

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.018

基于摩擦纳米发电机的输电线路微风振动自驱动传感技术

高思航, 刘咏熙, 王锐, 罗小婷, 韦昊, 何维晟

(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:随着泛在电力物联网的快速发展,大量传感监测节点部署在电力系统的各个环节,用于实时监测电力装备运行状态及周围环境参数。当前传统供电方式已难以满足电力系统传感节点的供电需求,尤其是户外复杂环境下的输电系统,因此利用输电系统周围环境中的微能量为各种传感器供电成为潜在的解决方案。为此,文中面向电力输电场景,基于摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG),将旋转型 TENG 与扑动型 TENG 进行结合,提出一种自供电多风向驱动的能量采集器,由基于旋转型 TENG 的风能采集模块和基于扑动型 TENG 的风矢量传感模块两部分组成。首先,通过测试风能采集模块的输出特性,提出备用电源的混合供电策略,实现由低到多高级风速下的蓝牙温湿度传感器高效供电。其次,验证表明风矢量传感模块可灵敏响应 2.6~13.5 m/s 范围内的 8 个方向风矢量,并建立输电线路截面风向角、风速范围与导线微风振动的逻辑关联,用于评估导线异常振动。最后,在此基础上开发由能量采集器、八通道信号采集电路、LabVIEW 上位机构成的环境温湿度与风矢量监测的自驱动传感系统,可实时监测温度、湿度、风速、风向等参数,并通过分析多风向矢量信息实现导线微风振动预警。

关键词:电力物联网;摩擦纳米发电机(TENG);输电线路;风能采集;风矢量监测;微风振动预警

中图分类号:TM282

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)05-0188-10

0 引言

当前,以电力系统为核心的能源互联网快速发展,促使大量传感监测节点部署于电力系统的各个环节,对电力装备运行状态、周围环境参数进行实时监测,保障设备安全稳定运行^[1-7]。然而,无线传感节点的爆炸式增长使得供能问题已经成为电力系统传感网络建设的瓶颈^[8-10],传统供电方式已渐渐无法满足众多传感节点的供电需求^[11-12],尤其对于电力输电系统而言,其所处环境的复杂性使得大量传感节点的持续稳定供电面临严峻挑战。

当前输电线路在线监测系统大多采用蓄电池结合太阳能的供电方式,虽然可行性与效率方面表现尚可,但依然存在较大局限性。传统以锂电池、太阳能为主的供电方式受限于续航能力弱、维护成本高及污染环境等问题,而感应取能技术虽可通过输电线路的电磁场获得电能,却存在易发热、体积大、效率低等问题^[13]。在此背景下,收集输电系统周围环境中的微能量为各种传感器供电被视为具有潜力的解决方案^[14-16]。基于环境微能量采集的自驱动技术按照工作原理可分为压电发电机(piezoelectric generator, PEG)、电磁发电机(electromagnetic generator, EMG)和摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)。相比于 PEG 与 EMG, TENG

作为一种新兴能源技术,凭借其功率密度高、结构灵活、响应灵敏度高及成本低等优势,已成为分布式传感节点环境微能量采集的主要手段。在电力输电系统工程场景中,可利用的环境能量形式包括太阳能、电磁能、振动能和风能。其中,高压杆塔周围丰富的风能资源尤为突出,为输配电网中的传感器供电提供有效解决方案。通过环境微能量采集技术将高压输电系统周围丰富的风能转换为电能,有望实现传感节点的长效、绿色供能。

目前,基于 TENG 的风能采集与风矢量传感研究已取得显著进展^[17-20],主流方案多采用旋转型 TENG 实现风能收集,扑动型 TENG 实现风矢量感知^[21-23]。文献[24]设计一种具有良好气动互补性的双转轴结构 TENG,可实现宽带风速下的高效风能采集,但缺乏风矢量感知功能。文献[25]提出一种用于风能收集的薄膜扑动型 TENG,为在室外环境下使用 TENG 驱动电动设备提供可行的解决方案,但目前扑动型 TENG 的输出功率还无法成为自供电电源使用。此外,输电杆塔周围丰富的风能可能导致线路发生微风振动,使得风矢量监测与导线振动间的关联成为近年来的研究热点。文献[26]设计一种基于垂直接触分离模式的多层结构 TENG,用于输电线路微风振动条件下的振动能量收集。然而,垂直接触分离模式 TENG 在输电线路户外复杂环境中的耐久性有待进一步验证。文中针对输电线路振动能收集,提出一种基于多层弹性

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307162)

性薄膜。其中,转子叶片数作为 TENG 的电极对数 p , 其个数影响着 TENG 的电流输出, 如图 4 所示。当电极对数为 6 时, RD-TENG 输出电流优于其他电极对数, 因此将转子叶片设计为 6 个。其定子采用与转子平行的上下两层亚克力圆板, 每层贴附 12 片扇形铜膜电极, 形成上层 TENG (upper TENG, U-TENG) 和下层 TENG (lower TENG, L-TENG) 的双层结构。当外界风激励驱动风杯旋转时, 转轴带动转子同步转动, 使 FEP 薄膜与铜膜电极发生周期性接触分离, 通过摩擦起电和静电感应效应实现电荷转移, 实现在 U-TENG 和 L-TENG 中产生有效电流输出。

