

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407779

基于罗氏线圈和 CEEMDAN 的雷电流波形测量方法*

徐伟¹ 李想¹ 王学孟² 刘岩^{3,4}

(1. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044; 2. 广州市气象公共服务中心 广州 511400;

3. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京气象科技创新研究院 南京 210041;

4. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 北京 100081)

摘要:浪涌保护器中嵌入雷电流波形测量模块为其老化分析提供了数据支撑。针对目前浪涌保护器中雷电流测量存在不能记录完整电流波形、噪声较大的问题,通过分析雷电流波形的时频特性,设计由罗氏线圈传感器、低噪声宽带放大、单端转差分、高速模数转换器和现场可编程门阵列(FPGA)等组成的雷电流波形测量系统。FPGA完成采集信号的处理、数据的缓存发送以及雷击计数等功能。通过差分电路和自适应噪声完备集合经验模态分解相结合的方法减小噪声对雷电流波形的影响,采用阈值与斜率联合触发方式,提高雷电流冲击次数计数的准确度。利用雷电防护实验室的雷电流组合波发生器对系统和去噪方法进行了实验测试,结果表明,系统能完整精确地记录雷电流波形,峰值1~10 kA范围内雷电流采集无漏触发现象,峰值的最大测量误差为1.27%,半峰值到达时间的测量误差 $\leq 0.2 \mu\text{s}$,前峰平均坡度测量误差 $\leq 2.04\%$ 。系统将推动浪涌保护器的智能化发展,并为雷电研究提供数据支撑。

关键词:浪涌保护器;雷电流;罗氏线圈;FPGA;CEEMDAN

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Lightning current waveform measurement based on Rogowski coil and CEEMDAN

Xu Wei¹ Li Xiang¹ Wang Xuemeng² Liu Yan^{3,4}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guangzhou Meteorological Public Service Center, Guangzhou 511400, China;

3. Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China; 4. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese

Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The lightning current waveform measurement module embedded in the surge protector provides data support for its aging analysis. To address the current issues in lightning current measurement within surge protectors, such as the inability to record complete waveforms and high noise levels, this study analyzes the characteristics of lightning current waveforms and designs a measurement circuit comprising a Rogowski coil, low-noise wideband amplification, single-ended to differential conversion, high-speed analog-to-digital converter, and FPGA. The processing of collected signals, caching and sending of data, and counting of lightning strikes are completed by FPGA. This design aims to reduce measurement errors in lightning current waveforms. A threshold and slope combining triggering method is employed to enhance the accuracy of counting lightning current impulses. Additionally, a method combining differential circuit and complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise is proposed to reduce the influence of noise on lightning current waveform. Experimental tests were conducted using a lightning current composite wave generator from a lightning protection laboratory to evaluate the system and denoising methods. The results demonstrate that the system can accurately and comprehensively record lightning

收稿日期: 2024-08-22 Received Date: 2024-08-22

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41605121)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B11)、广东省气象局科技项目面上项目、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_0471)资助

current waveforms. The lightning current measurement with the peak range of 1 ~ 10 kA has no leakage trigger phenomenon, a measurement error of $\leq 0.2 \mu\text{s}$ for half-peak arrival time, and a measurement error of $\leq 2.04\%$ for the average slope of the front peak. The system will promote the intelligent development of surge protectors and provide data support for lightning research.

Keywords: surge protective device; lightning current; Rogowski coil; FPGA; CEEMDAN

0 引言

雷电是一种自然放电现象。近年来,雷电流侵入电力和通信系统造成信息设备损坏的事故时有发生。浪涌保护器(surge protect device, SPD)是电力和通信系统中常用的雷电防护器件。当电气回路中出现尖峰电流或过电压时,SPD 内部压敏电阻的阻值会急剧减小,将电流信号泄放大地,从而保护设备的安全^[1-2]。SPD 中嵌入雷电流波形参数测量模块完成峰值、时间、波形等雷电流参数的准确测量,对 SPD 的老化和及时更换具有重要的预警作用^[3-4]。

2016 年,钟林设计了多种触发条件的雷击判断方式,有效的提取 10/350 μs 雷电流波形,可用于 10/350 μs 的雷电流信号监测^[5]。但电子设备前级 SPD 设备多为 8/20 μs 感应雷模型,该采集系统不适用于电子设备前级 SPD 的雷电流波形测量。2020 年~2021 年,陈绍东等^[6-8]采用人工引雷测试 SPD 耐压能力及分析通过 SPD 的雷电流特征,采集数据显示雷电流平均时长为 67 μs ,最大持续时长可达 1 s。这些研究作为雷电流的监测系统设计提供了重要的数据支撑作用。2021 年, Santos 等^[9]使用双通道示波器采集了雷电流数据,并采用光纤传输数据。但系统难以集成到 SPD 中,且没有考虑噪声对测量的影响。2022 年,华国环等^[10]设计了一种高精度雷电监测系统,但时间参数误差大于 0.41 μs ,且采集波形的波头数据部分丢失。2023 年,张雷等^[11]采用霍尔电流传感器采集模拟雷电流信号,采集误差小于 1.51%,霍尔电流传感器测量精度受温度影响较大^[12],且传感器的输入电流范围太小,不适用于感应雷电流的测量。SPD 通常安装在较复杂的电磁环境中,干扰和噪声会影响雷电流波形参数的测量。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)去噪是将信号分解为多个不同频率和振动模式的分量,再利用分量重构原信号,从而达到去噪的目的。自适应噪声的完全集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)通过在每个 EMD 阶段加入自适应白噪声,计算其特定残差,得到每个 IMF 分量,与 EMD 方法相比,克服了模态混叠的问题,有效降低了重构误差。雷电流信号的频谱范围广,重构时若直接舍弃 CEEMDAN 算法分解的高频 IMF 分量,会出现有效高频信息丢失的问题^[13-14]。

