考虑铣削静动态特性及时变刀具磨损的铣削稳定性判别方法

郭森现[1*] 韩琛潼[1] 郭维诚[1] 丁子珊[1] 魏 燕[2] 周金强[3]
1.上海理工大学机械工程学院,上海,200093
2.上海理工大学能源与动力工程学院,上海,200093
3.上海航天设备制造总厂有限公司,上海,200241

摘要:增大铣削加工参数可提高加工效率,却易产生加工颤振的问题,因此提出一种同时考虑铣削静动态性能和时变刀具磨损影响的稳定性判别方法。先依托铣削力模型建立考虑径向切削深度与刀具直径的三维铣削叶瓣稳定图,确定基础加工参数。再通过频域信号处理剔除主轴转频干扰,判别实际加工的铣削稳定性;同时基于铣削刃口系数变化监测刀具磨损,并将磨损因素融入判别体系。铣削稳定性在线判别实验结果表明,所提方法在保证工艺稳定的前提下提高了材料去除率。

关键词:铣削稳定性;材料去除率;刀具磨损;动态判别
中图分类号:TG50
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.007 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

A Milling Stability Determining Method Considering the System Static-dynamic Characteristics and Time-varying Tool Wear

GUO Miaoxian[1*] HAN Chentong[1] GUO Weicheng[1] DING Zishan[1] WEI Yan[2] ZHOU Jinqiang[3]
1.School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093
2.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093
3.Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Co., Ltd., Shanghai, 200241

Abstract: Increasing milling parameters improves machining efficiency but tends to cause chatter. To address this issue, this paper proposes a stability identification method that considers the static and dynamic characteristics of the milling process as well as the influence of timevarying tool wear. First, a threedimensional stability lobe diagram, incorporating radial cutting depth and tool diameter, is established based on the milling force model to determine the basic machining parameters. Second, frequencydomain signal processing is adopted to eliminate interference from spindle rotational frequency and to identify the actual stability state. Meanwhile, tool wear is monitored based on variations in cutting edge coefficients, and the wear factor is integrated into the identification system. Online identification test results verify that the proposed method can increase the material removal rate while ensuring process stability.

Key words: milling stability; material removal rate; tool wear; dynamic characteristics

0 引言

准确预测和判别铣削稳定性对优化加工参数、提高材料去除率至关重要。铣削稳定性判别方法主要有铣削叶瓣稳定图静态稳定性判别[1]、加工过程中的在线稳定性判别[2]、考虑刀具磨损的铣削稳定性判别[3]。铣削叶瓣稳定图静态判别受铣削系统初始模态、铣削力系数影响;铣削稳定性在线判别需分析铣削系统当前的物理信号特征,确定铣削系统的稳定性;考虑刀具磨损的铣削稳定性判别主要针对难加工材料,分析不同刀具磨损下的铣削力系数对铣削稳定性的影响。

传统稳定性判别方法通过求解铣削力模型得到关于主轴转速、极限轴向切削深度的二维叶瓣稳定图,并在此基础上添加径向切削深度/刀具直径,获得三维铣削叶瓣稳定图,以及对应的极限稳定铣削加工参数。YAO等[4]基于预先获得的三维稳定性叶瓣图,采用相对小波包能量熵和局部离群因子算法实现了颤振的早期检测。王民等[5]

收稿日期:2025-07-08
基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2023-063);国家自然科学基金(52275452,52475478)

建立了考虑主轴转速、轴向切削深度和径向切削深度的三维稳定性叶瓣图，并以工件材料最大去除率为优化目标选择切削参数，在保证切削加工质量的前提下，更快、更好地完成铣削加工。

传统的铣削稳定性叶瓣图是通过固定参数计算求解稳定极限的静态判别方法，然而铣削加工过程会发生变化，因此需设计铣削稳定性的在线识别方法。张智等[6]以小波包能量熵为指标来识别铣削加工的稳定状态及振动形式。刘长福等[7]采用快速傅里叶变换频谱选择变分模态的分解模态个数，提取仿真信号和实验信号的颤振频带。

铣削稳定性受机床动力学特性、刀具参数等影响，而铣削力系数会随刀具磨损状态变化发生改变。DOU等[8]建立了刀具后刀面磨损量的估算模型，并结合时间序列分析模型预测了刀具后刀面的磨损量。PAN等[9]采集瞬时切削力提取铣削力系数，并对多维度铣削力系数进行特征融合，筛选高灵敏度磨损特征，将融合后的特征输入支持向量机，实现变参数铣削的刀具磨损状态监测。

上述的单一判别方法无法关联不同影响因素，而工艺状态的变化会影响铣削稳定性判别的准确性。融合了离线优化与实时监控的铣削加工参数优化方法[10]考虑了切削力、稳定性、主轴扭矩和功率等约束，建立了主轴电流与铣削力的关系，可实现切削力系数的实时估计。因此，本文基于静态判别、在线判别、考虑刀具磨损判别的研究，实现从基于单因素到考虑多因素的稳定性判别。首先得到静态三维铣削叶瓣稳定图，然后基于不稳定铣削特征提出过滤主轴转频的在线铣削稳定判别方法，并分析刀具磨损对铣削系数的影响，进而实现面向材料去除率的铣削稳定动态判别方法。

