

面向低碳低成本的法兰盘钻削工艺参数优化

曹宪硕, 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4月24日; 录用日期: 2023年6月30日; 发布日期: 2023年7月7日

摘要

为了响应国家的双碳政策, 降低制造业的碳排放势在必行, 本文从钻削加工中碳排放和加工成本影响因素出发, 结合约束条件建立以低碳低成本为目标的法兰盘钻削加工优化模型。对传统灰狼优化算法收敛速度慢、精度不高、容易过早陷入局部优化的缺点进行改进, 选用法兰盘的钻削加工过程作为研究对象, 使用改进后的灰狼优化算法结合Matlab得出优化结果, 并与传统灰狼优化算法优化结果作对比验证算法改进的有效性与准确性。最终得到的优化结果较未优化前碳排放量最大可降低13.1%, 加工成本最大可降低26.8%。本文所建立的模型和工艺参数优化方法可为企业低碳低成本制造提供一种可行方案。

关键词

碳排放, 低碳低成本, 数控钻削, 工艺参数优化, 改进灰狼优化算法

Optimized Process Parameters for Low-Carbon and Low-Cost Flange Drilling

Xianshuo Cao, Renwang Li

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

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: Jun. 30th, 2023; published: Jul. 7th, 2023

Abstract

In order to respond to the national dual carbon policy, it is imperative to reduce the carbon emissions of the manufacturing industry, starting from the factors influencing carbon emissions and processing costs in drilling processing, and combining the constraints to establish an optimization model of flange drilling with low carbon and low cost as the goal. The shortcomings of the traditional gray wolf optimization algorithm are slow convergence, low precision, and easy to fall into local optimization too early, and the drilling process of flange is selected as the research object, and the optimization results of the improved gray wolf optimization algorithm are obtained by

combining with Matlab, and the effectiveness and accuracy of the algorithm improvement are verified by comparing the optimization results with the traditional gray wolf optimization algorithm. The resulting optimization results can reduce carbon emissions by up to 13.1% and processing costs by up to 26.8% compared with before optimization. The model and process parameter optimization method established in this paper can provide a feasible scheme for low-carbon and low-cost manufacturing.

Keywords

Carbon Emissions, Low Carbon and Low Cost, CNC Drilling, Parameter Optimization, Improved Gray Wolf Optimization Algorithm

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

我国是制造业大国, 总体规模在世界上居于前列, 制造业的发展决定了我国未来经济发展的质量, 根据统计, 2020 年我国制造业所产生的碳排放量占我国碳排放总量的 47% [1]。与此同时制造业的飞速发展也导致了这个数字在逐年攀升, 因此如何降低制造业产生的二氧化碳排放量, 成为我国亟待解决的问题。部分国家采用对制造业收取碳税的方式使制造业降低碳排放, 对于我国来说, 碳税的引入会加大制造业的生产成本降低人民的生活质量水平, 因此企业通过合理规划生产工艺进而达成“低碳制造”成为了解决制造业二氧化碳排放问题的关键[2]。

如何建立出能够准确量化碳排放量的模型是进行加工参数优化的前提, 田成诗等[3]从供应链的角度核算碳排放, 并考虑到温室气体的扩散特性, 使用高斯模式和拉格朗日 K 模式分别建立了静态和动态两种排放源的碳足迹核算模型, 并对模型的准确性在纺织服装供应链进行了实验验证。Balogun 等[4]在总结现有机床消耗能量所产生的碳排放核算的不足后, 提出要从机床的不同运行阶段分别计算出能耗, 在此基础上提出机床的碳排放量核算模型。Kara 等[5]选择了机加工的铣削与磨削加工, 从加工中的切削力以及加工参数对切削力的影响出发, 建立了切削力对铣削与磨削加工的能耗影响模型。上述研究从不同的角度研究了碳排放量化模型建立的问题, 为建立钻削加工碳排放模型提供了理论依据。

