

基于模糊线性自抗扰的薄壁件机器人铣削切深控制

石龙 周鹤翔 李洲龙*

上海交通大学机械与动力工程学院,上海,200240

摘要:弱刚性的大型薄壁零件在机器人减薄加工过程中会出现较大的变形和振动,使得工件表面加工质量下降,剩余壁厚精度难以保证。为此,采用音圈电机驱动的随动支撑头进行振动和变形抑制,并提出了基于模糊线性自抗扰控制(FLADRC)的薄壁件机器人铣削切深控制策略。为验证该控制策略的有效性,首先采用MATLAB/Simulink仿真实验平台建立系统控制模型并进行了仿真分析,然后在薄壁件机器人铣削实验平台上进行了实验验证。仿真和实验结果均表明,基于随动支撑头的切深控制策略能够显著抑制薄壁件加工过程中的振动和变形,并有效保证剩余壁厚的精度。此外,相较于传统的模糊PID(FPID)控制,模糊线性自抗扰控制器具有更好的控制效果,在外部干扰的情况下表现出更好的鲁棒性。

关键词:薄壁件;机器人铣削;切深控制;模糊线性自抗扰控制;音圈电机;随动支撑头

中图分类号:TG54;TP242.2;TP273

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Depth of Cut Control for Thin-walled Parts in Robotic Milling Based on FLADRC

SHI Long ZHOU Hexiang LI Zhoulong*

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240

Abstract: Weakly rigid large thin-walled parts had large deformations and vibrations during robotic thinning machining, which led to a degradation of the surface quality of the workpieces and difficulties in ensuring the accuracy of the remaining wall thickness. To this end, a VCM-driven follower support head was used for vibration and deformation suppression, and a FLADRC based control strategy was proposed for depth of cut of robotic milling thin-walled parts. In order to verify the effectiveness of the control strategy, the system control models were firstly established based on the MATLAB/Simulink simulation and experimental platform, and the simulation analysis was carried out, then experimental verification was carried out on the thin-walled parts robotic milling experiment platform. Both of the simulation and experimental results show that the depth-of-cut control strategy based on the follower support head may significantly suppress the vibrations and deformations during the machining processes of thin-walled parts and effectively ensure the accuracy of the remaining wall thickness. In addition, compared with the traditional fuzzy PID control, the FLADRC has a better control effectiveness and exhibits higher robustness in the presence of external disturbances.

Key words: thin-walled part; robotic milling; depth of cut control; fuzzy linear active disturbance rejection controller(FLADRC); voice coil motor(VCM); follower support head

0 引言

大型铝合金薄壁零件因其质量小、强度高、结构效率高而被广泛应用于飞机和火箭的制造^[1-3]。目前通常采用端铣来高效地实现飞机蒙皮板、火箭油箱壁等复杂结构件的减薄加工,但薄壁零件存在刚度低、时变动态特性弱等缺点,在加工过程中会产生静态变形、强迫振动和颤振,从而降低表

面质量,而且难以保证剩余壁厚的精度^[4-5]。因此,大型薄壁件的高效减薄加工技术一直是国内外学者的研究热点。

在薄壁件加工过程中,因较大变形和剧烈振动使得加工过程中切深难以保持稳定,且表面质量也较差,因此,设计一种能够确保恒定切深且减少振动的加工方案至关重要。目前已有许多学者对此进行了深入研究。JIA等^[6]设计了一种气动夹具,通过精确调节气压对薄壁工件施加可控的支撑力来抑制变形和振动。MA等^[7]设计了一种

新型可控阻尼夹具,在薄壁件的背面安装多点磁流变阻尼支撑,有效提高了工件的刚度和阻尼。WAN 等^[8]开发了一种安装在机床主轴箱上的移动夹具,加工过程中通过保持支撑点和铣削点的距离不变,使切深保持稳定,同时随着夹具的移动,可持续提高薄壁件的刚度和阻尼,使工件的颤振得到抑制。DU 等^[9]将压电片贴在薄壁件上,采用主动模态控制方法有效抑制了加工过程中工件的振动和变形。WANG 等^[10]选用加速度传感器和压电片作为传感器和执行器,考虑铣削过程中动态特性的时变以及传感器和执行机构的位置限制,提出并应用了一种时变 PD(VPD)控制方法,获得了满足要求的壁厚精度和表面质量。YUAN 等^[11]开发了一种纯数据驱动的基于稀疏贝叶斯学习的工件变形预测方法,仅利用历史位移信息来预测工件未来的变形,通过实时控制主轴的 Z 向运动来进行变形补偿,从而达到控制切深的效果,同时开发了一种双模预测控制器,在水平薄壁板下安装音圈电机驱动的执行机构,以减小端面铣削时的垂直振动。上述加工方案都只适用于小型薄壁件的减薄加工,无法实现大型薄壁件端铣加工过程中的壁厚保持和振动抑制。

对于大型薄壁件的减薄加工,镜像铣削是更高效、精度更高的一种加工技术^[12]。SHENG 等^[13]提出了一种针对镜像铣削系统支撑侧设计的模糊自适应混合阻抗控制方案,能够在铣削大型薄壁件的过程中保持恒定的支撑力。ZHANG 等^[14]提出了一种基于扰动观测器(DOB)和改进史密斯预测器(MSP)的镜像铣削在线厚度误差测量和补偿方法,在加工过程中支撑端实时测量铣削区域的剩余壁厚并进行补偿,实现了剩余壁厚的稳定实时闭环控制。BO 等^[15]基于磁流变液的镜面支撑装置,提出了一种以自抗扰控制(ADRC)为外环、PID 位置控制为内环、极限学习机(ELM)补偿镜铣系统不确定性的力/位混合控制策略,实现了镜像铣削过程中支撑力以及剩余壁厚的精确控制。WANG 等^[16]设计了一种基于精确变形预测模型和卡尔曼滤波的改进预测补偿系统,该系统在镜像铣床上实现,支撑端作为变形补偿的执行器。上述镜像铣削方案保证了加工质量,提高了加工效率,可以获得满足要求的加工表面和剩余壁厚。然而镜像铣削加工系统造价高昂,并且需要足够大的空间来容纳工件两侧的加工设备,同时加工质量高度依赖于加工侧和支撑侧的协同运动效果。

