

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.021

# 基于摩擦纳米发电机的输电线路振动能量收集装置

高思航, 冯少轩, 刘咏熙, 王锐, 韦昊, 罗小婷

(重庆邮电大学(工业物联网与网络化控制教育部重点实验室), 重庆 400065)

**摘要:**在电力物联网蓬勃发展的当下,如何持续且长时间地供能成为了数以万计的传感器所要面临的技术难题。摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)作为新崛起的高效供能技术,在传感器的自供电领域有着非常广阔的应用前景。文中基于摩擦电工作原理,利用多层弹性体结构的垂直接触分离 TENG,设计出一种面向输电线路微风振动的多层弹性体 TENG 能量采集装置。通过振动能量采集器输出性能测试平台模拟输电线路微风振动状态,对不同频率和振幅下能量采集器的基本电气特性进行测试,结合电能管理策略,构建面向输电线路微风振动的振动能量采集自供电系统,实现宽频带振动能量的高效采集与转换,完成对商用传感器的供能。最后,通过输电线路振动缩比模型验证文中所设计振动能量采集装置的有效性与可行性。文中设计的振动能量采集自供电系统能够有效地将输电线路宽频振动能量转换为电能,具有结构简单、经济性好的特点,解决了电力物联网传感器不能持久绿色供电的问题。

**关键词:**摩擦纳米发电机(TENG); 电力物联网; 输电线路; 微风振动; 自供电系统; 宽频带能量收集

**中图分类号:** TM282

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)05-0208-08

## 0 引言

目前,随着电力物联网的快速发展,输变电网络已经发生了巨大的变化<sup>[1-2]</sup>。电力设备稳定、智能、自感知等特点,有效保障了智能电网安全稳定运行<sup>[3]</sup>。架空输电线路在电力传输系统中起着至关重要的作用,高压架空输电线路具有大跨度、高断面的特点,在风荷载作用下,卡门涡旋是在输电线路垂直方向交变的高频振动驻波,振动频率为 10~60 Hz,振幅小于 10 mm<sup>[4]</sup>。持续的微风振动会进一步加剧输电线路的疲劳,甚至导致绞线断裂和塔架倒塌,严重威胁电网的安全可靠性<sup>[5]</sup>。因此,通过对高压架空输电线路振动状态的监测,实现对微风振动的实时监测具有重要意义,这主要依赖于传感器技术的发展<sup>[6-7]</sup>。目前,分布式加速度传感器、光纤传感器和压电传感器已广泛应用于传输线风振监测<sup>[8-10]</sup>。这些传感器在材料成本高、非线性测量误差方面具有不可忽视的局限性,并且不适合在恶劣的电力传输环境中应用<sup>[11-12]</sup>。值得注意的是,在输电线路在线监测系统中,传感器大多由化学电池供电,少数是基于太阳能和感应电源的设备<sup>[13-14]</sup>。然而,传统的基于电池和太阳能的供电受到续航能力弱、维护成本高和环境污染的限制,无法实现全天候、低维护、绿色环保的自供电<sup>[15-16]</sup>。磁场和电场能量提取技术存在过热、体积大、效率低的缺点,难以满足供电稳定性和可靠性的要求。

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52307162)

为了满足输电线路的长期监测需要,环境微能量收集技术是为传感器提供电力的一种替代方案。利用压电发电机、电磁发电机和摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)从环境中捕获微能量并将其转化为电能,是目前国内外研究的热点<sup>[17-19]</sup>。值得注意的是,输电线路微风振动过程中产生的振动能量为自供电系统的应用提供了可行性。传统的压电发电机与电磁发电机难以高效收集振幅较小的振动能量,进而使得振动能利用受限。接触分离模式下的 TENG 已被证明是收集环境振动能量最有效的方式之一,包括折叠多层结构的 TENG、弹簧式的 TENG、多层结构的 TENG 等<sup>[20-22]</sup>。文献[23]等提出一种振动驱动的基于 TENG 的折叠结构,用于收集振动能量并监测输电线路的运行状况,然而,采集到的 3.5~5 Hz 的振动频率范围并未覆盖传输线微风振动的主要频段,且折叠结构存在接触和分离不充分的局限性,导致高频振动条件下输出不足且杂乱。文献[24]提出一种基于弹簧质量的多层 TENG,用于振动能量收集和微风振动宽带传感,然而由于具有变形无突变特征的物理弹簧,导致在低振幅状态下,基于弹簧的 TENG 只在底部接触和分离。而基于弹簧的 TENG 的振动能量收集主要集中在谐振频率附近,故宽带平均输出较低。综上所述,考虑到多层结构 TENG 在接触分离模式下具有空间利用率高的优点,因此多层结构 TENG 是一种具有良好应用前景的输电线路微风振动能量收集方法。

文中针对输电线路微风振动特征,提出一种

基于多层弹性体垂直接触分离 TENG 的振动能量采集器结构原理设计。搭建振动能量采集器输出性能测试平台,对其输出性能进行分析,并提出相应的电能管理策略。搭建振动能量采集自供电系统,验证其在输电线路振动状态下的自供电特性。文中所提输电线路微风振动能量收集策略表明 TENG 在输电系统振动能量收集应用中具有广阔前景。