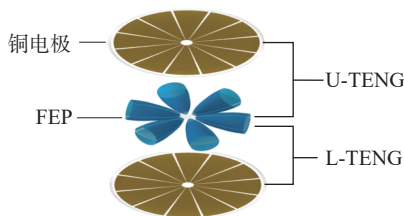


图 3 RD-TENG 结构
Fig.3 RD-TENG structure

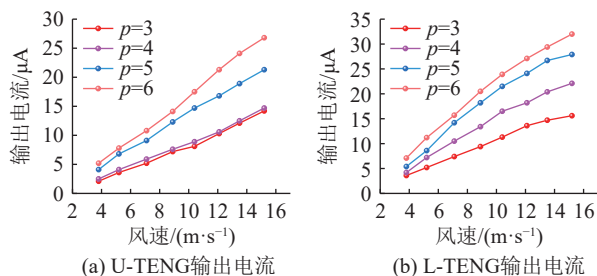


图 4 不同电极对数对输出电流的影响
Fig.4 The effect of different pole pairs on TENG's output current

扑动型风矢量传感模块采用风致薄膜拍打结构的摩擦纳米发电机 (flapping TENG, F-TENG) 设计, 其结构如图 5 所示。该模块由以下核心部件构成: (1) 内侧贴有 PTFE 薄膜的长方体结构; (2) 上下两侧嵌入式铜电极组。通过风致薄膜拍打驱动的摩擦发电效应, 系统可实现多方向风速检测与风向判定。当不同方向的气流作用于装置时, 风杯底部呈圆周分布的 8 个 F-TENG 传感单元将依据风向选择性激活。在气流激励下, PTFE 薄膜产生高频拍打运动, 与上层双侧铜电极发生周期性接触分离, 通过摩擦起电效应在界面产生异种电荷。持续的机械运动导致电极间形成交变电势差, 最终在外部电路中产生电流信号。通过分析各 F-TENG 模块的输出信号幅值差异, 即可实现风向的精确判别。

1.2 工作原理

RD-TENG 的工作原理基于摩擦起电与静电感

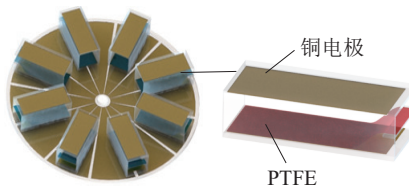


图 5 F-TENG 结构
Fig.5 F-TENG structure

效应, 如图 6 所示。定义与 FEP 负极性膜完全接触的铜电极为电极 1, 相邻的铜电极为电极 2。当负极性膜与电极 1 完全接触时, 两者接触表面会产生等量异种电荷。当负极性膜向电极 2 移动时, 静电感应效应驱动电子通过外部负载从电极 2 流向电极 1。当负极性膜与电极 2 完全接触时, 系统建立起新的静电平衡, 完成半个发电周期。当负极性膜继续移回电极 1 时, 电子反向流动, 从电极 1 流向电极 2, 从而完成整个发电循环。

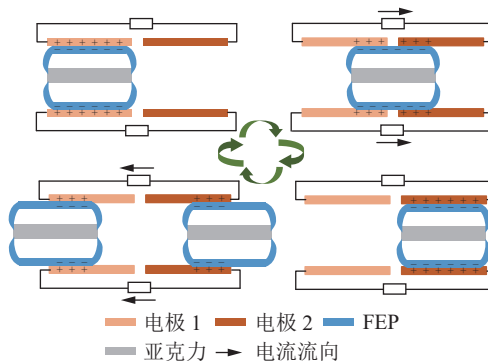


图 6 RD-TENG 工作原理
Fig.6 Working principle of RD-TENG

F-TENG 采用垂直接触分离工作模式, 其工作原理如图 7 所示。定义上层铜电极为电极 3, 与 PTFE 负极性膜充分接触的下层铜电极为电极 4。当负极性膜与电极 4 充分接触时, 接触面因摩擦起电效应产生等量异种电荷。当 PTFE 移动至电极 3 时, 静电感应驱动电子通过外部负载从电极 3 流向电极 4。当 PTFE 与电极 3 充分接触时, 接触面产生新的等量异种电荷, 系统建立新的静电平衡。PTFE 返回电极 4 过程中, 电子通过外部负载反向流动, 从电极 4 流向电极 3。当 PTFE 再次与电极 4 接触时, 电极 4 表明正电荷数量达到初始状态的 4 倍。当 PTFE 继续向电极 3 移动时, 电子再次反向流动, 从电极 3 流向电极 4, 完成整个工作循环。

1.3 风能采集器输出性能测试平台

为了对所设计的风能采集器进行性能测试, 搭建如图 8 所示的风能采集器测试系统。该系统由鼓风机、变频器、能量采集器、Keithley 6514B 高性能静电计、BNC 屏蔽盒、数据采集卡、LabVIEW 上

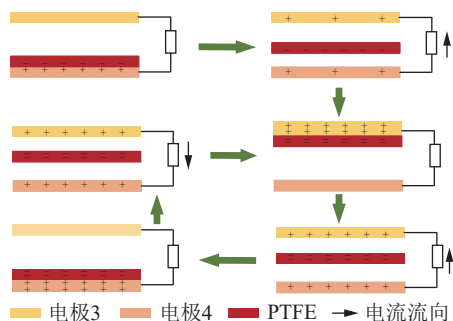


图7 F-TENG 工作原理

Fig.7 Working principle of F-TENG

位机组成。测试中采用鼓风机与变频器的组合作为激励源,以模拟实验室环境下不同风速条件,并通过风速仪对鼓风机输出的风速进行标定。Keithley 6514B 静电计可测量 100 aA~20 mA 的电流和 $10\ \mu\text{V}$ ~200 V 的电压,满足对能量采集器输出信号的测量需求。数据采集方面,静电计与 BNC 屏蔽盒连接,屏蔽盒内置数据采集卡,将测量数据传输至 LabVIEW 上位机。LabVIEW 上位机将输出信号转为模拟数据进行处理,并且实现实时记录与分析功能。

