



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106402229 A

(43)申请公布日 2017. 02. 15

(21)申请号 201610447997.4

(22)申请日 2016.06.20

(71)申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

(72)发明人 程春 李舜酩 王勇 谭延峥

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237

代理人 贺翔

(51) Int. Cl.

F16F 7/00(2006.01)

F16F 15/067(2006.01)

B60N 2/54(2006.01)

B63B 29/04(2006.01)

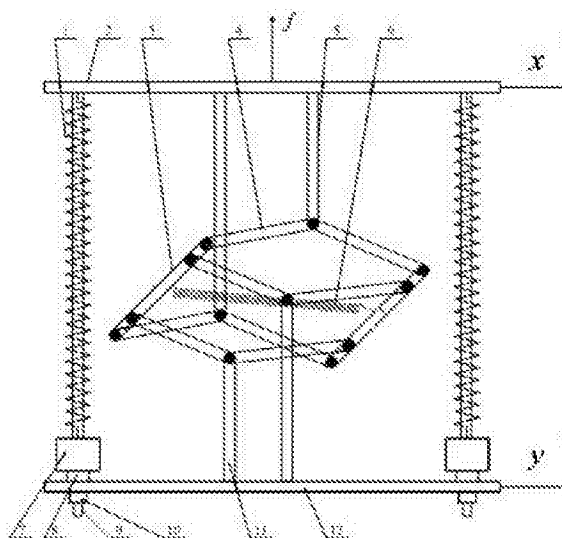
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种剪式准零刚度隔振器及其工作方法

(57)摘要

本发明公开了一种剪式准零刚度隔振器及其工作方法,剪式准零刚度隔振器包括支撑基座、正刚度模块、负刚度模块和支撑板;正刚度模块包含至少一个正刚度单元;负刚度模块包含第一至第二上支架、第一至第八连杆、第一至第二下支架、第一至第二水平连接轴和至少一根水平弹簧。针对现有的线性隔振器难以隔离低频振动以及现有的准零刚度隔振器结构复杂、有效行程短的缺点,本发明基于正负刚度并联的原理,具有高的静刚度和低的动刚度,能够隔离低频或是超低频振动,且易于加工实现、承载能力高、可靠性强。



1. 一种剪式准零刚度隔振器,其特征在于,包括支撑基座、正刚度模块、负刚度模块和支撑板;

所述正刚度模块包含至少一个正刚度单元;

所述正刚度单元包含支撑弹簧、导向轴和直线轴承;

所述直线轴承穿过所述支撑基座并固定在所述支撑基座上;

所述导向轴与所述直线轴承相匹配,一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端穿过所述直线轴承,能够沿所述直线轴承上下滑动;

所述支撑弹簧套在所述导向轴上,一端与所述支撑板固定相连,另一端与所述支撑基座固定相连;

所述负刚度模块包含第一至第二上支架、第一至第八连杆、第一至第二下支架、第一至第二水平连接轴和至少一根水平弹簧;

所述第一上支架一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端分别与所述第一连杆、第二连杆的一端铰接;

所述第二上支架一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端分别与所述第三连杆、第四连杆的一端铰接;

所述第一下支架一端与所述支撑基座固定相连,另一端分别与所述第五连杆、第六连杆的一端铰接;

所述第二下支架一端与所述支撑基座固定相连,另一端分别与所述第七连杆、第八连杆的一端铰接;

所述第一连杆、第三连杆、第五连杆、第七连杆的另一端与所述第一水平连接轴铰接;

所述第二连杆、第四连杆、第六连杆、第八连杆的另一端与所述第二水平连接轴铰接;

所述水平弹簧的一端与所述第一水平连接轴固定相连,另一端与所述第二水平连接轴固定相连。

2. 根据权利要求1所述的剪式准零刚度隔振器,其特征在于,所述正刚度单元的个数为2个,所述水平弹簧的个数为1根。

3. 根据权利要求1所述的剪式准零刚度隔振器,其特征在于,剪式准零刚度隔振器处于初始状态时,所述第一至第八连杆处于同一平面,剪式准零刚度隔振器在纵向的动刚度为零。

