

基于经验模态分解方法的拉曼光谱信号处理研究

李明, 赵迎, 崔飞鹏, 刘佳

(钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081)

摘要:经验模态分解(EMD)方法是一个以信号内在物理频率成分为对象的自适应时频分析方法, 而常见的非平稳信号分析方法, 比如小波分析, 它需要选择小波基, 不同小波基的分析结果不同; 拉曼光谱信号是典型的非线性和非平稳信号, EMD方法充分地保留了信号本身的非线性和非平稳的特征, 适应于拉曼光谱信号的分析。实验在自行研制的拉曼光谱测试平台上获得了原始的拉曼光谱信号, 并通过经验模态分解将信号分解成不同频率的10个本征模式分量, 信号能量集中在 750 cm^{-1} 和 1500 cm^{-1} 左右, 最后进行了频率成分分析和去噪处理, 并和小波分析方法进行了对比, 验证了EMD方法的有效性和实用性, 该方法在拉曼光谱信号分析中有较好的应用前景。

关键词:经验模态分解(EMD); 拉曼光谱; 本征模式分量(IMF); 信号自适应分析

中图分类号: O657.37

文献标志码: A

文章编号: 1000-7571(2019)05-0057-04

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是处理非线性、非平稳信号的时频分析方法, EMD具有类似小波变换的二进制滤波特性, 区别在于其自适应地分解而不需要选择基函数, 也不需要确定分解层数。EMD根据非线性、非平稳信号等特点, 自适应地将信号分解为若干个本征模式分量^[1](Intrinsic Mode Function, IMF), 每个IMF是信号的一个单分量信号, 包含的频率成分随信号本身的变化而变化, 该方法不需要事先选择基函数, 而是根据信号本身的特性自适应地产生合适的IMF, 而这些IMF能很好地反映信号在任何时间局部的频率特征^[2-3], 实现真正的信号自适应时频分析。

拉曼光谱信号是典型的非线性、非平稳信号。研究表明, 拉曼光谱中噪声有两类: 来自仪器的电子热运动噪声和外部通信系统干扰。噪声的存在极大影响了光谱真实信息的解读, 因此信号分析及降噪在光谱解析中有着举足轻重的作用。

本文在自行研制的拉曼光谱测试平台获得的数据基础上展开研究, 运用EMD方法对拉曼光谱信号进行分解, 通过对分解结果的进一步分析可以得到信号的频率分布, 从而用于信号滤波和成分分析。

1 EMD 相关理论

黄锷(Huang)等^[4-5]提出一种自适应的信号时

频分析方法—希尔伯特-黄变换(HHT), 其核心经验模态分解(EMD), EMD分解方法能够将任意的信号自适应地分解成为多个不同频带的IMF分量。所谓的IMF应满足以下两个条件: (1)分量的过零点和极值点数量必须相等或者至多相差1; (2)分量关于时间轴局部对称, 即信号上面的任意一点, 由局部极大指点确定的包络线和局部极小值确定的包络线的均值为零。

EMD的分解步骤如下:

步骤1: 如图1所示, 先确定原始信号 $x(t)$ 的所有极大指点和极小值点, 并采用三次样条差值函数分别对其进行拟合, 得到信号的上包络线和下包络线, 然后求得上、下包络线的均值记为 $m_1(t)$, 如式(1)所示, 计算 $x(t)$ 和包络线均值 $m_1(t)$ 的差值, 记为 $h_1(t)$,

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (1)$$

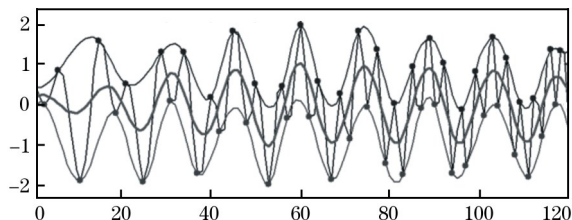


图1 EMD的筛选过程

Fig. 1 The shift process of EMD

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFF0108900)

作者简介: 李明(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为分析仪器的研制; E-mail: lmsq@163.com

步骤 2: 判断 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件, 若不满足, 将 $h_1(t)$ 作为原始信号, 计算 $h_1(t)$ 和包络线均值 $m_{1,1}(t)$ 的差值, 记为 $h_{1,1}(t)$ 重复步骤 1, 得到:

$$h_{1,1}(t) = h_1(t) - m_{1,1}(t) \quad (2)$$

反复的筛选 k 次, 直到 $h_{1,k}(t)$ 满足 IMF 的条件, 并记 $c_1(t) = h_{1,k}(t)$, 则 $c_1(t)$ 为从原始信号 $x(t)$ 中提取的第 1 阶 IMF, 是信号中最高频率的分量。