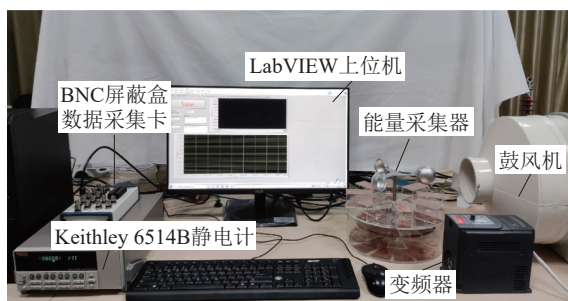


图8 风能采集系统

Fig.8 Wind energy acquisition system

2 能量采集器输出性能

2.1 RD-TENG 电学输出性能

测试不同风速下 RD-TENG 的输出电压与电流如图 9 所示。可以看出, U-TENG 和 L-TENG 的输出电压在 3.7~9.8 m/s 的风速范围内持续上升;当风速超过 9.8 m/s 后,输出电压分别稳定在约 220 V 和 270 V,随后基本不再变化。这是因为输出电压可表示为 $V=Q/C$,当风速达到一定值时,薄膜表面的转移电荷 Q 达到饱和状态,而旋转的 U-TENG 和 L-TENG 可等效为电容器。由于电容 C 仅与材料特性与材料尺寸有关,在模型结构确定后几乎保持不变,因此在系统稳定运行后,输出电压基本不再发生变化。此外, U-TENG 和 L-TENG 的短路电流随风速的增加逐渐增大,在 16.3 m/s 风速下达到最大短路电流,分别为 $22.5\ \mu\text{A}$ 和 $34\ \mu\text{A}$ 。

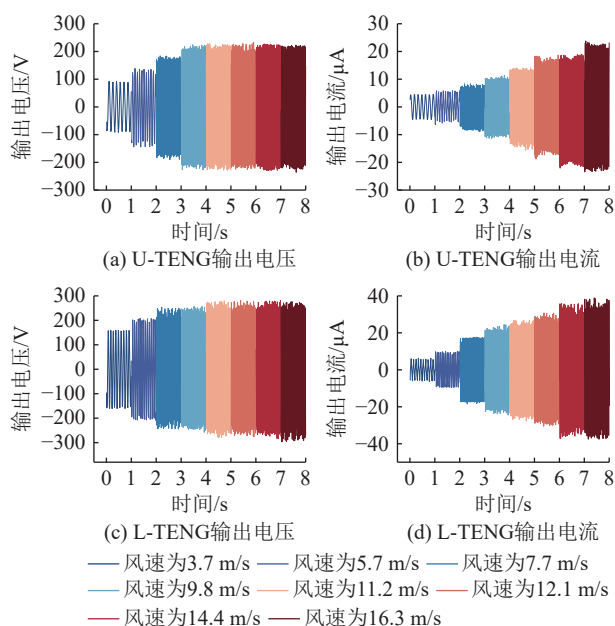


图9 U-TENG 和 L-TENG 输出电压与电流

Fig.9 Output voltages and currents of U-TENG and L-TENG

2.2 RD-TENG 负载特性与供能验证

在 10 m/s 风速条件下,测试 U-TENG 与 L-TENG 在不同负载电阻下的输出特性,结果如图 10 所示。U-TENG 与 L-TENG 的输出电压随外部负载电阻的增加而增大,而输出电流则呈现相反的变化趋势,当电阻约为 $9.5\ \text{M}\Omega$ 时, U-TENG 最大输出功率达到 1.5 MW,当电阻约为 $9\ \text{M}\Omega$ 时, L-TENG 最大输出功率达到 2.4 MW。

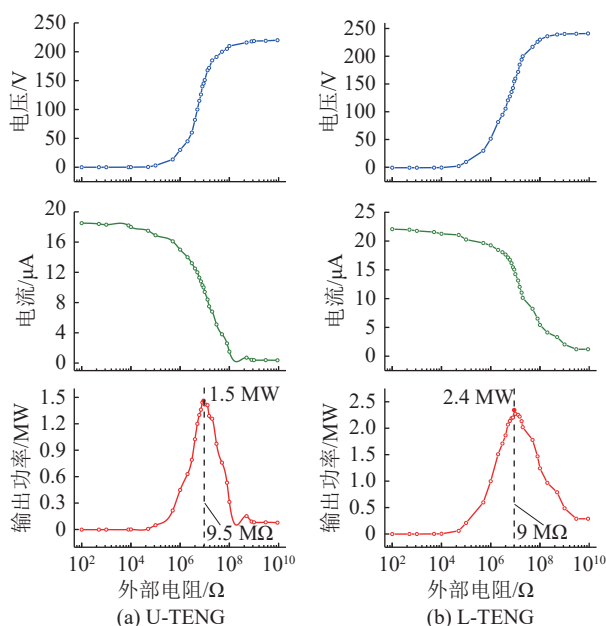


图10 U-TENG 与 L-TENG 负载特性

Fig.10 Load characteristics of U-TENG and L-TENG

图 11 展现了 U-TENG 与 L-TENG 在 6 m/s 风速下对 LED 灯的供电效果。实验结果表明, U-TENG

能够有效点亮约 380 盏 LED 灯; L-TENG 能够点亮约 500 盏 LED 灯, 这一结果表明, L-TENG 输出功率性能优于 U-TENG。

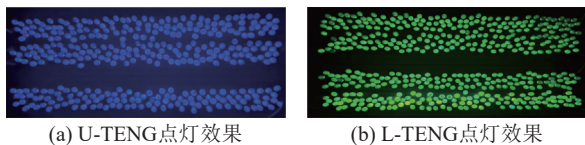


图 11 点灯试验
Fig.11 Lighting test

当 U-TENG 和 L-TENG 单独对 3.3 mF 电容充电 400 s 后, 能够分别支持蓝牙温湿度传感器工作 7.5 s 和 10 s, 如图 12 所示。图 12(a) 展示了电容充放电的全过程, 当电容电压达到传感器额定工作电压时, 传感器开始工作, 电容则进入放电状态。图 12(b) 展示了传感器开始工作后, 电容放电的过程。

