

[无线测试]

智能电网中避雷器无线测试装置的优化设计

文/黄继来 曹辉 周辽 刘冲 陈翔翔 刘茂集
国网浙江省电力有限公司温州供电公司

对智能电网避雷器无线测试装置的性能瓶颈进行分析，提出优化设计方案。从通信性能、测量准确度、功耗及系统集成四个方面进行论述。实验验证结果表明，优化设计后的装置在通信、测量准确度、功耗与稳定性方面均达到预期效果，解决现有系统在长时间高效运行中的不足，为智能电网避雷器的在线监测提供有效的技术支持。

随着智能电网的发展与电力设备监测需求的提升，避雷器作为重要的保护设备，其在线监测与故障诊断变得愈加重要。近年来，无线测试装置由于其高效、便捷的特点，成为避雷器监测的研究热点之一。尽管现有研究取得了一定的进展，但无线测试装置在通信稳定性、测量准确度、低功耗与系统集成等方面仍存在诸多挑战。本文通过优化无线通信模块、提升测量准确度、设计低功耗系统及模块化集成，提出一种更加高效可靠的智能电网避雷器无线测试装置，为智能电网的安全运行提供技术支持。

现有无线测试装置问题分析

现有无线测试装置在智能电网中的应用面临以下技术问题。

1) 通信模块性能不足。常用的ZigBee、蓝牙或Wi-Fi协议限制了数据传输速率与覆盖范围，同时抗电磁干扰能力弱，导致在高噪声环境中误码率上升，影响数据传输的实时性与准确性。

2) 测量准确度较低。高准确度传感器在分辨率与线性度上不达标，模数转换器（ADC）存在量化

误差，数据处理算法不优化，导致测试数据偏差较大，无法准确反映避雷器状态。

3) 功耗较高。采用高功耗微控制器单元（MCU）与高频通信模块，缩短电池寿命，增加维护成本，限制装置的长期运行与大规模部署。

4) 系统集成度低。模块化设计不足，导致设备体积大、维护复杂，缺乏扩展性与兼容性，难以满足智能电网的多样化需求。

无线测试装置优化设计方案

1. 通信模块优化

在通信模块优化中，采用LoRaWAN协议，因其具有远距离、低功耗的优势，适应智能电网中的复杂电磁环境。LoRaWAN使用Chirp Spread Spectrum（CSS）调制技术，有效降低信号衰减，并在低信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）环境中提高数据可靠性。LoRa信号接收功率与路径损耗、频率和天线增益等因素密切相关，其表达式为

$$P_{\text{received}} = P_{\text{transmitted}} + G_{\text{antenna}} - L_{\text{path loss}} \quad (1)$$

式中， P_{received} 为接收信号功率，dBm； $P_{\text{transmitted}}$ 为发送信号功率，dBm； G_{antenna} 为天线增益，dB；

基金项目：国家电网有限公司双创孵化资金项目“全站氧化锌避雷器带电测试装置（无线）的研究”（B711JZ24000G）

$L_{\text{path loss}}$ 为路径损耗，dB。

选择Semtech SX1276 LoRa模块，具有高达-137 dBm的接收灵敏度，能够在长距离内稳定传输数据，降低误码率（Bit Error Rate, BER）。此外，采用YSF-915-4dBi高增益天线，增强信号接收范围与抗干扰能力，确保通信链路的可靠性。

2. 准确度提升方法

测量准确度直接影响无线测试装置的准确性和稳定性，尤其在电压、电流等高精度测量方面。为提高准确度，选用Analog Devices AD7606 16位模数转换器（ADC），其具有低量化误差和优良的线性度。同时，采用Kalman滤波器处理数据，以减少噪声与外部干扰带来的误差。卡尔曼滤波器的系统状态估计过程为

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (2)$$

式中， $\hat{x}_{k|k}$ 为系统估计值； K_k 为卡尔曼增益； y_k 为观测值； H_k 为观测矩阵。

此外，系统采用低噪声放大器（Low Noise Amplifier, LNA）以进一步提高信号质量，减小噪声对测量结果的影响，优化信号与噪声比（SNR）。为精确测量电流、电压等物理量，选用Honeywell的电压传感器（如PR-15系列），其具有高线性度与低偏移量的特点。

