

薄壁筒切削加工的多频颤振监测方法研究*

王鑫¹, 吕凯波¹, 谷丰收², 李苗硕^{2,3}, 李臻¹, 庞新宇¹

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024)

(2. 哈德斯菲尔德大学工程与计算学院 西约克郡, HD1 3DH)

(3. 浙江大学机械工程学院 杭州, 310030)

摘要 针对薄壁筒切削加工过程中的多频颤振复杂现象, 提出一种在线监测声压信号小波包能量相对熵的薄壁筒切削状态识别方法。以不同状态对应主振动频率以及能量分布不同作为颤振依据, 首先, 通过小波包分解得到切削过程中声压信号能量概率分布; 其次, 以机床空载时的信号能量概率分布作为参考分布; 最后, 建立小波包能量分布相对熵指标来监测薄壁筒零件的切削状态。切削振动试验结果表明: 随着加工状态的恶化, 小波包能量相对熵值明显增大; 在主振动频率发生跳跃的位置, 相对熵值也会发生突变; 相比于传统的频谱监测方法, 所提出方法表现出更快的响应速度, 能够对多频颤振状态进行准确判别。

关键词 薄壁筒; 切削颤振; 颤振监测; 相对熵; 小波包能量

中图分类号 TH113

引言

切削加工航空发动机中的薄壁筒零件, 极易产生切削颤振^[1]。切削颤振是由于前后两转切痕存在相位差导致切削厚度动态变化进而激发的一种自激振动^[2]。颤振的发生将严重影响工件的加工精度和效率, 同时会产生大量噪声, 缩短刀具的使用寿命。因此, 在加工过程中实时、准确、快速地识别颤振的发生, 对于保证薄壁筒类零件的稳定切削具有重要意义。

切削颤振监测主要包括信号采集、特征提取和状态判别3个环节。常用的切削加工状态监测信号有振动^[3]、切削力^[4]、噪声^[5]、电流或功率信号^[6]等。通过信号处理技术, 提取并放大原始信号中所蕴藏的颤振特征。Lu等^[3]融合振动加速度信号的时域方差和频谱特征用以监测细长轴零件的车削颤振。Ding等^[4]利用切削力信号自相关系数和小波包熵提高了对车削早期颤振的敏感性。Hynynen等^[5]利用加速度信号和声音信号的相干函数对车削颤振进行早期监测。

考虑到工件材料去除、刀具接触位置改变等因素引起切削加工过程的非平稳性, 时频分析方法被广泛应用于颤振信息的提取。常见的时频分析方法

有短时傅里叶变换^[7]、小波变换^[8-9]、经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称EMD)^[10]等。Liu等^[8]利用小波包变换(wavelet packet transform, 简称WPT)从电机电信号中提取敏感小波包频段, 并将其标准差和能量比作为颤振特征向量, 增强了早期颤振的监测能力。吕凯波等^[9]利用WPT实时分解车削过程中的声压信号, 获得指定频带的小波包能量系数, 构建能量峭度指标实现对早期微弱颤振的准确识别。Ji等^[10]根据能量比选取有用的固有模态函数(intrinsic mode function, 简称IMF)来重构信号, 基于多指标对早期切削颤振进行有效识别。Cao等^[11]利用梳状滤波器去除加速度信号中主轴转频、铣削刀齿通过频率及其谐波成分, 通过频带滤波提取包含颤振频率的频带信息。以上方法本质上是通过滤波手段来提高颤振信号的信噪比。随着人工智能技术的快速发展, 神经网络模型、支持向量机模型、隐马尔可夫模型^[2]等机器学习模型也被应用到切削颤振的状态识别中。

薄壁筒的模态振型由轴向梁振型和周向壳体振型复合组成, 振动响应特性变得更为复杂^[12]。研究发现, 薄壁筒工件的振动特性对切削过程中材料的去除较为敏感, 振动响应表现出很强的时变性, 颤振频率存在多频、跳跃等现象^[13-14], 故很难通过固定频

* 国家自然科学基金面上资助项目(52175108)

收稿日期: 2022-11-29; 修回日期: 2023-03-27

带的滤波方法捕捉动态颤振信息。因此,笔者选用易于安装且非接触的声压信号作为信号源,利用小波包分解得到信号能量分布,在整个频率范围内分析提取颤振信息,引入相对熵衡量信号能量分布之间的差异来表征加工状态的变化,并通过薄壁筒切削试验对所提出方法进行验证。

