

## 多局放源检测分类用特征提取时频算子

魏本刚<sup>1</sup>, 姚周飞<sup>1</sup>, 贺林<sup>1</sup>, 李悦<sup>2</sup>

(1. 国网上海电力公司, 上海 200437; 2. 上海赛璞乐电力科技有限公司, 上海 200437)

**摘要:** 根据目前基于100 MS/s超宽带检测实现多局放源识别和干扰抑制依据的局部放电波形特征提取及分类,指出实现此系统的关键技术为脉冲群波形的快速特征提取。其一般通过对脉冲群时、频域波形进行非线性映射,形成特征参数的2D平面或3D空间,再进行无监督聚类分析即可实现局放源间和噪声源的分离。针对目前应用较多的等效时频法,提出了时频自相法和时频熵法,基于指数模型和蒙特卡洛法产生仿真脉冲群,对上述3种时频算子进行了特征参数2D平面和3D空间的可分类性评定。可分类性测度值表明,定义的2D和3D时频算子均具有较好的脉冲源可分类性,同一种时频算子3D空间的可分类性测度均优于2D平面。交、直流下局放试验数据均验证了3种特征提取时频算子的实用性。这为研制多局放检测及识别系统选择脉冲群波形特征提取方法提供了理论和试验依据。

**关键词:** 局部放电; 超宽带检测; 脉冲群; 特征提取; 时频算子; 可分类性评定; 多局放源

## Time-frequency Feature Extractors Used in Multi-PD Source Detection and Grouping

WEI Bengang<sup>1</sup>, YAO Zhoufei<sup>1</sup>, HE Lin<sup>1</sup>, LI Yue<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

2. Shanghai Saipule Electric Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200437, China)

**Abstract:** In view of the presence of feature extraction and grouping method used in multi-partial discharge source (multi-PDs) identification and noise suppression system realized by ultra-wideband detection with sampling rate of 100 MS/s, this paper points out that one of the key technologies is the fast feature extractors used for the pulse sequence waveforms. A general way to make feature extraction resorts to nonlinear mapping of the waveforms in time and frequency (TF) domains, respectively, which are characterized by points in 2D Cartesian parameters plane or 3D Cartesian parameters space (3DCPS), then multi-PDs and noise separation can be realized using the unsupervised clustering analysis. According to the popular equivalent TF method (ETFM), a TF autocorrelation method (TFACM) and a TF entropy method (TFEM) are proposed, and a separability criterion for those feature extractors is defined and analyzed with pulse sequences generated with combination of exponential models and Monte Carlo simulation. The separability evaluation results show those TF operators with good performance, especially in 3DCPS. The practicability of those TF operators is validated with the data from AC and DC PD tests. This study may provide experimental and theoretical basis for selecting feature extraction method in development of multi-PDs detection and identification system.

**Key words:** partial discharge; ultra-wideband detection; pulse sequence; feature extraction; time-frequency operator; separability evaluation; multi-PD source

## 0 引言

对高压电缆、气体组合绝缘电器(GIS)、电力变压器等电力设备的绝缘进行在线监测或离线检测时,基于局放脉冲峰值—时间序列的检测系统对于

存在多局放源(包含两个)或异常干扰噪声源时,若脉冲源信号频谱重叠,其获取的数据将是随机混叠的峰值—时间序列,相应的PRPD放电谱图也是随机混叠的,使用统计分析获取的放电指纹将与故障特征数据库中的单个缺陷的放电指纹不匹配<sup>[1-5]</sup>。

因此, 对此类问题再使用单一缺陷模型构造的数据库对检测数据进行识别分析, 系统可能无法给出准确结果。

针对上述工况, 国外意大利Bologna大学于2002年开始<sup>[6-8]</sup>、国内西安交通大学则于2008年开始<sup>[9-11]</sup>, 相继提出了基于超宽带检测的多局放源检测和识别技术。即将传统的脉冲峰值—时间序列检测改为脉冲波形—时间序列检测, 即记录单个局放脉冲波形及其获取时间点(相位); 使用某种方法将获取的脉冲群进行快速分类, 并将具有相似性脉冲组成的各子类脉冲群转换成峰值—时间序列, 然后再按传统的PRPD放电谱图进行数据处理, 与由单个人工缺陷模型构造的放电模式进行对比并做出放电模式判别。与系统数据库中放电模式无关的子脉冲群, 可判断为噪声(或是无效数据)。这样, 该系统不仅解决了峰值—时间序列的混叠问题, 而且可以对存在干扰的多局放源进行检测和识别。随后, 清华大学、华北电力大学于2009年开始也对该技术进行了研究和应用<sup>[12-13]</sup>。近期, 文[14]再次指出实现此系统的关键技术之一是脉冲群快速分类技术, 且特征提取方法影响分类的准确性和分类结果。因此, 局部放电脉冲波形特征提取是影响多局放源检测和识别技术最关键的影响因素。

文中在参考国内外对于该技术研究的基础上, 提出了脉冲群特征参数快速提取的一般方法, 并基于等效时频法, 定义了时频自相法和时频熵法。通过基于指数模型和蒙特卡洛的仿真脉冲群, 建立了可分类性测度, 对3种时频算子进行了特征参数2D平面和3D空间的分类性评定。并将3种时频算子应用于开发的交、直流局部放电检测系统, 进行了实用性试验验证。

## 1 脉冲群特征参数快速提取方法

Sammon于1969年提出非线性映射方法在很大程度上可以克服聚类分析的不足<sup>[15]</sup>。非线性映射(变换)是一种几何降维的数学方法, 即将高维变量综合为少数几个综合变量, 使综合指标能够最大限度地表达原来多个指标的信息。在上述基础之上, 非线性映射还能够将高维空间的几何图像变成低维空间中的图像, 便于人为干预和判别分析。现阶段非线性映射分析的适用范围非常广泛, 它只针对数据, 因此引入非线性映射对局放脉冲波形进行特征参数提取。

脉冲群波形特征参数快速提取的一般方法见

图1, 其主要思想是将脉冲时、频域波形通过非线性变换函数 $F$ 进行参数计算, 形成2D特征参数平面或3D特征参数空间。当选择不同的 $F$ 时, 可以得到不同的特征参数。考虑局放数据在线检测中的实时处理,  $F$ 要求满足如下特性<sup>[16]</sup>: ①计算的实时快速性; ②与时间记录点无关; ③与脉冲的幅值、极性无关; ④具有较好的可分类性。目前一般 $F$ 均满足特性①; 特性②表明 $F$ 只针对脉冲波形数据间的相对时间, 不涉及其绝对记录时间(预处理技术可参见文[11]); 特性③是对交流局放脉冲的要求, 而直流下只具有单极性, 只要求与脉冲幅值无关; 特性④是最关键的, 其性能评定详见第2章。

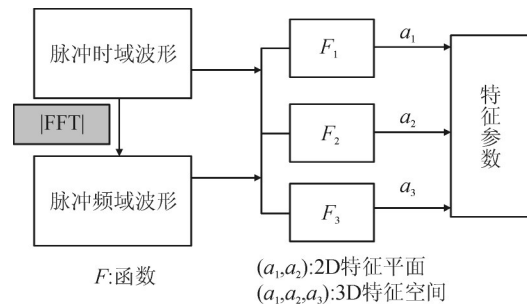


图1 脉冲群波形快速特征提取的一般方法

Fig. 1 A fast extraction method defined for pulse sequence

当然, 图1中的快速傅里叶变换(FFT)也可以寻求其他快速变换, 比如快速梅林变换<sup>[16]</sup>(FMT)、小波变换<sup>[17]</sup>(WT)等。下面介绍借助于FFT用于实现局放脉冲群特征参数提取的等效时频参数法、时频自相关参数法和时频熵参数法。

