

引文格式: 葛立才, 黄涛, 顾梦沁, 等. 基于高斯过程回归的复杂曲面加工切削力高效预测[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 84-94.
GE Licai, HUANG Tao, GU Mengqin, et al. Cutting forces prediction for complex surface machining based on Gaussian process regression[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 84-94.

基于高斯过程回归的复杂曲面加工切削力高效预测*

葛立才, 黄涛, 顾梦沁, 张小明

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 为了准确高效地监测和预报复杂曲面多轴加工的切削力, 本文建立了一种基于高斯过程回归(GPR)算法的切削力预测模型。提出根据刀具位文件(CLS)提取刀具-工件啮合区刀轴矢量倾角、切宽等特征参数的方法, 构建以特征参数为输入的GPR模型, 实现复杂曲面加工切削力预测。开发了复杂曲面加工切削力仿真软件, 与传统机械力模型利用布尔运算计算刀具-工件啮合区域并预测切削力的方法进行对比, 切削力预测误差小于10%, 预测结果评价系数维持在0.98以上。设计叶轮流道加工试验, 验证了本文提出的GPR模型对复杂曲面加工切削力预测的准确性。在整体叶轮流道加工同一条刀路的预测时间上, 基于布尔运算预测切削力的方法耗时161 s, 而本文方法耗时仅为1.63 s, 实现了复杂曲面加工切削力高效准确预测。

关键词: 切削力预测; 特征参数提取; 高斯过程回归(GPR); 整体叶轮加工; 仿真软件开发

Cutting Forces Prediction for Complex Surface Machining Based on Gaussian Process Regression

GE Licai, HUANG Tao, GU Mengqin, ZHANG Xiaoming

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] In order to accurately and efficiently forecast the cutting force of complex surface multi-axis machining, a cutting force model based on Gaussian process regression (GPR) algorithm is developed in this paper. Feature parameters of tool-workpiece engagement, such as tool-axis inclination angles and cutting width, which serve as input characteristic parameters of GPR model for cutting force prediction in complex surface machining, are extracted based on cutter location file (CLS). The training set of the GPR model are obtained using the mechanical force model where the tool-workpiece engagement is calculated by Boolean operations. Cutting force simulation software for complex surface machining is developed and the efficiency of the proposed GPR model is verified by comparing with the traditional force prediction model which adopts the Boolean operations to calculate the tool-workpiece engagement. The error of cutting force prediction is less than 10% and the evaluation coefficient of prediction results is maintained above 0.98. An impeller runner machining experiment was designed to verify the accuracy of the GPR model proposed in this paper for predicting cutting force in machining complex curved surface. In force prediction based on the same CLS file for an impeller passage processing, the method using Boolean operation takes 161 s, while the time elapsed of the proposed model is only 1.63 s. The results indicate that the proposed model is efficient and accurate for cutting force prediction in complex surface machining.

Keywords: Cutting force prediction; Feature parameter extraction; Gaussian process regression (GPR); Impeller machining; Simulation software development

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.084

* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0714900); 国家自然科学基金(52075205, 92160207)。

复杂曲面球头刀五轴加工中的切削力一直以来都是学者们研究的关键问题,切削力预测模型主要包括经验模型、机械模型、数值模型、代理模型等^[1-2]。现阶段最经典的球头刀切削力模型是 Lee 等^[3]于 1996 年提出的机械模型,该模型基于切削力与切屑横截面积成正比的假设,对球头刀刀线离散分析,将离散后的切削刃微元受力分解为剪切力和犁耕力,得到切削力机械模型。Budak 等^[4]提出利用矢量投影法计算未变形切屑厚度,建立完整的球头刀五轴加工几何模型和切削力模型,更加准确地描述曲面加工过程中的加工状态。Zhu 等^[5-6]建立未变形切屑厚度和刀具-工件啮合的模型,以获取更加精确的切削力模型。Huang 等^[7]根据矢量分解法建立未变形切屑厚度计算的解析模型,完善现有的切削力模型。Sai 等^[8]考虑五轴铣削加工中的刀轴倾角变化,基于刀齿轨迹与加工表面特征,建立刀具-工件啮合区域的解析模型。Sun 等^[9]根据刀具刀线扫描轨迹预测未变形切屑厚度,结合刀轴跳动建立切削力预测模型。Li^[10-11]等基于圆弧-曲面求交的方法求解刀具-工件接触区域的边界,提出考虑刀轴跳动求解五轴加工接触区域的模型。Taner 等^[12]基于影射几何,采用一种新的方法快速计算刀具包络与工件啮合区域,并将其应用于切削力预测。Lazoglu 等^[13-14]通过布尔运算提取切触区域边界,在刀轴方向上离散,并计算微元的切入角、切出角,进而预测切削力。上述模型都能够较为准确地预测切削力。机械模型对于加工几何区域的求解较为复杂,一般基于微元思想,采用布尔求交算法获取切触区域及刀具-工件啮合范围。布尔运算需要大量的线面求交、面面求交计算,因此在预测效率上并不具有优势。

随着数据驱动的代理模型在加工领域的广泛应用,对于切削力的预测也有了新的方法。高斯过程回归(GPR)模型作为一种基于统计学的概率模型,在加工领域具有较好的应用前景,很多学者开始关注基于 GPR 模型的切削力预测。Liao 等^[15]提出基于高斯过程调整技术的切削力预测修正模型,将数据驱动的代理模型与机械力模型结合,对模型进行修正。Sun 等^[16]提出基于贝叶斯框架的数据代理模型,通过预测切削力进而预测薄壁零件加工误差及变形。Wang 等^[17]针对切削力均值和切削力峰值,考虑切削参数随机性的切削力概率分布,利用克里金模型重构切削参数与切削力之间的映射关系。Alajmi 等^[18]对比 GPR 模型、支持向量机(SVM)模型、人工神经网络(ANN)模型预测切削力,结果表明,GPR 模型预测效果更好。李康等^[19]采用最优权值组合预测模型,将 ANN 模型、GPR 模型、经验模型按照最优权值矩阵组合,结果表明,组合模型预测切削力有较好的稳定性和准确性。

代理模型一般直接将名义切削参数作为模型输入特征进行预测,然而五轴加工过程中由于多种约束的存在导致实际切深、切宽等切削参数具有时变性,且与名义切削参数存在较大偏差,因此,现有方法难以适应复杂曲面五轴加工。本文提出一种基于 GPR 的切削力预测模型,在曲面加工过程中建立局部坐标系来表征局部刀具-工件啮合状态,在局部坐标系下求解刀轴倾角、切宽等关键参数,将其作为模型输入特征。利用机械力模型代替切削试验构建切削力训练数据集,建立五轴加工切削力的 GPR 预测模型,实现复杂曲面加工切削力高效准确预测。

