



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106024261 B

(45)授权公告日 2018.04.10

(21)申请号 201610385747.2

(22)申请日 2012.02.23

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106024261 A

(43)申请公布日 2016.10.12

(30)优先权数据

1103052.5 2011.02.23 GB

(62)分案原申请数据

201210041837.1 2012.02.23

(73)专利权人 英国西门子子公司

地址 英国坎伯利

(72)发明人 H.A.布莱克斯 M.J.隆菲尔德

P.W.雷茨

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 余鹏 宣力伟

(51)Int.Cl.

H01F 6/06(2006.01)

(56)对比文件

JP S5850711 A,1983.03.25,

JP S5850711 A,1983.03.25,

JP S57106008 A,1982.07.01,

EP 0122133 A1,1984.10.17,

EP 0896228 A1,1999.02.10,

CN 101425373 A,2009.05.06,

审查员 吴肖志

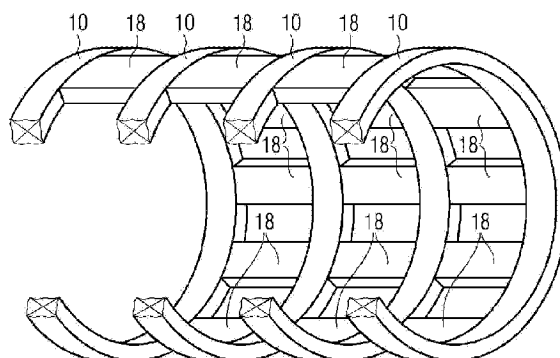
权利要求书1页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

包括粘接到支撑结构的线圈的超导电磁体

(57)摘要

本发明涉及一种螺线管超导电磁体,其包括超导导线的多个环形线圈,所述多个环形线圈沿轴向方向布置,粘接到支撑结构,所述支撑结构包括环形的支撑元件,所述环形的支撑元件设置在相邻的超导导线环形线圈之间,用于支撑这些环形线圈,其中,这些线圈仅仅通过它们的轴向内表面和轴向外表面被粘接到所述支撑结构。



1. 一种螺线管超导电磁体,其包括超导导线(10)的多个环形线圈,所述多个环形线圈沿轴向方向布置,粘接到支撑结构,所述支撑结构包括环形的支撑元件(16),所述环形的支撑元件(16)设置在相邻的超导导线环形线圈之间,用于支撑这些环形线圈,

其中,这些线圈仅仅通过它们的轴向内表面(B1)和轴向外表面(B2)被粘接到所述支撑结构。

2. 根据权利要求1所述的螺线管超导电磁体,其中,所述环形的支撑元件(16)包括多个支撑块(18),所述多个支撑块(18)被布置成在周向方向上彼此分隔开。

包括粘接到支撑结构的线圈的超导电磁体

[0001] 本申请是2012年2月23日提交的名称为“包括粘接到支撑结构的线圈的超导电磁体”、申请号为201210041837.1的中国发明专利申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及包括粘接到支撑结构的超导导线线圈的超导电磁体。

[0003] 具体地,本发明涉及如下组件的改进,该组件在其出现突然温度变化的情形下减少线圈和支撑结构之间的热诱导应力。

[0004] 本发明特别涉及包括由环形线圈组成的基本上圆柱状组件的电磁体,环形线圈关于公共轴线对齐,但沿该轴线相对于彼此移位。这种布局结构(或称装置, arrangement)通常被称为螺线管磁体,虽然它们在严格的字面意义上可能并不是螺线管。

背景技术

[0005] 图1-4示意性地例示了粘接到支撑结构(如螺线管磁体)的线圈的某些布局结构。

[0006] 图1示出了一种非常著名的传统布局结构,其中超导导线线圈10卷绕在线圈架12内的环形凹腔中。该结构基本上具有关于轴线A-A的360度对称,并且也基本上具有关于平面B-B的反射对称。线圈架典型为车制铝管,其中形成有环形通道。在其它较不常见的变体中,线圈架可被模制而成或以合成材料(例如玻璃纤维增强环氧树脂)车制而成。在典型的制造工艺中,用硬化材料(典型地为环氧树脂)浸渍线圈10,硬化材料会将线圈中的导线粘接在一起。典型地,利用在线圈和线圈架之间形成滑移面的材料,线圈10在其径向内表面(称为A1表面)、轴向内表面(称为B1表面)和轴向外表面(称为B2表面)上与线圈架12绝缘。相对于磁体中心来定义这些尺寸。在替代性实施例中,线圈可在所有面上粘接到支撑结构。

[0007] 如图1所示,表面A1和A2分别在距轴线A-A的半径A1、A2处,并且表面B1和B2分别在距平面B-B的轴向位移B1、B2处。所谓的“中心线圈”相对于B-B对称平面被定义为具有B1=0和被对称平面所反射的B2,。所有其它线圈能够由对称平面中反射的B1和B2限定。