### 1.1 等效时频法

表征脉冲信号 $p(t)$ 时域和频域特征|FFT|的简单方法是用信号的均值和散布来表示, 即把 $|p(t)|^2$ 及其频谱 $|p(f)|^2$ 看作概率密度, 观察其均值和标准差来分析信号的时域和频域特征。其分别定义为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} t_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} t |p(t)|^2 dt / E_p \\ f_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} f |p(f)|^2 df / E_p \\ T^2 = 4\pi \int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_0)^2 |p(t)|^2 dt / E_p \\ F^2 = 4\pi \int_{-\infty}^{+\infty} (f - f_0)^2 |p(f)|^2 df / E_p \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $t_0$ 、 $f_0$ 为信号的时间均值和频率均值; $T$ 、 $F$ 为信号的等效时宽和等效频宽; $E_p$ 为信号的能量。

则在时频平面内, 信号可以用其平均位置 $(t_0, f_0)$ 和一个面积正比于等效时宽和频宽乘积 $T \times F$ 的能量聚集区域表征出来。对采集获取脉冲波形 $p(t)$ 及其频谱 $p(f)$ 做如下处理

$$\begin{cases} T_0^j = \sum_{i=0}^{n-1} t_i \cdot p_j^2(t_i) / \sum_{i=0}^{n-1} p_j^2(t_i) \\ F_0^j = \sum_{i=0}^{n/2-1} f_i \cdot p_j^2(f_i) / \sum_{i=0}^{n/2-1} p_j^2(f_i) \\ (T_j)^2 = \sum_{i=0}^{n-1} (t_i - T_0^j)^2 \cdot p_j^2(t_i) / \sum_{i=0}^{n-1} p_j^2(t_i) \\ (F_j)^2 = \sum_{i=0}^{n/2-1} (f_i - F_0^j)^2 \cdot p_j^2(f_i) / \sum_{i=0}^{n/2-1} p_j^2(f_i) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $j$ 为脉冲群中第 $j$ 个脉冲; $n$ 为脉冲波形的记录点数; $t_i$ 为脉冲波形第 $i$ 点对应时间; $f_i$ 为脉冲波形频谱第 $i$ 点对应频率成分。

式(2)先计算脉冲波形信号 $p_j(t)$ 的时间均值 $T_0^j$ 和频率均值 $F_0^j$ ;再分别求取脉冲波形信号在时域和频域的散布 $T_j$ 和 $F_j$ ,即等效时宽和等效频宽。由式(2)对所有脉冲波形进行特征提取后,即可以得到脉冲群在2D等效时频面内的特征向量分布图 $(T_j, F_j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为脉冲个数。同样,可以得到脉冲群在3D等效时频空间内的特征向量分布图 $(T_j, F_j, TF_j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,其中 $TF_j = T_j \times F_j$ 为时频宽乘积。

## 1.2 时频自相关法

局部放电脉冲波形 $p(t_k)$ ,  $k=0, 1, 2, \dots, n-1$ , 可视为随机信号,其自相关函数可表示为

$$r(m) = \sum_{k=0}^{n-1} p(t_k) p(t_{k+m}) / n \quad (3)$$

对采样点数为 $n$ 的脉冲波形进行自相关计算,可得到对于零点对称的 $2n-1$ 点自相关函数值。对不同的放电脉冲波形,可以选择某些自相关函数值来表征其特征参数,从而用于分类。

同样,对单个脉冲波形 $p_j(t)$ 及其FFT频谱 $p_j(f)$ 做如下处理

$$\begin{cases} r_t^j(0) = \sum_{k=0}^{n-1} p_j(t_k) p_j(t_k) / n \\ r_f^j(0) = 2 \sum_{k=0}^{n/2-1} p_j(f_k) p_j(f_k) / n \\ r_t^j(m) = \sum_{k=0}^{n-1} p_j(t_k) p_j(t_{k+m}) / r_t^j(0) / n \\ r_f^j(m) = 2 \sum_{k=0}^{n/2-1} p_j(f_k) p_j(f_{k+m}) / r_f^j(0) / n \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $m$ 为延迟量,可取1或2。

式(4)先计算脉冲波形信号 $p_j(t)$ 的时域和频域的自相关参数最大值 $r_t^j(0)$ 和 $r_f^j(0)$ ;再分别求取脉冲波形信号在时域和频域的自相关参数 $r_t^j$ 和 $r_f^j$ ,这里称之为时域自相关和频域自相关。由式(4)对脉冲群中所有的脉冲波形进行特征提取后,即可以得到脉冲群在2D时频自相关参数平面内的特征向量分布图 $(r_t^j, r_f^j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为脉冲个数。同样,脉冲群在3D时频自相关参数空间内的特征向量分布图 $(r_t^j, r_f^j, r_{tf}^j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,其中定义 $r_{tf}^j = r_t^j \times r_f^j$ 为时频自相关乘积。

## 1.3 时频熵法

局放脉冲信号是非平稳信号,可以求取信息熵对其进行描述。信息熵表征了信源整体的统计特性,是整体的平均不确定性量度。对于某一特定的信源(可理解为信号源),其信息熵唯一,不同的信源,因统计特性不同,其熵也不同。由于著名的Shannon信息量不能用于可能取负值的某些分布,因此必须引入允许分布为负值的广义信息量,即Renyi信息量,其定义为<sup>[18]</sup>

$$Ri_x^m = \log_2 \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} p^m(x) dx \right] / (m-1) \quad (5)$$

式(5)中: $m$ 为信息量的阶次, $m=1$ 时的一阶Renyi信息量退化为Shannon信息量。

那么假定脉冲波形 $p_j(t)$ 是时间变量 $t$ 的概率密度分布;而其FFT频谱 $p_j(f)$ 是频率变量 $f$ 的概率密度分布,则可以选择变量的信息量作为脉冲波形的特征参数。则对单个脉冲波形 $p_j(t)$ 及其FFT频谱 $p_j(f)$ 也可做如下处理

$$\begin{cases} Ri_t^j(m) = \frac{1}{m-1} \log_2 \left[ \sum_{i=0}^k (t_i - T_0^j)^m \frac{P_j^m(t_i)}{\sum_{i=0}^k P_j^m(t_i)} \right] \\ Ri_f^j(m) = \frac{1}{m-1} \log_2 \left[ \sum_{i=0}^{k/2} (f_i - F_0^j)^m \frac{P_j^m(f_i)}{\sum_{i=0}^{k/2} P_j^m(f_i)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $m$ 为阶数,一般取2。

式(6)同样先计算脉冲波形信号 $p_j(t)$ 的时间均值 $T_0^j$ 和频率均值 $F_0^j$ (见式(2));再分别求取脉冲波形信号在时域和频域的 $m$ 阶信息量 $Ri_t^j(m)$ 和 $Ri_f^j(m)$ ,这里称之为时域熵和频域熵。由式(6)对脉冲群中所有的脉冲波形进行特征提取后,即可以得到脉冲群在2D时频熵面内的特征向量分布图 $(Ri_t^j, Ri_f^j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为脉冲个数。同样,可以得到脉冲群在3D时频熵空间内的特征向量分布图 $(Ri_t^j, Ri_f^j, Ri_{tf}^j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,其中定义 $Ri_{tf}^j = Ri_t^j \times Ri_f^j$ 为时频熵乘积。

