



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110208605 B

(45) 授权公告日 2021.06.04

(21) 申请号 201910480147.8

CN 104574462 A, 2015.04.29

(22) 申请日 2019.06.04

CN 107833188 A, 2018.03.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 1344929 A, 2002.04.17

申请公布号 CN 110208605 A

CN 109035352 A, 2018.12.18

(43) 申请公布日 2019.09.06

WO 2014/191715 A9, 2016.01.21

WO 2014/141630 A1, 2014.09.18

(73) 专利权人 河南师范大学

WO 2018/108848 A1, 2018.06.21

地址 453007 河南省新乡市牧野区建设东路46号

李鹏等.《迭代正则化电容层析成像图像重建算法》.《南方能源建设》.2017,

江鹏等.《采用二阶导数阵作为正则化的电容成像图像重建算法》.《化工学报》.2008,

(72) 发明人 施艳艳 张旭 王萌

YanbinXu等.《An adaptive Tikhonov regularization parameter choice method for electrical resistance tomography》.《Flow Measurement and Instrumentation》.2016,

(74) 专利代理机构 新乡市平原智汇知识产权代理事务所(普通合伙) 41139

Benyuan Sun等.《An Improved Tikhonov Regularization Method for Lung Cancer Monitoring Using Electrical Impedance Tomography》.《IEEE》.2019,

代理人 路宽

审查员 薛冰

(51) Int. Cl.

G01R 27/02 (2006.01)

G01N 27/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104634829 A, 2015.05.20

CN 104535294 A, 2015.04.22

CN 1344929 A, 2002.04.17

权利要求书2页 说明书6页 附图4页

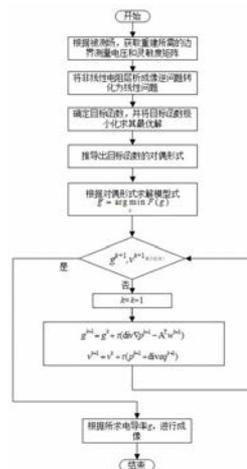
(54) 发明名称

一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法

图像的锐利边缘,在很大程度上提高重建图像的质量。

(57) 摘要

本发明公开了一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,用于非连续介质的电阻层析成像,该方法将电阻层析成像的不稳定逆问题看作线性问题进行求解,并确定目标函数;重建方法为:根据被测场域,获取重建所需的边界测量电压和灵敏度矩阵;将非线性电阻层析成像逆问题转化为线性问题求解;确定目标函数,并将目标函数极小化求其最优解;推出目标函数的对偶形式;利用原始-对偶算法更新解;判断是否终止收敛;根据最终求解所得灰度值,进行成像。本发明提出的新方法在对被测模型的重建中有效地抑制了重建图像的阶梯效应,保留了



CN 110208605 B

1. 一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,其特征在于具体步骤为:

步骤一:求解被测模型的相对边界测量电压和灵敏度矩阵,边界测量电压是指电阻层析成像系统在检测物体时收集到的测量数据,检测系统是一个16电极系统,并采用相邻电极对的电流激励和电压检测的模式,在循环激励下采集检测到的数据,共获得208组边界测量电压的值,相对边界测量电压 b 为不含内含物的空场边界测量电压 b_1 与含有内含物的有物场边界测量电压 b_2 之差,即: $b=b_1-b_2$;

灵敏度矩阵 A 可根据空场边界测量电压和灵敏度理论共同计算得出,其计算公式为:

$A_{ij} = -\int \frac{\nabla \phi_i}{I_i} \cdot \frac{\nabla \phi_j}{I_j} dx dy$, 式中 A_{ij} 是第 j 个电极对对第 i 个电极对的灵敏度系数, ϕ_i 是第 i 个电极对在激励电流为 I_i 时场域的电势分布, ϕ_j 是第 j 个电极对在激励电流为 I_j 时场域的电势分布, $\nabla \phi_i$, $\nabla \phi_j$ 分别表示 ϕ_i 和 ϕ_j 的梯度算子;

步骤二:将非线性电阻层析成像的逆问题转化为线性问题,边界测量电压与电导率分布的关系是非线性的 $f(\sigma) = b$,式中 σ 是电导率,对于变化不大的电导分布, $f(\sigma) = b$ 可将边界测量电压的变化简化为线性形式 $\Delta b = \frac{df(\sigma)}{d\sigma} \cdot \Delta \sigma$,式中 $\Delta \sigma$ 是电导率分布的扰动, Δb 是电导率的变化引起的边界测量电压的变化,最后导出电阻层析成像逆问题的线性化形式 $Ag = b$,式中 g 为所求成像的灰度值;

