

基于 HHT 和 Cohen 核的磁控焊缝跟踪信号分析

洪 波¹, 徐爱军², 柳 健¹, 李湘文¹

(1. 湘潭大学 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湘潭 411105;

2. 中国人民解放军 76117 部队, 衡阳 421002)

摘 要: 针对磁控焊缝跟踪信号的非线性非平稳特点, 提出了一种基于 Hilbert-Huang 变换和 Cohen 核的磁控电弧传感器焊缝跟踪系统的信号提取分析方法; 运用经验模态分解, 把周期激励下磁控跟踪信号分解成多个从高频到低频的本征模态函数分量, 依据各分量的 Hilbert 边际谱, 采用 Cohen 核分布的时频变换, 能有效抑制交叉项, 提取出磁控焊缝跟踪实时信号动态规律。结果表明, 利用此方法有助于更深入地揭示焊缝自动跟踪系统内各种干扰源的时频和频谱特征, 为建立有激励源的焊接信号新的非线性模型提供了理论依据。

关键词: 磁控电弧传感器; 信号分析; 希尔伯特-黄变换; 经验模态分解

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)11-0005-04

0 序 言

焊接电弧是一种典型的非线性非平稳的时变负载。焊接时电弧负载的燃烧状况以及与之密切相关的熔滴过渡过程均会发生变化^[1]。这些变化给焊接过程中电信号的时频域分析处理带来很大不便, 现有信号分析方法已经不能满足深入研究焊接机理和干扰源的需要。

非线性非平稳信号的分析、处理以及特征提取问题一直是学术和工程界关注的热点问题之一。傅里叶变换作为一种传统的时频分析工具, 试图用统一的谐波成分逼近非统一的非平稳信号, 往往会造成失真。虽然短时傅里叶分析能够解决上述问题, 但是它严格服从平稳性假设并且被测不准原理所困扰。小波分析结果严重依赖小波基的选择, 对非线性非平稳信号需不断调整小波基函数。希尔伯特-黄变换是一种处理同时表现为非线性和非平稳性信号的自适应算法, 现广泛应用于地震工程学、故障诊断、结构系统识别、生物医学工程等方面^[2]。

文中结合希尔伯特-黄变换理论和 Cohen 核时频分布提出一种磁控电弧焊接系统焊缝跟踪信号特性分析的新方法, 并将其应用磁控焊缝跟踪系统的动态特性分析中, 该方法不仅全面、客观地提取出了反映磁控焊缝跟踪信号的动态信号, 对进一步信号

滤波电路的优化设计提供理论依据, 而且对自动焊接系统动态特性的测试与评价、故障诊断都有很好的参考价值。

1 磁控电弧传感信号特征分析

1.1 磁控旋转电弧传感器的基本原理

磁控电弧传感器是利用洛伦磁力摆动电弧引起焊接电流变化作为传感信息^[3], 理论电流信号为与励磁频率同步的正弦波, 实际焊缝跟踪信号受各种高频噪声、熔滴过渡、飞溅和断弧等影响, 淹没在众多噪声之中, 得到的是一种非线性非平稳信号, 如图 1 所示。对研究焊缝自动跟踪带来不便。

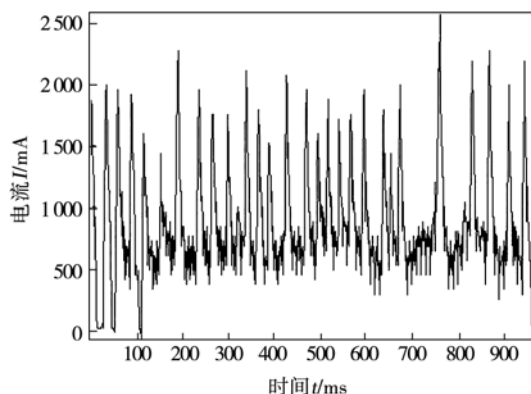


图 1 初级采样焊接电流波形

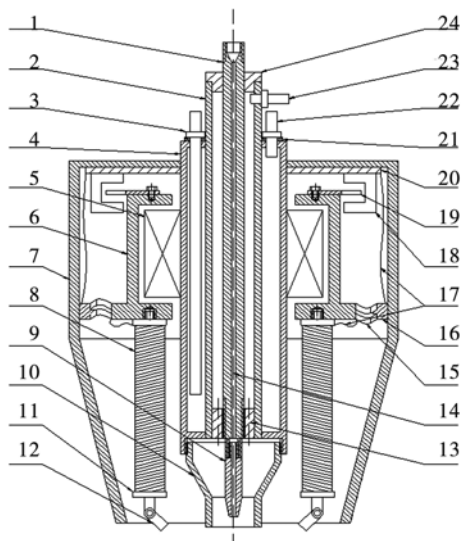
Fig. 1 Diagram of primary welding current signal

