

基于多目标优化的微铣削表面粗糙度检测指标研究

李文琴,许金凯,于化东,张向辉,刘启蒙,于占江
(长春理工大学跨尺度微纳制造教育部重点实验室,长春 130022)

[摘要] 针对微铣削表面形貌复杂而难以准确评价的问题,提出了一种基于三维表征的表面粗糙度检测指标。首先,在主成分分析的基础上,基于灰色关联分析方法将表征意义不同的三维表面粗糙度参数 S_a 、 S_{sk} 和 S_{ku} 转化为单一的灰色关联度作为表面粗糙度检测指标;其次,利用响应曲面法建立灰色关联度模型,分析工艺参数对灰色关联度的影响规律;最后,获取最优工艺参数组合并进行验证。结果表明,灰色关联度模型的平均相对误差为 6.54%,拟合精度高,预测效果好,验证了模型的有效性;获取的最优工艺参数组合对应的灰色关联度提高了 15.27%,实现了表面粗糙度和表面异常特征最小化的目的,证明了检测指标的可行性。

关键词: 表面微加工;多目标优化;灰色关联分析;响应曲面法;三维表面粗糙度;表面粗糙度检测指标

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.066



李文琴

硕士研究生,研究方向为精密传感与测试技术。

微铣削加工技术是微制造业的一种先进制造技术,具有可加工三维微小复杂零件的优势,广泛应用于航空航天领域中^[1-2]。相较于常规铣削,微

铣削对表面质量的要求更加严格,因刀具和工件尺寸缩小及切削厚度减小引起的尺寸效应,表面质量更难控制。因此,微铣削条件下对加工表面形貌进行准确地检测具有重要意义。

表面粗糙度是加工表面质量检测的重要衡量指标,直接影响零件的工作精度、耐腐蚀性和耐磨性等^[3]。近年来,国内外学者对微铣削表面粗糙度的评价和优化进行了大量研究。高奇等^[4]设计了正交试验对单晶高温合金的微铣削表面粗糙度进行研究,基于极差分析得到工艺参数对表面粗糙度 R_a 的影响主次因素,并获得工艺参数的优化组合,实现表面粗糙度优化。Kuram 等^[5]针对 Ti6Al4V 合金和 Inconel 718 两种材料,采用田口试验设计方法确定了表面粗糙度的最佳微铣削条件,优化了表面粗糙度。但由于在微铣削的

实际加工过程中工艺参数对表面形貌的影响不同,导致表面出现异常特征,从而使加工表面高度呈现非高斯分布。因此,使用单一的参数对表面粗糙度进行检测不够准确,选择多个合适的参数能够使检测更为全面。目前常见的多为粗糙度与其他加工因素的多目标优化,以实现响应目标的优化。Lu 等^[6]利用田口法和回归分析在 Inconel 718 微铣削过程中基于遗传算法获得了最大材料去除率和最小表面粗糙度多目标优化的最佳切削参数。Thepsonthi 等^[7]利用有限元分析和数学建模,基于多目标粒子群优化方法寻找 Ti-6Al-4V 合金微端铣削刀具路径和工艺参数的最优解,实现表面粗糙度的优化。Beruvides 等^[8]利用微铣削过程中产生的振动信号预测表面粗糙度,采用自适应神经模糊推理系统模型对表

面粗糙度进行建模,使用多目标遗传算法针对单位加工时间和粗糙度进行了多目标优化。

二维表面粗糙度广泛地用于科学分析和工程实践中,但已经不能满足技术发展对表面形貌信息检测的需求。表面粗糙度的表征逐渐由二维向三维发展,轮廓算数平均偏差 S_a 、表面偏斜度 S_{sk} 和表面峭度 S_{ku} 分别为 R_a 、 R_{sk} 和 R_{ku} 在三维的扩展,其中 S_a 具有望小特性,即 S_a 越小表面质量越好,而表面偏斜 S_{sk} 和 S_{ku} 具有望目特性,即当 S_{sk} 为 0、 S_{ku} 为 3 时为高斯表面,表面无异常特征。本文以 S_a 、 S_{sk} 和 S_{ku} 为研究对象,基于灰色关联分析法和响应曲面法(Response surface methodology, RSM)将多目标参量转化为灰色关联度(Grey correlational grade, GRG)作为表面粗糙度检测指标,分析了微铣削过程中的主要工艺参数对灰色关联度的影响规律,构建灰色关联度模型,对工艺参数进行了优化,对检测指标进行验证。

