

面向大功率LED的紧凑型PV-TEG-PZT多源混合能量收集系统

施琦, 贾宏志*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2026年2月9日; 录用日期: 2026年2月21日; 发布日期: 2026年4月28日

摘要

为解决大功率LED在复杂环境中的供电间断与振动干扰等问题, 本文构建了一种紧凑型光伏(PV)、热电(TEG)与压电(PZT)多源混合能量收集系统。该系统通过分级能源管理实现多源输入的融合与调度, 并采用瞬态电压辅助电路完成冷启动。同时, 三种能量源互补协同, 可支撑不同天气条件下的全天候运行。实验结果表明, 相较传统架构, 所提混合结构的自启动时间与稳定输出建立时间分别降至4 s与15 s, 降幅分别达到76.47%与85%。该方案为大功率LED照明提供了一种高效且可行的自供电技术路径。

关键词

混合能量收集, 压电换能器, 自供电

Compact PV-TEG-PZT Multi-Source Hybrid Energy Harvesting System for High-Power LEDs

Qi Shi, Hongzhi Jia*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: February 9, 2026; accepted: February 21, 2026; published: April 28, 2026

Abstract

To address intermittent power supply and vibration disturbances affecting high-power LEDs in

*通讯作者。

文章引用: 施琦, 贾宏志. 面向大功率 LED 的紧凑型 PV-TEG-PZT 多源混合能量收集系统[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(2): 114-123. DOI: 10.12677/aepe.2026.142013

complex environments, a compact multi-source hybrid energy-harvesting system integrating photovoltaic (PV), thermoelectric (TEG), and piezoelectric (PZT) sources is developed in this study. Multi-source inputs are integrated and coordinated through a hierarchical energy-management scheme, and cold start is enabled by a transient-voltage-assisted circuit. Complementary operation among the three energy sources is leveraged, and all-weather power generation under varying meteorological conditions is supported. Experimental results show the proposed hybrid structure reduces self-starting and stable output establishment times to 4 s and 15 s. This represents significant decreases of 76.47% and 85% compared to traditional architecture. An efficient and practical self-powered technical route is thus provided for high-power LED lighting.

Keywords

Hybrid Energy Harvesting, Piezoelectric Transducer, Self-Powered

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着物联网(Internet of Things, IoT)技术的快速发展, 大功率 LED (High-Power Light Emitting Diode, HP-LED)照明系统在野外、工业建筑、道路与交通隧道等复杂环境中的应用日益广泛[1]-[6]。然而, 这些应用场景往往处于无电网覆盖或供电不稳定的离网状态, 传统依赖化学电池的供电方式存在寿命有限、维护成本高以及报废后易引发环境负担等问题[7]-[9]。因此, 利用环境能源实现照明节点自供电, 已成为相关领域的重要研究方向。对于离网照明系统而言, 要实现长期稳定运行, 关键在于充分挖掘场景中可利用的环境能量, 并通过合理的能量耦合与管理策略提升供电连续性和系统可靠性。

单一光伏(PV)系统在运行过程中存在严重的废热损耗, 这不仅会引起电池温升, 还会导致光电转换效率明显下降[10]-[12]。因此, 引入光伏-热电(PV-TEG)耦合技术被认为是一种有效途径。在硬件结构方面, Khenfer 等人提出了一种基于水冷的光伏/光热-热电(PV/T-TEG)混合系统, 结果表明在阿尔及利亚夏季条件下该系统总电输出达到 29.04 W, 较标准光伏模块提高 3.61 W [13]。除了硬件结构优化外, 面向波动环境的控制与能量管理同样关键。Mirza 等人提出了带有智能控制的高效 PV-TEG 混合系统, 以在非静态工况下获取更高能量输出[14]; Mishu 等人则进一步面向自供能 IoT 传感应用构建了自适应 TE-PV 混合采能系统, 验证了光能与温差能协同供能的可行性[15]。尽管 PV-TEG 耦合能够在一定程度上回收废热并提升系统输出性能, 但其整体运行仍显著依赖光照条件, 因此在夜间或连续阴雨等低辐照环境下, 系统仍可能出现输出不足甚至失效。为降低系统对光照条件的敏感性, 研究者进一步引入机械振动能, 构建光伏-压电(PV-PZT)协同架构。已有研究表明, 混合能量采集能够利用不同环境能源在时间和空间上的互补性, 从而改善单一能量源“间歇性强、启动慢、稳态输出低”的问题[16]。例如, Clementi 等人面向电力线路监测开发了 PV + PZT 混合采能系统, 在不同线路电流工况下压电侧 RMS 功率输出分别为 23 μ W (5 A)与 77 μ W (10 A) [17]。然而, 这类方案的能量供给仍以光伏为主, 当设备进入隧道、地下管道等长期无光的封闭空间时, 光伏侧难以持续工作, 系统供电能力将显著受限。针对这类无光照但同时存在温差与振动源的工业或嵌入式场景, 热电-压电(TEG-PZT)协同捕获逐渐受到关注。Liu 等人从建模角度分析了热电-压电混合采能结构的耦合机理, 指出通过结构与参数协同优化, 可提升混合采能器的综合能量获取性能[18]。Vankecke 等人面向飞机蒙皮内部等具有较大温差且伴随强振动的无光环境, 设