1.2 磁控旋转电弧传感器的结构设计

磁控旋转电弧传感器结构设计如图 2 所示。

收稿日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405414); 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(2015JJ5013); 湖南高校科技创新团队项目资助



1-导电杆; 2-连接轴心管; 3-进水管导电嘴; 4-传感器内壁; 5-电机定子; 6-电机转子; 7-传感器外壳; 8-励磁线圈; 9-导电嘴; 10-保护气罩; 11-导磁铁芯; 12-导磁杆; 13-匀气盘; 14-焊丝; 15-碳刷; 16-碳刷基座; 17-导线; 18-光耦; 19-光码盘; 20-电路板; 21-密封垫圈; 22-出水管; 23-进气管; 24-胶木圈

图2 磁控旋转电弧传感器示意图

Fig. 2 Magnetron rotating arc sensor schematic diagram

2 HHT 和 Cohen 类时频方法

Hilbert-Huang 变换,由经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)与 Hilbert 谱分析(hilbert spectral analysis, HSA)两部分组成^[4];任意的非平稳信号首先经过 EMD 方法处理后被分解为若干个 IMF 分量;然后对每个 IMF 分量进行 Hilbert 谱分析得到相应分量的 Hilbert 谱。

2.1 经验模态分解(EMD)

EMD 方法是一种自适应的信号分解方法,基于信号的局部特征,能把复杂的信号分解为按照频率从高到低产生的有限个基本模式分量之和,具有强大的局部适应性,而且分解所得到的 IMF 分量也大都具备明确的物理意义^[5],将原始信号 EMD 分解后得到的 IMF 分量根据不同的物理意义进行分类,在此基础上进行信号重构,就可以提取出含有特定物理意义的信号分量。EMD 计算过程如下。

(1) 确定信号所有的局部极值点。利用三次样条线分别将所有的局部极大值点、极小值点连接起来形成上、下包络线,上、下包络线的平均值记为 $m_1(t)$ 。

(2) 信号 $x(t)$ 和 $m_1(t)$ 的差值为第一个分量,即

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

如果 $h_1(t)$ 是一个本征模态函数(intrinsic mode

functions, IMF), 那么 $h_1(t)$ 就是第一个 IMF 分量。

(3) 如果 $h_1(t)$ 不满足 IMF 条件,把 $h_1(t)$ 作为原始数据,重复上述步骤,得到

$$h_1(t) - m_{11}(t) = h_{11}(t) \quad (2)$$

式中: $m_{11}(t)$ 是 $h_1(t)$ 上下包络的平均值。反复筛选 k 次后,使得 $h_{1k}(t)$ 为 IMF 分量,即

$$h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) = h_{1k}(t) \quad (3)$$

$$c_1(t) = h_{1k}(t) \quad (4)$$

从原始信号中获得的第一个 IMF 分量 $c_1(t)$ 应该包含信号最好的范围或者最短的周期成分。

(4) 从 $x(t)$ 分离出 $c_1(t)$, 得到

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (5)$$

将 $r_1(t)$ 看作原始数据重复以上步骤,得到 $x(t)$ 的第二个 IMF 分量 $c_2(t)$ 。重复循环 n 次,得到信号 $x(t)$ 的 n 个 IMF 分量。这样就有

$$\left. \begin{aligned} r_1(t) - c_2(t) &= r_2(t) \\ \dots \\ r_{(n-1)}(t) - c_n(t) &= r_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当 $r_n(t)$ 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束。这样由式(5)和式(6)得到

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (7)$$

因此可以将信号分解为 n 个经验模态,残余函数 $r_n(t)$ 代表信号的平均趋势。

2.2 Cohen 核分布

典型的 Cohen 类时频分布就是 Wigner-Vill 分布^[6],它具有较高的时频分辨能力,较多的时频表示特性,但难以消除交叉干扰项。采用一种改进的 Wigner-Vill 分布(WVD)——Choi-Williams 分布(CWD)来描述信号的时频能量分布,既可大大消除传统 Wigner-Vill 分布中的交叉干扰项,同时不会增加计算量。

