

面向输电线路悬挂防振结构的电磁—压电复合风振能量采集系统

齐超亮¹, 李肖¹, 尚静怡², 褚元好¹, 张忆南³, 何维晟⁴, 高思航⁴

(1. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 郑州 450099; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052; 3. 国网河南省电力公司营销服务中心(计量中心), 郑州 450052; 4. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

摘要: 目前在电力物联网蓬勃发展下, 各种传感器终端设备及小型无线基站组成的无线传感网络成为了输电电力物联网感知层的重要组成部分。然而, 户外输电线路中的分布式传感节点的连续可靠供电是目前需要重点解决的问题, 其中环境微能量采集技术为输电线路传感节点的自驱动供电提供了一种有效解决思路。为解决输电线路分布式监测节点在户外环境下的连续供电问题, 文中面向输电线路周围风能与导线微风振动能, 设计了一种基于悬挂防振结构的电磁—压电复合取能系统。通过将风杯悬挂结构与导线防振结构相集成, 应用风力驱动的电磁取能单元与振动驱动的减振压电取能单元, 用于联合收集风能与线路振动能, 并具有减振功能, 进一步提出具有欠压锁定功能的电源管理策略, 以提供面向无线传感节点的标准化直流输出, 与传统的整流充电供能方式相比, 该电能管理电路的功耗降低了 94.7%, 可实现对传感器节点的高效持续供电。文中设计的电磁—压电复合能量采集系统为解决输电线路在线监测传感节点的绿色、持续、可靠供电提供了全新的解决思路。

关键词: 输电线路; 自供电; 悬架结构; 防振结构; 电磁发电; 压电发电; 电源管理

Electromagnetic-piezoelectric Composite Wind-induced Vibration Energy Harvesting System for Transmission Line Suspension and Antivibration Structures

QI Chaoliang¹, LI Xiao¹, SHANG Jingyi², CHU Yuanhao¹, ZHANG Yinan³, HE Weisheng⁴, GAO Sihang⁴

(1. State grid Henan Electric Power Company Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450099, China; 2. State grid Henan Electric Power Company Economic and technological Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company Marketing Service Center (Measurement Center), Zhengzhou 450052, China; 4. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: At present, with the vigorous development of power Internet of Things, wireless sensor networks composed of various sensor terminal devices and small wireless base stations have become an important part of the perception layer of power transmission Internet of things. However, the continuous and reliable power supply of distributed sensor nodes in outdoor transmission lines is a key problem that needs to be solved at present, and the environmental micro-energy acquisition technology provides an effective solution for the self-driven power supply of sensor nodes in transmission lines. To address the continuous power supply of distributed monitoring nodes for transmission lines in outdoor environments, this paper designs an electromagnetic-piezoelectric hybrid energy-harvesting system based on a suspended antivibration structure, targeting both the ambient wind energy around transmission lines and the conductor's micro-aolian vibration energy. By integrating the suspension structure of the wind cup with the anti-vibration structure of the wire, a wind-driven electromagnetic power generation unit and a vibration-driven vibration damping piezoelectric power generation unit are designed. Furthermore, a power management strategy with undervoltage locking function is proposed to provide standardized DC output for wireless sensor nodes. Compared with the traditional rectifier charging power supply mode, the power management circuit reduces the power consumption by 94.7%, which can realize efficient and continuous power supply for sensor nodes. The electromagnetic-piezoelectric composite energy acquisition system designed in this paper provides a new solution to solve the problem of green, continuous and reliable power supply of online monitoring sensor nodes of transmission lines.

Key words: transmission lines; self-powered; suspension structure; antivibration structure; electromagnetic power generation; piezoelectric power generation; power management

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307162)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52307162).

0 引言

高压架空输电线路作为电力系统中传输与分配电能的重要电力装备, 需要实现输电线路运行参量和状态信息的实时感知。当前在输电线路, 高压杆塔等各种应用场景下都有大量的物联网传感节点用于监测周围的环境信息^[1]。这对电能的持续稳定供给提出了更高的要求, 也是对物联网的全新的挑战^[2]。

目前输电系统中, 传感器节点的供电一般为电池、感应取能、太阳能供电 3 种方式。电池供电存在续航周期短、更换与维护困难等问题^[3]。太阳能供电存在受气象天气影响较大、无法实现全天候能源自给、电池板维护成本高等问题^[4]。取能供电存在设备体积大、安装方式复杂、无法在直流输电场景中应用^[5]。这些目前应用广泛的供电方式无法实现输电系统传感节点的全天候、绿色稳定供电。尽管在电池领域高能量密度材料不断涌现, 但其无法从根本上打破这一局限。究其根源, 在于实现以最低的成本完成电能供应循环的可持续性上。

为更有效的实现物联网传感节点的自驱动可靠供能, 收集环境微能量被认为是突破传统供电限制的潜在解决方案^[6-9], 例如输电线路周围丰富的风能 & 线路自身的振动能^[10-11]。风能作为可持续发展过程中最易获取和利用的能源展示出了极大优越性^[12-15], 但风能带来的有害振动也时刻存在^[16-19]。当前, 环境微能量自供电技术按照工作的机理可以分为: 摩擦纳米发电机(TENG)^[20-22]、风驱电磁发电机(EMG)^[23-24]、压电发电机(PEG)^[25-26]。基于摩擦起电与静电感应效应耦合的 TENG 目前主要受限于其内阻过大、输出电流较低、摩擦材料耐久性差等问题, 在实际中无法持续稳定应用。基于电磁感应的 EMG 具有输出电流高、输出稳定、适