综上,目前智能化 SPD 通过峰值检测电路实现雷电流幅值测量,难以记录完整雷电流波形,忽略了时间参数,受干扰噪声影响较大,雷电流冲击计数存在误判,难以为 SPD 的维护更换提供有效参考依据。提出一种改进雷电流波形采集方案,实现雷电流波形全参数的采集。系统结合雷电流的波形特征,设计雷电流高速采集电路,通过采用 CEEMDAN 算法联合小波阈值去噪,避免了 CEEMDAN 在重构时出现波形失真问题。

1 雷电流时频特性分析

1.1 标准雷电流波形

我国的建筑物防雷设计规范国标 GB-50057 划分了浪涌保护器的防护等级,并指出了电子设备前级 SPD 的雷电流冲击测试波形采用 8/20 μs 双指数函数。双指数函数雷电流波形如式(1)所示。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{I_0}{M}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_0 为电流峰值大小; M 为峰值的修正系数; α 与 β 为函数的上升与下降时间的修正系数。双指数函数模型为可微分可积分函数,函数的微分为:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{I_0}{M}(\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

根据微分求极值,即令 $di(t)/dt = 0$ 可确定峰值时间。双指数函数雷电流的波形如图 1 所示。

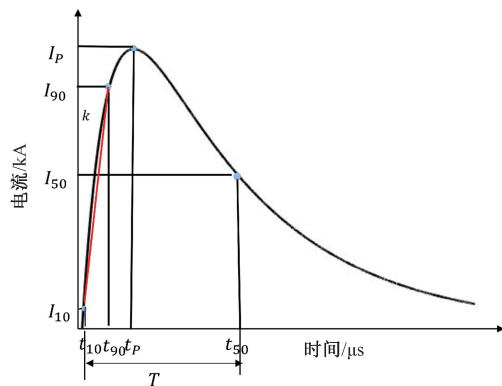


图1 雷电流波形的特征参数

Fig. 1 Characteristic parameter plot of lightning current

图1中雷电流在 t_p 时刻达到峰值 I_p , t_{10} 、 t_{90} 分别为雷

电流上升到 10%、90% 幅值的时间, t_{50} 为下降达到 50% 幅值的时间。定义 $T=t_{50}-t_{10}$ 为雷电流脉冲宽度, $I_{90}-I_{10}$ 与 $t_{90}-t_{10}$ 的比值 k 表示前峰平均坡度^[15]。

1.2 雷电流频谱

雷击电流的频谱范围直接决定了雷电流采样硬件电路的器件选型, 选用双指数函数模型进行频谱分析。

对式(1)做傅里叶变换, 可得:

$$I(\omega) = \frac{I_0}{M} \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \tag{3}$$

$I(\omega)$ 取模, 即所求幅值频谱函数:

$$H(\omega) = |I(\omega)| = \frac{I_0}{M} \frac{\beta - \alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)}} \tag{4}$$

根据电力电子设备前级浪涌保护器测试标准, 选用 8/20 μs 雷电流标准波形绘制频谱图, 如图 2 所示。

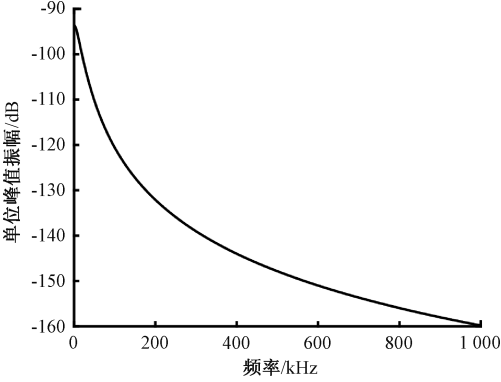


图 2 雷电流频谱
Fig. 2 Lightning current spectrum

根据 Parseval 定理和式(4), 得出 8/20 μs 双指数函数的能量分布函数:

$$w(\omega) = \frac{I_0^2(\beta - \alpha)}{\pi M^2 \alpha \beta (\alpha - \beta)} \left[\beta \arctan\left(\frac{\omega}{\alpha}\right) - \alpha \arctan\left(\frac{\omega}{\beta}\right) \right] \tag{5}$$

由式(5)计算能量分布密度如表 1 所示。分析雷电流频谱能量分布, 振幅主要集中在 10~100 kHz, 能量累积密度在 500 kHz 内占比在 99% 以上。

表 1 8/20 μs 雷电流相对能量累积密度
Table 1 8/20 μs lightning current relative energy cumulative density

频率/kHz	能量累积占比/%	频率/kHz	能量累积占比/%
0.5	0.52	100	74.06
1	1.03	500	99.35
10	10.3	1 000	99.91

2 系统硬件设计

2.1 总体方案

雷电流脉冲具有幅值大、时间短、频谱范围较宽的特点, 现场可编程门阵列 (FPGA) 在高速信号采集和存储方面有着独特的优势, 选用 ALTER 公司的 FPGA 作为控制核心。设计的雷电流波形采样及参数测量系统如图 3 所示。

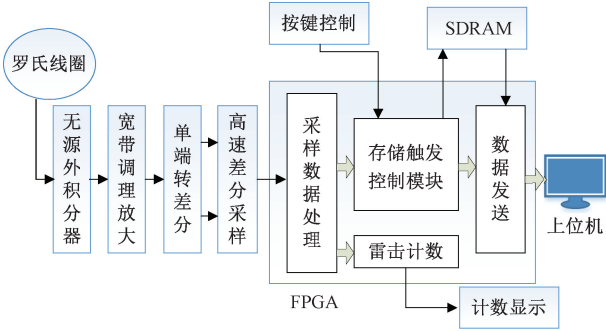


图 3 系统硬件组成
Fig. 3 Hardware composition of the system

图 3 中利用电流互感的原理进行无接触式测量。罗氏线圈不含铁磁性材料, 能测量大电流而不饱和, 频率范围宽, 柔韧性好而适合安装^[16]。系统采用高线性度、幅值和频率响应范围大的罗氏线圈作为雷电流传感器, 感应的电流经过无源积分电路, 输出与雷电流成线性关系的电压信号。设计宽带放大电路对感应电压信号进行调理放大, 以匹配后续采集电路的 ADC 输入范围。为减小被测信号在传输过程中的共模噪声干扰, 采用低噪声高速差分运放将单端电压转换为差分信号, 同时, 内置高性能采样保持和基准源的差分 ADC 实现高速采样。采用 256 Mbit 的 SDRAM 实现高速数据存储, 有效的记录多次雷电流脉冲, 解决持续脉冲电流信号的存储深度问题。FPGA 完成采样控制、数据处理、存储触发、雷击计数等功能。

