

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.04.010

基于声发射频谱分析的磨削消空程研究

龙郁¹, 李臻峰^{1,2}, 宋飞虎^{1,2}, 李静^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;
2. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:为解决由单一声发射信号时域特征作为消空程指标引起的误报,课题组设计了接触速度作为变量的单因素实验,分析磨削进程开始前后信号差异。并提出已信号频域最大峰值频率作为指标之一,采用主成分分析结合费舍尔判别法来监测磨削接触的发生,进而实现磨削消空程,研究结果表明:该方法对砂轮工件接触与否的判别的准确率达到96.7%,且与传统判别法比较,能通过高频信号变化更早识别到接触的发生。该方法提高了消空程效果,且能提前识别到接触进程的发生,为实际生产设计提供了参考。

关键词:磨削加工;声发射;消空程;主成分分析;费舍尔判别法

中图分类号:TP277;TH132 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)04-0054-05

Eliminating Grinding Idle Process Based on Spectrum Analysis of Acoustic Emission

LONG Yu¹, LI Zhenfeng^{1,2}, SONG Feihu^{1,2}, LI Jing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to eliminate the false alarms caused by the time-domain characteristics of single acoustic emission signal as the index of eliminating idle process, a single factor experiment with contact speed as a variable was designed to analyze the signal difference between idle process and grinding process. A method using principal component analysis combined with Fisher discriminant was been proposed to monitoring the beginning of process. The results show that the accuracy of the method to discriminating the contact up to 96.7%. Compared with the traditional discrimination method, the occurrence of contact can be recognized earlier through the change of high-frequency signals. This method improves the accuracy of the eliminating grinding idle process and recognizes the occurrence of the contact process in advance, and provide reference for actual production design.

Keywords: grinding processing; acoustic emission; eliminating idle process; principal component analysis; Fisher discriminant

磨削加工过程中,通常在指定工位将刀具切换至粗磨速度,以靠近工件并进行后续加工。而磨削尚未发生的过程被称为空程。实际加工生产中空程耗时较长,有效的消空程能极大的提高生产效率。但磨削过程较为复杂,且刃口的锋利程度随加工过程作用不断变化,因此磨削加工的状态监测具有挑战性。考虑接

触状态识别对时长和传感器安装的苛刻要求,声发射信号(acoustic emission, AE)以其速度快、测量范围广等特点成为间接监测的有效方案。

随着声发射技术的快速发展,国内外学者对磨削过程中的声发射信号变化进行了大量研究。潘永成^[1]通过比较表征声发射信号有效值的均方根 A_{Erms}

收稿日期:2020-01-18;修回日期:2020-05-06

基金项目:国家自然科学基金(21606109)。

第一作者简介:龙郁(1995),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为磨削加工中的过程监测。E-mail: LooongYu@163.com

与特定阈值,判断砂轮与工件是否接触。Mohammed等^[2]发现声发射信号对接触很灵敏,可用于监测接触程度。邢康林^[3]发现工件进给速度影响声发射信号特征曲线上升时间。徐水竹^[4]采用均方根 $A_{E_{rms}}$ 构造特征向量,并以此来预测不同的磨削状态。郭力^[5]发现小波重构声发射信号能量法不受机床背景噪声的影响,磨削接触判别更准确。王嗣阳等^[6]提出信噪特征比方法可对磨削过程过载实现预判,盛伟佳等^[7]基于声发射技术设计出自学习磨削加工监控系统。

但上述研究内容均仅从时域信号判断接触的发生,未考虑信号频域特性对磨削接触的表征,尤其是信号中几乎不受环境噪声、振动干扰的高频分量。课题组基于声发射信号在不同接触速度下的时、频域信号特征,在原始声发射信号的基础上,通过主成分分析和费舍尔判别分析得到一种判断砂轮与工件接触的监测方法。

1 实验方法

磨削过程中进给速度、工件材料、砂轮类型、工件转速和刀具主轴转速等因素为主要的工艺参数,各因素水平变化会影响磨削加工效果,因此各工况均与磨削加工过程中的声发射信号产生映射关系。但对于消空程而言,进给速度为首要的研究对象,因此采用单因素法,通过改变工件的进给速度采集空程及初始接触时的连续声发射信号,研究接触速度对声发射信号的影响。

