

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101366093 B

(45) 授权公告日 2012. 12. 12

(21) 申请号 200780001934. 5

(22) 申请日 2007. 01. 05

(30) 优先权数据

11/326, 903 2006. 01. 06 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2008. 07. 04

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2007/000461 2007. 01. 05

(87) PCT申请的公布数据

W02007/081914 EN 2007. 07. 19

(73) 专利权人 量子设计有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 约斯特·代德里克斯

安德烈亚斯·阿曼

迈克尔·B·西蒙兹

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限

责任公司 11240

代理人 余刚 尚志峰

(56) 对比文件

US 6777938 B2, 2004. 08. 17, 说明书第 7 栏第 56 行至第 59 行.

US 5680085 A, 1997. 10. 21, 说明书第 7 栏第 19 行至第 30 行及图 3.

US 2005/0145617 A1, 2005. 07. 07, 说明书第 0041 段及图 7C、7D.

US 4906861 A, 1990. 03. 06, 说明书第 3 栏第 16 行至第 4 栏第 30 行及图 2、3.

JP 特开 2001-4233 A, 2001. 01. 12, 全文.

US 2003/0057942 A1, 2003. 03. 27, 说明书第 3 栏第 16 行至第 4 栏第 30 行及图 2、3.

US 6977571 B1, 2005. 12. 20, 说明书第 12 栏第 21 行至第 13 栏第 11 行及图 4.

CN 1688249 A, 2005. 10. 26, 全文.

US 4906861 A, 1990. 03. 06, 说明书第 3 栏第 16 行至第 4 栏第 30 行及图 2、3.

US 6317303 B1, 2001. 11. 13, 说明书第 6 栏第 1 行至第 31 行及图 3、4.

审查员 胡晓英

(51) Int. Cl.

H01F 6/00 (2006. 01)

H01F 1/00 (2006. 01)

H01F 7/00 (2006. 01)

权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 4 页

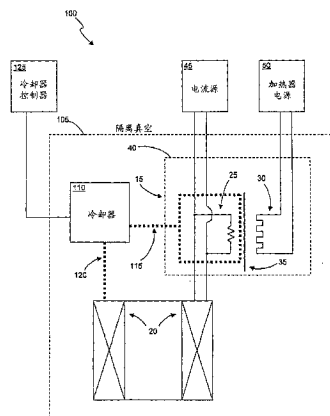
(54) 发明名称

超导快速开关

(57) 摘要

一种用于产生磁场的磁体系统可包括:超导磁体、开关、以及热耦合到开关的加热器元件。超导磁体被构造为产生磁场,以及开关包括并联连接到超导磁体的非感应超导电流承载路径。通常,开关被构造为仅承载其为获得超导磁体的全磁场所需电流的一部分的电流电平。

CN 101366093 B



1. 一种用于产生磁场的磁体系统,所述系统包括:
超导磁体,被构造为产生磁场;
非持久开关,包括并联连接到所述超导磁体的非感应超导电流承载路径,所述非持久开关被构造为仅承载少于获得所述超导磁体的全磁场所需要的电流的 100% 的电流电平,所述非持久开关被构造为连接至电流源,所述电流源被构造为在所述磁场的产生期间向所述超导磁体持续地提供电流;以及
加热器元件,热耦合至所述非持久开关,所述非持久开关能够响应于由所述加热器元件产生的热量而从超导模式转变为非超导模式,当所述非持久开关转换回超导模式后,所述电流源保持向所述超导磁体提供电流。
2. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
加热器电源,与所述加热器元件电连通。
3. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
非传导壳体,用于容纳所述开关和所述加热器元件。
4. 根据权利要求 3 所述的磁体系统,其中,所述壳体适于被插入到包含冷却剂的容器中,所述壳体包括被构造为阻止热量从所述开关和所述加热器元件传递到所述冷却剂的保暖材料。
5. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
第一热链路,热耦合到所述开关,所述第一热链路被构造为将所述开关有效冷却到超导温度;以及
第二热链路,热耦合到所述超导磁体,所述第二热链路被构造为将所述超导磁体有效冷却到超导温度。
6. 根据权利要求 5 所述的磁体系统,进一步包括:
冷却器,被构造为提供所述第一热链路和所述第二热链路;以及
冷却器控制器,被构造为控制所述冷却器,并使所述第一热链路和所述第二热链路分别将所述开关和所述超导磁体冷却到所需的超导温度。
7. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
射频 (RF) 屏蔽件,相对于所述开关和所述加热器元件设置,以有效减少所述开关和所述加热器元件之间的射频信号的耦合。
8. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,其中,所述电流承载路径是薄膜电流承载路径。
9. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,其中,所述开关包括非包覆双股缠绕超导导线。
10. 根据权利要求 9 所述的磁体系统,其中,所述超导导线包括大约 $5\ \mu\text{m}$ - $125\ \mu\text{m}$ 的直径。
11. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,其中,所述开关被构造为仅承载作为获得所述超导磁体的所述全磁场所需的所述电流的大约 1% -20% 的电流电平。
12. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,其中,所述开关被构造为仅承载作为获得所述超导磁体的所述全磁场所需的所述电流的大约 2% -7% 的电流电平。
13. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,其中,所述超导磁体包括螺线管。
14. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
保护元件,并联连接到所述开关,并被构造为限制跨接所述开关的最大电压。

