

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.04.029

基于响应面法通用旋转设计的 铣削参数对能效影响研究^①

姚 柳, 李 丽, 邓兴国, 柳泉萧萧, 舒 鑫

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为了研究铣削参数对铣削过程能效的影响规律, 提出了一种铣削加工能耗建模方法. 采用通用旋转组合设计试验方法, 以较少试验次数, 达到加工过程参数最优效果; 建立了 304 不锈钢铣削参数与加工过程能效的二阶响应模型, 运用方差分析检验模型的拟合性, 通过分析各因素影响效应找到各参数对铣削过程能效的影响规律.

关键词: 响应面法; 通用旋转组合设计; 铣削参数; 能效

中图分类号: TH162

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)04-0193-06

制造业是国民经济的主体, 打造具有国际竞争力的制造业, 是提升我国综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路, 加快制造业绿色升级是我国建设制造强国面临的紧迫任务之一^[1]. 据统计, 我国机械产品单位能耗比发达国家高 30%, 存在大量浪费^[2]. 推广节能生产工艺产品是我国提高机电产品制造能源利用率重要着力点, 其中制造过程能效状态研究是推广节能工艺的基础. 麻省理工学院的 Gutowski T 等和澳大利亚新南威尔士大学的 Kara S 等建立的经验模型验证了切削参数是影响切削能耗的最重要因素^[3-4]; Diaz N 等试验分析了一个微加工中心在不同的材料去除率下切削低碳钢的能量需求建立了切削能耗模型, 指出材料的切削能耗随着材料去除率的增大而降低^[5]; 刘飞等对机械加工系统的能效进行了分析^[6]; 李洪丞等分析了机械制造过程中能耗的动态特性^[7].

然而, 针对铣削用量对切削能耗的影响以及如何高效、低成本地建立它们之间的关系尚缺乏相关研究. 本文以 304 不锈钢铣削为例, 采用二阶响应面组合设计实现以较少实验次数完成多元优化经验模型创建, 通过对经验模型的分析、优化及实验验证, 检验了模型的准确性和实用性. 通过本文研究, 期望该方法能为工艺编制过程中材料去除能耗标准、切削加工中能耗计算与优化、零件加工切削参数选取提供一定理论基础及数据支持.

1 铣削参数对能效影响关系模型的建立

1.1 铣削加工的能效函数

铣削参数主要包括: 主轴转速、进给量、切削深度、切削宽度, 这 4 个参数选择关系到整个切削加工过

^① 收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405396); 中央高校基本科研业务费重点项目(XDJK2014B007; SWU113086).

作者简介: 姚 柳(1987-), 男, 四川射洪人, 硕士研究生, 加工中心高级工, 主要从事绿色制造方向研究.

通信作者: 李 丽, 博士, 副教授.

程能耗状况. 本文采用将单位体积材料去除的能量损耗作为评价指标, 称为能效, 由于能效值越小, 代表去除单位体积材料能耗越少, 因此能效指标具有望小特性. 其能效函数可表示为

$$E_e = \frac{p}{a_p \times a_e \times f} \quad (1)$$

式中, E_e 为材料去除能效, 单位 J/mm^3 , f 为切削进给量, 单位 mm/min , a_p 为切削加工背吃刀深度, 单位 mm , a_e 为切削加工每次的切削宽度, 单位 mm ; p 为加工时机床的功率(功率与研究因素中转速相关), 单位 kW .

1.2 基于响应面法的铣削参数对能效影响模型

目前研究因子和指标之间的关系常用方法有田口法和响应面法, 其中响应面法分为一阶响应面法和二阶响应面法. 田口法是一种用线性数学模型进行设计的试验方法, 能通过极差分析判断用量对指标影响主次因子和基于实验点的最优因子组合. 但是田口法只能分析离散型数据, 具有精度不高, 预测性不佳的缺点. 响应面法采用非线性模型, 能求得高精度的回归方程, 进行合理预测来找出最优工艺条件^[8]. 一阶响应面法能建立多元线性和非线性响应模型, 但是不能用于存在高次作用的关系模型建立, 二阶响应面法能解决大部分非线性问题. 本文研究采用二阶响应面法来建立的铣削参数与能效之间的关系数学模型^[9]为

$$\hat{y} = y - \epsilon = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{h < k} b_{hj} x_h x_k + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2 \quad (2)$$

y 为能耗指标, \hat{y} 为能耗指标估计值, ϵ 为试验误差, b 为系数的估计值, x 为加工参数编码. 各参数通过实验参数进行转换, 把各试验因素的自由变量和能效都转换为矩阵形式, 然后利用最小二乘法求各系数估计值, 从而建立能效与铣削参数间的二阶响应回归模型.