令信号 $x(t)$, 其傅里叶变换是 $x(jw)$, $x(t)$ 的 WVD 分布定义为

$$\text{WVD}_x(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-jw\tau} d\tau \quad (8)$$

式中: $*$ 表示复数共轭; $x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$ 为信号 $x(t)$ 的瞬时相关信号; τ 为时延; t 为时间; w 为角频率; WVD_x 是信号 $x(t)$ 的 Wigner-Vill 分布。为了降低或消除交叉干扰项的影响,引入一个平滑窗函数也称为核函数,即

$$\varphi(t, \tau) = (4\pi\alpha\tau^2)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{j^2}{4\alpha\tau^2}} \quad (9)$$

式中: α 称为平滑因子。将式(9)代入式(8)得到

式(10),即

$$\text{CWD}_x(t, w) = \iint (4\pi\alpha\tau^2)^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{-i^2}{4\alpha\tau^2}} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-jw\tau} d\tau \quad (10)$$

即 Choi-Williams 分布,实际上是对 WVD 分布的一种改进算法.从式(3)可以看出,CWD 分布采用指数核函数 $\varphi(t, \tau)$. 由于 $\varphi(0, 0) = 1$, 而 $t \neq 0, \tau \neq 0, \varphi(t, \tau) < 1$. 因此,核函数能有效抑制不同频率和时间中心两个函数产生的交叉项,同时保持较高的时频分辨率.

2.3 Hilbert 变换

对于任意一个时间序列数据 $X(t)$,能得到它的希尔伯特变换结果 $Y(t)$,即

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (11)$$

式中: P 是柯西主分量.

通过这个变换, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 可组成一个复数信号,即

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (12)$$

式中: $a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$; $\theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right)$.

定义瞬时频率 $\omega(t)$ 为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (13)$$

把式(11) ~ 式(13) 所表示的变换用于每个本征模函数序列,数据便可表示为

$$X(t) = \text{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp(i\int \omega_j(t) dt) \quad (14)$$

式中:Re 为实部. 在这里忽略了残余项 r_n ,因为它不过是单调函数或常数.

3 磁控电弧实测信号的 HHT 分析

采用虚拟示波器 Dso2904_512 采集到的实际 CO_2 焊磁控电弧扫描焊接电流波形,采样频率为 1 kHz,用 HHT 方法对自行研制的磁控焊缝自动跟踪系统的实测数据进行分析. 焊接工艺参数为电弧电压 26 V,焊接电流 220 A,焊接速度 45 cm/min,气体流量 15 L/min, 20° 斜板焊接,励磁频率 4 Hz.

将实际测量的信号进行 HHT 变换,首先经 EMD 方法处理后被分解为若干个 IMF 分量如图 3 所示.

对比图 4 可知,应用小波分析磁控焊接信号时得不到信号频率,能量分布也与事实情况不符. 经过多次试验,采用 Morlet, Symlets, Haar 小波基分析磁控焊接信号,不同的分解层数会得到不同的结果.

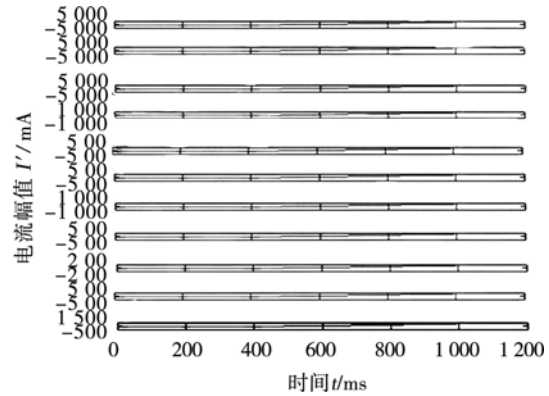
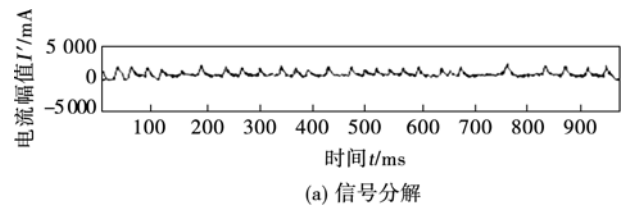
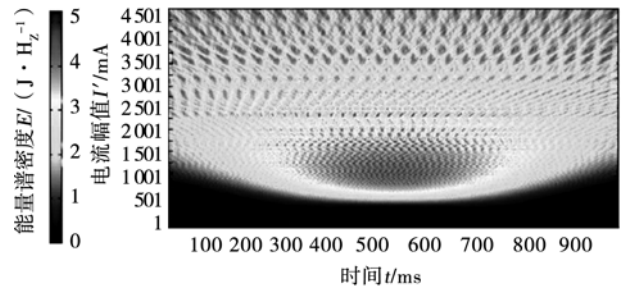


