

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007000

基于双通道能量差的环网柜局放信号消噪方法*

刘元, 匡文凯, 苏盛, 李彬

(长沙理工大学 清洁能源与智能电网湖南省协同创新中心 长沙 410114)

摘要:利用放电声音信号检测环网柜的局部放电具有信息量丰富、能够准确反映放电故障等特点而得到广泛应用,但放电声音信号的有效检测是一个难点。双通道录音在消噪领域中具有独特的优势,能够有效消除非平稳噪声,根据现场测量噪声干扰多为远距离的非平稳噪声,而局放信号为近距离声源的特点,提出了一种基于双通道能量差(PLD)的环网柜放电信号消噪方法。仿真实验结果表明,相比基于谱减法和维纳滤波的单通道消噪方法,本文所提消噪方法在两种非平稳噪声下的信噪比分别平均高出了14.8 dB和9.1 dB,均方误差(1×10^{-4})分别平均减小了19.34和15.50,消噪效果优于单通道消噪算法,现场实验结果表明,环网柜放电声音波形明显被突出加强,能够有效去除周围环境中的非平稳噪声,从而保留有效放电信号,为环网柜的局放诊断提供有效的数据支撑。

关键词:环网柜;局部放电;噪声消除;非平稳噪声;双通道能量差

中图分类号: TN912 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

A denoising method for partial discharge signal of ring network cabinet based on dual-channel power level difference

Liu Yuan, Kuang Wenkai, Su Sheng, Li Bin

(Hunan Province Innovation Center of Renewable Energy & Smart Grids, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The discharge sound signal has been widely utilized to detect the partial discharge of the ring network cabinet, which has the characteristics of rich information and can accurately reflect the discharge fault. However, the effective detection of the discharge sound signal is a difficult point. The two-channel recording has unique advantages in the field of noise cancellation, which can effectively eliminate non-stationary noise. According to the characteristics of long-distance non-stationary noise measured on-site, the main noise interference has long-distance non-stationary feature. But, the partial discharge signal is a short-distance sound source. The noise elimination method of the discharge signal of the ring main unit is based on the dual-channel energy difference (power level difference, PLD). Compared with the single-channel denoising method based on spectral subtraction and Wiener filtering, the simulation experiment results show that the signal-to-noise ratio of the proposed denoising method under the two non-stationary noises is 14.8 dB and 9.1 dB higher on average, respectively. The square errors (1×10^{-4}) is reduced by 19.34 and 15.50 on average, respectively, and the denoising performance is better than that of the single-channel denoising algorithm. In the field experiment, the discharge sound waveform of the ring network cabinet is enhanced, which can effectively remove non-stationary noise of the surrounding environment. Thus, the effective discharge signal is retained, which can provide effective data support for the partial discharge diagnosis of the ring main unit.

Keywords: ring network cabinet; partial discharge; noise reduction; non-stationary noise; power level difference

收稿日期: 2020-10-12 Received Date: 2020-10-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(51777015)、湖南省自然科学基金(202004611)、湖南省教育厅重点项目(19A011)资助

0 引言

环网柜具有结构简单、体积小以及可靠性高等优点,在城市配电系统中应用极为广泛。受运行环境、设备质量和施工工艺等因素的影响,环网柜多发局部放电故障,可能起火爆炸,易造成停电事故甚至威胁附近人员安全。由于电力设备局放异常多伴随声音信号,工作人员可借助基于声音信号的局放检测原理诊断设备运行情况^[1-3]。

检测局放声音信号可通过可听声音传感器(频率范围 20 Hz ~ 20 kHz)或超声波传感器(频率范围 20 ~ 100 kHz)采集环网柜局放声音信号,利用滤波等方法去除噪声干扰,提取局放信号相关特征后进行故障诊断^[4-7]。由于早期局放故障放电信号微弱,在靠近马路的嘈杂环境中,局放信号容易淹没在环境噪声中,难以准确测量。如何去除噪声干扰,是开放环境下检测环网柜局放异常的瓶颈问题。

针对声音信号中噪声干扰问题,既有研究多采用基于单通道(一个通道的麦克风)的消噪算法,包括基于谱减法、维纳滤波、小波消噪算法等进行消噪^[8-13]。该类算法的参数设置依赖于对背景噪声的评估,需要利用仅含背景噪声的声音作为比较进行去噪,因此在含平稳、信噪比高的背景噪声中具有较好的效果,而现场噪声多为非平稳噪声,普遍存在难以预测背景噪声的问题。

针对非平稳噪声干扰,文献[14]提出了一种非平稳噪声信号的增强方法,主要针对电缆放电检测场景中部分具有相似性的非平稳噪声如远处缓慢变化的车流噪声消噪,文中分解小波包后得到多个子信号,重构子信号后进行随机组合,并利用遗传算法加速寻找组合信号中与背景噪声最相似的信号,将原始信号减去该信号可得到不含噪声的放电声音。该方法能有效削弱部分具有相似性的非平稳背景噪声,是去除非平稳噪声研究的重要基础。需要指出的是,现场环境中还存在大量说话、碰撞、知了、喇叭等随时间不断变化、一般不具有相似性的噪声,此类噪声现有方法难以有效应对。

不同于单通道消噪算法,基于双通道(两个麦克风)的声音消噪算法结合了目标声源和噪声在空间上的差异,能有效消除非平稳噪声。该类算法主要利用双通道在相位、时间和能量上的差异消噪^[15-17],其中,基于双通道能量差的声音信号消噪算法在高度非平稳噪声环境下消噪效果较好,且同时具有复杂度低、传感器数量少和易于实现等优势,近几年来得到了广泛的关注,在智能手机通话消噪中得到了普及应用。该方法是智能手机在手持语音通话模式下,启动位于手机底部的主麦克风和顶部的辅助麦克风同时录音,根据人说话声源和外界噪声源到达两个麦克风之间的差异性消除外界噪声。当环网柜

