

(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 6 月 4 日 (04.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/108156 A1

(51) 国际专利分类号:
F16F 15/02 (2006.01) **F16F 15/04** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/111673

(22) 国际申请日: 2019 年 10 月 17 日 (17.10.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811427114.9 2018 年 11 月 27 日 (27.11.2018) 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路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

(72) 发明人: 姜伟 (JIANG, Wei); 中国湖北省武汉市洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 陈学东 (CHEN, Xuedong); 中国湖北省武汉市洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 吴九林 (WU, Jiulin); 中国湖北省武汉市洪山路喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

(74) 代理人: 华中科技大学专利中心 (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PATENT AGENCY CENTER); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学东一楼 340 室, Hubei 430074 (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: MULTI-DIMENSIONAL MAGNETIC NEGATIVE-STIFFNESS MECHANISM AND MULTI-DIMENSIONAL MAGNETIC NEGATIVE-STIFFNESS DAMPING SYSTEM COMPOSED THEREOF

(54) 发明名称: 一种多维磁负刚度机构及其构成的多维磁负刚度减振系统

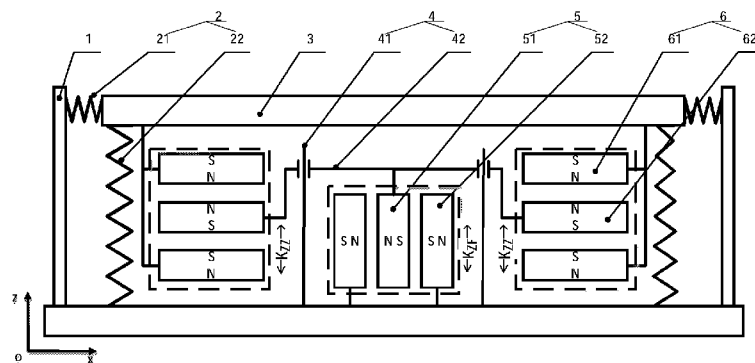


图 2

(57) Abstract: Disclosed are a multi-dimensional magnetic negative-stiffness mechanism and a multi-dimensional magnetic negative-stiffness damping system composed thereof. The multi-dimensional damping system is composed of a positive-stiffness mechanism (2), a multi-dimensional negative-stiffness mechanism, a floating frame (4), a body to be damped (3) and a mounting base (1), wherein the positive-stiffness mechanism (2) is a traditional elastic element, same is connected to the body to be damped (3) and the mounting base (1), and provides supporting forces in an X direction, a Y direction and a Z direction, and a basic damping function. The multi-dimensional negative-stiffness mechanism is composed of at least two negative-stiffness magnetic groups (6). Each of the negative-stiffness magnetic groups (6) can provide one-dimensional or two-dimensional negative stiffness. By means of a series connection of the at least two negative-stiffness magnetic groups (6), a two-dimensional or three-dimensional negative-stiffness effect can be achieved, and the damping performance of the system in multiple dimensions can be improved. By using the multi-dimensional magnetic negative-stiffness mechanism, a large force for bearing the body to be damped (3) is realized, and the function of multi-dimensional high-performance damping is also realized.

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, 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: 一种多维磁负刚度机构及其构成的多维磁负刚度减振系统, 该多维减振系统由正刚度机构(2)、
多维负刚度机构、浮动框架(4)、被减振体(3)和安装基座(1)构成。其中, 正刚度机构(2)是传统的
弹性元件, 连接被减振体(3)和安装基座(1), 提供X向、Y向和Z向的支撑力和基本减振功能。多维负刚
度机构由至少两个负刚度磁组(6)构成, 每个负刚度磁组(6)可以提供一维或者二维的负刚度, 通过至少
两个负刚度磁组(6)的串联, 可以实现二维或者三维的负刚度效果, 提升系统多个维度上的减振性能。利
用多维磁负刚度机构, 既实现了对被减振体(3)的大承载力, 又实现了多维高性能减振的功能。

一种多维磁负刚度机构及其构成的多维磁负刚度减振系统

【技术领域】

本发明属于减振领域，更具体地，涉及一种多维磁负刚度机构及由其构成的多维减振系统。

【背景技术】

振动问题普遍地存在于工业生产和工程的各个领域，随着各种机械设备向着高速、高精、高稳定性发展，它们对振动的要求越来越严格。需要利用减振器隔离设备向其固定支座的传递，或者需要利用减振器隔离机械结构的振动向相关设备的传递。

减振器的性能主要有承载性能和减振性能。传统形式的减振器，如金属弹簧、橡胶结构、金属-橡胶复合结构、气体弹簧等，都存在承载性能和减振性能互相矛盾的问题，主要体现在减小系统刚度时，可以提高系统的减振性能，但是会降低系统的承载性能。目前较好的解决方法是在减振系统中引入磁负刚度机构，其有以下主要优点：

- 1) 在保证系统承载性能不降低的情况下提升系统的减振性能；
- 2) 磁场力为非接触力，不会引入摩擦及其带来的非线性问题。

但是，目前磁负刚度技术应用于减振领域尚存在一些技术难点，例如难以实现较大的负刚度，难以实现稳定线性的负刚度，难以实现多维度的负刚度等，这限制了磁负刚度技术在减振系统中的应用。针对难以实现多维负刚度这一技术难点，减振领域存在着发展一种多维磁负刚度机构的需求。

