

# 钻削振动信号小波包分频谱减特征增强方法<sup>\*</sup>

周友行, 李 勇, 章本毅, 石弦韦, 刘 疏

(湘潭大学机械工程学院 湘潭, 411105)

**摘要** 针对在钻削加工噪声背景下振动信号微弱特征识别和提取困难的问题,提出了一种基于小波包分频谱减的钻削振动信号特征增强方法。首先,在经典谱减法原理的基础上,将钻削前机床空转信号视为监测信号的“加性噪声”;其次,根据钻削过程振动信号的特点,采用小波包分解方法将“加性噪声”和监测信号分成多个子频带;最后,对每个子频带内“加性噪声”的相应频带进行谱减处理后,重构钻削振动信号。仿真和实验结果表明,该方法能有效降低环境噪声对钻削过程特征提取的影响,从而达到增强监测信号特征的目的,同时建立了钻削过程与监测信号之间很好的映射关系模型。

**关键词** 振动信号;微弱特征;映射模型;小波包;谱减法

**中图分类号** TH166

## 引 言

按照刀具与加工材料相对位置的改变,钻削过程可分为钻前、钻中、出钻 3 个阶段<sup>[1]</sup>。有效提取与 3 个阶段相对应的信号特征,建立与切削状态相匹配的信号模型,是通过监测信号来研究钻削加工质量的关键技术之一。

随着传感器和信号分析处理技术的发展,越来越多的学者广泛采用各种类型的传感器监测研究钻削过程和钻削质量。Matsuzaki 等<sup>[2]</sup>研究了振动信号与钻削颤振之间的关系。Bhuiyan 等<sup>[3]</sup>利用振动和声发射信号对麻花钻磨损状态进行监测与评估。张锴锋等<sup>[4]</sup>在车削实验中,通过声发射信号成功实现了车刀磨损状态的监测。文献<sup>[5-7]</sup>基于振动信号分析加工表面粗糙度及融合声发射、切削振动、轴向力等多种信号,研究其与刀具磨损之间的对应关系。纵观国内外学者近年来所取得的成果,发现当前的基于钻削过程监测信号的研究主要可分为两大类:a. 通过提取监测信号比较明显的突变特征来预测、判断刀具破损或者钻孔质量明显异常等情况;b. 对监测信号进行整体分析,研究刀具磨损或评估钻削质量变化趋势。这些研究结果对保证高精度钻削质量有较好的指导意义,但还不能预测钻孔过程中刀具破损、质量异常产生于何时、何处。因此,提取与钻削过程相匹配的信号特征,建立与之对应的

映射关系,判别钻削异常出现在何时、何处,可有效保障所加工孔壁表面的质量。

理论上,随着钻刀与所加工材料相对位置的变化,监控信号也会产生相对应的差异性突变,形成相应的钻削过程特征。相对于刀具破损、切削系统异常等故障信息特征,信号的钻削过程特征比较微弱,常常淹没在钻削时的机床电机、传动系统、电气系统以及加工现场其他噪声信息中。钻削加工实验所采集的钻削过程信号之中,往往包含一大段刀具切入工件之前的机床空运转信号,包括机床电机、传动系统、电气系统以及加工现场其他噪声等信息。基于此,笔者引入语音增强研究领域常用的谱减法原理,采用小波包分频改进谱减法,视机床空运转信号为监测信号的“加性噪声”,将“加性噪声”信号和监测信号分成多个子频带,在每个频带内对“加性噪声”进行相应频谱谱减,尽量降低机床空运转信号等噪声对信号的影响,对钻削过程监测信号进行增强,有效提取钻削过程信号特征。

## 1 经典谱减算法的小波包分频改进

### 1.1 谱减法原理

经典谱减法基于噪声的统计平稳性以及加性噪声与语音不相关的特点,在频域将带噪信号的功率谱减去噪声的功率谱得到源信号的功率谱估量,开

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51775468,51375419,51375418);湘潭大学海泡石专项资助项目  
收稿日期:2017-01-04;修回日期:2017-03-23

