

基于声发射信号的高速铣削过程监测技术*

AE-Based Monitoring Technology of High Speed Milling Process

南昌航空大学航空与机械工程学院 龚廷恺 王细洋

[摘要] 叙述了如何将声发射技术应用于航空铝合金的高速铣削过程监测,介绍了监测装置硬件系统和信号数据采集平台的构成,最后运用小波分析进行信号分解,计算分解后的各频段能量,并从频段的能量对比中发现,信号能量可以作为刀具磨损的特征参数。

关键词: 切削过程监控 小波变换 虚拟仪器 刀具磨损

[ABSTRACT] It is described how to use acoustic emission (AE) technology for aviation aluminum alloy high-speed milling process monitoring. A monitoring device hardware systems and the composition of signal data acquisition platform are introduced. The signals are decomposed by using the wavelet analysis, and then each frequency band of energy after decomposition is computed. From the comparison of each frequency band of energy, it is found that signal energy can be used as the characteristic parameter of the tool wear.

Keywords: Cutting process monitoring Wavelet transform Virtual instrument Tool wear

金属切削过程中,刀具在破裂时会产生一种弹性波,这种弹性波是以固体在产生塑性变形和破裂时释放出的能量转换成声波的形式传播出来的。与其他无损监测方法相比,声发射(Acoustic Emission, AE)监测具有传感器安装简便、信号频率信息丰富、不影响加工过程、可实现动态检测等优点。而且声发射法监测的是刀具磨损和破损时发出的高频弹性应力波信号,避开了加工过程中振动和音频信号污染严重的低频区,在高频区内灵敏度较高,抗干扰能力强,同时受切削参数和刀具几何参数的影响较小,对刀具破损非常敏感。

1 高速铣削过程中AE信号的产生及特征

金属在塑性变形、裂纹形成与断裂、金相组织相变等动态过程中都将伴随有 AE 现象发生。在金属切

削加工中,AE 源主要来自工件、切屑和刀具的弹塑性变形和断裂,包括第一变形区的材料在切削力作用下产生剪切滑移等弹塑性变形、挤裂和折断;第二变形区刀—屑内外摩擦结果使切屑进一步挤压与剪切变形;在第三变形区,刀具与工件表面摩擦,使已加工表面和刀具后面分别产生塑性变形和磨损^[1]。在金属铣削过程中,下述因素也会产生 AE 信号或 AE 信号的变化:

(1) 切削过程的不连续性,使得刀具切入和切离工件时产生声发射信号。这个信号电压值很高,产生 AE 信号 RMS(均方根)的 2 个峰值。

(2) 在每一切削周期中切削厚度发生变化,使得刀具倾斜表面上切削力和接触条件发生随机变化,引起 AE 信号的变化。

(3) 刀具切离时,切屑附着在刀具上并进入下一切削循环,引起切屑的拥塞。使得 AE 信号水平和特征随机变化。

(4) 多刃切削使得同时有多个切削刃发挥作用,因此有多个切削力和 AE 信号源产生。

AE 信号可分为连续型和突发型 2 种。连续型声发射信号幅值较低,事件发生的频率较高,以致难以分出单独事件,比如由固体材料的弹塑性变形和正常切削发出的 AE 信号等。突发型 AE 信号是在表面开裂时产生的,其信号幅值较高,各个声发射事件之间间隔较长,如刀具的异常磨损、破损时释放的能量转换成声音传播,主要发出非周期的 AE 信号。AE 信号具有如下特征:

(1) 上升时间很短,约 $1\mu\text{s}$ 左右。

(2) 有很宽的频率范围,从次声到超声(30MHz)。

(3) 一般是不可逆的,即具有不复现性。

(4) 它的产生不仅与宏观因素有关,还与微观因素有关,具有随机性。

(5) 抗干扰能力强,受切削参数和刀具几何参数的影响较小。

2 声发射监控试验

试验在 MIKRON UCP600 高速数控加工中心上

* 航空科学基金(2006ZE56007)资助项目。

进行,工件材料为航空铝(7050-T7451),刀具选择高速钢三齿立铣刀HSS($\phi 10\text{mm}$)。选用SR150A声发射传感器,其主要技术参数包括:频率范围50~400kHz,谐振频率150kHz,灵敏度峰值大于-65dB。我们感兴趣信号的中心频率为150kHz,因此这个传感器的参数指标可以满足试验要求。

