DOI：10.19789/j.1004-9398.2022.04.007
文献引用：范媛媛，王其权，桑英军，等．基于ANSYS软件的压电和电磁复合式振动俘能器设计[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2022，43（4）：38-45. FAN Y Y，WANG Q Q，SANG Y J，et al. Design of piezoelectric and electromagnetic composite vibration harvester based on ANSYS software[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2022，43（4）：38-45.

基于ANSYS软件的压电和电磁复合式振动俘能器设计

范媛媛[1]，王其权[2]，桑英军[2*]，盛政霖[2]，董　昭[2]，尹明宇[2]，黄　飞[2]

（1. 淮阴工学院数理学院，江苏 淮安　223003；2. 淮阴工学院自动化学院，江苏 淮安　223003）

摘要：基于ANSYS软件设计了压电和电磁复合式振动俘能器，建立了压电和电磁式振动俘能器数学模型，并利用ANSYS软件对电磁场进行仿真．通过对压电式振动俘能器进行结构静力、模态与谐响应分析，得到其1阶共振频率为10.9 Hz，输出电压峰值为5.0 V.同时，对电磁式振动俘能器进行静态分析，并通过对不同位置磁感应强度的测量，计算出电磁式振动俘能器的感应电动势为2.4 V.通过复合式振动俘能器的实验，得到压电和电磁式振动俘能器输出电压的实验值分别为5.1和2.3 V，验证了仿真结果，说明压电和电磁复合式振动俘能器将压电和电磁发电方式有效地整合在一起，充分地利用了振动能．

关键词：压电；电磁；复合型；悬臂梁；俘能技术
中图分类号：TM60

Design of piezoelectric and electromagnetic composite vibration harvester based on ANSYS software

FAN Yuanyuan[1]，WANG Qiquan[2]，SANG Yingjun[2*]，SHENG Zhenglin[2]，DONG Zhao[2]，YIN Mingyu[2]，HUANG Fei[2]

（1. Faculty of Mathematics and Physics，Huaiyin Institute of Technology，Huaian Jiangsu　223003；2. Faculty of Automation，Huaiyin Institute of Technology，Huaian Jiangsu　223003）

Abstract：Based on ANSYS software，the piezoelectric and electromagnetic composite vibration energy capture device is designed，the mathematical models of piezoelectric and electromagnetic vibration energy capture device are established，and the electromagnetic field is simulated by ANSYS software. Through the structural static，modal and harmonic response analysis of the piezoelectric vibration energy trap，it is obtained that the first-order resonance frequency is 10.9 Hz and the peak output voltage is 5.0 V. At the same time，the static analysis of the electromagnetic vibration energy trap is carried out，and through the measurement of magnetic induction intensity at different positions，the induced electromotive force of the electromagnetic vibration energy trap is calculated to be 2.4 V. Through the experiment of the composite vibration capture device，the experimental value of the output voltage of the piezoelectric and electromagnetic vibration caprisoner is 5.1 and 2.3 V，respectively，

收稿日期：2021-08-25
* 通信作者：sangyingj@163.com

which verifies the simulation results, and also shows that the piezoelectric and electromagnetic composite vibration capture device effectively integrate the piezoelectric and electromagnetic power generation modes together, and make full use of the vibration energy.

Keywords: piezoelectric; electromagnetic; compound; cantilever beam; energy capture technology
CLC: TM60

0　引　言

自然界中存在着一种能源——振动能,与传统能源相比,有着得天独厚的优势.振动在生活中无处不在,虽然会产生噪声污染,但是如果能够从自然界中收集并转化为可用的能源进而对设备进行供电,一方面能够削弱振动带来的不利影响,另一方面还可以充分利用平时忽略的能源给便携式电子产品供电,此举不仅拥有巨大的发展潜力,而且应用前景广阔[1].

振动能量的采集技术主要有压电、电磁和静电式3种方式.压电式是利用相关压电材料自身的压电效应,当外作用力作用于压电材料产生形变时,压电材料会产生电荷,从而能够输出电能.压电式能量收集技术能够同机械系统集成,能量输出大,并且结构简单.电磁式主要是运用法拉第电磁感应定律进行电能输出,具有结构简单、无需启动电源的优点.而静电式主要是利用机械运动使得电容2个极板发生相对运动,改变了电容值,从而可以进行电能输出,这种方式的优点是容易与电子机械集成,并且输出电压高,但是需要外接电源[2].

