

综 述

# 基于切削功率木工刀具 磨损在线监测的研究现状

董伟航<sup>1</sup>, 胡 勇<sup>2</sup>, 田广军<sup>2</sup>, 郭晓磊<sup>1\*</sup>

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037;  
2. 博深普锐高(上海)工具有限公司, 上海 201316)

**摘 要:** 刀具智能化监测发展迅速, 目前已有多种信号监测方式, 选择合适的监测信号能够提高刀具磨损在线监测的精确度、优化产品加工质量、降低企业的生产成本。对加工时影响切削功率的主要因素、功率采集方法、信号处理方法与特征提取、监测模型进行综述, 分析其关键技术, 旨在加快木制品制造智能化进程, 丰富木工刀具磨损在线监测理论。

**关键词:** 木材切削; 切削功率; 功率采集; 刀具磨损; 在线监测

中图分类号: TS642 文献标识码: A 文章编号: 2095-2953(2020)10-0004-05

DOI:10.13279/j.cnki.fmwe.2020.0109

## Research Status of Online Woodworking Cutter Wear Monitoring Based on Cutting Power

DONG Wei-hang<sup>1</sup>, HU Yong<sup>2</sup>, TIAN Guang-jun<sup>2</sup>, GUO Xiao-lei<sup>1\*</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037, China;  
2. Bosun Prewi(Shanghai) Tool System Co., Ltd, Shanghai 201316, China)

**Abstract:** Recently, the intelligent monitoring of cutting tools has developed rapidly. A variety of signal monitoring methods have been adopted. Selecting appropriate cutter monitoring signals can improve the online monitoring accuracy of tool wear, optimize product processing quality and reduce production costs of enterprises. The overview of main factors affecting cutting power, cutting power collecting methods, signal processing methods, feature extraction, and monitoring models was conducted, with key technologies analyzed with the aim to accelerate the intelligent process of wood product manufacturing and enrich the online monitoring theories related to woodworking cutter wear.

**Key words:** wood cutting; cutting power; power collection; cutter wear; online monitoring

木工刀具在切削过程中受加工参数、机床性能等因素影响有不同程度的刀具磨损<sup>[1-2]</sup>, 致使木质产品边部表面撕裂、挖切等, 影响木质产品表面粗糙度和整体美观性<sup>[3-4]</sup>。及时对磨损的刀具进行更换, 可以提高产品质量, 降低产品残次率与生产成

本。相关研究数据表明, 采用准确可靠的刀具磨损状态监测技术可提高数控机床使用率 50%, 生产成本降低近 30%<sup>[5]</sup>, 刀具磨损在线监测对木质产品智能制造具有重大意义。

目前, 刀具磨损监测方法大致分为直接监测法

收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20\_0273)

第一作者简介: 董伟航(1997-) 男, 硕士研究生, 研究方向为木材加工装备工程, E-mail: dwhnjfu@163.com。

\* 通讯作者: 郭晓磊(1980-) 男, 副教授, 博士, 研究方向为木材加工装备工程, E-mail: youngleiguo@hotmail.com。

和间接监测法两类<sup>[6-7]</sup>。直接监测法通过测量刀具的后刀面磨损量来判断刀具磨损状态,具有表现磨损直观、精度高的优点。虽然直接监测法监测精度高,但冷却液、灯光和切屑会影响测量结果,不利于实际生产应用。间接监测法是通过分析切削过程中产生的信号与刀具磨损的关联来识别刀具磨损状态,间接监测法监测精确度不如直接监测法高,对信号需要进行分析与特征提取,但可以在切削过程中对刀具进行实时监测,适合于实际生产应用。

使用间接监测法监测刀具磨损时,由于刀具磨损直接影响切削力变化,因此一般根据切削力来对刀具磨损进行判断,但对切削力进行监测时发现测力仪较为昂贵且传感器安装受工件体积与装夹方式的影响,不便于大规模使用。而在使用声发射信号、振动信号对刀具磨损进行监测时,所提取的信号容易受机床振动、外部噪声和工件装夹的干扰,也不能广泛使用。切削功率与切削力有直接联系,切削功率随切削力增大而增大,因此切削功率可用于反映刀具磨损状态,而且功率传感器相对便宜,不受工件装夹影响,适合大规模生产应用。

