



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105379084 B

(45)授权公告日 2018.10.16

(21)申请号 201380073516.2

(22)申请日 2013.12.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105379084 A

(43)申请公布日 2016.03.02

(30)优先权数据
A1334/2012 2012.12.21 AT

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.08.20

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2013/077888 2013.12.23

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/096444 DE 2014.06.26

(73)专利权人 斯易爱奇有限公司
地址 马耳他比尔基卡拉米里尔埃尔

(72)发明人 杰里米·海恩
马丁·马施纳冯海姆里奇

(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262
代理人 张瑞 杨明钊

(51)Int.Cl.
H02K 33/16(2006.01)
H01F 7/16(2006.01)
H02P 25/032(2016.01)

(56)对比文件
US 2007166022 A1, 2007.07.19,
US 5621293 A, 1997.04.15,
US 2008290624 A1, 2008.11.27,
DE 102007051917 A1, 2008.05.29,
审查员 彭维娜

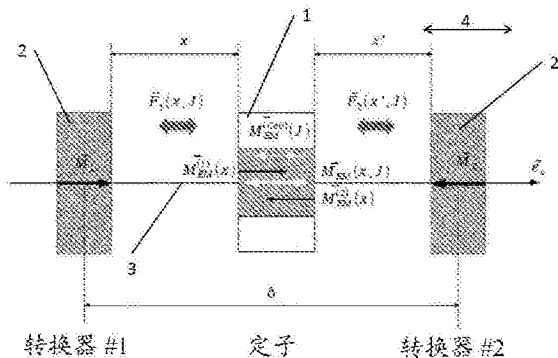
权利要求书2页 说明书11页 附图19页

(54)发明名称

具有作用于转换器的加速单元的磁性装置

(57)摘要

一种具有至少一个定子(1)和转换器(2)的磁性装置,所述转换器(2)可沿着转换器运动路径(3)相对于定子(1)在转换器运动方向(4)上运动,其中转换器(2)在转换器运动路径(3)的至少部分区域与加速单元(5)耦合,该加速单元在转换器(2)与加速单元(5)耦合时导致包含了至少一个校正力 F_{corr} 的、作用于转换器(2)的加速力状态,所述加速力状态可使得转换器(2)运动离开定子(1),其中当转换器(2)与加速单元(5)耦合时并且当转换器(2)运动离开定子(1)时,在转换器运动方向(4)上因磁性所致作用于转换器(2)的力之和大于或等于零,从而使得转换器(2)可借助校正力 F_{corr} 摆脱由定子(1)引起的引力。



1. 一种磁性装置,其具有至少一个定子(1)和至少一个转换器(2),所述转换器(2)能够沿着转换器运动路径(3)相对于定子(1)在转换器运动方向(4)上运动,

其中所述定子(1)为永磁体并且所述转换器(2)为电磁体,或者所述定子(1)为电磁体并且所述转换器(2)为永磁体,

其中在所述定子(1)和所述转换器(2)之间形成磁力 $\vec{F}(x, J)$,其中 $x \geq 0$ 为所述定子(1)和所述转换器(2)之间的距离,而 J 为电磁体的电流密度,并且

其中所述转换器(2)在所述转换器运动路径(3)的至少部分区域与加速单元(5)耦合,所述加速单元(5)在所述转换器(2)与加速单元(5)耦合时导致至少包含校正力 $\vec{F}_{\text{corr}}(x)$ 的、作用于所述转换器(2)的加速力状态,所述加速力状态在所述转换器离开所述定子的运动方向上取向,

其特征在于,

在转换器运动方向(4)上作用于所述转换器(2)的力 $\vec{F}(x, J)$ 的总和由 $\vec{F}_{\text{tot}}(x, J) = \vec{F}(x, J) + \vec{F}_{\text{corr}}(x)$ 来定义;

由所述加速单元(5)导致的校正力 $\vec{F}_{\text{corr}}(x)$ 依赖于 $\vec{F}(x, J = 0)$,其中 $\vec{F}(x, J = 0)$ 能够在所述电磁体未被供应电流时通过测量来确定;

以及其特征在于,

a) 当所述转换器(2)运动离开所述定子(1)时,在转换器运动方向(4)上作用于所述转换器(2)的力的总和大于零, $F(x, J=0) + F_{\text{corr}}(x) > 0$,其中 $F_{\text{corr}}(x) > -F(x, J=0)$,或者

b) 当所述转换器(2)朝向所述定子(1)运动时,在转换器运动方向(4)的反方向上作用于所述转换器(2)的力的总和小于零, $F(x, J=0) + F_{\text{corr}}(x) < 0$,其中 $F_{\text{corr}}(x) < -F(x, J=0)$,或者

c) 当所述转换器(2)和所述定子(1)处于平衡状态时,作用于所述转换器(2)的力的总和为零, $F(x, J=0) + F_{\text{corr}}(x) = 0$,其中 $F_{\text{corr}}(x) = -F(x, J=0)$,

从而使得所述转换器(2)能够借助所述校正力与所述定子(1)分开。

2. 如权利要求1所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)能够根据所述转换器(2)到所述定子(1)的距离在所述转换器(2)接近所述定子(1)时预张紧,和/或,所述加速单元(5)根据所述转换器(2)到所述定子(1)的距离导致所述加速力状态。

3. 如权利要求1所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)与所述转换器(2)和固定点(6)耦合,并且至少部分地在所述转换器(2)和所述固定点(6)之间延伸,其中所述定子(1)为所述固定点(6)。

4. 如权利要求2所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)与所述转换器(2)和固定点(6)耦合,并且至少部分地在所述转换器(2)和所述固定点(6)之间延伸,其中所述定子(1)为所述固定点(6)。

5. 如权利要求1至4中任一项所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)具有磁体或驱动单元,其中该驱动单元包括电动机和/或气动装置或液压装置。

6. 如权利要求1至4中任一项所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)具有弹簧,此弹簧具有平行于所述转换器运动方向(4)作用的弹簧力分量。

7. 如权利要求1至4中任一项所述的磁性装置,其特征在于,所述磁性装置具有控制装置,所述控制装置用于根据加速力状态来控制所述电磁体的极性以及控制所述电磁体的磁场强度。

8. 如权利要求5所述的磁性装置,其特征在于,所述加速单元(5)具有弹簧,此弹簧具有平行于所述转换器运动方向(4)作用的弹簧力分量。

9. 如权利要求5所述的磁性装置,其特征在于,所述磁性装置具有控制装置,所述控制装置用于根据加速力状态来控制所述电磁体的极性以及控制所述电磁体的磁场强度。

10. 如权利要求6所述的磁性装置,其特征在于,所述磁性装置具有控制装置,所述控制装置用于根据加速力状态来控制所述电磁体的极性以及控制所述电磁体的磁场强度。

11. 如权利要求8所述的磁性装置,其特征在于,所述磁性装置具有控制装置,所述控制装置用于根据加速力状态来控制所述电磁体的极性以及控制所述电磁体的磁场强度。

具有作用于转换器的加速单元的磁性装置

[0001] 本发明涉及一种具有至少一个定子磁体和转换器磁体的磁性装置,所述转换器磁体可沿着转换器运动路径相对于定子磁体在转换器运动方向上运动,其中转换器在转换器运动路径的至少一部分区域中与加速单元耦合,在转换器与加速单元耦合时所述加速单元导致作用于转换器的包含校正力 F_{corr} 的加速力状态,该加速力状态可导致转换器运动离开定子。

[0002] 为了简单起见,定子磁体在下面简称为定子,转换器磁体在下面简称为转换器。

[0003] 根据现有技术的磁制动器具有至少一个定子和转换器,转换器可使用在定子和转换器之间作用的磁性引力和斥力来相对于定子运动。从AT20110001260 20110905(申请人Jeremy Hein、Martin Marschner von Helmreich)中已知,引力和斥力基本上是在定子和转换器之间的距离的函数。通过选择在转换器到较近定子的间距可优化作用于转换器的、导致转换器运动的力之和。

[0004] 在朝定子运动且与定子间距为 r 的转换器上,作用于转换器的、由磁引力所引起的受力情况可达到最大值。如果转换器的运动方向反过来,也就是说如果转换器运动离开定子,那么在间距 r 足够小时,定子与运动的转换器之间会有引力作用。

[0005] 因此,当定子和转换器之间的距离足够小时,定子和转换器独立于定子和转换器的极性被用作磁体。此外,该足够小的距离通过转换器相对于定子的场强来给定,反之亦然。转换器的场强在磁性装置运行时,例如在电磁体极性反转时刻与定子相比会很小。

[0006] 若在定子与转换器之间的间距足够小,则转换器远离定子的运动会被在定子与转换器之间作用的引力阻止或抑制。现有技术公知的这种效应称之为将转换器“捕获(Fangen)”在定子上。例如,被用作磁驱动器的磁性装置的性能会因此降低。

[0007] DE102997051917公开的磁性装置具有被构造成电磁体的致动器和用于在运动方向上产生力的弹簧元件。DE102997051917中没有指出在本专利申请公开内容中所讨论的至少在转换器充分接近定子时在定子和转换器的作用的问题。结果是,本领域技术人员面临的不是提出在下面所描述的、根据本发明的力的平衡或力的不平衡。DE102997051917中不包括与要在运动方向上生成的力的大小有关的说明,从而使得本领域技术人员不能从DE102997051917中推断出弹力的大小。

[0008] EP1320178中也没有指明除了电磁线性驱动器外起作用的弹簧的大小。当转换器充分接近定子时,定子和转换器用作磁体这一问题在EP1320178中也没有谈及,从而使得本领域技术人员不能从EP1320178中推断出弹力的大小或者可推断出EP1320178中所述与下面所描述的加速单元类似的弹簧的作用。

[0009] DE10003928中公开了一种具有作用于转换器的弹簧机构的电磁致动器。根据DE10003928的公开内容,该弹簧机构充当转换器的回转机构。本发明所针对的当转换器运动离开定子时转换器脱离定子这一问题在DE10003928中没有谈及。

[0010] 在W02007063222中,弹簧的任务在于,若线圈发生故障则将致动器置于关闭位置。因此,在W02007063222中没有谈及本发明所针对的问题。

[0011] DE202009014192中所公开的装置的弹簧不会影响转换器的运动,但被用于耦合多

个装置。

[0012] 这里所谈论的发明提出的任务在于,提供一种磁性装置,该磁性装置与根据现有技术的装置相比具有额外的组件,该组件会减少或阻止将转换器捕获在定子上的作用。下面将通过捕获作用所导致的受力状态称为捕获力状态。

[0013] 根据本发明所述情况是这样实现的,即当转换器与加速单元耦合时并且当转换器运动离开定子时,在转换器运动方向上因磁性所致作用于转换器的力之和大于或等于零,从而使得转换器可借助校正力 F_{corr} 摆脱由定子引起的引力。

[0014] 根据本发明,磁性装置可以是磁驱动器、发电机、电阻单元或其它装置,在所述装置中,转换器大体上相对于定子运动,或者由于磁场所引起的力导致仅部分地运动。

[0015] 当转换器到定子的距离足够小时,定子和转换器用作磁体,从而使得转换器向着定子运动。由加速单元引起的加速力状态在转换器离开定子的运动方向上取向。加速力状态的作用可局限在转换器运动路径的部分区域,在此区域会出现上面描述的捕获效应。

[0016] 加速力状态可通过在转换器运动路径的部分区域中叠加捕获力状态得到。捕获力状态基本上通过在定子与转换器之间作用的引力形成。加速力状态会根据其自身的大小部分地或全部地与捕获力状态抵消。

[0017] 加速单元可导致以机械生成的力或磁力为基础的受力状态。加速单元可引起由于至少部分弹性变形体的事先变形产生的加速力状态。转换器运动可导致弹性体的变形。一般说来,在发生捕获效应之前和/或在转换器到达充分接近定子的区域(在此区域随后会发生捕获效应)之前,转换器至少部分地向着定子运动期间会引起弹性体的变形。

[0018] 根据本发明的磁性装置的实施形式的特征在于,加速单元通过整个转换器运动路径有效地与转换器耦合。

[0019] 可根据转换器到定子的距离,在转换器接近定子时,将加速单元预张紧和/或加速单元可根据转换器到定子的距离导致加速力状态。

[0020] 当转换器与加速单元耦合时并且当转换器向着定子运动时,在转换器运动方向的反方向上作用于转换器的力之和可以小于或等于零。

[0021] 当转换器与加速单元耦合时并且当转换器运动离开定子时,在转换器运动方向上的、在转换器上的作用力之和可以大于或等于零。

[0022] 此处公开的根据本发明的磁性装置不局限于将加速单元定位在定子与转换器之间的区域。将加速单元定位在所述区域只是加速单元根据本发明的一种定位可能性。此外,加速单元可布置在转换器运动路径的侧面,与转换器运动路径呈任意角度延伸。

[0023] 弹簧也可与支承元件构成整体式构成,所述支承元件实现支承在转换器轴上滑行的转换器的功能。弹簧可构造成片簧或螺旋弹簧。支承元件可具有弹性材料,该弹性材料在根据本发明的磁性装置运行时会发生变形。

[0024] 根据现有技术,在转换器上的作用力为依据相应的定子和相应的转换器之间的距离在此区域作用的定子和转换器之和。在出现上述捕获效应时,在定子与运动离开定子的转换器之间作用的捕获力的行为与弹簧的相应结构相类似。这里公开的发明的特征在于,加速单元会依据转换器到定子的暂时距离产生加速力状态。

[0025] 加速单元的上述特征,例如可由于弹簧的几何结构在弹簧长度上不同或因弹簧的材料性质在弹簧长度上不同来实现。例如用类似的方式可构成弹性变形体。

[0026] 根据本发明的磁性装置的以下实施形式被证明是有利的,即根据接近定子的转换器来预张紧加速单元。在本发明的框架中,预张紧状态被描述为与预张紧弹簧得到的一种状态类似,在此状态下加速单元存储被施加在加速单元上的、用于以后释放的力或变形。根据本发明,以后释放被施加的力或变形,以便释放被捕获在定子上的转换器。

[0027] 根据本发明的磁性装置的可能实施形式的特征在于,加速单元与转换器和固定点耦合,且至少部分地在转换器与固定点之间延伸。

[0028] 固定点可以是位于根据本发明的装置以外的物体。此外,固定点可以是设备部件,例如机架或壳体部件。固定点相对于定子能够是不可移动地或可移动地布置。

[0029] 可将定子构造成固定点。

[0030] 加速单元可以是另一个磁体,该磁体与转换器耦合并被接通用于加速转换器。此磁体可以是永磁体和/或电磁体。

[0031] 此外,加速单元可具有驱动器,从而使得根据本发明的核心思想,在驱动器与转换器耦合时可应用受力状态。该驱动器例如可以是根据现有技术的电动机和/或气动装置或液压装置。

