

基于工作电流信号的车床刀具故障分析

官 金, 李国富*, 陈志刚

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在车刀的故障分析中, 选择机床加工时的工作电流作为故障检测的分析对象, 分别利用傅里叶变换和小波包分析法提取刀具故障的傅里叶特征和小波包特征, 联合采用提取的两种特征以实现刀具故障的诊断。研究表明, 提取的车床刀具故障特征参数的波动特性与车刀故障的发生存在联系, 从而为分析判断车床刀具故障的发生提供了一种新的思路和方法。

关键词: 小波包分析; 傅里叶变换; 工作电流; 刀具故障分析

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 01-0113-04

与刀具磨损相比, 金属切削加工过程中刀具的非正常损坏如破损、崩刃、热塑变形等的在线检测更为重要, 因为刀具的非正常损坏是突发性的, 如不能及时排除, 将会导致加工过程的中断或工件的报废及机床的损坏, 严重的可能会引起加工事故, 造成重大损失^[1]。

目前对机床刀具诊断的方法主要集中在切削力监测技术、电机负载监测技术、声发射检测技术和多传感器融合监测技术等, 这些方法中传感器的安装普遍存在问题^[2-4]。电流法具有信息获取方便、信息集成度高、测试系统简单等特点, 可以有效地弥补其他检测技术存在的缺陷, 提升机床运行状态的监测与故障诊断能力^[5]。小波分析特别适合分析非平稳信号, 能同时提供非平稳信号时域和频域中的局部化信息^[6]。

笔者选用电流信号为车床车刀故障检测的分析对象, 并结合小波分析与傅里叶变换的信号处理方法, 从包含各种噪声信号的工作电流中提取出车床车刀故障特征, 对机床刀具的故障状态进行分析。

1 傅里叶变换与小波分析

1.1 傅里叶变换

基于傅里叶(Fourier)变换的信号频域揭示了时

间函数和频谱函数间的内在联系, 在传统的平稳信号分析和处理中发挥了极其重要的作用^[7]。

设 $f(x)$ 是以 2π 为周期的函数, 且 $f(x) \in L^2(-\pi, \pi)$, 那么 $\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-inx} \right\}_{n=0, \pm 1, \pm 2, \dots}$ 是 $L^2(-\pi, \pi)$ 的标准正

交化基, 则 $f(x)$ 可展开为:

$$f(x) = \sum_n \hat{f}(n) e^{-inx}, \quad (1)$$

式中,

$$\hat{f}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx$$

称为 $f(x)$ 的傅里叶级数, 其中 n 的取值为整数。傅里叶级数将函数分解成在一组归一化正交函数(也就是正弦波)上的叠加, 刻画了在频域的每个离散点上信号的成分。

此外, 傅里叶级数将信号分解为离散谱上函数的叠加, 但是在对频率变化敏感的某些应用中, 离散的频率信息线显得较为粗糙, 而傅里叶变换就是傅里叶级数在连续情况下的推广。

函数 $f(x) \in L^1(\mathbb{R})$ 的逆傅里叶变换定义为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt. \quad (2)$$

$F(\omega)$ 的逆傅里叶变换定义为:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} F(\omega) d\omega. \quad (3)$$

收稿日期: 2012-09-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://nbdxlg.paperopen.com/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1080429); 宁波大学研究生优秀学位论文培育基金(PY20110014)。

第一作者: 官 金 (1987-), 女, 江西抚州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机电测控. E-mail: litswee@163.com

*通信作者: 李国富 (1966-), 男, 浙江温岭人, 教授, 主要研究方向: 机电测控、制造系统工程. E-mail: liguofu@nbu.edu.cn

傅里叶变换是一种整体变换,对信号的表征或是完全在频域内,或是完全时域内。 t 与 ω 是2个相互排斥的变量。当采用傅里叶变换来分析信号的频域特性时,具有最好的频率分辨率。

