

基于 Kriging 模型的数控机床空间切削稳定性*

邓聪颖¹, 苗建国², 杨闪闪², 殷国富², 魏博¹

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆, 400065) (2. 四川大学空天科学与工程学院 成都, 610065)

摘要 针对机床加工点空间位姿的改变, 导致切削稳定性预测具有复杂性和不确定性问题, 提出一种基于 Kriging 模型的机床空间切削稳定性研究方法。该方法以机床最小极限切削深度为研究对象, 首先, 通过构建描述其与加工位姿间数学关系的 Kriging 模型, 预测其在加工空间的演化规律; 其次, 引入改进粒子群算法, 计算具有最小极限切削深度极大值的加工位置, 并结合切削实验和能量分布理论确定机床易颤振模态及对应的薄弱结合部, 通过优化结合部动刚度以提高最小极限切削深度值。以一台立式加工中心主要加工任务中耗时较多的工序进行实例验证, 建立该工序最小极限切削深度的 Kriging 模型, 阐明加工位置变化对切削稳定性有较大影响, 并提出结合部动刚度优化方案, 提高了最小极限切削深度。

关键词 切削稳定性; 最小极限切削深度; Kriging 模型; 加工空间

中图分类号 TG506; TH113

引言

切削过程中出现的颤振失稳现象是恶化工件加工质量和加工效率、加速机床磨损和精度丧失的重要原因^[1-2]。通常情况下, 一般的铝合金等轻金属的高速切削稳定性主要受到刀具系统动力学特性的影响, 而铸铁、钢等材料在粗加工与半精加工时的切削稳定性主要与机床主体结构动力学特性相关^[3]。在加工过程中, 刀具点空间位置的改变使机床整体结构随之变化, 形成动态的整机质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵, 引起机床动力学特性表征指标变化, 进而使切削稳定性在整个加工空间发生演变^[4]。因此, 研究机床切削稳定性与加工位置的关联关系, 有利于提高切削稳定性预测精度。

近年来, 国内外许多学者研究了机床结构动力学特性与加工位置的关系^[4-6], 但是机床用户更关心面向加工过程的切削稳定性。Law 等^[7]采用模态选择准则对机床子部件进行简化, 耦合各子部件构建机床整机动力学模型, 通过更新结合面约束方程计算不同位置处刀尖点的频响函数, 进而计算各位置的切削稳定性。杨毅青等^[8]基于实验研究了机床沿不同进给方向以及机床主轴处于不同位置的颤振稳定域图预测, 但是针对每个加工位置进行实验或

仿真计算, 需要较大的工作量。文献^[3, 9]结合实验设计、有限元仿真以及响应面模型, 可计算机床任意位置的最小极限切削深度, 但是在建立响应面模型时未考虑样本数据的空间相关性, 也没有进一步探讨加工位置的优选方法。

笔者以机床加工点空间位置变化为研究基点, 考虑切削稳定性表征指标的空间相关性, 建立最小极限切削深度的 Kriging 预测模型, 并采用改进粒子群算法确定具有最小极限切削深度最大值的加工位置。在此基础上, 采用切削实验确定机床易颤振模态, 进而基于能量分布理论确定机床薄弱结合部, 通过提出结合部动刚度优化配置方案进一步提高最小极限切削深度值, 以期更加精确地预测切削稳定性空间分异特性, 并扩大稳定区域选择范围。

1 机床切削稳定性空间信息预测建模

1.1 机床空间切削稳定性概念

加工过程中切削力的动态变化量^[10]可表示为

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta F_x(t) \\ \Delta F_y(t) \end{Bmatrix} &= \frac{a_p K_{tc} N}{4\pi} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{xy} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} = \\ & \frac{a_p K_{tc} N}{4\pi} \mathbf{A} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(51705058); 重庆市基础科学与前沿技术研究资助项目(cstc2017jcyjAX0005); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1704087)

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-08-15

其中： ΔF_x 和 ΔF_y 分别为 x 和 y 方向的切削力变化量； a_p 为轴向切削深度； K_{tc} 为切向切削力系数； \mathbf{A} 为方向系数矩阵。

$$\begin{cases} a_{xx} = [-\cos(2\varphi_{jl}) + 2K_{rt}\varphi_{jl} - K_{rt}\sin(2\varphi_{jl})] \varphi_{st}^{ex} \\ a_{xy} = [2\varphi_{jl} + \sin(2\varphi_{jl}) - K_{rt}\cos(2\varphi_{jl})] \varphi_{st}^{ex} \\ a_{yx} = [-2\varphi_{jl} + \sin(2\varphi_{jl}) - K_{rt}\cos(2\varphi_{jl})] \varphi_{st}^{ex} \\ a_{yy} = [\cos(2\varphi_{jl}) + 2K_{rt}\varphi_{jl} + K_{rt}\sin(2\varphi_{jl})] \varphi_{st}^{ex} \end{cases} \quad (2)$$

