

一种采用双换能器和摆式结构的宽频振动能量采集器

代显智 刘小亚 陈蕾

A broadband vibration energy harvester using double transducers and pendulum-type structures

Dai Xian-Zhi Liu Xiao-Ya Chen Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 130701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.130701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.130701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅纳米线/氧化钒纳米棒复合材料的制备与气敏性能研究

[Synthesis and gas-sensing properties of the silicon nanowires/vanadium oxide nanorods composite](#)

物理学报.2016, 65(9): 090701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.090701>

顶栅石墨烯离子敏场效应管的表征及其初步应用

[Characterization and preliminary application of top-gated graphene ion-sensitive field effect transistors](#)

物理学报.2016, 65(8): 080701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080701>

基于中红外量子级联激光器和石英增强光声光谱的CO超高灵敏度检测研究

[Research on high sensitivity detection of carbon monoxide based on quantum cascade laser and quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy](#)

物理学报.2016, 65(6): 060701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.060701>

基于电学调制相消法和高功率蓝光LD的离轴石英增强光声光谱NO₂传感器设计和优化

[Design and optimization of off-beam NO₂ QEPAS sensor by use of E-MOCAM with a high power blue laser diode](#)

物理学报.2015, 64(13): 130701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130701>

分时偏振成像系统中光束偏离的补偿方法研究

[Study on compensation method of beam deviation in division of time imaging polarimetry](#)

物理学报.2015, 64(6): 060701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060701>

一种采用双换能器和摆式结构的宽频 振动能量采集器*

代显智^{1)†} 刘小亚¹⁾ 陈蕾²⁾

1)(西华师范大学电子信息工程学院, 南充 637009)

2)(重庆文理学院软件工程学院, 重庆 402160)

(2015年12月12日收到; 2016年3月24日收到修改稿)

针对悬臂梁振动能量采集器在大振幅振动下梁容易断裂的缺点, 本文提出了一种基于摆式结构的具有宽频和倍频特性的振动能量采集器, 该采集器由两个 Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D 磁电换能器和嵌有六个磁铁的旋转摆构成. 文中建立了摆式结构的摆动方程, 分析了采集器的频率响应特性以及谐振时的机-磁-电转换特性, 并对采集器输出电压波形进行了频谱分析. 理论和实验研究表明: 该采集器具有宽频和倍频特性, 采集器样机在 1 g ($1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$) 有效值加速度振动下, 向下扫频时的半功率带宽达到 4.8 Hz , 且能在 $f = 16.9\text{ Hz}$ 的振动下获得 3.569 mW 的负载功率. 利用双换能器以及采集器的倍频和宽频特性, 能有效地提高低频时采集器的输出功率.

关键词: 振动能量采集, 宽频, 非线性, 摆式结构

PACS: 07.07.Df, 07.07.Mp, 84.60.-h, 45.20.dg

DOI: 10.7498/aps.65.130701

1 引言

振动能量是一种广泛存在于自然环境中的能量, 将环境界中振动能量转换为电能, 是实现无线传感网络和微机电系统自供电的一种可行方案. 环境中的振动大都不是单一频率的振动, 其频率成分分布在一个较宽的频带内. 为了充分采集和利用环境中的振动能量, 要求振动能量采集器具有宽频振动能量采集特性.

在宽频振动研究中, 大多数的宽频振动能量采集器都采用悬臂梁或类悬臂梁结构^[1-7]来感应环境的振动. 因为该结构具有简单、易制造等优点, 所以受到了许多研究者的青睐. 如 Yang 等^[8]在采用双梁结构的基础上, 利用磁电换能器与磁路的非线性磁力, 展宽了磁电式振动能量采集器

的频带, 在 0.2 g 加速度条件下, 实现了 5.4 Hz 的带宽和 $0.2\text{--}0.56\text{ mW/cm}^3$ 的功率密度. Bai 等^[9]提出一种采用螺旋悬臂梁和磁耦合的多模态宽频振动能量采集器, 在 0.2 g 振动激励下, 采集器在 $15\text{--}70\text{ Hz}$ 的频率范围内出现了 5 个峰值频率, 实现了宽频振动能量采集, 最大输出功率约为 $130\text{ }\mu\text{W}$. Xu 等^[10]提出了一种采用弯曲压电梁的双稳态振动能量采集器, 压电梁两端固定, 中部固定有一质量块, 其中一个固定端可移动, 用来调整压电梁压缩程度, 在 20 m/s^2 的加速度下带宽达到 28 Hz . 王光庆等^[11]提出了一种由双压电悬臂梁和弹性放大器组成的宽频振动能量采集器, 对其模型进行了理论和实验研究, 实验结果显示采集器样机有两个峰值频率, 能有效地提高采集的带宽和转换效率.

但在大振幅的振动激励下, 悬臂梁发生大幅度

* 国家自然科学基金(批准号: 61304255)、西华师范大学创新团队基金(批准号: CXTD2015-13)、西华师范大学基本科研业务费专项资金(批准号: 15C001)和重庆市基础科学与前沿技术研究专项资金(批准号: cstc2015jcyjBX0019)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: daixianzhi@sina.com

的弯曲,产生很大的应力,容易使梁或压电片断裂,导致采集器寿命缩短,无法满足长期工作的需要.利用摆也能实现宽频振动能量采集^[12-17].基于摆式结构的宽频振动能量采集器,将环境振动转化为摆的转动或来回摆动.在摆的摆动过程中,摆内部产生的应力通常很小,不容易断裂.因此摆式振动能量采集器特别适用于大振幅振动下的能量采集.

目前多数的摆式宽频振动能量采集器采用电磁感应原理采集振动能量.如2006年, Spreemann等^[12]提出了一种基于电磁式的摆式振动能量采集器,该采集器由一个嵌有4个磁铁的旋转摆和6个线圈构成.当振动振幅从30 Hz的100 μm 线性减少到80 Hz的75 μm ,采集器能产生0.4—3 mW的功率. Ma等^[16]提出了一种参数激励的非线性宽频振动能量采集器,该采集器由一个摆、一个圆柱型磁铁和两个线圈构成,在0.14 g加速度条件下,能实现约2 Hz的带宽,最大功率达到0.78 mW. Malaji等^[15]提出了一种采用两个耦合摆和两个线圈的电磁式振动能量采集器,能采集0.8 Hz的带宽,其采集频率范围为2—2.8 Hz,最大输出功率达到110 μW . Ylli等^[13]提出了一种电磁式振动能量采集器,该采集器采用三个摆臂的旋转摆,用于采集人行走的能量,当人行走速度为4—6 km/h时,采集器能输出超过8 mW的功率.

但电磁式振动能量采集器输出的电压通常较低,需要使用变压器提高输出电压,才能用于整流.这必然会增大整个系统的体积.如果采用磁致伸缩/压电层合换能器转换环境振动能量,能输出较高的电压,可以直接用于整流. Huang等^[18]的研究还表明:如果向Terfenol-D/PZT/Terfenol-D磁电换能器施加一个500—3000 Oe (1 Oe相当于 10^{-4} T)的交变磁场, Terfenol-D产生的最大应力达到 6×10^7 Pa,这个应力远大于通过人(约为 10^4 Pa)或机械振动($1-2 \times 10^5$ Pa)产生的应力.因此磁电式振动能量采集器不仅具有压电式振动能量采集器的优点,而且还能输出更高的电压和功率.

