

基于 EMD 和小波分解的颤振信号特征提取方法比较研究

吴 飞, 陈换过, 张廷秀

(浙江理工大学机电产品可靠性技术研究浙江省重点实验室, 杭州 310018)

摘 要: 以数控动梁龙门导轨磨床 KD4020X16 为试验对象, 对不同磨削参数情况下磨床的不同振动状态进行试验测试。分别应用经验模态分解和小波变换对磨床的颤振信号进行颤振特征提取, 以相关系数和方差为依据分析和比较这两种方法在非线性和非线性时序信号处理中的优劣。分析结果表明, 在磨床的磨削颤振信号特征量提取方面, 基于经验模态分解的提取方法具有更好的准确性和自适应性。

关键词: 经验模态分解; 小波变换; 磨床颤振信号; 相关系数; 方差

中图分类号: TG596 **文献标志码:** A

0 引 言

颤振是一种由系统内部激发反馈产生的周期性自激振动, 在磨削加工过程中, 砂轮和工件间的强烈自激振动称为磨削颤振^[1]。很多的研究^[2-3]表明磨削过程从未发生磨削颤振到颤振发生要经历一段过渡磨削过程, 在此过程中的信号包含了丰富的磨削状态信息, 对于磨削颤振检测具有独特的价值。高速数控机床磨削动态过程为非线性时变系统, 且磨削过程参数众多、制约关系复杂, 信号特征重复再现性差, 磨削颤振过渡过程时间一般又特别短, 这就导致了收集到的信号会包含很多干扰信息, 针对磨削颤振过渡过程的信号特点, 有必要寻求一种有效的信号特征提取方法, 把磨床颤振的特征信息从繁冗的原始振动信息中分离出来, 得到准确的特征量振动信号, 为后续的信号分析奠定基础。

对此, 国内外学者做了大量的研究, Yao 等^[4]采用小波包分解方法构造颤振检测特征量; Mei 等^[5]采用自适应滤波方法对铣削加工的声音信号进行分析, 通过声音信号功率谱提取信号特征; Tansel^[6]采用 S 变换方法获取振动信号特征值; 成建国等^[7]基于声发射信号来提取信号特征; Gradisek 等^[8]采用

熵和 CIR (coarse-grained information rate) 方法对外圆切入磨床颤振信号特征进行研究。这些方法都比较有针对性, 即对某些特定对象有较好的效果, 但是在对不同信号的适应性上有所欠缺。

信号处理方法是磨削颤振检测的关键技术, 主要作用是对磨床振动信号进行提取、变换, 并从中提取出敏感故障征兆。在诸多信号处理技术中, 快速傅里叶变换和小波分析应用最为普遍, 对线性信号分析有很好的效果, 但是对于一些类似磨床磨削颤振等复杂的非线性的信号处理则不具有较好的分析效果。针对这种情况, 本文以数控动梁龙门导轨磨床 KD4020X16 的振动信号为研究对象, 分别应用小波变换 (wavelet transform, WT) 和经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)^[9]对磨床的颤振信号进行颤振特征量提取, 并比较这两种方法在非线性和非线性时序信号处理中的优劣。

1 特征信号提取方法的理论基础

1.1 小波变换

小波变换是时间和频率范围的局域变换, 能有效地提取信号中的特征信息, 通过伸缩和平移等运算对信号进行多尺度细化分析, 因此小波变换被誉

为“数学显微镜”,其实质则是相当于高通滤波器和低通滤波器(如图1),每次分解相当于将信号分解到两个频率通道内,高频放进 cD_1 ,低频放进 cA_1 ,然后下一层分解是对 cA_1 重复上述分解过程,分解层数则由分解阶数决定。

