

主轴电流信号中铣削力成分的时频分析及提取方法研究

毛新勇^①, 刘红奇^①, 李斌^{①②*}

① 华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074;

② 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

* E-mail: libin999@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009-03-18; 接受日期: 2009-06-30

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2005CB724100)和国家自然科学基金项目(批准号: 50875098)资助

摘要 通过电流信号间接监测切削力波动的方法在刀具状态检测中得到了广泛的应用。但由于实测电流信号具有时变非平稳特性, 使得从电流信号中提取有用信号表征成分存在一定的困难。本文针对电流信号的非平稳时变特性, 基于切削力信号的频域分析, 应用小波分析方法来重构电流信号中的切削力表征信号量。切削力测量试验结果表明文中所提出的重构方法能成功地应用于主轴电流信号, 完成加工切削力波动的监测。

关键词

刀具监测
主轴电流
切削力
小波变换

刀具状态检测是提高数控机床加工质量和效率的主要因素之一^[1]。一般用于刀具破损和磨损的监控是通过对加工过程信号, 如切削力, 振动信号, 主轴电流及电压信号, 伺服电机的电流信号以及声信号^[2,3]。采用何种信号取决于信号测量的成本以及传感器安装和采集对加工环境的要求程度。Sun 等人^[4]基于声信号利用 Bayesian 假设采用支持向量机方法提取出有效的刀具状态特征量。Wang 等人^[5]基于隐式马尔科夫模型对刀具状态分类, 采用向量量化方法从振动信号中提取出刀具状态特征量。而 Balazinski 等人^[6]通过研究则指出: 切削力相对于振动信号和声信号是更为有效的指示信号。但切削力测量所采用的测力仪, 装置价格昂贵, 难以适用工程应用。而基于电流测量通过表征实际切削力的方式则是一个有效方便的方法^[7]。Lee 等人^[8]利用小波方法分析了主轴电流信号的突变特征与刀具破损的相关性, 从而对

刀具的破损进行检测。Xu 等人^[9]则直接利用了主轴电流信号对建立的切削力模型进行了参数标定, 从而省去了复杂的切削标定试验。但是金属切削加工是一个非常复杂的过程, 影响进给电机电流的因素很多。Jeong 等人^[1]指出只通过伺服电机的电流信号分析, 很难得到信号中满意的切削力表征量, 在加工噪声环境下两者的相关程度较低。李斌利用带通滤波器对主轴电流滤波并与切削力信号进行相关分析, 结果显示力信号和主轴电流信号两者相关程度较高^[11]。Bhattacharyya 等人^[12]则利用主轴电流和电压信号两者合成功率率信号, 通过对傅立叶分解和多元线性回归方法来重构切削力的模型。

本文就主轴电流中存在的时变非线性干扰, 基于切削力信号的时频分析, 应用小波重构切削力波动的表征量, 可在实际加工过程中无需测力仪, 直接基于主轴电流信号实现对切削力的实时监测, 相关

引用格式: 毛新勇, 刘红奇, 李斌. 主轴电流信号中铣削力成分的时频分析及提取方法研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(11): 1824—1827
Mao X Y, Liu H Q, Li B. Time-frequency analysis and detecting method research on milling force token signal in spindle current signal. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(10): 2810—2813, doi: 10.1007/s11431-009-0234-x

的设计切削试验给出了验证结果比较.

1 交流主轴驱动系统建模

如图 1 所示, 主轴系统包括主轴伺服电机、电机轴、主轴等, 来自于电机电枢的信号控制主轴运转. 主轴电机的输出扭矩不仅包括金属切削扭矩, 还包括轴承等引起的摩擦力矩, 其系统方程可表示为

$$J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M = T_e - T_f, \quad (1)$$

式中 J 为电机等效惯量, ω_M 为主轴电机角速度, B 等效阻尼系数, T_e 为电机输出扭矩, T_f 为摩擦力矩.

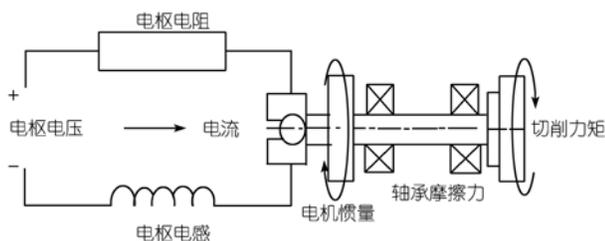


图 1 主轴驱动系统示意

切削扭矩可以看做是主轴电机系统的一个输入扰动, 而电机系统摩擦扭矩本质上是粘性和库伦摩擦, 其模型是时变和非线性的.