1 静态铣削稳定性要求的材料去除率

高效铣削加工与加工稳定性密切相关，为获得稳定性条件下的最大材料去除率，通过三维铣削叶瓣稳定图获得当前铣削系统推荐的加工参数，并计算材料去除率。

1.1 铣削力模型构建

建立包含一个刀具、一个加工零件的刀具-工件二自由度铣削力模型，其中，工具视为具有两个自由度的质量-弹簧-阻尼器系统。铣削系统的动力学运动方程可简写为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}(t)=a_{\mathrm{p}}\boldsymbol{k}(t)\boldsymbol{u}(t,t-\tau) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{u}(t)$、$\dot{\boldsymbol{u}}(t)$、$\ddot{\boldsymbol{u}}(t)$分别为刀具与工具的相对位移、相对振动速度和相对振动加速度；a_{p}为轴向铣削深度；$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{k}(t)$为切削力系数矩阵；$\boldsymbol{u}(t,t-\tau)$为前时刻的位移$\boldsymbol{u}(t)$与前一刀齿切削时刻位移$\boldsymbol{u}(t-\tau)$的相对位移差。

对测试实验机床进行频响实验，获得如下模态参数：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}0.053 & 0\\ 0 & 0.050\end{bmatrix}\mathrm{kg}\qquad \boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}3.727 & 0\\ 0 & 3.261\end{bmatrix}\mathrm{N\cdot s/m}$$

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}4.120 & 0\\ 0 & 3.931\end{bmatrix}\mathrm{MN/m}$$

$$\boldsymbol{k}(t)=\sum_{j=1}^{N}g[\varphi_j(t)]\begin{bmatrix}s(k_{\mathrm{tc}}c+k_{\mathrm{rc}}s) & c(k_{\mathrm{tc}}c+k_{\mathrm{rc}}s)\\ s^2(-k_{\mathrm{tc}}+k_{\mathrm{rc}}) & c(-k_{\mathrm{tc}}s+k_{\mathrm{rc}}c)\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$s=\sin[\varphi_j(t)]\qquad c=\cos[\varphi_j(t)]$$

式中：$\varphi_j(t)$为第$j(j=1,2,\cdots,N)$个刀齿的位置。

实验加工方式均为顺铣，通过刀具的径向切削深度a_{e}、直径D，计算顺铣切入角φ_{st}及切出角φ_{ex}

$$\left.\begin{aligned}\varphi_{\mathrm{st}}&=\arccos(2a_{\mathrm{e}}/D-1)\\ \varphi_{\mathrm{ex}}&=\pi\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

铣削过程不连续，刀齿与工件间断接触。转角φ_j在φ_{st}、φ_{ex}之间时，刀齿处于切削状态，$g[\varphi_j(t)]=1$；反之，刀齿处于脱离状态，$g[\varphi_j(t)]=0$。

此外，式(2)中的铣削力系数k_{tc}、k_{rc}可通过如下的铣削系数快速识别公式获取[9]：

$$\begin{bmatrix}\overline{F}_x\\ \overline{F}_y\\ \overline{F}_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{1x} & A_{2x} & A_{3x} & A_{4x} & 0 & 0\\ A_{1y} & A_{2y} & A_{3y} & A_{4y} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{5z} & A_{6z}\end{bmatrix}\cdot \begin{bmatrix}k_{\mathrm{tc}} & k_{\mathrm{te}} & k_{\mathrm{rc}} & k_{\mathrm{re}} & k_{\mathrm{ac}} & k_{\mathrm{ae}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\left.\begin{aligned}A_{1x}&=A_{3y}=\frac{Na_{\mathrm{p}}f_z}{8\pi}(\cos 2\varphi_{\mathrm{st}}-\cos 2\varphi_{\mathrm{ex}})\\ A_{2x}&=\frac{Na_{\mathrm{p}}}{2\pi}(\sin\varphi_{\mathrm{ex}}-\sin\varphi_{\mathrm{st}})\\ A_{3x}&=-A_{1y}=\frac{Na_{\mathrm{p}}f_z}{8\pi}(2\varphi_{\mathrm{ex}}-2\varphi_{\mathrm{st}}+\sin 2\varphi_{\mathrm{st}}-\sin 2\varphi_{\mathrm{ex}})\\ A_{4x}&=-A_{2y}=-A_{4y}=\frac{Na_{\mathrm{p}}}{2\pi}(\cos\varphi_{\mathrm{st}}-\cos\varphi_{\mathrm{ex}})\\ A_{5z}&=\frac{Na_{\mathrm{p}}f_z}{2\pi}(\cos\varphi_{\mathrm{st}}-\cos\varphi_{\mathrm{ex}})\\ A_{6z}&=\frac{Na_{\mathrm{p}}}{2\pi}(\varphi_{\mathrm{ex}}-\varphi_{\mathrm{st}})\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：$\overline{F}_x$、$\overline{F}_y$、$\overline{F}_z$分别为铣削加工中测得的X向、Y向、Z向的平均铣削力；f_z为每齿进给量；t、r、a分别为切向、法向和轴向的铣削力系数，$\mathrm{N/mm^2}$；k_{tc}、k_{re}、k_{ae}分别为切向、法向、轴向的刃口系数，N/mm。

1.2 基于三维叶瓣稳定图的材料去除率

为研究径向切削深度a_{e}与刀具直径D的比值（下文简称“切深刀径比”）λ导致的铣削稳定性差异，在不同切深刀径比下，采用基于有限维Floquet变换矩阵的半离散方法求解式(1)[11]，得

到关于主轴转速n、切深刀径比λ、极限轴向切削深度a_p的三维叶瓣稳定图(图1)。仿真初始条件如下:切向铣削力系数k_{tc}为704 N/mm^2,法向铣削力系数k_{rc}为546 N/mm,刀具齿数N为2。

