

基于VMD和FFT的变切深侧铣颤振特征提取方法

刘长福¹, 朱立达¹, 仇健², 李明¹
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳机床集团有限责任公司
高档数控机床国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110142)

摘 要: 针对铣削过程中颤振频带不明显的问题,采用变分模态分解(VMD)和快速傅里叶变换(FFT)相结合的方法来提取颤振频带,为进一步提取颤振特征值奠定基础.为获得包含颤振频率的频带,采用变切深侧铣薄壁件实验获取铣削力信号.提出结合FFT频谱来选择VMD中模态个数的方法,并采用此方法对仿真信号和实验信号进行颤振频带提取,结果表明VMD和FFT相结合的方法能有效提取铣削颤振频带.
关 键 词: 侧铣颤振;特征提取;变分模态分解;变切深;薄壁件
中图分类号: TH 17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)08-1153-05

Chatter Feature Extraction Method in Variable Cutting Depth Flank Milling Based on VMD and FFT

LIU Chang-fu¹, ZHU Li-da¹, QIU Jian², LI Ming¹
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of High Grade NC Machine Tools, Shenyang Machine Tool (Group) Co., Ltd., Shenyang 110142, China. Corresponding author: ZHU Li-da, E-mail: neulidazhu@163.com)

Abstract: A chatter frequency band extracting method combining the variational mode decomposition (VMD) and fast Fourier transform (FFT) was proposed for extracting the obscure chatter frequency band in milling process, making good basis of further extracting the chatter feature value. To obtain the frequency band including chatter frequency, the variable cutting depth flank milling experiment was carried out and the forces were measured in the experiment. A method of choosing the number of modes in the VMD by combining the FFT spectrum was proposed. The simulation signal and experiment signal were extracted by the above method. The results show that the method of combining the VMD and FFT can effectively extract the chatter frequency bands in milling, which offers a new method to extract the chatter feature.
Key words: chatter in flank milling; feature extraction; VMD; variable cutting depth; thin-walled workpiece

薄壁件刚度低、尺寸大,在铣削过程中经常发生颤振.发生颤振时,零件表面质量会受到严重影响.颤振特征提取是在线颤振检测的关键技术,而实现颤振特征提取的前提是准确确定颤振频带.在颤振产生初期,存在颤振特征不明显的问题,研究高效、高精的早期颤振特征的提取方法对理论和实践有指导意义.

目前,颤振特征提取方法有时域法、频域法、时频法.时频法由于能定位时间和频率,在特征提取中被广泛应用^[1-2].短时傅里叶变换(STFT)、小波变换(WT)、小波包(WPT)、同步压缩小波(SSWT)、经验模态小波^[3]等方法在机械故障诊断和识别领域得到广泛应用^[4-7].1998年,黄锬等提出了经验模态分解方法(EMD),并提出了集合经验模态分解方法(EEMD).EMD和EEMD方法在信号处理中得到了广泛的应用^[8-10].2005年,Smith提出了局部均值分解(LMD).但是,基于EMD的方法缺乏理论基础,限制了其应用.

变分模态分解(VMD)是一种新的非递归式信号处理方法^[11],Wang等^[12]指出,VMD方法能更准确地提取特征.唐贵基等^[13]采用基于包络谱特征因子(feature factor of envelope spectrum, EFF)的影响参数自动搜寻策略来选择模态个数和惩罚因子.钱林等^[14]提出了利用互信息法来选择模态个数的方法,然后利用形态学对信号进行降噪处理,提取出滚动轴承的特征频率.VMD方法在特征提取中得到了广泛应用^[15-18],但是将VMD方法用于提取铣削过程中颤振特征则鲜少有文献报道.

为了验证VMD方法在铣削颤振频带识别中的有效性,本文采用变切深侧铣薄壁件实验来获取铣削力,对仿真信号和铣削实验信号分别用VMD和FFT相结合的方法来进行颤振频带提取.VMD的模态个数对识别结果有重要影响,依据FFT频谱特点来选择模态个数,结果表明VMD方法能准确确定铣削力信号的颤振频带,为颤振特征提取提供了一种新的手段.

1 VMD方法的数学模型

VMD方法的建模过程是:首先定义本征模态函数(IMF),然后对变分问题进行构造,最后求解变分问题.引用文献[17],定义IMF为一个调幅-调频信号,其表达式为

$$r_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) . \tag{1}$$

通过Hilbert变换和加入指数项,将每个IMF的频谱调制到相应的基频带:

$$\left\{ \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * r_k(t) \right\} e^{-jw_k(t) \cdot t} . \tag{2}$$

式中: $A_k(t)$ 为 $r_k(t)$ 的瞬时幅值; $w_k(t)$ 为 $r_k(t)$ 的瞬时频率.为简便计, $w_k(t)$, $r_k(t)$ 简写为 w_k , r_k .

