

文章编号: 1004-4353(2020)04-0333-06

数控铣削参数优化方法的研究

王德超¹, 朴成道², 尹凤哲¹, 赵德金²

(1. 延边大学 工程训练中心, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为了优化数控铣削参数,以切削比能低、表面质量优为优化目标,对 45 号钢进行了单工步干式铣削沟槽正交实验.采用多目标遗传算法求解出了不同铣削参数的优化解,并通过对比经验参数与优化参数的实验结果得出了最优铣削参数组合.在最优铣削参数组合下对工件进行加工(粗/半精加工)时,其加工切削比能和工件表面粗糙度比优化前分别降低了 46.2% 和 41.6%,因此本文优化方法可为提高数控铣削加工质量和降低能耗提供参考.

关键词: 多目标遗传算法; 切削功率; 表面粗糙度; 铣削参数

中图分类号: TH16

文献标识码: A

Research on optimization method of CNC milling parameters

WANG Dechao¹, PIAO Chengdao², YIN Fengzhe¹, ZHAO Dejin²

(1. *Engineering Training Center, Yanbian University, Yanji 133002, China;*

2. *College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: In order to optimize the CNC milling parameters, with low cutting specific energy and excellent surface quality as the optimization goals, a single-step dry milling groove orthogonal experiment was carried out on 45 steel. The multi-objective genetic algorithm is used to solve the optimization solutions of different milling parameters, and the optimal milling parameter combination is obtained by comparing the experimental results of the empirical parameters and the optimized parameters. When machining under the optimal combination of milling parameters (rough/semi-finish machining), the specific energy of machining and the surface roughness of the workpiece are reduced by 46.2% and 41.6% respectively compared to before optimization. Therefore, the optimization method in this paper can provide reference for improving the quality of CNC milling and reducing energy consumption.

Keywords: multi-objective genetic algorithm; cutting power; surface roughness; milling parameters

0 引言

在数控铣削过程中,切削参数的选择对工件表面质量以及数控机床的切削比能、加工效率等会产生重要的影响.传统的数控切削参数的选取一般是以加工者的经验或参考切削手册进行选

取,因此难以满足质量需求.对此,国内外众多学者对数控铣削参数优化进行了研究.例如:李聪波等^[1]以最高能量效率和最小加工时间为优化目标,采用连续禁忌法对数控铣削参数进行了优化求解;Fratila 等^[2]以获得最优的工件表面质量为

收稿日期: 2020-05-22

作者简介: 王德超(1991—),男,助理实验师,研究方向为数控技术与智能制造等.

基金项目: 延边大学应用基础项目(602020025);吉林省高教科研课题(JGJX2020D50);延边大学 2020 年度“金课”项目

目标,采用田口法对数控加工的切削参数进行了参数优化;谢书童等^[3]以降低工件加工成本为目标,运用边缘分布估算法优化了车削参数;Camposco^[4]以加工过程中能耗损耗最少为最终优化目标,运用方差分析法对切削参数进行了参数优化;马峰等^[5]以低能耗和少切削液为优化目标,应用非支配排序遗传算法求解了加工目标的最优参数;李爱平等^[6]以低能耗为目标,对加工参数进行了全局优化;邓朝晖等^[7]以能量效率最高、碳排放最低和材料去除率最大为目标,并将多目标转化为单目标来对铣削参数进行了优化求解。目前,在相关的研究中以切削比能、表面质量为目标的多目标优化研究得较少,因此本文以切削比能和表面质量为优化目标,采用多目标遗传算法对铣削参数进行优化分析。

1 铣削参数模型的确立

1.1 功率模型

分析数控机床的功耗消耗时,通常是根据机床各子系统功耗消耗的特性将机床功耗消耗分为:基本功耗、主传动功耗、进给功耗、负载功耗 4 个模块^[8]。机床加工过程中实时功耗消耗的情况如图 1 所示。

