

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311024



# 机器人石材雕刻粗加工能耗 建模与优化分析

黄吉祥<sup>1</sup>, 尹方辰<sup>1</sup>, 黄身桂<sup>1</sup>, 张舜德<sup>2</sup>, 顾立志<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 泉州信息工程学院 机械与电气工程学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 以 ABB1200 型石雕机器人加工汉白玉为例, 对石雕机器人加工能耗进行建模和分析, 探究其功耗特点。首先, 基于田口法规划实验, 采用 Minitab 非线性拟合建立磨削工艺参数与磨削比能的回归方程, 构建以磨削加工工艺参数为变量, 以最小磨削比能为优化目标的优化模型。然后, 使用模拟退火算法计算最小磨削比能的工艺参数, 通过实验数据和算法优化结果分析石雕机器人粗加工能耗特点。结果表明: 去除同等体积的材料, 磨削比能最小目标下的最优磨削加工参数的能耗比经验参数节约了 38.4%。

**关键词:** 机器人石材雕刻; 工艺参数; 田口法; 能量效率; 模拟退火算法

中图分类号: TG 147; TG 17

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)04-0471-07

## Modeling and Optimization Analysis of Energy Consumption in Rough Machining of Robotic Stone Carving

HUANG Jixiang<sup>1</sup>, YIN Fangchen<sup>1</sup>, HUANG Shengui<sup>1</sup>,  
ZHANG Shunde<sup>2</sup>, GU Lizhi<sup>2</sup>

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Taking the machining processing of white marble using ABB1200 type stone carving robot as an example, the energy consumption characteristics were explored through modeling and analyzing of the energy consumption of stone carving robot processing. Firstly, based on the Taguchi method for planning experiments, using Minitab nonlinear fitting to establish a regression equation between grinding process parameters and grinding specific energy, an optimization model was constructed with grinding processing parameters as variables and the minimum grinding specific energy as the optimization objective. Then, the processing parameters of the lowest grinding specific energy was calculated using a simulated annealing algorithm, and the energy consumption characteristics of rough machining using stone carving robot were analyzed through experimental data and algorithm optimization results. The results show that to remove the same volume of materials, the energy consumption employing the optimal grinding parameters under the goal of minimizing grinding specific energy is reduced by 38.4% compared to that using the empirical parameters.

**Keywords:** robotic stone carving; processing parameters; Taguchi method; energy efficiency; simulated annealing algorithm

收稿日期: 2023-11-29

通信作者: 黄吉祥(1989-), 男, 实验师, 主要从事高效精密加工的研究。E-mail: xmz024@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划项目(2022H6029, 2022H0018); 工业机器人智能制造福建省高校工程研究中心开放课题(GYJQ2002)

作为一种天然的原材料,石材具有抗腐蚀性能好、抗风化能力强、易于获得等优点。古时候的人们就已经开始使用石材作为装饰品的原材料。石材发展历史源远流长,而石雕作为可以传承千年的文化载体,是人们窥探历史过往和表达当下文化的重要媒介。长期以来,石材的加工和雕刻一直采用人工加工的方法,工人们通过高超的手艺和创造力,对一块石材进行雕刻打磨,经过长时间的工作,最终完成一项作品,与未加工之前的原材料相比,作品的艺术价值和商业价值都会发生质变,正因如此,石材雕刻吸引越来越多的人加入工业生产之中。目前,传统的石材雕刻行业面临着生成力低下、劳动力短缺、环境污染严重等发展瓶颈<sup>[1-2]</sup>,而将工业机器人用于石材雕刻已被广泛认可<sup>[3]</sup>。例如,福建省惠安县已有企业采用规模化的石材雕刻机器人(简称石雕机器人)加工石雕工艺品。然而,由于目前机器人用于石材雕刻的相关研究较少,行业内也没有成体系的加工工艺技术,从而导致加工过程存在低效率、高能耗等问题。在当前严格控制能耗、减少碳排放的大背景下,提高石材雕刻过程的能量效率,减少能耗具有重要意义。