另一方面,采集器的输出功率与环境的振动频率成比例关系,频率低输出的功率也较低^[19].为了提高采集器在低频率时的输出功率,可通过升频方法来实现^[20-23].但现有研究中,将升频、摆、磁电换能器相结合的宽频振动能量采集器研究的较少.针对以上问题,本文提出了一种采用双换能器和摆

式结构的磁电式宽频振动能量采集器.该采集器采用摆式结构能采集大振幅的振动,采用双换能器能进一步提高采集器的输出功率和功率密度,且采集器具有倍频和宽频特性,能有效提高低频时的输出功率和采集带宽.另外,升频振动能量采集器大都需要专门设计频率转换机构,如Külah等^[19]设计的磁力升频转换结构, Liu等^[21], Özge和Külah^[22]设计的撞击升频转换结构;而本文提出的采集器利用磁场的非线性实现倍频,不需要专门设计频率转换机构,使得结构简单、设计难度降低.

2 工作原理

采用摆式结构的振动能量采集器由两个磁电换能器(ME)、旋转摆、框体等组成.旋转摆由两个对称的扇形块和一根转轴构成,且通过轴承固定在框体支撑板上,可相对于框体做自由摆动.每个扇形块又由两个子扇形块和三个磁铁构成,外侧子扇形块采用钢制作,内侧子扇形块采用铝制作,且三个磁铁嵌入在铝扇形块中,扇形块中磁铁磁极方向布置见图1.铝子扇形块和钢子扇形块通过环氧树脂胶黏接在一起.旋转摆中铝子扇形块的作用是固定磁铁,其材料也可采用其他非导磁材料,如铜、塑料等材料.旋转摆中钢子扇形块的作用是与磁铁一起组成一个能在空气隙中产生高磁场梯度的磁路,这样可使旋转摆在同样摆幅下产生更高的变化磁场,使磁电换能器输出更高的功率.另外,框体和框体支撑板均采用硬铝制作.磁电换能器由两层磁致伸缩材料夹一层压电材料构成,层与层间通过环氧树脂胶黏接固定组成一个整体.其中,磁致伸缩材料的磁化方向沿长度方向(L),压电材料的极化方向沿厚度方向(T),磁电换能器工作在L-T模式^[24].磁电换能器通过中间固定方式固定在框体支撑板上,且偏离铅垂位置一定的角度,并位于两个扇形块形成的空腔内,感应磁铁产生的磁场.

未振动时,使上下两排磁铁与两个磁电换能器对齐,此时磁铁与换能器间的切向磁力最小.在振动作用下,无论旋转摆正转还是反转,都会产生很强的切向磁力,该切向磁力始终试图将磁铁拉回静平衡位置,这样切向磁力起到回复力的作用.因此,振动时旋转摆将绕静平衡位置来回地摆动.在来回摆动过程中,旋转摆不会弯曲,因而不会发生断裂.另外在摆动过程中,磁电换能器感应到变化的

磁场, 在变化磁场的作用下, 换能器中的磁致伸缩层产生机械应变, 机械应变传递到压电层, 产生电能输出, 实现振动能到电能的转换^[25].

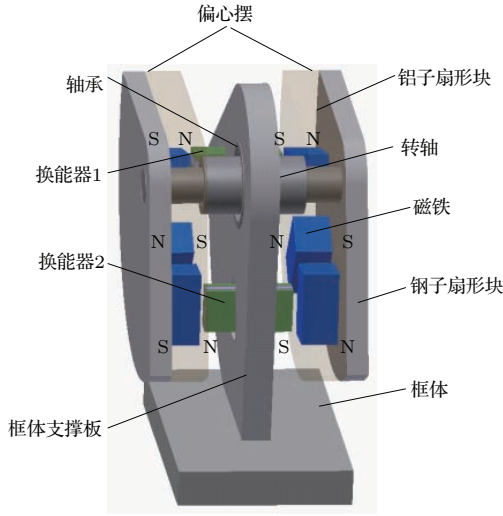
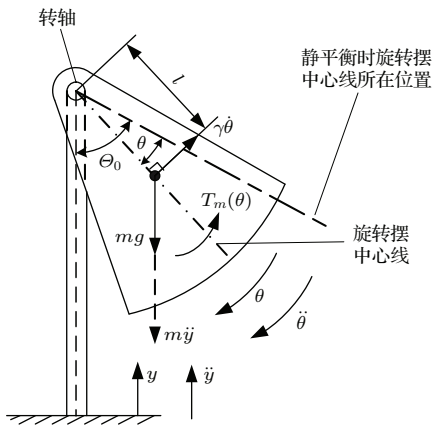


图1 (网刊彩色) 采集器的结构示意图
Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the proposed harvester.

3 输出特性分析

能量采集器的运动特性可用图2所示的简化模型来分析. 图中, m 为旋转摆的质量, g 为重力加速度, l 为旋转摆重心到转轴中心的距离, Θ_0 为旋转摆静平衡时其中心线相对于铅垂位置的角度, θ 为振动时旋转摆相对于静平衡位置偏转的角度, $\dot{\theta}$ 表示旋转摆的角速度, $\ddot{\theta}$ 表示旋转摆的角加速度, y 为振动台相对于地的运动位移, \ddot{y} 为振动台相对于地的运动加速度, γ 为空气阻尼系数, $T_m(\theta)$ 为旋转摆偏离静平衡位置 θ 时受到的磁力矩.



无外部输入振动时, 旋转摆处于静平衡位置, 在重力矩和磁力矩 $T_m(0)$ 的作用下, 旋转摆保持静止不动. 由力矩平衡得

$$T_m(0) = mg \sin \Theta_0 l. \quad (1)$$

设振动台沿 y 做简谐振动, 其振动加速度 \ddot{y} 为 $\ddot{y} = -A \cos(\omega t + \phi)$, 其中 A 为加速度振幅, ω 为振动角频率, ϕ 为初相位. 设旋转摆偏离平衡位置 θ 角度时, 产生相对于框体顺时针偏转的角加速度为 $\ddot{\theta}$, 由刚体转动定律得

$$J\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + T_m(\theta) - mgl \sin(\Theta_0 - \theta) = -mAl \cos(\omega t + \phi) \sin(\Theta_0 - \theta), \quad (2)$$

式中, J 为旋转摆转动惯量.

利用泰勒公式可将磁力矩 $T_m(\theta)$ 展开成幂级数形式. 对于大多数的非线性系统来说, 磁力矩 $T_m(\theta)$ 展开到6次幂项时, 已达到较高的精度, 且对于后续讨论的采集器模型来说也完全达到要求, 所以 $T_m(\theta)$ 为

$$T_m(\theta) = \sum_{\tau=0}^6 a_{\tau} \theta^{\tau}. \quad (3)$$

将(1)和(3)式代入(2)式得到

$$J\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + a_1\theta + \sum_{\tau=2}^6 a_{\tau}\theta^{\tau} - mgl[\sin(\Theta_0 - \theta) - \sin \Theta_0] = -mAl \cos(\omega t + \phi) \sin(\Theta_0 - \theta). \quad (4)$$

由于振动过程中旋转摆转动的角度 θ 很小, 所以有 $\sin(\Theta_0 - \theta) \approx \sin \Theta_0$, 此时, 采集器的动力学方程变为

$$J\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + a_1\theta + \sum_{\tau=2}^6 a_{\tau}\theta^{\tau} = -mAl \cos(\omega t + \phi) \sin \Theta_0. \quad (5)$$

方程(5)为非线性运动方程^[26], 该方程可利用林斯泰特-庞加莱法求出振动方程谐振时的一阶近似解^[25,27], 其解为

$$\theta(t) = \left[\beta + \frac{1}{3360J\omega_0^2} (1120a_2\beta^2 - 105a_3\beta^3 + 672a_4\beta^4 - 140a_5\beta^5 + 480a_6\beta^6) \right] \cos \omega t + \frac{16a_2\beta^2 + 16a_4\beta^4 + 15a_6\beta^6}{96J\omega_0^2} \cos 2\omega t$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{4a_3\beta^3 + 5a_5\beta^5}{128J\omega_0^2} \cos 3\omega t \\
 & + \frac{2a_4\beta^4 + 3a_6\beta^6}{240J\omega_0^2} \cos 4\omega t \\
 & + \frac{a_5\beta^5}{384J\omega_0^2} \cos 5\omega t + \frac{a_6\beta^6}{1120J\omega_0^2} \cos 6\omega t \\
 & - \frac{8a_2\beta^2 + 6a_4\beta^4 + 5a_6\beta^6}{16J\omega_0^2}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{a_1/J}$. β 由下式确定

$$\begin{aligned}
 & (2\xi\omega\omega_0\beta)^2 + \left[\frac{6a_3\beta^3 + 5a_5\beta^5}{8J} + (\omega_0^2 - \omega^2)\beta \right]^2 \\
 & = \frac{A^2m^2l^2 \sin^2 \Theta_0}{J^2}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中, $\xi = \gamma l / (2\sqrt{a_1 J})$, ξ 为系统阻尼比.