【发明内容】

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种利用永磁体构建的多维磁负刚度机构，通过一个浮动结构将不同方向的磁负刚度机构

进行整合，结合刚度数值的设定，产生三维负刚度或者二维负刚度，并以此为基础提出了一种多维减振系统，结合正刚度机构的三维设计实现正刚度与负刚度的多维度串并联复合减振，从而能在多种工况下提高系统多个维度的减振性能，同时保证承载能力，提高减振系统的综合性能。

为了实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种多维磁负刚度机构，包括：安装基座、浮动框架、二维磁负刚度单元和一维磁负刚度单元；

二维磁负刚度单元包括至少一个二维负刚度磁组，一维磁负刚度单元包括至少一个一维负刚度磁组；

浮动框架包括直线导轨和永磁体安装架；永磁体安装架沿直线导轨做一维直线运动；以主承载方向为 Z 向建立三维直角坐标系 OXYZ，则直线导轨沿 Z 向布置，二维负刚度磁组的两个负刚度方向分别沿 X 向和 Y 向布置，一维负刚度磁组的负刚度方向沿 Z 向布置；

二维负刚度磁组包括沿 Z 向直线排布的两个二维动磁铁和位于其间的两个二维定磁铁；二维定磁铁和二维动磁铁均沿 Z 向充磁，两个二维定磁铁充磁方向相同且与二维动磁铁充磁方向相反；

一维负刚度磁组包括垂直于 Z 向直线排布的两个一维定磁铁和位于其间的两个一维动磁铁；

直线导轨和两个一维定磁铁均固定于安装基座上，两个二维定磁铁均固定于被减振体上；或者，直线导轨和两个一维定磁铁均固定于被减振体上，两个二维定磁铁均固定于安装基座上；

一维动磁铁和一维动磁铁均固定于永磁体安装架上，以随永磁体安装架一同沿直线导轨做 Z 向的一维直线运动；

整个多维磁负刚度机构在 Z 向上的等效刚度 k_z 满足如下关系：

$$k_z = \frac{k_{ZZ}k_{ZF}}{k_{ZZ} + k_{ZF}}$$

其中, k_{ZZ} 是二维磁负刚度单元在 Z 向产生的正刚度, k_{ZF} 是一维磁负刚度单元在 Z 向产生的负刚度;

$k_{ZF} < 0 < -k_{ZF} < k_{ZZ}$ 时, $k_z < 0$, 整个多维磁负刚度机构为三维磁负刚度机构;

$k_{ZF} < 0 < k_{ZZ} \leq -k_{ZF}$ 时, $k_z \geq 0$, 整个多维磁负刚度机构为 X 向和 Y 向的二维磁负刚度机构。

进一步地, 包括两个二维负刚度磁组和一个一维负刚度磁组, 两个二维负刚度磁组沿 X 向或 Y 向分布于一维负刚度磁组两侧。

进一步地, 包括一个二维负刚度磁组和两个一维负刚度磁组, 两个一维负刚度磁组沿 X 向或 Y 向分布于二维负刚度磁组两侧。

进一步地, 一维定磁铁和一维动磁铁均由多个磁铁堆叠而成, 且在相互堆叠的磁铁中, 相邻的磁铁充磁方向相反; 两个一维动磁铁的同层磁铁充磁方向相同, 且与一维动磁铁的同层磁铁充磁方向相反。

进一步地, 一维负刚度磁组中用于堆叠的磁铁均是截面为正方形的长条矩形体。

为了实现上述目的, 另一方面, 本发明还提供了一种多维磁负刚度减振系统, 包括: 正刚度机构以及如权利要求~任意一项所述的多维磁负刚度机构;

正刚度机构包括 X 向正刚度组件、Z 向正刚度组件和 Y 向正刚度组件, 分别沿 X 向、Z 向和 Y 向支撑于被减振体和安装基座之间。

进一步地, X 向正刚度组件、Z 向正刚度组件和 Y 向正刚度组件分别包括金属弹簧、橡胶结构、金属-橡胶复合结构、气体弹簧中的任意一种或多种。

进一步地, Z 向正刚度组件包括四个 Z 向螺旋弹簧, 对称分布在被减振体和安装基座之间的四个角落。

进一步地, X 向正刚度组件包括两个 X 向螺旋弹簧, 沿 X 向对称分布

在被隔振对象的两侧，通过 X 向安装立柱固连到安装基座上。

进一步地，Y 向正刚度组件包括两个 Y 向螺旋弹簧，沿 Y 向对称分布在被隔振对象的两侧，通过 Y 向安装立柱固连到安装基座上。

总体而言，本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，能够取得下列有益效果：

1、本发明提供的多维磁负刚度机构，通过至少一个一维负刚度磁组和至少一个二维负刚度磁组的关联关系设定，在 Z 向上实现了负刚度与正刚度串联，从而能够结合 Z 向正负刚度数值的选取，实现三个方向或者两个方向的负刚度特性。该多维磁负刚度机构与正刚度机构组成的多维减振系统，在多个方向上实现负刚度与正刚度的并联，能适应多种减振环境。

