



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105257750 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201510800802. 5

(22) 申请日 2015. 11. 19

(71) 申请人 西安空间无线电技术研究所  
地址 710100 陕西省西安市长安区西街 150 号

(72) 发明人 王朋朋 方永刚 薛永刚 王峰  
王辉 王磊 王波

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心  
11009

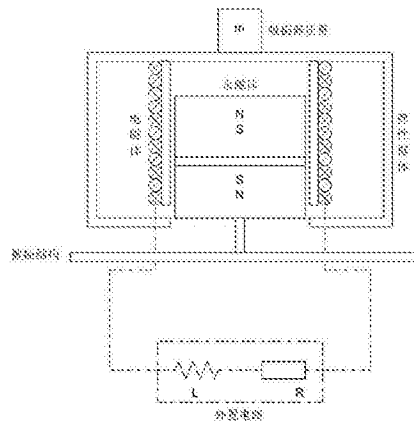
代理人 臧春喜

(51) Int. Cl.  
F16F 6/00(2006. 01)  
F16F 7/104(2006. 01)

权利要求书1页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称  
一种多模态电磁吸振器

(57) 摘要  
一种多模态电磁吸振器,其特征在于,主要包括:弹性框体、吸振器质量、永磁体、电磁线圈套筒、电磁线圈和外置电路;所述永磁体与被控结构固定连接,所述吸振器质量固定安装在弹性框体顶部,电磁线圈套筒固定安装在弹性框体内壁的顶部,且电磁线圈套筒的底部与弹性框体的内壁不接触。电磁线圈缠绕在电磁线圈套筒上,且两端分别与外置电路相连,组成闭合电路。本发明中的外置电路能消除线圈电感影响,提高系统多模态阻尼系数,从而实现多模态吸振特性。



1. 一种多模态电磁吸振器,其特征在于,主要包括:弹性框体(1)、吸振器质量(2)、永磁体(3)、电磁线圈套筒(4)、电磁线圈(5)和外置电路(6);

所述永磁体(3)与被控结构(7)固定连接,所述吸振器质量(2)固定安装在弹性框体(1)顶部,电磁线圈套筒(4)固定安装在弹性框体(1)内壁的顶部,且电磁线圈套筒(4)的底部与弹性框体(1)的内壁不接触。

电磁线圈(5)缠绕在电磁线圈套筒(4)上,且两端分别与外置电路(6)相连,组成闭合电路。

2. 根据权利要求1所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述永磁体(3)的剩磁强度为 $1.1\text{T} \sim 1.3\text{T}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述电磁线圈(5)的匝数为 $500 \sim 1000$ 匝。

4. 根据权利要求1所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述永磁体(3)包括两块同极正对紧压在一起的磁铁。

5. 根据权利要求4所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述两个磁铁的轴向间距为 $2 \sim 4\text{mm}$ ,电磁线圈和永磁体的径向间距为 $2 \sim 4\text{mm}$ 。

6. 根据权利要求4所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述多模态电磁吸振器通过增加永磁体的剩磁强度和/或电磁线圈的匝数来提高电磁结构的机电耦合系数。

7. 根据权利要求1所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述外置电路包括串联在一起的负电阻和负电感。

8. 根据权利要求6所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述外置电路中的电感的取值为 $-40\text{mH} \sim -100\text{mH}$ 。

9. 根据权利要求6所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:所述外置电路中的电阻的取值为 $-200\Omega \sim -450\Omega$ 。

10. 根据权利要求1所述的一种多模态电磁吸振器,其特征在于:外置电路为被动状态、NR型电路状态或NINR型电路状态。其中,被动状态为电路开环状态,NR型电路状态为负电阻状态,NINR型电路状态为负电阻-负电感状态。

## 一种多模态电磁吸振器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种多模态电磁吸振器。本发明结合星载大型柔性可展开天线的研制需求,提高了大型柔性可展开天线抵抗振动扰动的能力。

### 背景技术

[0002] 为了适应卫星发射时整流罩的包络要求,大型天线一般采用可展开形式,在卫星发射时天线锁紧收纳在卫星平台上,入轨后天线展开至工作状态。该类型天线除了满足既定的任务要求以外,还需要具有收拢和展开的功能。由于大型可展开天线的口径大,其展开状态会对卫星产生严重的遮挡,同时如果距离卫星本体过近,还可能产生天线网面与卫星的钩挂干涉问题。因此,该类型天线一般都采用大型可展开反射器+展开臂的形式,在展开阶段,先通过展开臂的展开动作,将天线反射器展开至远离星体位置,再通过反射器的展开,最终到达预定的型面位置。

[0003] 由于大型可展开天线的高度柔性,大型可展开天线在轨工作过程中,天线的弹性振动与卫星载体的姿态振荡是相互作用的,星体的大范围刚体运动与天线弹性变形运动间的耦合作用将会直接影响卫星运行的精度和姿态稳定性,同时导致天线的指向偏差。因此,需要对天线的振动进行严格的控制。

[0004] 电磁结构具有较好的机电耦合特性,由电磁结构构成的各种阻尼器、吸振器已经广泛的应用于吸振工程中。主动式电磁吸振器可以通过设计控制算法实现多模态吸振,但其结构复杂,能耗高,需要设计相应的控制系统。然而,如何实现使用一个吸振器来完成结构的多模态吸振,而不使用传感系统和反馈系统显得较为困难。结构的多模态吸振,亟需一种高效可行的多模态阻尼吸振方法。