为了提高能量转换效率,将多种形式的能量转换技术整合在一种结构上,进而实现高密度能量转换的技术是目前新的发展趋势.压电和电磁式2种方式可以巧妙地整合到同一结构中,由此制成的振动俘能器具备各自的优点,彰显了潜在的应用价值.对于压电和电磁式振动俘能器的研究均受到了国内外许多科研人员的关注:Wang等[3]将压电与电磁式2种能量收集技术结合起来,实现了复合式振动俘能器,此俘能装置为悬臂梁结构,末端采用四极磁铁排列,外界振动发生时实现电能的收集,实验结果证实,通过有效地集成压电与电磁能量收集,可以产生比单一能量收集更多的能量;Sang等[4]应用电磁转换理论和压电耦合效应,搭建了振动能量俘能器件测试系统,验证了多种混合式能量收集技术的可行性,实验结果显示,复合式能量收集装置的输出电流更大,能量转换效率更高;Abohamer等[5]研究了压电和电磁装置动态系统,建立2个新模型,研究并讨论了激发振幅、阻尼系数和不同频率对能量采集设备输出的影响,通过频率响应曲线的稳定性和不稳定范围,对调制方程进行非线性稳定性分析.

结合上述3种振动能量收集方式的优缺点,并考虑实验的可行性,本文采用了将压电和电磁2种技术结合起来发电的方式,对压电和电磁复合式振动浮能器的模型进行了仿真与实验测试.

1　系统结构及数学模型

1.1　系统结构及原理

压电式振动俘能器主要是利用压电材料的正压电效应,当有外部机械应力对压电材料作用并使其发生形变,使得材料极化在2个表面产生异号电荷,反之是逆压电效应.最初的压电材料并不具有压电效应,只有被直流电场极化才能具有这一特性.压电材料的正压电效应如图1所示.当在压电材料表面施加外力($\boldsymbol{F}$)时,压电材料2个表面距离变小,并且使得极化强度变小,个别吸附在电极上的电子会被释放出去,从而在表面形成正负自由电荷.相反地,当外力消失后,极化强度变大,使得电极又会吸附电子从而出现充电现象.

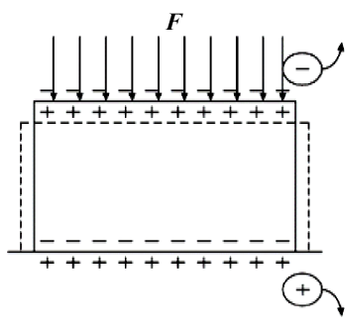


图1　压电材料的正压电效应示意

电磁式振动俘能器是由永磁体和感应线圈构成的装置,利用法拉第电磁感应定律将机械能转化为电能.法拉第电磁感应定律的表述为:当处于闭合回路中的磁通量发生改变时,就会在闭合回路中

产生感应电动势,感应电动势的大小与磁通量的变化率相等,表达式为

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}, \tag{1}$$

式中:ε表示感应电动势,Φ表示磁通总量.

1.2　数学模型

1.2.1　压电式振动俘能器数学模型

压电振子的结构对压电式振动俘能器发电性能起着决定性作用,但是在实际使用中结构的大小是受限制的,因此需要建立相关数学模型,并且进行相关仿真以确定结构参数的最优值.单层压电片悬臂梁振动结构[6-7]如图2所示.

本文采用的压电式悬臂梁满足欧拉-伯努利微分方程.由压电效应可知,当悬臂梁振动结构的右端(即自由端)在施加外力时,此结构会发生形变,从而会在压电材料内部产生自由电荷.由于作用的是单层压电片结构,支撑板与压电片的弹性模量不一样,并且从几何中心可知其并不是一个对称结构,最终算出Z轴上中性层到支撑板距离为[8]

$$z_c = \frac{h_s^2 c_p^E - h_p^2 c_{11}^E}{2(h_p c_{11}^E + h_s c_p^E)}, \tag{2}$$

式中:c_p^E和c_{11}^E分别表示支撑板和压电层的弹性系数;h_s和h_p分别表示压电材料和支撑板的厚度.假设E_p和E_s分别表示支撑板和压电层的弹性模量,则$c_{11}^E = 1/E_s$,$c_p^E = 1/E_p$.

压电体所受应力及产生电场的关系可表示为:

$$\boldsymbol{S} = c_{11}^E \boldsymbol{T} - d_{31}\boldsymbol{E}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{D} = -d_{31}\boldsymbol{T} + s_{33}\boldsymbol{E}, \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{D}$和$\boldsymbol{E}$分别表示应变、应力、电位移和电场,d_{31}和s_{33}分别为横向压电系数和相对介电数.