针对镜像铣削存在的缺陷,LIU 等^[17]和

TIAN 等^[18]设计了一种可安装在机器人末端的磁性随动支撑装置,在加工过程中可以实时夹紧铣削区域并跟随刀具运动,有效抑制了加工过程中薄壁件的振动和变形,获得了良好的加工表面质量,同时使实际切深的误差大幅度减小。

使用机器人进行大型薄壁件的减薄加工具有成本低、占地空间小、工作灵活的优势,该加工方式可有效解决镜像铣削系统占用空间大的问题。但串联悬臂结构机器人的刚度低,而大型薄壁件本身具有极端弱刚性特性,因此减薄加工过程中薄壁件会发生剧烈的振动和变形。同时,受限于机器人本身较低的重定位精度以及低刚度,在铣削过程中不能如机床那样保持 Z 向的位置不变,最终导致切深不是一个稳定的值,从而很难保证薄壁工件的剩余壁厚精度。

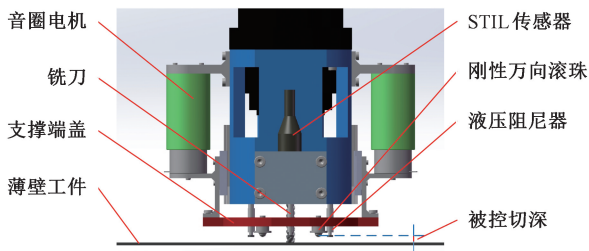
为了克服大型薄壁件机器人减薄加工存在的上述问题,本文采用音圈电机驱动的支撑头进行振动和变形抑制,并提出了一种基于模糊线性自抗扰控制(FLADRC)的实时切深控制策略。支撑头直接安装在机器人末端的电主轴上,可跟随铣刀移动,实时压紧工件,持续提高铣削区域的刚度和阻尼。此外,随动支撑头采用音圈电机驱动,结合位移反馈实现实时闭环控制,能够精准控制铣削过程中的切深,提高加工精度和稳定性。

1 音圈电机驱动的刚柔多点随动支撑头

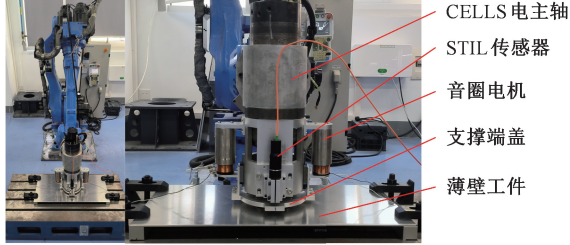
1.1 随动支撑头的机械结构

为了实现薄壁件加工过程中切深的精确控制,本文采用响应速度快、运动精度高且结构紧凑的音圈电机(VCM)^[19-20]作为随动支撑头的驱动机构。基于音圈电机驱动的刚柔多点随动支撑头如图 1 所示,采用 4 个 M6 螺栓安装在电主轴上。支撑头可分为驱动模块、反馈模块、支撑模块三部分。驱动模块由两套音圈电机和直线导轨模组组成,音圈电机选用雅科贝思 AVM50-HF-20(最大持续推力 50 N,行程±10 mm),可实现支撑头的轴向伸缩运动。反馈模块为固定在套筒上的激光位移传感器(STIL 光谱共焦传感器,型号为 CL4-MG35,最大线性误差±0.3 μm),其配套的控制器的 CCS-OPTIMA+,最高采样频率为 10 kHz,适用于高频振动的实时监测与反馈。支撑模块由支撑头端盖、4 个刚性万向滚珠和 4 个液压阻尼器组成,加工时滚珠与阻尼器压紧工件,实现刚性支撑与柔性支撑的结合。

当进行切深控制时,铣刀刀尖与滚珠之间的轴向距离为被控切深(图 1a),在铣削过程中通过



(a) 支撑头示意图



(b) 机器人-电主轴-支撑头-薄壁工件系统

图 1 安装随动支撑头的机器人铣削平台

Fig.1 Robotic milling platform with follower support head

位移反馈闭环控制保证该距离不变即可实现切深的控制,具体切深控制原理和加工流程如下。

1) 首先进行对刀,当铣刀刀尖与工件表面刚接触时,将支撑端盖搭在工件上,然后控制支撑端盖上抬,抬升距离即为被控切深(以 0.5 mm 切深为例)。

2) 开启电主轴,控制机器人 Z 轴向下进刀 1.5 mm。机器人下压距离大于被控切深,当向下运动超出 0.5 mm 时,因为支撑端盖相对于铣刀刀尖的位置保持不变,此时支撑头会推动工件向下移动 1 mm,这个距离称为预推位移。

3) 机器人水平进刀,支撑头跟随主轴移动,工件的被铣削深度保持为 0.5 mm。整个水平进刀过程中支撑头持续压紧工件,为加工区域提供额外的刚度和阻尼。

薄壁件机器人减薄加工过程中的剧烈振动和变形会导致切深不稳定和加工表面质量下降。通过预推位移实时压紧工件可以持续抑制振动,而保持被控切深不变可以有效抑制工件变形,结合音圈电机调节和位移反馈监测可实现铣削过程中切深的精确控制。薄壁件的加工精度不再依赖于机器人本身的定位精度,实际切深仅取决于支撑头单向伸缩运动的位移控制精度,即取决于本文采用的模糊线性自抗扰位置控制算法在加工过程中受工件振动等干扰时的有效性,从而解决了机器人定位精度差导致的切深不稳定的问题。

1.2 系统模型辨识

音圈电机一般可等效为质量-弹簧-阻尼系

统^[21-23]。然而,本文的随动支撑头在进刀过程中始终压紧工件,工件会对支撑头产生与薄壁件动态特性相关的回弹力。由于薄壁件本身的动态特性在加工过程中是时变的,仅依靠数学推导很难精确建立切深控制系统的数学模型,因此,本文采用 MATLAB 系统识别工具箱来辨识系统的传递函数^[24-25]。首先通过控制平台开环给两个音圈电机施加一定的电压,使薄壁工件下压 1 mm,模拟加工过程中的压紧状态;然后选取低幅值带限白噪声信号作为系统输入信号,并通过激光位移传感器获取支撑端盖的位移作为系统输出;最后利用系统辨识工具箱获得切深控制系统的传递函数,具体表示为

$$G(s) = \frac{1.639 \times 10^4}{s^2 + 154.8s + 2.242 \times 10^4} \quad (1)$$

识别模型的频率响应与实测结果对比如图 2 所示,可以看出,实验和识别系统的频率响应曲线趋势基本一致,因此,上述方法辨识得到的传递函数可较为精确地描述整个系统的动态特性。

