

引用格式:陆旭,邹永久,曾宇迪,等. 基于液态金属基摩擦纳米发电机的振动传感器结构设计及其性能[J].大连海事大学学报,2026,52(1):79-86.

## 基于液态金属基摩擦纳米发电机的 振动传感器结构设计及其性能

陆旭,邹永久\*,曾宇迪,周长民,荆一航,徐敏义  
(大连海事大学 轮机工程学院,辽宁 大连 116026)

**摘要:**提出一种基于摩擦纳米发电机(TENG)的高灵敏度液态金属基振动传感器,用于船舶机械设备的实时振动检测。该传感器由导电织物、氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)薄膜及液态金属构成,利用摩擦起电效应将机械振动转化为电信号。实验验证表明,该传感器在 $5\sim 50\text{ m/s}^2$ 动态加速度范围内呈现优异的线性电压响应( $R^2=0.995$ ),灵敏度达 $0.218\text{ V}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$ 。此外,该传感器还具备良好的耐久性,经21 600次加速疲劳测试后信号衰减可忽略不计,已成功应用于船舶空气压缩机的振动监测。相较传统压电式与电磁式传感器,该技术具有高灵敏度、抗电磁干扰及柔性适配复杂工况等优势,为船舶等恶劣环境下的设备状态监测提供了新型解决方案,对于保障设备安全运行、预防故障发生具有重要意义。

**关键词:**振动传感器;摩擦纳米发电机(TENG);液态金属;机械振动检测

中图分类号:U664.1;TM31

文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2026)01-0079-08

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.008

### Structural design and performance of vibration sensor based on liquid metal-based triboelectric nanogenerators

LU Xu,ZOU Yongjiu\*,ZENG Yudi,  
ZHOU Changmin,JING Yihang,XU Minyi

(Marine Engineering College, Dalian Maritime  
University, Dalian 116026, China)

**Abstract:**This paper proposed a highly sensitive liquid metal-

based vibration sensor based on triboelectric nanogenerator (TENG) for real-time vibration monitoring of marine mechanical equipment. The sensor consisted of conductive fabric, fluorinated ethylene propylene (FEP) film, and liquid metal, utilizing the triboelectric effect to convert mechanical vibrations into electrical signals. Experimental verification shows that this sensor exhibits excellent linear voltage response ( $R^2=0.995$ ) within the dynamic acceleration range of 5 to 50  $\text{m/s}^2$ , with a sensitivity of  $0.218\text{ V}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$ . In addition, the sensor also has good durability, and the signal attenuation can be ignored after 21 600 acceleration fatigue tests, and has been successfully applied to vibration monitoring of ship air compressors. Compared to traditional piezoelectric and electromagnetic sensors, this technology offers advantages such as high sensitivity, anti-electromagnetic interference capability, and flexible adaptation to complex working conditions, which provides a novel solution for equipment condition monitoring in harsh environments such as ships, and is of great significance for ensuring the safe operation of equipment and preventing faults.

**Key words:**vibration sensor; triboelectric nanogenerators (TENG); liquid metal; mechanical vibration detection

## 0 引言

在现代工业体系中,机械振动监测技术对于保障设备安全运行、预防故障发生具有重要意义

收稿日期:2025-08-07;修回日期:2025-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52401417)

作者简介:陆旭(2000—),男,硕士生;邹永久\*(1989—),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail:zouyj0421@dlmu.edu.cn

义<sup>[1-3]</sup>。随着工业 4.0 和智能制造的快速发展,对振动传感器的灵敏度和适应性特性提出了更高要求<sup>[4]</sup>。这一技术升级在智能船舶领域同样关键<sup>[5]</sup>,准确的振动信息监测,可为航行安全与智能运维提供核心数据支撑。机械振动作为反映设备运行状态的核心物理量,其相关特征参数(如振幅、频率、加速度等)的精确获取,为设备的健康维护、潜在故障的早期预测与性能优化提供了不可或缺的数据支撑<sup>[6]</sup>。例如,在工业生产线中,对旋转机械(如压缩机、泵、风机)进行持续的振动监测,能够及时识别轴承磨损、转子不平衡、轴系不对中等典型故障征兆,有效防止因设备突发失效导致的生产停滞和重大经济损失。此外,通过实时振动监测系统采集的数据,结合人工智能算法进行趋势分析和故障预测,可以优化设备的维护周期,实现从“定期检修”向“预测性维护”的转型,进而显著降低维护成本、延长设备使用寿命<sup>[7]</sup>。同时,振动监测数据也可为设备运行效率的量化评估提供依据,为优化生产工艺参数、提升能源利用效率提供支撑。在关键工业领域,这种智能化的振动监测手段已成为保障设备安全运行、实现智能制造的重要技术支撑<sup>[8]</sup>。