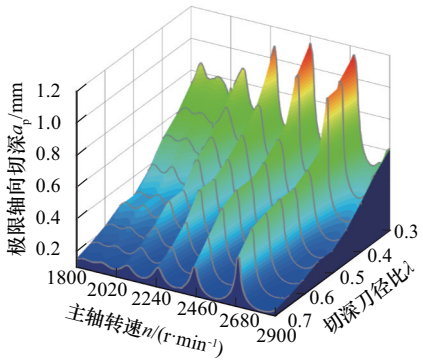


图1　三维铣削叶瓣稳定图

Fig.1　Stability lobe diagram of three-dimensional milling process

由图1可确定极限轴向切削深度对应的主轴转速与切深刀径比。由材料去除率

$$Q=a_e a_p n N f_z \tag{6}$$

式中:Q为材料去除率,mm^3/min。

可知,主轴转速n、轴向切深a_p、径向切深a_e、刀具齿数N均为影响材料去除率的关键因素。

每齿进给量对再生颤振产生的动态铣削厚度影响较小[7],所以忽略每齿进给量对铣削稳定性的影响即对三维铣削叶瓣稳定图的影响。结合三维铣削叶瓣稳定图中的切深刀径比$\lambda=a_e/D$、极限轴向切深a_p、主轴转速n,及三维叶瓣稳定图仿真初始条件刀具齿数N,修正材料去除率公式:

$$Q=Q^* D f_z=(\lambda a_p n N) D f_z \tag{7}$$

$$Q^*=\lambda a_p n N$$

式中:Q^*为材料去除率的标准值,mm/min。

后续实验的每齿进给量为常数,通过式(7)将图1中的轴向铣削深度改为材料去除率的标准值后,可由材料去除率的标准值Q^*判断加工效率并确定最大材料去除率对应的工艺参数,如图2所示。

2　加工过程中铣削稳定性在线判别

根据铣削叶瓣稳定图可对铣削系统稳定性进行了静态分析判断。由式(1)可知,随着刀具磨损状态即铣削力系数的变化,铣削叶瓣稳定图会发生关联性改变。为验证静态判断结果在实际铣削加工过程中提供初始稳定区域的有效性,设计了铣削稳定性在线判别方法。

2.1　实验平台搭建

实验平台如图3所示,其中,铝合金6061的加

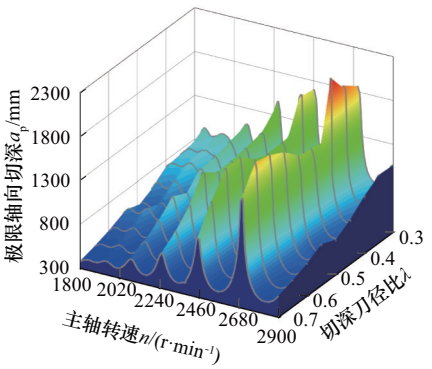


图2　三维材料去除率叶瓣稳定图

Fig.2　Three-dimensional stability lobe diagram with material removal rate

工在北京精雕数控铣床Carver S600B上完成,钛合金TC4的加工在发那科数控铣床ROBODRILL上完成。使用KISTLER动态测力仪采集铣削过程中的力信号,采样频率为2500 Hz。

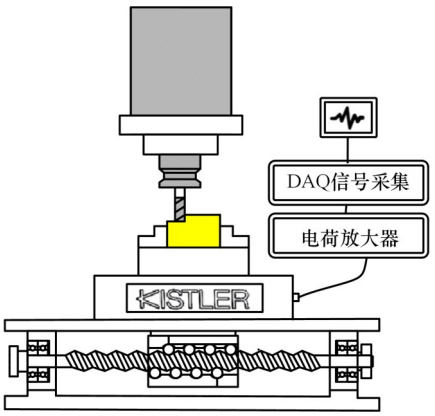


图3　铣削实验平台

Fig.3　Milling experimental platform

实验铣削工艺参数如表1所示,其中,Test1～4为单因素实验,刀具为普通立铣刀(直径10 mm、伸长量35 mm、齿数3),用于观察铣削力的频域分布并验证不稳定铣削识别方法的有效性。

表1　测试验证实验铣削工艺参数

Tab.1　Milling process parameters of verification tests

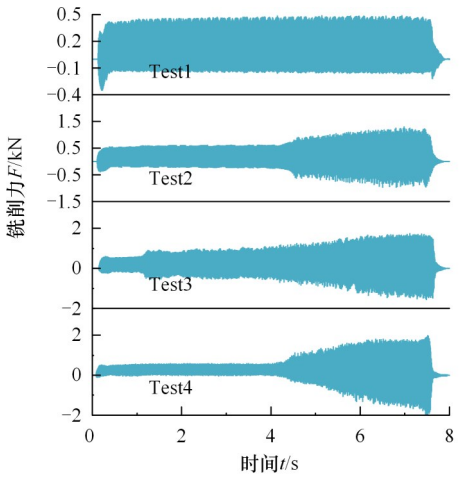
实验	n/(r·min^{-1})	a_e/mm	a_p/mm	v/(mm·min^{-1})	工件材料
Test1	7200	5	2.5	1000	铝合金
Test2	7200	5	5	1000	铝合金
Test3	7200	5	7.5	1000	铝合金
Test4	7200	5	10	1000	铝合金
Test5	1820	7	0.5	182	钛合金