2、本发明实现了多维磁负刚度，使得减振系统在多个维度上减振效果均显著提高；在提高减振系统的减振性能的同时，保证了系统承载能力不下降。

3、本发明的多维磁负刚度机构，其负刚度通过非接触的磁场力实现，无摩擦，避免了因摩擦力而引起的非线性问题，简单方便，易于在传统减振器上应用，满足各类实际工程需要。

4、本发明的所有相互接触的永磁体之间均为吸引力，提高负刚度值的同时安装方便安全，无需粘接，结构紧凑，重量较轻，加工简单，成本较低。

5、将二维负刚度磁组设置成两对，对称布置于一维负刚度磁组两侧，课以达到平衡稳定的效果。将浮动框架与安装基座（或被减振体）用直线导轨连接，浮动框架和安装基座（或被减振体）之间可以实现 Z 向相对运动，而 X 向和 Y 向不能发生相对运动，从而得到一维负刚度磁组，可以提高系统稳定性，方便安装和维护。

6、一维负刚度磁组选择一个运动磁体置于两个固定磁体之间，在 X 方向直线均匀排列，相互之间为斥力形式，可以增大负刚度行程，减小磁铁

之间相互碰撞的风险。

7、一维负刚度磁组的永磁体可以设置成截面为正方形的长条矩形体，可以增大 Z 向的负刚度值，同时减小 Y 向的正刚度值，提升系统减振性能。此外，一维负刚度磁组还可以设置为 Z 向多层堆叠，形成矩形阵列结构，同样能够提高 Z 向负刚度值，提升系统减振性能。

8、正刚度机构在 Z 向可以选择四个螺旋弹簧、X 向选择两个螺旋弹簧、Y 向选择两个螺旋弹簧，易于安装且能够提升系统的稳定性。

【附图说明】

图 1 是本发明的原理图；

图 2 是本发明专利一种多维磁负刚度机构及其构成的减振系统实施例 1 正视图；

图 3 是本发明专利一种多维磁负刚度机构及其构成的减振系统实施例 1 俯视图；

图 4 是本发明专利一种多维磁负刚度机构及其构成的减振系统实施例 2 正视图；

图 5 是本发明专利一种多维磁负刚度机构及其构成的减振系统实施例 3 正视图；

图 6 是本发明专利一种多维磁负刚度机构及其构成的减振系统实施例 4 正视图。

【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。本发明中建立的坐标系及方向仅用于描述各构造之间的相对关系，以便于更好地理解本发明，而非作为对本发明的具体限制。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。

请参照图 1~3，本发明的基本工作原理如下：

在多维磁负刚度机构中，将一维负刚度磁组 5 的负刚度方向与减振系统的主承载方向 Z 向重合，二维负刚度磁组 6 的两个负刚度方向与减振系统的 X 向和 Y 向重合。

当被减振体 3（或者安装基座 1）由于外部原因或者内部原因发生振动时，会产生被减振体 3（或者安装基座 1）与浮动框架 4 之间、浮动框架 4 与安装基座 1（或者被减振体 3）之间的相对位移，导致运动磁体和固定磁体之间发生相对位移，进而导致两者之间相互作用的磁力发生变化。

一维负刚度磁组 5 的磁力-位移特征在于，在一维负刚度磁组 5 的负刚度方向 Z 向上，一维动磁体 51 与一维定磁体 52 间的磁力随着磁体间 Z 向相对位移的增大而增大，产生 Z 向负刚度特性 k_{ZF} ；在 X 方向和 Y 方向上，由于直线导轨 41 和浮动框架 42 的限制，一维动磁体 51 与一维定磁体 52 不能产生相对运动，因此没有对应方向正刚度特性和负刚度特性。

二维负刚度磁组 6 的磁力-位移特征在于，在 Z 向上，二维动磁体 62 与二维定磁体 61 间的磁力随着磁体间 Z 向相对位移的增大而减小，产生 Z 向正刚度特性 k_{ZZ} ，从而在 Z 向上与一维负刚度磁组 5 的 Z 向负刚度特性 k_{ZF} 组成串联关系。在 X 方向上，二维动磁体 61 与二维定磁体 62 间的磁力随着磁体间 X 向相对位移的增大而增大，产生负刚度特性 k_{XF} ；在 Y 方向上，二维动磁体 61 与二维定磁体 62 间的磁力随着磁体间 Y 向相对位移的增大而增大，产生负刚度特性 k_{YF} 。

对于多维磁负刚度机构而言，由于在 Z 方向上存在正刚度 k_{ZZ} 和负刚度 k_{ZF} ，其中一个作用在被减振体 3（或者安装基座 1）与浮动框架 4 之间，一个作用在浮动框架 4 与安装基座 1（或者被减振体 3）之间。因此，安装基座 1 和被减振体 3 之间 Z 向的刚度特性 k_z 为二者的串联，根据刚度串联公式：

$$k_z = \frac{k_{zz}k_{zf}}{k_{zz} + k_{zf}}$$

当 $k_{zf} < 0 < -k_{zf} < k_{zz}$ 时, $k_z < 0$ 。因此, 适当匹配一维负刚度磁组的 k_{zf} 和二维负刚度磁组的 k_{zz} 值, 可以使得安装基座和被减振体之间的刚度特性 k_z 小于 0, 而由于 X、Y 方向被浮动框架 4 限制而不具有正刚度, 从而使上述机构实现三维负刚度。而当 $k_{zf} < 0 < k_{zz} \leq -k_{zf}$ 时, $k_z \geq 0$, 该多维磁负刚度机构实现 X 向和 Y 向的二维负刚度。