1 球头刀曲面加工参数解析

复杂曲面球头刀五轴加工过程中,刀轴矢量、切深、切宽等切削参数不断改变,这些切削参数直接影响每个时刻刀具与工件表面的啮合区域面积,进而影响每个时刻的切削力。因此,需要计算每个时刻的实际切削参数才能够对切削力做出较为准确的预测。为了准确描述加工过程中刀具相对于工件的运动关系,获取加工过程中局部切削参数,通常需要定义 3 个坐标系^[20],如图 1 所示,分别为工件坐标系(WCS)、加工局部坐标系(FCN)和刀具坐标系(TCS)。WCS 在数控编程中定义。FCN 在加工过程中随着刀具进给发生变化,某一时刻的 FCN 原点为该时刻的刀触点(CC),FCN 的 F 轴由该时刻的瞬时进给矢量确定,N 轴由刀触点处的曲面外法向量确定,C 轴通过右手笛卡尔坐标系规则得到,称为横向进给轴 C。TCS 由 FCN 旋转平移得到,刀轴方向即为 TCS 的 Z 轴方向。在复杂曲面五轴加工中,WCS 一经设定就不会改变,FCN 和 TCS 跟随加工过程不断改变。因此,构建坐标系之间的转换关系对于准确描述加工过程是十分重要的。

五轴铣削加工中,根据前倾角和侧倾角描述 TCS 相对于 FCN 的位置关系。前倾角 α 描述为刀轴绕横向进给轴 C 旋转的角度;侧倾角 β 描述为刀轴绕进给轴 F 旋转的角度;切深 a_p 定义为刀具切削工件时已加工表

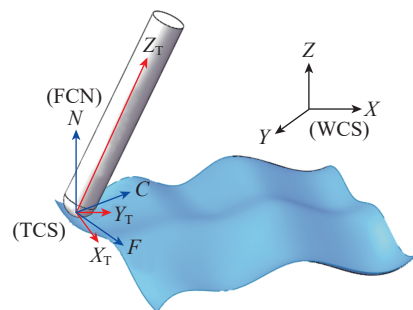


图 1 五轴加工坐标系定义^[20]

Fig.1 Definition of 5-axis machining coordinate system^[20]

面和未加工表面间的垂直距离;切宽 s 定义为相邻刀路之间的距离^[21]。

1.1 刀位源文件解析

刀位源文件(Cutting location source file, CLS)可由CAM软件进行刀具路径规划得到,包含刀具路径信息及每个刀位点的切削参数信息。CLS是对刀具加工过程中运动轨迹的描述,通常采用APT语言表达。图2为采用UG NX12.0对整体叶轮流道加工、整体叶轮叶片精加工的刀具路径规划图和CLS文件示意图。

刀位轨迹上根据不同的颜色将不同形式的运动进行区分。CLS文件中包含的运动指令(如“GO TO”),后面的数据表示刀位点坐标、刀轴矢量和刀触点坐标;“PAINT/COLOR”后面数字表示刀轨颜色信息,通过刀轨颜色指令可以确定参与切削的始末位置“FEDRAT/MMPM”后面数字表示给定进给速度;“LOAD/TOOL”后面数字表示加载刀具信息。通过对CLS文件进行解析,可以得到加工过程中的刀位点、刀触点、刀轴矢量、刀具信息及加工参数。

1.2 前倾角和侧倾角解析

CLS文件中的刀位点、刀触点坐标、刀轴矢量、加工参数等都是定义在WCS下,刀具前倾角、侧倾角定义在FCN下。为了准确获取FCN下的参数信息,需要在加工过程中建立FCN,将WCS下的切削参数映射到FCN中。不同于三轴加工刀轴矢量方向保持不变,在五轴铣削加工中,刀轴矢量不断变化,刀位轨迹上的刀位点(CL)和刀具与工件表面的接触点(CC)并不重合。如图3所示,通过确定刀触点处的进给矢量 f 、曲面外法矢

向量 n 来建立FCN,加工过程中实际速度矢量 v 可以根据同一条刀路上相邻两刀触点计算得到。

$$v = \frac{CC_{i+1} - CC_i}{|CC_{i+1} - CC_i|} \quad (1)$$

式中, CC_i 为当前刀触点; CC_{i+1} 为下一刀触点。

曲面外法矢向量 n 可以根据当前刀位点与刀触点相减计算得到:

$$n = \frac{CL_i - CC_i}{|CL_i - CC_i|} \quad (2)$$

式中, CL_i 为当前刀位点。

横向进给矢量 c 根据右手定则叉乘得到:

$$c = n \times v \quad (3)$$

进给矢量 f 由横向进给矢量 c 和曲面外法矢向量 n 叉乘得到:

$$f = c \times n \quad (4)$$

通过计算进给矢量、曲面法矢量、横向进给矢量的单位向量可以确定FCN,即 f 、 c 、 n 分别为FCN的3个坐标轴,这样可以将任意向量 $u = [u_i, u_j, u_k]^T$ 在WCS下的表达转换到FCN下:

$$\begin{bmatrix} u_F \\ u_C \\ u_N \end{bmatrix}_{(FCN)} = {}^F_w R \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix}_{(WCS)} = \begin{bmatrix} f_i & f_j & f_k \\ c_i & c_j & c_k \\ n_i & n_j & n_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix}_{(WCS)} \quad (5)$$

式中, u_F 表示向量 u 在FCN中的坐标轴 F 上的坐标。TCS是由FCN经过旋转平移变换得到的,刀轴矢量 Z 在TCS下表示为 $(0,0,1)$,而在FCN下可以由刀具前

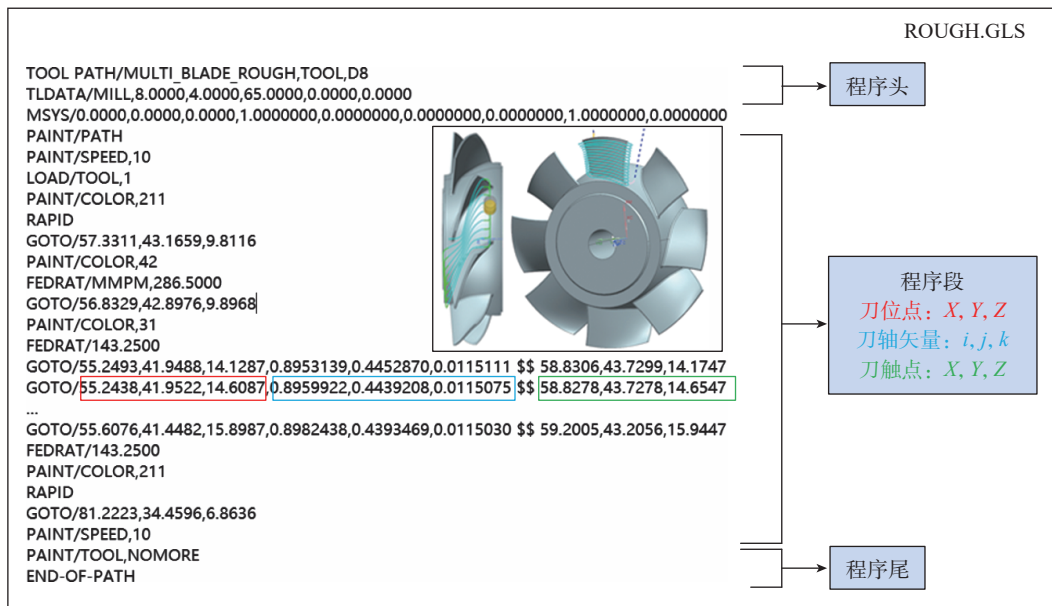


图2 通过CAM软件生成的CLS文件
Fig.2 CLS files generated by CAM software

倾角 α 和侧倾角 β 确定刀轴矢量,即曲面法矢向量 \mathbf{n} 绕着横向往进给矢量 \mathbf{c} 和进给矢量 \mathbf{f} 旋转形成前倾角和侧倾角。TCS 相对于 FCN 的旋转矩阵 ${}^F\mathbf{R}$ 可以通过绕 C 轴旋转 α 角和绕 F 轴旋转 β 角得到^[22]:

$${}^F\mathbf{R} = \text{rot}(\mathbf{f}, \beta) \cdot \text{rot}(\mathbf{c}, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ \sin\beta \sin\alpha & \cos\beta & -\sin\beta \cos\alpha \\ -\cos\beta \sin\alpha & \sin\beta & \cos\beta \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

