



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107102031 A

(43)申请公布日 2017.08.29

(21)申请号 201710251647.5

(22)申请日 2017.04.18

(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 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.

G01N 27/04(2006.01)

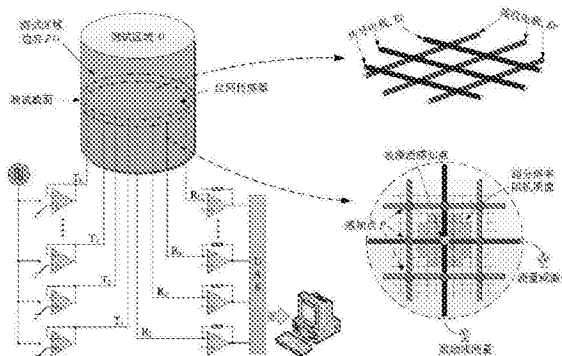
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

用于丝网传感器的超分辨率成像方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于丝网传感器的超分辨率成像方法,包括:对于丝网成像系统,建立描述被测场域内电势分布的数理模型;将被测场域内电阻抗分布离散化表征为超分辨率电阻抗分布图像,建立丝网传感器测量值与超分辨率电阻抗分布图像之间的近似线性关系;由丝网传感器获取测量值变化量 y ,建立约束最小二乘问题;采用局部线性近似LLA法,迭代求解约束最小二乘问题,获取当前电阻抗分布图像的最优估计。



1. 一种用于丝网传感器的超分辨率成像方法,包括如下步骤:

步骤一:对于包含 L_1 个传导电极和 L_2 个接收电极的丝网成像系统,根据丝网传感器工作原理,建立描述被测场域内电势分布的数理模型;

步骤二:将被测场域内电阻抗分布离散化表征为包含 $H_1 \times H_2$ 个像素点的超分辨率电阻抗分布图像,其中 $H_1 > L_1$ 且 $H_2 > L_2$,并由步骤一中的数理模型,建立丝网传感器测量值与超分辨率电阻抗分布图像之间的近似线性关系:

$$y = Ax + n$$

其中, y 为当前丝网传感器测量值关于参考测量值的变化量, x 为当前电阻抗分布图像关于参考电阻抗分布图像的变化量, n 为测量噪声向量, A 为丝网传感器测量值关于电阻抗分布图像的雅克比矩阵;

步骤三:由丝网传感器获取测量值变化量 y ,建立下述约束最小二乘问题:

$$\min_x \left\{ \frac{1}{2N} \|Ax - y\|_2^2 + \sum_{i=1}^N w_i |x_i| \right\}, \quad \text{s.t. } x_i \in [0, x_{\max}] \text{ for } i = 1, 2, \dots, N$$

其中, x_{\max} 为允许的最大电阻抗变化量,根据经验选取; $N = H_1 \times H_2$ 为超分辨率电阻抗图像中像素点的个数; w_i 为第 i 个像素点的稀疏约束权重,由折叠凹惩罚函数确定:

$$w_i = \frac{1}{\alpha} (\alpha\lambda - |x_i|)$$

其中, α 和 λ 为权重系数,满足 $\alpha\lambda = \bar{x}$ 且 $\alpha \in (0, 1/\max(e_A))$, \bar{x} 为 x 的平均值, e_A 为矩阵 A 的特征值;

步骤四:采用局部线性近似LLA法,迭代求解步骤三中的约束最小二乘问题,获取当前电阻抗分布图像的最优估计。

用于丝网传感器的超分辨率成像方法

技术领域

[0001] 本发明属于多介质分布参数测量与成像领域,涉及一种应用于丝网传感器的超分辨率成像方法。

背景技术

[0002] 丝网成像技术利用双层电极阵列,构成栅格感知网络,测量感知点附近电导率、电容率等参数分布,根据多种介质间电学特性的差异性,计算截面介质分布图像。该技术具有较高的时间分辨率、较低的测试成本、以及稳定的测试结果,在工业和生物等领域中,具有较好的应用前景。