### 发明内容

[0005] 本发明解决的技术问题是:克服传统主被动电磁吸振器的不足,提供一种多模态电磁吸振器,在电磁吸振器电磁线圈两端连接一负电阻负电感外置电路来增大吸振器阻尼系数,该负电阻负电感外置电路能消除线圈电感影响,提高系统多模态阻尼系数,从而实现多模态吸振特性。

[0006] 本发明的技术解决方案是:一种多模态电磁吸振器,主要包括:弹性框体、吸振器质量、永磁体、电磁线圈套筒、电磁线圈和外置电路;

[0007] 所述永磁体与被控结构固定连接,所述吸振器质量固定安装在弹性框体顶部,电磁线圈套筒固定安装在弹性框体内壁的顶部,且电磁线圈套筒的底部与弹性框体的内壁不接触。

[0008] 电磁线圈缠绕在电磁线圈套筒上,且两端分别与外置电路相连,组成闭合电路。

[0009] 所述永磁体的剩磁强度为  $1.1\text{T} \sim 1.3\text{T}$ 。

[0010] 所述电磁线圈的匝数为  $500 \sim 1000$  匝。

[0011] 所述永磁体包括两块同极正对紧压在一起的磁铁。

- [0012] 所述两个磁铁的轴向间距为 2 ~ 4mm,电磁线圈和永磁体的径向间距为 2 ~ 4mm。
- [0013] 所述多模态电磁吸振器通过增加永磁体的剩磁强度和 / 或电磁线圈的匝数来提高电磁结构的机电耦合系数。
- [0014] 所述外置电路包括串联在一起的负电阻和负电感。
- [0015] 所述外置电路中的电感的取值为 -40mH ~ -100mH。
- [0016] 所述外置电路中的电阻的取值为 -200  $\Omega$  ~ -450  $\Omega$ 。
- [0017] 外置电路为被动状态、NR 型电路状态或 NINR 型电路状态。其中,被动状态为电路开环状态, NR 型电路状态为负电阻状态, NINR 型电路状态为负电阻 - 负电感状态。
- [0018] 本发明与现有技术相比的有益效果:
- [0019] 本发明中的电磁吸振器无需测量系统、反馈系统以及控制算法,因此,同主动式电磁吸振器相比,本发明具有结构简单、易于构造、成本低等特点;同被动式电磁吸振器相比,本发明所提出的电磁吸振器能显著的提高系统阻尼比,其适应性更大,控制力更好。

### 附图说明

- [0020] 图 1 为多模态电磁吸振器基本原理图;
- [0021] 图 2 为单个永磁体模型;
- [0022] 图 3 为同极相对永磁体型;
- [0023] 图 4 为悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统仿真模型图;
- [0024] 图 5 为实现负电阻负电感的外置电流控制电压源电路;
- [0025] 图 6 为悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统吸振仿真结果;
- [0026] 图 7 为悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统吸振试验配置图;
- [0027] 图 8 为悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统吸振试验结果,其中 a) 为负电阻型吸振试验结果, b) 为负电阻 - 负电感型吸振试验结果。

### 具体实施方式

- [0028] 下面结合附图对本发明的具体实施方式进行进一步的详细描述。
- [0029] 1、电磁吸振器机电耦合分析
- [0030] 对于图 1 所示的电磁吸振器,主要包括:弹性框体 1、吸振器质量 2、永磁体 3、电磁线圈套筒 4、电磁线圈 5 和外置电路 6;
- [0031] 所述永磁体 3 与被控结构 7 固定连接,所述吸振器质量 2 固定安装在弹性框体 1 顶部,电磁线圈套筒 4 固定安装在弹性框体 1 内壁的顶部,且电磁线圈套筒 4 的底部与弹性框体 1 的内壁不接触。所述永磁体 3 在本发明中的剩磁强度为 1.1T ~ 1.3T,包括两块同极正对紧压在一起的磁铁,两个磁铁的轴向间距为 2 ~ 4mm,电磁线圈和永磁体的径向间距为 2 ~ 4mm,永磁体 3 需要在电磁线圈套筒 4 内上下活动,形状优选为圆柱形。所述被控结构 7 为可展开天线上与天线固连的机构或天线本体机构。
- [0032] 电磁线圈 5 缠绕在电磁线圈套筒 4 上,且两端分别与外置电路 6 相连,组成闭合电路。所述电磁线圈 5 的匝数为 500 ~ 1000 匝。所述外置电路包括串联在一起的负电阻和负电感,外置电路中的电感的取值为 -40mH ~ -100mH,外置电路中的电阻的取值为 -200  $\Omega$  ~ -450  $\Omega$ 。

[0033] 根据具体应用需求不同,外置电路可能为被动状态、NR 型电路状态或 NINR 型电路状态;其中,被动状态为电路开环状态,NR 型电路状态为负电阻状态,NINR 型电路状态为负电阻-负电感状态。

[0034] 当被控结构振动时,吸振器弹性框体 1 会随之发生变形导致永磁体 3 与电磁线圈 5 产生相对位移,从而在电磁线圈中产生感应电流。通过将结构的振动能量转化为电路电阻电感的热能,可以实现对结构振动能量的耗散。

[0035] 下面对本发明的工作原理进行详细的说明:

[0036] 1) 磁特性分析

[0037] 根据分子电流假设,单个环形永磁体可以简化为等效体电流密度和面电流密度。对于均匀磁化的永磁体,其体电流密度为零,仅包含面电流密度  $J_s$ 。根据 Biot-Savart 定理,在圆柱坐标系下,如图 2 所示的单个永磁体外任意一点 P 处的磁感应强度分量为:

$$[0038] \quad B(r, \phi, z) = B_r(r, \phi, z)r + B_\phi(r, \phi, z)\Phi + B_z(r, \phi, z)z \quad (1)$$