试验及方法

1 试验设备及材料

试验在 Mikron MILL P 900 高性能加工中心进行,微铣削加工的材料为常用于航空航天工业的 7075 铝合金,工件体积参数为 $16\text{mm} \times 16\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。为了避免刀具磨损的影响,每组试验均使用全新的刀具,刀具选用直径为 1mm 的双刃硬质合金端铣刀,螺旋角为 30° ,切削方式为干切削。微铣削加工过程如图 1 所示。

三维表面粗糙度的确定使用法国 STIL 光谱共焦显微镜,量程为 $130\mu\text{m}$,横向分辨率为 $0.1\mu\text{m}$,纵向分辨率为 35nm 。

2 试验方案

响应曲面法涉及数学方法和统计方法,用于试验的设计和分析,优化多变量响应^[9-11]。Box-Behnken

Design (BBD)方法是最常用的响应曲面优化法之一。本文选用了主要加工工艺参数即主轴转速 n 、进给速度 v_f 、轴向切深 a_p 和径向切深 a_e ,根据 BBD 法的要求设计了 4 因素 3 水平试验,试验水平分布见表 1,试验参数安排及三维表面粗糙度见表 2。

图 2 所示为表 2 中第 2、1、4 组试验的加工表面形貌,分别记为表面 1、表面 2、表面 3。表面 3 相对于表面 1 和表面 2 其进给速度增大,即每齿进给量增加,比较图 2 可以明显看出表面 3 的刀具轨迹更为清晰,同时导致表面整体的微细毛刺较大,3 个三维表面粗糙度参数显著增大。表面 1 相对于表面 2 和表面 3 其轴向切深增大,导致刀具颤振加剧,表面不规整的微细毛刺增多,从而使 S_a 、 S_{sk} 、 S_{ku} 均增大,降低表面质量。表面 1、表面 2、表面 3 的径向切深依次增大,刀痕重叠率相应依次降低,残留高度相应增大,则 S_{sk} 减小而 S_a 和 S_{ku} 增大。由于工艺参数对粗糙度影响大小不同以及耦合影响的作用,粗糙度变化规律复杂,检测难度增加。

3 多目标优化方法

灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分,通过分析因素之间的发展趋势来衡量因素间的关联程度,用于分析事物之间的不确定性关联^[12]。基本思路为通过比较确定的参考数据序列和比较序列之间几何形状的相似程度,基于灰色关联度来描述两个因素之间的关联程度。多目标优化使用基于主成分分析的灰色关联分析方法,具体过程如下:

(1) 记 $x_i^0(k)$ 为第 k 个指标的

i 个参数,其中 $i=1,2, \dots, m; k=1,2, \dots, n$ 。由于因素的量纲不同或数量级相差较大,不便做比较或比较结果不准确,为了消除这种影响,对原始数据做标准化处理得到序列 $x_i^*(k)$,其中具有望小特性和望目特性的因素分别按照式(1)和式(2)进行处理。

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max |x_i^0(k) - x_0^0(k)| - |x_i^0(k) - x_0^0(k)|}{\max |x_i^0(k) - x_0^0(k)| - \min |x_i^0(k) - x_0^0(k)|} \quad (2)$$

(2) 选取每个粗糙度参数的理想值组成参考序列 $x_0^*(k)$,标准化后的序列作为比较序列。

(3) 灰色关联系数表征的是参考序列和比较序列的关联程度,根据式(3)计算灰色关联系数。

$$\gamma(x_0^*(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \lambda \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中, $\Delta_{0i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)|$, 为两序列对应点的绝对差值; $0 < \lambda(x_0^*(k), x_i^*(k)) \leq 1$, $\lambda \in [0, 1]$, 为分辨系数; Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 分别为 $\Delta_{0i}(k)$ 的最大值和最小值。

