

证书号第 4199723 号



发明专利证书

发明名称：用于产生负刚度的电磁设备和振动控制的方法

发明人：朱松晔;石翔

专利号：ZL 2017 1 0113005.9

专利申请日：2017 年 02 月 28 日

专利权人：香港理工大学

地址：中国香港九龙

授权公告日：2021 年 01 月 12 日

授权公告号：CN 107795631 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第 4199723 号



专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年 02 月 28 日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

香港理工大学

发明人：

朱松晔；石翔



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107795631 B

(45) 授权公告日 2021.01.12

(21) 申请号 201710113005.9

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2017.02.28

F16F 15/03 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107795631 A

审查员 王麒

(43) 申请公布日 2018.03.13

(30) 优先权数据
15/257,958 2016.09.07 US

(73) 专利权人 香港理工大学
地址 中国香港九龙

(72) 发明人 朱松晔 石翔

(74) 专利代理机构 北京柏杉松知识产权代理事
务所(普通合伙) 11413
代理人 谢攀 刘继富

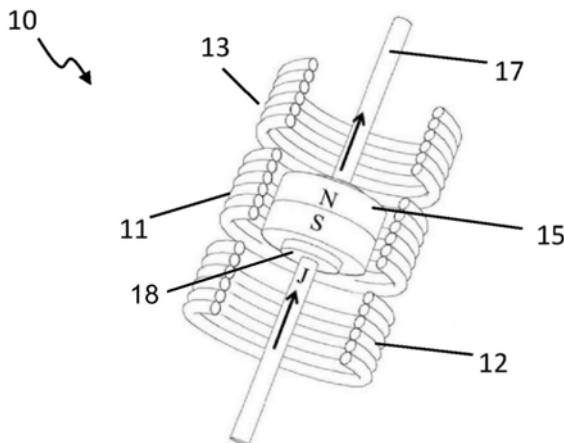
权利要求书2页 说明书9页 附图10页

(54) 发明名称

用于产生负刚度的电磁设备和振动控制的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种用于负刚度的电磁设备,其包含用于产生磁场的—个或多个螺线管,以及可相对于该—个或多个螺线管而移动的可移动磁体。该—个或多个螺线管可被配置以在平衡位置周围产生对称的磁场,其磁场强度与距离平衡位置的距离成平方关系。可移动磁体在该平衡位置处受到的合力为零,根据相应的磁极方向和在设备中轴线方向产生的按二次方程分布的磁场强度,其所受合力与其位移成线性关系且合力方向与位移方向相同,即产生—种线性负刚度。本发明还涉及—种振动控制的方法。



1. 一种用于产生负刚度的电磁设备,其包括用于产生磁场的的一个或多个螺线管和可移动磁体,所述可移动磁体可沿着所述一个或多个螺线管的中心轴线做相对移动,所述一个或多个螺线管可被配置以在平衡位置周围产生对称的磁场,从而使得在使用中,其磁场强度与距离平衡位置的距离成平方关系,因此所述可移动磁体在所述平衡位置处受到的合力为零,根据相应的磁极方向和在所述中心轴线上产生的按二次方程分布的磁场强度,所述可移动磁体所受合力与其位移成线性关系且合力方向与位移方向相同,从而产生线性负刚度。

2. 根据权利要求1所述的电磁设备,其包括多个螺线管,所述多个螺线管包含第一螺线管、布置于所述第一螺线管的一侧的第二螺线管和布置于所述第一螺线管的相反侧的第三螺线管,其中所述多个螺线管相对于彼此布置以使得所述磁场在所述平衡位置周围对称。

3. 根据权利要求2所述的电磁设备,其中所述第二螺线管和第三螺线管与所述第一螺线管是等距的。

4. 根据权利要求3所述的电磁设备,其包括布置于所述第二螺线管的一侧的一个或多个附加螺线管和布置于所述第三螺线管的一侧的一个或多个附加螺线管。

5. 根据权利要求4所述的电磁设备,其中所述多个螺线管等距间隔开。

6. 根据权利要求2所述的电磁设备,其中位于中央的所述第一螺线管被配置以向所述可移动磁体提供随着位移增加而逐渐软化的负刚度,位于两侧的所述第二螺线管和第三螺线管被配置以向所述可移动磁体提供随着位移增加而逐渐硬化的负刚度。

7. 根据权利要求6所述的电磁设备,其中附加螺线管位于所述第一螺线管的两侧,且其中所述第二螺线管、所述第三螺线管和所述附加螺线管被配置以向所述可移动磁体提供随着位移增加而逐渐硬化的负刚度。

8. 根据权利要求6所述的电磁设备,其中所述第一螺线管、所述第二螺线管和所述第三螺线管共同作用可向所述可移动磁体提供符合线性特征的负刚度。

9. 根据权利要求2所述的电磁设备,其中每一螺线管的线圈几何形状均大体相同。

10. 根据权利要求2所述的电磁设备,其中所述多个螺线管以相同的方向卷绕。

11. 根据权利要求1所述的电磁设备,其中所述一个或多个螺线管和所述可移动磁体可配置使得所述一个或多个螺线管和所述可移动磁体的磁化方向相同。

12. 根据权利要求2所述的电磁设备,其中所述多个螺线管沿着共用纵向中轴线对准。

13. 根据权利要求1所述的电磁设备,其中所述可移动磁体固定地安装到用于将外部振动传输到所述可移动磁体的轴杆。

14. 根据权利要求7所述的电磁设备,其中所述第一螺线管、所述第二螺线管和所述第三螺线管共同作用可向所述可移动磁体提供符合线性特征的负刚度。

15. 根据权利要求1、11和13中任一权利要求所述的电磁设备,其中所述一个或多个螺线管具有环形的横截面,所述可移动磁体具有圆形或环形的横截面。

16. 根据权利要求2-10、12和14中任一权利要求所述的电磁设备,其中所述一个或多个螺线管具有环形的横截面,所述可移动磁体具有圆形或环形的横截面。

17. 根据权利要求16所述的电磁设备,当所述可移动磁体位于所述平衡位置时,其中所述第一螺线管和所述可移动磁体同心。

18. 一种振动控制的方法,其包括以下步骤:

提供根据前述权利要求中任一权利要求所述电磁设备；
将所述可移动磁体连接到外部振动源；
配置一个或多个螺线管激磁从而使所述可移动磁体获得所要的负刚度特性；
通过调整螺线管中的电流，使所述螺线管产生对于平衡位置对称的，且磁场强度与距离平衡位置的距离成平方关系的磁场。

用于产生负刚度的电磁设备和振动控制的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种可应用于振动控制的具有负刚度特性的电磁设备。

背景技术

[0002] 可将负刚度认为是其所受外力方向与其形变方向相反。这可具有将系统的总体刚度减小到零或至少接近于零的效应。将负刚度引入到隔振系统中将大大降低系统的外部振动的传输率。

[0003] 隔振系统或设备可以使用负刚度与抑制振动的阻尼的组合,例如,粘性或电涡流阻尼器。这种电磁负刚度装置适用于需要将目标物体隔离于振动源的多种应用中。举例来说,负刚度阻尼器可用于多种土木及机械结构的振动控制中,例如斜拉桥的拉索、建筑物,用于保护精密设备的隔振台等等。现有的负刚度装置可分为被动、半主动或主动模式。由于被动模式的负刚度装置并不需要复杂的反馈系统,因此其制造和安装更简单且更便宜,且相较于主动或半主动负刚度装置有更好的鲁棒性。然而,现有的其他形式的被动负刚度仅可实现非线性负刚度,其不利于在理论分析及现实生活中应用。处于被动模式下的负刚度装置的实例公开于US 20130118098A1中,其描述了包括锚定框架及可相对于该锚定框架横向移动的移动框架的装置。该装置还具有压缩弹簧以及将该弹簧连接到移动框架以将负刚度引入到系统中的连接机构。在平衡位置处,压缩弹簧并不将横向力施加到移动框架。在接合状态下,压缩弹簧被配置以施加横向力从而在地震荷载的横向方向上使移动框架产生位移。

