

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3部分：测试规范

Energy harvesting technical specification for sensors using in electricity industry—
Part 3: Test specification

(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	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 通用术语	1
4 通用试验	1
4.1 试验条件	1
4.2 结构和外观检查	2
4.3 质量和尺寸检查	2
4.4 防护等级试验	2
4.5 基本功能试验	2
4.6 连续运行试验	3
4.7 自供电性能老化试验	3
4.8 环境试验	3
4.9 电磁兼容试验	5
4.10 机械性能试验	5
4.11 备用电源性能试验	6
5 专用试验	7
5.1 磁场取能自供电传感器试验	7
5.2 电场取能自供电传感器试验	8
5.3 振动取能自供电传感器试验	9
5.4 温差取能自供电传感器试验	10
5.5 光照取能自供电传感器试验	11
5.6 风取能自供电传感器	12
5.7 射频取能自供电传感器试验	14
5.8 多源取能自供电传感器试验	15
参 考 文 献	16

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3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，黄辉，鞠登峰，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3部分：测试规范

1 范围

本文件规定了电力传感器自供电特性的通用试验和专用试验测试方法。

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/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

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 通用试验

4.1 试验条件

除另有规定外，各项试验宜在如下正常试验大气条件下进行：

- a) 环境温度： $+15^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $25\%\text{RH}\sim 75\%\text{RH}$ ；
- c) 大气压力： $860\text{hPa}\sim 1060\text{hPa}$ 。

4.2 结构和外观检查

4.2.1 检查方法

目测和手感

4.2.2 判定准则

自供电电力传感器除满足《自供电电力传感器 第2部分：技术要求》等相关技术规范要求外，还应满足以下技术要求。

- a) 外观应完好、整洁、无损伤；
- b) 各零部件应无松动，无机械损伤；
- c) 应具有标识，铭牌、文字及符号应简明清晰、正确，应用型号、名称、出厂编号、出厂日期、制造厂名等标记；

4.3 质量和尺寸检查

4.3.1 检查方法

采用计量器具对自供电电力传感器的质量和结构尺寸进行测量，计量器应满足计量要求。

4.3.2 判定准则

自供电电力传感器的质量和尺寸应与产品说明书相一致，质量误差不超过 $\pm 50\text{g}$ ，尺寸误差不超过 $\pm 2\text{mm}$ 。

4.4 防护等级试验

4.4.1 试验方法

按GB 4208中规定的试验要求和方法进行防尘、防水试验。

4.4.2 判定准则

自供电电力传感器的防护等级，应达到GB 4208中规定的IP67等级。

4.5 基本功能试验

4.5.1 试验方法

按照自供电电力传感器产品使用说明要求，完成自供电电力传感器在试验环境中的部署安装，逐项检测自供电电力传感器各项功能。

4.5.2 判定准则

4.5.2.1 自供电

自供电电力传感器的自供电功能应满足以下要求：

- a) 应在某一种或几种环境能量激励条件下可实现传感器上电工作；
- b) 应在某种环境能量激励强度下可实现传感器定周期工作。

4.5.2.2 数据采集

自供电电力传感器数据采集功能应满足以下要求：

- a) 应采用定周期采集方式；
- b) 工作流程应为先采集后休眠；
- c) 数据采集周期应可配置。

4.5.2.3 数据通信

自供电电力传感器数据通信功能应满足以下要求：

- a) 应具备上下行双向通信能力；
- b) 通信周期应与数据采集周期同步；

- c) 工作流程应为数据采集-发送数据-接收数据，逐项进行。

4.6 连续运行试验

4.6.1 试验方法

按照自供电电力传感器产品使用说明要求，完成自供电电力传感器在试验环境中的部署安装，在下列条件下分别进行168小时连续环境能量激励试验（常温）：

- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，统计试验期间数据缺失率，以及连续数据丢失最大数量；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最大环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，统计试验期间数据缺失率，以及连续数据丢失最大数量；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的冷启动所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，统计试验期间数据平均间隔，以及相邻数据最大间隔。

4.6.2 判定准则

试验期间，监测装置各项功能正常，还需满足以下条件：

- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度时，试验期间数据丢失率应不大于10%，连续数据丢失最大数量应不大于2；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最大环境激励强度时，试验期间数据丢失率应不大于10%，连续数据丢失最大数量应不大于2；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的冷启动所需最小环境激励强度时，试验期间数据平均间隔应不大于自供电电力传感器说明书中标注的定周期支持最小监测周期的3倍，相邻数据最大间隔应不大于自供电电力传感器说明书中标注的定周期支持最小监测周期的5倍。