下面结合几个具体实施例对本发明进行进一步说明。

【实施例 1】

请参照图 2、图 3, 一种多维磁负刚度机构及由其构成的多维减振系统的实施例 1, 包括安装基座 1、正刚度机构 2、被减振体 3、浮动框架 4、一维负刚度磁组 5 和二维负刚度磁组 6。图 2 中为便于理解磁负刚度的方向, 两个二维负刚度磁组 6 均标示了 k_{zz} , 实际上 k_{zz} 是整个二维磁负刚度单元在 Z 向的整体正刚度, 其余附图的刚度标记同理, 不再赘述。

所述安装基座 1 与地基或者基础结构固定连接, 可以是振动输入端或振源, 也可以是振动输出端。所述被减振体 3 为被减振设备或平台等, 可以是振动输出端, 也可以是振动输入端或振源。

所述浮动框架 4 用于固定运动的永磁体, 其包含直线导轨 41 和永磁体安装架 42。其中, 四根直线导轨 41 与安装基座 1 固连, 且直线导轨方向为减振系统主承载方向 Z 向, 与安装基座平面垂直; 永磁体安装架 42 上安装有四个直线轴承分别与四根直线导轨 41 配合, 使得永磁体安装架只能在 Z 向运动。

所述正刚度机构 2 包含 X 向弹簧 21、Z 向弹簧 22 和 Y 向弹簧 23。其中, 四个 Z 向弹簧 23 沿 Z 向布置, 两端分别连接安装基座 1 和被减振体 3, 构成 Z 向支撑正刚度; 安装基座 1 上有四根立柱用于固定弹簧, X 向弹簧 21 沿 X 向布置, 两端分别连接安装基座 1 和被减振体 3, X 向弹簧 21 有

两个，对称布置于被减振体 3 的两侧，提供 X 向正刚度； Y 向弹簧 23 沿 Y 向布置，两端分别连接安装基座 1 和被减振体 3， Y 向弹簧 23 有两个，对称布置于被减振体 3 的两侧，提供 Y 向正刚度。

所述一维负刚度磁组 5，包含垂向负刚度磁组动磁体 51 和垂向负刚度磁组定磁体 52。垂向负刚度磁组动磁体 51 与所述永磁体安装架 42 固连。垂向负刚度磁组定磁体 52 为两块永磁体，对称分布于垂向负刚度磁组动磁体 51 的两侧，与安装基座 1 固连。三块永磁体沿 X 方向均匀排列，充磁方向也均为 X 方向，相邻永磁体间充磁方向相反，形成排斥力，构成一维负刚度磁组，提供 Z 向负刚度。

所述二维负刚度磁组 6 包括两组磁体，对称布置于一维负刚度磁组的两侧。每一组磁体包括二维负刚度磁组定磁体 61 和二维负刚度磁组动磁体 62。所述二维负刚度磁组动磁体 62 与永磁体安装架 42 固连。同一侧的两块二维负刚度磁组定磁体 61 与被减振体 3 固连，且对称布置于二维负刚度磁组动磁体 62 的上下两侧。三块永磁体沿 Z 向直线均匀排列，且充磁方向都相同，均为 Z 向，形成吸力，提供 X 向和 Y 向的负刚度。二维负刚度磁组 6 在 Z 向形成的正刚度与一维负刚度磁组 5 形成的负刚度串联，形成被减振体 3 和安装基座 1 之间的 Z 向负刚度。

【实施例 2】

请参照图 4，本发明的实施例 2 与实施例 1 的区别在于，一维定磁铁 52 和直线导轨 41 与被减振体 3 固连，而二维负刚度磁组定磁体 61 与安装基座 1 固连。

【实施例 3】

请参照图 5，本发明的实施例 3 与实施例 1 的区别在于，一维定磁铁 52 和一维动磁铁 51 均由三层界面为正方形的长条形磁体组成，所有磁体充磁方向均为 X 方向，但是同一行、同一列的相邻磁体的充磁方向相反。本实施例可以增大 Z 向的负刚度，提升系统 Z 向的减振性能。

【实施例 4】

请参照图 6，本发明的实施例 4 与实施例 3 的区别在于，采用两个一维负刚度磁组 5 对称布置于一个二维负刚度磁组 6 两侧。

在其他实施例中（未图示），由于一维负刚度磁组 5 仅能沿 Z 向做一维直线运动，一维负刚度磁组 5 并不需要如实施例 1~4 那样按照 X 方向充磁。实际上，只要按照 XY 平面上的任意直线充磁，即垂直于 Z 向充磁均可。

在其他实施例中（未图示），直线导轨 41 也可以仅包括两个直线导套，或者仅需要一个直线滑块，只要能实现一维直线运动即可。

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、一种多维磁负刚度机构，其特征在于，包括：安装基座（1）、浮动框架（4）、二维磁负刚度单元和一维磁负刚度单元；

二维磁负刚度单元包括至少一个二维负刚度磁组（6），一维磁负刚度单元包括至少一个一维负刚度磁组（5）；

浮动框架包括直线导轨（41）和永磁体安装架（42）；永磁体安装架（42）沿直线导轨（41）做一维直线运动；以主承载方向为 Z 向建立三维直角坐标系 OXYZ，则直线导轨（41）沿 Z 向布置，二维负刚度磁组（6）的两个负刚度方向分别沿 X 向和 Y 向布置，一维负刚度磁组（5）的负刚度方向沿 Z 向布置；

二维负刚度磁组（6）包括沿 Z 向直线排布的两个二维动磁铁（62）和位于其间的一个二维定磁铁（61）；二维定磁铁（61）和二维动磁铁（62）均沿 Z 向充磁，两个二维定磁铁（61）充磁方向相同且与二维动磁铁（62）充磁方向相反；