[0003] 美国专利US6314373提出一种两相流电导式丝网成像方法。专利中所涉及的丝网感知阵列由两层分布于管道不同截面处的平行电极阵列组成,分别为传导电极阵列和接收电极阵列。电极为直径等于0.12毫米的裸露导线,层间距离为1.5毫米,同层相邻电极距离等于3毫米。两层电极阵列相互垂直,电极交叉点用于探测局部流体的电导率。通过依次测量各交叉点处的电导率,直接获取管道截面处的流体分布信息,无需复杂的图像重建运算。但该方法未考虑感知点区域外围电导率对测量值的贡献,因此重建结果具有较大的误差。

[0004] 中国专利CN1854726A提出一种两相流体网丝电容层析成像方法。专利中所涉及的介入式网丝电容的每根绝缘网丝都为一条投影射线,其投影值等于网丝的电容值,电容值大小与网丝两相流体中的导电相与网丝的接触面有关,通过电动旋转装置,介入式网丝电容器对管线中的两相流体进行高速旋转扫描,获得两相流体在管线截面上的各个方向的投影信息,进而通过反演算法计算两相流体的实时图像。该发明需要额外的旋转装置,会对流体带来更多的扰动。发明中所提到的固定传感器形式,不经过图像重建运算,直接获取两相流体的实时图像,仍未考虑感知点区域外围电导率对测量值的贡献,空间分辨率有限。

[0005] US7940038Silva等人2010年提出一种包含 24×24 个测量点的丝网成像方法(M. J. Da Silva, S. Thiele, L. Abdulkareem, B. J. Azzopardi, and U. Hampel, High-resolution gas-oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor, Flow Measurement & Instrumentation, 2010, 21 (3) :191-197),管道直径67毫米,电极直径0.12毫米,同层相邻电极距离等于2.8毫米,可以提供分辨率相对较高的流体界面分布图像。但所涉及的成像方法中仍未考虑感知点区域外围电导率对测量值的贡献。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种可以提高成像分辨率,得到目标物边界更加清晰图像的用于丝网传感器的超分辨率成像方法,方案如下:

[0007] 一种用于丝网传感器的超分辨率成像方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤一:对于包含 L_1 个传导电极和 L_2 个接收电极的丝网成像系统,根据丝网传感器工作原理,建立描述被测场域内电势分布的数理模型;

[0009] 步骤二:将被测场域内电阻抗分布离散化表征为包含 $H_1 \times H_2$ 个像素点的超分辨率

电阻抗分布图像,其中 $H_1 > L_1$ 且 $H_2 > L_2$,并由步骤一中的数理模型,建立丝网传感器测量值与超分辨率电阻抗分布图像之间的近似线性关系:

$$[0010] \quad y = Ax + n$$

[0011] 其中, y 为当前丝网传感器测量值关于参考测量值的变化量, x 为当前电阻抗分布图像关于参考电阻抗分布图像的变化量, n 为测量噪声向量, A 为丝网传感器测量值关于电阻抗分布图像的雅克比矩阵;

[0012] 步骤三:由丝网传感器获取测量值变化量 y ,建立下述约束最小二乘问题:

$$[0013] \quad \min_x \left\{ \frac{1}{2N} \|Ax - y\|_2^2 + \sum_{i=1}^N w_i |x_i| \right\}, \quad \text{s.t. } x_i \in [0, x_{\max}] \text{ for } i = 1, 2, \dots, N$$

[0014] 其中, x_{\max} 为允许的最大电阻抗变化量,根据经验选取; $N = H_1 \times H_2$ 为超分辨率电阻抗图像中像素点的个数; w_i 为第 i 个像素点的稀疏约束权重,由折叠凹惩罚函数确定:

$$[0015] \quad w_i = \frac{1}{\alpha} (\alpha\lambda - |x_i|)$$

[0016] 其中, α 和 λ 为权重系数,满足 $\alpha\lambda = \bar{x}$ 且 $\alpha \in (0, 1/\max(e_A))$, \bar{x} 为 x 的平均值, e_A 为矩阵 A 的特征值;

[0017] 步骤四:采用局部线性近似LLA法,迭代求解步骤三中的约束最小二乘问题,获取当前电阻抗分布图像的最优估计。

[0018] 本发明中所提出的方法,可以在不改变传感器结构和数据采集系统的前提下,有效地提高丝网成像分辨率,得到目标物边界更加清晰的图像。

附图说明

[0019] 图1丝网传感器与测量原理图;

[0020] 图2超分辨率丝网感知模型;

[0021] 图3被激活的感知点处灵敏度分布图像;

