

文章编号: 1006-4710(2011)04-0446-05

基于深孔钻削噪声信号的钻头 磨损特征提取方法研究

李佳¹, 郑建明¹, 李言¹, 魏磊磊², 卞小静¹

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安陕鼓动力股份有限公司 工艺部, 陕西 西安 710075)

摘要: 采用深孔钻削过程中的噪声信号对钻头的磨损状态进行监测, 建立了钻削过程噪声信号采集系统。运用改进的经验模态分解方法对经过广义形态滤波后的噪声信号进行了模态分解, 获得了钻削噪声信号的本征模态函数。采用希尔伯特变换对本征模态函数进行处理, 获得了与本征模态函数对应的边际谱。研究了谱频段能量和峰值随钻头磨损的变化规律。结果表明, 边际谱频段能量和峰值与钻头磨损状态之间存在密切联系, 根据噪声信号边际谱特征参数的变化规律可实现钻头磨损状态的监测。

关键词: 深孔钻削; 钻头磨损; 噪声信号; HHT

中图分类号: TH165⁺.3 **文献标志码:** A

Research on Feature Extraction Method of Drilling Tool Wear Based on Noise Signal of Deep-Hole Drilling Process

LI Jia¹, ZHENG Jianming¹, LI Yan¹, WEI Leilei², BIAN Xiaojing¹

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Craft Department, Xi'an Shaangu Power Co., LTD, Xi'an 710075, China)

Abstract: The drilling tool wear condition monitoring is investigated in this paper by using the drilling noise signal. The noise signal acquisition system is established for the drilling process. The improved Empirical Mode Decomposition method is used to carry out the modal decomposition for noise signal filtered by the generalized morphological filtering, and the Intrinsic Mode Function (IMF) of signal is obtained. The IMF is processed by Hilbert transformation, and the marginal spectrum of IMF is obtained. The changing laws of the special frequency range energy and peak value of marginal spectrum along with the drilling tool wears are researched. The experimental results show that there exist the closer correlations between the tool wear condition and the two feature parameters. The drilling tool wear condition monitoring can be realized based on the variation laws of the marginal spectrum feature parameters of noise signal.

Key words: deep-hole drilling; drilling tool wear; noise signal; HHT

在深孔加工领域, 人们一直努力探索一种有效的方法来降低加工成本、提高产品质量和减少事故发生率。钻头作为钻削过程中至关重要的环节, 其完好率与磨损状态对产品质量与运行的可靠性具有重要影响, 因此实现钻削过程中钻头磨损的状态监测对保证加工过程正常运行具有重要意义。为了解决这一问题, 人们进行了广泛的研究, 提出了许多监

测方法。文献[1]采用钻削力信号监测钻头磨损, 利用小波变换对钻削力信号进行处理, 实现了钻头磨损信号特征的提取, 建立了基于HMM的钻头磨损监测实验系统。文献[2]通过提取了钻削过程中的钻削力、振动和声音信号, 建立了基于模糊理论的钻头磨损状态识别模型。文献[3]采集了加工过程中的切削力信号, 并且进行了有效的时频分析, 建立了刀具

收稿日期: 2011-05-08

基金项目: 陕西省“13115”科技创新工程基金资助项目(2009ZDKG-25)。

作者简介: 李佳(1982-), 男, 河南焦作人, 硕士生, 研究方向为机电系统测试与智能控制系统。E-mail: lj110011@126.com。郑建明(1968-), 男, 四川仁寿人, 博士, 教授, 研究方向为制造过程状态监测技术。E-mail: zjm@xaut.edu.cn。

