

# 基于EMD复杂度与鉴别信息的磨削颤振预测\*

董新峰<sup>1</sup>, 张为民<sup>1,2</sup>, 姜源<sup>1</sup>

(1. 同济大学机械与能源工程学院 上海, 200092) (2. 同济大学中德学院 上海, 200092)

**摘要** 为避免磨削加工中出现颤振, 提出一种基于经验模式分解(empirical mode decomposition, 简称EMD)复杂度与鉴别信息的颤振预测方法。采用经验模式分解对磨削加工中滤波后的振动信号进行分解, 获得振动信号的本征特征函数; 采用L-Z复杂度指标对本征特征函数进行复杂度分析, 获得磨削颤振特征值; 采用鉴别信息对复杂度变化进行量化, 通过鉴别信息对磨削加工颤振进行预测。在外圆磨床实验平台对该方法的有效性进行了验证, 分别采用变工件转速、变砂轮转速和变磨削厚度3种加工方式逼近颤振状态。分析结果表明, 当磨削加工趋于颤振时对应的鉴别信息值增大。实验结果通过鉴别信息的大小可以对磨削加工中的颤振进行预测。

**关键词** 磨削; 颤振; 经验模式分解; L-Z复杂度; 鉴别信息

**中图分类号** TG596

## 引言

颤振主要是由于刀具与工件之间的自激振动引起。在加工过程中, 颤振会降低加工表面的加工质量、加剧刀具磨损、产生过大噪声、降低加工效率和加速机床破坏; 因此, 许多学者对加工过程中颤振预测进行了研究。文献[1]采用小波包分解方法构造颤振检测特征向量, 采用支持向量机对颤振进行预测。文献[2]通过隐马尔科夫模型对测量的振动信号进行建模, 完成了切削加工中的颤振预测。文献[3]采用自适应滤波方法对铣削加工中的声音信号进行分析, 通过声音信号功率谱提取特征, 采用模糊逻辑方法对颤振进行预测。文献[4]采用非线性时间序列指数自回归模型对深孔钻削中的颤振进行预测。文献[5]采用S变换获取振动信号特征值, 采用模糊逻辑方法对车削加工中的颤振进行预测。文献[6]采用小波变换方法对颤振进行预测。文献[7]基于声发射信号的功率谱采用神经网络方法对磨削颤振进行预测。文献[8]采用熵和CIR(coarse-grained information rate)方法对外圆切入磨颤振预测进行研究。文献[1-8]从不同角度对颤振进行预测, 但这些方法属于监督式学习方法, 即模型的建立需要颤振特征值对模型进行训练, 当训练样本无法获得时, 模型无法进行建立。

笔者根据磨削加工中振动信号的非平稳、非线性特征, 提出一种基于EMD复杂度指标和鉴别信息的非监督式颤振预测方法, 并通过3种趋于颤振的加工对该方法的有效性进行了验证。

## 1 理论方法

### 1.1 经验模式分解理论

在磨削加工中, 由于运动部件的非线性特征使加工过程中的振动信号呈非平稳、非线性特征, 传统的时域、频域分析方法不适用于非线性、非平稳信号的分析。Huang N. E<sup>[9]</sup>提出一种处理非线性、非平稳信号的方法——经验模式分解, 它是一种基于数据本身的分解, 具有很好的自适应性。EMD可以把复杂的非平稳信号分解为有限个具有物理意义的本征特征函数(intrinsic mode function, 简写IMF)<sup>[10]</sup>, 分解的IMF需满足两个条件: a. 各个IMF数据的极值点(包括极大值和极小值)数目和过零点数目相同或相差1个; b. 数据极大值包络与极小值包络的局部均值为0<sup>[11]</sup>。具体分解步骤如下<sup>[12-13]</sup>:

1) 提取原始信号 $X(t)$ 的极大值和极小值, 采用3次样条方法拟合极大值和极小值, 形成上包络线 $h_1$ 和下包络线 $h_2$ , 计算包络均值

$$M(t) = 1/2[h_1 + h_2] \quad (1)$$

\* 国家科技重大专项资助项目(编号: 2011 ZX04016-021)  
收稿日期: 2012-01-11; 修改稿收到日期: 2012-03-17

2) 计算  $C(t) = X(t) - M(t)$ , 如果  $C(t)$  不满足 IMF 的条件, 将  $C(t)$  作为新的原始信号重复以上分解

$$C_{1k} = C_{1(k-1)}(t) - M_{1k}(t) \quad (2)$$

若如  $C_{1k}$  满足 IMF 的条件, 则视其为一个本征特征函数。

3) 计算残余函数  $R(t) = X(t) - C_{1k}$ , 重复以上步骤得到信号的多个本征特征函数, 直到  $C_{1k}$  很小或  $C_{1k}$  基本呈单调趋势时停止分解。

## 1.2 复杂度指标

复杂度指标在医学领域具有广泛的应用, 其能够通过少量的数据对非线性系统特征进行度量, 主要用来描述时间序列信号的复杂程度<sup>[14-15]</sup>。目前, 许多复杂度指标(如 CO 复杂度、L-Z 复杂度和语法复杂度等)是基于文献[16]基础上扩展得到。L-Z 复杂度算法步骤如下。

1) 有限长时间序列的粗粒化: 设有限长时间序列  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 对  $X$  求平均值, 将大于平均值的数  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 记为“1”, 小于或者等于平均值的数  $x_i$  记为“0”, 此过程称为粗粒化操作。经过粗粒化操作, 时间序列  $X$  变为一个由“0”, “1”符号组成的时间序列  $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 。

2) 在  $S$  序列中选择一个子串  $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ , 在子串  $S$  后添加一个符号  $Q = s_{m+1}$  或者一个符号串  $Q = (s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_{m+k})$ , 得到一个包括“0”, “1”的序列  $SQ = (s_1, s_2, \dots, s_m, s_{m+1})$  或者  $SQ = (s_1, s_2, \dots, s_m, s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_{m+k})$ 。令  $SQ_v = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  或  $SQ_v = (s_1, s_2, \dots, s_m \dots s_{m+k-1})$ , 判断是否存在某个变量  $i, 1 \leq i \leq m$ , 使  $(s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_{m+k}) = (s_i, \dots, s_{i+k-1})$ 。如果存在某个  $i$ , 称  $Q$  为“复制”, 然后把  $Q$  延长, 重复上面步骤, 直到  $Q$  不属于  $SQ_v$  的一个子串; 当  $Q$  不属于  $SQ_v$  中的一个子串时, 称  $Q$  为“插入”。若“插入”时用小数点“.”标记在  $Q$  后, 然后把小数点“.”前面的所有符号看成  $S$  重复以上步骤, 直到序列结束。

3) 通过步骤 2 得到一个由小数点“.”分隔的时间序列, 把时间序列的段数记为“复杂度”  $c(n)$ 。

4) 依照文献[16]知道复杂度指标按概率趋向一个稳定的数值, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} c(n) = b(n) = \frac{n}{\log_2 n} \quad (3)$$

其中:  $b(n)$  为有限长时间序列  $S$  的渐进稳定值。

用  $b(n)$  对  $c(n)$  进行归一化, 得到复杂度指标为

$$C_{LZ} = c(n)/b(n) \quad (0 \leq C_{LZ} \leq 1) \quad (4)$$

## 1.3 鉴别信息

鉴别信息也称交叉熵、相对熵、方向散度和 Kullback-Leibler 距离。鉴别信息是对两个概率分布的一种度量, 随机变量  $X$  在离散数据情况下的鉴别信息<sup>[17]</sup>描述为: 设随机变量  $X$  可能出现的值为  $(a_1, a_2, \dots, a_k)$ , 其中  $X$  的概率分布(实际中, 将某个值出现的频率值近似代替该值概率值)与  $H_1$  和  $H_2$  这 2 种假设有关联。设在  $H_1$  状态时,  $X$  的概率分布为

$$\begin{bmatrix} X \\ p_1(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_K \\ p_1(a_1) & p_1(a_2) & \dots & p_1(a_K) \end{bmatrix}$$

在  $H_2$  状态时,  $X$  的概率分布为

$$\begin{bmatrix} X \\ p_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_K \\ p_2(a_1) & p_2(a_2) & \dots & p_2(a_K) \end{bmatrix}$$

