

磁耦合式压电振动发电机的试验与分析

阚君武^{1,2}, 王 凯¹, 王 进¹, 张忠华^{1,2}, 费 翔¹, 王淑云^{1,2}

(1. 浙江师范大学精密机械与智能结构研究所, 浙江 金华 321004;
2. 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室, 浙江 金华 321004)

摘要: 为提高环境适应性和可靠性, 提出一种基于组合换能器的磁耦合式压电振动发电机, 该发电机由纵振的耦合器和横摆的组合换能器构成。建立了组合换能器和磁力的 COMSOL 有限元模型, 并进行了仿真分析, 获得了组合换能器簧片长度比、厚度比及磁铁间距对发电机输出性能的影响。在此基础上, 选取较佳的结构参数(长度比为 0.57、厚度比为 2), 设计制作了样机并进行了试验测试, 获得了激励磁铁和受激磁铁间横向距离 L_x 、纵向距离 L_y 、竖向距离 L_z 及负载电阻对发电机输出性能的影响规律。结果表明: 激励频率 $f < 20$ Hz 时, 存在两个较佳谐振频率(由小到大分别记为 f_{n1} 和 f_{n2}), 使输出电压出现峰值。谐振频率及其所对应的电压峰值均随 L_x 、 L_y 及 L_z 的变化而变化, 故合理选择激励磁铁和受激磁铁间距可降低 f_{n1} 、提高 f_{n2} 及增大输出电压, 有效提高发电机的带宽和环境适应性。存在最佳负载电阻使发电机输出功率达到最大, $f = 11$ Hz, $R = 540$ k Ω 时所获得的最大输出功率达 0.19 mW。

关键词: 磁耦合; 组合换能器; 间接激励; 压电; 振动发电机

中图分类号: TM619; TN384 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)04-0887-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.012

引 言

随着车载式传感器、可穿戴设备的飞速发展和广泛使用, 其供能问题也越发突显。传统的电池存在着易造成污染、需定期更换等缺点, 布线输电方式存在着成本高、易损坏等问题。因此, 基于电磁、摩擦电、热电及压电等原理的发电机研究成为自供电研究领域的热点^[1-4]。压电发电机因其能量密度高、结构简单、体积小及无电磁干扰等优点已成为能量转换的一种重要方式。根据能量来源形式压电发电机大致可分为压电振动发电机^[5]、压电旋转发电机^[6]、压电流体发电机^[7]。

振动能无处不在, 具有较高的能量密度且不易受天气等因素影响, 因此近年来压电振动发电机被广泛研究。现今最普遍使用且高效的压电振动发电机是悬臂梁结构的。根据其受激励方式, 大致可分为两类: ①直接激励式^[8-10], 利用同向振动直接作用于单/阵列/异形压电振子上, 这类发电机结构简单, 体积小, 但压电振子在外激励振幅较大时易变形过大或在承受交变拉压应力时易破损; ②间接激励式^[11-12], 主要利用磁力或弹簧结构间接激励, 传递振动能量, 此方法相较于直接激励式提高了可靠性和

使用寿命, 但存在额外的能量转换, 能量转换效率一般低于直接激励式。

上述两类振动发电机的环境适应性和可靠性都存在提高空间。振动发电机的发电量与其振动频率的立方成正比^[13], 低频意味着功率密度低, 国内关于低频振动发电机的研究成果远少于中高频压电发电机。然而, 自然界的大多数环境是低频的^[14-15], 例如人或动物运动(~ 1 Hz)、大型工程机械振动(< 10 Hz)和车辆振动(< 20 Hz), 而单体压电振子基频(数千或上万赫兹)远高于自然环境, 因此环境适应性强的压电发电机研究为压电俘能的研究热点^[16]。

为提高压电振动发电机的环境适应性和可靠性, 本文提出一种基于组合换能器的磁耦合式压电振动发电机。利用组合换能器替代单体压电振子, 建立组合换能器和磁力的 COMSOL 有限元仿真模型, 探究组合换能器簧片长度比、厚度比及磁铁间距等结构参数对发电机输出性能的影响规律。在此基础上设计制作样机并进行试验测试, 以探究磁铁空间排布(激励磁铁和受激磁铁间距离在 x 轴、 y 轴及 z 轴方向的投影)对发电机输出性能的影响。为构造环境适应性强、可靠性高的压电振动发电机后续研究提供借鉴。

收稿日期: 2020-12-01; **修订日期:** 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877199, 52077201); 浙江省重点研发计划项目(2021C01181); 浙江省自然科学基金资助项目(LY20F010006); 国家级大学生创新创业训练计划(201810345037)。

1 压电发电机结构及工作原理

基于组合换能器的磁耦合式压电振动发电机结构原理如图1所示,由耦合器和组合换能器两部分组成。耦合器由纵振簧片及自由端安装的激励磁铁构成,纵振簧片根部固定在基座上并可实现纵向(环境激励方向)弯曲振动;组合换能器由横摆簧片、横摆簧片自由端安装的受激磁铁及两侧安装的压电振子构成,横摆簧片和压电振子可实现横向的弯曲振动。压电振子为平直结构,压电振子与横摆簧片的根部固定在基座上,端部安装的顶块(可调节压电振子预弯量)顶靠在横摆簧片上,并使压电振子产生预弯变形;压电振子预弯可使其在横摆簧片往复振动时单向变形,且始终承受压应力(不承受拉应力或拉应力较小),从而提高了发电机的可靠性。激励磁铁和受激磁铁同性磁极相对安装。