在机床加工领域,加工能耗建模优化问题已有非常广泛的研究<sup>[4-8]</sup>。文献[9]对机器人抛光系统进行能耗研究,构建一种综合机器人运动规划和任务调度的优化模型,并通过自适应优化算法对模型进行求解,通过优化可以降低 18% 以上的能耗。文献[10]基于 BN-LSTM 构建机器人抛光系统的能耗模型,并在安川机器人抛光系统中进行实验验证。文献[11]研究铣削机器人系统的能量特性,通过特定应用下的加工实验,定性地给出加工参数对铣削加工机器人能耗的影响分析。目前,还没有关于机器人石材加工能耗优化分析方面的研究。基于此,本文就机器人石材雕刻过程中能耗最大的粗加工过程进行能耗建模与优化分析。

# 1 机器人石材雕刻能耗分析

## 1.1 石雕机器人加工工艺过程

石材雕刻机器人(图 1)的主体为 ABB1200 型工业机器人。ABB1200 型工业机器人广泛应用于电子、机械加工等场景,且可以和外部系统进行广泛的沟通。该工业机器人集成旋转工作台、电主轴、对刀仪和水冷等部件可构成石雕机器人,通过更换刀具可以满足立体石雕粗加工、精加工和表面抛光等加工需求。

石雕机器人加工石材的原理是通过高速旋转的钎焊金刚石刀具磨削加工去除多余的材料,从而达到预期的加工形状和加工精度。石雕机器人的工件安装转台可以进行无限制旋转,有更高的自由度和更大的加工范围,能够实现更细分的加工策略,完成更为复杂曲面的雕刻加工。

对于复杂的石雕工艺品一般采用粗加工—二次粗加工—分区精加工的工艺过程。粗加工一般选用直径较大的平底金刚石刀具快速去除材料,获得石雕工艺品的大致轮廓形状。二次粗加工选用直径为粗加工刀具直径 40%~60% 的球刀或锥形刀,这一步是为了去除粗加工刀具直径过大而无法加工到的残余材料<sup>[12]</sup>。分区精加工则根据需要的表面质量和模型精度选用直径为 1~4 mm 的球刀或锥形刀,按照模型的特点分区加工。其中,粗加工过程去除材料最多、加工时间最长,是加工能耗的主要来源。因此,着重对石雕机器人粗加工过程的能耗进行建模分析,并给出面向能效最优的加工参数指导。

## 1.2 粗加工过程的能耗分析

石雕机器人属于复杂的机电产品,具有能量消耗源多、能耗过程复杂、能耗效率低等特点。对石雕机器人加工建立能耗模型是节能工艺优化的基础,而能耗分析则是能耗建模的前提。

从机器人加工过程的工作状态出发,分析石雕机器人运行各阶段的能耗。石雕机器人加工过程中的能耗包括启动能耗、空切能耗、磨削能耗。

1) 启动能耗。打开石雕机器人的电源后,机器人控制柜、示教器、显示屏、照明灯等开启。机器人启动后的稳定状态为机器人启动状态,该状态下的能耗为稳定值。



图 1 石材雕刻机器人  
Fig. 1 Stone carving robot

2) 空切能耗。石雕机器人在加工前开启主轴电机和自动模式, 机器人各轴上电运行, 未参与磨削前的状态为机器人空切运行状态。空切功率( $P_u$ )计算式为

$$P_u = kn + P_0. \tag{1}$$

式(1)中:  $n$  为主轴转速,  $r \cdot \min^{-1}$ ;  $k$  为主轴功率系数;  $P_0$  为机器人上电待机功率,  $W$ 。