刀轴矢量 \mathbf{Z} 在 FCN 中表示为 $[Z_F, Z_C, Z_N]^T$,可以根据下式计算得到:

$$\begin{bmatrix} Z_F \\ Z_C \\ Z_N \end{bmatrix}_{(\text{FCN})} = {}^F\mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(\text{TCS})} \quad (7)$$

根据 CLS 文件可以获取刀轴矢量在工件坐标系下的表达,将刀轴信息转换到 FCN 下,根据式(5)旋转变换结果如下:

$$\begin{bmatrix} Z_F \\ Z_C \\ Z_N \end{bmatrix}_{(\text{FCN})} = \begin{bmatrix} f_i & f_j & f_k \\ c_i & c_j & c_k \\ n_i & n_j & n_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ Z_j \\ Z_k \end{bmatrix}_{(\text{WCS})} \quad (8)$$

式中, $[Z_i, Z_j, Z_k]^T$ 为刀轴矢量在 WCS 下的表达。

联立式(7)和(8)得到:

$$\begin{bmatrix} f_i & f_j & f_k \\ c_i & c_j & c_k \\ n_i & n_j & n_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ Z_j \\ Z_k \end{bmatrix}_{(\text{WCS})} = {}^F\mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(\text{TCS})} \quad (9)$$

将式(9)进行简化:

$$\begin{bmatrix} \text{dot}(\mathbf{f}, \mathbf{Z}) \\ \text{dot}(\mathbf{c}, \mathbf{Z}) \\ \text{dot}(\mathbf{n}, \mathbf{Z}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \\ -\sin\beta \cos\alpha \\ \cos\beta \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以得到前倾角和侧倾角的解析表达:

$$\alpha = \arcsin(\text{dot}(\mathbf{f}, \mathbf{Z})) \quad (11)$$

$$\beta = -\arctan\left(\frac{\text{dot}(\mathbf{c}, \mathbf{Z})}{\text{dot}(\mathbf{n}, \mathbf{Z})}\right) \quad (12)$$

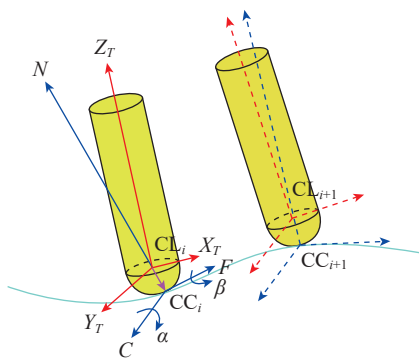


图3 局部坐标求解示意图

Fig.3 Schematic figure of the local coordinate solution

式中, $\text{dot}(\mathbf{f}, \mathbf{Z})$ 为 \mathbf{f}, \mathbf{Z} 向量的点积。

1.3 切削宽度解析

切削宽度定义为相邻两刀具轨迹对应的刀触点之间的距离,对于三轴加工和简单曲面加工,相邻两条刀具轨迹上的刀位点数大致相等,并且对应刀触点间的距离变化不明显,这种情况下的切削宽度可以根据对应刀触点之间的距离进行计算,但是在复杂曲面加工过程中这种方法并不适用。本节提出根据 CLS 解析计算复杂曲面加工过程中的切削宽度的算法,图4为叶轮流道加工切宽计算示意图。

在计算切宽时,需要确定相邻两条刀路的刀触点信息,相邻两条刀路上刀触点间的最小距离可以近似为每个刀位点处的切削宽度。在第 k 条刀路上的第 i 个刀触点切宽计算如下,分别计算 $CC_{(i,k)}$ 点与 $CC_{(i,k+1)}$, $CC_{(i+1,k+1)}$, \dots , $CC_{(j,k+1)}$ 点之间的距离:

$$S_{(i,k+1)} = |CC_{(i,k)} - CC_{(i,k+1)}| \quad (13)$$

$$S_{(i+1,k+1)} = |CC_{(i,k)} - CC_{(i+1,k+1)}| \quad (14)$$

\dots

$$S_{(j,k+1)} = |CC_{(i,k)} - CC_{(j,k+1)}| \quad (15)$$

则第 k 条刀路上的第 i 个刀位点切宽为 $\min\{S_{(i,k+1)}, S_{(i+1,k+1)}, \dots, S_{(j,k+1)}, R\}$,其中 R 为刀具与工件相交圆的半径。

2 GPR 模型搭建及训练

2.1 GPR 原理

GPR 是一个有监督的学习过程,本质是低维空间高斯分布向高维空间的拓展表示。对于给定的数据集 $D = \{(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, N\}$ 作为模型训练样本,其中 $x_i \in \mathbb{R}^n$ 代表影响切削力的特征参数,包括切深、切宽、刀轴倾角和进给量 (n 表示特征参数个数); y_i 为给定切削

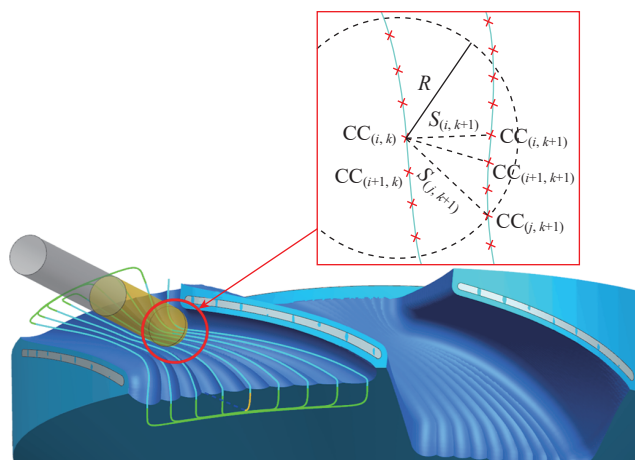


图4 叶轮流道加工切宽计算示意图

Fig.4 Cutting width calculation diagram of impeller runner processing

参数下仿真获取的切削力数据。基于贝叶斯理论的标准 GPR 模型可以表示为^[23]

$$Y = f^T(X)\omega + \varepsilon \quad (16)$$

式中, Y 为观测值; X 为输入特征矩阵; ω 为线性模型的权重向量; f 为映射函数; ε 为高斯噪声, $\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$; σ_n^2 为噪声方差。

高斯过程为

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (17)$$

$$m(x) = \mathbb{E}[f(x)] \quad (18)$$

$$k(x, x') = \mathbb{E}[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (19)$$

一般来说, 均值函数 $m(x)$ 设置为 0, 协方差函数 $k(x, x')$ 可以根据不同的需求进行选择, 较为常见的协方差函数包括高斯核函数、Matern 核函数、有理二次核函数(RQ)等^[24]。本文采用高斯核函数作为协方差函数, 即

$$k(x_i, x_j) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|_2^2}{2l^2}\right) \quad (20)$$

