

(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
2021 年 6 月 17 日 (17.06.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/114604 A1

(51) 国际专利分类号:
G01V 7/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/097619

(22) 国际申请日: 2020 年 6 月 23 日 (23.06.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201911284211.1 2019 年 12 月 13 日 (13.12.2019) CN

(71) 申请人: 华中科技大学(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。

(72) 发明人: 刘向东(LIU, Xiangdong); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 刘习凯(LIU, Xikai); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 马东(MA, Dong); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 王璐璐(WANG, Lulu); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。

(74) 代理人: 武汉华之喻知识产权代理有限公司 (WUHAN HUAZHIYU INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国湖北省武汉市东湖高新区佳园路 2 号高科大厦 7028, Hubei 430074 (CN)。

(54) Title: SUPERCONDUCTING GRAVITY GRADIOMETER, AND METHOD FOR IMPROVING SENSITIVITY THEREOF

(54) 发明名称: 一种超导重力梯度仪及其灵敏度的提高方法

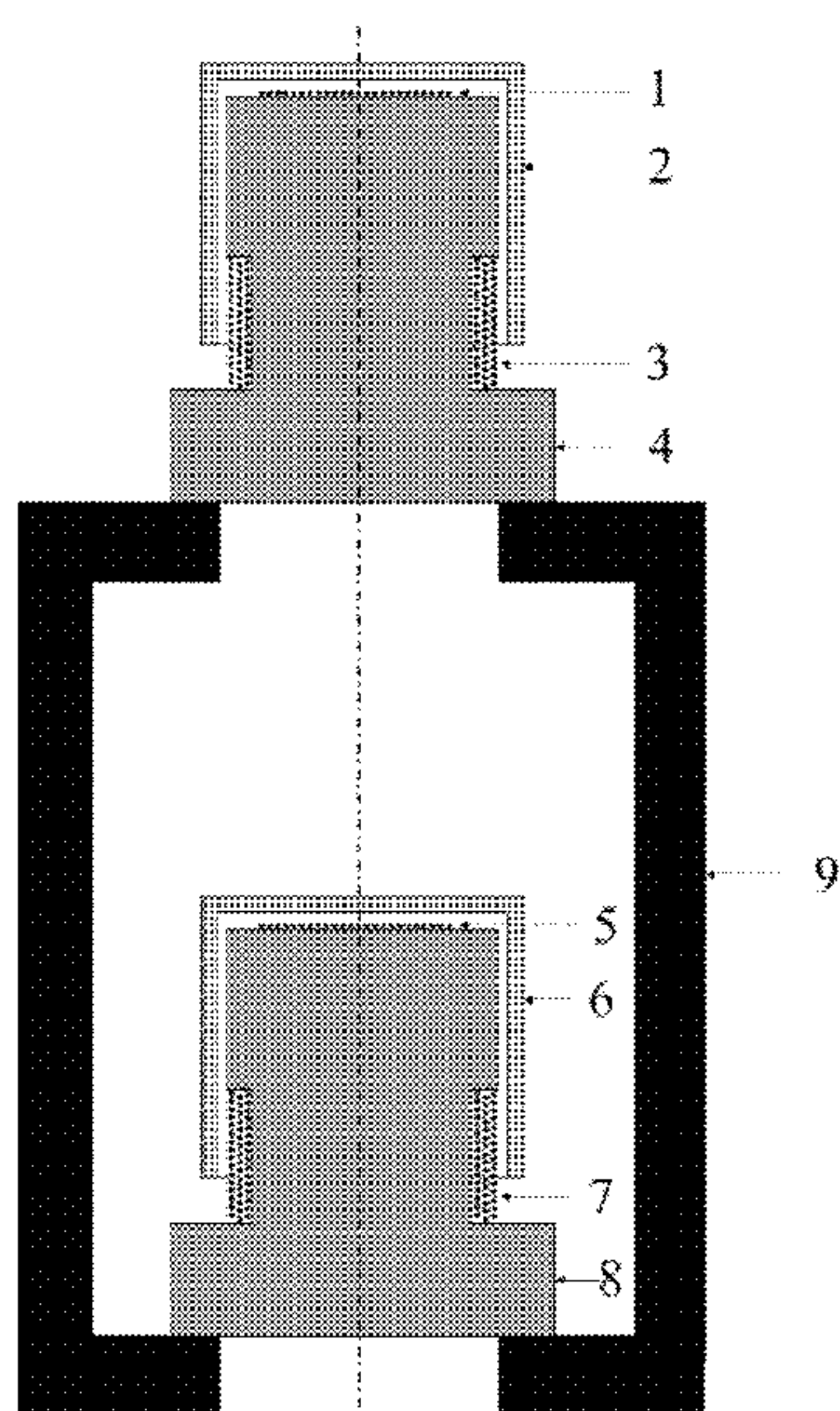


图 1

(57) Abstract: A superconducting gravity gradiometer, and a method for improving the sensitivity thereof. The superconducting gravity gradiometer comprises: paired superconducting test masses (2, 6), paired negative-stiffness superconducting coils (3, 7), paired positive-stiffness superconducting coils (1, 5) and a superconducting circuit for coupling the paired test masses (2, 6) to create a two-degrees-of-freedom superconducting magnetic spring oscillator. The main points of the superconducting gravity gradiometer lie in that the negative-stiffness superconducting coils (3, 7) are introduced, and the negative-stiffness superconducting coils (3, 7) are connected in series by using a superconducting wire to form the superconducting circuit, so as to reduce the differential-mode stiffness of the two-degrees-of-freedom superconducting magnetic spring oscillator, and increase the ratio of common-mode stiffness to the differential-mode stiffness. When the method is used to construct the magnetic spring oscillator of the superconducting gravity gradiometer, especially construct a vertical diagonal component superconducting gravity gradiometer with the fully-magnetically-levitated test masses (2, 6), the sensitivity of gradient measurement can be significantly improved; and a common-mode rejection ratio is increased, thereby rejecting the interference of the motion acceleration of a mounting platform in the gradient measurement.

(57) 摘要: 一种超导重力梯度仪及其灵敏度提高方法, 包括: 成对的超导检验质量 (2, 6)、成对的负刚度超导线圈 (3, 7)、成对的正刚度超导线圈 (1, 5) 以及将成对检验质量 (2, 6) 耦合成两自由度超导磁力弹簧振子的超导电路。其要点是引入负刚度超导线圈 (3, 7), 并使用超导线将负刚度超导线圈 (3, 7) 串联成超导回路, 降低两自由度超导磁力弹簧振子的差模刚度, 增大共模刚度与差模刚度的比值。使用该方法构建超导重力梯度仪的磁力弹簧振子, 特别是构建检验质量 (2, 6) 全磁悬浮的垂向对角分量超导重力梯度仪时, 能显著提高梯度测量的灵敏度; 增大共模抑制比, 抑制安装平台运动加速度对梯度测量的干扰。

(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, 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))。

一种超导重力梯度仪及其灵敏度的提高方法

【技术领域】

本发明涉及重力测量技术领域，更具体地，涉及一种超导重力梯度仪及其灵敏度的提高方法。

【背景技术】

超导重力梯度仪是利用超导电性构建的时变重力梯度测量仪器，工作在 4.2K 液氦温度，具有仪器固有噪声低、分辨率高、格值稳定等优点。以矿产资源勘查为应用目标的航空超导重力梯度仪，具有突破常温重力梯度测量仪器的分辨率极限的潜力，可望成为深部资源勘查的重要工具。

一种典型的超导重力梯度仪构建方法是利用超导体载流线圈与超导检验质量之间的磁相互作用，使用超导电路将成对的分开放置的超导检验质量耦合成一个两自由度的磁力弹簧振子，振子运动可分解为共模与差模两种自然模态，通过测量振子的差模位移，给出重力梯度随时间的变化量。

对于构建梯度仪的耦合磁力弹簧振子，希望其差模刚度小，共模刚度大。重力梯度是以差分重力加速度的形式被测量，小的差模刚度意味着从重力梯度到差分位移的传递函数大，有利于提高仪器的灵敏度与分辨率。在运动平台上，平台的运动加速度以共模加速度的形式被仪器感知，是需要通过差分扣除的，大的共模刚度意味着对平台运动不敏感，有利于提高仪器的共模抑制比，弱化仪器安装平台振动对梯度测量的干扰。

