

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.009

## 基于白化滤波和RBF-KF的变压器局部放电超声波信号提取

李利华, 杨新志, 鲍鹏, 慎志勇, 刘扬

(中国长江电力股份有限公司, 北京 100033)

**摘要:** 局部放电(partial discharge, PD)是电力变压器出现绝缘劣化的初始迹象,局部放电信号的及时准确提取对于变压器状态监测具有重要意义。然而,受周期性窄带干扰和白噪声等的影响,传统快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)阈值,小波降噪和奇异值分解(singular value decomposition, SVD)等方法噪声抑制性能较差,难以有效提取PD信息。提出一种基于白化滤波和径向基神经网络联合卡尔曼滤波(radial basis function neural network-Kalman filtering, RBF-KF)的变压器PD超声波信号提取方法。首先,根据周期性窄带干扰特征构建白化滤波矩阵,并利用该矩阵对染噪PD信号进行“白化”预处理,将周期性窄带干扰转化为白噪声。然后,建立卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)模型进行白噪声抑制,同时针对KF滤波结果易发散问题,利用径向基神经网络(radial basis function neural network, RBF)对滤波误差进行动态修正,提升噪声抑制性能。基于仿真和实测数据的试验结果表明,所提方法噪声抑制性能优良,相对于传统FFT阈值、小波降噪和SVD方法提取的局部放电超声波信号波形畸变小,能量损失少,具有更高的工程应用前景。

**关键词:** 电力变压器; 局部放电; 超声波信号; 白化滤波; 窄带干扰; 噪声抑制

### Ultrasonic Signal Extraction of Transformer Partial Discharge Based on Whitening Filter and RBF-KF

LI Lihua, YANG Xinzhi, BAO Peng, SHEN Zhiyong, LIU Yang

(China Yangtze Power Co., Ltd., Beijing 100033, China)

**Abstract:** Partial discharge (PD) is the initial sign of insulation deterioration in power transformer. The timely and accurate extraction of partial discharge signals is of great significance for transformer status monitoring. However, due to the influence of periodic narrowband interference and white noise, the noise suppression performance of such methods as traditional fast Fourier transformation (FFT) thresholding, wavelet denoising, and singular value decomposition (SVD) methods is weak and are difficult to effectively extract PD information. In this paper, a transformer PD ultrasonic signal extraction method based on whitening filtering and radial basis function neural network-Kalman filtering (RBF-KF) is proposed. First, a whitening filtering matrix is constructed based on the characteristics of periodic narrowband interference signals, and this matrix is then used to preprocess the noise-contaminated PD signal through whitening, thereby converting the periodic narrowband interference into white noise. Then, the Kalman filter (KF) model is set up for white noise suppression. Meanwhile, to address the issue that KF filtering results are prone to divergence, a radial basis function neural network (RBF) is used to dynamically correct the filtering errors, thereby improving the noise suppression performance. The experimental results based on simulation and measured data indicate that the proposed method has excellent noise suppression performance. Compared to traditional FFT threshold, wavelet denoising, and SVD methods, the waveforms of the partial discharge ultrasonic signals extracted by the proposed method have less distortion, less energy loss and greater engineering application prospects.

**Key words:** power transformer; partial discharge; ultrasonic signal; whitening filtering; narrowband interference; noise suppression

收稿日期:2025-11-21; 修回日期:2026-01-27

基金项目:三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532202003)。

Project Supported by Ningnan Baihetan Hydropower Plant of Three Gorges Jinsha River Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd. Research Project(Z532202003).

## 0 引言

近年来,中国电网规模不断扩大,发电机组装机容量高速增长,电气设备的信息化、智能化水平不断提升,给人民群众的生产生活带来极大便利<sup>[1]</sup>。变压器作为电力系统中实现电压变换,电能传输的核心设备,其运行状态直接关系着区域电网的安全性和稳定性,因此进行变压器运行状态监测和故障预警具有重要意义<sup>[2]</sup>。局部放电(partial discharge, PD)是变压器绝缘劣化的初始迹象,绝缘劣化会引起PD,而PD又会进一步加快绝缘劣化,如何实现变压器PD检测是当前研究的热点<sup>[3-4]</sup>。目前常用的方法有高频电流法,特高频法和超声波法<sup>[5]</sup>,其中,超声波法由于具备可带电、非侵入、抗电磁干扰能力强和价格低廉等优点,成为当前现场检测中应用最广的一种方法<sup>[6-8]</sup>,因此文中针对PD超声波信号检测开展研究。

变压器PD信号检测属于瞬态微弱信号测量,检测过程中不可避免的会受到白噪声和周期性窄带干扰的影响。白噪声持续时间长,频带分布范围广,与PD信号在时间和频率上重叠,周期性窄带干扰出现概率高,信号幅度大,两种噪声干扰的存在给PD信号检测带来严重挑战<sup>[9-11]</sup>。文[12-13]根据周期性窄带干扰的频谱特点,提出快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)阈值法,首先利用FFT将染噪PD信号转换至频域,通过设置合适的阈值并将高于阈值的信号置零,从而实现窄带干扰抑制,具有原理简单,实时性高的优点,但是针对不同的噪声干扰,如何自适应的设置最优阈值难题尚未解决<sup>[14]</sup>;文[15-16]将小波变换应用到PD信号检测领域,利用小波变换的多尺度时频分辨特性进行噪声抑制,具有理论成熟,容易实现的优点,但是噪声抑制性能受小波基函数和分解尺度影响较大<sup>[17]</sup>;文[18-19]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、局部均值分解(local mean decomposition, LMD)等自适应分解算法对染噪PD信号进行时频分析和噪声抑制,具有精度高和鲁棒性强的优点,但同时存在模态混叠和算法稳定性差的问题<sup>[20]</sup>;文[21-22]将奇异值分解(singular value decomposition, SVD)应用到PD噪声抑制领域,作为一种数据驱动方法,能够适应复杂环境且噪声抑制能力强,但是在噪声抑制的同时会造成PD信号波形畸变和能量损失<sup>[23-24]</sup>。