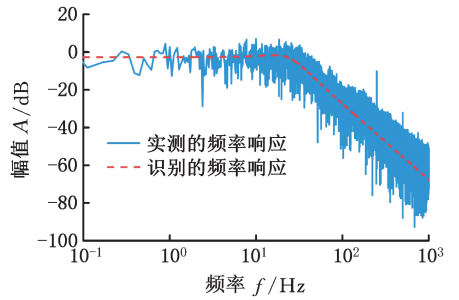


图 2 实测与识别的频率响应对比

Fig.2 Comparison of measured and recognised frequency response

2 基于模糊线性自抗扰的切深控制

2.1 模糊线性自抗扰控制算法

为了实现切深的稳定控制,本文结合线性自抗扰控制算法(LADRC)^[26]和模糊控制算法,提出了模糊线性自抗扰切深控制算法。LADRC 算法是一种扰动观测加补偿的自动控制算法,能够利用系统的输入输出估计控制系统中的模型不确定性(内扰)以及外部扰动所造成的影响并对其进行补偿,具有较好的鲁棒性和抗干扰性^[27-28]。LADRC 控制器不需要受控对象精确的数学模型,可有效解决薄壁件加工过程中系统模型时变的问题。本文同时引入模糊控制算法对 LADRC 控制器的状态误差反馈参数进行在线自整定,可进一步提高控制器的自适应能力。模糊线性自抗扰控制器的结构如图 3 所示。

LADRC 控制器主要由跟踪微分器(TD)、线

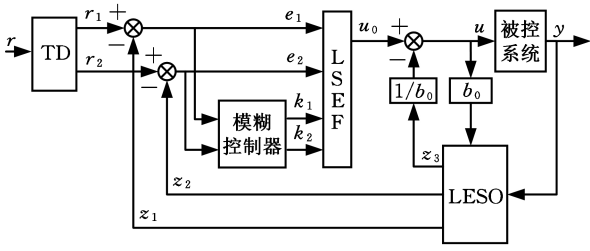


图 3 模糊线性自抗扰控制器的控制结构

Fig.3 Control structure of a FLADRC

性扩张状态观测器(LESO)、线性状态误差反馈控制律(LSEF)三部分构成。TD对给定的期望信号进行预处理,使输入信号的变化更加平滑,避免直接跳变引起系统冲击,使系统既能快速响应又能避免超调。LESO根据系统输出估计被控系统的状态量和总扰动,并将状态量和总扰动应用于LSEF。LSEF将TD得到的过渡值与LESO得到的各阶状态估计量线性组合,并对估计的总扰动进行补偿,输出被控对象的最终控制值。

根据前文辨识得到的支撑头系统传递函数,可用二阶微分方程描述薄壁件铣削加工过程中支撑头位置(切深)的变化,表示为

$$\ddot{y} = a_1 \dot{x} + a_0 x + bu + w \quad (2)$$

式中: a_1 、 a_0 、 b 为与支撑头系统特性相关的参数; y 为激光位移传感器测量的位移信号输出; u 为音圈电机的输入电压; x 为切深控制系统的相关状态参数; w 为系统的外界干扰量。

除了外部干扰,切深控制系统还存在由于控制器增益改变和系统参数变化而引起的内部干扰,因此,式(2)改写为

$$\ddot{y} = f(x, w) + b_0 u \quad (3)$$

$$f(x, w) = a_1 \dot{x} + a_0 x + (b - b_0)u + w \quad (4)$$

式中: b_0 为 b 的估计值; $f(x, w)$ 为切深控制系统的总扰动量,包括系统的未建模部分以及外部扰动部分。

综上,可得切深控制系统的状态方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 &= f(x, w) \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由状态方程可知,通过引入二阶LADRC控制器可以实现加工过程中的切深控制。控制器的设计可以分为以下三部分进行。

1) 跟踪微分器。首先建立跟踪微分器跟踪期望切深信号 r 及其微分信号,并根据音圈电机的执行能力安排平滑过渡过程。离散形式的非线性跟踪微分器为

$$\left. \begin{aligned} r_1(k+1) &= r_1(k) + hr_2(k) \\ r_2(k+1) &= r_2(k) + hf \\ f &= F(r_1(k) - r(k), r_2(k), \delta, h_0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$F(x_1, x_2, \delta, h_0) = - \left\{ \begin{aligned} \delta \text{sign}(a) & \quad |a| > d \\ \delta a/d & \quad |a| \leq d \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$a = \left\{ \begin{aligned} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(c) & \quad |c| > d_0 \\ x_2 + c/h_0 & \quad |c| \leq d_0 \end{aligned} \right.$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta|c|}$$

$$d = \delta h_0 \quad d_0 = h_0 d \quad c = x_1 + hx_2$$

式中: h 为采样周期; r 为期望切深; r_1 、 r_2 分别为输入信号 r 平滑过渡的跟踪值和微分跟踪值; $F(\cdot)$ 表示最速控制综合函数; δ 为可变参数“速度因子”,与跟踪速度有关, δ 越大,跟踪速度越快; h_0 为可变参数“滤波因子”,代表跟踪微分器的滤波性能,取适当大于采样周期 h 的参数,可消除速度曲线进入稳态时刻的超调现象。

2) 线性扩张状态观测器。LESO是线性自抗扰控制的核心,通过对激光位移传感器采集的位移信号进行观测,可将影响切深控制系统输出的所有因素(工件变形与振动、主轴抖动、机器人抖动等)扩展为系统的其中一个状态,对其进行预测和估算,并实时进行补偿,利用估算的扰动状态变量还可消除稳态误差,结合式(5)可建立如下离散形式的LESO:

$$\left. \begin{aligned} e(k) &= z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) &= z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_1 e(k)) \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_2 e(k) + b_0 u(k)) \\ z_3(k+1) &= z_3(k) - h\beta_3 e(k) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, y 为传感器采集的位移信号; z_1 、 z_2 分别为输出信号 y 及其微分信号的跟踪及估计; z_3 为切深控制系统所有不确定扰动的总和; b_0 为补偿因子,即式(3)中的 b_0 ,与控制系统的模型有关,通常不需要非常精确,增加 b_0 可以部分消除 β_1 、 β_2 过大导致的音圈电机抖振,但同时会减小扰动的补偿量,影响补偿效果; β_1 、 β_2 、 β_3 的参数整定参考文献[26]提出的带宽法,即 $\beta_1 = 3\omega_0$ 、 $\beta_2 = \omega_0^2$ 、 $\beta_3 = \omega_0^3$ (ω_0 为状态观测器的带宽,与铣削加工过程中的扰动频率直接相关)。

