

# 基于复阻抗的低功耗叶片覆冰监测传感器设计

胡章博<sup>1</sup>, 黄忠初<sup>1</sup>, 王宇庭<sup>1</sup>, 何立夫<sup>1</sup>, 肖利涛<sup>2</sup>, 陈碧雨<sup>2</sup>

(1. 中国三峡武汉科创园, 湖北 武汉 430010; 2. 湖北能源集团新能源发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**针对风机叶片覆冰监测设备布线难、体积大、影响气动性能等问题, 基于复阻抗结冰探测技术, 设计了一种无线无源柔性薄膜化叶片覆冰监测传感器。采用太阳能电池供电与 LoRa 无线通信技术相结合, 有效解决了传统监测设备的布线安装难题。设计三层式工艺结构, 实现了传感器柔性薄膜化。采用多种低功耗运行策略, 显著提升了系统的续航能力和运行稳定性。试验结果表明: 传感器环境温度测量精度达到 1.9%, 冰厚测量的均方根误差低至 0.103 mm; 在无光照环境下传感器能持续工作超过 1000 小时, 且不影响风机叶片的气动性能。传感器的精度、续航时间和环境适应性均满足叶片现场应用要求。

**关键词:**叶片覆冰监测; 复阻抗特性; 低功耗; 无线无源; 柔性薄膜化

**中图分类号:** TM934.73; TH73

**文章编号:** 1000-0682(2025)05-0047-06

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.05.009

## Design of a low-power blade icing monitoring sensor based on complex impedance

HU Zhangbo<sup>1</sup>, HUANG Zhongchu<sup>1</sup>, WANG Yuting<sup>1</sup>, HE Lifu<sup>1</sup>, XIAO Litao<sup>2</sup>, CHEN Biyu<sup>2</sup>

(1. China Three Gorges Wuhan Science and Technology Innovation Park, Hubei Wuhan 430010, China;

2. Hubei Energy Group New Energy Development Co., LTD., Hubei Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the difficult wiring, large size, and impact on aerodynamic performance of wind blade icing monitoring device, a wireless passive flexible thin-film sensor is designed to monitor the state of blade icing based on complex impedance icing detection technology. The combination of solar battery power supply and LoRa wireless communication technology effectively solves the wiring and installation problems of monitoring equipment. A three-layer structure is designed, which enables flexible and thin-film sensors. Various low-power operation strategies are adopted to significantly improve the endurance and stability of the system. The experimental results indicate that the accuracy of environmental temperature measurement reaches 1.9% and the root mean square error of ice thickness measurement is as low as 0.103 mm. The sensor can work for more than 1,000 hours under the environment of no light. It does not affect the aerodynamic performance of wind blades. The accuracy, endurance and environmental adaptability of the sensor meet the requirements of wind blade field applications.

**Keywords:** monitoring of blade ice cover; complex impedance measurement of ice thickness; low power consumption; wireless passive; flexible thin filming

## 0 引言

受微地形、微气象影响, 高山地区风电机组叶片

在冬季极易结冰, 叶片结冰不但影响叶片的气动性能, 降低机组的发电效率<sup>[1]</sup>, 还会危及风电机组本体及附近设备、人员的安全等, 危害极大<sup>[2]</sup>。为降低叶片结冰的危害, 及时准确采取措施应对叶片覆冰, 需对叶片结冰状况进行监测<sup>[3-4]</sup>。

目前覆冰状态监测方法主要包括视觉监测<sup>[5]</sup>、光纤传感<sup>[6]</sup>、超声波探测<sup>[7]</sup>、阻抗测量<sup>[8-9]</sup>等。视觉监测技术通过摄像头采集覆冰图像, 结合图像识别算法计算覆冰厚度, 具有部署方便的优势, 但易受

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司项目(立项编号 NBZZ202300860, 项目编号 NBZZ202300669)

第一作者: 胡章博(1997—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事风电装备状态监测与故障诊断研究。