步骤 3: 将第 1 阶 IMF 分量 $c_1(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中提取出来, 得到余量 $r_1(t)$, 有:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将 $r_1(t)$ 作为原始信号, 重复步骤 1 和步骤 2, 依次提取第 2 阶 IMF $c_2(t)$, 第 3 阶 IMF $c_3(t)$, ..., 第 n 阶 IMF $c_n(t)$, 第 1 阶余量 $r_1(t)$, 第 2 阶余量 $r_2(t)$, ..., 第 n 阶余量 $r_n(t)$ 则有:

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - c_2(t) \\ r_3(t) &= r_2(t) - c_3(t) \\ &\vdots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - c_n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 原始信号 $x(t)$ 的最终分解结果可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

$r_n(t)$ 为残余量, 不能从中提取 IMF 分量, 代表信号的最终趋势。

2 拉曼光谱测试平台

自行研制的拉曼光谱测试平台结构及实物如图 2 所示, 该平台由激光器提供稳定的激光经二色镜进入聚焦镜, 聚焦镜将激光会聚并将拉曼散射光收集, 拉曼散射光由耦合镜进入分光系统, 光栅实现

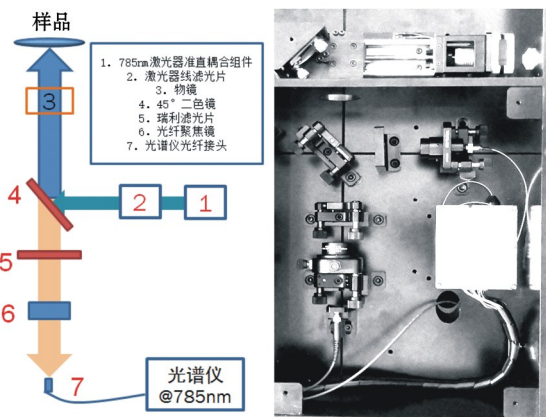


图 2 拉曼光谱测试平台结构及实物图
Fig. 2 Structure and physical diagram of Raman spectroscopy test platform

不同波长信号光谱的分辨, 最终由主机控制器对信号进行采集、处理并将数据传送至计算机。平台光谱采集范围为 $200 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$, 光谱分辨率为 6.5 cm^{-1} , 激发波长为 785 nm , 功率为 $0 \sim 450 \text{ mW}$ 连续可调。

3 实验与数据分析

实验采用上述拉曼光谱测试评测采集到一组塑料的拉曼光谱信号, 试验条件为激光器波长 785 nm ; 激光器能量 20 mW ; 积分时间 1 s 。其未经处理的原始拉曼信号如图 3 所示, 图 3 中可见, 原始信号附加有一定的高频噪声, 有效的拉曼信号集中在 750 cm^{-1} 和 1500 cm^{-1} 左右。

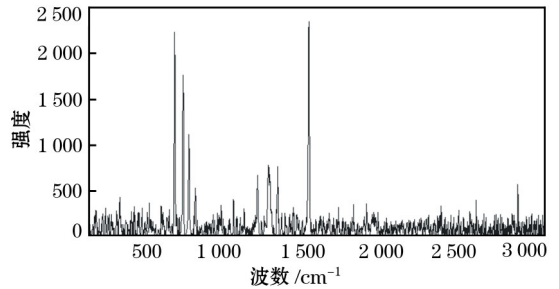


图 3 原始拉曼信号
Fig. 3 The original Raman signal

图 4 所示为上述拉曼信号经过 EMD 分解的 IMF 分量, 一共分解出 10 个 IMF 和一个 $r(t)$, 按信号频率的高低依次排布, 各阶 IMF 代表了信号本身的频率成分的实际分布。

EMD 方法通过对信号从最小的局部特征时间尺度进行筛分, 从而获得局部最短周期的 IMF 分量, 随后经过层层筛分, 可获得局部周期长度逐渐增多的多个 IMF, 每一个 IMF 分量都有明显的物理意义, 也包含了一定范围的特征尺度^[3]。图 5 所示为第 1 阶和第 2 阶 IMF, 代表信号中频率较高的组分, 根据文献所述^[4], 拉曼光谱激光源波长为纳米级, 考虑到正负几千的散射频移, 拉曼光谱有效信息主要集中在极高频至甚高频段。从图 5 可以看出, 信号能量集中在 750 cm^{-1} 和 1500 cm^{-1} 左右, 也是拉曼有效信号所在的范围。