注:v为进给速度。

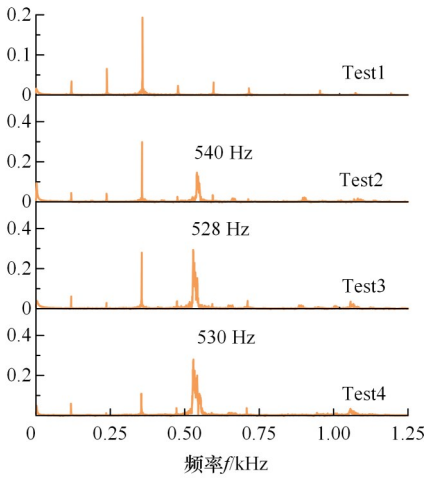
2.2　铣削力的频域分布

Test1～4采集的铣削力信号如图4所示,其中,频域信号为快速傅里叶变换处理的时域信号(时长6 s)。Test1为稳定铣削实验,铣削力主要

分布在转速转频及整数倍上。Test2～4为不稳定铣削实验，随着轴向切削深度a_p的增大，不稳定铣削引起的非转频附近铣削力占比逐渐增大，非转频540 Hz、528 Hz、530 Hz处出现明显的不稳定铣削信号。



(a)进给方向铣削力信号



(b)6 s处的频域信号

图4 单因素实验铣削力频域分布

Fig.4 Frequency domain distribution of milling force in single-factor experiments

2.3 滤除转频的铣削稳定性判别方法

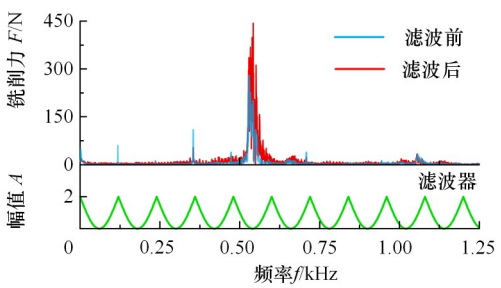
为判断加工过程中的铣削稳定性，剔除主轴转频、刀齿频率等主轴转速频率相关的稳定铣削加工频率，保留非主轴转频相关的不稳定铣削加工频率。采用主轴转频滤波器

$$H_{abs}(f)=|A\sin(\pi f/f_0)| \tag{8}$$

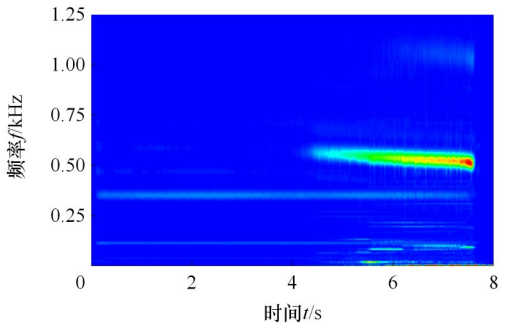
式中：A为滤波器的倍数，取2；f_0为机床主轴的转动频率，$f_0=n/60$。

对Test4信号进行滤波(图5a的绿色曲线)。对比滤波前后的时频图(图5b、图5c)可知，过滤与主轴转频相关的信号后，可清晰观察到非主轴转频上的不稳定铣削信号。

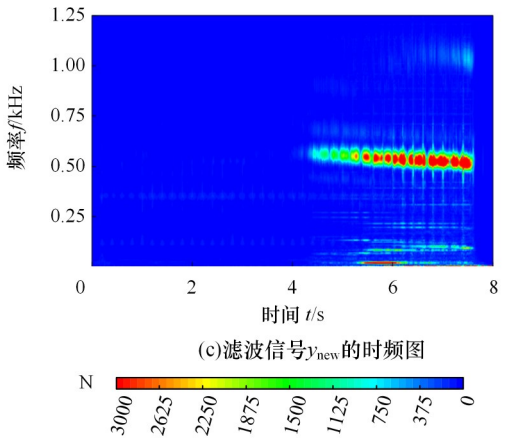
计算滤波前后Test4信号的方差比：



(a)滤波前后频域对比



(b)原始信号y_{og}的时频图



(c)滤波信号y_{new}的时频图

图5 铣削稳定性判别滤波器

Fig.5 Filter for milling stability identification

$$V=\sqrt{\sum_{i=1}^{M}(y_{new_i}^2-\bar{y}_{new}^2)\Big/\sum_{i=1}^{M}(y_{og_i}^2-\bar{y}_{og}^2)} \tag{9}$$

式中：M为计算数据点个数，$M=1000$；y_{og_i}、y_{new_i}分别为滤波前后的第i个数据；$\bar{y}_{og}$、$\bar{y}_{new}$分别滤波前后的数据均值。

由图6可知，方差比V与工件表面质量对应，可有效反映铣削系统的即时稳定性，进而实时判别加工过程中的铣削稳定性。

3 考虑刀具磨损的铣削稳定性分析

铣削系数中的铣削力系数是叶瓣稳定图仿真的重要初始条件，刃口系数与刀具磨损有明显的对应关系[3]，因此本节先通过刀具磨损试验确认铣削系数(包括铣削力系数和刃口系数)与刀具磨损之间的关系，再根据不同刀具磨损程度的铣削力系数研究铣削力系数对铣削稳定性的动态影响规律，以此联系静态判别方法和动态判别方法，得