一维负刚度磁组（5）包括垂直于 Z 向直线排布的两个一维定磁铁（52）和位于其间的一个一维动磁铁（51）；

直线导轨（41）和两个一维定磁铁（52）均固定于安装基座（1）上，两个二维定磁铁（61）均固定于被减振体（3）上；或者，直线导轨（41）和两个一维定磁铁（52）均固定于被减振体（3）上，两个二维定磁铁（61）均固定于安装基座（1）上；

一维动磁铁（51）和一维动磁铁（62）均固定于永磁体安装架（42）上，以随永磁体安装架（42）一同沿直线导轨（41）做 Z 向的一维直线运动；

整个多维磁负刚度机构在 Z 向上的等效刚度 k_z 满足如下关系：

$$k_z = \frac{k_{zz}k_{zf}}{k_{zz} + k_{zf}}$$

其中, k_{zz} 是二维磁负刚度单元在 Z 向产生的正刚度, k_{zf} 是一维磁负刚度单元在 Z 向产生的负刚度;

$k_{zf} < 0 < -k_{zf} < k_{zz}$ 时, $k_z < 0$, 整个多维磁负刚度机构为三维磁负刚度机构;

$k_{zf} < 0 < k_{zz} \leq -k_{zf}$ 时, $k_z \geq 0$, 整个多维磁负刚度机构为 X 向和 Y 向的二维磁负刚度机构。

2、如权利要求 1 所述的一种多维磁负刚度机构, 其特征在于, 包括两个二维负刚度磁组 (6) 和一个一维负刚度磁组 (5), 两个二维负刚度磁组 (6) 沿 X 向或 Y 向分布于一维负刚度磁组 (5) 两侧。

3、如权利要求 1 所述的一种多维磁负刚度机构, 其特征在于, 包括一个二维负刚度磁组 (6) 和两个一维负刚度磁组 (5), 两个一维负刚度磁组 (5) 沿 X 向或 Y 向分布于二维负刚度磁组 (6) 两侧。

4、如权利要求 1~3 任意一项所述的一种多维磁负刚度机构, 其特征在于, 一维定磁铁 (52) 和一维动磁铁 (51) 均由多个磁铁堆叠而成, 且在相互堆叠的磁铁中, 相邻的磁铁充磁方向相反; 两个一维动磁铁 (51) 的同层磁铁充磁方向相同, 且与一维动磁铁 (51) 的同层磁铁充磁方向相反。

5、如权利要求 4 所述的一种多维磁负刚度机构, 其特征在于, 一维负刚度磁组 (6) 中用于堆叠的磁铁均是截面为正方形的长条矩形体。

6、一种多维磁负刚度减振系统, 其特征在于, 包括: 正刚度机构 (2) 以及如权利要求 1~5 任意一项所述的多维磁负刚度机构;

正刚度机构 (2) 包括 X 向正刚度组件 (21)、Z 向正刚度组件 (22) 和 Y 向正刚度组件 (23), 分别沿 X 向、Z 向和 Y 向支撑于被减振体 (3) 和安装基座 (1) 之间。

7、如权利要求 6 所述的一种多维磁负刚度减振系统, 其特征在于, X

向正刚度组件（21）、Z 向正刚度组件（22）和 Y 向正刚度组件（23）分别包括金属弹簧、橡胶结构、金属-橡胶复合结构、气体弹簧中的任意一种或多种。

8、如权利要求 7 所述的一种多维磁负刚度减振系统，其特征在于，Z 向正刚度组件（22）包括四个 Z 向螺旋弹簧，对称分布在被减振体（3）和安装基座（1）之间的四个角落。

9、如权利要求 7 所述的一种多维磁负刚度减振系统，其特征在于，X 向正刚度组件（21）包括两个 X 向螺旋弹簧，沿 X 向对称分布在被隔振对象（3）的两侧，通过 X 向安装立柱固连到安装基座（1）上。

10、如权利要求 7 所述的一种多维磁负刚度减振系统，其特征在于，Y 向正刚度组件（23）包括两个 Y 向螺旋弹簧，沿 Y 向对称分布在被隔振对象（3）的两侧，通过 Y 向安装立柱固连到安装基座（1）上。