在超导重力梯度仪中，有多种因素限制了共模差模刚度比值的提高。例如，在测量重力梯度的垂向对角分量的检验质量全磁悬浮超导重力梯度仪中，超导线圈与检验质量之间的磁斥力需要足够大，能够抵消检验质量所受的重力，从而悬浮检验质量。受这一因素的限制，现有技术中的差模固有频率一般大于 10Hz，共模刚度与差模刚度比值也较小。

【发明内容】

针对现有技术的缺陷，本发明的目的在于解决现有超导重力梯度仪的共模差模刚度比值提高受限制，不利于提高重力梯度仪的灵敏度和分辨率的技术问题。

为实现上述目的，第一方面，本发明提供一种超导重力梯度仪，包括：两组超导磁力弹簧振子和超导电路；

每组超导磁力弹簧振子包括：密绕盘型超导线圈、检验质量、螺线管超导线圈以及线圈骨架；检验质量为下方开口的半封闭超导筒体；所述线圈骨架位于检验质量的下方；所述单层密绕盘型超导线圈绕制在线圈骨架的顶部，螺线管超导线圈绕制在线圈骨架的底部；单层密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈与检验质量之间的磁斥力平衡检验质量的重力，将检验质量进行磁悬浮；所述磁斥力是检验质量位移的函数，检验质量所受磁力和重力的合力具有恢复力的性质，构成超导磁力弹簧振子；

所述单层密绕盘型超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相反，为超导磁力弹簧振子贡献正的刚度；螺线管超导线圈磁力线的一部分处于检验质量的封闭空间内呈压缩状态，另一部分处于检验质量的封闭空间外呈扩展状态，螺线管超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相同，为超导磁力弹簧振子贡献负的刚度；所述超导磁力弹簧振子的刚度通过单层密绕盘型超导线圈的电流值和螺线管超导线圈的电流值调节；

所述超导电路通过超导线将两组超导磁力弹簧振子的密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈连接构成超导回路，以将两组超导磁力弹簧振子耦合成为两自由度的弹簧振子，构成超导重力梯度仪；所述超导重力梯度仪的共模刚度与差模刚度的比值相比不包括螺线管超导线圈的超导重力梯度仪的共模刚度与差模刚度的比值高。

可选地，所述超导重力梯度仪的共模刚度 k_c 和差模刚度 k_d 分别为：

$$\begin{cases} K_d = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{L_p I_0^2}{L_0 + 2L_p} \\ K_e = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \frac{i_0^2}{l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{I_0^2}{L_0} \end{cases}$$

其中, L_0 、 I_0 分别表示平衡位置处正刚度单层密绕盘型超导线圈的有效电感和超导电流强度, l_0 、 i_0 分别表示平衡位置处负刚度螺线管超导线圈的有效电感和超导电流强度, $l(z)$ 表示负刚度螺线管超导线圈随检验质量位移变化的有效电感, $L(z)$ 表示单层密绕盘型超导线圈随检验质量位移变化的有效电感, L_p 表示超导电路中间支路所接电感, z 表示检验质量相对于平衡位置的位移。

可选地, $d^2 L(z)/dz^2 < 0$; $d^2 l(z)/dz^2 > 0$ 。

可选地, 该超导重力梯度仪还包括: 结构件; 所述结构件用于上下连接两组超导磁力弹簧振子的线圈骨架。

可选地, 所述密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈均可以包括多组超导线圈。

第二方面, 本发明提供一种超导重力梯度仪灵敏度的提高方法, 所述超导重力梯度仪包括两个自由度的超导磁力弹簧振子, 该方法包括如下步骤:

在所述两个自由度的超导磁力弹簧振子中均引入负刚度超导线圈;

通过超导线圈将负刚度超导线圈串联成超导回路, 以降低所述超导重力梯度仪的差模刚度, 提高所述超导重力梯度仪的灵敏度。

可选地, 每个自由度的超导磁力弹簧振子包括: 密绕盘型超导线圈、检验质量以及线圈骨架; 检验质量为下方开口的半封闭超导筒体; 所述线圈骨架位于检验质量的下方; 所述单层密绕盘型超导线圈绕制在线圈骨架的顶部; 单层密绕盘型超导线圈与检验质量之间的磁斥力平衡检验质量的重力, 将检验质量进行磁悬浮; 所述磁斥力是检验质量位移的函数, 检验质量所受磁力和重力的合力具有恢复力的性质, 构成超导磁力弹簧振子;

所述单层密绕盘型超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相反，为超导磁力弹簧振子贡献正的刚度；

在所述两个自由度的超导磁力弹簧振子中均引入负刚度超导线圈，包括如下步骤：

在两个线圈骨架的底部均绕制螺线管超导线圈，所述螺线管超导线圈磁力线的一部分处于检验质量的封闭空间内呈压缩状态，另一部分处于检验质量的封闭空间外呈扩展状态，螺线管超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相同，为超导磁力弹簧振子贡献负的刚度；所述超导磁力弹簧振子的刚度通过单层密绕盘型超导线圈的电流值和螺线管超导线圈的电流值调节。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，具有以下有益效果：

本发明提供一种超导重力梯度仪及其灵敏度的提高方法，在构建超导重力梯度仪的双检验质量两自由度超导磁力弹簧振子中，引入成对的负刚度超导线圈，分别与超导检验质量相互作用，负刚度超导线圈以串联的形式包含在超导回路中，有效地降低弹簧振子的差模刚度，提高共模刚度与差模刚度的比值，提高了超导重力梯度仪的灵敏度。本发明通过降低差模刚度，增大差模加速度，即重力梯度到差模位移的传递函数，提高梯度测量的灵敏度，降低噪声水平；通过提高共模刚度与差模刚度的比值，提高共模抑制比，抑制安装平台运动加速度对梯度测量的干扰。

【附图说明】

图 1 为本发明提供的超导重力梯度仪的结构示意图；

图 2 为本发明提供的超导重力梯度仪的正刚度超导线圈的超导电路等效示意图；

图 3 为本发明提供的超导重力梯度仪的负刚度超导线圈的超导电路等效示意图；

图 4 为本发明提供的正刚度超导线圈有效电感对位移的关系曲线示意图；

图 5 为本发明提供的负刚度超导线圈有效电感对位移的关系曲线示意图；

在所有附图中，相同的附图标记用来表示相同的元件或结构，其中，1 为上部单层密绕盘型超导线圈、2 为上部检验质量、3 为上部螺线管超导线圈、4 为上部线圈骨架、5 为下部单层密绕盘型超导线圈、6 为下部检验质量、7 为下部螺线管超导线圈、8 为下部线圈骨架以及 9 为结构件。

【具体实施方式】

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

本发明针对现有技术中两自由度超导磁力弹簧振子只包含正刚度超导线圈的情况，提出一种构建差模刚度小、共模刚度与差模刚度比值大的两自由度耦合磁力弹簧振子的方法，其核心是在振子同时包含成对负刚度超导线圈和成对正刚度超导线圈，成对的两个超导线圈分别与两个超导检验质量相互作用，并连接在同一个超导电路中，负刚度超导线圈对的引入显著降低耦合弹簧振子的差模刚度，增大共模刚度与差模刚度比值。利用本发明构建超导重力梯度仪敏感探头，可显著提高梯度测量灵敏度，改善梯度仪抵抗外部振动干扰的能力。

本发明提供一种可应用于构建超导重力梯度仪的耦合超导磁力弹簧振

子，包括：成对的超导检验质量、成对的负刚度超导线圈、成对的正刚度超导线圈以及将成对检验质量耦合成两自由度超导磁力弹簧振子的超导电路。其要点是引入负刚度超导线圈，并使用超导线将负刚度超导线圈串联成超导回路，降低两自由度超导磁力弹簧振子的差模刚度，提高梯度测量的灵敏度；提高共模刚度与差模刚度的比值，抑制安装平台运动加速度对梯度测量的干扰。