[0008] 图2示出了一种替代性布局结构,其中没有提供这种线圈架。作为替代,线圈10在其径向外表面(称为A2表面)被粘接到典型地基本上圆柱形的支撑结构14。这种结构可通过将线圈10卷绕成线圈架,将填充材料(例如玻璃纤维布)卷绕在线圈的径向外表面上,并且利用硬化材料(例如环氧树脂)浸渍整个结构来制造。线圈10因此仅仅通过其径向外(A2)表面粘接到支撑结构14。

[0009] 图3示出了另一种可能。这里,线圈10被卷绕在支撑元件16之间。线圈10被粘接到支撑元件16,例如通过硬化材料(例如环氧树脂)来粘接。线圈10因此仅仅通过其轴向内表面B1和轴向外表面B2粘接到包括支撑元件16的支撑结构。这种结构可通过将支撑元件16临时附接到绕组管,将线圈10卷绕在支撑结构之间的绕组管上,利用硬化材料例如环氧树脂浸渍线圈10来形成,环氧树脂也可用来将线圈10粘接到支撑元件16。

[0010] 图3的支撑元件16可为由铝、复合材料或任何具有适当机械强度、热膨胀系数、密度特性的材料制成的环形零件。适当的材料包括金属,典型地为铝和不锈钢;例如那些商标

名为Tufnol、Durostone的复合材料;各种填充有玻璃球或布料的环氧树脂;或者具有适当机械强度、杨氏模量和热膨胀系数特性的材料的任何其它组合。

[0011] 图4示出了图3布局结构的变体的部分切除视图,其中图3的环形支撑元件16被支撑块18取代,其围绕线圈的轴向表面被周向地隔开。

[0012] 这种结构可通过类似于为制造图3的结构所描述的工艺制造,但其中,间隔块(未示出)被定位在支撑块18之间以确保支撑块的正确间隔,支撑线圈绕组和在浸渍过程期间使树脂移位。在树脂浸渍之后,可从结构移除这些间隔块。

[0013] 在这种布局结构中,线圈10因此仅通过其轴向内表面B1和轴向外表面B2,而且仅在周向隔开的位置被粘接到包括支撑块18的支撑结构。

[0014] 图4的支撑块18可为由铝、复合材料或任何具有适当机械强度、热膨胀系数和密度特性的复合材料制成的零件。适当的材料包括金属,典型地为铝和不锈钢;或例如那些以Tufnol、Durostone为商标销售的复合材料;各种填充有玻璃球或布料的环氧树脂;或者具有适当机械强度、杨氏模量和热膨胀系数特性的材料的任何其它组合。

[0015] 线圈10由超导导线构成,其典型地由在铜基体中的NbTi基体丝构成。导线匝被非常薄的电绝缘材料(例如环氧树脂)层分开。然而,线圈的热膨胀系数和热传导性接近圆周方向铜的热膨胀系数和热传导性。在径向和轴向方向,热膨胀系数由导线和树脂复合层的热膨胀系数的组合确定。

[0016] 支撑结构的材料——例如铝或GRP(玻璃纤维增强塑料)——热传导性和热膨胀系数颇为不同。当线圈和支撑结构组件经历温度突变,线圈和支撑结构将以不同程度并以不同比率膨胀或收缩。对于具有相对低热传导性的材料,温度变化将仅仅慢慢地起作用,而对于具有较高热传导性的材料,温度变化将更迅速地起作用。此外,具有较大热膨胀系数的材料与具有较低热膨胀系数的材料相比,因温度变化导致的膨胀或收缩程度更大。

[0017] 由于材料随着温度膨胀或收缩,应变值可被定义成材料尺寸变化的比例。例如,如果长度 d 的物体以 Δd 改变长度,相应的应变可表达为 $\Delta d/d$ 。

[0018] 对于不同的材料,即使其温度变化可能相似,应变值也将不同。

[0019] 在上述任何线圈组件内,线圈中的应变与相邻的支撑结构中的应变不同。因为粘接界面处存在剪切应变,这使得线圈和支撑结构之间的粘接界面有损坏风险。线圈上的合成机械力可导致线圈在使用中运动、粘接到支撑结构的线圈在界面处破裂、引起应力和内部破裂的线圈弯曲的风险,其可导致失超(quench)。

[0020] 失超期间,由于扰乱了超导状态(典型地,是由与支撑结构的机械相互作用、或线圈内的树脂的内部破裂、或线圈过度应力产生的热引起的),存储在超导磁体磁场中的能量突然被耗散成线圈和磁体结构内的热。在一个线圈出现失超后,许多已知的布局结构能够将能量分散在多个线圈上。然而,这会导致线圈快速发热,但粘接到线圈的支撑结构并不会同样快地发热。这将导致线圈和支撑结构之间的表面应变差异,冒有损害线圈和支撑结构之间粘接的风险。

[0021] 在例如图1所示的磁体结构中,线圈可利用线圈和支撑结构之间的滑移面独立于支撑结构自由移动,因此线圈和线圈架间的损害仅限于粘滑问题。在类似于图1所示的具有粘接到线圈架的线圈的磁体结构中,对线圈和线圈架间粘接的损害可导致失超。