考虑在主轴转速不变的情况下, 有 $\frac{d\omega_M}{dt} = 0$, 且非切削空转状态下的输出扭矩为转速的二次函数近似, 则切削状态下的输出扭矩为静态下输出量与切削状态下输出量的线性叠加.

而在交流伺服系统中, 如果采用等效的直流电流来计算电机的转矩, 则等效电流正比于电机静态输出扭矩与切削扭矩输入的叠加量.

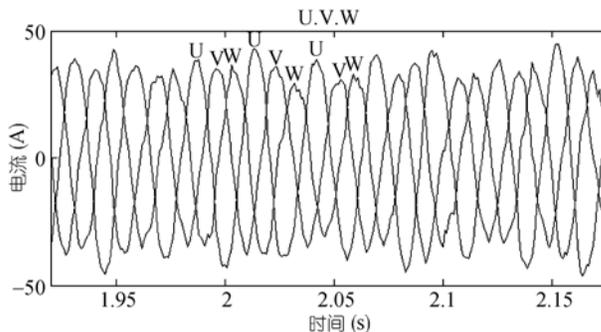
因为电机静态扭矩在一确定电机转速下可认为恒值不变, 故考虑刀具切入切出工件时切削力的周期变化情况下, 电机有效电流的波动是由主轴系统的切削输入扭矩的波动引起的. 故对切削力的监测可间接通过测量分析电机有效电流得到反映力的表征量.

2 主轴电流信号试验分析

试验机床鸿庆 DM4600 数控三轴铣床, 数控系统为华中数控世纪星, 刀具采用三齿螺旋立铣刀, 直径

25 mm, 材质为硬质合金, 工件为调质 45# 钢, 加工方式顺铣全切宽, 进行不同加工参数的实验.

利用霍尔传感器采集主轴电机三相电流信号, 连接截止频率为 60 Hz 的模拟低通滤波器, 数据采样频率 1 kHz. 图 2 为主轴转速 800 rpm, 进给速度 150 mm/min, 切削深度 2.0 mm 时的电机 U, V, W 三相电流时域信号, 图 2 中近似正弦信号的波峰周期性波动正是由切削扭矩变化引起的.



切削条件: 主轴转速 800 rpm, 进给速度 150 mm/min, 切削深度 2.0 mm

图 2 主轴电机三相电流信号时域表示

对交流电流转换成直流电流的方法是均方根法, 如(2)式所示.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}}. \quad (2)$$

为对切削力波动进行监测, 故对电流的均方根信号去除常量偏移, 其结果如图 3 所示. 可见图 3 中的信号比较复杂, 由(1)式可知, 非线性和时变的摩擦力矩引起的有效电流变化量, 使得主轴电机系统对于正弦输入的切削力的电流响应很难服从线性系统控制规律.

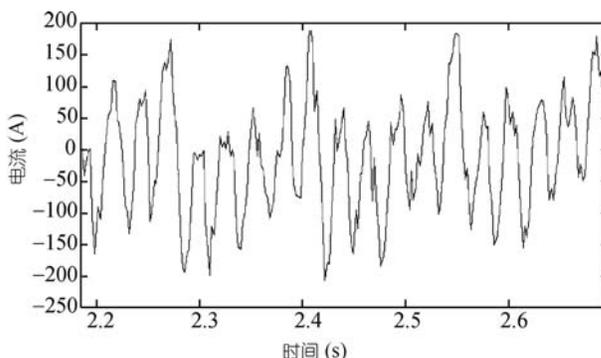


图 3 主轴电机三相电流均方根信号时域表示

3 切削力信号试验分析

为辨识切削力与电机有效电流之间的函数关系, 利用切削力信号对电流信号进行辅助分析. 测力平台采用 Kistler9253B23 型测力台, 电荷放大器为 5070A, 输出力信号. 图 4 为切削过程中进给方向的 X 向力信号时域图.