式中, 参数 l 控制函数的平滑程度, l 在不同输入维度上一般表现不同; σ 影响方差的大小。

GPR 的主要思想是通过输入特征的相关性描述输出特征的相关性^[6]。本研究旨在给定新的观测点 x_* , 预测输出均值 \bar{f}_* 和方差 $\text{cov}(f_*)$ 。根据高斯过程的描述, 新测试点的观测值与函数值遵循以下高斯联合分布^[24]:

$$\begin{bmatrix} Y \\ f_* \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} m(X) \\ m(X_*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n & \mathbf{K}_*(X, X_*) \\ \mathbf{K}_*(X_*, X) & \mathbf{K}(X_*, X_*) \end{bmatrix}\right) \quad (21)$$

式中, $\mathbf{K}(X, X) = \{k(x_i, x_j)\}$ 表示训练输入 X 的协方差矩阵, 是维度为 $N \times N$ 的对称正定矩阵; $\mathbf{K}_*(X, X_*) = \mathbf{K}_*(X_*, X)^T$ 表示训练输入 X 和测试输入 X_* 之间的协方差矩阵, 维度是 $N \times N_*$; $\mathbf{K}(X_*, X_*)$ 表示测试输入的协方差矩阵, 维度是 $N_* \times N_*$ 。上述矩阵定义为

$$\mathbf{K}(X, X) = \begin{bmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \cdots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \cdots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \cdots & k(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{K}_*(X_*, X) = [k(x_*, x_1) \quad k(x_*, x_2) \quad \cdots \quad k(x_*, x_n)] \quad (23)$$

根据高斯过程的先验表达, 可以得到预测值 f_* 的后验分布:

$$f_* | X, Y, X_* \sim N(\bar{f}_*, \text{cov}(\bar{f}_*)) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{f}_* &= \mathbb{E}[f_* | X, Y, X_*] = m(X_*) + \\ &[\mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n]^{-1} * (Y - m(X)) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{cov}(f_*) = \mathbf{K}(X_*, X_*) - \mathbf{K}_*(X_*, X)$$

$$[\mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n]^{-1} * \mathbf{K}_*(X, X_*) \quad (26)$$

当均值函数 $m(x) = 0$ 时, 式(25)可以简化为

$$\bar{f}_* = [\mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n]^{-1} Y \quad (27)$$

因此, 可以根据预测值的后验分布得到在测试点处的预测输出均值 \bar{f}_* 以及方差 $\text{cov}(f_*)$ 。

从上述预测过程可以看出, GPR 模型的预测输出只依赖于训练输入输出、测试输入。因此, GPR 模型是非参数的概率模型, 但是在 GPR 模型中需要确定由于核函数、噪声方差所引入的超参数 $\theta = [l, \sigma_f, \sigma_n]$ 。

2.2 超参数优化

GPR 模型在被唯一确定后, 需要求解模型中的超参数 θ , 本文采用经典的极大似然估计法对超参数进行求解。根据贝叶斯原理:

$$P(\theta | Y, X) = \frac{P(Y|X, \theta)P(\theta)}{P(Y|X)} \quad (28)$$

当式(28)取得最大值时, 可以得到超参数 θ 的最大后验估计, 问题转化为求解 $P(Y|X, \theta)$ 的最大值。进一步转化为对 $L(\theta) = -\lg(P(Y|X, \theta))$ 求最小值。

$$\begin{aligned} L(\theta) &= -\lg(P(Y|X, \theta)) = \frac{1}{2} Y^T [\mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n]^{-1} Y + \\ &\frac{1}{2} \lg |\mathbf{K} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_n| + \frac{N}{2} \lg(2\pi) \end{aligned} \quad (29)$$

在对超参数进行初始化后可以根据梯度下降算法进行优化求解, 得到最优超参数的集合 θ 。用于切削力预测的 GPR 模型流程如图 5 所示。

2.3 训练数据获取

通过建立机械模型能够较为准确的计算切削力, 将铣刀切削刃等间隔离散成一系列微元切削刃后, 每个微元切削刃的切削过程都可以视为一个斜角切削过程, 提

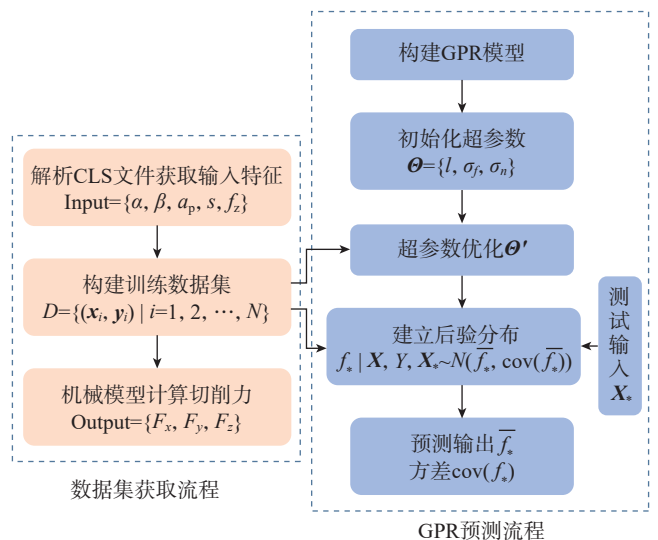


图 5 GPR 切削力预测流程
Fig.5 Process of GPR cutting force prediction

出了将微元切削力分离为剪切力分量和犁耕力分量的机械力模型^[3]。

$$\begin{cases} dF_r(\theta, z) = K_{rc}dS + K_{rc} \cdot t_n(\varphi, \kappa)db \\ dF_t(\theta, z) = K_{tc}dS + K_{tc} \cdot t_n(\varphi, \kappa)db \\ dF_a(\theta, z) = K_{ac}dS + K_{ac} \cdot t_n(\varphi, \kappa)db \end{cases} \quad (30)$$

式中, dF_r 、 dF_t 、 dF_a 为径向、切向、轴向力分量, N; K_{rc} 、 K_{tc} 、 K_{ac} 为每个切削单元的剪切系数, N/mm²; K_{re} 、 K_{te} 、 K_{ae} 为每个单元的犁耕力系数, N/mm; dS 为每个离散量的切削刃长度; t_n 为切削单元的未切削厚度; db 为切削单元的宽度。

机械力模型切削力计算首先需要确定切削力系数, 球头铣刀的切削力系数可以分为考虑剪切效应剪切力系数和考虑犁耕效应的犁耕力系数。剪切力系数可以表示为沿着刀具 z 轴方向变化的三次多项式。

$$\begin{aligned} K_{rc} &= a_{r0} + a_{r1}z + a_{r2}z^2 + a_{r3}z^3 \\ K_{tc} &= a_{t0} + a_{t1}z + a_{t2}z^2 + a_{t3}z^3 \end{aligned} \quad (31)$$

$K_{ac} = a_{a0} + a_{a1}z + a_{a2}z^2 + a_{a3}z^3$
犁耕力系数主要与刀具边缘刃口半径有关, 一般采用常数表示, 即

$$K_{re} = a_{e1}, K_{te} = a_{e2}, K_{ae} = a_{e3} \quad (32)$$

机械力模型中需要对刀具-工件接触区域进行建模, 获取刀具-工件在切削过程中的啮合区域, 通过判断切入切出角确定刀具是否在进行切削。这一过程可以采用布尔实体求交进行计算, 将刀具与工件在每一刀位点处进行求交运算, 进而求解微元处的周期平均切削力^[25]。本文采用布尔实体仿真对刀具工件啮合区域进行提取, 计算切入切出角, 最后代入切削力预测模型进行切削力预测。

