

# 电能质量扰动信号时频原子分解的进化匹配追踪算法

杨烁<sup>1</sup>, 曹思扬<sup>1</sup>, 戴朝华<sup>1,2</sup>, 朱云芳<sup>1,2</sup>, 陈维荣<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要:** 时频原子分解对电能质量扰动信号具有良好的分析效果, 但其常用的匹配追踪(MP)算法, 存在计算量大、参数空间离散化影响原子匹配性能等不足。基于差分进化, 研究了电能质量扰动信号原子分解的进化匹配追踪(EMP)算法, 给出了算法流程。针对几种电能质量扰动信号, 通过 Gabor 和衰减正弦量原子分解的 30 次独立仿真实验, 分析了信号长度、噪声等对性能的影响。结果表明, EMP 算法与 MP 相比大大减少了计算耗时且不受信号长度的影响, 进一步提高了原子的全局匹配能力, 具有很好的抗噪声能力。最后, 给出了下一步工作的展望。

**关键词:** 时频原子分解; 匹配追踪; 差分进化; 电能质量扰动信号

## Evolutionary matching pursuit based time-frequency atom decomposition for power quality disturbance signals

YANG Shuo<sup>1</sup>, CAO Siyang<sup>1</sup>, DAI Chaohua<sup>1,2</sup>, ZHU Yunfang<sup>1,2</sup>, CHEN Weirong<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Engineering & Technology Research Center of Electrification and Automation in Rail Transit, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Time-frequency atom decomposition has good analysis effects on power quality disturbance signals. However, commonly-used matching pursuit (MP) algorithm has several defects, such as the heavy burden of computation, the impacts of spacial discretization on the performance, etc. An in-depth study is conducted on the evolutionary matching pursuit (EMP) of power quality disturbance signal atom decomposition based on differential evolution (DE) algorithm. The algorithm steps are presented in detail. For several typical power quality disturbance signals, the independent simulation experiments of 30 times are implemented with both Gabor and damped sinusoid atoms. An analysis is made on the performance impacts of the signal length and the noise. The simulation results show that, compared with the MP algorithm, the EMP algorithm greatly reduces the computation time without the influence from the signal length. Moreover, the global matching performance of the optimal atoms is further improved without the influence from the noise. Finally, the future research prospects are introduced.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307144).

**Key words:** time-frequency atoms decomposition; matching pursuit; differential evolution; power quality disturbance signals

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)16-0079-08

## 0 引言

电力系统电能质量对生产、社会和经济影响很大, 一直备受工程学术界、电力用户和电力公司的关注。随着电网中大量电力电子设备和非线性负荷的应用, 使得电能质量问题日益突出, 对电能质量进行有效监测和分析愈显重要<sup>[1-2]</sup>。

对于电能质量扰动信号分析, 现有方法主要有: 傅里叶变换、小波变换、S 变换、Hilbert-Huang

变换(HHT)等<sup>[3]</sup>。傅里叶变换主要用于分析稳态信号, 对于非平稳信号不具有时间局部性, 不能满足时频分析的要求, 而且存在频谱泄漏和栅栏效应等问题。小波变换的性能与采样率、小波基、分析频带的选择相关, 缺乏自适应性<sup>[4]</sup>, 而且会产生能量泄漏和频谱混叠现象, 不能单独提取任意频次的信号, 使其无法定量检测含噪、含谐波的扰动信号的幅值特征<sup>[5]</sup>。S变换结果只包含若干个特定频率分量(由时间窗决定)在不同时刻的幅值信息, 无法精确测量基波频率波动以及间谐波的特征参数<sup>[6]</sup>。HHT能够得到解析的信号分解形式, 且具有一定的自适

基金项目: 国家自然科学基金(51307144)

应性,但这种算法不适用于不连续的信号<sup>[4]</sup>。

近年来,时频原子分解(TFAD)<sup>[7-8]</sup>在信号处理领域成为关注的热点<sup>[4]</sup>。该方法采用超完备冗余时频原子代替传统的正交基函数,利用原子库的冗余特性捕捉信号的自然特征,可以最佳匹配信号的整体和局部结构,极大地提高了信号表达的简洁性和灵活性<sup>[9]</sup>,既保持了小波变换的“自适应聚焦”能力,又克服了其在频率域的缺陷,具有良好的抗混叠带通滤波器特性<sup>[10]</sup>,在信号建模、压缩、特征提取等方面得到广泛应用<sup>[4]</sup>。

文献[4, 9-18]将时频原子分解应用于电能质量扰动信号分析中,分解算法主要为匹配追踪(MP)算法。但是,MP算法存在以下不足:(1)由于采用贪心搜索,计算量大;(2)将搜索空间进行离散化,当全局最优解位于离散点之外时,将无法得到全局最优解。为此,基于进化算法的时频原子分解方法得到了国内外学者的高度关注,特别是文献[19-20]讨论了进化算法用于时频原子分解的一般框架及其方法和步骤。

