



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404026

引用格式:袁权,吴义鹏,沈心,等.风-光互补取电装置性能及其清灰特性[J].科学与技术工程,2025,25(14):5862-5869.

Yuan Quan, Wu Yipeng, Shen Xin, et al. The performance of wind-solar hybrid generation device and its photovoltaic panel cleaning characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 5862-5869.

风-光互补取电装置性能及其清灰特性

袁权¹, 吴义鹏^{1*}, 沈心¹, 刘建², 周建华²

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210000;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 210000)

摘要 采用风光互补供电的小型传感器无需定期更换电源,可部署在各类人迹罕至地区,然而在实际应用中光伏组件容易受到污垢沉积导致发电功率降低,小型风力发电机的旋转部件也极易出现故障。设计了一种结构较为简单且具有自清洁功能的风-光互补取电装置,结合气象统计数据对装置的太阳能和风能取电性能进行了实验测试,比较了不同灰尘覆盖量下光伏组件的振动清灰性能。研究表明该装置在模拟晴朗天气下(光照强度 948.1 W/m^2)下太阳能收集可产生 77.28 mW 的最大输出功率;基于压电效应的风致涡激振动取电启动风速在 1.5 m/s 左右,实验条件下 4.3 m/s 风速可以产生 4.63 mW 的输出功率;通过风致振动对不同灰尘覆盖量的光伏组件清灰后,太阳能收集输出功率能恢复到清洁状态下的 84% 以上。该研究为偏远地区无维护的小型微功率发电设备提出了新的技术方案。

关键词 风光互补发电; 涡激振动; 压电效应; 光伏组件清灰

中图分类号 TK89; 文献标志码 A

The Performance of Wind-Solar Hybrid Generation Device and Its Photovoltaic Panel Cleaning Characteristics

YUAN Quan¹, WU Yi-peng^{1*}, SHEN Xin¹, LIU Jian², ZHOU Jian-hua²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China;

2. Research Institute of State Grid, Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

[Abstract] Small sensors powered by wind-solar hybrid power supply do not require regular replacement of the power supply, and can be deployed in various remote areas. However, in practice, the photovoltaic panels are prone to accumulation of dirt, resulting in reduced power generation, and the rotating parts of small wind turbines are also very prone to failure. A wind-solar hybrid power device with a simple structure and self-cleaning capability was designed, and its solar and wind energy collection performance was experimentally evaluated based on meteorological statistical data. Moreover, the vibration cleaning efficacy of the photovoltaic panels under various dust coverage levels was compared. The research results show that the device can generate a maximum output power of 77.28 mW under simulated clear weather conditions (light intensity of 948.1 W/m^2). The starting wind speed of wind energy collection based on piezoelectric and vortex-induced vibration effects is around 1.5 m/s , and a wind speed of 4.3 m/s in the experiments can generate an output power of 4.63 mW . After vortex-induced vibration cleaning of the photovoltaic module with different dust coverage densities, the output power of solar energy collection can be restored to over 84% of the clean state. This study presents a new technical solution for maintenance-free small-scale micro power generation equipment in remote areas.

[Keywords] wind-solar hybrid power generation; vortex-induced vibration; piezoelectric effect; photovoltaic module dust removal

无线传感器网络可以直接获取客观世界的物理信息,提供源源不断的“大数据”,是人工智能、物联网等新兴技术的重要组成部分,受到了中外学者的广泛关注。此类设备通常能源独立,需要自备电池或者从周围环境中获取能源^[1]。前者需要定期

更换电池,海量废旧电池也给环境带来了沉重负担^[2]。而对于原始森林防火预警、海洋环境监测、特高压架线塔检测等人迹罕至的应用场景而言,从周围环境取电是优势最为明显的技术方案^[3-6]。在物联网技术快速推进的背景下,小型微功率环境取

收稿日期: 2024-05-30; 修订日期: 2025-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(52241103); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项(ILA22003)

第一作者: 袁权(2001—),男,汉族,江西永丰人,硕士研究生。研究方向: 环境自取电技术。E-mail: sz2301165yq@nuaa.edu.cn。

* 通信作者: 吴义鹏(1986—),男,汉族,江苏南通人,博士,副教授。研究方向: 环境自取电方向、自供电无线传感器。E-mail: yipeng.wu@nuaa.edu.cn。

电装置可以为部署在各个角落数量众多的无线传感器设备提供源源不断的电能^[7]。除此之外,对于使用电网供电的传感器设备,当电力供应系统因自然灾害或设备故障等因素损坏时^[8-11],小型取电装置也可以起到临时供电的作用。

