

DOI: 10.7667/PSPC171337

# 电厂开关柜局部放电振动信号降噪方法研究

黄涛<sup>1</sup>, 黄焯城<sup>1</sup>, 魏海增<sup>2</sup>, 马宏忠<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 针对电厂开关柜运行环境复杂, 振动干扰较强, 又需要保留振动干扰、分析振动干扰特征的问题, 将基于相空间重构的ICA降噪方法应用到电厂开关柜局放振动信号中, 进行信噪分离。首先依据相空间重构, 在不破坏信号本身动力学特征的情况下构造高维相空间矩阵。然后利用独立分量分析方法进行信噪分离, 提取有用振动信号。仿真信号和实际检测数据的应用表明, 所提方法与小波法降噪能力相当, 甚至更优; 且不需要考虑最优小波基和最佳分解层数, 自适应强, 易于实现; 且适用于电厂开关柜局放振动信号降噪。

**关键词:** 开关柜; 局部放电; 相空间重构; 独立分量分析; 降噪

## Study on de-noise method for partial discharge vibration signal of switch cabinet of power plant

HUANG Tao<sup>1</sup>, HUANG Xuancheng<sup>1</sup>, WEI Haizeng<sup>2</sup>, MA Hongzhong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In view of the problems of power switch cabinet such as complex operating environment, strong vibration disturbance, and needing to retain the vibration disturbance and analyze the characteristics of vibration disturbance, the Independent Component Analysis (ICA) de-noise method based on phase space reconstruction is applied to the partial discharge vibration signal of the switch cabinet of the power plant, and the signal separation is carried out. First, according to phase space reconstruction, this paper constructs the high dimension phase space matrix without destroying the dynamical characteristics of the signal itself. Then the independent component analysis method is used to separate the signal from the noise and extract the useful vibration signal. The application of the simulation signal and the actual data shows that the method is equivalent to or better than the wavelet method in de-noise. Besides, the optimal wavelet base and the optimal decomposition layer are not considered, and the self adaptation is strong and easy to implement. It is also suitable for de-noise of partial discharge vibration signals of switch cabinet of power plant.

This work is supported by Key Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Company (No. J2017070).

**Key words:** switch cabinet; partial discharge (PD); phase space reconstruction; independent component analysis (ICA); de-noise

## 0 引言

电厂开关柜作为电厂内重要的控制装置, 其是否可靠地运行直接关系到电厂的安全。长期的运行和检修经验表明, 开关柜内部的绝缘事故是导致其运行故障的一个主要原因<sup>[1-3]</sup>。而开关柜内部局部放电又是导致其内部绝缘老化、发生绝缘故障的重要因素<sup>[4-6]</sup>。因此, 准确提取出开关柜局部放电故障信

号、诊断局部放电故障对整个电厂的可靠运行具有重要意义。由于电厂开关柜运行环境复杂, 开关柜发生局部放电时, 信号十分微弱, 常被湮没在强烈的干扰噪声中, 影响开关柜局部放电检测结果的准确性。所以, 消除开关柜局部放电信号噪声是提高检测结果准确性的关键。

根据电厂工作人员介绍, 根据局放检测方法可将干扰源分为两类: 一是振动干扰, 主要来源于各个开关柜输出源远端(电动机)随动力电缆传输的振动及开关柜所处大环境的背景振动两部分; 二是电磁干扰, 分为脉冲电磁波对振动传感器的测量干扰、

基金项目: 江苏省电力公司重点科技项目资助(J2017070); 江苏方天电力技术有限公司科技项目资助(0FW-17677-DJ)

空间电磁场对暂态对地电压(Transient Earth Voltage, TEV)测量的干扰以及开关柜内部干扰,细分为线圈类设备的电磁波干扰及故障源的干扰。因此,选择了振动信号作为检测电厂开关柜局部放电故障的一种方法。一方面,振动信号常湮没在强烈的振动干扰噪声中,影响开关柜局部放电检测结果;另一方面,为了分析振动干扰特征,需要保留振动干扰信号,所以,选择了独立分析分析方法(Independent Component Analysis, ICA)提取开关柜局放振动信号,同时保留振动干扰信号。

独立分量分析方法可实现对混合信号中具有统计独立性的信号分量进行有效分离。但是传统的ICA方法在应用中要求观测通道的个数大于等于振动源信号的个数<sup>[7-8]</sup>。在实际工程中,观测信号很难满足ICA方法的这一假设条件,限制了ICA方法的应用范围。而相空间重构可以通过单一的系统输出时间序列来构造一组表征原系统动力学特性的坐标分量<sup>[9]</sup>,弥补了传统ICA方法的不足。

因此,结合ICA方法和相空间重构各自的优点,本文提出了一种基于相空间重构的ICA降噪方法,并将该方法应用于电厂开关柜局部放电振动信号的降噪中。通过该方法在仿真信号和实际信号中的处理,表明该方法降噪效果良好,具有优势,验证了该方法的可行性及有效性。