为便于描述,激励磁铁和受激磁铁间距离在 x 轴、 y 轴及 z 轴方向的投影分别称为磁铁间横向距离 L_x 、纵向距离 L_y 及竖向距离 L_z 。在仿真分析中, L_x 称为轴向距离 x_m , L_y 和 L_z 统称为径向距离 y_m 。

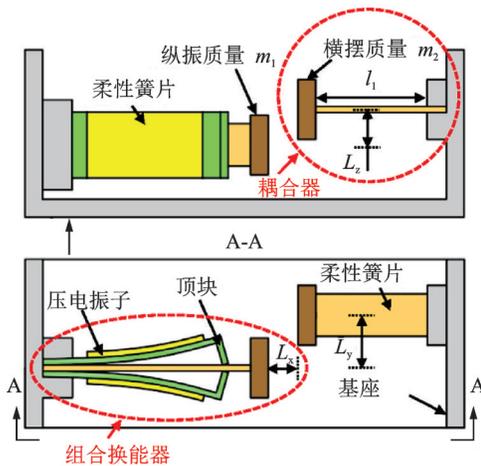


图1 压电发电机结构原理图

Fig. 1 Structure and working principle of PEH

耦合器受环境振动激励而产生纵向振动时,激励磁铁和受激磁铁间的相互位置及耦合作用力发生变化,从而迫使横摆簧片及其两侧的压电振子产生横向弯曲振动,压电振子弯曲变形时将机械能转换成电能。

由发电机工作原理可知:发电机的输出特性由组合换能器和耦合器共同决定。组合换能器的输出特性由横摆簧片长度、簧片宽度及磁铁间距等参数共同决定,实际工作中可通过参数设计来调节发电机的性能,从而提高发电机的环境适应性。

2 理论建模及仿真分析

2.1 组合换能器的有限元建模与仿真分析

图2为组合换能器几何模型简图,为便于描述,将压电振子长度与横摆簧片长度的比值定义为长度比 α ($\alpha = l_p/l_2$),将压电振子厚度与横摆簧片厚度的比值定义为厚度比 β ($\beta = b_p/b_2$),其中压电振子为压电陶瓷和基板组成的整体,故厚度比中压电振子厚度为压电陶瓷和基板厚度之和。

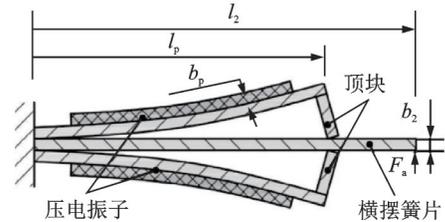


图2 组合换能器几何模型

Fig. 2 Model of the combined transducer

根据机械振动理论,组合换能器的振动响应与激励频率有关,当激励频率与组合换能器固有频率接近时,发电机将会发生共振,此时压电振子振幅最大、发电机发电效果最好。本文建立了组合换能器的COMSOL有限元仿真模型,研究其固有频率与结构参数的关系,以便根据环境激励频率选取合适参数,提高发电机的环境适应性。仿真参数如表1所示,试验与仿真所用参数相同。

表1 组合换能器结构尺寸与仿真参数

Tab. 1 The main structure of combined transducer

参数	量值
横摆簧片尺寸 $l_2 \times a_2 \times b_2 / \text{mm}^3$	70 × 20 × 0.3
基板材料	铍青铜
激励频率/Hz	5
压电陶瓷材料	PZT-4
组合换能器等效阻尼 C_2	0.24
压电振子刚度 $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	356
压电振子尺寸 $l_p \times a_p \times b_p / \text{mm}^3$	40 × 30 × 0.6
压电陶瓷尺寸 $l_k \times a_k \times b_k / \text{mm}^3$	24 × 30 × 0.3
基板尺寸 $l_p \times a_p \times b_m / \text{mm}^3$	40 × 30 × 0.3
静力载荷 F_a / N	1

图3给出了组合换能器的前四阶振动模态,其所对应的固有频率分别为25, 99, 179及414 Hz。由图可知:一阶振型为弯曲形态,二阶振型为扭曲形

态,三阶和四阶为多阶弯曲形态。组合换能器中横摆簧片的各阶弯曲变形均可迫使压电振子变形发电。因此,利用组合换能器替代单体压电振子构造振动发电机更具优势,尤其是可通过改变横摆簧片结构参数降低其固有频率,以适应低频甚至超低频振动环境,从而提高发电机的环境适应性。

