

基于经验小波变换的多通道微弱 电流信号噪声控制

于双江, 倪建军, 富 帅
(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘要: 多通道微弱电流信号受很多噪声因素的干扰, 导致输出的微弱电流信号与原始信号之间的相对误差增加, 控制效果变差, 为此提出基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制方法; 采集多通道微弱电流信号, 利用经验小波变换技术分解采集到的微弱电流信号, 判断电流信号中是否存在噪声并确定噪声类型; 设计微弱电流信号噪声控制器, 根据电流信号中的噪声量与噪声类型生成控制指令, 对不同通道微弱电流信号噪声进行控制; 在两种不同噪声强度的实验环境下, 该方法控制下的多通道微弱电流信号信噪比较高, 输出信号与原始信号间的相对误差较低, 控制任务完成时间更短; 以此证明该方法的多通道微弱电流信号噪声控制效果更好, 可以广泛应用至电流信号噪声控制领域。

关键词: 经验小波变换; 多通道; 微弱电流信号; 噪声控制; 信号分解; 噪声量; 噪声类型

Noise Control of Multi-Channel Weak Current Signal Based on Empirical Wavelet Transform

YU Shuangjiang, NI Jianjun, FU Shuai

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: Multi-channel weak current signals are interfered with many noise factors, resulting in an increase in relative error between the output weak current signal and original signal, and its control effect becomes poor. Therefore, a multi-channel weak current signal noise control method based on empirical wavelet transform is proposed. By collecting the multi-channel weak current signals, the empirical wavelet transform technology is used to decompose the collected weak current signals, determine whether there is noise in the current signal, and determine the type of noise. Based on the amount and type of noise in the current signal, a weak current signal noise controller is designed to generate control instructions, and control the weak current signal noise in different channels. In two experimental environments with different noise intensities, the multi-channel weak current signal of this method has a high signal-to-noise ratio, lower relative error between the output signal and original signal, and shorter control task completion time, which proves that the multi-channel weak current signal noise control effect of the method is better, it can be widely applied in the field of current signal noise control.

Keywords: empirical wavelet transform; multi-channel; weak current signal; noise control; signal decomposition; noise level; noise type

0 引言

电流信号是指以电流的形式出现的信号, 特点是电流的大小能很好地体现信号的波形, 可以接较大的负载, 适合功率放大的输入信号, 主要用来反映电网的运行状态, 由于电流信号具有容易产生、便于控制等优势, 因此通过对电网电流信号状态进行检测, 能及时发现电网的异常情况, 第一时间制定相应的解决方案, 将电网故障带来的负面影响降至最低。由此可见, 对电网电流信号进行检测与分析是十分必要的。由于电网线路部分较为复杂, 不同电网线路会产生不同的电流信号, 导致多通道电流信号中所蕴含的噪声分量较多。在多通道电流信号中, 噪声的存在会极大程度地影响信号的有效性, 尤其是使得微弱电流信

号难以捕捉, 因此无法保证电网电流状态监测的及时性和有效性^[1]。多通道微弱电流信号噪声控制的重要意义在于提高数据采集和处理的准确性和可靠性。当需要采集多个通道的微弱电流信号时, 噪声问题会变得更加复杂和棘手。这是因为各通道之间可能存在交叉干扰, 而干扰信号的程度会受到信号源、传输线路、环境噪声等多种因素的影响, 导致信号失真和误差累积。为了提高多通道微弱电流信号的完整度和有效性, 有必要对信号中的噪声进行控制。

采用工程技术措施控制噪声的传播和接收, 以得到目标信号, 即为噪声控制。目前发展较为成熟的电流信号噪声控制方法有很多, 其中文献 [2] 方法利用小波变换模极大值的方法来进行带噪信号的奇异性检测的理论, 通过混

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-04-18。

作者简介: 于双江(1979-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 于双江, 倪建军, 富 帅. 基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 122-128.

沌蚁群算法确定噪声控制任务的作用路径。文献 [3] 方法就通过对多噪声信号的耦合, 实现噪声信号的控制。而文献 [4] 方法根据均方误差准则以及均方误差, 预测实时信号误差, 以此决定信号的滤波参数, 采用自适应滤波的方式及可能性信号噪声的控制结果。然而将上述噪声控制方法应用到多通道微弱电流信号的处理工作中, 不能同时处理好去噪和保留瞬变信号的问题, 为此本文引入经验小波变换技术。经验小波变换技术是将 Fourier 频谱分解为连续段, 在各段上建立小波滤波器, 并对其进行滤波与重建, 从而获得一系列 FM 成分。这种方法可以利用具有紧密支持性质的小波滤波器组对 Fourier 频谱中的特征信息进行识别, 从而实现了对信号频段的自适应提取。将经验小波变换技术应用到多通道微弱电流信号的噪声控制工作中, 以期能够提高有效电流信号质量, 通过有效提升数据采集和分析的准确性和可靠性, 为科学研究和工程应用提供更加精确的数据支持。