在低碳加工参数优化方面, Addona [6]等对车削加工进行了实验探究, 并会传统的遗传算法进行了优化改进, 利用改进遗传算法对车削加工中的切削参数进行了优化, 从而完成了降低生产成本和时间以及提高生产质量的多目标优化。詹欣隆等[7]将切削加工参数与工艺调度组合在一起, 通过改进的 NSGA-II 算法和离散化引力搜索算法, 求出了最小碳排放和最短加工工时的加工参数与车间调度方案。方喜峰[8]等将遗传算法改进后结合粒子群算法对柴油机关键件的加工参数进行了优化, 并采用数字孪生对优化结果进行验证, 通过验证得出相较于未优化的加工方案, 优化后的碳排放量降低了 14%, 钟健等[9]使用反向传播神经网络建立了滚齿加工效果评价模型, 同时采用花粉授粉算法进行了最优工艺参数求解, 得到的结果经实验验证降低了碳排放。上述研究大多数针对车削、铣削进行了低碳加工参数优化, 目前针对钻削加工的低碳加工参数优化研究较少。

针对上述问题, 本文综合考虑机床、刀具性能约束, 建立了钻削过程中以低碳、低成本为目标的工艺参数优化模型, 最后使用改进的灰狼优化算法对所建模型进行求解, 并结合实例验证所建模型的

有效性。

2. 法兰盘钻削加工工艺参数优化模型建立

2.1. 优化变量确定

在钻削加工过程中, 合理制定加工工艺参数对碳排放量和加工成本有着重要影响。因此本文设定钻削加工主要工艺参数作为优化变量为主轴转速 n 、进给量 f 以及背吃刀量 a_p 。

2.2. 优化目标函数

目标函数需以客观反映问题为前提, 同时将所需要优化的目标精确展示。在国家双碳目标层面, 钻削加工过程中的碳排放量是需改善的地方, 在企业层面, 加工过程中的生产成本是需改善的地方。因此本文选取碳排放量和加工成本作为优化目标。

2.2.1. 钻削加工过程碳排放函数

法兰盘钻削加工引起的碳排放主要有: 1) 原材料制备产生的碳排放; 2) 机床运行消耗电能; 3) 刀具碳排放; 4) 切削液制备与消耗产生的碳排放; 5) 废屑处理产生的碳排放。其中原材料制备与废屑处理所产生碳排放量为加工工艺固定碳排放量, 不会随着切削参数改变而改变或者变化甚微, 可以认为是一个常量, 因此本文以切削参数为优化变量, 考虑其他三方面的碳排放量。根据机床活动状态, 本文从基本启动、待机运行、空载运行与负载运行四个阶段考虑钻削加工碳排放。

钻削加工过程的总碳排放可用式(1)计算:

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

其中: C_{total} 为钻削加工产生的总碳排放量, g; C_e 为加工中心运行所消耗的电能, g; C_t 为刀具碳排放, g; C_o 为切削液制备与消耗产生的碳排放, g。

1) 电能碳排放

立式加工中心在加工过程中主要消耗是电能, 并且在不同的加工状态下所产生的碳排放量不同, 加工中心所产生的总电能可用式(2)计算:

$$\begin{aligned} E_{le} &= \sum_{s=1}^{n_1} CE_{hw}^s + \sum_{s=1}^{n_2} CE_{la}^s + \sum_{s=1}^{n_3} CE_{lc}^s + CE_{ls} \\ &= \sum_{s=1}^{n_1} \int_0^{t_{hw}^s} P_{hw}^s dt + \sum_{s=1}^{n_2} \int_0^{t_{la}^s} P_{la}^s dt \\ &\quad + \sum_{s=1}^{n_3} \int_0^{t_{lc}^s} P_{lc}^s dt + \int_0^{t_{ls}} P_{ls} dt \end{aligned} \quad (2)$$

其中: E_{le} 为整个加工过程中所消耗的总电能, kWh; CE_{hw}^s 、 CE_{la}^s 、 CE_{lc}^s 、 CE_{ls}^s 分别为第 s 个运行待机、空载运行、切削加工、基本启动阶段所消耗的电能, kWh; P_{hw}^s 、 P_{la}^s 、 P_{lc}^s 、 P_{ls}^s 为四个不同阶段所对应的功率, kW; t_{hw}^s 、 t_{la}^s 、 t_{lc}^s 、 t_{ls} 为四个不同阶段所对应的运行时间, s。