试验中,声发射传感器的安装在加工件的侧边并尽可能靠近切削点处(如图1所示),声发射信号经过前置放大器、带通滤波器和主放大器,最后通过系统平台进行采集、分析和保存等处理。为了使试验数据具有可对比性,试验前人为钝化3把刀具,把刀具分成新刀、微磨损刀和严重磨损刀3类。试验中采样频率设定为2MHz/s。大量的数据固然有助于分析,但数据处理的工作量会急剧增加,因此从3种不同磨损刀具的试验样本中选取3段共20480个数据点进行数据分析,试验中切削参数按照表1进行设置。



图1 AE传感器安装图

Fig.1 AE sensor installation diagram

表1 切削参数表

刀具类别	主轴速度/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	背吃刀量/ mm
新刀	5 000	95	0.8
微磨损刀	5 000	200	2
严重磨损刀	5 000	290	1.5

3 小波分析

AE信号的分析处理大体可分为特征参数分析法和波形分析法2大类。特征参数分析法是自20世纪90年代至今一直广泛使用的经典声发射信号分析方法,它具有信息记录量大、处理快捷等优点,但相比信号原始波形,特征参数已经损失了大量的信息。自20

世纪90年代初模态声发射理论确立后,运用小波分析等波形分析方法研究处理声发射信号成为新的研究热点^[2-6]。

3.1 小波分析理论

小波分析(Wavelet Analysis),也称为多分辨分析(Multiresolution Analysis),是建立在泛函分析、傅立叶分析、样条分析与调和分析基础上的新的信号分析方法,具有很好的应用价值。小波分析是一种窗口大小固定不变,但其形状可以改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。

小波分析的基本思想是用一族函数表示或逼近一个信号,这一族函数称为小波函数系,它是通过基本小波函数的不同尺度的平移和伸缩构成的。设 $\psi(t) \in L_2(R)$ ($L_2(R)$ 表示平方可积的实数空间,即能量有限的信号空间),其Fourier变换满足允许条件时:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (1)$$

式中, $\hat{\psi}(\omega)$ 表示小波函数的傅立叶变换的共轭, ω 为小波基函数的频率。称 $\psi(t)$ 为一个小波基或母小波。将 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后,就可以得到一组小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 。

设 $f(t) \in L_2(R)$ (t 表示时间变量, R 表示实数域),则 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$\psi_j(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \int_R f(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (2)$$

式中, $\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$ 代表内积, a 表示尺度因子, b 表示平移因子。

小波分析方法把信号分解成不同频率范围的分量,由于不同类型的声发射信号包含的信息成分不同,经过小波分解后,声发射信号中的信息成分在各个分解尺度的不同频带分量中的分布也不同。从统计学的角度考虑,信号在不同频带上信息分布情况可以通过各频带上信号的能量反映出来。如果信号 $f(t)$ 经过 j 尺度的小波分解可分解成 $j=j+1$ 个频率范围分量,即有

$$f(n) = A_j f(n) + D_1 f(n) + D_2 f(n) + \dots + D_j f(n), \quad (3)$$

那么信号的总能量为

$$E_{f(n)} = \sum_{n=1}^N [A_j f(n)]^2 + \sum_{n=1}^N [D_j f(n)]^2, \quad (4)$$

式中, $\sum_{n=1}^N [A_j f(n)]^2$ 表示信号在分解尺度 j 上的低频

分量的能量, $\sum_{n=1}^N [D_j f(n)]^2$ 表示信号在分解尺度 j 上高频段的能量。

3.2 AE信号的小波分析

对3段不同磨损刀具的AE信号数据采用Daubechies系列中的DB5小波基对其进行6层小波分解,把信号分解成7个频段分量。AE信号 $f(n)$ 经小波6层分解后,信号可由它的近似信号 a_6 (频宽 0~31.25kHz)、细节信号 d_6 (频宽 31.25~62.5kHz)、 d_5 (频宽 62.5~125kHz)、 d_4 (频宽 125~250kHz)、 d_3 (250~500kHz)、 d_2 (频宽 500~1MHz) 和 d_1 (频宽 1~2MHz) 构成。图2为新刀AE信号小波分解后的小波系数图,从图中可以看出近似信号 a_6 系数包含信息丰富,细节信号中只有 d_6 和 d_5 的系数反映明显,细节信号其他几个高频段的小波系数很少,所以在新刀中的信号成分由近似信号 a_6 和细节信号 d_6 、 d_5 构成,根据小波分解频率范围的确定方法,新刀中信号的主要频宽范围应在0~125kHz内。