## 2 仿真局部放电脉冲群特征参数提取及可分类性评定

由理论和实际工况表明:局部放电脉冲电流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电流实际波形相差很大。这类信号可以采用如下指数衰减振荡模型来表示<sup>[19]</sup>

1)单指数衰减和单指数衰减振荡波形。

$$P_1(x) = A_1 e^{-t/\tau_0} \quad (7)$$

$$P_2(x) = A_2 e^{-t/\tau_0} \sin 2\pi f_{c1} t$$

2)双指数衰减和双指数衰减振荡波形。

$$P_3(x) = A_3 (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (8)$$

$$P_4(x) = A_4 (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \sin 2\pi f_{c2} t$$

式(7)、(8)中:  $A$  为局部放电脉冲幅值;  $\tau$  为衰减系数;  $f_c$  为振荡频率。

式(7)、(8)所示模型的仿真脉冲电流波形见图2。传感器检测获取实际放电源在某一特定条件下产生的脉冲群, 其脉冲波形幅值、衰减系数和振荡频率等都具有一定的随机性(分散性), 可通过同时控制参数  $A$ 、 $\tau$ 、 $f_c$  来进行模拟仿真。文中基于蒙特卡洛法, 结合式(7)、(8)所示指数衰减模型产生4类仿真脉冲群, 从而作为进行参数提取实验的样本数据。

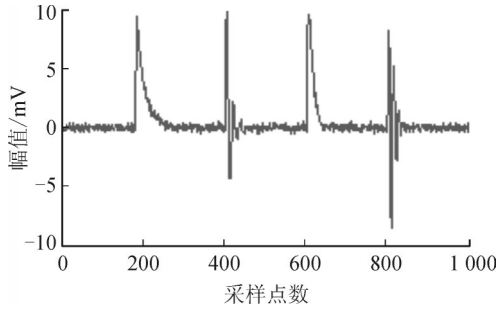


图2 仿真用局部放电脉冲波形

Fig. 2 PD pulse waveshapes used for simulation

### 2.1 基于蒙特卡洛法的仿真脉冲群

蒙特卡洛方法亦称为随机模拟(random simulation)法, 有时也称作随机抽样(random sampling)法。其基本思想是<sup>[20]</sup>: 将符合一定概率分布的大量随机数作为参数输入数学模型, 求出所关注变量的概率分布, 从而了解不同变量对目标变量的综合影响以及目标变量最终结果的统计特性。其基本原理可

简单描述如下: 假定函数  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 蒙特卡洛法利用一个随机数发生器生成一组样本值  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ , 然后按  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的关系式确定函数的值  $y_i=f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ 。反复独立抽样(模拟)多次  $i=1, 2, \dots, k$ , 便可得到函数的一组抽样数据  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。当模拟次数足够多时, 便可给出与实际情况相近的函数  $y$  的概率分布与其数字特征。应用蒙特卡洛方法的前提是: 要确定目标变量的数学模型以及模型中各个变量的概率分布。如果确定了这两点, 就可以按照给定的概率分布生成大量的随机数, 并将它们代入模型, 得到大量目标变量的可能结果, 从而可以研究目标变量的各种特性。

基于蒙特卡洛法的仿真脉冲群生成方法如下, 以双指数衰减振荡波形模型为例:

$$P_4(x) = (A_4 + \xi_1) (e^{-t/(\tau_1 + \xi_2)} - e^{-t/(\tau_2 + \xi_3)}) \cdot \sin 2\pi(f_{c2} + \xi_4)t \quad (9)$$

式(9)中:  $\xi$  定义为幅值区间  $[a, b]$  上均匀分布的随机变量(参数  $\xi_i$  对应的幅值区间  $[a_i, b_i]$  设置决定与幅值参数  $A_i$ , 其他类似), 其密度函数定义为

$$f(\xi) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq \xi < b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式(7)、(8)所示模型产生的4类加噪仿真脉冲群见图3。这里, 不研究目标变量(仿真脉冲群)的统计特性, 而是利用目标变量模拟某一实际局放源或干扰源可能产生的脉冲群。

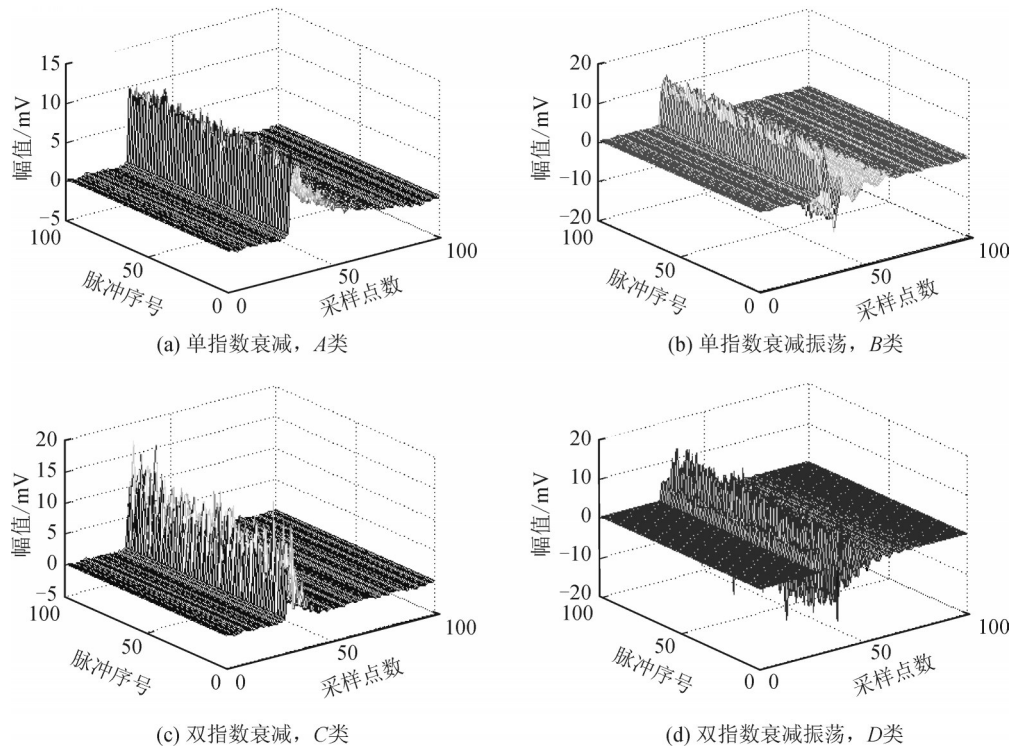


图3 基于蒙特卡洛法的4类仿真脉冲群

Fig. 3 Four kinds of simulation pulse groups based on Monte Carlo method

## 2.2 脉冲群特征参数提取

对图3对应的4类仿真脉冲群(A、B、C、D),分别使用基于2D特征参数平面和3D特征参数空间的等效时频参数法、时频自相关参数法和时频熵参数法,得到相应的特征参数分布见图4。图4所示直观的数据结构分布,表明该4类加噪仿真脉冲群在相应的特征参数平面上或空间内均是完全可分的

——类内距离小、类间距离大。改变式(7)、(8)所示模型参数,基于蒙特卡洛法的仿真脉冲群参数提取实验,同样得到了大量的类似与图4所示的特征参数分布结果,这里不再给出。该实验结果表明,提出的基于FFT的快速特征提取时频算子具有期望的分类性能,适合用于构造局部放电脉冲群快速分类技术。

