

面向智能轴承自供电系统的压电-摩擦 复合式振动能量采集器

罗梦婷, 郑薛亮, 姚兆琦, 王恒

(南通大学机械工程学院, 226019, 江苏南通)

摘要: 针对智能轴承外圈径向开槽结构中以电池供能的状态监测设备存在应用场合受限的问题, 提出了一种适用于智能轴承自供电系统的压电-摩擦复合式振动能量采集器。该能量采集器以带双质量块的三角形单晶压电悬臂梁为基础, 在悬臂梁的振动方向上有机集成兼具限位功能的摩擦纳米发电机, 实现了振动和限位碰撞过程中压电-摩擦电两种模式的复合协同发电, 有效利用了空间并提高了输出性能。同时, 利用集中参数法建立了能量采集器的机电耦合动力学模型, 通过COMSOL软件分析了不同结构与尺寸对压电悬臂梁固有频率和输出电压的影响, 并通过试验验证机电耦合动力学模型与仿真分析的准确性。试验结果表明: 所提能量采集器能够在 $0 \sim 28.2 \text{ m/s}^2$ 的智能轴承正常工作振动加速度范围内有效工作; 在加速度为 2 m/s^2 时, 该采集器的压电和摩擦电单元开路输出电压最大峰峰值分别可达 1.28 V 和 1.05 V ; 在加速度为 20 m/s^2 时, 该采集器的压电和摩擦电单元开路输出电压最大峰峰值分别可达 2.85 V 和 1.18 V 。

关键词: 智能轴承; 自供电; 压电-摩擦复合; 振动能量采集

中图分类号: TH133 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202303016 **文章编号:** 0253-987X(2023)-03-0173-10

Hybrid Piezoelectric-Triboelectric Vibration Energy Harvester for Intelligent Bearing Self-Powered System

LUO Mengting, Zheng Xueliang, Yao Zhaoqi, Wang Heng

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract: A hybrid piezoelectric-triboelectric vibration energy harvester for the intelligent bearing self-powered system is proposed for the problems of limited applications of battery-powered condition monitoring devices in the radially slotted outer ring structure of the intelligent bearing. The energy harvester is based on a triangular single-crystal piezoelectric cantilever beam with double mass blocks, and two nanogenerators with limiting function are organically integrated with the vibration direction of the cantilever beam. The composite co-generation of piezoelectric and triboelectric modes during vibration and limit collisions is realized. The space is effectively utilized and the output performance is improved. Meanwhile, the electromechanical coupling dynamic model of the energy harvester is established by using the centralized parameter method. The effects of different structures and sizes on the natural frequency and output voltage of the piezoelectric cantilever beam are analyzed by COMSOL software. The accuracy of the electrome-

chanical coupling dynamic model and simulation analysis are verified by experiments. The test results show that the proposed energy harvester can work effectively in the range of $0 \sim 28.2 \text{ m/s}^2$ of the normal working vibration acceleration of intelligent bearing. At an acceleration of 2 m/s^2 , the maximum peak-to-peak values of the open-circuit output voltages of the piezoelectric and triboelectric units of the harvester are 1.28 V and 1.05 V respectively. At an acceleration of 20 m/s^2 , the maximum peak-to-peak values of the open-circuit output voltages of the piezoelectric and triboelectric units of the harvester are 2.85 V and 1.18 V respectively.

Keywords: intelligent bearing; self-powered; hybrid piezoelectric-triboelectric; vibration energy harvesting

滚动轴承作为旋转机械的核心零部件,广泛应用于航空航天、高铁、机床等领域,其服役性能直接影响设备的工作性能、可靠性和使用寿命^[1]。20世纪90年代,一些学者在传统轴承的基础上将不同用途的微型传感器和调控装置集成到轴承结构中,使其结合成为一体而形成具有自感知、自决策及自调控能力的独特结构单元,提出了智能轴承的概念,实现了轴承运行状态有效监测^[2-3]。

随着物联网(IoT)和大数据技术的发展,智能轴承得到了广泛的研究^[4-5]。智能轴承大多采用有线、化学电池或无线供电方式。有线供电可以稳定供能但需要电缆连接,无法满足轴承旋转的需求。电池供电机动性高、供电稳定,但仍存在寿命有限需要定期更换和污染环境等问题。无线供电需要外置供电线圈,存在体积大、传输距离短且效率低等缺点,无法有效满足工业现场的使用要求。因此,智能轴承的自供电技术具有重要的应用前景和研究价值。目前,采集环境机械能将其转换为电能,是实现自供电一种便捷又行之有效的方法,发展比较成熟的机械能采集主要有电磁式发电机(EMG)^[6-8]、压电纳米发电机(PENG)^[9-11]和摩擦纳米发电机(TENG)^[12-14]。

轴承在运行中能产生振动等多种形式的机械能,国内外有许多学者对轴承旋转能量采集技术进行了研究。Han等^[15]提出了一种具有自供能、自感知能力的摩擦电智能滚动轴承,在保持滚动轴承结构完整性的前提下,通过在轴承外圈上粘贴柔性叉指电极,可将捕获的轴承旋转能转化为电能,但由于其设计的轴承元件均采用非金属材料,降低了轴承的承载能力,限制了其在实际中的应用。Zhang等^[16]提出了一种用于智能轴承自供能的环形 Halbach 电磁能量采集器,由于轴承结构紧凑,难以满足电磁能量采集器需要较大的安装空间和固定旋转部件这一要求。Zhang等^[17]提出了一种压电能量采集器,通过在滚动轴承外圈和轴承座之间安装弧

