

采用独立成分分析的局部放电脉冲双通道提取技术研究

司文荣, 李军浩, 梁永春, 袁鹏, 李延沐, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 简单介绍了独立成分分析(ICA)基本模型的假设、含混性问题及模型估计的等变化性. 根据局部放电脉冲序列幅值的超高斯分布特性以及实际工况下的其他条件, 得出了将 ICA 基本模型用于强背景白噪声下微弱局部放电脉冲信号提取的可行性. 针对 IEC60270 规定的标准脉冲电流法, 基于双通道超宽带检测, 对试品放电状态下的脉冲提取进行了仿真, 对直流下油纸绝缘针板模型进行局部放电实验, 并给出直流下局部放电脉冲提取的 ICA 含混性消除方法. 实验结果表明, 该方法能够提取出被白噪声完全淹没的局部放电脉冲信号, 可以恢复出局部放电波形之间相对幅值关系和单个脉冲波形以及脉冲极值所对应的时间点等重要局部放电信息.

关键词: 局部放电; 脉冲提取; 双通道; 独立成分分析; 直流

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1264-05

Pulse Extraction for Partial Discharge with Double Channels with Independent Component Analysis

SI Wenrong, LI Junhao, LIANG Yongchun, YUAN Peng, LI Yanmu, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The assumption, ambiguities, and solution of basic independent component analysis (ICA) model are briefly introduced. According to the features of white noise (gaussian) and partial discharge (PD) signals (supergaussian) on the probability distribution of magnitude, and the IEC 60270 standard PD measurement method, it indicates that the basic ICA model is feasible to suppress white noise of PD pulse signals. The simulation and on field tests for PD pulses extraction using ultra-wideband (UWB) detection technique with double channels are carried out, respectively. And the ambiguities elimination method for ICA model to extract PD pulses under HVDC is also presented. The results show that PD pulses are able to be exactly extracted from the strong white noise with keeping PD pulses amplitude of the relative relationship, the maximum amplitude corresponding to the time point, and the other important information of PD pulses.

Keywords: partial discharge; pulse extraction; double channels; independent component analysis; direct current

局部放电是造成电力系统中高压电气设备最终绝缘击穿的主要原因之一. 通过对局部放电信号检

测, 判断放电强度、辨识放电缺陷类型和定位放电源位置, 并反映设备绝缘状况及其发展趋势, 可以尽

量避免设备因绝缘劣化而发生重大故障^[1-3].

为了能够获取局部放电信号的更多信息,超宽带检测技术被用于局部放电的检测和识别^[1].但是,由于检测带宽在百兆以上,现场的干扰信号很容易进入检测系统,使得在强干扰下提取微弱局部放电脉冲信号成为目前需要研究解决的课题.

近年来,大量的研究工作主要集中在小波分析方法上^[2],并取得了相当大的成就.但是,小波方法均会对宽带局部放电脉冲信号造成损失,且小波分析方法最优母小波的选择难以确定.独立成分分析(ICA)是一种信号处理和数据分析技术,在数据挖掘、信号处理等领域已有广泛应用,相关的研究见文献[3-8].它是为非高斯数据找到一种变换,使得变换后各成分之间尽可能独立而提取出各个独立源信号.本文针对 IEC60270 规定的标准脉冲电流法,提出了基于 ICA 的局部放电脉冲双通道提取技术,分析得出了 ICA 基本模型用于局部放电脉冲信号提取的可行性^[9],仿真实验与实测数据处理均表明了该方法的有效性.

1 独立成分分析

1.1 基本模型及其假设

如图 1 所示,ICA 可描述为:在独立信源 $\mathbf{O}$ 和混合系统 $\mathbf{A}$ 未知的条件下,对获取的观测信号 $\mathbf{X}$,寻求分离矩阵 $\mathbf{B}$ (通常可由白化矩阵 $\mathbf{W}$ 和正交矩阵 $\mathbf{U}$ 组成),使得 $\mathbf{Y}=\mathbf{B}\mathbf{X}\rightarrow\mathbf{O}$,从而得到独立成分.