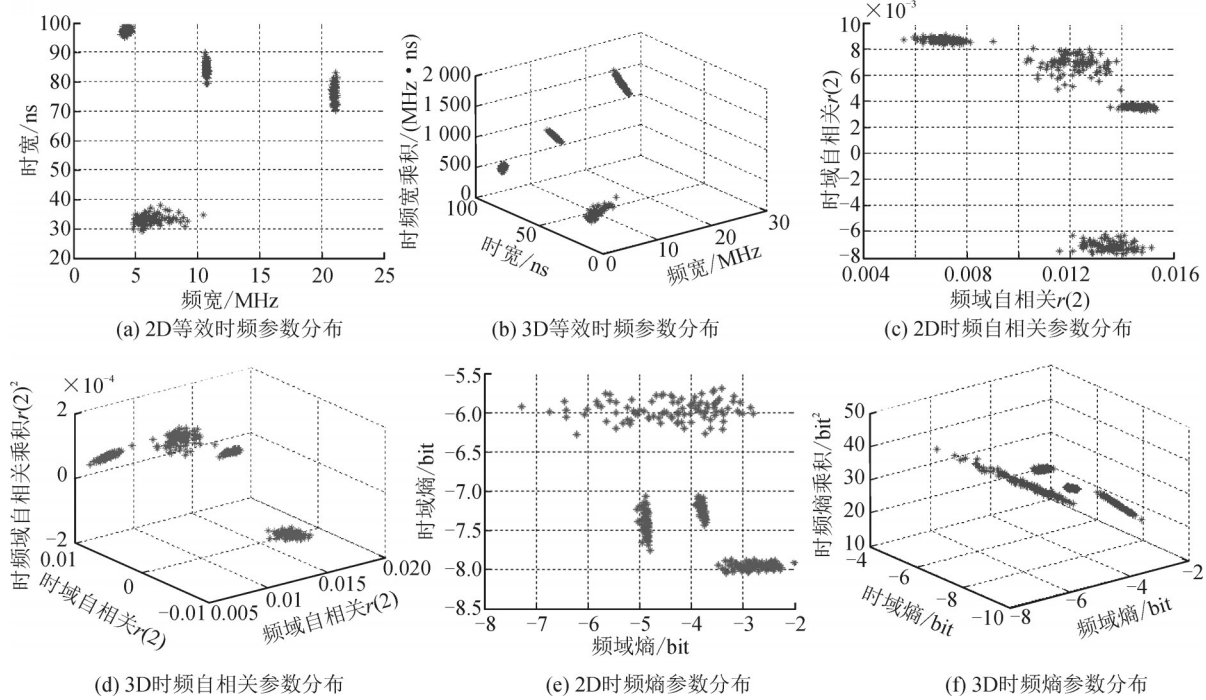


图4 仿真脉冲群特征参数提取

Fig. 4 Feature extraction results of simulated PD pulse sequences

## 2.3 脉冲源可分类性测度

对于同一类特征构成的特征集合 $\{\sigma_i\}$ ,  $i=1, 2, \dots, k$ (2D特征参数提取时,集合元素 $\{\sigma_i\}=(\sigma_{1i}, \sigma_{2i})$ ; 3D特征参数提取时,集合元素 $\{\sigma_i\}=(\sigma_{1i}, \sigma_{2i}, \sigma_{3i})$ ,其类内距离是衡量模式可分性的重要指标之一。类内距离平方定义为该集合内各特征向量间距离均值

$$D_{i,j}^2(\{\sigma_i\}, \{\sigma_j\}) = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k D^2(\sigma_i, \sigma_j) / [k(k-1)] \quad (11)$$

式(11)中,  $D^2(\sigma_i, \sigma_j)$ 是集合个体 $\{\sigma_i\}$ 和 $\{\sigma_j\}$ 在特征参数2D平面上或3D空间内距离,以3D空间为例

$$D^2(\sigma_i, \sigma_j) = (\sigma_{1i} - \sigma_{1j})^2 + (\sigma_{2i} - \sigma_{2j})^2 + (\sigma_{3i} - \sigma_{3j})^2 \quad (12)$$

对于两类特征集合 $\{\sigma_i^1\}$ ,  $i=1, 2, \dots, k^1$ 和 $\{\sigma_j^2\}$ ,  $j=1, 2, \dots, k^2$ ,其中 $\{\sigma_i^1\} \in A$ 类,  $\{\sigma_j^2\} \in B$ 类,则A类和B类之间距离的平方定义为

$$D_{i,j}^2(\{\sigma_i^1\}, \{\sigma_j^2\}) = \frac{\sum_{i=1}^{k^1} \sum_{j=1}^{k^2} D^2(\sigma_i^1, \sigma_j^2) / (k^1 k^2) \quad (13)$$

式(13)中,  $D^2(\sigma_i^1, \sigma_j^2)$ 是两类集合个体 $\{\sigma_i^1\}$ 和 $\{\sigma_j^2\}$ ,在特征参数2D平面上或3D空间内的距离,其定义

类似于式(12)。

由式(11)、(12)定义可见,如果某种特征参数提取方法能够使得类间距离较大,类内距离较小,则称这种特征参数提取方法对该类数据样本是较优的。把类内距离和类间距离统一起来,定义可分类性测度为

$$J_{A,B}^{D^2} = \frac{D_{i,j}^2(\{\sigma_i^1\}, \{\sigma_j^2\})}{D_{i,j}^2(\{\sigma_i^1\}, \{\sigma_j^1\}) + D_{i,j}^2(\{\sigma_i^2\}, \{\sigma_j^2\})} \quad (14)$$

它可作为衡量两类间可分性的一个决定性指标。该值越大,表示A类和B类间的可分性越好;该值越小,表示A类和B类间的可分性越差。一般情况下,该值 $\geq 1$ 表示具有较好的可分性;而该值 $< 1$ 则表示可分性较差。

## 2.4 可分类性测度评定

图3所示4类仿真脉冲群(A、B、C、D)其对应图4所示的2D和3D特征参数提取实验结果,分别应用类别可分离性判据得到的各特征参数提取方法的性能指标见表1-3,其中2D和3D等效时频法的4类脉冲群间可分类性测度均值分别为5.59和8.94,2D

和3D时频自相关法的4类脉冲群间可分类性测度均值分别为5.58和6.52,而2D和3D时频熵法的4类脉冲群间可分类性测度均值分别为2.15和2.40。

表1 等效时频法可分类性评定指标值

Table 1 Values of separability measure of ETFM (2D, 3D)

| 类别 | A               | B               | C               | D           |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| A  | 1.18, 29.10     |                 |                 | $D_{ij}^2$  |
| B  | 14.50, 493.00   | 2.81, 29.60     |                 |             |
| C  | 64.60, 226.00   | 52.00, 707.00   | 2.66, 56.30     |             |
| D  | 27.20, 1 194.00 | 48.00, 1 573.00 | 46.00, 1 407.00 | 3.98, 84.30 |
| A  | 0.00, 0.00      |                 |                 | $D_{ij}^2$  |
| B  | 3.64, 8.41      | 0.00, 0.00      |                 |             |
| C  | 1.12, 2.65      | 9.51, 8.24      | 0.00, 0.00      |             |
| D  | 5.27, 10.50     | 7.07, 13.80     | 6.92, 10.00     | 0.00, 0.00  |

