



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108291949 A

(43)申请公布日 2018.07.17

(21)申请号 201680068652.6

G·O·金博尔

(22)申请日 2016.11.17

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
72002

(30)优先权数据

62/259,758 2015.11.25 US

代理人 蔡洪贵

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2018.05.24

(51)Int.Cl.

G01R 33/38(2006.01)

F25D 19/00(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/IB2016/056910 2016.11.17

H01F 6/04(2006.01)

G01R 33/3815(2006.01)

(87)PCT国际申请的公布数据

W02017/089929 EN 2017.06.01

(71)申请人 皇家飞利浦有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

(72)发明人 P·A·门特乌尔

J·K·希尔德布兰德

G·G·普夫莱德雷尔

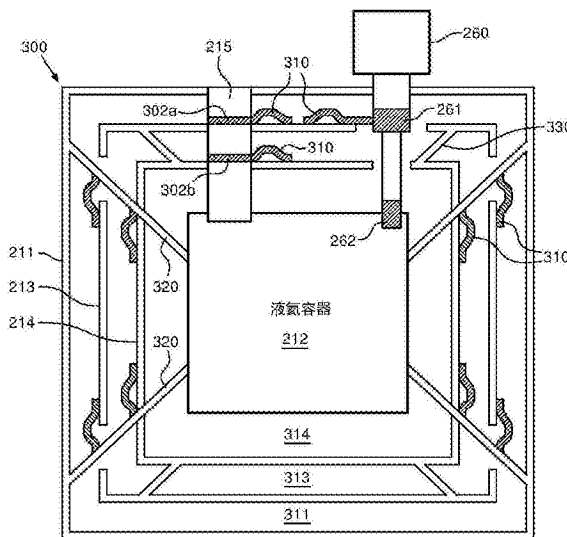
权利要求书4页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

磁共振成像(MRI)设备和用于MRI设备的低温恒温器

(57)摘要

一种设备(100)包括:外部壳体(211);内部容器(212),其被布置在外部壳体内;冷头(260),其具有被布置在外部壳体内的第一级(261)并具有用于接触内部容器的内部的第二级(262);孔口(215),其从内部容器的内部延伸到外部壳体的外部;第一热交换器(302a)和第二热交换器(302b);第一热屏(213),其被布置在内部容器和外部壳体之间;以及第二热屏(214),其被布置在内部容器与第一热屏之间。第一热屏被热连接到冷头的第一级和第一热交换器并与内部容器和外部壳体隔热。第二热屏被热连接到第二热交换器并且与内部容器、外部壳体、第一热屏和冷头隔热。



1. 一种磁共振成像 (MRI) 设备 (100), 包括:
  - 患者台 (104), 所述患者台被配置为保持患者 (10);
  - 超导导电线圈 (230), 所述超导导电线圈被配置为当电流通过时产生磁场;
  - 梯度线圈 (106), 所述梯度线圈被配置为至少部分地环绕所述MRI设备为其生成图像的所述患者的一部分;
  - 射频 (RF) 线圈 (108), 所述射频线圈被配置为将射频信号施加到患者的所述一部分并且改变所述磁场的对准;
  - 传感器 (20), 所述传感器被配置为感测由所述射频信号和所述患者引起的所述磁场的变化;
  - 外部壳体 (211);
  - 内部容器 (212), 所述内部容器被布置在所述外部壳体内, 所述内部容器具有被布置在其中的所述超导导电线圈并且被配置为具有被布置在其中的低温流体;
  - 冷头 (260), 所述冷头具有第一冷却级 (261), 所述第一冷却级被布置在所述外部壳体内并且被配置为提供冷却到第一温度的冷却, 并且具有第二冷却级 (262), 所述第二冷却级被布置在所述外部壳体内并且被配置为接触所述内部容器内的所述低温流体并且将所述低温流体冷却到小于所述第一温度的第二温度;
  - 孔口 (215), 所述孔口从所述内部容器的内部延伸到所述外部壳体的外部, 所述孔口具有与其相关联的第一热交换器 (302a) 和第二热交换器 (302b);
  - 第一热屏 (213), 所述第一热屏被布置在所述内部容器和所述外部壳体之间, 所述第一热屏被热连接到所述冷头的所述第一冷却级并被进一步热连接到所述第一热交换器并与所述内部容器和所述外部壳体隔热, 其中, 第一真空空间 (311) 被限定在所述第一热屏和所述外部壳体之间;
  - 第二热屏 (214), 所述第二热屏被布置在所述内部容器与所述第一热屏之间, 所述第二热屏被热连接到所述第二热交换器并与所述内部容器、所述外部壳体、所述第一热屏和所述冷头隔热, 其中, 第二真空空间 (313) 被限定在所述第一热屏和所述第二热屏之间, 并且第三真空空间 (314) 被限定在所述第一热屏和所述内部容器之间; 以及
  - 多个隔热支撑元件 (320、330), 所述多个隔热支撑元件被配置为将所述内部容器、所述外部壳体、所述第一热屏和所述第二热屏彼此附接。
2. 根据权利要求1所述的MRI设备 (100), 其中, 所述多个隔热支撑元件 (320、330) 由选自凯夫拉尔、s-玻璃/环氧树脂、G-10、碳纤维/环氧树脂和氧化铝中的一种制成。
3. 根据权利要求1所述的MRI设备 (100), 其中, 所述多个隔热支撑元件 (320、330) 还包括:
  - 至少一个第一隔热支撑元件 (320), 所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器 (212)、所述第二热屏 (214) 和所述外部壳体 (211) 彼此物理连接; 以及
  - 至少一个第二隔热支撑元件 (330), 所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏 (213) 和所述第二热屏 (214) 彼此物理连接,
  - 其中, 所述第一热屏 (213) 和所述第二热屏 (214) 都被热附接到所述至少一个第一隔热支撑元件 (320)。
4. 根据权利要求1所述的MRI设备 (100), 其中, 所述多个隔热支撑元件还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)、所述第一热屏(213)和所述外部壳体(211)彼此物理连接;以及

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)彼此物理连接,

其中,所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)都被热附接到所述至少一个第一隔热支撑元件(320)。

5. 根据权利要求1所述的MRI设备(100),其中,所述多个隔热支撑元件还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212),所述第一热屏(213)和所述外部壳体(211)彼此物理连接;以及

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述内部容器(212)彼此物理连接,

其中,所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)都被热附接到所述至少一个第一隔热支撑元件(320)。