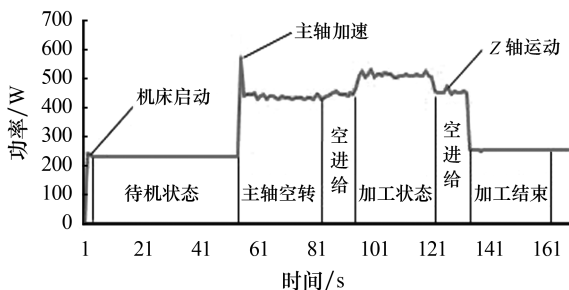


图 1 数控铣床实时功率的变化曲线

1) 基本功耗. 数控机床的基本功耗是指从机床启动到稳定运转所消耗的基本功率,包括数控装置 P_{cnc} 、照明灯 P_{led} 、电控制冷装置 P_{cool} 、控制面板 P_{pop} 、输入/输出设备功率 $P_{\text{i/o}}$ 等器件的固有消耗。该模块工作状态恒定,功率不随工况改变而变化。基本功耗的表达式为

$$P_{\text{basic}} = C_0 = P_{\text{cnc}} + P_{\text{led}} + P_{\text{cool}} + P_{\text{pop}} + P_{\text{i/o}}.$$

式中, C_0 为机床稳定条件下的待机状态基本功率

(测量值)。

2) 主传动功耗. 数控机床的主传动功耗是指主轴旋转运动所损耗的功耗,也是机床功耗消耗中最大的模块。在无负载状况下,主轴恒速转动时其克服的阻力与摩擦是一个稳定值,因此此时的主传动功耗可表示为关于主轴转速 n 的一次函数,其表达式为

$$P_{\text{spindle1}} = k_1 n + C_1. \quad (1)$$

式中, k_1 、 C_1 为拟合常数。因数控机床的主轴电机大部分采用的是变频变压控制,因此也可认为主传动功耗是一个非单调函数^[9],如下式所示:

$$P_{\text{spindle2}} = k_2 n^2 + k_3 n + C_2. \quad (2)$$

式中, k_2 、 k_3 、 C_2 为拟合常数。

3) 进给功耗. 进给功耗是指运动部件在运动过程中完成刀具或工件的进给运动所消耗的能耗。进给功耗可用如下线性函数公式表示:

$$P_{\text{feed}} = k_4 v_f + C_3.$$

式中: k_4 、 C_3 为拟合常数; v_f 为进给速度, $v_f = n f_z N$ (f_z 为每齿进给量, n 为主轴转速, N 为铣刀齿数)。

4) 负载功耗. 负载功耗是指机床在负载情况下刀具接触材料并进行切削时所消耗的功耗。根据文献^[7]和文献^[10]中的理论和模型,可推导出本文数控机床的负载功耗为指数型函数,其表达式为

$$P_{\text{cutting}} = C_4 n^{y_1} f_z^{y_2} a p^{y_3} a e^{y_4}.$$

式中: C_4 为修正系数, $a p$ 为切削深度, $a e$ 为切削宽度, y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 为拟合常数。

1.2 表面粗糙度预测模型

表面粗糙度(Ra)是评价工件表面微观几何形貌好坏的重要指标,常用的经验公式是以主轴转速 n 、每齿进给量 f_z 、切削深度 $a p$ 和切削宽度 $a e$ 为主的指数型函数^[11]:

$$Ra = C_5 n^{b_1} f_z^{b_2} a p^{b_3} a e^{b_4}.$$

式中: C_5 为修正系数, b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为拟合常数。

1.3 切削比能模型

切削比能(specific energy consumption, SEC)是指去除单位体积材料机床所消耗的能量,该指标可以反应机床在切削过程中的能效状态^[12]。当

去除体积量为恒定时,切削比能越低,机床所消耗的能耗越少.在加工阶段,切削比能可以用机床功率 P_{normal} 与金属去除率(material removal rate, MRR) 的比值表示,即:

$$SEC = \frac{P_{\text{normal}}}{MRR} = \frac{P_{\text{normal}}}{nf_z ap ae N}.$$

(3)

2 实验条件及方案

2.1 实验设备及材料

实验平台选用大连机床厂生产的 VDF-850A 型数控铣床,采用 WB9128-1 型功率传感器采集机床加工功率.实验材料为 45 号的方钢(90 mm×90 mm×30 mm),刀具选用 DE1004 型平底立铣刀(刀具直径为 10 mm,齿数为 4).

