



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102944643 B

(45) 授权公告日 2016.06.08

(21) 申请号 201210325670.1

(22) 申请日 2012.06.30

(30) 优先权数据

13/173896 2011.06.30 US

(73) 专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 R·V·V·L·兰戈朱 W·巴苏

M·库马科伊蒂塔米塔尔

S·马哈林加姆

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

72001

代理人 柯广华 刘春元

(51) Int. Cl.

G01N 33/00(2006.01)

G01N 27/02(2006.01)

G01N 27/22(2006.01)

G01N 29/02(2006.01)

A61B 5/053(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

(56) 对比文件

US 5588429 A, 1996.12.31,

US 2002/0138019 A1, 2002.09.26,

CN 1538168 A, 2004.10.30,

CN 101839881 A, 2010.09.22,

CN 101241094 A, 2008.08.13,

Andrew Allers 等. Stability and resolution analysis of a linearized problem in electrical impedance tomography. 《Inverse problems》. 1991, 第 7 卷(第 4 期), 第 515-533 页.

谭超等. 过程层析成像与多相流测量应用. 《仪器仪表用户》. 2010, 第 17 卷(第 1 期), 第 3-6 页.

黄志尧等. 电阻层析成像传感器软场特性分析. 《仪器仪表学报》. 2001, 第 22 卷(第 6 期), 第 572-576 页.

审查员 李莲

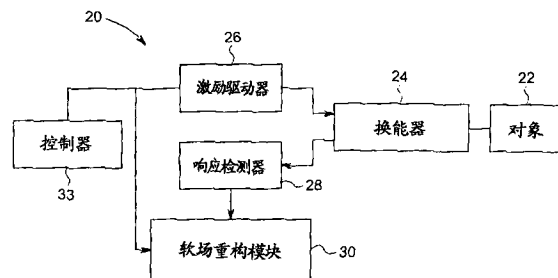
权利要求书2页 说明书9页 附图10页

(54) 发明名称

用于软场重构的系统和方法

(57) 摘要

提供一种用于软场重构的系统和方法。一种方法包括对于被激励对象使用多个换能器来获得施加的输入和测得的输出信息，并基于施加的输入和测得的输出信息形成导纳矩阵。该方法还包括使用导纳矩阵来确定多个矩，以及使用多个矩计算被激励对象的特性分布。



1. 一种用于软场层析成像重构的方法,所述方法包括:
对于被激励对象使用多个换能器来获得施加的输入和测得的输出信息;
基于所述施加的输入和测得的输出信息来形成导纳矩阵,所述导纳矩阵包括多个导纳元素;
使用所述导纳矩阵由所述多个导纳元素来确定多个矩;
变换所述导纳矩阵并且使用所变换的导纳矩阵来确定所述多个矩,其中所述多个导纳元素根据结构矩阵定义的矩量矩阵来确定,基于对于被激励对象使用多个换能器获得施加的输入和测得的输出信息的软场层析成像仪器的几何信息来预先计算所述结构矩阵;以及
使用所述多个矩来计算所述被激励对象的特性分布。
2. 如权利要求1所述的方法,还包括:迭代地比较所确定的多个矩与所计算的多个实验性的矩,从而计算所述特性分布的估计。
3. 如权利要求1所述的方法,其中所述多个矩是电磁矩,并且所述方法还包括:把傅立叶变换矩阵用于所述变换以及通过最小化所述多个矩的能量函数来计算所述被激励对象的特性分布,其中所述能量函数定义了传导率分布的能量。
4. 如权利要求1所述的方法,还包括:使用基于形状的重构来计算所述特性分布。
5. 如权利要求4所述的方法,其中,所述基于形状的重构使用从矩形和圆形元素其中之一形成的网孔。
6. 如权利要求1所述的方法,还包括:使用基于网格的重构来计算所述特性分布。
7. 如权利要求6所述的方法,还包括:自适应地细化用于所述基于网格的重构的网格网孔。
8. 如权利要求7所述的方法,还包括:对于所细化的网格网孔,迭代地比较所确定的多个矩与所计算的多个实验性的矩,从而计算所述特性分布的估计。
9. 如权利要求6所述的方法,其中,所述基于网格的重构包括求逆到极坐标网格或笛卡尔网格其中之一。
10. 如权利要求1所述的方法,其中,所述被激励对象是管道,并且所述多个换能器形成沿着所述管道的内周的多个环,所述多个环沿着所述管道轴向间隔开。
11. 如权利要求10所述的方法,其中,计算所述特性分布包括计算所述管道内流动的气体的特性分布。
12. 如权利要求10所述的方法,还包括:采用在所述多个环的软场重构来计算所述管道内流动的气体的速度。
13. 如权利要求1所述的方法,其中,所述特性分布是在电阻抗层析成像EIT、扩散光层析成像DOT、近红外光谱学NIRS、热像图成像、弹性图成像或者微波层析成像其中之一中确定的分布。
14. 如权利要求1所述的方法,其中,所述特性分布包括电导率、电容率、磁导率、吸光率、光散射率、光反射率、弹性或热导率中的一个或多个的分布。
15. 一种用于软场层析成像重构的方法,所述方法包括:
对于被激励对象使用多个换能器来获得施加的输入和测得的输出信息;
使用所述施加的输入和测得的输出信息以及导纳矩阵来进行对称分量变换SCT迭代重构,所述导纳矩阵具有与多个矩有关的多个导纳元素;

变换所述导纳矩阵并且使用所变换的导纳矩阵来确定所述多个矩,其中所述多个导纳元素根据结构矩阵定义的矩量矩阵来确定,基于对于被激励对象使用多个换能器获得施加的输入和测得的输出信息的软场层析成像仪器的几何信息来预先计算所述结构矩阵;以及基于SCT迭代重构来确定所述被激励对象的特性分布。

16.如权利要求15所述的方法,其中,所述SCT迭代重构包括空间频率重构并且确定特性分布包括执行在来自导纳矩阵重构过程的所确定的多个矩上而不是在多个所测量的电流上迭代的迭代重构。

17.如权利要求15所述的方法,其中,所述被激励对象是管道,并且所述多个换能器形成沿着所述管道的内周的多个环,所述多个环沿着所述管道轴向间隔开,并且其中,确定所述特性分布包括确定所述管道内流动的气体的分布。

18.一种软场层析成像系统,包括:

配置成用于安置在对象表面附近的多个换能器;

一个或多个激励驱动器,所述激励驱动器耦合到所述多个换能器,并且配置成为所述多个换能器产生激励信号;

一个或多个响应检测器,所述响应检测器耦合到所述多个换能器,并且配置成测量所述对象在所述多个换能器上对激励的响应,所述激励是所述多个换能器基于所述激励信号来施加的;以及

软场重构模块,所述软场重构模块配置成采用从导纳矩阵重构过程中确定的多个矩,基于所述激励信号和测得的响应来重构所述对象的特性分布,其中根据导纳矩阵的多个导纳元素来计算所确定的多个矩,所述多个导纳元素与所确定的多个矩有关,所述软场重构模块还配置成变换所述导纳矩阵并且使用所变换的导纳矩阵来确定所述多个矩,其中所述多个导纳元素根据结构矩阵定义的矩量矩阵来确定,基于对于被激励对象使用多个换能器获得来自所述一个或多个激励驱动器的施加的输入以及测得的响应的软场层析成像仪器的几何信息来预先计算所述结构矩阵。

19.如权利要求18所述的软场层析成像系统,其中,所述对象是管道,并且所述多个换能器形成沿着所述管道的内周的多个环,所述多个环沿着所述管道轴向间隔开,并且其中,所述软场重构模块还配置成计算所述管道内流动的气体的特性分布。

用于软场重构的系统和方法

技术领域

[0001] 本文中公开的主题一般涉及数据重构系统和方法,更具体地涉及特别是在多材料对象的软场重构中估计感兴趣区域的特性的系统和方法。

背景技术

[0002] 软场层析成像,诸如电阻抗层析成像(EIT)、扩散光层析成像、弹性图成像以及相关的方式,可以被用来测量对象的内部特性,例如包括对象内部结构的材料的电特性。例如,在EIT系统中,对内部结构的电导率的分布作出估计。这样的EIT系统基于在区域或体积表面或附近得到的施加的激励(例如电流)和测得的响应(例如电压)来重构区域或体积内的材料的电导率和/或电容率。然后可以形成估计值的可视分布。