3) 磨削能耗。刀具切入加工工件进行磨削加工时的状态为磨削加工状态。磨削功率与加工参数相关<sup>[13]</sup>, 磨削功率( $P_c$ )计算式为

$$P_c = F_c v_c. \tag{2}$$

式(2), (3)中:  $F_c$  为磨削力,  $N$ ;  $v_c$  为磨削速度,  $m \cdot$

$$s^{-1}, v_c = \frac{\pi d n}{1\,000 \times 60}, d \text{ 为刀具直径, mm}.$$

由此可知, 石雕机器人石材粗加工总能耗( $E_{all}$ )计算式为

$$E_{all} = \int_0^t (P_c + P_u). \tag{3}$$

建立石雕机器人粗加工能耗模型, 如图 2 所示。图 2 中:  $P$  为功率;  $t$  为时间。

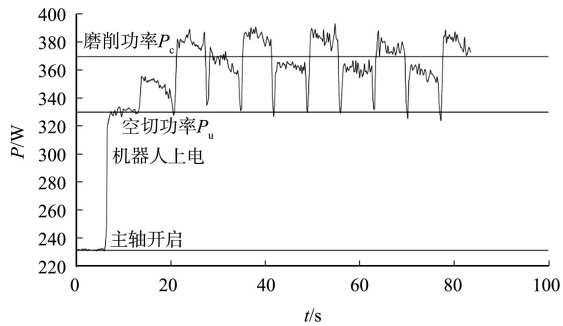


图 2 石雕机器人粗加工能耗模型  
Fig. 2 Energy consumption model of rough machining using stone carving robot

## 2 粗加工过程能耗相关系数试验拟合

### 2.1 试验条件

1) 功率采集设备。测量仪器为 WT1800 型功率分析仪(日本横河电机株式会社), 基本功率精度为  $\pm 0.1\%$ , 简单平均值(DC)基本功率精度为  $\pm 0.05\%$ , 电流/电压带宽为 5 MHz, 采样率约为 2 MHz, 电流测量范围为 0.000 1~55.000 0 A。

2) 实验条件。以顶部粗加工为例, 石雕机器人磨削加工(图 3)中, 主轴转速为  $100 \sim 12\,000 \text{ r} \cdot \min^{-1}$ , 最大功率为 800 W。机器人工具中心点(TCP)的最大速度为  $7\,300 \text{ mm} \cdot \min^{-1}$ , 最大加速度为  $35 \text{ m} \cdot s^{-2}$ , 有效负载为 7 kg。实验平台为 ABB IRB1200, 工件材料为汉白玉, 磨削长度和磨削宽度均为 60 mm, 采用平行粗加工, 加工方向垂直, 采用金刚石平底刀, 刀具直径为 7 mm。

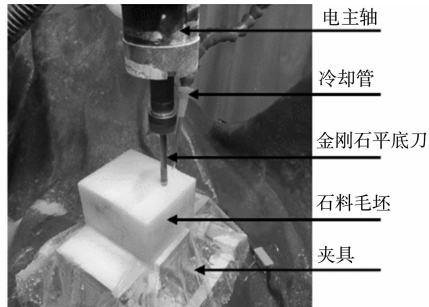


图 3 石雕机器人磨削加工  
Fig. 3 Grinding processing using stone carving robot

### 2.2 空切功率

根据空切功率为主轴转速的线性函数, 改变主轴转速, 测定系统的空切功率, 并建立空切功率模型。选用常用的主轴转速( $7\,000 \sim 10\,000 \text{ r} \cdot \min^{-1}$ ), 故主轴转速分别设置为 7 000, 7 600, 8 200, 8 800, 9 400  $\text{r} \cdot \min^{-1}$ 。不同主轴转速下的空切功率, 如图 4 所示。通过线性拟合可得空切功率关于主轴转速的计算式为

$$P_u = 0.004\,1n + 289. \tag{4}$$

### 2.3 磨削功率

磨削功率由磨削参数与主轴系统特性决定, 其中, 磨削力由磨削宽度( $a_c$ )、磨削深度( $a_p$ )、主轴转速和进给速度( $v_f$ )等磨削参数及加工刀具、工件材料等非磨削参数决定。

机床的磨削功率模型的经验公式<sup>[13]</sup>为

$$P_c = \frac{k_s a_p a_c v_f}{60 \times 10^6}. \tag{5}$$

式(5)中:  $k_s$  为单位磨削力。

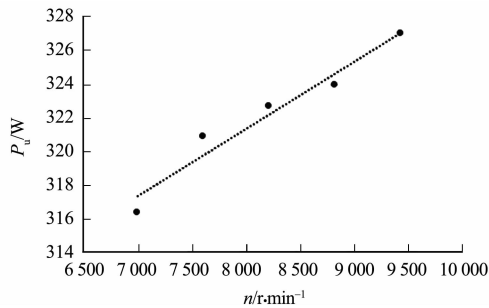


图 4 不同主轴转速下的空切功率  
Fig. 4 Unloaded cutting power at different spindle speeds

磨削功率模型在机床磨削过程有较好的精度,但在石雕机器人加工过程中并未得到验证,因此,通过多因素正交实验,采用经验非线性回归拟合方式对磨削功率进行建模。

建立磨削功率与 4 参数指数关系的模型,有

$$P_c=k_c v_c^x v_f^y a_p^z a_e^w。$$

(6)