其中： K_{rt} 为径向切削力系数和切向切削力系数的比值； φ_{st} 和 φ_{ex} 分别为切入角和切出角； φ_{jl} 为当前刀齿瞬时接触角。

在频域范围内分析式(1)可得

$$\mathbf{F}e^{i\omega_c t} = \frac{a_p K_{tc} N}{4\pi} \mathbf{A}_1 (1 - e^{-i\omega_c \tau}) [\mathbf{G}(i\omega_c)] \mathbf{F}e^{i\omega_c t} \quad (3)$$

其中： \mathbf{F} 为切削力矩阵； $\mathbf{G}(i\omega_c)$ 为工件-刀具接触区域的传递函数矩阵。

当工件系统刚性较大时，通常采用刀尖点频率响应函数矩阵表示。式(3)的特征方程及特征值 Λ 为

$$\begin{cases} \det[\mathbf{I} + \Lambda [\mathbf{G}_1(i\omega_c)]] = 0 \\ \Lambda = -\frac{a_p K_{tc} N}{4\pi} (1 - e^{-i\omega_c \tau}) \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)，极限切削深度 a_{plim} 及主轴转速 n 为

$$\begin{cases} a_{plim} = -\frac{2\pi\Lambda_R \left[1 + \left(\frac{\Delta l}{\Lambda_R}\right)^2\right]}{K_{tc} N} \\ n = \frac{60\omega_c}{N \left[(2k+1)\pi - 2\tan^{-1}\left(\frac{\Delta l}{\Lambda_R}\right)\right]} \end{cases} \quad (5)$$

采用图1所示的颤振稳定域叶瓣图描述式(5)中切削深度和主轴转速的关系，直线表示最小极限切削深度，其以下为绝对稳定区，在任意转速下选择该区域内的切削深度加工都不会发生颤振。针对一般较硬材料的粗加工、半精加工，切削过程中选择的主轴转速较低，对应的条件稳定区相对狭窄，因此通常选择在最小极限切削深度以下进行加工^[3]。传递函数矩阵 $\mathbf{G}(i\omega_c)$ 是绘制切削颤振稳定域图的关键。研究表明， $\mathbf{G}(i\omega_c)$ 受加工位置的影响，因此针对较硬材料在粗加工、半精加工阶段的切削稳定性准确预测问题，以最小极限切削深度 $a_{plimmin}$ 在加工空间的动态变化为研究对象，提出更为全面的广义最小极限切削深度函数

$$a_{plimmin} = F(x, y, z) \quad (6)$$

其中： x, y, z 分别为各向运动轴的位移。

基于式(6)，进一步将 $a_{plimmin}$ 与加工位置的关联关系显性化，即可求解 $a_{plimmin}$ 在加工空间的演化规律。

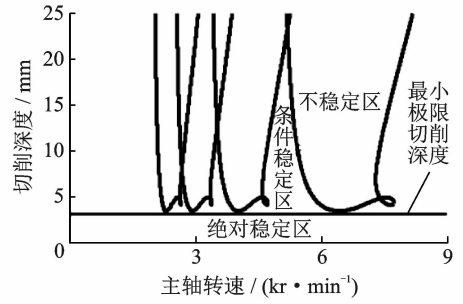


图1 颤振稳定域叶瓣图

Fig. 1 Chatter stability chart

1.2 广义最小极限切削深度 Kriging 预测模型

Kriging 方法是基于已知样本信息的动态构造，从变量的空间相关性和变异性角度，构建对象问题的近似函数关系式，对非样本点信息进行无偏、最优估计^[6,11]。该方法包括线性回归部分和非参数部分，通常 Kriging 近似模型具有如下表达

$$\hat{y}(x) = \sum_{l=1}^n \beta_l f(x_l) + z(x) = \mathbf{f}^T(x) \boldsymbol{\beta} + z(x) \quad (7)$$

其中： $\hat{y}(x)$ 为待测点响应的预测值； $f(x_l)$ 为待测点附近采样点的回归函数； β_l 为回归系数； $z(x)$ 为随机函数，反映局部偏差的近似，它服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。

协方差矩阵可表示为

$$\text{cov}(z(x_l), z(x_j)) = \sigma^2 R(x_l, x_j) \quad (8)$$

$R(x_l, x_j)$ 为样本空间中任意两个样本点 x_l 和 x_j 的空间相关函数，目前广泛采用高斯函数和指数函数表达，它决定了模拟的精度，依次具有如下形式

$$\begin{cases} R(x_l, x_j) = \prod \exp(\theta_k |x_{lk} - x_{jk}|^2) \\ R(x_l, x_j) = \prod \exp(\theta_k |x_{lk} - x_{jk}|) \end{cases} \quad (9)$$

其中：参数 θ_k 为待定参数； x_{lk}, x_{jk} 为样本点 x_l, x_j 的 k^{th} 分量。

根据实验样本点及其对应的响应值，形成一个相关矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(x_1, x_2) & \cdots & R(x_1, x_{ns}) \\ \vdots & & \vdots \\ R(x_{ns}, x_1) & \cdots & R(x_{ns}, x_{ns}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