[0003] 在软场层析成像中,传统的重构算法能够求出对象内的阻抗分布而无需使用任何先前的信息。可是,这类重构过程由于收敛到某个解所需的迭代而在计算上是密集的。因而,用于这些传统算法的重构过程可能非常费时并且需要高速电子装置和处理器。因此,如果需要快速测量,例如对于多材料对象(比如通过管道的气体流)的实时可视化,传统重构算法表现不令人满意。再者,传统重构算法不能适应对象的真实阻抗分布中的高反差。

发明内容

[0004] 根据一个实施方式,提供一种用于软场层析成像重构的方法。该方法包括:对被激励对象使用多个换能器来获得施加的输入和测得的输出信息;以及基于施加的输入和测得的输出信息形成导纳矩阵。该方法还包括:使用导纳矩阵确定多个矩,并且使用多个矩计算被激励对象的特性分布。

[0005] 根据另一个实施方式,提供一种用于软场层析成像重构的方法。该方法包括:对被激励对象使用多个换能器来获得施加的输入和测得的输出信息;以及使用施加的输入和测得的输出信息来进行对称分量变换(SCT)迭代重构。该方法还包括基于SCT迭代重构来确定被激励对象的特性分布。

[0006] 根据又一个实施方式,提供一种软场层析成像系统,该系统包括:配置成用于安置在对象表面附近的多个换能器;以及耦合到多个换能器的一个或多个激励驱动器,激励驱动器配置成为多个换能器产生激励信号。软场层析成像系统还包括耦合到多个换能器的一个或多个响应检测器,响应检测器配置成测量对象在多个换能器上对激励的响应,该激励是多个换能器基于激励信号来施加的。软场层析成像系统还包括软场重构模块,软场重构模块配置成采用从导纳矩阵重构过程中确定的多个矩,基于激励信号和测得的响应来重构对象的特性分布。

附图说明

[0007] 参考附图阅读下面的非限制性实施方式的描述,将更好地理解目前公开的主题,其中以下:

- [0008] 图1为说明根据各种实施方式形成的软场层析成像系统的简化框图。
- [0009] 图2为根据一个实施方式的换能器配置的透视图。
- [0010] 图3为说明特性分布的重构的简图。
- [0011] 图4为说明根据各种实施方式的软场层析成像信息流程的框图。
- [0012] 图5为说明根据各种实施方式的导纳确定流程的框图。
- [0013] 图6为根据各种实施方式采用对称分量进行软场重构的方法的流程图。
- [0014] 图7为示出根据各种实施方式计算的惯性矩的值的表格。
- [0015] 图8为根据其它各种实施方式采用对称分量进行软场重构的方法的流程图。
- [0016] 图9为根据各种实施方式用于极坐标求逆过程的网格(grid)的图示。
- [0017] 图10为说明根据各种实施方式的极坐标网格求逆过程的示意图。
- [0018] 图11为根据各种实施方式用于执行对称分量变换(SCT)迭代重构的方法的流程图。

具体实施方式

[0019] 上述概要以及下面的某些实施方式的详细描述,在结合附图解读时能够获得更好的理解。在附图说明各种实施方式的功能块的图示的程度上,功能块不一定指示硬件电路之间的分割。因而,例如,一个或多个功能块(例如处理器,控制器,电路或存储器)可以在单片硬件或多片硬件中实现。应当理解,各种实施方式并不局限于图中所示的安排、组件/元件互连和手段。

[0020] 如本文所用的,以单数记载并且以单词“一(a)”或“一个(an)”修饰的模块或步骤应理解为不排除多个所述元件或步骤,除非明确指出排除这种情况。此外,提及“一个实施方式”不应被解释为排除了也结合所记载特征的附加实施方式的存在。此外,除非明确指出相反的情况,“包括”或“含有”具有特定特性的模块或多个模块的实施方式可以包括不具有该特性的附加的这种模块。

[0021] 各种实施方式提供了用于特别是多材料对象的软场层析成像的系统和方法,其中使用对称分量来估计多材料对象的特性,例如流动气体的特性。各种实施方式提供了在确定的矩上迭代(而不是在测得的电流上迭代)的方法。各种实施方式的至少一个技术效果是提高了准确性和多材料对象的特性的可视化速度。例如,在工业应用中,通过实践至少一个实施方式,可迅速地(例如当气体流动时实时地)提供管道内流动的气体分布的重构可视表示。

[0022] 应当指出,本文所用的“软场层析成像”通常指的是并非“硬场层析成像”的层析成像方法的任何断层或多维扩展。

[0023] 软场层析成像系统20的一个实施方式如图1所示。例如,软场层析成像系统20可以是电阻抗层析成像(EIT)系统,用于确定对象22、特别是多材料对象(如图2中所示)内的材料的电特性。在一个实施方式中,可确定对象22或其它区域或体积内部的电导率(σ)和/或电容率(ϵ)的空间分布。例如,软场层析成像系统20提供EIT以用于对象22内的多相流测量,例如管道内流动的石油中的气体或油的特性或体积流速的可视化。

[0024] 在图示的实施方式中,系统20包括多个换能器24(例如电极),它们被设置在对象内,例如环绕管道42的内周间隔排列,并且如图2所示与流动介质接触。在一个实施方式中,

换能器24的多个环40沿着内部长度安放,例如轴向间隔开管道42的距离D(例如一米)。例如,换能器24(例如电极,热源,超声换能器)可以被安放在管道42的内周的表面上,临近表面或者从管道42外侧穿透表面至管道42内部(例如针式电极)。因此,换能器24可以采取不同形式,诸如表面接触式电极、对峙电极、电容耦合电极和传导线圈(比如天线)等。根据各种实施方式,间隔开的环40可形成多相流量计,以便例如(基于管道42中的气体和油的可视化)确定在管道42中有多少气体,以及基于(在管道42中的两个位置的)环40之间的差分测量来确定流速,例如通过执行互相关来进行。因而,根据各种实施方式,在每个环40上执行重构。因此,可提供管道42中的气体特性分布或气流确定的体积可视化,以便确定流过的气体和油的量。

[0025] 应当指出,软场层析成像系统20可以是其它类型的系统。例如,软场层析成像系统20可以是扩散光层析成像(DOT)系统,近红外光谱学(NIRS)系统,热像图成像系统,弹性图成像系统或微波层析成像系统等。

[0026] 激励驱动器26和响应检测器28与换能器24耦合,它们均连接到软场重构模块30。软场重构模块30可以是任何类型的处理器或计算装置,其至少部分基于从换能器24收到的响应进行软场重构,如本文更详细描述的那样。例如,软场重构模块30可以是硬件、软件或其组合。在一个实施方式中,激励驱动器26和响应检测器28为物理上分离的装置。在其它实施方式中,激励驱动器26和相应检测器28被物理上集成为一个单元。控制器33也被提供并且发送指令到激励驱动器26,激励驱动器26基于指令来驱动换能器24。应当指出,可以与所有换能器24或换能器24的子集相关地提供激励驱动器26。

[0027] 还应当指出,可使用不同类型的激励以获取用于各种实施方式的重构过程中的特性分布数据。例如,电、磁、光、热或超声激励等可以与各种实施方式结合使用。在这些不同的实施方式中,换能器24可以与对象22以不同方式耦合,并且不必直接接触或只在对象22的内表面(例如电耦合,电容耦合,电流耦合等)。

[0028] 在一些实施方式中,在各种各样的应用中,可使用软场层析成像系统20以产生电阻抗分布的可视表示,诸如用于确定包括油和水(或其它流体或气体,例如石油)的混合流体流中的材料特性,或者用于地下陆地区域的土壤分析和路基检查等。然而,所述实施方式还可应用于其它应用,例如在对象22是人体部分,诸如头部、胸部或腿部的情况下,其中空气和组织具有不同的电导率。

[0029] 在各种实施方式中,换能器24由任何适合的材料制成。例如,使用的换能器24的类型可基于具体应用,使得对于具体应用,使用相应的换能器类型(例如电极,线圈等)来产生软场激励(例如电磁(EM)场)并接收对象22对激励的响应。在一些实施方式中,可使用导电材料以产生电流。例如,换能器24可以由一种或多种金属(诸如铜、金、铂、钢、银和它们的合金)制成。用来制成换能器24的其它示范性材料包括导电的非金属,例如结合微电路使用的基于硅的材料。在一个实施方式中,其中对象22是气体或流体流经的管道42,换能器24被制成能耐受液体的。此外,换能器24可以被制成不同的形状和/或尺寸,例如,杆形、平板形或针形的结构。应当指出,在一些实施方式中,换能器24彼此间绝缘。在其它实施方式中,换能器24能够被安放为与对象22直接欧姆接触,或者与对象22电容耦合。