4. 根据权利要求1所述的剪式准零刚度隔振器,其特征在于,所述正刚度单元还包含调节管和支撑管;

所述调节管和支撑管均为空心圆管,其中,支撑管的外壁上设有螺纹,调节管的内壁上设有与所述支撑管外壁上螺纹相匹配的螺纹;

所述支撑管与所述直线轴承的上端固定连接;

所述调节管套接在所述支撑管上,能够通过旋转调节其与支撑基座之间的距离;

所述支撑弹簧的另一端不再与支撑基座固定相连,而是与调节管上端铰接。

5. 根据权利要求1所述的剪式准零刚度隔振器,其特征在于,所述第一连杆、第五连杆的另一端与所述第一水平连接轴的一端铰接,所述第三连杆、第七连杆的另一端与所述第一水平连接轴的另一端铰接;

所述第二连杆、第六连杆的另一端与所述第二水平连接轴的一端铰接,所述第四连杆、

第八连杆的另一端与所述第二水平连接轴的另一端铰接。

6. 基于权利要求3所述的剪式准零刚度隔振器的工作方法, 其特征在于, 包含以下过程:

第一至第八连杆初始状态处于水平位置;

当支撑板受力往下运动时, 正刚度单元中的支撑弹簧被压缩, 同时, 第一至第二上支架往下压, 使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短, 第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小, 第一至第八连杆与水平面成一定角度, 从而为纵向提供负刚度;

当支撑板受力往上运动时, 正刚度单元中的支撑弹簧被拉伸, 同时, 第一至第二上支架往上拉, 使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短, 第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小, 第一至第八连杆与水平面成一定角度, 从而为纵向提供负刚度。

一种剪式准零刚度隔振器及其工作方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种低频或超低频非线性隔振装置,具体为一种剪式准零刚度隔振器及其工作方法,适用于汽车、舰船、潜艇等隔振系统中。

背景技术

[0002] 汽车的乘坐舒适性直接与驾驶员的疲劳、不舒适以及安全相关。商用车驾驶员经常处于超负荷、恶劣的工作环境中。驾驶员主要受到高幅值的低频振动的影响,且人体各主要器官的固有频率分布在2~7赫兹的低频区域,故低频振动是导致驾驶员健康问题的一个主要原因。传统的座椅悬架采用的是线性隔振技术,仅在激励频率大于固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时才有隔振效果,并且存在固有频率越低,静位移越大的矛盾。而具有准零刚度特性的非线性隔振器能在保证不影响静刚度的前提下实现很低的动刚度,从而降低隔振器的固有频率,实现低频隔振。

发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题是针对现有的线性隔振器难以隔离低频振动以及现有的准零刚度隔振器结构复杂、有效行程短的缺点,基于正负刚度并联的原理,提出一种剪式准零刚度隔振器及其工作方法。

[0004] 本发明为解决上述技术问题采用以下技术方案:

[0005] 一种剪式准零刚度隔振器,包括支撑基座、正刚度模块、负刚度模块和支撑板;

[0006] 所述正刚度模块包含至少一个正刚度单元;

[0007] 所述正刚度单元包含支撑弹簧、导向轴和直线轴承;

[0008] 所述直线轴承穿过所述支撑基座并固定在所述支撑基座上;

[0009] 所述导向轴与所述直线轴承相匹配,一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端穿过所述直线轴承,能够沿所述直线轴承上下滑动;

[0010] 所述支撑弹簧套在所述导向轴上,一端与所述支撑板固定相连,另一端与所述支撑基座固定相连;

[0011] 所述负刚度模块包含第一至第二上支架、第一至第八连杆、第一至第二下支架、第一至第二水平连接轴和至少一根水平弹簧;