## 1 多层弹性体 TENG 结构模型

面向输电线路振动能量采集应用场景,针对风载荷作用下导线微风振动特征,将具有结构灵活、高灵敏传感特征的垂直接触分离模式 TENG 作为导线微风振动能量采集设计方案。根据 TENG 典型的接触分离工作模式,将输电线路微风振动能量采集器设计为一种具有多层结构的 TENG,如图 1 所示。

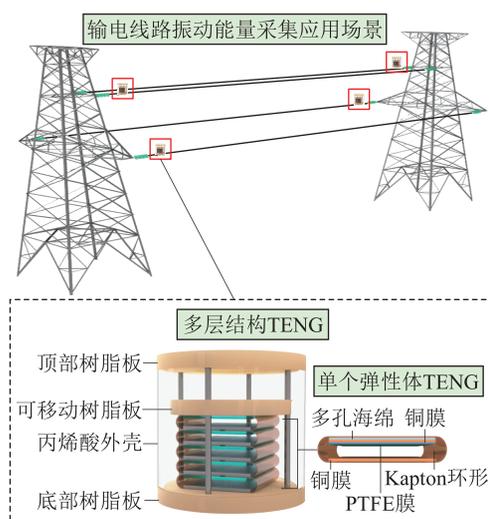


图1 导线振动能量采集应用场景与振动能量采集器结构

Fig.1 Application scenario of wire vibration energy acquisition and structure of vibration energy collector

将具有优异柔性、重量轻和适当刚度的聚酰亚胺薄膜设计为环形弹性体,作为 TENG 结构的基底材料。针对单个 TENG 结构,拟采用高性能导电铜膜与具有表面纳米线结构的四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 膜作为其正、负摩擦层,将 PTFE 膜附着在铜膜电极上并与多孔弹性海绵贴合,以进一步实现软接触、高稳定性和强导电性,将多个环形弹性体 TENG 结构叠加构成多层柔性弹性体 TENG 结构,使其在外部振动激励下表现出类弹簧运动特征。将多层柔性弹性体 TENG 结构集成于一个绝缘、密封的丙烯酸圆柱容器中,其中多层 TENG 结构定于中间移动树脂板和底部树脂板之间,在外部微风振动激励作用下,可移动树脂板在丙烯酸容

器内部的钛合金支撑棒上垂直振动,多层柔性弹性体 TENG 在可移动树脂板垂直振动挤压下不断接触分离,将导线振动机械能转换为电能。

以上述多层弹性体 TENG 结构设计与理论分析为基础,研制相应的振动能量采集器样机,如图 2 (a) 所示。文中省略多层弹性体 TENG 结构的材料优化部分,考虑到能量采集器结构尺寸限制与输出性能的平衡,通过系统分析与对比,设计振动能量采集器总体尺寸为  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 8\text{ cm}$ ,内部多层弹性体 TENG 的个数为 5,弹性体内部间距为  $4\text{ mm}$ 。此外,在实验室条件下搭建振动能量采集器输出性能测试平台,如图 2 (b) 所示。图 2 (b) 以电磁式激振器、信号发生器及功率放大器作为模拟导线微风振动的激励源平台,利用信号发生器产生一定频率的正弦信号,功率放大器对信号进行放大后输入电磁式激振器中,激振器产生与信号发生器相同频率的振动,通过加速度传感器测量激振器产生的振动加速度,进而调节输出信号的振动频率与幅度大小,为振动能量采集器提供导线微风振动频带内的不同振动频率与振幅工作模式,利用数据采集卡与高性能静电计采集振动能量采集器的输出,通过 LabVIEW 上位机对输出结果实现可视化与采集。微风振动模拟平台如图 2 (c) 所示。



图2 测试平台工作原理、振动能量采集器实物和振动模拟平台

Fig.2 Principle of testing platform, vibration energy collector and vibration simulation platform

## 2 实验结果分析

### 2.1 振动能量采集器工作原理

基于摩擦起电和静电感应耦合效应,以振动能量采集器中的单个弹性体 TENG 为例,对其工作原理进行分析。机电转换过程可以分为 4 个阶段,如图 3 所示。首先,在外部风振激励诱导的磁体的挤压下,每个弹性 TENG 中的上 PTFE 膜与下电极完全接触,并通过摩擦起电作用在 PTFE 和电极表面分别产生等量的负电荷和正电荷。然后,PTFE 与电极的分离导致电极之间形成电位差。由于 PTFE 表面不能被完全屏蔽,电子在 PTFE 表面停留了一段时间,这促使电子从上电极移动到下电极,重新平衡静电状态,并产生与电子通过外负载运动方向相反的等量正电荷。PTFE 与电极之间重新建立静电平衡,使电流呈现先增大后减小的变化趋势。最后,当上电极与下电极逐渐接近并充分接触时,电子被从下电极驱动到上电极,直至重新建立静电平衡状态。从而形成反向电流,完成弹性 TENG 发电过程的整个循环。

