



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101916640 B

(45) 授权公告日 2014. 04. 09

(21) 申请号 201010223949. X

US 5786695 A, 1998. 07. 28, 全文.

(22) 申请日 2010. 03. 23

US 2009/0009171 A1, 2009. 01. 08, 全文.

US 2007/0257758 A1, 2007. 11. 08, 全文.

(30) 优先权数据

0904910.7 2009. 03. 23 GB

1004361.0 2010. 03. 17 GB

审查员 李娇娇

(73) 专利权人 英国西门子公司

地址 英国坎伯利

(72) 发明人 罗伯特·斯莱德

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 王冉

(51) Int. Cl.

H01F 6/00(2006. 01)

G01R 33/38(2006. 01)

G01R 33/385(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1882847 A, 2006. 12. 20, 全文.

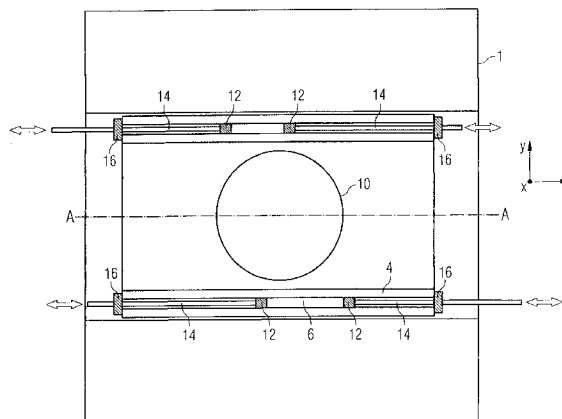
权利要求书3页 说明书11页 附图13页

(54) 发明名称

用于磁场匀场的装置和方法

(57) 摘要

一种用于提高在均匀场区 (10) 内的磁场的均匀性的匀场装置和方法, 所述匀场装置包括: 在磁场发生器 (1) 和均匀场区 (10) 之间的体积内延伸的匀场通道 (6); 位于每个匀场通道 (6) 内的至少一片匀场材料 (12); 用于沿着相应的匀场通道移动每个匀场件的装置 (14; 46); 以及用于保持每个匀场件在合适的位置的保持装置 (16; 46)。在磁体在场下, 匀场通过在匀场通道内移动匀场件进行。在匀场阶段中, 没有匀场件加入或移出匀场通道。



1. 一种圆柱形超导磁体装置包括：

具有孔 (5) 的中空圆柱形超导磁场发生器 (1)；

还包括

匀场装置 (6, 12, 14, 16), 用于改变在均匀场区 (10) 内的磁场的均匀性,

所述匀场装置本身包括：

在所述孔内轴向延伸的匀场通道 (6), 该匀场通道在所述磁场发生器和所述均匀场区之间的体积中,

至少一个包含磁性材料的匀场件 (12), 该匀场件位于各匀场通道 (6) 内；

保持装置 (16 ;46), 该保持装置用于在轴向位置保持各匀场件；

装置 (14 ;46), 该装置用于当所述磁场发生器在产生磁场时, 在相应的匀场通道内轴向移动各匀场件, 从而在相应的匀场通道内重新定位匀场件, 因此在均匀场区 (10) 范围内改变磁场的均匀性 ;其中

所述保持装置 (16 ;46) 用于将各垫匀场件保持在其调整了的轴向位置, 用于在相应的匀场通道内轴向移动各匀场件的所述装置 (14 ;46) 是可操作的以便在相应匀场通道内调整各匀场件的轴向位置而没有从匀场通道增加和移出任何匀场件。

2. 根据权利要求 1 的圆柱形超导磁体装置, 还包括位于所述孔内的中空圆柱形梯度线圈组件 (4), 并包括位于所述孔内的用于在均匀场区 (10) 中产生磁场梯度的线圈 (7)。

3. 根据权利要求 2 的圆柱形超导磁体装置, 其中匀场通道 (6) 位于所述梯度线圈组件的径向外表面和所述中空超导磁场发生器的孔壁之间。

4. 根据权利要求 2 的圆柱形超导磁体装置, 其中匀场通道 (6) 位于所述梯度线圈组件的径向内表面和所述均匀场区之间。

5. 根据权利要求 2 的圆柱形超导磁体装置, 其中匀场通道 (6) 位于所述梯度线圈组件的径向内表面和所述梯度线圈组件的所述孔内的体 (RF) 线圈之间。

6. 根据权利要求 2 的圆柱形超导磁体装置, 其中匀场通道 (6) 在梯度线圈组件 (4) 内形成且穿过该梯度线圈组件轴向延伸。

7. 根据权利要求 6 的圆柱形超导磁体装置, 其中所述梯度线圈组件包括梯度线圈 (7) 和位于该梯度线圈的径向外侧的梯度屏蔽线圈 (7A); 所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈被嵌入陶制材料 (8), 所述匀场通道在所述陶制材料内形成, 径向介于所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈之间。

8. 根据权利要求 6 的圆柱形超导磁体装置, 其中所述梯度线圈组件包括梯度线圈和位于该梯度线圈径向外侧的梯度屏蔽线圈 ; 所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈被嵌入在陶制材料 (8) 内, 所述匀场通道在所述陶制材料内形成, 径向位于所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈的外侧。

9. 根据权利要求 6 的圆柱形超导磁体装置, 其中所述梯度线圈组件包括梯度线圈和位于该梯度线圈的径向外侧的梯度屏蔽线圈, 所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈被嵌在陶制材料 (8) 内, 所述匀场通道在所述陶制材料中形成, 径向位于所述梯度线圈和所述梯度屏蔽线圈内。

10. 根据前面的任一权利要求的圆柱形超导磁体装置, 其中用于沿着相应的匀场通道移动各匀场件的所述装置包括多个附着在各自匀场件上的杆 (14), 以便能通过驱动相应的

杆进出所述匀场通道调整匀场件在所述匀场通道内的位置。

11. 根据权利要求 10 的圆柱形超导磁体装置,其中用于保持各匀场件在合适的位置的所述保持装置(16 ;46)包括用于将各杆保持在所述匀场通道端部附近的夹具装置(16)。

12. 根据权利要求 1 到 9 中任一项的圆柱形超导磁体装置,其中用于沿着相应的匀场通道移动各匀场件的所述装置(46)包括多个螺纹杆(46),各个螺纹杆与在各自匀场件内的螺纹通孔协作,以便匀场件在匀场通道内的位置能通过相对于各自的匀场件转动螺纹杆进行调整。

13. 根据权利要求 12 的圆柱形超导磁体,其中用于保持各匀场件在合适的位置的所述保持装置(16 ;46)包括在各螺纹杆(46)和在各自匀场件内的螺纹通孔之间的相互作用。

14. 根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体,还包括用于导引受控温度下的流体的流动穿过所述匀场通道中的至少一个的装置。

15. 根据权利要求 12 或任一从属于权利要求 12 的权利要求的超导磁体装置,其中匀场件(1112 ;1212)和所述匀场通道有相应的非圆形径向截面。

16. 根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体装置,其中所述匀场通道中的至少一个包括多个匀场件(28,30 ;34,36),各所述匀场件设置有各自的用于移动匀场件的装置,以及用于保持所述匀场件在合适的位置的保持装置,所述匀场件有互补的径向截面面积,以便所述多个匀场件可在所述匀场通道内叠置。

17. 根据权利要求 16 的圆柱形超导磁体装置,其中所述多个匀场件,在叠置时合起来看,具有组合的径向截面,该径向截面与所述匀场通道的径向截面相同。

18. 根据权利要求 16 或 17 的圆柱形超导磁体装置,其中所述多个匀场件(28,30)具有与所述匀场通道的径向截面积的部分相对应的径向截面面积。

19. 根据权利要求 16 或 17 的圆柱形超导磁体装置,其中所述多个匀场件包括有轴向通孔的第一匀场件(34),和径向被做成一定尺寸以穿过所述第一匀场件的通孔的互补的第二匀场件(36)。

20. 根据权利要求 1 到 15 中任一项的圆柱形超导磁体装置,其中所述匀场通道中的至少一个包括多个匀场件(40,42),各所述匀场件设置有各自的用于移动所述匀场件的装置和用于保持所述匀场件在合适的位置的保持装置,所述匀场件被安排在所述匀场通道内的不同位置,一个或多个通孔(44)被设置成以允许用于移动一个匀场件(42)的装置(14)穿过另一个匀场件(40)。

21. 根据权利要求 14 或任一从属于权利要求 14 的权利要求的圆柱形超导磁体装置,其中一个或多个匀场件(1312)设置有允许流体穿过所述匀场件的通孔(50)。

22. 根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体装置,其中在连续的匀场通道内的磁性材料的体积和 / 或类型是变化的,以便相对匀场效果以比率为 1,3,5,3,1,3,1,5,1,3,5,3,1,3,5 的重复模式提供。

23. 根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体装置,其中所述磁场发生器在所述均匀场区内产生磁通量密度为 0.1T 或更大的磁场。

24. 根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体装置,还包括用于校正所述均匀场区中磁场均匀性的降级的装置,包括:

一个或多个传感器,该一个或多个传感器被布置成用于探测和测量所述磁场均匀性的

改变；

计算设备,该计算设备被布置成用于计算某些匀场件想要的移动量,其适合校正探测到的所述磁场均匀性的改变；

促动器,该促动器被布置成用于使某些匀场元件移动计算所希望的移动量。

25. 一种 MRI 系统,包括根据前面任一权利要求的圆柱形超导磁体装置。

26. 一种用于改变圆柱形超导磁体装置中均匀场区 (10) 内的磁场均匀性的方法,其中所述圆柱形超导磁体装置包括有孔的中空圆柱形超导磁场发生器 (1),该方法包括：

在磁场发生器和均匀场区之间的体积中,提供在孔内轴向延伸的匀场通道 (6),

提供位于各匀场通道 (6) 内的至少一片匀场材料 (12)；

激活所述磁场发生器以在所述均匀场区内产生磁场；

在整个所述均匀场区内测量磁场的均匀性；

在磁场发生器仍然运行的情况下,沿着相应的匀场通道移动至少一些匀场件,从而改变整个所述均匀场区的磁场均匀性,以便在该步骤自始至终,各匀场件保持在相应的匀场通道内,在该步骤中没有另外的匀场件被引入所述匀场通道；

通过使用保持装置将所述匀场件保持在它们的位置。

27. 根据权利要求 26 的方法,还包括步骤：

在整个所述均匀场区测量改变的磁场均匀性。

28. 根据权利要求 26 或 27 的方法,其中所述磁场发生器在所述均匀场区内产生磁通量密度为 0.1T 或更大的磁场,在整个所述均匀场区改变的磁场均匀性具有峰到峰值为百万分之 40 或更小的不均匀性。

29. 根据权利要求 28 的方法,其中所述均匀场区包括直径为 50cm 的球。

用于磁场匀场的装置和方法

技术领域

[0001] 本发明涉及磁场匀场的装置和方法。在诸如磁共振成像 (MRI) 的应用中,有必要提供非常均匀的背景磁场。比如,在一个例如直径 50cm 的球的成像体积内,磁通密度为 0.1T 或更大的磁场必须具有峰到峰值为百万分之 40 或更小的不均匀性。

背景技术

[0002] 常规地,在本领域技术人员所知的“无源匀场”的过程中,小片状的铁磁性材料,如片状低碳钢,被策略地安排在成像体积周围适当的位置,用于补偿磁体造成的磁场不均匀性。比如,一种典型的 MRI 磁体可为圆柱形形状,由超导线圈形成并封装在一个圆柱形冷冻剂导管中,其自身封装在一个与环境温度热隔离的中空圆柱形的外真空室 (OVC) 内。在外真空室的孔内安置了一个圆柱形梯度线圈组件。这是一个典型的在陶制材料如环氧树脂内包含电阻线圈的模制品,用于产生正交磁场梯度。电阻线圈包括梯度线圈本身,并且在梯度线圈的径向外侧,梯度屏蔽线圈可选择地设置为用于减少从梯度线圈到达外真空室 (OVC) 的磁场强度。模制品内提供了匀场槽。这些是孔,典型地为矩形截面,且典型地设置在梯度线圈和梯度屏蔽线圈之间。具有相似矩形截面的匀场盘位于匀场槽内。每个匀场盘包括沿着其长度的许多匀场室。成片的铁磁材料,被称作匀场板,典型地,诸如那些用于变压器叠片中的、具有可再生磁性的低碳钢,被置于匀场盘的匀场室内。匀场盘装入梯度线圈组件内。成片的铁磁材料影响磁体产生的磁场,可用于提高生成的磁场的均匀性。一种匀场算法被用于计算需要将成像体积内磁场不均匀性减小到所需水平的匀场板的数量和分布。匀场盘也可或可选地置于梯度线圈组件的径向外表面和 OVC 的孔之间,或在梯度线圈组件的径向内表面和梯度线圈组件的孔内的体 (RF) 线圈之间。