针对上述问题,文中提出一种基于白化滤波和

RBF神经网络联合卡尔曼滤波(radial basis function neural network-Kalman filtering, RBF-KF)的变压器PD超声波信号提取方法。首先针对周期性窄带干扰抑制问题,在最小信干比(signal interference ratio, SIR)准则下建立白化滤波矩阵对染噪PD信号进行“白化”滤波预处理,将周期性窄带干扰转化为白噪声,然后建立RBF-KF模型进行白噪声抑制,RBF-KF通过对卡尔曼滤波(Kalman filtering, KF)误差进行动态修正,提升噪声抑制性能。基于仿真和实测数据的试验结果表明,所提方法相对于传统FFT阈值、小波降噪和SVD方法具有更强的噪声抑制性能和更广泛的工程应用前景。

## 1 信号模型建立

工程实践中,PD信号通常表现为指数衰减振荡类型,因此采用式(1)、(2)所示单指数衰减振荡和双指数衰减振荡模型进行建模分析,其具体形式为<sup>[24]</sup>:

$$s_1 = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

$$s_2 = A_2 \left[ \exp\left(-\frac{1.3t}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{2.2t}{\tau}\right) \right] \sin(2\pi f_c t) \quad (2)$$

式(1)、(2)中:  $A_1$ 、 $A_2$  为信号幅值;  $\tau$ 、 $f_c$  分别为衰减系数、振荡频率。

实际采集得到的染噪PD信号可以看作是由PD信号,周期性窄带干扰和白噪声叠加而成,其中白噪声通常采用幅度服从高斯分布,功率谱密度服从均匀分布的随机序列进行表示。

周期性窄带干扰主要来源于环境中的载波和手机通信信号干扰,可以看作是由不同频率正弦信号叠加而成,其具体表达式为<sup>[24]</sup>

$$s_c = \sum_{i=1}^N a_i \sin(2\pi f_i t) \quad (3)$$

式(3)中:  $a_i$  为第  $i$  个正弦信号的幅度 ( $i=1, \dots, N$ );  $f_i$  为第  $i$  个正弦信号的频率;  $N$  为正弦信号个数。

## 2 周期性窄带干扰抑制方法

染噪PD信号可以表示为一维时间序列

$$\mathbf{x} = [x(1), x(2), \dots, x(T)]^T \quad (4)$$

式(4)中:  $x(t)$  为第  $t=1, \dots, T$  个采样时刻得到的采样值;  $T$  为总采样时刻;上标 T 为矩阵转置符。周期性窄带干扰存在情况下,  $\mathbf{x}$  可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{s} + \mathbf{c} \quad (5)$$

式(5)中:  $\mathbf{s}$  为PD信号;  $\mathbf{c}$  为周期性窄带干扰。

周期性窄带干扰抑制问题本质上可以看作是对式(5)所示信号进行滤波处理,滤波的目的是在尽可能多的抑制干扰信号  $c$  的同时尽量减少对原始PD信号  $s$  的影响。即,使滤波后输出信号的信干比  $SIR$  (signal interference ratio)最大。定义滤波后输出信号的  $SIR$  为

$$SIR_{\text{out}} = \frac{\langle |w^T s|^2 \rangle}{\langle |w^T c|^2 \rangle} = \frac{|w^T s|^2}{w^T R_c w} \quad (6)$$

式(6)中:  $w$  为滤波器权值;  $R_c = \langle cc^T \rangle$  为干扰信号的协方差矩阵,即所提方法的“白化滤波矩阵”;  $\langle \cdot \rangle$  为对矩阵或向量求期望运算符。

对式(6)进行分析可知,要使滤波后输出  $SIR$  最大,只需要最小化  $w^T R_c w$ ,同时为了避免干扰抑制过程对  $s$  产生影响,在  $SIR$  准则下需要增加惩罚项  $w^T s = 1$ ,上述最大  $SIR$  准则下的干扰抑制问题转化为式(7)优化问题

$$\begin{cases} \min_w w^T R_c w \\ \text{s.t. } w^T s = 1 \end{cases} \quad (7)$$

利用梯度下降法对式(7)进行求解,可以得到最优滤波器为

$$w_{\text{opt}} = R_c^{-1} s \quad (8)$$

实际应用过程中,上述方法的关键在于如何估计得到干扰信号的白化滤波矩阵  $R_c$ 。根据干扰信号特点,文中提出一种滑窗自相关方法估计  $R_c$ 。首先对  $x$  进行滑窗截取,窗长设置为  $T/4$ ,间隔为 1 个采样点,得到  $x_1, x_2, \dots, x_{T/4}$ ,其中  $x_i = [x_i, x_{i+1}, \dots, x_{T/4+i-1}]$ 。然后,按照式(9)计算  $R_c$  的估计值  $\tilde{R}_c$

$$\tilde{R}_c = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^{T/4} \alpha_m x_m x_m^T \quad (9)$$