## 1 独立分量分析数学模型

ICA实际上是一种优化(寻优)过程,即如何使分离出的独立成分最大限度地逼近各信号源<sup>[10]</sup>。ICA包括优化判据(目标函数)和寻优算法两个方面。目标函数是ICA方法的核心,最小化互信息量法<sup>[11-12]</sup>、信息传输最大化法(负熵最大化法)<sup>[13]</sup>、极大似然估计法<sup>[14]</sup>等是几种比较典型的建立目标函数的方法。而寻优算法则是一种通过迭代计算使得目标函数达到最大值或最小值的学习算法,常用的学习算法有随机梯度法和自然梯度法。

ICA模型分为混合和分离两个方面,其原理框图如图1所示。

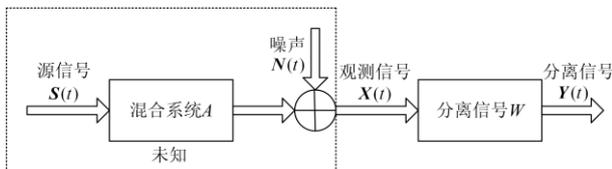


图1 ICA原理框图

Fig. 1 ICA schematic diagram

观测信号  $X(t)$  满足

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad t=1, 2, \dots \quad (1)$$

式中:  $A$  为  $M \times N$  维混合矩阵,  $M$  为观测信号的个数,  $N$  为源信号的个数; 源信号  $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ ; 观测信号  $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ ;  $N(t)$  为  $M$  维观测噪声向量, 即  $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 。

ICA方法就是在源信号  $S(t)$  中各成分未知且相互独立和  $A$  未知的情况下,由观测信号  $X(t)$  估计分离矩阵  $W$ , 用输出信号  $Y(t)$  逼近  $S(t)$  <sup>[15]</sup>。

$$Y(t) = W^T X(t) \quad t=1, 2, \dots \quad (2)$$

而快速独立分量分析(FastICA)算法又称固定点算法,是基于非高斯性最大化原理,使用固定点迭代理论寻找矩阵  $W$  的非高斯性最大值。该算法采用牛顿迭代算法对观测变量  $X(t)$  的大量采样点进行批处理,以最大化负熵作为目标函数,每次从观测信号中分离出一个独立成分,是进行ICA处理的一种快速算法。因此,本文选用FastICA算法进行数据分析。

## 2 相空间重构

### 2.1 概念

相空间重构是由Takens提出的一种非线性问题处理方法,其目的在于通过一维的时间序列反向构造出原系统的相空间结构<sup>[16]</sup>。相空间重构的方法有导数坐标法、奇异值分析法和延迟时间法,目前较为常用的是延迟时间法<sup>[17]</sup>。

给定一个时间序列  $x = x_n, n=1, 2, \dots, N$ , 嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$  的相空间矩阵  $x$  通过行向量来定义。

$$x = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}] \quad (3)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, L, L=N-(m-1)\tau, N$  为原始时间序列点数,  $L$  为重构后相空间矢量个数;  $x$  为重构后的相空间矢量;  $\tau$  为重构采样间隔,即延迟时间;  $m$  为嵌入维数。

相空间重构的关键在于正确选择嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$ , 所以选择恰当的嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$ , 重构相空间才能够充分反映时间序列的内部特征。

### 2.2 互信息法确定时间延迟

互信息法是计算相空间时间延迟的一种有效方法,且不受噪声的干扰<sup>[18]</sup>。考虑到开关柜局放振动信号干扰较强,本文选择互信息法确定时间延迟。假设存在两个系统  $Q$  和  $S$ , 依据信息论和互信息函数的定义,如式(4)所示。

$$I(Q,S) = H(Q) + H(S) - H(Q,S) \quad (4)$$

式中:  $H(Q)$ 、 $H(S)$  分别为系统  $Q$ 、 $S$  的熵;  $H(Q,S)$  为系统  $Q$ 、 $S$  的联合熵。

对于混沌时间序列, 互信息法首先计算得到时间序列的互信息函数, 然后将互信息函数的第一个极小值所对应的  $\tau$  作为最优时间延迟。分别令  $\tau=1, 2, \dots, n$ , 计算互信息函数  $I(x, y)$ : 首先, 计算  $x(i)$  与  $x(i+\tau)$  的相关度; 然后令  $y(j) = x(i+\tau)$  进行信息熵计算。对于时间序列  $x(i)$ 、 $y(j)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $j=1, 2, \dots, N-\tau$ ,  $N$  为时间序列长度, 根据平均信息熵  $H(x)$ , 联合  $H(x, y)$  的定义, 由此得到互信息函数  $I(x, y)$ , 如式(5)一式(7)所示。

$$H(x) = -\sum_{i=1}^N P[x(i)] \log\{P[x(i)]\} \quad (5)$$

$$H(x, y) = -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P[x(i), y(j)] \log\{P[x(i), y(j)]\} \quad (6)$$