3) 线性状态误差反馈控制律。LSEF的核心思想与PID控制器一样,都是基于误差反馈消除误差,将切深误差信号及其导数信号进行线性组合:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 \\ e_1 &= r_1 - z_1 \\ e_2 &= r_2 - z_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: α_1 、 α_2 为需要整定的状态误差反馈参数。对得到的控制量进行扰动补偿,得到音圈电机的最终控制电压,表示为

$$u = u_0 - z_3/b_0 \quad (10)$$

加工过程中薄壁件的动态特性是时变的,固

定的反馈参数难以取得良好的控制效果,因此本文采用模糊控制算法对式(9)中两个参数 α_1 、 α_2 进行在线自整定,可进一步提高系统的鲁棒性和自适应能力。取切深误差 e_1 和误差变化率 e_2 作为模糊控制器的输入,输出为 k_1 和 k_2 。 α_{01} 和 α_{02} 是初始参数,在此基础上,将模糊控制器的输出 k_1 和 k_2 作为变化系数对 α_1 和 α_2 进行在线自整定,具体表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_{01} + k_1 \alpha_{01} \\ \alpha_2 &= \alpha_{02} + k_2 \alpha_{02} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据切深控制系统的实际情况,将模糊控制器的输入 e_1 和 e_2 的论域设置为 $[-0.1, 0.1]$,输出 k_1 和 k_2 的论域设置为 $[-0.2, 0.2]$ 。每个参数都在自己的论域内取 7 个语言值,即“负大(NB)”、“负中(NM)”、“负小(NS)”、“零(ZO)”、“正小(PS)”、“正中(PM)”、“正大(PB)”,将输入和输出变量进行模糊化。为了获得更高精度的切深控制效果,本文选取更灵敏的三角函数(TRIMF)作为输入输出的隶属度函数,分布方式为均匀分布,得到对应的隶属度函数图像如图 4 所示。针对切深控制时存在较多干扰且模型动态特性时变的特点,本文采用鲁棒性更好且实时性更强的 Mamdani 模糊推理法,输出 k_1 和 k_2 的模糊控制规则分别如表 1 和表 2 所示。为充分利用切深的误差信息,并使输出更加平滑,本文采用面积重心法,通过计算模糊集合中所有元素与其对应隶属度的加权平均来得到精确的输出量。

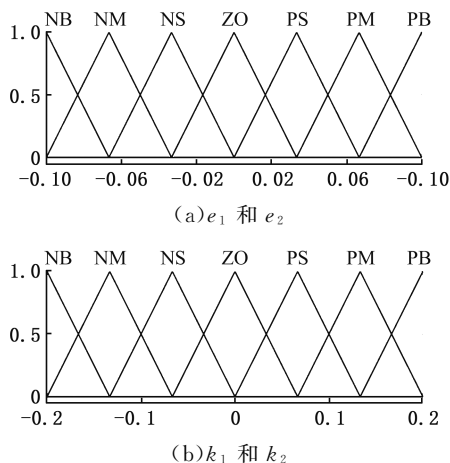


图 4 e_1 、 e_2 、 k_1 和 k_2 的隶属度函数

Fig.4 Membership function of e_1 , e_2 , k_1 and k_2

2.2 切深控制仿真

根据前文建立的 FLADRC 控制器和辨识得到的系统传递函数,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建模糊线性自抗扰控制器并进行切深控制仿真,验证所提控制方法的有效性。控制结构框图见图 5,其中, $d(t)$ 为干扰信号,用于模拟进

表 1 输出 k_1 的模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control rules of output k_1

k_1		e_2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_1	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 输出 k_2 的模糊控制规则

Tab.2 Fuzzy control rules of output k_2

k_2		e_2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_1	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

刀过程中支撑头所受到的干扰。FLADRC 的控制参数为:带宽 $\omega_0 = 1000$,补偿系数 $b_0 = 1.64 \times 10^4$, $\alpha_{01} = 5$, $\alpha_{02} = 0.08$ 。为验证所提控制算法的优越性,搭建了传统模糊 PID(FPID) 的控制框图。FPID 模糊控制模块的两个输入为误差 E 以及误差变化量 E_c ,论域为 $[-0.1, 0.1]$;输出为三个变化系数 k_p 、 k_i 和 k_d ,论域为 $[-0.2, 0.2]$,对 PID 的三个控制参数进行实时整定。设置控制参数的初始值分别为:比例系数 $k_{p0} = 0.224$,积分系数 $k_{i0} = 20.544$,微分系数 $k_{d0} = 0.002$ 。

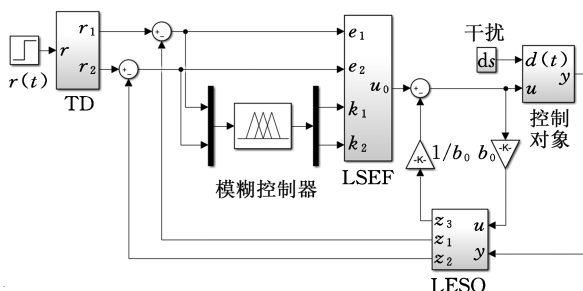


图 5 切深控制仿真框图

Fig.5 Simulation block diagram for cutting depth control

设置切深为 1 mm,主轴转速为 5000 r/min,铣刀齿数为 3,则铣刀对工件的激励频率为 250 Hz。本文采用端铣加工,垂直进刀过程中,支撑头与工件接触时,工件会给支撑头施加一个反弹力,在 0.6 s 时施加幅值为 0.5 的阶跃信号模拟这种突变干扰;在水平进刀过程中,支撑头的主要干扰来源于薄壁工件的振动,在 1.2~1.6 s 期间施加最大幅值为 0.15、采样频率为 250 Hz 的带限白

