

T/ZOIA

中关村光电产业协会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

电力传感器自供电技术规范 第2部分：技术要求

Energy harvesting technical specification for sensors using in electricity industry—
Part 2: General rules

(工作组讨论稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中关村光电产业协会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 通用术语	2
4 自供电电力传感器组成基本要求	2
4.1 概述	2
4.2 能量收集单元	2
4.3 传感单元	3
4.4 数据处理单元	3
4.5 通信单元	3
5 自供电电力传感器功能要求	3
5.1 自供电功能要求	3
5.2 数据采集和无线通信要求	3
5.3 工作模式要求	3
5.4 远程配置要求	3
5.5 备用电源要求	3
6 自供电电力传感器性能要求	4
6.1 工作环境	4
6.2 自供电性能通用要求	4
6.3 电磁兼容性能	5
6.4 气候防护性能	5
6.5 防护等级要求	6
6.6 使用寿命要求	6
6.7 机械性能要求	6
6.8 备用电源性能要求	6
7 技术参数标注要求	6
7.1 磁场取能自供电传感器	6
7.2 电场取能自供电传感器	7
7.3 振动取能自供电传感器	7
7.4 温差取能自供电传感器	8
7.5 光照取能自供电传感器	8
7.6 风取能自供电传感器	8
7.7 射频取能自供电传感器	9
7.8 多源取能自供电传感器	10
8 自供电电力传感器通信接口规范	10
8.1 通则	10
8.2 ZigBee	10

8.3 LoRa	10
8.4 蓝牙	10
8.5 无线局域网	10
8.6 RFID	10
8.7 无线 HART	10
8.8 WIA-PA	10
8.9 ISA100	10
9 自供电电力传感器可靠性设计方法	10
9.1 概述	10
9.2 供电可靠性设计	11
9.3 硬件可靠性设计	12
9.4 软件可靠性设计	12
9.5 通信可靠性设计	12
10 试验一般准则与要求	12
10.1 概述	12
10.2 试验方法标准化	12
10.3 影响因素	12
10.4 试验方法的文件化	13
10.5 试验结果的处理	13
10.6 试验结果受其他试验的影响性	13
11 通用试验程序和注意事项	13
11.1 试验机构	13
11.2 试验准备工作	13
11.3 测量系统及参比测量设备的选择	13
11.4 环境能量激励的质量	13
11.5 试验顺序	13
11.6 每一组测量的中断和持续时间	13
11.7 试验期间的异常情况和故障	14
11.8 试验的重新开始	14
11.9 计量符号和单位	14
11.10 试验报告和试验文件	14
参 考 文 献	15

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2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，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，鞠登峰，黄辉，郭经红，崔力民，王鑫，陈华宁，肖子洋，杜君，方东明，苏澜，牟笑静，贺学锋，王路，陈亚伟，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2部分：技术要求

1 范围

本文件规定了自供电电力传感器组成基本要求、功能要求、性能要求、技术参数标注要求、通信接口规范、可靠性设计方法、试验一般准则与要求、通用试验程序和注意事项。

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 33905.1—2017 智能传感器 第1部分：总则
- GB T 7665-2005 传感器通用术语
- GB-T8897.1-2013 原电池第1部分：总则
- GB/T 8897.2-2013 原电池 第2部分：外形尺寸和电性能要求
- GB/T 17626.2-2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3-2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 2423.1-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.4-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Db：交变湿热(12h+12h循环)
- GB/T 2423.6-1995 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Eb和导则：碰撞
- GB/T 10125-2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
- GB-T 16422.3-2014 塑料 实验室光源暴露试验方法 第3部分 荧光紫外灯
- GB-T 16422.2-2014 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分氙弧灯
- GB/T 2423.24-2022 环境试验 第2部分：试验方法 试验S：模拟地面上的太阳辐射及太阳辐射试验和气候老化试验导则
- GB/T 3512-2014 硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验
- GB/T 6587-2012 电子测量仪器通用规范
- GB/T 156-2007 标准电压
- GB/T 4208-2017 外壳防护等级(IP代码)
- QJ/T 815.2-1994 产品公路运输加速模拟试验方法
- GB/T 34071—2017 物联网总体技术 智能传感器可靠性设计方法与评审
- GB/T 29768-2013 信息技术 射频识别 800/900MHz空中接口协议
- GB/T 29910.3-2013 工业通信网络现场总线规范 类型20：HART规范 第3部分：应用层服务定义
- GB/T 29910.4-2013 工业通信网络 现场总线规范 类型20：HART规范 第4部分：应用层协议规范
- GB/T 29910.5-2013 工业通信网络 现场总线规范 类型20：HART规范 第5部分：WirelessHART 无线网络及通信行规
- GB/T 29910.6-2013_工业通信网络 现场总线规范类型20：HART规范 第6部分：应用层附加服务定义和协议规范
- GB/T 26790.1-2011 工业无线网络WIA规范 第1部分：用于过程自动化的WIA系统结构与通信规范
- GB/T 26790.2-2015工业无线网络WIA规范 第2部分：用于工厂自动化的WIA系统结构与通信规范
- GB/T 26790.3-2015 工业无线网络WIA规范 第3部分：WIA-PA协议一致性测试规范
- GB_T 26790.4-2020 工业无线网络WIA规范 第4部分：WIA-FA协议一致性测试规范