设计了一种由 TEG 与压电能量采集器(PEH)构成的双源接口电路, 实验表明该双源协同方案可将系统冷启动时间缩短 38.5% [19]。总体来看, 现有双源或多源能量采集技术虽已取得一定进展, 但在复杂工况下仍普遍存在协同机制较为简单、启动响应偏慢以及有效输出功率受限等问题, 距离目标设备真正意义上的全天候持续自供能仍有一定差距。

因此, 本文提出一种紧凑型 PV-TEG-PZT 一体化混合能量收集系统。针对单一能量源采集易出现供电中断与启动滞后等问题, 本文设计并集成面向三类能量源的采集装置, 并进一步提出瞬态压电辅助冷启动电路, 以实现系统快速启动与稳定供能, 为离网 HP-LED 照明节点提供一种面向复杂环境的多源自供能解决方案。

2. 系统设计

2.1. PV-TEG-PZT 混合能量收集系统架构

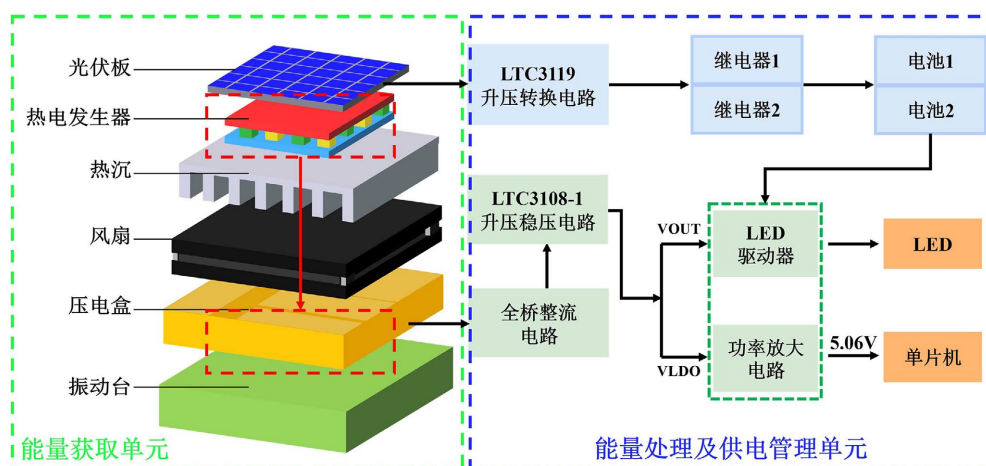


Figure 1. Architecture of a compact PV-TEG-PZT multi-source hybrid energy-harvesting system for high-power LEDs

图 1. 面向大功率 LED 的紧凑型 PV-TEG-PZT 多源混合能量收集系统架构

为克服光伏供能在夜间中断以及热电单元在低温差条件下启动缓慢等问题, 本文构建了一种以 PV-TEG-PZT 多源互补为核心的自供电系统, 其总体架构如图 1 所示。系统由环境能量获取单元与能量处理及供电管理单元两部分组成。在能量获取端, 装置采用沿能量传递方向的垂直集成结构, 自上而下依次设置为光伏板、TEG 与 PZT。光伏板用于获取太阳辐照, 并在白天工作过程中将部分热量向下传导至 TEG 热端; TEG 冷端与热沉及风扇紧密耦合以强化散热, 从而在冷热端形成稳定温差并输出热能。PZT 用于采集环境机械振动能, 其激励来源包括车辆行驶引起的外部振动以及系统内部部件(如风扇)运行产生的结构振动。电气拓扑上, PZT 输出经整流后与 TEG 输出串联汇合, 为后级升压稳压电路提供输入, 实现对系统的供能。在能量处理与供电管理端, 引入双继电器切换机制实现双蓄电池的交替充电与智能供电, 以提升储能利用效率并保证负载供电连续性。针对夜间或低温差工况下 TEG 输出不足导致的唤醒迟滞问题, 系统进一步利用 PZT 在振动激励下产生的瞬态电压作为启动触发信号, 使升压稳压电路快速跨越启动阈值并完成唤醒, 从而增强系统在弱能量输入条件下的启动可靠性与运行稳定性。

2.2. 前端能量接口与能量管理电路

为明确各能量支路的接口形式及管理方式, 本文对 PV 支路与 PZT/TEG 支路采用了不同的前端处理

策略。对于 PZT-TEG 混合支路, PZT 输出的交流电首先经全桥整流电路转换为直流, 随后与 TEG 输出采用串联方式进行电压叠加, 串联后的合成电压直接输入超低压升压转换电路, 如图 2(a)所示。该支路的设计目标是利用 PZT 在振动激励下产生的瞬态较高电压与 TEG 在温差作用下提供的持续低压输出形成互补, 以提高系统在弱能量输入条件下的冷启动能力与供能稳定性。对于 PV 支路, 本文采用基于 LTC3119 芯片的升压转换电路, 如图 2(b)所示。由于 LTC3119 内部集成最大功率点跟踪功能, 因此 PV 支路具备 MPPT 能力, 可在光照变化条件下实现较优的功率提取。该 MPPT 功能由芯片内部实现, 而非外加独立 MPPT 控制模块。