[0012] 所述第一上支架一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端分别与所述第一连杆、第二连杆的一端铰接;

[0013] 所述第二上支架一端与所述支撑板的下壁固定相连,另一端分别与所述第三连杆、第四连杆的一端铰接;

[0014] 所述第一下支架一端与所述支撑基座固定相连,另一端分别与所述第五连杆、第六连杆的一端铰接;

[0015] 所述第二下支架一端与所述支撑基座固定相连,另一端分别与所述第七连杆、第八连杆的一端铰接;

[0016] 所述第一连杆、第三连杆、第五连杆、第七连杆的另一端与所述第一水平连接轴铰接；

[0017] 所述第二连杆、第四连杆、第六连杆、第八连杆的另一端与所述第二水平连接轴铰接；

[0018] 所述水平弹簧的一端与所述第一水平连接轴固定相连，另一端与所述第二水平连接轴固定相连。

[0019] 作为本发明一种剪式准零刚度隔振器进一步的优化方案，所述正刚度单元的个数为2个，所述水平弹簧的个数为1根。

[0020] 作为本发明一种剪式准零刚度隔振器进一步的优化方案，剪式准零刚度隔振器处于初始状态时，所述第一至第八连杆处于同一平面，剪式准零刚度隔振器在纵向的动刚度为零。

[0021] 作为本发明一种剪式准零刚度隔振器进一步的优化方案，所述正刚度单元还包含调节管和支撑管；

[0022] 所述调节管和支撑管均为空心圆管，其中，支撑管的外壁上设有螺纹，调节管的内壁上设有与所述支撑管外壁上螺纹相匹配的螺纹；

[0023] 所述支撑管与所述直线轴承的上端固定连接；

[0024] 所述调节管套接在所述支撑管上，能够通过旋转调节其与支撑基座之间的距离；

[0025] 所述支撑弹簧的另一端不再与支撑基座固定相连，而是与调节管上端铰接。

[0026] 作为本发明一种剪式准零刚度隔振器进一步的优化方案，所述第一连杆、第五连杆的另一端与所述第一水平连接轴的一端铰接，所述第三连杆、第七连杆的另一端与所述第一水平连接轴的另一端铰接；

[0027] 所述第二连杆、第六连杆的另一端与所述第二水平连接轴的一端铰接，所述第四连杆、第八连杆的另一端与所述第二水平连接轴的另一端铰接。

[0028] 本发明还公开了基于该剪式准零刚度隔振器的工作方法，包含以下过程：

[0029] 第一至第八连杆初始状态处于水平位置；

[0030] 当支撑板受力往下运动时，正刚度单元中的支撑弹簧被压缩，同时，第一至第二上支架往下压，使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短，第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小，第一至第八连杆与水平面成一定角度，从而为纵向提供负刚度；

[0031] 当支撑板受力往上运动时，正刚度单元中的支撑弹簧被拉伸，同时，第一至第二上支架往上拉，使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短，第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小，第一至第八连杆与水平面成一定角度，从而为纵向提供负刚度。

[0032] 本发明采用以上技术方案与现有技术相比，具有以下技术效果：

[0033] 1. 结构简单、有效行程大；

[0034] 2. 易于加工实现、承载能力高、可靠性强；

[0035] 3. 具有高的静刚度和低的动刚度，能够隔离低频或是超低频振动。

附图说明

- [0036] 图1为本发明的整体结构示意图；
- [0037] 图2为本发明的正面结构示意图；
- [0038] 图3为图2所示装置放上被隔振设备后的正面结构示意图；
- [0039] 图4为本发明一实施例水平弹簧预拉伸量与准零刚度系统无量纲刚度的关系曲线；
- [0040] 图5为针对基础位移激励的本发明隔振器和等效线性系统的绝对位移传递率比较图。
- [0041] 图中,1-支撑弹簧,2-支撑板,3-水平连接轴,4-连杆,5-上支架,6-水平弹簧,7-调节管,8-支撑管,9-导向轴,10-直线轴承,11-下支架,12-支撑基座。