IEC 62734-2014 工业网络. 无线通信网络和通信协议. ISA 100.11a[Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - ISA 100.11a]

IEEE 802.11 国际电机电子工程学会信息技术标准 局域网和城域网通信和信息交换 技术规范 第11部分: 无线局域网媒体访问控制和物理层规范[IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11:Wireless LAN Medium Access Control (MC) and Physical Layer(PHY) Specifications]

蓝牙核心规范 4.0 (Bluetooth Core Specification version 4.0)

ZigBee-2007 规范 (ZigBee-2007 Specification)

LoRaWAN 规范1.0 (LoRaWAN Specification 1R0)

ISO 31 (所有部分) 量和单位 (Quantities and units)

3 通用术语

下列术语和定义适用于本文件。

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

电力传感器自供电技术规范 第1部分: 术语 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4 自供电电力传感器组成基本要求

4.1 概述

自供电电力传感器一般由能量收集单元、传感单元、数据处理单元和通信单元构成,其模型见图1。

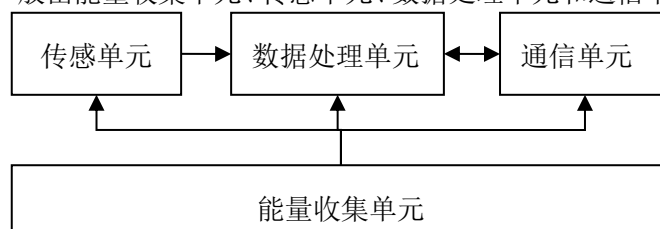


图1 自供电电力传感器模型

4.2 能量收集单元

能量收集单元是自供电电力传感器实现自供电的核心单元。它的主要功能是将环境能量转换为直流稳压电能,为传感器运行提供能量。

能量收集单元一般由能量转换前端、能量管理电路、储能单元构成,其模型见图2。

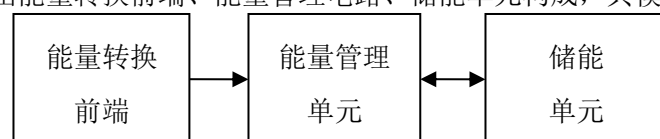


图2 能量收集单元模型

4.2.1 能量转换前端

能量转换前端的主要功能是将电、磁、振动、温差、风、光等环境能量转换为交流或直流电能,输出的电能特性受环境能量波动而波动。

4.2.2 能量管理单元

能量管理单元的主要功能是将能量转换前端输出的微弱不稳定电能进行电能变换和调度,形成稳压直流输出。

能量管理单元的调度功能主要负责根据传感单元、数据处理单元和通信单元用电需求,动态调整能量转换前端获取电能在储能单元与传感单元、数据处理单元、通信单元等用电单元间的流动。

除电能变换和调度等主要功能外，能量管理电路还应具备通过外委电阻电路进行电能调度参数配置的功能，可配置参数有：

- 储能单元过充保护阈值；
- 储能单元放电启动阈值；
- 储能单元放电截止阈值；
- 稳压输出电压。

4.2.3 储能单元

储能单元的主要功能是将环境能量转换的微弱电能进行储存并积累，以供能量管理电路进行电能调度。

储能单元类型可包括电容、可充电电池和原电池等中的一种或多种。其中，电容或可充电电池主要用于能量储存与积累，原电池主要作为后备电源使用。

4.3 传感单元

传感单元功能参照GB/T 33905.1-2017中4.3规定的内容执行。

4.4 数据处理单元

数据处理单元是自供电电力传感器进行采样处理与通信控制的核心，它的主要功能参照GB/T 33905.1-2017中4.2规定的内容执行。

除GB/T 33905.1-2017中4.2规定的内容外，自供电电力传感器的数据处理单元还应具备休眠与唤醒两种工作模式，且休眠时间可远程配置。

4.5 通信单元

自供电电力传感器通信单元的主要功能是将感知数据上传和接收远程配置命令。

5 自供电电力传感器功能要求

5.1 自供电功能要求

- a) 采用磁场、电场、振动、温差、光、风、射频等环境能量中的一种或几种作为传感器的主要工作电能来源；
- b) 在环境能量激励条件下，应可实现传感器定周期的采样和无线通信。