[0022] 图4不同丝网成像方法的仿真结果比较;

[0023] 图5不同丝网成像方法的仿真结果局部比较;

[0024] 图6不同丝网成像方法在水平管气液两相流中的测试结果。

具体实施方式

[0025] 下面以应用于气-液两相流的电导型(忽略复阻抗中电容率的变化,只考虑电导率变化所引起的测量值变化量)丝网成像系统为例,介绍所提出超分辨率成像方法的具体实施方案。实施方案中,测试管道直径为50毫米,丝网传感器包含 $L_1 = 16$ 个传导电极和 $L_2 = 16$ 个接收电极,同层相邻电极间距离为3.2毫米,待重建超分辨率电导率图像中 $H_1 = H_2 = 64$ 。

[0026] 步骤一:如图1所示,丝网传感器由两组位于不同截面处的电极阵列组成,分别为传导电极阵列和接收电极阵列。传导电极与接收电极相互垂直,其电极间交点为“感知点”。测试过程中,通过多路选通器,依次选择传导电极作为激励电极,注入电压激励信号;并由数据采集系统,选取接收电极作为测量电极,获取电极上的电流响应信号。被选择的激励电极与测量电极的交叉点被称为被激活的感知点,与之相应的电压激励和电流响应信号,成为该感知点处的电压和电流信号。如果被激活感知点附近的电导率发生变化,该点处的电

流响应信号也会发生改变。设测试区域为三维闭合区域 Ω ，测试区域边界记为 $\partial\Omega$ 。第 i 个电极记为 E_i ，并规定 E_1 至 E_{16} 为传导电极， E_{17} 至 E_{18} 为接收电极。与传导电极 E_i 和接收电极 E_j 相应的感知点记作 $P_{i,j}$ 。根据上述原理，由电磁场理论和似稳场假设，可得到描述测试区域内电势分布的控制方程：

$$[0027] \quad \nabla \cdot \sigma(z) \nabla u(z) = 0, \quad \text{for } z \in \Omega$$

[0028] 其中， $\sigma(z)$ 为测试区域内的电导率分布， $z \in R^3$ 为笛卡尔坐标系中的三维空间变量。设第 i 个电极施加电压激励信号，其余电极接地，电极表面处的边界条件由狄利克雷边界条件确定：

$$[0029] \quad u(z) = \begin{cases} V, & \text{for } z \in E_i \\ 0, & \text{for } z \in E_j, i \neq j \end{cases}$$

[0030] 其中， V 为激励电压幅值。其余非电极覆盖的边界处没有电流穿过，即法向电流密度为零，由纽曼边界条件描述：

$$[0031] \quad \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0, \quad \text{for } z \in \partial\Omega$$

[0032] 其中， ν 为边界外法方向， E_1 至 E_{16} 为传导电极， E_{17} 至 E_{18} 为接收电极。根据上述条件，若电导率 $\sigma(z)$ 已知，采用边界元或有限元方法，即可得到被测区域内的电势分布情况，并应用下述边界积分方程，计算第 j 个电极上的电流值：

$$[0033] \quad I_{i,j} = \int_{E_j} \sigma \frac{\partial u}{\partial \nu} dS, \quad \text{for } j = 17, 18, \dots, 32$$

[0034] 进而基于欧姆定律，得到感知点 $P_{i,j}$ 处的表观电导率测量值 $Z_{i,j} = V/I_{i,j}$ 。将测量值依序写入列向量，可得测量列向量 $Z = [Z_{1,1}, \dots, Z_{1,16}, Z_{2,1}, \dots, Z_{16,16}]^T$ ，则测量值与电导率之间的关系可由泛函 $Z(\sigma)$ 表示。

[0035] 步骤二：本实施例将丝网传感器所在截面处的电导率 $\sigma(z)$ 离散化表征为 64×64 的电导率分布图像 $\hat{\sigma}$ ，重建图像像素点个数约为传感器感知点个数的四倍。由于部分感知点和像素点落于测试管道外部，传感器有效感知点个数为 $M = 242$ ，有效超分辨率电导率像素点个数为 $N = 3228$ 。考虑测量误差的影响，丝网传感器的实际测量值为：

$$[0036] \quad \xi = Z(\hat{\sigma}) + v$$

[0037] 其中， $\xi \in R^{242 \times 1}$ 为实际测量值， $v \in R^{242 \times 1}$ 为测量误差。测量误差主要来源于电子器件的非线性、数据传输中的电磁干扰、三维效应、被测对象运动造成的模糊效应、电极震动等。为了不失一般性，假设测量误差服从高斯分布。由理论分析可知，被测场域内的电导率分布与测量值之间为非线性关系，这里应用泰勒公式获得其一阶线性近似形式：

$$[0038] \quad Z(\hat{\sigma}) = Z(\hat{\sigma}_{ref}) + A(\hat{\sigma}_{ref})(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}_{ref})$$