通过平方范数来估计各IMF的带宽,如果将原始信号 $y(t)$ 分解为 K 个IMF分量,则对应的约束变分模型表达式为

$$\begin{aligned} \min_{\{r_k\}, \{w_k\}} & \left\{ \sum_k \delta(t) \parallel \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * r_k(t) \right] e^{-jw_k t} \parallel_2^2 \right\}; \\ \text{s. t. } & \sum_k r_k = y(t) . \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $\{r_k\} = \{r_1, \cdots, r_K\}$ 代表VMD分解得到的 K 个IMF分量; $\{w_k\} = \{w_1, \cdots, w_K\}$ 表示各IMF分量的频率中心.

VMD中采用乘法算子交替方向法(ADMM)

解决以上变分问题:

$$L(\{r_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \parallel \delta(t) \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * r_k(t) \right] e^{-jw_k t} \parallel_2^2 + \parallel y(t) - \sum_k r_k(t) \parallel_2^2 + [\lambda(t), y(t) - \sum_k r_k(t)] . \tag{4}$$

式中 α 定义为引入拉格朗日因子 λ 时的二次惩罚系数.初始化 $\{r_k^1\}, \{w_k^1\}, \lambda^1, n=0$,通过交替更新 $r_k^{n+1}, w_k^{n+1}, \lambda^{n+1}$ 寻求扩展拉格朗日表达式的鞍点,得到待求解的二次无约束优化问题频域解:

$$\hat{r}_k^{n+1}(w) = \arg \min \{ (w - w_k)^2 | \hat{r}_k(w) |^2 dw \} . \tag{5}$$

在频域内求解,得到各频带中心频率的更新方法:

$$w_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty w | \hat{r}_k(w) |^2 dw}{\int_0^\infty | \hat{r}_k(w) |^2 dw} . \tag{6}$$

式中: w 为信号频率; $\hat{r}_k^{n+1}(w)$ 相当于当前剩余量 $1/(w - w_k)^2$ 的维纳滤波; w_k^{n+1} 为当前IMF功率谱的中心.

2 仿真信号分析

利用式(7)模拟含有颤振分量的铣削振动信号:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) . \tag{7}$$

式中: $x_1(t) = 4 \sin(160\pi t)$; $x_2(t) = 5 \cos(40\pi t)$; $x_3(t) = 0.5 [1 + 0.6 \sin(30\pi t)] \cos(300\pi t + 1.5 \sin(15\pi t))$,采用VMD对 $x(t)$ 进行分解,4个模态分量分别记为 u_1, u_2, u_3, u_4 ,其与原信号组成分量的对比如图1所示.可以看出 u, u_2, u_1, u_3 和与之对应的 $x(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ 在幅值和频率上相差不大;而 u_4 与 $x_4(t)$ 则相差较大,这是因为 $x_4(t)$ 是随机产生的白噪声.由图2看出,频谱主要集中在4个频带,这为模态个数选择提供了依据.其频谱分析如图2所示.

原信号中 $x_1(t)$ 的频率 $w_1 = 80$ Hz, $x_2(t)$ 的频率 $w_2 = 20$ Hz,以及 $x_3(t)$ 代表的颤振频带,均清晰地出现在重组信号中,说明没有频率信息的遗漏.但重组信号 u 的频谱图中,由噪声产生的高频信号相比原信号平坦许多,说明VMD可以有效保留有用信息并去除噪声.

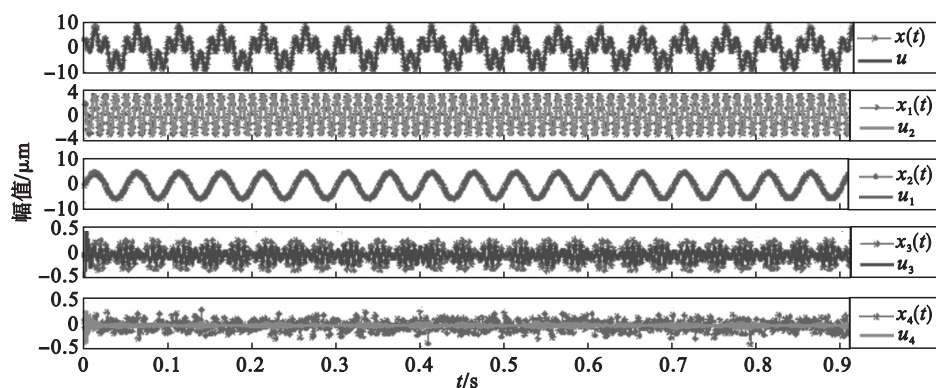


图 1 原信号和 VMD 分解后各模式对比图
Fig. 1 Modes comparison between pre-VMD and the post-VMD signals