方后得到源信号幅度估计。以源信号的相位估计为处理后纯净信号的相位,采用傅里叶逆变换可在时域上得到增强后的源信号。其算法基本流程如下。

假设含噪源信号为

$$x(i) = s(i) + n(i) \quad (1)$$

其中:  $s(i)$  为源信号;  $n(i)$  为噪声信号。

经傅里叶变换后,相应的频域表示为

$$X_K = S_K + N_K \quad (2)$$

由此可得

$$|X_K|^2 = |S_K|^2 + |N_K|^2 + S_K N_K^* + S_K^* N_K \quad (3)$$

由于  $s(i)$  和  $n(i)$  相互独立,故  $S_K$  与  $N_K$  也相互独立,所以

$$E(|X_K|^2) = E(|S_K|^2) + E(|N_K|^2) \quad (4)$$

现实中,很多噪声信号往往处于不稳定状态,为获得相对较精确的频谱估计,通常在计算之前开展信号的分帧处理

$$|Y_K|^2 = |S_K|^2 + \lambda_k \quad (5)$$

$\lambda_k$  为“加性噪声”  $|N_K|^2$  的统计平均值,由此可得源信号的谱估计值

$$|\hat{S}_K| = [ |X_K|^2 - |N_K|^2 ]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$|\hat{S}_K|$  和  $|N_K|$  分别为  $s(i)$  和  $n(i)$  的频谱估计,最终可获得各窗源时域信号

$$\hat{s}(k) = \text{IFFT} [ |\hat{S}_K| \exp(\angle X(K)) ] \quad (7)$$

其中: IFFT 表示快速傅里叶逆变换操作(inverse fast fourier transform, 简称 IFFT);  $\angle X(K)$  为噪声的相位谱。

通过 IFFT 计算可以获得消噪后的信号,最后将各频区间的信号进行相加,并去除窗函数增益,理论上可得到准确的去噪信号  $\hat{s}(i)$  [8-10]。但是,即使对于频率带宽较窄的含噪声波信号,分帧处理时噪声的短时功率谱上也既有波峰,又有波谷。在一帧里,它们的频率分布是随机的,所以谱减处理之后的信号中依然存留较多的残余噪声。

钻削实验中采集的监测信号的频带宽为 10 kHz,若采用经典谱减法处理,因信号的高频、低频部分所要求的帧长不一样,无法同时对高频、低频信号进行准确的频谱估计,导致谱减处理效果较差。

## 1.2 小波包分频谱减算法

准确的信号频谱估计,要求帧长既需满足信号在该帧内的短时平稳,还要求采样周期小于最小研究频率对应的周期。目前,采用小波包分频方法处理带宽达 10kHz 的信号时,可根据研究需要提高不同频段的信号短时平稳和谱估计准确性。小波包定义<sup>[11]</sup>如下

$$\begin{cases} \mu_{2n}(x) = \sum h_m \mu_n(2x - m) \\ \mu_{2n+1}(x) = \sum g_m \mu_n(2x - m) \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $h_m(n)$  和  $g_m(n)$  为正交镜像滤波器。

当  $n=0$  时,可得

$$\begin{cases} \mu_0(x) = \sum h_m \mu_0(2x - m) \\ \mu_1(x) = \sum g_m \mu_0(2x - m) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)分别为尺度函数  $\mu_0(x)$  与小波函数度  $\mu_1(x)$  的双尺度方程。

若采用小波包进行  $j$  层分解,则它在第  $j$  层的各个子频带范围分别为  $0 - \frac{1}{2^j} f_{\max}$ ,  $\frac{1}{2^j} f_{\max} - \frac{2}{2^j} f_{\max}$ ,  $\frac{2}{2^j} f_{\max} - \frac{3}{2^j} f_{\max}$ , ...,  $\frac{2^j - 1}{2^j} f_{\max} - f_{\max}$ , 而且小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配。在此基础上再选择合适的帧长进行谱减处理,即可提高钻削源监测信号增强效果。

因此,笔者基于谱减法原理和信号小波包分解方法,针对较大带宽的监测信号,首先,将监测信号和噪声信号分别进行多层小波包分解,获得多个相应的频带信号;其次,针对不同的频带范围的噪声信号选择合理的帧长,通过 IFFT 变换获得各频带信号的频谱估计值;接着,将其与对应的源信号分频带进行谱减处理,采用傅里叶逆变换处理谱减后的信号频谱,获得各频带的去噪信号;最后,将消噪后的各个频域范围的信号累加,即可获得所需的源信号。其算法原理如图 1 所示。

