

薄壁筒件机器人铣削颤振识别及抑制方法研究

宜亚丽^{1,2*} 程阳洋² 陈晓卫² 杨文博² 金贺荣^{1,2}

1.燕山大学起重机械关键技术全国重点实验室,秦皇岛,066004

2.燕山大学机械工程学院,河北,秦皇岛,066004

摘要:针对机器人在铸造类薄壁筒件断续开槽铣削应用中易发生颤振导致零件表面质量降低的问题,提出一种基于功率谱熵差和变转速的颤振在线识别及抑制方法。基于薄壁件铣削工况分析确定颤振类型及不同铣削状态特征;结合功率谱熵差与均方根值进行铣削状态识别,并针对早期颤振频率易被淹没的问题,提出一种主轴转频及其倍频快速去除算法;结合多组试验明确铣削参数对颤振的影响,采用离散变转速法进行颤振抑制并制定主轴转速更新策略;开发了颤振在线监测及抑制系统并进行变转速颤振抑制试验。试验结果表明,该方法可有效识别出空转、稳定和颤振状态,且颤振抑制后振动加速度幅值降低约37.3%,加工槽底表面粗糙度值降低约34.7%。

关键词:薄壁件;机器人铣削;颤振识别;颤振抑制

中图分类号:TP249

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Chatter Recognition and Suppression Methods for Robotic Milling of Thin-walled Cylinders

YI Yali^{1,2*} CHENG Yangyang² CHEN Xiaowei² YANG Wenbo² JIN Herong^{1,2}

1.State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: Aiming at the problems that chattering was easy to occur in robotic intermittent grooving milling applications of cast thin-walled cylindrical parts, which led to the degradation of surface quality of the parts, an on-line identification and suppression method of chatter was proposed based on entropy difference of power spectrum and variable rotational speed. Firstly, the type of chatter and the characteristics of different milling states were determined based on the analyses of milling conditions of thin-walled parts. Secondly, the combination of power spectrum entropy difference and root-mean-square value was utilized for milling state identification, and a spindle rotational frequency and the multiplier fast removal algorithm was proposed to address the issues of early chatter frequencies being easily drowned out. Thirdly, combined with a number of experiments to clarify the influences of milling parameters on chatter, the discrete variable speed method was adopted for chatter suppression, and a spindle speed update strategy was developed. Finally, an online chatter monitoring and suppression system was developed, and variable speed flutter suppression tests were conducted. The results show that the method proposed herein effectively identifies the idle, stable and chattering states, and the amplitude of vibration acceleration is reduced by about 37.3% after chattering suppression, and the roughness value of the machined groove bottom surface is reduced by about 34.7%.

Key words: thin-wall component; robotic milling; chatter recognition; chatter suppression

0 引言

大型薄壁件因其质量小、强度高、结构紧凑等特点被广泛应用于航空航天领域^[1]。某筒类舱段作为一种典型的航天薄壁结构件,由多段铸造铝合金筒件焊接成形,各筒段连接处的外壁进行断续开槽加工时,由于其内壁未经打磨,呈壁厚不均特征。目前此类零件多依赖于数控机床铣削和人

工修磨,面临加工范围受限、壁厚及精度保证难、修磨工作量大等问题^[2]。近年来工业机器人迅速发展,因其具备操作柔性高、加工范围广、易扩展、低成本等优势被作为薄壁零件加工技术新型载体^[3]。然而,利用机器人进行该类薄壁筒件开槽铣削时易发生颤振现象,致使槽底表面出现不规则振纹降低加工质量,影响成品服役性能。因此,为进一步促进机器人在铣削领域的深入应用,满足此类航天薄壁零件高效率、高精度的生产需求,颤振问题亟待解决。

收稿日期:2025-01-14

基金项目:装备预先研究共用技术项目(920722MS)

工业机器人多为串联结构,整体刚度较低,约为普通机床的1%~2%,其弱刚性特征与薄壁件的强时变动态特性是引发颤振的根源^[4-5]。机器人铣削颤振主要包括以刀具模式为主的再生型高频颤振^[6]和以机器人结构模式为主的低频颤振^[7],两类颤振皆会降低零件表面加工质量。为避免颤振发生,有学者开展了铣削系统稳定性分析,如WANG等^[8]建立了薄壁件机器人铣削过程的动力学模型并绘制出稳定性叶瓣图,进行颤振预测。但这类方法适用于壁厚均匀工件,针对本文壁厚不均且需断续开槽的薄壁筒件,其动态特性因壁厚变化显著时变,加工边界条件复杂,导致实际预测效果有限。因此,颤振在线识别与抑制研究尤为关键。

传感技术发展也为在线监测提供了可靠支撑。当前监测信号包括振动加速度、切削力、声发射和电流等,其中振动加速度传感器因其具有易集成、响应快和抗干扰强等优点倍受学者青睐^[9]。在信号处理识别方面,LAMRAOUI等^[10]采用方差、均方根和峭度等时域指标对铣削状态进行表征,虽简单高效但缺乏频域信息,稳定性较差。CHEN等^[11]基于频率分析开发的监测系统抗扰性良好,却无法反映频率出现时间。单独采用时域或频域法存在局限性,兼具两者优势的时频域分析法成为主流,包括小波分析、经验模态分解、变分模态分解等。ZHENG等^[12]提出一种基于小波包变换与粒子群优化支持向量机融合的多特征颤振检测识别系统。JI等^[13]采用集成经验模态分解法将加速度信号分解为多个本征模态函数对颤振进行监测。LI等^[14]采用变分模态分解法提取颤振敏感子信号并结合功率谱熵差对颤振进行识别。然而,该类时频域法存在超参数优化耗时、计算效率低、参数易受壁厚影响等问题,且提取的敏感子信号残留主轴转频周期成分,叠加断续开槽加工中主轴空转状态的功率谱熵差值易与早期颤振值混淆,降低识别可靠性。

在颤振抑制方面,当前研究主要分为被动抑制、主动抑制和切削参数调整抑制三类^[15]。被动抑制主要通过特定刀具、阻尼材料和辅助支撑装置被动降低系统振动^[16],该方法难以应对复杂工况。主动抑制则利用各类传感器监测铣削状态,通过作动器提供外激励抑制颤振^[17],该方法适应性强、可调节性高,但所需辅助设备复杂且昂贵,对控制算法要求极高。对于本文所述壁厚不均且需断续开槽的复杂时变工况,上述两类方法均难以适用,采取措施一旦与系统局部动态特性不匹

配,反而加剧振动。而切削参数调整抑制无需改动系统结构或增加辅助装置,通过在线调整切削参数打破再生效应^[18],具有实施性高、成本低等优势。刘阔等^[19]提出一种主轴转速和进给速度自适应调控技术。LI等^[20]采用连续正弦变主轴转速进行抑制,并对转速信号幅值比和变化频率参数进行优化,加工的零件表面更加光滑。因此,切削参数调整抑制是解决薄壁筒件断续开槽铣削颤振的合适选择。

上述关于颤振识别和抑制方面的多项研究都各具优势,然而难以适用于壁厚不均且需断续开槽的复杂实际工况。鉴于此,本文提出一种基于功率谱熵差与变转速的识别抑制方法。通过分析薄壁筒件铣削振动特性,结合功率谱熵差与时域均方根识别颤振,并设计转频及倍频去除算法以提取早期颤振频率;进一步采用离散变转速策略抑制颤振,开发在线监测系统,并进行对比试验。