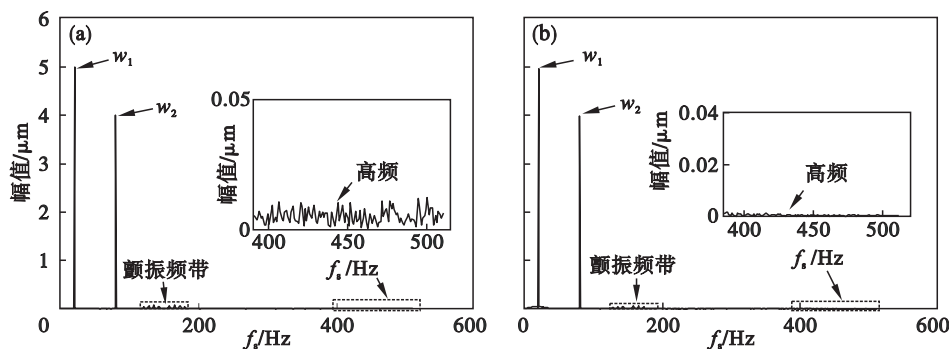


图 2 频谱图
Fig. 2 Frequency spectrum
(a)—原信号 $x(t)$ 的频谱图；(b)—VMD 后重组信号 u 的频谱图。

3 实验信号分析

3.1 实验平台的搭建

采用五轴数控机床 DMU50 实现变切深铣削,铣刀直径 $D=10\text{ mm}$,齿数 $N=2$,薄壁件尺寸为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times5\text{ mm}$,见图 3。加工参数如下:径向切深 $a_r=1\text{ mm}$,轴向切深从 0 mm 开始,进给速度 36 mm/min ,转速为 $2\,000\text{ r/min}$ 。采用测力仪 Kistler 9257B 采集 x,y,z 三向力信号,整个切削过程在干铣削条件下进行。测力仪用压板固定在工作台上,工件通过虎钳夹持。设置测力仪采样频率 $f_s=7\,000\text{ Hz}$ 。

3.2 实验结果和讨论

测量的铣削力及其频谱图如图 4 所示。机床主频率 $SF=n/60$,机床刀具通过频率 $TPE=nNL/60$,其中 L 代表采集的通道数(比如采集的是 xyz 三个方向的切削力, L 就等于 3)。

依据颤振理论,颤振频率接近于固有频率,故颤振频率是主频的非整数倍。由图 4 可以看出,在频谱图中能找到 4 个频带。其中,频带 1,2,3 属于主频率的谐振频带,说明刀齿切入频率在力频谱中起主导作用^[19],频带 1,2,3 不包含颤振频率。

而频带 4 不等于主频率的倍数,说明系统结构模态频率在力频谱中起主导作用,频带 4 中包含颤振频率。

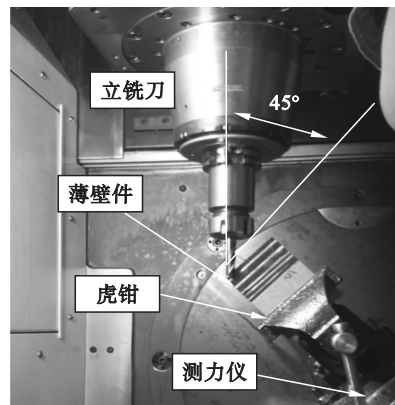


图 3 实验平台布局
Fig. 3 Milling experimental setup

将测量力信号经 VMD 处理,因为图 4 中整个频段分为 4 个频带,所以取模式个数 $K=4$,惩罚因子 $\alpha=2\,000$,对每一个 IMF 做 FFT 分析,如图 5 所示。图中可以看出, u_1,u_2,u_3 对应频带 1,2,3,而 u_4 对应着颤振频带 4。为验证 VMD 分解效果,对 VMD 处理后的信号做时频分析,如图 6 所示。

