

用于长期环境监测的植物耦合能量收集系统

单嘉泽, 赵达哲, 钟俊文*

(澳门大学机电工程系, 澳门 999078)

摘要: 长期环境监测设备作为物联网的关键节点, 在智慧城市系统中发挥着至关重要的作用。然而, 为这些设备提供可持续的长期电力供应仍然是一项重大挑战。在本研究中, 我们提出了一种基于绿色植物叶片的植物耦合能量收集系统 (Plant-Coupled Energy Harvesting System, PCEHS), 用于从周围环境中收集能量并支持长期环境监测设备运行。植物叶片广阔的生物界面为耦合环境中的电磁能量提供了理想的媒介, 其角质层与细胞层在工频电场下可等效为电容-电阻结构, 能够有效汇聚环境中的电磁辐射。实验结果表明, 玫瑰书带木、辐叶鹅掌柴、红鸡蛋花等多种类型的植物叶片在 50 Hz 工频电场作用下均能够产生有效的电能输出, 并且在叶片遭受纵向撕裂、横向撕裂等物理损伤的情况下仍能保持稳定的能量供应, 验证了系统良好的鲁棒性。其中, 辐叶鹅掌柴因叶片宽大平坦、叶脉网络发达, 展现出最优的能量收集性能, 被选为后续实验的研究对象。该系统采用事件驱动型间歇工作与双级异构储能架构, 通过小容量电容器快速积累能量并周期性唤醒电源管理芯片, 实现了极低的静态功耗。本研究成功将 PCEHS 部署于实际办公场景, 以植物盆栽叶片为能量耦合介质, 通过笔记本电脑充电器产生的环境电场, 实现了长达数天的温湿度连续监测, 数据每 5 min 通过无线网络上传至手机终端。实验数据表明, 该系统单次信号传输能耗低至 0.27 mJ, 5 min 监测周期总能耗约为 2.455 mJ, 充分验证了 PCEHS 在超低功耗下的稳定运行能力, 可满足长期监测需求并适配各类能源敏感场景。凭借其稳定性、可持续性与环境友好特性, PCEHS 无需接触电力线, 也不依赖光照或机械运动, 在绿色建筑、智能办公等典型低频电磁场场景中展现出广阔的应用前景。该技术有望在城市管理智能化与效能提升方面发挥关键作用, 为智慧城市的可持续发展提供有力支撑。

关键词: 植物耦合能量收集; 环境电磁能量; 可持续系统; 自供电系统; 智慧城市; 物联网

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52522513); 澳门科学技术发展基金 (No.0117/2024/AMJ)

中图分类号: TM919; X851 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2026)03-1337-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250178

Plant-Coupled Energy Harvesting System for Long-Term Environment Monitoring

SHAN Jiaze, ZHAO Dazhe, ZHONG Junwen*

(Department of Electromechanical Engineering, University of Macau, Macao 999078, China)

Abstract: Long-term environmental monitoring devices serve as critical nodes in the Internet of Things and play an essential role in smart city systems. However, providing sustainable long-term power supply for these devices remains a significant challenge. In this study, we propose a plant-coupled energy harvesting system (PCEHS) based on green plant leaves. This system harvests energy from the surrounding environment to support long-term environmental monitoring devices. The extensive biological interface of plant leaves provides an ideal medium for coupling electromagnetic energy from the environment. The cuticle and cell layers of leaves can be equivalent to a capacitor-resistor structure under power frequency electric fields. This structure effectively converges ambient electromagnetic radiation. Experimental results demonstrate that multiple plant species, including *Clusia rosea*, *Schefflera actinophylla*, and *Plumeria rubra*, generate effective electrical output under 50 Hz power frequency electric fields. The system maintains stable energy supply even when leaves suffer physical damage such as longitudinal tearing or horizontal tearing. This verifies the strong robustness of the system. Among the tested species, *Schefflera actinophylla* exhibits optimal energy harvesting performance due to its broad, flat leaves and well-developed vein networks. Therefore, this species is selected as the research subject for subsequent experiments. The system adopts an event-driven intermittent operation architecture with dual-stage heterogeneous energy storage. A small-capacitance capacitor rapidly accumulates energy and periodically wakes up the power management chip. This design achieves extremely low static power consumption. We successfully deploy the PCEHS in an actual office environment.

Using potted plant leaves as the energy coupling medium, the system utilizes the ambient electric field generated by a laptop adaptor. It achieves continuous temperature and humidity monitoring for several days. Data are uploaded to mobile terminals via wireless networks every five minutes. Experimental data show that the system consumes only 0.27 mJ per signal transmission. The total energy consumption over a five-minute monitoring cycle is approximately 2.455 mJ. These results fully verify the stable operation capability of PCEHS under ultra-low power conditions. The system meets long-term monitoring requirements and adapts to various energy-sensitive scenarios. With its stability, sustainability, and environmental friendliness, PCEHS requires no contact with power lines. It does not depend on light exposure or mechanical motion. The system demonstrates broad application prospects in typical low-frequency electromagnetic field scenarios such as green buildings and smart offices. This technology is expected to play a key role in enhancing the intelligence and efficiency of urban management. It provides strong support for the sustainable development of smart cities.

Keywords: plant-coupled energy harvesting; ambient electromagnetic energy; sustainable system; self-powered system; smart city; IoT

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52522513); Science and Technology Development Fund, Macao SAR (No.0117/2024/AMJ)

0 引言

随着人类社会的科技进步,清洁能源以及为实现可持续发展目标而推进的数字革命受到研究者的关注^[1]。电子学、计算机科学、材料科学及相关领域的快速发展推动了物联网节点的广泛部署与智慧城市平台的构建。基于摩擦纳米发电机^[2]、压电纳米发电机^[3]、热电发电机^[4]和磁电发电机^[5]的能量收集技术,因其环境友好性以及和电子设备无缝集成的特性,在自供电系统中展现出显著优势。与传统能源转换器相比,电磁能量收集作为一种新兴技术,能够从环境中高效捕获能量并在低功耗应用中展现出巨大潜力^[6-7]。尽管电磁辐射的功率密度较低,但其无处不在的特性使其能够通过人体耦合效应为发光织物^[8]、低功耗可穿戴电子设备^[9-10]和视觉显示界面^[11]供电。与人体类似,植物也是一种常见的电磁辐射耦合介质,可作为小型能源为低功耗设备供电^[12-13]。植物叶片通常包含作为电介质的角质层和作为导体的细胞层,二者共同构成了能量传输的高效通道^[14]。

此外,城市化进程加速了智慧城市作为物联网核心概念的发展。信息通信技术通过无线传感网络在智慧城市运营中发挥着关键作用,推动了信息城市与数字城市的实现^[15-17]。作为理想的电磁辐射耦合介质之一,植物叶片以其在城市中广泛分布的生物界面特性,为低功耗能量收集提供了重要的平台^[18]。专为低功耗应用设计的传感器和电路不仅能够与植物叶片实现无缝集成,还能通过提供实时、连续的传感器数据,促进对植物微环境及其健康状况的自主监测^[19-23]。