[0004] 主动及半主动负刚度装置使用外部电源、反馈系统中的传感器及作动器以对振动做出反应及缓解振动。主动及半主动控制技术相较于被动技术通常可实现更好的控制性能。线性二次调节器算法(一种用于最优主动控制的控制理论)可在一些情形下产生有益于减振性能的具有明显负刚度特征的滞洄(即力-变形)关系。然而,由于主动及半主动阻尼器对电源及反馈系统的要求且相对于被动阻尼器而言较高的复杂度,主动及半主动阻尼器相较于被动阻尼器而言可靠度较低且具有较高维护要求。这些现象引起了对被动负刚度装置的探索,这种被动负刚度装置可产生类似于主动阻尼器的滞洄特性,从而实现与主动阻尼器的性能相当的控制效果。

发明内容

[0005] 本发明的目的为提供能够实现具有线性负刚度的被动装置。

[0006] 根据本发明的第一方面,提供用于产生负刚度的电磁设备,其包括用于产生磁场的的一个或多个螺线管和可移动磁体,该可移动磁体可沿着一个或多个螺线管的中心轴线做相对移动。该一个或多个螺线管可被配置以在平衡位置两侧产生对称的磁场,从而使得在使用中,其磁场强度与距离平衡位置的距离成平方关系,因此该可移动磁体在该平衡位置处受到的合力为零。根据相应的磁极方向和在中心轴线方向上产生的按二次方程分布的磁场强度,该可移动磁体所受合力与其位移成线性关系且合力方向与位移方向相同,从而产

生线性负刚度。

[0007] 该设备可包括多个螺线管,其包含第一螺线管、布置于第一螺线管的一侧的第二螺线管和布置于第二螺线管的相反侧的第三螺线管,其中多个螺线管可相对于彼此对称布置以使得其产生的磁场在平衡位置周围对称。

[0008] 有利的是,包括多个螺线管的负刚度设备使得该设备能够被配置以提供多种不同特性的刚度(可正可负)。举例来说,该设备可被配置以通过将电流通过螺线管的方向反转从而产生线性正刚度、通过在适当时选择性地给一个或多个螺线管激磁以提供软化(减小)的正或负刚度,或者硬化(增大)的正或负刚度。

[0009] 第二螺线管和第三螺线管与第一螺线管是等距的。

[0010] 该设备可包括布置于第二螺线管的一侧的一个或多个附加螺线管和布置于第三螺线管的一侧的一个或多个附加螺线管。多个螺线管大体上等距间隔开。

[0011] 位于中央的第一螺线管被配置以向可移动磁体提供随着可移动磁体的位移增加而逐渐软化的负刚度,而位于两侧的第二螺线管、第三螺线管和附加螺线管被配置以向可移动磁体提供随着可移动磁体的位移增加而逐渐硬化的负刚度。而当多个螺线管共同作用时,可向可移动磁体提供符合线性特征的负刚度(既不软化也不硬化)。

[0012] 每一螺线管的线圈几何形状均可大体相同。多个螺线管以相同的方向卷绕。

[0013] 一个或多个螺线管和可移动磁体可配置使得一个或多个螺线管和可移动磁体的磁化方向相同。

[0014] 多个螺线管沿着共用纵向中轴线对准。可移动磁体可固定安装在用于将外部振动传输到可移动磁体的轴杆。

[0015] 一个或多个螺线管和可移动磁体可具有圆形横截面。当可移动磁体位于平衡位置时,第一螺线管和可移动磁体同心。

[0016] 根据本发明的第二方面,提供一种振动控制的方法,其包括以下步骤:

[0017] 提供如任一前述技术方案所述的设备;

[0018] 将固定可移动磁体的轴杆连接到外部振动源;

[0019] 配置一个或多个螺线管激磁从而使可移动磁体获得所要的负刚度特性;

[0020] 通过调整螺线管中的电流,使螺线管产生对于平衡位置对称的,且磁场强度与距离平衡位置的距离成平方关系的磁场。

附图说明

[0021] 下文将通过实例并且参考附图来进一步详细解释本发明的优选实施例,在附图中:

[0022] 图1(a)展示的是包括单一螺线管的负刚度装置的剖面透视图;

[0023] 图1(b)展示的是当电流流动通过螺线管时图1(a)中展示的负刚度装置的横截面图;

[0024] 图1(c)展示的是当磁体位于螺线管内的两个不同位置时图1(a)中展示的负刚度装置的横截面图;

[0025] 图2展示的是图1(a)到图1(c)中所展示的螺线管的匝数对与螺线管中心的距离的曲线;

[0026] 图3展示的是磁体的磁场与螺线管的磁场之间的相互作用力对与螺线管中心的距离的曲线;

[0027] 图4展示的是包括三个螺线管的负刚度装置的剖面透视图;

[0028] 图5展示的是螺线管的磁场与磁体的磁场之间的相互作用力对位移的曲线,该位移为磁体相对于负刚度装置的平衡位置的位移;

[0029] 图6展示的是因螺线管与磁体之间的相互作用而产生的负刚度装置的刚度特性对位移的曲线,该位移为磁体相对于负刚度装置的平衡位置的位移;

[0030] 图7展示的是图4中所展示的负刚度装置的横截面图;

[0031] 图8展示的是螺线管的磁场与磁体的磁场之间的相互作用力对位移的曲线,该位移为磁体从具有第一参数集的负刚度装置的平衡位置的位移;

[0032] 图9展示的是因螺线管与磁体之间的相互作用而产生的负刚度装置的刚度特性对位移的曲线,该位移为磁体从具有第一参数集的负刚度装置的平衡位置的位移;

[0033] 图10展示的是螺线管的磁场与磁体的磁场之间的相互作用力对位移的曲线,该位移为磁体从具有第二参数集的负刚度装置的平衡位置的位移;

[0034] 图11展示的是因螺线管与磁体之间的相互作用而产生的负刚度装置的刚度特性对位移的曲线,该位移为磁体从具有第二参数集的负刚度装置的平衡位置的位移;

[0035] 图12展示的是螺线管的磁场与磁体的磁场之间的相互作用力对位移的曲线,该螺线管磁场相对于磁体的磁极方向发生反转,该位移为磁体相对于图8的装置的平衡位置的位移;

[0036] 图13展示的是因螺线管与磁体之间的相互作用而产生的装置的刚度特性对位移的曲线,该位移为磁体相对于图8的装置的平衡位置的位移;

[0037] 图14展示的是原型负刚度装置的实验设定;以及

[0038] 图15展示的是磁体的磁场与螺线管的磁场之间的相互作用力对位移的曲线,该位移为通过图14的设定所测量的磁体的位移。

具体实施方式

[0039] 图1(a)及图1(b)描绘了理论上理想的负刚度装置1,其包括螺线管3和永久磁体5,该永久磁体5可在螺线管内沿着螺线管3的纵向轴线移动。永久磁体5通过间隔物8固定安装到轴杆7。因此,轴杆7和磁体5可相对于螺线管3且沿着螺线管3的纵向轴线位移到如图1(c)中5'所描绘的位置。在电流流动通过螺线管3时,由螺线管3产生磁场,该磁场与永久磁体5的磁场相互作用。由螺线管产生的磁场B与流动通过螺线管的电流I和每一单位长度的匝数n成比例。

[0040] 因此,有可能通过调整每一单位长度的匝数和/或流动通过螺线管的电流来操控螺线管内部的磁场的强度及梯度。

[0041] 作用于均匀磁场内部的磁体上的合力等于零,这是因为来自磁体的北极及南极的磁力互相抵消。对于图1(a)及图1(b)中所展示的理想线性负刚度装置,选择匝数以使其在螺线管的任一侧且远离螺线管中心的方向上以平方方式变化。因此,参考图2,匝数呈二次函数形式变化且关于中心或平衡位置对称地变化。因此,参考图3,螺线管与永久磁体之间的相互作用力随着从平衡位置0-0的位移线性地增大。

[0042] 理论模型被构建用来模拟理想电磁负刚度装置 (EM-NSD) 的行为。根据图1 (c) 中描绘的EM-NSD所提出的配置,将磁体及线圈布置成共轴,且磁体仅可在纵向方向上以各种位移 x 移动。EM-NSD的负刚度力通过磁体与由线圈产生的磁场之间的相互作用而产生。

