

引文格式: 申望, 徐继泽, 费少华, 等. 基于主轴电流小波变换的刀具磨损状态监测[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 133-139.

SHEN Wang, XU Jize, FEI Shaohua, et al. Tool wear condition monitoring based on spindle current wavelet transform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 133-139.

基于主轴电流小波变换的刀具磨损状态监测*

申望¹, 徐继泽², 费少华¹, 尚江坤¹, 薛贵军¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 为消除机器人自动制孔系统中由于刀具磨损引起的孔径误差, 提出一种基于主轴电流离散小波变换的刀具磨损状态在线监测以及寿命预测方法。首先根据主轴电流信号的波动规律, 综合小波信号的正则性、相似性及曲线误差光滑性等要求, 选用3阶多贝西小波基对主轴电流信号进行离散分解。结合刀具磨损规律, 选取电流信号的3阶低频分解量作为刀具磨损状态监测的最有效特征, 将电流信号的1阶高频分解量进行离散傅里叶变换, 得到高频分量的频域特性, 为电磁兼容设计提供依据; 最后利用最小二乘法拟合刀具磨损量与主轴电流特征值的线性关系, 通过监测主轴电流特征值, 实现对刀具后刀面磨损量的在线监测以及刀具寿命预测。

关键词: 机器人制孔; 铝合金; 刀具磨损; 主轴电流; 离散小波变换

Tool Wear Condition Monitoring Based on Spindle Current Wavelet Transform

SHEN Wang¹, XU Jize², FEI Shaohua¹, SHANG Jiangkun¹, XUE Guijun¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] In order to eliminate the hole diameter error caused by tool wear in robot automatic drilling system, a method based on spindle current discrete wavelet transform for tool wear state online monitoring and life prediction was proposed. Firstly, according to the fluctuation law of the spindle current signal and the requirements of the regularization, similarity and smoothness of the curve error of the wavelet signal, the 3rd-order Daubechies wavelet base is selected to carry out the discrete decomposition of the spindle current signal. Combined with the law of tool wear, the 3rd-order low-frequency decomposition of the current signal is selected as the most effective feature of tool wear state monitoring. The first order high frequency decomposition of the current signal is carried out by discrete Fourier transform to obtain the frequency characteristics of the high frequency component, which provides a basis for electromagnetic compatibility design. Finally, the least square method was used to fit the linear relationship between tool wear and spindle current characteristic value, and realized the online monitoring of spindle tool wear state and the prediction of tool life by monitoring the characteristic value of spindle current.

Keywords: Robot drilling; Aluminium alloy; Tool wear; Spindle current; Wavelet transform

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.133

机器人自动制孔凭借其高度柔性化与灵活性, 目前在航空制造领域得到了广泛研究与应用。随着应用的深入, 对机器人自动制孔系统的加工精度、智能化程度、功能性等多方面要求越来越高, 铝合金、钛合金、复合材料等难加工材料被大量应用。这些难加工材料极易引起刀具磨损甚至崩刃, 导致加工孔几何形状、孔径、表面

粗糙度等加工指标超差。因此, 刀具状态是机器人制孔系统中的一项关键因素, 为了保证加工精度, 对刀具状态进行准确、实时监测显得尤为重要。

目前, 刀具磨损状态的监测方法已经得到了广泛研究^[1-3]。Li等^[4]提出了一种基于音频信号分析的刀具磨损监测新方法, 该方法不需要研究刀具磨损退化

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2022205B026)。

机制就能准确识别不同切削条件下的刀具磨损量,然而该方法需要建立复杂的刀具磨损预测模型,并进行大量复杂计算,集成该检测模型,在实际工程中难以适用。机器视觉也被应用于辅助监测刀具磨损状态,Küllaç 等^[5]利用工业相机对加工孔的纹理特征进行在线分析,并利用快速傅里叶变换从图像特征中提取反映刀具磨损状态的有效特征,识别准确率在95%以上。Malhotra 等^[6]将机器视觉应用于微铣削工艺中的刀具磨损监测,通过模糊C-均值聚类算法提取了图像中的有效特征,识别误差在5%以内。Zhu 等^[7]在此基础上,针对单图像提出了一种超分辨率方法,克服了传统机器视觉识别不够精确的缺陷。然而,通过机器视觉识别刀具磨损量的方法使得系统更加复杂,加工成本大幅增加,准确率也难以保证,因此在实际工程中并不适用^[8]。切削力是加工过程中一个非常重要的参数,刀具的磨损或者崩刃将直接引起切削力的急剧增加^[9-10]。为此,多种高精度多维力传感器被研发,用于监测加工过程中的各向切削力和扭转力,并将其用作刀具磨损的有效表征。目前最新的方式是在主轴刀柄内部嵌入多维力传感器,实现对侧向、轴向、扭向作用力的实时采集,并耦合一系列智能算法,实现对刀具磨损状态的智能监测,该方法可以将刀具磨损识别准确度提高到97.5%^[11-13]。然而这种方式增加了昂贵的传感器和数据采集系统费用以及后期使用维护成本,而且传感系统的嵌入破坏了刀柄的内部结构,会对加工性能产生一定的影响。

