

# 采用改进人工蜂群算法的低碳铣削参数优化

聂俊争, 李仁旺

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月29日

## 摘要

出于对国家双碳号召的响应, 有效推动制造车间节能减排, 本文对铣削加工过程中工艺参数优化进行研究, 建立以最低碳排放和最低加工成本为目标的铣削加工优化模型。在此基础上, 针对标准人工蜂群算法存在过多无用迭代、易过早陷入局部最优解的缺点, 引入贴近最优思想, 并将其与粒子群算法结合, 增强粒子的全局搜索能力, 改善求解效率与寻优精度。结果表明, 实验加工工艺的碳排放减少了11.4%, 加工成本减少了7%, 表明了该模型的准确性和高效性。铣削加工模型为加工工艺的碳排放量化和加工成本最小化问题提供了一种高效的可行方案。

## 关键词

铣削加工, 碳排放, 工艺参数优化, 人工蜂群算法

# Optimization of Low Carbon Milling Parameters Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm

Junzheng Nie, Renwang Li

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In response to the national call for "double carbon" and to effectively promote energy conservation and emission reduction in manufacturing workshops, this paper studies the optimization of process parameters in the milling process, and establishes a milling optimization model with the goal of minimum carbon emissions and minimum processing costs. On this basis, in view of the shortcomings of the standard artificial bee colony algorithm, which has too many useless itera-

tions and is easy to fall into the local optimal solution prematurely, the idea of close to the optimal solution is introduced and combined with particle swarm optimization to enhance the global search ability of particles and improve the solution efficiency and optimization accuracy. The results show that the carbon emission of the experimental processing technology is reduced by 11.4%, and the processing cost is reduced by 7%, indicating the accuracy and efficiency of the model. The milling model provides an efficient and feasible scheme for the carbon emission quantification and processing cost minimization of the processing process.

## Keywords

Milling, Carbon Emission, Process Parameter Optimization, Artificial Bee Colony

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球变暖日益加剧, 大力发展并实现低碳制造已经成为制造业发展的潮流与趋势。国际能源机构指出, 制造业碳排放已达全球碳排放占比 30%以上[1]。如不采取有效措施减缓碳排放, 将可能对生态系统、社会发展乃至人类生存造成不可估量的影响。2020 年 9 月, 中国政府在第七十五届联合国大会上宣布, 我国将通过有力措施推动温室气体减排, 力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和[2]。走低碳制造之路, 是双碳目标推进过程中的重要一环。

铣削工艺参数的选择直接影响着被加工零件的成型质量、生产效率和碳排放, 如何合理选择加工参数是一个值得探讨的问题。对此, 尹瑞雪等人[3]在分析铣削加工能耗的基础上, 提出了碳排放评估函数和碳效率的概念, 将其作为优化目标建立模型, 采用遗传算法优化求解获得最佳铣削参数。黄文良等人[4]建立铣削加工过程中的碳排放量化模型, 通过粒子群算法和平面铣削优化实验验证模型, 为铣削加工的碳排放量化提供解决方案。邓朝晖等人[5]采用信噪比方法和灰色关联分析法优化模型问题, 通过量子遗传算法以最高能效、最低碳排放和最高材料去除率为目标进行优化计算。Shixiong Xing 等人[6]提出一种高效低碳铣削参数优化方法, 采用引力搜索算法并引入位置更新退避操作, 对比分析单目标和多目标优化结果, 为各种加工场景提供决策依据。

综上所述, 当前的铣削工艺参数优化研究大多注重能量效率、材料去除率和加工时间等经济性指标, 而忽视了加工成本等经济性指标和碳排放等环境性指标的兼容, 导致研究成果在实际加工生产中具有局限性。本文在机床功率、表面粗糙度和铣削深度等约束条件下, 以铣削加工中最低碳排放和最低加工成本为目标建立铣削工艺参数多目标优化模型, 采用改进人工蜂群算法对铣削工艺参数进行优化。

## 2. 工艺参数优化模型

### 2.1. 选择优化变量

在铣削加工过程中, 影响碳排放和加工成本的主要工艺参数为铣削速度  $v_c$ , 每齿进给量  $f_z$  和铣削深度  $a_p$ 。因此, 本文选择以上 3 种铣削工艺参数作为优化变量。