信号经过 EMD 方法分解以后的各阶 IMF 分量的频率是按 2 的负幂次方形式递减, 而噪声的频率较高, 各个 IMF 分量包含噪声的强度也越来越弱^[3]。根据信号的频率分布, 对拉曼原始信号进行滤波分析处理, 将原号中较高频率的两个 IMF 滤除

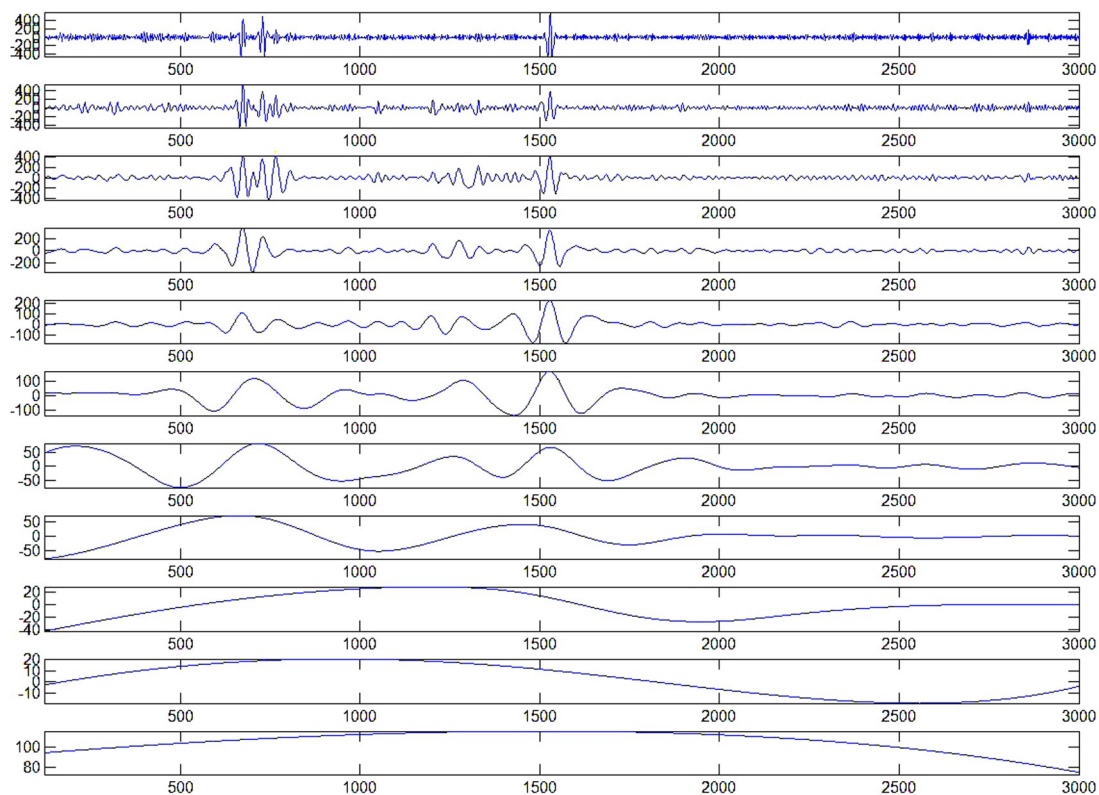
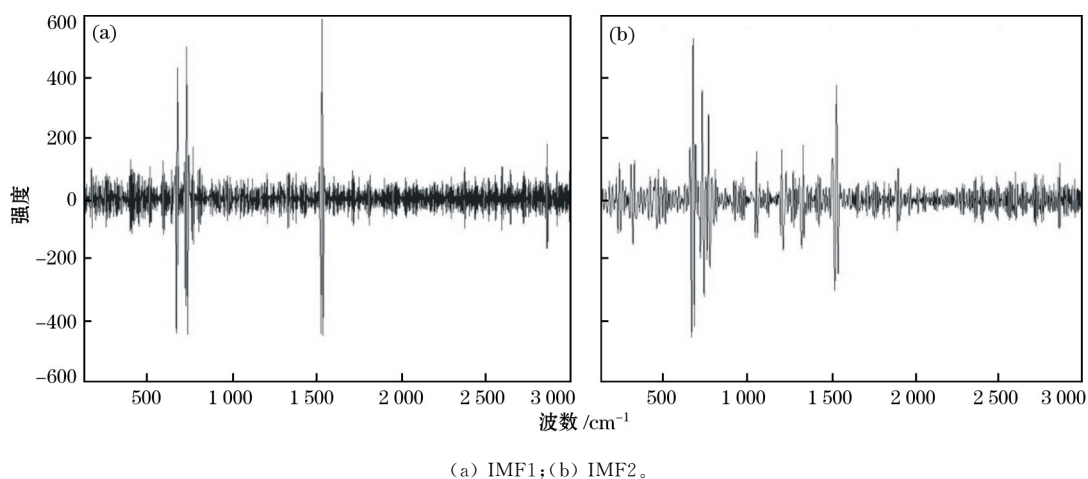


