第 52 卷 第 6 期：2747-2756 高电压技术 Vol.52, No.6: 2747-2756
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250964

基于悬臂结构的磁机电耦合能量采集装置的环境可靠性评估

王　真[1]，刘征宇[1]，朱雪琼[1]，夏　东[2]，胡妍捷[1]
（1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103；2. 国网江苏省电力有限公司，南京 210094）

摘　要：为研究环境温度、湿度对磁机电耦合能量采集装置环境可靠性的影响，该文设计并制造了 1 款基于悬臂结构的磁机电耦合能量采集装置，通过多物理场联合可控试验平台对该装置分别进行高低温工作试验和交替湿热试验。每项试验均采用 3 款相同样机进行测试，所选样机分别经历高温、低温、高温高湿、低温高湿的工作环境并恢复至室温条件后，谐振频率偏移均小于 2%，装置谐振频率处的输出电压衰减幅度均小于 10%，装置中悬臂梁的力学性能和永磁体的磁学性能未受影响。试验结果表明，该能量采集装置具备良好的抗极端温度干扰能力和抗温湿度耦合干扰能力。该研究可为能量采集装置的可靠性优化提供数据支撑与理论依据。
关键词：能量采集装置；悬臂结构；磁机电耦合；温湿度控制；可靠性

Environmental Reliability Assessment of Magnetic-electromechanical Coupling Energy Harvesting Device Based on Cantilever Structure

WANG Zhen[1], LIU Zhengyu[1], ZHU Xueqiong[1], XIA Dong[2], HU Yanjie[1]
(1. State Grid Jiangsu Electric Power Science Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210094, China)

Abstract: To study the influence of ambient temperature and humidity on the environmental reliability of magnetic-electromechanical coupling energy harvesting device, we designed and fabricated a magnetic-electromechanical coupling energy harvesting device based on cantilever structure. We conducted high- and low-temperature operational tests and alternating damp-heat tests on the device using a multi-physical-field coupled controllable test platform. Three prototypes of the same batch were used for each test. The selected prototypes were subjected to high temperatures, low temperatures, high temperatures plus high humidity, and low temperatures plus high humidity working environments. After being restored to room temperature, the resonant frequency shift was less than 2%, and the output voltage attenuation at the resonant frequency of the device was less than 10%. The mechanical properties of the cantilever beams and the magnetic properties of permanent magnets in the device remained unaffected. Test results show that the energy harvesting device has excellent ability to resist extreme temperature interference and temperature-humidity coupling interference. This research provides data supports and a theoretical basis for optimizing the reliability of energy harvesting devices.
Key words: energy harvesting device; cantilever structure; magnetic-electromechanical coupling; temperature and humidity control; reliability

0　引言

在 “双碳”目标驱动的能源革命下，智能电网与能源互联网加速转型。随着能源系统向分布式演进，无线传感设备作为感知层核心，通过全环节部署保障电网安全运行。然而，其依赖的化学电池存在能量密度低、需频繁更换及污染环境等问题，难以满足传感网络规模扩张需求，成为制约能源互联网智能化发展的瓶颈。因此，探索可持续清洁能源供能技术，对推动能源低碳转型意义重大。

环境能量采集技术凭借将环境中广泛存在的微弱能量，例如太阳能[1-2]、风能[3-4]、温差能[5-6]、振动能[7-8]、磁场能[9-11]等，转换成电能储存利用，为解决无线传感设备供电难题提供了创新解决方

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(强磁场高电压设备运行状态高精度高可靠感知关键技术研究及应用) (5500-202318528A-3-2-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (Research and Application on Key Technologies for High Accuracy and Reliability Perception of Operating States in Strong Magnetic Field and High Voltage Equipment) (5500-202318528A-3-2-ZN).

案[12-14]。但是，太阳能与风能发电装置体积较大且受天气影响显著，温差发电受限于低转换效率与可靠性问题，振动能虽普遍存在却因其间歇性特征易导致功率不稳定，磁场能含量丰富且分布广泛，然而磁场能量采集器的尺寸会限制器件的输出性能。当前，电磁式能量采集器在能量采集领域应用颇为普遍，但其自身存在输出功率密度较低、低频响应能力欠佳等短板，难以契合特殊场景的供能需求。近年来，基于磁-机-电耦合效应的磁场能量采集器实现了振动与磁场能量采集的优势互补，因其能在低频磁场下产生高功率密度输出而受到广泛关注，在电力设备状态监测供能领域展现出广阔的应用前景。

然而，在实际的复杂工况下，磁机电耦合能量采集装置易受多种因素影响，其性能表现与理论预期存在显著差异[15-16]。例如，温度波动可能引起材料热膨胀或磁性能退化，湿度变化可能诱发腐蚀或绝缘失效。在温度方面，Kuo 等人研究了不同工作温度下长期工作的微型压电能量采集器的输出性能、疲劳性和机械性能之间的相关性[17]。结果表明，当采集器在高温(50 ℃)下运行时，谐振频率显著下降且无法保持恒定的功率输出。Pancharoen 等人研究了磁悬浮电磁能量采集器的温度特性[18]。该研究分析了温度变化对器件谐振频率和输出功率的影响。结果表明，过高的温度会导致器件中的永磁体退磁，从而导致器件失效，严重影响器件的可靠性。在湿度方面，Yun 等人研究了基于驻极体的高质量摩擦电纳米发电机[19]。设定相对湿度为 20%和 90%，温度为 25 ℃的环境来储存驻极体。试验结果表明，器件的输出性能经历潮湿环境中的储存后会退化。在温度和湿度方面，Peddigari 等人研究了基于单晶宏观纤维复合材料的压电能量采集器在不同温度和湿度环境下的表征[20]。该研究将温度从 20 ℃改变到 70 ℃以及将相对湿度从 10%改变到 90%。试验结果表明，在室温(25 ℃)下，短期湿度暴露对压电能量采集器的的影响可忽略不计，在恶劣条件下(温度 50 ℃和相对湿度 60%)，该器件的输出功率与 10%相对湿度条件下的输出功率相比，其变化并不显著，偏差量维持在 6.5%以下。