[0039] 其中,  $B_r(r, \phi, z)$ 、 $B_\phi(r, \phi, z)$  和  $B_z(r, \phi, z)$  分别表示磁感应强度沿圆柱坐标系的径向、切向和轴向分量,  $r$ 、 $\Phi$  和  $z$  分别表示圆柱坐标系径向、切向和轴向的单位矢量。

[0040] 对于图 3 所示的为一对同极相对的永磁体模型,此时,磁体外任意一点 P 处的磁感应强度应当为:

$$[0041] \quad B_p(r, \phi, z) = B_{p1}(r, \phi, z) + B_{p2}(r, \phi, z) \quad (2)$$

[0042] 其中,  $B_{p1}(r, \phi, z)$  和  $B_{p2}(r, \phi, z)$  分别为永磁体 1 和 2 在 P 点处产生的磁场强度。

[0043] 2) 机电、力电耦合特性分析

[0044] 当结构发生振动时,闭合线圈在同极相对永磁体所形成的磁场中切割磁力线,将会在线圈中产生感应电动势,感应电动势可以由经典 Maxwell 方程表示为:

$$[0045] \quad dE = N(v \times B) \cdot dl \quad (3)$$

[0046] 其中,  $E$  表示感应电动势,  $N$  为电磁线圈的匝数,  $v$  表示线圈切割磁力线的速度,  $B$  表示磁感应强度,  $l$  表示单圈线圈的长度。

[0047] 将磁感应强度的表达式代入上式并进行简化可得:

$$[0048] \quad E = vN \int_l B_{pr} dl \Phi = vC_e \Phi \quad (4)$$

[0049] 其中,  $E$  表示感应电动势,  $v$  表示线圈切割磁力线的速度,  $\Phi$  为圆柱坐标系切向单位矢量,  $C_e$  定义为吸振器的机电耦合系数,其体现了阻尼器的机电转换特性。  $C_e$  越大,表明吸振器能够将更多的振动能量转化为电路的感应电动势。其具体表达式为:

$$[0050] \quad C_e = N \cdot R_p \int_0^{2\pi} B_{pr} d\phi \quad (5)$$

[0051] 其中,  $N$  为电磁线圈的匝数,  $R_p$  为任一点 P 在圆柱坐标系下的径向坐标,  $B_{pr}$  为任一点 P 在圆柱坐标系下沿径向的磁感应强度。

[0052] 由于感应电动势的存在,闭合线圈回路中会产生感应电流,其在磁场中会相应的产生与线圈相对运动相反的电磁阻尼力,由安培定理可知:

$$[0053] \quad dF = NI dl \times B_p \quad (6)$$

[0054] 其中,  $F$  为电磁阻尼力,  $N$  为电磁线圈的匝数,  $I$  为感应电流,  $l$  表示单圈线圈的长度,  $B_p$  为 P 点处的磁感应强度。

[0055] 将磁感应强度的表达式代入上式并进行简化可得:

[0056]  $F = -C_m I z$  (7)

[0057] 其中,  $z$  为圆柱坐标系轴向单位矢量,  $C_m$  定义为吸振器的机电耦合系数, 其体现了吸振器的机电转换特性。  $C_m$  越大, 表明在磁场中运动时, 吸振器可以产生更大的电磁阻尼力。其具体表达式为:

[0058] 
$$C_m = N \cdot R_p \int_0^{2\pi} B_{pr} d\phi$$
 (8)

[0059] 其中,  $N$  为电磁线圈的匝数,  $R_p$  为任一点  $P$  在圆柱坐标系下的径向坐标,  $B_{pr}$  为任一点  $P$  在圆柱坐标系下沿径向的磁感应强度。由  $C_m$  和  $C_e$  表达式可知,  $C_m$  和  $C_e$  大小相等。

[0060] 假设电路的总阻抗为  $Z$ , 则电路中的感应电流为:

[0061] 
$$I = \frac{E}{Z} = \frac{C_e}{Z} v \Phi$$
 (9)

[0062] 最终的电磁阻尼力大小为:

[0063] 
$$F = -\frac{C_m^2}{Z} v$$
 (10)

[0064] 2、悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统耦合分析

[0065] 空间大型柔性可展开天线的展开臂可以简化为悬臂梁, 则展开臂的吸振可以简化为悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统的结构响应求解问题, 具体结构如图 4 所示。

[0066] 建立图 4 所示悬臂梁 - 多模态电磁吸振器系统动力学控制微分方程如下:

[0067]

$$\begin{aligned} & EI_b \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \\ & + c_a \left[ \frac{\partial w_a(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_m(t)}{\partial t} \right] \delta(x-x_a) + k_a [w_a(x,t) - \eta_m(t)] \delta(x-x_a) \\ & + C_m i(t) \delta(x-x_a) = F_{exc}(t) \delta(x-x_f) \\ & m_a \ddot{\eta}_m(t) + c_a [\dot{\eta}_m(t) - \dot{w}_a(x,t)] \delta(x-x_a) + k_a [\eta_m(t) - w_a(x,t)] \delta(x-x_a) = C_m i(t) \end{aligned} \quad (11)$$

[0068] 式中各项的具体含义如下:

[0069]  $E$ 、 $\rho$ 、 $A$ 、 $I_b$ : 悬臂梁的弹性模量、材料密度、截面积和截面惯性矩。

[0070]  $w(x, t)$ : 悬臂梁的横向位移。

[0071]  $w_a(x, t)$ 、 $\dot{w}_a(x, t)$ : 悬臂梁在吸振器安装位置处的横向位移和速度。

[0072]  $\eta_m(t)$ 、 $\dot{\eta}_m(t)$ 、 $\ddot{\eta}_m(t)$ : 吸振器的横向位移、速度和加速度。

[0073]  $i(t)$ : 吸振器外置电路中的电流。

[0074]  $F_{exc}(t)$ : 激振器的激振力。

[0075]  $x_a$ 、 $x_f$ : 吸振器和激振器距固定端距离。

[0076]  $c_a$ 、 $c_b$ : 吸振器和悬臂梁的阻尼系数。

[0077]  $m_a$ 、 $k_a$ :吸振器的质量和刚度系数。

[0078] 采用 Galerkin 方法进行离散,悬臂梁的振型函数表示为:

$$[0079] \quad w(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \eta_i(t) = \Phi^T \boldsymbol{\eta} \quad (12)$$

[0080] 代入控制微分方程,可得:

[0081]

$$[0081] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t) \\ \ddot{\eta}_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} + c_m \Phi_a \Phi_a^T & -c_m \Phi_a \\ -c_m \Phi_a^T & c_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}(t) \\ \dot{\eta}_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} + k_a \Phi_a \Phi_a^T & -k_a \Phi_a \\ -k_a \Phi_a^T & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(t) \\ \eta_m(t) \end{bmatrix} \\ [0081] \quad = \begin{bmatrix} \Phi_b F_{exc}(t) - \Phi_a C_m i(t) \\ C_m i(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

[0082] 通过 Laplace 变化,将上述微分方程转化到频域,得到最终的控制方程为:

[0083]

$$[0083] \quad \left[ \mathbf{M}^* s^2 + \left( \mathbf{C}^* + \frac{C_m^2}{(R_e + R_s) + (L_e + L_s)s} \mathbf{C}_a \right) s + \mathbf{K}^* \right] \mathbf{U}(s) = \mathbf{F}(s) \quad (14)$$

$$[0084] \quad \text{式中, } \mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_a \end{bmatrix}, \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{K} + k_a \Phi_a \Phi_a^T & -k_a \Phi_a \\ -k_a \Phi_a^T & k_a \end{bmatrix}, \mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} \Phi_a \Phi_a^T & -\Phi_a \\ -\Phi_a^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

[0085] 则系统的传递函数为:

$$[0086] \quad \mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{U}(s)}{\mathbf{F}(s)} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{M}^* s^2 + \left( \mathbf{C}^* + \frac{C_m^2}{(R_e + R_s) + (L_e + L_s)s} \mathbf{C}_a \right) s + \mathbf{K}^*} \quad (15)$$

[0087] 其中,  $\mathbf{M}^*$ 、 $\mathbf{K}^*$ 分别表示系统的质量矩阵和刚度矩阵,  $\mathbf{C}^*$ 为系统的初始阻尼矩阵,  $R_e$ 、 $L_e$ 分别表示电磁线圈的电阻和电感,  $R_s$ 、 $L_s$ 分别表示外置电路的电阻和电感,  $\mathbf{C}_a$ 为吸振器安装位置处的模态坐标矩阵。

[0088] 由上式可知,引入吸振器会增加结构的阻尼,但由于上式中阻尼增加项与频率密切相关,无法涵盖结构的多阶模态,为了增大阻尼器的吸振效果,同时实现多模态吸振,本发明提出了如下创新措施:

[0089] (1) 一方面要尽可能地提高电路的机电耦合系数  $C_e$ 或力电耦合系数  $C_m$ ;增加永磁体的剩磁强度,同时增加电磁线圈的匝数。在确定磁体间的几何参数时应当尽量使两永磁体的轴向间距减小,并减小电磁线圈和永磁体的径向间距。

[0090] (2) 另一方面要尽可能地减小电路的总阻抗值,由于感应线圈的电阻  $R_e$ 和电感  $L_e$ 是确定的,要减小总阻抗值,需要将外置电路电阻  $R_s$ 和电感  $L_s$ 设置为负电阻和负电感。本发明提出了图 5 所示的电流控制电压源电路来实现任意形式的外置电路阻抗。电路包含四个运算放大器 (OA1-OA3 以及 OPA548) 和多个电阻对 (R1-R7、P1-P4),电磁线圈一端与运算放大器 OA1 的同相输入端连接,另一端与运算放大器 OA3 的同相输入端连接。运算放大器

OA1、OA2 和 OA3 均通过电阻对引入负反馈,调节电阻对中可变电阻的阻值,可以对运算放大器的放大系数进行控制,具体电路结构见图 5。

[0091] 本发明通过增加永磁体的剩磁强度和电磁线圈的匝数来提高电磁结构的机电耦合系数,方法简单可行;且无需复杂的控制电路,系统鲁棒性好。

[0092] 电路中,运算放大器 OA1、OA2 的电压放大倍数分别表示为:

$$[0093] \quad A_1 = \frac{P_1}{R_1 + P_1} \cdot \frac{R_2 + P_2}{R_2} \quad A_2 = \frac{P_3}{R_3 + P_3} \cdot \frac{R_4 + P_4}{R_4} \quad (16)$$