图 1 为本发明提供的一种超导重力梯度仪的结构示意图，如图 1 所示，包括：上部单层密绕盘型超导线圈 1、上部检验质量 2、上部螺线管超导线圈 3、上部线圈骨架 4、下部单层密绕盘型超导线圈 5、下部检验质量 6、下部螺线管超导线圈 7、下部线圈骨架 8 以及刚性连接上部线圈骨架 4 和下部线圈骨架 8 的结构件 9。上述上部元件与对应的下部元件具有相同的参数，上部单层密绕盘型超导线圈和螺线管线圈的安装方式与下部相同。上部线圈骨架轴线与下部线圈骨架轴线沿铅垂线相互对准，但上下错开一定距离，该距离为梯度仪的基线。

所述检验质量、负刚度超导线圈、正刚度超导线圈和超导电路的材料均为超导体，所述负刚度超导线圈和正刚度超导线圈在存储超导电流后与检验质量之间存在磁斥力。

根据电磁学原理，磁斥力为 $F(z) = \frac{1}{2} \frac{dL_{eff}(z)}{dz} I^2$ ，式中 $L_{eff}(z)$ 是依赖检验质量位移的超导线圈的有效电感， I 为线圈中的电流。所述正刚度超导线圈是其有效电感 $L_{eff}(z)$ 对检验质量在敏感自由度位移 z 的二阶导数为负值的超导线圈，即 $d^2L_{eff}(z)/dz^2 < 0$ ；所述负刚度超导线圈是其有效电感 $L_{eff}(z)$ 对检验质量在敏感自由度位移 z 的二阶导数为正值的超导线圈，即 $d^2L_{eff}(z)/dz^2 > 0$ 。所述有效电感定义为线圈的磁通量与其电流的比值，线圈磁通量指线圈本身电流产生的磁通和与其相互作用的检验质量表面的超导屏蔽电流产生的磁通之和。与检验质量相互作用的超导线圈的有效电感随检验质量位移变化，两者之间的函数关系表征了载流超导线圈与超导检验质量之间基于迈

斯纳效应的磁相互作用的全部特性。

所述超导电路，是由超导导线将超导线圈连接而成的超导网络，由单个或多个回路构成。回路具有磁通守恒的性质，即 $\sum_{i=1}^2 L_{eff}^i(z_i) I_i(z_1, z_2) + \sum_j L_j I_j(z_1, z_2) = const.$ ，式中 $L_{eff}^i(x_i)$ 是回路中与第 i 个与检验质量相互作用的超导线圈的有效电感，是该检验质量位移的函数， $I_i(z_1, z_2)$ 是流经第 i 个超导线圈的电流，由两个检验质量的位移共同决定； L_j 和 $I_j(z_1, z_2)$ 分别是回路中不与检验质量相互作用的超导线圈和该超导线圈中的超导电流， z_1 是第一个检验质量的位移， z_2 是第二个检验质量的位移。

可以理解的是，将两个超导检验质量分开放置，将分别与两个检验质量相互作用的成对超导线圈连接到超导电路中，两个检验质量的运动通过超导电路耦合，构成两自由度的超导磁力弹簧振子。以一种垂向振子为例，如图 2 所示，使用载流超导线圈 L_1 和 L_2 分别对在垂向分开放置的两个质量相同的超导检验质量进行磁悬浮，超导线圈的有效电感是检验质量相对平衡位置位移的函数。将 L_1 和 L_2 连接到同一个超导回路中，根据超导回路磁通守恒原理，其中一个检验质量发生位移，与另一个检验质量作用的超导线圈中电流会随之变化，因此两个检验质量的运动通过超导电路相互耦合，形成两自由度的弹簧振子。不计阻尼，检验质量的动力学方程做傅里叶变换后可写为：

$$\begin{cases} -m\omega^2 z_1 + k_{11}z_1 + k_{12}z_2 = -m[g_1(\omega) - a(\omega)] \\ -m\omega^2 z_2 + k_{22}z_2 + k_{21}z_1 = -m[g_2(\omega) - a(\omega)] \end{cases} \quad (1)$$

式中， m 为质量， ω 为角频率， g_1 和 g_2 分别为上下两个检验质量质心处的时变重力加速度， a 为安装平台的运动加速度， k_{ij} 为系统弹簧振子的刚度参数，其中 $i=1, 2$ 和 $j=1, 2$ 。当 $i=j$ 时， k_{ii} 表示直接与检验质量 i 相互作用的单层密绕超导线圈和螺线管超导线圈提供的刚度；当 $i \neq j$ 时， k_{ij} 表示与第 i 个检验质量相互作用的单层密绕超导线圈和螺线管超导线圈，通过超导电路耦合，提供给第 j 个检验质量的刚度。梯度仪设计中，一般要求两个

检验质量参数相同，检验质量与超导线圈的磁作用参数相同，超导电路关于两个检验质量对称，我们将这种情况称为理想匹配，此时有 $k_{11}=k_{22}$, $k_{12}=k_{21}$ 。做坐标变换，令差模位移 $z_d=z_1-z_2$ ，共模位移 $z_c=(z_1+z_2)/2$ ，动力学方程组的解为：

$$\begin{cases} z_d = -\frac{ma_d(\omega)}{-m\omega^2 + k_{11} - k_{12}} \\ z_c = -\frac{ma_c(\omega)}{-m\omega^2 + k_{11} + k_{12}} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $a_d(\omega)=g_1(\omega)-g_2(\omega)$ ，称为差模加速度，包含时变重力梯度的信息，在梯度仪中通常通过检测差模位移 z_d 得到重力梯度；式中 $a_c(\omega)=a(\omega)+[g_1(\omega)+g_2(\omega)]/2$ ，称为共模加速度，包含平台运动加速度。从式(2)可以看出， $(k_{11}-k_{12})$ 为差模刚度， $(k_{11}+k_{12})/2$ 为共模刚度。通常希望梯度仪弹簧振子具有较小的差模刚度，以获得较高的重力梯度测量灵敏度。通常希望梯度仪有较大的共模刚度，以提高共模抑制比，这是因为加工制作不可避免地存在误差，有小量共模位移混入被梯度仪检测的差模位移中，共模刚度越大，混入的共模位移信号越少，梯度仪抵抗安装平台运动加速度干扰的能力越强。

以图 2 所示超导电路为例，向超导电路中注入超导持久电流，使线圈 L_1 和 L_2 中的电流为 I_0 ，检验质量处于平衡位置，中间支路 L_p 中没有电流，超导回路磁通守恒原理要求在此后任意时刻，各超导线圈中的电流均满足以下方程组：

$$\begin{cases} L_1(z_1)I_1(z_1, z_2) + L_p I_p(z_1, z_2) = L_0 I_0 \\ L_2(z_2)I_2(z_1, z_2) - L_p I_p(z_1, z_2) = L_0 I_0 \\ I_1(z_1, z_2) + I_p(z_1, z_2) = I_2(z_1, z_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中： L_0 为检验质量处于平衡位置时，超导线圈 L_1 和 L_2 的有效电感。 $L_1(z_1)$ 和 $L_2(z_2)$ 分别是两个超导线圈有效电感随与之相互作用的检验质量位移变化的函数关系，在理想匹配情况下，成对超导线圈的参数相同，可以用 L_0 、 I_0 表示平衡位置处与检验质量相互作用超导线圈的有效电感和超导

电流强度, 且有 $dL_1(z_1)/dz_1 = dL_2(z_2)/dz_2$, 统一用 $dL(z)/dz$ 表示。 $I_1(z_1, z_2)$ 、 $I_2(z_1, z_2)$ 和 $I_p(z_1, z_2)$ 分别是两个检验质量发生位移时, 超导线圈 L_1 、 L_2 和 L_p 中的电流。由式(3)可求到 $I_1(z_1, z_2)$ 、 $I_2(z_1, z_2)$ 。

如前面已论述的, 超导线圈与检验质量之间的磁力表达式为 $F(z) = \frac{1}{2} \frac{dL_{eff}(z)}{dz} I^2$ 。具体地, 当与两个检验质量相互作用的超导线圈连接成超导回路后, 两个检验质量受到的磁力分别为:

$$\begin{cases} F_1(z_1, z_2) = \frac{1}{2} \frac{dL(z)}{dz} [I_1(z_1, z_2)]^2 \\ F_2(z_1, z_2) = \frac{1}{2} \frac{dL(z)}{dz} [I_2(z_1, z_2)]^2 \end{cases} \quad (4)$$

