



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119677458 A

(43) 申请公布日 2025. 03. 21

(21) 申请号 202280099013.1

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2022.08.23

A61B 5/0515 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2025.02.11

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2022/031728 2022.08.23

(87) PCT国际申请的公布数据
W02024/042614 JA 2024.02.29

(71) 申请人 三菱电机株式会社
地址 日本

(72) 发明人 山内一辉

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所
有限公司 11038
专利代理师 许海兰

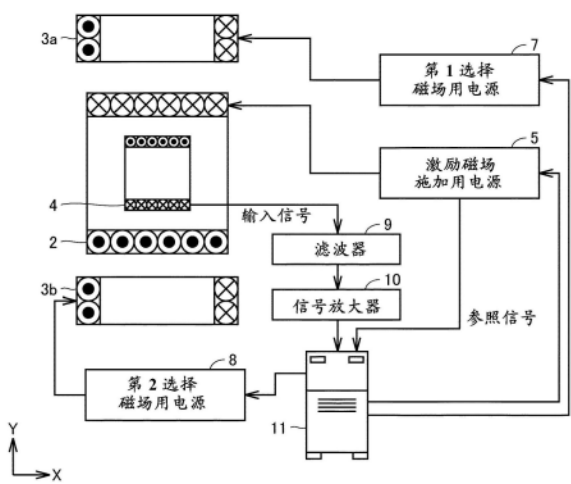
权利要求书2页 说明书10页 附图10页

(54) 发明名称

磁粒子成像系统、磁粒子成像方法以及磁粒子成像程序

(57) 摘要

处理器 (21) 通过基于在将校正试样配置到检查区域时得到的第1检测信号的组、和包含于校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算系统函数。处理器 (21) 通过基于在将检查试样配置到检查区域时得到的第2检测信号的组、和系统函数的第2反卷积运算,得到包含于检查试样的磁粒子的空间分布。



1. 一种磁粒子成像系统,对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像,所述磁粒子成像系统具备:

选择器,生成以在所述检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场;

激励器,以使存在于所述选择磁场的所述磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场;

接收器,接收利用所述激励磁场来激励的所述磁粒子的磁化变化作为检测信号;以及处理器,

所述检测信号用所述磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示,

所述处理器通过基于在将校正试样配置到所述检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于所述校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算所述系统函数,通过基于在将检查试样配置到所述检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和所述系统函数的第2反卷积运算,得到包含于所述检查试样的磁粒子的空间分布。

2. 根据权利要求1所述的磁粒子成像系统,其中,

所述数值模型表示所述校正试样的形状和包含于所述校正试样的所述磁粒子的浓度。

3. 根据权利要求1或者2所述的磁粒子成像系统,其中,

所述校正试样的尺寸大于表示得到的所述磁粒子的空间分布的图像的像素尺寸。

4. 根据权利要求1~3中的任意一项所述的磁粒子成像系统,其中,

所述校正试样是向柱状形状的空间填充磁粒子而成的,

所述处理器使用阶梯函数来生成所述校正试样的数值模型。

5. 根据权利要求1~3中的任意一项所述的磁粒子成像系统,其中,

所述校正试样是向四棱柱的空间填充磁粒子而成的,

所述处理器使用阶梯函数来生成所述校正试样的数值模型。

6. 根据权利要求1~5中的任意一项所述的磁粒子成像系统,其中,

所述处理器针对静置于所述检查区域中的1处的所述校正试样,使用伴随包括所述选择磁场的旋转扫描在内的相对位置变化而收集的第1检测信号的数据组,来执行所述第1反卷积运算。

7. 根据权利要求1~6中的任意一项所述的磁粒子成像系统,其中,

所述处理器以使所述第1检测信号的数据组的各要素、与通过预想系统函数和所述校正试样的数值模型的卷积运算得到的第1预想检测信号的数据组的各要素的误差的平方和减少的方式,更新所述预想系统函数,从而执行所述第1反卷积运算。

8. 根据权利要求1~7中的任意一项所述的磁粒子成像系统,其中,

所述处理器以使所述第2检测信号的数据组的各要素、与通过利用第1反卷积运算来计算的所述系统函数和预想磁粒子分布的卷积运算得到的第2预想检测信号的数据组的各要素的误差的平方和减少的方式,更新所述预想磁粒子分布,从而执行所述第2反卷积运算。

9. 一种磁粒子成像方法,对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像,所述磁粒子成像方法具备:

选择器生成以在所述检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场的步骤;

励磁器以使存在于所述选择磁场的所述磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场的步

骤;以及

接收器接收利用所述激励磁场来激励的所述磁粒子的磁化变化作为检测信号的步骤,所述检测信号用所述磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示,

所述磁粒子成像方法包括:

处理器通过基于在将校正试样配置到所述检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于所述校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算所述系统函数的步骤;以及

所述处理器通过基于在将检查试样配置到所述检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和所述系统函数的第2反卷积运算,得到包含于所述检查试样的磁粒子的空间分布的步骤。

10. 一种磁粒子成像程序,在对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像的磁粒子成像系统中使用,其中,

所述磁粒子成像系统生成以在所述检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场,以使存在于所述选择磁场的所述磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场,接收利用所述激励磁场来激励的所述磁粒子的磁化变化作为检测信号,所述磁粒子成像系统具备处理器,所述检测信号用所述磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示,

所述磁粒子成像程序使处理器执行:

通过基于在将校正试样配置到所述检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于所述校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算所述系统函数的步骤;以及

通过基于在将检查试样配置到所述检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和所述系统函数的第2反卷积运算,得到包含于所述检查试样的磁粒子的空间分布的步骤。

磁粒子成像系统、磁粒子成像方法以及磁粒子成像程序

技术领域

[0001] 本公开涉及磁粒子成像系统、磁粒子成像方法以及磁粒子成像程序。

背景技术

[0002] 以往已知磁粒子成像系统。磁粒子成像系统具备：选择单元，在检查区域中生成具有低的磁场区域和高的磁场区域的选择磁场；驱动单元，使检查区域中的2个区域针对磁粒子的相对位置关系变化；激励单元，以使磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场；以及接收单元，接收磁粒子的磁化变化作为检测信号。

[0003] 磁粒子成像系统的检测信号的值是对磁粒子的空间分布卷积积分了系统函数而得到的值，所以为了根据检测信号使磁粒子的空间分布成像，进行伴随系统函数的反卷积的图像重构。

[0004] 系统函数包括磁粒子的磁化曲线、系统（选择单元、驱动单元、激励单元、以及接收单元）的信息，所以一般每次选择用于检查的粒子时、以及针对系统的每个设定条件，在检查前事先取得系统函数的数据。作为系统函数的取得方法，已知基于实际测定的方法。

[0005] 在基于实际测定的方法中，通过使微小的点状的校正试样在检查区域中一点一点移动，取得测定的值作为系统函数。包含于校正试样的磁粒子是微量的，所以为了得到充分的SN比，在一点一点的测定中需要花费时间。其结果，为了取得系统函数而需要大量的时间。

[0006] 针对这样的问题，在专利文献1中，使用基于数值计算的方法。在专利文献1中，活用理论上系统函数具有的空间对称性。例如，在系统函数分布相对2轴对称的情况下，在仅4分之1的区域中设置点状的校正试样并使其移动，取得各位置处的信号强度。之后，以符合系统函数的对称性的方式复制测定信号来制作系统函数。

[0007] 现有技术文献

[0008] 专利文献

[0009] 专利文献1：日本特表2012-510847号公报

发明内容

[0010] 然而，在专利文献1记载的方法中，无法应对由于制造误差产生的系统函数的非对称性。其结果，由于重构图像中发生伪影（artifact）、空间分辨率降低、以及定量性降低等而重构图像的画质劣化。

[0011] 因此，本公开的目的在于，提供一种与基于实际测定的方法相比能够以更短时间取得系统函数，并且能够生成高画质的重构图像的磁粒子成像系统、磁粒子成像方法以及磁粒子成像程序。

[0012] 本公开的对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像的磁粒子成像系统具备：选择器，生成以在检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场；激励器，以使存在于选择磁场的

磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场;接收器,接收利用激励磁场来激励的磁粒子的磁化变化作为检测信号;以及处理器。检测信号用磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示。处理器通过基于在将校正试样配置到检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算系统函数,通过基于在将检查试样配置到检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和系统函数的第2反卷积运算,得到包含于检查试样的磁粒子的空间分布。

[0013] 本公开的对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像的磁粒子成像方法具备:选择器生成以在检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场的步骤;励磁器以使存在于选择磁场的磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场的步骤;以及接收器接收利用激励磁场来激励的磁粒子的磁化变化作为检测信号的步骤。检测信号用磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示。磁粒子成像方法包括:处理器通过基于在将校正试样配置到检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算系统函数的步骤;以及处理器通过基于在将检查试样配置到检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和系统函数的第2反卷积运算,得到包含于检查试样的磁粒子的空间分布的步骤。

[0014] 在本公开的对检查区域中的磁粒子的空间分布进行成像的磁粒子成像系统中使用的磁粒子成像程序中,磁粒子成像系统生成以在检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场,以使存在于选择磁场的磁粒子的磁化变化的方式提供激励磁场,接收利用激励磁场来激励的磁粒子的磁化变化作为检测信号。磁粒子成像系统具备处理器。检测信号用磁粒子的空间分布和系统函数的卷积表示。磁粒子成像程序使处理器执行:通过基于在将校正试样配置到检查区域时得到的第1检测信号的数据组、和包含于校正试样的磁粒子的空间分布的数值模型的第1反卷积运算,计算系统函数的步骤;以及通过基于在将检查试样配置到检查区域时得到的第2检测信号的数据组、和系统函数的第2反卷积运算,得到包含于检查试样的磁粒子的空间分布的步骤。

[0015] 根据本公开,能够以短时间取得系统函数,并且能够生成高画质的重构图像。

附图说明

[0016] 图1是示出磁粒子成像系统的整体结构的一个例子的图。

[0017] 图2是示出信息处理装置11的硬件结构的一个例子的图。

[0018] 图3是示出实施方式的磁粒子成像方法的过程的流程图。

[0019] 图4是示出图3的步骤S104的校正试样测定的过程的流程图。

[0020] 图5是示出校正试样的配置的例子图。

[0021] 图6是示出图4的步骤S206的系统函数生成(第1反卷积运算)的子例程的过程的流程图。

[0022] 图7是示出图3的步骤S107的诊断测定(检查试样测定)的过程的流程图。

[0023] 图8是示出图7的步骤S406的空间分布成像处理(第2反卷积运算)的过程的流程图。

- [0024] 图9是示出专利文献1的校正试样的测定的过程的流程图。
- [0025] 图10是示出专利文献1的校正试样的配置例的图。
- [0026] 图11是示出专利文献1的系统函数生成子例程的过程的流程图。

具体实施方式

[0027] 以下,参照附图说明实施方式。

[0028] 实施方式1.

[0029] 图1是示出磁粒子成像系统的整体结构的一个例子的图。

[0030] 磁粒子成像系统具备激励器2、第1选择器3a、第2选择器3b、接收器4、激励磁场施加用电源5、第1选择磁场用电源7、第2选择磁场用电源8、滤波器9、信号放大器10、以及信息处理装置11。

[0031] 第1选择器3a以及第2选择器3b生成以在放置被检体的检查区域中形成具有低磁场强度的第1部分区域、和具有更高的磁场强度的第2部分区域的方式具有磁场强度的空间图案的选择磁场。

[0032] 由此,在检查区域中存在的磁粒子中的、可对测定信号作出贡献的磁粒子的区域被限制于第1部分区域附近。将在第1部分区域中特别是磁场强度取接近零的值的区域称为零磁场区域(Field Free Region (FFR))。例如,根据形状,零磁场区域FFR还被称为点状零磁场区域(Field Free Point (FFP))、线状零磁场区域(Field Free Line (FFL))、面状零磁场区域。关于FFL,零磁场区域在某一个方向上延伸即可,例如,也可以是长方形形状(在该情况下长边的长度方向为延伸方向)、椭圆形形状。例如,面状零磁场区域以及FFL与FFP相比可对信号作出贡献的区域更大,所以具有以短时间得到对测定以及图像重构而言充分的SN比这样的优点。

[0033] 第1选择器3a包括第1电磁铁。第2选择器3b包括第2电磁铁。第1电磁铁以及第2电磁铁以在检查区域发生逆向的磁场的方式相向配置。第1电磁铁与第1选择磁场用电源7连接。第2电磁铁与第2选择磁场用电源8连接。从第1选择磁场用电源7向第1电磁铁流过电流、并且从第2选择磁场用电源8向第2电磁铁流过电流,从而发生选择磁场。通过使来自第1选择磁场用电源7以及第2选择磁场用电源8的电流的大小变化,能够使选择磁场(更具体而言第1部分区域以及第2部分区域)针对磁粒子的相对位置关系变化(电气的移动)。

[0034] 例如,通过改变第1电磁铁和第2电磁铁的电流平衡,能够使检查区域中的零磁场区域FFR的位置在并进方向上或者旋转方向上移动。这样,在扫描区域中第1部分区域(特别是零磁场区域FFR)被驱动扫描。选择磁场的发生方法不限于电磁铁。也可以代替第1电磁铁以及第2电磁铁,而使用相向配置的2个永久磁铁、或者永久磁铁和电磁铁的组合。另外,磁场(在本例子中零磁场区域FFR)的扫描方法也不限于上述方法。例如,也可以设为通过第1选择器3a以及第2选择器3b的物理移动、或者电气移动和物理移动的组合来对磁场进行扫描驱动。或者,也可以通过固定磁场的位置并使被检体移动来针对被检体使磁场相对地扫描。

[0035] 激励器2以使放置校正试样或者检查试样等被检体的检查区域的选择磁场中存在的磁粒子的磁化变化的方式施加激励磁场。校正试样是被用于确定系统函数并磁粒子分布已知的试样。检查试样是要检查磁粒子分布的试样。

[0036] 例如,激励器2包括与激励磁场施加用电源5连接的线圈。通过从激励磁场施加用电源5向线圈流过交流电流,对放置被检体的检查区域作为激励磁场而施加交流磁场。

[0037] 通过对被检体施加激励磁场,包含于被检体的磁粒子发生频率与激励磁场相同的基波的磁信号和比其高次的高次谐波的磁信号。对磁粒子修饰了通过抗原抗体反应来与包含于被检体的标的物质偶联的蛋白质等物质。

[0038] 接收器4接收利用激励磁场来激励的磁粒子的磁化变化作为检测信号。接收器4例如包括线圈。接收器4是如霍尔元件、磁电阻元件(AMR(Anisotropic Magneto Resistive,各向异性磁阻)元件、SMR(Semiconductor Magneto Resistive,半导体磁阻)元件、TMR(Tunnel Magneto Resistive,隧道磁阻)元件等)、MI(Magneto Impedance,磁阻抗)传感器等那样能够检测变动磁场的元件即可。将检测信号例如经由噪声去除用的滤波器9以及信号放大器10输入到信息处理装置11。

[0039] 图2是示出信息处理装置11的硬件结构的一个例子的图。

[0040] 信息处理装置11具备处理器21、RAM(Random Access Memory,随机存取存储器)25、读出部26、内部存储部27、显示部22、操作部23、以及通信接口24。

[0041] 处理器21例如是CPU(Central Processing Unit,中央处理单元),执行运算处理。

[0042] RAM25存储伴随处理器21的运算处理而发生的临时性的信息。

[0043] 处理器21读出储存于内部存储部27的程序(包括系统函数生成程序、以及空间分布成像程序),将程序在RAM25中展开并执行。

[0044] 读出部26例如读出记录于CD-ROM(Compact Disk Read Only Memory,紧凑型光盘只读存储器)等光学存储介质的信息。

[0045] 内部存储部27例如是硬盘驱动器。内部存储部27存储系统函数生成程序以及空间分布成像程序等各种程序、以及校正试样的数值模型等各种数据。

[0046] 显示部22例如是液晶显示器。显示部22显示根据处理器21的运算处理生成的画面。

[0047] 操作部23例如包括键盘、鼠标等。操作部23接受由操作人员作出的操作输入。

[0048] 通信接口24经由网络与外部的装置(例如服务器装置)进行通信。

[0049] 系统函数生成程序包括用于根据校正试样的测定信号生成系统函数的处理的命令群。空间分布成像程序包括与患者的生物体等检查试样中存在的磁粒子的空间分布的成像有关的处理的命令群。这些程序例如被记录于光学记录介质,由读出部26读取并储存到内部存储部27。或者,这些程序也可以利用通信接口24从服务器装置下载并储存到内部存储部27。

