

基于时频分析法的开关柜避雷器泄漏电流检测

黄华[✉], 谢静媛, 汪正玲, 申葳, 张伟鹏

(国网福建省电力有限公司龙岩供电公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: [目的]在电力系统中, 开关柜避雷器承担着抑制瞬态过电压和泄放脉冲大电流的重要作用, 对于维持其正常运行具有重大意义。[方法]为了有效抑制噪声对泄漏电流信号检测的干扰, 提出了一种基于自相关系数与卡方检验优化的时频分析方法。首先通过电流传感器和分流器两种测量结果进行分析, 然后利用基于自相关系数与卡方检验优化的小波变换消除信号中的噪声干扰, 实现最优分解尺寸的确定, 从而更好地适应小信噪比场合。[结果]通过软件平台分析得出在分流器的测量基础上利用优化后的小波算法去噪的抗干扰能力更强, 波形质量更好。最后研制了一款泄漏电流在线检测装置, 对提出的泄漏电流检测模型加以验证。[结论]实验结果表明该装置能够较好地实现避雷器泄漏电流的实时检测。

关键词: 泄漏电流检测; 噪声干扰; 优化小波; 时频分析法; 抗干扰能力

中图分类号: TM591; TM855 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0150-09

开放科学(资源服务)二维码:



Leakage Current Detection for Surge Arrester in Switchgear Based on Time-Frequency Analysis Method

HUANG Hua[✉], XIE Jingyuan, WANG Zhengling, SHEN Wei, ZHANG Weipeng

(Longyan Electric Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Longyan 364000, Fujian, China)

Abstract: [Introduction] In the power system, the surge arrester in switchgear plays an important role in suppressing transient overvoltage and discharging large pulse currents, which is of great significance to maintain its normal and stable operation. [Method] A time-frequency analysis method based on the autocorrelation coefficient and the Chi-squared test optimization was proposed in the research to effectively suppress the noise interference on leakage current signal detection. Firstly, the measurement results of the current sensor and the shunt were analyzed. Then, the wavelet transform based on the autocorrelation coefficient and the Chi-squared test optimization was used to eliminate the noise interference in the signal in order to determine the optimal decomposition size to better suit the occasion of small signal-noise ratio. [Result] Based on the analysis in the software platform, it is concluded that the optimized wavelet algorithm denoising has stronger anti-interference capability and better waveform quality on the basis of measurement of the shunt. Finally, an online leakage current detection device is developed to verify the leakage current detection model proposed in the research. [Conclusion] The experimental results show that the device can realize the real-time detection of leakage current of the surge arresters.

Key words: leakage current detection; noise interference; optimized wavelet; time-frequency analysis method; anti-interference capability

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着智能电网的发展, 实时监控电网的健康状

态尤为重要^[1-3]。开关柜是电力系统中的重要环节之一^[4-5], 为了保证柜内电力设备的安全运行, 通常都需要安装避雷器, 以减少雷击事件或内部操作带来的

收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-02-18

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目“开关柜内避雷器缺陷在线监测与识别技术研究”(52136021004C)

影响^[6-7]。避雷器在稳态状态下运行时, 内部的非线性电阻阀片表现为高阻、低通流状态, 使得经过阀片的泄漏电流较为微弱。当避雷器由于自身原因或环境因素出现故障时, 阀片电阻的绝缘性能会下降, 等效阻值开始减小, 致使泄漏电流中的阻性电流分量逐渐增大。如果没有及时发现并妥善处理故障, 则可能导致避雷器发生击穿或者爆炸, 对开关柜内的电力设备造成冲击, 严重时甚至会引发大范围的停电事故, 进而造成不必要的经济损失。因此对开关柜中避雷器的泄漏电流进行实时检测是十分重要的。

常见的泄漏电流检测方法可以分成两大类: 一类是利用外部硬件直接测量得到泄漏电流中的阻性分量或者与其等价的变量, 如三次谐波法和容性电流补偿法等^[8-10]; 另一类则是利用软硬件相结合的方式, 通过相应的分析和计算过程, 间接获取阻性电流分量, 如谐波分析法及其改进算法等^[11-13]。针对第一类检测方法的研究起步较早, 国内外已有学者进行了相关工作, 并且获得了大量的成果。而第二类检测方法则通常会加入离散傅里叶变换或者数字滤波器等算法, 结合信号分析技术对测量信号进行处理, 这些数学工具比较适用于解构非线性问题, 因此第二类检测方法在测量准确度、特征量获取等方面优于前者。

然而当避雷器在稳态下运行时, 经过阀片的泄漏电流较为微弱, 很容易受到环境噪声等因素的影响。在干扰强度大的情况下, 泄漏电流的原始波形有可能完全被噪声信号所淹没。因此仅根据波形难以判别避雷器是否存在缺陷。针对这一问题, 部分学者引入离散小波变换算法对泄漏电流信号进行预处理。相比传统的数字滤波工具或离散傅里叶变换等处理手段, 该方法对于突变信号的捕捉更为敏感, 并且能够通过时间和频率两种角度进行分析, 从而更好地分辨出缺陷等情况引起的异化特征。Liu^[14]参考了在傅里叶变换中加入窗函数的思路, 将汉宁窗插值与小波消噪相结合, 用于修正时频分析过程得到的幅值和相位等特征量。文献[15]根据信噪比参数的变化情况选择合适的小波变换基函数, 以达到改进小波消噪过程的目的。这些方法的提出对泄漏电流信号消噪方面的研究起到了重要的推动作用。

