

自由曲面数控加工中刀具破损的小波分析

许树新, 赵 继, 王洪刚

(吉林工业大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:介绍了小波变换的特点, 并将其与傅立叶变换及快速傅立叶变换进行了对比, 结合刀具破损信号, 分析了快速小波变换——Mallat 算法。对自由曲面数控加工中主轴电机电流信号的提取技术进行了分析, 指出了霍尔电流传感器是行之有效的方法。鉴于刀具破损电机电流信号的瞬时性, 采用小波分析方法给出了提取刀具破损信息特征的成功应用实例。研究表明, 多分辨(多尺度)分析的方法, 对于刀具破损这种突变信号不但具有精确的时-频定位作用, 还具有易于监测的优点, 说明这种方法能够有效地应用于刀具破损监控的信号处理。

关键词:小波分析; 刀具破损; 电流信号

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A

1 引 言

模具是现代工业生产中的基础工艺装备, 汽车、仪器仪表等行业约有 60~80% 的零件需用模具加工。这些模具大多是由复杂的自由曲面组成, 制造周期较长, 通常为十几小时, 有的甚至达几十小时, 操作人员极易疲劳。故障一旦发生, 从人的感知到采取相应的措施常常需要数秒的时间, 这有可能导致产品报废, 造成严重的经济损失。

随着现代生产和制造技术的不断发展, CNC、FMC、FMS、CIMS 等众多的现代化加工设备广泛用于各种模具制造中, 为了保证这些高度自动化加工系统能够持续、高效地进行生产, 避免因切削刀具的磨损、破损等因素造成加工零件的精度下降, 甚至损害机床设备, 必须对整个加工过程进行有效地监控。有数据表明, 采用监控系统后可避免人和技术因素引起的故障停机时间的 75%^[1]。刀具破损在线监控技术国内外研究得较多, 提出了许多监测方法, 如用接触式探头或工业电视摄像机监测刀具的破损量, 监测被加工零件的尺寸、表面粗糙度和加工过程中的切削力、电机电流等的变化, 间接判断刀具破损状况^[2-4], 但目前较为成熟的产品不多, 究其原因在于: 一是所采用的传感器在刀具自动化加工机床上很难安装,

不是妨碍加工, 就是拾取信号信噪比太小; 二是刀具破损信号处理较困难。本文采用在机床上易于安装, 信噪比大的非接触式霍尔电流传感器监测主轴电机电流, 同时采用小波分析的方法处理, 为刀具破损在线监控提供了有效的手段。

2 小波分析思想

小波分析是傅立叶分析的发展。80年代中期, 物理学家 Morlet 和 Grossman 在处理地震信号数据时提出了一个小波的概念, 它被看做近年来在数学方法上的重大突破, 解决了傅立叶分析无法解决的问题。傅立叶分析采用一个不变的基函数 $e^{i\omega t}$ 作为积分变换函数, 参数 ω 的变化反映了对信号中所含频率的某种限制, 即在单频上做分解, 频率分辨率可任意好, 但基函数在时间轴上无限延伸, 故无时间分辨率。特别是当参数 ω 经整数放缩后, $\{e^{in\omega}\}_n$ 构成了能表现所有的以 2π 为周期的能量有限函数 $f(t) \in L^2(0, 2\pi)$ 的一组正交基底, 信号 $f(t) \in L^2(0, 2\pi)$ 可用这组正交基底展开为 Fourier 级数。当信号含有局部信息时, 傅立叶分析在一定程度上失去意义, 因为它不能客观地反映出信号在时间局部区域上的频率特征。为了解决上述问题, D. Gabor 提出了窗口傅立叶变换的概念, 加窗傅立叶变换, 一旦窗函数选定, 则

时-频窗的尺寸即固定。对不同的频率,完全依靠积分变换函数 $e^{i\omega t}$ 将信号频率调制到感兴趣的频段;对不同的时间,可将窗沿时间轴滑动。因此,加窗傅立叶变换是一种窗口大小及形状均固定的时-频局域化分析,这在一定程度上解决了信号非平稳分析方面的问题,使得信号在局部范围内的频率特征得以体现,但这种方法受 Heisenberg 测不准原理的极限制约,时窗与频窗不能同时达到极小值,而在实际问题中对低频信号要求有较高的频率分辨率,对高频信号要求有较高的时间分辨率,即它不能适应信号频率高低的不同要求。

