

[配电网]

# 改进EMD算法在配电网故障信号分析中的应用

文/国网甘肃省电力公司陇南供电公司 李 权 苏心明 高 鹏  
西华大学电气与电子信息学院 余碧凯 雷 霞

针对配电网线路短、分支多，容易造成单相接地故障且故障信号难以分析、定位困难的问题，提出一种基于遗传优化的改进EMD (Empirical Mode Decomposition) 信号分析算法，对故障信号进行分解。该方法就三次样条插值在EMD中存在的模态混叠、过包络及欠包络问题，利用带有形状控制参数的分段有理Hermite插值的灵活性，在筛分过程中，用遗传算法对不同参数对应的不同插值曲线进行寻优，确保每阶分解过程中IMF (Intrinsic Mode Function) 最优，从而提高定位效果。

配电网的快速精确故障定位有利于故障的小范围隔离和快速检修，配电网故障信号复杂，如何提取真实的故障特征，准确地找出故障点位置，对于配电网的安全、稳定和高效运行有着重要的意义。

故障信号处理的方法有很多，1998年N E Huang等人提出了一种全新的信号时频分析方法——希尔伯特黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)，其核心是通过EMD将复杂的信号分解为多个固有模态函数IMF。但EMD也有一些明显的缺陷，如模态混叠、虚假分量、过包络和欠包络。众多学者围绕模态混叠的抑制和消除等问题展开了研究。提出一种改进的方法——EEMD，引入高斯白噪声有效地改善了模态混叠问题，但在加入白噪声时，白噪声的幅值和集合平均数都是经验值，难以确定，且重构误差较大，为了解决这些问题，也有许多学者提出不同的改进策略，取得了一定的成果，但都没摆脱人为设定的困境。

EMD的核心是经过有限次“筛分”，而“筛

分”过程的重点是包络线的拟合，包络拟合要用到插值方法，其类型的选择是EMD方法的关键步骤，直接影响分解的结果。目前，已使用的插值方法有B样条插值、分段幂函数插值、分段抛物线插值、分段三次Hermite插值、最小长度约束及分段四次Hermite插值等。以上其他方法在插值时形状固定，无法改变，缺乏灵活性，而在四次样条插值中引入了形状控制参数，可通过调整参数改变插值曲线形状。

本文在分段有理四次插值的基础上结合遗传算法，以插值曲线长度最小为优化目标函数，提出一种优化的改进EMD算法。在每一阶分解“筛分”过程中，通过优化算法寻找一个最优的IMF及其对应的形状控制参数，在满足固有模态分量条件情况下，确保每阶IMF都是最优的，以便提高算法的分解效果。为验证算法的有效性，在MATLAB搭建的配电网中产生故障信号，运用本文所提算法进行分解，并与EMD、EEMD方法对比，结果表明，该方