E-mail: hu\_zhangbo@ctg.com.cn

环境光照、天气等因素干扰；光纤传感技术利用光栅传感器测量物体应力变化来推算覆冰厚度，具有较高的测量精度和灵敏度，但量程较小；超声波探测技术通过声信号识别结冰厚度与冰型，但由于技术特性限制，不适用于风机叶片环境<sup>[10]</sup>；而阻抗测量主要通过测量传感器表面物质的阻抗参数计算表面结冰状态，在保持高精度的同时还能具有较大量程，并且其具有齐平保型等优势，特别适用于风机叶片表面安装<sup>[11]</sup>。

尽管现有覆冰监测技术种类繁多，但大多不够成熟，并没有应用于风机叶片的覆冰监测中，风电场站仍主要依赖气象环境数据与风电机组出力情况来辅助判断叶片结冰状态<sup>[12]</sup>。这主要源于风机叶片环境的特殊性：一方面，在旋转叶片外表面安装传感装置面临布线困难等技术挑战<sup>[13]</sup>；另一方面，叶片作为风电机组采集风能的核心部件，其气动外形的完整性直接影响发电效率<sup>[14]</sup>，这对传感装置的体积和外形提出了严格要求<sup>[15]</sup>。

为了实现冬季风机叶片覆冰厚度的实时监测，并克服上述问题，该文基于复阻抗结冰探测原理，提出并研制了无线无源低功耗薄膜化覆冰监测传感器。通过试验，验证了其测量精度、功耗性能与环境适应性。

## 1 复阻抗结冰探测基本原理

复阻抗结冰探测技术的核心在于利用冰、水复介电常数在不同频率范围内的变化特性。冰、水和空气的复介电常数的频率变化曲线如图 1 所示。在 0 °C 条件下，冰、水和空气的复介电常数的实部和虚部分别展现出不同的频率变化特性。在 1 kHz 以下的低频范围内，冰和水的复介电常数实部均保持在较高水平。当频率升高至一定范围时，复介电常数会发生显著变化，这一频率范围被称为弥散区间。对于冰和水而言，它们的弥散区间分别位于 1 ~ 100 kHz 和 1 ~ 10 GHz。特别地，在 100 kHz 至 1 GHz 的频率区间内，冰和水的复介电常数表现出明显的差异，这为复阻抗结冰探测区分冰、水状态提供了理论依据。相较之下，空气的复介电常数在整个频率范围内的变化相对较小，其变化幅度与冰和水相比较可以忽略。复阻抗结冰探测技术是利用冰、水和空气的频率特性来测量冰层的厚度以及冰水混合相态<sup>[16]</sup>。

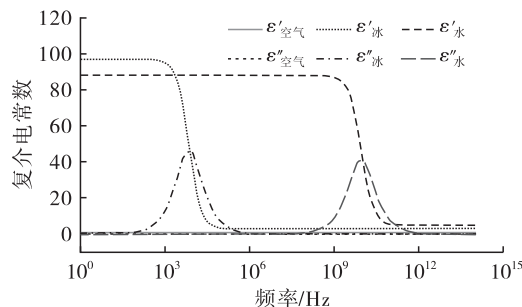


图 1 0 °C 下水、冰和空气的相对复介电常数曲线

在结冰探测的实际应用过程中，复介电常数通常无法直接测量获取，而是借助阻抗测量的方法进行间接推算。在 RC 等效电路模型中，当施加一个交变电压  $V$  时，流经 RC 网络的总电流为电阻电流  $I_R$  及电容电流  $I_C$  之和，有