本文利用差分进化(DE)算法的快速全局寻优能力,寻找时频原子分解最佳匹配原子的同时,减少计算时间。本文将这种基于进化算法的MP算法,称为进化匹配追踪(EMP)算法。然后,运用该进化匹配追踪算法,实现多种典型电能质量扰动信号及其混合信号的时频原子分解。仿真结果表明,此方法相对于MP算法,不仅能大大减少计算时间,而且能寻找到更匹配原子。

## 1 时频原子分解的进化匹配追踪算法

### 1.1 时频原子分解

对于连续信号  $f(t) \in H$ , 其中  $H$  表示 Hilbert 空间, 对应的离散采样信号为  $f(n)$ 。定义原子库  $D = (g_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$ , 其中  $\Gamma$  是原子参数组  $\gamma$  的集合, 且  $\|g_\gamma\| = 1$ 。从原子库  $D$  中选出与信号  $f(n)$  最为匹配的原子  $g_{(\gamma_0)}(n)$ , 也就是  $D$  中与  $f(n)$  内积绝对值最大的原子:

$$\left\langle f(n), g_{(\gamma_0)}(n) \right\rangle = \sup_{\gamma \in \Gamma} \left\langle f(n), g_\gamma \right\rangle \quad (1)$$

信号可以分解为在最佳原子  $g_{(\gamma_0)}(n)$  上的分量和信号残差  $R^1 f(n)$  两部分, 信号可以表示为

$$f(n) = \left\langle f(n), g_{(\gamma_0)}(n) \right\rangle g_{(\gamma_0)}(n) + R^1 f(n) \quad (2)$$

然后对  $R^1 f(n)$  进一步分解, 从原子库中选取与其最为匹配的原子  $g_{(\gamma_1)}(n)$ , 如此每次对信号残

差做进一步分解, 经过  $k$  次分解后,  $R^k f(n)$  可以表示为

$$R^k f(n) = \left\langle R^k f(n), g_{(\gamma_k)}(n) \right\rangle g_{(\gamma_k)}(n) + R^{k+1} f(n) \quad (3)$$

令  $R^0 f(n) = f(n)$ , 则  $f(n)$  可表示为

$$f(n) = \sum_{l=0}^k \left\langle R^l f(n), g_{(\gamma_l)}(n) \right\rangle g_{(\gamma_l)}(n) + R^{k+1} f(n) \quad (4)$$

上述过程即为时频原子分解过程。当  $R^{k+1} f(n)$  足够小,  $f(n)$  可近似表示为

$$f_k(n) = \sum_{l=1}^k \left\langle R^l f(n), g_{(\gamma_{l+1})}(n) \right\rangle g_{(\gamma_{l+1})}(n) \quad (5)$$

$f_k(n)$  称之为重构信号, 它与原始信号  $f(n)$  的相似度  $C_k$  为

$$C_k = \frac{\left\langle f(n), f_k(n) \right\rangle}{\|f(n)\| \cdot \|f_k(n)\|} \quad (6)$$

### 1.2 进化匹配追踪算法

进化匹配追踪算法就是在对信号进行时频原子分解时, 利用进化算法实现匹配原子参数的搜索。在现有的进化算法中, 差分进化(DE)倍受关注和广为应用<sup>[21]</sup>。本文采用基于DE的EMP进行时频原子分解。DE的基本操作主要是: 变异、交叉和选择。主要步骤如下。

(1) 初始化种群。定义初始种群  $\{x_{ij}(0) \mid x_{ij}^L \leq x_{ij}(0) \leq x_{ij}^U, i=1, \dots, NP; j=1, \dots, D\}$ , 其中  $NP$  为种群规模,  $D$  为优化空间维数。按式(7)随机产生每个个体。

$$x_{ij}(0) = x_{ij}^L + rand(0,1) \cdot (x_{ij}^U - x_{ij}^L) \quad (7)$$

式中,  $rand(0,1)$  产生 0 到 1 的均匀随机数。

(2) 变异操作

从当前第  $g$  代种群随机选取三个相异个体, 通过差分策略得到变异矢量为

$$v_i^{g+1} = x_{r_1}^g + F \cdot (x_{r_2}^g - x_{r_3}^g) \quad (8)$$

式中:  $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ;  $F$  为尺度因子。

(3) 交叉操作

对当前第  $g$  代种群  $x_i^g$  及其变异矢量  $v_i^{g+1}$  进行如下交叉操作, 得到试验个体

$$u_{ij}^{g+1} = \begin{cases} v_{ij}^{g+1} & \text{if } rand(0,1) \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{ij}^g & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $CR$  为交叉概率因子;  $j_{rand}$  为  $[1, NP]$  内的随机整数, 以确保试验矢量  $u_i^{g+1}$  不同于其相应的目标矢量  $x_i^g$ 。

(4) 选择操作

采用贪婪选择策略, 在  $\mathbf{u}_i^{g+1}$  与  $\mathbf{x}_i^g$  之间通过竞争来选择下一代个体。

$$\mathbf{x}_i^{g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{g+1}, & \text{if } O(\mathbf{u}_i^{g+1}) \leq O(\mathbf{x}_i^g) \\ \mathbf{x}_i^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $O(\cdot)$  为最小化优化问题的适应度函数。