步骤三:设计目标函数为: $F(g) = \frac{\lambda}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \alpha_1 \|\nabla g - v\| + \alpha_0 \|\varepsilon(v)\|$,其中 $\alpha_1 \|\nabla g - v\|$ 为一阶导数项, $\alpha_0 \|\varepsilon(v)\|$ 为二阶导数项, α_1 和 α_0 为权重因子用于调节一阶导数项和二阶导数项之间的权重, λ 为正则化参数用于调节最小二乘项 $\frac{1}{2} \|Ag - b\|_2^2$ 的权重,将正则化参数放置在最小二乘项之前有利于减小正则化参数选择的范围,加快求解的速度,在电阻层析成像图像重建中,通过将目标函数极小化来求解最优灰度值,其模型式表示为: $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$;

步骤四:推导出模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$ 的对偶形式为: $\min_{g,v} \max_{p \in P, q \in Q} \langle \nabla g - v, p \rangle + \langle \varepsilon(v), q \rangle + \frac{\lambda}{2} \|Ag - b\|_2^2$,其中 $P = \{p = (p_1, p_2) \mid \|p\|_\infty \leq \alpha_1\}$, $Q = \{q = (q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}) \mid \|q\|_\infty \leq \alpha_0\}$;

步骤五:根据对偶形式求解模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$ 的算法如下:

- 1) 初始化: $w=0, v=0, \bar{v}=0, p=0, \bar{p}=0, q=0, g_0=0, \tau=1/L, \sigma=1/L$;
- 2) $p^{k+1} = \text{proj}_P(p^k + \sigma(\nabla \bar{p}^k - \bar{v}^k))$;
- 3) $q^{k+1} = \text{proj}_Q(q^k + \sigma(\varepsilon(\bar{v}^k)))$;
- 4) $w^{k+1} = \text{prox}^\sigma(w^k + \sigma(A\bar{g}^k - b))$;
- 5) $g^{k+1} = g^k + \tau(\text{div} \nabla p^{k+1} - A^T w^{k+1})$;
- 6) $\bar{v}^{k+1} = \bar{v}^k + \tau(p^{k+1} + \text{div} \varepsilon q^{k+1})$;
- 7) $\bar{g}^{k+1} = 2g^{k+1} - g^k$;
- 8) $\bar{v}^{k+1} = 2v^{k+1} - v^k$;

- 9) 直到满足 g^{k+1} 和 v^{k+1} 收敛为止；
步骤六：根据求解出的灰度值 g ，完成成像。

一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法

技术领域

[0001] 本发明属于电学层析成像技术领域,具体涉及一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法。

背景技术

[0002] 电学层析成像技术(Electrical Tomography,ET)出现于20世纪80年代后期,是一种基于电学特性敏感机理的过程层析成像技术,它通过边界测量值得出被测区域内介质的分布信息,进而对电学特性分布信息进行成像。电学层析成像技术主要包括电阻层析成像(Electrical Resistance Tomography,ERT)、电阻抗层析成像(Electrical Impedance Tomography,EIT)、电容层析成像(Electrical Capacitance Tomography,ECT)和电磁层析成像(Electrical Magnetic Tomography,EMT)。图像重建是一个不适定逆问题,严重阻碍了电学层析成像的应用。针对不适定逆问题,提出了在目标函数中加入正则化项的方法来稳定解,例如Z Q Cui等人2016年发表于《传感器综述》(Sensor Review)第36卷,第429-445页,题名为《电容/电阻层析成像图像重建算法综述》(A review on image reconstruction algorithms for electrical capacitance/resistance tomography)。

[0003] 在正则化方法中,Tikhonov是常用的,因为它可以使的解稳定。例如Y B Xu等人2016年发表于《流测量与仪表》(Flow Measurement and Instrumentation)第50卷,第1-12页,题为《电阻层析成像的自适应Tikhonov正则化参数选择方法》(An adaptive Tikhonov regularization parameter choice method for electrical resistance tomography); M Vauhkonen等人1998年发表于《IEEE医学成像》(IEEE Transactions on Medical Imaging)第17卷,第285-293页,题为《基于电阻抗层析成像的Tikhonov正则化和先验信息选择》(Tikhonov regularization and prior information in electrical impedance tomography)。然而,作为 L_2 范数的正则化方法,的边缘过度光滑,导致图像清晰度低。

[0004] 为了解决Tikhonov正则化重建图像时的问题,提出了以 L_1 范数为正则化项的全变分正则化。例如B Chen等人2018年发表于《传感器》(Sensors)第18卷,题为《用时空全变分正则化算法实现运动物体可视化的电阻层析成像》(Electrical resistance tomography for visualization of moving objects using aspatiotemporal total variation regularization algorithm); M Hinze等人2018年发表于《数值数学》(NumerischeMathematik)第138卷,第723-765页,题为《全变分正则化电阻抗层析成像中电导率的识别》(Identifying conductivity in electrical impedance tomography with total variation regularization)。它避免了边缘的过度光滑,并保留了重建图像的锐利边缘。然而,全变分正则化方法产生了严重的阶梯效应。

[0005] 针对全变分正则化方法在重建图像时产生的阶梯效应的问题,本发明提出了一种将一阶导数项和二阶导数项共同作为目标函数的正则化项的方法,既能够有效抑制阶梯效应,又能够较好对重建图像的锐利边缘进行保留。