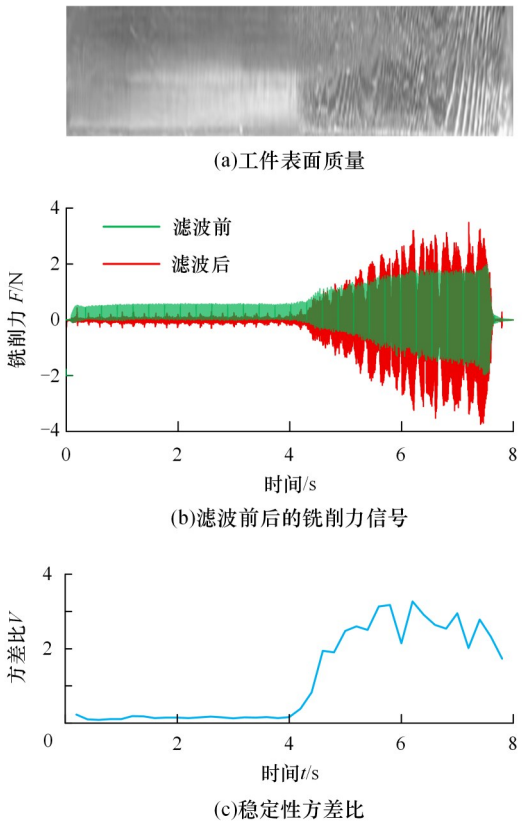


图 6　滤波条件下的铣削稳定性判别

Fig.6　Milling stability identification under filtering conditions

到铣削系统稳定性的判断流程。

3.1　面向铣削系数的刀具磨损分析

进行硬质合金铣刀(直径 14 mm、伸长量 70 mm、齿数 2)加工钛合金 TC4 的干切削实验，实验中的加工参数(见表 1 中的 Test5)不变直至铣刀严重磨损。采集 X、Y、Z 方向上的铣削力(采样频率为 2500 Hz)，将铣削力均值(2500 个铣削力测量值的平均值)代入式(4)，计算得到铣削系数。如图 7 所示，铣削力系数、刃口系数均随加工时间的延长逐渐增大。

将综合铣削力系数 k_c 和综合刃口系数 k_e

$$\left.\begin{aligned} k_c &= \sqrt{k_{tc}^2 + k_{rc}^2 + k_{ac}^2} \\ k_e &= \sqrt{k_{te}^2 + k_{re}^2 + k_{ae}^2} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

作为后续刀具磨损判断标准。

综合铣削力系数 k_c、综合刃口系数 k_e 低通滤波后的值为 k_{c_L}、k_{e_L}，由图 8 可得铣削系数与刀具磨损的关系。k_e=120 N/mm 时，刀具后刀面的磨损为 351 μm，刀具已严重磨损，故将综合刃口系数 k_e 的阈值 120 N/mm 作为刀具严重磨损的判别标准。

3.2　铣削力系数对铣削稳定性的动态影响

为分析铣削力系数对铣削稳定性的影响，将

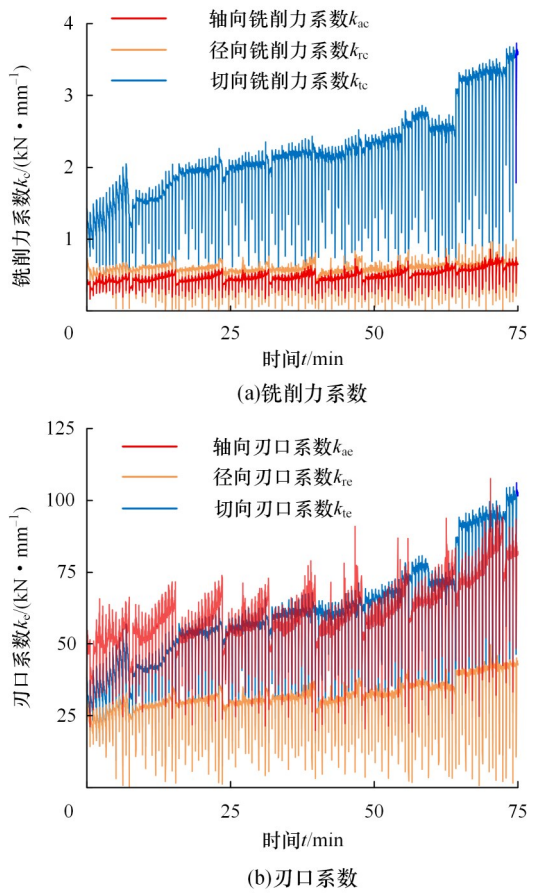


图 7　铣削系数动态计算结果

Fig.7　Dynamic calculation results of milling coefficients

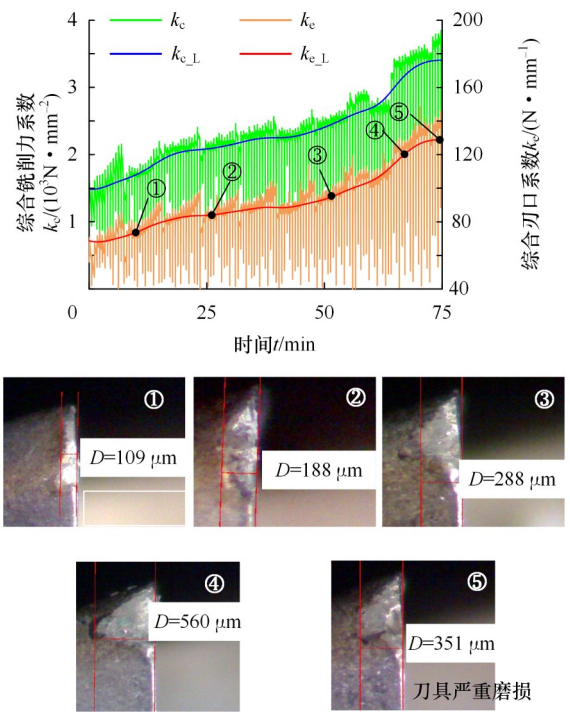


图 8　综合铣削力系数及对应刀具磨损

Fig.8　Comprehensive milling force coefficients and corresponding tool wear

后刀面不同程度磨损的切向铣削力系数k_{tc}与径向铣削力系数k_{rc}(表2)作为输入,获取切深刀径比为0.3时的铣削叶瓣稳定图。

表2 刀具不同磨损程度对应的铣削力系数

Tab.2 Milling force coefficients corresponding to different tool wear levels

刀具后刀面磨损V_B/μm	109	188	288	560
切向铣削力系数k_{tc}/(N·mm^{-2})	1502	2109	2410	3868
径向铣削力系数k_{rc}/(N·mm^{-2})	619	613	609	727

