

基于信号波形特征的刀具破损监控方法优化

吕国艳¹, 张志毅¹, 方喜凤¹, 江源², 湛红晖³

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

²华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉

³华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月26日

摘要

针对微弱破损信号的监控, 提出了一种基于信号波形特征的刀具破损监控方法。先分析了刀具破损监控的各项特征, 包括信号降噪方法对破损特征值的影响、不同工艺条件下破损特征值的监控要求等。对于破损造成的时域信号波动较小而动态包络法难以识别的问题, 提出了基于信号波形特征的刀具破损监控方法。最后验证了基于信号波形特征的刀具破损监控方法的有效性, 相比于动态包络法准确度大幅提高。

关键词

刀具状态智能化监控, 刀具破损, 波形特征

Optimization of Tool Damage Monitoring Method Based on Signal Waveform Characteristics

Guoyan Lyu¹, Zhiyi Zhang¹, Xifeng Fang¹, Yuan Jiang², Honghui Zhan³

¹CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

²School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

³HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi Jiangsu

Received: Apr. 25th, 2024; accepted: Jul. 19th, 2024; published: Jul. 26th, 2024

Abstract

Aiming at the monitoring of weak damage signal, a tool damage monitoring method based on sig-

文章引用: 吕国艳, 张志毅, 方喜凤, 江源, 湛红晖. 基于信号波形特征的刀具破损监控方法优化[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(4): 666-680. DOI: 10.12677/jsta.2024.124073

nal waveform characteristics is proposed. Firstly, the characteristics of tool damage monitoring are analyzed, including the influence of signal noise reduction method on the damage characteristic value, and the monitoring requirements of the damage characteristic value under different process conditions. To solve the problem that the time domain signal fluctuation caused by damage is small and the dynamic envelope method is difficult to identify, a tool damage monitoring method based on signal waveform characteristics is proposed. Finally, the effectiveness of the tool damage monitoring method based on signal waveform characteristics is verified, and the accuracy is greatly improved compared with the dynamic envelope method.

Keywords

Intelligent Monitoring of Tool Status, Tool Breakage, Waveform Feature

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在企业的加工制造过程中围绕刀具失效造成的资源浪费一直是重要的难题。各类刀具在生产中会出现多种失效形式，主要包括刀具的磨损、破损。为了防止失效刀具对工件质量造成影响，目前主要采取两种措施。第一是抽样定检，对加工完成的工件质量进行抽样检查，抽样频率视具体情况而定[1]。这种方式需要由固定的操作工人来完成，既需要耗费大量人力、物力，又具有滞后性。第二种措施是定期更换刀具，为了防止失效刀具对工件造成损坏，企业通常会提前、定期地更换刀具，即使刀具状态良好，也会在达到预定的工作小时后换上新刀，这无疑会造成刀具资源的浪费。

针对前述问题，对具有智能化技术特点的刀具状态在线监控系统的需求是迫切的[2]。它能够在一定程度上解决以上两个问题。由于刀具状态智能化监控系统是实时、在线地监测加工过程中刀具的工作状态，因此当刀具出现磨损、破损等失效问题时，它能够及时、准确地监测到状况的发生并及时反馈给现场的工作人员或数控机床[3]。1983年Tlustý J.等人即提出，拥有高可靠性、高效率传感技术的智能化监控系统是实现智能加工单元的关键因素[4]。Kaya B.等人基于大量研究统计发现，刀具失效造成的停机时间占理论预计加工时间的20%左右[5]。此外，德国学者H.K. Tonshoff等人仔细对比了刀具监控技术应用前后多年实际生产的数据得出结论，刀具监控技术可以减少人为原因导致机床故障时间的75%，提高生产率10%~60%，提高机床利用率50%以上[6][7]。

目前刀具监控系统的功能主要包括刀具磨损监控、刀具破损监控、刀具碰撞监控以及自适应控制等，其中尤以刀具破损监控为技术重点和难点。过去开发的刀具监控系统在刀具破损监控上的智能化程度和准确度存在不足，主要涉及到传感器原始信号的预处理以及破损监控的特征提取和阈值设定两大方面。现代工业生产中复杂多变的工艺状况对刀具监控系统提出了更高的要求。结合在中车青岛四方构架加工等场景中积累的刀具监控项目经验，相比于刀具磨损监控、崩刀监控等功能，刀具破损监控的应用范围更广，车间现场的需求也更加急迫。

目前常用的固定阈值法或者包络法在面对一些有温度和刀具破损影响的工况时应用效果较差，为了解决这个问题，本文提出了一种基于信号波形特征的刀具破损监控方法，可以有效地降低刀具磨损等因素的影响，提高对微小破损现象的识别能力。

2. 刀具破损监控特征值优选方法研究

2.1. 刀具破损原理及其特征分析

2.1.1. 刀具破损产生原理分析

刀具破损是刀具常见失效形式之一，特别是在一些脆性较大、切削过程不平稳的加工过程中[8]。从力学角度分析，刀具破损产生的主要原因包括机械应力和热应力两个方面：

(1) 机械应力

刀尖在与工件表面进行相对运动挤压、去除材料的过程中会产生很大的内应力。国内外学者多使用应力函数法、有限元法等来研究刀具的受力状态[9]。以如下图 1 所示的车刀为例来分析，一般刀具刀尖的受力情况如下图 2 所示。