1 多通道微弱电流信号噪声控制方法

1.1 采集多通道微弱电流信号

多通道微弱电流信号的采集面临着噪声问题, 这是由于信号本身的微弱性质以及环境、设备等因素导致的。微弱电流信号的采集面临着噪声问题, 原因主要有以下几点:

1) 信号本身微弱: 微弱电流信号往往非常微弱, 可能只有几微安的电流值, 这样的信号很容易被环境噪声掩盖, 导致信号难以采集和处理。

2) 器件噪声: 采集微弱电流信号的仪器或器件通常会引入一定程度的噪声, 例如前置放大器、滤波器、模数转换器等。这些噪声可能来自器件的内部电路, 也可能来自器件与外界电磁环境的相互作用。

3) 环境噪声: 采集环境中可能存在各种干扰源, 例如电源干扰、电磁辐射、热噪声等。这些干扰源会在脆弱的微弱信号中引入额外的噪声, 影响信号的准确性和数据的解析。

多通道微弱电流信号中的噪声来源可分为 3 种类型, 分别为发电机产生的低频波纹噪声、变压器在电压切换过程中产生的谐波分量以及瞬时信号变换产生的同步噪声。多通道微弱电流信号中噪声信号的产生原理如图 1 所示。

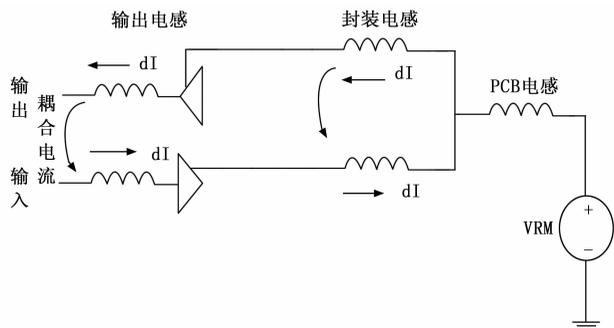


图 1 噪声信号产生原理图

在存在噪声干扰的情况下, 利用采集电路获取多通道微弱电流信号样本。使用的电流信号采集电路由前置电路控制、AD 采集、数据处理、时钟分频、RS232 收发以及收发控制等模块组成。其中前置电路控制模块的主要功能是实现模拟开关、采样保持、程控放大等数据采集电路的控制; AD 数据采集模块通过 TLC2543 进行数据采集; 数据处理模块通过平滑滤波, 过滤出频繁波动的随机错误; RS232 收发模块主要用于 FPGA 和 PC 的数据传输和接收的全双工异步收发; 接收和接收控制模块主要负责对主机发出的命令进行分析, 并按照命令将所存储的数据进行抽取, 再由 RS232 传输到主机; 时钟分频器模块将时钟分配到各个程序中^[5]。在实际的多通道微弱电流信号采集过程中, 通过电压变换电路把微弱电流信号变换成一个电压信号, 利用二阶放大器把有效信号放大到 AD 装置的最大输入区域, 用 A/D 装置进行模拟和数字变换, 产生相应的数字信号, 然后传输到数据处理中心进行数据处理和整理, 最后由 PC 机进行数据处理和分析。为提高系统的动态范围, 模拟电路全部采用高压电源, 同时采用正、负两种电源, 确保零点附近的信号能够得到高效地采集, 同时也能减少电源的噪声对多通道微弱电流信号采集结果产生的影响^[6]。则任意通道微弱电流信号的采集结果表示为:

$$I_i = s_i + n_i \quad (1)$$

式中, s_i 和 n_i 分别为噪声信号和理想的无噪声电流信号。按照上述方式可以得出电网多通道中微弱电流信号的采集结果, 通过整合将电流信号的采集结果表示为:

$$I(t) = \sum_{i=1}^{n_i} I_i(t) \cdot \kappa_i \quad (2)$$

其中: κ_i 为第 i 条通道的信号传输损失系数^[7]。按照上述流程完成多通道微弱电流信号的采集结果, 最大程度地避免采集结果中存在噪声干扰。

1.2 基于经验小波变换的信号分解

信号分解是将一个信号分解成多个基本信号(也称原子信号)的线性组合的过程。这种分解可以帮助研究人员了解信号的本质和特征, 并且可以更好地描述和解释信号的物理和数学特性。信号分解在信号处理、数据压缩、信号识别和分类等领域都有着广泛的应用, 并且在许多科学和技术研究中都扮演着重要角色。

经验小波变换是一种分解非平稳信号的方法, 它能够处理周期性信号, 又能够处理非周期性或不规则信号, 并且不需要预设信号的本质频率或幅值信息。其基本思想是通过一连串的滤波操作, 将信号分解成多个尺度和频率内的小波, 每个尺度和频率的小波可以被表示为一个二元数, 分别表示振幅和相位。这些小波的振幅和相位具有重要的物理和数学意义, 能够描述信号的结构、特征和有效信息。