2.2 雷电流传感电路

雷电流参数采集的关键在于雷电流的准确提取, 使用罗氏线圈采集脉冲大电流信号得到广泛应用^[17-19]。基于法拉第电磁感应原理, 其输出感应电压与被测电流的微分成正比, 其输出经过积分器, 即可得到与一次电流成正比的输出电压。罗氏线圈结构如图 4 所示。

其中, R 为罗氏线圈半径, C 为线圈的线径, $i(t)$ 为穿过线圈中心导线上的电流, $e(t)$ 为输出感应电动势。 $e(t)$ 与输入电流信号的关系为:

$$e(t) = M \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

式中: M 为输入与输出的比例系数。由于输出感应电动势为雷电流信号的微分形式, 需要罗氏线圈的输出端设计积分电路。无源积分器无需电源供电, 适用于大型快变电流脉冲的测量, 等效电路如图 5 所示。

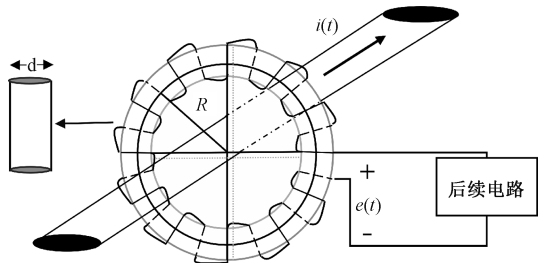


图4 罗氏线圈结构

Fig. 4 Structure of the Roche coil

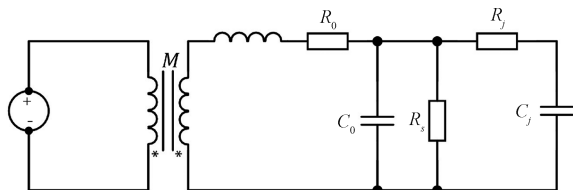


图5 无源 RC 积分罗氏线圈等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of passive RC integrated Roche coil

其中, L_0 、 R_0 、 C_0 分别为线圈等效电感、等效电阻和等效电容, R_j 为线圈的外接电阻, R_j 和 C_j 为积分电阻和积分电容, U_0 为积分后的输出电压。无源积分电路的传递函数 $H(s)$ 可表示为:

$$H(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = \frac{1}{1 + R_j C_j s} \quad (7)$$

当 $R_j C_j s \gg 1$ 时, 式 $H(s)$ 可表示为:

$$H(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = \frac{1}{Ts} \quad (8)$$

其中, $T = R_j C_j$ 表示无源积分的时间常数。

2.3 宽带调理放大及单端转差分电路

安装于电子设备前级 SPD 的雷电流通容量应达到 10 kA。设计采用的罗氏线圈的输入电流和感应输出电压的线性关系为 1 kA/50 mV, 可得线圈积分后输出电压范围为 -0.5~0.5 V, 采用差分 ADC 芯片 AD9226 进行模数转换, 为完成罗氏线圈输出电压范围与 ADC 匹配, 故设计宽带信号放大电路调整线圈积分器的输出电压范围, 宽带信号放大电路原理如图 6 所示。

图 6 中, V_0 为罗氏线圈的积分器输出电压, 第 1 级运放 TL072 作为电压跟随器, TL072 具有高压摆率的特点, 用以信号缓冲隔离。第 2 级放大电路构成比例运放。

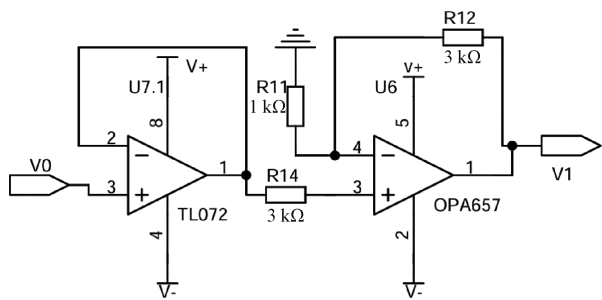


图6 宽带信号放大电路

Fig. 6 Broadband signal amplification circuit

调理放大电路输出 V_1 与输入 V_0 的关系可表示为:

$$V_1 = (1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}) V_0 \quad (9)$$

由式(9)计算可知, 线圈积分器输出电压经过调理后的电压的取值范围为 -2~2 V。

为减小信号链电路上的共模噪声, 将调理后的单端电压转换为差分电压, 再送给差分 ADC。相同的输入电压下, 差分电路产生的电压幅度是单端的 2 倍, 线性度较好。且信号传输中产生的干扰噪声会等值的加载到差分信号上, 其差值可以充分抑制噪声干扰^[20]。模块采用 ADI 公司的低噪声芯片 AD8138 将单端信号转换为差分信号, 输出接入 AD9226 进行高速采样。单端转差分电路如图 7 所示。

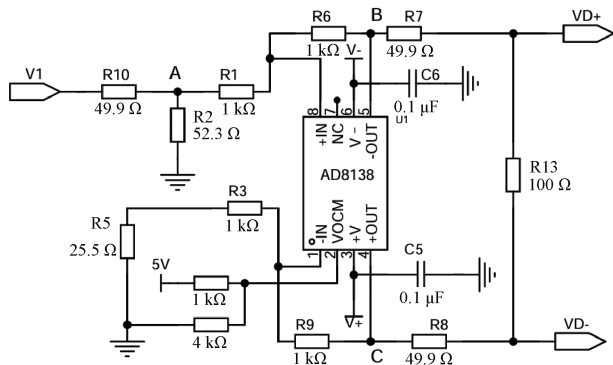


图7 单端转差分电路

Fig. 7 Single-ended conversion differential circuit

电路中 V_1 为调理后的单端电压, V_{ocm} 为共模电压, 转换后的差分电压信号为 V_{d+} 及 V_{d-} 。分析放大器增益 k 及阻抗匹配问题, 计算放大器输入阻抗 R_{in} 。

