

一种电磁式低频振动能量收集器建模仿真与分析^①

黎雪芬^{②*} 祝志鹏^{**} 刘建胜^{③**}

(* 无锡职业技术学院控制学院 无锡 214121)

(** 南昌大学机电工程学院 南昌 330031)

摘 要 对广泛存在于环境中的低频振动能,基于电磁感应原理,采用新型的磁力弹簧,透明光敏树脂材料和 N38 永磁体,设计了将低频振动能转换成电能的 2 种能量收集器原型样机;建立了能量收集器物理模型的静力学和动力学模型,采用 Simulink 模块分别对能量收集器的 3 种结构形式进行了运动学仿真,得到了相应的位移、速度及加速度表达式及其随时间变化图像;搭建测试平台,进行了低频振动实验对比和性能分析,结果表明 2 个磁力弹簧且上方悬空结构形式感应电压高。

关键词 电磁式; 低频振动; 能量收集器; 感应电压

0 引 言

20 世纪 70 年代以来,能源与人口、粮食、环境、资源被列为世界上的 5 大问题。各国在强调节约能源的基础上,非常注重能源的开发和利用,在一定程度上增加能源产量,改善环境,推动社会经济的发展和科学技术的进步。而振动能量作为清洁能源之一,广泛存在于振动机械环境中,因此,对振动能的回收利用具有较好的研究前景^[1-3]。振动能量收集器包括能量收集系统和转换系统,收集系统用来收集振动机械能,然后电磁转换系统将收集到的振动机械能转化为电能存储起来,收集的电能作为能源为各种低功耗的电子器件或者系统持续供电。振动能量收集器受到国内外高校的广泛关注,例如英国的拉夫堡大学^[4]、美国的纽约州立大学^[5]到国内的清华大学^[6]和上海交通大学^[7]等高校对振动能量收集器均开展了相关研究。振动能量收集器作为一种能量收集技术,具有不受存储密度限制、体积小、可持续供电等一系列的优点^[8,9]。振动能量收集器

按工作原理主要分成 3 个类型,即静电式^[10]、压电式^[11]和电磁式^[12]。静电效应收集能量的收集器通常只适合尺寸小、功率低的收集器,发电效率远低于压电式和电磁式 2 种类型。当振动频率高、加速度大时压电式优于电磁式,而振动频率低、加速度小时电磁式则更优。目前电磁式低频振动能量收集器的性能指标不高,应用到实际中存在一些困难。本文首先设计制作了一种电磁式低频振动能量收集装置,再建立物理模型,并基于此模型建立静力学和动力学建模及运动学仿真分析,并进行了实验研究。

1 电磁式振动能量收集器工作原理

电磁式能量收集器工作原理采用的是法拉第电磁感应定律来收集能量,其组成部分主要有永磁体和感应线圈 2 部分。外界振动作用于电磁式能量收集器,线圈和永磁体间会有一个相对运动,相对运动会使线圈在磁场中做切割永磁体磁感线运动,这个运动会导致通过线圈的磁通量发生变化,而变化的磁通量会产生感应电动势。

① 国家自然科学基金(51565036)资助项目。

② 女,1979 年生,硕士,讲师;研究方向:机电一体化及控制; E-mail: 27960965@qq.com

③ 通信作者, E-mail: liujiansheng@ncu.edu.cn

(收稿日期:2019-08-29)

本文设计的振动能量收集器,由振动系统和线圈 2 部分组成。如图 1 所示,振动系统是一个有阻尼振荡系统,其组成部分有质量块、弹簧以及壳体,线圈直接缠绕在壳体外部。