[0043] 在理论模型中,单独地模拟磁体及线圈。在图1 (c) 中展示了EM-NSD参数的详细符号。通过库仑 (Coulombian) 模型模拟永久磁体,同时通过长丝方法模拟线圈。对于基于库仑模型的永久磁体的模拟,已经开发出许多分析型解决方案用以模拟具有特定形式的磁体的磁特性,特定形式包括不同形状 (Akoun及Yonnet,1984;Agashe及Arnold,2008;Babic及Akyel,2008a) 和极化方向 (Ravaud等人,2008及2009a、b)。类似地,也已开发出许多分析型表达式以基于长丝方法求解由线圈产生的磁性参数 (Babic及Akyel,2008b;Akyel等人,2009;Ravaud等人,2010a、b)。下文将陈述模拟EM-NSD的详细过程。

[0044] 库仑模型是基于磁性单极子的假定。通过库仑模型,将环形或圆柱形磁体转移到具有均匀分布的磁性单极子的两个表面。一个表面充有北极 $+\sigma^*$ 而另一表面充有南极 $-\sigma^*$ 。每一单极子充有 σ^* ,因此 σ^* 在库仑模型中也被称作极密度。在数学上,极密度 σ^* 等于磁体的顽磁。

[0045] 对于位于磁体的平坦表面上的单一磁性单极子,可通过以下方程式描述在经受磁场时由磁体接收的力

$$[0046] \quad \vec{F}_m = \sigma^* \vec{H} \quad (1)$$

[0047] 其中 σ^* 为磁性单极子的磁荷或极密度,而 \vec{H} 为由螺线管形成的磁场强度。

[0048] 在位移 x 处由磁场内部的永久磁体所接收的磁力可通过对由所有磁性单极子所接收的磁力的积分来计算,如通过方程式 (2) 所示。

$$[0049] \quad \vec{F} (R_{m-out}, R_{m-in}, T_m, \vec{H}(r, \theta, z), x) = \sum_{i=1}^2 \int_{r_m=R_{m-in}}^{R_{m-out}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \pm \sigma^* \vec{H}(r_m, \theta, z_i) dr_m d\theta \quad (2)$$

[0050] 其中 $z_1 = x + T_m/2$, 及 $z_2 = x - T_m/2$ 。 R_{m-out} 为磁体的外部半径, R_{m-in} 为磁体的内部半径, T_m 为磁体的厚度, x 为位移。 \vec{H} 为由线圈形成的磁场。

[0051] 由于磁体与线圈被布置成共轴,因此径向的合力始终等于零,仅需要考虑在纵向上的磁力。因此,方程式 (2) 可简化为:

$$[0052] \quad F_z (R_{m-out}, R_{m-in}, T_m, H_z(r, \theta, z), x) = \sum_{i=1}^2 \int_{r_m=R_{m-in}}^{R_{m-out}} \int_{\theta=0}^{2\pi} \pm \sigma^* H_z(r_m, \theta, z_i) dr_m d\theta \quad (3)$$

$$F_r = 0$$

[0053] 其中 H_z 为纵向上的磁场。

[0054] 在电流流动通过线圈时,线圈将产生磁场。根据毕奥-萨伐尔 (Biot-Savart) 定律,在任何空间点处由线圈形成的磁场可通过以下公式表示

$$[0055] \quad \vec{H}(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{z=-L/2}^{L/2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r_c=R_{c-in}}^{R_{c-out}} \vec{j}(z) \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dr_c d\theta dz \quad (4)$$

[0056] 其中 R_{c-out} 为线圈的外部半径 (m); R_{c-in} 为线圈的内部半径 (m); L 为线圈的高度 (m); $\vec{r} - \vec{r}'$ 为点 $P(r, z)$ (在此处计算磁场) 与线圈内部的点 (r', z', θ') (图1 (c)) 之间的空间向

量。 $\vec{j}(z)$ 为体积电流密度 (A/m^2)。

[0057] 通过匝数 N 乘以线圈内部的电流 I (NI) 而确定体积电流密度 \vec{j} 。如果 NI 随着沿着线圈的纵向位置变化, 那么 \vec{j} 在线圈内部非均匀地分布。在各种纵向位置 z 处 $\vec{j}(z)$ 与 $NI(z)$ 之间的关系可通过以下公式表示:

$$[0058] \quad dNI(z) = \vec{j}(z) \cdot (R_{e-out} - R_{e-in}) dz \quad (5)$$

[0059] 对于图1(c)中呈现的几何形状, 由线圈形成的磁场可分解成纵向方向及半径方向, 如通过以下方程式所示

$$[0060] \quad \vec{H}(r, z) = H_r(r, z)\vec{u}_r + H_z(r, z)\vec{u}_z \quad (6)$$

[0061] 其中 \vec{u}_r 和 \vec{u}_z 为沿着半径及纵向方向的单位向量。

[0062] 两个磁场分量的量值可通过以下公式计算 (Ravaud 等人, 2010b):

$$[0063] \quad H_r(r, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{z=-L/2}^{L/2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=R_{e-in}}^{R_{e-out}} j(z) \cdot \frac{r'(z-z')\cos\theta'}{(r^2 + r'^2 - 2rr'\cos\theta' + (z-z')^2)^{3/2}} dr d\theta dz \quad (7a)$$

$$[0064] \quad H_z(r, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{z=-L/2}^{L/2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=R_{e-in}}^{R_{e-out}} j(z) \cdot \frac{r'(r-r\cos\theta')}{(r^2 + r'^2 - 2rr'\cos\theta' + (z-z')^2)^{3/2}} dr d\theta dz \quad (7b)$$

[0065] 将方程式 (7a) 代入方程式 (3), 可计算 EM-NSD 的负刚度力。通过此理论模型, 可确定线性负刚度装置和准线性负刚度装置的刚度力。

[0066] 尽管基于单一螺线管或线圈的线性负刚度装置在理论上是可能的, 但实际上难以制造, 这是由于其对于对称地在平衡位置任一侧的符合精确函数的线圈匝数的控制及对于具有贯穿其长度的均匀线圈横截面的需要。已发现, 使用多于一个螺线管实际上能更为方便的实现负刚度装置, 该负刚度装置能够实现大致线性或准线性负刚度。

[0067] 参考图4, 展示了能够实现准线性负刚度的装置10, 其包括第一螺线管11、第二螺线管12和第三螺线管13。第二螺线管12和第三螺线管13布置在第一螺线管11的两侧且与第一螺线管11的相邻端等距间隔开。每一螺线管11、12、13相对固定且沿着共用纵向轴线对准。通过磁体15两侧的两个固定间隔物18将圆柱形 (NdFeB) 永久磁体15固定地安装到不锈钢轴杆17。轴杆17和磁体15安置在螺线管内, 且可沿着共用纵向轴线相对于螺线管11、12、13移动。轴杆17可被配置以通过将轴杆17连接到振动源而将外部振动传输到永久磁体15上。

[0068] 每一螺线管11、12、13包括卷绕成线圈的铜线的长度, 其中根据相应螺线管11、12、13所要的磁力特性来选择每一单位长度的匝数。每一螺线管11、12、13的线圈的半径及每一线圈的厚度 (即每一线圈的相应端之间的纵向距离) 应该相同, 且每一线圈以相同的方向卷绕, 从而使得电流以相同的方向通过相应螺线管11、12、13从而使螺线管11、12、13具有相同的极化方向。

[0069] 每一线圈的几何形状和匝数均可选择为相同。在一些实施例中, 第一螺线管11的匝数可选择为不同于第二螺线管12和第三螺线管13的匝数。然而, 在第二螺线管12和第三

螺线管13与第一螺线管11的相应端等距间隔开的实施例中,第二螺线管12和第三螺线管13应彼此具有相同的线圈几何形状和匝数。这确保在电流大小、方向相同的情况下,第二螺线管12和第三螺线管13可在第一螺线管11的两侧产生对称的磁场。