[0094] 则运算放大器 OA1 的输出端电压为  $A_1 R_s I$ , 输出端电流为  $I$ , 经过 DSPACE 半物理仿真系统实现传递函数  $R_s + L_s s$ , 运算放大器 OA2 的输出端电压为  $(R_s + L_s s) A_1 A_2 R_s I$ , 运算放大器 OA3 的输出端电压为  $(R_s + L_s s) A_1 A_2 R_s I$ , 对于运算放大器 OA3, 其同相输入端的输入电压为:

$$[0095] \quad U_+^3 = [R_s I - (R_s + L_s s) A_1 A_2 R_s I] \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_7} \quad (17)$$

[0096] 通过合适的参数调整,可以将式 (17) 简化为:

$$[0097] \quad U_{out} = U_+^3 = R_s I - (R_s + L_s s) I \quad (18)$$

[0098] 则外置电路的阻抗表示为:

$$[0099] \quad Z = \frac{U_{in} - U_{out}}{I} = R_s + L_s s \quad (19)$$

[0100] 通过电流控制电压源电路实现了外置电流阻抗为 DSPACE 半物理仿真系统实现的传递函数  $R_s + L_s s$ , 在 DSPACE 中设置  $R_s = -R_e$ ,  $L_s = -L_e$ , 即可实现外置电路的负电阻和负电感。

[0101] 为了验证本发明中的多模态电磁吸振器对空间大型柔性可展开天线的吸振效果,对图 4 所示简化模型进行了吸振仿真与试验。模型中用悬臂梁来模拟空间大型柔性可展开天线展开臂,展开臂所受到的扰动输入通过激振器激励施加。悬臂梁的材料为铝合金,结构尺寸  $540\text{mm} \times 40\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。

[0102] 图 6 给出了对该悬臂梁-多模态电磁吸振器系统进行吸振的控制效果仿真对比,仿真中外置电路分别为被动状态(电路开环)、NR 型电路(负电阻)、NINR 型电路(负电阻-负电感),相对于无控制状态,当外置电路为 NINR 型电路时,结构的前三阶传递函数峰值分别下降了 24.19dB、25.86dB 和 6.4dB,结构的前三阶振动得到了很好的抑制,本发明中的多模态电磁吸振器可以实现对该悬臂梁前三阶模态的有效吸振。

[0103] 图 7 为针对上述悬臂梁-多模态电磁吸振器系统开展的吸振试验配置图。图 8 给出了悬臂梁-多模态电磁吸振器系统吸振试验结果。由图 8 中的传递函数曲线可知,结构的前三阶传递函数峰值由无控制状态的 27.11dB、47.23dB 和 61.6dB 分别下降至 NINR 型电路时的 15.82dB、28.57dB 和 45.2dB,下降比例分别为 41.6%、39.5% 和 26.6%,本发明所提出的多模态电磁吸振器吸振效果明显。表 1 总结了不同电路状态下本发明中的多模态电磁吸振器的吸振效果对比。

[0104] 表 1

[0105]



状态	加速度传递函数峰值		
	一阶模态	二阶模态	三阶模态
无控制	27.11dB	47.23dB	61.6dB

[0106]

被动吸振	20.98dB	44.21dB	58.85dB
NR 吸振	18.33dB	33.54dB	48.44dB
NINR 吸振	15.82dB	28.57dB	45.2dB

[0107] 本发明在电磁吸振器线圈两端连接一负电阻负电感外置电路,增大了吸振器的阻尼系数,该负电阻负电感外置电路能消除线圈电感影响,提高系统多模态阻尼系数,从而实现多模态吸振特性。以上述悬臂梁-多模态电磁吸振器系统为例,系统原有模态阻尼比为 2.2%,被动吸振状态系统模态阻尼比为 3.9%,引入负电阻负电感外置电路后,系统阻尼比最大增加至 8.1%。