3. 低功耗设计

低功耗设计是确保无线测试装置长时间高效运行的关键。采用Texas Instruments CC2650低功耗微控制器（MCU），支持深度睡眠模式，非活动状态下功耗仅为数微安（ μA ），显著延长装置运行时间。系统还引入动态电压调节（DVS）技术，根据负载自动调整工作电压与频率，以进一步降低功耗。功耗（PPP）与电压（V）和电流（I）之间的关系为

$$P = VI \quad (3)$$

此外，采用LoRaWAN的自适应数据速率（ADR）技术，根据链路质量动态调整数据传输速率，减少冗余数据传输，降低整体功耗。ADR的传输功率调整公式为

$$P_{\text{transmit}} = P_{\text{max}} - \Delta P \quad (4)$$

式中， P_{transmit} 为实际传输功率； P_{max} 为最大传输功率； ΔP 为根据链路质量调整的功率增量。

通过这些低功耗设计，系统在保证数据传输质

量的同时，能够显著延长电池寿命，满足长期监控需求。

4. 系统集成与模块化设计

系统集成与模块化设计通过高效资源利用与灵活功能扩展，简化系统开发与维护。采用System on Chip (SoC)架构，将核心处理、数据传输和传感器接口等功能集成在单一芯片上，提升集成度并降低功耗。选用STM32L4系列微控制器，搭载ARM Cortex-M4核心，支持高速处理与低功耗运行，适合智能电网的长时间运行需求。模块化设计将系统分为独立模块，包括传感模块、通信模块和数据处理模块，各模块通过I2C、SPI等标准接口连接。传感模块使用Honeywell HPM115S0颗粒物传感器，能在动态电力环境中实时采集数据。通信模块结合LoRaWAN与BLE协议，实现远程与近距离通信，确保数据可靠传输。数据处理模块集成嵌入式处理器与实时操作系统（RTOS），进行实时数据处理与反馈控制。系统集成与模块化设计的流程图如图1所示。

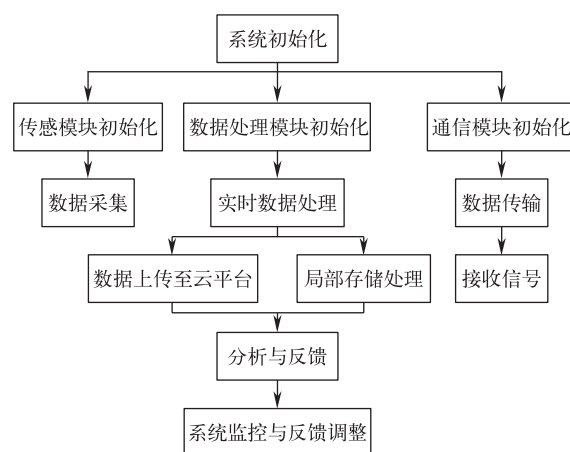


图1 系统集成与模块化设计流程图

优化设计方案的实验验证

1. 实验设计与环境搭建

为验证优化设计方案的有效性，实验设计涵盖通信模块、测量准确度、功耗与系统集成性能。实验环境搭建模拟电网测试平台，包含负载模块、电压传感器、温湿度传感器、无线通信模块与数据处理单元。核心设备包括Texas Instruments CC2650低功耗微控制器、Semtech SX1276 LoRa模块、Analog Devices AD7606模数转换器（ADC）等。

实验分为4部分：①通信性能测试、测量准确度测试、功耗测试与系统集成测试。通信测试通过比较LoRaWAN与传统通信系统在信号覆盖、误码率与传输速率上的差异；②准确度测试对比优化前后的电压、电流测量误差，验证卡尔曼滤波器与高准确度ADC的效果；③功耗测试评估低功耗设计的运行时间与能源消耗；④系统集成测试评估各模块协作能力，验证数据采集、处理与传输的稳定性与延时。实验设备包括Honeywell PR-15电压传感器、YSF-915-4dBi高增益天线、Rigol DS1054Z数字示波器等，所有测试在实验室控制环境里进行，以确保数据的准确性与可重复性。