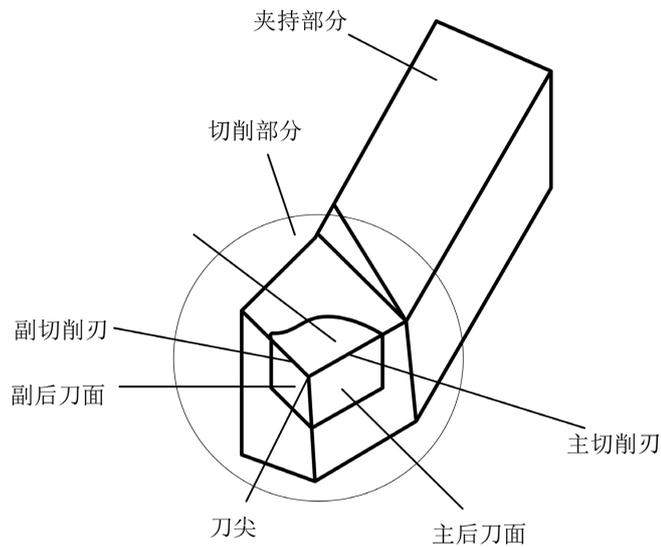


Figure 1. Turning tool diagram
图 1. 车刀示意图

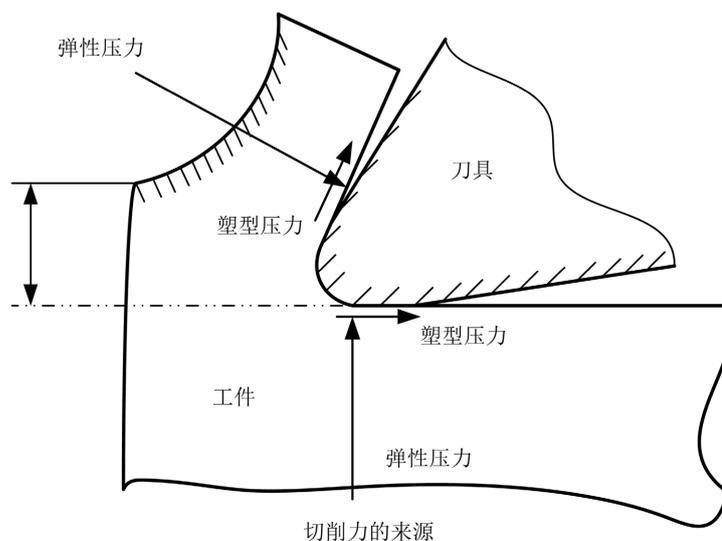


Figure 2. Knife point force diagram
图 2. 刀尖受力示意图

(2) 热应力

断续切削过程中刀具各个表面温度会频繁发生剧烈变化。以前刀面为例，正常切削时前刀面温度急剧上升，由于热胀作用会在前刀面形成较大的压应力，刀具内部会形成拉应力；空切时温度又会降低，前刀面区域冷缩形成拉应力。两种应力的频繁变化、交替也会促进刀尖产生裂纹，导致刀具破损[10]。

2.1.2. 刀具破损监控的影响因素

目前在刀具破损监控中应用较成熟、广泛的方法通常使用的是经过降噪等处理的时域信号，在实时加工信号附近添加用于辨识刀具破损状态的阈值，当监测的实时信号超出阈值边界，即判断刀具发生破损。此方法的具体效果主要受到以下四个因素的影响：

(1) 信号降噪方法。从原始信号中剥离出能够表达切削状态的信号受限于多种情况。

(2) 信号的多样性。一种信号会受到多种因素的限制，因此需要考虑能否借助于其他信号来提高信号的多样性以提供更加可靠的特征判断依据。

(3) 破损阈值的可靠性。破损阈值的可靠性是刀具破损监控中的关键因素。

(4) 被监测工序的波动。与刀具磨损监控相似，刀具破损监控要求被监测工序的切削参数的不能更改，但是工件毛坯、刀具磨损等因素会影响到破损监控的效果。

2.1.3. 刀具破损的时、频域特征分析

使用盘铣刀切削实验某次加工过程中出现的刀具破损数据进行分析，下图3所示为该 $\phi 80$ 盘铣刀破损信号经过预处理的时域波形。

从时域波形来分析，刀具发生破损的时刻信号出现突变，突变时刻的信号波形明显与其他时刻的波形不同。在此之后加工信号幅值有所减小但依然平稳，说明仅有少量刀齿发生破损，其他刀齿依然可以正常切削，刀具能够继续工作。但是发生刀齿破损后的信号有许多毛刺，说明破损后各个刀齿之间的差异造成了切削过程的不平稳，如图4所示的工件表面形貌照片也说明了这一点。

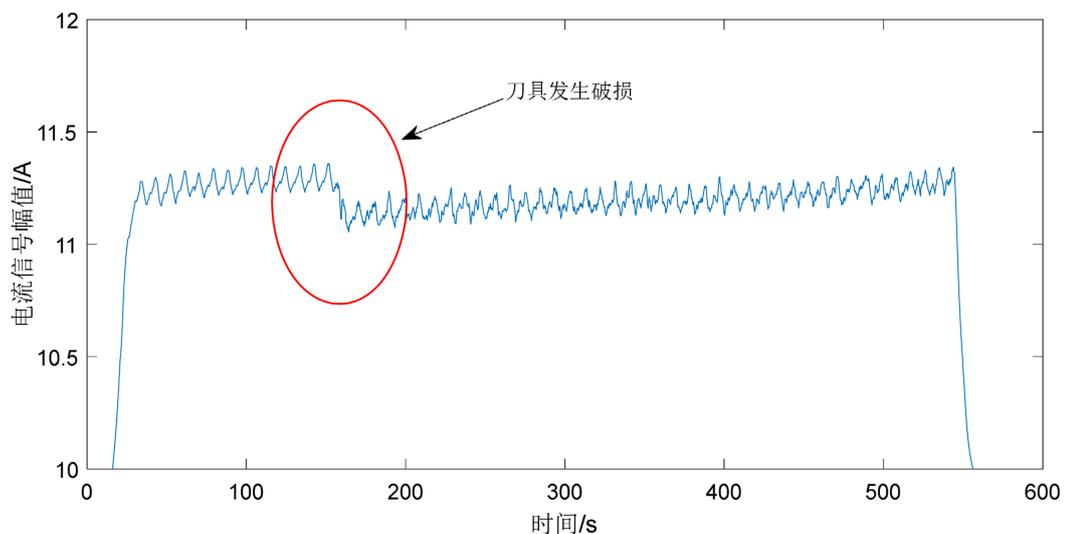


Figure 3. Tool damage during milling

图3. 铣削过程的刀具破损

从频域角度分析，如图5、图6所示分别为该信号在破损前与破损后低频区域的幅频图。信号在一倍转频、二倍转频和三倍转频处信号幅值分别降低了32.7%、44.2%和73.5%。