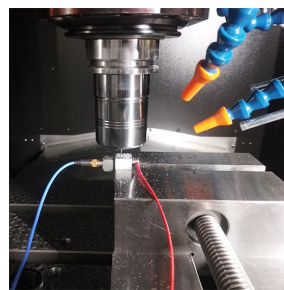


图1 微铣削加工现场图
Fig.1 Machining scene of micro-milling

表1 试验参数水平分布

Table 1 The level of experimental parameters

水平	主轴转速 n ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度 v_f ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	轴向切深 a_p μm	径向切深 a_e mm
1	8000	100	20	0.1
2	12000	200	40	0.3
3	16000	300	60	0.5

(4) 主成分分析是一种非线性降维方法^[13],能够分析各个变量因素对响应目标的贡献率。对灰色关联系数进行主成分分析,通过主成分分析法量化分析粗糙度对灰色关联度的影响权重。

(5) 灰色关联度是灰色关联系数的加权和,是综合评价的结果。根据式(4)计算灰色关联度:

$$\xi(x_0^*, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k \gamma(x_0^*(k), x_i^*(k)) \quad (4)$$

式中, β_k 为第 k 个响应变量的权重, $\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$ 。

结果与讨论

1 多目标优化结果

对表2中的试验数据进行前文中的多目标优化转换。经主成分分析得到粗糙度参数 S_a 、 S_{sk} 和 S_{ku} 对灰色关联度的响应权重分别为 0.479644045、0.296122676 和 0.224233279,根据响应权重将3个三维表面粗糙度参数进行加权和计算,转换为单一的表面粗糙度检测指标即 GRG 以进行灰色关联度模型的建立,计算结果见表2。

2 灰色关联度模型建立

设计参数与目标响应之间的关系是 RSM 通过回归分析方法得到的,通常采用二阶回归模型来表示。本文基于 RSM 建立了加工参数与灰色关联度之间的映射关系,灰色关联度模型见式(5)。

表2 试验参数安排及结果

Table 2 Arrangement of experimental parameters and results

序号	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p/\mu\text{m}$	a_e/mm	$S_a/\mu\text{m}$	S_{sk}	S_{ku}	GRG
1	12000	200	40	0.3	0.1319	-0.3572	4.9002	0.5014
2	12000	200	60	0.1	0.1535	-0.2840	4.5977	0.4885
3	8000	300	40	0.3	0.2039	-0.3325	3.3956	0.4877
4	12000	300	40	0.5	0.1779	0.3431	5.2174	0.4209
5	16000	200	40	0.5	0.1154	0.3008	6.6577	0.5220
6	12000	200	20	0.1	0.1129	-0.4805	4.0162	0.5677
7	8000	100	40	0.3	0.1167	-0.2565	4.4329	0.5844
8	8000	200	40	0.5	0.1625	0.2511	4.8916	0.4747
9	12000	300	60	0.3	0.1431	-0.2886	3.7861	0.5456
10	16000	200	60	0.3	0.1088	-0.0872	3.9411	0.7143
11	12000	100	40	0.5	0.1359	0.2250	5.5035	0.5132
12	16000	100	40	0.3	0.0795	-0.1418	5.0015	0.7904
13	12000	300	40	0.1	0.1755	-0.2750	4.0054	0.4876
14	12000	300	20	0.3	0.1261	-0.2608	4.3751	0.5594
15	12000	100	60	0.3	0.1285	-0.3539	4.6166	0.5198
16	12000	100	20	0.3	0.1177	-0.3679	4.6654	0.5439
17	8000	200	20	0.3	0.1297	-0.3943	3.1034	0.6118
18	12000	200	40	0.3	0.1419	-0.2346	4.9964	0.5111
19	8000	200	60	0.3	0.1886	-0.1668	3.2058	0.5761
20	12000	200	40	0.3	0.1849	-0.1694	4.7566	0.4829
21	12000	100	40	0.1	0.1130	-0.2880	3.8436	0.6167
22	12000	200	60	0.5	0.1852	0.2544	4.9169	0.4452
23	16000	200	20	0.3	0.0888	-0.0938	3.9496	0.8002
24	12000	200	40	0.3	0.1844	-0.5455	5.7228	0.3679
25	12000	200	20	0.5	0.1438	0.2670	4.3236	0.5215
26	16000	200	40	0.1	0.1139	-0.0200	3.9213	0.7585
27	16000	300	40	0.3	0.1121	-0.0367	3.7124	0.7600
28	12000	200	40	0.3	0.1576	-0.2746	4.5102	0.4882
29	8000	200	40	0.1	0.1323	-0.1197	3.6970	0.6422

