DOI: 10.3901/JME.2020.23.172

实时振动数据驱动的薄壁件平铣工艺 参数自适应优化*

赵雄¹ 郑联语¹ 樊伟¹ 余路²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083;

2. 上海飞机制造有限公司 C919 事业部智能装配技术室 上海 201324)

摘要: 为减小加工振动对薄壁件平铣(端面盘铣)加工质量及效率的影响, 提出一种实时铣削振动数据驱动平铣工艺参数自适应优化方法。首先根据再生效应原理建立薄壁件平铣颤振稳定性模型。其次将薄壁件平铣过程中前一个工步内的实测振动数据分为若干段, 以此模拟其材料去除过程, 对各段铣削振动数据进行分析, 由有限元单位力法和优化 STD 法分别识别出薄壁件刚度和各材料去除阶段模态频率及阻尼比, 并由此导出薄壁件单模态频响函数, 将其代入颤振稳定性模型求解稳定域叶瓣图并做插值处理后即可确定包含材料去除信息的薄壁件三维颤振稳定域叶瓣图。基于此, 以避免铣削颤振、共振和满足机床性能要求为约束条件, 以材料去除率最大为目标, 利用遗传算法计算薄壁件下一个工步较优的工艺参数, 如此循环进行, 直到完成薄壁件加工。最后, 通过某型飞机垂尾薄壁装配界面平铣试验验证该方法的可行性和有效性。由试验结果可看出, 采用优化后的加工工艺参数, 能使薄壁装配界面粗加工过程表面粗糙度从 Ra 3.2 提升为 Ra 1.6, 加工效率提高 33%。

关键词: 实时振动数据; 薄壁件; 工艺参数优化; 工步; 优化 STD 法

中图分类号: V262

Real-time Machining Vibration Data Driven Milling Process Parameters Adaptive Optimization

ZHAO Xiong¹ ZHENG Lianyu¹ FAN Wei¹ YU Lu²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083;

2. Business Department, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 201324)

Abstract: In order to decrease the influence of machining vibration to the finishing quality and efficiency of the thin-walled parts, this paper proposed a real-time machining vibration data driven milling process parameters adaptive optimization method. Firstly, the chatter stability model is constructed according to the regeneration principle. Next, dividing the measured vibration data of one step into several segments to simulate the material remove process. The stiffness and modal parameters of thin-walled parts is calculated by finite element unit force method and optimized STD method to derive the frequency response function of thin-walled parts, which is used to calculate the 3D stability lobe diagram. Then, taking the maximum material removal rate as the goal, the genetic algorithm is used to calculate the optimized process parameters of next process step considering to avoid the milling chatter and resonance. Repeat the above cycle again until the thin-walled parts milling process is completed. Finally, the feasibility and effectiveness of the method are verified by the assembly interface of aircraft cutting experiment. The experiment results proves that the method can not only shorten the assembly interface milling process time by 33%, but also improve the surface roughness from Ra 3.2 to Ra 1.6.

Key words: real-time vibration data; thin-walled parts; process parameters optimization; process step; optimized STD method

0 前言

薄壁零件在航空航天制造业中应用广泛, 如壁

板、长桁、涡轮叶盘及叶片等^[1-2], 其加工质量直接影响航空航天器服役性能和使用寿命。然而, 薄壁件铣削过程中, 由于其刚度较低, 在时变铣削力作用下, 极易产生加工振动导致变形甚至报废。为此, 很多学者对薄壁件自适应加工工艺规划及优化进行了一定的研究, 以期提高其加工质量和效率。郑联

* 国家自然科学基金资助项目(51775024)。20191218 收到初稿, 20200624 收到修改稿

语等^[3-4]开发的基于 STEP-NC 的闭环加工控制系统可利用在机测量方法对大型薄壁件加工余量进行评估并据此优化轴向切深。LIU 等^[5]通过考虑薄壁件的尺寸公差等对刀具路径进行自适应调整。HUANG 等^[6]提出的刀具轨迹补偿算法可实现薄壁件加工误差的自适应补偿。以上方法从薄壁件被加工特征的形位误差出发,通过自适应工艺规划对其进行调整和补偿,但并未考虑其加工过程中的振动问题。

铣削加工振动严重制约薄壁件加工质量及效率的提高^[7]。根据产生原因的不同可将铣削加工振动分为:自由振动、颤振和强迫振动(特别是铣削共振)等^[8]。对于薄壁件,铣削颤振及共振的产生与其加工工艺参数的选择直接相关。因此,根据薄壁件实际振动情况(由实测加工振动数据反映)自适应优化工艺参数对于提高其加工质量和效率具有重要意义。

避免或抑制铣削颤振的一个重要研究方向是根据颤振稳定域叶瓣图优选工艺参数,其本质上属于铣削颤振稳定性预测问题,较为通用的颤振稳定性预测方法主要有基于频域法(单频法等)^[9-10]和时域法(半离散法及全离散法等)^[11-15]两类,单频法利用铣削力方向性系数矩阵的傅里叶级数零阶频率项构造颤振稳定性模型,可给出特定主轴转速下的临界切深解析式,因此计算效率极高;半、全离散法通过对时滞微分程的状态项和时滞项进行离散化求取颤振稳定域叶瓣图。两类方法的关键步骤为计算工件或刀具的频响函数。

上述方法均在试验中得到了验证,据此优化工艺参数即可在一定程度上减小铣削颤振。但这些方法只考虑了通过锤击试验获得的工件及刀具静态频响函数。而 ZAGHBANI 指出,结构静态与运行状态下的频响函数具有一定的差别^[16]。只考虑工件与刀具静态频响函数所确定的颤振稳定域有可能会在铣削状态下失效。因此,铣削振动数据驱动的颤振稳定性分析方法得到了应用,主要包括两种思路,一是根据铣削颤振频率与加工系统模态参数之间的关系,利用实测颤振频率反求加工系统频响函数,从而预测颤振稳定性^[17-18],但此类方法需进行多次试切试验寻找颤振频率;二是基于加工振动数据并利用大数据分析方法进行颤振稳定性预测^[19-20],此类方法的预测精度取决于加工振动数据量,因此需要进行大量切削试验;上述方法具有较高的预测精度,但试验成本较高。为此,本文将环境激励下结构模态参数识别方法(Operational modal analysis, OMA)引入到铣削颤振稳定性预测过程中,OMA 法仅根据实测振动数据即可计算结构模态频率及阻尼