$$I(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (7)$$

式中,  $M=N-\tau$ 。

由此得到互信息函数  $I(x, y)$  的第一个极小值所对应的时间延迟为最优时间延迟  $\tau$ 。

### 2.3 cao 法确定最佳嵌入维数

cao 法是确定相空间重构最佳嵌入维数的常用方法, 只需要时间延迟作为先验条件, 因此本文选择 cao 法确定最佳嵌入维数。通过互信息法求得  $\tau$  后, 将嵌入维数  $m$  依次取值, 计算两临近点距离随  $m$  的变化情况。对于  $m$ , 相空间中一点  $X(i) = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\}$  都存在某一点  $X(j) = \{x(j), x(j+\tau), \dots, x(j+(m-1)\tau)\}$  与之最近,  $X(i)$  与  $X(j)$  距离记为  $R(i, m)$ , 且

$$R(i, m) = \|X(i) - X(j)\| \quad (8)$$

式中,  $\|\bullet\|$  为向量范数, 可以采用 2 范数或  $\infty$  范数。

当嵌入维数增加到  $m+1$  时, 两点重构记为

$$X(i) = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+m\tau)\} \quad (9)$$

$$X(j) = \{x(j), x(j+\tau), \dots, x(j+m\tau)\} \quad (10)$$

此时距离记为

$$R(i, m+1) = \|X(i) - X(j)\| \quad (11)$$

令

$$a(i, m) = \frac{R(i, m)}{R(i, m+1)}, \quad i=1, 2, \dots, N-m\tau \quad (12)$$

定义

$$E(m) = \frac{1}{N-m\tau} \sum_{i=1}^{N-m\tau} a(i, m) \quad (13)$$

$$E_1(m) = \frac{E(m+1)}{E(m)} \quad (14)$$

在混沌时间序列中, 当重构得到吸引子达到完全伸展时, 邻近点的距离会达到稳定。因此, 利用 cao 法计算嵌入维数  $m$  时, 随着嵌入维数  $m$  的增加, 两邻近点距离不随之变化, 此时  $m$  便为所求最小嵌入维数。

### 3 基于相空间重构的 ICA 降噪方法

一维信号经过相空间重构形成高维相空间, 也即多维信号。将多维信号作为 ICA 算法的输入, 分离得到一系列的独立分量, 独立分量分析信号分离的作用决定了这些独立分量之间具有统计独立性, 能够反映出观测信号中的隐含信息和特征, 有用信号和噪声信号存在于这一系列独立成分中, 即有用信号和噪声信号在独立成分空间中实现了分离。舍弃独立成分中的噪声信号, 选择独立成分中的有用信号重建, 实现噪声的消除。

为了实现噪声的消除, 首先将独立成分中的有用信号构造一个有用信号空间, 再将有用信号空间中的每一个有用信号成分乘上混合矩阵的对应列, 构造出高维相空间的一个子相空间。

$$S'' = a'' y'' \quad (15)$$

式中:  $S''$  为高维相空间的一个子相空间;  $y''$  为有用信号空间;  $a''$  为混合矩阵的对应列空间。

因此, 降噪后的振动信号  $\hat{x}$  为

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S''_i \quad (16)$$

式中:  $S''_i$  为子相空间第  $i$  个向量;  $n$  为子相空间向量个数。

基于相空间重构的 ICA 降噪方法具体流程步骤如下:

- ① 信号预处理;
- ② 利用互信息法计算时间延迟  $\tau$ ;
- ③ 根据步骤②计算的时间延迟  $\tau$ , 利用 cao 法计算嵌入维数  $m$ ;
- ④ 利用选定的  $\tau$  和  $m$  重构高维相空间矩阵  $\mathbf{X}$ ;
- ⑤ 将高维相空间矩阵  $\mathbf{X}$  作为独立分量分析的输入, 分离得到一系列独立分量;
- ⑥ 舍弃独立分量中的噪声信号, 选择独立分量中的有用信号重建, 实现噪声的消除。

### 4 仿真信号分析

为了分析验证文中降噪方法的有效性及其优越性, 采用的数学仿真信号模型为

$$x = \sin(2 \times 10\pi t) + 2\sin(2 \times 20\pi t) + 0.5\sin(2 \times 50\pi t) + n(t) \quad (17)$$

式中,  $n(t)$ 为用 `awgn` 函数所加的白噪声信号。仿真过程中采样点取 1 000, 采样频率为 1 000 Hz, 仿真信号的信噪比设为 1 dB。原始信号波形及加噪信号波形如图 2 所示。