### 2.2. 优化目标函数

目标函数必须在正确反映客观问题的前提下, 把所有需要优化的地方都完美展示出来。在 3060 双碳

目标下, 铣削加工过程中的碳排放和生产成本是我们亟待改善的方面。因此, 本文选取碳排放量和加工成本作为优化目标函数。

### 2.2.1. 最低碳排放函数

铣削加工过程中的碳排放主要包括原材料碳排放  $C_m$ 、电能碳排放  $C_e$ 、刀具碳排放  $C_t$ 、铣削液制备与消耗所产生的碳排放量  $C_f$  和废屑处理碳排放  $C_s$ 。铣削加工碳排放核算首先需要确定核算边界, 由于原材料碳排放和废屑处理碳排放主要取决于工艺设计和处理方式, 与加工参数关系甚微, 因此对于铣削加工的单工序碳排放核算模型只考虑电能碳排放、刀具碳排放和铣削液消耗处理所产生的碳排放三种。则铣削加工过程中的碳排放总量如式(1)所示:

$$C_{total} = C_e + C_t + C_f \quad (1)$$

#### 1) 电能碳排放

数控铣床的能耗主要集中在保持主轴旋转所造成的功率损失上, 由于主轴旋转所造成的摩擦能耗无法进行优化。因此对数控铣床的能耗核算不计入摩擦能耗。数控铣床铣削加工的电能碳排放由两部分构成: 空转能耗和工作能耗, 如式(2)所示:

$$E = \int_{t_{1s}}^{t_{1e}} P_n dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} P_w dt \quad (2)$$

式中  $P_n$  为铣床空载功率, kW;  $P_w$  为铣床切削功率, kW;  $t_{1s}$ 、 $t_{1e}$  为铣床空载的开始时间和结束时间, s;  $t_{2s}$  和  $t_{2e}$  为铣削加工的开始时间和结束时间, s。

数控铣削加工过程中必然会产生附加载荷损耗, 损耗系数按文献[7]以  $b_m$  记录, 因此机床的主传动系统碳排放核算模型为:

$$C_e = F_e \times E = F_e \left( \int_{t_{1s}}^{t_{1e}} P_n dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} (1 + b_m) P_w dt \right) \quad (3)$$

式中  $F_e$  为电能碳排放系数, kg/kWh; 损耗系数  $b_m$  因机床型号在 0.15~0.25 波动。

数控铣床空载功率与机床主轴转速直接相关, 由文献[8]可知, 机床空载功率可描述为式(4), 而实际铣削加工过程中切削功率可表示为式(5):

$$P_n = P_{n0} + A_1 n + A_2 n^2 \quad (4)$$

$$P_w = F_c v_c \times 10^{-3} = C_{F_c} a_p^{x_{F_c}} f_z^{y_{F_c}} a_e^{n_{F_c}} K_{F_c} v_c \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中,  $A_1$  和  $A_2$  为主轴转速系数;  $P_{n0}$  为铣床最低空载功率, kW;  $n$  为主轴实际转速, r/min;  $F_c$  为主切削力, N;  $v_c$  为铣削速度, m/s;  $C_{F_c}$  是由工件材质和铣削条件共同决定的系数;  $x_{F_c}$  为铣削深度  $a_p$  的系数;  $y_{F_c}$  为每齿进给量  $f_z$  的系数;  $n_{F_c}$  为铣削宽度  $a_e$  的系数;  $K_{F_c}$  为修正系数。

#### 2) 刀具碳排放

刀具碳排放是指铣削加工过程中因刀具磨损造成的寿命缩短而间接产生的碳排放, 计算公式如下:

$$C_t = \frac{\int_{t_{2s}}^{t_{2e}} F_t Q_t}{T_t} \quad (6)$$

$$T_t = \frac{C_f}{v_c^m f^r a_p^k} \quad (7)$$

式中  $F_t$  为刀具材料的碳排放系数;  $Q_t$  为刀具质量;  $T_t$  为刀具耐用度;  $C_f$ 、 $m$ 、 $r$ 、 $k$  为与工件及刀具材质相关的刀具寿命相关系数, 其参数值参考文献[9]。