相比之下,主轴电流信号更容易获取,电流大小本质上是主轴扭矩大小的表征^[14-15]。由于主轴电流信号受多种加工因素影响,同时自身还受到外界电磁干扰,采集到的信号常常包含了多个频率段的噪声信号,因此仅依靠电流信号,难以准确识别刀具磨损状态^[16]。为此有学者引入了数字滤波技术^[17]。此外,小波变换为主轴电流信号的“分解”提供了很好的解决方案。Niaki 等^[18]将电流信号进行小波变换,得到的特征曲线只是大致反映了刀具磨损的趋向,难以实现对刀具磨损量的监测以及刀具寿命的预测。

综上所述,目前刀具磨损状态较低的认识准确率以及高昂的传感器成本,导致刀具磨损状态监测功能在实际工程项目中难以推广和普及。

本文基于主轴电流信号反馈,利用小波变换提取刀具磨损状态的电流特征值,对刀具磨损状态在线监测以及寿命预测方法进行研究,在不增加硬件成本的前提下,提升识别准确率,确保机器人制孔系统高效率、高精度制孔,对提升飞机装配质量,提高我国航空制造竞争力具有重要意义。

1 试验及方法

1.1 机器人自动制孔系统

机器人自动制孔系统主要包括KUKA工业机器人、AGV系统、多功能末端执行器、试刀架等,如图1所示。自动制孔过程:(1)利用激光跟踪仪建立机器人基坐标系及工件坐标系;(2)根据产品数模及加工工艺要求,生成离线加工程序;(3)根据基准孔位置,利用工业相机对加工孔位进行修正;(4)压脚作用到工件表面,利用压脚末端的4个距离传感器对加工孔的法矢进行修正;(5)最后进行制孔加工。主轴是加工系统的核心元器件,带动刀具进行旋转运动,对工件进行切削。

1.2 主轴电流采集系统

控制系统选用德国西门子公司840D sl数控系统,主轴选用德国INNA公司永磁同步电机(PMSM),额定功率为8.8 kW,额定转速为16000 r/min,利用西门子S120伺服驱动器进行转速控制,同时反馈主轴的运行速度、扭矩、电压、电流等信息。其中电流信号经过UVW三相电信号的载波、滤波由驱动器采集,采样频率为1000 Hz,并由上位机读取,如图2所示。上位机对采集的电流信号进行离散小波变换,再进行数据分析。



图1 机器人自动加工系统
Fig.1 Robot automatic drilling system

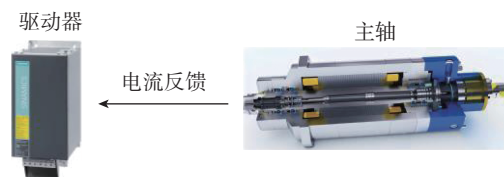


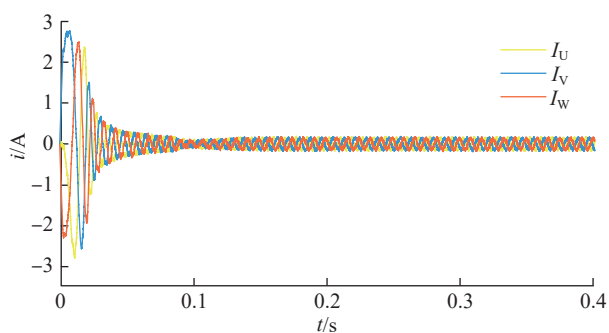
图2 主轴电流信号采集系统
Fig.2 Spindle current signal acquisition system