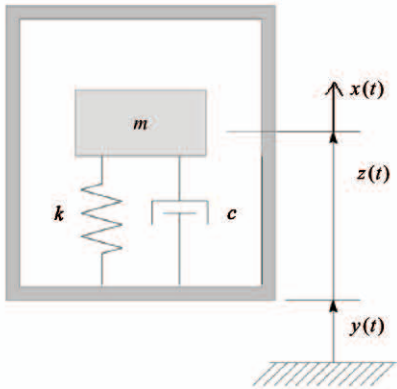


图 1 振动系统示意图

工作时,外界振动直接作用在壳体上,使壳体产生一个 $y(t)$ 的位移,接着外界振动通过质量块和壳体间的弹簧传递到质量块上,使之产生一个 $x(t)$ 的位移,因为质量块和壳体通过弹簧相连,所以 $x(t) \neq (y)t$,质量块和缠绕在壳体外部的线圈会有一个相对运动。若质量块带有磁性,那么这个相对运动会导致线圈中的磁通量发生改变,根据磁电效应就使线圈中产生相应的感应电流,即把输入的机械振动能转化成了电能。

2 电磁式振动能量收集器设计

根据电磁式能量收集器工作原理,使用粗细合适的漆包线用以完全隔离线圈;根据“同名磁极相互排斥,异名磁极相互吸引”的原理,引入磁力弹簧结构,即用 2 块磁极相对的永磁体来代替质量块和弹簧,一方面简化了能量收集器的结构,另一方面代替了传统的螺旋弹簧,减少能量收集器的制作难度,也克服了传统弹簧在多次振动后带来疲劳损伤的缺点。为了使质量块在振动时永磁体和壳体间接触面尽可能小以减少阻力,同时也为了使壳体自身在质量块振动时起导路作用,把壳体设计为略大于永磁体直径的圆柱形管状结构。

根据振动系统示意图的结构分析,对收集器的基本结构进行设计:(1) 外形为圆柱管状结构;(2)

底部固定有永磁体,管内有与之相对的运动永磁体;(3) 管体外部缠有若干线圈。中部外径略小于两端是为了方便缠绕线圈,这 3 部分的内径是一样大的,略大于选定的圆柱形永磁体。底座上的 2 个突起是方便安装定位用的,管体的对应处留有相应的沉孔。底座两端留有 2 个螺栓的安装孔,使管体和底座可以通过螺栓连接起来。底座中部留有一个沉孔,用于安装固定磁力弹簧的固定部分。在收集器基本结构的基础上,再设计一种包含 2 个磁力弹簧的改进能量收集器结构。改进结构的底部除可以安装磁力弹簧外,顶部可也安装一个磁力弹簧。在振动过程中,顶部的磁力弹簧能加速质量块回到平衡位置,从而加速线圈中磁通量的变化率,增加感应电能的电压值。2 个磁力弹簧的改进结构如图 2 所示。

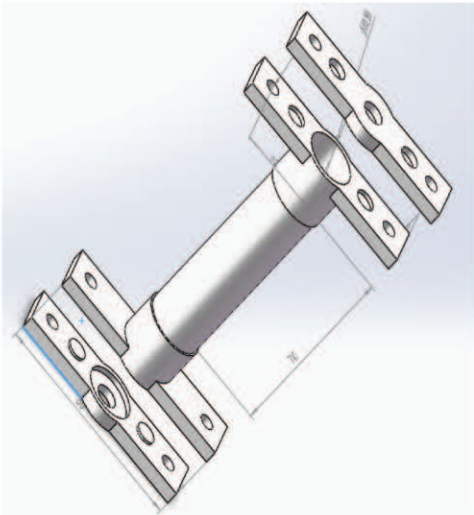


图 2 装有 2 个磁力弹簧的改进结构

电磁式振动能量收集器 2 种管体结构的基本参数如表 1 所示,另外其底板结构参数为长 80 mm、宽 20 mm、高 5 mm,螺栓孔间距 64 mm、螺栓孔直径 6 mm,凸台高度 1 mm、凸台直径 8 mm,中部凹孔高度 2 mm、直径 20.5 mm;线圈相关参数为匝数 300、阻值 17.5 Ω 、绕线位置 55.8 mm、直径 0.15 mm。

目前稀土材料的永磁体磁积能最高,其中钕铁硼系列永磁体最大磁积能达 398 kJ/m^3 ,剩余磁感应强度达 1.47 T,是综合性能最好的永磁体材料之一。钕铁硼磁铁牌号中数字越高意味着磁性越强,同时材料价格也相应增加。考虑到经济因素,决定选用