[0050] 处理器21存储来自接收器4的检测信号。在检测信号被测定为电压的情况下,零磁场区域存在于并进位置 r_i 以及角度 θ_j 时的检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_k(r_i, \theta_j)$ 用系统函数 $S_k(p)$ 和磁粒子分布 $c(p)$ 的卷积表示。 p 是表示三维位置 (x, y, z) 的矢量。卷积运算例如用以下的式表示。系统函数 $S_k(p)$ 是由对磁粒子的磁化曲线、磁粒子成像系统进行校正的装置的特性的影响来决定的。在式(1)中, d^3p 表示 $dx \times dy \times dz$ 。

[0051] [式1]

$$U_k(r_i, \theta_j) = \int S_k(p) \cdot c(p) d^3p \cdots (1)$$

[0053] 系统函数 $S_k(p)$ 是将输入设为磁粒子分布 $c(p)$ 、并将输出设为检测信号的 k 次的高

次谐波分量 $U_k(r_i, \theta_j)$ 时的传递函数。

[0054] 将使用检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_k(r_i, \theta_j)$ 和磁粒子分布 $c(p)$ 来计算系统函数 $S_k(p)$ 称为第1反卷积运算。通过第1反卷积运算,即使不知道系统函数 $S_k(p)$ 的特性也能够根据 $U_k(r_i, \theta_j)$ 和磁粒子分布 $c(p)$ 得到 $S_k(p)$ 。

[0055] 第1反卷积运算的一个例子是:通过对将 $U_k(r_i, \theta_j)$ 的傅里叶变换值除以 $c(p)$ 的傅里叶变换值而得到的值进行逆傅里叶变换来得到 $S_k(p)$ 的方法。

[0056] 在本实施方式中,处理器21使用作为伴随校正试样和选择磁场的相对位置变化而收集的检测信号的第1检测信号的数据组,来执行反卷积运算。以下,将使用第1检测信号的数据组进行的反卷积运算称为第1反卷积运算。在此,“第1检测信号的数据组”是指,在多个位置收集的第1检测信号的数据的集合。因此,作为第1检测信号的数据组的各要素的各数据与第1检测信号的收集位置对应。例如,每当使位置变化时,收集与该位置对应起来的第1检测信号的数据。这些收集的每个位置的第1检测信号的数据的集合成为第1检测信号的数据组。第1反卷积运算既可以使用在扫描结束时与全部位置对应的第1检测信号的数据组来执行,也可以使用每当扫描位置变化时与变化前以及变化后的各位置对应的第1检测信号的数据组来逐次地执行。

[0057] 此时,作为具体的处理,处理器21例如也可以以使利用校正试样的磁粒子分布和预想系统函数的卷积运算得到的第1预想检测信号的数据组、和第1检测信号的数据组成为尽可能接近的值的方式,更新预想系统函数,从而执行第1反卷积运算。作为一个例子,处理器21也可以以使第1预想检测信号的数据组的各要素、与第1检测信号的数据组的各要素的误差的平方和减少的方式更新预想系统函数。

[0058] 将使用检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_k(r_i, \theta_j)$ 和系统函数 $S_k(p)$ 来计算磁粒子分布 $c(p)$ 称为第2反卷积运算。

[0059] 第2反卷积运算的一个例子是:通过对将 $U_k(r_i, \theta_j)$ 的傅里叶变换值除以 $S_k(p)$ 的傅里叶变换值而得到的值进行逆傅里叶变换来得到 $c(p)$ 的方法。

[0060] 在本实施方式中,处理器21使用作为伴随检查试样和选择磁场的相对位置变化而收集的检测信号的第2检测信号的数据组,来执行反卷积运算。以下,将使用第2检测信号的数据组进行的反卷积运算称为第2反卷积运算。在此,“第2检测信号的数据组”是指,多个收集的第2检测信号的数据的集合。因此,作为第2检测信号的数据组的各要素的各数据与第2检测信号的收集位置对应。例如,每当使位置变化时,收集与该位置对应起来的第2检测信号的数据。这些收集的每个位置的第2检测信号的数据的集合成为第2检测信号的数据组。第2反卷积运算既可以使用在扫描结束时与全部位置对应的第2检测信号的数据组来执行,也可以使用每当扫描位置变化时与变化前以及变化后的各位置对应的第2检测信号的数据组来逐次地执行。此时,检查试样既可以静置于检查区域中的1处,也可以静置于多处,还可以相对选择磁场移动。

[0061] 处理器21也可以以使利用系统函数和预想磁粒子分布的卷积运算得到的第2预想检测信号的数据组、和第2检测信号的数据组成为尽可能接近的值的方式,更新预想磁粒子分布,从而执行第2反卷积运算。作为一个例子,处理器21也可以以使第2检测信号的数据组的各要素、与第2预想检测信号的数据组的各要素的误差的平方和减少的方式,更新预想磁粒子分布。

[0062] 图3是示出实施方式的磁粒子成像方法的过程的流程图。

[0063] 在步骤S101中,选定与希望成像的标的物质对应的检查药剂。

[0064] 在步骤S102中,设定适合被检体以及检查药剂的系统条件。检查药剂是对超顺磁性的磁粒子修饰了通过抗原抗体反应来与标的物质偶联的蛋白质等而成的。根据检查药剂的种类,检查药剂的磁化特性不同。进而,在磁化特性不同时,系统函数也不同。因此,需要使用与选定的检查药剂对应的系统函数。磁化特性例如不仅受到磁粒子的芯粒径的大小、以及芯粒径分布等磁粒子自身的特性的影响,而且还受到由对磁粒子修饰的抗体分子的种类的差异引起的流体力学的粒子径的变化以及病灶部附近的粘性等周围环境的影响。

[0065] 系统条件中,作为代表性的条件而包括:励磁强度分布以及励磁频率等激励条件、选择磁场的强度分布等选择条件、驱动选择磁场的驱动条件、接收线圈的灵敏度分布、滤波器特性、以及信号放大器的特性等接收条件。系统条件是对测定信号强度作出贡献的系统设定值。

[0066] 为了保证通过磁粒子的空间分布成像得到的重构图像的可靠性,最好使用在与诊断测定(检查试样测定)相同的条件下取得的系统函数。

[0067] 在步骤S103中,判断在与诊断测定(检查试样测定)相同的条件下取得的系统函数是否存储于信息处理装置11。在未存储这样的系统函数的情况下,处理进入到步骤S104。

[0068] 在步骤S104中,进行校正试样测定。由此,在诊断测定(检查试样)之前进行校正试样测定。

[0069] 在步骤S105中,判定系统函数的取得时期。在系统函数并非是在一定期间内取得的函数的情况下,处理返回到步骤S104。其原因为,即使在需要的系统函数已经存储于信息处理装置11的情况下,由于磁粒子成像系统的状态经时间变化,所以最好实施按照每个某一定期间测定校正试样的定期检查。在使用检查药剂的种类或者系统条件不符合的系统函数来进行诊断测定的情况下,通过空间分布成像得到的重构图像成为包含伪影的图像,并且磁粒子的定量性会受损。其结果,对诊断测定造成恶劣影响。

[0070] 在步骤S106中,选择系统函数。在此,例如,选择最新的系统函数。

[0071] 在选择系统函数后,在步骤S107中,执行诊断测定(检查试样测定)。在图3所示的磁粒子成像方法中,首先,判断有无符合各种条件(例如检查药剂的种类、系统条件或者时期性条件)的系统函数,如果无符合的系统函数,则在检查试样测定之前进行校正试样测定,得到符合条件的系统函数。