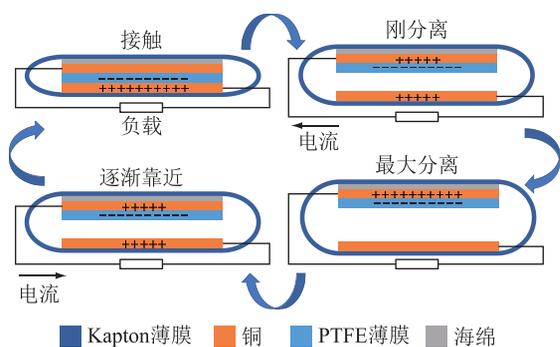


图 3 基于 TENG 的能量采集器工作原理

Fig.3 Working principle of energy collector based on TENG

### 2.2 不同振动条件下振动能量采集器输出特性

为了表征 TENG 的电气输出性能,利用振动能量采集器输出性能测试平台模拟微风振动的特征振频(15~35 Hz)与振幅(1~6 mm)。针对 5 mm 振幅条件,对振动能量采集器在 15~35 Hz 振频范围内的输出电气性能进行测量,获得其开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、转移电荷  $Q_{sc}$  的峰值变化趋势,见图 4。可见,随着振频从 15 Hz 增加至 20 Hz,振动能量采集器的  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $Q_{sc}$  迅速上升至最大值,分别达到 360 V、47  $\mu$ A、350 nC,由 A 点(18 Hz)的斜率可知三者的上升趋势基本一致。随着振频继续增加至 35 Hz, $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $Q_{sc}$  均呈现下降趋势,由 B 点(26 Hz)的斜率可知开路电压与转移电荷下降速率更快。由此可见,振动能量采集器在振频 20 Hz 左右时具有最佳输出,整个微风振动主频段(15~35 Hz)下的

平均峰值输出约为 240 V。

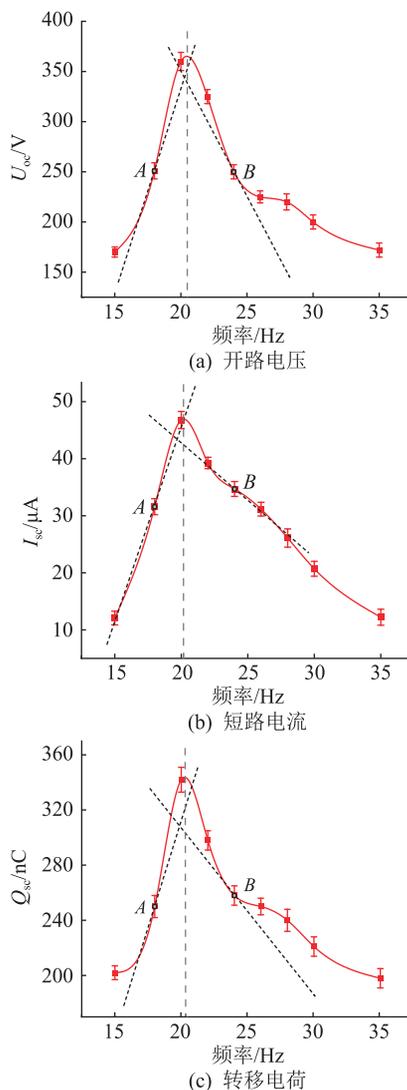


图 4 不同频率下振动能量采集器的输出电气性能变化趋势

Fig.4 Variation trend of output electrical performance of vibration energy collector at different frequencies

进一步分析不同振频下振动能量采集器的  $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $Q_{sc}$  输出波形。图 5 为 18、20、24 Hz 振频下振动能量采集器的  $U_{oc}$  波形。可以看出,能量采集器在 18 Hz 振频下的输出波形近似正弦波, $U_{oc}$  峰值达到 256 V,但输出都为正,这是 TENG 接触分离模式输出的主要特征。图 5 (b)、图 5 (c) 中峰值分别为 360、240 V,其输出波形不再呈现正弦波。其原因为当振频增加后,活动板作为配重模块在 5 mm 振动时,由于惯性向上运动,而外部激励振动已经开始向下运动,导致多层结构的上层与下层输出不同步,故输出波形并不是与外界激励匹配的正弦波。

图 6 (a)、图 6 (b) 分别为振动能量采集器在 24 Hz 下的  $I_{sc}$  与  $Q_{sc}$  输出波形,两者皆与开路电压波形相同,但仍与外部振动激励的正弦波不相同,其峰值分别可以达到 36  $\mu$ A 和 269 nC。

