$

$$[0038] \quad \int_{E_l} \sigma(x, y) \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} ds = I_l, \quad l = 1, 2, \dots, L$$

$$[0039] \quad \sum_{l=1}^L I_l = 0$$

$$[0040] \quad \sum_{l=1}^L U_l = 0$$

[0041] 其中, $\Gamma \in (-\infty, +\infty)$ 是开区域的真实边界; E_l 是被电极1覆盖的边界; ρ_l 是电极1与内部介质之间的接触阻抗; U_l 是电极1上的电压; I_l 是从电极1注入场域 Ω 的电流。

[0042] (2) 将被测开区域按照保形变换关系映射为封闭的单位圆域。

[0043] 针对开区域成像问题,传统直接成像方法采用构建虚拟边界的方法将上述边界条件构建为完备的边界条件,降低了求解难度,但是会引入模型误差与截断误差。本发明基于保形变换的思想,将所测开区域映射为封闭的单位圆域,在封闭圆域内进行逆问题求解,可以有效改善传统方法的缺点。变换关系如下:

[0044] 对于开区域U内的点(x, y)可由下式变换为单位圆域D内的点(u, v):

$$[0045] \quad w = \frac{(1+z)}{(1-z)} i$$

[0046] 其中 $z = x + yi$, $w = u + vi$ 。映射过程如图3所示。

[0047] (3) 在变换后的圆域内构建灵敏度矩阵,进行均匀的网格剖分,采用以上测量值进行图像重建。

[0048] 在变换后的圆域内采用有限元方法构建均匀的剖分网格。之后构建灵敏度矩阵J,根据保形变换理论,经过保形变换的两区域具有相同的物理性质,因此可以采用在开区域下获得的测量电压U,在变换后的圆域内进行图像重建。

[0049] (4) 将圆域内的均匀网格按照映射关系映射到开区域内。

[0050] 按照上述映射关系,单位圆域D内的点(u, v)可由下式变换为开区域U内的点(x, y):

$$[0051] \quad z = \frac{w-i}{w+i}$$

[0052] 因此,圆域内的均匀网格可点对点的映射到开区域内用于图像重建。

[0053] (5) 将在圆域内的重建结果映射到被测开区域内实现对开区域内内含物的图像重建。

[0054] 将圆域内的重建结果按照网格的映射关系,一一对应到被测的开区域内,由此实现对所测开区域内内含物的高精度及高质量的图像重建。

[0055] 对上述实施方案进行仿真和实验测试。图4为基于本发明方法的仿真重建结果与传统方法重建结果的对比图,重建算法采用Tikhonov正则化算法,结果对比了对于不同位置内含物的对比重建结果,可以看出本发明所提方法对内含物的形状和位置有更好的重建精度,同时当内含物位置位于成像区域边界附近时,传统方法的重建结果会有较大的形变以及位置误差,而本发明所提方法仍能得到较好的重建结果。图5为基于本发明方法与传统方法在不同重建算法下的重建结果的对比图,结果对比了Tikhonov正则化算法,基于L1范数的正则化算法,TV正则化算法在结合本发明所提方法以及传统直接成像方法下基于无噪声和30dB SNR噪声下的仿真数据的成像结果。可以看出,本发明所提方法在不同算法下均有较传统成像方法更好的成像结果,其中,在仿真条件下本发明所提方法结合TV正则化算法有最好的重建结果。图6为基于本发明方法的实验重建结果与传统方法重建结果的对比图,可以看出,对于不同位置内含物,相较于传统直接成像方法,本发明所提方法对内含物有更好的重建结果,同时本发明所提方法在成像深度方面也有较好的表现。图7为基于本发明方法与传统方法在不同重建算法下实验重建结果的对比图,可以看出在不同重建算法下,本发明所提方法相较于传统重建方法都有较好的图像重建质量。

[0056] 以上示意性的对本发明及其实施方式进行了描述,该描述没有限制性,附图所示的也只是本发明的实施方案之一,如有本领域的普通技术人员在不脱离本发明创造宗旨的情况下,不经创造性的设计出与本发明相类似的结构形式或实施例,均应属于本发明的保护范围。