[0022] 在例如图2所示的磁体结构中,对线圈10和支撑结构14间粘接的损害可使得线圈

出现一定的轴向移动,而这又可能导致失超。

[0023] 在例如图3和图4所示的磁体结构中,对线圈10和支撑结构16、18之间的粘接的损害可破坏该结构作为一个整体的机械完整性,因为其基本上仅通过线圈和支撑元件之间的粘接保持在一起。对粘接的损害可表现为破裂的形式,其可导致磁体失超。

发明内容

[0024] 因此,本发明旨在提供当线圈经历温度突变时,用于减少线圈和相邻支撑结构之间界面应变差异的方法和装置。这种温度变化的示例包括将磁体初始冷却到工作温度,以及失超时磁体的发热。

[0025] 为此,本发明提供了所附权利要求中限定的装置。

附图说明

[0026] 根据下文对本发明某些实施例的描述,并结合附图,本发明的上述及更多目标、特征和优点将的描述变得更加明显,附图中:

[0027] 图1-4示出了包括粘接到支撑结构的线圈的螺线管超导电磁体的示例;

[0028] 图4A示出了可在本发明某些实施例中使用的成型支撑区段;

[0029] 图5示出了传统失超保护电路的示例;

[0030] 图6示出了传统失超保护电路的另一示例;

[0031] 图7示出了窗穿过传统结构“末端”线圈70的轴向部分横截面;

[0032] 图8示出了图7的结构,其由于末端线圈的膨胀而变形;以及

[0033] 图9-12示出了根据本发明某些实施例的粘接到支撑结构的加热元件的示例性布局结构。

具体实施方式

[0034] 根据本发明,加热元件被提供为与支撑结构热接触,并且被布置成在温度突然转变期间加热支撑结构,以便减少线圈与支撑结构之间界面应变的差异。

[0035] 在一些实施例中,加热元件也被提供为与线圈热接触,并被布置成在温度突然转变期间根据需要加热线圈,以便减少线圈与支撑结构之间界面应变的差异。

[0036] 失超和初始冷却是引起温度突变的两种最常见事件。

[0037] 失超期间,如上所述,由于从超导状态转变到电阻状态在线圈内引起的的能量耗散,和线圈的热膨胀系数通常较大,因此,线圈将突然发热,且往往比支撑结构膨胀得更多和更快。

[0038] 在初始冷却期间,线圈和支撑结构将根据各自所含材料热传导性和热膨胀系数的不同以不同的比率收缩。

[0039] 温度变化最终将导致线圈和支撑结构出现尺寸变化,所出现的稳态界面应变将依赖于线圈和支撑结构各自的热膨胀系数。

[0040] 根据本发明,提供了一种布局结构,用于加热支撑结构以便在线圈温度变化期间,使线圈和支撑结构之间的表面界面应变差异最小化。

[0041] 根据本发明,这种用于加热支撑结构的布局结构还将在冷却和温度上升期间使结

构弯曲导致的线圈内应力最小化,从而减少线圈内的环氧树脂破裂的一个因素。

[0042] 在本发明的实施例中,电阻性导体,例如一定长度的导线被提供在支撑结构内或支撑结构的表面上用作加热元件。具体的布局结构将依赖于支撑结构的材料。例如,如果支撑结构由例如GPR的复合材料组成,当制造支撑结构时将电阻性导线嵌入到支撑结构中相对简单。另一方面,如果支撑结构由铝制成,将电阻性导线附接到支撑结构表面可能更实际,通过这种方式,电阻性导线与铝支撑结构电绝缘并且与其热接触。

[0043] 在某些实施例中,电阻性导体被布置成通过与失超保护电路的适当连接来承载在线圈中流动的一部分电流。

[0044] 图5示出了如提供在已知超导磁体中的典型失超保护电路的一个示例,其可在本发明的实施例中使用。线圈10通过两个超导开关22和24串联连接。每个超导开关包括示意性地以26表示的一定长度的超导开关导线和以28表示的开关加热器。使用时,开关22处于其闭合状态。开关22的超导导线26通过应用到线圈10的制冷布局结构被冷却到其超导转变温度以下。由于开关22的加热器28由超导线圈和在闭合状态的超导开关进行旁通,因而没有功率供应给开关22的加热器28。超导开关24被用于控制将电流引入磁体线圈10中以及控制将电流从磁体线圈10的移除。如果电流将被引入或移除,那么功率被供应给开关加热器28。这会使开关导线26失超,并且允许外部的磁体功率供应单元(未示出)根据需要电流引入线圈10或从线圈10移除电流。一旦达到需要的电流水平,就移除开关加热器28的功率,开关导线26被冷却到其转变温度以下,超导电路形成。