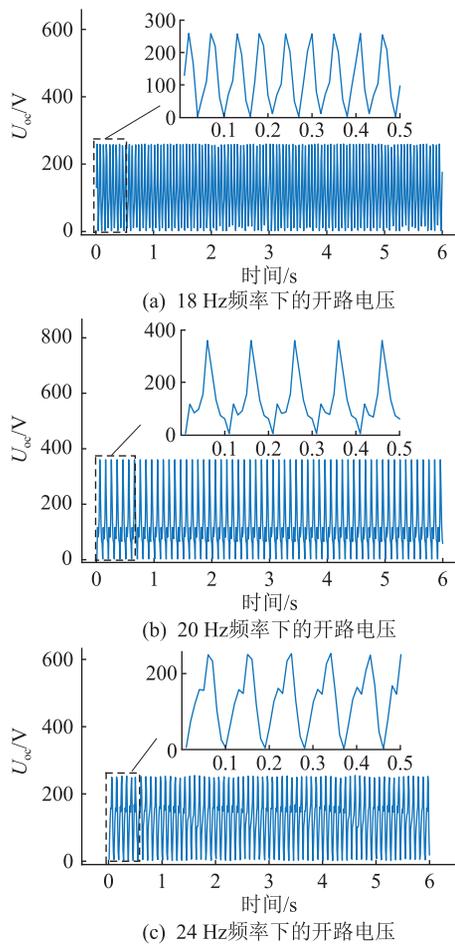


图5 18、20、24 Hz 频率下的开路电压  $U_{oc}$   
Fig.5 Waveform of open circuit voltage  $U_{oc}$   
at the frequency of 18,20,24 Hz

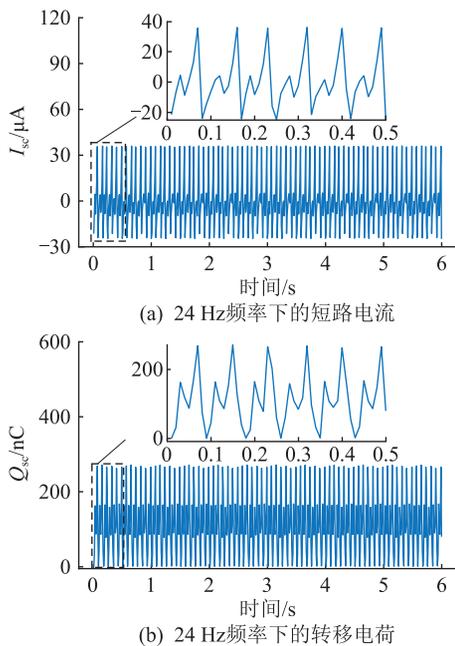


图6 24 Hz 频率下短路电流和转移电荷的波形  
Fig.6 Waveforms of short circuit current  $I_{sc}$  and trans-  
ferred charge  $Q_{sc}$  at the frequency of 24 Hz

负载阻抗的大小是影响基于 TENG 能量采集器的输出功率的重要因素之一,通过将振动能量采集器的输出端连接到可变负载,可以分别测试出不同负载阻抗下的负载电压与电流以及对应的瞬时输出功率。在 20 Hz 频率与 5 mm 振幅的外部振动激励下的负载特性曲线如图 7 所示。

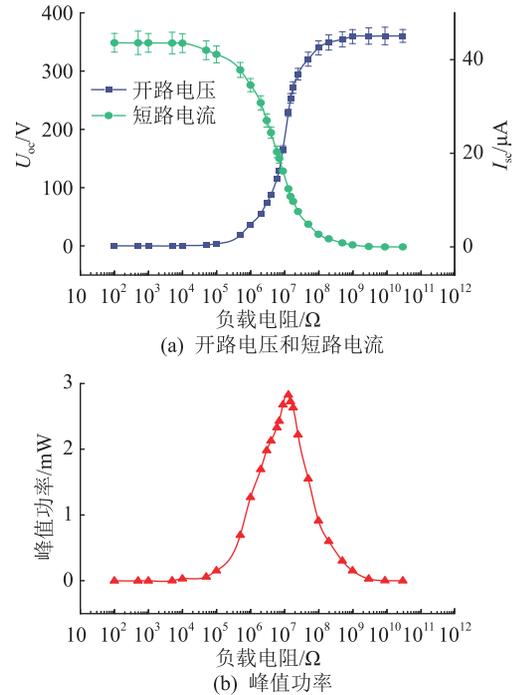


图7 振动能量采集器在 20 Hz 振频与  
5 mm 振幅下负载特性

Fig.7 Vibration energy collector load characteristics  
at 20 Hz vibration frequency and 5 mm amplitude

由图 7 可以看出,当负载阻抗为  $100 \Omega$  时,此时的负载电压几乎为 0,负载电流为  $46 \mu\text{A}$ 。随着负载阻抗持续增加到  $1000 \text{ M}\Omega$ ,负载电流逐渐趋近于 0,而负载电压逐渐增大并稳定在  $360 \text{ V}$  附近。根据负载电压与电流曲线可以近似计算出多层 TENG 的峰值输出功率曲线,峰值功率随负载阻抗的增大表现出先增大后减小的趋势,在  $10 \text{ M}\Omega$  附近达到最高峰值输出  $2.8 \text{ mW}$ 。

负极性薄膜材料的选择也会影响输出的大小。因此,针对不同负极性薄膜材料,测试振动能量采集器的输出特性。PTFE、聚全氟乙丙烯 (fluorinated ethylene propylene, FEP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET)、聚酰亚胺 (polyimide, PI) 以及聚乙烯 (polyethylene, PE) 作为负极性材料,400 000 次测试循环后输出电压  $U_{oc}$  分别为 310、225、190、120、105 V,与初始 10 000 次测试循环相比分别减少了 3%、20%、21.5%、20.2%、34.6%。综合耐久实验可以看出,与其他负极性薄膜相比,