该基本模型理论和算法一般都需作以下假设:

- (1)组成观测信号 $\mathbf{X}$ 的成分数目大于或等于组成源信号 $\mathbf{O}$ 的成分数目;
- (2)源信号 $\mathbf{O}$ 各成分是瞬时统计相互独立的;
- (3)源信号 $\mathbf{O}$ 中至多有一个高斯信号.

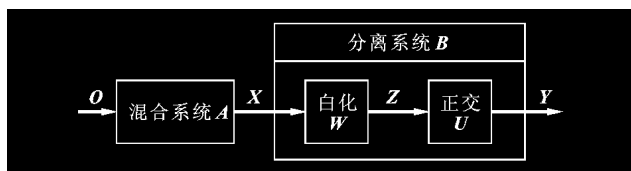


图1 基本ICA模型

1.2 算法及其处理过程

ICA 的关键问题是建立一个能够度量分离结果独立性(非高斯性)的目标函数及其相应的分离算法.本文采用一种基于负熵的 ICA 固定点算法^[6],其单个独立成分提取算法为:

- (1)将观测信号 $\mathbf{X}$ 去均值,然后加以白化得 $\mathbf{Z}$;
- (2)任意选择 $\mathbf{u}_i$ 的初始值 $\mathbf{u}_i(0)$,要求

$$\|\mathbf{u}_i(0)\|_2=1;$$

(3) $\mathbf{u}_i(k+1)=E[\mathbf{Z}f(\mathbf{u}_i^T(k)\mathbf{Z})]-E[f'(\mathbf{u}_i^T(k)\cdot\mathbf{Z})]\mathbf{u}_i(k)$,非线性函数 f 选择 $\tanh$ 函数;

(4)归一化 $\mathbf{u}_i(k+1)\leftarrow\mathbf{u}_i(k+1)/\|\mathbf{u}_i(k+1)\|_2$;

(5)如未收敛,回到步骤(3).

1.3 含混性

含混性是所有 ICA 模型均无法避免的问题^[6-7].由于 $\mathbf{O}$ 和 $\mathbf{A}$ 都是未知的,对于某一源的任意标量乘积都能通过对 $\mathbf{A}$ 矩阵对应的列 $\mathbf{a}_i$ 除以对应的标量值 α_i 而抵消,即 $\mathbf{X}=\sum_i(\mathbf{a}_i/\alpha_i)(\mathbf{o}_i\alpha_i)$.就是说求解得到的 $\mathbf{Y}$ 存在符号和幅值的不确定性问题,在某些特殊场合下需要进行修正.

1.4 模型估计的等变化性

假设 ICA 模型中混合矩阵 $\mathbf{A}$ 为方阵,由观测信号 $\mathbf{X}$ 来估计此未知混合矩阵 $\mathbf{A}$.由基本模型定义,混合矩阵 $\mathbf{A}$ 的一个估计 $\mathbf{A}'$ 仅为观测信号 $\mathbf{X}$ 的函数,即有 $\mathbf{A}'=F(\mathbf{X})$.对于任何可逆矩阵 $\mathbf{R}$,如果对变换 $\mathbf{A}$ 的一个估计 $\mathbf{A}'$ 满足 $F(\mathbf{R}\mathbf{X})=\mathbf{R}F(\mathbf{X})$,则称此估计具有等变化性^[6-8].ICA 模型估计具有等变化性,可理解如下:估计分量 $\mathbf{O}=(\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{X}$,这里 $\mathbf{A}'$ 由一个具有等变化性的估计获得,那么有

$$\mathbf{O}=F^{-1}(\mathbf{X})\mathbf{X}=F^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{O})\mathbf{A}\mathbf{O}=$$

$$\mathbf{A}F^{-1}(\mathbf{O})\mathbf{A}\mathbf{O}=F^{-1}(\mathbf{O})\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{O}=F^{-1}(\mathbf{O})\mathbf{O} \quad (1)$$

式(1)意味着具有等变化性的 ICA 模型估计性能不决定于混合矩阵 $\mathbf{A}$.