基于 DE 的时频原子分解算法流程如图 1 所示。整个流程中, 有两个循环, 外循环是时频原子分解次数, 其终止条件可以是最大分解次数、残差信号足够小、或相似度达到一定值等。内循环是 DE 算法对每次分解原子参数的寻优迭代过程, 该迭代过程的终止条件可以是最大迭代次数、最大计算时间或连续一定迭代代数适应值不再改善等。

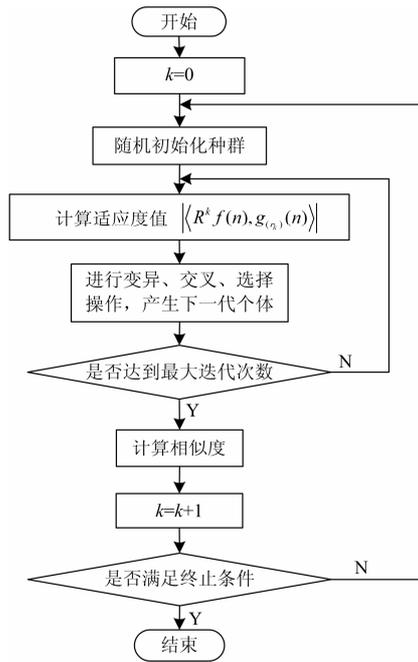


图 1 基于差分进化的时频原子分解算法流程图

Fig. 1 Flowchart of DE-based TFAD algorithm

## 2 与 MP 算法的比较

在现有电能质量扰动信号时频原子分解中, 采用的原子主要是 Gabor 原子和衰减正弦量原子<sup>[4,9-18]</sup>, 其中衰减正弦量原子分解往往是先用 Gabor 原子按 MP 算法进行分解, 再用分解出的 Gabor 原子计算对应的衰减正弦量原子<sup>[4,11,13]</sup>。本节分别基于 MP 和 EMP, 对典型电能质量扰动信号进行 Gabor 原子分解, 比较两者的性能和计算耗时。

Gabor 原子的表达式如式(11)所示。

$$g_\gamma(t) = \frac{K_\gamma}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

式中:  $g(t) = 2^{\frac{1}{4}} e^{-\pi t^2}$ ;  $\gamma = (s, \tau, \omega, \varphi)$  为 Gabor 原子参数。

电能质量扰动信号见附录, 包括电压暂降、暂升、中断、谐波、暂态振荡、暂态脉冲、闪变等 9 种类型, 采样频率  $f_s = 2.5$  kHz。DE 算法参数: 搜索空间为  $0 \leq s \leq N$ 、 $0 \leq \tau \leq L$ 、 $0 \leq \omega \leq 2\pi f_s$ 、 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , 种群规模为 60, 最大迭代次数为 300, 尺度因子  $F = 0.5$ , 交叉概率因子  $CR = 0.9$ 。分解次数设定为 2; 由于 DE 为随机搜索算法, 因此每次分解都进行独立的 30 次仿真实验, 分别记录 30 次实验的最大、最小和均值 (见表 1、表 2)。

表 1 两种算法得到的 |内积| 和相似度

Table 1 Absolute value of the scalar product and the similarity degree for two algorithms

信号 序号	分解 次数	参数	MP	EMP		
				最大	最小	均值
1	1	内积	26.412 4	26.720 0	26.719 9	26.720 0
		相似度	0.941 3	0.952 3	0.952 3	0.952 3
	2	内积	5.682 5	5.279 2	5.266 7	5.276 7
		相似度	0.962 9	0.971 2	0.971 1	0.971 1
2	1	内积	38.631 9	39.271 9	39.271 8	39.271 9
		相似度	0.950 5	0.966 3	0.966 3	0.966 3
	2	内积	7.450 0	6.308 5	6.300 0	6.306 8
		相似度	0.968 0	0.979 0	0.979 0	0.979 0
3	1	内积	23.134 1	23.423 9	23.423 9	23.423 9
		相似度	0.849 0	0.859 6	0.859 6	0.859 6
	2	内积	8.565 0	8.583 4	8.583 4	8.583 4
		相似度	0.906 7	0.916 7	0.916 7	0.916 7
4	1	内积	31.632 0	31.970 6	31.970 6	31.970 6
		相似度	0.962 7	0.973 0	0.973 0	0.973 0
	2	内积	6.182 2	6.393 9	6.393 8	6.393 8
		相似度	0.980 9	0.992 2	0.992 2	0.992 2
5	1	内积	31.653 6	31.988 8	31.988 8	31.988 8
		相似度	0.989 0	0.999 5	0.999 5	0.999 5
	2	内积	3.990 4	0.089 9	0.089 9	0.089 9
		相似度	0.996 8	0.999 5	0.999 5	0.999 5
6	1	内积	44.859 0	45.319 2	45.318 9	45.319 1
		相似度	0.986 6	0.996 7	0.996 7	0.996 7
	2	内积	5.489 2	0.255 8	0.238 7	0.247 3
		相似度	0.994 0	0.996 8	0.996 8	0.996 8
7	1	内积	31.653 5	31.989 7	31.989 7	31.989 7
		相似度	0.984 0	0.994 4	0.994 4	0.994 4
	2	内积	4.001 4	2.398 0	2.397 9	2.398 0
		相似度	0.991 8	0.997 2	0.997 2	0.997 2

