

T/ZOIA

中关村光电产业协会团体标准

T/ZOIA 3005—2024

电力传感器自供电技术规范 第1部分：术语

Energy harvesting technical specification for sensors using in electricity industry—Part 1: Terminology

2024 - 04 - 02 发布

2024 - 04 - 02 实施

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 通用术语	1
4 自供电电力传感器分类术语	1
5 自供电电力传感器功能与性能术语	7
参 考 文 献	8

前 言

《电力传感器自供电技术规范》分为3部分

- 第1部分：术语；
- 第2部分：技术要求；
- 第3部分：测试规范。

本部分为《电力传感器自供电技术规范》的第1部分。

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国传感器与物联网产业联盟能源专委会提出。

本文件由中关村光电产业协会归口。

本文件起草单位：国网智能电网研究院有限公司，国网新疆电力有限公司信息通信公司，国网江西省电力有限公司信息通信分公司，国网江苏省电力有限公司南京供电分公司，北京智芯微电子科技有限公司，凯铭诺（深圳）科技有限公司，重庆大学，西安交通大学

本文件主要起草人：李春龙，郭经红，鞠登峰，黄辉，崔力民，牟笑静，肖子洋，王路，王鑫，陈华宁，张明，贺学锋，杜君，臧志成，方东明，苏澜，陈亚伟，朱海超，白巍，邓辉，黄莉，曾鹏飞，高志东，李庆，黄凤，孙晓艳，田文锋，杨智豪，王瑶

电力传感器自供电技术规范 第1部分：术语

1 范围

本文件规定了电力传感器自供电特性的通用术语、分类术语、功能与性能术语。

本文件适用于面向电力领域应用的，无需电力线供电、无需电池供电或电池仅作为应急后备电源，即可实现被测量感知并将感知量回传的自供电电力传感器的生产、科学研究、教学以及其他有关技术领域。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7665-2005 传感器通用术语

GB/T 33905.1—2017 智能传感器 第1部分：总则

IEC 62047-28-2017 半导体器件 - 微机电器件 - 第28部分：振动驱动MEMS驻极体能量收集装置的性能测试方法

IEC 62830-1-2017 半导体器件 - 用于能量收集和产生的半导体器件 - 第1部分：基于振动的压电能量收集

IEC 62830-2-2017 半导体器件 - 用于能量收集和生成的半导体器件 - 第2部分：基于热能的热电收获

IEC 62830-3-2017 半导体器件 - 能量收集和产生用半导体器件 - 第3部分：基于振动的电磁能量收集

IEC 62952-3-2017 无线通信设备用电源. 第3部分：通用能量收集适配器模块

3 通用术语

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

GB/T 33905.1—2017、GB T 7665-2005界定的术语和定义适用于本文件。

3.2

电力传感器 Sensors for the Electricity Industry
应用于电力行业的传感器的统称，简称‘电力传感器’

自供电传感器 self-powered sensor

基于环境能量收集实现传感、处理和无线通信一体化系统自供电的传感器

注：自供电传感器是包含能量收集、传感采样、数据处理、无线通信等功能单元的传感器。传感器、处理器和无线通信单元是自供电传感器必不可少的组成部分。

4 电力传感器自供电技术分类术语

4.1 一般分类术语

4.1.1

磁场取能自供电传感器 self-powered sensor based on magnetic field energy harvesting
基于环境中磁场获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.2

电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on electric field energy harvesting
基于环境中电场获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.3

振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on vibration energy harvesting
基于环境中振动获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.4

温差取能自供电传感器 self-powered sensor based on thermoelectric energy harvesting
基于传感器热端与冷端之间温差获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.5

光照取能自供电传感器 self-powered sensor based on light energy harvesting
基于环境中光照获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.6

风取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind energy harvesting
基于环境中风能获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.7

射频取能自供电传感器 self-powered sensor based on radio frequency energy harvesting
基于环境中射频电磁波（300kHz~300GHz）获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.1.8