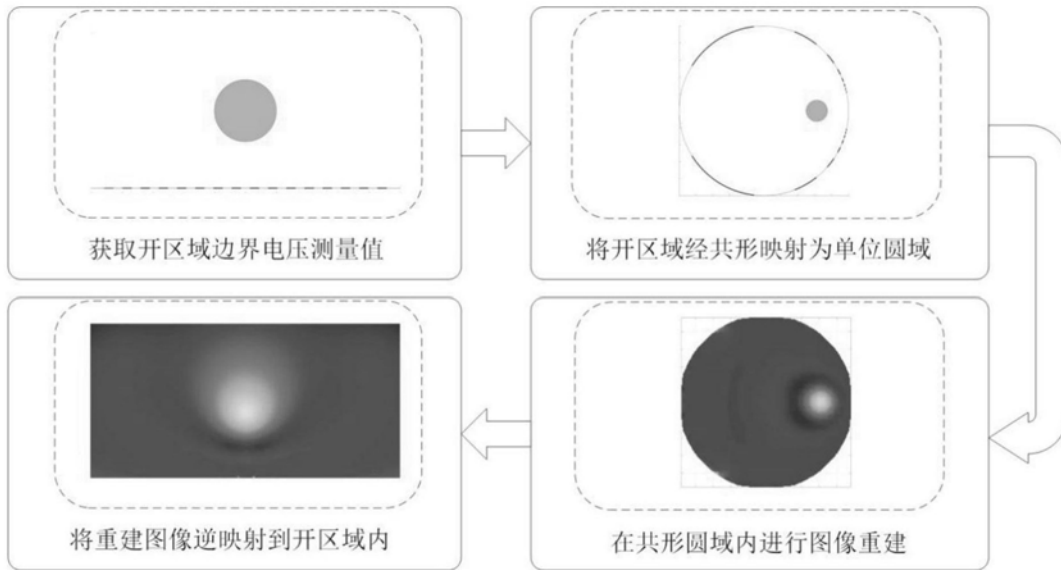


图1

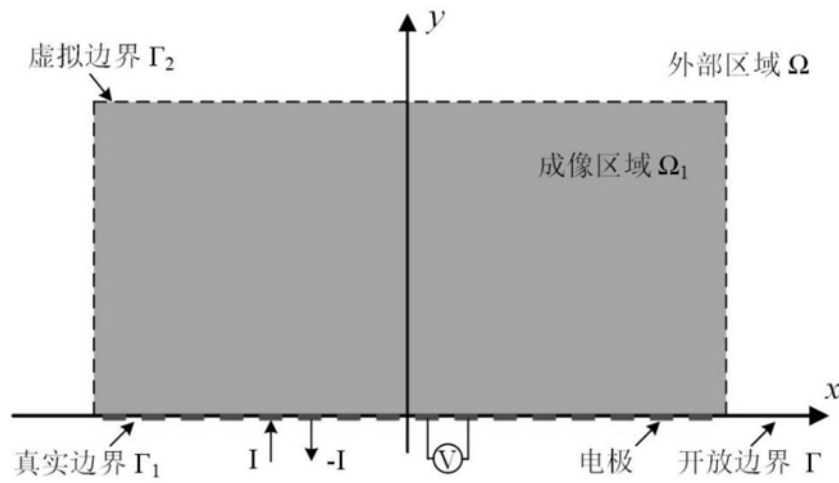


图2

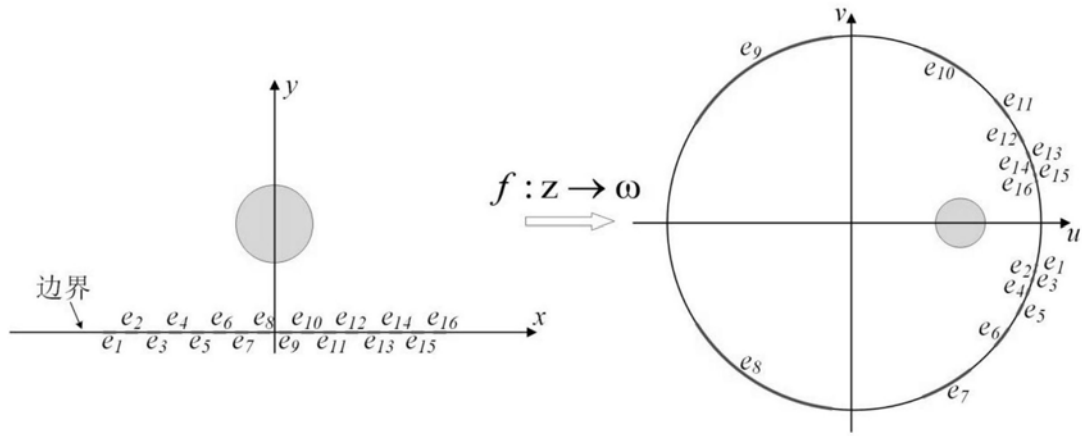


图3

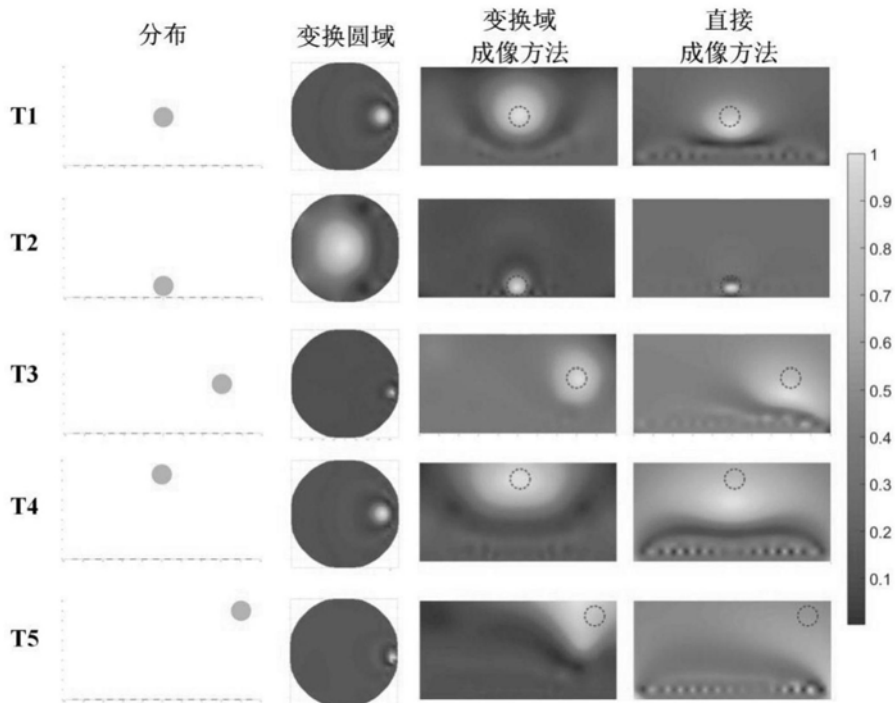


图4

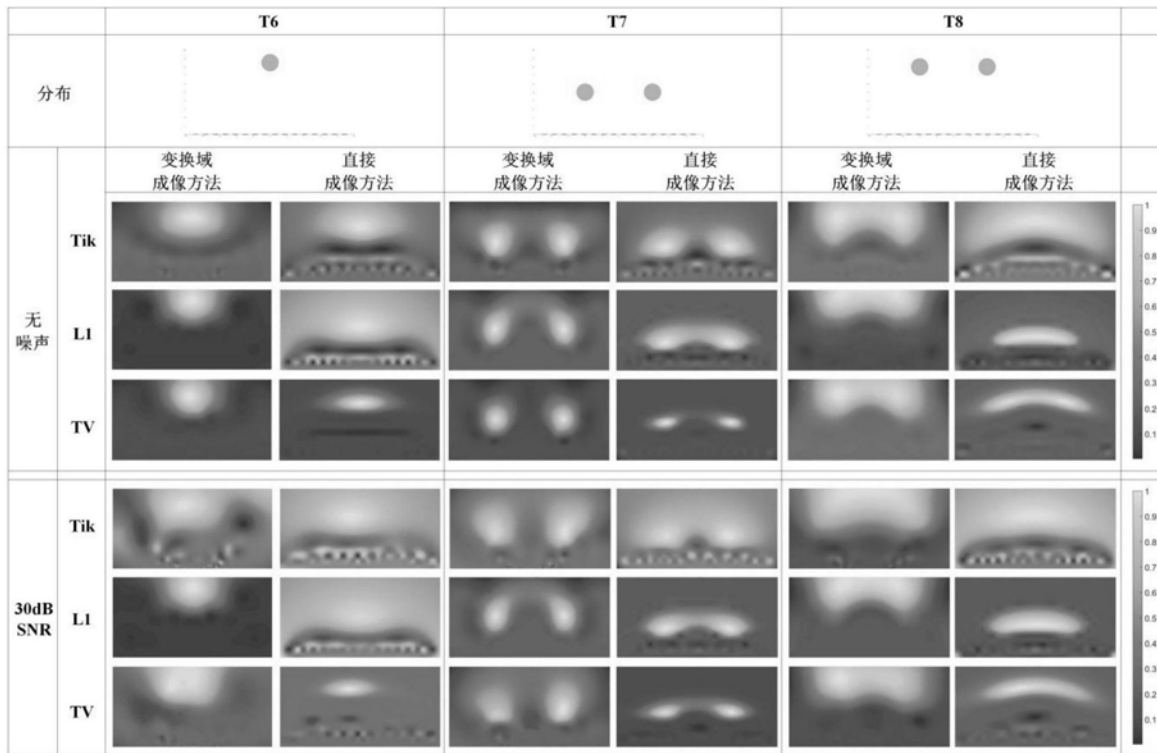