在野外空旷场景下,基于太阳能或风能的微功率取电是最为成熟的两种技术方案^[12]。这是因为在“双碳”目标的大背景下,太阳能和风能是目前大力发展的新能源,各类取电产品层出不穷,例如直接将光伏组件小型化即可得到微功率太阳能取电装置。目前技术条件下,单一的太阳能或者风能发电容易受到天气变化的影响,但两种能源有着空间与时间上的互补性^[13]。通过储蓄、制氢等能量存储方式,加以各类分解协调、改进多目标粒子群等优化算法,风光互补型取电逐渐成为主流^[14-17]。小型微功率取电装置无法大规模储能、并网等,所以更加需要风光互补取电。为此,李春成等^[18]设计了一款基于光生伏特效应和电磁感应定律的小型风光互补取电装置。取电装置同时将太阳能和风能转换为电能,进而实现森林火灾无线监测系统的自供电。该系统加以低功耗电路,能够满足其内部功耗为 104 mW 的定位系统模块正常工作。然而在实际运行过程中人们发现,此类取电装置放置在偏远地区,常常难以定期维护。其内部需要结构相对复杂的旋转零部件的小型风力发电机故障率较高,位于表面的光伏组件容易落灰或沉积其它污垢,经常一段时间后被供电设备就掉电不工作,难以正常取回数据。

绕开叶片和旋转装置,利用流固耦合导致的风致涡激振动效应将风能转换为结构的振动能,再通过机电转换元件变为电能,不失为一种简单可靠的微功率取电方法^[19]。为此,Kan 等^[20]提出了一种由压电元件、柔性梁、圆柱体和附加的耦合器组成的压电风能收集器。该收集器设有密封结构来保护压电元件,以减小雨水和风雪的损耗并延长使用周期。收集器在最优阻抗为 1 000 kΩ 下能实现 4.76 mW 的输出功率。

在极端地区长时间的大面积灰尘沉积会使光伏组件发电效率衰减 70% 以上^[21],光伏组件上局部灰尘沉积导致的热斑效应也将缩减其使用寿命^[22]。为解决积灰问题,各类无需人工干预的光伏组件清洁手段被陆续提了出来。杭茂尧等^[23]结合 *Elastica* 理论,将用作光伏组件清洁的刷丝简化为柔性梁后分析其与灰尘颗粒间的力学模型,在此基础上进行仿真与实验,为机械清洁光伏组件总结出更加贴近实际的刷丝与灰尘颗粒模型。机械清洁方

案与实际应用较为成熟,但所需的额外供能和机械结构同样也不利于维护。Attia 等^[24]通过小型风扇和传动组件对利用风能产生的振动清洁光伏组件的方式进行了研究,发现这种方式下的风致振动可以使沉积在 15° 放置的光伏组件表面的灰尘除去 70%,有效证明风能产生的振动对光伏组件的清洁效果。

能否设计一款无需风扇等复杂旋转零部件的新型风光互补取电装置,在利用风致涡激振动取电的同时,通过周期性振动清洁光伏组件的灰尘,进而实现取电装置的免维护? 基于上述应用挑战引出来的技术难题,现设计一种结构较为简单且具有自清洁功能的风-光互补取电装置,结合气象统计数据对装置的太阳能光伏取电及风致涡激振动取电性能进行实验测试与分析,并在不同灰尘覆盖量下,将装置的光伏组件利用风致涡激振动实现抖动清灰与一般光伏组件通过自然风吹拂清灰进行比较。该研究旨在为偏远地区无维护的小型微功率发电设备提出了新的技术方案。

1 风光互补取电装置取电性能分析

1.1 装置设计介绍

图 1 为风致振动-光伏互补取电装置实物与示意图,取电装置由圆柱体和悬臂梁组成,微型光伏组件用 AB 胶固定于圆柱体顶部以实现太阳能的收集,圆柱通过其底部夹具安装在悬臂梁的自由端,悬臂梁固定端附近贴有压电元件,悬臂梁的外围安装限位保护装置。

雷诺数 Re 是表示流体所受惯性力与黏性力之比的无量纲参数,其表达式为

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1)$$

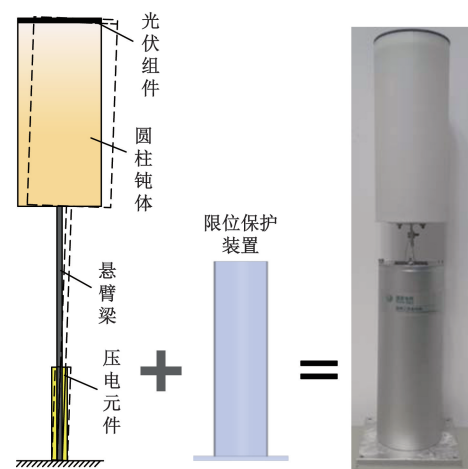


图 1 取电装置实物与示意图

Fig. 1 Physical and schematic diagram of power device

式(1)中: ρ 为流体密度; V 为流体速度; D 为圆柱直径; μ 为运动黏性系数。

雷诺数大于40时,随着空气的通过,圆柱表面时两侧会周期性脱落旋向相反的涡流,涡流的脱落伴随着圆柱表面的压力分布变化,脱落频率 f_s 的公式为

$$f_s = \frac{S_t V}{D} \quad (2)$$

式(2)中: S_t 为斯特鲁哈数,无量纲系数,与雷诺数有关; V 为风速; D 为圆柱直径。

当涡流脱落频率 f_s 接近圆柱与悬臂梁所组成结构的一阶模态固有频率 f 时,结构将产生大幅度的振动,此时脱落频率被锁定而不再随风速变化。这种情况下结构的其他模态的振动可忽略不计,该结构等效为单自由度系统,其固有频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3)$$