采用加权最小二乘法，得到 Kriging 模型的回归系数矩阵

$$\begin{cases} \boldsymbol{\beta}^* = (\mathbf{F}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}_s)^{-1} \mathbf{F}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \\ \mathbf{F}_s = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_{ns})]^T \end{cases} \quad (11)$$

基于样本点 x^s 的响应值 \mathbf{Y} 的线性加权差值来预估待测点 x 的响应值

$$\begin{cases} \hat{y}(x) = \mathbf{c}^T \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y} = [y(x_1), y(x_2), \dots, y(x_{n_s})]^T \end{cases} \quad (12)$$

近似值与真实值之间的误差为

$$\hat{y}(x) - y(x) = \mathbf{c}^T \mathbf{Y} - y(x) \quad (13)$$

将式(9)、式(10)的函数代入式(13),可得

$$\begin{cases} \hat{y}(x) - y(x) = \mathbf{c}^T \mathbf{z}_s - z(x) + (\mathbf{F}_s^T \mathbf{c} - \mathbf{f}(x))^T \boldsymbol{\beta} \\ \mathbf{z}_s = [z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_{n_s})] \end{cases} \quad (14)$$

基于无偏差预测要求

$$\mathbf{F}_s^T \mathbf{c} = \mathbf{f}(x) \quad (15)$$

式(15)的均方差为

$$\begin{cases} \varphi(x) = E[(\hat{y}(x) - y(x))^2] = \\ \sigma^2 (1 + \mathbf{c}^T \mathbf{R} \mathbf{c} - 2\mathbf{c}^T \mathbf{r}) \\ \mathbf{r}(x) = [R(x, x_1), R(x, x_2), \dots, R(x, x_{n_s})]^T \end{cases} \quad (16)$$

结合上式与方差最小条件、拉格朗日乘子法

$$\begin{cases} \mathbf{c} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{F}_s \tilde{\lambda}) \\ \tilde{\lambda} = (\mathbf{F}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F}_s)^{-1} (\mathbf{F}_s^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} - \mathbf{f}(x)) \end{cases} \quad (17)$$

综上,Kriging模型可最终表达为

$$\hat{y}(x) = \mathbf{f}^T(x) \boldsymbol{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \boldsymbol{\gamma}^* \quad (18)$$

其中: $\boldsymbol{\gamma}^* = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y}^T - \mathbf{F}_s \boldsymbol{\beta}^*)$ 。

为检验Kriging模型的预测精度,采用设计空间任意样本点的相对误差(RE)与平均相对误差(ERR)两个标准^[14]来评价

$$\begin{cases} \text{RE} = \frac{|(y(x_i) - \hat{y}(x_i))|}{|y(x_i) + \epsilon|} \\ \text{ERR} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|(y(x_i) - \hat{y}(x_i))|}{|y(x_i) + \epsilon|} \\ \epsilon = \begin{cases} 0 & (|y(x_i)| \neq 0) \\ 0.01 & (|y(x_i)| = 0) \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

其中: m 为样本点数量; $y(x_i)$ 、 $\hat{y}(x_i)$ 分别为第*i*个样本点的真实值和预测值。

如果RE与ERR的值越接近0,则表明Kriging模型的精度越高。

构建广义最小极限切削深度Kriging预测模型的主要流程如下:

1) 采用实验设计方法离散化机床工作空间,确定样本点的空间位置坐标 (x_i, y_i, z_i) ,并通过实验获取各样本点位置对应的频率响应函数 $\mathbf{G}(i\omega)_i$;

2) 绘制各样本点位置对应的颤振稳定域叶瓣图,进而确定各样本点位置的最小极限切削深度;

3) 基于式(7)~式(18)构建广义最小极限切削深度的Kriging预测模型

$$a_{\text{plimmin}}(x, y, z) = \mathbf{f}^T(x, y, z) \boldsymbol{\beta} + \mathbf{r}^T(x, y, z) \boldsymbol{\gamma}^* \quad (20)$$

4) 求解新样本点处的最小极限切削深度,结合

式(19)、式(20)检验步骤3中Kriging预测模型的精度,根据验证结果调整模型,提高拟合精度。

2 基于Kriging预测模型的广义空间切削稳定性优化问题描述

本研究中广义空间切削稳定性优化问题是在给定切削宽度和进给量的基础上,基于式(20)建立的最小极限切削深度Kriging预测模型,寻求具有较高最小极限切削深度值的加工位置,并在此基础上进一步提高最小极限切削深度值,扩大切削参数选择范围。

2.1 改进粒子群优化算法

粒子群算法作为一种机器学习的群体智能优化算法,能有效实现非线性和多峰值复杂目标的优化^[12]。在*D*维空间中,假设*n*个粒子组成一个群落,每个粒子的特性通过位置 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 、速度 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 以及适应值 f_i 来表征。每一个粒子位置对应应该优化的一个潜在解,速度表征粒子当前的飞行方向和距离,适应度值则采用适应度函数计算,表示粒子在当前位置的优劣性。每个粒子的位置更新取决于个体极值Pbest和群体极值Gbest的变化,同时更新适应度值,通过分析新粒子、个体极值和群体极值的适应度值,进一步更新个体极值与群体极值。位置与速度按下式更新