[0045] 如果在电流流经线圈10时,线圈10发生失超,电压将出现在该线圈上。流过其中的电流将开始下降,并且反向电压将出现在其它线圈上。这些电压将导致开关加热器28上出现电压,并且功率将被供应给开关加热器28。这将导致开关导线26失超,变得有电阻。电压将出现在开关导线26上,并且一些电流将通过连接30转移到本发明的加热布局结构40。如传统中的情况一样,一些电流还将被提供给热连接到线圈10的失超加热器(未示出)。此电流将加热任一未失超的线圈,使其全部失超,因此将失超引起的热量散播开,从而防止最初失超的线圈出现过热。通过将本发明的加热器连接到失超保护电路,支撑结构可被加热,并且线圈和支撑结构之间的界面应变的差异可被减少,从而减少了由于失超引起的损害的风险。

[0046] 图6示出了有所简化的替代性布局结构。这里,仅提供了一个超导开关24,在将电流引入到线圈10或从线圈10移除电流时使用。在失超发生在任何一个线圈10的情形下,该线圈将突然变得有电阻,并且电压差将出现在该线圈上。由于感应线圈对抗失超线圈引起的电流减少,反向电压将出现在其它的线圈。电压将因此出现在输出32处,其可被使用以对根据本发明提供的加热布局结构40提供功率。如传统中的情况一样,一些电流还将被提供给热连接到线圈10的失超加热器(未示出)。此电流将加热任一未失超的线圈,使其全部失超,因此在所有磁体线圈上共享失超引起的存储能量的耗散,且因此防止最初失超的线圈出现过热。通过将本发明的加热元件连接到失超保护电路,支撑结构可被加热,并且线圈和支撑结构之间的界面应变的差异可被减少,从而减少由于失超引起损害的风险。

[0047] 在本发明的另一应用中,加热元件可被用于加热支撑结构,以便减少传统磁体末端线圈上失超期间的表面应变差异,磁体末端线圈由它们的径向外表面支撑。

[0048] 图7示出了穿过传统结构的“末端”线圈70的轴向部分横截面。在这种传统布局结

构中,末端线圈在其轴向内表面B1和径向外表面A2表面上被附接到线圈支撑结构74的剩余部分的支撑环72支撑。线圈没有被粘接到支撑结构,而是在线圈和支撑之间具有材料层,其形成允许线圈相对支撑结构移动的滑移面。在使用中,由于末端线圈产生的磁场和磁体的剩余部分产生的磁场的交互作用引起圆周应力,使得这种末端线圈具有膨胀的趋势。

[0049] 如果失超事件发生在末端线圈70中,线圈将突然发热并膨胀。这种膨胀引起的直径增加将压靠图8所示的支撑环72,引起线圈和支撑环变形。这种变形可对线圈的结构造成机械损害,例如由于破坏了线圈70的线匝之间的树脂粘接。

[0050] 线圈的这种膨胀还可导致支撑结构弯曲,导致支撑环的永久变形并造成不正确的支撑线圈70,这又会因为大的线圈移动导致线圈失超。

[0051] 在本发明的实施例中,加热布局结构被提供为与支撑环72热接触。在失超的情况下,加热布局结构加热支撑环,从而导致其比无发热布局结构的情况更快地膨胀,从而减少末端线圈70和支撑环72之间的应变差异。

[0052] 下面计算说明了,根据本发明的实施例,可从典型磁体(例如,图4中所示的)获得足够的能量,以在类似时间内将支撑结构18加热到一个温度,该温度造成的热应变类似于线圈达到的热应变,因此减少了线圈和支撑结构之间的剪切应力。

[0053] 对于给定的质量 m ,根据材料的初始温度到最后温度的热函变化,可计算出增加支撑结构18的温度所需的热 Q 。热函变化通过比热容 C_p 在温度变化上的积分计算:

$$[0054] \quad Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = m [H(T_2) - H(T_1)],$$

[0055] 其中 m 为结构的总质量, T_1 和 T_2 分别为初始温度和最后温度, $H(T)$ 为相关材料在温度 T 的热函,其为热容的积分。

[0056] 存储在典型的3特斯拉超导磁体中的电能大约是12MJ,该电存储磁体能量的一小部分可从磁体中得到,并且可用于加热支撑结构18。

[0057] 假设线圈失超温度变化,热膨胀系数、支撑结构的质量、以及失超期间的热函变化,对于特定的磁体设计和线圈失超情景,使差热应变最小化所需的能量能被优化,并且加热元件被设计和提供以确保不同的表面应变最小化。

[0058] 现在将以示例方式描述根据本发明某些实施例的加热元件的某些示例。

[0059] 在图9的示例中,为了通过磁体电流加热分段的支撑结构(如上文所述示例中的支撑结构),每个支撑区段18被提供有加热元件42,所述加热元件42由卷绕在每个区段内或区段上的电阻性导线形成。替代性地,如图10中例示的,电阻性加热器44可被拴接(即用螺栓连接)或以其他方式附接到支撑元件18,其用作散热器。在失超时,使用例如图5和图6中例示的电路,一定比例的线圈电流被转移到这些电阻性导线或加热器。由此产生的欧姆热对支撑结构18进行加热,并且提供了形成支撑结构中所需应变所需要的能量。