$$R_{in} = \frac{R_1}{1 - k/[2(1 + k)]} // R_2 \approx 50 \Omega \quad (10)$$

其中, 增益 $k = R_6/R_1$, 同时, 差分放大两输出端分别接 50 Ω 电阻, 保证了差分输出与 ADC 输入的阻抗匹配。

设差分放大器输出 B、C 两点的电压分别为 V_{o+} 与 V_{o-} , A 点电压为差分放大器实际输入 $V_1/2$, 则 AD8138 差

分输出端 V_{o+} 与 V_{o-} 的输出电压为:

$$\begin{cases} V_{o+} = V_{ocm} + k \frac{V_1}{2} \\ V_{o-} = V_{ocm} - k \frac{V_1}{2} \end{cases} \quad (11)$$

差分放大器与差分采样 AD9226 之间存在 50Ω 的阻抗匹配,故 AD9226 的输入电压 V_{D+} 与 V_{D-} 分别为:

$$\begin{cases} V_{D+} = \frac{1}{2} V_{o+} = \frac{V_{ocm}}{2} + \frac{V_1}{4} \\ V_{D-} = \frac{1}{2} V_{o-} = \frac{V_{ocm}}{2} - \frac{V_1}{4} \end{cases} \quad (12)$$

图 7 电路中, $V_{ocm} = 4 \text{ V}$,则由式(12)计算得到,与取值范围均为 $1.5 \sim 2.5 \text{ V}$ 。

2.4 高速差分 ADC 电路

采用高速差分 AD9226 完成雷电流信号的采集,电路如图 8 所示。

引脚 VINA 与 VINB 为差分输入端,基准电压选择 $V_{ref} = 2 \text{ V}$ 。引脚 $BIT_1 \sim BIT_{12}$ 为转换后的 12 bit 数字量, FPGA 提供采样时钟 CLK,输入电压 V_{IN} 为:

$$V_{IN} = V_{D+} - V_{D-} = \frac{V_1}{2} \quad (13)$$

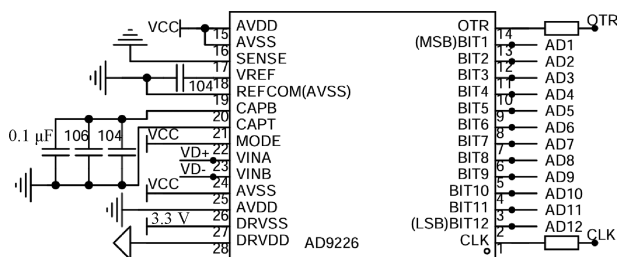


图 8 高速差分 ADC 原理

Fig. 8 Schematic diagram of high-speed differential ADC

可得 AD9226 输入差分电压的峰峰值的最大值为 2 V ,与 ADC 的参考电压范围达到匹配。

2.5 FPGA 逻辑电路

FPGA 完成数据采集、信号处理,数据存储发送以及雷击计数等逻辑功能。RTL 视图如图 9 所示。其中,逻辑模块 AD 完成雷电流信号的判断, Tx_ctl 模块完成数据拼接、存储以及发送控制, pll 模块为 ADC 提供时钟, uart_tx 模块将数据以串行方式输出, number 模块完成雷电流脉冲的计数, seg_led 为计数显示提供段选和位选信号。

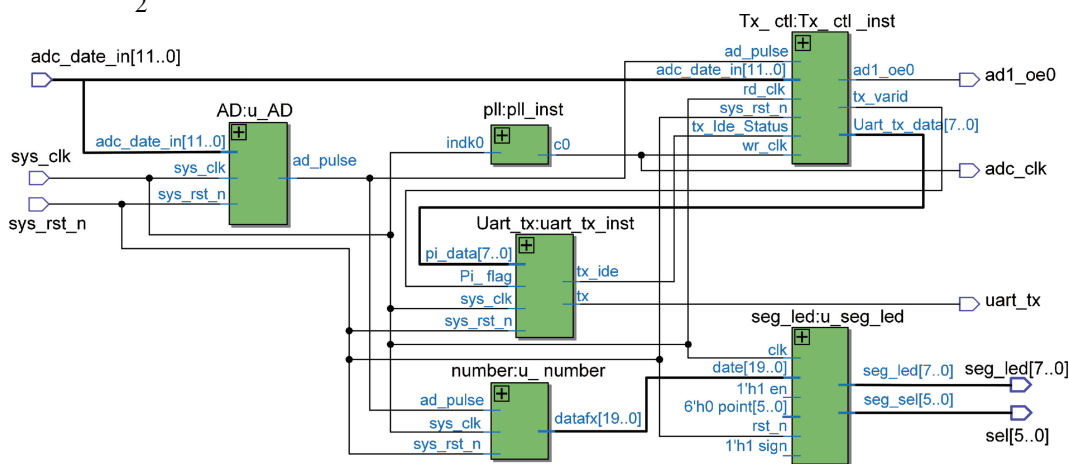


图 9 FPGA 逻辑电路

Fig. 9 FPGA logic circuit

使用 Verilog 语言编程设计雷电流计数触发模块,其逻辑实体如图 10 所示。Ad_data 为输入的 12 bit 采样信号, ad_pulse 为输出至计数模块的触发电平。

相较传统的幅值触发方式,采用阈值与斜率的联合触发减少漏触发、误触发现象,判断条件如下。

条件 1:两个连续采样信号 $|i(t)| \geq I_{\max}$ 时,则认定为有效信号, $I_{\max}$ 为设定阈值。

条件 2:连续两次采样信号斜率满足 $K_{\max} \geq \left| \frac{di}{dt} \right| \geq K_{\min}$, 则判定为有效雷电信号。 $K_{\min}$ 为设定斜率最小值,