表2 时频自相法可分类性评定指标值

Table 2 Values of separability measure of TFACM (2D, 3D)

| 类别 | A             | B            | C            | D               |
|----|---------------|--------------|--------------|-----------------|
| A  | 7.50, 7.90    |              |              | $D_{ij}^2$      |
| B  | 91.80, 122.00 | 5.42, 6.42   |              |                 |
| C  | 55.50, 80.20  | 42.90, 64.40 | 14.70, 18.70 | 55.50, 80.20    |
| D  | 171, 211      | 108, 137     | 142, 201     | 171, 211        |
| A  | 0.00, 0.00    |              |              | $J_{A,B}^{D^2}$ |
| B  | 7.09, 8.50    | 0.00, 0.00   |              |                 |
| C  | 2.49, 3.01    | 2.13, 2.56   | 0.00, 0.00   | 2.49, 3.01      |
| D  | 9.45, 10.8    | 6.74, 7.61   | 5.59, 6.64   | 9.45, 10.80     |

表3 时频熵法可分类性评定指标值

Table 3 Values of separability measure of TFEM (2D, 3D)

| 类别 | A           | B          | C          | D               |
|----|-------------|------------|------------|-----------------|
| A  | 0.44, 3.55  |            |            | $D_{ij}^2$      |
| B  | 1.29, 6.07  | 0.13, 0.36 |            |                 |
| C  | 2.78, 8.12  | 1.72, 6.21 | 1.38, 8.39 | 2.78, 8.12      |
| D  | 2.20, 14.49 | 1.11, 8.81 | 1.82, 11.6 | 2.20, 14.49     |
| A  | 0.00, 0.00  |            |            | $J_{A,B}^{D^2}$ |
| B  | 2.26, 1.55  | 0.00, 0.00 |            |                 |
| C  | 1.53, 0.68  | 1.14, 0.71 | 0.00, 0.00 | 1.53, 0.68      |
| D  | 3.43, 3.25  | 3.36, 6.94 | 1.15, 1.25 | 3.43, 3.25      |

上述计算分析结果基于2D特征参数平面和3D特征参数空间的等效时频参数法、时频自相关参数法和时频熵参数法均具有较好的可分性,同一种时频算子的3D特征参数空间的可分性测度均优于2D特征参数平面的可分性测度。此外通过均值大小可得;3D等效时频参数法性能最优,而2D时频熵参数法性能略差。

3 试验结果与分析

文中利用高性能NI示波采集卡、工控机和Measurement Studio软件,开发了交流、直流局部放电宽带检测和分析系统,对时频算子处理实测脉冲群波形的实用性进行试验验证。

3.1 双局放标定源

使用两个脉冲重复率分别为100 Hz和4 Hz局部放电电量标定用脉冲发生器以模拟两个局放源,以及试验大厅内大灯(其产生高重复率的高频振荡信号)作为干扰源。检测系统采集卡采样率设置为100 MS/s,脉冲阈值为20 mV,单个脉冲存储长度为100个点(1 μs,图5-7中为1 kns)。采集100个周期后得到如图5(a)所示的脉冲峰值—相位的混叠序列。按式(2)、(4)和(6)对图5(a)对应采集存储的脉冲群进行非线性映射,在等效时频特征2D平面和3D空间上的分布见图5(b)-(g)。使用模糊C均值聚类分析后,均分成4个子类。各子类对应的峰值—相位序列和单个脉冲波形分别见图6、7。

图7(a)对应类A所示单个时、频波形是由脉冲重复率为100 Hz的发生器产生的,脉冲峰值在工频周期上的分布如图6(a)所示。单个脉冲时、频波形如图7(d)所示的脉冲发生器,由于脉冲重复率为4 Hz,所以在正弦周期上的分布如图6(d)所示,其相位分布没有规律,且脉冲个数较少。图7(b)所示高重复率的高频振荡脉冲干扰信号其峰值—相位分布如6(b)所示,同样没有相位特征,脉冲重复率在各个相位内基本相同。而图7(c)所示单个脉冲波形与选用的局放信号源和干扰信号源均不同,其可能为试验时的其他随机干扰脉冲。

3.2 交流悬浮放电

对220 kV GIS装置内部设置人工悬浮电极缺陷进行局放试验时,采集脉冲群进行处理分析的案例见图8-10。检测系统采集卡采样率设置为100 MS/s,脉冲阈值为20 mV,单个脉冲存储长度为100个点。采集100个周期后得到如图8(a)所示的脉冲峰值—相位的混叠序列,而对脉冲群进行特征提取,等效时频法、时频自相关法和时频熵法均给出了同样的分析结果(见图9),进行分类后则得到了2个子脉冲群,脉冲峰值—相位序列分别见图8(b)、(c)。图10所示A、B两类子脉冲群典型的正、负极性波形在时域仅有细微的差别(B类的时域波形在峰值处振荡较严重,而A类的较为光滑)。查看表明,是由于