事实上,很多 ICA 估计算法均满足上述的等变化性能.这使得尽管 ICA 模型估计中存在固有的含混性,但借助估计的独立成分可以成比例地再现真实源信号波形,即具有信号波形保持性,从而可有效保留数据的某些重要信息.

2 局部放电脉冲 ICA 提取的可行性

2.1 局部放电脉冲序列与白噪声

理论和实际工况表明:局部放电脉冲信号从局部放电点传播到传感器的过程中会产生很大的衰减和振荡,从而使检测到的波形与局部放电脉冲实际波形相差很大.这类信号可以采用指数衰减振荡模型来表示.

单指数衰减

$$P_1(x)=\xi e^{-t/\tau} \quad (2)$$

单指数衰减振荡波形

$$P_2(x)=\xi e^{-t/\tau} \sin 2\pi f_c t \quad (3)$$

双指数衰减

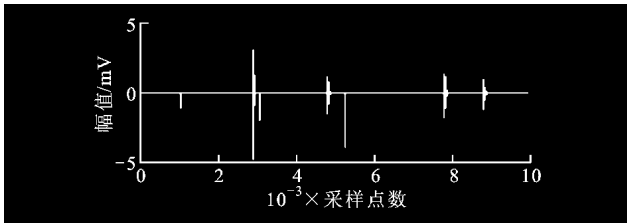
$$P_3(x) = \xi(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (4)$$

双指数衰减振荡波形

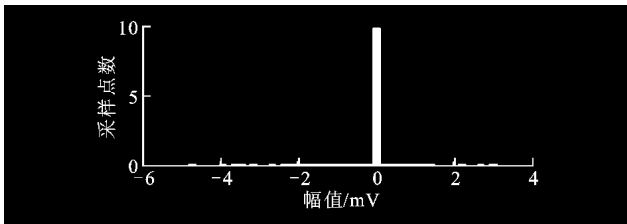
$$P_4(x) = \xi(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \sin 2\pi f_c t \quad (5)$$

式中: ξ 表示局部放电脉冲的幅值; τ 表示衰减系数; f_c 表示放电脉冲的振荡频率。

本文使用式(2)~式(5)所示模型,生成如图 2a 所示的局部放电脉冲的一个随机序列。对该序列进行幅值概率密度估计,得到如图 2b 所示的幅值概率密度分布,可以看出该分布变量取值在 0 附近最为频繁,为超高斯分布。众所周知的白噪声其幅值概率密度估计则为高斯分布。



(a) 仿真局部放电脉冲序列



(b) 幅值概率密度估计

图 2 局部放电脉冲序列及其幅值概率密度估计

2.2 双通道检测

在基本 ICA 模型中,观测信号通道数需大于等于独立信号源数。因此,从强背景白噪声中提取局部放电脉冲信号时,可建立能在实际中使用的双通道局部放电脉冲检测系统,如图 3 所示。图 3 中, R_z 为保护电阻, C_k 和 C_x 分别为耦合电容和试品, Z_1 和 Z_2 为超宽带检测无感电阻(阻值略有差异),示波器输入端匹配在图中省略。

假设图 3 中 A 通道获取的观测信号为 x_1 , B 通道获得的观测信号为 x_2 ,那么

$$\mathbf{X} = \mathbf{AO} \rightarrow \begin{cases} x_1 = a_{11}o_1 + a_{12}o_2 \\ x_2 = a_{21}o_1 + a_{22}o_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: o_1 和 o_2 组成 ICA 模型中的独立源信号 $\mathbf{O}$,即局部放电脉冲和背景白噪声信号; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 为 ICA 模型中的混合系统(图 1),即实际中局部放电脉冲 o_1 与背景白噪声信号 o_2 的未知线性混合。