6. 根据权利要求1所述的MRI设备(100),其中,所述冷头(260)被焊接到所述外部壳体(211)。

7. 根据权利要求1所述的MRI设备(100),其中,所述内部容器(212)具有在其中被布置为液氮的所述低温流体。

8. 根据权利要求7所述的MRI设备(100),其中,在并未向所述冷头供电的一段时间之后,氦气通过所述孔口(215)从所述内部容器到达所述外部壳体的外部。

9. 根据权利要求1所述的MRI设备(100),其中,所述第一温度处于 $35^{\circ}\text{K}$ 至 $75^{\circ}\text{K}$ 的范围中,并且所述第二温度低于 $5^{\circ}\text{K}$ 。

10. 根据权利要求1所述的MRI设备(100),其中,所述多个隔热支撑元件(320、330)包括至少一个柔性支撑元件。

11. 一种设备(100),包括:

外部壳体(211);

内部容器(212),所述内部容器被布置在所述外部壳体内,所述内部容器具有被布置在其中的导电线圈;

冷头(260),所述冷头具有第一冷却级(261)和第二冷却级(262),所述第一冷却级被布置在所述外部壳体内的,所述第二冷却级被布置在所述外部壳体内并且被配置为接触位于所述内部容器内的内部空间;

孔口(215),所述孔口从所述内部容器的内部延伸到真空壳体的外部,所述孔口具有与其相关联的第一热交换器(302a)和第二热交换器(302b);

第一热屏(213),所述第一热屏被布置在所述内部容器和所述外部壳体之间,所述第一热屏被热连接到所述冷头的所述第一冷却级并被进一步热连接到所述第一热交换器并与所述内部容器和所述外部壳体隔热;以及

第二热屏(214),所述第二热屏被布置在所述内部容器与所述第一热屏之间,所述第二热屏被热连接到所述第二热交换器并与所述内部容器、所述外部壳体、所述第一热屏和所述冷头隔热。

12. 根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器、所述第二热屏和所述外部壳体彼此物理连接;以及

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏和所述第二热屏彼此物理连接。

13.根据权利要求12所述的设备(100),其中,所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)都被热附连到所述至少一个第一隔热支撑元件(330)。

14.根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)、所述第一热屏(213)和所述外部壳体(211)彼此物理连接;以及

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)彼此物理连接。

15.根据权利要求14所述的设备(100),其中,所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)都被热附连到所述至少一个第一隔热支撑元件(330)。

16.根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)、所述第一热屏(213)和所述外部壳体(211)彼此物理连接;以及

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述内部容器(212)彼此物理连接。

17.根据权利要求16所述的设备(100),其中,所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)都被热附接到所述至少一个第一隔热支撑元件(320)。

18.根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)和所述第二热屏(214)彼此物理连接;

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)彼此物理连接;以及

至少一个第三隔热支撑元件(320),所述至少一个第三隔热支撑元件将所述第二热屏(214)和所述外部壳体(211)彼此物理连接。

19.根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)和所述第一热屏(213)彼此物理连接;

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述第二热屏(214)彼此物理连接;以及

至少一个第三隔热支撑元件(330),所述至少一个第三隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述外部壳体(211)彼此物理连接。

20.根据权利要求11所述的设备(100),其中,所述设备还包括:

至少一个第一隔热支撑元件(320),所述至少一个第一隔热支撑元件将所述内部容器(212)和所述第一热屏(213)彼此物理连接;

至少一个第二隔热支撑元件(330),所述至少一个第二隔热支撑元件将所述第一热屏(213)和所述内部容器(212)彼此物理连接;以及

至少一个第三隔热支撑元件 (320), 所述至少一个第三隔热支撑元件将所述第一热屏 (213) 和所述外部壳体 (211) 彼此物理连接。

## 磁共振成像 (MRI) 设备和用于 MRI 设备的低温恒温器

### 技术领域

[0001] 本发明主要涉及磁共振成像 (MRI) 设备和用于冷却用于 MRI 设备的磁体的超导线圈的低温恒温器。

### 背景技术

[0002] 超导磁体系统被在多种环境中使用,这些环境包括核磁共振 (NMR) 分析和磁共振成像 (MRI)。为了实现超导性,将磁体保持在温度接近绝对零度的低温环境中。通常,磁体系统包括一个或多个导电线圈,其充当一个或多个磁体并被设置在低温恒温器中且由诸如液氮之类的低温流体进行冷却以保持超导性。低温流体又通过制冷单元进行冷却,该制冷单元包括压缩机,该压缩机驱动冷却单元或“冷头”,以便将低温恒温器中的温度保持成接近绝对零度,使得用于磁体的超导性的条件持续存在。

[0003] 然而,例如在低温恒温器的运输期间,通常并不为该制冷系统供电。在那种情况下,低温恒温器内的低温流体的温度将开始升高。如果长时间不向该制冷系统供电(例如可能是运输期间的情况),这将最终致使一些或全部低温流体例如通过通常被包括在超导磁体系统中的排放口或释压阀蒸发掉并被损失掉。实际上,如果运输时间过长,则整个液氮存货(inventory)可能被损失掉。具有高氮损失率的低温恒温器可能呈现出困难的物流问题,这是因为必须对运输时间进行仔细管理,以避免氮存货被完全耗尽,从而在到达时导致温暖的氮容器,这可能是在目的地所要解决的复杂而昂贵的问题。

[0004] 此外,可能的是,在系统安装之后,例如由于压缩机的故障或由于用于操作该压缩机的交流(AC)电网供电的损失,导致制冷系统可能变得无法运转,从而关闭超导磁体系统的制冷。当不再向压缩机供应电力并且冷头停止对低温流体进行冷却时,低温恒温器内的状况劣化并且磁体的温度将开始升高。从某种程度上来说,如果并不重新施加电力以恢复对磁体环境的冷却,则磁体的温度将升高以达到所谓的临界温度,在该临界温度下,磁体将“失超(quench)”并将其磁能转换为热能,从而加热低温恒温器内的低温流体。这又可能导致部分或全部的低温流体蒸发并通过排放口或释压阀损失。此外,热量可能损坏设备的磁体和/或其它部件。

[0005] 在那种情况下,一旦恢复电力,使磁体返回到超导操作可能需要更换低温恒温器内的损失掉的低温流体,随后将磁体冷却回到低于临界温度,将导线连接到该磁体以便将来自外部电源的电流重新施加到该磁体,从而使磁场再生,并且随后再次将磁体与外部电源断开连接。此外,如果失超所产生的热量致使磁体或其它部件受损,则可能需要进行修理或更换。