1 薄壁筒切削颤振监测方法

1.1 相对熵

相对熵是2个概率分布间差异的非对称性度量,可以衡量2个随机分布之间的差异。差异值越大,表示2个随机分布差异越大;差异值越小,表示2个随机分布越接近。

设 $P(x)$ 、 $Q(x)$ 为随机变量 X 上的2个概率分布($P(x)$ 为真实分布, $Q(x)$ 为理想分布或参考分布),则在离散和连续随机变量的情形下,相对熵(Kullback-Leibler,简称KL)的定义分别为

$$\text{KL}(P\|Q) = \sum P(x) \log \frac{P(x)}{Q(x)} \quad (1)$$

$$\text{KL}(P\|Q) = \int P(x) \log \frac{P(x)}{Q(x)} dx \quad (2)$$

统计学中,若 $P(x) = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的概率分布,其中: $p_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$,且 p_i 的和为1,则设离散随机变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{10})$ 的3组数据向量分别为 $X_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$; $X_2 = [1.1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$; $X_3 = [0.9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 。三者的不同仅为向量中第1个元素产生0.1的增大或减小。以向量中元素的归一化结果作为其概率分布,即

$$p_i = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

以 X_1 为参考状态,利用式(1)、(3)计算3组向量的相对熵和方差。图1为3组向量的方差和相对

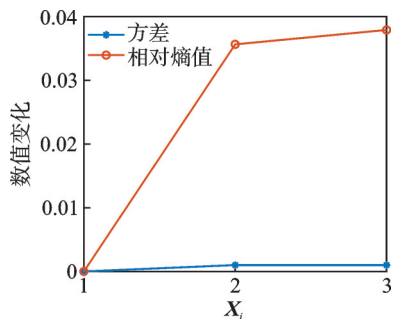


图1 3组向量的方差和相对熵值对比

Fig.1 Comparison of variance and relative entropy of three vectors

熵值对比。可以看出,与方差相比,相对熵值的变化更为明显,说明相对熵值对于向量中各元素幅值的增大或减小都较为敏感。可见,选择合适的颤振特征结合相对熵构成颤振指标,可以对颤振的发生进行快速识别。

1.2 小波包能量相对熵

研究表明^[2],当颤振发生时,切削振动幅值将增大,能量分布由宽带向窄带过渡,切削颤振频率通常与工艺系统中薄弱环节所对应的模态频率相接近。实际切削过程中,工艺系统的振动响应会受到切削过程中时变性和不确定性因素的影响,这必将影响切削振动信号的时、频域特征。显然,以单一的时、频域特征作为颤振监测指标会引起较大的误诊率。

切削过程中,薄壁筒工件作为工艺系统中的薄弱环节,其振动特性对材料去除较为敏感,颤振频率呈现出时变、复杂等特点。为了提高监测方法的鲁棒性,应在整个频带范围内搜索颤振信息,同时保证高信噪比来构建有效的监测指标。笔者通过建立小波包能量相对熵来衡量信号能量分布之间的细微差异,从而反映加工状态的变化。小波包变换对监测信号在低频段和高频段进行分解,计算各频段的能量占比,从而得到小波包能量相对熵。

小波包分解 m 层,可将原始信号分为 2^m 个频段,按频率大小顺序进行排序后,第 m 层第 i 频段的频率范围为

$$[(i-1)2^{-m}f, i2^{-m}f] \quad (i=1, 2, \dots, 2^m) \quad (4)$$

其中: f 为信号的奈奎斯特频率。

对应频段的小波包系数定义为

$$x_m^i = \{c_{i,j}, j=1, 2, \dots, K\} \quad (i=1, 2, \dots, 2^m) \quad (5)$$

因此,第 m 层第 i 频段的能量为

$$E_{m,i} = \sum_{j=1}^K |c_{i,j}|^2 \quad (6)$$

其中: K 为该频段信号小波包变换离散点的总数。

所有频段的总能量 E 表示为

$$E = \sum_{i=1}^{2^m} E_{m,i} \quad (7)$$

将各频段能量 $E_{m,i}$ 与总能量 E 的比值定义为能量占比,表示为

$$p_i = \frac{E_{m,i}}{E} \quad (8)$$

将信号 $x_i(t)$ 小波包分解为 m 层($l=1, 2, \dots, n$),计算各频段能量占比,得到信号能量概率分布为 $P_l = \{p_1^l, p_2^l, \dots, p_{2^m}^l\}$ 。由于稳定加工时信号频谱图特点与机床空载信号频谱图特点相