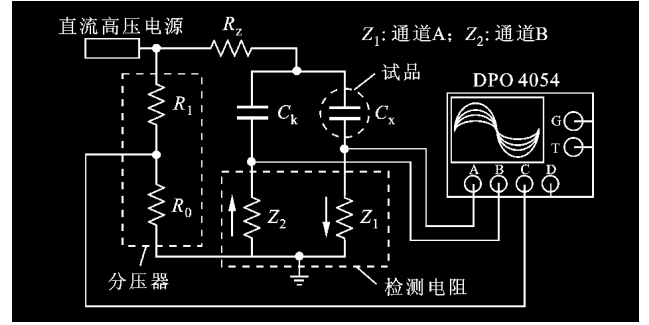


图 3 双通道局部放电脉冲信号检测实验系统

从上述分析可以得出:淹没于背景噪声中的局部放电脉冲提取问题满足 ICA 基本模型及其假设,可以使用 ICA 基本模型进行局部放电脉冲提取。

3 局部放电脉冲提取仿真实验

3.1 试品放电

由图 3 和式(6)可知,当 a_{11} 和 a_{21} 符号相反,且 $a_{11}o_1$ 大于 $a_{12}o_2$ 以及 $a_{21}o_1$ 大于 $a_{22}o_2$ (即局部放电信号没有被淹没在背景噪声的情况下)时,由极性鉴别原理可以判断为试品放电。当由图 2a 所示仿真脉冲序列与白噪声信号按 $a_{11}o_1$ 小于 $a_{12}o_2$ 且 $a_{21}o_1$ 小于 $a_{22}o_2$ 时,进行未知线性混合,得到图 4 所示的观测信号 x_1 和 x_2 ,脉冲序列基本已被背景噪声淹没,无法进行判别,需要对观测信号进行局部放电脉冲提取。

使用基于负熵判据的 FastICA 算法对图 4 所示的观测信号 $\mathbf{X}$ 进行单次提取,得到图 5 所示的分离信号 y 。将图 2a 所示脉冲信号与利用 ICA 基本模型提取得到的脉冲信号进行对比可以得出:ICA 模型可以提取出淹没于白噪声信号中的局部放电脉冲信号,保持了局部放电波形之间相对幅值关系和单个脉冲波形形状(见图 6b),以及脉冲极值所对应的时间点。但是,图 5 出现了第 1.3 节所提的含混性问题,分离信号的幅值与脉冲信号有个比值,且符号也相反(取决于算法初始化向量的选择)。

3.2 直流下局部放电信号提取的 ICA 消混技术

由图 3 所示,局部放电脉冲极性与所加直流高压极性一致。即通道 A 检测获取的局部放电脉冲信号与电压源极性一致,因此可选取观测信号 x_1 对分离信号 y 进行幅值修正。先将 y 幅值进行归一化,再求取观测信号 x_1 相应极性下最大幅值的 1/2,相乘即完成幅值的修正得到 y_{PD} 。幅值修正是粗略的,但并不影响后期对该信号的处理。

图 5 所示的分离信号 y 按上述方法消混后得到

脉冲序列 y_{PD} , 如图 6a 所示. 图 6b 简单比较两信号, 得出的结果是令人满意的.

