doi: 10.11720/wtyht.2022.1437

黄泽佼,徐子东,罗晗,等.希尔伯特—黄变换(HHT)在 EH-4 数据去噪处理中的应用[J].物探与化探,2022,46(5):1232-1240.http://doi.org/ 10.11720/wtyht.2022.1437

Huang Z J, Xu Z D, Luo H, et al. Application of Hilbert-Huang transform in EH-4 data processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46 (5):1232-1240.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1437

希尔伯特—黄变换(HHT)在 EH-4 数据 去噪处理中的应用

黄泽位^{1,2},徐子东^{1,2},罗晗²,黄远生²

(1.海南省海洋地质资源与环境重点实验室,海南海口 570206;2.海南水文地质工程地质勘察院, 海南海口 571100)

摘要:工频噪声源于社会生产活动中产生的电磁噪声,常会造成视电阻率曲线病态或发散。为了提高数据处理与 解释的精度,本文针对EH-4数据中常见的工频噪声,采用希尔伯特—黄变换进行去噪处理,通过对实际数据的时 间序列处理分析可知,该方法利用数据自身的时间尺度特征自适应地分解信号,能够很好地去除工频噪声,为大地 电磁信号的去噪提供了一条有效的路径。另外,本文还针对经验模态分解过程中产生严重的模态混叠及"端点效应" 进行分析,运用聚合经验模态(EEMD)对仿真信号及实测数据的时间序列进行分解,有效地解决了模态混叠等问题。 关键词:EH-4 去噪;经验模态法(EMD);希尔伯特—黄变换(HHT);聚合经验模态(EEMD) 中图分类号:P631 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2022)05-1232-09

0 引言

大地电磁测深法是一种以天然交变电磁场为场 源的电磁勘探方法,其特点为:信噪比弱、频带分布 较宽、极易受到各种噪声的干扰,是典型非线性、非 平稳信号^[1-2],加之人文干扰噪声日益加剧,严重影 响了电磁勘探的处理和解释精度。自大地电磁法提 出以来,随着解释需求的提高,去噪方法一直都是学 者们所关心的话题。

傅里叶变换、小波变换等方法常用来分析复杂的信号,但其具有较大的局限性^[3]:傅里叶变换只适合分析频率固定的平稳信号,并不适合分析非平稳、非线性的大地电磁信号;而小波变换本质上是一种窗口可调的傅里叶变换,其窗口内的信号必须是 平稳的,并没有摆脱傅里叶变换的束缚,分解效果很 大程度上依赖于小波基函数的选取。另外,小波变 换是非适应性的,小波基一经选定,在整个信号分析 过程中是固定不变的。

1998年,美国国家航空航天局(NASA)首席专 家 Norden E. Huang(黄锷)院士在 Proceeding of the Royal Society of London(英国皇家学会会刊)发表了 一篇经典文章,一个全新的时频分析方法——希尔 伯特—黄变换(Hilbert-Huang transformation, HHT) 由此产生^[4-5]。通过 HHT 对信号进行一维经验模 态分解(empirical mode decomposition, EMD),将信 号分解为各阶本征模态函数(intrinsic mode function,IMF)和一个剩余分量(residue, res),各阶的 IMF 频率由高到低变化,且每一阶的 IMF 分量有其 自身的物理意义。再对 IMF 进行 Hilbert 变换,可得 到包含时间—能量—频率三维离散时频谱的分布特 征。希尔伯特—黄变换不仅具有多分辨率的特性, 而且具有自适应性,该方法的提出很好地解决了非 线性、非平稳信号的时频分析问题^[6-7]。化希瑞、汤 井田等^[8-9]引入 HHT 方法对 EH-4 原始时间序列进 行时频分析,根据 EMD 将复杂信号分解为随频率变 换的各阶本征模态函数,对受干扰的原始时间序列

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-12-06

第一作者:黄泽佼(1989-),男,硕士研究生,2015年毕业于中国地质大学(武汉),主要从事电磁数据处理,正、反演与解释方面的研究工作。 Email:1020236730@qq.com