1.3 面向能效建模的试验设计

能效建模过程中期望试验次数少, 但要求所建立的模型预测范围广及精度高, 通过组合设计能满足上述工程需求. 组合设计就是在编码空间中选择几类具有不同特征的试验点, 将其组合成实验方案, 因此组合设计能大大减小试验次数. 二阶响应面旋转设计能使在多维空间超球面上预测估计方差 $D(\hat{y})$ 相等, 但是在不同半径上实验点估计值方差却不相同. 能效研究中期望满足旋转性同时满足通用性, 即以半径为 r 的多维空间域各试验点的估计方差基本相等, 使不同半径的球面上实验点能比较. 通过通用旋转组合设计能实现其在多维空间以 r 为半径的超球体内具有可比性. 综上, 能效研究实验设计包括 3 类特征试验点: 全面实验点 m_c , 0 水平实验点(中心点) m_0 , 中心距为 r 的星号臂实验点 m_r , 所有试验点构成实验方案. 其通用旋转性通过调整星号臂的大小来确定.

本文研究铣削参数对能效的影响因素个数为 4, 设计参数在 $p=4$ 时, $r=1.682$, $n=20$, $m_0=4$, $m_c=m_r=8$, 其参数选择参考文献[10-11], 在此不做进一步介绍. 设铣削参数的 4 个因素中, 主轴转速 s 为 x_1 、进给量 f 为 x_2 、切削深度 a_p 为 x_3 、切削宽度 a_e 为 x_4 , 同时确定考察参数范围. 设参数考察范围上下限分别为 z_1 、 z_2 , $\pm r$ 、 ± 1 、0 表示实验所选择的 5 个水平, 通过二阶响应设计水平编码公式对铣削用量进行编码, 其编码公式为

$$x_j = \frac{z_j - x_0}{\Delta_j} \quad (3)$$

其中: $x_0 = \frac{(z_1 + z_2)}{2}$, $\Delta_j = \frac{z_1 - z_2}{r}$. 本文以 304 不锈钢在 PL-700 型铣床上的能耗为例, 确定 4 个参数考察范围为 s : 600~1 400 r/min , f : 100~240 mm/min , a_p : 0.2~0.8 mm , a_e : 2.5~4 mm , 对考察的铣削参数按公式(3)进行编码, 编码后试验点在编码空间对应的铣削参数如表 1.

表 1 铣削能效四因素(1/2 实施)二阶响应面通用旋转设计水平编码表

| | 主轴转速(s)/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$) | 进给量(f)/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | 切削深度(a_p)/ mm | 铣削宽度(a_e)/ mm |
|------------|---|--|----------------------|----------------------|
| 上星号臂 1.682 | 1 404 | 237.3 | 0.8 | 4 |
| 上水平 1 | 1 240 | 210 | 0.68 | 3.7 |
| 零水平 0 | 1 000 | 170 | 0.5 | 3.25 |
| 下水平-1 | 760 | 130 | 0.32 | 2.8 |
| 下星号臂-1.682 | 596 | 102.7 | 0.2 | 2.5 |
| Δj | 240 | 40 | 0.18 | 0.45 |

2 试验与结果

2.1 试验过程

试验用工件: 304 不锈钢, 基本尺寸(长×宽×高) 200 mm×30 mm×40 mm; 试验机床: 成都普瑞斯数控机床有限公司生产的 PL-700 型数控铣床, 主轴额定功率 7.5 kW, 进给轴额定功率 4.25 kW; 试验用铣刀: DHK-DA0606 系列 $\varphi 10$ mm 立铣刀; 机床能耗监测系统: HIOKI-3390, 额定电流 5A, 精度 0.5%, 可测导体直径 $\varphi 36$ mm. 试验过程中首先将功率分析仪的传感器的夹头按相位分别装到机床的电源输入处, 具体接线方法如图 1; 试验前期准备首先将试验用的工件通过虎钳装夹在铣床工作台上, 然后利用可转位式平面铣刀将工件预铣平整, 调试好功率分析仪和实验机床后进行试验.