小波变换继承和发展了 Gabor 变换局部化的思想,它通过在信号上加一个变尺度的窗函数来对信号分段截取和分析,并采用一个弹性的小波基函数 $\Psi_{a,b}(t)$ 作为积分变换函数,对不同的频率,依据参数 a 的伸缩来实现。分析检测高频特性时(a 减小),时间窗口自动变窄,频率窗口自动变宽;分析检测低频特性时(a 增大),时间窗口自动变宽,频率窗口自动变窄,实现了时频窗口的自适应变化。对不同的时段,可将基函数沿时间轴滑动。因此小波变换具有良好的时-频定位功能,可以分析信号的任意时段的任意细节,从而对于分析非平稳信号十分有效。

3 自由曲面加工中刀具破损信号小波分析原理

当刀具在切削过程中发生破损时,由于切削力突然发生变化,导致切削功率发生变化,相应地驱动刀具工作的电机电流也将发生变化。因此,用电机电流监测切削力的变化可间接监测刀具状态。从主轴电机提取电流信号,最简单的方法是串联电阻进行 I/V 转换,以电压形式输出,但电阻的加入使得电机本身的负载特性发生变化,降低了测量的精度。另外,在电阻两端连接的其他仪器必须等值变压以悬浮其电位,无疑增加了测量系统的复杂性。鉴于此,本文采用磁平衡式霍尔电流传感器,由于霍尔元件输入-输出间具有良好的线性关系,因此其输出信号的波动可间接反映电机电流的变化情况。设输出信号为 $f(t)$,则 $f(t)$ 的连续小波变换的定义为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{a} \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中 a 是尺度参数, $a \in R^+$; b 是时移参数, $b \in R$;

$\Psi_{a,b}(t)$ 称为小波基函数。当 $a > 1$ 时 $\Psi(t)$ 的波形伸展,当 $a < 1$ 时, $\Psi(t)$ 的波形压缩。参数 a 的伸缩和参数 b 的平移如连续取值,称为连续小波变换。实际应用中对其进行二进离散,即取 $a = 2^{-j}$, $b = 2^{-j}k, j, k \in Z$, 则

$$W_f(j, k) = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) 2^{\frac{j}{2}} \Psi^* (2^j t - k) dt \quad (2)$$

称为二进小波变换。已经证明^[5-7],小波基的二进离散能够覆盖整个频率轴,且形成的不同的小波空间是相互正交的。信号 $f(t)$ 向各个小波空间投影的结果,可以得到其在各个频段上的分量,从而可以在不同层次上观察信号。

对于计算机采样获得的数字信号,其二进小波变换可用 Mallat 算法求得。设空间 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 为 $L^2(R)$ 的多分辨逼近,相应的尺度函数

$$\varphi(x) = 2^j \varphi(2^j x) \Big|_{j \in Z} \quad (3)$$

由于 $V_j \perp V_{j+1}$,故 V_j 空间的基函数

$$2^{-\frac{j}{2}} \varphi(x - 2^{-j}n) \quad (4)$$

也应位于 V_{j+1} 空间中,因此可以用 V_{j+1} 空间的规范正交基

$$2^{-\frac{j+1}{2}} \varphi_{j+1}(x - 2^{-(j+1)}n) \quad (5)$$

来表示。由于信号的 2^{j+1} 和 2^j 的逼近分别是它在 V_{j+1} 和 V_j 的正交投影,根据投影定理,分辨率为 2^j 的细节信号应该是原始信号在 V_j 关于 V_{j+1} 的正交补空间上的正交投影,设此正交补空间为 W_j ,即

$$W_j \perp V_j \text{ 且 } W_j \oplus V_j = V_{j+1} \quad (6)$$

故 W_j 空间的基函数 $2^{-\frac{j}{2}} \Psi_j(x - 2^{-j}n)$ 也应位于 V_{j+1} 空间中,因此也可以用 V_{j+1} 空间的规范正交基(式(5))来表示。如信号 $f(t) \in V_{j+1}$, 则

$$\begin{cases} A_j^d f = \sum_{k=-J}^J \tilde{h}(2n-k) A_{j+1}^d f \\ D_j f = \sum_{k=-J}^J \tilde{g}(2n-k) A_{j+1}^d f \end{cases} \quad (7)$$