[0072] 图4是示出图3的步骤S104的校正试样测定的过程的流程图。

[0073] 图4所示的流程图中的步骤S201~S206的处理是通过处理器21执行在RAM25中展开的程序来实现的。

[0074] 在步骤S200中,将校正试样配置到检查区域。

[0075] 图5是示出校正试样的配置的例子的图。在本例子中,图5中的1个格子与磁粒子的空间分布的重构图像的1个像素对应。校正试样的尺寸大于重构图像的像素尺寸即可。图5所示的例子为作为零磁场区域而使用线状零磁场区域(FFL)的例子。校正试样例如放在检查区域的大致中央。

[0076] 在步骤S201中,处理器21生成控制向第1电磁铁以及第2电磁铁的电力供给的指令,将生成的指令输出给第1选择磁场用电源7以及第2选择磁场用电源8。第1选择磁场用电

源7以及第2选择磁场用电源8根据指令而开始向第1电磁铁以及第2电磁铁供给电力。其结果,在检查区域中发生选择磁场。

[0077] 在步骤S202中,处理器21生成控制向激励器2的电力供给的指令,将生成的指令输出给激励磁场施加用电源5。激励磁场施加用电源5根据指令而开始向激励器2供给电力。其结果,对被检体施加交流的激励磁场。

[0078] 在步骤S203中,处理器21通过调整从第1选择磁场用电源7以及第2选择磁场用电源8向第1电磁铁以及第2电磁铁的电流平衡,扫描检查区域中的选择磁场。例如,针对静置于检查区域中的1处的校正试样,使选择磁场的相对位置变化。进而,在FFL的情况下,也可以伴随旋转扫描。

[0079] 在步骤S204中,接收器4接收利用激励磁场来激励的磁粒子的磁化力矩的变化作为检测信号。将检测信号经由噪声去除用的滤波器9以及信号放大器10输入到信息处理装置11。

[0080] 在步骤S205中,处理器21根据预先设定的结束条件而判定检查区域中的选择磁场的扫描是否结束。在扫描未结束的情况下,处理返回到步骤S203。在扫描结束的情况下,处理进入到步骤S206。例如,作为零磁场区域FFR是线状零磁场区域(FFL)时的一个例子,通过使FFL以在0度到180度的范围中指定的角度刻度旋转、并且在各角度下使FFL向检查区域中的全部范围的位置并进移动,扫描结束。在零磁场区域FFR为其他形状时,扫描结束条件不同。

[0081] 在步骤S206中,处理器21执行使用在步骤S204中存储的检测信号的组来生成系统函数的处理(第1反卷积运算)。

[0082] 此外,步骤S201的选择磁场发生和步骤S202的激励磁场发生的顺序也可以反过来。步骤S203的选择磁场的扫描驱动和步骤S204的信号检测的顺序也可以反过来。

[0083] 图6是示出图4的步骤S206的系统函数生成(第1反卷积运算)的子例程的过程的流程图。

[0084] 在步骤S301中,处理器21根据表示在图4的步骤S204中存储的检测信号的组以及零磁场区域的扫描位置的信息而生成校正测定正弦图。校正测定正弦图是表示高次谐波分量的次数 k 、并进位置 r 以及角度 θ 下的检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_k(r, \theta)$ 的映射(map)。

[0085] $U_k(r_i, \theta_j)$ 用系统函数 $S_k(p)$ 和校正试样的磁粒子分布 $c(p)$ 的卷积表示。

[0086] 在步骤S302中,处理器21设定预想系统函数 $S2_k(p)$ 。在步骤S302的第1次中,预想系统函数 $S2_k(p)$ 被设定预先决定的初始值。

[0087] 在步骤S303中,处理器21通过在步骤S202中设定的预想系统函数 $S2_k(p)$ 和校正试样的磁粒子分布 $c(p)$ 的卷积运算,计算预想检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U2_k(r, \theta)$ 。

[0088] 校正试样的磁粒子分布 $c(p)$ 用表示校正试样的形状以及磁粒子浓度的数值模型表示。在作为校正试样使用以浓度 c_t 均匀地填充到柱状形状的空间的磁粒子的情况下,使用阶梯函数 $H(p)$ 如下那样表示数值模型。例如,在校正试样是圆柱形状(在YZ平面中直径 R 的圆、X方向的长度为 L)的情况下,数值模型用以下的式表示。

[0089]
$$c(r) = c_t \times [H((R/2)^2 - (z-z_0)^2 - (y-y_0)^2) \times H(L/2 - (x-x_0))] \cdots (A1)$$

[0090] 在校正试样是四棱柱形状(X方向的长度 L_x 、Y方向的长度 L_y 、Z方向的长度 L_z)的情

况下,数值模型用以下的式表示。

$$[0091] \quad c(r) = c_t \times [H(L_x/2 - (x-x_0)) \times H(L_y/2 - (y-y_0)) \times H(L_z/2 - (z-z_0))] \cdots (A2)$$

[0092] 在式(A1)以及(A2)中, x_0 、 y_0 、 z_0 是校正试样的中心坐标。

[0093] 处理器21生成校正预想正弦图。校正预想正弦图是表示高次谐波分量的次数 k 、并进位置 r 以及角度 θ 下的预想检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_{2k}(r, \theta)$ 的映射。

[0094] 在步骤S304中,处理器21计算校正测定正弦图的各要素与校正预想正弦图的各要素的误差的平方和 $E1$ 。

[0095] 例如,在将表示预想系统函数 $S_{2k}(p)$ 的张量设为 S_{ass} 、将表示校正试样的磁粒子分布的数值模型的张量设为 C_{model} 时,表示校正预想正弦图的张量 U_{ass} 用以下的式表示。 S_{ass} 具有 $k, r_i, \theta_j, x, y, z$ 的维度。 C_{model} 具有 x, y, z 的维度。 U_{ass} 具有 k, r_i, θ_j 的维度。

$$[0096] \quad U_{ass} = S_{ass} \cdot C_{model} \cdots (B1)$$

[0097] 在将表示校正测定正弦图的张量设为 U_{cal} 时, $E1$ 用以下的式表示。 U_{cal} 具有 k, r_i, θ_j 的维度。以下的式是2个张量的各要素的误差的平方和。

$$[0098] \quad E1 = |U_{cal} - U_{ass}|^2 \cdots (B2)$$

[0099] 在步骤S305中,处理器21判定 $E1$ 是否为预先决定的收敛条件以下。在 $E1$ 是预先决定的基准值以下的情况下,处理返回到步骤S302。在 $E1$ 超过预先决定的基准值的情况下,处理进入到步骤S306。

[0100] 在步骤S302中,处理器21更新预想系统函数 $S_{2k}(p)$ 。处理器如以下的式那样通过梯度下降法更新预想系统函数 $S_{2k}(p)$ 。 η 是决定更新速度的加速系数。

$$[0101] \quad \mathbf{S2_k(p)} = \mathbf{S2_k(p)} - \eta \nabla E2(\mathbf{S2_k(p)}) \dots (B3)$$

[0102] 在步骤S306中,处理器21将与满足收敛条件的校正预想正弦图对应的预想系统函数 $S_{2k}(p)$ 决定为系统函数 $S_k(p)$ 。

[0103] 此外,一般而言,系统函数具有平滑的分布,但在设定的预想系统函数 $S_{2k}(p)$ 是如包含噪声那样的不平滑的分布的情况下,导致对空间分布成像的结果得到的空间分布影像也赋予噪声这样的结果。因此,针对决定的系统函数 $S_k(p)$ 在后处理中进行平滑化、或者在用于决定系统函数 $S_k(p)$ 的收敛计算中赋予制约即可。

