

基于响应面法的数控车床切削工艺参数优化

全江凌 余钰洋 卜寿一 周逸群 李储成

安徽三联学院智慧交通现代产业学院 安徽合肥 230601

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12732

[摘 要] 传统切削加工在参数选择、加工质量方面存在瑕疵，此次聚集于切削工艺参数优化，旨在提升切削加工质量，降低生产成本。以响应面法为核心优化手段，选取切削速度、进给速度、加工尺寸为关键切削工艺参数，通过 BBD 试验设计，获取不同参数组合数据，建立数学模型，利用方差分析验证模型有效性。经优化验证，得到切削工艺参数的最优组合。

[关键词] 切削工艺参数；响应面法；多目标优化

1 试验设计

1.1BBD 试验设计

Box-Behnken（BBD）是一种广泛应用于响应面分析的三水平二阶实验设计方法^[1]。该方法通过为每个设计元素设定低、中、高三个水平，并将这些水平分别编码为+1、0和-1，0是试验设计的中心点，从而构建实验，能够有效减少实验次数。

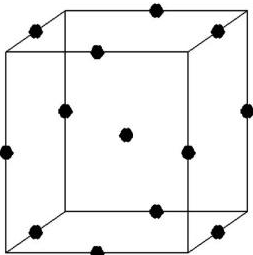
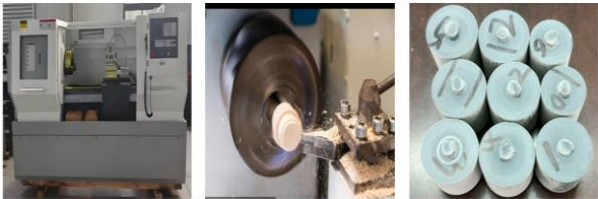


图1 BBD设计的试验点位置分布

图1呈现了一个立方体结构，其表面球形象征着各试验因子的试验数值，BBD设计选取立方体的中点作为因子试验点，会使得经济成本有所降低。在试验因子设定一致的前提下，BBD设计巧妙地规避了垂直方向上的试验点分布，这一策略显著降低了试验次数，提高了实验效率，增加了数据的可靠性。

1.2实验设备与加工材料



(a) 车床 (b) 加工过程 (c) 加工对象

图2 . 数控切削

图2展示了利用数控机床进行数控加工，针对不同工艺参

数进行优化^[2]，得到多组模型来验证工艺参数优化效果。图2

(a)为CAK6150数控机床，图2（b）为数控切削过程图，图2

（c）为加工的工艺参数优化验证的实验对象。

2 切削试验设计

为在机床动态加工过程中同步优化工件的生产效能和工艺品质，实现数控车床切削工艺参数优化，我们以切削参数作为优化目标，以切削速度、进给速度和加工尺寸作为优化变量进行切削工艺参数优化^[3]。在试验的过程中需要设计合理的参数，当切削速度越大时，切削效率越高，但是会加剧刀具的磨损和工件表面质量的波动。针对切削工艺参数优化，我们需要做多组试验来得到最优参数，通过考虑实际情况与成本大小，确定了设计变量的初始范围，切削速度的范围为500~800r/min，进给速度为60~80mm/min，加工尺寸固定在25~30mm。针对切削速度、进给速度和加工尺寸这三个因素，设计的实验变量编码参数及水平的具体赋值如下表1所示。

表 1 设计变量编码及其对应的水平值

因素	水平		
	-1	0	1
切削速度	500	60	25
进给速度	650	80	27.5
加工尺寸	800	100	30

根据表1设计的变量水平数值，当切削速度A的范围为500~800r/min，进给速度B为60~80mm/min，加工尺寸C固定在25~30mm时，通过BBD这个试验方法，对切削速度、进给速度、加工尺寸这三个参数进行全面研究，通过仿真计算得到了对应的响应面数值，下表2陈列了基于不同的参数组合所得出的工艺参数优化数值。

表 2 响应面试验设计和结果

序号	A	B	C	结果
1	500	60	27.5	7.695
2	500	100	27.5	9.251
3	800	60	27.5	6.337
4	800	100	27.5	8.838
5	500	80	25	10.920
6	500	80	30	20.000
7	800	80	25	9.336
8	800	80	30	20.000
9	650	60	25	5.000
10	650	60	30	6.254
11	650	100	25	5.000
12	650	100	30	13.985
13	650	80	27.5	9.797

3 响应面结果分析

将上表 2 的试验数值结果进行响应面模型的拟合^[4]，在三水平二阶实验中，公差与已设计的变量之间的二阶多项式预测模型可以通过以下的公式进行描述：

$$z = \gamma_0 + \sum_{i=1}^n \gamma_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \gamma_{ij} x_i + \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} x_i^2 + \theta$$