5.2 数据采集和无线通信要求

- a) 具备采集功能。按设定时间间隔自动采集待感知量的功能，并可通过无线通信将采集数据上传，感知量采集和通信间隔应可配置；
- b) 传感器启动后应在完成必要初始化工作后，率先完成数据采集及基于无线通信的数据发送，数据发送后应持续一定时间的数据接收。

5.3 工作模式要求

- a) 应具备工作模式和休眠模式两种状态，休眠或唤醒周期应可配置；
- b) 在环境能量激励处于某一范围内条件下应可维持定周期工作状态；
- c) 在环境能量激励处于某一较弱范围条件下应根据环境能量强度进行变周期工作。

5.4 远程配置要求

自供电电力传感器的数据采样及通信周期应可基于无线通信进行远程配置。

5.5 备用电源要求

- a) 含备用电源的自供电电力传感器，备用电源应采用不可充电的原电池，原电池技术要求参照GB/T 8897.1-2013、GB/T 8897.2-2013中技术要求；
- b) 含备用电源时，应可在不破坏自供电电力传感器结构的条件下，取出或切断备用电源。

6 自供电电力传感器性能要求

6.1 工作环境

6.1.1 环境条件

- a) 环境温度：-25℃~+45℃（普通型）或-40℃~+45℃（低温型）
- b) 相对湿度：5%RH~100%RH；
- c) 大气压力：550hPa~1060hPa。

6.1.2 工作温度

-40℃~+70℃（工业级）或-40℃~+125℃（扩展工业级）

6.2 自供电性能通用要求

6.2.1 冷启动性能

自供电电力传感器在冷启动状态下应可完成完整的采样处理通信工作流程。

6.2.1.1 磁场取能自供电传感器

磁场取能自供电传感器的冷启动电流或冷启动磁场强度应根据带电导线长期运行电流范围或磁场强度范围确定，应能保证长期连续供电的要求：

- a) 用于10kV/35kV场景的环型/开环型工频磁场取能自供电传感器冷启动电流宜不大于1A，用于110kV及以上电压等级场景的环型/开环型工频磁场取能自供电传感器冷启动电流宜不大于10A；
- b) 用于10kV及以上电压等级场景的平面型工频磁场取能自供电传感器冷启动工频磁场强度宜不大于100μT。

6.2.1.2 电场取能自供电传感器

电场取能自供电传感器应可在10kV、35kV、110kV、220kV、330kV、500k或1000kV某一个电压场景下实现冷启动。

6.2.1.3 振动取能自供电传感器

振动取能自供电传感器的冷启动振动加速度应根据应用场景的长期振动特性确定，应能保证长期连续供电的要求：

- a) 用于变压器等主设备场景的振动取能自供电传感器冷启动振动加速度宜不大于0.1g；
- b) 用于架空线路场景的振动取能自供电传感器冷启动振动加速度宜不大于1g。

6.2.1.4 温差取能自供电传感器

温差取能自供电传感器的冷启动温差应根据应用场景的长期温差特性确定，应能保证长期连续供电的要求，宜不大于5℃。

6.2.1.5 光照取能自供电传感器

光照取能自供电传感器的冷启动光照强度应根据应用场景的长期光照特性确定，应能保证长期连续供电的要求：

- a) 用于野外场景的太阳光光照取能自供电传感器冷启动光照强度宜不大于1000lux；
- b) 用于室内的照明光光照取能自供电传感器冷启动光照强度宜不大于200lux。

6.2.1.6 风取能自供电传感器

风取能自供电传感器的冷启动风速应根据应用场景的长期风速特性确定，应能保证长期连续供电的要求：

- a) 用于输电场景的风取能自供电传感器冷启动风速宜不大于3m/s；

b) 用于配电场景的风取能自供电传感器冷启动风速宜不大于1.5m/s。

6.2.1.7 射频取能自供电传感器

射频取能自供电传感器的冷启动射频强度应根据应用场景的长期射频特性确定，应能保证长期连续供电的要求：

- a) 对于含自建激励源的射频取能自供电传感器，冷启动射频强度宜不大于-15dbm；
- b) 对于基于公网射频激励的射频取能自供电传感器，冷启动射频强度宜不大于-80dbm。

6.2.2 稳态工作性能

- a) 应可实现定周期的数据采样与无线通信；
- b) 稳态工作的工作周期应可远程配置。

6.2.3 供电电压性能

自供电电力传感器的自供电单元应提供稳压直流供电，供电电压宜为3.3V、5V、12V或24V，供电纹波 $\leq \pm 25\text{mV}$ 。

6.2.4 供电电流性能

自供电电力传感器的自供电单元支持的峰值供电电流应不小于30mA。

6.3 电磁兼容性能

6.3.1 静电放电抗扰度

应能承受“GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验”中第5章规定的试验等级为4级的静电放电试验。在试验器件及试验后，自供电电力传感器能正常工作。