2. 测试结果

通过一系列实验，测试了无线测试装置的主要性能指标，包括通信性能、测量准确度、功耗与系统集成表现。实验结果总结如下。

1) 通信性能测试，系统集成与模块化设计流程见表1。

表1 系统集成与模块化设计流程

测试项目	优化前 (传统系统)	优化后 (LoRaWAN)	提升幅度 (%)
最大发送距离/m	500	1 500	200
误码率 (BER)	2.4×10^{-4}	5.0×10^{-5}	79.17
最大传输速率/(bit/s)	500	1 200	140

通过实验，优化后的LoRaWAN通信模块在距离、误码率和传输速率上均表现出了显著的提升，特别是在高干扰环境下，误码率显著降低，稳定性和可靠性得到了增强。

2) 测量准确度测试，测量准确度测试的数据见表2。

表2 测量准确度测试数据

测量项目	优化前 (传统系统)	优化后 (卡尔曼滤波+ADC)	精度提升
电压测量误差 (%)	± 3	± 0.5	83.33
电流测量误差 (%)	± 2.8	± 0.3	89.29
数据延迟/ms	120	40	66.67

优化后的系统在电压和电流测量准确度上取得显著提高，特别是在使用卡尔曼滤波处理后的数据，其误差显著减少，且数据响应速度也得到了显著提升。

3) 功耗测试，如图2所示，低功耗设计在不同

工作模式下均表现出了显著的功耗下降，尤其在空闲模式下，功耗降低了80%，极大延长了设备的工作寿命，适应了智能电网长期在线监控的需求。

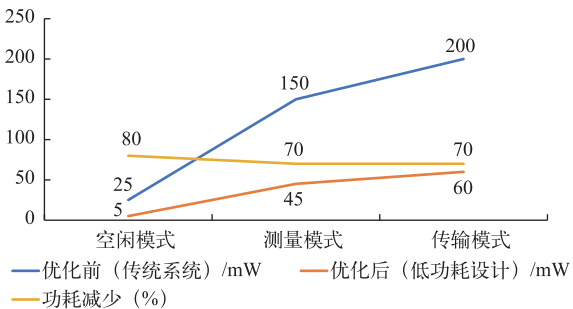


图2 功耗测试数据图

4) 系统集成与性能验证，系统集成与性能验证的测试数据见表3。

表3 系统集成与性能验证测试数据

测试项目	优化前 (传统系统)	优化后 (系统集成)	提升幅度 (%)
系统响应时间/ms	350	120	65.71
数据传输稳定性 (%)	85	98	15
系统可靠性 (%)	90	99	10

优化后的系统集成度显著提升，响应时间偏短，数据传输的稳定性和可靠性大幅提高，能够更好地应对智能电网中可能出现的各种异常情况。

结束语

本研究提出的智能电网避雷器无线测试装置优化设计方案，显著提高装置的通信性能、测量准确度、低功耗表现及系统集成度。优化后的LoRaWAN通信模块在通信距离、误码率及传输速率方面均表现出显著提升，最大传输距离可达1 500 m，误码率降低至 5.0×10^{-5} ，传输速率提高至1 200 bit/s。测量精度通过采用卡尔曼滤波与高精度ADC显著提高，电压误差控制在 $\pm 0.5\%$ ，电流误差控制在 $\pm 0.3\%$ 。低功耗设计将功耗降低至传统系统的20%以下，延长了装置的工作寿命。系统集成后的无线测试装置响应时间缩短至120 ms，数据传输稳定性提高至98%。通过这些优化，装置在智能电网环境中具备了更高的可靠性、稳定性及长时间运行的能力，能够满足未来电力系统监测的需求。EA

(收稿日期：2025-06-25)