[0104] 图7是示出图3的步骤S107的诊断测定(检查试样测定)的过程的流程图。

[0105] 图7所示的流程图中的步骤S401~S406的处理是通过处理器21执行在RAM25中展开的程序来实现的。

[0106] 在步骤S400中,将检查试样配置到检查区域。

[0107] 步骤S401~S405的处理与图4的步骤S201~S205的处理相同,所以不反复进行说明。

[0108] 在步骤S406中,处理器21使用在步骤S404中存储的检测信号的组来执行空间分布成像处理(第2反卷积运算)。

[0109] 图8是示出图7的步骤S406的空间分布成像处理(第2反卷积运算)的过程的流程图。

[0110] 在步骤S501中,处理器21根据表示在图7的步骤S404中存储的检测信号的组以及零磁场区域的扫描位置的信息而生成检查测定正弦图。检查测定正弦图是表示高次谐波分量的次数 k 、并进位置 r 、角度 θ 下的检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_k(r, \theta)$ 的映射。

[0111] $U_k(r_i, \theta_j)$ 用系统函数 $S_k(p)$ 和检查试样的磁粒子分布 $c(p)$ 的卷积表示。

[0112] 在步骤S502中,处理器21设定预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 。在步骤S502的第1次中,预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 被设定预先决定的初始值。

[0113] 在步骤S503中,处理器21通过在步骤S502中设定的预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 和系统函数 $S_k(p)$ 的卷积运算,计算预想检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_{2k}(r, \theta)$ 。

[0114] 处理器21生成检查预想正弦图。检查预想正弦图是表示高次谐波分量的次数 k 、并进入位置 r 以及角度 θ 下的预想检测信号的 k 次的高次谐波分量 $U_{2k}(r, \theta)$ 的映射。

[0115] 在步骤S504中,处理器21计算检查测定正弦图的各要素与检查预想正弦图的各要素的误差的平方和 E_2 。

[0116] 例如,在将表示系统函数 $S_k(p)$ 的张量设为 S 、将表示预想磁粒子分布的张量设为 C_{exp} 时,表示检查预想正弦图的张量 U_{exp} 用以下的式表示。 S 具有 $k, r_i, \theta_j, x, y, z$ 的维度。 C_{exp} 具有 x, y, z 的维度。 U_{exp} 具有 k, r_i, θ_j 的维度。

[0117] $U_{exp} = S \cdot C_{exp} \cdots (C1)$

[0118] 在将表示检查测定正弦图的张量设为 U_{ins} 时, E_2 用以下的式表示。 U_{ins} 具有 k, r_i, θ_j 的维度。以下的式是2个张量的各要素的误差的平方和。

[0119] $E_2 = |U_{ins} - U_{exp}|^2 \cdots (C2)$

[0120] 在步骤S505中,处理器21判定 E_2 是否为预先决定的收敛条件以下。在 E_2 是预先决定的基准值以下的情况下,处理返回到步骤S502。在 E_2 超过预先决定的基准值的情况下,处理进入到步骤S506。

[0121] 在步骤S502中,处理器21更新预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 。处理器21如以下的式那样通过梯度下降法更新预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 。

[0122] **$c_2(p) = c_2(p) - \eta \nabla E_2(c_2(p)) \dots (C3)$**

[0123] 在步骤S506中,处理器21将满足收敛条件的预想磁粒子分布 $c_2(p)$ 决定为磁粒子分布 $c(p)$ 。表示该磁粒子分布 $c(p)$ 的图像是空间分布成像数据、即重构图像。

[0124] 接下来,说明专利文献1、以及专利文献1和实施方式的相异。

[0125] 图9是示出专利文献1的校正试样的测定的过程的流程图。

[0126] 图9的流程图与图4的流程图相异的点是图9的流程图代替步骤S200、S206而具备步骤S800、S806的点。

[0127] 图10是示出专利文献1的校正试样的配置例的图。

[0128] 在专利文献1中,在步骤S801中,将点状的校正试样配置到与检查区域中的1个像素对应的空间位置。使校正试样以与1个像素对应的幅度依次移动。

[0129] 图11是示出专利文献1的系统函数生成子例程的过程的流程图。

[0130] 在步骤S901中,读出系统函数的对称性。

[0131] 在步骤S902中,通过以符合系统函数的对称性的方式复制测定信号(检测信号)的数据,制作系统函数。

[0132] 在步骤S903中,输出系统函数数据。

[0133] 在本实施方式中,校正试样的分布被反卷积,所以与专利文献1的方法不同,无需使校正试样的大小符合与重构图像的像素对应的大小,所以能够使校正试样的大小大于重构图像的像素的大小。由于校正试样大,测定校正试样的时的测定信号变大,所以即便测定

时间短也能够得到充分的SN比。其结果,能够以更短的时间执行校正试样的测定。因此,在本实施方式中,能够以与以往相比高的频度实施磁粒子成像系统的定期检查,所以空间分布成像的画质提高。

[0134] 另外,在本实施方式中,校正试样的测定能够通过与诊断测定(检查试样的测定)同样的过程来进行。即,无需将校正试样移动设置到重构图像的像素的对应的位置而进行改变校正试样和选择磁场的相对位置关系的驱动扫描即可。例如,在作为零磁场区域使用FFL的情况下,也可以针对检查区域中的某个校正试样,通过伴随FFL的并进扫描以及旋转扫描的测定来执行校正试样的测定。在这样的情况下,不需要校正试样的机械性的扫描,所以校正测定的时间变短,并且也不需要用于执行机械性的扫描的驱动机构。

[0135] 重构图像一般用按被格子状划分的像素表示,所以在校正试样的数值模型化中,与圆柱形状相比在使用四棱柱形状时,校正试样端部的离散化误差变小。由于数值模型化的误差变小,能够减小生成的系统函数的误差、进而空间分布影像的误差。

[0136] 应认为本次公开的实施方式在所有点上仅为例示而不是限制性的。本公开的范围并非上述说明而是通过权利要求书表示,意图包括与权利要求书均等的意义以及范围内的所有变更。在实施方式中说明的内容中的、权利要求书的权利要求1记载的事项以外的内容并非必须这一点对于本领域技术人员来说是显而易见的。

[0137] (符号说明)

[0138] 2:激励器;3a:第1选择器;3b:第2选择器;4:接收器;5:激励磁场施加用电源;7:第1选择磁场发生以及驱动用电源;8:第2选择磁场发生以及驱动用电源;9:滤波器;10:信号放大器;11:信息处理装置;21:处理器;22:显示部;23:操作部;24:通信接口;25:RAM;26:读出部;27:内部存储部。