1 铣削颤振特性分析

1.1 薄壁筒件机器人铣削系统

某航天筒类舱段由多段铸造薄壁筒件焊接成形,其材质为5A06铝合金,长为7200 mm,直径为800 mm,壁厚为7 mm。筒体轴线侧面存在一条半径为4 mm的弧形槽,其中各筒件连接处留有5段约50 mm的待加工区域,需进行断续开槽加工,将整条弧形槽连通,同时保证槽底壁厚为 $0.8\text{ mm} \pm 0.15\text{ mm}$,粗糙度 Ra 优于 $3.2\text{ }\mu\text{m}$,如图1所示。

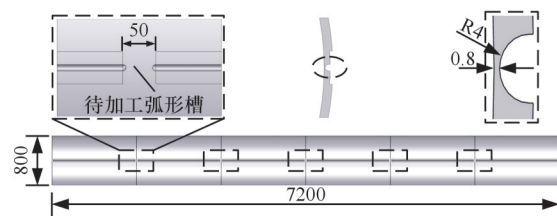


图1 薄壁筒件

Fig.1 Thin-walled cylinder

针对此类大型薄壁多段焊接筒件断续开槽加工的功能需求,研发了一套机器人铣削加工系统,主要包括机器人、移动地轨、末端执行器和柔性工装等,如图2所示。柔性工装用于不同内径薄壁筒件的夹持。机器人通过地轨移动至加工区域,利用所携带末端执行器进行局部精细化开槽加工。末端执行器配备了铣削电主轴、高精度滑台以及六维力、加速度、测厚仪等各类传感器,如图3所示。机器人铣削加工作业时,机器人变姿态带动电主轴完成横向进给运动,电主轴轴向运动

由进给滑台完成。该系统铣削时易出现颤振,为保障薄壁筒件加工质量,开展颤振在线识别与抑制研究。

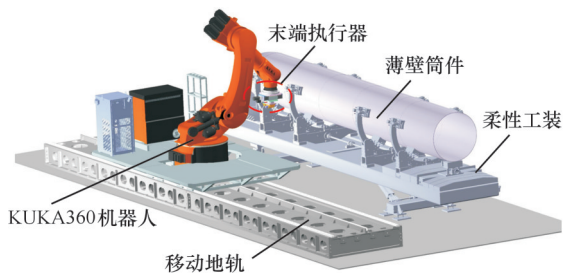


图2 机器人铣削加工系统

Fig.2 Robotic milling system

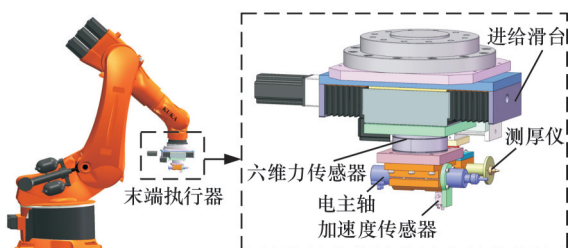


图3 机器人末端执行器

Fig.3 Robotic end-effector

薄壁筒件机器人铣削加工振动信号分析是进行颤振识别和抑制研究的基础,因此本文搭建了机器人铣削试验平台,采集试验振动信号进行后续的相关分析。选用多段焊接薄壁筒件其中的一段作为试验件,长为1200 mm,选用直径8 mm的硬质合金两刃球头铣刀为试验刀具,如图4所示。

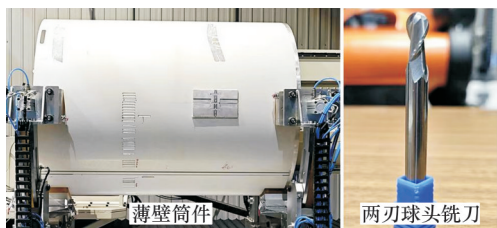


图4 试验件和铣刀

Fig.4 Test piece and milling cutter

机器人铣削试验平台如图5所示,主要包括铣削系统、控制系统和振动采集系统,其中机器人型号为KUKA KR360,额定负载360 kg;电主轴



图5 机器人铣削试验平台

Fig.5 Robot milling test bed

为NAKANNISHI公司研发的BMS-4020RA精密高速电主轴,最高转速20 000 r/min;控制系统采用汇川H5U-A16控制器。铣削试验过程需测量槽底表面粗糙度,采用北京时代锐达TR200粗糙度测量仪进行测量。铣削进给方向均表示为X正向,径向即垂直于进给方向均表示为Y向,刀具轴向均表示为Z向。

1.2 系统各区域振动特性及颤振类型分析

铣削加工时主轴刀具端、薄壁筒件和机器人各关节等区域都会发生一定程度的振动,文献[6-7]指出,机器人铣削颤振存在再生型高频颤振和低频颤振两类。因此,通过槽铣试验采集各区域振动数据,以筛选最佳监测区域、明确主要颤振类型及适配抑制方法。刀具在X和Y向刚性较弱,将东华1A312E三轴加速度传感器布置在主轴前端处;而薄壁筒件沿垂直于其表面方向即Z向刚性较弱,在加工区域内壁布置1只单轴加速度传感器AFT601D;机器人末端关节振动较明显,在机器人末端3个关节处沿关节轴向分别各布置1只单轴加速度传感器AFT601D,整体布置如图6所示。选取一组铣削参数进行铣削试验,主轴转速 n 为10 000 r/min,进给速度 v_f 为480 mm/min,铣削深度 a_p 为0.6 mm,加速度采集频率均设置为5000 Hz,铣削长度为50 mm,机器人铣削时的关节角如表1所示。

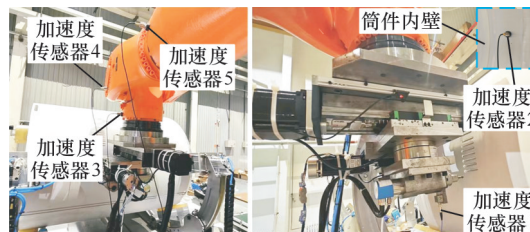


图6 加速度传感器布置

Fig.6 Acceleration sensor arrangement

表1 机器人关节角度

Tab.1 Robot joint angles (°)

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
下刀点	-13.43	-80.36	117.50	-0.24	52.79	2.62
退刀点	-15.27	-79.87	116.87	-0.23	52.92	0.77

各区域振动数据如图7所示,由时域图可以看出,薄壁筒件内壁传感器2的振动幅值最大,薄壁筒件沿垂直于其表面方向的刚性表现最弱;主轴刀具端传感器1的振动次之,其中X、Y两个方向幅值略大于Z向;而机器人关节的振动情况为,随着与刀具前端距离增大,机器人第六(传感器3)、第五(传感器4)和第四关节(传感器5)的振动幅值相继减小。由频域图可以看出,各区域振动

频率成分类似,只在能量占比上存在区别,主要包括主轴转频及其倍频、颤振频率及其谐波、气源振动噪声杂波,而本文采用刀具为两刃球头铣刀,刀齿切割频率属于主轴转频的2倍频;随着与刀具前端距离增大,颤振分量在不断衰减,特别是在机器人第四关节处几乎衰减为0,只存在主轴转频的2倍频332 Hz,即切割频率成分较为明显。因此,在各区域振动频谱成分类型一致的情况下,综合考虑其他因素,监测传感器布置在主轴刀具端更为合适,易安装,不用频繁拆装,且振动信号强烈,可采集3个方向振动,其振动幅值和频谱各类型成分能量占比与薄壁筒件相近。而其中径向Y的振动数据主轴转频及其倍频、颤振谐波成分相对较少,颤振主频率显著,后续分析选用主轴刀具端传感器1沿径向Y的振动数据。