在本研究中,我们开发了一种植物耦合能量收集系统(Plant-Coupled Energy Harvesting System, PCEHS),用于收集植物周围环境中的低品质电磁能量。该系统将耦合的电磁能量存储在能量存储单元中,并为集

成到系统中的功能模块供电。PCEHS在确保植物不受损害的前提下运行,能够为智慧城市中多种环境参数(如温度、湿度和液位)的远程监测提供稳定的电力支持^[24-25]。本研究展示了PCEHS的长期运行能力,包括充电过程与24 h的连续温湿度监测,充分验证了该方案的实用性和可靠性。PCEHS可作为智慧城市传感器网络的重要节点^[26],克服了传统供电系统的局限性,展现出更广泛的应用前景和更高的系统灵活性。

1 结果与讨论

1.1 PCEHS的工作机制与设计策略

电气设备产生的电磁辐射在日常生活中无处不在,尤其是在城市环境中。户外设施以及室内设备向环境中发射电磁波^[27-28]。本研究提出的植物耦合能量收集系统(PCEHS)主要针对环境中最为普遍的低频电磁场进行设计,其工作频段集中于50~60 Hz的工频范围^[29]。这些电磁辐射可通过PCEHS进行捕获,并利用低功耗传感器实现环境数据的采集。本研究提出的PCEHS与国内外多种能量收集方案进行了综合对比。现有方案主要包括:(1)基于供电线磁场的能量收集器利用电磁感应原理,通过耦合由大电流(65.3 A)产生的强磁场发电,可在高负载线路中输出百毫瓦级功率,适合为监测系统持续供电,但此方式依赖特定安装与持续电流^[30];(2)基于供电线电场的收集器则基于电容耦合原理,从带电导线周围的电场中获取能量,其结构简单,仅需包裹导线的金属箔即可收集微安级电流,为无线传感器供电。该方式仅依赖线路电压,即使线路空载也可工作,但收集的能量微弱,导致充电周期较长^[31];(3)基于供电线磁场的高效收集器同样采用电磁感应,但针对的是中小电流(3.1 A)的普通家用线路,需依赖“储能-放电”的间歇

模式工作,传感器每次仅工作约 27 s,随后系统关闭并进入约 75 s 的充电阶段,传感器有效工作时间占比仅约 26.5%^[32]; (4) 鞋载压电/摩擦电能量收集系统利用人体行走机械能发电,可提供数毫瓦级功率,但能量输出具有活动依赖性^[33]; (5) 采用无铅压电材料的磁场能量收集器件在强交变磁场下具有高功率密度,但需要外部磁场持续激励^[34]; (6) 还有支持太阳能等多源输入的通用电源管理电路,可实现能量自治循环,其持续运行能力仍取决于环境能量输入的稳定性^[35]。相较于上述方案,本研究系统无需与任何电力线实体接触,而是利用植物叶片作为生物界面,直接从广泛存在的环境电磁辐射中获取能量,实现了自适应环境部署;系统一经启动,即可稳定工作数天,克服了间歇供电模式的限制,实现了连续的数据采集与传输。在工频电场下,单叶片($4 \times 4 \text{ cm}^2$)输出功率约 $16.44 \text{ } \mu\text{W}$,结合事件驱动唤醒与双级储能设计,系统实现了极低静态功耗与长期持续工作,尤其适用于稳定低频电磁环境下的自主监测应用。该系统的能量收集方式对信号调制方式不敏感,其设计主要针对工频范围的电磁环境进行优化,并在稳定的交变电场中测试使用。因此,该系统适合应用于由常规电器等构成的、电磁环境相对稳定的典型低频场景,如图 1(a) 所示。绿色植物作为室内外环境中广泛存在的生物体,不仅用于景观美化和空气净化,还为电磁能量收集提供了理想的天然媒介。如图 1(c) 所示,植物叶片的结构主要由角质层和细胞层组成^[36-37],细胞层因其较高的相对介电常数,能够有效地将电磁能量汇聚其中,其内部电场强度亦随外界电磁辐射的变化而动态响应。图 1(d) 展示了系统的等效电路模型,其中叶片可等效为电容 C_{leaf} 与电阻 R_{leaf} 的联合结构,且在 50 Hz 工频条件下, C_{leaf} 的典型值为 8 nF, R_{leaf} 的典型值为 $2.4 \text{ M}\Omega$ ^[12]。电磁电源与植物叶片通过电场耦合形成电容通路。当外部负载(如电容器)连接到植物时,耦合到叶片中的电能可有效传输至负载。

PCEHS 的系统框图如图 1(b) 所示,该系统由四个核心模块组成:主板、唤醒模块、电源管理模块和传感器模块。模块化设计不仅确保了能量收集的高效性,还支持各组件的独立优化与升级,从而提升了系统的整体性能和可靠性。电磁波在植物叶片内部激发周期性变化的电场,在一个周期 T 内,电场的方向和强度发生动态变化,驱动电荷载流子的双向运动并产生交流输出。能量存储单元包括一组电池和一个电容器,分别由两个桥式整流器供能:镍氢电池组为电源管理模块和传感器模块提供能源,而电容器则专用于为唤醒模块供电,且电容器的容量远小于电池组,可在短时间内充电至低压差稳压器 MAX666 (Low

DropOut regulator, LDO) 的工作电压。LDO 由电容器供电,并产生稳定的 5 V 输出,用于短暂激活电源管理芯片 BQ25504 (Power Management Chip, PMC)。电池组需要较长的充电时间,并与电源管理芯片直接连接。在 LDO 提供的短暂激活期内,PMC 监测电池电压。当电池电压达到设定值时,PMC 将电池电压转换为稳定电压,为自身和传感器模块供电;否则,PMC 将保持休眠状态,直到电池电压充电至设定值。传感器模块包括一个微控制器单元 TLSR8258 (MicroController Unit, MCU),用于与个人终端进行无线通信,以及商用传感器芯片(SHT30 用于温湿度监测,TC301D 用于液位监测)。通过充分利用植物的电磁辐射耦合能力,PCEHS 实现了无需更换电池的长期环境监测功能。

1.2 植物耦合的电学性能

植物种类可能影响叶片的理化性质,进而影响从周围环境中收集电磁能量的耦合效率^[38]。本研究选取了五种植物叶片作为耦合源进行测试:玫瑰书带木、辐叶鹅掌柴、红鸡蛋花、艳山姜和朱蕉,其电学输出如图 2(a) 所示。所有植物均健康无病虫害,并被切割为相同尺寸($4 \times 4 \text{ cm}^2$),在测试时叶片均贴近电磁源表面放置。以鹅掌柴叶片为例计算植物耦合环境中的电磁能量效率,接入一片叶片对 $4.7 \text{ } \mu\text{F}$ 电容进行充电,起始电压为 $V_1 = 0.23 \text{ V}$,充电至 8.01 V ,充电时长 $\Delta t = 9.16 \text{ s}$ (从 1.84 s 开始充电至 11 s 结束);电磁源空载典型值经 YB39DM 数字功率计实测为: $V_2 = 220 \text{ V}$, $I_2 = 0.046 \text{ A}$,有功功率 0.249 W 。