现将h_s和支撑板与单层压电片的总厚度(H)的比值定义为厚度比[9],表示为$\alpha = \frac{h_s}{H}$,弹性模量可以表示为$\beta = \frac{E_p}{E_s}$,并且压电材料的电压常数是g_{31},最终得到单层压电片悬臂梁的输出电压表达式为

$$U_s = -\frac{3\alpha(1-\alpha)\beta g_{31} L}{[\alpha^4(1-\beta)^2 - 2\alpha(2\alpha^2 - 3\alpha + 2)(1-\beta) + 1]WH}. \tag{5}$$

式中:L表示悬臂梁的长度,W表示支撑板与单层压电片的宽度.

当压电式振动俘能器所处环境的振动频率与压电片悬臂梁的固有频率相同(即共振)时,此装置的输出电压最大,最终得到此装置的固有频率表达式

$$f_s = \frac{\lambda_i H}{4\pi L^2}\sqrt{\left\{\frac{E_s[\beta^2\alpha^4 + 2\beta(2\alpha + 3\beta^2) + 1]}{3\rho_s[(1+\alpha)^2(\alpha q + 1)(\alpha\beta + 1)]}\right\}}, \tag{6}$$

式中:λ_i表示频率系数,即表示每1阶的频率(本文取1阶频率);$q = \frac{\rho_s}{\rho_p}$表示曲率比,其中$\rho_s$表示压电材料曲率,$\rho_p$表示支撑板曲率.

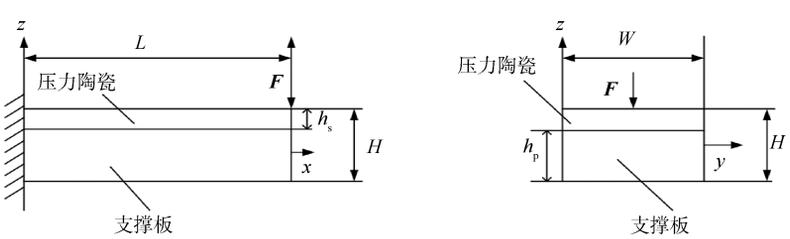
在实际生产和生活中要得到更高的输出电压,则需要考虑相关结构的固有频率,本文使用建模与仿真的悬臂梁是自由端固定一个质量块的模型,对于质量均匀分布且带有质量块的压电式悬臂梁的固有频率表示为

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m + m_a}}, \tag{7}$$

式中:m表示压电悬臂梁的有效质量,k表示单压电片悬臂梁的刚度系数,m_a表示质量块的有效质量.根据铁木辛柯悬臂梁理论,当m=0.24M,M表示悬臂梁的实际质量,此时单压电片悬臂梁的刚度系数为$k = \frac{\boldsymbol{E}H^3 W}{4L^3}$.

1.2.2　电磁式振动俘能器数学模型

在实际生产中的许多方面都需要对电磁场进



注:h_p表示支撑板的厚度;h_s表示压电材料的厚度;$\boldsymbol{F}$表示作用在悬臂梁端部的力;H表示支撑板与单层压电片的总厚度;L表示悬臂梁的长度;W表示支撑板与单层压电片的宽度.

图2　单层压电片悬臂梁振动结构二维示意

(a)正视;(b)侧视

行分析,利用ANSYS软件进行仿真[10],创建的电磁式振动俘能器三维立体如图3所示.图3中的永磁体(即压电式振动俘能器中的质量块)位于铜线圈的正上方,悬臂梁在1阶频率下振动时,是在线圈垂直的平面里上下振动,此时永磁体的电磁极化方向沿着其圆柱体轴线.当电磁式振动俘能器受外力作用振动时,压电悬臂梁带动永磁体上下振动,在永磁体运动时,线圈中的磁通量会发生变化,根据法拉第电磁感应定律得到线圈中感应电动势的表达式为

$$E = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -NS\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}, \tag{8}$$

式中:N表示线圈的匝数,Φ表示每匝线圈所穿过的磁通量,$\boldsymbol{B}$表示磁感应强度.通过式(8)可知,永磁体的磁感应强度、结构的尺寸参数以及永磁体到线圈的距离都能够决定线圈最终的磁感应强度.