由图 4 可知切削力信号相对电机有效电流信号周期性和信噪比都有很大改善. 信号主频率大约为 40 Hz, 考虑转速 800 rpm, 切削刀具为螺旋立铣刀 3 刃, 故其切削频率为

$$n_{\text{主轴转速}} \times 3 = \frac{800}{60} \times 3 = 40 \text{ Hz.}$$

因为时变非线性的摩擦力矩影响, 从输出的电流信号中提取出输入力信号的代表成分, 很难利用线性系统的解决方法.

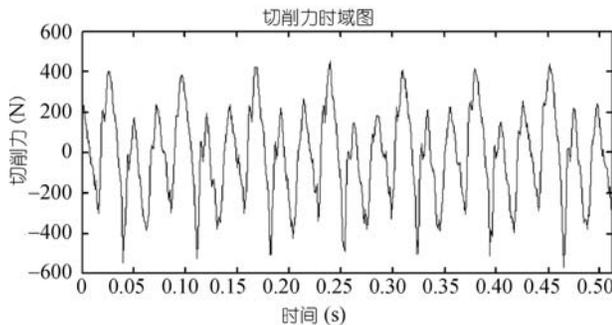


图 4 进给方向切削力信号时域表示

主轴转速 800 rpm, 进给速度 150 mm/min, 切削深度 2.0 mm

4 电流信号的小波重构

由于主轴系统中时变非线性摩擦力矩的影响, 主轴电机电流信号与切削力的信号关系复杂, 若利用传统的低通滤波方法, 可能会导致所提取的电流信号不能精确地反映切削力的真实变化; 或者利用传统的带通滤波方法, 则不能处理主轴转速发生变化时的工况.

小波分析方法是利用尺度和移位两维的自动变化对非平稳信号进行分析.

故对主轴电机电流的均方根信号利用 db3 小波对电机电流均方根信号进行 7 层分解, 可得各层小波系数.

随着尺度因子的减小, 原始信号的频带逐层细分, 各时间段内各频带所包含的电流信号成分将清晰展出来. 与铣削力对应的电流成分分布于 A3 层. 随后利用最低层低频尺度系数(A3)进行重构, 图 5 为利用电流信号和力信号在 A3 层构的逼近效果.

由图 5 可以看出, 重构后的电流信号在峰值的变化上与铣削力信号是对应的.

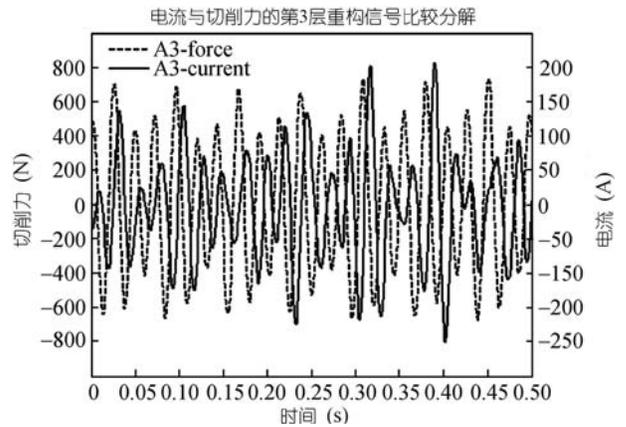


图 5 重构电流量表征信号与铣削力信号

主轴转速 800 rpm, 进给速度 150 mm/min, 切削深度 2.5 mm

因为切削刀具的安装偏心, 所以 3 刃对应的力幅值大小交替变化, 而电流对切削力每齿跟踪准确, 反映出了每齿切削力的幅值变化. 且当主轴转速发生变化时, 小波处理之后的电流信号能跟踪铣削力的频率变化.

图 6 为电流均方根信号中提取的力表征信号与重构的力信号的功率谱图, 两者的主频率一致, 其纵坐标数值的差异取决于各信号所取的单位值. 图 6 中两重构信号也含有 30 Hz 的切削基频率 10 Hz 的倍频信号.

5 结论

本文针对电流信号的非平稳时变特性, 基于切削力的时频分析, 运用小波分析来重构电流信号中的切削力表征信号量. 切削力测量试验结果表明文中所提出的重构算法能成功地应用在主轴有效电流信号中完成加工切削力波动的监测.