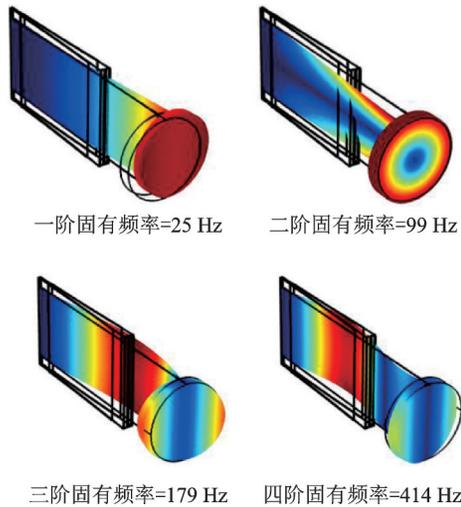


图 3 组合换能器应力分布对比图

Fig. 3 Vibration mode simulation diagram of combined transducer

图 4 为横摆簧片端部承受力载荷作用时横摆簧片端点和夹持点变形量与力载荷的关系曲线。由图可知,端部载荷力小于 1 N 时(材料弹性极限内),横摆簧片端点和夹持点变形量均与端部载荷力线性正相关,故可用横摆簧片端部变形量表征压电振子的变形量。

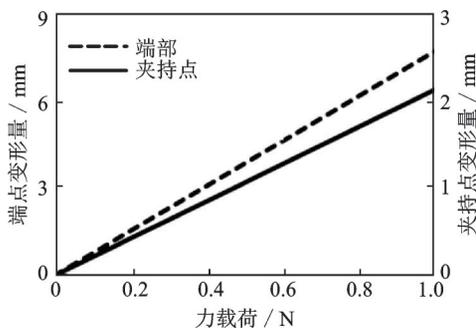


图 4 力载荷对端点和夹持点变形量的影响曲线

Fig. 4 Curve of influence of force load on deformation of end point and clamping point

图 5 为长度比对端部和夹持点变形量的影响曲线。由图可知,横摆簧片端部变形量随长度比的增加而减小,减幅先缓后急;夹持点变形量随长度比的增加后减少,存在较佳长度比使夹持点变形量较大;当长度比趋近 1 时,端部变形量与夹持点变形量趋近相等。

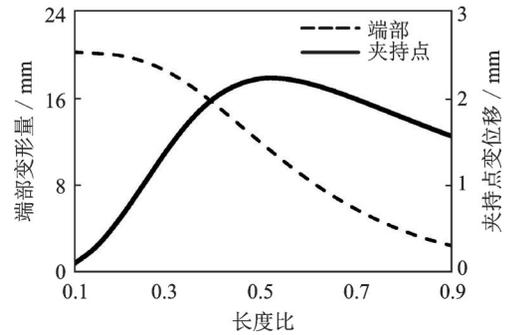


图 5 长度比对端点和夹持点变形量的影响曲线

Fig. 5 Curve of influence of α on the deformation of end point and clamping point

图 6 为厚度比对端部变形量和夹持点变形量的影响曲线。由图可知,随着厚度比增加,端部变形量呈指数关系增加,而夹持点变形量呈近似线性关系增加。

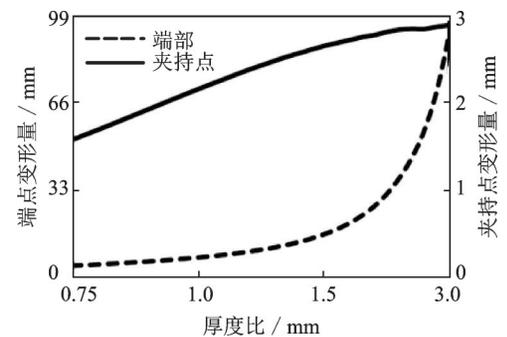


图 6 厚度比对端点和夹持点变形量的影响曲线

Fig. 6 Curve of influence of β on the deformation of end point and clamping point

由研究结果可知,选取合适的长度比(0.5~1)和较大的厚度比(1.5~3)可以增加压电振子端部变形量,提高发电机的发电能力;选取较小厚度比(0.75~1.5),可提高组合换能器的承载能力及可靠性。故实际问题中可根据应用环境选择合适的结构参数,提高发电机的环境适应性。

2.2 磁力建模与仿真分析

对于发电机而言,磁力过大会导致其可靠性降低,磁力过小会导致其发电能力降低。理论上,磁铁间距离对磁力有影响,但激励磁铁和受激磁铁间存在非线性的耦合关系,难以通过简单的计算获得磁力与磁铁间距的关系。为了研究磁力与磁铁间距的关系,建立了如图 7 所示的磁力模型,其中激励磁铁和受激磁铁的尺寸完全相同且同性磁极相对。仿真参数设置如表 2 所示,试验与仿真所用磁铁参数一致。

图 8(a)为磁铁轴向距离 $x_m=10$ mm,径向距离 $y_m=0$ 时的磁势云图,图 8(b)为磁铁轴向距离 $x_m=10$ mm,径向距离 $y_m=10$ mm 时的磁势云图。定义激励磁铁和受激磁铁间的正作用力为斥力,负作用力为吸力。