发明内容

[0006] 本发明解决的技术问题是提供了一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,该方法将一阶导数项和二阶导数项作为目标函数的正则化项,并通过调节权重因子来控制一阶导数项与二阶导数项之间的比重。相比于Tikhonov正则化方法和全变分正则化方法,本发明提出的抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法在提高电阻层析成像重建图像的成像质量方面有明显的效果,该方法实际上是全变分正则化方法的广义化,不仅继承了全变分正则化方法在保留图像锐利边缘方面的特性,还能够有效抑制重建图像的阶梯效应。

[0007] 本发明为解决上述技术问题采用如下技术方案:一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,此重建方法将电阻层析成像的非线性逆问题,线性化和归一化为线性问题 $Ag=b$ 。其中,A为灵敏度矩阵,b为相对边界测量电压,g为电导率分布的灰度值。本发明设计的目标函数为:

$$[0008] \quad F(g) = \frac{\lambda}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \alpha_1 \|\nabla g - v\|_1 + \alpha_0 \|\varepsilon(v)\|_1$$

[0009] λ 为正则化参数,它控制着最小二乘项(又称数据保真项) $\|Ag - b\|_2^2$ 和正则化项(又称惩罚项) $\alpha_1 \|\nabla g - v\|_1 + \alpha_0 \|\varepsilon(v)\|_1$ 之间的权重。 α_1 和 α_0 为权重因子,控制着一阶导数项与二阶导数项之间的权重。

[0010] 在电阻层析成像中,将目标函数以最小二乘极小化方法求其最优解,并将其表示为:

$$[0011] \quad \bar{g} = \arg \min_g F(g)$$

[0012] 为了求解上式的极小化问题,本发明中采用了原始-对偶算法进行求解。该算法能够同时解决原始的优化问题和对偶问题,并且由于原始-对偶算法采取了交替迭代的方式,从而加快了收敛的速度。

[0013] 重建的算法包含以下步骤:

[0014] 1. 根据被测场域,获取重建所需的相对边界测量电压b和灵敏度矩阵A;相对边界测量电压b为不含内含物的空场边界测量电压 b_1 与含有内含物的有物场边界测量电压 b_2 之差。

[0015] 2. 将非线性电阻层析成像逆问题转化为线性问题,推导出其线性化形式 $Ag=b$ 。

[0016] 3. 确定目标函数,并将目标函数极小化求出最优值。

[0017] 4. 推导出求解最优灰度值的模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$ 的对偶形式。

[0018] 5. 根据对偶形式求解模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$, 获得最优的灰度值。

[0019] 6. 根据求解得到的灰度值,进行成像。

[0020] 本发明提出了一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,通过将一阶导数项和二阶导数项相结合作为正则化项,降低了重建图像的阶梯效应,保持了重建图像的锐利边缘。两个导数之间的权重由两个加权因子来调整。此外,本发明还将原始-对偶算法应用于对模型式的求解,对新正则化方法的性能进行了仿真和定量分析。结果表明,所提出的新正则化方法比Tikhonov和全变分正则化方法成像的质量更高,特别是在加噪声

的情况下优势更加明显,它避免了Tikhonov方法中的过度光滑,也减少了全变分方法中的阶梯效应。

附图说明

[0021] 图1为本发明的流程框图;

[0022] 图2为本发明的电阻层析成像系统原理图;

[0023] 图3为选取的六种真实模型用Tikhonov正则化方法、全变分正则化方法和本发明方法重建的结果图;

[0024] 图4为六种真实模型重建图像的相对误差(Relative Error,RE)和相关系数(Correlation Coefficient,CC);

[0025] 图5(a)为不同噪音水平下光滑边缘模型的RE及CC值,(b)为不同噪音水平下锐利边缘模型的RE及CC值。

[0026] 图中:1-激励电流,2-被测物体,3-测量电压,4-被测域,5-电极。

具体实施方式

[0027] 结合附图详细对本发明一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法加以说明。

[0028] 本发明针对全变分正则化方法重建的图像中出现严重的阶梯效应的问题,是在原来全变分正则化方法的正则化项为一阶导数项的基础上增加了二阶导数项,用于抑制阶梯效应。根据不同边缘的重建模型,通过调节权重因子来控制一阶导数项与二阶导数项之间的权重。

[0029] 如图1所示,为本发明一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法流程图。

[0030] 如图2所示,为本发明的电阻层析成像系统原理图,图中展示了单截面被测场域,16电极5均匀的安装在被测物体2的外部表面上,并采用了相邻对电流激励即激励电流1和相邻对电压测量即测量电压3的模式,最后根据实测数据重构被测域4内部电导率的分布情况。