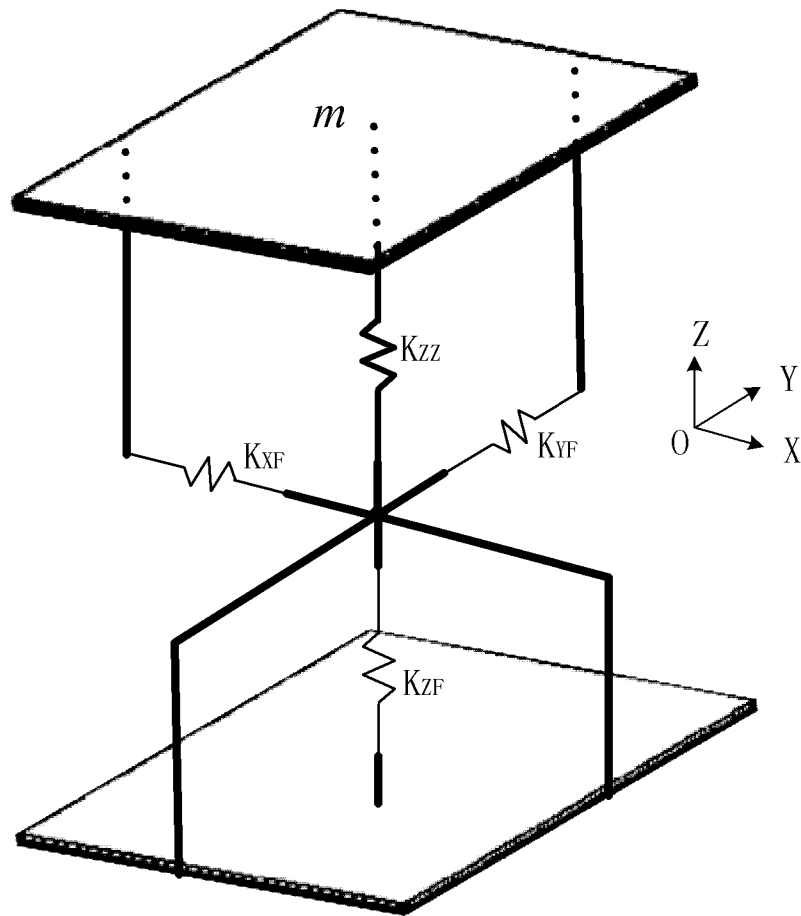


图 1

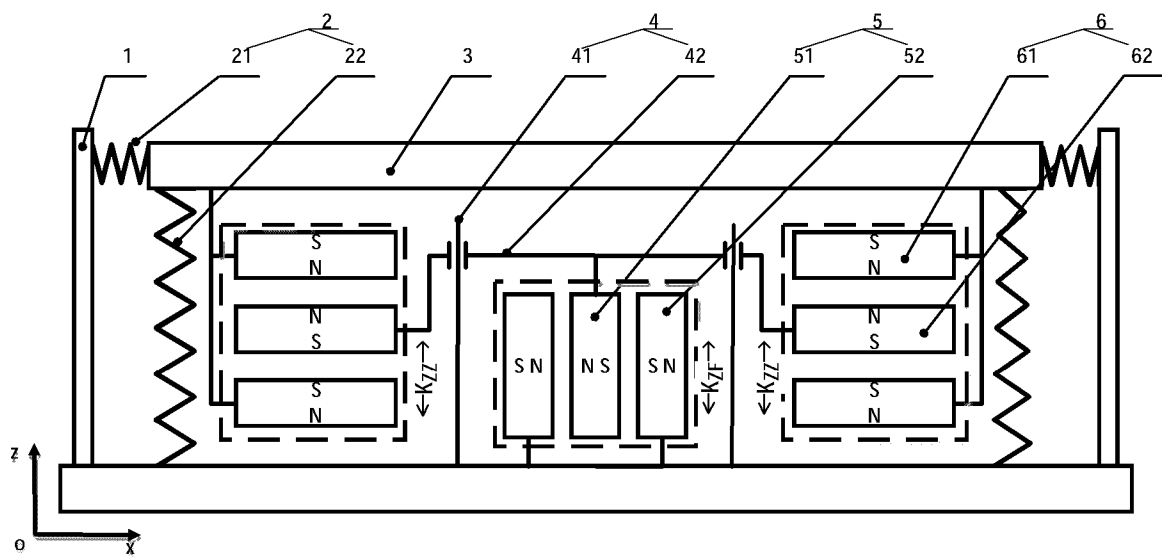


图 2

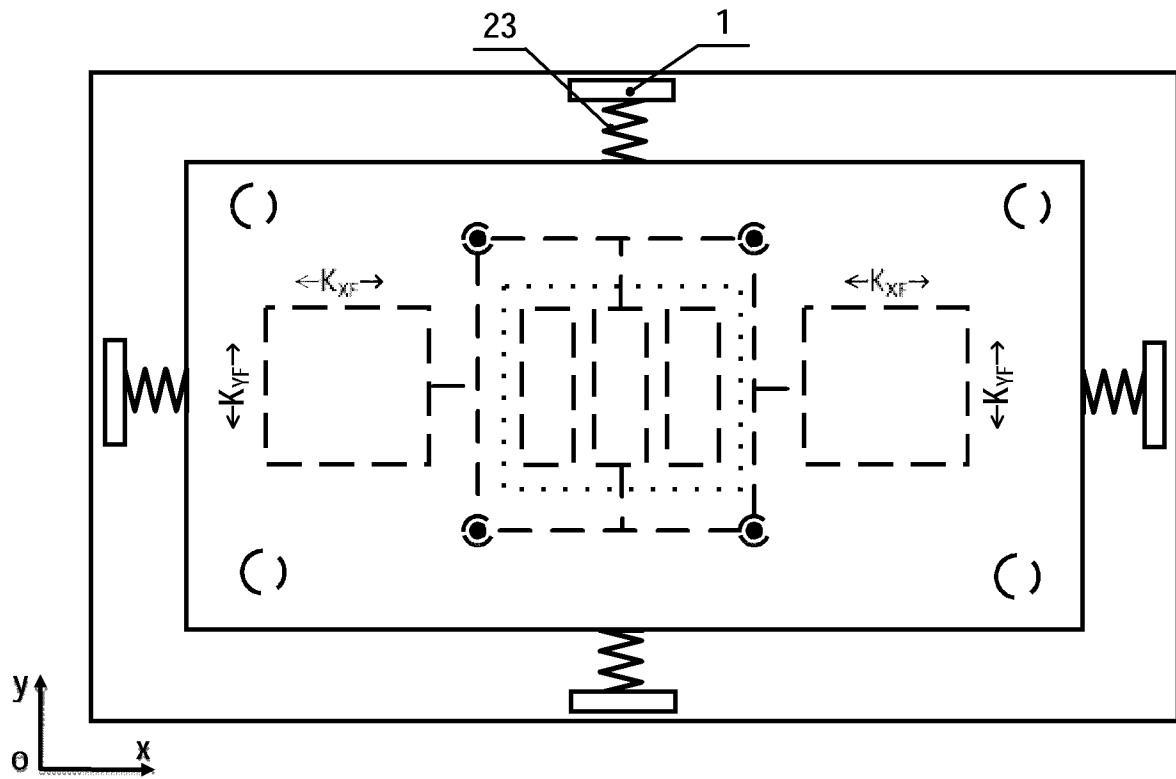


图 3

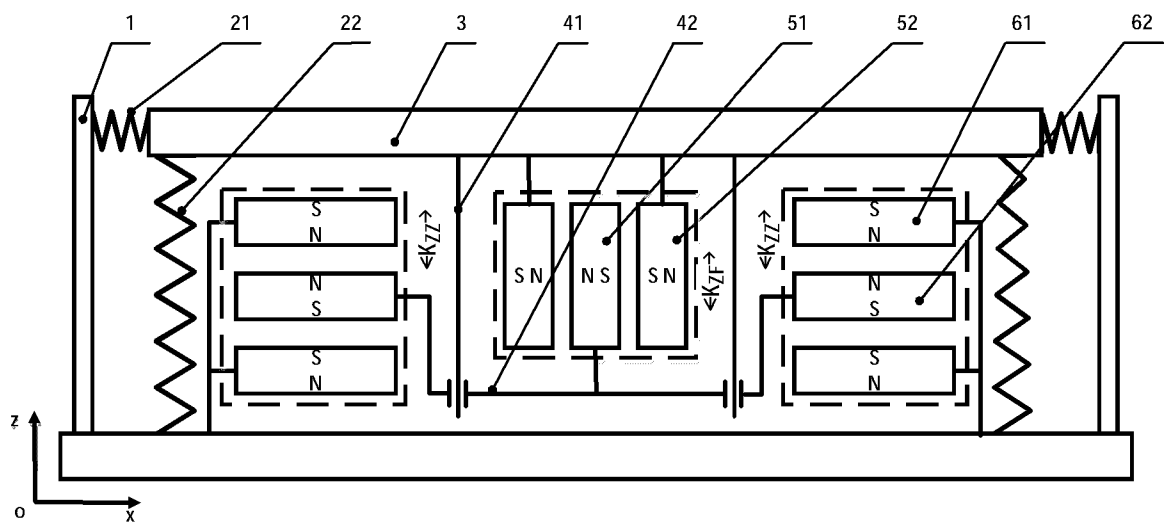


图 4

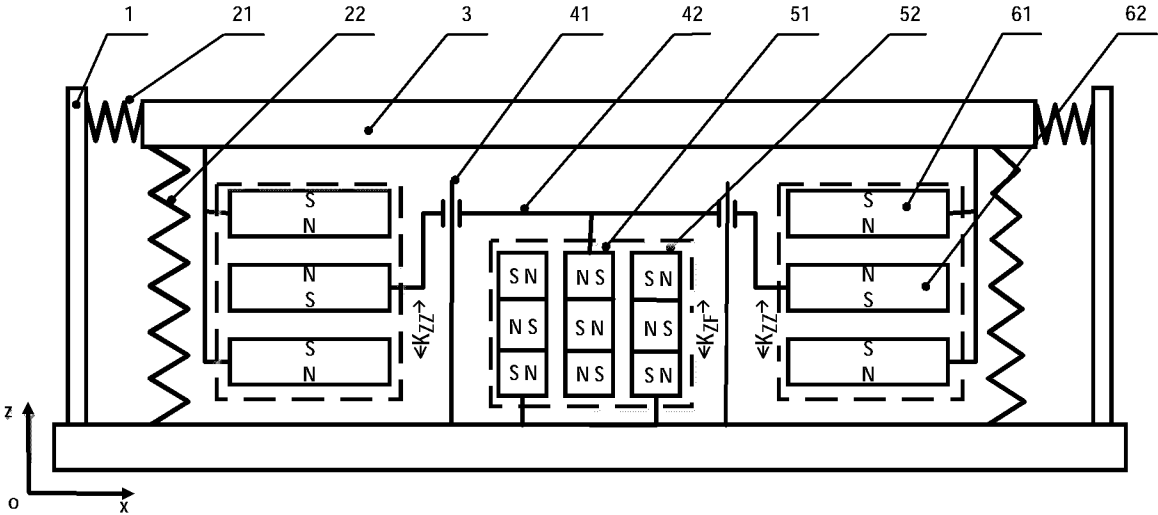


图 5

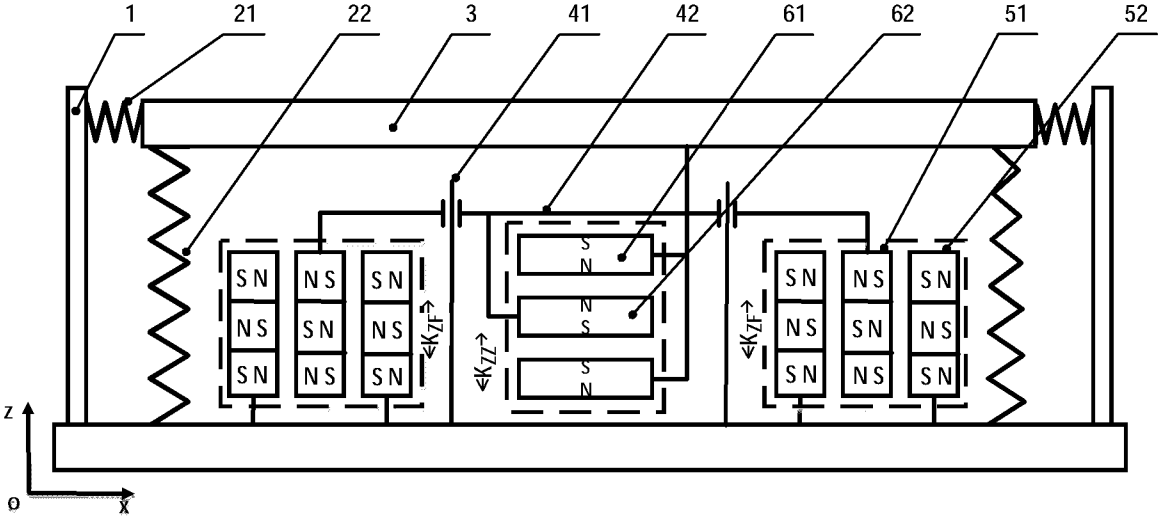


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/111673

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F16F 15/02(2006.01)i; F16F 15/04(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)

F16F15/+

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, CNKI, WPI, EPODOC: 华中科技大学, 姜伟, 陈学东, 多维, 磁负刚度, 串联, 减振, 减震, 承载, 稳定性, multi-dimensional, negative stiffness, rigidity, magnet+, in- series, vibration, bear, stability.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109356962 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 19 February 2019 (2019-02-19) entire document	1-10
A	CN 102410337 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 11 April 2012 (2012-04-11) description, paragraphs 19-23, and figures 1-4	1-10
A	CN 103256332 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 21 August 2013 (2013-08-21) entire document	1-10
A	CN 102734377 A (SHANGHAI MICRO ELECTRONICS EQUIPMENT CO., LTD.) 17 October 2012 (2012-10-17) entire document	1-10