4.7 自供电性能老化试验

4.7.1 试验方法

按照自供电电力传感器产品使用说明要求，完成自供电电力传感器在试验环境中的部署安装，依次按照如下步骤开展试验（常温）：

- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，连续运行168h，统计试验期间数据缺失率 η_1 ，以及连续数据丢失最大数量 N_1 ；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最大环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，连续运行168h；
- 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，启动环境能量激励后，连续运行168h，统计试验期间数据缺失率 η_2 ，以及连续数据丢失最大数量 N_2 。

4.7.2 判定准则

试验后， $|\eta_2 - \eta_1| / \eta_1$ 应不大于2%， $|N_2 - N_1| / N_1$ 应不大于2%。

4.8 环境试验

4.8.1 高温试验

4.8.1.1 试验方法

在保障自供电电力传感器有效密封和功能完整的情况下，按照GB/T 2432.2中规定的试验方法要求，在下述条件下进行试验：

- a) I级：试验温度：+70℃，持续时间72小时；
- b) II级、III级：试验温度：+85℃，持续时间72小时；
- c) 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，统计试验期间数据缺失率，以及连续数据丢失最大数量。

4.8.1.2 判定准则

试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作，外观应整洁，无损伤和变形，还需满足以下条件：

- a) 试验期间数据丢失率应不大于10%，连续数据丢失最大数量应不大于2；
- b) 试验期间数据丢失率和连续数据丢失最大数量与4.6.1中a项测试结果偏差应不大于5%。

4.8.2 低温试验

4.8.2.1 试验方法

在保障自供电电力传感器有效密封和功能完整的情况下，按照GB/T 2423.1中规定的试验方法要求，在下述条件下进行试验：

- a) I级：试验温度：-25℃，持续时间72小时；
- b) II级：试验温度：-40℃，持续时间72小时；
- c) III级：试验温度：-55℃，持续时间72小时；
- d) 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，统计试验期间数据缺失率，以及连续数据丢失最大数量。

4.8.2.2 判定准则

试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作，外观应整洁，无损伤和变形，还需满足以下条件：

- a) 试验期间数据丢失率应不大于10%，连续数据丢失最大数量应不大于2；
- b) 试验期间数据丢失率和连续数据丢失最大数量与4.6.1中a项测试结果偏差应不大于5%。

4.8.3 交变湿热试验

4.8.3.1 试验方法

在保障自供电电力传感器有效密封和功能完整的情况下，按照GB/T 2423.4中规定的试验方法要求，在下述条件下进行试验：

- a) 试验温度：55℃；
- b) 连续试验时间48小时，循环次数：2次；
- c) 相对湿度：稳定期间应不小于95%；
- d) 配置环境能量激励为自供电电力传感器说明书中标注的定周期所需最小环境激励强度，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期，统计试验期间数据缺失率，以及连续数据丢失最大数量。

4.8.3.2 判定准则

试验期间及试验后，自供电电力传感器能正常工作，外观应整洁，无损伤和变形，还需满足以下条件：

- a) 试验期间数据丢失率应不大于10%，连续数据丢失最大数量应不大于2；
- b) 试验期间数据丢失率和连续数据丢失最大数量与4.6.1中a项测试结果偏差应不大于5%。

4.8.4 盐雾腐蚀试验

4.8.4.1 试验方法

按照GB/T 10125中规定的试验方法，对自供电电力传感器进行盐雾腐蚀试验，试验方法选择如下两种之一：

乙酸盐雾试验：试验箱内温度为 $35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，溶液 $\text{Ph}=3.1\sim 3.3$ ，保持72h；

铜加速乙酸盐雾试验：试验箱内温度为 $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，溶液 $\text{Ph}=3.1\sim 3.3$ ，氯化铜溶液浓度： $0.26\text{g/L}\pm 0.02\text{g/L}$ ，保持24h。

4.8.4.2 判定准则

自供电电力传感器表面应无腐蚀产物，以及点蚀、裂纹、气泡等腐蚀缺陷。

4.8.5 结构材料老化试验

4.8.5.1 试验方法

含塑料类材料或橡胶类材料部件的自供电电力传感器，应开展如下试验：

- a) 荧光紫外老化：按GB/T 16422.3中规定的试验方法要求，暴露总时间：168h；
- b) 氙灯老化：按GB/T 16422.2中规定的试验方法要求，暴露总时间：168h；
- c) 热老化：按GB/T 3512中规定的试验方法要求进行试验，暴露总时间：168h。