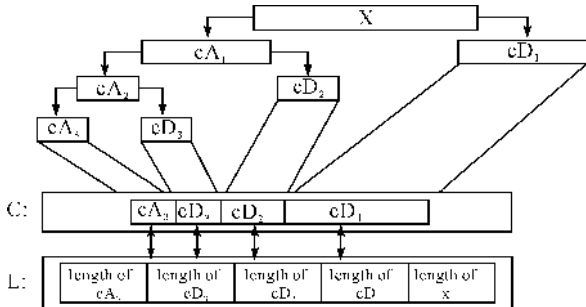


图1 小波分解示意

1.2 经验模态分解特点

基于EMD的分析方法是以特征时间尺度为基准对一组时间序列的数据进行分解,将信号分解成一系列本征模函数(intrinsic mode function, IMF)组,然后再对每个分离出来的拥有具体物理含义的IMF进行处理。该方法的主要特征是把非平稳信号进行局部平稳化处理,将信号不同特征尺度的波动或趋势逐级分解开来,从而产生一系列具有不同特征时间尺度的数据序列,每一个序列对应一个本征模函数分量。所谓本征模函数,必须满足两个条件:a)对于一组数据,极值点和过零点的数目必须相等或至多相差一点;b)在任意点,由局部极大值点包络线和局部极小值点包络线求得的平均包络为零。EMD的具体分解过程如图2所示。

信号 $x(t)$ 通过以上EMD筛选过程,分解成一系列本征模函数组和残余量之和,如下式所示,

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

表1 磨削试验参数

砂轮材料	砂轮尺寸/ mm×mm	工件材料	工件尺寸/ mm×mm×mm	砂轮转速 /(r/min)	进给速度 /(mm·s ⁻¹)	磨削深度 /μm
绿碳化硅	Φ600×150	灰铸铁 250	3 050×500×500	800~1 000	0.381 0.254 0.210	5、10、15

表2 传感器位置及灵敏度

传感器标号	1	2	3	4	5	6	7	8
灵敏度(mV/g)	9.9	10.6	10.4	10.1	10.4	10.5	10.2	10.1
位置	立柱 Z向	主轴 X向	主轴 Z向	主轴 Y向	电机 Z向	电机 X向	主轴 Y向	立柱 Y向

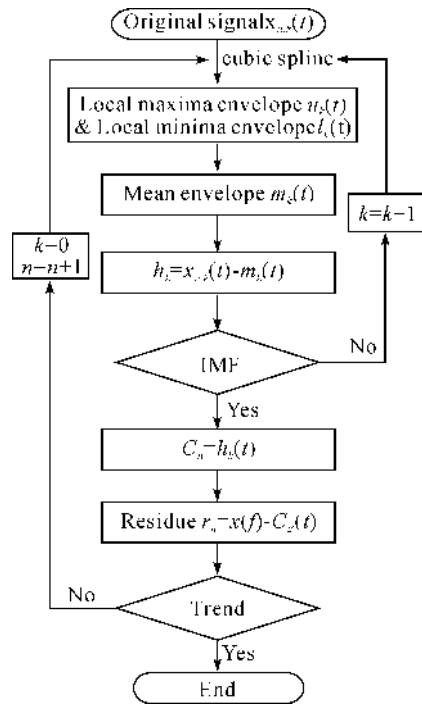


图2 EMD分解程序框图

2 磨削试验与信号分析

2.1 磨削试验

以杭州杭机股份有限公司的KD4020X16数控动梁龙门导轨磨床为研究对象,对磨床在不同磨削参数情况下的不同振动状态进行试验。试验中所用的振动加速度传感器为IEPE压电加速度传感器,并使用配套的TST5912动态信号测试分析系统采集磨床的振动信号。

按照表1的试验条件,使用8个压电式加速度传感器分别测试砂轮主轴、电机及立柱在各个方向上的振动加速度信号,这8组加速度信号通过信号测试系统的8个数据通道进行采集,用TST5912进行相应的数据运算及处理。