通讯作者:徐子东(1985-),男,硕士研究生,2009年毕业于中国地质大学(武汉),长期从事水文地质调查及物探资料解释方面的研究工作。 Email:70199117@qq.com

进行处理,得到了很好的效果。但是其文章没有对 EMD 分解存在的一些问题,如"模态混叠"、"端点 效应"等进行讨论及处理。

本文主要针对 EH-4 数据中常见的干扰噪 声——工频噪声,采用希尔伯特——黄变换(HHT)进 行去噪处理。对于工频噪声,由于我国工业电流的 基频并不是稳定的 50 Hz,而是在其左右波动,应用 其他的去噪方法效果不佳,尤其是陷波法。本文采 用希尔伯特——黄变换(HHT)对实测的时间序列进 行 EMD 分解,结合各阶本征模态分量(IMF)的希尔 伯特谱,在一定程度上能将工频噪声的影响去除,但 从重构后的信号上看,EMD 分解过程中会产生严重 的"模态混叠"^[10]及"端点效应"。针对此问题,本 文引入聚合经验模态(EEMD)法,很好地抑制了"模 态混叠"及"端点效应"。通过实测数据表明,基于 聚合经验模态(EEMD)的希尔伯特——黄变换(HHT) 是一种有效的去噪手段,为大地电磁信号的去噪提 供了一条有效的路径。

 大地电磁信号噪声干扰分类及工频噪声 的特点

严家斌^[11]将噪声归类分为:人文噪声、随机噪 声、场源噪声和地质噪声。有些干扰信号在时间序 列上具有明显特征,如工频噪声等;有的干扰信号在 频率域上有很强的特征,如地磁噪声等;而有的干扰 信号在时间域上和频率域上均无任何明显特征,如 地质噪声等。所以,噪声类型不同,其表现出的电磁 特征也是不一样,因此,在物探工作过程中,研究噪声 的形成机制、分布特征及规律以及压制与消除噪声的 方法是至关重要的。

本文主要考虑的是人文噪声中尤为常见的工频 噪声。人文噪声源于社会生产活动中产生的电磁噪 声,主要有高压电线、无线电通讯、铁路公路等。人 文噪声的信号强度比天然电磁信号强几十甚至几百 倍,常会造成视电阻率曲线病态或发散,严重影响电 磁勘探的效果,因此在采集数据时尽可能要偏离供 电线,最好是能协调当地供电部门停电。但是有时 不可避免的会在有供电环境的干扰下进行信号的观 测采集,当外在环境影响无法剔除时,这就迫切需要 数据处理技术的提高,所以,如何在强工频干扰的环 境下提取弱的有效信号就显得尤为重要了。

2 HHT 在工频噪声去除中的应用

2.1 经验模态分解(EMD)分解过程

经验模态分解就是将信号 x(t) 分解成一系列

满足条件的 IMF 的过程,具体实现步骤^[3,12-14](图 1)为:



decomposition (EMD)

1)获得信号 x(t) 全部极值点,并通过插值方法 构建上下包络线的线性方程 $\mu_0(t)$ 、 $d_0(t)$,一般常 用的插值方法为三次样条插值。

2)通过上下包络线曲线方程计算得到平均值 曲线,得到 $m_0(t) = [\mu_0(t) + d_0(t)]/2$;记 $h_1(t) = x(t) - m_0(t)$ 。

3)判断 $h_1(t)$ 是否满足上面的 IMF 条件,若不 满足,令 $x(t) = h_1(t)$,重复步骤 1)、2),直到 $h_n(t)$ 满足 IMF 条件,记 $c_1 = h_n(t)$,即得到第一个 IMF。

4)将原始信号减去 $c_1(t)$,得到分解剩余项,即 $Res_1(t) = x(t)$,对 $Res_1(t)$ 重复前 4 个步骤的分解, 即可获得一系列的单分量信号 $c_i(t)$ (i = 1, 2, ..., n)。

5)事先给定特定的值,当剩余项小于该值时,则分解结束,可得:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t) + Res_n(t)$$