Figure 4. The surface appearance of the workpiece where the tool damage occurred
图 4. 发生刀具破损的工件表面形貌

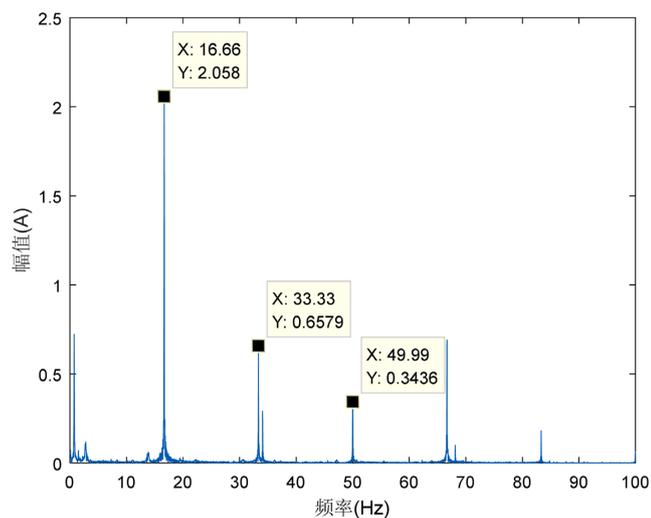


Figure 5. Amplitude-frequency diagram of normal cutter milling
图 5. 正常刀具铣削幅频图

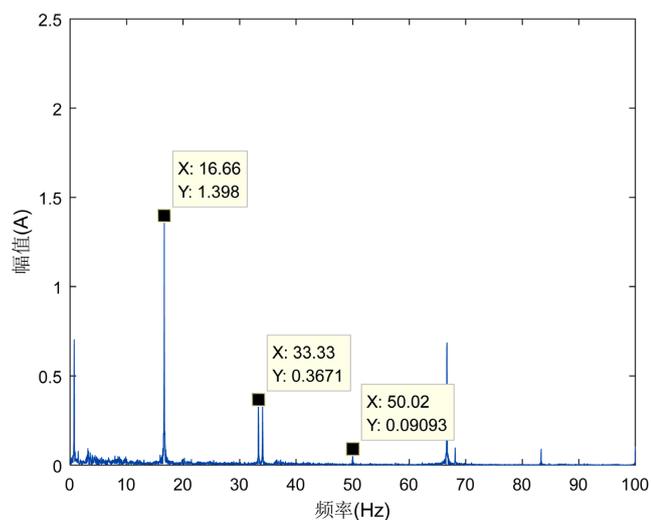


Figure 6. Amplitude-frequency diagram of milling with damaged tool
图 6. 破损刀具铣削幅频图

因此通过对上例的分析可以发现相对复杂的铣刀破损存在以下特征：

- (1) 发生破损时刻的波形明显不同于正常切削时刻的波形；
- (2) 发生破损后铣刀切削过程的平稳性降低；
- (3) 发生破损后信号幅值与正常刀具的切削有明显差异；
- (4) 破损发生后信号的频域特征发生变化。

2.2. 基于信号波形特征的刀具破损监控方法

2.2.1. 现有动态包络法的局限性

动态包络法是针对切削参数变化的刀具破损监控提出的一种解决方案。它通过学习一个工件加工过程信号幅值的变化情况，生成信号的上下边界作为破损监测的动态阈值曲线，使用这两条阈值曲线来包络后续加工曲线，当信号幅值超过某一条边界时即发出刀具破损报警信号。如图 7 所示。

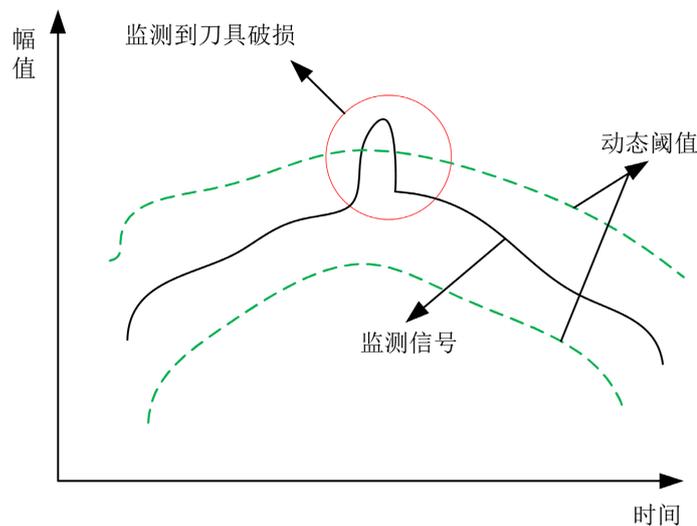


Figure 7. Principle of dynamic envelope method
图 7. 动态包络法原理

动态包络法上下曲线的计算方法如下式(1)、(2)所示：

$$Max(t) = \bar{A}(t) * \sigma_{up}(t) * \eta \quad (1)$$

$$Min(t) = \bar{A}(t) * \sigma_{down}(t) * \eta' \quad (2)$$

式中： $Max(t)$ 为监测 t 时刻的上阈值； $\bar{A}(t)$ 为 t 时刻电流信号基准值； $\sigma_{up}(t)$ 为 t 时刻的上阈值动态系数； η 为上阈值安全系数； $Min(t)$ 为 t 时刻的下阈值； $\sigma_{down}(t)$ 为 t 时刻的下阈值动态系数； η' 为下阈值安全系数。