1.2 小波包分析

小波包是由 Mickerhanser M V 和 Coifman R R 等人在小波变换理论的基础上进一步提出来的。它是一种比多分辨率分析更加精细的分析方法,能够对没有细分的高频部分进行进一步分解,从而提高时频分辨率。

笔者在此以一个三层分解为例对小波包分析进行说明,其小波包分解树如图1所示。

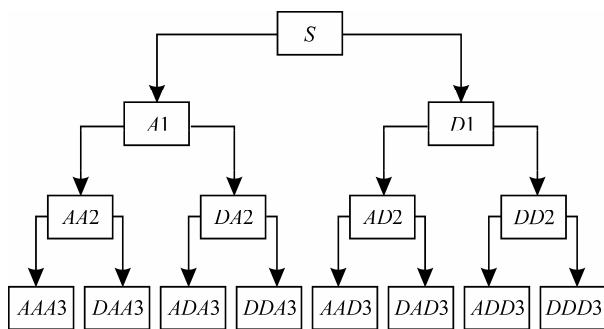


图1 小波包三层分解树结构

从图1可见, D 和 A 分别代表高频和低频, 数字则为小波包分解的层数, 其分解关系可表述为如下结构:

$$S = AAA3 + DAA3 + ADA3 + DDA3 + AAD3 + DAD3 + ADD3 + DDD3.$$

2 车刀故障特征信息的提取

2.1 傅里叶故障特征提取

由于电流信号具有信息获取方便、信息集成度高、测试简单等特点, 因而选择电流信号作为车刀故障分析的基础。采用 HFR-EKA 开环霍尔电流传感器采集 1 台 C2616-1B 型卧式车床工作的总电流信号, 采样频率为 50 000 Hz, 对采集到的电流信号进行傅里叶变换, 得到的傅里叶图谱如图2所示。

从图2中可以发现, 在 50 Hz 倍频谐波分量的幅值较为明显。由于不同加工状态(转速、切削用量等)对各倍频谐波分量的影响程度不同, 因此当机床的车刀发生异常时, 必然会对各谐波分量产生

一定程度的影响。但仅从幅值绝对值的变化来判断刀具是否发生故障是不科学的, 因为电流大小会直接影响傅里叶变换的幅值。故提取加工状态电流信号傅里叶变换后倍频谐波 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, ..., 850 Hz 处傅里叶变换幅值, 求各倍频谐波点处的幅值与 250 Hz 处的比值, 记为 λ , $\lambda = [x_1, x_2, \dots, x_{17}]$, 其中, $x_1, x_2, \dots, x_{17}$ 依次为 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, ..., 850 Hz 处幅值与 250 Hz 幅值处的比值。

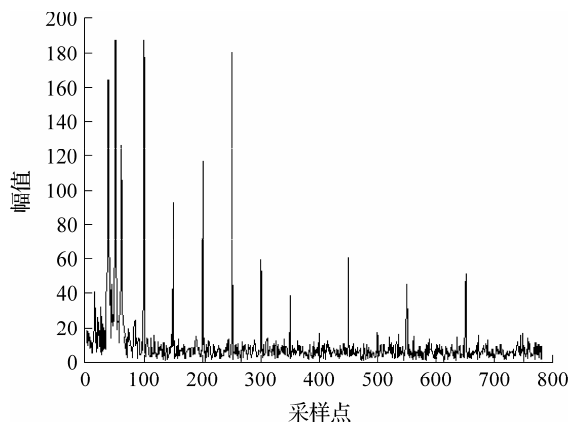


图2 加工电流信号傅里叶变换

2.2 小波包故障特征提取

特征信息提取是设备故障诊断的核心, 决定了状态识别的准确性。在机械设备的故障诊断中, 要求所提取特征信息能够准确反映设备的运行状态, 且对设备的异常状态有较高的敏感性。