应各种恶劣户外环境等特点, 因此得到广泛应用。学者 YONG Shun 等人设计了一种双转轴落地式风能采集装置, 其中电磁取能单元在风速为 10.6 m/s、负载为 300 Ω 时所输出的峰值功率约为 11 mW^[27]。学者 GUI Yingang 等人依托于智慧农业的背景, 设计了一个落地式的摩擦-电磁复合能量采集装置用于收集风能, 其中电磁取能单元可以高效的收集风能产生较高的输出, 能够在 6 m/s 的较低风速下输出 118 mW 的峰值功率^[28]。虽然基于电磁发电的风能采集装置已有大量研究报告, 但当前的风能采集装置均设计为落地式结构, 极大地限制了应用场景, 尤其针对输电电缆很难直接应用。基于压电效应的 PEG 具有输出电压高、不受电磁干扰、共振频率较低、结构简单等特点。学者马华安等人设计了一种基于环境能量采集的悬臂梁压电振动能量采集装置, 为无线传感器和微机电系统的长期供能提供了一种有效解决方案^[29]。学者 KAN Junwu 等人利用压电结构实现了对风能的有效收集, 在负载 1 000 k Ω 、下可输出 4.73 mW 的瞬时峰值功率^[30]。鉴于传统防振锤本身属于悬臂梁结构, 将压电发电单元与之结合, 便可实现振动能量收集与防振的双重功能。一般而言, 防振锤的有效工作频率及其对应的起振风速与线路所处的地形条件、档距大小、导线平均运行应力以及分裂导线根数等多种因素共同相关。防振锤主要用于削弱低风速下出现的高频微风振动, 这类振动虽振幅较小、但频率较高, 是影响导线疲劳寿命的重要诱因之一。工程经验表明, 引起疲劳振动的典型风速多落在 0.5~8.0 m/s 区间内, 对应振动频率约为数十赫兹、振幅为毫米量级。悬挂式结构具有体积小、布置灵活, 适用于各种场景下的线缆, 压电防振结构具有发电与防振双重功能, 并且利用电磁与压电

发电结构在输出特性上的互补以及两者都适用于户外恶劣工况,设计一种电磁—压电复合的悬挂式风振能采集装置是解决输电线路传感节点自供电的有效方法。

因此,文中针对输电线路上风能与微风振动能量资源丰富的特点,基于电磁感应和压电效应,提出了一种基于悬挂防振结构的风振能量复合采集装置,可用于收集风能和微风振动能并且可以削减导线振动的电磁—压电复合能量采集装置,分别利用有限元仿真和实验室条件下开展能量采集器的可行性分析和输出性能优化分析,并利用 LTC 3588 芯片,提出一种具有欠压锁定功能的电源管理策略,有效降低了传感器节点 94.7%的损耗。文中展示了一种有效的风能,振动能采集策略,揭示了电磁和压电能量采集在输电线路上的广泛应用潜力。

1 悬挂防振式电磁—压电复合取能装置设计

1.1 复合能量采集装置结构原理设计

面向输电线上风能和振动能能量采集的应用场景,针对输电线路广泛存在的微风振动及其伴随的风能资源,同时为了减弱振动对输电线路带来的危害提升供电稳定性,采用输出稳定灵敏、结构简单的电磁—压电复合能量采集装置设计方案。该装置以电磁感应原理和正压电效应为基础,设计出利用风能驱动的电磁取能和利用振动能驱动的模拟防振锤的压电取能,结合悬挂结构不仅可以减弱导线上的有害振动,也可以有效利用有害振动进行能量采集,该模型应用于输电线的场景见图 1。压电采集器由 2 个质量块、2 个弹簧钢和 4 个压电片组成,风驱电磁发电结构由 4 组磁铁和电磁感应线圈组成,风力取能部分通过中间部分的减振弹簧与

振动取能部分相连,最终两部分通过悬挂与输电线相连。

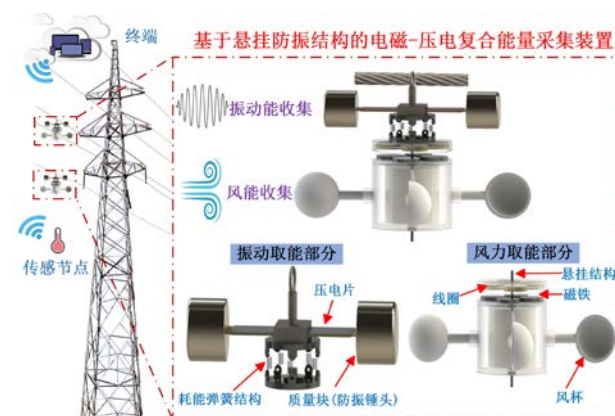


图 1 输电线场景下的电磁—压电复合能量采集系统

Fig. 1 Electromagnetic-piezoelectric composite energy harvesting system in power line scenario

针对振动激励,模拟防振锤的压电结构会收集振动能,并且由于减振弹簧结构的存在有害振动并不会对风力取能部分造成影响;针对风激励,在自然风作用下电磁结构产生电能。EMG 实现高电流输出,而 PEG 能提供高电压输出,两者结合可显著提升整体能量采集的连续性、稳定性与有效功率密度,这两部分电能可以稳定对输电线附近的传感器节点进行稳定供电。这些传感器节点利用蓝牙传输到终端完成对输电线路的环境监测,保证周围环境的安全可靠。

1.2 电磁与压电取能单元的有限元建模仿真

为了分别验证电磁发电结构在风能驱动旋转和压电发电结构在振动能驱动状态下的输出可行性,对电磁、压电取能单元进行了有限元仿真分析。针对电磁发电结构,相对运动的线圈与磁铁在有限元环境下的电磁分布见图 2。在初始状态下,假设其中一个线圈与磁体对齐,没有相对运动,根据电磁感应,线圈内不形成电流;其次,当磁体在风能的激励引起转子旋转下运动时,线圈切断磁场,使通过线圈的磁通量减小,进而在线圈中产生感应电

流，阻碍磁通量的减小；然后，当磁体完全远离前一个线圈时，线圈中的感应电流迅速降至零；最后，当磁体逐渐移动到下一个线圈时，通过下一个线圈的磁通量增加，线圈中产生反向电流。

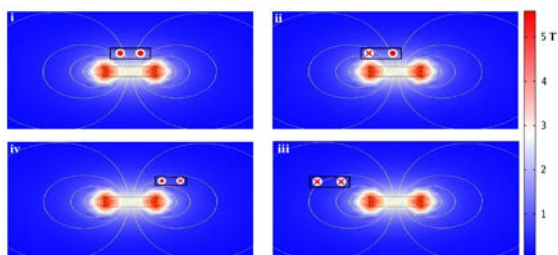


图 2 电磁发电仿真结果

Fig. 2 Simulation results of EMG

针对压电发电结构，将压电片其中一端固定，另一端放置一个质量合适的质量块从而提升输出，构成悬臂梁结构，有限元环境下悬臂梁在形变过程中的电场分布见图 3，验证了压电片在受外部振动能发生形变时的输出可行性以及电位分布情况。综上所述，无论是电磁发电还是压电结构的发电，在风能和振动能等外力的驱动下输出理论是可行的。结合合理的装置结构设计、布置以及场景的选择，便可以达到优异的输出。