$$I = I_R + I_C = \frac{V}{R} + i\omega CV \quad (1)$$

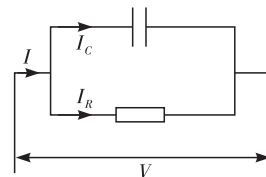


图 2 RC 等效电路模型

由图 2 可得 RC 电路模型的导纳  $Y^*$  可表征为：

$$Y^* = \frac{I}{V} = \frac{1}{R} + i\omega C = G + iB \quad (2)$$

根据阻抗与导纳的关系  $Z^* = \frac{1}{Y^*}$  和阻抗角  $\theta$  推

导出 RC 网络的电导  $G$  及电容  $C$ 。

$$\begin{cases} Z^* = Z' + iZ'' = |Z^*| \cos\theta + i|Z^*| \sin\theta \\ G = \frac{1}{|Z^*| \cos\theta} = \sigma \frac{S}{d} \\ C = -\frac{\sin\theta}{\omega |Z^*|} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可以计算出平行板电容器在 0 °C 下的极间电容值。设定平行板面积  $S$  为 0.01 mm<sup>2</sup>，极间间距  $d$  为 0.1 m，极板间电介质分别为空气、冰和水，则理论电容曲线如图 3 所示。介质为空气时，极间电容不受电压频率的影响，始终维持在较低数值水平。而介质为冰和水时，极间电容值随着频率逐渐增大，分别在 103 ~ 105 kHz 和 109 ~ 1011 kHz 频率区间内迅速下降。这说明了冰和水的介电特性具有差异性，因此利用该特性实现阻抗结冰探测中冰、水相态的识别与冰层厚度的测量。

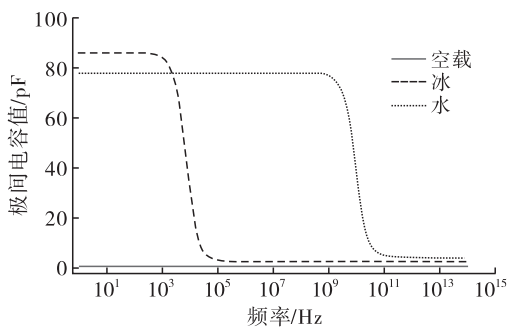


图3 0 °C下平行板电容器极间电容值的理论曲线

## 2 传感器覆冰监测技术方案

针对风机叶片外表面布线困难的问题,传感器采用太阳能电池供电与无线数据传输相结合的方式,取代了传统的有线供电与数据传输模式。这一设计不仅显著简化了安装流程,降低了施工难度,同时提升了系统的灵活性和可维护性。

监测系统由三部分组成,如图4所示,包括感知层、网络层、应用层。感知层为覆冰监测传感器,负责覆冰状态数据的采集。传感器采用薄膜式柔性结构设计,可直接通过胶粘方式固定于风机叶片表面,实时采集并传输粘贴覆盖区域的温度和覆冰厚度数据。网络层为无线网关,负责接收并整合该风机三个叶片上所有覆冰监测传感器传回的状态数据。传感器与网关之间采用LoRa(Long Range Radio)技术传输数据,该技术具有低功耗、长距离传输的优势,特别适用于此类应用场景<sup>[17]</sup>。应用层为管理后台,网关设备通过有线连接将采集到的数据传输至管理后台系统。管理后台具备数据整理、可视化展示和存储功能,可将监测数据实时呈现在用户界面并存入数据库。