PTFE 作为负极性薄膜时的输出电压最大且稳定性最好。

此外,进一步分析振动能量采集器输出与振动激励间的相关性,图 8 为振动能量采集器在 20 Hz 振频下的输出电压  $U_{oc}$  与振幅的变化关系。可以看出,随着振幅增加, $U_{oc}$  峰值呈线性上升趋势,拟合优化达到 98%,表明所设计的基于多层 TENG 结构的振动能量采集器在振动状态传感方面的巨大潜力。

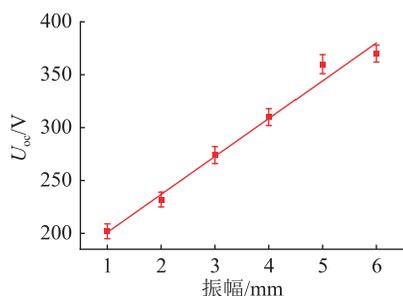


图 8 20 Hz 频率下振动能量采集器输出电压与振幅关系

Fig.8 Relation between output voltage and amplitude of vibration energy collector at the frequency of 20 Hz

### 2.3 激振平台振动能量采集器供能验证

为验证所设计的基于多层弹性体 TENG 结构的振动能量采集器作为输电线路振动能量采集装置的可行性,首先通过商用发光二极管(light emitting diode, LED)点灯实验对其供电能力进行验证。利用激振实验平台开展在 2、4、6 mm 振幅下的能量采集器 LED 点灯实验,如图 9 所示。可以看出,随着振动激励增加,能量采集器点亮的 LED 数量增多,具体在 2、4、6 mm 振幅激励下,能量采集器分别点亮了 100、240、360 个 LED 灯。

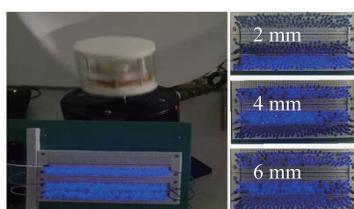


图 9 振动能量采集器 LED 点灯供能实验

Fig.9 Vibration energy collector LED lighting energy supply experiment

为验证所设计的振动能量采集器对传感器供电效果,首先需要对能量采集器输出的电能进行整流与稳压,即电能管理。文中提出由全桥整流电路、滤波电容、储能电容、滤波电阻以及稳压二极管组成的电能管理方案,实现整流、滤波以及存储等环节,在接入负载时稳压供能,如图 10 所示。

进一步搭建基于多层弹性体 TENG 结构的振动能量采集自供电系统,该自供电系统包含多层结构 TENG、电能管理电路以及毫瓦级商用温湿度传感

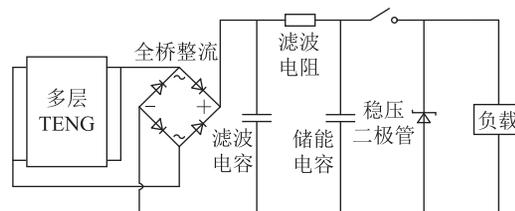


图 10 电能管理电路

Fig.10 Power management circuit

器。在该系统的工作过程中,振动能量采集器收集到的电能在经过整流与滤波后会储存到储能电容之中,使得储能电容的电压达到一定阈值。通过控制机械开关,释放存储在电容中的电能,对传感器进行供电,持续驱动温度计工作一段时间后关闭,即完成对传感器供能的一个循环。以 20 Hz 振频、5 mm 振幅条件为例,所设计的振动能量采集器自供电系统能够实现每 53 s 驱动传感器持续工作 22 s,如图 11 所示。在外部振动激励作用下,基于多层弹性体 TENG 的振动能量采集器将振动机械能转化为电能,收集到的电能经过电能管理电路的整流、滤波以及存储的功能将能量储存在 470  $\mu F$  的储能电容中,经过 119 s 充电达到温湿度传感器的额定工作电压之后,储能电容开始对温湿度传感器持续供电 22 s,工作一段时间后关闭,此时继续对储能电容充电,经过 53 s 后再次达到额定电压,进而再次对温湿度传感器供能,如此循环。值得注意的是,通过调整电能管理电路可以满足振动能量采集自供电系统对其他用于输电系统状态监测的低功耗传感器供能,如风速传感器、倾斜角度传感器以及气压传感器等。驱动不同类型传感器所需要的功耗是不同的,但是可以通过设计的电能管理电路控制和调整充电时间,进而控制输出总能量的大小,以便与不同的传感器进行适配。