[0039] 其中， $\hat{\sigma}_{ref}$ 为参考电导率分布， A 为测量值关于电导率分布的雅可比矩阵或灵敏度矩阵。雅可比矩阵 A 中的元素代表单位像素点内电导率变化所引起的测量值变化情况，其计算公式如下：

$$[0040] \quad A_{i,j}^k = \frac{\delta Z_{i,j}}{\delta x_k} = \frac{1}{V} \int_{vol_k} \nabla u_i \cdot \nabla u_j dV$$

[0041] 其中， vol_k 为第 k 个像素点所占区域， ∇u_i 为第 i 个电极被用激励时的电场强度分

布。进而可得超分辨率线性观测模型：

$$[0042] \quad y = Ax + n$$

[0043] 其中, $y = \xi - \xi_{ref}$ 为观测值的相对变化量, $\mathbf{x} = \hat{\sigma} - \hat{\sigma}_{ref}$ 为超分辨率电导率图像的相对变化量, n 为零均值测量噪声向量。这里选取管道内充满水时的电导率分布作为参考量电导率分布, 参考电导率分布下的测量值为参考测量值。附图2给出了超分辨率感知模型的原理图, 丝网感知点的测量值同时受到该点附近诸多电导率像素点的影响, 感知点对电导率的感知作用在以其为中心的一定区域内有效, 作用区域和测量方式由 A_i 决定。图3中给出第 i 个感知点被激活时的灵敏度分布图像。可以看出该感知点处的测量值, 主要受到该点附近以及与该点相关的激励和测量电极附近的电导率变化有关。感知点附近电导率变化对测量值影响最为明显, 距离该点近的电导率对测量值的贡献量远远大于距离该点远的电导率的贡献量。电极经过处的电导率也会影响测量结果, 但作用程度远远小于感知点附近的电导率。

[0044] 步骤三: 丝网成像的逆问题为根据观测值 y 估计超分辨率电导率图像 x 。由于待估计像素点个数远远多余观测值个数, 该问题为欠定的图像重建问题, 需要引入额外的先验信息, 改善问题欠定性。本发明考虑待估计图像是稀疏的, 并将超分辨率图像重建问题转化为稀疏约束最小二乘问题:

$$[0045] \quad \min_x \left\{ \frac{1}{2N} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2^2 + \sum_{i=1}^N w_i |x_i| \right\}, \quad \text{s.t. } x_i \in [0, x_{\max}] \text{ for } i = 1, 2, \dots, N$$

[0046] 其中, $x_{\max} = 1$ 为像素点允许的最大灰度值, w_i 为第 i 个像素点处稀疏约束的权重。这里采用折叠凹惩罚 (Folded Concave Penalty 简称FCP) 来确定权重函数:

$$[0047] \quad w_i = \frac{1}{\alpha} (\bar{x} - |x_i|)$$

[0048] 其中, λ 和 α 为权重系数。本实施例中选取 $\alpha = 0.95 / \max(e_A)$, 且 $\alpha\lambda = \bar{x}$ 为 x 的平均值。

[0049] 步骤四: 步骤三中所涉及稀疏约束最小二乘问题可采用如下局部线性近似 (Local Linear Approximation 简称LLA) 法求解:

[0050] 1) 设置 $k=0$ 和 $x^0=0$;

[0051] 2) 根据如下公式计算各像素点处稀疏约束的权向量 w_i^k ;

[0052] 3) 设置 $k=k+1$, 计算如下权重最小值问题:

$$[0053] \quad \min_x \left\{ \frac{1}{2N} \|\mathbf{Ax}^k - \mathbf{y}\|_2^2 + \sum_{i=1}^N w_i^{k-1} |x_i^k| \right\}$$