多源取能自供电传感器 self-powered sensor based on multi-source energy harvesting
基于环境中多种能量源获取能量作为主电源的自供电传感器。

4.2 磁场取能自供电传感器

4.2.1

工频磁场取能自供电传感器 self-powered sensor based on power frequency magnetic field energy harvesting

取能磁场频率为工频的磁场取能自供电传感器。

4.2.1.1

环型工频磁场取能自供电传感器 annular self-powered sensor based on power frequency magnetic field energy harvesting

形状为圆环型或方环形等闭合环形且不可分离或打开的工频磁场取能自供电传感器。

4.2.1.2

开环型工频磁场取能自供电传感器 open-annular self-powered sensor based on power frequency magnetic field energy harvesting

环形结构可分离或打开的环形工频磁场取能自供电传感器。

4.2.1.3

平面型工频磁场取能自供电传感器 planar self-powered sensor based on power frequency magnetic field energy harvesting

形状为长方体等平面型结构的工频磁场取能自供电传感器。

4.2.2

宽频磁场取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency magnetic field energy harvesting

取能磁场频率带宽不小于1kHz的磁场取能自供电传感器。

4.3 电场取能自供电传感器

4.3.1

10kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 10kV electric field energy harvesting
适用于10kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.2

35kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 35kV electric field energy harvesting
适用于35kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.3

110kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 110kV electric field energy harvesting
适用于110kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.4

220kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 220kV electric field energy harvesting
适用于220kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.5

330kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 330kV electric field energy harvesting
适用于330kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.6

500kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 500kV electric field energy harvesting
适用于500kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.3.7

1000kV电场取能自供电传感器 self-powered sensor based on 1000kV electric field energy harvesting
适用于1000kV电压场景的电场取能自供电传感器

4.4 振动取能自供电传感器

4.4.1

单频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on single frequency vibration energy harvesting

取能振动频率为单一频点的振动取能自供电传感器。

4.4.1.1

压电型单频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on single frequency vibration energy harvesting by piezoelectric effect

振动到电能转换机理为压电效应的单频点振动取能自供电传感器。

4.4.1.2

电磁型单频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on single frequency vibration energy harvesting by electromagnetic induction

振动到电能转换机理为电磁感应效应的单频点振动取能自供电传感器。

4.4.1.3

摩擦型单频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on single frequency vibration energy harvesting by triboelectrification

振动到电能转换机理为摩擦起电效应的单频点振动取能自供电传感器。

4.4.1.4

复合型单频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on single frequency vibration energy harvesting by multiple principles

振动到电能转换机理为压电效应、电磁感应和摩擦起电效应中两种或多种的单频点振动取能自供电传感器。

4.4.2

多频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple frequency vibration energy harvesting

取能振动频率为多个频点的振动取能自供电传感器

多频点振动取能自供电传感器可根据机电转换机理进一步分类。

4.4.2.1

压电型多频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple frequency vibration energy harvesting by piezoelectric effect

振动到电能转换机理为压电效应的多频点振动取能自供电传感器。

4.4.2.2

电磁型多频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple frequency vibration energy harvesting by electromagnetic induction

振动到电能转换机理为电磁感应效应的多频点振动取能自供电传感器。

4.4.2.3

摩擦型多频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple frequency vibration energy harvesting by triboelectrification

振动到电能转换机理为摩擦起电效应的多频点振动取能自供电传感器。

4.4.2.4

复合型多频点振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple frequency vibration energy harvesting by multiple principles

振动到电能转换机理为压电效应、电磁感应和摩擦起电效应中两种或多种的多频点振动取能自供电传感器。

4.4.3

宽频段振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency vibration energy harvesting

取能振动频率为某一频段的振动取能自供电传感器

宽频段振动取能自供电传感器可根据机电转换机理进一步分类。

4.4.3.1

压电型宽频段振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency vibration energy harvesting by piezoelectric effect