[0030] 在操作中,换能器24或换能器24的子集可以被用于传送信号(例如传输或调制信号),例如,持续地传输电流或者传输时变信号,使得可在某个时间频率范围(例如1kHz至

1MHz)上施加激励以在对象22内产生EM场。在EIT应用中,所得到的表面电位(也就是换能器24上的电压)被测量,以便使用本文所述的重构方法来确定电导率或电容率分布。例如,可视分布可以基于换能器24的几何、施加的电流和测得的电压来重构。

[0031] 因此,在各种实施方式中,激励驱动器26向每一个换能器24施加激励,响应检测器28测量在每个换能器24(可通过复用器来复用)上响应于施加在换能器24上的激励的响应。应当指出,可以提供任何类型的激励,例如电流、电压、磁场、射频波、热场、光信号、机械变形和超声信号等。

[0032] 例如,在EIT应用中,如图3所示,执行软场重构以识别对象22中的感兴趣区域32。如图所示,响应检测器28(如图1所示)测量在换能器24上响应于激励驱动器26(如图1所示)向换能器24施加的电流(或电压)的响应电压(或响应电流)。

[0033] 应当指出,响应检测器28还可以包括一个或多个模拟信号调节元件(未显示),它对所测得的响应电压或电流进行放大和/或滤波。在其它实施方式中,软场层析成像系统20的处理器包括信号调节元件,用于对从响应检测器28接收到的响应电压或响应电流进行放大和/或滤波。

[0034] 软场重构模块30由此计算对象22对于所施加的激励的响应。因此,可使用软场层析成像系统20来重构特性分布或流可视化。

[0035] 在各种实施方式中,软场层析成像系统20采用对称(也称为对称的)分量方法。例如,在图4中示出EIT信息流程48,它使用对称分量方法利用确定的矩来重构。特别是,从计算装置52从基于激励的一个或多个矩阵(例如预先计算的矩阵)形成的导纳图50用于预测提供给软场重构模块30的电压(预测数据)。应当指出,在一些实施方式中,可选地使用导纳图。通过软场层析成像仪器54向对象22施加激励(如图1至3所示),仪器54可包括换能器24和其他激励和测量部件,测得的电压(测得的数据)也提供给软场重构模块30。然后,软场重构模块30采用各种实施方式来执行重构,以产生特性分布56(例如,阻抗分布)的估计,识别对象22中的感兴趣区域32,诸如流动的液体或气体中不同材料的含量。应当指出,各种部件可以是物理上分离的部件或元件,或者可以是组合的。例如,软场重构模块30可以形成软场层析成像系统20的一部分(如图1所示)。

[0036] 应用各种实施方式,不需要使用先验信息(且不需要使用正演模型),提供软场重构以便确定阻抗分布。例如,在一个实施方式中,可以如图5的导纳确定流程60中所示进行阻抗或导纳确定。导纳确定包括在62由软场层析成像仪器54使用施加的输入(例如激励)和测得的输出(例如响应)作为输入来构建导纳矩阵64(或阻抗矩阵),该矩阵分别定义导纳图50或阻抗图(如图4所示),本文将更详细地描述。导纳矩阵64包括如下的与矩(例如EM矩)有关的导纳元素:

[0037] $Y_s = f(M)$ 公式1

[0038] $Y_S^{p,q} = f_{p,q}(M_{p,q}) = f_{p,q} \iint \sigma(x,y) (x + iy)^{p-2} (x - iy)^{q-2} dx dy$ 公式2

[0039] 其中b是将 Y_s 与矩相关的系数,并且可以基于建模或模拟等来预先计算。应当指出,在各种实施方式中, $\sigma = \sigma^*$ 。因此,如本文中所述的,各种实施方式中的电导率包括以下三种电特性:电导率(σ),磁导率(μ)和电容率(ϵ)。因此,在各种实施方式中,本文中使用的各种公式包括 σ , μ 和 ϵ 的影响或以它们表示的因子。

[0040] 矩量矩阵可进一步定义如下:

[0041] $M = S_{\sigma} \Rightarrow \sigma = (S^H S)^{-1} S^H M$ 公式3

[0042] $s = \iint (x+iy)^{p-2} (x-iy)^{q-2} dx dy$ 公式4

[0043] 其中S是结构矩阵,它可以例如基于软场层析成像仪器54的几何信息(如图4所示)来预先计算, σ 是待确定的电导率, $(S^H S)^{-1} S^H$ 是结构矩阵的伪逆矩阵(例如多行逆矩阵),M是矩量矩阵。因此,在一个实施方式中,使用上述公式将实验测得的矩相关以估计电导率分布。

[0044] 应当指出,如本文使用的,符号“ σ ”既表示某一点的电导率,也表示电导率矢量。

[0045] 因此,导纳值(Y)可用于确定关于分布的信息,包括如66和68所示的分布的物理信息和几何信息,在这里分别一般地表示为 $Y = I \cdot (V^H V)^{-1} \cdot V^H$ 和 $Y_s = Y_{\text{transformed}} = P \cdot Y \cdot Q^{-1}$ 。在一个实施方式中, $P=Q$ =离散傅里叶变换(DFT)矩阵C。因此,在这个实施方式中, $Y_s = C \cdot Y \cdot C^{-1}$ 。然而,应当指出,任何基于矩阵变换的方法或算法均可使用,并且C仅仅是这里用来描述实施方式的一个例子。

[0046] 在这个实施方式中,使用对称分量变换(SCT)方法将导纳矩阵64在70变换为如本文更详细描述的变化后的导纳矩阵,其中Y定义离散矩阵中的分布。应当指出,可使用除这里描述的之外的不同类型的变换和求逆技术。因此,SCT方法用于其中 $P=Q$ =DFT矩阵C的情况。

[0047] 在一个实施方式中,提供使用对称分量的软场重构的方法80,如图6所示。以下将通过对各种步骤的具体描述来概括描述方法80,其中包括不同的实现。方法80包括在82施加激励信号和在84测量响应。例如,如本文所述,可以使用多个换能器向对象施加电流,并测量每个换能器上的响应。应当指出,在82施加的激励信号可以是例如任何标准正交(orthonormal)信号。

[0048] 随后,在86使用施加的激励信号和测得的响应来重构导纳矩阵。例如,导纳矩阵可以定义在多个换能器中的每一个上施加的和测得的信号的值。然后在88,使用自左乘和自右乘过程来变换导纳矩阵,例如,使用傅里叶变换矩阵来求逆。

[0049] 应当指出,假定对象中的分布是均匀的,并且网孔(mesh)由例如方形元素、矩形元素或扇形等等形成。于是,可以在分析上定义网格。然而,应当指出,如本文更详细描述,可以使用基于形状的方法代替基于网格的方法。

[0050] 然后,通过变换的矩阵定义的计算出的矩在90用于迭代计算过程,以估计例如对象内的电导率(σ),从而重构对象内、比如多材料对象内的分布。例如,可以确定计算出的矩的差,并且对估计出的 σ 进行更新,直至达到收敛(在预先确定的水平内)。

[0051] 然后,所使用的网孔可在92被细化。例如,可以选择用于网孔细化的区域,并且基于先前确定的有界的异常或不同材料在分析上计算细化的网孔。接着在94,在细化的网孔上进行了迭代计算过程。

[0052] 在一个实施方式中,现在特别关于在86的导纳矩阵的构建,与电导率的极矩对应的矩阵的每个 Y_s 元素通过下面一组公式来定义:

[0053] $Y_s(p, q) = \iint_{\Omega} \sigma(x, y) (x+iy)^{p-2} (x-iy)^{q-2} dx dy$

[0054] $Y_s(p, q) = \sigma_0 \cdot \iint_{\Omega_{\text{homogeneous}}} (x+iy)^{p-2} (x-iy)^{q-2} dx dy \quad \because \sigma_0 \gg \sigma_{\text{anomaly}}$

[0055]
$$Y_s(p, q) = \sigma_0 \cdot \iint_{\Omega} (x + iy)^{p-2} (x - iy)^{q-2} dx dy - \sigma_0 \cdot \iint_{\Omega_{anomaly}} (x + iy)^{p-2} (x - iy)^{q-2} dx dy$$

[0056] 公式5、6和7

[0057] 在上述公式中，p和q定义矩阵中的行和列，并且x和y定义像素的坐标。因此，Y_s元素定义用于这里描述的迭代求解过程的矩。另外，应当指出，假定均匀分布。

[0058] 还应当指出，公式7的如下部分要预先计算：

[0059]
$$\sigma_0 \cdot \iint_{\Omega} (x + iy)^{p-2} (x - iy)^{q-2} dx dy$$

[0060] Y_s元素也可以如下以极坐标来表示：

[0061]
$$- \sigma_0 \cdot \iint_{\Omega_{anomaly}} (x + iy)^{p-2} (x - iy)^{q-2} dx dy =$$