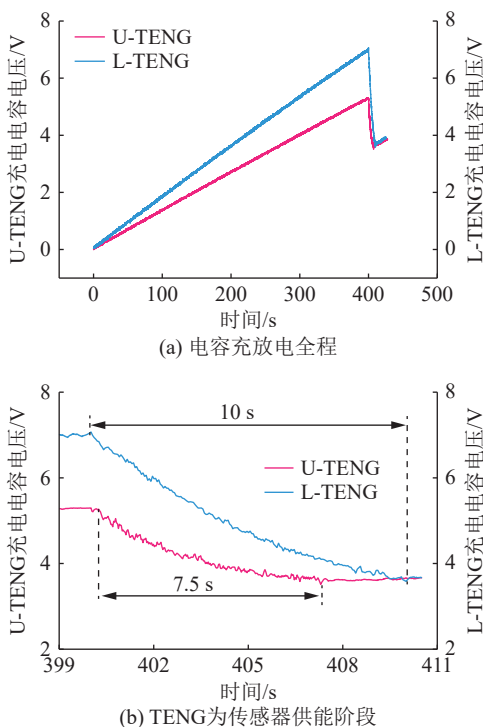


图 12 单个 TENG 为蓝牙温湿度传感器
供电时电容充放电曲线

Fig.12 Capacitance charging and discharging curves of a single TENG which supply energy to a bluetooth temperature and humidity sensor

2.3 基于备用电源的混合供电策略

为优化 U-TENG 与 L-TENG 的电能利用效率, 文中首次在 TENG 中提出备用电源的概念, 将 U-TENG 作为 L-TENG 的备用电源, 如图 13 所示。其中, D1—D4 为二极管; C 为电容。通过控制开关的通断, 可灵活选择 U-TENG 或 L-TENG 作为供电电源。具体地, 当 U-TENG 作为 L-TENG 的备用电源时, 首先闭合触点 1、2, 此时 L-TENG 为蓝牙温湿

度传感器供电, 经过预设时段后, 断开触点 1、2, 接通触点 1、3, 将 U-TENG 接入电路, 蓝牙温湿度传感器仍可工作, 通过周期性切换开关状态, 实现双电源交替供电。图 14 展示了 6 m/s 风速下蓝牙温湿度传感器供电过程中储能电容的电压变化曲线, 可以看出备用电源的接入使蓝牙温湿度传感器的持续工作时间达到 17 s, 相比于单一 TENG 的供电模式, 工作时间分别提升了 126.7%(对比 U-TENG 单独供电)和 70%(对比 L-TENG 单独供电)。

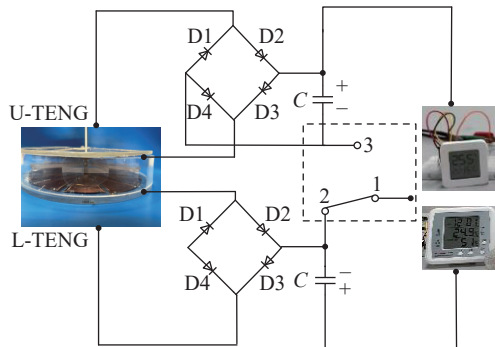


图 13 基于备用电源策略的电管理电路
Fig.13 Power management circuit based on backup power strategy

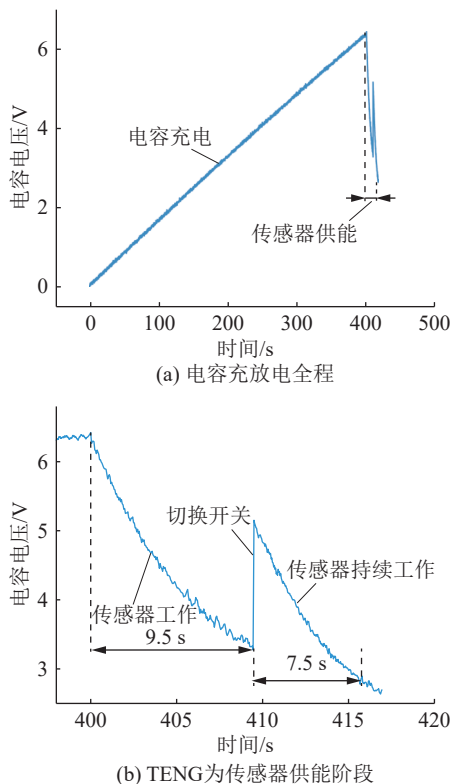


图 14 蓝牙温湿度传感器的电容充放电规律
Fig.14 Capacitor charging and discharging rule of bluetooth temperature and humidity sensor

2.4 风矢量感知模块传感特性

单个 F-TENG 的输出电压与电流变化规律与 U-TENG 和 L-TENG 一致, 但其功率输出峰值仅为

13.8 μW , 远小于 U-TENG 和 L-TENG 的功率输出峰值, 因此不宜作为供电电源。然而, 其传感特性仍具有重要应用价值。在不同风速值下展开不少于 5 次的重复测试, 取测量平均值为数据点, 如图 15 所示, 所附上下线为误差棒, 表示测量数据的波动范围, F-TENG 的电流与频率随风速的变化呈现高度一致性。在 1.8~13.5 m/s 的风速范围内, F-TENG 的电流与频率均表现出良好的线性响应特性。