式(6)中: $k_c,x,y,z,w$  为待确定模型系数。

通过 L25 的正交实验表设计 4 因素 5 水平正交实验表。为了参数设置的合理性,提前进行预实验,确定最大可行磨削力对应下的加工参数,选取的磨削参数为磨削宽度、磨削深度、主轴转速和进给速度。

磨削功率的正交实验因素及水平,如表 1 所示。磨削功率的正交实验数据,如表 2 所示。

表 1 磨削功率的正交实验因素及水平

Tab.1 Orthogonal experimental factors and levels of grinding power

因素水平	$a_c/\text{mm}$	$a_p/\text{mm}$	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_f/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
1	1.0	1.2	7 000	700
2	1.5	1.6	7 600	800
3	2.0	2.0	8 200	900
4	2.5	2.4	8 800	1 000
5	3.0	2.8	9 400	1 100

表 2 磨削功率的正交实验数据

Tab.2 Orthogonal experimental data of grinding power

试验组号	$a_c/\text{mm}$	$a_p/\text{mm}$	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_f/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	$P_c/\text{W}$
1	1.0	1.2	7 000	700	327.363
2	1.0	1.6	7 600	800	333.254
3	1.0	2.0	8 200	900	339.219
4	1.0	2.4	8 800	1 000	345.739
5	1.0	2.8	9 400	1 100	353.070
6	1.5	1.2	7 600	900	332.939
7	1.5	1.6	8 200	1 000	340.794
8	1.5	2.0	8 800	1 100	349.957
9	1.5	2.4	9 400	700	349.227
10	1.5	2.8	7 000	800	341.828
11	2.0	1.2	8 200	1 100	340.749
12	2.0	1.6	8 800	700	342.073
13	2.0	2.0	9 400	800	354.129
14	2.0	2.4	7 000	900	348.596
15	2.0	2.8	7 600	1 000	363.296
16	2.5	1.2	8 800	800	342.045
17	2.5	1.6	9 400	900	352.790
18	2.5	2.0	7 000	1 000	359.003
19	2.5	2.4	7 600	1 100	367.908
20	2.5	2.8	8 200	700	363.021
21	3.0	1.2	9 400	1 000	352.761
22	3.0	1.6	7 000	1 100	355.343
23	3.0	2.0	7 600	700	352.629
24	3.0	2.4	8 200	800	368.912
25	3.0	2.8	8 800	900	379.087

通过 Minitab 非线性拟合确定待定系数,可得磨削功率公式为

$$P_c=0.059 v_c^{-0.076} v_f^{0.778} a_p^{1.011} a_e^{0.875}。$$

(7)

磨削功率测量值与预测值对比,如图 5 所示。由图 5 可知:测量值与预测值拟合效果较好,最大预测偏差为 1.59%,验证了模型的可行性和适用性。

由此可获得当前加工条件下的系统功率模型为

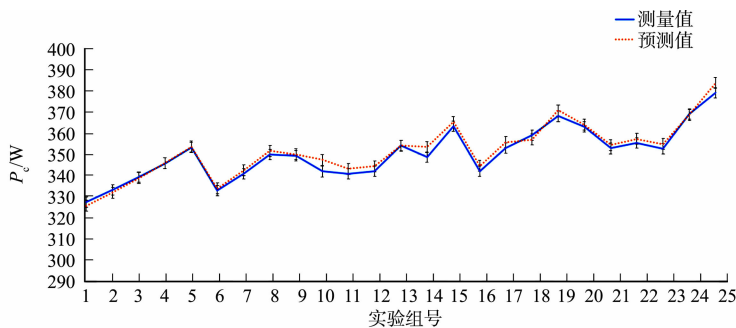


图 5 磨削功率测量值与预测值对比

Fig. 5 Comparison of measured and predicated values of grinding power

$$P=P_c+P_u=0.059v_c^{-0.076}v_f^{0.778}a_p^{1.011}a_e^{0.875}+0.004\ 1n+289。$$
 (8)

