Journal of Sensor Technology and Application 传感器技术与应用, 2026, 14(6), 934-941
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jsta
https://doi.org/10.12677/jsta.2026.146089

基于气溶胶喷印PI摩擦电层的自供电振动传感器设计与性能研究

刘一霏[1]，郝永平[1,2*]，张　慧[1]，张金鹏[2]，李建铖[1]

[1]沈阳理工大学装备工程学院，辽宁 沈阳
[2]沈阳理工大学机械工程学院，辽宁 沈阳

收稿日期：2026年10月5日；录用日期：2026年11月5日；发布日期：2026年11月16日

摘　要

针对传统振动监测节点依赖外部供电或电池的问题，设计了一种基于摩擦纳米发电机(TENG)的自供电振动传感器。该传感器采用垂直接触－分离式结构，以聚酰亚胺(PI)和聚四氟乙烯(PTFE)为摩擦电材料，利用气溶胶喷印工艺制备PI摩擦电层。建立理想平行板模型，分析分离距离与开路电压之间的关系，并采用COMSOL Multiphysics对选定结构进行三维静电场仿真，分析分离状态下的电势分布。搭建振动测试平台，研究5~20 Hz激励频率和1~3 mm最大分离距离下的电压响应。实验结果表明，在相同最大分离距离下，实测输出电压随激励频率增加呈上升趋势；在20 Hz、3 mm工况下，输出电压峰峰幅值达到220 V。该器件能够利用接触－分离运动产生电压信号，为基于摩擦电信号的自供电振动检测提供了实验基础。时域波形及FFT分析表明，在5~20 Hz测试范围内，输出信号基频与激励频率基本一致，验证了器件用于振动频率检测的可行性。

关键词

摩擦纳米发电机，自供电振动传感器，气溶胶喷印

Design and Performance Study of Self-Powered Vibration Sensor with Aerosol Jet Printed PI Triboelectric Layer

Yifei Liu[1], Yongping Hao[1,2*], Hui Zhang[1], Jinpeng Zhang[2], Jiancheng Li[1]

[1]School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning
[2]School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: October 5, 2026; accepted: November 5, 2026; published: November 16, 2026

*通讯作者。

文章引用: 刘一霏, 郝永平, 张慧, 张金鹏, 李建铖. 基于气溶胶喷印 PI 摩擦电层的自供电振动传感器设计与性能研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(6): 934-941. DOI: 10.12677/jsta.2026.146089

Abstract

Aiming at the problem that traditional vibration monitoring nodes rely on external power supply or batteries, a self-powered vibration sensor based on a triboelectric nanogenerator (TENG) is designed. The sensor adopts a vertical contact-separation structure, uses polyimide (PI) and polytetrafluoroethylene (PTFE) as triboelectric materials, and the PI triboelectric layer is fabricated by aerosol jet printing. An ideal parallel-plate model is established to analyze the relationship between separation distance and open-circuit voltage. COMSOL Multiphysics is utilized to conduct three-dimensional electrostatic field simulation for the selected structure, and the potential distribution under the separated state is analyzed. A vibration test platform is built to investigate the voltage response under excitation frequencies of 5-20 Hz and maximum separation distances of 1-3 mm. Experimental results show that at the same maximum separation distance, the measured output voltage rises with the increase of excitation frequency. Under the condition of 20 Hz and 3 mm, the peak-to-peak amplitude of output voltage reaches 220 V. The device can generate voltage signals via contact-separation motion, which provides an experimental foundation for self-powered vibration detection based on triboelectric signals. Time-domain waveforms and FFT analysis show that the fundamental frequency of the output signal agrees with the excitation frequency over the tested range of 5-20 Hz, demonstrating the feasibility of vibration frequency detection.