经验小波变换的优点在于其采用了一种自适应的调整小波函数和尺度的方法, 这种方法优化了小波分解的结果和精度, 并且避免了传统小波变换中可能出现的过度平滑

或过度分解的问题。此外还具有更好的可重构性和鲁棒性，能够处理噪声、干扰和不规则信号等情况，在信号分解领域具有广泛的应用前景。

以采集的多通道微弱电流信号作为处理对象，利用正交小波滤波器组对其频域进行经验分割，提取与傅里叶谱紧密相关的分量，将分量表示为与各个频段相对应的时域模态信号^[8]。经验小波变换技术的执行过程如图 2 所示。

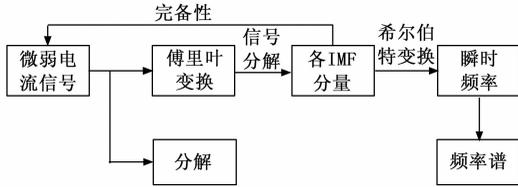


图 2 经验小波变换过程

利用傅里叶变换技术对采集到的信号进行初步处理，傅里叶变换是利用积分运算实现电流信号的转换，积分运算过程可以表示为：

$$I(\alpha) = \int_{a=1}^{+\infty} I(t) f(t, a) dt \quad (3)$$

式中， $f(t, a)$ 为积分变换核，其中变量 a 为积分因子， $I(\alpha)$ 为微弱电流信号 $I(t)$ 的积分运算结果^[9]。微弱电流信号的傅里叶变换结果表示为：

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\alpha) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

式中， ω 为微弱电流信号频率。对经过傅里叶变换得到的电流信号进行归一化处理，在 2π 范围内的傅里叶频谱，根据香农准则将微弱电流信号频谱支撑区间定义在 $[0, \pi]$ 范围内^[10]。将微弱电流信号对应的傅里叶频谱划分为多个连续区段，划分结果表示为：

$$G_n = [\psi_{n-1}, \psi_n] \quad (5)$$

式中， ψ_{n-1} 和 ψ_n 为连续两个分割区段。在上述区域范围内，利用 Meyer 小波的思想，获得经验小波函数如下：

$$h_w(\psi) = \begin{cases} 1, \psi_n + r_n \leq |\psi| \leq \psi_{n+1} - r_{n+1} \\ \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \lambda \left[\frac{1}{2\tau_{n+1}} (|\psi| - \psi_{n+1} + r_{n+1}) \right] \right\}, \\ \psi_{n+1} - r_{n+1} \leq |\psi| \leq \psi_{n+1} + r_{n+1} \\ \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \lambda \left[\frac{1}{2\tau_n} (|\psi| - \psi_n + r_n) \right] \right\}, \\ \psi_n - r_n \leq |\psi| \leq \psi_n + r_n, \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中， r_n 表示分割区段 ψ_{n-1} 和 ψ_n 之间的间距，尺度 λ 的计算公式如下：

$$\lambda(x) = \kappa_1 x^4 - \kappa_2 x^5 + \kappa_3 x^6 - \kappa_4 x^7 \quad (7)$$

式中， κ_1 、 κ_2 、 κ_3 和 κ_4 表示不同的常数^[11]。同理可以得出经验尺度函数表达式，将其标记为 h_c 。由此得出多通道微弱电流信号的分解结果为：

$$I_{EWT}(t) = \varphi_{\text{details}}(t) \times h_w + \sum \varphi_{\text{approach}}(t) \times h_c \quad (8)$$

式中， $\varphi_{\text{details}}(t)$ 和 $\varphi_{\text{approach}}(t)$ 分别表示细节系数和逼近系数，

将构建的经验小波函数和经验尺度函数代入式 (10) 中，即可实现多通道微弱信号的分解，得到相关的分解结果并记录各模态分量信号。

1.3 确定信号噪声类型

根据多通道微弱电流信号的采集与分解结果，判断当前微弱电流信号中是否存在噪声，利用特征提取与匹配的方式判断微弱电流信号中包含噪声的类型^[12]。依据多通道微弱电流信号中噪声信号的产生原理，可以将信号噪声分为窄带噪声、背景噪声以及脉冲噪声等多种类型，其中窄带噪声与背景噪声的标准表达式如下：

$$\begin{cases} n_{\text{narrowband}} = \sum A_z(t) \sin(2\pi f_z t + \varphi_z) \\ n_{\text{background}} = n_{\text{CEN}} + n_{\text{narrowband}} \end{cases} \quad (9)$$