内部放电电源接近主麦克风时,也相当于一个近距离的声源,而周围环境噪声干扰一般距离较远,类似于手机通话消噪原理,有可能将基于双通道的消噪技术应用到环网柜局放信号消噪中,从而为环网柜的局放故障诊断提供数据支撑。

本文将基于 PLD 的双麦克风消噪方法引入到环网柜放电声音信号的消噪中,通过对比实验验证了所提方法的有效性。

1 基于 PLD 的双麦克风声音信号消噪原理

1.1 PLD 算法消噪原理

图 1 所示双麦克风接收信号系统中,一般将靠近目标声源的麦克风称作为主麦克风,远离的称作辅助麦克风,认为处于近场中的声源信号发射球面波,由于越靠近声源的声音衰减越大,到达两个麦克风之间的声音存在较大的能量差,而远场噪声干扰认为是平面波,信号传递到两个麦克风之间的能量差距小。

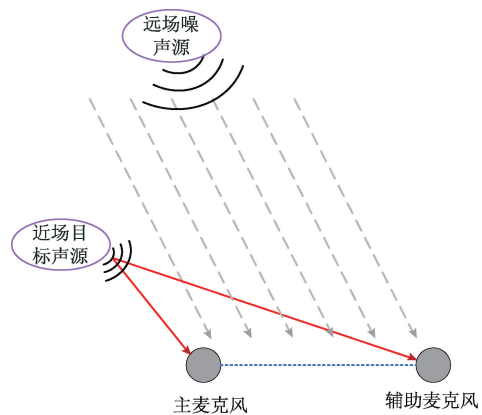


图 1 双麦克风接受近、远场声源模型

Fig. 1 Two microphones receiving near and far field sound source models

PLD 算法消噪的原理便是基于上述特性进行声音信号消噪,其原理如图 2 所示,假设目标声源处于一个含大量噪声干扰的环境中,主麦克风和辅助麦克风接收的声音信号可分别表示为^[18]:

$$x_1(m) = h_1(m) \times s(m) + n_1(m) \quad (1)$$

$$x_2(m) = h_2(m) \times s(m) + n_2(m) \quad (2)$$

式中: $x_1(m)$ 和 $x_2(m)$ 为由麦克风获得的信号; $h_1(m)$ 和 $h_2(m)$ 分别为主、辅助麦克风与目标信号源之间的脉冲响应; $s(m)$ 为目标声源信号; $n_1(m)$ 、 $n_2(m)$ 分别是两个麦克风接受的噪声。将信号经过分帧加窗处理,得到若干声音片段后进行分析,对分帧后的每帧时域信号进行傅里叶变换,可得信号的频域表示:

$$X_1(n, k) = H_1(n, k)S(n, k) + N_1(n, k) \quad (3)$$

$$X_2(n, k) = H_2(n, k)S(n, k) + N_2(n, k) \quad (4)$$

式中: n 表示第 n 帧信号; k 为频率索引; 令 $S_1(n, k) = H_1(n, k)S(n, k)$, 则上式可改写为:

$$X_1(n, k) = S_1(n, k) + N_1(n, k) \quad (5)$$

$$X_2(n, k) = H_{12}(n, k)S_1(n, k) + N_2(n, k) \quad (6)$$

式中: $H_{12}(n, k) = H_2(n, k)/H_1(n, k)$, 为麦克风间传递函数, 根据 FFT 变换结果, 可分别计算主麦克风与辅助麦克风的信号的功率密度谱函数 (power spectral density, PSD), 分别为:

$$P_{X_1}(n, k) = P_{S_1}(n, k) + P_{N_1}(n, k) \quad (7)$$

$$P_{X_2}(n, k) = |H_{12}(n, k)|^2 P_{S_1}(n, k) + P_{N_2}(n, k) \quad (8)$$

式中: $P_{X_1}(n, k)$ 、 $P_{X_2}(n, k)$ 分别表示两个麦克风接受信号的功率谱密度估计; $P_{S_1}(n, k)$ 为主麦克风接受的目标声源功率谱密度估计; $P_{N_1}(n, k)$ 、 $P_{N_2}(n, k)$ 分别是各麦克风接受的噪声功率谱密度估计。则两个信号的能量差为:

$$\Delta P_X(n, k) = P_{S_1}(n, k)(1 - |H_{12}(n, k)|^2) + \Delta P_N(n, k) \quad (9)$$

其中, $\Delta P_X(n, k) = P_{X_1}(n, k) - P_{X_2}(n, k)$, $\Delta P_N(n, k) = P_{N_1}(n, k) - P_{N_2}(n, k)$, 根据前文分析, 在远场或扩散场中, 可认为两通道噪声信号的功率差忽略不计, 则有:

$$|\Delta P_X(n, k)| = P_{S_1}(n, k)(1 - |H_{12}(n, k)|^2) \quad (10)$$

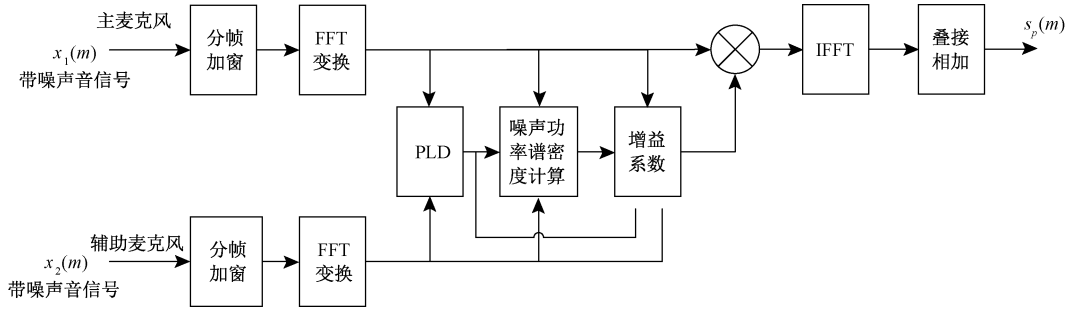


图2 PLD算法消噪原理

Fig. 2 PLD algorithm noise cancellation

由式(10)可知, 双通道的能量差为目标声源信号乘以一个系数, 实际情况中, 声波遇障碍反射容易产生混响, 主麦克风接收到的目标声源能量可能会小于辅助麦克风接受的能量, 即 $\Delta P_X(n, k)$ 值可能小于0, 通过加绝对值可避免出现负值情况出现。