压电式与应变片式传感器虽已广泛应用于振动检测领域,但其自身存在固有技术缺陷。压电传感器通常需配备复杂的电荷放大电路及信号调理模块,这无疑增加了系统复杂度;此外,其对环境温度变化敏感,在高温应用场景下性能易出现明显漂移甚至衰减。为此,Zhou 等<sup>[9]</sup>提出通过环化改性提升材料耐高温性能的方法,该方法虽有一定成效,但当温度超过一定阈值时,仍存在介电损耗剧增、信噪比降低的问题。压阻式应变片传感器则普遍存在柔性适配性差的问题,在测量较大应变时,非线性效应明显,且其固有的刚性基底导致柔韧性差,难以紧密贴合并适应具有复杂曲面或动态变形的被测物体表面<sup>[10]</sup>。Feng 等<sup>[11]</sup>采用薄化工艺提升传感器的柔性,但其弯曲半径仍然受限,导致动态测量过程中出现界面滑移现象。随着全球能源挑战日益严峻,以及行业对极端复杂环境(如高温、腐蚀环境、狭小空间)下监测需求的持续增长,开发兼具自供电能力、高灵敏度与良好环境适应性的新型机械振动传感技术愈发迫切<sup>[12-13]</sup>。

摩擦纳米发电机(TENG)作为一种基于摩擦起电与静电感应效应的新型能量转换及传感技术,近年来在科学界与工程领域受到广泛关注<sup>[14]</sup>。TENG 技术具备结构设计灵活、材料选择范围广、制备成本低廉及易于大规模生产等特性,这些优势使其在自供电传感器系统构建中展现出巨大潜力<sup>[15-17]</sup>。液态金属,尤以镓基合金为代表,凭借其独特的物理化学特性,已成为柔性电子与传感领域的研究热点<sup>[18]</sup>。这类材料展现出卓越的流动性与可变形能力,在外力作用下可实现形态的自主调控,同时维持电气连接的完整性及性能的稳定,为构建可紧密贴合复杂曲面、适应动态环境的柔性传感器提供了理想的材料载体。此外,液态金属所具备的极高电导率,有效保障了电荷传输过程的高效性。Zhan 等<sup>[19]</sup>利用液态金属的流动变形特性,提出了一种基于其特性的快速响应角度检测传感器。Rahman 等<sup>[20]</sup>提出了一种宽机械响应式液态金属传感器,可实现手势及触觉力的检测,为柔性传感器领域提供了新思路。

尽管基于液态金属的摩擦振动传感研究已取得初步进展,但该技术在各工业领域的广泛应用及深度技术拓展仍面临一系列关键挑战:一方面,在多维度振动感知方面,现有研究大多聚焦于单一维度振动信号的检测,如何通过创新器件结构设计,实现对不同频率、振幅振动的全面精准识别与量化,是亟待突破的核心问题;另一方面,灵敏度与分辨率还有待提升,随着设备微早期故障诊断需求的持续攀升,这就要求传感器具备更高灵敏度以捕捉微弱振动信号,同时具备更优分辨率以区分相近振动特征<sup>[21]</sup>。

针对上述研究背景及现存挑战,本文提出并研制出一种高灵敏度柔性液态金属基摩擦纳米发电机振动传感器(LM-TENG)。该传感器采用接触式独立层模式,其核心结构由封装于硅橡胶柔性基体中的液态金属液滴,以及上下两侧分别粘贴的导电织物电极与圆形 FEP 薄膜构成。首先,深入探究了液态金属种类、质量及摩擦层间隙尺寸等关键结构参数对 LM-TENG 输出电信号(电压、电流、电荷量)性能的影响规律。其次,系统评估了传感器的核心性能指标,包括灵敏度、线性度、响应时间、稳定性和重复性等。最后,搭建了模拟工业设备振动测试的平台,成功将该传感器

应用于船舶空气压缩机振动状态监测,并验证了其工程应用的可行性。该柔性 LM-TENG 传感器的研发,为复杂环境下的机械振动检测提供了一种创新且有效的解决方案,对推动智能传感技术的升级换代具有积极的推进作用。