文章通过实验研究和仿真分析相结合的方式, 主要围绕避雷器泄漏电流的检测方式以及运行状态

的评估问题进行研究。首先, 采用电流传感器和分流器两种方式分别获取泄漏电流信号, 根据测量结果进行对比分析; 然后, 利用传统小波变换及其优化算法对信号中的噪声干扰进行处理, 分析比较其在不同分解尺度下的消噪效果, 通过结合白噪声序列检验原理, 确定了更为合适的分解尺度, 并且引入信噪比参数进行验证, 分别在阀片老化、内部受潮以及表面污秽等缺陷情况进行模拟实验, 验证降噪算法的可行性; 最后研制了一款泄漏电流的在线监测装置, 通过单片机和无线串口模块将采集数据发送到上位机, 对泄漏电流进行实时监测。

1 泄漏电流波形分析

1.1 泄漏电流发生装置

交流泄漏电流的实验装置如图1所示。首先, 工频电源经过试验变压器和保护电阻后, 分别接至高压交直流电容分压器和避雷器的高压端。其中电容分压器的作用是测量试验变压器输出端的电压信号及获取波形数据。出于安全性等方面的考虑, 需要将避雷器放置在两只支柱绝缘子上, 以保证其对地绝缘。然后, 将避雷器低压端的接地线穿过零磁通霍尔电流传感器, 并将精密无感电阻及其过压保护器件的组合串联于接地线中。最后, 将电容分压器输出的参考电压信号以及两种测量方式所获得的泄漏电流信号接入示波器中, 并导出各信号的波形数据, 以便进一步分析。

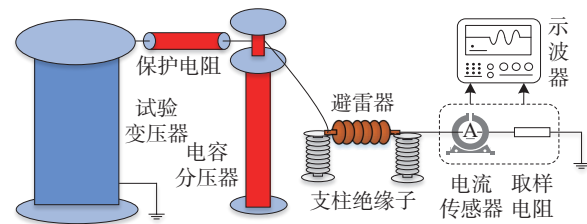


图1 交流泄漏电流实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC leakage current experiment

相关实验设备的主要参数如下: (1)三相试验变压器线电压为10 kV; (2)配电型避雷器型号为HY5WS-17/50; (3)电容分压器的变比为1000:1; (4)示波器的型号为DSOX2020A, 采样频率为20 kHz, 采样点数为2000, 采样时长为0.1 s, 共计5个波形周期。泄漏电流信号采集器件的主要参数如下: (1)零磁通霍尔电流传感器型号为SPM-2/CGQ, 输入、

输出的变比为 $1 \mu\text{A} : 10 \mu\text{V}$; (2)精密无感电阻为 $9.62 \text{ k}\Omega$, 额定功率为 10 W ; (3)25D201KJ型压敏电阻, 最大通流容量为 20 kA , 最大钳位电压峰值为 330 V ; (4)型瞬态电压抑制器, 脉冲峰值电流为 10 kA , 最大钳位电压峰值为 340 V 。

1.2 信号采集方法对比

实验时, 将三相试验变压器升至系统标称电压, 其线电压有效值为 10 kV 。再将电容分压器输出的参考电压和两种测量方式获得的取样电压信号分别接入示波器通道。利用示波器显示各信号的波形, 并将波形数据导出。根据信号采集电路的缩放比例, 将取样电压转换为相应的泄漏电流, 信号波形如图2所示。红色曲线代表 10 kV 线电压 u 的波形, 黑色曲线代表泄漏电流 i_x 的波形。

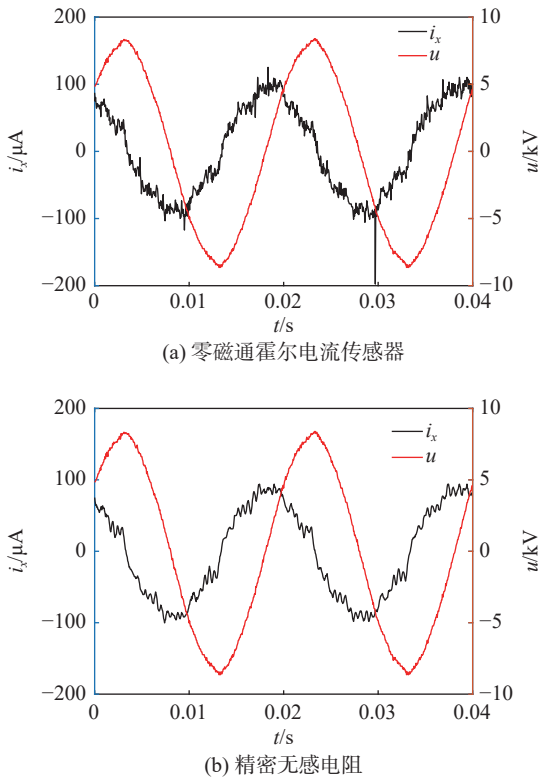


图2 泄漏电流及参考电压波形
Fig. 2 Leakage current and reference voltage waveform

比较两种测量方式可以发现, 通过传感器采集法提取的泄漏电流波形混杂着较多的毛刺现象(总谐波畸变率为 0.152), 可能对波形的判断结果造成影响。而分流器采集法获得的波形则相对稳定(总谐波畸变率为 0.133), 即抗干扰能力较强。值得注意的是, 即使在实验室条件下, 测量所得的泄漏电流