麦克风接受声音的功率谱密度估计计算采用一阶递归的周期图法, 即:

$$P_X(n, k) = \lambda_X P_X(n-1, k) + (1 - \lambda_X) P_X(n, k) \quad (11)$$

其中, λ_X 表示平滑因子, 取值在0~1之间。

通过双麦克风之间的能量差可以估计主麦克风接受的目标源信号 P_{S_1} , 再经过一个增益函数进行补偿可得到目标声源信号的估计值。该增益函数的求解过程基于维纳滤波, 维纳滤波器增益函数表示为:

$$H_\omega(n, k) = \frac{P_S(n, k)}{P_S(n, k) + P_N(n, k)} \quad (12)$$

将上式右边分子分母同乘 $|1 - |H_{12}(n, k)|^2|$, 并将式(10)代入得:

$$G_\Delta(n, k) = \frac{|P_X(n, k)|}{|P_X(n, k)| + |(1 - |H_{12}(n, k)|^2)|P_N(n, k)} \quad (13)$$

由上式可知, 计算增益函数还需先求得噪声的功率谱 $P_N(n, k)$ 以及传递函数 $H_{12}(n, k)$ 。

噪声功率谱的求解与式(11)一致, 即:

$$P_N(n, k) = \lambda_N P_N(n-1, k) + (1 - \lambda_N) P_N(n, k) \quad (14)$$

与单通道消噪方法需要利用只含有噪声的声音样本才能估计噪声功率谱不同, PLD 算法利用双通道中的能量差消噪, 并不依赖于对未知非平稳噪声的准确估计, 因此具有独特的优势。

传递函数用来定义两个麦克风接收到的目标声源成分关系, 假设目标声源和噪声是独立的, 将式(8)乘以式(9)的一个共轭复数可得:

$$P_{X_1 X_2}(n, k) = H_{12}(n, k) P_{X_1}(n, k) + P_{N_1 N_2}(n, k) \quad (15)$$

其中, $P_{X_1 X_2}$ 和 $P_{N_1 N_2}$ 分别为输入信号和噪声信号在两通道的互功率谱 (CPSD)^[19], 可得传递函数:

$$H_{12}(n, k) = \frac{P_{X_1 X_2}(n, k) - P_{N_1 N_2}(n, k)}{P_{X_1}(n, k) - P_{N_1}(n, k)} \quad (16)$$

在信号增强算法中, 降噪程度偏大会对源信号有一定损害, 造成失真。为调整降噪水平, 通常对式(13)分母中的右边式子乘以一个缩放系数得:

$$G_\Delta(n, k) = \frac{|P_X(n, k)|}{|P_X(n, k)| + \alpha |(1 - |H_{12}(n, k)|^2)|P_N(n, k)} \quad (17)$$

其中, 系数 α 越大消噪效果越好, 但可能会造成失真情况, 一般取经验值 0.25。

综上, PLD 算法消噪的主要步骤为:

1) 首先采集两路信号记作 x_1 和 x_2 , 均分割成 n 帧;

2) 分别对 x_1 和 x_2 的第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 帧信号加窗并进行傅里叶变换, 计算其功率谱, 得到两者能量差; 通过噪声功率谱估计计算得到增益函数, 将增益函数与主麦克风信号相乘, 并对其进行傅里叶反变换得到第 i 帧信号的时域信号;

3) 重复执行步骤 2), 直至第 n 帧信号; 最后, 将得到的 n 帧信号叠接相加, 可得消噪后的音频信号。

1.2 带噪信号以及噪声功率谱密度估计方法

在原 PLD 的双麦克风消噪方法中, 对带噪信号的功率谱密度估计采用一阶递归平滑的周期图法, 其表达式如式(11)所示, 其中, 平滑因子 λ 一般设置为固定值, 需要指出的是, 在放电期间, 平滑因子 λ 应该尽可能小, 以追踪放电信号变化, 在无放电区间, 平滑因子 λ 应该尽可能接近 1, 以减小功率谱波动, 因此采用固定平滑因子难以准确追踪带噪声的放电信号, 为提高功率谱估计精度, 考虑引入自适应平滑因子^[20-21]。

设带噪声放电信号为 $x(m)$, 其功率谱密度为 $P_X(n, k)$, 噪声的功率谱密度为 $P_N(n, k)$, 通过最小化 $P_X(n, k)$ 与 $P_N(n, k)$ 之间的条件均方误差得到最优平滑因子 $\lambda_{opt}(n, k)$, 条件均方误差可表示为:

$$E\{(P_X(n, k) - P_N(n, k))^2 | P_X(n, k-1)\} \quad (18)$$

将式(11)带入, 令其关于 λ 的一阶导数为 0, 可得:

$$\lambda_{opt}(n, k) = \frac{1}{1 + (\beta - 1)^2} \quad (19)$$

其中, $\beta = P_X(n, k-1) / P_N(n, k)$, 表示放电信号的后验 SNR^[15], β 与平滑因子之间关系如图 3 所示, 当存在放电信号时, β 值较大, 此时平滑因子较小, 能够追踪放电信号, 当无放电信号时, β 值较小, 此时平滑因子接近 1, 因此能够减小功率谱波动, 此外, 平滑因子不宜过大或偏小, 根据文献[20]中结果设置其范围为 $[0.3, 0.96]$, 图 4(a) 为一段带噪声的放电信号时域波形, 图 4(b) 为利用本文方法对其功率谱密度估计时平滑因子的变化情况。

