

基于铣削力仿真样本和降维分类算法的 刀具状态监测方法

徐涛,李亮,郭月龙,郝碧君,何宁

南京航空航天大学

摘要: 针对铣削加工过程中刀具磨损造成的主切削力增大现象,提出一种基于计算仿真、降维和分类模型的铣削力判断方法。该方法基于瞬时切厚推导铣削力计算公式,模拟铣削加工过程的时域切削力。依据刀具磨损和切削力增大的关系,生成模拟样本。对生成的样本进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和核支持向量机(kernel-based Support Vector Machine, kSVM)分类训练。试验表明,该方法对铣削力样本具有很强的辨认能力,成本较低,可以应用到刀具磨损判断领域。

关键词: 刀具状态监测;铣削力;主成分分析;支持向量机

中图分类号: TG54;TH162

文献标志码: A

Tool Condition Monitoring Method Based on Simulation Samples of Milling Force and Algorithms of Dimensionality Reduction and Classification

Xu Tao, Li Liang, Guo Yuelong, Hao Bijun, He Ning

Abstract: According to the increase of the cutting force caused by tool wear in milling process, a judging method on milling force in time domain is brought up, which is based on calculation, dimensionality reduction and categorization model. This method simulates the cutting force in the milling process by deducing the formula of milling force based on undeformed chip thickness. Principal component analysis (PCA) and kernel-based support vector machine (kSVM) classifier are used on those generated samples. The experiment results show that this method works well on distinguishing milling force samples and it could be applied to the field of tool condition monitoring in consideration of its good economy and generalization ability.

Keywords: tool condition monitoring; milling force; principal component analysis; support vector machine

1 引言

制造领域对加工工具的可靠性要求逐步提升,因此刀具状态监测(TCM, Tool Condition Monitoring)技术得到了广泛的关注。刀具状态监测分为直接法和间接法,其中间接法得到了广泛的关注和应用。间接监测采集常用信号类型主要为切削力信号、振动信号、声发射信号、功率与电流信号等^[1]。因此,不同种类的传感器被应用到该领域,包括测力仪、加速度传感器和声发射传感器等^[2-4]。测力仪是使用最多、最受研究者欢迎的,因为时域切削力信号直接真实,信号幅度较大,抗干扰能力较强,不受加工区内切屑和冷却液的影响。文献[5]总结了近年来基于神经网络的刀具状态监测研究成果,统计得出有42.4%是基于测力仪的研究。由于工作台测力仪是最容易布置的传感器,所以三向力是最容易获取的

加工信号特征。

针对应用切削力判断的实际困难,大量学者提出了富有建设性的方法,主要是通过各种方法人为选取切削力信号的特征。Zhu K. P. 等^[6]对近年来使用小波变换提取切削力特征的研究进行了总结综述;A. M. Bassiuny 等^[7]和 K. Tomas 等^[8]都使用了希尔伯特—黄变换(HHT)获取切削力信号中的能量特征;M. Nouri 等^[9]通过提取切削力模型中的四个参数实现刀具实时监控。上述研究方法普遍存在两个问题:①模型的训练普遍依赖试验数据样本,经济性欠佳;②切削力特征是人为选择提取的,加工过程的可靠性存疑。

为弥补上述研究的不足,本文提出了一种新的刀具状态监测方法。通过对三角刀片镶齿铣刀建模并推导铣削力计算公式,获得时域切削力仿真样本,从而通过大量的仿真样本替代试验样本,解决经济性问题;然后训练基于主成分分析和核支持向量机的分类模型,利用主成分分析,从样本协方差最大的角度,让计算机自主选择重要的特征点,从而避免了