此外,系统还支持通过云端API实现远程指令下发和设备控制功能,形成了一个完整的智能化监测闭环系统。

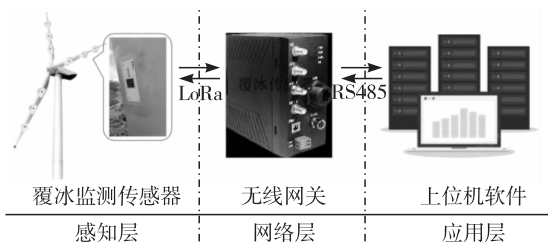


图4 技术方案

## 3 覆冰监测传感器设计

### 3.1 硬件电路设计

传感器的硬件电路如图5所示,主要由供能模

组、测量模组、主控单元和LoRa通信模块构成。

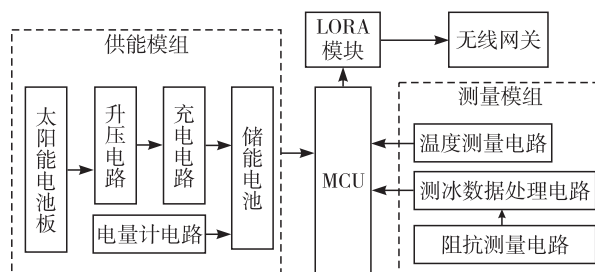


图5 硬件电路组成

供能模组由太阳能电池板、升压电路、充电电路、储能电池和电量计电路组成。太阳能电池板作为能量采集单元,将太阳能高效转化为电能;升压电路将太阳能电池板输出的0.9~5 V波动电压稳定提升至5 V直流输出,确保系统供电稳定性。充电电路接入锂电池,精确管理锂电池的充放电过程,当锂电池亏电时将太阳能板转换的电能对电池充电,当锂电池达到截止电压时,停止充电,保护电池,防止过充,有效延长电池使用寿命。储能电池作为能量存储单元,为传感器提供持续稳定的电力供应,保障系统长期可靠运行。电量计电路基于补偿放电结束电压(CEDV)算法,通过I<sup>2</sup>C接口与主控芯片实现数据交互,实时监测并提供电池剩余电量(mAh)、充电状态(%)、续航时间(分钟)、电池电压(mV)、温度(°C)和健康状况(%)等多维度关键参数,为系统能源管理提供精准数据支持。

测量模组由温度测量电路和覆冰测量电路两个功能单元组成。温度测量电路具有-40 °C至+125 °C的宽范围量程,静态电流仅3.5 μA,确保低功耗运行。覆冰测量电路包括两部分:阻抗测量电路与测冰数据处理电路,阻抗测量电路通过采样线与测量电极连接,采集电极的电容数据并转换为数字信号;测冰数据处理电路基于STM32L0芯片,通过SPI接口与AD采样芯片通信,对冰厚检测数据进行处理并转换为用户可用的数据格式,最终通过I<sup>2</sup>C接口输出至LoRa模块。

主控芯片采用超低功耗单片机STM32WL,配备I<sup>2</sup>C、SPI和GPIO7控制接口,将传感器采集的数据通过LoRa天线进行无线广播。用户可通过部署在风机机舱内的LoRa网关接收传感器数据,实现远程监测功能。

### 3.2 工艺结构

为了最大程度降低对风机叶片气动外形的影响,传感器采用超薄结构设计,整体厚度控制在2.5 mm以内;同时为适应大尺寸风机叶片在风载荷作用下

的动态形变特性,传感器采用柔性化设计,具备优异的可弯折性和可卷曲性能,能够随叶片形变而自适应调整。如图 6 所示,传感器采用独特的三层式工艺结构,在保证功能完整性的同时实现了结构的极致柔性化、轻薄化。

底层结构以风机叶片保护膜为基础,根据实际需求裁剪适当长度的保护膜作为底部基材,并将其平整放置于模具底层。在保护膜中心区域,以软板 PCBA 基板的尺寸为基准进行适当延展,并去除该区域的背胶离层纸,为后续组装做好准备。



图 6 覆冰监测传感器试样

中层结构作为核心功能层,集成了传感器、储能单元和能量采集单元三大功能模块。其中,传感器基于柔性基材印刷电路,具有优异的可弯曲性和动态形变适应性,显著提升了空间利用率和叶片环境适应性。能量采集模块选用非晶硅锗太阳能电池板,以超薄不锈钢为衬底,柔韧性高,可适应风机叶片表面的弯曲形态,支持任意卷曲、裁剪和粘贴。储能单元采用聚合物低温锂电池,厚度仅为 0.85 mm,可在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的宽温范围内稳定工作,完全满足低温结冰环境下的使用需求。中层采用精密组装工艺,将软板 PCBA 基板背面粘贴在保护膜中心预留区域,利用保护膜自身的粘性实现初步固定,随后采用专用模具进行灌胶处理,确保表面平整度和元器件密封性。通过层压工艺,实现 PCBA 基板与保护膜的无缝贴合,有效消除界面气泡,提升传感器的结构强度。