$K_{\max}$ 为设定斜率最大值。

数据存储发送控制模块用以控制有效雷电流数据的

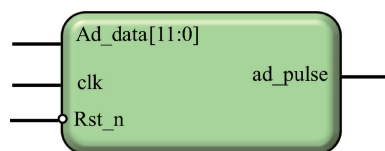


图 10 触发模块逻辑电路

Fig. 10 Trigger module logical circuit

存储与发送,逻辑实体如图 11 所示。数据发送模块单次仅发送 8 bit 宽数据,将 12 bit 采样数据与高四位‘0000’拼接为 16 bit 宽信号后进行发送。设计两级 FIFO 用以数据的缓存处理。

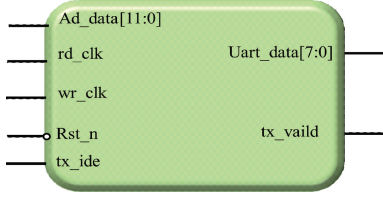


图 11 数据存储发送控制电路

Fig. 11 Data store send control circuit

3 基于 CEEMDAN 的雷电流信号去噪

SPD 通常安装在较复杂的电磁环境中,除采用硬件措施抑制共模噪声外,针对雷电流信号的特点,采用软件算法进一步减小噪声对雷电流波形的影响。

EMD 去噪是将信号分解为多个不同频率和振动模式的分量,再利用分量重构原信号,达到去噪的目的。CEEMDAN 通过在 EMD 分解后加入带辅助噪声的 IMF 分量,有效抑制分解过程出现的模态混叠。

设 $IMF_i(n)$ 为 CEEMDAN 分解的第 i 个本征模态分量, v^j 为服从正态分布的高斯白噪声, $j=1,2,\dots,F$ 为加入高斯白噪声次数, $n=1,2,\dots,N$ 为采样点数,为最终分解 IMF 数量, ε 为高斯白噪声的标准差。

1) 设雷电流序列为 $y(n)$, $q=1,2$ 表示加入高斯白噪声的正负, EMD 分解得到一阶本征模态分量:

$$y(n) + (-1)^q \varepsilon v^j(n) = IMF_1^j(n) + r_1^j \quad (14)$$

2) 对得到的 F 个模态分量求和,并进行平均得到 CEEMDAN 分解的第 1 个本征模态分量:

$$IMF_1(n) = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F IMF_1^j(n) \quad (15)$$

3) 计算去除第 1 个模态分量后的残差:

$$r_1(n) = y(n) - IMF_1(n) \quad (16)$$

4) 在 $r_1(n)$ 中加入正负白噪声得到新信号,对其进行 EMD 分解,得第 2 个本征模态分量:

$$IMF_2(n) = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F IMF_2^j(n) \quad (17)$$

5) 计算第 2 个模态后的残差:

$$r_2(n) = y(n) - IMF_2(n) \quad (18)$$

6) 重复上述步骤,直至残差为单调函数,不能继续分解,设模态分量数量为 K ,雷电流信号分解为:

$$y(n) = \sum_{i=1}^K IMF_i(n) + r_K(n) \quad (19)$$

为选择最佳的分解层数,通过计算雷电流信号分解后的残余分量 $r_K(n)$ 与其余 IMF 分量重构之后信号的互

相关系数来判定。互相关系数达到最小值时,残余分量含雷电流有效信息最少,认定分解层数最佳。

设重构后信号为 $y'(n)$,互相关系数函数表达为:

$$R_{yy'}(\tau) = \sum_{n=0}^N y'(n) r(n - \tau) \quad (20)$$

其中, N 为样本数, τ 为延迟时间,互相关系数最小时,代表达到最佳的分解层数 K 。

雷电流信号分解出的单个 IMF 分量选用固定软阈值、sym6 小波 5 层分解。函数表达式为:

$$IMF_i = \begin{cases} \text{sng}(|imf_i| - \delta), & |imf_i| \geq \delta \\ 0, & |imf_i| < \delta \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\delta = \delta_i \sqrt{2 \ln N} = \frac{\lambda}{0.6754} \sqrt{2 \ln N}$ 。 δ_i 为第层分量的

的标准差, λ 为小波系数在第 i 层的中值, N 为序列长度。

雷电流去噪算法流程如图 12 所示,通过比较各模态分量与原始信号的相关系数,筛选出含噪声的分量,将去噪后和未处理的模态分量重构得到雷电流。

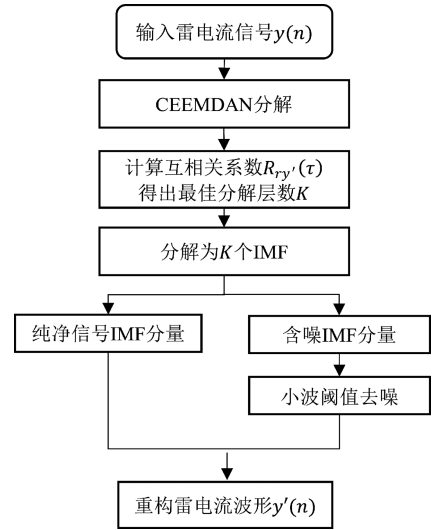


图 12 雷电流波形数据去噪算法流程

Fig. 12 Lightning current waveform data denoising algorithm process

4 实验仿真

4.1 系统测试

使用雷击防护实验室的雷电流冲击平台进行冲击实验,冲击平台如图 13 所示。

罗氏线圈通流导体的偏心位置会影响测量精度,分别将引流线靠近线圈的边缘、开合位置穿过线圈,线圈积分器输出电压的误差测试结果如图 14 所示。

冲击雷电流 1~10 kA 范围内,引流线置于线圈边缘位置时的最大误差为 0.82%,置于开合处最大误差为 1.26%,这表明即使引流线不在其中心穿过,误差也较



图 13 雷电流冲击平台

Fig. 13 Lightning current impinges on the platform

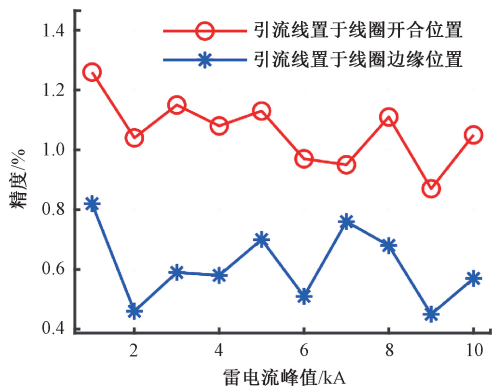


图 14 罗氏线圈偏心位置时产生的误差
Fig. 14 Error generated when the Roche coil is in an eccentric position