Keywords

Triboelectric Nanogenerator, Self-Powered Vibration Sensor, Aerosol Jet Printing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在石油化工、电力冶金等工业场景中，机械设备长期承受振动和冲击，持续监测其振动状态对于设备运行维护具有重要意义。传统振动传感器及监测节点通常依赖外部供电或电池，在分布式、长期部署条件下存在布线复杂和维护成本较高等问题。摩擦纳米发电机(Triboelectric Nanogenerator, TENG)利用摩擦起电与静电感应的耦合作用，将机械能转换为电能，为自供电传感器设计提供了新的途径[1]。其输出电信号与机械接触和相对运动过程相关，可直接用于感知外部机械激励[2]，在振动能量采集与状态监测领域具有应用潜力[3]。TENG 的输出信号受材料特性、界面接触状态及测量电路等因素共同影响。由于器件通常具有较高的内部阻抗，测量电路的输入阻抗可能影响实测电压及波形，因此需要合理选择信号采集方式[4]。此外，摩擦电材料的表面形貌和接触力会影响实际接触状态及界面电荷转移，进而改变器件输出[5]。通过调控摩擦电层制备工艺，有望改善器件结构的一致性及输出的重复性。气溶胶喷印(Aerosol Jet Printing, AJP)是一种非接触、数字化沉积技术，可用于摩擦电功能层的图形化制备。已有研究利用 AJP 制备精细结构摩擦电传感器，实现了运动信号检测[6]。相关研究也报道了聚酰亚胺体系材料的气溶胶喷印，为 PI 功能层的制备提供了工艺参考[7]。本文选用聚酰亚胺(PI)与聚四氟乙烯(PTFE)作为摩擦电材料，利用二者电子获取倾向的差异构建接触界面[8]。

基于上述思路，本文设计一种垂直接触－分离式 TENG 振动传感器，采用 AJP 制备 PI 摩擦电层，并与 PTFE 薄膜组装形成传感单元。通过理论分析、静电场仿真及振动测试，研究分离距离和激励频率对

输出电压及波形的影响，评价其用于振动参数检测的可行性。

2. 传感器设计

2.1. 结构设计与工作原理

本文设计的振动传感器采用垂直接触－分离式 TENG 结构，主要由 PI 摩擦电层、PTFE 摩擦电层、背面电极、绝缘支撑框架和引线组成，如图 1 所示。PI 摩擦电层采用 AJP 工艺制备，PTFE 摩擦电层采用预制薄膜。两摩擦电层的背面分别设置导电电极，用于连接外部测量电路。绝缘支撑框架用于保持初始间隙并约束相对运动方向，使两摩擦电层在机械激励下沿垂直方向接触和分离。

传感器利用摩擦起电与静电感应的耦合作用产生电信号。当 PI 与 PTFE 接触时，界面发生电荷转移，使 PI 表面带正电、PTFE 表面带负电。两摩擦电层分离后，表面电荷改变电极间的电势差；再次接近时，电势差随之变化。在周期性机械激励下，器件产生周期性电压响应，其幅值、周期及波形特征可用于分析外部振动状态。

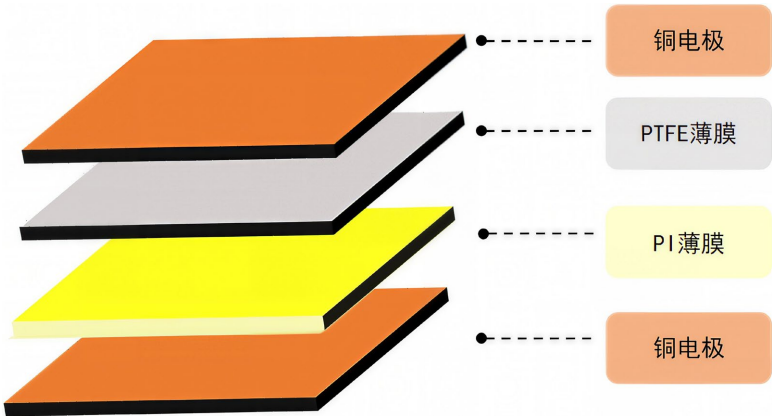


Figure 1. Schematic diagram of the vertical contact-separation mode TENG vibration sensor
图 1. 垂直接触－分离式 TENG 振动传感器结构示意图