3 石雕机器人粗加工参数优化模型

磨削参数涉及磨削宽度、磨削深度、主轴转速和进给速度。每一个参量的变化都会影响能耗和加工时间,综合研究磨削参数对目标的影响更具有实际意义,因此,将 4 个参数都作为优化变量。

3.1 磨削比能模型

磨削比能(SEC)是评估加工过程能量效率的一个常用的指标,它表征了单位材料去除体积下所消耗的能量,SEC 越小,则加工过程能量效率越高,SEC 基本公式<sup>[14]</sup>为

$$SEC=\frac{E_{all}}{V}=\int_0^{t_c}P/\int_0^{t_c}R。$$
 (9)

式(9)中:V 为材料去除总体积;t<sub>c</sub> 为加工时间;R 为材料去除率。

材料去除率是指单位时间磨削加工去除的材料体积,计算公式为

$$R=\frac{v_f a_p a_e}{60}。$$
 (10)

根据式(8)~(10)可得磨削比能模型为

$$SEC=\frac{0.059v_c^{-0.076}v_f^{0.778}a_p^{1.011}a_e^{0.875}+0.004\ 1n+289}{v_f a_p a_e/60}。$$
 (11)

在机器人加工过程中去除相同的体积,需要的能耗越少,则磨削比能越小,综合能量效率也就越高。工艺参数的优化是把最小磨削比能作为优化目标函数。

3.2 约束条件

石雕机器人粗加工参数的设定需要结合实际的约束,包括机器人负载能力约束、机器人运动约束和刀具刚度约束等。优化变量需满足以下 4 个约束条件。

- 1)  $F_c \leq F_{rob-spot}$ ,  $F_{rob-spot}$  为机器人最大负载力,当磨削力超过这个值时,机器人将报警并停机。
- 2)  $F_c \leq n \leq F_s$ ,  $F_s$  是主轴刚度允许的最大磨削力。
- 3)  $n_{min} \leq n \leq n_{max}$ ,  $n_{min}$ ,  $n_{max}$  分别为主轴的最高转速和最低转速。
- 4)  $v_{f_{min}} \leq n \leq v_{f_{max}}$ ,  $v_{f_{min}}$ ,  $v_{f_{max}}$  分别为机器人 TCP 运动速度的最小值和最大值。

因此,石雕机器人粗加工参数优化模型为

$$\left. \begin{aligned} \min F(n,v_f,a_p,a_e) &= \min SEC, \\ \text{s. t. } F_c &\leq F_{rob-spot}, \quad F_c \leq n \leq F_s, \quad n_{min} \leq n \leq n_{max}, \quad v_{f_{min}} \leq n \leq v_{f_{max}}。 \end{aligned} \right\}$$
 (12)

4 基于模拟退火算法的能耗模型求解

4.1 模拟退火算法

模拟退火(SA)算法基于临界加热固体的热退火模拟,当固体(金属)通过加热到高温而进入熔融状态时,熔融金属中的原子彼此自由移动<sup>[15]</sup>。随着温度降低,原子趋于有序,最终形成具有最小可能内能的晶体。SA 算法是一种随机搜索方法,由于它具有按照概率接受差解的特性,在算法充分搜索的情况

下,可以有效避免陷入局部最优解。在温度( $\theta$ )趋于平衡时的概率公式为

$$p(E)=\exp\left(-\frac{\Delta E}{K_{\text{B}}\theta}\right)。$$

(13)

式(13)中: $K_{\text{B}}$  为波尔兹曼常数; $E$  为能量; $\Delta E$  为退火过程的能量变化,是算法的目标函数值。

SA 算法先从一个随机点开始最小化退火能量(目标函数),再通过尝试搜索空间中所有点的能量值来寻找最小解。在这种选择较高冷却速度的方法中,陷入局部极小值的概率非常高。因此,为了逃离局部极小值,应当选择适当的较慢冷却速度。