式(9)中,  $0 \leq \alpha_m \leq 1$  权值,定义为

$$\alpha_m = \frac{\text{cov}(x_m, x^*)}{\sqrt{\text{var}(x_m) \text{var}(x^*)}} \quad (10)$$

式(10)中:  $x^*$  为包含局部放电信号  $s$  的滑窗信号;  $\text{cov}(\cdot)$  为计算互相关系数运算符;  $\text{var}(\cdot)$  为计算标准差运算符。从式(10)可以看出,由于PD信号  $s$  与干扰信号互不相关,对应的归一化互相关系数  $\alpha_m$  取值很小,在根据式(9)计算协方差矩阵估计值时对应的分量可以忽略,从而避免了干扰抑制时对  $s$  的影响。

为了进一步说明白化滤波的效果,根据式(5)可

以计算得到  $x$  的协方差矩阵为

$$R_x = R_s + R_c \quad (11)$$

对  $R_c$  进行Cholesky分解可得

$$R_c = U^T U \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)并按照矩阵运算规则进行化简可得

$$U^{-T} R_x U^{-1} = U^{-T} R_s U^{-1} + U^{-T} U^T U U^{-1} = U^{-T} R_s U^{-1} + I \quad (13)$$

我们知道,白噪声的协方差矩阵为单位阵。从式(13)可以看出,利用所提方法对染噪PD信号进行滤波处理后,周期性窄带干扰的协方差矩阵被转变为单位矩阵,即周期性窄带干扰信号被转化为白噪声。这也是  $R_c$  被称为“白化滤波矩阵”的原由。

经过上述方法对染噪PD信号进行处理,周期性窄带干扰和白噪声同时存在的PD信号提取问题转化为白噪声存在下的PD信号提取问题。

### 3 白噪声抑制方法

#### 3.1 KF原理

卡尔曼滤波是一种白噪声背景下对线性系统时间序列进行噪声抑制的最优滤波器,作为一种递归优化算法,KF只需要系统当前时刻的观测值和前一时刻的估计值即可实现状态滤波,具有结构简单,实时性高的优势<sup>[25]</sup>。利用KF对白化滤波后的PD信号进行噪声抑制,首先需要建立系统状态方程和观测方程:

$$\tilde{s}_t = A \tilde{s}_{t-1} + B \omega_{t-1} \quad (14)$$

$$x_t = H \tilde{s}_t + \varepsilon_t \quad (15)$$

式(14)、(15)中:  $A$  和  $B$  分别为系统状态矩阵和控制矩阵;  $\tilde{s}_t$  和  $\tilde{s}_{t-1}$  分别为  $t$  和  $t-1$  时刻估计得到的PD信号;  $\omega_{t-1}$  为系统状态噪声;  $H$  为观测矩阵;  $x_t$  为  $t$  时刻的观测值;  $\varepsilon_t$  为观测噪声。KF假设系统状态噪声和观测噪声分别服从零均值,协方差矩阵为  $Q_t$  和  $O_t$  的高斯分布。

在状态方程和观测方程的基础上,KF通过递归优化算法实现噪声抑制,一次完整的递归迭代流程包括以下4个步骤。

步骤1,计算当前时刻PD信号预测误差协方差矩阵  $P_t$

$$P_t = A \tilde{P}_{t-1} A^T + B Q_t B^T \quad (16)$$

式(16)中,  $\tilde{P}_{t-1}$  为  $t-1$  时刻估计得到的误差协方差矩阵。

步骤2,根据  $P_t$  和系统观测方程,计算得到卡尔曼滤波增益  $K_t$

$$K_i = P_i H_i^T (H_i P_i H_i^T + O_i)^{-1} \quad (17)$$

步骤3, 根据式(14)-(17), 采用加权平均的方式对当前时刻PD信号估计值进行更新

$$\tilde{s}_i = \tilde{s}_{i-1} + K_i (x_i - H_i \tilde{s}_{i-1}) \quad (18)$$

步骤4, 更新当前时刻PD信号估计误差协方差矩阵  $\tilde{P}_i$

$$\tilde{P}_i = (1 - K_i H_i) P_i \quad (19)$$

通过上述步骤1-4的多次递归迭代, 实现对式(14)所示PD状态估计方程的求解, 从而获得白噪声抑制后的PD信号。

### 3.2 RBF-KF

KF滤波过程中假设系统观测噪声协方差矩阵  $O_i$  和状态噪声协方差矩阵  $Q_i$  精确已知, 这在实际应用中往往难以满足, 同时PD信号是一种典型的非线性、非平稳随机过程, KF滤波的线性系统假设不成立, 上述两点会造成KF滤波结果发散, 噪声抑制性能下降。

RBF神经网络是机器学习领域中一种经典的自适应、自学习神经网络模型, 具有结构简单, 学习能力强的优点, 并且能够高精度逼近于任意复杂非线性系统。因此, 文中将RBF神经网络与KF相结合, 利用RBF神经网络对KF滤波误差进行修正, 从而提升KF对非线性系统的适应能力和噪声抑制性能。