根据 (7) 式, 利用最大值求解法还可求出系统主共振时 β 的最大值 β_n 和主共振频率 ω_n . β_n 由下式求出:

$$\begin{aligned}
 & 6a_3\beta_n^2 + 5a_5\beta_n^4 + 8J\omega_0^2(1 - \xi^2) \\
 & = \frac{2A^2m^2l^2 \sin^2 \Theta_0}{J\xi^2\omega_0^2\beta_n^2}, \quad (8)
 \end{aligned}$$

主共振频率 ω_n 为

$$\omega_n = \sqrt{(1 - 2\xi^2)\omega_0^2 + \frac{6a_3\beta_n^2 + 5a_5\beta_n^4}{8J}}. \quad (9)$$

将 β_n 代入 (6) 式, 可求出主共振时采集器的最大振幅.

由于六个磁铁产生的磁场是非均匀磁场, 振动时磁电换能器将感应到变化的磁场. 设磁电换能器感应的磁场与摆动角度的关系为 $B(\theta)$, $B(\theta)$ 可通过理论或电磁场仿真软件求出. 设求出的表达式为

$$B(\theta) = f(\theta), \quad (10)$$

式中, $f(\theta)$ 为任意函数, 该函数与具体的采集器结构有关, 结构不同, $f(\theta)$ 的表达式就不同. 将 (6) 式代入 (10) 式, 可求出谐振时磁电换能器感应的磁场 B 与时间 t 的函数关系 $B(t)$, 其表达式为

$$B(t) = f[\theta(t)]. \quad (11)$$

$B(t)$ 一般由静态磁场 $\bar{B}(t)$ 和交变磁场 $\tilde{B}(t)$ 两部分构成, 静态磁场 $\bar{B}(t)$ 对磁电换能器来说, 起偏置磁场的作用. 交变磁场 $\tilde{B}(t)$ 使磁电换能器产生磁电效应, 输出电能. 由于系统振动和磁铁产生的磁场都是非线性的, 交变磁场 $\tilde{B}(t)$ 一般是非正弦函数, 它的有效值 B_3 可由下式求出:

$$B_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\tilde{B}(t)]^2 dt}, \quad (12)$$

式中, T 为系统的振动周期.

由于环境振动多为低频振动, 其频率一般远离磁电材料的谐振峰, 所以磁电换能器的磁电电压系数近似为常数 [24,28,29]. 实验制作的磁电换能器工作在 L-T 模式, 且采用中间固定方式, 所以磁电换能器的等效电路图可用图 3 所示的电路表示 [24,27]. 图中, H 为磁电换能器感应的磁场强度, α_V 为磁电电压系数, R_L 为外负载, I 为电流, C 为磁电换能器的等效电容, 其大小由下式求出 [27]:

$$C = \frac{wl\varepsilon_{33}^T [n(1 - k_{31}^2)s_{11}^E + (1 - n)s_{33}^H]}{t_c(1 - n)[ns_{11}^E + (1 - n)s_{33}^H]}, \quad (13)$$

式中, w, l, t_c 分别为磁电换能器的宽度、长度和厚度; n 为层合比, 即磁致伸缩层的厚度与换能器总厚度的比值; s_{33}^H 为磁致伸缩材料的柔顺系数; $s_{11}^E, \varepsilon_{33}^T, k_{31}$ 分别为压电材料的柔顺系数、介电常数和机电耦合系数.

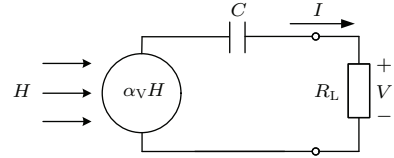


图3 磁电换能器的等效电路

Fig. 3. Equivalent circuit of the magnetolectric transducer.

由于理论与实验测量的磁电系数有较大的差异 [24], 计算采集器的电输出时采用实验测量值. 当磁电换能器开路时, 其开路输出电压 $v_o(t)$ 为

$$v_o(t) = \alpha_V H(t) = \alpha_V B(t) / \mu_0, \quad (14)$$

式中, μ_0 为真空磁导率.

利用 (7) 式可求出 β 与频率的关系特性曲线, 与 (6) 式结合可求出采集器的振幅频率响应曲线, 再与 (14) 式结合可求出电压频率响应曲线.

由于磁电换能器感应的磁场一般是非均匀磁场, 所以开路输出电压通常不是纯的正弦波, 含有多种频率成分. 利用快速傅里叶 (FFT) 变换可求出开路电压包含的各种频率分量. 设开路电压含有 M 个频率分量, 对于其中第 j 个 (j 为整数, 取值范围为 1 到 M) 频率分量 ω_j , 在外接负载电阻 R_L 上产生的电压和功率分别为

$$V_j = \frac{\alpha_V B_3 R_L \omega_j C}{\mu_0 \sqrt{1 + (\omega_j C R_L)^2}}, \quad (15)$$

$$P_j = \frac{V_j^2}{R_L} = \frac{(\alpha_V B_3 \omega_j C)^2 R_L}{\mu_0^2 [1 + (\omega_j C R_L)^2]}. \quad (16)$$

负载电阻 R_L 获得的总功率为

$$P = \sum_{j=1}^M P_j. \quad (17)$$

4 制作与仿真

实验制作的采集器如图 4(a) 所示. 旋转摆中钢扇形块的厚度为 3 mm, 铝扇形块的厚度为 5 mm. 铝扇形块的其他详细尺寸见图 4(b). 两个旋转摆的间距为 14.5 mm. 六个磁铁均采用 NdFeB 磁铁, 尺寸为 10 mm × 5 mm × 6 mm, 剩磁 B_r 为 1.20 T, 相对磁导率为 1.05. 每个铝扇形块分别嵌入 3 个磁铁, 并以转轴为中心按 40° 间隔对称地嵌入, 嵌入时磁铁中心到转轴中心的距离为 17 mm. 磁电换能器采用 Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D 层合材料组成. Terfenol-D 和 PMN-PT 均为矩形片状结构, 尺寸均为 12 mm × 6 mm × 1 mm. Terfenol-D 与 PMN-PT 通过环氧树脂胶粘接构成. Terfenol-D 和 PMN-PT 的相关参数见表 1. 实验中测量的磁电换能器 1 的磁电电压系数为 0.206 V/Oe, 对应的偏置磁场为 0.1253 T, 磁电换能器 2 的磁电电压系数为 0.201 V/Oe, 对应的偏置磁场为 0.1228 T. 为什么采用这两个偏置磁场将在第 5 节中说明. 装配时, 磁电换能器 1 以转轴为中心偏离铅垂位置 30° 固定在框体支撑板上, 其中心到转轴中心的间距为 17 mm. 磁电换能器 2 同样以转轴为中心偏离铅垂位置 110° 固定在框体支持板上, 其中心到转轴中心的距离也为 17 mm. 初始时, 转动旋转摆, 使上排磁铁与换能器 1 对齐, 这时下排磁铁也刚好与换能器 2 对齐. 由于重力作用旋转摆下偏约 1°, 所以旋转摆中心线相对于铅垂线的角度 $\theta_0 \approx 69^\circ$. 旋转摆的总质量 $m = 0.082$ kg, 其余相关参数为: $J = 2.6368 \times 10^{-5}$ kg·m², $l = 11.7$ mm, $\gamma = 0.0362$.