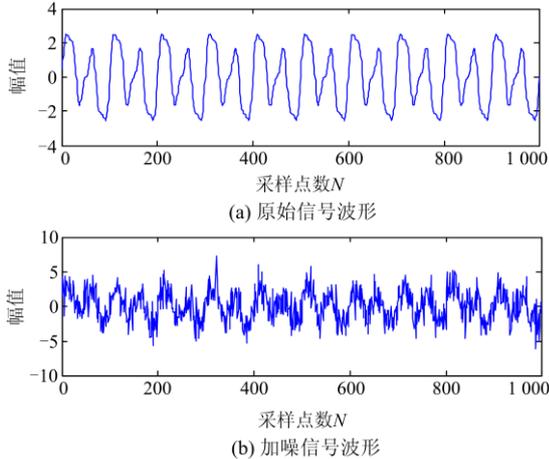


图 2 仿真信号

Fig. 2 Simulation signal

采用文中方法对仿真加噪信号进行降噪, 首先利用互信息法计算时间延迟, 互信息函数  $I(x, y)$  随时间延迟  $\tau$  变化如图 3 所示。

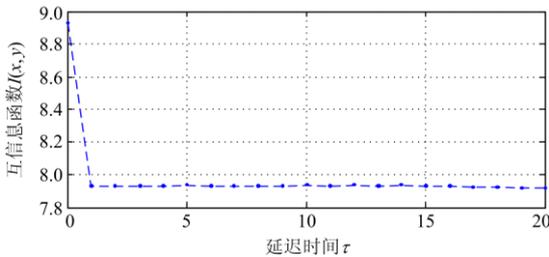


图 3 互信息函数  $I(x,y)$  变化图

Fig. 3 Mutual information function  $I(x,y)$  change chart

从图 3 上看, 互信息函数  $I(x, y)$  的第一个极小值所对应的时间延迟为 1, 确定时间延迟, 并将其作为 `cao` 法的先验条件计算最佳嵌入维数  $m$ , `cao` 法  $E_1(m)$  函数变化如图 4 所示。

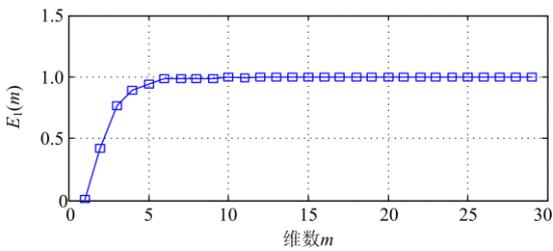


图 4 `cao` 法  $E_1(m)$  函数变化图

Fig. 4  $E_1(m)$  function change diagram of `cao` method

从图 4 可以看出, 在嵌入维数  $m=12$  之后,

$E_1(m)$  函数不再变化, 因此, 选择 12 作为最佳嵌入维数。

根据选定的时间延迟  $\tau$  和最佳嵌入维数  $m$ , 重构高维相空间矩阵  $\mathbf{X}$ , 并将高维相空间矩阵作为 ICA 方法的输入, 对加噪仿真信号进行信噪分离, 在得到的一系列独立分量中, 舍弃噪声信号成分, 并将有用信号成分重构, 得到降噪后的信号如图 5(a)所示。为了验证文中噪声方法的效果, 同时利用小波降噪法<sup>[19]</sup>对加噪仿真信号进行降噪处理。小波基采用常用的 `db3` 小波和 `sym5` 小波, 两种小波方法均进行 3 层和 4 层分解, 小波法降噪后的信号如图 5(b)~图 5(e)所示。为便于观察, 均将降噪结果进行归一化处理。