对应地, 两自由度弹簧振子的刚度系数为:

$$\begin{cases} k_{11} = -\frac{\partial}{\partial z_1} F_1(z_1, z_2) \\ k_{22} = -\frac{\partial}{\partial z_2} F_2(z_1, z_2) \\ k_{12} = k_{21} = -\frac{\partial}{\partial z_2} F_1(z_1, z_2) = -\frac{\partial}{\partial z_1} F_2(z_1, z_2) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可给出在平衡位置附近, 图 2 所示两自由度弹簧振子的刚度系数为:

$$\begin{cases} k_{11} = k_{22} = \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{(L_p + L_0) I_0^2}{L_0(L_0 + 2L_p)} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} \\ k_{12} = k_{21} = \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{L_p I_0^2}{L_0(L_0 + 2L_p)} \end{cases} \quad (6)$$

差模刚度 k_d 和共模刚度 k_c 分别为:

$$\begin{cases} k_d = -\frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{I_0^2}{L_0 + 2L_p} \\ k_c = -\frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{I_0^2}{L_0} \end{cases} \quad (7)$$

对于正刚度超导线圈, 有效电感对检验质量位移的二阶导数小于零, 即 $d^2 L(z)/dz^2 < 0$ 。式(7)表明, 共模刚度恒大于差模刚度, 其差值由 k_d 和 k_c 表达式的最后一项决定。

可以理解的是，引入与两个检验质量分别作用的负刚度超导线圈对，并用超导导线将两个线圈串联构成超导回路，与正刚度线圈共同构建两自由度超导磁力弹簧振子，可以有效地降低差模刚度，增大共模刚度与差模刚度的比值。仍然以一种垂向两自由度振子为例，在图 2 的基础上增加一对负刚度超导线圈，分别与两个超导检验质量相互作用，且负刚度线圈串联成超导回路，如图 3 所示。需要说明的是，图 3 中超导线圈与检验质量的相对位置不具有实际意义，图中只是表示超导线圈均与超导检验质量发生相互作用。由于正刚度线圈和负刚度线圈共同作用于超导检验质量，振子的总刚度系数是两类线圈分别与检验质量相互作用提供的刚度系数之和，负刚度线圈对刚度系数的贡献为：

$$\begin{cases} k'_{11} = k'_{22} = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} + \frac{i_0^2}{2l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 \\ k'_{12} = k'_{21} = \frac{i_0^2}{2l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中， k'_{ij} 为两螺线管线圈提供的刚度，其中 $i=1, 2$ 和 $j=1, 2$ 。当 $i=j$ 时， k'_{ii} 表示直接与检验质量 i 相互作用的螺线管超导线圈提供的刚度；当 $i \neq j$ 时， k'_{ij} 表示与第 i 个检验质量相互作用的螺线管超导线圈，通过超导电路耦合，提供给第 j 个检验质量的刚度， $l(z)$ 为负刚度超导线圈随检验质量位移变化的有效电感， l_0 和 i_0 分别是检验质量处于平衡位置处负刚度超导线圈的有效电感和超导电流强度。弹簧振子的总刚度系数为：

$$\begin{cases} K_{11} = K_{22} = -\frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} - \frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{(L_p + L_0)I_0^2}{L_0(L_0 + 2L_p)} + \frac{i_0^2}{2l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 \\ K_{12} = K_{21} = \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{L_p I_0^2}{L_0(L_0 + 2L_p)} + \frac{i_0^2}{2l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 \end{cases} \quad (9)$$

引入负刚度超导线圈之后，振子的差模刚度和共模刚度为：

$$\begin{cases} K_d = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{L_p I_0^2}{L_0 + 2L_p} \\ K_c = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \frac{i_0^2}{l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{I_0^2}{L_0} \end{cases} \quad (10)$$

与没有负刚度超导线圈的式(7)比较,差模刚度多了 K_d 表达式的第一项,负刚度超导线圈具有 $d^2l(z)/dz^2 > 0$ 的性质,加入负刚度超导线圈之后差模刚度会减小。调节负刚度超导线圈的电流 i_0 ,可以使振子的差模刚度为一个较小的正值,刚度为正值是形成弹簧振子的基本条件。加入负刚度超导线圈之后振子的共模刚度多了 K_c 表达式的第一项和第三项,第一项为负值,与差模刚度的减小值相同,第三项恒为正值,表明共模刚度即便是变小,其减小值也恒小于差模刚度的减小值。在没有引入负刚度超导线圈情况下,共模恒大于差模刚度,因此,引入负刚度超导线圈后,弹簧振子共模刚度与差模刚度的比值总是增大的。

可选地,可以在公式(10)的指导下,调节负刚度超导线圈和正刚度超导线圈中的超导电流,满足不同的设计需求。

可选地,所述负刚度超导线圈和正刚度超导线圈均可以包括多组超导线圈。

可选地,连接正刚度超导线圈的超导电路可以具有与图2不同的形式,如图3所示的连接负刚度超导线圈的超导回路中可以再串入不与检验质量相互作用的超导线圈。

可选地,可依照本发明的方法,可以使用正刚度线圈组和负刚度线圈组提供垂向的磁作用力,抵消检验质量所受重力,共同悬浮检验质量,如图1,构建垂向对角分量 T_{zz} 超导重力梯度仪的垂向磁力弹簧振子,通过检测振子的差模位移给出时变重力梯度值。负刚度超导线圈的引入,能克服单独使用正刚度线圈悬浮检验质量情况下,差模刚度存在下限值的技术缺陷,显著降低差模刚度,提高共模刚度与差模刚度的比值,从而提高梯度测量灵敏度,改善共模抑制比。

具体地,重力梯度张量有5个独立分量,其中的垂向对角分量 T_{zz} 表征重力加速度在垂向的变化率。该分量信号大, T_{zz} 航空超导重力梯度仪在资源勘查领域有重要的应用前景。

可选地，可引入负刚度超导线圈构建其它自由度的耦合超导磁力弹簧振子，用来测量重力梯度张量中的不同分量。

具体地，检验质量为上端有封口盖板的超导体圆筒，单层密绕盘型超导线圈比邻安置在筒内盖板下方，螺线管线圈外径略小于检验质量圆筒内径，同轴地安置在检验质量圆筒开口位置。选择合适的几何参数，单层密绕盘型超导线圈为正刚度超导线圈，螺线管线圈为负刚度超导线圈。

具体地，以 36[#] 铌线绕制 110 匝密绕单层盘形线圈，检验质量为内径为 47.5mm 的圆形筒体，线圈有效电感对检验质量位移 z 的依赖关系曲线的有限元计算结果如图 4 所示。曲线为凹函数，其二阶导数 $d^2L_{eff}(z)/dz^2 < 0$ ，是正刚度超导线圈。

具体地，使用同样尺寸的铌制圆筒形超导检验质量，在检验质量开口端同轴安置一个螺线管线圈，螺线管用 36[#] 铌线以 4 层×50 匝方式在 $\phi 45$ 骨架上密绕而成，螺线管线圈与检验质量同轴安置，线圈绕组上部置于检验质量筒内，下部伸出检验质量下端面 2mm。使用有限元数值计算方法，得到线圈有效电感对检验质量位移 z 的依赖关系曲线如图 5 所示。曲线为凸函数，其二阶导数 $d^2l_{eff}(z)/dz^2 > 0$ ，是负刚度超导线圈。

更具体地，具有轴对称结构的有限元数值计算方法可参考现有技术，其关键是计算超导体表面的屏蔽电流分布。在有限元数值计算中，将超导体表面连续分布的屏蔽电流离散成众多电流环 $I_i (i = 1, 2 \dots n)$ ，分别计算任意两个屏蔽电流环之间的互感 $M_{ij} (i, j = 1, 2 \dots n, i \neq j)$ ，每一个屏蔽电流环与超导线圈间的互感 $M_{i0} (i = 1, 2 \dots n)$ ，以及每一个屏蔽电流环的自感 $L_i (i = 1, 2 \dots n)$ ，超导体的迈斯纳效应要求在超导线圈中注入电流 I_0 后，第 i 个屏蔽电流环的磁通 $\Phi_i (i = 1, 2 \dots n)$ 为零，据此可列出 n 个方程：