15. 根据权利要求 14 所述的磁体系统,其中,所述保护元件包括电路。
16. 根据权利要求 14 所述的磁体系统,其中,所述保护元件至少包括两个二极管。
17. 根据权利要求 1 所述的磁体系统,进一步包括:
第一热链路,热耦合到所述非感应超导电流承载路径,所述第一热链路被构造为将所述非感应超导电流承载路径有效冷却到超导温度。
18. 根据权利要求 17 所述的磁体系统,进一步包括:
冷却器,被构造为提供所述第一热链路;以及
冷却器控制器,被构造为控制所述冷却器,并使所述第一热链路将所述非感应超导电流承载路径冷却到所需的超导温度。
19. 一种用于产生磁场的磁体系统,所述系统包括:
超导磁体,被构造为产生磁场;
用于在所述磁场的产生期间保持提供至所述超导磁体的电流的装置,其中,非持久开关转换回超导模式后,不切断电流源向所述超导磁体提供电流;
所述非持久开关,并联连接到所述超导磁体,所述非持久开关被构造为仅承载小于获得所述超导磁体的全磁场所需要的电流的 100% 的电流电平;
所述非持久开关被构造为连接至所述电流源;
用于选择性地使所述非持久开关在超导模式和非超导模式之间转换的装置;以及
用于改变所述电流以产生所需磁场的装置。
20. 一种用于产生磁场的方法,所述方法包括:
在磁场的产生期间,保持提供至被构造为产生磁场的超导磁体的电流,其中,非持久开关转换回超导模式后,不切断电流源向所述超导磁体提供电流;以及
通过以下步骤改变所述磁场:
(a) 将并联连接到所述超导磁体的非持久开关加热到临界温度,所述加热使所述非持久开关转换到非超导模式,所述开关被构造为仅承载小于获得所述超导磁体的全磁场所需要的电流的 100% 的电流电平,所述非持久开关被构造为连接至电流源;
(b) 改变所述电流以产生所需磁场;以及
(c) 使所述开关冷却到所述临界温度之下,使所述开关转换到超导模式。
21. 根据权利要求 20 所述的方法,进一步包括:
以所述电流的不同值重复操作 (a) 到 (c) 以产生相应的不同磁场。
22. 根据权利要求 20 所述的方法,进一步包括:
以冷却剂冷却所述超导磁体和所述开关。
23. 根据权利要求 20 所述的方法,进一步包括:
冷却所述超导磁体和所述开关。

超导快速开关

技术领域

[0001] 本发明大体涉及磁体系统,并且具体的,涉及与超导磁体一起使用的非持久开关。

背景技术

[0002] 众所周知,可以通过将磁体放置在极度低温的环境下(诸如通过将其封闭在冷却器或装有液态氦或其他冷却剂的压力容器中)而将其制成超导。极度低温将磁体线圈中的电阻减小到可以忽略的等级。在断开最初连接到线圈的电源后,通过可忽略的电阻,电流将继续相对不受阻碍的流过磁体线圈,从而保持磁场。

[0003] 为了在断开电源之后保持磁体线圈中的电流流动,一般需要在低温环境中以与电源以及磁体线圈并联连接的超导开关来完成电子电路。超导开关一般由超导导体组成,超导导体在被驱动为非超导状态或正常状态时,具有足够大的电阻以使来自电源的电流在“上升(ramp up)”期间基本上流经磁体线圈。当达到所需的磁场电流时,开关返回到其超导状态,并且在电源下降(ramp down)时,磁体电流转换为从电源中流出并流经开关。磁体当前处于被称为“持久模式”的状态。

[0004] 超导开关通常显示四种特性。第一,必须能够容易并快速的从超导状态转换(切换)到正常状态,以及反之亦然。可以实现其的方式有三种:a)热-通过将超导材料加热到超过其转换温度;b)磁-通过施加大于材料临界磁场的磁场;c)电-将材料中的电流升高到超过它的临界电流。热方法是最常见的。第二,在其正常状态中必须具有足够高的电阻以使在上升期间流经开关的电流可以被忽略,从而不会在冷却环境中产生过多的热量。第三,开关必须稳定。即,除了在需要的转换阶段期间以外,不准从超导状态转换到正常状态。第四,必须能够承载与磁体线圈一样高的电流。

[0005] 传统的热型持久开关通过将超导材料加热到超过其超导临界温度而工作。一种已知的热持久开关包括缠绕在超导导线周围的电阻丝。通过向电阻丝施加电流从而将超导材料加热到超过其临界温度来实现开关的超导材料的正常化。在超导开关设计中的挑战之一是平衡超导状态和电阻状态之间的最小转换时间的矛盾需求,以及需要低的热量输出以最小化冷却剂的汽化。

发明内容

[0006] 根据实施例,用于产生磁场的磁体系统包括:超导磁体、开关、以及热耦合到开关的加热器元件。超导磁体被构造为产生磁场,以及开关包括并联连接到超导磁体的非感应超导电流承载路径。一般的,开关被构造为承载其为获得超导磁体的全磁场所需要电流的一部分的电流电平。

附图说明

[0007] 从以下结合附图对优选实施例的描述中,本发明的上述和其它方面、特征、和优点将变得更加显而易见,附图中:

- [0008] 图 1 是根据本发明实施例的磁体系统的电气示意图；
- [0009] 图 2 是根据本发明可替换实施例的磁体系统的电气示意图；
- [0010] 图 3 是示出了根据本发明实施例的用于产生磁场的示例性操作的流程图；以及
- [0011] 图 4 是实现保护元件的磁体系统的可替换实施例的电气示意图。