具体实施方式

- [0042] 下面结合附图对本发明的技术方案做进一步的详细说明：
- [0043] 如图1和图2所示,本发明公开了一种剪式准零刚度隔振器,包括支撑基座、正刚度模块、负刚度模块和支撑板,正刚度模块包含至少一个正刚度单元。
- [0044] 正刚度单元包含支撑弹簧、导向轴和直线轴承,其中,直线轴承穿过所述支撑基座并固定在支撑基座上;导向轴与直线轴承相匹配,一端与支撑板的下壁固定相连,另一端穿过直线轴承,能够沿所述直线轴承上下滑动;支撑弹簧套在导向轴上,一端与支撑板固定相连,另一端与支撑基座固定相连。
- [0045] 负刚度模块包含第一至第二上支架、第一至第八连杆、第一至第二下支架、第一至第二水平连接轴和至少一根水平弹簧;其中,第一上支架一端与支撑板的下壁固定相连,另一端分别与第一连杆、第二连杆的一端铰接;第二上支架一端与支撑板的下壁固定相连,另一端分别与第三连杆、第四连杆的一端铰接;第一下支架一端与支撑基座固定相连,另一端分别与第五连杆、第六连杆的一端铰接;第二下支架一端与支撑基座固定相连,另一端分别与第七连杆、第八连杆的一端铰接;第一连杆、第三连杆、第五连杆、第七连杆的另一端与所述第一水平连接轴铰接;第二连杆、第四连杆、第六连杆、第八连杆的另一端与所述第二水平连接轴铰接;水平弹簧的一端与第一水平连接轴固定相连,另一端与第二水平连接轴固定相连。
- [0046] 正刚度单元的个数可以采用为一个,也可以采用两个,或者采用四个也行,具体情况而论。
- [0047] 水平弹簧的个数为可以是一根,也可以是多根。
- [0048] 为了达到效果最佳,可以选用合适的水平弹簧,使得剪式准零刚度隔振器处于初始状态时,第一至第八连杆处于同一平面,剪式准零刚度隔振器在纵向的动刚度为零。
- [0049] 正刚度单元还可以包含调节管和支撑管,具体如下：
- [0050] 调节管和支撑管均为空心圆管,其中,支撑管的外壁上设有螺纹,调节管的内壁上设有与支撑管外壁上螺纹相匹配的螺纹;支撑管与直线轴承的上端固定连接;调节管套接在所述支撑管上,能够通过旋转调节其与支撑基座之间的距离;支撑弹簧的另一端不再与支撑基座固定相连,而是与调节管上端铰接。
- [0051] 如此一来,可以通过调节管调节所述支撑板的位置。
- [0052] 负刚度模块可以对称设置,第一连杆、第五连杆的另一端与第一水平连接轴的一

端铰接,第三连杆、第七连杆的另一端与第一水平连接轴的另一端铰接;第二连杆、第六连杆的另一端与第二水平连接轴的一端铰接,第四连杆、第八连杆的另一端与第二水平连接轴的另一端铰接。

[0053] 基于该剪式准零刚度隔振器的工作方法,包含以下过程:

[0054] 第一至第八连杆初始状态处于水平位置;

[0055] 当支撑板受力往下运动时,正刚度单元中的支撑弹簧被压缩,同时,第一至第二上支架往下压,使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短,第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小,第一至第八连杆与水平面成一定角度,从而为纵向提供负刚度;

[0056] 当支撑板受力往上运动时,正刚度单元中的支撑弹簧被拉伸,同时,第一至第二上支架往上拉,使得第一至第八连杆将第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的距离拉短,第一水平连接轴和第二水平连接轴之间的水平弹簧拉伸量变小,第一至第八连杆与水平面成一定角度,从而为纵向提供负刚度。