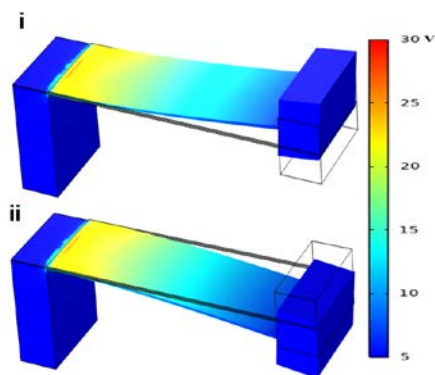


图 3 压电仿真结果

Fig. 3 Simulation results of PEG

2 实验结果与讨论

2.1 模拟悬挂输电线路平台搭建

为验证所提复合能量采集系统的可行性及其输出特性，本研究搭建了输电线路缩比实验平台，

通过可控风振激励实验，分析了电磁与压电单元在不同工况下的能量转换性能。文中利用升降台和固定支架来模拟高压杆塔，钢绞线作为输电线路的高压线，利用鼓风机和变频器提供风激励，通过激振器、功率放大器、信号发生器提供振动激励，见图 4。将电磁—压电复合能量采集器悬挂固定在缩比输电线路路上，通过数据采集卡和高性能静电计测量能量采集装置由风能和振动驱动后输出的电压、电流情况，并将输出信号传输到 Labview 进行数据记录和波形观测。由于所设计的模型具有防振锤与弹簧减振结构，因此，通过商用加速度计也测试了弹簧减振结构的必要性问题。



图 4 输电线路模拟平台

Fig. 4 Transmission Line Simulation Platform

2.2 电磁—压电复合能量采集装置的减振分析

2.2.1 振动取能单元的受力分析

在高压输电线路中，风力引起的风振现象会导致线路产生振动，振动取能单元充当防振锤的角色，利用质量块和弹簧系统的惯性作用来减缓振动，减少对线路的影响。电磁—压电能量采集装置受力分析见图 5，如图 5 所示，受力分析可以被拆分为两个阶段。当风力 F_1 使输电线向上振动时，振动单元中的质量块由于惯性作用产生向下的运动，图 5 中的 $F_{2,3}$ 表示惯性力；同时，减振弹簧通过拉伸产生恢复力 F_4 抵消向上的力，减小振动幅度，降低风力对输电线路的影响。相反，当风力使输电线向下振动时，振动单元的质量块和弹簧系

统产生与之前相反的反作用力，质量块向上运动，压电材料通过形变转化为电能，4种力(F_1 , F_2 , F_3 , F_4)共同作用下振动单元不仅能有效减振，还能持续稳定地收集风能和振动能，为传感器节点稳定供电。

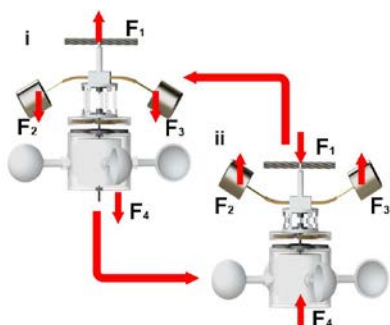
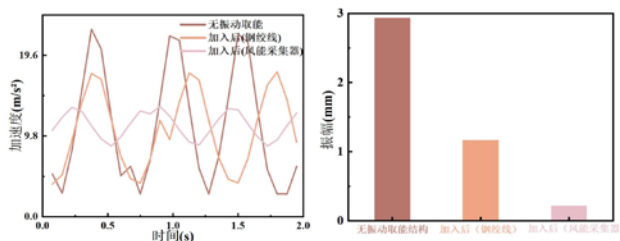


图5 电磁-压电能量采集装置受力分析

Fig. 5 Force analysis of electromagnetic-piezoelectric energy harvester

2.2.2 振动取能部分的减振效果

由于减振弹簧的存在，振动取能单元的加入不仅可以收集振动能，还能有效减弱有害振动对线路的影响。在本部分我们将激振器频率设置为 11.1 Hz、振幅为 3 mm，进一步对比振动取能单元对风力取能部分和钢绞线的振动衰减情况，见图 6。



(a) 加速度的影响 (b) 振幅的影响

图6 加入振动取能部分对振动的影响

Fig. 6 The impact of incorporating vibration energy harvesting components on vibration

图6所展示的结果来看，在加入了振动单元后，无论是加速度还是振幅，钢绞线和风能采集部分受振动的影响都更小。当无振动取能单元时，风能采集器的加速度峰值为 22.8 m/s^2 ，加入后降至 13.3 m/s^2 ，加速度降低了约 41.7%。振幅由原本的 2.93

mm 大幅降至 0.21 mm，降低了约 92.8%。以上结果表明文中所涉及的具有减振功能的压电取能单元能够有效抑制导线的有害振动。

2.3 压电单元的输出特性分析

2.3.1 压电取能单元的电学输出性能

压电能量采集单元被设计为悬臂梁结构，以高效捕获振动能量。该结构采用一块尺寸为 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的基板作为悬臂梁，并在其表面粘贴了一枚尺寸为 $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的 PZT 压电陶瓷片。为使悬臂梁的固有频率与目标振动频率相匹配，梁的自由端固定了一个尺寸为 $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的质量块。

依据输电线路微风振动在工程上通常表现出的典型的微风振幅和微风振动常见频段，将激振器的振动频率设置为 6.2~28.9 Hz，振动幅度固定为 3 mm，测试了压电单元的输出特性，输出电压和电流情况见图 7。随着振动频率增大，电压和电流的输出情况均呈现先增加后减小的趋势，其中当频率为 11.1 Hz 时，输出电压和电流达到峰值，分别为 33.2 V 和 $1066.8 \mu\text{A}$ ，此时压电单元达到谐振状态。