[0006] 该恢复过程可能是昂贵而耗时的。通常,必须将经过培训的技术人员派遣到超导磁体系统所在的设施(例如,医疗中心或医院),并且必须向低温恒温器供应可能是非常昂贵的新的低温流体(例如液氮)以弥补失超期间所损失掉的流体。

[0007] 因此,会期望提供一种低温恒温器,该低温恒温器可在由于运输、功率损失或故障所导致的制冷损失的情况下呈现出降低了的低温材料(例如,氮)的损失率。

## 发明内容

[0008] 在本发明的一方面中,一种磁共振成像(MRI)设备包括:患者台,其被配置为保持患者;超导导电线圈,其被配置为当电流通过时产生磁场;梯度线圈,其被配置为至少部分地环绕MRI设备为其生成图像的患者的一部分;射频(RF)线圈,其被配置为将射频信号施加到患者的该部分并且改变磁场的对准;传感器,其被配置为感测由射频信号和患者所引起的磁场的变化;外部壳体;内部容器,其被布置在外部壳体内,内部容器具有被布置在其中的超导导电线圈并且被配置为具有被布置在其中的低温流体;冷头,其具有:第一冷却级,其被布置在外部壳体内并且被配置为提供冷却到第一温度的冷却;以及第二冷却级,其被布置在外部壳体内并且被配置为接触内部容器内的低温流体并且将低温流体冷却到小于第一温度的第二温度;孔口,其从内部容器的内部延伸到外部壳体的外部,该孔口具有与其相关联的第一热交换器和第二热交换器;第一热屏,其被布置在内部容器和外部壳体之间,第一热屏被热连接到冷头的第二冷却级并被进一步热连接到第一热交换器并与内部容器和外部壳体隔热,其中,第一真空空间被限定在第一热屏和外部壳体之间;第二热屏,其被布置在内部容器与第一热屏之间,第二热屏被热连接到第二热交换器并与内部容器、外部壳体、第一热屏和冷头隔热,其中,第二真空空间被限定在第一热屏和第二热屏之间,并且第三真空空间被限定在第一热屏和内部容器之间;以及多个隔热支撑元件,其被配置为将内部容器、外部壳体、第一热屏和第二热屏彼此附接。

[0009] 在一些实施例中,多个隔热支撑元件由选自凯夫拉尔、s-玻璃/环氧树脂、G-10、碳纤维/环氧树脂和氧化铝中的一种制成。

[0010] 在一些实施例中,多个隔热支撑元件还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第二热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接,其中,第一热屏和第二热屏都被热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0011] 在一些实施例中,多个隔热支撑元件还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第一热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接,其中,第一热屏和第二热屏都被热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0012] 在一些实施例中,多个隔热支撑元件还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第一热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和内部容器彼此物理连接,其中,第一热屏和第二热屏都被热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0013] 在一些实施例中,冷头被焊接到外部壳体。

[0014] 在一些实施例中,内部容器具有在其中被布置为液氦的低温流体。

[0015] 在一些形式的这些实施例中,在并未向冷头供电的一段时间之后,氦气通过孔口从内部容器到达外部壳体的外部。

[0016] 在一些实施例中,第一温度处于 $35^{\circ}\text{K}$ 至 $75^{\circ}\text{K}$ 的范围内,第二温度低于 $5^{\circ}\text{K}$ 。

[0017] 在一些实施例中,多个隔热支撑元件包括至少一个柔性支撑元件。

[0018] 在本发明的另一方面,一种设备包括:外壳;内部容器,其被布置在外部壳体内,内

部容器具有布置在其中的导电线圈;冷头,其具有布置在外部壳体内的第一冷却级并且具有被布置在外部壳体内且被配置为接触内部容器内的内部空间的第二冷却级;孔口,其从内部容器的内部延伸到外部壳体的外部,该孔口具有与其相关联的第一热交换器和第二热交换器;第一热屏,其被布置在内部容器和外部壳体之间,第一热屏被热连接到冷头的第一冷却级并被进一步热连接到第一热交换器并与内部容器和外部壳体隔热;以及第二热屏,其被布置在内部容器与第一热屏之间,第二热屏被热连接到第二热交换器并与内部容器、外部壳体、第一热屏和冷头隔热。

[0019] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第二热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接。

[0020] 在一些形式的这些实施例中,第一热屏和第二热屏都被热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0021] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第一热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接。

[0022] 在一些形式的这些实施例中,第一热屏和第二热屏都被热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0023] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器、第一热屏和外部壳体彼此物理连接;以及至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和内部容器彼此物理连接。

[0024] 在一些形式的这些实施例中,第一热屏和第二热屏都热附接到至少一个第一隔热支撑元件。

[0025] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器和第二热屏彼此物理连接;至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接;以及至少一个第三隔热支撑元件,其将第二热屏和外部壳体彼此物理连接。

[0026] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器和第一热屏彼此物理连接;至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和第二热屏彼此物理连接;以及至少一个第三隔热支撑元件,其将第一热屏和外部壳体彼此物理连接。

[0027] 在一些实施例中,该设备还包括:至少一个第一隔热支撑元件,其将内部容器和第一热屏彼此物理连接;至少一个第二隔热支撑元件,其将第一热屏和内部容器彼此物理连接;以及至少一个第三隔热支撑元件,其将第一热屏和外部壳体彼此物理连接。

## 附图说明

[0028] 根据下文中对结合附图考虑的示例性实施例进行的详细描述,将更容易理解本发明,在附图中:

[0029] 图1示出了磁共振成像(MRI)设备的示例性实施例。

[0030] 图2是示出了可以在MRI设备中采用的超导磁体系统的一个示例性实施例的功能图。

[0031] 图3示出了低温恒温器和冷头的第一示例性实施例的一部分。



[0032] 图4示出了低温恒温器和冷头的第二示例性实施例的一部分。

[0033] 图5示出了低温恒温器和冷头的第三示例性实施例的一部分。

### 具体实施方式

[0034] 现在将在下文中参照附图更为详细地描述本发明,在附图中,示出了本发明的诸多实施例。然而,本发明被具体体现在不同的形式中并且不应被解释为受限于本文中所阐述的实施例。相反,这些实施例被作为本发明的教导示例予以提供。