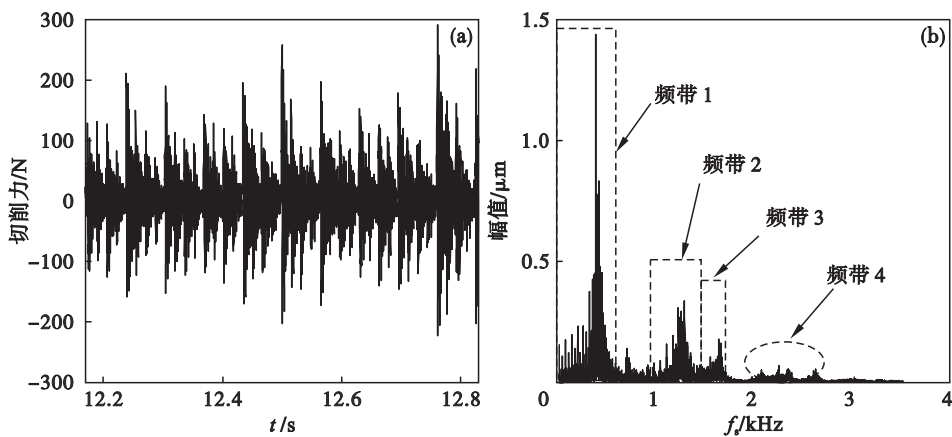


图 4 实验信号及其频谱图
Fig. 4 Experimental signal and frequency spectrum
(a)—切削力; (b)—频谱图.

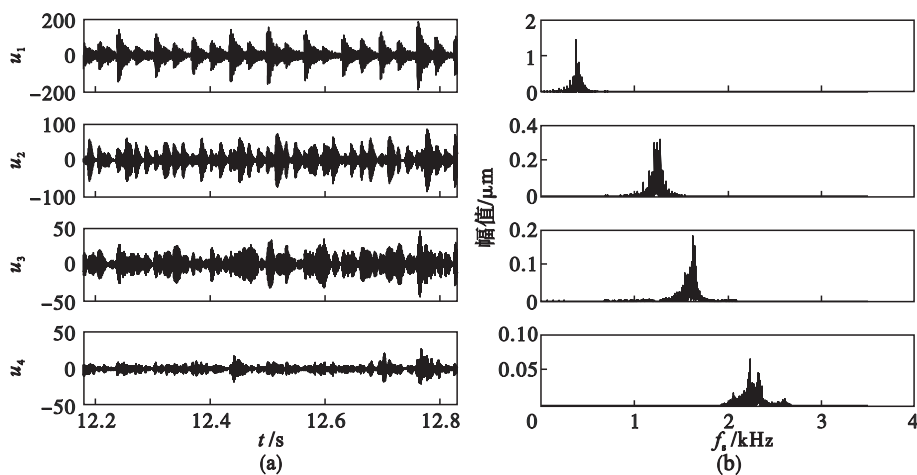


图 5 VMD 处理结果
Fig. 5 Result of VMD processing
(a)—本征模态函数; (b)—频谱图.

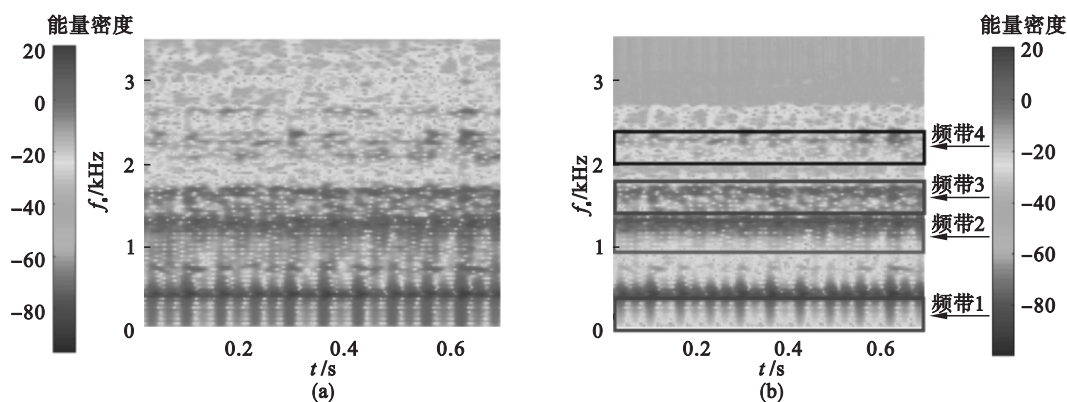


图 6 原信号和 VMD 处理后的信号时频图
Fig. 6 Time-frequency diagram of the row signal and signal after VMD
(a)—原信号; (b)—VMD 处理后.