[0003] 匀场常规地进行如下。首先将磁体带入磁场中,典型地使用核磁共振 (NMR) 探针阵列,测量成像体积内的磁场变化。将磁体带入磁场中导致流过超导线圈的电流逐渐增加,一个被称为坡升的过程。由于加热发生在冷冻导管内,坡升过程花费时间,并消耗冷冻剂。除此坡升花费的时间之外,其中该坡升花费的时间典型地至少为半小时,可能为数小时,必须允许磁体达到平衡,这还要花费 1-2 小时。

[0004] 一旦测量到磁场变化,这可使用 NMR 场相机绘制球面表面流量密度并将它分解为球谐函数之和以描述不均匀性来实现,已知算法可用于计算匀场板合适的分布从而提高成像体积内磁场的均匀性。然后移除超导磁体中的电流。与上述坡升过程相似,该“坡降”步骤消耗时间和制冷剂。当磁体已经完成坡降时,匀场盘从梯度线圈组件中移出。匀场板被放置在匀场盘内匀场室中适当的位置。然后匀场盘被放回梯度线圈组件中。

[0005] 由于安全的原因匀场板不能在场被加载或移出;在圆柱形磁体孔的开口端,当匀场板移动通过陡磁场梯度,要经历上百牛顿的相当大的力。已经对取出并用“在场”磁体替换匀场盘做了一些实验,但已证明不够令人满意。

[0006] 然后重复坡升和测量磁场均匀性的过程。由于各匀场板设置精度的小误差,因此在一次反复操作中这种匀场不大可能实现足够均匀的磁场。典型地,需要二或三次匀场反

复操作,这需要三或四个坡升和二或三个坡降过程。这样费时并浪费制冷剂。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一些方法和设备,用于使由磁体特别是超导磁体产生的磁场有效匀场,而不需要在匀场操作之间坡降磁体。避免重复坡循环节约了安装或重新启用超导磁体的时间,并减少了冷冻剂的消耗。当随着热量进入冷冻剂而超导磁体恢复到电阻状态并失去储存的能量时,淬火典型地仅发生在坡期间。通过减少对坡循环的需求,本发明减少了淬火的可能性。本发明的方法和装置可适用于圆柱形超导磁体。

[0008] 本发明相应地提供附属权利要求中限定的方法和装置。特别地,本发明提供装置和方法,用于通过在位于待匀场的磁场周围的匀场通道内移动匀场件使磁场匀场。在匀场操作时,匀场通道内没有加入或移出匀场件。由于匀场件不需要横穿圆柱形磁体孔的开口端处的陡磁场梯度,因此匀场操作可在磁体在场的情况下实施。根据本发明的方法,匀场时根本不必将磁体坡降。

附图说明

[0009] 在考虑以下仅通过非限制性的例子给出的特定实施例的描述后,本发明的以上以及进一步的目标、特点和优点将变得显而易见,其中:

[0010] 图 1 示出了根据本发明的实施例修改的超导磁体组件的示意性端视图;

[0011] 图 2A 和 2B 分别示出了根据本发明实施例修改的梯度线圈组件的示意性的部分的径向截面图;

[0012] 图 3 示出了根据本发明实施例的穿过超导磁体和梯度线圈组件的轴向截面的部分放大视图;

[0013] 图 4-5 示出了在本发明的一些实施例中有用的保持或夹紧装置的例子;

[0014] 图 6-10 示意地图解了本发明中实施例有用的匀场件;

[0015] 图 11A-11B 示出了根据本发明实施例的匀场件和互补的匀场通道轮廓的例子;

[0016] 图 12A-12B 示出了根据本发明的实施例的另一种匀场件和互补的匀场通道轮廓的例子;

[0017] 图 13 示出了具有为了调节温度允许流体循环的通孔的匀场件的例子;

[0018] 图 14 示出了作为匀场板位置的函数的通量密度的轴向分量;

[0019] 图 15 示出了在不同轴向位置处匀场件上的力;

[0020] 图 16 示出了匀场通道设置于梯度线圈组件径向外表面和 OVC 的孔管表面之间;

[0021] 图 17 示出了图 16 实施例的匀场通道怎样设置在如图 1 描述的中空圆柱形超导磁场发生器中;

[0022] 图 18 示出了在多于一个离梯度线圈组件的轴的径向距离处设置匀场通道;

[0023] 图 19 示出了匀场通道被设置在梯度线圈组件的径向内表面上,介于梯度线圈组件的径向内表面和在孔内的均匀区域之间;以及

[0024] 图 20 示出图 19 实施例的匀场通道可怎样设置在如图 1 描述的中空圆柱形超导磁场发生器中。

具体实施方式

[0025] 图 1 示意地描述了根据本发明修改的超导磁体装置的端视图。空心的圆柱形超导磁场发生器包括含有超导磁体的外部真空容器 1, 以及冷却装置, 如制冷机 2, 以保持超导磁体足够的冷从而超导成为可能。入口转台 3 被示意性的描述, 其能使进入外部真空容器 1, 以到达磁体, 增减冷冻剂, 必要时穿过电缆或管道。

[0026] 空心的圆柱形梯度线圈组件 4, 位于圆柱形外部真空容器 1 的孔 5 内, 并在其中设置一个孔, 成像对象, 如病人, 可置于其中。梯度线圈组件一般被设置在圆柱形外部真空容器的孔内, 例如像在圆柱形 MRI (磁性共振成像) 磁体中所用的。根据发明实施例阐明的特点, 在梯度线圈组件的材料内设置了许多匀场通道 6。这些通道在轴向, 也就是说, 与圆柱形外部真空容器 1 的轴 A-A (图 3) 平行的方向, 延伸过梯度线圈组件。在本说明书和所附权利要求中, 术语“径向”将用于指与圆柱形外部真空容器 1 的轴 A-A (图 3) 垂直的方向。

[0027] 这将在下面予以更详细的描述, 匀场通道也可以或可选地被放置于梯度线圈组件的径向外表面和 OVC 的孔表面之间, 或者在梯度线圈组件径向内表面和均匀区域之间。一个体 (RF) 线圈可设置在梯度线圈组件的孔内, 匀场通道可被设置在径向位于梯度线圈组件和体 (RF) 线圈之间的位置。

[0028] 图 2A 示出了图 1 所示的梯度线圈组件 4 的放大的部分径向截面图。许多常规的梯度线圈 7 和梯度屏蔽线圈 7A 被设置成嵌入陶制材料 8 中, 典型地为环氧树脂中。梯度线圈能够产生在 z 方向取向的快速变化的磁场, 其具有正交方向 x, y, z 的梯度。梯度线圈组件如此布置, 以便这些匀场通道 6 可被设置成, 通过梯度线圈 7 和梯度屏蔽线圈 7A 之间的梯度线圈组件的轴向长度, 而不阻碍它们的操作。

[0029] 匀场通道 6 类似于已知的匀场槽, 但是截面直径 d 可能仅为 5-15mm。在一个典型的全身 MRI 系统中, 可设置数量相对较大的匀场通道 6。比如, 在本发明描述的实施例中, 匀场通道的数量可在 90-400 的范围内, 尽管为了清楚图中示出的少得多。由于机械强度, 期望匀场通道在横截面上将为圆形, 具有大约 5-15mm 的直径 d, 尽管本发明不限于该尺寸范围或任何特别的截面形状的匀场通道。相较于少量 (典型的 16, 20 或 24) 矩形截面通道, 提供具有相似的总体积的大量较小的、圆形截面通道更可取, 因为梯度线圈组件可制造的更硬, 对振动和挠曲更加有抗性。所有的匀场通道 6 可被布置成距离梯度线圈轴的径向距离相同 (如图 2A 所示), 或在离梯度线圈轴的不同径向距离之处 (如图 2B 所示) 设置不止一圈匀场通道。匀场通道可有不同的直径 d1, d2。在优选实施例中, 设置了 128 个匀场通道, 每个直径 8mm, 在两个不同的半径交错布置, 如图 2B 所示。

[0030] 本发明涉及一种特殊类型的匀场装置, 包括可设置在匀场通道 6 中的匀场设备; 和一种使用该匀场装置使磁体的磁场匀场的方法。本发明应用于设置在匀场通道中的匀场设备, 不限于在梯度线圈组件内形成的匀场通道。实际上, 本发明的匀场通道可设置在任何方便主体中, 或在主体间的空间 (如在 OVC 孔表面和梯度线圈组件的外径之间), 且在磁场发生器 1 和均匀场区域 10 之间的体积内如直径 50cm 的球内延伸。匀场通道可置于梯度线圈组件的径向外表面和 OVC 的孔表面之间, 或梯度线圈组件的径向内表面和均匀区域之间。一个体 (RF) 线圈可被设置于梯度线圈组件的孔内, 匀场通道可径向设置在梯度线圈组件和体 (RF) 线圈之间。

[0031] 根据本发明的一个实施例, 图 3 示出了类似于图 1 中示出的通过超导磁体装置的

轴向截面。示出了轴 A-A, 整个组件相对于这个轴大体对称。在磁体组件内的中央, 示出了成像区域 10。超导磁体需要在成像区域内产生一个非常均匀的磁场, 也可称为均匀区域。本发明的匀场设备被设置成用于补偿在由成像区域内的磁体产生的磁场中的不均匀性。

[0032] 根据本发明的实施例, 如图 3 所示, 设置了匀场件 12, 每个匀场通道 6 中两个匀场件。每个匀场件 12 与杆 14 相连, 杆足够长以允许操作者沿着匀场通道的至少一半长度, 优选其全长, 移动匀场件 12。在每个匀场通道的端部附近, 如在梯度线圈组件 4 的端部上, 设置夹具 16。这些夹具对于用户是能够接近的, 能使杆 14 能在任何希望的位置被夹住, 从而将相应的匀场件 12 保持在匀场通道 6 中选定的位置。夹具 16 可用任何合适的保持装置替代。匀场件被定位成以便影响在成像区域中由超导磁体产生的磁场, 从而改变其均匀性。根据本发明的特征, 匀场通道 6 内匀场件 12 的位置会在磁体在场时被改变。尽管匀场件可在匀场通道内被轴向移动, 但是匀场期间和磁体在场时, 没有匀场件需要被移出匀场通道, 没有匀场件需要引入通道。本发明避免了需要改变存在于磁体 1 的孔内的匀场材料数量, 并且通过重新排列已经存在的匀场件提供匀场。

[0033] 本发明利用了下述事实, 即磁体在场时当匀场件 12 在匀场通道 6 的内部之时, 作用于匀场件上的力较小, 那些力为几牛顿量级。在另一方面, 已经观察到, 当匀场件移出匀场通道, 或者进入匀场通道时, 作用于匀场件的力 (数百牛顿) 大得多。这是因为相较于沿着匀场通道长度的小得多的磁场强度梯度, 由于接近圆柱形磁场发生器的开口端, 大的磁场强度梯度存在于匀场通道的端部。结果, 已经发现沿着匀场通道 6 移动匀场件 12 是容易和安全的, 只要没有试图从匀场通道移出匀场件, 和没有试图将另外的匀场件引入到匀场通道中。

[0034] 因此, 根据本发明, 匀场件阵列 12, 如铁或钢, 在坡升磁体之前, 被引入匀场通道 6。使用一种合适的装置沿着相应的匀场通道移动每个匀场件, 可以在磁场在场时调整匀场件的位置。比如, 可通过驱动附着于每个匀场件 12 且操作者容易接近的杆 14, 进出相关匀场通道来实现, 如箭头 17 示意指示。比如, 杆 14 可通过夹具装置 16 被保持在希望的位置, 以固定相应匀场件的位置。