[0070] 由于图4中所描绘的实施例的螺线管11、12、13被选择成具有大体上相同的匝数且由于第二螺线管12和第三螺线管13与第一螺线管11的相应邻近端等距间隔开,因此在流动通过第二螺线管12和第三螺线管13的电流及由第二螺线管12和第三螺线管13产生的磁场大体上相同时,永久磁体15的平衡位置为第一螺线管11的中心。在此位置中,可以看出永久磁体15和第一螺线管11同心。

[0071] 参考图5及图6,可观测到在平衡位置处,通过与螺线管11、12、13的磁场的相互作用的磁体15上的合力为零。此平衡位置非常不稳定,因为永久磁体15从此位置的甚至轻微位移也会改变永久磁体15上的合力,这是由于其与螺线管11、12、13的相应磁场的共同作用。

[0072] 可通过首先孤立地考虑第一螺线管11(中间螺线管)对永久磁体15的效应及其其次孤立地考虑第二螺线管12和第三螺线管13(外部螺线管)对永久磁体15的效应来解释相应螺线管11、12、13对永久磁体15的负刚度效应。

[0073] 可从图5展示的图表中的“软化”线观测到,当永久磁体15偏离平衡位置时,第一线圈11与磁体15之间的相互作用力随着位移 X 增大而增大,但增大的速率在减小。由于磁体15所受力的方向与位移方向相同,即为负刚度。

[0074] 如图6中所展示,因第一或中间螺线管11而产生的负刚度(如通过“软化”线所描绘)在平衡位置处最大且会随着位移的增大而减小,这可认为是随着位移软化的负刚度。可观测到,磁体15超出远离平衡位置的某一位移时,因第一螺线管11而产生的负刚度变为正刚度。这是因为磁体15相对于第一螺线管11移动到一位置,在该位置处磁体之间的吸引力胜过斥力而使得产生朝向平衡位置的方向上的合力。

[0075] 也可从图5观测到,第二线圈12和第三螺线管13与磁体15之间的相互作用力随着位移 X 增大而增大,且增大的速率也在增大。由于磁体15所受力的方向与位移方向相同,即为位移负刚度。

[0076] 参考图6,可观测到,相应螺线管11、12、13的组的软化和硬化负刚度效应产生准线性负刚度(如通过“线性”线所描绘)。螺线管11、12、13与磁体之间的组合相互作用力随着位移 X 大体上线性地增大(如图5中通过“线性”线所描绘)。这种平衡可通过下列方式实现:调整每一螺线管11、12、13的每一单位长度的匝数和/或调整流动通过相应螺线管11、12、13的电流。这种大体上线性负刚度效应通过如以下实例中所展示的模式来验证。

[0077] 实例

[0078] 参考图7,第一螺线管11、第二螺线管12、第三螺线管13和永久磁体15具有数个参数(下文列出对应符号),该参数可根据装置10所要的特性而改变。

[0079] 符号

[0080]	T_m (mm)	磁体的厚度
[0081]	R_{m-out} (mm)	磁体的外部半径
[0082]	R_{m-in} (mm)	磁体的内部半径
[0083]	L_{c0} (mm)	第一螺线管的的厚度

[0084]	L_c (mm)	第二/第三螺线管的厚度
[0085]	R_{c-out0} (mm)	中间线圈的外部半径
[0086]	R_{c-in0} (mm)	中间线圈的内部半径
[0087]	R_{c-out} (mm)	第二/第三螺线管的外部半径
[0088]	R_{c-in} (mm)	第二/第三螺线管的内部半径
[0089]	e (mm)	第二/第三螺线管与第一螺线管之间的间隙
[0090]	I_0	第一螺线管的电流
[0091]	I	第二/第三螺线管的电流
[0092]	N_0	第一螺线管的匝数
[0093]	N	第二/第三螺线管的匝数

[0094] 实例1

[0095] 在第一实例中,选择以下参数以用于负刚度装置10:

[0096] 参数

[0097]	T_m (mm)	20
[0098]	R_{m-out} (mm)	5
[0099]	R_{m-in} (mm)	24
[0100]	L_{c0} (mm)	20
[0101]	L_c (mm)	20
[0102]	R_{c-out0} (mm)	40
[0103]	R_{c-in0} (mm)	25
[0104]	R_{c-out} (mm)	40
[0105]	R_{c-in} (mm)	25
[0106]	e (mm)	20
[0107]	I_0 (A)	0.25
[0108]	I (A)	5
[0109]	N_0	380
[0110]	N	380

[0111] 从参数可以看出,第一螺线管11、第二螺线管12和第三螺线管13的匝数被选择为相同的。然而,流动通过第一螺线管11的电流为分别流动通过第二螺线管12和第三螺线管13的电流的二十分之一以在平衡位置周围通过螺线管11、12、13产生磁场强度随着距离成平方关系变化的磁场且由此提供准线性的组合力。

[0112] 参考图8,在所有三个线圈11、12、13均起作用时,随着磁体15从平衡位置到例如图7中15'所描绘的位置的位移,相应螺线管与磁体15之间的组合力大致为线性的。再参考图9,因第一螺线管11、第二螺线管12和第三螺线管13而产生的磁体上的组合负刚度在-10mm与+10mm位移之间大致为线性的,如通过“总”线所描绘。

[0113] 实例2

[0114] 在第二实例中,选择以下参数以用于负刚度装置10:

[0115] 参数

[0116]	T_m (mm)	20
--------	------------	----

[0117]	R_{m-out} (mm)	5
[0118]	R_{m-in} (mm)	24
[0119]	L_{c0} (mm)	20
[0120]	L_{c1} (mm)	30
[0121]	R_{c-out0} (mm)	31
[0122]	R_{c-in0} (mm)	30
[0123]	R_{c-out1} (mm)	50
[0124]	R_{c-in1} (mm)	25
[0125]	e_1 (mm)	20
[0126]	I_0 (A)	3
[0127]	I_1 (A)	3
[0128]	N_0	10
[0129]	N_1	930

[0130] 从参数可以看出,第二螺线管12和第三螺线管13均被选择为具有930匝,而第一螺线管11被选择为具有10匝。但是,流动通过每一螺线管11、12、13的电流均被选择为相同的3A。

[0131] 参考图10,在所有三个线圈11、12、13均起作用时,随着磁体15从平衡位置的位移,相应螺线管与磁体15之间的组合力大致为线性的。再参考图11,如在实例1中,通过第一螺线管11、第二螺线管12和第三螺线管13施加的磁体上的组合负刚度在-10mm与+10mm位移之间大致为线性的,如通过“总”线所描绘。

[0132] 可从两个实例观测到,相应线圈可被配置以在平衡位置周围产生磁场强度与位移成平方关系的磁场,其中中间线圈产生软化型负刚度,外部线圈产生硬化型负刚度,两者组合产生准线性负刚度。

[0133] 实例3

[0134] 在第三实例中,选择与实例1相同的参数,但是如下所示将流动通过相应螺线管11、12、13的电流方向反转:

[0135] 参数

[0136] I_0 (A) -0.25

[0137] I (A) -5

[0138] 反转电流流动方向使得线圈11、12、13的磁化方向反转,因此,一旦磁体从平衡位置位移,施加于磁体上的力的方向也将反转。举例来说,如果磁体15向下移动,那么磁场作用在磁体15上的力的方向则向上。因此,参考图12,可以看出,将通过相应线圈11、12、13的电流的方向反转可产生正刚度。尽管如此,从图13可观测到,反转电流方向对相应螺线管11、12、13的软化或硬化刚度特征没有影响,且对于-10mm与+10mm之间的磁体位移,可实现准线性正刚度。

[0139] 通过实验来构造并测试装置10的原型以验证拟线性负刚度特性。实验设定的相片描绘于图14中,其展示包括三个螺线管的装置。使用了以下参数:

[0140] 参数

[0141] 磁体 NdFeB

[0142]	T_m (mm)	18
[0143]	R_{m-out} (mm)	5
[0144]	R_{m-in} (mm)	24
[0145]	L_{c0} (mm)	16
[0146]	L_{c1} (mm)	9
[0147]	R_{c-out0} (mm)	38
[0148]	R_{c-in0} (mm)	25
[0149]	R_{c-out1} (mm)	38
[0150]	R_{c-in1} (mm)	25
[0151]	e_1 (mm)	26
[0152]	I_0 (A)	0.5
[0153]	I_1 (A)	5
[0154]	N_0	600
[0155]	N_1	300

[0156] 如图15所示,原型实现了被动式的准线性负刚度装置。

[0157] 尽管上述每一个实施例均包括三个螺线管,但可沿着纵向增加更多的螺线管到装置中,以产生更为精确的线性负刚度。举例来说,可使用五个螺线管,从而在装置中心处提供第一或中间螺线管,在中间螺线管两侧各提供两个螺线管。在此布置中,每一螺线管共轴对准且与邻近螺线管等距间隔开。同理,装置可包括7个、9个、11个等螺线管,其中每一螺线管均共轴对准且间隔开的,使得轴杆及磁体可移动通过相应螺线管。根据螺线管位置不同从而确定合适的参数(例如,匝数及电流),生成更为准确的符合二次函数分布的磁场,从而实现更为精确的线性负刚度特性。

[0158] 螺线管可以灵活地调整装置的负刚度特性。举例来说,可以通过调整电流的大小而调整负刚度的量值。还可以通过反转电流方向而从负刚度切换到正刚度。此外,装置可灵活地从具有线性刚度特性切换到具有软化刚度特性(通过仅激磁中间螺线管)或硬化刚度特性(通过仅激磁外部线圈)。

[0159] 本发明的装置可被用于各种不同系统的振动控制中,例如斜拉桥中的斜索,精密仪器的隔振台,汽车悬架等等。

[0160] 仅借助于实例来描述上述实施例。在不脱离本发明的范围的情况下许多变化是可能的,如在所附权利要求书中所定义。

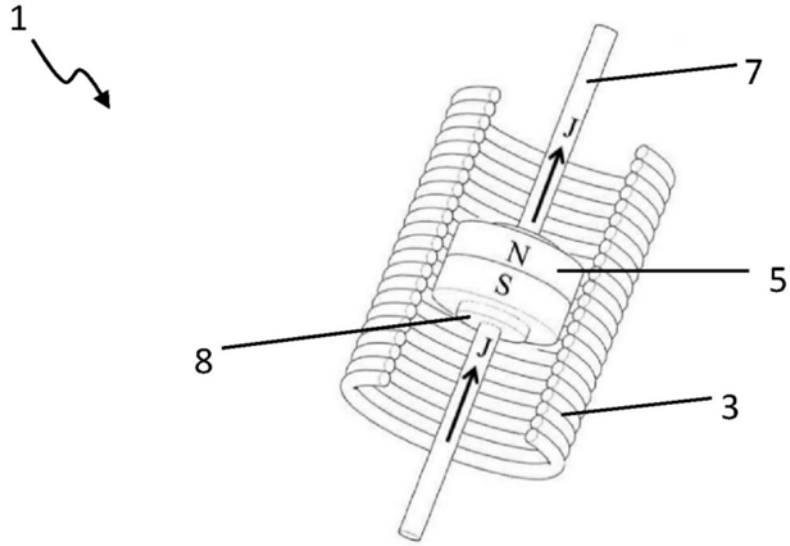


图1 (a)

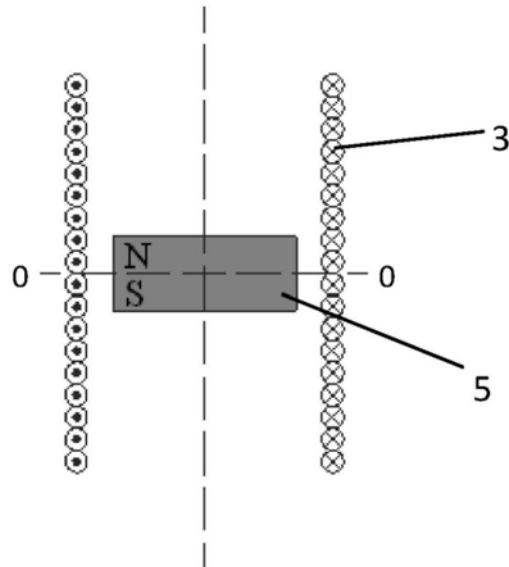


图1 (b)

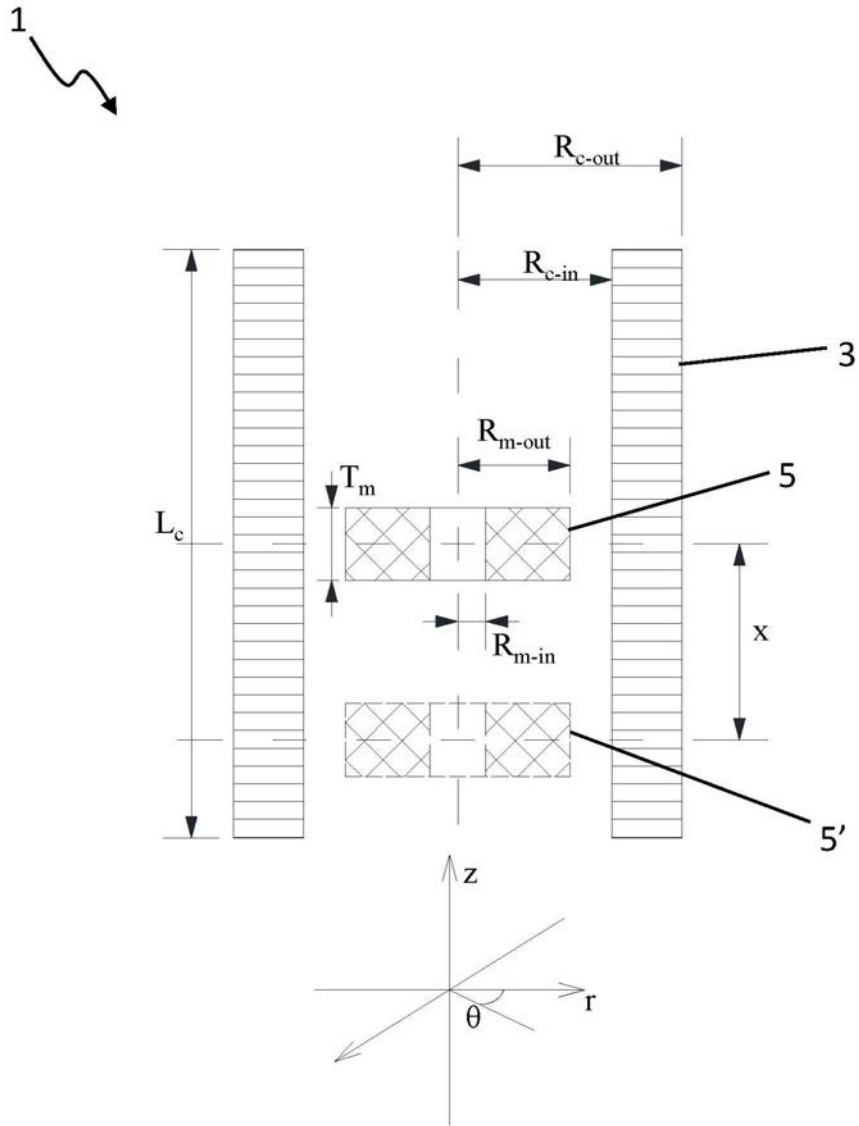


图1(c)