[0031] 如图3所示,本发明选取了六种典型的模型进行电导率分布的重建,图中最左侧的竖列为真实模型,右边三竖列分别为Tikhonov正则化方法、全变差正则化方法和一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法三者重建的电导率分布的图像。此外,为了便于进行比较分析;本发明对两类不同边缘的模型,具有光滑边缘的模型(模型(a)-(c))和具有锐利边缘的模型(模型(d)-(f))进行了研究。结果表明,采用Tikhonov正则化方法重建的图像质量最差,图像边缘出现过度光滑。与Tikhonov正则化方法相比,采用全变分正则化方法重建的图像质量有了很大的提高,边缘得到了更好的保留。然而,在重建的图像中阶梯效应是明显的。与Tikhonov正则化方法和全变分正则化方法相比,本发明提出的新正则化方法可以有效地降低阶梯效应,重建图像的质量最好。

[0032] 电阻层析成像逆问题的求解是一个不适定性问题。一般来说,正则化方法是解决这类问题的有效方法,通过在最小二乘项的基础上增加正则化项,提高解的稳定性。最小二

乘极小化形式的目标函数表示： $\min_g \{F(g)\} = \min_g \left\{ \|Ag - b\|_2^2 \right\}$ 其中 $F(g)$ 为目标函数。理论上，当 $F(g)$ 极小化时，可以找到最优解。正则化方法的一般形式可以描述为： $F(g) = \frac{1}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \lambda R(g)$ 其中， λ 是正则化因子，它控制最小二乘项 $\|Ag - b\|_2^2$ 和正则化项 $R(g)$ 之间的权衡。

[0033] 在正则化方法中，Tikhonov 正则化方法被广泛应用于求解不适定问题。Tikhonov 正则化方法的标准形式可以描述为： $F(g) = \frac{1}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \lambda \|g\|_2^2$ 该算法有良好的稳定性，对连续电导率分布的图像重建效果良好。然而，由于其正则化项为 L_2 范数，因此在图像边缘施加了过度的光滑。因此，重建图像的图像质量较差。

[0034] 为了保留重建图像的锐利边缘，提出了一种全变分正则化方法，表示为： $F(g) = \frac{1}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \lambda \int_{\Omega} |\nabla g| dx$ 该方法基于具有 L_1 范数的正则化项，有利于边缘的保留。然而，该方法仅能对分段常数函数进行重建，所以在重建图像的光滑区域会产生阶梯效应。

[0035] 本发明研究了一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法，具体实施步骤为：

[0036] 步骤一：求解被测模型的相对边界测量电压和灵敏度矩阵。边界测量电压是指电阻层析成像系统在检测物体时收集到的测量数据。本发明的检测系统是一个 16 电极系统，并采用相邻电极对电流激励和电压检测的模式。在循环激励下采集检测到的数据，共获得 208 组边界测量电压的值；相对边界测量电压 b 为不含内含物的空场边界测量电压 b_1 与含有内含物的有物场边界测量电压 b_2 之差，即： $b = b_1 - b_2$ ；

[0037] 灵敏度矩阵 A 可根据空场边界测量电压和灵敏度理论共同计算得出，其计算公式为： $A_{ij} = -\int \frac{\nabla \phi_i}{I_i} \cdot \frac{\nabla \phi_j}{I_j} dx dy$ 式中 A_{ij} 是第 j 个电极对对第 i 个电极对的灵敏度系数， ϕ_i 是第 i 个电极对在激励电流为 I_i 时场域的电势分布， ϕ_j 是第 j 个电极对在激励电流为 I_j 时场域的电势分布， $\nabla \phi_i$ ， $\nabla \phi_j$ 分别表示 ϕ_i 和 ϕ_j 的梯度算子。

[0038] 步骤二：将非线性电阻层析成像的逆问题转化为线性问题；相对边界测量电压与电导率分布的关系是非线性的 $f(\sigma) = b$ ，式中 σ 是电导率。对于变化不大的电导分布， $f(\sigma) = b$ 可将边界测量电压的变化简化为线性形式 $\Delta b = \frac{df(\sigma)}{d\sigma} \cdot \Delta \sigma$ ，式中 $\Delta \sigma$ 是电导率分布的扰动， Δb 是电导率的变化引起的边界测量电压的变化。最后导出电阻层析成像逆问题的线性化形式 $Ag = b$ ，式中 g 为所求成像的灰度值。

[0039] 步骤三：设计目标函数为： $F(g) = \frac{\lambda}{2} \|Ag - b\|_2^2 + \alpha_1 \|\nabla g - v\|_1 + \alpha_0 \|\varepsilon(v)\|_1$ 其中 $\alpha_1 \|\nabla g - v\|_1$ 为一阶导数项， $\alpha_0 \|\varepsilon(v)\|_1$ 为二阶导数项， α_1 和 α_0 为权重因子用于调节一阶导数项和二阶导数项之间的权重。 λ 为正则化参数用于调节最小二乘项 $\frac{1}{2} \|Ag - b\|_2^2$ 的权重，将正则化参数放置在最小二乘项之前有利于减小正则化参数选择的范围，加快求解的速度。在电阻层析成像图像重建中，通过将目标函数极小化来求解最优灰度值，其模型式表示为：

$$\bar{g} = \arg \min_g F(g)。$$

[0040] 步骤四:推导出模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$ 的对偶形式为: $\min_{g,v} \max_{p \in P, q \in Q} \langle \nabla g - v, p \rangle + \langle \varepsilon(v), q \rangle + \frac{\lambda}{2} \|Ag - b\|_2^2$