A	CN 102808883 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 05 December 2012 (2012-12-05) entire document	1-10
A	CN 106321719 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 11 January 2017 (2017-01-11) entire document	1-10

☒ 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

31 December 2019

Date of mailing of the international search report

15 January 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/CN2019/111673**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 20120093014 A (SHIN, K. H.) 22 August 2012 (2012-08-22) entire document	1-10
A	JP 4157393 B2 (MIZUNO, T. et al.) 01 October 2008 (2008-10-01) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/111673

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109356962	A	19 February 2019	None			
CN	102410337	A	11 April 2012	None			
CN	103256332	A	21 August 2013	None			
CN	102734377	A	17 October 2012	None			
CN	102808883	A	05 December 2012	WO	2014023057	A1	13 February 2014
CN	106321719	A	11 January 2017	None			
KR	20120093014	A	22 August 2012	None			
JP	4157393	B2	01 October 2008	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/111673

A. 主题的分类 F16F 15/02 (2006.01) i; F16F 15/04 (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) F16F15/+ 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, CNKI, WPI, EPDOC: 华中科技大学, 姜伟, 陈学东, 多维, 磁负刚度, 串联, 减振, 减震, 承载, 稳定性, multi-dimensional, negative stiffness, rigidity, magnet+, in-series, vibration, bear, stability.		