同,且量级和振动频率与机床空载时几乎相同^[15],所以选择机床空载时的空转信号能量概率分布作为参考分布 $P_r = \{p_1^r, p_2^r, \dots, p_{2^n}^r\}$ 。

根据式(1),小波包能量相对熵定义为

$$KL(P_l \| P_r) = \sum_{i=1}^{2^n} p_i^l \log \frac{p_i^l}{p_i^r} \quad (9)$$

其中: p_i^l 为第 l 个时间点第 i 个频段的能量占比; p_i^r 为参考分布第 i 个频段的能量占比。

针对薄壁筒车削过程中的时变颤振特性,选择小波包能量分布作为颤振特征,并结合相对熵构成颤振指标,可对颤振的发生进行准确快速识别。

1.3 监测方案

针对薄壁筒工件的时变振动特性,以不同状态对应主振动频率以及能量分布特征不同作为颤振依据,引入小波包能量相对熵颤振指标,所提出的颤振监测流程如下:

- 1) 通过模态分析来获得切削系统的频率响应曲线,为了避免两种频率出现在同一个小波包频段内,以前2阶固有频率差值的一半作为输入,通过程序计算自适应选择小波包分解层数;
- 2) 采集空转信号同时对信号进行小波包分解,计算各频段能量占比,得到参考分布;
- 3) 采集切削信号同时对信号进行小波包分解,计算各频段能量占比;
- 4) 计算颤振指标小波包能量相对熵,识别加工状态。

2 试验设计与数据分析

2.1 试验台的搭建

为了验证颤振指标的可行性,开展薄壁筒工件车削试验。试验在CA6140普通车床进行,如图2所示,薄壁筒工件采用一端固定、另一端自由的装夹方式,切削时刀具进给方向从卡盘端到自由端。选用刀杆型号为SDNCN25*25M11,刀具型号为DC-MT11T304。选取2种几何尺寸的工件进行比较,材料为40钢,卡盘端夹持长度为40 mm,夹持部分厚度远大于加工部分厚度,可忽略装卡变形造成的影响。采用2种传感器采集车削加工过程的振动信息,其中:加速度传感器型号为YMC121A20,贴附在刀具背面;声压传感器型号为D130E20 SN,由支架夹持放置在车床旁;采集仪采样频率设置为10.24 kHz。表1为切削加工参数。

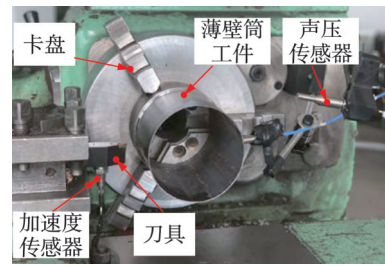


图2 车削试验台布置

Fig.2 Layout of turning test bench

表1 切削加工参数

Tab.1 Cutting parameters

参数	数值	
	工件A	工件B
切削长度/mm	100	130
壁厚/mm	1.3	1.5
内径/mm	130	111
主轴转速/(r·min ⁻¹)	583	740
切深/mm	0.6	0.8
进给量/(mm·rev ⁻¹)	0.1	0.1

2.2 模态敲击试验

为获取工件的模态参数,对薄壁筒进行锤击试验获取工件频响函数。力锤敲击点设置在距离工件悬臂端40 mm处,采用加速度传感器拾取敲击点附近的加速度响应信号。频率响应函数(frequency response function, 简称FRF)曲线如图3所示,工件A前3阶固有频率分别为601,977和1 365 Hz;工件B前2阶固有频率分别为555和1 070 Hz。

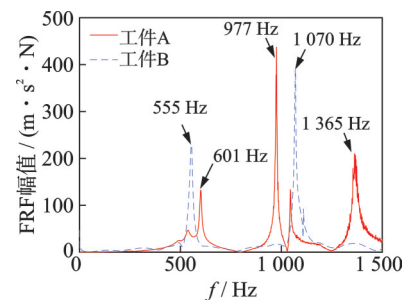


图3 频率响应函数曲线

Fig.3 Frequency response function curve

2.3 数据初步分析

以工件A切削信号为例,图4为切削工件A时的声压信号与加速度信号。观察2种信号的时域波形,0~32 s内幅值平稳且较小,之后幅值逐渐变大,现场开始出现刺耳的噪声,说明颤振开始发生,随后振动幅值出现规律性地增大到减小,再增大到减小的过程,直至加工结束,工件表面留有规律的振纹。