### 3) 铣削液碳排放

对于铣削加工过程中的铣削液碳排放, 主要考虑制备铣削液和处理废液所产生的碳排放, 即矿物油的制备所产生的碳排放量  $C_p$  和处理废液所产生的碳排放  $C_a$ 。在实际生产中, 铣削液一般周期性更换, 因此单工序中铣削液消耗处理产生的碳排放采用与整个铣削液生命周期的折算方式进行核算, 公式如下:

$$C_f = \frac{\int_{t_{1s}}^{t_{1e}} (C_a + C_p) dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} (C_a + C_p) dt}{T_f} \quad (8)$$

$$C_a = F_a V \quad (9)$$

$$C_p = F_p V \rho \quad (10)$$

式中,  $T_f$  为铣削液的更换周期, min;  $F_a$  为铣削液碳排放系数, kg/L;  $V$  为铣削液消耗用量, L;  $\rho$  为铣削液浓度;  $F_p$  为矿物油碳排放系数, kg/L。

联立以上各式, 铣削加工过程中的碳排放总量可表示为:

$$C_{total} = \int_{t_{1s}}^{t_{1e}} \left( F_e (P_{n0} + A_1 n + A_2 n^2) + \frac{F_a V + F_p V \rho}{T_f} \right) dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} \left( (1 + b_m) F_e C_{F_c} a_p^{x_{F_c}} f_z^{y_{F_c}} a_e^{n_{F_c}} K_{F_c} v_c \times 10^{-3} + \frac{F_i Q_t v_c^m f^r a_p^k}{C_f} + \frac{F_a V + F_p V \rho}{T_f} \right) dt \quad (11)$$

### 2.2.2. 最低加工成本函数

在数控机床的铣削工艺过程中, 加工成本主要有电能成本、机械设备成本、刀具成本以及铣削液成本。

$$C_{cost} = C_{elec} + C_{equip} + C_{tool} + C_{fluid} \quad (12)$$

1) 电能成本是指数控机床能耗和车间辅助设备如照明系统能耗, 由于辅助设备因地制宜, 与加工参数关系甚微, 在此不做考虑, 则电能成本可表示为:

$$C_{elec} = C_p E_{total} \quad (13)$$

式中  $C_p$  为单位电能单价, 元/kWh;  $E_{total}$  为数控铣床铣削加工的总能耗, kWh。

2) 机械设备成本可通过机床的折旧成本进行换算, 如下所示:

$$C_{equip} = \int_{t_{1s}}^{t_{1e}} \frac{C_{mach}}{T_m} dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} \frac{C_{mach}}{T_m} dt \quad (14)$$

式中,  $C_{mach}$  为数控铣床成本, 元;  $T_m$  为数控铣床的使用寿命, min。

3) 刀具成本可采用实际铣削加工时间和刀具寿命的折算方式进行核算。

$$C_{tool} = \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} \frac{C_p}{T_t} dt \quad (15)$$

式中,  $C_p$  为刀具价格, 元。

4) 铣削液成本为:

$$C_{fluid} = \int_{t_{1s}}^{t_{1e}} \frac{pV}{T_f} dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} \frac{pV}{T_f} dt \quad (16)$$

式中,  $p$  为单位体积铣削液成本, 元/L。

### 2.2.3. 多目标优化

在铣削加工中, 单一的考虑碳排放因素而忽略加工成本等经济性指标的做法缺少实际生产意义。当

前 3060 双碳目标下, 深入研究加工过程中的经济指标和环境指标具有重要意义。因此, 本文在建立碳排放核算模型和成本核算模型的基础上, 将碳排放和加工成本作为优化目标。

$$\min F(v_c, f, a_p) = (\min C_{total}, \min C_{cost}) \quad (17)$$

此时的铣削工艺参数优化问题是一个多目标优化问题, 针对多目标函数很难同时获得最优解的缺点, 采用权重系数法将其转变为单目标函数, 同时进行量纲统一化处理, 最终的目标函数为:

$$\min F(v_c, f, a_p) = \min \left( \omega_1 \frac{C_{total} - C_{total \min}}{C_{total \max} - C_{total \min}} + \omega_2 \frac{C_{cost} - C_{cost \min}}{C_{cost \max} - C_{cost \min}} \right) \quad (18)$$