本文的目标训练数据集由上述机械力模型计算切削力得到。图 6 为不同切深的刀具路径规划图。表 1 为仿真参数表。

每组仿真采集 250 个刀位点数据, 训练数据集和测试数据集分别是 3500 个和 1000 个, 其中第 2、第 7、第 8、第 11 组为测试数据集, 剩下的为训练数据集。利用上文对加工参数的提取算法, 对每个刀位点处的刀轴前倾角、侧倾角、切宽进行求解, 得到样本数据的输入维度为五维, 分别是前倾角、侧倾角、切深、切宽、每齿进给量。通过仿真获取切削力数据, 得到样本数据的输出维度为三维。结合 GPR 算法建立输入特征与切削力之间的映射关系 $F=f(x)$, 其中 $x=\{\alpha, \beta, a_p, s, f_z\}$, $F=\{F_x, F_y, F_z\}$ 。

2.4 预测结果

利用 MATLAB 计算工具构建 GPR 模型, 初始化超参数 $\Theta_0=\{I_0, \sigma_{f_0}, \sigma_{n_0}\}$ 。由于输入维度为五维, 所以初始超参数为

$$I_0=\{0.2560, 0.1266, 0.0300, 0.3906, 1.3089\}$$

$$\sigma_{f_0}=733.5931$$

$$\sigma_{n_0}=7.3359$$

经过 800 次超参数优化迭代得到最优超参数, 在 X 方向上预测模型的最优超参数为

$$I_0=\{-1.3675, -4.2450, -1.2857, 1.0079, 0.8344\}$$

$$\sigma_{f_0}=5.2073$$

$$\sigma_{n_0}=-0.0163$$

在 Y 方向上预测模型的最优超参数为

$$I_0=\{-2.0674, -4.1041, -1.5994, 0.6348, -0.3425\}$$

$$\sigma_{f_0}=4.3408$$

$$\sigma_{n_0}=0.2608$$

在 Z 方向上预测模型的最优超参数为

$$I_0=\{-1.9654, -4.3367, -1.6082, 0.5762, 0.5382\}$$

$$\sigma_{f_0}=4.0684$$

$$\sigma_{n_0}=0.3764$$

图 7 为 X 、 Y 、 Z 方向上机械模型计算切削力与 GPR 模型预测切削力比较分析图。在训练数据集上,

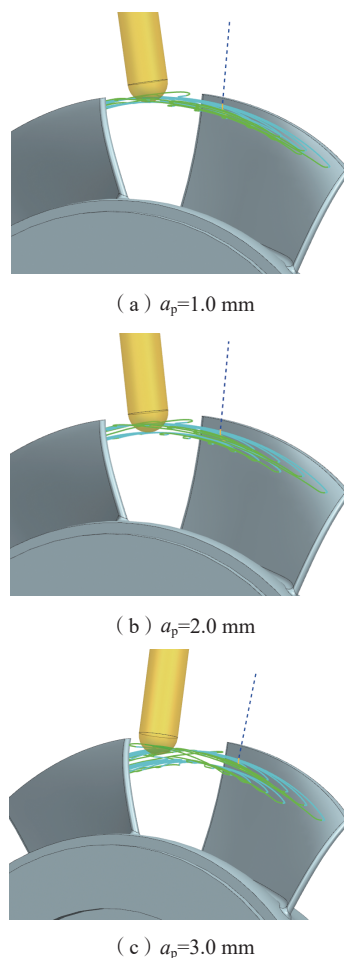


图 6 不同切深刀具路径规划图

Fig.6 Tool path planning diagram of different cutting depth

GPR 预测切削力与理论计算切削力吻合程度很高；在测试数据上，预测结果基本能够保持在 ±10% 误差范围以内。

为了分析 GPR 预测模型的性能，对以下 4 种评价指标进行研究。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \bar{f}_i| \quad (33)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{f}_i)^2 \quad (34)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{f}_i)^2} \quad (35)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{f}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (36)$$

表 2 为 GPR 预测模型性能评估表，其中 MAE 表示平均绝对误差；MSE 表示均方误差；RMSE 表示均方根误差； R^2 表示模型评价系数， R^2 数值越接近于 1，表示预测模型和理论模型匹配度越高。这些指标可以较为全面地对 GPR 模型的预测性能进行综合评价。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters mm

序号	切削深度 a_p	每齿进给量 f_z
1	1.0	0.03
2	1.0	0.05
3	1.0	0.1
4	1.5	0.03
5	1.5	0.05
6	1.5	0.1
7	2.0	0.03
8	2.0	0.05
9	2.0	0.1
10	2.5	0.03
11	2.5	0.05
12	2.5	0.1
13	3.0	0.03
14	3.0	0.05
15	3.0	0.1
16	3.5	0.03
17	3.5	0.05
18	3.5	0.1

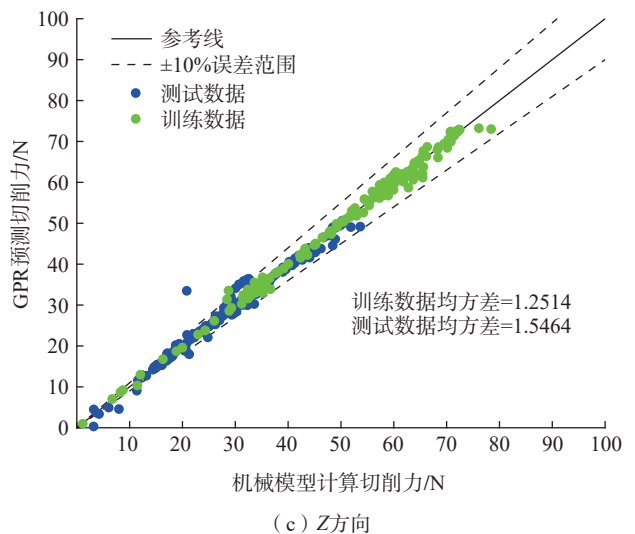
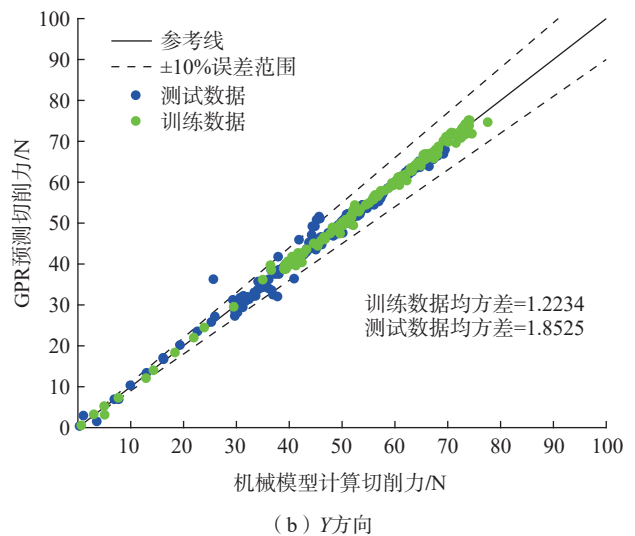
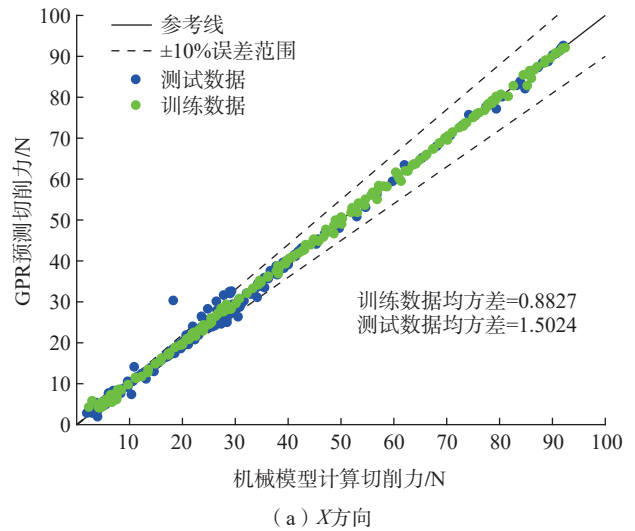