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (21)$$

其中: ω 为惯性权重;*i*为第*i*个粒子, $i=1,2,\dots,n$;*d*为维数, $d=1,2,\dots,D$; c_1 和 c_2 表示速度加权因子为0或正的常数; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

惯性权重 ω 的设置对粒子群算法的求解极为重要,为更好地满足实际要求,迭代求解过程中基于粒子不同的特性,动态调整惯性权重 ω 。假设全部粒子平均适应度以 f_{avg} 表征, f_{max} 为本轮迭代中的最大适应度值, f_{havg} 代表适应度值大于 f_{avg} 的粒子的平均适应度值,则迭代过程中按如下方式动态调整 ω ^[12]:

1) 当 $f_i \leq f_{\text{avg}}$ 时,优先考虑提高该类粒子的全局搜索能力,应设置较大的 ω

$$\omega = 1.2 - \frac{1 - \exp(-f_{\text{max}} + f_{\text{havg}})}{1 + \exp(-f_{\text{max}} + f_{\text{havg}})} \quad (22)$$

2) 当 $f_{\text{avg}} < f_i \leq f_{\text{max}}$ 时,该类粒子的全局和局部搜索能力较强,因此在初始阶段设置较大的 ω ,然

后逐步降低 ω , 提高局部寻优能力

$$\omega = \begin{cases} \omega - (\omega - \omega_{\min}) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{\max}}\right)\right) & (0 \leq t \leq t_{\max}) \\ \omega_{\min} & (t = t_{\max}) \end{cases} \quad (23)$$

3) 当 $f_{\text{havg}} < f_i \leq f_{\text{max}}$ 时, 可适当降低 ω 值

$$\omega = \omega - \omega_{\min} \frac{f_i - f_{\text{havg}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{havg}}} \quad (24)$$

式(22)~式(24)中, 右侧 ω 值遵循线性递减规律, k 为当前迭代次数, k_{max} 为初始化最大迭代次数

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} k \quad (25)$$

为避免粒子群算法出现早熟收敛, 采用变异算子的形式对粒子群算法中某些变量以一定概率重新初始化

$$P_m = 0.5 - \frac{1}{1 + \exp[-k(f_{\text{max}} - f_{\text{havg}})]} \quad (k > 0) \quad (26)$$

以加工点各向位移 x, y, z 为变量, 最小极限切削深度的最大值为目标, 结合式(23)~(26)可建立刀具点加工位置寻优模型, 并按图 2 所示流程求解。

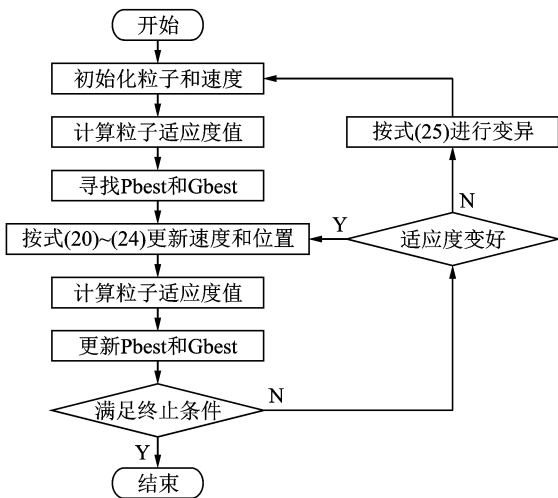


图 2 改进粒子群算法流程

Fig. 2 Improved particle swarm optimization algorithm

2.2 基于能量分布的切削稳定性优化

在 2.1 节确定的机床最优加工点位置附近进行切削时, 为扩大切削参数选择范围, 提高切削效率, 从机床结构动力学特性和切削稳定性关联关系角度进行切削稳定性优化。考虑机床振动问题 60% 以上来源于结合部, 且结合部动刚度特性研究比阻尼特性研究更易实现, 笔者结合切削实验和能量分布理论, 确定机床易颤振模态及对应的薄弱结合部, 通过优化薄弱结合部动刚度来提高机床加工点动刚

度, 进而提高最小极限切削深度。

首先以 2.1 节中求解的最小极限切削深度的最大值为基准, 线性递增作为切削深度并进行切削实验, 采用麦克风拾取加工过程的声音信号, 根据声音信号的频谱分析确定机床易颤振模态。在此基础上, 采用能量分布理论分析机床在易颤振阶模态振动时弹性能在整机中的分布情况。假设系统由 N 个模块构成, 其中第 m 个模块在 i 阶模态振动时, 系统与模块 m 的弹性能^[13]可表达为

$$\begin{cases} V_{Ai} = \sum_{m=1}^n V_{mi} \\ V_{mi} = \frac{1}{2} \mathbf{A}^i \mathbf{T} \mathbf{K}_i \mathbf{A}^i \end{cases} \quad (27)$$