[0060] 在图11所示的替代性布局结构中,提供的用于加热支撑结构18的加热元件没有电连接到失超保护电路或磁体结构的线圈。用于支撑结构18的加热元件46均通过卷绕在支撑件18中的导线的电短路闭合回路形成。失超时,变化的磁场感应耦合到支撑结构内的闭合电路,从而引起撑结构出现涡电流以及电阻性加热。与通过感应线圈提供的由电阻性加热供给结构的能量相比,这种闭合回路感应电路46被设计成通过构成支撑结构的合成物的热传导性、热膨胀的适当选择来产生所需加热以及支撑结构中的应变。

[0061] 图12示出了另一替代结构,其中电阻性导线48在相邻的线圈之间围绕整个支撑结构周向地卷绕。

[0062] 对于粘接到两个线圈的支撑结构,结构内的电流能沿着其长度被改变,以补偿两个线圈中的应变的任何差异。类似地,电阻性导线42或电阻性加热器44的分布可适于提供邻近每个线圈的所需应变。这种思想能被应用到任何或所有的轴向、径向和环向应变。

[0063] 线圈10和支撑结构18之间的差热应变问题也发生在超导磁体被从室温冷却到低温以诱发NbTi丝从电阻状态转变到超导状态,以准备将电流引入线圈时。这在通过添加牺牲性制冷剂(例如氮,其为液氮的添加做准备)来预冷却磁体的情形下尤为正确,因为这些情形下冷却得非常快。在例如通过运行低温致冷器使磁体更慢冷却的布局结构中也可能发生问题。由于热膨胀系数和热传导性的差异,不同材料的不同比率的热收缩在冷却期间能导致线圈10和支撑结构18之间界面的高机械应力。对此的解决方案是通过在每一这些材料内使用加热器来控制支撑结构和线圈的冷却速度。由于在磁体的冷却期间将没有来自超导磁体的变化磁场,这些加热器不能通过到磁体的感应耦合被供电。相反,在冷却过程期间,加热器必须通过电连接到磁体、或合适地修改的分离失超保护电路、或连接到专门电路来被供电。

[0064] 与上述铝间隔件18类似形式的间隔件可由铝、不锈钢或铜的浸渍树脂的线圈构成。在冷却阶段,这些线圈可被电连接在一起,且被连接到失超电路或用于提供电流的电路。替代性地,间隔件中的线圈可被电短路以形成导电回路,其在失超事件期间和逐渐缩小的磁场感应耦合,从而在失超事件期间在线圈中感应电流,由此加热间隔教案。替代性地,或另外,间隔件可被布置成感应地接收在失超期间从超导磁体的逐渐缩小的磁场的电功率。为此,可将多个间隔件电串联连接起来,或者,可将每个间隔件中的线圈短路成一个闭合回路。

[0065] 根据本发明,在本发明的某些实施例中,热被提供给保持超导线圈的支撑结构,使得线圈和相邻的支撑结构在失超期间,并且额外地或替代性地,在冷却阶段具有类似的应变。在本发明的实施例中,不但要考虑用于支撑结构的材料的机械强度和低温的公差,而且要考虑间隔件的热传导性和热膨胀系数。