式(3)中: M 为等效质量; K 为等效刚度。

粘贴在悬臂梁固定端正反面附近的压电元件采用并联连接,通过压电效应可以将振动的机械能转换为电能以实现风能的收集。装置各个部件的尺寸参数由表1给出。其中压电元件是正负电极同面的PZT-5H压电陶瓷片,钝体材料为光敏树脂,悬臂梁选取弹簧钢。

表1 风致振动-光伏混合取电装置尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of wind-solar hybrid power device

参数	数值/mm
悬臂梁长×宽×厚	250×25×0.8
压电元件长×宽×厚	30×20×0.5
圆柱钝体壁厚	1
圆柱钝体外直径	66
光伏组件直径	66
光伏组件厚度	2.5

1.2 太阳能光伏取电性能实验与分析

光伏组件的输出功率在理想情况下与光照强度直接相关。如图2所示,将装置放置在模拟光源下,太阳光强度仪测量模拟光源的光照强度。电阻箱作为等效负载接入电路的输出端,万用表测量不同光照强度和不同阻值下电阻两端的电压以计算光伏组件的输出功率。

实验结果如图3所示,可以看到随着光照强度的增大,光伏组件最大输出功率相应提高,最优输出阻抗相应降低。在光照强度为948.1 W/m²下,最大输出功率达到77.28 mW,对应最优输出阻抗约为900 Ω;在光照强度为65.8 W/m²时,最大输出功率只有6.68 mW,对应阻抗提高至6800 Ω。如图4

所示,最大输出功率结果表明其与光照强度近似线性关系,而最优阻抗的阻值随着光照强度的降低先缓慢再迅速增大。

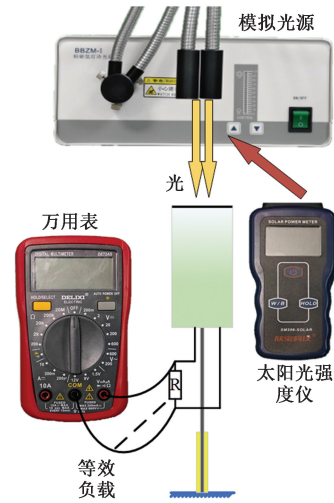


图2 模拟光源实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulated solar source experiment

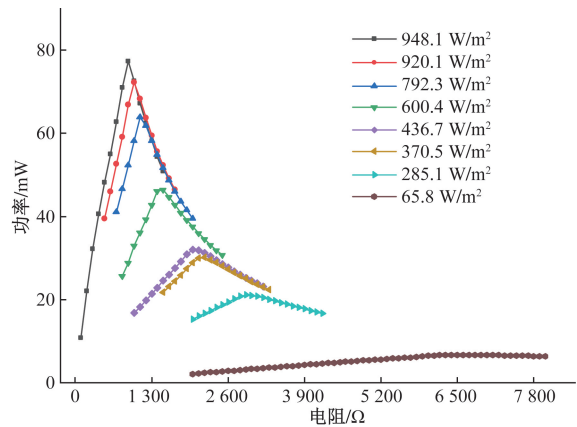


图3 不同光照强度下光伏组件输出功率

Fig. 3 Photovoltaic module output power under different light intensities

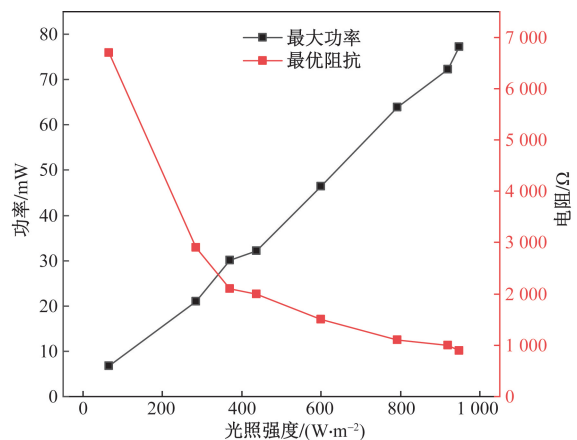


图4 最大功率和最优阻抗随光照强度的变化

Fig. 4 Variation of maximum power and optimum impedance with light intensity

1.3 结合气象数据的太阳能与风能特征

尽管太阳能的收集可以不受地域限制,平原、山地或者是岛屿都可以设置光伏组件,但天气变化对每日的光照强度影响不可忽略。为此,这里通过对中国气象网站上南京江宁地区 2021—2023 年的历史气象数据整理得到如图 5 所示的归纳结果,可以发现有利于太阳能收集的“晴”天数只占到三年的 10%,太阳能收集困难的“阴雨”天数占 30%,剩下 60% 的天数则是太阳能取电功率波动较大的“多云为主”和“晴/多云”天气。实测 2024 年 1 月 28 日 13:01 阴雨天气中南京某处空旷地区光照强度为 43.3 W/m^2 ,图 1 所示装置的太阳能收集输出功率降低至 5.05 mW 。