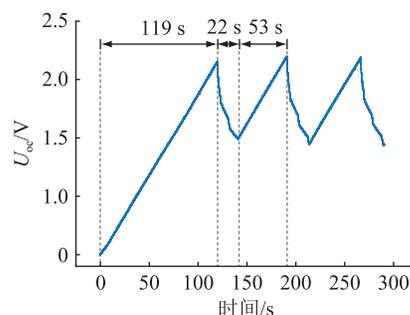


图 11 储能电容充电与传感器供能曲线

Fig.11 Energy storage capacitor charging and sensor energy supply curve

### 2.4 导线振动缩比场景振动能量采集器供能验证

为更好地展现所设计的振动能量采集自供电系统在导线振动条件下的能量采集及其对传感器

持续供电的情况,在实验室条件下搭建输电线路缩比模型,并利用激振器模拟导线振动状态。输电线路的缩比模型由缩比杆塔、钢芯铝绞线、绝缘子串、耐张线夹组成,如图 12(a)所示。缩比模型中使用 FXBW4-10/70 复合悬式绝缘子,绝缘子的一侧固定于缩比杆塔上,另一端连接至耐张线夹,钢芯铝绞线通过耐张线夹进行固定和支撑,钢芯铝绞线的标称截面积为 25/4、50/8、95/15,可依据模型进行替换。为了避免输电线路交流电流对输出的影响,设计了一个固定与屏蔽结合的柱式屏蔽外壳,屏蔽外壳由屏蔽桶、屏蔽底板以及导线固定板三部分组成,每个部分的内部表面都装设有铝膜用以形成电磁屏蔽空间。整个采集器装置可以放在屏蔽外壳中,屏蔽外壳的上部的导线固定板具有一个可以穿过导线的孔,其为可拆卸式。整个屏蔽外壳连接成一个整体,通过导线固定板与导线进行稳固连接,从而使得整个装置与外壳共同与导线形成紧密连接,如图 12(b)所示。图 12(c)和图 12(d)分别为采集器本身的质量以及加上屏蔽外壳后的质量,可以看出采集器装置仅有 293.1 g,加上屏蔽外壳也仅有 438.4 g,这得益于设计时对材料的选择以及对部分固定器件的空心化处理。

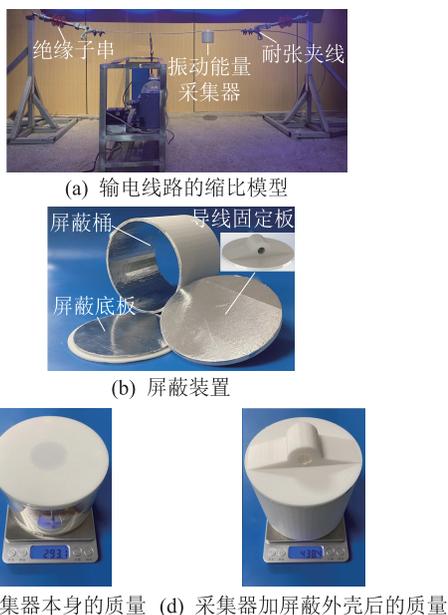


图 12 输电线路振动能量采集缩比模型、屏蔽装置以及采集器质量

Fig.12 Scale model of vibration energy acquisition of transmission line and quality of shielding device and collector

调节激振器输出,可以使振动能量采集器在导线主振频与振幅范围内获得较好的电输出特性,如图 13 所示。可以看出,相比于实验室激振平台,振动能量采集器在输电线路振动缩比平台上的输出

变低,并且出现不规则的波动起伏,但在输电线路微风振动主振频内,其开路电压与短路电流均值依然能保持在 100 V、15  $\mu\text{A}$  左右,满足电力物联网低功耗传感器供电需求。

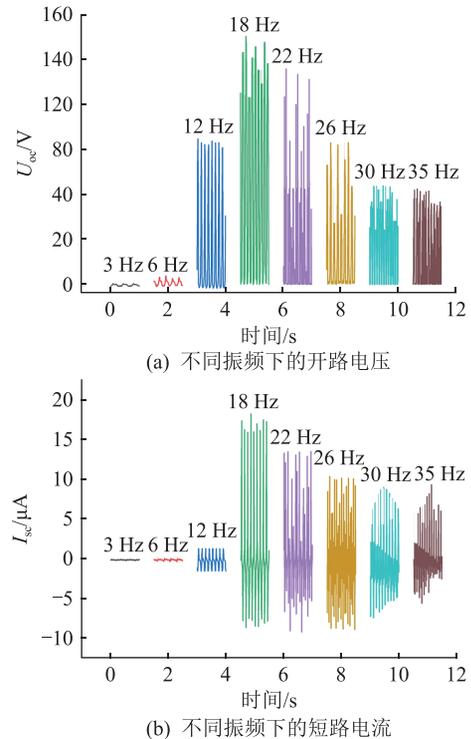


图 13 振动能量采集器在输电线路缩比振动模拟平台上的输出特性

Fig.13 The output characteristics of vibration energy collector on transmission line scaled vibration simulation platform

综上所述,相较于压电能量采集和电磁能量采集在小振幅下输出电压低、无法达到传感器额定电压的特点,TEENG 的高输出电压使得储能电容电压始终能够在持续的外部激励之下达到传感器的额定电压,通过对储能电容的选择可以匹配不同功率的传感器。此外,现代集成化工业设计使得振动能量采集自供电系统更加微型化,大幅提高其在三维空间上的能量转换效率。

### 3 结论

文中提出并设计出面向架空输电线路微风振动的多层弹性体 TENG 能量采集器结构,并提出行之有效的电能管理策略,构建了振动能量采集器自供电传感系统,通过振动测试平台模拟不同频率以及不同振幅的振动状态,测得多层结构 TENG 的电气输出特性。结果表明,作为能量收集器,多层 TENG 的最大开路电压、短路电流、转移电荷分别为 360 V、47  $\mu\text{A}$ 、350 nC,瞬时峰值功率可达 2.8 mW。可为 360 个 LED 或商用温湿度传感器供电,在微风