设  $H_1$  成立时概率为  $p(H_1)$ ,  $H_2$  成立时概率为  $p(H_2)$ , 根据概率论中条件概率和全概率定理有

$$p(H_1 | a_k) = \frac{p(H_1)p_1(a_k)}{p(H_1)p_1(a_k) + p(H_2)p_2(a_k)}$$

$$p(H_2 | a_k) = \frac{p(H_2)p_2(a_k)}{p(H_1)p_1(a_k) + p(H_2)p_2(a_k)}$$

根据  $H_1$  和  $H_2$  状态下  $X$  的概率分布可以得到

$$p_1(a_k) = p(a_k | H_1)$$

$$p_2(a_k) = p(a_k | H_2)$$

由上式得到

$$\log \frac{p_1(a_k)}{p_2(a_k)} = \log \frac{p_1(H_1 | a_k)}{p_2(H_2 | a_k)} - \log \frac{p(H_1)}{p(H_2)} \quad (5)$$

定义在假设  $H_1$  时, 式(5)的数学期望称为两个概率分布  $\{p_1(x)\}$  和  $\{p_2(x)\}$  之间的鉴别信息

$$D(p_1, p_2) = \sum_{i=1}^K p_1(a_i) \log \frac{p_1(a_i)}{p_2(a_i)} \quad (6)$$

## 2 磨削实验与分析

本实验平台由斯来福临 K-C33 高精密度数控万能外圆磨床、45 号钢工件(硬度为 HRC35, 磨削长度为 90 mm), AVANT MI-7008 数据采集仪, DY-TRAN 3263M8 三向加速度传感器组成。三向加速度传感器分别安装在工件主轴和砂轮主轴附近(其中砂轮为氧化铝基体型), 如图 1 所示。

采集振动信号时, K-C33 按照以下方式运行:

1) 变工件转速磨削。砂轮以 35 m/min 速度旋转, 磨削深度为 0.01 mm, 砂轮进给速度为

500 mm/min,在以上3种磨削参数不变的情况下,工件主轴分别以80,100,120和150 r/min速度旋转,测量工件主轴和砂轮主轴附件的加速度信号(采样时间为50 s,采样频率为10 K/s)。

2) 变磨削深度磨削。砂轮以35 m/min旋转,工件主轴以150 r/min旋转,砂轮进给速度为500 mm/min,在以上3种磨削参数不变的情况下,砂轮磨削深度分别为0.01,0.015和0.02 mm测量加速度信号。

3) 变砂轮转速磨削。工件以120 r/min速度旋转,砂轮进给量为500 mm/min,磨削深度为0.015 mm,砂轮分别以20,25,30和35 m/min速度旋转测量加速度信号。

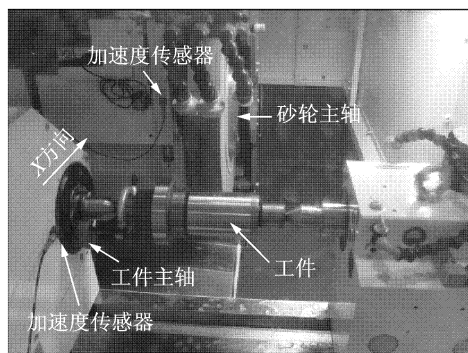


图1 磨削加工过程

根据磨削加工颤振理论可以知道,在3种不同的磨削加工中当对应的磨削参数增大时会引起磨削颤振,在磨削试验中对以上观点进行了验证,即当单独增加工件转速、砂轮转速以及磨削厚度到一定值时,磨削实验中会发生颤振。采用趋于颤振的加工方式验证该方法在颤振预测中的有效性是可行的。

## 2.1 变工件转速磨削颤振预测

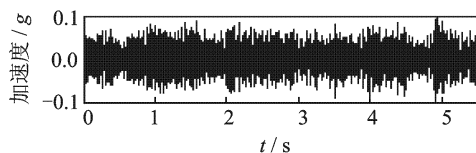
在外圆磨削加工过程中, $x$ 方向为工件的误差敏感方向,因此主要对变工件转速磨削时工件主轴和砂轮主轴 $x$ 方向的振动信号进行分析,其数据处理顺序为:

- 1) 根据工件主轴和砂轮主轴的模态参数选取研究频段,对振动信号进行频域滤波获得研究信号;
- 2) 采用EMD方法对滤波后的振动信号进行分解,获得本征特征函数,采用L-Z复杂度指标计算本征特征函数复杂度,获得颤振预测分析的特征值;
- 3) 采用鉴别信息对特征值的变化进行量化,从而对磨削加工过程中的颤振进行预测。

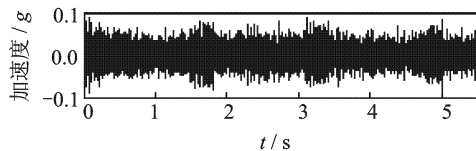
下面以变工件转速磨削时,工件主轴 $x$ 方向的振动信号为对象来说明信号处理过程。

### 2.1.1 振动信号的频域滤波

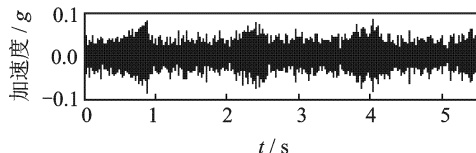
磨削加工中产生的振动信号含有多种噪声信息,对颤振进行精确预测必须正确选择研究的频段。根据颤振理论,磨削颤振频率发生在砂轮主轴系统和工件主轴系统固有频率附近,通过模态测量获得工件主轴和砂轮主轴1阶固有频率为300 Hz,选择200~300 Hz频段研究对象。采用频域滤波方法获得滤波后的波形如图2所示。



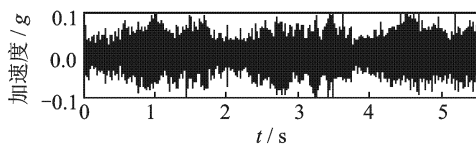
(a) 工件主轴以80 r/min旋转



(b) 工件主轴以100 r/min旋转



(c) 工件主轴以120 r/min旋转



(d) 工件主轴以150 r/min旋转

图2 变工件转速磨削时工件主轴 $x$ 方向滤波后的波形

### 2.1.2 滤波后信号的EMD

根据经验模式分解计算步骤可得到变工件转速时振动信号的EMD,为了说明EMD数据处理过程,以变工件转速磨削、工件主轴以100 r/min旋转时 $x$ 方向的振动信号为例进行EMD计算。

在理想情况下,工件主轴旋转一转测量的振动信号能够反映磨削过程的全部信息,考虑随机因素的影响,选择2转的振动信号为分析对象对其进行EMD分解(工件主轴每2转对应的时间为1.2 s,选择前24 s的振动数据为分析对象进行EMD分析,共20组,图3为其中一组)。图3为通过经验模式分解方法获得的前2转振动信号的EMD结果。

