

考虑铣削表面形貌的工艺参数可靠性优化

黄贤振^{1,2}, 王旭¹, 丁鹏飞¹, 姜智元¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对球头铣削过程进行研究,旨在完成铣削工艺参数的可靠性优化. 首先,根据球头铣刀切削刃运动轨迹,利用Z映射(Z-MAP)算法对加工形成的表面形貌进行仿真,引入表面粗糙度(R_a)衡量加工后的表面质量,通过表面形貌分析实验验证表面形貌仿真模型的准确性;然后,考虑到铣削过程中加工表面质量、刀具使用寿命以及工艺参数不确定性的实际约束条件,建立以主轴转速、刀具进给速度、轴向切深、径向切深为优化变量,以材料去除率(Q)的最大化为优化目标的工艺参数可靠性优化模型;最后,基于灰狼优化算法对优化模型进行求解以获得最优工艺参数,并通过铣削实验验证优化结果的可行性.

关键词: 球头铣刀;Z-MAP算法;表面形貌;表面粗糙度;灰狼优化算法;可靠性优化

中图分类号: TG 547 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0080-08

Reliability Optimization of Process Parameters Considering Milling Surface Morphology

HUANG Xian-zhen^{1,2}, WANG Xu¹, DING Peng-fei¹, JIANG Zhi-yuan¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HUANG Xian-zhen, E-mail: xzhuang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Research is conducted on the ball end milling process with the aim of achieving reliable optimization of milling process parameters. Firstly, according to the motion trajectory of the ball end mill cutting edge, the surface morphology formed during machining is simulated using the Z-mapping (Z-MAP) algorithm, and the surface roughness (R_a) is introduced to measure the surface quality after machining. The accuracy of the surface morphology simulation model is validated through surface morphology analysis experiments. Then, considering the actual constraint conditions of the machining surface quality, the tool service life, and the uncertainty of process parameters during the machining process, a reliability optimization model for process parameters is established with spindle rotation speed, tool feed rate, axial cutting depth and radial cutting depth as the optimization variables, and maximizing the material removal rate (Q) as the optimization objective. Finally, the optimization model is solved using the grey wolf optimization algorithm to obtain the optimal process parameters, and the feasibility of the optimized results is verified through milling experiments.

Key words: ball end mill; Z-MAP algorithm; surface morphology; surface roughness; grey wolf optimization algorithm; reliability optimization

铣削作为一种先进的机械制造技术,在航空航天、军工等多个领域应用广泛. 铣削表面形貌会直接影响铣削表面粗糙度,从而对铣削表面质

量产生影响^[1]. 因此,为了保证铣削表面质量,深入了解加工机理,对铣削表面形貌进行建模仿真至关重要. 此外,不合理的工艺参数会导致

表面粗糙度差、切削效率低,甚至在加工过程中造成刀具与主轴的损坏.因此,选择合理的工艺参数,保证加工表面质量与刀具安全,提高切削效率,满足多重约束条件,是值得深入研究的问题^[2].

近年来,学者们对铣削表面形貌建模进行了大量研究.Imani等^[3]提出了一种实体建模方法,通过在零件实体模型和刀具扫描体积间执行连续的布尔运算从而模拟表面形貌.谭刚^[4]利用微分几何理论,建立了不同轮廓铣刀切削刃的参数方程,开发了不需要离散切削刃与切削运动的表面形貌仿真新算法,提高了仿真效率.Xu等^[5]通过一系列坐标变换完成了刀具在所建立工件坐标系中的扫掠面建模,从而实现了铣削表面形貌的仿真分析.Zhou等^[6]利用Z-MAP算法建立了4轴铣削表面形貌的预测模型,通过刀具轨迹数据计算刀具与工件的相对运动关系和接触面积,最终仿真获得了工件的加工表面形貌.

工艺参数与加工表面质量、切削效率密切相关,工艺参数的优化对提高加工表面质量、提升切削效率而言具有非常重要的意义^[7].郭斌等^[8]将最大化材料去除率作为优化目标,表面粗糙度作为约束条件,利用遗传算法对主轴转速、进给速度、切削深度进行了优化.张昱等^[9]利用正交实验法建立了加工表面粗糙度的经验公式,并通过多目标粒子群优化算法对铣削参数进行局部寻优,在保证切削效率的同时提升了加工表面质量.Wu等^[10]通过信号特征提取技术与神经网络对铣削 Inconel 718 工件表面的粗糙度进行了预测,并利用训练好的表面粗糙度模型,在不同表面粗糙度约束条件下,以最大化进给率为目标,通过粒子群算法完成了切削参数的优化.Kumar等^[11]采用田口法研究了镀 TiN 刀具对 AISI 1005 钢进行面铣削加工时的主轴转速、进给速度、切削深度的最优组合.以上研究为铣削表面形貌仿真与铣削工艺参数优化奠定了基础.