噪声信号模拟工件的振动干扰,控制仿真结果如图6所示。

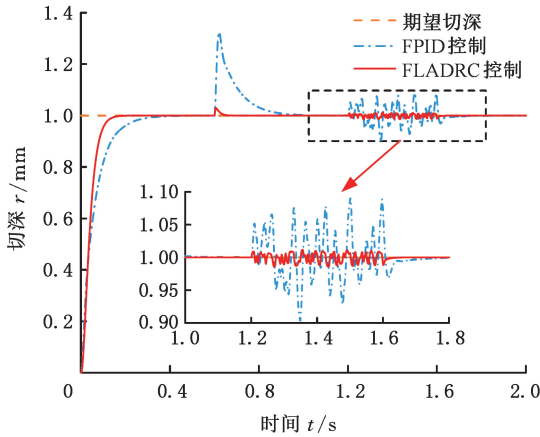


图6 切深控制的仿真结果

Fig.6 Simulation results of cutting depth control

由仿真结果可知,对于期望切深,FLADRC控制到达稳态的时间比FPID缩短了约50%;针对突变干扰,相较于传统的FPID控制,FLADRC控制的误差扰动幅值减小了约90%,且恢复稳定的时间远短于FPID控制;针对振动干扰,FLADRC控制相比于FPID减小了约90%的误差扰动幅值,且同样在更短的时间内恢复稳定。仿真对比分析表明,FLADRC控制可以实现铣削切深的稳定控制,且抗干扰能力高于FPID,具有更好的鲁棒性和自适应能力。

3 实验验证

为了验证所采用控制策略的有效性,在图1所示的机器人铣削平台上进行了薄壁件铣削加工实验。切深控制系统如图7所示,采用MATLAB/Simulink搭建2.1节所描述的FLADRC控制器的控制框图,然后下载到搭载有Simulink Real-Time的实时控制平台中。该控制平台采用NI数采卡PCI-6221进行数据采集和控制信号输出,具有16路模拟输入通道和2路模拟输出通道。

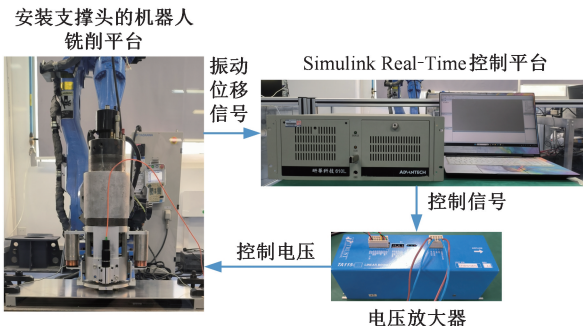


图7 薄壁件加工切深控制系统

Fig.7 Cutting depth control system for thin-walled parts

道。在铣削过程中,将激光位移传感器采集得到的支撑头位移信号传输给数据采集卡的模拟输入通道,通过模拟输出通道将控制器计算得到的控制信号传递给Trust Automation TA115电压放大器,最后将控制电压施加到音圈电机上,通过控制支撑头的轴向运动实现实时切深控制。此外,在加工过程中将PCB 356A01型加速度计固定在尽可能靠近铣削加工区域的位置,通过NI PXIe-4492板卡实时采集加工过程中薄壁工件的振动加速度信号,用于评估支撑头的抑振效果。

飞机蒙皮、火箭贮箱等大型铝合金薄壁零件具有尺寸大、壁薄的特点,通常可达数米甚至数十米,一般厚度在2~5 mm之间,具有大长厚比的特征。基于此特征,同时受限于实验室工作台空间,本文选取具有较大长厚比的6061铝合金薄壁平板(600 mm×300 mm×3 mm)作为加工工件。铣刀材质为硬质合金,刀齿数3、直径12 mm、长度75 mm,其中悬伸长度设置为35 mm。主轴转速设置为5000 r/min,径向切宽为12 mm,轴向切深包括0.5 mm和1 mm两种情况,支撑头预推位移设为1 mm。在FPID控制、FLADRC控制和无支撑三种条件下共进行6组实验,具体实验条件设置如表3所示。

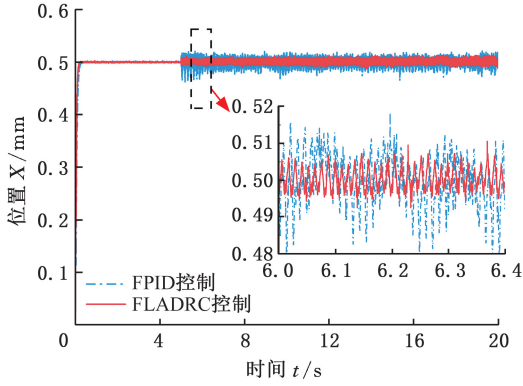
表3 铣削加工的实验参数

Tab.3 Experimental parameters for milling

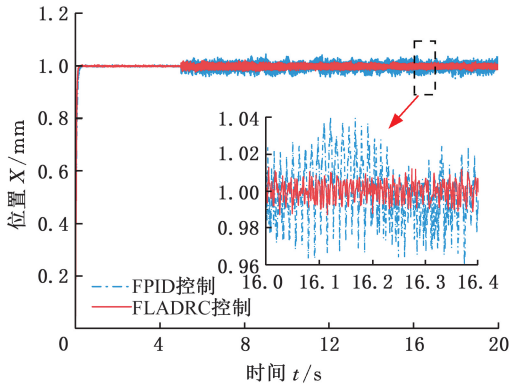
实验组号	主轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	控制算法	轴向切深/mm	预推位移/mm	进给速度/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
1	5000	FPID	0.5	1	120
2	5000	FPID	1.0	1	120
3	5000	FLADRC	0.5	1	120
4	5000	FLADRC	1.0	1	120
5	5000	无支撑	0.5	无	120
6	5000	无支撑	1.0	无	120

为了验证本文所提出的模糊线性自抗扰控制算法的有效性和优势,根据1.1节所描述的恒定切深控制加工流程,按照表3设定的实验条件,分别采用FPID和FLADRC控制算法进行了切深为0.5 mm和1 mm的铣削实验。图8所示为加工过程中不同控制算法的切深控制效果。两种切深条件下,FLADRC控制算法的支撑头位置控制误差均比FPID的位置控制误差小。当切深为0.5 mm时,FPID的位置控制误差幅值约为 $\pm 15 \mu\text{m}$,而FLADRC的位置控制误差幅值约为 $\pm 7 \mu\text{m}$,误差幅值减小了约53.3%;当切深为1 mm时,FPID的位置控制误差幅值约为 $\pm 25 \mu\text{m}$,而FLADRC的位置控制误差幅值约为 $\pm 10 \mu\text{m}$,误差幅值减小了约60%。实验结果表明,本文所提

