

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006138

基于振动信号的深孔钻削涡振在线检测方法研究*

思悦, 孔令飞, 李旭阳, 郑建明, 李淑娟

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要: 涡振是深孔钻削中极易出现的刀具异常振动形式之一。深孔钻削中刀具系统的涡振将导致深孔圆度超差,甚至损坏刀具和孔壁。因此,实时监测深孔钻削状态、辨识刀具系统涡振,对及时抑制刀具系统涡振、提高深孔加工质量具有重要意义。提出一种基于主轴振动信号的深孔钻削中涡振在线检测方法。首先,对实时采集的主轴振动信号进行经验小波变换分解,提取主轴转频的高倍频信号;其次,计算所提取高倍频信号的能量比,作为监测指标;最后,依据监测指标实时辨识刀具系统涡振。实验结果表明,所提检测方法可有效识别深孔加工中导致孔圆度误差大于0.035 mm的刀具系统涡振缺陷。

关键词: 深孔钻削; 涡振; 在线检测; 振动信号

中图分类号: TG806 TH165+.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

An online whirl detection method in deep hole drilling based on vibration signal

Si Yue, Kong Lingfei, Li Xuyang, Zheng Jianming, Li Shujuan

(School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Whirling is one kind of abnormal vibration in deep hole drilling. During the drilling process, it may enlarge the roundness error, and even damage the tool and hole wall. Thus, it is important to monitor the drilling condition and identify the whirling timely. To be specific, the whirling should be suppressed timely and the quality of deep hole machining should be improved. In this study, an online whirling detection method in deep hole drilling is proposed based on vibration signal. Firstly, the vibration signal is decomposed by empirical wavelet transform, and the high multiple frequency components of spindle rotation are extracted. Secondly, the energy ratio between the extracted component and the original signal is calculated. Finally, the energy ratio is viewed as the detection index to identify the tool condition. The proposed method is evaluated with BTA deep-hole drilling tests. Experimental results show that the proposed method can effectively identify the whirling which lead to the roundness error that is larger than 0.035 mm during the deep hole drilling.

Keywords: deep hole drilling; whirling vibration; online detection; vibration signal

0 引言

机械加工中,深孔一般定义为长径比大于5的孔。深孔钻削是将专用切削刀具安装在空心长钻杆上,工件安装在工作台上,使刀具相对于工件作高速旋转运动实现切削加工。深孔制件已广泛应用于航空航天、新能源装备等高新技术领域,并且发挥着重要作用,如航空发动机的空心主轴及复杂壳体类零件^[1]、核电站蒸汽发生器管板^[2]、超临界汽轮机螺栓孔和阀杆套筒^[3]等都是机械

装备中能量传递和动力转换必备的核心零部件。深孔的加工质量直接影响相关机械装备的服役性能和使用寿命。刀具系统的异常振动是影响深孔加工质量、可靠性和效率等的关键因素^[4-6]。

涡振是深孔钻削中极易出现的刀具系统异常振动形式之一^[7]。刀具系统的涡振将导致深孔出现多边形孔缺陷,造成加工深孔的尺寸精度、圆度等超差,甚至损坏刀具和孔壁,进而造成深孔加工质量不合格、甚至报废深孔制件^[8]。因此,实时监测深孔钻削中刀具系统振动状态、辨识刀具系统涡振,对及时抑制刀具系统涡振、提高深孔

收稿日期:2020-03-01 Received Date: 2020-03-01

* 基金项目:国家自然科学基金(51905421)、中国博士后科学基金(2019M653880XB)、陕西省教育厅自然科学专项(19JK0586)资助

加工质量具有重要意义。

国内外学者在深孔加工状态监测方面已展开了一些研究。德国学者 Messaoud 等^[9]提出一种基于非线性时间序列的深孔刀具系统振动状态监测方法,实时检测深孔刀具系统颤振状态,为调整加工过程和抑制刀具颤振提供依据。日本学者 Uekita 等^[10]结合短时傅里叶变换和谱峭度等方法,研究了深孔加工过程中随机振动和刀具颤振的识别方法。国内学者 Xiao 等^[11]研究了深孔加工过程中刀具磨损状态监测方法,建立了刀具系统固有频率处幅值和刀具磨损状态的对应关系。这些研究主要集中在深孔加工中的刀具颤振和刀具磨损研究。Kovalyshen 等^[12]和 Jiménez 等^[13]通过建立刀具系统的理论模型分析了深孔加工中刀具涡振的发生规律,指出涡振发生在主轴转动频率及其倍频附近。基于该结论,Steininger 等^[14]研究了通过采集切削力信号在线检测涡振的方法。然而由于深孔加工工艺的特殊性,加工过程切削力不容易获得。因此,本文研究基于振动信号的深孔钻削中刀具涡振在线检测方法。