[0035] 图1示出了磁共振成像(MRI)设备100的示例性实施例。MRI设备100包括磁体系统102;患者台104,其被配置为保持患者10;梯度线圈106,其被配置为至少部分地环绕MRI设备100为其产生图像的患者10的至少一部分;和射频线圈108,其被配置为将射频信号施加到正被成像的患者10的至少该部分,并且改变磁场的对准;以及传感器20,其被配置为感测由射频信号和患者10引起的磁场变化。

[0036] MRI设备的一般操作是众所周知的并且因此将不在这里进行重复。

[0037] 在MRI设备100中,磁体系统102是超导磁体系统,其包括设置在低温恒温器内的一个或多个导电线圈,由此导电线圈通过制冷器或冷却器和低温流体(例如,液氮)保持在非常低的温度,以便是超导的。

[0038] 被称为零蒸发系统的低温恒温器可以包括位于低温恒温器内的液氮容器和介于液氮容器与低温恒温器的外部壳体之间的单个热屏,并且该热屏可以被热附接到制冷器的两级冷头的第一冷却级。冷头的第二冷却级在低于液氮的沸点的温度下运转,从而经由热交换器将氮蒸气冷凝回到液态并使其返回到容器中的液氮存货。附接到冷头的第一冷却级的热屏在比冷却容器内的氮的第二冷却级高得多的温度范围内运转。热屏的目的是在正常运转期间将尽可能多的热量分流到冷头的第一冷却级,以使得任何剩余热量到液氮容器的传导最小化。

[0039] 然而,在低温恒温器的真空空间中具有冷头的单个热屏系统的问题在于,当制冷系统失效时或如上所述在并未向制冷系统供电时的低温恒温器的运输期间可能出现高氮损失率。

[0040] 为了降低氮损失率,逸出的冷却氮气可被用于经由热交换器来冷却该热屏,从而降低热屏的温度。不幸的是,热屏的最大热负荷是不运转的冷头,这可能导致热屏在高于100°K的温度下运转,此时,对液氮容器的热辐射过高。在某些情况下,这可能导致比每小时3升液氮高得多的氮损失率,这是不合乎要求的。

[0041] 相应地,图2示出了超导磁体系统200的一个示例性实施例,其可以被用在诸如MRI设备100之类的MRI设备中,并且其包括未被热耦合到冷头的“浮动的”热屏。特别地,超导磁体系统200可以是MRI设备100中的磁体系统102的一个实施例。应该明白的是,通常,超导磁体系统200可以包括图2中并未示出的许多其它组件。为了清楚说明并且为了不使得下文中所要讨论的本发明的各个方面难以理解,图2中已经省略掉了一些部件。

[0042] 超导磁体系统200包括低温恒温器210,该低温恒温器210具有外壳或外部真空容器(下文中称为外部壳体)211和被全部布置在外部壳体211内的第一热屏213;第二热屏214;和液氮罐或容器212(下文中称为内部容器)。超导磁体系统200还包括孔口215,该孔口215用于向内部容器212填充低温流体(例如,液氮),并且通过孔口215,沸腾的氮气可以从

内部容器212释放到低温恒温器210的外部。超导磁体系统200还包括由压缩机270驱动以使内部容器212中的氦气再凝结的冷头260。有益地是,冷头260可以是两级冷头,如将在下面参照图3更为详细地描述的那样。尽管在图2中并未示出,超导磁体系统200还包括热交换器,这些热交换器与孔口215相关联并且被热附接或耦合至第一热屏213和第二热屏214。如将在下面更为详细地描述的那样,第二热屏214是“浮动”热屏,其并不热耦合到冷头260。下面将参照图3详细地描述超导磁体系统200的上述元件的布置的这个和其它重要细节。

[0043] 超导磁体系统200还包括被布置在低温恒温器210的液氦容器212中的低温流体(例如,液氦)内的一个或多个导电线圈230和持续电流开关240以及布置在低温恒温器210的外侧(外部)的电源250。超导磁体系统200还包括磁体控制器280,其可以控制超导磁体系统200的多种操作。

[0044] 超导磁体系统200还包括第一导电引线201和第二导电引线202以及第三导电引线203和第四导电引线204。在此,第一导电引线201和第三导电引线203穿过孔口215。然而,在超导磁体系统200的其它变型中,第一导电引线201和第三导电引线203可以穿过外部壳体211和内部容器212中的单独的检修孔。

[0045] 第一导电引线201和第二导电引线202在电触点205处被彼此连接,并且第三导电引线203和第四导电引线204在电触点206处被彼此连接。第一导电引线201和第三导电引线203被连接到电源250。第一导电引线201和/或第三导电引线203可被经由开关(未示出)连接到电源250。第二导电引线202和第四导电引线204被连接到导电线圈230的相对两端。在一些形式的超导磁体系统200中,一旦导电线圈230是超导的并且持续电流开关240是起作用的,第一导电引线201和第三导电引线203可以从低温恒温器210的外部壳体211缩回。在一些变型中,第一导电引线201和第二导电引线202可被利用一条导电引线所代替,并且第三导电引线203和第四导电引线204可被利用另一条导电引线所代替,并且电触点205和206可以被省略掉。

[0046] 有益地是,超导磁体系统200是氦浴式系统。在一些实施例中,与常规氦浴式系统中的氦体积相比,内部容器212可以包含相对少量的低温流体,例如,50至100升(或更少)的液氦。

[0047] 持续电流开关240被布置在内部容器212内并且可以包括一段超导体导线,其被经由被附接到小型加热器的第二导电引线202和第四导电引线204跨接导电线圈230的相对两端。

[0048] 超导磁体系统200可具有一个或多个传感器(图2中未示出),其用于测量多种运行参数,例如,多个位置处的温度、低温流体(例如,液氦)的液位、诸如压缩机270之类的部件是否正适当地运转、电力是否已经由于例如电力中断而损耗掉等。每个传感器可被连接到磁体控制器280并且向磁体控制器280供应对应的传感器信号。

[0049] 磁体控制器280可以包括处理器和存储器,该存储器包括非易失性存储器和易失性存储器。非易失性存储器可以存储用于致使处理器执行用于控制超导磁体系统200的操作的一种或多种算法的编程代码或指令(软件)。

[0050] 如上所述,在一些形式的超导磁体系统200中,第一导电引线201和第三导电引线203各自可以是可缩回的。在那种情况下,在超导磁体系统200的启动操作期间,可缩回的引线201和203被插入到内部容器212中,并且持续电流开关240中的导线被加热到高于其转变