比^[21],但由于激励信号未知,不能准确计算结构频响函数。针对该问题,可通过附加质量或刚度法计算模态振型间接导出频响函数^[22-24],或测量激励与响应信号直接计算结构频响函数^[25]。显然,OMA 法试验成本低,且获得的结构运行状态下的频响函数对于铣削颤振稳定性研究更为真实可靠。

利用薄壁件铣削状态下的频响函数进行颤振稳定性预测理论上具有更高的预测精度,但在材料去除过程中,薄壁件频响函数时刻发生变化。针对该问题,SHI 等^[26]从能量角度出发,建立了薄壁件材料去除过程中的颤振稳定性预测模型,并采用全离散法进行求解。SALIH 和 ERHAN 等^[27-28]通过有限元方法预测了涡轮叶片铣削过程颤振稳定性,并由此对各铣削阶段工艺参数进行优化。YANG 等^[29]基于子结构综合法建立了薄壁零件铣削过程(In process workpiece, IPW)动力学模型,由此给出考虑刀具作用位置变化的三维铣削颤振稳定域叶瓣图。以上考虑材料去除过程的稳定性预测方法均在切削试验应用中取得了较好的效果,但分析过程计算量较大,且只考虑了铣削颤振对薄壁件加工质量的影响,并未对其铣削共振问题进行研究。

在铣削共振研究方面,ANTON 等^[30]指出铣刀转速调整过程中,应使其激励频率避开工件的固有频率,从而避免铣削共振发生。张洁等^[31]考虑了柔性刀具的铣削颤振及共振,根据工件表面位置误差及表面粗糙度对工艺参数进行了优化,但对于薄壁件铣削,一般可认为是刚性刀具-柔性工件系统,薄壁件的动力学特性对加工稳定性的影响不能忽略。

综上,以减小加工振动为目标进行薄壁件工艺参数自适应优化主要存在以下三个问题:一是薄壁件静态与切削状态的频响函数具有一定的差别,基于锤击试验法预测的颤振稳定域很可能在工件铣削状态下失效;二是忽略了工件材料去除过程中频响函数变化对颤振稳定性预测的影响,所确定的颤振稳定域有可能不能适用于工件完整加工过程;三是有关从薄壁件实际振动情况出发,综合考虑铣削颤振及共振对其工艺参数进行自适应优化的研究相对较少。针对以上问题,提出一种实时振动数据驱动平铣加工工艺参数自适应优化方法。该方法首先建立薄壁件平铣颤振稳定性模型;然后基于该模型,根据薄壁件前一个工步内的实测加工振动数据(可认为是实时振动数据)确定其三维平铣颤振稳定域叶瓣图,在此基础上,考虑铣削共振原理及机床额定性能要求计算其下一个工步较优的工艺参数;如此循环进行,直至薄壁件完成铣削加工。通过该

方法能够根据薄壁件实际振动情况自适应优化其平铣工艺参数,最大限度地保证薄壁件在各工步中平稳铣削,从而提高其加工质量和效率。

1 薄壁件平铣颤振稳定性模型

薄壁件颤振稳定性模型是其工艺参数自适应优化的基础,因此,首先对其进行铣削颤振稳定性建模。对一般周铣加工,刀具主轴平行于工件待加工平面,其径向刚度较低,铣削颤振稳定性建模过程通常仅考虑与刀具轴向正交的两个自由度。而在薄壁件平铣加工系统(图1a)中,刀具Z向刚度相比于薄壁件较大,而薄壁件Z方向刚度较低,极易产生铣削颤振,只考虑刀具径向的二维颤振稳定性模型不能准确反应薄壁件实际颤振情况。因此,综合考虑刀具-薄壁件平铣加工系统轴向及径向自由度,建立其三维平铣颤振稳定性模型。

图1 薄壁件平铣再生效应模型

考虑再生效应(图1b、c)的薄壁件平铣动态切削厚度为

$$h_j(t) = g(\varphi_j(t)) \begin{bmatrix} \sin \varphi_j(t) \cos \varepsilon \\ \cos \varphi_j(t) \cos \varepsilon \\ -\sin \varepsilon \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} (x_c(t) - x_c(t-T)) - (x_w(t) - x_w(t-T)) \\ (y_c(t) - y_c(t-T)) - (y_w(t) - y_w(t-T)) \\ (z_c(t) - z_c(t-T)) - (z_w(t) - z_w(t-T)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ε 为刀具轴向接触角; T 为相邻齿间周期;

$[x_c(t), y_c(t), z_c(t)]^T$ 及 $[x_w(t), y_w(t), z_w(t)]^T$ 分别为刀具及工件在 t 时刻的位移; $g(\varphi_j(t))$ 用于确定刀齿是否处于切削中, 并满足下式

$$\begin{cases} g(\varphi_j(t)) = 1, & \varphi_{st} < \varphi_j(t) < \varphi_{ex} \\ g(\varphi_j(t)) = 0, & \varphi_j(t) < \varphi_{st}, \varphi_j(t) > \varphi_{ex} \end{cases} \quad (2)$$

式中, φ_{st} 、 φ_{ex} 分别为刀齿切入切出角; $\varphi_j(t)$ 为第 j 个刀齿的瞬时接触角, 并满足下式

$$\varphi_j(t) = \varphi_1 - (j-1)\varphi_p - 2 \cdot \tan \beta / D \cdot a_p \quad (3)$$

式中, φ_1 为某一刀齿的瞬时接触角; φ_p 为相邻齿间角; β 为螺旋角; D 为铣刀直径; a_p 为轴向切深。

则作用于刀齿 j 上的径、切和轴向动态切削力 dF_{rj} 、 dF_{tj} 和 dF_{aj} 分别为

$$\begin{aligned} dF_{rj}[\phi_j(t)] &= K_{re} dz + K_{rc} h_j(t) dz \\ dF_{tj}[\phi_j(t)] &= K_{te} dz + K_{tc} h_j(t) dz \\ dF_{aj}[\phi_j(t)] &= K_{ae} dz + K_{ac} h_j(t) dz \end{aligned} \quad (4)$$

式中, K_{rc} 、 K_{tc} 、 K_{ac} 分别为径向、切向和轴向剪切力系数; K_{re} 、 K_{te} 、 K_{ae} 分别为径向、切向和轴向刃口力系数; dz 为刀具轴向切削刃微元高度。

则径向切削力 dF_{rj} , 切向切削力 dF_{tj} 和轴向切削力 dF_{aj} 的 X , Y , Z 方向分量为分别为

$$\begin{bmatrix} dF_{xj} & dF_{yj} & dF_{zj} \end{bmatrix}^T = \mathbf{U} \cdot \begin{bmatrix} dF_{rj} & dF_{tj} & dF_{aj} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中, $\mathbf{U}$ 为切削力雅克比矩阵, 可写为式(6)