表 1 Terfenol-D 和 PMN-PT 的相关参数

Table 1. Material characteristics of Terfenol-D and PMN-PT.

	$d_{33,m}$ or $d_{31,p}$	s_{33}^H or s_{11}^E / 10^{-12} m ² /N	ϵ_{33}/ϵ_0	k_{31}	μ_r
Terfenol-D	1.1×10^{-8} m/A	40			5
PMN-PT	-2197 pC/N	10	5173	0.92	1

利用 Ansoft 公司的磁场仿真软件 Maxwell 可求出旋转摆在摆动过程中受到的磁力矩大小, 以及换能器感应到的磁场. 仿真时采用 Maxwell 三维瞬

态场求解器进行仿真, 仿真建模图如图 5 所示. 仿真时将坐标原点建立在转轴中心 (图 5 未画出转轴, 详见图 1), 同时将旋转摆中的钢子扇形块和磁铁设为转动物体, 并绕 x 轴转动. 在设置材料属性时, Terfenol-D 按厂家给的 B-H 曲线来设置.

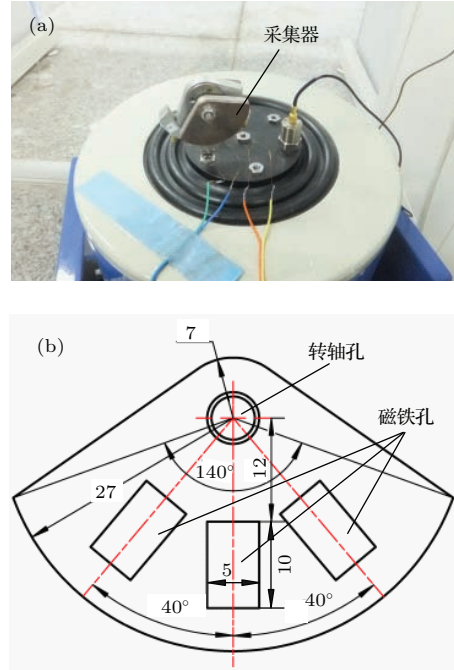


图 4 (网刊彩色) (a) 实验制作的采集器照片; (b) 铝子扇形块尺寸图 (单位 mm)
Fig. 4. (color online) (a) Photograph of the prototype; (b) dimension diagram of the aluminum sub-sector block (unit: mm).

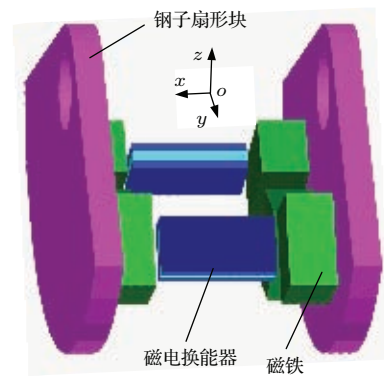


图 5 (网刊彩色) 仿真模型
Fig. 5. (color online) Simulation model.

每个换能器由上下两层 Terfenol-D 感应磁场, 由于磁场在空间分布不均匀, 上下层 Terfenol-D 感应的磁场不同, 且 Terfenol-D 在正反方向磁场作用下均伸长, 所以可这样确定换能器感应的等效磁场 B [4,27]: 将上下层 Terfenol-D 感应的磁场分别求绝对值, 然后再将这两者求平均, 并

将这个平均值作为换能器感应的等效磁场. 即 $B = (|\bar{B}_{Uxav}| + |\bar{B}_{Dxav}|) / 2$, 其中 \bar{B}_{Uxav} 和 \bar{B}_{Dxav} 分别是上下 Terfenol-D 层感应的平均磁场. 旋转摆在摆动过程中, 仿真得到的磁力矩和换能器感应的等效磁场如图 6 和图 7 所示. 从图 6 可看出旋转摆位于静平衡位置时, 旋转摆受到的切向磁力矩较小, 无论正偏还是反偏, 切向磁力矩都先变大, 该磁力矩始终企图将旋转摆拉回静平衡位置, 因此该力矩相当于起到弹簧质量系统中回复力的作用.

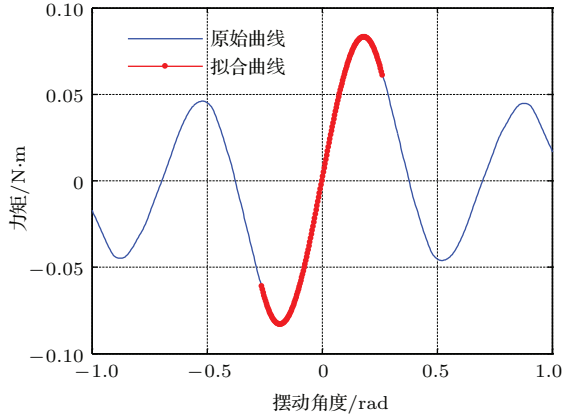


图 6 (网刊彩色) 旋转摆受到的磁力矩曲线

Fig. 6. (color online) Magnetic force moment of the rotary pendulum versus swing angle.

利用曲线拟合法可求得旋转摆受到的磁力矩和换能器感应磁场的表达式. 由于实验发现旋转摆最大摆幅不超过 15° (0.262 rad), 拟合时仅拟合 -15° — 15° 这个范围. 磁路受到的磁力矩 $T_m(\theta)$ 的表达式为

$$T_m(\theta) = \sum_{n=0}^6 a_n \theta^n, \quad (18)$$

式中, $a_0 = 1.2312 \times 10^{-2}$ N·m, $a_1 = 0.69319$ N·m/rad, $a_2 = -0.45384$ N·m/rad², $a_3 = -7.7014$ N·m/rad³, $a_4 = 3.5510$ N·m/rad⁴, $a_5 = 12.334$ N·m/rad⁵, $a_6 = -29.080$ N·m/rad⁶.

磁电换能器 1 感应的磁通密度 $B_{ME1}(\theta)$ 表达式为

$$B_{ME1}(\theta) = \sum_{n=0}^5 b_n \theta^n, \quad (19)$$

式中, $b_0 = 0.18733$ T, $b_1 = -4.1627 \times 10^{-2}$ T/rad, $b_2 = -2.3667$ T/rad², $b_3 = -0.69255$ T/rad³, $b_4 = 9.7486$ T/rad⁴, $b_5 = 5.7530$ T/rad⁵.

磁电换能器 2 感应的磁通密度 $B_{ME2}(\theta)$ 表达式为

$$B_{ME2}(\theta) = \sum_{n=0}^5 b_n \theta^n, \quad (20)$$

式中, $b_0 = 0.18733$ T, $b_1 = 4.1627 \times 10^{-2}$ T/rad, $b_2 = -2.3667$ T/rad², $b_3 = 0.69255$ T/rad³, $b_4 = 9.7486$ T/rad⁴, $b_5 = -5.7530$ T/rad⁵.