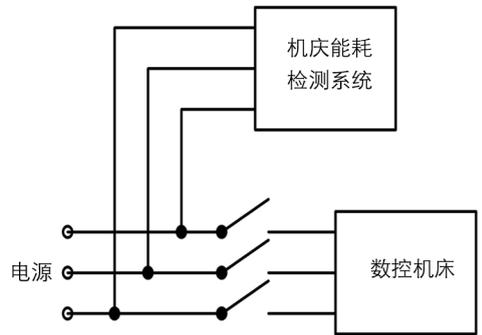


图 1 能耗检测系统接线图

2.2 试验结果

根据表 1 进行试验, 得到试验结果如表 2 所示, 表 2 中包括了实验号、实验设计 x_i 在编码空间取值、具体实施参数值, 以及最终试验结果.

表 2 铣削能效四因素(1/2 实施)二阶响应通用旋转试验设计及实验结果

| 试验号 | 实验设计 | | | | 实验实施 | | | | 实验结果 |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | s | f | a_p | a_e | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 760 | 130 | 0.32 | 2.8 | 5.05 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | 1 | 760 | 130 | 0.68 | 3.7 | 1.96 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 1 | 760 | 210 | 0.32 | 3.7 | 2.63 |
| 4 | -1 | 1 | 1 | -1 | 760 | 210 | 0.68 | 2.8 | 1.56 |
| 5 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 240 | 130 | 0.32 | 3.7 | 3.76 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 240 | 130 | 0.68 | 2.8 | 2.33 |
| 7 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 240 | 210 | 0.32 | 2.8 | 3.10 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 240 | 210 | 0.68 | 3.7 | 1.05 |
| 9 | -1.682 | 0 | 0 | 0 | 596 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.09 |
| 10 | 1.682 | 0 | 0 | 0 | 1 404 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.45 |
| 11 | 0 | -1.682 | 0 | 0 | 1 000 | 102.7 | 0.5 | 3.25 | 3.48 |
| 12 | 0 | 1.682 | 0 | 0 | 1 000 | 237.3 | 0.5 | 3.25 | 1.54 |
| 13 | 0 | 0 | -1.682 | 0 | 1 000 | 170 | 0.2 | 3.25 | 5.45 |
| 14 | 0 | 0 | 1.682 | 0 | 1 000 | 170 | 0.8 | 3.25 | 1.34 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | -1.682 | 1 000 | 170 | 0.5 | 2.5 | 2.88 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 1.682 | 1 000 | 170 | 0.5 | 4 | 1.70 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 000 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.15 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 000 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.21 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 000 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.19 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 000 | 170 | 0.5 | 3.25 | 2.39 |

3 分析与讨论

通过试验参数转换,把各试验因素的自由变量和能效指标都转换为矩阵形式,然后利用最小二乘法计算可得式(2)中相应系数的值,从而建立铣削参数对能效影响的响应模型为

$$\hat{y} = 2.258 - 0.026x_1 - 0.587x_2 - 1.066x_3 - 0.338x_4 + 0.11x_{12} + 0.085x_{13} + 0.175x_{14} + 0.175x_{23} + 0.085x_{24} + 0.110x_{34} - 0.01x_1^2 + 0.075x_2^2 + 0.388x_3^2 - 0.003x_4^2 \quad (4)$$

响应模型方差分析如表 3 所示,由表可知:响应模型失拟检验 $F_{lf} = 1.38 < F_{0.25}(2, 3) = 2.28$, 差异不显著,说明所选用的响应模型适当;响应模型显著性检验 $F = 136.11 > F_{0.01}(14, 5) = 99.01$, 极显著,说明响应模型的预测值与实际值吻合,所建立的响应模型适合用于研究铣削参数对能效影响的规律。