中仍然存在锯齿状纹波。这是避雷器阀片自身的非线性特性所致, 该特性使得其阻性电流中必然会产生高次谐波成分。

在现场测量环境更为复杂的情况下, 可能存在电网谐波、电磁场以及强噪声等干扰因素, 使得缺陷避雷器的劣化特征更加容易被干扰信号所淹没, 进一步影响泄漏电流的波形。这对于避雷器的在线监测极为不利, 仅从波形上很难区分正常和存在缺陷的避雷器。因此, 有必要对泄漏电流信号进行消噪处理。

2 优化的小波消噪

小波分解的过程可以近似看作高通滤波器和低通滤波器的组合, 示意图如图3(a)所示。其中, S 为待处理的信号序列, A 表示该信号的低频分量, D 则表示该信号的高频分量。信号消噪的简化过程如图3(b)所示, cA 和 cD 分别对应上述两部分信号的小波系数, 下标数字则表示当前的分解层次。

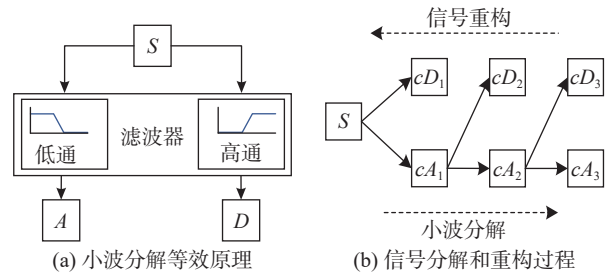


图3 小波变换原理及过程
Fig. 3 Wavelet transform principle and process

具体计算过程如下所示。首先信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 可以按照以下关系展开:

$$f(t) = \sum_k d_{j,k} \cdot \varphi_{j,k}(t) + \sum_k c_{j,k} \cdot \phi_{j,k}(t) \quad (1)$$

式中:

- j —— 预先设置的分解尺度;
- $\varphi(t)$ 、 $\Phi(t)$ —— 分解过程中的小波函数和尺度函数;

$d_{j,k}$ 、 $c_{j,k}$ —— 分解尺度 j 所对应的小波系数和尺度系数。其递推关系式可表示为:

$$\begin{aligned} c_{j+1,k} &= \sum_m h_0 \cdot (m-2k) \cdot c_{j,m} \\ d_{j+1,k} &= \sum_m h_1 \cdot (m-2k) \cdot c_{j,m} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:

$h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ ——展开系数, 与分解尺度无关。固定计算式为:

$$\begin{aligned} h_0(n) &= \langle \phi(t), \phi_{-1,n}(t) \rangle \\ h_1(n) &= \langle \varphi(t), \phi_{-1,n}(t) \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

对小波系数和尺度系数进行重组, 成为新的小波分解结构。再运用逆变换对这些系数作重构处理, 即可以复现为去除噪声干扰的信号。其递推关系式为:

$$c_{j-1,m} = \sum_k h_0(m-2k) \cdot c_{j,k} + \sum_k h_1(m-2k) \cdot d_{j,k} \quad (4)$$

为了防止消噪处理后含噪声信号的不连续邻域中可能会出现振荡现象, 引入平移不变量小波消噪法。假设待处理信号为 $s(t)(0 \leq t \leq n)$, 其中 t 为时间, n 为信号序列的长度。则经过循环平移的消噪法表达式为:

$$\tilde{T}(s(t), S_h) = \frac{1}{h} \cdot \sum S_{-h}(T(S_h \cdot s(t))) \quad (5)$$

式中:

h —— 平移量, 正整数且有 $0 \leq h \leq n$;

S_h —— 信号序列循环平移 h 的算子, 即 $S_h \cdot s(t)$ 为经过 h 循环平移后的信号;

T —— 对信号进行阈值消噪处理。

为了检验重构信号中的噪声抑制效果, 从而选取最佳重构参数, 假设给定的待检验信号序列为 $\{x(n), n=1, 2, \dots, N\}$, 则该信号序列的自相关系数可由以下表达式计算得到:

$$\rho_k = \frac{\sum_{n=1}^{N-k} (x_n - \bar{x}_N) \cdot (x_{n+k} - \bar{x}_N)}{\sum_{n=1}^{N-k} (x_n - \bar{x}_N)^2} \quad (6)$$

$$\bar{x}_N = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_n \quad (7)$$

式(6)中, $\{\rho_k, k=1, 2, \dots, m\}$ 表示给定信号序列的自相关系数估计值; 自由度参数 $m^2 \leq N$, 通常取值为 5 ~ 10。根据时间序列分析理论, 若该序列为白噪声信号, 则当 N 足够大时, 近似服从于 m 维标准正态分布。进一步推导知 $\chi^2(m) = N \cdot (\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_m^2)$ 将会近似服从于 m 维 χ^2 分布。换言之, 若序列表现为白噪声的特征, 也即含噪声信号的高频分量中仍然存在噪声干扰, 则可以得到以下关系式:

$$\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_m^2 = 0 \quad (8)$$

假设给定的显著性水平为 α , 根据自由度 m 查表得 χ^2 分布的临界值 λ_α , 则检验统计量 χ^2 必然符合以下关系式:

$$\chi^2(m) = N \cdot (\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_m^2) < \lambda_\alpha \quad (9)$$