基于此,本文针对木工刀具磨损在线监测,围绕影响切削功率的主要因素、功率采集方法、信号处理方法与特征提取、监测模型进行介绍,并分析其关键技术,以期为木工刀具磨损在线监测的研究提供借鉴。

## 1 影响切削功率的主要因素

机床的切削功率受刀具磨损状态的影响,刀具磨损严重,切削功率会逐渐增大<sup>[8]</sup>。贺军胜等<sup>[9]</sup>在竹材切削加工时发现,切削功率与刀具磨损量、刀具楔角有着明显的正相关线性关系。

在木材切削中,切削功率 $P_c$ 可由主切削力 $F$ 与切削速度 $V$ 乘积表示,即:

$$P_c = F \cdot V \quad (1)$$

式中: $F$ 为与切削速度方向平行的切削力; $V$ 为切削速度。

切削力在车削与铣削加工中分别用式(2)、式(3)表示:

$$F_c = C a_p^x f_c^y v_c^n K \quad (2)$$

$$F_x = C a_p^x f_x^y Z^Z a_e^u D^{-q} n^{-w} K \quad (3)$$

式中: $F_c$ 为车削切削力; $a_p$ 为背吃刀量; $f_c$ 为车削每转进给量; $F_x$ 为铣削切削力; $f_x$ 为铣削每齿进给量; $Z$ 为铣刀齿数; $a_e$ 为铣削宽度; $D$ 为铣刀直径; $n$ 为主轴

转速; $C$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $u$ 、 $-q$ 、 $-w$ 、 $K$ 为对应的指数。

结合式(1)、式(2)和式(3),可以看出车削切削功率受背吃刀量、每转进给量与切削速度的影响,铣削切削功率受背吃刀量、每齿进给量、铣削宽度、刀具参数与切削速度的影响。李黎等<sup>[10]</sup>的研究表明,木材切削时切削功率还受到木材材性、工件几何尺寸、材种、切削方向、木材含水率、温度、切削路径等的影响,因此在选择功率信号作为监测信号时,以上各种参数都要考虑。

## 2 切削功率采集方法

切削功率 $P_c$ 是机床电机主轴驱动刀具切削加工材料时损耗的功率。目前机床切削功率采集方法主要有三种,一种是使用传感器测量机床控制箱电机输出端电流或电压计算得出功率值,另一种是通过计算材料去除率间接得到切削功率值,第三种是通过传感器直接采集处理得到功率信号。下面对三种常用的切削功率采集方法进行分析。

### 2.1 电流电压计算法

电流电压计算法是直接在机床中接入电流表和电压表,测量切削过程中电流和电压,然后根据式(4)计算出切削功率,计算公式为:

$$P_c = UI \cos \varphi \quad (4)$$

式中: $U$ 为机床电压; $I$ 为机床电流; $\cos \varphi$ 为机床电机功率因数。

唐宗军等<sup>[11]</sup>使用该方法利用互感器测量螺杆铣削过程中主轴电机电压,对电压整流滤波后,通过式(4)计算出功率值,最后使用PCL-812PG采集卡采集功率数字信号并进行A/D转换成模拟信号。该方法只能判断出不同加工位置的功率变化情况,而且忽略了主轴电机空转时也产生电流,不能得出准确的切削功率,因此无法应用于刀具磨损在线监测。

### 2.2 材料去除率计算法

一些学者提出机床切削时其切削功率由两部分组成,一部分为固定能耗功率,另一部分为随切削参数变化的可变功率,而可变功率与材料去除率成比例关系,比例系数可以通过实验数据拟合得到<sup>[12-13]</sup>。

Gutowski等<sup>[14]</sup>根据该理论,通过多组实验拟合出二者比例系数后,建立了一种铣床的铣削功率模

型,该模型为:

$$P_c = P_0 + k \times MRR \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为空载功率;  $k$  为切削功率与材料去除率比例系数;  $MRR$  为材料去除率。

Li 等<sup>[15]</sup> 在该理论基础上,考虑主传动系统损耗、加工材料以及机床特性,提出了一种铣削功率模型,该模型为:

$$P_c = P_0 + k_1 \times n + b + k_0 \times MRR \quad (6)$$

式中:  $P_0$  为空载功率;  $b$  为主传动系统功率损耗;  $k_0$  和  $k_1$  为模型拟合系数;  $MRR$  为材料去除率。

使用材料去除方法获取切削功率时,实验量与计算量较少,但使用不同的切削参数组合获得相同的材料去除率时,实际测量的切削功率值并不相同<sup>[16]</sup>,因此该方法也无法应用于刀具磨损在线监测。