[0054] 4) 根据电导率变化的最大最小值条件, 对当前电导率图像 x^k 进行如下投影操作:

$$[0055] \quad x_i^k = \begin{cases} 0, & \text{for } x_i^k < 0 \\ 1, & \text{for } x_i^k > 1 \end{cases}$$

[0056] 5) 如果 k 大于或等于迭代步数的最大值, 或者 $\|\mathbf{Ax}^k - \mathbf{y}\|_2^2$ 小于容差预设值, 终止迭代, 否则返回步骤2) 继续迭代计算。

[0057] 实施结果: 对上述实施方案进行仿真和实验测试。仿真测试中, 选择泡状流、环状流、层状流三种不同的流动型态作为测试目标。实施效果如图4所示, 图中高电阻率用高值

表示,低电阻率值用低值表示,真实相界面采用实线表示。仿真数据中加入了5%的高斯白噪声。测试中对比了真实电导率图像、原始低分辨率成像结果、四阶样条插值成像结果、基于 l_1 范数的稀疏成像结果以及所提出的Folded Concave Penalty Sparse Reconstruction(简称FCPSR)方法成像结果,并给出了局部区域ROI-A、ROI-B、ROI-C、ROI-D的细节图。可以看出,由感知数据直接构建的分布图像,分辨率较低、噪点明显、界面处模糊,不能清晰的辨认出电导率变化的细节。虽然四阶样条插值方法可以提高原始图像的分辨率,但方法本身不考虑传感器测试机理,很难提高界面处分辨率。基于超分辨率观测模型的 l_1 范数稀疏成像结果能够在一定程度上抑制图像中噪点,但被重建目标的边界仍然模糊不清。本发明中所提出的方法,通过局部权重,强化稀疏分布约束,可以得到近似二值化的成像效果,增强界面分辨能力。泡状分布中最小泡及层状流界面波动细节,在该方法中可以较为清晰地分辨出来,而在其他方法中不明显。实验测试对象为水平管段内的气-水两相流。流动形态以塞状流为主,测试结果如图6所示。图中给出了采用FCPSR方法的三维图像重建结果,以及不同方法得到的二维俯视和侧视图。可以看出,相比于其他方法,所提出方法得到的流动界面更加清晰,可以更加准确的反映出流动细节。