该传感器基于摩擦起电与静电感应耦合效应实现机械能到电能的转化，并同时产生可反映机械激励状态的电信号。为定量描述其输出特性，本节建立接触分离式摩擦纳米发电机的理论模型。设 PI 薄膜和 PTFE 薄膜的厚度分别为 d_1 和 d_2，相对介电常数分别为 ε_{r1} 和 ε_{r2}，有效接触面积为 S，真空介电常数为 ε_0，摩擦电荷面密度为 σ，上下层摩擦电层的分离距离为 $x(t)$，转移电荷量为 $Q(t)$，输出电压为 $V(t)$。根据摩擦纳米发电机的静电感应理论，接触分离式 TENG 的电压－电荷－分离距离关系可表示为：

$$V(t)=-\frac{Q(t)}{\varepsilon_0 S}\left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}}+\frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}+x(t)\right)+\frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

由式(1)可进一步得到开路电压和短路电流的表达式。当外电路断开时，$Q(t)=0$，开路电压为

$$V(t)=-\frac{Q(t)}{\varepsilon_0 S}\left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}}+\frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}+x(t)\right)+\frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

式(2)表明，开路电压与分离距离 $x(t)$成正比，与摩擦电荷面密度 σ 成正比。在本文设计的 PI/PTFE 配对中，PI 偏向正极性、PTFE 位于负极性末端，二者接触后可获得较高的 σ，从而提升开路电压。

在经历接触起电后，两摩擦电层由接触状态逐渐分离，理想开路电压随 $x(t)$增大而升高；当分离距离

达到最大值时，开路电压达到最大值。随后，两摩擦电层重新接近，电压随分离距离减小而降低。在重复接触–分离过程中，器件形成周期性电压响应。

上述模型表明，理想开路电压主要取决于摩擦电荷面密度和分离距离，激励频率不直接出现在其表达式中。实际测试时，接触状态、表面电荷变化以及测量电路的有限输入阻抗均可能影响电压幅值和波形。因此，实验结果应结合机械激励条件及测量参数进行分析。

2.2. 三维静电场仿真分析

为分析所设计传感器在分离状态下的电势分布，采用 COMSOL Multiphysics 静电场接口建立三维模型。模型由 PI 摩擦电层、PTFE 摩擦电层、背面电极及周围空气域组成。PI 和 PTFE 的相对介电常数分别设为 3.4 和 2.1，厚度分别为 25 μm 和 50 μm，两摩擦电层的有效重叠面积为 20 mm × 20 mm，分离距离设为 3 mm。摩擦界面的表面电荷密度依据垂直接触–分离 TENG 平行板静电理论及摩擦电序列相关文献[1] [8]选取，合理范围为 25~95 μC/m^2，本模型取 45 μC/m^2。该参数为摩擦界面等效特征参数，受真实接触面积、表面微观形貌、环境湿度等多重因素影响，仿真中主要用于分析器件的静电分布特征，不以仿真电压与实验测试结果完全一致为选取目标。