[0032] 加速单元可构造成弹簧,此弹簧具有平行于转换器运动方向作用的弹簧力分量。

[0033] 因此,所述弹簧力分量在与通过捕获效应引起的力的相反方向上作用。转换器向着定子的移动会预张紧弹簧,其中存储在弹簧中的力会在转换器运动离开定子时释放。

[0034] 上述说明涉及到线性的或多边形的转换器运动路径。转换器运动路径的延长线(Strahl)可通过定子。

[0035] 根据本发明的磁性装置的可能实施形式包括电磁体和永磁体的所有可能组合形式,特别是包括将定子和转换器构造成永磁体或电磁体。

[0036] 可将定子和转换器构造成永磁体。

[0037] 可将定子构造成永磁体并将转换器构造成电磁体。

[0038] 可将定子构造成电磁体并将转换器构造成电磁体。

[0039] 根据一般的专业知识,要极化电磁体和/或永磁体,使得可通过产生的斥力或引力使转换器相对于定子运动或使其在定义的位置。

[0040] 在将定子和/或转换器构造成电磁体时,定子和/或转换器作为另一个磁体。这一点可通过改变在规定的时间内定子和/或转换器的磁场来实现。可根据运动的转换器的位置来选择规定的时间。

[0041] 根据本发明的磁性装置可具有控制装置,其用于根据加速力状态来控制电磁体的极化以及控制电磁体的强度。

[0042] 借助以下附图和相应的附图说明来对作为根据本发明的磁性装置一部分的加速单元的作用进行阐述以便对上述说明进行补充。

[0043] 附图中用以下参考号标示了下列元件:

[0044] 1 定子

[0045] 2 转换器

[0046] 3 转换器运动路径

[0047] 4 转换器运动方向

[0048] 5 加速单元

[0049] 6 固定点

[0050] 7 弹簧

[0051] 图1至16涉及的磁性装置具有一个定子和一个转换器。

[0052] 图17至27涉及的磁性装置具有一个定子和两个转换器。

[0053] 此外,在下面关于转换器运动的讨论中,为了本领域技术人员根据前述教导方便实现本申请的技术方案起见没有考虑相反作用的力,如摩擦力或空气阻力。

[0054] 参照图1至16来观察两个沿线性的转换器运动路径3布置的磁偶极子的相互作用。第一偶极子1被构造成电磁体,第二偶极子2被构造成永磁体。借助图1至17进行的讨论是基于假设在偶极子之间没有相对运动,因此不能够将偶极子称为定子或转换器。

[0055] 为了简化根据前述教导的技术方案的实现起见,假设永磁体具有圆柱形状,以及至少沿转换器运动轴延伸的磁场。此外,采用以安培每米[A/m]为单位的、磁场具有均匀的磁化强度 $\vec{M}_1 = M_1 \vec{e}_x$ 。永磁体外的磁场随着与磁体距离x的增加而减少。这一点可用如下公式表示:

$$[0056] \quad \vec{H}_1(x) = M_1 \times f(x) \vec{e}_x \text{ [A/m]}, \text{ 并且 } \begin{cases} f(0) = 1 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0 \end{cases}$$

[0057] 电磁体具有圆柱形的铁磁芯,线圈也以圆柱形状绕此铁磁芯延伸。为了简单起见,假设铁磁芯具有均匀的磁化强度,当使用外磁场 $H_{coil}(J)$ [A/m]时,有以下关系式成立:

[0058] $\vec{M}_{core}(H) = \chi_v \times \text{vec} H$, 式中 χ_v 为铁磁芯的磁化率。当电流I流经电磁体的绕组时,会在线圈内产生均匀的磁场 $H_{coil}(J)$, 其中J[A/m]为线圈绕组内的电流密度。

[0059] 相应地,可根据 $\vec{M}_{EM}^{(coil)}(J) = \chi_v H_{coil}(J) \vec{e}_x$ 由电流密度J计算出电磁体的铁磁芯的磁场。结果是,与铁磁芯相距x的永磁体会产生另一个磁场 $\vec{M}_{EM}^{(1)}(x) = \chi_v \times H_1(x) \vec{e}_x = \chi_v \times M_1 \times f(x) \vec{e}_x$ [A/m]。根据相关教导,当 $x=0$ 时,所述另一磁场的最大值为 $\vec{M}_{EM}^{(1)}(0) = \chi_v \times H_1(0) \vec{e}_x = \chi_v M_1 \vec{e}_x$ 。

[0060] 结果是,铁磁芯的磁场强度为相距x的永磁体提供的磁场和施加电流密度为J的线圈所提供的磁场之和:

$$[0061] \quad \vec{M}_{EM}(x, J) = \vec{M}_{EM}^{(1)}(x) + \vec{M}_{EM}^{(coil)}(J) = \chi_v [H_{coil}(J) + H_1(x)] \vec{e}_x = \chi_v [H_{coil}(J) + M_1 \times f(x)] \vec{e}_x$$

[0062] 考虑在永磁体与电磁体之间的相互作用力时,要注意下面两种基本情况(情况1,情况2)。在图2至5中导出的永磁体和电磁体的磁化强度可从下列基本情况中推导出来。

[0063] 情况1:永磁体和芯在同一方向上被磁化,从而得出:

$$[0064] \quad \begin{aligned} \forall x, \forall J, \vec{M}_{EM}(x, J) &= M_{EM}(x, J) \vec{e}_x, \quad M_{EM}(x, J) > 0 \\ \forall x, \vec{M}_1(x) &= M_1(x) \vec{e}_x, \quad M_1(x) > 0 \end{aligned} \text{ , 其中永磁体和芯彼此相对定向}$$

的侧面具有不同的极性。合力为引力, $\vec{F}_1(x) = F_1(x) \vec{e}_x$, $F_1(x) < 0$ 适用于该引力。

[0065] 情况2:永磁体和铁芯在不同方向上被磁化,从而得出

$$[0066] \quad \begin{aligned} \forall x, \forall J, \vec{M}_{EM}(x, J) &= M_{EM}(x, J) \vec{e}_x, \quad M_{EM}(x, J) < 0 \\ \forall x, \vec{M}_1(x) &= M_1(x) \vec{e}_x, \quad M_1(x) < 0 \end{aligned} \text{ , 其中永磁体和芯彼此相对定向的}$$

侧面具有相同的极性。合力为斥力, $\vec{F}_1(x) = F_1(x)\vec{e}_x$, $F_1(x) > 0$ 适用于该斥力。

[0067] 当芯被“正”磁化时出现引力, 这会导致 $H_{coil}(J) > -H_1(x)$ 。其中电流密度 J_1 满足 $\forall x$, $H_{coil}(J) = -H_1(x)$ 条件时, 若 $J > J_1$ 则出现引力。

[0068] 当芯被“反”磁化时出现斥力, 这会导致 $H_{coil}(J) < -H_1(x)$, 且 $J < J_1$ 。

[0069] 如不给线圈施加电流, 则会出现引力相互作用, 因为芯被“正”磁化, 则 $H_{coil}(0) = 0 > -H_1(x)$ 成立。

[0070] 当电磁体的磁场比永磁体的磁场强并且与之反向时, 产生斥力。这是因为 $H_{coil}(J) < -H_1(x)$, 且 $J < J_1$ 所致。

[0071] 图1示出了永磁体(第一偶极子1)与电磁体(第二偶极子2)之间引力相互作用的情况。电磁体上没有施加电流。芯在以距离 x 被磁场磁化并从而被永磁体吸引。

[0072] 图2示出了永磁体(第一偶极子1)与电磁体(第二偶极子2)之间引力相互作用的情况, 该电磁体上施加了“正”电流强度。施加正向电流密度应被理解为线圈磁场的方向和永磁体的磁场的方向相同。

[0073] 线圈和芯的磁场会使芯被更强地磁化, 这样一来引力通常会更大, 同时随电流密度增大而变大。

[0074] 图3示出了施加“反”电流的情况下, 永磁体(第一偶极子1)与电磁体(第二偶极子2)之间的引力相互作用, 从而使得线圈磁场和磁场的方向相反。若满足条件 $-H_1(x) < H_{coil}(J) < 0 \Rightarrow J_1 < J < 0$, 则相互作用为引力相互作用。

[0075] 图4示出了施加“反”电流密度的情况下, 永磁体1与电磁体2之间斥力相互作用的情况, 从而使得 $H_{coil}(J) < -H_1(x)$, 或 $J < J_1$ 成立。斥力相互作用产生的条件是, 电磁体的磁场强度从计量上看比永磁体的磁场强度大并且方向相反。

[0076] 图5示出了通过线圈产生的磁场来补偿永磁体1形成的磁场的情况。这通过使用根据本发明的磁性装置来提供。这种特殊情形的特征在于, 电磁体的芯未被磁化, 并且没有因相互作用而产生的相互作用力。电磁体的相反极性得以中和。

[0077] 这种平衡状态的特征在于, 没有相互作用力 $\vec{F}_1(x, J_1) = \vec{0}$, 当 $H_{coil}(J) = -M_1(x)$ 或 $J = J_1$ 时得到所述相互作用力。

[0078] 图6示出了FEM模拟的结果。在图6示出了未给线圈施加电流情况下的磁场强度 ($\|\vec{B}\|$ [mT]) 和磁场线。图6示出了转换器的间隔距离为60.0mm、30.0mm、10.0mm和0.0mm (与永磁体和电磁体接触)。

[0079] 永磁体1将电磁体2的芯磁化, 从而产生引力作用力, 该引力作用力与间距 x 成反比例。即间距越大, 引力作用力就越小。

[0080] 图7示出了图6所示FEM模拟的结果图。横坐标为间距 x , 纵坐标为力。

[0081] 图8示出了给线圈施加电流密度 $J_{coil} = 5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ 时, 类似于图6的FEM模拟结果。永磁体1和电磁体2在同一方向上被极化, 从而有更大的引力作用力发生作用。

[0082] 类似于图7, 图9示出了与图8有关的图表, 该图表描述了在额外施加 $J_{coil} = 5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ 时随永磁体和电磁体的间距变化的相互作用力。因此, 图9示出了根据本发明的磁性装置实施形式使用的作用方式。这样一来, 引力作用力得以增大(实线)。

[0083] 另外,未施加电流时的力-间距线用虚线表示。

[0084] 与图8和图9类似,图10示出了给电磁体施加 $J_{coil} = -5 [A/mm^2]$ 时的FEM模拟结果并且图11示出了与之有关的图表。图11示出了给电磁体施加 $J_{coil} = -5 [A/mm^2]$ 时根据永磁体和电磁体间距得到的用实线表示的相互作用力曲线。虚线为未给电磁体施加电流密度时的曲线。图10和图11同样涉及根据本发明的磁性装置实施形式的作用方式。

[0085] 根据图11,只有在 $x > 14.0mm$ 的间距内才会出现斥力作用力。因此图10中所示电磁体的磁场就永磁体的磁场产生的引力而言还不够强。

[0086] 图12示出了给电磁体施加电流密度 $J_{coil} \leq 0 [A/mm^2]$ 时产生的效应。横坐标为永磁体与电磁体之间的间距,纵坐标为永磁体与电磁体之间的作用力。本领域技术人员从图12的图表中可以看出,建立特别是由斥力形成的磁性装置状态用于施加电磁体2。

[0087] 若条件 $H_{coil}(J) < -H_1(x)$ 没有满足,则相互作用力为引力作用力。在这种情况下,转换器被捕获在定子上。

[0088] 此外,在持续给电磁体施加电流时会存在永磁体和电磁体间距的平衡点 x_{eq} 。该平衡点通过 $H_{coil}(J) = -H_1(x_{eq})$,例如 $\begin{matrix} J_{coil} = -10 [A/mm^2] \Rightarrow x_{eq} = 4 [mm] \\ J_{coil} = -5 [A/mm^2] \Rightarrow x_{eq} = 13 [mm] \end{matrix}$ 来定义。

[0089] 发生捕获效应的相应区域通过 $\forall x \in [0, x_{eq}], F(x, J_{coil}) < 0$ 来定义。在捕获效应的区域以外,相互作用力为斥力作用力 $\forall x > x_{eq}, F(x, J_{coil}) > 0$ 。电流密度 J_{coil} 确定时,通过 $F(x_{eq}, J_{coil}) = 0$ 来定义平衡位置。

[0090] 作为图12的补充,图13示出了在线圈内给电磁体施加电流密度 $J_{coil} \geq 0 [A/mm^2]$ 的情况。

[0091] 此外,在图14中将给电磁体施加 $J_{coil} = +10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ 和 $J_{coil} = -10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ 时,永磁体与电磁体之间作用力的发展进行比较。可以看出,当施加的电流密度不同时,力的合成强度不相同。

[0092] 基于上面对永磁体与电磁体之间相互作用的阐述,现在对转换器相对于定子振动这种特殊情况下的相互作用进行阐述。转换器的振动通过在保持电能例如 $U_{coil} = 10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$ 不变的情况下以一定的时间间隔改变电磁体的极性得以实现。由于要简化将要讨论的问题,故在下面不再进一步考虑当电磁体改变时由于线圈的内阻和感应率所导致的延迟。

[0093] 为了确保转换器的有效振动,必须在捕获区域以外驱动转换器。所述捕获区域会使得确定在永磁体与电磁体之间的最小间距 ϵ 。这会使得 $\forall x \geq \epsilon, \vec{F}(x, J_{coil}) = |F(x, J_{coil})| \vec{e}_x$,其中通过条件 $\epsilon \geq x_{eq}$ 来确保在捕获区域以外驱动转换器。

[0094] 为了在捕获区域以外的驱动必须注意的是,在电能恒定的情况下场力分布图 $|J_{coil}| = Cte [A/mm^2]$ 是不对称的。相互作用引力从计量上看比斥力作用力高。结果是,最小间距 ϵ 会减少最大可激活的引力。

[0095] $\begin{matrix} \epsilon = x_{eq} \Rightarrow |F_{max}(0, 10)| = 500 [N] \\ \epsilon = x_{offset} \Rightarrow |F_{max}(0, 10)| = 200 [N], \end{matrix}$

[0096] 其中位置 x_{eq} 和 x_{offset} 为线圈内的电流密度 J_{coil} 的函数,并由于此原因依赖于线圈

的内部时间因数 $\tau_{coil} = \frac{L_{coil}}{R_{coil}}$ 。

[0097] 场力分布图的非对称性通过所需的额外能量来解释,该能量必须被用来反作用于磁场。在上面引用的关于在永磁体与电磁体之间相互作用的说明中,通过电磁体的线圈来施加额外的能量,其中给线圈施加了更大的电流密度。为了确保斥力作用力必须满足如下条件: $H_{coil}(J) < -H_1(x)$ 。