形压电片来收集轴承旋转能量,并建立了自供电无线传感器系统,但该系统需要改变轴承座结构,对轴承座的支撑能力有一定影响。Han等^[18]提出了一种基于轴承回转组件的具有双面绒毛和双 Halbach 阵列的纳米发电机,虽然该结构在低频和耐用性方面表现出卓越的输出性能,但其只适用于收集波浪能,应用场合较为单一。崔宝珍等^[19]提出了一种基于电磁感应原理的智能轴承自供电结构,采用外拓式结构将轴承与供电结构集成为一个整体,虽然该结构能够满足传感器和无线传输组件正常工作的供电要求,但由于增加了轴承体积,对安装空间有所要求。以上研究对采集滚动轴承旋转能量以及开发智能轴承自供电系统进行了良好的尝试,但是,这些能量采集装置对轴承结构和使用材料有所要求,限制了智能轴承的应用场合,并且这些自供电系统大多采用单一的能量采集装置,均存在着一定的不足,而多能量采集装置之间的相互影响与协同效应鲜少涉及。

针对嵌入式智能轴承结构,课题组提出了一种基于 6220 深沟球轴承外圈径向开槽的智能轴承^[20],但该结构采用有线供电方式,存在着抗干扰能力不强、应用场合受限等不足。针对智能轴承外圈径向开槽结构中的传感器供电问题,本文提出了一种适用于智能轴承自供电系统的压电-摩擦复合式振动能量采集器,该采集器可将轴承弹性振动能量收集并转换为电能后供给状态监测设备使用,利用集中参数法建立了采集器的机电耦合动力学模型,通过 COMSOL 软件对采集器进行结构尺寸的优化设计,并通过试验验证了机电耦合动力学模型与仿真分析的准确性。

1 压电-摩擦复合式振动能量采集器 结构与建模

1.1 结构设计

滚动轴承的振动复杂多样,通常可分为以下 3

种^[21]:①由于滚动体的不断变换使得受载轴承运行时发生弹性振动;②轴承各元件间存在加工误差引起轴承振动;③由于轴承故障发生而引起的振动。轴承在受载时,无论轴承正常与否,滚动体因受载变形都会产生弹性振动,其振动频率为

$$f = Z \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

(1)

式中: Z 为滚动体数; f_r 为主轴的旋转频率; d 为滚动体直径; D 为节圆直径; α 为接触角。

根据国内现行的滚动轴承振动加速度测量标准^[22],可将滚动轴承的振动加速度由低到高依次分为 5 个等级——Z、Z1、Z2、Z3、Z4,振动等级越高,噪声越小。其中,Z1 级多用于滚动轴承成品检验,即在正常工况下轴承的振动加速度应小于相应 Z1 级的限值。因此,6220 深沟球轴承正常工作时的振动加速度幅值应小于 Z1 标定的 28.2 m/s^2 ,若振动加速度幅值超过 28.2 m/s^2 ,则表明轴承可能出现异常。

目前最常用的换能机制包括电磁式发电、压电式发电和摩擦电式发电,与电磁式发电相比,压电式发电和摩擦电式发电均具有输出电压高、制作简单的优点,但二者的内阻相对较大,若采用单一发电方式供电,当采集器所俘获的机械能超出换能单元的转换能力时,大部分能量将以热能、形变等形式消散,只有少部分能被换能单元转换为电能,从而降低换能单元转换效率,而将两种换能机制的换能单元集成在同一器件中可实现机械能的互补式复合采集,提高器件输出性能。

为了收集轴承正常工作时的弹性振动能量,并且综合考虑智能轴承结构与自供电要求,本文提出了如图 1 所示的压电-摩擦复合式振动能量采集器,该采集器在轴承上的安装位置如图 2 所示。由图 1 可知,压电-摩擦复合式振动能量采集器主要由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)支撑板、压电单元以及摩擦电单元组成。以三角形铝(Al)板为弹性基板,并将其底端固定在左侧支撑板上,在聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜上、下表面粘贴 Al 电极并固定在弹性基板底端,在弹性基板尖端上、下表面粘贴铅(Pb)质量块,构成带双质量块的单晶压电悬臂梁作为压电单元。在两个质量块的表面粘贴 Al 摩擦电极,将两个贴有背部 Al 电极的聚二甲基硅氧烷(PDMS)摩擦薄膜分别固定在上、下支撑板上,上下两组摩擦材料分别构成两个垂直接触-分离式摩擦纳米发电机(即 TENG1、TENG2)作为摩擦电单元,同时,摩擦电单元也作为压电悬臂梁的限位结构。

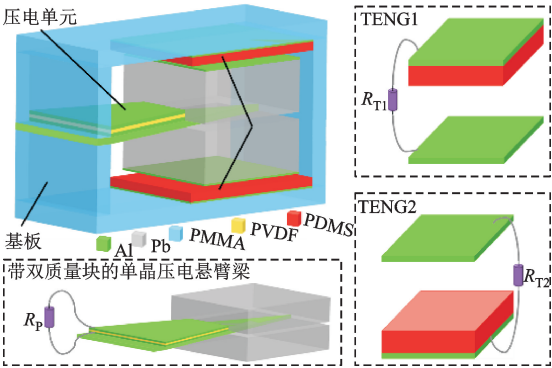


图 1 能量采集器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of energy harvester

