

基于差分进化 - 灰狼混合算法的低碳低成本优化模型

王烜波, 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11月18日; 录用日期: 2023年12月10日; 发布日期: 2024年1月12日

摘要

为了满足碳达峰碳中和需求, 单单追求产能效率的机械加工, 已经不能满足现代化机械加工产业发展方向的需求。从低能耗和可持续发展角度来看, 当前机械设备产品的加工存在提升空间, 因此, 本文尝试从机械加工制造体系能耗影响因素出发, 探讨机械加工钻削工艺优化, 以各低碳设计参数改进引起的碳排放和成本双重优化目标, 构建关键低碳设计的多约束目标优化模型, 并采用差分进化 - 灰狼混合算法对优化模型进行求解。最后以行星齿轮箱的上端盖为例, 验证了文中方法的可行性和有效性。

关键词

机械加工, 碳排放, 低碳设计, 多约束目标优化

Low-Carbon Low-Cost Optimization Model Based on Differential Evolution-Grey Wolf Hybrid Algorithm

Xuanbo Wang, Renwang Li

School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

Received: Nov. 18th, 2023; accepted: Dec. 10th, 2023; published: Jan. 12th, 2024

Abstract

In order to meet the requirements of carbon peak and carbon neutrality, simply pursuing produc-

tion efficiency in mechanical equipment processing is no longer sufficient to meet the needs of the modern mechanical processing industry's development. From the perspective of low energy consumption and sustainable development, there is room for improvement in the processing of current mechanical equipment products. Therefore, this paper attempts to explore the optimization of mechanical drilling processes by considering the factors influencing energy consumption in the mechanical processing manufacturing system. It aims to achieve a dual optimization objective of reducing carbon emissions and costs through improvements in various low-carbon design parameters. To achieve this, a multi-constraint objective optimization model for key low-carbon design is constructed, and the model is solved using the Differential Evolution-Grey Wolf hybrid algorithm. Finally, taking the upper cover of a planetary gear case as an example, the feasibility and effectiveness of the methods proposed in this paper are validated.

Keywords

Mechanical Processing, Carbon Emissions, Low-Carbon Design, Multi-Constraint Objective Optimization

Copyright © 2024 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

随着制造业的日益发展, 能源消耗、环境污染等问题日益突出, 为更好地实现可持续发展, 节能减排和低碳制造已成为当前全球关注的焦点。低碳制造作为一种全新的可持续制造模式, 受到国内外广泛关注。在碳达峰碳中和背景下, 开展低碳制造对推动低碳技术创新, 实现产业低碳转型升级具有重要意义[1]。

张择琳等[2]建立失效特征 - 加工工艺 - 操作特征的再制造工艺过程多层碳排放关联机制, 再构建最小碳排放量、时间、成本为多目标的再制造工艺方案选择模型, 并提出一种基于多层编码方式的差分进化和灰狼算法的混合算法求解。李聪波等[3]引入特征元和加工元概念表示机械零部件特征, 建立以工艺路线最短总加工时间(高效)和最低总碳排放(低碳)为优化目标的机械加工工艺路线多目标优化模型。应用改进的 NSGA-II (Non-dominated sorting genetic algorithm II) 算法对优化模型进行寻优求解。仇阳[4]以能耗控制目标和机床负载均衡目标为优化方向, 在充分分析机械加工工艺过程中的能耗构成后, 确定了各时段机床加工零件切削参数和工艺路线相关的决策变量, 得出以高效与低碳为目标的机械加工切削参数和工艺路线的多目标优化模型。鲍宏等[5]采用模块化思想和生命周期分析方法建立了基于产品结构的碳足迹分析模型, 基于敏感性分析方法研究关键低碳设计参数变化与碳排放变化之间的映射关系, 在对分析结果进行处理的基础上, 以各低碳设计参数改进引起的碳足迹最小为优化目标, 构建关键模块单元低碳设计改进的多约束目标优化模型, 并采用回溯算法和遗传算法对优化模型进行求解。孙良峰等[6]追踪零部件各生产环节中的碳排放, 用基础零部件的工艺过程信息来描述其碳排放信息, 构建了面向生产过程的基础碳排放库。利用功能分解树映射结构形成产品结构的分层递阶划分, 并通过结构的逐层搭建及碳排放信息的逐层提取, 自底向上地构建了产品的碳排放分层递阶模型。重点分析了该模型在锻压机设计中的应用, 搭建了锻压机低碳化设计平台, 通过对产品的碳排放分层描述, 准确定位各层高碳排零部件, 为低碳优化设计提供实际指导[7]。