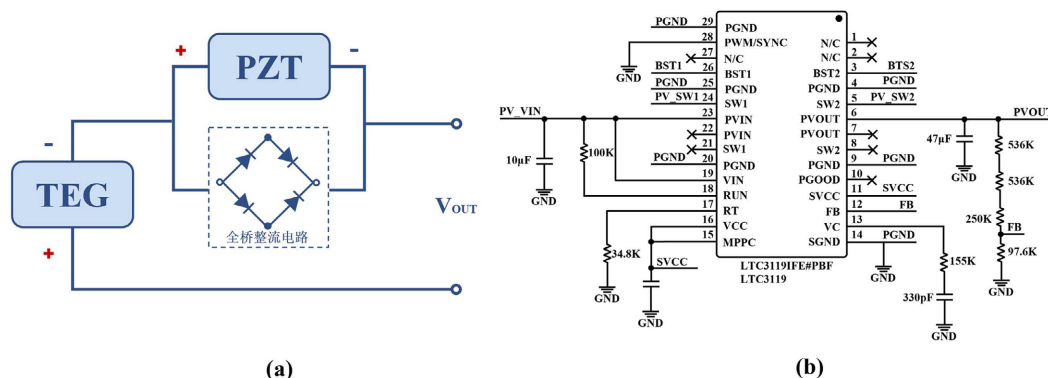


Figure 2. (a) Schematic diagram of TEG/PZT energy integration; (b) PV boost converter and MPPT management circuit based on LTC3119

图 2. (a) TEG/PZT 能量合并原理框图; (b) 基于 LTC3119 的 PV 升压及 MPPT 管理电路

2.3. 双蓄电池智能切换充放电管理系统设计

为确保运算放大器和功率三极管等有源器件的持续稳定工作, 本研究设计了一种基于单片机控制的双蓄电池智能切换充放电系统。该系统利用光伏阵列经 LTC3119 升压变换后的能量作为主电源, 通过逻辑切换确保负载(含控制电路与风扇)在任何时刻均有稳定的 12V 直流供电。具体控制策略及工作流程如下: 当系统检测到双蓄电池电压均处于 0 V 时, 单片机驱动继电器 1 与继电器 2, 使 COM1 连通 NO1、COM2 连通 NC2。此时, 光伏充电回路同时为两组蓄电池进行充电。当双蓄电池电压均达到标 12V 后, 系统进入循环工作状态。单片机控制继电器 1 动作, 使 COM1 切换至 NC1, 由蓄电池 1 接入负载回路供电, 蓄电池 2 保持备份或充电状态。系统通过电压监测电路实时采集在用蓄电池的端电压。当蓄电池 1 电压降至临界阈值 9 V 时, 触发切换信号, 单片机指令继电器 1 切换至充电位(COM1-NO1), 同时指令继电器 2 切换至放电位(COM2-NO2), 由蓄电池 2 接替供电。同理, 当蓄电池 2 电压低于 9 V 时, 系统自动完成反向切换, 恢复由蓄电池 1 供电并对蓄电池 2 进行充电。具体切换流程如图 3 所示。

2.4. 光照感知与 LED 智能调光功能设计

为提高 LED 照明系统的自动化水平并降低控制成本, 本文设计了光照感知与 LED 智能调光功能。传统 LED 调光通常依赖人工调节驱动电压来改变 LED 的工作状态, 同时需要借助照度计判断环境亮度。这种方式不仅操作繁琐、实时性差, 而且难以适应环境光照的动态变化, 不利于系统智能化与节能化运行。因此, 本文采用基于环境照度感知的自动调光方式, 使 LED 亮度能够随外界光照条件变化而自主调节。该功能以环境照度作为输入, 以 LED 驱动电压作为输出, 通过建立环境光照与 LED 工作电压之间的对应关系, 实现按需照明。图 4 为基于环境照度感知的 LED 智能调光流程图。系统首先通过光敏电阻构建的光控检测电路对外界光照强度进行采集, 并将照度变化转化为相应的电信号, 再送入单片机进行

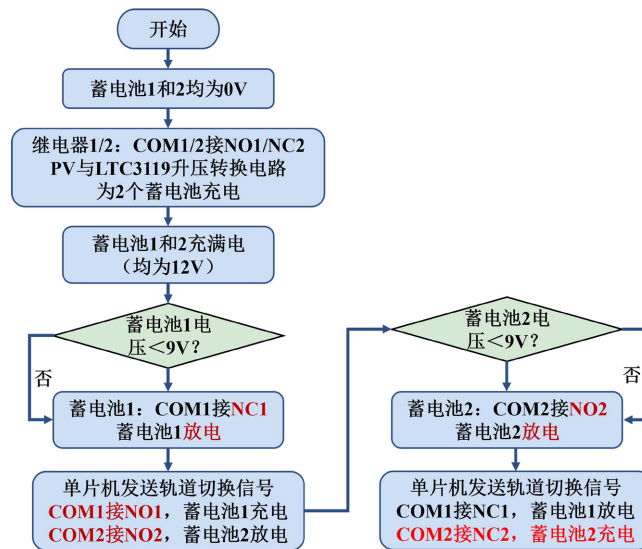


Figure 3. Flowchart of the intelligent dual-battery switching strategy
图 3. 双蓄电池轮流充放电流程图