通过前人的研究基础得知^[10-11],深孔刀具系统涡振主要发生在主轴转动频率及其倍频附近。另外,通过大量实验研究发现高倍频信号对刀具系统涡振更敏感。因此,提取主轴振动信号中的转频高倍频成分是本文的首要任务。经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)^[15]结合了经典小波变换和经验模式分解的优势,是一种自适应频谱划分的方法,在非平稳信号特征提取方面中取得了广泛的应用^[16-20]。本文采用 EWT 提取振动信号中转频高倍频成分,然后计算所提取倍频信号占振动信号总能量的比值作为检测指标,并以此检测深孔钻削中刀具系统的涡振。

1 经验小波变换

EWT 摒弃了经典小波变换的固定二进制频率分配特点,继承了经典小波变换的多分辨率特性,是一种新的小波变换方法^[21]。EWT 可实现信号频谱的自由划分。经验小波基函数定义为一组带通滤波器,通过灵活划分信号的频谱来构造。EWT 分解过程相当于对信号进行一系列带通滤波。

考虑到标准傅里叶轴的周期为 2π ,根据香农采样定理,则分析频率的范围为 $[0, \pi]$ 。傅里叶轴的频率划分如图 1 所示,假设将频率区间 $[0, \pi]$ 划分为 N 个连续的区间段,区间段的边界用 $\omega_n (\omega_0 = 0, \omega_N = \pi)$ 表示,则每个区间段可表示为 $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$,且有 $\cup_{n=1}^N \Lambda_n = [0, \pi]$ 。过渡段 T_n 以 ω_n 为中心,宽度为 $2\tau_n$ 。其中: $\tau_n = \gamma\omega_n$ 且 $0 < \gamma < 1$ 。

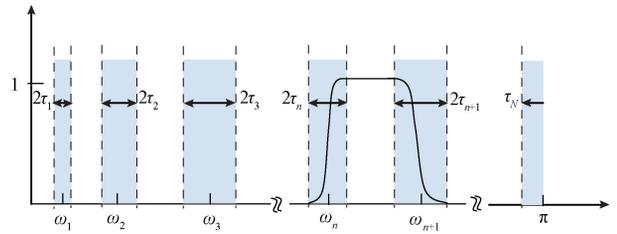


图 1 傅里叶轴的划分

Fig. 1 Segmentation of the Fourier axis

经验小波定义为一组带通滤波器,每个区间段 $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$ 对应一个带通滤波器,基于 Meyer 小波构造理论,经验小波尺度函数和小波函数的构造公式如下所示。

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_n \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n) \right) \right], & (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & (1 + \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_{n+1} \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_{n+1}) \right) \right], & (1 - \gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_{n+1} \\ \sin \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n) \right) \right], & (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中,函数 $\beta(x)$ 是一个任意 $C^k([0, 1])$ 函数,如下所示:

$$\beta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta(x) + \beta(1 - x) = 1, \quad \forall x \in [0, 1]$$

满足 $\beta(x)$ 性能的函数中应用最广泛的函数如下所示:

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3)$$

为满足小波函数的紧框架特性,参数 γ 必须满足如下方程:

$$\gamma < \min \left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n} \right)$$

基于式(1)和(2),可构造一组紧框架经验小波滤波器。EWT 的分解过程与经典小波变换相同,EWT 分解的细节系数计算公式如下:

$$f_x(n, t) = \langle f(t), \psi_n(t) \rangle = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \cdot \overline{\hat{\psi}_n(\omega)}) \quad (4)$$

EWT分解的近似系数计算公式如下:

$$f_x(0, t) = \langle f(t), \phi_1(t) \rangle = \int f(\tau) \overline{\phi_1(\tau - t)} d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \cdot \overline{\hat{\phi}_1(\omega)}) \quad (5)$$

式中: $\hat{\phi}_1(\omega)$ 和 $\hat{\psi}_n(\omega)$ 是经验尺度函数 $\phi_1(t)$ 和小波函数 $\psi_n(t)$ 的傅里叶谱。