对KF递归过程进行分析可知, KF性能与预测误差  $\Delta = \tilde{s}_i - \tilde{s}_{i-1}$ , 滤波增益  $K_i$  和信息  $\delta = x_i - x_{i-1}$  密切相关, 因此文中将其作为RBF神经网络的输入神经元并建构三层网络结构, 隐含层采用高斯函数作为径向基函数将输入层神经元映射至输出层, RBF神经网络的输出为修正后的滤波误差, 利用修正后的滤波误差对KF滤波结果进行滤波补偿获得局部放电信号并将其反馈至KF递归过程。所提RBF-KF算法原理框图见图1。在模型求解过程中, 利用RBF神经网络的自学习能力对KF滤波结果和滤波误差进行自适应动态调整, 从而实现噪声抑制。

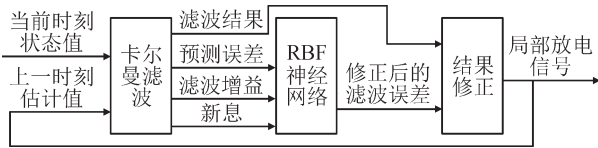


图1 RBF-KF原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of RBF-KF

## 4 仿真数据分析

为了验证所提方法在周期性窄带干扰和白噪声存在条件下的PD信号提取性能, 按照式(1)、(2)所

述模型仿真得到4个局部放电信号见图2(a), 仿真过程中的参数设置见表1, 其中脉冲1、3采用单指数衰减振荡模型, 脉冲2、4采用双指数衰减振荡模型。仿真过程中采样点频率设置为5 GHz, 仿真点数为2 000个采样点。

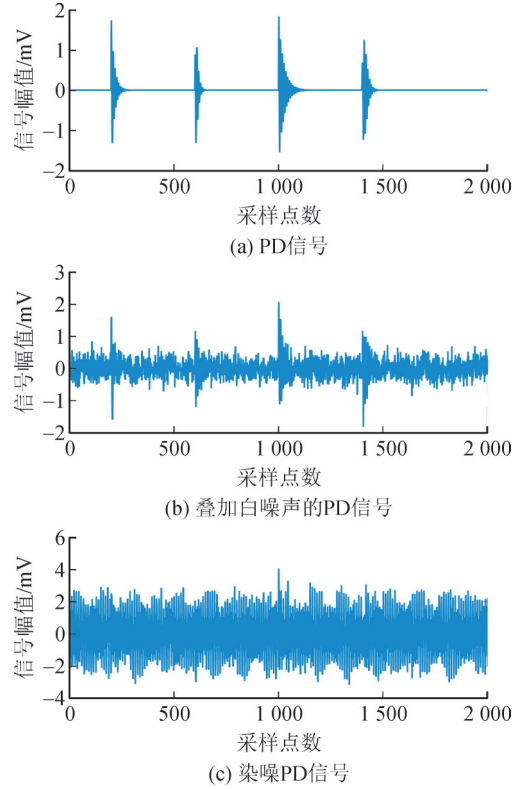


图2 PD信号仿真

Fig. 2 Simulation of PD signal

表1 局部放电信号参数

Table 1 Parameters of PD signal

脉冲序列	信号幅值/mV	振荡频率/MHz	衰减系数
1	2	600	3
2	7	600	2
3	2	600	5
4	7	600	3

对图2(a)叠加信噪比为-3 dB白噪声后得到的信号见图2(b)。从图2(b)可以看出, 叠加白噪声后, 虽然仍能检测到PD信号, 但是其中的细节信息已被污染。

按照式(3)模型继续对图2(b)叠加周期性窄带干扰后的染噪PD信号见图2(c), 仿真中设置  $N=3$ ,  $a_1=a_2=a_3=1$  mV,  $f_1=470$  MHz,  $f_2=900$  MHz,  $f_3=1800$  MHz。可以看出, 叠加周期性窄带干扰后, PD信号已完全被淹没。

利用所提周期性窄带干扰抑制方法对图2(c)所示染噪PD信号进行白化滤波得到的结果见图3(a), 在此基础上进一步利用所提RBF-KF对图3(a)进行白噪声抑制得到的结果见图3(b)。为了对比, 利用