反之, 当检验统计量 $\chi^2 > \lambda_\alpha$ 时, 则表示该序列是相关序列。此时, 含噪声信号中的高频分量均为有用信号, 噪声干扰已被消除。结合上述原理, 设计最优小波分解尺度的判断流程如图 4 所示。

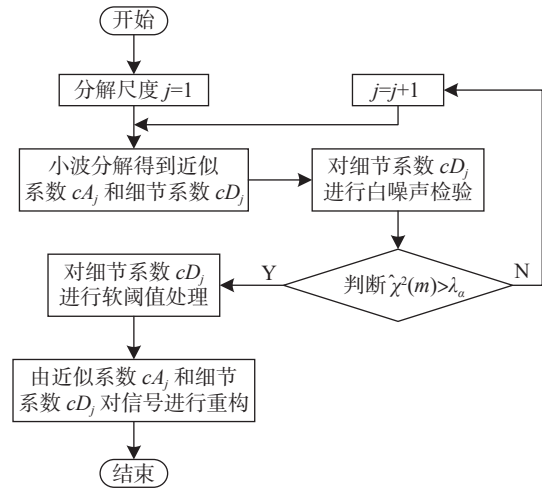


图 4 最优小波分解尺度的判断流程图

Fig. 4 Decision flow chart of optimal wavelet decomposition scale

3 离线分析

为了验证小波分解尺度选择算法的可行性, 首先产生标准测试信号来模拟泄漏电流信号, 表达式如下:

$$s_2(t) = 100 \times \sum_k A_k \cdot \sin(2\pi f_k \cdot t) \quad (10)$$

式中, $k=1, 3, 5$; $A_1=1$ mA, $A_3=A_5=0.03$ mA。即包含 3 次、5 次谐波分量的正弦波形。然后将高斯白噪声叠加于标准测试信号中, 如图 5 所示。其中, 干扰信号由噪声函数随机生成, 同样取其均值为 0, 标准差为 20, 服从高斯分布。

首先, 针对叠加高斯白噪声的标准测试信号, 运用平移不变量小波变换进行消噪处理, 部分结果如图 6 所示。在本次测试过程中, 统一选择 sym8 作为小波变换的基函数, 并依次取分解尺度 $j=1 \sim 9$ 。从图中可以看出, 当分解尺度 $j=5$ 时, 经过消噪处理后的测试信号波形与其有用信号部分最为接近。

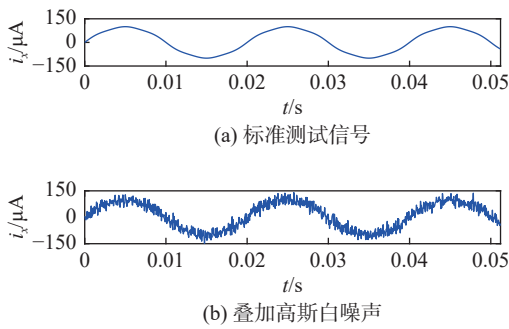


图5 泄漏电流模拟信号与加噪

Fig. 5 Leakage current analog signal and noising

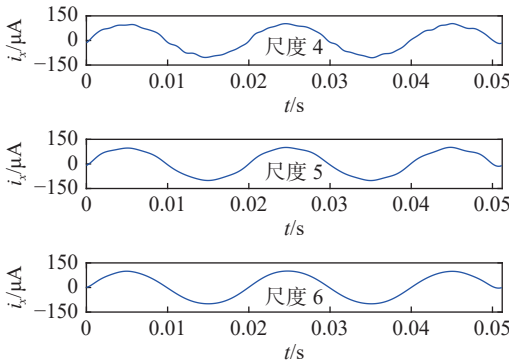


图6 测试信号消噪效果($j=4\sim 6$)

Fig. 6 Test signal denoising effect ($j=4\sim 6$)

取自由度 $m=5$, 显著性水平 $\alpha=0.01$, 查表得 2 分布的临界值 $\lambda_a=15.086$ 。在不同的分解尺度下, 分别计算测试信号高频分量对应的小波系数的检验统计量。结果列于表 1。从表中数据可以看出, 当分解尺度 $j=5$ 时, 检验统计量大于临界值, 应拒绝原假设, 即是相关序列。这表示高频分量的小波系数均为有用信号, 噪声干扰已被消除。信噪比 R 同样在该分解尺度下达到最大值, 此时的消噪效果达到最优。

