

凸轮轴高速磨削烧伤机理分析与在线监测系统研究

邓朝晖^{1,3} 卓荣锦^{2,3*} 陈敬强^{2,3} 葛吉民^{2,3} 吕黎曙^{2,3} 刘伟^{2,3}

1. 华侨大学制造工程研究院, 厦门, 361021

2. 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭, 411201

3. 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭, 411201

摘要: 凸轮轴非圆轮廓高速磨削过程容易发生磨削烧伤, 导致表面质量和使用寿命下降甚至报废, 因此开展了凸轮轴高速磨削烧伤机理分析与在线监测系统研究。探讨了工艺参数对磨削烧伤的影响规律, 通过表面形貌和硬度分析提出了磨削烧伤量化评价方法; 利用频域和时频域分析方法进行信号处理与特征提取, 并分析了传感信号与磨削烧伤的关系; 基于ReliefF提取了与磨削烧伤具有高相关性的AE信号特征, 基于遗传算法-支持向量机(GA-SVM)建立了磨削烧伤监测模型并进行了实验验证。开发了凸轮轴高速磨削烧伤在线监测系统并实现了应用。

关键词: 凸轮轴; 高速磨削; 磨削烧伤; 在线监测

中图分类号: TH165

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Mechanism Analysis and Online Monitoring System of Camshaft High-speed Grinding Burns

DENG Zhaohui^{1,3} ZHUO Rongjin^{2,3*} CHEN Jingqiang^{2,3} GE Jimin^{2,3} LYU Lishu^{2,3} LIU Wei^{2,3}

1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Xiangtan, Hunan, 411201

Abstract: The high-speed grinding of the non-circular contours of the camshafts was prone to grinding burns, resulting in a decrease in surface quality and service life and even scrapping. Therefore, the mechanism analysis and online monitoring system of camshaft high-speed grinding burns were studied. The influences of processing parameters on grinding burns were discussed. A grinding burn's quantitative evaluation method was proposed by surface morphology and hardness. Frequency and time-frequency domain analysis methods carried out the signal processing and feature extraction. The relationship between the sensing signals and grinding burns was analyzed. The AE (acoustic emission) signal features with a high correlation with grinding burn were extracted based on ReliefF. The monitoring model of grinding burn was established based on GA-SVM (genetic algorithm-support vector machine). And it was verified by experiments. The online monitoring system of camshaft high-speed grinding burns was developed and applied.

Key words: camshaft; high speed grinding; grinding burn; online monitoring

0 引言

凸轮轴是发动机的重要零部件, 其服役性能受到轮廓曲面加工质量的影响^[1]。高速磨削是其主要加工方式, 具有较高的加工质量和效率^[2]。但高速磨削加工过程会产生大量磨削热, 大部分

热量直接传入工件中, 只有小部分热量被磨屑和磨削液带走, 使得凸轮轴表面与砂轮接触区域形成瞬时局部高温^[3]。当温度超过临界值时, 工件表层金属的金相组织发生变化, 即发生磨削烧伤^[4]。凸轮轴发生磨削烧伤会导致表面质量下降甚至报废^[2, 5]。为了提高凸轮轴高速磨削质量, 有必要对磨削烧伤机理进行研究, 并进行有效检测, 最终实现磨削烧伤在线监测。

目前磨削烧伤的检测以离线为主, 然而离线

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(52375428, 52405470, 52405471);

国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U23A20634)

检测方法无法实现磨削烧伤的在线监测,难以满足实际生产需要,所以学者们开始关注间接监测方法^[6]。磨削烧伤间接监测方法是通过建立磨削过程物理量(力、振动、声发射以及功率等)与磨削烧伤的关系来反映磨削烧伤状态^[7]。目前,基于声发射信号(acoustic emission, AE)的监测方法是最常用的磨削烧伤在线监测方法。LIU等^[8]通过激光热诱导模拟磨削烧伤实验发现:高温会使AE能量往高频段集中,而当温度降低时,能量向低频段转移。CHEN等^[9]进行了单颗磨粒划痕、拉伸和激光热诱导等试验,将AE中的机械特性和热特性分离,发现高温产生的弹性波以高频率振荡为主。YANG等^[10]发现AE固有模态函数分量中均方根、边际谱振幅和频谱矩心值对磨削烧伤敏感。朱欢欢等^[11]发现AE经小波包分解后的能量分布可对磨削烧伤进行有效监测,其趋势与温度分布趋势一致。GAO等^[12]通过交叉小波变换和小波相干来揭示纯金属烧伤信号和磨削烧伤信号的相干关系。由此可见,AE对磨削烧伤反应灵敏,可实现高速磨削烧伤在线监测。

为了提高可靠性与稳定性,AE还经常搭配力、振动、温度、功率等传感器进行在线监测。GUO等^[13]在磨削烧伤实验中采集了力、振动和AE信号,经过小波包和集合经验模式分解后提取大量信号特征;为降低特征空间的维度并提高与磨削烧伤的相关性,提出一种两阶段的特征选择方法。HÜBNER等^[14]基于AE将卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)应用于磨削烧伤监测中,可以直接从时频图中提取信号特征。尽管CNN已应用于磨削状态监测,但还存在需要大量训练样本、训练时间长、对硬件要求高等问题。然而,实际应用中难以提供大量训练样本,应尽量避免磨削烧伤的出现,且需较快的响应速度。支持向量机(support vector machine, SVM)适合小规模样本的分类且计算速度快。YANG等^[15]发现在单一磨削参数下SVM烧伤监测模型准确率可达到96.88%,而在不同参数下准确率仅为91.67%。然而,SVM对接近分类边界的相似特征容易出现误判,有待进一步研究。

目前,国内外学者针对磨削烧伤已经开展了大量研究,但较少考虑凸轮轴高速磨削烧伤的机理及在线监测技术,且还存在以下问题:①磨削烧伤机理及在线监测的研究较少涉及非圆轮廓曲面高速磨削;②磨削烧伤的判定多是定性分析,较少考虑机理与信号的联系以及磨削烧伤的量化评

价;③在线监测多是建立信号特征与磨削烧伤之间的关系,缺乏机理解释;④磨削烧伤在线监测研究仍停留在建模阶段,未实现实际的应用。为此,本文开展凸轮轴高速磨削烧伤实验,探讨工艺参数对磨削烧伤的影响规律,分析磨削烧伤对表面质量的影响,揭示磨削烧伤与信号的关系,最后基于遗传算法(genetic algorithm, GA)优化的SVM开发凸轮轴高速磨削烧伤在线监测系统,并实现其应用。

1 凸轮轴高速磨削烧伤实验

1.1 实验工件及设备

如图1所示,凸轮轴高速磨削烧伤实验在湖南海捷精密工业有限公司生产的凸轮轴高速磨床CNC8325上进行;砂轮为浓度125%的陶瓷结合剂CBN高速砂轮,直径400 mm,宽度20 mm,粒度120 μm;工件为冷激合金铸铁(HT250GB943 9-88)465Q型凸轮轴,其基圆半径为15.5 mm。