人工选择的不可靠性;最后,通过大进给铣削试验,验证了该模型的有效性。试验结果表明,本方法具有很高的可靠性和经济性。

2 样本生成及分类训练

2.1 铣削模型

镶齿铣刀使用方便,性价比高,广泛应用于航空部件制造、汽车制造、钛合金零件加工等领域。本研究以三角形刀片单齿镶齿铣刀为例进行建模。

图1为单镶齿铣刀的端铣示意图。根据瞬时切厚模型,可以推导出三角刀片镶齿铣刀主切削力动态计算的公式为

$$F_c = k_{c1.1} \times (f_z \sin\phi)^{(1-m_c)} \times \left\{ a_p - \frac{R}{2} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{f_z \sin\phi}{R} \right)^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, f_z 为每齿进给量; a_p 为铣削深度; R 为三角形刀片圆弧的曲率半径; ϕ 为刀片相对于初始位置的转角; $k_{c1.1}$ 和 m_c 为跟工件材料有关的经验值。

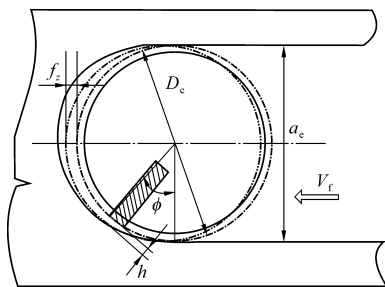
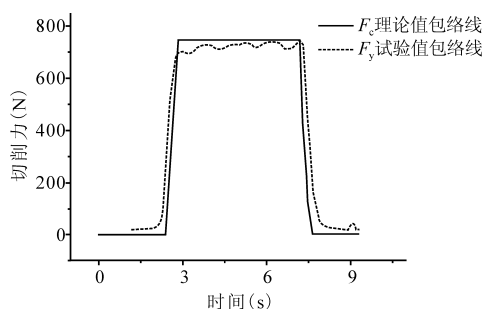


图1 镶齿铣刀端铣

将主切削力理论图线和端铣试验的Y方向切削力进行包络处理(见图2)。主切削力 F_c 理论值包络线和Y方向力 F_y 试验值包络线基本吻合。



($v_c = 80\text{m/min}$, $f_z = 0.8\text{mm/z}$, $a_p = 0.6\text{mm}$, $a_c = 25\text{mm}$,
工件:退火态 TC4 钛合金)

图2 主切削力理论值和试验值包络线对比

2.2 仿真样本生成

已有一些刀具磨损的研究^[10,11]阐述了后刀面磨损与切削力变化之间的关系。在文献[11]中,当后刀面磨损量达到0.3mm时,切削静态分量增加了

50%。在此基础上,对上文生成的主切削力理论图进行数学变换,通过时域平移,模仿CNC力信号采集中提前和滞后的情况;然后对样本进行包络处理,因为判断仅对主切削力最大值感兴趣;最后,对包络线上的每个特征点使用高斯随机数,正确样本每个特征点取100%–150%理论值范围内的随机数,错误样本每个特征点取150%–300%理论值范围内的随机数。

2.3 降维分类方法

降维方法采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA),分类器选择核支持向量机(kernel-based Support Vector Machine, kSVM)。假设样本集为 N 个 M 维行向量 $\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_N\}$ 。

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2)$$

$$\Sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (k_i - \bar{k})^T (k_i - \bar{k}) \quad (3)$$

该样本集的平均向量为 \bar{k} ,可以看作是该样本集在高维空间的数据中心。样本集的协方差矩阵 Σ 可以看作计算各向量离该空间数据中心的距离。求解该协方差矩阵的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ 及相应的单位特征向量 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_N$ 。选取前 m ($m < N$)个特征值,将原样本集的 M 维特征降至 m 维。如图3所示,降维后的主成分相对于原样本的信息还原度可用协方差矩阵特征值贡献率来计算,即

$$K_m = \frac{\sum_{i=1}^m |\lambda_i|}{\sum_{i=1}^N |\lambda_i|} \quad (4)$$

当协方差矩阵特征值贡献率超过95%时,主成分相对于原样本信息的还原是完全可信的。当 $m = 14$, $K_m = 0.95$ 时,样本集数据可视化结果如图4所示。