式中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  都是权重系数, 在此将最低碳排放量与最低加工成本看作同等重要, 取  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ ;  $C_{total \min}$  和  $C_{total \max}$  为铣削碳排放函数的最小值和最大值;  $C_{cost \min}$  和  $C_{cost \max}$  为铣削加工成本函数的最小值和最大值。

### 2.3. 约束条件

数控铣削加工工艺参数的选择须符合机械加工系统各种限制条件。根据实际加工情况, 将约束调节分为最大功率约束、进给量约束、表面粗糙度约束、铣削深度约束和加工参数规范。

#### 1) 最大功率约束

铣削加工过程中, 实际加工功率必须小于机床的最大切削功率, 如下式所示:

$$\frac{F_c v_c}{1000} = \frac{C_{F_c} a_p^{x_{F_c}} f_z^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} v_c}{1000} \leq \eta P_{\max} \quad (19)$$

式中,  $\eta$  为机床效率系数;  $P_{\max}$  为机床最大切削功率。

#### 2) 进给量约束

$$f_{z \min} \leq f \leq f_{z \max} \quad (20)$$

式中,  $f_{z \min}$ 、 $f_{z \max}$  为机床最小、最大进给范围, mm/r。

#### 3) 表面粗糙度约束

$$R_a = \frac{1000 f^2}{8 r_g} \leq R_{a \max} \quad (21)$$

式中,  $R_a$  为工件表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ ;  $R_{a \max}$  为最大表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ ;  $r_g$  为刀具刀尖圆弧半径, mm。

#### 4) 铣削深度约束

$$a_{p \min} \leq a_p \leq a_{p \max} \quad (22)$$

式中  $a_{p \min}$  和  $a_{p \max}$  为铣削深度最小值和最大值, mm。

#### 5) 加工参数规范

铣削加工过程中, 选用的工艺参数须符合机床的额定参数规定。铣削加工时的主轴转速须在机床允许的最小主轴转速  $n_{\min}$  与最大主轴转速  $n_{\max}$  之间, 如式(23)所示。而主轴转速和切削速度呈正相关, 因此切削速度也须满足机床的参数规定, 见式(24)。

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (23)$$

$$\frac{\pi D n_{\min}}{1000} \leq v_c \leq \frac{\pi D n_{\max}}{1000} \quad (24)$$

式中,  $D$  为铣削直径, mm。

### 3. 改进人工蜂群算法

#### 3.1. 标准人工蜂群算法

人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)是土耳其学者 Karaboga 等人受蜜蜂采蜜行为启发提出的一种种群智能进化算法,它在求解连续函数优化问题时性能优异[10],具有强鲁棒性、无需先验信息、需控参数少、计算便捷等特点。ABC 算法包含蜜源、引领蜂、跟随蜂和侦查蜂四种基础要素;寻找蜜源、面向蜜源的招募和抛弃蜜源的三种基本行为模式。每个蜜源位置都代表优化问题的一个可行解,而蜜源的花粉数量则代表该解的适应度值。引领蜂负责寻找蜜源和分享蜜源信息,跟随蜂则停留在蜂巢内按照引领蜂分享的蜜源信息选择蜜源,经过多次开采仍未更新的蜜源将会被抛弃,之后失去蜜源的引领蜂变为侦查蜂并随机寻找新的蜜源[11]。人工蜂群算法通过不断迭代重复执行这三个步骤,寻求问题的最优解。各阶段如下:

1) 蜂群与蜜源的初始化。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= x_{j\min} + \text{rand}[0,1](x_{j\max} - x_{j\min}) \\ i &\in (1, 2, \dots, n), j \in (1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (25)$$

式中,  $x_{ij}$  为第  $i$  个蜜源  $x_i$  的第  $j$  维度值;  $x_{j\min}$  和  $x_{j\max}$  是参数的最小与最大值;  $n$  为蜜源数目, 蜜源数目、引领蜂数与跟随蜂数三者相等;  $m$  为优化问题的参数维度。

2) 引领蜂阶段, 寻找新蜜源公式如下:

$$y_{ij} = x_{ij} + R_{ij}(x_{ij} - x_{rj}) \quad (26)$$

式中,  $y_{ij}$  为第  $i$  个新蜜源  $y_i$  的第  $j$  维度值;  $R_{ij}$  为  $[-1,1]$  的一个随机数;  $x_{rj}$  为邻域中第  $r$  个蜜源, 且  $r \neq i$ 。