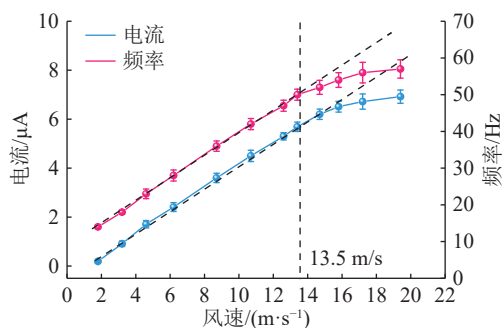


图 15 F-TENG 输出电流与频率随风速的变化
Fig.15 Output current and frequency variation of F-TENG with wind speed

因此, F-TENG 适用于 1.8~13.5 m/s 风速范围内的实时监测。将鼓风机固定于 F-TENG 正前方, 利用 LabVIEW 实时采集 F-TENG 的输出频率。预测风速 v_{wind} 与频率 $f_{\text{F-TENG}}$ 之间的关系如式(1)所示, 预测风速 v_{wind} 与实际风速 v_a 的误差 e_{wind} 如式(2)所示。

$$v_{\text{wind}} = 0.32f_{\text{F-TENG}} - 2.75 \quad (1)$$

$$e_{\text{wind}} = \frac{|v_a - v_{\text{wind}}|}{v_a} \quad (2)$$

在 1.8~13.5 m/s 风速范围内对 50 次测量误差进行统计分析, 结果如图 16(a)、(b)所示。数据显示, 40% 的测量误差集中在 0~1% 范围内, 其中最小的测量误差仅为 0.09%, 并且 50 次的测量中仅有少数的几次测量误差超过 3%。综上, F-TENG 在 1.8~13.5 m/s 的风速范围内对正对风向的风速测量具有较高的准确性, 可有效应用于杆塔周围风速监测。

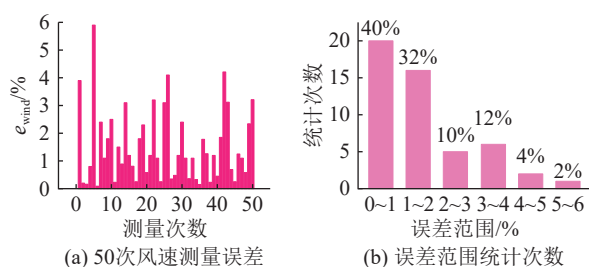


图 16 F-TENG 风速测量误差

Fig.16 Wind speed measurement error of F-TENG

2.5 不同风速下 F-TENG 输出随风向角的变化

根据能量采集器结构设计可知, 8 个 F-TENG

的组合可使每个 F-TENG 的平均监测范围达到 45° , 最大偏移角 α 为 22.5° 。为验证 F-TENG 在实际应用中是否能在该范围内有效监测风向, 文中测试不同风速下 F-TENG 输出随风向角的变化, 如图 17 所示。当风向偏移角在 20° 以内时, F-TENG 的输出电流与频率基本保持稳定; 当偏移角超过 20° 时, 尽管输出信号出现下降, 但在偏移角为 22.5° 的监测范围内仍具有可辨识的输出响应, 可实现有效风向监测。因此, 当多个 F-TENG 同时输出时, 可将输出最大的 F-TENG 作为参考方向, 并默认该 F-TENG 所在方向为当前风向。

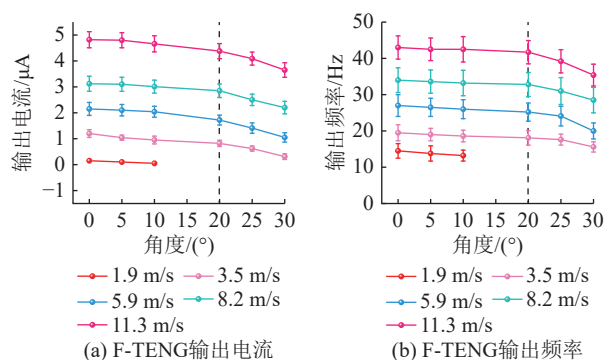


图 17 F-TENG 不同风速下输出随风向角的变化
Fig.17 Variation of output wind direction angle of F-TENG under different wind speed

值得注意的是, 在风速为 2.6 m/s 时, F-TENG 在偏移角较大区域的电流输出已处于临界状态, 当风速进一步降低时, 其风向感知能力将受到更大限制。8 个 F-TENG 的组合能够实际有效地监测的风速范围缩小至 2.6~13.5 m/s。

3 导线微风振动预警

3.1 基于多风向驱动能量采集器的导线微风振动预警系统构建

研究表明, U-TENG 及 L-TENG 具有较理想的输出功率, 可为蓝牙温湿度传感器供电, F-TENG 能有效判断风向及风速。多个 F-TENG 的监测风速范围为 2.6~13.5 m/s, 并可实现风向的有效监测, 对输电线路的振动预警具有重要作用。

输电线路在 0.5~10 m/s 稳定风作用下, 其背风侧会形成“卡门旋涡”, 使得导线受到周期性上下交相互作用力, 当作用力频率与导线固有频率一致时, 即产生导线微风振动。除风速外, 风向也是导致线路发生微风振动的重要因素, 尤其是与导线夹角为 45° ~ 90° 的风向最易诱发振动, 且夹角越接近 90° 振动越显著, 如图 18 所示。此外, 夹角在 30° ~ 45° 时振动很小且不连续, 而夹角小于 20° 时通常不会引发振动现象。