SA 算法过程分步实施的伪程序表示如下。

- 1) 初始化。随机生成初始点  $x_0$ ,设置初始温度  $\theta=\theta_{\text{mit}}$ ,迭代次数  $K=0$ 。
- 2) 计算当前能量。随机产生定义域内的初值  $X_K$ ,并计算该点的能量  $E_1=F(X_K)$ 。
- 3) 随机生成邻域内的点。在  $X_K$  邻域随机产生新点  $X_{K+1}$ ,并计算该点的能量  $E_2=F(X_{K+1})$ ,并确定  $\Delta E=E_2-E_1$ 。
- 4) 判断评价函数  $\Delta E$ 。如果  $\Delta E<0$ ,接受新解,直接跳至第 6 步;否则,随机生成  $[0,1]$  内的随机数  $a$ ,并计算概率  $p=\exp(-\Delta E/K_{\text{B}}\theta)$ 。
- 5) 按照概率接受新解。如果  $p>a$ ,则接受新解,并进入第 6 步,否则,不接受新解,回到第 3 步。
- 6) 检查迭代次数。如果  $K<N$ ( $N$  为设定的最大次数),迭代次数增加  $K=K+1$ ,回到第 3 步。
- 7) 停止条件。判断是否冷却充分,如果  $\theta\leq\theta_{\text{min}}$ ( $\theta_{\text{min}}$  为温度最小值),则冷却充分,算法停止,输出最优解;否则,温度衰减  $\theta=k_t\theta$ ( $k_t$  为衰减系数),并回到第 3 步。

通过能耗目标函数与 SA 算法相关联,求解出最优加工参数。

4.2 MATLAB 模拟退火算法

基于模拟退火算法的概念,编写一个 MATLAB 代码,由此得到当前加工环境下最优的加工参数及算法适应度进化曲线。由于加工参数主轴转速、进给速度、磨削深度、磨削宽度的取值范围差异很大,需要把它们映射到统一的取值范围内,故进行线性变换,有

$$y=\frac{2\times(Y-Y_{\text{min}})}{(Y_{\text{max}}-Y_{\text{min}})}+1。$$

(14)

式(14)中: $y$  为参数的统一化取值; $Y$  为参数的真实值; $Y_{\text{max}}$  为参数的最大值; $Y_{\text{min}}$  为参数的最小值。

对每个参数进行变换,在程序中可得统一的取值范围 $[1,3]$ 。SA 算法的参数设置如下:初温为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;马科夫链长为 50;温度衰减系数为 0.99;搜索步长因子为 0.04;容差为  $10^{-6}$ 。

计算后输出磨削比能最小时的加工参数,经式(9)逆变换后可知:当主轴转速为  $6\,562\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,进给速度为  $1\,200\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,磨削宽度为 3 mm,磨削深度为 2.9 mm 时,磨削比能达到最小值  $5.6\text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 。因此,在保证实际加工约束下,主轴转速取最小值,进给速度、磨削深度和磨削宽度均取到最大值。算法适应度进化曲线,如图 6 所示。对比经验加工时设定的加工参数:主轴转速为  $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,进给速度为  $1\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,磨削深度为 2 mm,磨削宽度为 3 mm,去除同等体积的余量,文中方法能耗可节约 38.4%。

由此可知,石雕机器人在顶部粗加工选取材料去除率越高的工艺参数,能量效率也越高。在较高材料去除率下,加工同等体积余量时,可明显缩短加工时间,使磨削时段的辅助系统、空切运行时间缩短。较大的工艺参数虽然会增大磨削功率,但相较于磨削能耗,石雕机器人基础能耗占比更为突出。因此,在一定程度上通过选择更加激进的工艺参数,缩短加工时间可以显著提高加工过程的能量效率,减少能量消耗。然而,对于石雕粗加工这个表面质量和精度要求不高的加工场景,过大的加工参数会加剧刀具磨损,缩短机器使用寿命,产生更大的噪声。文中仅从能耗最优目标给出工艺参数设定建议,实际的加工过程还需综合考虑其他目标。