以上阈值来说明， $\bar{A}(t)$ 取的是监控过程前几个加工信号在 t 时刻幅值的平均值，此时要监控的信号阈值是在前几次加工信号的基础上生成的，可以避免磨损趋势、温度趋势等对破损监控造成影响。 $\sigma_{up}(t)$ 动态系数为学习过程中根据 t 时刻所有数据的最大值得到。 η 为根据经验手动设置的阈值安全系数。

以 $\varphi 80$ 盘铣刀切削试验信号来分析动态包络法的局限性。发生了刀具破损的某把 $\varphi 80$ 盘铣刀共计 23 次加工如下图 8 所示。图中由黄到绿为前 22 次加工过程的信号，蓝色曲线为发生刀具破损的第 23 次加工信号，上、下两条红色曲线为刀具破损监控上、下包络线。

图中可见第 23 次加工信号在 24.30 s 发生破损，信号幅值突变并上升了 3.8%，并且整个波形几乎处

在其他所有信号的范围之内，也必定在两条破损包络线以内，因此动态包络法不能监测到此次刀具破损的发生。

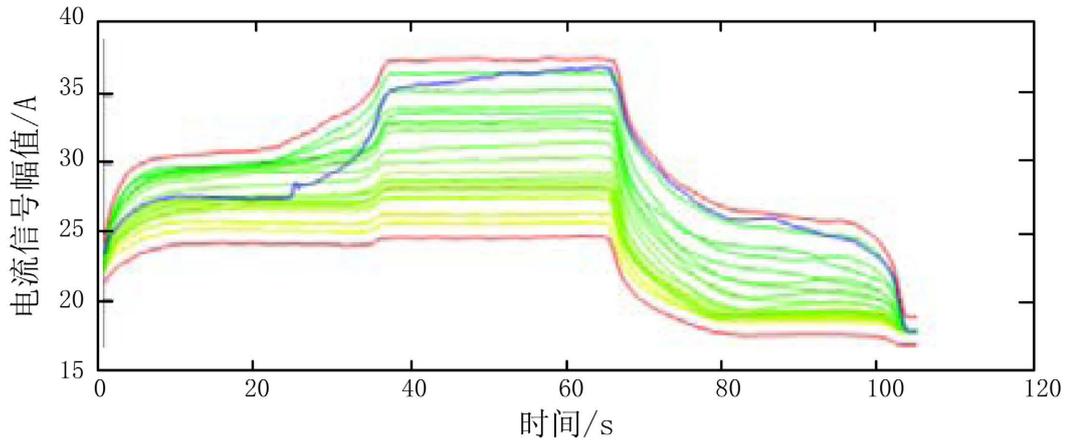


Figure 8. $\phi 80$ disk cutter cutting signal

图 8. $\phi 80$ 盘铣刀切削信号

基于以上分析可以得出结论，动态包络法不能监测到现象不剧烈、信号波动较小的刀具破损情况。

2.2.2. 刀具破损信号波形特征分析

如图 8 所示，在未发生刀具破损的前 22 次加工过程中，所有信号波形的形状相似，伴随着刀具的磨损，电流信号的幅值缓慢上移，各个信号幅值发生变化位置的变化趋势也相似。但是对于发生了刀具破损的第 23 个工件的加工曲线，在第 24.3 s 时信号畸变严重，与其他信号相同时刻的波形差异很大，并且在此之后信号的波形也出现歪斜的现象。经过以上分析可以发现，发生刀具破损的瞬间信号波形会发生剧烈畸变，与正常刀具的切削信号差异非常大。可以看到图 5 的刀具破损也具有以上特征。因此考虑利用此信号波形的特征来进行刀具破损的监控。

2.2.3. 基于信号波形特征的刀具破损监控原理

分析可知，未发生破损的信号波形形状相似，而发生破损的信号在发生破损时刻与正常加工信号波形形状差异很大，因此可以使用能够表征波形差异的方法来进行刀具破损监控。

方法的基本原理为：将被监测信号与预先学习得到的标准信号进行信号波形的比较，使用波形差异特征值 A 来评价差异程度，当差异程度超过预先学习得到的动态阈值时即可判断为刀具发生破损。

(1) 波形差异特征值 A

波形差异特征值 A 在此方法中作为刀具破损判断特征值，其定义为相同长度的两组信号分别减去其自身均值后求差得到的向量所有元素之和。以信号 $X(t)(t=1,2,\dots,k)$ 和信号 $Y(t)(t=1,2,\dots,k)$ 为例说明 A 的计算方法。

$$X'(t) = X(t) - \text{mean}(X) \quad (3)$$

$$Y'(t) = Y(t) - \text{mean}(Y) \quad (4)$$

上式中 $\text{mean}(X)$ 、 $\text{mean}(Y)$ 分别为 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 的均值。

$$A = \sum_{t=1}^k |X'(t) - Y'(t)| \quad (5)$$

经过上式(3)~(5)的计算即可以得到破损特征值 A 。 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 减去自身均值可以将整段波形平移到同一水平程度比较,得到的 $X'(t)$ 、 $Y'(t)$ 消除了刀具磨损等趋势项因素造成的信号幅值差异。 $X'(t)-Y'(t)$ 可以得到信号中两个点之间的差异,因此所有点差异之和 A 即可用来表征两组信号 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 之间的波形差异。

(2) 标准信号

标准信号是所有监控信号的参照,破损特征值是根据信号与标准信号波形之间的差异求得的。标准信号的选取直接影响到特征值能否真实地反应正常切削过程。标准信号可以选取一把刀某次加工的信号,也可以取多组信号的平均值。