传统KF对图3(a)所示数据进行噪声抑制得到的结果见图3(c)。

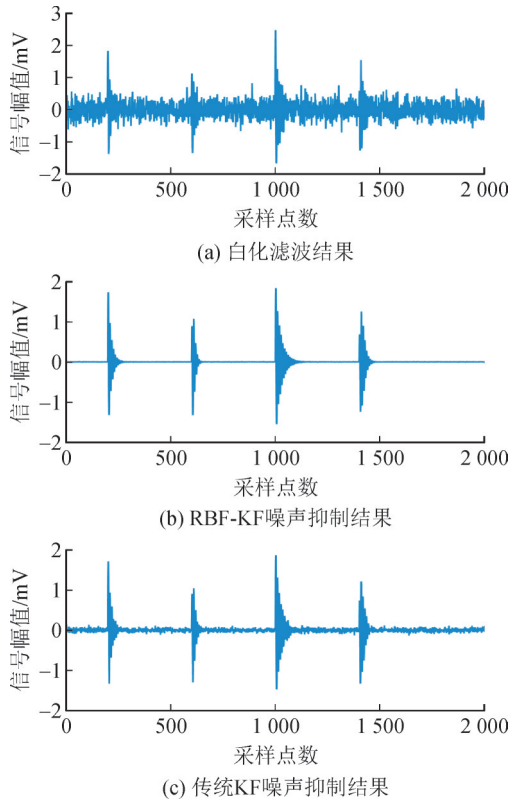


图3 PD信号提取结果

Fig. 3 Extraction results of PD signal

从图3可以看出,原始染噪PD信号经过白化滤波后,周期性窄带干扰被很好的抑制(转化为白噪声),同时由于白噪声之间相互独立,因此周期性窄带干扰转化而成的白噪声与原始信号中包含的白噪声并不会线性叠加,图3(a)、2(b)的信噪比相差不大,进一步说明了所提白化滤波的有效性。对比图3(b)、(c)可以看出,经过RBF神经网络优化后,RBF-KF的白噪声抑制性能(图3(b))明显优于未经优化的传统KF方法(图3(c))。同时对比图3(b)、2(a)可以看出,所提方法在实现对周期性窄带干扰和白噪声有效抑制的同时,几乎保留了原始PD信号的所有细节信息。

为了对比,在相同条件下文中分别选择FFT阈值法<sup>[12]</sup>,小波降噪法<sup>[15]</sup>和SVD方法<sup>[19]</sup>对图2(c)所示染噪信号进行PD信号提取,3种方法得到的结果见图4。为了定量评估不同方法的噪声抑制性能,采用提取后信号的信干噪比  $SINR$ (signal interferences noise ratio)和波形相似系数  $NCC$ (normalized correlation coefficient)作为评估指标,其中, $SINR$ 越大表明周期性窄带干扰和白噪声抑制性能越好, $NCC$ 越接近于1表明抑制后波形畸变越小。4种方法的  $SINR$ 和

$NCC$ 计算结果见表2。

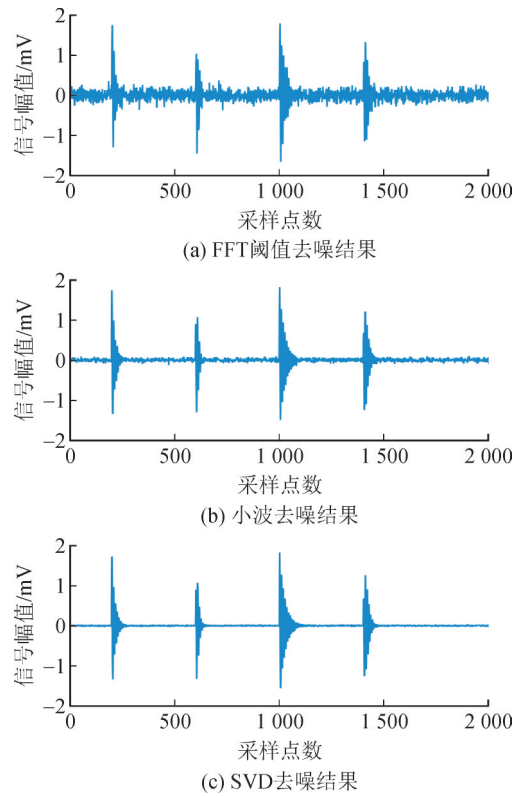


图4 PD信号提取结果

Fig. 4 Extraction results of PD signal

表2 去噪结果评价指标

Table 2 Evaluation parameters of denoising results

所用方法	$SINR/dB$	$NCC$
FFT阈值	26.2	0.913
小波降噪	27.5	0.954
SVD	28.3	0.970
所提方法	29.7	0.988

从图4、表2所示结果可以看出,FFT阈值法噪声抑制后,PD信号脉冲的起始和终止点信息仍然被淹没在噪声中,无法有效提取,其  $SINR$ 和  $NCC$ 两项指标是4种方法中性能最差的;小波降噪方法能够滤除染噪信号中绝大部分干扰和噪声分量,但从图4(b)可以看出,小波降噪方法的噪声抑制不彻底;SVD方法通过将染噪信号投影至主分量空间实现干扰和噪声抑制,去噪结果的  $SINR$ 和  $NCC$ 两项指标明显优于FFT阈值和小波去噪,但是SVD方法忽略了周期性窄带干扰和白噪声在主分量空间中的分布特性差异,导致信号休止区内仍有少量高斯白噪声残留,其噪声抑制性能略差于所提方法。根据表2可以计算得到所提方法噪声抑制结果的  $SINR$ 相对于3种对比方法分别提升11.78%、7.4%、4.7%,  $NCC$ 相对于3种对比方法分别提升7.59%、3.44%、1.82%。

为了评估不同方法分别对单指数衰减振荡模型(脉冲1、3)和双指数衰减振荡模型(脉冲2、4)两种不同模型的噪声抑制性能,在图4、表2所示结果的基础上进一步分析了4种方法对两种不同PD模型的噪声抑制评价指标见表3。从表3可以看出,由于单指数模型相对于双指数模型的频谱结构更加简单,FFT阈值和小波降噪2种基于时频分布的方法对单指数模型的噪声抑制性能明显优于双指数模型。而SVD方法和所提方法噪声抑制性能与频谱分布无关,因此对于2种模型的噪声抑制性能差异不大。同时,所提方法对2种模型的噪声抑制性能均优于3种对比方法,进一步验证了所提方法的有效性。