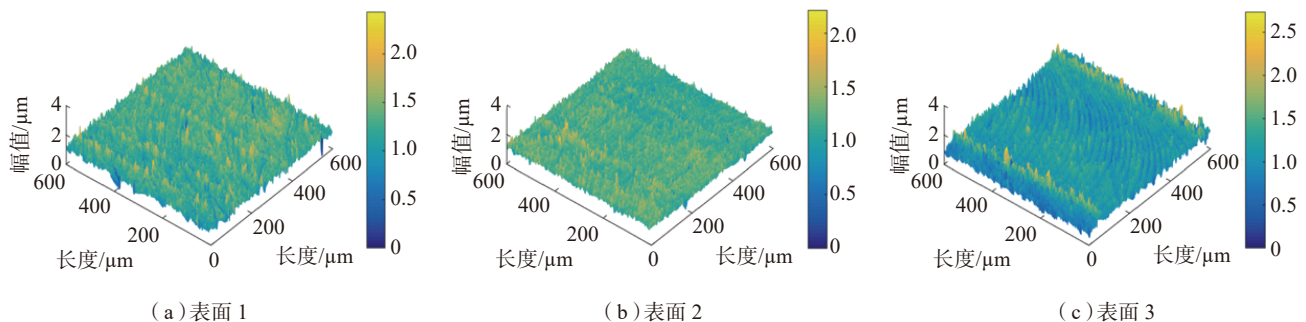


图2 部分试验加工表面形貌

Fig.2 Machined surface morphology of several experiments

方差分析可以检验回归模型的显著性及失拟情况,从而建立模型的拟合精度^[14]。表3对基于RSM建立的灰色关联度模型进行了方差分析。 P 值表示信度,模型的 P 值小于0.05,而失拟项的 P 值大于0.05,即模型显著而其失拟项不显著,表明所建回归模型拟合较好,模型可靠。图3比较了实测计算值与模型预测值,平均相对误差为6.54%,拟合误差较小,精度较高;图4为拟合模型的残差概率分布图,所有残差点均在直线附近波动,无明显异常点。因此,基于RSM建立的回归模型可作为灰色关联度模型。

$$GRG = 2.04975 - 1.98555 \times 10^{-4}n - 2.43111 \times 10^{-3}v_f - 8.79141 \times 10^{-3}a_p + 0.020472a_e + 4.14212 \times 10^{-8}n \cdot v_f - 1.56989 \times 10^{-7}n \cdot a_p - 2.15574 \times 10^{-5}n \cdot a_e + 1.29839 \times 10^{-6}v_f \cdot a_p + 4.59546 \times 10^{-4}v_f \cdot a_e + 1.81101 \times 10^{-4}a_p \cdot a_e + 9.29979 \times 10^{-9}n^2 + 3.72088 \times 10^{-6}v_f^2 + 1.13116 \times 10^{-4}a_p^2 - 0.22914 \times 10^{-7}a_e^2 \quad (5)$$

3 影响规律分析

主效应分析可以度量1个或多个因子在各水平上对响应的大小^[15]。利用主效应分析研究微铣削工艺参数对GRG的影响,结果如图5所示,其中横轴为单因素的多水平,纵轴为响应即GRG数值,水平实线表示响应平均值。

由图5可知,主轴转速和径向切深的变化幅度较大,表明主轴转速和径向切深对GRG的影响较大,而进给速度和轴向切深对GRG的影响相对较小。其中,GRG随着进给速度、轴向切深和径向切深的增大均呈减小的趋势,因此,GRG在高主轴转速、低进给速度、低轴向切深和低径向切深处更大,表面质量更优。除此之外,由表3的方差分析结果可知,主轴转速和径向进给的 P 值小于0.05,对灰色关联度的影响显著,而进给速度和轴向进给的 P 值大于0.05,对灰色关联度的影响不显著; F 值用来评估组间差异, F 值越大,工