[0108] 此外,本发明中的电磁吸振器具有能耗低的特点,现有主动式电磁吸振器包含复杂电路系统,功率多超过 10w,本发明中的电磁吸振器最大功耗不超过 2w。

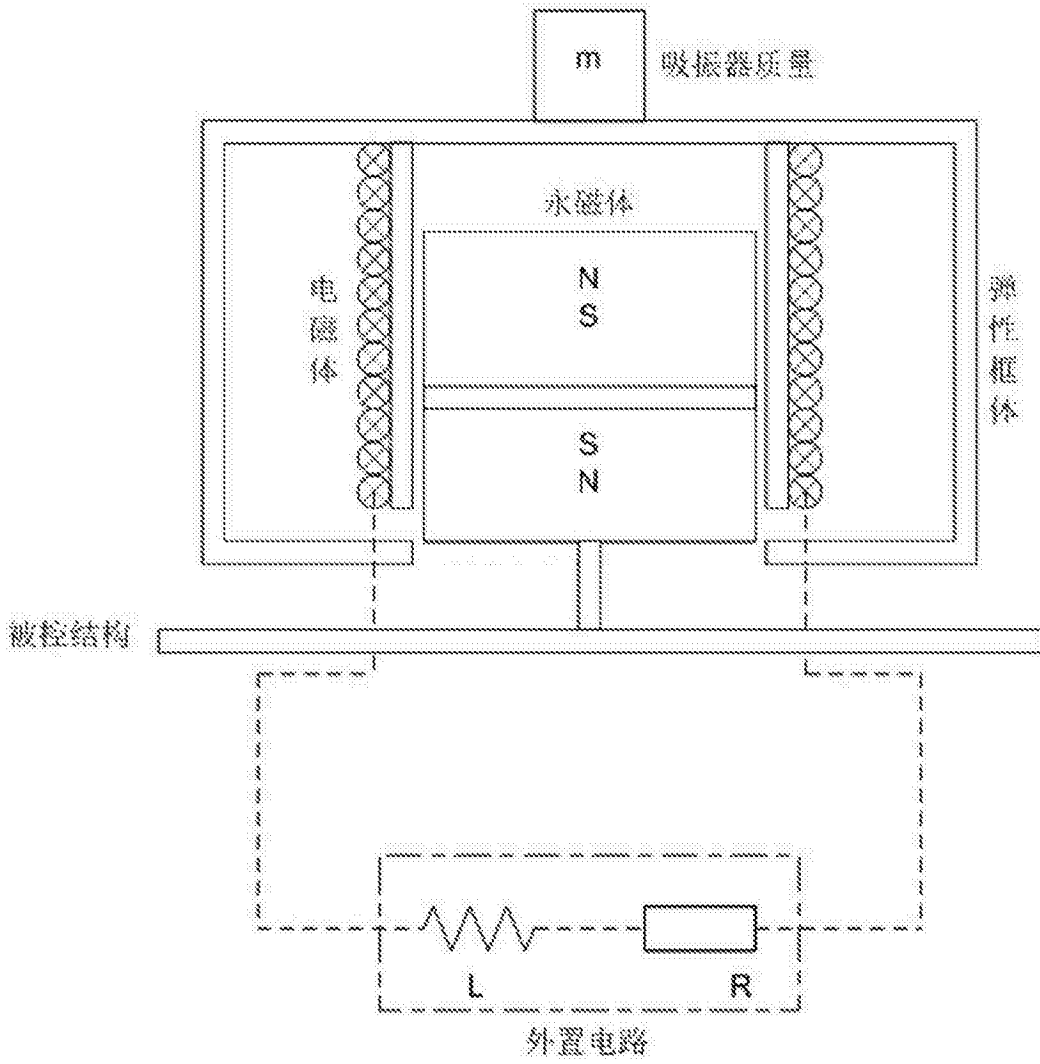


图 1

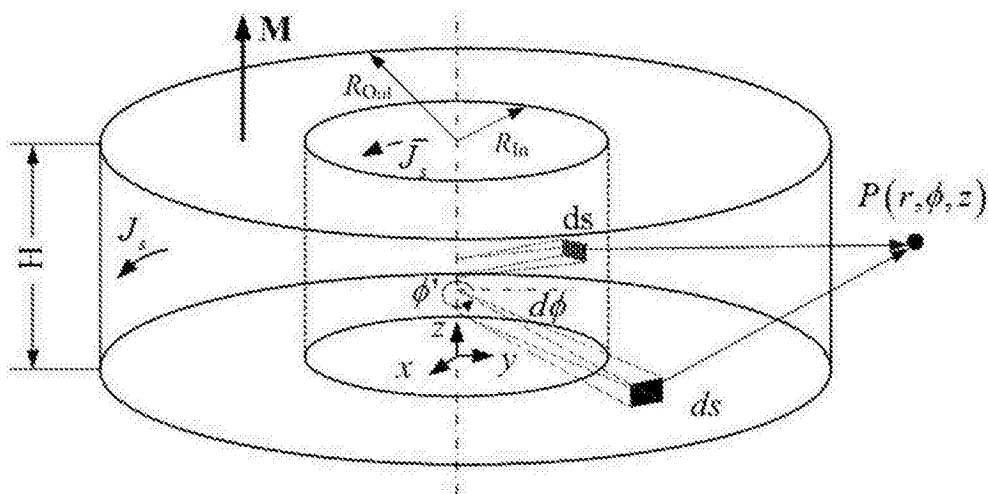


