

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 16 日 (16.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/143764 A1

- (51) 国际专利分类号:
H01F 6/00 (2006.01) *H02M 3/335* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/071412
- (22) 国际申请日: 2020 年 1 月 10 日 (10.01.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910023177.6 2019 年 1 月 10 日 (10.01.2019) CN
201910163732.5 2019 年 3 月 5 日 (05.03.2019) CN
PCT/CN2019/102301
2019 年 8 月 23 日 (23.08.2019) CN
- (71) 申请人: 上海交通大学 (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。
- (72) 发明人: 黄振 (HUANG, Zhen); 中国上海市闵行区东川路 800 号, Shanghai 200240 (CN)。
- (74) 代理人: 上海智威知识产权代理有限公司 (KNOWLLEY INTELLECTUAL PROPERTY ATTORNEYS); 中国上海市静安区成都北路 333 号南楼 1802 室, Shanghai 200041 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: ENERGY CONVERSION DEVICE HAVING LOW-TEMPERATURE COIL

(54) 发明名称: 一种具有低温线圈的能量转换装置

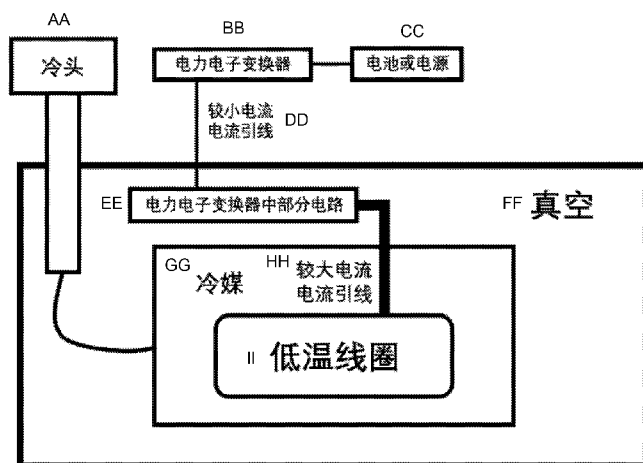


图 4a

- AA Cold head
BB Power electronic converter
CC Battery or power source
DD Small-current current lead
EE Some of circuits in the power electronic converter
FF Vacuum
GG Refrigerant
HH Large-current current lead
II Low-temperature coil

(57) Abstract: The present invention relates to the technical field of electromagnet excitation. Disclosed is an energy conversion device having a low-temperature coil, comprising a cold source module, a vacuum module, an external energy module, an internal energy module and a connection module; the cold source module is configured to provide a cold source for the vacuum module, the external energy module is configured to be located outside the vacuum module, the internal energy module is configured to be located inside the vacuum module, and the internal energy module and the external energy module are configured to be connected by means of the connection module. The energy conversion device having the low-temperature coil further comprises a refrigerant module, the refrigerant module being configured to be located inside the vacuum module, and the internal energy module being configured to be located inside the refrigerant module. The connection module comprises a power electronic converter, the power electronic converter comprising a large-current unit and a small-current unit, the small-current unit being configured to be located outside the vacuum module, and the large-current unit being connected to the internal energy module by means of a large-current current lead.

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种具有低温线圈的能量转换装置, 涉及电磁铁励磁技术领域, 包括冷源模块、真空模块、外部能量模块、内部能量模块和连接模块; 冷源模块被配置为向真空模块提供冷源, 外部能量模块被配置为位于真空模块外部, 内部能量模块被配置为位于真空模块的内部, 内部能量模块与外部能量模块之间被配置为通过连接模块连接。具有低温线圈的能量转换装置还包括冷媒模块, 冷媒模块被配置为位于真空模块的内部, 内部能量模块被配置为位于冷媒模块的内部。连接模块包括电力电子变换器, 电力电子变换器包括大电流单元和小电流单元, 小电流单元被配置为位于真空模块外部, 大电流单元通过大电流电流引线与内部能量模块连接。

一种具有低温线圈的能量转换装置

技术领域

[0001] 本发明涉及电磁铁励磁技术领域，尤其涉及一种具有低温线圈的能量转换装置。

背景技术

[0002] 超导现象于1911年被发现，并且由于其零电阻等优良特性迅速在世界范围内得到研究者们的关注。超导材料的临界温度已经可以达到20 K-77 K甚至更高，有些已经在液氮环境下即可使材料进入超导态。目前，有些超导材料已经实现工业化量产（如NbTi， Ni_3Sn ， MgB_2 ， ReBCO 等），由超导材料绕制而成的超导线圈由于其零电阻特性，在直流励磁下可以产生相比于传统铜线绕制而成的线圈无法达到的磁感应强度，并且在某些场合下，可以在相同磁感应强度的情况下，比传统铜线绕制的线圈轻很多，且损耗更小，因此有着广泛的应用前景，如磁共振成像、核磁共振波谱仪、电机、磁悬浮等应用。与此同时，如橡树岭国家实验室带头开发的“超级铜线”技术，在铜材料上附着一种碳纳米管材料，这种材料类似于石墨烯。它的导电率是10倍于铜，电流容量100倍于铜，热传导效率10倍于铜，强度是铜的300倍，重量仅铜的1/4-1/6。这种“超级铜线”也是一种具有绕制成低温线圈产生强磁场潜力的材料。但如何低漏热、简单高效、高功率密度的给低温线圈励磁以及能量回馈当前没有一个比较好的技术方案。

[0003] 经检索发现以下三个较为接近的现有技术，分别描述如下：

[0004] 【现有技术1】低温线圈开环励磁技术

[0005] 如图1所示，传统的低温线圈励磁采用电流引线对开环的低温线圈进行直接励磁。此时，由于低温线圈工作在极低温（一般为4.2 K-77 K），因此电流引线会存在一个从高温到低温的较大温度梯度进而产生较大的传导漏热；与此同时，由于低温线圈运行电流相对较高（一般为百安级甚至千安级）会随之产生较大的焦耳热。这种励磁技术鲁棒性较高，但是对制冷量的要求也较高，在很多

制冷量有限或需要系统轻量化应用场合受到了限制。

[0006] **【现有技术2】** 超导线圈闭环励磁技术

[0007] 为了克服传统超导线圈开环励磁技术的缺点，利用超导的零电阻特性，将超导线圈励磁完成以后形成闭环并且在真空层中将电流引线断开/拔开（如图2所示）。在这种技术下，超导线圈励磁时电流引线漏热依然比较大；但是励磁完成超导线圈闭合以后，其漏热几乎为零，漏热仅为电流引线冷热端的辐射换热。这种励磁技术的缺点是相较于现有技术1，系统较为复杂，超低阻或无阻接头工艺本身较为困难，接头电阻对于闭合线圈来说越小越好，以用来保证闭合线圈电流长时间几乎不衰减运行；其次为了使超导线圈电阻几乎为零，闭合线圈所能通的电流在相同条件下相较开环线圈相对要低（超导线圈中电流接近临界电流时，电阻就会慢慢产生；开环线圈不需要太担心小电阻的出现）；最后闭合线圈需要做到励磁前后开环闭环的控制（励磁时需要让闭合超导线圈局部失超，励磁方式和上面现有技术1提到的开环励磁技术一样，励磁完成后失超部分需要恢复超导态，然后断开电流引线形成闭环）。这样的开闭环操作会引入额外的控制难度和不确定因素，系统鲁棒性较开环励磁技术差一些。

[0008] **【现有技术3】** 超导线圈闭环励磁技术

[0009] 为了克服超导线圈闭环励磁技术（上述现有技术2）中励磁时因为有电流引线，漏热量较大的问题，有了超导线圈闭环励磁技术（本现有技术），如图3所示。此技术方案利用了磁通泵技术对闭合线圈进行直接励磁，整体发热量可以很少，但其他由于闭合线圈带来的缺点仍然存在（参考现有技术2中所述）且会使得线圈内部结构相较于上述现有技术2相对复杂。磁通泵技术是将能量交替地泵入超导闭合线圈。其中不中断超导特性的磁通泵通常在线圈两端产生的励磁电压较低，是比较好的补磁技术，但这恰恰制约了对大电感低温线圈需要快速充电的应用场合；如利用其产生相对较大的励磁电压，提高励磁速度，损耗也会随之增加，系统热负荷变大，影响励磁效率。一些磁通泵因含有铁心作为其组件，在功率较大频率较低时，其重量相对较重，体积较大。有些类型磁通泵无法做到能量回馈。

发明概述

技术问题

[0010] 因此，本领域的技术人员致力于开发一种具有低温线圈的能量转换装置，功率较大且功耗较低，同时解决现有技术的大部分缺陷，如引线漏热大，系统复杂，控制难，重量重，体积大和快速充放电不易等等。

问题的解决方案

技术解决方案

[0011] 有鉴于现有技术的上述缺陷，本发明所要解决的技术问题包括：

[0012] （1）解决了对于已有的低温线圈开环励磁技术（现有技术1）中存在的电流引线发热量大进而导致所需制冷机容量较大，线圈低温系统过于笨重等问题。开环运行可以避免闭环运行时对超低阻或无阻接头苛刻制造工艺的依赖；解决了超导材料利用率不高（超导线圈闭环运行电流相对于开环在同等条件下相对较低）；对于高温超导材料（如REBCO等）绕制的闭合线圈不易快速释能等问题。

[0013] （2）解决了对于已有的超导线圈闭环励磁技术（现有技术2）中存在的励磁系统相对复杂；励磁时，电流引线发热量仍然较大，传统可插拔电流引线存在连接处的接口接触热阻带来的热功率较大等问题。

[0014] （3）解决了对于已有的超导线圈闭环励磁技术（现有技术3）中存在的不断超导特性的磁通泵技术由于在线圈两端产生的电压较低，用于大电感低温线圈时充放电慢；如利用磁通泵产生相对较大的端电压，损耗也会随之增加，系统热负荷变大，影响励磁/去磁效率；超导材料利用率不高等问题。

[0015] （4）解决了对于已有的超导线圈闭环励磁技术（现有技术3）中存在的一些磁通泵因含有铁心作为其组件，在功率较大频率较低时，其重量相对较重，体积较大；有些类型磁通泵无法做到能量回馈等问题。

[0016] 为实现上述目的，本发明提供了一种具有低温线圈的能量转换装置，包括冷源模块、真空模块、外部能量模块、内部能量模块和连接模块；所述冷源模块被配置为向所述真空模块提供冷源，所述外部能量模块被配置为位于所述真空模块外部，所述内部能量模块被配置为位于所述真空模块的内部，所述内部能量模块与所述外部能量模块之间被配置为通过所述连接模块连接。

[0017] 进一步地，所述具有低温线圈的能量转换装置还包括冷媒模块，所述冷媒模块

被配置为位于所述真空模块的内部，所述内部能量模块被配置为位于所述冷媒模块的内部。

- [0018] 进一步地，所述连接模块包括电力电子变换器，所述电力电子变换器包括大电流单元和小电流单元，所述大电流单元通过大电流电流引线与所述内部能量模块连接。
- [0019] 进一步地，所述大电流单元被配置为在所述真空模块内部。
- [0020] 进一步地，所述大电流单元被配置为在所述冷媒模块内部。
- [0021] 进一步地，所述内部能量模块为低温线圈和/或超导线圈。
- [0022] 进一步地，连接所述大电流单元和所述内部能量模块的电流引线为可断开式。
- [0023] 进一步地，连接所述小电流单元和所述大电流单元的电流引线和/或信号线为可断开式，和/或连接所述外部能量模块和所述大电流单元的电流引线为可断开式。
- [0024] 进一步地，所述电力电子变换器为直流-直流转换器或交流-直流转换器，且所述直流-直流转换器为单个或多个并联的拓扑结构，所述交流-直流转换器为半波全控整流电路或全波全控整流电路或单相半桥全控整流电路或单相全桥全控整流电路。
- [0025] 进一步地，所述交流-直流转换器被配置为带有紧耦合变压器或松耦合变压器。
- [0026] 进一步地，所述紧耦合变压器或松耦合变压器的输入端为逆变器或交流电源。
- [0027] 进一步地，所述松耦合变压器的原副边隔有容器壁时，所述这部分容器壁为非金属材料 and/或 非铁磁材料。
- [0028] 进一步地，所述半波全控整流电路或全波全控整流电路或单相半桥全控整流电路或单相全桥全控整流电路中的全控型功率半导体器件替换为二极管和/或半控型功率半导体器件。
- [0029] 进一步地，所述直流-直流转换器的多个并联结构为交错并联结构。
- [0030] 进一步地，所述直流-直流转换器包含半桥式电路或全桥式电路，其半桥臂或全桥臂被配置为单个或并联多个全控型功率半导体器件。
- [0031] 进一步地，所述大电流单元和所述小电流单元之间被配置为至少通过一对双绞

线连接。

- [0032] 进一步地，所述大电流电流引线为单根或多根超导材料。
- [0033] 进一步地，所述超导材料为多层堆叠或多股绞线或超导复合缆线。
- [0034] 进一步地，所述多层堆叠结构层间被配置为通过焊锡进行连接加固。
- [0035] 进一步地，所述大电流电流引线为单根或多根良导体材料或超导材料和良导体材料的组合。
- [0036] 进一步地，所述电力电子变换器包括Buck电路、双向Buck—Boost电路、半桥式电路、桥式直流变换电路中的一种或组合。
- [0037] 进一步地，所述电力电子变换器包括桥式直流变换电路，还包括双向正激式转换器中除变压器绕阻以外的副边部分。
- [0038] 进一步地，所述Buck电路或所述双向Buck—Boost电路或所述半桥式电路或所述桥式直流变换电路中的全控型功率半导体器件部分被配置为在所述真空模块内部。
- [0039] 进一步地，所述Buck电路或所述双向Buck—Boost电路或所述半桥式电路或所述桥式直流变换电路中的全控型功率半导体器件部分被配置为在所述冷媒模块内部。
- [0040] 进一步地，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述真空模块外部。
- [0041] 进一步地，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述真空模块内部，所述小电流单元被配置为处于相对于所述大电流单元所处温度较高的温度，由所述冷源模块或冷媒模块或杜瓦壁或冷氦气排管或冷屏或低温线圈进行散热。
- [0042] 进一步地，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述冷媒模块或真空模块中，处于和低温线圈或热沉相近或相同的温度。
- [0043] 进一步地，所述外部能量模块包括储能元件和/或整流器和/或隔离变压器，所述储能元件包括电源、电池、电容或电感中的一种或组合。
- [0044] 进一步地，所述内部能量模块被配置为开环运行或闭环运行。