其中 $P = \{p = (p_1, p_2) \mid \|p\|_\infty \leq \alpha_1\}$, $Q = \{q = (q_{21}, q_{22}) \mid \|q\|_\infty \leq \alpha_0\}$ 。

[0041] 步骤五:根据对偶形式求解模型式 $\bar{g} = \arg \min_g F(g)$ 的算法如下:

[0042] 1) 初始化: $w=0, v=0, \bar{v}=0, p=0, \bar{p}=0, q=0, g_0=0, \tau=1/L, \sigma=1/L$;

[0043] 2) $p^{k+1} = \text{proj}_P(p^k + \sigma(\nabla \bar{p}^k - \bar{v}^k))$;

[0044] 3) $q^{k+1} = \text{proj}_Q(q^k + \sigma(\varepsilon(\bar{v}^k)))$;

[0045] 4) $w^{k+1} = \text{prox}^\sigma(w^k + \sigma(A\bar{g}^k - b))$;

[0046] 5) $g^{k+1} = g^k + \tau(\text{div} \nabla p^{k+1} - A^T w^{k+1})$;

[0047] 6) $v^{k+1} = v^k + \tau(p^{k+1} + \text{div} \varepsilon q^{k+1})$;

[0048] 7) $\bar{g}^{k+1} = 2g^{k+1} - g^k$;

[0049] 8) $\bar{v}^{k+1} = 2v^{k+1} - v^k$;

[0050] 9) 直到满足 g^{k+1} 和 v^{k+1} 收敛为止;

[0051] 步骤六:根据求解出的灰度值,完成成像。

[0052] 图3为本发明的实例,选取六种典型的模型分别由Tikhonov正则化方法、全变分正则化方法和本发明方法重建的图像结果图。从图中可以看出,用Tikhonov正则化方法重建的图像边缘过于光滑,且成像质量低;相比于Tikhonov正则化方法,由全变分正则化方法重建的图像边界更加清晰,但阶梯效应比较明显;相比于前面两种正则化算法,本发明所提出一种抑制阶梯效应的电阻层析成像电导率分布重建的方法,不仅能很好的保留了重建图像的边缘,而且有效的抑制了阶梯效应。为了更加准确的评价成像的质量,在电学层析成像中通常采用图像的相对误差RE和相关系数CC两个指标来定量评价图像重建质量,表达式如(1)、(2)所示,图像的RE越小,CC越大,表明图像重建质量越好。六种不同有限元模型的图像的RE和CC如图5所示:

$$[0053] \quad RE = \frac{\|\sigma - \sigma^*\|_2^2}{\|\sigma^*\|_2^2} \quad (1)$$

$$[0054] \quad CC = \frac{\sum_{i=1}^t (\sigma_i - \bar{\sigma})(\sigma_i^* - \bar{\sigma}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^t (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 \sum_{i=1}^t (\sigma_i^* - \bar{\sigma}^*)^2}} \quad (2)$$

[0055] 其中, σ 是重建区域的计算电导率, σ^* 是实际电导率, t 表示像素数, $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\sigma}^*$ 表示 σ 和 σ^* 的平均值, σ_i 和 σ_i^* 表示的是 σ 和 σ^* 的第 i 个三角形单元。

[0056] 图4中展示出了用三种正则化方法获得的重建图像的RE和CC值。与Tikhonov正则化和全变分正则化相比,当使用新方法时,具有光滑边缘的模型(模型(a)-(c))的重建图像的RE值最小,CC值最大,这表明了图像重建的质量高。然而,用新方法重建的锐利边缘的模

型(模型(d)-(f))的图像的RE和CC值与全变分基本相同。原因如下,对于光滑边缘的模型(模型(a)-(c)),只需考虑阶梯效应,从而有较高的图像质量。对于锐利边缘的模型(模型(d)-(f)),既需要考虑阶梯效应的抑制,也需要考虑保留锐利的边缘。因此,新方法的边缘保持性能可能比全变分正则化略差,但总体成像质量仍然较高。

[0057] 为了测试新方法在不同噪声水平下的性能,在0%、2.5%、5%、7.5%和10%的噪声水平下,研究了光滑边缘模型(a)和锐边模型(e)。图5中示出了用三种正则化方法获得的相关RE和CC值。可以看出,随着噪声水平的增加,RE值增加,CC值减小。与Tikhonov正则化和全变分正则化方法相比,用新方法重建的光滑边缘的模型(a)具有图5(a)中所示的最小RE值和最大CC值。然而,与全变分正则化方法相比,本发明的新方法重建的锐利边缘的模型(e)具有相对稍大的RE和稍小的CC值,如图5(b)所示。实验结果验证了本发明提出的新方法在电阻层析成像图像重建中的有效性。