温度,使得它变成是有阻力的。在一些实施例中,第一导电引线201和第三导电引线203各自可以在其端部具有凸销,该凸销可以被接收并耦合到被设置在电触点205和206中的每一个中的插口中。

[0051] 导电线圈230最初被通过外部电源250供电,该外部电源250使电流通过导电线圈230。由于持续电流开关240中的导线正在启动操作期间被加热,该开关的电阻明显大于导电线圈230的电阻,使得来自外部电源的电流流过导电线圈230。

[0052] 为了转换到处于持续模式中的操作,对通过导电线圈230的电流进行调整,直到获得所需磁场,随后关闭持续电流开关240中的加热器。在关闭该加热器之后,持续电流开关240中的超导体导线冷却到其超导温度,从而使导电线圈230短路,如上所述,导电线圈230也是超导的。电源中的电流缓降并且导线201和203被从内部容器212缩回。

[0053] 图3示出了低温恒温器300和冷头260的第一示例性实施例的一部分。具体地,低温恒温器300可以是超导磁体系统200中的低温恒温器210的一个实施例。应当明白的是,通常,低温恒温器300可包括图3中未示出的许多其它部件。为了清楚说明并且为了不使下为中所要讨论的本发明的多个方面难以明白,已经从图3中省略掉了一些部件。

[0054] 低温恒温器300包括外部壳体211和被全部布置在外部壳体211内的第一热屏213;第二热屏214;和内部容器212。低温恒温器300还包括孔口215以及第一热交换器302a和第二热交换器302b。

[0055] 冷头260是两级冷头,其包括第一冷却级261和第二冷却级262,该第一冷却级261被布置在外部壳体211内并且被配置为提供冷却至第一温度(例如,处于从约35°K至约85°K的范围内的温度)的冷却,该第二冷却级262被布置在外部壳体211内并且被配置为接触内部容器212内的低温流体并且将该低温流体冷却到第二温度(例如,约4.2°K),该第二温度小于第一温度并且是足够冷的以使低温气体(例如,氦气)凝结,从而将低温流体维持处于液态中(例如,液氦)。有益地是,冷头260被例如通过焊接到外部壳体211而被固定到低温恒温器300的外部壳体211。

[0056] 如可在图3中所见,第一热屏213被布置在内部容器212和外部壳体211之间。具体地,第一热屏213被布置在第二热屏214和外部壳体211之间,并且第二热屏214被布置在内部容器212和第一热屏213之间。第一真空空间311被限定在第一热屏213和外部壳体211之间;第二真空空间313被限定在第一热屏213和第二热屏214之间;并且第三真空空间被限定在第二热屏214和内部容器212之间。因此,第一热屏213和第二热屏214被彼此隔热并且与内部容器212和外部壳体211隔热。

[0057] 第一热屏213例如通过高热导率连接件310热连接到冷头260的第一冷却级261,并且还例如通过另一高热导率连接件310热连接到第一热交换器302a。在此,高热导率连接件310可以是刚性的或柔性的,并且在一些形式中,可以包括金属连接件,例如,铝带或铜带。在一些实施例中,高热导率连接件310可以具有在低温恒温器300的运转温度下 $>0.5\text{W}/^\circ\text{K}$ 的热导率。第二热屏214被例如通过另一高热导率连接件310热连接到第一热交换器302a。然而,第二热屏214与冷头260隔热并且因此也可以被称为“浮动屏”。因此,与被热连接到冷级260的第一级211的第一热屏213相比,第二热屏214上的热负荷被显著降低。因此,在失去由冷头260进行的制冷(例如,由于电力损失或在低温恒温器300的运输期间)的情况下,通过孔口215逸出的冷却氦气可以经由第二热交换器302b将第二热屏214冷却到更低的温度,从

而大大地降低了氦损失率。

[0058] 在一些形式的低温恒温器300中,第一热屏213和第二热屏214可以各自包括铝合金或其它材料,该其它材料可以提供高横向热传导性和足够大的机械强度或刚度,以承受在超导磁体失超的情况下可能诱生的力。

[0059] 在结构上,内部容器212通过将内部容器212和外部壳体211彼此物理连接的一个或多个第一隔热(即,低热导率)支撑元件320从外部壳体211加以支撑。在该实施例中,第二热屏214被机械地固定或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个,并且第一热屏213又经由将第一热屏213和第二热屏214彼此物理连接的一个或多个第二隔热支撑元件330从第二热屏214加以支撑。有益地是,第一热屏213和第二热屏214还被例如经由一个或多个高热导率连接件310热耦合或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个。

[0060] 有益地是,第一隔热支撑元件320和/或第二隔热支撑元件330可以各自具有在低温恒温器300的操作温度下 $<0.04\text{W}/^\circ\text{K}$ 的导热率。在一些形式中,第一隔热支撑元件320和/或第二隔热支撑元件330可以由凯夫拉尔(Kevlar)、s-玻璃/环氧树脂、G-10、碳纤维/环氧树脂、氧化铝或其它适用的材料制成,该其它适用的材料具有低导热率并且在低温下具有足够的机械强度,例如具有小于 $0.3\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{K}$ 的导热率的材料。

[0061] 除了图3中所示的布置结构之外,设想到了用于在结构上支撑内部容器212、第一热屏213和第二热屏214的其它布置结构。

[0062] 例如,图4示出了低温恒温器400和冷头260的第二示例性实施例的一部分。低温恒温器400类似于低温恒温器300,因此将仅描述它们之间的差异。具体地,在低温恒温器400中,第一热屏213被机械地固定或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个,并且第二热屏214又被经由将第一热屏213和第二热屏214彼此物理连接的一个或多个第二隔热支撑元件330从第一热屏213进行支撑。如在低温恒温器300中一样,在低温恒温器400中,第一热屏213和第二热屏214也例如被经由一个或多个高热导率连接件310热耦合或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个。

[0063] 图5示出了低温恒温器500和冷头260的第三示例性实施例的一部分。低温恒温器500类似于低温恒温器400,因此将仅描述它们之间的差异。特别地,在低温恒温器500中,第一热屏213被机械地固定或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个,并且第二热屏214被经由将内部容器212和第二热屏214彼此物理连接的一个或多个第二隔热支撑元件330从内部容器212进行支撑。如在低温恒温器300和400中一样,在低温恒温器500中,第一热屏213和第二热屏214也例如被经由一个或多个高热导率连接件310热耦合或附接到第一隔热支撑元件320中的一个或多个。