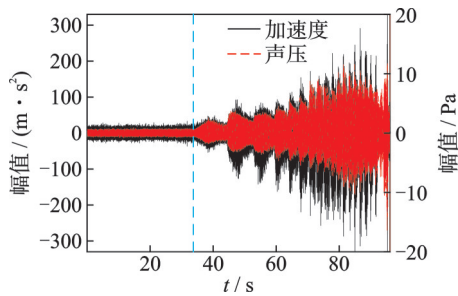


图4 切削工件A时的声压信号与加速度信号

Fig.4 Acoustic and acceleration signal in cutting workpiece A

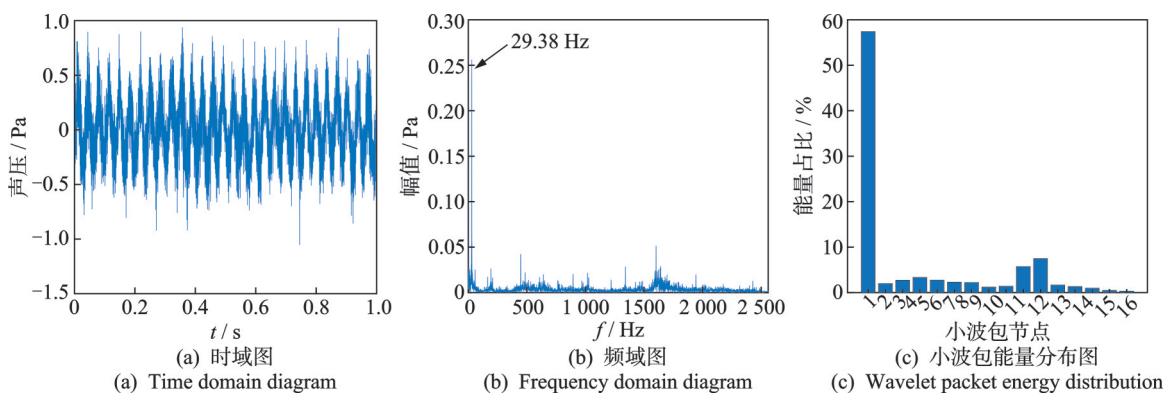
考虑到声音传感器具有安装便捷、对工艺系统干扰小、且可以实现远距离非接触测量,因此选择声压信号进行处理分析。

3 薄壁筒车削颤振监测

3.1 特征提取

为了观察不同加工状态信号能量分布的变化,对声压信号时域图、时频谱图以及已加工表面进行对比。

根据已加工表面形貌特点,将工件A表面划分为稳定区和颤振区2个区域。图5为工件A的已加工表面与声压信号时频谱图。稳定区表面光洁平整,颤振区呈现抛物线状的振纹,如图5(a)所示。与其对应的时域波形和频谱特征如图4和图5(b)所示,稳定区时域波形平稳且较小,主振动频率在30 Hz处,约为主轴转频的3倍;颤振区时域波形幅值变大,并出现规律性波动,主振动频率在1 300 Hz附近,还有其倍频成分,且呈下降趋势。



(b) Time-frequency spectrum of sound pressure signals

图5 工件A的已加工表面与声压信号时频谱图

Fig.5 Machined surface and time-frequency spectrum of sound pressure signals of workpiece A

在各加工状态信号以及空转信号截取1 s进行分析对比, S_1 (3~4 s)和 S_2 (51~52 s)分别对应的切削位置为2.9~3.9 mm和49.5~50.5 mm。由FRF曲线可得,工件第1阶固有频率为601 Hz,第2阶固有频率为977 Hz,差值的一半为188 Hz。根据式(4),将小波包层数设为5层,每个频段间隔为160 Hz,频率为0~2 560 Hz为主。图6为空转信号分析。