[0058] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

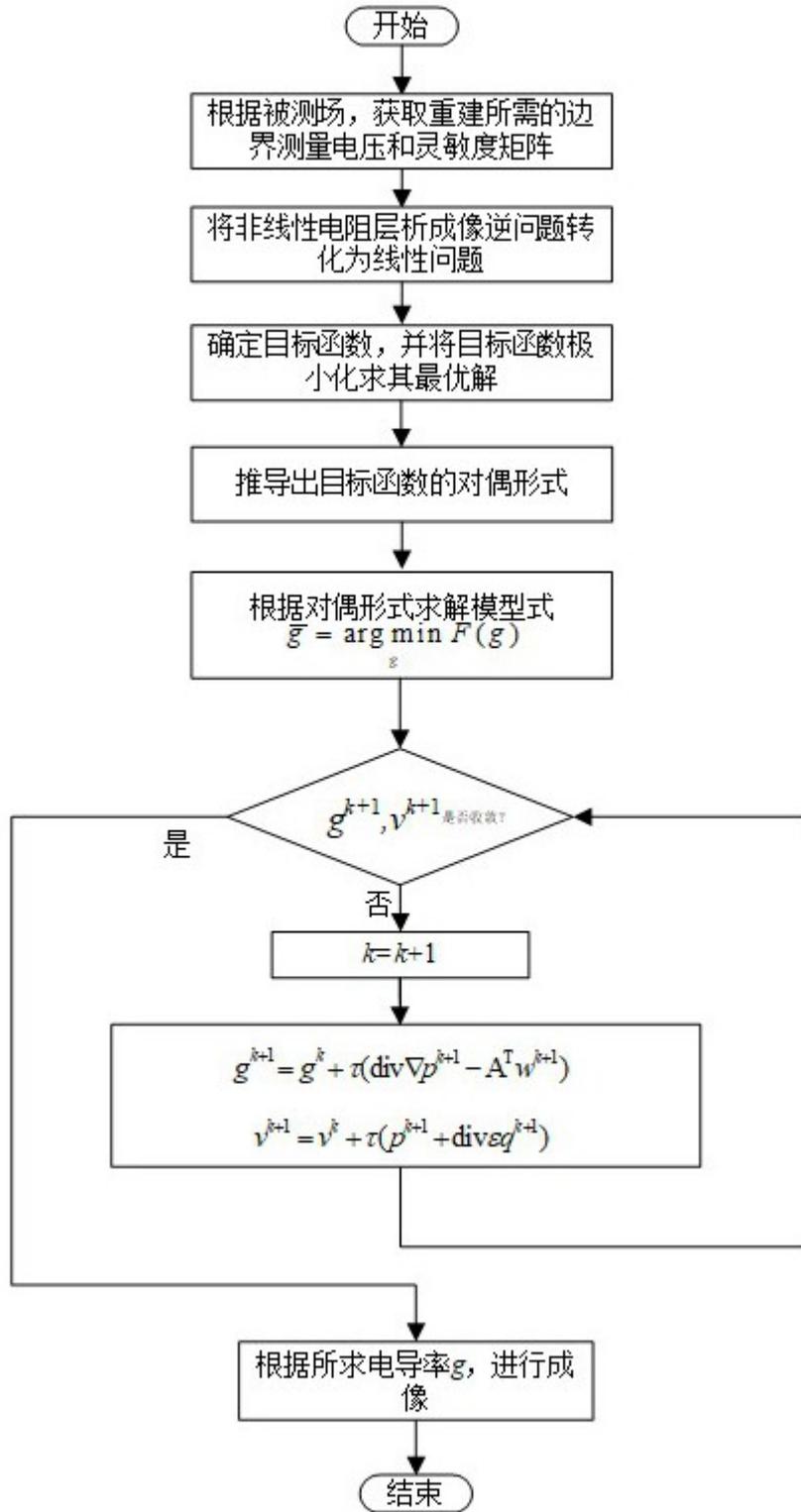