其中: V_{Ai} , V_{mi} 分别为系统在第 i 阶模态振动时系统与模块 m 的弹性能; \mathbf{A}^i 为 i 阶模态下模块 m 所有自由度的幅值向量; \mathbf{K}_i 为模块 m 的刚度矩阵。

模块 m 在系统中的弹性能分布率 R_i 定义为

$$R_i = \frac{V_{mi}}{V_{Ai}} \quad (28)$$

机床在易颤振阶模态振动时, 如果计算的结合部 R_i 值越高, 则表明该结合部刚度越低, 需要对其进行优化设计。

2.3 广义空间切削稳定性优化的实现

图 3 为广义空间切削稳定性优化流程, 首先, 基于构造的样本信息在 Matlab 环境中建立最小极限切削深度 Kriging 模型, 并结合改进粒子群算法求解最优加工位置及最小极限切削深度; 其次, 采用切削实验和弹性能分布率确定机床易颤振模态下的薄弱结合部, 提出其动刚度优化方案, 进而计算整机模态和切削稳定性, 获取各薄弱结合部动刚度最优配置以及优化后的最小极限切削深度值。

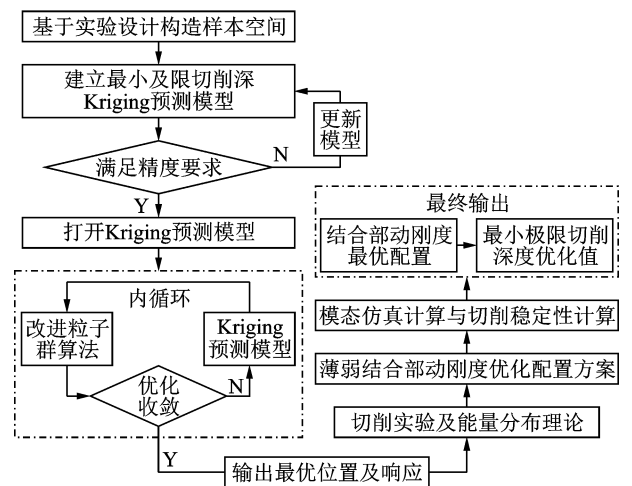


图 3 广义空间切削稳定性优化的实现

Fig. 3 Optimization of cutting stability in generalized space

3 基于 Kriging 预测模型的广义空间切削稳定性优化实例

将提出的广义空间切削稳定性优化方法应用于普瑞斯数控机床厂的一台三轴立式加工中心,如图 4 所示。针对该机床耗时最多的某铸件的粗加工、半精加工阶段,采用的切削深度仅为 2.42 mm。为提高加工效率,结合理论分析与图 3,对该工序的最小极限切削深度进行优化。

3.1 广义最小极限切削深度 Kriging 模型构建

工作台、床鞍以及主轴箱的行程依次为 x -400 mm, y -400 mm 和 z -550 mm。笔者结合中心复合表面设计和 Box-Behnken 实验设计法规划样本点空间位置,如表 1 和图 4 所示。各样本点位置对应的刀尖点频率响应函数 (frequency response functions, 简称 FRF) 由锤击法模态实验获取,进而通过式(1)~(5)计算对应的最小极限切削深度

$a_{plimmin}$ 。

采用图 4 中实心标记的 27 个空间点作为位置变量输入,关联的 $a_{plimmin}$ 作为输出,选择随机函数 $z(x, y, z)$ 协方差计算模型为高斯函数,获取正则化 θ 参数 ($\theta_x = 0.825, \theta_y = 0.625, \theta_z = 0.825$),完成 Kriging 预测模型构建。为验证该模型的准确性,首先,采用该模型预测图 4 中空心标记的 6 个加工位置的 $a_{plimmin}$;其次,在该 6 个位置进行切削实验,刀具为直径 20 mm、螺旋角 45° 的 4 齿硬质合金立铣刀,工件材料为 45 钢,主轴转速为 3kr/min,径向切削宽度为 14 mm,进给速度为 0.06 mm/z。通过磁力座将 PCB 公司测量范围为 4 Hz~20 kHz 的探头型传声器固定在工作台上,拾取切削过程的声音信号并进行频谱分析,确定颤振及对应的 $a_{plimmin}$,其采样频率为 6 kHz。根据式(19)获取由表 2 给出的样本点实验值和预测值的相对误差(RE)与平均相对误差(ERR),其中 RE 最大值为 3.12%,ERR 最大值为 2.03%,可见建立的 Kriging 预测模型拟合精度较高。