小。但需避免引流线置于线圈开合处。

4.2 采样测试

使用雷电流组合波发生器 GPP-CWG-2010 测试采集系统性能,如图 15 所示。

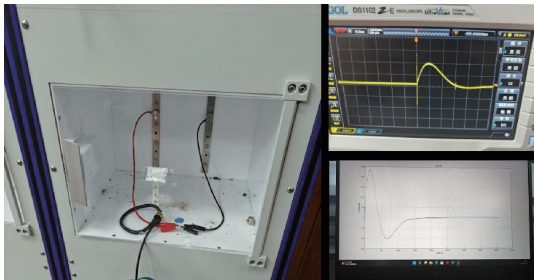


图 15 实验装置连接

Fig. 15 Connection of the experimental setup

冲击平台可输出 8/20 μs 雷电流脉冲,压敏电阻短接冲击平台输出端,引流线置于罗氏线圈传感器中心处,传感器输出端分别连接至示波器与设计的采集电路。使用冲击平台输出不同峰值极性和大小的雷电流脉冲各

10 次,测试系统漏触发的次数,结果如表 2 所示。由表 2 可知,FPGA 的雷击计数模块在雷电流峰值 1~10 kA 范围内未出现雷击漏触发现象。

表 2 雷击漏触发测试

雷电流峰值/极性	漏触发次数/测试次数
1 kA/正	0/10
1 kA/负	0/10
5 kA/正	0/10
5 kA/负	0/10
10 kA/正	0/10
10 kA/负	0/10

为测试采样精度,对雷电流峰值、半峰值到达时间和前波平均坡度 3 个参数进行测量,结果如图 16 所示。

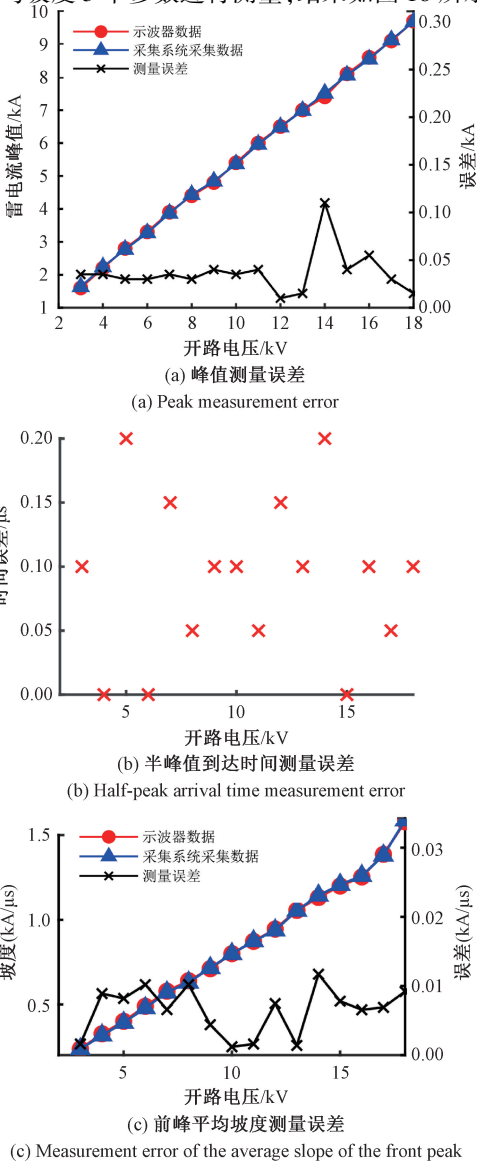


图 16 系统测量雷电流峰值和时间参数

Fig. 16 System measurement of lightning current peak and time parameters

从图 16(a) 可以看出,雷电流峰值测量的最大误差为 0.11 kA,相对误差 $\leq 1.27\%$ 。图 16(b) 中,半峰值到达时间测量误差 $\leq 0.2\text{ }\mu\text{s}$ 。图 16(c) 中,前波平均坡度测量最大误差 0.012 7 kA/ μs ,相对误差 $\leq 2.04\%$ 。

为检验单端转差分电路的去噪性能,分别测试系统含有差分和无差分电路时采集的雷电流波形。测试结果如图 17 所示。图 17(b) 为添加差分电路后的波形,相比图 17(a) 的波形,明显有改善。表明差分电路有效的去除数据传输过程中的噪声干扰。

4.3 雷电流去噪算法效果分析

系统采集的波形数据添加标准差为 0.05 的高斯白噪声,波头至波峰的雷电流上升速度快,具有更强的电磁干扰,为加强对比,在波峰处添加衰减振荡波干扰,设为振荡波起始时间,表达式为:

$$n(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq t_0 \\ \sin[2\pi 10^6(t - t_0)] \times \\ \quad [e^{-10^{5(t-t_0)}} - e^{-10^{6(t-t_0)}}], & t_0 < t \leq 20\text{ }\mu\text{s} \end{cases} \quad (22)$$