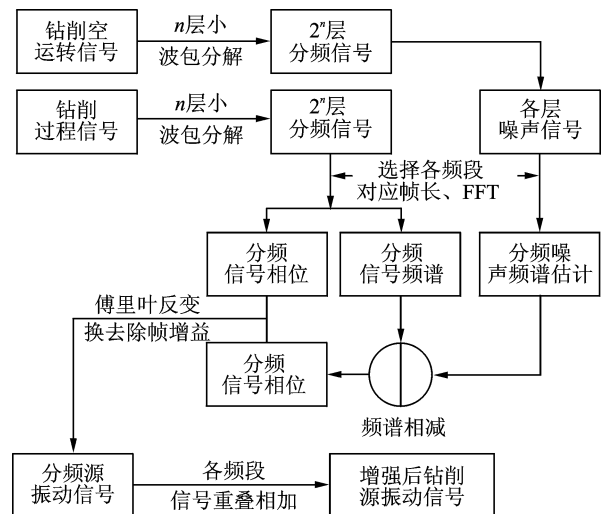


图1 算法原理图

Fig. 1 The principle diagram of the algorithm

## 2 仿真分析

任设一采样率为  $f = 20$  kHz 的仿真信号为

$$x(t) = s(t) + c(t) + n(t) \quad (10)$$

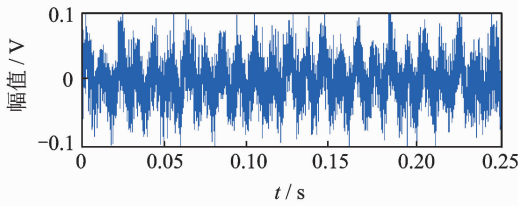
其中:  $s(t) = 0.02\sin(2\pi 50t)$  为信号  $x(t)$  中的平稳分

量;  $c(t) = 0.05\sin(2\pi 100t)$  为信号中的循环平稳分量;  $n(t)$  为随机非平稳分量, 将其认为随机噪声源。

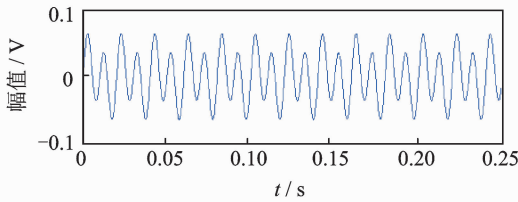
采用经典谱减法和小波包分频谱减算法分别对上述信号进行处理, 仿真分析结果如图 2、图 3 所示。

由图 2(c)、(d) 可以看出, 在时域波形上, 笔者提出的小波包分频谱减法对信号的处理结果更加接近纯净源信号。

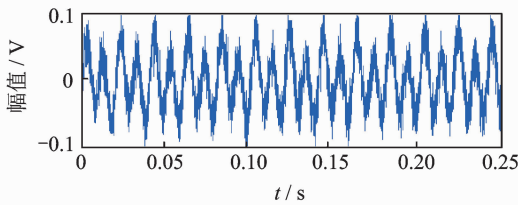
由图 3(a) 可以看出,  $s(t)$  和  $c(t)$  完全淹没在噪声信号之中; 图 3(b) 中在 99.8 Hz 处出现明显的峰值, 表明经典谱减法有效增强  $c(t)$  的谐波分量, 但  $s(t)$  依然没有得到有效增强; 图 3(c) 中在 50 和 100 Hz 处出现明显的峰值, 可认为小波包分频谱减可在不损坏源信号的前提下, 有效提取出  $s(t)$ 、 $c(t)$  的谐波分量。对比图 3(b) 和图 3(c) 可得, 小波包分频谱减法去噪效果和信号特征增强更加明显。



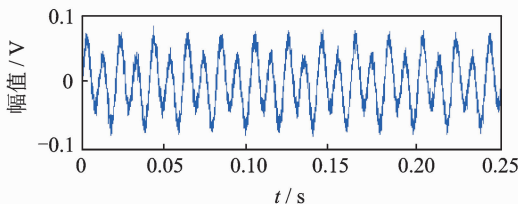
(a) 含噪声信号  
(a) Original signal with noise