上层结构在硅胶完全固化后实施,采用与保护膜留白区域尺寸精确匹配的双面背胶胶带进行覆盖。同样运用层压工艺,确保双面背胶与固化硅胶层及保护膜之间的完美贴合,杜绝气泡产生。

在实际安装过程中,只需去除双面背胶和风机叶片保护膜的离层纸,便可将覆冰传感器直接粘贴在经过清洁处理的风机叶片表面。这种三层式结构设计既保证了传感器的可靠便捷安装,又确保了传感器在恶劣环境下的长期稳定运行。

### 3.3 低功耗设计

为保障传感器在太阳能板面积小、储能单元容量少的情况下实现长期稳定的工作要求,传感器整体平均功耗必须降至微安级别。因此采用多种策略实现传感器超低功耗运行。

#### 3.3.1 主控低功耗设计

基于主控系统 STM32WL 单片机的工作模式切换,使用 PWR 电源管理模块执行功耗管理。系统采用 RTC(实时时钟)结合 STOP2 低功耗模式的控制策略,以实现超低功耗运行和高效的数据采集与上报。系统默认进入 STOP2 模式,在此模式下,单片机的功耗降至最低(典型电流  $1\text{ }\mu\text{A}$ ),RTC 基于低频晶振(LSE,  $32.768\text{ kHz}$ )提供精确的时间基准,周期性唤醒系统以执行定时任务。其自动唤醒功能无需外部中断,减少了系统功耗,并在唤醒后保持原有参数,继续执行程序。

#### 3.3.2 基于电量的自适应调节策略

设计了基于电量的自适应调节策略,如图 7 所示。电量计实时监测电池的剩余电量和健康状态,并将这两项指标反馈至主控单元。当电量低于安全阈值时,系统自动切换至待机充电模式,以确保设备安全运行;当电量高于安全工作阈值时,系统将启用环境温度监测功能,若环境温度高于覆冰临界温度,系统仅维持温度采集功能以降低无效功耗;若环境温度低于临界值,则启动覆冰状态数据采集功能,运行过程中根据电量,自适应调节相关参数以保持最低功耗。

其中自适应调节机制基于模糊控制算法,根据电池剩余电量  $C$  动态调整通信扩频因子  $SF$ 、发射功率  $P_t$  和传感器采集周期  $T$  等关键参数。模糊控制器采用四输入三输出架构,具体输入变量包括  $C$ 、 $SF$ 、 $P_t$ 、 $T$ ,输出变量为  $\mu SF$ 、 $\mu P_t$  和  $\mu T$ 。在模糊集控制规则设计中,将变量参数划分为 8 个等级:将电量  $C\%$  划分为 8 档,  $C = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ ;扩频因子  $SF$  划分为 8 档,  $SF = 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ ;发射功率  $P_t$  划分为 8 档,  $P_t = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22\text{ dBm}$ ;将传感器采集周期  $T$  划分为 8 档,  $T = T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_7, T_7, T_8$ ;通过上述规则进行模糊决策,进而实现不同电量对应不同的通信扩频因子、发射功率、传感器采集周期。配置完成后,根据传感器采集周期,主控模块进入对应时长的低功耗休眠状态,所有传感器电源关闭,定时时间到,主控退出休眠,然后进入循环工作模式,再次运行以上流程。