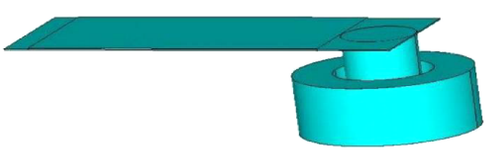


图3　电磁式振动俘能器三维立体

2　仿真分析

ANSYS模型的创建主要由建立实体模型、定义节点与单元的属性、对实体划分网格等内容构成.模型的建立有直接法与间接法:直接法主要运用于一些简单的结构建模,此方法是根据节点与单元来创建模型;间接法主要运用于面、体结构较多的复杂模型中.本文使用间接法,采用自底向上和自顶向下建立几何模型的方法.

结构的静力分析是为了分析出那些始终固定不变的载荷施加在结构上时的响应,这种分析方法不会考虑到结构在实际使用中的惯性以及材料的阻尼,但是能够分析出重力等载荷对结构的响应[10].本研究考虑重力时的静力分析,在结构里Z轴反方向上施加一个9.8 m/s^{2}的加速度,最终进行求解分析,压电式振动俘能器结构静力分析如图4所示.在自身的重力作用下,右端质量块的右下脚位置的位移最大,因此,在实物制作时质量块的质量不宜太大,以防止压电层过度弯曲损坏.由图4(c)可知,在悬臂梁的最左端(即固定端)所受到的应力最大,表明此处在受力时最容易损坏甚至断裂,这在后期的分析中需要特别注意.

在ANSYS软件中运用模态分析能够确定结构的各阶振型和固有频率,该参数对后续的结构设计与优化非常重要.本文结构在固有频率时能够产生较大的输出电压,所以进行模态分析时很有必要.进行模态分析使用最基本的Block Lanczos方法.压电式振动俘能器模态分析前4阶频率应力的实验结果如图5所示.每阶频率为结构不同的固有频率,并且振动频率随着阶数的增高不断变大,相邻两阶的固有频率相差较大.在实际生活中,所研究的结构大部分都使用在频率较低的场所,所以后期的数据处理主要考虑1阶频率附近的频率对输出电压的影响.