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} -\sin \varepsilon \cos \varphi_j(t) & -\cos \varphi_j(t) & -\cos \varepsilon \sin \varphi_j(t) \\ -\sin \varepsilon \sin \varphi_j(t) & -\sin \varphi_j(t) & -\cos \varepsilon \cos \varphi_j(t) \\ \cos \varphi_j(t) & 0 & -\sin \varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

忽略刃口力及铣刀再生位移的影响, 作用在薄壁件 X , Y , Z 方向合力为

$$\begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z \end{bmatrix}^T = a_p \cdot \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{q} \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{q} = \begin{bmatrix} (x_w(t) - x_w(t-T)) \\ (y_w(t) - y_w(t-T)) \\ (z_w(t) - z_w(t-T)) \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_x \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_y \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_z \end{bmatrix}$$

式中, $\Delta \mathbf{q}$ 为薄壁件再生位移矩阵; $\mathbf{A}$ 为方向性系数矩阵, 矩阵中各元素可由式(8)求出。

$$\mathbf{A} = \sum_{j=0}^{N_z-1} g(\varphi_j(t)) \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} \sin \varphi_j(t) \cos \varepsilon \\ \cos \varphi_j(t) \cos \varepsilon \\ -\sin \varepsilon \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

为简化表达形式, 式(7)可写为

$$\mathbf{F} = \mathbf{a}_p \cdot \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{q} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ 、 $\mathbf{K} = [K_{rc} \ K_{tc} \ K_{ac}]^T$ 分别为薄壁件铣削力矩阵、铣削力系数矩阵。

将 $\mathbf{A}$ 及 $\Delta \mathbf{q}$ 在固有频率 ω_c 处按傅里叶级数展开并保留其直流分量 $\mathbf{A}(0)$, 则式(9)可写为

$$\mathbf{F} \exp(j\omega_c t) = \frac{1}{2} \mathbf{a}_p \cdot \mathbf{K}_{tc} \cdot (1 - \exp(-j\omega_c T)) \cdot \mathbf{A}(0) \cdot \Phi(i\omega) \cdot \mathbf{F} \exp(j\omega_c T) \quad (10)$$

式(10)中薄壁件频响函数矩阵 $\Phi(i\omega)$ 包含直接频响函数和交叉频响函数, 考虑其三个自由度可表示为

$$\Phi(i\omega) = \begin{bmatrix} \phi_{xx}(i\omega) & \phi_{xy}(i\omega) & \phi_{xz}(i\omega) \\ \phi_{yx}(i\omega) & \phi_{yy}(i\omega) & \phi_{yz}(i\omega) \\ \phi_{zx}(i\omega) & \phi_{zy}(i\omega) & \phi_{zz}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $\phi_{ab}(i\omega) = \phi_c(i\omega) + \phi_w(i\omega)$ ($a, b = x \text{ or } y$) 理论上为铣刀及薄壁件频响函数之和, 但薄壁件相对于铣刀刚度较小, 加工振动更为严重。因此, 为了减小计算量, 只考虑薄壁件的频响函数, 即 $\phi_{ab}(i\omega) = \phi_w(i\omega)$ 。

要使式(10)成立, 则必须满足下式

$$\det\{\mathbf{I} + \mathbf{A}[\Phi_0(i\omega)]\} = 0 \quad (12)$$

式(12)即是薄壁件平铣颤振稳定性模型。式中, $\Phi_0(i\omega)$ 为 $\Phi(i\omega)$ 与 $\mathbf{A}(0)$ 的乘积, 代表频响函数矩阵傅里叶级数展开的零阶项, 可表示为

$$\Phi_0(i\omega_c) = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{xx} \\ \phi_{yy} \\ \phi_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其特征值为 $\Lambda = -\frac{N_z}{4\pi} a_p K_a (1 - \exp(-j\omega_c T))$ 。式中,

N_z 为铣刀齿数; K_a 为轴向切削力系数。

2 平铣工艺参数自适应优化方法

受刀具作用位置变化及材料去除效应等因素的影响, 薄壁件固有特性及实际振动情况时刻发生变化。为能根据薄壁件实际振动情况自适应优化工艺参数, 减小加工振动对其加工质量的影响, 提出了一种实时振动数据驱动的薄壁件平铣工艺参数优化方法。采集薄壁件平铣加工过程中的前一个工步的振动加速度数据并作积分处理求取其振动位移数据, 将该工步时间段内的振动位移数据分为若干子时间段模拟其材料去除过程, 即 $T = m\tau$, 则各时间节点为 $t_k = t_1 + (k-1)\tau, k=1, 2, \dots, m+1$ 。

以子时间段 $t_1 \sim t_2$ 内 X 、 Y 和 Z 向的振动位移数

据为例进行分析。首先基于薄壁件 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的实时振动数据, 通过有限元单位力法^[32]与优化 STD 法计算其单模态频响函数并代入第 1 节中的颤振稳定性模型即可确定薄壁件颤振稳定域叶瓣图。同理可依次获得薄壁件其余各时间段(各铣削阶段)平铣颤振稳定域叶瓣图, 然后作插值处理即可获得薄壁件三维平铣颤振稳定域叶瓣图。最后结合铣削共振原理利用优化算法(以遗传算法为例)计算薄壁件下一个工步较优的工艺参数。重复上述过程, 直到薄壁件完成加工。方法实施流程如图 2 所示。

图 2 薄壁件工艺参数自适应优化原理及流程

2.1 薄壁件单模态频响函数确定

传统铣削颤振稳定性预测过程中大都采用锤击法获取工件静态频响函数, 为避免锤击试验耗费大量时间成本, 首先将薄壁件简化为二阶弹簧-阻尼振动模型; 然后为减小计算量, 通过有限元单位力法^[32]计算薄壁件刚度, 基于薄壁件平铣加工振动位移数据, 通过优化 STD 法识别薄壁件模态频率及阻

尼比。最后将其代入二阶振动频响函数通式获得薄壁件单模态频响函数,详细计算过程如下。

仅考虑一阶模态参数,薄壁件可简化为图 3 所示的弹簧-阻尼二阶振动系统。由此可确定其在 X 、 Y 和 Z 方向上的频响函数通式为

$$\phi_{aa}(j\omega) = \frac{\omega_a^2}{k_a(-\omega^2 + 2j\xi_a\omega\omega_a + \omega_a^2)} \quad a = x, y, z \quad (14)$$