3) 跟随蜂阶段, 蜜源被选择的概率公式如下:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^n f_k} \quad (27)$$

式中,  $f_i$  为第  $i$  个蜜源的适应度值。

4) 侦查蜂阶段, 当某个引领蜂寻找的蜜源连续  $n_{limit}$  代未改变, 则该引领蜂自动变为侦查蜂并按公式(25)寻找新的蜜源。

#### 3.2. 算法改进

通过分析人工蜂群算法原理可知, 该算法具有强大的全局搜索能力是因为引领蜂数目与蜜源数目相等, 并且在迭代过程中不断更新适应度值较低的蜜源, 即在增强算法全局搜索能力的同时又保证了解空间的多样性[12]。但在侦查蜂阶段, 侦查蜂进行局部搜索时只是随机的生成一个新解, 并没有参照当前解的有用信息, 具有很大的随机性, 这将大幅度降低搜索效率, 进而造成算法的过多无用迭代, 导致算法的收敛速度慢以及过早收敛。

因此, 在侦查蜂阶段引入贴近最优解思想[13]将算法初始化公式(25)改进为式(28), 以此提高生成新解的质量, 加快算法的迭代速度。

$$\begin{aligned} x'_{ij} &= x_{j\min} + \text{rand}[0,1](x_{j\max} - x_{j\min}) \\ x_{ij} &= x'_{ij} + \text{rand}[0,1](g_{jbest} - x'_{ij}) \end{aligned} \quad (28)$$

式中,  $g_{jbest}$  为当前种群最优解的第  $j$  维度值。

同时, 结合粒子群优秀的全局寻优能力, 将贴近最优思想与粒子群算法融合, 在当前解附近重新生

成  $N$  个粒子, 设置生成的粒子个数及最大迭代次数, 并随即初始化其速度, 通过粒子群算法优化得到最优解, 即新的蜜源位置。这样既利用了当前解的有效信息, 又增强了人工蜂群算法的寻优性能。

### 3.3. 改进人工蜂群算法的基本步骤

对标准人工蜂群算法进行改进之后, 其基本操作步骤如下:

- (1) 设置主要参数, 如蜜源数目、限制次数  $n_{limit}$  与最大迭代次数。
- (2) 初始化种群, 记录各初始解的适应度值与种群最优解  $g_{best}$ 。
- (3) 引领蜂基于当前位置进行邻域搜索, 利用式(25)进行贪婪选择, 生成适应度值较高的蜜源。
- (4) 更新蜜源的适应度值及种群最优解  $g_{best}$ , 利用式(27)计算跟随蜂选择各蜜源的概率  $P_i$ 。
- (5) 跟随蜂依据概率值  $P_i$  随机选择蜜源位置, 并基于当前位置进行邻域搜索。
- (6) 判断蜜源的未被改善次数是否达到  $n_{limit}$ , 若未达到, 进入步骤(7); 否则, 按式(28)进行粒子群优化得到新的蜜源位置, 代替被遗弃的蜜源。
- (7) 记录当前最优解、种群最优解  $g_{best}$  及相应参数。
- (8) 判断是否达到最大迭代次数, 若达到则输出最优解; 否则, 转步骤(3)。

## 4. 实例验证

### 4.1. 实验模型参数

本文基于典型的花键轴工艺设计[14], 通过优化铣花键的工艺参数为例进行仿真优化, 工件零件图如图 1 所示。花键轴毛坯选用直径为 34 mm 的热轧圆棒料, 其铣削加工工艺流程为: 一夹一项装夹工件, 粗、精铣花键  $6 \times 8^{+0.015}_{-0.055}$  mm, 保证小径  $\phi 25.3$  mm; 加工安排为一次粗铣加工、一次精铣加工, 铣削深度分别为 2 mm、0.35 mm, 铣削宽度为 5 mm, 最终的表面粗糙度要求为  $Ra = 6.3 \mu m$ 。数控铣床参数规格如下表 1 所示。刀具选用 YT15 硬质合金刀具, 价格为 200 元, 刀具质量为 0.015 kg, 刀具寿命为 60 min, 直径为 12 mm, 齿数为 4, 刀尖圆弧半径为 3 mm, 螺旋角为 30 度。参考文献[15], 切削力相关参数见表 2。碳排放相关参数见表 3。