2.2 实验方案与结果

实验步骤为:

- 1) 选取主轴转速 n 、每齿进给量 f_z 、铣削深度 ap 和铣削宽度 ae 4 个因素为实验变量,每个因素选取 4 个水平,且在正交实验表 $L_{16}(4^5)$ 中选择前 4 列作为实验因素序列.
- 2) 使用日本三丰公司生产的 Mitutoyo SV-3100 型表面粗糙度测量仪(如图 2 所示)对加工

后的工件表面进行测量.测量时沿工件表面等距(3.5 mm)取样,总测量长度为 17.5 mm.

通过上述实验步骤获得的各参数铣削实验的数控机床功率和工件表面粗糙度的测量值如表 1 所示.将表 1 中的数据代入式(3)即可得出各参数组的切削比能,如表 2 所示.



图 2 Mitutoyo SV-3100 型表面粗糙度测量仪

为确定主传动功耗模型,利用 Matlab 软件中的多元线性回归分析方法对表 2 中的主传动功率数据进行拟合分析.拟合结果显示,式(1)和式(2)的相关系数分别为 0.93 和 0.99.该结果表明,式(2)完全符合该机床的主传动功耗消耗模型.

表 1 各参数的铣削实验测量结果

| 序号 | $n/(r/min)$ | $f_z/(mm/r)$ | ap/mm | ae/mm | P_{standby}/W | P_{idle}/W | P_{air}/W | P_{normal}/W | $Ra/\mu m$ |
|----|-------------|--------------|---------|---------|------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| 1 | 1 500 | 0.02 | 1.5 | 2.0 | 459.61 | 702.71 | 759.41 | 793.20 | 0.47 |
| 2 | 1 500 | 0.03 | 1.8 | 2.5 | 459.72 | 726.66 | 744.81 | 813.45 | 0.50 |
| 3 | 1 500 | 0.04 | 2.1 | 3.0 | 459.54 | 726.66 | 765.60 | 867.60 | 0.72 |
| 4 | 1 500 | 0.05 | 2.4 | 3.5 | 465.48 | 734.58 | 757.15 | 934.56 | 0.99 |
| 5 | 2 000 | 0.02 | 1.8 | 3.0 | 472.03 | 827.03 | 832.26 | 910.70 | 0.32 |
| 6 | 2 000 | 0.03 | 1.5 | 3.5 | 466.43 | 815.94 | 823.02 | 936.26 | 0.42 |
| 7 | 2 000 | 0.04 | 2.4 | 2.0 | 467.56 | 809.72 | 851.00 | 962.12 | 0.78 |
| 8 | 2 000 | 0.05 | 2.1 | 2.5 | 460.13 | 807.02 | 818.73 | 993.68 | 0.66 |
| 9 | 2 500 | 0.02 | 2.1 | 3.5 | 460.90 | 863.37 | 889.35 | 1 014.02 | 0.38 |
| 10 | 2 500 | 0.03 | 2.4 | 3.0 | 458.37 | 857.04 | 881.89 | 1 076.76 | 0.50 |
| 11 | 2 500 | 0.04 | 1.5 | 2.5 | 457.66 | 859.32 | 911.02 | 1 011.34 | 0.68 |
| 12 | 2 500 | 0.05 | 1.8 | 2.0 | 460.07 | 859.44 | 878.13 | 1 050.25 | 0.63 |
| 13 | 3 000 | 0.02 | 2.4 | 2.5 | 456.13 | 892.41 | 941.69 | 1 070.26 | 0.38 |
| 14 | 3 000 | 0.03 | 2.1 | 2.0 | 465.17 | 903.11 | 922.19 | 1 067.22 | 0.57 |
| 15 | 3 000 | 0.04 | 1.8 | 3.5 | 464.90 | 906.53 | 957.33 | 1 151.57 | 0.43 |
| 16 | 3 000 | 0.05 | 1.5 | 3.0 | 462.88 | 907.41 | 932.09 | 1 134.54 | 0.53 |