[0066] 虽然已具体参考了其中超导线圈为环形的实施例对本发明进行了描述,但是本发明可应用于具有任何形状线圈的超导电磁体。

[0067] 本发明可应用于导电材料例如铝形成的支撑结构,并且应用于非导电材料(例如玻璃纤维增强塑性合成物)形成的支撑结构。

[0068] 虽然已参考某些类型的支撑结构对本发明进行描述,但本发明可有效地应用于其中线圈被粘接到支撑结构的任何超导磁体结构。

[0069] 虽然已参考有限数量的特定实施例对本发明进行描述,但众多变型和替代性实施例对于本领域技术人员而言将是明显的。本发明的范围由所附权利要求限定。

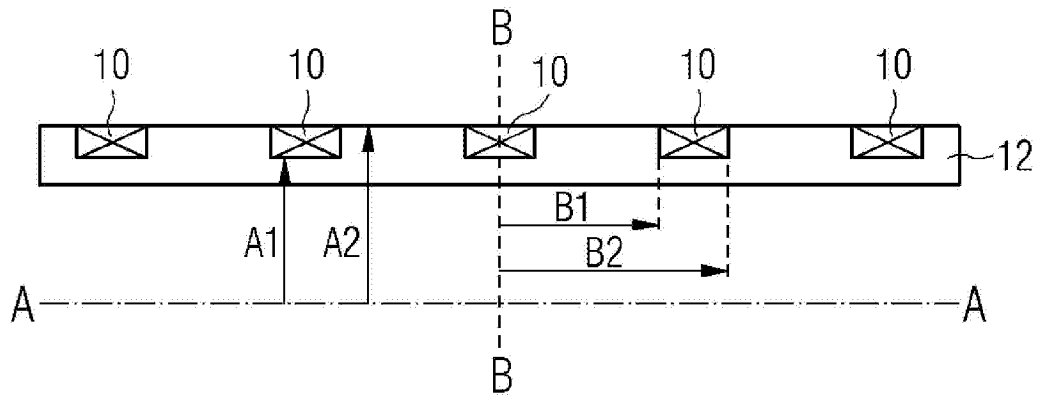