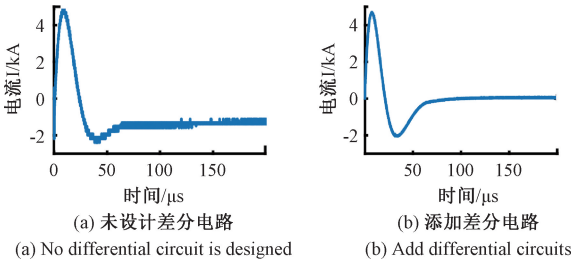


图 17 单端转差分电路测试结果

Fig. 17 Test results of single-ended converter differential circuit

使用 CEEMDDN 算法分解的 IMF 分量如图 18 所示。

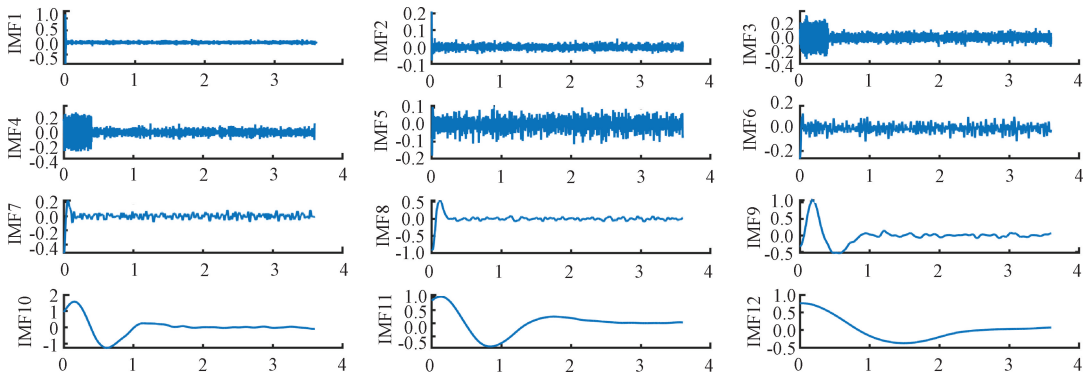


图 18 分解 IMF 分量效果

Fig. 18 Decomposition of IMF component effects

曲线拟合与 CEEMDAN 方法常用作波形信号的去噪处理^[21],为检验去噪效果,分别采用曲线拟合方法、CEEMDAN 算法、联合去噪方法进行对比测试。染噪声信号与消噪结果如图 19 所示。

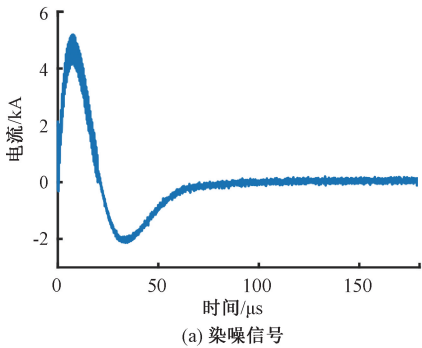
系统采集的雷电流信号作为原始波形,峰值为 8.174 kA,脉冲宽度为 19.85 μs 。将采集的雷电流波形加噪处理,分别使用 3 种方法进行去噪,去噪后的峰值电流、脉宽如表 3 所示。可以看出,基于 CEEMDAN 和小波阈值的雷电流去噪算法取得了最优的效果,去噪后的峰

值和脉冲宽度与原信号的误差均为最小。

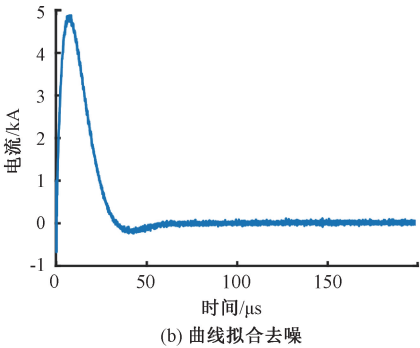
表 3 算法对比

Table 3 Comparison of algorithms

方法	峰值/kA		脉宽/ μs	
	测量值	误差	测量值	误差
曲线拟合	8.437	0.263	20.60	0.75
CEEMDAN	8.216	0.042	19.70	0.15
联合去噪	8.165	0.009	19.90	0.05



(a) 染噪声信号
(a) Stained noise signal



(b) 曲线拟合去噪
(b) Curve fitting denoising

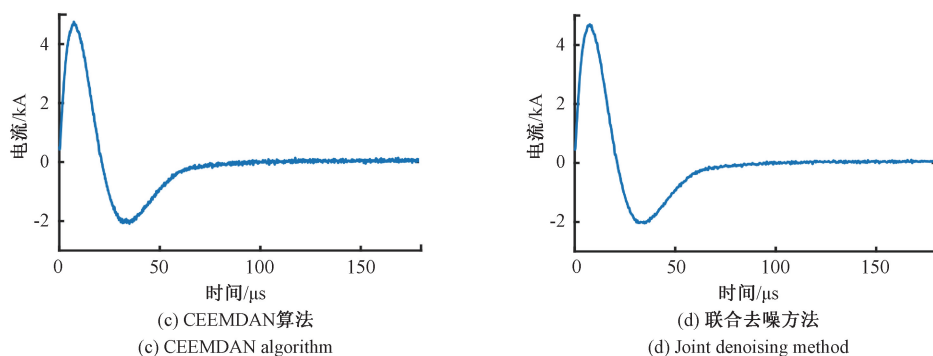


图 19 算法去噪效果对比

Fig. 19 Comparison of denoising effect of the algorithm

5 结 论

系统以 FPGA 为逻辑控制核心,利用其高速缓存的优势实现了雷电流脉冲波形的采集、处理和传输,采用硬件差分电路与 CEEMDAN 软件算法相结合的措施减小了系统干扰噪声的影响。有效的解决了当前智能化 SPD 测量参数单一、冲击计数误判的问题。后续工作是利用该系统进行自然雷电流的采集,优化雷电流识别方法,使系统应用于更多的雷击防护场景。测量模块可集成于 SPD 中,为雷电流波形分析以及智慧防雷提供大数据。

参考文献

- [1] HADJICOSTAS A Y, STAIKOS E T, PEPPAS G D, et al. A simplified transient model of surge protective devices employing varistors[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 109601.
- [2] 徐伟,盛泓,张春龙,等. 多脉冲雷电冲击下 ZnO 压敏电阻的劣化性能[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3785-3793.
XU W, SHENG F, ZHANG CH L, et al. Degradation performance of ZnO varistor under multi-pulse lightning impulse[J]. High Voltage, 2019, 45(12): 3785-3793.
- [3] 陈璞阳,杨仲江,李祥超,等. 氧化锌压敏电阻冲击老化过程中电容量变化的分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 116-121, 127.
CHEN P Y, YANG ZH J, LI X CH, et al. Analysis on capacitance variation during impulse current conditioning of ZnO varistor [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 116-121, 127.
- [4] 李祥超,董昌鑫,蔡露进,等. 固体放电管在组合波发生器冲击下的性能分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(2): 1-6.