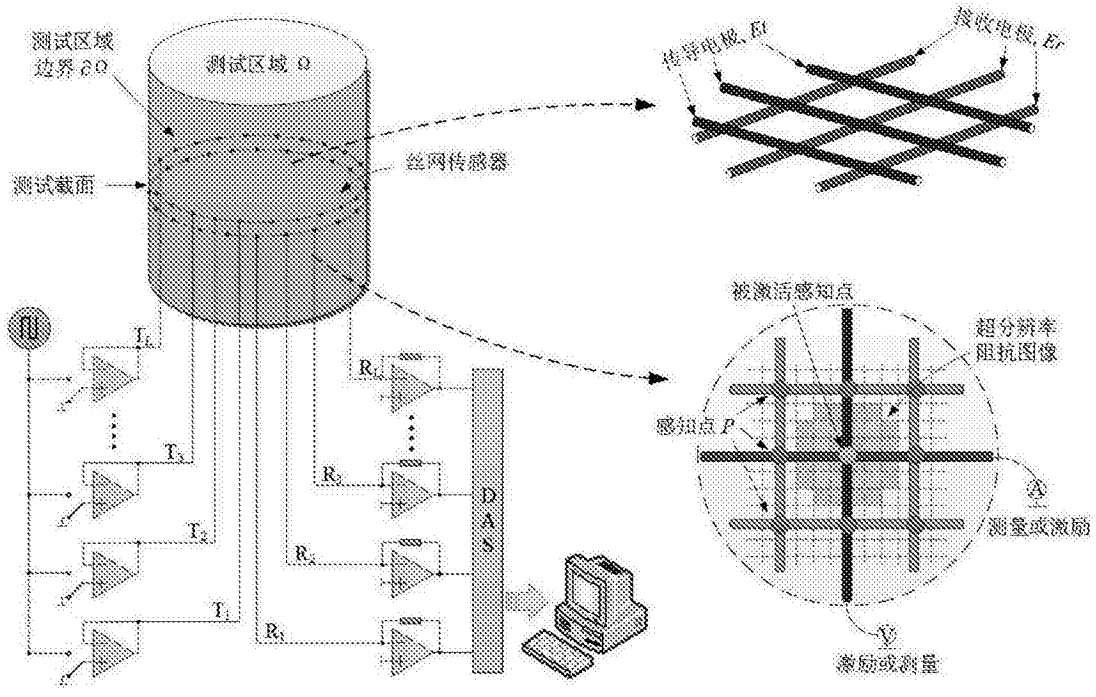


图1

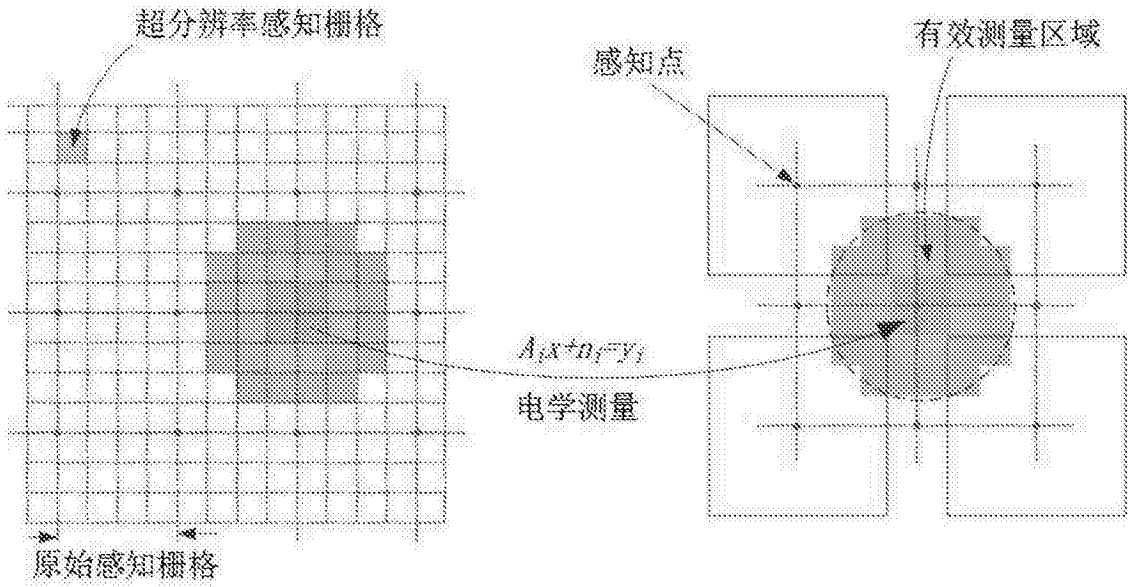


图2