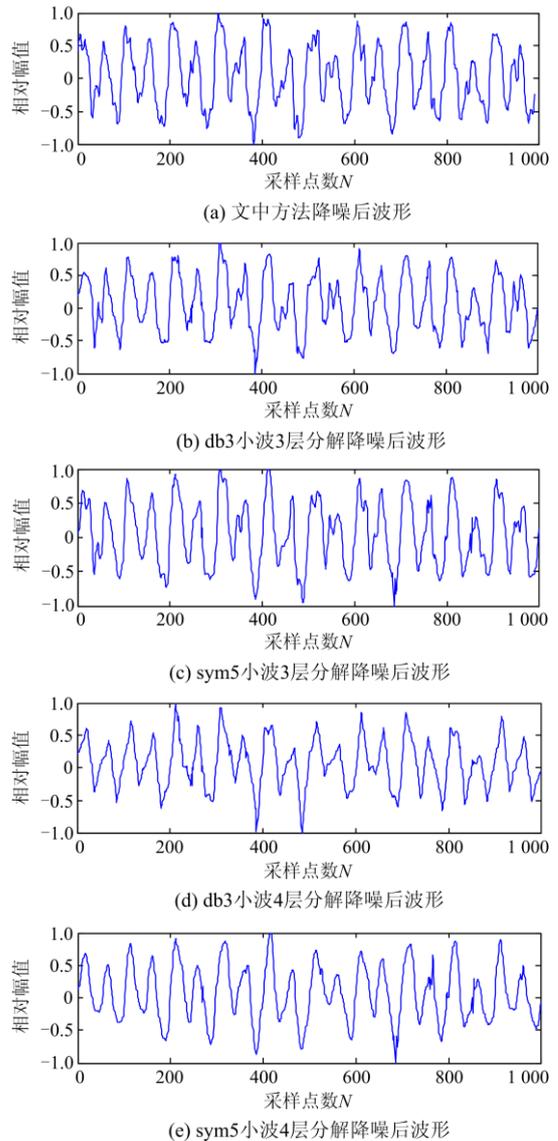


图 5 降噪效果对比

Fig. 5 De-noise effect comparison

从图 5 可以看出,文中方法和小波法均能有效抑制噪声,但很难从图中直观地看出降噪效果的好坏。为了从理论的角度来说明降噪效果,引入了信噪比(SNR)、波形相似系数(NCC)和均方差(MSE)作为评价标准。

由信噪比(SNR)、波形相似系数(NCC)和均方差(MSE)的定义可知:信噪比越大,波形相似系数越大,均方差越小,降噪效果越好。各方法降噪后的 SNR、NCC、MSE 计算结果如表 1 所示。

表 1 SNR=1 时降噪效果对比

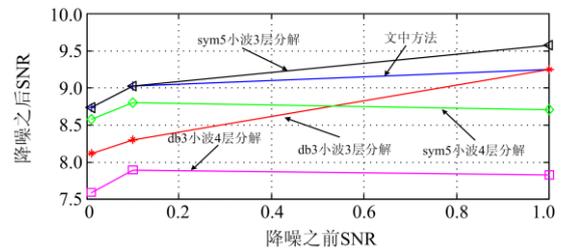
Table 1 Comparison of de-noise effects in SNR=1

方法	SNR	NCC	MSE
文中方法	9.255 6	0.951 1	0.539 3
db3 3层分解	9.250 2	0.945 1	0.558 5
小波法 4层分解	7.822 7	0.916 0	0.658 3
sym5 3层分解	9.578 0	0.949 0	0.537 9
小波法 4层分解	8.709 1	0.933 0	0.594 4

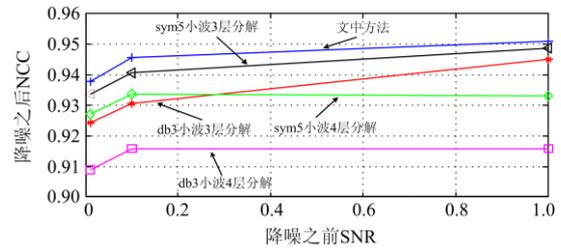
由表 1 可知,文中方法与小波法均能极大地提高有用信号的信噪比,两者降噪效果接近。但文中方法相对于小波法,波形相似系数较大,均方差较小,表明文中方法在保持波形畸变方面更好。同时可以看出, sym5 小波基要比 db3 小波基降噪效果好,而无论 sym5 小波基还是 db3 小波基,3 层分解比 4 层分解降噪效果更优,其原因为 4 层分解属于过度分解,去掉了一些高能量信号。小波法降噪需要选取合适的小波基和确定最佳分解层数,选取不同的小波基和分解层数都会对降噪效果产生一定的影响。因此小波降噪有一定的局限性,而文中方法不存在这个问题。

改变上述仿真过程中的噪声强度,进行多次仿真研究。设置仿真信号的信噪比为 0.1 dB 和 0.01 dB,各方法降噪后的 SNR、NCC、MSE 计算结果如图 6 所示。

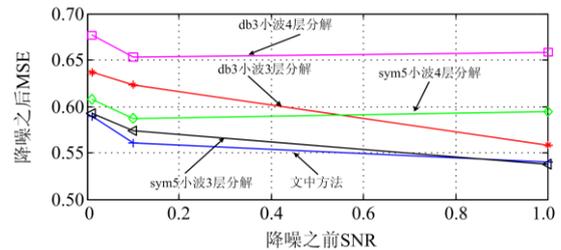
由图 6(a)可知,随着噪声强度的增加,降噪后的信噪比整体逐渐减小;文中方法的降噪效果与小波法相当,甚至优于小波法;不同小波基和分解层数有不同的降噪效果。由图 6(b)、图 6(c)可知,随着噪声强度的增加,降噪后的波形相似系数整体逐渐减小,均方差随之增加,降噪效果减弱;文中方法的 NCC 值和 MSE 值始终好于小波法,也表明了对于不同强度的噪声,文中方法在保持波形畸变方面始终较好。因此,文中方法的降噪能力与小波法相当,甚至优于小波法。



(a) 不同信噪比下降噪后 SNR



(b) 不同信噪比下降噪后 NCC



(c) 不同信噪比下降噪后 MSE

图 6 不同信噪比下降噪后 SNR、NCC、MSE

Fig. 6 SNR, NCC, and MSE after de-noise under different SNR

此外,文中方法还存在一定的优势。首先文中方法利用相空间重构对信号进行延迟构造高维相空间矩阵,可以反映信号自身的动力学特征;其次,文中方法不需要对信号进行多尺度分解,自适应强,易于实现,而小波法降噪在多尺度分解时还需要选择合适的小波基和最佳分解层数,有一定的局限性。