的 FLADRC 控制算法比 FPID 控制算法抗干扰性更强,控制过程中的支撑头位置偏移波动更小。



(a)0.5 mm 切深

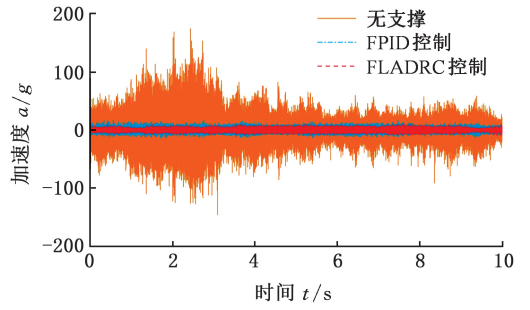


(b)1 mm 切深

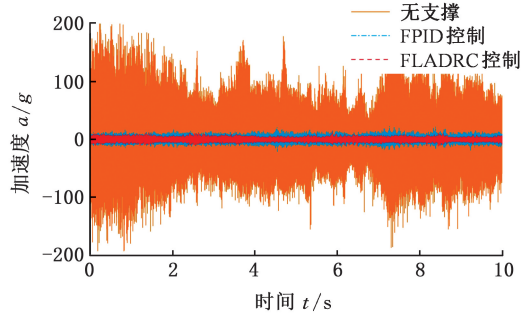
图 8 不同控制算法的切深控制效果

Fig.8 Effect of cutting depth control with different control algorithms

为验证随动支撑头以及切深控制算法的振动抑制效果,在无支撑、FPID 控制和 FLADRC 控制三种情况下进行 0.5 mm 和 1 mm 切深的铣削实验,无支撑时切深由机器人的 Z 向进给距离控制,使用 PCB 加速度计采集加工过程中工件的实时振动信号,进行傅里叶变换并计算其功率谱,结果如图 9 和图 10 所示,其中,SF 代表主轴转速频率,CF 代表铣削颤振频率。由图 9 可知,当切深为 0.5 mm 时,无支撑加工时,工件的加速度平均振幅为 $\pm 50g$,振幅均方根(RMS)值为 $20.33g$ 。采用支撑头进行切深控制,在 FPID 和 FLADRC 算法控制下,工件的平均加速度振幅分别为 $\pm 10g$ 和 $\pm 7g$,RMS 值分别为 $4.18g$ 和 $2.8g$,FPID 控制比无支撑加工的加速度振幅减小了 80%,RMS 值减小了 79.4%,而 FLADRC 控制比 FPID 控制振动加速度振幅减小了 30%,RMS 值减小了 33%;同样,当切深为 1 mm 时,无支撑加工时的加速度振幅为 $\pm 100g$,RMS 值为 $40.47g$,FPID 和 FLADRC 控制的加速度振幅分别为 $\pm 10g$ 和 $\pm 6g$,RMS 值分别为 $4.45g$ 和 $2.5g$,



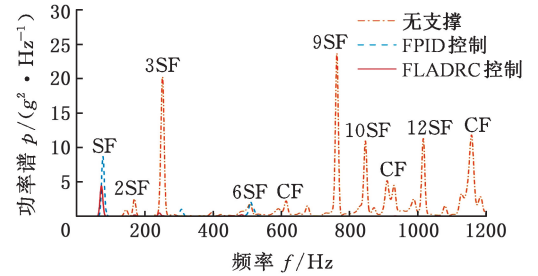
(a)0.5 mm 切深



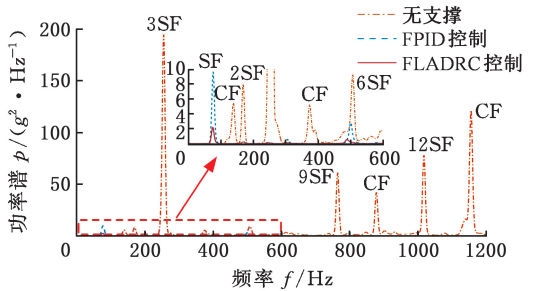
(b)1 mm 切深

图 9 不同实验条件下的工件振动加速度

Fig.9 Vibration acceleration of workpieces under different experimental conditions



(a)0.5 mm 切深



(b)1 mm 切深

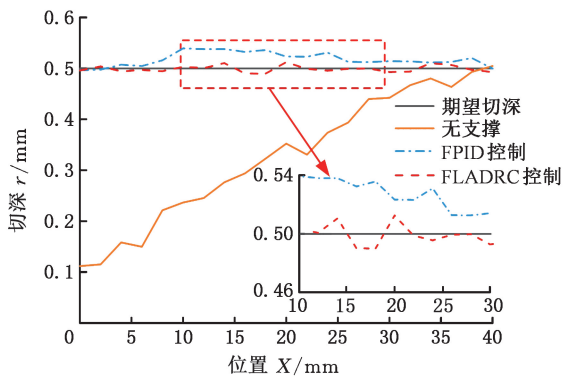
图 10 不同实验条件下的工件振动加速度频谱图

Fig.10 Spectra of workpiece vibration acceleration under different experimental conditions

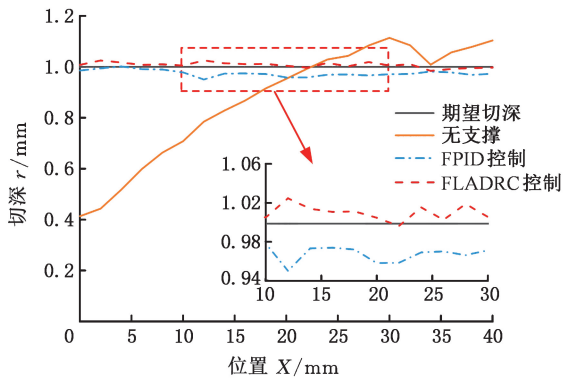
FPID 控制比无支撑加工加速度振幅减小了 90%,RMS 值减小了 89%,而 FLADRC 控制比 FPID 控制加速度振幅减小了 40%,RMS 值减小了 43.8%。由频谱图可知,当未加支撑时,振动信号频域中包含多倍的主轴转速频率,且存在较多的颤振分量,加工过程不稳定;而加支撑头并采用控制算法进行切深控制时,只有单一的主轴转速

频率, 颤振分量也被消除。振动加速度信号的时域和频域分析表明, 通过支撑头施加预推位移并采用控制算法控制切深可以有效提高加工过程的稳定性, 抑制加工过程中工件的强迫振动并消除颤振。而与 FPID 控制相比, 采用 FLADRC 进行切深控制时工件振动幅值进一步减小, 这是由于采用 FLADRC 进行切深控制时, 支撑头的位置波动比 FPID 控制时小, 而支撑头在加工过程中始终压紧工件, 使得工件本身的振动进一步减小。