图 6 整合了设置在江宁地区的多个微气象传感器在不同日期不同天气状况下不同时刻的光照强度,可以看出由于天气变化,在存在太阳光条件时,不同日期下的光照强度差距较大;但每天 19:00 到第二天 05:00 的光照强度都为 0。对于使用光伏组件的微功率取电装置,光照强度每天大范围的浮动极大地增加了储能以及电能管理的负担,连续阴雨天气里装置一旦掉电不工作,将很难及时唤醒。

风能是一种重要的可再生清洁能源,中国气象网站江宁地区 2021—2023 年的风速整理结果如图 7 所示,其中 95% 的天数中风速低于 7.9 m/s ,这为稳定的风能收集提供了客观条件。

图 8 统计了多个微气象传感器数在不同日期中所测得的不同时刻的风速结果,可以看出在全天 24 h 范围内,风速不会出现大范围的规律性变化,整体较为平稳。特别统计后还可以发现微气象传感器测得的风速主要集中在 5.0 m/s 以下。结合图 7 统计的气象数据,可见风能取电装置设计的最优风速应该在 $1.5 \sim 5.0 \text{ m/s}$ 这个范围,“填补”太阳能收集方式在夜晚或连续阴雨天气里在输出功率上

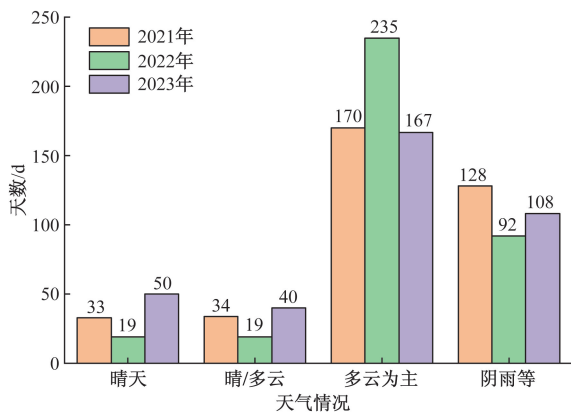


图 5 南京江宁地区近三年天气状况

Fig. 5 Weather conditions in the Jiangning Area of Nanjing over the past three years

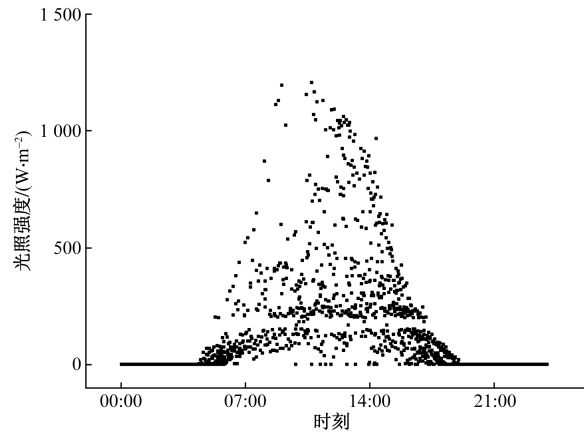


图 6 一天 24 h 中光照强度统计

Fig. 6 Statistical analysis of light intensity over a 24-hour period

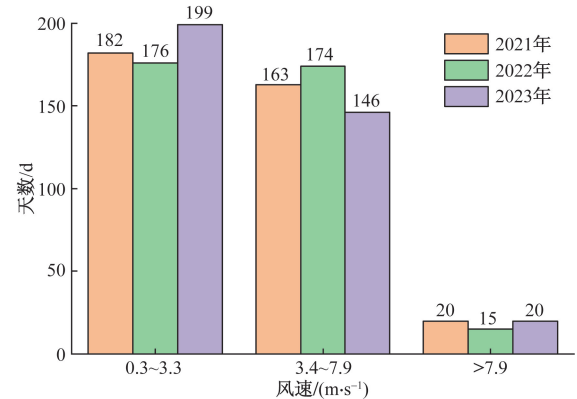


图 7 南京江宁地区的风力状况

Fig. 7 Wind conditions in the Jiangning Area of Nanjing

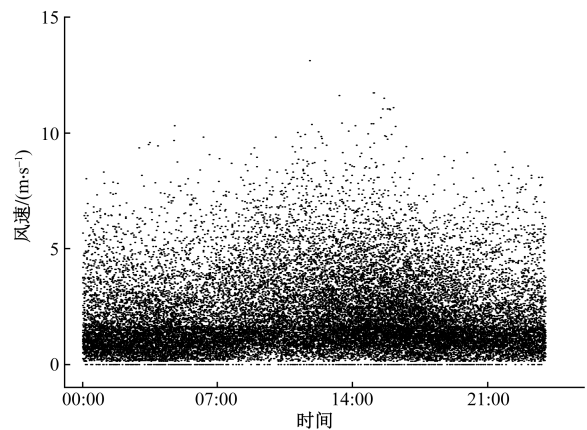


图 8 一天 24 h 中风速统计

Fig. 8 Statistical analysis of wind speed over a 24-hour period

形成的“波谷”。

1.4 风致涡激振动取电性能实验与分析

随着风速增大,涡流周期性脱落的频率与装置的固有频率接近时会引起共振,共振时涡流脱落频率被锁定且不再随风速变化。本装置利用压电效应实现风致涡激振动取电的输出功率主要与振动的频率、振幅、机电耦合系数等相关,共振时可以将