空载条件下,主轴从 0 r/min 加速到 2000 r/min,利用霍尔传感器采集了主轴 UVW 三相电流信号,采样频率为 1000 Hz。该信号在驱动器内部进行了截止频率为 100 Hz 的模拟低通滤波,结果如图 3(a)所示,三相电流存在固定的相位差,当主轴转速趋于稳定后,三相电流幅值也趋于稳定。一般情况会对主轴三相交流电流进行均方根计算,得到主轴运行的等效直流电流,即

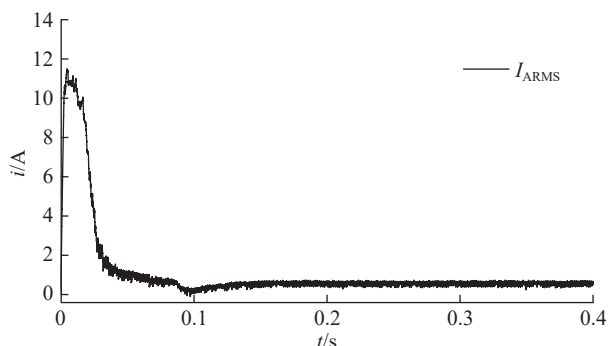
$$I_{\text{ARMS}} = \sqrt{\frac{I_{\text{U}}^2 + I_{\text{V}}^2 + I_{\text{W}}^2}{3}} \quad (1)$$

得到等效电流信号如图 3(b)所示,主轴在瞬间加速启动时电流较大,经过 0.2 s 左右到达设定转速后,电流趋于稳定值。电流信号为主轴运行的重要参数,表征了主轴运行的实际输出扭矩大小,在制孔过程中反馈了刀具所受负载,与刀具磨损量大小密切相关。为此本文对主轴电流信号展开研究,利用固定的制孔工艺参数进行铝合金板钻孔加工,实时记录主轴电流数据,同时利用电子显微镜对切削刃的磨损状态进行记录,探究两者的关联关系。渐进的后刀面磨损是一个相对比较稳定的过程,后刀面的磨损量也是衡量刀具寿命的重要指标^[19]。为了简化刀具寿命预测模型,本文选取后刀面中间区域 3 个点的平均磨损量,用以表征刀具磨损状态,如图 4 所示。

试件选用航空铝合金 7075 材料,厚度约为 6 mm,钻孔刀具标称直径 6 mm,材料为硬质合金,未加涂层。



(a) 主轴UVW三相电流信号



(b) 主轴三相电流均方根信号

图3 主轴启动电流特征

Fig.3 Spindle start-up current characteristics

试验过程中设置固定的主轴转速 2500 r/min,进给速度为 120 mm/m,连续进行钻孔加工,记录每个孔加工过程的电流信号,并间隔 10 个孔对切削刃进行显微观察,研究对比与电流信号的关联关系。

2 结果与讨论

2.1 电流信号小波变换

在钻孔过程中,典型的电流信号曲线如图 5 所示,当钻头接触试件表面,电流开始急剧增加,并随着进给深度的增加而增加,在 2.5 s 后钻头完全进入试件内部,电流呈现出一定范围内的稳定,该区域的信号变量相对统一,可以作为刀具磨损状态的特征区域。由于该信号包含了多个频率段的信号分量,难以提取固定特征,为此进行小波分析。

小波分析是一种变分辨率的时频分析方法,可以提取不同频率段的时域信号,然后进行放大分析,为主轴电流信号监测刀具磨损状态提供了很好的分析方法。主轴电流信号是由数控系统采集的离散数字信号,因此进行离散小波变换分析。利用 MATLAB 软件自带的离散小波变换函数,对主轴电流信号进行分解。综合考虑主轴