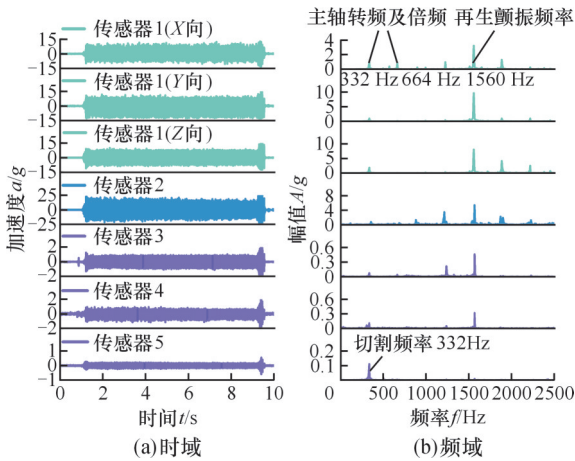


图7 各区域信号时频域图

Fig.7 Time/frequency domain plots of signals in each region

经过对各区域振动频谱的分析,发现主颤振频率为1560 Hz,周围分布着其谐波。沿径向Y的0~50 Hz低频段的位移频域图见图8,并未在低频率段发现低频颤振。根据文献[21]可知,低频颤振并非发生在所有机器人加工中,部分机器人由于刚性相对较大且铣削力较小,低频颤振不易激发或不明显难以监测,对加工影响微弱。因此本文研究以再生型颤振为主。

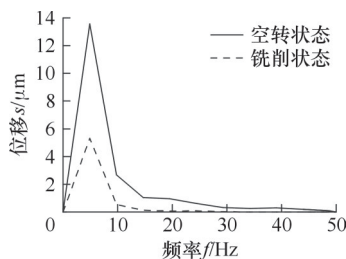


图8 低频区位移频域图

Fig.8 Frequency-domain diagram of displacement in the low-frequency region

采用多点激励单点拾振法对机器人铣削系统和薄壁件进行了测量,模态锤击试验采用的设备为秦皇岛爱伏特电子科技有限公司AFT-L4冲击力锤、AFT601D加速度传感器、AFT-09668电荷变换器和CDSP16数据采集仪等,刀具敲击如图9所示。经试验测试与数据处理,获取薄壁件机器人铣削系统模态参数,如表2所示,机器人铣削系统的二阶模态为1407.14 Hz,薄壁件二阶模态为1661.52 Hz,铣削时主颤振频率为1560 Hz,铣削颤振发生在铣削系统和工件二阶模态附近,表明机器人铣削过程发生的是再生型颤振。

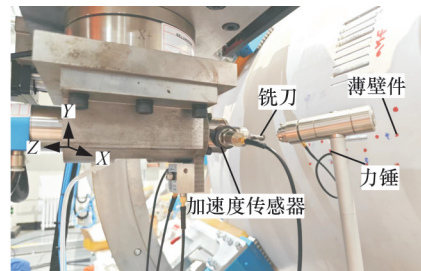


图9 机器人铣削系统和薄壁件锤击试验图

Fig.9 Robotic milling system and hammer impact test diagram of thin-walled component

表2 薄壁件机器人铣削系统模态参数表

Tab.2 Modal parameters table of robotic milling system for thin-walled components

	模态阶次	频率/Hz	阻尼比/%	振型系数	模态质量/kg
机器人铣削系统	1阶	523.24	1.6	0.033	9.47
	2阶	1407.14	12.4	0.047	0.86
	3阶	1734.22	4.3	0.016	7.27
薄壁件	1阶	1235.14	2.5	0.035	5.71
	2阶	1661.52	1.7	0.017	17.30
	3阶	1836.51	2.6	0.038	5.06

1.3 各铣削状态信号特征分析

为进一步对比不同铣削状态,选取如下参数:主轴转速 n 为10 000 r/min,进给速度 v_f 为480 mm/min、铣削深度 a_p 为0.6 mm进行铣削。各铣削状态时/频域如图10所示。当主轴空转时,振动加速度时域和频域幅值都极小,频域中主要成分为主轴转频及其倍频、气源冷却系统振动噪声。主轴转频 $f_{sp}=n/60$,该组试验参数下的主轴转频 f_{sp} 约为166 Hz。而空转状态频域中,主轴2倍频明显是因铣刀轻微刮蹭弧形槽内壁所致。稳定加工状态下,振动幅值增大,整体较为平稳,铣削表面较为光滑,频域中主要成分为主轴转频及其倍频,此时气源振动噪声能量占比极小,是铣削加工的理想状态。过渡状态下,加速度时域幅值在逐渐增大,表面出现轻微刀纹,且频域新增非主轴转频,而学者们将不等于主轴转频及其倍频且幅值较大的频

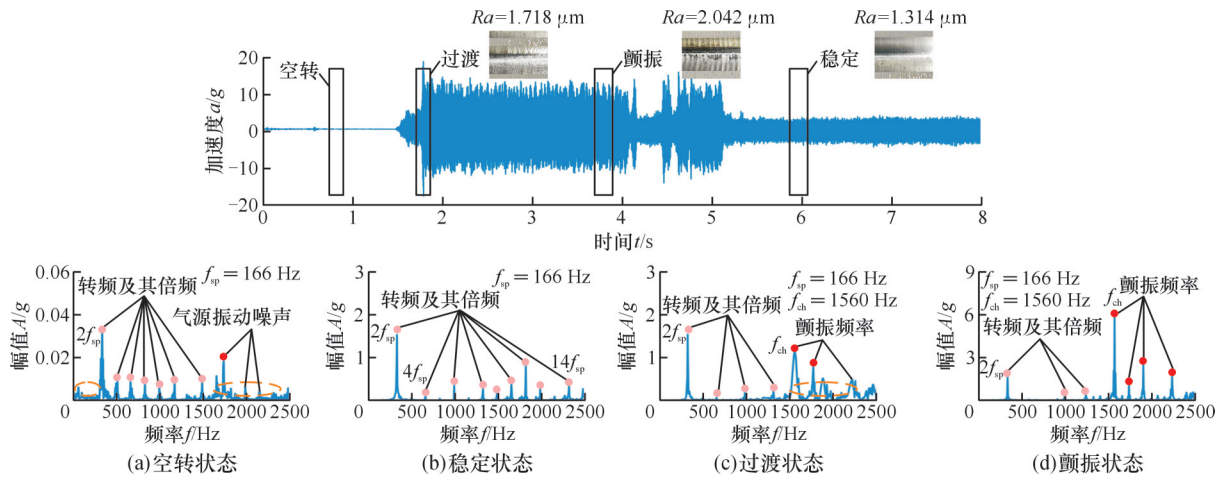


图10 不同铣削状态时/频域图

Fig.10 Time/frequency domain plots for different milling states

率定义为颤振频率^[5],新频率周围出现能量集聚效应,且较为杂乱属于早期颤振。颤振状态下,振动加速度波动剧烈且幅值再次增大,铣削表面刀纹明显,频域中颤振频率成分幅值远大于主轴转频及其倍频,其中主颤振频率 f_{ch} 为1560 Hz,该频率属于再生颤振频率,接近于系统的固有频率。图10中的铣削槽有明显纹理,结合0~50 Hz低频位移频域图,机器人未发生低频振动,因此,振动纹路由壁厚不均引起。