取电装置结构等效为单自由度振动系统,其机电耦合模型如图9所示。

该模型下的动态平衡方程为

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku + F_p = F \quad (4)$$

式(4)中: u 为等效质量与基座间的相对位移; \dot{u} 为相对速度; \ddot{u} 为相对加速度; D 为系统的等效阻尼; F 为涡流周期性脱落伴随的圆柱表面的压力分布变化所引起的激振力; F_p 为压电元件通过逆压电效应施加在悬臂梁根部的力的等效。

$$F_p = \alpha V \quad (5)$$

压电元件的传感方程则为

$$Q = \alpha U - C_p V \quad (6)$$

式中: α 为力因子; Q 为压电元件上产生的电荷; C_p 为压电元件的等效电容。

式(4)左右为两边乘速度并对时间积分后可得

$$\frac{1}{2}M\dot{u}^2 + \frac{1}{2}Ku^2 + \int D\dot{u}^2 dt + \int F_p \dot{u} dt = \int F\dot{u} dt \quad (7)$$

从式(7)可以看出由涡流脱落的激振力输入的能量 $\int F\dot{u} dt$ 被机械损耗 $\int D\dot{u}^2 dt$ 和机电转换能 $\int F_p \dot{u} dt$ 所消耗。通过压电能量调控电路的开关切换对机电转换能进行操控,装置可以实现振动的抑制或者能量的收集^[25]。选择弹簧钢作为悬臂梁来降低结构的等效阻尼,增大共振时的振幅,提高机电转换能,获得更大的输出功率。

悬臂梁轴向长度影响着结构的等效刚度,进而影响了风能取电装置的固有频率。当涡脱落频率接近装置固有频率时,悬臂梁结构会产生共振,进而最大化系统取电性能。因此,装置的固有频率影响着最优风速区间。由式(2)可知风速越低,涡脱落频率越低,因此对应较低固有频率的长悬臂梁结构可以拥有更低的启动风速,而短悬臂梁在高风速下更容易产生共振,对应的输出功率更大。参考

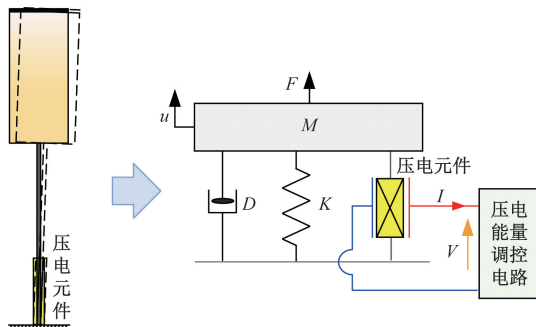


图9 取电装置的等效机电耦合模型

Fig. 9 Equivalent electromechanical coupling model of power device

图8的统计数据,本装置主要针对1.5~5.0 m/s这一风速区间进行优化,选取25 cm的悬臂梁,装置的固有频率在3.28 Hz左右。

实验所用低速风洞包含进出风道、收缩通道和蜂窝网板。YWF4E-400型鼓风机位于进风口,鼓风机的具体参数列于表2。

如图10所示,取电装置固定在出风口,热式风速仪测量圆柱钝体前方风速,可编程电阻作为等效负载接入电路输出端,用示波器记录不同风机档位下不同负载两端在结构振动的数十个周期内的电压波形以计算相应的平均功率。

实验结果如图11所示,与太阳能收集类似,随着风速增大,风致涡激振动取电最大输出功率相应提高,在4.3 m/s的风速下可产生4.63 mW的输出功率。但如图12所示,通过风致振动的风能取电的最大输出功率与风速之间未呈现非常明显的线性关系。

表2 鼓风机相关参数

Table 2 Blower-related parameters

额定功率/ W	转速/ (r·s ⁻¹)	额定电压/ V	风压/ Pa	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)
190	23	220	210	4 800

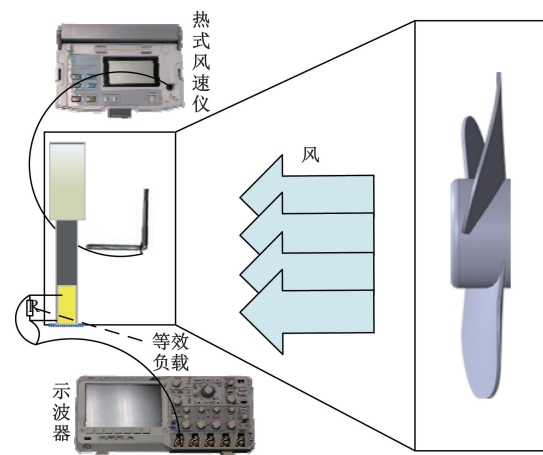


图10 风致振动取电实验示意图

Fig. 10 Vortex-induced vibration electricity generation experiment schematic diagram