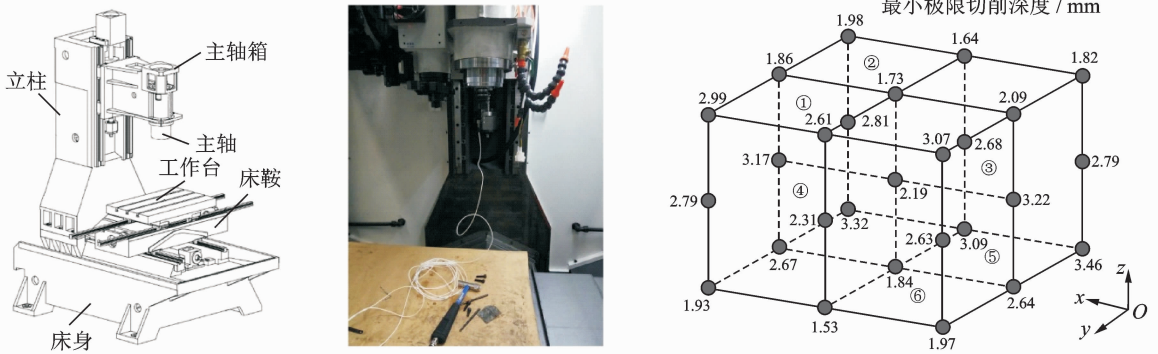


图 4 实验机床及实验样本信息

Fig. 4 Experimental machine tools and experimental sample information

表 1 实验方案及实验样本信息

Tab. 1 Experiment plan and the sample information

序号	各向位移/mm			最小极限切削深度/mm	序号	各向位移/mm			最小极限切削深度/mm	序号	各向位移/mm			最小极限切削深度/mm
	x	y	z			x	y	z			x	y	z	
1	380	530	380	2.99	10	20	20	200	2.79	19	380	530	20	1.93
2	380	275	380	1.87	11	20	275	200	3.22	20	380	275	20	2.67
3	380	20	380	1.98	12	20	530	200	2.63	21	380	20	20	3.32
4	200	20	380	1.64	13	200	530	200	2.31	22	200	20	20	3.09
5	200	275	380	1.73	14	200	275	200	2.19	23	200	275	20	1.84
6	200	530	380	2.61	15	200	20	200	2.68	24	200	530	20	1.53
7	20	530	380	3.07	16	380	20	200	2.81	25	20	530	20	1.97
8	20	275	380	2.09	17	380	275	200	3.17	26	20	275	20	2.64
9	20	20	380	1.82	18	380	530	200	2.79	27	20	20	20	3.46

表2 精度检验样本点相对误差

Tab. 2 Relative error of the sample points

序号	最小极限切削深度/mm		RE/%	ERR/%
	实验值	预测值		
1	2.36	2.33	1.45	2.03
2	1.54	1.59	3.12	
3	2.73	2.79	2.16	
4	2.68	2.61	2.78	
5	2.95	2.93	0.69	
6	1.79	1.75	2.01	

图5描述了最小极限切削深度 $a_{plimmin}$ 在加工空间的演化规律,由图可以看出, $a_{plimmin}$ 随加工位置变

化而改变。图5(b)中, $y-z$ 轴联动时, $a_{plimmin}$ 最低为 1.47 mm, 最高为 3.10 mm, 变化率达 111.7%; 图5(e)中, $x-z$ 轴联动时, $a_{plimmin}$ 最低为 2.15 mm, 最高为 3.27 mm, 变化率达 52.0%; 图5(h)中, $x-y$ 轴联动时, $a_{plimmin}$ 最低为 1.74 mm, 最高为 3.30 mm, 变化率达 89.4%。分析图5(a~c)发现, 当 $y-z$ 轴坐标确定时, 工作台 x 向位置的变化对 $a_{plimmin}$ 的影响相对较小。上述研究表明, 在规划机床切削工艺时, 应尽量使机床处于具有较高切削深度且其变化率较小的加工区域, 并且应优先使用极限切削深度变化较小的运动方式来保障机床加工的平稳性。