振动到电能转换机理为压电效应的宽频段振动取能自供电传感器。

4.4.3.2

电磁型宽频段振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency vibration energy harvesting by electromagnetic induction

振动到电能转换机理为电磁感应效应的宽频段振动取能自供电传感器。

4.4.3.3

摩擦型宽频段振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency vibration energy harvesting by triboelectrification

振动到电能转换机理为摩擦起电效应的宽频段振动取能自供电传感器。

4.4.3.4

复合型宽频段振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wideband frequency vibration energy harvesting by multiple principles

振动到电能转换机理为压电效应、电磁感应和摩擦起电效应中两种或多种的宽频段振动取能自供电传感器。

4.5 温差取能自供电传感器

4.5.1

室温区温差取能自供电传感器 self-powered sensor based on near room temperature thermoelectric energy harvesting

取能温差热端温度在300-550K的温差取能自供电传感器。

4.5.2

中温区温差取能自供电传感器 self-powered sensor based on middle temperature thermoelectric energy harvesting

取能温差热端温度在550-950K的温差取能自供电传感器。

4.5.3

高温区温差取能自供电传感器 self-powered sensor based on high temperature thermoelectric energy harvesting near room temperature

取能温差热端温度在950K以上的温差取能自供电传感器。

4.6 光照取能自供电传感器

4.6.1

太阳光光照取能自供电传感器 self-powered sensor based on sunlight energy harvesting

取能光源为太阳光的光照取能自供电传感器

4.6.2

照明光光照取能自供电传感器 self-powered sensor based on illumination light energy harvesting

取能光源为照明光的光照取能自供电传感器

4.6.3

激光光照取能自供电传感器 self-powered sensor based on laser light energy harvesting

取能光源为激光的光照取能自供电传感器

4.7 风取能自供电传感器

4.7.1

风致转动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced rotation energy harvesting

流固耦合过程为风致转动的风取能自供电传感器。

风致转动取能自供电传感器根据机电转换机理可进一步进行分类。

4.7.1.1

电磁型风致转动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced rotation energy harvesting by electromagnetic induction

机电耦合过程为电磁感应的风致转动取能自供电传感器。

4.7.1.2

压电型风致转动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced rotation energy harvesting by piezoelectric effect

机电耦合过程为压电效应的风致转动取能自供电传感器。

4.7.1.3

摩擦型风致转动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced rotation energy harvesting by triboelectrification

机电耦合过程为摩擦起电效应的风致转动取能自供电传感器。

4.7.2

风致振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced vibration energy harvesting

流固耦合过程为风致振动的风取能自供电传感器。

风致振动取能自供电传感器根据机电转换机理可进一步进行分类。

4.7.2.1

电磁型风致振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced vibration energy harvesting by electromagnetic induction

机电耦合过程为电磁感应的风致振动取能自供电传感器。

4.7.2.2

压电型风致振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced vibration energy harvesting by piezoelectric effect

机电耦合过程为压电效应的风致振动取能自供电传感器。

4.7.2.3

摩擦型风致振动取能自供电传感器 self-powered sensor based on wind-induced vibration energy harvesting by triboelectrification

机电耦合过程为摩擦起电效应的风致振动取能自供电传感器。

4.8 射频取能自供电传感器

4.8.1

单频点射频取能自供电传感器 self-powered sensor based on single radio frequency energy harvesting

取能频率为单一频点的射频取能自供电传感器

4.8.2

多频点射频取能自供电传感器 self-powered sensor based on multiple radio frequency energy harvesting