上述研究多聚焦于单一温度或湿度变化对系统的影响，且局限于单一的能量转换机制，针对磁机电耦合能量采集装置的系统性研究仍显匮乏。在实际工况下，该装置需承受温湿度耦合应力，环境因素对其性能影响显著。为确保磁机电耦合能量采集装置能够持续输出稳定且高效的电能，本文围绕其温湿度可靠性展开研究。首先，分析了磁机电耦合能量采集装置的动力学模型和可靠性判据。随后，设计了 1 款基于悬臂结构的磁机电耦合能量采集装置测试样机，并搭建了多物理场联合可控试验平台。最后，通过多物理场联合可控试验平台对该装置分别进行高低温工作试验和交替湿热试验，验证了该磁机电耦合能量采集装置的环境可靠性。

1 磁机电耦合能量采集装置的可靠性理论

1.1 磁机电耦合能量采集装置动力学模型

根据单元功能划分，磁机电耦合能量采集装置可分为拾振单元和换能单元。拾振单元主要由拾振梁和质量块构成，把永磁体在外部磁场作用下磁机械转矩转化为线圈和永磁体的相对运动。换能单元主要由线圈和永磁体构成，将线圈与永磁体之间的相对运动转换为线圈两端产生的电动势。磁机电耦合能量采集装置的动力学模型图如图 1 所示。

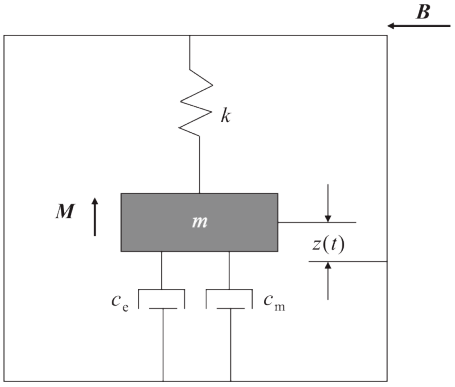


图 1 磁机电耦合能量采集装置动力学模型图

Fig.1 Dynamic modeling diagram of magnetic-electromechanical coupling energy harvesting device

图中，m 为质量块(振动永磁体)的质量，k 为悬臂梁刚性系数，c_e 为电磁阻尼系数，c_m 为机械阻尼系数，$z(t)$为质量块(振动永磁体)相对外壳的位移，按照牛顿第二定律，拾振单元运动方程如下所示：

$$m\frac{\mathrm{d}^2 z(t)}{\mathrm{d}t^2}+(c_e+c_m)\frac{\mathrm{d}z(t)}{\mathrm{d}t}+kz(t)=F_m \tag{1}$$

式中：F_m 为永磁体受到的磁力标量幅值。永磁体在外界磁场作用下的磁力矢量 $\boldsymbol{F}_m$ 表达式为：

$$\boldsymbol{F}_m=\nabla(\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{B}) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为永磁体的磁矩矢量；$\boldsymbol{B}$ 为外界变化磁场的磁场强度矢量。外界工频交流磁场可表示为：

$$B=B_0\sin(\omega t) \tag{3}$$

式中：ω 为环境交流磁场的角频率；B_0 为外界环境中交流磁场磁场强度幅值。

当外界交流磁场方向与永磁体磁矩方向保持不变时，外界交流磁场强度幅值 B_0 增大，永磁体所受磁力也增大，同时永磁体在外界交流磁场激励下与线圈之间的相对运动位移幅值增大，装置的输出电压增大。

作为典型的谐振式能量采集器，谐振工况下结构疲劳失效是其主导失效模式。极端温度或强磁场中永磁体易不可逆退磁，导致磁性能劣化，影响装置能量转换效率与工作稳定性；金属拾振梁在高温下因蠕变变形与疲劳失效，导致结构力学性能衰退，制约器件输出性能；金属材质整体结构长期暴露于高湿度环境，会引发电化学腐蚀、材料分层及电路短路等故障，进一步凸显了环境湿度对装置可靠性的关键影响。

1.2　磁机电耦合能量采集装置可靠性判据

温度对能量采集装置可靠性的影响主要体现为：永磁体的磁性能退化、温度升高使拾振梁的杨氏模量降低，同时引发热膨胀效应，二者共同导致拾振梁整体刚度下降，进而引起谐振频率漂移、装置内部的绝缘材料性能下降。为尽可能探究被测装置的温度可靠性，本文高低温工作试验采取的温度分别是装置许用温度范围内的最高温度和最低温度。

许多装置在单一应力(如高温应力)作用下能够展现良好的耐受性。然而，当装置同时受温湿度耦合应力作用时，可能会出现短时间内即发生失效的现象。本文采用的磁机电耦合能量采集装置在实际应用环境中承受的是温湿度耦合应力。

以往大多文献均认为，能量采集装置的谐振频率偏移 2%或输出电压下降 10%即认为装置失效[21-22]，但由于该能量采集装置是谐振式装置，装置本身的初始谐振频率和带宽很大程度上决定了其在失效过程中相应的输出电压变化量大小，不能盲目遵循以往文献设置标准。因此，本文统一采取能量采集装置谐振频率的变化作为可靠性试验的关键参量，其谐振频率偏移 2%即认为装置失效。

2　磁机电耦合能量采集装置可靠性测试平台

2.1　磁机电耦合能量采集装置测试样机设计

2.1.1　拾振单元设计

能量采集装置中的拾振单元主要由拾振梁和永磁体构成。由于钢材料与铜、钛的杨氏模量相近，其成本较低更利于量产，且受温度的影响较小，故选择钢材料制作拾振梁。鉴于直梁结构简易，同磁场强度下永磁体相对位移大，有利于器件输出，故选用悬臂梁直梁结构，图 2(a)为直梁结构的根部区域优化后的悬臂梁，因工业设备交流磁场频率多为 50 Hz 工频，故将该能量采集装置初始谐振频率设为 50 Hz 左右。借助 COMSOL 辅助设计几何参数，获得装置前三阶振动模态，如图 2 所示。