CNC8325型凸轮轴数控高速复合磨床

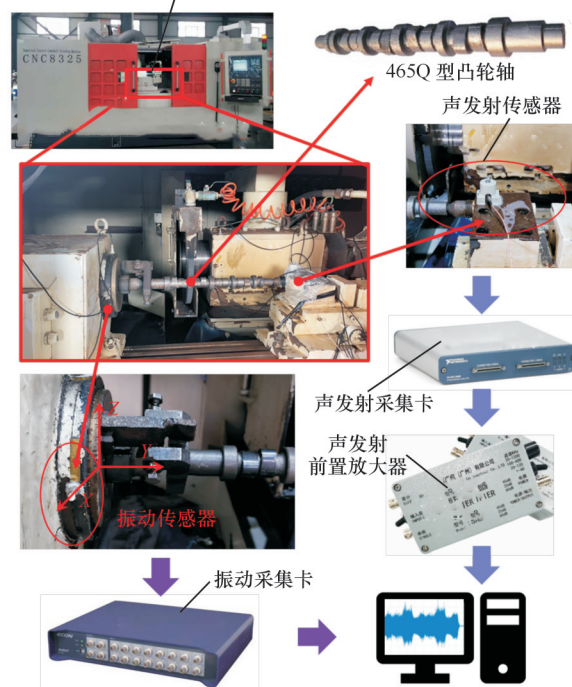


图1 实验和信号采集设备

Fig.1 Experiment and signal acquisition equipment

实验过程中同时采集AE和振动信号。其中,AE采样频率为1 MHz,采集卡为NI的USB-6351。振动信号由亿恒ECON振动数据采集仪采集,采样频率为6400 Hz。为保证信号的强度与准确性,调试后将AE传感器装在尾架Z轴方向,而振动传感器则放置在头架X轴方向。采用HVS-1000型显微硬度计测量轮廓表面维氏硬度 C_{HV} ,如图2a所示。考虑到磨削烧伤主要发生在凸

轮升程段,于是从此处截取长宽约为15 mm的小块弧制备硬度测试试样。使用超景深三维显微镜(VHX-500FE)观察磨削表面形貌,如图2b所示。

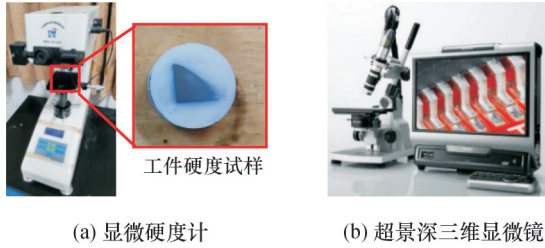


图2 实验检测设备

Fig.2 Experimental detection equipment

1.2 实验方案

为开展凸轮轴高速磨削烧伤机理和在线监测系统研究,进行了正交试验 $L_{25}(3^5)$,见表1。正交试验采用湿磨,每次磨削3圈。为保证实验初始条件一致,每隔4组实验通过金刚石修整滚轮(125 mm× ϕ 28 mm×12 mm)对砂轮进行修整,且保持凸轮轮廓尺寸一致。

表1 磨削烧伤正交试验参数

Tab.1 Orthogonal experimental parameters of grinding burn

水平	1	2	3	4	5
砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	60	85	110	135	160
工件转速 $v_w/(r \cdot min^{-1})$	30	60	90	120	150
磨削深度 a_p/mm	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25

2 凸轮轴高速磨削烧伤实验结果与分析

2.1 磨削烧伤的形成及影响

如图3a所示,凸轮轴凸轮轮廓由多段高次曲线形面组成,可将其分为桃尖、升程、基圆及回程段。凸轮轴高速磨削时,由于高速砂轮产生的气流和复杂轮廓型面,使得磨削液难以进入磨削接触弧区,容易形成瞬时局部高温,从而导致磨削烧伤。

凸轮轴凸轮内部金相组织构成如图3b所示。最外层由渗碳体、莱氏体、珠光体及少量游离石墨构成了激冷白口区,中间的麻口过渡区则由碳化物、珠光体、莱氏体及少量石墨构成,而灰口心部区则主要有石墨和珠光体。当磨削温度在回火温度和相变温度之间时,凸轮表层金相组织转换为回火屈氏体或回火马氏体,即为磨削回火烧伤。 C_{HV} 会随着金相组织的改变显著下降。当磨削温度高于相变温度时,金相组织则转变为奥氏体。在磨削液的作用下,凸轮表层转换为二次淬火马氏体,亚表层则变成回火索氏体与屈氏体。此时,工件表面 C_{HV} 有所提高,但亚表面 C_{HV} 会下降。磨

削烧伤改变了凸轮轴轮廓表面 C_{HV} 、残余应力、强度及形貌,甚至会形成磨削烧伤裂纹。其中,磨削烧伤对凸轮轴轮廓表面的影响最为明显。如图4所示,凸轮轮廓曲面因氧化反应在其表面形成一层氧化膜,使其表面变色。且当其表面的拉应力超过材料的极限强度时产生磨削烧伤裂纹。

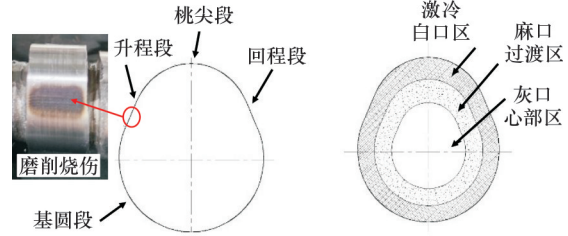


图3 凸轮轴轮廓及金相切样示意图

Fig.3 Camshaft contour and metallographic sample diagram

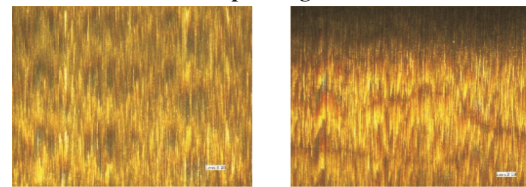


图4 磨削烧伤对工件表面的影响

Fig.4 Effect of grinding burn on workpiece surface

2.2 磨削工艺参数对高速磨削烧伤的影响规律

运用极差与方差分析法对实验结果进行分析,见表2、表3。比较表3中 $\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i, \bar{\gamma}_i, \bar{\delta}_i, \bar{\epsilon}_i$ 和 R_i 可得出,工艺参数对凸轮轴磨削表面 C_{HV} 的影响程度从大到小依次为: a_p, v_s, v_w 。 C_{HV} 是表征磨削烧伤程度的重要指标,因此,磨削工艺参数对烧伤的影响程度从大到小依次为: a_p, v_s, v_w ,并且表3中F与显著性水平Sig.给出一致的结论。

由图5中 v_s 与 C_{HV} 的变化曲线可知,60 m/s< v_s <110 m/s时, C_{HV} 随着 v_s 的增大而减小。滑擦与耕犁阶段的磨削接触弧长会随着 v_s 的提高而增加,从而导致磨削热难以散发,引起磨削烧伤程度加剧。随着 v_s 的不断提高,单位时间内磨粒划过凸轮轮廓表面的痕迹不断增加,使得更多的热量被带走。 v_s 达到临界值时,热量达到平衡点,此时磨削温度处于最大值。当 v_s 继续提高时,砂轮带走的热量会大于产生的热量,磨削温度开始下降。因此,110 m/s< v_s <160 m/s时, C_{HV} 随着 v_s 的增大而增大,此时,磨削烧伤程度减轻。由 v_w 与 C_{HV} 的变化曲线可知, C_{HV} 随着 v_w 的增大而减小,且下降速率不断减小。由于单位时间内材料的去除率不断增加,导致磨削热增加、磨削烧伤加剧。但 v_w 的提高也缩短了加工时间,单位时间内

表2 正交试验结果与极差分析
Tab.2 Orthogonal experimental results and range analysis

组号	烧伤程度	C_{HV}/MPa	a_p/mm	$v_w/(r \cdot min^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$
1	无	578.9	0.05	30	60
2	一般	513.6	0.15	60	60
3	严重	457.3	0.25	90	60
4	一般	525.6	0.10	120	60
5	一般	492.6	0.20	150	60
6	严重	459.5	0.25	30	85
7	一般	518.4	0.10	60	85
8	一般	481.7	0.20	90	85
9	无	573.8	0.05	120	85
10	一般	495.3	0.15	150	85
11	严重	453.6	0.20	30	110
12	无	552.7	0.05	60	110
13	一般	485.5	0.15	90	110
14	严重	442.9	0.25	120	110
15	一般	547.3	0.10	150	110
16	一般	510.9	0.15	30	135
17	一般	484.9	0.25	60	135
18	一般	524.4	0.10	90	135
19	严重	468.1	0.20	120	135
20	无	524.2	0.05	150	135
21	无	564.3	0.10	30	160
22	一般	470.6	0.20	60	160
23	无	571.1	0.05	90	160
24	一般	491.3	0.15	120	160
25	严重	438.0	0.25	150	160
$\bar{\alpha}_i$	513.60	513.44	560.14		
$\bar{\beta}_i$	505.74	508.04	536.00		
$\bar{\gamma}_i$	496.40	504.00	499.32		
$\bar{\delta}_i$	502.50	500.34	473.32		
$\bar{\epsilon}_i$	507.06	499.48	456.52		
R_i	17.20	13.96	103.62		