传感器位置及相应的灵敏度见表2。

结合实际经验以及试验分析,磨床颤振在 x 方向表现得最为明显,综合考虑,本论文采用砂轮主轴 x 方向的传感器作为试验分析的信号来源。

因砂轮转速、工件进给速度以及砂轮磨削深度这 3 个参数对磨床的颤振比较敏感,容易引起磨床的振动不平衡,故试验磨床按以上 3 种参数改变式运行,即变砂轮主轴转速、变工件进给速度以及变砂轮磨削深度。在试验中,先保持工件进给速度和砂轮磨削深度不变,逐渐改变砂轮转速(由小到大),然后再保持工件进给速度和砂轮转速不变,逐渐改变磨削深度。即控制其中两个参数不变,改变第 3 个参数,轮流交替进行记录并采集改变的磨削参数相应的振动信号。

本次试验通过改变磨床的磨削参数(砂轮转速、进给速度和磨削深度)总共进行了 80 组测试,得到 80 组磨床振动信号,其中颤振状态的数据 34 组,平稳状态的数据 46 组,从中随机选取一部分数据(包含颤振磨削状态的和平稳磨削状态)作为例子,以对比 EMD 方法和 WT 方法在磨床振动信号处理的优缺点。

2.2 颤振特征信号分析效果比较

图 3 为试验对象 KD4020X16 数控动梁龙门导轨磨床,由于磨削过程的复杂性,其大多数过程的振动输出是非平稳、非线性信号,对磨床颤振信号的分析可知颤振频率大约发生在 62.5~250 Hz 之间,图 4 为其中一组磨床颤振状态的振动加速度信号时域图,图中所示其颤振发生在 70~75 s 之间(见图 4),过渡时间约为 1~3 s,图中也可以看出在颤振发生时其振幅较之平稳阶段有明显增大。试验设置的采样频率为 2 kHz,由采样定理可知,振动信号的振动频率范围约在 0~1 000 Hz 之间。



图 3 数控导轨磨床 KD4020X16

图 5 和图 6 分别是 WT 和 EMD 的前 6 阶分解结果,其中 WT 选用 Daubechies 小波基,分解滤波器的阶数为 10,且根据磨床的实际振动特性,选用

其低频近似信号作为特征信号。对比上述两图可以看出,两种方法都是先分离出周期最小(频率最高)、振幅最大的分量,然后是振幅不断减小、周期逐渐变大(频率减小)。图 5 第一个分量信号与二、三分量的幅值比较,可以看出,基于 EMD 的信号分解特点是将最主要信号首先提取出来,即最先分解出的 IMF 分量是信号颤振的主频率带,包含了原始信号的显著信息,所以说 EMD 也是一种新的主成分分析法。观察图 6 的小波变换分量,前两阶分量 a_1 和 a_2 的振幅近似,说明小波变换没有将特征信号频率带完整的分离出来。