国家自然科学基金资助项目 (51877181)；国网甘肃省电力公司科技项目 (5227122000J6)：110 kV变电站故障测距系统。

法更好地改善了模态混叠及“过冲、欠冲”问题，也提高了配电网故障定位的准确度。

## EMD算法及其缺陷

EMD的主要思想是将信号分解成振荡分量，对于给定信号 $S(t)$ ，EMD的分解流程如图1所示。

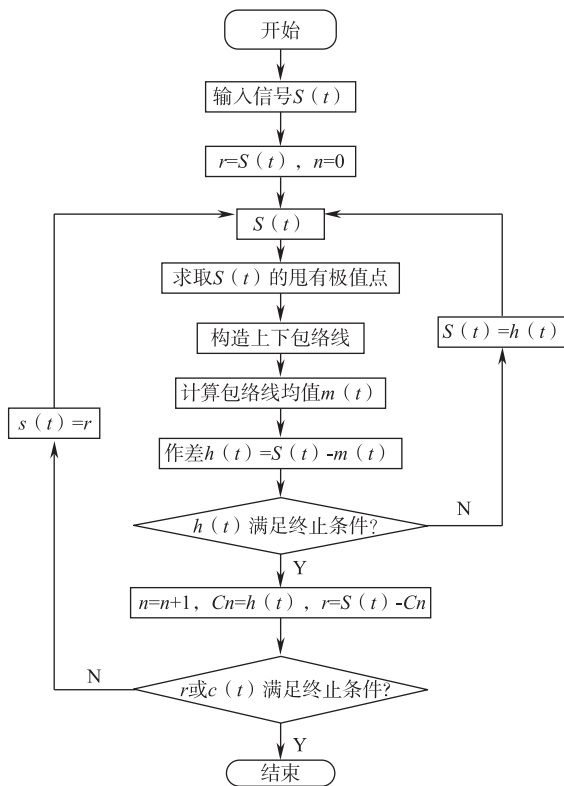


图1 EMD分解流程图

分解完成后，信号 $S(t)$ 表示为

$$S(t) = \sum_{n=1}^N c_n(t) + r_N(t) \quad (1)$$

式中， $N$ 为分解的IMF的个数； $r_N(t)$ 为最终的残差；将 $c_n(t)$ 称为 $n$ 阶IMF，低阶IMF分量为快速振荡模态，而高阶IMF分量通常表示慢振荡模态。

传统的EMD算法需要通过插值极值点拟合出一条光滑的包络曲线，而包络线的质量直接影响迭代次数和IMF分量的准确度。通常EMD分解采用的是三次样条插值进行包络线的拟合，虽然它在一定程度上能保证光滑性，但对非均匀的插值点该方法容易产生过冲和欠冲现象，如图2椭圆标识所示，同时会产生模态混叠、虚假IMF分量等问题，因此对包络线的研究和改进非常重要。为了改善标准三次样条插值时的问题，引入四次Hermite插值样条函数。

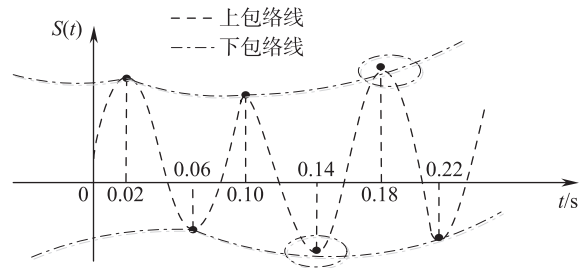


图2 包络过冲、欠冲现象

## 有理四次Hermite插值基函数

在标准三次Hermite插值基函数中引入形状控制参数即可得到有理四次Hermite样条插值，有理四次Hermite样条插值是一种新的具有原有基函数特性的插值方法。此方法在插值过程中增加了形状控制参数，因此插值包络曲线的形状会随形状控制参数的改变而改变，可通过使插值样条曲线不断逼近被插值目标的方式来提高信号插值包络线的拟合准确度，也为选取更优的包络线提供了可能性。本文将此插值算法应用于图1所示原始EMD分解过程中。

### 1. 有理四次Hermite插值基函数

对 $0 \leq t \leq 1$ ，设 $\lambda_i$ 为任意实数，称下列关于 $t$ 的四个多项式为带形状控制参数 $\lambda_i$ 的有理四次Hermite基函数，即

$$\begin{cases} F_i(t) = 1 - (\lambda_i - 3)t^2 - (2\lambda_i - 2)t^3 + \lambda_i t^4 \\ F_{i+1}(t) = -(\lambda_i - 3)t^2 + (2\lambda_i - 2)t^3 - \lambda_i t^4 \\ G_i(t) = t + (\lambda_i - 2)t^2 - (2\lambda_i - 1)t^3 + \lambda_i t^4 \\ G_{i+1}(t) = -(\lambda_i + 1)t^2 + (2\lambda_i + 1)t^3 - \lambda_i t^4 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\lambda_i$ 为插值函数的形状控制参数。