6.3.2 射频电磁场辐射抗扰度

应能承受“GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验”中第5章规定的试验等级为3级的辐射电磁场干扰试验。在试验期间及试验后，导线温度采集单元能正常工作。

6.4 气候防护性能

6.4.1 高温性能

应能承受GB/T 2423.2 试验Bb中严酷等级为：温度+70°C或温度+85°C、持续时间72h的高温试验。在试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作。

6.4.2 低温性能

应能承受GB/T 2423.1 试验Ab中严酷等级为：温度-25°C或-40°C或-55°C、持续时间72h的低温试验。在试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作。

6.4.3 交变湿热性能

应能承受GB/T 2423.4中高温温度为+55°C，试验周期48h，循环次数2此的试验要求。在试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作。

6.4.4 盐雾腐蚀性能

应能承受GB/T 10125中温度为35°C \pm 2°C、溶液Ph=3.1~3.3、试验周期72h的乙酸盐雾试验，或者温度为50°C \pm 2°C，溶液Ph=3.1~3.3，氯化铜溶液浓度：0.26g/L \pm 0.02g/L，试验周期24h的铜加速乙酸盐雾试验。在试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作。

6.4.5 结构材料性能

应满足 GB/T 16422.3、GB/T 16422.2、GB/T 2423.24、GB/T 3512 中规定的荧光紫外老化、氙灯老化、热老化试验要求。

6.5 防护等级要求

对于工业级应用的自供电电力传感器，应满足GB 4208中规定的IP67等级要求。

6.6 使用寿命要求

自供电电力传感器在规定环境能量激励上限条件下连续运行168h后，自供电性能衰减应不大于2%。

6.7 机械性能要求

6.7.1 碰撞性能

在非工作状态下，非包装状态的自供电电力传感器应能承受GB/T2423.6中规定的如下试验等级的碰撞：

- a) 脉冲持续时间：16ms；
- b) 每方向的碰撞次数：1000次；
- c) 峰值加速度：9.8m/s²

6.7.2 包装运输性能

- a) 包装后的自供电电力传感器应能承受GB/T 6587-2012中规定的等级为2级的自由跌落和翻滚。
- b) 包装后的自供电电力传感器应能承受QJ/T 815.2中规定的等级为四级公路低级路面、连续2h的运输。

6.8 备用电源性能要求

对于含备用电源的自供电电力传感器，应满足如下要求：

- a) 备用电源30d的荷电保持能力不应低于99.5%；
- b) 对于工业级应用的自供电电力传感器备用电源55℃±5℃高温环境下持续供电时间应不低于25℃±5℃常温环境下供电时间的90%；
- c) 对于工业级应用的自供电电力传感器备用电源-40℃±5℃低温环境下持续供电时间应不低于25℃±5℃常温环境下供电时间的60%。

7 技术参数标注要求

自供电电力传感器应根据其具体自供电类型进行自供电技术参数标注。

7.1 磁场取能自供电传感器

7.1.1 结构形态

应标注磁场取能自供电传感器的主体结构为环型、开环型或平面型。

7.1.2 结构参数

- a) 环型磁场取能自供电传感器应标注环型内径直径，以及外部边缘结构长宽高详细尺寸；
- b) 开环型磁场取能应标注开环紧固方式、紧固件尺寸、内径直径范围、以及外部边缘结构长宽高详细尺寸；
- c) 平面型磁场取能自供电传感器应标注边缘结构长宽高详细尺寸。

7.1.3 冷启动磁场激励条件

- a) 环形/开环型磁场取能自供电传感器应标注冷启动所需导体电流及电流频率，以及冷启动时间；
- b) 平面型磁场取能自供电传感器应标注冷启动所需磁场强度及磁场频率，以及冷启动时间。

7.1.4 冷启动条件下工作周期

应标注磁场取能自供电传感器在冷启动磁场激励条件下的工作周期。

7.1.5 定周期工作环境磁场激励条件

- a) 应标注环形/开环型磁场取能自供电传感器可按设置参数定周期工作所需的导体电流激励范围，含电流激励下限与上限；
- b) 应标注平面型磁场取能自供电传感器可按设置参数定周期工作所需的环境磁场激励范围，含磁场激励下限与上限。