表 1 检验统计量及信噪比

Tab. 1 Test statistics and signal-to-noise ratio

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
χ^2	1.98	10.91	13.81	11.26	20.14	41.35	128.11	69.90	171.08
R	14.52	17.65	20.80	23.47	24.89	23.47	21.75	19.03	18.51

然后针对叠加高斯白噪声的泄漏电流原始信号, 运用平移不变量小波变换进行消噪处理, 部分结果如图 7 所示。此处同样选择 sym8 作为小波变换过程的基函数, 并依次取分解尺度 $j=1\sim 9$ 。从图中可以看出, 当 $j=5$ 时, 很好地消除了噪声干扰和高次谐波分量, 且未过度消噪, 较为符合泄漏电流有用信号的波形。

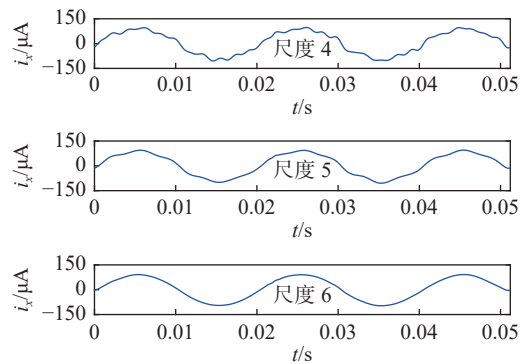


图7 泄漏电流信号消噪效果(尺度=4~6)

Fig. 7 Leakage current signal denoising effect (scale=4~6)

取和上述相同的自由度以及显著水平。在不同分解尺度下, 分别计算高频分量对应的小波系数的检验统计量。当 $j=5$ 时, 检验统计量大于临界值。这表示高频分量的小波系数均为有用信号, 噪声干扰已被消除, 与图 6 中对波形的判断结果相符合。

4 在线检测

文章中设计的泄漏电流在线监测装置由信号采集、信号处理和数据传输等几个部分组成。其中, 信号采集部分包括供电电源模块、电压互感器取样电阻及其外围电路; 信号处理部分包括模数转换器、单片机、轻触按键以及显示模块; 数据传输部分则包括无线串口模块和上位机软件。如图 8 所示是泄漏电流在线监测装置的总体设计框图。

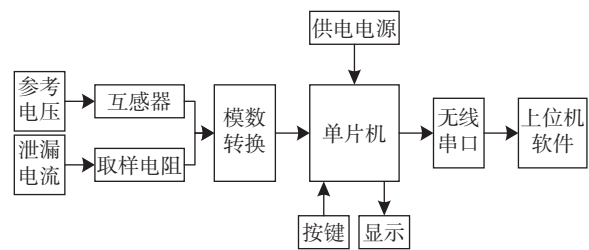


图8 样机设计框图

Fig. 8 Block diagram of prototype design

4.1 采集模块

由于分流器采集法测量所得的泄漏电流信号更不易受到环境噪声等干扰的影响, 信号的波形较为稳定。本设计最终决定采用该方式进行检测, 泄漏电流信号的采集电路如图 9 所示。其中, R_s 和 V_3 分别为压敏电阻和瞬态抑制二极管, R_0 为精密无感电阻。测量部分的主要设计思路已经在 1.2 节中进行

了相关描述,故不再重复。瞬态抑制二极管 V_4 的作用是构成二级保护,从而进一步提高保护电路对雷击过电压或内部操作过电压的防护能力,提升测量电路的可靠性。对于不同厂家生产的各种型号避雷器来说,其泄漏电流的大小均可能存在一定差异。因此,需要在取样电阻的两端添加一个电压放大电

路,以扩大该监测装置的适用范围,使之能够更加有效地完成信号采集工作。将取样电压连接至双运算放大器 LM358,根据闭环增益公式,选择合适的电阻进行匹配,使得该运放的增益系数在一定范围内可调。其中,输入电阻 $R_1=1\text{ k}\Omega$,反馈电阻为 $R_f=10\text{ k}\Omega$ 的可调电位器,平衡电阻 $R_p=R_1/\approx 1\text{ k}\Omega$ 。

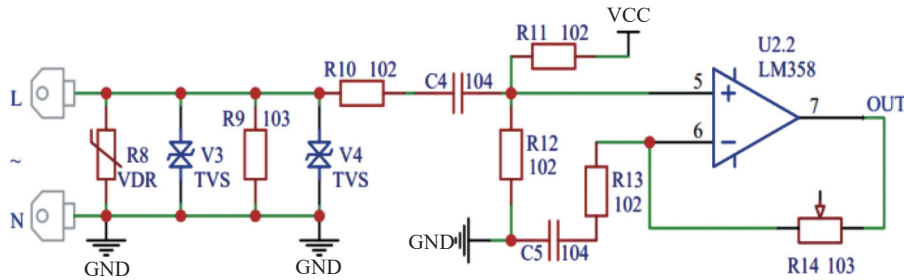


图 9 泄漏电流信号采集电路

Fig. 9 Leakage current signal acquisition circuit

4.2 控制模块

STM32F 系列芯片是由意法半导体公司生产的微控制单元,通常也可以直接称作单片机。其内部已经集成了定时/计数器和模拟/数字转换器等多种外设功能,能够在一定程度上减少外围电路的使用,以减小监测装置的体积。本设计最终选择使用 STM32F051C8T6 型单片机作为泄漏电流监测装置的控制芯片,其外围电路的引脚接线设计如图 10 所示。值得注意的是,在实际使用时,一般将该芯片的