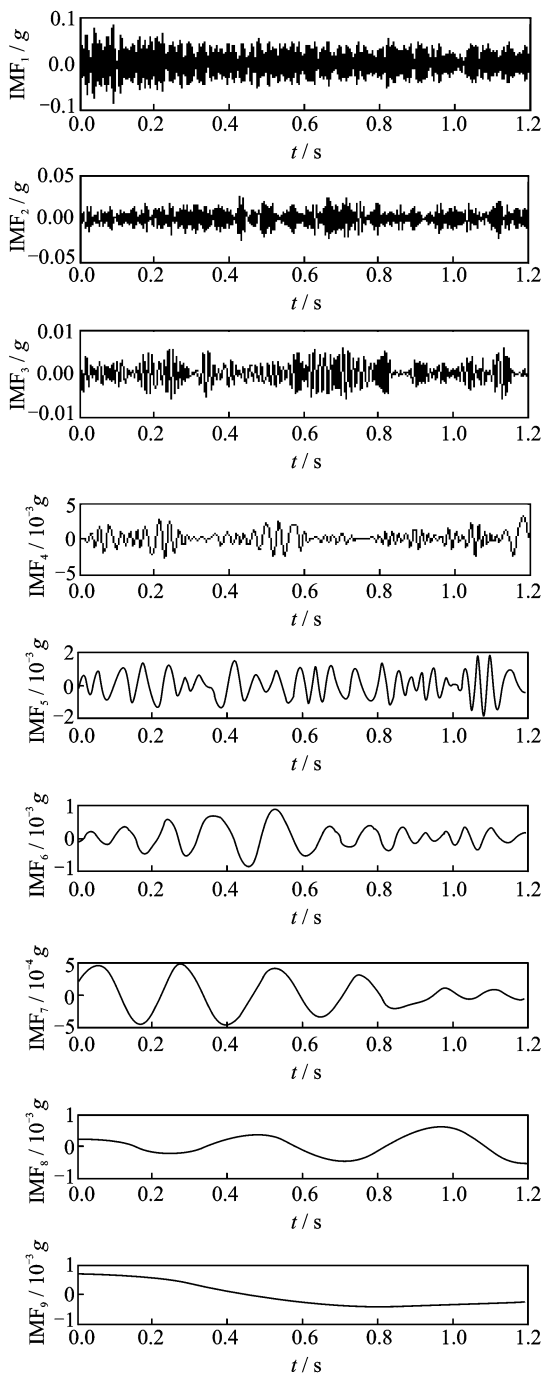


图3 工件主轴以100 r/min 旋转 $x$ 方向前两转振动信号的EMD

图3中,  $IMF_1 \sim IMF_9$  经过重构后可得到原始滤波信号, 每一个本征特征函数具有特定的物理意义, 即经过EMD分解的信号反应磨床主轴系统中不同的振动模式, 每一个IMF表示主轴系统内部运动部件的振动模式。在磨削加工中如果能够获得主轴系统内部不同运动部件的特征, 就可以对磨削加工过程中的颤振进行预测。

### 2.1.3 本质特征函数的复杂度计算

根据复杂度定义可以计算工件主轴以100 r/min 旋转时, 每2转振动信号不同本征特征函数(共9个)的复杂度。为了消除外界干扰的影响, 把前20组振动信号对应的本征特征函数的复杂度值进行平均得到工件主轴以100 r/min 旋转时振动信号每个IMF复杂度的平均值。按照以上计算得到工件不同转速每个IMF的平均复杂度, 如表1所示。变工件转速时砂轮主轴在 $x$ 方向的复杂度值如表2所示。

### 2.1.4 基于鉴别信息的特征值变化分析

根据鉴别信息定义选择表1, 表2中80 r/min 对应的复杂度向量作为基准, 记为 $P_1$ ; 100, 120 和150 r/min 对应的复杂度向量记为 $P_2, P_3, P_4$ 。计算 $P_1, P_2, P_3, P_4$  相对于 $P_1$ 的鉴别信息值, 结果如表3和表4所示。

## 2.2 变磨削深度和砂轮转速颤振预测

根据数据处理步骤可得到变磨削深度和变砂轮转速时工件主轴和砂轮主轴振动信号的复杂度和鉴别信息值, 如表5~表8所示。从表1、表2、表5、表6、表9和表10可以看出: 在3种不同的磨削加工中, 当对应的磨削参数增大时不同IMF复杂度向量会增大; 当3种不同的磨削趋于颤振时, 磨削力振动频率会发生变化, 磨削力激发主轴系统中各部件发生振动, 使振动信号包含的高频成分增大, 导致复杂度增大。从表3、表4、表7、表8、表11和表12中可看出, 当磨削参数趋于颤振变化时对应的鉴别信息值变大; 因此, 通过其变化可以对磨削加工中的颤振进行预测。

表1 变工件转速磨削时工件主轴 $x$ 方向各个IMF的复杂度

工件转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	不同IMF的复杂度								
	$IMF_1$	$IMF_2$	$IMF_3$	$IMF_4$	$IMF_5$	$IMF_6$	$IMF_7$	$IMF_8$	$IMF_9$
80	0.534 0	0.465 8	0.403 3	0.295 4	0.193 1	0.113 6	0.073 8	0.034 1	0.022 7
100	0.530 6	0.578 9	0.447 9	0.337 7	0.206 7	0.124 0	0.068 9	0.048 2	0.020 7
120	0.620 9	0.564 5	0.459 6	0.322 6	0.161 3	0.096 8	0.088 7	0.040 3	0.024 2
150	0.644 5	0.615 2	0.439 5	0.312 5	0.195 3	0.117 2	0.0684	0.048 8	0.024 2