图 7 机械模型计算切削力与 GPR 预测切削力比较
Fig.7 Comparison of mechanical model calculated cutting force and GPR predicted cutting force

3 试验验证及应用

3.1 整体叶轮流道加工试验设计

设计整体叶轮流道加工试验,采集切削力,验证文中提出的 GPR 模型预测切削力的准确性。根据 UG NX12.0 对整体叶轮进行加工刀路规划,图 8 为叶轮流道加工第 1 层刀路。

试验开始前需要针对刀路文件进行后置处理,采用与 Mikron UCP800 Duro 五轴数控机床适配的机床后置处理软件,将刀路文件转换成适应机床加工的 NC 文件,采用 Vericut 软件对 NC 文件进行仿真分析,检查 NC 文件的正确性,查看是否发生碰撞及干涉等。图 9 为 Vericut 仿真结果,流道加工完成,没有任何碰撞发生。

试验在 Mikron UCP800 Duro 五轴数控机床上展开,

表 2 GPR 模型性能评估表

Table 2 Performance evaluation table of GPR model

评价指标	F_x		F_y		F_z	
	训练集	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集
MAE	0.5256	0.8889	0.7448	1.0794	0.7277	0.9067
MSE	0.7791	2.2570	1.4967	3.4318	1.5659	2.3912
RMSE	0.8826	1.5023	1.2234	1.8525	1.2513	1.5463
R^2	0.9989	0.9956	0.9976	0.9858	0.9945	0.9803

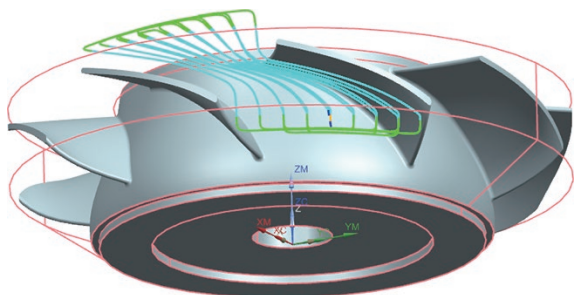
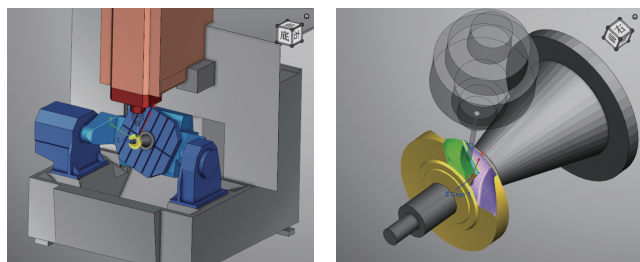


图 8 整体叶轮流道加工刀路

Fig.8 Integral impeller runner machining tool path



(a) 机床仿真

(b) 切削仿真

图 9 Vericut 仿真结果图

Fig.9 Graph of Vericut simulation results

工件采用夹具固定, Kistler 旋转测力仪 9123C 装夹在主轴上,测力仪实时采集加工过程中 3 个方向上的瞬时切削力信号,通过切削力信号采集器和 NI 采集器进行数据采集并显示。整体叶轮毛坯材料为 7075 铝合金,采用硬质合金球头刀切削,刀具直径 8 mm、螺旋角 55°、刀长 75 mm、刃长 20 mm、刃数 2、主轴转速恒定 1000 r/min、每齿进给 0.2 mm,试验现场如图 10 所示。

3.2 流道加工结果验证

通过切削力系数标定得到切削力系数为

$$K_{rc}=141.056+3899.8z-68.42z^2+848.856z^3$$

$$K_{tc}=1816.06-1302.579z+7509.66z^2-1436.42z^3$$

$$K_{ac}=-471.64+2196.53z-5115.62z^2+1680.32z^3$$

$$K_{re}=7.1649$$

$$K_{te}=-17.01$$

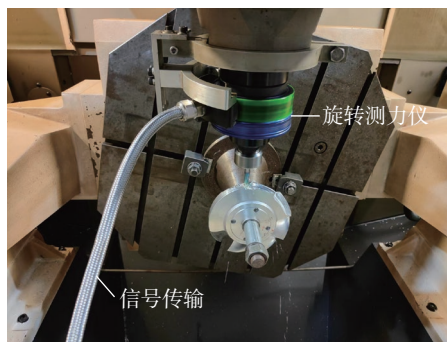
$$K_{ae}=27.535$$

(37)

流道加工试验中采用平均切削力进行切削力系数标定,流道加工属于复杂曲面加工,其加工工况复杂,切削力影响因素较多,瞬时切削力波动较大,因此采用周期平均切削力进行对比分析。根据 GPR 模型对整体叶轮流道加工周期平均切削力进行预测,并将切削力转换到刀具坐标系下,与试验测得的切削力进行对比分析,结果如图 11 所示。



(a) 信号采集



(b) 叶轮切削

图 10 试验现场

Fig.10 Experimental site

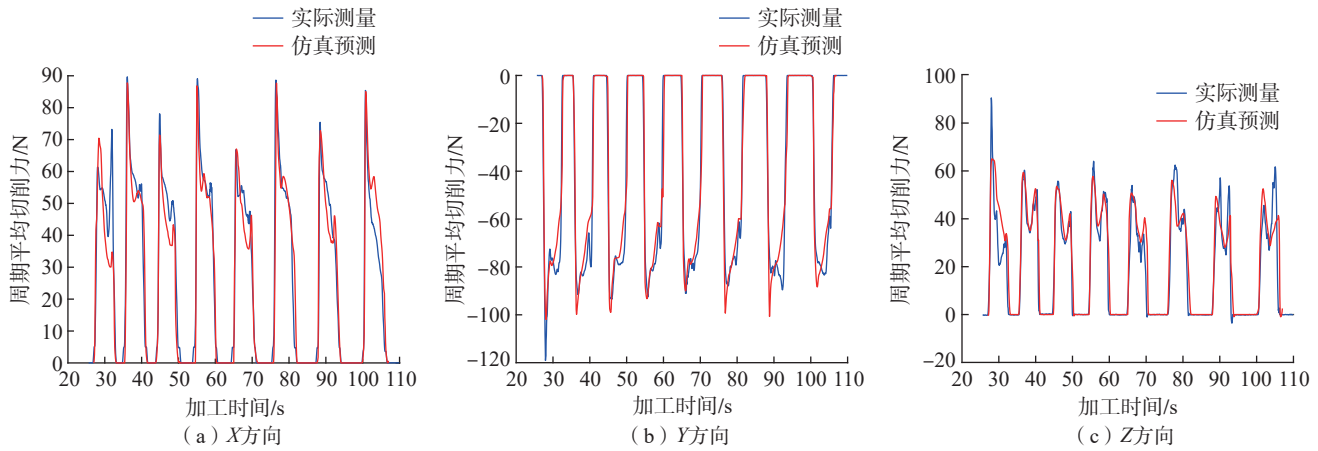


图 11 X、Y、Z 方向实测切削力与预测切削力对比图

Fig.11 Comparison of measured cutting force and predicted cutting force in X, Y and Z directions