如图9所示,随着刀具磨损的加剧,铣削叶瓣稳定图中的极限轴向切削深度曲线整体下降,因此在铣削加工过程中需实时判别铣削稳定性。使用铣削叶瓣稳定图中的最大材料去除率对应的加工参数进行铣削,刀具磨损达到一定程度时会出现不稳定铣削,因此需使用出现不稳定铣削时刻的铣削力系数重新计算叶瓣稳定图,并确定新的铣削加工参数,且一旦出现不稳定铣削就需要重新计算叶瓣稳定图,直至综合刃口系数超过刀具严重磨损阈值,停止铣削加工。上述文字对应的流程如图10所示,后续将设计动态工艺适应性试验来验证该流程图的有效性。

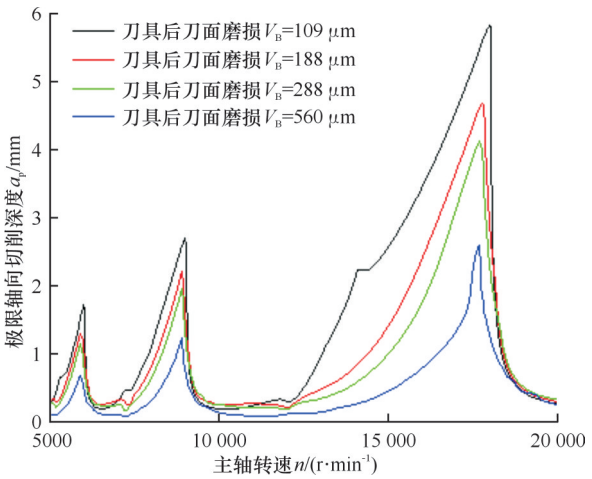


图9 不同刀具后刀面磨损值的叶瓣稳定图

Fig.9 Stability lobe diagrams for different flank wear values of cutting tools

4 铣削稳定性动态判别的工艺适应性验证

根据图10所示的铣削稳定动态判别方法进行工艺适应性试验验证,加工参数根据不同时刻铣削系统的叶瓣稳定图调整,铣削过程中的刀具、工件与Test5一致。试验用硬质合金刀具对不同工件有推荐的铣削速度v_c。根据钛合金材料的推荐铣削速度80～130 m/min和$n=1000v_c/(\pi D)$,确定刀具的推荐主轴转速1800-2900 r/min,刀具-工件的初始铣削力系数k_{tc}=704 N/mm^2,k_{rc}=546 N/mm^2,以此绘制初始条件对应的三维铣削叶瓣稳定图(图11的(Ⅰ)),确定最大材料去除率对应的加工工艺参数:主轴转速n=2712 r/min,轴向切深a_p=1.02 mm,径向切深a_e=5.6 mm。

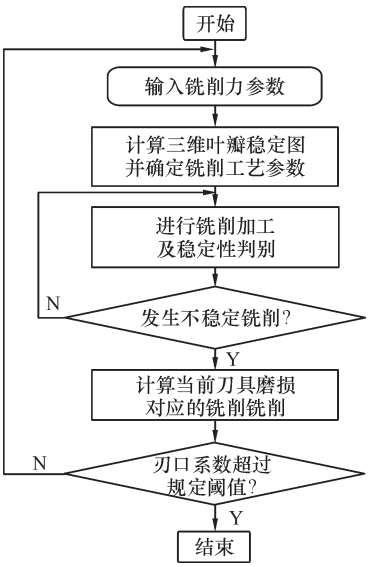


图10 铣削系统稳定性判别流程

Fig.10 Dynamic identification flowchart of milling stability

切削过程中,刀具磨损导致铣削力系数增大,铣削叶瓣稳定图(图9)极限整体下降。铣削加工时间228～428 s内,铣削稳定性判别方差比有上升趋势,出现不稳定铣削信号(图12a),428 s的k_{tc}=875 N/mm^2,k_{rc}=715 N/mm^2,并重新绘制铣削叶瓣稳定图(图11的(Ⅱ)),确定最大材料去除率对应的加工参数:n=2702 r/min,a_p=1.08 mm,a_e=4.2 mm,并按照该加工参数进行铣削加工。1781～1981 s时,再次出现不稳定铣削信号(图12b),此时,须计算1981 s的铣削力系数,并绘制新的铣削叶瓣稳定图(图11的(Ⅲ)),重新确定加工参数并进行铣削加工。后续分别在2405～2605 s(图12c)、2777～2977 s(图12d)时间段内出现了不稳定铣削信号,图11中的(Ⅳ)、(Ⅴ)为出现不稳定铣削信号后重新绘制的铣削叶瓣稳定图,对应的铣削力系数如表3所示,通过铣削叶瓣稳定图确定的最大材料去除率对应的加工参数如表4所示。铣削加工时长为2977 s时(图11中(Ⅴ)对应时刻,综合刃口系已达刀具严重磨损的阈值120 N/mm,需要停止铣削、更换全新的刀具)。继续加工直至3500 s(图11的(Ⅵ)对应时刻)时,综合刃口系数为140 N/mm,刀具后刀面磨损601 μm,存在断刃的风险。表4中,Test5验证铣削系数与刀具磨损的对应关系,Test6验证铣削稳定性动态判别方法的工艺适应性。表4