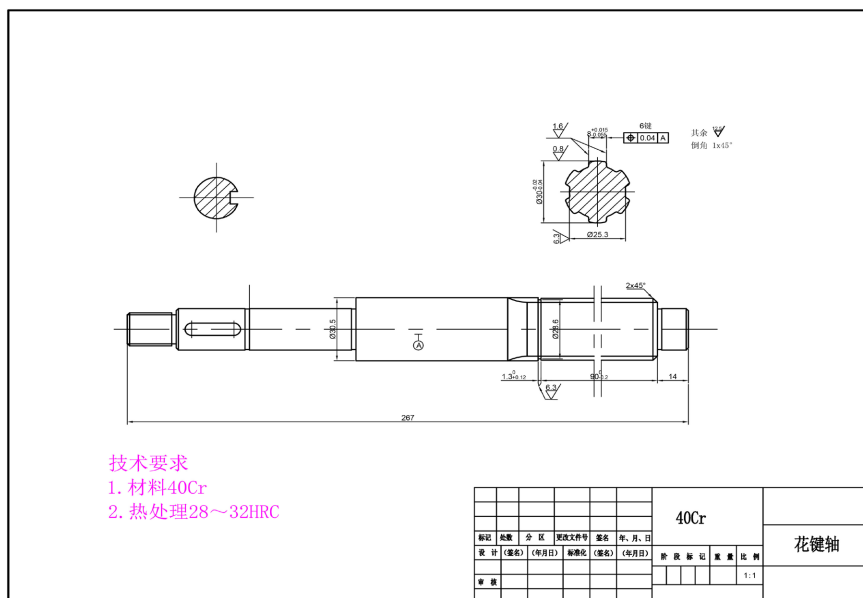


Figure 1. Spline shaft parts drawing

图 1. 花键轴零件图

**Table 1.** CNC milling machine specifications  
**表 1.** 数控铣床参数规格

主轴实际转速 $n$ (r/min)	每齿进给量 $f_z$ (mm/r)	机床最大切削功率 $P_{max}$ (kw)	主切削力 $F_c$ (N)	机床效率系数 $\eta$
50~3000	0.02~3.5	7.5	9000	0.8

**Table 2.** Cutting force related parameters  
**表 2.** 切削力相关参数

由工件材质和铣削条件共同决定的系数 $C_{F_c}$	铣削深度系数 $x_{F_c}$	每齿进给量系数 $y_{F_c}$	铣削宽度系数 $n_{F_c}$	修正系数 $K_{F_c}$
7900	1.0	0.75	1.1	0.25

**Table 3.** Carbon emission related parameters  
**表 3.** 碳排放相关参数

刀具碳排放系数 (kg/L)	铣削液浓度	铣削液碳排放系数 (kg/L)	制备铣削液的矿物油碳排放系数(kg/L)	铣削液更换周期 (min)
75	0.05	0.2	2.85	21,600

将各项铣削加工参数代入相应公式, 计算得出铣削加工的总碳排放为 297.4 g, 总加工成本为 16.8 元。其原始铣削加工参数如表 4 所示。

**Table 4.** Milling parameters  
**表 4.** 铣削加工参数

	主轴实际转速 $n$ (r/min)	每齿进给量 $f_z$ (mm/r)	铣削深度 $a_p$ (mm)	铣削宽度 $a_e$ (mm)
粗铣加工	400	0.2	2.0	5
精铣加工	500	0.04	0.35	5

## 4.2. 实验结果

根据上述两种算法的基本步骤编写程序, 使用 Matlab 软件运行, 并为其设置相同的初始化参数: 种群规模  $n$  为 100、限制次数  $n_{limit}$  为 50、迭代次数为 1000。对于粒子群优化步骤, 设置粒子个数  $N$  为 50、迭代次数为 100。记录 20 次随机实验得到的数据并取平均值, 在最优目标函数下的铣削工艺参数优化结果如表 5 所示, 两种算法的目标函数值分析如表 6 所示, 单位为%。