处理与判断。由于光敏电阻具有结构简单、响应明显和易于集成的特点，因此能够较好地满足本系统对环境光照实时检测的需求。在调光控制方面，本文采用单片机输出阶梯电压的方式实现 LED 分档驱动。系统根据采集到的环境照度信号进行区间判断，并输出相应电压档位，使环境照度与 LED 亮度形成自适应匹配关系。当外界环境较暗时，系统自动提高 LED 驱动电压，以增强照明效果；当外界环境较亮时，则降低 LED 驱动电压，以减少不必要的能量消耗，为系统节能运行和智能控制提供了基础。

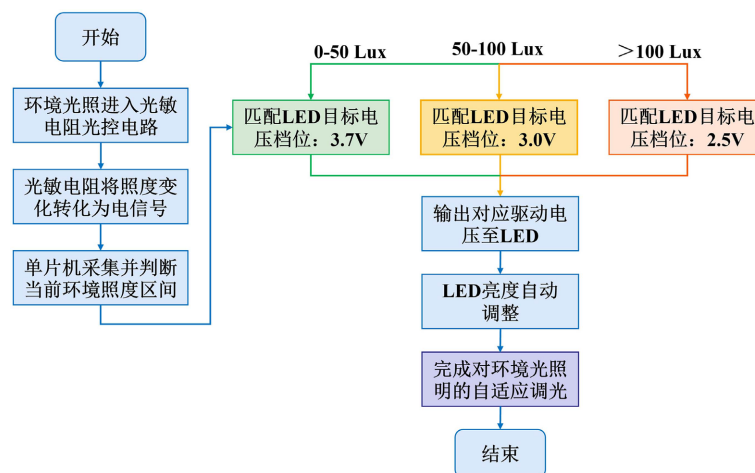


Figure 4. Flowchart of intelligent LED dimming based on ambient light sensing
图 4. 基于环境照度感知的 LED 智能调光流程图

3. 结果与讨论

3.1. 实验设置

为验证所设计混合供能系统的整体运行效果，本文搭建了对应的实验测试平台，如图 5 所示。该平台并非单一的能量获取装置，而是由前端多源能量采集模块和后端能量调控与负载供电模块共同构成，

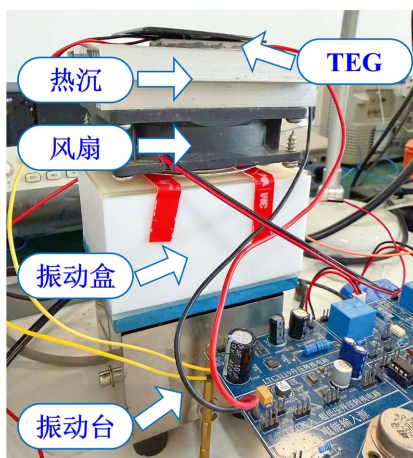


Figure 5. Experimental platform

图 5. 实验平台

目的在于完整模拟系统从环境能量输入到照明负载输出的实际工作过程。在前端能量采集部分, 系统同时接入光伏、热电和压电三类能量获取路径, 以实现多种环境能源的联合利用。其中, 光照能量由一块尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、最大输出电压为 5.5 V 的光伏板获取。考虑到光伏器件工作时会伴随热量积累, 实验中进一步将其产生的热量引入热电转换环节。通过在器件接触界面涂覆导热硅脂, 使热量有效传递至布置在其下方的 SP1848 温差发电模块。该温差发电模块的热导率为 $16 \times 10^{-3}\text{ W}/^\circ\text{C}$ 。为保证其冷热端保持较好的温差条件, 在模块背面安装了铝制散热片, 并辅以转速为 $4500\text{ r}/\text{min}$ 的风扇进行强制散热, 以增强热电发电效果。除光热耦合采能外, 系统还设置了振动能量采集单元。该单元由三片 $30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的 PZT 压电陶瓷并联组成, 固定在 3D 打印成型的振动盒上, 盒内放置 304 不锈钢钢珠, 以配合外部振动台产生可重复的机械激励条件, 从而模拟实际工况中的振动输入。在后端控制与供电部分, 系统采用 STC89C52 单片机作为主控核心, 用于完成状态监测、控制决策和能量分配等任务。实验中, 控制器按照 20 ms 的周期对 5528 型光敏电阻输出信号进行采集, 以获取环境光照变化信息, 并在此基础上执行双蓄电池组的轮换充放电控制。与此同时, 控制单元还对 LED 侧电压状态进行实时检测和调节, 确保前端采集到的能量能够经过处理后稳定供给 3 W 大功率白光 LED 负载。通过上述平台构建, 系统实现了多源环境能量的采集、调理、存储与输出一体化验证, 为后续功能测试和性能分析提供了实验基础。