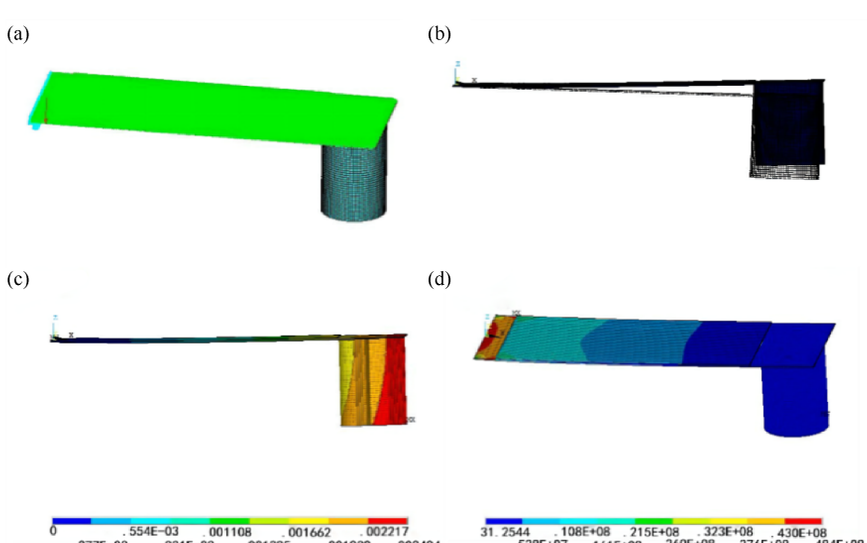


图4　压电式振动俘能器结构静力分析

(a)压电式振动俘能器施加重力;(b)静态位移示意;(c)静态应力示意;(d)静态von Mises等效应力分布

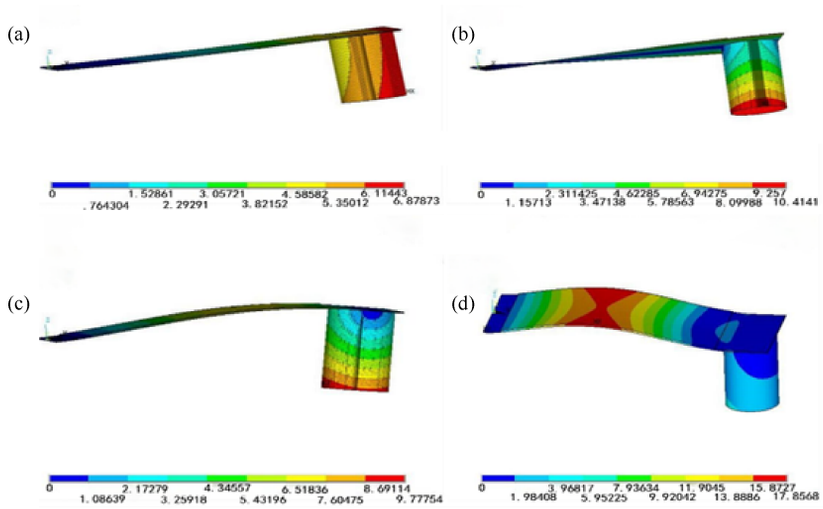


图5　压电式振动俘能器模态分析前4阶频率应力

(a)1阶;(b)2阶;(c)3阶;(d)4阶

在前4阶的振动固有频次基础上进行谐响应分析.对结构进行谐响应分析的一般方法是缩减法、模态的叠加法以及本文使用的完全法.通过基本的谐响应分析能够得到结构在各种频率下的分析结果,如位移、应力以及施加电极层后得到的电压.该分析主要是为了确认在输出电压为最大值时的频率是否为之前的1阶固有频率,并且为结构优化等打下基础.本文分析了频率在3.0~21.0 Hz的响应结果,并且设置频率子步(即处理结果的数目)为10,悬臂梁结构的恒定阻尼比为0.02.规定材料的阻尼是为了防止装置在固有频率振动时产生共振导致响应较大,有可能引起装置的损坏.谐响应分析是为了得到振动俘能器在不同低频下的电压输出性能,最终实验时需要在最左端的固定处通过激振器施加一个9.8 m/s^{2}的加速度,从而模拟外部环境的振动频率.压电式振动俘能器振动频率与输出电压关系如图6所示.压电式振动俘能器的输出电压峰值为5.0 V,其1阶共振频率为10.9 Hz.

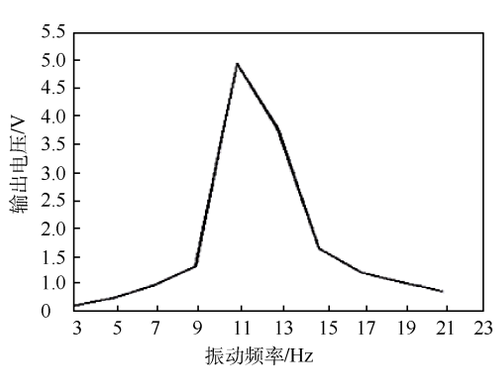


图6　压电式振动俘能器振动频率与输出电压关系

在实际生产中需要对电磁场进行分析,如电动机、衔铁发电机和无线充电器等,大多数要分析磁场作用对产品的性能影响.总体来说,电磁场的分析方法有二维和三维电磁场的静态、谐波和瞬态分析法.其中三维静态分析法能够使用标量法、矢量法以及棱边单元法,谐波分析法与瞬态电磁场分析法可以使用矢量法和棱边单元法进行分析.

由于电磁式振动俘能器是一个轴对称结构,最终决定取其截面进行二维电磁场分析,此方法不仅能够更好地观察到永磁体的磁场分布情况,而且理论分析比较简单,运算量较少.对电磁式振动俘能器进行静态分析[11],并通过对不同位置的磁感应强度的测量,利用公式计算出感应电动势为2.4 V.这些参数是分析结果与结构优化的基础,对结构的输出性能起着决定性作用.电磁式振动俘能器的仿真设计如图7所示.图7(c)是在ANSYS软件中对电磁式结构的二维结构进行静态分析,得到二维模型结构的磁感线分布,本文选择具有代表性的9条磁感线,数量在后期处理图像前可以调节.

电磁式振动俘能器模型结构不同柱体大小的磁感线分布如图8所示.磁感线在永磁体的外径边界处密度最大,在永磁体的外部,距离永磁体的距离越远,磁感线的分布越稀疏.当距离较大时,磁感线将会消失,磁场强度变为0.所以,最终要考虑永磁体中心与线圈中心的距离,选择磁感线密度较大的地方,对于装置的输出有较大影响.