图 2

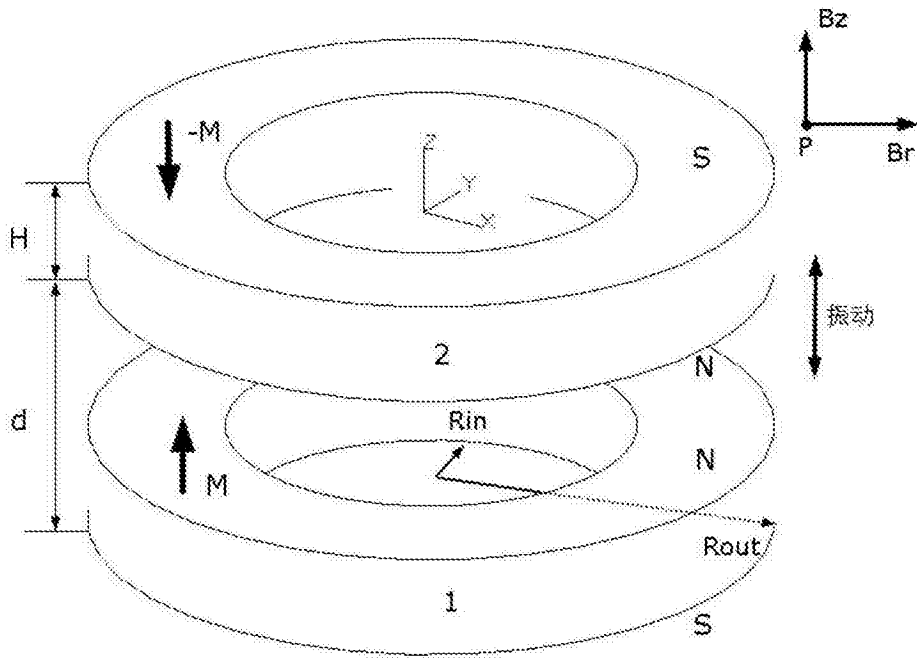


图 3

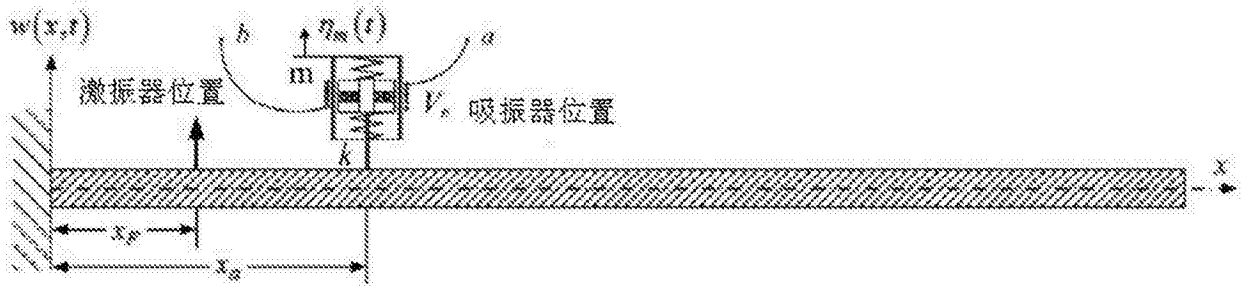


图 4

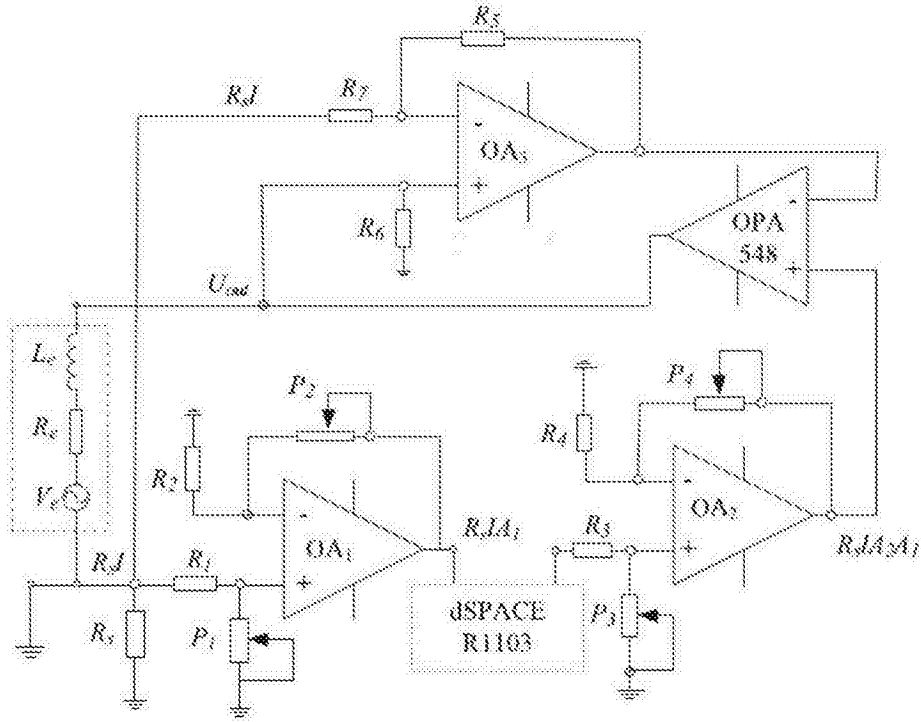


图 5