2 铣削颤振识别方法

2.1 基于快速傅里叶变换的特定频率去除法

各铣削状态振动频域均含主轴转频及其倍频等周期性成分这类与主轴转速相关的固定频率成分,然而其存在会严重干扰早期颤振辨识。当颤振发生时,由再生效应引发的新频率分量将会向系统固有频率附近集聚,且其幅值将逐渐增大,而早期阶段颤振成分幅值较小,易淹没于主轴转频及其倍频中。因此,如何准确快速去除主轴转频及其倍频是下一步研究的前提。由于需滤除的主轴相关频率成分较多,传统滤波器仅能滤除单一频率,经验模态分解、变分模态分解等方法虽能提取含颤振的频带,但仍残留部分主轴倍频,需二次处理且耗时。而基于快速傅里叶变换的特定频率去除法能解决该问题。首先根据铣削参数确定主轴转频及其倍频,再对振动信号进行傅里叶变换以去除相关干扰成分,最后经逆傅里叶变换得到新时域信号,具体步骤如下。

1) 根据初始铣削参数计算主轴转频 f_{sp} ,则其倍频为 $f_{msp} = nf_{sp}, n = 1, 2, \dots$ 。

2) 将加速度数据 $\{x(t)|t = 1, 2, \dots, M\}$ 进行傅里叶变换得到频谱 $X(\omega)$:

$$X(\omega) = \sum_{t=1}^M x(t) W_M^{-j\omega t} \quad (1)$$

$$W_M^{-j\omega} = [\exp(-2\pi j/M)]^{-j\omega} \quad \omega = 1, 2, \dots, M$$

式中: M 为采样点总数。

3) 由于实际铣削时主轴转速存在一定波动,导致实际主轴转频 f_{sp} 与理论值存在误差,因此引入常量值 b ,该值根据主轴转速理论和实际误差值进行调整。主轴转频及其倍频可表示为 $(f_{msp} - b, f_{msp} + b)$,将该区间频谱分量设为零:

$$X_{new}(\omega) = \begin{cases} 0 & f_{sp} - b \leq \omega \leq f_{sp} + b \\ X(\omega) & (n-1)f_{sp} + b < \omega < nf_{sp} - b \end{cases} \quad (2)$$

4) 由于频谱具有中心对称特性,若 $\omega > M/2$ 则停止计算进行下一步操作,令 $X_{new}(M+1-\omega) = X_{new}(\omega), \omega = 1, 2, \dots, M/2$,得到去除主轴转频及其倍频的新频谱。

5) 对获取的新频谱进行逆傅里叶变换,重构新时域信号:

$$x(t) = \sum_{i=1}^M X_{new} W_M^{-j\omega t} \quad t = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

选取1.3节中稳定和过渡状态两组数据进行主轴转频及其倍频去除,去除效果如图11所示,红色虚线表示主轴转频的倍频 f_{msp} 。可以看出,两组不同状态的原信号频谱中主轴转频相关成分完全去除,过渡状态中的早期颤振成分也得到凸显,为后续准确识别颤振状态奠定了基础。

2.2 基于功率谱熵差与均方根结合的颤振识别

信息熵用于描述信息源各类事件发生的不确定性,核心规律为事件发生概率越高,信息熵越低。信息熵包含多种特征熵,如功率谱熵、能量熵、样本熵等,LI等^[20]成功地将功率谱熵应用于颤振识别。功率谱熵 H_{PSE} 属于量纲一指标,取值0~1之间,其值越趋近于1,表明加速度频域分量分布越均匀且不确定性越强;越趋近于0,表明加速度频域分量越集中、不确定性越弱。计算流程如下。

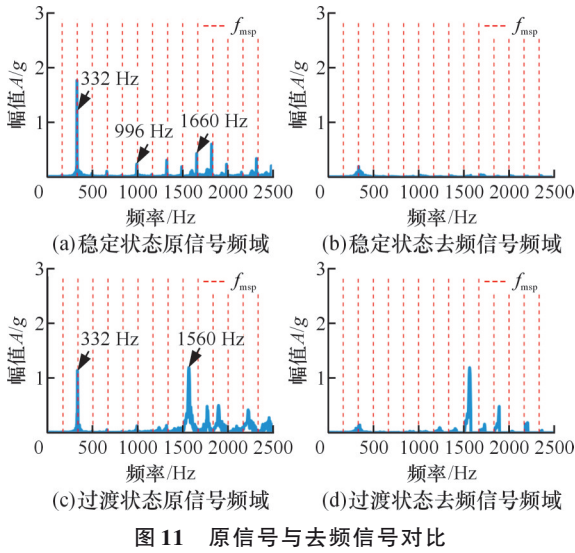


图 11 原信号与去频信号对比

Fig.11 Comparison of original signal and de-frequency signal

对加速度信号 $x(t)$ 进行傅里叶变换得到频谱 $X(\omega)$, 计算功率谱:

$$s(f) = \frac{1}{2\pi M} |X(\omega)|^2 \quad (4)$$

将频率分量归一化, 得到频谱概率密度函数:

$$P_i = s(f_i) / \sum_{i=1}^M s(f_i) \quad i, t = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: $s(f_i)$ 为第 i 个频率点的频谱能量。

最后计算功率谱熵 H_{PSE} :

$$H_{PSE} = - \sum_{i=1}^M P_i \ln P_i / \ln M \quad (6)$$

理论上铣削稳定时信号频谱分布均匀, 功率谱熵值偏向于 1; 发生颤振时频谱出现能量集聚, 功率谱熵值偏向于 0。然而由于颤振是从稳定、过渡等阶段逐步发展起来的, 其频率能量占比逐渐增大, 难以确定功率谱熵阈值区间, 因此无法直接使用功率谱熵精准识别各铣削状态。

根据 1.3 节分析可知, 稳定加工频谱含主轴转频及其倍频、气源噪声; 颤振频谱则额外包含颤振频率, 因此利用功率谱熵差法辨识颤振状态。首先计算原信号的功率谱熵 ΔH_{PSE1} , 再通过 2.1 节方法去除主轴转频及倍频, 计算重构信号的功率谱熵 ΔH_{PSE2} , 最后计算二者差值, 得到功率谱熵差 ΔH_{PSE} 。加工处于稳定状态时, 新信号频谱中只剩余气源杂波, 其功率谱熵值大于原信号, 则 $\Delta H_{PSE} < 0$; 加工状态为颤振时, 新信号频谱存在颤振频率、气源杂波, 其功率谱熵值小于原信号, 则 $\Delta H_{PSE} > 0$ 。选取 1.3 节中稳定和颤振状态两组数据进行功率谱熵差分析, 结果如图 12 所示, 其中 V_{TH2} 为功率谱熵差阈值。从图中可见, 铣削状态为稳定时, 功率谱熵差 $\Delta H_{PSE} < 0$; 铣削状态为颤振时, 功率谱熵差 $\Delta H_{PSE} > 0$, 证明了该方法的