表 3 能耗响应模型方差分析表

| 方差来源 | 自由度(f) | 平方和 | 比值 | 水平 |
|-------------|------------|-------|-------------------|------|
| 回归 U | 14 | 24.89 | 拟合性 | |
| 剩余 Q_{e2} | 5 | 0.07 | $* F_{lf} = 1.38$ | 0.25 |
| 失拟 Q_{lf} | 2 | 24.82 | 显著性 | |
| 误差 Q_e | 3 | 0.03 | $* F = 136.11$ | 0.01 |
| 总 SST | 19 | 0.03 | | |

同时通过 t 检验对各系数进行检验,各系数检验公式如下:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{\sqrt{KQ_{e2}/f_{e2}}} \quad t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{e^{-1}Q_{e2}/f_{e2}}} \\ t_{ij} = \frac{|b_{ij}|}{\sqrt{m_e^{-1}Q_{e2}/f_{e2}}} \quad t_{ii} = \frac{|b_{ii}|}{\sqrt{FQ_{e2}/f_{e2}}} \quad (5)$$

其中 t_0 表示常数项检验, t_i 表示一次项检验, t_{ij} 表示一次交互项检验, t_{ii} 表示二次项检验,根据公式(4)计算各系数显著性水平为: $t_0 = 32.370.001$, $t_1 = 0.651$, $t_2 = 278.930.001$, $t_3 = 505.940.001$, $t_4 = 160.6060.001$, $t_{12} = 23.4150.001$, $t_{13} = 18.0930.001$, $t_{14} = 370.2510.001$, $t_{23} = 37.2510.001$, $t_{24} = 18.0930.001$, $t_{34} = 23.4140.001$, $t_{11} = 0.253$, $t_{22} = 1.920.2$, $t_{33} = 9.9320.005$, $t_{44} = 0.085$. 通过 t 检验表明除 t_1 、 t_{11} 、 t_{22} 、 t_{44} 不显著,其它各系数存在不同层度显著性. 去掉不显著项后得到简化的模型为

$$\hat{y} = 2.258 - 0.587x_2 - 1.066x_3 - 0.338x_4 + 0.11x_{12} + 0.085x_{13} + 0.175x_{14} + 0.175x_{23} + 0.085x_{24} + 0.110x_{34} + 0.388x_3^2 \quad (6)$$

由于设计中各因素均经过无量纲线性编码处理,且各一次项系数之间、一次项系数和交互项系数之间以及二次项系数之间均独立不相关的,因此可直接用一次项系数的绝对值大小来衡量 4 个因素对指标的影响程度. 由于 x_3 、 x_1 、 x_2 、 x_4 系数绝对值递减,即参数对能效影响程度大小依次是切削宽度、进给量、切削深度、主轴转速,且皆为负效应. 在通用旋转设计中,二次项系数具有相关性,系数不能用于切削参数对能效效应分析. 由于主轴转速对能效影响不显著,在加工参数选择时,主轴转速因素可以不作为能效考虑的因素,可根据加工实际情况合理选择.

为了分别考察切削参数中各因素对能效的影响,需要对各因素效应进行分析. 由于主轴转速对能效影响不显著,所以不做因素效应分析,将建立的响应模型中除主轴转速外的其它 3 个因素中,将其中 2 个因素固定某一水平(如 0, ± 1 , ± 1.682)上,能够得到剩下单因素效应模型. 设进给量、切削深度、切削宽度, 3 个单因素效应函数为分别为 \hat{y}_2 、 \hat{y}_3 、 \hat{y}_4 , 则各单因素响应函数为进给量:

$$\hat{y}_2 = 2.258 - 0.587x_2 \quad (7)$$

切削深度:

$$\hat{y}_3 = 2.258 - 1.006x_3 + 0.338x_3^2 \quad (8)$$

切削宽度:

$$\hat{y}_4 = 2.258 - 0.338x_4 \quad (9)$$

基于函数图形有能直接反应出各铣削参数对能效的影响规律和影响程度,在MATLAB软件中绘制单因素对能效影响效果叠加图,如图2所示.由图可知,进给量 \hat{y}_2 曲线在因子区间内为单调减函数,因此增大进给量会减小能效,且减小的幅度较大;切削深度 \hat{y}_3 曲线,曲率变化最大,在极值点左侧,能效率变化较大,因此选用较大的切削深度能显著降低能耗;铣削宽度 \hat{y}_4 曲线,图像平缓,在编码区间内呈递减趋势,因此在生产条件允许的情况下选择更大的铣削宽度有助于能效降低.通过单因素对能效率影响效果叠加图分析,能够直观反应各因素对能效的影响,以便设计和加工中优化相关参数.