- LI X CH, DONG CH X, CAI L J, et al. Performance analysis of solid discharge tube under impulse of combination wave generator [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2): 1-6.
- [5] 钟林,廖敏夫,袁幸,等. 雷电流识别与在线检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 69-73.
ZHONG L, LIAO M F, YUAN X, et al. Lightning current identification and design of on-line detection system[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(6): 69-73.
- [6] 陈绍东,张义军,颜旭,等. 初始长连续电流引起的地电位抬升和 SPD 损坏[J]. 应用气象学报, 2020, 31(2): 236-246.
CHEN SH D, ZHANG Y J, YAN X, et al. Ground potential rise and SPD damage caused by initial long continuous current process in triggered lightning [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(2): 236-246.
- [7] 曹雪芬,陈绍东,颜旭,等. 一次触发闪电引起的 SPD 接地线电流特征分析[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 49-52, 140.
CAO X F, CHEN SH D, YAN X, et al. Characteristics analysis on spd grounding current for overhead distribution line based on artificial-triggered lightning [J]. Electric Power, 2016, 49(5): 49-52, 140.
- [8] 陈绍东,张义军,颜旭,等. 一次触发闪电地电位抬升引发的氧化锌电涌保护器损坏事件分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(3): 320-328.
CHEN SH D, ZHANG Y J, YAN X, et al. Analysis of ZnO surge protective device damage caused by ground potential rise in one triggered lightning flash [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(3): 320-328.

- [9] SANTOS M N N, PIANINI A. Characteristics of lightning-induced voltages based on experimental data [J]. High Voltage, 2021, 6(3):555-561.
- [10] 华国环, 舒梁, 张文锋, 等. 基于北斗卫星和 STM32F407 的雷电监测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2022, 35(9):1282-1286.
- HUA G H, SHU L, ZHANG W F, et al. Design of lightning monitoring system based on beidou satellite and STM32F407 [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(9):1282-1286.
- [11] 张雷, 范菁, 曲金帅. 基于在线监测的雷电流识别方法及其应用 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(5):172-178.
- ZHANG L, FAN J, QU J SH. Rapid identification of lightning current method based on online monitoring and its application [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(5):172-178.
- [12] 李平, 赵仁涛, 铁军, 等. 金属水溶液电解电极电流在线测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6):253-260.
- LI P, ZHAO R T, TIE J, et al. An on-line measurement method for electrode current of metal aqueous solution electrolysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6):253-260.
- [13] LI S P, HAN Y ZH, GABER J, et al. A multi-antenna spectrum sensing method based on ceemdan decomposition combined with wavelet packet analysis [J]. Electronics, 2023, 12(18):3823.
- [14] ULLAH Z, TEE K F. A highly efficient adaptive geomagnetic signal filtering approach using CEEMDAN and salp swarm algorithm [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(6):1455-1469.
- [15] MINGOTTI A, BETTI C, TINARELLI R, et al. Simplifying rogowski coil modeling: Simulation and experimental verification [J]. Sensors, 2023, 23(19):8032-8043.
- [16] SAMIMI M H, MAHARI A, FARAHNAKIAN M A, et al. The rogowski coil principles and applications: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2):651-658.
- [17] 肖剑锋, 王剑飞, 何志满, 等. 基于罗氏线圈和微分环的雷电流在线监测综述 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(17):1-8.
- XIAO J F, WANG J F, HE ZH M, et al. Review of lightning current online monitoring based on roche coil and differential ring [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(17):1-8.
- [18] 陈昌鑫, 郭文超, 冉召会, 等. 罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8):151-158.
- CHEN CH X, GUO W CH, RAN ZH H, et al. Research on the current measurement technology of the combination of Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8):151-158.
- [19] YAO CH G, LONG Y, WU H, et al. A novel lightning current monitoring system based on the differential-integral loop [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4):1247-1255.
- [20] 徐伟, 张灿灿, 施元, 等. 闪电电场传感与测量系统的研制 [J]. 电子器件, 2019, 42(3):767-773.
- XU W, ZHANG C C, SHI Y, et al. Development of lightning electric field sensing and measurement system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(3):767-773.
- [21] 边杰, 陈亚农, 郑锦妮, 等. 基于 CEEMDAN 降噪与双谱分析的滚动轴承故障诊断 [J]. 航空发动机, 2023, 49(6):47-53.
- BIAN J, CHEN Y N, ZHENG J N, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on CEEMDAN de-noising and bispectral analysis [J]. Aero-engine, 2023, 49(6):47-53.

作者简介



徐伟, 于南京信息工程大学获得博士学位, 主要研究方向为气象观测方法及仪器。

E-mail: xw@nuist.edu.cn

Xu Wei received his Ph. D. degree in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include meteorological observation methods and instruments.



李想, 2022 年于齐鲁工业大学获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表与信号处理。

E-mail: 772460420@qq.com

Li Xiang received his B. Sc. degree from Qilu University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include instrumentation and signal processing.



王学孟, 2004 年于南京信息工程大学获得学士学位, 2011 年于清华大学获得硕士学位, 现为广州市气象公共服务中心高级工程师, 主要研究方向为雷电防御和专业气象服务。

E-mail: 84815270@ qq. com

Wang Xuemeng received his B. Sc. degree in Nanjing University of Information Science and Technology in 2004. He received his M. Sc. degree in Tsinghua University in 2011. Now he is a senior engineer at the Guangzhou Meteorological Public Service Center. His main research interests include lightning protection and professional meteorological services.



刘岩 (通信作者), 于南京信息工程大学获得学士、硕士学位, 现为南京气象科技创新研究院高级工程师, 主要研究方向为气象灾害防御技术。

E-mail: yanliu@ cma. gov. cn

Liu Yan (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology. Now she is a senior engineer at Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences. Her main research interests include the development and application of meteorological disaster defense technology.