- [0045] 进一步地，在超导线圈的闭合处串联低温电感，和/或所述内部能量模块和所述大电流单元之间的电流引线处串联低温电感。
- [0046] 进一步地，所述大电流单元的冷却方式为冷源模块、冷媒容器壁、冷媒、冷氦气排管、冷屏、低温线圈中的一种或组合。
- [0047] 进一步地，所述电力电子变换器包括全控型功率半导体器件。
- [0048] 进一步地，所述全控型功率半导体器件为MOSFET、IGBT、宽禁带半导体中的一种或组合。
- [0049] 进一步地，所述电力电子变换器被配置为输出直流配合带有铁芯的电磁铁提供的外加交变磁场相互作用，在超导线圈的闭合处产生动态电阻，用于进行磁控励磁。
- [0050] 进一步地，所述冷媒模块为液氮、固氮、液氖、固氖、液氢、液氦、冷氦气、液氧、液化天然气之间的一种或多种组合。

发明的有益效果

有益效果

- [0051] 和现有技术相比，本结构能带来的优点和有益效果主要包括：
- [0052] （1）相较于现有技术1低温线圈开环励磁技术，如果低温线圈开环运行，本发明励磁时电流引线上的发热量大为减少，因此制冷机所需功率变小，低温线圈系统整体重量大为减轻。本发明由于解决了电流引线上漏热较大的问题，使得原本超导线圈只能闭环运行的场合可以选用开环运行，开环运行可以让高温超导材料（如REBCO等）绕制的线圈更易进行快速释能。同时，相较于现有技术2和现有技术3超导线圈闭环励磁技术，避免了对超低阻或无阻接头的依赖。超导线圈开环运行较闭环运行可以获得更高的运行电流，这就意味着相同情况下超导线圈产生相同磁感应强度所需要的超导材料更少，减少了线圈系统的材料成本或在相同超导材料用量的情况下，提高运行温度，使得超导线圈系统获得更多的冷却功率。
- [0053] （2）相较于现有技术1低温线圈开环励磁技术和现有技术2超导线圈闭环励磁技术，由于本发明在线圈励磁的时候电流引线上的发热功率低，如为现有技术2，励磁时带有电力电子变换器的电流引线可以避免或减少在连接处的接口接触

热阻产生的热功率，因此可以使超导线圈在相同励磁条件下获得更低的温度，进而获得更大的电流裕度或更高的励磁电流。

[0054] (3) 相较于现有技术2超导线圈闭环励磁技术，如果超导线圈闭环运行，本发明可使热控超导持续电流开关励磁时电流引线上的总发热量降低。超导持续电流开关可以选用由热控开关变为流控开关，较大程度上简化了闭合线圈的内部结构和省去了一些外部的配套设备（如温控仪等）。或可以热控配合流控开关使用，降低开关处形成热岛的风险。

[0055] (4) 相较于现有技术3超导线圈闭环励磁技术，本发明中的电力电子变换器可以输出直流配合带有铁芯的电磁铁提供的外加交变磁场相互作用，在线圈闭合处产生动态电阻，进行磁控励磁（磁通泵），相对于低频整流型磁通泵重量更轻、能量泵入更快、控制更简单。

[0056] (5) 相较于现有技术3超导线圈闭环励磁技术，本发明中的电力电子变换器可以做到对超导线圈更快的励磁速度和/或更方便的能量回馈。

[0057] (6) 相较于现有技术2和3，本发明可用于低温线圈开环运行，此时，不仅限于超导线圈，同时适用于其他良导体低温线圈。

[0058] 以下将结合附图对本发明的构思、具体结构及产生的技术效果作进一步说明，以充分地了解本发明的目的、特征和效果。

对附图的简要说明

附图说明

[0059] 图1是现有技术1描述的低温线圈开环励磁结构连接示意图；

[0060] 图2是现有技术2描述的超导线圈闭环励磁结构连接示意图；

[0061] 图3是现有技术3描述的超导线圈闭环励磁结构连接示意图；

[0062] 图4a是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的一个较佳实施例示意图；

[0063] 图4b是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的一个较佳实施例示意图；

[0064] 图4c是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的一个较佳实施例示意图；

- [0065] 图4d是本发明所述的超导线圈闭环工作的一个较佳实施例示意图；
- [0066] 图5是本发明所述的电力电子变换器双向Buck-Boost和桥式电路拓扑结构示意图；
- [0067] 图6是本发明所述的电力电子变换器桥式直流变换器电路拓扑结构示意图；
- [0068] 图7a 是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0069] 图7b是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0070] 图7c是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0071] 图8a是本发明所述的一种基于全桥电路的能量转换装置示意图；
- [0072] 图8b是本发明所述的另一种基于半桥电路的能量转换装置示意图；
- [0073] 图9是本发明所述的低温线圈单向励磁装置的一个较佳实施例示意图。
- [0074] 图10是本发明所述的双向正激式转换器(forward converter)和桥式直流变换器的电路拓扑结构示意图；
- [0075] 图11a是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0076] 图11b是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0077] 图11c是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0078] 图11d是本发明所述的低温线圈励磁或去磁能量转换装置的另一个较佳实施例示意图；
- [0079] 图12是本发明所述的半波全控整流交流-直流转换器示意图；
- [0080] 图13是本发明所述的全波全控整流交流-直流转换器示意图；
- [0081] 图14是本发明所述的单相半桥全控整流交流-直流转换器示意图；
- [0082] 图15是本发明所述的单相全桥全控整流交流-直流转换器示意图；
- [0083] 图16是本发明所述的由低温电力电子变换器和交流铁芯线圈组成的磁通泵示意

图；

[0084] 图17是本发明所述的一种直流-直流转换器交错并联的拓扑结构示意图。

发明实施例

本发明的实施方式

[0085] 以下参考说明书附图介绍本发明的多个优选实施例，使其技术内容更加清楚和便于理解。本发明可以通过许多不同形式的实施例来得以体现，本发明的保护范围并非仅限于文中提到的实施例。

[0086] 在附图中，结构相同的部件以相同数字标号表示，各处结构或功能相似的组件以相似数字或文字标号表示。附图所示的每一组件的尺寸和厚度是任意示出的，本发明并没有限定每个组件的尺寸和厚度。为了使图示更清晰，附图中有些地方适当夸大了部件的厚度。

[0087] 本申请文件中所述的相关概念定义如下：

[0088] 低温线圈：由良导体材料或者超导材料绕制而成的线圈处于低温环境中。

[0089] 零电阻特性：处于超导态的超导材料，在无变化电流或磁场作用时其电阻为零。

[0090] 超导材料：在某些特定条件下，一种具有零点阻特性的材料。

[0091] 临界温度：超导材料的温度降至某个温度以下时，超导材料呈现零电阻特性。该温度称之为超导材料的临界温度。

[0092] 临界磁场：超导材料处于的外部磁感应强度在某个值以下时，超导材料呈现零电阻特性。该磁场称之为超导材料的临界磁场。

[0093] 临界电流：超导材料中的直流励磁电流在某个值以下时，超导材料呈现零电阻特性。该电流称之为超导材料的临界电流。

[0094] 失超：超导材料由超导态变为非超导态，原因可能是温度高于临界温度，磁场高于临界磁场，或电流大于临界电流等。

[0095] 超导线圈：一种由超导材料绕制而成的线圈，和铜线圈类似，但线圈内阻非常小或趋近于零。

[0096] 固氮：固氮是由空气中的氮气提炼而来，价格低廉，作为冷媒用于让超导线圈运行温度低于临界温度。氮气在约77 K发生气液相变，在约63 K发生液固相变

，在约35.6 K发生固固相变。

[0097] 电流引线：用于给低温线圈励磁或能量回馈的引线。电流引线通常一端在低温环境中另外一端在室温中，两端因存在较大的温度梯度而会产生较大的传导漏热，加上低温线圈虽然电阻小，但一般为大励磁电流，励磁同时会产生较大焦耳热，一般情况下低温系统会因为使用电流引线而使整体漏热相对严重，使得制冷系统负荷大为增加。

[0098] 磁通泵技术：一种将能量交替地泵入超导闭合线圈的励磁技术。

[0099] 动态电阻：超导线中所通直流电和外加交变磁场相互作用而产生的电阻。外加交变磁场通常通过一个带有铁芯的电感产生。

[0100] 第一组实施例

[0101] 本发明设计了一种低温线圈用低漏热励磁、去磁单向或双向能量转换装置，通过将电力电子变换器中部分含有大电流的电路冷却至低温（温度可与低温线圈一样，或者稍高，或者稍低，或低温线圈系统使用二级制冷机或有其他热沉，也可降温至一级冷头或其他热沉温度附近），并将部分小电流的电路优选放置在相对高温中，以此极大的减少了传统电流引线在对低温线圈励磁及能量回馈时的整体总发热量（总发热量主要包括了电流引线上的传导漏热和通流时的焦耳热）。

[0102] 如图4（a）-（c）所示，低温线圈，优选为超导线圈。低温线圈的冷却方式可以是通过冷源模块，如图4（a）-（c）的制冷机（冷头）或利用冷氦气排管，也可以是冷媒直接制冷等。如低温线圈为超导线圈，则既可以开环运行，也可以闭环运行。闭环运行工作原理如图4（d）所示，超导线圈励磁时虚线部分变为有阻（电阻来源为超导失超或者磁通泵的动态电阻），通过电池或电源和电力电子变换器（包括低温部分）开始励磁，励磁完成后虚线部分恢复成几乎或完全零电阻，最后关断电池或电源或电力电子变换器，电流在闭合线圈里流动。

[0103] 闭环运行和现有技术2超导线圈闭环励磁技术相似，只是由传统可插拔的电流引线变为带有电力电子变换器的电流引线（变为带有电力电子变换器的电流引线后也可选择采用可断开/可插拔模式，断开位置可以在较大电流电流引线处也

可在较小电流电流引线处和/或信号线处，以此进一步减少闭环运行时的漏热）。如果为其他有电阻的导体线圈（如铜线圈等），则优选为开环运行。其中，电力电子变换器优选为直流-直流转换器。

[0104] 直流-直流转换器可选为单个或多个并联的电路拓扑结构，如为多个并联结构优选为采用交错并联（interleave）技术，交错并联可以采用两相或者多相并联，其中如图17所示为一种两相交错并联，多相交错并联可以以此类推。交错并联电路可用来替换图5中的双向Buck-Boost电路。其中输入输出是小电流且有可能不适合在低温环境中工作的电路器件（下面简称为相对高温电路部分），如控制电力电子变换器的数字控制器（例如DSP、FPGA、MCU、以ARM核为基础的CPU等），电路中全控型功率半导体器件的驱动等优选为放置在相对高温中，如室温或独立放置在真空当中由冷头或冷媒模块（如冷媒容器壁）或杜瓦壁或冷氦气排管或冷屏或低温线圈进行散热；但也可放置在冷媒模块或真空模块中，处于和低温线圈或二级制冷机的一级冷头或其他热沉相近或相同的温度。

[0105] 低温中的主要电路为含有大电流的全桥式电路（对应于图4（a）-（c）中电力电子变换器中部分电路），此电路中的功率半导体器件可选为全控型功率半导体器件。全控型功率半导体器件优选为MOSFET，IGBT，宽禁带半导体（SiC/GaN）等，并且每个全桥臂优选为并联多个全控型功率半导体器件。其中由MOSFET组成的单个双向直流-直流转换器电路拓扑结构如图5或图6所示（图5或图6实线框中的部分为放置在低温环境中的部分）。

[0106] 图5电路由双向Buck-Boost电路和桥式直流变换器组成，而图6电路由桥式直流变换器组成。低温电路部分和相对高温电路部分中信号传输易受干扰的线路优选为通过一对或多对双绞线（twisted pair）进行连接。

[0107] 本发明中较大电流电流引线可选用单根或多根超导材料，使其在励磁或能量回馈时发热量几乎为零。为防止超导电流引线上可能存在的温度梯度所造成超导材料临界电流的减少（温度越高，超导材料临界电流越低），使用超导材料时优选为多层堆叠或多股绞线或超导复合缆线（如CORC等）等的结构以增加超导作为较大电流电流引线时的载流能力，防止失超的发生，优选的层数或股数应多于低温线圈单匝的层数或者股数，多层堆叠结构层间优选通过焊锡进行连接

加固。此较大电流电流引线也可良导体材料，或良导体材料和超导材料的混合电流引线（如一段是良导体材料，一段是超导材料或者整体为良导体材料和超导材料堆叠在一起）。良导体材料如：铜、铝或银引线，这些材料处于低温时，其电阻率变小（20 K时，铜（RRR=50）电阻率约为室温的0.02倍，铝电阻率约为室温的0.012倍，银电阻率约为室温的0.004倍），再通过优化良导体引线的长度和截面积，使得良导体材料的总发热量进一步减少，因此低温中较大电流侧良导体引线的发热量也非常小。相对高温的较小电流侧可以通过控制输入低温电力电子变换器的电压大小，使得较小电流侧电流可以变得非常小。

[0108] 如图5实线框所示的低温电力电子变换器部分电路可以放置在真空中，可通过冷头或冷媒容器壁或冷氦气排管或冷屏或低温线圈降至所需低温；也可以如图4（b）放置在冷媒模块中（可通过冷媒或冷媒容器内壁或低温线圈降至所需低温）。冷媒可根据低温线圈的不同工作温度选择液氮、固氮、液氦、固氦、液氢、液氘、冷氦气、液氧、液化天然气等。图4（a）-（c）的方案也可变化为类似图7（a）-（c）的方案，其不同之处是处于低温的电力电子变换器部分电路变为如图5虚线框所示（包含了双向Buck-Boost电路中的全控型功率半导体器件和高低电压母线间的电感等更多的电路），图5虚线框中的双向Buck-Boost电路也可由全桥式电路代替。

[0109] 第二组实施例

[0110] 如图11所示，电力电子变换器可以选择为带有变压器的交流-直流转换器，如半波全控整流电路或全波全控整流电路或单相半桥全控整流电路或单相全桥全控整流电路，本实施例的其他部分（如数字控制器位置，双绞线，大电流引线，全控型功率半导体器件可用类型等等）和第一组实施例基本相同。半波全控整流电路和桥式直流变换器示意图如图12所示，全波全控整流电路和桥式直流变换器示意图如图13所示，单相半桥全控整流电路和桥式直流变换器示意图如图14所示，单相全桥全控整流电路和桥式直流变换器示意图如图15所示。图12、图13、图14、图15中变压器输入端优选为逆变器或交流电源。如果需要将变压器原边电路和副边电路通过真空隔开，则优选为松耦合变压器。将有变压器的电力电子变换器中部分电路1（如图11（a）-（d）所示，对应的电路拓扑结