图 1

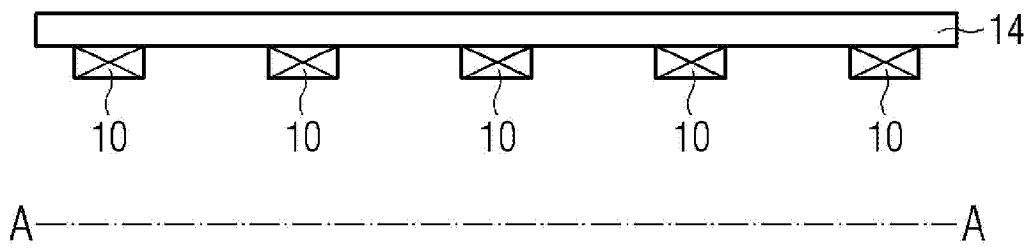


图 2

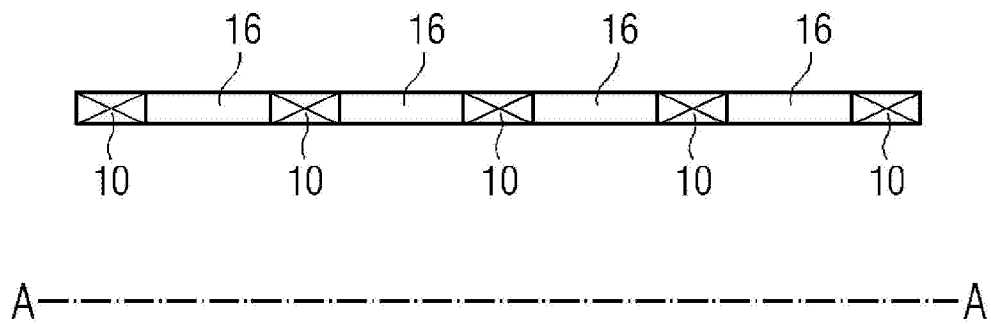


图 3

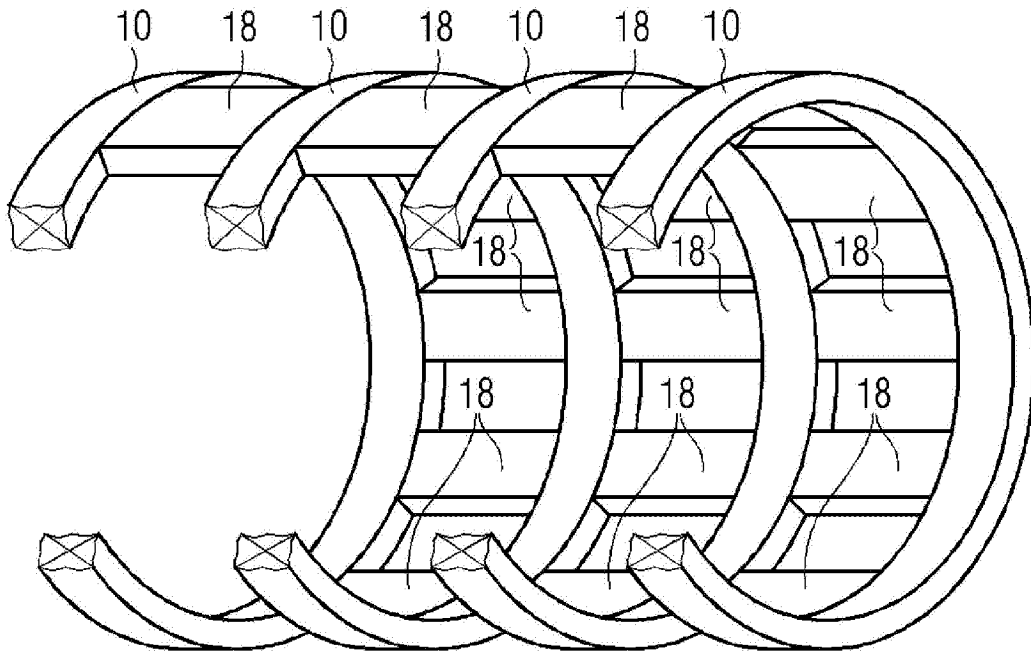


图 4

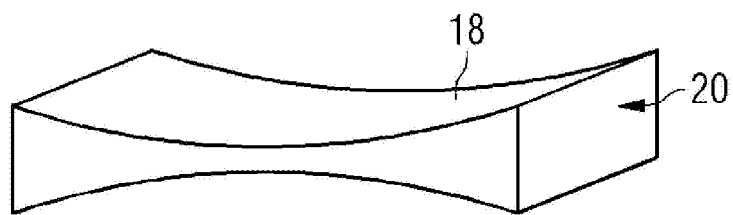


图 4A

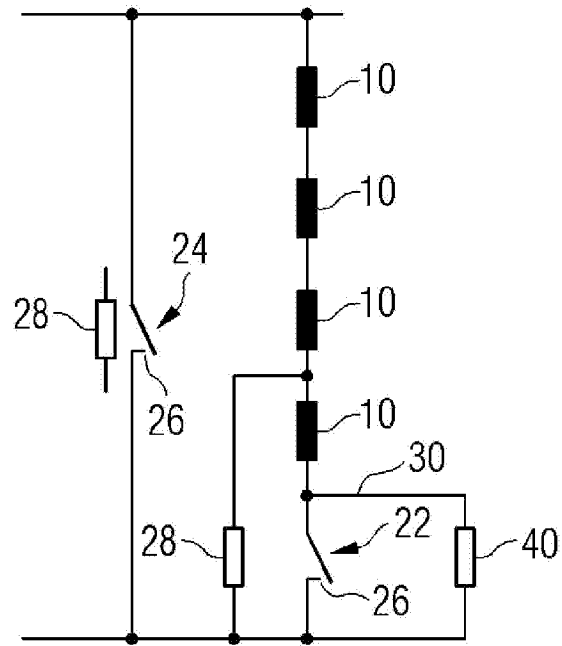


图 5

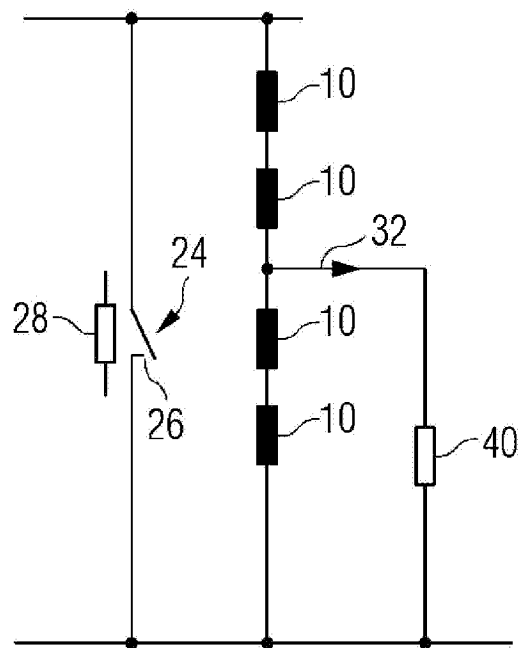