(3) 破损特征值动态阈值 $M(t)$

使用动态阈值法作为刀具破损状态识别的方法。对于变参数的加工过程,信号的幅值在不断变化,通常来说切削参数越稳定幅值的波动越小,反之则波动越大。在一段信号中刀具切入、切出位置的信号波动一般会很大,因此磨损特征值也会有较大波动。使用动态阈值法作为状态识别方法可以较好地适应工艺状况导致的信号波动,提高刀具破损监控的智能化程度。以最大值作为参照的动态阈值 $M(t)$ 设定公式如下式所示:

$$M(t) = A_{max} \times \eta \quad (6)$$

式中: A_{max} 为学习过程破损特征值的最大值, η 为根据经验手动设置的阈值安全系数,通常在 1.1~1.8 之间,也可以设定阈值安全系数数组以针对不同位置设定不同的安全系数。

2.2.4. 刀具破损监控方法的准确性与实时性验证

使用该 $\phi 80$ 铣刀完整寿命周期的信号来验证方法是否能够识别出图 8 所示的刀具破损。计算该把刀共计 22 次切削过程信号的平均值,将其作为波形特征值计算的标准信号波形,如下图 9 所示。图中由黄至绿为 22 次正常刀具切削过程的时域信号,中央红色线为根据均值得到的标准信号,蓝色为待识别的破损信号。

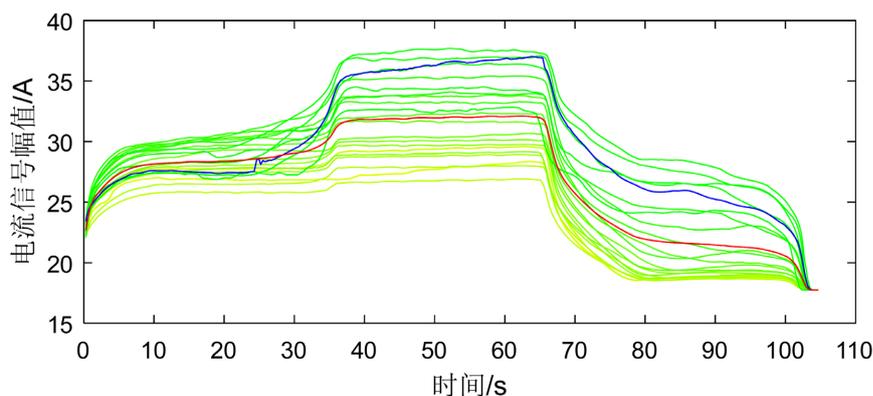


Figure 9. $\phi 80$ milling cutter cutting signal

图 9. $\phi 80$ 铣刀切削信号

使用标准信号与破损刀具前 22 组信号计算破损阈值,取每个时刻破损阈值的最大值,取安全阈值系数 η 为 1.1,可以得到破损特征值动态阈值曲线 $M(t)$ 。

图 10 中由黄至绿的 22 条曲线为计算得到的破损特征值变化曲线,红色为破损特征值动态阈值曲线 $M(t)$,蓝色即为待识别的刀具破损信号的特征值曲线。图中可以看到,在 24.32 s 蓝色信号波形首次超

出红色阈值线，在 24.37 s 蓝色信号尖峰处破损特征值明显超过动态阈值曲线 $M(t)$ ，达到此时刻破损阈值的 12.9 倍。所以该方法对于以上刀具破损的响应时间为 0.02 s，能够有效监测到该刀具破损现象，而基于信号幅值的动态包络法则不能监测到此次刀具破损现象。

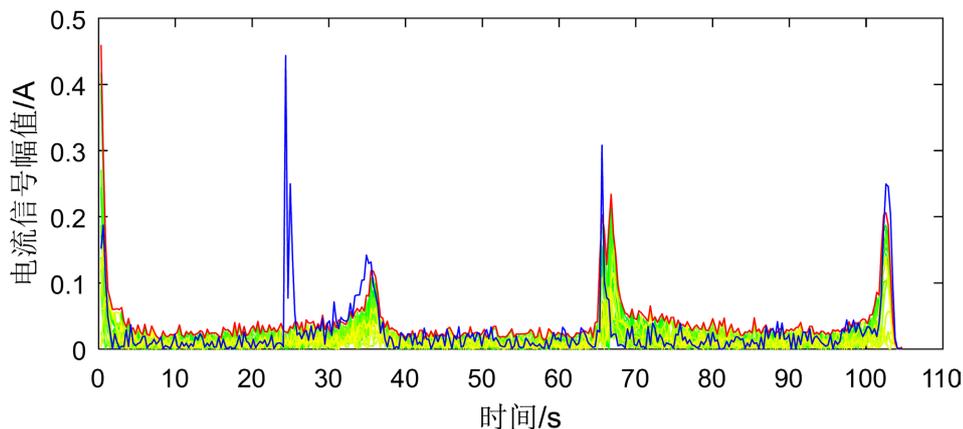


Figure 10. Damage threshold curve

图 10. 破损阈值曲线

通过以上分析可知，基于信号幅值的动态包络法难以识别到现象不剧烈、信号特征不明显的刀具破损，而基于波形特征的刀具破损监测方法能够准确、有效识别出这种刀具破损造成的信号突变，并且能够保证足够的实时性。

3. 验证与应用

本章主要针对基于信号波形特征的刀具破损监控方法进行实际项目的数据验证，检验理论方法对于实际工况下的应用效果。方法的验证工作在上汽通用五菱汽车股份有限公司宝骏基地的发动机工厂开展。

3.1. 应用验证

基于信号波形特征的刀具破损监控方法的验证试验在刀具监控系统的应用现场开展，因此试验效果即方法进行实际应用后的效果。

3.1.1. 验证条件

(1) 数控机床

本次刀具智能化监控系统的数据采集对象是工厂缸体生产流水线和曲轴生产流水线上的卧式加工中心。该加工中心为美国 MAG 公司生产的 XS321 卧式加工中心，采用 FANUC31i 数控系统。

