

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106198

基于联合近似对角化的多源局部 放电混合信号分离方法研究

刘鑫 朱宁宁 郑祥

(大连交通大学 电气信息工程学院 大连 116021)

摘要: 电气设备内存在多个局部放电源时,会产生混合的局部放电信号,这会给后续信号识别等工作带来困难。针对该问题,以电气设备内同时存在3种不同绝缘缺陷为例,分别用3种指数型信号模型和3种特高频局放数学模型构造了两组混合局放信号,以模拟不同电气设备产生的混合信号,并提出使用一种通用的基于联合近似对角化(JADE)的盲源分离算法来分离信号,接着使用相似系数和信号干扰比两种评价参数来描述分离算法的性能,最后在信号中加入适当的噪声,测试了算法的鲁棒性。仿真结果表明,该方法能够有效分离信号,分离信号与源信号的相似系数分别在0.90以上,信号干扰比在9.0以上,且具备一定的鲁棒性,为后续信号识别工作打下了一定的基础。

关键词: 局部放电;联合近似对角化(JADE);混合信号;盲源分离

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Multi-source partial discharge mixed signal separation method based on JADE algorithm

Liu Xin Zhu Ningning Zheng Xiang

(School of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China)

Abstract: When there are multiple partial discharge sources in electrical equipment, mixed partial discharge signals will be generated, which will bring difficulties to subsequent signals identification and other work. Aiming at this problem, this paper to electrical equipment inside at the same time there are three different insulation defects, for example, each with three kinds of signal model with exponential and three kinds of UHF bureau put mathematical model is constructed in the two groups mixed signals, partial discharge to simulate different mixed signals generated by electrical equipment, and put forward using a JADE based on blind source separation algorithm to separate the signal, and then use the similarity coefficient and signal interference ratio of two kinds of evaluation parameters to describe the separation performance of the algorithm, finally add appropriate noise in the signal, test the robustness of the algorithm. The simulation results show that the method can effectively separate the signals, the similarity coefficient of the separated signal and the source signal is above 0.90, and the signal interference ratio is above 9.0, and it has a certain robustness, which lays a certain foundation for the subsequent signal identification work.

Keywords: partial discharge; JADE algorithm; mixed signal; blind source separation

0 引言

局部放电是危害电气设备平稳运行的主要原因之一,它会加快设备的绝缘性老化,缩短设备的使用寿命,在发展到一定程度后甚至会引发绝缘击穿事故,影响设备的平稳运行^[1-2]。因此,及时准确地检测出局部放电信号,根据局部放电信号蕴藏的信息正确的识别出故障类型并合理安排检修工作,能够保障电力设备的平稳运行^[3-5]。但各类高压

电气设备往往具有复杂的结构,这就可能出现同一电气设备内出现多个不同的绝缘故障,并产生混合的局部放电信号,这会给后续的信号识别工作带来较大的干扰,因此选择一种合适的算法来将混合局部放电信号分离,能够为后续信号识别工作打下一定基础。目前关于局部放电的研究大多是针对单一局部放电信号,对于多源混合局放信号的研究较少。文献[6]总结了4种典型GIS局部放电信号模型,文献[7]首次提出了GIS设备的混合局放信号的分离问题,

收稿日期:2021-03-28

并提出了信号的卷积混合模型,文献[8]提出了一种估计多源局部放电信号精确波达方向(DOA)的方法,目前已有的分离方法包括各种聚类以及改进聚类算法^[9-10]、基于累积能量函数的算法^[11]、基于时频相似度的算法^[12]等,但这几类算法普遍存在仅能分离混合程度较低的信号的问题,文献[13]提出了使用FAST-ICA算法,但仅考虑了GIS设备的混合信号分离,且FAST-ICA算法有时会在不收敛的问题,具有一定的局限性。

针对上述问题,本文基于前期研究^[14],提出使用一种基于联合近似对角化的盲源分离算法来分离混合局放信号,该算法具有一定的通用性,适合于高压电机、GIS、高压电缆、变压器等高压设备的混合局放信号分离,且具有一定的鲁棒性,为接下来局放信号的识别工作打下一定的基础。

1 局放信号混合模型

产生在不同位置的局放源,由于其距离传感器的远近不同,导致不同局放信号到达同一传感器的时间、衰减程度不同,这意味着混合信号并非单一局放信号的简单线性叠加,而是具有时延、衰减的混合过程。常用的信号混合模型有瞬时混合模型和卷积混合模型,本文选用卷积混合模型来描述局放信号的混合过程,混合模型如下。