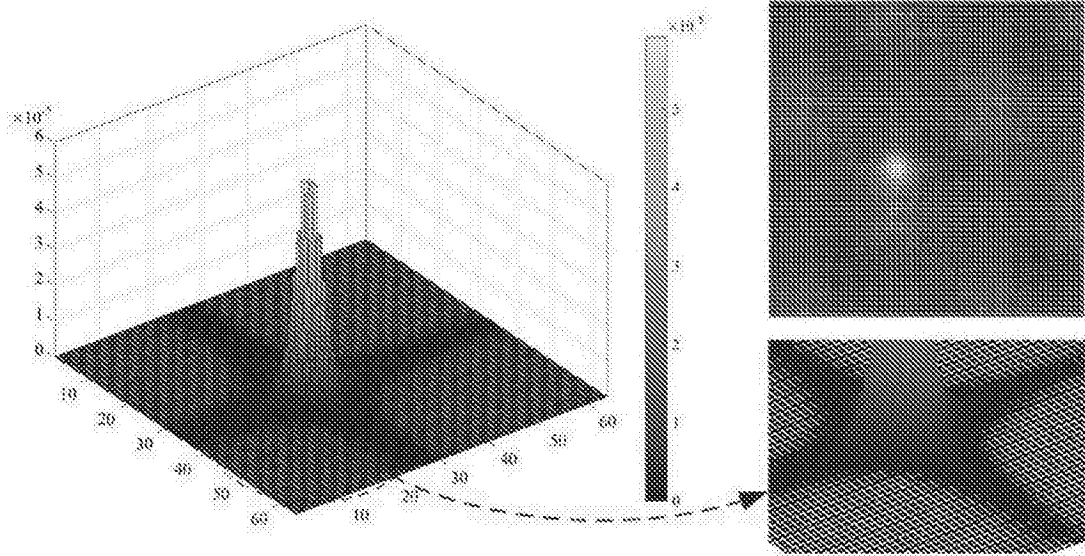


图3

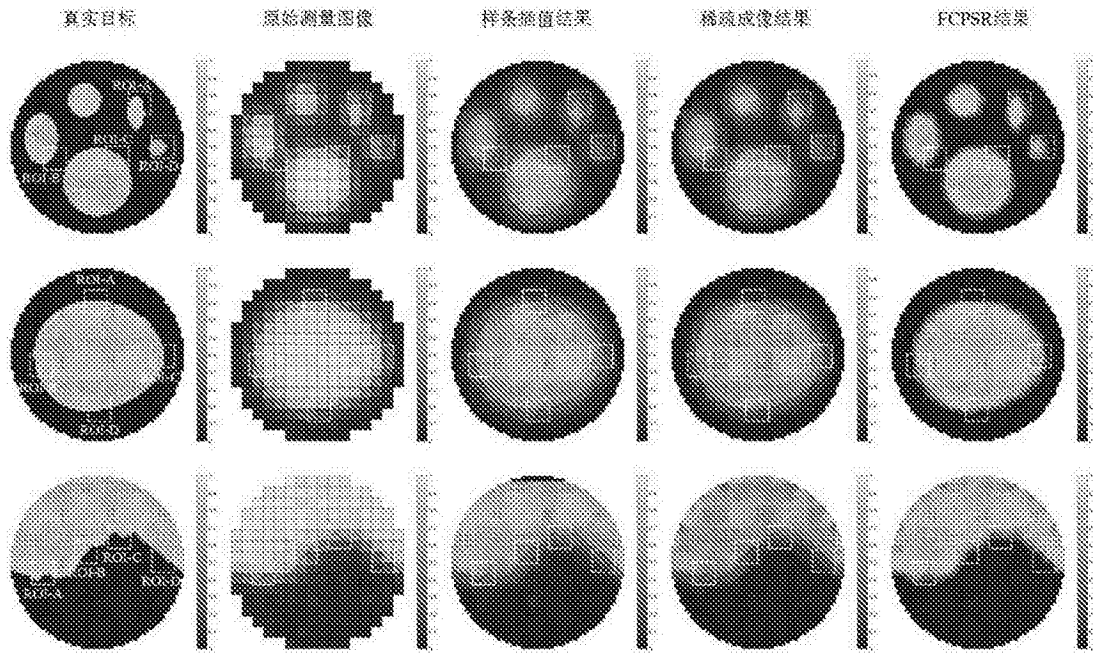


图4