表 2 各参数的 MRR 值与 SEC 值

| 序号 | $n/(\text{r}/\text{min})$ | $f_z/(\text{mm}/\text{r})$ | ap/mm | ae/mm | $P_{\text{normal}}/\text{W}$ | $\text{MRR}/(\text{mm}^3/\text{s})$ | $\text{SEC}/(\text{J}/\text{mm}^3)$ |
|----|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 1 500 | 0.02 | 1.5 | 2.0 | 793.20 | 360 | 2.203 |
| 2 | 1 500 | 0.03 | 1.8 | 2.5 | 813.45 | 810 | 1.004 |
| 3 | 1 500 | 0.04 | 2.1 | 3.0 | 867.60 | 1 512 | 0.574 |
| 4 | 1 500 | 0.05 | 2.4 | 3.5 | 934.56 | 2 520 | 0.371 |
| 5 | 2 000 | 0.02 | 1.8 | 3.0 | 910.70 | 864 | 1.054 |
| 6 | 2 000 | 0.03 | 1.5 | 3.5 | 936.26 | 1 260 | 0.743 |
| 7 | 2 000 | 0.04 | 2.4 | 2.0 | 962.12 | 1 536 | 0.626 |
| 8 | 2 000 | 0.05 | 2.1 | 2.5 | 993.68 | 2 100 | 0.473 |
| 9 | 2 500 | 0.02 | 2.1 | 3.5 | 1 014.02 | 1 470 | 0.690 |
| 10 | 2 500 | 0.03 | 2.4 | 3.0 | 1 076.76 | 2 160 | 0.499 |
| 11 | 2 500 | 0.04 | 1.5 | 2.5 | 1 011.34 | 1 500 | 0.674 |
| 12 | 2 500 | 0.05 | 1.8 | 2.0 | 1 050.25 | 1 800 | 0.583 |
| 13 | 3 000 | 0.02 | 2.4 | 2.5 | 1 070.26 | 1 440 | 0.743 |
| 14 | 3 000 | 0.03 | 2.1 | 2.0 | 1 067.22 | 1 512 | 0.706 |
| 15 | 3 000 | 0.04 | 1.8 | 3.5 | 1 151.57 | 3 024 | 0.381 |
| 16 | 3 000 | 0.05 | 1.5 | 3.0 | 1 134.54 | 2 700 | 0.420 |

为了验证本文建立的功耗模型的准确性,将功耗数据导入模型中后通过拟合分析与仿真得到了数控机床加工状态功耗的仿真结果,如图 3 所示.由仿真结果可以看出,仿真预测值与实验值接近,说明建立的能耗模型符合该机床的能耗消耗特性.

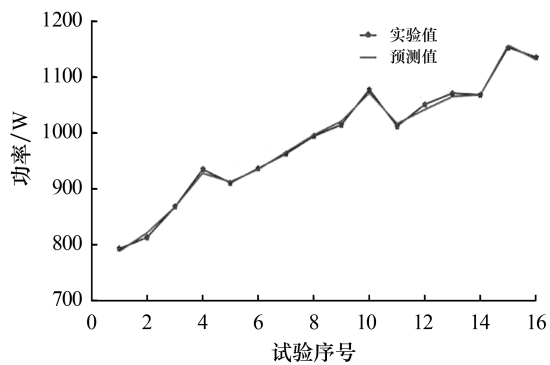


图 3 加工状态时功率模型的仿真结果

3 多目标遗传算法的优化

多目标遗传算法是将待优化变量视为基因,通过染色体的遗传、变异、选择和淘汰来寻找非劣解.由于多目标遗传算法具有很强的鲁棒性,因此被广泛应用于各个领域^[13-14].采用多目标遗传算法优化的具体步骤为:①在参数可行域中随机生成 n 个铣削参数组合 $x_i^{(1)} = (n_i^{(1)}, f_{z_i}^{(1)}, ap_i^{(1)},$

$ae_i^{(1)})$,然后通过迭代的方式将这些个体的集合作为初始种群($C^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$)进行进化,以此形成新的个体群体($C^{(k+1)} = (x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_n^{(k+1)})$).②通过计算适应度得出个体或解的优劣性,再经过选择、交叉、变异和修剪等过程优选解集.③当种群循环进化达到优化算法设定的上限时,结束算法,并输出 Pareto 最优解.