[0098] 与捕获区域的边界点类似的平衡点通过 $H_{coil}(J) = -H_1(x_{eq})$ 来定义。

[0099] 当转换器相对于定子振动时,机械的加速单元可能是有利的,该加速单元具有在作用于转换器的受力状态方面与上面阐述的给线圈施加额外的电流密度类似的作用。在这种情况下,加速单元的任务在于将加速力状态应用到转换器上,所述加速力状态对抗作用在转换器上的永磁体的引力,特别是在电磁体不运行情况下。

[0100] 在使用根据本发明的装置时,作为作用于转换器的引力和加速力状态之和的受力状态在任意位置均为零。在给线圈施加电流密度 J 时作用在处于 x 位置的转换器上的受力状态 $\vec{F}_{TOT}(x,J)$ 用下面的表达式来表述: $\forall x \geq 0, \vec{F}_{TOT}(x,J) = \vec{F}(x,J) + \vec{F}_{corr}(x)$, 其中 $\vec{F}_{corr}(x)$ 为通过加速单元激活的、包括校正力 $\vec{F}_{corr}(x)$ 的加速力状态,并且 $\vec{F}(x,J)$ 为在定子与转换器之间作用的相互作用力。需要的机械作用是由于转换器的平衡条件所致 $\forall x \geq 0, \vec{F}_{TOT}(x,0) = \vec{0} \Rightarrow \vec{F}_{corr}(x) = -\vec{F}(x,0)$, 由此产生加速单元的如下特征: $\forall x \geq 0, \vec{F}_{corr}(x) = -\vec{F}(x,0)$, 从而使得在电磁体不运行时加速力状态或校正力与作用在转换器上的定子的引力抵消,从而使得受力状态的作用力之和为零。由此得出

$$\forall x \geq 0, \vec{F}_{TOT}(x,0) = \vec{0}$$

$$\forall x \geq 0, \forall J, \vec{F}_{TOT}(x,J) = [\vec{F}(x,J) - \vec{F}(x,0)] \vec{e}_x$$

[0101] 图15示出了与在 x 轴上标记的转换器和定子的间距相关的校正力曲线。

[0102] 图16示出了给电磁体的线圈施加三种不同电流密度,即施加 $J_{coil} = +10 [A/mm^2]$, $J_{coil} = -10 [A/mm^2]$ 和 $J_{coil} = 0 [A/mm^2]$ 时,与转换器和定子的间距相关的、作用在转换器上的力的曲线。作用在转换器上的力之和通过 $\forall x \geq 0, \forall J, \vec{F}_{TOT}(x,J) = [\vec{F}(x,J) - \vec{F}(x,0)] \vec{e}_x$ 来定义,其中平衡在当满足 $\forall x \geq 0, \vec{F}_{TOT}(x,0) = \vec{0}$ 时产生。此外,斥力作用力产生的条件是,满足条件 $H_{coil}(J) < 0 \Rightarrow J_{coil} < 0$ 。反过来,引力作用力产生的条件是,满足条件 $H_{coil}(J) > 0 \Rightarrow J_{coil} > 0$ 。力的曲线基本上关于图中的 x 轴对称。斥力作用力和引力作用力的大小基本相等,因为其通过电磁体线圈内所含的电流密度来定义。

[0103] 上面引用的说明在下面将应用到具有 $n+1$ 个转换器 ($n=1,2,3,\dots$) 和 n 个定子的磁性装置上。图17示出了一个定子和两个转换器沿轴的基本布置,所述轴对应于转换器的运动轴。

[0104] 下面将要考虑的是具有一个定子和两个转换器的磁性装置。定子1被构造成具有芯和线圈的电磁体,转换器2、2' 被构造成永磁体。

[0105] 根据图17中的图片,第一转换器2的面向定子1的表面与定子1的面向第一转换器2的表面之间的距离用 x 表示,而 x' 表示第二转换器2' 的面向定子1的表面与定子1的面向第

二转换器2'的表面之间的距离。 δ 表示第一转换器2的芯与第二转换器2'的芯之间的距离,其中d为转换器运动路径3的长度,结果以下公式成立:

$$[0106] \quad \forall x \in [0, d], \forall x' \in [0, d], \delta = Cl_e$$

$$[0107] \quad x \in [0, d]$$

$$[0108] \quad x' = d - x \Rightarrow x' \in [0, d]$$

[0109] 电磁体的芯作为定子1的一部分被三个磁场磁化,即通过由第一转换器2形成的磁场来磁化,所述第一转换器2与定子的距离为x。 $\vec{M}_{EM}^{(1)}(x) = \chi_v H_{EM}^{(1)}(x)$,其中 $H_{EM}^{(1)}(x) = M_1 \times f(x) \vec{e}_x$ 。

[0110] 与定子1的距离为x'的第二转换器2'的第二磁场可通过表达式 $H_{EM}^{(2)}(x') = -M_2 \times f(x') \vec{e}_x$ 来表示,其中利用 $x' = d - x$ 来计算 $\vec{M}_{EM}^{(2)}(x') = -\chi_v H_{EM}^{(2)}(d-x) = -\chi_v M_2 f(d-x) \vec{e}_x$ 。

[0111] 第三磁场是由电磁体的线圈产生的磁场 $\vec{M}_{EM}^{(coil)}(J) = \chi_v H_{coil}(J) \vec{e}_x$,其中电流的方向确定了磁场的方向, $J > 0 \Rightarrow I > 0 \Rightarrow H_{coil}(J) > 0$ 。

[0112] 总的来说,可将电磁体的芯的磁化通过以下表达式来表示: $\vec{M}_{EM}(x, J) = \chi_v [M_1 f(x) - M_2 f(d-x) + H_{coil}(J)] \vec{e}_x$,其中f(x)是与间距x成反比例的函数并且 $f(0) = 1, \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$ 。

[0113] 此外, $\vec{F}_1(x, J)$ 为定子1与第一转换器2之间的相互作用力状态, $\vec{F}_2(x, J)$ 为定子1与第二转换器2'之间的相互作用力状态,因此对于作用在定子1上的受力状态而言有 $\vec{F}_{EM}(x, J) = \vec{F}_1(x, J) + \vec{F}_2(x, J)$ 成立。

[0114] 项 $x \in [0, d]$ 表示将转换器2、2'沿轴向转换器运动路径3移动,其中从左向右的运动被看作是从初始位置 $x = d$ 或 $x' = 0$ 往“正”方向运动到终端位置 $x = 0$ 或 $x' = d$ 。从右向左的运动被看成是从初始位置 $x = 0$ 或 $x' = d$ 往“反”运动到终端位置 $x = d$ 或 $x' = 0$ 。

[0115] 当 $\vec{M}_{EM}(x, J) = M_{EM}(x, J) \vec{e}_x$,其中 $M_{EM}(x, J) > 0$ 时成立的有:

[0116] 在图17中,第一转换器2和定子1在同一方向上被极化,从而使得相互作用力为引力且 $F_1(x, J) > 0$ 成立。这在 $H_{coil}(J) > -M_1 f(x)$ 的情况下成立,其中 $\max(f(d-x)) = 1$ 且 $H_{coil}(J) > -M_1$ 。

[0117] 第二转换器2'和定子1在不同的方向上被极化,从而使得相互作用力为斥力。这在 $H_{coil}(J) > M_2 f(d-x)$ 时是成立的,并且当 $\forall x \in [0, d], H_{coil}(J) > M_2$ 时 $\max(f(d-x)) = 1$ 成立。

[0118] 从左向右的运动的实现条件是, $\forall x \in [0, d], H_{coil}(j) > M_2 > 0 > -M_1$ 使得定子被“正”磁化。

[0119] 捕获效应的产生条件是, $M_2 > H_{coil}(J) > -M_1$ 。定子1通过第二转换器2'的磁场捕获,或反之亦然。

[0120] 若 $\vec{M}_{EM}(x, J) = M_{EM}(x, J) \vec{e}_x$ 且 $M_{EM}(x, J) < 0$,则第一转换器2和定子1在相反的方向上被极化,从而使得相互作用力为斥力且 $F_1(x, J) < 0$ 成立。其在 $F_1(x, J) < 0$ 时成立,使得

$\forall x \in [0, d], H_{\text{coil}}(J) < -M_1$ 时, 有 $\forall x \in [0, d], F_1(x, J) < 0$ 。第二转换器 2' 和定子 1 在同一方向被极化, 从而使得相互作用力为引力且 $F_2(x, J) < 0$ 成立。其在 $H_{\text{coil}}(J) < M_2 f(d-x)$ 时成立, 使得当 $\forall x \in [0, d], H_{\text{coil}}(J) < M_2$ 时, 有 $\forall x \in [0, d], F_2(x, J) < 0$ 。

[0121] M_1 和 M_2 是正的, 从而可推断出转换器 2、2' 从右向左的运动, 条件是用 $\forall x \in [0, d], H_{\text{coil}}(J) < -M_1 < 0 < M_2$ 来表示转换器 2、2' 的“反”极化。

[0122] 捕获问题的出现条件是, $-M_1 < H_{\text{coil}}(J) < M_2$, 使得定子 1 通过第一转换器 2 的磁场捕获。

[0123] 当磁场强度相同时, 即 $M_1 = M_2 = M$ 时, “正”极化和从左向右运动的实现条件是 $\forall x \in [0, d]$ 和 $H_{\text{coil}}(J) > M$ 。反过来, “反”极化和从右向左运动的实现条件是 $\forall x \in [0, d]$ 和 $H_{\text{coil}}(J) < -M$ 。当 $H_{\text{coil}}(J) \in [-M, M]$ 时出现捕获效应; 当确保 $|H_{\text{coil}}(J)| > M$ 时, 该捕获效应可停止。

[0124] 当 $M_{EM}(x, J) = 0 \Rightarrow \chi_v \{-M_1 f(x) + M_2 f(d-x) + H_{\text{coil}}(J)\} = 0$
 $\Rightarrow H_{\text{coil}}(J) = M_1 f(x) - M_2 f(d-x)$ 时, 系统处于平衡状态。假设

磁体受到相同磁化, 即 $M_1 = M_2 = M$, 则当 $H_{\text{coil}}(J) = M\{f(x) - f(d-x)\}$ 时转换器处于平衡。

[0125] 当电磁体未被施加电流时, 系统具有内部平衡, 条件是 $H_{\text{coil}}(J) = 0 \rightarrow M\{f(x) - f(d-x)\} = 0 \rightarrow f(x) = f(d-x)$, 这一方面在 $x = \frac{d}{2}$ 处实现。如果第一转换器和第二转换器具有相同的极化, 且与定子间隔距离相同就是这种情况。

[0126] 在使用具有不同磁场强度的转换器时, 平衡点会从较强的转换器移走, 以满足条件 $M_1 f(x_{eq}) = M_2 f(d-x_{eq})$ 。

[0127] 图 18 至图 24 示出了 FEM 模拟的结果。该模拟以下列假设为基础:

[0128] 将定子 1 看作具有软金属材质的铁磁芯的电磁体, 并且其直径为 30.0mm, 长度为 30.0mm (圆柱形状)。假定线圈的电流密度为 $J_{\text{coil}} [\frac{A}{\text{mm}^2}]$ 且是一个截面积为 $30.0 \times 30.0 \text{mm}^2$ 的铜材质体。

[0129] 假定转换器 2、2' 是半径和长度均为 30.0mm 的圆柱形的永磁体, 其中所述永磁体具有在圆柱轴方向上的磁化。假设磁化值为 $M_1 = M_2 = M = 10E5 [\text{A/m}]$, 这对应于通常的 N45° 永磁体。转换器 2、2' 可沿线性的转换器运动路径 3 自由运动, 所述运动路径也是系统轴。转换器 2、2' 的相对位置用变量 $x \in [0, d] [\text{mm}]$ 来描述。

[0130] 图 18 至图 24 中示出了和转换器的位置相关的、转换器在 $x \in [0, 73] [\text{mm}]$ 位置且给定子施加 $J_{\text{coil}} \in [-10, 10] [\text{A/mm}^2]$ 时的相互作用力。

[0131] 图 18 示出了在 $x \in [0, d]$ 的转换器位置范围、给电磁体施加 $J_{\text{coil}} = 0 [\text{A/mm}^2]$ 的情况。与上面的描述一致, 平衡点 $F_{EM}(x_{eq}, 0) = 0$ 位于转换器运动中间即 $x_{eq} = \frac{d}{2}$ 。

[0132] 图 19 示出了在 $x \in [0, 73] [\text{mm}]$ 的转换器范围中给构造造成电磁体的定子施加 $J_{\text{coil}} \in [0, 10] [\text{A/mm}^2]$ 时相互作用力的变化。给定子施加电流密度会使定子正向磁化。定子和第一转换器受到引力作用力; 定子和第二转换器受到斥力作用力。当定子靠近第二转换器时, 不满足定子和第二转换器之间的斥力相互作用的条件 $|H_{\text{coil}}(J)| > M_2$ 。

[0133] 图 20 示出了根据 $x \in [0, 73] [\text{mm}]$ 范围中的定子位置、并且给定子施加 $J_{\text{coil}} \in [-10, 0] [\text{A/mm}^2]$ 时的相互作用力的变化。这会使定子反磁化; 定子和第二转换器受到引力作用力的影响, 而定子与第一转换器之间是斥力作用力起作用。

[0134] 当定子靠近第一转换器时,不满足定子和第一转换器之间的斥力作用力的条件。

[0135] 图21将根据 $x \in [0, 73]$ [mm] 范围中的第一定子2的位置比较给构造成电磁体的定子1施加 $J_{\text{coil}} \in [0, 10]$ [A/mm²]的情况与施加 $J_{\text{coil}} \in [-10, 0]$ [A/mm²]的情况。

[0136] 在不满足条件 $\forall x \in [0, d], |H_{\text{coil}}(J)| > M$ 且出现捕获效应的区域中(下面称之为“捕获区域”),相互作用力会有效抵消期望的转换器2、2'的运动。捕获区域的端点通过平衡点 x_{eq} 来定义。

[0137] 捕获区域大致对应于定子的以下位置,即在该位置定子的磁场不能补偿转换器2、2'中最近的转换器的磁场。

[0138] 本领域技术人员会看出,-为了得到有效的转换器振动-转换器2、2'的运动应该在捕获区域外部延伸。由此在第一转换器与定子之间产生所需的最,小距离 $\in \geq x_{\text{eq}}$ 。

[0139] 图22至图24涉及加速单元的使用。

[0140] 在上述考察中,通过加速单元激发的加速力状态,特别是校正力根据第一转换器2与定子1的距离通过术语 $F_{\text{corr}}^{\vec{x}}(x)$ 来定义,从而使得通过方程 $F_{\text{TOT}}^{\vec{x}}(x, J) = \vec{F}(x, J) + F_{\text{corr}}^{\vec{x}}(x)$ 来计算作用在第一转换器1上的受力状态。