2 光伏组件清灰特性分析

结合风能取电技术,本装置可以一定程度上弥补无法在夜间进行太阳能收集的不足,并且面对长期阴雨天气的恶劣环境时,微弱的太阳能收集加以风能取电也能够保证装置的供电对象保持休眠状态,确保在供电功率恢复较高水平时能够唤醒继续工作。除此之外,针对灰尘沉积也会降低光伏组件的输出功率的问题,取电装置通过压电能量调控电

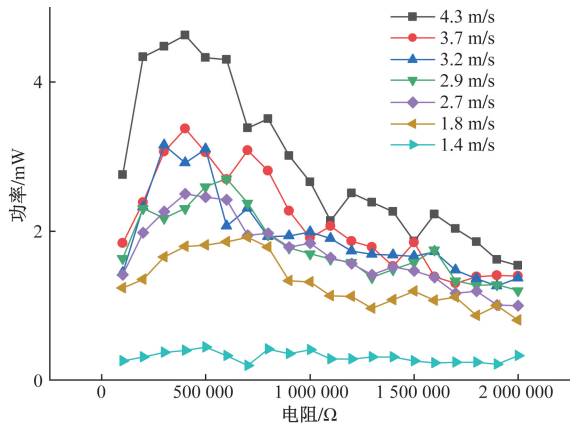


图 11 不同风速下输出功率随电阻变化趋势

Fig. 11 Trend of output power with resistance at different wind speeds

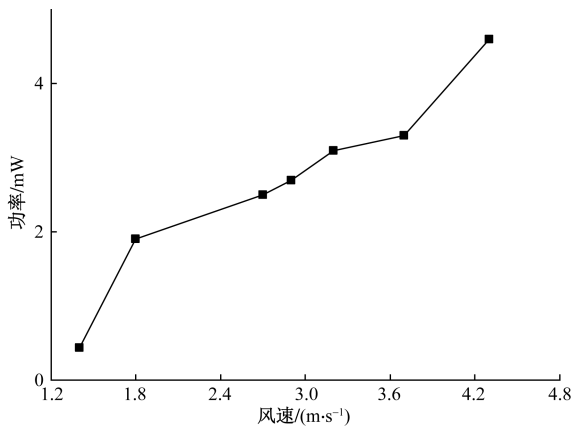


图 12 风能收集最大输出功率随风速变化趋势

Fig. 12 Trend of maximum output power collected by wind energy with wind speed

路,在晴天抑制装置的振动,稳定太阳能收集的输出功率,夜间利用风致涡激振动收集风能并实现抖动清灰。

如图 13 所示,装置仍放置于低速风洞口,模拟光源固定在光伏组件的上方,光照强度始终维持在 700 W/m^2 。通过示波器测量等效负载的两端电压,计算此时无灰尘覆盖的清洁状态下太阳能收集的输出功率。接着覆盖一定的灰尘于光伏组件的表面,测量负载两端电压以计算太阳能收集的输出功率;利用风致涡激振动对被灰尘覆盖的光伏组件进行 5 min 的抖动清灰后,测量负载两端电压以计算太阳能收集的输出功率;再次覆盖一定量的灰尘,在圆柱钝体固定的情况下,以相同风速 2.7 m/s 吹拂光伏组件的表面 5 min 后(模拟一般光伏取电装置的自然风吹拂清灰),测量负载两端电压以计算太阳能收集的输出功率。依次增大光伏组件表面灰尘覆盖量,通过对比未清灰、抖动清灰后和自然风吹拂清灰后的光伏组件的太阳能收集输出功率,

验证装置的清灰性能。值得说明的是,这里的光照强度是为了验证清灰之后光伏组件的发电效果,清灰之后实际装置在此光照强度下将尽可能地保持稳定来最大化太阳能收集输出功率。另外,实验所用灰尘来自黄河壶口瀑布地区自然沉淀的沙尘。

实验的对比结果如图 14 所示,随着光伏组件表面灰尘覆盖量的增加,光伏组件发电功率迅速降低,在灰尘覆盖量达到 355 g/m^2 后光伏组件的输出功率降至清洁状态下的 1.7%;仅靠类似自然条件的 2.7 m/s 风速的微风对光伏组件表面进行吹拂清灰的效果有限,吹拂清灰后,光伏组件的太阳能收集的输出功率相比未清灰时只有略微提高;而利用相同风速下的风致涡激振动效应对光伏组件进行抖动清灰后,光伏组件的太阳能收集的输出功率相比未清灰时提升明显。即使光伏组件表面的灰尘覆盖量达到 690 g/m^2 ,抖动清灰后,太阳能收集的输出功率也能达到清洁状态时的 84%。图 15 展示了 690 g/m^2 灰尘覆盖下光伏组件表面和抖动清灰后的表面,可以看到,通过风致涡激振动实现抖动清灰对于清洁沉积在光伏组件表面的干灰尘具有良好的效果。