电容储存的能量增量:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (V_f^2 - V_i^2) = \frac{1}{2} \times 4.7 \times 10^{-6} \text{ F} \times [(8.01 \text{ V})^2 - (0.23 \text{ V})^2] \approx 1.5065 \times 10^{-4} \text{ J} \quad (1)$$

计算平均功率:

$$P_{\text{输出}} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1.5065 \times 10^{-4} \text{ J}}{9.16 \text{ s}} \approx 1.644 \times 10^{-5} \text{ W} = 16.44 \text{ } \mu\text{W} \quad (2)$$

能量转化效率:

$$\eta = \frac{P_{\text{输出}}}{P_{\text{输入}}} \times 100\% = \frac{1.644 \times 10^{-5} \text{ W}}{0.249 \text{ W}} \times 100\% \approx 0.0066\% \quad (3)$$

由于辐叶鹅掌柴的叶片更宽且更平坦,被选为后续实验的研究对象。叶片数量显著影响能量收集效率,如图 2(b) 所示,在贴近电磁源表面的情况下使用一片面积为 160 cm^2 的叶片收集电磁能量时,电流约为 $4.5 \text{ } \mu\text{A}$;而当两片和三片面积相同的叶片并联到数据采集卡时,电流分别增加至约 $8.2 \text{ } \mu\text{A}$ 和 $12.3 \text{ } \mu\text{A}$ 。

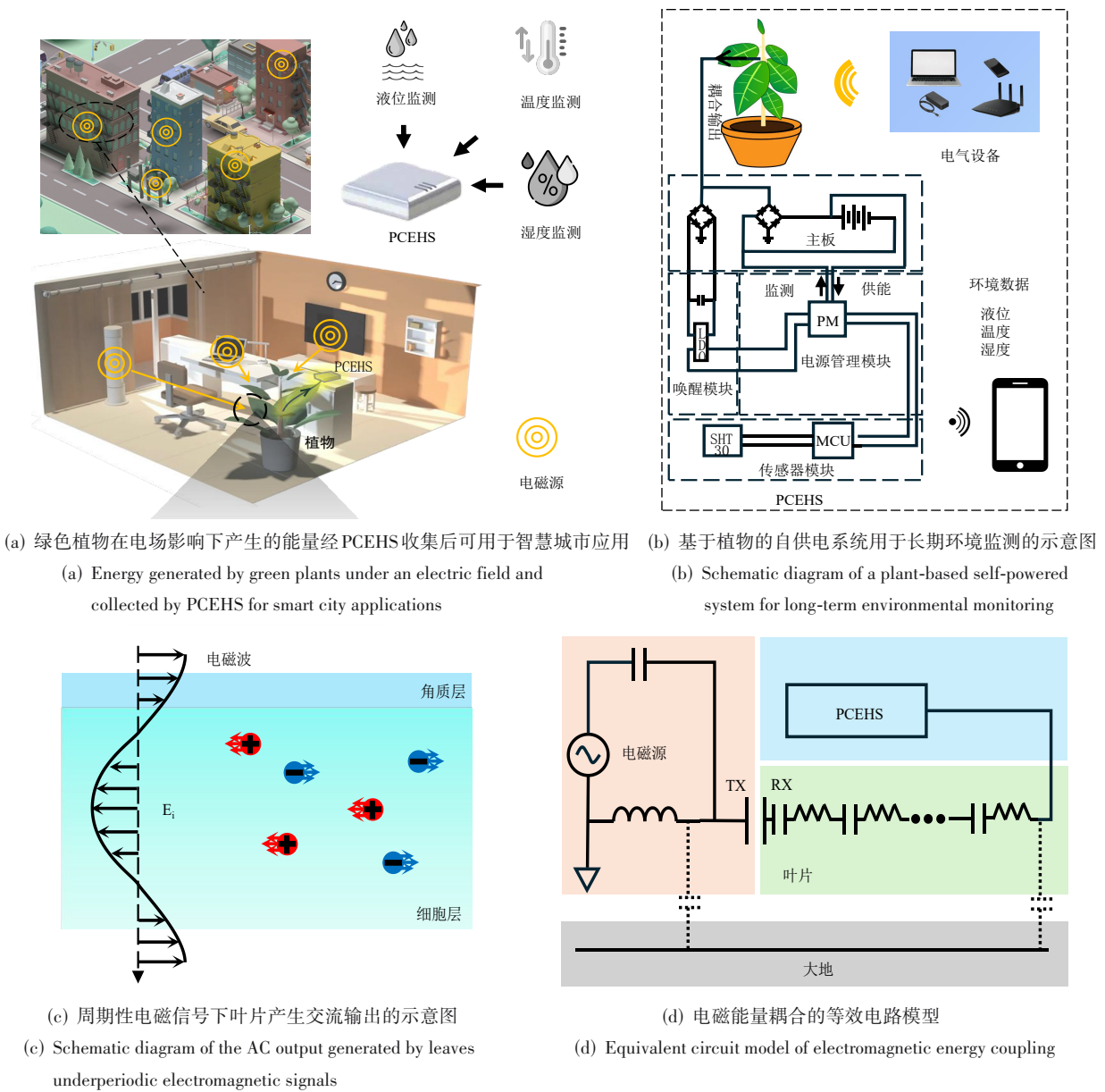


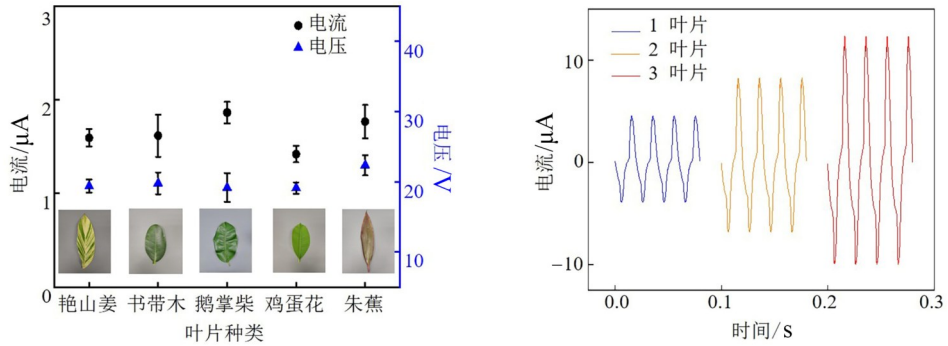
图1 PCEHS的设计与工作机理
Figure 1 Design and working mechanism of PCEHS