表 2 两种算法的耗时  
Table 2 Time consumed by two algorithms

信号	MP	EMP		
		最大	最小	均值
1	698.55(2 429.58)	8.91(24.05)	8.38(22.11)	8.65(23.04)
	705.78(2 372.34)	7.84(22.77)	7.19(21.02)	7.58(21.99)
2	695.16(2 356.28)	8.83(23.53)	8.03(21.89)	8.44(22.92)
	682.81(2 345.66)	7.92(22.30)	6.94(20.47)	7.36(21.55)
3	693.31(2 355.83)	8.84(24.11)	8.33(22.19)	8.62(23.17)
	701.72(2 358.33)	7.73(22.39)	7.00(20.25)	7.37(21.78)
4	687.92(2 456.05)	9.06(24.08)	8.30(22.55)	8.53(23.25)
	706.11(2 375.22)	8.25(24.88)	7.69(22.16)	7.97(23.30)
5	747.73(2 400.89)	8.88(23.81)	8.33(22.56)	8.67(23.04)
	587.34(2 417.81)	7.53(21.97)	6.77(20.58)	7.16(21.39)
6	549.36(2 402.72)	8.89(23.66)	8.45(22.11)	8.64(23.00)
	551.44(2 360.06)	7.33(22.80)	6.97(20.81)	7.18(21.71)
7	559.23(2 369.36)	8.53(23.94)	8.06(22.08)	8.30(23.03)
	553.56(2 431.91)	8.45(24.73)	7.75(22.88)	8.14(23.90)

表1是两种算法得到的|内积|和相似度。从该表可知，对于所有信号，EMP得到的第1次分解之|内积|均大于MP得到的值，同时针对第1、2次分解后重构信号与原始信号的相似度，EMP也明显优于MP。以信号2第一次分解为例，EMP得到的原子参数 $\gamma=(2\ 048, 0.818\ 8, 0.125\ 666, 3.136\ 380)$ ；MP能得到并与其最相近的原子参数为 $\gamma=(2\ 048, 0.818\ 8, 0.125\ 786, 3.141\ 593)$ ，对应的|内积|=26.412 4，比MP最大值小5.6026e-12。

表2是两种算法的计算耗时比较(括号内、外分别为 $N=2\ 048$ 和 $N=4\ 096$ 时的耗时)，从中可以看出，EMP的耗时远小于MP的耗时。不仅如此，DE算法在进化过程中，如果连续多次迭代(如10次)均搜索不到更好的解，则视为进化完成，从而可以进一步减少计算时间；如以信号1的Gabor时频原子分解为例，图2是两次分解的进化曲线，图中显示，仅仅需要2 s就搜索到了优化解。

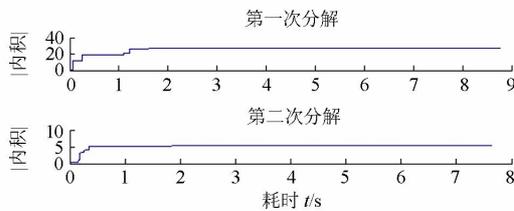


图 2 Gabor 时频原子分解的 DE 进化曲线图  
Fig. 2 Evolutionary curves for time-frequency decomposition with Gabor atoms

需要指出的是，由于MP需要对离散化空间进行遍历搜索，信号数据的长度对其耗时产生很大的影响，数据越多、耗时越长。表2中括号内的数据为两种算法对 $N=4\ 096$ 的数据进行分解的计算耗时。

从中可以看出，虽然数据长度只为原来的2倍，但计算耗时高达原来的2~3倍，高达2 300多秒；而对于EMP，由于其本身的运算(交叉、变异和选择等)不随数据长度的变化而不同，因此计算耗时仅仅20多秒，其相对于原来耗时的增加，完全是由于数据量增加导致信号重构和相似度求解等的计算量增加引起的。

### 3 基于 EMP 的衰减正弦量原子分解

#### 3.1 原子分解

衰减正弦量原子的表达式如式(12)。

$$g_\gamma(t) = e^{-\rho(t-t_s)} \cos(\omega t + \varphi)[u(t-t_s) - u(t-t_e)] \quad (12)$$

式中： $u(t)$ 为单位阶跃函数； $\gamma=(\omega, \varphi, \rho, t_s, t_e)$ 。由于DE能灵活处理优化变量，既可以像文献[4,11,13]一样先确定Gabor原子再确定衰减正弦量原子，又可以在衰减正弦量原子参数空间进行直接搜索；本文采用后一种搜索形式，相应的搜索空间为 $0 \leq \omega \leq 2\pi f_s$ 、 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 、 $0 \leq \rho \leq N$ 、 $0 \leq t_s \leq L$ 、 $t_e \leq L$ 。电能质量扰动信号见附录，包括电压暂降、暂升、中断、谐波、暂态振荡、暂态脉冲、闪变、谐波含暂降及谐波含暂升等9种类型，EMP的相关参数如第2节，分解次数终止条件为相似度 $Cr \geq 0.99$ 且次数大于2。