N38 永磁铁作为磁力弹簧和质量块的材料。N38 永磁体相关参数为矫顽力 H_c 为 1.245 T, 剩余磁感应强度 B_r 为 919000 A/m, 体电导率为 625 000 ms/cm, 直径 20 mm, 厚度 1 mm。

表 1 管体结构参数		
参数	基本结构	改进结构
内径(mm)	φ20.5	φ20.5
外径(mm)	中部:φ23.5	中部:φ23.5
	两端:φ25	两端:φ25
	总长:180	总长:110
长度(mm)	中部:80	中部:70
	底部:50	底部:20
	长:80	长:80
安装板尺寸(mm)	宽:20	宽:20
	厚:5	厚:5
	间距:64	间距:64
螺栓孔尺寸(mm)	直径:6	直径:6
	直径:8.2	直径:8.2
凹孔尺寸(mm)	高度:1.5	高度:1.5

3 电磁式振动能量收集器力学建模

3.1 静力学模型

静力学模型分析的是当外界输入振动为 0 时, 即系统处于静止状态时系统的力学模型。磁力弹簧固定于壳体上, 受力分析时不用考虑底部的永磁体, 只对充当质量块的永磁体加以分析即可。对于只包含一个磁力弹簧的结构, 质量块受力分析如图 3 所示, 得到如式(1)的平衡方程。

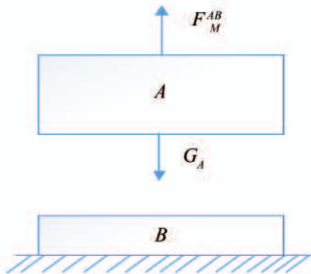


图 3 基本结构一个磁力弹簧受力图

$$\begin{cases} F_M^{AB} = \frac{\mu_0 Q_A Q_B}{4\pi r_{AB}^2} \\ F_M^{AB} - m_A g = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{解得 } r_{AB} = \sqrt{\frac{\mu_0 Q_A Q_B}{4\pi m_A g}} \quad (2)$$

μ_0 是真空磁导率, 大小等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$; Q_A 是永磁体 A 的磁场强度, Q_B 是永磁体 B 的磁场强度; r_{AC} 为静止时永磁体 A 和永磁体 B 之间的距离; m_A 为永磁体 A 的质量; g 为重力加速度, 大小 9.8 m/s^2 。数值计算时, 磁场强度可由 $Q_A = H_c \cdot A$, $Q_B = H_c \cdot B$, 其中 H_c 是矫顽力, A 、 B 分别是极面积。

对于包含 2 个磁力弹簧的结构, 可以分成 2 种类型来讨论子图(a)上方磁力弹簧固定; 子图(b)上方磁力弹簧不固定, 质量块受力分析如图 4 所示。

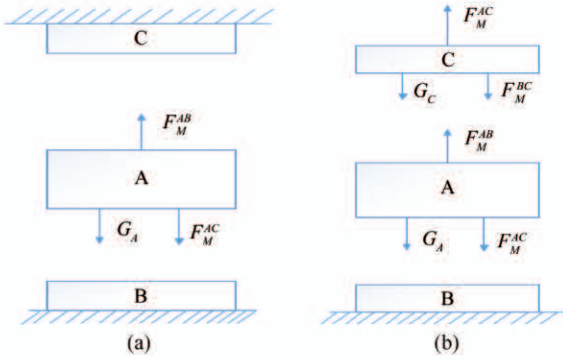


图 4 改进结构 2 个磁力弹簧受力图

对于图 4(a)情况, 同样也只需对质量块作受力分析:

$$\begin{cases} F_M^{AB} = \frac{\mu_0 Q_A Q_B}{4\pi r_{AB}^2} \\ F_M^{AC} = \frac{\mu_0 Q_A Q_C}{4\pi r_{AC}^2} \\ F_M^{AB} - F_M^{AC} - m_A g = 0 \\ r_{BC} = r_{AB} + r_{AC} + H_A \end{cases} \quad (3)$$