3.2. 能量采集性能测试

为了验证由 PV 与升压转换电路所构成的太阳能收集系统对蓄电池的充电性能, 本实验以初始电压分别为 1.16 V 和 1.18 V 的蓄电池 1 与蓄电池 2 作为实验对象, 在不同负载条件下进行了充电实验。系统输出电压由万用表测量, 实验结果如图 6 所示。可以看到, 该系统在对单一蓄电池 1 充电时, 可输出 10.33 V 的稳定电压; 在同时对蓄电池 1 与 2 进行充电时, 系统仍能维持 10.30 V 的输出电平。两种模式下, 充电耗时均为 160 分钟左右。该结果表明, 经过升压稳压后的光伏电能可有效存储于蓄电池中, 系统具备可靠的充电能力。因此能够为风扇、运算放大器及功率三极管提供 10.33 V 的充足电能, 这是保证整个多源能量收集系统正常工作的关键。

为了建立振动台控制器与实际振幅之间的对应关系, 采用高精度测振仪(希玛 ST63A)对动态振幅进行了三次重复测量, 取平均值作为最终结果, 以确保数据的可靠性, 表 1 为振幅测量结果。在振动盒中选用 304 不锈钢钢珠作为激励源, 通过振动台的振动使钢珠撞击压电片以产生电能。鉴于后级电源管理

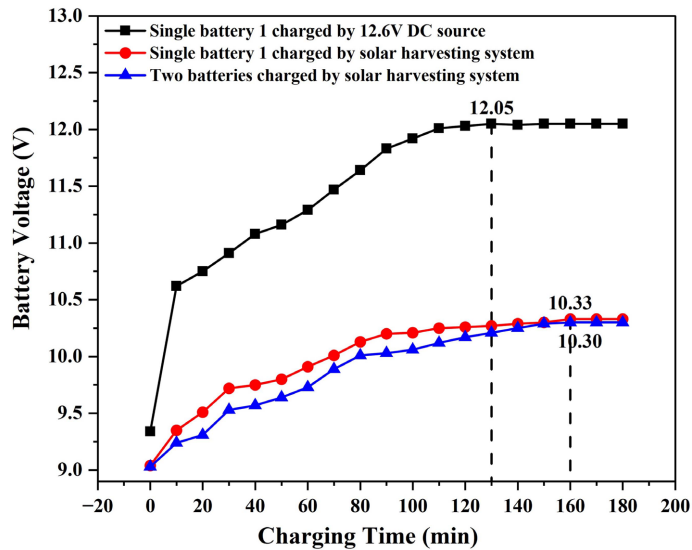


Figure 6. Comparison of battery charging characteristics under different charging conditions

图 6. 不同充电条件下蓄电池的充电特性对比

芯片的最大允许输入电压为 500 mV，本部分旨在确定在固定振幅与总质量条件下，能够使输出电压最接近但不超过该阈值的钢珠直径与数量组合。实验中，选用两种规格的钢珠：5 mm 钢珠(单颗质量约为 0.5 g)与 10 mm 钢珠(单颗质量约为 4.1 g)，并测量了不同直径钢珠在不同数量下所产生的最大开路电压，实验结果如图 7(a)所示。可以看出，在输出电压不超过 500 mV 的范围内，采用 5 mm 钢珠的参数组合(即不同数量)明显多于 10 mm 钢珠，表明该规格钢珠在限制电压条件下具有更稳定的适用性。因此，后续实验中选用 5 mm 钢珠作为激励源。为进一步优化激励参数，对 5 mm 直径钢珠在不同总质量下的输出特性进行了分析。结果如图 7(b)所示，与 41 g 的总质量相比，当钢珠总质量为 20.5 g 时，压电的输出电压接近 500 mV 的实验组数量更多，即该条件在更宽的参数范围内能稳定将输出电压维持在目标阈值附近。因此，最终确定选用总质量为 20.5 g 的 5 mm 钢珠作为压电能量采集盒中的激励源。

Table 1. Correlation between vibration intensity and amplitude

表 1. 振动强度与振幅对照

振动强度	振幅第 1 次测量(mm)	振幅第 2 次测量(mm)	振幅第 3 次测量(mm)	振幅平均值(mm)
1	0.039	0.035	0.030	0.035
5	0.106	0.209	0.101	0.139
10	0.264	0.342	0.251	0.286
15	0.477	0.506	0.447	0.477
16	0.669	0.701	0.681	0.684
18	0.863	0.889	0.795	0.849
20	1.047	1.079	0.992	1.039
21	1.224	1.301	1.278	1.267
23	1.461	1.488	1.423	1.457
25	1.597	1.639	1.622	1.619