图 3 EMD 分解的 IMF 分量

Fig. 3 EMD decomposition of IMF



(a) 信号分解



(b) 小波系数能量的百分比

图 4 Gauss 4 小波分解图

Fig. 4 Wavelet decomposition of Gauss 4

由图 5 可以得知出现一个 4.395 Hz 的较大信号,其余较大信号为 9.277, 15.14, 22.46 和 30.27 Hz,分别为 4.395 Hz 信号的 2 倍、4 倍、6 倍和 8 倍频. 同时得到一个 1.953 Hz 的突变信号,这是由于

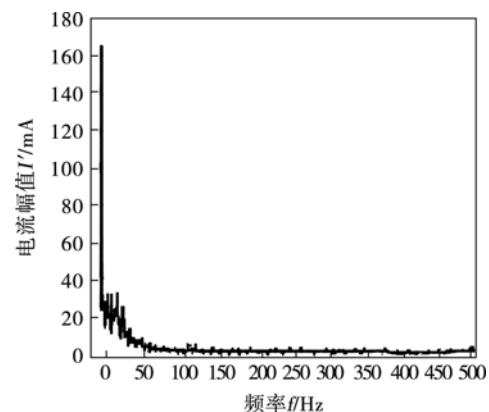


图 5 EMD 后的时频谱

Fig. 5 Time-frequency diagrams for EMD

系统随机产生的. 对比希尔伯特边际谱可知, 反映焊接实际过程的 4.395 Hz 信号及其倍频可以很明显的观察出, 同时还可以发现有 50, 100 和 200 Hz 的频谱, 结合实际可以分析得出这是由于公共电网所引起的有规律的干扰. 通过以上对比可以得出, 相比傅里叶变换、快速傅里叶变换和小波分析非线性信号的缺点, HHT 和 Cohen 核相结合的方法能很好的分析非线性焊接信号, 得到良好的效果.

4 结 论

(1) 提出一种 HHT 变换和改进 Wigner-Vill 分布——Choi-Williams 分布, 应用于实测焊接信号的分析的方法, 提取并研究了有激励源的磁控焊接信号中隐含的时频分布特征.

(2) 通过对实测磁控焊接信号的分析, 对比普通傅里叶变换、快速傅里叶变换和选用不同小波基的小波分析发现, 这些方法对于受强烈噪音干扰的焊接信号分析都不能取得比较理想的效果.

(3) 频谱分析结果表明, 应用 HHT 变换和 Cohen 核分析的新方法能提供更多的有用信息, 有助于揭示焊缝自动跟踪系统内各种干扰源的时频和频谱特征, 为建立有激励源的焊接信号新的非线性模型提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 罗 怡, 伍光凤, 李春天. Choi-Williams 时频分布在 CO₂ 焊接电信号检测中的应用[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 101 - 104.
- [2] 沈 毅, 沈志远. 一种非线性非平稳自适应信号处理方法——希尔伯特-黄变换综述: 发展与应用[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(5): 1 - 5.
Shen Yi, Shen Zhiyuan. A review of the nonlinear nonstationary adaptive signal processing method-hilbert-huang transform: its development and applications[J]. Techniques of Automation and Applications, 2010, 29(5): 1 - 5.
- [3] 洪 波, 魏复理, 来 鑫, 等. 一种用于焊缝跟踪的磁控电弧传感器[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 1 - 4.
Hong Bo, Wei Fuli, Lai Xin, *et al.* A magnetic control arc sensor for seam-tracking[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 1 - 4.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454: 903 - 995.
- [5] Zhao H W, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1 - 41.
- [6] Yang J N, Lei Y. Identification of natural frequencies and damping ratios of linear structures via Hilbert transform and empirical mode decomposition[C] // Proceedings of International Conference on Intelligent Systems and Control, IASTED/Acta Press, Anaheim, CA, 1999: 310 - 315.

作者简介: 洪 波, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接机器人和自动化、焊接工艺及设备等方面的科研和教学工作. 发表论文 70 余篇, 获国家发明专利 14 项. Email: hongbo@xtu.edu.cn