艺参数对灰色关联度影响越大,故工艺参数对灰色关联度的影响大小顺序为:主轴转速>径向进给>轴向进给>进给速度。

GRG模型进行方差分析后得到各工艺参数耦合因素的 F 值,如图6所示,可以直观地比较 F 值的大小, F 值越大,耦合作用越显著,则工艺参数间耦合作用对灰色关联度的影响大小顺序为: $n-a_e > n-v_f > n-a_p > v_f-a_e > v_f-a_p > a_p-a_e$ 。

由于进给速度对GRG的影响最小,固定进给速度作为第四维绘制GRG与微铣削工艺参数相关的响应轮廓如图7所示。

观察图7可知,由于进给速度对GRG的影响相较于本文其他工艺参数较小,当进给速度取不同水平时,响应轮廓呈现出相似的变化趋势。当主轴转速与轴向切深耦合作用、主轴转速与径向切深耦合作用、轴向切深与径向切深耦合作用时,随着工艺参数的共同增加,GRG均先减小后

表3 GRG模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of GRG model

项目	模型	n	v_f	a_p	a_e	失拟项
平方和	0.29	0.078	7.858×10^{-3}	8.262×10^{-3}	0.037	0.038
均方	0.021	0.078	7.858×10^{-3}	8.262×10^{-3}	0.037	3.834×10^{-3}
F 值	5.62	21.07	2.12	2.23	9.90	1.13
P 值	0.0013	0.0004	0.1676	0.1580	0.0071	0.4937

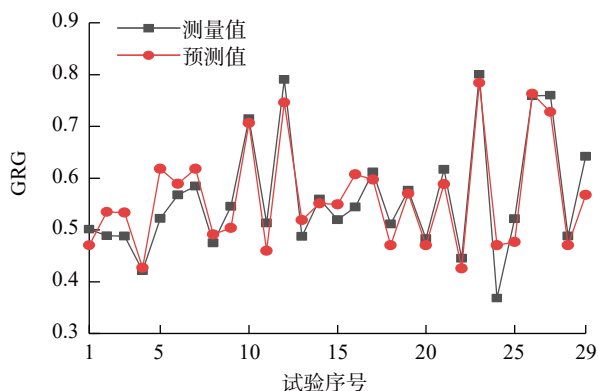


图3 实测计算值和模型预测值的比较

Fig.3 Comparison of actual measured values and model predicted values

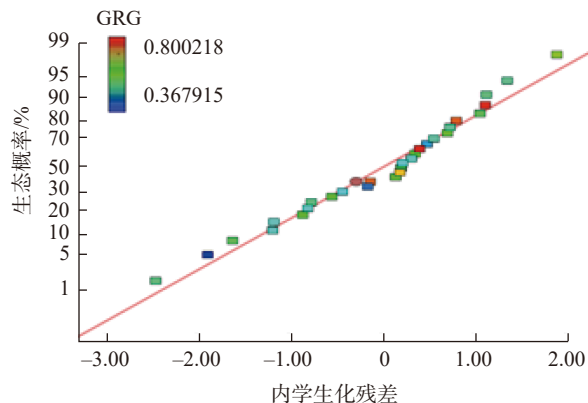


图4 模型的残差概率分布图

Fig.4 Residual probability distribution of model

增大。当工艺参数全因素耦合时, GRG 的最大值出现在高主轴转速、低进给速度、低轴向切深和低径向切深处, 而 GRG 的最小值出现在中主轴转速、中进给速度、中轴向切深和高径向切深处。从整体看, 低进给速度时 GRG 值更大, 响应更优。

4 最优表面粗糙度预测

利用 Design-Expert 软件选择具有最高满意度值的过程条件组合作为响应的最佳条件, 并找到最优目标响应。本文的最优目标响应为最大的 GRG 值。图 8 为 GRG 的最优目

标响应及其工艺参数条件。最佳工艺参数条件为: 主轴转速=15983.89r/min, 进给速度=100mm/min, 轴向切深=20.12 μ m, 径向切深=0.1mm; 最优目标响应为: GRG=0.903625, 优于表 2 所示试验的最大 GRG 值, 即第 23 组试验的 GRG 值。

5 试验验证

为了验证模型预测的最优工艺参数水平的可靠性和有效性, 选择设计试验中最优的试验参数组合即表 2 中第 23 组作为初始试验, 前文中的预测的最优参数组合作为对比试验,