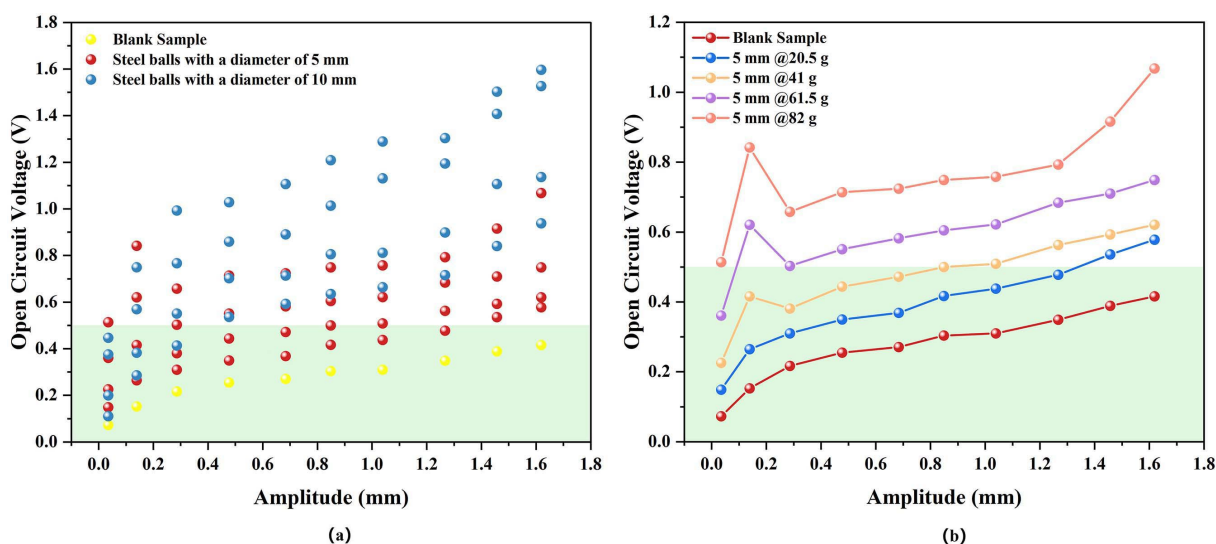


Figure 7. Comparison of steel ball diameter and mass

图 7. 钢球直径与质量对比

为评估压电振动盒的电收集效率与负载驱动能力, 搭建了如图 8(a)所示的标准整流充电测试平台。实验设定振动强度为 25, 内部质量球使用 20.5 g (5 mm)规格, 在此条件下考察装置对不同容值电容的充电响应特性。图 8(b)记录了五组电容在 20 s 时间窗口内的电压积蓄曲线。测试数据显示, 该装置表现出优异的瞬态响应与快速充电能力。其在 20 s 内即可将 47 μF 、100 μF 、220 μF 、330 μF 和 470 μF 的电容器分别充电至 4.253 V、3.920 V、3.327 V、3.101 V、2.793 V。曲线整体呈现出陡峭的初始上升斜率, 表明压电单元在振动起始阶段具有较高的瞬时电压输出能力。综合实验结果证实所设计的压电能量捕获装置具备高效的机电转换性能, 其短时间内建立的电压势能足以满足超低压快速冷启动与稳压电路的启动需求, 从而验证了其作为系统冷启动能源的可行性与优越性。

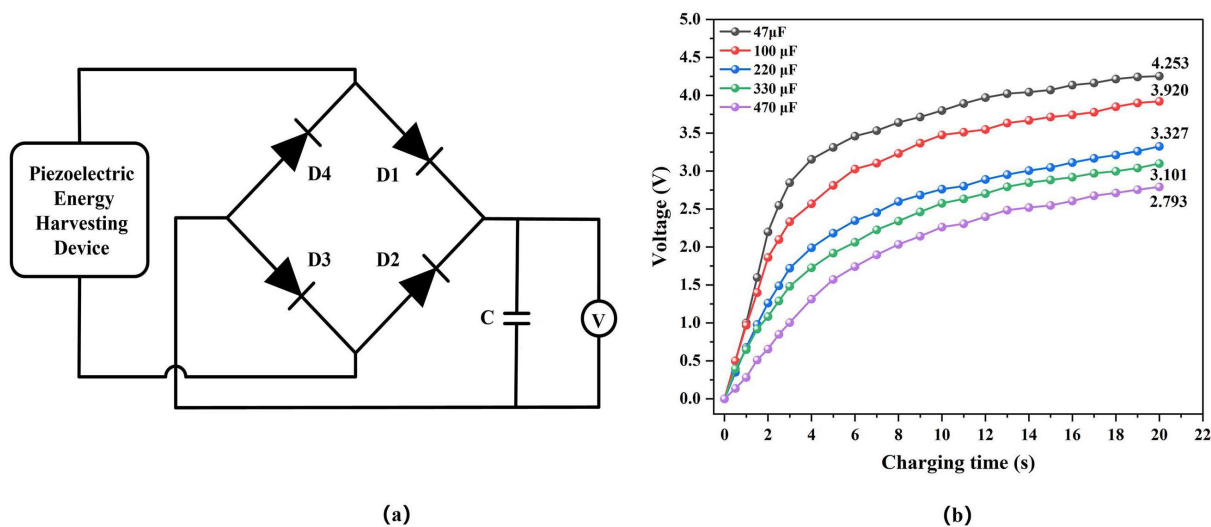


Figure 8. (a) Test circuit for evaluating the charging capability of the piezoelectric device; (b) Steel-Ball capacitor charging experiment