30次独立仿真中，相似度最好的一次仿真得到的原子参数和相应相似度如表3所示，对应的分解及重构波形如图3~图11。

表 3 各原子参数及相似度

Table 3 Atom parameters and the similarity degree

信号	分解次数	$\omega/(2\pi)$	$\varphi$	$\rho$	$t_s$	$t_e$	相似度
1	1	2 450.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.952
	2	50.00	3.14	0.00	0.26	0.48	0.998
2	1	2 450.00	0.00	0.11	0.00	0.82	0.960
	2	2 450.00	0.00	0.00	0.26	0.48	0.995
3	1	50.00	6.28	0.00	0.48	0.82	0.754
	2	2 450.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.999
4	1	2 450.00	0.00	0.01	0.00	0.82	0.973
	2	150.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.992
5	1	2 450.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.999
	2	1 300.11	4.20	667.28	0.30	0.31	1.000
6	1	50.00	0.01	0.00	0.00	0.82	0.996
	2	0.00	0.66	0.20	0.30	0.30	1.000
7	1	50.00	3.14	0.00	0.00	0.82	0.994
	2	1 850.00	3.15	0.01	0.00	0.82	0.997
8	1	2 450.00	0.00	0.39	0.00	0.82	0.916
	2	50.00	0.00	0.91	0.26	0.64	0.978
	3	2 450.02	6.18	0.00	0.64	0.82	0.983
	4	2 449.99	0.00	0.00	0.00	0.25	0.989
9	1	50.00	0.01	0.00	0.00	0.82	0.951
	2	2 450.00	0.00	0.06	0.26	0.64	0.979
	3	2 449.99	0.00	0.02	0.00	0.26	0.984
	4	2 449.99	3.21	0.00	0.64	0.82	0.990