目前,铣削表面粗糙度的计算往往采用经验公式或利用基于正交实验数据建立的表面粗糙度数值模型,这可能会影响计算精度与效率.此外,上述工艺参数优化研究并未考虑工艺参数的随机性,而是将它们视为确定值.采用确定性优化方法获得的优化结果通常落在约束的边界上,如果设计变量由于各种不确定性而发生改变,获得的最优解很可能进入失效域,导致可靠性无法满足预期要求^[12].

本文运用齐次坐标矩阵变换原理建立球头铣刀切削刃的运动轨迹方程,基于Z-MAP算法对铣削表面形貌进行仿真,并利用仿真获得的表面形貌对表面粗糙度进行计算.通过对比仿真与实验获得的铣削表面形貌与加工表面粗糙度,验证所建立表面形貌仿真模型的准确性.此外,考虑到工艺参数的随机性,建立工艺参数的可靠性优化模型,利用灰狼优化算法进行求解从而获得满足设定条件的最优工艺参数,并通过铣削实验验证优化结果的可行性.

1 球头铣削表面形貌建模

球头铣削表面形貌建模的关键在于加工过程中切削刃运动轨迹方程的构建,为此本文建立了铣削运动参考坐标系.此外,考虑到仿真精度与效率,引入Z-MAP算法进行表面形貌仿真.

1.1 铣削运动参考坐标系

本文将恒定导程的球头铣刀作为研究对象,为准确描述铣削加工过程中球头铣刀任意切削点和工件的相对位置关系,建立了如图1所示的参考坐标系.

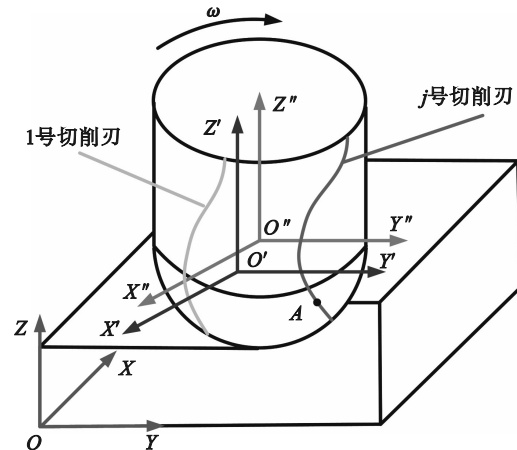


图1 球头铣刀运动参考坐标系

Fig. 1 Ball end mill motion reference coordinate system

图1中,工件坐标系XYZ是固联在工件上的全局坐标系;主轴坐标系X'Y'Z'的O'Z'坐标轴与机床主轴回转轴线重合,并随机床主轴一起相对工件运动;刀具坐标系X''Y''Z''固联在铣刀上,坐标原点O''与铣刀的球心重合,O''Z''坐标轴与铣刀轴线重合,O''X''坐标轴以角速度 ω 旋转.

1.2 球头铣刀切削刃运动轨迹方程

若球头铣刀切削刃数量为N,则第j号切削刃上任意切削点A在刀具坐标系中的齐次坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c \sin \kappa \cos(\tan \gamma \ln(\cot(\frac{\kappa}{2})) + (j-1)\frac{2\pi}{N}) \\ R_c \sin \kappa \sin(\tan \gamma \ln(\cot(\frac{\kappa}{2})) + (j-1)\frac{2\pi}{N}) \\ -R_c \cos \kappa \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: R_c 为刀具半径, mm; κ 为 A 点处的轴向位置角, rad; γ 为铣刀螺旋角, rad; $j = 1, 2, \dots, N$.

由于刀具制造、安装误差以及机床回转误差等因素的影响, 导致刀具轴线偏离机床主轴回转轴线, 从而引发刀具跳动, 如图 2 所示. 若刀具跳动偏移量为 ρ , 刀具跳动偏移位置角为 μ , 则刀具跳动的齐次变换矩阵 M_1 为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho \sin \mu \\ 0 & 1 & 0 & \rho \cos \mu \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

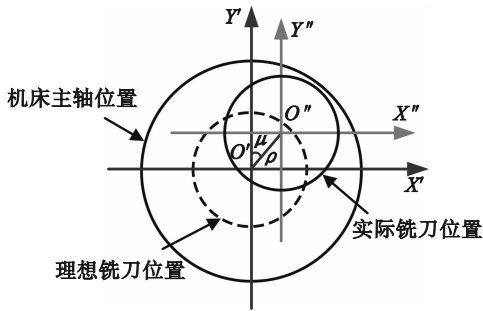


图 2 刀具跳动
Fig. 2 Tool runout

假定刀具坐标系绕主轴坐标系以角速度 ω 顺时针旋转, 则刀具旋转的齐次变化矩阵 M_2 为

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_0 + \omega t) & \sin(\varphi_0 + \omega t) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_0 + \omega t) & \cos(\varphi_0 + \omega t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中: φ_0 为初始相位, rad; t 为刀具从进给开始到当前位置所需时间, s.