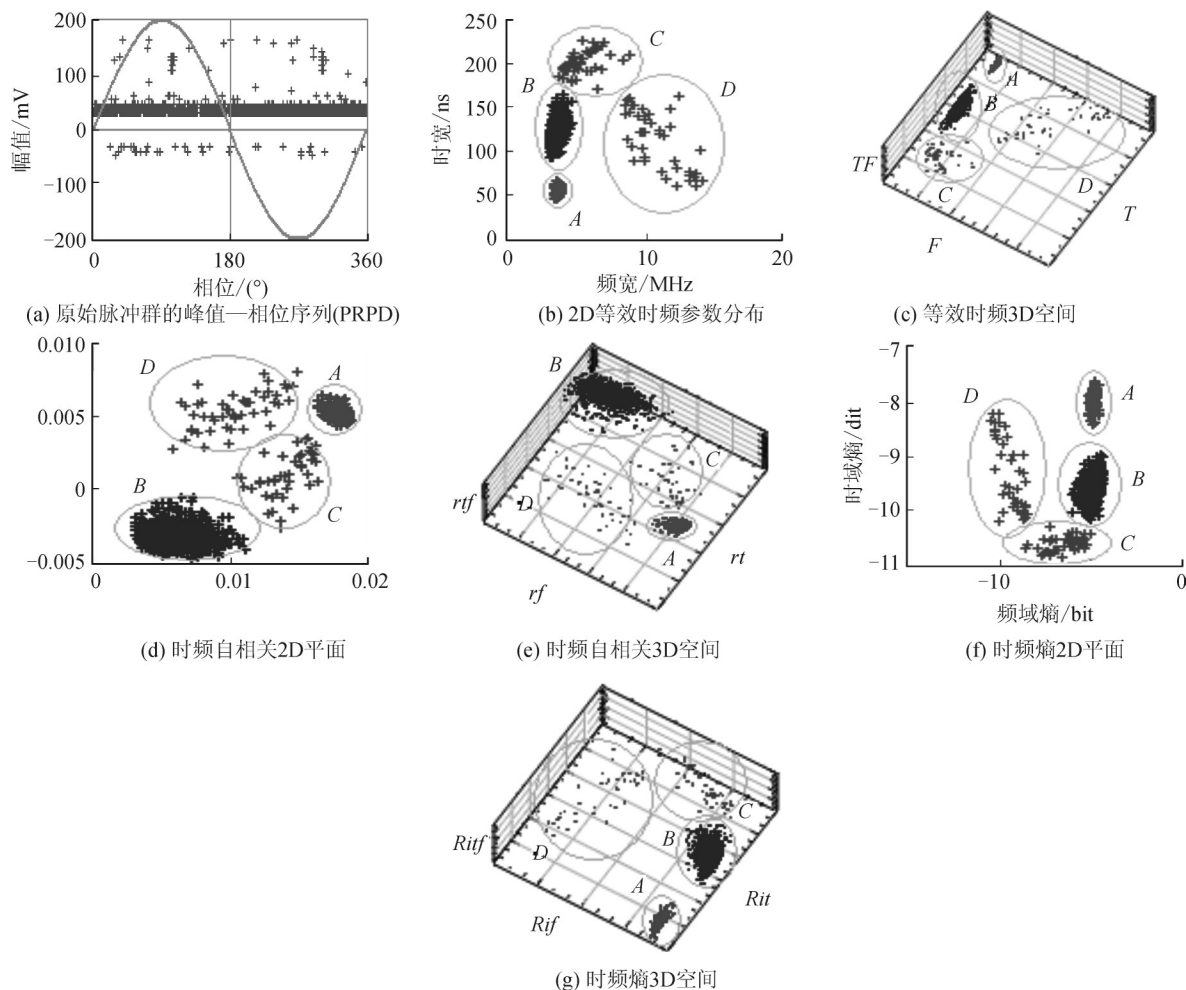


图5 脉冲群的PRPD及波形特征提取

Fig. 5 Waveshapes feature extraction and PRPD of the detected pulse sequence

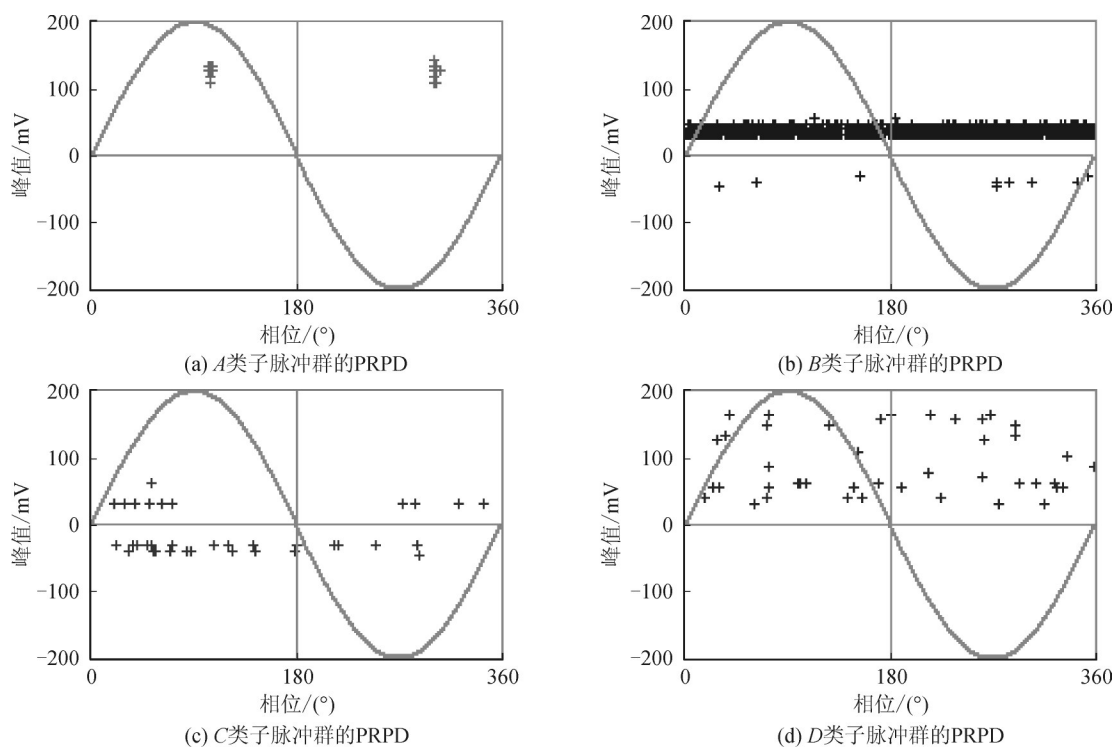


图6 图5中各子脉冲群对应的峰值—相位序列

Fig. 6 PD patterns of each sub-group in Fig. 5

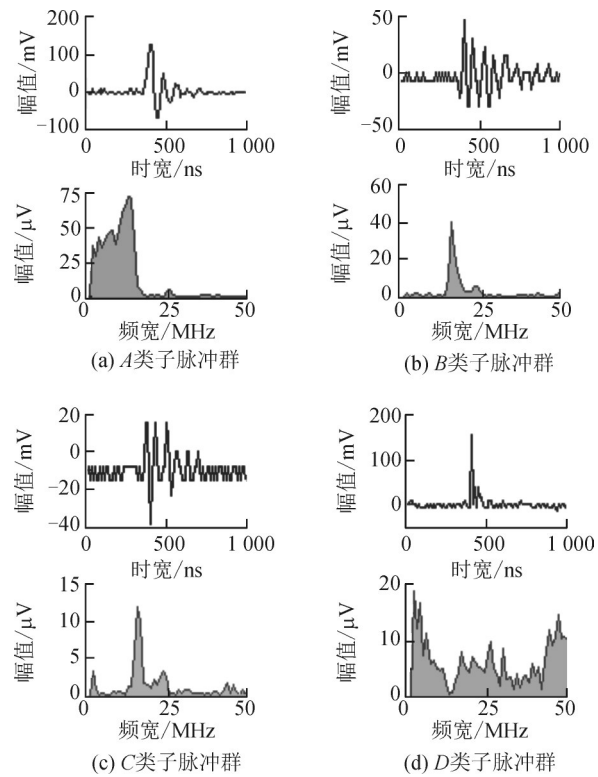


图7 图5中各子脉冲群对应典型的脉冲时、频域波形

Fig. 7 Typical pulse waveshapes in time and frequency domains of each sub-group in Fig. 5