[0062]
$$- \sigma_0 \cdot \iint_{\Omega_{anomaly}} r^{p+q-4} e^{(p-q)i\theta} dx dy$$
 公式8

[0063] 在各种实施方式中，Y_s元素特性可以如图7中所示编成表格100，表格显示了计算出的惯性矩的值。在表格100中，行是在上述公式5-8中p的值，列是在上述公式5-8中q的值。应当指出，如果阻抗是复数(即，有电阻也有电抗)，则部分102中的值是有用的。另外，由于公式中使用的系数的周期性，部分102中的值实质上是冗余的。

[0064] 在各种实施方式中，如图8中所示的方法110被提供来定义EIT的对称分量方法。特别是，方法110包括在112从施加的激励和测得的响应，例如从使用多个换能器24(如图1所示)施加的电流(I)和测得的电压(V)，来计算导纳值Y。例如，Y可以如Y = I · (V^HV)⁻¹ · V^H来计算。然后，在114，可以从Y采用Y_s = C · Y · C⁻¹(定义了自左乘和自右乘过程)来计算Y_s，其中C和C⁻¹分别是变换矩阵和它的逆矩阵。变换矩阵可以是任何适合的矩阵，例如正交矩阵。在一个实施方式中，变换矩阵是如下定义的傅里叶变换矩阵：

[0065]
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{n-1} \\ 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & \alpha^{n-1} & \alpha^{2(n-1)} & \dots & \alpha^{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix}$$
 其中 $\alpha = e^{i\frac{2\pi}{n}}$

[0066]
$$\alpha^n \cdot \alpha^{n-1} = \alpha^{n-1} \cdot \alpha = 1 \quad \therefore \alpha^n = 1$$
 公式9

[0067] 然后，在116，从如上所述的Y_s计算矩。计算出的矩被用于迭代SCT重构过程，它可以是在118的基于形状的重构或者在124的基于网格的重构。应当指出，可以使用任何合适的分布重构方法来执行重构过程。

[0068] 关于在118的基于形状的重构，在一个实施方式中，在120使用等效圆，并且在122执行顶点识别。然而，应当指出，可假定除圆以外的任何形状，特别是任何基本几何形状用于重构中。因此，异常可以被假定为任何几何形状。

[0069] 在一个实施方式中，在118的基于形状的重构包括使用由三个坐标(X_c, Y_c, R)完全描述的圆。在这个实施方式中，独立变量的数量除以3等于等效圆的最大数量。因此，感兴趣区域32(如图3所示)可以假定为圆，它可以表示例如流动的石油中的气泡。因此，多个圆的最初假定或近似可以用于确定感兴趣区域32的大小和位置，它可以是流动的液体中的空气

异常。在一个实施方式中,可假定两个 σ 区域,一个表示感兴趣区域32(例如异常),一个表示背景。但是,可使用附加的圆来假定附加的感兴趣区域32。采用圆形感兴趣区域32的假定提供了简单的可视化,例如用于流测量可视化。如下文更详细地描述的,重构方法接着使用计算出的矩收敛到解。

[0070] 在一个实施方式中,在124的基于网格的重构包括在126求逆到极坐标网格(inversion to a polar grid),随后在128对网格进行可选细化,可以自适应地执行细化。特别是,极坐标网格求逆可以使用以下公式来完成:

$$[0071] \quad M_{mn} = \iint_{\Omega_{anomaly}} r^m e^{i\theta \cdot n} dA$$

$$[0072] \quad M_{mn}(R, t, \theta_1, \Delta\theta) = \int_R^{R+t} \int_{\theta_1}^{\theta_1+\Delta\theta} r^{m+1} e^{i\theta \cdot n} dr d\theta$$

[0073] 公式10和11

$$[0074] \quad = \frac{1}{m+2} \{(R+2)^{m+2} - R^{m+2}\} \Delta\theta \text{ 当 } n=0$$

$$[0075] \quad = \frac{1}{(m+2)(ni)} \{(R+2)^{m+2} - R^{m+2}\} \{e^{in(\theta_1+\Delta\theta)} - e^{in\theta_1}\} \text{ 当 } n>0$$

[0076] 公式12和13

[0077] 应当指出,公式13可以是预先计算的。用于极坐标求逆的网格140可以如图9所示提供,在这个实施方式中它表示管道42(如图2所示)或其它管状结构的横截面。在网格140中,每部分142代表重构表示中的像素。在这个实施方式中,有8个八分圆,每个八分圆在径向(R)不同位置由4个部分定义。应当指出,一旦矩被计算出,也就知道由部分142代表的每个像素的位置。

[0078] 因此,在一个实施方式中,极坐标网格求逆过程150可以如图10中所示地执行。可以看出,两个部分142a和142b最初被假定为具有低得多的电导率(即1而不是0)。每个部分142对每个矩的贡献也可以预先计算。特别是,将 Y_s 与矩相关的系数可以预先计算,例如基于建模、模拟或异常配置等。应当指出,预先计算可以通过静态试验来核实。

[0079] 在这里描述的用于预先计算出的部分142和测得的矩的线性方程组被求解以获得第一近似值。因此,确定了 σ 值,并将其分配到部分142中的每一个。例如,网格140可以被修改以包括单独的背景区域144和两个分开的部分142a和142b。

[0080] 为了更好地定义边界,例如确定第二相的边界,部分142a和142b被进一步划分成区域146以对测量进行细化。应当指出,所有其它部分142(除了部分142a和142b之外)在计算中不再使用。因此,用于第二相的进一步划分的部分142a和142b的矩被确定。

[0081] 因此,在各种实施方式中,网孔和它的逆以采用几何形状的叠加来近似的分布来假定。例如,在一个实施方式中,圆被用作第二相(例如在气体或油中的气泡)的近以。

[0082] 在另一实施方式中,在124基于网格的重构包括在130求逆到笛卡尔网格,接着是在132对网格进行可选细化,可以自适应地执行细化。此转换类似于前面描述的极坐标网格求逆过程来执行。

[0083] 因此,各种实施方式提供了矩阵变换方法,例如,基于SCT的EIT,其使用利用了多个 $\sigma(-\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2 \dots)$ 的空间频率重构。通过预先计算,各种实施方式的重构过程不求解微分方程,而是求解代数或多项式方程,这在计算上更快。因此,基于SCT的EIT可以被用于高反差材料上的重构,例如带有体积流量的材料。

[0084] 在一个实施方式中,用于SCT迭代重构的方法160可以如图11所示地执行。方法160可以提供异常的一般分布的粗略、但特征性的表示。方法160包括在162计算实验性的矩M,例如使用软场层析成像仪器54,其中 $M_{\text{exp}} = b^{-1}Y_s$ 。此后,在164估计电导率,它在一个实施方式中被定义如下:

$$[0085] \quad \sigma = (S^H S)^{-1} S^H M_{\text{exp}} \quad \text{公式14}$$

[0086] 应当指出,如这里更详细描述,在估计中可使用不同形状或网格。例如,可以使用任何形状的网格,诸如极坐标网格、三角网格或矩形网格等。

[0087] 随后,在166计算矩,它可以被定义为 $M_{\text{comp}} = S\sigma$ 。应当指出,S可以基于精确转换的解来改变,它然后在感兴趣区域(例如异常)被识别后被细化。

[0088] 然后,在168确定从当前迭代计算出的矩和实验性计算出的矩之差。在该迭代过程中,该差定义了用来更新在164的估计的更新项。由矩之差计算出的更新项可以如下定义:

$$[0089] \quad \sigma^{i+1} = \sigma^i + \alpha (S^H S)^{-1} S^H (M_{\text{exp}} - M_{\text{comp}}) \quad \text{公式15}$$

[0090] 接着,更新项(例如误差项)被输入回到在164的估计步骤,从而迭代地提供了更新的电导率分布。执行这个迭代过程,直至达到解的收敛,例如,当: $M_{\text{comp}} \approx M_{\text{exp}}$ 。因此,当矩之差不存在差或者存在预先确定的差(例如可接受的方差)时,可达到收敛。

[0091] 因此,在各种实施方式中,SCT迭代重构使用如本文所述的矩阵乘法过程。因此,求逆中的雅可比行列式(Jacobian)(S)被预先计算。在一个实施方式中,矩形网孔被用于提高重构速度,例如,达到大约2500帧每秒。采用其它形状的网孔可以达到不同的重构速度。例如,采用三角网孔,在某些实施方式中可以提供大约80帧每秒的重构速度。