具体实施方式

[0012] 在下面的详细描述中,对构成本说明书一部分的附图进行参考,该附图是通过示出本发明特定实施例的方式示出的。本技术领域的普通技术人员可以理解,可以使用其它实施例,并且在不背离本发明范围的前提下,可以进行结构、电、以及程序方面的改变。为了方便,将使用示例性材料、尺寸、形状、以及维度对磁体系统的各种元件和相关的超导开关进行描述。但是,本发明不限于所述实例并且其他构造也是可能的并且包括在本公开的教导中。

[0013] 现在参照图 1,其示出了本发明的磁体系统的一个实施例的电气示意图。具体的,磁体系统 10 被示为包括开关组件 15 和超导磁体 20。开关组件包括开关 25,其与磁体电连通,并热耦合到加热器元件 30。可选的射频 (RF) 屏蔽件 35 被示为相对于开关和加热器元件而设置,并能有效减少这些元件之间的 RF 耦合。开关组件的各个部件被示为包括在壳体 40 中。

[0014] 电流源 45 可用于向磁体 20 提供电流,以及加热器电源 50 向加热器元件 30 提供电流。在实施例中,磁体和开关组件的各个部件均可位于适宜的冷却环境(诸如容器 55,其使得磁体和开关的超导属性得到充分发挥)中。

[0015] 容器 55 可以使用设计用于容纳液态氦或其他冷却剂的合适的容器或结构。壳体 40 可以由不导电的材料制成,并且通常用于容纳开关组件 15 的各个部件。在壳体和所包括的部件都处于冷却环境的实施例中,诸如图 1 所示,壳体可以还包括保暖材料。这种保暖材料被构造为阻止热量从开关 25 和加热器元件 30 传递到容纳在容器中的周围的冷却剂。减少向冷却剂的热传递减少了在磁体充电和放电过程(将在下面详细讨论)中的昂贵的汽化。

[0016] 在一个实施例中,磁体 20 和开关 25 可以包括由例如 NbTi、Nb₃Sn 等制成的适合的超导导线缠绕而成的线圈。磁体通常能够提供由电流源 45 提供的电流控制的一定范围的磁场,并且与开关一起工作。

[0017] 开关 25 包括并联连接到磁体的非感应电流承载路径。可选的,开关被构造为只承载其为获得磁体 20 的全磁场所需电流的一部分(即,少于 100%)的电流电平。通过非限定实例的方式,开关能够被构造为只承载其为获得磁体 20 的全磁场所需电流的大约 1% -20%,或更优选的大约 2% -7%的电流电平。

[0018] 一般的,用于形成磁体 20 的超导导线可具有从大约 25 μ m-125 μ m 到大约 6 英寸(或更大)的范围内的直径。磁体可以使用传统磁体技术来实现,其细节对本发明不重要。开关 25 可以由具有提供上述电流承载电平(current carrying level)的直径的超导导线(例如,非包覆双股缠绕导线)。通常开关 25 没有所需的最小导线直径。在典型实施例中,用于开关 25 的超导导线具有大约 5 μ m-125 μ m 的直径,但是也可能是更大的直径。

[0019] 进一步参照图 1,将对根据本发明的实施例的磁体系统的工作进行描述。最初,容

纳在容器 55 中的冷却剂对磁体 20 和开关 25 进行冷却以使其处于超导状态。这时,磁体系统可根据由电流源 45 提供的电流电平来产生磁场。

[0020] 在一些时候,需要磁体系统产生的磁场有所改变。磁场的改变可通过加热器电源 50 向加热器元件 30 提供电流,从而将开关 25 加热到其超导临界温度以上来完成。一旦达到临界温度,开关就从超导状态(闭合状态)转换到非超导电阻状态(断开状态)。当开关达到电阻状态时,电流源 45 可以调节或者改变提供给磁体 20 的电流。

[0021] 当所提供的电流达到特定或期望的电流值(由磁体产生的期望磁场来确定)时,关闭来自加热器电源的功率。这使得加热器元件 30 冷却、从而使开关 25 冷却。在开关冷却时,其温度降低到超导临界温度之下并转换回超导状态(闭合状态)。

[0022] 与使用持久开关的系统相反,在开关转换回超导状态后,不切断由电流源 45 向磁体 20 提供的电流。相反,电流源 45 保持向磁体提供电流,从而产生稳定的磁场。由于开关 25 没有被设计为将磁体维持在持久模式,所以通常必须保持提供给磁体的功率。这是因为开关不能承载磁体的全磁场电流电平。如果不保持向磁体提供电流,则产生的磁场将减弱,并且磁体将最终消磁。应该注意,由于感应电流噪声的存在,持续的向磁体施加电流可能会影响所产生的磁场。但是,开关 25 短路掉了可能被引入到磁体中的任何噪声。

[0023] 通过基本重复上述操作可以再次改变由磁体 20 产生的磁场。例如,加热器电源 50 可再次向加热器 30 提供电流,使开关 25 被加热到其超导临界温度以上。在开关处于电阻状态时,通过电流源 45 提供到磁体 20 的电流根据将产生的期望磁场而改变。当所施加的电流达到期望值时,关闭加热器电源,以及开关的温度降低到超导临界温度之下。开关 25 最终转换回超导状态(闭合状态)。电流源 45 再次继续向磁体提供电流。