4.8.5.2 判定准则

试验后，自供电电力传感器相关部件表面不应出现发黏、变色、裂纹、龟裂、气泡、麻点、粉化或分离等现象。

4.9 电磁兼容试验

4.9.1 静电放电抗扰度试验

4.9.1.1 试验方法

自供电电力传感器处于正常工作状态，按照GB/T 17626.2中规定的试验方法，试验等级为4级，进行试验。

4.9.1.2 判定准则

试验期间及试验后，自供电电力传感器的功能和性能正常。

4.9.2 射频电磁场辐射抗扰度试验

4.9.2.1 试验方法

自供电电力传感器处于正常工作状态，按照GB/T 17626.3中规定的试验方法，试验等级为3级，进行试验。

4.9.2.2 判定准则

试验期间及试验后，自供电电力传感器的功能和性能正常。

4.10 机械性能试验

4.10.1 碰撞试验

4.10.1.1 试验方法

自供电电力传感器不包装、不通环境能量激励，固定在碰撞试验台中央，按GB/T 2423.6中规定的试验方法，在下述条件下进行试验：

- 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： 98m/s^2 。

4.10.1.2 判定准则

试验后，自供电电力传感器应无损坏，紧固件、模块及元器件无松动、脱落等现象，自供电电力传感器能正常工作。

4.10.2 运输试验

4.10.2.1 试验方法

包装完整的自供电电力传感器，按照GB/T 6587中规定的试验方法进行自由跌落和翻滚试验，试验等级为2级。

4.10.2.2 判定准则

试验后，包装应无破损、严重变形、磨损，自供电电力传感器应无损坏、能正常工作。

4.11 备用电源性能试验

4.11.1 试验条件

除另有规定外，自供电电力传感器备用电源性能试验应在温度为 $25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为15%~90%，大气压力为860hPa~1060hPa的环境中进行。

4.11.2 持续供电能力试验

4.11.2.1 常温持续供电能力试验

4.11.2.1.1 试验方法

对含备用电源的自供电电力传感器按照以下方法进行试验：

- a) 将全新备用电源安装于自供电电力传感器中；
- b) 将自供电电力传感器置于说明书中标注的定周期工作所需最大环境激励强度条件下，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期 t ，直到自供电电力传感器已按照设定周期完成2次数据采样及上传；
- c) 关闭环境激励条件，开始计时，将自供电电力传感器置于 $25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 环境中，持续观察，直至连续 $3t$ 时间未收到传感器数据，记录常温持续供电时间为 T 。

4.11.2.1.2 判定准则

常温持续供电时间应不低于自供电电力传感器制造商标称备用电源供电时间。

4.11.2.2 高温持续供电能力试验

4.11.2.2.1 试验方法

对含备用电源的自供电电力传感器按照以下方法进行试验：

- a) 将全新备用电源安装于自供电电力传感器中；
- b) 将自供电电力传感器置于说明书中标注的定周期工作所需最大环境激励强度条件下，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期 t ，直到自供电电力传感器已按照设定周期完成2次数据采样及上传；
- c) 关闭环境激励条件，开始计时，将自供电电力传感器置于 $55^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 环境中，持续观察，直至连续 $3t$ 时间未收到传感器数据，记录高温持续供电时间为 T_1 。

4.11.2.2.2 判定准则

高温持续供电时间应不低于自供电电力传感器制造商标称备用电源供电时间的90%。

4.11.2.3 低温持续供电能力试验

4.11.2.3.1 试验方法

对含备用电源的自供电电力传感器按照以下方法进行试验：

- a) 将全新备用电源安装于自供电电力传感器中；
- b) 将自供电电力传感器置于说明书中标注的定周期工作所需最大环境激励强度条件下，配置自供电电力传感器工作周期为说明书中标注的定周期支持的最小监测周期 t ，直到自供电电力传感器已按照设定周期完成2次数据采集及上传；
- c) 关闭环境激励条件，开始计时，将自供电电力传感器置于 $-40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 环境中，持续观察，直至连续 $3t$ 时间未收到传感器数据，记录常温持续供电时间为 T_2 。