在加工中心的待机阶段, 此时还未进行切削加工, 辅助系统会保持运行, 其电能消耗如公式(3)所示:

$$\sum_{s=1}^{n_1} CE_{hw}^s = \sum_{s=1}^{n_1} \int_0^{t_{hw}^s} P_{hw}^s dt = P_{hw} \sum_{s=1}^{n_1} t_{hw}^s \quad (3)$$

加工中心在空载过程中相对于待机运行来说会增加主传动系统和进给系统的功率, 这两个系统的总功率 Δp 可以由主轴转速 n 计算而出如公式(4)所示:

$$\Delta p = k_1 n + k_2 \quad (4)$$

其中: k_1 与 k_2 为回归系数。

加工中心空载阶段的功率可由公式(5)表示:

$$\sum_{s=1}^{n_2} CE_{la}^s = \sum_{s=1}^{n_2} (\Delta p + p_{lw}) \cdot t_{la}^s \quad (5)$$

加工中心的钻削加工所消耗的电能可以结合切削比能来计算得出, 如公式(6)所示:

$$\sum_{s=1}^{n_3} CE_{lc}^s = \sum_{s=1}^{n_3} e_s^s \cdot MRV_i \quad (6)$$

2) 刀具碳排放

刀具碳排放是指钻削加工过程中因钻头磨损造成的寿命缩短而间接产生的碳排放, 计算公式如下:

$$C_t = \frac{\int_{t_{2s}}^{t_{2e}} F_t Q_t}{T_t} \quad (7)$$

$$T_t = \frac{C_f}{v_c^m f^r a_p^k} \quad (8)$$

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[10]。

3) 切削液碳排放

对于钻削加工过程中的钻削液碳排放, 主要考虑制备废液处理所产生的碳排放, 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, 钻削液一般周期性更换, 因此单工序中钻削液消耗处理产生的碳排放采用与整个钻削液生命周期的折算方式进行核算[11], 公式如下:

$$C_f = \frac{\int_{t_{1s}}^{t_{1e}} (C_a + C_p) dt + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} (C_a + C_p) dt}{T_f} \quad (9)$$

$$C_a = F_a V \quad (10)$$

$$C_p = F_p V \rho \quad (11)$$

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

根据上述公式可以得出钻削加工过程中的碳排放总量计算模型如式(12)所示:

$$C_{total} = F_e \times \left(p_{lw} \sum_{s=1}^{n_1} t_{lw}^s + \sum_{s=1}^{n_2} (\Delta p + p_{lw}) \cdot t_{la}^s + \sum_{s=1}^{n_3} e_s^s \cdot MRV_i + p_{ls} \times t_{ls} \right) + \int_{t_{2s}}^{t_{2e}} \left(\frac{F_t Q_t v_c^m f^r a_p^k}{C_f} + \frac{F_a V + F_p V \rho}{T_f} \right) dt \quad (12)$$

其中: F_e 为电能碳排放系数, kg/kWh。

2.2.2. 钻削加工过程成本函数

在立式加工中心的钻削工艺过程中, 加工成本主要有电能成本、机械设备成本、刀具成本以及钻削液成本。其中机械设备成本受加工参数影响较少因此不将其纳入考虑范围:

$$C_{cost} = C_{elec} + C_{tool} + C_{fluid} \quad (13)$$

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:

$$C_{elec} = C_p E_{total} \quad (14)$$

式中 C_p 为单位电能单价, 元/kWh; E_{total} 为立式加工中心钻削加工的总能耗, kWh。

2) 刀具成本可采用实际钻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。

3) 钻削液成本为:

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

式中, p 为单位体积钻削液成本, 元/L。

2.3. 约束条件

1) 最大功率约束

在进行钻削加工时的的切削功率需要在立式加工中心的有效功率范围内:

$$p_{lc} \leq \eta P_{max} \quad (17)$$

2) 表面质量约束

加工参数的改变会影响到工件的表面粗糙度, 加工后应满足工件的表面质量要求:

$$Ra = \frac{312f^2}{r_g} \leq Ra_{max} \quad (18)$$

其中: Ra 和 Ra_{max} 分别为表面粗糙度和最大表面粗糙度; r_g 为刀尖圆弧半径, mm。

3) 钻削力约束

立式加工中心的最大切削力 F_{max} 必须大于切削所需要的切削力[12]:

$$C_{F_c} a_{sp}^{x_{F_c}} f^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} \leq F_{max} \quad (19)$$

4) 加工参数约束

立式加工中心钻削加工过程中, 选用的加工参数必须符合加工设备的额定参数要求:

$$n_{min} < n < n_{max} \quad (20)$$

其中: n_{min} 、 n_{max} 分别为最小主轴转速和最大主轴转速, $r \cdot \min^{-1}$ 。设待加工面直径为 d , 可得:

$$n = \frac{1000v_c}{\pi d} \quad (21)$$

5) 钻头寿命约束

单次加工所采用的钻头的使用寿命应大于加工时间:

$$T_{min} \leq \frac{C_T}{v^{1/m} f^{1/n} a_p^{1/p}} \quad (22)$$

3. 基于改进灰狼优化算法的模型求解

3.1. 标准灰狼优化算法

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization, GWO)是在2014年由Mirjalili [13]等人在研究狼群群体协作的机制后提出的一种种群性能优化算法, 该算法的优化过程是通过模拟狼群的捕食行为来实现的。灰狼优化算法具有高效性、简单性、灵活性、全局性和鲁棒性较好的优点[14]。灰狼优化算法实现简单不需要复杂的数学模型, 适用范围较广, 在处理复杂的非线性、非凸优化问题上具有一定优势, 灰狼是群居动物并且在狼群中存在着严格的等级制度, 灰狼算法基于这个等级制度建立了一个模型, 狼群中的每一头狼则代表该种群的每一个潜在解, 其中种群中的领导者 α 狼的位置则是最优解, 处于第二阶层和第三阶层的 β 狼和 δ 狼的位置为优解和次优解, 处于最低阶层的 ω 狼则是候选解[15]。

原理如下:

1) 灰狼种群初始化。

$$X_{i,j} \sim U(lb_j, ub_j) \quad (23)$$

其中: X 是灰狼的种群; $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$; $j \in \{1, 2, 3, \dots, \text{sizepop}\}$, N 是种群的个数; sizepop 是种群的维度; U 为随机分布函数; lb 和 ub 为搜索区间的下界和上界。

2) 包围猎物。

$$\begin{aligned} D &= |C \circ X_p(t) - X(t)| \\ X_p(t+1) &= X_p(t) - A \circ D \\ A &= 2a \circ r_1 - a \\ C &= 2r_2 \end{aligned} \quad (24)$$

其中: t 为迭代次数; \circ 为 hadamard 乘积操作; A 与 C 是协同系数向量; X_p 为猎物的位置向量; a 为由 2 线性下降到 0 的控制参数; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 中的随机向量。

3) 位置更新。

$$\begin{aligned} D_\alpha &= C \circ X_\alpha(t) - X \\ D_\beta &= C \circ X_\beta(t) - X \\ D_\delta &= C \circ X_\delta(t) - X \\ X_1 &= X_\alpha - A_1 \circ D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta - A_2 \circ D_\beta \\ X_3 &= X_\delta - A_3 \circ D_\delta \\ X(t+1) &= \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \end{aligned} \quad (25)$$

其中: X_α 、 X_β 与 X_δ 代表当前种群中 α 、 β 、 δ 狼的位置向量; X 表示灰狼的位置向量; D_α 、 D_β 与 D_δ 代表当前所选灰狼与最优 α 、 β 、 δ 狼的距离。