图 6

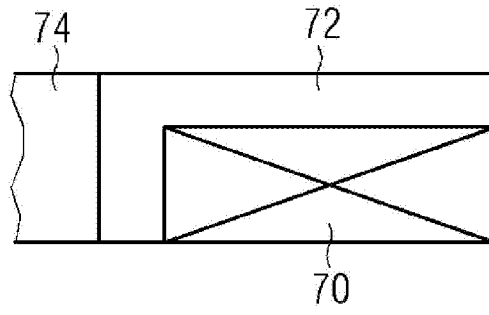


图 7

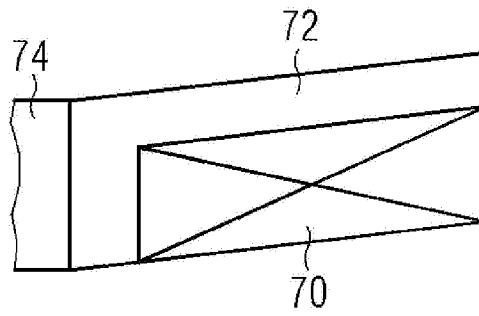


图 8

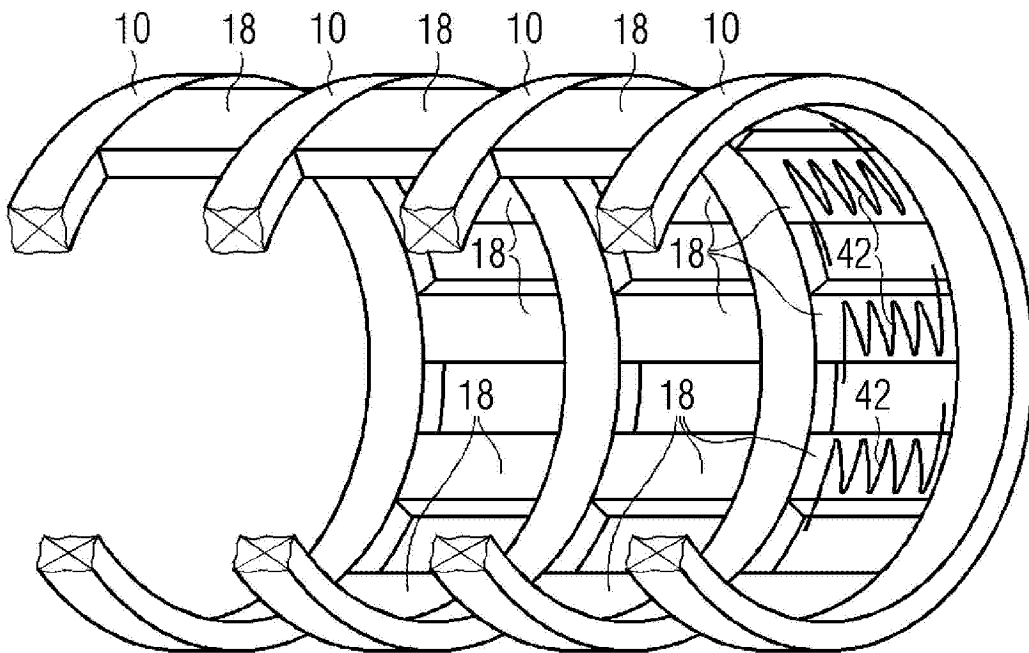


图 9

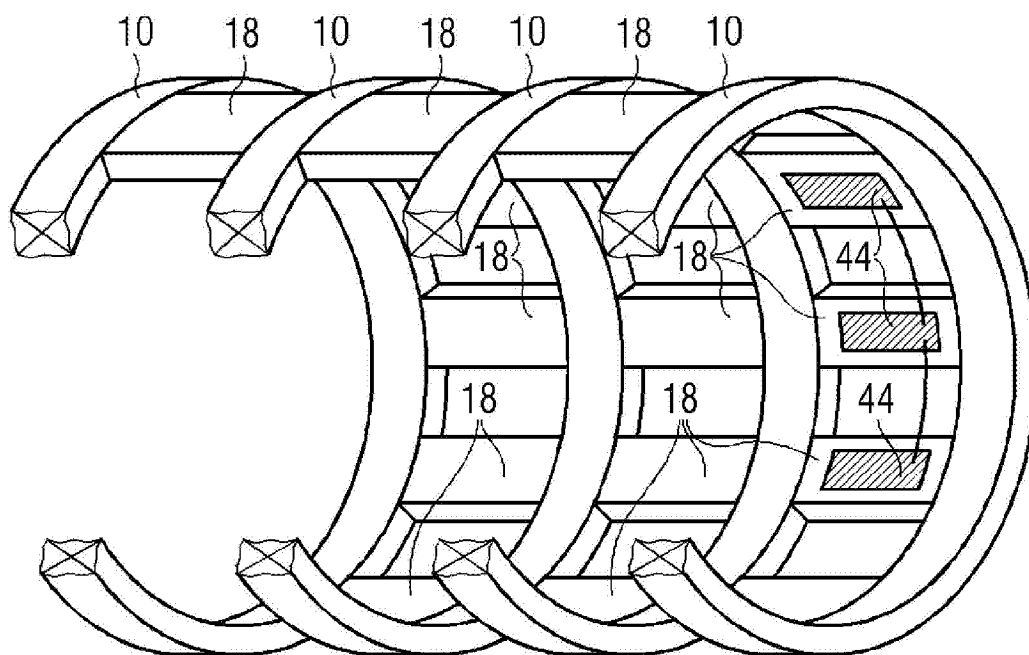


图 10

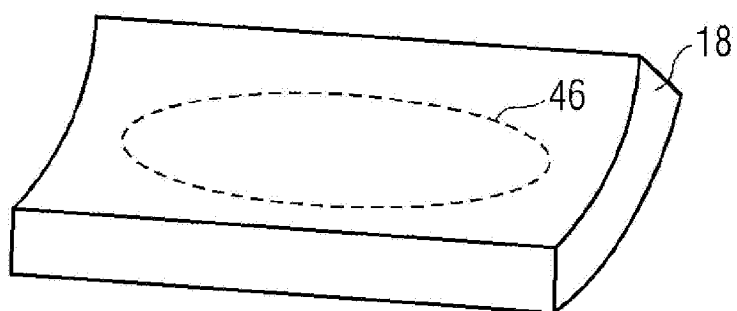


图 11

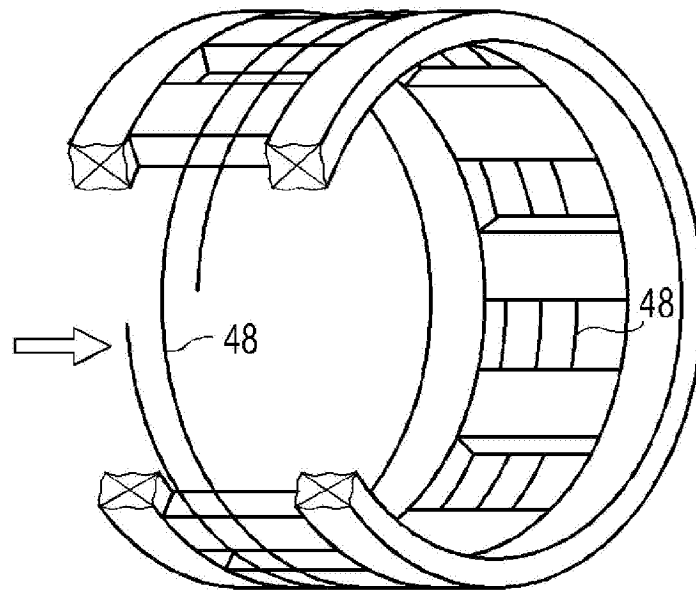


图 12