电源电压设置为 3.3 V。因此,需要在供电电源模块的 5 V 直流输出端,再连接 5 V 转 3.3 V 的线性稳压电路。本设计选用三端口稳压芯片 AMS1117 作为核心器件。并将陶瓷电容、电解电容并联连接于电压输入和输出端。其中,输入端电容的主要作用是吸收高频干扰信号,防止高频自激;而输出端电容则起到输出滤波的作用,降低电压波动,从而进一步稳定输出直流电的平滑度。

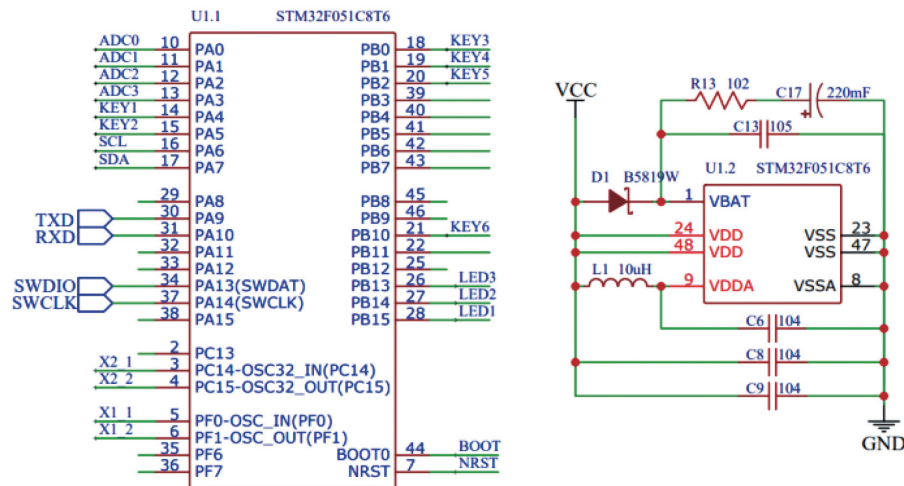


图 10 控制单元及其外围电路

Fig. 10 Control unit and its peripheral circuit

4.3 无线模块

本设计选用 E36-TTL-100 型无线串口模块,作

为控制芯片与计算机之间的数据远传器件。该模块不需要用户重新编写射频驱动程序或进行硬件调试,

仅通过串口本身便可以完成射频信号的发送和接收操作。此外,还具有功率密度集中,抗干扰能力强的优势;在空旷环境中,其数据传输距离可以接近 2 km。

无线串口模块电路如图 11 所示。其中,引脚 VCC、GND 分别连接 3.3 V 直流源和公共地极。引脚 RXD 和 TXD 为该模块实现数据传输的核心通道,引脚 AUX 通常用于指示模块的运行状态。若模块连接至电源,则该引脚将立即固定为低电平,并保持

状态直至串口初始化设置完毕。在编写程序时,可以将 AUX 引脚输出的第一个上升沿信号作为模块开始工作的标志。此外,当该串口模块正在执行数据传输任务,而数据没有完全发送或接收时,该引脚也将一直保持低电平。引脚 M1 和 M0 用于设置串口的工作模式,通常将其设置为默认状态,即串口执行初始化程序,可以进行数据远传功能。

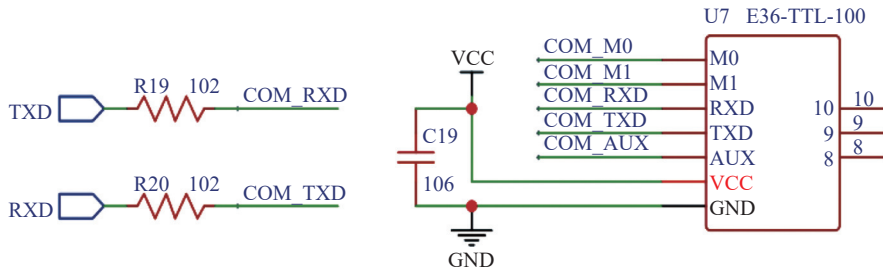


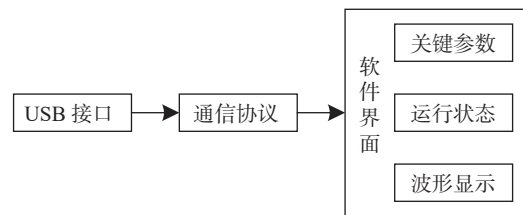
图 11 无线串口模块电路图

Fig. 11 Circuit diagram of wireless serial port module

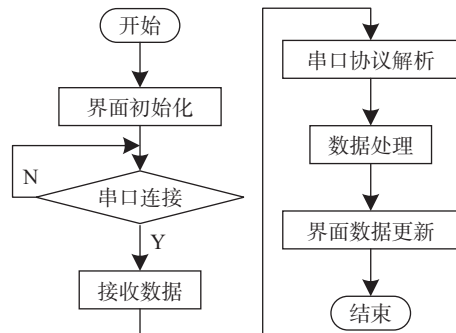
4.4 上位机设计

通过结合上位机软件的图形界面,将关键参数以及信号波形可视化,则可以起到较好的补充作用。这样既可以便于运维检修人员直观地了解避雷器的各项参数,及时对异常信号进行观测和排查,也能够通过软件对接收到的信号数据作进一步分析。