信号不同频段内的能量分布可以通过小波包分析, 并以能量谱的形式表现出来; 利用小波包分析以及结合对信号的经验估计, 可以任意选择信号特定的频段和时段进行研究分析。当车床处于不同的加工状态, 小波包分解的部分频段内的能量就存在差异, 则存在一个或系列小波熵对车床的状态变化规律反映敏感。

设定载波频率为电网频率 50 Hz, 信号的采样频率为 50 000 Hz, 则傅里叶变换的最高频率 f_s 为 25 000 Hz; 并设车床的转速为 n , 则车床的转速频率特征为 $f = n/60$ 。如果分析车床的最高转速为 $1120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 则车床最高转速频率 $f = 1120/60 = 18.67 \text{ Hz}$ 。在车削的过程中, 在信号的转速频率段范围内必然包含了刀具加工状态的信息, 所以在进行小波包分解的过程中, 为了将工频频率与车

床转速特征分离开, 选择对电流信号进行 10 层分解, 各节点的频率范围为 $0 \sim f_s / 1024, \dots, 1023 f_s / 1024 \sim f_s$, 小波包分解的第一层重构信号的频率范围为 $0 \sim f_s / 2^{10}$ Hz, 即 $0 \sim 24.4$ Hz, 此时即实现了对转速频率与载波频率的分离。

当刀具发生失效时, 第一层重构信号的能量必然会发生变化, 其与各层分解重构信号能量的比值也必将发生变化, 通过大量的数据实验分析发现, 节点[10,0]小波包系数的 4 阶标准熵与节点[10,0], [10,5], [10,7], [10,10]的小波包系数的 4 阶标准熵的和中占有的比率对刀具失效比较敏感, 所以选取其作为状态诊断的特征向量, 记为:

$$D_0 = \frac{E_{(10,0)}}{E},$$

其中, $E = E_{(0,0)} + E_{(10,5)} + E_{(10,7)} + E_{(10,10)}$ 。

3 刀具故障诊断

图 3 和图 4 分别为车床在为主轴转速为 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 进给速度 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, 切削深度 1.0 mm , 加工工件为 45 钢, 刀具的材质为钨钴钛类中的 YT1 状态下加工时车刀处于正常和异常加工状态电流信号傅里叶变换后倍频谐波 100 Hz , 150 Hz , 200 Hz , $\dots$, 850 Hz 处傅里叶变换幅值与 250 Hz 处的比值图, 从图中可以发现, 正常加工和异常加工时, 2 个图形存在明显的差异, 在 350 Hz 到 800 Hz 之间, 正常加工状态 550 Hz 处的比值明显高于异常加工状态。因此, 各倍频谐波处的这种比值特征图可以作为刀具是否发生故障的初步依据。

在对 100 组数据分析中发现, 这种方法存在

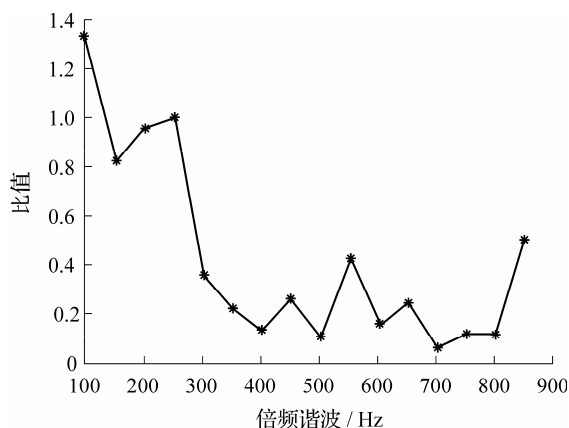


图 3 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 正常加工电流信号下的各谐波点比值

10%左右的误判率, 为了提高分析的可靠性, 在初步判断刀具是否处于故障状态后, 可选择加工电流信号的小波包特征对刀具的状态进行进一步的诊断。

表 1 为车床在不同加工状态及不同转速下能量的特征分布参量 D_0 。

表 1 车床 1 不同转速时的 D_0 值

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	D_0		
	空转	正常	故障
350	0.1983	0.2055	0.2218
450	0.2128	0.1975	0.2251
640	0.2110	0.1959	0.2182
800	0.2100	0.1988	0.2151