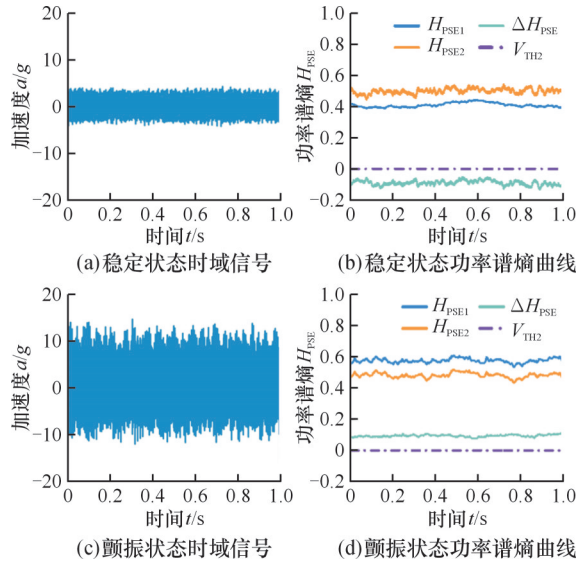


图 12 功率谱熵曲线

Fig.12 Power spectrum entropy curves

有效性。

主轴处于空转状态时, 信号幅值较低, 其频谱中主轴转频及其倍频与气源杂波分布均匀, 此时的功率谱熵差 ΔH_{PSE} 趋近于 0, 如图 13 所示, 干扰颤振早期阶段的识别, 因此需先判定空转状态。主轴由空转进入加工时, 加速度幅值急剧增大, 引入可反映振动能量强度与稳定性的均方根值 X_{RMS} 表征空转状态, 其表达式为

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^M x(t)^2}{M}} \quad (7)$$

式中: $x(t)$ 为加速度数据。

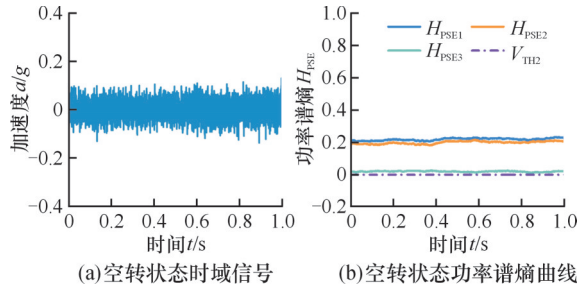


图 13 主轴空转状态功率谱熵变化曲线

Fig.13 Power spectrum entropy curves of spindle idle state

同样选取 1.3 节一段含有空转与加工状态的数据进行均方根计算, 如图 14 所示。将均方根阈值 V_{ALTH1} 设为 1, 即可有效区分空转与加工状态, 继而利用阈值法可精确快速识别出加工状态。

3 铣削颤振抑制方法

3.1 不同铣削参数对颤振影响分析

3.1.1 变铣削深度对颤振影响

开展变切深槽铣试验, 设定主轴转速 n 为 10 000 r/min, 进给速度 v_f 为 480 mm/min, 为避免

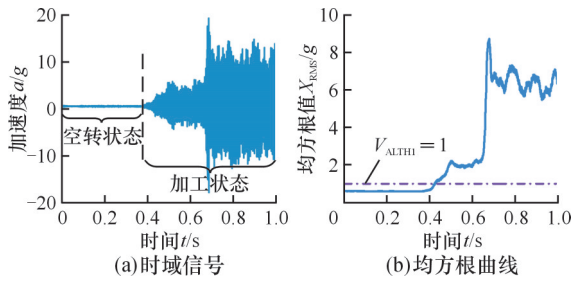


图 14 均方根值变化曲线

Fig.14 Root mean square value changing curve

薄壁筒件弧形表面的影响,预先铣削深3 mm、长50 mm的弧形槽,然后进行0~2 mm变切深铣削,采集得到的加速度时域信号如图15所示。

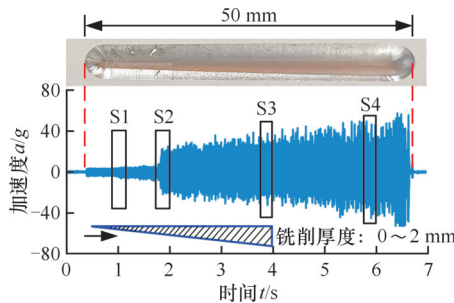


图 15 变铣削深度效果图

Fig.15 Variable milling depth effect diagram

从变切深时域图截取S1、S2、S3和S4四段进行频域分析并测量表面粗糙度,如图16所示,随着薄壁件切削深度增加,振动加速度幅值逐渐增大,加工状态从稳定状态(S1)经过渡状态(S2)转为颤振状态(S3、S4),且切削深度越大颤振越剧烈,颤振主频率幅值和能量占比越高,加工表面质量越差。切削深度对加工颤振的影响呈线性,当切削深度达到临界值时,铣削系统受扰动失稳引发颤振,颤振频率幅值随切削深度增加而增大。

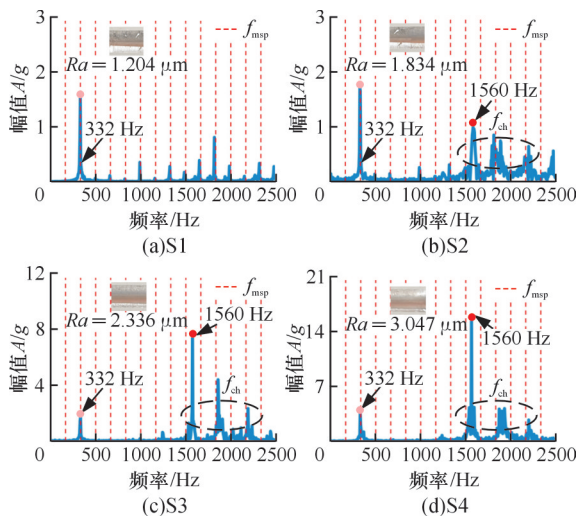


图 16 不同铣削深度频域图

Fig.16 Frequency domain plots for different milling depths

3.1.2 变进给速度对颤振影响

开展变进给速度槽铣试验,主轴转速 n 为 10 000 r/min,铣削深度 a_p 为 0.6 mm,进给速度 v_f 以 120 mm/min 为梯度,在 240~840 mm/min 范围内设 6 组试验。试验后测量槽底粗糙度,并对振动加速度数据进行时/频域分析,如图 17 所示。随着进给速度的增大,颤振分量持续存在且主颤振频率逐渐减小,而加工槽底粗糙度不断增大。

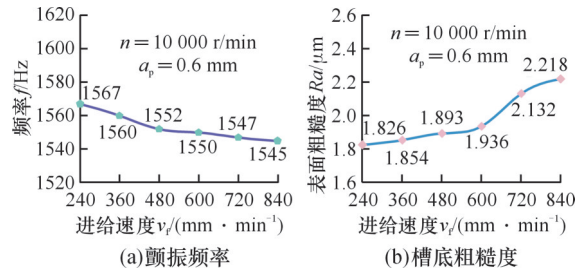


图 17 颤振频率和粗糙度变化图

Fig.17 Plot of chattering frequency and roughness variation

选取进给速度 v_f 为 240, 600, 840 mm/min 进行对比,如图 18 所示。可知,进给速度越大,加速度时域幅值也越大,颤振主频率会略微减小,但频率幅值变化不显著。改变进给速度对颤振的抑制作用较弱,无法实质性阻止颤振发生,而铣削槽底粗糙度增大是由于铣刀单齿切削量增大导致铣削力增大,进而降低加工质量。