[0057] 下面以包含两个正刚度单元、一根水平弹簧的剪式准零刚度隔振器实例来说明本发明的工作原理:

[0058] 设支撑弹簧的刚度为 $\frac{1}{2}k_v$,水平弹簧的刚度为 k_h ,八个连杆的长度均为 L 。图2为支撑弹簧处于自由状态时隔振器的初始状态,此时连杆与水平面间的夹角为 α ,水平弹簧处于预拉伸状态。当被隔振设备置于支撑板时,支撑弹簧被压缩,上支架带动两侧的连接轴水平方向运动,于是水平弹簧进一步被拉伸,最终八个连杆与水平面间的夹角为 0 ,处于水平状态,该位置正好是被隔振设备的静平衡位置,此时被隔振设备的重量完全由支撑弹簧承载着,如图3所示。只要选择合适的系统参数,可以使得隔振系统在静平衡位置(八个连杆均水平)的刚度为零,那么被隔振设备在静平衡位置附近振动时,系统具有很小的动刚度,隔振器的固有频率很低,从而实现低频甚至超低频隔振的目的。

[0059] 支撑弹簧的刚度为 $\frac{1}{2}k_v$,水平弹簧的刚度为 k_h ,连杆的长度为 L 。静平衡位置处,支撑弹簧的压缩量为 $\Delta x = mg/k_v$,水平弹簧拉伸量为 d 。在垂直方向的力 $f(x)$ 的作用下,被隔振设备位移为 x 时,连杆与水平面的夹角为 α ,此时 $f(x)$ 与 x 之间的关系为

$$[0060] \quad f(x) = mg + f_v - f_h \tan \alpha \quad (1)$$

[0061] 其中: $f_v = k_v(x - \Delta x)$, $f_h = k_h(d - 2L(1 - \cos \alpha))$, $\tan \alpha = x / \sqrt{4L^2 - x^2}$ 。

[0062] 力与位移的关系可进一步写为

$$[0063] \quad f(x) = k_v x - k_h x \left(\frac{d - 2L}{\sqrt{4L^2 - x^2}} + 1 \right) \quad (2)$$

[0064] 令 $u = x/L$, $g = f/(k_v L)$,恢复力可以写成无量纲形式

$$[0065] \quad g(u) = u - \beta u \left(\frac{\delta - 2}{\sqrt{4 - u^2}} + 1 \right) \quad (3)$$

[0066] 其中: $\beta = k_h/k_v$, $\delta = d/L$ 。上式对 u 求导,可以得到刚度的无量纲形式

$$[0067] \quad k = 1 - \beta \left(\frac{4(\delta - 2)}{(4 - u^2)^{3/2}} + 1 \right) \quad (4)$$

[0068] 从上式可以看出,当 β 和 δ 满足一定关系时,隔振器在静平衡位置的刚度为零。令 $k(u=0)=0$,可以得到隔振器准零刚度条件

$$[0069] \quad \delta_{qzs} = \frac{2}{\beta} \quad (5)$$

[0070] 准零刚度隔振器的恢复力与位移间的关系为

$$[0071] \quad g_{qzs}(u) = u - \frac{2u}{\delta_{qzs}} \left(\frac{\delta_{qzs} - 2}{\sqrt{4 - u^2}} + 1 \right) \quad (6)$$

[0072] 准零刚度隔振器的刚度与位移间的关系为

$$[0073] \quad k_{qzs} = 1 - \frac{2}{\delta_{qzs}} \left(\frac{4(\delta_{qzs} - 2)}{(4 - u^2)^{3/2}} + 1 \right) \quad (7)$$

[0074] 无量纲刚度 k_{qzs} 曲线如图4所示, δ 越大, k_{qzs} 曲线越平坦,小刚度区间越宽。

[0075] 当被隔振设备的质量发生变化时,被隔振设备的静位移发生变化,此时可以通过改变调节管的位置来保证连杆处于水平状态。因此,对于任何质量的被隔振设备,均可以通过设计系统的参数,使隔振器具备准零刚度特性,达到低频隔振的目的。