[0024] 通过本文中披露的各种开关实现的好处包括较快的充电时间和减少的冷却剂汽化。通过减少开关在超导状态和电阻状态之间转换所需的时间量可以提高整个磁体充电时间。例如,开关 25 经历的转换时间明显低于传统持久开关可能经历的转换时间。开关 25 经历的转换时间(从冷却或加热状态)大约为 0.5 秒-1.5 秒。由于形成开关的导线的较小尺寸,所以这些转换时间是可能的。

[0025] 较快充电时间的另一个原因是因为可以以为比传统持久开关中一般存在的电阻更高的电阻来实现开关 25。例如,在实施例,开关 25 可具有介于大约 60ohm-500ohm 之间或更高的电阻。较高的开关电阻允许在充电阶段向磁体施加更高的充电电压。较高的充电电压转化为在磁体中达到所需电流电平的充电时间的减少。

[0026] 由于将冷却剂保持在密封容器中是昂贵并且耗时的过程,所以需要最小化磁体系统中的冷却剂汽化。汽化作为由诸如加热元件 30 的开关加热装置所产生的热量造成的结果而发生。汽化还发生在磁体充电阶段,这是因为在该阶段开关 25 处于电阻(非超导)状态。在开关处于电阻状态时,有电压通过开关。该电压产生热量,从而导致不期望的冷却剂汽化。

[0027] 与传统持久开关相比,由于多个原因而可以减少由开关 25 产生的汽化量。首先,开关 25 通常比传统持久开关小得多,从而该开关达到超导临界状态需要较少的热量。较少的热量转变为减少的汽化。另外,减少的充电时间最小化开关保持在电阻状态的时间长度。这减少了有电压通过开关的时间长度,这减少了所产生的热量以及相应的汽化量。

[0028] 由开关 25 提供的另一好处是与传统持久开关中的连接要求相比,开关和磁体 20

之间的连接要求不如传统持久开关严格。一般的,传统持久开关在连接到磁体时需要注意,这是因为该连接导致的过大电阻量是所不期望的。然而,本发明没有任何这样的要求,并且由开关到磁体的连接所产生的较高电阻可以包括在开关的全部电阻中。

[0029] 根据一个实施例,另一个优点涉及开关 25 的较高的电阻。例如,当对典型磁体进行充电时,在开关中流动的任何电流都可以表示实际磁场的减少。这种测量可以通过监测导线中的电流而推断出。但是,得到变暖的持久开关的有效电阻是略有困难的,所以不可能对这种效应进行非常精确的补偿。开关 25 使得与其较高的电阻成比例的最小化该问题。

[0030] 将在下面举例示出本发明的开关和磁体系统的实施例提供的各种好处。将利用传统持久开关工作的磁体系统与利用开关 25 工作的相同系统进行比较。对于两种类型的开关,磁体 20 将从 0 特斯拉升高到 9 特斯拉,每隔 0.01 特斯拉就停止。以已知的方式对使用传统持久开关的磁体系统进行操作。传统持久开关的电阻为 30ohm,以及由加热器电源提供的功率为 75mW(35mA 通过 60ohm)。对这两种设置,磁体 20 具有 5V 的充电电压、10 亨利(H)的感应率、以及 9 特斯拉时的 50A 的电流。

[0031] 使用开关 25 的磁体系统的操作如下。每次上升过程停止时,开关 25 被加热以使其从超导状态(闭合状态)转换为电阻状态(断开状态)。接下来电流源 45 向磁体 20 提供附加电流直到磁体中的电流达到期望值。然后,切断提供到加热器元件 30 的电流,并允许开关冷却,以转换回超导状态(闭合状态)。电流源 45 甚至在开关达到超导状态之后再次仍然保持向磁体提供电流。停止上升过程使得可以在产生的磁场中进行测量。在这种情况下,进行了 900 次独立的测量。通过非限定性实例,开关 25 的电阻为 250ohm,以及由加热器电源 50 提供的功率为 20mW(30mA 通过 20ohm)。

[0032] 下表 1 提供了传统持久开关和开关 25 两者的测量时间的实例。更具体的,表 1 描述了将磁体上升到所需磁场所需要的时间、断开和闭合开关的时间(即,开关从超导状态(闭合状态)转换到电阻状态(断开状态),并返回到超导状态(闭合状态)所花费的时间)、以及获得 900 个独立测量结果所需要的时间。注意所示出的时间都是近似的。

[0033] 表 1

[0034]

| 事件 | 传统持久开关 | 开关 25 |
|-------------------------------|----------|-------|
| 上升时间 ($t = L \Delta I / V$) | 100 秒 | 100 秒 |
| 每个测量点的闭合和断开开关的时间 | 60 秒 | 1.0 秒 |
| 900 次测量的全部时间 | 54,000 秒 | 900 秒 |

[0035] 前述结果示出了根据本发明实施例的上述开关使得测量时间显著加快。如表中所示,闭合和断开典型的持久开关耗时大约 60 秒。这导致获得 900 个测量结果的总时间为大约 900 分钟。在这种情况下,开关 25 比传统持久开关执行得快 50 倍。

[0036] 如上面所示,与传统持久开关相比,本发明的开关和磁体系统的各种实施例还造成减少了的冷却剂汽化。下面的表 2 提供了所涉及的两种类型的开关的液态氢汽化的各种参数的实例。与以上结合表 1 描述的开关设置相同的开关设置用于表 2 中的数据。