[0035] 在图 3 示出的实施例中, 每个匀场通道 6 插入两个杆 14, 每端一个。在示例实施例中, 杆 14 是柔韧的玻璃纤维杆, 如用于排水沟清理设备, 其被切到合适的长度, 至少匀场通道 6 的一半长度, 但优选全长。匀场件 12 可通过夹持, 胶接, 或使用弹簧钩分别附着于相应的杆。可使用任何保持方法, 只要允许匀场件抵抗一个最大约为 100N 的力, 在匀场通道 6 内被往复驱动。每个杆有一个匀场件 12 附着于它的端部。匀场件可为铁, 或合适的钢或任何其它合适的磁性材料。每个匀场件能被制成认为合适的形状, 比如圆盘、平板、球、柱、长方体等。

[0036] 匀场件和附着杆在磁体坡升前被安装在匀场通道内。这个安装可在磁体组件运到客户方之前在工厂完成。

[0037] 在操作中, 通过在附着的杆 14 上推拉, 匀场件 12 可在匀场通道内被往复移动。在匀场通道的开口处使用一个合适的简单夹具 16, 可在任何需要的位置夹持杆。

[0038] 当启用或重新启用磁体时, 磁体可优选被坡升到场中, 使杆 14 最大程度地拉出, 将匀场件 12 尽量远地带离成像区域 10, 以使它们对成像区域 10 中的磁场的影响最小化。通过夹持 16 各匀场通道开口端附近的附着杆 14, 匀场件 12 被固定在这些位置。然后磁体

被坡到场,其磁场在成像区域 10 的表面绘制。在这些位置作用在匀场件 12 上的力被示出为是小而安全的。

[0039] 匀场是通过将选定的匀场件的位置移动计算的或估算的距离得以实现的,从而可以改变成像区域 10 内磁场的均匀性。计算或估算不同匀场件的最佳位置可基于熟练用户的经验,或者基于数学算法完成。可以用合适的匀场算法找到需要的每个匀场件 12 轴向位置。目标是使匀场件对均匀区域内磁场的最终影响与来自该区域内超导磁体的场的不均匀性相同并对立,和传统的无源匀场一样。

[0040] 以毫米分辨率调整每个匀场件的轴向位置是可能的,不像有固定室的传统匀场盘的分辨率为好几个厘米。典型地,本发明的匀场装置允许设置许多比传统匀场盘可能提供的更多的匀场通道 6。典型地,有相比于传统盘 6 至少六倍多的匀场通道的空间,可能 12-24 倍那么多(如 192-384 个匀场通道 6)。相较于传统盘和室匀场,这补偿了存在于每个通道内的匀场元件的减少的数量。

[0041] 仅通过使用尺子测量从匀场通道 6 端部伸出的杆 14 的剩余量,匀场件 12 可被移动到它们计算要求的位置。可选的,杆本身可以标记有刻度指示附着的匀场件例如相对于匀场通道 6 的开口端或相对于成像区域的轴向中心的位置。根据本发明,这种匀场件 12 的重置可在磁体在场时予以实施,典型地每个匀场件的移动需要不多于约 100N 的力,尽管这个最大力将随着磁场梯度和匀场件大小的增加而增加。没有匀场件在匀场过程中被移出匀场通道,没有另外的匀场件在匀场过程中被增加到匀场通道中。

[0042] 一旦匀场件 12 被重新安置到它们的计算或估算的要求的位置,杆 14 被夹持就位,成像区域 10 的磁场能被重新绘制。如果在成像区域的磁场仍然不够均匀,计算或估算匀场件要求的位置、移动匀场件到它们所要求的位置,并重新绘制成像区域的磁场的过程可被重复。这个过程可在磁体在场时实施。不要求磁体坡变,所以这是一种非常快速和有效的匀场方法。

[0043] 当成像区域中改变的磁场均匀性令人满意时,杆 14 的端部伸出部分将被简单地切断。依赖于杆材料的柔韧性,它们可选地弯过 90 度并用系节系在旁边。无论使用哪种方法,梯度线圈组件的端部、匀场通道 6、杆 14 和夹具 16 典型地被孔端部“注视”盖隐藏,该盖被常规地设置成对操作者和病人隐藏磁体组件的工作部分。

[0044] 如图 4 所示,设想了比如使用在张力下的合成橡胶限位器 20 被夹持在简单的 V 形槽 18 中的柔韧的玻璃纤维杆 14 的使用。可以使用其它任何合适的装置,例如图 5 中所示的螺钉夹具 22,优选非磁性材料,如黄铜或尼龙。

[0045] 受控温度的空气或者其他流体可循环过匀场通道 6,以将匀场件 12 保持在一个稳定的温度,这样避免其磁化强度的改变。匀场件应被制成相对宽松安装在匀场通道内,或者通孔应当被设置成穿过匀场件,如以下关于图 13 的描述。

[0046] 如图 2B 中示明,匀场通道 6 能被设置在两个或更多不同的径向位置。匀场件通道的直径 d_1 , d_2 可与放置在匀场通道中匀场件的径向截面直径一起变化。使用不同大小和在不同径向位置的匀场件的能力,为匀场计算提供进一步的自由度,有助于寻找将磁场匀场到满意的均匀性的匀场件位置分布。

[0047] 不需要改变成像体积内磁场的均匀性的匀场件可留在匀场通道的端部,以它们对成像区域 10 内磁场的影响最小化。

[0048] 图 16-20 进一步图解了本发明的实施例,其中匀场通道布置被设置成不在梯度线圈组件内。

[0049] 如图 16 所示,匀场通道 61 可设置于梯度线圈组件 4 径向外表面和 OVC 的孔管表面 102 之间。在这个图示的实施例中,梯度线圈组件包括梯度线圈 7,但是没有梯度屏蔽线圈。如果优选,梯度屏蔽线圈可包含在这个实施例的梯度线圈组件中。匀场通道 61 可以是中空的塑胶管道,例如能通过张力皮带连接或用别的方法被保持在梯度线圈组件上。优选在匀场通道之间设置间隔,以保持其各自的相对位置。如 103 中示出的特征能被模制到梯度线圈组件 4 的径向外表面,以帮助匀场通道在合适的位置定位和保持。优选设置如此数目的匀场通道,它们在梯度线圈组件整个径向外周靠着彼此,以便确保匀场通道之间恒定的间隔。可选地,匀场通道可设置为孤立的框架,其包括轴向匀场通道本身,被两个或多个支撑环连接。这样的组件可用模压塑料或加工的复合材料如玻璃纤维增强树脂,优选不导电、非磁性、刚性且不贵的材料制造而成。这样的匀场通道组件可首先被安装在外部真空容器 (OVC) 1 的孔 5 中,然后将梯度线圈组件 4 加入到匀场通道组件内。

[0050] 在匀场通道沿径向定位在梯度线圈组件 4 的外部的实施例中,将它们与梯度线圈组件热隔离是有利的;替代地,或另外,强迫液体冷却整个匀场通道。

[0051] 图 17 示出了图 16 实施例的匀场通道怎样设置在如参照图 1 描述的中空圆柱形超导磁场发生器 1 中。

[0052] 图 18 示出了图 16 实施例的一种变体。如图 18 所示,可能在多于一个离梯度线圈组件的轴的径向距离处设置匀场通道 62,63。每组匀场通道 62,63 可具有不同于其他匀场通道组直径的直径 d_1 ; d_2 。机械间隔片可被设置成将匀场通道保持在需要的相对位置。在变体中,模制特征可设置在梯度线圈组件的径向外表面,以帮助将径向内部的那组匀场通道 62 保持在合适的位置,下一组匀场通道 63 被居中放置在第一组中邻近的匀场通道之间,并,例如通过张力俘获件 (trap) 保持在合适的位置。再者,匀场通道可具体为塑料管道,被粘结或者以别的方式保持在合适位置。可选地,匀场通道和间隔片可为柔韧模制,弯成圆柱形,并通过任何合适的布置或来自模制材料的回弹力保持自身在合适的位置。

[0053] 图 19 示出了本发明的一种可选实施例。如图 19 所示,匀场通道 64 能被设置在梯度线圈组件 4 的径向内表面上,介于梯度线圈组件 4 的径向内表面和在孔 5 内的均匀区域之间。图 19 还示出的是一体 (RF) 线圈 104,如用于在 MRI 系统中成像并设置在梯度线圈组件的孔内。成像对象,如病人,被放置在体 (RF) 线圈内。如所示,匀场通道 64 可设置在梯度线圈组件 4 的径向内表面和体 (RF) 线圈 104 之间。在这个示出的实施例中,梯度线圈组件 4 包含梯度线圈 7,但是没有梯度屏蔽线圈。在这个实施例中,如果优选,梯度屏蔽线圈能被包含在梯度线圈组件内。匀场通道 6 可为中空塑料管,其被粘结或者用其他方法保持在梯度线圈组件上。

[0054] 在这样一个装置中,优选将间隔片设置在匀场通道之间,以将它们保持在各自的相对位置。特征可模制到梯度线圈组件的径向外表面,帮助定位和保持匀场通道在合适的位置。优选设置如此数目的匀场通道,以使它们在梯度线圈组件的整个径向外周彼此抵靠,从而确保匀场通道之间恒定的间距。

[0055] 在实施例中,包括形成匀场通道 6 的管道的塑料模件设置有将管道连接在一起的柔韧的间隔件。这可能形成为一段模件,其在管道和间隔件之间交变。这个模件随后可被

切割成比梯度线圈组件的径向内部周长稍微小的长度,绕成一个圆柱形,并滑入梯度线圈组件。模件材料自身的弹性能足以保持匀场通道在合适的位置。可选的,固体的、非磁性的且非导电性的材料如玻璃纤维的环,能够被引入以压着匀场通道就位,与梯度线圈组件 4 的内表面接触。在一些布置中,体 (RF) 线圈 104 可适合用于保持匀场通道在合适的位置。位于梯度线圈组件 4 和体 (RF) 线圈 104 之间的匀场元件会妨碍 RF 返回磁通量,这能通过返回体 (RF) 线圈得以消除。

[0056] 图 20 示出图 19 实施例的匀场通道 64 可怎样设置在如参照图 1 描述的中空圆柱形超导磁场发生器 1 中。

[0057] 虽然本发明已按一般形式进行了描述,但是现在将描述匀场件本身各种可能的实施例以及它们的附属益处。

[0058] 图 6 示出了一个能被本发明采用的简单匀场件 612 的例子。匀场件由磁性材料如铁或钢的圆柱体 22 组成,其附着于合适的杆 14。圆柱体的径向截面直径能使匀场件 612 贴合地装在匀场通道,但足够松弛以致几乎不施力就可将其在匀场件通道内轴向移动。如图 3 示出,每个匀场通道 6 可容纳两个这样的匀场件,每个从相应的匀场通道端部引入。通过设置比匀场通道的半长还长的杆 14,两个匀场件能被设置在相同的匀场通道轴向的一半,如果需要的话,提供匀场的增加范围。

[0059] 如果发现需要额外的自由度以求出提供成像区域 10 中可接受的磁场均匀性的匀场解,进一步的改良是可能的。

[0060] 图 7 示出了具有偏心放置的匀场材料的匀场件 712 的例子。匀场件的圆柱体形状与图 6 中的匀场件 612 的圆柱体形状相似。但是,圆柱体被轴向的分成了两等分。圆柱体的一半 24 由磁性材料组成,而另一半 26 由非磁性材料组成。杆 14 被连接在圆柱体径向截面的中心。这个匀场件的匀场效果与磁性材料半圆柱体相当,非磁性半圆柱体仅被设置为用于确保磁性半圆柱体保持在匀场通道内合适的位置。通过转动杆 14,磁性材料 26 的质心的径向位置能调整几个毫米。在一个相似的实施例中,一个平面被放在其他圆柱形匀场件的一边,有效地导致了偏心磁性效果。匀场件对均匀区域匀化的磁场的影响对各匀场件的径向位置非常敏感,其效果是在匀场通道径向截面内偏心的匀场件的特征可用来微调匀场。与移动匀场材料轴向位置相比,这种装置的一个特别的优点,是当匀场件转动时,它贡献的调和校正将在强度上改变,但将保持同样的相对比例。