取能频率为多个频点的射频取能自供电传感器

5 电力传感器自供电功能与性能术语

5.1

能量触发工作模式 energy-triggered mode

自供电传感器的采样与通信周期完全由环境能量激励强弱决定的工作模式。

5.2

定周期工作模式 periodic mode

自供电传感器的采样与通信周期可配置为某一固定值的工作模式。

5.3

冷启动 cold start

自供电传感器从初始状态开始，首次进入启动状态的过程，称为冷启动。

5.4

定周期工作最小环境激励 minimum environmental incentive for periodic work

自供电传感器可根据配置周期保持定周期工作状态的最小环境激励条件。

5.5

定周期工作最大环境激励 maximum environmental incentive for periodic work

自供电传感器可根据配置周期保持定周期工作状态的最大环境激励条件。

5.6

耐受最大环境激励 withstand maximum environmental incentive

自供电传感器在不损坏的条件下，可承受的最大环境激励。

5.7

定周期模式最小监测周期 minimum monitoring period of fixed period mode

自供电传感器保持定周期工作可配置的最小监测周期。

5.8

恢复初始时间 restore initial time

自供电传感器在停止环境能量激励后，内部电能状态恢复至出厂状态所需时间。

5.9

备用电源 back up power

自供电传感器中，在环境能量激励不足条件下，进行备用供电的电源。

5.10

备用供电寿命 back up power supply time

自供电传感器在无环境能量激励，仅备用电源进行供电条件下可持续运行的时间。

参 考 文 献

- [1] Kuang Y, Chew Z J, Ruan T, et al. Magnetic field energy harvesting from the traction return current in rail tracks[J]. Applied Energy, 2021, 292. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116911.
- [2] Yu Z, Chu Z, Yang J, et al. Enhancing weak magnetic field MME coupling in NdFeB magnet/piezoelectric composite cantilevers with stress concentration effect[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(13):132902. DOI:10.1063/5.0043062.
- [3] Qu J, He L, Tang N, et al. Wireless Power Transfer using Domino-Resonator for 110 kV Power Grid Online Monitoring Equipment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, PP(99):1-1. DOI:10.1109/TPEL.2020.2989757.
- [4] Wang Q, Kim K B, Woo S B, et al. Enhanced electrical performance of spring-supported magneto piezoelectric harvester to achieve 60 Hz under AC magnetic field[J]. Energy, 2022, 238.
- [5] Li Z, Liu Y, Yin P, et al. Constituting Abrupt Magnetic Flux Density Change for Power Density Improvement in Electromagnetic Energy Harvesting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2021.106363.
- [6] 聂晴晴, 彭晗, 李红斌等. 宽频带范围下磁场能量收集的匹配网络设计[J]. 中国电力, 2021, 54(10):134-143+195.
- [7] 王祎凡, 任春光, 张佰富等. 基于电压源型PWM整流电路的输电线路测量与感应取电一体化互感器实现方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(01):15-25. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220539.
- [8] 程志远, 隋立程, 宋凯等. 谐振补偿式电流互感器取能方法的研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12):4896-4902. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1213.
- [9] 丁柏文, 沈金荣, 唐启阳等. 基于电流感应取电的无线测温节点[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12):21-25.
- [10] 杨洋, 许晓彦, 刘鹏等. 非闭合式磁心感应取能供电模块功率输出研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(02):12-19.
- [11] 夏竹青, 吴细秀, 苏超等. 高压输电线路感应电场能量收集新方法研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(05):699-707. DOI:10.13443/j.cjors.2019072501.
- [12] 倪源, 谢施君, 贾程乾等. 电场耦合取能技术的仿真与试验研究[J]. 四川电力技术, 2021, 44(04):1-5+10. DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210401.
- [13] 王黎明, 李宗, 孟晓波等. 一种交流电场无线取能电源的优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(05):121-127. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.019.
- [14] 江翼, 刘正阳, 肖黎等. 基于多级电容充电的输电线路电场感应取能装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(02):176-182. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.026.
- [15] 何宁辉, 张佩, 吴旭涛等. 用于输电线路监测设备的一种电场感应取能电源[J]. 电源学报, 2020, 18(05):203-209. DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2020.5.203.
- [16] 史宇昊, 王鸿, 薛枫等. 10 kV系统电容取能方式电源特性分析[J/OL]. 电源学报:1-15[2023-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230111.1105.002.html>.
- [17] 黄继盛, 贾洪瑞, 刘学忠等. 基于高压陶瓷电容的自取能与暂态电压监测一体化传感器设计与特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(03):86-92. DOI:10.16188/j.isa.1003-8337.2021.03.013.
- [18] Yang F, Du L, Yu H, et al. Magnetic and electric energy harvesting technologies in power grids: A review[J]. Sensors, 2020, 20(5):1496.
- [19] Bunnoon P, Thongyoo T, Wanden C. Right-of-Way Monitoring Camera Storage Energy Around High Voltage Power Transmission Using Hybrid Energy Harvesting-M field, E field to Super Capacitor Batteries Back-Up Charger[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(2):611-620.