(b) 纯净源信号  
(b) Pure original signal



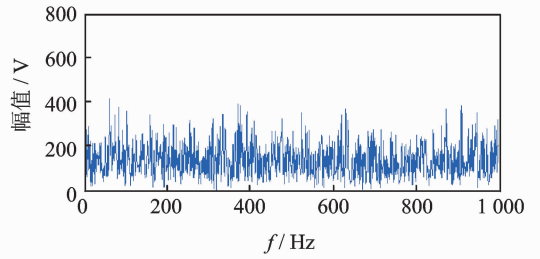
(c) 经典谱减法增强后信号  
(c) Enhanced Signal using the classical spectral subtraction



(d) 小波包分频谱减法增强后信号  
(d) Enhanced Signal using wavelet packet subtraction

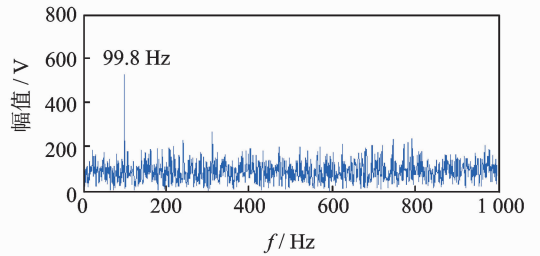
图 2 信号时域图

Fig. 2 The time domain signal figure



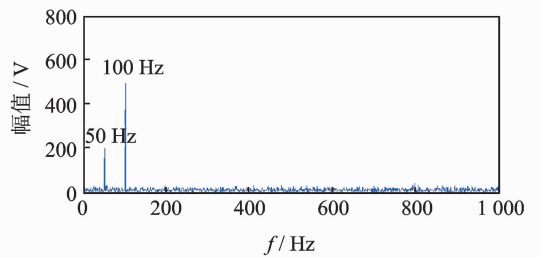
(a) 仿真信号  $x(t)$  频谱图

(a) The spectrum of the simulation signal  $x(t)$



(b) 经典谱减法增强后信号频谱图

(b) Spectrum of the enhanced Signal using the classical spectral subtraction



(c) 小波包分频谱减增强后信号频谱图

(c) Spectrum of the enhanced signal using wavelet packet division-spectral subtraction

图 3 仿真信号频谱图

Fig. 3 Spectrum of the simulation signal

信噪比 (signal-to-noise ratio, 简称 SNR) 的大小可以作为判别信号的谱减增强效果的标准。信噪比的计算公式为

$$SNR = 10\lg S/N \quad (11)$$

其中:  $S$  为源信号的平均功率;  $N$  为噪声信号的平均功率。

SNR 值越大, 说明信号还原效果越好, 即不失真的效果越好。

式(9)中的信号通过两种方法处理之后, 获得信号的 SNR 值如表 1 所示。由表 1 可看出, 小波包分频谱减法在频带较宽的信号处理中明显比经典谱减算法要好, 既消除了噪声干扰, 同时保真效果更好。

表 1 仿真信号的信噪比

Tab. 1 The SNR of the simulation signal

处理方法	经典谱减处理	小波包分频处理
SNR	0.88	11.06

### 3 钻削过程振动监测信号特征增强

#### 3.1 钻削实验及振动监测信号频谱分析

笔者以钻削过程振动监测信号为研究对象,探讨小波包分频谱减法研究钻削过程特征增强的效果。钻削加工实验如图 4 所示。

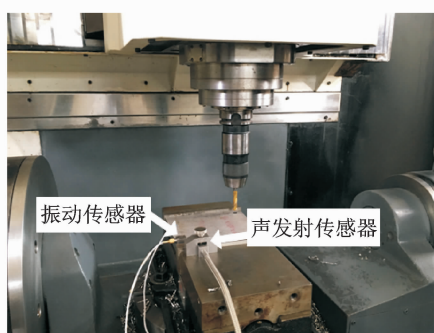


图 4 钻削加工实验

Fig. 4 Holes drilling experiment

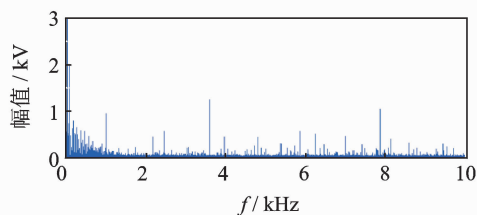
所采用的传感器为 Kistler8793A 三向加速度振动传感器和 Kistler8152B 声发射传感器。因为钻削过程中,尤其在刀具钻入、钻出时刻,刀具与工件接触位置变化会导致切削变形区材料内部晶格位错滑移产生的高频弹性应力波信号变化明显,故实验中所采集的声发射信号主要用于对比分析小波包分频谱减振动监测信号增强效果。