## 1 振动传感器的设计及其工作原理

### 1.1 振动传感器结构及其工作原理

TENG 的基本原理为:基于两种不同材料接触摩擦时因电子亲和能力差异发生电荷转移(即摩擦起电效应),当带电材料发生分离或相对运动时,通过静电感应在电极间形成电势差,促使电子在外部电路中流动,进而将机械能(如振动、按压、滑动)转化为电能。TENG 的工作模式主要包括垂直接触-分离、水平滑动、单电极及独立层模式,其核心机制在于通过材料间的相对运动引发电荷分布变化,进而实现能量转换<sup>[22]</sup>。基于上述 TENG 的基本原理,本文设计了新型液态金属基摩擦电振动传感器,其结构如图 1 所示。LM-TENG 的结构组成从上而下依次为:硅橡胶外壳、作为上电极的导电织物、FEP 薄膜、液态金属液滴、FEP 薄膜、作为下电极的导电织物及硅橡胶下壳。液态金属液滴与上下两侧带有导电织物电极的 FEP 薄膜,共同构成了采用接触式独立层工作模式的 LM-TENG。这一巧妙设计充分发挥了液态金属的流动性与可变形性优势,使其在机械振动作用下产生上下往复运动,通过与上下 FEP 薄膜摩擦起电,进而实现对振动信号的传感检测。此外,硅橡胶外壳作为封装材料,不仅能实现对内部结构的保护,还能为该传感器赋予良好的柔韧性与足够的机械强度。

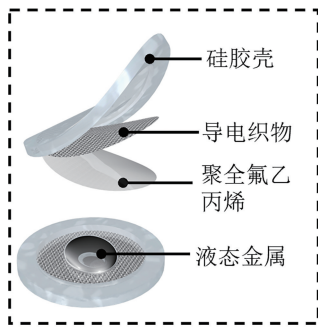


图 1 LM-TENG 的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of LM-TENG structure

图 2 为 LM-TENG 的工作原理图,详细阐释了该振动传感器将机械运动转化为电信号的完整过程。具体而言,当机械振动作用于 LM-TENG 时,液态金属液滴凭借自身优异的流动性与可变形性,随振动产生上下往复运动,进而与上下 FEP 薄膜交替接触与分离。在接触过程中,液态金属液滴与 FEP 薄膜因材料属性差异发生摩擦起电,使两者表面分别带上异种电荷;当二者分离时,基于电荷守恒定律,电极间会形成显著电势差。在该电势差的驱动下,电子沿外部电路定向移动,产生稳定电流输出,从而实现从机械振动信号到电信号的高效转换。

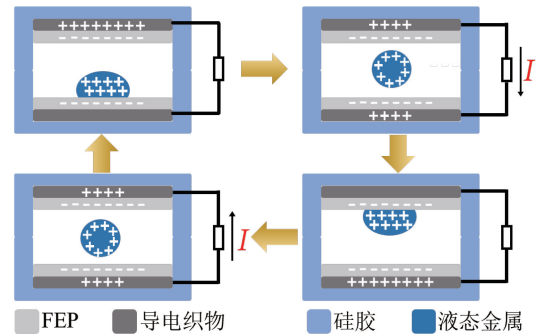


图 2 LM-TENG 的工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of LM-TENG

### 1.2 理论分析

为确定影响装置输出性能的关键因素,本文建立了 LM-TENG 的力学模型。考虑到振动传感器常用于检测垂直振动,因此,将该模型的振动形式简化为双平行表面间液滴的振动行为,并假设液滴的振动为近似简谐的周期性运动<sup>[23]</sup>。

液滴的动能为  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ , 由于  $v = dh/dt = A\omega\cos(\omega t + \varphi)$ , 因此,动能也可表示为:

$$E_k = \frac{1}{2}m(A\omega\cos(\omega t + \varphi))^2 \quad (1)$$

以液滴平衡位置为零势能面,则重力势能为:

$$U_g = mgh = mgA\sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中:  $h$  为液滴的垂直位移;  $A$  为振幅;  $\omega = 2\pi f$  为角频率( $f$  为频率);  $\varphi$  为初相位;  $m$  为液滴质量。

液滴系统的表面能  $U_s$  与接触面积和表面张力系数相关,上下界面贡献的表面能分别为  $U_{s1} = \sigma_1 S_1 \cos\theta_1$  和  $U_{s2} = \sigma_2 S_2 \cos\theta_2$ , 总表面能  $U_s = U_{s1} + U_{s2} = \sigma_1 S_1 \cos\theta_1 + \sigma_2 S_2 \cos\theta_2$ 。其中,  $S_1$ 、 $S_2$  分别为

上下表面的接触面积;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为上下界面的表面张力系数;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为对应的接触角。

振动过程中表面能的变化 ( $\Delta U_s$ ) 与接触面积的变化 ( $\Delta S_1$  和  $\Delta S_2$ ) 相关,其公式表达式为:

$$\Delta U_s = \sigma_1 \Delta S_1 \cos \theta_1 + \sigma_2 \Delta S_2 \cos \theta_2 \quad (3)$$

根据能量守恒定律,系统在一个振动周期内的总能量变化为零。将式(1)—(3)代入后可得:

$$\sigma_1 \Delta S_1 \cos \theta_1 + \sigma_2 \Delta S_2 \cos \theta_2 = -mgA \quad (4)$$