[0076] 将恢复力与位移间的关系式(6)在 $u=0$ 处进行泰勒展开,可以得到近似表达式,以便后续动力学分析

$$[0077] \quad g_{qzs}^e(u) = \gamma u^3 \quad (8)$$

[0078] 其中: $\gamma = (2 - \delta_{qzs}) / (8\delta_{qzs})$ 。

[0079] 下面从绝对位移传递率的角度来展示剪式准零刚度隔振器隔离基础振动的效果。

[0080] 隔振器在简谐基础激励 $y = Y \cos \omega t$ (Y 为基础激励幅值)作用下,被隔振设备在静平衡位置附近运动,其位移为 x 。设被隔振设备与基础间的相对位移为 $z = x - y$,根据牛顿第二定律,可以得到被隔振设备运动微分方程

$$[0081] \quad m\ddot{z} + c\dot{z} + f(z) = -m\ddot{y} \quad (9)$$

[0082] 其中: m 为被隔振设备的质量, c 为隔振系统阻尼系数, $f(z)$ 见式(2)。令 $\omega_0 = \sqrt{k_v/m}$, $\Omega = \omega / \omega_0$, $\tau = \omega_0 t$, $u = z/L$, $\beta = k_h/k_v$, $\delta = d/L$, $Y_1 = Y/L$, $\zeta = c / (2m\omega_0)$ 。将式(5)代入上式中可以得到准零刚度隔振器运动微分方程

$$[0083] \quad \ddot{u} + 2\zeta\dot{u} + g_{qzs}(u) = \Omega^2 Y_1 \cos \Omega \tau \quad (10)$$

[0084] 其中:符号 (\cdot) 表示关于自变量 τ 的导数, $g_{qzs}(u)$ 见式(6)。将式(6)用近似表达式(8)代替,得到如下运动微分方程

$$[0085] \quad \ddot{u} + 2\zeta\dot{u} + \gamma u^3 = \Omega^2 Y_1 \cos \Omega \tau \quad (11)$$

[0086] 假设系统的振动频率由简谐激励频率主导,那么系统的周期解可设为

$$[0087] \quad u = A \cos(\Omega \tau + \theta) \quad (12)$$

[0088] 其中: A 为被隔振设备周期振动的无量纲幅值, θ 为相位。

[0089] 将式(12)代入式(11)中,应用谐波平衡法得到幅值与频率间的关系式

$$[0090] \quad (2\zeta A\Omega)^2 + \left(\Omega^2 A - \frac{3}{4}\gamma A^3\right)^2 = Y_1^2 \Omega^4 \quad (13)$$

[0091] 相位与频率间的关系式

$$[0092] \quad \cos\theta = \frac{3\gamma A^3 - 4A\Omega^2}{4Y_1\Omega^2} \quad (14)$$

[0093] 那么隔振器的绝对位移传递率可表示为

$$[0094] \quad T = \frac{|x|}{|y|} = \frac{\sqrt{(A + Y_1 \cos\theta)^2 + (Y_1 \sin\theta)^2}}{Y_1} = \sqrt{\left(\frac{A}{Y_1}\right)^2 + \frac{6\gamma A^4 - 8A^2\Omega^2}{4Y_1^2\Omega^2} + 1} \quad (15)$$

[0095] 其中： ζ 为阻尼比。 $\zeta=0.1$ ， $\delta=1$ ，系数 $\gamma=0.125$ 。

[0096] 从图5可以看出，对于不太大的基础激励，本发明可以实现低频隔振甚至是超低频隔振，且绝对位移传递率比线性系统低得多，实现了隔离基础振动的目的。

[0097] 本技术领域技术人员可以理解的是，除非另外定义，这里使用的所有术语（包括技术术语和科学术语）具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是，诸如通用字典中定义的那些术语应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义，并且除非像这里一样定义，不会用理想化或过于正式的含义来解释。