可见多个叶片并联收集电磁能量时,其输出电流并不完全呈线性叠加。尽管并联后总电流有所增加,但增幅低于理想线性值,这可能是由于叶片间的电磁干扰、能量采集器件的非线性响应特性等因素所致,导致整体能量转化效率在多片耦合时存在一定的衰减。

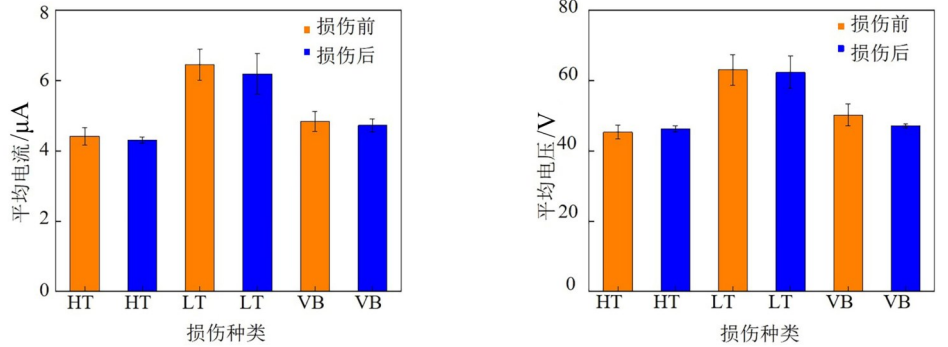
叶片的状态(如水分含量)会影响电磁辐射的耦合效率,而叶片的损伤也可能对其性能产生影响。为了研究不同类型损伤的影响,实验测量了贴近电磁源表面放置时,三种不同损伤条件下叶片(面积均为 160 cm^2)的电学输出:纵向撕裂(Longitudinal Tear, LT)、横向撕裂(Horizontal Tear, HT)和叶脉断裂(Vein

Breakage, VB)。图2(c)和图2(d)对比了叶片损伤前后的平均输出电流和电压。当叶片受损但面积未发生变化时,输出保持稳定,体现了PCEHS的鲁棒性。

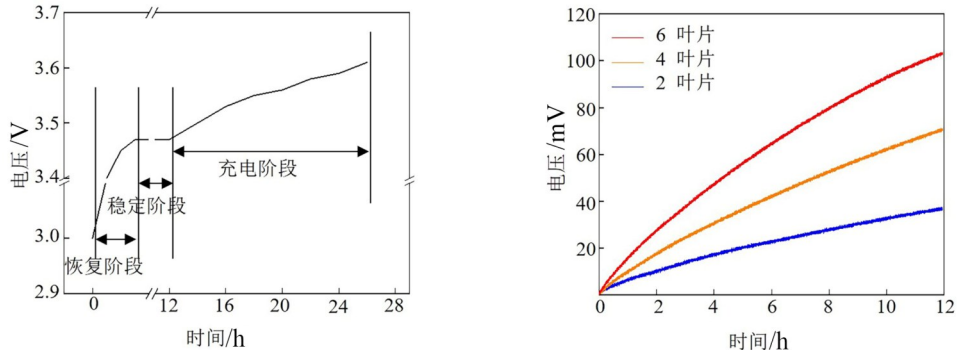
耦合的电能被整流并存储在电容器和电池中^[39],充电过程如图2(e)所示。电池首先完全放电,随后经过电压恢复过程达到稳定值约 3.46 V 。接着,在6片 160 cm^2 叶片连接到PCEHS进行电磁能量耦合的情况下,电池在14 h内充电至 3.6 V 。同时,连接到PCEHS的叶片数量对充电过程有显著影响。如图2(f)所示,当连接到PCEHS的叶片(面积均为 160 cm^2)数量分别为2、4和6时,电压在12 h内分别增加36、70



(a) 在贴近电磁源放置时,五种植物 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 叶片的电流和电压输出 (b) 在贴近电磁源放置时,不同并联叶片数量下的电流输出 (单个叶片面积为 160 cm^2)
 (a) Current and voltage outputs of $4 \times 4 \text{ cm}^2$ leaves from five plant species when placed close to an electromagnetic source (b) Current output under different numbers of parallel leaves when placed close to an electromagnetic source (the area of a single leaf is 160 cm^2)



(c) 160 cm^2 叶片在受损情况下的电流输出稳定性 (d) 160 cm^2 叶片在受损情况下的电压输出稳定性
 (c) Stability of current output of 160 cm^2 leaves under damaged conditions (d) Stability of voltage output of 160 cm^2 leaves under damaged conditions



(e) 电池组完全放电后恢复至稳定状态,并进行充电的电压变化曲线 (f) 不同并联叶片数量下电池充电时的电压随时间变化曲线(单个叶片面积为 160 cm^2)
 (e) Voltage variation curve during battery charging after the battery pack is fully discharged and recovered to a stable state (f) Voltage-time curves during battery charging under different numbers of parallel leaves (the area of a single leaf is 160 cm^2)

图2 PCEHS 的电学表征

Figure 2 Electrical characterization of PCEHS

和 84 mV , 表明耦合面积与充电效率呈正相关。

1.3 系统设计与性能表征

传统能量收集系统常采用整流后直接供电的简单拓扑^[31,34],存在两个局限:一是系统工作完全取决于储能电压是否达到负载阈值,在弱能量环境中导致漫长的被动“充电-等待”空窗期;二是负载即便休眠,

主电源管理电路仍持续耗电,存在的静态功耗。针对上述问题,本文设计了事件驱动型间歇工作和双级异构储能管理的协同架构,通过引入一个独立的、超低功耗的唤醒模块实现事件驱动型间歇工作。该模块通过小容量电容快速积累环境能量,周期性地产生 5 V 脉冲以主动唤醒 PMC 并检测电池状态,从而将系统完

整工作循环绑定于“储能达标”事件:环境能量→电容充电→唤醒脉冲→PMC检测→电压达标→系统上电→任务完成后断电。该设计实现了近零静态功耗待机,系统大部分时间仅唤醒电路运行,主传感器与MCU仅在事件触发时短暂工作。这种从被动供电到主动监测的转变,使得利用植物耦合电磁能实现长期可持续监测成为可能。

另外,进一步设计了双级异构储能与供电路径(图1(d)):唤醒路径:叶片→整流器→小电容→唤醒电路专用于快速响应与低功耗唤醒;主供能路径:叶片→整流器→电池组→PMC→传感器则提供持续稳定的能量输出。通过优化PMC的控制逻辑,系统仅在收到唤醒信号后才短暂上电检测电池电压,电压达标则启动供电,否则立即返回休眠,从而实现功耗隔离与静态功耗的大幅降低。这一设计不仅有效提升了微弱环境能量的利用效率,更通过事件驱动唤醒与异构储能分级管理,确保了系统在能量受限条件下的长期稳定与可持续运行。

