

基于 EEMD 方法的火花光谱信号处理研究

李明^{1,2}, 李颜冰³, 张翹楚², 史玉涛², 崔飞鹏², 赵迎^{1,2}

1. 钢铁研究总院, 北京 100081
2. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100094
3. 益阳职业技术学院, 湖南 益阳 413055

摘要 基于电荷耦合器件(CCD)的火花光谱仪是一种用于元素成分分析的光谱仪,其输出信号是高频的 CCD 有效信号和低频的背景噪声叠加在一起的复合信号,火花光谱的有效信息主要集中在信号的较高频段,很容易被背景噪声淹没和干扰,因此获取完整有效的光谱信息,需要对信号进行有效处理。经验模态分解(EMD)方法可以自适应分析信号,不需要设置参数,但存在模态混叠的问题,信号中不同频率的成分可能会混淆;集合平均经验模态分解(EEMD)成功地解决了 EMD 方法中模态混叠的问题,能更加清晰地将信号中的不同频率成分分解出来,因此更加适合光谱信号的研究。使用火花光谱仪对不锈钢标准样品(选取短波段、中波段和长波段代表性元素碳 C、锰 Mn、镍 Ni、铬 Cr 和铝 Al)进行采集,获得了标准样品的火花光谱原始信号。通过 EEMD 方法进行自适应的分析和处理,每个 CCD 信号均获得了 11 阶固有模态函数(IMF),根据信号的幅频特性,IMF1—IMF2 表征为特征信号部分,最后一阶 IMF11 为背景噪声成分。通过重构上述处理信号,结合基于连续小波变换的惩罚最小二乘法进行了二次处理,获得了最终处理后的信号。将处理后的信号导入仪器处理软件中,获得了碳、锰、镍、铬和铝元素的含量梯度曲线,结果显示采用 EEMD 方法处理的信号和原处理方法效果相当,但省去了额外采集空白噪声段的环节,大大节省了分析的时间,从而提高了仪器的运行效率。

关键词 集合平均经验模态分解方法;电感耦合信号;火花光谱;元素分析

中图分类号: O657.31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)06-1923-06

引言

火花光谱中的原始测量信号由电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)有效信号以及噪声信号组成,引起噪声的来源包括:散粒噪声、暗电流噪声以及数据采集噪声等等,噪声的存在会降低仪器检测灵敏度和信噪比,甚至会湮没有效的光谱信息。张恺^[1]将一种自适应经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法应用于激光波长测量实验系统输出信号的降噪预处理中,设计了归一化降噪指标,并将其应用到基于劈尖干涉的波长测量实验系统输出信号的降噪中。肖启阳等^[2]利用一维经验小波变换对散斑图片进行逐行分解,获得一系列的固有分量。根据分解后分量的核概率密度函数提出基于核概率密度的自适应降噪法,但小波分析依赖于小波基的选择,无法做到自适应。

本文使用平均经验模态分解(ensemble empirical mode

decomposition, EEMD)方法对火花光谱信号进行自适应分解,得到有物理意义的 CCD 有效信号段和低频背景段,在重构并二次处理了火花光谱信号后,获得了更好的特征谱图。最后,通过仪器自带的软件进行统计分析,得了与原仪器自带方法等同的效果,但省去了采集充气背景信号的流程,显著缩短了分析时间,为火花光谱信号处理提供了一种新的方法。

1 理论部分^[3]

EMD(empirical mode decomposition)是 Huang 等^[4]于 1998 年提出一种信号时频分析方法,能将信号自适应分解成有限个具有物理意义的分量—固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)。但 EMD 方法的一个重要缺陷就是模态混叠,为此, Wu 等在对白噪声进行 EMD 分解深入研究的基础上,提出了平均经验模态分解(EEMD)方法^[5],其基本步

收稿日期: 2020-01-13, 修订日期: 2020-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1103900)资助

作者简介: 李明, 1982 年生, 钢铁研究总院纳克检测技术有限公司高级工程师 e-mail: lmsq@163.com

骤^[6]为:

步骤 1: 给被分析信号 $x(t)$ 加入一组白噪声 $w(t)$ 来获得一个总体 $X(t)$

$$X(t) = x(t) + w(t) \quad (1)$$

步骤 2: 对 $X(t)$ 进行 EMD 分解, 得到相应的各阶 IMF

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (2)$$

步骤 3: 给被分析信号 $x(t)$ 加入一组不同的白噪声 $w_j(t)$ 对获得另一个总体 $X_j(t)$, 对 $X_j(t)$ 进行 EMD 分解后, 得到相应的各阶 IMF

$$X_j(t) = \sum_{i=1}^n c_{ji}(t) + r_j(t) \quad (3)$$

步骤 4: 求得各个 IMF 的均值作为最终信号的 IMF

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n c_{ji}(t) \quad (4)$$

式(4)中, N 为加入白噪声的次数, 即总体的个数, ϵ 是加入白噪声的幅度, ϵ_n 是原始信号和由最终的 IMF 之和所得信号的误差。

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

EEMD 方法和 EMD 方法相比较, 克服了其模态混叠缺陷, 能更加清晰的将信号中不同频率的成分分解出来, 更加适合频率成分丰富的火花光谱信号的分析 and 处理。

2 实验部分

2.1 样品

采用钢铁研究总院分析测试所研制的 GSB03—2028 系列不锈钢光谱标准物质, 关注的元素为碳 C、镍 Ni、锰 Mn、铬 Cr 和铝 Al(见图 1)。



图 1 不锈钢标准样品

Fig. 1 Samples of stainless-steel reference material

2.2 仪器与参数设置

使用钢研纳克检测技术股份有限公司 SparkCCD 7000 型火花光谱仪, 仪器参数设置如下: 激发频率 500 Hz, 充气时间 15 s, 预燃时间 10 s, 积分时间 8 s。

2.3 方法

实验室环境温度为 25 °C, 在仪器上对 GSB03—2028 的 6 块样品进行测试, 共获得 5 个元素的 6 组共 30 张火花光谱原始 CCD 信号, 作为示例, 图 3 给出了碳 C 元素的 6 个原始 CCD 信号, 可见信号的有效信息被高强度的背景噪声掩盖, 很难直接获取有效信息, 必须对信号进行处理。

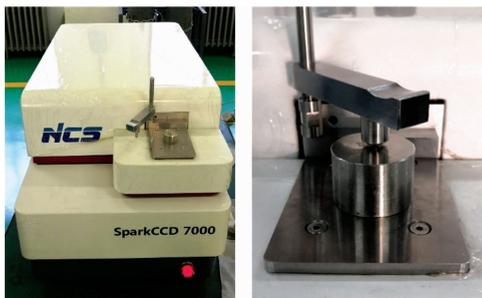


图 2 火花光谱仪

Fig. 2 Spark spectrometer

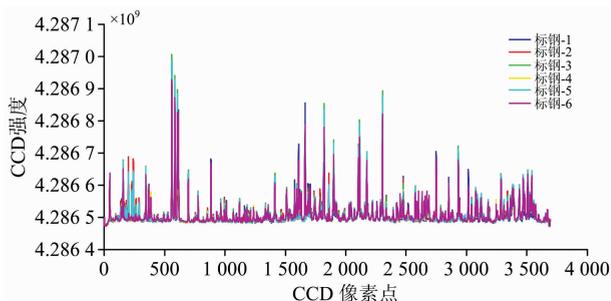


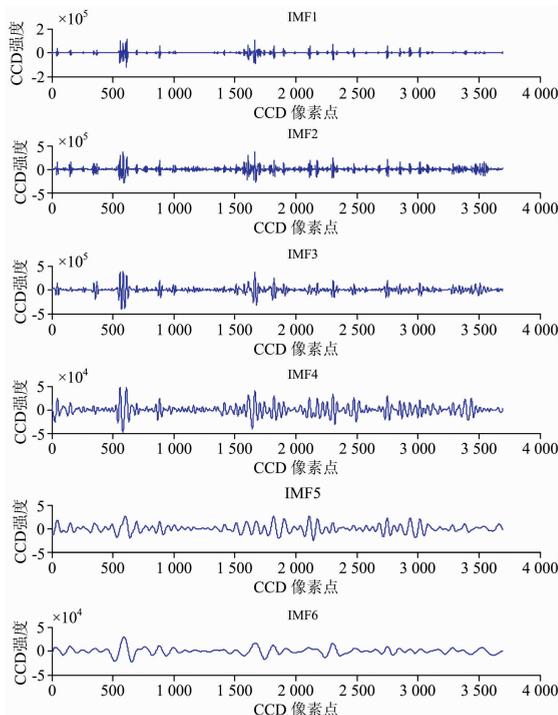
图 3 原始 CCD 信号

Fig. 3 Original CCD signal

3 结果与讨论

3.1 CCD 信号的 EEMD 处理

选取碳 C 元素对应的原始 CCD 信号, 经 EEMD 分解, 自适应的得到了 11 阶 IMF, 如图 4 所示, 其特征频率从高到低排布, 其中 IMF1 频率最高, IMF11 [即信号的趋势 $r(t)$]