[0098] 以上所述的具体实施方式，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施方式而已，并不用于限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

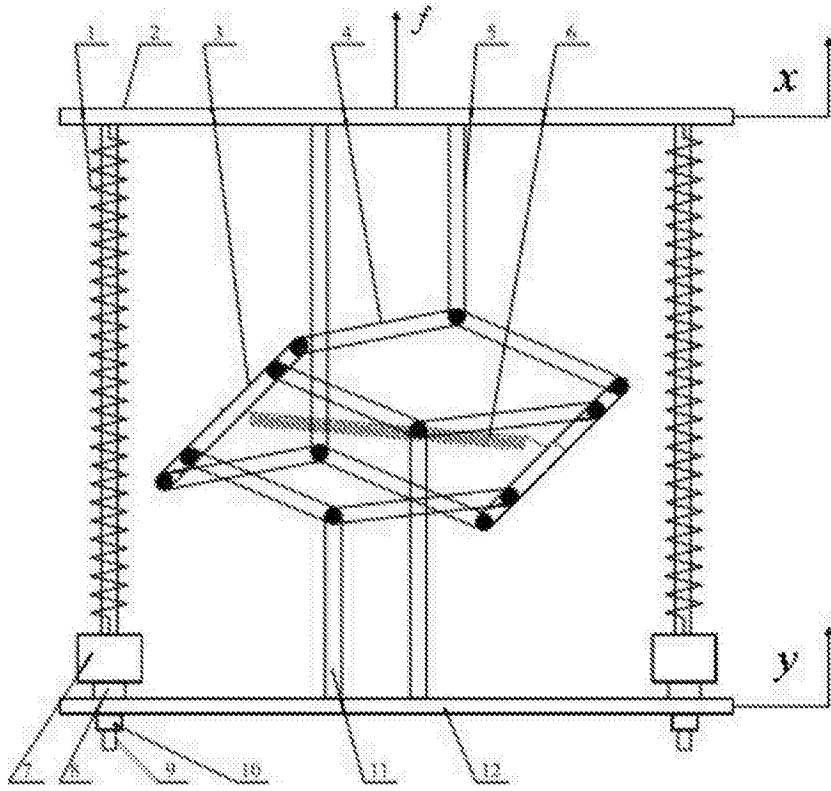


图1