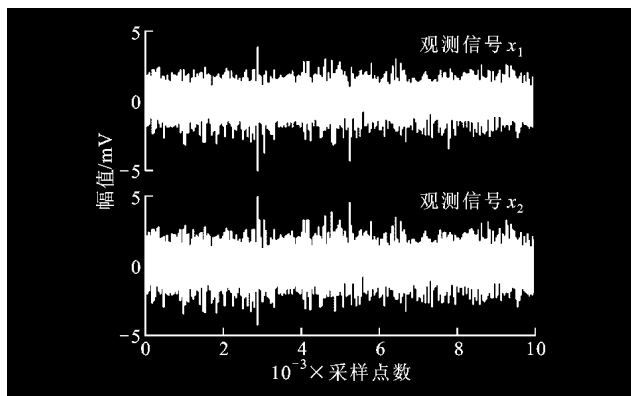


图4 试品放电时的观测信号

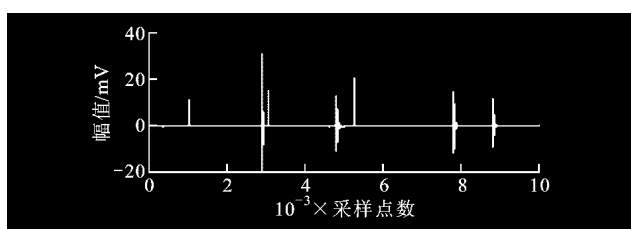
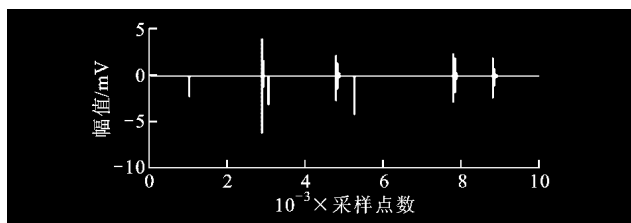
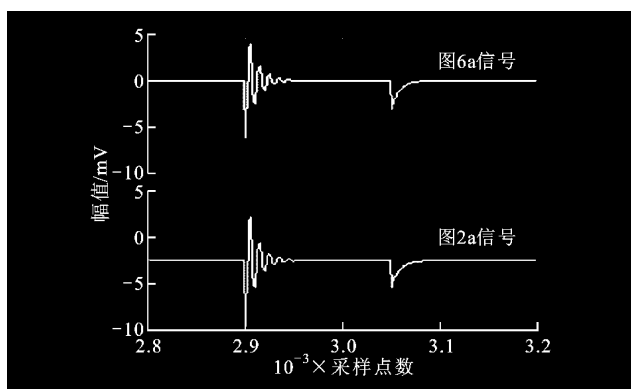


图5 ICA模型求解结果



(a)脉冲序列



(b)脉冲波形对比

图6 消混后的局部放电脉冲序列及脉冲波形

3.3 脉冲提取效果指标

用常用的均方误差 e 和互相关系数 ρ 表示波形相似度来对脉冲提取效果进行评价

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_1(i) - y_{PD}(i))^2 \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (o_1(i) y_{PD}(i))}{\left(\sum_{i=1}^N o_1(i)^2 \sum_{i=1}^N y_{PD}(i)^2 \right)^{0.5}} \quad (8)$$

式中: N 为数据长度; $o_1(i)$ 为原始局部放电脉冲信号; $y_{PD}(i)$ 为 ICA 模型提取得到的脉冲信号. 针对图 6a 所示结果与图 2a 所示原始脉冲, 利用式(7)和式(8)进行计算, 得到的指标分别为 $e = 4.74 \times 10^{-4}$, $\rho = 0.997$.

4 直流下针板模型实验

直流与交流下的局部放电检测原理相同^[10-11], 都可以使用 IEC60270 推荐的脉冲电流法. 作者设计了油纸绝缘针板模型以模拟换流变压器中的一种典型实际缺陷. 实验时, 图 7 所示针板模型作为图 3 中的试品.