表2 变工件转速磨削时砂轮主轴  $x$  方向各个 IMF 的复杂度

工件转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	不同 IMF 的复杂度						
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>
80	0.399 8	0.527 7	0.367 8	0.271 8	0.143 9	0.095 9	0.048 0
100	0.687 6	0.475 6	0.305 7	0.251 8	0.141 9	0.087 9	0.048 0
120	0.703 6	0.511 7	0.367 8	0.255 8	0.159 9	0.095 9	0.048 0
150	0.751 5	0.447 7	0.383 8	0.287 8	0.191 9	0.127 9	0.080 0

表3 变工件转速磨削时工件主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$	$D(P_4, P_1)$
0	0.360 1	0.390 5	0.530 1

表4 变工件转速磨削时砂轮主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$	$D(P_4, P_1)$
0	0.343 3	0.553 0	0.817 2

表5 变磨削深度时工件主轴  $x$  方向各个 IMF 的复杂度

磨削深度/ mm	不同 IMF 的复杂度							
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>	IMF <sub>8</sub>
0.010	0.488 3	0.556 6	0.439 5	0.302 7	0.185 5	0.117 2	0.068 4	0.048 8
0.015	0.625 0	0.546 9	0.468 8	0.302 7	0.175 8	0.097 7	0.058 6	0.029 3
0.020	0.683 6	0.576 2	0.449 2	0.373 4	0.196 0	0.117 4	0.078 1	0.048 8

表6 变磨削深度时砂轮主轴  $x$  方向各个 IMF 的复杂度

磨削深度/ mm	不同 IMF 的复杂度							
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>	IMF <sub>8</sub>
0.010	0.429 7	0.507 8	0.390 6	0.263 7	0.175 8	0.097 7	0.078 1	0.048 8
0.015	0.546 9	0.546 9	0.410 2	0.273 4	0.156 3	0.087 9	0.068 4	0.039 1
0.020	0.673 8	0.556 6	0.419 9	0.273 4	0.166 0	0.107 4	0.058 6	0.029 3

表7 变磨削深度时工件主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$
0	0.343 3	0.553 0

表8 变磨削深度时砂轮主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$
0	0.178 4	0.518 6

表9 变砂轮转速时工件主轴  $x$  方向各个 IMF 的复杂度

砂轮转速/ ( $m \cdot \min^{-1}$ )	不同 IMF 的复杂度							
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>	IMF <sub>8</sub>
20	0.538 2	0.328 9	0.318 9	0.189 3	0.119 6	0.069 8	0.059 8	0.029 9
25	0.607 8	0.468 0	0.348 5	0.108 9	0.109 3	0.109 6	0.069 8	0.039 9
30	0.637 5	0.488 1	0.358 6	0.169 1	0.139 3	0.099 7	0.069 8	0.049 8
35	0.657 4	0.498 3	0.378 6	0.179 1	0.149 4	0.099 7	0.079 8	0.053 9

表10 变砂轮转速时砂轮主轴  $x$  方向各个 IMF 的复杂度

砂轮转速/ ( $m \cdot \min^{-1}$ )	不同 IMF 的复杂度							
	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	IMF <sub>3</sub>	IMF <sub>4</sub>	IMF <sub>5</sub>	IMF <sub>6</sub>	IMF <sub>7</sub>	IMF <sub>8</sub>
20	0.627 8	0.498 3	0.388 7	0.239 2	0.129 6	0.089 7	0.039 9	0.029 9
25	0.657 7	0.498 3	0.289 0	0.289 0	0.169 4	0.089 7	0.069 8	0.039 9
30	0.677 4	0.587 9	0.428 5	0.318 9	0.209 3	0.129 6	0.069 8	0.059 8
35	0.697 8	0.608 1	0.418 6	0.289 0	0.369 4	0.199 7	0.079 7	0.059 8

表11 变砂轮转速时工件主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$	$D(P_4, P_1)$
0	0.391 9	0.601 0	0.746 1