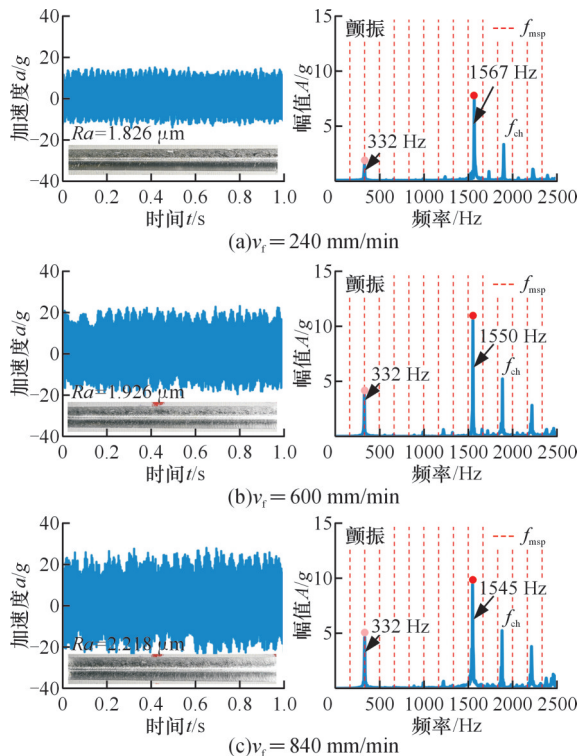


图 18 不同进给速度时频域图

Fig.18 Time and frequency domain plots for different feed rates

3.1.3 变主轴转速对颤振影响

开展变转速槽铣试验,设定进给速度 v_f 为480 mm/min,铣削深度 a_p 为0.6 mm,主轴转速 n 从6000 r/min起,每隔1 s增加2000 r直到16000 r/min。加速度时域数据如图19所示,随着主轴转速的增大,加速度幅值先逐渐增大,在12000 r/min时达到最大且此时幅值波动剧烈,在转速为14000 r/min时幅值回落、波动平缓,随后又开始增大。截取转速为12000 r/min和14000 r/min两组数据进行频域对比分析,结果如图20所示,转速12000 r/min时发生颤振,主颤振频率 f_{ch} 为1518 Hz,频域幅值较大,而转速为14000 r/min时,各频率为主轴转频及其倍频,幅值较小,处于稳定状态。该试验表明主轴转速直接影响着铣削状态。

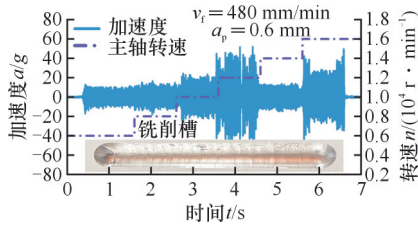


图19 不同主轴转速时域图

Fig.19 Time domain plot for different spindle speeds

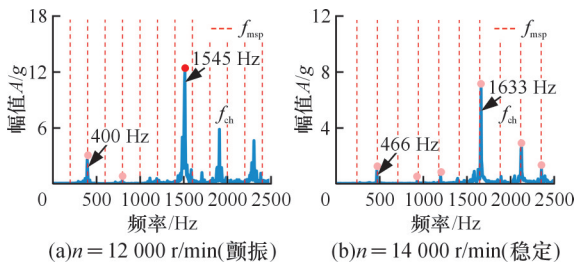


图20 不同主轴转速频域对比

Fig.20 Frequency domain comparison of different spindle speeds

根据上述铣削参数对颤振影响试验及分析可知,铣削深度和主轴转速对颤振影响显著,进给速度影响较弱。铣削过程中改变铣削深度难以保证薄壁筒件壁厚一致性。机器人刚性较差,铣削过程中改变进给速度,末端执行器易受到惯性引发颤动。因此,本文采用在线调整主轴转速的方法抑制颤振。

3.2 变转速颤振抑制策略

变转速颤振抑制有连续和离散两种转速控制方法。连续变转速控制法通过匹配转速变化波形、扰动幅值及频率比值来改善抑制效果,该方法需大量试验分析,参数匹配不当则无抑制效果,还易损伤电主轴。离散变转速控制只需在监测到颤

振后,将主轴转速调整至稳定区域,颤振抑制迅速有效且易于实现。本文采用离散变主轴控制方法进行颤振抑制,最优主轴转速选取遵循SMITH等^[22]所提原则,一是颤振频率与系统固有频率接近,二是主轴转频处的谐波速度具有更高切削稳定性。该方法先对采集数据进行傅里叶变换以提取出主颤振频率,再结合当前主轴转速和颤振频率计算最优主轴转速,使主轴某倍频与颤振频率相接近,最后不断迭代调节抑制颤振。具体计算步骤如下。

根据再生颤振机理计算铣削稳定域时的轴向临界切深 a_{plim} :

$$a_{plim} = -\frac{1}{K_c G_m(j\omega_c)(1 - \exp(-j\omega_c \tau))} \quad (8)$$

式中: K_c 为铣削力系数; $G_m(\cdot)$ 为铣削力响应传递函数; ω_c 为颤振角频率; τ 为连续刀具切削时间延迟。

若铣削系统由稳定转换为颤振,则前后刀齿振纹相位差 φ 与颤振角频率 ω_c 关系为 $\varphi = \omega_c \tau$ 。利用欧拉公式对式(8)简化得

$$a_{plim} = -\frac{1}{K_c G_m(j\omega_c)(1 - \cos \varphi + j \sin \varphi)} \quad (9)$$

据式(9)可知,当前后刀齿振纹相位差 φ 为 2π 整数倍时, $1 - \cos \varphi + j \sin \varphi$ 项趋于0,则轴向临界切深具有极大值。实际中相位差 φ 与 2π 关系为

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\omega_c \tau}{2\pi} = \frac{60f_{ch}(t)}{Zn(t)} = Q + \epsilon \quad (10)$$

式中: $f_{ch}(t)$ 为当前颤振频率; $n(t)$ 为当前转速; Z 为铣刀齿数; Q 为正整数部分; ϵ 为小数部分。

若想调整转速抑制颤振,则需将相位差 φ 调整为 2π 整数倍,此时新主轴转速计算公式为

$$n_{new}(t) = \frac{60f_{ch}(t)}{(Q+1)Z} \quad (11)$$

由式(11)计算的新主轴转速可使轴向临界切深大于当前切深以规避颤振,而 Q 值不唯一,实际主轴转速调整过程中,可取不同 Q 值迭代计算,获取不同新转速,直至颤振消除。

4 变转速颤振抑制试验

4.1 变转速颤振监测和抑制系统

基于LabVIEW软件,结合传感器、信号采集分析及状态识别技术,开发铣削加工颤振在线监测及抑制系统,涵盖设备通信、参数设置、数据采集、数据分析、铣削状态识别和颤振抑制等功能模块,主界面如图21所示。颤振识别和抑制程序流程如图22所示。先在加工前给系统输入初始铣削参数,采集振动加速度数据;然后计算原信号均

方根 X_{RMS} , 依据均方根阈值 V_{TH1} 判断加工或空转状态; 而后计算功率谱熵差 ΔH_{PSE} , 依据功率谱熵差阈值 V_{TH2} 判别稳定或颤振状态; 若判定为颤振, 则计算离散新主轴转速并输入主轴变频控制器, 迭代调整直至颤振消除。