式中: k_x, k_y, k_z 、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 和 ξ_x, ξ_y, ξ_z 分别为薄壁件 X 、 Y 和 Z 方向上的刚度和一阶模态频率、阻尼比。

图 3 薄壁件弹簧阻尼二阶系统

薄壁件 X 、 Y 和 Z 向刚度可通过有限元单位力法^[32]求得,而其一阶模态频率及阻尼比可由优化 STD 法求得。优化 STD 法是在传统 STD 法^[33]的基础上对其数据预处理方式及结果可靠性判别方式进行优化。首先利用 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的实测振动位移数据构造 Toeplitz 矩阵,并将其作为传统 STD 法的输入,然后根据 STD 法原理识别薄壁件的各阶模态参数,最后利用模态置信因子及模态保证准则选出稳定性最高的识别结果作为薄壁件的真正模态参数。详细计算过程主要分为以下三个步骤。

(1) Toeplitz 矩阵的构造。

首先,利用薄壁件 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的振动位移数据构造 Toeplitz 矩阵,可保留数据中的所有信息项,并去除噪声的影响。因此,为提高薄壁件加工过程模态参数的识别精度,首先由实测振动位移数据构成 Hankel 矩阵为 $Y_{0|3M-2}$, 表达形式如下

$$Y_{0|3M-2} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{M}} \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{M-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{M-1} & y_M & \cdots & y_{2M-2} \\ y_M & y_{M+1} & \cdots & y_{2M-1} \\ y_{M+1} & y_{M+2} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{2M-1} & y_{2M} & \cdots & y_{3M-2} \end{bmatrix}_{2M \times M} \quad (15)$$

式中, $y_i (i=0,1,2,\dots)$ 为实测振动位移响应值; Y_p 为 $y_0 \sim y_{2M-2}$ 构成 $M \times M$ 的上 Hankel 矩阵; Y_f 为 $y_M \sim y_{3M-2}$ 构成 $M \times M$ 的下 Hankel 矩阵。

将上、下 Hankel 矩阵中所有实测振动位移响应值进行协方差计算,所得序列构成 Toeplitz 矩阵为 T , 表达形式为

$$T = Y_f \cdot (Y_p^T) = \begin{bmatrix} \tilde{R}_M & \tilde{R}_{M-1} & \cdots & \tilde{R}_1 \\ \tilde{R}_{M+1} & \tilde{R}_M & \cdots & \tilde{R}_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{R}_{2M+1} & \tilde{R}_{2M} & \cdots & \tilde{R}_M \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $\tilde{R}_i (i=0,1,2,\dots)$ 为实时振动数据的协方差。

(2) 薄壁件模态频率及阻尼比识别。

依据 STD 法建立薄壁件模态参数识别模型有

$$\tilde{X} = X \cdot B \quad (17)$$

式中, X 为薄壁件振动响应矩阵; $\tilde{X}$ 为 X 延时 T_s (采样周期) 后的延时振动响应矩阵; B 为薄壁件动力学特征矩阵。

可以证明, T 的第 M 行可由其第 $M-1$ 行延时 T_s 之后得到,因此,把 Toeplitz 矩阵的 1 至 $M-1$ 行可看作自由振动响应的矩阵 X ,而 2 至 M 行可看作 X 延时 T_s 后得到的矩阵 $\tilde{X}$, 则有

$$B = X^{-1} \cdot \tilde{X} \quad (18)$$

由式(16)、(17)可得矩阵 B 的表达式为

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_2 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & b_M \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (19)$$

显然, B 是只有第 M 列元素未知的 Hessenberg 矩阵。由式(17)可知

$$X_{M \times M} \cdot b_{M \times 1} = \tilde{x}_{M \times 1} \quad (20)$$

式中: $b_{M \times 1} = [b_1, b_2, \dots, b_M]^T$; $\tilde{x}_{M \times 1}$ 为矩阵 $\tilde{X}$ 的第 M 列元素; 则 b 的最小二乘解用伪逆法可表示为

$$b = (X \cdot X^T)^{-1} \cdot X^T \cdot \tilde{x}_M \quad (21)$$

将 b 代入 B , 可得到矩阵 B 特征值的 e 指数为

$$V_r = \exp(s_r \cdot T_s) \quad (r = 1, 2, \dots, M) \quad (22)$$

式中, s_r 为第 r 阶特征值。

对式(22)两边取对数, 有

$$R_r = \ln V_r = s_r \cdot T_s \quad (23)$$

由式(23)可分别求得工件的各阶模态频率 ω_r 和阻尼比 ξ_r 分别为

$$\omega_r = \frac{|\mathbf{R}_r|}{\Delta t} \quad (24)$$

$$\xi_r = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\text{Im}(\mathbf{R}_r)}{\text{Re}(\mathbf{R}_r)} \right)^2}} \quad (25)$$

(3) 模态参数识别结果可靠新判别。

假设工件模态阶次依次为 1, 2, ..., $r_{\max}$, 各阶次分别包含 1, 2, ..., $r_{\max}$ 阶模态参数, $r_{\max} \geq M$ 。求取工件 1~ $r_{\max}$ 各阶次模态参数, 并以此构造模态频率下三角矩阵 ω 为

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_{1,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \omega_{2,1} & \omega_{2,2} & 0 & \cdots & 0 \\ \omega_{3,1} & \omega_{3,2} & \omega_{3,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{r_{\max},1} & \omega_{r_{\max},2} & \omega_{r_{\max},3} & \cdots & \omega_{r_{\max},r_{\max}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, $\omega_{a,b}$ 为具有 a 阶次工件的第 b 阶模态频率, $b \leq a$ 。

对模态阶次矩阵 $\mathbf{R}$ ($\mathbf{R} = [1, 2, \dots, r_{\max}]^T$) 及 ω 进行插值处理, 得到拟合函数 H , 并对 H 微分求取模态置信因子函数 h 。 h 是模态置信因子 κ 与模态阶次 r_i 的函数, h 的根(H 的极点)所对应点处相邻两阶模态频率变化最小, 可认为是模态参数较为稳定的阶次, 模态频率的置信度较高, 因此, 求 h 的所有根所构成的矩阵如下

$$\kappa = \text{root}(h(\omega)) \quad (27)$$

式中, κ 为模态置信因子构成的矩阵; $\text{root}()$ 为求根公式; $h(\omega)$ 代表模态置信因子函数。

从 κ 中由大到小选择其中 m 个模态置信因子 $\kappa_{i,i+1}, \kappa_{j,j+1}, \kappa_{k,k+1}, \dots$ (共 m 项), 并求其对应的阶次 $r_{i,i+1}, r_{j,j+1}, r_{k,k+1}, \dots$ (共 m 项) 及各阶次所对应的模态参数, 建议 m 取值至少大于 3。