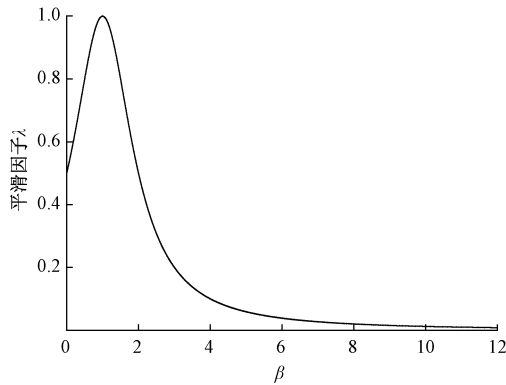
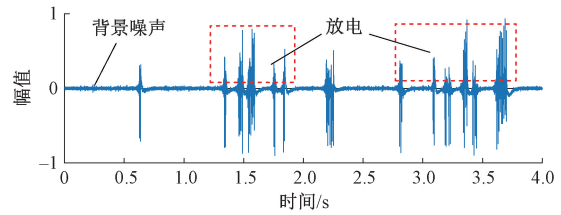
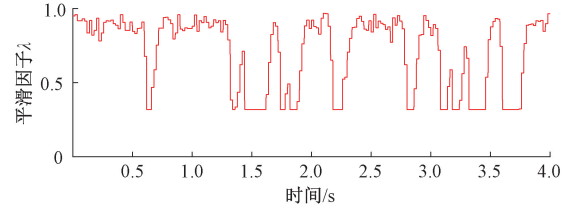


图 3 平滑因子与 β 之间的关系

Fig. 3 The relationship between smoothing factor and β



(a) 带噪放电声音的时域波形
(a) Time domain waveform of noisy discharge sound



(b) 不同时间的平滑因子
(b) Smoothing factor at different times

图 4 平滑因子更新过程

Fig. 4 Smoothing factor update process

从式(19)中可以看出, β 值的求解须同时计算噪声的功率谱密度 $P_N(n, k)$, 原 PLD 算法中, 对噪声功率谱密度估计采用最简单的稳态噪声估计方法, 需要在无放电声音段进行, 虽然在平稳噪声下效果较好, 但面对复杂的非平稳噪声时, 该方法容易将放电信号估计为噪声, 为此, 引入基于标准化能量差的噪声谱估计方法, 标准化能量差定义为:

$$\Delta\varphi(n, k) = \left| \frac{P_{X1}(n, k) - P_{X2}(n, k)}{P_{X1}(n, k) + P_{X2}(n, k)} \right| \quad (20)$$

式中: $P_{X1}(n, k)$ 、 $P_{X2}(n, k)$ 分别表示两个麦克风接受信号的功率谱密度估计, 可通过前文提出的自适应平滑因子的一阶递归的周期图法求得, 噪声的功率谱密度估计分为以下 3 种情况分别进行估计:

1) 当录音中信噪比较低时, 噪声占主导, 根据 PLD 算法假设, 此时有 $P_{X1}(n, k) \approx P_{X2}(n, k)$, 即 $\Delta\varphi(n, k) \approx 0$, 利用主麦克风接收的信号对噪声功率谱持续进行估计:

$$P_N(n, k) = \lambda_1 P_N(n, k-1) + (1 - \lambda_1) |X_1(n, k)|^2 \quad (21)$$

式中: 平滑因子 λ_1 取固定值, 本文取 0.8, $\Delta\varphi(n, k)$ 取值接近 0, 可设置一个最小能量差阈值 $\Delta\varphi_{min}$, 当 $\Delta\varphi(n, k) < \Delta\varphi_{min}$ 时, 利用式(21)进行估计, 本文取 $\Delta\varphi_{min} = 0.15$ 。

2) 当信噪比较高时, 此时放电信号占主导, 主麦克风接收的能量远大于辅助麦克风接收的能量, 即 $P_{X1}(n, k) \gg P_{X2}(n, k)$, 则有 $\Delta\varphi(n, k) \approx 1$, 此时应该停止对噪声的估计:

$$P_N(n, k) = P_N(n, k-1) \quad (22)$$

因 $\Delta\varphi(n, k)$ 接近 1, 可设置一个最大能量差阈值 $\Delta\varphi_{max}$, 当 $\Delta\varphi(n, k) > \Delta\varphi_{max}$ 时利用式(22)进行估计, 本文

取 $\Delta\varphi_{\max} = 0.9$ 。

3) 当放电和噪声含量相当时,即满足条件 $0.15 \leq \Delta\varphi(n, k) \leq 0.9$ 时,利用辅助麦克风接收信号进行噪声的功率谱密度估计:

$$P_N(n, k) = \lambda_2 P_N(n, k-1) + (1 - \lambda_2) |X_2(n, k)|^2 \quad (23)$$

其中,平滑因子 λ_2 取 0.8。

2 仿真实验

2.1 消噪实验

为了更好地模拟适应现场环境,本文采集实际场景中常见的马路上车流、知了叫声等环境噪声,并在实验室中产生放电信号,利用双麦克风传感器采集放电声音信号,将二者混合后测试所提 PLD 算法的消噪性能。作为对比,引入基于单通道的谱减法^[22]、维纳滤波消噪算法^[23]进行测试。

图 5 为一段利用双麦克风传感器录制的高信噪比放电音频的时域波形及其中一帧信号的功率谱。由图 5 可见,不同通道的时域波形及功率谱具有明显差异,主麦克风的放电时域波形幅值远大于辅助麦克风,其中一帧信号对应功率谱位于辅助麦克风功率谱曲线上方,说明两通道中存在较大能量差异。

为了评价去噪效果,将以信噪比 (SNR) 和均方误差 (MES) 作为评价指标,两者定义如下:

$$SNR = 10 \lg \sum_{i=1}^N \left[\frac{s(i)}{d(i) - s(i)} \right]^2 \quad (24)$$

$$MES = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |s(i)^2 - d(i)^2| \quad (25)$$

式中: $s(i)$ 是不含噪声的原始局放信号, $d(i)$ 为去噪后的信号。经消噪后声音的信噪比值增加得越大、均方误差越小,说明去噪效果越好,反之说明效果越差。