7.1.6 定周期模式工作周期范围

应标注磁场取能自供电传感器在定周期工作磁场激励下限条件下，可设置的定周期工作参数范围。

7.1.7 耐冲击磁场强度

应根据7.1.3中规定的工作电流或磁场频率，标注耐冲击的电流或磁场强度。

7.2 电场取能自供电传感器

7.2.1 结构形态

应根据与高压带电导体的连接方式，标注电场取能自供电传感器为环型、开环型或平面型。

7.2.2 结构参数

- a) 环型电场取能自供电传感器应标注环型内径直径，以及外部边缘结构长宽高详细尺寸；
- b) 开环型电场取能应标注开环紧固方式、紧固件尺寸、内径直径范围、以及外部边缘结构长宽高详细尺寸；
- c) 平面型电场取能自供电传感器应标注边缘结构长宽高详细尺寸。

7.2.3 工作电压等级

应根据GB/T 156-2007中对于设备标称电压的规定，标注电场取能自供电传感器适应的工作电压等级，以及冷启动时间。

7.2.4 定周期模式工作周期范围

应根据7.2.3中规定的工作电压等级，分别标注电场取能自供电传感器定周期模式可配置的工作周期范围。

7.2.5 耐冲击电压

应标注电场取能自供电传感器耐冲击的最高电压等级，耐冲击电压应满足GB/T 156-2007中对于设备标称电压对应的设备最高电压规定。

7.3 振动取能自供电传感器

7.3.1 结构参数

应提供振动取能自供电传感器的结构图，并标注结构边缘的最大投影长、宽、高尺寸。

7.3.2 振动取能频率范围

应标注振动取能自供电传感器工作所需的环境振动频率范围。

7.3.3 冷启动振动激励条件

应分别标注7.3.2中振动取能频率范围下限与上限条件下，振动取能自供电传感器冷启动所需的最小振动加速度和冷启动时间。

7.3.4 冷启动条件下工作周期

应分别标注7.3.3中振动取能频率范围下限与上限冷启动条件下，振动取能自供电传感器工作周期。

7.3.5 定周期工作环境振动激励条件

应分别标注7.3.2中振动取能频率范围下限与上限条件下，振动取能自供电传感器定周期工作所需振动激励加速度范围。

7.3.6 定周期模式工作周期范围

应分别标注7.3.2中振动取能频率范围下限与上限的定周期工作振动激励下限条件下，振动取能自供电传感器工作周期可配置范围。

7.3.7 耐冲击振动激励

应分别标注振动取能自供电传感器耐冲击的振动频率和振动加速度。

7.4 温差取能自供电传感器

7.4.1 结构参数

应提供温差取能自供电传感器的结构图，并标注结构边缘的最大投影长、宽、高尺寸。

7.4.2 冷启动温差激励条件

应以冷端温度为25℃，标注温差取能自供电传感器冷启动的温差值。

7.4.3 冷启动条件下工作周期

应标注温差取能自供电传感器冷启动条件下的工作周期。

7.4.4 定周期工作温差激励条件

应以冷端温度为25℃，标注温差取能自供电传感器定周期工作所需温差激励范围。

7.4.5 定周期模式工作周期范围

应标注7.4.4中定周期工作温差激励下限条件下，温差取能自供电传感器定周期工作模式可配置的周期范围。

7.5 光照取能自供电传感器

7.5.1 结构参数

应提供光照取能自供电传感器的结构图，并标注结构边缘的最大投影长、宽、高尺寸。

7.5.2 取能光照类型

应标注光照取能自供电传感器的取能光照类型为太阳光、照明光等类型。

7.5.3 冷启动光照激励条件

应标注光照取能自供电传感器冷启动所需光照强度。

7.5.4 冷启动条件下工作周期

应标注光照取能自供电传感器冷启动条件下的工作周期。

7.5.5 定周期工作环境光照激励条件

应标注光照取能自供电传感器定周期工作所需光照强度范围。

7.5.6 定周期模式工作周期范围

应标注7.5.5中规定光照强度下限下，光照取能自供电传感器定周期模式工作可配置的周期范围。

7.6 风取能自供电传感器

7.6.1 结构形态

应标注风取能自供电传感器的结构形态为风致转动型或风致振动型。

7.6.2 结构参数

应提供风取能自供电传感器的结构图，并标注结构边缘的最大投影长、宽、高尺寸。

7.6.3 取能风向范围

应标注风取能自供电传感器的取能风向为定向、全向或某一方向角。

- a) 对于定向或某一方向角风取能自供电传感器应在传感器本体显著位置标注取能风向。
- b) 对于全向或某一方向角风取能自供电传感器应在传感器本体显著位置标注输出功率最小和最大的方向。

7.6.4 冷启动风能激励条件

- a) 对于定向风取能自供电传感器，应标注冷启动所需风速条件；
- b) 对于全向或某一方向角风取能自供电传感器，应标注输出功率最小风向下的冷启动风能激励条件。