[0141] 选择现有的平衡状态作为加速单元的第二特征,当电磁体未运行时应该存在所述平衡状态: $F_{\text{TOT}}^{\vec{x}}(x, 0) = \vec{0} \Rightarrow F_{\text{corr}}^{\vec{x}}(x) = -\vec{F}(x, 0)$ 。

[0142] 由加速单元引起的、包括 $F_{\text{corr}}^{\vec{x}}$ 的加速力状态基本上与捕获力状态一致,根据本发明,所述捕获力状态至少在部分区域中与加速力状态叠加。加速力状态,特别是其分布,能够在必要时在电磁体未运行状态下通过测量推导出来。

[0143] 图22比较了确保 $F_{\text{corr}}(x) = -F(x, 0)$ 时加速力状态的分布。此外,虚线表示的是以下情况下的相互作用力,即被构造成电驱动装置的定子未被激活的情况。

[0144] 图23示出了使用加速单元以及给定子施加“正”或“反”电流密度 $|J_{\text{coil}}| = 10$ [A/mm²]时的 $F_{\text{TOT}}(x, J)$ 曲线,其作为转换器与定子距离位置的函数。在此图表中考虑的范围是 $x \in [0, 73]$ [mm]。此外,用点划线来表示未施加电流给定子时的 $F_{\text{TOT}}(x, J)$ 曲线。

[0145] 图23中示出的力曲线是以第一转换器和第二转换器具有相同的磁化的简化条件为基础的。由此当未施加的电磁体处于 $x_{\text{eq}} = \frac{d}{2}$ 时产生平衡位置 $F_{\text{TOT}}(\frac{d}{2}, 0) = 0$ 。

[0146] 图23中示出的在使用加速单元时的受力状态具有以下特征:

[0147] 未施加的转换器总是处于平衡: $\forall x \in [0, d], F_{\text{TOT}}(x, 0) = 0$ 。

[0148] 先前提到的平衡位置 $x_{\text{eq}} = \frac{d}{2}$ 成为经过修正的相互作用力的 $F_{\text{TOT}}(x, J)$ 曲线的对称点。经过修正的相互作用力的分布图为u形。

[0149] 图24示出了给电磁体施加不同的 $J_{\text{coil}} \in [-10, 10]$ [A/mm²]时,根据 $x \in [0, 73]$ [mm]范围内的转换器的相对位置得到的经过修正的相互作用力 $F_{\text{TOT}}(x, J)$ 曲线。

[0150] 转换器从左向右最佳运动的特征在于 $F_{\text{TOT}}(x, J) > 0$ 。这在 $J > 0$ 时实现。反过来,转换器从右向左的运动通过 $J < 0$ 时 $F_{\text{TOT}}(x, J) < 0$ 得以实现。

[0151] 图25至27关注的是加速单元的特别实施形式,即以弹簧形式。弹簧的作用方式将基于加速单元的上述特征进行阐述。

[0152] 由于 $x_{eq}=\frac{d}{2}$ 是修正力的曲线的对称点,因此在考虑到弹簧的机械性能的情况下可将校正力表述成两个弹簧力之和:

$$\forall x \in [0, d], F_{\text{corr}}(x) = F_1(x) + F_2(x)$$

[0153] $\forall x \in [0, \frac{d}{2}], F_1(x) > 0, F_2(x) = 0$, 其中 $\forall x \in [0, \frac{d}{2}], F_1(x) > 0, F_2(x) = 0$ 。
 $\forall x \in [\frac{d}{2}, d], F_1(x) = 0, F_2(x) < 0$

[0154] 图25示出了 $\forall x \in [0, d], F_{\text{corr}}(x) = F_1(x) + F_2(x)$ 的分布。在这里适用的 $\forall x \in [0, d], F_1(x) \geq 0$ 总是引起“正”力,而 $\forall x \in [0, d], F_2(x) \leq 0$ 总是引起“反”力。第一弹簧力 F_1 仅在 $x \in [0, \frac{d}{2}]$ 范围起作用,从而使得第一弹簧力反作用于定子与第一转换器之间的相互作用。

与之类似地,第二弹簧力 F_2 仅在 $x \in [\frac{d}{2}, d]$ 范围起作用,并且和定子与第二转换器之间的相互作用相反。

[0155] 在将第一转换器和第二转换器进行相同的磁化时,可对第一弹簧力和第二弹簧力进行如下特殊定义。第一弹簧力和第二弹簧力从计量上看是相等的且作用方向相反。

$$[0156] \quad \forall x \in [0, d], F_2(x) = -F_1(d-x)$$

[0157] 上述讨论会导致第一弹簧和第二弹簧的以下布置,即其具有相同的弹性特征,但作用方向相反。

[0158] 图26示出了将弹簧7、7'用作加速单元5、5'时根据本发明的磁性装置的可能实施形式。

[0159] 第一弹簧7在第一定子1与第一转换器2之间分别有效延伸到相对表面上。第一弹簧7反作用于在定子1与第二转换器2之间的捕获效应。根据第一转换器2接近定子1来预张紧第一弹簧7。定子1充当第一弹簧7的固定点6。类似地,根据第一转换器2与定子1的距离来提供作为“正”力的第一弹簧力 F_1 。

[0160] 第二弹簧7'的作用与第一弹簧7类似。与第一弹簧7的布置类似,将第二弹簧7'布置在定子1与第二转换器2'之间。定子1充当第二弹簧7'的固定点6。

[0161] $F_{\text{corr}}(x) = F_1(x) + F_2(x) = -F(x, 0)$ 适用于通过第一弹簧7和第二弹簧7'产生的校正力。

[0162] 根据相关的先前教导,弹簧力与弹簧的长度变化成正比。弹簧被压缩 δx [mm]时 $F = -k\delta x$,其中 k [N/m]为弹簧常数。

[0163] 在将转换器运动分成 n ($n=1, 2, 3, \dots$)个子区间 $[x_{n-1}, x_n]$ 并且 $x_0=0$ 以及 $x_n=d$ 时,则可通过线性外推法来表示弹簧力。

$$[0164] \quad F(x) = \alpha_n \times x + \beta_n \text{ 且 } \alpha_n = \frac{F(x_n) - F(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}}, \beta_n = F(x_{n-1})。$$

[0165] 在考虑到压缩长度 $\delta_n = x_n - x_{n-1}$ 和弹簧常数 $k_n = \left| \frac{F(x_n) - F(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}} \right|$ [N/m]的情况下,由