### 2.3 机床能耗特性算法

根据机床能耗特性可以将电机主轴输入功率  $P_{sp}$  分为主轴空载功率  $P_u$ 、切削功率  $P_c$  以及载荷损耗功率  $P_{ad}$ ,即:

$$P_{sp} = P_u + P_c + P_{ad} \quad (7)$$

电机主轴输入功率  $P_{sp}$  和主轴空载功率  $P_u$  可以通过传感器从主轴电机输入端测取,但附加载荷损耗功率  $P_{ad}$  的形成比较复杂,主要为电机和机械传动部分在切削状态下产生的附加电损和机械消耗,尚不能直接测量。而在数控机床切削时,载荷损耗功率  $P_{ad}$  可以近似表示成切削功率  $P_c$  的二次函数关系<sup>[17]</sup>,即:

$$P_{ad} = a_1 P_c^2 + a_0 P_c \quad (8)$$

式中:  $a_0$  与  $a_1$  为附加载荷损耗系数,可通过最小二乘法拟合得到。

将式(8)代入式(7)则有:

$$P_c = \frac{-(1 + a_0) + \sqrt{a_1^2 + 4(1 + a_0)(P_{ad} - P_u)}}{2(1 + a_0)} \quad (9)$$

通过式(9)即可计算出主轴切削功率。Hu 等<sup>[18]</sup> 使用该方法在车削 C45E4 时采集实时切削功率,结果发现所获取的实时切削功率误差仅为 5%,而使用电流电压计算法和材料去除率计算法采集切削功率时,误差率最低为 10%,最高为 24.09%。机床能耗特性算法不会因为加工材料特性不同而造成采集的切削功率与实际功率存在误差,对于不同的机床,只需重新拟合附加载荷损耗系数即可,因此该方法适用于刀具磨损在线监测。

## 3 切削功率信号的处理与特征提取

功率传感器采集的原始切削功率信号需要处理并提取信号中能反映刀具磨损状态的有用特征,为建立监测模型做准备。目前功率传感器采集的信号分为数字信号和模拟信号两种,下面分别介绍两种信号的处理方法。

### 3.1 防脉冲干扰滑动平均滤波法

原始切削功率数字信号由于电流波动会产生噪声和干扰,造成信号失真,因此对采集的切削功率数字信号需要进行处理。目前常用的数字信号处理方法有平均值滤波、中值滤波、限幅滤波,以上方法各有缺点,如不能完全消除干扰、滤波效果和平滑度差等。而防脉冲干扰滑动平均滤波法融合了平均值滤波和中值滤波的优点,能消除功率信号中的噪声与干扰<sup>[19]</sup>,避免信号失真。

万腾等<sup>[20-21]</sup> 使用防脉冲干扰滑动平均滤波法对原始功率信号进行消噪处理,发现原始信号中干扰与噪声部分基本消除,有效部分得到完好保存。防脉冲干扰滑动平均滤波法计算简单,效果好,能极大地提高功率信号的精度,适用于刀具磨损在线监测。

### 3.2 离散小波变换(DWT)

目前对原始切削功率模拟信号提取特征的方法为时域、频域和离散小波变换。时域分析和频域分析是模拟信号分析中两种常用的方法,但只能应用于平稳信号,而功率信号是不平稳信号,使用离散小波变换能有效地提取功率信号中与刀具磨损状态相关的特征。

离散小波变换是对切削功率进行时频域分析,提取切削功率中近似系数和细节系数来反映刀具磨损状态的变化。离散小波变换可以在任意尺度观察信号,分解层数越多效果越明显,对含有噪声与干扰的功率信号,主要特征蕴含在细节系数中。

设有信号  $f(n)$ , 其中  $n=1, 2, 3, \dots, M$  和  $j \geq j_0$ 。通过以下方式近似离散信号:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k W_{\theta}[j_0, k] \phi_{j_0, k}[n] + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k W_{\varphi_j, k}[n] \quad (10)$$

式中:  $f(n)$ 、 $\phi_{j_0, k}[n]$ 、 $\varphi_{j_0, k}[n]$  是在  $[0, M-1]$  中定义

的离散函数, 总共  $M$  个点。然后采用内积来获得小波系数:

$$W_{\phi}[j_0, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f[n] \phi_{j_0, k}[n] \quad (11)$$

$$W_{\varphi}[j, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f[n] \varphi_{j, k}[n] \quad j \geq j_0 \quad (12)$$