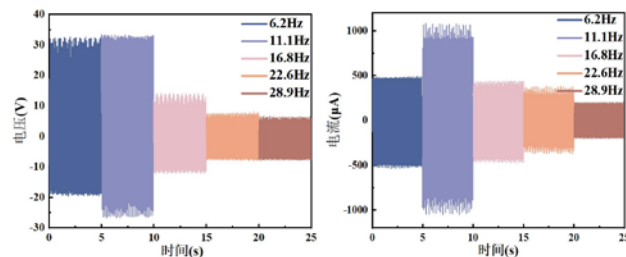
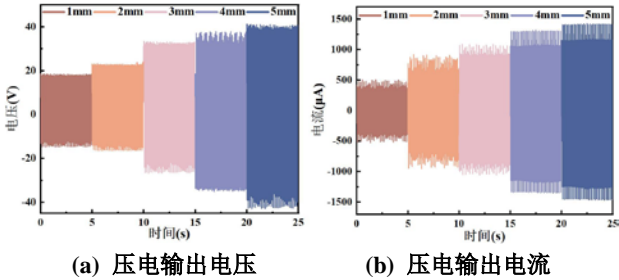


图7 不同频率下压电输出情况

Fig. 7 PEG output at different frequencies

压电部分对于相同频率、不同振幅同样表现出不同的输出特性，实验将激振器的频率设置为谐振频率 11.1 Hz，在振幅为 1~5 mm 时测试了电压、电流的输出情况，见图 8。结果表明，随着振幅增加，电压和电流输出均呈现出逐渐增加的趋势，这

是因为随着振幅的增加压电片的形变加剧,加速其内部极化作用,从而产生更高电能输出。



(a) 压电输出电压 (b) 压电输出电流
图 8 不同振幅下压电输出情况
Fig. 8 PEG output under different amplitudes

2.3.2 压电取能单元的负载特性

将压电取能单元固定在所搭建的输电线模拟平台上,设置振动激励为振幅 3 mm 和振动频率 11.1 Hz,外接不同电阻值的负载 $10^{-1} \sim 10^{10} \Omega$,测量压电取能单元的峰值输出电压与电流,并计算瞬时功率,见图 9。当匹配负载约为 $10^4 \Omega$ 时,压电取能单元的瞬时峰值功率达到最大值,约为 8.6 mW。

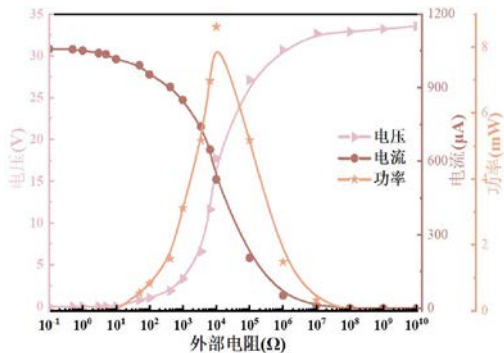


图 9 压电取能单元在振幅 3 mm、振频 11.1 Hz 下的负载特性

Fig. 9 Load characteristics of PEG unit under the vibration amplitude of 3 mm and frequency of 11.1 Hz

进一步探究压电取能单元在不同振动频率下的负载特性,设置振幅 3 mm 不变,振动频率 6.2~28.9 Hz,外接不同电阻值的负载 $10^{-1} \sim 10^{10} \Omega$,测量压电取能单元的输出电压与电流峰值,并计算瞬时功率,见图 10。随着频率的增加,压电取能单元的瞬时峰值功率呈现先增加后降低趋势,在谐振

频率下输出的瞬时峰值功率达到最大值,分析原因为随着频率增加,偏离谐振频率,振动幅度减小导致输出减小。

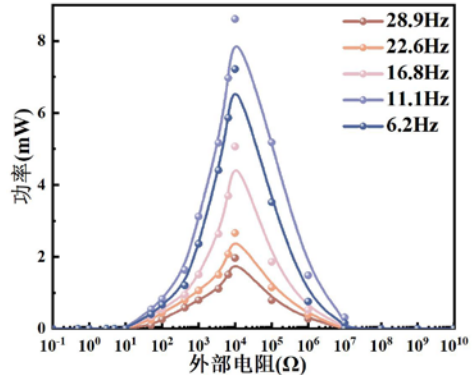
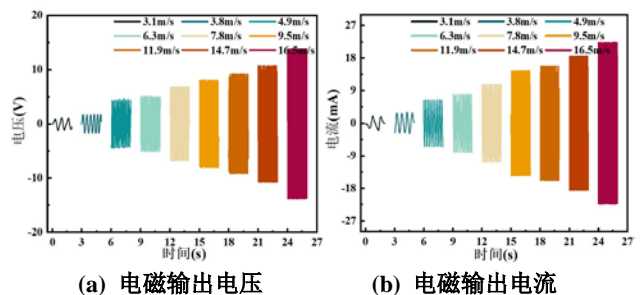


图 10 压电取能单元在不同振频下的负载特性
Fig. 10 Load characteristics of PEG unit on varied vibration frequencies

2.4 电磁取能单元的输出特性分析

2.4.1 电磁取能单元的电学输出性能

整个电磁采集单元被封装在一个最大直径为 50 mm 的圆柱形外壳内,以风杯传递的扭矩进行旋转发电。转轴直径为 3 mm,尺寸为 10 mm×5 mm 的永磁体固定在转轴上。感应线圈由线径为 0.3 mm 的铜线绕制 800 匝制成,线圈直径与永磁体保持一致并随风杯转动。与数利用鼓风机和变频器提供不同风速的风激励,实验在风速 3.1~16.5 m/s 下进行,测试了电磁取能单元在不同风速下的输出电压和电流,见图 11。随着风速增加,输出电压与电流均增加,分析原因为风速的增加将会加快定子相对运动,线圈切割磁感线频率更快,输出则增加。当风速达到 16.5 m/s 时,电压、电流分别可达到 13.9 V 和 22.3 mA。



(a) 电磁输出电压 (b) 电磁输出电流

图 11 不同风速下电磁输出情况

Fig. 11 EMG output at different wind speeds

2.4.2 电磁取能单元的负载特性研究

将电磁取能单元同样固定在所搭建的输电线模拟平台上进行负载特性试验,设置将外部负载电阻在 $10^{-1} \sim 10^7 \Omega$ 、风速为 7.8 m/s。电磁取能单元在风速 7.8m/s 时的负载特性见图 12,如图 12 所示,电磁取能单元的匹配负载大小约为 400Ω ,瞬时峰值功率约为 42.4 mW。