其中： $A_z(t)$ 、 f_z 和 φ_z 分别为窄带噪声信号的幅值、中心频率和相位， $n_{\text{background}}$ 、 $n_{\text{narrowband}}$ 和 n_{CEN} 分别为背景噪声、窄带噪声和有色噪声^[13]。针对上述噪声信号设置其标准特征，其中背景噪声的概率密度特征可以表示为：

$$\tau_{\text{background}, p} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n_{\text{background}}}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中， σ 为背景噪声信号方差。按照上述方式可以得出多种不同类型噪声的标准特征，以此作为判定微弱电流信号噪声类型的参考标准^[14]。以采集并分割处理完成的多通道微弱电流信号为处理对象，从时域和频域两个方面提取信号特征。电流信号峭度特征的提取结果如下：

$$\tau_{\text{Kurtosis}} = L_{\text{signal}} \frac{\sum (I_{EWT}(t) - \bar{I}_{EWT})^4}{\left(\sum (I_{EWT}(t) - \bar{I}_{EWT})^2 \right)^2} - 3 \quad (11)$$

式中， L_{signal} 为微弱电流信号的长度， \bar{I}_{EWT} 为信号的平均值。按照上述方式可以得出微弱电流信号对象所有特征的提取结果，并利用下述公式对提取特征进行融合处理，结果如下：

$$\tau_{\text{com}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{features}}} \tau_i \cdot \bar{\omega}_i \quad (12)$$

式中， $\bar{\omega}_i$ 为第 i 个特征 τ_i 的权重值， n_{features} 为信号特征总量^[15]。最终将设置的标准特征与微弱电流信号特征提取结果进行匹配，计算两者之间的相似度，计算过程如下：

$$\zeta = \frac{2 \left| \tau_{\text{com}} \right| \left| \tau_{\text{standard}} \right|}{\left| \tau_{\text{com}} \right|^2 + \left| \tau_{\text{standard}} \right|^2} \quad (13)$$

若计算结果高于阈值 ζ_0 ，则当前噪声类型即为多通道微弱电流信号所包含的噪声类型，否则需要进行下一种噪声类型的匹配，直到确定多通道微弱电流信号噪声类型为止。

1.4 构建信号噪声控制器

将电流信号噪声控制器作为噪声控制方法的执行元件，控制器采用通用芯片 UAF42，可以通过级联实现 4 阶至 8 阶的滤波器，该芯片具有过滤功能，能够保证数据噪声控制质量^[16]。UAF42 内置逆变器和两个积分器，可以很好地解决在无源滤波器中实现低功耗电容的问题。所构建的多通道微弱电流信号噪声控制器结构如图 3 所示。

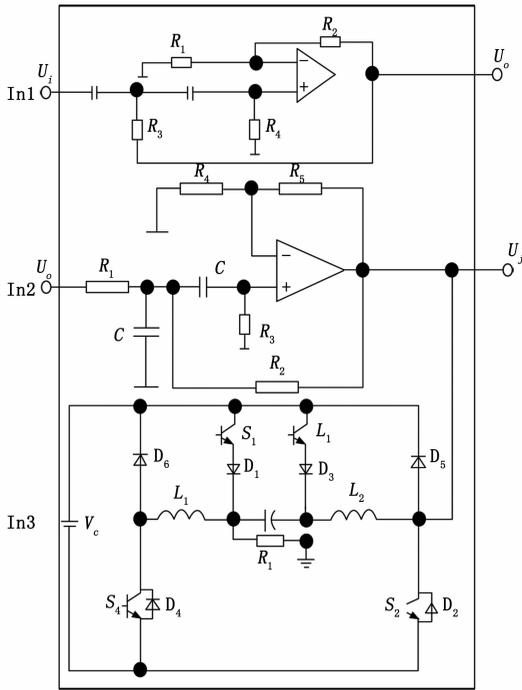


图 3 微弱电流信号噪声控制器结构图

图 3 中, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 表示不同的电阻, U_i 表示原始信号, U_o 表示高通滤波处理后的信号, U_j 表示带通滤波处理后的信号, L_1, L_2 表示不同的电感, S_1, S_2, S_3, S_4 表示不同的电导, $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ 表示不同的二极管。

从实际的设计要求出发, 可以很容易地获得滤波器的特性参数, 包括质量因子、最大通带衰减、滤波器阶数、滤波器增益等, 它能快速地计算出不同类型的滤波器的振幅、频率, 以此搭建相关的频率曲线, 以此可以直观地看出滤波器的衰减情况。由铁氧体管和外部镀有导电材料的低电流信号噪声控制器的传输线路也可以作为吸收滤波器。吸收滤波器可以消除干扰分量, 而不只是把它反射到信号源上^[17]。在外部连接一个可伸缩的波纹管, 其内部具备铜导线。在波纹管的作用下, 铜导线不会发生局部放电, 此时波纹管具有防护功能。采用高压电容器, 将高压电容器置于绝缘铜筒中, 使其能有效地进行高压、低压滤波。其阻滞波段与局放探测器波段相一致。电感器缠绕在一个抱套上。在该抱套中安装了一层绝缘材料, 该材料由一个中空电感器和一个滤波器组成了一个电回路, 该电路可以有效地阻断来自电源输入端的干扰, 阻断由测试变压器自身产生的部分放电信号, 从而避免了被测信号含有一定的干扰分量^[18]。