[0037] 表 2

[0038]

| 事件 | 传统持久开关 | 开关 25 |
|-------------------------------|--|---|
| 上升时通过开关的功率 ($P = U^2/R$) | 833mW | 100mW |
| 通过开关加热器的功率 | 75mW | 20mW |
| 上升时间 ($t = L \Delta I/V$) | 100 秒 | 100 秒 |
| 每个点用于断开开关的时间 (加热前的时间) | 30 秒 | 0.5 秒 |
| 每次测量的总能量 | 2115.82J ($100s \cdot 908mW +$ $900 \cdot 30s \cdot 75mW$) | 21.00J ($100s \cdot 120mW +$ $900 \cdot 0.5s \cdot 20mW$) |
| 每次测量的液态氮消耗 | 825ml | 8.2ml |

[0039] 这些结果示出了在操作开关 25 所需的总能量方面可以实现显著的节省。能量节省转变为液态氮的汽化减少。

[0040] 图 2 是根据本发明可替换实施例的磁体系统的电气示意图。在该图中,磁体系统 100 包括位于隔离真空 105 中的开关组件 15 和超导磁体 20。冷却器 110 可用于将开关 25 和磁体 20 冷却到期望的超导温度。具体的,冷却器被示为具有与开关热接触的热链路 (thermallink) 115, 和与磁体热接触的热链路 120。冷却器 110 可使用诸如压缩气体冷却器的已知冷却系统实现,其可向磁体和开关提供使这些元件处于超导所需的冷却。隔离真空 105 是通常用于对容纳在隔离真空中的各种部件与外界环境进行热隔离的一种结构。

[0041] 对磁体系统 100 的操作可如下进行。最初,冷却器 110 对磁体 20 和开关 25 进行冷却以使其处于超导状态。此时,磁体系统可根据由电流源 45 提供的电流电平来产生磁场。如前述,在磁体产生磁场时没有从磁体 20 断开由电流源提供的功率。

[0042] 在一些时候,期望磁体系统产生的磁场有所改变。磁场的这种改变可以通过结合图 1 所描述的方式相似的方式来实现。即,开关 25 可被加热到其超导临界温度以上。当开关达到电阻状态时,电流源 45 可以调节或者改变向磁体 20 提供的电流的量。当所提供的电流达到特定或期望电流值(由磁体产生的期望磁场确定)时,允许开关冷却并降低到超导临界温度之下,并转换回超导状态(闭合状态)。和前述一样,在开关转换回超导状态之后,未从磁体 20 断开电流源 45 所提供的功率。一般的,电流源 45 保持向磁体提供电流,从而产生稳定的磁场。由磁体 20 产生的磁场基本可以通过重复上述操作来改变。

[0043] 开关 25 已经被描述为由超导导线形成。但是,这并不是必须的,并且可替换或额外地使用能够提供非感应电流承载路径的其他技术和结构。例如,开关 25 可以使用包括集成电路的装置来实现,从而电流承载路径包括薄膜电流承载路径。

[0044] 本文中披露的各种磁体系统包括单个磁体 20 和单个开关组件 15。然而,具有多个

磁体且每个磁体都具有独立的开关组件的磁体系统也是可能的并包括在本公开的教导中。

[0045] 已经披露了其中超导磁体用于产生所需磁场的各种实施例。应该理解,这样的磁体可用一个或多个超导线圈,或以一个或多个螺线管实现。

[0046] 图 3 是示出了根据本发明实施例的用于产生磁场的示例性操作的流程图。方框 300 包括保持提供至超导磁体的电流,该超导磁体被构造为产生磁场。如果需要,由超导磁体产生的磁场可根据方框 305、310、以及 315 的操作而改变。例如,在方框 305 处,非持久开关可被加热到临界温度。一般的,非持久开关工作在超导模式中,并且并联连接到超导磁体。因此,加热使得非持久开关转换到非超导模式。在方框 310 处,可以改变提供到超导磁体的电流以产生所需的磁场。接下来,允许开关冷却到临界温度之下,从而使得开关转换回超导状态(方框 315)。如果需要,可以以不同的电流值重复方框 300、305、310、以及 315 的操作以产生相对应的不同磁场。

[0047] 尽管根据本发明的多个实施例的各种处理和方法可以使用图 3 所示的一系列操作来实现,但本领域技术人员将会认识到,可以执行更多或更少的操作。另外,应该理解,图 3 所示的操作顺序仅是示例性的并且不需要单一顺序的操作。

[0048] 作为紧急事件(例如磁体电流源的功率停止或突然或非期望地失去)的结果,开关可能会损坏。在停止期间,磁体可产生高的内部电压并且局部温度升高。这导致了线圈中的电和机械压力,以及也可能损坏开关。有各种原因可导致发生停止。例如,由于容器中的冷却剂量不足或运行的冷却器故障可能使磁体系统失去冷却动力。

[0049] 不考虑紧急事件的发生,可能会在磁体和开关的两端产生大的电压,这是由于这些元件是并联连接的。由于开关一般被实现为在超导状态时只承载磁体电流的一部分,并且在其正常状态是具有高电阻,因此,跨接开关的较大电压会导致在开关中消耗大量的功率。这可能会对开关造成显著的损坏。

[0050] 为防止或最小化诸如上述紧急事件对开关造成的损坏,磁体系统可以利用适当的保护元件、装置、或电路来实现。例如,图 4 是实现保护元件的磁体系统的可替换实施例的电气示意图。在该图中,磁体系统 400 包括多个与图 1 的系统 10 相同的部件。然而,磁体系统 400 包括保护元件 405,其并联地电连接到磁体 20 和开关 25。