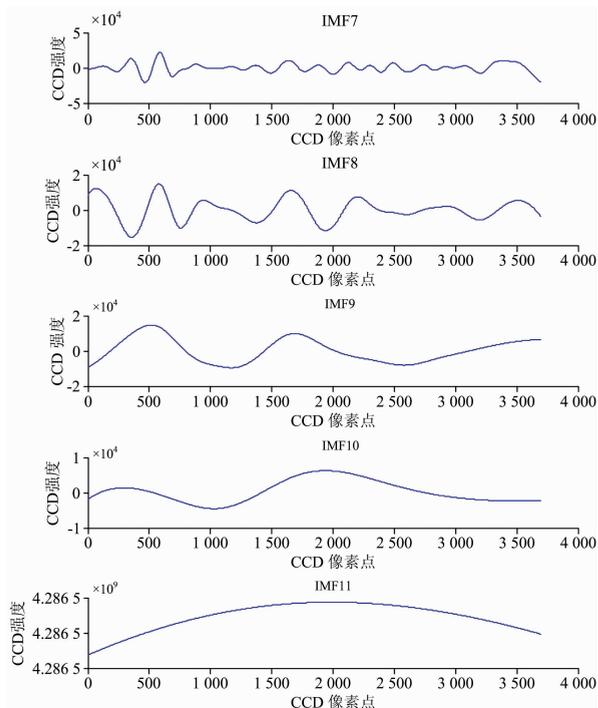


图 4 原始 CCD 信号的 EEMD 分解

Fig. 4 EEMD processing of original CCD

最低。根据信号的能量分布以及幅值特性，IMF1 和 IMF2 表征为信号中的噪声和 CCD 有效部分；最后一阶 IMF11 表征为背景低频噪声部分。由此可见，EEMD 方法可以将 CCD 信号中各个有物理意义的频率成分分解出来。

3.2 信号的重构及二次处理

根据上述分解结果，IMF11 表征为背景低频噪声部分且强度最高，通过信号的重构去除低频的背景噪声 IMF11 后获得信号 $Y(t)$ [见式(6)]，需要特别指出的是，一般而言需要进行 CCD 的高频噪声滤波处理，本研究 CCD 的高频噪声和 CCD 的有效信号频率十分接近，但信号强度相差较大，为了避免滤去高频噪声的同时对有效信号产生影响，实验中不对高频噪声进行滤波处理。

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{10} IMF_i \quad (6)$$

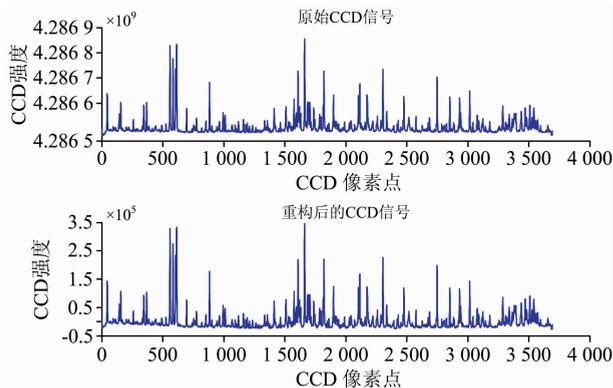


图 5 原始 CCD 信号和重构后的 CCD 信号

Fig. 5 Original CCD signal and restructured CCD signal

如图 5 所示，为重构后的 CCD 信号和原始 CCD 信号对比，图中可见，重构后的 CCD 信号去除了高强度的背景噪声干扰，更有利于后续的处理，但存在信号基线漂移和波动的问题，需要进行二次处理。