上述推导的能量守恒方程,为阐述液滴在上下表面间的接触面积变化与其振动频率、振幅的关系提供了理论支撑。本文仅推导液态金属液滴宏观运动的影响规律,故在推导过程中忽略了黏性阻力的作用。

### 1.3 振动传感器实验平台

图 3 为 LM-TENG 测试平台流程图。通过对该测试平台的振动频率与加速度进行精确调控,可模拟多维机械振动环境,进而表征 LM-TENG 传感器在复杂工况下的输出性能。

该振动传感器实验平台采用激振器驱动振动台实现机械振动模拟,其核心激振部件为 JZK-20 型电动式激振器(振幅:  $\pm 8$  mm),可生成正弦波等标准振动模式。通过信号发生器与功率放大器对振动频率、振幅及加速度参数实施闭环控制,并借助加速度传感器(KS96B.100)完成参数校准,可有效复现旋转机械振动等典型实际工况。信号采集系统由 NI 采集卡与 Keithley 6514 静电计协同组成。其中,NI 采集卡需先通过阻抗匹配电路,对摩擦纳米发电机输出的高电压、小电流信号完成降压调理,再执行模数转换与数据传输操作。Keithley 6514 静电计凭借其高电流灵敏度特性,可精准捕捉传感器振动产生的电信号,并实时记录振动过程中转移电荷量随时间的变化曲线。同时,基于 LabVIEW 程序开发的测控系统可实现电信号波形(如电压时域曲线、频谱图等)的实时可视化。实验中,将 LM-TENG 通过 Kapton 胶带粘贴于激振器顶杆上,借助该测试平台可对传感器开展不同结构参数(如电极间距、液态金属质量等)及工况条件(振幅 1~3 mm、加速度 5~50  $m/s^2$  等)下的电信号输出特性测试,为器件构型优化与振动信息感知能力验证提供实验支撑。

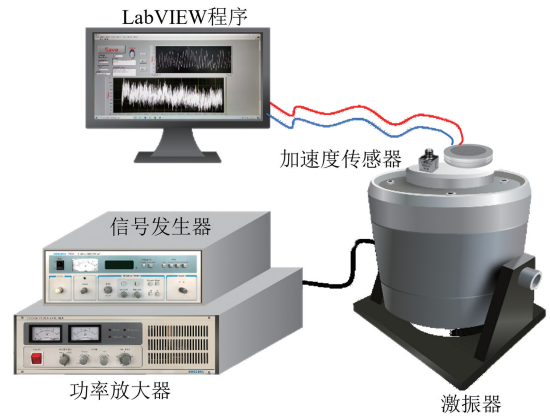


图 3 LM-TENG 测试平台流程图

Fig.3 Flow chart of LM-TENG test platform

## 2 实验结果与讨论

为系统研究 LM-TENG 的输出性能,需考量的核心参数包括液态金属配比、液态金属质量及电极间距。首先,选取电极间距 3 mm、液态金属质量 1.5 g、液态金属配比为 Ga : In : Sn = 68.5 : 21.5 : 10.0 的 LM-TENG 传感器开展可行性实验。

以不同液态金属配比为变量,研究传感器在 30 Hz 条件下输出电压随加速度 ( $5 \sim 50 m/s^2$ ) 的变化,结果如图 4 所示。

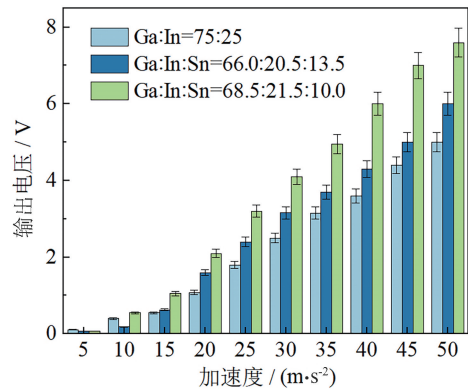


图 4 不同液态金属配比时, LM-TENG 传感器输出电压随加速度的变化

Fig.4 Curves of output voltage versus acceleration for the LM-TENG sensor with different liquid metal ratios

由图 4 可知,输出电压随加速度的增加呈线性增长趋势。对比三种不同液态金属配比对输出信号强度与线性拟合度的影响可知,配比为 Ga : In : Sn = 68.5 : 21.5 : 10.0 时, LM-TENG 传感器的输出性能最优。究其原因,主要有两点:一是

该配比液态金属的表面张力处于理想区间,可与摩擦层实现大面积紧密贴合,从而提升接触起电的电荷密度;二是其黏度适配振动频率,能够快速跟随形变完成接触-分离过程,有效避免形变滞后或接触不稳定问题。上述两方面因素协同作用,使 LM-TENG 传感器实现最优输出效果,峰值电压可达 8 V。据此,本文选取 Ga : In : Sn = 68.5 : 21.5 : 10.0 配比的液态金属开展后续实验。