本实验在 MK2115S 数控磨床上测试,使用树脂 CBN 金刚石砂轮磨头,外径 26 mm,实验中砂轮转速恒定为 1 670 r/min,待加工件为直径 50 mm 的 304 不锈钢试件,工件外磨转速保持为 200 r/min,磨削接触速度分别设置为 60,120,180 和 240 mm/min。

Kim H^[8]研究发现磨削过程中发生塑性变形后,声发射信号影响的主要频率位于 100 ~ 300 kHz,根据香农采样定理,为能得到不失真信号,采样率应高于 600 kHz。因此数据采集卡选用美国 NI 公司的单插槽 cDAQ-9171 及 NI-9223,16 位精度,最大采样频率 1 MHz。所用声发射传感器为鹏翔电子科技有限公司 PXR40,传感器信号频率带宽为 100 ~ 500 kHz,灵敏度 65 dB。传感器头部涂抹导声剂后紧贴在磨床机架上,确保声发射信号的稳定传输。根据 Webster 等^[9]研究,传感器安装位置与磨削区域距离应不宜超过 150 mm,安装位置如图 1 所示。

实验开始前应保证无关变量恒定,且定期检查砂轮磨损情况,对有磨损砂轮进行定期修整以保持正常



图 1 传感器安装位置

Figure 1 Installation position of sensor

的磨削条件,定期更换导声剂,保证机床外壳与传感器间良好的耦合性,防止因声发射信号传播不良造成的数据偏差。鉴于实验属于过载性接触,因此需严格把控走刀行程,避免损伤机床主轴,降低加工精度。

2 砂轮与试件接触的声发射分析

在消空程研究中,常通过声发射信号背景噪声阈值电压 V_{lim} 及信号均方根 $A_{E_{rms}}$ 来判断接触的发生,2 项指标分别表征某时刻信号幅值大小与单位时间内电压信号的有效值。然而这些指标易受环境噪声,尤其是冲击振动等低频信号的干扰,从而容易产生误报。图 2 所示为砂轮从空程开始行进直至接触工件的声发射信号。图中时刻 1 和时刻 2 时域电压信号值发生明显变化,但是时刻 1 砂轮与工件未接触,因此仅依据时域电压信号会造成接触状态的误报。图 3 所示为对图 2 中 2 个时刻信号的频谱分析,样本容量为 256 (即从图 2 中峰值前后连续取 256 个数据点),从中可见时刻 2 的声发射频谱中高频、低频分量均有明显的幅值,而时刻 1 的声发射频谱中仅有来源于冲击振动引起的低频分量。从而可以通过引入声发射信号的频谱中的高频信号来减少磨削接触的误报,提高消空程的准确率和效率。

对 50 ~ 300 kHz 的声发射信号开展特征研究。不同接触速度加工条件下各频率段能量有:

$$w = \int_{f_b}^{f_a} |x(f)|^2 df. \quad (1)$$

式中: f_a 为终止频率; f_b 为起始频率; $x(f)$ 为原始信号在单位时间跨度内的傅里叶变换结果。

由表 1 可知,在不同接触速度的加工条件下,51 ~ 100 kHz 频率段的能量仍远大于其他频段,且 101 ~ 150 kHz 及 151 ~ 200 kHz 频段能量有随着接触速度增加逐渐上升的趋势,而其他 2 个频带的能量随接触速度的变化,变化程度不大。

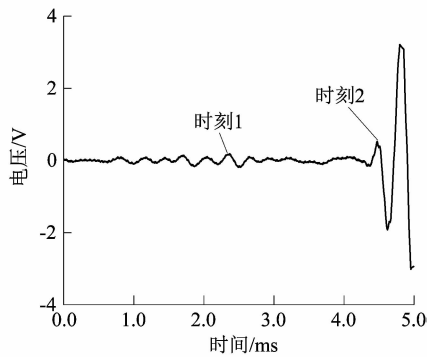


图2 磨削声发射原始信号

Figure 2 Raw signal of grinding acoustic emission

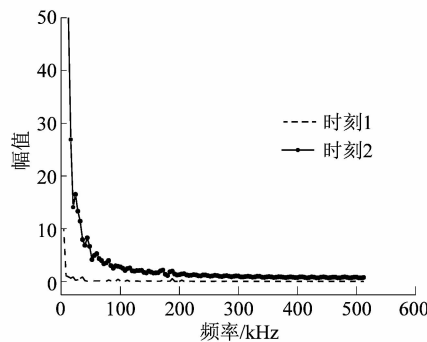


图3 磨削信号的FFT变换

Figure 3 FFT transform of grinding signal

表1 不同接触速度下各频段能量

Table 1 Energy of each band under different contact speeds

进给速度/ (mm · min ⁻¹)	频段功率/(v ² · s)				
	50 ~ 100 kHz	100 ~ 150 kHz	150 ~ 200 kHz	200 ~ 250 kHz	250 ~ 300 kHz
空程	3.47	1.66	0.97	1.42	0.82
60	118.72	6.55	1.80	0.71	1.13
120	121.26	4.13	5.67	2.85	3.86
180	173.19	9.21	8.27	1.51	2.04
240	319.53	25.45	9.28	3.01	2.66