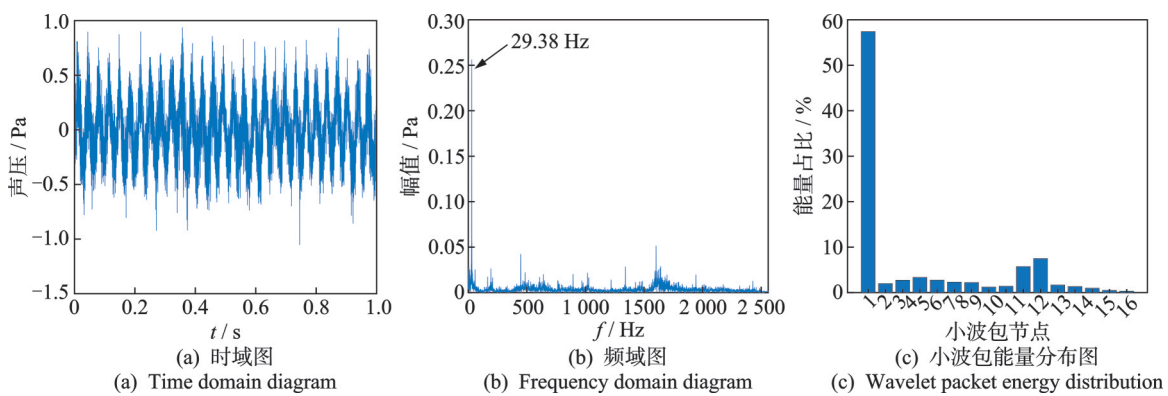


图6 空转信号分析

Fig.6 Analysis of idling signal

稳定区信号 S_1 分析如图7所示。信号经快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 简称FFT)后,频谱中最大幅值对应的频率为29.38 Hz(大约为3倍转频);能量分布集中在小波包节点1,对应的频段范围为0~160 Hz。由图6和图7对比可知,空转信号和稳定加工信号频谱分布和能量分布几乎

相同。

颤振区信号 S_2 分析如图8所示。FFT频谱中最大幅值对应的频率为1 289 Hz,对应敲击试验中工件A的第3阶固有频率,同时存在29.38 Hz(约为3倍转频),但幅值较小;能量分布集中在小波包节点8和节点9,对应的频段范围为1 120~1 440 Hz。