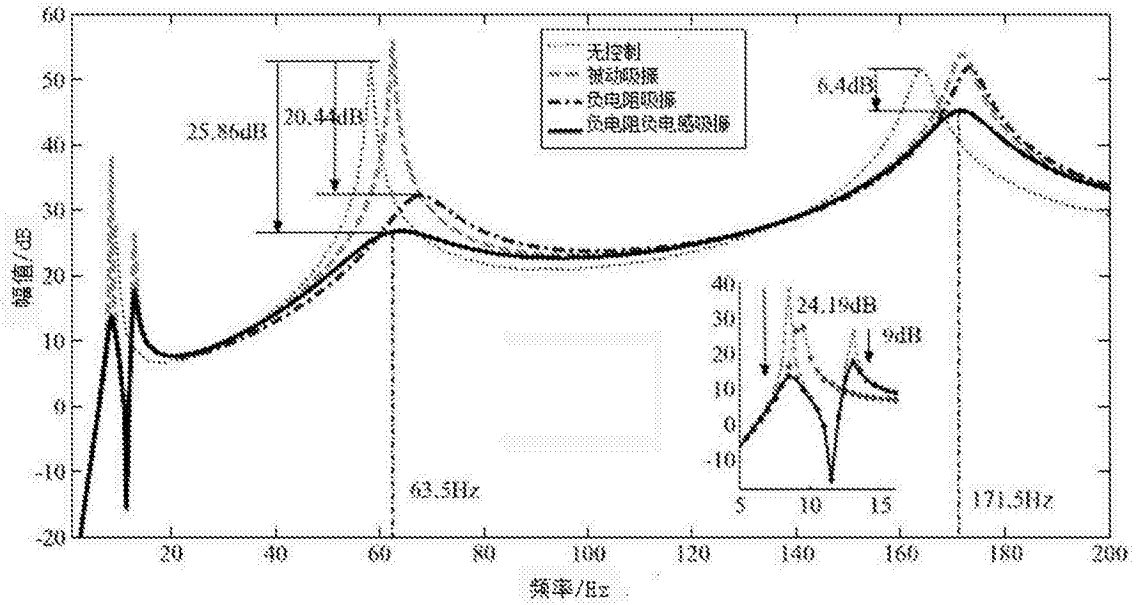


图 6

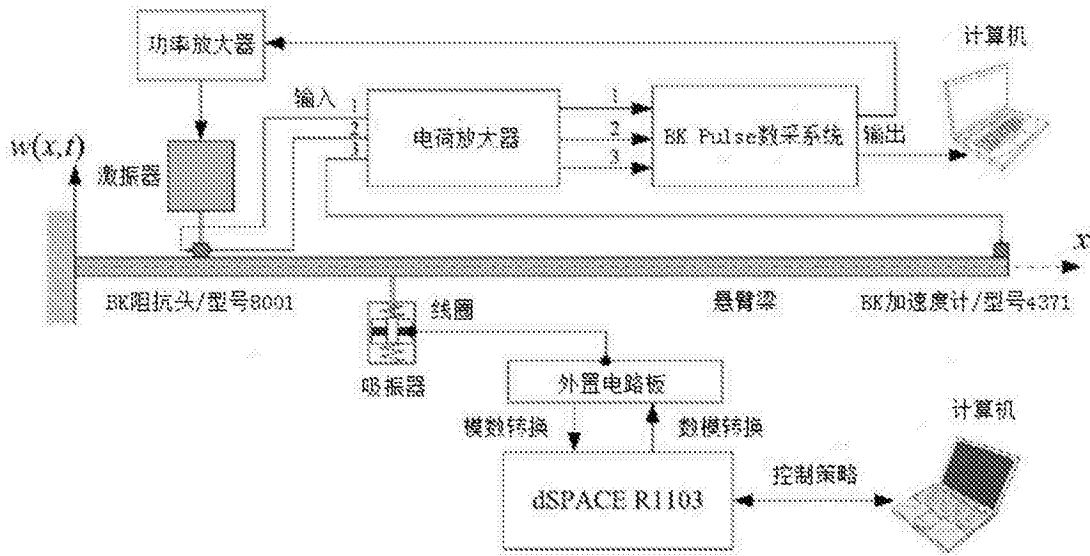
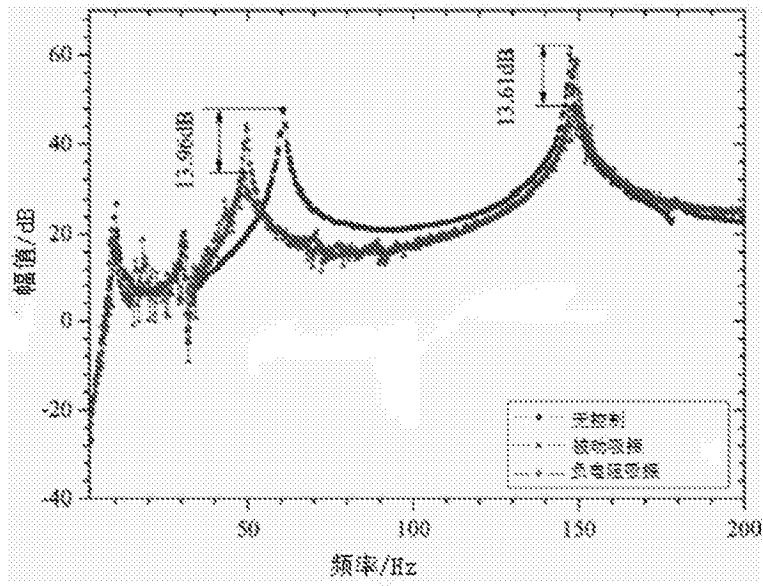


图 7



a)

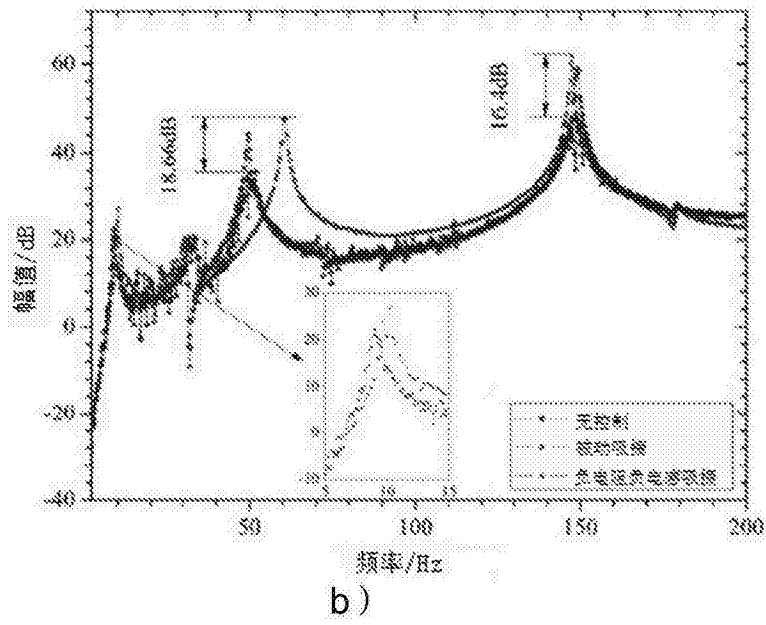


图 8