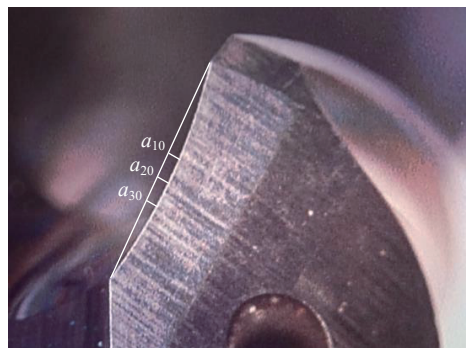


图4 刀具磨损测量

Fig.4 Tool wear measurement

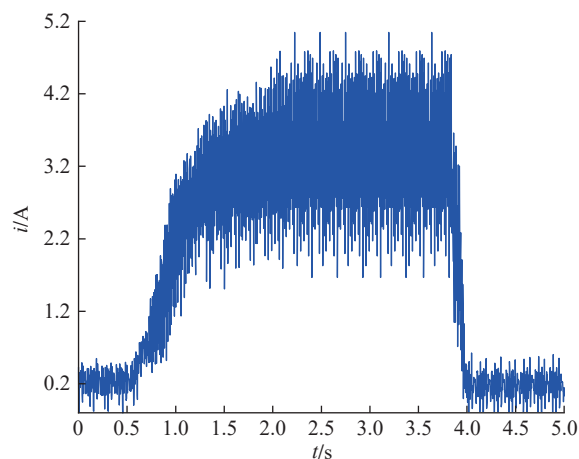


图5 钻孔过程主轴电流信号

Fig.5 Spindle current signal during drilling

电流的波动规律,以及对小波信号正则性、相似性及曲线误差光滑性等要求,选用3阶多贝西(Daubechies)小波基,分解结果如图6(a)所示,重构信号如图6(b)所示,