构示意图如图12或图13或图14或图15虚线框所示)降温至与低温线圈温度相同或相近(如低温线圈系统使用二级制冷机或有其他热沉,也可降温至一级冷头或其他热沉温度附近),通过变压器耦合的方式进行电能传输。有变压器的电力电子变换器中部分电路2(如图11(a)、(b)和(d)所示)和有变压器的电力电子变换器(如图11(c)所示)包含了松耦合变压器的原边部分。有松耦合变压器的电力电子变换器和低温容器的相对摆放位置如图11(a)-(d)所示。在真空中且不和较大电流电流引线接触的电路,热量可以通过选用冷头或冷媒容器壁或杜瓦壁或冷氦气排管或冷屏或低温线圈连接将热量带走。需注意如松耦合变压器原副边隔有容器壁时(如图11(a)、(c)),这部分容器壁优选为非金属材料 and/或非铁磁材料。

[0111] 如为紧耦合变压器,则如图12所示的半波全控整流电路和桥式直流变换器可冷却至低温或桥式直流变换器冷却至低温或除变压器以外的电路冷却至低温;如图13所示的全波全控整流电路和桥式直流变换器可冷却至低温或桥式直流变换器冷却至低温或除变压器以外的电路冷却至低温;如图14所示的单相半桥全控整流电路和桥式直流变换器可冷却至低温或桥式直流变换器冷却至低温或除变压器以外的电路冷却至低温;如图15所示的单相全桥全控整流电路和桥式直流变换器可冷却至低温或桥式直流变换器冷却至低温或除变压器以外的电路冷却至低温。当上面四种情况中桥式直流变换器冷却至低温时,图12中的半波全控整流电路,图13中的全波全控整流电路,图14中的单相半桥全控整流电路,图15中的单相全桥全控整流电路中的全控型功率半导体器件可由二极管和/或半控型功率半导体器件代替。这里的低温定义为与低温线圈温度相同或相近(如低温线圈系统使用二级制冷机或有其他热沉,也可降温至一级冷头或其他热沉温度附近)。低温电路的位置如图4(a)-(c)电力电子变换器中部分电路所示。

[0112] 在本组的其他实施例中,图5、图6、图10、图12、图13、图14、图15中的桥式直流变换器部分均可由图8(a)的全桥式电路形式简化为图8(b)的半桥式电路形式;且如图9(实线框中的部分为放置在低温环境中的部分),是把图5的双向Buck-Boost电路由Buck电路代替,优选的桥式直流变换器可由半桥电路代

替。图5、图6、图9、图10中电池和/或电源也可以包括如电容、电感等其他储能器件和/或整流器和/或隔离变压器。

[0113] 带有隔离变压器的电路有反激式、正激式、推免式、半桥式、全桥式等多种多样，如双向正激式转换器(forward converter)和桥式直流变换器的拓扑结构示意图如图10所示，此电路中的正激式转换器与桥式直流变换器的位置摆放关系如图4(a) - (c)所示，图中电力电子变换器部分电路可以包含图10实线框所示部分(全桥)或者虚线框所示部分(双向正激式转换器电路的副边，但不包括变压器绕组)。

[0114] 在前述实施例中，根据情况可选择在图4、图7、图11低温线圈和电力电子变换器中部分电路或有变压器的电力电子变换器中部分电路1中连接的较大电流电流引线处和/或超导闭合线圈闭合处(如图4(d)虚线处)多加一个低温电感用于控制励磁和/或去磁电流的纹波波动，低温电感优选为超导线圈。

[0115] 在本发明的前述实施例中，本发明所述的具有低温线圈的能量转换装置还包括释能保护模块，释能保护模块可由正反并联的二极管对和/或电阻构成，连接于内部能量模块(低温线圈和/或超导线圈)的两端，用于释放能量、保护低温线圈和/或持续电流开关等。

[0116] 在本发明的另一个实施例中，如图16所示，低温电力电子变换器可以输出直流配合带有铁芯的电磁铁提供的外加交变磁场相互作用，在超导线圈闭合处产生动态电阻，进行磁控励磁(磁通泵)，相对于现有的低频整流型磁通泵重量更轻、能量泵入更快、控制更简单。和现有技术相比，本发明所述的具有低温线圈的能量转换装置能带来的优点和有益效果主要包括：

[0117] (1) 相较于现有技术1低温线圈开环励磁技术，如果低温线圈开环运行，本发明励磁时电流引线上的发热量大为减少，因此制冷机所需功率变小，低温线圈系统整体重量大为减轻。本发明由于解决了电流引线上漏热较大的问题，使得原本超导线圈只能闭环运行的场合可以使用开环运行，开环运行可以让高温超导材料(如REBCO等)绕制的线圈更易进行快速释能。同时，相较于现有技术2和现有技术3超导线圈闭环励磁技术，避免了对超低阻或无阻接头的依赖。超导线圈开环运行较闭环运行可以获得更高的运行电流，这就意味着相同情况下超

导线圈产生相同磁感应强度所需要的超导材料更少，减少了线圈系统的材料成本或在相同超导材料用量的情况下，提高运行温度，使得超导线圈系统获得更多的冷却功率。

[0118] (2) 相较于现有技术1低温线圈开环励磁技术和现有技术2超导线圈闭环励磁技术，由于本发明在线圈励磁的时候电流引线上的发热功率低，如为现有技术2，励磁时带有电力电子变换器的电流引线可以避免或减少在连接处的接口接触热阻产生的热功率，因此可以在相同励磁条件下获得更低的温度，进而获得更高的电流裕度或更高的励磁电流。

[0119] (3) 相较于现有技术2超导线圈闭环励磁技术，如果超导线圈闭环运行，本发明可使热控超导持续电流开关励磁时电流引线上的总发热量降低。超导持续电流开关可以选用由热控开关变为流控开关，较大程度上简化了闭合线圈的内部结构和省去了一些外部配套设备（如温控仪等）。或可以热控配合流控开关使用，降低开关处形成热岛的风险。

[0120] (4) 相较于现有技术3超导线圈闭环励磁技术，本发明中的电力电子变换器可以输出直流配合带有铁芯的电磁铁提供的外加交变磁场相互作用，在线圈闭合处产生动态电阻，进行磁控励磁（磁通泵），相对于低频整流型磁通泵重量更轻、能量泵入更快、控制更简单。

[0121] (5) 相较于现有技术3超导线圈闭环励磁技术，本发明中的电力电子变换器可以做到对超导线圈更快的励磁速度和/或更方便的能量回馈。

[0122] (6) 相较于现有技术2和3超导线圈闭环励磁技术，本发明可用于低温线圈开环运行，此时，不仅限于超导线圈，同时适用于其他良导体低温线圈。

[0123] 综上，本发明中低温线圈能量馈送单或双向转换装置鲁棒性强；漏热少；充放电快慢均可；功率密度高；能量回馈方便并且由于制冷系统功率可以变小很多，如冷头和压缩机，低温线圈系统重量大为减轻。

[0124] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解，本领域的普通技术无需创造性劳动就可以根据本发明的构思做出诸多修改和变化。因此，凡本技术领域中技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案，皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

权利要求书

- [权利要求 1] 一种具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，包括冷源模块、真空模块、外部能量模块、内部能量模块和连接模块；所述冷源模块被配置为向所述真空模块提供冷源，所述外部能量模块被配置为位于所述真空模块外部，所述内部能量模块被配置为位于所述真空模块的内部，所述内部能量模块与所述外部能量模块之间被配置为通过所述连接模块连接。
- [权利要求 2] 如权利要求1所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述具有低温线圈的能量转换装置还包括冷媒模块，所述冷媒模块被配置为位于所述真空模块的内部，所述内部能量模块被配置为位于所述冷媒模块的内部。
- [权利要求 3] 如权利要求1或2所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述连接模块包括电力电子变换器，所述电力电子变换器包括大电流单元和小电流单元，所述大电流单元通过大电流电流引线与所述内部能量模块连接。
- [权利要求 4] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流单元被配置为在所述真空模块内部。
- [权利要求 5] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流单元被配置为在所述冷媒模块内部。
- [权利要求 6] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述内部能量模块为低温线圈和/或超导线圈。
- [权利要求 7] 如权利要求4或5或6所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，连接所述大电流单元和所述内部能量模块的电流引线为可断开式。
- [权利要求 8] 如权利要求4或5或6所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，连接所述小电流单元和所述大电流单元的电流引线和/或信号线为可断开式，和/或连接所述外部能量模块和所述大电流单元的电流引线为可断开式。

- [权利要求 9] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述电力电子变换器为直流-直流转换器或交流-直流转换器，且所述直流-直流转换器为单个或多个并联的拓扑结构，所述交流-直流转换器为半波全控整流电路或全波全控整流电路或单相半桥全控整流电路或单相全桥全控整流电路。
- [权利要求 10] 如权利要求9所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述交流-直流转换器被配置为带有紧耦合变压器或松耦合变压器。
- [权利要求 11] 如权利要求10所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述紧耦合变压器或松耦合变压器的输入端为逆变器或交流电源。
- [权利要求 12] 如权利要求10所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述松耦合变压器的原副边隔有容器壁时，所述这部分容器壁为非金属材料 and/或非铁磁材料。
- [权利要求 13] 如权利要求9所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述半波全控整流电路或全波全控整流电路或单相半桥全控整流电路或单相全桥全控整流电路中的全控型功率半导体器件替换为二极管和/或半控型功率半导体器件。
- [权利要求 14] 如权利要求9所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述直流-直流转换器的多个并联结构为交错并联结构。
- [权利要求 15] 如权利要求9或14所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述直流-直流转换器包含半桥式电路或全桥式电路，其半桥臂或全桥臂被配置为单个或并联多个全控型功率半导体器件。
- [权利要求 16] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流单元和所述小电流单元之间被配置为至少通过一对双绞线连接。
- [权利要求 17] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流电流引线为单根或多根超导材料。
- [权利要求 18] 如权利要求17所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述超导材料为多层堆叠或多股绞线或超导复合缆线。

- [权利要求 19] 如权利要求18所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述多层堆叠结构层间被配置为通过焊锡进行连接加固。
- [权利要求 20] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流电流引线为单根或多根良导体材料或超导材料和良导体材料的组合。
- [权利要求 21] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述电力电子变换器包括Buck电路、双向Buck—Boost电路、半桥式电路、桥式直流变换电路中的一种或组合。
- [权利要求 22] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述电力电子变换器包括桥式直流变换电路，还包括双向正激式转换器中除变压器绕组以外的副边部分。
- [权利要求 23] 如权利要求21所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述Buck电路或所述双向Buck—Boost电路或所述半桥式电路或所述桥式直流变换电路中的全控型功率半导体器件部分被配置为在所述真空模块内部。
- [权利要求 24] 如权利要求21所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述Buck电路或所述双向Buck—Boost电路或所述半桥式电路或所述桥式直流变换电路中的全控型功率半导体器件部分被配置为在所述冷媒模块内部。
- [权利要求 25] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述真空模块外部。
- [权利要求 26] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述真空模块内部，所述小电流单元被配置为处于相对于所述大电流单元所处温度较高的温度，由所述冷源模块或冷媒模块或杜瓦壁或冷氦气排管或冷屏或低温线圈进行散热。

- [权利要求 27] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述小电流单元包括数字控制器和/或全控型功率半导体器件的驱动电路，所述小电流单元被配置为位于所述冷媒模块或真空模块中，处于和低温线圈或热沉相近或相同的温度。
- [权利要求 28] 如权利要求1所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述外部能量模块包括储能元件和/或整流器和/或隔离变压器，所述储能元件包括电源、电池、电容或电感中的一种或组合。
- [权利要求 29] 如权利要求1所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述内部能量模块被配置为开环运行或闭环运行。
- [权利要求 30] 如权利要求6所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，在超导线圈的闭合处串联低温电感，和/或所述内部能量模块和所述大电流单元之间的电流引线处串联低温电感。
- [权利要求 31] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述大电流单元的冷却方式为冷源模块、冷媒容器壁、冷媒、冷氢气排管、冷屏、低温线圈中的一种或组合。
- [权利要求 32] 如权利要求3所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述电力电子变换器包括全控型功率半导体器件。
- [权利要求 33] 如权利要求32所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述全控型功率半导体器件为MOSFET、IGBT、宽禁带半导体中的一种或组合。
- [权利要求 34] 如权利要求3或6所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述电力电子变换器被配置为输出直流配合带有铁芯的电磁铁提供的外加交变磁场相互作用，在超导线圈的闭合处产生动态电阻，用于进行磁控励磁。
- [权利要求 35] 如权利要求2所述的具有低温线圈的能量转换装置，其特征在于，所述冷媒模块为液氮、固氮、液氦、固氦、液氢、液氘、冷氢气、液氧、液化天然气之间的一种或多种组合。