H_A 为永磁体 A 的厚度, Q_A 是永磁体 A 的磁场强度, Q_B 是永磁体 B 的磁场强度, Q_C 是永磁体 C 的磁场强度; r_{AC} 为静止时永磁体 A 和永磁体 C 之间的距离; r_{AB} 为静止时永磁体 A 和永磁体 B 之间的距离; r_{BC} 为永磁体 B 和永磁体 C 之间的距离; m_A 为永磁体 A 的质量; g 为重力加速度, 大小 9.8 m/s^2 。

对于图 4(b)情况, 情况较为复杂, 因为运动的质量块有 2 个, 除了中间的永磁体外, 还要考虑到上方磁力弹簧的受力, 永磁体 A 和永磁体 C 均悬空时系统的平衡方程为

$$\begin{cases} F_M^{AB} = \frac{\mu_0 Q_A Q_B}{4\pi r_{AB}^2} \\ F_M^{AC} = \frac{\mu_0 Q_A Q_C}{4\pi r_{AC}^2} \\ F_M^{AB} - F_M^{AC} - m_A g = 0 \\ r_{BC} = r_{AB} + r_{AC} + H_A \\ F_M^{AC} = \frac{\mu_0 Q_A Q_C}{4\pi r_{AC}^2} \\ F_M^{BC} = \frac{\mu_0 Q_B Q_C}{4\pi r_{BC}^2} \\ F_M^{AC} - F_M^{BC} - m_C g = 0 \end{cases} \quad (4)$$

μ_0 是真空磁导率,大小等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$; Q_A 是永磁体 A 的磁场强度, Q_B 是永磁体 B 的磁场强度, Q_C 是永磁体 C 的磁场强度; r_{AC} 为静止时永磁体 A 和永磁体 C 之间的距离; r_{AB} 为静止时永磁体 A 和永磁体 B 之间的距离; r_{BC} 为静止时永磁体 B 和永磁体 C 之间的距离; m_A 为永磁体 A 的质量; m_C 为永磁体 C 的质量; g 为重力加速度,大小 9.8 m/s^2 ; H_A 为永磁体 A 的厚度。

3.2 动力学模型

能量收集器的物理模型等效于“弹簧-质量块-阻尼”系统,不受外界扰动的时候,系统处于平衡状态,弹簧处于原长不发生形变。当外界扰动作用到系统上时,结合牛顿第二运动定律可以得出相应的振动方程。假设壳体的绝对运动是 $y(t)$, 质量块的绝对运动是 $x(t)$, 对于第二种结构,上方磁力弹簧的绝对运动是 $w(t)$, 以壳体为参考系,那么质量块和壳体的相对运动是 $z(t) = x(t) - y(t)$, 磁力弹簧和壳体的相对运动 $u(t) = w(t) - y(t)$ 。坐标原点均设置为中部质量块的平衡位置。

对于包含一个磁力弹簧的结构,如图 3 所示,其振动方程为

$$m_A \ddot{z}(t) + F_M - m_A g + d\dot{z}(t) = -m\dot{y}(t) \quad (5)$$

其中, d 是阻尼系数, $F(M)$ 可以用式(2)~(3)来近似代替。考虑初始条件,有:

$$\begin{cases} z(0) = 0 \\ \dot{z}(0) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

联立式(5)、(6)得到质量块的位移表达式 $x(t)$, 分别对 $x(t)$ 求一阶导数和二阶导数得到相应

的速度和加速度表达式。

对于包含 2 个磁力弹簧的结构,如图 4(a)、(b) 所示,分成上方磁力弹簧固定和上方磁力弹簧悬空 2 种。其中,上方磁力弹簧固定的情况类似于只有一个磁力弹簧的情况,分析较为简单;而上方磁力弹簧悬空的情况因为运动的永磁体有 2 个,分析相对复杂。

对于图 4(a) 结构,有:

$$m_A \ddot{z}(t) + F_M^{AB} - m_A g - F_M^{AC} + d\dot{z}(t) = -m\dot{y}(t) \quad (7)$$