噪声控制器滤波部分的信号传递函数为:

$$H_i(q) = \frac{1}{1 - q^{-1}} \quad (14)$$

式中, q 为噪声控制指令。将微弱电流信号及其类型分析结果输入到噪声控制器中, 生成噪声控制指令, 通过传递函数输出并作用在对应通道中。

计算多通道微弱电流信号噪声的控制量, 具体公式如下:

$$\Delta n = |n_m - n_{target}| \quad (15)$$

式中, n_m 为输入多通道微弱电流信号中的噪声含量, n_{target} 为信号中允许存在的最大噪声量^[19]。多通道微弱电流信号噪声控制采用小波硬阈值和软阈值执行两次噪声控制工作, 硬阈值函数表达式如下:

$$\vartheta_y = \begin{cases} \vartheta, & |\vartheta| \geq \sqrt{\sigma^2 \ln L_{\text{signal}}} \\ 0, & |\vartheta| < \sqrt{\sigma^2 \ln L_{\text{signal}}} \end{cases} \quad (16)$$

同理可以得出软阈值噪声控制函数^[20]。确定微弱电流信号的对应通道位置, 根据噪声类型和噪声量生成对应的控制指令, 作用在不同的通道上, 完成多通道微弱电流信号噪声控制的目标。

2 噪声控制效果测试实验分析

采用白盒测试方式测试基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制方法的控制效果。实验使用的白盒测试方法是一种测试用例设计方法, 即在已知测试对象内部逻辑结构与运作原理的情况下, 对所有路径进行测试。此次实验是在无噪声微弱电流环境中使用人为添加的方式加入噪声因素, 并控制加入的噪声类型和噪声量。分别使用不同的噪声控制方法, 判断控制作用下电流信号是否能够恢复原貌, 且在不破坏原电流信息的情况下, 最大程度减少信号噪声含量。

2.1 配置多通道电流信号实验环境

此次实验选择 220 kV 的交流电网作为研究对象, 交流电网中的通道数量为 211 条, 为了减少实验工作量, 随机选择交流电网中的任意 10 条通道作为测试对象, 并保证电压不变, 信号传输长度为 15 km。电网中的负载使用的是滑动变阻器, 将电阻阻值调至 72 Ω , 保证电网各通道输出的电流信号均为微弱信号。将电网与开关电源相连, 其中电源额定输出功率为 25 kW。将主侧计算机、多通道电网与频谱仪通过同轴电缆连接, 在频谱仪上加设一个 10 dB 放大器, 通过该设备实现实时电流信号的可视化显示。

2.2 安装并调试噪声生成器

实验使用 m 序列的噪声生成器, 该设备产生的噪声特性与周期长度有关, 周期越长, 噪声信号密度越小。安装的噪声生成器采用 32 级的移位寄存器序列, 输出的噪声信号可以用多项式的形式表示:

$$n = b^{32} + b^{22} + b^2 + b + 1 \quad (17)$$

式中, b 为噪声信号的生成强度。设置噪声生成器的驱动时钟为 15 MHz, 采用驱动时钟对信号进行分频处理, 利用锁相环对相位进行修正, 使噪声频谱得到扩大。特别要注意的是, 在设计中增加了一个强制设置函数, 使得 m 序列产生器输出为 0 的情况下被强制设置到初始状态。实时调整噪声生成器的运行参数, 从而实现噪声类型与噪声信号量的控制。

2.3 准备多通道微弱电流信号样本

将多通道电网开关调整至闭合状态, 按照用户端的负

载需求, 传输微弱电流信号, 并利用采集设备获取无噪声环境下的微弱电流信号样本。交流电网中 01 号通道的微弱电流信号波形如图 4 所示。

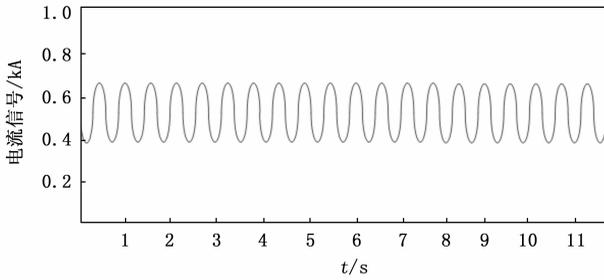


图 4 微弱电流信号波形图

在此基础上, 启动噪声生成器, 并将噪声信号直接作用在微弱电流信号中, 通过信号间的耦合, 得出含有噪声的微弱电流信号, 如图 5 所示。

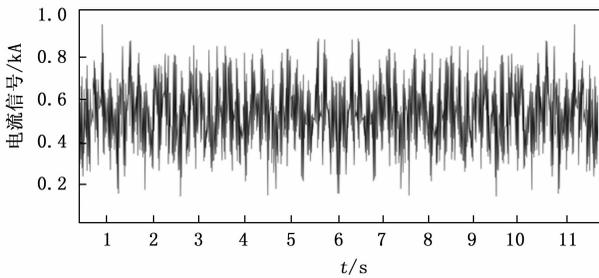


图 5 含有噪声的微弱电流信号波形图

按照上述操作, 可以得出电网环境中所有通道内的电流信号样本生成结果。由于噪声生成器与各通道之间存在一定的距离, 因此各通道中微弱电流信号中含有的噪声信号量存在差异。根据噪声生成器的设置工作参数及其与通道之间的距离, 计算微弱电流信号中噪声元素的理论值, 以此进行信号噪声控制。