钻削加工设备和工艺参数具体如下:加工机床为 VMC-C30;加工材料为 Ti6Al4V 合金;钻孔孔径为 6.5 mm;主轴转速为 740 r/min;刀具进给量为 0.5 mm/s;传感器采样频率为 20 kHz;实验钻孔个数为 24 个。

钻削实验时,引钻过程中会采集一大段机床空运转信号,它包含了机床电机、传动系统、电气系统以及加工现场其他噪声等信息。它与钻削过程信号不相关,可视其为后续钻削监测信号中隐含的“加性噪声”。

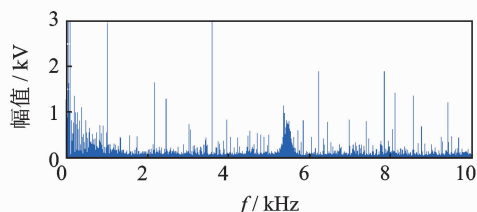
在前述 24 个钻孔实验中,任选一个钻孔(第 3 号钻孔)的监测信号为研究对象,对提取的机床空运转信号和钻削过程中的信号进行频谱分析,结果如图 5 所示。由图 5 可看出,机床空运转信号频谱变化剧烈部位在钻削过程振动监测信号相应频谱处都有所体现,在一定程度上也验证了机床空运转信号属于钻削过程振动监测信号“加性噪声”的定义。

对图 5 所示机床空运转信号和钻削过程中的信号,笔者采用 3 层小波包(db5 小波)分频处理,得到



(a) 机床空运转信号频谱

(a) Spectrum of machine idling signal



(b) 钻削过程信号频谱

(b) Spectrum of the drilling process signal

图 5 z 轴振动信号在引钻和钻中阶段频谱  
Fig. 5 Spectrum of z-axis vibration signals

了 8 个频带段的信号。通过对钻削信号各频段短时平稳性的分析,确定了各频段信号合适的帧长。钻削过程振动监测信号的小波包分频频带范围及帧长如表 2 所示。

#### 3.2 钻削过程振动信号特征增强效果

##### 3.2.1 信号处理前后时域波形对比

3 号钻孔振动监测信号小波包分频谱减获得的钻削过程振动源信号、增强信号时域波形对比见图 6。由图 6 可看出,对信号小波包分频谱减后,增强信号受机床空运转等环境噪声的干扰程度显著降低,特别是钻刃钻入、钻出工件时刻,振动信号突变特征增强明显,初始钻削时刻瞬时振动纹理非常清晰。

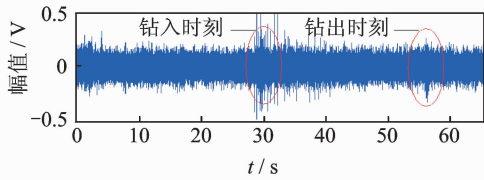
表 2 小波包频率范围及对应帧长

Tab. 2 Wavelet packet frequency range and corresponding frame length

序号	节点	频带范围/Hz	帧长
1	[3,0]	0~1 250	$2^{10} = 1 024$
2	[3,1]	1 250~2 500	$2^9 = 512$
3	[3,2]	2 500~3 750	$2^9 = 512$
4	[3,3]	3 750~5 000	$2^8 = 256$
5	[3,4]	5 000~6 250	$2^8 = 256$
6	[3,5]	6 250~7 500	$2^7 = 128$
7	[3,6]	7 500~8 750	$2^7 = 128$
8	[3,7]	8 750~10 000	$2^7 = 128$