本文以切削比能和表面粗糙度为优化目标建立数控铣削加工工艺参数的多目标优化模型,其函数可表示为:

$$\min SEC(n, f_z, ap, ae);$$
$$\min Ra(n, f_z, ap, ae);$$
$$\text{s. t. } x_{\min} < x_i < x_{\max} (i = 1, \dots, 4).$$

在实际铣削加工过程中,加工量的选择通常会受到主轴转速、每齿进给量、切削深度、切削宽度、铣削力、机床功率等因素的限制^[15],因此本文对优化函数给出如下约束条件:

1)主轴转速约束.根据数控机床使用说明书(主轴电机在 1 500~4 500 r/min 时输出稳定功率),并结合实验刀具、机床振动频率、加工工艺等情况,本文将主轴转速的约束条件设置为

$$n_{\min} \leqslant x_1(n, f_z, ap, ae) \leqslant n_{\max}.$$

式中, n_{\min} 、 n_{\max} 分别为实际加工情况下允许的最小、最大主轴转速.

2) 每齿进给量约束. 根据刀具厂商提供的每齿进给量选择范围, 本文将每齿进给量的约束条件设置为

$$f_{z\min} \leq x_2(n, f_z, ap, ae) \leq f_{z\max}.$$

式中, $f_{z\min}$ 、 $f_{z\max}$ 分别为实际加工情况下允许的最小、最大每齿进给量.

3) 切削深度约束. 根据切削手册^[16] 中关于粗 / 半精加工工艺中切削深度的选取范围和刀具提供的合理区间, 以及根据表面粗糙度测量仪测量的实际情况, 本文将切削深度的约束条件设置为

$$ap_{\min} \leq x_3(n, f_z, ap, ae) \leq ap_{\max}.$$

式中, ap_{\min} 、 ap_{\max} 分别为实际加工情况下允许的最小、最大切削深度.

4) 切削宽度约束. 根据切削手册^[16] 中关于切削宽度合理取值范围的推荐(一般不大于刀具直径的 50%), 以及干式切削对刀具损伤的情况, 本文将切削宽度的约束条件设置为

$$ae_{\min} \leq x_4(n, f_z, ap, ae) \leq ae_{\max}.$$

式中, ae_{\min} 、 ae_{\max} 分别为实际加工情况下允许的最小、最大切削宽度.

4 优化与分析

应用 Matlab 软件中多目标遗传算法对试验数据进行优化求解, 得到的 spread 变化趋势如图 4 所示. 在优化过程中, 当优化目标、优化参数迭代到 200 代时(优化算法设定的上限), 优化结果

趋于稳定. 优化后获得的部分解集如表 3 所示.

由图 4 可知, SEC 和 Ra 两者相互抑制, 不能同时最小. 由表 3 可知, n 和 ae 均接近设定的上限限定值, 这说明提高主轴转速、增大切削宽度可以降低切削比能和提高工件的表面质量.

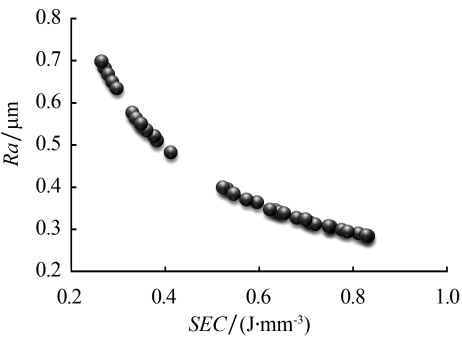


图 4 GA-spread 的变化趋势

为了验证优化后的参数对加工工艺(粗/半精加工)的适用性, 本文对参数优化前后的实验结果进行了对比, 结果如表 4 所示. 由表 4 的数据可知: 加工工艺为粗加工时, 采用优化参数时的切削比能(0.269 J/mm^3)比参数未优化时的切削比能(0.500 J/mm^3)降低了 46.2%; 加工工艺为半精加工时, 采用优化参数时的表面粗糙度($0.292\text{ }\mu\text{m}$)比参数未优化时的表面粗糙度($0.500\text{ }\mu\text{m}$)降低了 41.6%. 由此可见, 使用优化的铣削参数进行粗/半精加工时, 可以有效降低切削比能和提高工件的表面质量.