4.11.2.3.2 判定准则

低温持续供电时间应不低于自供电电力传感器制造商标称备用电源供电时间的60%。

4.11.3 备用电源荷电保持能力试验

4.11.3.1 试验方法

对含备用电源的自供电电力传感器按照以下方法进行试验：

- a) 将全新备用电源安装于自供电电力传感器中；
- b) 将自供电电力传感器在室温、无环境能量激励条件下，静置30d；
- c) 按4.10.2.1.1的规定，计算常温持续供电时间 T_3 ；
- d) 以 $T_3/T \times 100\%$ 公式计算荷电保持能力。

4.11.3.2 判定准则

试验后应满足荷电保持能力 $\geq 99.5\%$

5 专用试验

自供电电力传感器应根据具体的自供电类型进行对应的专用试验。

5.1 磁场取能自供电传感器试验

5.1.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

- a) 高精度工频电流源，准确度： $\pm 0.1\text{A}$ ；
- b) 工频大电流发生器，准确度： $\pm 1\text{A}$ ；
- c) 高精度磁场模拟装置，磁场频率准确度： $\pm 0.1\text{Hz}$ ，磁场强度模拟准确度： $0.010e$ 。

5.1.2 冷启动磁场激励试验

5.1.2.1 试验方法

按照以下方法进行试验：

- a) 对于环形磁场取能自供电传感器，应在试验设备断电条件下，根据使用说明将传感器安装于试验设备，之后根据标注的冷启动电流强度，配置试验设备，并开始计时；
- b) 对于开环型磁场取能自供电传感器，根据标注的冷启动电流强度，配置试验设备，静止10min保持稳定后，将传感器安装于试验设备，并开始计时；
- c) 对于平面型磁场取能自供电传感器，根据标注的冷启动磁场频率和强度，配置试验设备，静止10min保持稳定，将传感器安装于试验设备，并开始计时；

5.1.2.2 判定准则

磁场取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.1.3 冷启动条件下工作周期

5.1.3.1 试验方法

按照5.1.2完成试验并通过后，保持试验设备配置不变，在磁场取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{cold} 。

5.1.3.2 判定准则

T_{cold} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.1.4 最小定周期工作磁场激励试验

5.1.4.1 试验方法

按照5.1.3完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

根据产品说明书标注的定周期工作电流或磁场激励下限，配置试验设备，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_1 。

5.1.4.2 判定准则

T_1 应在 $T_{min} \pm 1S$ 以内。

5.1.5 最大定周期工作磁场激励试验

5.1.5.1 试验方法

按照5.1.4完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

根据产品说明书标注的定周期工作电流或磁场激励上限，配置试验设备，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_2 。

5.1.5.2 判定准则

T_2 应在 $T_{min} \pm 1S$ 以内。

5.1.6 磁场激励冲击试验

5.1.6.1 试验方法

根据产品说明书标注的耐冲击磁场强度，配置试验设备，开展3次以上冲击试验，每次试验间隔不小于5min。

5.1.6.2 判定准则

试验前后，磁场取能自供电传感器无损坏，可正常工作。

5.2 电场取能自供电传感器试验

5.2.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

a) 试验变压器，准确度： $\pm 10\%$ 。

5.2.2 工作电压等级试验

5.2.2.1 试验方法

按照以下方法进行试验：

应在试验设备断电条件下，根据使用说明将电场取能自供电传感器安装于试验设备，之后根据标注的工作电压等级，配置试验设备，并开始计时。

5.2.2.2 判定准则

电场取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.2.3 定周期模式工作周期

5.2.3.1 试验方法

按照5.2.2完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

根据产品说明书，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 3}$ ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_3 。

5.2.3.2 判定准则

T_3 应在 $T_{\min 3} \pm 1S$ 以内。

5.2.4 电场激励冲击试验

5.2.4.1 试验方法

根据GB/T 156-2007中对于设备标称电压对应的设备最高电压规定，配置试验设备，开展3次以上冲击试验，每次试验间隔不小于5min。

5.2.4.2 判定准则

试验前、试验中、试验后，电场取能自供电传感器无损坏，可正常工作。

5.3 振动取能自供电传感器试验

5.3.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

a) 振动台：振动频率准确度 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，振动加速度准确度 $\pm 0.01g$ 。