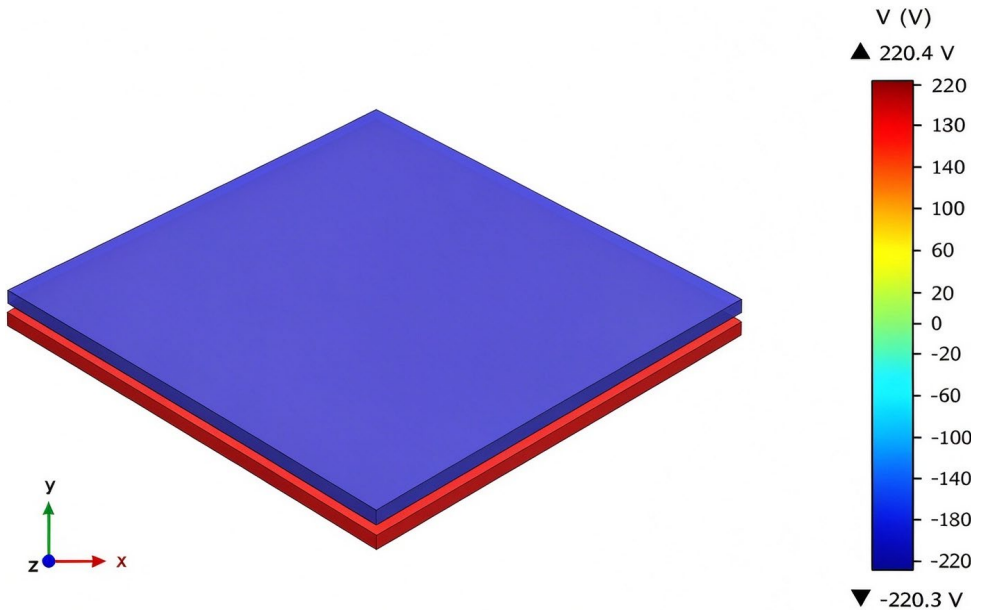


Figure 2. Three-dimensional potential distribution of the sensor under a separation distance of 3 mm
图 2. 传感器在 3 mm 分离距离下的三维电势分布

图 2 给出了所选结构在 3 mm 分离距离下的三维电势分布。上下摩擦电层及其背面电极附近呈现不同的电势水平，表明接触起电后，两摩擦电层的分离能够建立电势差，为器件产生电压响应提供静电驱动。该仿真用于说明所设计结构的静电工作机制，为后续实验结果分析提供参考。

为考察电极尺寸对静电响应的影响，在摩擦层尺寸保持 20 mm × 20 mm 的条件下，将上下方形电极的边长分别设置为 12、16 和 20 mm，均居中布置。各工况保持薄膜厚度、分离距离、表面电荷密度及电学边界条件一致，通过计算上下电极的电势差比较电极尺寸的影响。

如图 3 所示，当电极边长分别为 12、16 和 20 mm 时，电极间电势差分别为 158、191 和 220 V。在所考察范围内，电势差随电极尺寸增加而增大，说明电极覆盖范围对器件静电响应具有影响。因此，本文选用 20 mm × 20 mm 电极，使其覆盖摩擦层的有效区域。该结果为电极尺寸选择提供参考，但不代表

电极尺寸与动态输出功率之间的变化关系。

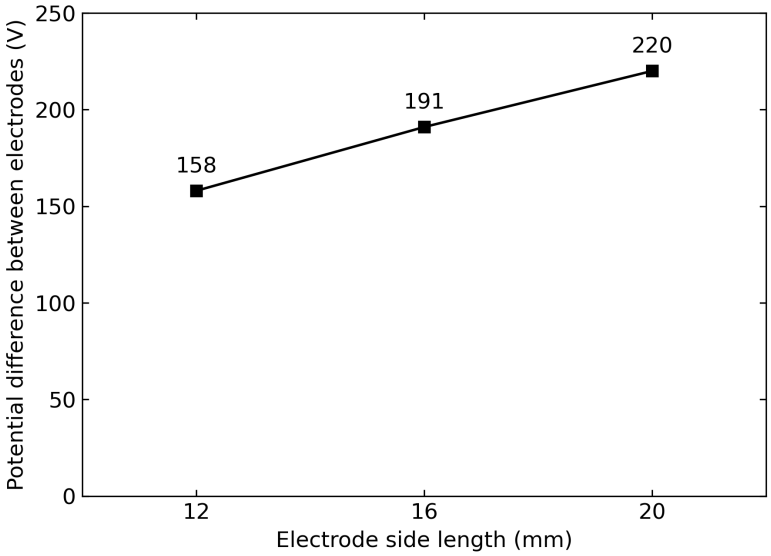


Figure 3. Effect of electrode size on the potential difference between electrodes
图 3. 电极尺寸对电极间电势差的影响