振动能量收集方面具有良好的前景。构建的自供电传感系统能够为传感器持续供电,测试结果表明在 20 Hz、5 mm 的振幅条件下,该自供电系统可以实现每 53 s 驱动传感器持续工作 22 s,能量采集与转化能力优异,解决了电力物联网传感器不能持久绿色供电的问题。此外,多层 TENG 输出与振幅之间的线性关系也展示出 TENG 在振幅传感方面具有巨大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] 郭劲枫,刘东,魏力鹏,等. 物联网技术在需求侧资源灵活接入的研究进展与应用展望[J]. 供用电,2023,40(9):1-8.  
GUO Jinfeng, LIU Dong, WEI Lipeng, et al. Research progress and application prospect of Internet of Things technology in flexible access of demand-side resources[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 1-8.
- [2] 何磊,唐宝锋,薛林,等. 新型电力系统背景下智慧配电物联网云主站建设与应用[J]. 供用电,2023,40(7):25-32.  
HE Lei, TANG Baofeng, XUE Lin, et al. Construction and application of intelligent power distribution Internet of Things cloud master station under the background of new power system[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 25-32.
- [3] 严康,陆艺丹,覃芳璐,等. 配电网用户侧异构电力物联网设备网络风险量化评估[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(11):64-76.  
YAN Kang, LU Yidan, QIN Fanglu, et al. Network security risk assessment of UPIDs in the distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 64-76.
- [4] 陈海,周波. 架空输电线路微风振动分析及防振设计[J]. 现代工业经济和信息化,2016,6(22):68-69,72.  
CHEN Hai, ZHOU Bo. Vibration analysis and anti vibration design of overhead transmission line[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016, 6(22): 68-69, 72.
- [5] 杨芳,唐小亮,尹文阔,等. 基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):169-177.  
YANG Fang, TANG Xiaoliang, YIN Wenkuo, et al. Analysis of transmission line wind vibration monitoring based on a multi parameter distributed optical fiber sensor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 169-177.
- [6] 吴建蓉,姜苏,黄欢,等. 不同电压等级直线塔线路覆冰拉力值预警模型及核密度概率估计研究[J]. 电瓷避雷器,2022(5):199-204.  
WU Jianrong, JIANG Su, HUANG Huan, et al. Early warning model and kernel density probability estimation of icing tension value of tangent tower lines with different voltage levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 199-204.
- [7] 康丽莉,陈科技,韩颂雨,等. 两次强对流天气对 500 kV 输电线路的影响[J]. 浙江电力,2023,42(3):79-87.  
KANG Lili, CHEN Keji, HAN Songyu, et al. Influence of two strong convective weather cases on a 500 kV transmission line[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(3): 79-87.
- [8] 王欣欣,赵建平,邓慰,等. 跨越高速铁路输电线路绝缘子振颤分析[J]. 电瓷避雷器,2022(6):174-179.  
WANG Xinxin, ZHAO Jianping, DENG Wei, et al. Vibration behavior of insulators of transmission line when crossing G-series high-speed railway[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 174-179.
- [9] LEI X, JI H, XU Q, et al. Research on data diagnosis method based on acoustic spectrogram of acoustic array sensor device[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 418-433.
- [10] 耿亮,王峥,王海宝,等. 基于加速度传感器的输电线路舞动监测系统研发及应用[J]. 电气时代,2018(4):80-84.  
GENG Liang, WANG Zheng, WANG Haibao, et al. Development and application of transmission line galloping monitoring system based on acceleration sensor[J]. Electric Age, 2018(4): 80-84.
- [11] 李子新,王硕,赵隆,等. 多参数影响的导线热稳监测及动态增容研究[J]. 智慧电力,2022,50(12):100-106.  
LI Zixin, WANG Shuo, ZHAO Long, et al. Thermal stability monitoring of conductor and dynamic line rating considering effects of multiple parameters[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 100-106.
- [12] 张博,陶亚光,常帅帅,等. MEMS 传感器输电线路舞动轨迹监测[J]. 中国测试,2022,48(1):53-59.  
ZHANG Bo, TAO Yaguang, CHANG Shuaishuai, et al. Transmission line galloping trajectory monitoring based on MEMS sensor[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 53-59.
- [13] 熊兰,何友忠,宋道军,等. 输变电线路在线监测设备供电电源的设计[J]. 高电压技术,2010,36(9):2252-2257.  
XIONG Lan, HE Youzhong, SONG Daojun, et al. Design on power supply for the transmission line on-line monitoring equipment[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2252-2257.
- [14] 熊兰,何友忠,席朝辉,等. 基于风光互补供电的监测设备供电电源[J]. 电源技术,2011,35(7):788-791.  
XIONG Lan, HE Youzhong, XI Zhaozhui, et al. Power supply for monitoring equipment based on wind and solar generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(7): 788-791.
- [15] 陈文哲. 高压输电线路监控设备感应取电装置的设计[J]. 宁夏电力,2015(2):46-50,64.  
CHEN Wenzhe. Design of induction electricity acquisition device for monitoring equipment of HV transmission line[J]. Ningxia Electric Power, 2015(2): 46-50, 64.
- [16] 李卫东,刘洛阳,孙迅雷. 基于超级电容储能模块在输电线路中取电的研究与应用[J]. 电工技术,2019(10):71-72.  
LI Weidong, LIU Luoyang, SUN Xunlei. Research and application of power acquisition based on super capacitor energy storage module in power transmission lines[J]. Electric Engineering, 2019(10): 71-72.
- [17] 张琛,熊庆,汲胜昌,等. 基于压电材料的变压器振动能量收集装置研究[J]. 电力工程技术,2021,40(6):173-178.  
ZHANG Chen, XIONG Qing, JI Shengchang, et al. Vibration