设设备内存在 n 个局放源,共 m 个传感器,假设 m 不小于 n ,混合过程可用下式来表示。

$$\mathbf{H}_{ij} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=0}^L \mathbf{H}_{ij} \mathbf{S}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 表示传感器检测到的混合局放信号矩阵; $\mathbf{S}(t)$ 表示源信号矩阵; \mathbf{H}_{ij} 表示混合矩阵。在实际现场中, \mathbf{H}_{ij} 是不可测的,即难以通过混合信号直接得到源信号的信息特征,因此需要选择一种合适的方法来寻找分离矩阵,“估计”源信号的特征,也即盲源分离问题。

2 混合信号分离算法

盲源分离算法(BBS)于20世纪80年代提出,主要研究对象为著名的“鸡尾酒会”问题,一经提出便引起了相关学者极大的兴趣,经过数十年的发展,现已广泛应用到雷达、声呐、通信等领域,并发展出了十多种不同类型的盲源分离算法^[15],经过反复仿真对比试验,本文选择联合近似对角化(JADE)算法来分离信号。混合信号的可分为信号白化、分离两个环节。

2.1 混合信号预白化

对信号进行预白化后观测信号和源信号之间仅存在正交变换关系,使盲源分离问题进一步简化,具体白化步骤如下。

- 1) 计算观测信号的自相关矩阵 \mathbf{R}_x 。
- 2) 对 \mathbf{R}_x 进行奇异值分解,如式(3)所示得到特征向量

矩阵 \mathbf{U} 和特征值矩阵 $\mathbf{\Lambda}$ 。

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{U}^T \quad (3)$$

3) 计算预白化矩阵如式(4)所示。

$$\mathbf{B} = \mathbf{\Lambda}^{-\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{U}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}(t)$$

式中: \mathbf{B} 表示白化矩阵; $\mathbf{Z}(t)$ 表示白化后信号。

2.2 联合近似对角化算法

定义白化信号的四阶累积量矩阵如式(5)所示。

$$\mathbf{C}_z(\mathbf{M}) = \sum_{k,l=1}^N \text{cum}(z_i, z_j, z_k, z_l) m_{kl}, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中: m_{kl} 为任意 $N \times N$ 维矩阵 \mathbf{M} 的元素,此累积量矩阵可分解为 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M}) = \lambda \mathbf{M}$,因此 \mathbf{M} 被称为 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M})$ 的特征矩阵。由于 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M})$ 是对称阵,则可将 \mathbf{C}_z 改写为:

$$\mathbf{C}_z(\mathbf{M}) = \mathbf{V}^T \mathbf{\Lambda}(\mathbf{M}) \mathbf{V} = \mathbf{V}^T \text{diag}(k_1(s_1) \mathbf{v}_1 \mathbf{M} \mathbf{v}_1^T, \dots, k_1(s_N) \mathbf{v}_N \mathbf{M} \mathbf{v}_N^T) \mathbf{V} \quad (6)$$

该式说明,用 \mathbf{V} 阵对矩阵 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M})$ 作二次型处理可以得到对角矩阵 $\mathbf{\Lambda}(\mathbf{M})$ 。任意选择 p 个不同的 $N \times N$ 维矩阵 $\mathbf{M}_p (1 \leq p \leq N)$, 计算各 $N \times N$ 维矩阵下的四阶累积量矩阵。最后将这些四阶累积量矩阵组合成一个如式(8)所示的大的矩阵,然后采用联合近似对角化方法对 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M}_p)$ 进行对角化,得到正交分离矩阵 \mathbf{U} 。综上所述,可得到分离矩阵如式(6)所示。将JADE算法步骤总结如下:

- 1) 利用式(6)计算 $z(t)$ 的四阶累积量矩阵组 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M}_p)$ 。
- 2) 对步骤1)得到的矩阵组 $\mathbf{C}_z(\mathbf{M}_p)$ 进行联合近似对角化处理,估计出一个酉矩阵 \mathbf{U} 。
- 3) 得到估计分离矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{U}^T \mathbf{Q}$ 。

3 算法性能测试

3.1 典型局部放电信号模型

为保证算法的通用性,使用几种常见的局部放电数学模型来构造混合信号,包括单指数衰减、双指数衰减、单指数振荡衰减、双指数振荡衰减等常出现于高压电缆、高压电机等电气设备的局放数学模型以及文献[6]中总结的3种GIS内典型绝缘缺陷的局放信号数学模型。各种单一局放信号的波形如图1所示,图中横坐标表示采样点数。

前3种模型常出现在高压电机、开关柜、高压电缆等电气设备,频率通常均在100 MHz以下,后3种模型信号的频率通常在300 MHz以上,适用于GIS设备的局放信号建模。在本文使用的模型中,前3组设定采样点时间差为10 ns,后3组设定为0.05 ns。

在实际工况中,前3种信号模型有同时出现的可能,后3种信号有同时出现的可能,故在后续的算法测试中,仅将前3种模型作为一组来构造混合局放信号并称为高频组,将后3种模型作为另一组构造信号并称为低频组。生成的混合信号如图2所示,图中横坐标表示采样点数。