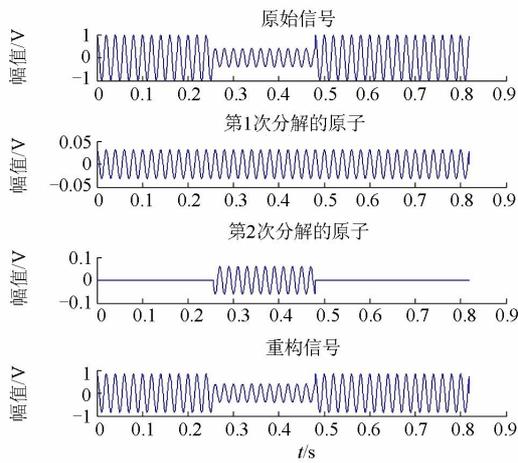


图 3 信号1的原子分解和重构波形

Fig. 3 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 1st signal

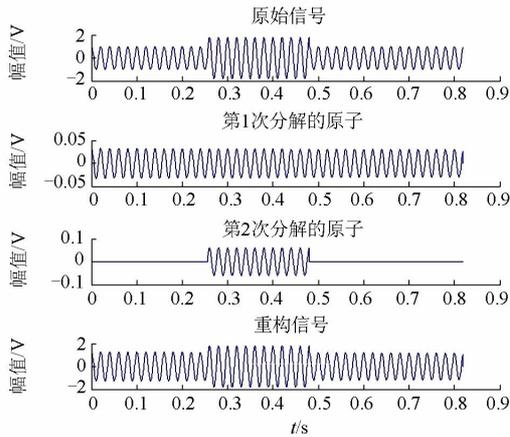


图 4 信号2的原子分解和重构波形

Fig. 4 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 2th signal

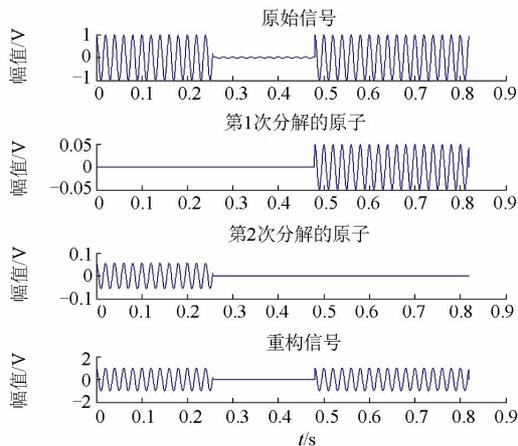


图 5 信号3的原子分解和重构波形

Fig. 5 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 3th signal

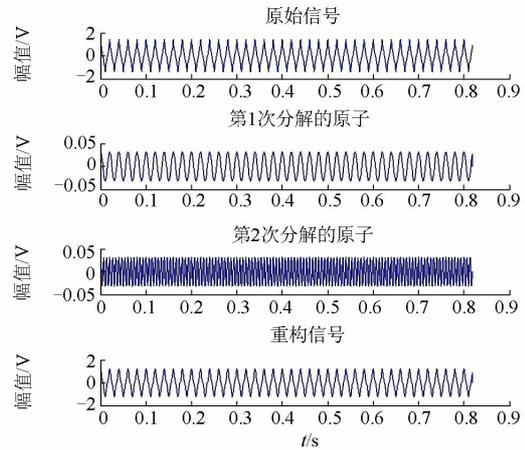


图 6 信号4的原子分解和重构波形

Fig. 6 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 4th signal

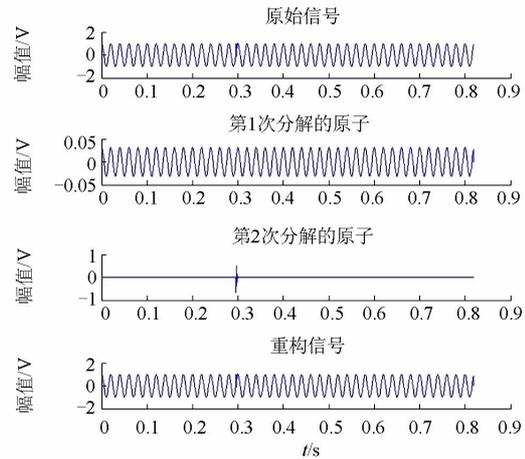


图 7 信号5的原子分解和重构波形

Fig. 7 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 5th signal

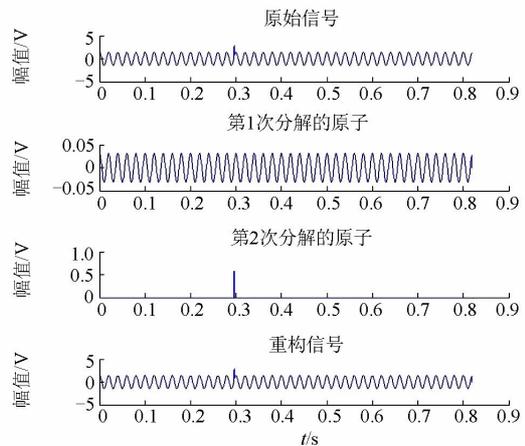


图 8 信号6的原子分解和重构波形

Fig. 8 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 6th signal

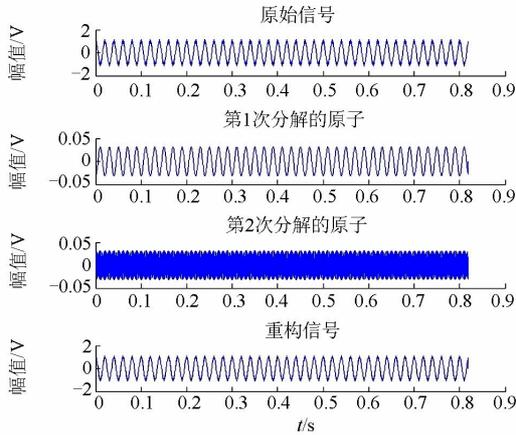


图9 信号7的原子分解和重构波形

Fig. 9 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 7th signal

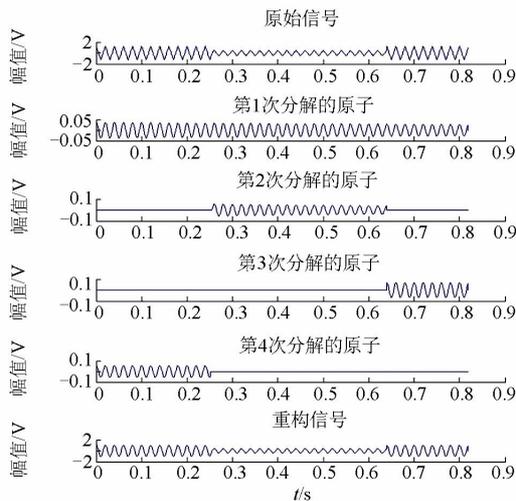


图10 信号8的原子分解和重构波形

Fig. 10 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 8th signal

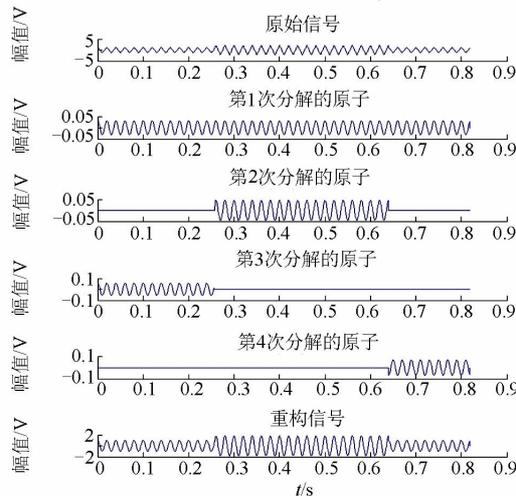


图11 信号9的原子分解和重构波形

Fig. 11 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 9th signal

### 3.2 噪声影响分析

为了评价噪声对算法性能的影响,在信号中加入信噪比(SNR)为30 dB的白噪声,再对其进行原子分解,30次独立仿真实验得到的|内积|和相似度均值如表4所示,其中括号内、外分别为无、有噪声的情况。

表中数据表明,含噪声情况下,EMP算法同样取得相同或相近的|内积|和相似度,说明算法具有很好的抗噪声能力。以含噪声的信号1为例,两次分解的原子及最终重构信号波形如图12所示,图形显示具有很好的分解效果。