在 30 Hz 条件下,不同液态金属质量(1.00 g、1.25 g、1.50 g、1.75 g、2.00 g)时,LM-TENG 传感器输出电压随加速度(5~50 m/s<sup>2</sup>)的变化如图 5 所示。

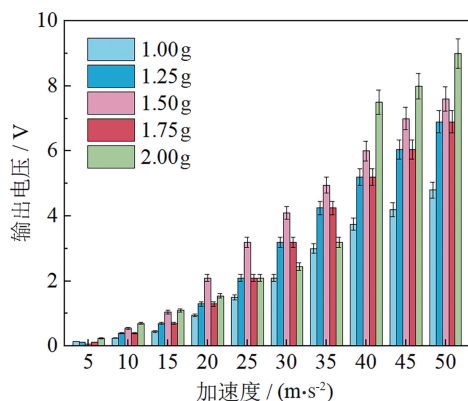


图 5 不同液态金属质量时, LM-TENG 传感器输出电压随加速度的变化

Fig.5 Curves of output voltage versus acceleration for the LM-TENG sensor with different liquid metal masses

由图 5 可知,输出电压随加速度的增加呈线性增长趋势。当液态金属质量为 2.00 g 时,输出电压达到最大值 9 V,但此时输出信号与加速度的线性度不佳。综合考虑输出信号强度与拟合线性度,当液态金属质量为 1.50 g 时,输出性能最佳,线性拟合度达 0.989。据此,本文选取液态金属质量为 1.50 g 开展后续实验。

在 30 Hz 条件下,不同液态金属质量(1.00 g、1.25 g、1.50 g、1.75 g、2.00 g)时,LM-TENG 传感器的输出电荷量随加速度(5~50 m/s<sup>2</sup>)的变化如图 6 所示。

图 7 为不同电极间距(2.50 mm、2.75 mm、3.00 mm、3.25 mm、3.50 mm)时,LM-TENG 传感器的输出电压随加速度(5~50 m/s<sup>2</sup>)的变化。由图

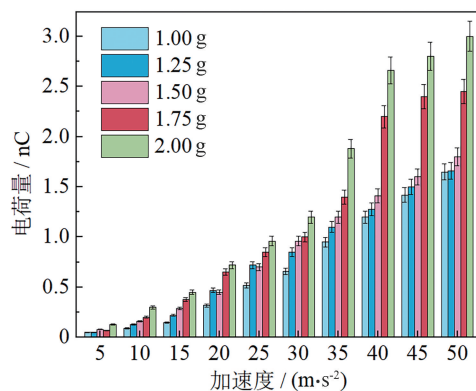


图 6 不同液态金属质量时, LM-TENG 传感器输出电荷量随加速度的变化

Fig.6 Curves of output charge quantity versus acceleration for the LM-TENG sensor with different liquid metal masses

7 可知,不同电极间距条件下,传感器输出电压随加速度的增大而升高;当电极间距为 2.75 mm 时,输出最优。核心原因在于表面张力与振动特性的协同适配:该间距下,液态金属的表面张力恰好可支撑其与摩擦层形成稳定的大面积接触,进而提升起电电荷密度;同时,该间距与振动幅度适配,液态金属能够高效完成接触-分离过程,避免过度形变或接触不充分的问题,减少能量损耗,最终使输出电压达 10 V,线性拟合度达 0.995。由此可见,电极间距大小也是影响传感器性能的重要因素,适宜的间距可优化装置内部的电场分布与电荷转移过程,从而提升传感器的检测灵敏度与输出稳定性。

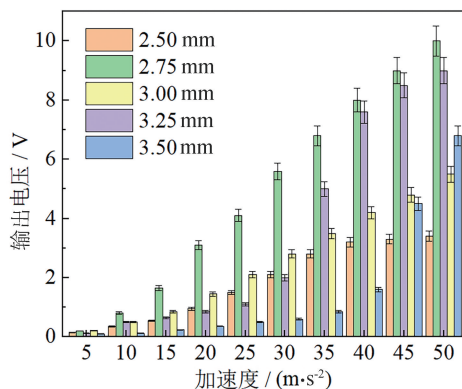


图 7 不同电极间距时, LM-TENG 传感器输出电压随加速度的变化

Fig.7 Curves of output voltage versus acceleration for the LM-TENG sensor with different electrode spacings