比较两组试验的 GRG 值, 对优化结果进行验证, 结果见表 4。结果表明, 验证试验的预测 GRG 值则比初始试验预测值增加了 0.1197, 验证试验的测量 GRG 值相较于初始试验测量值增加了 0.1103, 表明预测模型所得最优目标响应优于初始试验结果, 优化结果相对于初始试验参数组合提高了 15.27%, 即 GRG 模型可用于优化微铣削工艺参数组合, 实现更理想的表面粗糙度, 证明了 GRG 作为粗糙度检测指标对表面粗糙度能够进行更全面地评价。

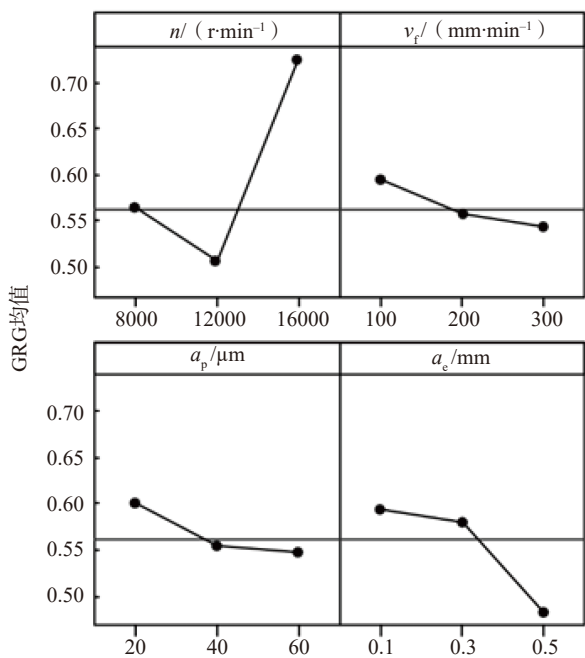


图5 GRG主效应图
Fig.5 Main effect on GRG

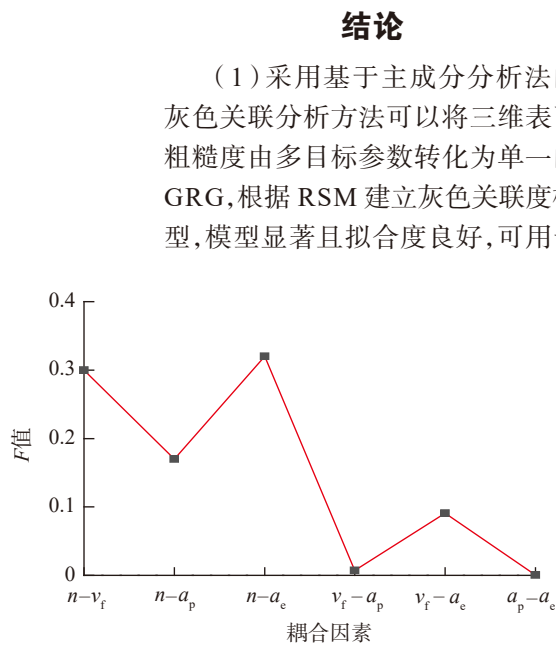


图6 工艺参数耦合作用的F值
Fig.6 F value of coupling effect of machining parameters

结论

(1) 采用基于主成分分析法的灰色关联分析方法可以将三维表面粗糙度由多目标参数转化为单一的 GRG, 根据 RSM 建立灰色关联度模型, 模型显著且拟合度良好, 可用于