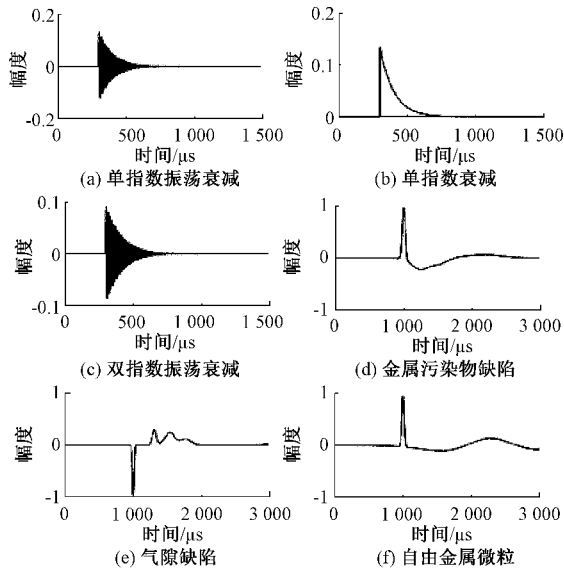


图 1 6 种典型局放信号模型

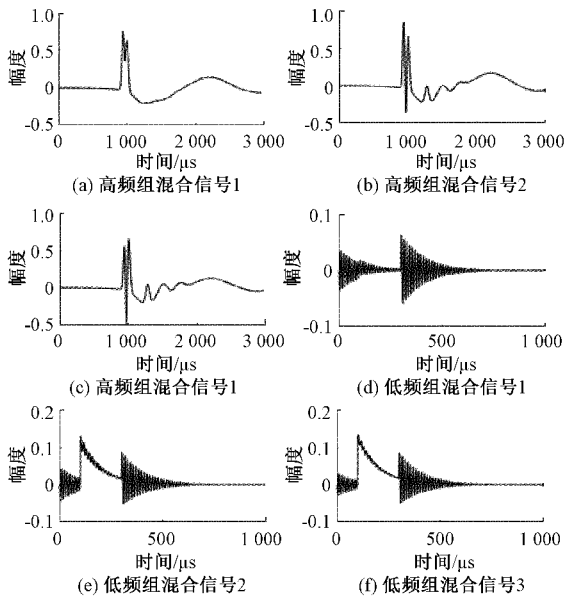


图 2 混合信号波形图

3.2 算法性能评价指标

1) 相似系数

相似系数反映了分离信号与原信号波形的相似程度,定义如下:

$$\lambda(y_i, s_j) = \frac{\sum_{k=1}^M |y_i(k)s_j(k)|}{\sqrt{\sum_{k=1}^M y_i^2(k) \sum_{k=1}^M s_j^2(k)}} \quad (7)$$

式中: $0 < \lambda_{ij} \leq 1$, $i, j = 1, 2, \dots, N$; y_i 表示传感器采集到的信号; s_j 表示源信号, 两信号间的 λ 值越高, 说明分离信号与源信号的相似程度越高, 分离效果越好。

2) 信号干扰比

信号干扰比(signal interference ratio, SIR)描述了混

合信号和分离信号相对于源信号的受干扰程度, 定义信号干扰比如下:

$$SIR = -10 \lg \left(\frac{\|x_i - s_j\|_2^2}{\|s_j\|_2^2} \right) \quad (8)$$

$$\Delta SIR = SIR_{x_s} - SIR_{y_s}$$

式中: s_j 表示源信号, SIR_{x_s} 表示混合信号对源信号的受干扰程度, 此时 x_i 表示混合信号, 在计算 SIR_{y_s} 即分离信号对源信号的受干扰程度时, x_i 表示分离信号, ΔSIR 越大说明信号间的互相干扰越小, 也即分离效果越好。

3.3 分离效果测试

为测试 JADE 算法对混合局放信号的分离能力, 本文将上述局放信号模型分为两组, 前 3 种指数衰减型模型为一组, 后 3 种频率较高的信号为一组, 并将两组内的局放信号按照一定的时延卷积混合, 利用 MATLAB 软件随机生成混合矩阵。为了保证测试的普遍性, 在测试每种混合信号时均生成 100 次随机混合矩阵, 取这 100 次评价指标的平均值。同时使用了文献[15]使用的分离算法, 即 FAST-ICA 算法作为对比。测试结果如下所示。

从表 1 及 2 中可以看出对于低频组, JADE 算法能够有效分离时延在 $1.3 \mu s$ 以上的混合信号, 分离信号相对于源信号的相似系数在 0.90 以上, 信号干扰比在 9.0 以上。而对于高频组信号, 在触发时间差大于 3 ns 时分离性能较好。