式中:  $W_{\phi}[j_0, k]$  为近似系数;  $W_{\varphi}[j, k]$  为细节系数。

Milad 等<sup>[22]</sup>对铣削过程中采集的切削功率使用离散小波变换进行处理, 发现正常刀具的切削功率频率曲线与磨损刀具相比逐渐向左偏移, 能够明显区分刀具磨损状态, 因此使用离散小波变换提取的近似系数与细节系数可以作为切削功率与刀具磨损的相关特征。

## 4 监测模型

在提取切削功率中与刀具磨损状态相关的特征后, 还要将相关特征输入到监测模型中对刀具磨损状态进行判断。目前, 针对切削功率的刀具磨损状态监测模型建立方法有响应面法、支持向量机和概率神经网络, 下面对三种方法的特点进行分析。

### 4.1 响应面法

响应面法是通过使用拟合多项式建立回归模型, 建立响应量和自变量之间的函数关系, 表达式为:

$$y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \sum_i \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (13)$$

式中:  $y$  为响应量;  $x_i$  为自变量;  $\beta_i$  为函数的系数;  $\varepsilon$  为模型误差。

李聪波等在使用硬质合金刀车削 45 钢时, 使用响应面法建立了切削功率与刀具磨损量及加工参数之间的回归模型, 并对模型进行了方差分析, 发现切削功率函数拟合程度良好, 能有效预测刀具磨损状态。响应面法具有通过极少的实验即可得出回归模型的优点, 但其明显的缺点是无论选择 BBD (Box-Behnken Design) 还是 CCD (Central Composite Design), 若选取的实验点不是最佳, 则建立的回归模型准确度低, 因此在使用时需要确定各因素的水平范围, 同时回归模型只能反映切削功率与刀具磨损量之间的影响规律, 不能准确地识别刀具磨损状态。

### 4.2 支持向量机

支持向量机 (Support Vector Machines, SVM) 作

为一种基于统计学理论的监督学习算法, 广泛应用于故障诊断领域。支持向量机是通过训练寻优样本数据, 创建超平面对数据进行分类识别。

谢楠等<sup>[23]</sup>采集了车削高碳铬轴承钢时的切削功率, 使用 PCA 提取了功率信号中影响最显著的成分作为支持向量机的输入样本, 训练寻优后建立模型对刀具磨损状态进行识别, 结果发现即使在样本条件较少的情况下, SVM 建模准确度也高于 BP 神经网络。支持向量机只能单一地识别刀具是否磨损, 无法对刀具寿命进行预测; 能够保证样本有限时模型的精度, 但样本范围需要通过实验确定。

### 4.3 概率神经网络

概率神经网络 (Probabilistic Neural Network) 是基于贝叶斯策略的前馈神经网络, 是通过建立 PNN 层次模型来对数据进行检验及分类。PNN 层次模型由四层组成, 分别为输入信号的输入层、包含传递函数的模式层、线性求和的累加层和具有判决功能的输出层。

Rodrigo 等<sup>[24]</sup>测量并分类了铣削过程中的切削功率和声发射信号, 同时提取信号特征, 使用概率神经网络建立刀具磨损状态监测模型, 发现监测精度达到 91%。概率神经网络训练方式简单, 扩充性能优异, 收敛速度快, 容错性高, 神经元数目固定, 便于硬件实现, 适合于刀具磨损实时监测, 但样本选择要有实验理论依据, 否则建立的监测模型精度差。

## 5 结束语

研究和开发先进刀具磨损在线监测技术对提高木工刀具切削性能和推进木质产品智能制造技术具有重大意义<sup>[25-26]</sup>。目前我国木工刀具磨损在线监测水平还较低, 本文围绕切削功率对木工刀具磨损在线监测的研究现状进行综述, 对其关键技术进行分析。切削功率可以有效地反映木工刀具磨损状态, 制定合理的功率采集和分析手段, 建立可靠的监测模型可以有效地提高木工刀具磨损在线监测的准确性, 同时也是后期木工刀具磨损在线监测的研究重点。

参考文献:

- [1] 郭晓磊, 田新春, 叶浩然, 等. 氟涂层刀具铣削饰面刨花板的切削性能[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 202-206.
- [2] 郭晓磊, 张清, 朱兆龙, 等. 切削速度对 CrN 涂层刀具铣削饰面刨花板表面质量及磨损的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 112-116.