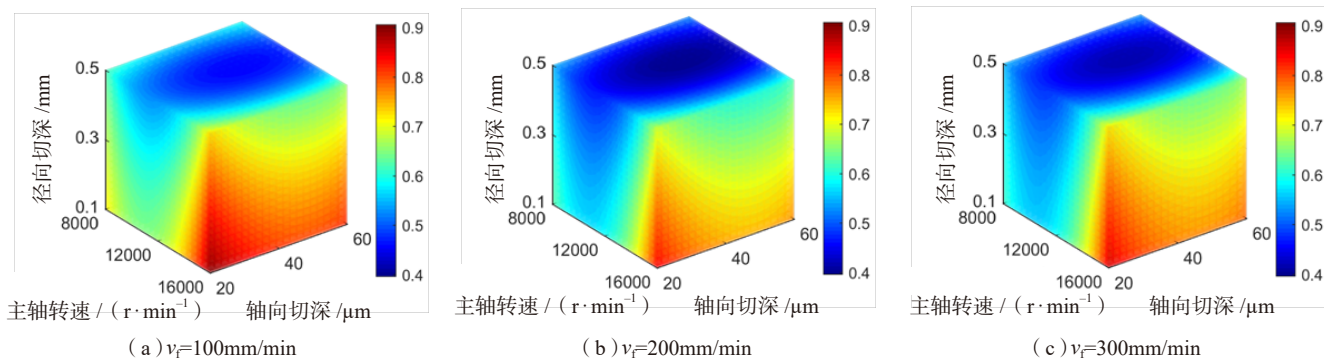


图7 GRG与微铣削工艺参数相关的响应轮廓
Fig.7 Response profile of GRG related to micro-milling machining parameters

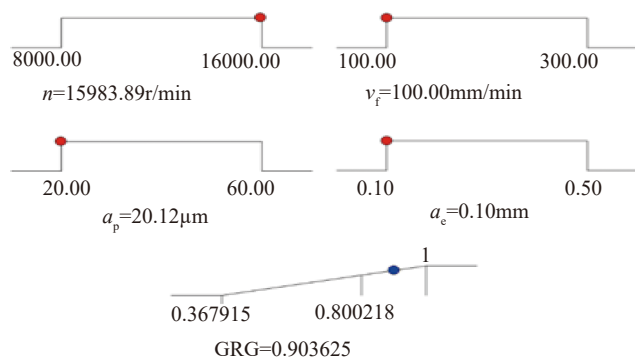


图8 最优工艺参数组合及目标响应

Fig.8 Optimal machining parameter combination and target response

表4 验证试验结果

Table 4 Results of validated experiments

试验	预测 GRG 值	测量 GRG 值	相对误差 /%
初始试验	0.7839	0.8002	-2.0370
对比试验	0.9036	0.9105	-0.7578

表面粗糙度优化分析。

(2) 通过灰色关联度的主效应分析和灰色关联度模型的方差分析, 微铣削工艺参数对灰色关联度的影响大小顺序为主轴转速 > 径向进给 > 轴向进给 > 进给速度; 通过 GRG 响应轮廓的分析掌握了工艺参数耦合作用对 GRG 的影响规律。

(3) 灰色关联度模型优化了微铣削工艺参数组合, 实现了表面粗糙度和表面异常特征最小化, 验证了该粗糙度检测指标比单一的粗糙度参数对表面的评价更理想, 证明了该粗糙度检测指标的有效性和可行性。

参考文献

[1] KURAM E, OZCELIK B. Micro milling[M]//Materials Forming, Machining and Tribology. Heidelberg: Springer, 2014.

[2] 孙树峰, 章钦栋, 黄克, 等. 基于灰色关联度分析法的微铣削毛刺研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2036-2040.

SUN Shufeng, ZHANG Qindong, HUANG Ke, et al. Research on micro milling burr based on grey correlation analysis method[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15): 2036-

2040.

[3] VIPINDAS K, KURIACHEN B, MATHEW J. Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5-8): 1207-1222.

[4] 高奇, 巩亚东, 周云光. 单晶 Ni₃Al 基高温合金微铣削表面粗糙度试验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 801-804.

GAO Qi, GONG Yadong, ZHOU Yunguang. Experimental study on surface roughness in micro-milling of single crystal Ni₃Al-based superalloy[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(6): 801-804.

[5] KURAM E, OZCELIK B. Optimization of machining parameters during micro-milling of Ti6Al4V titanium alloy and Inconel 718 materials using Taguchi method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(2): 228-242.

[6] LU X, WANG F, XUE L, et al. Investigation of material removal rate and surface roughness using multi-objective optimization for micro-milling of inconel 718[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(6): 787-794.

[7] THEPSONTHI T, ÖZEL T. An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 57-75.

[8] BERUVIDES G, CASTANO F, QUIZA R, et al. Surface roughness modeling and optimization of tungsten-copper alloys in micro-milling processes[J]. Measurement, 2016, 86: 246-252.