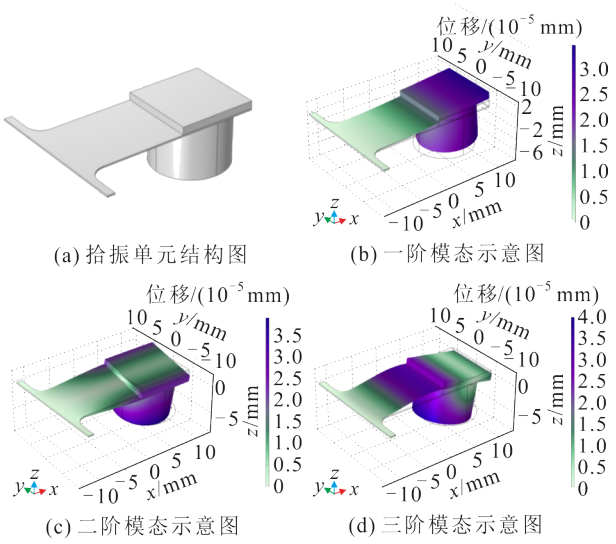


图 2　拾振单元优化后结构及前三阶振动模态

Fig.2　Optimized structure of the pickup unit and the first three vibration modes

图 2 中，图 2(b)为一阶上下弯曲振动模态(51.866 Hz)，是装置的主工作模态，图 2(c)为 xy 平面的二阶绕 x 轴扭转模态，图 2(d)为三阶沿 y 轴轴线上呈波浪形摆动模态，后两阶模态频率远高于工频，在实际工作中不会被激发。由 COMSOL 仿真结果可得，拾振单元的主振动模态为沿竖直方向的弯曲振动模态(即一阶模态)，该能量采集装置中的永磁体并不是垂直从圆环形线圈中穿入/穿出，而是倾斜从圆环形线圈中出入。因此，圆环形线圈内径应略大于拾振梁下端圆柱形永磁体的直径。

2.1.2　器件整体结构设计

磁机电耦合能量采集装置结构示意图如图 3 所示，其主要由不锈钢拾振梁和钕铁硼磁体构成的拾振单元和穿入/穿出结构的能量采集单元组成。其中，拾振梁是由铝合金夹板通过上下紧密压合的方式构成，拾振梁与铝合金夹板之间设计有对应的孔位，以便利用黄铜螺丝进行紧固连接。同时，利用铜柱和螺丝将铝合金夹板与固定线圈的 PCB 板牢

固结合。为能最大程度降低温度对装置可靠性的影响，本文选用 402 抗高温胶水来固定永磁体和拾振梁。其中，本文设计的磁机电耦合能量采集装置的几何参数设计值与实际值如表 1 所示。

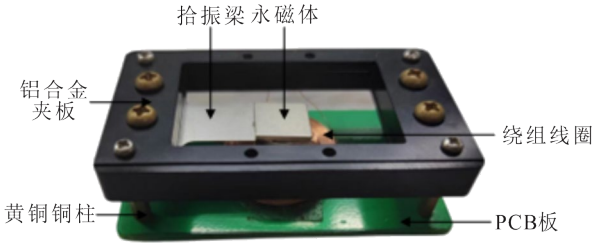


图 3 磁机电耦合能量采集装置实物图

Fig.3 Physical drawing of magnetic-electromechanical coupling energy harvesting device

表 1 装置的几何参数设计值与实际值

Table 1 Design and actual values of geometrical parameters of the device

参数	设计值	实际值
装置整体尺寸/(mm×mm×mm)	60.0×35.0×19.5	60.1×35.1×19.7
拾振梁整体尺寸/(mm×mm×mm)	24.0×10.0×0.2	23.8×10.1×0.19
方形磁体边长/mm	10.0	10.1
方形磁体厚度/mm	1.00	0.97
圆形磁体直径/mm	10.00	9.87
圆形磁体厚度/mm	7.00	7.01
拾振梁-能量采集单元线圈之间高度差/mm	9.5	9.6

2.2 磁机电耦合能量采集装置可靠性测试平台设计

图 4 是结合温湿度控制系统和磁场控制系统共同搭建的多物理场联合可控测试平台示意图。

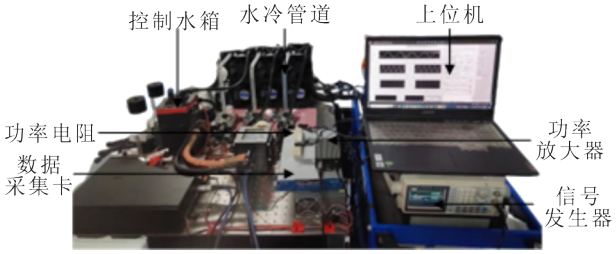


图 4 多物理场联合可控测试平台

Fig.4 Controllable test platform of multi-physical field joint

图中，温湿度控制系统由测试箱、控制电路、电源、水冷装置、提供水汽的水箱及连接管道组成，通过水蒸汽管道改变测试箱内相对湿度。同时，测试箱壁设置有馈通插件，有利于实现测试箱内外电气连接。试验人员可通过计算机发出信号传递到控制电路，从而精准控制其测试箱内环境的温度和湿度，为后续能量采集装置的可靠性试验奠定基础。

在温湿度试验箱内设置 9 个温度测试点：A、B、C、D、O、K、L、N、M；3 个湿度测试点：D_h、O_h、L_h。其温度测试点和相对湿度测试点的布放位置如图 5 所示。

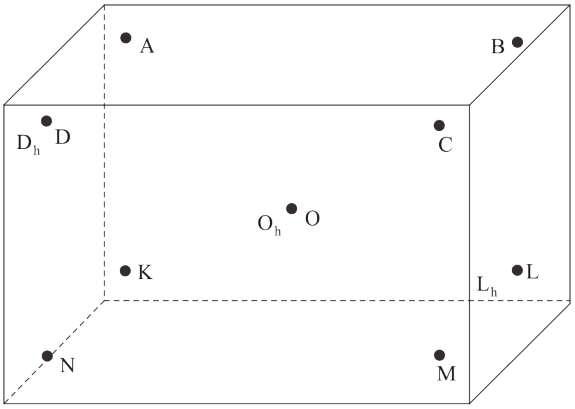


图 5 温湿度测量点布放位置图

Fig.5 Layout map of temperature and humidity measurement points

将温度 25 ℃设为标称温度值，相对湿度 95%设置为标称相对湿度值。将试验箱内温湿度调至标称值，待其箱内温湿度稳定在标称值后，记录各个测量点的温湿度平均测量值，具体如表 2 所示。由表 2 中数据可得，各测试点在这段时间内实际测试得出的温度最大值和温度最小值分别与最初设置的标准温度数值的差值不超过 3 ℃，各个测试点在这段时间内实际测试所得的湿度最大值和湿度最小值分别与最初设置的标准湿度的差值不超过 3%。

表 2 测量点的温湿度分布对比

Table 2 Comparison of temperature and humidity distribution at the measurement point

测试点	温度 θ/℃	相对湿度/%
A	25.07	95.60
B	25.66	94.54
C	26.80	96.11
D	25.99	95.77
O	25.00	95.00
K	24.23	95.60
L	24.67	94.60
N	25.8	95.01
M	25.93	95.13