2.2 经验模态分解(EMD)的模态混叠问题

· 1234 ·

当信号存在跳跃性变化或是间断时,分解过程 中一些时间尺度就会丢失,信号本身存在的极值点 分布不均匀,这时就会造成分解的混乱,出现模态混 叠的情况,这时候所分解得到的各阶 IMF 分量就不 存在所谓的物理意义。模态混叠包括两个方面:① 一个本征模态函数 IMF 中同时包含了不属于同一 频率内的两个频率;②同一个本征模态函数包含了 尺度差异较大的信号分量^[15-17]。

建立如图 2 待分解的仿真信号,其中图 3 为模 拟信号的分量。由图 3 可知,待分解的仿真信号由 3 个信号分量组成,其中有 1 个信号分量为间断跳 跃性信号、1 个正弦信号及 1 个线性信号。

运用 EMD 方法对待分解的仿真信号进行经验 模态分解,得到如图 4。从原理上分析,由于待分解 的信号中存在间断性跳跃信号,会造成包络线的突 变,EMD 分解时会出现模态混叠现象。事实上,从 图 4 中可知,各阶的 IMF 分量,即不同的频率之间 互相干扰严重,EMD 并不能够将待分解的 3 个信号 分量完全分解出来。











Fig.4 The result of EMD decomposition

图 5 为某工区的实测数据,由图 5 原始信号可 以明显地看到,数据受到了很强的工频干扰,完全无 法观察到天然电磁场的特性。将实际信号通过 EMD 自适应地分解得到 18 阶固有本征模态函数 (IMF),如图 5(b)~(s)所示。通过分析可知,IMF5 ~IMF10 分量包含了不属于同一频率段的信息,每 一阶的 IMF 分量并没有表现出某一尺度范围的模 态,即同一阶的 IMF 分量表现出两个甚至多个频率 的信息,各阶 IMF 分量彼此间出现了严重的模态混 叠现象。

2.3 聚合经验模态分解(EEMD)抑制模态混叠

EEMD 的目的在于使白噪声相互抵消,其原 理^[18]为:高斯白噪声的频率分布很均匀,当信号混 入高斯白噪声之后,信号的极值点就会发生改变,使 极值点分布更为均匀,包络线不存在畸变的现象,从 而抑制了模态混叠现象。另外,高斯白噪声具有随 机性,每次加入的噪声信号都是独立的,所以,只有 加入了足够的噪声组,利用噪声的不相关性使其均 值为零,才能消除高斯白噪声对真实信号的影响。 EEMD 的分解步骤^[15-18]为:

 1)在原始信号 x(t)的 N 次分解时(N>1)加入 均值为零的高斯白噪声;

2) 对加有高斯白噪声的信号进行 EMD 分解,得到 K 个 IMF 和一个剩余分量 Res;

3)由于高斯白噪声属于随机噪声,具有不相关的特性,其均值为零。将各阶相对应的 IMF 分量进 行求和取总平均,以消除多次加入高斯白噪声对真 实 IMF 和 Res 的影响,得到最终 EEMD 分解结果。

对上一节提到的仿真信号采用 EEMD 进行分 解:由图 6 可知,通过加入的白噪声,EEMD 分解很 好地分离了 3 个模拟信号分量,模态混叠现象得到 了很好地抑制,使得到的各阶 IMF 分量有实质的物 理意义。

上小节提到,对实测数据的原始时间序列进行 EMD分解,由于模态混叠现象,在信号重构的过程









The result of EEMD decomposition

Fig.6

中就有可能导致有效信号也被剔除,各阶 IMF 分量 也失去了分解的意义。对此,本文采用 EEMD 方法 对原始数据进行分解处理。本次 EEMD 分解采用的 噪声方差为 0.01,组数为 400 的白噪声,经分解得到 各阶本征模态函数,见图 7。由图 7 可知,各阶的 IMF 分量只包含其自身频率相近的信号成分,EMD 分解 中的模态混叠现象已经被 EEMD 完全抑制。