如图 6 所示，可见处理前的信号部分为负值，结合基于连续小波变换的惩罚最小二乘法 (continuous wavelet transform-penalized least squares, CWT-PLS) 进行二次处理，处理后的信号基线平滑，且没有负值信号的出现，更有利于有效光谱信息的提取。

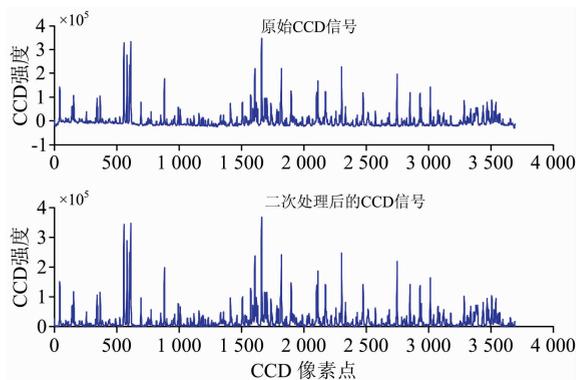
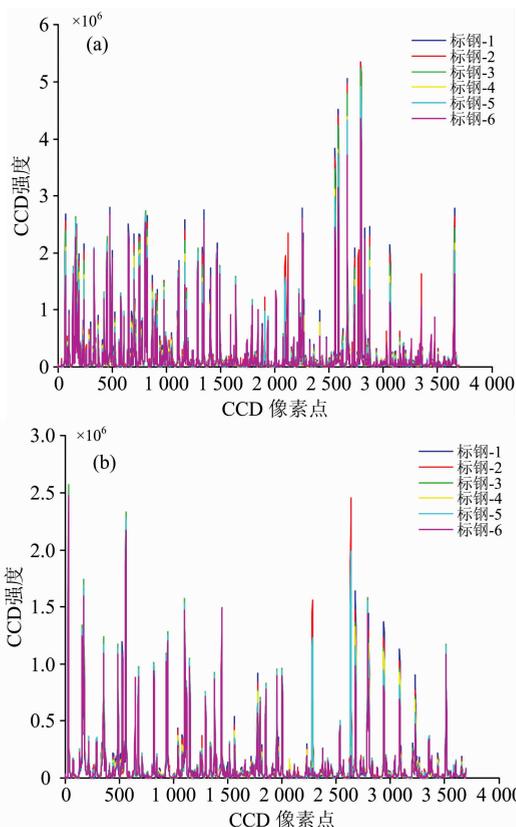