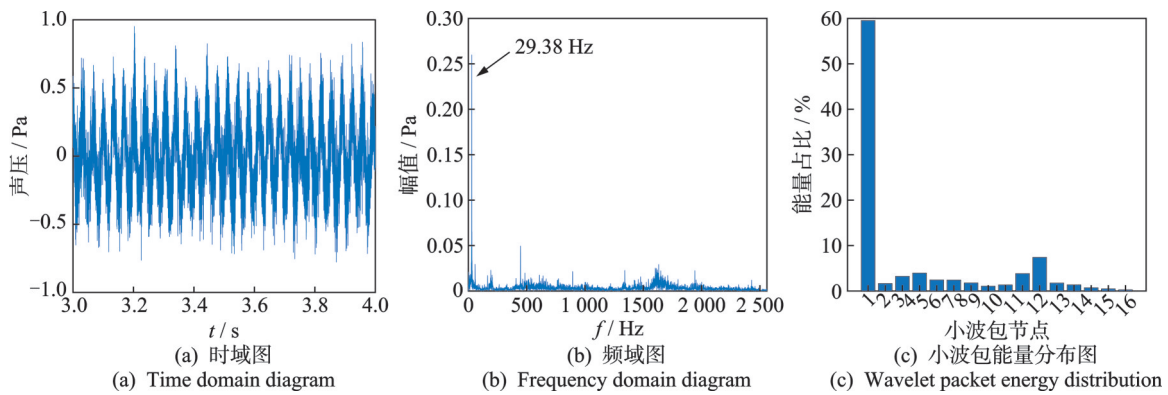


图 7 稳定区信号 S_1 分析

Fig.7 Analysis of signal S_1 in stable region

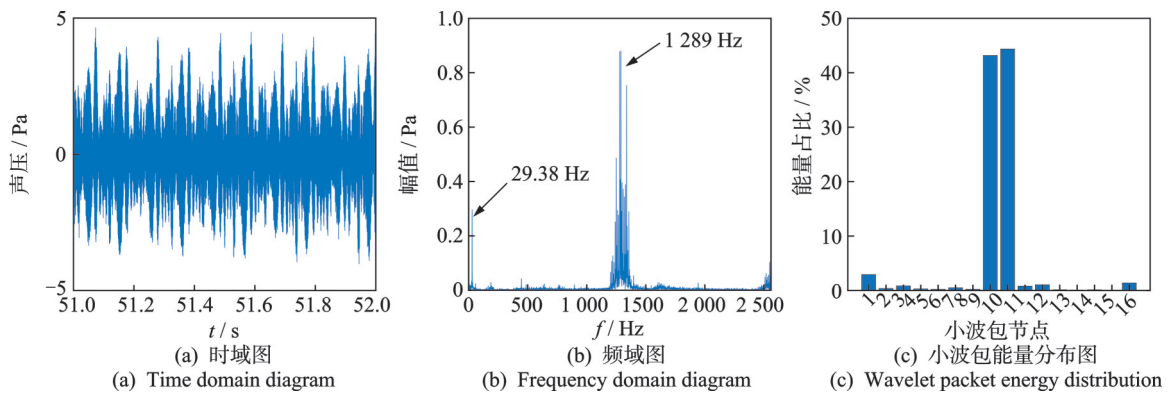


图 8 颤振区信号 S_2 分析

Fig.8 Analysis of signal S_2 in chatter region

工件 B 声压信号与表面形貌特征对比如图 9 所示。工件 B 情况较工件 A 更为复杂。首先,根据表面有无振纹,将表面划分为稳定区和颤振区;其次,根据振纹形状特点将颤振区分为 I 和 II,稳定区表面光滑无振纹,颤振区 I 表面呈现沟槽状振纹,颤振区 II 出现抛物线状振纹,见图 9(a)所示。与其对应的时域波形和频谱特征如图 9(b),(c)所示,稳定区时域波形平稳且较小,主振动频率在 37.5 Hz 处,约为主轴转频的 3 倍;颤振区 I 时域波形幅值变大,主振动频率在 656 Hz 附近;颤振区 II 时域波形幅值再次变大,并出现规律性增大到减小、再增大到减小的变化,主振动频率在 1 141 Hz 处,发生颤振频率跳跃现象,且有明显倍频成分出现,频率成分复杂,颤振强度增大,随着切削继续进行,主振动频率呈明显下降趋势。

在各加工状态信号以及空转信号截取 1 s 进行分析对比, S_3 (3~4 s), S_4 (40~41 s) 和 S_5 (80~81 s) 分别对应的切削位置为 3.7~4.9 mm, 49.3~50.6 mm 和 98.7~99.9 mm。由 FRF 曲线可得,第 1 阶固有频率为 555 Hz,第 2 阶固有频率为 1 070 Hz,差值的一半为 257.5 Hz,根据式(4),将小波包层数设为 5 层,每个频段间隔为 160 Hz。

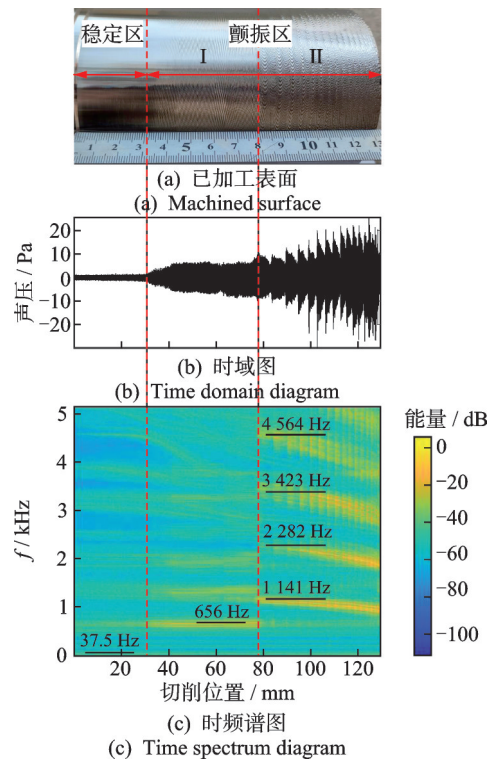


图 9 工件 B 声压信号与表面形貌特征对比

Fig.9 Comparison of sound pressure signal characteristics and surface morphology characteristics of workpiece B

工件B空转、稳定和颤振3种信号小波包能量分布对比如图10所示。与工件A类似,工件B空转信号与稳定加工信号能量分布特征相近,且在每个节点上2种信号的能量占比差异很小,能量主要集中在小波包节点1,频段范围为0~160 Hz;颤振信号能量分布与稳定信号相比发生明显变化,颤振区I信号能量主要集中在小波包节点4和节点5,频段范围为480~800 Hz,包含工件B的第1阶固有频率;颤振区II信号能量主要集中在小波包节点7,8,9和10,频段范围为960~1600 Hz,包含工件B的第2阶固有频率。