于弹簧的特性这两者都可推导出来,得到了图27,图中描述了五个区间 $x_n \in \{0, 5, 10, 20, 30, 73\}$ 的弹簧常数。

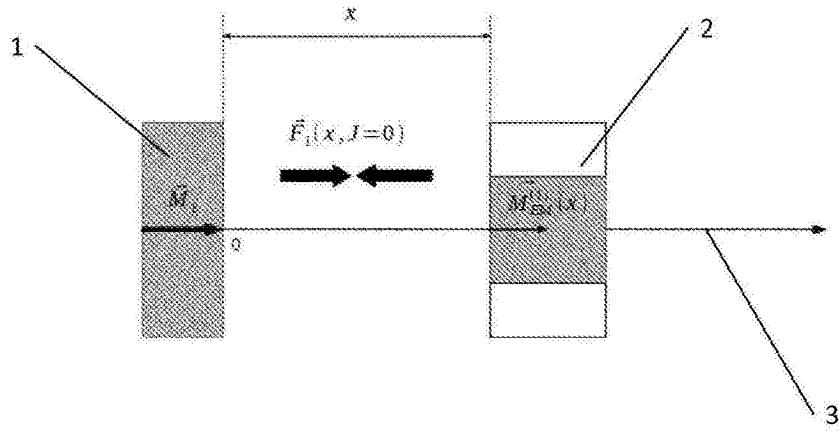


图1

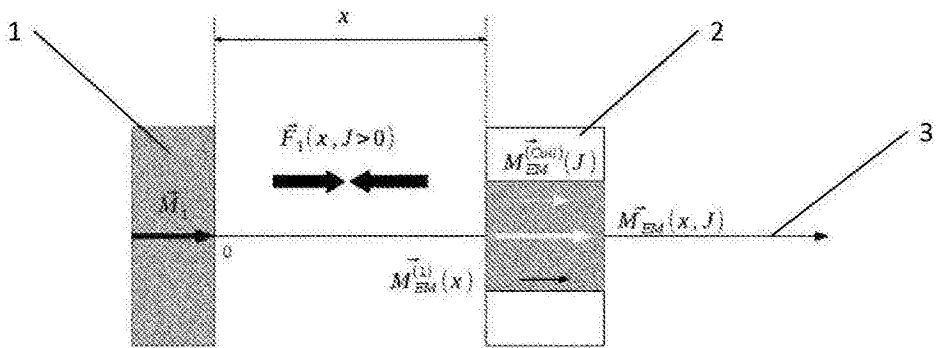


图2

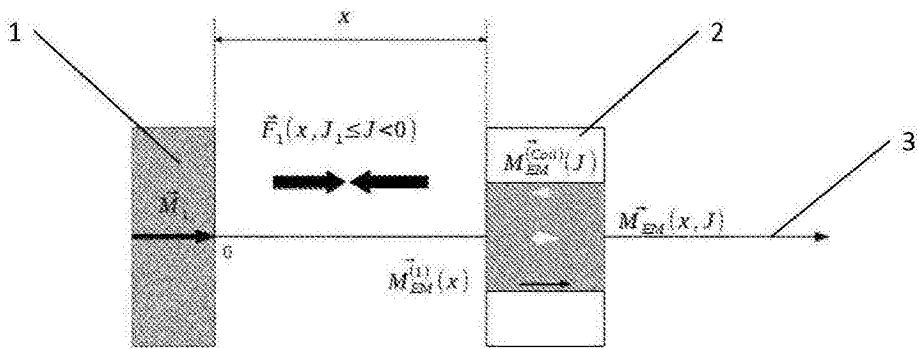


图3

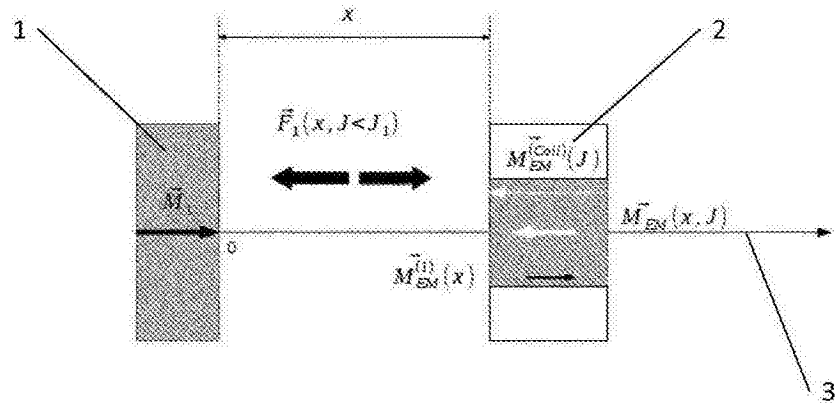


图4

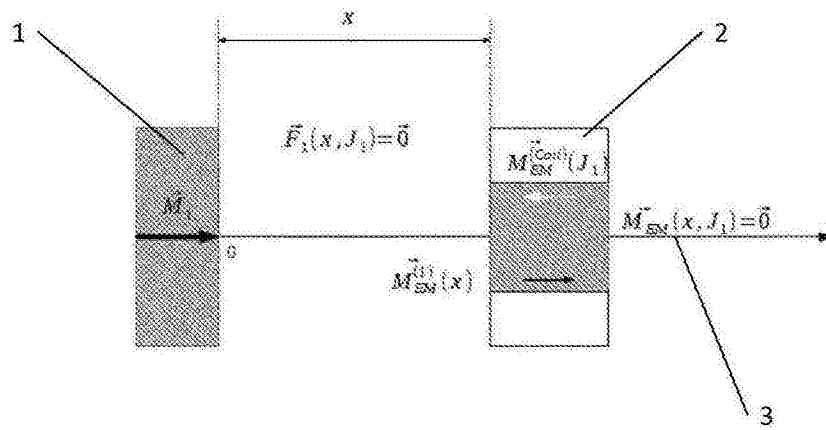


图5

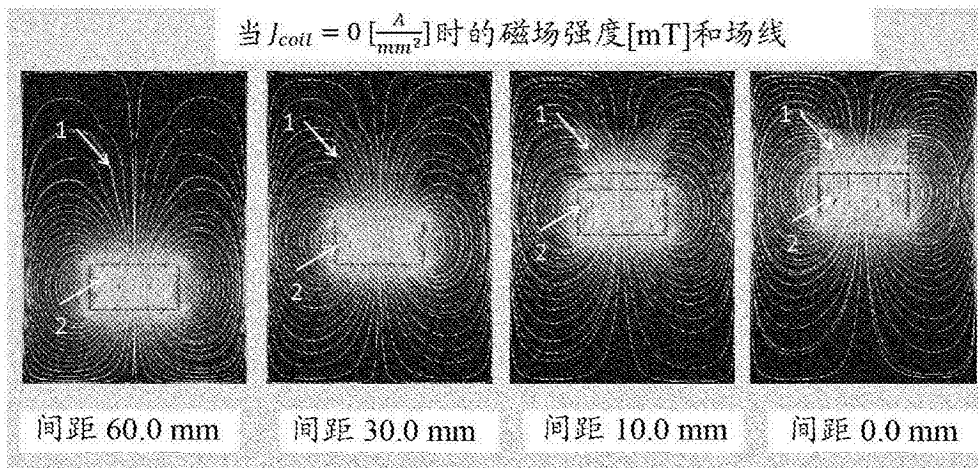


图6

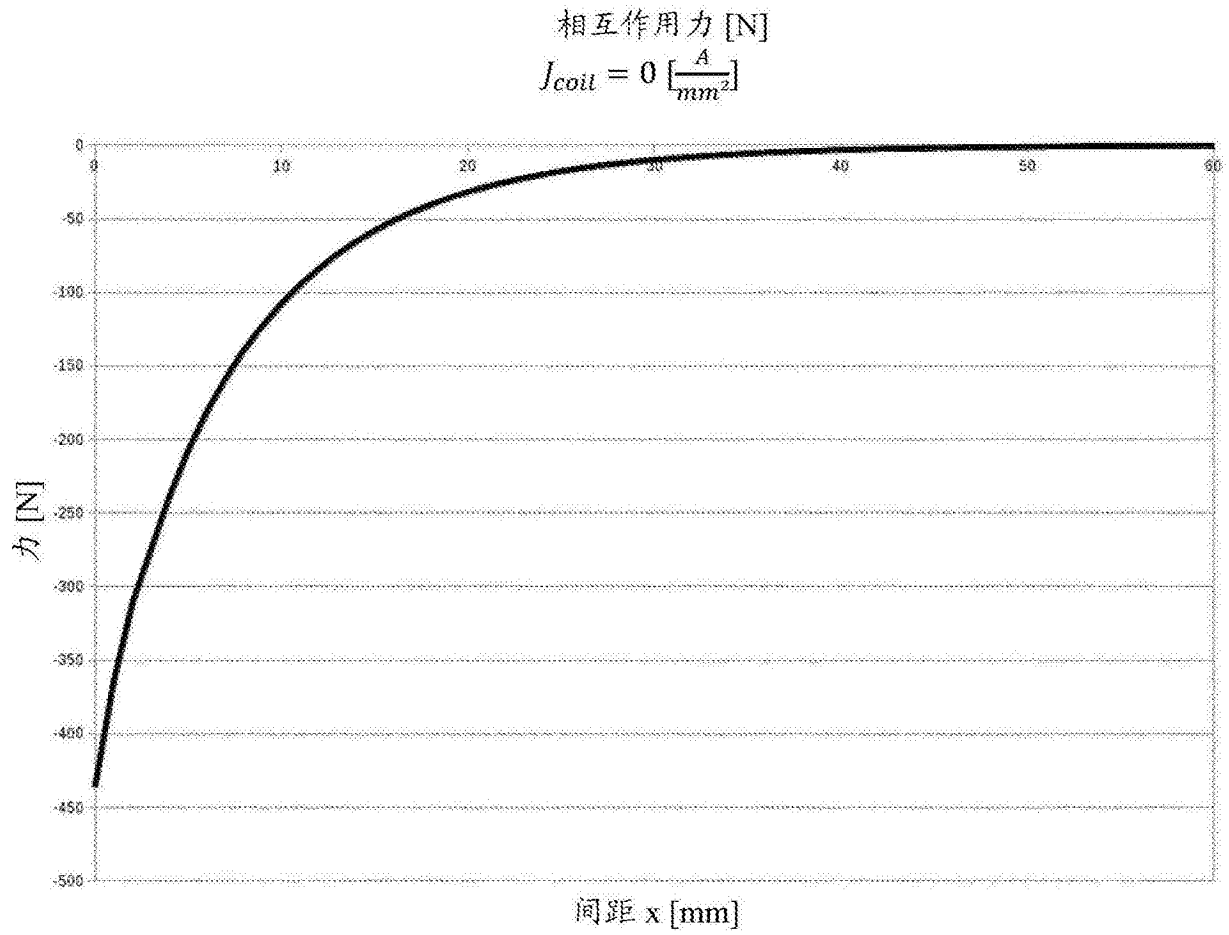


图7

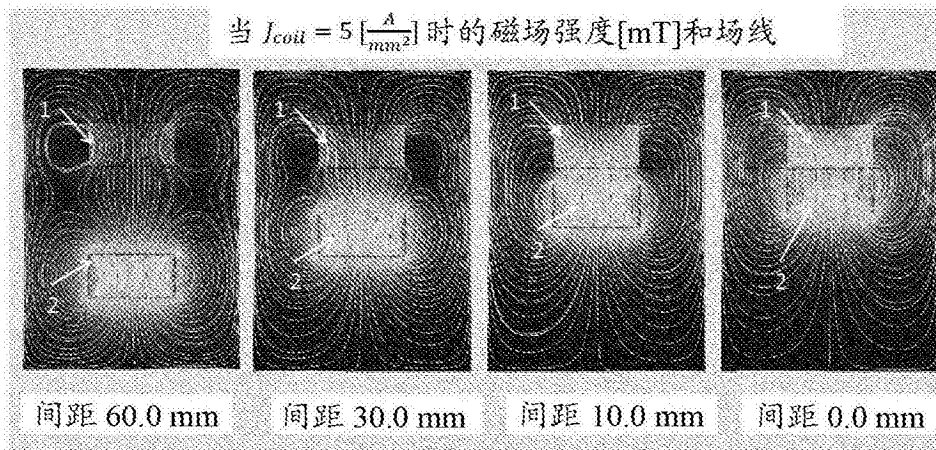


图8

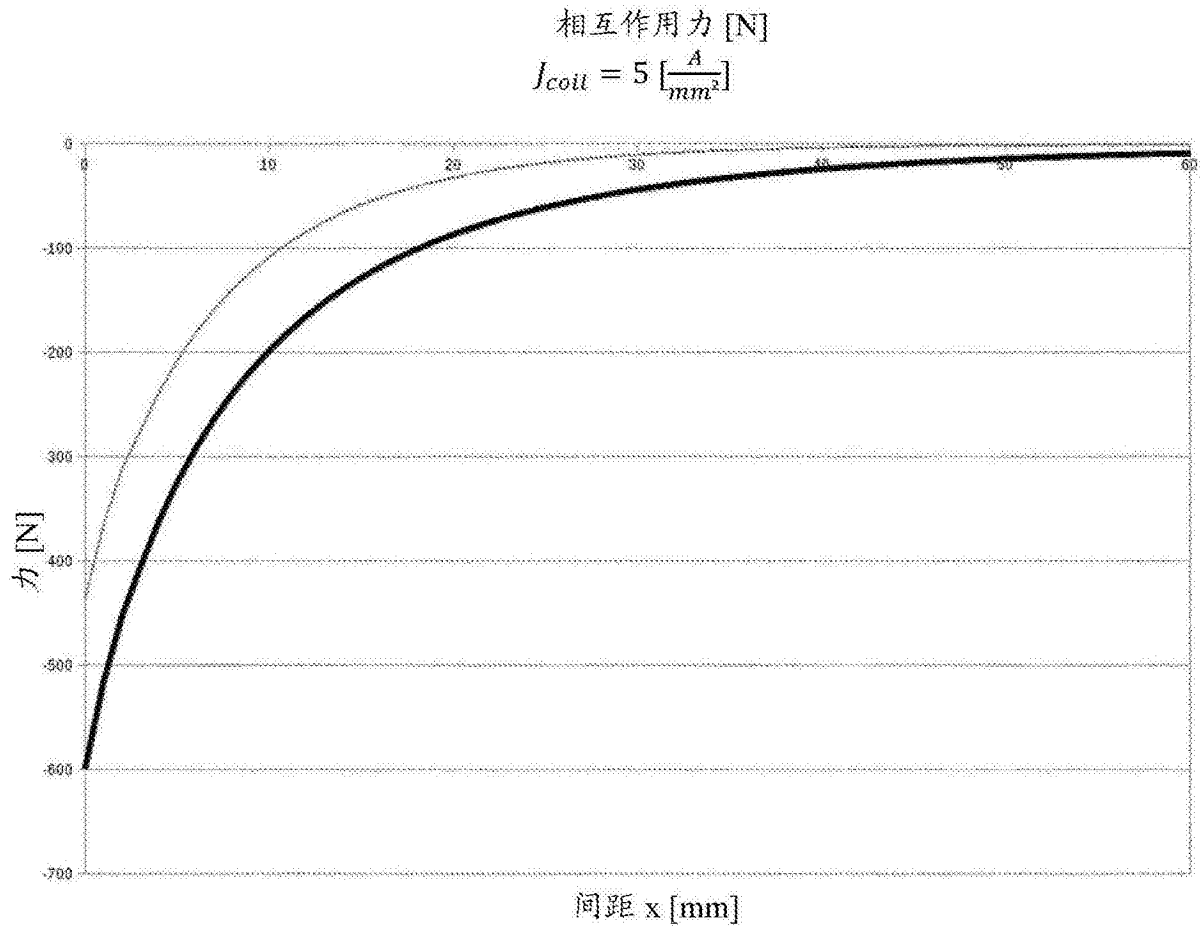


图9

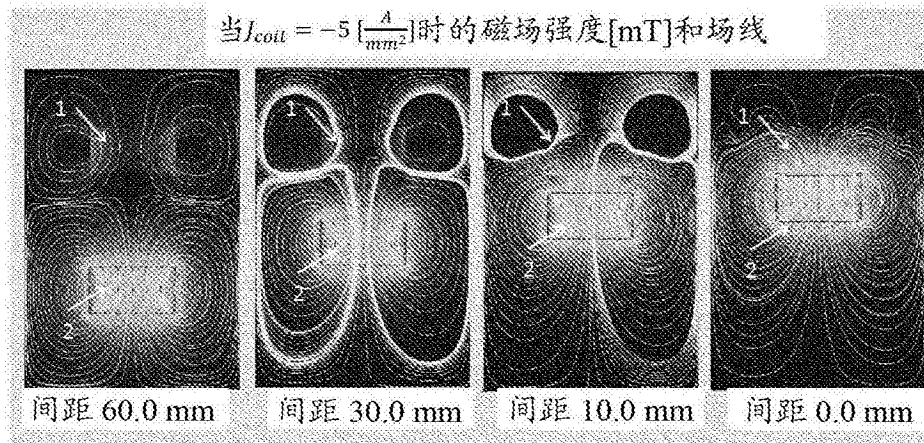


图10

相互作用力 [N]
 $I_{coil} = -5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

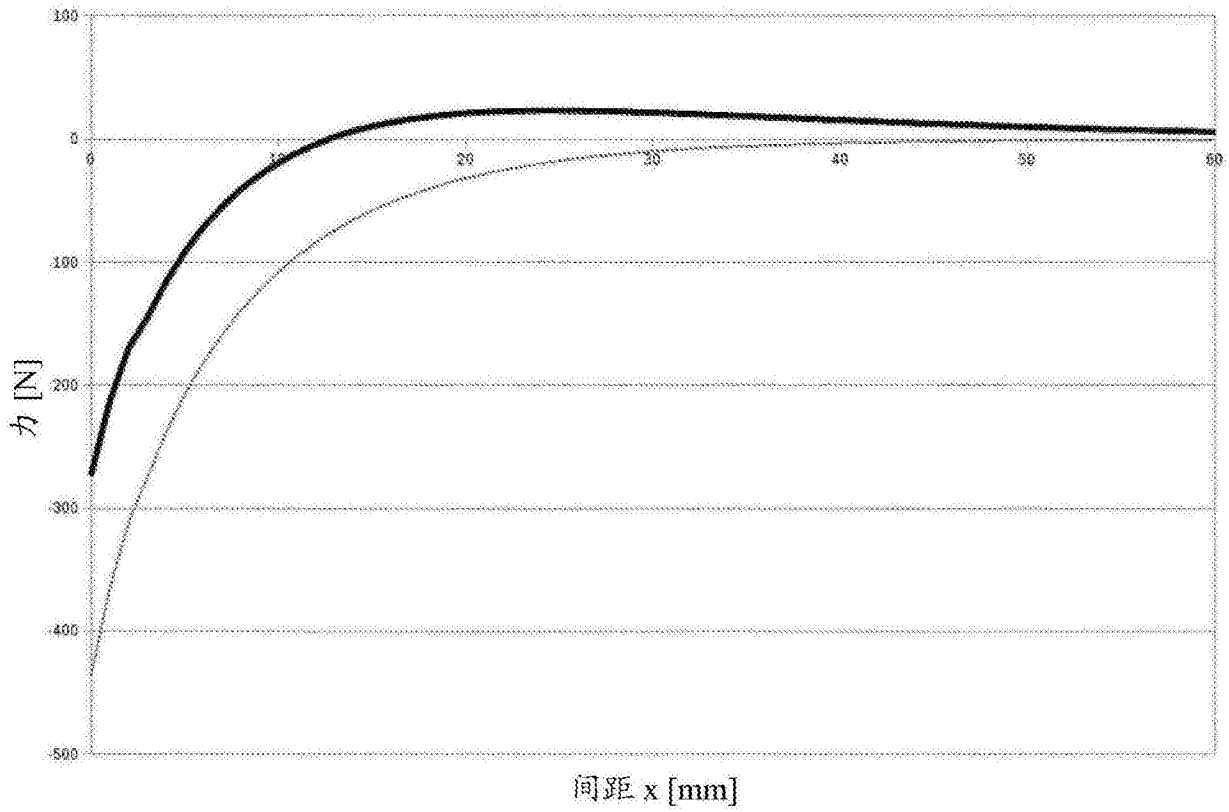


图11

相互作用力 [N]
 $J_{coil} \leq 5 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