3.2. 算法改进

灰狼优化算法在解决一些复杂的问题时存在着收敛速度慢且精度不高和容易过早陷入局部优化的缺点, 因此在进行法兰盘钻削加工优化前需要对灰狼优化算法进行改进, 使用精英反向学习对灰狼优化算法中的种群化进行改进, 并将其线性递减的控制参数 a 调整为非线性控制, 并对其位置更新公式进行改进, 具体改进如下:

1) 基于精英反向学习改进种群初始化。

$$\begin{aligned} X_{i,j}^e &= (X_{i,2}^e, X_{i,j}^e, \dots, X_{i,d}^e) \\ \overline{X_{i,j}^e} &= K(\alpha_j + \beta_j) - X_{i,j}^e \end{aligned} \quad (26)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, s$; $j = 1, 2, \dots, d$; K 为(0, 1)上面的动态参数; α_j 和 β_j 为动态边界。

2) 改进位置更新公式。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t+1) &= b_1 \times r_1 \times \frac{\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{X}_1(t) + \mathbf{X}_1(t)}{3} \\ &\quad + b_2 \times r_2 \times (\mathbf{X}' - \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (27)$$

其中: \mathbf{X}' 为随机选择的不同于 \mathbf{X} 的一个个体; r_1 和 $r_2 \in [0, 1]$; b_1 和 b_2 为调整灰狼搜索能力的常数, $b_1, b_2 \in (0, 1]$ 。

3) 非线性控制参数 a 调整。

$$a = a_{\text{initial}} - (a_{\text{initial}} - a_{\text{final}}) \times \left(\frac{\text{max_iter} - t}{\text{max_iter}} \right)^u \quad (28)$$

其中: a_{initial} 和 a_{final} 分别为控制参数的初始值和终止值; max_iter 为最大迭代次数; u 为非线性调整指数。

3.3. 改进灰狼优化算法的基本步骤

改进后的灰狼优化算法计算步骤如下所示:

- 1) 设置主要参数, 种群规模 N ; 最大迭代次数 max_iter ; 控制参数 a_{initial} 、 a_{final} 。
- 2) 初始化种群, 使用公式(26)初始化灰狼种群 X_i 。
- 3) 计算每个搜索代理的适应度值, 其中 X_α 、 X_β 、 X_δ 分别为第一、二、三优适应度值。
- 4) 判断迭代次数是否达到 max_iter , 若未达到, 进入步骤(5); 否则使用公式(28), 更新 a , 更新 A 、 C 。
- 5) 使用公式(27)更新当前代理位置, 迭代次数 + 1。
- 6) 计算所有搜索代理的适应度值。
- 7) 更新 X_α 、 X_β 、 X_δ 位置, 输出最优搜索代理 X_α 位置。

4. 实例分析

4.1. 模型参数设置

以 VMC-1370 立式加工中心(规格参数如表 1 所示)对某型号的法兰盘进行钻削加工为例(零件材质为 1Cr18Ni9 棒料, 尺寸参数如图 1 所示), 验证优化方法的可行性。

Table 1. VMC-1370 vertical machining center standard parameters

表 1. VMC-1370 立式加工中心标准参数

主轴转速范围 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	进给量范围 $f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	最大切削功率 P_{max}/kW	空载功率 $P_{\text{Mnlp}}/\text{kW}$	最大切削力 F_{max}/N	机床功率系数 η
20~4000	0.1~3.5	7.5	0.74	9000	0.8