5.3.2 冷启动振动激励试验

5.3.2.1 试验方法

按照以下方法进行试验：

- 在试验设备断电条件下，根据使用说明将传感器安装于试验设备；
- 根据使用说明书中标注的振动取能频率范围下限和该条件下冷启动最小振动加速度，配置试验设备，启动后，观察配套的远端显示设备，等待说明书中标注的冷启动时间 T_{cold4} ；
- 根据使用说明书中标注的振动取能频率范围上限和该条件下冷启动最小振动加速度，配置试验设备，启动后，观察配套的远端显示设备，等待说明书中标注的冷启动时间 T_{cold5} ；
- 在使用说明书中标注的振动取能频率范围上限和下限之间选取3个频点，重复上述试验。

5.3.2.2 判定准则

振动取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.3.3 冷启动条件下工作周期

5.3.3.1 试验方法

按照5.3.2完成试验并通过后，按照以下方法进行试验：

- 重复5.3.2中a)、b)试验步骤；
- 在振动取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{cold6} ；
- 重复5.3.2中c)试验步骤；
- 在振动取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{cold7} ；

5.3.3.2 判定准则

T_{cold6} 和 T_{cold7} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.3.4 最小定周期工作振动激励试验

5.3.4.1 试验方法

按照5.3.3完成试验并通过后，根据产品说明书标注的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，按以下方法进行试验：

- a) 配置试验设备为振动取能频率范围下限和振动激励加速度范围下限，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 8}$ ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_8 ；
- b) 配置试验设备为振动取能频率范围上限和振动激励加速度范围下限，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 10}$ ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{10} 。

5.3.4.2 判定准则

T_8 应在 $T_{\min 8} \pm 1S$ 以内， T_{10} 应在 $T_{\min 10} \pm 1S$ 以内。

5.3.5 最大定周期工作振动激励试验

5.3.5.1 试验方法

按照5.3.4完成试验并通过后，根据产品说明书标注的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，按以下方法进行试验：

- a) 配置试验设备为振动取能频率范围下限和振动激励加速度范围上限，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 9}$ ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_9 ；
- b) 配置试验设备为振动取能频率范围上限和振动激励加速度范围上限，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 11}$ ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{11} 。

5.3.5.2 判定准则

T_9 应在 $T_{\min 9} \pm 1S$ 以内， T_{11} 应在 $T_{\min 11} \pm 1S$ 以内。

5.3.6 振动激励冲击试验

5.3.6.1 试验方法

根据产品说明书标注的耐冲击振动频率和振动加速度，配置试验设备，开展3次以上冲击试验，每次试验间隔不小于5min。

5.3.6.2 判定准则

试验前后，振动取能自供电传感器无损坏，可正常工作。

5.4 温差取能自供电传感器试验

5.4.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

- a) 高温发生器：温度波动性 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
- b) 低温箱：温度波动性 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

5.4.2 冷启动温差激励试验

5.4.2.1 试验方法

按照以下方法进行试验：

- a) 将高温发生器置于低温箱内；
- b) 根据使用说明书，将温差取能自供电传感器热端固定与高温发生器发热端；
- c) 设置低温箱温度为 25°C ，根据使用说明书中的冷启动温差激励条件，设置高温发生器温度；

d) 启动试验设备，并开始计时。

5.4.2.2 判定准则

温差取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.4.3 冷启动条件下工作周期

5.4.3.1 试验方法

按照5.4.2完成试验并通过后，保持试验设备配置不变，在温差取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{cold12} 。

5.4.3.2 判定准则

T_{cold12} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.4.4 最小定周期工作温差激励试验

5.4.4.1 试验方法

按照5.4.3完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

保持低温箱配置不变，根据产品说明书标注的定周期工作温差激励下限，配置高温发生器，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min13} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{13} 。

5.4.4.2 判定准则

T_{13} 应在 $T_{min13} \pm 1S$ 以内。

5.4.5 最大定周期工作温差激励试验

5.4.5.1 试验方法

按照5.4.4完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

保持低温箱配置不变，根据产品说明书标注的定周期工作温差激励上限，配置高温发生器，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min13} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{14} 。

5.4.5.2 判定准则

T_{14} 应在 $T_{min13} \pm 1S$ 以内。

5.5 光照取能自供电传感器试验

5.5.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

- a) 太阳光模拟器：光强不均匀度 $\leq 5\%$ ，不稳定性 $\leq 4\%$ ；
- b) 照度模拟器：光照度准确度 $\pm 10\text{lux}$ ；