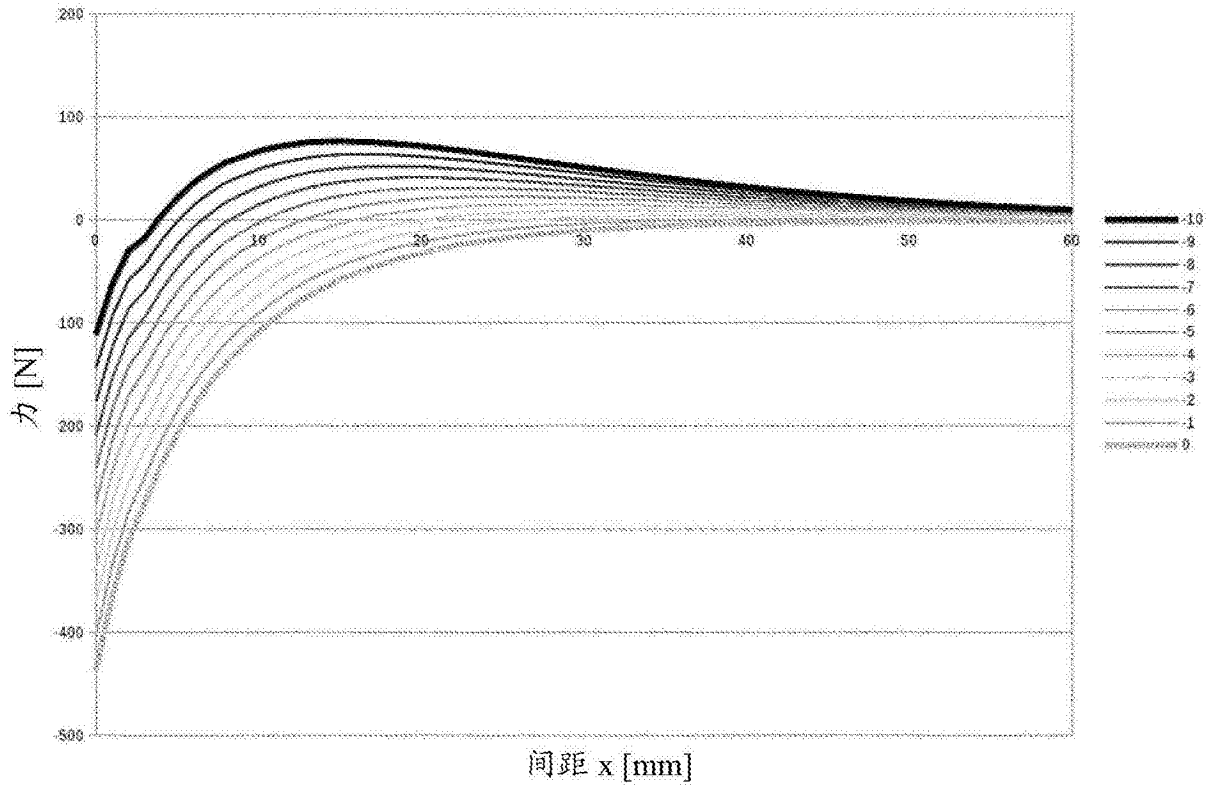


图12

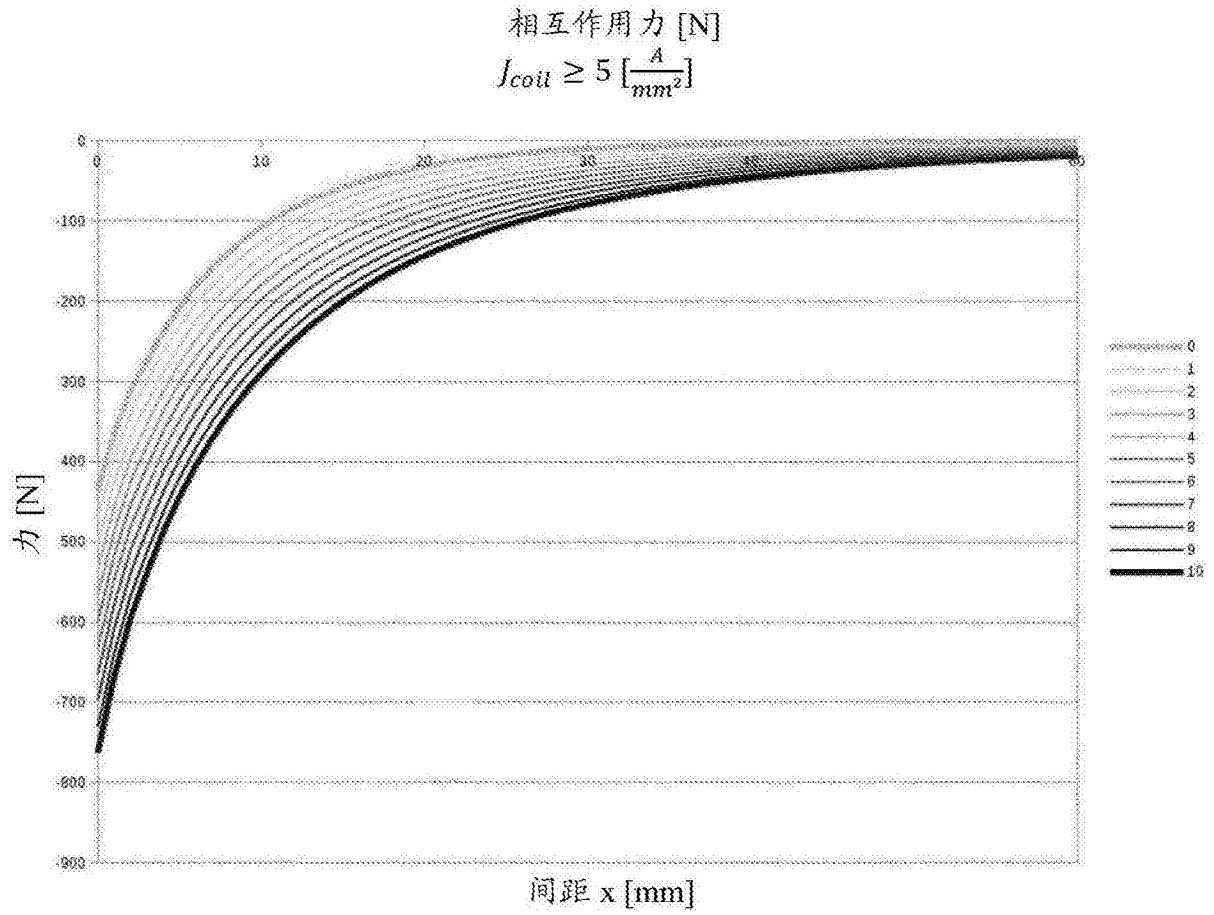


图13

相互作用力 [N]
 $I_{coil} = 10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

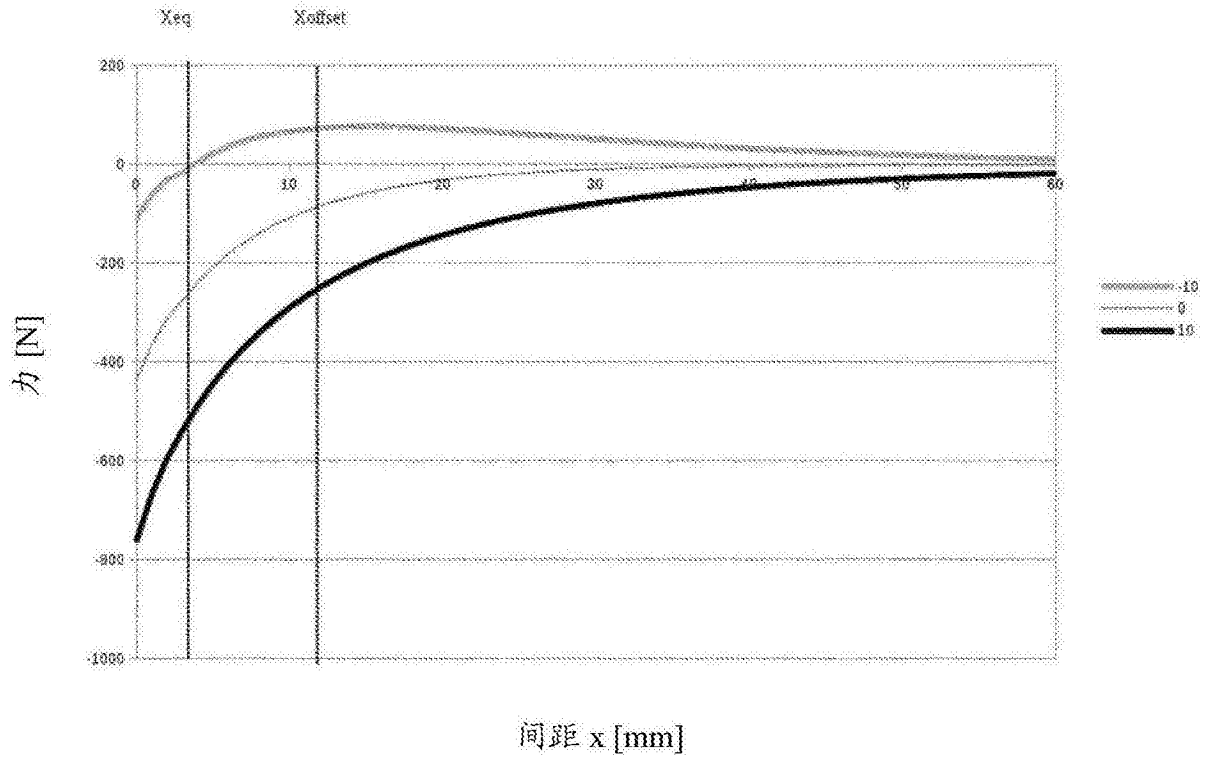


图14

校正力 F_{corr} [N]