[0051] 保护元件的一个目的是在诸如上述那些故障或紧急事件的情况中,限制通过开关消耗的功率。具体的,保护元件可以限制跨接开关的最大电压。保护元件可以使用例如如图 4 所示的一对二极管来实现。以与图 1 的系统的操作相似的方式对磁体系统 400 的进行操作,但是,当然具有由保护元件 405 提供的额外保护。应该注意,本文种的各种开关和磁体系统中的任意一个还可以配置有一个或多个保护元件。

[0052] 尽管已经参照公开实施例详细描述了本发明,但对本技术领域的普通技术人员来说,在本发明范围内进行各种改变是显而易见的。应该理解,参照一个实施例所描述的特征通常可以用于其他的实施例。因此,将仅参照权利要求来适当地解释本发明。

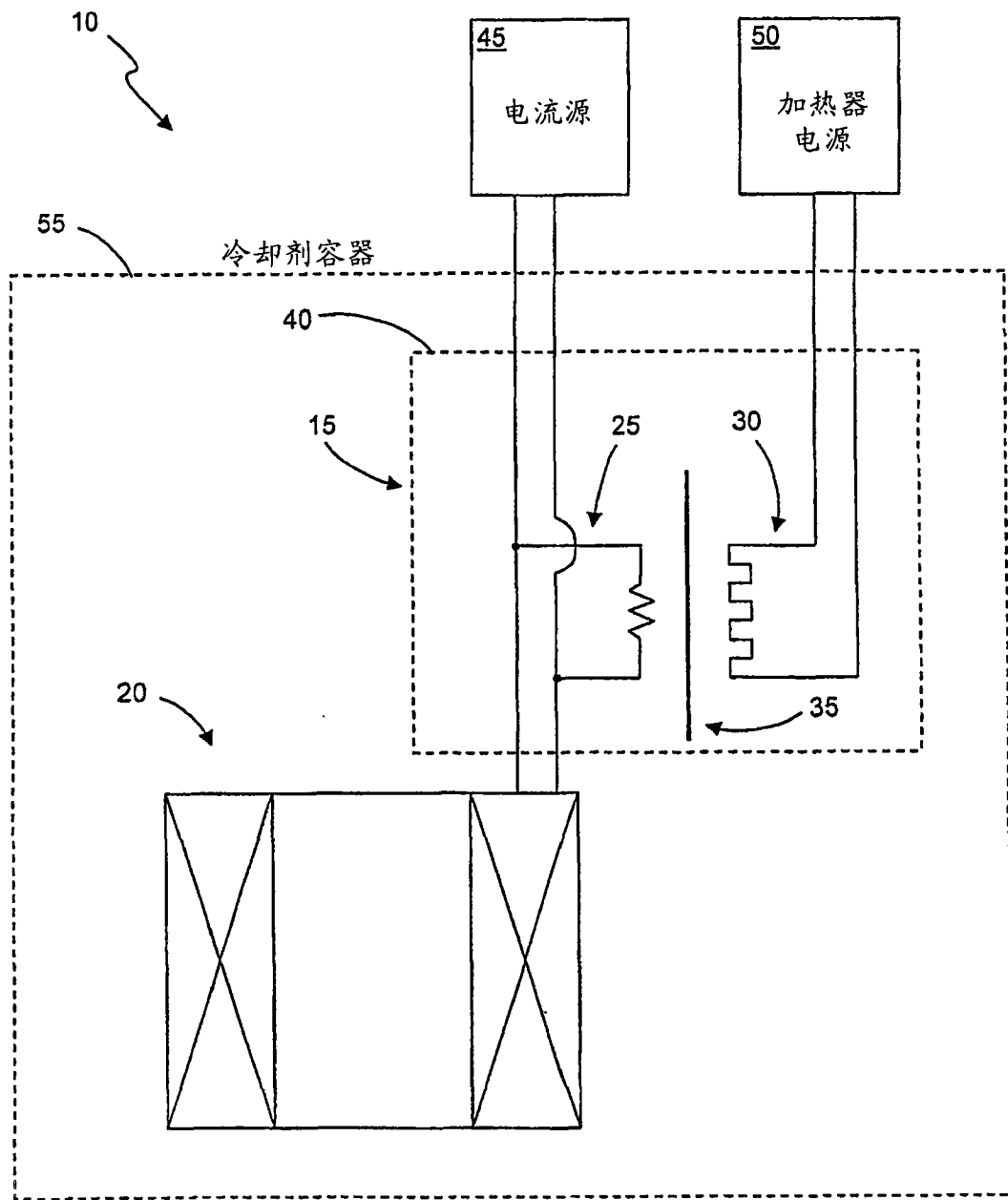