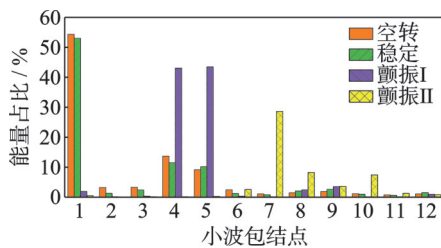


图10 工件B空转、稳定和颤振3种信号小波包能量分布对比
Fig.10 Comparison of wavelet packet energy distribution for three kinds of signals of workpiece B: idling, stability and chatter

通过分析可知:一方面空转信号与稳定加工信号能量分布特征相同,各节点能量占比数值接近;另一方面不同的加工状态对应的主振动频率以及能量集中的频段不同,数据特征分析结果与事先设定的颤振监测依据一致。另外,由2个工件的时频谱图可知,薄壁筒车削加工时,颤振频率可能会出现跳跃、倍频和下降等复杂情况。显然,基于指定频带内的颤振监测方法由于频谱的复杂性而失效。

3.2 监测结果

为验证相对熵值指标可以用于颤振监测,基于声压信号,数据处理滑动窗口的取样点数为5120,计算每个相对熵数值所需信号时间长度为0.5 s,重叠系数为50%,以空转信号的小波包能量分布作为参考分布,利用后续时间段的能量概率分布与参考分布之间的差异来揭示加工状态的变化情况。利用所提出的监测方案对加工状态进行监测,小波包能量相对熵值与时频谱图对比如图11所示。

可见,工件A切削开始时,信号相对熵值较小,且与空转信号相对熵值无明显差异(黑色虚线框内),判定此时为稳定加工状态;当切削到33.6 mm,相对熵值发生突变,加工状态发生变化,颤振开始;在黑色圆圈处数值略微下降后急速上升,是由于倍频成分能量下降导致,证明了相对熵具有较高的敏

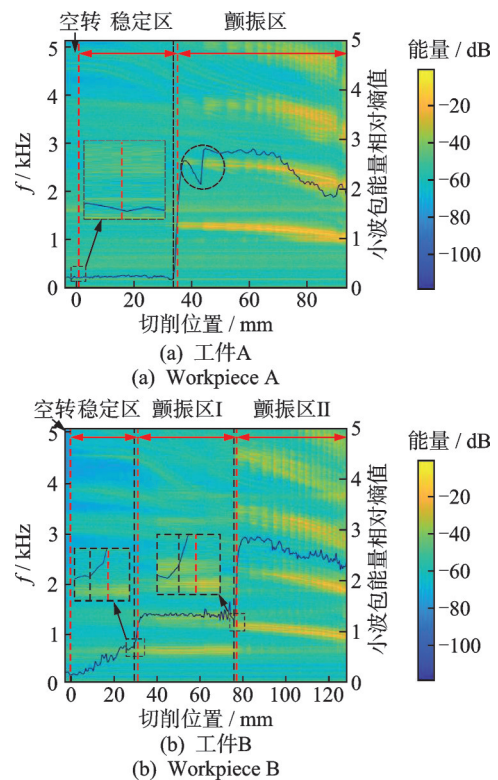


图11 小波包能量相对熵值与时频谱图对比
Fig.11 Comparison of wavelet packet energy relative entropy and time-frequency spectrum

感性。与工件A相似,工件B切削开始时,信号相对熵值较小,加工状态稳定;当切削至30.9 mm时,相对熵值发生突变,加工状态由稳定变为失稳,颤振持续了37.9 s后,相对熵值在77.6 mm处再次发生突增,颤振跳变到另一种态势,工件表面的振纹也发生明显改变。显然,为了提高信噪比,仅对指定频率或频段进行能级监测的传统方法无法准确判别多频颤振的跳转现象。小波包能量相对熵可在整个频带范围提取颤振信息,能准确反映加工状态的变化,具有较高的敏感性和鲁棒性。

监测分析结果表明,加工状态越不稳定,相对熵值越大,且在主振动频率发生跳跃的位置,相对熵值发生明显突变。根据相对熵曲线特点,切削状态的改变只出现在曲线斜率突然变化处。为了能够对加工状态实现自动判别,通过检测相对熵曲线斜率的突变点对颤振进行预警。