初始条件同方程组(6)。

对于图 4(b) 结构,振动方程有:

$$\begin{cases} m_A \ddot{z}(t) + F_M^{AB} - m_A g - F_M^{AC} + d\dot{z}(t) = -m\dot{y}(t) \\ z(0) = 0 \\ \dot{z}(0) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} m_C \ddot{u}(t) + F_M^{AC} - m_C g - F_M^{BC} + d\dot{u}(t) = -m\dot{y}(t) \\ u(0) = r_{AC} \\ \dot{u}(0) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

方程组(8)是质量块的振动方程,方程组(9)是上方磁力弹簧的振动方程。根据 2 组二阶微分方程和 4 个初始条件,可以求得质量块的位移表达式 $x(t)$ 以及上方磁力弹簧的位移表达式 $u(t)$, 分别对其求导即可得到速度和加速度表达式。

4 电磁式振动能量收集器运动学仿真

以振动方程为基础,用 Simulink 仿真运动过程,相关参数具体数值如表 2。本文只给出使用 Simulink 对 2 个磁力弹簧且上方磁力弹簧悬空的运动形

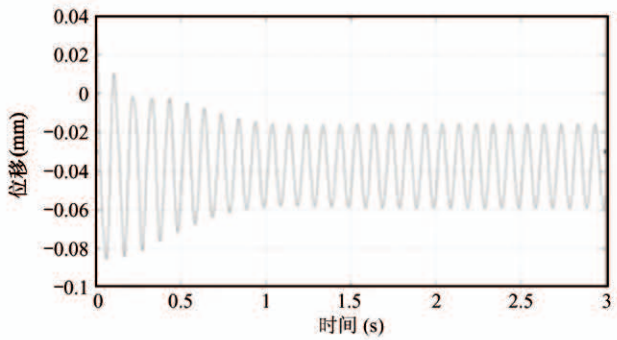
表 2 计算用到的参数具体数值

名称	数值	名称	数值
极面积 $A(\text{mm}^2)$	3.141×10^{-4}	Q_C	282.74
$H_C(\text{A/m})$	900 000	$r_{AB}(\text{mm})$	48
Q_A	282.74	$r_{AC}(\text{mm})$	100
Q_B	282.74	$r_{BC}(\text{mm})$	37

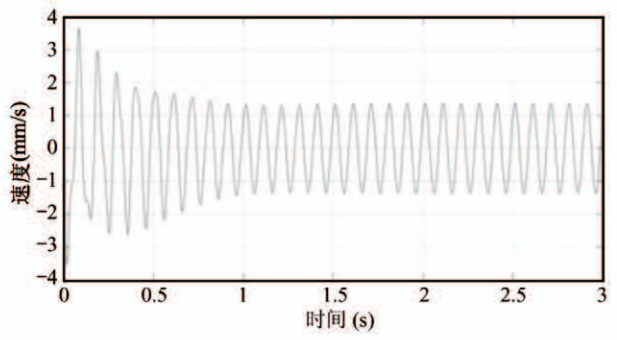
式进行运动仿真结果, 仿真时间 0 ~ 3 s, 其位移、速度、加速度仿真结果如图 5 所示。