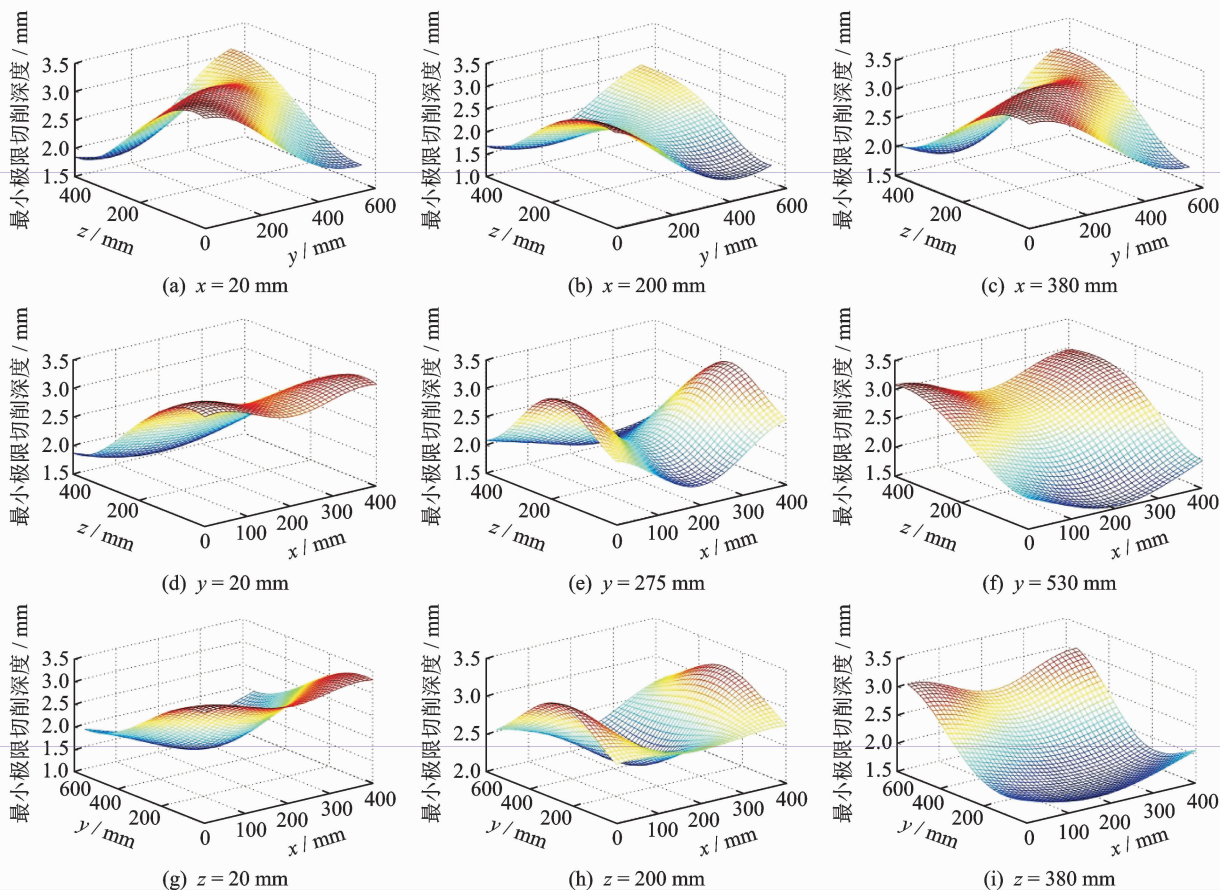


图5 最小极限切削深度在加工空间的演化规律

Fig. 5 Evolution law of minimum limit cutting depth in machining space

3.2 广义最小极限切削深度动态优化

采用改进粒子群算法获取使最小极限切削深度值最大化的加工位置, 首先设置基本参数如下: 初始化种群规模为 100, 以加工点各向位移 x, y, z 为变量, 种群中每个粒子的维数为 3, 粒子的位置和初始速度随机给定, 更新过程按式(22)~(25)进行, 根据式(20)建立的 Kriging 预测模型计算粒子的适应度

值, 每次更新后采用式(26)进行变异操作, 并重新初始化粒子。按照图2的求解流程, 计算的加工空间 $a_{plimmin}$ 最大值为 3.47 mm, 对应的最优加工位置为 30.77, 14.12, 36.78 mm。

在最优加工位置附近进行切削实验, 通过切削中声音信号的频谱分析确定颤振频率分布范围为 406~443 Hz (如图6所示的切削深度为 4.00 mm 时声音信号的频谱)。由于颤振常常出现在系统某阶固有频

率附近,可根据机床整机模态信息判断机床易颤振模态由第 10 阶模态(423.7 Hz)引起,对应模态振型表现为主轴-立柱系统绕 y 轴的摆动。因此,以该系统中 z 向主轴轴承结合部、z 向滚珠丝杠结合部、z 向导轨滑块结合部以及床身-立柱结合部为研究对象,根据式(27)、式(28)计算出各结合部弹性分布依次为 26.04%,6.58%,32.80%和 3.91%,从而判定主轴轴承结合部、导轨滑块结合部为较薄弱结合部,并以该类结合部动刚度为优化变量。

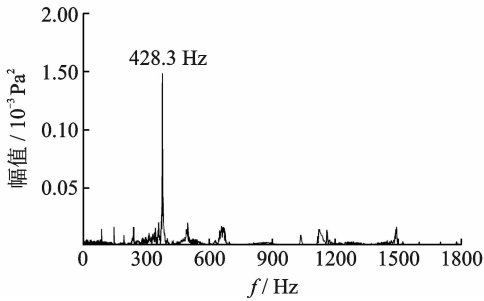


图 6 切削过程中声音信号频谱图

Fig. 6 Spectrogram of sound signal in cutting process

主轴与直线导轨系统均为外购件,并且其待优化结合部均为轻预载,因此根据产品技术手册和课题组结合部动力学特性辨识成果,基于表 3 中的中预载和高预载情况下的结合部动刚度,按照表 4 的优化方案依次将其写入处于最优工位的机床整机有限元模型中,以进行谐响应分析获取各组刀尖频响函数矩阵,采用式(1)~(5)计算各 $a_{plimmin}$ 。由表 4 看出, $a_{plimmin}$ 由初始的 2.42 mm 提高到 4.86 mm,增幅为 100.8%,验证了笔者提出的广义空间最小极限切削深度优化方法的有效性。

表 3 薄弱结合部刚度数据

Tab. 3 Stiffness of weak joints

结合部	刚度/(N · μm ⁻¹)					
	轻预载		中预载		高预载	
	轴向	径向	轴向	径向	轴向	径向
主轴轴承 k_1	70	420	110	550	157	706.5
z 导轨滑块 k_2	583		767		933	