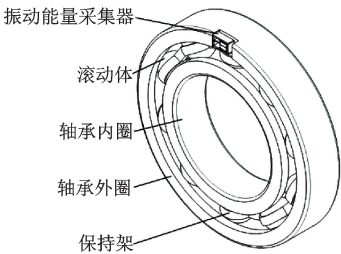


图 2 能量采集器在轴承上的安装位置示意图
Fig. 2 Diagram of the mounting of the energy harvester on the bearing

1.2 工作原理

压电-摩擦复合式振动能量采集器的工作原理如图 3 所示。在初始状态下,轴承静止,PVDF 悬臂梁没有弯曲,摩擦 Al 电极和 PDMS 薄膜上没有电荷。当轴承开始工作,滚动体因轴承受载变形而产生弹性振动,能量采集器受到振动激励,PVDF 悬臂梁弯曲,从而产生压电输出,当悬臂梁的振幅大于或等于能量采集器静止时悬臂梁末端质量块与限位结构的间距时,摩擦 Al 电极与悬臂梁一起振动并撞击 PDMS 薄膜,PDMS 薄膜捕获到摩擦 Al 电极上的电子而携带负电荷,摩擦 Al 电极由于失去电子而携带正电荷。PVDF 悬臂梁恢复,随着摩擦 Al 电极与 PDMS 薄膜表面间隙距离的增加,产生摩擦电输出。PVDF 悬臂弯曲至相反方向,产生反向压电输出。悬臂梁恢复,随着间隙距离的减小,产生反向摩擦电输出。若悬臂梁的振幅小于能量采集器静止时悬臂梁末端质量块与限位结构的间距,则摩擦电单元仅 TENG2 产生电能输出。

式中: Θ_C 为前向机电耦合系数,且 $\Theta_C = \kappa_b d_{31} Y_P A_P$ 。

将式(10)、(11)和(13)代入式(9),可得压电能量收集理论模型中电路部分方程为

$$C_P \frac{dV_P(t)}{dt} + \frac{V_P(t)}{R_P} + \Theta_C \frac{dX(t)}{dt} = 0 \quad (14)$$

当质量块与上下两个限位结构发生碰撞时,碰撞力 F_s 可表示为

$$F_s = \begin{cases} C_2 \frac{dX(t)}{dt} + K_2[X(t) - d], & X(t) \geq d \\ 0, & |X(t)| < d \\ C_2 \frac{dX(t)}{dt} + K_2[X(t) + d], & X(t) \leq -d \end{cases} \quad (15)$$

对于摩擦层材料,在接触-分离后会分别带上等量的异号电荷,同侧电极受到影响同样会产生等量异号电荷^[25],则在接触过程中,电介质层和空气层产生的电场强度分别为

$$E_T = -\frac{Q_T(t)}{\mathcal{S}\epsilon_0\epsilon_T} \quad (16)$$

$$E_{Air} = -\left[\frac{Q_T(t)}{S} + \rho_T\right]/\epsilon_0 \quad (17)$$

式中: $Q_T(t)$ 为两个电极之间转移的电荷; S 为接触面积; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_T 为摩擦材料的相对介电常数; ρ_T 为摩擦层材料表面电荷密度。

若上金属电极和摩擦材料表面的距离表示为 $X_T(t)$,上下金属电极之间的电势差可以表示为

$$\begin{aligned} V &= E_T d_T + E_{Air} X_T(t) = \\ &= -\frac{Q_T(t)}{\mathcal{S}\epsilon_0} \left[\frac{h_T}{\epsilon_T} + X_T(t)\right] + \frac{\rho_T X_T(t)}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: h_T 为摩擦材料的厚度。

当摩擦电发电单元连接负载电阻 R_T 时,根据欧姆定律可得

$$R_T \frac{dQ_T(t)}{dt} = -\frac{Q_T(t)}{\mathcal{S}\epsilon_0} \left[\frac{h_T}{\epsilon_T} + X_T(t)\right] + \frac{\rho_T X_T(t)}{\epsilon_0} \quad (19)$$

因此,压电-摩擦复合式振动能量采集器的机电耦合动力学方程为

$$\begin{cases} M \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + C_1 \frac{dX(t)}{dt} + K_1 X(t) + F_P + F_s = M \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} \\ C_P \frac{dV_P(t)}{dt} + \frac{V_P(t)}{R_P} + \Theta_C \frac{dX(t)}{dt} = 0 \\ R_{T1} \frac{dQ_{T1}(t)}{dt} = -\frac{Q_{T1}(t)}{\mathcal{S}\epsilon_0} \left[\frac{h_T}{\epsilon_T} + X_{T1}(t)\right] + \frac{\rho_T X_{T1}(t)}{\epsilon_0} \\ R_{T2} \frac{dQ_{T2}(t)}{dt} = -\frac{Q_{T2}(t)}{\mathcal{S}\epsilon_0} \left[\frac{h_T}{\epsilon_T} + X_{T2}(t)\right] + \frac{\rho_T X_{T2}(t)}{\epsilon_0} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $Q_{T1}(t)$ 和 $Q_{T2}(t)$ 分别为两个摩擦纳米发电机电极间转移的电荷; $X_{T1}(t)$ 和 $X_{T2}(t)$ 分别为两个摩擦纳米发电机摩擦表面的距离。