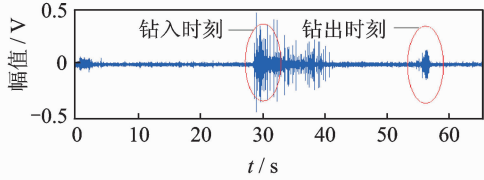
##### 3.2.2 信号处理前后突变处能量密度比值

对于钻削过程振动监测信号的特征,信号突变



(a) 钻削过程原始振动信号

(a) Original vibration signal of the drilling process



(b) 小波包分频谱减法增强后信号

(b) Enhanced signal using wavelet packet division-spectral subtraction

图 6 钻削振动时域图

Fig. 6 The time domain figure of vibration signals

处与信号平稳阶段的能量密度特征比值可作为一个较好的评判指标。振动监测信号的能量密度为

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [A(i)]^2 \quad (12)$$

其中:  $N$  为数据长度;  $A(i)$  为振幅。

钻刃切入工件瞬时的信号突变时刻和钻刃切入前信号变化平缓时刻的能量密度比值可表示为

$$\rho = E_z / E_L \quad (13)$$

其中:  $E_z$  为钻刃切入工件瞬时信号能量密度;  $E_L$  为钻刃切入前信号能量密度。

在同样的采样长度下,若  $\rho$  值越大,表明信号中突变部分更加明显。

笔者在 24 个钻孔中随机抽取 10 个钻孔,采用前述小波包分频谱减增强信号后,选择计算钻刃切入工件瞬时的信号突变时刻和钻刃切入前信号变化平缓时刻的能量密度比值,计算结果如表 3 所示。

表 3 能量密度比值

Tab. 3 The energy density ratio of Mutations in time and stability time

序号	处理前	处理后
1	1.652	23.421
2	1.504	22.542
3	2.189	52.441
4	1.788	30.461
5	1.315	12.901
6	1.457	17.138
7	1.495	19.655
8	1.236	17.451
9	1.877	40.322
10	1.914	39.841

由表 3 数据可以看出,采用小波包分频谱减算法处理钻削过程振动监测信号后,信号突变处与正常阶段能量比值增强了 10 倍左右。

### 3.3 钻削过程声发射信号与增强后振动信号突变对应关系

利用声发射均方差信号 (root mean square, 简称 RMS) 代替声发射信号 (acoustic emission, 简称 AE) 进行研究,利用采集的声发射信号对低频噪声不敏感的特点,笔者利用声发射信号来验证钻削过程振动监测信号小波包分频谱减处理效果。其中第 3 号孔钻削过程信号与对应声发射信号对比图如图 7 所示;小波分频谱减后的钻削过程信号与对应声发射信号对比图如图 8 所示;在钻入时刻,小波分频谱减后的信号与对应声发射信号对比图如图 9 所示。

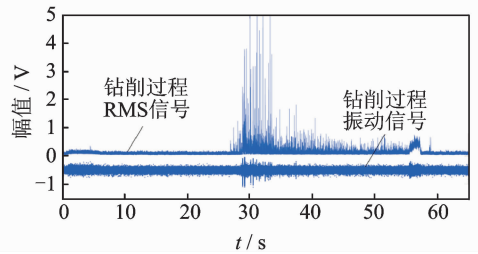


图 7 未处理的钻削过程信号与对应声发射信号时域对比图  
Fig. 7 The time domain figure of untreated drilling process signals and the AE signals

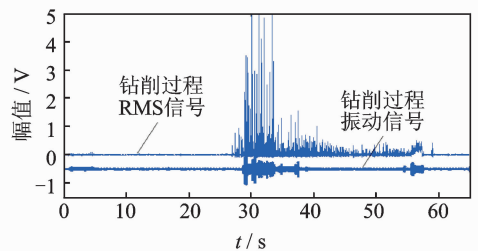


图 8 增强后的钻削过程信号与对应声发射时域对比图  
Fig. 8 The time domain figure of the enhanced signal drilling process and the AE signals

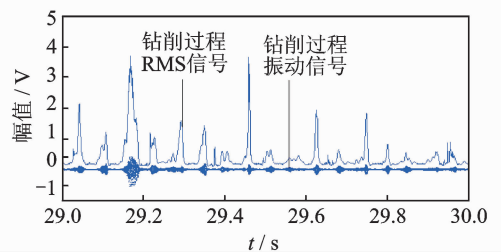


图 9 钻入时刻增强后的振动信号与对应声发射信号时域对比图  
Fig. 9 The time domain figure of the stage of guiding drilling signals of the enhanced signal and the AE signal