注： $\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i, \bar{\gamma}_i, \bar{\delta}_i, \bar{\epsilon}_i$ 分别为表中第*i*列的水平所对应 C_{HV} 的平均值； R_i 表示*i*因素对应 C_{HV} 的极差值。

表3 正交试验分析

Tab.3 Analysis for orthogonal experiment

因素	Sig.	均方	F值	自由度 <i>f</i>	离差平方和
v_s	0.983	198.679	0.094	4	794.716
v_w	0.988	167.054	0.078	4	668.216
a_p	0.000	9234.496	29.292	4	36 937.984

被带走的热量增加。因此，磨削温度的增长速率不断减小。当 a_p 增大后，磨削热更难被带走。磨削功率和接触弧长都在增大，磨削温度快速提高，导致磨削烧伤程度加剧，使得 C_{HV} 快速减小，如图5中 a_p 与 C_{HV} 的变化曲线所示。

2.3 凸轮轴高速磨削烧伤表面质量分析

当凸轮轴没有发生磨削烧伤时，其轮廓表面呈现亮黄色，纹理清晰、磨粒划痕平滑，如图6a所示；当磨削烧伤发生后，轮廓表面由于氧化变色现

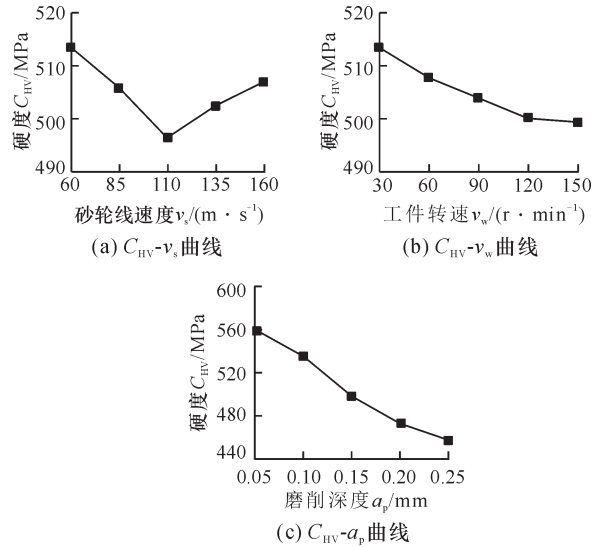


图5 磨削工艺参数对工件表面硬度的影响

Fig.5 The influence of grinding process parameters on the surface hardness of the workpiece

象而呈现黄黑色，磨粒划痕不连续从而使得表面形貌呈现出波浪形，如图6b所示；当出现严重烧伤时，轮廓表面氧化变色严重，并开始形成磨削裂纹，呈现青黑色，如图6c所示。

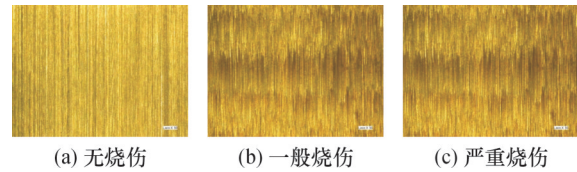


图6 磨削表面形貌

Fig.6 The surface morphology under grinding

凸轮轴轮廓曲面曲率不断变化，不同磨削区域接触点实际的 v_s 与 a_p 也产生变化，从而导致轮磨削温度变化。在升程段，实际磨削速度达到最大值，大量的磨削热快速聚集，磨削温度容易超过工件的相变温度，从而造成磨削烧伤，因此，凸轮升程段最易出现磨削烧伤。甚至当升程段已发生严重磨削烧伤时，其回程段仍然保持较好的表面质量，如图7所示。

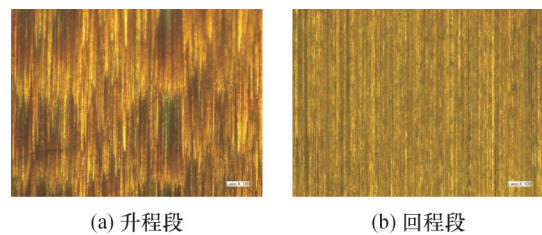


图7 凸轮轴轮廓的磨削表面形貌

Fig.7 Grinding surface morphology of camshaft profile

凸轮轴高速磨削烧伤的类型可以通过分析亚表面 C_{HV} 的变化进行判定。如图8所示，无磨削烧伤的凸轮轴表层和亚表层 C_{HV} 基本维持在同一水

平。一般烧伤的 C_{HV} 在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 处明显低于无烧伤,而严重烧伤的 C_{HV} 则进一步减小。在 $40\sim 50\ \mu\text{m}$ 处, C_{HV} 受磨削烧伤程度的影响降低,可以发现距离轮廓表面越远,其 C_{HV} 受到磨削烧伤的影响越小。但此时凸轮的 C_{HV} 从大到小依次为无烧伤、一般烧伤、大于严重烧伤。当超过 $50\ \mu\text{m}$ 后磨削烧伤对凸轮已经几乎不产生影响。根据金相组织、表层和亚表层 C_{HV} 分析,可知凸轮轴高速磨削烧伤实验中均为回火磨削烧伤。

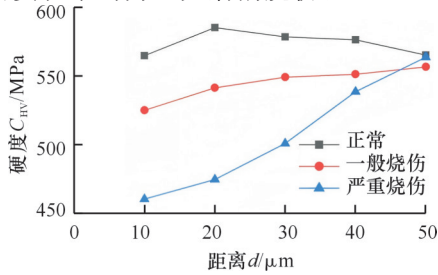


图8 磨削烧伤对亚表层 C_{HV} 的影响

Fig.8 Effect of grinding burns on C_{HV} of subsurface layer

2.4 凸轮轴高速磨削烧伤量化评价

综上,结合表面形貌检测提出一种基于 C_{HV} 的凸轮轴高速磨削烧伤量化评价方法。凸轮轴高速磨削烧伤的量化评价标准如下: $C_{HV} \geq 550\ \text{MPa}$ 且磨削表面无明显变色(亮黄色)为无烧伤状态; $470\ \text{MPa} < C_{HV} < 550\ \text{MPa}$ 且出现轻微变色(黄黑色)为一般磨削烧伤状态; $C_{HV} \leq 470\ \text{MPa}$ 且表面变色严重(青黑色)甚至伴有裂纹为严重磨削烧伤状态。

3 磨削烧伤与传感信号的相关性研究

3.1 磨削加工信号处理与特征提取

为了保证磨削烧伤监测的有效性、准确性以及减少计算,对信号进行预处理,如图9所示。凸轮轴轮廓升程与回程段易发生磨削烧伤,因此,截取该处的信号表征磨削烧伤。此外,信号中掺杂着机械与环境噪声。为此,对AE和振动信号分别使用 $20\ \text{kHz}$ 、 $500\ \text{Hz}$ 的高通滤波器进行滤波。