图 8. (a) 压电装置的充电能力测试电路; (b) 钢球电容充电实验

3.3. 系统动态响应特性测试

系统的瞬态响应速度是衡量微能量采集装置在动态环境下启动能力和供能时效性的关键指标之一。为验证所提混合能量收集策略在抑制启动延迟方面的有效性,本文在无光条件下对单一 TEG 结构与混合结构的冷启动及稳态建立过程进行了对比分析,具体时间-电压响应曲线如图 9 所示。对于单一 TEG 结构,其输出过程受热传导特性限制,温差场建立存在明显的热滞后现象。实验结果表明,如图 9(a)所示,系统需等待约 17 s 后开路电压才能达到 36 mV 并进入工作状态,而达到 55 mV 的最终稳态输出则需约 100 s。该过程反映出单一 TEG 对短时、快速变化热源的响应能力较弱,难以满足高实时性场景对快速启动的需求。相比之下,混合结构引入压电支路后,可利用压电效应毫秒级的机电转换特性,在热电势尚未充分建立的初始阶段快速捕获环境振动能,并提供瞬态高压脉冲,从而有效弥补热电模块启动阶段的响应盲区。与此同时,随着热电输出逐渐建立,混合结构进一步实现对系统稳态供能的持续支撑。实验结果表明,该结构的启动时间可缩短至 4 s 以内,较单一 TEG 结构提升 76.47%;同时,系统仅需 15 s 即可建立 171 mV 的高电平稳态输出,较单一结构的建立时间缩短 85%。结果说明,所提混合能量收集策略能够显著改善系统冷启动性能与动态响应能力,为复杂环境下自供能照明系统的快速启动与稳定运行提供了有效支撑。

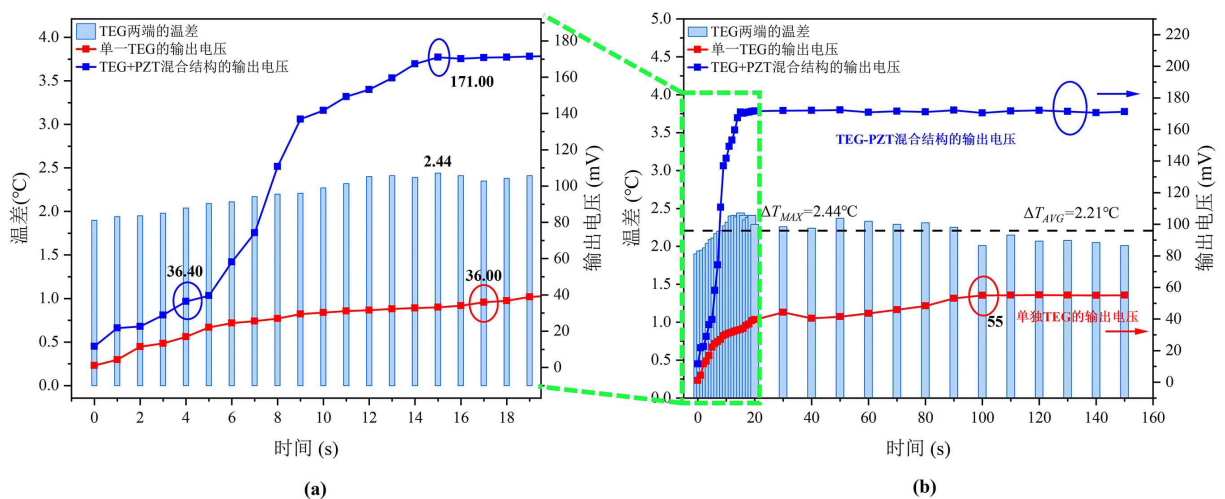


Figure 9. Comparison of dynamic characteristics between standalone TEG and hybrid TEG-PZT structures; (a) Enlarged view; (b) Global view

图 9. 单独 TEG 与 TEG + PZT 混合结构动态特性比较; (a) 放大图; (b) 全局图

4. 结论

为了解决户外大功率 LED 在夜间或无光环境下的持续供电难题,本研究设计了一套结构紧凑的 PV-TEG-PZT 多源混合能量收集系统。该系统利用光伏板作为主电源,并结合压电和温差发电作为辅助唤醒单元,通过这种多能互补的协作方式,弥补了光伏板在夜间失效以及温差发电启动缓慢的缺陷。实验中,通过调整振动盒内压电片的配重块参数,充分发挥了压电元件响应快的特点,从而带动整个系统快速进入工作状态。实测数据证明,该设计使系统的冷启动耗时从 17 秒缩短至 4 秒,稳定工作所需的等待时间也由 100 秒减少到 15 秒。这一改进为大功率户外智能照明提供了一种实用且可靠的自供电技术方案。

参考文献

- [1] Lee, C., Chen, L., Chu, H., Hsieh, C. and Liang, W. (2022) An Internet of Things (IoT)-Based Master-Slave Regionalized