为更直观地展示切深控制效果, 对铣削区域的实际切深进行测量, 不同实验条件下切深随加工位置的变化趋势如图 11 所示。当切深为 0.5 mm, 未安装支撑头进行加工时, 工件的夹持变形以及加工过程中铣削力导致加工区域严重的变形和振动, 使得加工后表面的实际切深非常不均匀, 最大误差可达 0.4 mm; 在采用支撑头和控制算法进行切深控制加工时, 实际切深的误差显著减小, FPID 控制的切深最大误差为 0.04 mm, FLADRC 控制的切深最大误差仅为 0.02 mm。当切深为 1 mm, 未安装支撑头时实际切深波动很大, 最大误差为 0.6 mm, FPID 控制和 FLADRC 控制的实际切深最大误差分别为 0.05 mm 和 0.03 mm。切深测量结果表明, 通过支撑头和切深控制算法



(a) 0.5 mm 切深



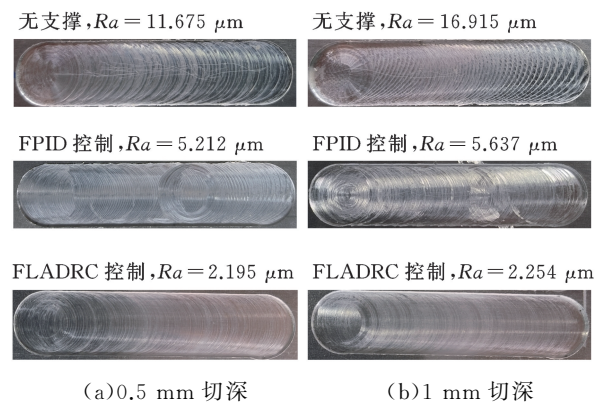
(b) 1 mm 切深

图 11 不同实验条件下的工件实际切深

Fig.11 Actual cutting depth of workpieces under different experimental conditions

可以显著减小薄壁件机器人减薄加工的剩余壁厚误差, 而且相较于传统的 PID 控制算法, FLADRC 控制算法的切深控制精度更高, 可以将实际切深误差控制在 0.05 mm 以下。

加工表面形貌如图 12 所示。在无支撑和不同的控制算法下, 被加工工件表面呈现出不同的表面质量。当未安装支撑头直接进行铣削加工时, 工件表面质量很差, 存在非常明显的颤振波纹; 采用支撑头并通过 FPID 控制算法进行切深控制时, 工件表面质量明显改善, 颤振波纹消失, 但是仍然存在较明显的铣削刀纹; 使用 FLADRC 控制算法进行切深控制时, 工件表面质量进一步改善, 表面光洁度提高, 无明显的振动痕迹, 满足加工要求。进一步地, 使用 JITAI-TR210 粗糙度仪对 6 个铣削区域进行表面粗糙度测量, 每个铣削槽选取多个测点, 取最大值作为最终的粗糙度测量值。当切深为 0.5 mm 时, 无支撑、FPID 控制和 FLADRC 控制的表面粗糙度 R_a 分别为 11.675 μm 、5.212 μm 和 2.195 μm ; 当切深为 1 mm 时, 无支撑、FPID 控制和 FLADRC 控制的表面粗糙度 R_a 分别为 16.915 μm 、5.637 μm 和 2.254 μm 。对比分析结果表明, 采用支撑头和 FLADRC 切深控制算法进行加工可以大幅度减小加工区域的表面粗糙度, 改善表面质量。



(a) 0.5 mm 切深

(b) 1 mm 切深

图 12 不同实验条件下的工件加工表面

Fig.12 Machined surfaces of workpieces under different experimental conditions

为进一步验证本文所提切深控制策略的有效性, 在无支撑和有支撑 (FLADRC) 两种实验条件下加工 40 mm × 30 mm × 1 mm 的下陷特征平面。如图 13 所示, 与无支撑相比, 有支撑时铣削表面质量明显提高。采用粗糙度仪测量铣削区域的表面粗糙度, 无支撑时最大粗糙度 R_a 为 12.161 μm , 有支撑时最大粗糙度 R_a 为 1.855 μm 。同时, 每个铣削平面选取 12 个均匀分布的点进行实际切深测量, 测量结果标注在图中 (单

位为 mm)。无支撑时切深最大误差为 0.39 mm, 有支撑时切深最大误差仅为 0.04 mm。随动支撑头结合 FLADRC 位置控制算法进行加工时, 铣削平面的表面粗糙度和切深误差均满足加工要求。

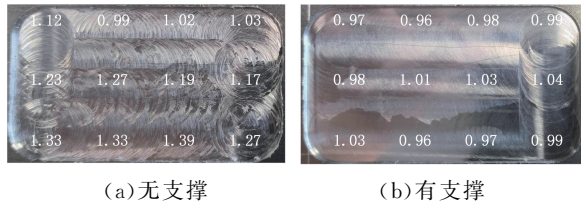


图 13 不同实验条件下的下陷特征加工平面
Fig.13 Sunken feature machining planes under different experimental conditions

4 结论

1) 为解决大型薄壁工件在机器人减薄加工过程中出现的切深不稳定且表面质量较差的问题, 本文采用一种由音圈电机驱动的随动支撑头, 将其安装在机器人末端电主轴上, 以实现加工过程中工件的振动和变形抑制。此外, 本文采用了一种结合模糊控制和线性自抗扰控制的模糊线性自抗扰(FLADRC)切深控制策略, 并通过仿真和一系列铣削加工实验进行了验证。

2) 随动支撑头结合 FLADRC 切深控制策略有效抑制了薄壁件机器人减薄加工过程中工件的振动和变形, 并明显提高了加工表面质量, 相较于无支撑头的加工方式, 工件振动加速度幅值最高衰减了 94%, 表面粗糙度最高减小了 86.67%。

3) 基于 FLADRC 位置控制算法的切深控制策略可以有效避免因工件的振动和变形以及机器人定位精度差导致的切深不稳定的问题, 获得满足要求的剩余壁厚精度, 铣削切深的误差在 0.05 mm 以下。

4) 对于铣削切深的位移反馈控制, 相较于传统的 FPID 控制, FLADRC 控制的抗干扰能力更强, 加工过程中支撑头的位置偏移波动更小。

参考文献:

[1] LI W, WANG L, YU G. Force-induced Deformation Prediction and Flexible Error Compensation Strategy in Flank Milling of Thin-walled Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297:117258.
[2] 钱栊, 张立强, 高秋阁, 等. 基于奇异避免的薄壁件镜像铣削加工路径优化[J]. 中国机械工程, 2023, 34(5):576-583.
QIAN Long, ZHANG Liqiang, GAO Qiuge, et al.