3 基于主成分分析与费舍尔判别的磨削接触识别

主成分分析是模式识别中最基本的多元分析方法。本实验中兼顾频域信号的抗干扰能力,以及时域信号的高计算效率的特点,对时域及频域特征提取主成分,计算各特征的权重值。为满足工程应用的实践性,将信号的均方根 $A_{E_{rms}}$, 50 kHz 以后反应信号在频域组成的变化趋势的前3最大峰值频率 f_1, f_2, f_3 , 以及 50 ~ 300 kHz 频段能量 w_1, w_2, w_3, w_4 和 w_5 作为主成分分析的输入变量。

经过分析后发现前2项主成分 p_{c1} 和 p_{c2} 的贡献率分别为 48.22% 和 37.27%, 累计贡献率达到 85.5%, 因此认为主成分 p_{c1} 和 p_{c2} 可以代替提取的时域、频域特征参数。通过主成分分析得到的2项主成分的综合指标模型:

$$p_{c1} = -0.012\ 94A_{E_{rms}} + 0.931\ 68f_1 + 0.248\ 94f_2 + 0.264\ 24f_3 - 0.000\ 06w_1 - 0.000\ 01w_2; \quad (2)$$

$$p_{c2} = -0.003\ 73A_{E_{rms}} - 0.133\ 14f_1 + 0.911\ 40f_2 - 0.389\ 35f_3 - 0.000\ 02w_1 - 0.000\ 01w_2。 \quad (3)$$

图4所示为经过 p_{c1} 和 p_{c2} 数据降维后的散点图。可以发现空程阶段样本较为分散,信号间的差异较为明显,而接触后样本分布集中。结合2个主成分的系数分析,其原因在于 50 kHz 以后频谱前3特征峰频率对于样本的表征起到更积极的作用,而空程阶段的白噪声在高频部分的峰值并不稳定,但接触后由于磨削作用,高频部分主要由声发射信号组成,且幅值显著高于环境噪声,因此在接触后特征的聚合性较为明显。

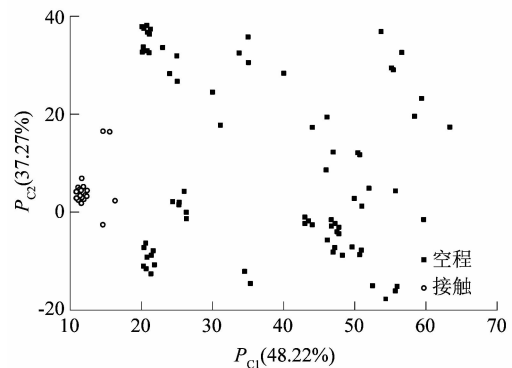


图4 接触状态的主成分分析结果

Figure 4 Principal component analysis results of contact state

费舍尔判别分析是一种对样本总体分布无要求的多变量统计分析方法。现对提取的520个特征进行费舍尔判别分析,将全部样本分为两部分,其中400个用于测试校准,其余120个样本用于验证,具体信息如表2所示。输入参数为由主成分分析提取的2个主成分 p_{c1} 和 p_{c2} 以及测试集对应样本的真实工况分类。分析结果本次总共得到1个判别函数,且该模型的贡献率达到100%。假设检验 P 值为 0.000, 说明在 0.05 水平上显著。结合费舍尔线性判别函数系数,对120个样本进行预测,发现接触阶段的判断准确率为 96.7%。