针对上述最优传感器配置(金属配比为 Ga : In : Sn = 68.5 : 21.5 : 10.0、电极间距 2.75 mm、液态金属质量 1.50 g),开展振动传感性能测试。图 8 为最优配置在不同频率(10 Hz、30 Hz、50 Hz、70 Hz、90 Hz)时,LM-TENG 传感器的输出电压随加速度(5~50  $\text{m/s}^2$ )的变化。由图 8 可知,在不同频率条件下,传感器的输出电压均随加速度的增大而升高。其中,当频率为 10 Hz 时,由于激振器的最大位移行程受限,产生 35  $\text{m/s}^2$  以上加速度所需的理论振幅已超出其物理极限,因此,该区间的的数据未能测得。

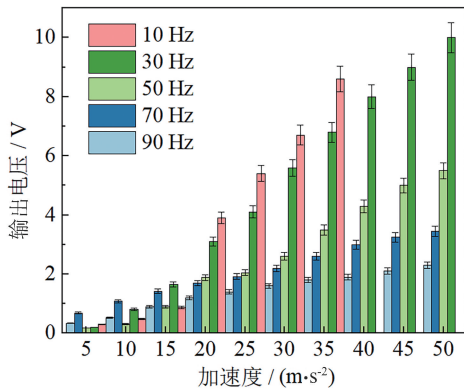


图 8 不同频率时, LM-TENG 传感器的输出电压随加速度的变化

Fig.8 Curves of output voltage versus acceleration for the LM-TENG sensor with different frequencies

图 9 为 LM-TENG 传感器在 20 Hz 频率、1~3 mm 振幅范围内的线性响应特性。其中,横坐标为机械振动振幅,纵坐标为传感器输出的峰值电压。预实验结果表明,当振幅低于 1 mm 时,传感

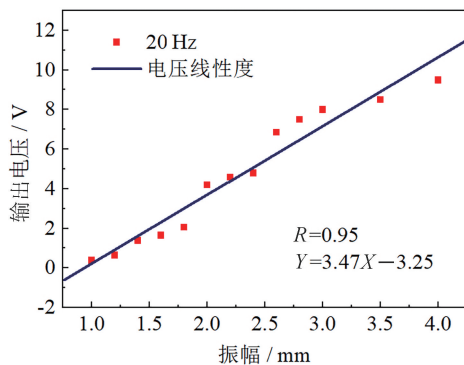


图 9 LM-TENG 传感器输出电压随振幅变化的线性响应特性

Fig.9 Linear response characteristics of LM-TENG sensor output voltage versus amplitude

器输出电压随振幅增大的线性度较差,因此,本文选取 1 mm 以上的振幅开展振幅传感性能测试。实验数据显示,随着振幅从 1 mm 逐步增加至 3 mm,输出电压呈现稳定的线性增长趋势,线性拟合优度达到 0.95,表明器件在该范围内具有较好的线性传感性能。具体而言,当振幅为 1 mm、2 mm 和 3 mm 时,传感器的输出峰值电压分别为  $0.4 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$ 、 $4.2 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$  和  $8.4 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$ 。经计算,其线性灵敏度为  $3.8 \text{ V/mm}$ 。

图 10 为最优配置装置的连续工作耐久性能测试结果。实验中, LM-TENG 传感器置于 30 Hz、20  $\text{m/s}^2$  的振动条件下。由图 10 可知,经过 21 600 次工作循环后,传感器的输出性能保持相对稳定,表明该器件具备良好的耐久特性,可满足长时间连续工作的使用需求。本文利用镓基液态金属的固有稳定性,并结合限制性结构设计,保证了液态金属在动态工作条件下的形态稳定性;传感器电输出信号的高度重复性与可逆性,证实其内部液态金属未发生不可逆分裂,进一步验证了该器件结构与工作性能的稳定性。

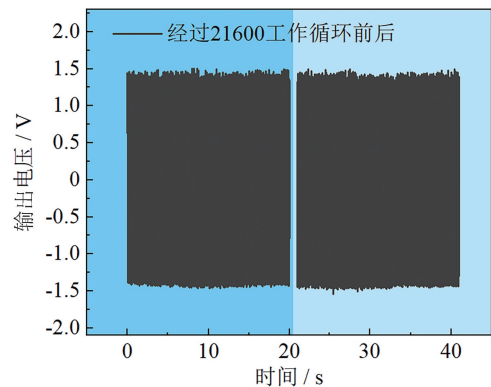


图 10 LM-TENG 传感器连续使用耐久性能测试  
Fig.10 Continuous operation durability test of the LM-TENG sensor

图 11 为 LM-TENG 传感器放置一段时间后的信号测试结果(测试条件均为 30 Hz、20  $\text{m/s}^2$ )。由图 11 可知,该传感器在非连续工作场景下仍具备优异的性能稳定性。具体而言,在第 1 天、第 3 天和第 5 天采集的传感器输出信号未出现明显的基线漂移、幅值衰减或波形畸变等现象,三次采集信号的电压幅值与波动水平均保持高度一致。该结果表明,即便传感器经一定时间的静置存放,其核心感知与信号输出功能仍能保持稳定,未受存