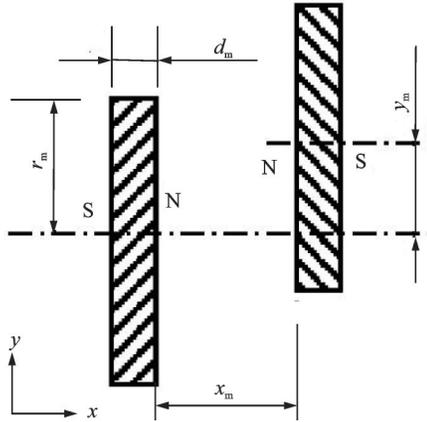


图7 磁力模型简图

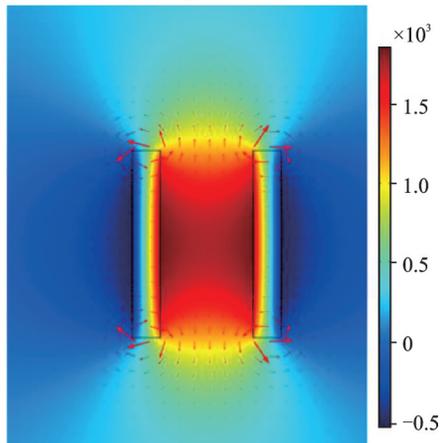
Fig. 7 Magnetic force model

表2 磁力仿真参数表

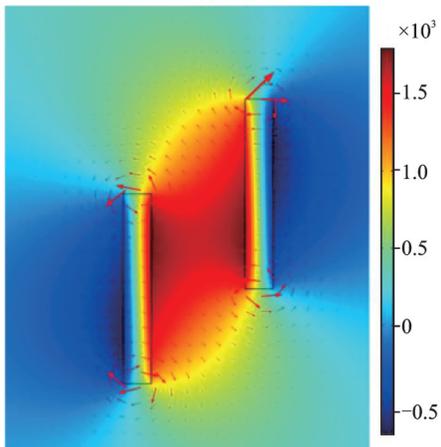
Tab. 2 The main simulation parameters of magnetic force

参数	量值
磁铁半径 r_m /mm	10
磁化强度/($A \cdot m^{-1}$)	850000
磁铁轴向距离 x_m /mm	5
磁铁厚度 d_m /mm	3
磁极排布方式	同磁极相对
磁铁径向距离 y_m /mm	0

表面：标量磁势(A)；面上箭头：磁通密度



(a)



(b)

图8 磁势云图

Fig. 8 Magnetic potential cloud picture

图9为磁铁径向距离 $y_m=0$ 时,磁力与轴向距离 x_m 的关系曲线。由图可知,激励磁铁和受激磁铁轴线重合时,磁力轴向分量随着轴向距离的增加而呈指数关系减小,而磁力径向分量却始终为零,合力在数值上等于两个分量平方和的算术平方根^[19]。轴向距离大于30 mm时,激励磁铁和受激磁铁的磁力趋于零。因此,为获得较大的磁力及提高发电机的可靠性,应选取适当的磁铁轴向距离。

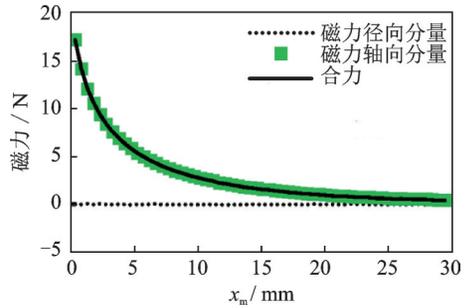


图9 磁力与轴向距离 x_m 的关系曲线

Fig. 9 Relationship between magnetic force and x_m

图10为磁铁轴向距离 $x_m=5$ mm时,磁力与径向距离 y_m 的关系曲线。由图可知,磁铁间轴向距离给定时,磁力的轴向和径向分量与径向距离的关系曲线均关于直线 $y_m=0$ 对称,但磁力的轴向和径向分量随径向距离的变化规律不同:① $y_m=0$ 时磁力轴向分量最大,磁力轴向分量随径向距离增加而减小,当径向距离增加至某一值(如磁铁半径)时磁力轴向分量减小至零;此后磁力轴向分量随径向距离增加由排斥力转变为吸引力,且径向距离到某一值(如磁铁直径)时吸引力达到最大;② $y_m=0$ 时磁力径向分量最小,磁力径向分量随径向距离增加而增加,当径向距离增加至磁铁半径时磁力径向分量增至最大。此后,磁力径向分量随径向距离增加而减小,当径向距离超过一定值后,排斥力转变为吸引力,但吸引力的幅值较小;合力随着径向距离的增加整体呈下降趋势,在径向距离大于50 mm后,合力几乎为零。

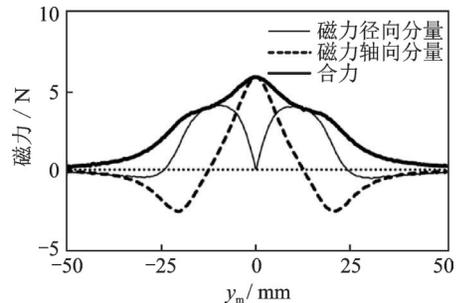


图10 磁力与径向距离 y_m 的关系曲线

Fig. 10 Relationship between magnetic force and y_m

由仿真分析可知,磁铁轴向较佳距离为10~20 mm,径向较佳距离为0~20 mm,此时磁力在0~5 N范围内,既不会因磁力过大导致压电振子损毁,也不

会因磁力过小导致发电机发电能力降低。

3 试验测试与分析

为验证基于组合换能器的磁耦合式压电振动发电机原理的可行性,设计制作了样机并搭建了测试系统,测试系统及样机如图11所示。主要设备包括:电脑控制端、RC-2000信号控制器、SA-15功率放大器、DC-1000振动台(工作频率5~2000 Hz,最大负载9800 N,最大位移±25 mm、最大加速度12g)及MSO6014A型混合信号示波器等。主要参数根据组合换能器仿真结果选取:长度比为0.57、厚度比为2。试验所用正弦激励振幅为3 mm。两个压电振子的连接方式为并联。