[0092] 因此,采用各种实施方式从施加的激励和测得的响应来确定Y。接着,可以从Y确定 Y_s 。然后,可以如 Y_s/b 来确定矩,将其用于迭代重构。

[0093] 各种实施方式和/或部件,例如,模块、元件或部件和其中的控制器,也可实现为一个或多个计算机或处理器的部分。计算机或处理器可包括计算装置,输入装置,显示单元和接口,例如,用于访问互联网。计算机或处理器可包括微处理器。微处理器可连接到通信总线。计算机或处理器还可包括存储器。存储器可包括随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。计算机或处理器进一步可包括存储装置,其可以是硬盘驱动器或可拆卸存储驱动器,诸如光盘驱动器、固态盘驱动器(例如闪存RAM)等。存储装置还可以是用于将计算机程序或其它指令加载到计算机或处理器中的其它类似装置。

[0094] 如本文使用的,术语“计算机”或“模块”可包括任何基于处理器或基于微处理器的系统,包括使用微控制器、精简指令集计算机(RISC)、专用集成电路(ASICs)、现场可编程门阵列(FPGAs)、图形处理单元(GPUs)、逻辑电路、以及任何其它能够执行这里所述功能的电路或处理器的系统。以上例子仅作为示范,因此并非要以任何方式限定术语“计算机”的定义和/或含义。

[0095] 计算机或处理器执行指令集,指令集存储在一个或多个存储元件中,以便处理输入数据。存储元元件也可存储数据或其它所想要或所需要的信息。存储元件可以采取信息

源或者处理机器内的物理存储元件的形式。

[0096] 指令集可以包括各种命令,它们指示计算机或处理器作为处理机器来执行特定的操作,诸如各种实施方式的方法和过程。指令集可以采取软件程序的形式,它可构成一个或多个有形的非临时性计算机可读介质的部分。软件可以是多种形式的,诸如系统软件或应用软件。此外,软件可以是分开的程序或模块的集合、较大程序内的程序模块或者程序模块的一部分的形式。软件还可包括面向对象的编程的形式的模块化编程。通过处理机器处理输入数据可以响应于操作者命令,或响应于先前处理的结果,或响应于另一处理机器进行的请求。

[0097] 如本文使用的,术语“软件”、“固件”和“算法”是可互换的,并且包括任何存储在存储器里以便由计算机执行的计算机程序,所述存储器包括RAM存储器、ROM存储器、EPROM存储器、EEPROM存储器和非易失性RAM(NVRAM)存储器。上述存储器类型仅仅是示范性的,因此不是对于可用于存储计算机程序的存储器类型的限定。

[0098] 应当理解,上述描述意在说明而不是限制。例如,上述描述的实施方式(和/或其方面)可以彼此结合使用。另外,可以对各种实施方式的教导作出许多修改以适应具体情况或材料,而没有背离所述教导。虽然这里描述的材料尺寸和类型是用来定义各种实施方式的参数,但是实施方式决不是限定性的而是示范性的实施方式。许多其它实施方式对于本领域技术人员来说在仔细阅读以上描述后是显而易见的。因此,各种实施方式的范围应该参考所附权利要求连同这类权利要求所涵盖的等价物的全部范围来确定。在所附权利要求中,术语“包括”和“在其中”用作相应术语“包含”和“其中”的纯英文同义词。此外,在下列权利要求中,术语“第一”、“第二”和“第三”等仅仅用于标记,而不是要对它们的对象施加数字要求。此外,以下权利要求的限定未写成部件加功能的格式,并且也不打算基于35U.S.C. § 112第6段来解释,直到这些权利要求限定明确地使用短语“用于.....的部件”并且后面是功能陈述而没有进一步结构,才这样解释。

[0099] 此书面描述使用示例公开了各种实施方式,包括最佳方式,并且也使本领域技术人员能够实践各种实施方式,包括制造和使用任何装置或系统,以及执行任何结合的方法。各种实施方式的可专利范围由权利要求限定,并且可以包括那些本领域技术人员能想到的其它示例。如果这些其它示例具有与权利要求字面语言相同的结构单元,或者如果这些示例包括具有与权利要求字面语言的非实质性差异的等价结构单元,则这些示例意在处于权利要求的范围内。