表12 变砂轮转速时砂轮主轴  $x$  方向的鉴别信息

$D(P_1, P_1)$	$D(P_2, P_1)$	$D(P_3, P_1)$	$D(P_4, P_1)$
0	0.306 1	0.736 8	1.332 9

### 3 结论

1) 基于磨削加工中振动信号的非线性、非平稳

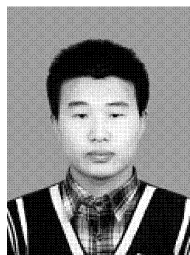
性的特征,提出一种磨削颤振预测方法,通过变工件转速、变砂轮转速和变磨削厚度3种趋于颤振的加工方式对该方法的有效性和可行性进行了验证。实验结果表明,在3种加工过程中,当磨削参数趋于

振方向发展时,对应的鉴别信息值增加。

2) 当磨削颤振发生时,通过本研究方法获得颤振阈值,在磨削过程中当鉴别信息接近颤振阈值说明加工中即将出现颤振,应采取进一步措施避免。确定精确的颤振阈值较为困难,还需要做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Yao Zhehe, Mei Deqing, Chen Zichen. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010(210):713-719.
- [2] Mei D Q, Li X, Chen Z C. Prediction of cutting chatter based on hidden markov model[J]. Key Engineering Material, 2007(353-358):2712-2715.
- [3] Bediaga I, Mu noa J, Hernandez J. An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009(49):384-394.
- [4] Messaoud A, Weihs C. Monitoring a deep hole drilling process by nonlinear time series modeling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009(321):620-630.
- [5] 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):43-50.
- [6] Gonzalez-Brambila O, Rubio E, Jauregui J C. Chattering detection in cylindrical grinding processes using the wavelet transform [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006(46):1934-1938.
- [7] Karpuschewski B, Wehmeier M, Inasaki I. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors[J]. Annals of the International Academy for Production Engineering, 2000,49(1):235-240.
- [8] Gradisek J, Baus A, Govekar E, et al. Automatic chatter detection in grinding[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2003:1397-1403.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal of London Series A, 1998(454):903-995.
- [10] 李宏坤,周帅,朱泓,等.基于经验模式分解的全信息故障识别方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2011,31(1):20-22. Li Hongkun, Zhou Shuai, Zhu Hong, et al. Rotor fault classification using empirical mode decomposition based holospectrum [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(1):20-22. (in Chinese)
- [11] 张志鹏,王伟平,郭明威.基于小波-中值降噪的经验模式分解与应用[J]. 振动、测试与诊断, 2011,31(6):779-782. Zhang Zhipeng, Wang Weiping, Guo Mingwei. EMD and it application based on wavelet-median synthesis de-noising [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(6):779-782. (in Chinese)
- [12] 胥保春,袁慎芳. IMF 筛选停止条件的分析及新的停止条件[J]. 振动、测试与诊断, 2011,31(3):348-353. Xu Baochun, Yuan Shenfang. IMF stopping criterion of EMD and new stopping criterion[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(3):348-353. (in Chinese)
- [13] 冷军发,荆双喜,陈东海.基于EMD与同态滤波解调的矿用齿轮箱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2011,31(4):435-438. Leng Junfa, Jing Shuangxi, Chen Donghai. Fault diagnosis of mine gearbox based on EMD and homomorphic filtering demodulation[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(4):435-438. (in Chinese)
- [14] Manuela F, Maria G S, Giovanni M. Complexity analysis of the fetal heart rate variability: early identification of severe intrauterine growth-restricted fetuses [J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2009,47(9):911-919.
- [15] Carlos G, Roberto H. Complexity analysis of the magnetoencephalogram background activity in Alzheimer's disease patients[J]. Medical Engineering and Physics, 2006,28(9):851-859.
- [16] Lempel A, Ziv J. On the complexity of finite sequences[J]. Information Theory, 1976,22(1):75-81.
- [17] 李晔,崔慧娟,唐昆.基于能量和鉴别信息的语音端点检测算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2006,46(7):1271-1273. Li Ye, Cui Huijuan, Tang Kun. Voice activity detection algorithm based on energy and discrimination entropy[J]. Journal of Tsinghua University: Edition of Science and Technology, 2006, 46(7):1271-1273. (in Chinese)



第一作者简介:董新峰,男,1985年10月生,博士研究生。主要研究方向为机械加工切削稳定性和机械故障诊断。  
E-mail:laile\_sd@163.com