通过 κ 的筛选, 获得模态频率置信度最高的 m 个阶次, 这 m 个阶次可看作是频率稳定的阶次, 但其中可能包含环境噪声模态。针对该问题, 对这 m 个频率稳定的阶次进行振型稳定性判定。振型稳定性可用 MAC 定义, 即

$$MAC_{a,b} = \frac{|\boldsymbol{\varphi}_{a,j}^T \boldsymbol{\varphi}_{b,j}|^2}{(\boldsymbol{\varphi}_{a,j}^T \boldsymbol{\varphi}_{a,j})(\boldsymbol{\varphi}_{b,j}^T \boldsymbol{\varphi}_{b,j})} \quad (28)$$

式中, $\boldsymbol{\varphi}_{a,j}$ 为具有 a 阶次工件的第 j 阶模态的振型矢量, $\boldsymbol{\varphi}_{b,j}$ 为具有 b 阶次工件的第 j 阶模态的振型矢量, $b=a+1$ 。

$MAC_{a,b}$ 的值处于 0~1 之间, 其值的大小表示阶次 a 和 b 模态振型的相关性。当 $MAC=0$ 和 1 时分别表示这两个模态振型之间完全无关和相关; 将 m 个频率稳定的阶次按阶次大小升序排列, 求取相邻阶次模态振型的 MAC 之和为

$$\Sigma MAC_i = \sum_{j=1}^n MAC_{i,i+1} \quad i < m \quad (29)$$

计算 $\kappa_i \cdot \Sigma MAC_i \quad i=1, 2, \dots, m-1$, 该值最大时的阶次对应的模态频率、阻尼比即是薄壁件 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的各阶真实模态参数。

将薄壁件刚度和一阶模态频率及阻尼比代入式频响函数通式(14)中即可确定其 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的单模态频响函数。按照上述步骤可依次获得薄壁件其余时间段 $t_k \sim t_{k+1}$ ($k=2, 3, \dots$) 内单模态频响函数。

2.2 薄壁件三维颤振稳定域叶瓣图确定

同理, 对薄壁件 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的颤振稳定性进行分析。颤振稳定域是通过颤振稳定域叶瓣图来表示, 因此, 首先依据薄壁件平铣颤振稳定性模型给出其颤振稳定域叶瓣图的确定方法, 将式(12)展开, 有

$$\det \begin{bmatrix} 1 + \Lambda \alpha_{xx} \phi_{xx} & \Lambda \alpha_{xy} \phi_{yy} & \Lambda \alpha_{xz} \phi_{zz} \\ \Lambda \alpha_{yx} \phi_{xx} & 1 + \Lambda \alpha_{yy} \phi_{yy} & \Lambda \alpha_{yz} \phi_{zz} \\ \Lambda \alpha_{zx} \phi_{xx} & \Lambda \alpha_{zy} \phi_{yy} & 1 + \Lambda \alpha_{zz} \phi_{zz} \end{bmatrix} = 0 \quad (30)$$

将薄壁件 $t_1 \sim t_2$ 时间段内单模态频响函数(式(14))代入式(30)求解行列式即可确定其特征值表示为

$$\Lambda = \Lambda_R + i \Lambda_I \quad (31)$$

式中, Λ_R 为特征根实部; Λ_I 为特征根虚部。结合欧拉公式, 可以解出

$$a_{p\lim} = -\frac{2\pi \Lambda_R (1 + \kappa^2)}{N_z K_{tc}} \quad (32)$$

式中, $a_{p\lim}$ 为极限切深; $\kappa = \Lambda_I / \Lambda_R$ 为特征值虚部与实部的比值。

$$\omega_c T = \varepsilon + 2k\pi \quad (33)$$

$$n = \frac{60\omega_c}{N[(2k+1)\pi - 2\arctan(\Lambda_I / \Lambda_R)]} \quad (34)$$

式中, $\varepsilon = \pi - 2\varphi$ 为内外调制波之间的相移; n 为主轴转速; k 为叶瓣数, $k=1, 2, \dots$ 。

式(32)、(34)分别代表薄壁件极限轴向切深和对应的主轴转速。针对所选叶瓣数和颤振频率范围依次重复上述过程, 即可获得薄壁件平铣颤振稳定域叶瓣图。

按照上述方法依次获得薄壁件其余各子时间段 $t_k \sim t_{k+1}$ 内的平铣颤振稳定域叶瓣图, 将所有叶瓣图进行插值拟合处理即可得到包含薄壁件材料去除过程信息(刀具作用位置信息)的三维平铣颤振稳定域

叶瓣图。

2.3 考虑铣削颤振及共振的薄壁件平铣加工工艺参数自适应优化

综合考虑薄壁件铣削颤振及共振对其工艺参数进行优化。首先为避免铣削颤振,需在薄壁件三维颤振稳定域中选择主轴转速 n 及切深 a_p , 即 $f(a_p, n) \in f_{plim}(a_p, n)$, 其中 $f_{plim}(a_p, n)$ 表示薄壁件三维颤振临界稳定域; 其次为了避免铣削共振, 主轴转速 n 对应的激励频率及其倍频应该避开薄壁件各阶模态频率, 即 $n \neq \omega_n \times 60 / (N \cdot N_z)$ ($N = 1, 2, \dots$), 其中 ω_n 代表薄壁件各阶模态频率, N 代表正整数; 与此同时, 在薄壁件铣削过程中, 主轴实际扭矩及功率应小于机床额定扭矩及功率; 在满足以上要求的条件下, 应尽量提高薄壁件平铣加工效率, 即使其材料去除率 η_{MRR} 最大 (Material removal rate, MRR)。根据以上约束条件及优化目标, 设计遗传算法对薄壁件平铣加工工艺参数进行自适应优化, 具体算法如下所述。

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta_{MRR}(a_p, f_t, n) \\ \text{s.t.} \quad & T(t) \leq T_{ra} \\ & P(t) \leq P_{ra} \\ & f(a_p, n) \in f_{plim}(a_p, n) \\ & n \neq \omega_n \cdot 60 / (N \cdot N_z) \\ & (N = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (35)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta_{MRR} &= N_z \cdot a_p \cdot a_e \cdot f_t \cdot n \\ T(t) &= F_c(t) \cdot (D/2) \\ P(t) &= F_c(t) \cdot (D \cdot \pi \cdot n / 60) \end{aligned} \quad (36)$$