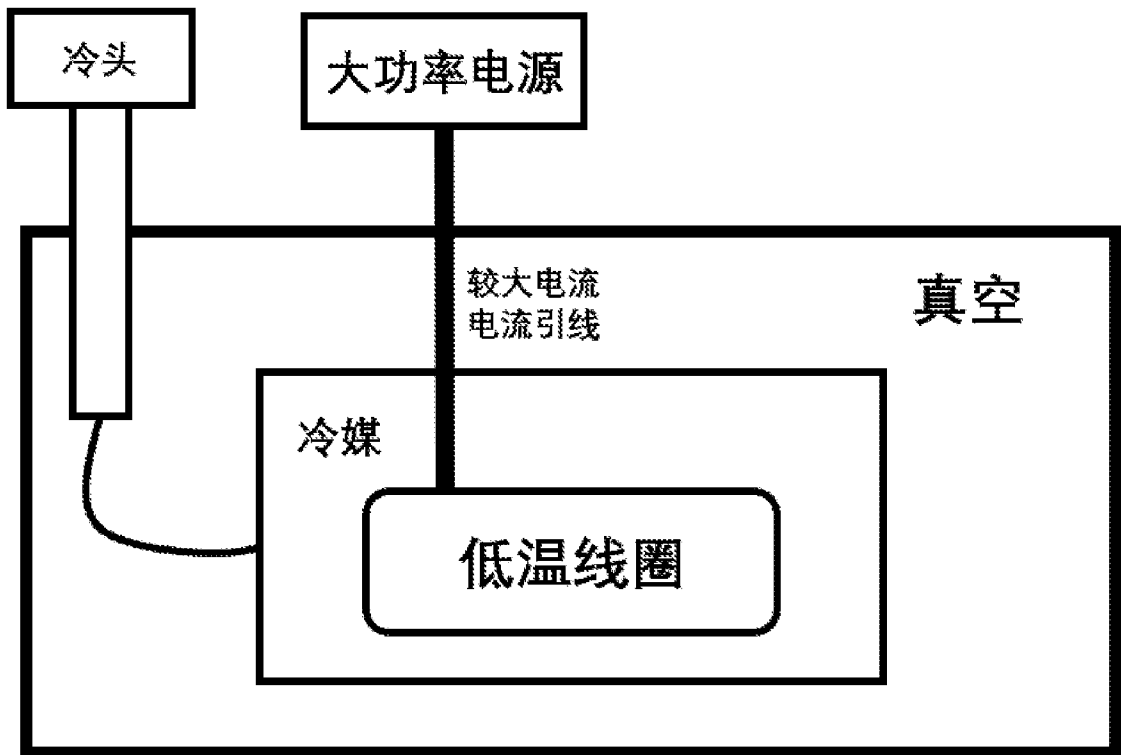


图 1

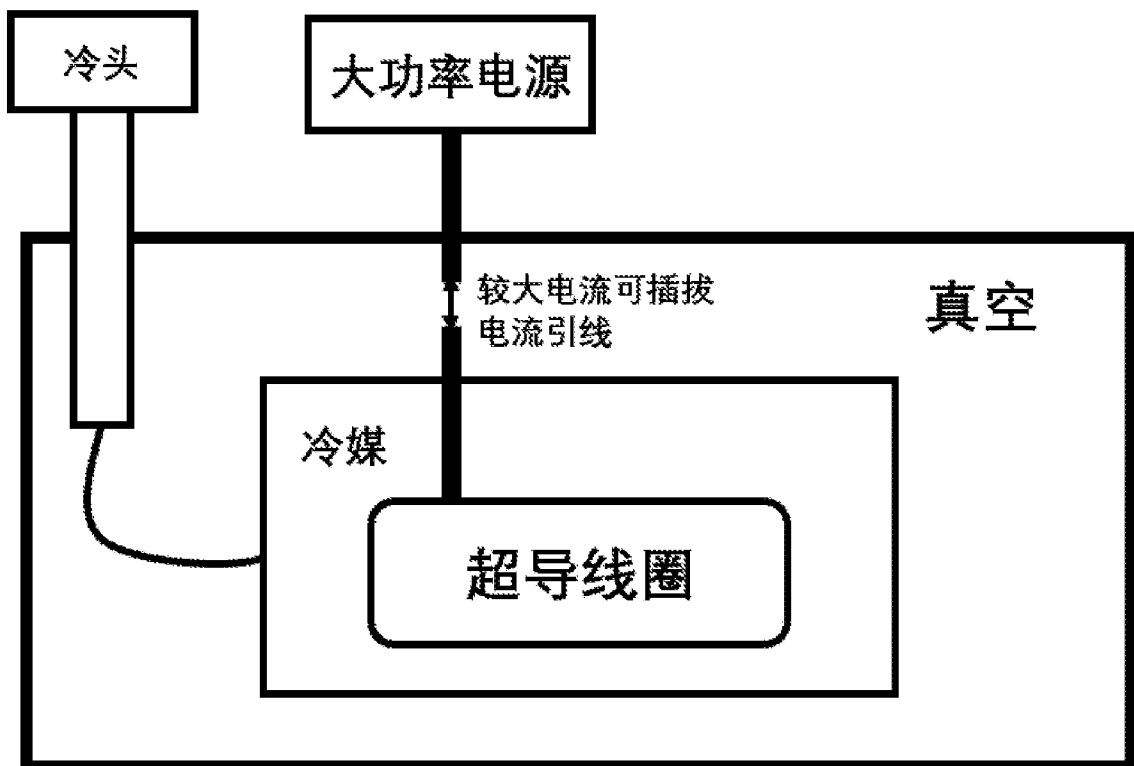


图 2

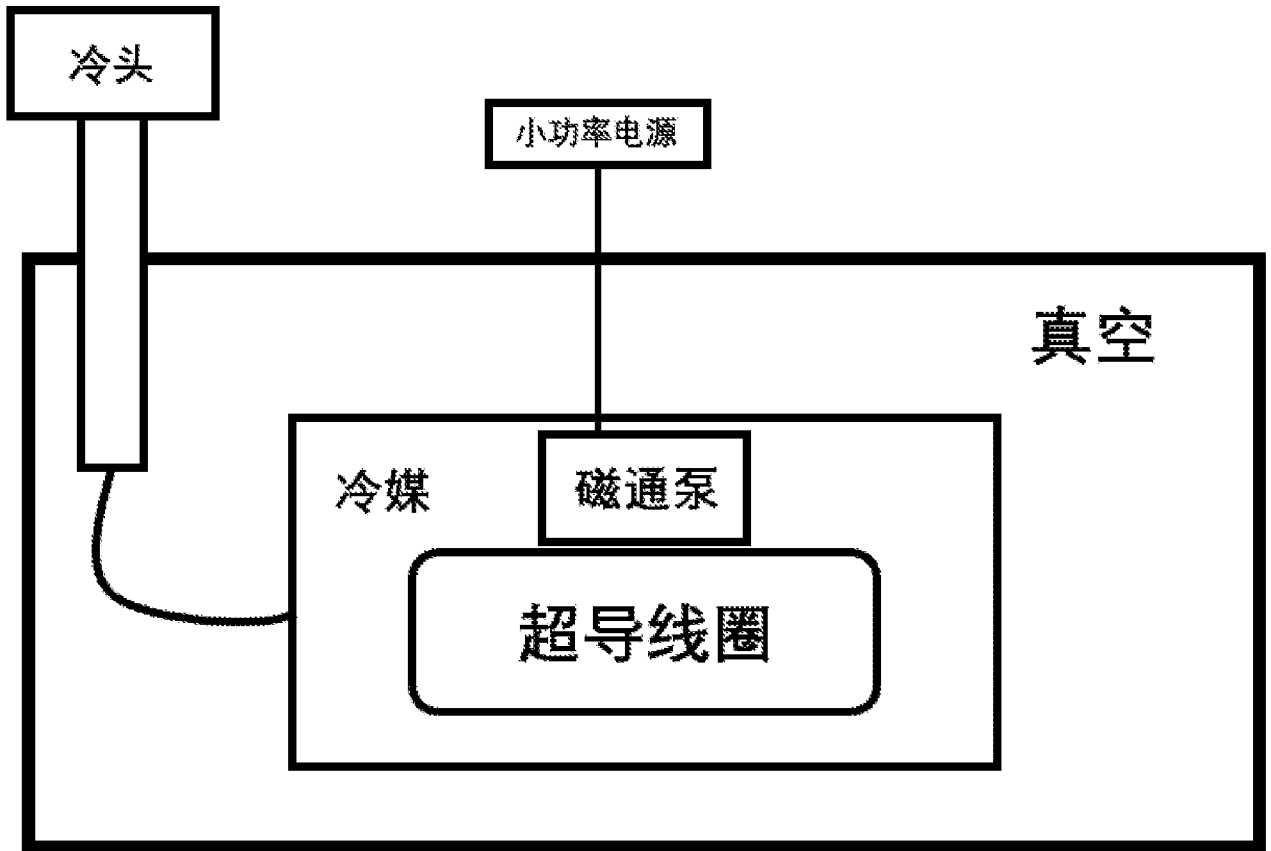


图 3

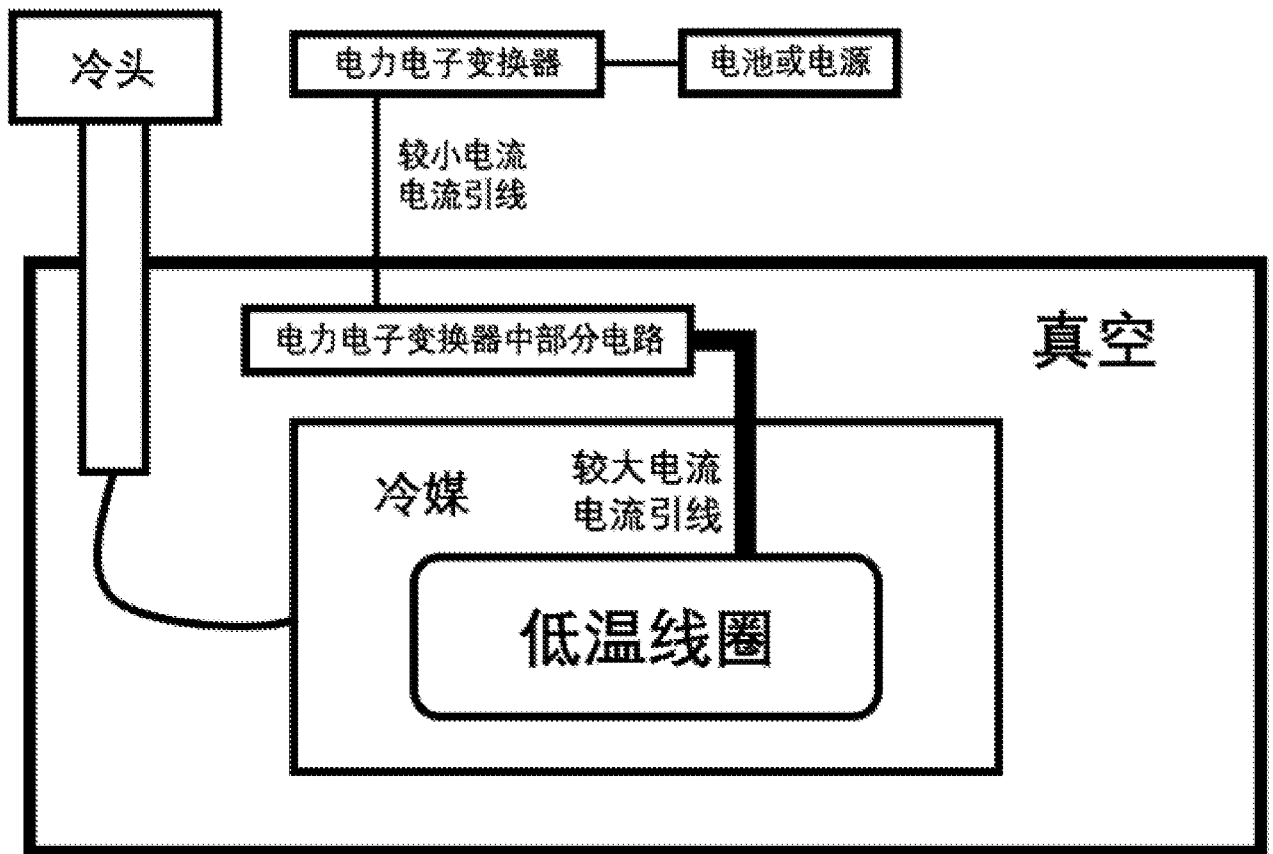


图 4a

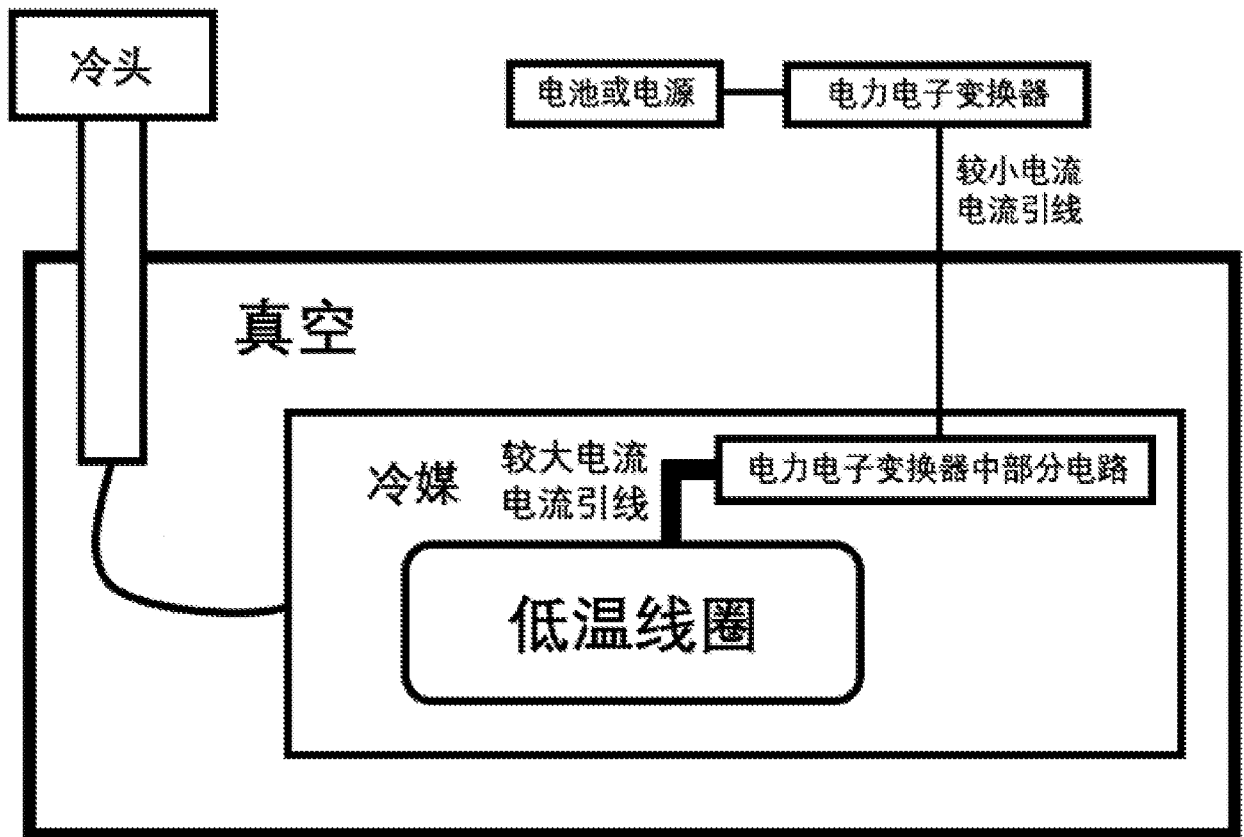


图 4b

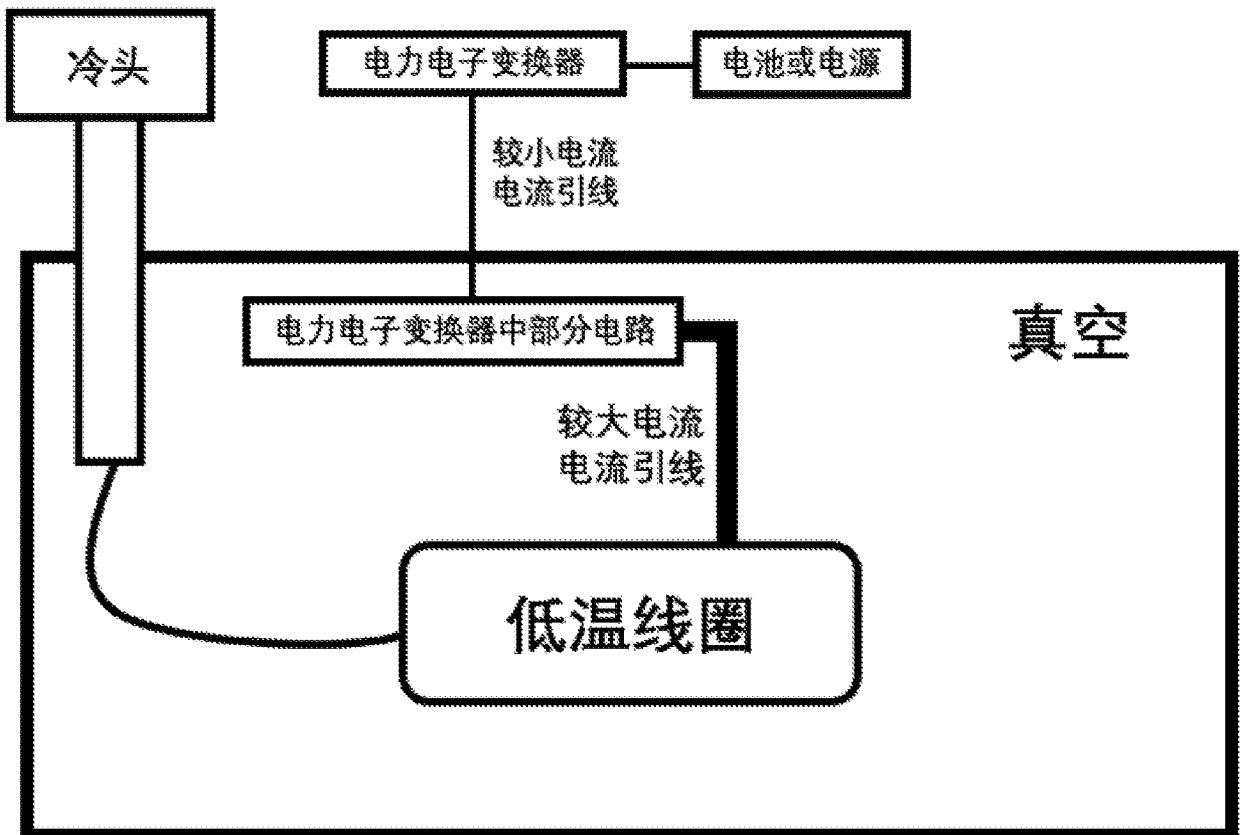


图 4c

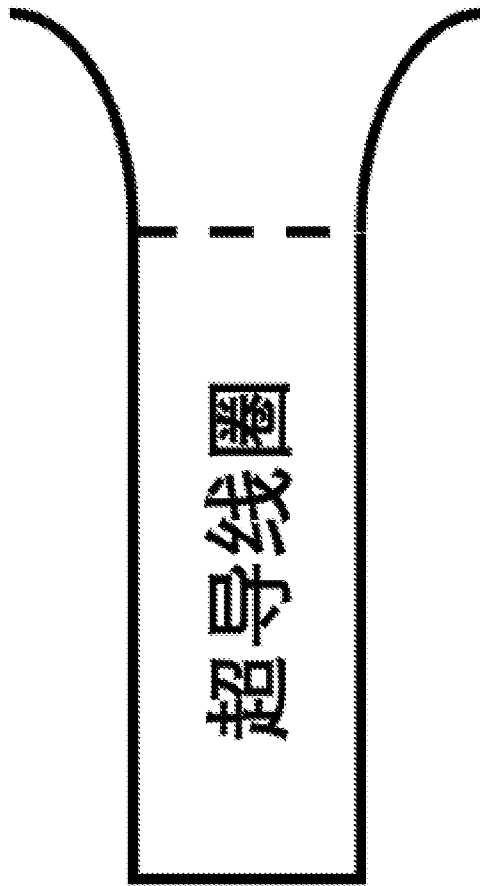


图 4d

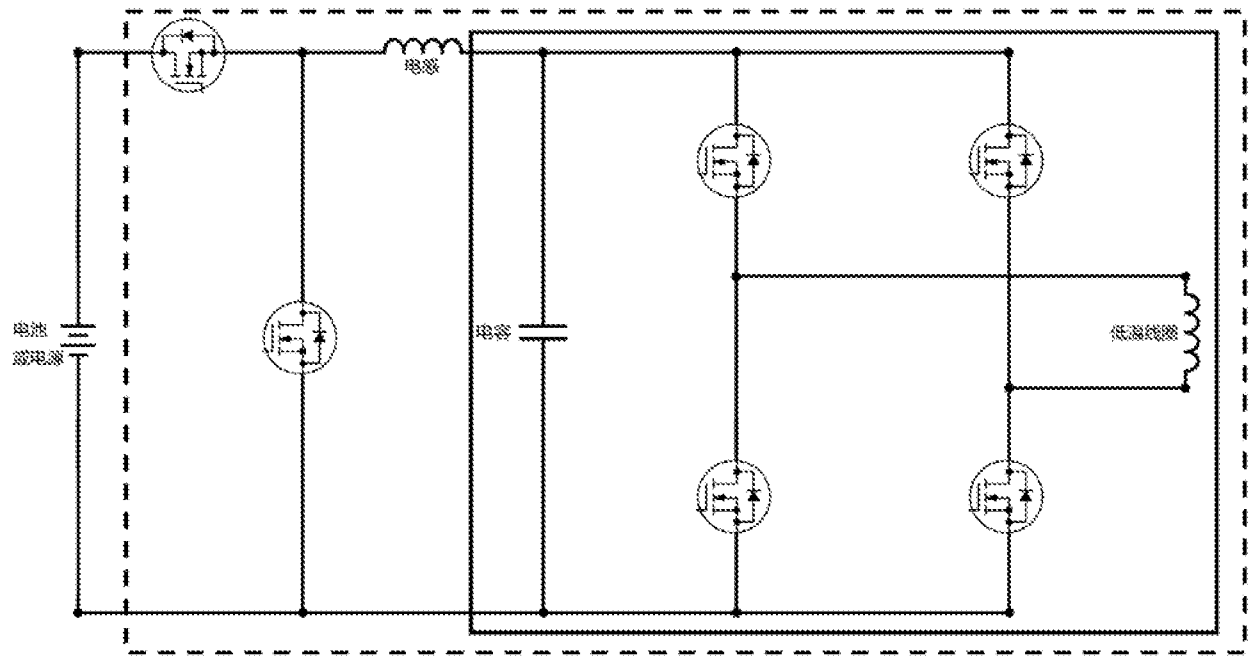


图 5

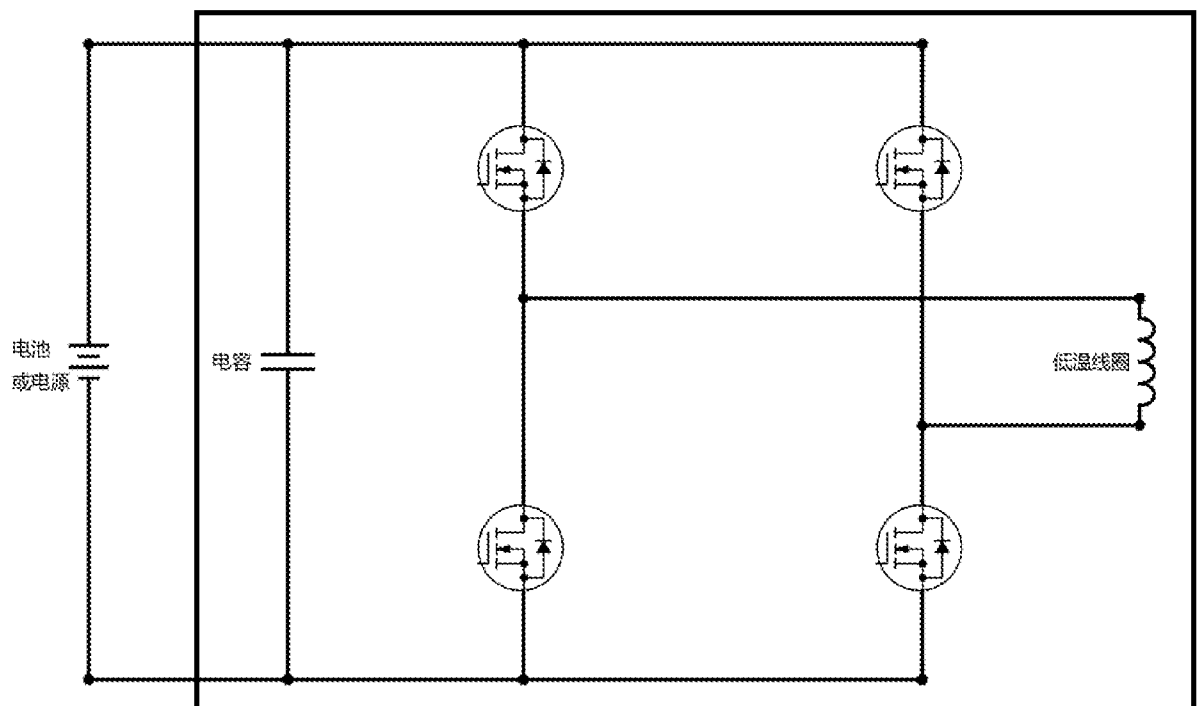


图 6

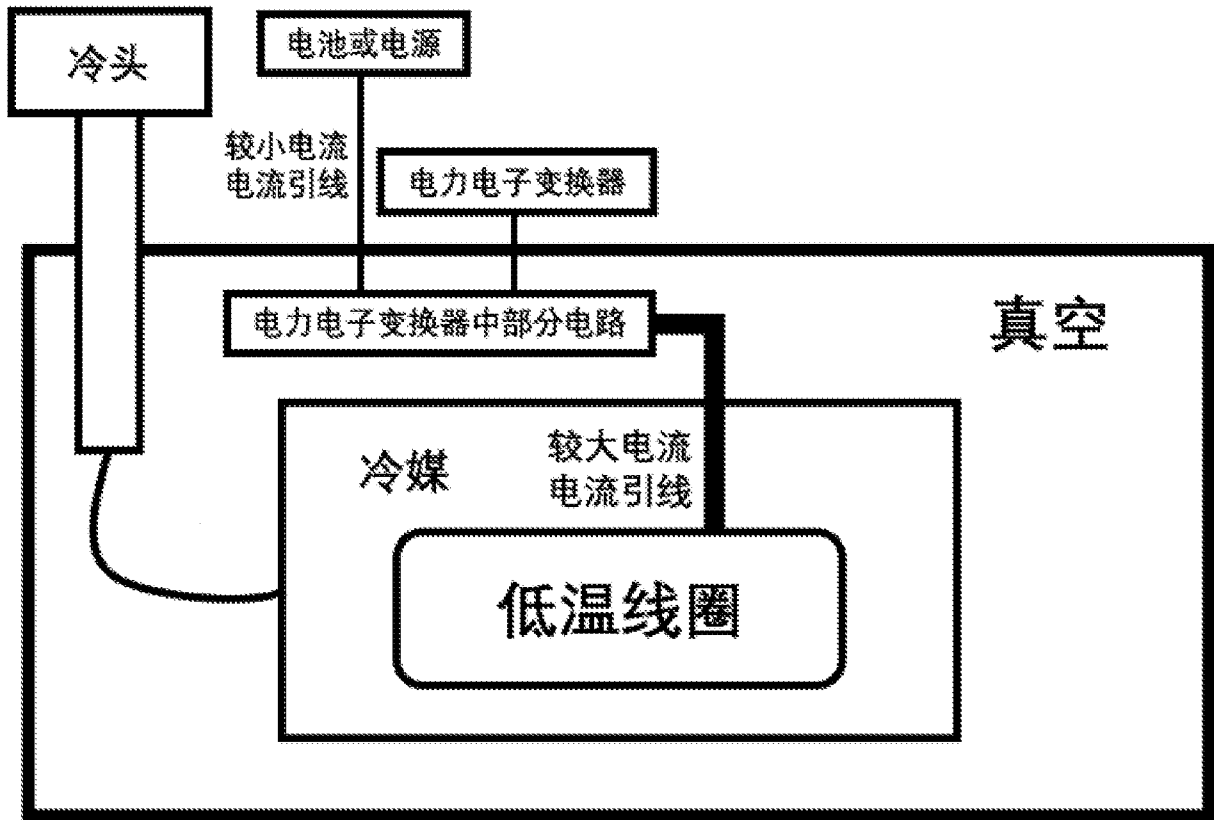


图 7a

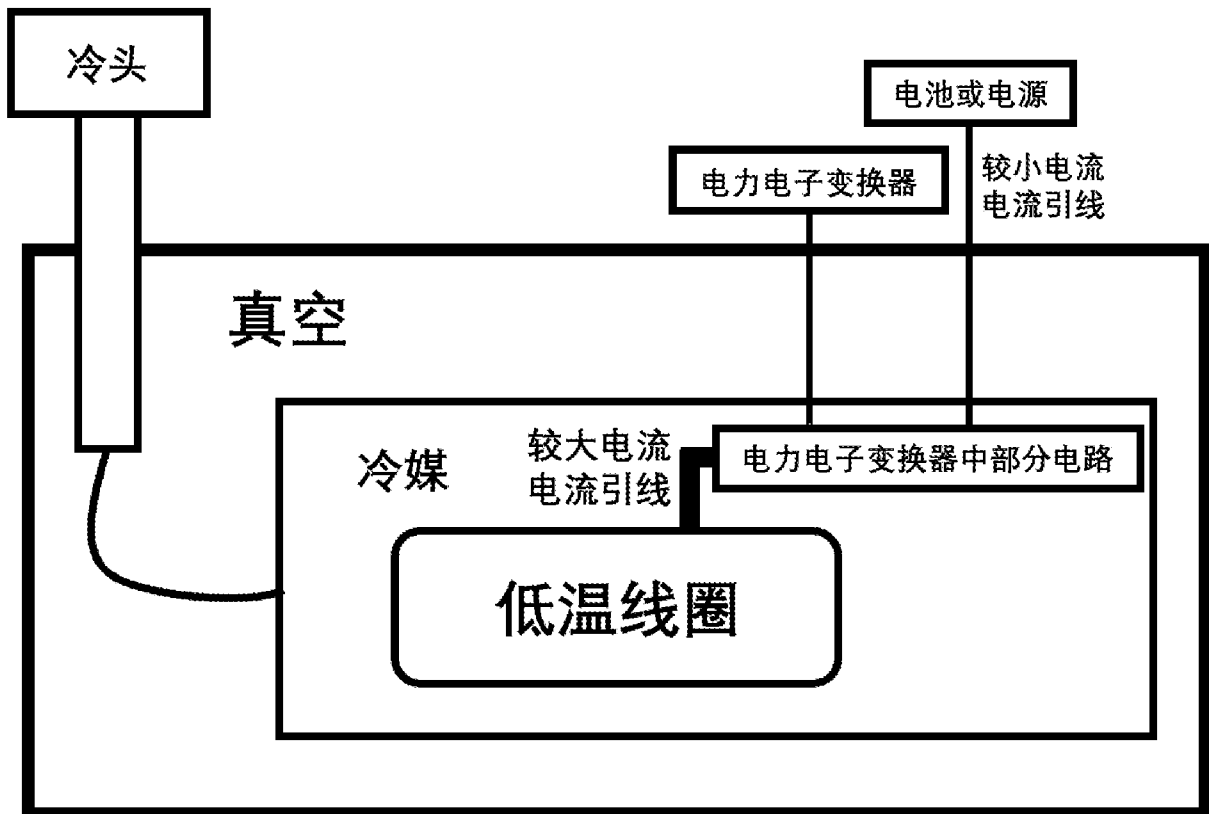


图 7b

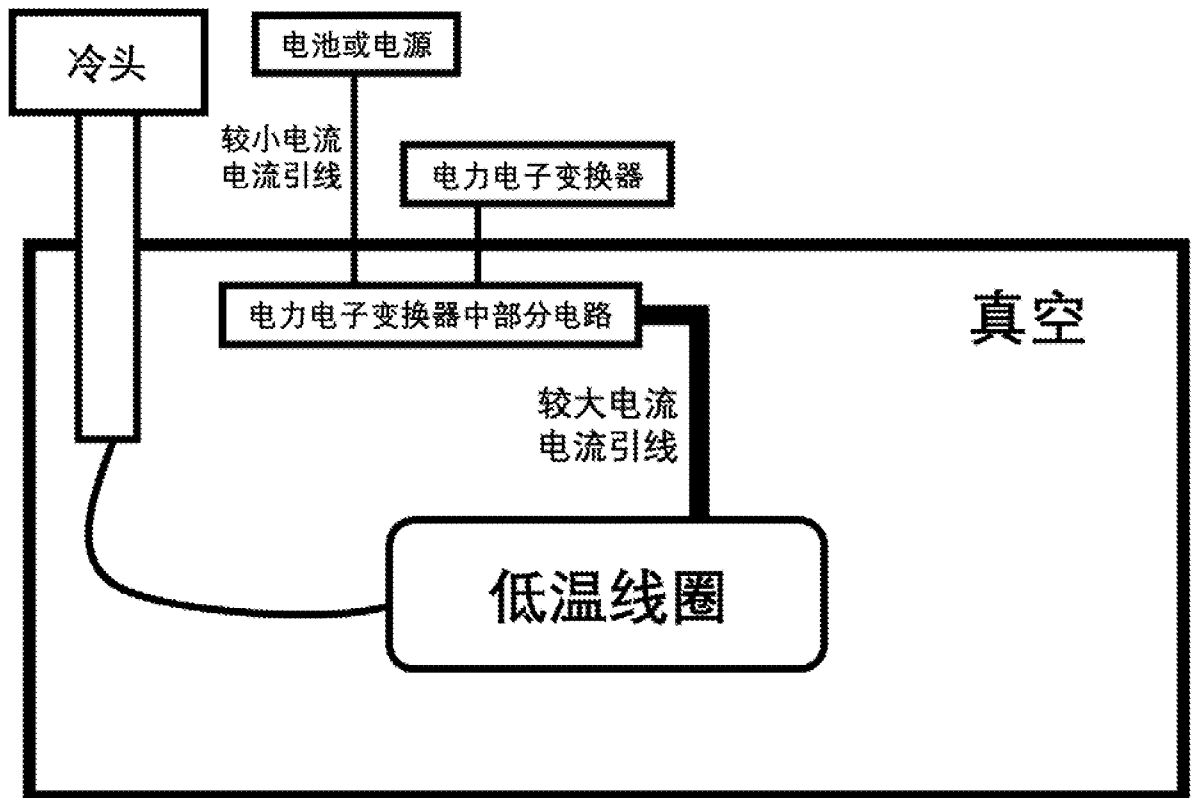


图 7c

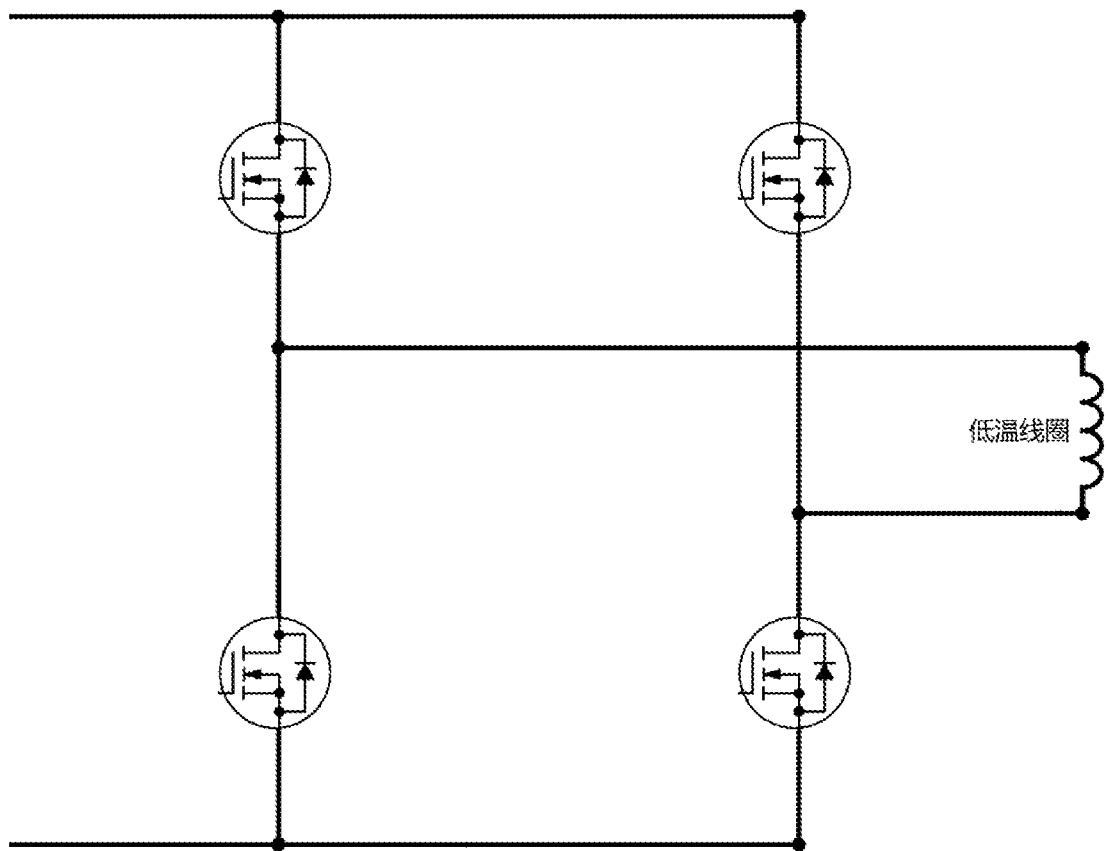


图 8a

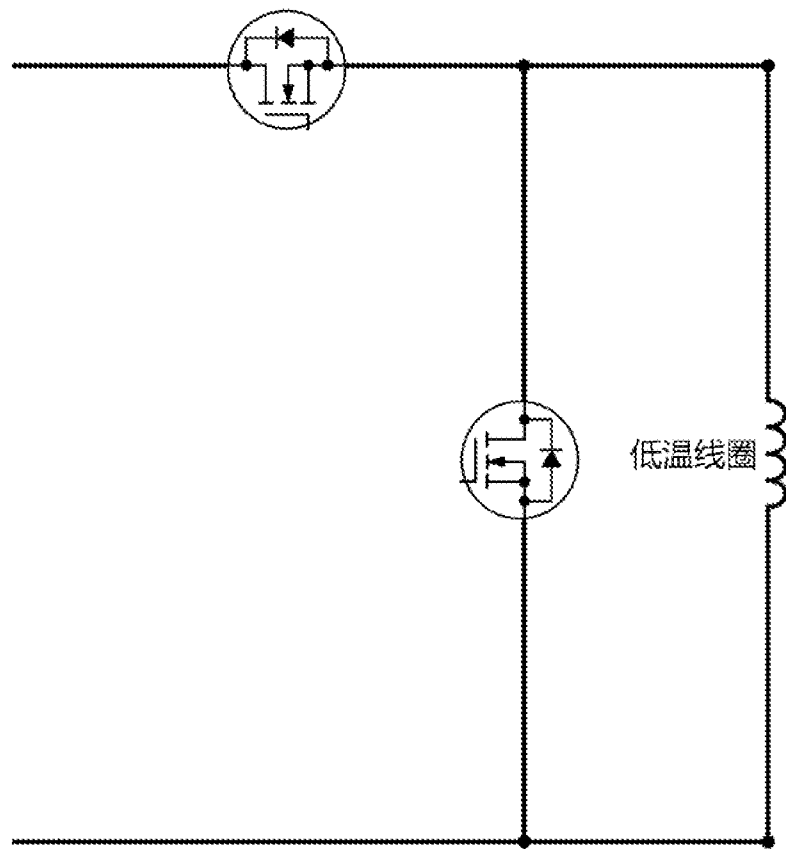


图 8b

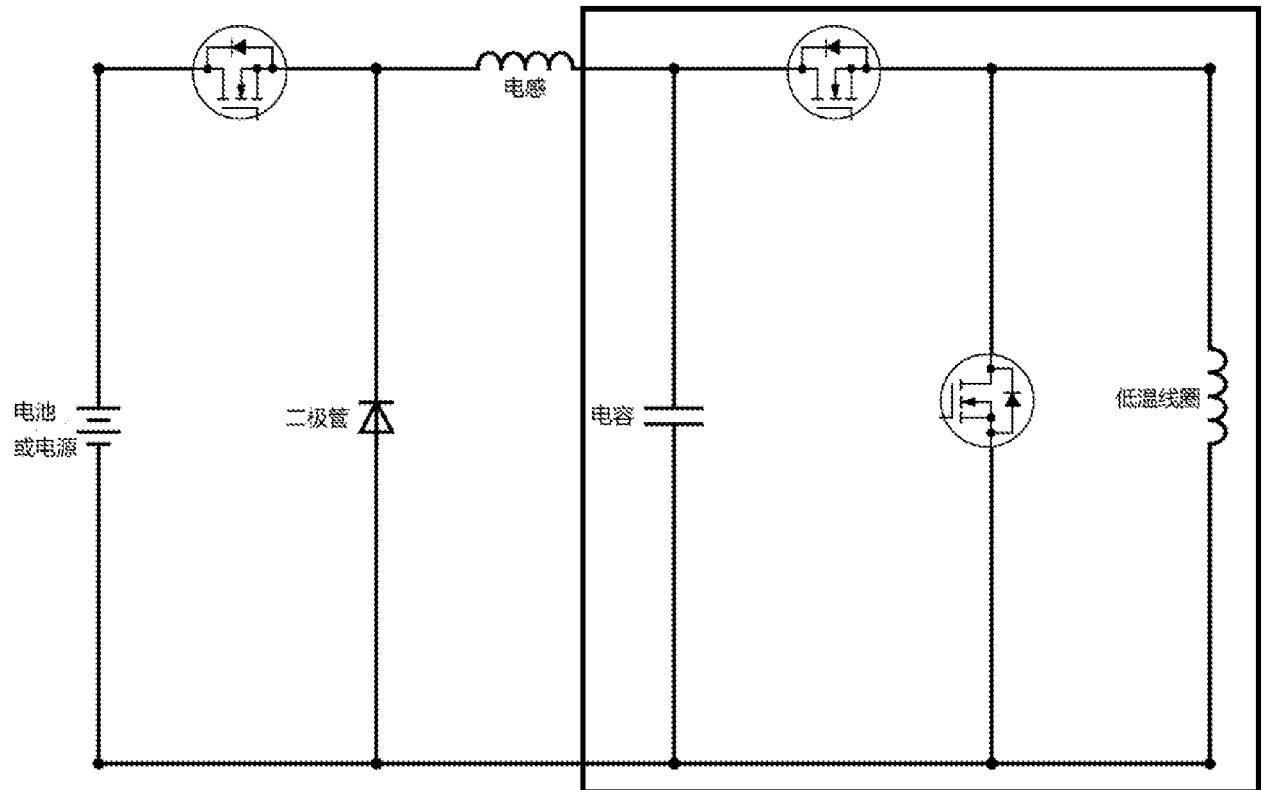


图 9

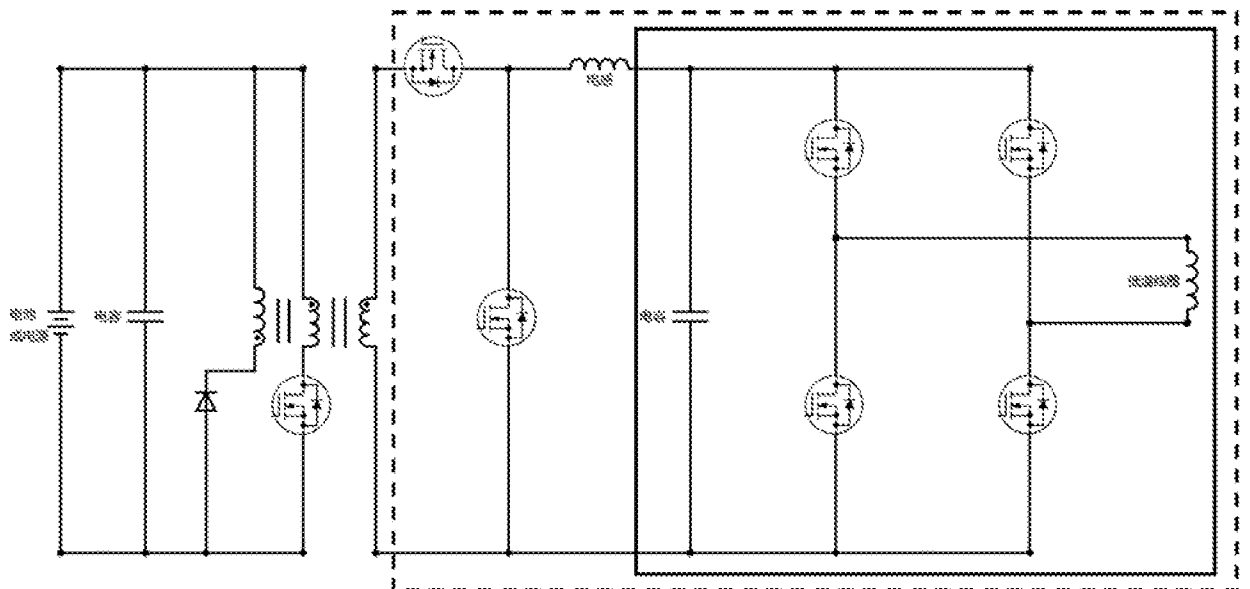


图 10

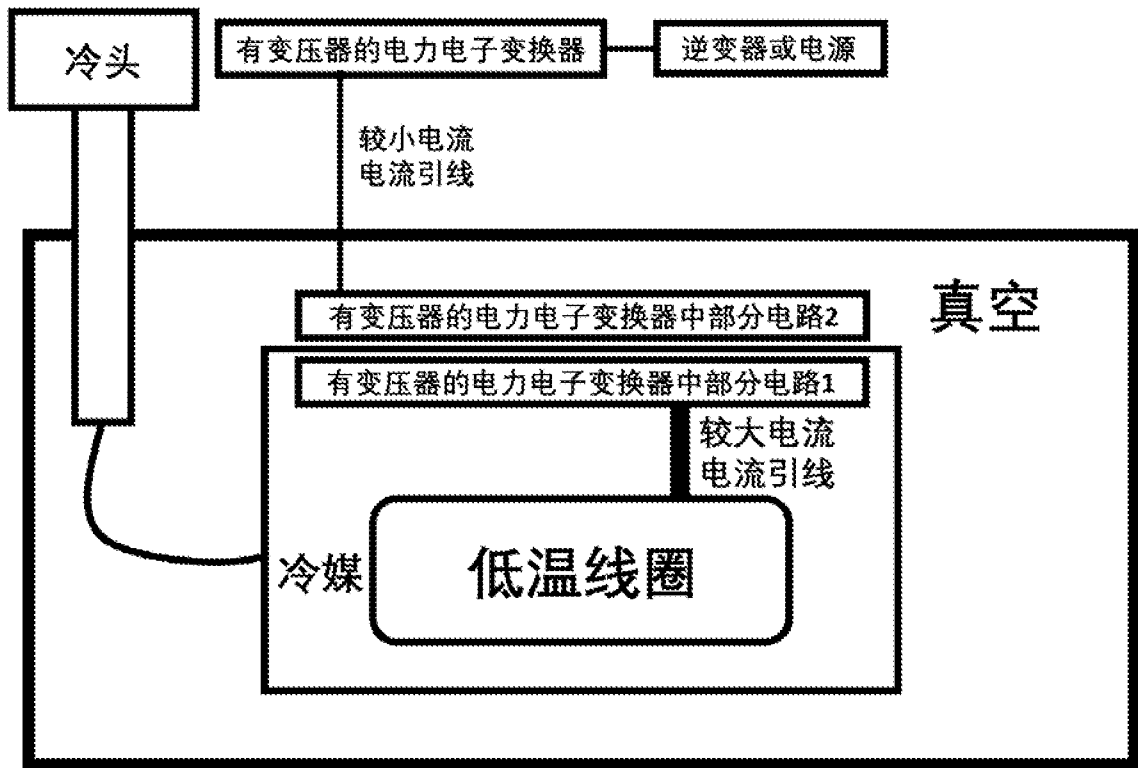


图 11a

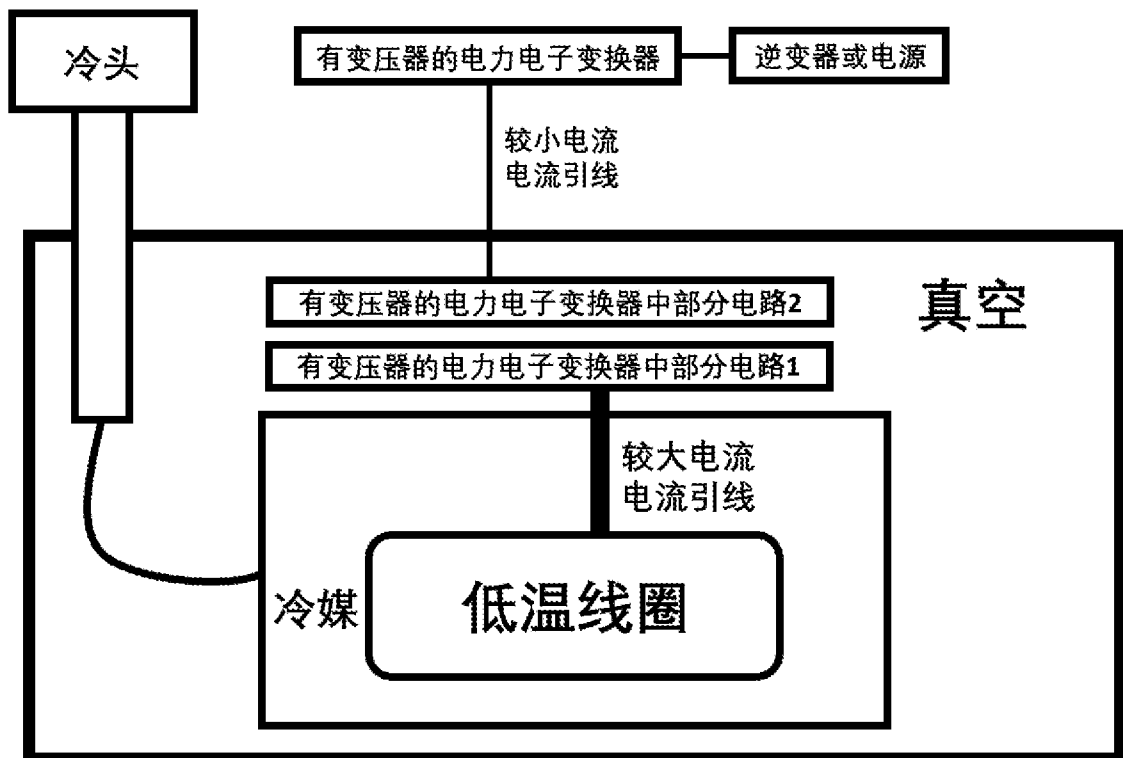


图 11b

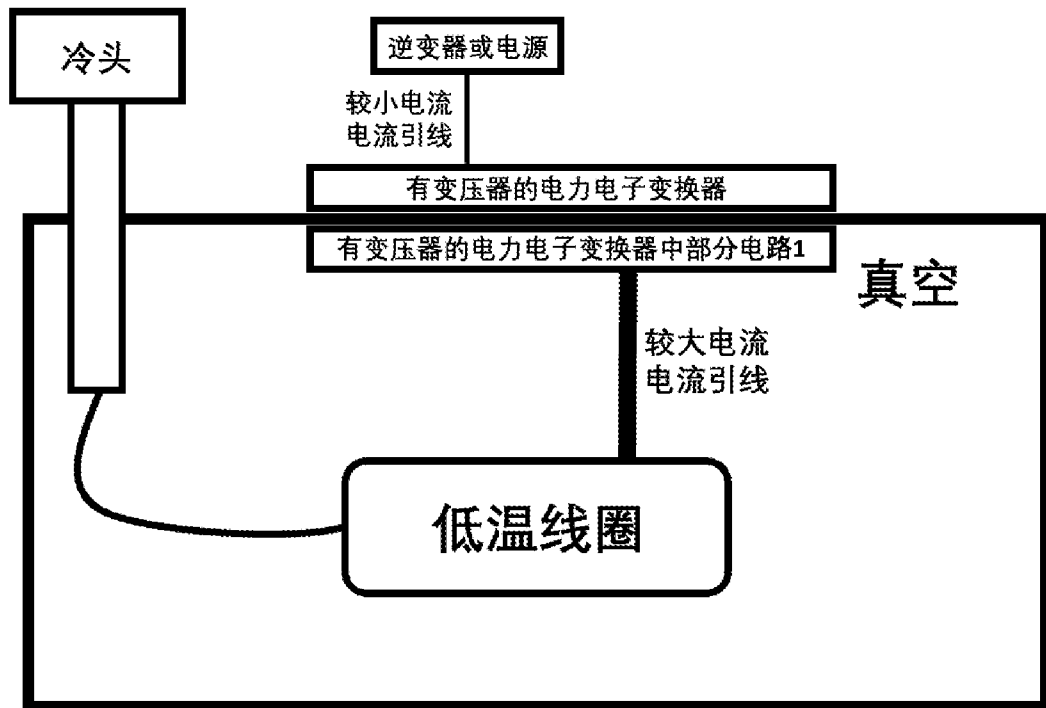


图 11c

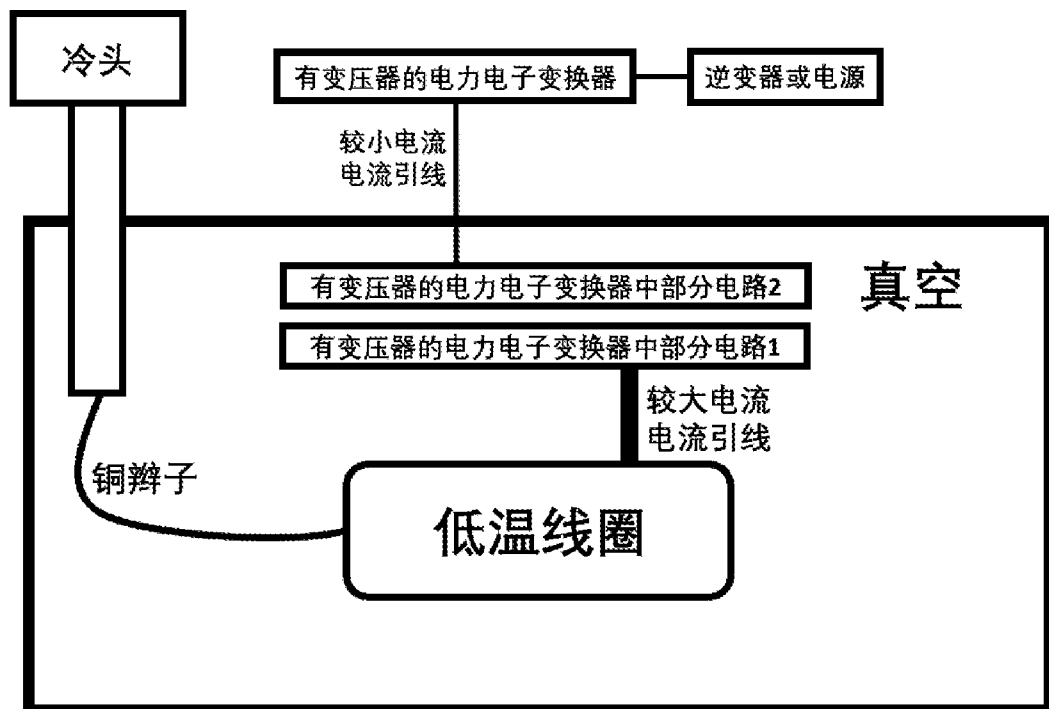