本文针对球头铣刀加工中的单向直线进给方式进行研究, OX 轴方向为铣刀的进给方向, OY 轴方向为铣刀的间歇进给方向. 假设首次进给时坐标原点 O'' 在工件坐标系中的初始位置坐标是 (x_0, y_0, z_0) , 则进给平移齐次变换矩阵 M_3 为

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 + vt \\ 0 & 1 & 0 & y_0 + (c-1)f_p \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中: c 为刀具进给次数; f_p 为径向切深, mm; v 为

刀具进给速度, mm/min.

通过一系列的齐次坐标矩阵变换, 球头铣刀切削过程中任意切削点 A 在工件坐标系中的运动轨迹方程为

$$\begin{bmatrix} x(\kappa, t) \\ y(\kappa, t) \\ z(\kappa, t) \\ 1 \end{bmatrix} = M_3 M_2 M_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.3 表面形貌仿真算法

综合考虑计算精度与效率, 采用 Z-MAP 算法^[13-14]对球头铣削表面形貌进行仿真. 首先将球头铣刀切削刃与切削时间作离散化处理, 并将工件进行网格划分. 然后通过式(5)计算各离散时间内任意切削刃离散点在工件坐标系下的位置坐标, 比较切削刃离散点的高度值和工件的高度值, 选择更小的数值作为铣削后的工件高度值. 重复以上过程, 直至加工结束. 最后根据计算获得的表面点云数据进行铣削表面形貌仿真.

2 工艺参数可靠性优化

工艺参数可靠性优化, 可以在保证加工质量的前提下, 尽可能提升切削效率. 可靠性优化模型可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} \min f(X), \\ \text{s.t. } g(X) \leq 0, \\ e(X) = 0, \\ r[g(X), e(X)] \geq P. \end{array} \right\} \quad (6)$$

式中: $f(X)$ 为优化目标函数; $g(X)$, $e(X)$ 分别为不等式、等式约束; X 为优化变量; $r[\cdot]$ 为可靠度计算; P 为可靠度要求.

2.1 工艺参数可靠性优化模型

2.1.1 优化变量

将主要影响铣削加工过程的主轴转速 n 、刀具进给速度 v 、轴向切深 a_p 、径向切深 f_p 作为优化变量.

2.1.2 优化目标函数

将材料去除率 Q 作为优化目标, 在满足规定条件下, 实现 Q 最大化. 优化目标函数 $f(X)$ 为

$$\min f(X) = Q^{-1} = (va_p f_p)^{-1}. \quad (7)$$

2.1.3 约束条件

在铣削加工过程中, 会受到各种因素的影响, 所以将适当的约束条件考虑到优化模型中是必要的^[15]. 由于加工过程中会出现各种不确定因素, 从而导致工艺参数存在随机性. 因此, 在建立

工艺参数优化模型时,添加相应的可靠性约束条件,可以保证优化结果的可靠性^[16-17].可靠性约束条件为

$$r_i(g_i(\mathbf{X}) \leq 0) \geq P = 0.99, i = 1, 2. \quad (8)$$

式中: r_1, r_2 分别为加工表面质量约束条件与刀具使用寿命约束条件的可靠度; $g_1(\mathbf{X}), g_2(\mathbf{X})$ 分别为加工表面质量约束与刀具使用寿命约束.

1) 加工表面质量约束为

$$g_1(\mathbf{X}) = R_a - R_{a, \max} \leq 0. \quad (9)$$

式中: $R_{a, \max}$ 为允许的最大加工表面粗糙度,其数值为 $3.2 \mu\text{m}$; R_a 为实际加工表面粗糙度,通过第1节建立的铣削表面形貌仿真模型计算获得.