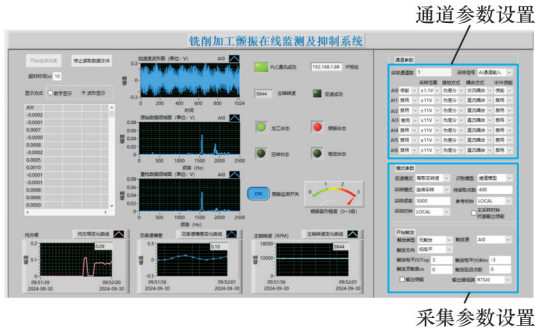


图 21 颤振在线监测及抑制系统主界面

Fig.21 Main interface of chatter online monitoring and suppression system

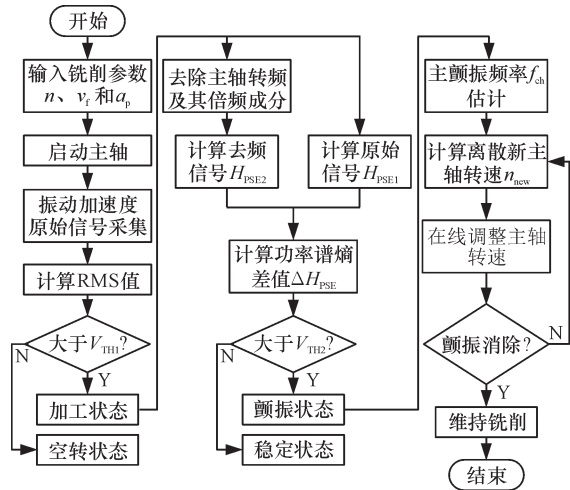


图 22 颤振识别及抑制程序流程

Fig.22 Flutter identification and suppression program flow

4.2 变转速颤振抑制试验设计及试验结果分析

设计 6 组颤振状态铣削参数, 对比机器人在铣削薄壁筒件过程中颤振抑制功能开启与未开启状态下的振动数据及加工效果, 每组参铣削 3 次。试验时, 每组参数对应两道加工槽, 分别开展常规铣削与开启颤振抑制的铣削试验, 同步采集振动加速度并测量相应槽底表面粗糙度。颤振在线监测及抑制程序中均方根阈值 V_{TH1} 设置为 1, 功率谱熵差阈值 V_{TH2} 设置为 0, 加速度采集频率为 5000 Hz。

试验参数及结果如表 3 所示, 6 组颤振参数经过颤振抑制后都转为稳定状态, 且加工槽底表面质量显著改善。颤振抑制前后表面质量对比如图 23 所示, 颤振抑制前槽底表面振纹明显, 粗糙度较大, 抑制后表面光滑, 粗糙度显著降低。统计 6

组试验抑制前后加速度振幅与粗糙度值, 加速度幅值从 26.8g 降至 16.8g, 降幅约为 37.3%; 粗糙度从 2.193 μm 降至 1.432 μm , 降幅约为 34.7%; 颤振识别精度为 94.44%。

表 3 铣削试验参数

Tab.3 Milling test parameters

序号	铣削次数	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	进给 $v_f/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	切深 a_p/mm	准确识别次数	抑制后状态
1	3	8000	360	0.6	3	稳定
2	3	8000	480	0.8	3	稳定
3	3	12000	360	0.6	2	稳定
4	3	12000	480	0.8	3	稳定
5	3	10000	360	0.6	3	稳定
6	3	10000	480	0.8	3	稳定



(a)抑制前 (b)抑制后

图 23 加工槽颤振抑制前后对比图

Fig.23 Comparison before and after chatter suppression of machining groove

选取第 4 组参数分析颤振抑制效果, 颤振抑制前后信号对比如图 24 所示。抑制前加速度幅

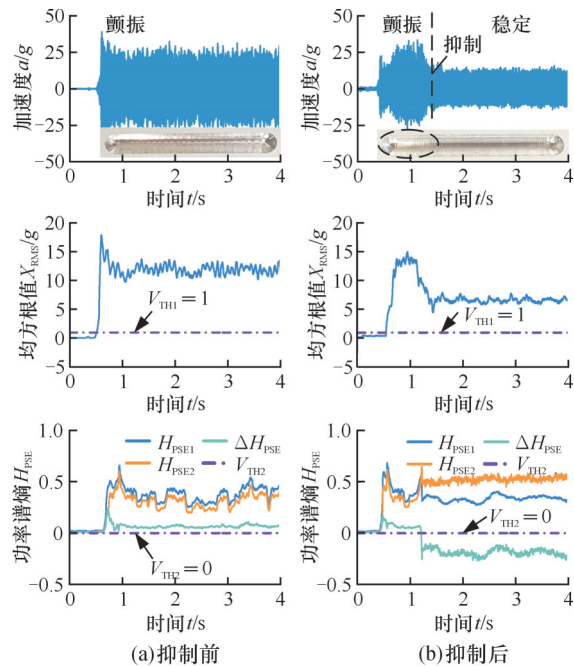


图 24 颤振抑制前后信号对比

Fig.24 Signal comparison before and after chatter suppression

值约 25g,抑制后降至 16g,降幅 36%。各铣削状态均能准确识别,颤振抑制后,功率谱熵差 ΔH_{PSE} 由正值变为负值,成功转换为稳定状态。分别测量抑制前后槽底粗糙度,如图 25 所示。抑制后粗糙度测量值显著降低,其中在第 4 测试点,抑制前 Ra 为 2.214 μm ,抑制后 Ra 为 1.536 μm ,降幅约为 30.6%。这验证了本文所提方法针对薄壁筒件机器人铣削颤振具有较好抑制效果,提高了铣削质量。

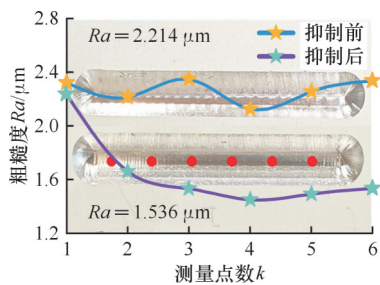


图 25 颤振抑制前后粗糙度变化

Fig.25 Roughness change before and after chatter suppression

5 结论

1) 本文针对机器人在铸造类薄壁筒件断续开槽铣削应用中易发生颤振导致零件表面质量降低的问题,提出了一种基于功率谱熵差和变转速的颤振识别及抑制方法。

2) 基于薄壁筒件机器人铣削实际工况,分析了铣削系统在主轴刀具端、薄壁筒件内壁和机器人各关节等区域的振动特性,选取主轴刀具端为最优监测区域,确定再生颤振为主要颤振类型,并分析了空转、稳定、过渡和颤振状态不同特征。

3) 提出一种基于快速傅里叶变换的特定频率去除法,有效去除主轴转频及其倍频,避免干扰;并提出一种功率谱熵差与均方根相结合的颤振阈值识别方法。

4) 分析了切深、进给和转速对颤振的影响,证实变转速对颤振抑制最有效,采用离散变转速控制法进行颤振在线抑制,并开发了铣削加工颤振在线监测及抑制系统。试验结果表明,本文所提方法能够识别空转、稳定和颤振状态,且颤振抑制后加速度平均振幅由 26.8g 降至 16.8g,降幅约为 37.3%,加工槽底表面平均粗糙度降低了 34.7%,有效提高了加工质量。

参考文献:

[1] 岳彩旭,张俊涛,刘献礼,等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525164.
YUE Caixu, ZHANG Juntao, LIU Xianli, et al. Research

Progress on Machining Deformation of Thin-walled Parts in Milling Process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525164.