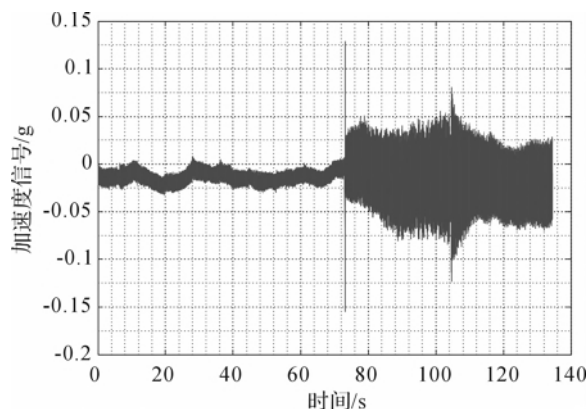


图 4 磨床颤振加速度信号

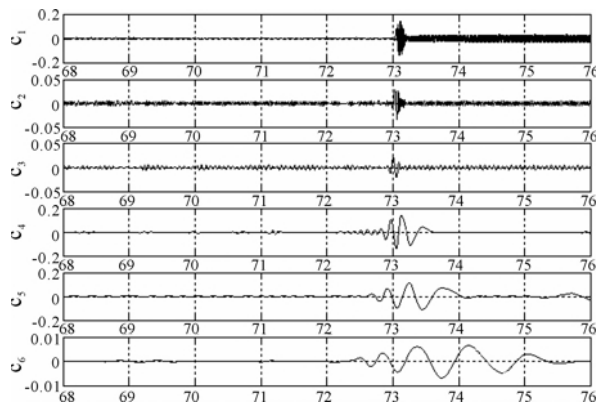


图 5 EMD 的各个分量

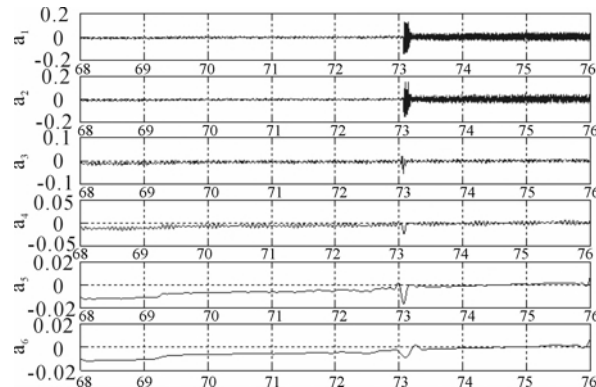


图 6 WT 的各个分量

2.3 特征信号提取的结果比较

表 3 给出了 EMD 和 WT 分解后的各分量与原始信号的相关系数以及各自的方差,通过比较

可以找出与原始信号相关性最好的分量,这样就可以找出最具代表性的分量信号作为颤振特征信号。

表 3 EMD 和 WT 的相关系数以及方差值

EMD			WT		
模态	相关系数	方差	模态	相关系数	方差
c ₁	0.9109	2.645e-004	a ₁	0.999 7	2.889e-004
c ₂	0.185 7	1.376e-005	a ₂	0.957 7	2.651e-004
c ₃	0.140 2	9.865e-006	a ₃	0.348 6	3.511e-005
c ₄	0.020 2	4.524e-006	a ₄	0.278 0	2.248e-005
c ₅	0.037 1	6.261e-006	a ₅	0.240 9	1.716e-005
c ₆	0.023 2	4.708e-006	a ₆	0.234 6	1.645e-005
c ₇	0.012 8	2.523e-006	a ₇	0.231 8	1.626e-005
c ₈	-0.058 0	9.693e-007	a ₈	0.225 7	1.686e-005
c ₉	0.093 9	5.336e-007	a ₉	0.227 1	1.711e-005
c ₁₀	0.076 8	1.481e-006	a ₁₀	0.220 5	1.659e-005

从柱状图 7 中可以很直观地看出, c₁ 与原始信号相关性较好,其余的分量相关度占有的比例则小了很多,而小波分量中 a₁ 和 a₂ 的相关度几乎相同,其余分量则很少;柱状图 8 中 EMD 分量信号 c₁ 的方差贡献度最大几乎占到了 85%,其余分量很小,而小波变换的方差贡献度排列和相关度类似,均是前两阶分量几乎相同,且较后续分量则大很多,因此

可知得出结论: EMD 分解方法具有很好的自适应性,能够较完整地获得颤振信号的主频率带,而小波分解则出现了主频率泄露现象(特征频率被分解到两个分量中),这种现象也可以描述为小波变换的某一尺度对应的窗口范围内(频率带)的能量扩展到其他频段。这在 WT 中是难以避免的,因为小波基在小波变换中一经选择,则在整个分解和重构过程都无法更改,因此即使以信号的全局最优为出发点,选择或者构造一个最好的小波基函数,但是对某个局部来说这个小波基的分析效果可能会是最差的,所以小波分析较之经验模态分解,缺少自适应性的特点,分解结果可能不够准确。