表4 噪声对EMP性能的影响

Table 4 Impacts of the noise on the performance of the EMP

信号	内积		相似度	
	第一次分解	第二次分解	第一次分解	第二次分解
1	26.70(26.71)	7.29(7.29)	0.952(0.951)	0.998(0.997)
2	39.01(39.06)	9.63(9.61)	0.960(0.960)	0.995(0.994)
3	23.12(23.38)	12.46(11.60)	0.848(0.858)	0.999(0.991)
4	31.96(31.96)	6.39(6.42)	0.973(0.972)	0.992(0.991)
5	31.98(31.96)	1.05(1.05)	0.999(0.998)	1.000(0.999)
6	45.30(45.27)	3.63(3.66)	0.996(0.996)	1.000(0.999)

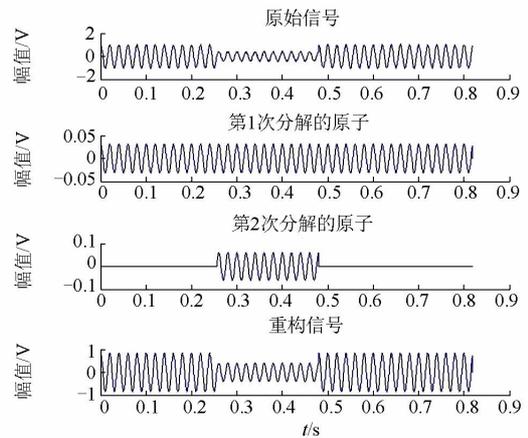


图12 含噪信号1的原子分解和重构波形

Fig. 12 Waveforms of decomposed atoms and the reconstruction for the 1st signal with noise

## 4 总结

本文基于差分进化,研究了时频原子分解的进化匹配追踪算法,并针对几种电能质量扰动信号进行了仿真实验。仿真结果表明:相对于电能质量扰动信号原子分解常用的匹配追踪算法,该算法能实现快速的原子分解,不仅大大减少计算耗时,而且能对匹配追踪算法离散点以外的空间进行全局搜索,提高原子参数的全局匹配能力。

下一步工作还有: (1) 本文采用 DE 算法直接在衰减正弦量原子参数空间进行搜索, 但也可以先采用 DE 得到 Gabor 原子参数, 再基于文献[4, 11, 13]的方法得到衰减正弦量原子参数。(2) 如文献[18], 研究各种原子库的构建, 基于进化匹配

追踪算法实现相应原子参数的匹配优化。(3) 从仿真结果看, 对于少量信号, DE 算法在 30 次仿真中得到的结果略有差异, 说明算法对不同信号性能也可能不同, 因此仍有必要研究进化匹配追踪算法在原子分解中的应用适用性。

附录

附表 1 标准信号及电能质量扰动信号仿真模型

Table 1 Simulation model of standard signal and power quality disturbance signal

信号序号及 类型	表达式	参数( $A=1$ p.u., $f=50$ Hz, $\omega=2\pi f$ , $u(t)=\begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ )
1 电压暂降	$v(t) = A\{1 - k[u(t_2) - u(t_1)]\} \cos(\omega t)$	$0.1 < k < 0.9; T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
2 电压暂升	$v(t) = A\{1 + k[u(t_2) - u(t_1)]\} \cos(\omega t)$	$0.1 < k < 0.9; T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
3 电压中断	$v(t) = A\{1 - k[u(t_2) - u(t_1)]\} \cos(\omega t)$	$0.9 < k < 1; T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
4 谐波	$v(t) = A\cos(\omega t) + h_2\cos(2\omega t) + h_3\cos(3\omega t) + h_5\cos(5\omega t) + h_7\cos(7\omega t) + h_9\cos(9\omega t) + h_{11}\cos(11\omega t)$	$0 \leq h_i < 0.25, i = 3, 5, 7;$ $0 \leq h_i < 0.1, i = 2, 9, 11$
5 暂态振荡	$v(t) = A\{\cos(\omega t) + k \exp[-(t - t_1)/\tau] \cos[\omega_n(t - t_1)] \cdot [u(t_2) - u(t_1)]\}$	$k = 0.7, \tau = 0.0015, \omega_n = 2\pi f_n,$ $900 \text{ Hz} \leq f_n \leq 1300 \text{ Hz}$
6 暂态脉冲	$v(t) = \sqrt{2}\{\cos(\omega t) + k \exp[-\alpha(t - t_1)] \cdot [u(t_2) - u(t_1)]\}$	$0.5 \leq k < 3, 0 \leq \alpha \leq 1,$ $20 \text{ ns} \leq t_2 - t_1 \leq 1 \text{ ms}$
7 闪变	$v(t) = A[1 + \alpha \cos(\beta\omega t)] \cos(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.2, 5 \leq \beta \leq 20$
8 谐波含电压暂降	$v(t) = A\{1 - k[u(t_2) - u(t_1)]\} [\cos(\omega t) + h_3\cos(3\omega t) + h_5\cos(5\omega t)]$	$0.05 \leq h_i < 0.15, i = 3, 5, 7;$ $0.1 < k < 0.9$
9 谐波含电压暂升	$v(t) = A\{1 + k[u(t_2) - u(t_1)]\} [\cos(\omega t) + h_3\cos(3\omega t) + h_5\cos(5\omega t)]$	$0.05 \leq h_i < 0.15, i = 3, 5, 7;$ $0.1 < k < 0.9$

参考文献

[1] 何世恩, 郑伟, 智勇, 等. 大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 39-44.  
HE Shien, ZHENG Wei, ZHI Yong, et al. Power quality issues of large-scale cluster wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 39-44.