由上面所得结果可知, Simulink 可较简单地对

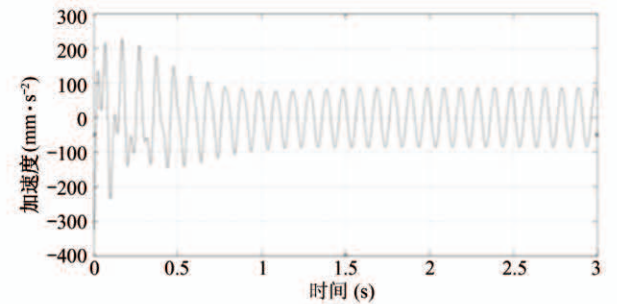
质量块或上方磁力弹簧进行运动仿真, 得到参数表达式或者相应的图像。



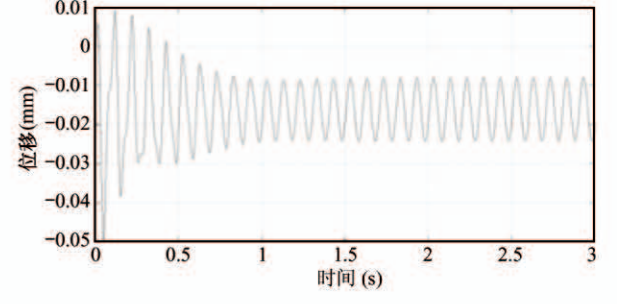
(a) 上方磁力弹簧位移图像



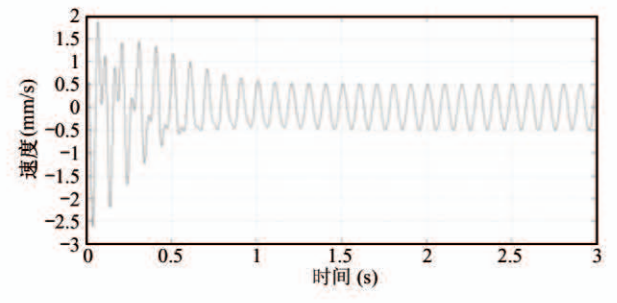
(b) 上方磁力弹簧速度图像



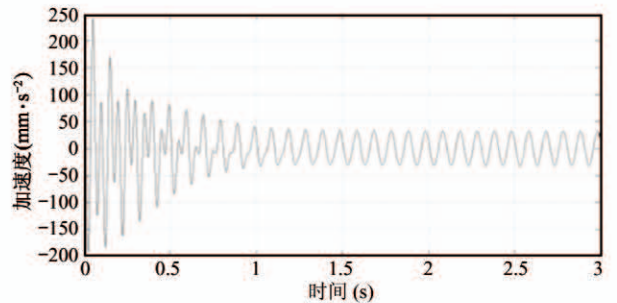
(c) 上方磁力弹簧加速度图像



(d) 质量块位移图像



(e) 质量块速度图像



(f) 质量块加速度图像

图 5 仿真时间 0 ~ 3 s 的位移、速度和加速度

5 开环感应电压计算及实验

5.1 开环感应电压的计算

能量收集器利用法拉第电磁感应定律将外界振动能量转换成电能。根据电磁感应定律, 线圈中的开环电压取决于线圈中磁通量的变化率如式 (10) 所示。

$$V_{oc} = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\phi}{dz} \frac{dz}{dt} = k_e(z) \cdot \frac{dz}{dt} \tag{10}$$

其中, ϕ 是穿过线圈的磁通量; $K_e(z)$ 是电磁耦合系数, 数值等于磁通量 ϕ 对 z 轴的导数。线圈总磁通量等于穿过每一匝线圈的磁通量的数值和, 即:

$$\phi = \sum_{i=1}^N \phi_i = \sum_{i=1}^N 2\pi r_i A_i \tag{11}$$

式(11)中, 对于关于 Z 轴几何对称的磁场, ϕ_i 是穿过第 i 匝线圈的磁通量, N 是线圈匝数, r_i 和 A_i 分别是相对线圈半径和磁场向量电势的圆周分量。

电磁阻尼力和感生电流成正比, 可表达为

$$f_e(z) = k_e(z) \cdot i \quad (12)$$

从式(10)和式(12)可知,电磁耦合系数是连接感应电压和电磁阻尼力的关键因素,磁力弹簧的力完全取决于电磁的性能。考虑到电磁场分布的数值解的难度,可以使用有限元的办法近似计算,沿着 Z 轴以 0.1 mm 长度对质量块进行剖分,那么电磁耦合系数可以通过下面的一般公式代替求导来计算:

$$k_e(z_j) = \frac{\phi(z_{j+1}) - \phi(z_{j-1})}{2z_\delta} \quad (13)$$

其中, z_j 是第 j 个离散点处的 z 轴位移, z_δ 是2个离散点之间的距离,在本文中等于 0.1 mm 。

5.2 实验分析

组装后的能量收集器如图6所示,进行不同输入频率振动的测试,并测得相对应的电压。实验平台的组成包括信号发生器、功率放大器、激振器、激光位移传感器、数字示波器以及U盘,如图7所示。