将含马路上车流噪声、知了叫这两种噪声与放电信号混合叠加后,进行消噪测试,测试结果如图 6 所示。分别计算 3 种消噪算法的 SNR 和 MES 指标,结果如表 1、2 所示,相比两种单通道消噪方法,本文所提消噪方法在两种非平稳噪声下的 SNR 指标分别平均高出了 14.8 和 9.1 dB, MES (1×10^{-4}) 指标分别平均减小了 19.34 和 15.50,结合图 6 波形,可看出使用本文的 PLD 消噪算法在两种非平稳噪声下效果更好,能突出原始的局放信号,而基于单通道的谱减法和维纳滤波表现较差。其中,基于谱减法消噪后放电信号被严重削弱,经过维纳滤波后的波形几乎未发生变化,这是由于单通道消噪算法需提前录制或搜索只含背景噪声不含放电的声音用来计算算法的核心参数,而实际环境中很难准确评估哪里是背景噪声。当放电信号被非平稳噪

声严重污染时,由于算法本身的缺陷,容易将有效放电信号误判为噪声,导致放电信号严重削弱,或者将噪声当作有效放电信号不做处理。

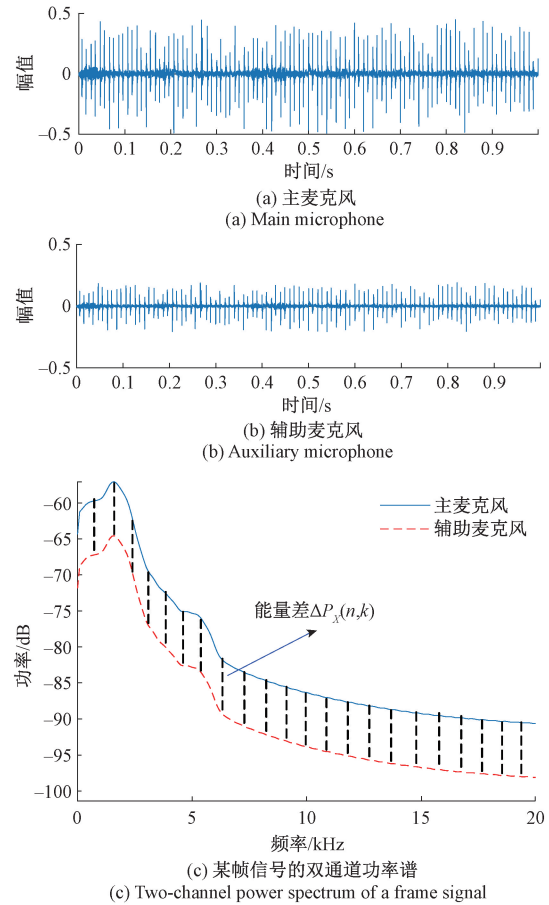


图 5 放电声音双通道的时域波形、功率谱
Fig. 5 Time-domain waveform and power spectrum of dual channels of discharge sound

表 1 含马路上车流噪声去噪结果对比

Table 1 Comparison of denoising results containing road traffic noise

评价指标	含噪声信号	谱减法	维纳滤波	本文 PLD
SNR/dB	-8.7	2.6	3.1	7.6
MES(1×10^{-4})	237.15	124.44	111.91	98.84

表 2 含知了叫声去噪结果对比

Table 2 Comparison of denoising results containing cicada noise

评价指标	含噪声信号	谱减法	维纳滤波	本文 PLD
SNR/dB	-7.6	0.9	0.6	9.8
MSE(1×10^{-4})	208.22	77.43	81.11	67.23