被分析信号与经验小波函数和尺度函数分别进行内积计算,获得 EWT 分解的细节系数和近似系数。信号重构过程如下所示:

$$f(t) = f_x(0, t) * \phi_1(t) + \sum_{n=1}^N f_x(n, t) * \psi_n(t) = F^{-1}(W_x(0, \omega) \hat{\phi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N W_x(n, \omega) \hat{\psi}_n(\omega)) \quad (6)$$

其中: “*” 为卷积符号。

2 基于 EWT 和转频高倍频信号的涡振检测方法

本文提出的基于振动信号的深孔钻削中涡振在线检测,主要思想是构造敏感检测指标。通过前期大量的理论和实验研究表明,深孔刀具系统涡振主要发生在主轴转动频率及其倍频附近。另外,通过大量实验研究发现高倍频信号对刀具系统涡振更敏感,涡振的出现将导致转频高倍频信号振幅增加。因此,需要从主轴振动信号中提取转频高倍频信号,并依此构造检测指标。本文将 8 倍频及以上倍频信号作为高倍频信号,引入 EWT 方法对振动信号进行分解,提取振动信号中的高倍频信号;然后,计算所提取倍频信号占主轴振动信号的能量比,并将此作为检测指标;最后,依据检测指标检测深孔钻削中刀具系统的涡振。本文中基于振动信号的深孔钻削中涡振在线检测方法的具体步骤如下所示:

- 1) 实时采集深孔加工过程中钻杆振动信号;
- 2) 对振动信号的频谱进行划分,构造经验小波函数和尺度函数;
- 3) 对振动信号进行 EWT 分解,提取高倍频信号;
- 4) 计算所提取高倍频信号的能量占振动信号总能量的比值,并将此作为检测指标;
- 5) 依据检测指标实时监测深孔加工中刀具系统的涡振。

3 深孔钻削实验验证

本节中对 45# 钢材料进行 BTA 深孔钻削实验,以验证

本文中刀具系统涡振检测方法的有效性。实验装置如图 2 所示,包括 BTA 深孔钻床、工件(45# 钢材料)、涡电流传感器(灵敏度为 1 V/mm,量程为 4 mm)、LMS 数据采集系统等。涡电流传感器以非接触的方式安装在靠近工件处的钻杆附近,测量钻杆的横向振动。LMS 数据采集系统与传感器连接采集振动数据。数据采样频率设置为 1 600 Hz。



图 2 BTA 深孔钻削实验装置

Fig. 2 The experimental setup of BTA deep hole drilling

BTA 深孔钻削实验中,钻头与空心钻杆以螺纹方式连接。钻头直径为 17.7 mm,钻杆长度为 800 mm。采用不同的切削参数加工深孔 A 和 B,并进行实时监测。深孔 A 和 B 的具体切削参数如表 1 所示。

表 1 深孔 A 和 B 的具体切削参数

Table 1 Cutting parameters for deep holes A and B

深孔	参数	数值
深孔 A	刀具转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 000
	进给速度/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	60
	孔深度/mm	210
深孔 B	刀具转速/($r \cdot \min^{-1}$)	600
	进给速度/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	24
	孔深度/mm	210

3.1 深孔钻削中刀具涡振检测

本节中将基于所提出的检测方法,对深孔 A 和 B 加工过程中刀具系统的振动状态进行检测。

1) 深孔 A 加工中刀具系统涡振检测

深孔加工中,每隔 2 s 采集一个检测样本,每个样本采样时间为 4 s,因此每相邻两个样本之间有数据冗余,深孔 A 加工中采集的整个加工过程振动信号和检测样本分割方式如图 3 所示。第 N 个检测样本如图 4 所示,提取样本信号中主轴转频的高倍频信号。由图 4(b)可知,样本信号中采集到的最高阶倍频信号为 12 倍频信号,因此 8 到 12 倍频信号为需要提取的特征信息。基于样本信号划分经验小波基函数的边界,并基于此构造经验小波基函数。