图1

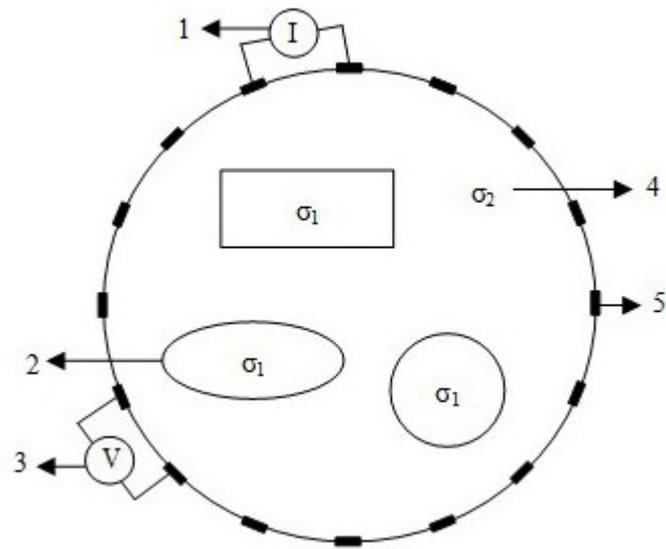


图2

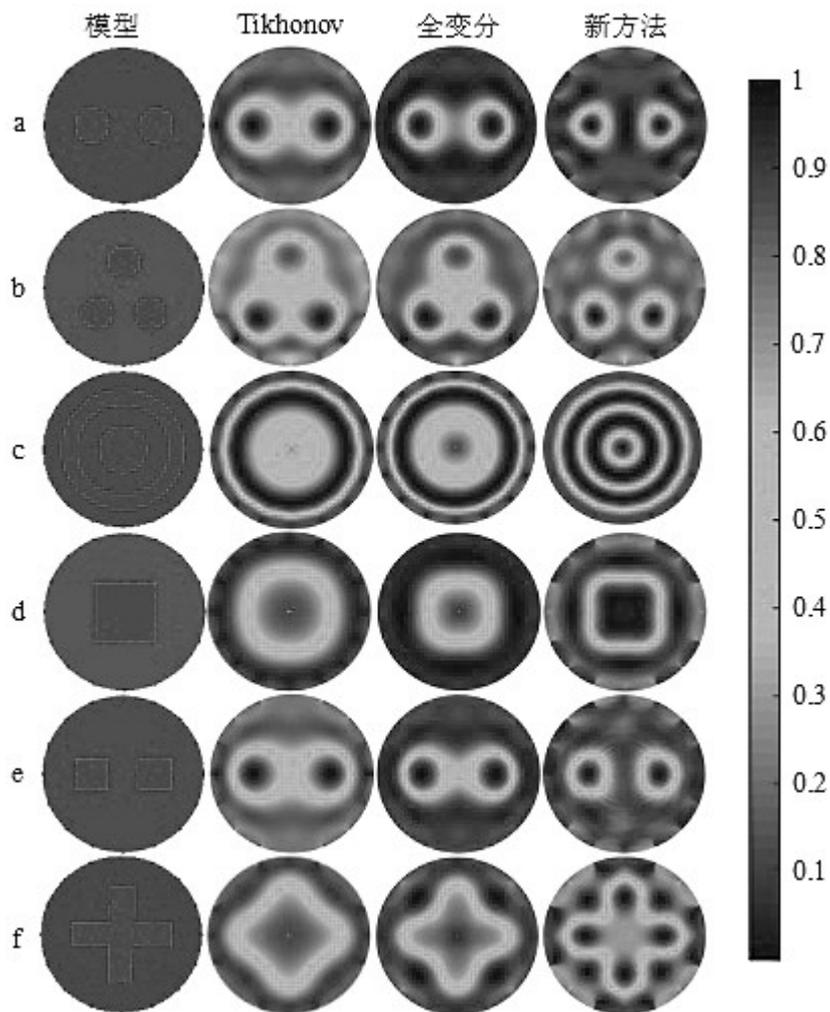