2.4 描述噪声控制及效果测试实验过程

将优化设计的基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制方法转换为计算机可直接读取的程序代码, 将其代入到配置的实验环境中。将生成的含有噪声的微弱电流信号样本作为输入项导入到控制程序中, 得出微弱电流信号噪声控制结果, 控制程序界面如图 6 所示。

由此可以得出交流电网中所有通道微弱电流信号的噪声控制结果。为了体现出优化设计方法在控制效果方面的优势, 分别将文献 [2-4] 方法作为实验对比方法, 按照上述流程完成控制方法的开发与运行, 并得出对应的噪声控制结果。

2.5 设置噪声控制效果评价指标

实验分别设置去噪后微弱电流信号信噪比和相对误差作为噪声控制效果的评价指标, 其中信噪比指标的数值结果如下:

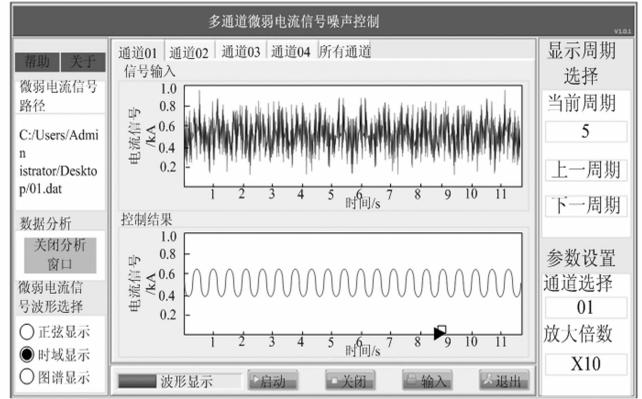


图 6 多通道微弱电流信号噪声控制结果

$$\mu = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{passageway}}} I_{\text{De-noising}}(i)^2}{\sum_{i=1}^{n_{\text{passageway}}} [I_m(i) - I_{\text{De-noising}}(i)]^2} \quad (18)$$

式中, $I_m(i)$ 和 $I_{\text{De-noising}}(i)$ 分别为 i 通道的电流信号及信号去噪结果, $n_{\text{passageway}}$ 表示实验通道数量。相对误差是指去噪处理结果与原始微弱电流信号之间的差距, 该指标主要用来判断去噪处理过程中是否对原始电流信号产生影响, 该指标的测试结果如下:

$$\epsilon_{\text{relative}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{passageway}}} I_{\text{De-noising}}(i) - I_{\text{primary}}(i) \quad (19)$$

式中, 变量 $I_{\text{primary}}(i)$ 为原始微弱电流信号。最终计算得出微弱电流信号噪声控制结果的信噪比越低、相对误差越小, 证明控制效果越优。在此次实验中, 利用调试成功的噪声生成器, 分别产生强度为 5 dB 和 25 dB 的噪声信号, 控制噪声信号量与电网产生的多通道电流信号一致。

2.6 噪声控制效果测试实验结果分析

2.6.1 5 dB 噪声环境

提取初始样本数据以及控制方法的信号输出结果数据, 经过式 (18) 得出 5 dB 噪声环境不同方法控制下信噪比的测试结果, 如图 7 所示。

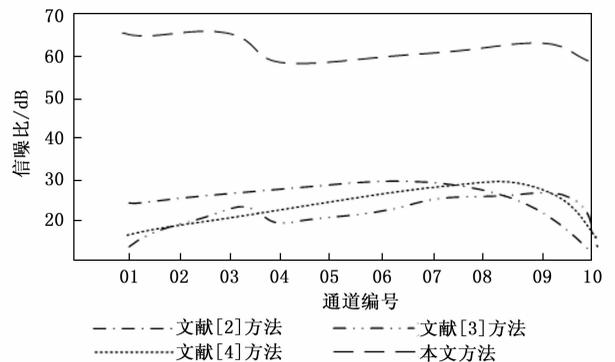


图 7 5 dB 噪声环境下多通道微弱电流信号信噪比测试对比结果

从图 7 中可以直观地看出, 在 5 dB 噪声环境中, 本文方法的电流信号信噪比始终在高于实验对比方法, 说明该方法的噪声控制效果好。5 dB 噪声环境下微弱电流信号相对误差的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 5 dB 噪声环境下微弱电流信号相对误差测试结果