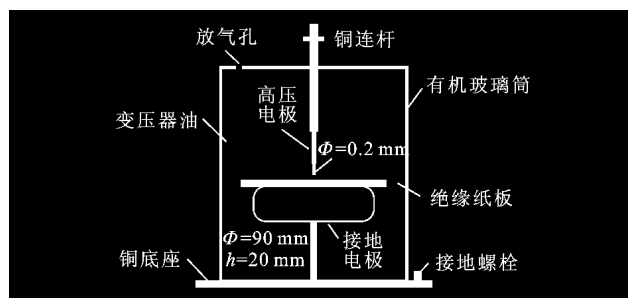


图7 油纸绝缘针板模型

在某一负极性直流电压下, 利用图 3 所示系统, 示波器采样率设置为 10^8 次/s 时获取的 2 个通道的局部放电脉冲序列如图 8 所示. 由于在高压实验屏蔽大厅, 故背景白噪声较小, 在 2 mV 左右. 图 8 所示的脉冲信号没有被背景噪声淹没, 由极性鉴别可以判断为试品放电. 为了模拟现场检测时的效果, 对图 8 所示信号加入了幅值略有差异的大幅值白噪声, 致使脉冲信号完全被淹没而作为现场检测的观测信号 $\mathbf{X}$, 如图 9 所示.

图 10 是使用 ICA 基本模型对图 9 所示的观测信号进行求解后得到的分离信号 y , 以及利用直流电压极性和图 9 中 A 通道观测信号 x_1 幅值进行消混后得到的局部放电脉冲序列 y_{PD} , 图 11 对比了部分脉冲波形.

对图 10 中所示脉冲提取结果 y_{PD} 与图 8 所示 A 通道或 B 通道获取的脉冲信号, 通过式(7)和式(8)计算得到的指标分别为 $e = 0.261$, $\rho = 0.92$ 和 $e = 0.382$, $\rho = -0.86$. 脉冲波形信号之间的差异是由于检测系统中存在的杂散电容、检测电阻 Z_1 和 Z_2 的不

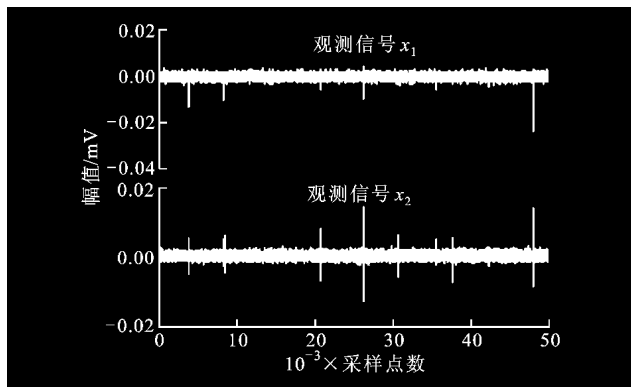


图8 直流下油纸绝缘针板放电脉冲序列信号

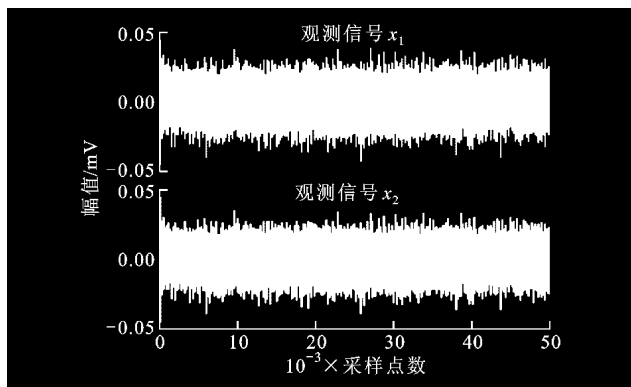


图9 被白噪声淹没的观测信号

一致以及采样率等众多因素引起。同样,其不影响对该脉冲波形信号进行处理。

由图10和图11所示的实测数据处理结果可以再次得出,利用ICA基本模型可以提取被背景白噪声完全淹没的局部放电脉冲信号。

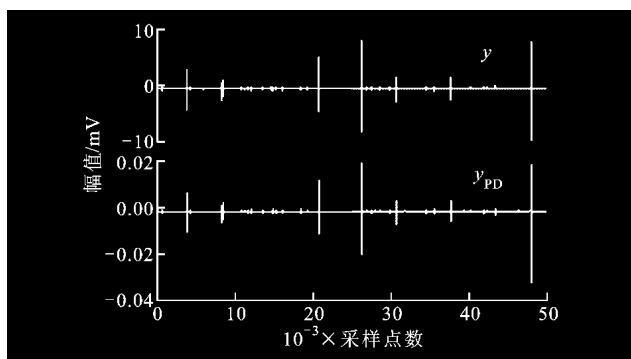


图10 强背景噪声中的针板放电脉冲提取

5 结论

局部放电脉冲信号与白噪声信号来源于不同的源,各个干扰源之间可以认为是相互独立的。从不同观测点获取的观测信号可看成独立干扰信号与局部放电脉冲信号的线性混合。据此,本文针对IEC60270,提出了基于独立成分分析的局部放电双