2 压电-摩擦复合式振动能量采集器仿真研究

2.1 压电悬臂梁有限元分析

压电悬臂梁结构作为能量采集器的设计核心,由式(14)可知,悬臂梁几何结构和尺寸对整个能量采集系统的输出电压和功率有较大的影响,因此,选择合适的悬臂梁几何结构和尺寸更有利于能量的采集。采用 COMSOL 软件分别建立三角形、梯形和矩形 3 种不同形状的带单质量块单晶压电悬臂梁模型,网格划分结果如图 5 所示,压电梁材料为 PVDF,弹性基体材料为 Al,质量块材料为 Pb,左侧基板材料为 PMMA,各结构的几何尺寸及选用材料性能参数如表 1、表 2 所示。

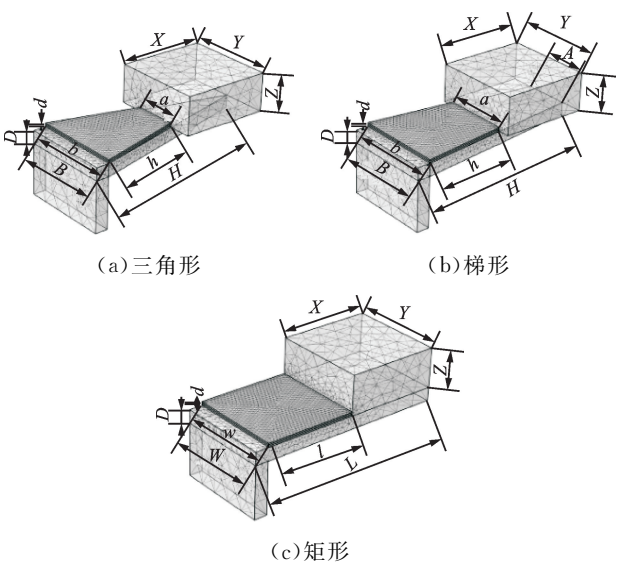


图 5 3 种形状压电悬臂梁的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of three shapes of piezoelectric cantilever beams

结构形状	尺寸/mm		
	弹性基板	压电材料	质量块
三角形	7×15×1	3.5×7×7×0.1	
梯形	3.5×7×15×1	5.25×7×7×0.1	7×7×3
矩形	15×7×1	7×7×0.1	

表 2 压电悬臂梁材料参数

Table 2 Piezoelectric cantilever beam material parameters

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松 比	弹性 模量/ GPa	耦合 系数 d_{31} / ($\text{C} \cdot \text{N}^{-1}$)	介电 常数 ϵ_{33}
PMMA	1 150	0.32	3		
PVDF	1780	0.30	2.5	1.358×10^{-11}	13.5
Al	2 700	0.35	70.0		
Pb	11 300	0.42	17		

在压电材料端施加固定约束,对悬臂梁施加 2 m/s^2 的加速度激励,利用压电效应和固体力学模块对 3 种压电悬臂梁结构进行静力学分析,获得 3 种结构压电悬臂梁的等效应力分布如图 6 所示,由图 6 可知,在相同条件下,三角形结构的应力分布最均匀,其他两种结构在固定端均出现不同程度的应力集中现象。

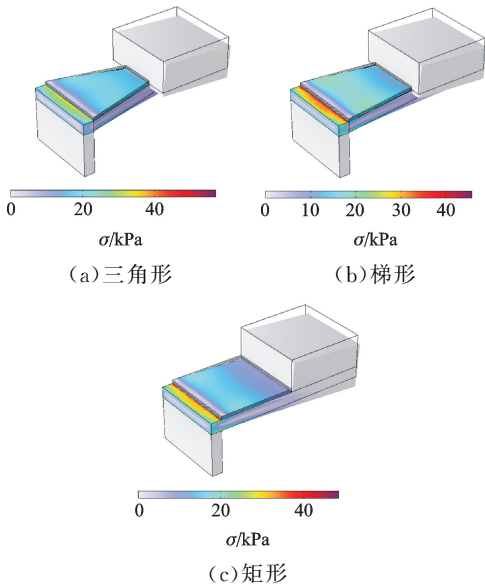


图 6 3 种形状压电悬臂梁的等效应力分布图

Fig. 6 Equivalent force distribution of three shapes of structural piezoelectric cantilever beams

保持压电悬臂梁尺寸和所受激励幅值不变,通过频域分析得到 3 种结构压电悬臂梁的开路输出电压与振动频率响应曲线如图 7(a)所示,由图 7(a)可知,三角形结构的一阶固有频率最小,而输出电压最大。因此,在结构设计中选用三角形结构的压电悬臂梁。在相同激励条件下,通过频域分析得到三角形压电悬臂梁开路输出电压与一阶固有频率随质量块变化关系如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,外加质量块能有效地降低压电悬臂梁的一阶固有频率同时增大开路输出电压,故选用双质量块悬臂梁结构。