电网通道编号	初始微弱电流信号值/kA	文献[2]方法输出的电流信号值/kA	文献[3]方法输出的电流信号值/kA	文献[4]方法输出的电流信号值/kA	本文方法输出的电流信号值/kA
01	0.69	0.62	0.61	0.64	0.68
02	1.32	1.26	1.24	1.25	1.30
03	1.65	1.60	1.58	1.61	1.64
04	1.17	1.11	1.14	1.13	1.15
05	1.04	0.99	1.02	1.00	1.04
06	0.89	0.81	0.82	0.84	0.87
07	1.28	1.23	1.21	1.22	1.28
08	0.97	0.92	0.94	0.93	0.96
09	1.06	1.00	1.01	1.01	1.05
10	1.31	1.23	1.25	1.27	1.30

将表 1 中的数据代入式 (23) 中, 计算得出 3 种对比控制方法作用下, 输出微弱电流信号的相对误差较大, 而基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制方法输出信号的相对误差较小, 由此可见利用优化设计控制方法输出的微弱电流信号更接近原始信号, 控制效果好。

5 dB 噪声环境下 3 种方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间对比如表 2 所示。

表 2 5 dB 噪声环境下噪声控制任务完成时间对比

实验次数	文献[2]方法/s	文献[3]方法/s	文献[4]方法/s	本文方法/s
10	2.66	5.84	3.66	1.25
20	2.58	5.63	3.58	1.36
30	2.63	5.24	3.47	1.54
40	2.58	5.47	3.55	0.96
50	2.64	4.96	3.21	1.41
60	2.47	5.68	3.58	1.23
70	2.59	4.98	3.63	1.24
80	2.11	5.25	3.47	1.52
90	2.45	5.36	3.52	1.11
100	2.36	5.47	3.55	1.13

分析表 2 中的数据可知, 文献 [2] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 2.11 s, 文献 [3] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 4.96 s, 文献 [4] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 3.21 s, 本文方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 0.96 s, 以此证明 5 dB 噪声环境下本文方法的控制任务完成时间更短, 效率

更高。

2.6.2 25 dB 噪声环境

其中, 25 dB 噪声环境下多通道微弱电流信号信噪比测试对比结果如表 3 所示。

表 3 25 dB 噪声环境下多通道微弱电流信号信噪比测试对比结果

电网通道编号	文献[2]方法控制下的信号信噪比/dB	文献[3]方法控制下的信号信噪比/dB	文献[4]方法控制下的信号信噪比/dB	本文方法控制下的信号信噪比/dB
01	38.2	44.1	42.1	52.7
02	34.1	41.3	44.6	51.5
03	29.4	47.2	45.5	53.8
04	35.5	45.5	47.5	50.4
05	28.5	43.4	35.3	50.6
06	28.6	38.6	42.3	51.9
07	31.4	36.5	41.7	52.1
08	33.3	45.8	45.4	51.3
09	30.5	43.4	43.1	50.7
10	29.2	41.6	44.5	52.4

表 3 中的信噪比数据均由式 (18) 计算得出, 通过平均值计算得出 3 种对比方法下多通道微弱电流信号信噪比的平均值分别为 31.9 dB、42.7 dB 和 43.2 dB, 而在本文方法的控制下, 多通道微弱电流信号的平均信噪比为 51.7 dB, 说明该方法控制下信号质量更高, 信号噪声控制效果更好。

25 dB 噪声环境下微弱电流信号相对误差测试结果如表 4 所示。

表 4 25 dB 噪声环境下微弱电流信号相对误差测试结果

电网通道编号	初始微弱电流信号值/kA	文献[2]方法输出的电流信号值/kA	文献[3]方法输出的电流信号值/kA	文献[4]方法输出的电流信号值/kA	本文方法输出的电流信号值/kA
01	0.69	0.51	0.56	0.61	0.67
02	1.32	1.12	1.17	1.21	1.30
03	1.65	1.51	1.54	1.57	1.61
04	1.17	1.02	1.06	1.10	1.13
05	1.04	0.93	0.91	0.94	1.02
06	0.89	0.74	0.73	0.81	0.84
07	1.28	1.10	1.12	1.17	1.25
08	0.97	0.82	0.85	0.88	0.94
09	1.06	0.92	0.96	1.01	1.03
10	1.31	1.15	1.19	1.24	1.28

将表 4 中的信号值数据代入式 (19) 中, 得出 15 dB 噪声环境下, 4 种控制方法作用下, 输出微弱电流信号的相对误差分别为 1.56 kA、1.29 kA、0.84 kA 和 0.31 kA, 由此证明在两种不同的噪声环境下, 本文方法控制效果始终优于传统方法。通过不同控制方法之间的横向对比, 发现在两种不同噪声强度环境下, 本文方法均能达到良好的噪声

控制效果,说明该方法的信号控制效果更好。

25 dB 噪声环境下 3 种方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间对比如表 5 所示。

表 5 25dB 噪声环境下噪声控制任务完成时间对比

实验次数	文献[2] 方法/s	文献[3] 方法/s	文献[4] 方法/s	本文方 法/s
10	3.66	8.63	5.66	1.63
20	3.52	8.15	5.47	1.47
30	3.69	8.47	5.26	1.58
40	3.88	7.96	5.85	1.69
50	3.56	7.88	5.63	1.47
60	3.47	7.63	5.28	1.51
70	3.69	7.45	5.15	1.23
80	3.85	7.98	5.36	1.66
90	3.55	8.61	5.54	1.71
100	3.69	8.55	5.89	1.53