放时间的显著影响,进一步验证了该传感器在间断使用场景下的可靠性,能够满足实际应用中非连续工作模式的性能要求。

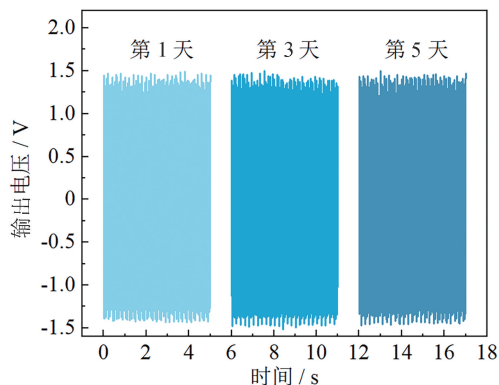


图 11 LM-TENG 传感器间隔使用耐久性能测试  
Fig.11 Durability test of LM-TENG sensor for intermittent operation

### 3 振动传感器的功能实现

为验证液态金属基高灵敏度柔性摩擦电振动传感器的实际应用性能,选取船用鼓风机设备开展现场测试。

图 12 为空气压缩机正常运行状态下的实际测试现场图。传感器安装于压缩机表面,可对其运行过程中产生的振动进行实时、直接监测,为后续的数据分析提供真实、可靠的原始数据。

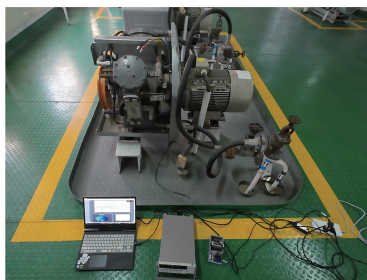


图 12 实际测试图

Fig.12 Actual test diagram

图 13 为空气压缩机正常运行时振动信号的快速傅里叶变换 (FFT) 图谱,其特征频率为 24.7 Hz。该测试结果与空气压缩机实际转速 (1440 r/min) 对应的理论振动频率高度吻合,充分验证了该传感器频率检测的准确性与可靠性,以及其精准捕捉设备运行过程中振动频率特性的能力。

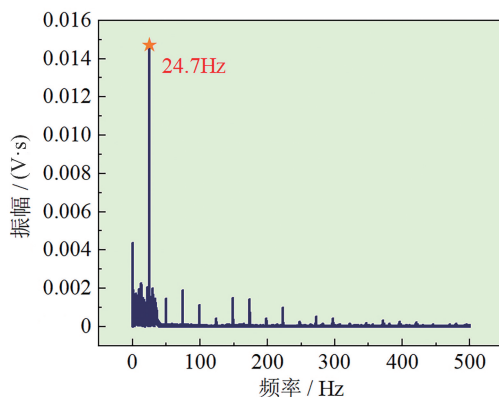


图 13 空气压缩机频谱图

Fig.13 Spectrum diagram of air compressor

图 14 为频率分析系统界面。该界面可直观显示传感器实时采集的振动信号,并可直接输出经 LabVIEW 内置 FFT 算法处理后的振动信号频率值。操作人员可通过该界面掌握机械设备的实时运行状态,及时发现潜在问题。该系统界面为空气压缩机正常运行状态下的振动测试数据,其特征频率为 25 Hz。该测试结果与设备实际振动频率高度吻合。上述结果进一步验证了该传感器在实际设备工况下,可精准检测振动频率的优异性能。

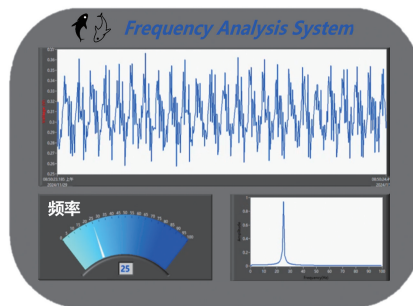


图 14 频率分析系统界面

Fig.14 Interface of frequency analysis system

### 4 结 论

本文提出一种高灵敏度液态金属基摩擦电振动传感器,设计了 LM-TENG 的新型结构,借助液态金属的优异特性,将机械振动高效转换为电信号,从而实现对振动的精准检测。研究确定影响该装置输出性能的关键因素为液态金属配比、液态金属质量及电极间距,并优化得到其最优工作参数:液态金属配比为 Ga : In : Sn=68.5 : 21.5 : 10.0,液态金属质量为 1.50 g,电极间距为 2.75 mm。

在此条件下,优化后的 LM-TENG 传感器表现出优异的电信号输出与线性拟合度,可准确捕捉微弱复杂的振动信号,并在各种环境中稳定运行。该传感器可准确检测加速度变化、振幅及频率特征,已成功应用于船舶空气压缩机的实时振动监测。