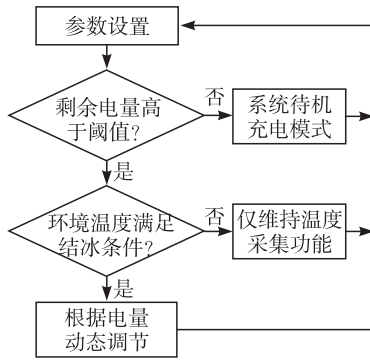


图 7 自适应调节流程图

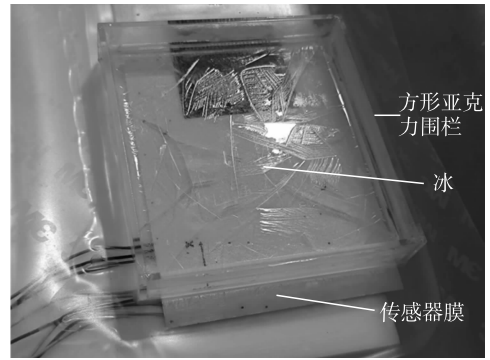


图 8 冰厚测量试验平台

## 4 试验测试

### 4.1 温度测量精度测试

为验证传感器测温模块的测量精度,采用恒温恒湿试验箱进行系统测试。将两个传感器样品置于试验箱内,设置目标温度值,待箱内温度达到设定值并稳定后,记录传感器的温度检测值。测试温度范围覆盖  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  为间隔设置测试点。测试结果详见表 1 所示。

试验结果表明,在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围之内,传感器温度测量模块工作正常,测量精度较高,达到 1.9%。

表 1 温度测量试验结果

试验箱温度/ $^{\circ}\text{C}$	样品 1 温度/ $^{\circ}\text{C}$	样品 2 温度/ $^{\circ}\text{C}$
-20	-19.75	-19.93
-10	-9.3	-9.41
0	0.58	0.71
10	10.58	10.51
20	20.03	20
30	29.86	29.84
40	39.66	39.63
50	49.6	49.54
60	59.39	59.43
70	69.21	69.25

### 4.2 冰厚测量精度测试

为检测风电叶片覆冰监测传感器结冰探测的准确性,搭建试验平台如图 8 所示。实验在水平放置的冷冻柜内进行,采用集成化设计将传感器测量电极及其电路封装于柔性膜上。实验装置上方采用亚克力板构建方形密闭区域。

实验过程中,通过注射器定量注入去离子水,控制冷冻条件,实现特定厚度冰层的制备。通过调节冷冻柜的制冷参数,精准控制测试环境温度。测试厚度范围为  $2\text{ mm}$  至  $20\text{ mm}$ 。为消除边缘效应,冰层制备后需在恒温条件下静置 30 分钟使冰晶结构充分稳定,随后进行厚度测量。

试验结果如图 9 所示,传感器测量结果与实际冰层厚度相近,二者均方根误差为  $0.103\text{ mm}$ ,测量精度较高。

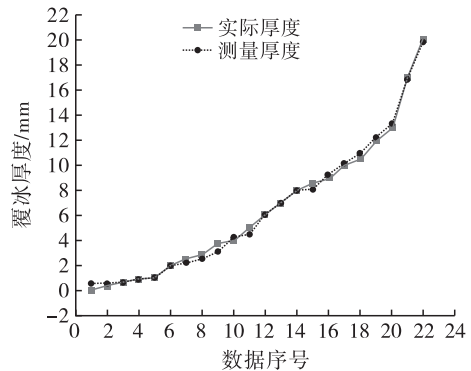


图 9 覆冰厚度测量实验结果

### 4.3 功耗测试

对叶片覆冰监测传感器的整体功耗进行测试分析。将完全充满电量的覆冰监测传感器置于恒温恒湿试验箱内,温度设定为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。保持无光环境下的正常工作模式,记录电量变化,直至电量消耗至安全工作阈值 3% 时,计算传感器总的工作时长。实验结果如表 2 所示,当工作时长达到 642 h、796 h、1012 h 时,电量逐渐降低至 43%、25%、3%。这表明传感器可以在无光照情况下实现 1000 小时以上的超长续航,完全满足风电机组叶片的应用要求。

表 2 传感器功耗测试

工作时长/h	电量百分比/%	电池电压/mV
0	100	4332
642	43	3831
796	25	3745
1012	3	3529

#### 4.4 风机叶片气动性影响测试

风电机组的发电能力是其核心性能指标,因此评估在风机叶片外表面安装传感器对发电性能的影响至关重要。为分析覆冰监测传感器的影响,选定真实的风电场站并进行叶片覆冰监测传感器的安装应用。统计分析了风电机组安装覆冰监测传感器前后三个月的风功率曲线对比,如图 10 所示。安装叶片覆冰监测传感器后,风电机组的风速-功率散点与安装前基本重合,这表明风电机组的发电效率未发生变化,安装叶片覆冰监测传感器不会对风电机组叶片的气功性能产生不利影响。