## 5 实测数据分析

实际电厂环境干扰较强,仿真并不能完全模拟其实际情况。为了验证文中方法对电厂开关柜局放振动信号降噪的有效性,采集了南京某电厂控制#1A 汽泵前置泵的开关柜实际运行时的局放振动信号进行分析,采样率为 16 kHz,取该开关柜实际运行时局放振动信号的 16 000 个数据,如图 7 所示。

利用文中方法对实际运行局放振动信号进行降噪。首先由互信息法确定时间延迟,互信息函数  $I(x, y)$  变化如图 8 所示,取时间延迟为 3,并将其作为 cao 法的先验条件,计算最佳嵌入维数,cao 法  $E_1(m)$  函数变化如图 9 所示,确定最佳嵌入维数为 18,构造高维相空间矩阵。

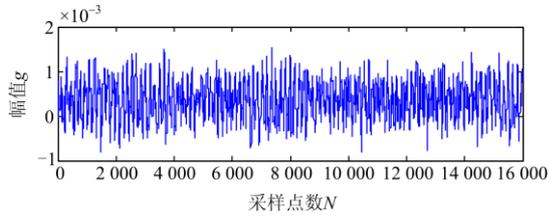


图 7 实际运行局放振动信号  
Fig. 7 Actual operation PD vibration signal

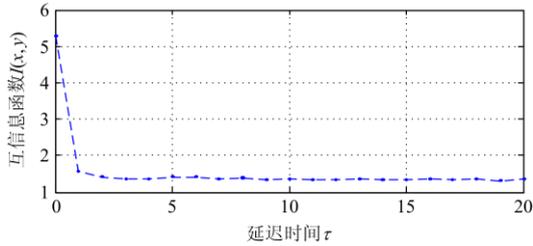


图 8 互信息函数  $I(x,y)$  变化图  
Fig. 8 Mutual information function  $I(x,y)$  change chart

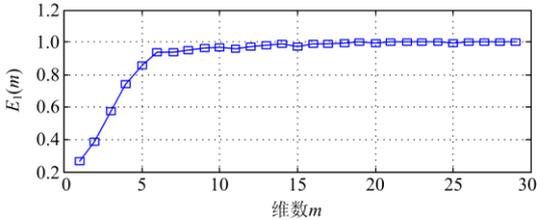
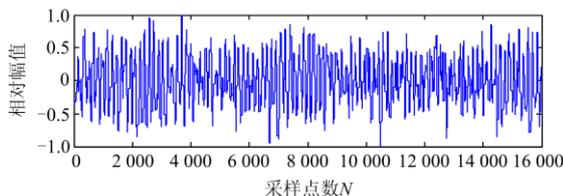


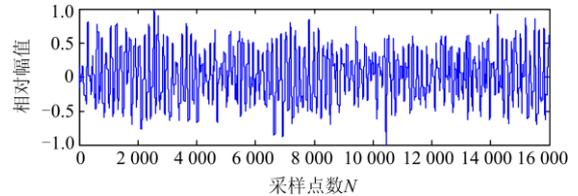
图 9 cao 法  $E_1(m)$  函数变化图  
Fig. 9  $E_1(m)$  function change diagram of cao method

将高维相空间矩阵作为 ICA 方法的输入, 对实际运行时开关柜局放振动信号进行信噪分离, 舍弃噪声信号成分, 并将有用信号成分重构, 得到降噪后信号如图 10(a)所示。同时利用小波降噪法对实际运行时开关柜局放振动信号进行处理, 小波基仍选用常用的 db3 小波和 sym5 小波, 两种小波方法均进行 5 层和 6 层分解, 小波法降噪后的信号如图 10(b)~图 10(e)所示。为便于观察, 均将降噪结果进行归一化处理。

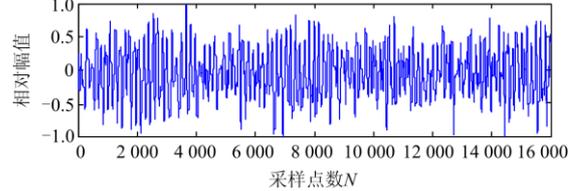
图 10 与图 7 相比, 信噪比得到有效改善, 但由于实测不到纯净的原始信号, 不能直接计算 SNR、NCC 以及 MSE。又由于文中方法和小波法降噪效果较为接近, 取文中方法和小波法的均值作为原始纯净