### 参考文献 (References):

- [1] FANG L, ZHENG Q W, HOU W C, et al. A self-powered vibration sensor based on the coupling of triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator [J]. *Nano Energy*, 2022, 97:107164.
- [2] TAMA B A, VANIA M, LEE S, et al. Recent advances in the application of deep learning for fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(5): 4667-4709.
- [3] BHATTA T, PRADHAN G B, SHRESTHA K, et al. All elastomeric pillars-based triboelectric vibration sensor for self-powered broad range machinery condition monitoring [J]. *Nano Energy*, 2023, 117:108929.
- [4] LONG Z H, LIN W K, LI P Y, et al. One-wire reconfigurable and damage-tolerant sensor matrix inspired by the auditory tonotopy [J]. *Science Advances*, 2023, 9(48): 11.
- [5] 李光正, 王涛, 张国勇. 基于物联网体系的智能船舶设计 [J]. *船舶工程*, 2012, 34(6): 59-62.  
LI G Z, WANG T, ZHANG G Y. Study of intelligent ship design based on internet of things [J]. *Ship Engineering*, 2012, 34(6): 59-62. (in Chinese)
- [6] HAN H W, LUO J C, GAO L X, et al. A wideband vibration sensor with piecewise nonlinear and up-frequency coupling strategy for mechanical fault monitoring [J]. *Nano Energy*, 2024, 129: 110040.
- [7] GAWDE S, PATIL S, KUMAR S, et al. A scoping review on multi-fault diagnosis of industrial rotating machines using multi-sensor data fusion [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(5): 4711-4764.
- [8] ZOU Y J, ZENG Y D, LU X, et al. Highly sensitive CNT-sponge triboelectric vibration sensor for machinery monitoring [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, 10(16): 10.
- [9] ZHOU T T, WANG S L, AO Y, et al. High-temperature-resistance flexible piezoelectric sensor via cyclized PAN/BTO nanofibers [J]. *Nano Energy*, 2025, 138: 110910.
- [10] YIN H, LI Y T, TIAN Z Y, et al. Ultra-high sensitivity anisotropic piezoelectric sensors for structural health monitoring and robotic perception [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 42.
- [11] FENG B, JIN H, FANG Z J, et al. Flexible strain sensor based on ultra-thin quartz plate [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18571-18577.
- [12] DU T L, DONG F Y, XI Z Y, et al. Recent advances in mechanical vibration energy harvesters based on triboelectric nanogenerators [J]. *Small*, 2023, 19(22): 27.
- [13] 徐新, 石岳功, 徐敏义, 等. 基于固液摩擦纳米发电机的法兰泄漏监测技术 [J]. *大连海事大学学报*, 2023, 49(3): 114-121.  
XU X, SHI Y G, XU M Y, et al. Pipeline flange leakage monitoring technology based on solid-liquid triboelectric nanogenerator [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2023, 49(3): 114-121. (in Chinese)
- [14] WANG Z L. Triboelectric nanogenerator (TENG)-sparking an energy and sensor revolution [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137.
- [15] DU T L, SHEN D L, XI Z Y, et al. Highly adaptive and broadband triboelectric energy harvester with stretching silicone rubber strip for variable harmonic frequency vibration [J]. *Nano Research*, 2024, 17(5): 4089-4099.
- [16] ZOU Y J, SUN M Z, XU W P, et al. Advances in marine self-powered vibration sensor based on triboelectric nanogenerator [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1348.
- [17] DU T L, ZUO X S, DONG F Y, et al. A self-powered and highly accurate vibration sensor based on bouncing-ball triboelectric nanogenerator for intelligent ship machinery monitoring [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 218.
- [18] GUO Z H, GAO X H, LU J S, et al. Recent advances for liquid metals; synthesis, modification and bio-applications [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 143: 153-168.
- [19] ZHAN F, LI P L, FU J H, et al. Liquid metal-based angle detection sensor [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(7): 3571-3578.
- [20] RAHMAN M S, HUDDY J E, HAMLIN A B, et al. Broadband mechanoresponsive liquid metal sensors [J]. *npj Flexible Electronics*, 2022, 6(1): 71.
- [21] QIN J H, CUI D D, REN L, et al. Emerging advances of liquid metal toward flexible sensors [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(14): 2300431.
- [22] CHENG T H, SHAO J J, WANG Z L. Triboelectric nanogenerators [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3(1): 39.
- [23] YI P S, THURGOOD P, NGUYEN N, et al. Oscillation and self-propulsion of Leidenfrost droplets enclosed in cylindrical cavities [J]. *Soft Matter*, 2020, 16(38): 8854-8860.