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + M_{10} I_0 + \sum_{j \neq 1} M_{1j} I_j = 0$$

.....

$$\Phi_i = L_i I_i + M_{i0} I_0 + \sum_{j \neq i} M_{ij} I_j = 0$$

.....

$$\Phi_n = L_n I_n + M_{n0} I_0 + \sum_{j \neq n} M_{nj} I_j = 0 \quad (11)$$

通过数值求解方程组，得到 n 个电流环的电流，进而根据安培定理求得所有电流环在超导线圈中产生的总磁通，加上超导线圈本身电流产生的磁通，除以超导线圈的电流，即为超导线圈在给定检验质量位移下的有效电感。在上述负刚度超导线圈的构建方法指导下，可使用有限元数值计算方法寻找符合设计需求的结构参数，包括检验质量的几何形状和超导线圈的几何参数与电磁参数。

构建重力测量惯性传感器的弹簧振子必须具有正的刚度，因此，具有负刚度性质的超导线圈必须与具有正刚度性质的超导线圈组合使用。通过调节两类超导线圈的电流值来调节超导磁力弹簧振子的差模刚度和共模刚度，使振子满足应用需求。

具体地，将本发明内容应用于构建对角垂向分量 T_{zz} 超导重力梯度仪。一种典型的方法是使用超导线圈将垂向分开放置的两个检验质量进行磁悬浮，使用超导电路将分别与检验质量相互作用的超导线圈连接成超导回路，借助超导回路的耦合构成两自由度的磁力弹簧振子，通过测量振子的差模位移给出重力梯度。

使用图 1 所示的结构和图 3 所示的超导电路构建两自由度超导磁力弹簧振子，在前面所述的正刚度线圈中注入超导电流 4.58A，在前面所述的负刚度线圈中注入超导电流 2.56A，两个超导线圈共同悬浮检验质量，将两个 100 克的检验质量悬浮在正刚度密绕单层盘形线圈上方 0.8mm 处，构成两自由度的垂向超导磁力弹簧振子。根据有限元数值计算结果，此时正刚度盘型超导线圈有效电感为 $L_0=44.2\mu\text{H}$ ，对检验质量位移的一阶导数为 $dL_{\text{eff}}(z)/dz=48.1\mu\text{H}/\text{mm}$ ，二阶导数为 $d^2L_{\text{eff}}(z)/dz^2=-17.4\mu\text{H}/\text{mm}^2$ ；负刚度螺线管超导线圈有效电感为 $999\mu\text{H}$ ，对检验质量位移的一阶导数为

$dl_{eff}(z)/dz=144.7\mu\text{H}/\text{mm}$ ，二阶导数为 $d^2l_{eff}(z)/dz^2=51.6\mu\text{H}/\text{mm}^2$ 。设定 L_p 为 $800\mu\text{H}$ ，依照前文给出的计算方法，可给出二自由度弹簧振子的差模刚度为 $42.9\text{N}/\text{m}$ ，共模刚度为 $1248.8\text{N}/\text{m}$ ，共模刚度与差模刚度的比值为 29。如果不引入负刚度超导线圈，则正刚度盘型超导线圈的电流需增加到 6.38A 才能将检验质量悬浮到相同的高度，此时二自由度弹簧振子的差模刚度为 $411.4\text{N}/\text{m}$ ，共模刚度为 $2484.8\text{N}/\text{m}$ ，共模刚度与差模刚度的比值为 6。这些计算结果清楚地表明，引入负刚度超导线圈，能显著地降低弹簧振子的差模刚度，显著地提高共模刚度与差模刚度的比值。更系统的计算与分析表明，在不同的悬浮高度下，或正刚度超导线圈的超导电路采用不同的形式与参数情况下，引入负刚度超导悬浮线圈均能不同程度地降低差模刚度，提高共模刚度与差模刚度的比值。

需要说明的是，本领域技术人员可以理解的是本发明给出的螺线管线圈或单层密绕盘型线圈仅作为超导线圈的一种举例，凡是采用其他类型的超导线圈实现弹簧振子的正、负刚度控制的技术方案，均应属于本发明的保护范围。

本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种超导重力梯度仪，其特征在于，包括：两组超导磁力弹簧振子和超导电路；

每组超导磁力弹簧振子包括：单层密绕盘型超导线圈、检验质量、螺线管超导线圈以及线圈骨架；检验质量为下方开口的半封闭超导筒体；所述线圈骨架位于检验质量的下方；所述单层密绕盘型超导线圈绕制在线圈骨架的顶部，螺线管超导线圈绕制在线圈骨架的底部；单层密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈与检验质量之间的磁斥力平衡检验质量的重力，将检验质量进行磁悬浮；所述磁斥力是检验质量位移的函数，检验质量所受磁力和重力的合力具有恢复力的性质，构成超导磁力弹簧振子；

所述单层密绕盘型超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相反，为超导磁力弹簧振子贡献正的刚度；螺线管超导线圈磁力线的一部分处于检验质量的封闭空间内呈压缩状态，另一部分处于检验质量的封闭空间外呈扩展状态，螺线管超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相同，为超导磁力弹簧振子贡献负的刚度；所述超导磁力弹簧振子的刚度通过单层密绕盘型超导线圈的电流值和螺线管超导线圈的电流值调节；

所述超导电路通过超导线将两组超导磁力弹簧振子的密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈连接构成超导回路，以将两组超导磁力弹簧振子耦合成为两自由度的弹簧振子，构成超导重力梯度仪；所述超导重力梯度仪的共模刚度与差模刚度的比值相比不包括螺线管超导线圈的超导重力梯度仪的共模刚度与差模刚度的比值高。

2、根据权利要求1所述的超导重力梯度仪，其特征在于，所述超导重力梯度仪的共模刚度 k_c 和差模刚度 k_d 分别为：

$$\begin{cases} K_d = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{L_p I_0^2}{L_0 + 2L_p} \\ K_c = -\frac{i_0^2}{2} \frac{d^2 l(z)}{dz^2} - \frac{I_0^2}{2} \frac{d^2 L(z)}{dz^2} + \frac{i_0^2}{l_0} \left[\frac{dl(z)}{dz} \right]^2 + \left(\frac{dL(z)}{dz} \right)^2 \frac{I_0^2}{L_0} \end{cases}$$

其中, L_0 、 I_0 分别表示平衡位置处正刚度单层密绕盘型超导线圈的有效电感和超导电流强度, l_0 、 i_0 分别表示平衡位置处负刚度螺线管超导线圈的有效电感和超导电流强度, $l(z)$ 表示负刚度螺线管超导线圈随检验质量位移变化的有效电感, $L(z)$ 表示单层密绕盘型超导线圈随检验质量位移变化的有效电感, L_p 表示超导电路中间支路所接电感, z 表示检验质量相对于平衡位置的位移。

3、根据权利要求 2 所述的超导重力梯度仪, 其特征在于, $d^2 L(z)/dz^2 < 0$; $d^2 l(z)/dz^2 > 0$ 。

4、根据权利要求 1 至 3 任一项所述的超导重力梯度仪, 其特征在于, 还包括: 结构件;

所述结构件用于上下连接两组超导磁力弹簧振子的线圈骨架。

5、根据权利要求 1 至 3 任一项所述的超导重力梯度仪, 其特征在于, 所述单层密绕盘型超导线圈和螺线管超导线圈均可以包括多组超导线圈。

6、一种超导重力梯度仪灵敏度的提高方法, 所述超导重力梯度仪包括两个自由度的超导磁力弹簧振子, 其特征在于, 包括如下步骤:

在所述两个自由度的超导磁力弹簧振子中均引入负刚度超导线圈;

通过超导线将负刚度超导线圈串联成超导回路, 以降低所述超导重力梯度仪的差模刚度, 提高所述超导重力梯度仪的灵敏度。

7、根据权利要求 6 所述的超导重力梯度仪灵敏度的提高方法, 其特征在于, 每个自由度的超导磁力弹簧振子包括: 密绕盘型超导线圈、检验质量以及线圈骨架; 检验质量为下方开口的半封闭超导筒体; 所述线圈骨架位于检验质量的下方; 所述单层密绕盘型超导线圈绕制在线圈骨架的顶部;