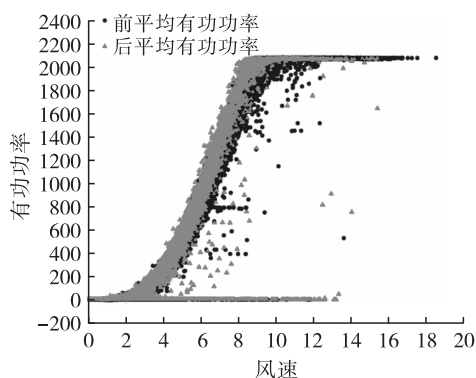


图 10 安装覆冰传感器前后机组风功率曲线对比

## 5 结束语

该文基于复阻抗结冰探测技术,设计了一种柔性、低功耗风机叶片覆冰监测传感器,实现了风机叶片覆冰状态的实时、长期、精准监测。在硬件设计方面,通过采用柔性电路印刷工艺和柔性器件选型,实现了传感器的薄膜化与柔性化,适应风机叶片的动态形变;在功耗优化方面,通过采用低功耗主控系统、基于电量的自适应调节策略,显著降低了系统能耗,确保了传感器在无线无源条件下的长期稳定运行。

试验结果表明,温度测量模块与冰厚测量模块工作正常,在  $-20 \sim 70$  °C 的环境下,温度测量精度达到 1.9%;覆冰厚度为 2 mm 至 20 mm 之间时,测量均方根误差低至 0.103 mm。在低功耗无线通讯策略控制下,一次充电的续航时间超过 1000 小时,

可完全适应风机叶片现场应用要求,且对风机发电效率完全无影响。该监测装置具有体积小、可弯折、易安装、长续航、精度高等优点,具有较高的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] WEI K X, YANG Y E, ZUO H Y, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine[J]. Wind Energy, 2020, 23(3): 433 - 457.
- [2] 沈学利, 杨莹, 秦鑫宇, 等. 基于残差神经网络的风机叶片结冰故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 79.
- [3] Guo P, Infield D. Wind turbine blade icing detection with multi - model collaborative monitoring method[J]. Renewable Energy, 2021, 179:1098 - 1105.
- [4] 刘庆超, 郭鹏, 张伟, 等. 多参数模型风电机组叶片结冰监测与预警研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 402 - 407.
- [5] 郝艳捧, 刘国特, 薛艺为, 等. 输电线路覆冰厚度的小波分析图像识别[J]. 高压电技术, 2014, 40(2): 368 - 373.
- [6] GUI X, ZENG F, GAO J, et al. Detection of Aircraft wing icing and de - icing by optical fiber sensing with FBG array[J]. Measurement, 2025: 116748.
- [7] MAIO L, MOLL J, MEMMOLO V, et al. Ultrasonic inspection for ice accretion assessment: effects on direct wave propagation in composite media [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 173:109025.
- [8] GUI K, LIU J Y, GE J F, et al. Atmospheric icing process measurement utilizing impedance spectroscopy and thin film structure [J]. Measurement, 2022, 202: 111851.
- [9] NEUMAYER M, BRETTERKLIEBER T, FLATSCHER M. Signal processing for capacitive ice sensing: electrode topology and algorithm design[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1458 - 1466.
- [10] 赵伟伟. 基于压电材料的飞机结冰探测系统[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- [11] 任宏宇, 苑丹丹, 桂康, 等. 复阻抗式结冰探测技术的温度补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 28(6): 88 - 94.
- [12] 刘庆超, 郭鹏, 张伟, 等. 多参数模型风电机组叶片结冰监测与预警研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 402 - 407.
- [13] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 269 - 92.