[0064] 除了图3-5中所示的布置结构之外,设想到了用于在结构上支撑内部容器212、第一热屏213和第二热屏214的其它布置结构。例如,一些实施例可以包括图3中的低温恒温器300的支撑结构的改型,其中,至少一个第一隔热支撑元件将内部容器和第二热屏彼此物理连接,至少一个第二隔热支撑元件将第一热屏和第二热屏彼此物理连接,并且至少一个第三隔热支撑元件将第二热屏和外部壳体彼此物理连接。

[0065] 尽管本文中公开了优选实施例,但是仍然保持在本发明的概念和范围内的许多变型是可能的。例如,上文中已经在氦浴式系统的背景下描述了诸多实施例。然而,在其它实施例中,可能的是,本文中所公开的原理可适于在“冷冻”或密封系统中加以使用。在检查了

本文中的专利说明书、附图和权利要求之后,这种变型对于本领域技术人员而言将变得清楚。因此,除了所附权利要求的范围内,本发明并不受到限制。

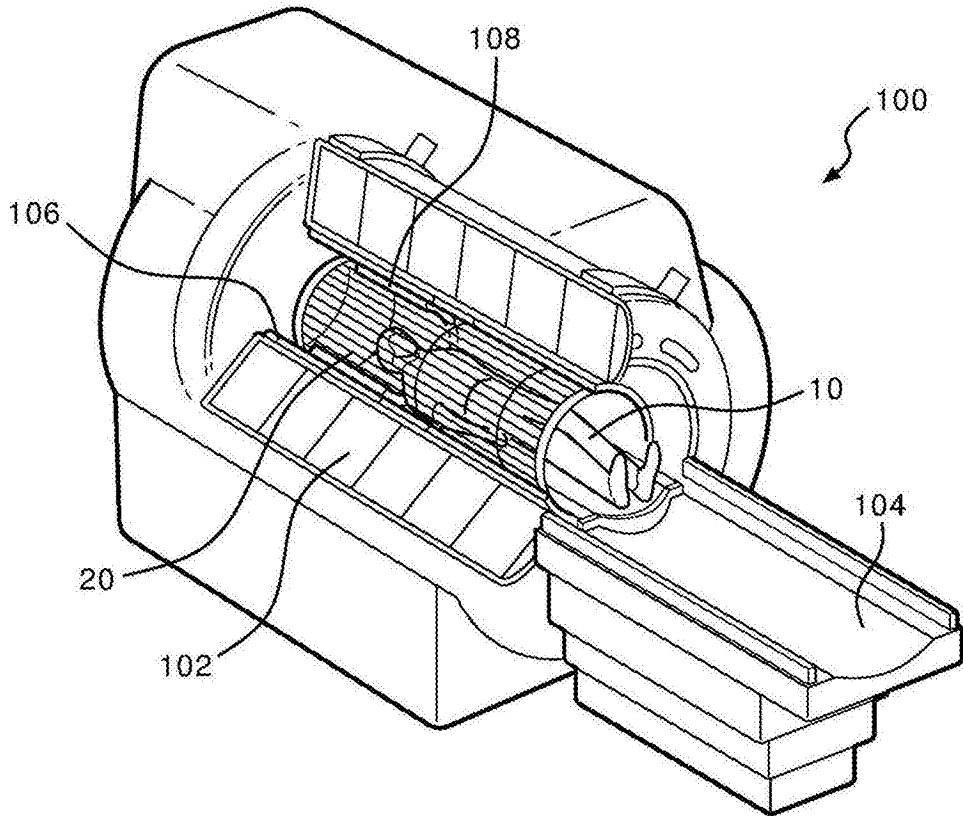