单层密绕盘型超导线圈与检验质量之间的磁斥力平衡检验质量的重力，将检验质量进行磁悬浮；所述磁斥力是检验质量位移的函数，检验质量所受磁力和重力的合力具有恢复力的性质，构成超导磁力弹簧振子；所述单层密绕盘型超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相反，为超导磁力弹簧振子贡献正的刚度；

所述在所述两个自由度的超导磁力弹簧振子中均引入负刚度超导线圈，包括如下步骤：

在两个线圈骨架的底部均绕制螺线管超导线圈，所述螺线管超导线圈磁力线的一部分处于检验质量的封闭空间内呈压缩状态，另一部分处于检验质量的封闭空间外呈扩展状态，螺线管超导线圈施加于检验质量的垂向磁斥力随检验质量偏离平衡位置的位移成比例变化，变化量方向与位移方向相同，为超导磁力弹簧振子贡献负的刚度；所述超导磁力弹簧振子的刚度通过单层密绕盘型超导线圈的电流值和螺线管超导线圈的电流值调节。

附图

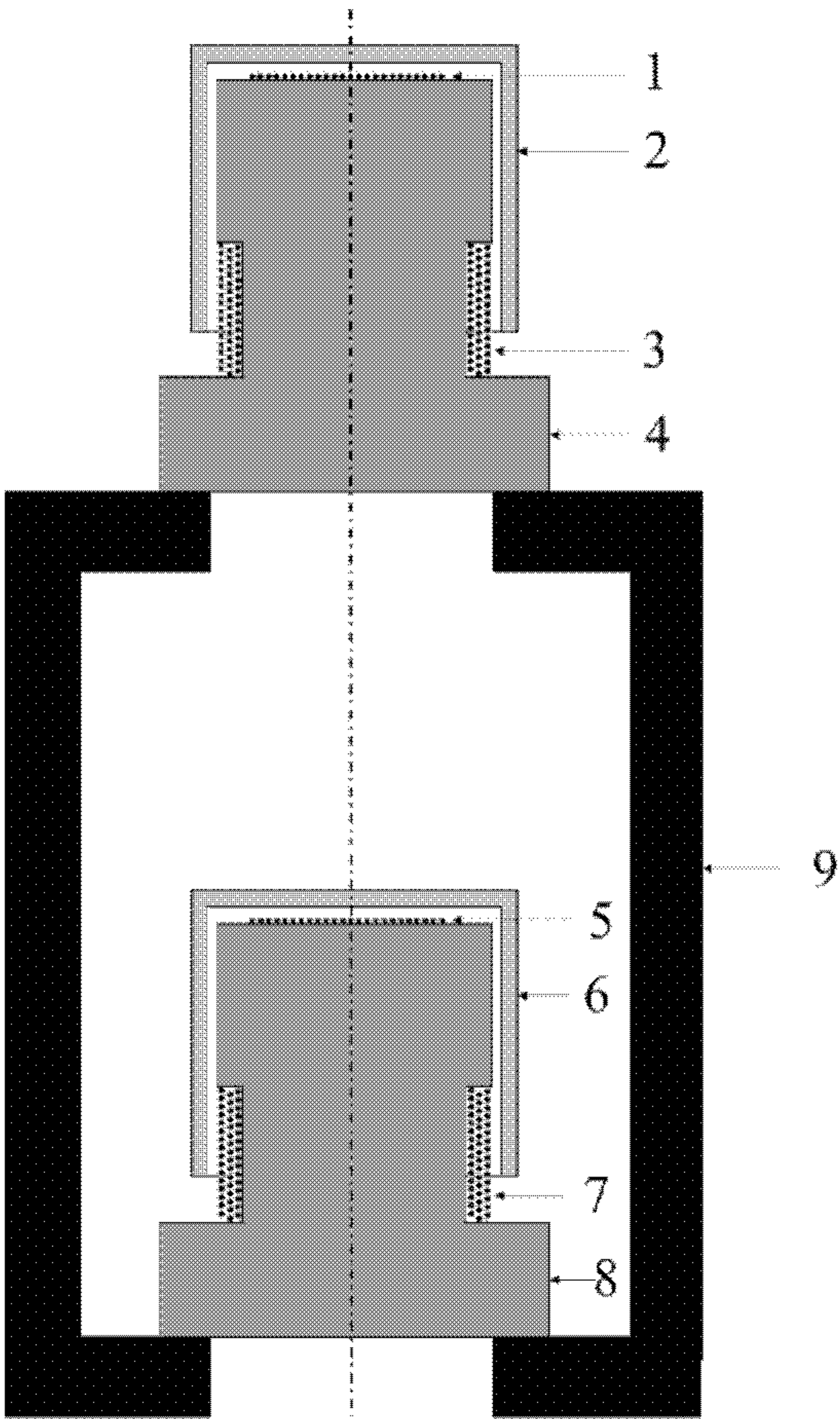


图 1

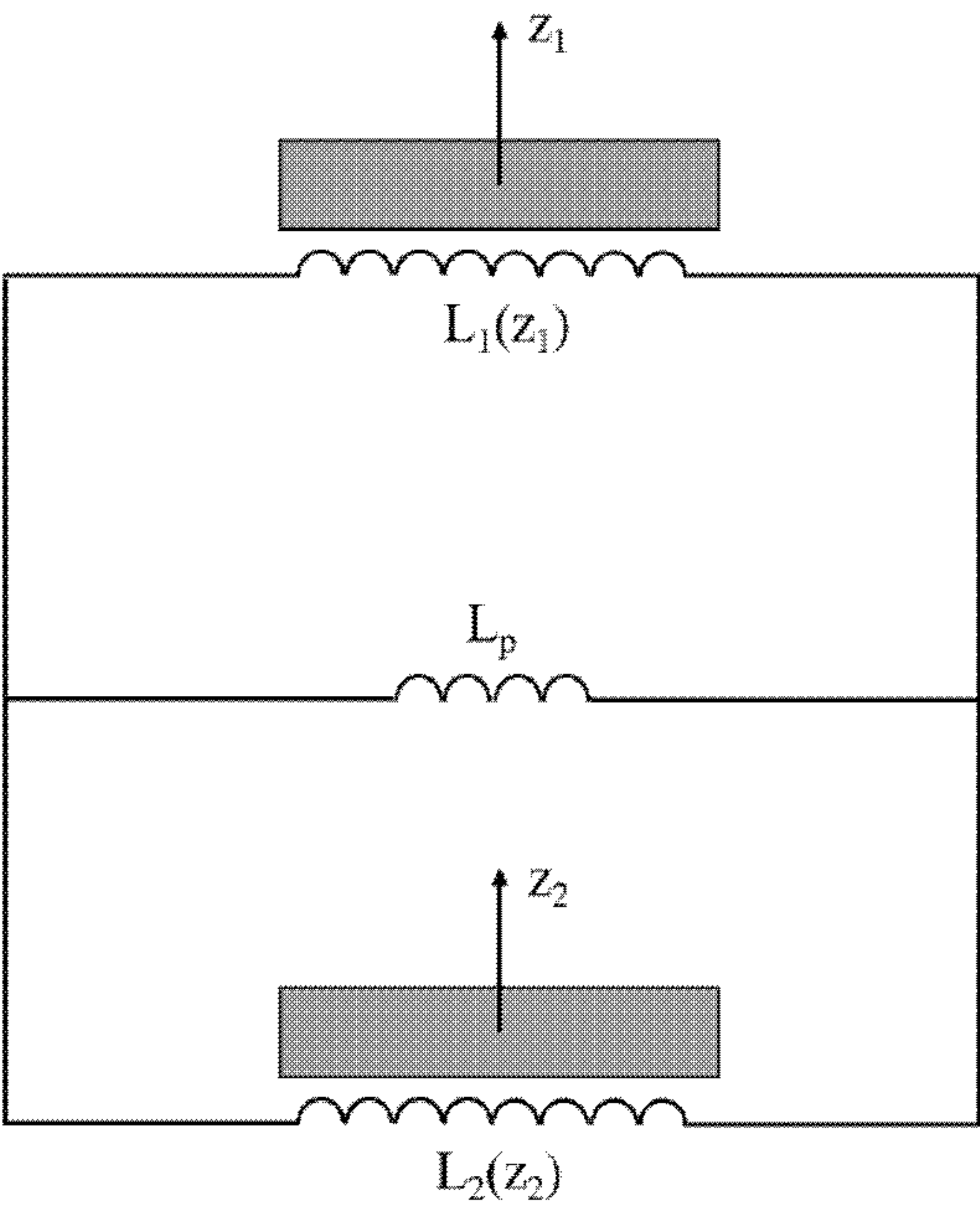


图 2

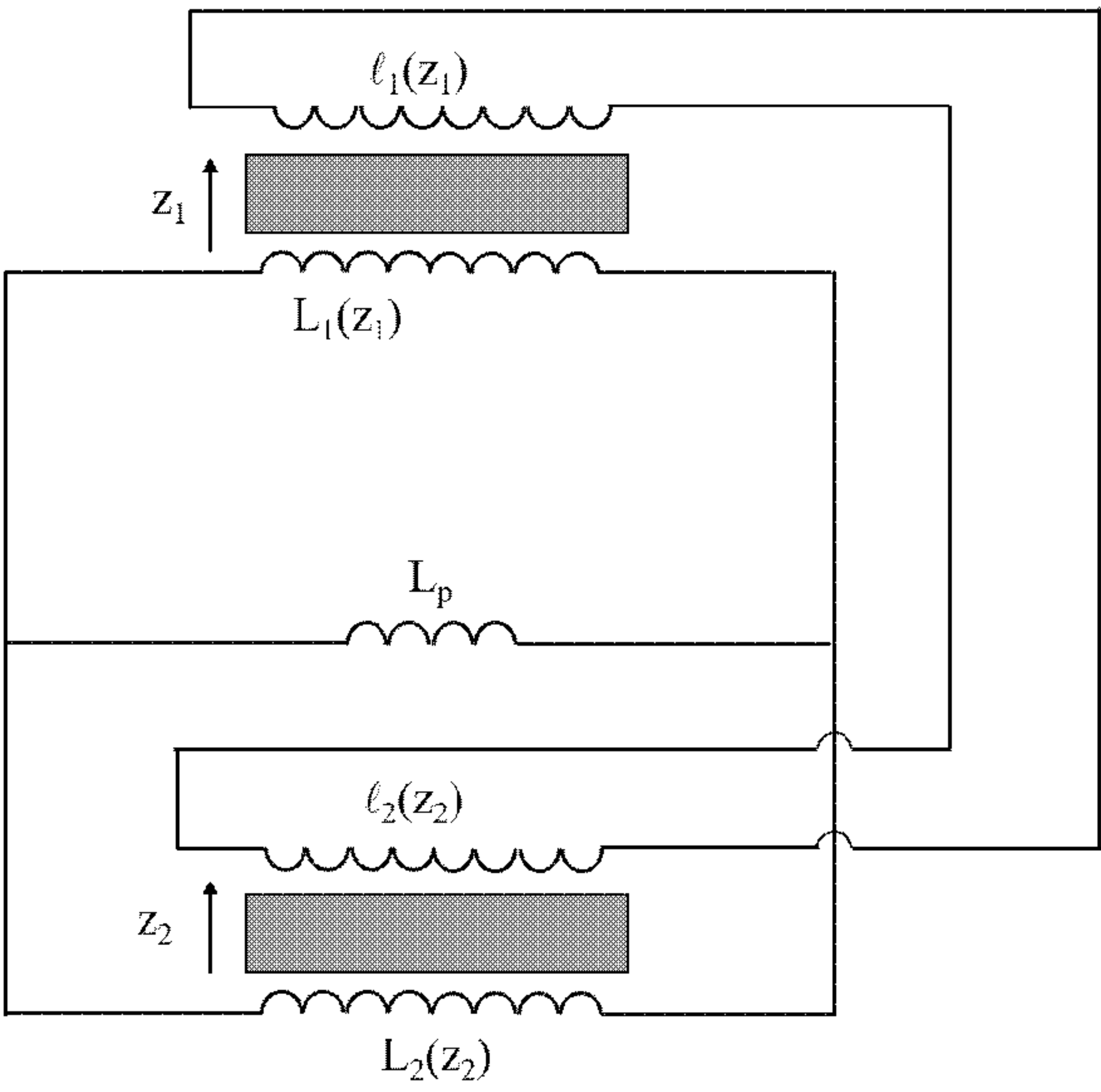


图 3

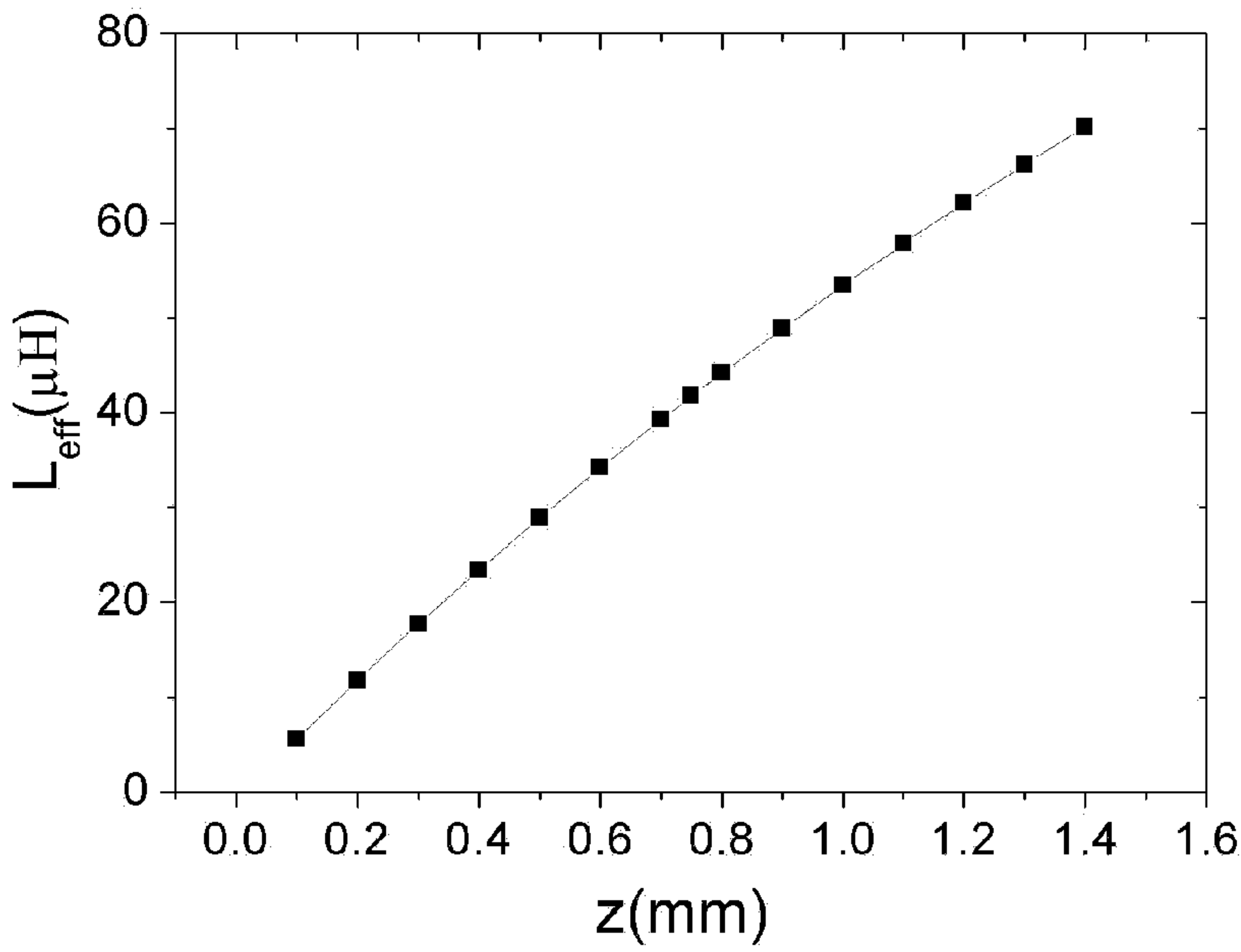


图 4

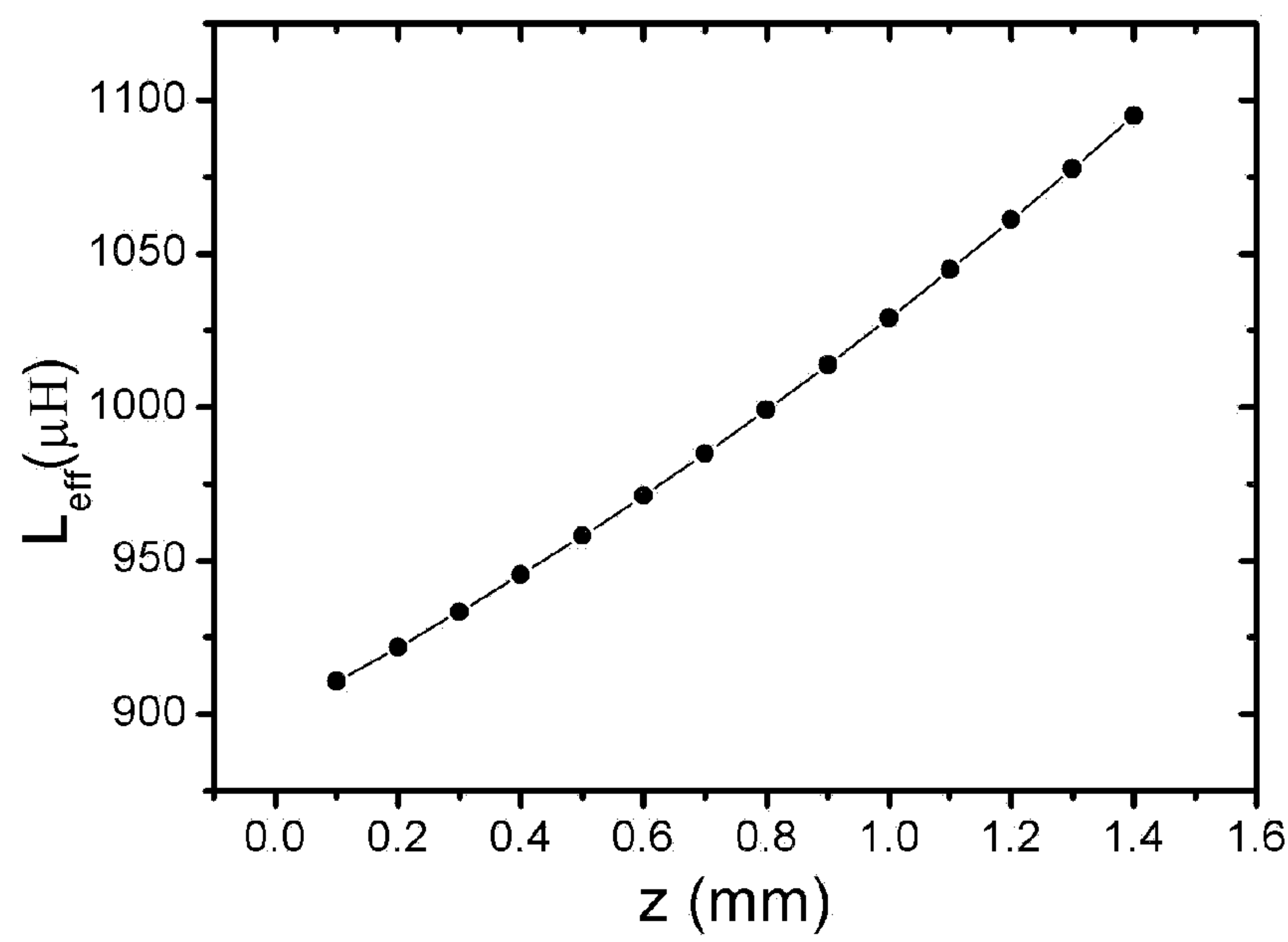


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/097619

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 7/00(2006.01)i

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)

G01V

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)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: 超导, 重力, 梯度仪, 灵敏度, 负刚度, 线圈, 检验质量, superconducting, gravity, gradiometer, tess, mass, sensitivity, coil

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111007573 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 14 April 2020 (2020-04-14) claims 1-7	1-7
Y	CN 108918913 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 30 November 2018 (2018-11-30) description, paragraphs [0008]-[0073], figure 1	1-7,
Y	刘向东 等 (LIU, Xiangdong et al.). "超导重力仪器 机遇与挑战 (Superconducting Gravity Instrument: Opportunities and Challenges)" 导航与控制 (Navigation and Control), Vol. 3, No. 18, 30 June 2019 (2019-06-30), ISSN: 1674-5558, pp. 7-13	1-7