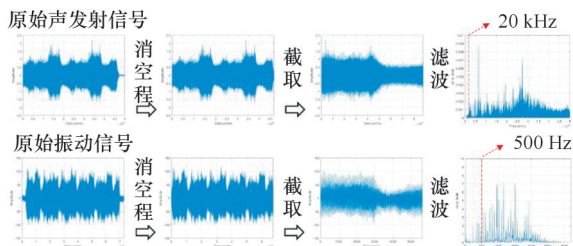


图9 信号预处理

Fig.9 Signal preprocessing

磨削加工信号频带宽广,时域分析难以反映其与磨削烧伤的关系且易受到干扰。因此,对信

号进行频域分析,如图10所示。快速傅里叶变换FFT是在离散傅里叶变换DFT基础上改良得到的,可以提供信号的频率结构和谐波成分等信息。DFT定义为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi nk/N) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi nk/N) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

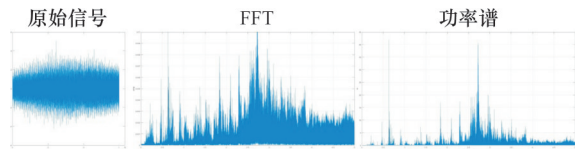


图10 频域分析(AE, $v_s=110\ \text{m/s}$, $v_w=120\ \text{r/min}$, $a_p=0.25\ \text{mm}$)

Fig.10 Frequency domain analysis(AE, $v_s=110\ \text{m/s}$, $v_w=120\ \text{r/min}$, $a_p=0.25\ \text{mm}$)

功率谱是信号能量在频域分布的描述。磨削烧伤与磨削过程消耗的能量相关。因此,功率谱适合用于磨削烧伤分析。自功率谱密度函数为^[16]

$$S_x(\omega) = |F(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

式中: $R_x(\tau)$ 为信号的自相关函数。

互功率谱密度函数为

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

式中: $R_{xy}(\tau)$ 为信号的互相关函数。

分析后,从振动和AE的FFT幅值谱与功率谱中分别提取14种频域信号特征,见表4。

表4 信号特征

Tab.4 Signal features

特征	表达式
重心频率	$f_w = \frac{\sum_{n=1}^N f_k u(n)}{\sum_{n=1}^N u(n)}$
均方频率	$f_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(n)$
频率偏差	$f_{sk} = \frac{1}{kf_{avr}^3} \sum_{n=1}^N (f_k - f_w)^3 u(n)$
频率标准差	$f_{rvf} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N f_w^2 u(n)}{\sum_{n=1}^N u(n)}}$
频率方差	$f_{avr} = \frac{\sum_{n=1}^N (f_k - f_w)^2 u(n)}{\sum_{n=1}^N u(n)}$
频率均方根值	$f_{af} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N f_k^2 u(n)}{\sum_{n=1}^N u(n)}}$
频率峭度	$f_{dr} = \frac{1}{kf_{avr}^4} \sum_{n=1}^N (f_k - f_w)^4 u(n)$

小波分解(wavelet packet decomposition, WPD)可同时满足低频与高频的细化分析^[17],其定义为:

$$\left. \begin{aligned} u_{2n}^{(j)}(t) &= \sqrt{2} \sum_k h(k) u_n^{(j)}(2t-k) \\ u_{2n+1}^{(j)}(t) &= \sqrt{2} \sum_k g(k) u_n^{(j)}(2t-k) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $n=0, 1, \dots$ 且 $k \in Z$ ； $g(k)$ 为高通滤波器系数； $h(k)$ 为低通滤波器系数。

小波基函数非常重要，会影响WPD分解结果^[18]。常见的小波基见表5。小波基的选择要满足高速磨削烧伤在线监测快速响应的要求，同时也要注意数据的离散性。考虑到DFT计算量小且满足离散计算需求，因此选择db小波基函数。由图11可知，基于db10的分解效果最好，能细致划分信号时频域的分布。经3层WPD分解后，得到8个小波包节点的分解信号，如图12所示。

表5 常见的小波基

Tab.5 Common wavelet bases

小波基	sym	morl	db	haar	meyr	coif
DFT	可以	不可	可以	可以	可以	可以
紧支性	有	有	有	有	有	有
CWT	可以	可以	可以	可以	可以	可以
对称性	近似	对称	近似	对称	对称	近似
正交性	有	无	有	有	有	有
消失矩	N	/	N	1	/	2N

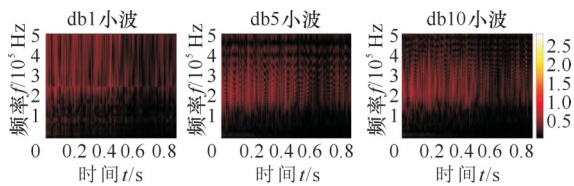


图11 不同db的时频分析

Fig.11 Time-frequency analysis with different db

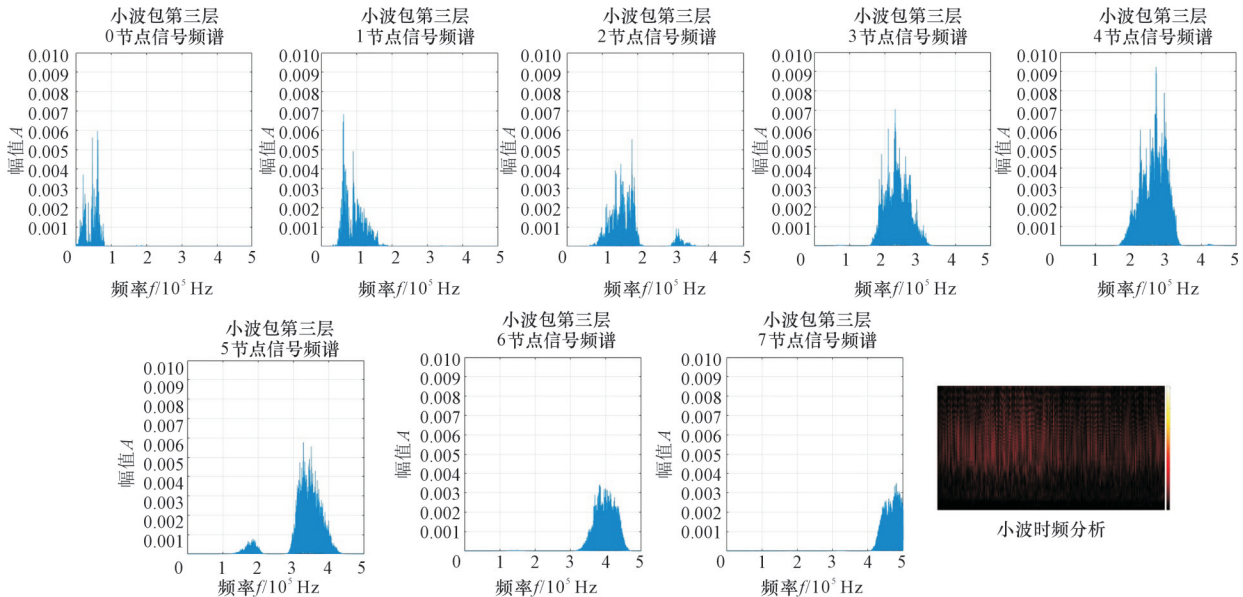


图12 WPD与时频分析(AE, $v_s=110$ m/s, $v_w=120$ r/min, $a_p=0.25$ mm)

Fig.12 WPD and time-frequency analysis(AE, $v_s=110$ m/s, $v_w=120$ r/min, $a_p=0.25$ mm)

振动信号采用相同的处理方法，如图14所示。当磨削烧伤状态变化时，其频谱幅值和信号

然而，磨削温度与各小波包节点的能量值 E_i 具有良好的对应关系^[12]：

$$E_i = \{E_{i,p}\} = \{|f_{i,p}|^2\} \quad (6)$$

式中， $p=0, 1, \dots, 2^i-1$ ； $f_{i,p}$ 为第 i 层的小波包系数。

能量占比 I_p 可反映各频段上的小波包能量系数，其计算公式如下：

$$I_p = E_{i,p} / \sum_{j=1}^{2^i-1} E_{i,j} \quad (7)$$

在WPD分解后提取16种不同的信号特征（高频/低频节点的能量比值、低频、中频与高频节点上的RMS、峭度、偏度、标准差、能量占比）与前述14种频域特征共同构成特征向量 D 。