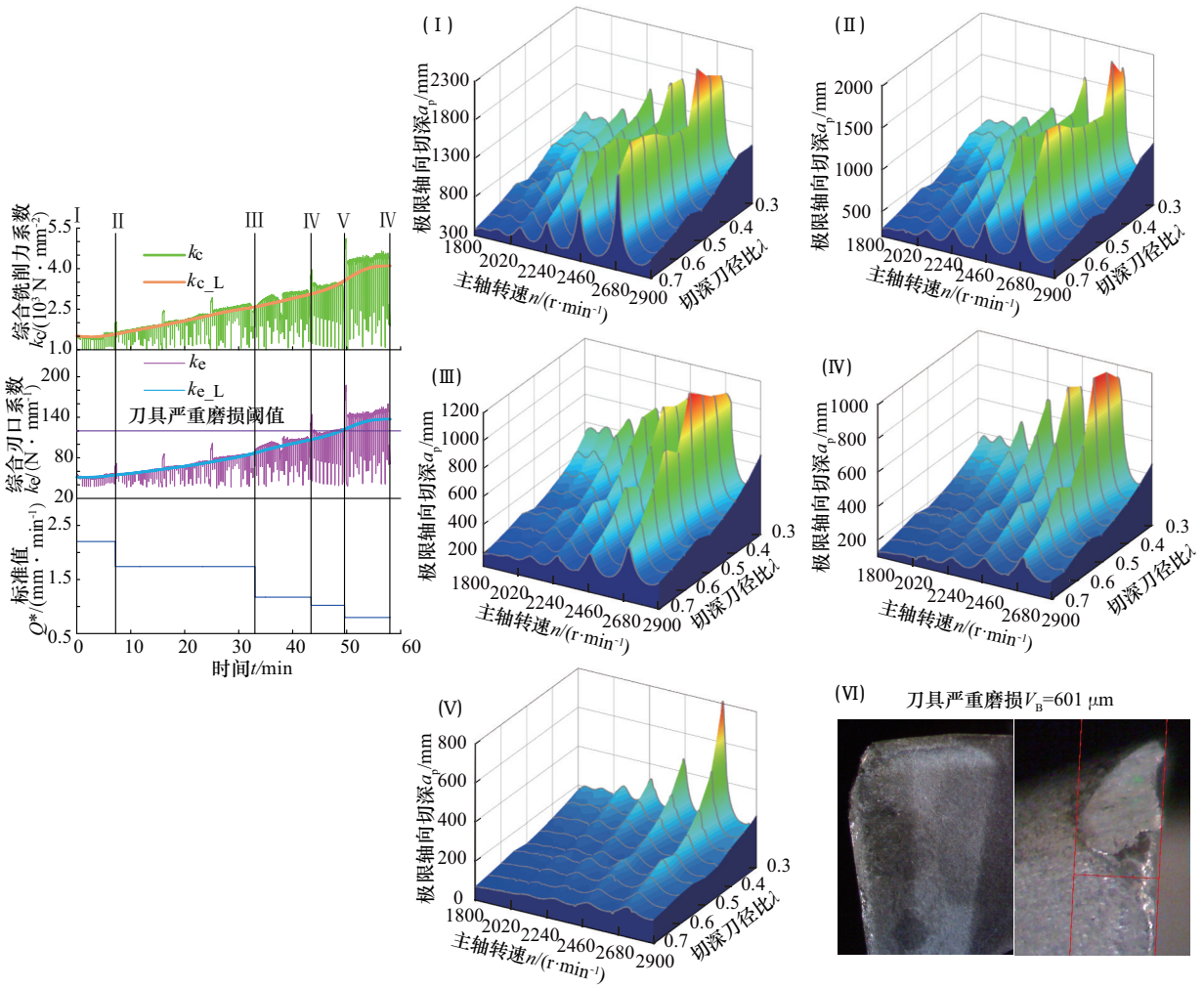


图 11　铣削稳定性动态判别工艺适应性验证

Fig.11　Process adaptability verification of dynamic identification for milling stability

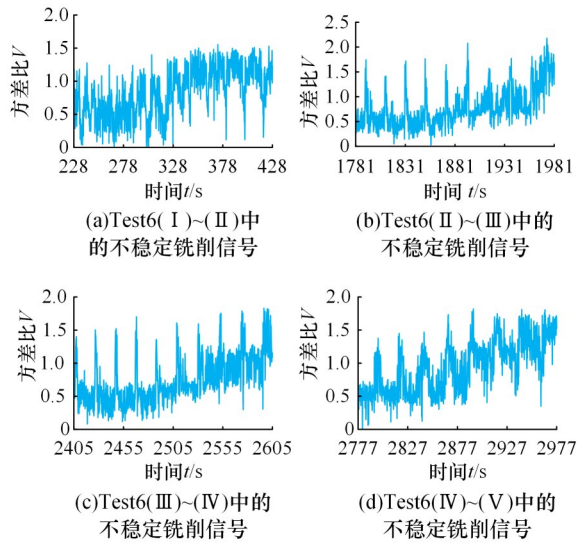


图 12　Test6 实验中出现的不稳定铣削信号

Fig.12　Unstable milling signals obtained in Test 6 experiment

统计了 Test6 综合刃口系数小于 120 N/mm 时的总计加工时长及材料去除量，与 Test5 相比，Test6 的材料去除量增大 31%、加工时长缩短 25%，验证了考虑铣削静动态特性及时变刀具磨损的铣削稳定性判别方法的可行性。