图1

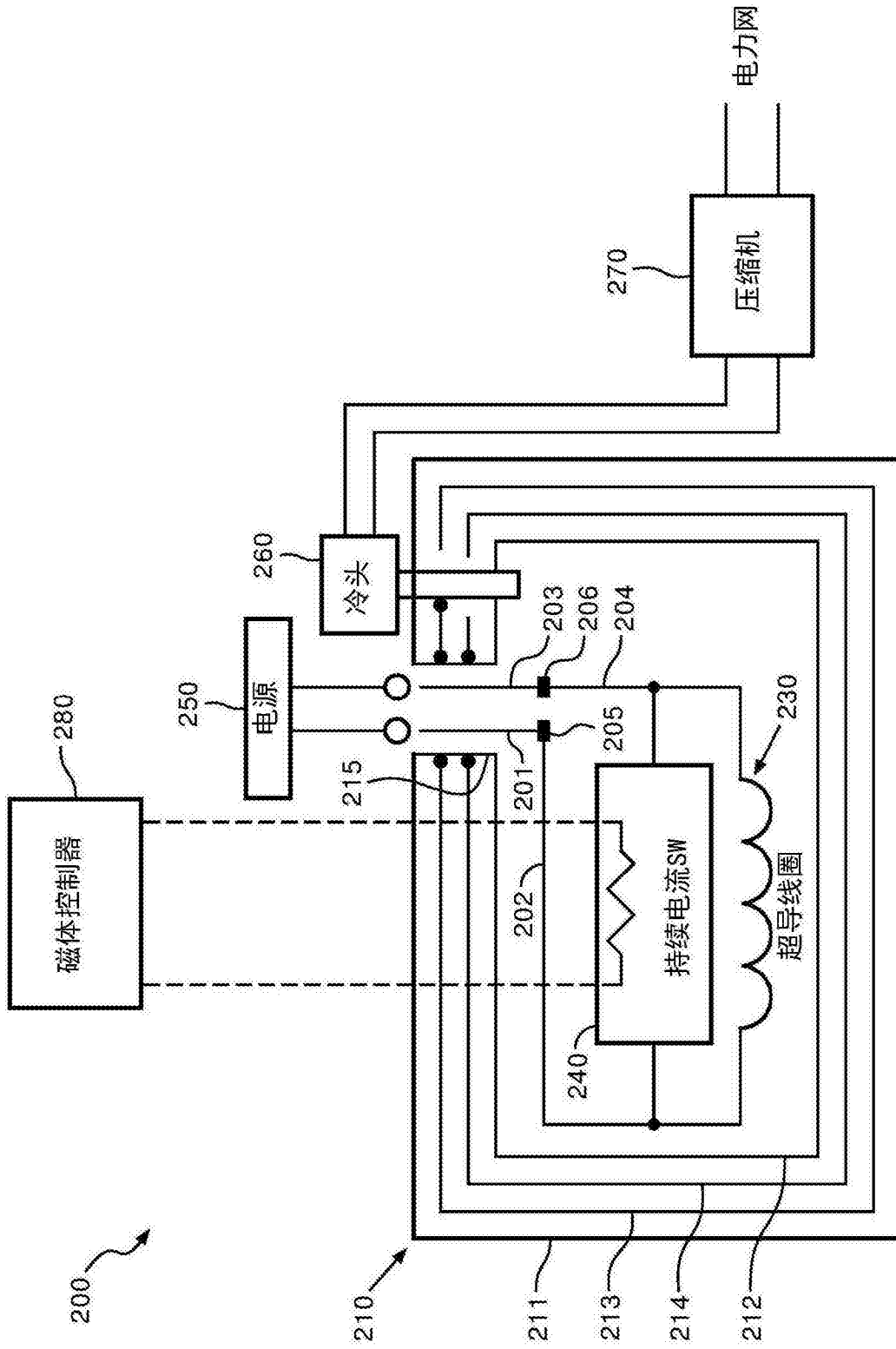


图2

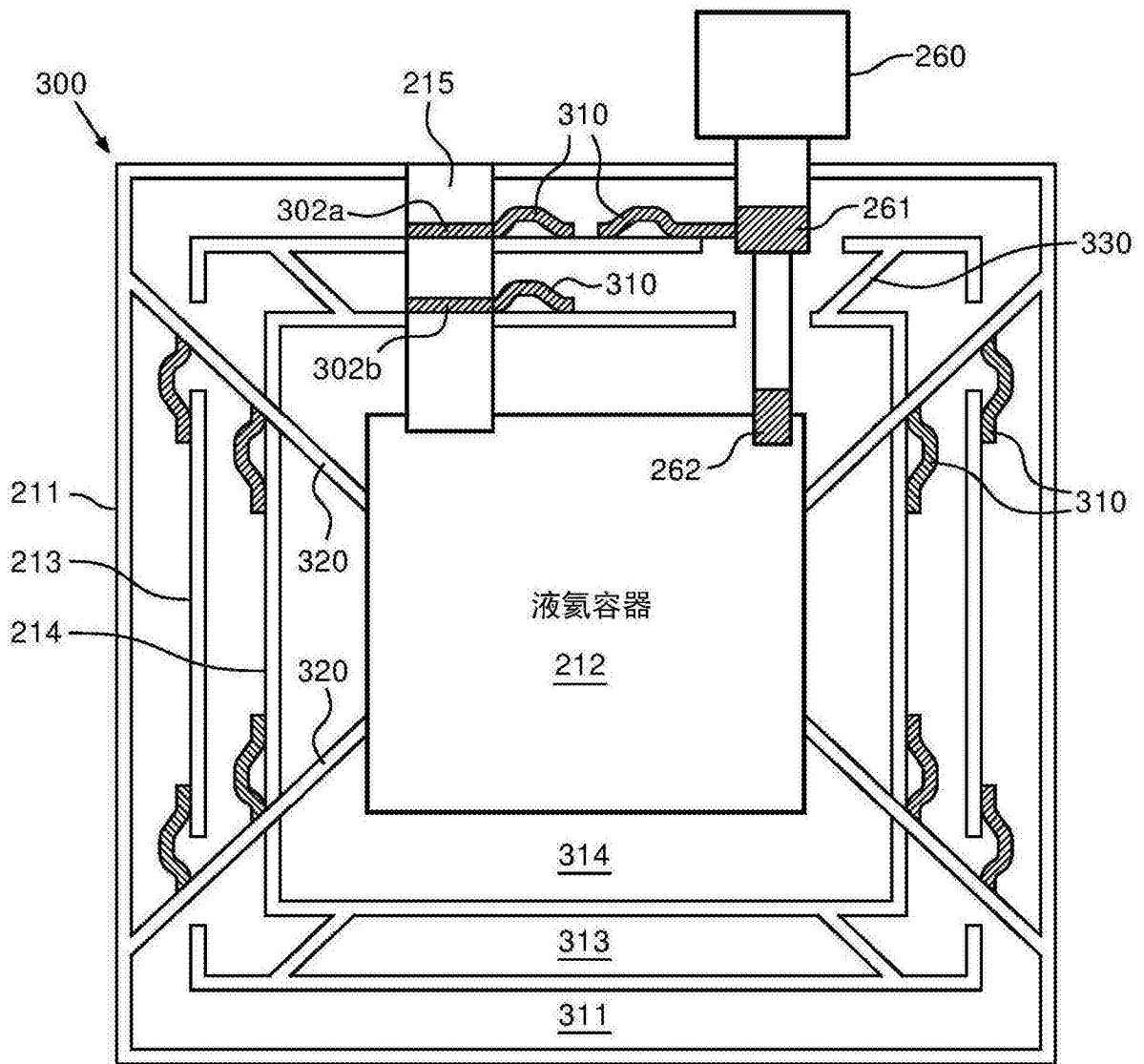


图3



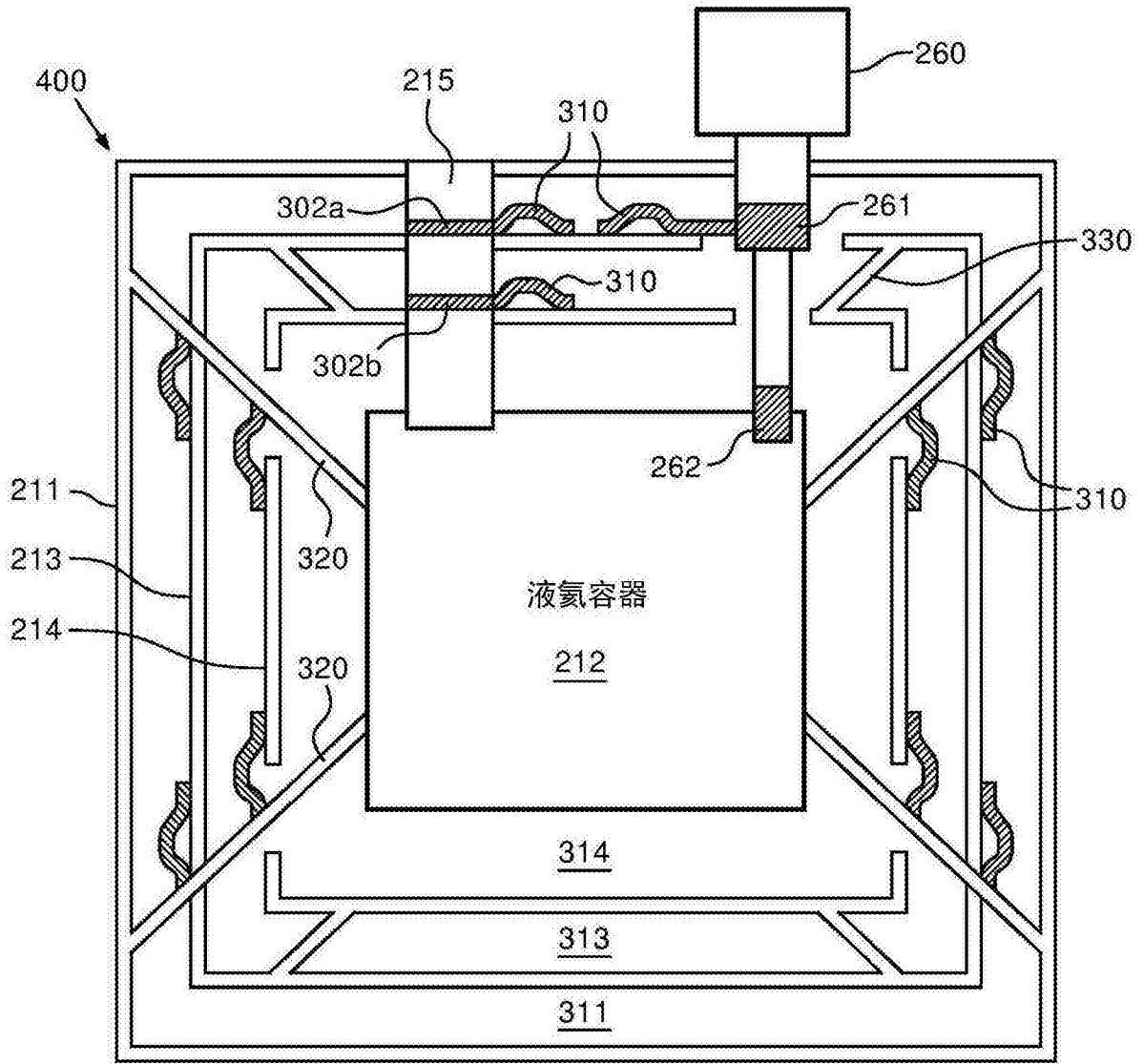


图4

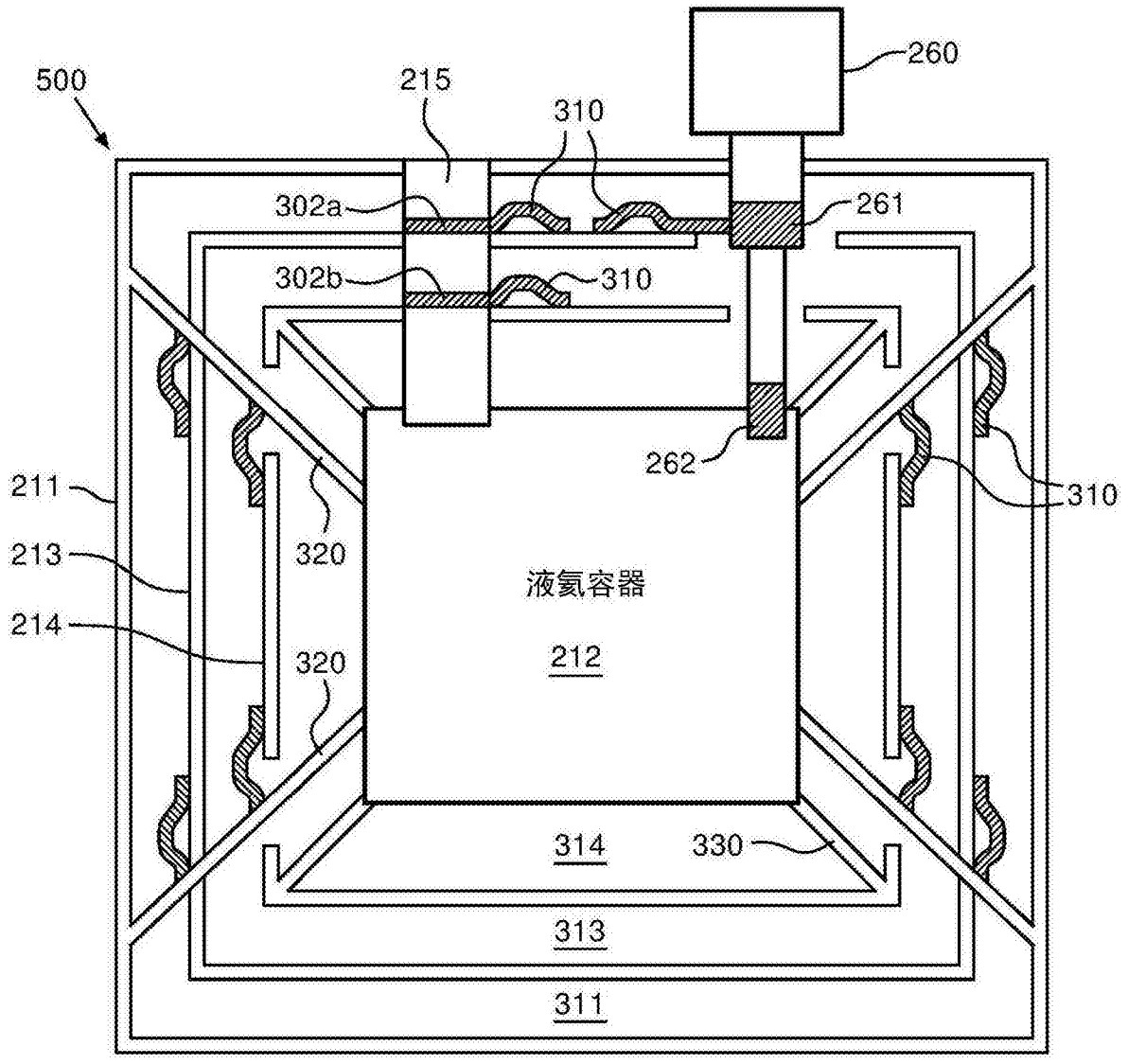


图5