PCEHS的详细工作流程如图3(a)所示。从植物叶片中收集的电磁能量用于为电池充电,并通过四个叶片(面积均为 160 cm^2)为唤醒模块的板载 $4.7\text{ }\mu\text{F}$ 电容器供电^[40-41]。唤醒模块中的LDO启动电源管理模块中的电池电压检测功能。当PMC检测到电池电压达到阈值时,系统开始为电源管理模块和传感器模块供电。随后,传感器数据通过MCU上传至云端,并在终端显示。系统的爆炸图如图3(b)所示。当电容器充电至LDO的阈值电压(设定为 8.6 V)时,电容器为LDO供电,从而输出稳定的 5 V 电压。如图3(c)所示,电容器能够维持约 0.44 s 的输出以激活电源管理模块,随后进入 3.06 s 的电容器再充电窗口期。PMC被LDO的周期性输出唤醒,并触发电池电压检测。当检测到的电池电压达到阈值时,PMC输出稳定的 3.3 V 电压,为自身及后续的传感器模块供电,阈值电压可根据电路图的配置进行调整。图3(d)展示了电池组供电时PMC的电压和电流,初始化阶段由于传感器模块进行网络配置,能耗较高(约 110 mJ),而初始化后的单次信号传输能耗极低(约 0.27 mJ)。该能量收集系统实现了整体超低功耗运行,在监测任务中(如每 5 min 上报一次数据),系统绝大部分时间处于仅有唤醒电路与微控制器休眠电流维持的状态。对系统进行监测时每 5 min 内的功耗进行计算:

BQ25504功耗典型值(3.3 V , 330 nA):

$$P_{\text{BQ}} = V \times I = 3.3\text{ V} \times 330 \times 10^{-9}\text{ A} = 1.089\text{ }\mu\text{W} \quad (4)$$

TL8258功耗典型值(3.3 V , $1\text{ }\mu\text{A}$):

$$P_{\text{TL8258}} = V \times I = 3.3\text{ V} \times 1 \times 10^{-6}\text{ A} = 3.3\text{ }\mu\text{W} \quad (5)$$

系统运行时PMC与MCU理论能耗:

$$P_{\text{sys}} = P_{\text{TL8258}} + P_{\text{BQ}} = 4.389\text{ }\mu\text{W} \quad (6)$$

$$E_{\text{sys}} = P_{\text{sys}} \times T_{\text{sys}} = 4.389\text{ }\mu\text{W} \times 300\text{ s} = 1.316\text{ mJ} \quad (7)$$

系统运行 5 min 总能耗(对图3(d)进行数据处理得到):

$$E_{\text{total}} = 2.455\text{ mJ} \quad (8)$$

理论能耗与实际能耗比:

$$\rho = \frac{E_{\text{sys}}}{E_{\text{total}}} \times 100\% = \frac{1.316\text{ mJ}}{2.455\text{ mJ}} \times 100\% = 53.6\% \quad (9)$$

其余 46.4% 的能量主要消耗于驱动外部传感器、执行器的工作电流,以及电路中导线、电阻、电容等元器件产生的热损耗与漏电流等。该系统所有关键芯片均采用低功耗设计,并仅在事件触发时短暂工作,从而使得整体功耗可由植物叶片在典型电磁环境下耦合的微弱能量持续支持,满足长期、免维护的环境监测需求。

1.4 长期环境数据监测的演示

为展示PCEHS的性能,我们将其用于 24 h 室内温湿度监测。实验装置如图4(a)所示,以一盆辐叶鹅掌柴植物样本作为电磁辐射耦合介质,并以空载功率为 0.249 W 的笔记本电脑充电器作为电磁辐射源。传感器信号通过网关传输至手机,手机上的显示界面如图4(a)右侧所示。一组完全放电的电池通过PCEHS充电,当电压达到阈值电压(约 3.6 V)时,整个系统开始运行,如图4(b)所示。实验结果表明,电池电压在初始化阶段快速下降,而在初始化完成后下降速度显著减缓。手机上的温湿度数据每 5 min 更新一次, 24 h 的环境监测数据如图4(c)所示,充分展示了该系统在长期应用中的可靠性。

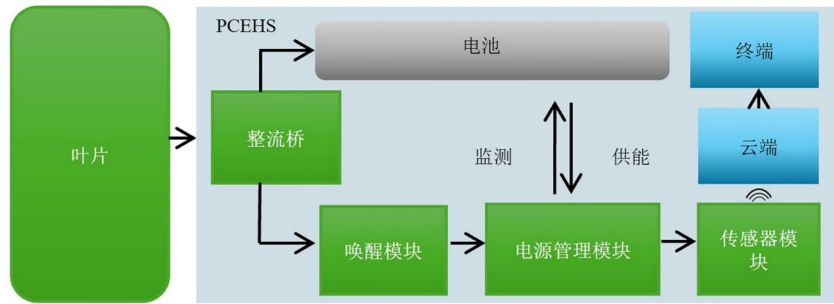
PCEHS还可用于城市液位监测。如图4(d)所示,将传感器芯片更换为TC301D,并使用蓝色发光二极管作为液位报警器。如图4(e)所示,当液位高于传感器芯片位置时,指示灯LED熄灭。通过在城区或办公环境中部署PCEHS,能够以低成本、可持续的方式实现长期城市环境数据监测^[42-44]。

实地部署时,系统工作时长并非由固定时间控制,而是由PMC监测的储能单元电压状态动态决定。当电池电压在唤醒周期内达到工作阈值时,系统即刻启动,为传感器与通信模块供电;电池持续放电直至电压降至截止阈值,系统则自动关闭进入休眠。此后,植物叶片持续为电池充电,直至电压再次达到工作阈值,系统重新唤醒,由此形成“放电-休眠-充电-唤醒”的自治循环。

2 材料与方法

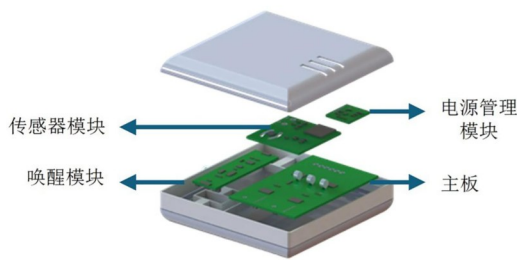
2.1 材料与电学表征

实验所用的植物叶片均采自户外自然生长的植



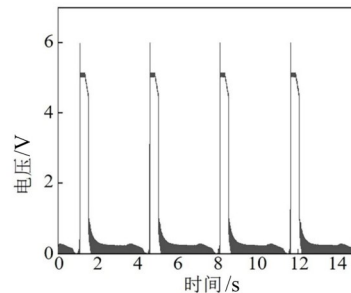
(a) PCEHS 的系统框图

(a) System block diagram of PCEHS



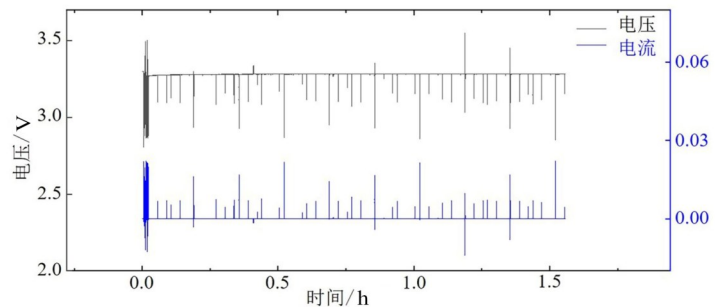
(b) PCEHS 电路模块爆炸图

(b) Exploded view of the PCEHS circuit modules



(c) 唤醒电路的输出电压曲线

(c) Output voltage curve of the wake-up circuit



(d) 当电池电压达到设定值时,电源管理芯片的输出电压和电流

(d) Output voltage and current of the power management chip when the battery voltage reaches the preset value