3.2 传感信号与磨削烧伤的关系分析

对AE进行FFT和功率谱分析，如图13所示。未发生磨削烧伤时，AE的频谱成分在低频频段集中（小于150 kHz）且幅值较小，而信号整体能量在中低频段（20~350 kHz）集中。此时，磨削温度低于相变温度，凸轮轴磨削去除过程主要发生弹塑性变形，弹性波主要集中在中低频频段。但磨削烧伤发生后，AE的频谱幅值增大，信号整体能量向中高频频段（150~350 kHz）转移，且AE的频谱幅值随着磨削烧伤程度的加剧而增加。因此，在严重磨削烧伤时，高频频段（350~500 kHz）信号能量增加。由于磨削烧伤发生时，磨削温度改变了凸轮内部的组织结构，减少了分子间的约束作用，故其容易产生高频振动，从而释放高频的弹性波。最后，信号整体能量在中高频频段（150~500 kHz）集中。

能量分布没有明显变化。尽管不同的磨削烧伤状态下频谱幅值存在波动，但这是由工艺参数的变

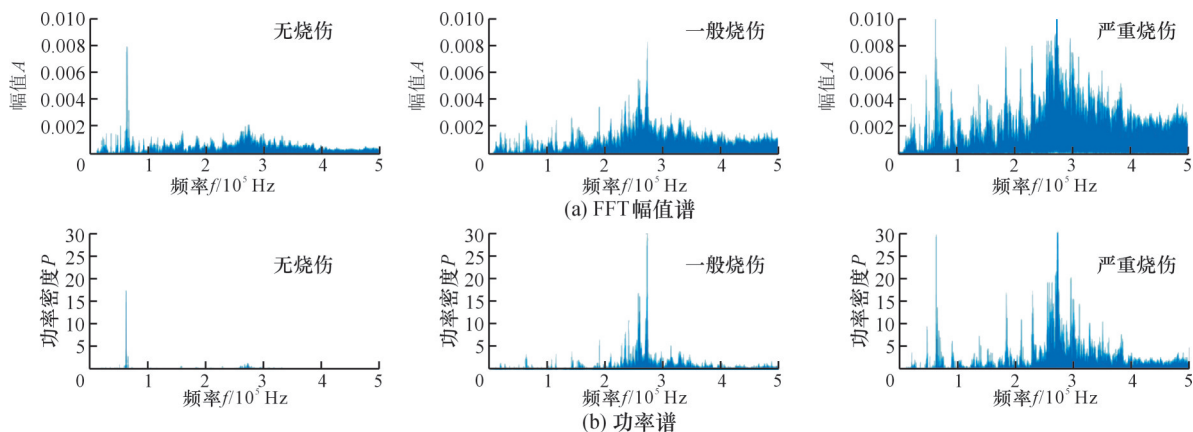


图13 AE的FFT幅值谱与功率谱

Fig.13 FFT amplitude spectrum and power spectrum of AE

化引起的。可见从频域角度看,振动信号与磨削烧伤没有明显的关联关系。

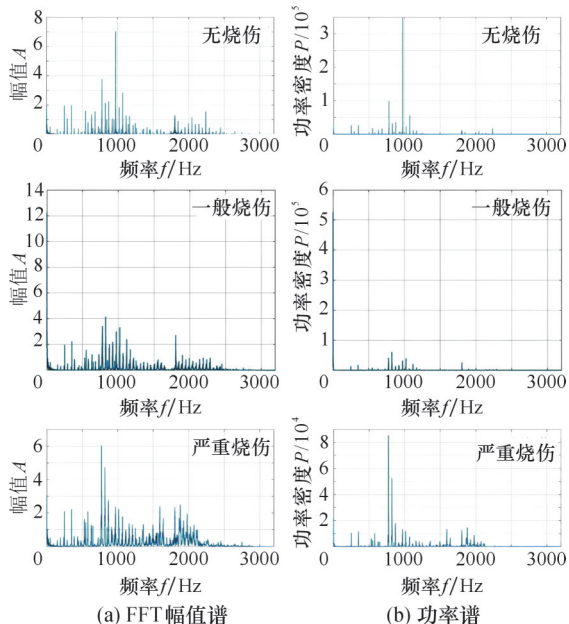


图14 振动信号幅值与功率谱

Fig.14 Vibration signal amplitude and power spectrum

工艺参数也会导致信号变化,如图15所示。尽管工件的检测结果均为一般烧伤,但AE信号FFT频谱幅值受磨削工艺参数变化的影响而产生明显的变化,而信号能量集中的频段并没有明显变化。FFT幅值谱的最大值主要在0.7 kHz和280 kHz附近,且信号整体能量主要在280 kHz附近集中,可见部分频谱特征(如有效值、峰值、平均值等)受磨削工艺参数的影响较大。因此,提取信号特征时应避免磨削工艺参数的干扰,选择可以反映信号整体分布的信号特征。

图16所示为AE信号时频分析和凸轮轴表面形貌,其升程段的信号能量明显高于回程段,且能量多集中在中高频段。此时,凸轮轴处于一般磨削烧伤状态,其表面形貌显示升程段已经出现磨

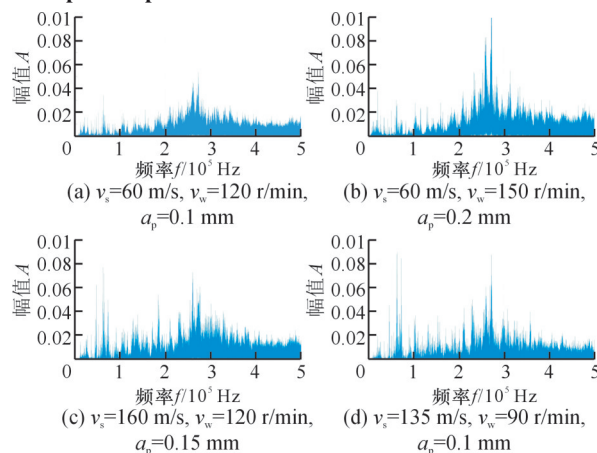


图15 不同工艺参数下的AE信号FFT幅值谱

Fig.15 AE's FFT amplitude spectrum under different process parameters

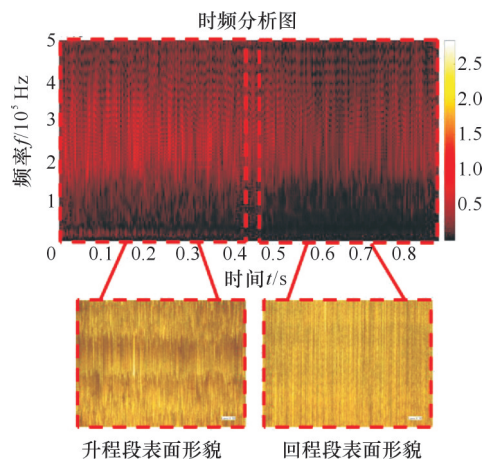


图16 时频分析与工件表面形貌(AE, $v_s=60$ m/s, $v_w=150$ r/min, $a_p=0.20$ mm)

Fig.16 Time-frequency analysis and workpiece surface morphology(AE, $v_s=60$ m/s, $v_w=150$ r/min, $a_p=0.20$ mm)