表3 不同模型去噪结果评价指标

Table 3 Evaluation parameters of denoising results for different signal model

所用方法	信号模型	SINR/dB	NCC
FFT 阈值	单指数	27.0	0.925
	双指数	25.4	0.901
小波降噪	单指数	28.2	0.961
	双指数	26.8	0.947
SVD	单指数	28.5	0.973
	双指数	28.1	0.967
所提方法	单指数	29.8	0.990
	双指数	29.6	0.986

进一步的,通过对图1(a)所示局部放电信号叠加不同幅度的白噪声和周期性窄带干扰,分别构建SINR为-12、-10、-8、-6、-4、-2、0 dB的染噪信号,进而利用所提方法和3种对比方法分别进行噪声抑制得到结果的SINR和NCC曲线见图5,从图5可以看出,所提方法对比不同SINR染噪信号均能获得最优的噪声抑制性能,进一步验证了所提方法的有效性。

### 5 实测数据分析验证

为了进一步验证所提方法对现场PD信号噪声抑制性能,对实际现场运行中的某110 kV变压器设备进行超声波PD检测,实测PD脉冲信号见图6(a),可以看出原始信号中已经叠加了白噪声,但是可以近似认为不包含窄带干扰信号。采用向其中人为增加幅值为1 mV,频率分别为460、680 MHz的周期性窄带干扰的方式建立染噪信号见图6(b),此时PD信号受到严重干扰,无法对其进行提取和识别。

分别采用所提方法和3种对比方法对染噪PD信号进行噪声抑制处理得到的结果见图7。从图7可以看出,对于实测数据,所提方法获得的噪声抑

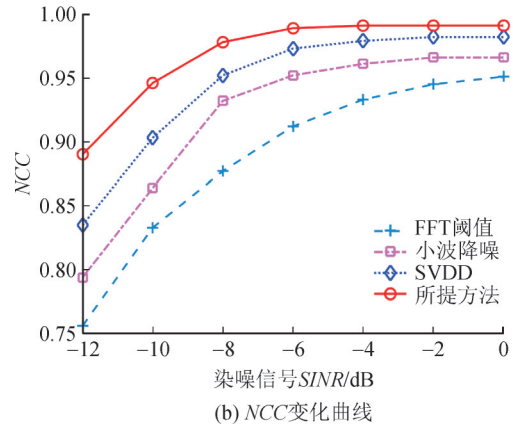
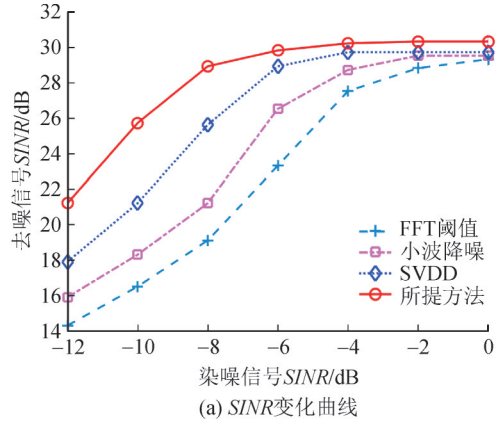


图5 不同SINR条件下的噪声抑制结果

Fig. 5 Noise suppression results under different SINR conditions

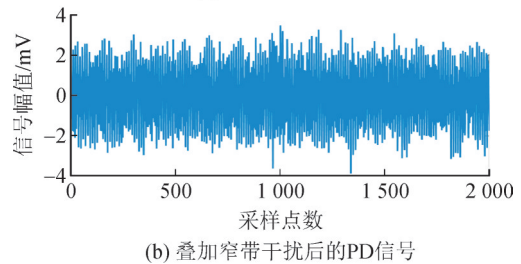
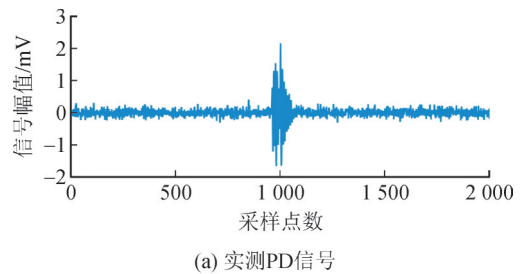


图6 现场测试含噪PD信号

Fig. 6 Field-detected nosiy PD signal

制结果明显优于3种对比方法,其中FFT阈值法和小波去噪方法的噪声抑制并不彻底,去噪结果中有少量特定频率的窄带周期性干扰存在,且PD脉冲的终止点较为模糊;SVD方法能够实现窄带周期性干扰的有效抑制,但是有较多白噪声残存。上述结果进一步验证了所提方法的有效性。