2) 刀具使用寿命约束为

$$g_2(\mathbf{X}) = T_{\min} - T \leq 0. \quad (10)$$

式中: T_{\min} 为允许的最小刀具使用寿命,其数值为 60 min ; T 为刀具使用寿命,表示为^[18]

$$T = \left(\frac{c_v q_v D}{v f_c^{y_v} a_p^{x_v} f_p^{u_v} N^{p_v} k_v} \right)^{\frac{1}{m_v}}. \quad (11)$$

式中: $c_v, q_v, k_v, x_v, y_v, u_v, p_v, m_v$ 为刀具耐用度系数,为常数; D 为刀具直径,mm; f_c 为每齿进给量,mm; f_c 表示为

$$f_c = v/(Nn). \quad (12)$$

2.1.4 优化变量约束

1) 主轴转速约束.主轴转速应介于最小允许主轴转速 n_{\min} 和最大允许主轴转速 n_{\max} 之间,表示为

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}. \quad (13)$$

2) 刀具进给速度约束.刀具进给速度应介于最小允许刀具进给速度 v_{\min} 和最大允许刀具进给速度 v_{\max} 之间,表示为

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}. \quad (14)$$

3) 轴向切深约束.轴向切深应介于最小允许轴向切深 $a_{p, \min}$ 和最大允许轴向切深 $a_{p, \max}$ 之间,表示为

$$a_{p, \min} \leq a_p \leq a_{p, \max}. \quad (15)$$

4) 径向切深约束.径向切深应介于最小允许径向切深 $f_{p, \min}$ 和最大允许径向切深 $f_{p, \max}$ 之间,表示为

$$f_{p, \min} \leq f_p \leq f_{p, \max}. \quad (16)$$

2.2 优化算法

本文采用的优化算法是由Mirjalili等^[19]提出的灰狼优化算法,该算法模拟了灰狼种群的统治等级及其搜寻、包围、攻击猎物的狩猎过程,为了获得最优解,所处位置进行不断地迭代优化,并

在迭代过程中自动调整收敛因子,具有良好的搜索精度与收敛速度.

2.3 可靠性分析

实际工程问题中的可靠性分析常采用蒙特卡罗模拟(MCS)法,但该方法计算量要求很高,非常耗时^[20-21].因此,为了提升计算效率,可以基于克里金(Kriging)模型进行可靠性分析^[22-23].Kriging模型可以近似为随机分布函数与多项式的和.

$$G_k(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{X}) \beta_i + z(\mathbf{X}), k = 1, 2. \quad (17)$$

式中: $G_1(\mathbf{X}), G_2(\mathbf{X})$ 分别为表面粗糙度 R_a 与刀具使用寿命 T 的Kriging模型; $\mathbf{f}(\mathbf{X}) = [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_p(\mathbf{X})]^T$ 为随机向量 \mathbf{X} 的基函数; $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]^T$ 为回归函数待定系数; p 为基函数个数; $z(\mathbf{X})$ 为随机过程函数.

$z(\mathbf{X})$ 的协方差矩阵的分量为

$$\text{cov}[z(\mathbf{x}_a), z(\mathbf{x}_b)] = \sigma^2 [R(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b)]. \quad (18)$$

式中: $R(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b)$ 为任意2个样本点的相关函数,是相关矩阵 \mathbf{R} 的分量; $a, b = 1, 2, \dots, m, m$ 为训练集中的样本量, σ^2 为方差.

表面粗糙度 R_a 与刀具使用寿命 T 的Kriging模型在未知点 \mathbf{x} 处的响应估计值为

$$G_k(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}}), k = 1, 2. \quad (19)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 为 $\boldsymbol{\beta}$ 的估计值; $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 为训练与预测样本点间的相关函数向量; \mathbf{g} 为训练样本的响应值组成的列向量; \mathbf{F} 为由 m 个样本点处的回归模型组成的矩阵.

σ^2 与 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 分别为

$$\sigma^2 = (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}}) / m. \quad (20)$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}. \quad (21)$$

通过上述分析,根据输入的样本变量与输出的响应值分别构建表面粗糙度 R_a 与刀具使用寿命 T 的Kriging模型.

为了减少模型调用次数,提升可靠性分析效率,获得更为准确的预测结果,本文采用自适应Kriging模型-MCS(AK-MCS)方法进行可靠性分析.图3为该方法进行可靠性分析的流程图.

1) 基于MCS方法在输入变量的样本空间生成样本池 \mathbf{S} .

2) 随机抽取样本池 \mathbf{S} 中的 N_0 组初始样本,并将这些初始样本分别代入相应的功能函数中计算功能函数值,从而获得初始训练集 T_0 .

3) 利用初始训练集 T_0 构建初始Kriging模型.

4) 基于初始 Kriging 模型计算样本池 S 中所有样本的 U 学习函数的值, 从而确定下一个需要更新的样本.