与初始电流信号保持了较高的一致性。

离散小波分解后,得到高低频率段各3阶重构信号,结果如图7所示。可以发现,3阶低频重构信号在

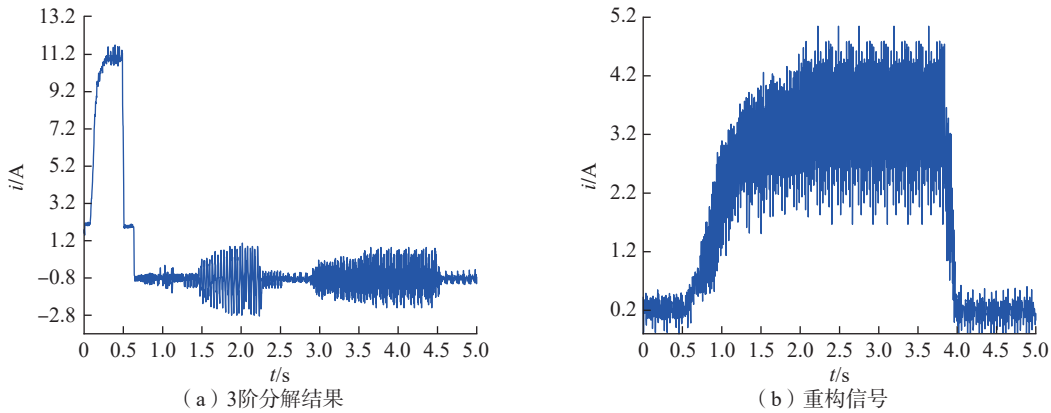


图6 主轴电流

Fig.6 Spindle current

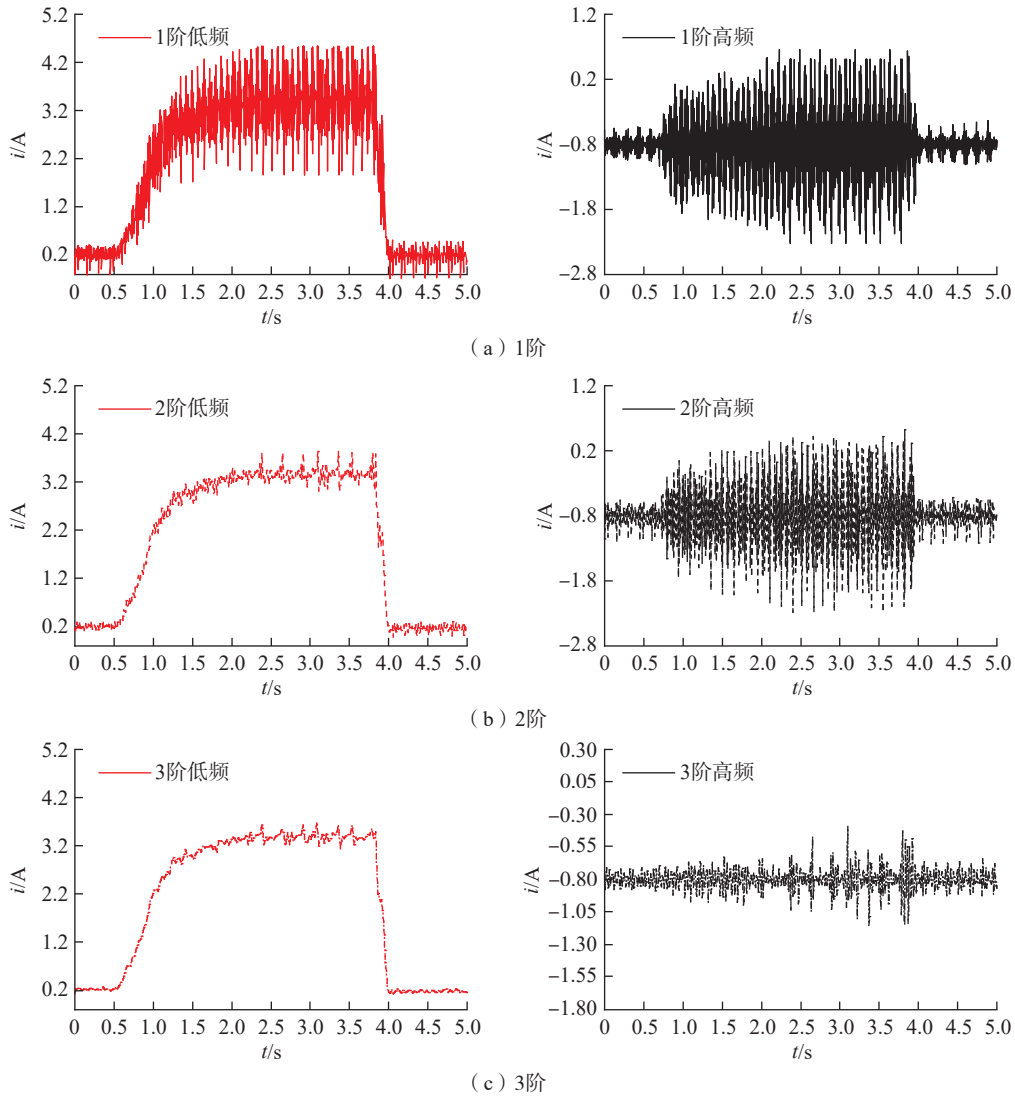


图7 主轴电流3阶低频和高频重构信号特征

Fig.7 Spindle current third-order low and high frequency reconstruction signal characteristics

钻头进入试件内部后,有一段相对平稳的电流值,提取以后进行最小二乘拟合,得到一个恒定的电流值,如图8所示。在相同的加工条件下,此处的电流信息即可作为监测刀具磨损状态的重要特征,电流值作为刀具磨损的特征值。

电流信号在离散小波分解后得到的1阶高频信号与噪声信号非常类似,对其进行了离散傅里叶变换,得到了频域特性曲线,如图9所示。可见主轴电流小波分解后的1阶高频分量,频率集中在50 Hz与150 Hz,该信号的频域特性为电气系统的电磁兼容设计提供了理论依据。

2.2 刀具磨损进程

完成整个刀具磨损钻孔试验,实际试验加工了242个孔,此时刀具的切削刃已经剧烈磨损,加工孔的孔径误差以及孔壁表面粗糙度均超差。在此过程中,每加工10个孔,对切削刃的磨损状态进行显微观察研究,记