图 1

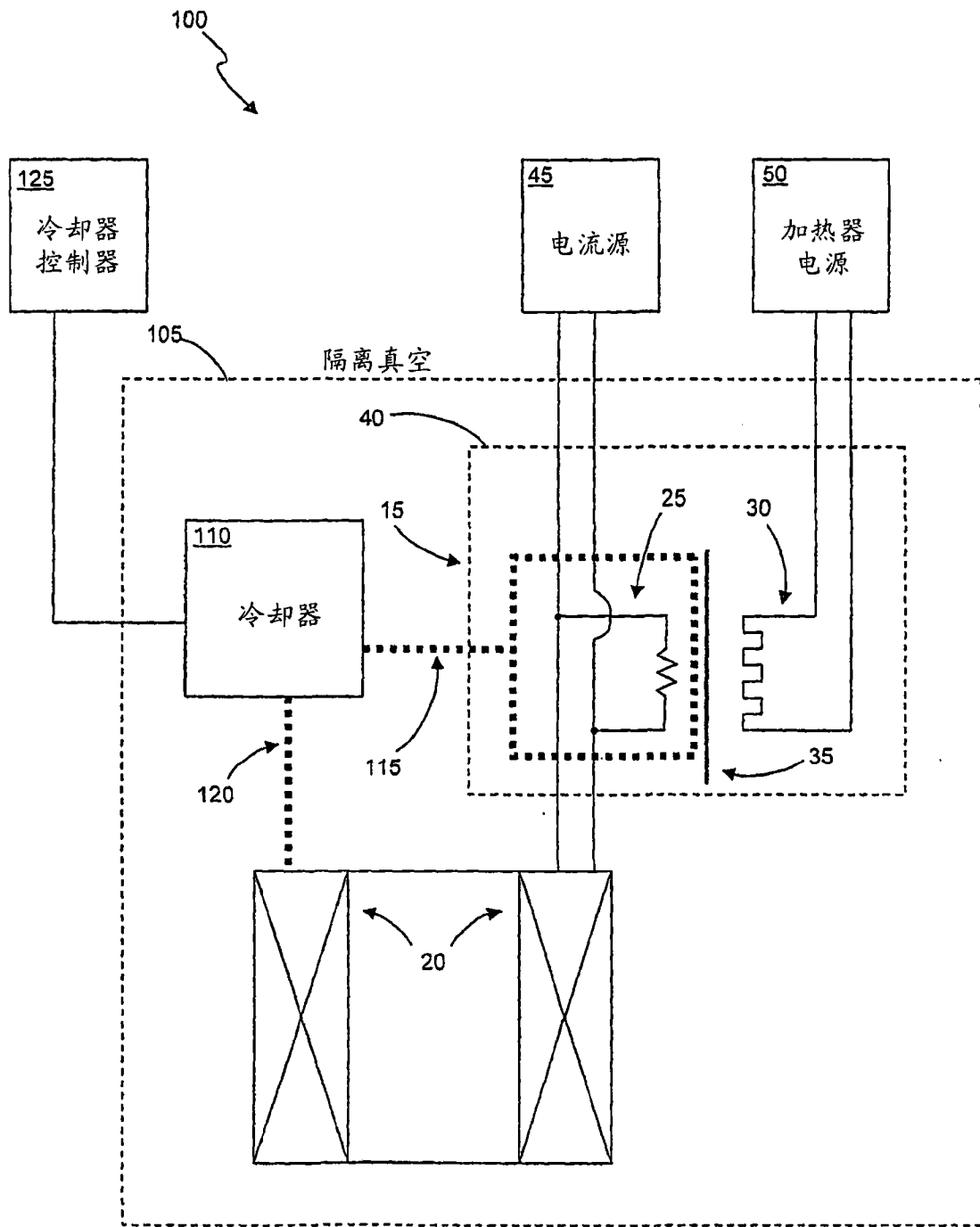


图 2

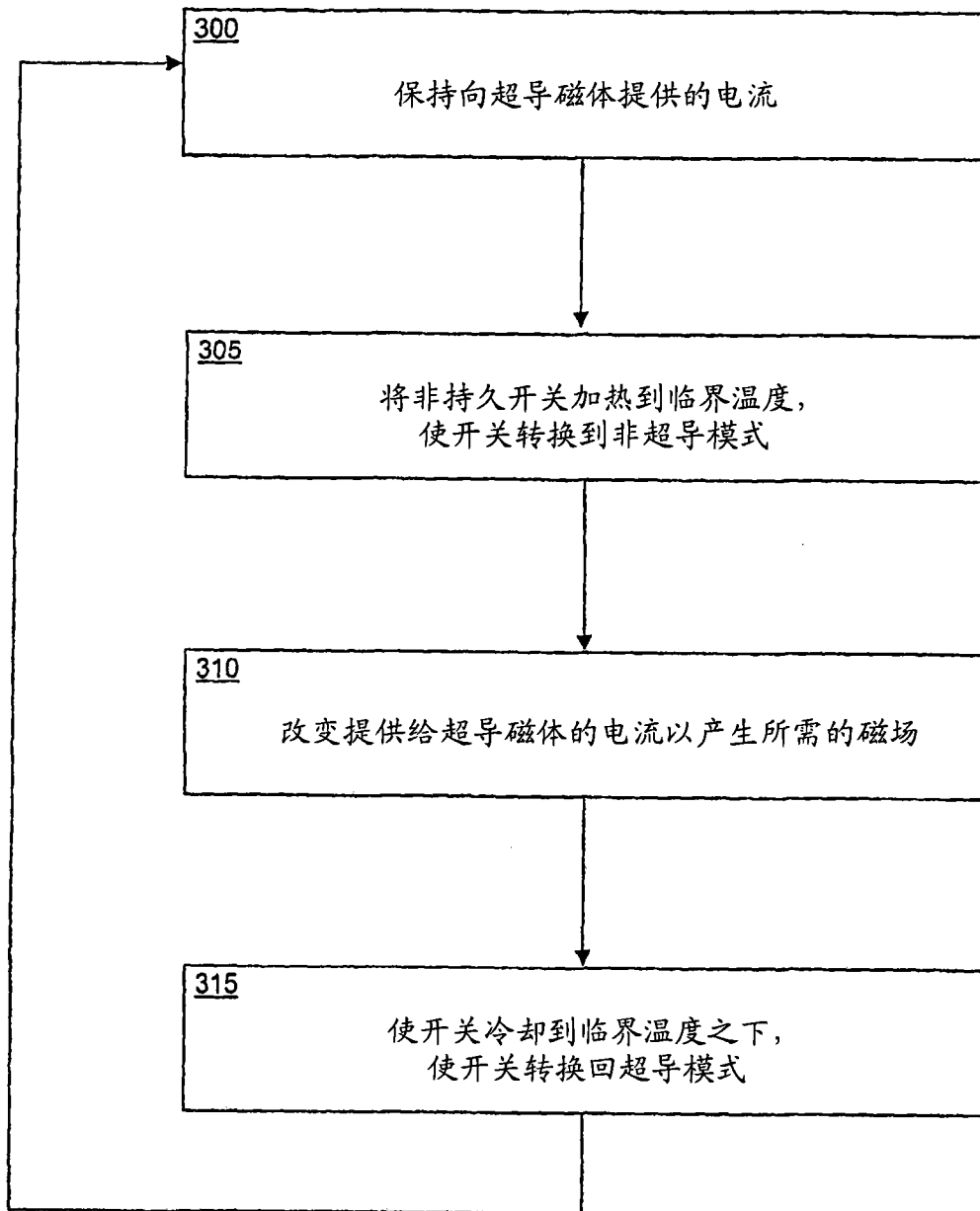


图 3

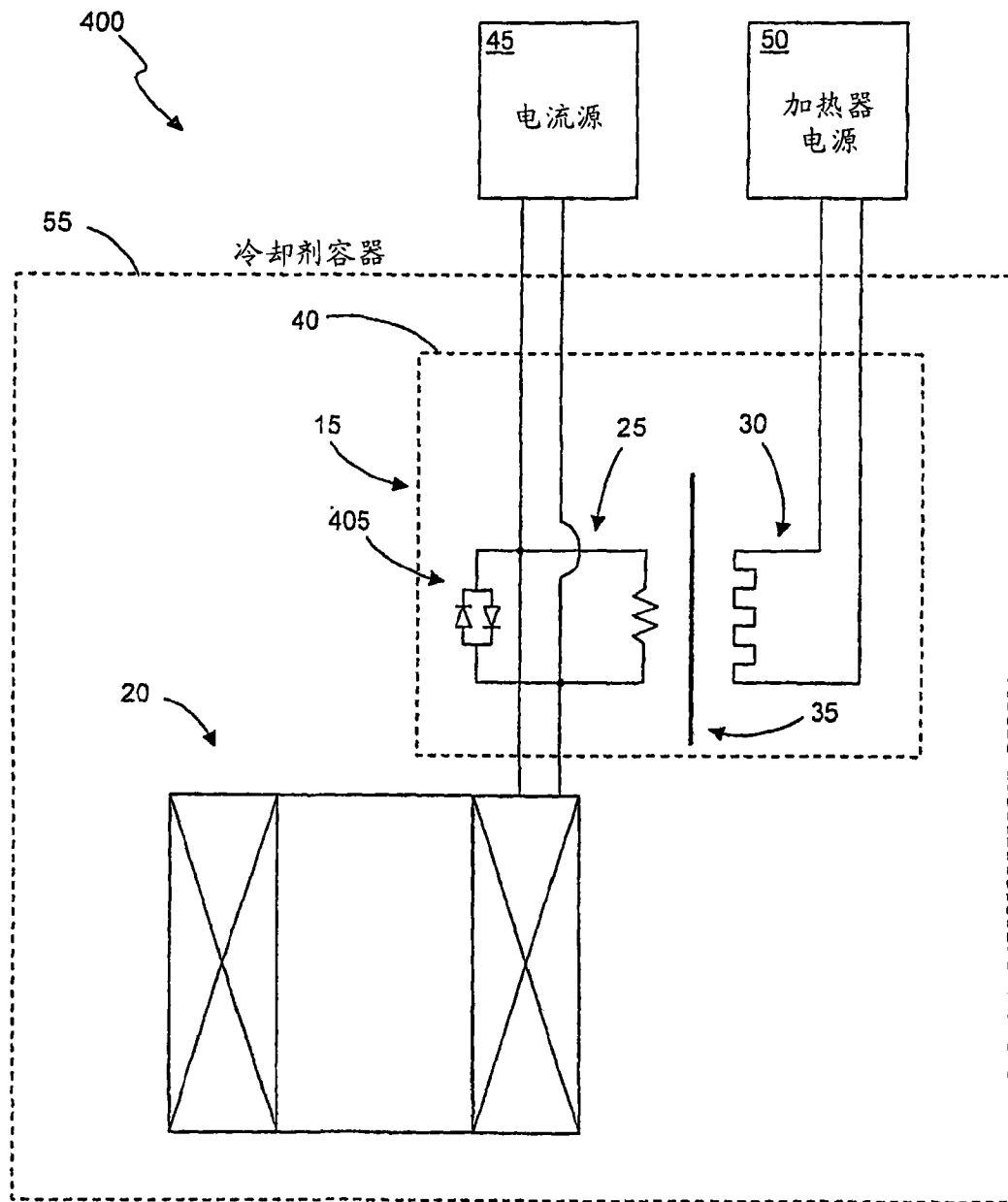


图 4