A	CN 105911487 A (SHANGHAI INSTITUTE OF MICROSYSTEM AND INFORMATION TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 31 August 2016 (2016-08-31) entire document	1-7
A	WO 2014007848 A1 (SRC, INC.) 09 January 2014 (2014-01-09) entire document	1-7

☒ 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

01 September 2020

Date of mailing of the international search report

10 October 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

International application No.

PCT/CN2020/097619

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102608668 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 25 July 2012 (2012-07-25) entire document	1-7
A	CN 107795631 A (THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY) 13 March 2018 (2018-03-13) entire document	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2020/097619

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111007573	A	14 April 2020	None			
CN	108918913	A	30 November 2018	WO	2019218889	A1	21 November 2019
				US	2020103435	A1	02 April 2020
				EP	3627158	A1	25 March 2020
				CN	108918913	B	13 August 2019
CN	105911487	A	31 August 2016	CN	105911487	B	14 December 2018
WO	2014007848	A1	09 January 2014	US	2014000362	A1	02 January 2014
				US	9038456	B2	26 May 2015
CN	102608668	A	25 July 2012	CN	102608668	B	09 July 2014
CN	107795631	A	13 March 2018	US	2018068773	A1	08 March 2018

国际检索报告		国际申请号 PCT/CN2020/097619