磁场控制系统测试箱箱体侧壁由铝合金制成，以确保外界磁场变化不影响测试箱内部磁场。为验证该磁场控制系统的磁场稳定性，首先设置相应的输入线圈电压幅值使得该通电线圈内部流经电流为0.5 A，并保持输入电压幅值不变，然后使其通电线圈持续工作 10 d，中间定时用磁强计监测该测试点磁场强度大小。测试结果如图 6 所示，测试点的磁场强度幅值波动在该试验平台连续工作 10 d 的过程中不超过 3%，磁场强度大小几乎没有变化。

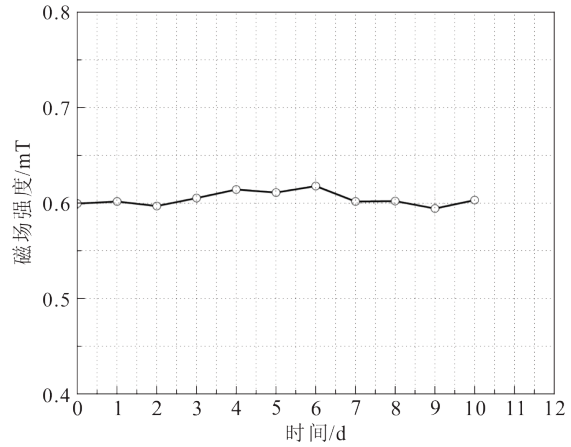


图 6　测试点磁场强度随时间变化的变化曲线示意图

Fig.6　Schematic diagram of the change curve of magnetic field strength with time at the test point

用于测定能量采集装置谐振频率的振动激励试验平台如图 7 所示，该平台采用模块化集成设计，核心组件包括信号发生器、功率放大器、振动台、数据采集系统及加速度传感单元，实验设备的主要性能参数如表 3 所示。该系统基于正弦扫频测试原理工作：通过向被测装置施加恒定幅值的正弦加速度激励，在设定频率范围内连续扫描，同步测量器件的输出电压响应，最终得到输出电压随激励频率变化的特性曲线，进而确定其固有谐振频率。为规避激励过载导致的频率偏移误差，试验将加速度峰值 0.1g 设定为标准激励幅值。

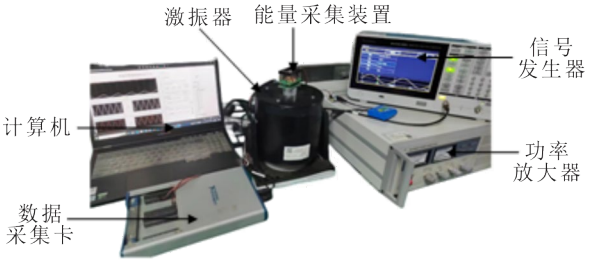


图 7　能量采集装置谐振频率测试平台

Fig.7　Test platform for the resonant frequency of an energy harvesting device

表 3　实验设备及主要性能参数

Table 3　Experimental equipment and main performance parameters

设备名称	设备型号	功能	主要参数
信号发生器	Tektronix AFG31000	提供振动波形	正弦波频率范围 1 μHz~250 MHz
功率放大器	SA-PA050	提供振动能量	额定输出功率 500 VA
激振台	JZK-20	提供振动环境	最大振幅±10 mm；频率范围直流 2 kHz
数据采集卡	NI USB-6353	数据采集	分辨率 16 位
加速度计	ADXL335	测试振动信息	量程±3g z 轴带宽 0.5~550 Hz

3　磁机电耦合能量采集装置的可靠性测试

3.1　样机初始性能表征测试

初始情况下激励频率对装置输出性能影响如图 8 所示。在室温下，对装置做扫频试验，当激励频率接近装置谐振频率时，输出电压峰峰值增大；当激励频率远离装置谐振频率时，输出电压峰峰值迅速减小。其中，该样机实际谐振频率为 49.9 Hz，故装置在接近工频 50 Hz 的交流磁场环境能量输出效率较高。

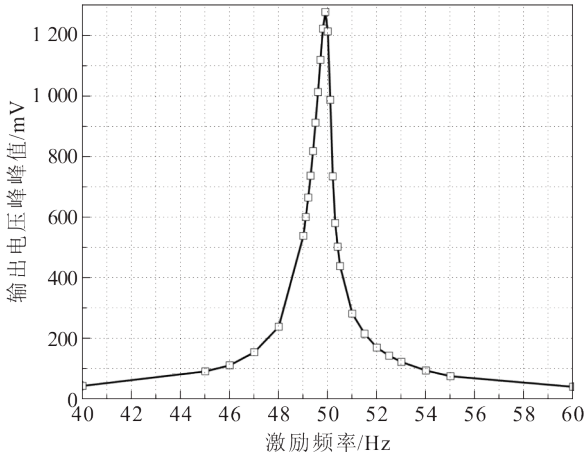


图 8　激励频率对装置初始输出性能的影响

Fig.8　Influence of excitation frequency on the initial output performance of the device

3.2　磁场强度梯度下样机输出性能测试

在激励频率 50 Hz，激励磁场强度 0.05~0.6 mT 范围内，装置输出电压峰峰值与激励磁场强度的关系曲线如图 9 所示。当激励磁场强度大于 0.6 mT 时，受拾振梁振动位移限制，装置输出电压波动较大，且输出电压随激励磁场强度增长率减小。考虑到激励磁场强度对装置输出电压的影响趋势，后续试验

中选择激励磁场强度 0.11 mT 作为试验条件。

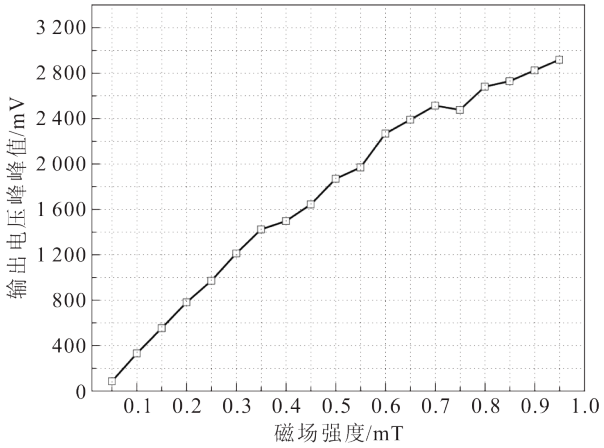


图 9 磁场强度对装置初始输出性能的影响

Fig.9 Influence of magnetic field strength on the initial output performance of the device