3. 实验与结果

PI 摩擦电层采用 AJP 工艺制备，其工作原理如图 4 所示。将商业 PI 墨水(UTD-PI-AJ)加入雾化器，经超声雾化形成气溶胶，并由载气输送至喷头，在鞘气作用下聚焦沉积于 PET 表面。喷印时，喷嘴与基底间距设为 3 mm，载气流量设为 32 sccm，鞘气流量设为 43 sccm，扫描速度设为 1 mm/s。通过 10 次重复沉积形成 PI 层，随后在 200℃下处理 2.5 h。PI 层厚度采用 SEM 测定，为 24.3 μm。PTFE 层采用厚度为 50 μm 的预制薄膜。上下电极采用导电银浆丝网印刷制备，经烘干处理后连接引线。两摩擦电层相对布置，并通过绝缘支撑框架组装成接触–分离结构，器件有效重叠面积为 20 mm × 20 mm。支撑框架用于保持初始间隙并限制相对运动方向。

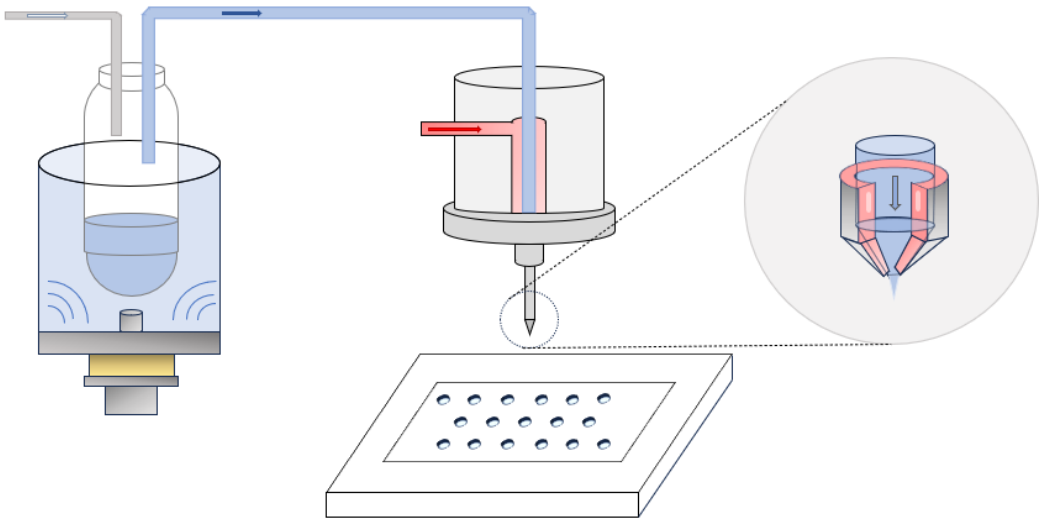


Figure 4. Schematic diagram of the working principle of aerosol jet printing (AJP)
图 4. 气溶胶喷印(AJP)工作原理示意图

为评价传感器的电压输出及振动响应，搭建如图 5 所示的测试平台。平台由信号发生器、功率放大器、激振器、传感器夹具、示波器和数据采集系统组成。信号发生器产生正弦激励信号，经功率放大器放大后驱动激振器。传感器通过夹具安装于激振器输出端，并由夹具限定两摩擦电层的相对接触－分离运动。传感器两电极连接示波器，通过示波器采集输出电压并观察波形。通过调节激励频率和驱动幅值，研究不同机械激励条件下的电压响应。