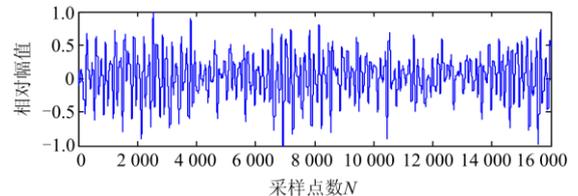
(a) 文中方法降噪后波形



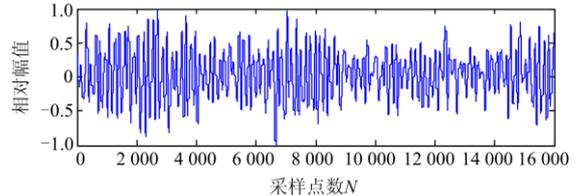
(b) db3小波5层分解降噪后波形



(c) sym5小波5层分解降噪后波形



(d) db3小波6层分解降噪后波形



(e) sym5小波6层分解降噪后波形

图 10 降噪效果对比

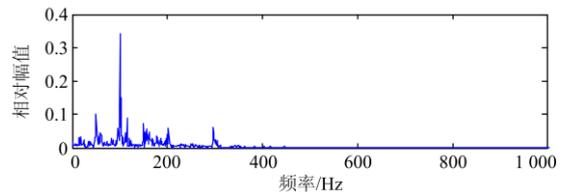
Fig. 10 De-noise effect comparison

信号估计值<sup>[20-22]</sup>, 计算 SNR、NCC 以及 MSE。计算结果如表 2 所示。表 2 的计算结果作为参考, 同时又将降噪后的信号进行 FFT 变换, 如图 11 所示。

表 2 实测信号降噪效果对比

Table 2 De-noise effect comparison of actual signal

方法	SNR	NCC	MSE/10 <sup>-4</sup>
文中方法	2.793 0	0.987 6	4.549 3
db3 5 层分解	2.794 9	0.985 2	4.560 1
小波法 6 层分解	1.554 5	0.950 7	5.260 1
sym5 5 层分解	2.802 3	0.979 6	4.556 3
小波法 6 层分解	1.660 8	0.953 9	5.196 2



(a) 文中方法降噪后信号FFT变换

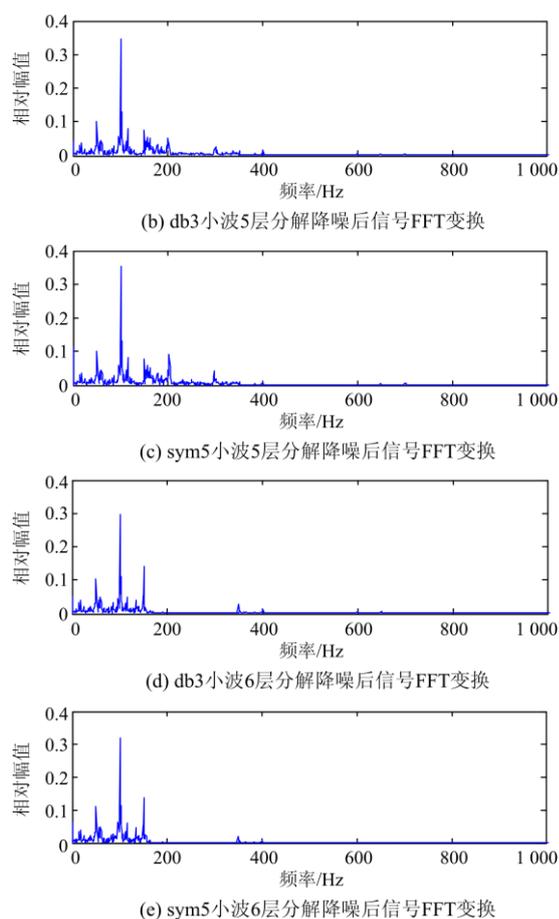


图 11 降噪后信号 FFT 变换

Fig. 11 FFT transform of de-noise signal

从图 11 可以看出,文中方法和小波法均能有效抑制高频噪声信号,但小波 6 层分解同时抑制了 200 Hz 和 300 Hz 的高能量信号,属于降噪过度。结合表 2 可知,文中方法和小波 5 层分解降噪效果相当,但文中方法的 NCC 值和 MSE 值均好于小波 5 层分解,文中方法在保持原始信号波形方面更有优势。通过对实测数据的分析,进一步验证了文中方法的有效性和可行性。

## 6 结语

电厂开关柜运行环境复杂,局放振动信号干扰较强,同时又需要保留振动干扰信号,分析振动干扰特征,因此,选择了独立分量分析方法(ICA)提取开关柜局放振动信号,同时保留振动干扰信号。首先依据相空间重构,在不破坏信号本身动力学特征的情况下构造高维相空间矩阵,然后利用独立分量分析方法进行信噪分离,提取有用振动信号。通过在仿真信号和实际检测数据中的应用表明,该方法与小波法降噪能力相当,甚至更优,且不需要考