磨损特征提取系统,证明了该监测方案的有效性。

然而,由于深孔加工过程属于封闭式加工,切削条件恶劣,历时长,钻削机理复杂,加工条件多变,给采集与提取准确反映钻头磨损状态的工况特征信号造成很大困难。深孔钻削过程中,传感器信号往往呈现出非线性与非平稳的特征,采用 STFT 和小波变换等时频分析方法存在分辨率低的问题。1998 年美国宇航局的 Norden E. Huang 提出了一种新的时频分析方法——希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform),简称 HHT。文献[4]、[5]分别利用 STFT、小波变换和 HHT 变换对旋转机械振动信号进行分析,证明了 HHT 比 STFT 和小波变换在处理非稳态信号方面具有明显的优势。本文为解决强噪声背景下深孔钻削过程噪声信号钻头磨损特征信息的提取问题,采用 HHT 对噪声信号进行多模态分解与模态边际谱分析,实现了钻头磨损噪声信号特征的提取,为深孔钻削过程钻头磨损监测提供了一种有效的方法。

1 钻削噪声信号采集与信号特征分析

1.1 钻削过程噪声信号采集系统的建立

深孔钻削过程噪声信号与钻头磨损状态之间存在密切联系,且具有便于采集的特点。为此本文采用深孔钻削过程加工噪声作为监测信号来建立钻头磨损监测实验系统。系统方案如图 1 所示,主要包括:CA6140 改装的内排屑 BTA 振动深孔钻、MCA-BTA 声音传感器(分辨率为 0.001 2 dB)、DSP 数据采集装置和计算机。

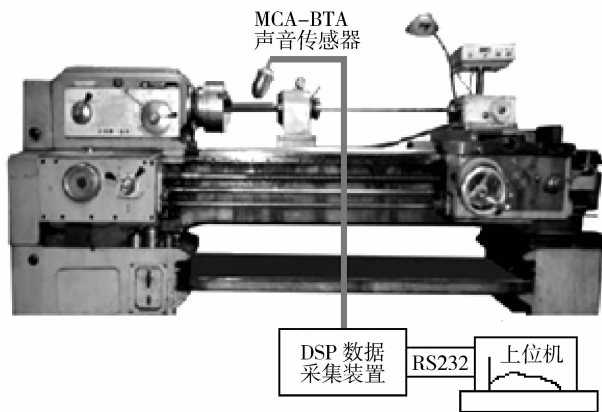


图 1 钻头磨损状态监测实验系统

Fig. 1 Experimental system for drilling tool wear monitoring

试验中钻削工件材料为 40Cr,其调质硬度为 HB240-250,钻头为 $\phi 20$ mm 的内排屑 BTA 深孔钻,机床主轴转速为 560 r/min,进给速度为 0.036 mm/r,频转比为 1.1,钻孔深度为 600 mm。

为了准确获取深孔钻削噪声信号随钻头磨损的变化规律,实验中取采样频率 $f_s = 40$ kHz。

1.2 钻削噪声信号特点分析

从钻削过程采集的不同钻头磨损状态下的噪声信号如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着钻头磨损量的增加,噪声信号的频率和幅值均呈现出上升趋势。实验过程中钻头磨损到一定程度时,可听到加工区附近刺耳的高频噪声。这一现象表明通过采集钻削过程中的加工噪声信号,提取与钻头磨损相关的特征信息进行钻头磨损状态监测是可行的,关键是如何解决噪声信号特征的提取。下面运用 HHT 对噪声信号进行分析,提取与钻头磨损状态相关的噪声信号特征信息。

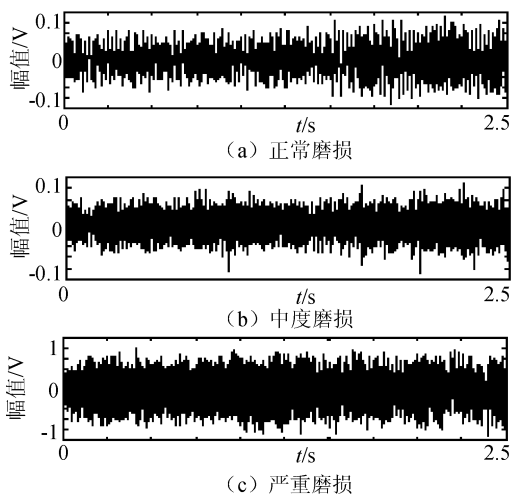


图 2 加工噪声时域图

Fig. 2 Time serial oscillogram of noise signal

2 HHT 原理与 EMD 算法改进

2.1 HHT 的原理

HHT 变换包含两大部分,第一部分为经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD),用于把数据序列分解成有限个本征模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)分量;第二部分为希尔伯特谱分析(Hilbert spectral analysis,简称 HAS),即对分解得到的每个 IMF 分量作 Hilbert 变换,从而得到信号在时频平面上的能量分布谱图和边际谱图^[6]。