图 8 为信号通过 HHT 变换后得到的时间—能

量一频率三维离散时频谱。EH-4 低频段的频率为 10~1000Hz, 从希尔伯特谱上可以看出, 这个区域



内的能量很强, 且分布不均匀。在 0~200 Hz 内可 以看到,50 Hz 左右有一红色的、能量很强且频率固 定的水平条带; 另外在 150 Hz 左右也存在类似的高 能量水平条带。可以判断这 2 个能量高的条带是由 50 Hz 及其谐波所引起的工频噪声。另外, 从希尔 伯特谱也可以看到, 图中的能量点越多就表示被分 解的信号的能量就越强, 越有利于数据的处理与解 释。所以, 在实际数据处理中, 可以通过时间序列的 希尔伯特谱, 将能量弱的叠加去除, 保留能量强的叠 加, 这样在一定程度上可以增加信号的信噪比。

将 EEMD 分解的各阶本征模函数做希尔伯特 变换,进行频谱谱分析,得到图 9。分析找出哪阶 IMF 是由于工频电引起的,将该阶 IMF 置零,然后将 信号进行重构,重构信号在一定程度上就能消除工 频电的干扰。从图 9 可知,在频率域中,EEMD 分解 过程表现为从高频到低频的滤波过程。具体表现 为:IMF1~IMF4 分量能够很好地体现原始电磁信号 的高频细节信息;IMF5 分量在 150 Hz 左右幅值表 现为突然性的"尖窄"跳跃且变化较大,同样 IMF6 分量及 IMF7 分量在 50 Hz 左右幅值也存在同一规 律的异常跳跃;IMF8~IMF10 能够很好地体现原始 电磁信号的低频细节信息。综上所述,从各阶本征 模态分量的频谱中可以看出 IMF5~IMF7 分量中包 含了异常信息且与工频噪声的特征吻合较好,应作 为噪声源去掉。

分别将 EMD 与 EEMD 分析处理后的信号进行 重构,可得图 10。由 EMD 分解重构后的信号可知, 在重构后信号的首部和尾部出现了信号的变形(如 图中红框内所示),这种现象称之为"端点效应"^[5]。



图 9 EEMD 分解的各阶 IMF 分量的频谱 Fig.9 The frequency spectrum of IMF decomposed by EEMD



-original signal ; b-signal reconfiguration decomposed by EEMD; c-signal reconfiguration decomposed by EMD; d-the error of signal reconstruction 图 10 去噪后信号重构结果

Fig.10 The result of signal reconfiguration after denoising

这种现象引起的原因为,当信号的边界端点不是极 值点时,这就导致构成上下包络线的三次样条曲线 在数据序列的两端出现发散。解决的方式有两种: 其一,对于短数据序列,可以将原始信号进行扩边, 即对原始数据的首尾各加一定量的数值,在运算结 束后进行裁边,恢复序列的原始长度。另一种方法 为"掐头去尾"[19-20]。另外,其重构后的信号局部有 非正常的起跳(如图中绿框内所示),预测其引起的 原因为由于模态混叠的原因将过多的 IMF 分量删 除,使相应的有效信号丢失所造成。

由 EEMD 分解重构后的信号可知, EEMD 在一

定的程度上解决了边界问题所引起的"端点效应". 目重构的信号其间没有不正常的波动,可见模态混 叠现象得到明显的抑制,信号恢复了天然信号所具 备的特点,信号分解重构后的误差正是所去除的工 频噪声,信号整体上平稳变化且频率是固定的。

EH-4 夫工频噪声实例分析 3

图 11 为某勘查区某测点的 EH-4 时间序列,该 点旁有输电线,采集受到严重的干扰。由图 11 可 知,测点高频段的电道未见明显的工频干扰,高频段



Fig.11 The original time series of measuring point

的磁道、中频段的电道磁道及低频段的电道磁道均 受到工频干扰较为明显。本文采用的噪声组数为 200组,均方差 0.001,根据上述 EEMD 分析方法,去 除工频噪声并将信号进行重构,将重构后的时间序 列写成二进制 Y 文件,导入 EH-4 自带的处理系统 IMAGEM。去噪后的时间序列如图 12 所示,各频段 的噪声得到了很好地压制。