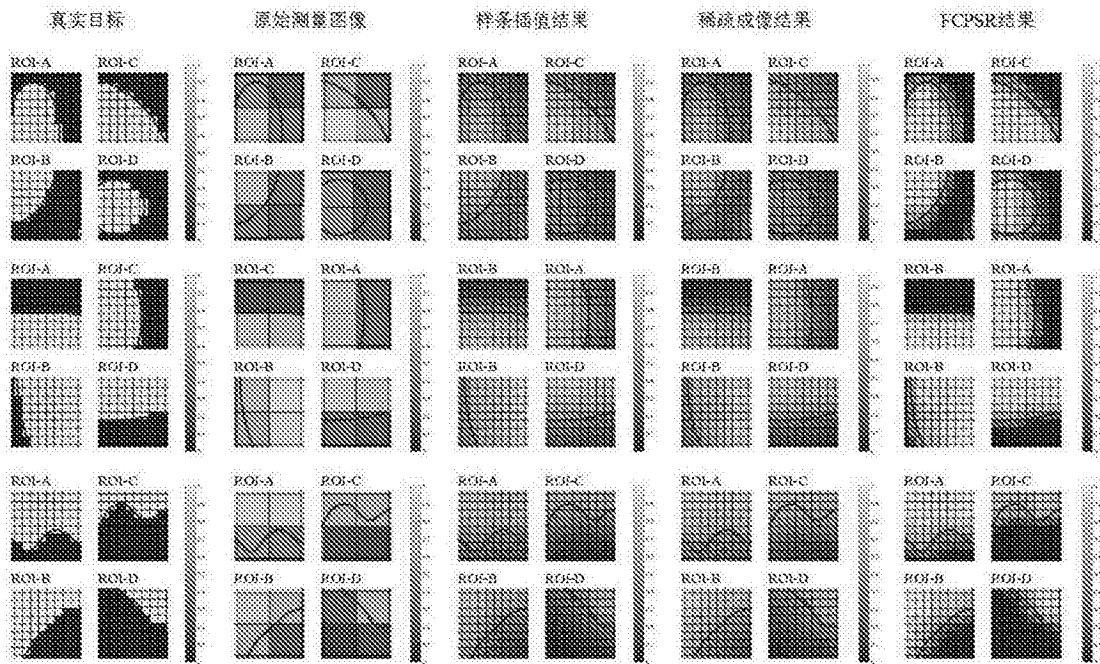


图5

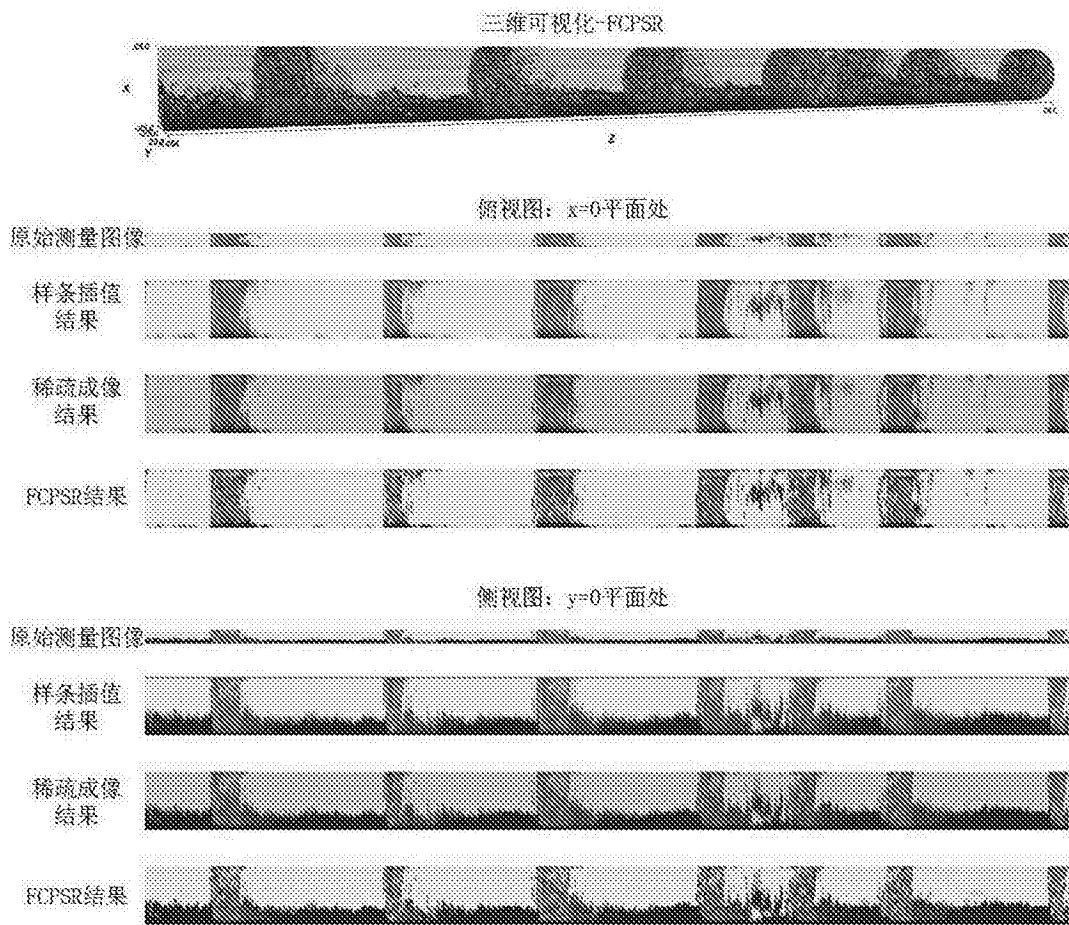


图6