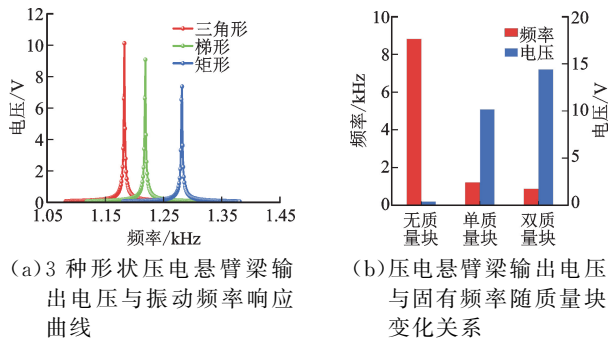


图 7 压电悬臂梁的频域分析

Fig. 7 Frequency domain analysis of piezoelectric cantilever beams

通过改变弹性基板的厚度、质量块长度与压电材料长度的比值、弹性基板的长度、固定端宽度进一步分析对带双质量块的三角形单晶压电悬臂梁一阶固有频率和输出电压的影响。设置弹性基板的厚度从 0.1 mm 开始增加,变化范围为 $[0.1 \text{ mm}, 1 \text{ mm}]$;质量块长度与压电材料长度的比值从 13.5 开始减小,变化范围为 $[0, 13.5]$;弹性基板的长度从 6 mm 开始增加,变化范围为 $[6 \text{ mm}, 15 \text{ mm}]$;弹性基板固定端的宽度从 2 mm 开始增加,变化范围为 $[2 \text{ mm}, 7 \text{ mm}]$ 通过频域分析,得到该结构的一阶固有频率和输出电压随弹性基板厚度、质量块与压电材料长度比的变化关系如图 8 所示,一阶固有频率和输出电压随弹性基板长度和固定端宽度变化关系如图 9 所示。

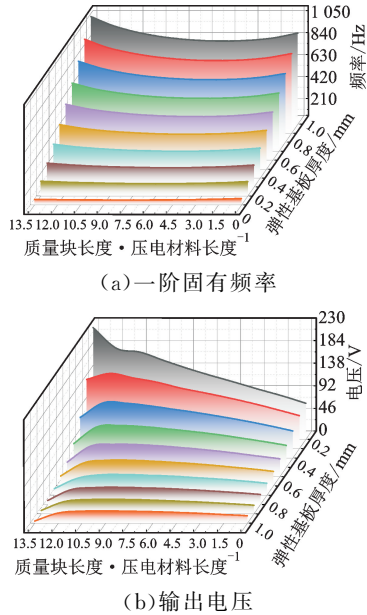


图 8 固有频率和输出电压随弹性基板厚度和质量块与压电材料长度比的变化关系

Fig. 8 Variation of intrinsic frequency and output voltage with the ratio of elastic substrate thickness and mass block length to piezoelectric material length

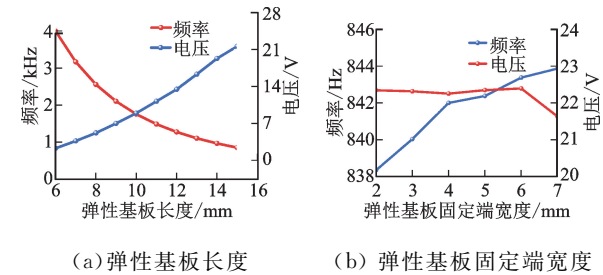


图 9 固有频率和输出电压随弹性基板长度和固定端宽度变化关系

Fig. 9 Inherent frequency and output voltage variation with flexible substrate length and fixed end width

由图 8(a)可知,悬臂梁的固有频率随质量块长度的增加先减小后增大,随弹性基板厚度的增加而增大,在压电材料长度和质量块长度相等时频率最小。由图 8(b)可知,输出电压随质量块长度的增加先增大后减小,随弹性基板厚度的增加而减小。由图 9 可知,悬臂梁的一阶固有频率随弹性基板长度的增加而减小,输出电压随弹性基板长度的增加而增大,弹性基板固定端的宽度对悬臂梁的一阶固有频率和输出电压影响不大。由频率 f 、结构刚度 K 和质量 M 的关系 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$ 可知,当刚度不变时,频率随质量的增大而减小,但当质量块过大时,结构刚度会大大增加,因此压电悬臂梁固有频率增大。适当增加质量块长度,可以增大悬臂梁自由端的振动幅值,同时输出电压也会变大,但当质量块长度继续增加,自由端的振动幅值减小,输出电压也变小。因此在尺寸设计时,质量块长度应与压电材料长度相等,并尽量避免压电悬臂梁在质量块自身重力作用下弯曲过大。

2.2 压电-摩擦复合式振动能量采集器有限元分析

本文使用的 6220 深沟球轴承的基本参数如表 3 所示,由式(1)计算得滚动体因轴承受载变形而产生弹性振动频率 $f=104.28\text{ Hz}$ 。由于悬臂梁固有频率与激励振动频率越相近,悬臂梁自由端的振动幅值越大,同时输出电压也会变大。故综合考虑滚动轴承径向开槽尺寸^[20]和滚动体弹性振动频率,选取弹性基板长 14 mm,固定端宽 2 mm,压电材料长 6.5 mm,质量块长 6.5 mm、宽 6 mm。

表 3 6220 深沟球轴承基本参数

Table 3 Basic parameters of deep groove ball bearing 6220				
滚动体 个数	主轴旋转 频率/Hz	滚动体 直径/mm	节圆直径/ mm	$\cos\alpha$
10	25	25.4	140	0.913 7