本设计采用 Qt 来设计避雷器泄漏电流监测装置的上位机软件。Qt 作为一款图形用户界面应用程序的开发工具,具备适用范围广、可移植性强、稳定以及易用等特点,这些特性都使得该工具被广泛应用于计算机程序的设计。文章所设计软件的程序总体结构如图 12(a)所示。结合泄漏电流监测装置,上位机软件实现的主要功能如下:首先,利用串口通信协议,将计算机的 USB 接口与该软件相连接;然后,通过无线串口模块以及软件的串口通信功能,与控制芯片进行实时通信,接收参考电压和泄漏电流等数据;最后,将避雷器的关键参数、运行状态以及相关波形显示于图形界面。图 12(b)为上位机软件的程序设计流程图。通过以上设置,即可以实现上位机软件与监测装置的串口通信。由监测装置通过串口发送检测到的数据到软件,再使用 Qt 设计开发的界面接收数据,然后截取并显示数据。从而实现参考电压、泄漏电流等信息的数据接收与显示,实时反映避雷器的运行状态。



(a) 上位机软件的程序总体结构



(b) 上位机软件的程序设计流程图

图 12 上位机软件的程序结构

Fig. 12 Program structure of upper computer software

利用 QWidget 模块创建并编辑图形显示界面,如图 13 所示。根据系统总体设计,图形界面分为主窗口和串口设置部分,且后者在初始时为隐藏状态。主窗口由软件基础信息、泄漏电流监测装置发送的特征量和波形显示等几个模块组成,串口设置部分则由端口选择、端口设置、接收设置、发送设置以及帮助等几个分窗口组成。其中,软件基础信息包括

设备编号、测量日期和时间;特征量包括参考电压有效值、泄漏电流有效值、相位差、阻性电流有效值、

容性电流有效值以及检测结果等;波形显示部分则包括参考电压和泄漏电流的波形。

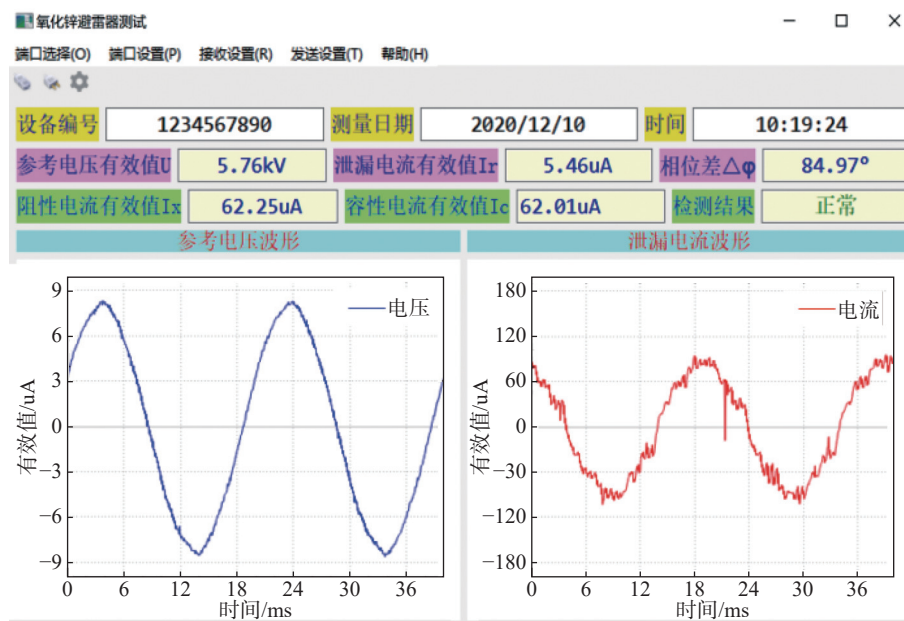


图 13 主窗口图形界面

Fig. 13 Graphical interface of main window

5 结论

文章将白噪声检验原理融入平稳小波消噪法,实现了泄漏电流测量信号与其分解尺度的最优匹配。相对霍尔电流传感器而言,使用分流器采集法获取的泄漏电流信号波形的质量更好,也即抗干扰能力较强,不容易受到环境噪声等因素的影响。在叠加加强噪声的情况下,平稳不变量消噪法的效果相对较好,当分解尺度较大时,也不容易出现过度消噪现象。将白噪声检验原理与平稳小波消噪法相结合,根据自相关系数以及卡方检验的判断关系式,能够确定更为合适的分解尺度,使其更好地适应强噪声环境。根据分流器法采集泄漏电流信号,并结合无线串口和上位机软件,研制了泄漏电流的在线监测装置。在实验室条件下,该装置能够很好地实现避雷器泄漏电流的在线监测工作。

参考文献:

- [1] 巫聪云,刘斌,沈梓正,等.二次设备集中安防运维及主动感知和诊断预警关键技术的研究[J].南方能源建设,2021,8(4): 85-94. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.012.
- WU C Y, LIU B, SHEN Z Z, et al. Research on secondary

equipment centralized security operation and maintenance and key technologies of active perception, diagnosis and early warning [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 85-94. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.012.