电磁式振动俘能器二维结构的磁感应强度如图9所示.磁通量密度在靠近永磁体的区域比较大,

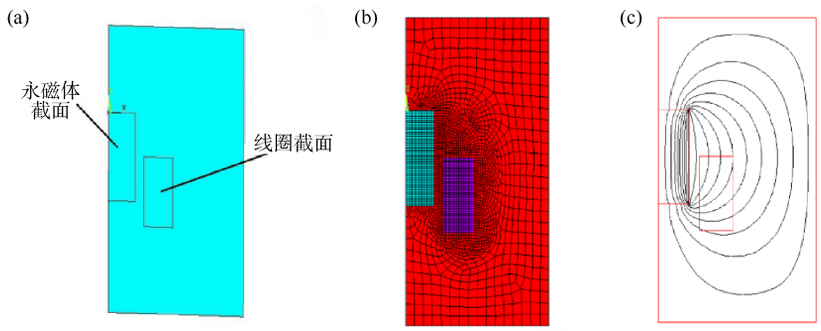


图7　电磁式振动俘能器的二维仿真设计
(a)二维模型;(b)二维模型划分网格的图形;(c)磁感线分布

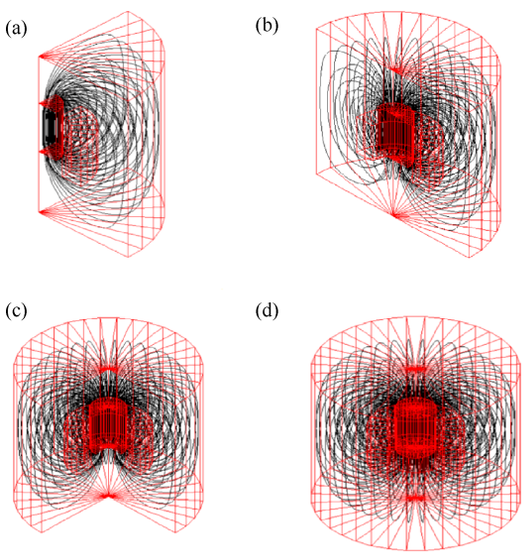


图8　电磁式振动俘能器模型不同柱体大小的磁感线分布
(a)1/4;(b)1/2;(c)3/4;(d)1

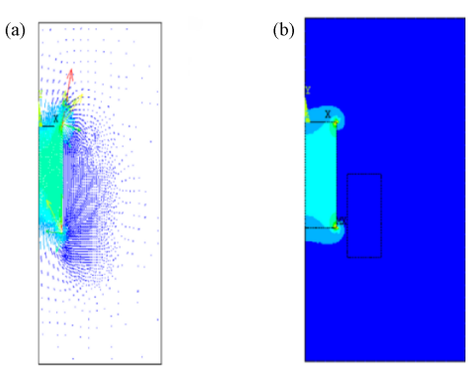


图9　电磁式振动俘能器二维结构的磁感应强度
(a)磁感应强度矢量;(b)磁感应强度等值云

随着到永磁体的距离增大不断变大.由式(8)可以得到电磁式振动俘能器在振动时的等效输出电压.在ANSYS软件的电磁场分析部分并不能够直接仿真出线圈的电压输出值,但是可以对其多个位置进行静态分析,得到不同位置的磁感应强度相对于时间的变化率,能够等效于线圈感应电动势的仿真值,通过计算可以近似地得到最终仿真的电压输出值为2.4 V.

对压电式振动俘能器进行结构静力、模态与谐响应分析,得到其1阶共振频率为10.9 Hz,其输出电压峰值为5.0 V.同时,对电磁式振动俘能器进行静态分析,并通过对不同位置的磁感应强度的测量,利用公式计算出电磁式振动俘能器的感应电动势为2.4 V.这些参数是分析结果与结构优化的基础,对结构的输出性能起着决定性的作用.

3　实验设置与分析

3.1　复合式振动俘能器系统的搭建

本文所采用的压电和电磁复合式振动俘能器实验装置如图10所示.实验采用的悬臂梁材料为铜[12-13],长度为80.0 mm,宽为30.0 mm,厚度为0.3 mm.压电片的压电材料是PZT-5H,其大小为:长60.0 mm,宽30.0 mm,厚度0.2 mm.质量块材料是带有磁性的复合材料圆柱体,其大小为:截面半径7.5 mm,高20.0 mm.制作时需要先擦干净准备的材料,以防止材料上面的污渍对后面使用与性能测试产生影响.本文所使用的压电层为单层压电片,需要用胶水将压电片与悬臂梁、悬臂梁铜右端下方的质量块粘贴到一起,形成一个整体.质量块不能有晃动和粘贴偏移的现象,否则都会对实验结果产生影响,导致实验所测数据不准确.使用的绕制线圈的材料为铜,导线的直径为0.1 mm,所需绕制的匝数为7 577匝.最终绕制成的线圈规格是:内圈直径20.0 mm,外圈直径36.0 mm,线圈高度16.0 mm.