为避免悬臂梁质量块的末端位移太大而影响轴承正常工作,需对悬臂梁安装限位结构,限位结构选用 PDMS 材料,其长度为 8.5 mm,宽度为 6 mm,厚度为 0.5 mm,密度为 970 kg/m^3 ,弹性模量为 750 kPa,介电常数为 2.75。由于智能轴承径向开槽尺寸有限,能量采集器静止时悬臂梁末端质量块与限位结构的最大间距可达 0.3 mm,对能量采集器进行静力学分析得到结果如图 10(a)所示。由图 10(a)可知,在重力作用下,压电悬臂梁自由端的最大位移为 0.028 mm,为达到限位碰撞的效果以增加摩擦电单元的电能输出,将限位高度设置为 0.028 mm。设置加速度激励从 $0.1g(1\text{ m/s}^2)$ 开始增加,到 $2g(20\text{ m/s}^2)$ 结束,通过稳态分析得到不同加速度激励下悬臂梁振动幅值随时间变化曲线如图 10(b)所示。由图 10(b)可以看出,随着加速度激励的增加,悬臂梁自由端的最大振幅逐渐增大。当加速度小于 20 m/s^2 时,质量块在振动时仅能碰撞到下方的限位结构,当加速度大于等于 20 m/s^2 时,质量块在振动时能碰撞到两个限位结构。

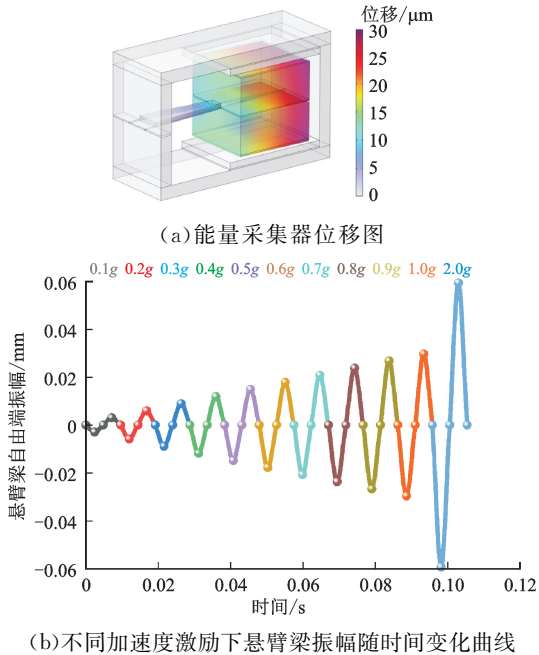
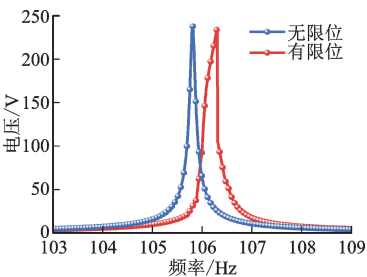


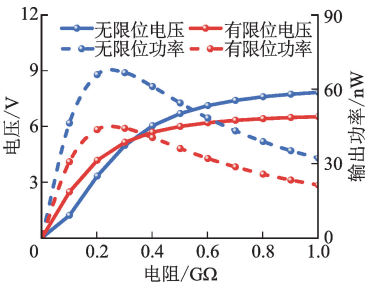
图 10 能量采集器的时域分析

Fig. 10 Time domain analysis of energy harvester

在 2 m/s^2 的加速度激励下,通过频域分析得到安装限位结构前、后振动能量采集器压电单元开路输出电压与振动频率响应曲线如图 11(a)所示,安装限位结构前、后振动能量采集器压电单元的负载电压、输出功率随负载电阻的变化曲线如图 11(b)所示。



(a) 压电单元输出电压与振动频率响应曲线



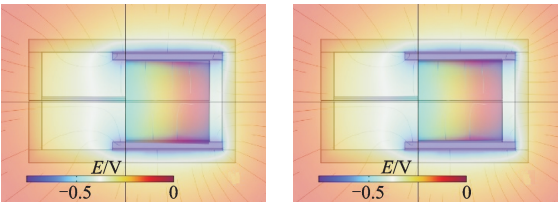
(b) 压电单元负载电压和输出功率随负载变化曲线

图 11 压电单元的频域分析

Fig. 11 Frequency domain analysis of piezoelectric unit

由图 11(a)可以看出,在小激励情况下,安装限位结构对压电悬臂梁的运动规律和输出电压影响不大。由图 11(b)可以看出,在小激励情况下,安装限位结构减小了器件的能量获取效率。

为弥补压电单元碰撞损失能量,在上下对称限位结构加入摩擦电单元。对能量采集器施加幅值为 20 m/s^2 、频率为 104.28 Hz 的正弦加速度激励,通过瞬态分析得到摩擦电单元在限位碰撞时刻的电势分布,如图 12 所示。由图 12 可以看出,电势(开路电压)随着摩擦层间距离的变化而变化,但由于间距较小,摩擦电单元的输出较小,单个摩擦纳米发电机的开路输出电压峰值可达 0.86 V 。



(a) 悬臂梁弯曲 (b) 悬臂梁反向弯曲

图 12 摩擦电单元电势分布图

Fig. 12 Potential distribution diagram of triboelectric unit

通过上述分析可知,对压电单元进行限位后,其输出电压相较于未限位压电单元有所减小,而在限位结构中加入摩擦电单元后,可增加输出电压。故将压电单元与摩擦电单元进行有机结合,形成的复合结构协同工作,达到有效收集轴承弹性振动能量、