5.5.2 冷启动光照激励试验

5.5.2.1 试验方法

按照以下方法进行试验：

- a) 根据使用说明中标注的光照类型选择试验设备，对于能量源为太阳光的选用太阳光模拟器，对于能量源为室内光的选用照度模拟器；
- b) 将光照取能自供电传感器置于试验设备中，保持感光面与光源相对，根据使用说明，设置试验设备光照强度，启动试验设备，并开始计时。

5.5.2.2 判定准则

光照取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.5.3 冷启动条件下工作周期

5.5.3.1 试验方法

按照5.5.2完成试验并通过后，保持试验设备配置不变，在光照取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{cold15} 。

5.5.3.2 判定准则

T_{cold15} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.5.4 最小定周期工作光照激励试验

5.5.4.1 试验方法

按照5.5.3完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

根据产品说明书标注的定周期工作光照激励下限，配置试验设备，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min16} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{16} 。

5.5.4.2 判定准则

T_{16} 应在 $T_{min16} \pm 1S$ 以内。

5.5.5 最大定周期工作光照激励试验

5.5.5.1 试验方法

按照5.5.4完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

根据产品说明书标注的定周期工作光照激励上限，配置试验设备，设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min16} ，并开始计时，在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{17} 。

5.5.5.2 判定准则

T_{17} 应在 $T_{min16} \pm 1S$ 以内。

5.6 风取能自供电传感器

5.6.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

- a) 风洞：风速准确度 $\pm 0.5m/s$ 。

5.6.2 冷启动风能激励试验

5.6.2.1 试验方法

- a) 将风取能自供电传感器安装于风洞试验位置，调整传感器方向，对于定向风取能自供电传感器应保持风向与标注的取能风向相一致，对于全向或某一方向角风取能自供电传感器，应保持风向与标注的输出功率最小方向相一致；
- b) 根据使用说明标注的冷启动风能激励条件，配置风洞风速，并开始计时。

5.6.2.2 判定准则

风取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.6.3 冷启动条件下工作周期

5.6.3.1 试验方法

按照5.6.2完成试验并通过后,保持试验设备配置不变,在风取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期,统计数量不小于30,计算平均周期为 T_{cold18} 。

5.6.3.2 判定准则

T_{cold18} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.6.4 最小定周期工作风能激励试验

5.6.4.1 试验方法

按照5.6.3完成试验并通过后,按以下方法进行试验:

保持风取能自供电传感器位置及方向不变,根据产品说明书标注的定周期工作风速激励下限,配置试验设备,设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min19} ,并开始计时,在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期,统计数量不小于30,计算平均周期为 T_{19} 。

5.6.4.2 判定准则

T_{19} 应在 $T_{min19} \pm 1S$ 以内。

5.6.5 最大定周期工作风能激励试验

5.6.5.1 试验方法

按照5.6.4完成试验并通过后,按以下方法进行试验:

- 对于定向风取能自供电传感器,保持风取能自供电传感器位置及方向不变;
- 对于全向或某一方向角风取能自供电传感器,应调整传感器方向,使得风向与标注的输出功率最大方向相一致;
- 根据产品说明书标注的定周期工作风速激励上限,配置试验设备,设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 T_{min20} ,并开始计时,在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期,统计数量不小于30,计算平均周期为 T_{20} 。

5.6.5.2 判定准则

T_{20} 应在 $T_{min20} \pm 1S$ 以内。

5.6.6 风向响应能力试验

5.6.6.1 试验方法

对于全向/某一方向角风取能自供电传感器,应开展风向响应能力试验:

- 依据5.6.3试验内容完成后,平面内转动传感器位置 10° ,重复5.6.2和5.6.3中试验步骤,记录平均周期为 T_{cold21} ;
- 重复步骤a,直至测试风向覆盖标注的取能风向;
- 依据5.6.4试验内容完成后,平面内转动传感器位置 10° ,重复5.6.4中试验步骤,记录平均周期为 T_{22} ;
- 重复步骤c直至测试风向覆盖标注的取能风向;
- 依据5.6.5试验内容完成后,平面内转动传感器位置 10° ,重复5.6.5中试验步骤,记录平均周期为 T_{23} ;
- 重复步骤e直至测试风向覆盖标注的取能风向。