式子中：z 为预估的响应值；n 为设计的工艺参数数量； γ 为二次回归系数； θ 为试验误差。

$$z = \gamma_0 + \gamma_1 x_1 + \gamma_2 x_2 + \gamma_3 x_3 + \gamma_4 x_1^2 + \gamma_5 x_2^2 + \gamma_6 x_3^2 + \gamma_7 x_1 x_2 + \gamma_8 x_1 x_3 + \gamma_9 x_2 x_3$$

基于所推导的数学模型进行方差分解分析，并对构架的二次回归模型进行参数显著性评估，参数包括一次项、二次项、常数项、交互作用项和曲面作用项。切削参数的方差分析数据见下表 3，表 3 中 SSR 代表回归平方和、df 代表自由度、MSR 代表回归均方值，* 代表显著性明显。

表 3 切削工艺参数的方差分析

回归模型的方差分析						
项目	SSR	df	MSR	F 值	P 值	显著性
模型	135.91	9	15.10	6.95	0.0091	*
A	1.85	1	1.85	0.8533	0.3864	
B	32.37	1	32.37	14.89	0.0062	*
C	35.66	1	35.66	16.40	0.0049	*
AB	0.2233	1	0.2233	0.1027	0.7580	
AC	0.2954	1	0.2954	0.1359	0.7233	
BC	2.94	1	2.94	1.35	0.2832	
A ²	12.11	1	12.11	5.57	0.0503	
B ²	27.05	1	27.05	12.45	0.0096	*

C ²	26.03	1	26.03	11.97	0.0105	*
残差	15.22	7	2.17			
总和	151.1	16				

采用 Design-Expert 的响应面模块，对表 3 所示工艺数据集进行方差分解分析，并建立最优参数与各个实验因素之间的数学响应面模型。如表 3 所示，F 值是指在方差分析中用来评估模型显著性的一个统计量，它的数值大小直接与影响因素的显著程度挂钩，F 值越大，说明模型越显著，其解释能力越强。P 值也称显著性值，主要用来描述各试验因素对试验结果影响的概率情况，其取值范围是 0~1，通常其数值对于 0.05 时，认为这个因素对试验结果有显著的影响。当 P 的数值越小时，其条件运用越充分，所构建的二阶回归模型预测精度越高。

通过表 3 知，模型、切削速度和加工尺寸的二阶交互作用项 AC、进给速度和加工尺寸的二阶交互作用项 BC 和切削速度的曲面作用项 A²对切削工艺参数优化较为显著。

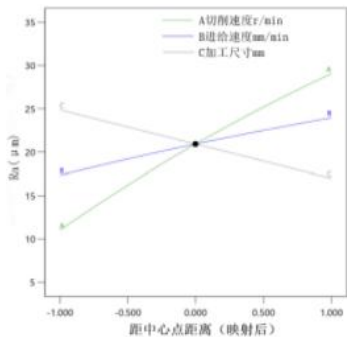


图 2 单因素优化曲线

图 2 展示了中心点附近区域单因素对参数优化效率的作用曲线，这些曲线是把实际设计的因子数按照线性的方式反映到设计区间[-1, +1]来进行分析的。由表 3 可知进给速度 B 和加工尺寸 C 对于切削参数优化效率的影响比较大，呈线性关系；切削速度 A 对切削参数优化效率的影响比较小^[5]。在实验的中心点条件下，切削参数优化效率大约为 9%。

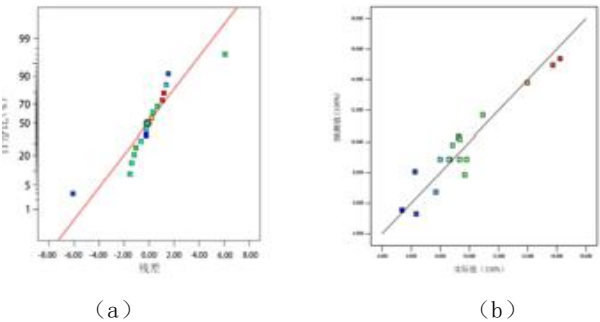


图 3 残差分布图和预测参数图

图3(a)表明工艺参数的残差满足正态概率分布特性,其数据点沿基准线呈线性聚集趋势,表明数据的分布正常且误差比较小。图3(b)对响应面模型预测值与实验观测值进行一致性测验,发现两者无显著差异,都在基准中心线附近充分证明了模型在工艺参数优化区域具有适用性。