表 3　铣削加工时间对应的铣削力系数

Tab.3　Milling force coefficients at different milling durations

铣削加工时间/s	切向铣削力系数 k_{tc}/(N·mm^{-2})	径向铣削力系数 k_{rc}/(N·mm^{-2})
0	704	546
428	875	715
1981	1649	1390
2605	2198	1399
2977	2523	1586

5　结论

1)通过不同径向切削深度与刀具直径比值的三维铣削叶瓣稳定图，可获得当前铣削系统的最大材料去除率及对应工艺参数，且该结果随刀具磨损的加剧逐渐减小。

2)通过滤除主轴转频的稳定性判别方法判断加工过程中铣削系统的稳定性，当出现不稳定

表4 Test5、Test6工艺参数加工时长、材料去除量对比

Tab.4 Comparison of machining time and material removal amount between test 5 and test 6

实验		主轴转速/(r·min^{-1})	径向切削深度/mm	轴向切削深度/mm	进给速度/(mm·min^{-1})	加工时长/s	材料去除量/mm^3
Test5		1820	7	0.5	182	4015	42 625.9
Test6	Ⅰ～Ⅱ(0～428 s)	2712	5.6	1.02	271	428	11 042.1
	Ⅱ～Ⅲ(428～1981 s)	2702	4.2	1.08	270	1553	31 699.8
	Ⅲ～Ⅳ(1981～2605 s)	2691	5.6	0.55	269	624	8616.6
	Ⅳ～Ⅴ(2605～2977 s)	2691	5.6	0.48	269	372	4483.0
	Ⅴ～Ⅵ(2977～3500 s)	2691	4.2	0.5	269	/	/
Test6综合刃口系数小于120 N/mm的总计加工时长及材料去除量						2977	55841.5

铣削信号时,使用出现不稳定铣削信号时的铣削力系数绘制三维铣削叶瓣稳定图,确定后续铣削加工的工艺参数,完成铣削加工参数的动态调整。

3)工艺适应性实验证明,考虑铣削静动态特性及时变刀具磨损的铣削稳定性判别方法可在保证工艺稳定的前提下,根据出现不稳定铣削信号时的刀具磨损状态实现多段加工的参数优化。相比于单加工参数实验,工艺适应性验证实验的材料去除量增大31%,加工时长缩短25%。

4)刀具严重磨损前,铣削稳定性动态判别的工艺适应性验证实验可实现4段加工的工艺参数优化,后续研究可优化静动态铣削稳定性判别方法的精度,实现更多段的加工工艺参数优化,从而进一步提高刀具全寿命的铣削材料去除率。

参考文献:

[1] DEFANT F, GHEZZI D, ALBERTELLI P. Development of a Generalized Extended Harmonic Solution for Analyzing the Combination of Chatter Suppression Techniques in Milling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 543: 117368.

[2] 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.

[3] NOURI M, FUSSELL B K, ZINITI B L, et al. Real-time Tool Wear Monitoring in Milling Using a Cutting Condition Independent Method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 1-13.

[4] YAO Y C, CHEN Y H, LIU C H, et al. Real-time Chatter Detection and Automatic Suppression for Intelligent Spindles Based on Wavelet Packet Energy Entropy and Local Outlier Factor Algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1): 297-309.

[5] 王民,曹帅鹏,咎涛. 基于切削稳定理论的铣削材料去除率[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 674-677.
WANG Min, CAO Shuaipeng, ZAN Tao. Milling Material Removal Rate Based on Machining Stability Theory[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(5): 674-677.

[6] 张智,刘成颖,刘辛军,等. 采用小波包能量熵的铣削振动状态分析方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 57-62.
ZHANG Zhi, LIU Chengying, LIU Xinjun, et al. Analysis of Milling Vibration State Based on the Energy Entropy of WPD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 57-62.

[7] 刘长福,朱立达,仇健,等. 基于VMD和FFT的变切深侧铣颤振特征提取方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1153-1157.
LIU Changfu, ZHU Lida, QIU Jian, et al. Chatter Feature Extraction Method in Variable Cutting Depth Flank Milling Based on VMD and FFT[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(8): 1153-1157.

[8] DOU Jianming, JIAO Shengjie, XU Chuangwen, et al. Unsupervised Online Prediction of Tool Wear Values Using Force Model Coefficients in Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(3): 1153-1166.

[9] PAN Tianhang, ZHANG Jun, ZHANG Xing, et al. Milling Force Coefficients-based Tool Wear Monitoring for Variable Parameter Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7): 4565-4580.

[10] ZHANG Xing, PAN Tianhang, MA Angyang, et al. High Efficiency Orientated Milling Parameter Optimization with Tool Wear Monitoring in Roughing Operation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165: 108394.

[11] FAASSEN R P H, van de WOUW N, NIJMEIJER H, et al. An Improved Tool Path Model Including Periodic Delay for Chatter Prediction in Milling[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2007, 2(2): 167-179.

(编辑 张 洋)

作者简介: 郭淼现*(通信作者),男,1988年生,教授、博士研究生导师。研究方向为先进制造工艺与装备。发表论文30余篇。E-mail: guomx@usst.edu.cn。

本文引用格式:

郭淼现,韩琛潼,郭维诚,等. 考虑铣削静动态特性及时变刀具磨损的铣削稳定性判别方法[J]. 中国机械工程,2026,37(7):1587-1594.

GUO Miaoxian, HAN Chentong, GUO Weicheng, et al. A Milling Stability Determining Method Considering the System Static-dynamic Characteristics and Time-varying Tool Wear[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1587-1594.