上式表明, $f(t)$ 的离散逼近 $A_j^d f$ 可以从高一级离散逼近 $A_{j+1}^d f$ 通过滤波器抽采得到, $f(t)$ 的细节信号 $D_j f$ 也可以从高一级离散逼近 $A_{j+1}^d f$ 通过另一滤波器抽采得到。若原始信号 $A_0^d f$ 有 N 个采样,只要给出 $h(n)$ 和 $g(n)$ ($\tilde{h}(n) = h(-n)$, $\tilde{g}(n) = g(-n)$, $g(n) = (-1)^n h(1-n)$) 便可以进行信号分解。可用下面的框图表示:

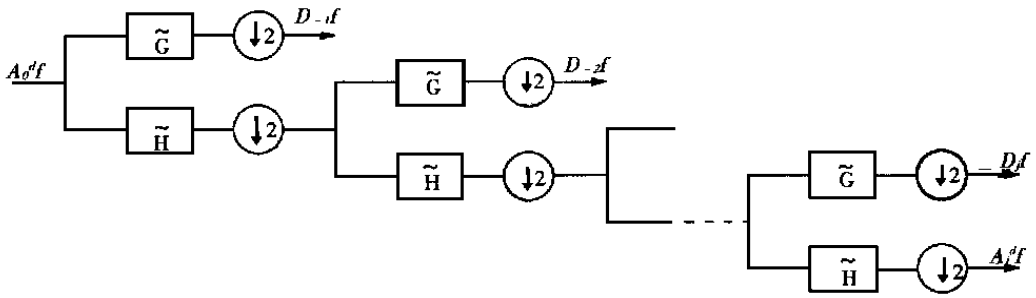


Fig. 1 The wavelet decomposition of the original signal

我们采用这种算法来处理自由曲面数控加工过程中电流信号, 选用 Db9 小波进行波形分解, Db9 小波无解析形式, 其计算完全依赖于 g 、 h 的数值。

行的, 实验原理图示于图 2, 分别模拟两种典型试验工况, 即重负载工况条件及硬质点工况条件, 采样频率为 1kHz。为节约时间, 所用的刀具在试验前均进行了轻微预磨处理。

4 实测信号及其小波分析结果

实验是在 TRIAC ATC 立式加工中心上进



Fig. 2 Schematic of the experimental theory

4.1 重负载工况条件

实验条件: 铣刀直径: $\varnothing 8\text{mm}$, 切削深度: 1mm, 切削速度: 500r/min, 进给速度:

150mm/min, 工件材料: A3 钢, 刀具材料: 高速钢。实测信号如图 3 中 s 所示。

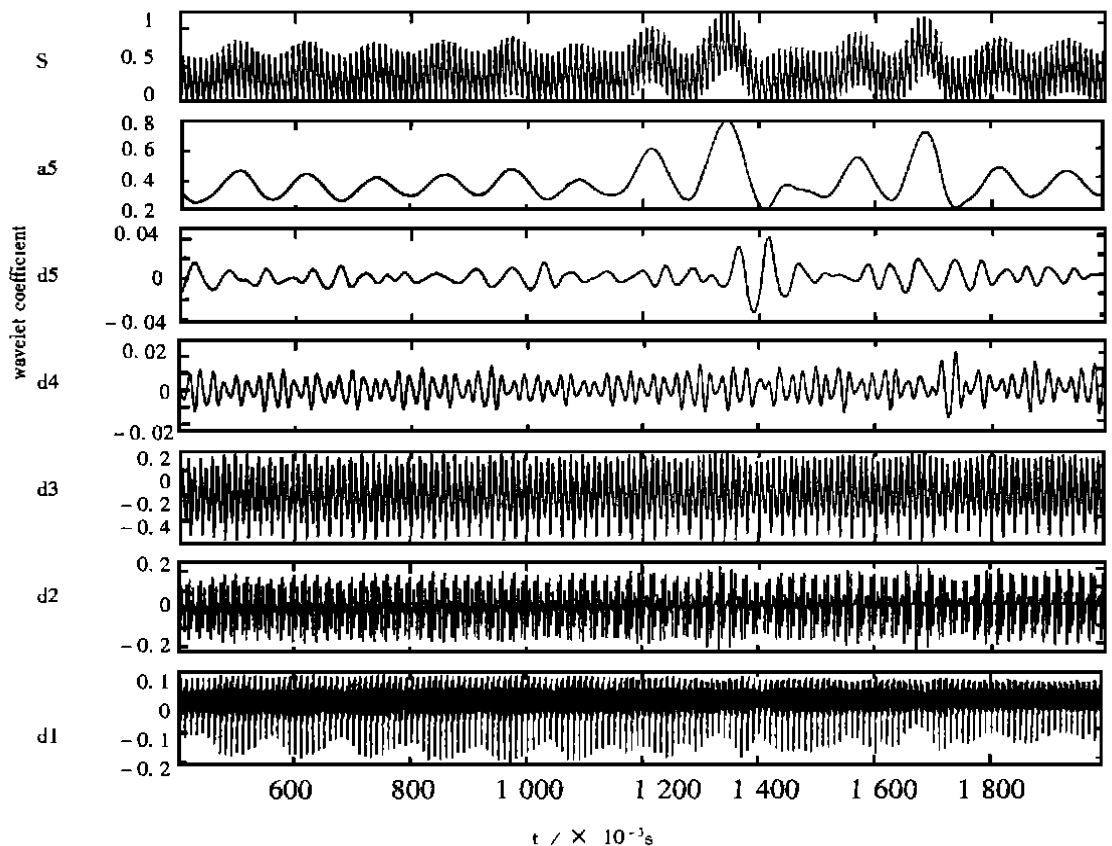


Fig. 3 Heavy loading signal and its decomposition

从图 3 可以看到时域信号较为复杂, 很难提取其特征, 如从频域上观察, 由于没有时域的定位作用而达不到实时的目的。因此, 对原始实测信号进行小波分解, 尺度 2^{-1} , 2^{-2} , 2^{-3} , 2^{-4} , 2^{-5} 所对应的频带分别为 250Hz ~ 500Hz、125Hz ~ 250Hz、62.5Hz ~ 125Hz、31.25Hz ~ 62.5Hz、15.625 Hz ~ 31.25Hz, 变换结果列于图 3, 其中 a5 表示信号中包含的小于 15.625Hz 的平滑信号成分。从图 3 变换结果可以看出, 刀具破损时在小尺度上(高频)反映不明显, 但在第 5 尺度上破损特征被明显表示出来, 实际监控中, 在该尺度上设定一个阈值, 即可识别刀具状态, 而且其破损点在小波变换

图中, 时频双向均被精确定位, 从而便于实时监控。

4.2 硬质点工况条件

实验条件: 铣刀直径: $\varnothing 8\text{mm}$, 切削深度: 0.5mm, 切削速度: 500r/min, 进给速度: 150mm/min, 工件材料: A3 钢, 刀具材料: 高速钢。在工件中预埋一个 $\varnothing 2\text{mm}$ 的淬硬的合金钢, 形成硬质点, 以使刀具破损。实测信号及其小波分解如图 4 所示。从图中可以看出反映刀具破损点在高频段反映也不明显, 同样在第 5 尺度上, 破损特征被明显地表现出来。