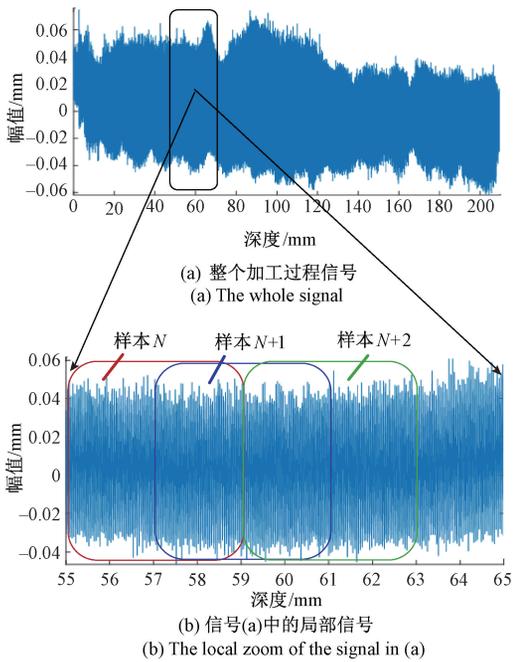


图 3 深孔 A 整个加工中采集的振动信号及局部信号
Fig. 3 The measured signal of deep hole A drilling process

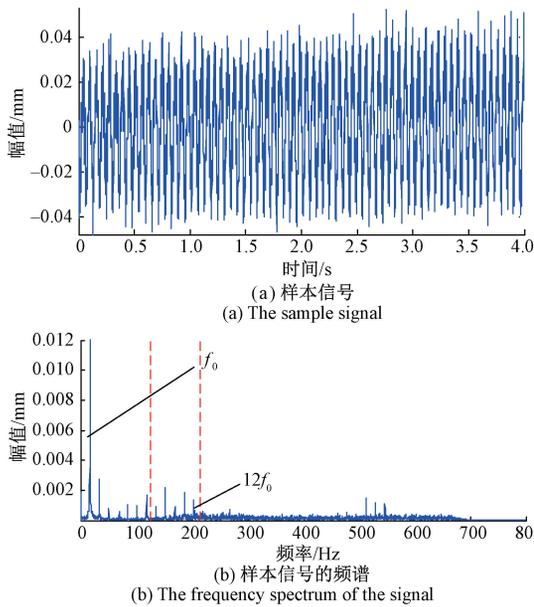


图 4 第 N 个检测样本及其频谱
Fig. 4 The N -th sample signal and its frequency spectrum

利用 EWT 对样本信号进行分解得到的小波系数如图 5 所示。由图 5 可知,8 倍频至 12 倍频信号包含于 C_2 子频带中。因此,基于 C_2 子频带信号计算检测指标。计算公式如下所示:

$$Y_{\text{index}} = \frac{\sum |c_2|}{\sum |c_1| + \sum |c_2| + \sum |c_3|} \quad (7)$$

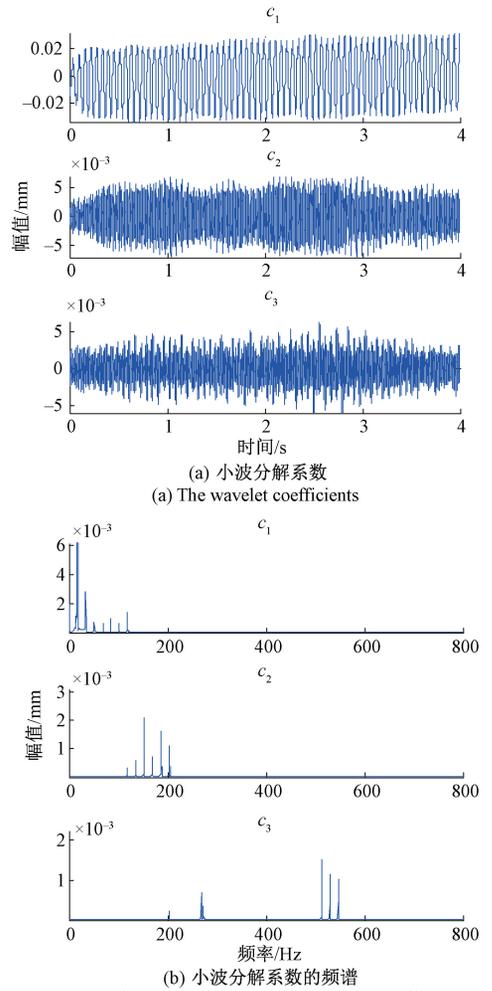


图 5 第 N 个检测样本信号的 EWT 分解结果
Fig. 5 The decomposition results of the N -th sample signal by the EWT method