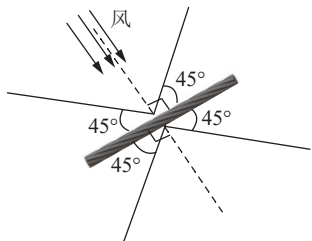


图 18 输电线路微风振动原理
Fig.18 Schematic of aeolian vibration with transmission line

基于文中设计的 TENG, 可构建杆塔自驱动环境监测及输电线路振动预警系统, 如图 19 所示。在外界风激励作用下, U-TENG、L-TENG 和 F-TENG 分别产生电输出。将 U-TENG、L-TENG 的输出连接至电源管理电路, 为蓝牙温湿度传感器供电, 同时, 将 8 个 F-TENG 的输出与八通道数据采集模块连接以进行数据处理。最终, 将处理得到的数据与温湿度数据通过蓝牙传输至 PC 端实现显示。

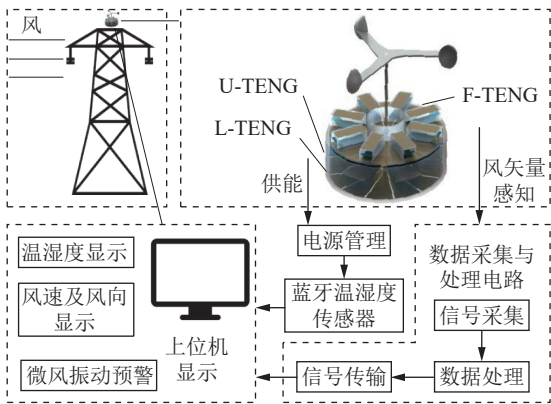


图 19 杆塔自供电环境监测及输电线路振动预警系统
Fig.19 Environmental monitoring of transmission tower and transmission line vibration warning system

3.2 F-TENG 信号采集及微风振动预警

假设 8 个 F-TENG 与输电线路导线的方位关系如图 20 所示, 即 F-TENG 组合的东西方向与导线平行。由于风向越接近 90°, 越容易引起输电线路舞动, 因此当南北方向的 F-TENG 产生输出信号时, 系统可触发报警。

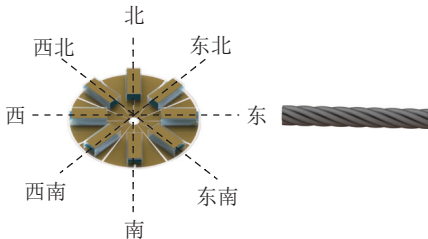


图 20 8 个 F-TENG 与输电线路位置关系
Fig.20 Relationship between eight F-TENG and transmission line location

为有效采集 8 个 F-TENG 的输出信号, 将 F-

TENG 产生的交流电压信号通过分压电阻传输到电压跟随器; 随后利用减法器将差分信号转换为 $\pm 1\text{ V}$ 的单端信号; 再通过加法器将负电压转换为正电压信号; 最后将该信号分压后送入 A/D 转换电路。STM32 单片机对转换后的数字信号进行处理, 并通过蓝牙模块实现数据上传。图 21 所示为设计的八通道信号采集板电路图。

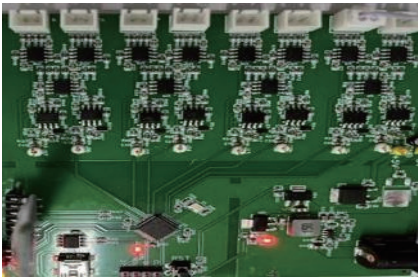


图 21 八通道信号采集板
Fig.21 Eight-channel signal acquisition board

在 LabVIEW 中对蓝牙发送的数据进行处理, 将温湿度、风向及风速等数据在相应窗口进行直接显示。在 LabVIEW 中对八通道信号采集后的 F-TENG 输出数据进行滤波处理, 并进行峰值检测。对输入通道按照图 22 所示方向进行编号, 判断输入通道中的频率最大值, 并将频率最大值的通道号和频率值作为后续数据, 将风速数据直接发送至前置界面, 对风向值进行判断是否为 3 或 7, 若是, 则发送报警信号, 具体流程如图 23 所示。

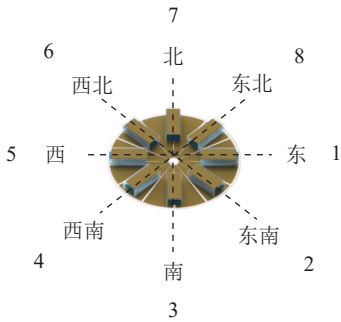


图 22 风向编号
Fig.22 Wind direction number

该系统集成 TENG、基于备用电源策略的电能管理电路、八通道信号采集板和 LabVIEW 上位机, 构建自供电杆塔环境在线监测与线路微风振动预警系统, 在 8 m/s 风速测试条件下, LabVIEW 界面成功实时显示温湿度、风速及风向数据, 经调整风向后, 系统准确触发微风振动报警功能, 如图 24 所示。

将上述测试重复 50 次, 发现对风向的识别准确率达到 100%, 但风速测量存在一定误差, 如图 25 所示, 最大测量误差达到 26%。分析表明, 误差主

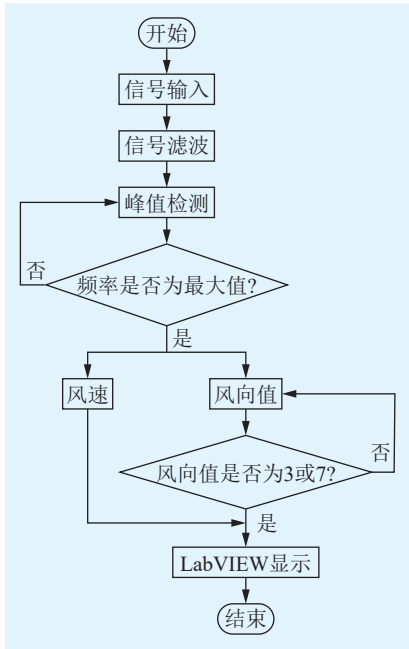


图 23 微风振动预警流程
Fig.23 Flow chart of aeolian vibration warning

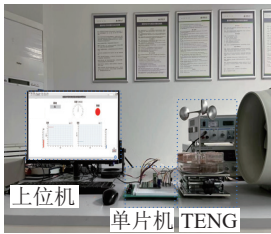


图 24 风矢量监测的自驱动传感系统
Fig.24 Self-powered sensing system for wind vector monitoring

要出现在低风速条件下,这是由于 F-TENG 对非正向入射的低风速气流响应灵敏度不足。尽管风速监测精度有待提升,但系统凭借准确的风向监测能力,仍可有效实现输电线路微风振动的预警功能。