2.2 EMD 存在的问题及改进方法

EMD 的本质是一个筛选过程,经过一系列分解后,将信号 $x(t)$ 分解成 n 个固有模式函数 c_i 和一个余项时间序列 r_n ^[7],如式(1)所示:

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

原则上 EMD 能有效地对稳态信号和非平稳非线性信号进行无虚假成分的分解。目前 EMD 分解主

要是依据极值点的三次样条插值原理实现的^[7],由于信号的端点不一定是极值点,导致EMD分解得到的本征模态函数容易产生端点效应,使模态在端点附近出现裂解现象,严重时使本征模态分量毫无意义。为此本文提出一种近端点内匹配寻优法,对端点效应进行改善,算法原理为:①在靠近两端点的信号波形上计算与端点值相同的 m 个交点(一般 m 取值约为10);②计算出各个点处的波形斜率,找到与端点的斜率相近的点;③对相近斜率的点,再计算其与下一点之间的距离,若相等,则所得点的前一个极值即为左端点处的极值。

通过上述方法可避免由于样条插值引起的端点极值问题。按照上述算法原理,对图3中的仿真信号进行端点搜索,得到左、右极值点(分别为图中的点7和点14)。

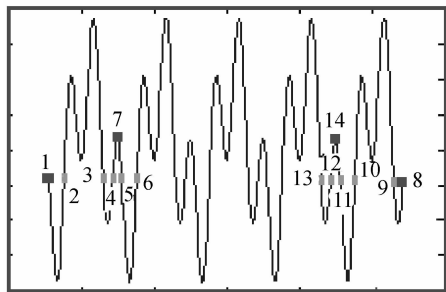


图3 端点寻优示意图
Fig. 3 End-point search diagram

2.3 Hilbert 时频谱和边际谱

对原始信号EMD分解后得到的本征模态函数 $c_i(t)$ 进行Hilbert变换,可以获得Hilbert时频谱和边际谱,具体算法如下^[7]。

1) 对 $c_i(t)$ 进行Hilbert变换:

$$y_i(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

2) 构造解析函数:

$$z_i(t) = c_i(t) + jy_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (3)$$

其中:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + y_i^2(t)}$$

$$\theta_i(t) = \arctan \frac{y_i(t)}{c_i(t)}$$

$a_i(t)$ 和 $\theta_i(t)$ 分别为信号 $x_i(t)$ 的瞬时振幅和瞬时相位。

3) 计算解析函数的瞬时频率:

$$C_{\omega_i}(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (4)$$

4) 根据瞬时频率可得Hilbert幅值谱的定义 $H(\omega, t)$ 为:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp(j \int C_{\omega_i}(t) dt) \quad (5)$$

5) 根据幅值谱可得Hilbert边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (6)$$

2.4 仿真算例

为了验证改进HHT算法的有效性,构造了一个仿真信号 $Y(t)$,该信号包括一个频率为25 Hz的正弦信号和一个频率为80~100 Hz的调频信号,其表达式如式(7)所示。

$$Y = [1 + 0.5 \sin(10\pi t)] \cos[10 \exp(2t) + 150\pi t] + \sin(50\pi t) \quad (7)$$

运用HHT对 $Y(t)$ 进行处理,结果如图4所示。在EMD分解图中得到了 imf_1 和 imf_2 两个本征模态函数,在时频谱中获得信号频率实时变化的情况,在边际谱中主要描述了频段能量的集中区域。