- Intelligent Led-Light-Controlling System. *Applied Sciences*, **12**, Article 420. <https://doi.org/10.3390/app12010420>
- [2] Ma, L. (2024) Smart LED Lighting Systems: Integration of Internet of Things Technology and Energy Saving Potential. *Journal of Progress in Engineering and Physical Science*, **3**, 105-114. <https://doi.org/10.56397/jpeps.2024.12.14>
- [3] Butun, I. (2020) Industrial IoT: Challenges, Design Principles, Applications, and Security. Springer.
- [4] Canada-Bago, J. and Fernandez-Prieto, J. (2022) A Knowledge-Based Battery Controller for IoT Devices. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, **11**, Article 76. <https://doi.org/10.3390/jsan11040076>
- [5] Agramelal, F., Sadik, M., Moubarak, Y. and Abouzahir, S. (2023) Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications. *Energies*, **16**, Article 7415. <https://doi.org/10.3390/en16217415>
- [6] Yuan, P., Tang, G., Ji, C., Wu, Y., Wang, Q., Zhang, T., *et al.* (2024) Intelligent Control Characteristics and Development of Highway Tunnel Lighting Environment in China. *Sustainability*, **16**, Article 5961. <https://doi.org/10.3390/su16145961>
- [7] Wieczorek, M., Wodyk, S., Poliszkievicz, R. and Witaszek, P. (2023) The Influence of Current in Off-Grid PV Systems on Lead-Acid Battery Lifetime and Hybridization with LFP Battery as Solution. *Energy Reports*, **9**, 766-773. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.213>
- [8] Ochoa-Barragán, R., Ponce-Ortega, J.M. and Tovar-Facio, J. (2023) Long-Term Energy Transition Planning: Integrating Battery System Degradation and Replacement for Sustainable Power Systems. *Sustainable Production and Consumption*, **42**, 335-350. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.017>
- [9] Li, J., Zhou, J., Wang, W., Chen, M., Zheng, W., Yang, W., *et al.* (2024) LCA for Lithium Battery Recycling Technology-Recent Progress. *Ionics*, **30**, 4417-4428. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05640-z>
- [10] Danyali, S., Shirkhani, M., Tavooosi, J., Razi, A.G., Salah, M.M. and Shaker, A. (2023) Developing an Integrated Soft-Switching Bidirectional DC/DC Converter for Solar-Powered LED Street Lighting. *Sustainability*, **15**, Article 15022. <https://doi.org/10.3390/su152015022>
- [11] Sadeghian, O., Mohammadi-Ivatloo, B., Oshnoei, A. and Aghaei, J. (2024) Unveiling the Potential of Renewable Energy and Battery Utilization in Real-World Public Lighting Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **192**, Article 114241. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114241>
- [12] Tohidi, F., Ghazanfari Holagh, S. and Chitsaz, A. (2022) Thermoelectric Generators: A Comprehensive Review of Characteristics and Applications. *Applied Thermal Engineering*, **201**, Article 117793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>
- [13] Khenfer, R., Lekbir, A., Rouabah, Z., Meddad, M., Benhadouga, S., Zaoui, F., *et al.* (2024) Experimental Investigation of Water-Based Photovoltaic/Thermal-Thermoelectric Hybrid System: Energy, Exergy, Economic and Environmental Assessment. *Journal of Power Sources*, **598**, Article 234151. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234151>
- [14] Mirza, A.F., Mansoor, M., Zerbakht, K., Javed, M.Y., Zafar, M.H. and Khan, N.M. (2021) High-Efficiency Hybrid PV-TEG System with Intelligent Control to Harvest Maximum Energy under Various Non-Static Operating Conditions. *Journal of Cleaner Production*, **320**, Article 128643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128643>
- [15] Mishu, M.K., Rokonuzzaman, M., Pasupuleti, J., Shakeri, M., Rahman, K.S., Binzaid, S., *et al.* (2021) An Adaptive TE-PV Hybrid Energy Harvesting System for Self-Powered IoT Sensor Applications. *Sensors*, **21**, Article 2604. <https://doi.org/10.3390/s21082604>
- [16] Wehbi, Z., Taher, R., Faraj, J., Castelain, C. and Khaled, M. (2022) Hybrid Thermoelectric Generators-Renewable Energy Systems: A Short Review on Recent Developments. *Energy Reports*, **8**, 1361-1370. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.068>
- [17] Clementi, G., Tinti, L., Castellini, L., Costanza, M., Neri, I., Cottone, F., *et al.* (2025) A Hybrid Piezoelectric and Photovoltaic Energy Harvester for Power Line Monitoring. *Actuators*, **15**, Article 1. <https://doi.org/10.3390/act15010001>
- [18] Liu, Y., Cui, Y.J., Wang, B. and Yang, J. (2022) Coupled Thermo-Electric-Mechanical Modeling of Hybrid Thermoelectric-Piezoelectric Energy Harvester. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **54**, Article 102845. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102845>
- [19] Vanhecke, C., Assouere, L., Wang, A., Durand-Estebe, P., Caignet, F., Dilhac, J., *et al.* (2015) Multisource and Battery-Free Energy Harvesting Architecture for Aeronautics Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 3215-3227. <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2331365>