由表 1 可知, 当车床处于空转状态, 在不同转速下的 D_0 值差距不大, 维持在一个稳定的范围内, 且不同车床的 D_0 值维持的范围不同, 可以以此作为区分车床的 1 个特征参量, 当车床处于正常加工状态时, D_0 值与其处于空转状态时总体差距不大, 当刀具发生故障时, D_0 的值会发生一个较大的突变, 或者增大或者减小。经过大量的数据验证, 同样存在上面的规律, 所以 D_0 可作为车刀是否发生故障的依据。用这种小波包频带能量监测的方法通过相应频带里能量比例的变化可有效区分设备的各种工作状态。

4 结论

利用车床工作电流信号作为其刀具故障分析的对象和基础, 以及采用霍尔电流传感器的非入侵式安装方法采集车床加工的电流信号的方法,

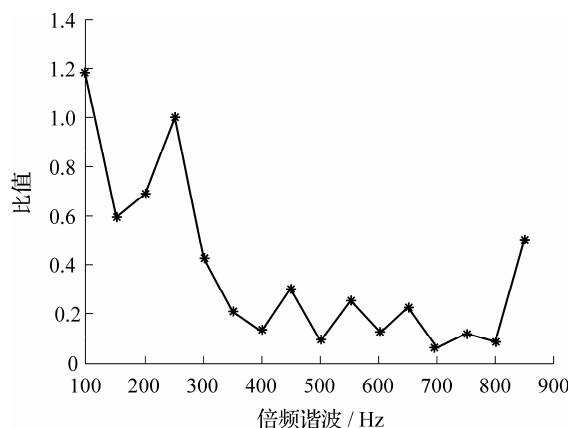


图 4 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 异常加工电流信号下的各谐波点比值

有利于简化信号的采集和分析过程。在车刀故障分析过程中,首先对机床工作电流进行傅里叶变换,并从对应的傅里叶变换频谱图中各倍频谐波点与 250 Hz 处的比值图中发现正常加工状态与异常加工状态存在明显差异,并以此作为刀具发生故障的初步依据,然后利用提取的小波包分解特征对刀具的状态进行进一步的诊断,提高了诊断的可靠性。

参考文献:

- [1] 宋雪萍, 李朝峰, 马辉, 等. 基于小波分析的旋转机械故障诊断技术及其实验研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17:328-331.
- [2] Tony Boutros, Ming Liang. Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25:2102-2124.
- [3] 何文波, 刘士荣, 冯志敏. 基于多分辨率奇异谱熵和支持向量机的轴系故障诊断及其应用[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2006, 19(4):476-480.
- [4] 何德虎, 谢建. 基于小波分析的液压系统故障特征提取研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(13):145-147.
- [5] 李思远, 闫建国. 小波分析在传感器故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(4):772-775.
- [6] 何学文, 孙林, 付静. 基于小波分析和支持向量机的旋转机械故障诊断方法[J]. 中国机械工程学报, 2007, 5(1):86-90.
- [7] 陈果. 一种改进的谐波小波及其在转子故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1):9-16.

Current Signal Based Failure Analysis on Lathe Tool Fault

GUAN Jin, LI Guo-fu*, CHEN Zhi-gang

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the cutter failure analysis, the working current is measured for analytical purposes. The gauged current is further decomposed using wavelet analysis, and the high-frequency and low-frequency component of the breakdown structure is respectively reconstructed. The result shows that the fluctuation characteristic of the extracted parameters is related to the cutter failure, and the finding provides a new idea and method for the tool fault detection and analysis.

Key words: wavelet analysis; Fourier transformation; working current; cutter failure analysis

(责任编辑 章践立)