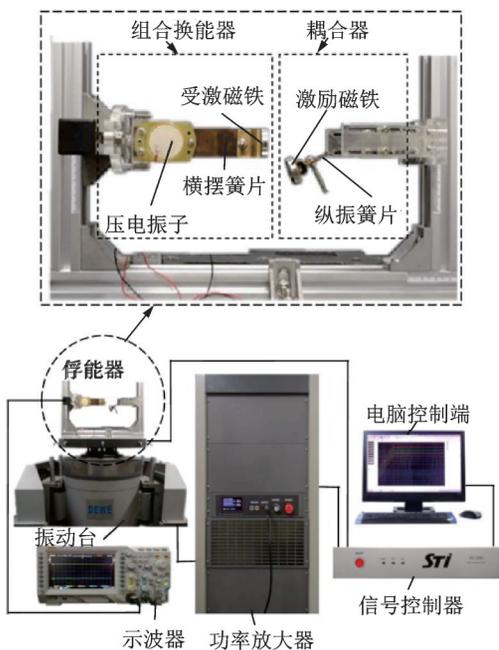


图11 发电机及试验测试系统

Fig. 11 Energy harvester and test system

试验主要研究了顶块高度、激励磁铁和受激磁铁空间排布对发电机输出电压和谐振频率的影响规律;外接负载电阻对发电机输出功率的影响规律。

图12为顶块高度 h 不同时输出电压与激励频率的关系曲线;图13为谐振频率和输出电压与顶块高度 h 的关系曲线。由图12和13可知,顶块高度 $h \leq 4$ mm时,发电机的谐振频率几乎不变, f_{n1} 和 f_{n2} 分别为11和13 Hz,其对应的输出电压 V_{n1} 相对较稳定; V_{n2} 随 h 的增大先增大后减小,但波动幅度不大,相对稳定。故在 $h \leq 4$ mm时,能使压电振子工作在以压应力为主的条件下,有效改善压电元件的可靠性,且对结构的机电耦合系数及共振频率影响不大。

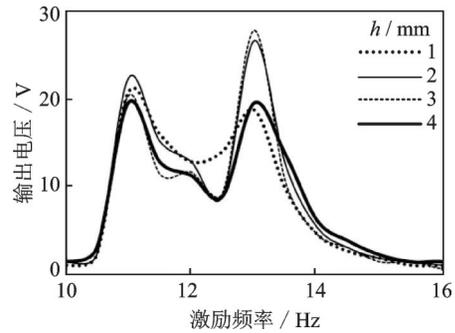


图12 顶块高度 h 不同时输出电压与激励频率的关系曲线
Fig. 12 Relationship between output voltage and excitation frequency under different h

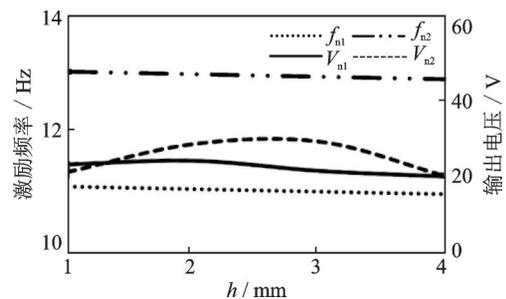


图13 谐振频率及输出电压与顶块高度 h 的关系曲线
Fig. 13 Relationship between output voltage and excitation frequency under different h

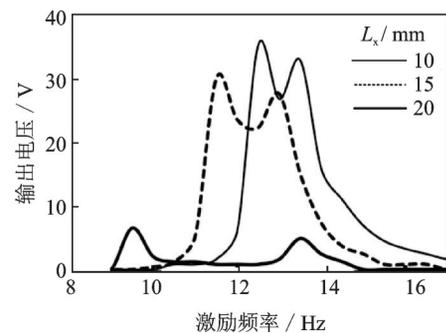


图14 磁铁间横向距离 L_x 不同时输出电压与激励频率的关系曲线
Fig. 14 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_x

图14给出了谐振频率和输出电压与磁铁间横向距离 L_x 的关系曲线;图15为谐振频率和输出电压与 L_x 的关系曲线。由图可知,存在两个较佳的谐振频率(由小到大分别记为 f_{n1} 和 f_{n2}),使发电机输出电压出现峰值,峰值电压分别记为 V_{n1} , V_{n2} 。 f_{n1} 和 f_{n2} 间的频率范围为发电机的有效频带。由理论分析可知, f_{n1} 和 f_{n2} 分别为耦合器和组合换能器的谐振频率。 L_x 主要影响 V_{n1} , V_{n2} 及 f_{n1} 的大小。当 L_x 为10,15及20 mm时,对应的 f_{n1} 分别为12.5,11.5,及9.5 Hz, V_{n1} 分别为35.2,30及6.8 V;对应的 f_{n2} 分别为13.5,13及13.5 Hz, V_{n2} 分别为32.8,27.6及5.2 V。由此可知: L_x 增大时, f_{n1} 降低, f_{n2} 基本不变, V_{n1} 和 V_{n2}