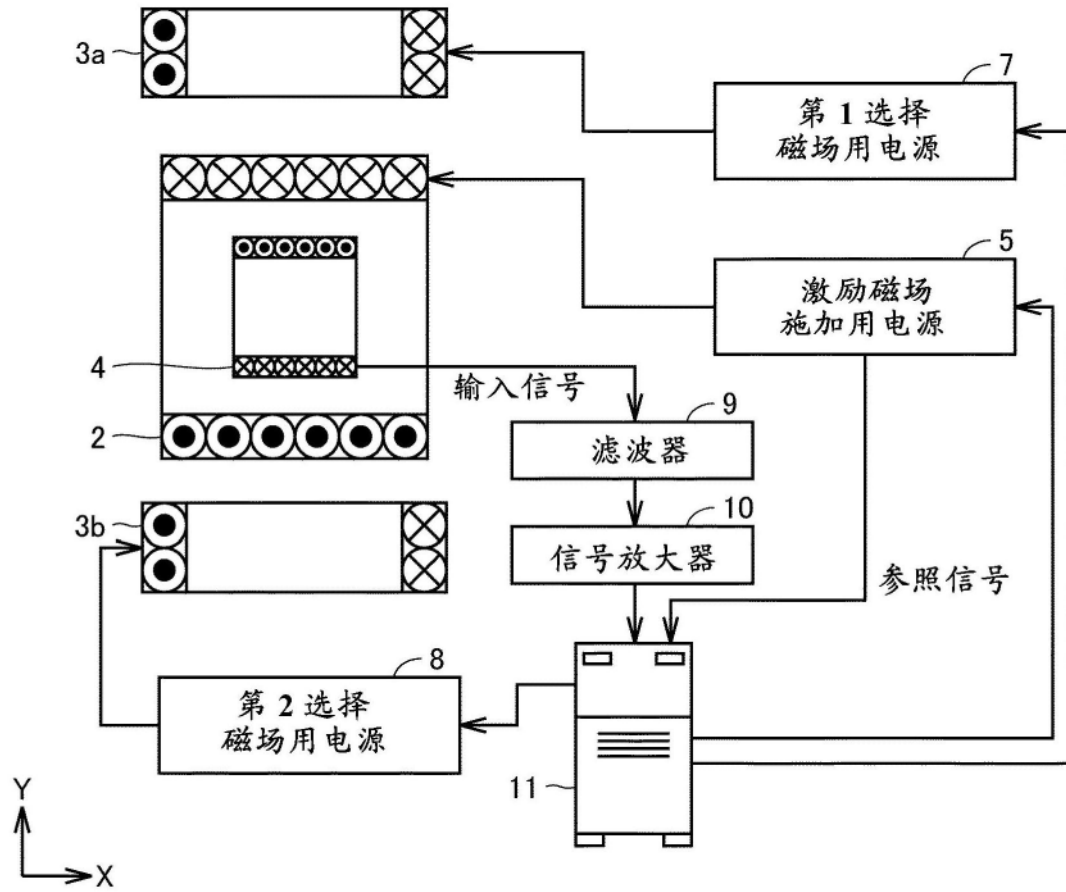


图1

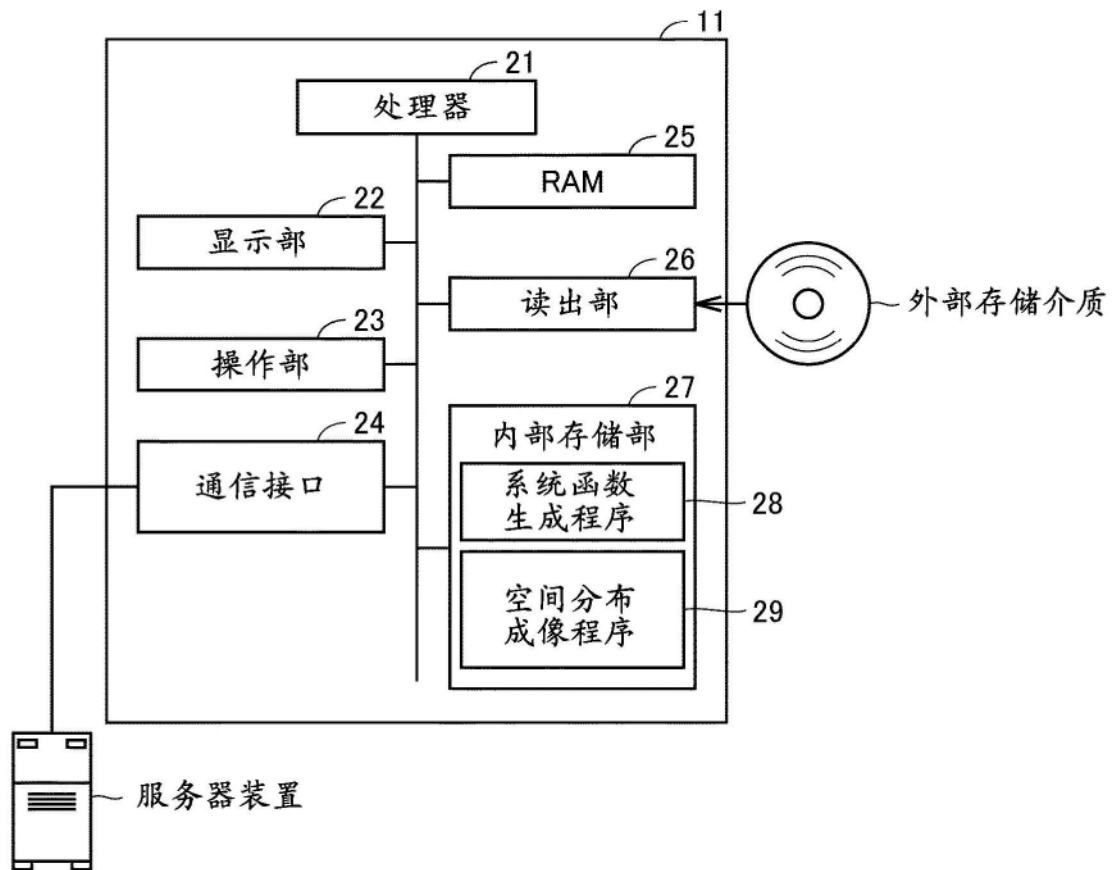


图2

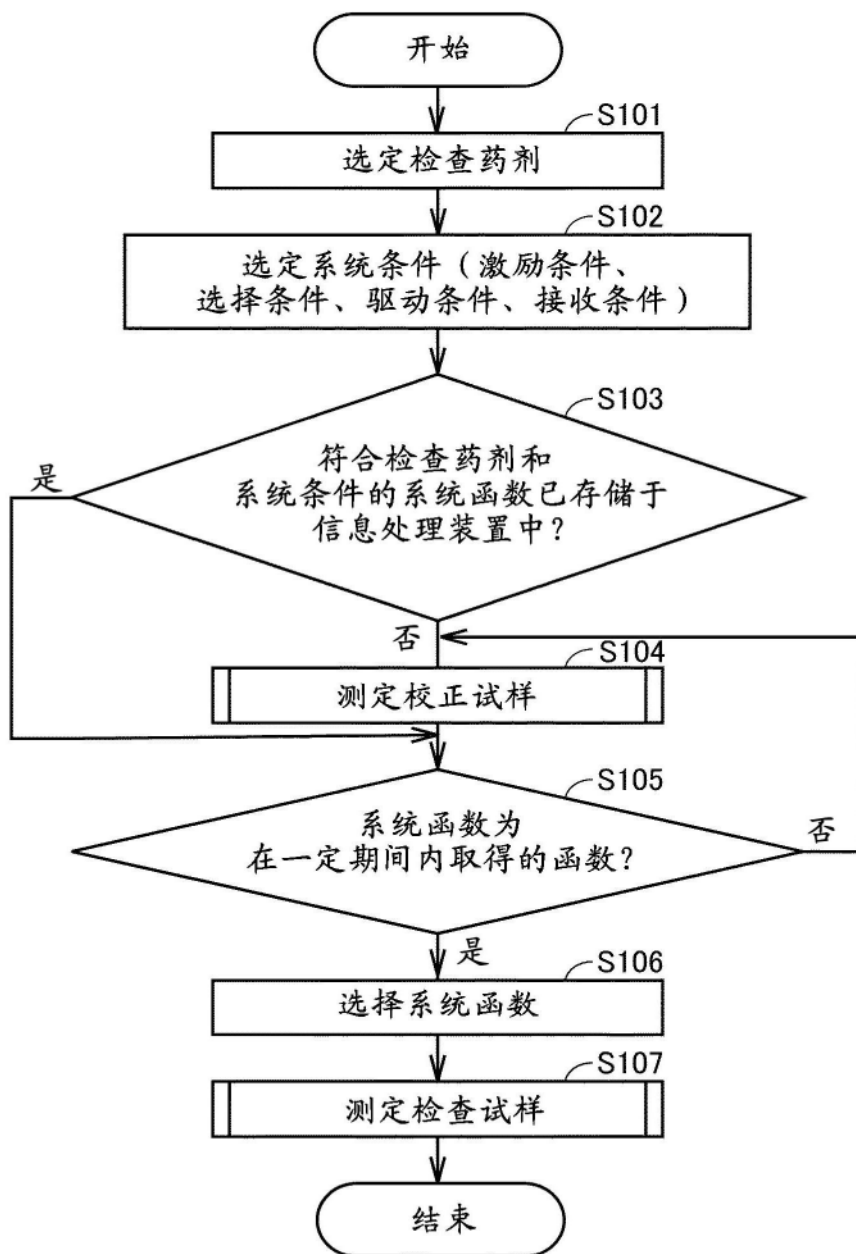


图3

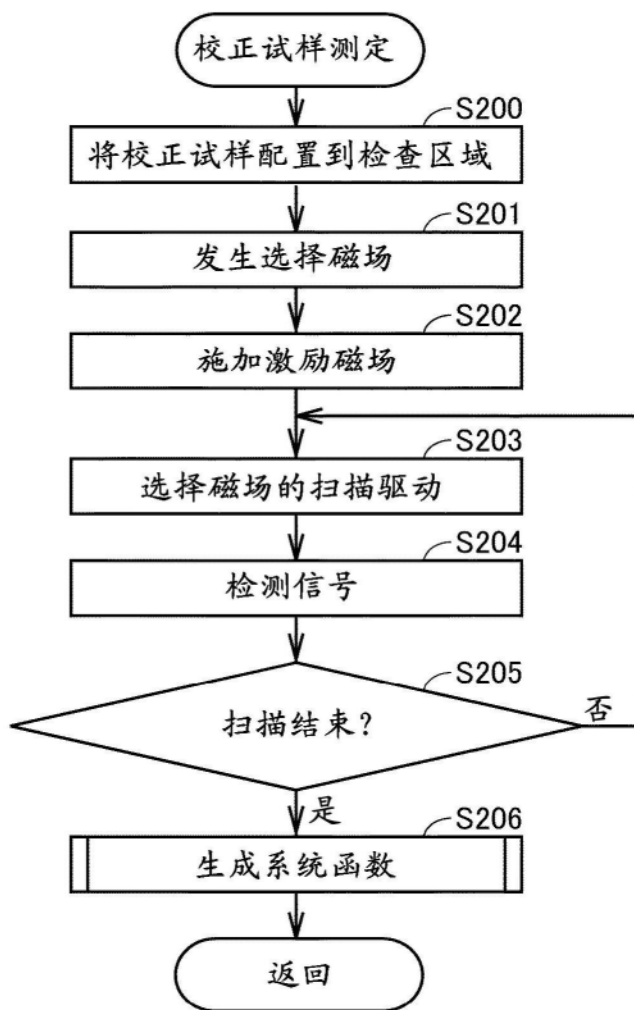