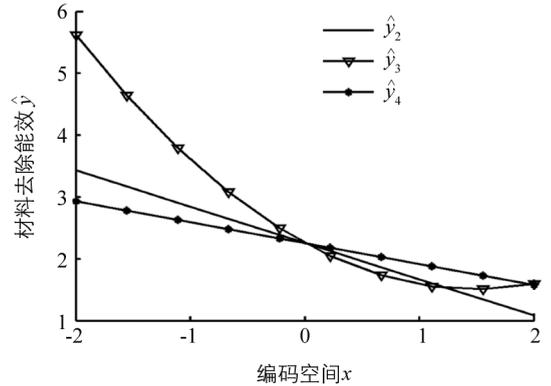


图2 单因素对能效率影响效果叠加图

4 结论

通过响应面法通用旋转组合实验设计,建立铣削参数对材料去除能效影响的响应模型及进行相关分析得到如下结论:

1) 通过优化实验设计,以20次试验建立了铣削用量对材料去除能效率影响的响应模型,通过对模型的相关检验,验证了所建立模型的精确性.

2) 材料去除能效率的因素效应分析表明:对304不锈钢铣削能效率影响大小依次是切削宽度、进给量、切削深度、主轴转速,其中主轴转速在试验的切削条件下对材料去除能耗影响不显著,主轴转速选择可以根据加工的实际情况确定.同时,本文方法可用于不同材料铣削能耗经验模型的建立,以及在工艺编制过程中可为材料去除能耗标准制定和优化切削参数提供一定参考.

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知 [EB/OL]. (2015-05-19) [2015-08-10] http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.html.
- [2] 谭旋. 机械制造企业的低碳制造模式初探 [J]. 上海企业, 2010(4): 60-62.
- [3] GUTOWSKI T, DAHMUS J, THIRIEZ A. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes [C]. The 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2006.
- [4] KARA S, LI W. Unit Process Energy Consumption Models for Material Removal Processes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 37-40.
- [5] DIAZ N, REDELSHEIMER E, DORNFELD D. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use [M] // Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 263-267.
- [6] 刘飞, 王秋莲, 刘高君. 机械加工系统能量效率研究的内容体系及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 87-94.
- [7] LI Hong-cheng, CAO Hua-jun, PAN Xiao-yong. A Carbon Emissions Analysis Model for Electronics Manufacturing

Process based on Value-Stream Mapping and Sensitivity Analysis [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2012, 25(12): 1102–1110.

- [8] 董心, 王勇, 高锐, 等. 正交实验联用响应面法优化脱皮马勃总生物碱提取的研究 [J]. *药物生物技术*, 2013(3): 245–249.
- [9] 赵选民. 实验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 204–228.
- [10] 李庆东. 试验优化设计 [M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2006: 63–75.
- [11] 卢恩双, 宋世德, 郭满才. 回归通用旋转设计的几个问题 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(5): 110–113.

Research of the Influence of Milling Parameters on Energy Efficiency Based on the Rotatable Design of Response Surface Methodology

YAO Liu, LI Li, DENG Xing-guo,
LIU Quan-xiao-xiao, SHU Xin

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To study the influence of milling parameters on energy efficiency in the milling process, this paper presents an energy consumption model for milling. A second-order response surface model is established between the milling parameters of 304 Stainless Steel and energy efficiency by using the general quadratic rotary regression with fewer experiments, and analysis of variance is used to test its goodness of fit. The influence of different parameters on the energy efficiency of the milling process is worked out by analyzing the effect of each factor.

Key words: response surface methodology (RSM); general composite rotatable design; milling parameter; energy efficiency

责任编辑 汤振金