3.3 样机在不同温度下的性能变化

本试验旨在系统研究温度对电磁式能量采集器输出性能的影响规律。试验对象为基于磁机电耦合的能量采集装置，其中拾振梁作为核心功能部件，其动力学特性直接决定装置的能量转换效率与输出性能。试验采用温度控制变量法，对不同温度工况下装置的输出电压、固有频率等关键特征参量进行精确表征。考虑到装置材料及结构的热稳定性限制，其工作温度临界阈值为 80 ℃，因此本试验将温度控制区间设定为 0~70 ℃。试验具体步骤如下所述。

1）选取 3 个性能良好的装置开展试验。

2）将装置安装于温湿度控制箱内，利用数据采集卡采集装置输出电压，用 LabVIEW 软件观测。

3）启动通电线圈，频率为 50 Hz，磁场强度为 0.11 mT，在室温下记录装置试验前数据。

4）使装置停止工作，启动温度控制箱，设置为恒温模式，具体温度设置值范围为 0~70 ℃，且需保障升温过程中温度上升速率不超过 1 ℃/min。

5）待试验箱内温湿度达到设置值稳定后，启动通电线圈，频率为 50 Hz，磁场强度为 0.11 mT。开始计时，使器件稳定工作 0.5 h 后，对器件做扫频试验，记录试验数据。

6）待试验结束后，使装置停止工作，待装置恢复到室温后，保持装置温度稳定不变，同时对该装置进行全面目视检查和工作性能检测，记录检查和检测数据，并与试验前数据进行比较。

当装置处于室温环境时，激励频率对于该试验采用的 3 款样机输出性能的影响如图 10 所示。温度对于 3 款样机谐振频率和输出电压的影响如图 11(a)—11(f)所示。试验结果表明，在 0~70 ℃温度区间内，3 款样机的谐振频率均呈现随温度升高而降低的趋势，降幅范围为 0.6~1.1 Hz。此现象归因于不锈钢拾振梁在热载荷作用下，杨氏模量因温度升高而下降，同时热膨胀效应导致结构尺寸变化，二者共同作用导致拾振梁刚度降低，进而引发谐振频率飘移。在输出性能方面，各样机在谐振频率处输出电压随温度变化呈非线性特征。当温度从 0 ℃升至 25 ℃时，输出电压增加 31~146 mV；温度继续升至 70 ℃时，输出电压降低 83~165 mV。这种变化趋势差异主要源于装置所采用的钕铁硼永磁体的温度敏感性，该永磁体的最佳工作温度区间为 20~35 ℃，极端温度条件下由于永磁体的退磁效应致使磁路中的磁通量大幅降低，从而使得磁电转换装置的输出电压显著降低。

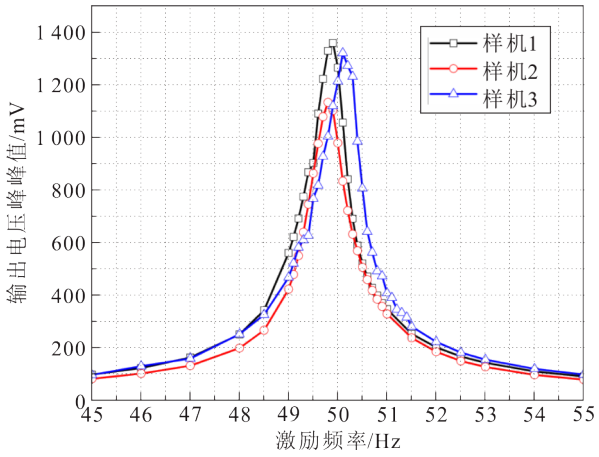


图 10 3 款样机室温环境下扫频曲线

Fig.10 Sweep frequency curves of the three prototypes at room temperature

3.4 高温工作试验

本试验旨在系统研究能量采集装置在高温环境下工作的能力。本文参考文献[23]确定该试验方案。高温工作试验步骤参照 3.3 节温度对装置输出性能影响的试验流程执行，具体温度设置值为 70 ℃，试验时间不低于 24 h。

在装置初始条件下和经受高温工作 24 h 并冷却至室温后，激励频率对于该试验采用 3 款样机输出性能的影响如图 12 所示。从图 12 可以看出，样机 1 在高温工作试验前后谐振频率不变，对应谐振频率处的输出电压减小了 6.9%；样机 2 在高温工作试验前后谐振频率不变，对应谐振频率处的输出电