通过计算，上述基函数还满足以下关系

$$\begin{aligned} F_i(0) &= F_{i+1}(1) = 1, F_i(1) = F_{i+1}(0) = 0 \\ F_i'(0) &= F_i'(1) = F_{i+1}'(1) = F_{i+1}'(0) = 0 \\ G_i(0) &= G_i(1) = G_{i+1}(1) = G_{i+1}(0) = 0 \\ G_i'(0) &= G_{i+1}'(1) = 1, G_i'(1) = G_{i+1}'(0) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

且有 $F_i(t) = F_{i+1}(t) = 1, -G_i(t) = G_{i+1}(1 - t)$ 。

综上所述，有理四次Hermite插值基函数与标准三次Hermite插值基函数具有完全相同的性质。且由式(3)可知，当参数 $\lambda_i = 0$ 时，四次Hermite插值函数等同于标准三次Hermite插值函数。因此，标准三次Hermite插值基函数的推广形式是带有形状控制参数的有理四次Hermite插值基函数，可利用该基函数定义带形状控制参数的有理Hermite样条插值曲线。

所定义的基函数结构简单、计算效率高并且结果可靠,可更加灵活地求取各极值点间分段有理四次Hermite插值包络线。

## 2. 有理Hermite样条插值曲线

在区间 $[a, b]$ 上,对插值极点 $a=x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n=b$ 及数据 $(x_i, y_i, y'_i)$ ,记 $h_i=x_{i+1}-x_i$ , $t=x-x_i/h_i$ ,则带形状参数的有理分段四次Hermite插值样条曲线表示为

$$H(x) = y_i F_i(t) + y_{i+1} F_{i+1}(t) + h_i y'_i G_i(t) + h_{i+1} y'_{i+1} G_{i+1}(t) \quad (4)$$

$$i=1, 2, \dots, n-1$$

式中, $y_i$ 、 $y'_i$ 分别是分点 $x_i$ 处的函数值和一阶导数值; $F_i(t)$ 、 $F_{i+1}(t)$ 、 $G_i(t)$ 与 $G_{i+1}(t)$ 为有理四次Hermite插值基函数。

当选择合适的形状控制参数时,此函数可达到二阶导数连续,插值函数应满足二阶导数连续性的约束条件为

$$\begin{aligned} & [(y_i - y_{i+1}) + h_i(y'_i - y'_{i+1})] h_{i+1}^2 \lambda_i - \\ & [(y_{i+1} - y_{i+2}) + h_{i+1}(y'_{i+1} - y'_{i+2})] h_i^2 \lambda_i \\ & = -[3(y_i - y_{i+1}) + h_i(y'_i + 2y'_{i+1})] h_{i+1}^2 - \\ & [3(y_{i+1} - y_{i+2}) + h_{i+1}(2y'_{i+1} + 2y'_{i+2})] h_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

根据插值基函数公式可知,在式(4)插值样条曲线中引入了一个参数 $\lambda_i$ ,插值曲线的形状可随其改变而改变,从而会形成插值曲线簇。在众多曲线中,理想光滑的插值曲线是长度最短的那条曲线,此时插值包络线最优,分解得到的IMF分量也最优。因此如何选择一个最优的形状控制参数 $\lambda_i$ 是改进EMD算法的关键。

## 基于遗传优化的改进EMD算法

### 1. 算法的基本思想和步骤

用优化的方法求解众多曲线簇,插值曲线簇如图3所示,长度最小的曲线对应的 $\lambda_i$ ,克服包络插值时的过冲、欠冲问题,确保每阶分解时的插值曲线最优,从而得到最优的IMF分量。