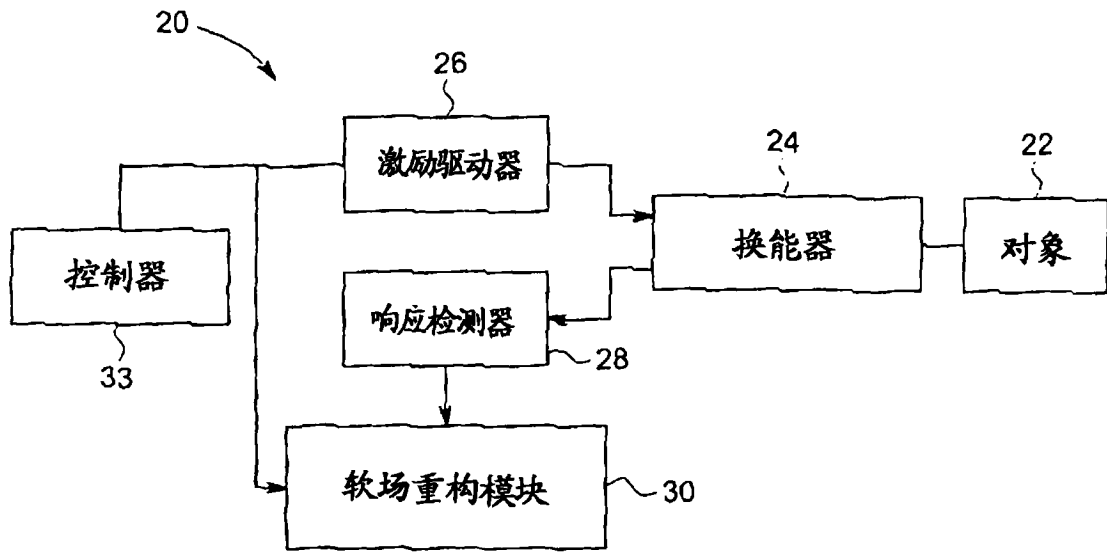


图1

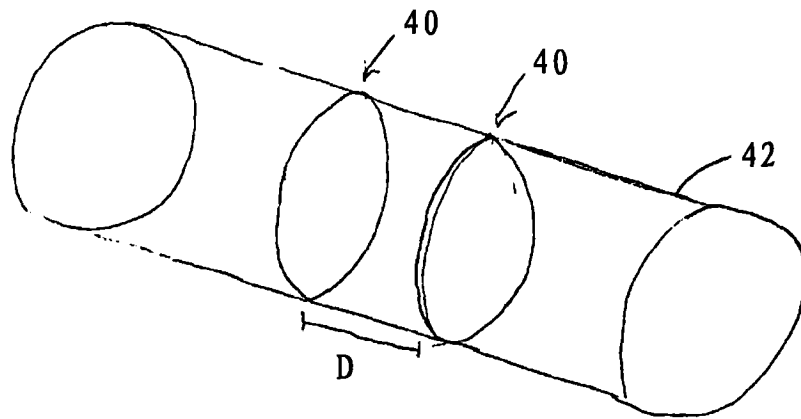


图2

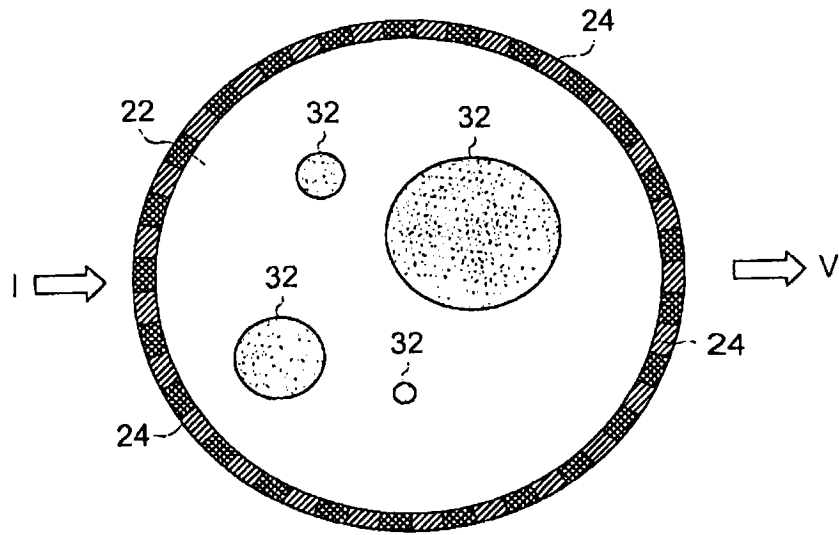


图3

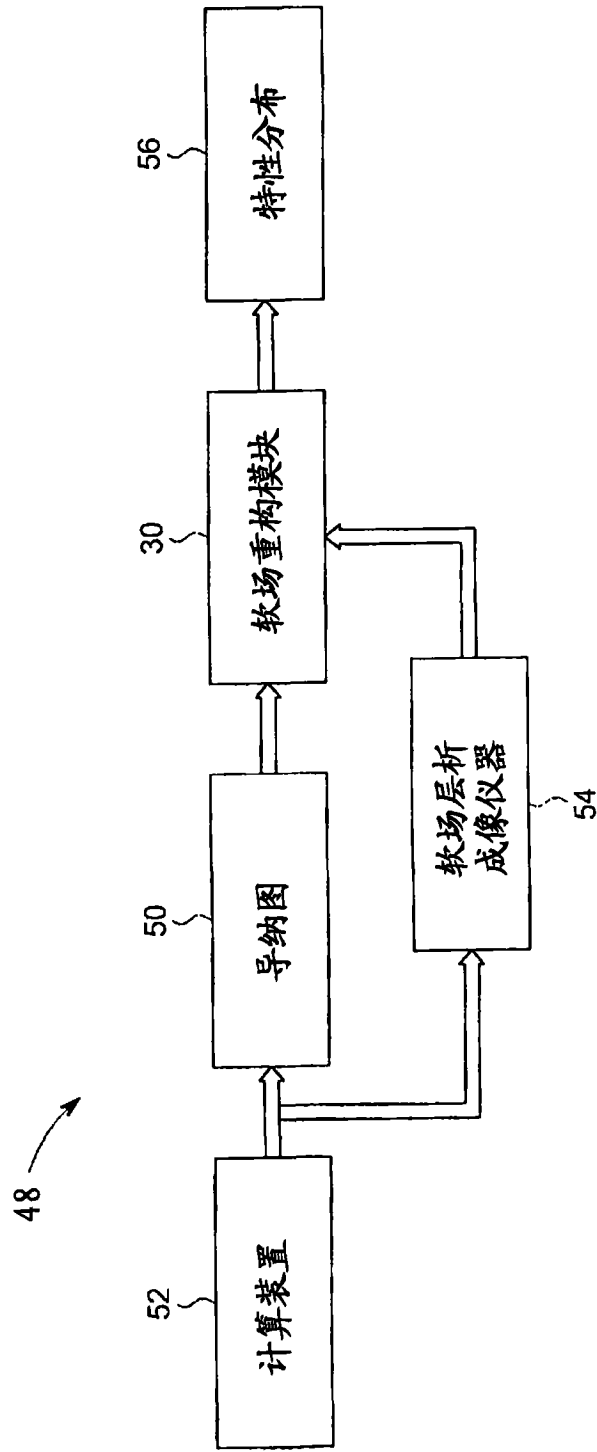


图4

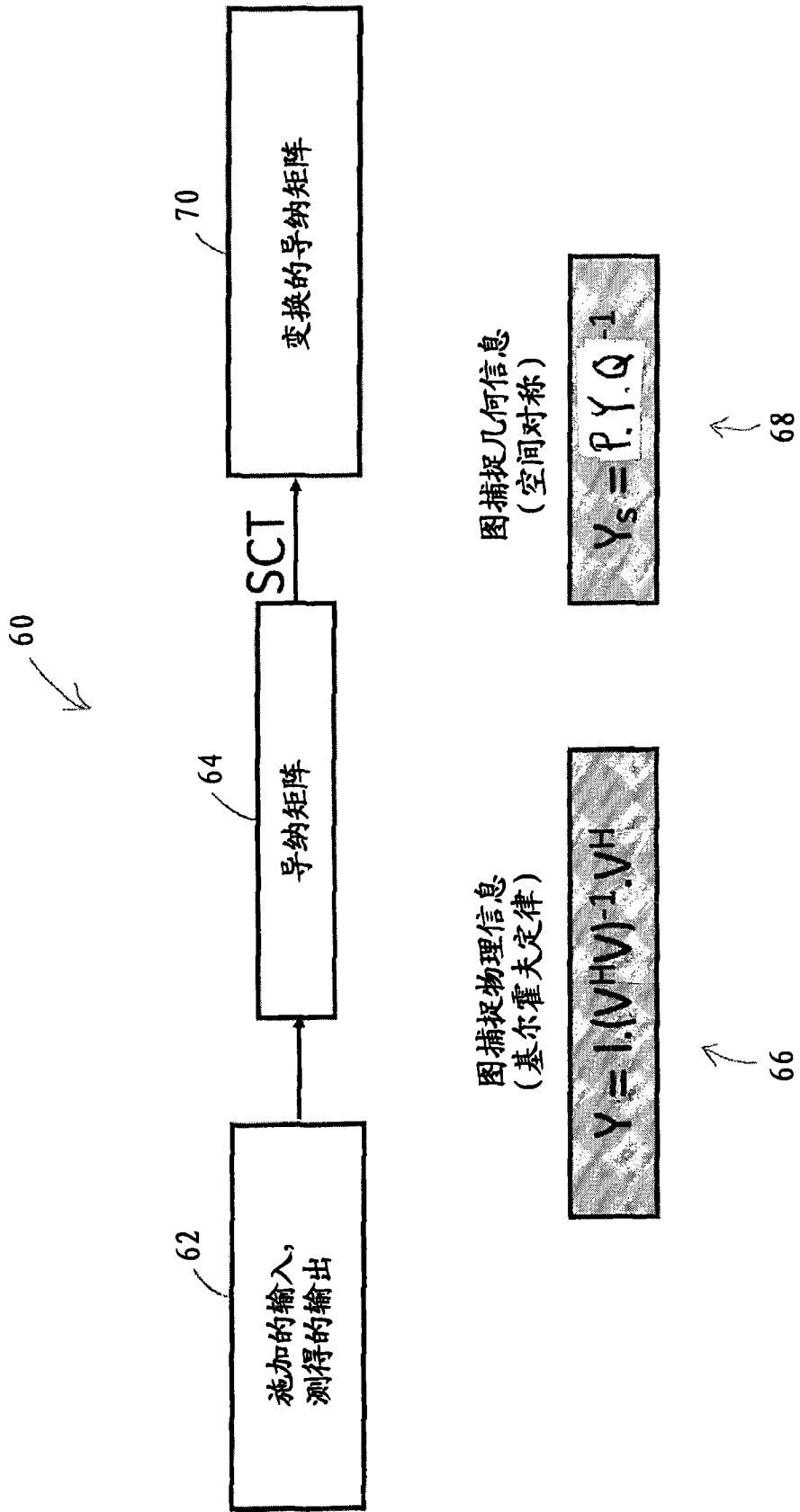
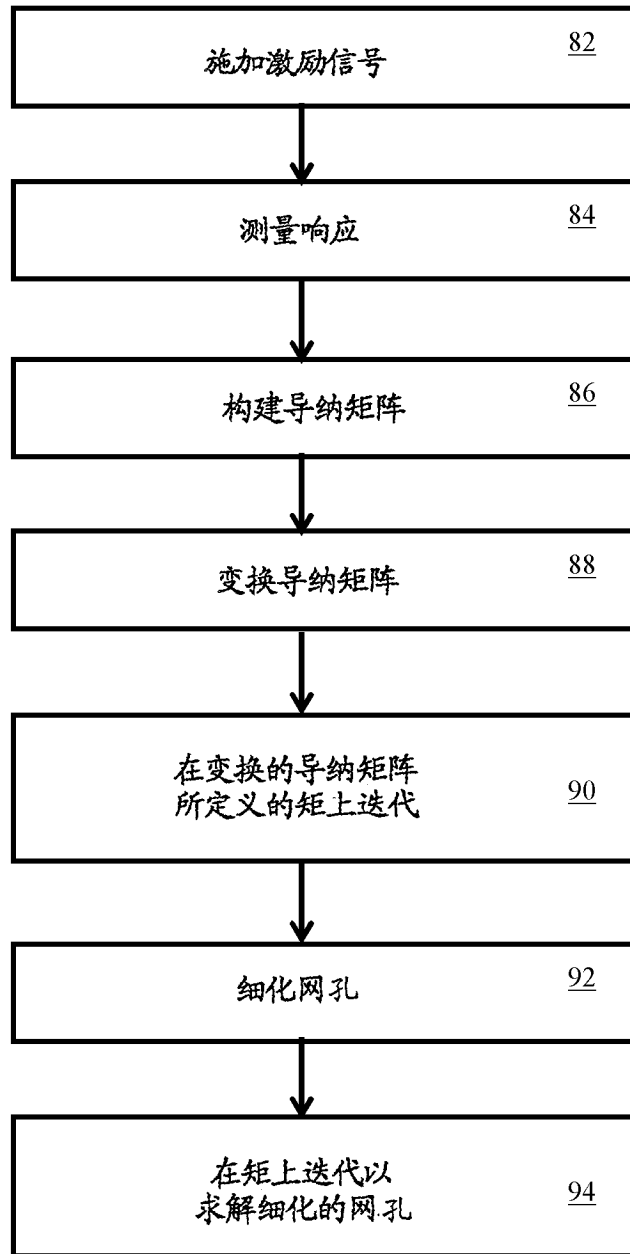