式中, a_e 为径向切深; f_t 为进给率; $F_c(t)$ 为主轴径向切削力, 可由 $F_c(t) = \max(K_r, K_t) \cdot a_p \cdot f_t$ 计算; f_t 为每齿进给量; $T(t)$ 为主轴切削扭矩, T_{ra} 为额定扭矩; $P(t)$ 为主轴切削功率, P_{ra} 为额定功率。在薄壁件平铣加工中, a_e 、 f_t 、 D 及 N_z 一般固定, 因此, 可构造加工工艺参数优化的遗传算法如下

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta_{MRR} = a_p \cdot n \\ \text{s.t.} \quad & T(t) \leq T_{ra} \\ & P(t) \leq P_{ra} \\ & f(a_p, n) \in f_{plim}(a_p, n) \\ & n \neq \omega_n \cdot 60 / (N \cdot N_z) \\ & (N = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (37)$$

经式(37)即可获得优化后的薄壁件平铣加工工

艺参数。在下一个工步中, 采用优化后的工艺参数不仅可减小平铣颤振、共振, 而且在满足机床额定性能要求的前提下提高了加工效率。

上述工艺参数优化方法仅由实时振动数据即可获得薄壁件在切削状态下的频响函数和切削过程的三维颤振稳定域叶瓣图, 分析过程更加接近实际情况。同时, 可根据薄壁件前一个工步的实际振动情况自适应调整下一个工步的工艺参数, 尽可能保证了薄壁件所有工步平铣加工过程的稳定性。除此之外, 无需进行锤击试验, 计算效率高, 试验成本低, 可为提高大型航空薄壁零件平铣加工质量及效率提供了一种可行且有效的方法。

3 试验与结果分析

为验证上述方法的可行性和有效性, 本文对某型飞机垂尾(图 4a)薄壁装配界面(垂尾与后机身对接结合面)的平铣加工工艺参数自适应优化。薄壁装配界面由 Ti6Al4V 钛合金制成, 其材料参数包括: 密度 $\rho = 4.48 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 114 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.33$ 。装配界面外形尺寸包括: 长为 570 mm, 高为 80 mm, 厚为 6.2 mm, 共需要粗铣 6 刀(6 个工步)去除 1.8 mm 的余量完成粗加工, 精铣 2 刀(2 个工步)去除 0.4 mm 的余量完成精加工。薄壁件粗铣过程振动现象更为明显, 因此本文利用粗铣过程前 2 个工步验证上述方法, 如图 4c 所示。

采用图 4b 所示的数据采样系统来采集和处理薄壁装配界面的振动加速度数据, 采样频率设置为 50 KHz。该数据采样系统主要由加速度传感器(INV9832-50)、数据采集仪(INV3062V2)和数据处理系统(Coninv DASP-V11)等组成。

试验采用额定功率为 30 kW、额定扭矩为 382 Nm 的卧式加工中心, 同时, 选择直径为 50 mm、齿数为 5 的盘铣刀对薄壁装配界面进行平铣加工。目前现场工人根据实际操作经验, 保守选择工艺参数包括: 主轴转速为 152 r/min, 轴向切深为 0.3 mm, 进给速度为 91 mm/min。将装配界面从 A 点(右端点)开始走刀到 B 点(左端点)结束视为一个工步, 时长约 360 s。同时, 选择对振动响应比较敏感的点 1 和 2(图 4c)作为振动数据拾取点, 采集其 X、Y 和 Z 向切削振动数据, 并对采集的振动加速度数据作积分处理计算其振动位移数据, 选择点 2 振动数据进行分析, 可以得到图 5 所示的装配界面振动加速度和位移的时域数据(第 1 个工步的实时振动数据)。

图 4 垂尾薄壁装配界面平铣加工系统

图 5 测点 2 振动加速度和位移

3.1 平铣加工工艺参数自适应优化

首先, 采用有限元单位力法进行薄壁装配界面刚度计算。首先, 在 Abaqus 软件中建立薄壁装配界面有限元模型; 然后分别在点 2 的 X 、 Y 、 Z 方向施加单位力 F , 并测量其变形 σ ; 最后, 利

用单位力及变形即可计算出薄壁装配界面 X 、 Y 和 Z 方向的刚度分别为: $k_x=5.54 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$, $k_y=1.73 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$, $k_z=1.85 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$, 计算原理如图 6 所示。可知薄壁装配界面 Y 、 Z 向刚度较低, 更容易发生铣削颤振及共振。

图 6 装配界面刚度分析原理

然后, 基于测点 2 的振动位移数据, 运用优化 STD 法对薄壁装配界面进行模态参数识别(方法见第 2.1 节)。将薄壁装配界面 X 、 Y 和 Z 向振动位移数据分别均分为 5 个子段, 分别代表 5 个不同的铣削阶段, 如图 7 所示。以 $t_1 \sim t_2$ 子时间段内的振动位移数据为例进行分析, 在保证计算精度的同时, 为减小计算量, 选择 $t_1 \sim t_2$ 时间段内振动响应相对平稳的共 10 s 的振动位移数据(图 7 中框内的数据)构造 400×400 的 Toeplitz 矩阵, 取其 1~399 行及 2~400 行数据作为 STD 法的输入, 并求取模态频率下三角矩阵 ω , 根据 ω 的模态置信因子及模态保证准则之和选择 $\kappa \cdot \Sigma \text{MAC}$ 最大的阶次所对应的模态参数作为装配界面 $t_1 \sim t_2$ 子时间段内的真实模态参数。

图7 测点2振动信号分段

表1 薄壁装配界面三向各阶段模态频率和阻尼比

阶次	方向	各阶段模态频率(ω_n/Hz)					各阶段模态阻尼比($\xi(\%)$)				
		$t_1 \sim t_2$	$t_2 \sim t_3$	$t_3 \sim t_4$	$t_4 \sim t_5$	$t_5 \sim t_6$	$t_1 \sim t_2$	$t_2 \sim t_3$	$t_3 \sim t_4$	$t_4 \sim t_5$	$t_5 \sim t_6$
1	X 向	530.64	546.60	555.33	559.35	569.74	6.22	6.69	5.91	1.53	1.29
2		621.87	664.66	686.79	693.95	677.61	2.16	2.15	1.79	1.82	2.24
3		747.12	746.06	816.84	801.42	713.79	1.05	3.96	2.05	1.22	3.02
1	Y 向	204.35	189.86	188.52	188.05	189.77	1.12	0.55	0.21	18.18	9.42
2		308.49	378.86	388.71	413.78	319.13	2.16	0.45	8.67	2.23	3.01
3		603.67	644.34	544.79	597.92	550.83	7.59	2.51	0.83	3.32	0.75
1	Z 向	216.58	206.77	199.16	202.89	199.17	2.17	3.02	3.06	1.67	3.78
2		325.04	351.42	395.41	324.58	342.87	3.28	5.86	3.44	4.88	4.24
3		422.83	440.60	529.28	534.78	406.94	2.40	2.02	2.66	8.88	1.40