图 3 PCEHS 的系统设计与性能表征

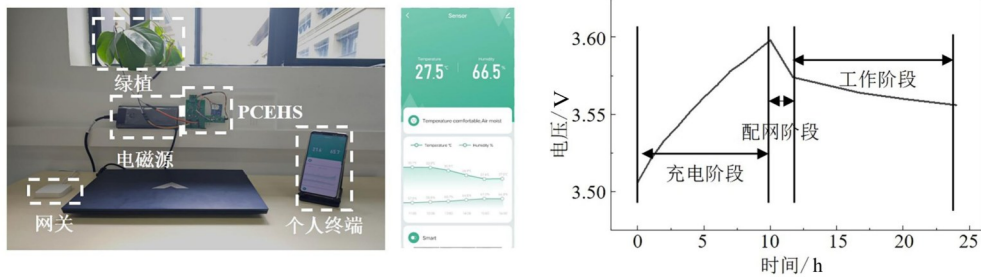
Figure 3 System design and performance characterization of PCEHS

物,仅选择健康且成熟的叶片。电场强度是由电磁场强度测量仪(Pudibei-620A)在贴近电磁源表面的情况下测定的。在该场强条件下,叶片能够为电容快速充电,使其电压迅速上升^[12]。在电磁能量耦合实验中,将叶片紧贴电磁源放置,导线插入各叶片的叶脉后,并联接入整流器。PCEHS 的电学表征通过 Keithley 6514 静电计和 NI USB 6341 数据采集系统完成。

2.2 驱动电路设计

PCEHS 包括了主板,传感器模块、唤醒模块、电源管理模块在内的四个模块。主板集成了两个整流器(型号为 DB201,用于为电容器和电池充电)以及用于连接唤醒模块和电源管理模块的引脚接口,唤醒模块(见图 5)包含一个低压差稳压器(型号为 MAX666)及

其外围电路:该设计利用叶片耦合的能量进行储能,周期性地输出 5 V 电压用于激活电源管理模块(见图 3(c))。叶片产生的输出经过整流器进行全波整流,当 C2 电压升高到大约 12.6 V(D1 击穿电压与 Q1 基极-发射极之间压降的和)时,Q1 导通,从而驱动 NMOS 导通,并使 Q1 保持导通状态(自锁)。当 Q1 导通时,C2 的高电位端此时有了返回地的通路,通过 MAX666 低压差线性稳压器 U1 输出稳定的 +5 V 电压。当 V_{out} 下降到大约 4.5 V 以下时(由电阻 R3 和 R6 设定),U1 内的低电压检测引脚将低于其阈值,从而会短暂地将低电压输出引脚拉低至地电位。这个负脉冲通过电容 C1 触发 Q1 关闭,进而使 NMOS 关闭,并重新开始 C2 的充电循环。

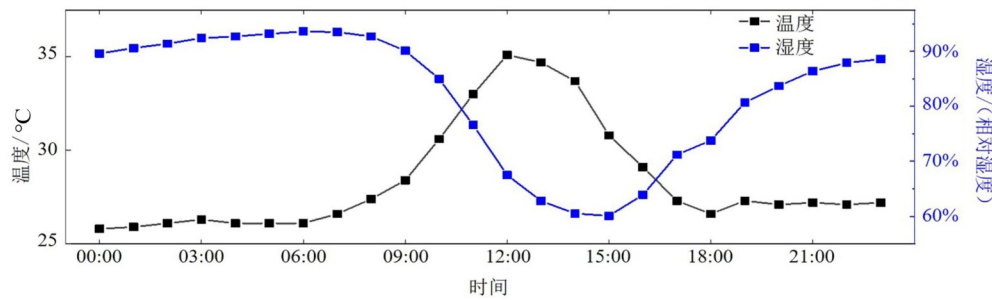


(a) 系统部署照片及数据传输界面

(b) 系统运行期间的电压变化曲线

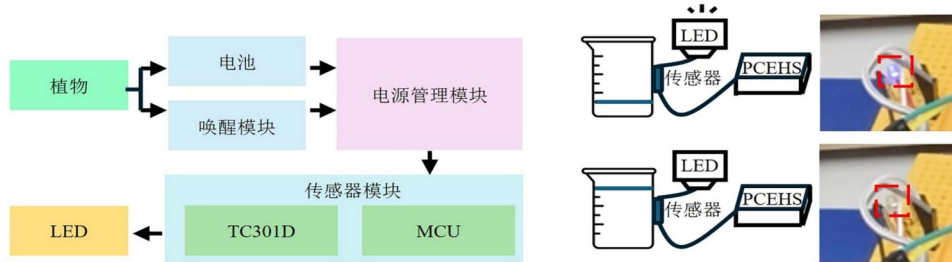
(a) Photograph of system deployment and data transmission interface

(b) Variation curve during system operation



(c) 24小时内的温湿度监测数据传输

(c) Transmission of temperature and humidity monitoring data over 24 hours



(d) 液位监测系统的工作过程

(e) 液位变化与系统灯光变化的对应关系

(d) Working process of the liquid level monitoring system (e) Correspondence between liquid level variation and system light changes

图 4 温湿度监测与液位监测的演示

Figure 4 Demonstration of temperature and humidity monitoring and liquid level detection

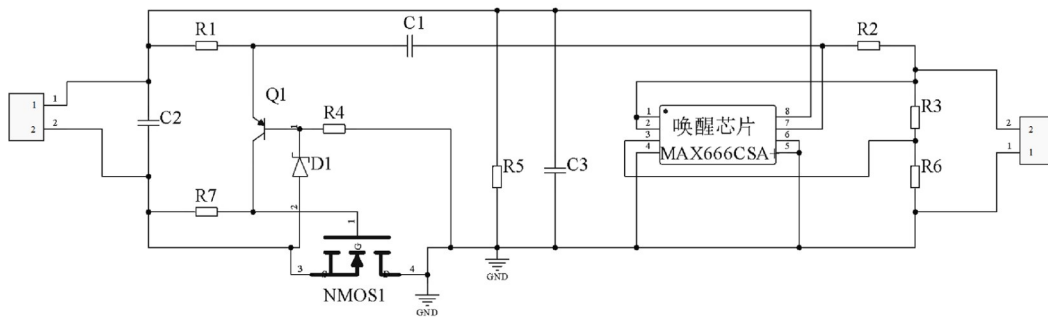


图 5 唤醒模块电路图

Figure 5 Wake-up module circuit diagram

电源管理模块(见图6)包含一个电源管理芯片(型号为BQ25504)及其外围电路,当检测到电池电压在激活后达到设定值时,系统开始利用电池为自身和传感器模块供电。传感器模块由具有通信功能的