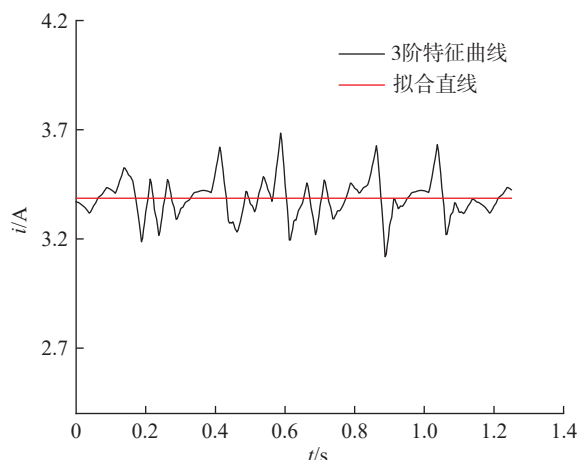


图8 刀具磨损状态识别电流特征

Fig.8 Current characteristics of tool wear state identification

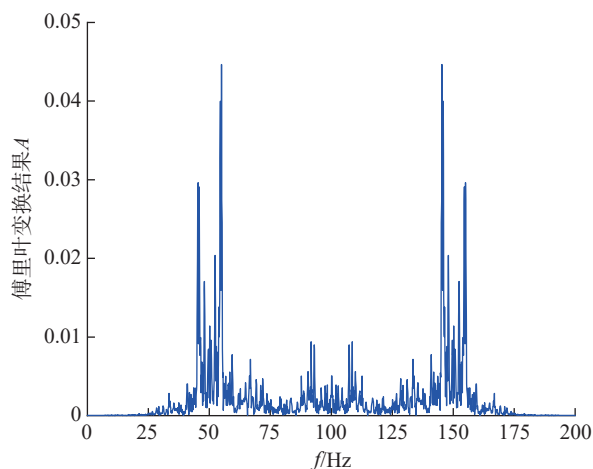


图9 1阶高频信号频域特性

Fig.9 Frequency characteristics of first-order high frequency signal

录刀具切削刃的整个磨损过程,选取6个后刀面的磨损阶段,如图10所示。可见渐进的后刀面磨损状态比较稳定,将后刀面磨损带中部的平均宽度定义为刀具磨损量,在拍摄刀具磨损显微图像后,对磨损量进行测量。同时,记录了每加工10个孔的主轴电流信号,进行离散小波变换后提取特征值,刀具磨损量与电流特征值测量结果如表1所示,其中 V_B 为刀具磨损量,mm; i_A^* 为电流特征值,Arms。将两个离散点制成曲线,利用多项式拟合出刀具磨损量以及电流特征值在钻孔试验中大致趋势,如图11所示。可见刀具在钻孔试验初期磨损速度较快,在钻完80个孔以后,磨损进入缓慢状态,钻完180个孔以后,又进入快速磨损阶段。刀具磨损量与电流特征值在钻孔试验过程中的整体趋势具有一定程度的一致性。

2.3 刀具磨损量与电流特征值的线性关系

电流特征值与刀具磨损量的关系如图12所示,可见两者的存在一定程度的线性关系。利用最小二乘法将散点图进行线性拟合,得到两者的线性关系为

$$V_B = 0.1523i_A^* - 0.5047 \quad (2)$$

在钻孔试验中,在加工第180个孔以后,加工孔的直径已经达到了6.34 mm,精度等级已经超过了H9,加工孔孔壁的表面粗糙度已经超过 $R_a 6.3 \mu\text{m}$ 。在得到刀具磨损量与主轴电流特征值的线性关系后,通过监测主轴电流特征值,即可实现低成本的刀具磨损状态监测,

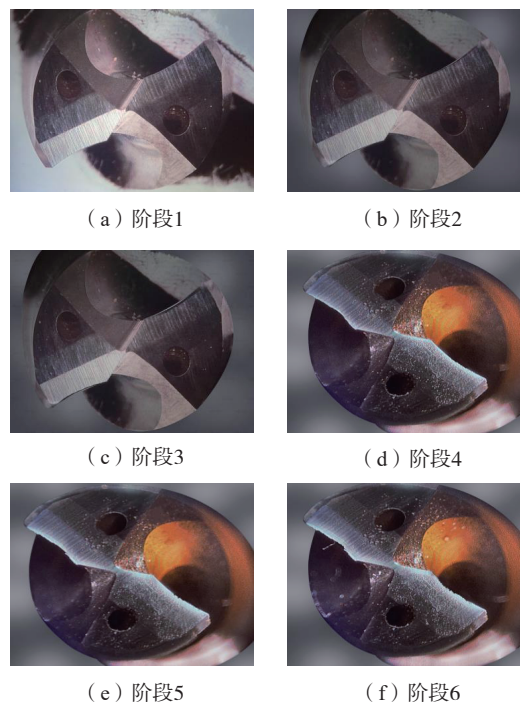


图10 刀具主切削刃磨损过程

Fig.10 Tool main cutting edge wear process

表 1 刀具磨损量与电流特征值提取结果

Table 1 Extraction results of tool wear and current characteristic values

孔编号	刀具磨损量 V_B/mm	电流特征值 $i_A^*/Arms$
0	0	3.3861
10	0.015	3.353
20	0.035	3.5345
30	0.065	3.7443
40	0.101	3.9956
50	0.131	4.173
60	0.141	4.2642
70	0.167	4.3775
80	0.171	4.3423
90	0.172	4.4953
100	0.184	4.5132
110	0.192	4.5934
120	0.202	4.5772
130	0.206	4.6882
140	0.211	4.7642
150	0.218	4.8123
160	0.225	4.7923
170	0.228	4.9123
180	0.248	4.9434
190	0.267	5.0021
200	0.291	5.0682
210	0.298	5.2753
220	0.310	5.3366
230	0.342	5.5735
240	0.347	5.6256