图 11d

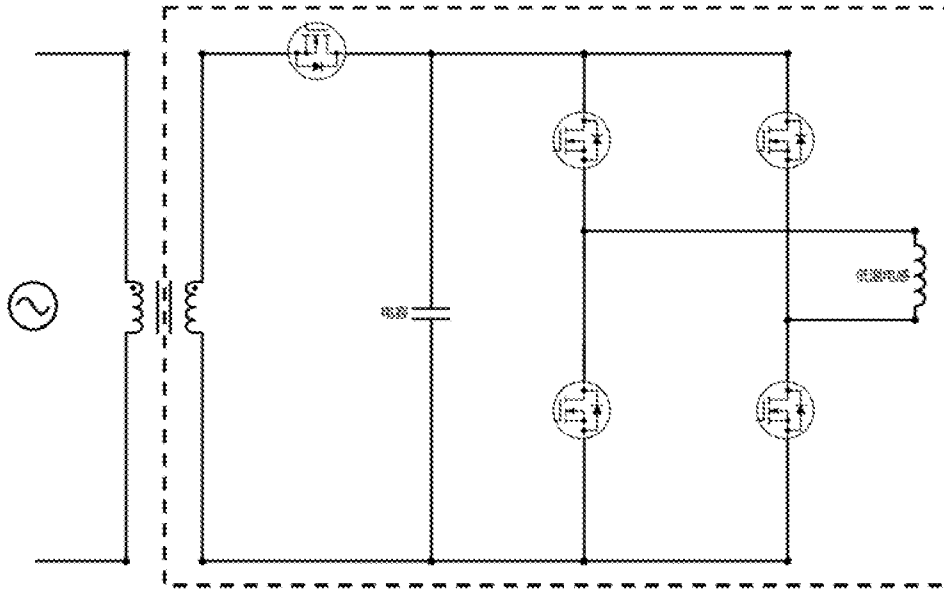


图 12

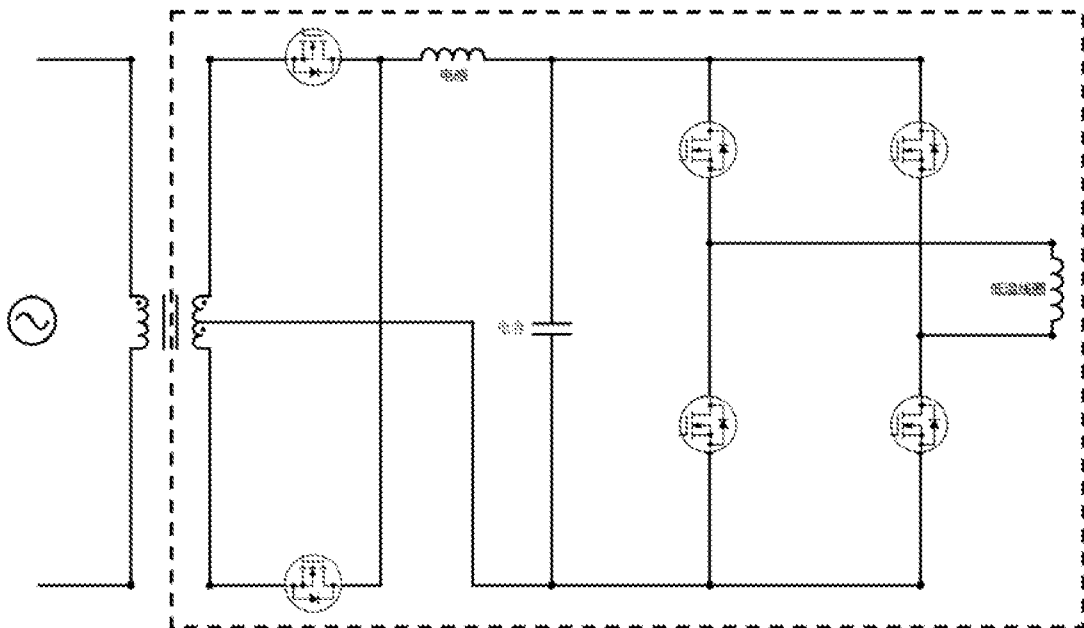


图 13

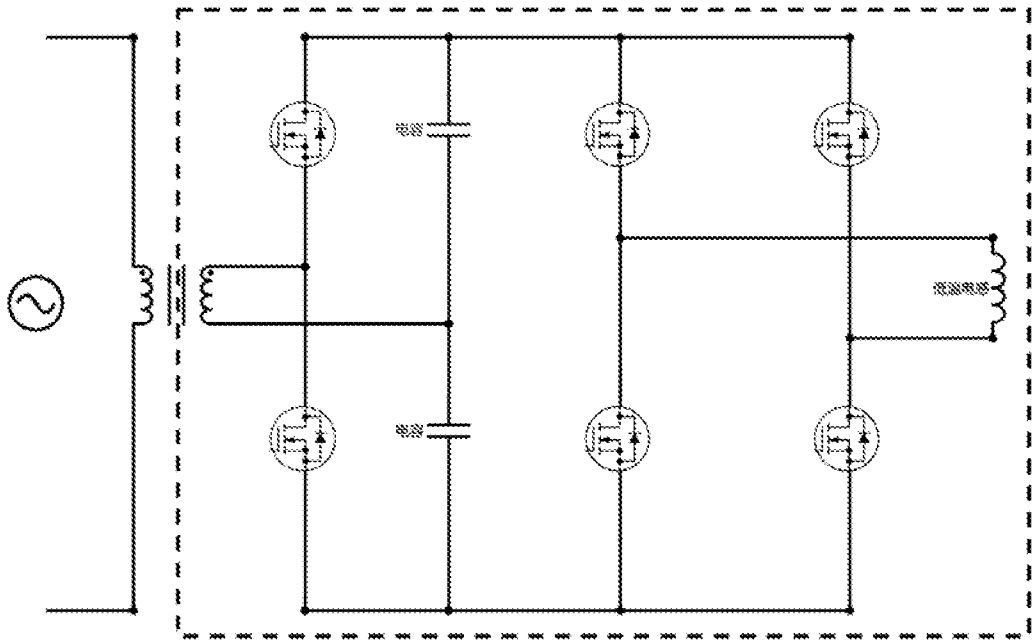


图 14

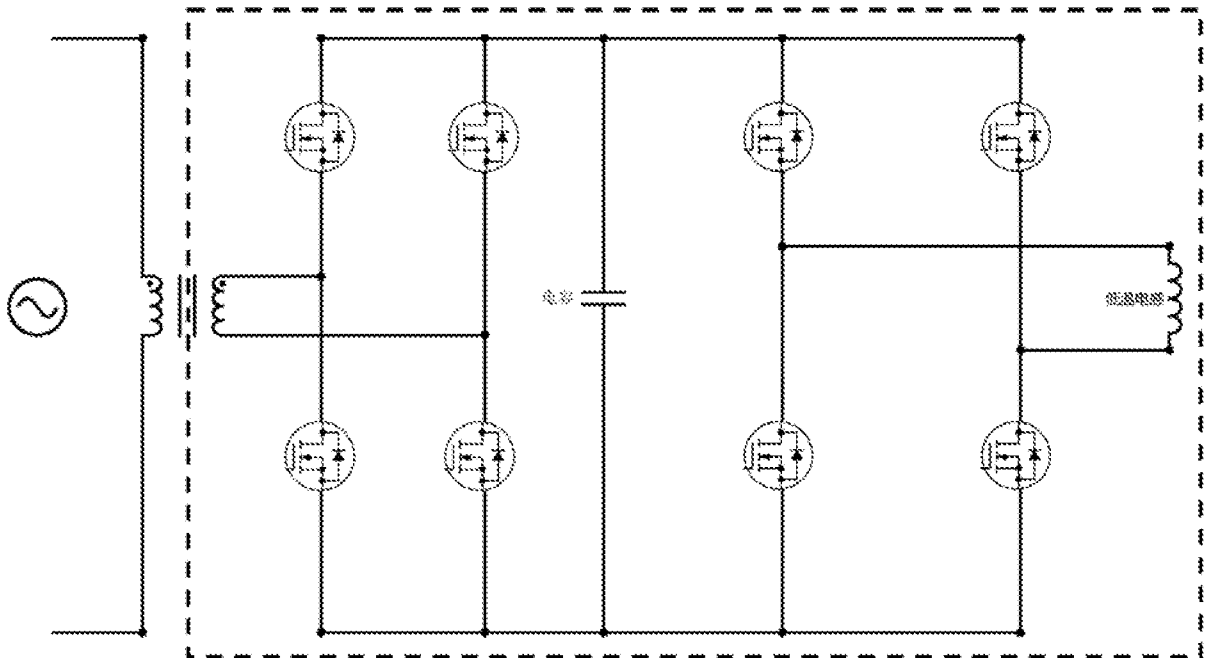


图 15

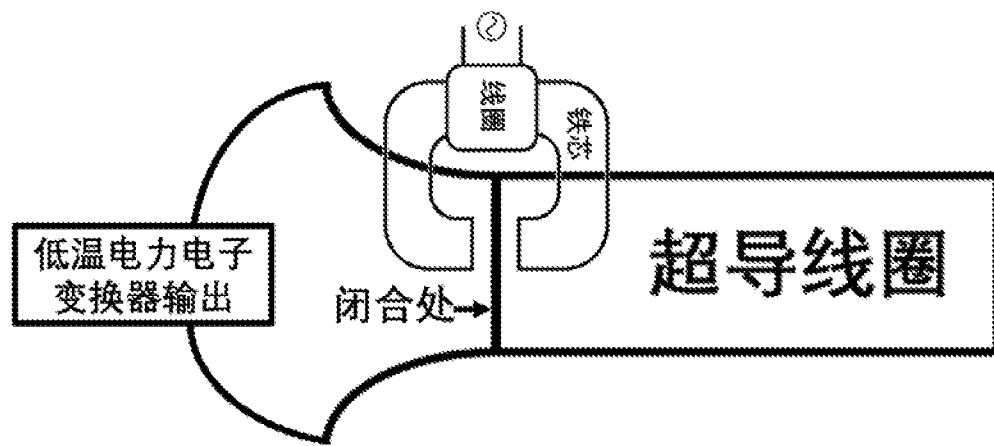


图 16

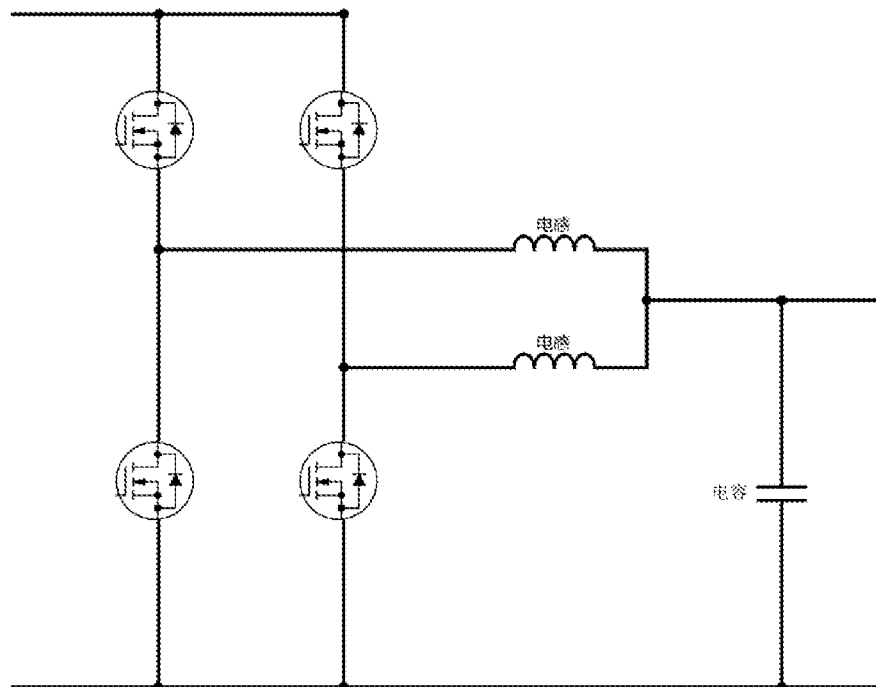


图 17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/071412

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01F 6/00(2006.01)i; H02M 3/335(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01F6; H02M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNABS, CNTXT, DWPI, SIPOABS: 超导, 低温, 线圈, 变换, 转换, 真空, 冷, superconduct, low temperature, coil, winding, convert+, invert+, vacuum, cold, cool

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 1874131 A (INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERING, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 06 December 2006 (2006-12-06) see description, page 4, line 22 to page 11, line 6, and figures 1-5	1-35