5) 验证能否满足 Kriging 自主学习过程的停止准则. 如果满足, 学习过程终止, 对可靠度进行计算; 如果不满足, 扩大初始样本的数量, 对初始 Kriging 模型进行更新.

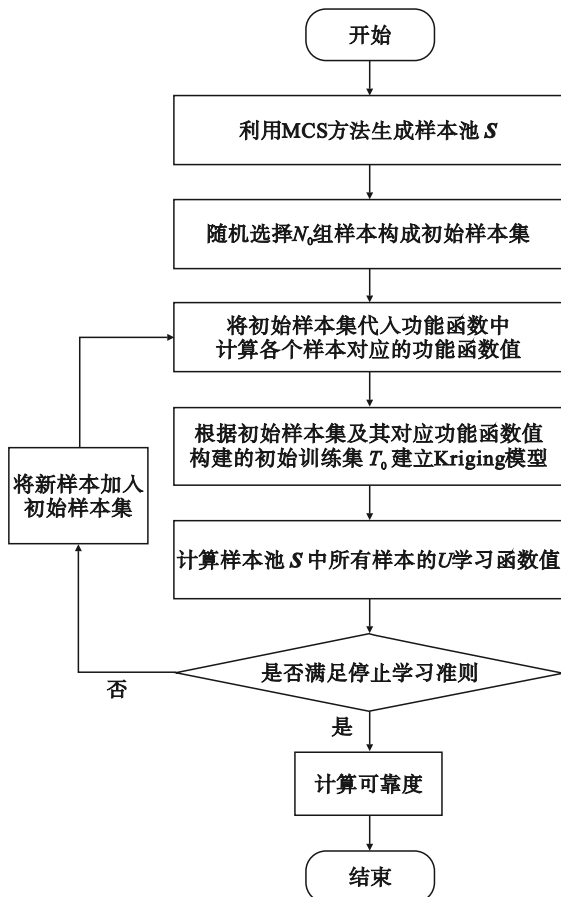


图3 基于 AK-MCS 方法的可靠性分析流程

Fig. 3 Reliability analysis process based on the AK-MCS method

3 模型验证与可靠性优化

3.1 铣削表面形貌仿真

基于第 1 节建立的仿真模型对铣削后的表面形貌进行仿真, 仿真参数如表 1 所示. 采用表面粗糙度 R_a 作为衡量加工表面质量的表征参数. 基于仿真的铣削表面形貌对加工表面粗糙度 R_a 进行计算, 计算公式为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (22)$$

式中: l 为采样区间长度; $Z(x)$ 为采样点与基准线的高度差.

表 1 仿真参数

组别	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$v/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	a_p/mm	f_p/mm
1	500	100	0.5	0.5
2	500	200	0.3	0.7
3	500	200	0.5	0.7
4	500	250	0.5	0.5
5	1 000	100	0.5	0.7
6	1 000	200	0.3	0.5
7	1 000	200	0.5	0.5
8	1 000	200	0.5	0.7

3.2 实验验证

为了验证仿真模型的准确性, 利用数控铣削中心 VMC 850Q 进行铣削实验, 根据数控铣削中心性能阈值以及生产加工经验, 确定加工参数范围如表 2 所示. 通过实验测量获得刀具装夹后的跳动偏移量为 $5 \mu\text{m}$, 跳动偏移位置角为 60° . 工件材料是淬硬钢 Cr12MoV. 刀具是直径为 10 mm , 螺旋角为 30° 的 2 刃钨钢球头铣刀. 实验参数与表 1 的仿真参数一致. 考虑到加工过程中的刀具磨损, 每完成 1 组实验更换 1 次铣刀. 加工完成后, 利用 OLYMPUS 光学数码显微镜 DSX510 观测加工表面形貌, 并测量间歇进给方向上的表面粗糙度 R_a . 实验装置如图 4 所示.

表 2 加工参数范围

$n/(r \cdot \min^{-1})$	$v/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	a_p/mm	f_p/mm
500~2 000	50~250	0.1~0.7	0.3~0.7

这里选取第 1, 2, 5, 8 组参数进行实验与仿真对比, 通过图 5 可以看出实验与仿真的铣削表面形貌轮廓变化趋势基本一致. 同时, 比较了间歇进给方向上的表面粗糙度, 如表 3 所示. 表面粗糙度最大预测误差为 10.37% , 平均预测误差为 6.76% . 因此, 基于仿真表面形貌预测获得的 R_a 可以较为准确地反映实际加工表面的粗糙程度. 所产生的预测误差可能是未考虑刀具与工件的变形、振动等因素导致的. 此外, 基于 Z-MAP 算法仿真第 1, 2, 5, 8 组表面形貌所需时间分别为 $10.062, 4.133, 8.085, 4.231 \text{ s}$. 因此, 综合上述分析可得, 所建立的仿真模型具有较好的预测精度, 仿真结果符合实际加工情况, 并且所采用的仿真算法具有较高的计算效率.