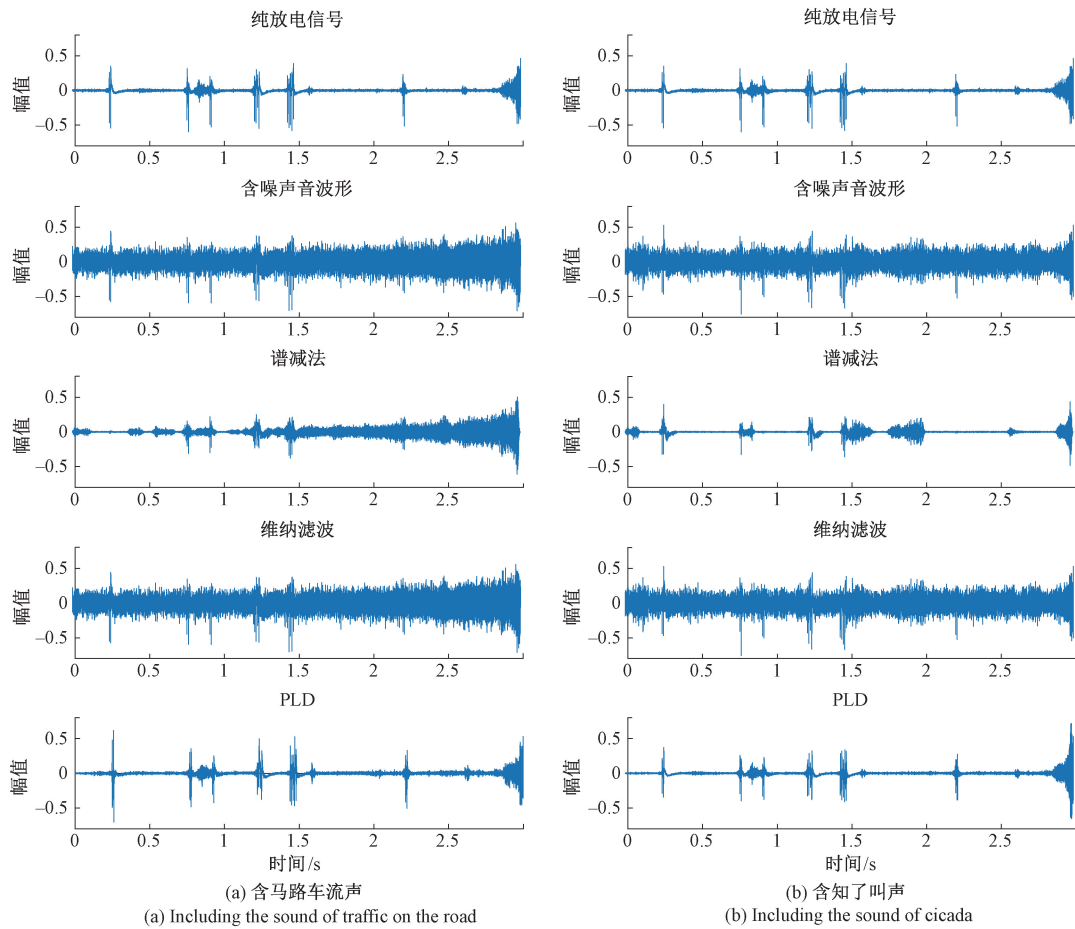


图6 去噪结果对比

Fig. 6 Comparison of denoising results

2.2 影响因素

PLD 消噪算法假设两个麦克风之间存在能量差,理论上该差值大于 0 即可满足算法的需求。但测量中发现随着声源与测量距离的增大,双麦克风之间声音信号的能量差异性逐渐减小达到一定程度时,容易与噪声混淆(远处噪声传播到双麦克风传感器中并不完全相同,同样存在较小的能量差,当测量位置远离放电点时,双麦克风传感器中放电信号的能量差接近噪声信号的能量差,难以区分)。因此,需确定合适的测量范围,才能保证 PLD 算法的消噪性能。

声音信号在传播中不断衰减,假设所测位置只有一处放电,其对应的声压级为 L_w ,可将其看成点声源,在不计空气吸收的情况下,离声源距离为 r 处测得声音的声压级 $L_p(r)$ 可近似表示为^[24-25]:

$$L_p(r) = L_w + 20\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \quad (26)$$

式中: Q 为指向性系数,假设放电处于的自由空间(无地

面反射)此时 Q 取 1,则上式可简化为:

$$L_p(r) = L_w - 20\lg(r) - 11 \quad (27)$$

由上式可知,声音的声压级随测量距离 r 增大而快速减小。设 r_1 和 r_2 处的声压级分别为 $L_1(r_1)$ 和 $L_2(r_2)$,可得任意两测点间声压级的差值为:

$$L_2(r_2) - L_1(r_1) = -20\lg(r_2/r_1) \quad (28)$$

本文所用双麦克风间距离约为 0.1 m,当主麦克风正对声源时,有 $r_2 = r_1 - 0.1$,通过式(28)计算可得理论上双麦克风之间声压级差随测量距离的变化曲线。

如图 7 所示,以下测试了本文使用的传感器声压级差随测量距离变化曲线。由图 7 可知实际测量的双麦克风间声压级差曲线位于理论曲线上方,由于两个麦克风之间材料阻碍声音传播,加大了声音到达辅助麦克风的衰减程度,因此在同一测量距离下,明显大于理论值,更有利于恢复放电信号。本文结合大量现场测量噪声数据及放电信号,将 3 dB 的能量差作为可接受的最小能量差,即当测量距离小于 1.5 m 可满足需求。

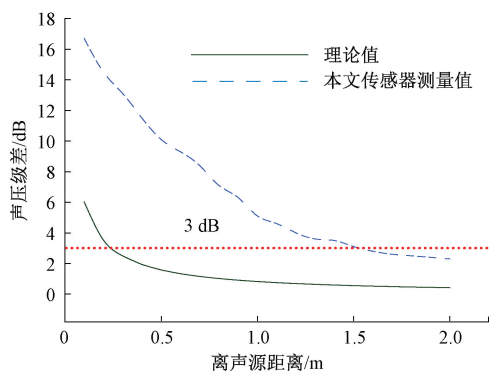


图7 双麦克风声压级差随测量距离变化关系
Fig. 7 The relationship between the sound pressure level difference of the dual microphones of the mobile phone and the measurement distance

3 现场实验

为进一步验证本文所提方法的有效性,对某户外10 kV环网柜进行现场测试。该环网柜位于市区主干道,附近可听明显的车流喇叭等噪声。利用双麦克风传感器进行持续测量,为减少近距离可能人为产生噪声的影响,测量时将传感器固定在可调长度的延长杆上,延长杆长度为1.5 m,并将主麦克风方向垂直对准环网柜,控制手机与环网柜距离小于0.3 m,该环网柜的尺寸高×宽×深为1 600 mm×500 mm×1 000 mm。

根据前文分析,外界环境噪声干扰大多为远场噪声而放电信号为近场声音,远处噪声信号在双通道录音中不会产生较大的能量差异,而近处放电会产生较大的能量差,因此可根据双通道能量差的大小初步定位放电,并认为越接近放电处的双通道能量差越大,反之越小,在不同位置测量的双通道能量差如图8所示。

从上图左半部分不同位置的的能量差曲线可见,在测量点1~6处的双通道能量差均大于3 dB,能满足所设置的阈值,而测点7~10处的能量差小与3 dB,说明该几处测得放电信号衰减程度较大,距离放电较远,不适合作为有效数据。此外,在测点6处出现了最大值,经查看确定该处为柜体缝隙处,而不是靠近故障点的位置。经分析,对该情况的解释如下,环网柜壳体金属材料阻碍声音传播,削弱了相当一部分能量,在外部测量的能量差偏小;但放电信号仍可从缝隙处传播,相当于在缝隙处产生新的点声源,且传感器离该点声源较近。因此,可将柜体缝隙处即测点6的声音作为有效样本。利用本文所提的PLD消噪算法对6测量位置的放电信号消噪,消噪结果如图9所示。