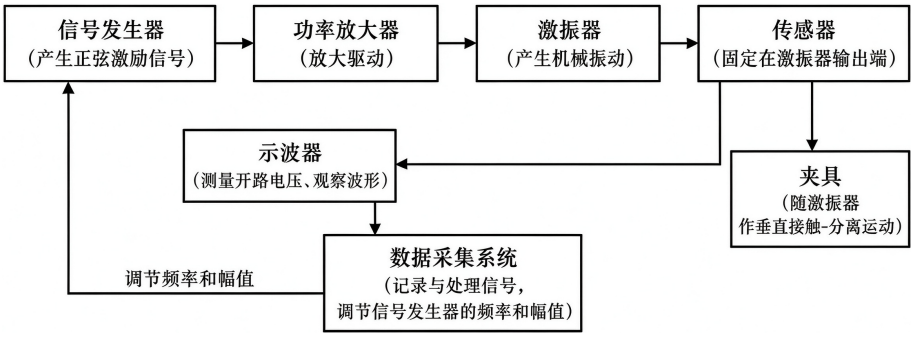


Figure 5. Schematic diagram of the test platform for the self-powered vibration sensor
图 5. 自供电振动传感器测试平台示意图

在上述平台上，测试传感器在不同激励频率和最大分离距离下的电压响应。激励频率分别设为 5、10、15 和 20 Hz，最大分离距离分别设为 1、2 和 3mm，并通过实际调节与校核方法确定。传感器有效重叠面积为 20 mm × 20 mm，测试环境温度为 25℃，相对湿度为 45%。在各工况下，待波形稳定后记录数据，以峰–峰值作为电压幅值指标。每种工况重复测试 5 次，统计结果以折线图表示。

选取最大分离距离为 3 mm 的工况，使用示波器记录 5、10、15 和 20 Hz 下的连续输出电压波形，采样率为 10,000 Sa/s，记录时长为 10 s。对稳定电压信号去除直流均值并采用 Hann 窗进行 FFT 分析，结合完整波形的重复周期确定输出基频。