图5



80 ↗

图6

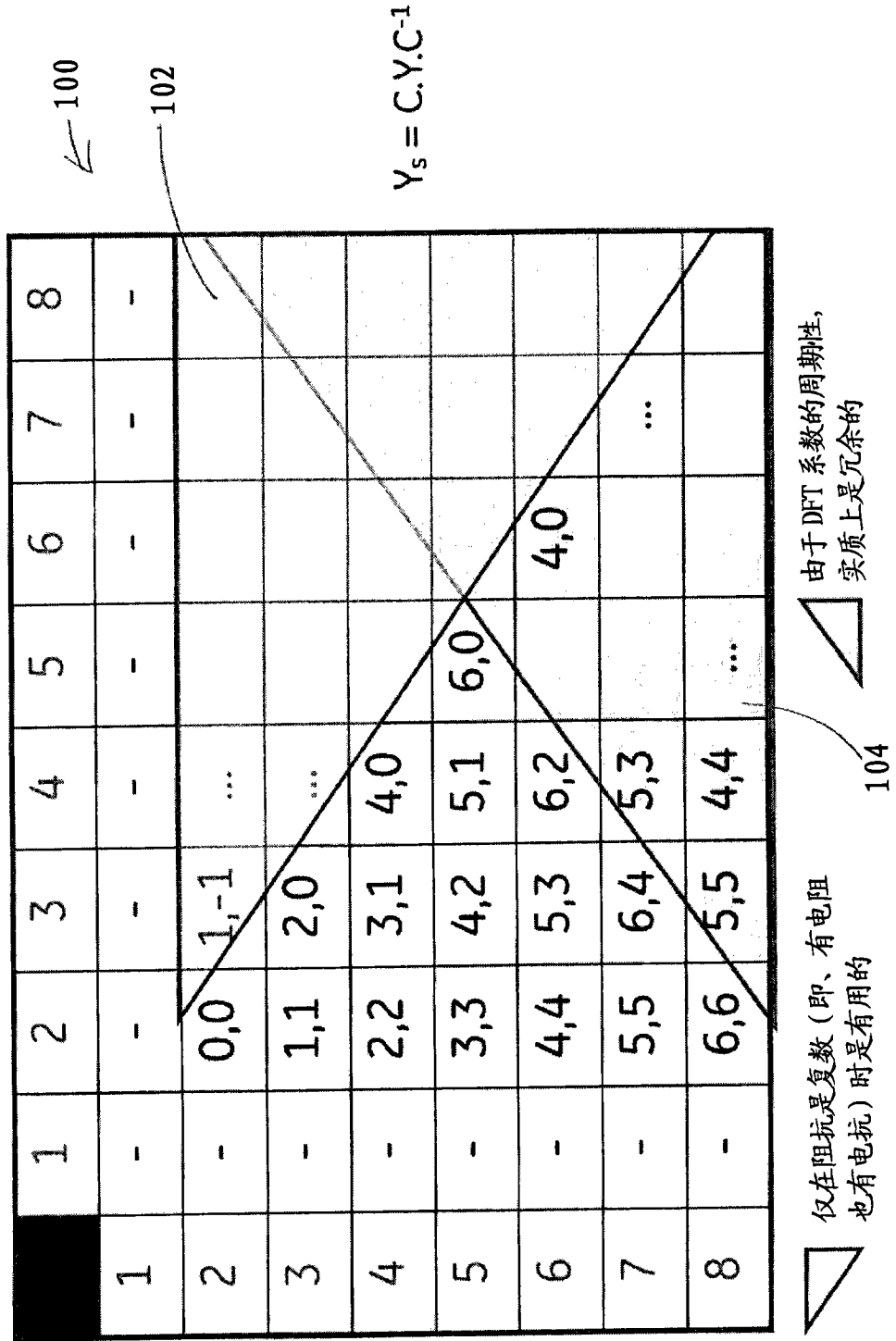


图7

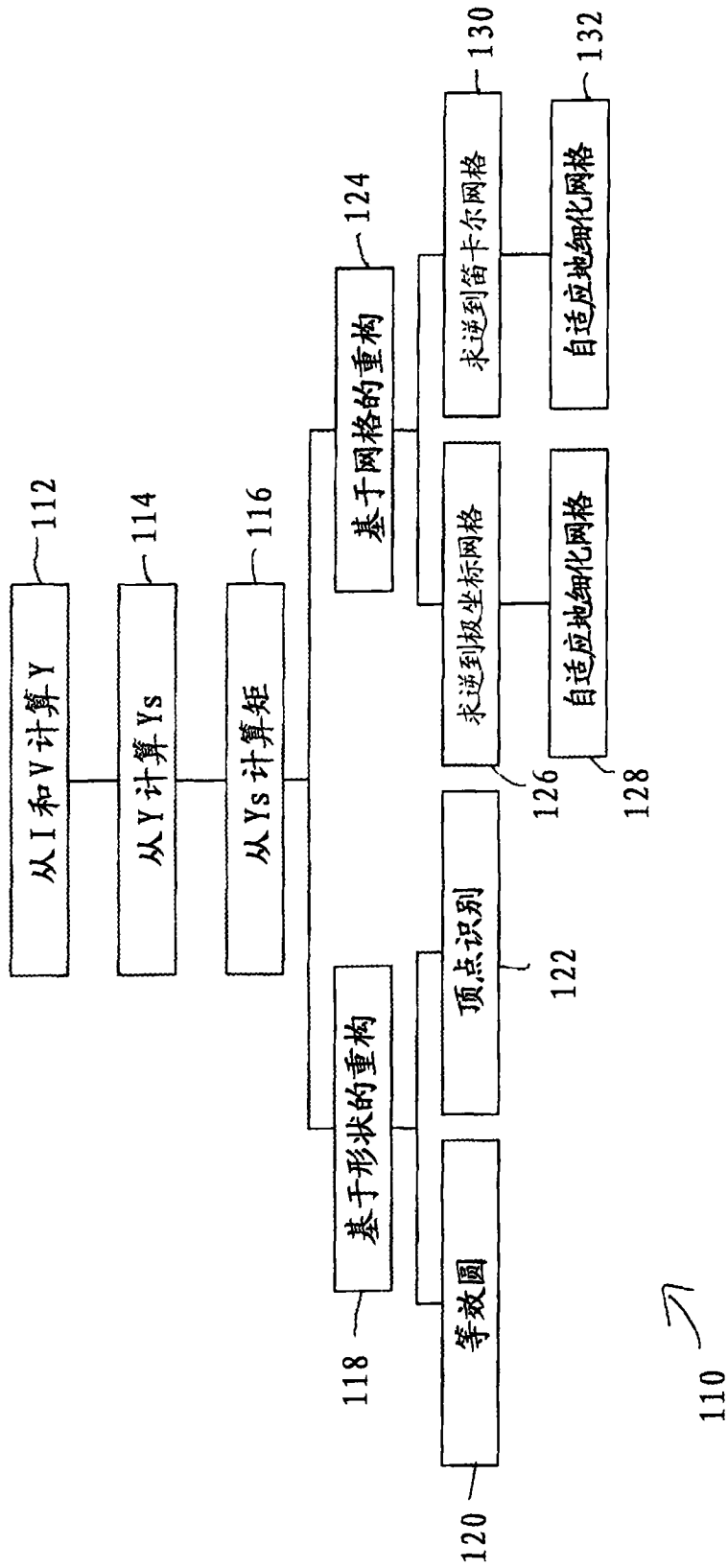


图8