- [20] Zeng X, Yang Z, Wu P, et al. Power source based on electric field energy harvesting for monitoring devices of high-voltage transmission line[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(8): 7083-7092.
- [21] Yang T, Cao Q, Hao Z. A novel nonlinear mechanical oscillator and its application in vibration isolation and energy harvesting[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2021, 155: 107636.
- [22] Wang J, Geng L, Ding L, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations[J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114902.
- [23] Lu Z Q, Zhao L, Ding H, et al. A dual-functional metamaterial for integrated vibration isolation and energy harvesting[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 509: 116251.
- [24] Wu H, Wang J, Wu Z, 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.
- [25] Mösch M, Fischerauer G, Hoffmann D. A self-adaptive and self-sufficient energy harvesting system[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2519.
- [26] 龙雅婷, 姚曙光, 李盈利. 单摆-电磁式振动能量收集器设计及实验[J/OL]. *机械科学与技术*:1-11[2023-09-03]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230250>.
- [27] 高凯, 彭晗, 王劲菁等. 基于非对称弹簧的宽频率范围振动能量收集器[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(10): 2832-2840. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220465.
- [28] 张佳佳, 袁强静, 严冬等. 一种基于防震锤的新型压电复合能量收集方法[J]. *压电与声光*, 2023, 45(01): 56-60+65.
- [29] 黄曼娟, 冯孝为, 刘会聪等. 基于双稳态磁耦合效应的瓦级高功率电磁振动能量收集器[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(20): 92-100.
- [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(06): 173-178.
- [31] Oliveira V S, Camboim M M, de Souza C P, et al. A thermoelectric energy harvester based on microstructured quasicrystalline solar absorber[J]. *Micromachines*, 2021, 12(4)..
- [32] Yu C, Youn J R, Song Y S. Reversible thermo-electric energy harvesting with phase change material (PCM) composites[J]. *Journal of Polymer Research*, 2021, 28(8): 279.
- [33] Vega J, Lezama J. Design and Implementation of a Thermoelectric Energy Harvester with MPPT Algorithms and Supercapacitor[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2021, 19(01): 163-170.
- [34] Ishii S, Miura A, Nagao T, et al. Simultaneous harvesting of radiative cooling and solar heating for transverse thermoelectric generation[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2021, 22(1): 441-448.
- [35] Liao X, Liu Y, Ren J, et al. Investigation of a double-PCM-based thermoelectric energy-harvesting device using temperature fluctuations in an ambient environment[J]. *Energy*, 2020, 202: 117724.
- [36] 肖颖, 梁耕源, 雷博文等. 用于能量收集的离子热电材料研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(04): 5-13.
- [37] 李一鸣, 王鑫, 李昊等. 基于热超构材料的能量收集与热电转换特性[J]. *物理学报*, 2022, 71(20): 273-282.
- [38] 彭鹏, 邵宇鹰, 胡海敏等. 基于碲化铋基柔性热电器件的自供能温度传感器结构设计及性能研究[J/OL]. *材料导报*, 2024(06): 1-10[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230315.1800.004.html>.
- [39] 聂晓蕾, 余灏成, 朱婉婷等. 石墨烯/Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃柔性热电薄膜及其面内散热器件的设计制备与性能评价[J]. *物理学报*, 2022, 71(15): 235-244.