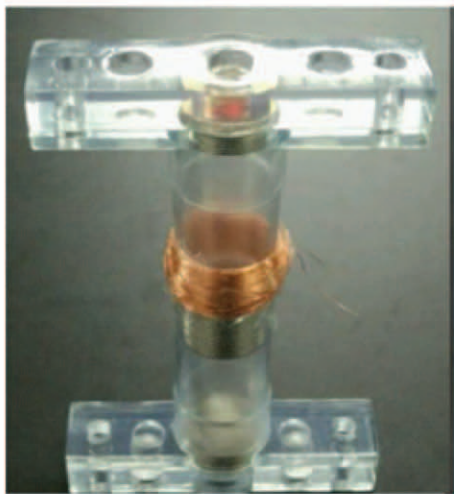


图6 2个磁力弹簧的能量收集器

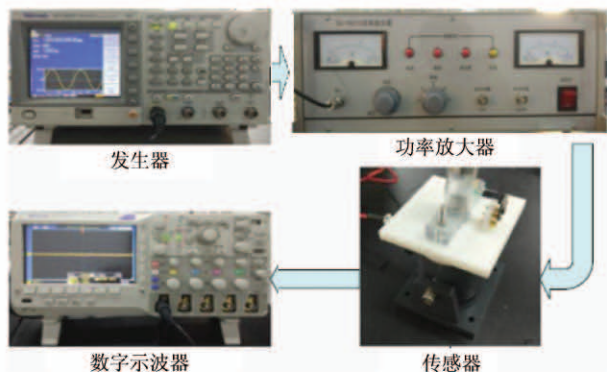


图7 实验平台

2种不同设计的壳体结构可以实现3种不同运动形式的能量收集,即只包含1个磁力弹簧,包含2个磁力弹簧且上方固定和包含2个磁力弹簧且上方悬空。因此,需要测量3种运动形式的能量收集器的开环感应电压,输入信号均为正弦信号,测量频率均为 $5\sim 40\text{ Hz}$,信号发生器产生信号的峰值均为 1 V ,相位为 0° 。下面展示几个实际测量的不同频率的开环感应电压。

根据采集到的测试数据,对数据进行相应的处理,求出3种运动形式的开环感应电压的均方根值,如图8所示。

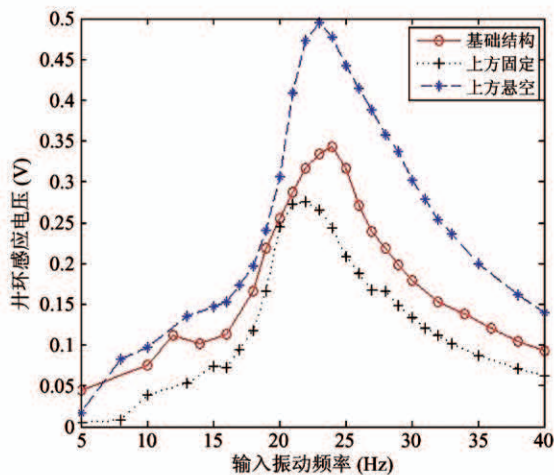


图8 3种运动形式的开环感应电压

从图8可以看出,包含2个磁力弹簧且上方悬空的结构其开环感应电压在同频率振动时最大,包含2个磁力弹簧且上方固定结构产生的开环感应电压最小,只包含一个磁力弹簧的结构开环感应电压位于中间。上方固定式结构感应电压最小,主要是因为两端都有磁力弹簧导致质量块振动的振幅变小,虽然加速了质量块回到平衡位置,但是振幅的减小对电压的削减作用大于增加的磁通量变化率对电压的增大作用,而上方悬空式的振幅削减作用小于增加的磁通量变化率对电压的增多作用,因此上方悬空结构的感应电压最大,上方固定结构的感应电压最小。