Y	CN 107110934 A (GENERAL ELECTRIC COMPANY) 29 August 2017 (2017-08-29) see description, paragraphs [0017]-[0049], and figures 1-6	1-35
Y	CN 1757122 A (CENTRAL JAPAN RAILWAY COMPANY) 05 April 2006 (2006-04-05) see description, page 6, line 10 to page 11, line 5, and figures 1-5	1-35
A	US 2018287407 A1 (SAYRE CHAUNCEY BIGELOW) 04 October 2018 (2018-10-04) entire document	1-35



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 March 2020

Date of mailing of the international search report

09 April 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/071412

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	1874131	A	06 December 2006	CN	100527582	C	12 August 2009
CN	107110934	A	29 August 2017	US	2016187439	A1	30 June 2016
				US	9874618	B2	23 January 2018
				WO	2016106037	A1	30 June 2016
CN	1757122	A	05 April 2006	RU	2005130985	A	10 July 2006
				EP	1601029	A1	30 November 2005
				JP	2004273621	A	30 September 2004
				US	7224250	B2	29 May 2007
				US	2006279387	A1	14 December 2006
				WO	2004079831	A1	16 September 2004
				KR	20050105276	A	03 November 2005
				JP	3983186	B2	26 September 2007
				CN	100413110	C	20 August 2008
US	2018287407	A1	04 October 2018	WO	2018183579	A1	04 October 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/071412

A. 主题的分类

H01F 6/00 (2006.01)i; H02M 3/335 (2006.01)n

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H01F6; H02M

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNKI, CNABS, CNTXT, DWPI, SIPOABS: 超导, 低温, 线圈, 变换, 转换, 真空, 冷, superconduct, low temperature, coil, winding, convert+, invert+, vacuum, cold, cool

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 1874131 A (中国科学院电工研究所) 2006年 12月 6日 (2006 - 12 - 06) 参见说明书第4页第22行-第11页第6行及附图1-5	1-35
Y	CN 107110934 A (通用电气公司) 2017年 8月 29日 (2017 - 08 - 29) 参见说明书第17-49段及附图1-6	1-35
Y	CN 1757122 A (东海旅客铁道株式会社) 2006年 4月 5日 (2006 - 04 - 05) 参见说明书第6页第10行-第11页第5行及附图1-5	1-35
A	US 2018287407 A1 (CHAUNCEY BIGELOW SAYRE) 2018年 10月 4日 (2018 - 10 - 04) 全文	1-35

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2020年 3月 27日

国际检索报告邮寄日期

2020年 4月 9日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

李路

电话号码 (86-10) 62411656

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/071412

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	1874131	A	2006年 12月 6日	CN	100527582	C	2009年 8月 12日
CN	107110934	A	2017年 8月 29日	US	2016187439	A1	2016年 6月 30日
				US	9874618	B2	2018年 1月 23日
				WO	2016106037	A1	2016年 6月 30日
CN	1757122	A	2006年 4月 5日	RU	2005130985	A	2006年 7月 10日
				EP	1601029	A1	2005年 11月 30日
				JP	2004273621	A	2004年 9月 30日
				US	7224250	B2	2007年 5月 29日
				US	2006279387	A1	2006年 12月 14日
				WO	2004079831	A1	2004年 9月 16日
				KR	20050105276	A	2005年 11月 3日
				JP	3983186	B2	2007年 9月 26日
				CN	100413110	C	2008年 8月 20日
US	2018287407	A1	2018年 10月 4日	WO	2018183579	A1	2018年 10月 4日