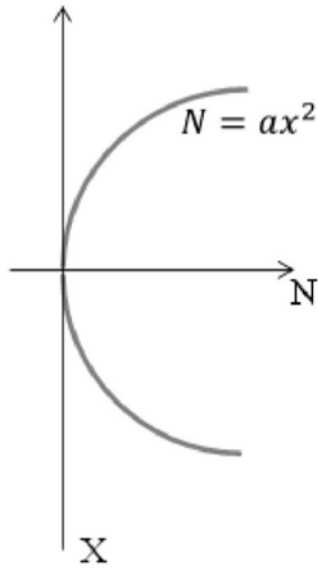


图2

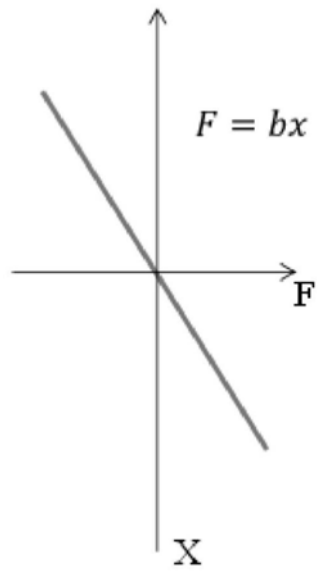


图3

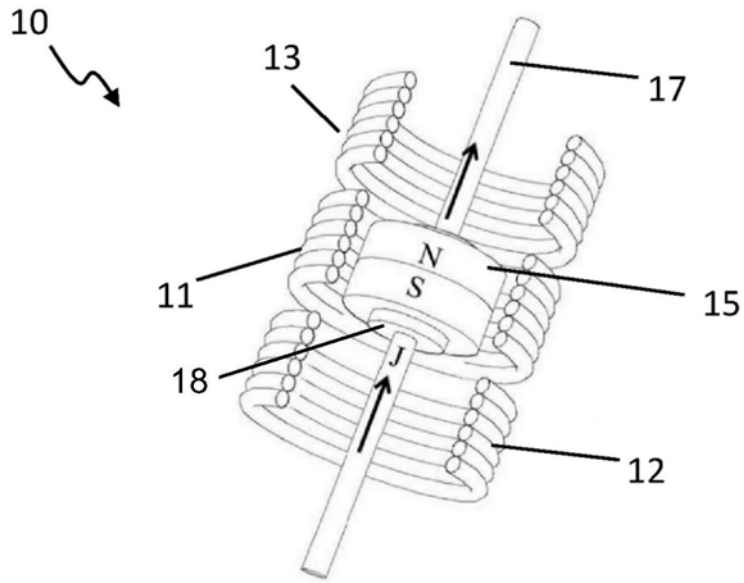


图4

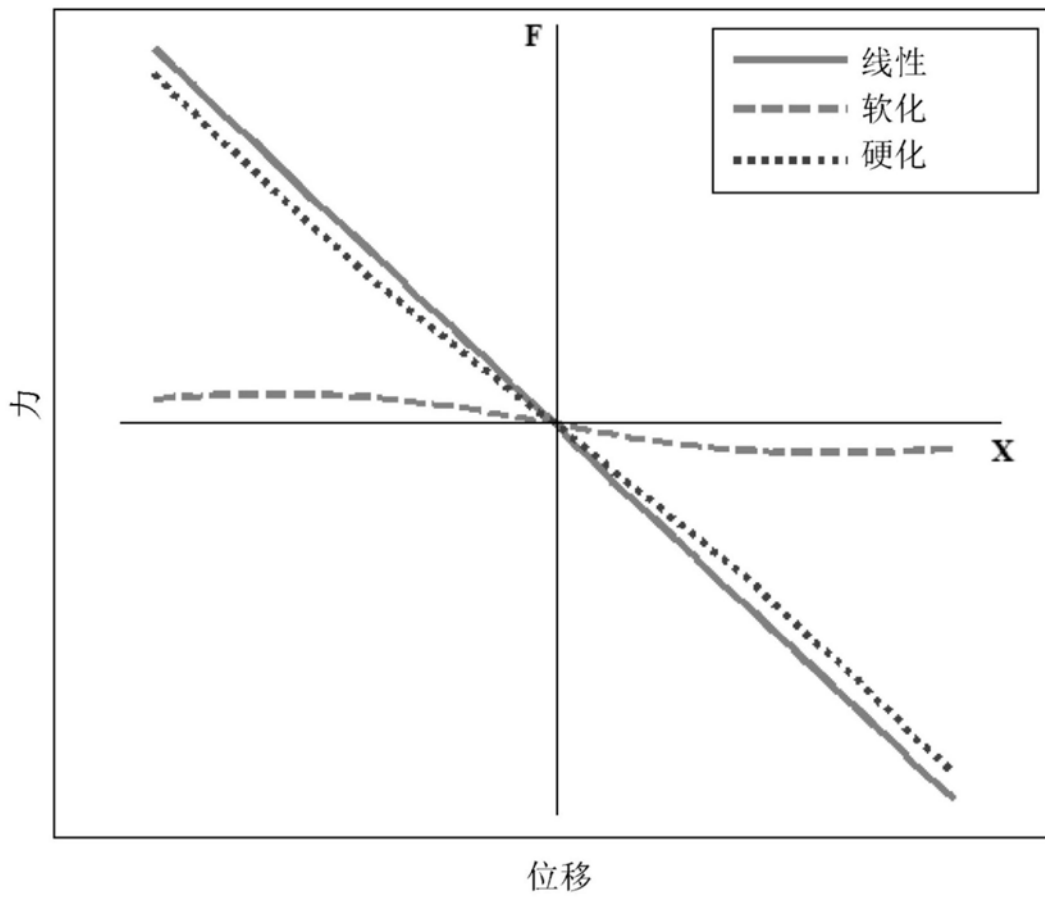


图5

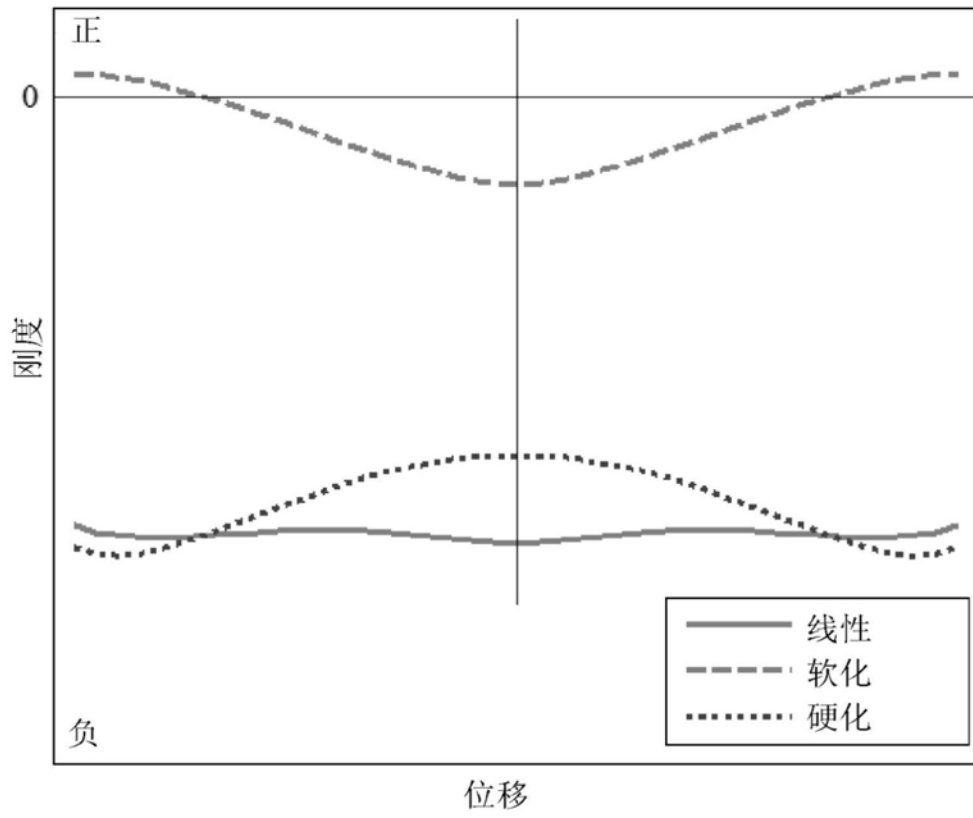