MCU和传感器芯片组成。

根据设备规格,电源管理电路的控制电压 V_{BIAS} 数值为1.25 V,电池的最小放电电压 $V_{BAT_{min}}$ 设置为2.5 V,最大充电电压 $V_{BAT_{ov}}$ 设置为3.6 V。此外,还

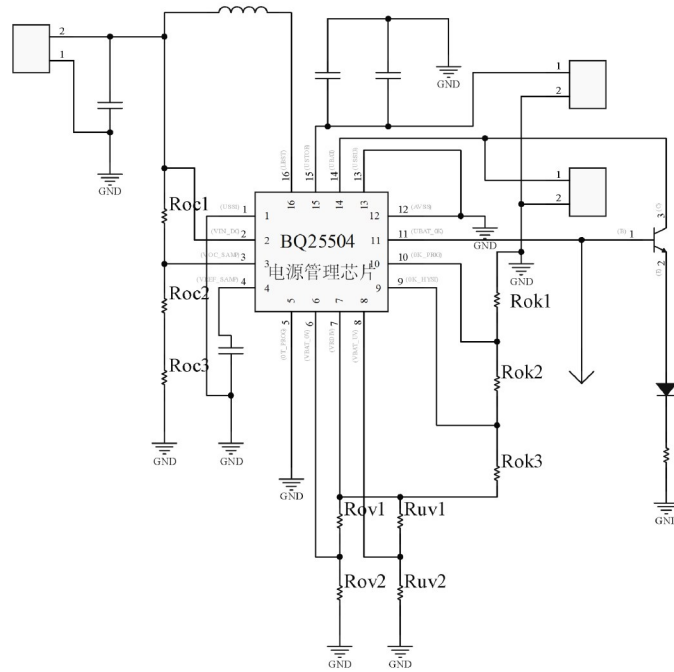


图6 电源管理模块电路图

Figure 6 Power management module circuit diagram

需配置两个关键引脚的电压阈值:VBAT-OK-PROG 和 VBAT-OK-HYST。VBAT-OK-PROG 引脚的数值设置为 3 V,代表电池正常工作的最低电压阈值;VBAT-OK-HYST 引脚的数值设置为 3.5 V,表示电池充电至正常状态的电压。设置这些电压的电阻值可通过以下公式计算:

$$VBAT_{uv} = VBIAS \left\{ 1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}} \right\} \quad (10)$$

$$VBAT_{ov} = 1.5 \times VBIAS \left\{ 1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right\} \quad (11)$$

$$VBAT-OK-PROG = VBIAS \left\{ 1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right\} \quad (12)$$

$$VBAT-OK-HYST = VBIAS \left\{ 1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right\} \quad (13)$$

根据上述公式计算得出: $R_{OV1} = 5.2 \text{ M}\Omega$, $R_{OV2} = 4.8 \text{ M}\Omega$, $R_{UV1} = 5 \text{ M}\Omega$, $R_{UV2} = 5 \text{ M}\Omega$; $R_{OK1} = 3.57 \text{ M}\Omega$, $R_{OK2} = 5 \text{ M}\Omega$, $R_{OK3} = 1.43 \text{ M}\Omega$ 。

3 结束语

在本研究中,我们开发了一种用于长期环境监测的植物耦合能量收集系统(PCEHS)^[45],该系统利用植物叶片作为媒介耦合周围电气设备产生的电磁辐射^[46],这种能量收集方法能够将低品质能量高效回收并广泛应用于各类低功耗场景。结合物联网技术,这些低成本、高效益且可分布式部署的系统将在智慧

城市建设中的城市环境监测领域发挥关键作用^[47]。与传统能源相比,我们的方法不仅具有可持续性,还具备显著的环境友好特性^[48]。本文详细阐述了系统的工作机制与设计原理,并通过充电管理、全天候温湿度监测及液位警报功能的集成演示,展示了系统面向实际场景的应用能力。该研究证实了PCEHS作为智慧城市平台核心组件,尤其在能量收集与环境感知方面的巨大潜力。在未来的研究中,我们将进一步探索新型材料以优化电磁辐射耦合与储能性能,开发更紧凑的电路与系统架构,从而提升能量收集效率与城市生态兼容性,为智慧城市的可持续发展提供关键的技术支持。

参考文献

- [1] Sachs J D, Schmidt-Traub G, Mazzucato M, et al. Six transformations to achieve the sustainable development goals[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 805-814.
- [2] 刘勃豪, 谢光忠, 段再华, 等. 一体化摩擦电自供能气湿传感器研究进展[J]. *电子学报*, 2024, 52(2): 660-677.
Liu Bohao, Xie Guangzhong, Duan Zaihua, et al. Research progress on integrated triboelectric self-powered gas and humidity sensors[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(2): 660-677. (in Chinese)
- [3] 罗翠线, 王莹, 李朋伟. 基于无铅钛酸钡/石墨烯/PDMS三相复合压电纳米发电机的研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(9): 2189-2195.