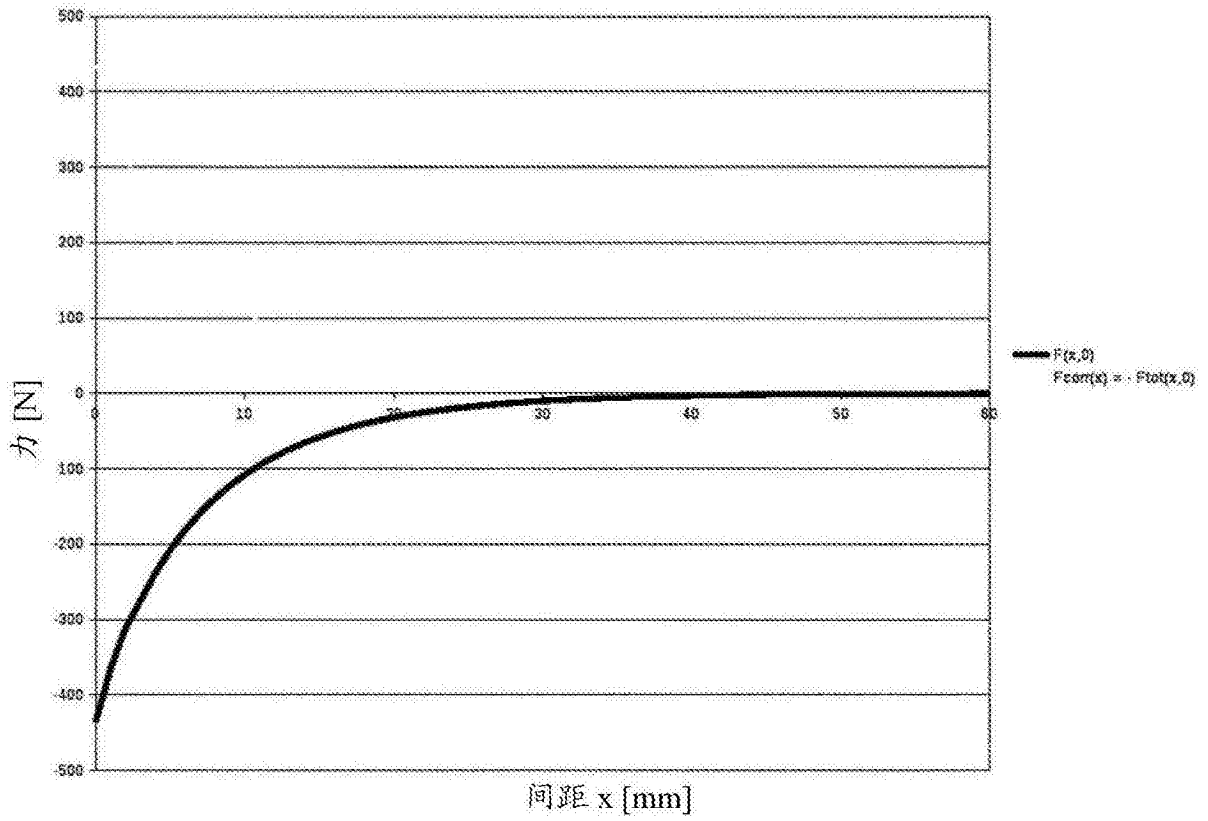


图15

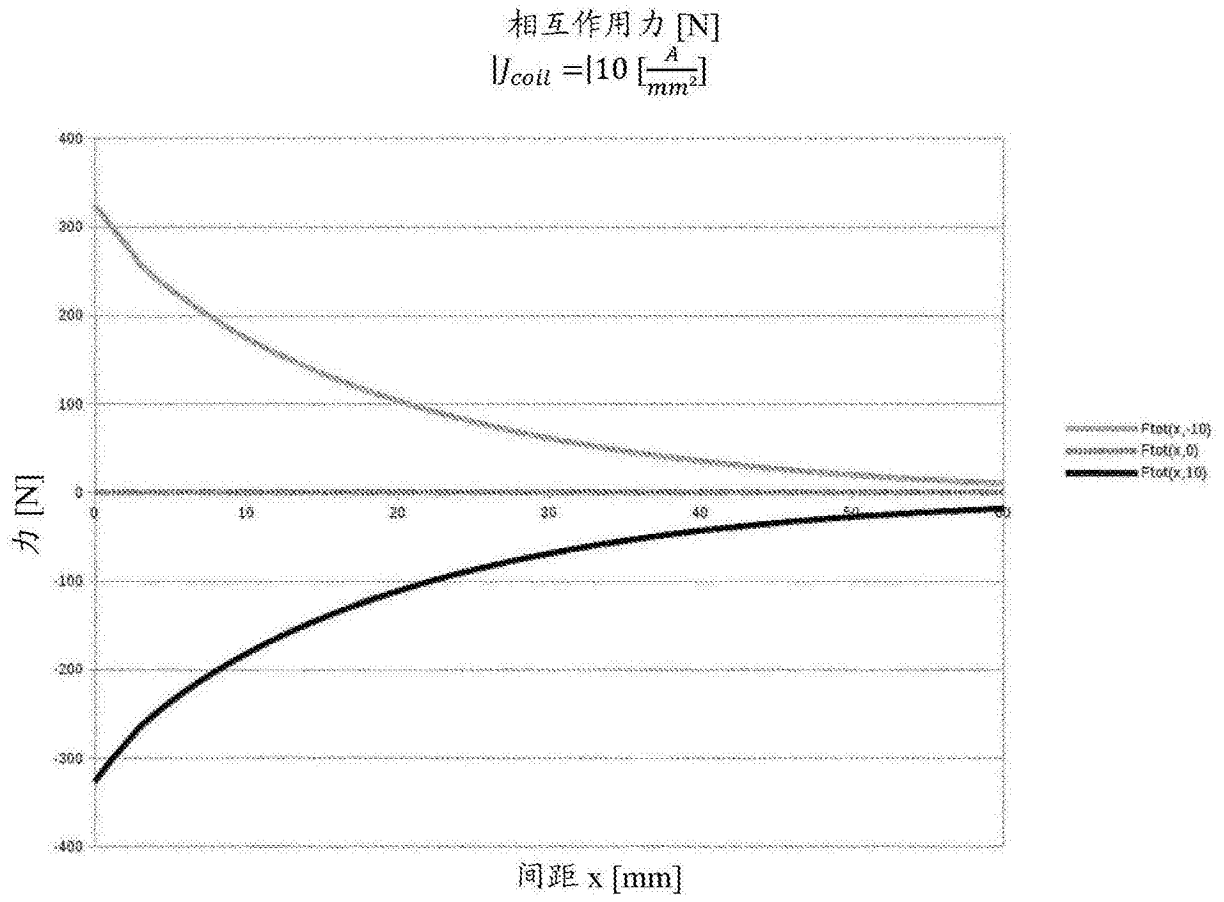


图16

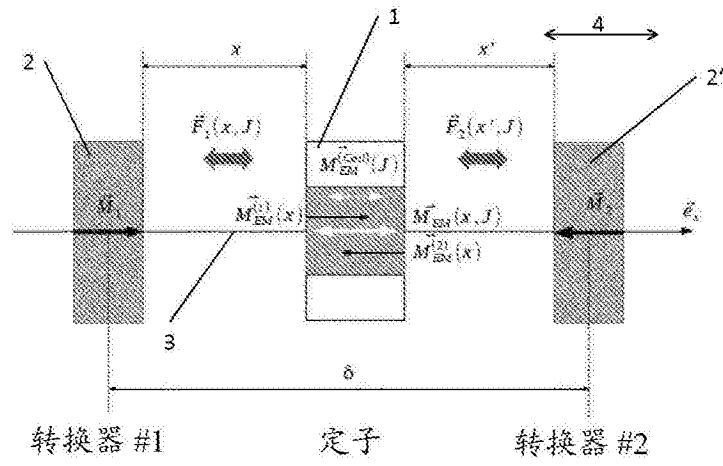


图17

相互作用力 [N]
 $I_{coil} = 0 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$

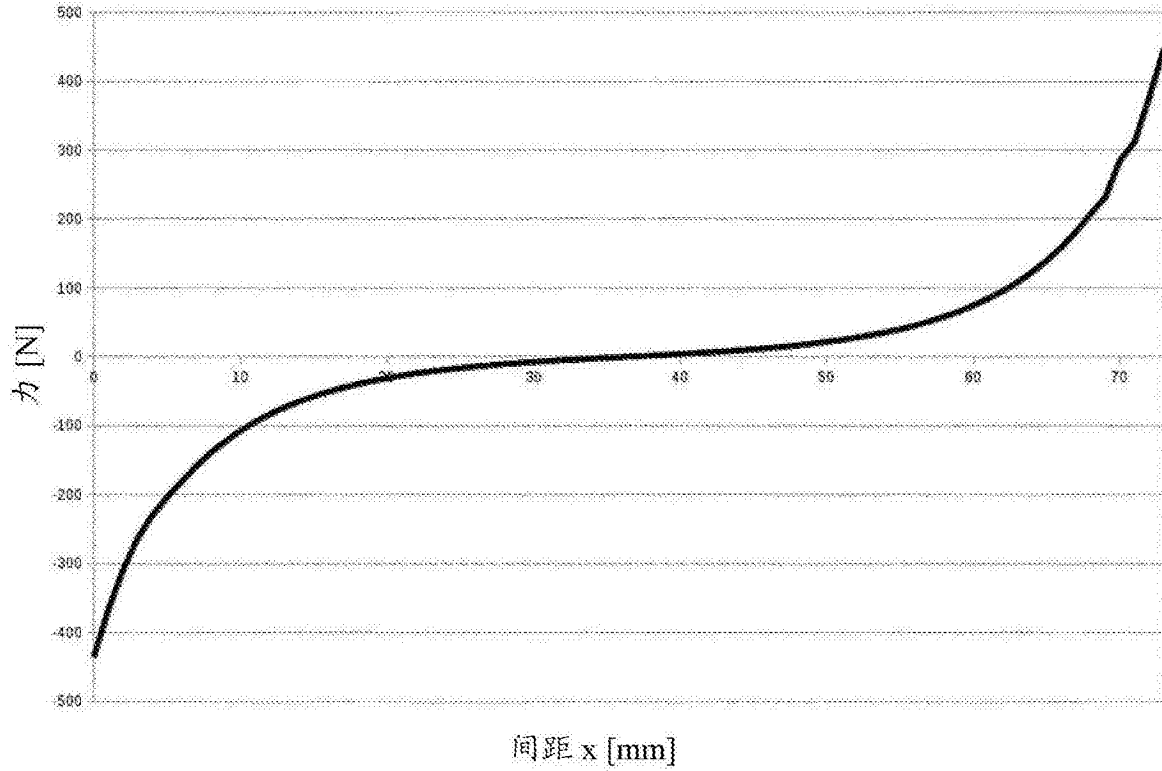


图18

3偶极子的相互作用力 [N] $J_{coil} > 0$ [$\frac{A}{mm^2}$]
转换器从左向右运动

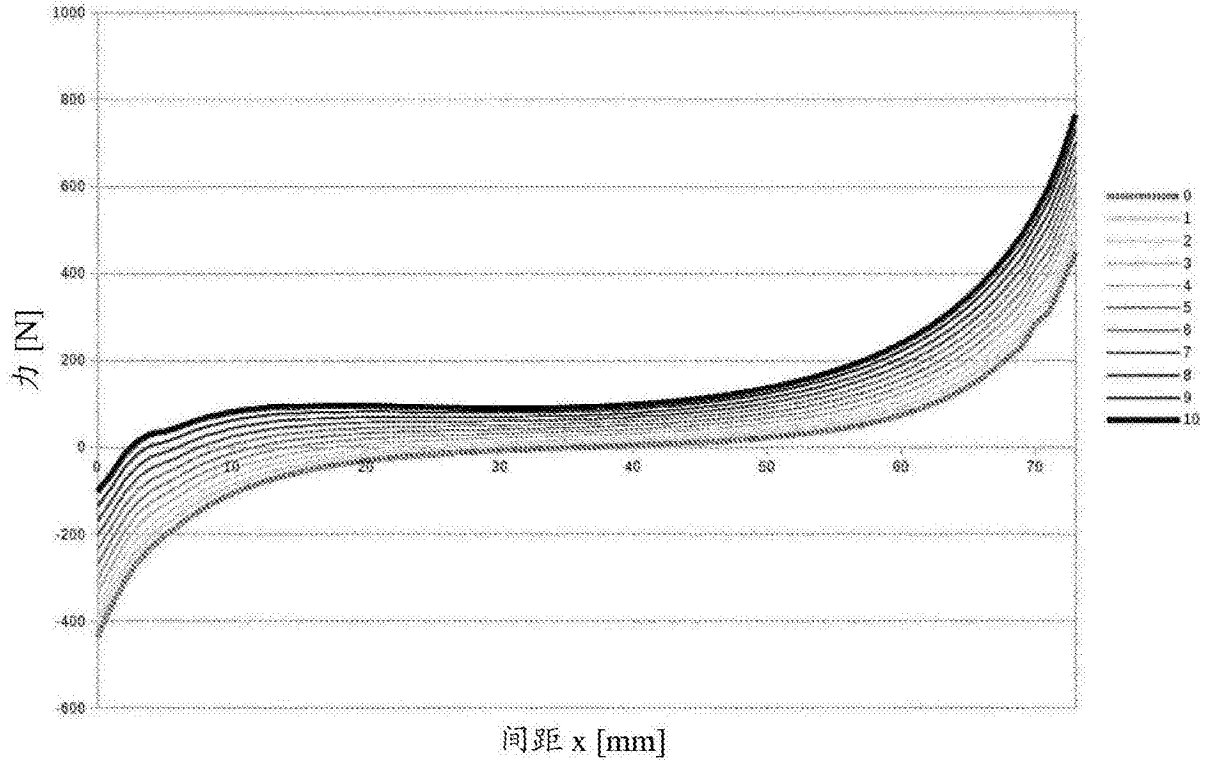


图19

3偶极子的相互作用力 $[N] J_{coil} > 0 [\frac{A}{mm^2}]$
转换器从右向左运动

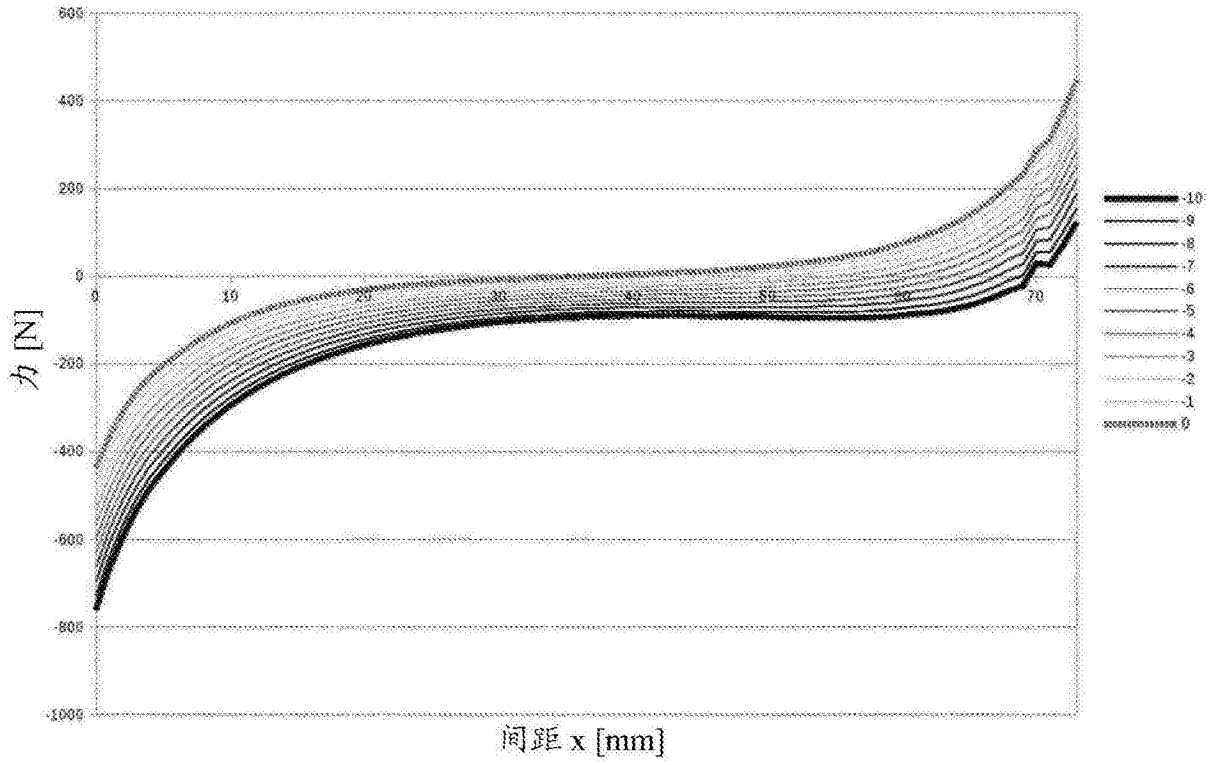


图20

3偶极子的相互作用力 [N]

$$|J_{coil}| = 10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

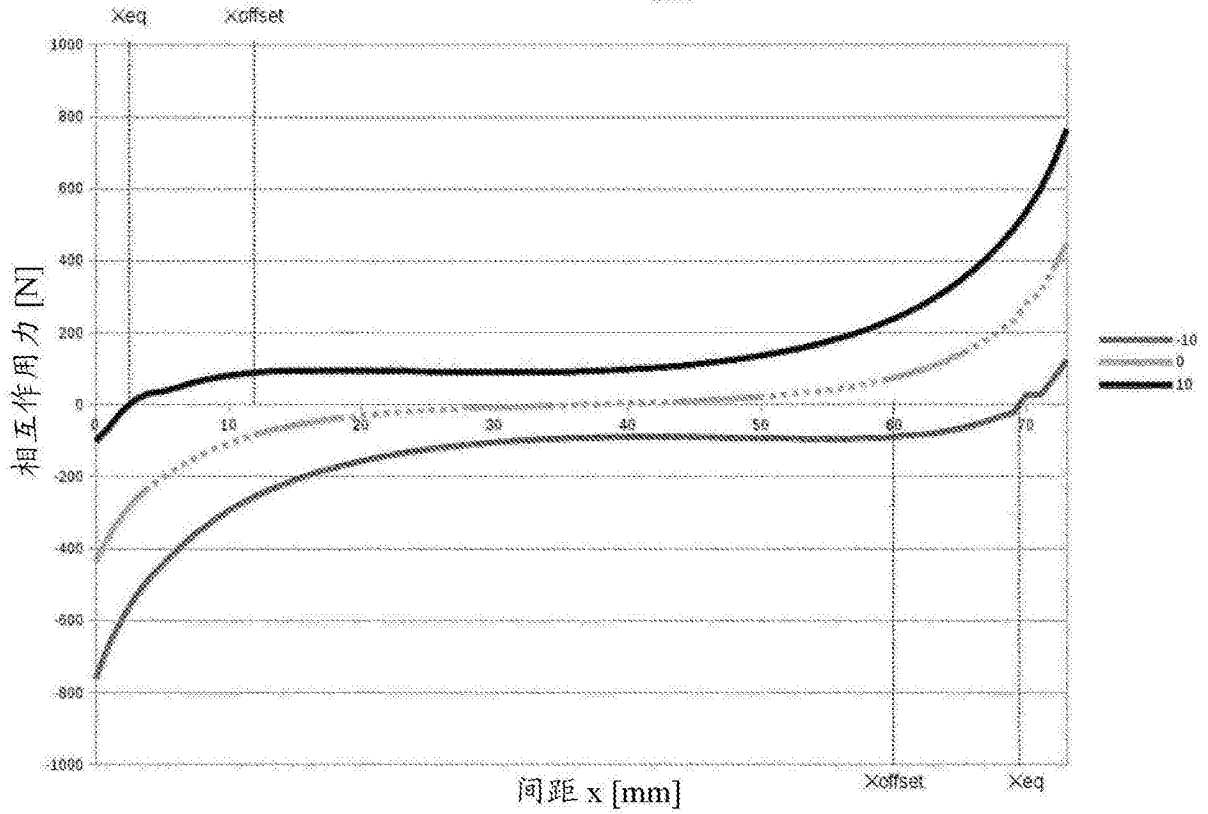


图21

3-偶极子相互作用力 [N]

$$|J_{coil}| = 10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

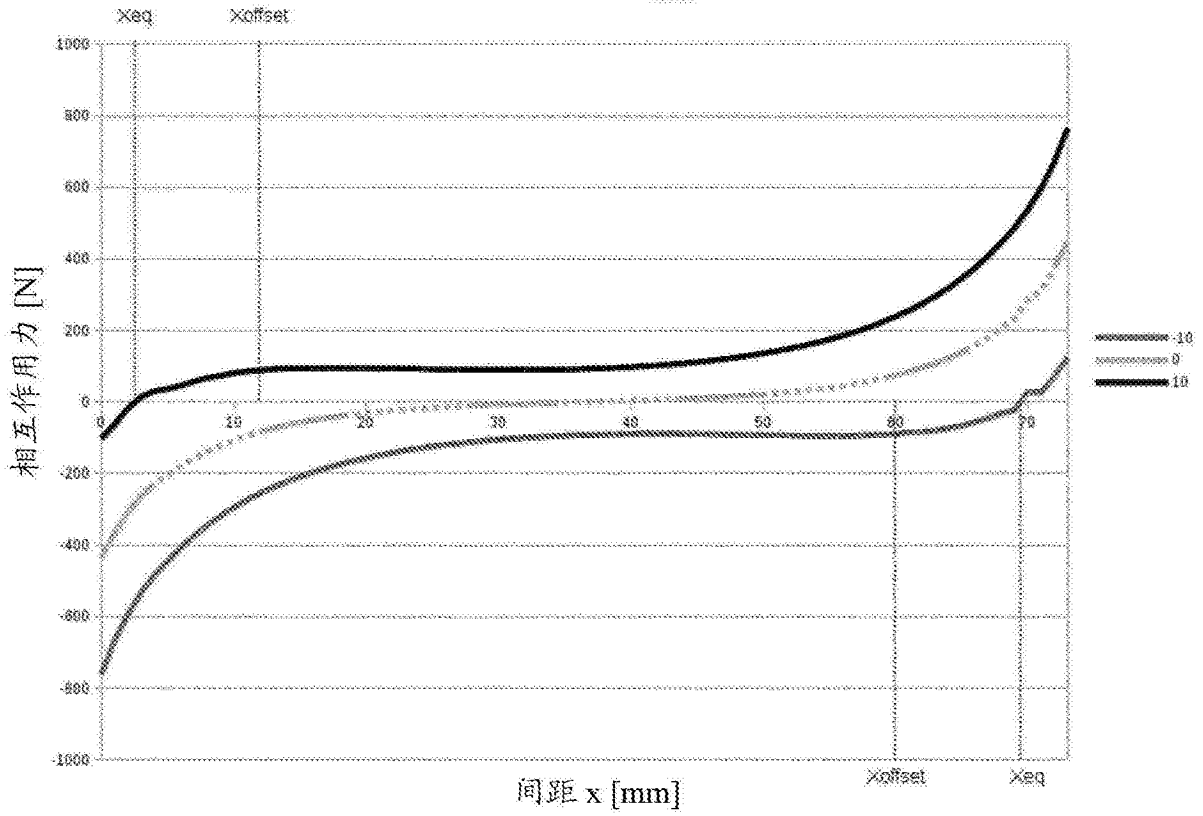


图22

当 $|J_{coil}| = 10 [\frac{A}{mm^2}]$ 时经过修正的3偶极子的相互作用力 [N]