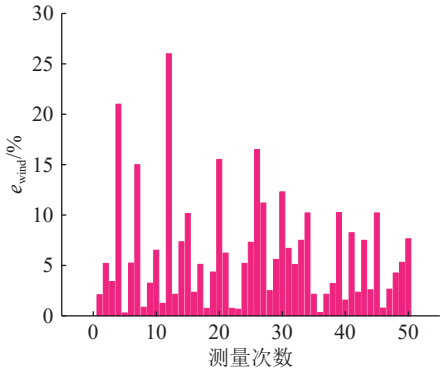


图 25 误差统计
Fig.25 Error statistics

4 结论

面向电力输电应用场景,文中提出一种自供电多风向驱动能量采集器,通过结合 RD-TENG 与多

方向风矢量感知的 F-TENG,实现能量采集与传感功能的协同优化。对能量采集器的风能采集模块和风矢量传感模块进行输出性能测试与传感特性分析,得到主要结论如下:

(1) 在 3.7~16.3 m/s 风速范围内,U-TENG 与 L-TENG 均具有优异的输出特性,其中最大开路电压分别达到 220 V 和 270 V,最大短路电流分别达到 22.5 μ A 和 34 μ A。在 6 m/s 风速下,U-TENG 与 L-TENG 可分别点亮约 380 盏与 500 盏 LED 灯,并能为蓝牙温湿度传感器持续供电 7.5 s 和 10 s。

(2) 提出备用电源的混合供电创新策略,设计基于备用电源策略的电管理电路。相较于传统电管理电路,有效延长 TENG 对温湿度传感器的供电时间,提升供电可靠性。

(3) 通过 8 个方向均匀分布的 F-TENG,系统在 2.6~13.5 m/s 风速范围内实现全风向风速监测,对风速与风向具有优异的感知能力。

(4) 成功集成 RD-TENG、基于备用电源策略的电管理电路、信号采集与处理电路、LabVIEW 上位机监测界面,构建高压杆塔自供电环境监测及输电线路微风振动预警系统。该系统实现环境温度湿度与风矢量的自驱动感知,并对超过设定阈值的风向及风速进行有效报警,为高压输电环境下风速、风向以及微风振动状态监测提供全新解决方案。

参考文献:

[1] 刘斌,张国彦,丁仁杰,等. 基于微能量收集的电力设备无线测温技术研究[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 216-222.
LIU Bin, ZHANG Guoyan, DING Renjie, et al. Research on wireless temperature measurement technology of power equipment based on micro-energy harvesting[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 216-222.
[2] 刘宇,胡上茂,刘刚,等. 基于 LoRa 和 GPRS 的山区输电线路监测信号无线传输方案[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 177-183,189.
LIU Yu, HU Shangmao, LIU Gang, et al. Wireless transmission scheme of transmission line monitoring signals in mountainous area based on LoRa and GPRS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 177-183,189.
[3] 赵松燕,曲朝阳,郭晓利,等. 基于 Map Reduce 的输电监测数据智能检索模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 177-187.
ZHAO Songyan, QU Zhaoyang, GUO Xiaoli, et al. Intelligent retrieval model of power transmission monitoring data based on Map Reduce[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 177-187.
[4] 谢佳,杨海涛,柯艳国,等. 基于同步授时的广域电容型设备的绝缘缺陷监测[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 234-240.