7.6.5 冷启动条件下工作周期

应标注风取能自供电传感器在冷启动条件下的工作周期。

7.6.6 定周期工作环境风能激励条件

应标注风取能自供电传感器定周期工作所需风速激励范围，其中对于全向或某一方向角风取能自供电传感器，风速激励下限应为输出功率最小风向定周期工作所需最小风速，风速激励上限应为输出功率最大风向定周期工作所需最大风速。

7.6.7 定周期模式工作周期范围

应标注7.6.6中规定定周期工作所需最小风速下，风取能自供电传感器定周期模式可配置的工作周期范围。

7.6.8 耐冲击风能强度

应标注风取能自供电传感器耐冲击的最大风速。

7.7 射频取能自供电传感器

7.7.1 结构形态

应标注射频取能自供电传感器的结构形态为取能天线独立式或取能天线集成式。

7.7.2 结构参数

- a) 对于取能天线独立式的射频取能自供电传感器应分别标注取能电线和传感器本体的结构边缘最大投影长、宽、高尺寸；
- b) 对于取能天线集成式的射频取能自供电传感器应标注整体的结构边缘最大投影长、宽、高尺寸。

7.7.3 取能射频频点

应标注射频取能自供电传感器的取能频点。

7.7.4 冷启动射频激励条件

应根据7.7.3中规定的取能频点，分别标注冷启动所需射频强度。

7.7.5 冷启动条件下工作周期

应根据7.7.3中规定的取能频点，分别标注冷启动条件下的工作周期。

7.7.6 定周期工作环境射频激励条件

应根据7.7.3中规定的取能频点，分别标注射频取能自供电传感器定周期工作所需的环境射频激励范围。

7.7.7 定周期模式工作周期范围

应标注7.7.6中规定的定周期工作环境射频激励下限条件下，射频取能自供电传感器定周期模式可配置的工作周期范围。

7.8 多源取能自供电传感器

7.8.1 结构参数

应标注多源取能自供电传感器整体结构边缘的最大投影长、宽、高尺寸

7.8.2 取能能量源类型

应标注多源取能自供电传感器的取能能量源类型。

7.8.3 取能性能

应根据7.8.2中规定能量源类型，分别参照7.1、7.2、7.3、7.4、7.5、7.6、7.7中要求，标注多源取能自供电传感器取能性能。

8 自供电电力传感器通信接口规范

8.1 通则

自供电电力传感器宜采用且不限于以下无线通信接口

8.2 ZigBee

支持ZigBee接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合ZigBee-2007规范的要求

8.3 LoRa

支持LoRa接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合LoRaWAN 规范1.0或其后续版本的要求。

8.4 蓝牙

支持蓝牙接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合蓝牙核心规范4.0或其后续版本的要求

8.5 无线局域网

支持无线局域网（WLAN）接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合IEEE802.11的要求。

8.6 RFID

支持RFID接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合GB/T 29768的要求。

8.7 无线 HART

支持无线HART接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合GB/T 29910.3-GB/T 29910.6的要求。

8.8 WIA-PA

支持WIA-PA接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合GB/T 26790（所有部分）的要求。

8.9 ISA100

支持ISA100接口的自供电电力传感器，其技术规范应符合IEC 62734的要求。

9 自供电电力传感器可靠性设计方法

9.1 概述

自供电电力传感器由硬件和软件构成，完成的自供电电力传感器可靠性设计包括供电可靠性设计、硬件可靠性设计、软件可靠性设计和通信可靠性设计。

9.2 供电可靠性设计

自供电电力传感器的供电可靠性设计主要指能量收集单元的供电可靠性设计

9.2.1 可靠性设计要求

9.2.1.1 自供电电力传感器在研制任务书中应明确规定供电可靠性的定性和定量要求。

9.2.1.2 供电可靠性设计的定性要求包括响应的环境能量类型、响应环境能量的方向性、有无备用电源、EMC设计、测试性设计等

9.2.1.3 供电可靠性设计的定量要求包括冷启动所需环境能量激励条件 E_{cs} 、定周期运行所需环境能量激励范围 E_{range} 、定周期运行所需环境能量激励范围下限条件下供电能力恢复时间 T_{re} 、定周期运行支持的最小监测周期 t_{min} 、环境能量中断后储能单元恢复初始状态所需时间 T_c 、环境能量中断后持续运行时间 T_{back} 等。