[0061] 在另一个可选特征中,比如通过改变匀场件的径向截面或轴向长度,来改变在邻近的匀场通道内的匀场件(们)的体积。一个特别有利的布置提供了具有重复匀场效应模式的匀场件的串行匀场通道,比如 (1,3,5,3,1) (3,1,5,1,3) (5,3,1,3,5)..... 即,匀场件的体积可按指示的比例变化,和 / 或可使用不同的材料以得到指示的匀场效应比。根据它们在磁体孔 5 附近的角位置,将小匀场件放置在大匀场件附近,给优化算法以额外的自由度。比如,如果优化算法需要集中大量的匀场材料到一点,以补偿磁场中一个非均匀局部区域,则所有 (1,3,5,3,1) 组的匀场件中能被轴向移到与局部非均匀性相应的位置,给予总的 $2 \times 1 + 2 \times 3 + 3 \times 5 = 13$ 单位。如果仅需要少量铁,则仅使用单独的 1 单位的匀场件。可使用其他局部组的元件的组合在这两个极值之间实现准连续变化,覆盖 1-13 单位范围内所有梯级。比如: $4 = 3 + 1$ 或者 $9 = 5 + 3 + 1$ 。此外,匀场算法可从给定组中选择任一个特定的值的匀场元件,作为最适抑制局部不均匀性。通过 (1,3,5,3,1) 和 (3,1,5,1,3) 和

(5,3,1,3,5) 组之间的交替,甚至更多的自由度被提供。为了匀场算法的简单化,希望使用一种重复的模式,不是随意的。这个技术允许匀场件的离散阵列以提供准连续的变化。

[0062] 如图 8A-9 中所示,多于一个的匀场元件可置于每个匀场通道轴向的一半。在图 8A 示出的布置中,图 6 的匀场件已经在直接上被分成两半。每半个 28,30 附着在其各自的杆 14 上。这两个匀场件 28,30 能被一起放置在一个相同的轴向位置,给予相似于从图 6 所示的匀场件得到的效果的匀场效果。可选的,这两个匀场件 28,30 能被设置在不同的轴向位置,在匀场通道中滑开。如在图 8B 中最佳所见,匀场件 28,30 的边缘 32 可倒角以帮助匀场件移动经过彼此。如果需要,两个部分 28,30 能被做成不同大小,允许更进一步改良匀场通道的匀场能力。图 9 示意一种具有相似效果的不同布置。在图 9 中,匀场件 912 其径向截面分为两个同轴部分:外部,中空圆柱体 34 和内部圆柱体 36,各有自己的杆 14。这两个部分 34,36 可有相同的体积,所以有大体上相同的匀场效果,或者可以具有不同体积,允许匀场通道匀场能力进一步的改良。部分 34,36 中一个或两个都有倒角边缘 38 以帮助匀场件移动经过彼此。

[0063] 图 10 示出了一个可选的布置,允许两个匀场件在单独的匀场通道中独立地设置。设置两个圆柱体匀场件 40,42,每个具有它自己的杆 14。匀场件被插入到匀场通道 6 中,以致匀场件 42 比匀场件 40 轴向更靠近匀场通道 6 的中心。匀场件 40 有一个通孔 44,通过它匀场件 42 的杆 14 能穿过,能独立的控制匀场件 42 的位置。匀场件 42 可设置有相似的通孔以使这两件的匀场效果相等,或简化制造。

[0064] 虽然参考图 6-10 描述的匀场件的各种可选特征已特别参照圆柱体匀场件进行了描述,但是匀场件可另外被成形为圆盘,板,球,立方体等。

[0065] 图 11A-11B 和 12A-12B 示出可选的实施例,其中设置了用于在匀场通道内移动匀场件的可选的杆 14。并非具有一个刚性附着于匀场件的杆 14,图 11 和 12 的匀场件有一个螺纹杆 46 轴向穿过各匀场件 1112,1212。匀场件 1112,1212 有一个协作的螺纹通孔,螺纹杆穿过其中。并非通过推或拉固定的杆在匀场通道内移动匀场件,图 11A,12A 中的匀场件通过转动螺纹杆 46 而移动。匀场件不能在匀场通道内转动,并且通过操作在螺纹杆 46 和螺纹通孔上的协作螺纹,沿着匀场通道受到轴向驱动。长度与匀场通道轴向半长相同的螺纹杆可连同匀场件 1112,1212 从各匀场通道的每一端引入。螺纹杆不需要从匀场件通道端部伸出,但必须设置有一种使其转动的工具,如一个把手或轮子。一个电动马达,比如步进马达,可提供来转动螺纹杆 46,在匀场过程中增加一定程度的自动化。在这些实施例中,确保匀场件 1112,1212 自身不能在匀场通道内转动是重要的。这可以通过使用非圆形径向截面的匀场件和匀场通道轻易达成。在图 11A-11B 的实施例中,匀场件 1112 和匀场通道都有一个方形的径向截面。在图 12A-12B 的实施例中,匀场件和匀场通道具有设置了键 48 的径向截面,允许匀场件在匀场通道内轴向移动,但阻止它转动。在实施例中使用了螺纹杆 46,可以发现不必提供独立的保持装置。发现各螺纹杆和各自匀场件内的螺纹通孔之间的相互作用可以足够维持匀场件在合适的位置。比如通过合适的安装在匀场通道开口处,螺纹杆将需要轴向保持在匀场通道内合适的位置。

[0066] 图 13 示出了具有通孔 50 的匀场件 1312 的例子,其容许气体或其他流体通过匀场件,允许控制其温度。材料的磁性随其温度而变化,梯度线圈在操作中由于欧姆损耗发热,所以通过稳定其温度稳定匀场件的磁效果变得重要。

[0067] 尽管已经参照匀场件的移动和保持在合适的位置对本发明进行了描述,但是无论是通过简单杆 14 和夹具 16,或者螺纹杆 46 和螺纹匀场件 1112,1212,任何适合的布置可被设置成用于使每个匀场件在它的匀场通道内轴向移动,并保持在合适的位置。

[0068] 如以上讨论的,匀场件径向截面的大小可不同,匀场通道的径向截面面积可相应不同。

[0069] 在特定实施例中,可在离轴的恒定的径向位置处设置 128 个匀场通道,每个直径 11mm。相较于传统的布置,其设置了 16 个匀场槽,各为矩形横截面 85×20mm,本发明要求移除的材料体积仅仅是传统布置中移除的材料体积的 45%。保留的梯度线圈组件的硬度可以比传统布置更大,减少在 MRI 成像系统的成像序列中使梯度线圈脉动时的振动。匀场组件可仅占用梯度线圈组件的 11mm 的径向尺寸,而不是典型地传统匀场件槽所占用的超过 20mm,允许梯度线圈组件在径向尺寸约 9mm 的减少量。这可转化为相应的更大的内孔直径,增加可容纳病人的体积,或者减少磁场发生器的直径,如包括超导磁体线圈,导致成本减少。可选的,或另外,由于在线圈设计中允许更多自由,因此根据在产生给定梯度场强度所需电流,梯度线圈组件能被重设计得更有效率。梯度线圈组件的共振模式将改变,期望变成更高频率,其在使用中激发到共振的可能性更少。

[0070] 已经参照图 2A 和 2B,将匀场通道 6 本身描述为设置在梯度线圈 7 和梯度屏蔽线圈 7A 之间的梯度线圈组件的径向间隙中。然而,本发明的匀场件布置能被径向地设置在梯度线圈组件内,在梯度线圈 7 和梯度线圈组件的孔之间的梯度线圈内部,或者它们可被放置在梯度线圈组件内,在梯度屏蔽线圈 7A 和外部真空容器的孔表面之间。在其它实施例中,本发明的匀场件布置可不设置在梯度线圈组件内,如在梯度线圈组件径向内侧,或可被径向地放置在梯度线圈组件外侧,在梯度线圈组件 4 和外部真空容器 (OVC) 的孔表面间。可发现后者位置能提供更好的稳定性,因为匀场件的材料不直接被梯度线圈加热,能更容易被冷却。在成像区域 10 如此增大的径向间距下,相同的匀场效果需要更大量的匀场材料。

[0071] 本发明也兼容所谓“有源”匀场:调整适合位于系统中为电阻的或超导的附加线圈中的电流以改进均匀性的技术,这是熟悉本领域的人员所知的。实际上,比如通过为了匀场目的而非成像使用而保留一部分可用的梯度线圈电流,并施加 DC 偏置以减少一级错误,设想本发明与传统的一级有源匀场联合使用。匀场算法可计算为提供最佳匀场分布解所需的梯度线圈电流。

[0072] 本发明相应地提供匀场布置,和相应的匀场方法,其中匀场件存在于匀场通道,并且通过在匀场通道内重新定位匀场件进行匀场。在匀场过程中没有匀场件加入或移除,该过程优选在磁体在场时进行。在匀场件不需要匀场之处,该匀场件被简单的移动到离成像区域 10 最远的范围,以便最小化它对成像区域磁场的影响。根据本发明,在磁体坡升之前,一些匀场材料被放置在匀场通道内,从而通过重新排列这些匀场材料进行匀场。在匀场过程中,没有匀场材料加入或移除,整个匀场过程中,磁体都在场内。这样通过避免需要在匀场反复操作之间坡降磁体并再回升而节约了很多时间和金钱。

[0073] 尽管已经特别参照用于 MRI 成像的磁体的成像区域内的磁场的匀场描述了本发明,但是其可能应用到在任何均匀场区域内改进磁场的均匀性,不管结果均匀场的目的为何。

[0074] 尽管已经特别参照磁体在场下实施的匀场方法描述了本发明,但是本发明的匀场

布置也能被用于涉及在匀场反复操作之间坡降磁体的方法。

[0075] 已知问题是,在如上所述初始匀场被实施后,无源匀场磁体的均匀性受加热或匀场件热致运动引起的温度不稳定性的影响。在本发明的另一些实施例中,在完成初始匀场之后,匀场件布置被安排校正成像区域中的场的均匀性的变化。更特别的,提供自动漂移补偿以周期地测量均匀场区域的磁场的均匀性,典型地使用 MRI 方法,计算出匀场件移动,其能补偿任何测得均匀性的降级,并根据计算的移动来移动匀场件。

[0076] 已发现以下文件对相似问题提供了大不同的解决方案:US6313634、US6617853、US7224167 和 US20070216413A1。

[0077] 为校正由于温致磁化变化或无源匀场件位置变化造成的均匀性场区域内磁场的均匀性降级,可提供附加特征,根据本发明特定的实施例,使匀场元件在轴向主动移动较小的量作为反馈回路的一部分。

[0078] 可设置传感器以探测和测量磁场均匀性的改变。传感器可为患者台中传统结构的 MRI 影象,或其它任何传统替代品。还需要一个计算设备,计算匀场件移动,其会校正探测到的不均匀性。这些计算设备是本领域技术人员熟知并且可得到的。还需要促动器,使匀场元件移动计算得到的移动量。这样的促动器可以是气动的,电动的,或者实际上任何合适的设备。理想地,为避免妨碍在那个区域中的场,促动器将远离均匀场区域。方便的,如上所述的杆 14 或者螺纹杆 46 可与合适的匀场设备相结合使用,电动马达,如步进马达,可布置成以适当地驱动杆 14 或螺纹杆 46 引起匀场件需要的移动。

[0079] 传统无源匀场装置的一个重要缺点是匀场难以获得,匀场只能通过坡降磁体,改变匀场材料的分布和再次坡升磁体被改变。这是一个如此繁重的任务,在初始匀场之后,无源匀场很少调整以校正均匀场区的改变,这些改变是如由磁体环境中的铁质量和位置的改变,如在建设过程中重设置铁梁,引起的。

[0080] 根据本发明,各匀场通道包括很少的能轻易从匀场件通道端部接近的匀场元件。匀场件的位置可在磁体在场下进行调整,场均匀性的测量,匀场件校正移动量的计算,以及匀场件的相应移动能根据本发明的特定实施例自动予以实施。