图3是微磨损刀具AE信号的小波分解后小波系数图。在图中可以发现,近似信号 a_6 和新刀的近似

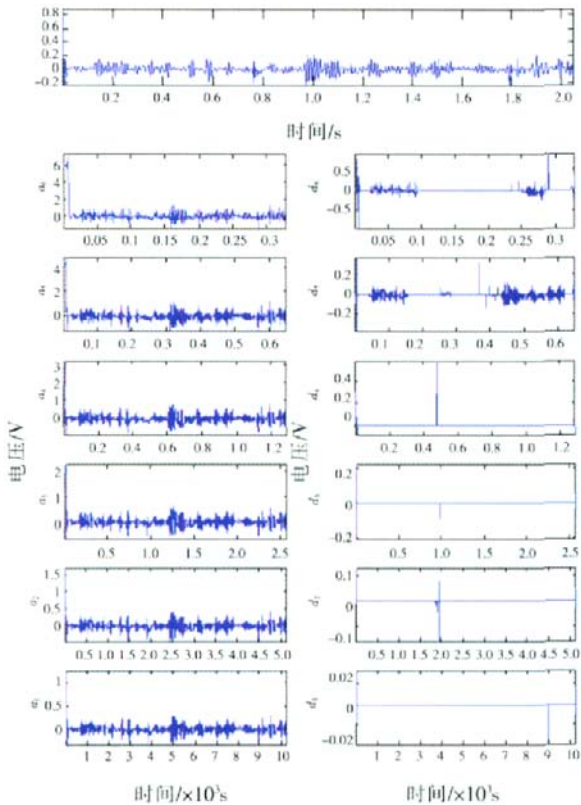


图2 新刀AE信号6层分解小波系数

Fig.2 6-layer decomposition of wavelet coefficients of new cutting tool by using AE signal

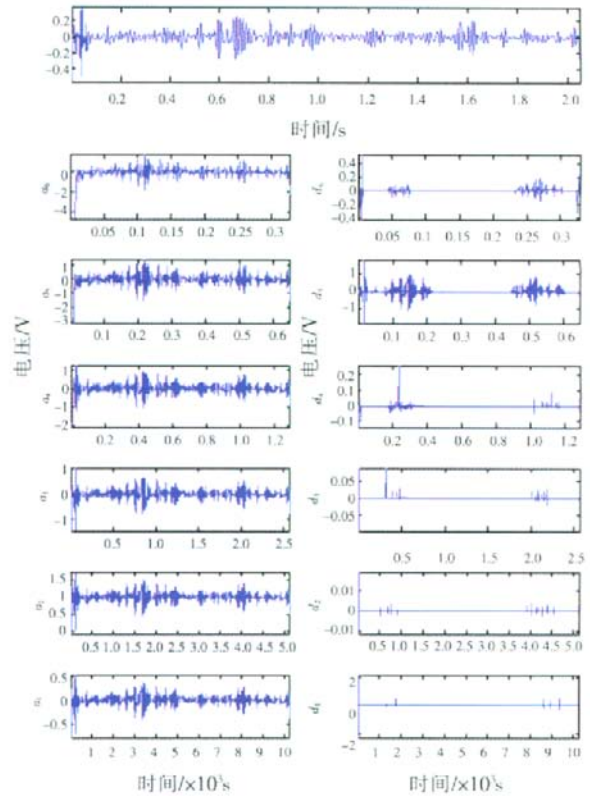


图3 微磨损刀具AE信号6层分解小波系数

Fig.3 6-layer decomposition of wavelet coefficients of micro-wear cutting tool by using AE signal

信号 a_6 相同,包含的信息丰富。细节信号主要在 d_6 和 d_5 部分。与新刀的细节信号其他频宽相比,微磨损刀具的细节信号有增加趋势,特别是在 d_5 部分表现明显。同样,根据小波频宽的确定方法,微磨损刀具AE信号频段的主要范围在0~250kHz内。

图4是严重磨损刀具AE信号小波分解后的小波系数图。与前面两种刀具AE信号小波分解后的小波系数图相比,严重磨损刀具的各个频段系数分布明显增加,而且其增加的趋势比微磨损刀具更为显著,频宽范围也更宽。

依据上文分析,3种刀具AE信号在小波分解后的小波系数有增加的趋势,为了能直观地看到分析结果,笔者提取3种刀具AE信号分解后近似信号 a_6 和各细节信号的小波系数,并计算它们的能量变化。为了便于比较,计算出的能量值都缩小了100倍。表2是计算后各个频段的能量特征向量(能量特征向量是通过小波分解后的小波系数经过计算得到的数据,无量纲)的对比。