对深孔 A 加工过程采集的检测样本进行分析,计算检测指标,其结果如图 6 所示。

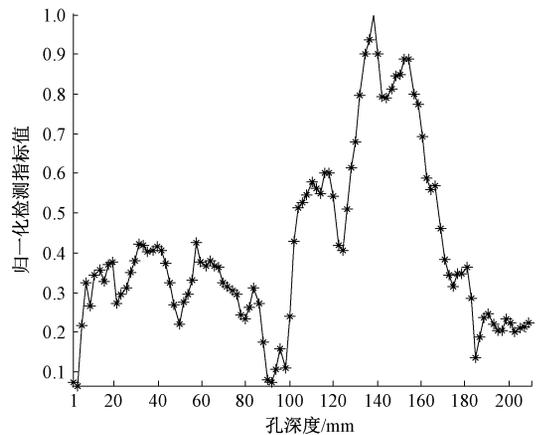


图 6 基于本方法的深孔 A 加工过程刀具振动状态监测结果
Fig. 6 The detection results of deep hole A drilling process based on the proposed method

由于刀具系统发生涡振将导致振动信号中主轴转频高倍频信号幅值增大,因此高倍频信号的能量占总振动信号的能量增加,即检测指标值增大。由图 6 可知,当加工深度在 100~150 mm 区间时,检测指标值明显增大,表明刀具系统在该区间发生了涡振。

为了验证基于本研究方法检测结果的准确性,通过破坏性实验,利用三坐标测量机对深孔 A 的圆度误差进行了检测,检测结果如图 7 所示。由图 7 可知,100~150 mm 深度区间的圆度误差明显增大。对比图 6 和 7 可知,在孔深度方向检测指标值与孔圆度误差的变化趋势一致,该方法可有效监测孔圆度误差大于 0.035 的缺陷。实验结果表明,本文提出的方法可有效检测深孔 A 加工中导致孔圆度误差大于 0.035 的刀具系统涡振缺陷。

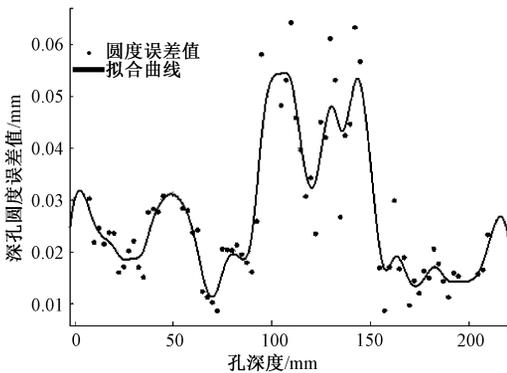


图 7 深孔 A 在深度方向的圆度误差值
Fig. 7 The roundness error of deep hole A

2) 深孔 B 加工中刀具系统涡振检测

类似于深孔 A 加工中刀具状态监测,深孔 B 加工中采集的整个加工过程振动信号和检测样本分割方式如图 8 所示,第 N 个检测样本如图 9 所示。基于样本信号特征构造经验小波基函数,并对样本信号进行 EWT 分解,提取其中主轴转频的 8 倍频及以上有效倍频信号。基于提取结果构造检测指标,对深孔 B 加工过程刀具状态进行检测,检测结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当加工深度在 20~40 mm 区间和 100~120 mm 区间时,检测指标值明显增大,表明刀具系统在该区间发生了涡振。为了进一步验证基于本研究方法检测结果的准确性,利用三坐标测量机对深孔 B 的圆度误差进行了检测,检测结果如图 11 所示。由图 11 可知,深孔 B 在 20~40 mm 深度区间和 100~120 mm 深度区间的圆度误差明显增大。对比图 10 和 11 可知,在孔深度方向检测指标值与孔圆度误差的变化趋势一致,该方法可有效监测孔圆度误差大于 0.035 的缺陷。实验结果表明,本文提出的方法可有效检测深孔 B 加工中导致孔圆度误差大于 0.035 的刀具系统涡振缺陷。