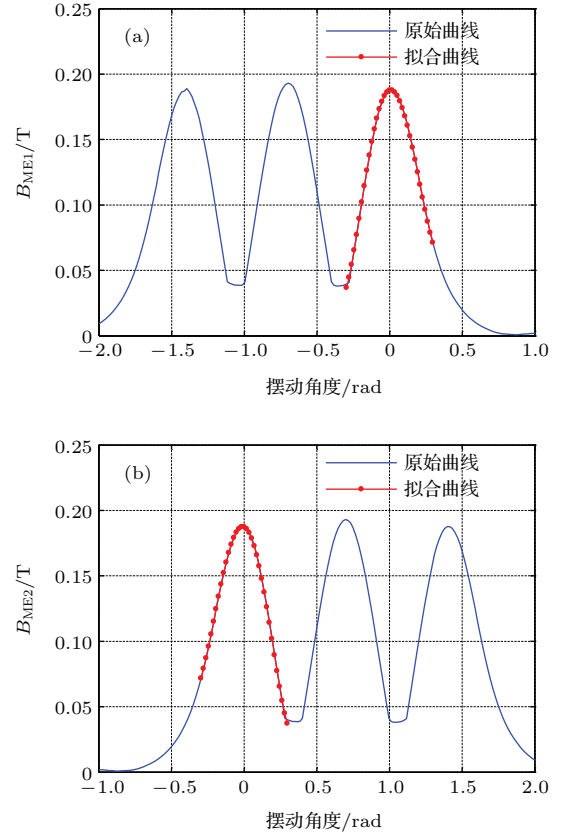


图 7 (网刊彩色) 两个换能器感应的磁通密度曲线 (a) 换能器 1; (b) 换能器 2

Fig. 7. (color online) Equivalent magnetic flux densities of the two ME transducers versus swing angle: (a) Transducer 1; (b) transducer 2.

5 结果与讨论

利用 (7) 式可求出一阶谐振振幅 β 与频率的关系, 再结合 (6) 式和 (14) 式可求出输出电压与频率的关系. 由于换能器 1 和 2 的电压频率响应特性基本一致, 本文只讨论换能器 1 的电压频率响应特性. 在 1 g 有效值加速度振动下, 求出换能器 1 的开路电压有效值与振动频率的关系如图 8 所示, 图中无箭头曲线为理论曲线, 实线箭头为频率上升时理论预测的频率响应曲线, 虚线箭头为频率下降时理论预测的频率响应曲线. 从图 8 可看出: 采集器的电压频率响应是非线性曲线, 这种非线性使得采集器具有宽频能量采集特性. 采集器输出的

最大电压有效值达到 91.97 V, 对应的谐振频率为 17.1 Hz (谐振频率也可利用 (9) 式求出). 频率缓慢上升时的理论半功率带宽 (或 3 dB 带宽) 为 1.7 Hz (22.5—24.2 Hz), 频率缓慢下降时的理论半功率带宽为 4.1 Hz (17.1—21.2 Hz). 实验测量的输出电压有效值与振动频率的关系如图 9 所示. 实验测量的最大电压有效值达到 90.9 V, 对应的谐振频率为 16.9 Hz; 频率缓慢上升时的半功率带宽为 2.1 Hz (22.8—24.9 Hz), 频率缓慢下降时的半功率带宽为 4.8 Hz (16.9—21.7 Hz). 理论带宽与实验带宽约有 0.7 Hz 左右的差异, 虽然存在着一定的差异, 但该理论带宽已达到一定的精度, 可以用本文提出的方法分析采集器的频率响应特性. 表 2 列出了一些非线性采集器的重要性能参数: 中心频率、半功率带宽、频带占宽比. 通过表 2 的对比可看出: 本文提出的采集器在频带占宽比上具有优势. 另外, 当采集器的频率响应范围与环境振动频率范围不同时, 可通过改变旋转摆的质量或摆长, 使采集器的频率响应范围与环境振动频率范围相一致, 从而使采集器产生高的输出功率.

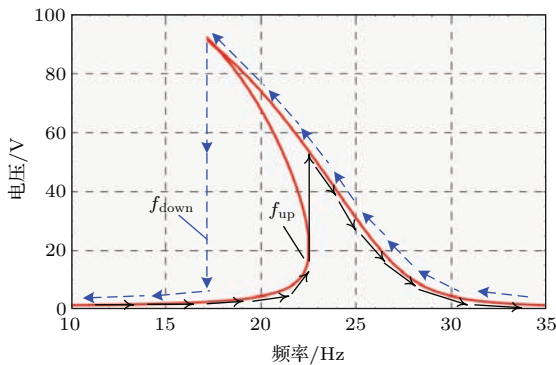


图 8 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时, 理论计算的换能器 1 开路电压有效值频率响应曲线
 Fig. 8. (color online) Theoretical RMS voltage-frequency response curve of the transducer 1 with 1 g RMS acceleration under open-circuit conditions.

根据 (6), (19) 和 (20) 式可求出旋转摆的摆动波形和两个换能器感应的理论磁场波形. 在 1 g 有效值加速度振动下, 谐振时旋转摆的理论摆动波形以及两个换能器感应的理论磁场波形如图 10 和图 11 所示. 从图 10 和图 11 可看出, 理论摆动波形近似为正弦波, 而理论磁场波形为非正弦波. 这是因为: 磁铁在空气隙中产生的非均匀磁场导致了理论磁场波形为非正弦波. 图 11 显示换能器 1 感应的最大磁场变化量达到 0.1346 T, 换能器 2 感应的最大磁场变化量达到 0.1370 T. 这表明采集器设计

的磁路能在空气隙中产生高梯度的磁场, 使换能器输出高的电压. 图 11 还显示换能器 1 感应的偏置磁场 (即平均磁场) 为 0.1253 T, 换能器 2 感应的偏置磁场为 0.1228 T. 实验测量这两个换能器的磁电电压系数时, 它们的偏置磁场应分别设为上述两个值, 这样理论计算的结果才与实验结果更相近.

表 2 非线性采集器性能参数对比

Table 2. Comparison of key parameters for different nonlinear vibration energy harvesters.

换能机理	中心频率/Hz	半功率带宽/Hz	频带占宽比/%	文献
电磁	54	10.0	18.5	[30]
电磁	3.25	0.5	15.4	[17]
压电	11.93	2.3	19.3	[31]
压电	89.0	10.0	11.2	[32]
静电	1500	100.0	6.7	[33]
磁电	22.5	4.2	18.7	[34]
磁电	23.15	4.1	17.7	[35]
磁电 (本文)	19.3	4.8	24.9	

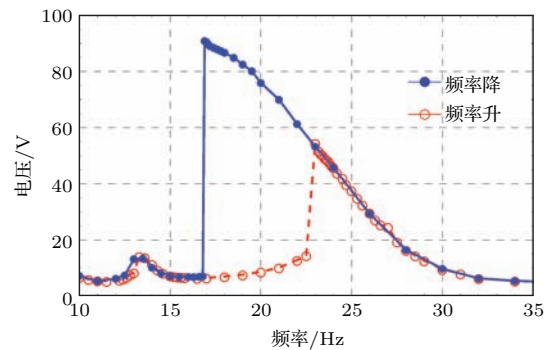


图 9 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时, 实验测试的换能器 1 开路电压有效值频率响应曲线
 Fig. 9. (color online) Measured RMS voltage-frequency response curve of the transducer 1 with 1 g RMS acceleration under open-circuit conditions.

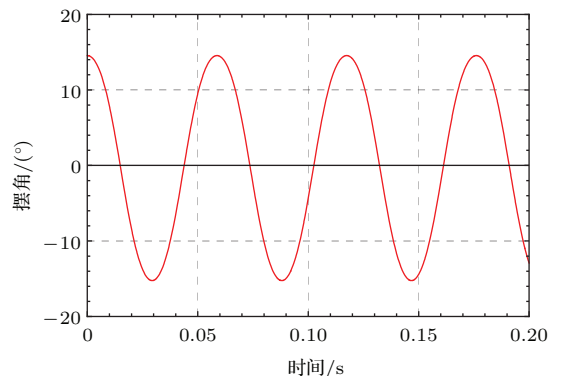


图 10 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时旋转摆的理论摆动波形
 Fig. 10. (color online) Theoretical swing waveform of the rotary pendulum for 1 g RMS acceleration.