为了更加直观的展示处不同因素相互作用下对于切削工艺参数效率的影响,绘制了展现两个试验因素的参数优化效率响应面图,如下所示。

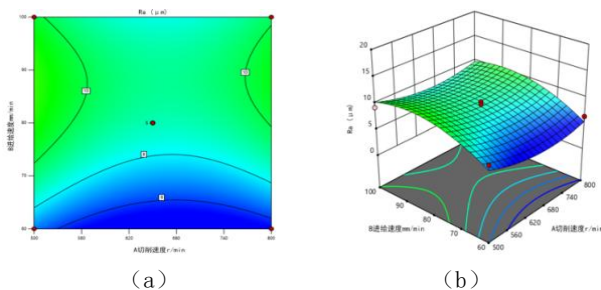


图4 AB交互的响应曲面图

由图4(a)、(b)知,在切削速度和进给速度的耦合作用中,切削速度的控制对切削参数的优化起重要作用^[6],进给速度对切削参数的优化作用相对弱,响应面呈现线性关系。

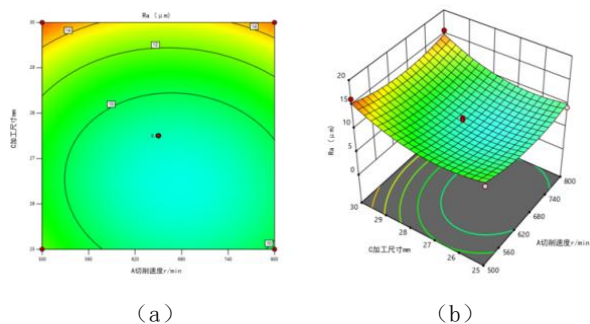


图5 AC交互的响应曲面图

由图5(a)、(b)可知,在切削速度和加工尺寸的耦合作用中,切削速度对切削参数优化起重要作用,加工尺寸对于切削参数优化影响较弱,响应面呈现线性关系。

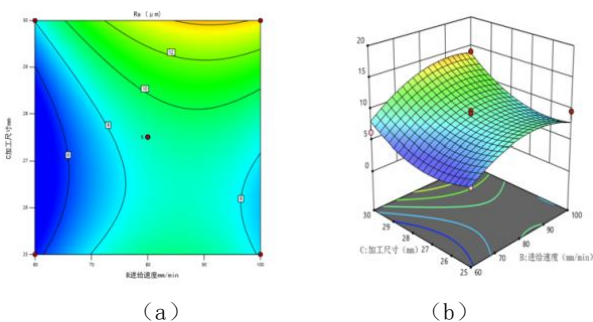


图6 BC交互的响应曲面图

由图6(a)、(b)可知,在进给速度和加工尺寸的耦合作用中,进给速度和加工尺寸对切削参数优化的影响都较弱,响应面呈现线性关系。

4 结语

在响应面试验的基础上,采用 Box-Behnken (BBD) 中心组合设计策略,对切削加工的参数进行系统性实验研究,选取切削速度、进给速度和加工尺寸为试验因素,构建三变量三水平二次试验。借助响应面法构建预测模型,分析各加工参数与切削性能指标间的关系,并对试验因素进行多目标优化。试验结果表明:最优参数组合为切削速度 650r/min、进给速度 60 mm/min、加工尺寸 25mm,验证试验结果与理论优化值基本吻合。

[参考文献]

- [1] 邓伟,徐玉梁,蒋权.基于响应面法的切削参数多目标优化[J].中国工程机械学报,2024,22(01):23-26+60.
- [2] 张继林,罗文翠,唐林虎,等.基于响应面法优化增韧尼龙66切削工艺参数[J].工程塑料应用,2022,50(09):56-63.
- [3] 方沂,李凤泉.响应面法在高速加工切削参数优选中的应用[J].机械设计,2006,(07):34-36.
- [4] 张金超,时礼平,余剑,等.基于响应曲面法的表面粗糙度预测模型的建立与切削参数的优选[J].机械工程师,2012,(04):15-17.
- [5] 杨新睿,楚昌昊.基于有限元仿真的机车轴桥车削工艺参数优化[J].技术与市场,2023,30(03):86-89.
- [6] 陈志强,江朝加,张愉,等.基于响应面法的环网柜接线套管干切削工艺参数优化研究[J].机床与液压,2024,52(06):38-46.

作者简介:全江凌(2003-)男,安徽六安,本科,研究方向:计算机辅助制造。

基金项目:安徽省安徽三联学院2024年大学生创新创业训练计划项目:基于改进NSGA-II算法的汽车尾灯壳注塑工艺多目标优化(项目编号:202410959017);安徽省教育厅自然科学基金项目:基于投影栅相位法的发动机叶片高动态三维测量技术研究(项目编号:2024AH050508)