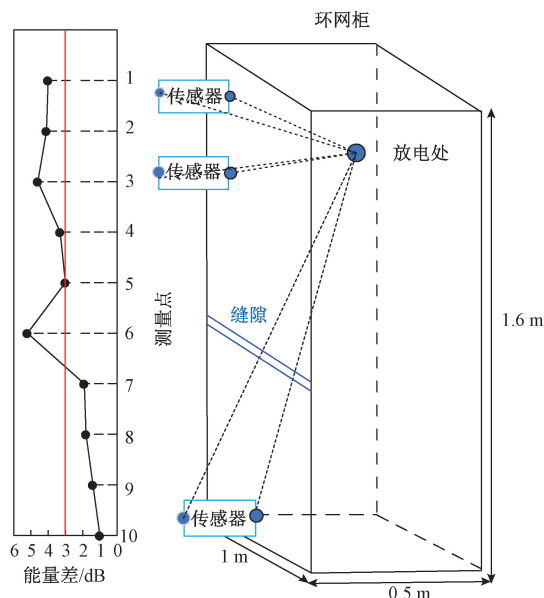


图8 测量点确定

Fig. 8 Determination of measuring points

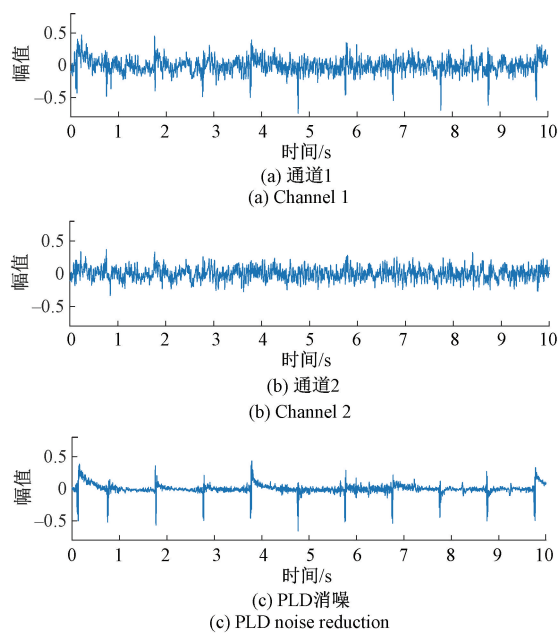


图9 环网柜局放信号的PLD消噪

Fig. 9 PLD noise elimination of partial discharge signal of ring network cabinet

图9中,通道1、2分别为主麦克风和辅助麦克风测得信号,两个通道所测放电信号均被大量非平稳噪声干扰淹没,但不同通道中信号存在差异。经PLD消噪后,环网柜放电声音波形明显被突出加强,而背景噪声干扰被有效削弱。因此,本文所提方法可有效消除周围环境噪声干扰,并突出放电信号。

4 结 论

在分析环网柜故障点放电声音信号以及环境噪声干扰特点基础上,提出采用基于 PLD 的声音信号算法检测放电信号,主要结论如下:

1)所提方法可有效消除非平稳的环境噪声,达到增强环网柜内放电声音信号的目的。当放电信号完全被淹没在复杂的环境噪声时,还能解决放电信号不明显的问题,进而结合放电故障诊断可准确判断放电故障。

2)利用双通道录音法采集网柜局放信号,结合 PLD 消噪算法对放电信号消噪,能大幅降低数据采集成本,是配电设备运维发展的趋势。

3)本文测量点选择为缝隙处,实际操作中可进行移动测量,并根据通道能量差初步估计故障放电位置,有可能为环网柜局放的定位提供新的思路,后续将基于本文所提消噪方法对环网柜的局放故障定位和诊断展开研究。