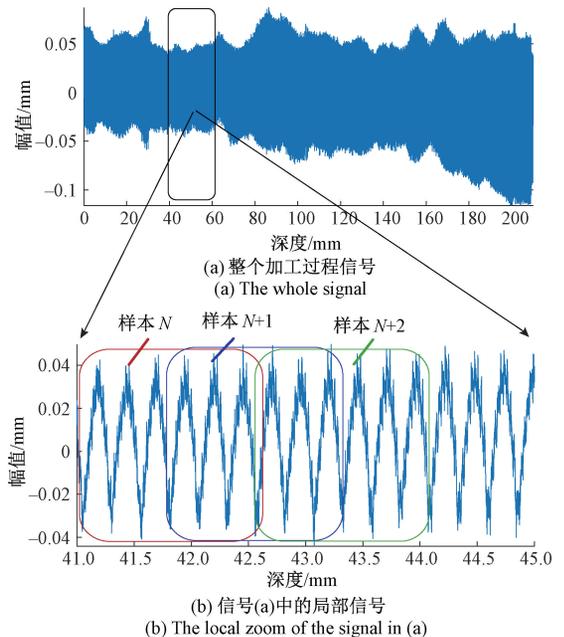


图 8 深孔 B 整个加工中采集的振动信号及局部信号
Fig. 8 The measured signal of deep hole B during the drilling process

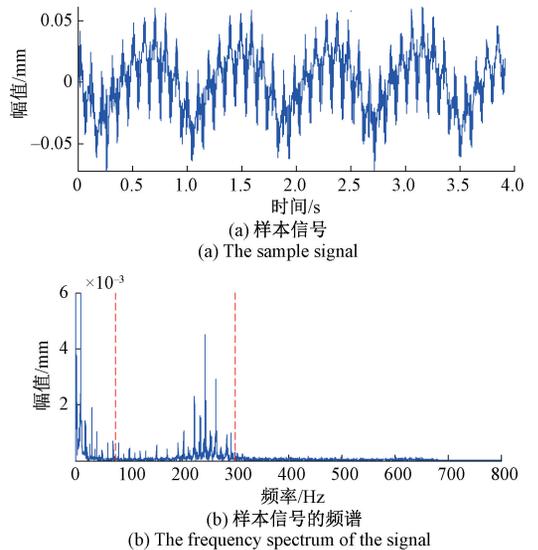


图 9 第 N 个检测样本及其频谱

Fig. 9 The N -th sample signal and its frequency spectrum

4 结 论

本文针对深孔加工中刀具系统涡振缺陷检测问题,提出了基于振动信号的深孔钻削中刀具系统涡振在线监测方法。考虑到主轴转频的高倍频信号对刀具系统涡振较为敏感,引入了具有频带自由划分特性的 EWT 方法,

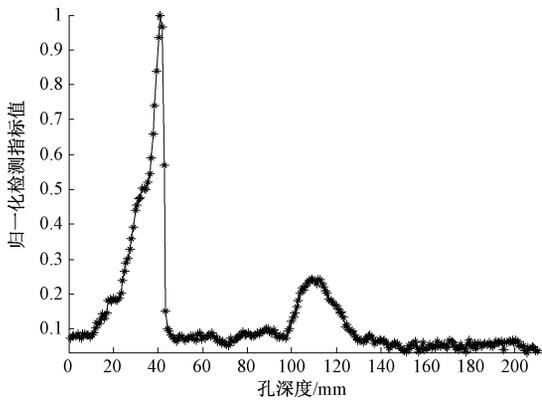


图10 基于本方法的深孔B加工过程刀具系统涡振监测结果
Fig. 10 The detection results of deep hole B drilling process based on the proposed method