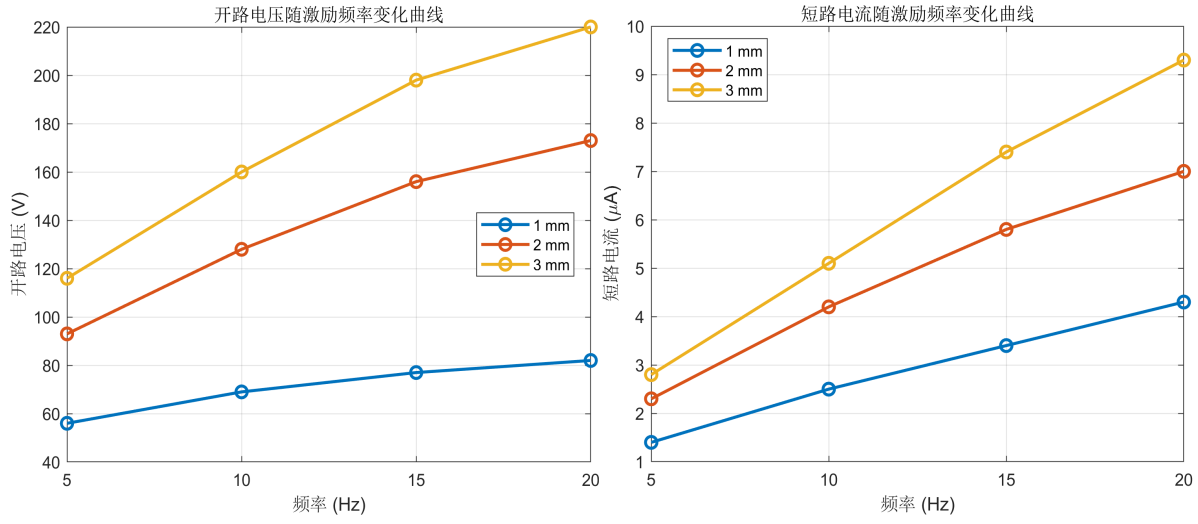
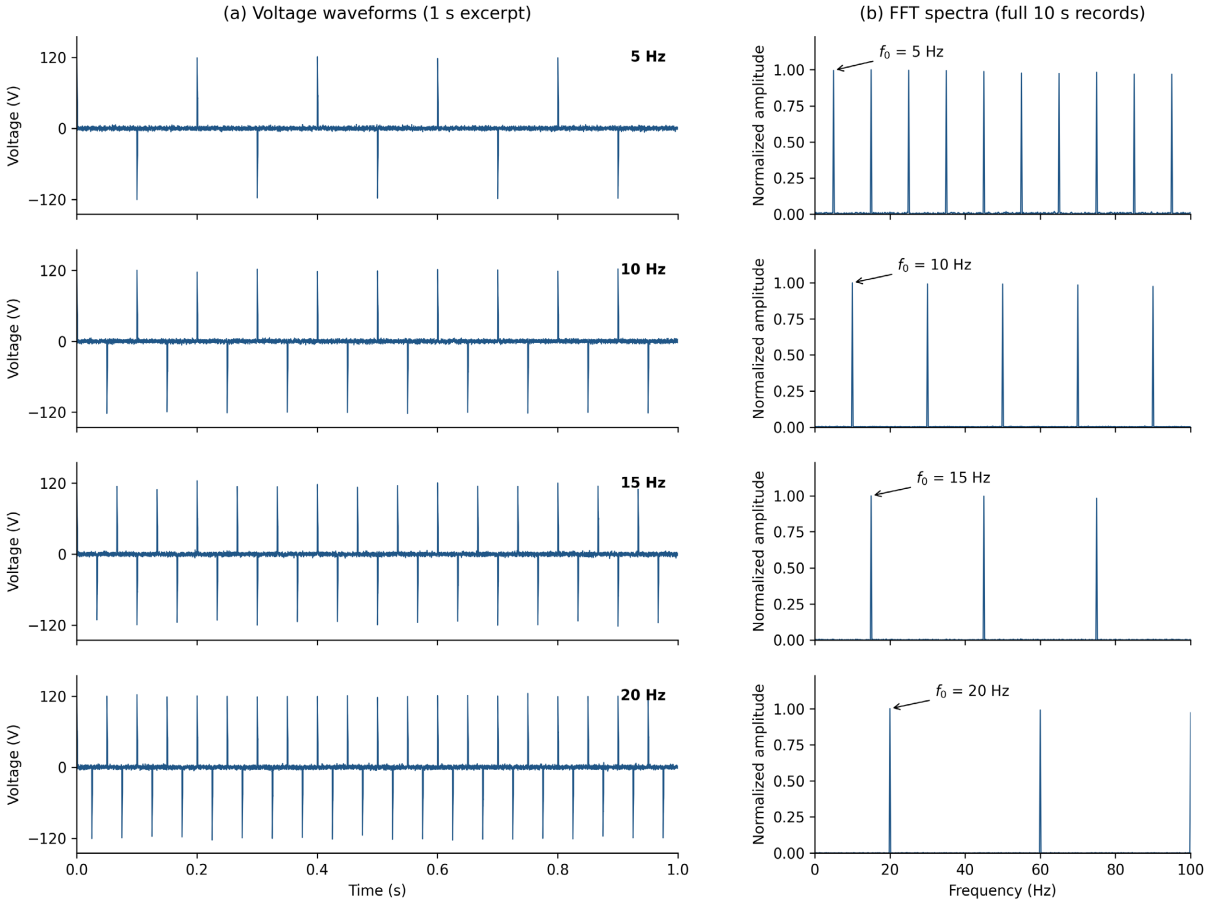


Figure 6. Variation of output performance of the sensor with frequency under different vibration amplitudes: (a) Variation of open-circuit voltage with vibration frequency; (b) Variation of short-circuit current with vibration frequency
图 6. 不同振动幅值下传感器输出性能随频率的变化；(a) 开路电压随振动频率的变化；(b) 短路电流随振动频率的变化

图 6 表明，在相同最大分离距离下，实测输出电压随激励频率增加呈上升趋势，在 20 Hz、3 mm 工况下电压峰峰值达到 220 V。根据式(2)，理想开路电压在表面电荷密度及分离距离不变时不直接取决于频率。实际测试中，频率变化可能同时改变接触力、接触持续时间及界面接触状态，进而影响摩擦起电过程；接触力与摩擦电荷之间的关联已有研究报道[5]。此外，示波器有限输入阻抗也可能影响不同频率下的实测电压。因此，本文观察到的上升趋势属于当前测试条件下的综合响应，尚不能确定各因素的独立贡献。