4 结 论

针对磨床的磨削颤振信号,通过比较 EMD 和 WT 这两种方法各个分量与原始信号的相关度以及各自的方差贡献度,判断出在磨床振动信号方面,基于 EMD 的特征提取方法比基于 WT 的特征提取方法具有更好的准确性和自适应性,给后续的磨床颤振特征信号分析与处理奠定了基础。

参考文献:

- [1] 魏云松. 磨削颤振[J]. 精密制造与自动化, 1979(3): 34-46.
- [2] 刘光复, 黎宝信, 张筱鸿. 切削颤振过渡过程的实验研究及在线识别[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 15(2): 36-44.
- [3] 王立刚, 刘习军, 贾启芬. 机床颤振的若干研究和进展[J]. 机床与液压, 2004, 11(1): 1-5.
- [4] Yao Z, Mei D, Chen Z. On-line chatter detection and i-

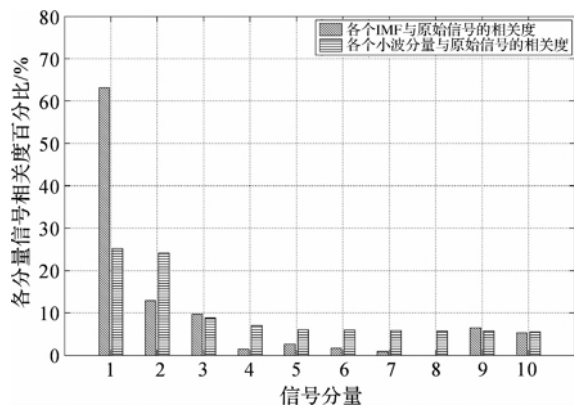


图 7 各个分量与原始信号的相关度

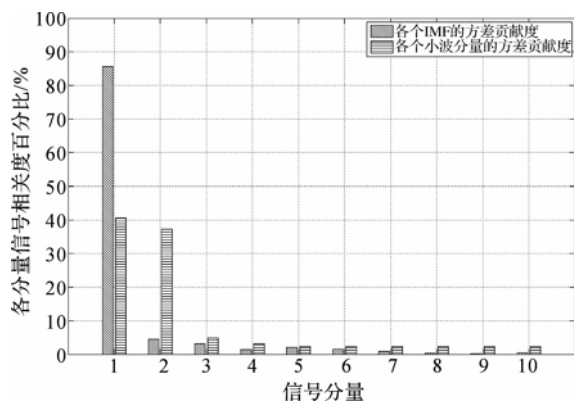


图 8 各个分量方差贡献度

- dentification based on wavelet and support vector machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(5): 713-719.
- [5] Mei D Q, Li X, Chen Z C. Prediction of cutting chatter based on hidden Markov model[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353: 2712-2715.
- [6] Tansel I N, Wang X, Chen P, et al. Transformations in machining, part 2: evaluation of machining quality and detection of chatter in turning by using s -transformation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(1): 43-50.
- [7] 成建国, 毛汉领, 黄振峰, 等. 金属材料声发射信号特征提取方法[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 309-314.
- [8] Gradišek J, Baus A, Govekar E, et al. Automatic chatter detection in grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(14): 1397-1403.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, A454: 903-995.

Comparative Study on Chatter Signal Feature Extraction Methods Based on EMD and Wavelet Transform

WU Fei, CHEN Huan-guo, ZHANG Ting-xiu

(Zhejiang Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electronic Products,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With numerical control and moving beam-type planer guideway grinder KD4020X16 as test object, this paper tests different vibrational states of grinder under different grinding parameters, respectively uses empirical mode decomposition and wavelet transform for chatter feature extraction of chatter signal of grinder and analyzes and compares advantages and disadvantages of both methods in non-linear sequence signal processing based on correlation coefficient and variance. The analysis result shows that the extraction method based on empirical mode decomposition has higher accuracy and adaptivity in terms of the extraction of characteristic quantity of grinding chatter signal of grinder.

Key words: empirical mode decomposition; wavelet transform; grinding chatter signal; correlation coefficient; variance

(责任编辑: 康 锋)