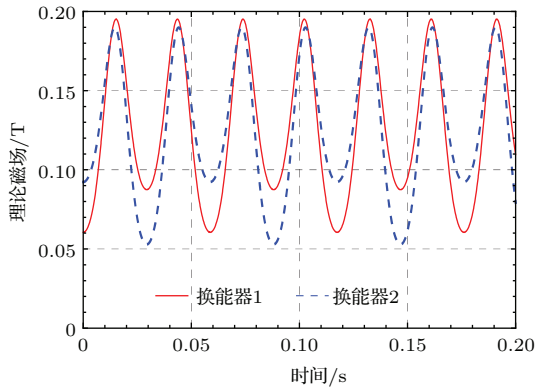


图 11 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时, 两个换能器感应的理论磁场波形

Fig. 11. (color online) Theoretical magnetic flux density waveforms of the two transducers for 1 g RMS acceleration.

根据 (14), (19) 和 (20) 式可以求出两个换能器开路时输出的电压波形. 在加速度有效值为 1 g, 谐振时理论计算的两个换能器开路输出电压波形如图 12 所示. 实验测量的两个换能器开路时输出电压波形如图 13 所示. 换能器 1 的理论和实验电压峰峰值分别为 277.3 V 和 275.4 V, 换能器 2 的理论和实验电压峰峰值分别为 273.2 V 和 262.5 V. 理论计算的换能器 1 和 2 的输出电压波形的相位差为 180° , 而实验的相位差约为 168° . 实验与理论之间存在相位差的原因为: 理论计算时两个换能器完全对称安装, 而实验中很难实现这种对称安装, 导致了这个差异. 由于两个换能器实际输出有相位差, 不能直接并联或串联, 所以实验测试中, 对这两个换能器的输出分别进行测试.

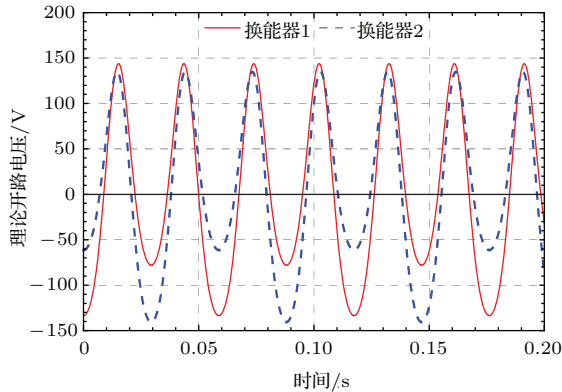


图 12 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时两个换能器的理论开路电压波形

Fig. 12. (color online) Theoretical open-circuit voltage waveforms of the two transducers for 1 g RMS acceleration.

图 13 显示两个换能器的理论和实验电压波形都是非正弦波, 其波形与理论磁场波形非常相似. 可见, 非正弦电压波形产生的原因来自于换能器

感应的非线性磁场. 由于电压波形不是单一频率的正弦波, 含有其他频率成分. 为了对电压波形的各频率成分进行分析, 需对各波形进行 FFT 变换, 求出它们的频谱图. 这里仅讨论换能器 1 的理论电压波形的频谱图, 其他波形频谱图可采用相同的方法求出. 对换能器 1 的理论开路电压波形进行 FFT 变换, 得到图 14 所示的频谱图. 从图 14 可看出该电压波形主要由谐振频率的 1 倍频、2 倍频、3 倍频、4 倍频组成, 对应的电压幅值分别为: 58.02, 115.10, 10.97, 16.96 V. 由此可见 2 倍频的电压值最大. 同样对其他波形进行频谱分析, 也发现每个波形的 2 倍频的电压值最大. 所以该采集器具有非常强的倍频特性. 倍频特性产生的原因以换能器 1 为例来说明. 假定在某一加速度振动下旋转摆的摆幅为 θ_1 , 换能器 1 感应的磁场与摆角的关系如图 15(a) 所示. 当旋转摆摆动一个周期时, 换能器 1 感应的磁场波形如图 15(b) 所示. 图 15(b) 显示换能器 1 感应的磁场由交变磁场和静态磁场组成, 其中交变磁场使换能器产生交变电压. 换能器 1 感应的交变磁场波形如图 15(c) 所示, 可见显示旋转摆摆动一个周期, 换能器 1 感应的交变磁场将发生两个周期的变化, 这就使换能器产生倍频电压输出. 结合图 10—图 14 以及前面的分析, 可进一步得出倍频特性产生的原因来自于换能器感应的非线性磁场. 与 Kùlah 和 Najafi [19], Liu 等 [21], Özge 和 Kùlah [22] 的升频采集器相比, 不需要专门的频率转换结构, 使得结构简单、设计难度降低. 由于换能器的最大输出功率与频率成正比 (见文献 [27] 的 (18) 式), 因此利用倍频特性可提高采集器的输出功率和能量转换效率.

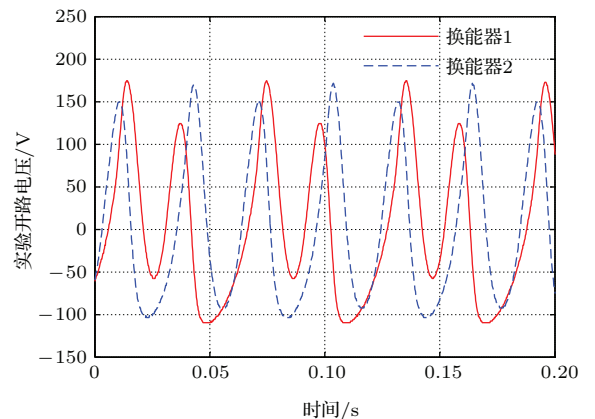


图 13 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时两个换能器的实验测量开路电压波形

Fig. 13. (color online) Measured open-circuit voltage waveforms of the two transducers for 1 g RMS acceleration.

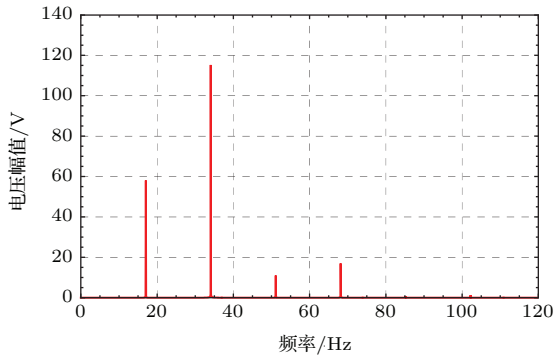


图 14 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 时换能器 1 理论开路电压波形的频谱图

Fig. 14. (color online) Spectrum of the theoretical open-circuit voltage of the transducer 1 for 1 g RMS acceleration.

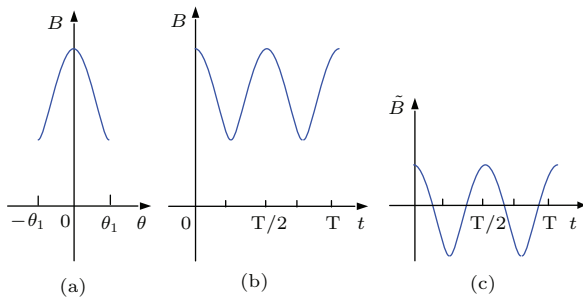


图 15 (网刊彩色) 倍频效应产生示意图 (a) 在某个加速度振动下换能器 1 感应的磁场与摆角的关系图; (b) 换能器 1 在一个振动周期感应的磁场波形; (c) 换能器 1 在一个振动周期感应的交变磁场波形

Fig. 15. (color online) Schematic diagram of frequency doubling effect: (a) The induced magnetic flux density of the transducer 1 versus swing angle at a certain acceleration; (b) the induced magnetic flux density waveform of the transducer 1 with one mechanical vibration cycle; (c) the induced alternating magnetic flux density waveform of the transducer 1 with one mechanical vibration cycle.