本实验所采用的棒料材料为 1Cr18Ni9Ti, 其抗拉强度大于 520 Mpa, 在加工过程中需选择合理的加

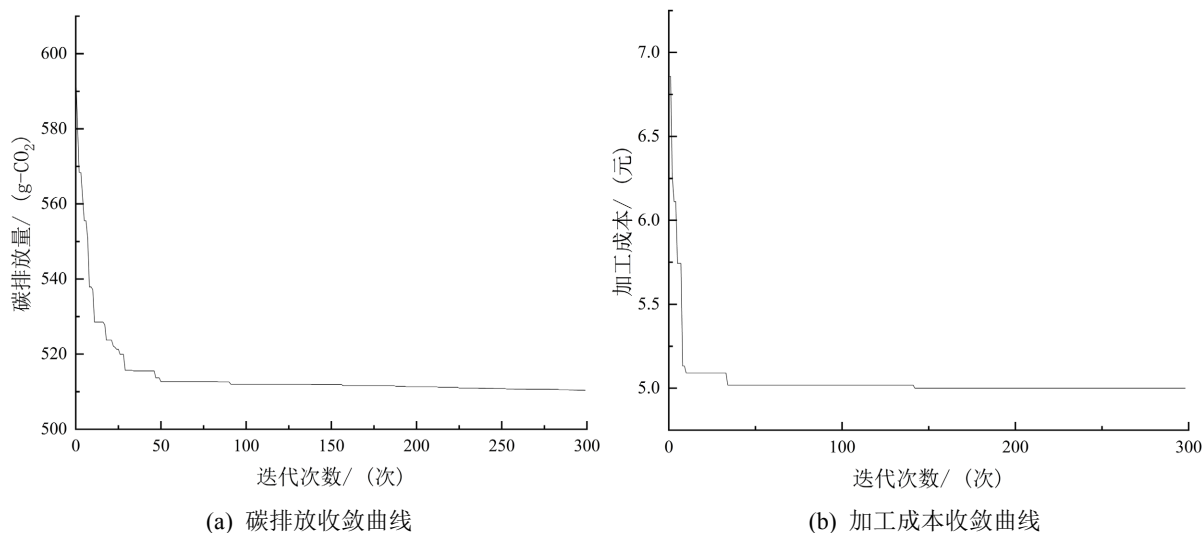


Figure 2. Algorithm convergence curve
图 2. 算法收敛曲线

由图 2 可知改进后的灰狼优化算法对于低碳低成本钻削加工模型拟合较好, 在 100 次迭代后仍可以继续优化, 分别在 236 次, 145 次迭代中达到最优, 为探寻其相对于灰狼优化算法改进的有效性, 设置相同的种群初始数量和迭代次数结合 Matlab2022b 使用灰狼优化算法与改进灰狼优化计算得到 Pareto 前沿分布结果如图 3 所示。

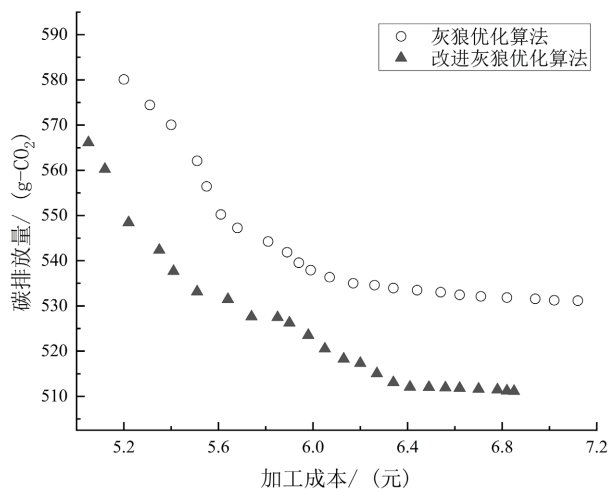


Figure 3. Pareto frontier distribution
图 3. Pareto 前沿分布

Table 5. Pareto set data statistics
表 5. Pareto 解集数据统计

优化目标	碳排放量/(gCO ₂)		加工成本/(元)	
	平均	最优	平均	最优
灰狼优化算法	511.02	524.753	5.01	5.92
改进灰狼优化算法	530	542.427	5.2	6.14