[0081] 本发明开启了在成像过程中,为补偿温度漂移,主动地控制匀场件位置的有吸引力的可能性。理想的,这可以由连在柔韧的杆 14 上的缆驱动装置实现。关联的马达可被安装在 OVC1 上,磁屏蔽均匀场区。可选的可使用气动的或水压的定位和移动。

[0082] 当应用于 MRI 或 NMR 成像系统,可设想一个有源反馈回路,其中来自成像区域(比如传统的位于患者台中)中的一或多个样品的成像信号被监视,调和计算和匀场位置校正被确定和应用以实时补偿漂移。并不需要调整所有匀场件位置以控制很多谐频。相信至少 8 或 16 个匀场件的移动将提供大体上的漂移补偿。

[0083] 因此本发明的这些实施例提供了一种方法和装置,其使用匀场通道阵列中连接在可移动的杆上的匀场件的阵列来调整磁体在场的匀场,匀场通道阵列可以位于梯度线圈组件内,比如在梯度线圈和梯度屏蔽线圈之间。一些或所有匀场元件的轴向位置能受到反馈回路的促动器的控制,以保持均匀场区域内的磁场的均匀性。这可有用地补偿由于温度引起的变化,比如在使用中由梯度线圈组件的加热引起的,或成像区域中使磁场均匀性改变的任何其它来源。

[0084] 作为帮助理解磁场与匀场件相互作用,图 14 中示出了作为由硅钢制成的尺寸为

65×80×0.28mm的饱和立方体匀场板的z位置的函数的通量密度的轴向分量(单位微特斯拉),该匀场在径向方向距离测量点位移了0.16m。

[0085] 图15示出作用在匀场件不同径向位置的力,并表明作用在匀场件上的力是相当的,低直到尝试从磁体中移除匀场件。作用在匀场件上的力给出为:

[0086]

$$F_z = M \cdot V \cdot \left(\frac{dB}{dz} \right)$$

[0087] 其中M是磁化强度,V是体积,dB/dz是通量密度梯度。特别地,图15示出了,在典型的1.5T螺线管超导磁体中,作用于体积为1.4cm³圆柱体匀场件上的力怎样沿着半径为0.4m处的匀场槽的长度变化。