通过 IMAGEM 软件处理所得到的阻抗视电阻 率曲线如图 13 所示,图中红色框线显示:无论是 TE 还是 TM 模式,中、低频信号在未去除工频噪声之前,有效信号被严重压制,视电阻率曲线出现了病态 或发散的现象,曲线在中、低频段存在大量的缺点、 间断,走势形态完全无法判断。而在中、低频信号去 除工频噪声之后,视电阻率曲线的中低频段曲线缺 点及间断现象得到较好地改善,曲线的走势形态趋 于明显,尤其是 TM 模式,中、低频的电阻率曲线更 加的平滑。可见,去噪的效果很明显。



图 13 TE 模式(a)和 TM 模式(b)去工频噪声前后视电阻率曲线对比



4 结论

本文研究了 EH-4 数据处理的方法,以工频噪

(a) TE 模式

1)通过对野外实测大地电磁信号进行希尔伯特—黄(HHT)变换、二维 Hilbert 时频分析,结果显示 HHT 变换能充分体现大地电磁信号的特征,该方

声作为主要研究对象,通过分析得出以下结论:

(b)TM 模式

法在一定程度能去除工频干扰噪声。本文应用聚合 经验模态分解(EEMD)法,通过实际数据的处理,较 好地抑制了 EMD 分解所引起的模态混叠现象,在去 除信号的同时保留了更多有效信号,在一定程度上 也很好地解决了"端点效应"的问题。

2)采用基于 EEMD 的 HHT 变换对实际数据进行去噪,在中、低频信号去除工频噪声之后,视电阻率曲线的中、低频段曲线间断的现象得到明显的改善,曲线的走势形态趋于明显,充分说明基于 EEMD的 HHT 变换在去工频噪声中的可行性。

参考文献(References):

 王书明,王家映.大地电磁信号统计特征分析[J]. 地震学报, 2004,26(6):669-674.

Wang S M, Wang J Y. Analysis on statistic characteristics of magnetotelluric signal [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6): 669–674.

[2] 王书明,王家映.关于大地电磁信号非最小相位性的讨论[J].
 地球物理学进展,2004,19(2):216-221.

Wang S M, Wang J Y. Discussion on the nonminimum phase of magnetotelluric signals [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19 (2): 216–221.

- [3] 何兰芳,王绪本,何展翔,等. MT 时间序列的小波去嗓分析
 [J]. 地震地质,2001,23(2):222-226.
 He L F, Wang X B, He Z X, et al. Wavelet-based denoising of MT time series[J]. Seismology and Geology, 2001,23(2):222-226.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proceeding of the Royal Society of London, 1998, 454(1971):903-995.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R.A new view of the nonlinear water waves: The Hilbert spectrum [J]. Annual Review of Fluid. 1999, 31(1):417-457.
- [6] 谭善文. 多分辨希尔伯特—黄(Hilbert-Huang)变换方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2001.
 Tan S W. Research on multi-resolution Hilbert-Huang transforma-

tion method[D]. Chongqing: Chongqing University,2001.

[7] 杨生.大地电磁测深法环境噪声抑制研究及应用[D].长沙: 中南大学,2004.

Yang S. Research and application of environmental noise restraining by magnetotelluric sounding [D]. Changsha: Central South University, 2004.

- [8] 化希瑞,汤井田,朱正国,等. EH-4系统的数据二次处理技术及应用[J].地球物理学进展,2008,23(4):1261-1268.
 Hua X R, Tang J T, Zhu Z G, et al. The improvement and applications of EH-4 system data processing technique[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1261-1268.
- [9] 汤井田,蔡剑华,任政勇,等. Hilbert-Huang 变换与大地电磁 信号地时频分析[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40 (5):1400-1405.

Tang J T, Cai J H, Ren Z Y, et al. Hilbert-Huang transform and time-frequency analysis of magnetotelluric signal [J]. Journal of Central South University:Science and Technology, 2009,40(5): 1400–1405.