从图 3 以及表 5 中可以得出, 改进后的灰狼优化算法相较于传统灰狼优化算法得出的 Pareto 解集的位置占据优势; 并且其碳排放量与加工成本最优结果均低于传统灰狼优化算法, 说明其探索优化空间较大; 同时, 传统灰狼优化算法解集中不满足背吃刀量约束条件的较多, 存在较多不可行解, 改进后的灰狼优化算法得到的解都满足约束条件。改进后的灰狼优化算法与灰狼优化算法得到的 Pareto 解集相比较碳排放优化结果平均降低了 3.76%, 加工成本优化结果平均降低了 3.32%, 因此可以得出改进后的灰狼算法优于传统的灰狼优化算法。当主轴转速为 792 r/min, 进给量 0.22 mm, 背吃刀量为 1.95 mm 时, 该型号法兰盘的钻削加工碳排放量达到最小值为 511.02 gCO₂, 相较于优化前的结果降低了 13.1%, 当主轴转速为 952 r/min, 进给量 0.26 mm, 背吃刀量为 2.35 mm 时, 该型号法兰盘的钻削加工成本达到最小值为 5.01 元, 相较于优化前的结果降低了 26.8%。

5. 结论与展望

1) 在分析了法兰盘钻削加工碳排放和加工成本的影响因素和考虑机床性能、最大切削力和表面粗糙度等约束条件的基础上, 建立了基于低碳低成本的钻削加工工艺参数优化模型。

2) 从三个方面对灰狼优化算法进行改进, 并通过一个具体实例, 采用改进后的灰狼优化算法对优化模型进行求解, 得到的参数优化结果可将碳排放量最多降低 13.1%, 加工成本最多降低 26.8%, 为法兰盘制造企业低碳制造提供了依据。

3) 由于法兰盘加工工序较多, 本文只是对其钻削加工工艺参数优化进行了研究, 而实际制造加工过程需要多工序、多工步完成, 因此其他工序的切削参数优化有待后续研究。

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] 李小燕, 王道平. 碳交易机制下考虑竞争和信息非对称的供应链协调研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(11): 47-52.
- [2] 李岩岩, 兰玲, 陆敏. 碳税对工业企业节能减排影响的模拟分析[J]. 统计与决策, 2017(16): 174-177.
- [3] 田成诗, 张诗雅. 中国行业供应链碳足迹的来源分解分析——基于投入产出的生命周期评价模型[J]. 环境经济研究, 2019, 4(2): 58-75.
- [4] Balogun, V.A. and Mativenga, P.T. (2013) Modelling of Direct Energy Requirements in Mechanical Machining Processes. *Journal of Cleaner Production*, **41**, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.015>
- [5] Li, W. and Kara, S. (2011) An Empirical Model for Predicting Energy Consumption of Manufacturing Processes: A Case of Turning Proces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **225**, 1636-1646. <https://doi.org/10.1177/2041297511398541>
- [6] D'addona, D.M. and Teti, R. (2013) Genetic Algorithm-Based Optimization of Cutting Parameters in Turning Processes. *Procedia CIRP*, **7**, 323-328. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.055>
- [7] 詹欣隆, 张超勇, 孟磊磊, 等. 面向高效低碳的切削参数与柔性作业车间调度集成建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 3519-3535.
- [8] 方喜峰, 张杰, 胡中泰, 等. 基于数字孪生技术的船用柴油机关键件切削参数在线决策优化方法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(1): 66-75.
- [9] 钟健, 阎春平, 曹卫东, 等. 基于 BP 神经网络和 FPA 的高速干切滚齿工艺参数低碳优化决策[J]. 工程设计学报, 2017, 24(4): 449-458.
- [10] 李聪波, 余必胜, 肖溱鹤, 等. 考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 217-229.
- [11] 李爱平, 古志勇, 朱璟, 等. 基于低碳制造的多工步孔加工切削参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1515-1522.

- [12] 王晓伟, 张绪龙, 张东杰, 等. 机床切削加工碳排放计算模型研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2018, 33(5): 79-83.
- [13] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A. (2014) Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, **69**, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- [14] Nadimi-Shahraki, M.H., Taghian, S. and Mirjalili, S. (2021) An Improved Grey Wolf Optimizer for Solving Engineering Problems. *Expert Systems with Applications*, **166**, Article ID: 113917. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113917>
- [15] Heidari, A.A. and Pahlavani, P. (2017) An Efficient Modified Grey Wolf Optimizer with Lévy Flight for Optimization Tasks. *Applied Soft Computing*, **60**, 115-134. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.044>