图5

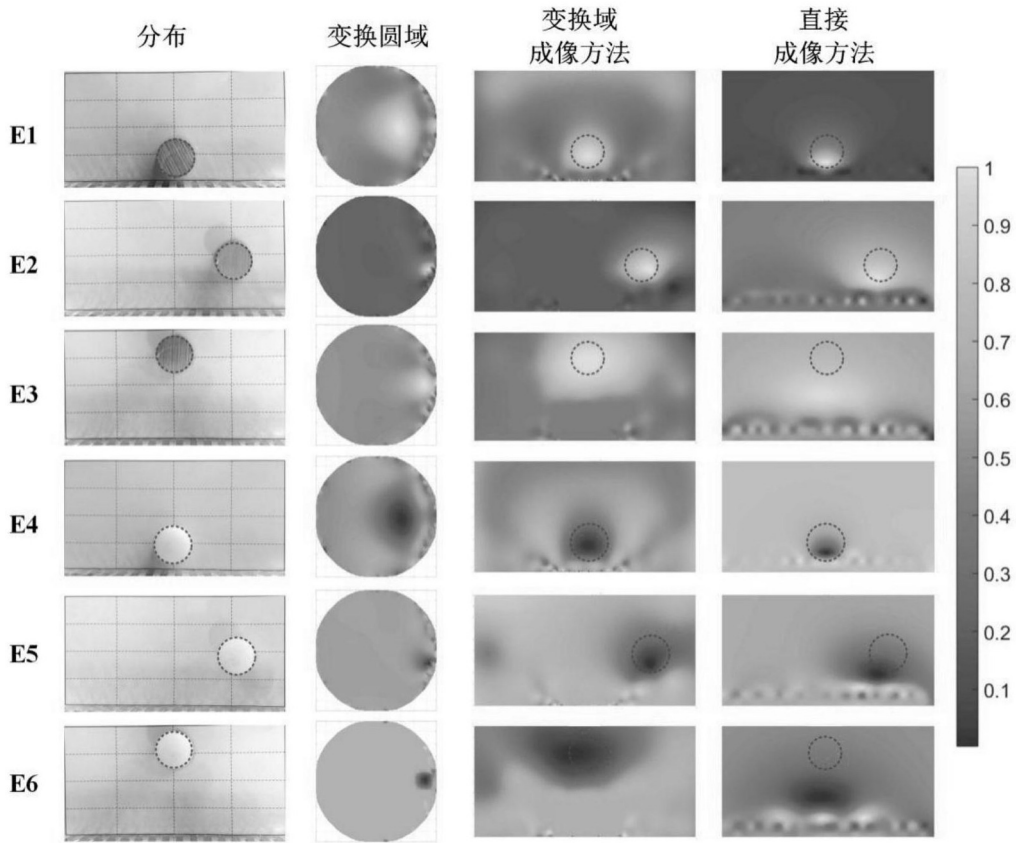


图6

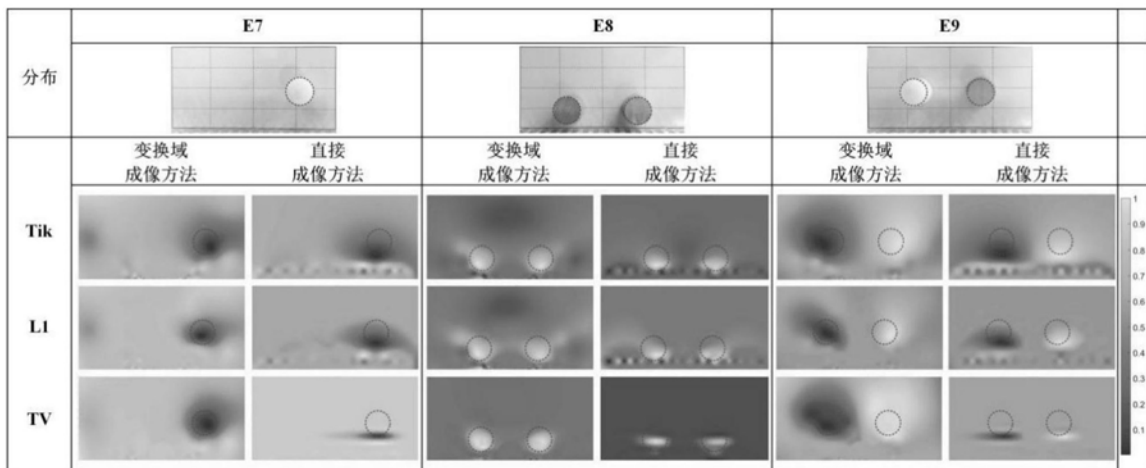


图7

专利名称(译)	基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法		
公开(公告)号	CN109493395A	公开(公告)日	2019-03-19
申请号	CN201811286530.1	申请日	2018-10-31
[标]申请(专利权)人(译)	天津大学		
申请(专利权)人(译)	天津大学		
当前申请(专利权)人(译)	天津大学		
[标]发明人	任尚杰 王语 董峰		
发明人	任尚杰 王语 董峰		
IPC分类号	G06T11/00 A61B5/00 A61B5/053		
CPC分类号	G06T11/00 A61B5/0536 A61B5/72		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明涉及一种基于保形变换的开放式电阻抗层析成像图像重建方法，该方法针对边界近似为平面的开区域，该开区域可简化为以水平方向为边界的上半平面，针对开区域内靠近电极的局部区域进行成像，包含以下步骤：构建线电极阵列，获取边界电压测量值；将被测开区域按照保形变换关系映射为封闭的单位圆域；在变换后的单位圆域内构建灵敏度矩阵，进行均匀的网格剖分，采用在开区域下获得的边界电压测量值，进行图像重建；将在单元圆域内的重建结果映射到被测开区域内实现对开区域内内含物的图像重建。