- energy harvesting device for transformer based on piezoelectric material[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(6):173-178.
- [18] 吴晔盛,刘启,曹杰,等. 收集振动能的摩擦纳米发电机设计与输出性能[J]. *物理学报*, 2019, 68(19):19-26.  
WU Yesheng, LIU Qi, CAO Jie, et al. Design and output performance of vibration energy harvesting triboelectric nanogenerator[J]. *ActaPhysica Sinica*, 2019, 68(19):19-26.
- [19] 高凯,彭晗,王劭菁,等. 基于非对称弹簧的宽频率范围振动能量收集器[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(10):2832-2840.  
GAO Kai, PENG Han, WANG Shaojing, et al. Wide frequency range vibration energy harvester based on asymmetric springs[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(10):2832-2840.
- [20] 庞亚凤,朱兴一,金屹阳,等. 基于折纸-摩擦纳米发电原理的自供电绿色智能轮胎研究[J]. *人工智能*, 2022(4):62-68.  
PANG Yafeng, ZHU Xingyi, JIN Yiyang, et al. Research on self-powered green intelligent tires based on origami triboelectric nanogenerator[J]. *AI-VIEW*, 2022(4):62-68.
- [21] 徐庆跃,潘远超,马浩翔,等. 用于收集岸基海浪能的弹簧辅助摩擦纳米发电机[J]. *热带海洋学报*, 2023, 42(4):176-183.  
XU Qingyue, PAN Yuanchao, MA Haoxiang, et al. Spring-assisted triboelectric nanogenerator for shore-based ocean wave energy harvesting[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023, 42(4):176-183.
- [22] 刘安国,苏玉香,罗健锋,等. 低频小振动能量收集的伞型摩擦纳米发电机[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10):4103-4112.  
LIU Anguo, SU Yuxiang, LUO Jianfeng, et al. Umbrel-shaped triboelectric nanogenerator for low-frequency small vibration energy harvesting[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10):4103-4112.
- [23] HU S T, YUAN Z H, LI R N, et al. Vibration-driven triboelectric nanogenerator for vibration attenuation and condition monitoring for transmission lines[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(13):5584-5591.
- [24] WU H, WANG J Y, WU Z Y, et al. Multi-parameter optimized triboelectric nanogenerator based self-powered sensor network for broadband aeolian vibration online-monitoring of transmission lines[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(13):2103654.

#### 作者简介:



高思航

高思航(1990),男,博士,副教授,研究方向为能源互联网自供电传感技术、电气设备在线监测与故障振动技术(E-mail:gaosh@cqupt.edu.cn);

冯少轩(1997),男,硕士在读,研究方向为能源互联网自供电传感技术;

刘咏熙(1999),女,硕士在读,研究方向为能源互联网自供电传感技术。

## Vibration energy harvesting device of transmission line based on triboelectric nanogenerator

GAO Sihang, FENG Shaoxuan, LIU Yongxi, WANG Rui, WEI Hao, LUO Xiaoting

(Chongqing University of Posts and Telecommunications (Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education), Chongqing 400065, China)

**Abstract:** At present, with the vigorous development of power Internet of Things, how to sustain and supply energy for a long time has become a technical problem that tens of thousands of sensors need to face. Triboelectric nanogenerator (TENG), as a new high efficiency energy supply technology, has a very broad application prospect in the field of sensor self-power supply. In this paper, based on the working principle of triboelectricity, a multi-layer elastic TENG energy harvesting device for transmission line breeze vibration is designed by using the vertical contact of the multi-layer elastic structure to separate the TENG, and the transmission line breeze vibration state is simulated by the output performance test platform of the vibration energy collector. The basic electrical characteristics of energy collectors at different frequencies and amplitudes are tested, and combined with power management strategies, a self-power supply system for vibration energy acquisition for transmission line breeze vibration is constructed, which realized efficient acquisition and conversion of wide-band vibration energy and completed energy supply for commercial sensors. Finally, the validity and feasibility of the vibration energy collection device designed in this paper are verified by the vibration reduction model of the transmission line. The vibration energy acquisition self-power supply system designed in this paper can effectively convert the broadband vibration energy of the transmission line into electric energy, and has the characteristics of simple structure and good economy, which can provide a new solution to solve the power supply problem of sensors for power Internet of Things.

**Keywords:** triboelectric nanogenerator (TENG); power Internet of Things; transmission line; breeze vibration; self-power supply system; broadband energy harvesting

(编辑 李栋)