- [2] 姜绍艳,李京平,蔡志平.智能分布式加电压-时间型双策略就地故障判别方法[J].南方能源建设,2020,7(增刊1): 48-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.009.
- JIANG S Y, LI J P, CAI Z P. Intelligent distributed voltage-time dual strategy local fault identification method [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(Supp. 1): 48-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.009.
- [3] 郑幸,陈逸鹏,齐冬辉.输电线路三相不平衡电流及高抗过补偿仿真分析[J].南方能源建设,2021,8(2): 78-84. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.012.
- ZHENG X, CHEN Y P, QI D H. Simulation analysis of three phase unbalanced current and over compensation of high voltage reactor in transmission line [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 78-84. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.012.
- [4] 陈红武.高压开关柜局部放电特性的检测研究[J].电工材料,2020(5): 40-42+47. DOI: 10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2020.05.011.
- CHEN H W. Research on detection of partial discharge characteristics of high voltage switchgear [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2020(5): 40-42+47. DOI: 10.16786/j.cnki.

- 1671-8887.eem.2020.05.011.
- [5] 张斌. 10kV开关柜局部放电检测技术及测试平台的研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
ZHANG B. Research on partial discharge detection technology and testing platform of 10kV switch cabinet [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [6] 熊文, 危国恩, 王莉, 等. 智能配电网广域同步相量测量体系设计方案研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 85-90. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013.
XIONG W, WEI G E, WANG L, et al. Research on the design scheme of wide area synchronous phasor measurement system for smart distribution grid [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 85-90. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.013.
- [7] 刘生, 巴砚. 油田群项目海上降压变电站布置方案研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 99-104. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.015.
LIU S, BA Y. Research on layout plan of offshore step-down substation for oilfield group project [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 99-104. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.015.
- [8] 张明瀚, 简翔浩, 陆子凯. 珠海“互联网+”柔性直流配电网换流站设计方案 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(1): 95-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015.
ZHANG M H, JIAN X H, LU Z K. Design of converter stations of Zhuhai "Internet + " flexible DC distribution network [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(1): 95-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015.
- [9] CHEN J, XU L Q, WAN Z L, et al. Research on monitor technology of MOA state based on third harmonic principle [C]// IEEE. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chengdu, 19-22, September, 2016. Chengdu: IEEE, 2016: 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800737.
- [10] HAN Y S, ZHENG H, LI Z H. Measurement of the resistive current of MOA based on an improved equivalent model [C]// IEEE. 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Sydney, 19-22, July, 2015. Sydney: IEEE, 2015: 1003-1006. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295444.
- [11] HAN Y S, LI Z H, ZHENG H, et al. A decomposition method for the total leakage current of MOA based on multiple linear regression [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(4): 1422-1428. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2462071.
- [12] 魏绍东, 邓维, 雷红才, 等. 500kV避雷器故障模拟及缺陷检测试验研究 [J]. 电瓷避雷器, 2019(2): 109-114. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2019.02.018.
WEI S D, DENG W, LEI H C, et al. Study on fault simulation and defect detection of 500 kV MOA [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(2): 109-114. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2019.02.018.
- [13] 胡锡幸, 鲍巧敏, 华盛继. 基于温度补偿的金属氧化物避雷器带电检测技术研究 [J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 96-99. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2017.01.019.
HU X X, BAO Q M, HUA S J. Research on MOA's on-line detection technology based on temperature compensation [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(1): 96-99. DOI: 10.16188/j.isa.1003-8337.2017.01.019.
- [14] LIU Q Y, GAO X G, MENG J S, et al. Design and realization of online monitoring device for arrester in substation [C]// IEEE. 2017 Chinese Automation Congress, Ji'nan, 20-22, October, 2017. Ji'nan: IEEE, 2017: 3164-3169. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243320.
- [15] DE C CUNHA C F F, CARVALHO A T D, PETRAGLIA M R, et al. An improved scale dependent wavelet selection for data denoising of partial discharge measurement [C]// IEEE. 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, 30 June-4 July, 2013. Bologna: IEEE, 2013: 100-104. DOI: 10.1109/ICSD.2013.6619894.

作者简介:



黄华

黄华 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 福建龙岩人, 工程师, 硕士, 主要从事智能电网相关工作(e-mail)812336733@qq.com。

谢静媛

1990-, 女, 福建龙岩人, 工程师, 硕士, 主要从事智能电网相关工作(e-mail)452826996@qq.com。

汪正玲

1985-, 女, 安徽合肥人, 工程师, 硕士, 主要从事电网数字化相关工作(e-mail)564069016@qq.com。

申葳

1978-, 男, 福建龙岩人, 工程师, 学士, 主要从事电网数字化相关工作(e-mail)750472160@qq.com。

张伟鹏

1987-, 男, 福建漳州人, 工程师, 学士, 主要从事电网数字化相关工作(e-mail)181630553@qq.com。

(编辑 叶筠英)