9.2.1.4 供电可靠性设计是自供电电力传感器设计的一部分，应与自供电电力传感器设计同时进行。

9.2.2 可靠性各阶段设计要求

9.2.2.1 方案论证阶段

9.2.2.1.1 方案设计阶段的可靠性设计要求包括

- 应明确自供电电力传感器响应的环境能量类型、响应环境能量的方向性、有无备用电源等。
- 应明确自供电电力传感器的供电可靠性设计指标，如 E_{cs} 、 E_{range} 、 T_{re} 、 t_{min} 、 T_c 、 T_{back} 等。
- 应明确在自供电电力传感器设计中采用的供电可靠性技术措施，包括供电可靠性建模和仿真，热设计，EMC设计，安全性设计，测试性设计，故障模式影响分析，元器件和电路的容差分析等。可以根据实际需求选择其中的几种。
- 应明确自供电电力传感器使用环境，说明其工作温度、电磁干扰、防潮、防震、储存及运输等环境条件的要求。
- 制定自供电电力传感器能量收集单元研制计划、试验计划和费用分析等。

9.2.2.1.2 方案设计阶段形成的文件资料包括

- 自供电电力传感器供电总体设计技术方案；
- 自供电电力传感器供电可靠性设计可行性分析报告。

9.2.2.2 技术设计阶段

9.2.2.2.1 技术设计阶段的供电可靠性设计要求包括：

- 建立自供电电力传感器能量收集单元设计的能量转换前端3D模型、能量管理电路模型和能量流数学模型；
- 完成自供电电力传感器的供电可靠性分配，将供电可靠性指标值逐层分解；
- 初步完成自供电电力传感器的供电可靠性设计，可采用有限元仿真法和数值算法；
- 完成关键件的失效判据、失效模式和效应分析，确立薄弱环节。

9.2.2.2.2 技术设计阶段应提交的技术文件资料包括：

- 可靠性分配方案；
- 供电可靠性仿真和数据计算报告；
- 初步供电可靠性预计报告；
- 供电关键件可靠新分析报告。

9.2.2.3 详细设计阶段

9.2.2.3.1 详细设计阶段的可靠性设计要求包括：

- a) 在自供电电力传感器的供电可靠性设计中可采用冗余设计、热设计、环境防护设计、抗冲击、振动设计等；
- b) 自供电电力传感器能量收集单元中能量管理电路的可靠性设计可采用简化方案，合理的元器件使用，热设计，容差与漂移设计，电气互连的可靠性设计，电磁兼容设计等；
- c) 元器件级的供电可靠性设计应关注器件的选择与使用，可采用降额设计；
- d) 应完成自供电电力传感器的供电可靠性预计；
- e) 应完成自供电电力传感器的失效模式、影响和危害度分析。

9.2.2.3.2 详细设计阶段的应提交技术文件资料包括：

- a) 自供电电力传感器能量收集单元设计说明；
- b) 自供电电力传感器供电可靠性预计报告；
- c) 自供电电力传感器供电失效模式、影响和危害度分析报告。

9.2.2.4 试生产阶段

9.2.2.4.1 试生产阶段的供电可靠性设计要求包括：

- a) 应编制自供电电力传感器能量收集单元关键件明细表，规定重点零部件规格和参数；
- b) 对选用的原材料、元器件、外协件的质量控制；
- c) 解决影响产品供电可靠性的所有薄弱环节；
- d) 批试的自供电电力传感器能量收集单元应经过各种环境试验、可靠性试验和工业现场使用的评定。

9.2.2.4.2 试生产阶段应提交的技术文件资料包括：

- a) 试生产暴露的问题和解决的措施；
- b) 环境试验、可靠性试验的试验记录和试验报告；
- c) 工业用户现场使用工作报告、失效分析和失效记录；
- d) 使用说明书。

9.3 硬件可靠性设计

参照GB/T 34071-2017中4.2内容规定执行。

9.4 软件可靠性设计

参照GB/T 34071-2017中4.3内容规定执行。

9.5 通信可靠性设计

参照GB/T 34071-2017中4.4内容规定执行。

10 试验一般准则与要求

10.1 概述

自供电电力传感器性能试验的理想测试环境应为真实应用环境，然而真实环境下评定自供电电力传感器的各项性能指标难以操作。为此，本部分规定了一种标准试验程序，以便在实验室条件下对自供电电力传感器的应用性能进行测试与评估。

10.2 试验方法的标准化

试验开始之前首先应确定试验方法，试验方法应与标准试验方法一致，或在标准试验方法基础上进行细化。

10.3 影响因素

试验期间，应检查除模拟的特定环境能量激励条件外所有可能影响自供电电力传感器性能的环境能量特性，并尽可能使其保持在较低能量等级且保持不变。

10.4 试验方法的文件化

试验报告应指标试验依据的标准，并说明在标准基础上细化的内容及原因。

10.5 试验结果的处理

由于每一项试验的重复次数有限，故不能按统计学方法来处理结果，而应以多次试验所得的最差指标作为试验结果（排除应误操作等引起的错误值）。

10.6 试验结果受其他试验的影响性

试验结果应不受先前试验的影响。

11 通用试验程序和注意事项

11.1 试验机构

承担试验的检验机构应在GB/T 33905.1-2017中10.1规定基础上，根据待测自供电电力传感器类型，试验机构应具备电场、磁场、振动、温差、光和风等一种或多种环境能量的模拟能力。