从图 6 中可以看出,原信号的频谱能量较均匀地分布在整个频域内,时频图中频带 1,2,3,4 的界限模糊,能量分布不集中,不利于后续的颤振特征值提取.而经 VMD 处理的时频图中,4 个频带所含频谱能量集中,各频带带宽变窄,颤振频带

4 被有效地提取出来.

4 结 论

1) 采用 VMD 结合 FFT 方法能有效提取铣

削颤振频带,方法简单、实用;

2) VMD 方法中模态个数需预先设定,本文通过 FFT 频谱选择模态个数,从而有效地分解各模态并获得颤振频带. 通过观察时频图可知颤振频带能量集中,为提取颤振特征值奠定了了的基础.

参考文献:

[1] Cao H,Zhou K,Chen X. Chatter identification in end milling process based on EEMD and nonlinear dimensionless indicators [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2015,92:52 – 59.

[2] Zhang C L,Li B,Chen B Q, et al. Weak fault signature extraction of rotating machinery using flexible analytic wavelet transform [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*,2015,64/65:162 – 187.

[3] Gilles J. Empirical wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2013,61(16):3999 – 4010.

[4] Cao H,Lei Y,He Z. Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert-Huang transform [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,2013,69:11 – 19.

[5] Karam S,Teti R. Wavelet transform feature extraction for chip form recognition during carbon steel turning [J]. *Procedia CIRP*,2013,12:97 – 102.

[6] Thakur G,Brevdo E,Fuckar N S, et al. The synchros queezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications[J]. *Signal Processing*,2013,93(5):1079 – 1094.

[7] Perez-Ramirez C A,Amezquita-Sanchez J P,Adeli H, et al. New methodology for modal parameters identification of smart civil structures using ambient vibrations and synchrosqueezed wavelet transform [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*,2016,48:1 – 12.

[8] Liu C F,Zhu L D,Ni C B. The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,91(9/10/11/12):3339 – 3348.

[9] Ji Y,Wang X,Liu Z, et al. EEMD-based online milling chatter detection by fractal dimension and power spectral entropy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92 (1/2/3/4): 1185 – 1200.

[10] Wang W C,Chau K W,Xu D M,et al. Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition [J]. *Water Resources Management*,

2015,29(8):2655 – 2675.

[11] Dragomiretskiy K,Zosso D. Variational mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2014,62(3):531 – 544.

[12] Wang Y,Markert R,Xiang J, et al. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*,2015,60/61:243 – 251.

[13] 唐贵基,王晓龙. 变分模态分解方法及其在滚动轴承早期故障诊断中的应用 [J]. *振动工程学报*,2016,29(4):638 – 648.

(Tang Gui-ji, Wang Xiao-long. Variational mode decomposition method and its application in the rolling bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016,29(4):638 – 648.)

[14] 钱林,康敏,傅秀清,等. 基于 VMD 的自适应形态学在轴承故障诊断中的应用 [J]. *振动与冲击*,2017,36(3):227 – 233.

(Qian Lin, Kang Min, Fu Xiu-qing, et al. The adaptive morphology in the application of the bearing fault diagnosis based on VMD[J]. *Journal of Vibration Engineering*,2017,36(3):227 – 233.)

[15] Wang Y,Markert R,Xiang J, et al. Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*,2015,60/61:243 – 251.

[16] Abdoos A A,Mianaei P K,Ghadikolaei M R. Combined VMD-SVM based feature selection method for classification of power quality events [J]. *Applied Soft Computing*,2016,38:637 – 646.

[17] Aneesh C,Kumar S,Hisham P M, et al. Performance comparison of variational mode decomposition over empirical wavelet transform for the classification of power quality disturbances using support vector machine [J]. *Procedia Computer Science*,2015,46:372 – 380.

[18] 吕中亮. 基于变分模态分解与优化多核支持向量机的旋转机械早期故障诊断方法研究 [D]. 重庆:重庆大学,2016.

(Lyu Zhong-liang. A novel method for mechanical fault diagnosis based on variational mode decomposition and multikernel support vector machine [D]. Chongqing: Chongqing University,2016.)

[19] 朱立达,王宛山,李鹤,等. 正交车铣偏心加工三维颤振稳定性的研究 [J]. *机械工程学报*,2011,47(23):186 – 192.

(Zhu Li-da,Wang Wan-shan,Li He, et al. Research on 3D chatter stability of eccentricity machining in orthogonal turn-milling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2011,47(23):186 – 192.)