3.2　复合式振动俘能器系统发电性能的实验研究

压电和电磁复合式俘能器发电系统的发电实验旨在对整个复合发电结构的发电性能进行分析,测试谐振状态下压电悬臂梁的输出电压、电磁感应

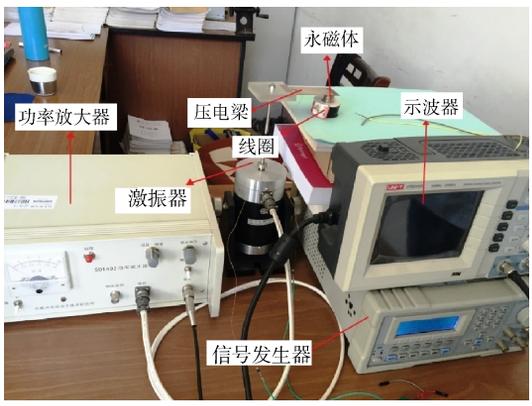


图10　压电和电磁复合式振动俘能器实验装置

线圈的输出电压以及系统的输出电压,在一定小微型负载中用以验证解析模型的正确性[14].压电和电磁复合式振动俘能器的实验系统如图11所示.实验的具体操作步骤如下:

(1)将压电悬臂梁的左端固定在激振器上,然后将电磁线圈安放在右端质量块的正下方,质量块下平面与线圈的上平面相齐平.然后连接数据采集卡和功率放大器构成一个回路.

(2)输出模拟信号发生器的信号到功率放大器上,信号处理后进入激振器,使其按照所设定的值运动,模拟实际生活环境.

(3)随着激振器的振动,整个结构也开始振动,



图11　压电和电磁复合式振动俘能器实验系统

从而压电悬臂梁与线圈同时工作发电,最终将压电与电磁的输出信号输入到采集卡中,并在电脑上显示.

通过实验可知,对于压电悬臂梁和电磁线圈,都是工作在共振频率状态,共振频率为10.1 Hz,与仿真值基本相符.分析表明,因为理论与实际存在误差,导致实验数据与仿真值略有不同.压电和电磁振动俘能器工作在共振频率下的电压峰值分别约为5.1和2.3 V,实验结果与仿真值基本相符.

实验结构在开路状态下压电和电磁输出电压峰值与振动频率的关系如图12所示.压电输出电压峰值在振动频率(即固有频率)为10.4 Hz时最大,为5.1 V;电磁输出电压峰值在振动频率(即固有频率)为10.4 Hz时最大,为2.3 V.实验所测得的固有频率为10.4 Hz,与仿真得到的10.9 Hz相差不大,在误差范围之内.

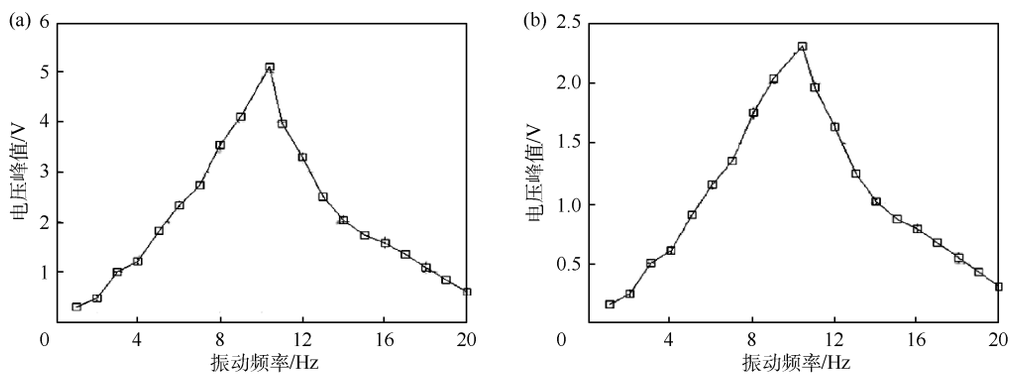


图12　压电和电磁输出电压峰值与振动频率的关系

(a)压电输出;(b)电磁输出

4　结　论

本文对压电和电磁复合式振动俘能器进行了详细介绍与分析,设计了俘能器的具体结构,并对其结构进行有限元仿真,通过实验测试与模拟仿真进行验证.利用ANSYS软件对压电和电磁式振动俘能器二者的模型进行了有限元仿真,得到结构的固有频率,以及2个俘能器的输出电压峰值分别为5.0与2.4 V.搭建了压电和电磁复合式振动俘能器的实验系统,并且进行相关实验测试,得到压电与电磁式振动俘能器的输出电压的实验值分别为5.1和2.3 V,与仿真模拟值的相差在误差范围内,表明了仿真结果的正确性.