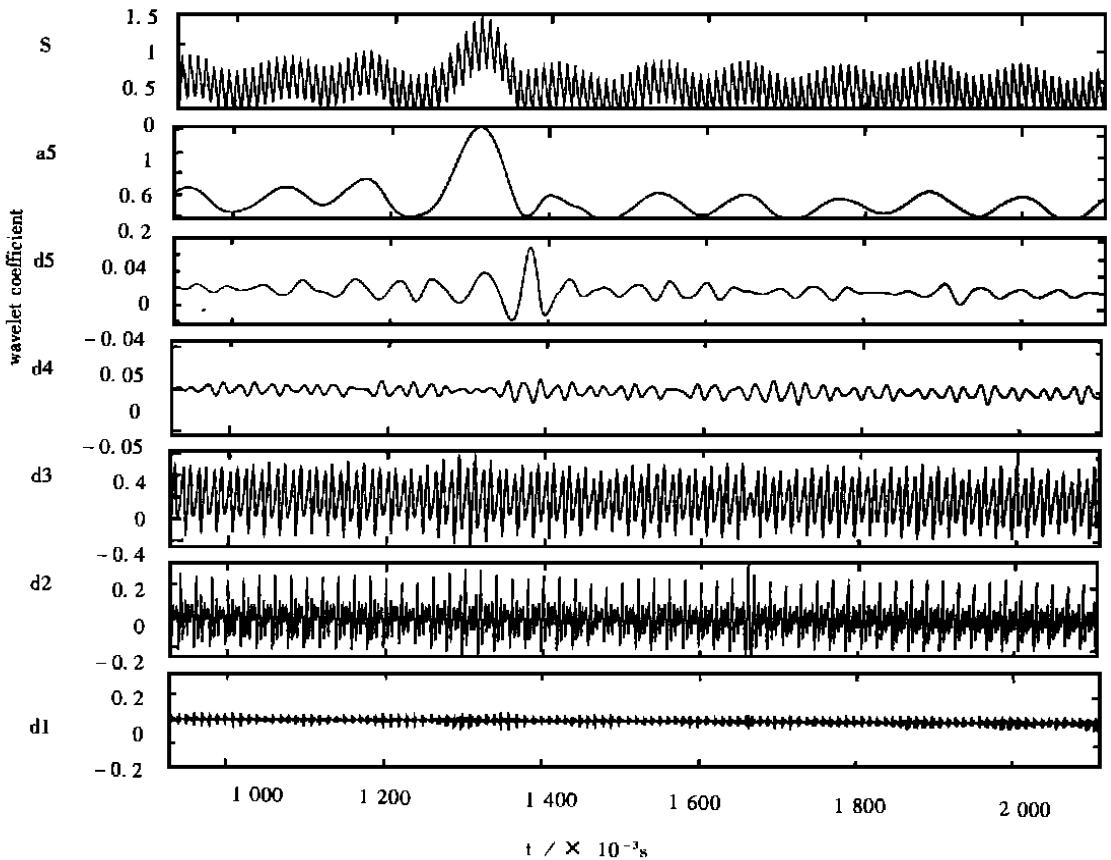


Fig.4 Hard-area broken signal and its decomposition

5 结 论

(1) 小波变换为信号的时频局部化提供了理论基础。采用小波分析方法, 可以同时从时域和频域对信号进行分析, 并对感兴趣的点进行精确时频定位。

(2) 本文通过典型实例说明了小波变换用于刀具信号监测的特点, 所进行的研究表明, 刀具破

损信号为非平稳信号, 时域信息很复杂, 如采用经典的信号处理方法, 无时域的精确定位作用而难以达到实时的目的, 而且时域上数据量庞大, 不易准确提取信号特征, 小波变换具有压缩数据的功能, 随着分解层数的增加, 数据量成几何级数递减, 从而可以更有效、快捷地“训练”数据, 为进一步实现刀具切削状态的智能化监控和无人化生产过程奠定了基础。

参考文献:

- [1] 徐春广,王信义,邢济收,等.FMS 刀具切削状态实时在线监控智能系统[J]. 机械工程学报, 1998, 34(6): 41- 47.
- [2] Rangwala S, dornfeld D A. Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring[J]. Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(8): 219- 228.
- [3] Jammu, Danni K, Malkin S. Unsupervised neural networks for tool breakage detection in turning[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42(1): 67- 70.
- [4] Li xiaoli. On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform[J]. International Journal of Machine Tools-& M anufacture, 1999, 39: 157- 164.
- [5] 陈逢时. 子波变换理论及其在信号处理中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 赵松年,熊小芸. 子波变换与子波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [7] 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.

Analysis of tool breakage in CNC manufacturing using wavelet transform

XU Shu-xin, ZHAO Ji, WANG Hong-gang

(College of Mechanical Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025, China)

Abstract: The paper introduces the features of the wavelet transform in contrast to the FT and FFT. Combining with tool breakage signal, the fast wavelet transform - Mallat algorithm is analyzed. It analyzes the technique of extracting the spindle motor current of the Machining Center, correspondingly, points out that Hall current sensor is a very efficient way. As the signal of tool breakage is transient, wavelet transform is used to analyze the signal of tool breakage in CNC milling and a successful example of the method is adduced to get the characteristics of the signal of tool breakage. Experimental results show that the method of MRA can not only locate the position in time-frequency domain, but also easily monitor the manufacturing system. The method can be applied effectively to signal processing of monitoring tool breakage.

Key words: wavelet analysis; tool breakage; DC current signal

作者简介: 许树新(1964-),男,黑龙江省佳木斯人,现为吉林工业大学副教授。1987年毕业于吉林工业大学机械学专业获工学学士学位;1990年6月获工学硕士学位;现在吉林工业大学机械制造专业攻读博士学位。研究领域为机械制造智能化加工。已发表论文20余篇。