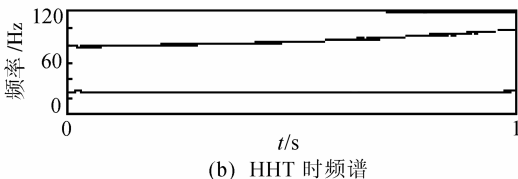
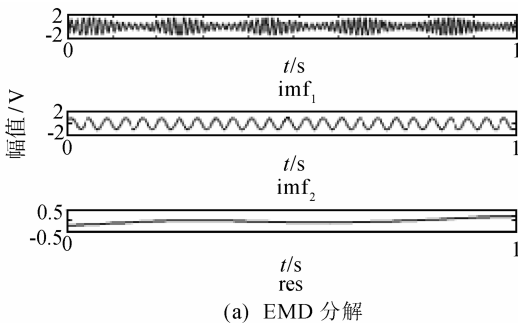


图4 仿真信号HHT变换
Fig. 4 HHT of simulation signal

3 基于HHT的噪声信号特征提取

3.1 深孔钻削噪声信号预处理

由于深孔钻削噪声信号中含有大量加工过程中的外界干扰成分,这些干扰成分不但会导致EMD分解层数明显增加,而且容易造成模态裂解现象,严重时使得EMD分解失去实际物理意义。

为了消除强干扰项的影响,本文引入形态学滤波方法,即采用由腐蚀运算和膨胀运算联合构成的形态开-闭运算进行消噪,运算公式如式(8)~(11)

所示。

腐蚀运算：

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m=1,2,\dots,M-1} \{f(n-m) + g(m)\} \quad (8)$$

膨胀运算：

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m=1,2,\dots,M-1} \{f(n+m) - g(m)\} \quad (9)$$

开运算：

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (10)$$

闭运算：

$$(f \cdot g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (11)$$

式中, \oplus 、 \ominus 、 \circ 和 \cdot 分别为腐蚀运算、膨胀运算、开运算和闭运算的运算符, f 为原始信号, g 为滤波算子(通常有三种:线段、三角形、圆)。

3.2 深孔钻削噪声信号的 EMD 分解和 Hilbert 变换

3.2.1 深孔钻削噪声信号的 EMD 分解

对深孔钻削噪声信号滤波处理后得到的 EMD 分解结果如图 5 所示。其中 res 为虚假成分, $\text{imf}_1 \sim \text{imf}_4$ 为所获得的本征模函数。

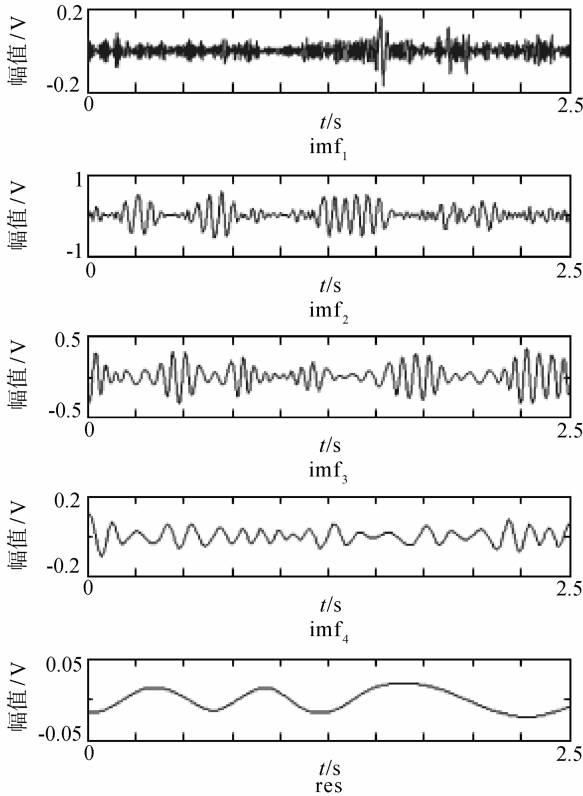


图 5 预处理后噪声信号 EMD 分解

Fig. 5 EMD decomposition of preprocessing noise signal

3.2.2 深孔钻削噪声信号的 Hilbert 变换

图 6 为针对深孔钻削过程中三种不同钻头磨损

状态(正常磨损、中度磨损和严重磨损)的噪声信号进行 HHT 变换后提取的时频谱信息。从图中可以看出:随着磨损程度的加大,频率复杂度加大,特别是 300 ~ 500 Hz 频段的能量发生了明显的增多。