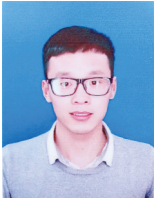
参考文献

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8): 2583-2601.
LI J H, HAN X T, LIU Z H, et al. Review of partial discharge detection technology for electrical equipment[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [2] 李通,谢庆,张宏伟,等. 基于信号稀疏分解的局放超声阵列定位法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6): 1301-1310.
LI T, XIE Q, ZHANG H W, et al. Research on the location of ultrasonic arrays based on signal sparse decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (6): 1301-1310.
- [3] 姚维强,司文荣,吕佳明,等. EFPI 光纤超声传感器及其潜在局放检测应用综述[J]. 高电压技术,2020,46(6): 1855-1866.
YAO W Q, SHI W R, LYU J M, et al. EFPI fiber ultrasonic sensors and their potential bureau release detection applications review [J]. High Voltage Technology, 2020, 46 (6): 1855-1866.
- [4] 白鹭,李小婧,董理科,等. 基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表,2020,57(11): 42-48.
BAI L, LI X J, DONG L K, et al. Research on the identification of partial discharge types of ring mains based on ultrasonic method[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(11): 42-48.
- [5] 史焱毓,曹雪虹,张彪,等. 基于可闻声源多模态特征的开关柜绝缘故障识别[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2018,16(4): 49-54.
SH G Y, CAO X H, ZHANG B, et al. Switchgear insulation fault identification based on multi-modal characteristics of audible sound sources [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2018, 16(4): 49-54.
- [6] 谢军,刘云鹏,刘磊,等. 局放信号自适应加权分帧快速稀疏表示去噪方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21): 6428-6439.
XIE J, LIU Y P, LIU L, et al. Bureau release signal adaptive weighted frame-between fast sparsely represents the denoise method [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2019, 39 (21): 6428-6439.
- [7] 高佳程,朱永利,贾亚飞,等. 基于改进 SVDD 算法与马氏距离的未知局部放电类型的识别[J]. 电工技术学报,2018,33(15): 3510-3517.
GAO J CH, ZHU Y L, JIA Y F, et al. Based on the identification of unknown local discharge types that improve the distance between the SVDD algorithm and mars [J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33 (15): 3510-3517.
- [8] 蔡宇,郝程鹏,侯朝焱. 采用子带谱减法的语音增强[J]. 计算机应用,2014,34(2): 567-571.
CAI Y, HAO CH P, HOU CH H. Speech enhancement using subband spectral subtraction [J]. Computer Applications, 2014, 34(2): 567-571.
- [9] 蓝天,彭川,李森,等. 单声道语音降噪与去混响研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(5): 928-953.
LAN L, PENG CH, LI S, et al. A review of monophonic speech noise reduction and de-reverberation [J]. Computer Research and Development, 2020, 57 (5): 928-953.
- [10] 邱政权,范小春,王俊年. 基于维纳滤波和混合模型的说话人识别[J]. 仪器仪表学报,2009,30(7): 1436-1440.
QIU ZH Q, FAN X CH, WANG J Y. Speaker recognition based on wina filtering and hybrid models[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2009, 30 (7): 1436-1440.
- [11] 黄金,周先春,吴婷,等. 混合维纳滤波与改进型 TV 的图像去噪模型[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(10): 1659-1666.
HUANG J, ZHOU X CH, WU W, et al. Mix Weiner filtering with improved TV image de noise model[J]. Journal of Electronic Measurements and Instruments, 2017, 31 (10): 1659-1666.
- [12] 苏祖强,萧红,张毅,等. 基于小波包分解与主流形识别的非线性降噪[J]. 仪器仪表学报,2016,37(9): 1954-1961.
SU Z Q, XIAO H, ZHANG Y, et al. Nonlinear noise reduction based on wavelet packet decomposition and mainstream shape recognition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1954-1961.
- [13] 周正仙,邹翔,袁扬胜,等. 干涉型光纤语音传感器及语音降噪方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017, 38(11): 2715-2724.
ZHOU ZH X, ZOU X, YUAN Y SH, et al. Interference fiber optic voice sensor and voice noise reduction method research[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (11): 2715-2724.
- [14] 米建伟,方晓莉,仇原鹰.非平稳背景噪声下声音信号增强技术[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1): 17-22.
MI J W, FANG X L, QIU Y Y. Sound signal enhancement technology under non-stationary background noise [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 17-22.
- [15] 袁文浩,梁春燕,夏斌,等. 一种融合相位估计的深度卷积神经网络语音增强方法[J]. 电子学报,2018, 46(10): 2359-2366.
YUAN W H, LIANG CH Y, XIA B, et al. A deep convolutional neural network speech enhancement method fused with phase estimation [J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 46(10): 2359-2366.
- [16] 方义,冯海泓,陈友元,等. 一种抑制方向性噪声的双耳语音增强算法[J]. 声学学报,2016, 41(6): 897-904.
FANG Y, FENG H X, CHEN Y Y, et al. A two-eared speech enhancement algorithm that suppresses directional noise [J]. Journal of Acoustics, 2016, 41 (6): 897-904.
- [17] YOUSEFIAN N, AKBARI A, RAHMANI M. Using power level difference for near field dual-microphone speech enhancement [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(11-12): 1412-1421.
- [18] CHOI J, CHANG J. Dual-microphone voice activity detection technique based on two-step power level difference ratio[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2014, 22 (6): 1069-1081.
- [19] 马晓红,陆晓燕,殷福亮.改进的互功率谱相位时延估计方法[J].电子与信息学报,2004(1):53-59.
MA X H, LU X Y, YIN F L. Improved cross-power spectrum phase delay estimation method [J]. Journal of Electronics and Information, 2004(1):53-59.
- [20] MARTIN R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2001,9(5):504-512.
- [21] ZH C, ZH Y, HU X, et al. Two-channel post-filtering based on adaptive smoothing and noise properties[C]. Proc, ICASSP, 2011: 1745-1748
- [22] 吴晓文,周年光,裴春明,等.特高压交流变电站可听噪声分离方法[J]. 高电压技术,2016, 42(8): 2625-2632.
WU X W, ZHOU N G, PEI CH M, et al. The hearing noise separation method of the UHV AC substation[J]. High Voltage Technology, 2016, 42 (8): 2625-2632.
- [23] 彭健新,唐云飞.谱减法与维纳滤波法相结合的睡眠鼾声降噪处理[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(3): 103-107.
PENG J X, TANG Y F. Sleep snoring noise reduction treatment combined with spectral subtractation and Wiener filtering[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Sciences Edition), 2018, 46 (3): 103-107.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则声环境: HJ 2.4—2009[S]. 北京:中国环境科学出版社,2009.
Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Environmental impact assessment technical guidance sound environment: HJ 2.4-2009 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [25] 李媛媛,王博文,黄文美,等.考虑应力波衰减特性的磁致伸缩位移传感器的输出特性与实验[J]. 仪器仪表学报,2018,39(7):34-41.
LI Y Y, WANG B W, HUANG W M, et al. The output

characteristics of magnetic telescopic displacement sensors considering the attenuation characteristics of stress waves and experiment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (7): 34-41.

作者简介



刘元, 2018年于安徽信息工程学院获得学士学位, 现为长沙理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电力设备故障诊断。

E-mail: 302620970@qq.com

Liu Yuan received his B. Sc. degree from Anhui Institute of Information Technology in 2018. He is currently a master student at Changsha University of Science and Technology. His main research interest is fault diagnosis of power equipment.



匡文凯, 2010年于湖南大学获得博士学位, 现任教于长沙理工大学电气与信息工程学院, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制。

E-mail: weikaikuang@csust.edu.cn

Kuang Wenkai received his Ph. D. degree from Hunan University in 2010. He is currently working at Changsha University of Science and Technology. His main research interests include power system analysis and control.



苏盛(通信作者), 1998年于武汉水利电力大学获得学士学位, 2002年于武汉大学获得硕士学位, 2009年于华中科技大学获博士学位, 现为长沙理工大学电气与信息工程学院教授, 主要研究方向为电力系统网络安全防护与大数据技术应用。

E-mail: susheng@163.com

Su Sheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University of Water Conservancy and Electric Power in 1998, received his M. Sc. degree from Wuhan University in 2002, and received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2009. He is currently a professor at Changsha University of Science and Technology. His main research interests include power system network security protection and big data technology application.