5.6.6.2 判定准则

- T_{cold21} 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内;
- T_{22} 应在 $T_{min19} \pm 1S$ 以内;
- T_{23} 应在 $T_{min20} \pm 1S$ 以内。

5.6.7 风能激励冲击试验

5.6.7.1 试验方法

根据产品说明书标注的耐冲击最大风速，配置试验设备，开展3次以上冲击试验，每次试验间隔不小于5min，每次试验时间不小于3hour。

5.6.7.2 判定准则

试验前后，风取能自供电传感器无损坏，可正常工作。

5.7 射频取能自供电传感器试验

5.7.1 试验设备

试验设备应满足以下技术要求：

- a) 电磁辐射测量仪：测量精度 $\pm 1\text{dB}$ ；
- b) 射频源：由射频取能自供电传感器送检厂商提供。

5.7.2 冷启动射频激励试验

5.7.2.1 试验方法

- a) 将电磁辐射测量仪探头和射频源置于试验环境中，电磁辐射测量仪探头与射频源距离应 $\geq 5\text{m}$ ；
- b) 启动射频源，并调整射频频率和射频信号强度，使得电磁辐射测量仪显示的射频信号频率和强度与使用说明书中冷启动射频激励条件相符，且其它频点信号强度低于配置射频激励的1%；
- c) 将射频取能自供电传感器置于电磁辐射测量仪探头侧边1cm范围内，保持试验设备配置不变，开始计时；
- d) 对于取能频点为多频点的射频取能自供电传感器，应分别按照上述3个步骤开展试验。

5.7.2.2 判定准则

射频取能自供电传感器配套的远端显示设备应可在规定时间内收到传感器数据。

5.7.3 冷启动条件下工作周期

5.7.3.1 试验方法

按照5.7.2完成试验并通过后，保持试验设备配置不变，在射频取能自供电传感器配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 $T_{\text{col}d24}$ 。

5.7.3.2 判定准则

$T_{\text{col}d24}$ 应在使用说明中标注的冷启动条件下工作周期 $T \pm 5\%$ 以内。

5.7.4 最小定周期工作射频激励试验

5.7.4.1 试验方法

按照5.7.3完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

- a) 保持试验设备和射频取能自供电传感器位置不变，保持射频源频点配置不变；
- b) 调整射频源射频信号强度，电磁辐射测量仪显示的射频信号频率和强度与使用说明书中标注的该频点定周期工作射频激励下限一致；
- c) 设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\text{min}25}$ ，并开始计时；
- d) 在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{25} ；
- e) 对于取能频点为多频点的射频取能自供电传感器，应分别按照上述4个步骤开展试验。

5.7.4.2 判定准则

T_{25} 应在 $T_{\text{min}25} \pm 1\text{S}$ 以内。

5.7.5 最大定周期工作射频激励试验

5.7.5.1 试验方法

按照5.7.4完成试验并通过后，按以下方法进行试验：

- a) 保持试验设备和射频取能自供电传感器位置不变，保持射频源频点配置不变；
- b) 调整射频源射频信号强度，电磁辐射测量仪显示的射频信号频率和强度与使用说明书中标注的该频点定周期工作射频激励上限一致；
- c) 设定传感器工作周期为说明书中标注定周期模式工作周期范围的最小值 $T_{\min 26}$ ，并开始计时；
- d) 在远端配套的远端显示设备统计传感数据回传周期，统计数量不小于30，计算平均周期为 T_{26} ；
- e) 对于取能频点为多频点的射频取能自供电传感器，应分别按照上述4个步骤开展试验。

5.7.5.2 判定准则

T_{26} 应在 $T_{\min 26} \pm 1S$ 以内。

5.8 多源取能自供电传感器试验

5.8.1 试验设备

参照5.1.1、5.2.1、5.3.1、5.4.1、5.5.1、5.6.1、5.7.1中要求。

5.8.2 冷启动多源激励试验

根据多源取能自供电传感器的能量源类型，分别按照5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.7中要求开展试验。

5.8.3 最小定周期工作多源激励试验

根据多源取能自供电传感器的能量源类型，分别按照5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.7中要求开展试验

5.8.4 最大定周期工作多源激励试验

根据多源取能自供电传感器的能量源类型，分别按照5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.7中要求开展试验

5.8.5 多源激励冲击试验

根据多源取能自供电传感器的能量源类型，分别按照5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.7中要求开展试验

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. 宽频带范围内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机性能的影响[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] Joshi M, Köhnen 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.