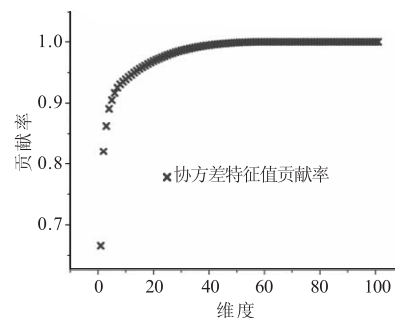


图3 协方差特征值贡献率

由图4可知,降维过后的样本集已经具有相当强的线性可分性。代入多项式核的支持向量机中进行分类训练,标签值为0和1。

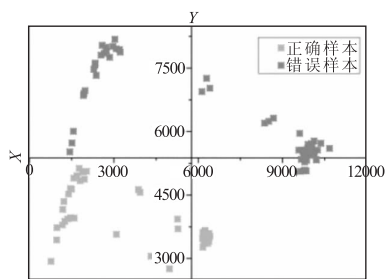


图4 降维后样本的 t-sne 可视化结果

3 铣削试验验证

(1) 试验条件

钛合金大进给端铣试验条件为:采用 TH5660A 立式加工中心,最高转速为 5300r/min,最大工作进给速度为 5000mm/min。选用 Walter P23696 - 1.0 WSM35S 硬质合金涂层刀具,刀具直径 $\phi 25\text{mm}$,只安装一个刀片。工件材料为退火态 TC4 钛合金($\alpha + \beta$ 型钛合金),工件尺寸 73mm \times 60mm \times 30mm。切削参数 $v_c = 80\text{m/min}$, $f_z = 0.8\text{mm/z}$, $a_e = 25\text{mm}$, $a_p = 0.6\text{mm}$,每条槽长度为 60mm。冷却条件选用无冷却、干切削方式。测量仪器选用瑞士 Kistler 公司的 9625B 三向压电式动态测力仪,同时选用 Kistler 5019A 电荷放大器配合使用,并采用相应软件进行测量。

(2) 试验结果分析

绘制试验的主切削力最大值变化曲线见图 5。对 30 组试验样本进行分类,分类结果在二维 t - SNE 图上的表示见图 6,分类的正确率为 100%。

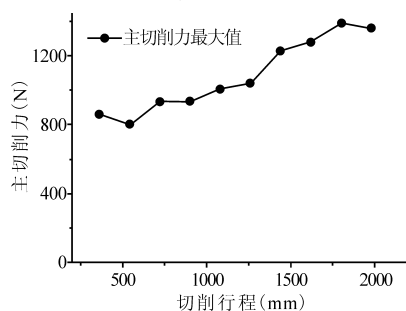


图5 切削行程与主切削力关系

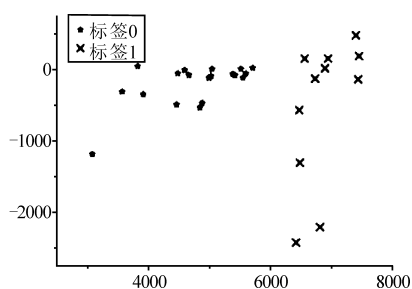


图6 试验结果分类

4 结语

本文针对铣削过程中刀具磨损导致主切削力增大的现象,提出一种基于计算机仿真样本和机器学习的换刀判断方法。通过理论公式计算铣削力,使用计算机仿真生成样本集,通过特征重组和主成分分析之后,使用支持向量机分类。完全依赖试验数据训练分类的模型经济性和推广性都较差,因此本文所提出的新方法具有极好的应用前景。

参考文献

- [1] 谢庆陆, 王国锋. 变参数铣削刀具磨损状态监测研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(12): 1842 - 1847.
- [2] A Hase, M Wada, T Koga, et al. The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(5 - 8): 947 - 955.
- [3] Cho S, Binsaeid S, Asfour S. Design of multisensor fusion - based tool condition monitoring system in end milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5 - 8): 681 - 694.
- [4] K Jemielniak, T Urbanski, J Kossakowska, et al. Tool condition monitoring based on numerous signal features[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1): 73 - 81.
- [5] Jose Vicente Abellan-Nebot, Fernando Romero Subirón. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(1): 237 - 257.
- [6] Zhu K P, Y San Wong, G S Hong. Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(7): 537 - 553.
- [7] A M Bassiuny, X Li. Flute breakage detection during end milling using Hilbert-Huang transform and smoothed nonlinear energy operator[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(6): 1011 - 1020.
- [8] T Kalvoda, Y R Hwang. A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert-Huang transform[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 495 - 501.
- [9] M Nouri, B K Fussell, B L Ziniti, et al. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 1 - 13.