[9] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[M]//Springer Series in Statistics. New York: Springer, 1992: 270-310.

[10] SINDHU D, THAKUR L, CHANDNA P. Parameter optimization of rotary ultrasonic machining on quartz glass using response surface methodology (RSM)[J]. Silicon, 2020, 12(3): 629-643.

[11] 杜华鹏, 陈杰, 郭东亮, 等. 基于响应表面法的钛合金零件磨抛加工工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 79-83.

DU Huapeng, CHEN Jie, GUO Dongliang, et al. Research on RSM-based process parameter optimization of titanium alloy surface polishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 79-83.

[12] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987.

DENG Julong. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1987.

[13] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.

ZHANG Peng. Comprehensive evaluation research based on principal component analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.

[14] LARSON M G. Analysis of variance[J]. Circulation, 2008, 117(1): 115-121.

[15] 史国宏, 陈勇, 杨雨泽, 等. 白车身多学科轻量化优化设计应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 110-114.

SHI Guohong, CHEN Yong, YANG Yuze, et al. BIW architecture multidisciplinary light weight optimization design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 110-114.

通讯作者: 于占江, 讲师, 硕士, 研究方向为精密传感与测试技术, E-mail: 13514310244@163.com。

Research on Surface Roughness Detection Index of Micro-Milling Based on Multi-Objective Optimization

LI Wenqin, XU Jinkai, YU Huadong, ZHANG Xianghui, LIU Qimeng, YU Zhanjiang

(Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

[ABSTRACT] Since the fact that the surface topography of micro-milling is complex and difficult to evaluate accurately, a surface roughness detection index based on three-dimensional (3D) characterization is proposed. Firstly, on the basis of principal component analysis, the 3D surface roughness parameters S_a , S_{sk} and S_{ku} are converted into gray correlation degree as a surface roughness detection index based on the gray correlation analysis method. Secondly, the response surface methodology (RSM) is used to establish a gray correlation degree model to analyze the influence of machining parameters on the GRG. Finally, the combination of optimal machining parameters is obtained and verified. The results show that the average relative error of the gray correlation degree model is 6.54%, the fitting accuracy is high and the prediction effect is good, which verifies the feasibility of the model. The GRG corresponding to the obtained optimal process parameter combination is increased by 15.27%, which realizes the purpose of surface roughness minimization and surface abnormal features minimization and proves the feasibility of the detection index.

Keywords: Surface micro-machining; Multi-objective optimization; Grey correlation analysis; Response surface methodology; 3D surface roughness; Surface roughness detection index

(责编 阳光)

(上接第46页)

detection method for large-scale structure of aircraft based on robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 51-57.

[9] 严剑锋, 邓喀中, 邢正全. 基于最小二乘拟合的三维激光扫描点云滤波[J]. 测绘通报, 2013(5): 43-46.

YAN Jianfeng, DENG Kazhong, XING Zhengquan. 3D laser scanning point cloud filtering based on least squares fitting[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(5): 43-46.

[10] 李广云, 李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.

LI Guangyun, LI Zongchun. The principles and applications of industrial measuring systems principles and applications of industrial measuring systems[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2011.

通讯作者: 王巍, E-mail: wwsh595@163.com。

Research on Inspection Technology of Aviation Tube Based on Laser Scanning

WANG Wei, JIN Wenhan

(College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] The manufacturing accuracy of aviation tube is one of the important factors that affect the assembly quality, it is necessary to inspect the manufacturing accuracy of tube before assembly. At present, the commonly used inspection method is to verify by mechanical checking-tools, but there are some defects such as low precision and low efficiency. So an efficient and accurate digital inspection technology of tube is proposed, in order to ensure the accuracy of inspection results and improve the production efficiency of tube. Non-contact measurement method is used to obtain the surface point cloud data of tube based on laser scanning technology, in the inspection system, the central axis, bending points and bending elements of point cloud data are extracted to make error analysis compared with the theoretical model of tube, and then the bending coefficient can be corrected, and high quality tubes will be produced by sending the correction data to the bending machine.

Keywords: Aviation tube; Digital inspection; Non-contact measurement; Laser scan; Error analysis

(责编 阳光)