图 4 拉曼信号的各阶本征模式分量

Fig. 4 IMFs of Raman signal



(a) IMF1;(b) IMF2。

图 5 第 1 阶 IMF 和第 2 阶 IMF

Fig. 5 The first IMF and the second IMF

后得到降噪后的信号。如图 6 所示为拉曼原始信号、基于小波分析的去噪处理以及基于 EMD 方法的去噪处理的结果对比,可以看出处理后的信号比较平滑,和小波分析的去噪相比,EMD 方法获得了更好的去噪效果,需要指出的是,因为有效信号和高频噪声有重合的频率段,导致两种滤噪方法后的有效信号强度均有所降低,但 EMD 方法去噪后的信噪比仍然要高于小波分析。

4 结语

本文在自行设计的拉曼光谱测试平台上获得了相应的拉曼光谱信号,并通过 EMD 的方法进行了信号的分解,获得了被测信号的 10 个 IMF,并进行了频率成分分析和去噪处理,证明了 EMD 方法分析拉曼光谱的有效性和实用性。但目前 EMD 方法分析时间长,数据运算量大,若能开发出类似于快速

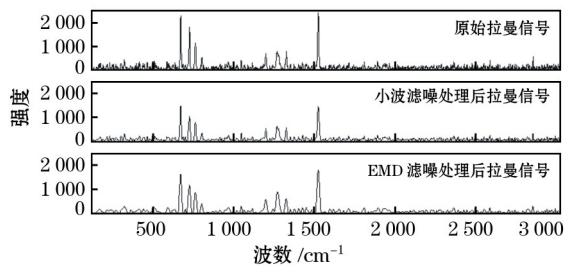


图 6 原始信号和滤噪处理后的信号

Fig. 6 The original signal and signal after noise filtering

傅里叶变换的快速 EMD 方法,会大大有利于 EMD 方法在拉曼光谱领域的使用和推广。

参考文献:

- [1] 李庆波,韩庆阳.人体血氧饱和度检测中消除脉搏波信号高频噪声的方法[J].光谱学与光谱分析,2012,32(9):2523-2527.
LI Qing-bo, HAN Qing-yang. The method of removing high-frequency noise in pulse wave signal in detecting ox-

xygen saturation of human[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2012,32(9):2523-2527.

- [2] 李卿,张国平,刘洋.基于 EMD 的拉曼光谱去噪方法研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(1):142-145.
LI Qing,ZHANG Guo-ping,LIU Yang.A Study of Raman spectra denoising based on empirical mode decomposition[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(1):142-145.
- [3] 赵肖宇,方一鸣,王志刚,等.EEMD 自适应去噪在拉曼光谱中的应用[J].光谱学与光谱分析,2013,33(12):3255-3258.
ZHAO Xiao-yu,FANG Yi-ming,WANG Zhi-gang.EEMD De-Noiseing adaptively in Raman spectroscopy,2013,33(12):3255-3258.
- [4] 薛嫚.总体平均经验模式分解法的理论研究[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [5] Huang N E,Zheng S,Long S R,et al.The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J].Proc. R. Soc. Lond.A,1998,454:903-995.

Study on signal processing of Raman spectrum based on empirical mode decomposition method

LI Ming,ZHAO Ying,CUI Fei-peng,LIU Jia
(NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Empirical mode decomposition (EMD) method was an adaptive time-frequency analysis method which took the inherent physical frequency components of signals as the objective. The common non-stationary signal analysis methods such as wavelet analysis needed to select wavelet basis, and the results of various wavelet bases were different. Raman spectrum signal was a typical non-linear and non-stationary signal. EMD method fully retained the characteristics of nonlinearity and nonstationarity characteristics of the signal itself, and it was suitable for the analysis of Raman spectrum signals. The original Raman spectrum signals were obtained on the self-developed Raman spectrum testing platform. The signals were decomposed into 10 intrinsic mode function (IMF) components with different frequencies using EMD method. The energy of signals was concentrated around 750 cm^{-1} and 1500 cm^{-1} . Finally, the frequency component analysis and denoising treatment were conducted. The effectiveness of EMD method was verified by comparing with the wavelet analysis method. The proposed method had a good application prospect in signal analysis of Raman spectrum.

Key words: empirical mode decomposition (EMD); Raman spectrum; intrinsic mode function (IMF); signal adaptive analysis