图 6 重构后的 CCD 信号和二次处理信号

Fig. 6 Restructured CCD signal and the signal after CWT-PLS

3.3 元素浓度分析

将试验获得的原始 CCD 谱图均按上述方法进行信号处理后，获得了碳 C、镍 Ni、锰 Mn、铬 Cr 和铝 Al 5 个元素对应的光谱图谱，如图 7 所示。



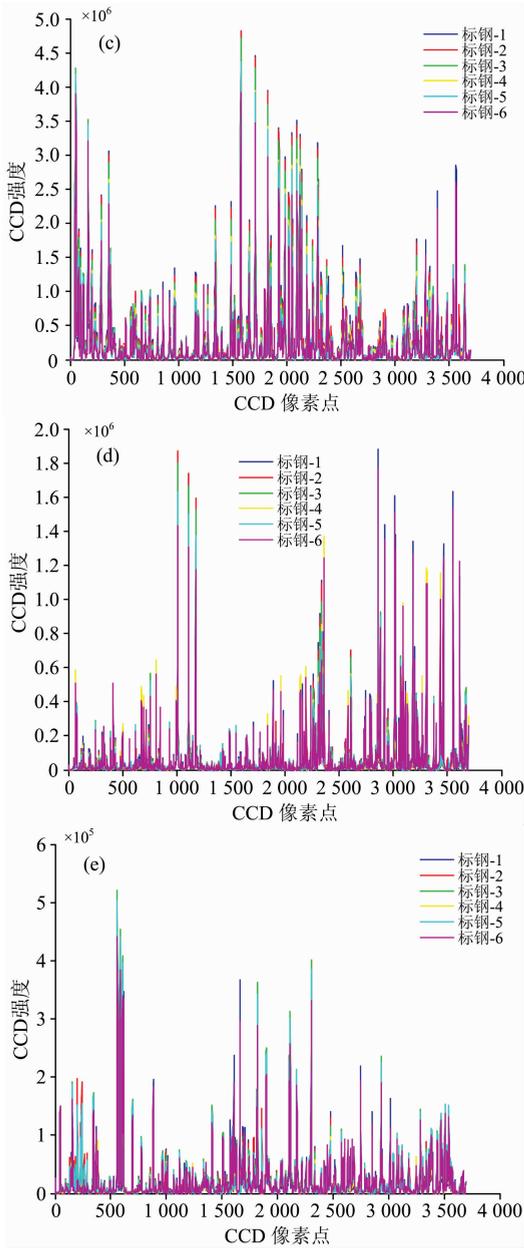


图 7 各元素二次处理后光谱谱图

(a): 碳 C; (b): 镍 Ni; (c): 锰 Mn; (d): 铬 Cr; (e): 铝 Al

Fig. 7 The spectrums of each element after secondary process

(a): Carbon; (b): Nickel; (c): Manganese; (d): chromium; (e): Aluminum

将上述数据导入仪器软件计算每个元素的浓度曲线，获得了五条浓度曲线以及相应的线性相关系数 R^2 ，结果如图 8(a—e)。

如表 1 所示：对比仪器自带算法计算相关元素的浓度曲线相关系数 R^2 ，本算法给出的结论和原仪器自带算法效果一致(仪器出厂要求 $R^2 > 0.999$)，可以很好地满足应用要求，并且本文算法能自适应地直接分解信号，不需要单独采集空白的噪声段(仪器自带算法需要单独采集一段空白的噪声段参与计算)，因此节省了分析流程，提高了仪器的分析效率。

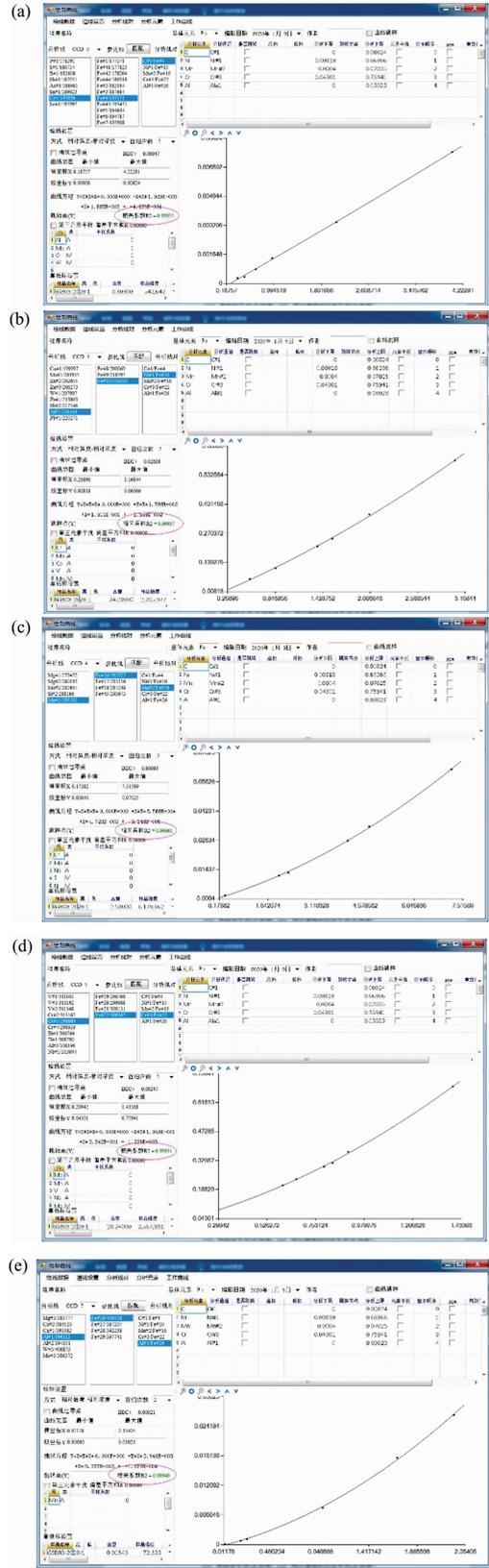


图 8 元素浓度曲线

(a): 碳 C; (b): 镍 Ni; (c): 锰 Mn; (d): 铬 Cr; (e): 铝 Al

Fig. 8 The curves of each element concentration

(a): Carbon; (b): Nickel; (c): Manganese; (d): chromium; (e): Aluminum

表 1 线性相关系数

Table 1 Linear correlation coefficient

相关系数 R^2	光谱仪自带算法	基于 EEMD 的算法
碳 C	0.999 69	0.999 55
镍 Ni	0.999 40	0.999 37
锰 Mn	0.999 85	0.999 61
铬 Cr	0.999 04	0.999 31
铝 Al	0.999 49	0.999 40