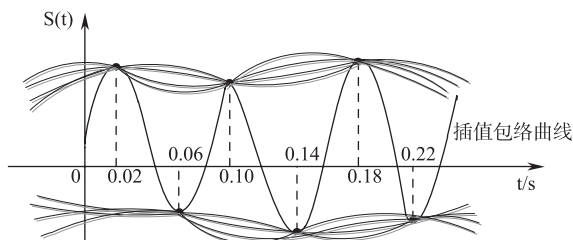


图3 插值曲线簇

把整个插值曲线分成 $[x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n]$ 等 $n-1$ 个区间,利用式(2)、式(3)对每个区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 先计算得到插值曲线 $H_i(x, \lambda)$ ,再求其一阶导数 $H'_i(x, \lambda)$ ,后积分求得插值曲线的长度。

曲线长度最小值目标函数为

$$\min L_i = \min \left( \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sqrt{1 + [H'_i(x, \lambda)]^2} dx \right), \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

式中, $x$ 是固定取值的已知参数。

式(6)是关于 $\lambda_i$ 的函数,求曲线长度 $L_i$ 的最小值其实是一个最优化问题,也是找最优曲线对应的最优参数。本文使用遗传算法来求解这个问题,提出一种基于遗传算法及分段有理四次Hermite插值方法的改进EMD算法(将改进算法称为I-EMD),该算法的过程如图4所示,用分段有理四次Hermite样条插值代替传统的三次样条插值,再利用遗传算法对参数控制的插值曲线进行寻优,使每阶选取的IMF分量都是最优,从而确保算法的自适应性及更高的准确度。

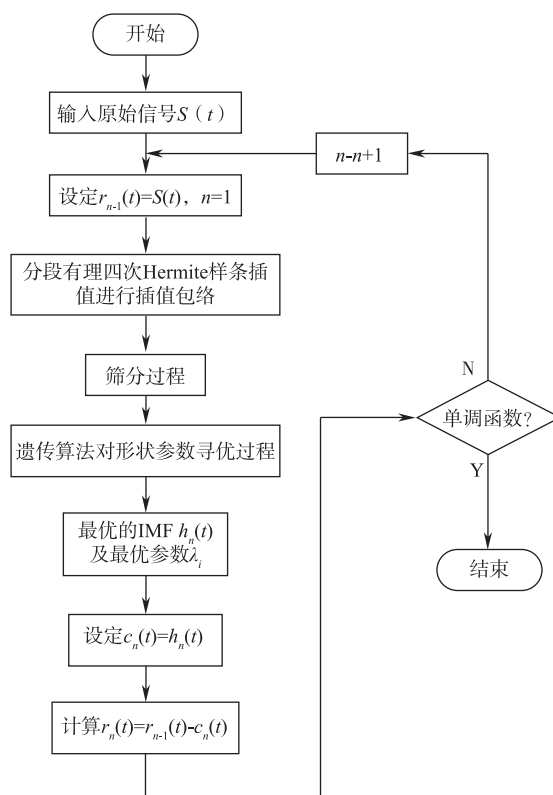


图4 改进的EMD算法流程

### 2. 分解方法的评判指标

虽然理论上没有严格证明IMF局部的正交性,

但通常正交度指标 (Index of Orthogonally, IO) 和均方根误差指标 (Root Mean Square Error, RMSE) 是评价EMD结果的两个重要指标。其中IO指分解出的IMF之间的正交程度, 其值越接近于0, 说明各个IMF分量之间越接近于正交; RMSE指分解出的IMF与原始信号的偏差程度, 其值越接近于0, 说明与原始信号越接近。

分解性能优劣性的评价指标RMSE和IO公式为

RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum\_{i=1}^N |x^2(t) - \hat{x}^2(t)|} \tag{7}

IO = \sum\_{i=0}^T \left( \sum\_{j=1}^{N+1} \sum\_{i=1}^{N+1} \hat{x}\_j(t) \hat{x}\_i(t) / x^2(t) \right) \tag{8}

式中,  $x(t)$ 为原始故障信号;  $\hat{x}(t)$ 为分解的IMF分量;  $\hat{x}_i(t)$ 为分解得到的第*i*个IMF分量; 公式中第*N*+1个IMF为剩余项。