表 3 部分 GA-pareto 的解

| 序号 | $n/(\text{r}/\text{min})$ | $f_z/(\text{mm}/\text{r})$ | ap/mm | ae/mm | $SEC/(\text{J}/\text{mm}^3)$ | $Ra/\mu\text{m}$ |
|----|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------|
| 1 | 2885.500 | 0.048 | 2.156 | 3.454 | 0.30 | 0.63 |
| 2 | 2891.003 | 0.021 | 1.580 | 3.464 | 0.78 | 0.30 |
| 3 | 2889.199 | 0.022 | 1.744 | 3.474 | 0.68 | 0.33 |
| 4 | 2889.352 | 0.026 | 1.702 | 3.468 | 0.60 | 0.36 |

表 4 优化前后的实验结果

| 加工状态 | | $n/(\text{r}/\text{min})$ | $f_z/(\text{mm}/\text{r})$ | ap/mm | ae/mm | $SEC/(\text{J}/\text{mm}^3)$ | $Ra/\mu\text{m}$ |
|------|-----|---------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------|
| 经验加工 | | 2500 | 0.03 | 2.4 | 3.0 | 0.500 | 0.500 |
| 粗加工 | 优化值 | 2885 | 0.05 | 2.4 | 3.5 | 0.272 | 0.681 |
| | 试切值 | 2885 | 0.05 | 2.4 | 3.5 | 0.269 | 0.720 |
| 半精加工 | 优化值 | 2885 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | 0.832 | 0.282 |
| | 试切值 | 2885 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | 0.849 | 0.292 |

5 结论

本文研究结果显示,使用优化后的铣削参数对工件进行粗/半精加工时,其加工切削比能和工件表面粗糙度比使用经验参数加工时分别降低了 46.2% 和 41.6%。该结果表明,使用优化参数对工件进行工艺加工时可以有效降低切削比能和提高工件的表面质量,因此本文优化方法可为提高工件表面质量和降低能耗提供参考。本文在研究中仅考虑了能耗和工件表面质量 2 个优化目标,而对切削过程中的振动、切削力等目标未能进行研究,因此在今后的优化研究中将考虑更多的优化目标,以取得更好的优化结果。

参考文献:

- [1] 李聪波,朱岩涛,李丽,等. 面向能量效率的数控铣削加工参数多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2016,52(21):120-129.
- [2] FRATILA D, CCAIZAR C. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg₃[J]. Journal of Cleaner Production, 2011,19(6):640-645.
- [3] 谢书童,郭隐彪. 边缘分布估计算法在车削参数优化中的应用[J]. 中国机械工程, 2010,21(1):22-26.
- [4] CAMPOSECO-NEGRETE C. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA[J]. Journal of Cleaner Production, 2013,53(16):195-203.
- [5] 马峰,张华,曹华军. 面向低能耗少切削液的多目标加工参数优化[J]. 机械工程学报, 2017,53(11):157-163.
- [6] 李爱平,鲍进,李聪,等. 基于低能耗的平面端铣粗/精加工参数全局多目标优化[J]. 中国机械工程, 2015,26(14):1888-1894.
- [7] 邓朝晖,符亚辉,万林林,等. 面向绿色高效制造的铣削工艺参数多目标优化[J]. 中国机械工程, 2017,28(19):2365-2372.
- [8] 徐敬通. 数控机床能耗建模与切削参数节能优化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [9] 胡韶华,何彦,刘飞. 高效高速稳态铣削参数优化[J]. 沈阳工业大学学报, 2017,39(3):286-291.
- [10] RAJEMI M F, MATIVENGA P T, ARAMCHAROEN A. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations[J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(10/11):1059-1065.
- [11] 石文天,王西彬,刘玉德,等. 基于响应曲面法的微细铣削表面粗糙度预报模型与实验研究[J]. 中国机械工程, 2009,20(20):2399-2402.
- [12] XIE J, LIU F, QIU H. An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,85(5/6/7/8):1339-1346.
- [13] 胡瑞飞,殷鸣,刘雁,等. 切削稳定性约束下的铣削参数优化技术研究[J]. 机械工程学报, 2017,53(5):190-198.
- [14] 赵丽娟,范佳艺. 基于遗传算法的采煤机螺旋滚筒多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2018,29(5):591-596.
- [15] 刺朝阳,魏娟,王广通. 基于 Matlab 遗传算法的数控铣床切削参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(1):39-41.
- [16] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2003.