表 1 低频组分离性能测试

触发时间差/ μs	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
相似系数	JADE 0.998	0.967	0.991	0.834	0.827
	FAST-ICA 0.822	0.733	0.688	0.521	0.528
ΔSIR	JADE 10.78	9.67	11.08	2.73	1.97
	FAST-ICA 2.148	0.637	-1.738	-3.479	-3.538

表 2 高频组分离性能测试

触发时间差/ns	9	6	3	2	1
相似系数	JADE 0.998	0.997	0.931	0.834	0.827
	FAST-ICA 0.904	0.835	0.829	0.704	0.714
ΔSIR	JADE 10.78	9.67	11.08	2.73	1.97
	FAST-ICA 5.831	2.618	2.085	1.346	0.043

3.4 鲁棒性测试

在两组混合信号下均加入不同强度的白噪声, 以测试算法的鲁棒性, 设定高频组的时延为 3 ns, 低频组的时延为 $1.3 \mu s$, 测试结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 随着白噪声的强度越来越强, 算法的分离性能略有下降, 但仍在可接受范围内, 具有一定的鲁棒性。而且对于强度较高的噪声, 应该首先使用合适的滤波算法来去除噪声, 再进行分离信号的工作。

表 3 鲁棒性测试

白噪声强度/dB		20	15	10	5	1
相似系数	低频组	0.998	0.984	0.981	0.960	0.958
	高频组	0.931	0.927	0.919	0.924	0.912
ΔSIR	低频组	11.08	10.63	9.62	8.37	8.16
	高频组	6.73	6.09	5.68	4.90	4.85

4 结 论

针对混合局放信号的分离问题,本文提出使用一种基于 JADE 算法的混合局放信号盲源分离算法。同时为了保证算法适用于电气设备,使用了 6 种数学模型来构造混合信号,以测试算法性能,结果表明,该算法具有良好的分离性能。本文仍存在不足之处,例如所用信号均为数学模型信号,对于混合程度极高的混合信号分离性能较差,有待改进。

参考文献

- [1] 陈君强,王鹏,黄寅,等.变频电机绝缘局放电压自动测试系统设计[J].电子测量与仪器学报,2019,33(7):114-121.
- [2] 刘元,匡文凯,苏盛,等.基于双通道能量差的环网柜局放信号消噪方法[J].仪器仪表学报,2021,42(2):218-227.
- [3] 黄寅,王鹏,李金泉,等.基于 FPGA 的变频电机绝缘击穿监测系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2019,38(10):70-74.
- [4] 王雪莉,牛博,赵山川,等. GIS 分布式特高频传感器的现场行波标定方法[J].高压电器,2021,57(1):165-170.
- [5] 陈泽昊,许永鹏,李喆,等.基于小波包分解的直流电缆泄漏电流分析研究[J].仪器仪表学报,2018,39(9):163-170.
- [6] GAO W, DING D, LIU W. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [7] TANG J, LI W, LIU Y L. Blind source separation of mixed PD signals produced by multiple defects in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 170-176.
- [8] 周南,罗林根,黄辉,等.基于虚拟阵列扩展的特高频多源局部放电 DOA 估计方法[J].高电压技术,2019,45(5):1551-1558.
- [9] 王署东,尹柏强,何怡刚,等.高压局部放电定位模型转换求解与改进 K-means 聚类优化方法[J].电子测量与仪器学报,2018,32(11):178-186.
- [10] 邵先军,何文林,刘浩军,等.基于数值仿真与多源聚类的 GIS 局部放电诊断与回归分析[J].高电压技术,2017,43(10):3163-3172.
- [11] 邵先军,何文林,徐嘉龙,等.利用累积能量函数特征参量优化提取的多源局部放电信号分离技术[J].中国电机工程学报,2017,37(11):3348-3358,3392.
- [12] 高敬贝,周毓颖,吴季浩,等.基于时频相似度的 GIS 多源局部放电信号分离方法[J].高压电器,2018,54(12):245-250.
- [13] 云玉新,赵笑笑,李世鹏,等.基于快速独立分量分析算法的气体绝缘开关设备局部放电混合信号分离与缺陷类型辨识[J].高电压技术,2014,40(3):853-860.
- [14] 郑祥,刘鑫,朱宁宁.基于改进 FAST-ICA 算法的 GIS 混合局部放电信号分离方法研究[J].电子测量技术,2020,43(21):164-167.
- [15] ZIBULEVSKY M, PEARLMUTTER B A. Blind source separation by sparse decomposition in a signal dictionary[J]. Neural Computation, 2014, 13(4): 863-882.

作者简介

刘鑫,硕士研究生,主要研究方向为高压电器局部放电检测技术等。

E-mail:763015519@qq.com

郑祥,工学博士,副教授,主要研究方向为高压电器测试及其控制技术等。

E-mail:zxyh@163.com