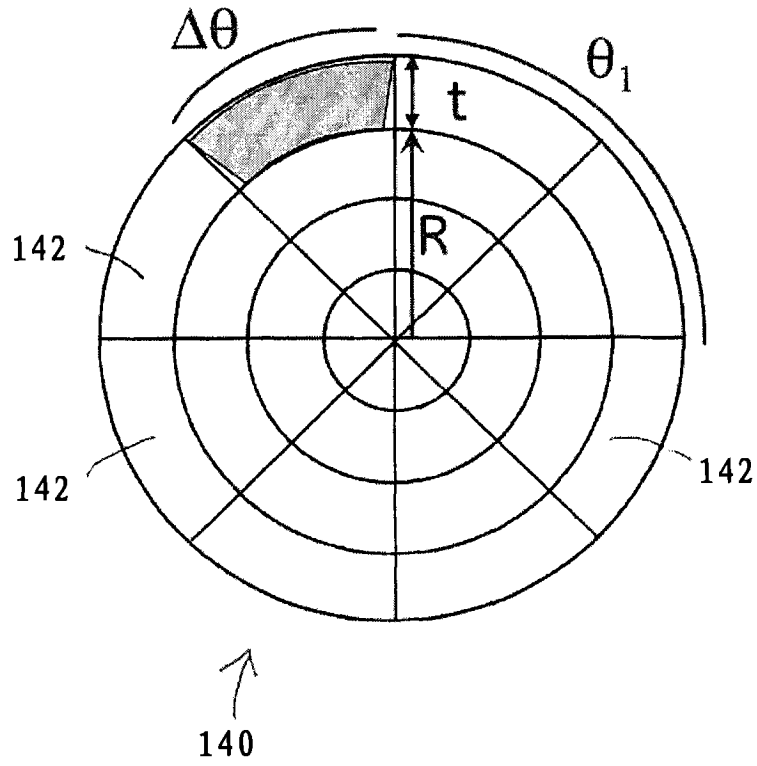


图9

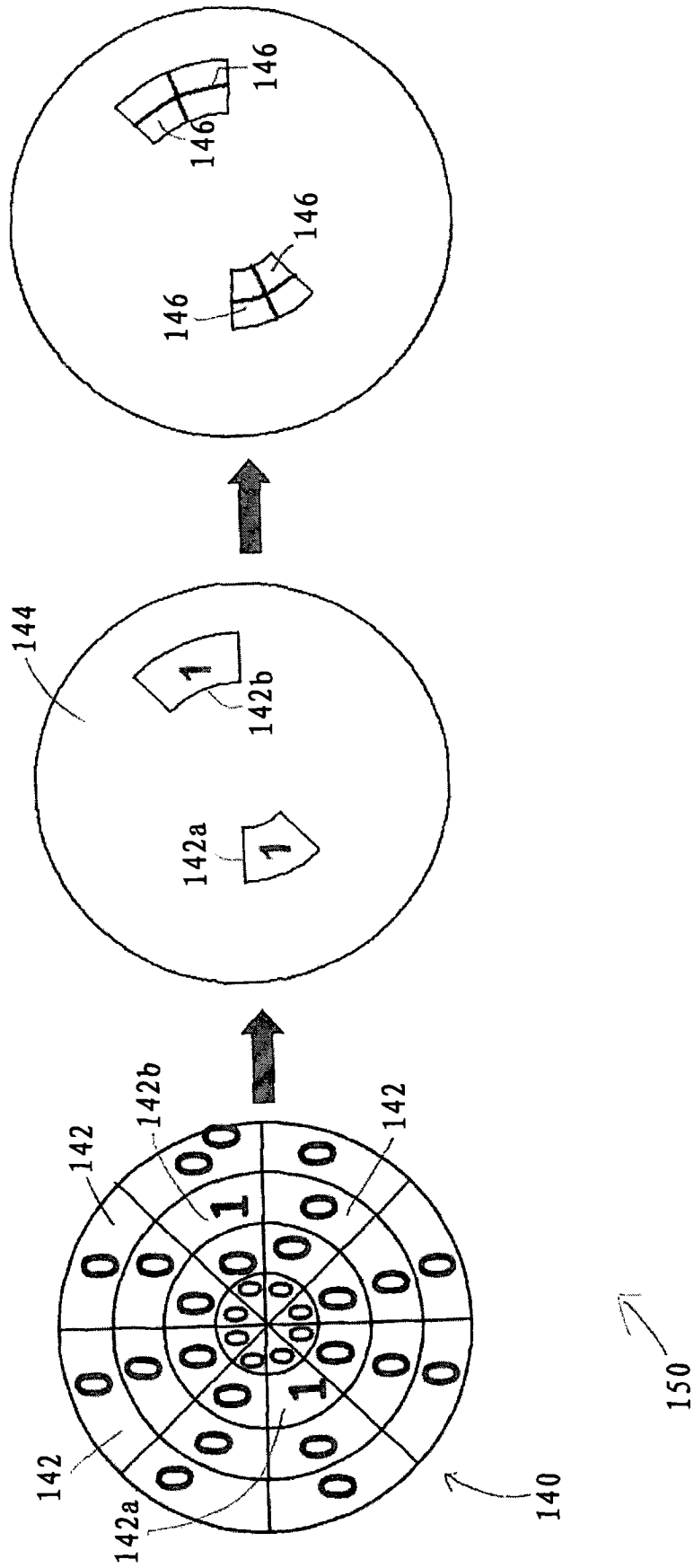
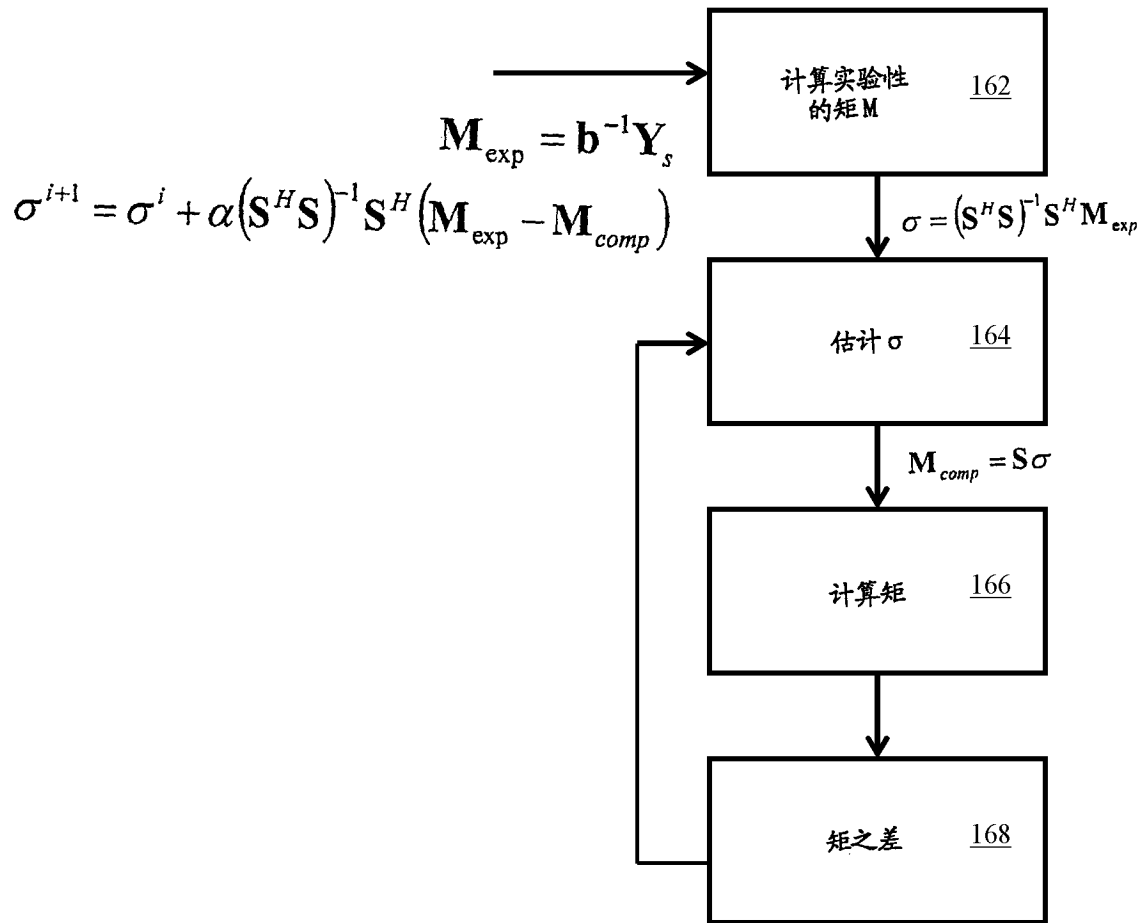


图10



160 ↗

图 11