(2) 刀具和工艺



Figure 11. Monitored milling cutter

图 11. 被监控铣刀

验证试验一共涉及到五把刀的 8 个生产工序，见图 11。刀具均由德国 GUHRING 公司生产，刀具型号与参数见下表 1，刀齿材料为硬质合金，铣刀刀齿均由刀具工程师使用螺钉固定在刀盘上。

Table 1. Tool type and parameters

表 1. 刀具型号与参数

刀具类型	刀具直径	刀齿数	预期寿命
T22141	125.0	20	260
T22003	99.0	13	510
T22001	52.0	4	260
T23013	63.0	8	310
T23002	50.0	5	1510

试验所采用的工件为缸体和曲轴的毛坯件，均为铸造件，所以工件表面余量波动较大。工件如下图 12、图 13 所示。

各铣刀的工艺参数见下表 2 和表 3 所示。



Figure 12. Cylinder block blank

图 12. 缸体毛坯件



Figure 13. Crankshaft blank

图 13. 曲轴毛坯件

Table 2. Cutting tools and technological parameters for cylinder block production line
表 2. 缸体生产线刀具与工艺参数

工序号	工序	刀具	主轴转速	加工时长
1	粗加工后端面	T22141	510	76.9 s
2	粗加工油壳底面	T22141	510	76.9 s
3	粗加工轴承盖接合面	T22003	579	18.8 s
4	粗加工曲轴半圆孔	T22001	700	46.2 s

Table 3. Cutting tools and technological parameters of crankshaft production line
表 3. 曲轴生产线刀具与工艺参数

工序号	工序	刀具	主轴转速	加工时长
1	铣端面	T23013	808	22 s
2	铣打标面	T23002	1019	9.7 s
3	钻中心孔	T23027	2476	6.7 s
4	套铣芯轴墙、倒角	T23014	1010	15.2 s

(3) 信号采集设备

机床主轴伺服电机电流信号采集使用美国 Honeywell 公司生产的 CSNS300M-002S 型号的霍尔电流传感器。信号采集装置为华中科技大学研制的 TMS 刀具监控系统。

3.1.2. 验证方案

对基于信号波形特征的刀具破损监控方法的验证以图 14 所示的流程进行。

3.2. 基于信号波形特征的刀具破损监控方法应用验证

刀具破损使用 T23013 生产中存在刀具破损现象的数据进行验证。

(1) T23013 在进行第 221 次加工过程中在第二次切出时发生了刀具破损，前 220 次切削正常。现使用基于信号波形特征的刀具破损监控方法来监测该过程以验证方法的有效性。

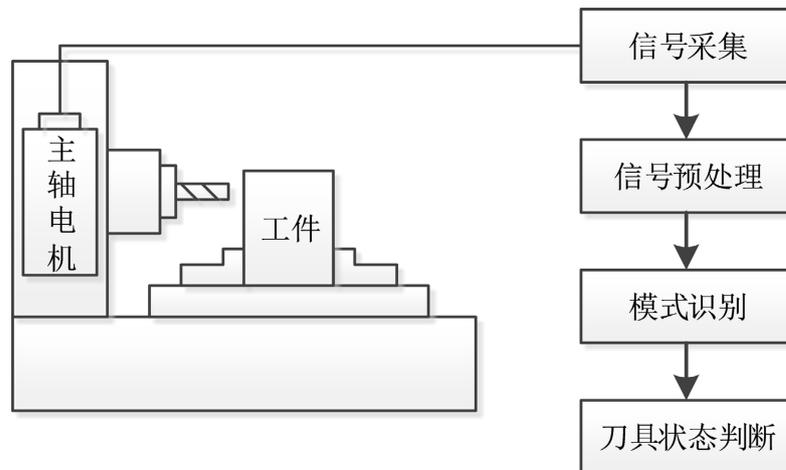


Figure 14. Verification process
图 14. 验证流程

如下图 15 所示为所有信号的时域波形。图中上、下两条红色曲线为动态包络法生成的第 221 次加工的上、下阈值曲线；由黄至绿为前 220 次加工的信号曲线；蓝色为第 221 次加工的信号曲线；洋红色曲线为根据前 220 次加工学习得到的标准信号曲线。

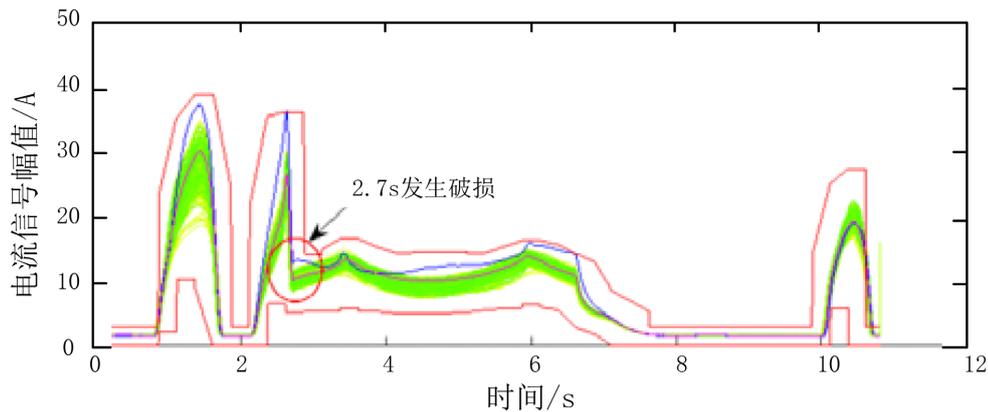


Figure 15. T23013 cutting signal

图 15. T23013 切削信号

图中可见第 221 次加工信号在第 2.7 s 位置处发生了突变，此处即为刀具发生破损时刻。动态包络法生成的上、下阈值曲线完全将第 221 次加工曲线包括在内，因此对于此情况动态包络法无法监测到刀具在第 2.7 s 发生了刀具破损，现场刀具监控系统也没有发出刀具破损提示。刀具破损状况如下图 16 所示，可以看到多数刀齿确实发生了破损。