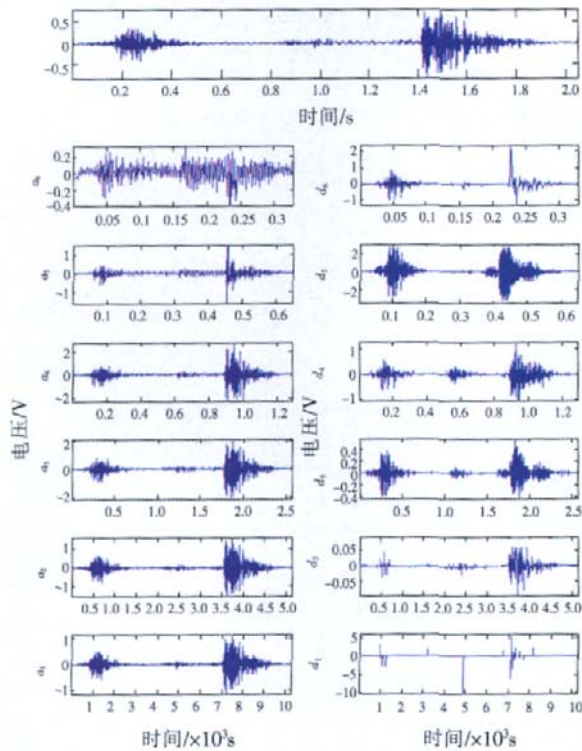


图4 严重磨损刀 AE 信号 6 层分解小波系数
Fig.4 6-layer decomposition of wavelet coefficients of serious-wear cutting tool by using AE signal

表 2 中可以看到 3 种刀具的各频段能量几乎都呈增加的趋势,而且还发现与其他的频段能量比较时,Ed₅ 频段能量增加的比例幅度最大,笔者认为这部分能量可以作为刀具磨损的特征参数。为了说明结论

表 2 3 种刀具声发射信号的能量特征向量

刀具类别	Ea ₁	Ed ₆	Ed ₅	Ed ₄	Ed ₃	Ed ₂	Ed ₁
新刀	16.164 5	10.372 6	32.162 8	10.612 1	1.721 3	0.561 9	0.471 6
微磨损	18.037 4	11.927 1	37.432 9	11.732 5	2.361 2	0.823 1	0.832 5
严重磨损	19.956 1	14.012 6	45.512 6	13.312 8	4.928 4	0.931 7	1.514 3

表 3 其他 2 种工况的切削参数

刀具类别		主轴速度/(r·min ⁻¹)	进给速度/(mm·min ⁻¹)	背吃刀具/mm
工况 1	新刀	8 000	200	1.5
	微磨损刀	8 000	290	0.8
	严重磨损刀	8 000	95	2
工况 2	新刀	12 000	290	2
	微磨损刀	12 000	95	1.5
	严重磨损刀	12 000	200	0.8

的正确性,用相同的方法分析了其他 2 种工况(表 3 中所列的工况 1 和工况 2),得到了相似结果。

4 结束语

本课题在介绍高速切削过程中声发射信号的产生和基本信号分析方法的基础上,提出了一种基于小波分解的刀具磨损状态检测方法,从传感器接收到的信号入手,判断出所关注的某一频率带的信号,并对该频带内的信号作小波分解,根据分解信号的能量判断刀具磨损的程度。试验表明,这种方法操作性强,有利于在实时监测中推广与应用。

参 考 文 献

[1] 孙宝元. 切削状态智能监控技术. 大连: 大连理工大学出版社, 1999. 107-108.
 [2] 纪洪广, 张天森, 张志勇, 等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价. 无损检测, 2001, 23(7): 289-291.
 [3] Geng R S, Shen G T, Liu S F. A study on modal acoustic emission theory. NDT, 2002, 24(7): 302-306.
 [4] 刘国光, 程青蟾, 李燮里, 等. 声发射神经网络模式识别. 仪器仪表学报, 2003, S2: 406-408.
 [5] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 等. 基于模态分析和小波变换的声发射源定位新算法研究. 仪器仪表学报, 2005, 26(5): 482-485.
 [6] Daig, Xuyt, Wang Zn. AE monitoring and data analysis for large spherical tanks. NDT&E, 1993, 26(6): 287-290.

(责编 晓静)

(上接第 79 页)

[4] 吴含前, 姜澄宇. 一种面向对象的产品结构与配置管理. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 171-174.

[5] Hvamy L. A procedure for the application of product modeling. International Journal of Production Research, 2001, 39(5): 873-885.

[6] 顾巧祥, 苏少辉, 余军合, 等. 基于事物特性表的产品变型设计研究. 中国机械工程, 2004, 15(19): 1 713-1 716.

[7] 鲍仲平. 数据库中的事物特性. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[8] 祁国宁, 顾新建, 谭建荣. 大批量定制技术及其应. 北京: 机械工业出版社, 2003: 139-148.

[9] 谭建荣, 冯毅雄. 设计知识建模、演化与应用. 北京: 国防工业出版社, 2007: 114-119.

(责编 侧卫)