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 109356962 A (华中科技大学) 2019年 2月 19日 (2019 - 02 - 19) 全文	1-10
A	CN 102410337 A (清华大学) 2012年 4月 11日 (2012 - 04 - 11) 说明书第19-23段, 图1-4	1-10
A	CN 103256332 A (华中科技大学) 2013年 8月 21日 (2013 - 08 - 21) 全文	1-10
A	CN 102734377 A (上海微电子装备有限公司) 2012年 10月 17日 (2012 - 10 - 17) 全文	1-10
A	CN 102808883 A (华中科技大学) 2012年 12月 5日 (2012 - 12 - 05) 全文	1-10
A	CN 106321719 A (华中科技大学) 2017年 1月 11日 (2017 - 01 - 11) 全文	1-10
A	KR 20120093014 A (SHIN Kihong) 2012年 8月 22日 (2012 - 08 - 22) 全文	1-10
A	JP 4157393 B2 (MIZUNO T. 等) 2008年 10月 1日 (2008 - 10 - 01) 全文	1-10
☐ 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 2019年 12月 31日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 15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 成春旺 电话号码 86-10-53960862

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/111673

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	109356962	A	2019年 2月 19日	无	
CN	102410337	A	2012年 4月 11日	无	
CN	103256332	A	2013年 8月 21日	无	
CN	102734377	A	2012年 10月 17日	无	
CN	102808883	A	2012年 12月 5日	W0 2014023057 A1	2014年 2月 13日
CN	106321719	A	2017年 1月 11日	无	
KR	20120093014	A	2012年 8月 22日	无	
JP	4157393	B2	2008年 10月 1日	无	