将薄壁装配界面 $t_1 \sim t_2$ 时间段内 X、Y、Z 向刚度、一阶模态频率和阻尼比代入式(14), 即可得到其三向频响函数, 据参考文献[34]中的切削力系数 $K_{tc} = 1963 \text{ MPa}$, $K_{rc} = 646 \text{ MPa}$, $K_{ae} = 778 \text{ MPa}$ 和薄壁装配界面平铣颤振稳定性模型(式(12))可获得其 $t_1 \sim t_2$ 时间段内的颤振稳定域叶瓣图, 如图 8a 所示。按照上述方法可依次计算薄壁装配界面其余各子时间段内的颤振稳定域叶瓣图, 如图 8b~8e 所示。对各颤振叶瓣图进行插值处理即可获得图 9 中装配界面三维颤振稳定域叶瓣图(方法见第 2.2 节)。可以看出, 随着薄壁装配界面材料不断去除, 其临界轴向切深大体呈下降变化趋势。

由于钛合金为难加工材料, 为保证垂尾加工安全性, 本文设置主轴转速最大为 200 r/min 作为约束条件。依据式(37)并按照图 10 的流程采用遗传算法计算薄壁装配界面粗加工过程第 2 个工步较优的主轴转速和轴向切深分别为 $n=192 \text{ r/min}$, $a_p=0.5 \text{ mm}$,

同理, 按照上述方法依次对其余各子时间段内的铣削振动数据进行分析, 可获得薄壁装配界面在各铣削阶段中 X、Y 和 Z 方向的各阶模态频率及阻尼比。由于篇幅限制, 且一般结构动力学分析过程中主要考虑前 3 阶模态参数, 因此本文只给出由铣削振动数据计算得到的薄壁装配界面 X、Y 和 Z 方向上 5 个材料去除阶段中的前 3 阶模态频率及阻尼比, 如表 1 所示。

需要指出的是本文在薄壁件铣削颤振稳定性分析过程中只考虑其单模态频响函数, 即只利用薄壁装配界面一阶模态频率和阻尼比进行颤振稳定域叶瓣图计算。同时, 铣削振动数据分段数量需要根据全部数据长度及各段数据长度是否能够满足模态参数识别精度要求等因素来决定。本文仅初步将其分为 5 个阶段用于验证方法的可行性, 更为合理的数据分段依据需要根据实际加工情况进行进一步研究。

利用该工艺参数, 理论上可以减小下一个工步中铣削颤振及共振对装配界面加工质量的影响, 从而提高薄壁装配界面的加工质量和效率。

(a) $t_1 \sim t_2$ 时间段内颤振稳定域叶瓣图 (b) $t_2 \sim t_3$ 时间段内颤振稳定域叶瓣图

图 8 薄壁装配界面各铣削阶段颤振稳定域叶瓣图

图 9 薄壁件三维颤振稳定域叶瓣图

图 10 薄壁装配界面平铣工艺参数优化算法流程

3.2 薄壁件平铣加工质量分析

为验证上述优化结果的可靠性,采用 3.1 节中优化后的主轴转速和轴向切深对薄壁装配界面进行平铣加工(执行第 2 个步骤),同时采集测点 2 的铣削振动加速度数据。图 11 为对工艺参数优化前后测点 2 的 Z 向振动加速度时域数据、频谱及装配界面平铣表面质量对比结果,可得出以下结果。

(b) 工艺参数优化前后平铣加工质量对比

图 11 工艺参数优化前后装配界面加速度及加工质量对比

(1) 工艺参数优化前, 装配界面铣削颤振现象较为明显, 其振动加速度数据频谱中, 颤振频率(Chatter frequency, CF)为 199.9 Hz; 工艺参数优化后的铣削过程较为平稳(振动加速度数据较为平稳), 振动加速度数据频谱中的频率成分主要为轴转速频(Spindle frequency, SF)的整数倍, 未发生颤振现象, 如图 11a 所示。

(2) 工艺参数优化后, 薄壁装配界面平铣加工质量得到了一定程度上的提高, 按照原来的工艺参

数进行加工,薄壁装配界面表面粗糙度为 $Ra\ 3.2$,按照优化后的工艺参数进行加工,其表面粗糙度可达到 $Ra\ 1.6$,如图 11b 所示。

(3) 工艺参数优化后,只需切 4 刀($0.3\text{ mm}\times 1+0.5\text{ mm}\times 3$)即可完成粗加工,而原来需要切 6 刀($0.3\text{ mm}\times 6$)完成粗加工,在进给率不变的情况下,加工效率提高了 33%。

综上,利用优化后的工艺参数可提高垂尾薄壁装配界面加工质量和效率,从而验证了本文所提出的实时振动数据驱动的薄壁件平铣加工工艺参数自适应优化方法的可行性和有效性。

4 结 论

(1) 从薄壁件实际振动情况出发,综合考虑铣削颤振及共振,提出一种实时振动数据驱动的薄壁件平铣工艺参数自适应优化方法,可根据薄壁件前一个工步的实际振动情况自适应优化下一个工步的工艺参数,为提高薄壁件加工质量及效率提供了理论依据和技术支持。

(2) 在传统铣削颤振稳定性预测方法的基础上进行改进,提出了一种利用实时振动数据计算薄壁件平铣颤振稳定域叶瓣图的方法,该方法综合考虑了薄壁件铣削状态下的频响函数及其在铣削过程中的变化,进而计算三维颤振稳定域叶瓣图,理论上预测结果更符合于实际情况。

(3) 所建立的实时振动数据驱动的薄壁件平铣加工工艺参数自适应优化方法还具有一定的通用性,可用于航空航天、汽车、船舶等领域的大型薄壁零件加工系统的动力学特性分析和工艺优化,为薄壁零件的自适应智能加工提供坚实基础。