A. 主题的分类 G01V 7/00(2006.01)i 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) G01V 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)) CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI: 超导, 重力, 梯度仪, 灵敏度, 负刚度, 线圈, 检验质量, superconducting, gravity, gradiometer, tess, mass, sensitivity, coil		
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
PX	CN 111007573 A (华中科技大学) 2020年 4月 14日 (2020 - 04 - 14) 权利要求1-7	1-7
Y	CN 108918913 A (华中科技大学) 2018年 11月 30日 (2018 - 11 - 30) 说明书第[0008]-[0073]段, 图1	1-7
Y	刘向东 等. “超导重力仪器 机遇与挑战” 导航与控制, 第3卷, 第18期, 2019年 6月 30日 (2019 - 06 - 30), ISSN: 1674-5558, 第7-13页	1-7
A	CN 105911487 A (中国科学院上海微系统与信息技术研究所) 2016年 8月 31日 (2016 - 08 - 31) 全文	1-7
A	WO 2014007848 A1 (SRC, INC.) 2014年 1月 9日 (2014 - 01 - 09) 全文	1-7
A	CN 102608668 A (华中科技大学) 2012年 7月 25日 (2012 - 07 - 25) 全文	1-7
A	CN 107795631 A (香港理工大学) 2018年 3月 13日 (2018 - 03 - 13) 全文	1-7
☐ 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 9月 1日		国际检索报告邮寄日期 2020年 10月 10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 邓晓蓓 电话号码 86-(10)-53962606

国际申请号
PCT/CN2020/097619

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	111007573	A	2020年 4月 14日	无			
CN	108918913	A	2018年 11月 30日	W0	2019218889	A1	2019年 11月 21日
				US	2020103435	A1	2020年 4月 2日
				EP	3627158	A1	2020年 3月 25日
				CN	108918913	B	2019年 8月 13日
CN	105911487	A	2016年 8月 31日	CN	105911487	B	2018年 12月 14日
W0	2014007848	A1	2014年 1月 9日	US	2014000362	A1	2014年 1月 2日
				US	9038456	B2	2015年 5月 26日
CN	102608668	A	2012年 7月 25日	CN	102608668	B	2014年 7月 9日
CN	107795631	A	2018年 3月 13日	US	2018068773	A1	2018年 3月 8日