均减小。原因在于增大 L_x ,磁铁间耦合作用力减小,压电振子形变减小,故输出电压减小;耦合器的磁刚度随 L_x 的增大而减小,故 f_{n1} 下降;组合换能器的磁刚度不随 L_x 变化,故 f_{n2} 基本不变。实际应用中,可通过改变 L_x 来拓宽频带,提高发电机的环境适应性。

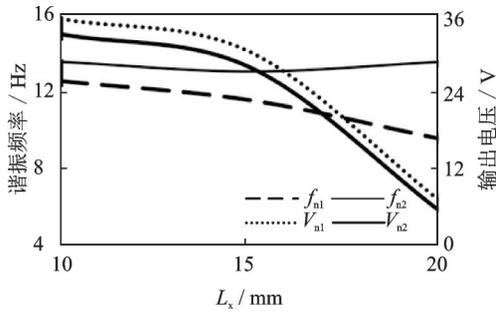


图15 谐振频率和输出电压与磁铁间横向距离 L_x 的关系曲线

Fig. 15 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_x

图16为磁铁间纵向距离 L_y 不同时输出电压与激励频率的关系曲线;图17为谐振频率和输出电压与 L_y 的关系曲线。由图可知, L_y 主要影响 f_{n1} 和 f_{n2} , V_{n1} 和 V_{n2} 。当 L_y 为0,5,10,15和20 mm时,对应的 f_{n1} 分别为11.5,10.5,9.5,8和5.5 Hz, V_{n1} 分别为28.8,25.6,24,22.4和11.2 V;对应的 f_{n2} 分别为13,13.5,14.5,15和16 Hz, V_{n2} 分别为34.8,34,31.2,27.2及28.8 V。由此可见: L_y 增大时, f_{n1} 降低、 f_{n2} 增大、对应 V_{n1} 和 V_{n2} 整体趋势均减小。原因在于, L_y 增大时,耦合器的磁刚度减小,故 f_{n1} 下降;组合换能器的磁刚度增大,故 f_{n2} 增大。当 f_{n1} 和 f_{n2} 相差越大时,磁力的耦合叠加作用越弱,输出电压越小,但频带越宽; f_{n1} 和 f_{n2} 相差越小,输出电压越大,但频带越窄。存在较佳 L_y 同时提高发电机的输出电压及其带宽:带宽一定时,改变 L_y ,可增大输出电压;输出电压一定时,改变 L_y ,可提升带宽。

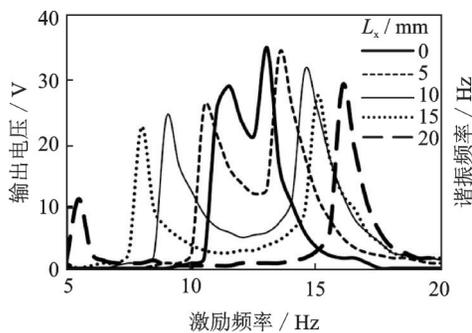


图16 磁铁间纵向距离 L_y 不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 16 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_y

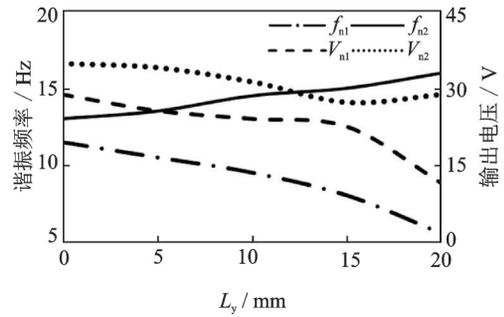


图17 谐振频率和输出电压与磁铁间纵向距离 L_y 的关系曲线

Fig. 17 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_y

图18为磁铁间竖向距离 L_z 不同时输出电压与激励频率的关系曲线;图19为谐振频率和输出电压与 L_z 的关系曲线。由图可知, L_z 主要影响 V_{n1} 和 V_{n2} 的大小。当 L_z 为0,5,10,15和20 mm时,对应的 f_{n1} 分别为11.5,11,11,10.5和9.5 Hz, V_{n1} 分别为28.8,25.2,22,14.8和4.8 V,对应的 f_{n2} 分别为13,13.5,13.5,14和14 Hz, V_{n2} 分别为34.8,36,40,21.2及22.8 V。由此可见: L_z 增大时, f_{n1} 和 f_{n2} 基本保持不变、 V_{n1} 减小、 V_{n2} 先增大后减小,当 L_z 等于磁铁半径时, V_{n2} 达到最大。原因在于随着 L_z 的增大,磁力径向分量随 L_z 的增大先增大后减小,磁力轴向分量随 L_z 的增大而减小;当 L_z 等于磁铁半径时,磁力径向分量最大,故耦合器谐振频率对应的输出电压 V_{n1} 减小,组合换能器谐振频率对应的输出电压 V_{n2} 先增大后减小,耦合器和组合换能器的磁刚度不随 L_z 变化,故改变 L_z 时, f_{n1} 和 f_{n2} 基本保持不变。

在关于发电机电压输出特性研究的基础上,进一步研究了其输出功率特性。试验中,左右两侧压电振子的发电性能一致,故以单侧压电振子为例进行研究,将其外接整流滤波电路和可调电阻器,获得了负载电阻对其输出功率特性的影响曲线。