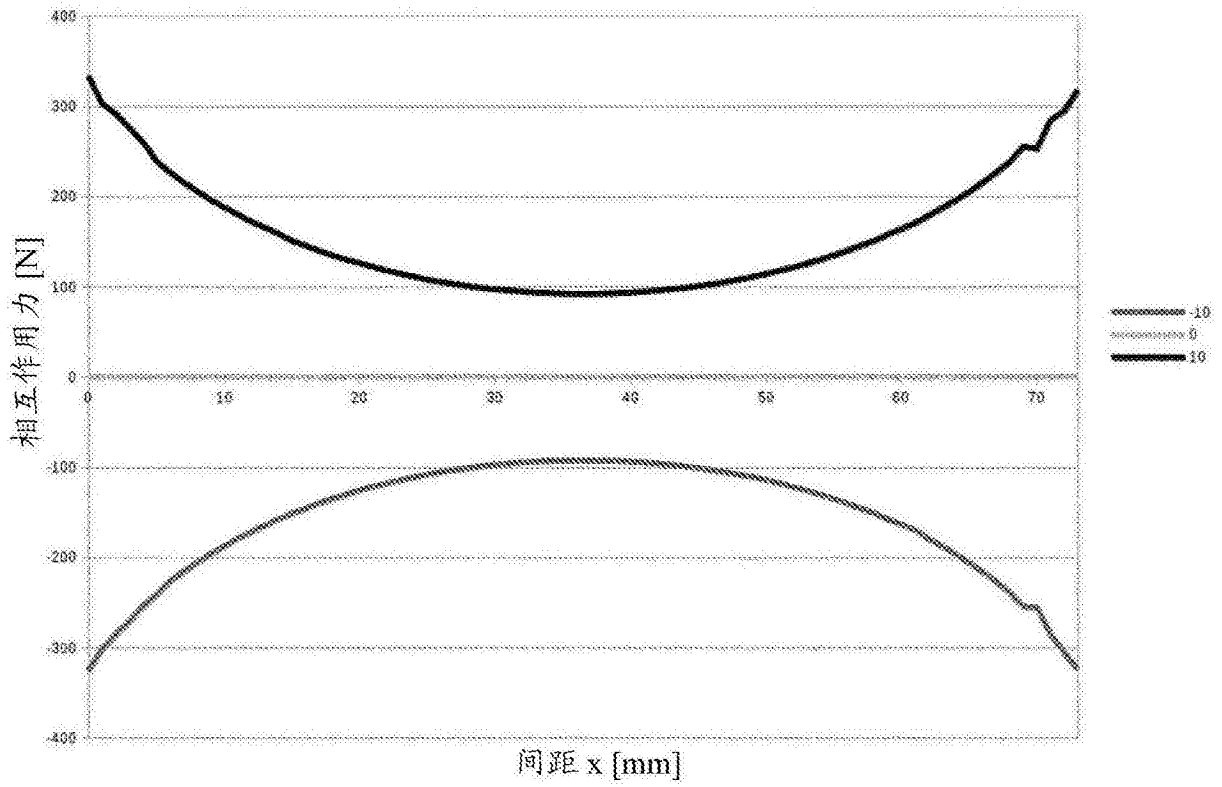


图23

3偶极子的相互作用力 [N]

$$|U_{coil}| \leq 10 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

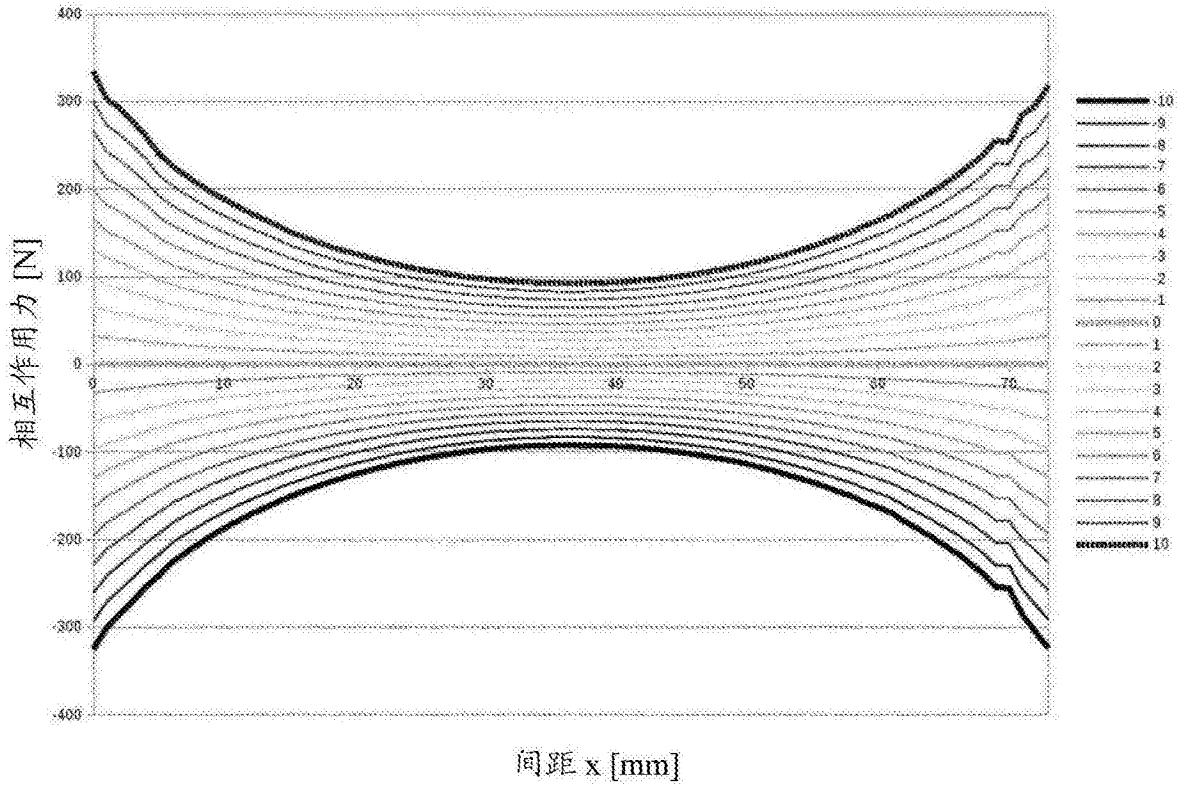


图24

经过修正的力曲线

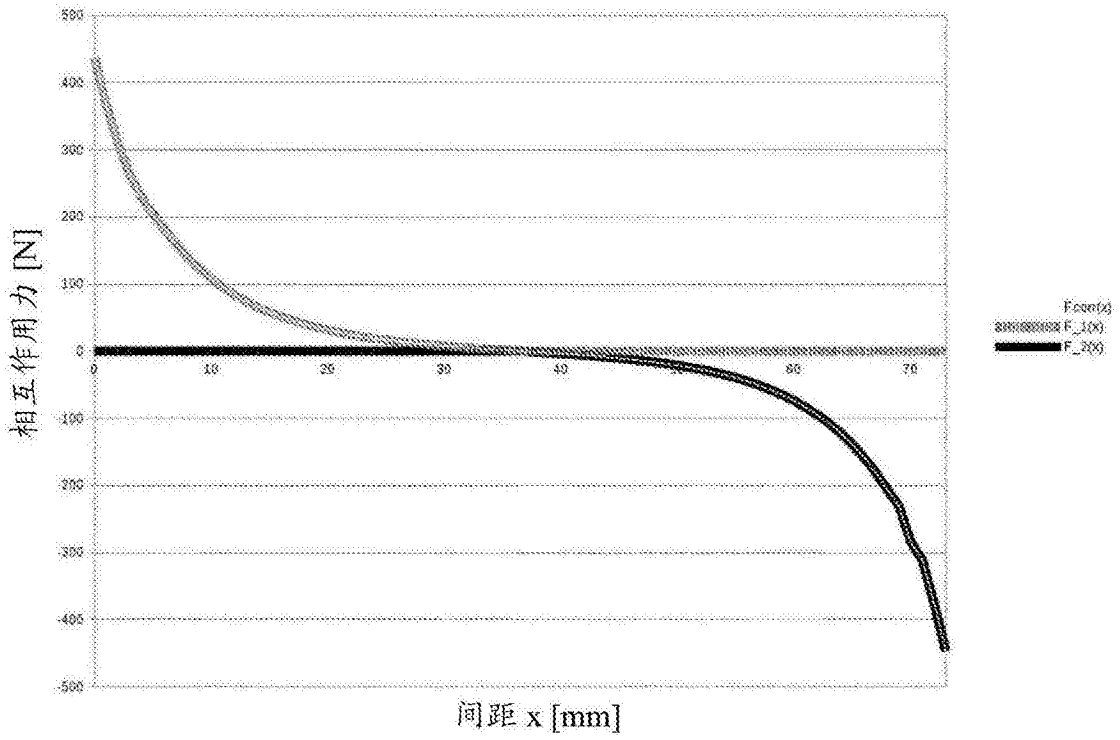


图25

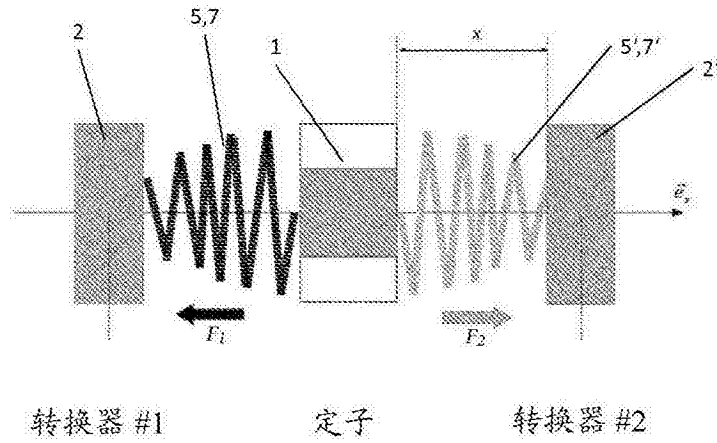


图26

弹簧 F_{corr} [N]
外推至五个子区间

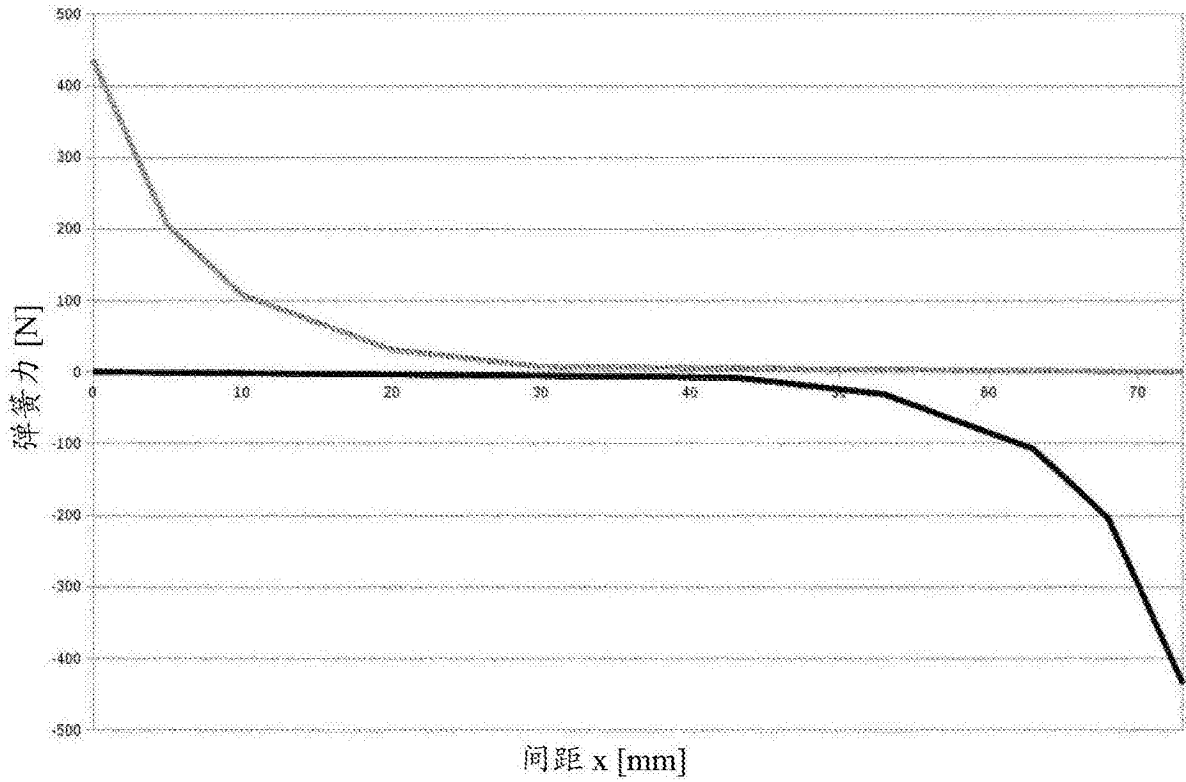


图27