**Table 5.** Optimized milling process parameters  
**表 5.** 优化后的铣削工艺参数

	主轴实际转速 $n$ (r/min)	每齿进给量 $f_z$ (mm/r)	铣削深度 $a_p$ (mm)	碳排放(g)	加工成本(元)
粗铣加工	474.34	0.322	1.76	263.49	15.62
精铣加工	617.25	0.09	0.59		



**Table 6.** Objective function value analysis  
**表 6.** 目标函数值分析

	标准人工蜂群算法	改进人工蜂群算法
最优值	27.7892	27.7252
最差值	27.8731	27.7554
平均值	27.8302	27.7406
标准差	1.91	1.45

分析实验结果可得, 优化后铣削加工的碳排放为 263.49 g, 相比优化前的 297.4 g, 减少了 11.4%; 加工成本优化后为 15.62 元, 相比优化前的 16.8 元, 减少了 7%, 由此可见所建立铣削工艺参数优化模型的有效性, 优化后的铣削工艺参数对于实际加工具有重要意义。改进人工蜂群算法的标准差相比标准人工蜂群算法的标准差较小, 变化量较小, 有效减少了算法的无用迭代, 减少了陷入局部最优解的概率, 使优化性能得到了提高。

## 5. 结语

针对制造车间节能减排问题, 本文综合考虑加工过程中的多种约束, 以铣削过程中的最低碳排放与最低加工成本为优化目标, 建立以铣削工艺参数为优化变量的数学模型, 并通过实验对模型进行验证, 表明所提出模型的精确度和可行性。结果表明, 改进人工蜂群算法得到的铣削工艺参数优于传统经验值与标准人工蜂群算法, 有效提高了铣削加工的生产效率, 降低了生产过程中的碳排放和加工成本, 为实际加工优化提供重要依据。而零件的加工大多需要多工序完成, 因此下一步工作是对多工序加工参数进行优化。

## 基金项目

浙江省 2023 年度“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2022C01SA111123); 国家自然科学基金资助项目(51475434)。

## 参考文献

- [1] 王玲, 姜丰, 张光立. 机电产品低碳制造策略与知识研究综述[J]. 家用电器, 2022(2): 45-48+62.
- [2] 高世楫, 俞敏. 中国提出“双碳”目标的历史背景、重大意义和变革路径[J]. 新经济导刊, 2021(2): 4-8.
- [3] 尹瑞雪, 柯杰. 碳效率目标下的铣削切削参数优化研究[J]. 机械设计与制造, 2022(1): 136-140+144.  
<https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20211116.068>
- [4] 黄文良, 邓朝晖, 吕黎曙, 万林林. 面向低碳高效的铣削工艺参数优化及应用[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 12-16. <https://doi.org/10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.03.004>
- [5] 邓朝晖, 符亚辉, 万林林, 张华. 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.
- [6] Xing, S., Chen, G., Yu, G., *et al.* (2021) Optimization of Milling Parameters Considering High Efficiency and Low Carbon Based on Gravity Search Algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **41**, 6303-6321.  
<https://doi.org/10.3233/JIFS-210059>
- [7] 刘飞. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 8-39.
- [8] 胡韶华, 刘飞, 何彦, 胡桐. 数控机床变频主传动系统的空载能量参数特性研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 326-331.
- [9] 李聪波, 崔龙国, 刘飞, 李丽. 面向高效低碳的数控加工参数多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 87-96.
- [10] Karaboga, D. and Basturk, B. (2007) A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. *Journal of Global Optimization*, **39**, 459-471.  
<https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>

- [11] 何尧, 刘建华, 杨荣华. 人工蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1281-1286.
- [12] 王继超, 李擎, 崔家瑞, 左文香, 赵越飞. 一种改进的人工蜂群算法——粒子蜂群算法[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 871-881. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.07.014>
- [13] 陈振文. 基于人工蜂群和粒子群算法的混合优化算法[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019: 30. <https://doi.org/10.27644/d.cnki.gsydu.2019.000546>
- [14] 余轶, 韩红宇. 花键轴数控车削加工的应用工艺研究[J]. 机电产品开发与创新, 2016, 29(4): 117-118.
- [15] 艾兴, 肖诗纲. 切削用量简明手册[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 1994: 110.