削烧伤,但回程段却状态良好。可见时频分析除了能有效描述凸轮轴磨削烧伤状态以外,还可以实现磨削烧伤在工件上的定位。

对AE进行3层WPD分解,得到8个节点的分解信号,每个节点长度为62.5 kHz。图17所示

为无烧伤状态下 AE 信号 WPD 各节点的能量分布。信号能量主要集中在第三层中低频节点上。其中,第 4 和第 5 节点的能量占总能量比例为 43.75%,而高频节点(6、7、8)的能量仅占总能量的 22.22%。为了更直观地展示 AE 的能量分布情况,将 WPD 各节点进行重构。将 6、7、8 节点重构为高频节点 W_3 (322.5~500 kHz);4、5 节点重构为中频节点 W_2 (187.5~322.5 kHz);1、2、3 节点重构为低频节点 W_1 (0~187.5 kHz)。

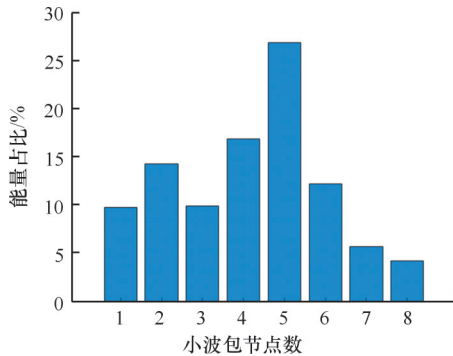


图 17 各个节点能量占比

Fig.17 The energy ratio of each node

图 18 所示为不同磨削烧伤状态下 AE 的 WPD 重构节点能量占比。无烧伤状态下的 AE 信号能量主要集中在 W_2 与 W_1 。无烧伤下的 W_1 能量占比远高于发生磨削烧伤状态下的 W_1 能量

占比,且一般烧伤状态下的 W_1 能量占比要高于严重烧伤。随着磨削烧伤的加剧,信号能量会向 W_3 转移,此时,信号能量主要分布在 W_2 与 W_3 ,当出现严重磨削烧伤时, W_3 的能量占比增至 36.38%。综上可知,磨削烧伤会使 AE 低频频段的能量占比下降,高频频段的能量占比上升。

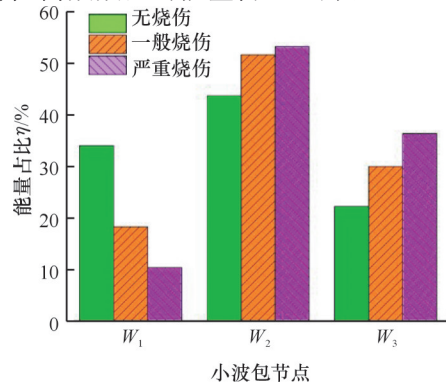


图 18 不同磨削烧伤状态下 AE 的重构节点能量占比

Fig.18 The energy proportion of reconstructed nodes of AE under different grinding burn conditions

对振动信号也进行了 WPD 分解,然后计算各个频段能量所占的比例,如图 19 所示。无烧伤、一般烧伤和严重烧伤状态下振动信号各小波包节点能量分布不存在明显规律,难以表征磨削烧伤状态,因此,未发现振动信号在时频域与磨削烧伤存在联系。

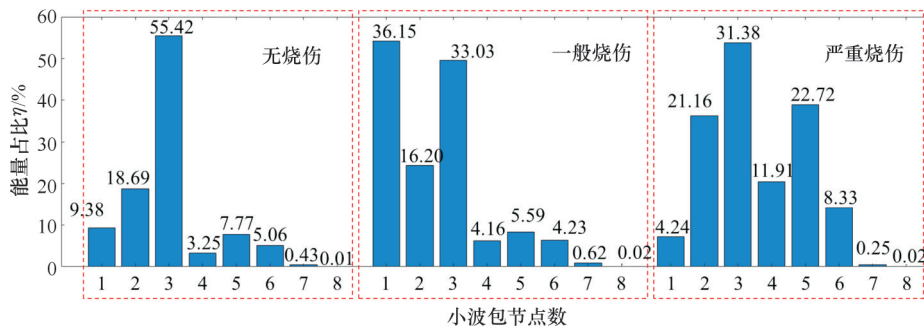


图 19 振动信号各节点能量占比

Fig.19 The energy ratio of each node of vibration signal

3.3 磨削烧伤信号特征优选

磨削加工信号特征向量 D 中包含大量的冗余、不相关的信号特征,难以保证它们都与磨削烧伤存在高的相关性。这会降低预测模型的分类能力,并增加计算时间。为此,本文通过 ReliefF 去除与磨削烧伤相关性较低或无关的特征。

Relief 可以根据特征与标记的相关性计算相应权重,但无法处理多分类的特征选择^[19],而 ReliefF 可以将多分类分解成多个二分类,并采用 k 近邻方法解决噪声的影响,其流程如下:

1) 设 D 中有 m 个特征子集且每个子集中有 n 个特征 $A_i, i=1, 2, \dots, n$; 初始权重值为 0, 初始迭

代次数 $l=1$, 迭代次数为 N 。

2) 从 D 中随机选择一个特征子集 x_i , 抽取距离 x_i 最近的 k 个近邻异类与同类样本分别组成异同类最近邻集合 $M_j(j=1, 2, \dots, k)$ 和同类最近邻集合 H_j , 然后计算特征的权重 w_i 。重复上述步骤,并更新 w_i :

$$w_i = w_i - \sum_{j=1}^k \frac{\text{diff}(A_i, x_i, H_j)}{lk} + \left\{ \sum_{C \neq \text{Class}(R)} \frac{P(C)}{1 - P(\text{Class}(R))} \sum_{j=1}^k \frac{\text{diff}(A_i, x_i, M_j(C))}{lk} \right\} \quad (8)$$

式中: C 为标签; $P(C)$ 为 C 在特征子集中的比例; $\text{diff}(A_i, x_i, M_j)$ 为 x_i 与 M_j 在 A_i 的距离; $\text{diff}(A_i, x_i, H_j)$ 为 x_i 与 H_j 在 A_i 的距离; $M_j(C)$ 为 C 中第 j 个特征子集; $\text{Class}(R)$ 为 x_i 所

属标签。

3)满足迭代设定后输出最优特征子集。AE信号处理与特征提取后得到的信号特征构成的磨削加工信号高维特征向量为 D_{AE} 。首先对 D_{AE} 的每维特征进行编号,随后基于RelieF计算特征权重。权重在前15的AE信号特征见表6。权重得分都大于0.06的为前10名,其对磨削烧伤的判别能力较强。而排名第10之后的特征权重得分已经不足0.05,难以支持模型对磨削烧伤进行有效判断。因此,选取权重得分排名前10的信号特征构造磨削烧伤优选特征向量 D_{AE1} 。振动信号特征权重前10的信号特征见表6,可以看出,其权重得分并不高,即使得分最高的中频RMS,其权重得分也仅为0.0210,甚至部分信号特征的权重得分为负数,因此,这些信号特征已无法有效识别磨削烧伤。

表6 AE和振动信号特征权重排序

Tab.6 Weight ranking of AE and vibration signal features

AE 信号			振动信号		
排名	特征	权重得分	排名	特征	权重得分
1	功率谱重心频率	0.1388	1	中频RMS	0.0210
2	功率谱均方频率	0.13499	2	功率谱均方频率	0.0184
3	高频能量占比	0.1325	3	功率谱矩心	0.0183
4	高频RMS	0.1209	4	中频标准差	0.0114
5	中频RMS	0.1081	5	幅值谱重心频率	0.0049
6	功率谱频率方差	0.1067	6	高频RMS	-0.0076
7	幅值谱重心频率	0.0961	7	高频标准差	-0.0081
8	高频标准差	0.0788	8	高频能量占比	-0.0114
9	高频节点/低频节点的能量比值	0.0723	9	高频峭度	-0.0135
10	中频标准差	0.0643	10	中频能量占比	-0.0195
11	低频RMS	0.0490			
12	低频偏度	0.0334			
13	中频能量占比	0.0321			
14	低频峭度	0.0272			
15	低频标准差	0.0266			