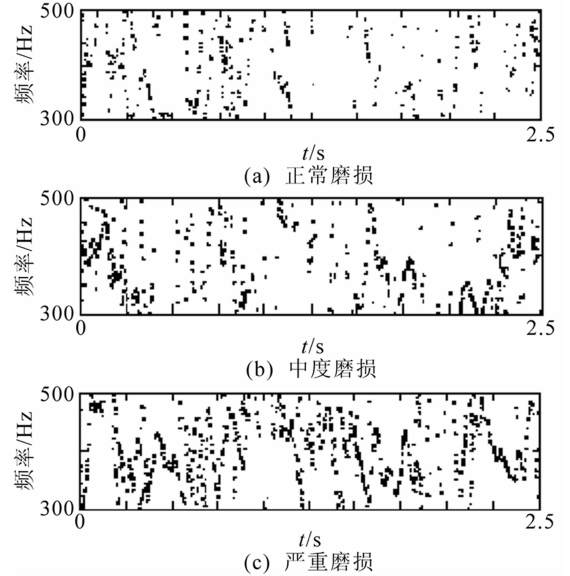


图 6 噪声信号 HHT 时频谱

Fig. 6 HHT time-frequency spectrum of noise signal

图 7 为钻头在不同磨损状态下的边际谱,可以看出在钻头磨损后期噪声信号的 300 ~ 500 Hz 频段出现峰群现象。因此采用 HHT 变换对钻削噪声进行处理能很好揭示钻削噪声与钻头磨损之间的内在联系。

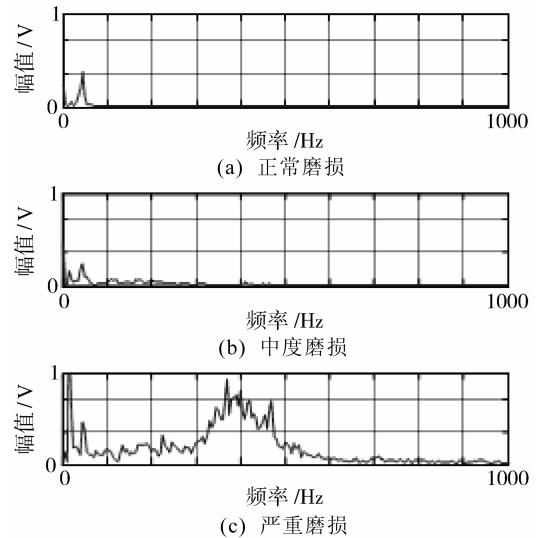


图 7 噪声信号 HHT 边际谱

Fig. 7 HHT marginal spectrum of noise signal

3.3 深孔钻削噪声信号特征提取

根据上述 HHT 分析呈现的钻头磨损信息,本实验对 430 组深孔钻削噪声数据(按钻头磨损的时间顺序)变化特征进行了深入分析,提取了各组数据

在 300 ~ 700 Hz 频段的能量和峰值作为特征参数。图 8、图 9 为经过 HHT 处理后提取的两个特征参数随钻削时间的变化规律,可以看出,在 0 ~ 1 000 s,峰值和能量的幅值变化不大,这是因为钻头磨损前期,轮廓形状较为规则,钻削容易,因此噪声信号较平缓;而在 1 000 ~ 2 300 s 左右的范围内,钻头处于正常磨损阶段,特征量变化的均值缓慢上升,特征量波动幅度明显增大;在 2 300 s 以后,特征量发生急剧变化,此时钻头磨损已经较为严重,钻头轮廓形状变得很复杂,钻削过程伴随大量尖锐刺耳噪声以及明显的钻杆振动。可见,采用 HHT 提取的噪声信号特征能准确地反映钻头磨损状态,从而实现钻头磨损状态的监测。