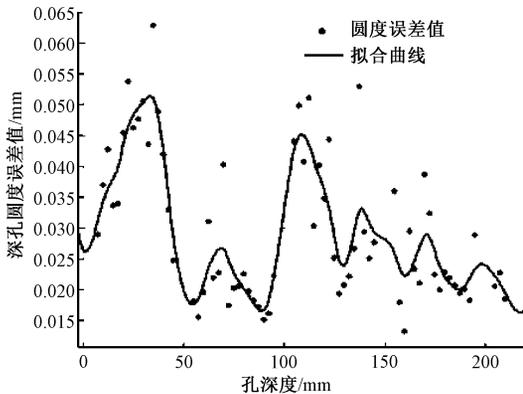


图11 深孔B在深度方向的圆度误差值
Fig. 11 The roundness error of deep hole B

对钻杆振动信号进行EWT分解,提取振动信号中有效的高频段成分作为特征信息。然后,基于提取的特征信息构造了能量比检测指标,并用于深孔加工中刀具振动状态检测。将该方法应用于BTA深孔钻削实验中,有效识别出了深孔加工中导致孔圆度误差大于0.035 mm的刀具系统涡振缺陷,验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 张晓东,韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2017(15): 50-57.
ZHANG X D, HAN C. Manufacturing technology for key aeroengine components[J]. Forum, 2017(15): 50-57.
- [2] 刘亚锦. 核电站蒸汽发生器动态安全评估体系与方法[D]. 武汉:武汉大学, 2012.
LIU Y J. Dynamic security assessment system and method for nuclear steam generator [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [3] 陈钊. 1 000 MW 超超临界汽轮机阀杆套筒深孔加工[J]. 中国设备工程, 2017(16): 218-219.
- CHEN ZH. The valve stem sleeve longhole machining of the 1 000 MW ultra supercritical turbine[J]. China Plant Engineering, 2017(16): 218-219.
- [4] BIERMANN D, BLEICHER F, HEISEL U, et al. Deep hole drilling [J]. CIRP Annals, 2018, 67 (2): 673-694.
- [5] 谢锋云,陈红年,江伟文,等. 基于模态区间的数控机床切削状态监测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2900-2907.
XIE F Y, CHEN H N, JIANG W W, et al. Cutting state monitoring of NC machine tool based on modal interval[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2900-2907.
- [6] LIU C F, ZHANG W X. On-line chatter detection using an improved support vector machine [J]. Instrumentation, 2019, 6(2): 2-7.
- [7] AHMADI K, ALTINTAS Y. Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 68: 63-74.
- [8] DENG C S, CHIN J H. Roundness errors in bta drilling and a model of waviness and lobing caused by resonant forced vibrations of its long drill shaft [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126 (3): 524-534.
- [9] MESSAOUD A, WEIHS C. Monitoring a deep hole drilling process by nonlinear time series modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321 (3-5): 620-630.
- [10] UEKITA M, TAKAYA Y. Tool condition monitoring technique for deep-hole drilling of large components based on chatter identification in time-frequency domain [J]. Measurement, 2017, 103: 199-207.
- [11] XIAO W, ZI Y, CHEN B, et al. A novel approach to machining condition monitoring of deep hole boring[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 27-33.
- [12] KOVALYSHEN Y. A simple model of bit whirl for deep drilling applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332 (24): 6321-6334.
- [13] JIMÉNEZ A, ARIZMENDI M, CUMBICUS W E. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (5-8): 1971-1990.
- [14] STEININGER A, BLEICHER F. In-process monitoring

- and analysis of dynamic disturbances in boring and trepanning association (bta) deep drilling[J]. Journal of Machine Engineering, 2018, 18 (4): 47-59.
- [15] GILLES J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61 (16): 3999-4010.
- [16] SI Y, ZHANG Z S, KONG L F, et al. Aging condition identification of viscoelastic sandwich structure based on empirical wavelet transform and Hilbert envelope demodulation [J]. Composite Structures, 2019, 215: 13-22.
- [17] MERAINANI B, RAHMOUNE C, BENZAOUZ D, et al. A novel gearbox fault feature extraction and classification using Hilbert empirical wavelet transform, singular value decomposition, and SOM neural network[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24 (12): 2512-2531.
- [18] ZHANG X, WANG J, LIU Z, et al. Weak feature enhancement in machinery fault diagnosis using empirical wavelet transform and an improved adaptive bistable stochastic resonance[J]. ISA Transactions, 2019, 84: 283-295.
- [19] 徐元博, 蔡宗琰. 三点对称差分能量算子与经验小波变换在轴承故障诊断中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(8): 1247-1256.
- XU Y B, CAI Z Y. Application of demodulation energy operator of symmetrical differencing and empirical wavelet transform in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(8): 1247-1256.
- [20] 辛玉, 李舜酩, 王金瑞, 等. 基于迭代经验小波变换的齿轮故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 79-86.
- XIN Y, LI SH M, WANG J R, et al. Gear fault diagnosis method based on iterative empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 79-86.
- [21] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11 (2): 112-114.

作者简介



思悦(通信作者), 2009年和2012年于西安理工大学分别获得学士学位和硕士学位, 2017年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断。

E-mail: siyue925@xaut.edu.cn

Si Yue (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an University of Technology in 2009 and 2012, and received her Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. She is currently a lecturer at Xi'an University of Technology. Her main research interests include mechanical fault diagnosis, structural condition monitoring and signal process.