表 4 优化方案及结果

Tab. 4 Optimization scheme and results

序号	结合部刚度值/(N · μm ⁻¹)			最小极限切削深度/mm
	k_1	k_2		
1	110	550.0	767	3.95
2	110	550.0	933	4.37
3	157	706.5	767	4.69
4	157	706.5	933	4.86

4 结 论

1) 基于 Kriging 方法理论建立最小极限切削深度的空间信息预测模型,研究其在加工空间的演化规律,融合了机床运动部件位姿的随机组合对切削稳定性的影响,有利于在完整加工空间中准确描述切削稳定性,提高了切削稳定性预测精度。

2) 结合最小极限切削深度 Kriging 预测模型与改进粒子群算法,可有效确定使最小极限切削深度最大化的加工位置,并在此基础上引入切削实验和弹性分布理论,优化机床在易颤振模态下薄弱结合部的动刚度配置,进一步提高了最小极限切削深度,也为机床厂家外购件的选择提供了技术支持。

3) 采用提出的机床空间切削稳定性研究方法,可进一步探讨轴向极限切削深度、主轴转速、切削宽度等切削稳定性关联指标与加工空间的关联关系,为更全面和更准确地进行切削加工参数选择和工艺规划提供理论依据和数据支持。

参 考 文 献

[1] Özahin O, Budak E, Özgüven H N. In-process tool point FRF identification under operational Conditions using inverse stability solution[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 89: 64-73.

[2] 黄华, 张树有, 刘晓健, 等. 基于动力学不确定性的重型切削工艺参数优化[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5):907-914.
Huang Hua, Zhang Shuyou, Liu Xiaojian, et al. Optimization of proces parameters for heavy-duty milling based on the uncertainty of cutting dynamics[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36 (5):907-914. (in Chinese)

[3] 黄华, 张树有, 刘晓健, 等. 基于响应面模型的广间切削稳定性研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49 (7): 1215-1223.
Huang Hua, Zhang Shuyou, Liu Xiaojian, et al. Research on cutting stability of generalized manufacturing space based on response surface mode [J]. Journal of Zhejiang University : Engineering Science, 2015, 49 (7): 1215-1223. (in Chinese)

[4] 刘海涛, 赵万华. 基于广义加工空间概念的机床动态

- 特性分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21):54-60.
- Liu Haitao, Zhao Wanhua. Dynamic characteristic analysis for machine tools based on concept of generalized manufacturing space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21):54-60. (in Chinese)
- [5] Wu Jun, Wang Jinsong, Wang Liping, et al. Study on the stiffness of a 5-DOF hybrid machine tool with actuation redundancy[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 289-305.
- [6] 李天箭, 丁晓红, 程凯. 基于空间统计学的机床动力学特性[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21):87-94.
- Li Tianjian, Ding Xiaohong, Cheng Kai. Machine tool dynamics based on spatial statistics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21):87-94. (in Chinese)
- [7] Law M, Altintas Y, Phani A S. Rapid evaluation and optimization of machine tools with position-dependent stability[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 68(3):81-90.
- [8] 杨毅青, 刘强. 数控机床切削稳定性分析及实验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 101-105.
- Yang Yiqing, Lu Qiang. Analysis and experimental investigation on the cutting process stability of machine tool[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 101-105. (in Chinese)
- [9] Zhang Li, Gao Weiguo, Zhang Dawei, et al. Rapid evaluation of machine tools with position-dependent milling stability based on response surface model[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(3): 1-12.
- [10] Altintas Y, Stepan G, Merdol D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain [J]. Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology, 2008, 1(1):35-44.
- [11] 陈士诚, 周昌玉, 潘林锋. 基于 Kriging 方法的压力容器开孔接管区结构强度可靠性分析[J]. 石油化工设备, 2010, 39(6):27-30.
- Chen Shicheng, Zhou Changyu, Pan Linfeng. Reliability analysis of opening nozzle zone for pressure vessel based on Kriging method [J]. Petro-Chemical Equipment, 2010, 39(6): 27-30. (in Chinese)
- [12] 杨娜, 荆园园. 基于改进 PSO 算法的函数极值寻优研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 263-266.
- Yang Na, Jing Yuanyuan. Recognition of function extreme optimization based on improved PSO algorithm [J]. Computer Simulation, 2015, 32(9):263-266. (in Chinese)
- [13] 邓聪颖, 殷国富, 肖红, 等. 基于能量分布的机床整机动态特性优化方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1083-1089.
- Deng Congying, Yin Guofu, Xiao Hong, et al. Dynamic characteristics optimization for whole machine tool based on energy distribution[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1083-1089. (in Chinese)



第一作者简介:邓聪颖,女,1991年1月生,博士、讲师。主要研究方向为数控机床动力学分析、数字化设计与仿真。曾发表《基于正交试验的机床结合部刚度优化配置》(《机械工程学报》2015年第59卷第19期)等论文。

E-mail: dengcy@cqupt.edu.cn