图4

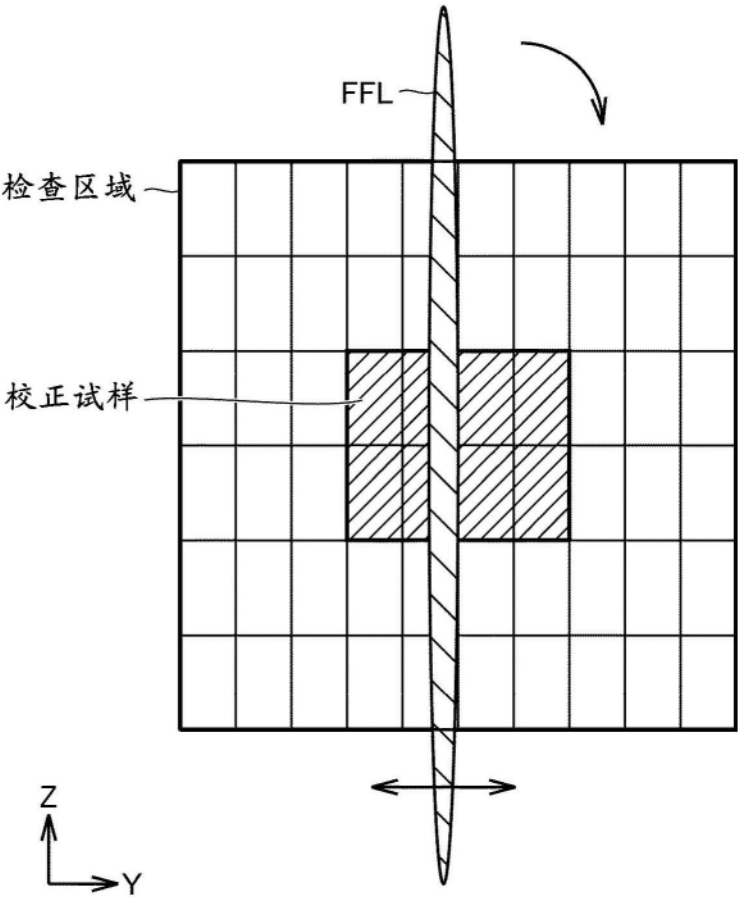


图5

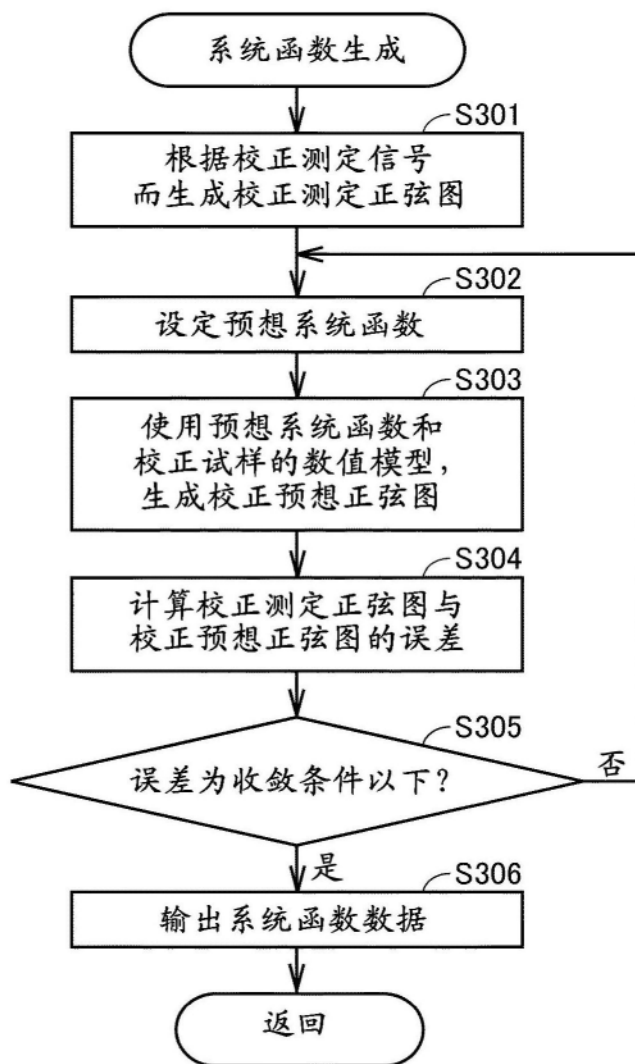


图6

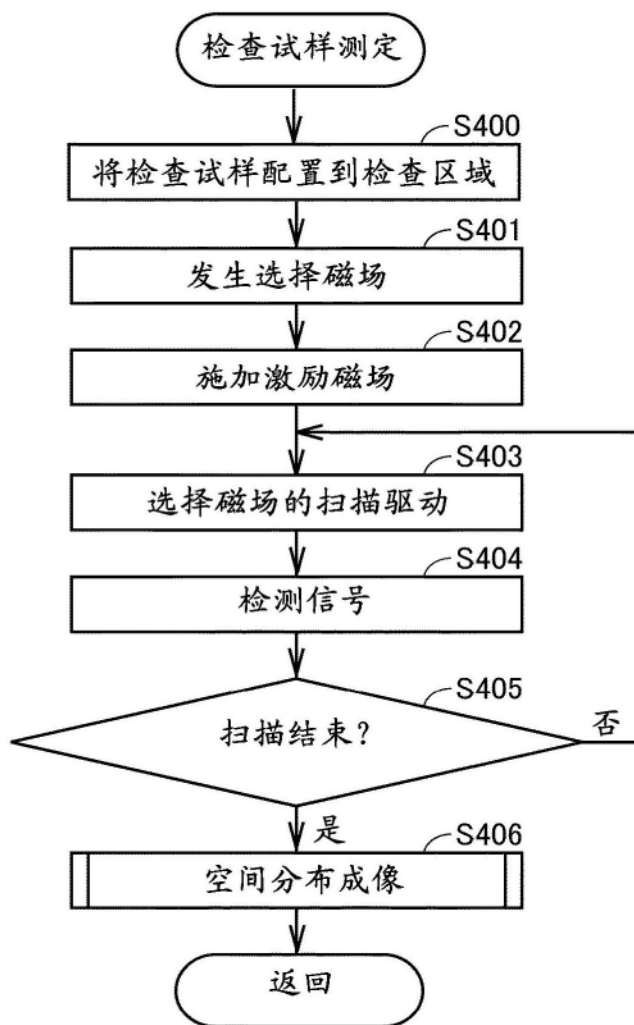


图7