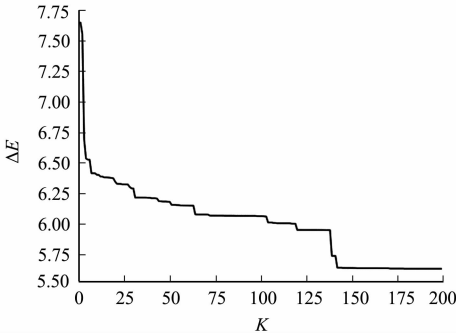


图 6 算法适应度进化曲线

Fig. 6 Evolution curve of algorithm fitness

5 结论

1) 基于模拟退火算法对建立的模型进行求解,得到磨削比能最小目标下的最优磨削加工参数,即主轴转速为  $6\,562\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,进给速度为  $1\,200\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,磨削深度为  $3\text{ mm}$ ,磨削宽度为  $2.9\text{ mm}$ ,此时磨削比能为  $5.6\text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ ,这比经验参数去除同等体积的余量能耗节约了  $38.4\%$ 。

2) 在当前加工环境下,采用更激进的工艺参数可以获得更高的能量效率,在同等工作量的基础上可以减少能量消耗。限制加工能量效率进一步提高的因素直接体现在对加工参数的约束上。如果采用更高材料去除率的加工参数将加大加工磨削力,使机器人磨削反力超过额定负载力,从而导致机器人触发保护停机。因此,实际加工过程应当在满足设备、工具等限制的前提下,选择更优的加工工艺参数。

参考文献:

[1] 孙卫星,田静. 践行宜业尚品理念 推进绿色低碳发展:《石材行业“十四五”发展规划纲要》简介及实施路径探讨[J]. 石材,2022(9):8-14. DOI:10.14030/j.cnki.scaa.2022.0143.

[2] 柯晶莹,王惠婷. 惠安石雕石材产业集群的现状与对策研究:基于惠安县洛阳石雕石材企业的问卷调查[J]. 宿州教育学院学报,2021,24(1):22-25. DOI:10.3969/j.issn.1009-8534.2021.01.006.

[3] 晏辉. 发展加工石材机器人可行性与必要性[J]. 石材,2015(9):58-60. DOI:10.14030/j.cnki.scaa.2015.0228.

[4] 李丽,邓兴国,尚川博. 面向能效的曲面数控加工刀具路径优化方法[J]. 机械工程学报,2017,53(11):184-194. DOI:10.3901/JME.2017.11.184.

[5] 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. DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2017.19.015.

[6] 迟玉伦,范志辉,葛爱丽,等. 面向绿色高表面质量制造的硬态车削工艺多目标参数优化[J]. 表面技术,2023,52(9):278-293. DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.024.

[7] 张华. 绿色高效切削加工工艺优化及其智能专家系统研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2018.

[8] 武煜航. 面向绿色制造的数控加工工艺参数多目标优化研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.

[9] CAO Huajun,ZHOU Jin,JIANG Pei,*et al.* An integrated processing energy modeling and optimization of automated robotic polishing system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2020,65:101973. DOI:10.1016/j.rcim.2020.101973.

[10] HSIEN-I L,RAJA M,FAUZY S W. BN-LSTM-based energy consumption modeling approach for an industrial robot manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2023,85:102629. DOI:10.1016/j.rcim.2023.102629.

[11] UHLMANN E,REINKOBER S,HOLLERBACH T. Energy efficient usage of industrial robots for machining processes[J]. Procedia CIRP,2016,48:206-211. DOI:10.1016/j.procir.2016.03.2412.

[12] 王柴志. 立体石雕机器人系统刚度对加工误差的理论及实验分析[D]. 厦门:华侨大学,2020.

[13] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[14] 刘霜,刘飞,王秋莲. 机床机电传动系统服役过程能量效率获取方法[J]. 机械工程学报,2012,48(23):111-116. DOI:10.3901/JME.2012.23.111.

[15] BABAJANZADE-ROSHAN S,BEHBOODI-JOOIBARI M,TEIMOURI R,*et al.* Optimization of friction stir welding process of AA7075 aluminum alloy to achieve desirable mechanical properties using ANFIS models and simulated annealing algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2013,69(5/6/7/8):1803-1818. DOI:10.1007/s00170-013-5131-6.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴跃勤)