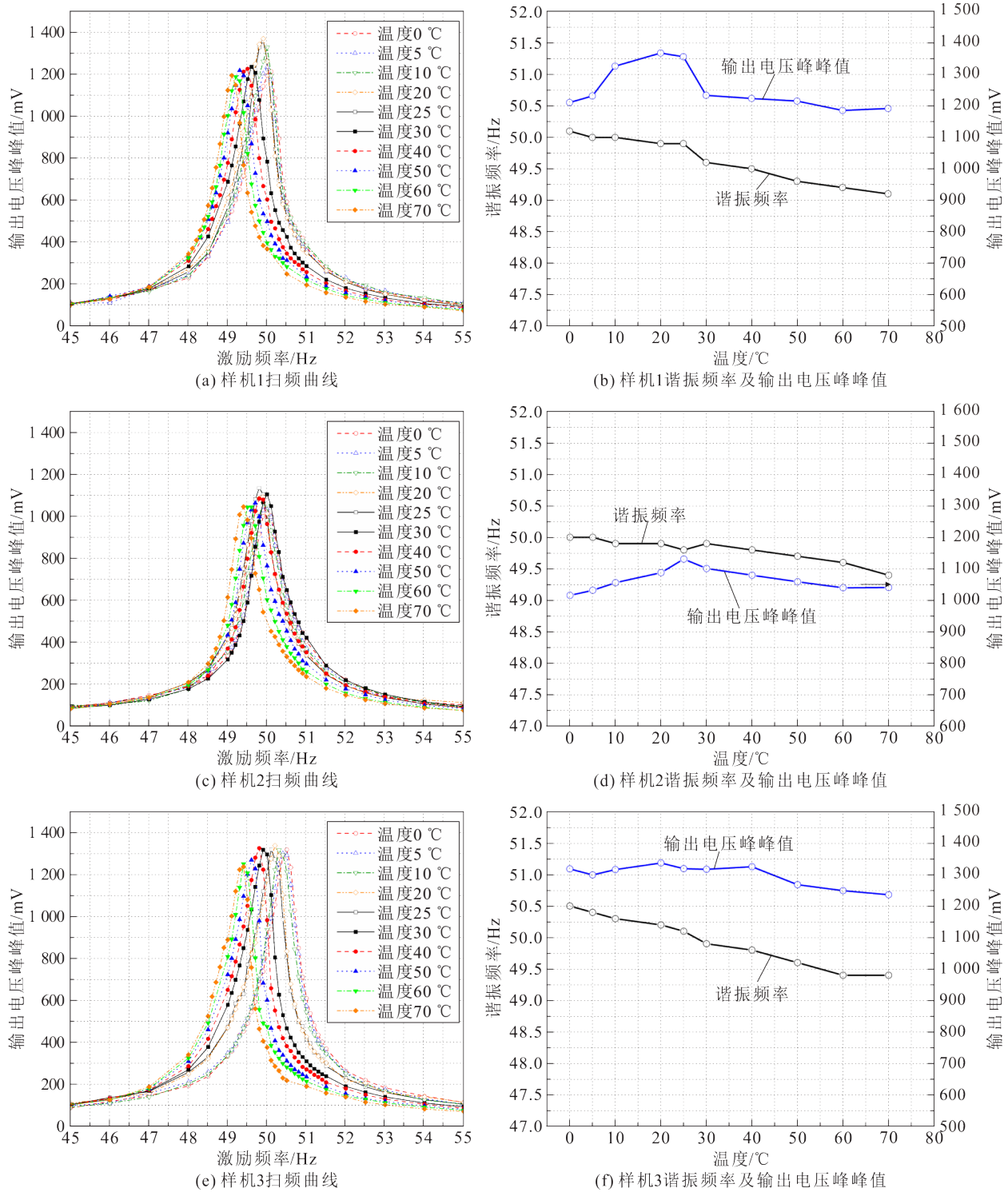


图 11　不同温度对装置的谐振频率及输出电压的影响

Fig.11　The effect of different temperatures on the resonant frequency and output voltage of the device

压减小了 8.1%；样机 3 在高温工作试验前后谐振频率增加了 0.2%，对应谐振频率处的输出电压增加了 0.6%。根据本文设置的能量采集装置性能评估指标，3 款样机的谐振频率及对应谐振频率处的输出电压在经历高温工作试验后都没有达到失效标准，所有样机目视检查结果合格。

由试验结果可得，本文采用能量采集装置的谐振频率随温度升高而降低，但当试验环境温度恢复至室温后，装置谐振频率也会恢复到装置的初始状态，证明装置经历高温工作并冷却后仍能保持性能稳定。

高温环境对器件中永磁体的磁性能具有更显著的劣化效应。若高温试验的温度阈值进一步提升

或时间持续延长，可能导致器件输出特性的劣化程度加剧，进而引发器件功能性失效。若选择温度适用区间更宽泛的永磁体(如钐钴磁体)，则能量采集装置在高温环境下的可靠性水平将进一步提升。

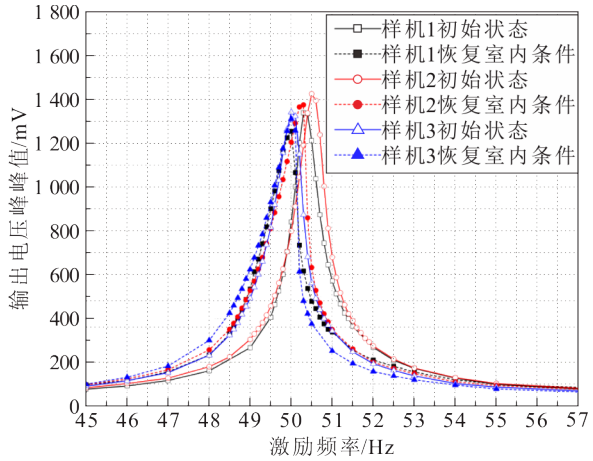


图 12 高温试验前后激励频率对装置输出性能影响关系图

Fig.12 Plot of the effect of excitation frequency on the output performance of the device before and after the high-temperature test

3.5 低温工作试验

本试验旨在系统研究能量采集装置在低温环境下的工作能力。本文参考文献[24]确定该试验方案。低温工作试验步骤同温度对装置的输出性能试验，具体温度设置为 0 ℃，试验时间不低于 24 h。

在装置初始条件下和经受低温工作 24 h 并冷却至室温后，激励频率对于该试验采用 3 款样机的输出性能的影响如图 13 所示。从图 13 可以看出，样机 1 在低温工作试验前后谐振频率不变，对应谐振频率处的输出电压增加了 2%；样机 2 在低温工作试验前后谐振频率减小了 0.2%，对应谐振频率处的输出电压增加了 1.17%；样机 3 在高温工作试验前后谐振频率不变，对应谐振频率处的输出电压增加了 8.1%。根据本文设置的能量采集装置性能评估指标，3 款样机的谐振频率及对应谐振频率处的输出电压在经历低温工作试验后都没有达到失效标准，所有样机目视检查结果合格。

由试验结果可得，本文采用的能量采集装置的谐振频率随着温度的降低而升高，但当试验环境温度恢复至室温后，装置的谐振频率也会恢复到装置的初始状态，从而体现装置在经历低温工作并恢复至室温后依旧保持其性能稳定。

同理，低温环境对器件中永磁体的磁性能具有更为显著的影响。若将所采用的钕铁硼永磁体替换为温度适用范围更宽泛的钐钴磁体，可有效提升能量采集装置在低温环境下的可靠性。

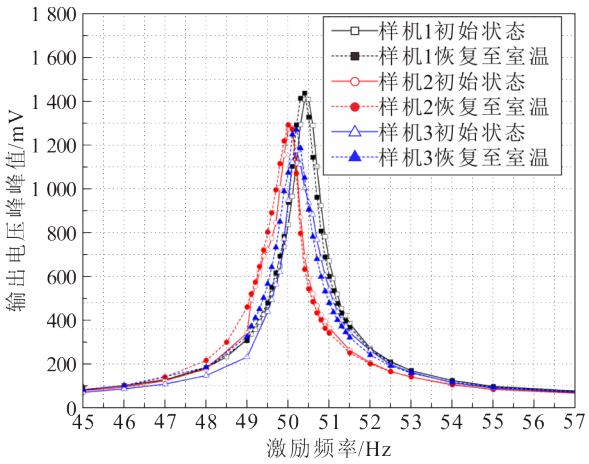


图 13 低温试验前后激励频率对装置输出性能影响关系图

Fig.13 Plot of the effect of excitation frequency on the output performance of the device before and after the low-temperature test