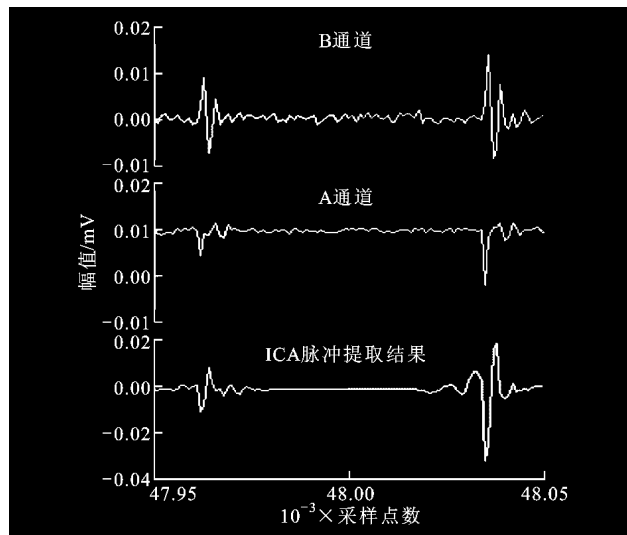


图11 强背景噪声中的针板放电脉冲提取

通道提取技术。仿真实验和实测数据的处理结果表明,利用ICA基本模型可以提取出淹没在噪声背景中的局部放电脉冲信号,且保持了局部放电波形之间相对幅值关系、单个脉冲波形以及脉冲极值所对应的时间点等局部放电信号信息,结合直流下局部放电的自身特性,可以对ICA模型固有的含混性问题进行消除。

参考文献:

- [1] CONTIN A, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 335-348.
- [2] MA X, ZHOU C, KEMP I J. Interpretation of wavelet analysis and it's application in partial discharge detection[J]. IEEE Trans Dielect Elect Insul, 2002, 9(2): 446-457.
- [3] 李洪, 孙云莲. 基于独立分量分析的局部放电脉冲信号提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 78-81.
LI Hong, SUN Yunlian. Extraction of partial discharge signals using independent component analysis [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 78-81.
- [4] 张海军, 温广瑞, 屈梁生. 一种提高诊断信息质量的方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 295-299.
ZHANG Haijun, WEN Guangrui, QU Liangsheng. Method to improve the quality of diagnostic information[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3): 295-299.
- [5] 李力, 屈梁生. 应用独立分量分析提取机器的状态特

- 征[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(1): 45-48.
- LI Li, QU Liangsheng. Independent component analysis for features extraction of machine condition[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1): 45-48.
- [6] 杨福生, 洪波. 独立分量分析的原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 周宗潭, 董国华, 徐昕, 等. 独立分量分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 焦卫东. 基于独立分量分析的旋转机械故障诊断[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2003.
- [9] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 局部放电脉冲信号 ICA 提取技术的初步研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1277-1282.
- SI Wenrong, LI Junhao, LI Yanming, et al. Preliminary study on signal extraction technology for PD pulse based on independent component analysis [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1277-1282.
- [10] PETER H F, JOHAN J. Partial discharges at dc voltage: their mechanism, detection and analysis [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 328-340.
- [11] 司文荣, 李军浩, 李彦明, 等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 481-486.
- SI Wenrong, LI Junhao, LI Yanming, et al. Measurement and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 481-486.

(编辑 杜秀杰)