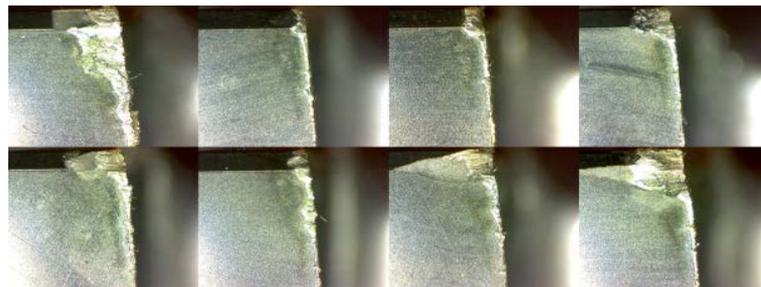


Figure 16. Knife teeth damaged condition

图 16. 刀齿破损状况

使用标准信号与前 220 次切削信号根据式(5)分别计算能够反映波性差异的刀具破损特征值 A ，由式(6)得到破损特征值阈值线 $M(t)$ 。将该刀共计 221 次加工破损特征值曲线及特征值阈值曲线绘制在下图 17 中。

可以看到图中蓝色曲线在多处明显要超出红色曲线，所以此方法能够成功监测到此时刀具的破损。

(2) T23013 加工至第 340 件时出现刀具严重破损，刀具监控系统做出报警。如下图所 18 所示，由黄至绿色波形为前 339 次加工的时域信号波形，上、下两条红色曲线为动态包络法生成的第 340 次加工的上、下阈值曲线，蓝色曲线为第 340 次加工的时域波形，洋红色曲线为根据前 339 个工件计算得到的标准信号波形。

图中①处为 0.99 s 发生刀具破损，②处为 1.31 秒信号波形第一次超出上阈值线。

刀齿破损状况如下图 19 所示，可以看到各刀齿破损情况均比较严重。

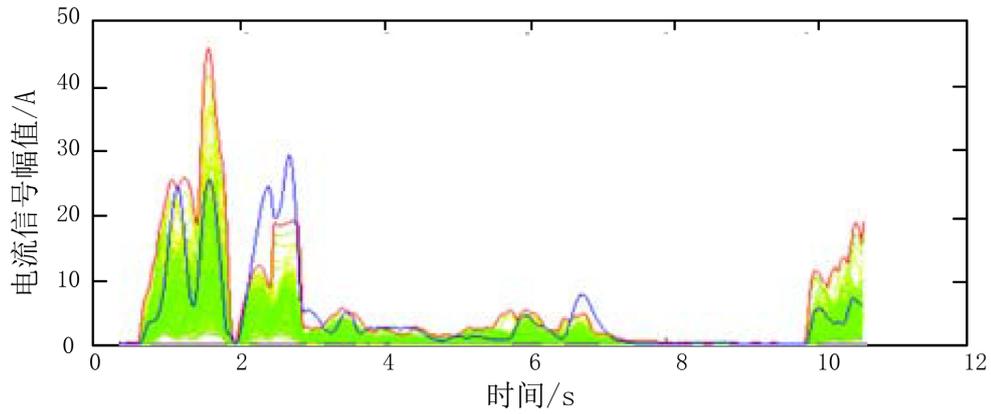


Figure 17. T23013 tool damage characteristic curve

图 17. T23013 刀具破损特征曲线

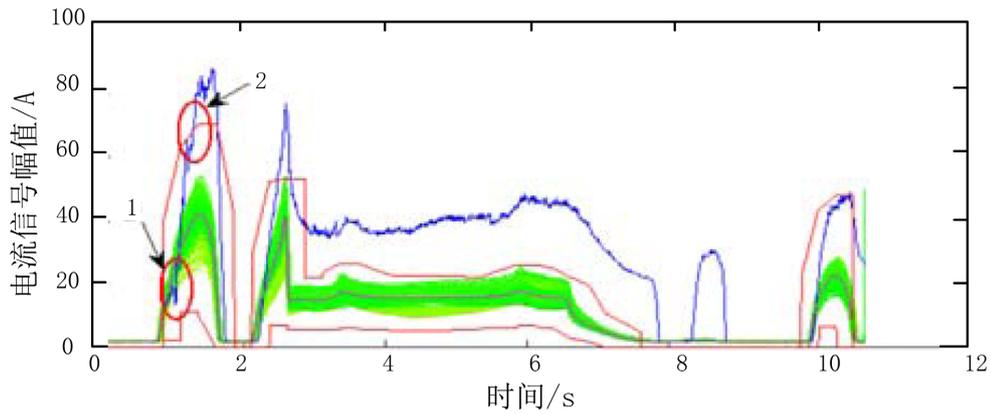


Figure 18. T23013 processing signal

图 18. T23013 加工信号

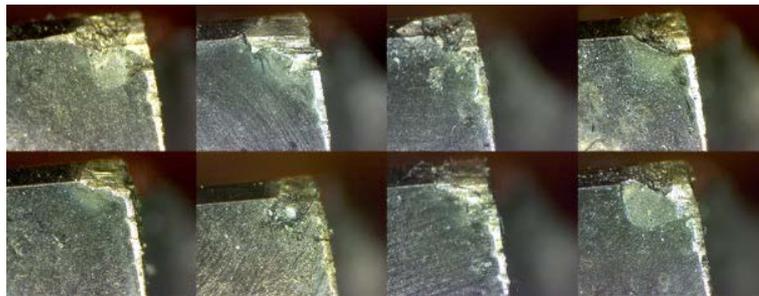


Figure 19. Knife teeth damaged condition

图 19. 刀齿破损状况

同样地，使用标准曲线与 340 次加工的信号波形曲线一一计算刀具破损特征值 A ，再根据前 339 次加工计算得到的破损特征值动态阈值线，分别绘制在下图 20 中。