本文仿真实验硬件配置为CPU: Intel (R) i7-3630QM 2.40 GHz; RAM: 8 GB; 软件配置为Windows10专业版64位操作系统, MATLAB2014a。

仿真验证

1. 仿真模型

基于MATLAB平台, 采用PSB建立一个有三条出线的配电网单相接地仿真故障模型, 如图5所示, 线路参数设置见表1。针对线路3, 仿真开始时间设为0 s, 故障时间设为0.02 s, 采样频率为10 MHz, 选择算法为ode15 tb, 故障类型设为A相接地故障, 故障距离设置为距变电站4.1 km, 产生配电网故障信号。在MATLAB中建模仿真得到配电网单相接地故障电压波形如图6所示。

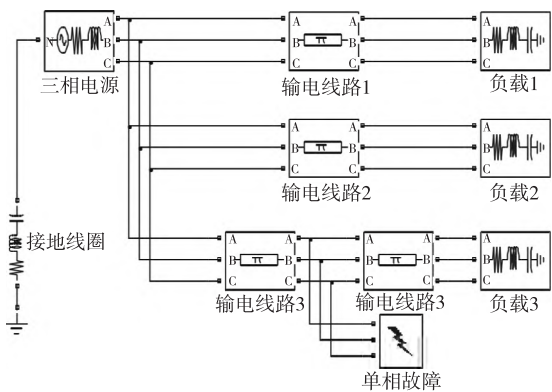


图5 配电网单相接地故障仿真模型

表1 线路参数

|    | 阻抗/ (Ω/km) | 感抗/ (mH/km) | 容抗/ (μF/km) |
|----|------------|-------------|-------------|
| 正序 | 0.1126     | 0.1302      | 0.1266      |
| 零序 | 0.198      | 5.106       | 0.1268      |

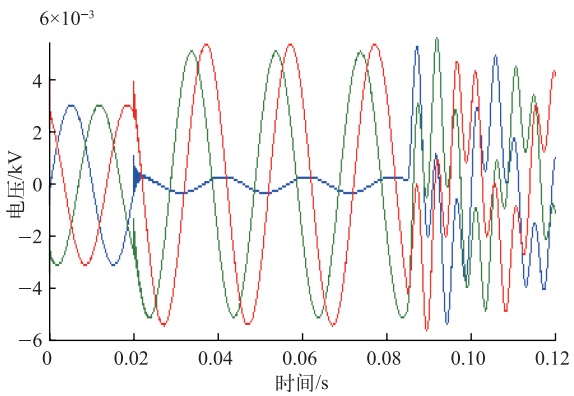


图6 配电网故障电压波形图

2. 信号的分解分析

为了验证改进EMD算法的有效性, 用分段有理四次Hermite插值代替传统三次样条插值, 将其代入到EMD过程中进行包络插值, 两种方法拟合插值得到插值包络线如图7所示。从图7中局部分大部分可以更为清晰地看出, 三次样条插值曲线存在“过冲和欠冲”现象, 不能很好地包络信号, 有理四次Hermite插值曲线拟合包络线的效果明显优于三次样条插值, 准确度更高。

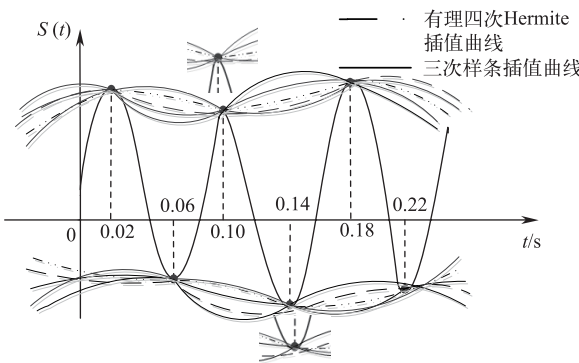


图7 插值包络线比较

用改进的EMD算法对A相接地故障信号进行分解处理, 并与传统EMD、EEMD进行比较, 结果分别如图8~图10所示。从图中可以看出, 传统方法EMD和EEMD过程模态混叠现象较为严重, 难以获得真实的故障特征信号, 不利于故障分析。