虑最优小波基和最佳分解层数,自适应强,易于实现。

## 参考文献

- [1] 潘长明, 刘刚, 熊炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.  
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and counter measures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [2] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 92-101. DOI: 10.1186/s41601-017-0039-z.
- [3] 陈曦, 潘成, 乌江, 等. 绝缘材料内部气隙中局部放电特性的影响因素[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 86-92.  
CHEN Xi, PAN Cheng, WU Jiang, et al. Influencing factors on characteristics of partial discharge in void of insulating materials[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 86-92.
- [4] 汪金刚, 林伟, 王志, 等. 基于紫外检测的开关柜电弧在线检测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 128-133, 152.  
WANG Jingang, LIN Wei, WANG Zhi, et al. Online detecting device for switchgear arc based on ultraviolet detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 128-133, 152.
- [5] 王有元, 刘强, 陆国俊, 等. 开关柜结构对超高频电磁波传播特性的影响分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 293-300.  
WANG Youyuan, LIU Qiang, LU Guojun, et al. Propagation characteristics of ultra-high frequency electromagnetic wave influenced by the switchgear structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 293-300.
- [6] 郑建康, 郑雷, 孙浩杰, 等. 内置式开关柜绝缘状态监测智能装置的研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 46-50.  
ZHENG Jiankang, ZHENG Lei, SUN Haojie, et al. Study on build-in smart device for insulation-condition monitoring of metal-clad switchgear[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 46-50.
- [7] 艾永乐, 张王飞, 闫玲玲, 等. 基于引入松弛因子的改进式单通道 FastICA 的间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 90-94.  
AI Yongle, ZHANG Wangfei, YAN Lingling, et al. Interharmonic detection method based on improved single channel FastICA with relaxation factor[J]. Power System

- Protection and Control, 2017, 45(16): 90-94.
- [8] 张文民, 徐樊浩, 张慧娟, 等. 基于 EMD 的单通道变压器振动信号盲分离[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 42-46.  
ZHANG Wenmin, XU Fanhao, ZHANG Huijuan, et al. Blind separation of single channel transformer vibration signal based on EMD[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 42-46.
- [9] 顾熹, 廖志伟. 基于相空间重构和高斯过程回归的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 73-79.  
GU Xi, LIAO Zhiwei. Short-term load forecasting based on phase space reconstruction and Gaussian process regression[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 73-79.
- [10] 余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] HYVARINEN A. Survey on independent component analysis[J]. Neural Computing Surveys, 1999, 2(4): 94-128.
- [12] 万敏. 独立分量分析的神经网络方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
WAN Min. Independent component analysis by neural networks approach[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [13] PHAM D, GARRAT P. Blind separation of mixture of independent sources through a quasi-maximum likelihood approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 9(1): 1457-1482.
- [14] HYVARINEN A, OJA E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [15] 杨凯, 张认成, 杨建红, 等. 基于频率约束独立分量分析的开关柜局部放电故障识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3452-3460.  
YANG Kai, ZHANG Rencheng, YANG Jianhong, et al. Partial discharge fault identification of switchgear based on frequency constrained independent component analysis[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3452-3460.
- [16] 张文超, 杨鼎才. 语音信号相空间重构中时间延迟的选择方法[J]. 电子测量技术, 2007, 30(5): 35-37, 63.  
ZHANG Wenchao, YANG Dingcai. Method to determine delay time of speech signal in reconstructed phase space[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(5): 35-37, 63.
- [17] 白焕莉. 基于独立分量分析的煤矿机械缺陷超声信号处理技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.  
BAI Huanli. Study on ultrasonic signal technology in defects of coal mine machinery based on independent component analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [18] 许岩. 含噪混沌时间序列相空间重构参数估计[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.  
XU Yan. Estimating parameters in phase space reconstruction of noisy chaotic time series[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [19] 肖文龙, 王维博, 刘勇, 等. 基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 90-96.  
XIAO Wenlong, WANG Weibo, LIU Yong, et al. Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 90-96.
- [20] 贾嵘, 徐其惠, 田录林, 等. 基于经验模态分解和固有模态函数重构的局部放电去噪方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 13-18.  
JIA Rong, XU Qihui, TIAN Lulin, et al. De-noising of partial discharge based on empirical mode decomposition and intrinsic mode function reconstruction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 13-18.
- [21] 王军涛, 郑群珍, 苏展, 等. 具有漏泄时滞和时变区间时滞的递归神经网络新的稳定性准则[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 166-171, 177.  
WANG Juntao, ZHENG Qunzhen, SU Zhan, et al. New stability criteria for recurrent neural networks with leakage delay and time-varying interval delay[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 166-171, 177.
- [22] 杨毅, 高庆水, 张楚, 等. CPR1000 技术核电机组高频振动故障诊断与处理[J]. 广东电力, 2016, 29(1): 22-26.  
YANG Yi, GAO Qingshui, ZHANG Chu, et al. Fault Diagnosis and Processing on high frequency vibration of CPR1000 nuclear power unit[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(1): 22-26.

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2017-11-29

作者简介:

黄涛(1990—), 男, 硕士, 研究方向为电力设备故障检测技术. E-mail: 459445906@qq.com

(编辑 魏小丽)