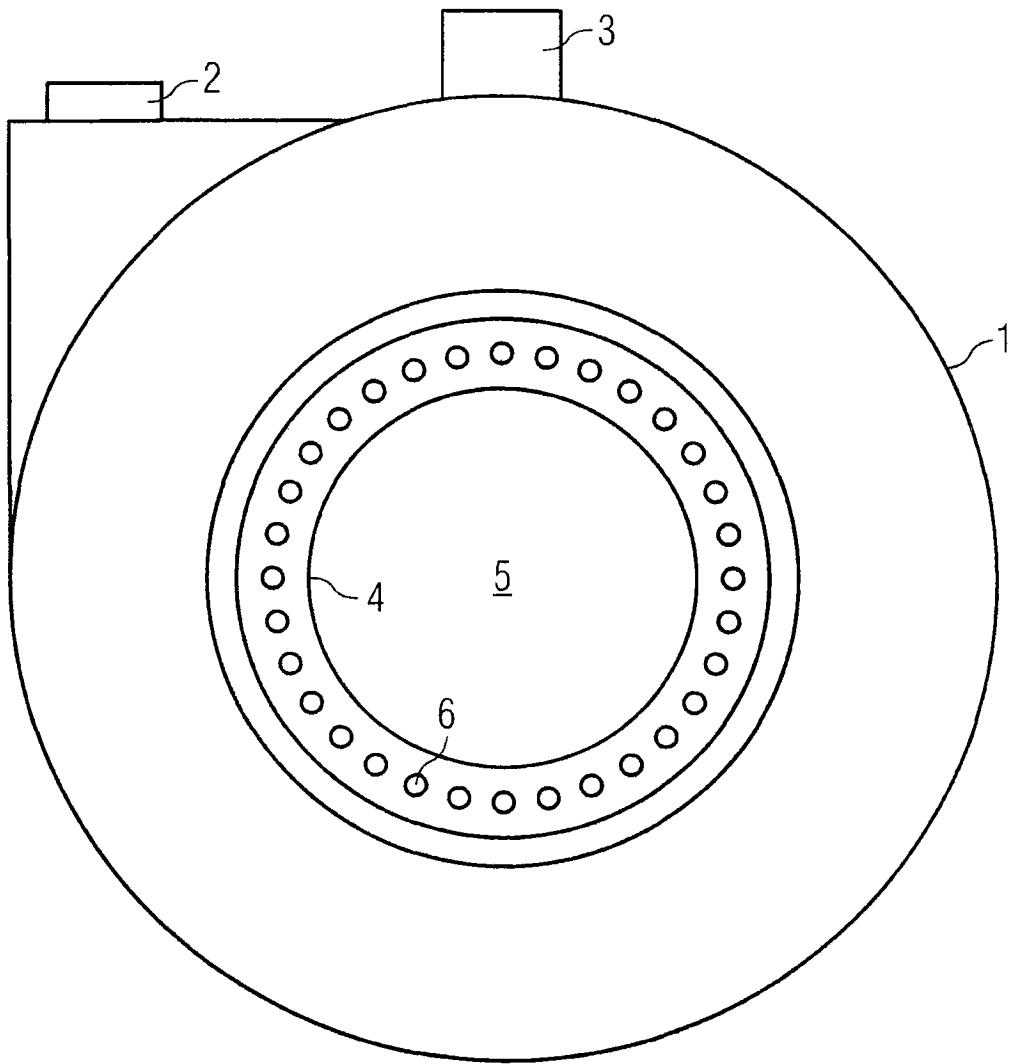


图 1

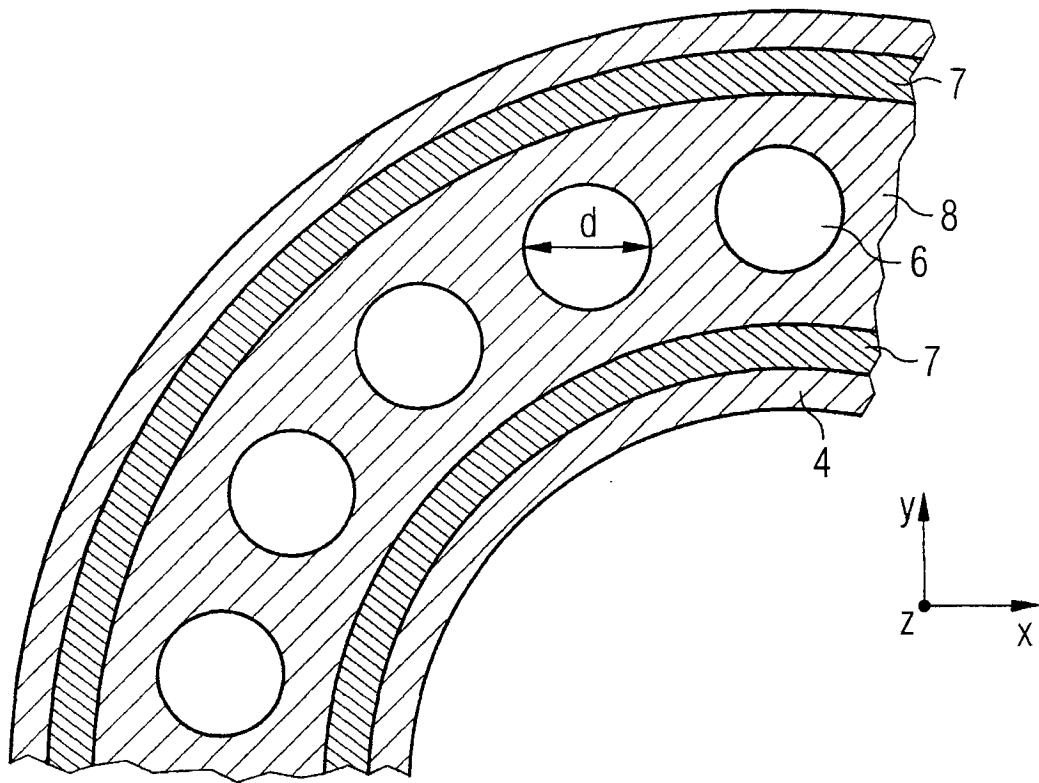


图 2A

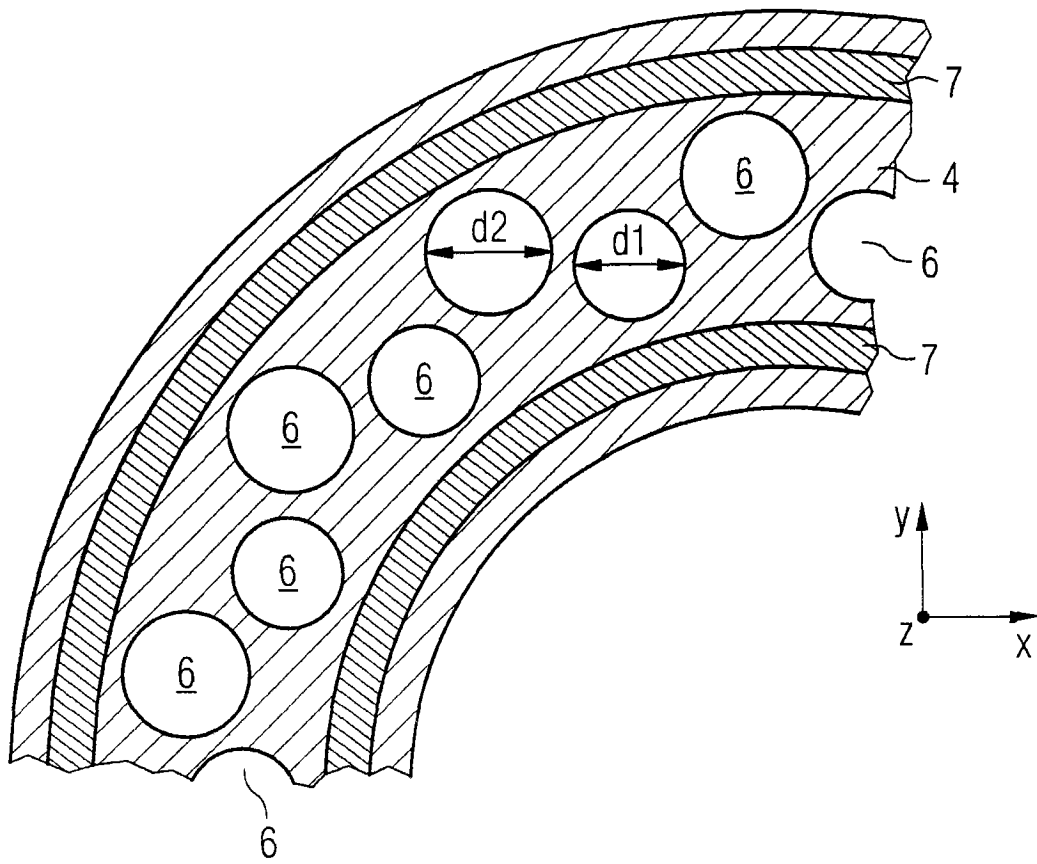


图 2B

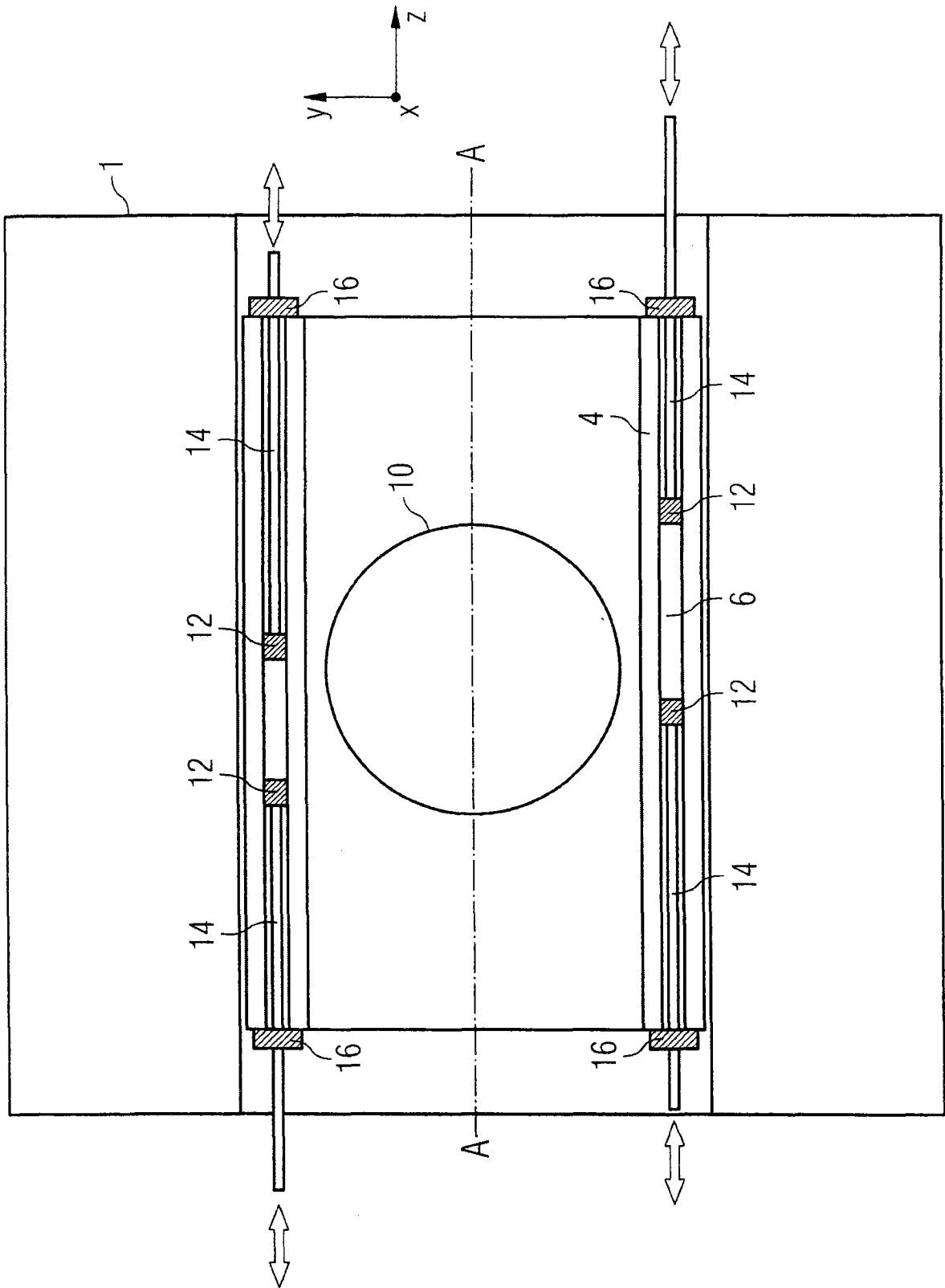


图 3

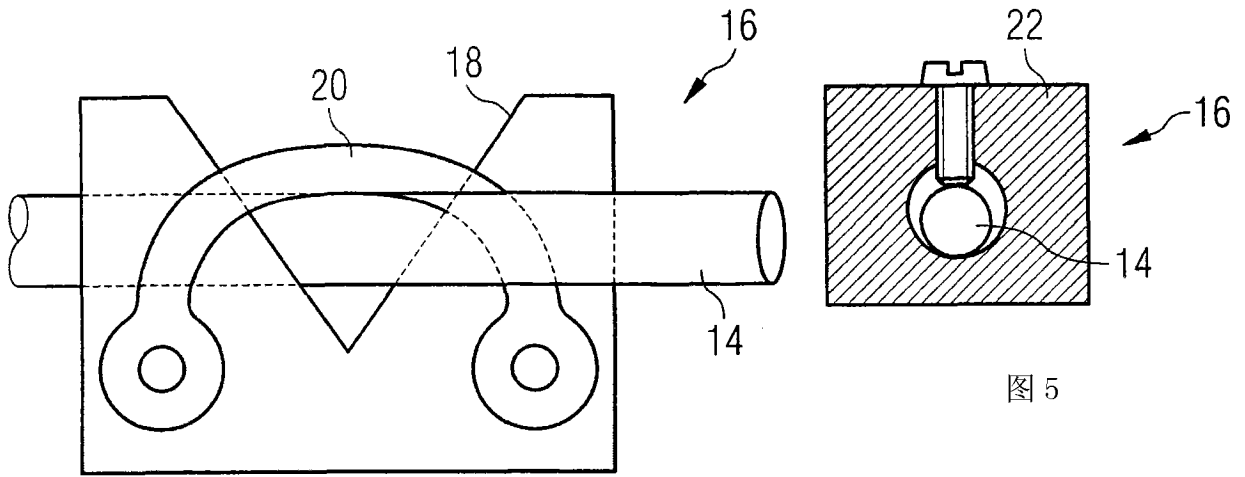


图 4

图 5

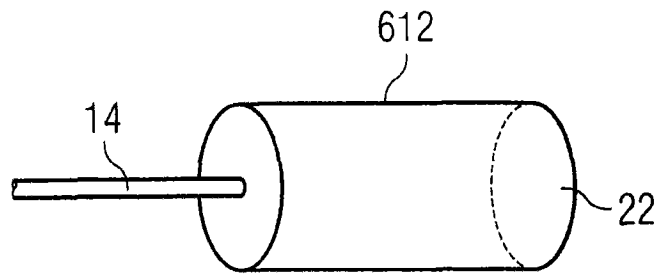


图 6

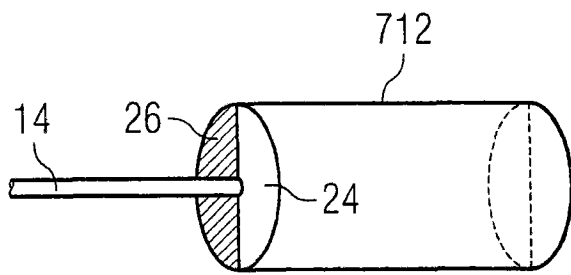


图 7

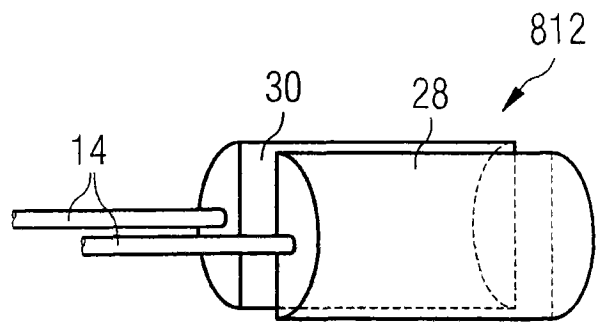


图 8A

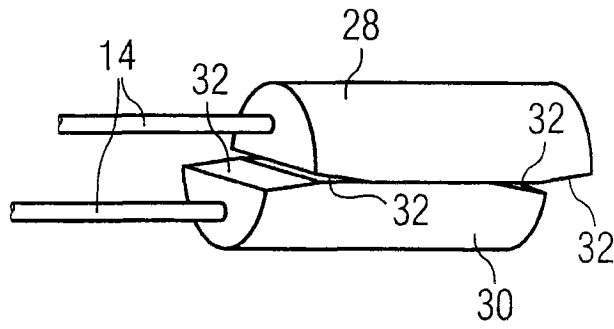