- Luo Cuixian, Wang Ying, Li Pengwei. Lead-free barium titanate/graphene oxide/PDMS three-phase composite piezoelectric nanogenerator[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(9): 2189-2195. (in Chinese)
- [4] Lee B, Cho H, Park K T, et al. Author Correction: High-performance compliant thermoelectric generators with magnetically self-assembled soft heat conductors for self-powered wearable electronics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1289.
- [5] Li P, Wen Y M, Jia C B, et al. A magnetoelectric composite energy harvester and power management circuit[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(7): 2944-2951.
- [6] Hemour S, Wu K. Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting: Development path and future outlook[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(11): 1667-1691.
- [7] Lu F, Zhang H, Mi C. A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology[J]. *Energies*, 2017, 10(11): 1752.
- [8] Yang W F, Lin S M, Gong W, et al. Single body-coupled fiber enables chipless textile electronics[J]. *Science*, 2024, 384(6691): 74-81.
- [9] Li J M, Dong Y L, Park J H, et al. Body-coupled power transmission and energy harvesting[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(7): 530-538.
- [10] Xia Y J, Heidari H, Fan H, et al. Hybrid microenergy harvesters for smart contact lenses[C]//2020 27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2020: 1-2.
- [11] Ren Z W, Nie J H, Xu L, et al. Directly visualizing tactile perception and ultrasensitive tactile sensors by utilizing body-enhanced induction of ambient electromagnetic waves[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(47): 1805277.
- [12] Zhang Y W, Zhang K J, Shi Y J, et al. Electromagnetic energy harvesters based on natural leaves for constructing self-powered systems[J]. *Materials Today Energy*, 2022, 29: 101131.
- [13] Meder F, Mondini A, Visentin F, et al. Multisource energy conversion in plants with soft epicuticular coatings[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(6): 2545-2556.
- [14] Meder F, Must I, Sadeghi A, et al. Energy conversion at the cuticle of living plants[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(51): 1806689.
- [15] Silva B N, Khan M, Han K. Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 697-713.
- [16] Ahad M A, Paiva S, Tripathi G, et al. Enabling technologies and sustainable smart cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102301.
- [17] Cerchecci M, Luti F, Mecocci A, et al. A low power IoT sensor node architecture for waste management within smart cities context[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1282.
- [18] Rawat U S, Agarwal N K. Biodiversity: Concept, threats and conservation[J]. *Environment Conservation Journal*, 2015, 16(3): 19-28.
- [19] Lu Y Y, Xu K C, Zhang L S, et al. Multimodal plant health-care flexible sensor system[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 10966-10975.
- [20] Im H, Lee S, Naqi M, et al. Flexible PI-based plant drought stress sensor for real-time monitoring system in smart farm[J]. *Electronics*, 2018, 7(7): 114.
- [21] Meder F, Thielen M, Mondini A, et al. Living plant-hybrid generators for multidirectional wind energy conversion[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(7): 2000236.
- [22] Jie Y, Jia X T, Zou J D, et al. Natural leaf made triboelectric nanogenerator for harvesting environmental mechanical energy[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(12): 1703133.
- [23] Feng Y G, Zhang L Q, Zheng Y B, et al. Leaves based triboelectric nanogenerator (TENG) and TENG tree for wind energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2019, 55: 260-268.
- [24] Feng Y G, Dong Y H, Zhang L Q, et al. Green plant-based triboelectricity system for green energy harvesting and contact warning[J]. *EcoMat*, 2021, 3(6): e12145.
- [25] Mahbub M. A smart farming concept based on smart embedded electronics, Internet of Things and wireless sensor network[J]. *Internet of Things*, 2020, 9: 100161.
- [26] Luvisi A, Lorenzini G. RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(4): 630-637.
- [27] Gajšek P, Ravazzani P, Grellier J, et al. Review of studies concerning electromagnetic field (EMF) exposure assessment in Europe: Low frequency fields (50 Hz-100 kHz)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(9): 875.
- [28] Staebler P. *Human Exposure to Electromagnetic Fields: From Extremely Low Frequency (ELF) to Radiofrequency*[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.
- [29] Garrido C, Otero A F, Cidras J. Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1310-1319.
- [30] Maharjan P, Salauddin M, Cho H, et al. An indoor power line based magnetic field energy harvester for self-powered wireless sensors in smart home applications[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 398-408.
- [31] Chang K S, Kang S M, Park K J, et al. Electric field energy

- harvesting powered wireless sensors for smart grid[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2012, 7(1): 75-80.
- [32] Jung S, Kim S, Cho W, et al. Development of highly efficient energy harvester based on magnetic field emanating from a household power line and its autonomous interface electronics[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 6607-6615.
- [33] Shenck N S, Paradiso J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics[J]. IEEE Micro, 2001, 21(3): 30-42.
- [34] Wang Q, Kim K B, Woo S B, et al. Magnetic field energy harvesting with a lead-free piezoelectric high energy conversion material[J]. Energies, 2021, 14(5): 1346.
- [35] Kim H S, Kang S M, Park K J, et al. Power management circuit for wireless ubiquitous sensor nodes powered by scavenged energy[J]. Electronics Letters, 2009, 45(7): 373-374.
- [36] Castro-Díez P, Puyravaud J P, Cornelissen J H C. Leaf structure and anatomy as related to leaf mass per area variation in seedlings of a wide range of woody plant species and types[J]. Oecologia, 2000, 124(4): 476-486.
- [37] 宋捷, 田青. 4种园林植物叶片的解剖结构及抗旱性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 262-269. Song Jie, Tian Qing. Leaf anatomical structures of 4 garden plants and their drought resistance[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(2): 262-269. (in Chinese)
- [38] Vian A, Davies E, Gendraud M, et al. Plant responses to high frequency electromagnetic fields[J]. BioMed Research International, 2016, 2016: 1830262.
- [39] Arya S, Verma S. Nickel-metal hydride (Ni-MH) batteries[J]. Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications, 2020: 131-175.
- [40] Zhang C X, Dai K R, Liu D, et al. Ultralow quiescent power-consumption wake-up technology based on the bi-ionic triboelectric nanogenerator[J]. Advanced Science, 2020, 7(12): 2000254.
- [41] Teng L, Liang J R, Du S J. A nano-power wake-up circuit for energy-driven IoT applications[C]//2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2022: 2383-2387.
- [42] Nassar J M, Khan S M, Villalva D R, et al. Compliant plant wearables for localized microclimate and plant growth monitoring[J]. npj Flexible Electronics, 2018, 2: 24.
- [43] Tanaka A, Ishihara T, Utsunomiya F, et al. Wireless self-powered plant health-monitoring sensor system[C]//SENSORS, 2012 IEEE. Piscataway: IEEE, 2012: 1-4.
- [44] Jamhari C A, Wibowo W K, Annisa A R, et al. Design and implementation of IoT system for aeroponic chamber temperature monitoring[C]//2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering. Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.
- [45] Teng H C, Kok B C, Utraphan C, et al. A review on energy harvesting potential from living plants: Future energy resource[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 8(4): 2598-2614.
- [46] De Ninno A, Pregolato M. Electromagnetic homeostasis and the role of low-amplitude electromagnetic fields on life organization[J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2017, 36(2): 115-122.
- [47] 陈庚. 数据可视化系统在智慧城市建设中的应用研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(8): 93-96. Chen Geng. Research on application of data visualization system in smart city construction[J]. Information Recording Materials, 2024, 25(8): 93-96. (in Chinese)
- [48] Yang L, Qian F, Song D X, et al. Research on urban heat-island effect[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 11-18.

作者简介



单嘉泽 男, 2000年7月出生于辽宁省大连市。现为电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心博士研究生。主要研究方向为集成迁移学习的多源性能间接预测方法。

E-mail: 202511040642@std.uestc.edu.cn



赵达哲 男, 1999年7月出生于河南省新乡市。现为澳门大学博士后研究员。主要研究方向为可穿戴电子设备、触觉反馈及微型机器人。

E-mail: yc17425@um.edu.mo



钟俊文 男, 1988年8月出生于广东省韶关市。现为澳门大学助理教授。主要研究方向包括柔性传感器/执行器及微型机器人。

E-mail: junwenzhong@um.edu.mo