利用(17)式, 可求出输出功率随负载电阻变化的关系曲线. 保持加速度 1 g 不变, 谐振时理论和实验得到的输出功率随负载电阻变化的关系曲线如图 16 所示. 从图 16 可看出: 理论求得的换能器 1 和换能器 2 的最佳电阻都为 2.04 MΩ, 换能器 1 和换能器 2 的最大功率输出分别为 1929.5 μW 和 1805.4 μW; 实验获得的换能器 1 和换能器 2 的最佳电阻都为 1.9 MΩ, 最大功率输出分别为 1813.5 μW 和 1755.3 μW. 理论和实验存在一定的差异, 这种差异可能是: 实验中磁铁的间距与计算值存在一定的偏差, 空气隙的磁阻很大, 稍有偏差将引起较大的磁场变化量; 实际的 NdFeB 磁铁的剩磁 B_r 与标称值有一定的差异; 理论计算时未考虑换能器的非

线性特性. 虽然存在这些差异, 但该理论已经达到了较高的精度, 可以用它进行相关的理论分析和设计优化.

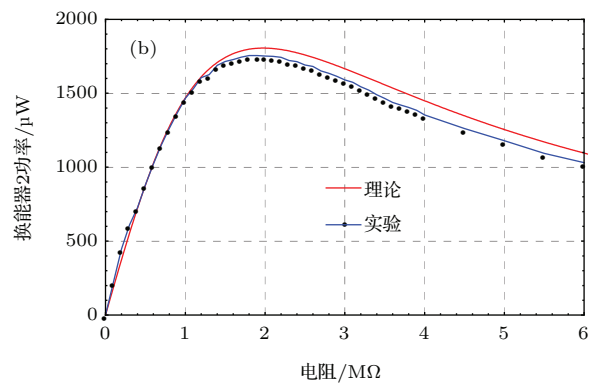
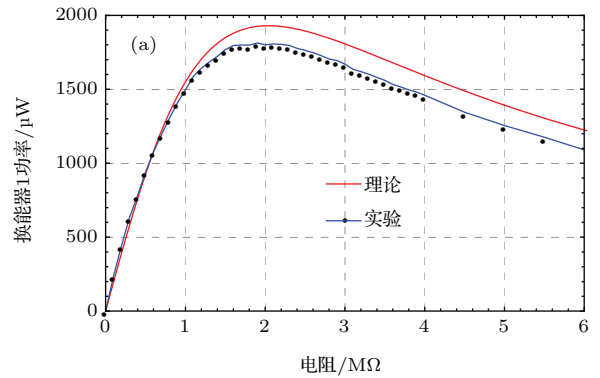


图 16 (网刊彩色) 加速度有效值为 1 g 且谐振时两个换能器输出功率随负载电阻的变化关系 (a) 换能器 1; (b) 换能器 2

Fig. 16. (color online) Output powers of the two transducers versus load resistance at resonance with 1 g RMS acceleration: (a) Transducer 1; (b) transducer 2.

保持最佳电阻 $R_L = 1.9 \text{ M}\Omega$ 不变, 谐振时实验测量的采集器输出功率随加速度变化的规律如图 17 所示, 图中总功率为换能器 1 和 2 的功率和. 由图 17 可知: 采集器在低于 0.3 g 有效值加速度时输出的总功率较低; 在高于 0.3 g 时, 输出总功率随加速度的增大而快速增大, 但到 1 g 时增长速度变缓, 然后趋于饱和; 采集器在 0.3, 1 和 1.2 g 时的输出总功率分别为 0.156, 3.569 和 3.681 mW. 如果要进一步提高低水平振动下的输出功率, 可通过调节两个换能器的安装位置, 使旋转摆中心线相对于铅垂线的角度 θ_0 接近 90° . 因为旋转摆惯性力矩为 $-mAl \cos(\omega t + \phi) \sin(\theta_0 - \theta)$, 在其他条件不变时, $\theta_0 = 90^\circ$ 得到的惯性力矩最大, 惯性力矩变大就会使旋转摆摆动角度增大, 换能器感应的磁场变化量也会增高, 从而使换能器输出的电压和功率变高, 所以使 θ_0 接近 90° 可提高采集器在低水平振动下

的输出功率. 目前, 低功耗无线传感器的功耗已降到 $100 \mu\text{W}$ 以下 [36,37], 而该采集器在 0.25 g 加速度振动下就能产生超过 $100 \mu\text{W}$ 的功率, 因此本文提出的采集器在超过 0.25 g 振动加速度时, 可满足低功耗无线传感器的能量需求.

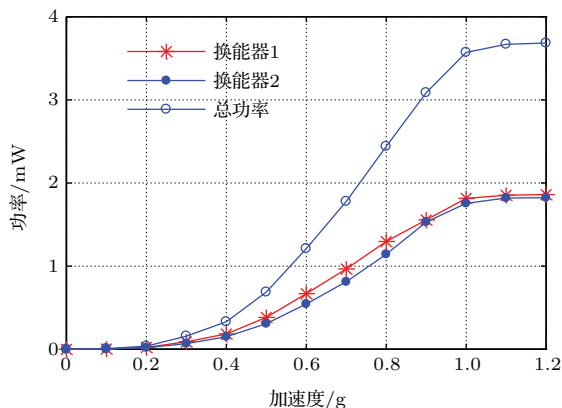


图 17 (网刊彩色) 谐振时实验测量的 $1.9 \text{ M}\Omega$ 负载电阻上输出功率随加速度的变化

Fig. 17. (color online) Measured output powers across the load resistance of $1.9 \text{ M}\Omega$ versus RMS acceleration at resonance.

6 结 论

本文设计了一种采用双磁电换能器的宽频振动能量采集器, 该采集器采用摆式结构感应环境中的振动, 并设计了一个由六个 NdFeB 磁铁组成的能产生高磁场梯度的磁路嵌入在摆式结构中. 利用有限元磁场仿真软件求出了振动过程中摆式结构受到的磁力矩和换能器感应的磁场. 建立了采集器摆式结构的摆动方程, 利用林斯泰特-庞加莱法对摆式结构的非线性动力学方程进行了求解, 并将摆动方程和换能器的磁电特性结合, 分析了能量采集器的频率响应特性和谐振时的机-磁-电转换特性. 理论和实验研究表明: 该采集器具有很强的非线性特性, 能实现宽频振动能量采集, 在 1 g 有效值加速度振动向下扫频时的半功率带宽达到 4.8 Hz , 负载电阻上获得的功率达到 3.569 mW , 且该采集器的电输出具有明显的倍频特性, 能有效地提高采集器低频时的输出功率.