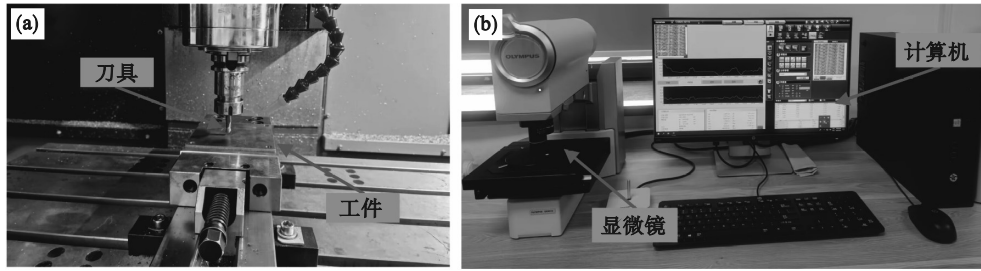


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

(a)—数控铣削中心; (b)—光学数码显微镜.

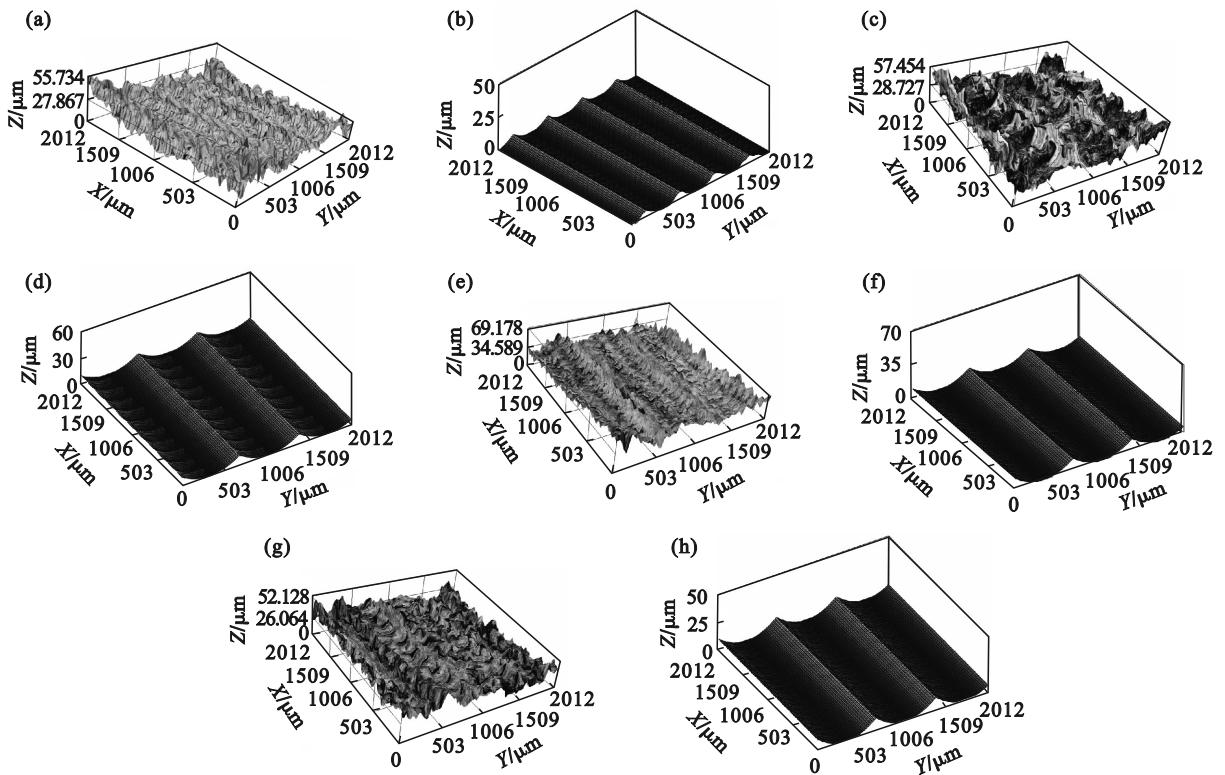


图 5 实验与仿真的铣削表面形貌对比

Fig. 5 Comparison of milling surface morphology between experiment and simulation

(a)—第 1 组实验结果; (b)—第 1 组仿真结果; (c)—第 2 组实验结果; (d)—第 2 组仿真结果;
(e)—第 5 组实验结果; (f)—第 5 组仿真结果; (g)—第 8 组实验结果; (h)—第 8 组仿真结果.