分析表 5 中的数据可知,文献 [2] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 3.47 s,文献 [3] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 7.45 s,文献 [4] 方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 5.15 s,本文方法的多通道微弱电流信号噪声控制任务完成时间最小值为 1.23 s,说明 25 dB 噪声环境下本文方法的控制任务完成时间更短,整体噪声控制效率更高。

3 结束语

微弱电流信号具有功率低、不易被接收等特点,为了提取到微弱电流信号中的有效信息,有必要对其噪声进行有效控制,由此提出了基于经验小波变换的多通道微弱电流信号噪声控制方法。在经验小波变换去噪分析中,针对存在噪声的信号分量进行控制,而对于无噪声的分量不做任何处理,以此保证信号数据不会丢失。实验结果证明,该方法不仅能去除微弱电流信号中的噪声,同时能够有效保留微弱信号的细节信息,具有较高的应用价值与研究意义。然而实验结果也反映出噪声控制方法与外界环境之间的关系,证明优化设计方法存在抗干扰能力差的问题,针对这一问题还需要在今后的研究工作中进一步改善。

参考文献:

- [1] 马星河,张登奎.基于改进经验小波变换的高压电缆局部放电噪声抑制研究[J].电工技术学报,2021,36(s1):353-361.
- [2] 刘军,陈磊,李文灿,等.基于混沌蚁群优化小波阈值法地磁信号噪声压制[J].科学技术与工程,2020,20(25):10177-10181.
- [3] 李景贵,靳伍银.基于改进双耦合 Duffing 振子的微弱信号检

测方法[J].仪表技术与传感器,2021(11):121-125.

- [4] 江友华,朱毅轩,江相伟,等.基于改进 LMS 自适应滤波的局部放电噪声抑制方法[J].科学技术与工程,2022,22(3):1039-1047.
- [5] 吴涛,庞涛,汤玉泉,等.半导体激光器驱动电路设计及环路噪声抑制分析[J].红外与激光工程,2020,49(6):162-171.
- [6] 黎泉,高雪松,周承豫,等.一种感应同步器电路工频噪声干扰抑制方法[J].电力电子技术,2020,54(4):29-32.
- [7] 彭海军,李斌,党政.基于 FPGA 的快速 PWM 闭环控制设计[J].电力电子技术,2021,55(11):101-103.
- [8] 万留杰,马凤翔,汪胜和,等.SF₆气体中 H₂S 光声检测及 FFT 滤波在检测信号噪声抑制中的应用[J].高电压技术,2021,47(7):2564-2571.
- [9] 丁明宽,石志勇,韩兰懿,等.基于 EMD-DFA-小波阈值的 MEMS 陀螺信号去噪方法[J].火炮发射与控制学报,2021,42(2):50-56.
- [10] 孙抗,李万建,张静.含窄带噪声和白噪声的复杂染噪局部放电信号提取及应用[J].电子科技大学学报,2021,50(1):14-23.
- [11] 姜敏敏,罗文茂,崔应留.基于耦合 Duffing 振子的局部放电信号去噪方法研究[J].电子器件,2022,45(2):346-351.
- [12] 徐艳春,夏海廷,李振华,等.基于同步压缩域多级阈值变压器局部放电噪声抑制方法[J].高压电器,2021,57(6):123-131.
- [13] 刘锦春,张春辉,沈惠杰,等.基于 PL-EPLL 的未知时变窄带噪声有源控制方法[J].电子学报,2020,48(6):1140-1148.
- [14] 饶显杰,周凯,汪先进,等.基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J].高电压技术,2021,47(2):705-713.
- [15] 武翠霞,张培峰,杨军佳,等.CMOS 神经元电路耦合同步对噪声的抑制作用[J].微电子学与计算机,2021,38(9):105-108.
- [16] 赵永梅.VMD 和小波阈值重构的电力电缆局部放电信号去噪法[J].西安科技大学学报,2021,41(4):739-746.
- [17] 余昌佳,梅飞,叶显媛,等.基于优化 VMD 与噪声估计的间隔阈值局部放电去噪方法[J].高压电器,2020,56(3):141-149.
- [18] 郑祥,田伟,管鹏.基于改进 VMD 算法的电机局部放电信号去噪方法研究[J].电机与控制应用,2020,47(11):117-121.
- [19] 黄明祥,郭志彬,潘立志,等.实验室内交流导线电晕噪声的频谱特性研究[J].中国电力,2021,54(5):111-120.
- [20] 徐永干,姜杰,唐昆明,等.基于 Hankel 矩阵和奇异值分解的局部放电窄带干扰抑制方法[J].电网技术,2020,44(7):2762-2769.