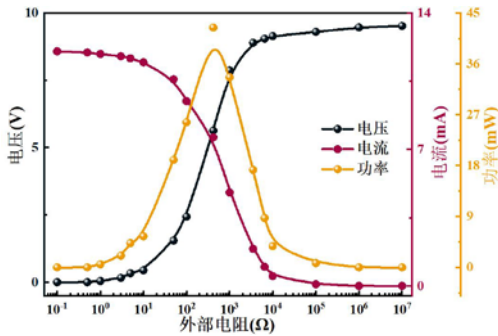


图 12 电磁取能单元在风速 7.8 m/s 时的负载特性

Fig. 12 Load characteristics of EMG unit at wind speed of 7.8 m/s

进一步探究不同风速下电磁取能单元的负载特性,见图 13。结果表明,风速与输出的瞬时峰值功率成正比,这符合上述不同风速下对电压和电流所测试的规律。当风速达到 16.5 m/s 时,其瞬时峰值功率可达 116.9 mW。

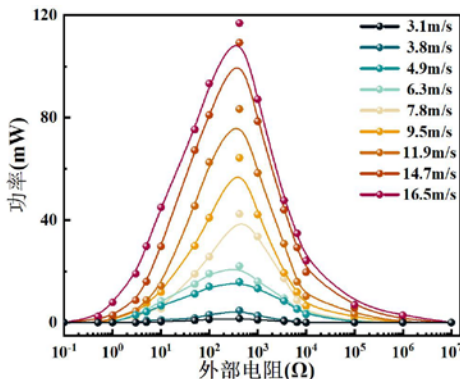


图 13 电磁取能单元在不同风速下的负载特性

Fig. 13 Load characteristics of EMG unit on varied wind speeds

2.5 电磁—压电复合能量采集装置的供能效果

为进一步验证电磁—压电复合能量采集装置

的供电能力,通过商用 LED 点灯实验对其供能效果进行验证。在振幅 3 mm、频率 11.1 Hz、风速 7.8 m/s 的条件下,LED 点灯实验见图 14。从图 14 可以看出,电磁—压电复合能量采集器能够共同点亮约 900 个 LED 灯。此外,所设计的采集器可实现各种悬挂场景的布置和使用,可以通过悬挂多个装置进行输出增强,达到更好的供电效果。

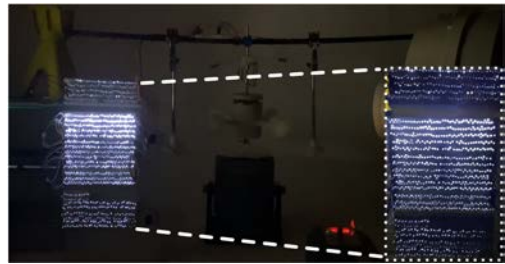


图 14 电磁—压电复合能量采集装置 LED 灯供能图

Fig. 14 Electromagnetic-piezoelectric composite energy collector LED light energy supply diagram

2.6 传统供电策略与 LTC 3588 供电策略对比选择

2.6.1 传统供电策略下能量采集装置的供电特性

传统的整流充电策略即复合能量采集装置输出交流电,通过整流桥整流,二极管提供反向电压保护,之后到达相应的储能电容进行储能,通过机械开关释放电容器电能,完成对温湿度传感器供电。为此,设计了一个基于传统供电策略下的三通道电能管理电路,并集成于 PCB 板,其中一组通道的设计是为了提升系统容错,不仅可以接入其他能量采集器的输出,也可以有效防止其余通道损坏后无法接入的情况,见图 15。此外,三通道电能管理电路体现了电磁—压电复合取能的汇聚增益。取能装置的输出接入此电路后,各通道经独立整流并联汇入同一储能电容,其中电磁取能侧更易提供较大电流、提升充电速率,压电取能侧具有较高电压输出、利于储能端快速建立电压,从而增强复合系统在真实工况下的供能连续性与稳定性。

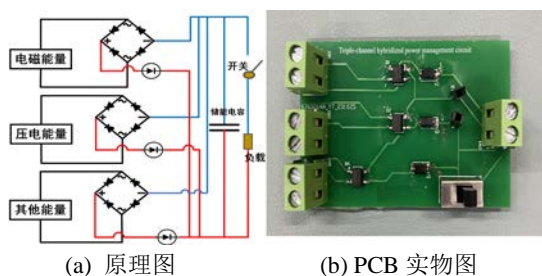


图 15 传统供电策略下的原理图和 PCB 板

Fig. 15 Schematic diagram and PCB board under traditional power supply strategy

在权衡温湿度传感器的供能稳定性和启动速度后，储能电容选择 $150\ \mu\text{F}$ 。在风速为 $7.8\ \text{m/s}$ ，频率为 $11.1\ \text{Hz}$ ，振幅为 $3\ \text{mm}$ 的实验条件下对温湿度传感器进行供电实验，由开始采集能量至结束的电容充放电完整过程见图 16。该过程表明，当 $150\ \mu\text{F}$ 的电容充电并在 $2.5\ \text{s}$ 内迅速增至 $2.7\ \text{V}$ 左右时，传感器内部部分元件由于达到启动电压而被触发，产生约 $1.5\ \text{s}$ 的电荷积累阶段。之后，当电压在 $0.7\ \text{s}$ 内迅速上升到 $7\ \text{V}$ 左右时，由于复合能量采集器初始阶段能量收集不足，传感器处于欠压状态无法正常工作。持续充电约 $8.1\ \text{s}$ 后，由电容供电的蓝牙传感器通过放电采集环境温湿度数据，并显示在面板上。放电过程使电容内部电压在 $0.5\ \text{s}$ 内从 $7\ \text{V}$ 迅速下降到 $5.2\ \text{V}$ ，并在 $0.3\ \text{s}$ 内恢复，由配备电源管理的复合能量采集器供电，实现蓝牙传感器的连续工作。当蓝牙模块连接并将数据上传到手机时，电容内部的电压迅速降到 $6.1\ \text{V}$ 以下，并在 $1\ \text{s}$ 内恢复到 $7\ \text{V}$ ，电容迅速放电，为蓝牙传感器供电，使其稳定连续工作。当温湿度传感器进行界面切换时会出现大量能量消耗的情况，但是由于优异的供电性能，都能使电容在 $1\ \text{s}$ 内迅速恢复正常工作状态。