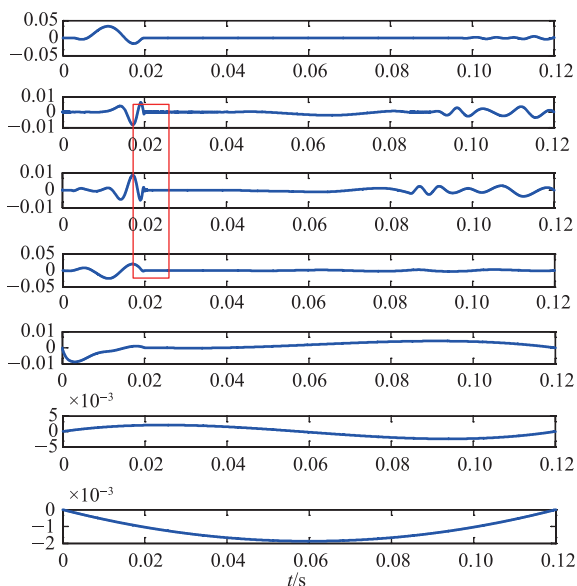


图8 故障信号传统EMD分解结果

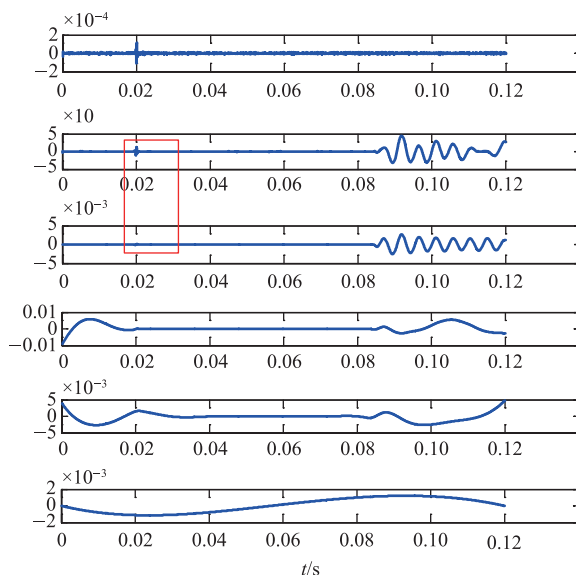


图10 故障信号I-EMD分解结果

故障信息主要包含在前几个分量且EEMD前两个分量存在大量高斯白噪声的情况下,选择三种分解方法中IMF3分量进行局部放大比较,如图11~图13所示。从三个局部放大图可以看出,在0.02 s故障发生时刻附近,EMD和EEMD算法分解的信号突变不明显,模态混叠现象明显,不易判断故障发生时刻,相对来说,I-EMD算法有一定的优越性,能较好地判别故障时刻。