如图 20 所示，蓝色为表示第 340 次加工刀具破损特征曲线，红色为根据前 339 次加工得到的第 340 次加工的破损特征值动态阈值线，蓝色曲线明显在多处超出红色曲线范围，第一次监控到刀具破损为 1.00 s。因此相比于动态包络法，基于波形特征的刀具破损监控方法能够准确捕捉到此次刀具破损现象，并且时间提前了 0.3 s。

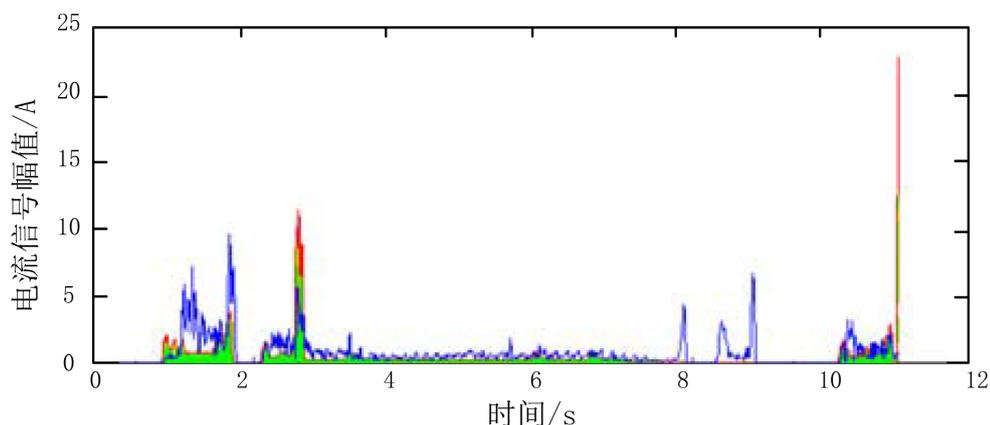


Figure 20. T23013 tool damage characteristic value curve

图 20. T23013 刀具破损特征值曲线

经过以上验证, 基于信号波形特征的刀具破损监控方法对于比较微小的破损具有比动态包络法更好的识别效果, 方法使用的破损特征值能够更好地表达刀具破损时刻信号发生的变化, 提高了系统对刀具破损的监控能力。

4. 结束语

本文针对刀具加工过程中, 微弱破损信号的监控, 对于破损造成的时域信号波动较小而动态包络法难以识别的问题, 提出了基于信号波形特征的刀具破损监控方法, 此方法能够准确识别到现象较微弱的破损现象, 相比于动态包络法准确度大大提高。

总体来说刀具监控系统仍然受加工对象与工艺限制, 存在通用性、智能化程度不够高的问题, 这为刀具监控系统的应用造成了一定困难。基于信号波形特征的刀具破损监控方法在一定程度上能够提高监控系统的智能化程度与识别准确度。刀具破损监控的主要问题是获得广泛有效的监控阈值。这涉及到信号处理、特征提取、模式识别等多方面因素的影响。刀具破损的识别可以着眼于发生破损瞬间信号的变化, 也可以着眼于发生破损前后信号的差异。目前机器学习等方法为刀具破损监控提供了崭新的思路, 可以尝试使用机器学习的方法进行刀具破损的模式识别。

基金项目

国家自然科学基金项目: 高精度薄壁零件加工的动力学特性分析与工艺在线精化方法研究(项目编号: 51775210)。

参考文献

- [1] Aliustaoglu, C., Ertunc, H.M. and Ocak, H. (2009) Tool Wear Condition Monitoring Using a Sensor Fusion Model Based on Fuzzy Inference System. *Mechanical Systems & Signal Processing*, **23**, 539-546. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.02.010>
- [2] Ambhore, N., Kamble, D., Chinchankar, S., et al. (2015) Tool Condition Monitoring System: A Review. *Materials Today: Proceedings*, **2**, 3419-3428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.317>
- [3] Antic, A., Popovic, B., Krstanovic, L., et al. (2018) Novel Texture-Based Descriptors for Tool Wear Condition Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **98**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.030>
- [4] Tlustý, J. and Andrews, G. (1983) A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, **2**, 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60184-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60184-X)
- [5] Kaya, B., Oysu, C. and Ertunc, H.M. (2011) Force-Torque Based On-Line Tool Wear Estimation System for CNC Milling of Inconel 718 Using Neural Networks. *Advances in Engineering Software*, **42**, 76-84.

- <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.12.002>
- [6] Tonshoff, H.K. (1988) Developments and Trends in Monitoring and Control Machining Processes. *Annals of the CIRP*, **37**, 611-622. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60758-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60758-6)
- [7] Donnell, G.O., Young, P., Kelly, K., *et al.* (2001) Towards the Improvement of Tool Condition Monitoring Systems in the Manufacturing Environment. *Journal of Materials Processing Technology*, **119**, 133-139. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00928-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00928-1)
- [8] Lange, J.H. and Abu-Zahra, N.H. (2002) Tool Chatter Monitoring in Turning Operations Using Wavelet Analysis of Ultrasound Waves. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **20**, 248-254. <https://doi.org/10.1007/s001700200149>
- [9] Abouelatta, O.B. and Mádl, J. (2001) Surface Roughness Prediction Based on Cutting Parameters and Tool Vibrations in Turning Operations. *Journal of Materials Processing Technology*, **118**, 269-277. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00959-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00959-1)
- [10] Venkata, Rao, K., Murthy, B.S.N. and Mohan, R.N. (2013) Cutting Tool Condition Monitoring by Analyzing Surface Roughness, Work Piece Vibration and Volume of Metal Removed for AISI 1040 Steel in Boring. *Measurement*, **46**, 4075-4084. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.021>