- XIE Jia, YANG Haitao, KE Yanguo, et al. Insulation defect monitoring of wide area capacitive equipment based on synchronous timing[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(11): 234-240.
- [5] 王要强, 李锐, 陈天锦, 等. 基于长周期暂态信号分析的电机驱动变换器直流母线电容在线状态监测[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(16): 120-131.
WANG Yaoqiang, LI Rui, CHEN Tianjin, et al. Online monitoring of a DC-link capacitor for a motor drive converter based on long period transient signal analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(16): 120-131.
- [6] 张煌辉, 董琪琪, 方杰, 等. 一种零磁通电流传感器适配装置的研制与应用[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 195-200.
ZHANG Huanghui, DONG Qiqi, FANG Jie, et al. Development and application of a zero-flux current sensor adaptive device[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 195-200.
- [7] 赵东生, 黄缙华, 王云龙, 等. 并联电容器组状态监测的新型无线传感器设计关键技术研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2023, 44(1): 20-26.
ZHAO Dongsheng, HUANG Jinhua, WANG Yunlong, et al. Research on key technology of wireless intelligent sensor design for monitoring condition of parallel capacitor bank[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(1): 20-26.
- [8] 张在琛. 泛在电力物联网关键支撑技术[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(6): 1.
ZHANG Zaichen. Key supporting technologies of ubiquitous power Internet of Things[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(6): 1.
- [9] CHAI Q, LUO Y. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 1.
- [10] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 847-870.
- [11] WANG P H, PAN L, WANG J Y, et al. An ultra-low-friction triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for rotation energy harvesting and self-powered wind speed sensor[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 9433-9440.
- [12] SAH D K, AMGOTH T. Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: a survey[J]. *Information Fusion*, 2020, 63: 223-247.
- [13] 胡江华. 应用于输电线路在线监测设备的太阳能电源设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
HU Jianghua. Design and research of the solar power supply of transmission line on-line monitoring device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [14] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(3): 360-381.
- [15] GUNDUZ D, STAMATIOU K, MICHELUSI N, et al. Designing intelligent energy harvesting communication systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(1): 210-216.
- [16] SELVAN K V, MOHAMED ALI M S. Micro-scale energy harvesting devices: review of methodological performances in the last decade[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1035-1047.
- [17] XIE Y N, WANG S H, LIN L, et al. Rotary triboelectric nanogenerator based on a hybridized mechanism for harvesting wind energy[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(8): 7119-7125.
- [18] WANG J Y, DING W B, PAN L, et al. Self-powered wind sensor system for detecting wind speed and direction based on a triboelectric nanogenerator[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3954-3963.
- [19] WANG Y, YANG E, CHEN T Y, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105279.
- [20] HE L X, ZHANG C G, ZHANG B F, et al. A dual-mode triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and self-powered wind speed monitoring[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4): 6244-6254.
- [21] YANG Y, ZHU G, ZHANG H L, et al. Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10): 9461-9468.
- [22] 杨恩, 王岩, 王建业, 等. 基于薄膜拍打型摩擦纳米发电机的风能收集研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(6): 684-698.
YANG En, WANG Yan, WANG Jianye, et al. Research on a film-flapping triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51(6): 684-698.
- [23] LIU Y M, LIU J L, CHE L F. A high sensitivity self-powered wind speed sensor based on triboelectric nanogenerators (TENGs)[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2951.
- [24] YONG S, WANG J Y, YANG L J, et al. Auto-switching self-powered system for efficient broad-band wind energy harvesting based on dual-rotation shaft triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(26): 2101194.
- [25] BAE J, LEE J, KIM S, et al. Flutter-driven triboelectrification for harvesting wind energy[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4929.
- [26] 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.
- [27] 赵隆, 郭玉龙, 郑天堂, 等. 考虑特征瞬变的导线微风振动在线监测及预警技术[J]. *中国电力*, 2021, 54(9): 34-44.
ZHAO Long, GUO Yulong, ZHENG Tiantang, et al. Online monitoring and early warning technology for conductor aeolian

- vibration considering characteristic transient[J]. *Electric Power*, 2021, 54(9): 34-44.
- [28] 黄新波, 赵隆, 舒佳, 等. 输电线路导线微风振动在线监测技术[J]. *高电压技术*, 2012, 38(8): 1863-1870.
- HUANG Xinbo, ZHAO Long, SHU Jia, et al. Online monitoring conductor aeolian vibration of transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(8): 1863-1870.
- [29] 万军, 范春菊, 胡炎, 等. 微风振动预警在输电线路在线监测系统中的应用[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(7): 169-172.
- WAN Jun, FAN Chunju, HU Yan, et al. Application of aeolian vibration early-warning in online monitoring system of transmission lines[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(7): 169-172.
- [30] 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.
- [31] CHEN J, GUO H Y, HU C G, et al. Robust triboelectric nanogenerator achieved by centrifugal force induced automatic working mode transition[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(23): 2000886.
- [32] PENG L H, QI Y B, LIU J T, et al. Contact and non-contact dual-piezoelectric energy harvesting system driven by cantilever vibration[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 111974-111984.
- [33] WANG J L, LI Y K, XIE Z J, et al. Cylindrical direct-current triboelectric nanogenerator with constant output current[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(10): 1904227.
- [34] GAO L X, LU S, XIE W B, et al. A self-powered and self-functional tracking system based on triboelectric-electromagnetic hybridized blue energy harvesting module[J]. *Nano Energy*, 2020, 72: 104684.

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(E-mail: gaosh@cqupt.edu.cn);

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;

王锐(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为可持续清洁能源技术。

Self-powered sensing technology of wind vibration for transmission lines based on triboelectric nanogenerator

GAO Sihang, LIU Yongxi, WANG Rui, LUO Xiaoting, WEI Hao, HE Weisheng

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

Abstract: With the rapid development of ubiquitous power internet of things, a large number of sensing and monitoring nodes are deployed across all aspects of the power system to enable real-time monitoring of power equipment operating status and surrounding environmental parameters. However, the traditional power supply mode has gradually failed to meet the power supply demand of the sensor nodes in the power system, especially for transmission systems in the complex outdoor environment. To address this, a self-powered multi-wind driven energy acquisition is proposed, based on the triboelectric nanogenerator (TENG) that combines a rotary TENG and a flapping TENG. The collector of two modules: wind energy acquisition module based on the combination of rotating TENG, and wind vector sensing module based on flapping TENG. Firstly, the output characteristics of the wind energy acquisition module are tested and analyzed, and the hybrid power supply strategy of the backup power supply is proposed to realize the efficient power supply of commercial temperature and humidity sensors under the multi-stage wind speed from low to high. Secondly, experiments demonstrate that the wind vector sensing module can respond sensitively to eight direction wind vectors in the range of 2.6~13.5 m/s. The logical relationship between wind vector and the aeolian vibration is established to evaluate abnormal wire vibration. Finally, on this basis, a self-driven sensing system consisting of an energy acquisition, an eight-channel signal acquisition circuit, and the ambient temperature, humidity and wind vector monitoring of the LabVIEW host computer is developed. The real-time monitoring of temperature, humidity, wind speed and wind direction is fully realized, and the aeolian vibration warning of the transmission line is realized through the multi-directional wind vector information in response to aeolian vibration.

Keywords: electric internet of things; triboelectric nanogenerator (TENG); transmission line; wind energy acquisition; wind vector monitoring; aeolian vibration warning

(编辑 吴昊)