- [2] 廖文和,田威,李波,等. 机器人精度补偿技术与应用进展[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 627142.
LIAO Wenhe, TIAN Wei, LI Bo, et al. Error Compensation Technology and Its Application Progress of an Industrial Robot [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 627142.
- [3] 何雨楠,谢福贵,刘辛军,等. 大型构件机器人原位加工中的测量方案概述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 1-14.
HE Yuhao, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Review on Measurement Schemes for Robotic Machining of Large Components In-situ [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 1-14.
- [4] CVITANIC T, NGUYEN V, MELKOTE S N. Pose Optimization in Robotic Machining Using Static and Dynamic Stiffness Models [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66: 101992.
- [5] 籍永建,姚利诚. 机器人铣削加工颤振自适应识别方法研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(18): 2165-2176.
JI Yongjian, YAO Licheng. Research on Self-adaptive Chatter Recognition Method for Robotic Milling [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(18): 2165-2176.
- [6] XIE Guosheng, XU Yang, XU Penghong, et al. Chatter Stability Analysis of a Six-axis Milling Robot [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(7): 3551-3561.
- [7] 杨靖,张小俭,吴毅,等. 基于刚度定向的工业机器人铣削姿态优化研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(16): 1957-1964.
YANG Jing, ZHANG Xiaojian, WU Yi, et al. Posture Optimization Based on Stiffness Orientation Method for Industrial Robotic Milling [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(16): 1957-1964.
- [8] WANG Ruoqi, SUN Yuwen. Chatter Prediction for Parallel Mirror Milling of Thin-walled Parts by Dual-robot Collaborative Machining System [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 88: 102715.
- [9] 李超,张俊,田辉,等. 综合振动信号能量比和幅值标准差的铣削颤振实时监测方法[J]. 机械工程学报, 2024, 60(14): 11-23.
LI Chao, ZHANG Jun, TIAN Hui, et al. Timely Chatter Detecting Method in Milling with Integrated Energy Ratio and Amplitude Standard Deviation of Vibration Signal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(14): 11-23.
- [10] LAMRAOUI M, BARAKAT M, THOMAS M, et al. Chatter Detection in Milling Machines by Neural Network Classification and Feature Selection [J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(7): 1251-1266.
- [11] CHEN Ding, ZHANG Xiaojian, ZHAO Huan, et al. Development of a Novel Online Chatter Monitoring System for Flexible Milling Process [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159: 107799.
- [12] ZHENG Qingzhen, CHEN Guangsheng, JIAO Anling. Chatter Detection in Milling Process Based on the Combination of Wavelet Packet Transform and PSO-SVM [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1): 1237-1251.
- [13] JI Yongjian, WANG Xibin, LIU Zhibing, 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.

- [14] LI Xiaohu, WAN Shaoke, HUANG Xiaowei, et al. Milling Chatter Detection Based on VMD and Difference of Power Spectral Entropy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(7): 2051-2063.
- [15] LI Zhenmin, SONG Qinghua, JIN Peijian, et al. Chatter Suppression Techniques in Milling Processes: a State of the Art Review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(7): 1-23.
- [16] YANG Yiqing, WANG Yunfei, LIU Qiang. Design of a Milling Cutter with Large Length - Diameter Ratio Based on Embedded Passive Damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(3): 506-516.
- [17] LI Denghui, CAO Hongrui, CHEN Xuefeng. Fuzzy Control of Milling Chatter with Piezoelectric Actuators Embedded to the Tool Holder[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 148: 107190.
- [18] LI Zhenmin, SONG Qinghua, LIU Zhanqiang, et al. Chatter Suppression Mechanism and Parameters Configuration of the Spindle Speed Variation with Piecewise Characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(7): 3041-3055.
- [19] 刘阔, 姜业明, 黄任杰, 等. 虑及颤振在线抑制的机床高效自适应加工技术研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 104-113.
- LIU Kuo, JIANG Yeming, HUANG Renjie, et al. Research on High-efficiency Adaptive Machining Technology of Machine Tools Considering Online Chatter Suppression[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 104-113.
- [20] LI Fei, LIU Jun, HU Baoquan. Chatter Suppression in the Milling Process of Thin-walled Components with Continuous Sinusoidal Spindle Speed Variation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2025, 12(4): 1233-1246.
- [21] DENG Kenan, YANG Lijun, LU Yong, et al. Multitype Chatter Detection via Multichannel Internal and External Signals in Robotic Milling[J]. Measurement, 2024, 229: 114417.
- [22] SMITH S, TLUSTY J. Stabilizing Chatter by Automatic Spindle Speed Regulation[J]. CIRP Annals, 1992, 41(1): 433-436.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 宜亚丽*(通信作者), 女, 1976年生, 副教授、博士研究生导师。研究方向为机器人加工技术与系统动力学。E-mail: yiyali@ysu.edu.cn.

本文引用格式:

宜亚丽, 程阳洋, 陈晓卫, 等. 薄壁筒件机器人铣削颤振识别及抑制方法研究[J]. 中国机械工程, 2026, 37(3): 634-644.

YI Yali, CHENG Yangyang, CHEN Xiaowei, et al. Research on Chatter Recognition and Suppression Methods for Robotic Milling of Thin-walled Cylinders[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 634-644.

(上接第 633 页)

- [16] ZHAO W, CHEN Z, CHEN Y, et al. Chamber Shape Optimization for Ultra-high-pressure Water-jet Nozzle Based on Computational Fluid Dynamics Method and a Data-driven Surrogate Model[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2025, 19: 2443128.
- [17] 薛胜雄, 王乐勤, 彭浩军, 等. 超高压水射流除锈机理试验研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(20): 1790-1793.
- XUE Shengxiong WANG Leqin, PENG Haojun, et al. Experimental Research on Mechanism of Ultrahigh Pressure Waterjet De-rusting[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(20): 1790-1793.
- [18] 龙明庆. 双喷嘴旋转速度的理论计算公式[J]. 高压水射流, 1990(1): 18-19.
- LONG Mingqing. Theoretical Calculation Formula for Rotational Speed of a Dual-nozzle System[J]. High Pressure Water Jetting, 1990(1): 18-19.
- [19] CHEN Y, CHEN Z, ZHAO W, et al. Optimisation Strategy to Enhance the Performance and Efficiency of Self-rotary Water-jet Derusting Sprayers[J]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117620.
- [20] ZHANG A, SUN P, MING F, et al. Smoothed Particle Hydrodynamics and Its Applications in Fluid-structure Interactions[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2017, 29(2): 187-216.
- [21] 孙玲, 弓永军, 王祖温, 等. 超高压旋转清洗盘的设计及密封分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(13): 1715-1718.
- SUN Ling, GONG Yongjun, WANG Zuwen, et al. Design and Sealing Analysis of Ultr-high Pressure Water Cleaning Rotary Device[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(13): 1715-1718.
- [22] GUO P, ZHAO Z, ZHANG Y, et al. Adaptive Access Strategy for Satellite-terrestrial Optical Networks Based on Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Physical Communication, 2025, 69: 102600.
- [23] STOPPATO A, CAVAZZINI G, ARDIZZON G, et al. A PSO (Particle Swarm Optimization)-based Model for the Optimal Management of a Small PV (Photovoltaic) -pump Hydro Energy Storage in a Rural Dry Area[J]. Energy, 2014, 76: 168-174.
- [24] SHI Y, EBERHART R. A Modified Particle Swarm Optimizer[C]// Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK, 1998: 69-73.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 赵文涛, 男, 2000年生, 硕士研究生。研究方向为水射流理论及技术。E-mail: zwt_sailors@163.com. 陈正寿*(通信作者), 男, 1979年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为船舶与海洋结构物结构振动与水动力分析。E-mail: aaacz@163.com.

本文引用格式:

赵文涛, 陈正寿, 陈源捷, 等. 超高压水射流自驱旋转喷头空间布局优化[J]. 中国机械工程, 2026, 37(3): 624-633.

ZHAO Wentao, CHEN Zhengshou, CHEN Yuanjie, et al. Spatial Layout Optimization of Ultra-high-pressure Water Jet Self-driven Rotary Sprayer[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 624-633.