- [10] 练继建, 荣钦彪, 董霄峰, 等. 抑制模态混叠的 HHT 结构模态
 参数识别方法研究[J]. 振动与冲击,2018,37(18):1-8.
 Lian J J, Rong Q B, Dong X F, et al. Structural model parameter identification method based on an improved HHT for suppressing mode mixing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018,37(18): 1-8.
- [11] 严家斌. 大地电磁信号处理理论及方法研究[D].长沙:中南大学, 2003.

Yan J B. Research on the theory and method of magnetotelluric signal processing[D]. Changsha: Central South University, 2003.

[12] 张双喜,陈超,王林松,等. 二维经验模态分解及其在位场去 噪和分离中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2855-2862.

Zhang S X, Chen C, Wang L S, et al. The bidimensional empirical mode decomposition and its applications to denoising and separation of potential field [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (6): 2855–2862.

- [13] 白大为, 底青云, 王光杰,等. Hilbert-Huang 变换与 E 信号处理[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 1032-1038.
 Bai D W, Di Q Y, Wang G J, et al. Hilbert-Huang transformation and ELF signal processing[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (3): 1032-1038.
- [14] 于彩霞,巍文博,景建恩,等.希尔伯特—黄变换在海底大地 电磁测深数据处理中的应用[J].地球物理学进展,2010,25
 (3):1046-1056.
 Yu C X, Wei W B, Jing J E, et al. Application of Hilbert-Huang transformation to marine magnetotelluric sounding data processing [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1046-1056.
- [15] 齐天, 裘焱,吴亚锋. 利用聚合经验模态分解抑制振动信号中的模态混叠[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(2): 103-106.
 Qi T, Qiu Y, Wu Y F. Application of EEMD to suppression of mode mixing in oscillation signals [J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(2): 103-106.
- [16] 吕建新,吴虎胜,田杰. EEMD 的非平稳信号降噪及其故障诊断应用[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(28): 223-227.
 Lyu J X, Wu H S, Tian J. Signal denoising based on EEMD for non-stationary signals and its application in fault diagnosis [J].
 Computer Engineering and Applications, 2011, 47(28): 223-227.
- [17] 陈可,李野,陈澜. EEMD 分解在电力系统故障信号检测中的应用[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 263-266.
 Chen K, Li Y, Chen L. Ensemble empirical mode decomposition for power quality detection applications[J]. Computer Simulation, 2010, 27(3): 263-266.
- [18] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advance in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [19] 刘慧婷, 张吴, 程家兴. 基于多项式拟合算法的 EMD 端点问题的处理[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(16): 84-86,

100.

Liu H T, Zhang W, Cheng J X. Dealing with the end issue of EMD based on polynomial fitting algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2004,40(16): 84-86,100.

[20] 黄大吉,赵进平,苏纪兰.希尔伯特—黄变换的端点延拓[J]. 海洋学报,2003,25(1):1-11.
Huang D J, Zhao J P, Su J L.Endpoint extension of Hilbert-Huang transform[J]. Acta Oceanologica Sinica,2003,25(1):1-11.

Application of Hilbert-Huang transform in EH-4 data processing

HUANG Ze-Jiao^{1,2}, XU Zi-Dong^{1,2}, LUO Han², HUANG Yuan-Sheng²

(1.The key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, China; 2. Hainan Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Haikou 571100, China)

Abstract: Industrial frequency noise comes from the electromagnetic noise produced in social activities, and it causes apparent resistivity curves to become pathological or divergent. To improve the accuracy of data processing and interpretation, this study used the Hilbert-Huang transform (HHT) to remove the common power frequency noise in EH-4 data. According to the time series processing and analysis results of measured data, this method can self-adaptively decompose signals according to the time-scale characteristics of the data and successfully remove the industrial frequency noise in the data, thus providing an effective way to remove the noise in magneto-telluric signals. In addition, this study also analyzed the serious modal aliasing and "end effect" occurring in the process of the empirical mode decomposition and decomposed simulation signals and the time series of measured data using the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), effectively solving problems such as modal aliasing.

Key words: EH-4 data denoising; empirical mode decomposition(EMD); Hilbert-Huang transform; ensemble empirical mode decomposition (EEMD)

(本文编辑:王萌)