图 8B

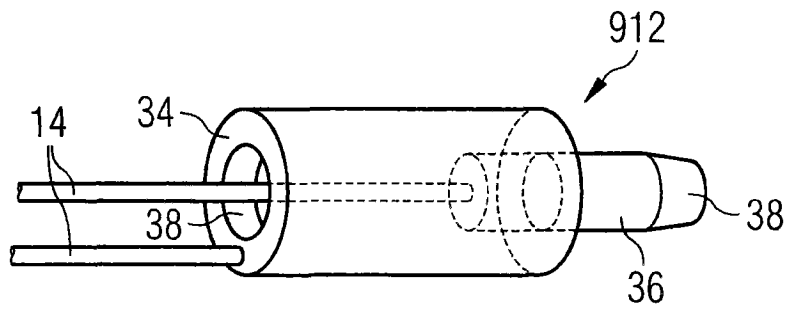


图 9

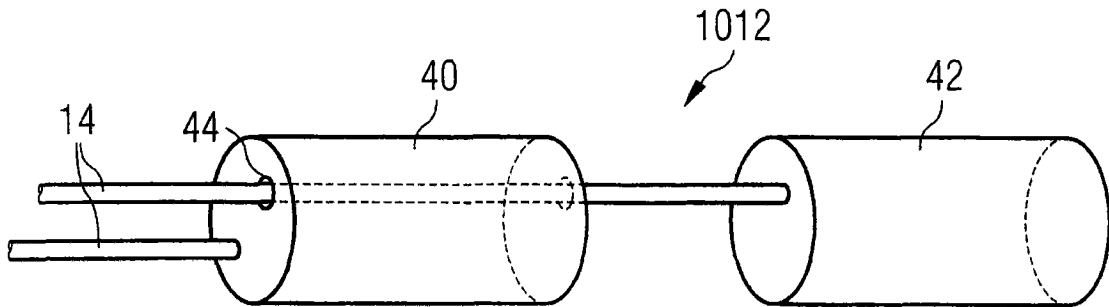


图 10

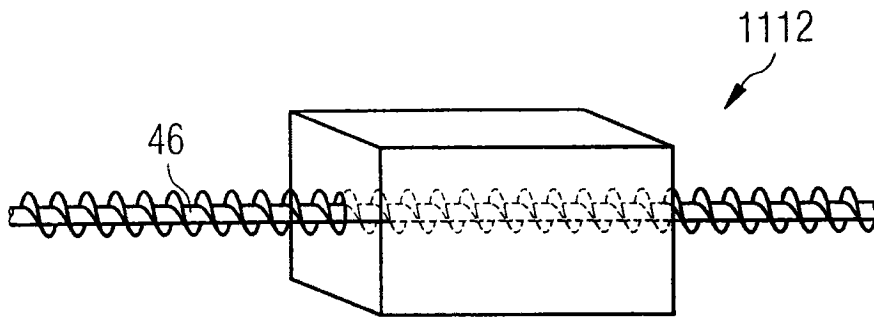


图 11A

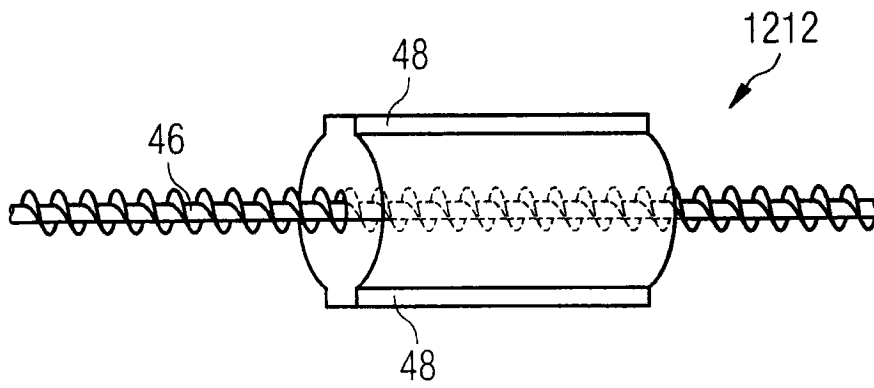


图 12A

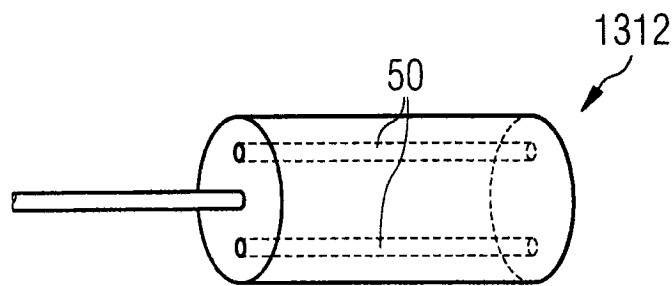


图 13

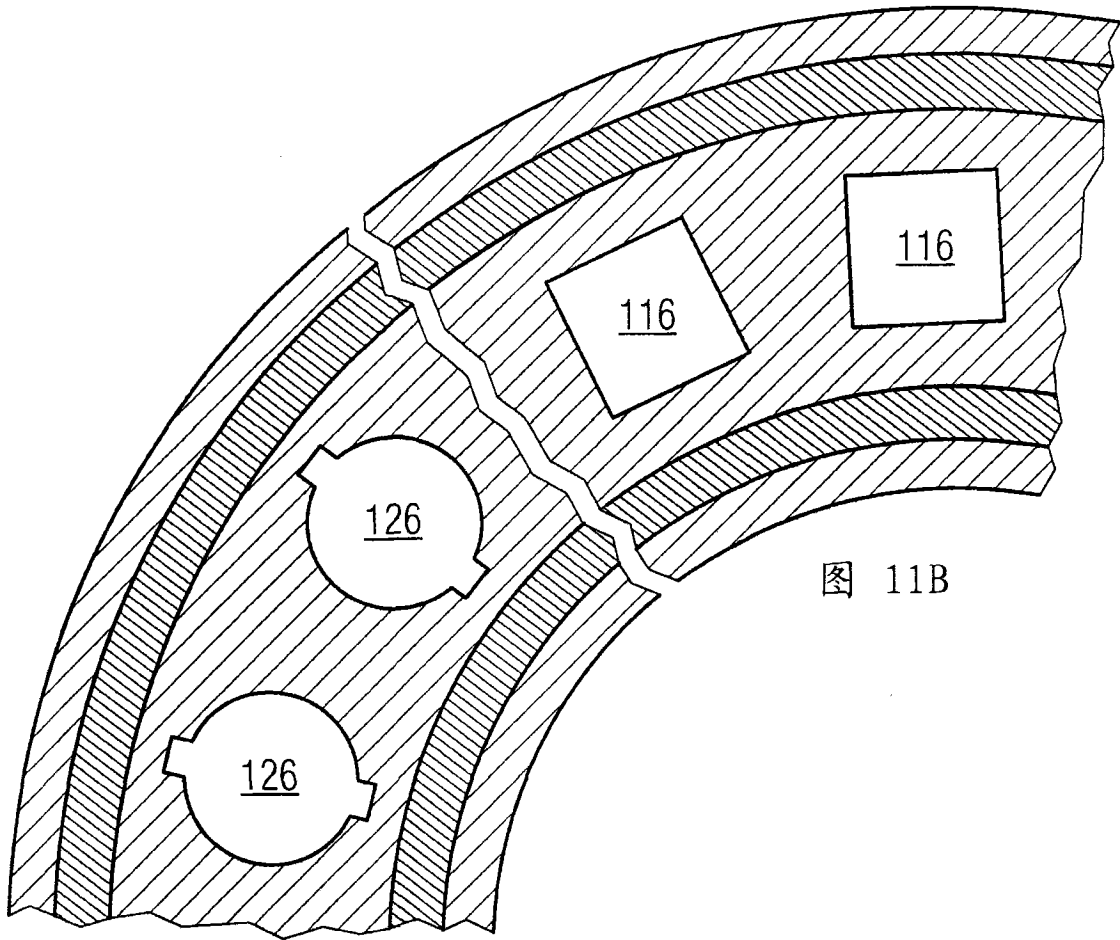


图 11B

图 12B

位于 $(0, 0, Z)$ 处的直径为 $1\text{cm} \times$ 长为 1.85cm 的饱和硅钢板
在 $(0, 0.16\text{m}, 0)$ 处的通量密度的 Z 分量