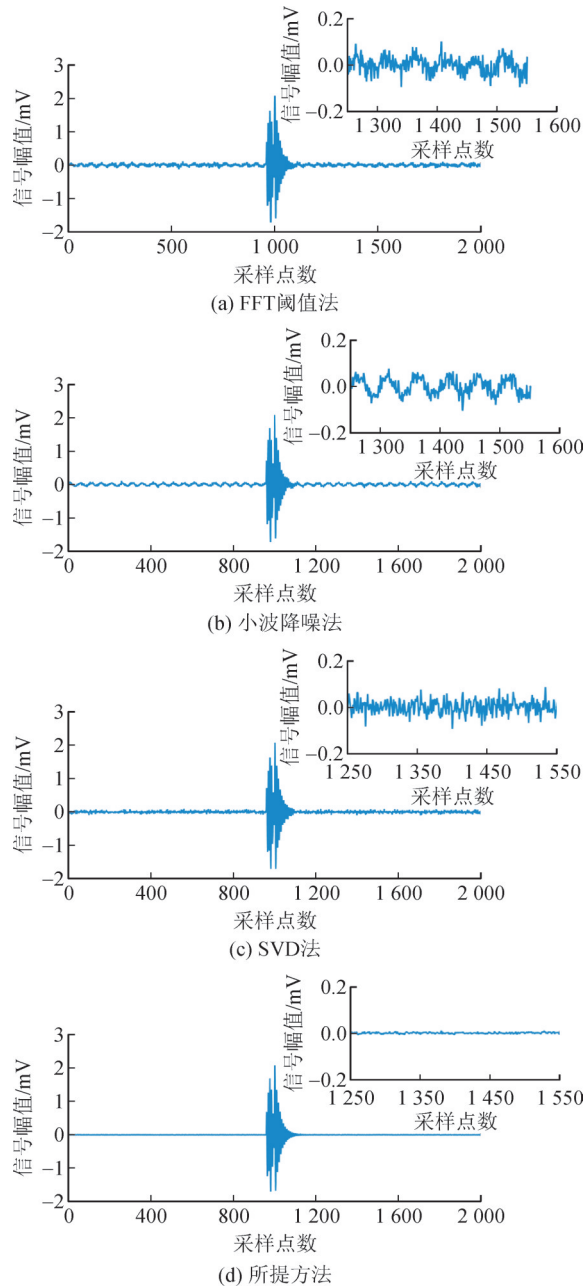


图7 现场PD信号去噪结果

Fig. 7 Denoising results of field-detected PD signals

## 6 结论

PD信号的有效提取是变压器运行状态监测和故障预警的关键一环,周期性窄带干扰和白噪声的存在给PD信号提取带来了严重挑战。提出一种基于白化滤波和RBF-KF联合的PD信号提取方法,主要贡献在于:

1)针对周期性窄带干扰抑制问题,建立最大信干比准则下的最优白化滤波矩阵,利用白化滤波矩阵对染噪PD信号进行白化滤波处理,将干扰转化为白噪声。

2)针对白噪声背景下PD信号提取问题,建立

RBF-KF模型,利用RBF对KF滤波误差进行修正,提升白噪声抑制性能。

3)仿真和试验结果表明,文中提出的先白化滤波后噪声抑制方法能够有效实现窄带干扰和白噪声的抑制,在 $SINR$ 和 $NCC$ 两项指标方面均优于FFT阈值,小波去噪和SVD方法。

## 参考文献:

- [1] 程道,李平,郭凌旭,等.基于量测数据贝叶斯概率矩阵分解的变压器运行状态监测方法[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(1):100-107.  
CHENG Xiao, LI Ping, GUO Lingxu, et al. Transformer operation status monitoring method based on Bayesian probabilistic matrix factorization of measured data[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1): 100-107.
- [2] 陈铁,陈卫东,李咸善,等.基于EMD和GCT的变压器油中溶解气体预测[J].高压电器,2022,58(4):70-79.  
CHEN Tie, CHEN Weidong, LI Xianshan, et al. Dissolved gas prediction in transformer oil based on EMD and GCT[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 70-79.
- [3] 刘振宇,罗日成,俞乾,等.基于高阶累积量的变压器多局放源定位算法研究[J].变压器,2024,61(5):58-64.  
LIU Zhenyu, LUO Richeng, YU Qian, et al. Research on multi-partial discharge source location algorithm of transformer based on high-order cumulan[J]. Transformer, 2024, 61(5): 58-64.
- [4] JAHANGIR H, AKBARI A, AZIRANI M A, et al. Turret-electrode antenna for UHF PD measurement in power transformers - part I: Introduction and design[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2113-2121.
- [5] LIN Jun, SU Lei, YAN Yingjie, et al. Prediction method for power transformer running stage based on LSTM - DBN network[J]. Energies, 2018, 11(7): 1880.
- [6] 谢庆,张焯宇,王春鑫,等.新一代人工智能技术在输变电设备状态评估中的应用现状及展望[J].高压电器,2022,58(11):1-16.  
XIE Qing, ZHANG Xuanyu, WANG Chunxin, et al. Application status and prospect of the new generation artificial intelligence technology in the state evaluation of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 1-16.
- [7] 贾骏,陶风波,杨强,等.复杂多径传播条件下变压器局部放电定位方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5338-5347.  
JIA Jun, TAO Fengbo, YANG Qiang, et al. Research on partial discharge location method of transformer under complex multipath propagation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5338-5347.
- [8] 付文光,薛利军,郑璐,等.油纸绝缘匝间放电超声信号的发展特性和放电阶段识别方法[J].电网与清洁能源,2025,41(12):85-93.  
FU Wenguang, XUE Lijun, ZHENG Lu, et al. Development