通过对比分析,本文提出的 GPR 模型能够较为准确地对叶轮流道加工切削力进行预测。在整体切削力变化趋势上与实测切削力吻合, X 方向上平均误差为 13.9%, Y 方向上平均误差为 8.3%, Z 方向上平均误差为 12.5%。根据试验结果对比图可以发现,在第 1 处峰值和最后两处峰值的地方,切削力预测误差较大。第 1 处峰值为流道切削的第 1 条刀路,由于刚开始切削,刀具属于全齿切削,切削力预测无法考虑顺铣、逆铣的复杂工况;最后的峰值为流道加工边缘刀路,边缘处实际加工过程中存在排屑困难,可能会发生粘刀,造成切削力波动较大。从整体效果来看,切削力预测模型能够有效地对整体叶轮复杂曲面加工切削力进行预测。

3.3 仿真软件开发

本节将上述算法模型集成到切削力仿真软件中,通过 ACIS 造型内核、HOOPS 3D 显示库、MFC 用户交互设计搭建仿真软件平台,利用 GPR 算法进行切削力仿真。并且以整体叶轮流道加工和叶片精加工为例展示仿真应用。

流道加工仿真采用直径为 8 mm 球头刀,进给量 f_z 为 0.1 mm,切深 a_p 为 2 mm,图 12 为流道加工仿真图。

整体叶轮流道加工时,刀具逐层完成整个切削过程,选取一层加工中的一条刀路进行分析。通过解析获取的切削宽度如图 13 所示,在每一层中每一条刀路的切削宽度呈现先递减到达最小值后递增的变化趋势,在流道加工过程中靠近流道中间的刀路相较于两侧的刀路更加密集,所以这种变化趋势与实际相符。

流道加工切削力预测结果如图 14 所示。在流道加工每层刀路的开始与结束阶段,由于开始阶段刀具-工件啮合区域不断增大,结束阶段啮合区域不断减小,切削力呈现波动现象,这一过程切削力变化的影响因素较为复杂,在本研究中暂不重点考虑。在流道加工

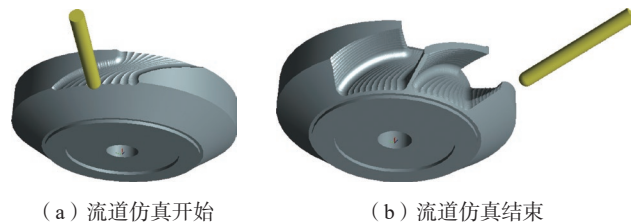


图 12 整体叶轮流道加工仿真图

Fig.12 Simulation diagram of overall impeller runner processing

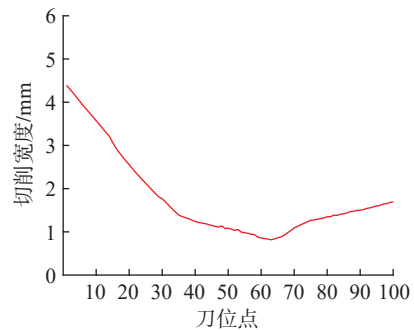


图 13 整体叶轮流道加工切宽变化图

Fig.13 Cutting width variation diagram of overall impeller runner processing

平稳阶段,切削深度基本保持恒定的情况下,切削力整体变化趋势与切削宽度变化基本一致。在整体预测结果上,GPR 模型能够准确预测流道加工过程中切削力的变化。

与基于布尔运算进行切削力预测相比,本文切削力仿真软件能够在保证较好预测精度的同时提高切削力预测的效率。以整体叶轮流道加工中的一条刀路为例,利用布尔运算进行切削力预测的方法耗时 161 s,而采用 GPR 模型进行切削力预测的方法耗时 1.63 s,结果表明,该软件很大程度上提高了切削力预测的效率。

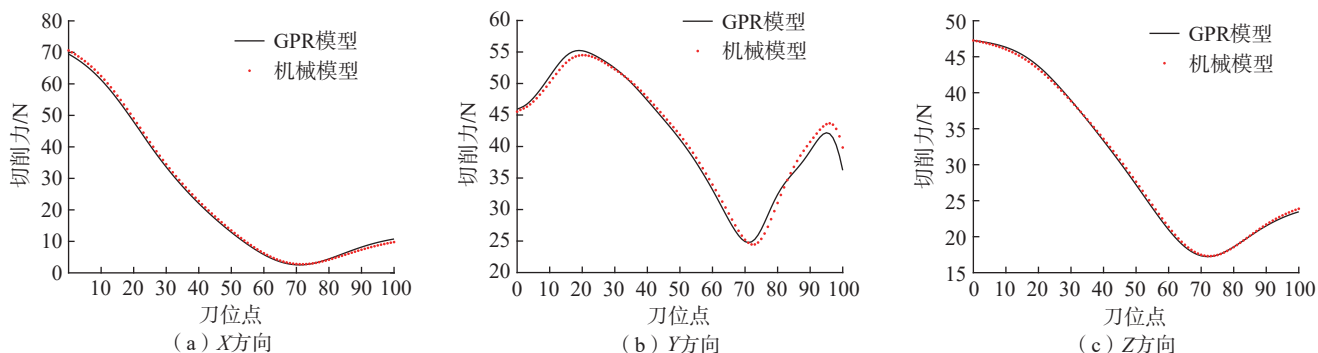


图 14 整体叶轮流道加工切削力预测结果

Fig.14 Cutting force predicted results of integral impeller runner processing

以整体叶轮叶片精加工为例进行加工仿真。叶片精加工仿真采用直径为 6 mm 球头刀,进给量 f_z 为 0.03 mm,切深 a_p 为 2.0 mm,图 15 为叶片精加工仿真图。

整体叶轮叶片精加工时,刀具从叶片顶端不断向下环切,选取加工过程中的一圈切削刀路进行分析,图 16 为切削力预测结果。由于叶片经过流道粗加工后形成的精加工毛坯材料分布并不均匀,在叶片两侧边缘位置剩余的材料较多,精加工过程中的切削力相较其他位置会有增大的趋势。图 16 中切削力波峰位置展示了切削

过程中叶片边缘处的切削情况。结果表明,切削力仿真预测整体趋势与机械模型计算结果相吻合。

4 结论

通过对球头刀曲面加工参数进行解析,在曲面加工过程中建立 FCN,确定 FCN 下的加工状态,计算得出刀轴前倾角、侧倾角以及切宽在 FCN 中的表达,作为后续 GPR 模型的输入特征参数。