参考文献

[1] Su W J, Zu J, Zhu Y 2014 *J. Intel. Mat. Syst. Str.* **25** 430

[2] Fan K Q, Xu C H, Wang W D, Fang Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 084501

[3] Huang P C, Tsai T H, Yang Y J 2013 *Microelectron. Eng.* **111** 214

[4] Dai X, Wen Y, Li P, Yang J, Li M 2011 *Sensor Actuator. A: Phys.* **166** 94

[5] Zhan Y Z, Wang G Q 2014 *J. Vib. Eng.* **27** 871 (in Chinese) [展永政, 王光庆 2014 振动工程学报 **27** 871]

[6] Wang G, Zhang W, Liu C, Yang B Q, Liao W X 2015 *Chin. J. Sensor Actuat.* **28** 1494 (in Chinese) [王光庆, 张伟, 刘创, 杨斌强, 廖维新 2015 传感技术学报 **28** 1494]

[7] Tan W, Wang X P, Cao J J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 240504 (in Chinese) [唐炜, 王小璞, 曹景军 2014 物理学报 **63** 240504]

[8] Yang J, Wen Y, Li P, Dai X 2011 *Sensor Actuator. A: Phys.* **168** 358

[9] Bai X, Wen Y, Li P, Yang J, Peng X, Yue X 2014 *Sensor Actuator. A: Phys.* **209** 78

[10] Xu C, Liang Z, Ren B, Di W, Luo H, Wang D, Wang K, Chen Z 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 114507

[11] Wang G Q, Zhan Y Z, Jin W P, Liao W X 2015 *J. Mech. Eng.* **51** 155 (in Chinese) [王光庆, 展永政, 金文平, 廖维新 2015 机械工程学报 **51** 155]

[12] Spremann D, Manoli Y, Folkmer B, Mintenbeck D 2006 *J. Micromech. Microeng.* **16** S169

[13] Ylli K, Hoffmann D, Willmann A, Folkmer B, Manoli Y 2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* **660** 012053

[14] Wang Y J, Chen C D, Sung C K 2010 *Sensor Actuator. A: Phys.* **159** 196

[15] Malaji P V, Ali S F 2015 *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **224** 2823

[16] Ma T W, Zhang H, Xu N S 2012 *Mech. Syst. Signal Process.* **28** 323

[17] Dai X 2016 *Sensor Actuator. A: Phys.* **241** 161

[18] Huang J K, O'Handley R C, Bono D 2003 *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials* California, USA, March 3-5, 2003 p229

[19] Kùlah H, Najafi K 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 261

[20] Liu H, Lee C, Kobayashi T, Tay C J, Quan C 2011 *Procedia Eng.* **25** 725

[21] Liu H, Lee C, Kobayashi T, Tay C J, Quan C 2012 *Sensor Actuator. A: Phys.* **186** 242

[22] Özge Z, Kùlah H 2013 *Sensor Actuator. A: Phys.* **202** 124

[23] Tang Q, Yang Y, Li X 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 1

[24] Dong S, Li J, Viehland D 2003 *IEEE T. Ultrason. Fekroelectr. Freq. Control* **50** 1253

[25] Dai X Z, Wen Y M, Li P, Yang J, Jiang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2137 (in Chinese) [代显智, 文玉梅, 李平, 杨进, 江小芳 2010 物理学报 **59** 2137]

[26] Liu Y Z, Chen W L, Chen L Q 1998 *Vibration Mechanics* (Beijing: Higher Education Press) p45 (in Chinese) [刘延柱, 陈文良, 陈立群 1998 振动力学 (北京: 高等教育出版社) 第 45 页]

[27] Dai X, Wen Y, Li P, Yang J, Zhang G 2009 *Sensor Actuator. A: Phys.* **156** 350

- [28] Dai X, Zhang Z, Wang Y, Li J, Chen L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 014104
- [29] Dai X Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 207501 (in Chinese) [代显智 2014 物理学报 **63** 207501]
- [30] Xing X, Lou J, Yang G M, Obi O, Driscoll C, Sun N X 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 134103
- [31] Stanton S C, McGehee C C, Mann B P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 174103
- [32] Ma H A, Liu J Q, Tang G, Yang C S, Li Y G 2011 *Transd. Microsyst. Techn.* **30** 66 (in Chinese) [马华安, 刘景全, 唐刚, 杨春生, 李以贵 2011 传感器与微系统 **30** 66]
- [33] Bartsch U, Gaspar J, Year P O 2009 *IEEE 22nd International Conference on MEMS*, Sorrento, Italy, Jan. 25–29, 2009 p1043
- [34] Yang J, Yue X, Wen Y, Li P, Yu Q, Bai X 2014 *Sensor Actuator. A: Phys.* **205** 47
- [35] Yue X H, Yang J, Wen Y M, Li P, Bai X L 2013 *Chin. J. Sci. Instrum.* **34** 1961 (in Chinese) [岳喜海, 杨进, 文玉梅, 李平, 白小玲 2013 仪器仪表学报 **34** 1961]
- [36] Zhang Y M, Yang C, Ma L, Wang K F 2012 *Comput. Eng.* **38** 71 (in Chinese) [张永梅, 杨冲, 马礼, 王凯峰 2012 计算机工程 **38** 71]
- [37] Zhang D Z, Yang T, Wei D M 2006 *Transd. Microsyst. Techn.* **25** 10 (in Chinese) [张大踪, 杨涛, 魏东梅 2006 传感器与微系统 **25** 10]

A broadband vibration energy harvester using double transducers and pendulum-type structures*

Dai Xian-Zhi^{1)†} Liu Xiao-Ya¹⁾ Chen Lei²⁾

1) (College of Electronic and Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

2) (College of Software Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

(Received 12 December 2015; revised manuscript received 24 March 2016)

Abstract

As cantilever-based vibration energy harvesters are easily fractured under large amplitude vibration excitation, in this paper we present a vibration energy harvester based on a pendulum-type structure with broadband and frequency-doubling characteristics. The harvester consists of two Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D magnetoelectric transducers and a rotary pendulum embedded with six magnets. These six magnets are arranged into an optimum configuration and can produce a concentrated flux gradient which makes the magnetoelectric transducers generate a high power. While the two transducers are used to further improve the output power and power density of the harvester without increasing the volume of the harvester. The rotary pendulum of the harvester changes linear vibration into a back-and-forth swing of the rotary pendulum. When the rotary pendulum swings, the stress is hardly generated in the interior of the rotary pendulum. Therefore the rotary pendulum is not easily fractured under the large amplitude vibration. Therefore the proposed pendulum-based vibration energy harvester is suitable for scavenging the large amplitude ambient vibration energy. The swing equation of the rotary pendulum is established. The nonlinear dynamic equation of the rotary pendulum is solved by the Lindstedt-Poincaré method. The frequency response characteristic and the mechano-magneto-electric transduction characteristic of the harvester at resonance are analyzed by combining the swing equation of the harvester with the magnetoelectric characteristics of the magnetoelectric transducers. The spectrum of the output voltage waveform of the harvester is discussed. The analytical and experimental results indicate that the harvester has broadband and frequency-doubling characteristics. The broadband characteristic of the harvester is derived from the nonlinear magnetic force between the magnets and magnetoelectric transducers. The voltage frequency-doubling characteristic is derived from the nonlinearity of the magnetic field produced by the magnets. It does not need frequency conversion mechanism for the proposed harvester, so the proposed harvester has some advantages, such as simple structure and easy manufacture. Under 1 g ($1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$) RMS vibration acceleration excitation, the measured maximum RMS voltage and the resonant frequency of the prototype are 90.9 V and 16.9 Hz, respectively. The 3 dB bandwidth for the sweep-down condition is 4.8 Hz from 16.9 Hz to 21.7 Hz and that for the sweep-up condition is 2.1 Hz from 22.8 Hz to 24.9 Hz. Compared with other harvesters, the proposed harvester has a wide relative bandwidth. The load output power of the prototype reaches 3.569 mW across a 1.9 M Ω optimal resistor at resonant frequency of 16.9 Hz with 1 g RMS vibration acceleration. The output RMS powers of the prototype across 1.9 M Ω resistor are 0.156 mW, 0.6863 mW, 1.777 mW at 0.3 g, 0.5 g and 0.7 g with resonance, respectively. The proposed harvester can effectively improve the output powers at lower frequency vibrations for its two transducers, broadband and frequency-doubling characteristics.

Keywords: vibration energy harvesting, broadband, nonlinear, pendulum-type structures

PACS: 07.07.Df, 07.07.Mp, 84.60.-h, 45.20.dg

DOI: 10.7498/aps.65.130701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61304255), the Innovative Research Team Foundation of China West Normal University (Grant No. CXTD2015-13), the Fundamental Research Funds of China West Normal University (Grant No. 15C001), and the Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology, China (Grant No. cstc2015jcyjBX0019).

† Corresponding author. E-mail: daixianzhi@sina.com