悬浮电极上存在2个放电点。

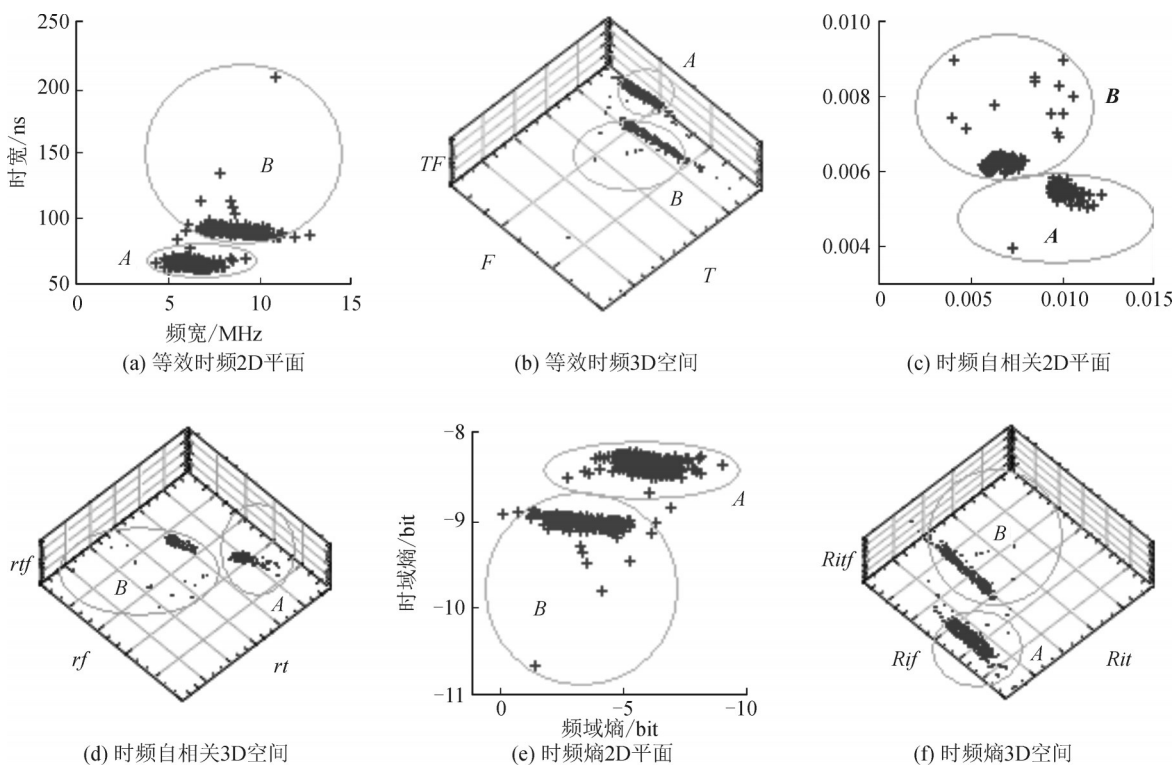


图9 图8(a)脉冲群的波形参数提取

Fig. 9 Waveshapes feature extraction of pulse sequence in Fig. 8(a)

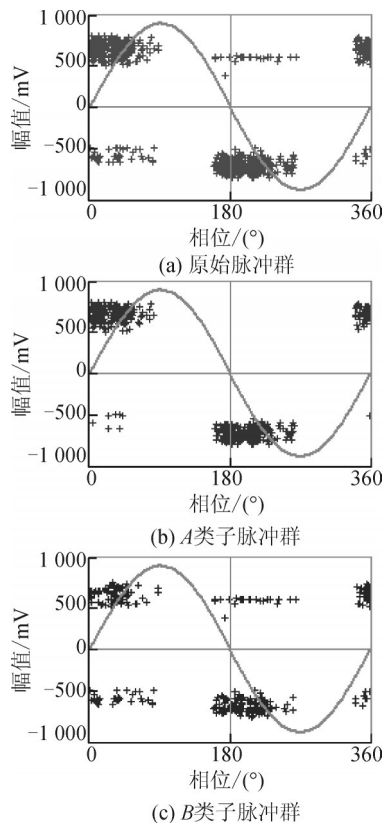


图8 脉冲群对应的峰值—相位序列(PRPD)

Fig. 8 PD patterns of each sub-group and the original group

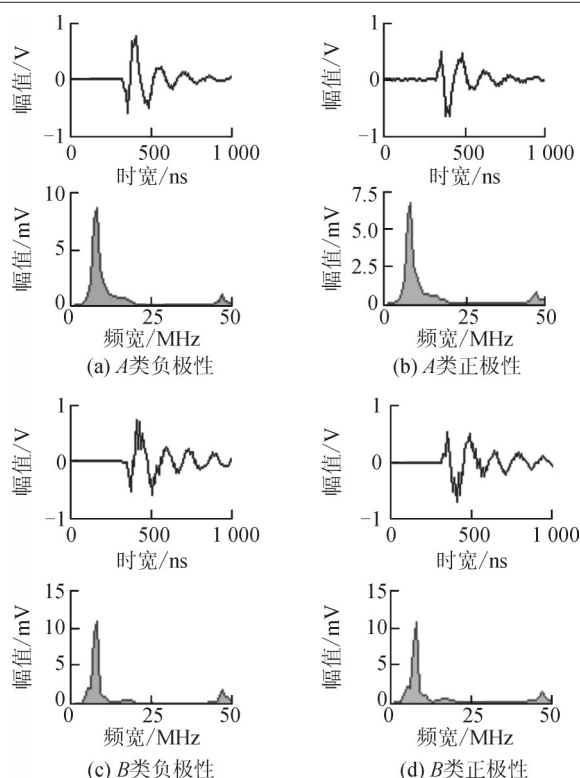


图10 图8中各子脉冲群对应典型的脉冲时、频域波形  
Fig. 10 Typical pulse waveshapes in time and frequency domains of each sub-group in Fig. 8

### 3.3 直流多局放源

试品采用油中尖端放电模型和油纸绝缘沿面放电模型并联,并在空气中的高压电极处设置1针尖以模拟空气中电晕,负极性下加压至检测软件界面中出现3种不同的脉冲时域波形,以确保3种放电脉冲群均存在。检测系统采样率设置为100 MS/s,脉冲阈值为10 mV,单个脉冲存储长度为100个点,

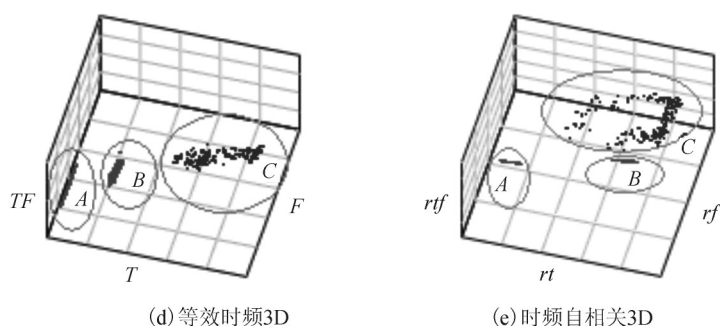
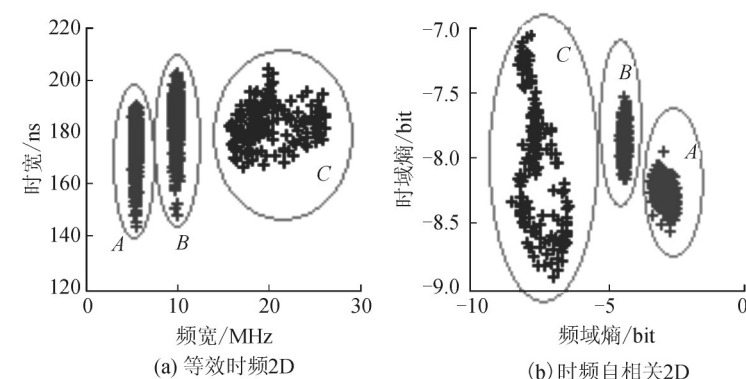


图12 图11(a)脉冲群的波形参数提取

Fig. 12 Waveshapes feature extraction of pulse sequence in Fig.11(a)

采集时长为1 min得到的原始脉冲群见图11(a)。进行3种时频算子特征提取的参数分布见图12,分类后子脉冲群对应的峰值—时间序列分别见图11(b)-(d),各峰值—时间序列对应的子脉冲群也均只含有一种典型电流脉冲波形,分别见图13(a)、(b)、(c)。