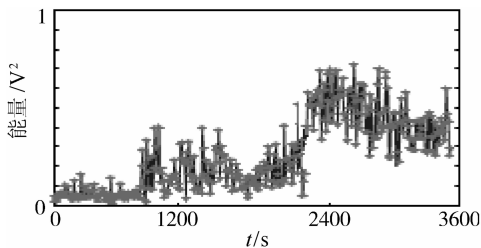


图 8 噪声信号 HHT 谱频段能量变化图

Fig. 8 Frequency band energy changing diagram of HHT spectrum

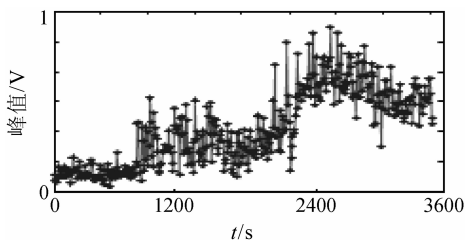


图 9 噪声信号 HHT 谱峰值变化图

Fig. 9 Peak value changing diagram of HHT spectrum

4 结 论

1) 在深孔钻削过程中,钻削噪声与钻头磨损程度之间具有密切联系,从钻削过程中采集的噪声信号显示:在钻头磨损前期,信号比较规整、平稳,高频成分能量很小;随着磨损量的增加,噪声逐渐增强,而且变得不稳定;尤其当钻头磨损到一定程度后,噪声信号中开始出现大量尖峰和低频成分。因此根据

钻削过程噪声信号的变化可准确反映钻头磨损状态。

2) 采用改进的 EMD 与形态滤波技术对钻削噪声信号进行处理,有效地实现了信号固有模态的分解。运用 HHT 获得的时频谱和边际谱可准确刻画噪声信号的变化特征,实现噪声信号钻头磨损特征参数的提取,为建立钻头磨损状态监测系统奠定了基础。

参考文献:

- [1] Huseyin Metin Ertunc, Cuneyt Oysu. Drill wear monitoring using cutting force signals [J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 533-548.
- [2] Cuneyt Aliustaoglu, Metin Ertunc H, Hasan Ocak. Tool wear condition monitoring using a sensor fusion model based on fuzzy inference system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 42(31): 129-137.
- [3] 朱云芳,戴朝华,傅攀. 采用小波神经网络的刀具故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2006, 26(1): 64-66.
Zhu Yunfang, Dai Chaochua, Fu Pan. Diagnosis of cutting tool fault by using wavelet neural network [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2006, 26(1): 64-66.
- [4] 胡劲松,杨世锡. 基于 HHT 的转子冲临界过程分析 [J]. *汽轮机技术*, 2004, 46(3): 196-198.
Hu Jinsong, Yang Shixi. The HHT-based analysis of rotor running across critical rotating [J]. *Turbine Technology*, 2004, 46(3): 196-198.
- [5] 杨世锡,胡劲松,吴昭同,等. 旋转机械振动信号基于 EMD 的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 102-107.
Yang Shixi, Hu Jinsong, Wu Zhaotong, et al. The comparison of vibration signals' time-frequency analysis between EMD-based HT and WT method in rotating machinery [J]. *Chin Soc for Elec Eng*, 2003, 23(6): 102-107.
- [6] Huang N E. A new method for nonlinear and non-stationary time series analysis: Empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. *Proc of SPIE*, 2000, 8(2): 197-209.
- [7] Li H, Zheng H Q, Tang L W. Hilbert-Huang transform and its application in gear faults diagnosis [J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 291-292: 655-660.

(责任编辑 王卫勋)