Mirror Milling Machining Path Optimization for Thin-walled Parts based on Singularity Avoidance [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(5): 576-583.
[3] 艾青波, 张洁, 程辉, 等. 基于 PointCPP-LSF 方法的航天筒段薄壁件滚弯成形质量分析[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8):977-985.
AI Qingbo, ZHANG Jie, CHENG Hui, et al. Analysis for Roll Bending Forming Quality of Space Flight Thin Walled Cylindrical Workpieces Based on Point CPP-LSF Method[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(8):977-985.
[4] ZHANG Z, LI H, LIU X, et al. Chatter Mitigation for the Milling of Thin-walled Workpiece[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138: 262-271.
[5] MATSUBARA A, TANIYAMA Y, WANG J, et al. Design of a Support System with a Pivot Mechanism for Suppressing Vibrations in Thin-wall Milling[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1):381-384.
[6] JIA J, NIU J, SUN Y. Dynamics Modeling and Stability Improvement in the Machining of Thin-walled Workpiece with Force-tunable Pneumatic Fixture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117:1029-1043.
[7] MA J, LI Y, ZHANG D, et al. Dynamic Response Prediction Model of Thin-wall Workpiece-fixture System with Magnetorheological Damping in Milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 74:500-510.
[8] WAN M, DANG X B, ZHANG W H, et al. Chatter Suppression in the Milling Process of the Weakly-rigid Workpiece through a Moving Fixture[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117293.
[9] DU J, LONG X. Chatter Suppression for Milling of Thin-walled Workpieces Based on Active Modal Control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84:1042-1053.
[10] WANG S, SONG Q, LIU Z. Vibration Suppression of Thin-walled Workpiece Milling Using a Time-space Varying PD Control Method via Piezoelectric Actuator[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 2843-2856.
[11] YUAN Y, ZHANG H T, WU Y, et al. Bayesian Learning-based Model-predictive Vibration Control for Thin-walled Workpiece Machining Processes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(1):509-520.
[12] YAN B A O, BIN W, ZENGXU H E, et al. Re-

- cent Progress in Flexible Supporting Technology for Aerospace Thin-walled Parts;a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3):10-26.
- [13] SHENG X, ZHANG X. Fuzzy Adaptive Hybrid Impedance Control for Mirror Milling System[J]. Mechatronics, 2018, 53:20-27.
- [14] ZHANG S, BI Q, JI Y, et al. Real-time Thickness Compensation in Mirror Milling Based on Modified Smith Predictor and Disturbance Observer[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 144:103427.
- [15] BO Q, WANG P, HOU B, et al. Mirror Supporting Device based on Magnetorheological Fluid and Control Strategy Based on Force Signal Feedback for Mirror Milling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 212:111309.
- [16] WANG X, BI Q, ZHU L, et al. Improved Forecasting Compensatory Control to Guarantee the Remaining Wall Thickness for Pocket Milling of a Large Thin-walled Part [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94:1677-1688.
- [17] LIU S, XIAO J, TIAN Y, et al. Chatter-free and High-quality End Milling for Thin-walled Workpieces through a Follow-up Support Technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 312:117857.
- [18] TIAN Y, XIAO J, LIU S, et al. Vibration and Deformation Suppression in Mirror Milling of Thin-walled Workpiece through a Magnetic Follow-up Support Fixture[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 99:168-183.
- [19] CHEN Y D, FUH C C, TUNG P C. Application of Voice Coil Motors in Active Dynamic Vibration Absorbers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(3):1149-1154.
- [20] FENG X M, DUAN Z J, FU Y, et al. The Technology and Application of Voice Coil Actuator[C]// 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Inner Mongolia, 2011:892-895.
- [21] WANG R, YIN X, WANG Q, et al. Direct Amplitude Control for Voice Coil Motor on High Frequency Reciprocating Rig[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3):1299-1309.
- [22] 史中权,叶文华.基于音圈电机作动器的主轴振动 LQG 控制研究[J].中国机械工程,2016,27(10):1308-1314.
- SHI Zhongquan, YE Wenhua. Research on LQG Control of Spindle Vibration Based on Voice Coil Motor Actuator[J].China Mechanical Engineering, 2016,27(10):1308-1314.
- [23] CHEN Y L, TAO Y, HU P, et al. Self-sensing of Cutting Forces in Diamond Cutting by Utilizing a Voice Coil Motor-driven Fast Tool Servo[J]. Precision Engineering, 2021, 71:178-186.
- [24] MENG Y, PAN M, LI L, et al. Frequency Domain Optimization Design of the Dual-loop Controller for Piezoelectric Tube Scanners with Compound Dynamics[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024,22:1-10.
- [25] MENG Y, WANG X, HUANG W W, et al. Intelligent Tracking Error Prediction and Feedforward Compensation for Nanopositioning Stages with High-bandwidth Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022,19(5):6460-6470.
- [26] GAO Z. Scaling and Bandwidth-parameterization Based Controller Tuning[C]// American Control Conference. Cleveland, Ohio, 2003:4989-4996.
- [27] HAN J. From PID to Active Disturbance Rejection Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.
- [28] GAO Z. Active Disturbance Rejection Control: a Paradigm Shift in Feedback Control System Design [C]// 2006 American Control Conference. Minneapolis, MN, 2006:2399-2405.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:石龙,男,1996年生,硕士研究生。研究方向为薄壁件的机器人铣削加工。E-mail:slong995@sjtu.edu.cn。李洲龙*(通信作者),男,1988年生,副教授。研究方向为精密超精密加工技术与装备。E-mail:lzl@sjtu.edu.cn。

本文引用格式:

石龙,周鹤翔,李洲龙.基于模糊线性自抗扰的薄壁件机器人铣削切深控制[J].中国机械工程,2025,36(4):671-680.

SHI Long, ZHOU Hexiang, LI Zhoulong. Depth of Cut Control for Thin-walled Parts in Robotic Milling Based on FLADRC[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4):671-680.