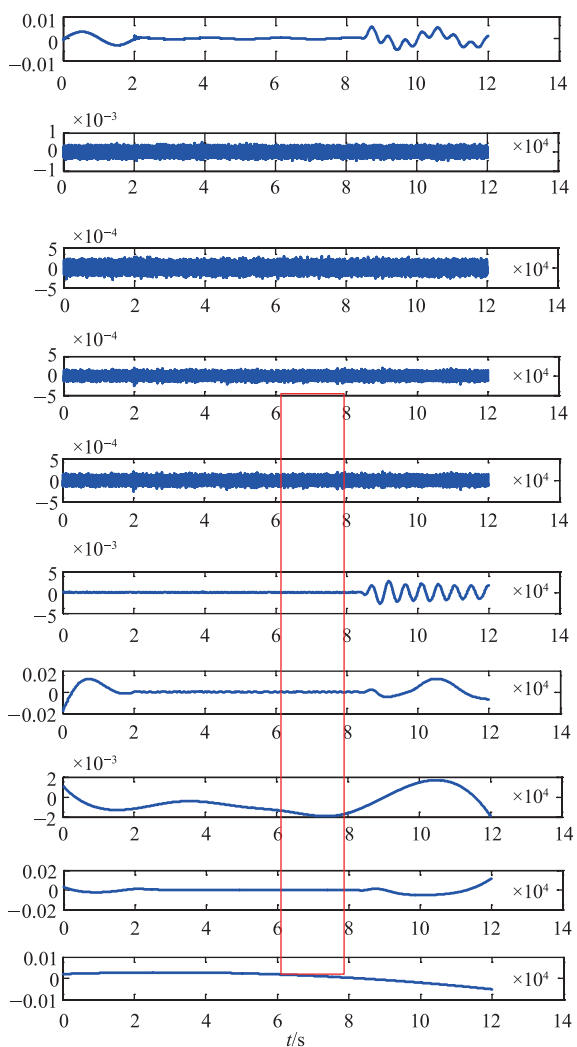


图9 故障信号EEMD分解结果

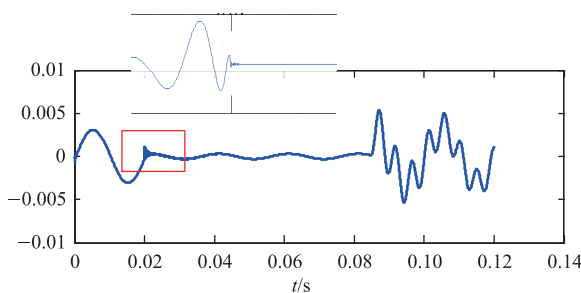


图11 EMD分解中IMF3分量局部放大图

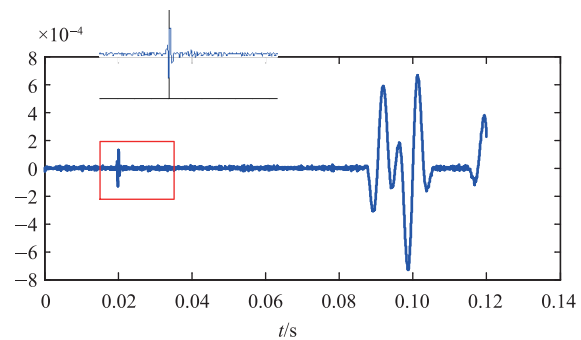


图12 EEMD分解中IMF3分量局部放大图

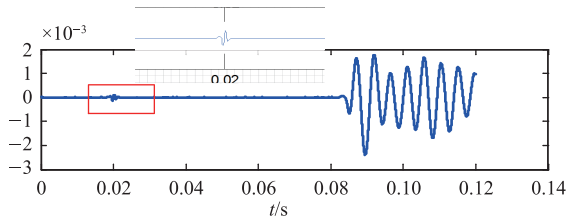


图13 I-EMD分解中IMF3分量局部放大图

综合上述分析可知，文中提出的I-EMD算法能抑制模态混叠，分解性能更好，有更好的噪声鲁棒性。

3. 三种分解方法的性能指标

针对前文仿真得到的配电网故障信号，根据式(7)和式(8)计算EMD、EEMD和I-EMD分解方法的性能指标，经计算，三种分解方法的评价指标结果对比见表2。

表2 各种方法分解结果性能指标比较

| 算法    | 分量   | RMSE    | IO       | Time/s  |
|-------|------|---------|----------|---------|
| EMD   | IMF2 | 0.286 3 | 0.056 93 | 0.362 5 |
|       | IMF5 | 0.278 4 |          |         |
| EEMD  | IMF2 | 0.232 4 | 0.034 67 | 0.547 6 |
|       | IMF5 | 0.191 5 |          |         |
| I-EMD | IMF2 | 0.086 3 | 0.017 85 | 1.346 8 |
|       | IMF5 | 0.078 9 |          |         |