结合3.2节中振动信号与磨削烧伤关系分析可知,凸轮轴高速磨削烧伤实验中振动信号与磨削烧伤不存在明显的关联关系。由于振动信号的采样频率较低,而磨削烧伤时通常产生高频弹性波,故难以监测到磨削烧伤相关信息。振动信号更多反映砂轮与工件的接触、加工系统振动以及环境噪声等,然而AE采样频率高,可以较好地监测磨削烧伤。基于此,后续的磨削烧伤在线监测系统研究中将不再涉及振动信号。

4 凸轮轴高速磨削烧伤在线监测系统研究

基于磨削烧伤机理研究、AE与机器学习方法,建立凸轮轴非圆轮廓高速磨削烧伤监测模型。

4.1 凸轮轴高速磨削烧伤监测方法

4.1.1 基于GA-SVM的磨削烧伤监测模型

高速磨削烧伤监测是一个小样本非线性多分类问题。设SVM的非线性映射为

$$x \rightarrow \Phi(x) \tag{9}$$

最优决策函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i (\Phi(x_i) \cdot \Phi(x)) + b \right\} \tag{10}$$

在原空间中找到核函数 $K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$,无需知道映射函数 $\Phi(x)$,通过计算 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 即可求解最优决策函数。径向基核函数(radial basic function, RBF)抗干扰能力强且适合小样本分类问题,其计算公式如下^[20]:

$$K(x_i, x_j) = \exp[-\gamma |x_i - x_j|^2 / \sigma^2] \tag{11}$$

式中: σ 为径向基半径; γ 为固定参数。

SVM性能受核参数 g 和惩罚因子 c 的影响,因此,需要对 g 与 c 进行优化。GA算法的非线性寻优能力较强且能高度收敛^[21],因此,通过GA算法对SVM进行优化,如图20所示,该优化过程选择SVM交叉验证的准确率作为适应度。

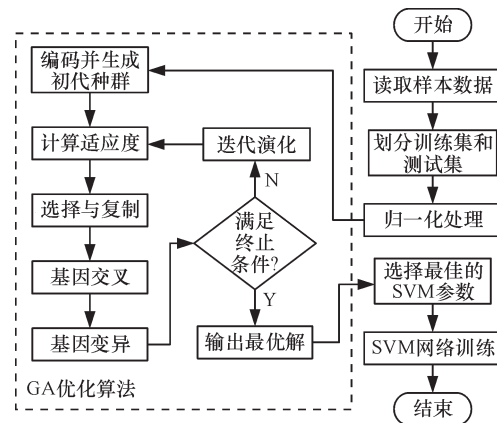


图20 GA-SVM运算流程图

Fig.20 GA-SVM flow chart

无论凸轮轴为一般烧伤还是严重烧伤,在实际加工中都应当避免。若将烧伤凸轮轴误判为无烧伤状态将造成极大的质量问题。实际应用中可以接受少量的无烧伤工件误判为烧伤,反之则难以接受。为了更准确地评价凸轮轴高速磨削烧伤在线监测模型的实际应用性能,引入真阳率(true positive rate, TPR)和假阳率(false positive rate, FPR)。

4.1.2 磨削烧伤监测方法验证与分析

实验中共采集到50组样本数据,按4:1的比

例将数据随机分为训练与测试样本,见表7。将 D_{AEI} 进行归一化处理后与标签值 L (无烧伤标签为1、一般烧伤标签为2、严重烧伤标签为3)构成 GA-SVM输入特征向量 $Q=(D_{AEI}, L)$ 。

表7 训练与测试样本分布

Tab.7 Training and test sample distribution

样本	样本数
训练样本	严重烧伤:9
	一般烧伤:20
	无烧伤:11
测试样本	严重烧伤:3
	一般烧伤:4
	无烧伤:3

为了评价 GA 对 SVM 的影响,使用 SVM 进行磨削烧伤状态分类。其中, c 与 g 设置为1。结果显示,训练和测试样本的准确率分别为 85%、60%。测试样本的 TPR 和 FPR 值分别为 66.7%、14.3%。由图 21 可以看出,基于 SVM 的磨削烧伤监测模型误判结果中有 75% 将磨削烧伤状态误判为无烧伤,这是难以接受的,因此,该模型难以在实际加工中使用。

使用 GA 算法对 SVM 的 g 与 c 进行优化,其

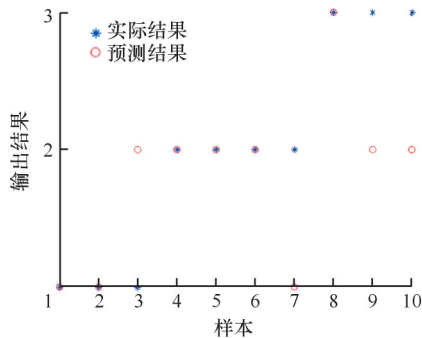


图 21 SVM 的分类结果

Fig.21 Classification results of SVM

中, g 和 c 的寻优范围分别设置为 0~1000 和 0~100, 迭代 100 次; 选用训练样本的准确率作为适应度函数, 并通过 5 重交叉验证进行参数寻优; 变异概率为 0.2; 群体规模为 50; 交叉概率为 0.8。其最优参数为: $g=2.872, c=73.080$ 。由图 22 可知, GA-SVM 对训练和测试样本的分类准确率分别为 100% 和 90%, 而测试样本的 TPR 和 FPR 值分别为 100% 和 0%, 其中仅有 1 组已经发生严重烧伤的凸轮被误判为一般烧伤。尽管基于实验中的数据测试样本准确率仅为 90%, 但从 TPR 和 FPR 值来看, 该模型没有将磨削烧伤状态误判为无烧伤或将无烧伤状态误判为磨削烧伤, 这能很好地解决实际加工问题, 并且随着数据样本的积累, 分类准确率将不断提高。

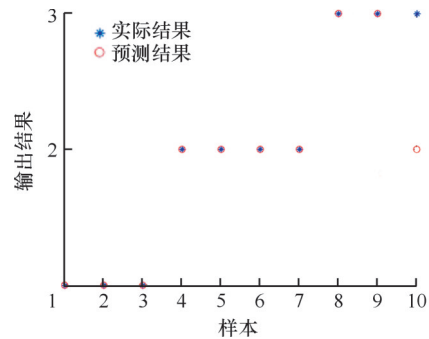


图 22 GA-SVM 的分类结果

Fig.22 Classification results of GA-SVM

4.2 凸轮轴高速磨削烧伤在线监测系统开发

以实际应用需求为导向, 考虑磨削烧伤机理, 基于信号处理、ReliefF 特征优选和 GA-SVM 高速磨削烧伤监测模型, 通过 LabView 与 MATLAB 联合编程, 在实际磨削加工中实现凸轮轴高速磨削烧伤在线监测, 系统架构如图 23 所示。通