增加智能轴承外圈开槽空间利用率和提高采集器可靠性的目的。

3 压电-摩擦复合式振动能量采集器输出特性试验

为了验证压电-摩擦复合式振动能量采集器的有效性,加工了如图 13 所示的原理样机,搭建了相应的试验系统,测试能量采集器的输出特性。试验系统主要由信号发生器、功率放大器、激振器、静电计和数据采集卡等组成,试验系统原理如图 14 所示。通过具有功率放大功能的 DF1641B1 型信号发生器产生和放大振动信号驱动 JK-02 型激振器工作,器件随激振器上下振动,输出电信号通过 MODEL SR570 电荷放大器放大后实时显示在 MSO1104Z-S 混合信号示波器上,同时由数据采集卡处理和存储在计算机上,试验装置如图 15 所示。

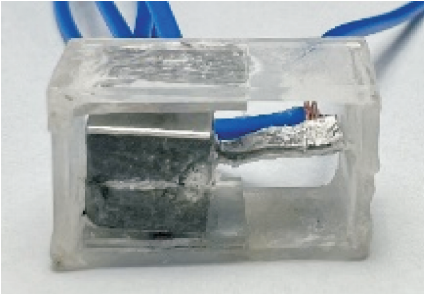


图 13 能量采集器

Fig. 13 Energy harvester

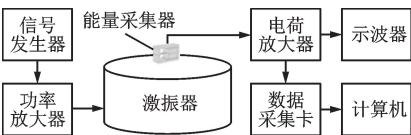


图 14 试验系统原理图

Fig. 14 Test system schematic

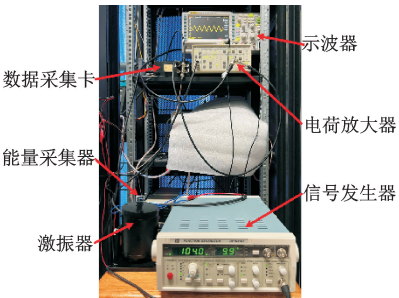


图 15 试验装置实物图

Fig. 15 Schematic diagram of test device

在试验中设定激励频率恒为 104.28 Hz,对能量采集器施加正弦加速度激励,测得不同加速度条件下的压电单元和摩擦电单元开路输出电压如图 16 和 17 所示。图 16 和 17 分别对应的加速度为 2 m/s^2 和 20 m/s^2 。通过对比理论、仿真和试验结果可以看出,三者得到的结果比较吻合,表明所建立的模型能很好地表征系统的开路输出电压。在加速度为 2 m/s^2 时,压电和摩擦电单元开路输出电压峰峰值分别可达 1.28 V 和 1.05 V;在加速度为 20 m/s^2 时,压电和摩擦电单元开路输出电压峰峰值分别可达 2.85 V 和 1.18 V。随着系统激励加速度的增大,响应电压幅值也会增大。

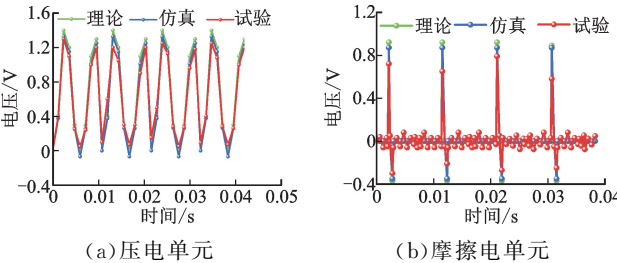


图 16 2 m/s^2 加速度激励时采集器输出电压
Fig. 16 Energy harvester output voltage under 2 m/s^2 acceleration excitation

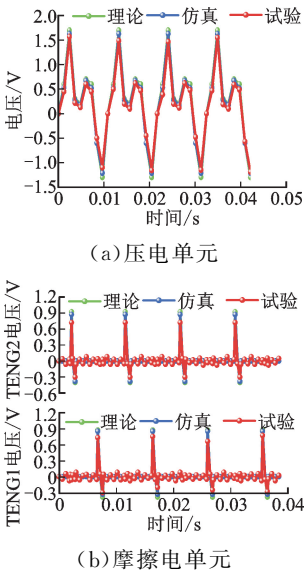


图 17 20 m/s^2 加速度激励下能量采集器输出电压
Fig. 17 Energy harvester output voltage under 20 m/s^2 acceleration excitation

4 结 论

本文针对智能轴承状态监测设备的自供电需求,设计了适用于智能轴承自供电系统的压电-摩擦复合式振动能量采集器,总结如下。

(1)通过在带双质量块的三角形单晶压电悬臂梁振动方向两侧加装限位结构,并在限位结构上集成摩擦纳米发电机,在振动和限位碰撞过程中实现了压电-摩擦两种机电转换模式的协同发电,达到有效收集轴承振动能量、增加智能轴承外圈开槽空间利用率和提高采集器可靠性的目的。

(2)利用集中参数法建立了采集器的机电耦合动力学模型,并通过 COMSOL 软件分析压电悬臂梁不同结构尺寸对一阶固有频率和输出电压的影响,根据实际工况计算出滚动体弹性振动频率为 104.28 Hz,确定了采集器的结构尺寸。

(3)加工了与仿真分析结果相同结构尺寸的原理样机,通过试验验证了机电耦合动力学模型与仿真分析的准确性。试验结果表明:所提能量采集器能够在 $0\sim28.2\text{ m/s}^2$ 的智能轴承正常工作振动加速度范围内有效工作;在加速度为 2 m/s^2 时,该采集器的压电和摩擦电单元开路输出电压最大峰峰值分别可达 1.28 V 和 1.05 V;在加速度为 20 m/s^2 时,该采集器的压电和摩擦电单元开路输出电压最大峰峰值分别可达 2.85 V 和 1.18 V。