表 3 仿真与实验的表面粗糙度对比
Table 3 Comparison of surface roughness between simulation and experiment

组别	表面粗糙度/ μm		相对误差/%
	仿真值	实验值	
1	1.581	1.764	10.37
2	3.062	3.252	5.84
5	2.912	2.723	6.94
8	2.954	2.844	3.87

3.3 工艺参数优化结果及分析

通过对比仿真与实验的铣削表面粗糙度 R_a 验证了预测结果的准确性,因此可以基于仿真的铣削表面形貌计算加工表面粗糙度 R_a ,从而进行

工艺参数的可靠性优化.为了突出可靠性优化方法的效果,采用确定性优化方法开展优化研究,两种方法的优化结果如表 4 所示.

从表 4 能够明显看出,对工艺参数进行确定性优化后,材料去除率显著提升,从 $9.0 \text{ mm}^3/\text{min}$ 增加至 $85.3417 \text{ mm}^3/\text{min}$,但加工表面质量与刀具使用寿命的可靠性约束条件无法满足要求.其中,加工表面质量约束条件的可靠度更是低至 0.4012.对工艺参数进行可靠性优化后,材料去除率虽然只由 $9.0 \text{ mm}^3/\text{min}$ 增加至 $53.0889 \text{ mm}^3/\text{min}$,但是加工表面质量与刀具使用寿命的可靠性约束条件均满足要求,尤其是加工表面质量约束条件

表 4 优化结果对比
Table 4 Comparison of optimization results

参数类型	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	a_p/mm	f_p/mm	r_1	r_2	$Q/(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
初始参数	500.0	100.0	0.3	0.3	—	—	9.0
确定性优化参数	1 389.142 4	247.817 9	0.695 0	0.495 5	0.401 2	0.985 7	85.341 7
可靠性优化参数	1 309.957 5	187.109 4	0.639 9	0.443 4	0.996 3	1.000 0	53.088 9

的可靠度有了大幅度提升.

3.4 可靠性优化结果验证

为了展现可靠性优化的结果,分别利用初始参数、确定性优化参数、可靠性优化参数进行铣削实验,分析3组参数对应的加工表面形貌.由图6可见,初始参数对应的加工表面形貌存在明显

的挤压摩擦痕迹,加工表面粗糙,而确定性优化参数与可靠性优化参数对应的加工表面形貌,几乎不存在挤压摩擦痕迹,加工表面质量整体较好.相比较而言,可靠性优化参数对应的加工表面形貌更精细,表面光滑度更好.综上可知,本文的可靠性优化结果是可行的,可靠性优化效果较好.

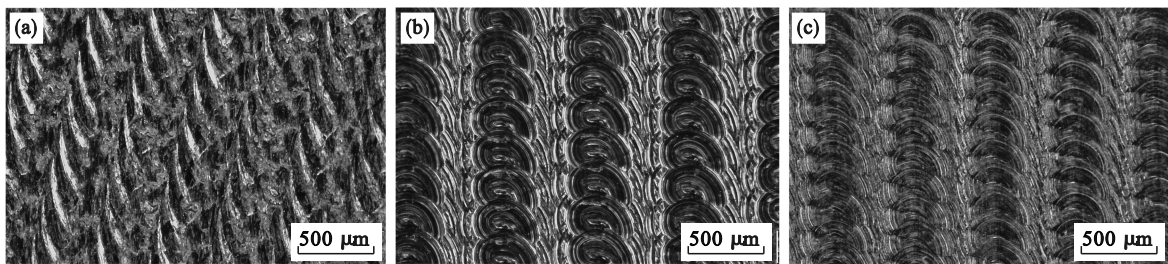


图 6 不同加工参数条件下铣削表面形貌对比

Fig. 6 Comparison of milling surface morphology under different processing parameter conditions

(a)—初始参数; (b)—确定性优化参数; (c)—可靠性优化参数.

4 结 论

1) 基于球头铣刀切削刃的运动轨迹方程,利用Z-MAP算法对铣削表面形貌进行了仿真.

2) 通过对比实验与仿真的铣削表面形貌与加工表面粗糙度,验证了所建立表面形貌仿真模型的准确性.模型的仿真结果符合实际加工情况,并且所采用的仿真算法具有较高的计算效率.