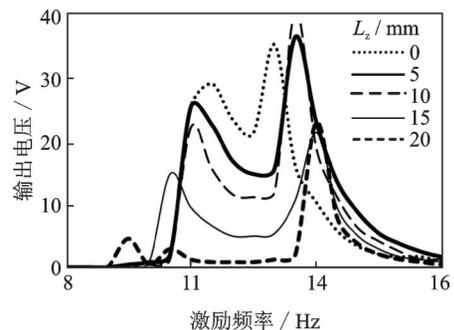


图18 磁铁间竖向距离 L_z 不同时输出电压与激励频率的关系曲线

Fig. 18 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_z

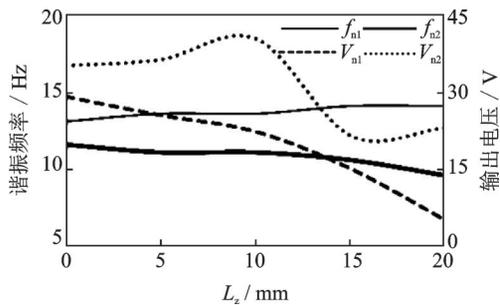


图19 谐振频率和输出电压与磁铁间竖向距离 L_z 的关系曲线
Fig. 19 Relationship between output voltage and excitation frequency under different L_z

图20为激励频率不同时输出功率与负载电阻的关系曲线。由图中曲线可知,各频率下都存在最佳的电阻使输出功率最大,各激励频率所对应的最佳负载基本相同(540 k Ω),输出功率的最大值随频率增加而降低;试验频率为11 Hz时所获得的最大输出功率约为0.19 mW。

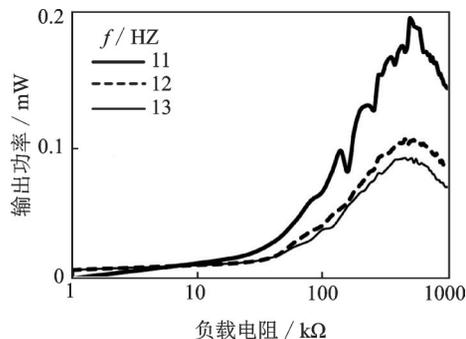


图20 激励频率不同时输出功率与负载电阻的关系曲线
Fig. 20 Relationship between output power and load under different excitation frequency

4 结论

为提高压电振动发电机的环境适应性和可靠性,本文提出了一种基于组合换能器的磁耦合式压电振动发电机,建立了组合换能器和磁力的COM-SOL有限元模型,获得了组合换能器簧片长度比、厚度比及磁力对发电机输出性能的影响规律。在此基础上选取较佳结构参数设计制作了样机并进行了试验测试,获得了磁铁空间距离对发电机输出性能的影响规律,具体结论如下:

(1)在满足组合换能器结构强度的范围内,选取合适的长度比(0.5~1)和较大的厚度比(1.5~3)可以增加压电振子端部变形量,提高发电效率;选择较小的厚度比(0.75~1.5)可提高组合换能器的承载能力及可靠性。故实际问题中利用组合换能器替代单体压电振子,选择合适的结构参数可以提高发电机的可靠性和环境适应性。

(2)环境激励频率 $f < 20$ Hz时,发电机存在两个

较佳频率 f_{n1} 和 f_{n2} ,使输出电压出现峰值(分别为 V_{n1} 和 V_{n2}), f_{n1} 和 f_{n2} 分别为耦合器和组合换能器的谐振频率。磁铁间横向距离 L_x 、纵向距离 L_y 及竖向距离 L_z 是发电机输出性能的重要影响因素, f_{n1} 随 L_x 和 L_y 的增大而降低, f_{n2} 随 L_y 的增大而增大; V_{n1} 随 L_x 、 L_y 及 L_z 的增大而减小; V_{n2} 随 L_x 和 L_y 的增大而减小,随 L_z 的增大而先增大后减小,当 L_z 为磁铁半径时 V_{n2} 最大。合理选择 L_x 、 L_y 及 L_z ,可降低 f_{n1} 、提高 f_{n2} 及增大 V_{n1} 和 V_{n2} ,有效提高发电机的带宽和环境适应性。

(3)与发电机阻抗相匹配的负载电阻可使发电机的输出功率最大化。随着外接负载的增大,输出功率先增大后减小。激励频率 $f=11$ Hz时,存在最佳的负载电阻(540 k Ω)使发电机输出功率最大,其最大值为0.19 mW。

参考文献:

- [1] 张振振,姜军强,贾振,等. 压电-电磁复合振动俘能器的耦合负载特性及俘能性能[J]. 振动工程学报, 2020, 33(3):459-466.
ZHANG Zhenzhen, LOU Junqiang, JIA Zhen, et al. Energy harvesting performance and coupling load effect of a novel hybrid piezoelectric-electromagnetic vibration energy harvester [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(3):459-466.
- [2] Qiu C, Wu F, Lee C, et al. Self-powered control interface based on Gray code with hybrid triboelectric and photovoltaics energy harvesting for IoT smart home and access control applications[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104456.
- [3] Kiziroglou M E, Becker T, Wright S W, et al. Three-dimensional printed insulation for dynamic thermoelectric harvesters with encapsulated phase change materials [J]. IEEE Sensors Letters, 2017, 1(4):1-4.
- [4] Zhang Zhonghua, Wang Shuyun, Kan Junwu, et al. A pneumatic piezoelectric vibration energy harvester based on the compressed air-transducer-structure interaction[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112861.
- [5] 吴义鹏,周圣鹏,裘进浩,等. 用于超低频振动能收集的压电弹簧摆结构设计及实现[J]. 振动工程学报, 2019, 32(5):750-756.
WU Yipeng, ZHOU Shengpeng, QIU Jinhao, et al. Design and implementation of a piezoelectric spring pendulum structure applied in ultra-low frequency vibration energy harvester [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5):750-756.
- [6] Fan Kangqi, Liu Jin, Cai Meiling, et al. Exploiting ultralow-frequency energy via vibration-to-rotation conversion of a rope-spun rotor [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113433.

- [7] Wang Junlei, Geng Linfeng, Ding Lin, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations[J]. Applied Energy, 2020, 267: 114902.
- [8] Zhou Z, Qin W, Zhu P. Harvesting performance of quad-stable piezoelectric energy harvester: modeling and experiment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 110: 260-272.
- [9] Li X, Upadrashta D, Yu K, et al. Analytical modeling and validation of multi-mode piezoelectric energy harvester[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 613-631.
- [10] Sun S, Peter W T. Modeling of a horizontal asymmetric U-shaped vibration-based piezoelectric energy harvester (U-VPEH) [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 467-485.
- [11] 阚君武, 文欢, 王淑云, 等. 磁铁夹持式压电俘能器输出性能分析与试验[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 84-90.
KAN Junwu, WEN Huan, WANG Shuyun, et al. Performance analysis and test of a piezoelectric energy harvester based on magnets holding[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 84-90.
- [12] Zhang J, Qin L. A tunable frequency up-conversion wideband piezoelectric vibration energy harvester for low-frequency variable environment using a novel impact-and rope-driven hybrid mechanism[J]. Applied Energy, 2019, 240: 26-34.
- [13] Wu Y, Ji H, Qiu J, et al. A 2-degree-of-freedom cubic nonlinear piezoelectric harvester intended for practical low-frequency vibration[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017;264:1-10.
- [14] Toyabur R M, Salauddin M, Park J Y. Design and experiment of piezoelectric multi-modal energy harvester for low frequency vibration[J]. Ceramics International, 2017, 43(S1):5675-5681.
- [15] WU Yi-Peng, Qiu Jin-Hao, Zhou Sheng-Peng, et al. A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting[J]. Applied Energy, 2018, 231: 600-614.
- [16] 王淑云, 朱雅娜, 阚君武, 等. 旋磁激励式预弯梁压电俘能器建模仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14):224-230.
WANG Shuyun, ZHU Yana, KAN Junwu, et al. Pre-bending-cantilever piezo-harvester excited by rotary magnet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14):224-230.

Experiments and analysis of a magnetically coupled piezoelectric vibration energy harvester

KAN Jun-wu^{1,2}, WANG Kai¹, WANG Jin¹, ZHANG Zhong-hua^{1,2}, FEI Xiang¹, WANG Shu-yun^{1,2}

(1. Institute of Precision Machinery and Intelligent Structure, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment of Zhejiang Province, Jinhua 321004, China)

Abstract: To improve environmental adaptability and reliability of piezoelectric harvester, a magnetically coupled piezoelectric vibration energy harvester (PVEH) based on a combined transducer is proposed in this paper. The PVEH is mainly composed of a coupler subjected to longitudinal vibration and a combined transducer subjected to transverse oscillation. The finite element model of the combined transducer and magnetic force is established using the COMSOL software, and the simulation analysis is carried out. Thus, the influence of the reed length ratio, thickness ratio and magnetic distance of the combined transducer on the PVEH performance is obtained through the simulation. On this basis, an optimal structural parameter (length ratio of 0.57 and thickness ratio of 2) is chosen to make the prototype and the characteristic experiments are performed. The experimental results shows the influence of the transverse distance L_x , longitudinal distance L_y , vertical distance L_z of the exciting magnet and the excited magnet on the PVEH performance. When the excitation frequency f is less than 20 Hz, there are two natural frequencies (denoted as f_{n1} and f_{n2} respectively, $f_{n1} < f_{n2}$), corresponding to the peak output voltages. Both the natural frequencies and their corresponding peak voltages are changed with the values of L_x , L_y and L_z . It is demonstrated that the adjustment of magnetic distance could reduce the first natural frequency f_{n1} , increase the second natural frequency f_{n2} , enhance the output voltage, and effectively improve the bandwidth and environmental adaptability of the PVEH. The load characteristics show that the maximum output power of 0.19 mW is achieved under the optimal load resistance of 540 k Ω at the excitation frequency of 11 Hz for the PVEH.

Key words: magnetic coupling; combined transducer; indirect motivation; piezoelectric; vibration energy harvester

作者简介: 阚君武(1965—),男,教授,博士生导师。电话:(0579)82286598;E-mail:kanjw@zjnu.edu.cn。

通讯作者: 张忠华(1980—),男,教授,硕士生导师。电话:(0579)82288627;E-mail:zhangzh@zjnu.edu.cn。