[2] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.  
ZHOU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.

[3] GRANADOS-LIEBERMAN D, ROMERO-TRONCOSO R J, OSORNIO-RIOS R A, et al. Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4): 519-529.

[4] 贾清泉, 于连富, 董海艳, 等. 应用原子分解的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 61-64.  
JIA Qingquan, YU Lianfu, DONG Haiyan, et al. Power quality disturbance features extraction based on atomic decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 61-64.

[5] 苏玉香, 刘志刚, 李科亮, 等. Hilbert-Huang 变换在电气化铁路谐波检测中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 30-35.  
SU Yuxiang, LIU Zhigang, LI Keliang, et al. Application of Hilbert-Huang transform in harmonic detection of electrified railway[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 30-35.

[6] 曹健, 林涛, 徐遐龄, 等. 一种电能质量扰动监测与识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 125-133.  
CAO Jian, LIN Tao, XU Xialing, et al. A new method for measurement and classification of power quality disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 125-133.

- 125-133.
- [7] 刘林, 林涛, 徐遐龄, 等. 应用于低频振荡在线监测的并行时频原子复带通滤波方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 58-65.  
LIU Lin, LIN Tao, XU Xialing, et al. Concurrent time-frequency atom complex band-pass filter based method for online monitoring low-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 58-65.
- [8] MALLAT S G, ZHANG Zhifeng. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [9] 李明, 张葛祥, 王晓茹. 时频原子方法在间谐波分析中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 81-85.  
LI Ming, ZHANG Gexiang, WANG Xiaoru. Application of time-frequency atom method in inter-harmonics analysis[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 81-85.
- [10] 曹健, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于最小二乘法和时频原子变换的谐波/间谐波测量算法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 1-7.  
CAO Jian, LIN Tao, XU Xialing, et al. Monitoring of power system harmonic/inter-harmonics based on least squares algorithm and time frequency transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 1-7.
- [11] 贾清泉, 于连富, 王宁, 等. 原子稀疏分解算法在电力系统扰动信号分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 17-21.  
JIA Qingquan, YU Lianfu, WANG Ning, et al. Application of atomic sparse decomposition to power systems disturbance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 17-21.
- [12] TCHEOU M P, LOVISOLO L, DA SILVA E A B, et al. Efficient coherent adaptive representation of monitored electric signals in power systems using damped sinusoids[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3831-3846.
- [13] TCHEOU M P, LOVISOLO L, DA SILVA E A B, et al. Optimum rate-distortion dictionary selection for compression of atomic decompositions of electric disturbance signals[J]. IEEE Signals Processing Letters, 2007, 14(2): 81-84.
- [14] 李明, 王晓茹. 采用时频原子方法的电压闪变检测[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 94-97.  
LI Ming, WANG Xiaoru. Detection of voltage flicker based on time-frequency atom method[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 94-97.
- [15] LOVISOLO L, DA SILVA E A B, RODRIGUES M A M, et al. Efficient coherent adaptive representations of monitored electric signals in power systems using damped sinusoids[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3831-3846.
- [16] YANG Qing, WANG Jing, SIMA Wenxia, et al. Mixed over-voltage decomposition using atomic decompositions based on a damped sinusoids atom dictionary[J]. Energies, 2011, 4(9): 1410-1427.
- [17] LOVISOLO L, TCHEOU M P, DA SILVA E A B, et al. Modeling of electric disturbance signals using damped sinusoids via atomic decompositions and its applications[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007(1): 1-15.
- [18] 王宁, 李林川, 贾清泉, 等. 应用原子分解的电能质量扰动信号分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 51-58.  
WANG Ning, LI Linchuan, JIA Qingquan, et al. Classification of power quality disturbance signals using atomic decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 51-58.
- [19] ZHANG Gexiang. Time-frequency atom decomposition with quantum-inspired evolutionary algorithms[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2010, 29(2): 209-233.
- [20] CHENG Jixiang, ZHANG Gexiang, ZENG Xiangxiang. A novel membrane algorithm based on differential evolution for numerical optimization[J]. International Journal of Unconventional Computing, 2011, 7(3): 159-183.
- [21] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1): 4-31.

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-01-05

作者简介:

杨 烁(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量, 压缩感知等; E-mail: 739331839@qq.com

曹思扬(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量, 现代信号处理等; E-mail: cao163\_@163.com

戴朝华(1973-), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向为智能电网运行优化、电能质量、智能信息处理等。E-mail: daichaohua@swjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)