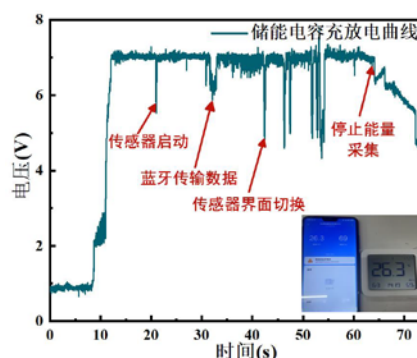


图 16 传统策略下的储能电容充放电曲线

Fig. 16 Charge and discharge curve of energy storage capacitor under traditional strategy

结果表明，配备传统电源管理策略的复合能量采集器能够稳定地为蓝牙温湿度传感器供电，表明该自供电系统具有同时高效地收集振动和风能的优良能力，并且其输出能力保证了蓝牙传感器持续工作所需的足够能量。

2.6.2 具有欠压锁定功能的电能管理策略下能量采集装置的供电特性

针对复合能量采集器初始阶段输出能力不足导致蓝牙传感器处于欠压状态的问题以及正常供电状态下的供电电压远超传感器额定电压的情况，文中采用了具有标准化输出的电源管理芯片 LTC 3588-1，提出了一种基于欠压锁定功能 LTC 3588-1 的电源管理策略，见图 17。LTC 3588-1 集成了超低损耗全桥整流电路和高效降压变换器，具有欠压锁定(UVLO)策略，可以有效降低损耗，快速达到蓝牙传感器的启动电压，并且所提供的标准输出电压也可以保证传感器节点在额定状态下工作，有效避免因电压过高导致的传感器烧坏。同样配置了三通道输入保证容错，复合能量采集器中 2 个发电模块的交流输出可通过全桥整流器转换为直流电，然后分别通过二极管并联连接到储能电容器 C_1 上。在 VIN 和 CAP 引脚之间插入 $1\ \mu\text{F}$ 的电容，防止高电压输入损坏芯片。LTC 3588-1 的 D_1 和

D_0 引脚用于电压选择, 通过控制开关 S_1 和 S_2 的通断, 提供 1.8、2.5、3.3、3.6 V 4 个标准电压输出。电感器 L_1 连接 V_{out} 引脚和 SW 引脚, 控制迟滞电压反馈信号。 C_4 是作为输出滤波的电容器。将所设计的电路集成在 PCB 上制作了实物电源管理电路, 见图 18。

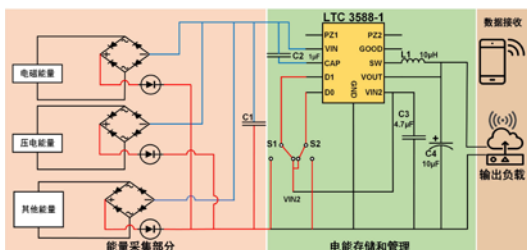


图 17 基于 LTC 3588-1 供电策略下的原理图

Fig. 17 Schematic diagram based on LTC 3588-1 power supply strategy

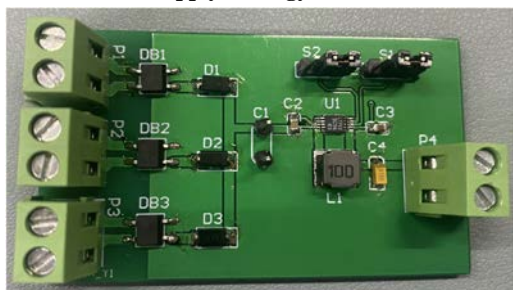


图 18 基于 LTC 3588-1 供电策略下的 PCB 实物图

Fig. 18 PCB diagram based on LTC 3588-1 power supply strategy

该电路中的 C_1 同样选择 $150 \mu\text{F}$ 电容, 电容的充放电曲线见图 19。从图 19 可以看出, 蓝牙传感器在配备基于 LTC 3588-1 的电源管理的复合发电机运行约 8.2 s 后即可稳定工作, 与传统电源管理相比, 启动过程更快, 提高约 50.3%。可以看出, 基于 LTC 3588 的复合电源管理具有优良的启动灵敏度, 欠压电荷积累阶段仅持续约 0.9 s, 与传统电源管理相比降低了约 40%。蓝牙传感器的工作使 C_1 的电压从 10.3 V 降低到 10.1 V, 与传统的复合电源管理相比, 能量损失更小, 提高了约 88.9%。蓝牙连接使 C_1 的电压迅速降到 7.3 V 以下, 1 s 内恢复到 9.7 V 左右, 数据持续上传使得 C_1 的电压

从 9.7 V 下降到 9.2 V, 1 s 内恢复, 实现连续工作, 可以采集环境温湿度数据, 通过蓝牙模块进行传输, 显示在手机上。类似地, 无论是单次、两次还是 3 次连续切换屏幕页面, 都可以通过储能电容 C_1 的快速放电, 立即恢复正常电压值。电源管理的输出端所设定的稳压 2.5 V 波形图见图 20。可以看出在集成 LTC 3588-1 电源管理策略后, 本复合能量采集系统可为蓝牙温湿度传感器稳定供电。

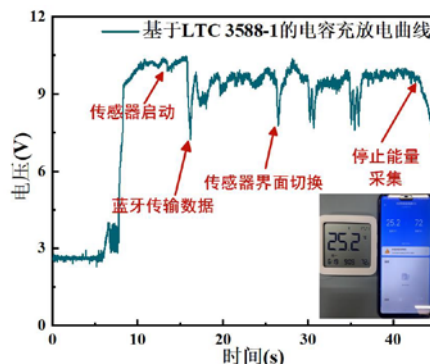


图 19 LTC 3588-1 供电策略的储能电容充放电曲线

Fig. 19 Charge and discharge curve of energy storage capacitor for LTC 3588-1 power supply strategy