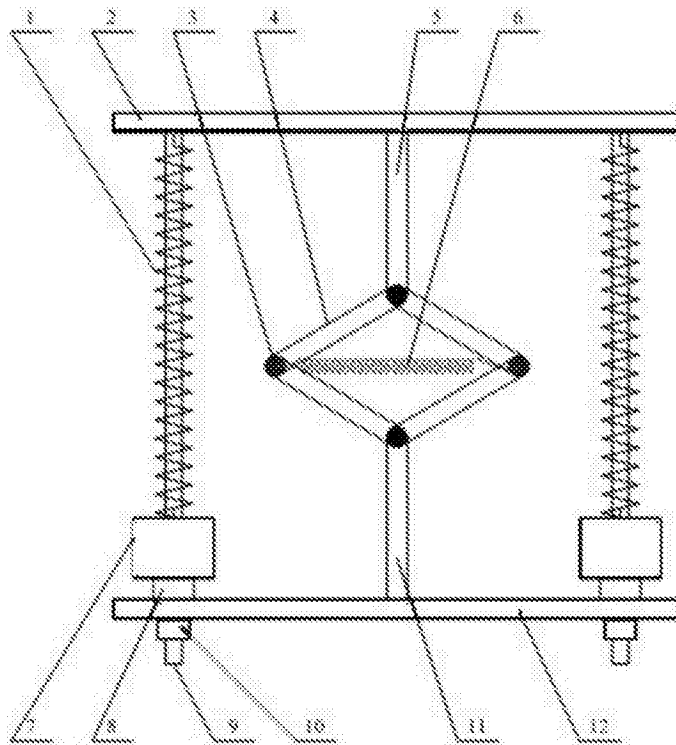


图2

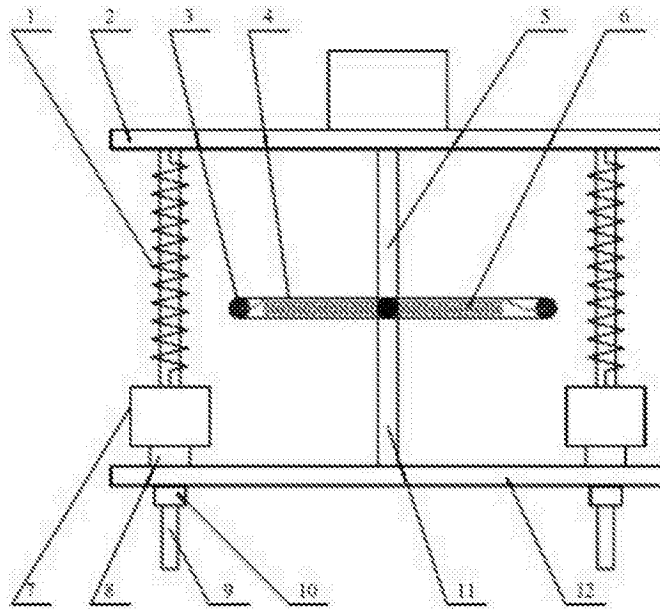


图3

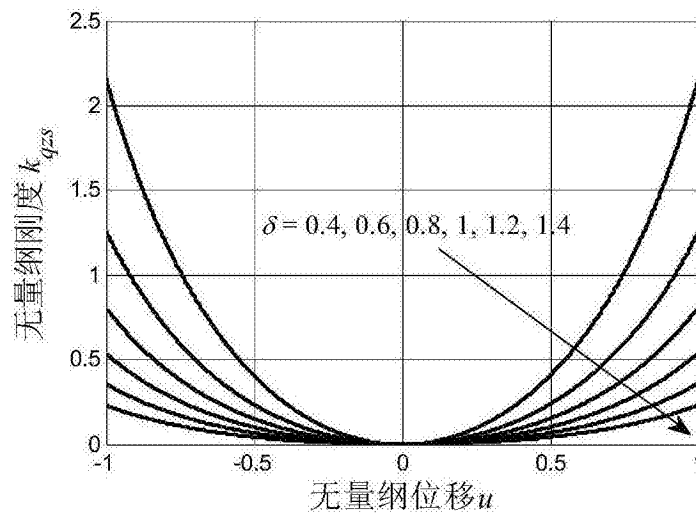


图4

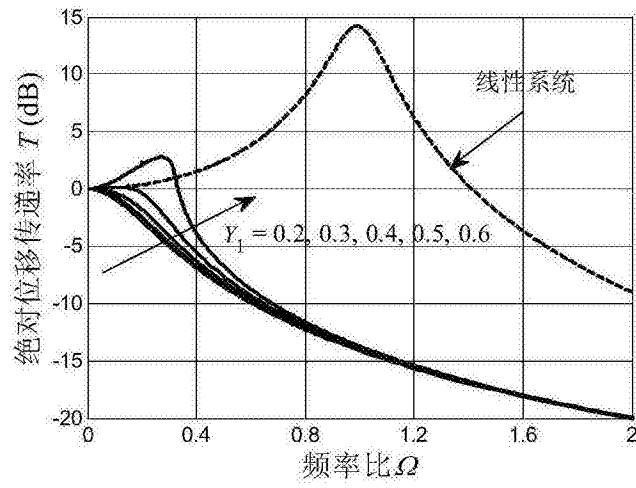


图5