4 结 论

将 EEMD 方法应用于火花光谱 CCD 信号的处理和研

究, 重构并二次处理了火花光谱信号, 可得如下结论:

(1) 集合经验模态分解方法可自适应的将火花光谱 CCD 信号分解成 11 阶 IMF, 其 IMF1 和 IMF2 表征为信号中的高频噪声和有效信号部分; 最后一阶 IMF11 表征为低频背景噪声部分。

(2) 基于 EEMD 的方法具有自适应的特点, 不需要预先设置其他参数, 通过应用于火花光谱 CCD 信号研究, 不需要单独采集空白的噪声段, 大大提高了仪器的分析效率, 为火花光谱的数据处理提供了新的方式。

References

- [1] ZHANG Kai(张 恺). Electro-Optic Technology Application(光电技术应用), 2018, (6): 44.
- [2] XIAO Qi-yang, LI Jian, WU Si-jin, et al(肖启阳, 李 健, 吴思进). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2018, (3): 1.
- [3] LI Ming, ZHAO Ying, CUI Fei-peng, et al(李 明, 赵 迎, 崔飞鹏). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(1): 54.
- [4] Huang N E, Long S R, Wu M C, et al. Proc. R. Soc. Lond., 1998, 454: 903.
- [5] Wu Zhaohua, Huang N E. Technical Report, 2005, 193: 51.
- [6] LI Ming, ZHAO Ying, CUI Fei-peng, et al(李 明, 赵 迎, 崔飞鹏, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2019, (5): 57.

Research on Spark Spectrum Signal Processing Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition

LI Ming^{1, 2}, LI Yan-bing³, ZHANG Qiao-chu², SHI Yu-tao², CUI Fei-peng², ZHAO Ying^{1, 2}

1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China

2. NCS Testing Technology Co. Ltd., Beijing 100094, China

3. Yiyang Vocational & Technical College, Yiyang 413055, China

Abstract The spark spectrometer based on Charge Coupled Device (CCD) is a kind of spectrometer which is used for element composition analysis. Its output signal is a composite signal of high-frequency CCD effective signal and low-frequency background noise. The effective information of spark spectrum is mainly concentrated in the higher frequency band of signal, which is easy to be submerged and interfered by background noise. Therefore, in order to obtain complete and effective spectral information, it requires effective signal processing. Empirical Mode Decomposition (EMD) method can analyze signals adaptively without setting parameters, but there is the problem of mode mixing, and the components of different frequencies in the signal may be confused; Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) successfully solves the problem of mode mixing in EMD method, It can more clearly decompose the different frequency components in signal, so it is more suitable for processing spark spectrum signal with dispersive frequency components. In this paper, the spark spectrometer is used to excite and collect the stainless steel standard samples (Carbon C, Manganese Mn, Nickel Ni, Chromium Cr and Aluminum Al, which are representative elements in the short, medium and long band), and the original spark spectrum signals of the standard samples are obtained. Through the adaptive analysis and processing of EEMD method, each CCD signal is obtained 11 order Intrinsic Mode Function (IMF). According to the amplitude and frequency characteristics of the signal, IMF1-IMF2 is characterized as the high-frequency characteristic signal component, and the last IMF11 is the low-frequency background noise component. By reconstructing the processed signal and combining with the continuous wavelet transform-penalized least squares, the final processed signal is obtained. The processed signal is introduced into the instrument data processing software, and the content gradient curve of Carbon, Manganese, Nickel, Chromium and Aluminum elements is obtained. The results show that the signal processed by EEMD

method is equivalent to the original instrument processing method, but the additional link of collecting blank noise section is omitted, and the analysis time is largely saved, so the operation efficiency of the instrument is improved.

Keywords Ensemble empirical mode decomposition method; Chargy coupted device signal; Spark spectrum; Element analysis

(Received Jan. 13, 2020; accepted Mar. 5, 2020)