基于布尔运算和机械力模型获取切削力数据作为 GPR 模型训练集输出,与上述输入特征参数一起构建训练数据集。建立 GPR 模型,对模型超参数利用最大似然估计法进行优化,获得最优超参数集合,在训练集和测试集上预测误差均小于 10%。设计整体叶轮流道加工试验对模型进行验证,结果表明,本文提出的模型能够有效地对复杂曲面加工切削力进行准确、高效预测。

将复杂曲面加工参数解析算法、GPR 预测算法集成到仿真软件平台。以整体叶轮流道加工和叶片精加工为例进行加工仿真,并与机械模型预测切削力进行对比,结果表明,该软件能够在保证预测精度的同时提升

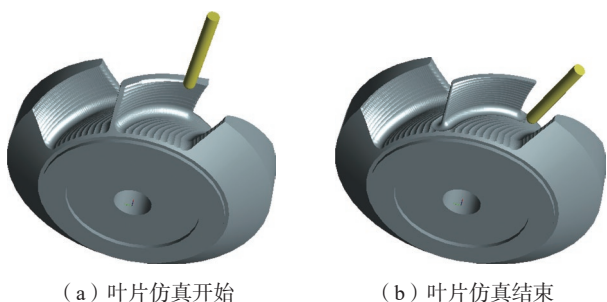


图 15 整体叶轮叶片精加工仿真图

Fig.15 Simulation diagram of finish machining of integral impeller blade

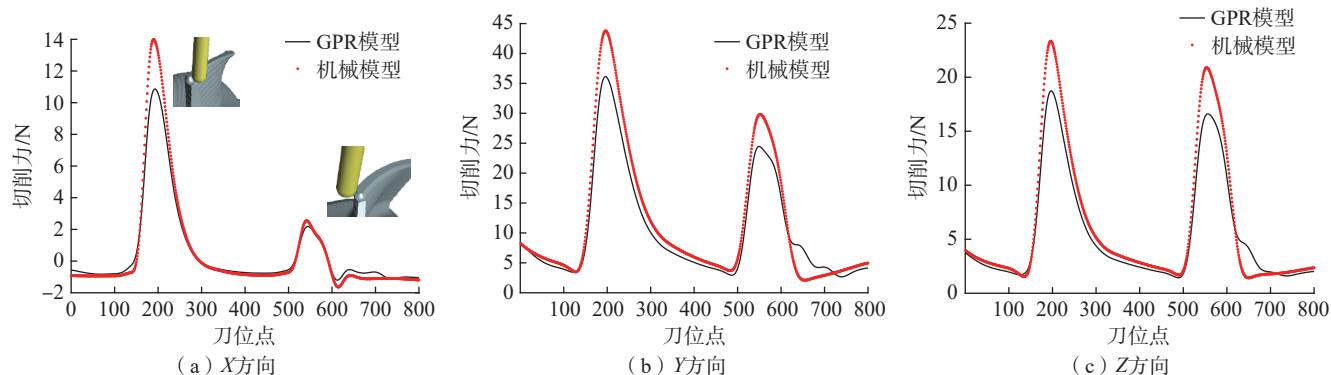


图 16 整体叶轮叶片精加工切削力预测结果

Fig.16 Cutting force predicted results of integral impeller blade finishing

预测效率,对比布尔求交算法,切削力预测效率提升了90%以上,实现了准确高效的复杂曲面加工切削力预测。

参考文献

[1] 赵凯,刘战强. 铣削力预测方法和影响因素综述[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1190–1200.

ZHAO Kai, LIU Zhanqiang. Summary of prediction methods and influencing factors of milling force[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(8): 1190–1200.

[2] DUAN Z J, LI C H, DING W F, et al. Milling force model for aviation aluminum alloy: Academic insight and perspective analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1–35.

[3] LEE P, ALTINTAŞ Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(9): 1059–1072.

[4] BUDAK E, OZTURK E, TUNC L T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes[J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 347–350.

[5] ZHU Z R, PENG F Y, YAN R, et al. High efficiency simulation of five-axis cutting force based on the symbolically solvable cutting contact boundary model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5–8): 2435–2455.

[6] ZHU Z R, YAN R, PENG F Y, et al. Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of five-axis general end milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 35–51.

[7] HUANG T, ZHANG X M, DING H. Decoupled chip thickness calculation model for cutting force prediction in five-axis ball-end milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(5–8): 1203–1217.

[8] SAI L, BELGUTH R, BAILI M, et al. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 7–17.

[9] SUN Y W, GUO Q. Numerical simulation and prediction of cutting forces in five-axis milling processes with cutter run-out[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(10–11): 806–815.

[10] LI Z L, ZHU L M. An accurate method for determining cutter-workpiece engagements in five-axis milling with a general tool considering cutter runout[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(2): 021001.

[11] LI Z L, WANG X Z, ZHU L M. Arc-surface intersection method to calculate cutter-workpiece engagements for generic cutter in five-axis milling[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 1–10.

[12] TANER T L, ÖMER Ö, ERHAN B. Generalized cutting force model in multi-axis milling using a new engagement boundary determination approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1–4): 341–355.

[13] LAZOGLU I, BOZ Y, ERDIM H. Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 117–120.

[14] BOZ Y, ERDIM H, LAZOGLU I. A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5–8): 811–823.

[15] LIAO X P, ZHANG Z K, CHEN K, et al. Modified mechanistic model based on Gaussian process adjusting technique for cutting force prediction in micro-end milling[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 1–12.

[16] SUN H, PENG F Y, ZHOU L, et al. A hybrid driven approach to integrate surrogate model and Bayesian framework for the prediction of machining errors of thin-walled parts[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 192: 106111.

[17] WANG C L, DING P F, HUANG X Z, et al. A method for predicting ball-end cutter milling force and its probabilistic characteristics[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023, 51(6): 3416–3433.

[18] ALAJMI M S, ALMESHAL A M. Modeling of cutting force in the turning of AISI 4340 using Gaussian process regression algorithm[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4055.

[19] 李康,鲁娟,马俊燕,等. 基于实验数据训练的切削力组合预测模型[J]. 现代制造工程, 2019(3): 6–10, 129.

LI Kang, LU Juan, MA Junyan, et al. Cutting force combination forecasting model based on experimental data[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(3): 6–10, 129.

[20] TUNC L T, BUDAK E. Extraction of 5-axis milling conditions from CAM data for process simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(5–6): 538–550.

[21] OZTURK E, TUNC L T, BUDAK E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(14): 1053–1062.

[22] MA J W, HU G Q, QIN F Z, et al. Optimization method of tool axis vector based on kinematical characteristics of rotary feed axis for curved surface machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5–8): 2007–2020.

[23] RASMUSSEN C E. Gaussian processes in machine learning[M]//Advanced Lectures on Machine Learning. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 63–71.

[24] KONG D D, CHEN Y J, LI N. Gaussian process regression for tool wear prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 104: 556–574.

[25] 顾梦沁. 基于ACIS的球头刀切削力系数辨识与刀具磨损监测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

GU Mengqin. Identification of cutting force coefficient and tool wear monitoring in ball end mill based on ACIS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

通讯作者: 黄涛, 副教授, 研究方向为数字化、智能化加工。

(责编 七七)