参 考 文 献

[1] 阚君武,唐可洪,王淑云,等.压电悬臂梁发电装置建模

与仿真分析[J].光学精密工程,2008,16(1):71-75.
[2] 赵兴强,温志渝.基于压电材料的振动能量收集器的谐振频率调节[J].压电与声光,2013,35(2):241-244.
[3] WANG H Y, TANG L H, GUO Y, et al. A 2DOF hybrid energy harvester based on combined piezoelectric and electromagnetic conversion mechanisms[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering),2014,15(9):711-722.
[4] SANG Y J, HUANG X L, LIU H X, et al. A vibration-based hybrid energy harvester for wireless sensor systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):4495-4498.
[5] ABOHAMER M K, AWREJCEWICZ J, STAROSTA R, et al. Influence of the motion of a spring pendulum on energy-harvesting devices[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18):2076-3417.
[6] HIBBELER R C. Mechanics of materials [M]. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall Publisher, 2005.
[7] 陈定方,孙科,李立杰,等.微型压电能量收集器的研究现状和发展趋势[J].湖北工业大学学报,2012,27(4):1-8.
[8] 张旭辉,赖正鹏,吴中华,等.新型双稳态压电振动俘能系统的理论建模与实验研究[J].振动工程学报,2019,32(1):87-96.
[9] 袁江波,单小彪,谢涛,等.悬臂梁单晶压电发电机的实验[J].光学精密工程,2009,17(5):1072-1077.
[10] 马小青,李帅波,王喃喃.复合式压电悬臂发电梁设计与实验分析[J].仪表技术与传感器,2019(10):8-11.
[11] 程光明,李新辉,张海滨,等.悬臂式压电双晶片振子夹持长度变化对其动态特性的影响[J].光学精密工程,2014,22(5):1296-1303.
[12] 房立清,张磊.单晶压电悬臂梁等效黏性阻尼建模与实验[J].光学精密工程,2014,22(3):641-648.
[13] 芮小博,李一博,曾周末.压电悬臂梁振动能量收集器研究进展[J].振动与冲击,2020,39(17):112-123.
[14] 关世伟.梁式结构压电:电磁复合俘能技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

(责任编辑:兰丽丽)

(上接第32页)

[55] CAI J M, RUFFIEUX P, JAAFAR R, et al. Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons [J]. Nature, 2010, 466(7305):470-473.
[56] BORRIELLO I, CANTELE G, NINNO D. Graphene nanoribbon electrical decoupling from metallic substrates [J]. Nanoscale, 2013, 5(1):291-298.
[57] JIA X T, HOFMANN M, MEUNIER V, et al. Controlled formation of sharp zigzag and armchair edges in graphitic nanoribbons[J]. Science, 2009, 323(5922): 1701-1705.
[58] JIA X T, CAMPOS-DELGADO J, TERRONES M, et al. Graphene edges: a review of their fabrication and characterization[J]. Nanoscale, 2011, 3(1):86-95.
[59] BERGER C, SONG Z M, LI T B, et al. Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2004, 108(52):19912-19916.
[60] EZAWA M. Peculiar width dependence of the electronic properties of carbon nanoribbons[J]. Physical Review B, 2006, 73(4):045432.
[61] ZHANG Z Z, CHANG K, CHAN K S. Resonant tunneling through double-bended graphene nanoribbons [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(6):062106.
[62] WANG Y, YANG S A, QIAN N. Edge states in graphene: from gapped flat-band to gapless chiral modes [J]. Physical Review Letters, 2009, 102(9):096801.
[63] GUNLYCKE D, WHITE C T. Graphene valley filter using a line defect[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(13):136806.
[64] XU H Y, HEINZEL T, ZOZOULENKO I V. Edge disorder and localization regimes in bilayer graphene nanoribbons[J]. Physical Review, 2009, 80(4):045308.
[65] 姜鹏程.边界态对双层石墨烯的电导和谷极化的影响[D].石家庄:河北师范大学,2013.
[66] 刘丽丽,龙文.线缺陷对扶手型石墨烯纳米带能隙的调控[J].首都师范大学学报(自然科学版),2016,37(1):20-26+29.
[67] 刘爽,龙文.线缺陷对锯齿型石墨烯带能谱和边态的调控[J].首都师范大学学报(自然科学版),2018,39(1):21-29.

(责任编辑:兰丽丽)