参 考 文 献

- [1] DEL SOL I, RIVERO A, LÓPEZ de LACALLE LN, et al. Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approach[J]. Material, 2019, 12(12): 2012.
- [2] 高鑫,李迎光,刘长青,等.基于 CAM/CNC 集成的航空大型薄壁件数控加工在机刀轨调整方法[J].航空学报, 2015, 36(12): 3980-3990.
GAO Xin, LI Yingguang, LIU Changqing, et al. An adjusting method of tool path on machine for NC manufacture of large thin-walled aeronautical part based on integration of CAM and CNC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3980-3990.
- [3] 郑联语,梁大伟,雷沛.基于 STEP-NC 的闭环加工技术研究及实现[J].计算机集成制造系统, 2011, 17(11): 2389-2398.
ZHENG Lianyu, LIANG Dawei, LEI Pei. Research and implementation of closed-loop machining technology based on STEP-NC[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(11): 2389-2398.
- [4] LEI Pei, ZHENG Lianyu, XIAO Wenlei, et al. A closed-loop machining system for assembly interfaces of large-scale component based on extended STEP-NC[J]. International Journal of Advantage Manufacturing and Technology, 2017, 91: 2499-2525.
- [5] LIU Changqing, LI Yingguang, HAO Xiaozhong. An adaptive machining approach based on in-process inspection of interim machining states for large-scaled and thin-walled complex parts[J]. International Journal of Advantage Manufacturing and Technology, 2017, 90: 3119-3128.
- [6] HUANG Nuodi, BI Qingzhen, WANG Yuhuan, et al. 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 74: 1-8.
- [7] YUE Caixu, GAO Haining, LIU Xianli, et al. A review of chatter vibration research in milling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 32(2): 215-242.
- [8] CHEN Yun, LI Huaizhong, HOU Liang, et al. An intelligent chatter detection method based on EEMD and feature selection with multi-channel vibration signals[J], Measurement, 2018, 127.
- [9] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1995, 44: 357-362.
- [10] TUNC L T, BUDAK E. Identification and modeling of process damping in milling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineer, 2013, 135: 0210011-0210019.
- [11] INSERGER T, STEPAN G. Semi-discretization method for delayed system[J]. International Journal of Numerical Method in Engineering, 2002, 55(5): 503-518.
- [12] ZATARAIN M, MUNOJA J, PEIGN G, et al. Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability[J], CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 365-368.
- [13] DING Ye, ZHU Limin, ZHANG Xiaojian, et al. A full-discretization method for prediction of milling

- stability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.
- [14] ZHANG Jie, LIU Cengying. Chatter stability prediction of ball-end milling considering multi-mode regenerations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100: 131-142.
- [15] TANG Xiaowei, PENG Fangyu, YAN Rong, et al. An effective time domain modal for milling stability prediction simultaneously considering multiple modes and cross-frequency response function effect[J]. International Journal of Advantage Manufactural Technology, 2016, 86(1-4): 1037-1054.
- [16] ZAGHBANI I, SONGMENE V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(12-13): 947-957.
- [17] EYNIAN M. In-process identification of modal parameters using dimensionless relationships in milling chatter[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 143: 49-62.
- [18] KRUTH J P, LIU A M, VANHERCK P, et al. A strategy for selection of optimal cutting parameter in high-speed milling to avoid chatter vibration[J]. International Journal of Production Engineer and computers, 2002, 4: 35-42.
- [19] SHRIVASTAVA Y, SINGH B. Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm[J]. European Journal of Mechanics/ A Solids, 2018, 70: 238-248.
- [20] JI Wei, YIN Shubin, WANG Lihui. A big data analytics based machining optimization approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30: 1483-1495.
- [21] LI Bin, CAI Hui, MAO Xinyong, et al. Estimation of CNC machine-tool dynamic parameters based on random cutting excitation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 71: 26-40.
- [22] PARLOO E, VERBOVEN P, GUILLAUME P, et al. Sensitivity-based operational mode shape normalization[J]. Machine System signal Process, 2002, 16(5): 757-767.
- [23] COPPOTELLI G. On the estimate of the FRFs from operational data[J]. Machine System Signal Process, 2009, 23(2): 288-299.
- [24] MAO Xinyong, LUO Bo, LI Bin, et al. An approach for measuring the FRF of machine tool structure without knowing any input force[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 86: 67-67.
- [25] PENG Yili, LI Bin, MAO Xinyong, et al. A method to obtain the in-process FRF of a machine tool based on operational modal analysis and experiment modal analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 3599-3607.
- [26] SHI Jiahao, SONG Qinghua, LIU Zhanqiang, et al. A novel stability prediction approach for thin-walled component milling considering material removing process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(5): 1789-1798.
- [27] ERHAN B, LUTFI T T, SALIH A, et al. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 339-342.
- [28] SALIH A, ERHAN B, NEVZAT H. Analytical prediction of part dynamics for machining stability analysis[J]. International Journal of Automation Technology, 2010, 4(3): 259-266.
- [29] YANG Yun, ZHANG Weihong, MA Yingchao, et al. An efficient decomposition-condensation method for chatter prediction in milling large-scale thin-walled structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 121: 58-76.
- [30] ANTON G, VIKTOR L, DMITRI A, et al. Optimal cutting conditional determination for milling thin-walled details[J]. Advantages Manufactural, 2018, 6: 280-290.
- [31] 张洁, 刘成颖, 郑峰, 等. 基于铣削动力学的刀具强迫振动抑制研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 94-99.
- ZHANG Jie, LIU Chengying, ZHEN Feng, et al. Research on suppression of the forced vibration of the cutter based on the milling dynamics[J]. Journal of Mechanical Engineer, 2018, 54(17): 94-99.
- [32] 秦国华, 张卫红, 周孝伦. 夹紧方案的数学建模及夹紧力的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2005, 24: 438-443.
- QIN Guohua, ZHANG Weihong, ZHOU Xiaolun. Modeling and optimal design of fixture clamping scheme[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24: 438-443.
- [33] 孟昭博, 胡博森, 赵庆双, 等. 基于 STD 法的光岳楼木结构自振频率计算[J]. 聊城大学学报, 2015, 28(4):

37-41.

MENG Zhaobo, HU Boseng, ZHAO Qingshuang, et al.

Natural frequency calculation of guangyue tower based on the method of STD[J]. Journal of Liaocheng, 2015, 28(4):

37-41.

- [34] BUDAK E, ALTINTAS Y. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118: 216-224.

作者简介: 赵雄, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为数字化与智能加工工艺及系统、可重构柔性智能工装。

E-mail: zhaoxiong@buaa.edu.cn

郑联语(通信作者), 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化与智能制造、可重构制造系统、制造建模与仿真, 下一代工业辅助技术及系统。

E-mail: lyzheng@buaa.edu.cn

樊伟, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为薄壁件自适应精加工、可重构柔性智能工装、数字化设计与智能制造。

E-mail: fanweiok@buaa.edu.cn

余路, 男, 1986 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为飞机大部件自适应加工。

E-mail: yulu@comac.cc