图6

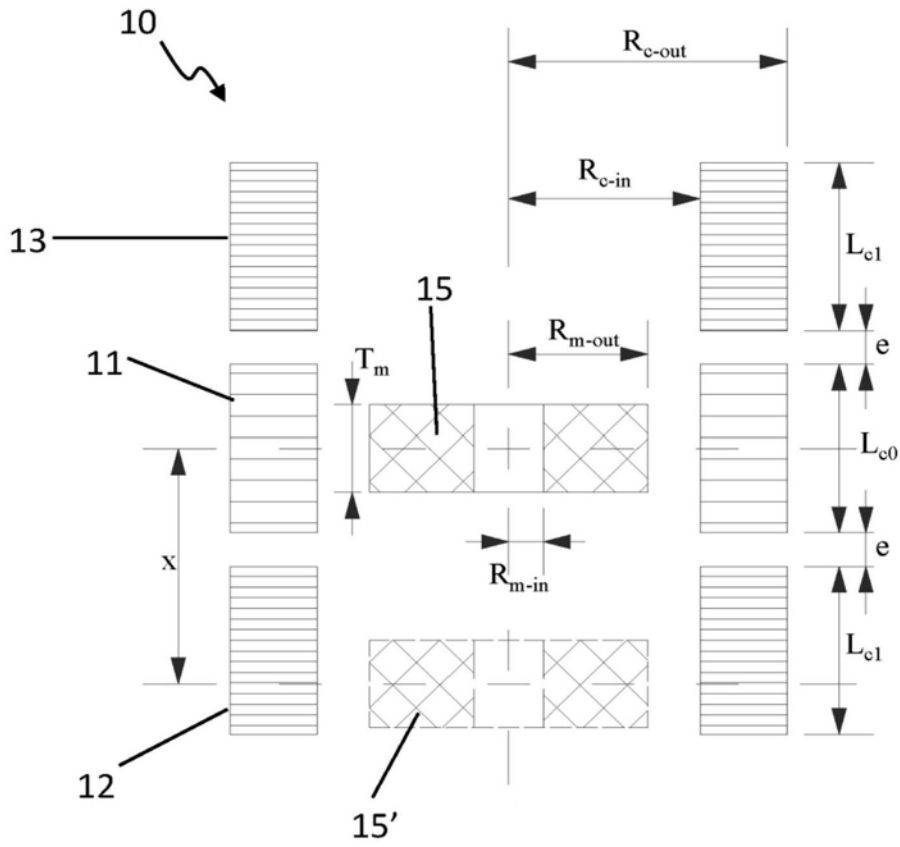


图7

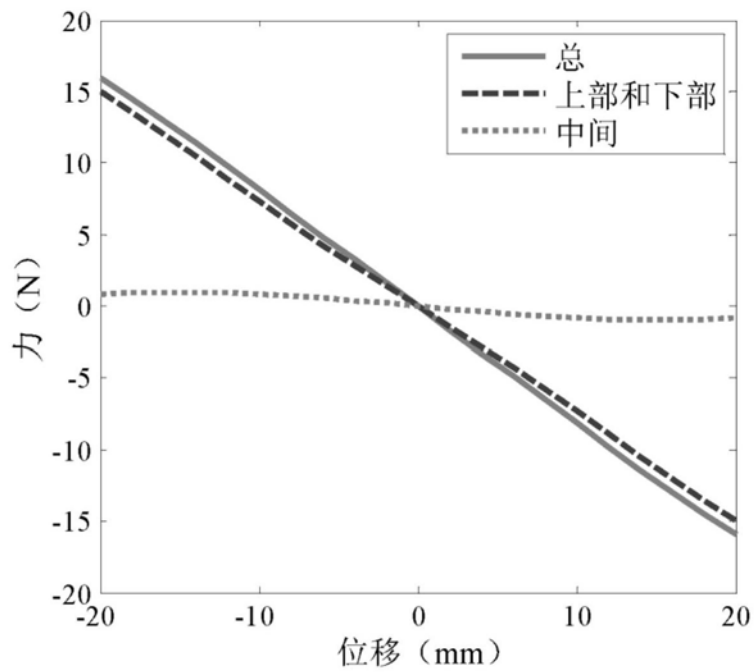


图8

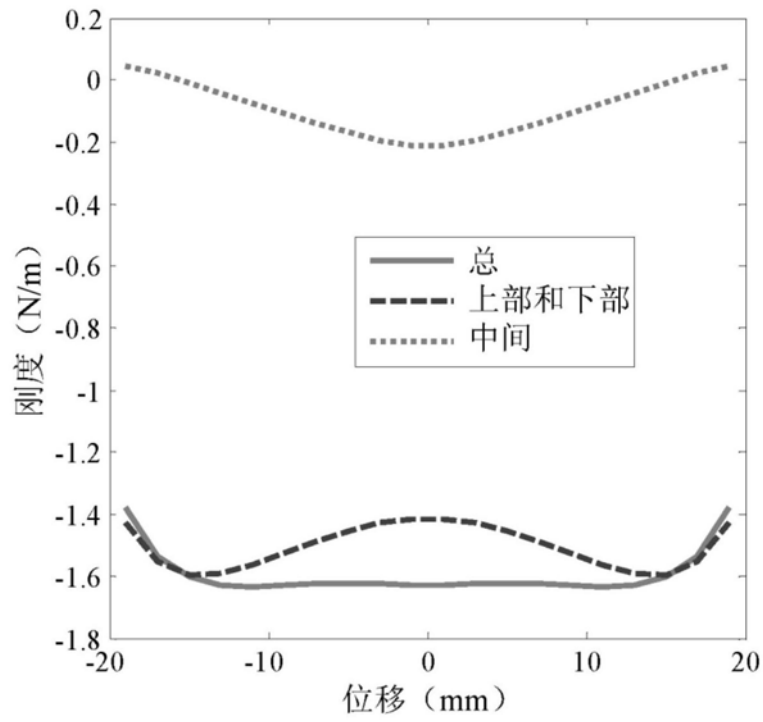


图9

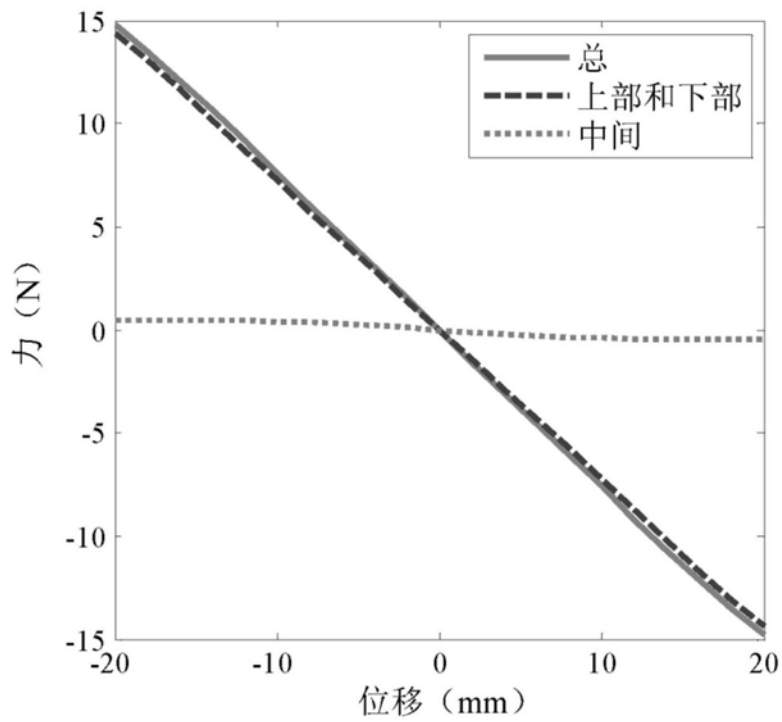


图10