参考文献:

[1] 朱文昌, 罗梦婷, 倪广县, 等. 随机矩阵理论和主成分分析融合的滚动轴承性能退化评估方法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 55-63.
ZHU Wenchang, LUO Mengting, NI Guangxian, et al. An evaluation method for rolling bearing performance degradation combining random matrix theory and principal component analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 55-63.
[2] 朱永生, 张盼, 袁倩倩, 等. 智能轴承关键技术及发展趋势 [J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(3): 455-462, 665.
ZHU Yongsheng, ZHANG Pan, YUAN Qianqian, et al. Key technologies and development trend of smart bearing [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 455-462, 665.
[3] HOLM-HANSEN B T, GAO R X. Smart bearing utilizing embedded sensors: design considerations [C]// Proceedings Volume 3041, Smart Structures and Materials 1997: Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1997: 602-610.
[4] XUE Enchi, GUO Zhiwei, ZHAO Hongyuan, et al. A review of the design and feasibility of intelligent water-lubrication bearings [J]. Journal of Marine Science and Application, 2022, 21(3): 23-45.

- [5] 王方哲, 朱永生, 闫柯, 等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 8-14.
WANG Fangzhe, ZHU Yongsheng, YAN Ke, et al. Wireless monitoring technology of rolling bearing inner ring temperature [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 8-14.
- [6] XU Yanwu, ZHANG Zhuoran, BIAN Zhangming, et al. Advanced angle control for active rectifier in doubly salient electromagnetic generator system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5672-5682.
- [7] HU Wenjing, ZHANG Xueyi, GENG Huihui, et al. Electromagnetic design and flux regulation analysis of new hybrid excitation generator for electric vehicle range extender [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, 2021: 5547517.
- [8] GIERCZAK M, MARKOWSKI P M, DZIEDZIC A. The modeling of magnetic fields in electromagnetic microgenerators using the finite element method [J]. Energies, 2022, 15(3): 1014.
- [9] LU Mingpei, SONG Jinhui, LU M Y, et al. Piezoelectric nanogenerator using p-type ZnO nanowire arrays [J]. Nano Letters, 2009, 9(3): 1223-1227.
- [10] ARUNGUVAI J, LAKSHMI P. Improved MgO/P (VDF-TrFE) piezoelectric nanogenerator with flexible electrode [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(11): 14365-14375.
- [11] BHADRA J, PONNAMMA D, ALKAREEM A, et al. Development of a piezoelectric nanogenerator based on mesoporous silica/zinc oxide hybrid nanocomposite fibres [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(6): 8503-8515.
- [12] FAN Fengru, TIAN Zhongqun, LIN WANG Zhong. Flexible triboelectric generator [J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334.
- [13] WANG Anqun, CHEN Jun, WANG Li, et al. Numerical analysis and experimental study of an ocean wave tetrahedral triboelectric nanogenerator [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118174.
- [14] DING Zhuyu, ZOU Ming, YAO Peng, et al. A triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and as self-powered pressure sensor [J]. Microelectronic Engineering, 2022, 257: 111725.
- [15] HAN Qinkai, DING Zhuang, QIN Zhaoeye, et al. A triboelectric rolling ball bearing with self-powering and self-sensing capabilities [J]. Nano Energy, 2020, 67: 104277.
- [16] ZHANG Ying, CAO Junyi, ZHU Hongyu, et al. Design, modeling and experimental verification of circular Halbach electromagnetic energy harvesting from bearing motion [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 811-821.
- [17] ZHANG Liufeng, ZHANG Feibin, QIN Zhaoeye, et al. Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring [J]. Energy, 2022, 238(B): 121770.
- [18] HAN Chengcheng, CAO Zhi, YUAN Zhihao, et al. Hybrid triboelectric-electromagnetic nanogenerator with a double-sided fluff and double Halbach array for wave energy harvesting [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(36): 2205011.
- [19] 崔宝珍, 王浩楠, 彭智慧, 等. 智能轴承自供电结构设计及仿真分析 [J]. 轴承, 2023, 518(1): 17-22.
CUI Baozhen, WANG Haonan, PENG Zhihui, et al. Design and simulation analysis of self-power supply structure of intelligent bearing [J]. Bearing, 2023, 518(1): 17-22.
- [20] CHEN Jinhai, ZHANG Wenyuan, WANG Heng. Intelligent bearing structure and temperature field analysis based on finite element simulation for sustainable and green manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021, 32(3): 745-756.
- [21] 涂文兵, 梁杰, 周建民, 等. 滚动轴承: 振动特性评价指标工况敏感度分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(4): 93-99, 131.
TU Wenbing, LIANG Jie, ZHOU Jianmin, et al. Analysis of sensitivity of the evaluation index of rolling bearing vibration characteristics to working conditions [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(4): 93-99, 131.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滚动轴承: 振动(加速度)测量方法及技术条件: GB/T 32333-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [23] WILLIAMS C B, YATES R B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 1996, 52(1/2/3): 8-11.
- [24] LE C P, HALVORSEN E. MEMS electrostatic energy harvesters with end-stop effects [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(7): 074013.
- [25] HASAN S, KOUZANI A Z, ADAMS S, et al. Comparative study on the contact-separation mode triboelectric nanogenerator [J]. Journal of Electrostatics, 2022, 116: 103685.

(编辑 刘杨)