图3

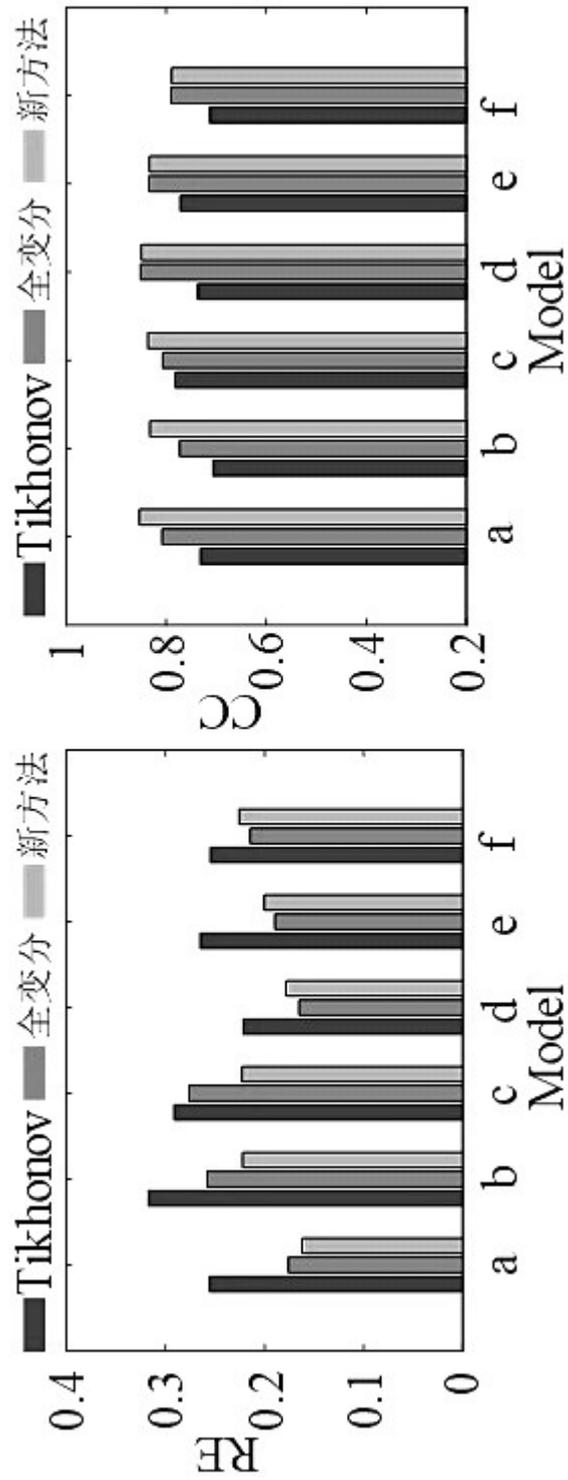


图4

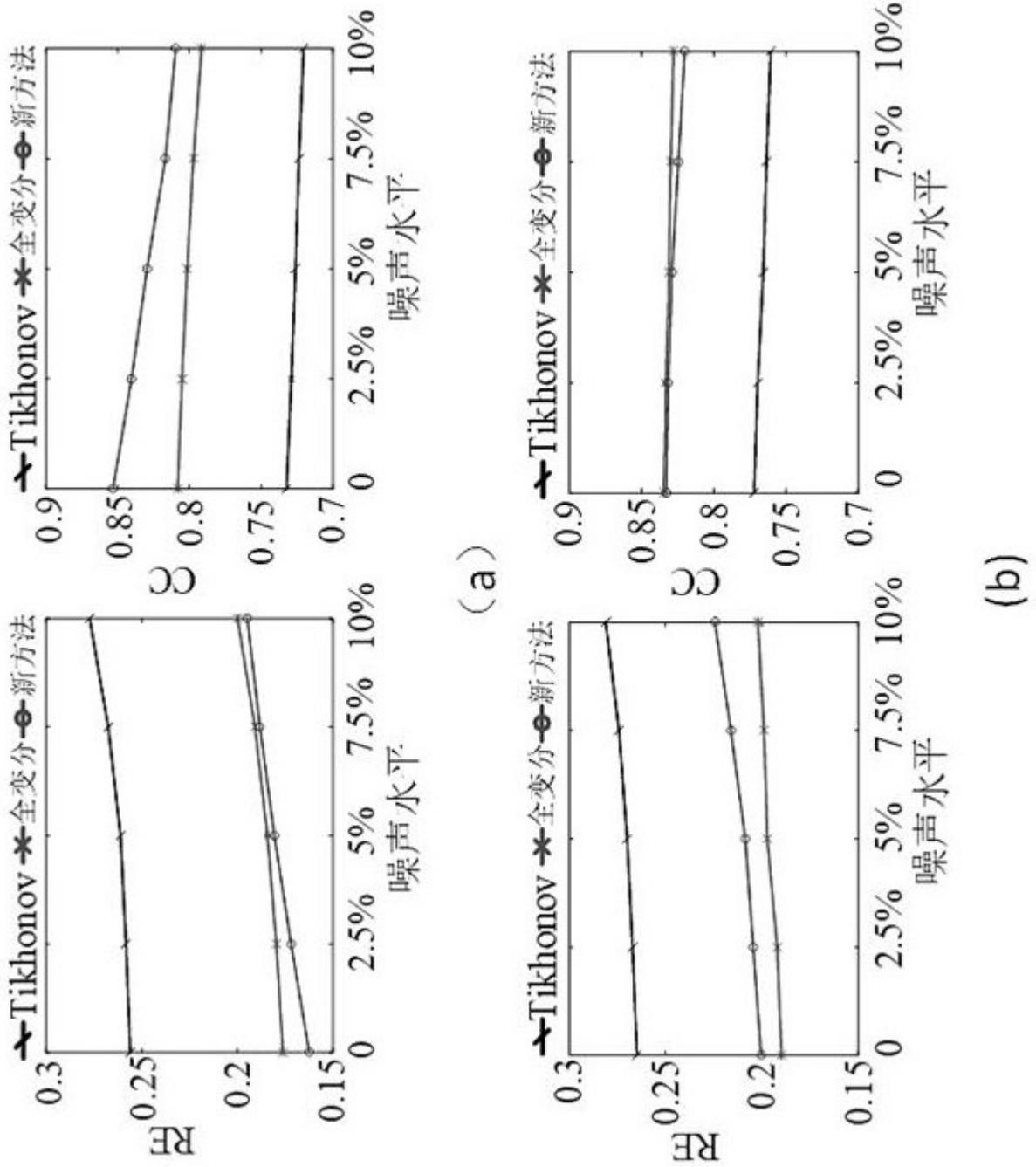


图5