由图9可明显看出,处理后的振动信号与声发射信号强度突变时刻基本一致。这表明对于钻削过程振动监测信号,视机床空运转信号为监测信号的“加性噪声”,采用小波包分频谱减,可有效去除机床空运转信号等噪声因素的影响。

## 4 结 论

1) 理论计算和仿真分析表明,对于频带较宽的信号,采用小波包分解将“加性噪声”信号和监测过程中含“加性噪声”信号分为多个频率范围间隔均匀的子频带,再进行相应频谱谱减和信号重构,可减少“加性噪声”信号的影响,有效增强监测信号各种特征。

2) 基于钻刃与工件接触位置变化,将钻削监测信号分为机床空运转信号区和钻削过程信号区。可视机床空运转信号区为“加性噪声”,在此基础上采用“谱减法”原理降低机床空运转信号等环境噪声对钻削过程监测信号的影响。

3) 实验数据分析表明,采用小波包分频谱减法处理钻削振动源信号,可明显增强钻刃钻入、钻出工件的信号特征,清晰描述钻削过程与振动信号匹配情况,为钻削加工状态监测提供更加精准的识别和判断依据。

### 参 考 文 献

- [1] 周友行, 张建勋, 董银松, 等. 基于振动信号过程特征的批量钻削工序质量检测[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7):171-177.  
Zhou Youhang, Zhang Jianxun, Dong Yinsong, et al. New approach to inspection of batch drilling quality based on the vibration signal mapping model vibration signal mapping model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7):171-177. (in Chinese)
- [2] Matsuzaki K, Ryu T, Sueoka A, et al. Theoretical and experimental study on rifling mark generating phenomena in BTA deep hole drilling process (generating mechanism and countermeasure) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 88: 194-205.
- [3] Bhuiyan M S H, Choudhury I A, Dahari M. Monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(4):476-487.
- [4] 张锴锋, 袁惠群, 聂鹏. 基于切削声信号与优化 SVM 的刀具磨损状态监测[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4):727-732.
- Zhang Kaifeng, Huan Huiqun, Nie Peng. Tool wear condition monitoring based on sound signal and optimized SVM[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4):727-732. (in Chinese)
- [5] Upadhyay V, Jain P K, Mehta N K. In-process prediction of surface roughness in turning of Ti-6Al-4V alloy using cutting parameters and vibration signals [J]. Measurement, 2013, 46(1):154-160.
- [6] Bombiński S, Błażej K, Nejman M, et al. Sensor signal segmentation for tool condition monitoring[J]. Procedia Cirp, 2016, 46:155-160.
- [7] Prasad B S, Babu M P. Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: numerical and experimental analysis[J]. Engineering Science & Technology An International Journal, 2016, 20(1):197-211.
- [8] Miyazaki R, Saruwatari H, Nakamura S, et al. Musical-noise-free blind speech extraction integrating microphone array and iterative spectral subtraction[J]. Signal Processing, 2014, 102(9):226-239.
- [9] 袁幸, 朱永生, 洪军, 等. 用盲反卷积和改进谱减法提取轴承微弱特征[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2):202-207.  
Yuan Xing, Zhu Yongsheng, Hong Jun, et al. Application of Blind Deconvolution and Improved Spectral Subtraction method in extracting weak feature of rolling bearing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2):202-207. (in Chinese)
- [10] Hussein R, Shaban K B, El-Hag A H. Acoustic partial discharge signal denoising using power spectral subtraction[C] // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S. l.]: CEIDP, 2015:330-333.
- [11] 蒋玲莉, 刘义伦, 李学军, 等. 小波包去噪与改进 HHT 的微弱信号特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5):510-513.  
Jiang Lingli, Liu Yilun, Li Xuejun, et al. feature extraction of weak signal using wavelet packet denoising and improved Hilbert-Huang transformation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5):510-513. (in Chinese)



**第一作者简介:**周友行,男,1971年8月生,博士、教授。主要研究方向为数字化设计与制造。曾发表《批量钻削监测信号双谱特征融合研究及应用》《机械工程学报》2014年第50卷第24期等论文。  
E-mail: zhouyouhang@xtu.edu.cn