(下转第 63 页)

中对钻孔雷达系统实际应用效果进行了试验验证,该次试验有效探测到煤岩交界面及地层岩性变化,且与钻孔伽马探测结果相符,该次试验充分验证了钻孔雷达在单孔反射模式下在实际工况中的应用效果,进一步验证了仪器对地质异常体的探查能力;(3)单孔反射雷达及其施工工艺在地质异常体探测方面展现出明显优势。结合煤矿生产实际,在百米以浅的钻孔中应用时,采用人工推送方式更为灵活便捷。然而,在长距离钻孔探测中,现有推送工艺仍存在一定局限,需进一步开展研究,例如探索基于小体积、低成本、本安型机器人的推送工艺,以提升其适应性与工程实用性。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 国家能源局网站. 2025年能源工作指导意见政策解读[EB/OL]. (2025-02-27) [2025-02-27]. [https://www.gov.cn/zhengce/202502/content\\_7007284.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202502/content_7007284.htm).
- [2] 中华人民共和国应急管理部. 关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知[EB/OL]. (2020-03-03) [2020-02-25]. [https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202012/t20201207\\_374225.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202012/t20201207_374225.shtml).
- [3] 董书宁. 人工智能技术在煤矿水害防治智能化发展中的应用[J]. 煤矿安全, 2023, 54(05): 1-12.
- [4] 陈小林. 智能化矿山建设背景下的煤矿监管监察模式[J]. 煤矿安全, 2022, 53(08): 237-241.
- [5] 梁文彬, 范凯, 卓军. 复杂地质条件工作面构造探测及智能化开采技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 188-191.
- [6] 汪继学, 沈浩宇, 郑兆伟, 等. 隐蔽致灾因素特征及防治措施研究[J]. 煤炭与化工, 2024, 47(06): 67-70.
- [7] 王嘉伟, 王海军, 吴汉宁, 等. 基于三维地质建模技术的煤矿隐蔽致灾因素透明化研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(03): 71-81+121.
- [8] 吴敏杰. 神北炭灰沟煤矿隐蔽致灾因素探查及分析[J]. 煤矿安全, 2023, 54(05): 252-256.
- [9] 罗忠琴, 刘鹏, 唐建益, 等. 煤矿隐蔽致灾因素地震勘探现状与发展方向[J]. 中国煤炭, 2023, 49(01): 16-29.
- [10] 宋雷, 黄家会, 杨维好. 钻孔地质雷达工作原理及应用[J]. 物探与化探, 1999(06): 454-458.
- [11] 田小超, 蒋必群. 随钻伽马测井探管节电降耗控制方法与系统设计[J]. 煤矿安全, 2022, 53(01): 161-166.
- [12] 田小超. 基于STM32的测井仪采控一体化电路设计[J]. 煤矿机械, 2023, 44(01): 18-21.
- [13] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(07): 1-12.
- [14] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第1部分: 设备 通用要求: GB 3836.1-2021[S]. 2021-10-11.
- [15] 田小超. 以STM32单片机为核心的数据采集与控制电路设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(06): 25-28+40.
- [16] 赵佳佳, 郭爱军, 汪凯斌, 等. 一种通用型矿用物探仪器锂电池充电管理系统[J]. 电子设计工程, 2022, 30(03): 158-162.
- [17] 邱建斌, 陈月卿, 范桂有, 等. 基于FPGA的高精度宽频测量校准仪研制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(01): 52-59.
- [18] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆炸性环境 第4部分: 由本质安全型“i”保护的 设备: GB 3836.4-2021[S]. 2021-10-11.
- [16] Matthias F, Markus N, Thomos B. Maintaining critical infrastructure under cold climate conditions: A versatile sensing and heating concept[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2017, 267(1): 538-546.
- [17] 郭政, 徐乐, 张海英, 等. 基于移动捎带的5G广域物联网信息传输方法研究[J]. 电信科学, 2024, 40(3): 15-28.

(上接第52页)

- [14] 周季峰, 石腾, 许波峰. 风电机组叶片损伤故障检测技术研究进展[J]. 新能源进展, 2023, 11(6): 556-563.
- [15] 岳凤英, 李永红, 王中山, 等. 新型柔性压力传感器阵列在风力机叶片受力测试中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 691-694.