表2 不同接触速度下测试和验证样本数

Table 2 Number of test and verification samples at different contact speeds

进给速度/(mm·min ⁻¹)	测试集样本数	验证集样本数
空程	200	60
60	50	15
120	50	15
180	50	15
240	50	15

以图2所示的磨削信号为例,其中在声发射信号发生剧烈波动前的具体细节如图5所示,图6所示为声发射信号发生明显变化前的3个样本,样本容量为256,对应时刻分别为 $t_1 = 4.096$ ms, $t_2 = 4.352$ ms及 $t_3 = 4.608$ ms,对应的样本1、样本2和样本3,可以看到在 $t = 4.096$ ms前后,信号的频率成分有明显的变化,可以判定此时接触已经发生,且当处于样本1时,即空程状态,150~200 kHz频率段内的幅值与其他高频部分幅值大小相似;而在样本2处,该频率段幅值较其他频率范围有了明显变化,说明已捕捉由切屑剥落产生的声发射信号;样本3中低频信号也出现显著变化后,该频率段的变化并不明显,原因在于由材料变形造成的声发射已接近饱和。说明根据信号的高频分量能够在低频信号发生前预测到磨削接触过程的发生。与此同时,对同一段数据以0.256 ms的时间跨度计算信号的均方根 $A_{E_{rms}}$,并通过主成分分析与费舍尔判别的复合模型预测接触状态,如图7所示。图7右侧纵坐标为根据复合模型预测的接触状态,“0”表示空程用,“1”表示接触。可以发现,信号的均方根 $A_{E_{rms}}$ 在 $t = 4.608$ ms时才发生显著变化,而采用复合模型较均方根法提前一个特征点就识别到接触过程。

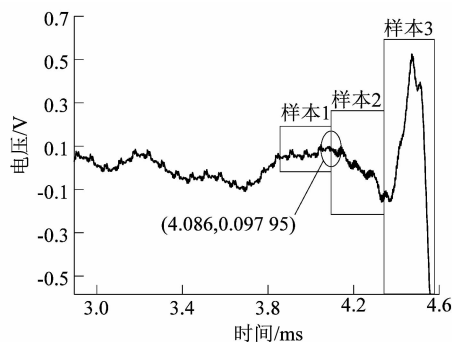


图5 磨削声发射原始信号细节

Figure 5 Details of grinding acoustic emission raw signal

通过复合模型分别判断不同进给速度的接触时间,结果如表3所示。由表3可知,当以60,120 mm/

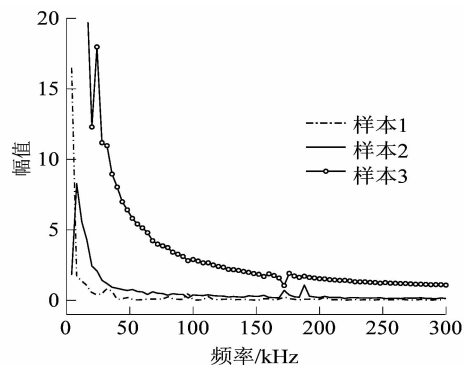


图6 接触前后信号频谱对比

Figure 6 Comparison of signal spectrum before and after contact

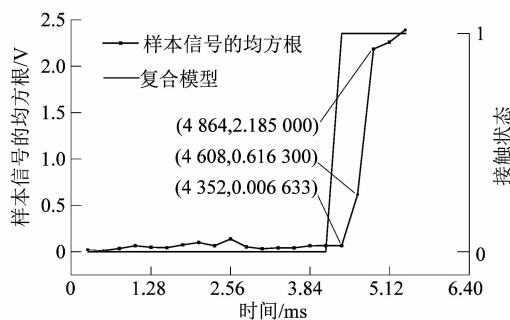


图7 判别效果对比

Figure 7 Comparison of discrimination effect

min的进给速度接触情况下,复合模型比均方根判别提早1个特征点识别到接触的发生,而在进给速度180,240 mm/min情况下则在同一样本情况下识别,这是因为此时接触速度过快,已超出正常的接受范围;同时在进给速度60,180 mm/min情况下阈值法比均方根判别法更早识别到接触的发生,原因在于受样本数的限制,当接触发生在样本的末端,由于电压是模拟信号,不能发生突变,因而通过模数转换后得到的变化后特征点较少,导致此时复合模型及均方根判别法只能在后一样本中识别接触的发生,因此基于时域特征的均方根信号则受到较大影响,而频域部分造成的影响较小,故复合模型能够顺利判断。

表3 磨削接触判断时间

Table 3 Time-consuming of grinding contact

进给速度/ (mm·min ⁻¹)	接触判断时间/ms		
	复合模型	均方根判别法	阈值法
60	4.352	4.608	4.523
120	8.417	8.673	8.802
180	8.945	9.201	8.988
240	7.409	7.409	7.517

(下转第63页)