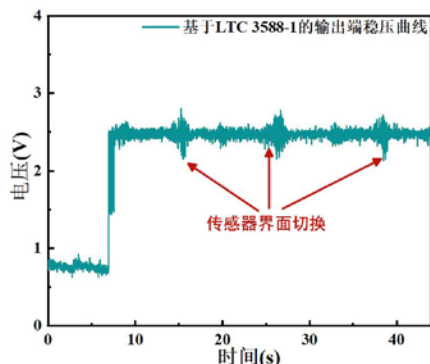


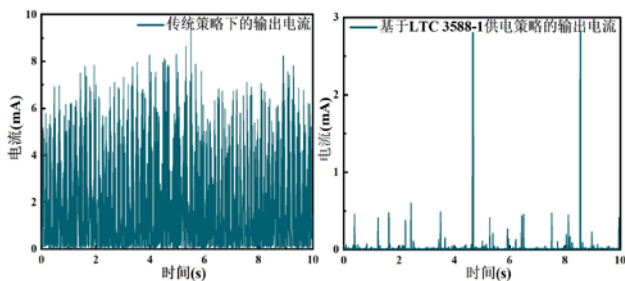
图 20 LTC 3588-1 供电策略的稳压曲线

Fig. 20 LTC 3588-1 Voltage regulation curve of power supply strategy

2.6.3 传统与 LTC 3588-1 电源管理策略的功耗对比

为了准确说明 LTC 3588-1 使用后的低能量损耗, 进行了两者功耗的对比。通过测量输出端口的电流值与电压值相乘进行功耗计算。两者电流输出情况见图 21。从图 21 可以明显看出传统策略下的输出电流明显高于采用 LTC 3588-1 后的电流值。

经计算两者的功耗分别为 47 mW 和 2.5 mW, 采用 LTC 3588-1 后的功耗降低了 94.7%, 效果显著。



(a) 传统策略下的输出电流 (b) LTC 3588-1 下的电流

图 21 不同策略下的电流输出情况

Fig. 21 Current output under different strategies

经对比, 证明了采用 LTC 3588-1 不仅能够采用标准电压为传感器节点进行供电, 而且有效的降低了功耗, 采用低功耗的电路提升供能的稳定性也是研究人员一直在追求的。因此, 该工作是非常有意义的。

值得注意的是, 文中所设计的基于悬挂场景下的复合能量采集系统打破了地面安装的传统风能采集装置的场景限制, 不仅节约了使用空间, 并且增加了同一场景下多模型级联供能的可能性。防振锤下挂风能取电装置的附加质量和布置方式也会对防振锤的防振性能产生一定影响, 文中工作主要在典型附加质量与布置参数下, 对基于防振锤悬挂结构的风能与微风振动能量采集方案及其减振效果进行可行性验证, 尚未对不同质量与布置组合对防振性能的影响开展系统优化研究。后续将考虑在以下几方面进行优化: ①优化压电取能结构的材料, 提升输出的耐久性和稳定性; ②优化输电线路的监测性能, 更长距离的信息传输; ③优化高压输电线路的磁场影响, 增加电磁屏蔽; ④研究不影响防振锤防振性能的布置方案; ⑤拓展次档距振荡工况下的取能研究; ⑥研究多单元级联取能装置对大功率设备的供电适配性问题, 并分析其驱动大功率设备时的单元数量需求; ⑦量化分析取能装置对输电

线路的减震效果。

3 结语

文中面向输电线路上的风能和振动能, 设计了一种面向输电线路悬挂防振结构的电磁-压电复合能量采集装置, 并提出了具有欠压锁定功能的电源管理策略。通过在搭建的输电线路模拟平台进行实验。结果表明, 所设计的振动取能部分具有优异的减震效果。在振幅 3 mm, 振动频率 11.1 Hz, 风速 7.8 m/s 的条件下, 压电能量采集器和电磁能量采集器的匹配负载分别为 $10^4 \Omega$ 和 400Ω , 当达到匹配负载时输出的峰值功率分别为 8.6 mW 和 42.4 mW。当电磁-压电复合能量采集器同时工作时, 可为约 900 盏 LED 灯进行供电。基于 LTC 3588-1 的电源管理电路可以为无线传感节点提供标准化直流输出, 与传统的整流充电供能方式相比, 该电能管理电路的功耗降低了 94.7%, 可实现对传感器节点的高效持续供电。文中工作创新性的提出了面向输电线路的悬挂防振结构风振联合采集思路, 打破了传统风能采集装置地面安装的限制, 为电力线缆悬挂场景下高效采集大范围风能、振动能量和实现振动衰减提供了创新策略和潜在应用前景。

参考文献:

- [1] 陈磊, 段钰. 智能电网输电线路中的在线监测技术应用[J]. 电子技术, 2023, 52(10): 332-333.
CHEN Lei, DUAN Yu. Application of online monitoring technology in smart grid transmission lines[J]. Electronic Technology, 2023, 52(10): 332-333.
- [2] 彭泽武, 冯歆尧, 谢瀚阳. 基于 LoRa 无线技术的台区配用电能物联网监测系统研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(5): 166-169.
PENG Zewu, FENG Xinyao, XIE Hanyang. Research on Internet of things monitoring system for power distribution in station area based on LoRa wireless technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(5): 166-169.

- [3] 朱永灿, 黄新波, 张冠军, 等. 输电线路在线监测设备供电电源应用分析[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 231-236.
ZHU Yongcan, HUANG Xinbo, ZHANG Guanjun, et al. Application research of the power supply for transmission line on-line monitoring devices[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 231-236.
- [4] 窦伟山, 刘永娟. 基于太阳能发电系统的分布式电网并网研究[J]. 电源技术, 2017, 41(7): 1052-1054.
DOU Weishan, LIU Yongjuan. Study on grid connection based on solar power system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(7): 1052-1054.
- [5] 刘宏伟, 郑遵国, 李玉付, 等. 一种基于交流电场感应的取电电源设计[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 214-222.
LIU Hongwei, ZHENG Zunguo, LI Yufu, et al. Optimal design of energy harvesting power supply based on AC electric field induction[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(6): 214-222.
- [6] 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.
- [7] 杜志刚, 贺学锋. 带谐振腔的微型压电风能采集器[J]. 传感技术学报, 2012, 25(6): 748-750.
DU Zhigang, HE Xuefeng. Micro piezoelectric wind energy harvester with a resonant cavity[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(6): 748-750.
- [8] 赵鹏程, 刘绍娜, 江坤, 等. 涡激式微型风能采集装置的控制策略研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(12): 1619-1623.
ZHAO Pengcheng, LIU Shaona, JIANG Kun, et al. Study on control system for micro wind power collection by vortex-induced vibration[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(12): 1619-1623.
- [9] 吴志东, 冯宇琛, 汪光亚. 基于温差/风振复合式发电的传感器自供电系统设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(9): 84-87.
WU Zhidong, FENG Yuchen, WANG Guangya. Design of sensor self-powered system based on temperature difference/wind induced vibration hybrid type power Generation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(9): 84-87.
- [10] 黄永刚, 雷文骞, 陈伟, 等. 适用于输电线路监测的自供电无线在线监测系统[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 83-91.
HUANG Yonggang, LEI Wenqian, CHEN Wei, et al. Self-powered wireless online monitoring system for electric transmission lines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 83-91.
- [11] 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.
- [12] 张恩琦, 于思洋, 王皓, 等. 风力发电机的发展及应用综述[J]. 电气工程学报, 2025, 20(1): 14-25.
ZHANG Enqi, YU Siyang, WANG Hao, et al. Overview of the development and application of wind turbine generators[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(1): 14-25.
- [13] 杨光源, 周诗嘉, 彭光强, 等. 基于18相风力发电系统的环流抑制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 190-198.
YANG Guangyuan, ZHOU Shijia, PENG Guangqiang, et al. Research on circulation suppression strategy based on 18-phase wind power system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 190-198.
- [14] 姜阳, 陆超, 袁志昌, 等. 高空风力发电系统能量捕获及变换技术: 现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(21): 8365-8377.
JIANG Yang, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Energy capture and conversion technology of high altitude wind power Generation systems: Current situation and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21): 8365-8377.
- [15] 冯运, 刘凡, 朱柏宇, 等. 面向电力物联网的宽风速摩擦纳米发电机自驱动系统[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 42-50.