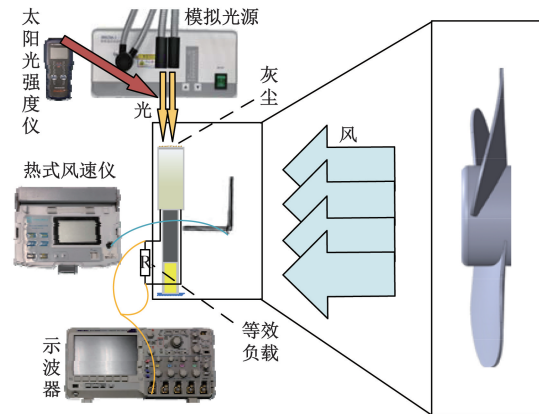


图 13 清灰实验示意图

Fig. 13 Dust cleaning experiment schematic diagram

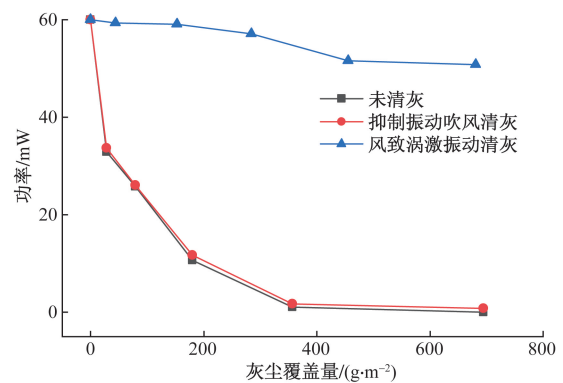


图 14 模拟自然吹风与风致振动清灰效果对比

Fig. 14 Comparison of the cleaning effects between simulated natural wind and vortex-induced vibration

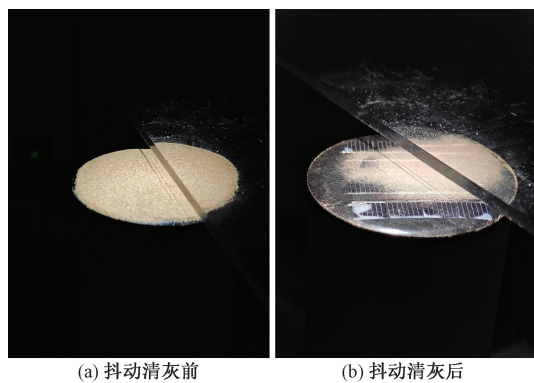


图 15 光伏组件表面清洁前后对比

Fig. 15 Comparison of photovoltaic module surface before and after cleaning

3 结论

通过压电效应利用风致涡激振动,设计了一种结构简单且具有自清洁的风光互补取电装置,结合气象统计数据对装置的太阳能和风能收集性能进行了实验测试,比较了不同灰尘覆盖量下光伏组件的振动清灰性能。

(1)该装置的太阳能收集的最大输出功率与光照强度呈线性关系,最优阻抗随着光照强度的降低先缓慢再迅速增大,在模拟晴朗天气下的 948.1 W/m^2 光照强度下可产生 77.28 mW 的输出功率。

(2)利用压电效应实现风致涡激振动取电的启动风速在 1.5 m/s 左右,最大输出功率随风速增大而提高,实验条件下的 4.3 m/s 风速可以产生 4.63 mW 的输出功率。

(3)在不同灰尘覆盖量下,比较了本文装置的光伏组件利用风致涡激振动实现抖动清灰后的输出功率与模拟一般光伏组件通过自然条件的吹拂清灰后的输出功率,光伏组件抖动清灰后的输出功率能够达到清洁状态下的 84% 以上,明显优于自然条件的吹拂清灰。

参 考 文 献

[1] 韦永祥,陈仲生,陈志文,等. 振动俘能的自供电无线传感器节点设计[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(3): 79-83.
Wei Yongxiang, Chen Zhongsheng, Chen Zhiwen et al. Design of self-powered wireless sensor nodes with vibration capture energy [J]. Sensors and Microsystems, 2023, 42(3): 79-83.

[2] 向荣淑. 废旧铅蓄电池的生态危害[J]. 生态经济, 2019, 35(4): 5-8.
Xiang Rongshu. Ecological hazards of used lead storage batteries [J]. Ecological Economy, 2019, 35(4): 5-8.

[3] Lee H C, Lee H W, Kim M S. Development of IoT-based real-time fire detection system using raspberry Pi and fisheye camera[J]. Ap-

plied Sciences, 2023, 13(15): 8568.

[4] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629-3664.
Lü Qingtian, Zhang Xiaopei, Tang Jingtian, et al. Geophysical exploration techniques and equipment for metal mines: review and progress[J]. Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3629-3664.

[5] 侯薇. 低成本海洋环境监测设备设计与实现[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(18): 88-90.
Hou Wei. Design and realization of low-cost marine environment monitoring equipment[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(18): 88-90.

[6] 陈黎, 肖洒, 任乔林, 等. 基于多传感器数据融合的输电线路杆塔稳定性监测系统研究[J]. 东北电力技术, 2018, 39(12): 44-47.
Chen Li, Xiao Sa, Ren Qiaolin, et al. Research on transmission line tower stability monitoring system based on multi-sensor data fusion[J]. Northeast Electric Power Technology, 2018, 39(12): 44-47.