(a) 输出电压时域波形　　(b) 输出电压 FFT 频谱

Figure 7. Time-domain output voltage waveforms and FFT spectra of the sensor under different excitation frequencies
图 7. 不同激励频率下传感器的输出电压时域波形及 FFT 频谱

图 7 展示了不同激励频率下的输出电压时域波形及 FFT 频谱。随着激励频率增加，电压波形的重复周期相应缩短。结合时域周期与频谱分析，四个工况下识别的输出基频分别为 5.02、10.01、14.98 和 20.03 Hz，与激励频率基本一致，表明输出信号能够反映激励频率的变化。由于接触－分离输出具有非正弦特征，频率识别时应区分基频与高次谐波。电压峰峰值为多稳定周期统计平均值，长时采集波形中存在少量瞬时脉冲极值，源于摩擦界面接触状态的随机波动。

4. 结论

本文设计了一种基于 PI/PTFE 摩擦电材料的垂直接触－分离式振动传感器，并采用气溶胶喷印工艺制备 PI 摩擦电层。通过理想平行板模型和静电场仿真，分析了分离距离对电压响应的影响；通过振动测

试，获得了不同激励频率和最大分离距离下的输出电压。在 5~20 Hz 激励频率和 1~3 mm 最大分离距离的测试范围内，器件能够产生可测的电压信号，其中 20 Hz、3 mm 工况下的实测电压峰峰值为 220 V。时域波形及 FFT 分析进一步表明，在所测试范围内，输出基频与激励频率基本一致，体现了器件用于振动频率检测的可行性。

该结构为利用摩擦电信号开展振动检测提供了实验基础。后续需进一步评价其频率识别误差、输出重复性、长期稳定性及环境适应性，以明确其在机械设备状态监测中的适用范围。

参考文献

[1] Fan, F.R., Tian, Z.Q. and Wang, Z.L. (2012) Flexible Triboelectric Generator. *Nano Energy*, **1**, 328-334. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004

[2] Wang, Z.L. (2013) Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors. *ACS Nano*, **7**, 9533-9557. https://doi.org/10.1021/nn404614z

[3] Chen, J. and Wang, Z.L. (2017) Reviving Vibration Energy Harvesting and Self-Powered Sensing by a Triboelectric Nanogenerator. *Joule*, **1**, 480-521. https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.004

[4] Wang, H.L., Guo, Z.H., Zhu, G., Pu, X. and Wang, Z.L. (2021) Boosting the Power and Lowering the Impedance of Triboelectric Nanogenerators through Manipulating the Permittivity for Wearable Energy Harvesting. *ACS Nano*, **15**, 7513-7521. https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00914

[5] Vasandani, P., Mao, Z.H., Jia, W., *et al*. (2017) Relationship between Triboelectric Charge and Contact Force for Two Triboelectric Layers. *Journal of Electrostatics*, **90**, 147-152. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.11.001

[6] Jing, Q., Choi, Y.S., Smith, M., Ćatić, N., Ou, C. and Kar-Narayan, S. (2018) Aerosol-Jet Printed Fine-Featured Triboelectric Sensors for Motion Sensing. *Advanced Materials Technologies*, **4**, Article 1800328. https://doi.org/10.1002/admt.201800328

[7] Wang, K., Chang, Y.H., Zhang, C., *et al*. (2016) Conductive-on-Demand: Tailorable Polyimide/Carbon Nanotube Nanocomposite Thin Film by Dual-Material Aerosol Jet Printing. *Carbon*, **98**, 397-403. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.032

[8] Zou, H., Zhang, Y., Guo, L., Wang, P., He, X., Dai, G., *et al*. (2019) Quantifying the Triboelectric Series. *Nature Communications*, **10**, Article No. 1427. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x