3.6 湿热工作试验

实际情况中，往往是温度与湿度这两种环境因素的综合作用(即耦合效应)引发装置可靠性的退化，本文参考文献[25]确定该试验方案。其具体试验步骤如下所述。

1）选取 3 个性能良好的装置开展试验。

2）将装置安装于温湿度控制箱内，并将其装置与通电线圈位置对齐，利用数据采集卡采集装置输出电压数据，用 LabVIEW 软件观测。

3）启动通电线圈，频率为 50 Hz，磁场强度为 0.11 mT，在室温下，记录装置试验前数据。

4）稳定期：试验装置温度应在试验前温度稳定在 (25±3) ℃，将测试箱内部温度设置为 (25±3) ℃，并保持该试验装置达到温度稳定后，将箱内的相对湿度升到不少于 95%。

5）开始 24 h 循环，升温阶段：将箱内温度升至所规定高温值(温度为 40 ℃)，应在(3±0.5) h 之内到达设置高温值(线性升温)。该阶段箱内相对湿度应不少于95%，最后15 min相对湿度不应少于90%。

6）高温稳定阶段：当箱内温度到达所设定高温值±2 ℃时，直到循环开始的(12±0.5) h，该阶段箱内最初和最后 15 min 内相对湿度应保持为 90%~100%，试验人员在其余时间内保证测试箱内部环境相对湿度为(93±3)%。

7）降温阶段：将箱内温度应在(3±0.25) h 内降到(25±3) ℃，在最初的 15 min 相对湿度应不小于 90%外，其余时间相对湿度应不小于 95%。

8）低温稳定阶段：温度应保持在(25±3) ℃，同时相对湿度不少于 95%，直至 24 h，即 1 个循环结束。

9）能量采集器需连续无间断完成至少 2 次循环，循环次数根据试验严酷程度确定(高温 40 ℃对应循环次数为 2、6、12、21、56；高温 55 ℃对应循环次数为 1、2、6)，直至达到预设循环次数为止。

10）待试验结束后，使试验装置停止工作，且始终保持在试验箱内。先在 1 h 之内将试验箱内相对湿度降到(75±3)%， 再在 1 h 内将试验箱内温度恢复至(25±1) ℃，随后让装置在室温条件下静置恢复至少 1 h，确保其温度完全稳定。

11)最后对装置进行目视检查和工作性能检测，记录检测结果并与试验前数据进行比较(即扫频试验)。其测试应在恢复期结束后马上进行(在 30 min 之内结束)。

在装置初始条件下和经受交替湿热工作 48 h 并恢复至室温后，激励频率对于该试验采用 3 款样机的输出性能的影响如图 14 所示。

由图 14 可知，在初始状态下样机 1 谐振频率为 50.3 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.342 V；在经历 48 h 交替湿热试验后样机 1 谐振频率为 50 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.257 V。在初始状态下样机 2 的谐振频率为 50.5 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.428 V；在经历 48 h 的交替湿热试验后样机 2 的谐振频率为 50.3 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.378 V。在初始状态下样机 3 的谐振频率为 50 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.344 V；在经历 48 h 的交替湿热试验后样机 3 的谐振频率为 50 Hz，对应的输出电压峰峰值为 1.314 V。

通过计算 3 款样机在试验前后的性能参数变化可知：样机 1 的谐振频率下降了 0.6%，对应谐振频率处输出电压峰峰值降低了 6.3%；样机 2 的谐振频率下降了 0.4%，对应谐振频率处输出电压峰峰值降低了 3.5%；样机 3 的谐振频率保持不变，对应谐振频率处输出电压峰峰值降低了 2.2%。根据本文设置的能量采集装置性能评估指标，3 款样机的谐振频率及对应谐振频率处的输出电压在经历湿热工作试验后都没有达到失效标准，所有样机目视检查结果合格。

本文采用的能量采集装置分别在高温高湿和低温高湿阶段性能保持不变，且装置中永磁体性能在经历极端温度环境中工作后几乎没有任何变化。装置中永磁体的力学性能和磁学性能没有受到影响。

此外，器件性能退化存在不一致性，其根源在于人工组装能量采集装置时，拾振梁与永磁体的粘接工艺中，胶粘剂的用量、涂布位置及均匀性存在差异，进而导致器件间的性能离散性。由试验结果可推断，本文采用的能量采集装置可通过更换耐高温且耐潮湿的胶粘剂，或对胶粘剂在拾振梁与永磁体间的涂布方式进行标准化规范，以提升器件在交变湿热环境下的工作可靠性。

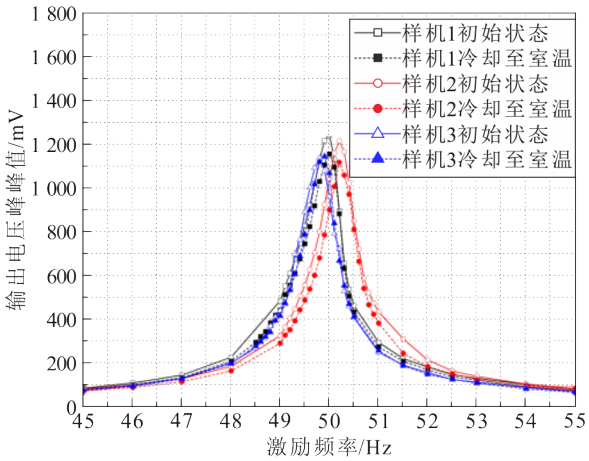


图 14　湿热试验前后激励频率对装置输出性能影响关系图

Fig.14　Plot of the effect of excitation frequency on the output performance of the device before and after the damp heat test

4　结论

1）本研究针对基于悬臂结构的磁机电耦合能量采集装置，开展环境可靠性测试，验证其在复杂工况下的高可靠性。研究结果为装置可靠性优化提供了数据支撑与理论依据，助力后续结构改进与性能提升。

2）试验结果表明，所选样机分别在经历高温、低温、高温高湿和低温高湿环境再恢复至室温条件后，谐振频率偏移均小于 2%，装置谐振频率处的输出电压衰减幅度均小于 10%。

3）本文探究了高温、低温和温湿度耦合环境对磁机电耦合能量采集装置性能的影响。但是，该装置中拾振梁为影响机械稳定性与可靠性的核心部件，长期工作时拾振梁容易受循环载荷或致疲劳失效，后续将针对该装置开展装置长期工作试验。