3) 以最大化材料去除率为优化目标,将加工表面质量、刀具使用寿命的极限状态作为约束条件,完成了主轴转速、刀具进给速度、轴向切深、径向切深4个工艺参数的可靠性优化.通过对比可靠性优化与确定性优化的结果,证实了可靠性优化方法的优越性.最后,通过比较初始参数、确定性优化参数、可靠性优化参数对应的铣削表面形貌,验证了可靠性优化结果的有效性.

参考文献:

[1] Miao H H, Li C Y, Liu C S, et al. Machined surface prediction and reliability analysis in peripheral milling operations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 272: 109193.

[2] Ding P F, Huang X Z, Zhang X W, et al. Reliability optimization of micro-milling cutting parameters using slime mould sequence algorithm [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2022, 119: 102575.

[3] Imani B M, Elbestawi M A. Geometric simulation of ball-end milling operations [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, 123(2): 177-184.

[4] 谭刚. 球头铣削切削力建模与加工表面形貌仿真研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
(Tan Gang. Study on the cutting force modeling and machined surface topography simulation in ball-end milling process [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.)

[5] Xu J T, Zhang H, Sun Y W. Swept surface-based approach to simulating surface topography in ball-end CNC milling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98: 107-118.

[6] Zhou R H, Chen Q L. An analytical prediction model of surface topography generated in 4-axis milling process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(9/10): 3289-3299.

[7] Jia S, Wang S, Zhang N, et al. Multi-objective parameter optimization of CNC plane milling for sustainable manufacturing [EB/OL]. [2023-06-23]. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24908-3>.

[8] 郭斌, 岳彩旭, 张安山, 等. 面向表面粗糙度约束的铣削过程参数优化 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2023, 28(1): 20-28.
(Guo Bin, Yue Cai-xu, Zhang An-shan, et al. Parameter optimization of milling process for surface roughness

- constraints[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2023, 28(1): 20–28.)
- [9] 张昱, 张昌明. AerMet100超高强度钢铣削表面质量与参数优化[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(5): 5–10. (Zhang Yu, Zhang Chang-ming. Milling surface quality and parameter optimization of AerMet100 ultra-high strength steel [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(5): 5–10.)
- [10] Wu T Y, Lin C C. Optimization of machining parameters in milling process of inconel 718 under surface roughness constraints[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2137.
- [11] Kumar S, Saravanan I, Patnaik L. Optimization of surface roughness and material removal rate in milling of AISI 1005 carbon steel using Taguchi approach [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22: 654–658.
- [12] 黄贤振, 孙良仕, 丁鹏飞, 等. 基于可靠性的GH4169车削参数优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(5): 696–702. (Huang Xian-zhen, Sun Liang-shi, Ding Peng-fei, et al. Optimization of turning parameters of GH4169 based on reliability [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2022, 43(5): 696–702.)
- [13] Zhou Y D, Tian Y L, Jing X B, et al. Surface topography modeling and roughness extraction in helical milling operation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 4561–4571.
- [14] Wang X, Jiang Z Y, Huang X Z, et al. Surface topography prediction and reliability analysis of ball end milling [J]. *Measurement*, 2025, 242: 115770.
- [15] Ding P F, Huang X Z, Li Y X, et al. Reliability optimization of cutting parameters considering the diameter error of slender shaft [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35: 4673–4683.
- [16] Liu H Z, Huang X Z, Jiang Z Y, et al. Reliability-based design optimization scheme of isolation capacity of nonlinear vibration isolators [J]. *Engineering Structures*, 2024, 300: 117220.
- [17] Jiang Z Y, Huang X Z, Wang B X, et al. Time-dependent reliability-based design optimization of main shaft bearings in wind turbines involving mixed-integer variables [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 243: 109817.
- [18] Ding P F, Huang X Z. Sustainable optimization of micro-milling machining parameters considering reliability assessment [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2025, 53(2): 864–901.
- [19] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46–61.
- [20] Zheng Z Q, Miao X L, Huang X Z, et al. Fastening reliability analysis of bolted joint anti-self-loosening [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 202: 107776.
- [21] 黄贤振, 于瑞, 姜智元, 等. 考虑热误差的电主轴建模与可靠性全局灵敏度分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(5): 675–682. (Huang Xian-zhen, Yu Rui, Jiang Zhi-yuan, et al. Modeling and reliability global sensitivity analysis of motorized spindles considering thermal errors [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2024, 45(5): 675–682.)
- [22] Jiang Z Y, Huang X Z, Chang M X, et al. Thermal error prediction and reliability sensitivity analysis of motorized spindle based on Kriging model [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105558.
- [23] Miao H H, Li C Y, Liu C S, et al. Nonlinear chatter and reliability analysis of milling Ti-6Al-4V with slender ball-end milling cutter [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 217: 111534.