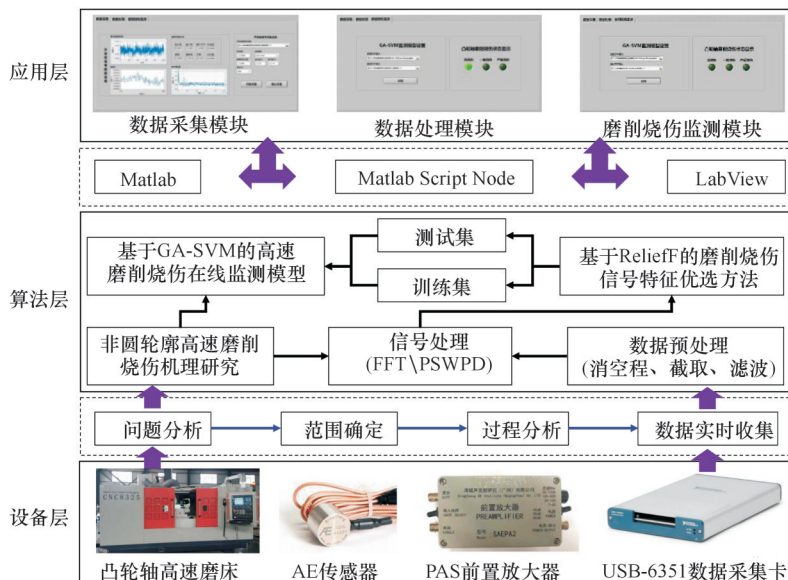


图 23 在线监测系统架构

Fig.23 Online monitoring system architecture

过Labview的虚拟仪器与函数库,可实现AE在线采集、分析、显示、存储。此外,通过MATLAB Script Node节点实时调取MATLAB算法进行信号处理与在线识别。为了方便应用程序的操作,降低运行成本以及提高实际应用能力,创建独立的可执行应用程序。

5 结论

本文以凸轮轴高速磨削烧伤在线监测为目标,探明了工艺参数对磨削烧伤的影响规律,分析了磨削烧伤对表面质量的影响规律,揭示了磨削烧伤与传感信号的关联关系,最后开发了凸轮轴高速磨削烧伤在线监测系统。得出结论如下:

1)工艺参数对磨削烧伤的影响程度从大到小依次为: a_p, v_s, v_w 。由金相组织的物理特性和表层显微硬度分析可知,实验中的磨削烧伤均为回火烧伤。

2)提出了一种基于工件表面形貌与硬度的磨削烧伤量化评价方法。

3)通过机理研究、频域与时频域分析,发现AE更适合磨削烧伤的监测,而振动信号与磨削烧伤不存在明显关系。

4)通过RelieF选取权重得分排名前10的AE特征构造磨削烧伤优选特征向量 D_{AE1} 。基于GA-SVM构建了凸轮轴高速磨削烧伤监测模型,对磨削烧伤的分类的真阳率达到100%,假阳率达到0%,未出现对磨削烧伤状态的误判。

参考文献:

- [1] SAIO K, MORIMOTO S, ARIKABE T, et al. Development of Ultra-high Speed, High-accuracy Profile Grinding Machine [J]. Komatsu Technical Report, 2017, 63(170): 9-17.
- [2] 邓朝晖, 刘涛, 廖礼鹏, 等. 凸轮轴高速磨削温度的实验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2717-2722.
DENG Zhaohui, LIU Tao, LIAO Lipeng, et al. Experimental Investigation on Temperature in Camshaft High Speed Grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(20): 2717-2722.
- [3] 朱正德. 工件磨削烧伤及其检测、评定方法简析[J]. 柴油机设计与制造, 2013, 19(2): 36-39.
ZHU Zhengde. Analysis on Inspection and Evaluation of Burnt Part Due to Grinding [J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2013, 19(2): 36-39.
- [4] 金滩, 易军. 高速高效磨削传热过程建模与数值分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 12-38.
- [5] WAN Linlin, DENG Zhaohui, LIU Tao, et al. Experimental Investigation of Grinding Temperature and Burn in High Speed Deep Camshaft Grinding [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2016, 7(4): 321.
- [6] WANG Jianjian, FENG Pingfa, ZHA Tijian. Process Monitoring in Precision Cylindrical Traverse Grinding of Slender Bar Using Acoustic Emission Technology [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(2): 859-864.
- [7] LAURO C H, BRANDÃO L C, BALDO D, et al. Monitoring and Processing Signal Applied in Machining Processes — a Review [J]. Measurement, 2014, 58: 73-86.
- [8] LIU Qiang, CHEN Xun, GINDY N. Investigation of Acoustic Emission Signals under a Simulative Environment of Grinding Burn [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3/4): 284-292.
- [9] CHEN Xun, GRIFFIN J, LIU Qiang. Mechanical and Thermal Behaviours of Grinding Acoustic Emission [J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2007, 12(1/2/3): 184.
- [10] YANG Zhensheng, YU Zhonghua, XIE Chao, et al. Application of Hilbert-Huang Transform to Acoustic Emission Signal for Burn Feature Extraction in Surface Grinding Process [J]. Measurement, 2014, 47: 14-21.
- [11] 朱欢欢, 迟玉伦, 闻章, 等. 断续磨削表面烧伤机理与在线监测方法研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 379-389.
ZHU Huanhuan, CHI Yulun, WEN Zhang, et al. Research on Burn Mechanism of Intermittent Grinding Surface and Online Monitoring Method [J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 379-389.
- [12] GAO Zheyu, LIN Jing, WANG Xiufeng, et al. Grinding Burn Detection Based on Cross Wavelet and Wavelet Coherence Analysis by Acoustic Emission Signal [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 68.
- [13] GUO Weicheng, LI Beizhi, SHEN Shouguo, et al. An Intelligent Grinding Burn Detection System Based on Two-stage Feature Selection and Stacked Sparse Autoencoder [J]. The International Journal of

- Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5): 2837-2847.
- [14] HÜBNER H B, DUARTE M A V, Da SILVA R B. Automatic Grinding Burn Recognition Based on Time-frequency Analysis and Convolutional Neural Networks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7): 1833-1849.
- [15] YANG Zhensheng, YU Zhonghua. Experimental Study of Burn Classification and Prediction Using Indirect Method in Surface Grinding of AISI 1045 Steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2439-2449.
- [16] 袁子皓. 基于多传感器信息融合的刀具磨损状态监测系统研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- YUAN Zihao. Research on Tool Wear Condition Monitoring System Based on Multi-sensor Information Fusion[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.
- [17] 李尧, 刘强. 基于小波包及 Hilbert-Huang 变换的数控铣削颤振诊断技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 204-216.
- LI Yao, LIU Qiang. Chatter Identification in CNC Milling Based on Wavelet Packet and Hilbert-Huang Transform [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 204-216.
- [18] 王宗炼, 任会兰, 宁建国. 基于小波变换降噪的声发射源定位方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 226-232.
- WANG Zonglian, REN Huilan, NING Jianguo. Acoustic Emission Source Location Based on Wavelet Transform De-noising [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 226-232.
- [19] 孙林, 陈雨生, 徐久成. 基于改进 ReliefF 的多标记特征选择算法[J]. 山东大学学报(理学版), 2022, 57(4): 1-11.
- SUN Lin, CHEN Yusheng, XU Jiucheng. Multilabel Feature Selection Algorithm Based on Improved ReliefF [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2022, 57(4): 1-11.
- [20] ZHUO Rongjin, DENG Zhaohui, CHEN Bing, et al. Research on Online Intelligent Monitoring System of Band Saw Blade Wear Status Based on Multi-feature Fusion of Acoustic Emission Signals [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(7): 4533-4548.
- [21] 王晶. 基于 DGA 特征量优选与 GA-SVM 的变压器故障诊断模型[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- WANG Jing. Transformer Based on DGA Feature Quantity Optimization and GA-SVM Fault Diagnosis Model. Hangzhou: China University of Metrology, 2021.

(编辑 陈勇)

作者简介: 邓朝晖, 男, 1968年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为先进加工技术、智能制造。发表论文 200 余篇。卓荣锦* (通信作者), 男, 1990年生, 博士研究生。研究方向为磨削加工过程质量动态建模及在线监测。发表论文 10 余篇。E-mail: zhuorj@126.com。

本文引用格式:

邓朝晖, 卓荣锦, 陈敬强, 等. 凸轮轴高速磨削烧伤机理分析与在线监测系统研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1784-1795.

DENG Zhaohui, ZHUO Rongjin, CHEN Jingqiang, et al. Research on Mechanism Analysis and Online Monitoring System of Camshaft High-speed Grinding Burns [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1784-1795.