经计算发现,相比于传统的频谱监测方法,本研究方法分别以0.9 s和0.75 s的提前时间发出预警,且工件B在颤振频率发生跳转时,也早于0.5 s发出预警(黑色线型为所提出方法发出预警的位置,红色线型为表面形貌及频谱发生突变的位置),说明小波包能量相对熵可以对早期颤振进行准确快速地识别,可为后续的颤振抑制动作赢取更充分的响应时间。

4 结 论

1) 通过对薄壁筒切削声压信号时域、时频域特点和已加工表面形貌特点三者进行对比发现:不同加工状态对应的主振动频率、能量集中频段以及振纹形状特点存在明显差异;空转信号与稳定加工信号能量分布特征相近。

2) 在薄壁筒车削加工过程中,沿着切削路径,工件的振动响应表现出很强的时变性,颤振发生后,表面会出现沟槽状或抛物线状振纹,颤振频率存在跳跃、倍频、下降等复杂情况。

3) 试验结果表明,所提出方法在薄壁筒车削颤振具有时变性的情况下,仍可以准确反映加工状态的变化。加工状态越不稳定,相对熵值越大;在主振动频率发生跳跃的位置,相对熵值发生明显突变;相较于传统频谱监测方法,所提出方法表现出更快的响应速度,能够对多频颤振状态进行准确判别。

参 考 文 献

- [1] 王聪梅. 航空发动机典型零件机械加工[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 71-294.
- [2] 王志学, 刘献礼, 李茂月, 等. 切削加工颤振智能监控技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 1-23.
WANG Zhixue, LIU Xianli, LI Maoyue, et al. Intelligent monitoring and control technology of cutting chatter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 1-23. (in Chinese)
- [3] LU K B, LIAN Z S, GU F S, et al. Model-based chatter stability prediction and detection for the turning of a flexible workpiece [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 814-826.
- [4] DING L Y, SUN Y X, XIONG Z H. Early chatter detection based on logistic regression with time and frequency domain features[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany: IEEE, 2017: 1052-1057.
- [5] HYNYNEN K M, RATAVA J, LINDH T, et al. Chatter detection in turning processes using coherence of acceleration and audio signals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(4): 044503.
- [6] LIU H Q, CHEN Q H, LI B, et al. On-line chatter detection using servo motor current signal in turning[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(12): 3119-3129.
- [7] THOMAZELLA R, LOPES W N, AGUIAR P R, et al. Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: a new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals [J]. Measurement, 2019, 145: 71-83.
- [8] LIU Y, WANG X F, LIN J, et al. Early chatter detection in gear grinding process using servo feed motor current [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9): 1801-1810.
- [9] 吕凯波, 娄培生, 谷丰收, 等. 基于声压信号能量峭度的早期切削颤振预警技术研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 50-55.
LÜ Kaibo, LOU Peisheng, GU Fengshou, et al. A study on early chatter monitoring based on energy kurtosis index of acoustic signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 50-55. (in Chinese)
- [10] JI Y J, WANG X B, LIU Z B, et al. Early milling chatter identification by improved empirical mode decomposition and multi-indicator synthetic evaluation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 433: 138-159.
- [11] CAO H R, ZHOU K, CHEN X F, et al. Early chatter detection in end milling based on multi-feature fusion and 3σ criterion [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9): 4387-4397.
- [12] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 290-308.
- [13] 刘一沛, 吕凯波, 张志浩, 等. 时变因素作用下薄壁筒工件车削振动特性与试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 600-606.
LIU Yipei, LÜ Kaibo, ZHANG Zhihao, et al. Vibration characteristics and experiments of thin-walled cylinders in turning process with time-varying factors [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 600-606. (in Chinese)
- [14] MEHDI K, RIGAL J F, PLAY D. Dynamic behavior of a thin-walled cylindrical workpiece during the turning-cutting process, part 2: experimental approach and validation [J]. Journal of Manufacturing Science Engineering, 2002, 124(3): 569-580.
- [15] 黄强, 张根保, 张新玉, 等. 对再生型切削颤振模型的试验分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 547-552.
HUANG Qiang, ZHANG Genbao, ZHANG Xinyu, et al. Experimental analysis on regenerative chatter model [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 547-552. (in Chinese)



第一作者简介:王鑫,男,1998年5月生,硕士生。主要研究方向为机械系统状态监测与故障诊断。
E-mail:960729492@qq.com

通信作者简介:吕凯波,男,1984年2月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为机械系统动力学、智能制造、测试技术与信号处理。
E-mail:lvkaibo@tyut.edu.cn