参考文献　References

[1]　何海龙，李祎，陈赦，等. 面向电力装备自供电传感的微纳能源收

集技术[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3387-3402.
HE Hailong, LI Yi, CHEN She, et al. Micro energy harvesting technologies for self-powered sensing of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3387-3402.
[2] CHEN G, TAO S C, LIANG R Q, et al. Development of a sunlight-driven thermoacoustic engine for solar energy harvesting[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 238: 122047.
[3] ALI A, ALI S, SHAUKAT H, et al. Advancements in piezoelectric wind energy harvesting: a review[J]. Results in Engineering, 2024, 21: 101777.
[4] HASAN A M, ZHU W X, BOWEN C R, et al. Triboelectric nanogenerators for wind energy harvesting[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1(7): 453-465.
[5] TUOI T T K, VAN TOAN N, ONO T. Thermal energy harvester using ambient temperature fluctuations for self-powered wireless IoT sensing systems: a review[J]. Nano Energy, 2024, 121: 109186.
[6] MA X L, ZHAO J, SHOU D H, et al. A highly-flexible and breathable photo-thermo-electric membrane for energy harvesting[J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(15): 2304032.
[7] 王志飞，王心怡，张庆宏，等. 基于复用结构的高灵敏度自取能式无线振动传感器[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2425-2435.
WANG Zhifei, WANG Xinyi, ZHANG Qinghong, et al. High sensitive and self-powered wireless vibration sensor based on reusable structure[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2425-2435.
[8] 张庆宏，王志飞，周晨媛，等. 基于磁场调制的电磁式振动能量采集器调频方法[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2415-2424.
ZHANG Qinghong, WANG Zhifei, ZHOU Chenyuan, et al. Frequency-tuning method of electromagnetic vibration energy harvester based on magnetic field modulation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2415-2424.
[9] 陈赦，胡东阳，汪泓，等. 电网状态监测装置自取能技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2077-2089.
CHEN She, HU Dongyang, WANG Feng, et al. Review on energy-harvesting technology for power grid condition monitoring device[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2077-2089.
[10] 樊绍胜，钟洪亮，岳舟. 基于阻抗自适应调整的输电线路取能装置稳定取能方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(14)：5348-5359.
FAN Shaosheng, ZHONG Hongliang, YUE Zhou. A stable energy acquisition method for transmission line energy extraction device based on adaptive impedance adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5348-5359.
[11] 王维，苏文博，许晨进，等. 换流阀磁场自取能装置取能特性分析及优化[J]. 电力工程技术，2025，44(1)：143-154.
WANG Wei, SU Wenbo, XU Chenjin, et al. Analysis and optimization of energy harvesting characteristics of converter valve magnetic field self-powered harvester[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 143-154.
[12] 高思航，冯少轩，刘咏熙，等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路振动能量收集装置[J]. 电力工程技术，2024，43(5)：208-215.
GAO Sihang, FENG Shaoxuan, LIU Yongxi, et al. Vibration energy harvesting device of transmission line based on triboelectric nanogenerator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 208-215.
[13] 王黎明，李宗，孟晓波，等. 基于电场感应的低功率在线监测传感器的供电技术[J]. 高电压技术，2020，46(2)：538-545.
WANG Liming, LI Zong, MENG Xiaobo, et al. Power supply technology of low power on-line monitoring sensor based on electric field induction[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 538-545.
[14] 高思航，刘咏熙，王锐，等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路微风振动自驱动传感技术[J]. 电力工程技术，2025，44(5)：188-197.
GAO Sihang, LIU Yongxi, WANG Rui, et al. Self-powered sensing technology of wind vibration for transmission lines based on triboelectric nanogenerator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 188-197.
[15] 赵肖斌. 温度、湿度应力在电气·电子产品失效中的作用探讨[J]. 中国新通信，2020，22(3)：244.
ZHAO Xiaobing. The role of temperature and humidity stress in the failure of electrical-electronic products[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(3): 244.
[16] 刘彬. 温度、湿度应力在电气·电子产品失效中的作用[J]. 电子技术与软件工程，2017(10)：235.
LIU Bin. The role of temperature and humidity stress in the failure of electrical-electronic products[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(10): 235.
[17] KUO Y C, CHIEN J T, SHIH W T, et al. The fatigue behavior study of micro piezoelectric energy harvester under different working temperature[C]//Proceedings of SPIE 10967, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XIII. Denver, USA: SPIE, 2019: 109672H.
[18] PANCHAROEN K, ZHU D, BEEBY S P. Temperature dependence of a magnetically levitated electromagnetic vibration energy harvester[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 256: 1-11.
[19] YUN Y C, LA M, CHO S, et al. High quality electret based triboelectric nanogenerator for boosted and reliable electrical output performance[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2021, 8(1): 125-137.
[20] PEDDIGARI M, KWAK M S, KIM H S, et al. Characterization of single-crystal macro-fiber composite-based piezoelectric energy harvesters in various temperature and humidity environments[J]. Ceramics International, 2022, 48(8): 10821-10826.
[21] 鲁启新，吴铁鹰. 振动疲劳试验的自动化[J]. 航空学报，1985，6(5)：474-477.
LU Qixin, WU Tieying. An automated fatigue test system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1985, 6(5): 474-477.
[22] 肖寿庭，杜修德. LY12CZ 铝合金悬臂梁动态疲劳 *S-N* 曲线的试验测定[J]. 机械强度，1995，17(1)：22-24.
XIAO Shouting, DU Xiude. Measurement of a dynamic fatigue *S-N* curve for LY12CZ al alloy cantilever specimens[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995, 17(1): 22-24.
[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 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 2423.2—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, The Standardization Administration of China. Environmental testing for electric and electronic products-Part 2: test methods—tests B: dry heat: GB/T 2423.2—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.
[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 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 2423.1—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, The Standardization Administration of China. Environmental testing-Part 2: test methods—tests A: cold: GB/T 2423.1—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.
[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 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(12 h+12 h 循环)：GB/T 2423.4—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, The Standardization Administration of China. Environmental testing for electric and electronic products-Part 2: test method—test D: damp heat, cyclic (12 h+12 hcycle)[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.



王　真(通信作者)
1992—，男，硕士，高工
主要从事电力物联网与人工智能等研究
E-mail: 951024011@qq.com

WANG Zhen
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2025-06-30　在线出版日期　2025-10-10　　编辑　卫李静