- [3] 郭晓磊,何继龙,庆振华,等. 软硬涂层刀具材料与木质复合材料摩擦特性[J]. 林业科学 2017 53(11): 164-169.
- [4] 郭晓磊,朱南峰,王洁,等. 切削速度和切削厚度对纤维板切削力和表面粗糙度的影响[J]. 林业工程学报 2016 1(4): 114-117.
- [5] Rehorn A., Jiang J., Orban P. et al. Erratum to: State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review[J]. Int J Adv Manuf Technol 2005 26 942.
- [6] H. Shao, H. L. Wang, X. M. Zhao. A cutting power model for tool wear monitoring in milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2004 44(14).
- [7] Nitin Ambhore, Dinesh Kamble, Satish Chinchankar, et al. Tool Condition Monitoring System: A Review [J]. Materials Today: Proceedings 2015 2(4-5).
- [8] 李聪波,万腾,陈行政,等. 基于切削功率的数控车削批量加工刀具磨损在线监测[J]. 计算机集成制造系统 2018 24(8): 1910-1919.
- [9] 贺军胜,杨永福. 刀具磨损对竹材铣削能耗的影响[J]. 木材加工机械 2009 20(3): 17-19+37.
- [10] 李黎,李启岭. 木材切削加工机械切削功率可靠性计算[J]. 北京林业大学学报 1995(4): 94-98.
- [11] 唐宗军,肖永飞,王亚丽. 铣削过程中切削功率的数据采集和预处理[J]. 沈阳工业大学学报 2005(5): 15-17.
- [12] 皮森森,俞国胜,陈忠加,等. 铣削式割灌机切割刀具的设计及工作参数优化[J]. 林业机械与木工设备 2019 47(5): 18-23.
- [13] Thomas Behrendt, André Zein, Sangkee Min. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology 2012 61(1).
- [14] Gutowski Timothy G, Branham Matthew S, Dahmus Jeffrey B, et al. Thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes [J]. Environmental science & amp technology 2009 43(5).
- [15] Li L, Yan J, Xing Z. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling [J]. Journal of Cleaner Production 2013 52: 113-121.
- [16] Waldorf Daniel J., Kapoor Shiv G., DeVor Richard E.. Automatic recognition of tool wear on a face mill using a mechanistic modeling approach [J]. 1992 157(2).
- [17] Hu S, Liu F, He Y, et al. Characteristics of Additional Load Losses of Spindle System of Machine Tools [J]. Journal of Advanced Mechanical Design 2010 4(7): 1221-1233.
- [18] Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, et al. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools [J]. Journal of Cleaner Production 2012 27.
- [19] 邵华,林益耀. 刀具功率监控系统中功率信号的实时处理问题[J]. 机械设计与研究 1994(1): 19-21.
- [20] 万腾. 基于切削功率的数控批量加工刀具磨损在线监测方法及系统[D]. 重庆: 重庆大学 2018.
- [21] 常润安,胡俊. 盾构开仓检修更换刀具施工关键技术研究[J]. 森林工程 2020 36(4): 85-93.
- [22] Elgargni M A, Al-Habaibeh A. Analytical and comparative study of using a CNC machine spindle motor power and infrared technology for the design of a cutting tool condition monitoring system [C] // IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE 2015.
- [23] 谢楠,马飞,段明雷,等. 基于主成分分析与C-支持向量机的刀具磨损状态监测[J]. 同济大学学报: 自然科学版 2016 44(3): 434-439.
- [24] Rodrigo Henriques Lopes da Silva, Márcio Bacci da Silva, Amauri Hassui. A probabilistic neural network applied in monitoring tool wear in the end milling operation via acoustic emission and cutting power signals [J]. Machining Science and Technology 2016 20(3).
- [25] 叶雨静,徐伟,黄琼涛,等. 单板厚度对小径柚木单板层积材力学性能的影响[J]. 林产工业 2019 56(9): 6-10.
- [26] 汤琳,关惠元,代鹏飞,等. 五轴机床在粽角榫加工中的运用研究[J]. 家具 2019 40(3): 55-60.

(责任编辑 王琦)

• 行业内外 •

全球第一中文报刊网  
bookan.com.cn 博视网