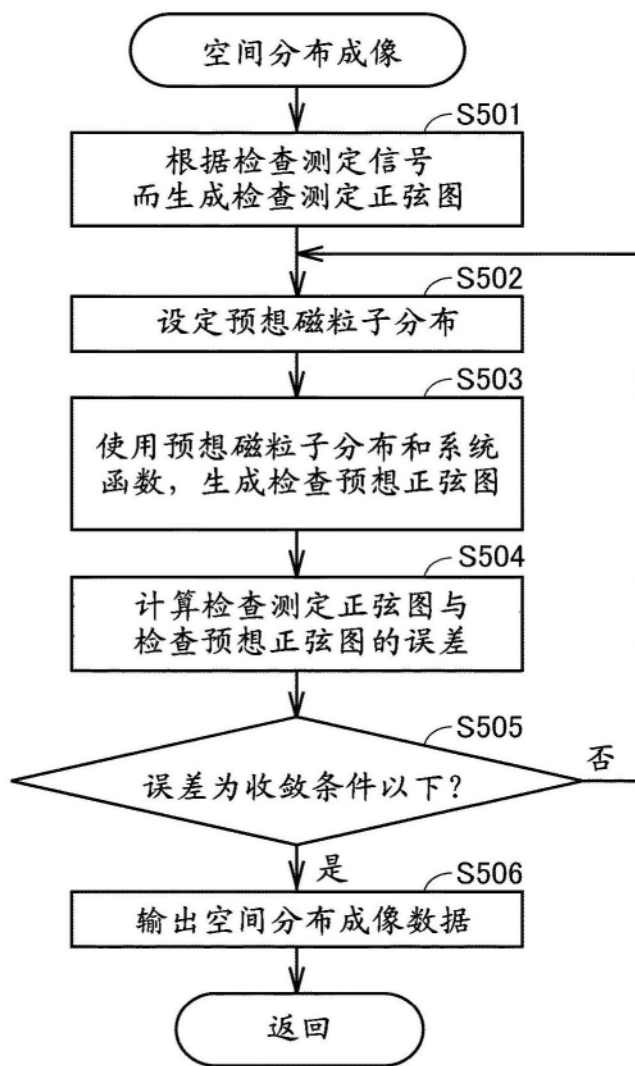


图8

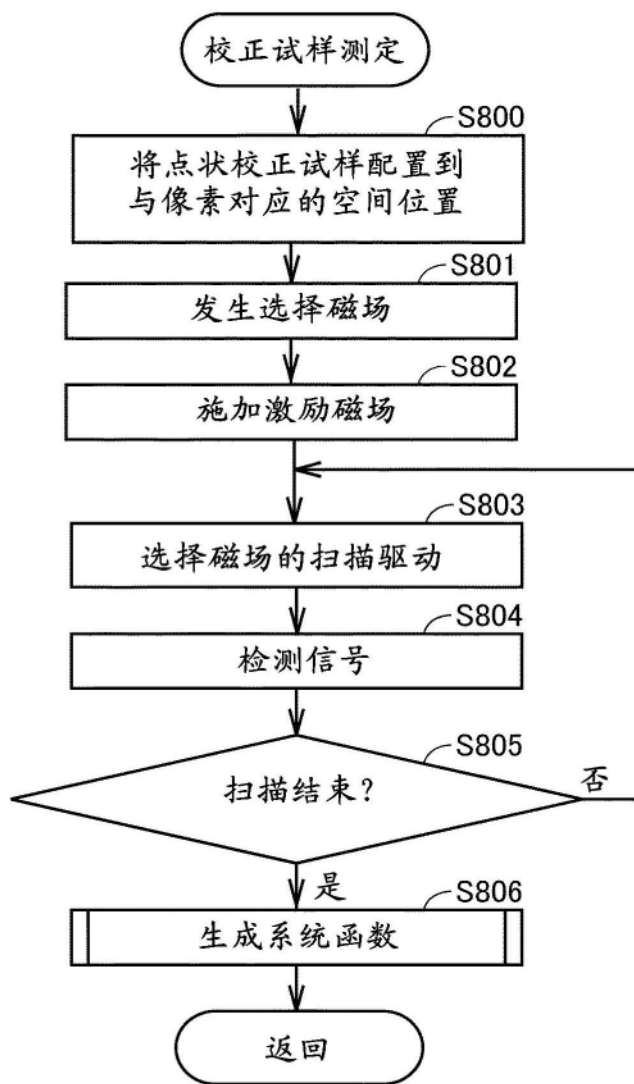


图9

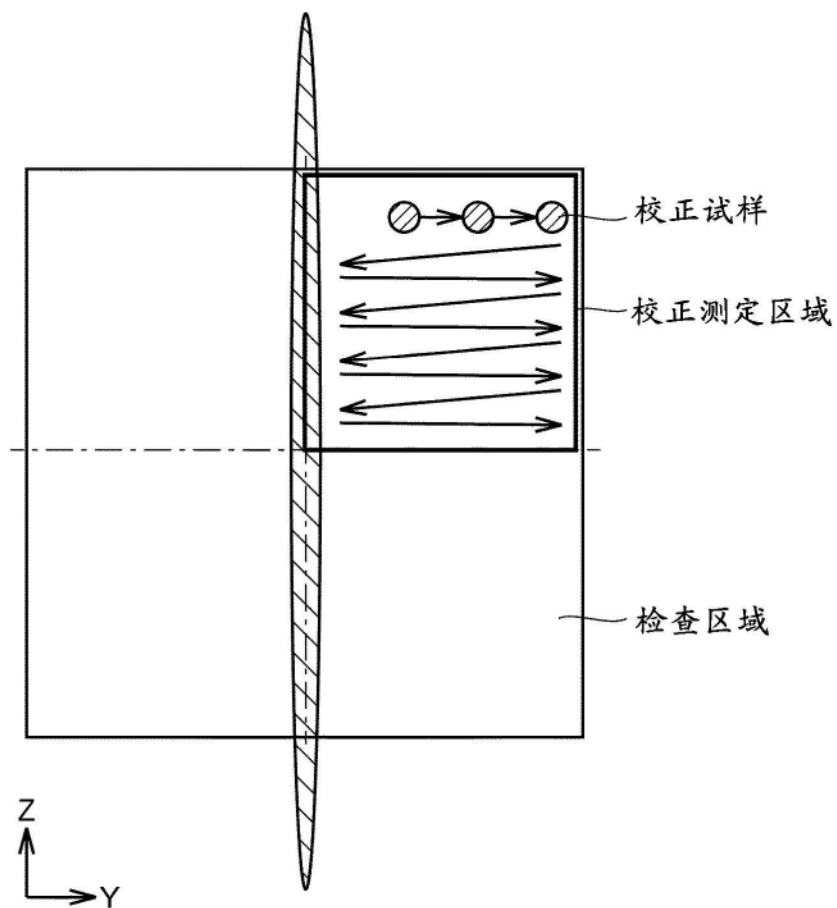


图10

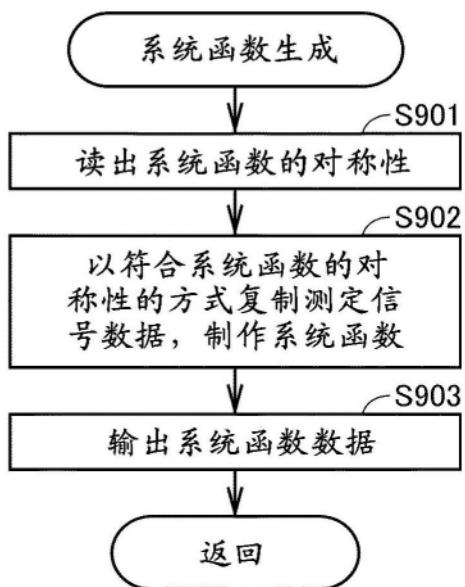


图11