[7] 刘建, 欧阳曾恺, 田正其, 等. 典型低功耗无线智能设备的一般功耗模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8515-8521.
Liu Jian, Ouyang Zengkai, Tian Zhengqi, et al. General power consumption model of typical low-power wireless intelligent devices [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8515-8521.

[8] 吴伟丽. 磁暴诱发电网故障灾害风险分析研究进展[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 135-141.
Wu Weili. Research progress on risk analysis of grid fault disasters induced by magnetic storms[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(9): 135-141.

[9] 徐志钮, 李先锋, 郭一帆, 等. 基于温度滞后相位的输电线路覆冰监测方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 91-100.
Xu Zhiyu, Li Xianfeng, Guo Yifan, et al. Ice-cover monitoring method for transmission lines based on temperature lag phase [J]. Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 91-100.

[10] 文屹, 陈易飞, 毛先胤, 等. 500 kV 输电铁塔覆冰风险评估与加固措施[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 250-257.
Wen Yi, Chen Yifei, Mao Xianyin, et al. Ice-covering risk assessment and reinforcement measures for 500 kV transmission towers [J]. Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 250-257.

[11] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
Zhang Baohui, Li Guanghui, Wang Jin, et al. Analysis of the influencing factors of wind power access to power system fault current and the impact on relay protection [J]. Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.

[12] Ribeiro D, Arouca C, Coelho M. Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: the influence of location, area and shape [J]. Renewable Energy, 2016, 2016: 85554-85563.

[13] Anas H, Mghouchi Y E, Chaoui M. Novel approaches for wind speed evaluating and solar-wind complementarity assessing [J]. Renewable Energy Focus, 2024, 48. DOI: 10.1016/j.ref.2024.100547.

- [14] 赵心怡, 谢俊, 周翠玉, 等. 风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 121-129.
Zhao Xinyi, Xie Jun, Zhou Cuiyu, et al. Multi-timescale coordinated scheduling model for wind-light-pumped storage zero-carbon power system[J]. Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 121-129.
- [15] 王侃宏, 赵政通, 罗景辉. 风光氢储系统的两阶优化匹配分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10790-10794.
Wang Kanhong, Zhao Zhengtong, Luo Jinghui. Two-stage optimization matching analysis of wind-solar hydrogen storage system[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10790-10794.
- [16] 朱娟娟, 段奕琳, 闫群民, 等. 基于BAS-IMOPSO算法的风电系统储能优化配置[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 180-187.
Zhu Juanjuan, Duan Yilin, Yan Qunmin, et al. Optimal allocation of energy storage in wind power system based on BAS-IMOPSO algorithm[J]. Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 180-187.
- [17] 史昭娣, 朱宁, 李政, 等. 基于分解协调的风光储联合规划分层优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 22-31.
Shi Zhaodi, Zhu Ning, Li Zheng, et al. A hierarchical optimization method for wind energy storage joint planning based on decomposition coordination[J]. Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 22-31.
- [18] 李春成, 杨云, 陈亮, 等. 自供电低功耗森林火灾无线监测系统[J]. 电子器件, 2021, 44(3): 707-712.
Li Chuncheng, Yang Yun, Chen Liang, et al. Self-powered low-power forest fire wireless monitoring system[J]. Electronic Devices, 2021, 44(3): 707-712.
- [19] 李海宁, 王海峰, 郭修宇, 等. 基于卡门涡街效应的压电悬臂梁的发电仿真分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(3): 11-15.
Li Haining, Wang Haifeng, Guo Xiuyu, et al. Simulation analysis of power generation of piezoelectric cantilever beam based on Kármán vortex effect[J]. Journal of Qingdao University (Engineering and Technology Edition), 2019, 34(3): 11-15.
- [20] 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.
- [21] 高德东, 孟广双, 王珊, 等. 荒漠地区电池板表面灰尘特性分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(11): 1597-1602.
Gao Dedong, Meng Guangshuang, Wang Shan, et al. Characterization of surface dust on battery panels in desert areas[J]. Renewable Energy, 2015, 33(11): 1597-1602.
- [22] 潘文峰, 陆晨, 王加鸿, 等. 晶体硅光伏组件的热斑效应详解[J]. 太阳能, 2019(1): 48-52.
Pan Wenfeng, Lu Chen, Wang Jiahong, et al. Hot spot effect of crystalline silicon photovoltaic modules in detail[J]. Solar Energy, 2019(1): 48-52.
- [23] 杭茂尧, 高德东, 王珊. 基于柔性梁的太阳能电池板清洁力研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(9): 1290-1295.
Hang Maoyao, Gao Dedong, Wang Shan. Research on the cleaning force of solar panel based on flexible beam[J]. Renewable Energy, 2018, 36(9): 1290-1295.
- [24] Attia O, Adam N, As'arry A, et al. Removal of dust from the solar panel surface using mechanical vibrator[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1262(1): 185-192.
- [25] 裴万鹏, 刘轩, 马少飞, 等. 能量操控式压电分流支路对结构振动的影响研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(1): 1-7.
Pei Wanpeng, Liu Xuan, Ma Shaofei, et al. Study on the influence of energy-controlled piezoelectric shunt branch on structural vibration[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(1): 1-7.