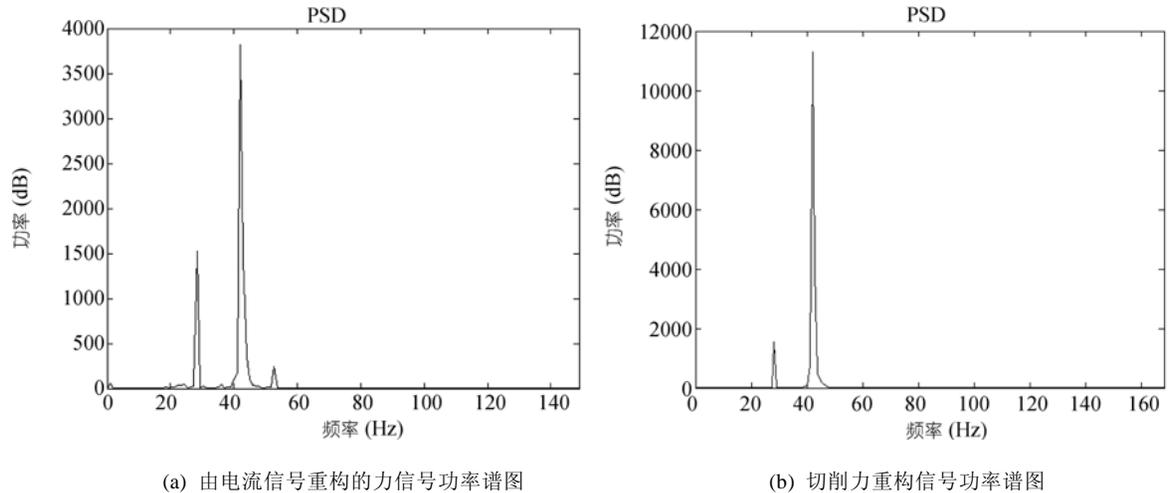


图 6 电流均方根信号中提取的力表征信号与重构的力信号的功率谱图

参考文献

- 1 Satish B, Soundar R K, Akhlesh L, et al. Fractal estimation of flank wear in turning. *ASME J Dyn Syst Meas Cont*, 2000, 122(1): 89—94
- 2 Dimla E D. Sensor signals for tool wear monitoring in metal cutting operations: review of methods. *Int J Mach Tool Manuf*, 2000, 40(9): 1073—1098 [\[DOI\]](#)
- 3 Karuda S, Bradley C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Compu Indust*, 1997, 34(1): 55—72
- 4 Sun J, Hong G S, Rahman M, et al. Identification of feature set for effective tool condition monitoring by acoustic emission sensing. *Int J Prod Res*, 2004, 42(5): 901—918 [\[DOI\]](#)
- 5 Wang L, Mehrabi M G, Kannatey E J R, et al. Hidden Markov model-based tool wear monitoring in turning. *J Manuf Sci Eng*, 2002, 124(3): 651—658 [\[DOI\]](#)
- 6 Balazinski M, Czogala E, Jemielniak K, et al. Tool condition monitoring using artificial intelligence. *Eng Appl Artif Intel*, 2002, 15(1): 73—80 [\[DOI\]](#)
- 7 Bernhard S. On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research. *Mech Syst Sig Proc*, 2002, 16(4): 487—546
- 8 Lee B Y, Tarng Y S. Application of the discrete wavelet transform to the monitoring of tool failure in end milling using the spindle motor current. *Int J Adv Manuf Technol*, 1999, 15(2): 238—243
- 9 Xu M, Jerard R B, Fussell B K. Energy based cutting force model calibration for milling. *Comput Aided Des Appl*, 2007, 4(1-4): 341—351
- 10 Jeong Y H, Cho D W. Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine. *Int J Mach Tool Manuf*, 2002, 42(14): 1559—1566 [\[DOI\]](#)
- 11 Li B, Zhang C, Liu H Q, et al. Indirect measurement of the milling forces based on spindle motor current (in Chinese). *J Huazhong Univ Sci Technol*, 2008, 36(3): 5—7
- 12 Bhattacharyya P, Sengupta D, Mukhopadhyay S, et al. On-line tool condition monitoring in face milling using current and power signals. *Int J Prod Res*, 2008, 46(4): 1187—1201 [\[DOI\]](#)