金属基超硬磨料砂轮电火花—ELID 复合修整试验研究

关佳亮,张妤,胡志远,路文文,孙晓楠,戚泽海

北京工业大学

摘要: 针对金属基超硬磨料砂轮高质量难修整的问题,采用电火花—ELID 复合修整技术,打破传统的低精度的一步到位修整方法,并基于正交试验对修整参数组合进行优化,由极差分析得到各因素对金属基超硬磨料砂轮修整质量的影响程度大小,并以此为基础进行工艺试验研究。

关键词: 金属基超硬磨料砂轮;电火花修型;ELID;复合修整

中图分类号: TG74.3;TH161

文献标志码: A

Experimental Study on EDM-ELID Composite Trimming of Metal-Based Super-Hard Abrasive Wheel

Guan Jialiang, Zhang Yu, Hu Zhiyuan, Lu Wenwen, Sun Xiaonan, Qi Zehai

Abstract: The metal-based super-hard abrasive grinding wheel is difficult to finish with high quality. Using EDM-ELID composite finishing technology instead of the traditional low-precision one-step trim method, the combination of trim parameters is optimized based on orthogonal test. The influence degree of each factor on the quality of metal-based super-hard abrasive grinding wheel is obtained by the range analysis, and the engineering testing is carried out.

Keywords: metal-based super-hard abrasive grinding wheel; EDM; ELID; composite dressing

1 引言

难加工材料(如铝基复合材料、钨钼合金、光学玻璃、陶瓷等)具有优良的加工性能,被广泛应用于航天、军工、汽车、数控机床、船舶等领域,如何高效精密地加工这些材料已成为研究的重点之一。超硬磨料砂轮以其优越的磨削性能,在难加工材料高效、精密磨削方面取得了显著成果。

磨削过程中,砂轮表面形貌的优劣是决定磨削质量的重要因素,由于超硬磨料砂轮的高硬度和耐磨性,使其高质量的修整变得十分困难。目前常用的整形方法有金刚石笔整形法、磨削修整法、滚压整形法、软钢滚轮修整法等^[1]。日本北见工业大学运用激光修整法实现了高效率地修整复杂型面的砂轮,但是由于激光束聚焦和能量控制精度问题,使得修整精度不太理想。国内学者也有将两种修整方法进行结合使用,如河南理工大学杨志波教授^[2]采用

激光—超声振动复合修整法,得到比普通机械修整法更好的修整效果,但如何高效、高精度、低成本地实现对超硬磨料砂轮的修整仍是亟待解决的难题。

本文结合 ELID 在线电解修锐技术对金属基超硬磨料砂轮进行了电火花—ELID 复合修整试验,得到了高精度的超硬磨料砂轮修整表面。

2 电火花修整技术和 ELID 在线电解修整技术

(1) 电火花修整技术

电火花修整砂轮(Electrical Discharge Dressing, EDD)由 Suzuki 在 20 世纪 80 年代提出,修整过程中,将金属基超硬磨料砂轮作为正极,工具电极作为阴极,在专用脉冲电源的作用下,在两极之间通入工作液,通过控制工具电极与工件进给方向的间隙大小,使脉冲电压穿过工作液,产生电火花放电,从而蚀除砂轮金属结合剂,使磨粒突出,达到修整效果^[3]。

(2) ELID 在线电解修整技术

使用金属基超硬磨料砂轮在线修整技术

收稿日期: 2017 年 9 月

[10] 谭云成,杨建东,夏仁丰. 考虑刀具磨损时的理论切削力[J]. 长春理工大学学报(社会科学版),1995,18(2): 41-45.

[11] 吴泽群,刘亚俊,汤勇,等. 刀具后刀面磨损量对切削力及加工表面粗糙度的影响[J]. 工具技术,2005,39(5): 37-39.

第一作者:徐涛,硕士研究生,南京航空航天大学机电学院,210016 南京市

First Author: Xu Tao, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China