- FENG Yun, LIU Fan, ZHU Baiyu, et al. Wide wind speed triboelectric nanogenerator self-powered system for power of things[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(7): 42-50.
- [16]王康达, 任慧敏, 李振明, 等. 三轴电磁式振动能量采集器设计与验证[J]. *微纳电子技术*, 2023, 60(3): 413-421.
- WANG Kangda, REN Huimin, LI Zhenming, et al. Design and verification of three-axis electromagnetic vibration energy harvester[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(3): 413-421.
- [17]GAO Sihang, LUO Xiaoting, WEI Hao, et al. Wind-driven suspended triboelectric-electromagnetic hybrid generator with vibration elimination for environmental monitoring in the high-voltage power transmission line[J]. *Nano Energy*, 2024, Part A(128): 109831.
- [18]GAO Sihang, ZENG Xisong, CHEN Xiaolei, et al. Self-powered system for environment and aeolian vibration monitoring in the high-voltage transmission system by multi-directional wind-driven triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2023(117): 108911.
- [19]GAO Sihang, ZENG Xisong, ZHENG Guowen, et al. Triboelectric-electromagnetic hybridized module for energy harvesting of power transmission lines galloping and self-powered galloping state monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022(101): 107530.
- [20]陈雨润, 张 虎, 徐才华, 等. 面向环境振动能量收集的直流摩擦纳米发电机技术进展[J]. *微纳电子技术*, 2023, 60(7): 1000-1011.
- CHEN Yurun, ZHANG Hu, XU Caihua, et al. Technical advances in DC triboelectric nanogenerators for ambient vibration energy harvesting[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(7): 1000-1011.
- [21]高思航, 冯少轩, 刘咏熙, 等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路振动能量收集装置[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 208-215.
- GAO Sihang, FENG Shaoxuan, LIU Yongxi, et al. Vibration energy harvesting device of transmission line based on triboelectric nanogenerator[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2024, 43(5): 208-215.
- [22]马超群, 王优强, 王秀通, 等. 雨滴能量收集型摩擦纳米发电机的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(3): 1-16.
- MA Chaoqun, WANG Youqiang, WANG Xiutong, et al. Research progress of raindrop energy harvesting triboelectric nanogenerators[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2024, 61(3): 1-16.
- [23]刘 豪, 牛姿懿, 宋亚凯. 永磁/笼障混合转子双定子风力发电机电磁设计与性能分析[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(5): 432-441.
- LIU Hao, NIU Ziyi, SONG Yakai. Electromagnetic design and performance analysis of dual-stator wind power generator with permanent-magnet/cage-barrier mixed rotor[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(5): 432-441.
- [24]王家欢, 夏银水, 沈家辉, 等. 自供电压电电磁混合能量俘获电路[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(11): 1538-1545.
- WANG Jiahuan, XIA Yinshui, SHEN Jiahui, et al. Self-powered hybrid harvesting circuit for piezoelectric energy and electromagnetic energy[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(11): 1538-1545.
- [25]马俊格, 李银辉, 耿爱森, 等. 基于 BTO/PAN 复合纳米纤维膜的柔性压电纳米发电机[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(9): 74-82.
- MA Junge, LI Yinhui, GENG Aisen, et al. Flexible piezoelectric nanogenerator based on BTO/Pan composite nanofiber membranes[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2024, 61(9): 74-82.
- [26]贺春山, 刘亚鑫, 盖厚君, 等. 拨动式压电旋转发电机设计与测试[J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(3): 35-38.
- HE Chunshan, LIU Yaxin, GE Houjun, et al. Design and test of a toggle piezoelectric rotating generator[J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(3): 35-38.
- [27]YONG S, WANG H, LIN Z, et al. Environmental self-adaptive wind energy harvesting technology for self-powered system by triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator with dual-channel power management topology[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022(12): 2202469.
- [28]GUI Y, WANG Y, HE S, et al. Self-powered smart agriculture real-time sensing device based on hybrid wind energy harvesting triboelectric-electromagnetic nanogenerator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022(269): 116098.
- [29]马华安, 刘景全, 唐 刚, 等. 一种宽频的磁式压电振

动能量采集器[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 66-68.
MA Huaan, LIU Jingquan, TANG Gang, et al. A magnetic structure for broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Sensors and Microsystems, 2011, 30(4): 66-68.

[30]KAN J, LIAO W, WANG S, et al. A piezoelectric wind energy harvester excited indirectly by a coupler via magnetic-field coupling[J]. Energy Conversion and Management, 2021(240): 114250.

齐超亮(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电设备管理、状态感知、状态评价及故障诊断工作。

李 肖(1989—), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计。

尚静怡(1996—), 女, 工程师, 主要从事竞争性电力市场研究、电价分析工作。

褚元好(1992—), 女, 高级工程师, 主要从事客户档案管理、电费电价、稽查管理及农排工作。

张忆南(1992—), 男, 工程师, 主要从事二次设备运检、电力市场交易、电费结算管理工作。

何维晟(1991—), 男, 副教授, 主要从事电工装备故障诊断工作。

高思航(1990—), 男, 副教授, 主要从事电工装备故障诊断工作(E-mail: gaosh@cqupt.edu.cn)。