从开环感应电压与频率图可以看出,质量块的共振频率在 20 Hz 左右,此时电压最大,而两端电压均减小,成“凸”形,和共振的振动图像相似。基础

结构在振动频率为 24 Hz 时感应电压达到最大 0.3431 V,上方固定式在振动频率为 22 Hz 时感应电压达到最大 0.2751 V,上方悬空式在振动频率为 23 Hz 时感应电压达到最大 0.4942 V,可以看出 3 种结构共振频率接近,但上方悬空式的性能最好。

6 结 论

设计了一种用于低频振动环境的电磁式振动能量收集器,使用磁力弹簧代替传统螺旋弹簧,建立了振动能量收集器的振动系统和转换系统的物理模型。采用 Simulink 软件对振动能量收集器作了运动学仿真分析,得到如下结论。

(1)能量收集器输出电压和质量块振幅大小成正比相关,在共振状态下输出最大的感应电压。

(2)质量块振动运动的周期和输入振动的周期一致,质量块在运动过程中以静止时平衡位置为原点振动。

(3)进行了频率 5 ~ 40 Hz 低频振动实验,测量了 3 种运动形式在各个振动频率下的开环感应电压大小。经过测试,3 种结构的共振频率均在 23 Hz 左右,在共振频率下收集到最大的感应电压,感应电压的均方根值分别为 0.2751 V、0.3413 V、0.4942 V。在 3 种运动形式中,包含 2 个磁力弹簧且上方悬空式结构性能最好。

参考文献

[1] Wang W, Cao J, Zhang N, et al. Magnetic-spring based

energy harvesting from human motions: design, modeling and experiments [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 132(11):189-197

[2] Ren H, Wang T. Development and modeling of an electromagnetic energy harvester from pressure fluctuations [J]. *Mechatronics*, 2018, 49:36-45

[3] Geada P, Rodrigues R, Loureiro L, et al. Electrotechnologies applied to microalgal biotechnology applications, techniques and future trends [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94(6): 656-668

[4] Alevras P, Theodossiadis S. Vibration energy harvester for variable speed rotor applications using passively self-tuned beams [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 444:176-196

[5] Yang W, Towfighian S. A hybrid nonlinear vibration energy harvester [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 90(6):317-333

[6] 白世鹏,侯之超. 簧下调谐系统回收车辆垂向振动能量的可行性 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(11):1013-1020

[7] Zou H X, Zhang W M, Li W B, et al. Magnetically coupled flextensional transducer for wideband vibration energy harvesting: design, modeling and experiments [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 416(3):55-79

[8] Töreyn H, Topal E, KÜlah H. A multi-source micro power generator employing thermal and vibration energy harvesting [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 5: 1176-1179

[9] 张亚婷,丑修建,郭涛,等. 振动驱动微能源技术研究进展 [J]. *微纳电子技术*, 2012, 49(4): 242-247

[10] Truong B D, Phu Le C, Halvorsen E. Analysis of electrostatic energy harvesters electrically configured as Bennet's doublers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(16): 5180-5191

[11] Fan K Q, Chang J W, Chao F B, et al. Design and development of a multipurpose piezoelectric energy harvester [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 96: 430-439

[12] Khan F U, Ahmad I. Review of energy harvesters utilizing bridge vibrations [J]. *Shock and Vibration*, 2016(2):1-21

Simulation and analysis of an electromagnetic low vibration energy harvester

Li Xuefen*, Zhu Zhipeng**, Liu Jiansheng**

(* School of Control Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121)

(** School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

Abstract

Aiming at the low-frequency vibration energy widely present in the environment, two energy harvesters are designed to convert low-frequency vibration energy into electrical energy based on principle of electromagnetic induction. The prototype of energy harvesters are assembled with a new type of magnetic spring, transparent photosensitive resin materials, and N38 permanent magnets. The static and dynamic models of the energy harvesters are built. The simulations of the three motion modes are performed by Simulink software, and the simulation results of displacement, velocity and acceleration are obtained. Finally, a test platform is built to conduct low-frequency vibration experiments. The results show that the inductive voltage of the two magnetic springs with one unfixed upper spring has good performance.

Key words: electromagnetic, low frequency vibration, energy harvester, inductive voltage