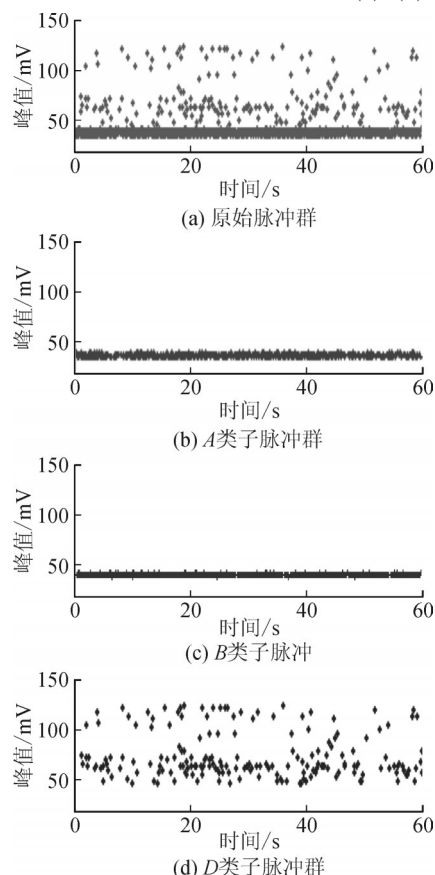
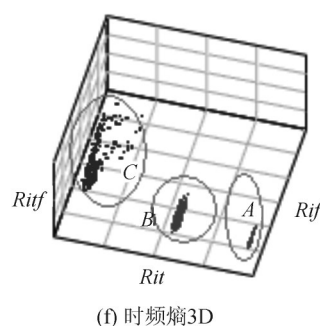
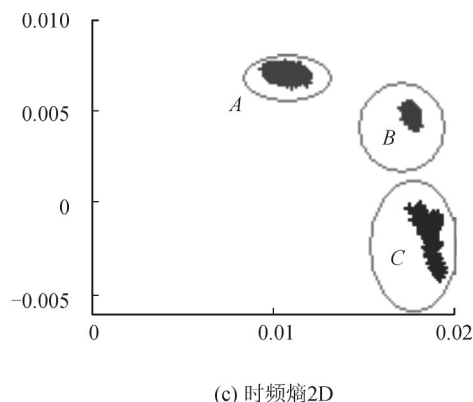


图11 脉冲群峰值—时间序列

Fig. 11 Peak-time series of pulse sequence



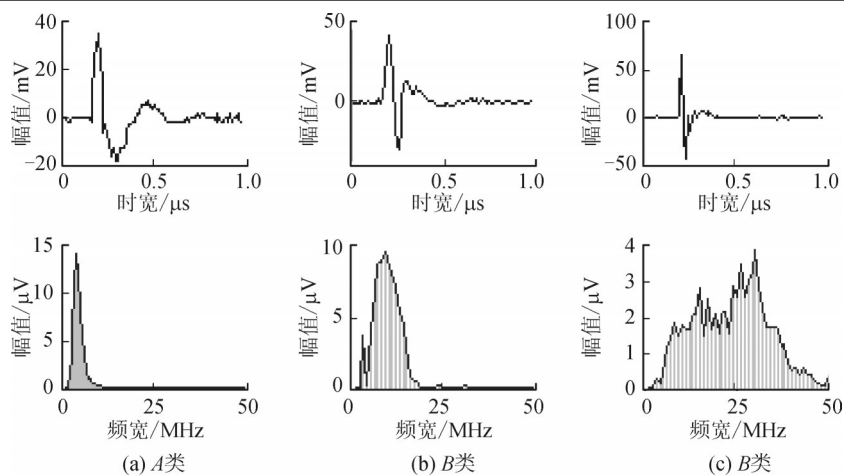


图13 各子脉冲群对应典型的脉冲时、频域波形

Fig. 13 Typical pulse waveshapes in time and frequency domains of each sub-group

#### 4 结论

1)多局放源检测和识别的关键技术之一为脉冲群波形的快速特征提取,通过对脉冲时、频域的波形进行非线性映射可以实现。

2)等效时频法、时频自相关法和时频熵法,在2D特征参数平面和3D特征参数空间除能够很好地表征同一类脉冲源的时频域波形特性外,均具有较好的可分类性,便于后期进行快速分类。

3)交、直流下的局放源和噪声源分离试验均表明提出的时频特征提取算子可用于开发多局放源检测和识别系统。

#### 参考文献:

- [1] 姜磊,朱德恒,谈克雄,等.基于人工神经网络的变压器绝缘模型放电模式识别的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(1):21-24.  
JIANG Lei, ZHU Deheng, TAN Kexiong, et al. ANN based discharge pattern recognition of insulation models of electrical transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 21-24.
- [2] 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 Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [3] 李军浩,司文荣,姚秀,等.油/纸绝缘沿面局部放电特性研究[J].西安交通大学学报,2009,43(6):108-112.  
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Partial discharge characteristics over oil/paper interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 108-112.
- [4] 王国利,袁鹏,李彦明.变压器超高频局部放电自动识别系统[J].电工电能新技术,2003,22(1):9-13.

WANG Guoli, YUAN Peng, LI Yanming. An automated recognition system of ultra-high-frequency PD in transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(1): 9-13.

- [5] 王国利,郑毅,沈嵩. AGA-BP神经网络用于变压器超高频局部放电模式识别[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(2): 6-9.  
WANG Guoli, ZHENG Yi, SHEN Song. AGA-BP neural network for UHF PD pattern recognition in transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(2): 6-9.
- [6] CONTIN A, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 335-348.
- [7] CAVALLINI A, MONTANARI G C, CONTIN A, et al. A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 23-30.
- [8] CAVALLINI A, MONTANARI G C, PULETTI F. A fuzzy logic algorithm to detect electrical trees in polymeric insulation systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1134-1144.
- [9] SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1663-1674.
- [10] 司文荣,李军浩,黎大健,等.基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 21-25.  
SI Wenrong, LI Junhao, LI Dajian, et al. Fast feature extraction technique for PD pulse shape based on wideband detection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 21-25.
- [11] 司文荣,李军浩,袁鹏,等.气体绝缘组合电器多局部

- 放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16):119-126.
- SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Detection and identification techniques for multi-PD source in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [12] 阮 羚, 高胜友, 郑 重, 等. 基于甚宽带脉冲电流法的局部放电监测系统[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 54-57.
- RUAN Ling, GAO Shengyou, ZHENG Zhong, et al. PD monitoring system based on wideband pulse current method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(3): 54-57.
- [13] 阮 羚, 郑 重, 高胜友, 等. 宽频带局部放电检测与分析辨识技术[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2473-2477.
- RUAN Ling, ZHENG Zhong, GAO Shengyou, et al. Detection and identification technologies of wideband PD[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2473-2477.
- [14] 鲍永胜. 局部放电脉冲波形特征提取及分类技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 28(28): 168-175.
- BAO Yongsheng. Partial discharge pulse waveform feature extraction and classification techniques[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 28(28): 168-175.
- [15] BABNIK T, AGGARWAL K, MOORE P J. Principal component and hierarchical cluster analyses as applied to transformer partial discharge data with particular reference to transformer condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1-9.
- [16] THEODORIDIS S, KOUTROUMBAS K. Pattern recognition[M]. Singapore: Elsevier, 2006: 1-6.
- [17] 孙才新, 李 新, 李 俭, 等. 小波与分形理论的互补性及其在局部放电模式识别中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 73-76.
- SUN Caixin, LI Xin, LI Jian, et al. Research on complementarity between wavelet and fractal theory and relevant application in PD pattern recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 73-76.
- [18] 胡昌华, 周 涛. 基于MATLAB的系统分析与设计: 时频分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 1-5.
- HU Changhua, ZHOU Tao. System analysis and design based on MATLAB: Time frequency analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 1-5.
- [19] 肖 燕, 黄成军, 江秀臣, 等. 波形匹配追踪算法在多局放脉冲提取中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 157-162.
- XIAO Yan, HUANG Chengjun, JIANG Xiuchen, et al. Application of wavelet-based matching pursuits algorithm of multiple PD pulses extracation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 157-162.
- [20] HIKITA K, NAKAMURA A, MIZUTANI T. Measurements of partial discharges by computer and analysis of partial discharge distribution by the monte carlo method[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(2): 453-468.
- 魏本刚(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为变压器类设备试验及计算仿真技术。