11.2 试验准备工作

试验人员应在GB/T 33905.1-2017中10.2规定基础上，明确自供电电力传感器对环境能量激励的响应类型、响应方向以及响应范围。

11.3 测量系统及参比测量设备的选择

11.3.1 准则

测量系统及参比测量设备应在GB/T 33905.1-2017中10.3.1基础上，增加环境能量模拟系统和环境能量激励强度特性测量仪表，环境能量模拟系统和环境能量激励强度特性测量仪表应通过国家质量技术监督部门检定或校准。

11.3.2 测量系统及参比测量设备的不确定度

环境能量模拟系统的最大允许误差应小于自供电电力传感器响应环境能量激励范围下限的10%。

参比测量设备的最大允许误差应小于自供电电力传感器响应环境能量激励范围下限的1%。

环境能量模拟系统的总不确定度应不超过5%。

参比测量设备的总不确定度应不超过2%。

环境能量模拟系统及参比测量设备的总不确定度应根据有关标准进行计算并应列入每一份最终试验报告内。

11.3.3 溯源性

应在GB/T 33905.1-2017中10.3.3基础上，增加定期对环境能量模拟系统进行检定和校准。

11.4 环境能量激励的质量

环境能量激励应不包含任何可能会显著影响试验结果的无关能量激励。

在不能消除无关能量激励的情况下，应设法将其影响减少到最低程度，且无关能量激励强度不得高于试验环境能量激励的5%。

11.5 试验顺序

应设计好试验的顺序，率先开展自供电电力传感器环境能量中断后储能单元恢复初始状态所需时间，之后开展环境能量激励较小的试验项目，最后开展环境能量激励较大或具有破坏性的试验项目。

如果出现意外情况，应与供货方和用户协商后，重新送样并重新开展试验。

11.6 每一组测量的中断和持续时间

为避免因自供电电力传感器内部能量缓存器件等未恢复至初始状态而引起的测量误差，每一组测量后，应等待自供电电力传感器环境能量中断后储能单元恢复初始状态所需时间，再进行开展下一组测试。

11.7 试验期间的异常情况和故障

参照GB/T 33905.1-2017中10.7执行。

11.8 试验的重新开始

参照GB/T 33905.1-2017中10.8执行。

11.9 计量符号和单位

与试验有关的一切数据应以ISO 31 中的国际单位制（SI）计量符号和单位表示。

11.10 试验报告和试验文件

试验结束后，应编写完整的试验报告，报告应覆盖自供电性能指标。

试验报告颁发后，试验检验机构应保存试验器件所有有关测量的原始文件至少3年。

参 考 文 献

- [1] IEC 62830-1:2017 半导体器件 用于能量采集和发电的半导体器件 第1部分: 基于振动的压电能量采集.
- [2] IEC 62830-2:2017 半导体器件. 收集和产生能量的半导体器件. 第2部分: 基于热能的热电能量收集.
- [3] IEC 62830-3:2017 半导体器件. 收集和产生能量的半导体器件. 第3部分: 基于振动的电磁能量收集.
- [4] IEC 62830-4:2021 半导体器件. 能量收集和产生用半导体器件. 第4部分: 柔性压电能量收集器件的试验和评估方法.
- [5] IEC 62830-5:2021 半导体器件. 能量收集和产生用半导体器件. 第5部分: 测量柔性热电器件产生功率的试验方法.
- [6] IEC 62830-6:2019 半导体器件. 能量收集和产生用半导体器件. 第6部分: 垂直接触式摩擦电能收集器件的试验和评定方法.
- [7] IEC 62830-7:2021 半导体器件. 能量收集和产生用半导体器件. 第7部分: 线性滑动模式摩擦电能收集.
- [8] IEC 62830-8:2021 半导体器件 用于能量收集和发电的半导体器件 第8部分: 用于低功率电子设备的柔性和可拉伸超级电容器的测试和评估方法.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Q/GDW 1242-2015 输电线路状态监测装置通用技术规范.
- [12] Q/GDW 1535-2015 变电设备在线监测装置通用技术规范.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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>.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Mösch M, Fischerauer G, Hoffmann D. A self-adaptive and self-sufficient energy harvesting system[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2519.
- [38] 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>.
- [39] 高凯, 彭晗, 王劭菁等. 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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)..

- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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>.
- [51] 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.
- [52] 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器性能的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(05): 947-953.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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>.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Ranga R, Kalra Y, Kishor K. Petal shaped nanoantenna for solar energy harvesting[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(3): 035001.

- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] Jos̃t M, Kõhnen 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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>.
- [71] 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>.
- [72] 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.