- characteristics of ultrasonic signals from inter-turn discharge in oil-paper insulation and identification methods for discharge stages[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(12):85-93.
- [9] 万晓琪, 宋辉, 罗林根, 等. 卷积神经网络在局部放电图像模式识别中的应用[J]. *电网技术*, 2019, 43(6):2219-2226.  
WAN Xiaoqi, SONG Hui, LUO Linggen, et al. Application of convolutional neural networks in pattern recognition of partial discharge image[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(6):2219-2226.
- [10] ROY S S, CHATTERJEE S. Partial discharge detection framework employing spectral analysis of horizontal visibility graph[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4):4819-4826.
- [11] 尚海昆, 张冉喆, 黄涛, 等. 基于CEEMDAN-TQWT方法的变压器局部放电信号降噪[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1):272-284.  
SHANG Haikun, ZHANG Ranzhe, HUANG Tao, et al. Partial discharge signal denoising based on CEEMDAN-TQWT method for power transformers[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1):272-284.
- [12] 樊高辉, 刘尚合, 刘卫东, 等. FFT谱最小熵解卷积滤波抑制放电信号中的周期性窄带干扰[J]. *高压技术*, 2017, 43(4):1378-1385.  
FAN Gaohui, LIU Shanghe, LIU Weidong, et al. Suppression of the periodic narrow-band noise in discharge signal by FFT spectrum minimum entropy deconvolution filtering[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(4):1378-1385.
- [13] 叶兆平, 曾静岚, 于利颖, 等. 地线外置式局部放电射频信号检测方法及其应用[J]. *高压电器*, 2022, 58(10):188-195.  
YE Zhaoping, ZENG Jinglan, YU Liying, et al. Detection method and application of external partial discharge radio frequency signals of grounding wire[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(10):188-195.
- [14] 倪鹤立, 姚维强, 傅晨钊, 等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J]. *高压电器*, 2022, 58(3):1-15.  
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, et al. Review on status of technical standards of partial discharge in electrical equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(3):1-15.
- [15] 程万胜, 岳伦, 付振贺, 等. 基于小波变换的变压器局放信号超声直达波提取[J]. *电测与仪表*, 2013, 50(9):46-50.  
CHENG Wansheng, YUE Lun, FU Zhenhe, et al. Ultrasonic direct wave extraction of transformer partial discharge signal based on wavelet transform[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013, 50(9):46-50.
- [16] 吴杰. 基于改进小波变换和随机森林的GIS局部放电故障识别系统[J]. *电子设计工程*, 2025, 33(13):138-143.  
WU Jie. GIS partial discharge fault identification system based on improved wavelet transform and random forest[J]. *Electronic Design Engineering*, 2025, 33(13):138-143.
- [17] 钱定冬, 宋柯, 谢虎波, 等. 基于GCC-MSSA的变压器局放超声内部定位方法[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(3):134-141.  
QIAN Dingdong, SONG Ke, XIE Hubo, et al. Transformer partial discharge ultrasound internal positioning method based on GCC-MSSA[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(3):134-141.
- [18] 施胜丹, 黄金军, 朱霄珣, 等. 基于声纹SDP-CNN的变压器局部放电模式识别[J]. *电力信息与通信技术*, 2022, 20(10):105-112.  
SHI Shengdan, HUANG Jinjun, ZHU Xiaoxun, et al. Partial discharge pattern recognition on transformer based on voiceprint SDP - CNN[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2022, 20(10):105-112.
- [19] 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.  
SUN Kang, LI Wanjian, ZHANG Jing. Denoising of complex noisy partial discharge pulses with narrowband interference and white noise[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2021, 50(1):14-23.
- [20] 张重远, 岳浩天, 王博闻, 等. 基于相似矩阵盲源分离与卷积神经网络的局部放电超声信号深度学习模式识别方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(6):1900-1906.  
ZHANG Chongyuan, YUE Haotian, WANG Bowen, et al. Pattern recognition of partial discharge ultrasonic signal based on similar matrix BSS and deep learning CNN[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(6):1900-1906.
- [21] LUO Yuanlin, LI Zhaohui, WANG Hong. A review of online partial discharge measurement of large generators[J]. *Energies*, 2017, 10(11):1-32.
- [22] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 史坦无偏估计自适应奇异值分解在局放信号白噪声抑制中的应用[J]. *电网技术*, 2018, 42(12):4153-4159.  
XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Application of adaptive singular value decomposition based on stein unbiased risk estimation in partial discharge signal white noise suppression[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(12):4153-4159.
- [23] 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.  
XU Yonggan, JIANG Jie, TANG Kunming, et al. A method of suppressing narrow-band interference in partial discharge based on hankel matrix and singular value decomposition[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7):2762-2769.
- [24] 杨晓丽, 黄宏光, 舒勤, 等. 基于SVD和低秩RBF神经网络的局部放电信号提取方法[J]. *高压技术*, 2021, 47(10):3608-3616.  
YANG Xiaoli, HUANG Hongguang, SHU Qin, et al. Partial discharge signal extraction method based on SVD and low rank RBF neural network[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10):3608-3616.
- [25] 尚彦鬣, 宋红为, 杨照光, 等. 基于二阶RC模型的锂电池充放电特性分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(7):87-94.  
SHANG Yanbin, SONG Hongwei, YANG Zhaoguang, et al. Charge and discharge characteristics analysis of lithium battery based on second-order RC model[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7):87-94.

李利华(1971—),男,本科,高级工程师,主要研究方向发电厂电气一次设备运行维护等(E-mail:li\_lihua@ctg.com.cn)。

杨新志(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为发电厂电气一次设备运行维护(通信作者)(E-mail:289393756@qq.com)。