从表2中三种分解方法处理后的三组数据可以看出：对于同样的IMF分量，本文提出的I-EMD方法对配电网故障信号分解后的RMSE和IO都更小，数据更理想，指标更优，比传统EMD、EEMD分解效果更好，提高了分解过程的包络线拟合效果，较好地改善了过冲、欠冲及模态混叠问题。因此验证了文中所提J-EMD方法在插值过程中拟合包络线性能的优越性。但在算法的计算时间上，因为提出的I-EMD方法在计算过程中增加了寻优过程，因此其计算时间比前两者都要长。

4. 故障定位结果分析

由前文几种分解方法，得到一系列IMF分量，其中选择IMF3分量作为故障定位分析特征量，在此基础上进行Hilbert变换，提取出瞬时频率，由瞬时频率的第一个突变点确定行波到达测量端的时刻。EMD-Hilbert变换的频谱图如图14所示，检测到故障行波波头到达的时间为0.130 7 s，同理得到行波波头到达另一端的时间为0.195 0 s，时间差为0.064 3 s；I-EMD-Hilbert变换的频谱图如图15所示，检测到故障行波波头到达的时间为0.134 s，同理可得行波波头到达另一端的时间为0.197 3 s，时间差为0.063

3 s。根据B型测距定位法的公式计算出故障点的位置，得到的故障距离比较见表3。

表3是对于不同分解方法选取同一个分量IMF3的定位结果比较，从中可以看出与实际故障距离4.1 km相比，文中提出的改进算法得到的定位距离误差为70 m，相比于其他两种方法的误差130 m和160 m，故障点位置误差更小，定位准确度更高，说明该方法具有更好的鲁棒性。

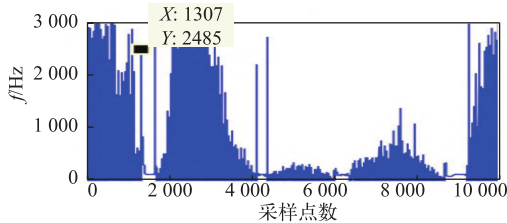


图14 EMD-Hilbert变换结果

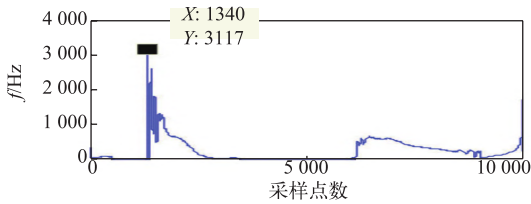


图15 I-EMD-Hilbert变换结果

表3 不同分解方法的定位结果比较

| 故障距离/km | 分解算法  | 时间差/s   | 计算距离/km | 绝对误差/km |
|---------|-------|---------|---------|---------|
| 4.1     | EMD   | 0.064 3 | 4.26    | 0.16    |
|         | EEMD  | 0.063 4 | 4.23    | 0.13    |
|         | I-EMD | 0.063 3 | 4.17    | 0.07    |

结束语

对于配电网故障信号分析，本文结合遗传算法和分段有理Hermite插值提出一种改进型的EMD算法。针对传统EMD方法包络插值时出现的问题，引入带有形状控制参数的分段有理四次Hermite插值函数，利用形状控制参数的灵活性，采用遗传算法对每阶分解过程寻优，找到最优的参数及对应的最优IMF分量，确保每阶得到的IMF都是最优的。遗传算法需不断搜索，增加了计算复杂性，新方法花费的时间较其他方法都要长，但该方法有效避免了“过冲和欠冲”现象，改善了模态混叠问题，正交性和均方根误差也优于其他算法，具有更好的检测结果，提高了定位准确度。文中的优化思想为信号分解提供了一种新的思路。EA

(收稿日期：2021-08-27)