- [40] 张爱兵, 闫文凯, 庞丹丹等. 热电偶臂构型尺寸对环形热电发电机性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(05): 947-953.
- [41] Lai Z, Wang S, Zhu L, et al. A hybrid piezo-dielectric wind energy harvester for high-performance vortex-induced vibration energy harvesting[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107212.
- [42] Wang J, Geng L, Zhou S, et al. Design, modeling and experiments of broadband tristable galloping piezoelectric energy harvester[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36: 592-605.
- [43] Zhang C, Liu Y, Zhang B, et al. Harvesting wind energy by a triboelectric nanogenerator for an intelligent high-speed train system[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(4): 1490-1499.
- [44] Liu S, Li X, Wang Y, et al. Magnetic switch structured triboelectric nanogenerator for continuous and regular harvesting of wind energy[J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105851.
- [45] Yong S, Wang J, Yang L, 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.
- [46] 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(06): 684-698.
- [47] 李支援, 吕文博, 马小青等. 一种磁力滑动式翼型颤振能量俘获器[J/OL]. *力学学报*: 1-11[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2062.o3.20230830.1657.006.html>.
- [48] 罗睿希, 艾兵, 杨爱超等. 驰振式风能采集器的研究进展及应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(06): 30-40.
- [49] 李智鹏, 陈荷娟. 基于风致振动效应的压电能量收集器技术[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(06): 2132-2140.
- [50] 王启曼, 李文豪, 郭家玮等. 风能收集型摩擦纳米发电机研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(02): 111-119. DOI:10.14106/j.cnki.1001-2028.2022.1740.
- [51] Ranga R, Kalra Y, Kishor K. Petal shaped nanoantenna for solar energy harvesting[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(3): 035001.
- [52] Zhang S, Wu Z, Liu Z, et al. Nanostructured Broadband Solar Absorber for Effective Photothermal Conversion and Electricity Generation[J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1354.
- [53] Liu W, Xu X, Yuan J, et al. Low-bandgap non-fullerene acceptors enabling high-performance organic solar cells[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(2): 598-608.
- [54] Jos̃ t M, Kõ hnen E, Al-Ashouri A, et al. Perovskite/CIGS tandem solar cells: from certified 24.2% toward 30% and beyond[J]. *ACS energy letters*, 2022, 7(4): 1298-1307.
- [55] Jia Z, Qin S, Meng L, et al. High performance tandem organic solar cells via a strongly infrared-absorbing narrow bandgap acceptor[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 178.
- [56] 朱树盛, 张翠苓, 方健海等. 光伏电池室内光能采集系统的研究进展与展望[J]. *新能源进展*, 2020, 8(06): 502-517.
- [57] 何韦, 陈飞, 李鸿祥等. 基于三氟苯甲酸自组装阳极界面层的高性能有机太阳能电池[J]. *高等学校化学学报*, 2023, 44(07): 103-109.
- [58] 马婷婷, 汪志鹏, 张梅等. 超长稳定的混合阳离子钙钛矿太阳能电池性能优化研究[J/OL]. *无机材料学报*: 1-13[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1363.TQ.20230705.1409.006.html>.
- [59] 羊美丽, 邹丽, 程佳杰等. PVDF添加剂提高CsPbBr₃钙钛矿太阳能电池性能[J/OL]. *物理学报*: 1-24[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1958.o4.20230619.1411.004.html>.
- [60] 谢嘉, 桑成松, 马勇等. 新能源供电多能互补发电系统设计[J]. *南京理工大学学报*, 2020, 44(04): 501-510. DOI:10.14177/j.cnki.32-1397n.2020.44.04.016.