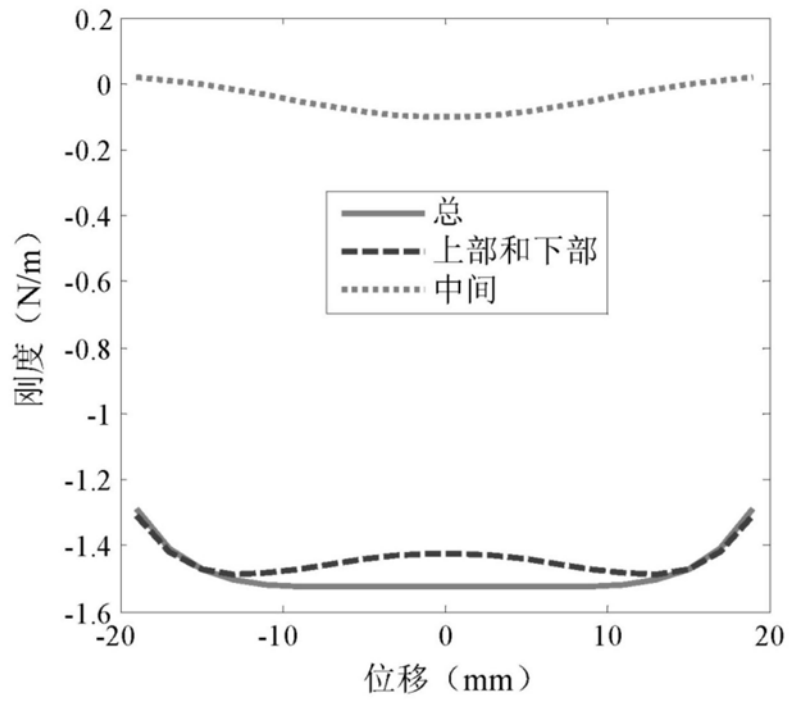


图11

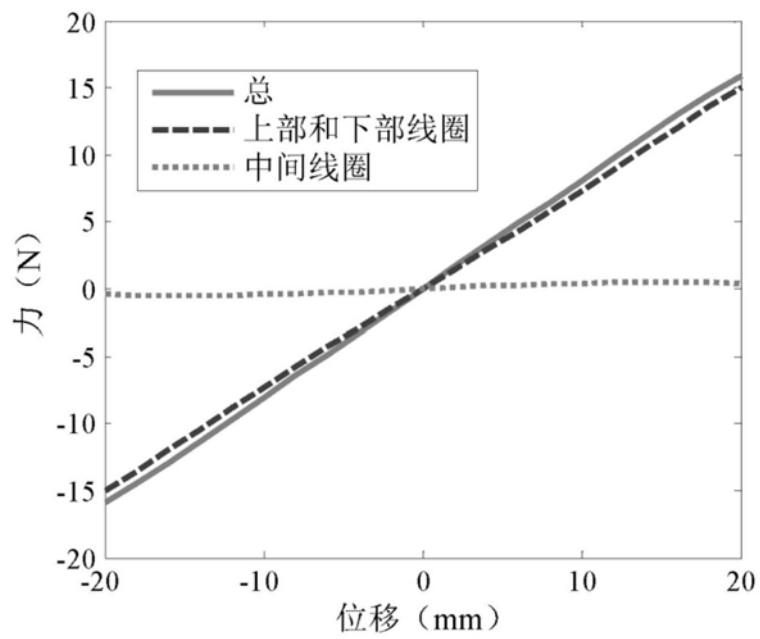


图12

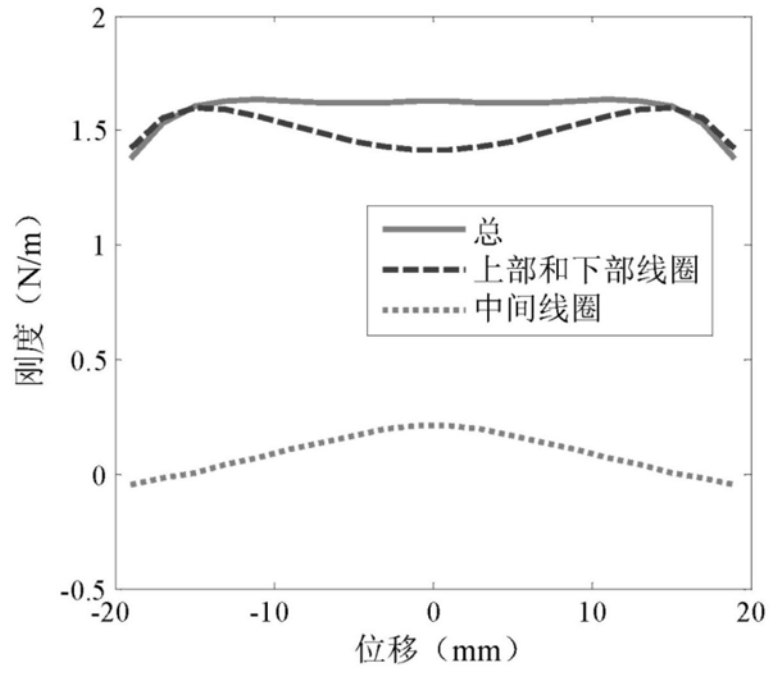


图13

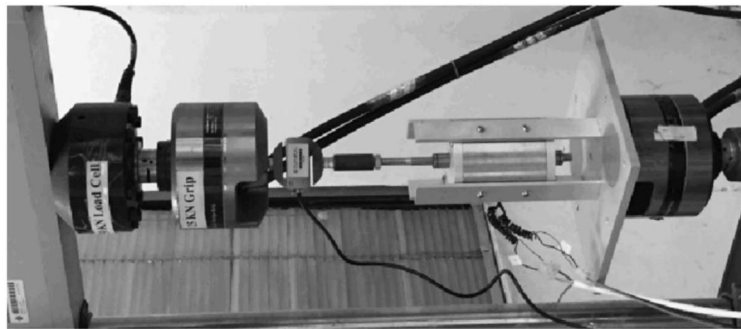


图14

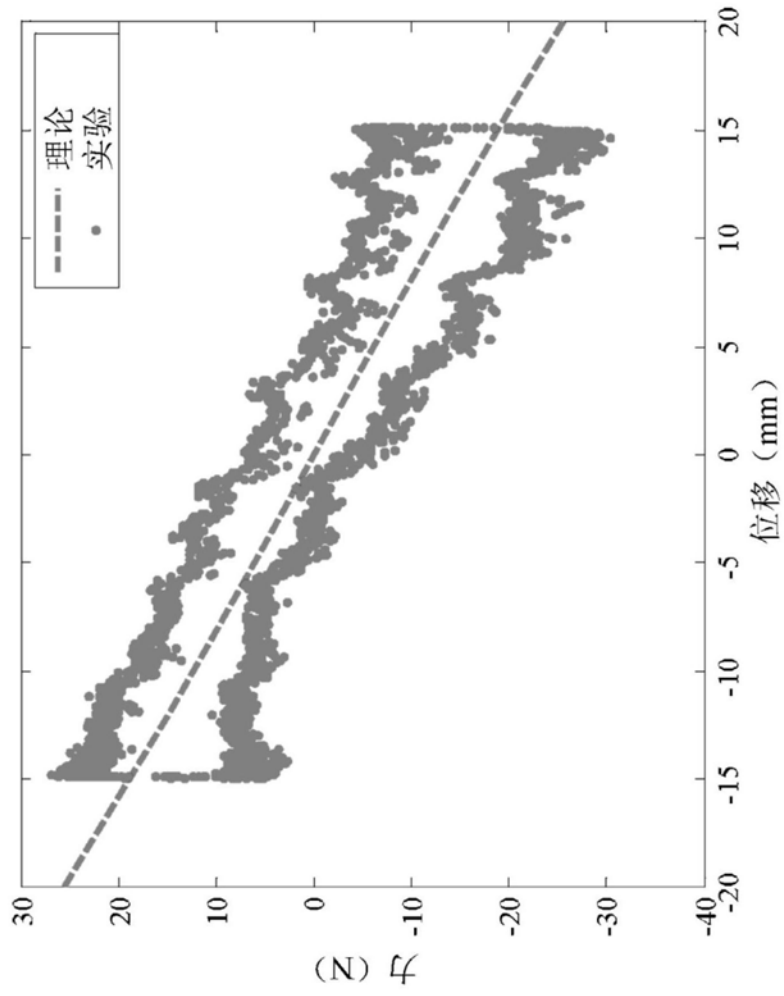


图15