并且可以做剩余加工孔数量的寿命预测。为了验证模型预测的准确率,重新加工 50 个孔,如图 13 所示。选取其中 10 个孔,采集主轴电流特征值,通过刀具磨损预测模型计算刀具磨损量,并与实际磨损量对比,结果如表 2 所示。刀具磨损状态监测的准确率在 96.5% 以上。

3 结论

(1) 本文对机器人自动制孔过程中的主轴电流信号进行实时采集,并根据电流信号的波动规律,选取了 3 阶多贝西小波基,对主轴电流信号进行离散小波分解。

(2) 选取电流信号的 3 阶低频分解量作为刀具磨损状态监测的最有效特征,通过特征值以及刀具磨损量

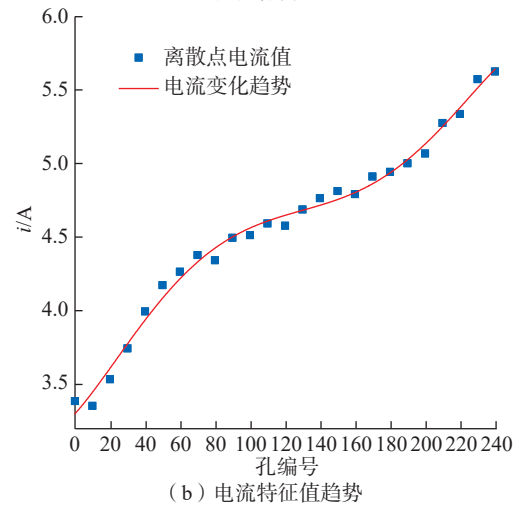
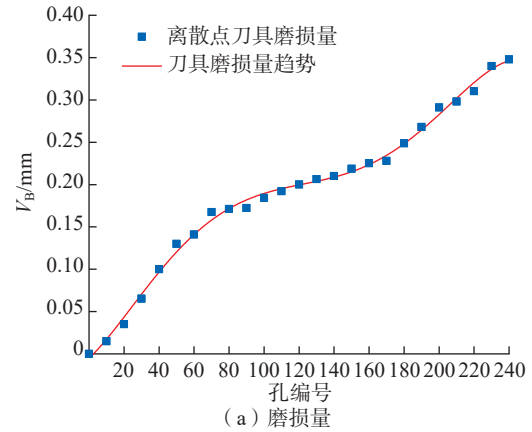


图 11 刀具磨损过程

Fig.11 Tool wear process

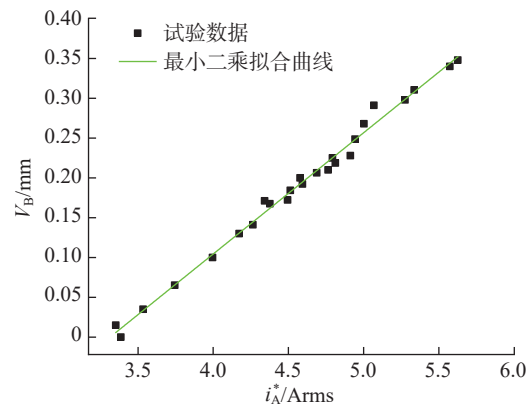


图 12 刀具磨损量与主轴电流特征值关系曲线

Fig.12 Curve of relationship between tool wear and spindle current characteristic value