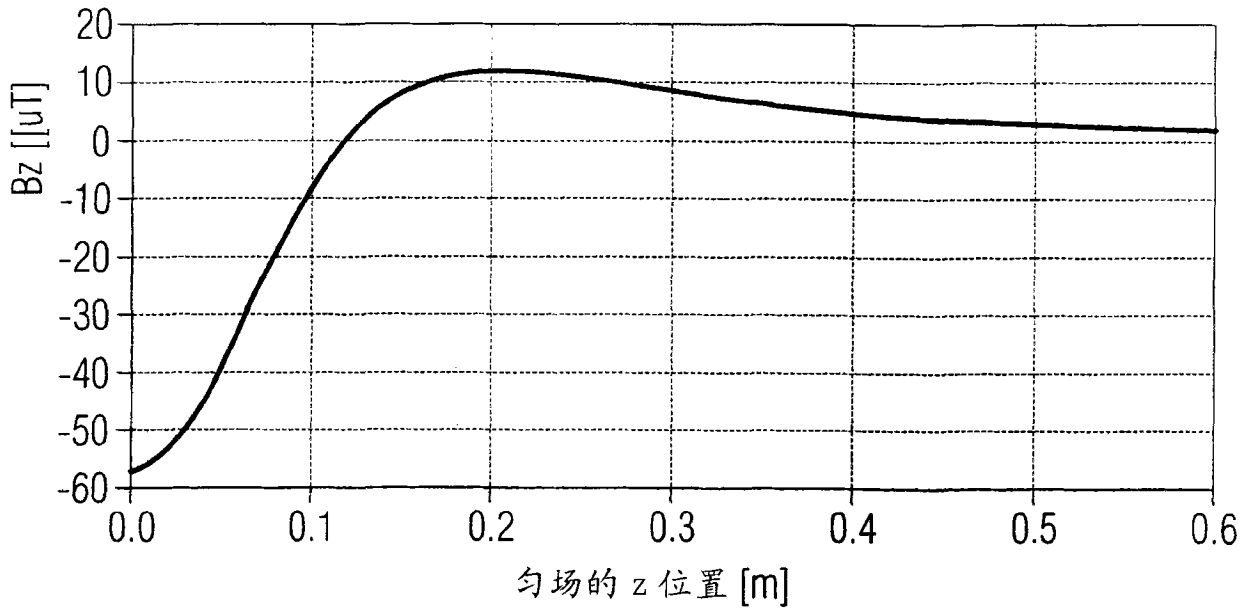


图 14

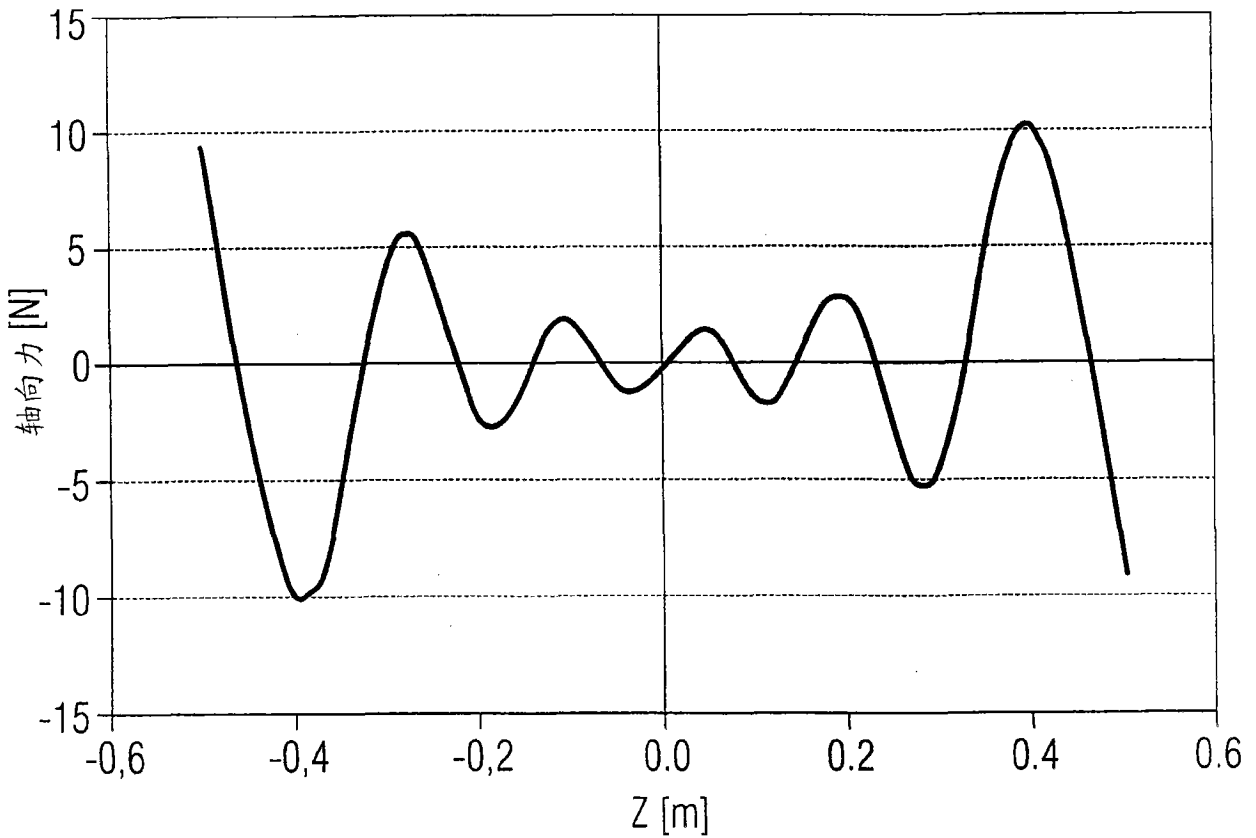


图 15

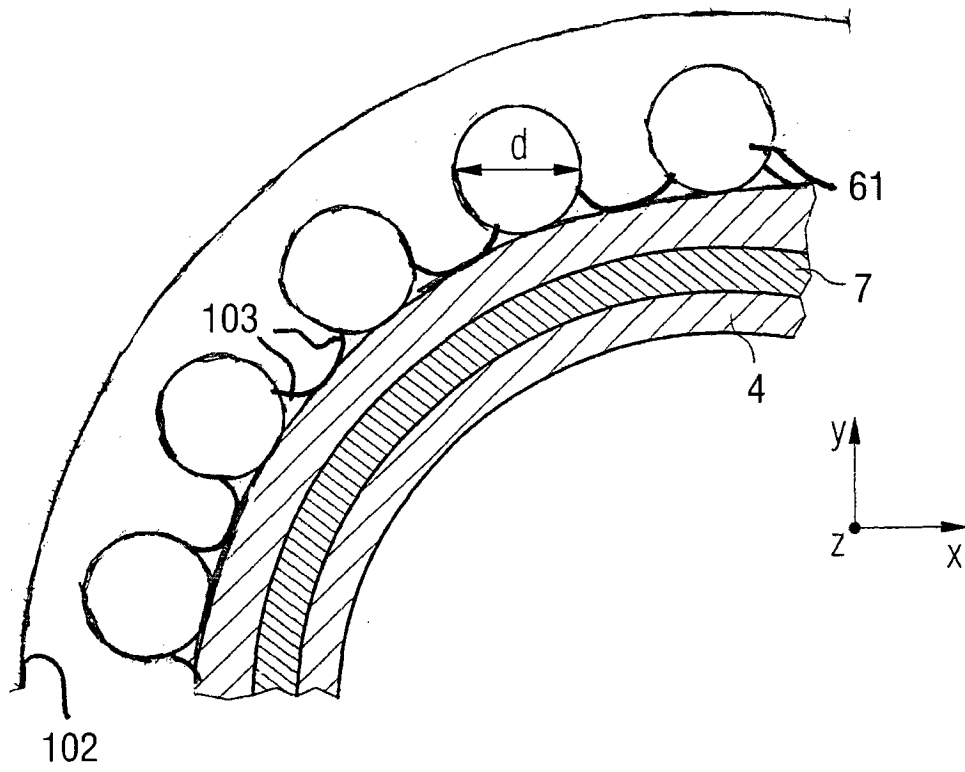


图 16

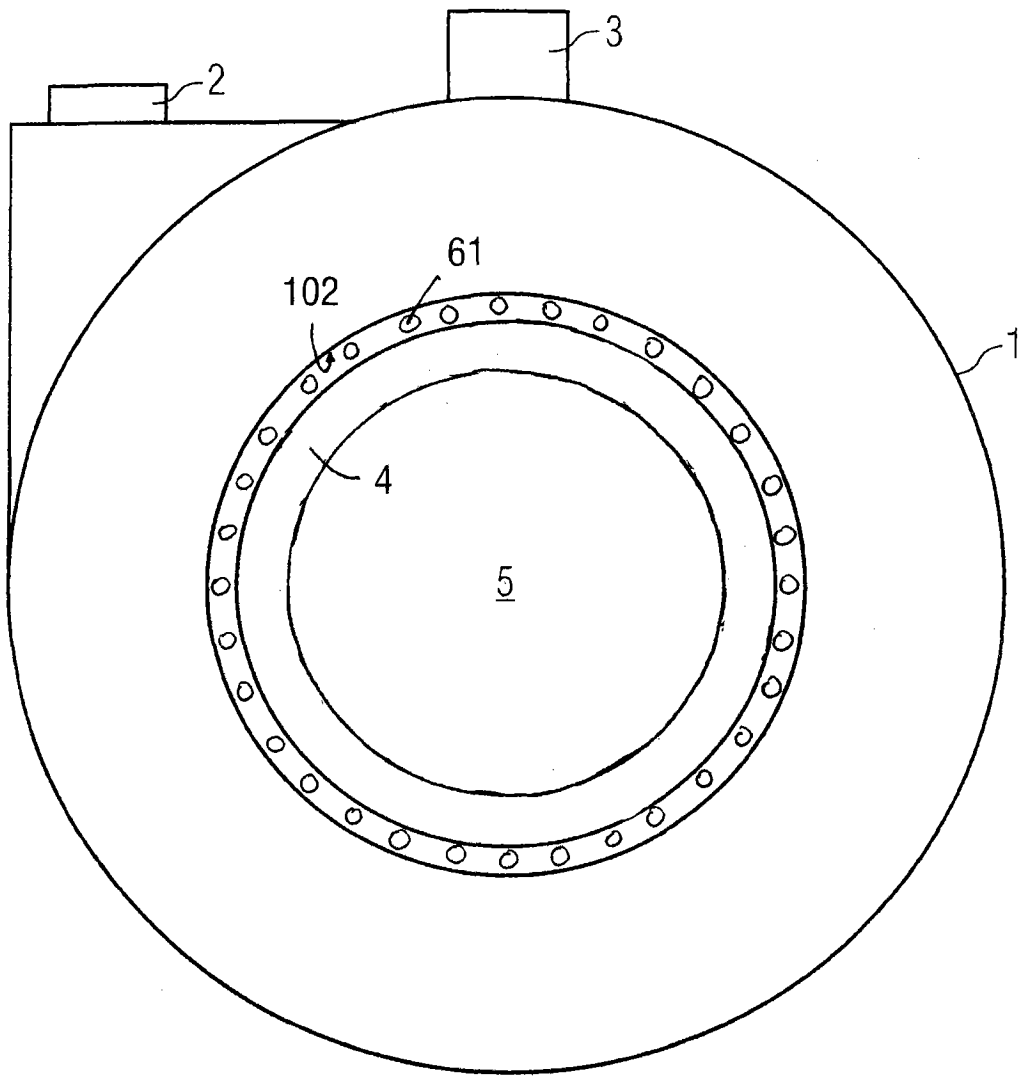


图 17

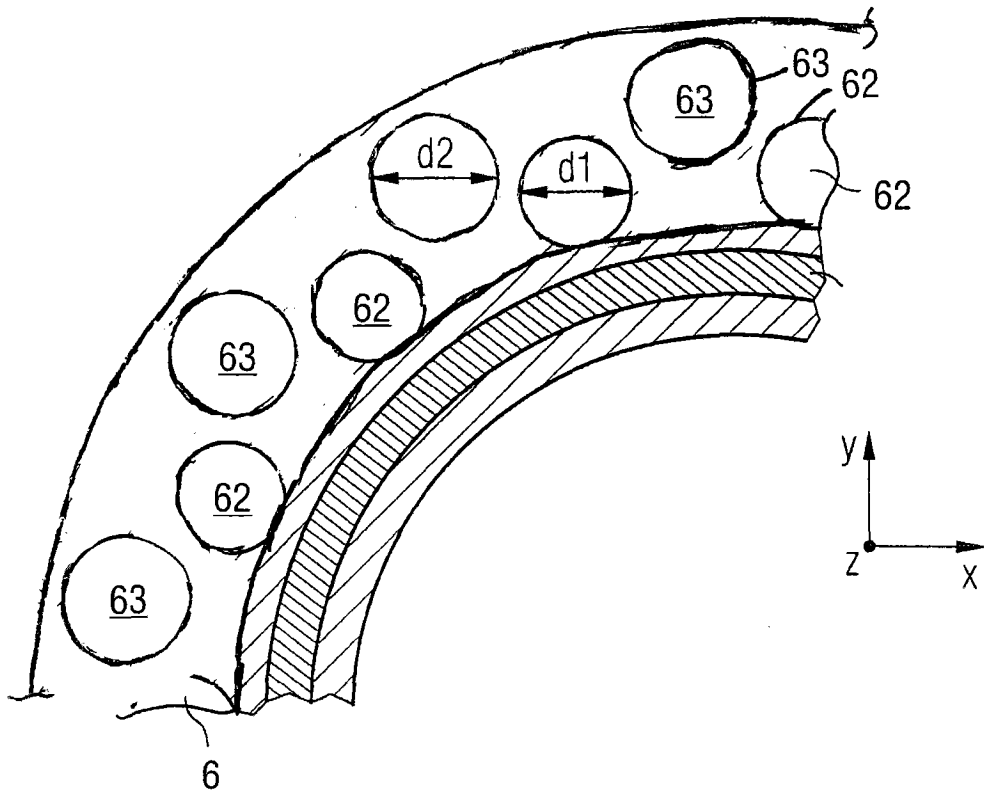


图 18

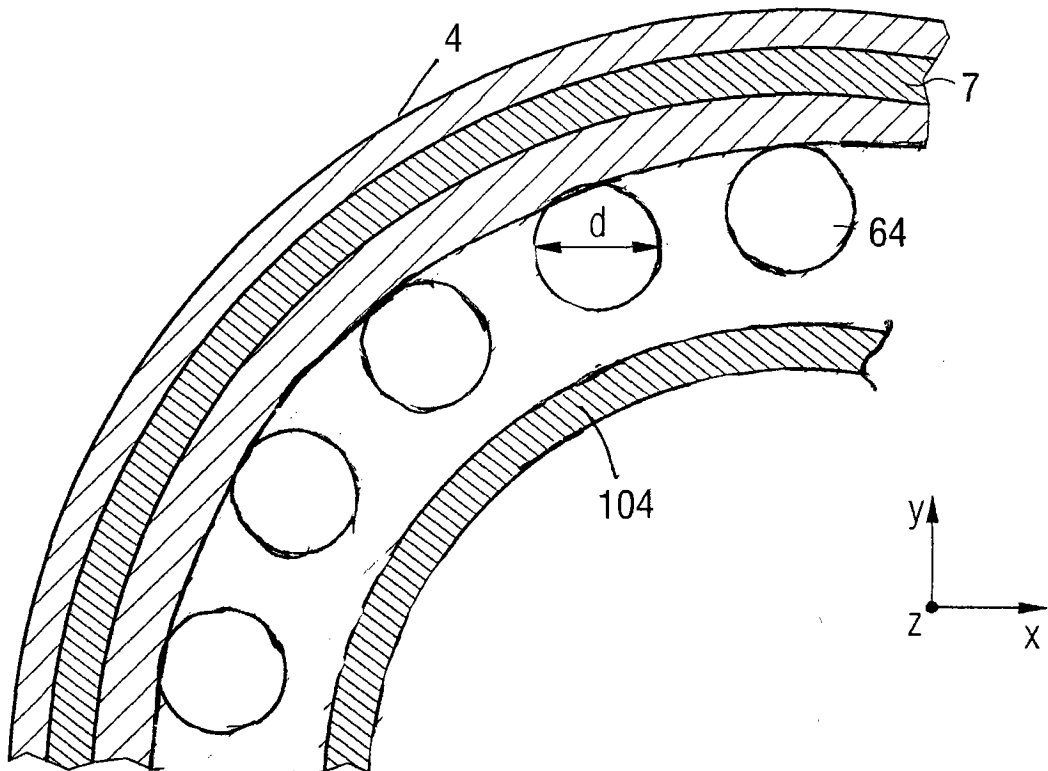


图 19

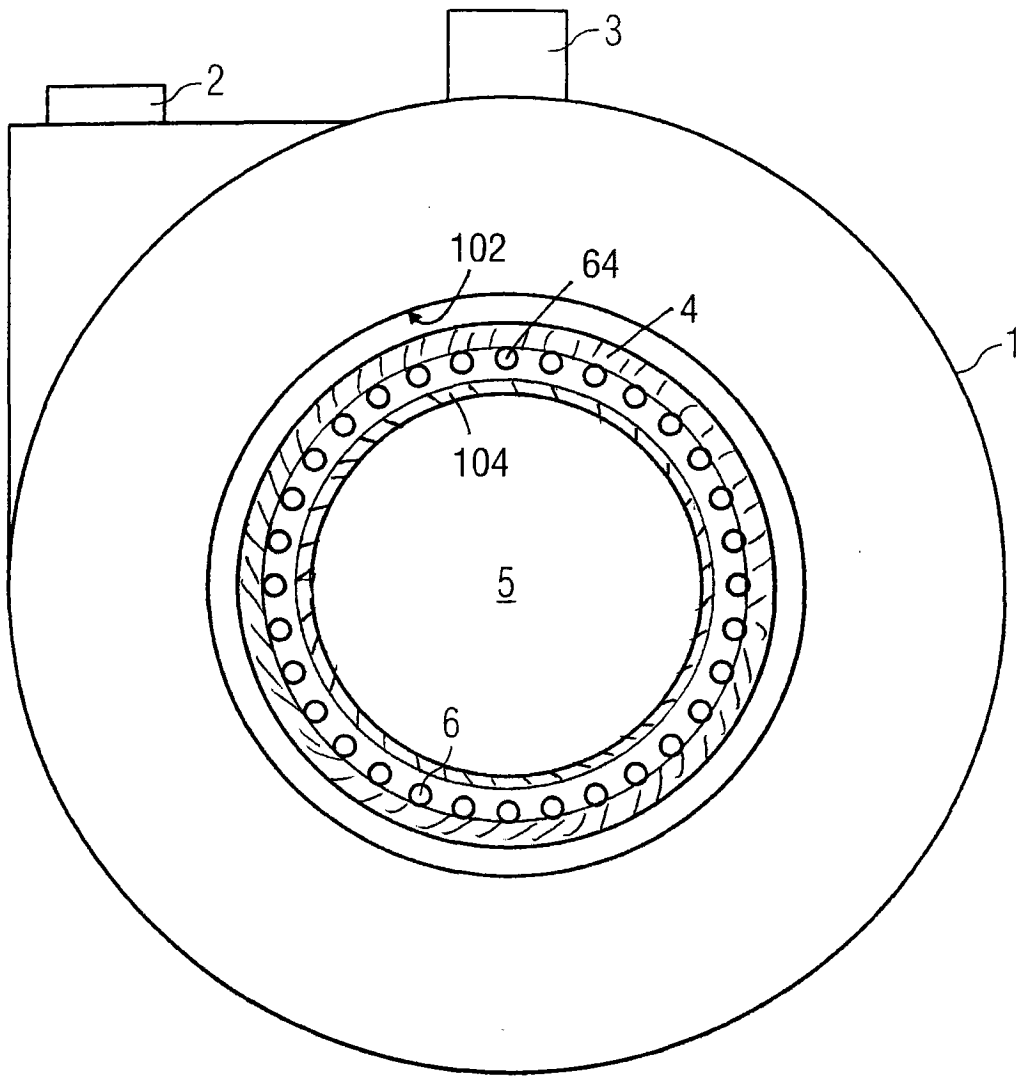


图 20