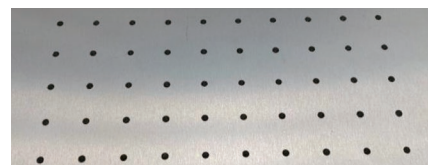


图 13 刀具磨损试验加工孔结果

Fig.13 Drilling hole results of tool wear testing

表 2 刀具磨损状态监测试验结果

Table 2 Results of tool wear condition monitoring test

孔编号	电流特征值 $i_n^*/Arms$	计算磨损量/ mm	实际磨损量/ mm	准确率/ %
1	3.322	0.00124	0.00122	98.3
2	3.325	0.00169	0.00168	98.9
3	3.451	0.02088	0.02019	96.5
4	3.546	0.03535	0.03441	97.2
5	3.672	0.05454	0.05351	98.1
6	3.777	0.07053	0.06923	98.1
7	3.814	0.07617	0.07392	96.9
8	3.901	0.08942	0.08651	96.6
9	3.945	0.09612	0.09412	97.8
10	4.025	0.10830	0.10492	96.7

的记录,建立了两者线性关系,为电流信号处理实现刀具磨损状态监测提供依据。

(3)将电流信号的1阶高频分解量进行离散傅里叶变换,得到高频分量的频域特性,为电磁兼容设计提供依据。

参考文献

- [1] JANTUNEN E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(9): 997-1010.
- [2] 曹大理, 孙惠斌, 张纪铎, 等. 基于卷积神经网络的刀具磨损在线监测[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 74-80.
- CAO Dali, SUN Huibin, ZHANG Jiduo, et al. In-process tool condition monitoring based on convolution neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(1): 74-80.
- [3] 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.
- XIE Nan, MA Fei, DUAN Minglei, et al. Tool wear condition monitoring based on principal component analysis and C-support vector machine[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(3): 434-439.
- [4] LI Z X, LIU X H, INCECIK A, et al. A novel ensemble deep learning model for cutting tool wear monitoring using audio sensors[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 233-249.
- [5] KÜLLAÇ M, CUVALC O. Correlation statistics of a Fourier transform feature with flank wear on different sections of turned surface images for real time monitoring applications[J]. Measurement, 2023, 207: 112399.
- [6] MALHOTRA J, JHA S. Fuzzy C-means clustering based colour image segmentation for tool wear monitoring in micro-milling[J].

Precision Engineering, 2021, 72: 690-705.

- [7] ZHU K P, GUO H, LI S, et al. Online tool wear monitoring by super-resolution based machine vision[J]. Computers in Industry, 2023, 144: 103782.
- [8] 敖银辉, 汪宝生. 钻头磨损检测与剩余寿命评估[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 177-181.
- AO Yinhui, WANG Baosheng. Monitoring of drill process and prediction for remaining useful life of drill Tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 177-181.
- [9] OLMO A, LOPEZ L N, PISSON G, et al. Tool wear monitoring of high-speed broaching process with carbide tools to reduce production errors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 172: 109003.
- [10] ZHANG X, GUO Y, GUO Z C, et al. Physical model-based tool wear and breakage monitoring in milling process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 184: 109641.
- [11] ZHANG P F, GAO D, LU Y, et al. Cutting tool wear monitoring based on a smart toolholder with embedded force and vibration sensors and an improved residual network[J]. Measurement, 2022, 199: 111520.
- [12] ZHANG P F, GAO D, LU Y, et al. A novel smart tool holder with embedded force sensors for milling operations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 175: 109130.
- [13] 王国锋, 李启铭, 秦旭达, 等. 支持向量机在刀具磨损多状态监测中的应用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(1): 35-39.
- WANG Guofeng, LI Qiming, QIN Xuda, et al. Application of support-vector-machine in tool wear of multi-stage monitoring[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(1): 35-39.
- [14] LIU Y K, GAO L, GAO H L, et al. Machine vision based condition monitoring and fault diagnosis of machine tools using information from machined surface texture: A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 164: 108068.
- [15] LI X L. On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(1): 157-164.
- [16] LIU Y P, KILIC Z M, ALTINTAS Y. Monitoring of in-process force coefficients and tool wear[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 38: 105-119.
- [17] FRANCO-GASCA L A, HERRERA-RUIZ G, PENICHE-VERA R, et al. Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3): 381-386.
- [18] NIAKI F A, MICHEL M, MEARS L. State of health monitoring in machining: Extended Kalman filter for tool wear assessment in turning of IN718 hard-to-machine alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24(2): 361-369.
- [19] 孙玉晶. 钛合金铣削加工过程参量建模及刀具磨损状态预测[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- SUN Yujing. Parametric modeling of milling titanium alloy and prediction of tool wear state[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

通讯作者: 申望, 工程师, 硕士, 主要研究方向为柔性装配技术。

(责编 七七)