综上, 本文在碳排放与各种影响因素研究的基础上, 建立低碳的钻削数学优化模型, 使用改进后的灰狼算法对模型进行多目标优化求解, 同时用实例证明模型有效性。

2. 参数优化模型的建立

2.1. 选择优化变量

在机械零部件的加工过程中, 加工工艺参数的选择对碳排放有重要影响。本文选择钻削过程中的主轴转速 n 、进给量 f 和背吃刀量 a_p 作为主要工艺参数。

2.2. 优化目标函数

目标函数应该从实际出发客观反映问题, 本文从国家双碳层面和企业生产制造层面综合考虑[8], 选择碳排放量和加工成本作为优化目标。

2.2.1. 加工过程碳排放函数

整个过程的碳排放包括三部分: 机械加工时产生的碳排放; 刀具磨损的碳排放; 切削液的碳排放。

(1) 机械加工时的碳排放

该过程主要指设备关于工作、空载和待机三个方面的状态, 能量来源主要为电能, 其碳排放量如式(1)所示:

$$E_1 = \left(\int_{t_{cu}}^{t_{cv}} P_c(t) dt + \int_{t_{ku}}^{t_{kv}} P_k(t) dt + \int_{t_{gu}}^{t_{gv}} P_g(t) dt \right) \times CEF_{ECO_2} \times GWP_{CO_2} \quad (1)$$

式中 $P_c(t)$ 、 $P_k(t)$ 、 $P_g(t)$ 分别表示机械加工设备工作、空载和待机的功率; $[t_{cu}, t_{cv}]$ 、 $[t_{ku}, t_{kv}]$ 、 $[t_{gu}, t_{gv}]$ 分别表示加工过程中设备工作、空载和待机的时间[9]。 CEF_{ECO_2} 表示电能消耗组分中二氧化碳的碳排放因子, 此因子是特定发电方式下, 测量发电过程中产生二氧化碳排放量, 再除以发电量所得, 取 1.0069 kgCO₂/kgce; GWP_{CO_2} 表示 CO₂ 的增温潜势, 根据实验和气候模型计算所得, 取 1.00。

(2) 刀具磨损的碳排放

在加工过程中, 由于长时间、高速度的钻削加工一定程度影响刀具的损耗程度[10], 但考虑成本因素, 需要对刀具进行必要维护, 定期对刀具进行检测和清洁, 因此采用时间折算方法计算刀具碳排放量, 如式(2)所示:

$$E_2 = \frac{t_c}{Q_u} \times M_f \times C_f \quad (2)$$

式中 t_c 指加工工艺的执行时间, Q_u 指加工工艺所用刀具的寿命, C_f 指刀具的碳排放因子(29.6 kgCO₂/kgce), M_f 指的是刀具的重量(kg)。

(3) 切削液的碳排放

切削液的碳排放主要包含两部分[11]:

1) 切削液在制造过程中的用量时也会产生碳排放, 其公式如(3)所示:

$$E_{31} = \frac{t_w}{T_c} \times (C_s + I_s) \times CEF_i \quad (3)$$

式中 t_w 为加工时长, T_c 为切削液的更换周期, C_s 为所需切削液的初始用量, I_s 为所需切削液的附加用量, CEF_i 为所需切削液碳排放因子, 综合考虑切削液成分、使用条件和制造过程中的能耗等多个因素该数值取 2.85 kgCO₂/L, α 为所需切削液浓度。

2) 在处理制造过程中产生的废液, 其公式如(4)所示:

$$E_{32} = \frac{C_s + I_s}{\alpha} \times CEF_j \quad (4)$$

式中 α 为所需切削液浓度, CEF_j 表示处理第 k 台机械加工设备产生废切削液碳排放因子(0.2 kgCO₂/L)。

综上, 总的加工过程碳排放如式(5)所示:

$$E_{\text{总}} = E_1 + E_2 + E_{31} + E_{32} \quad (5)$$

2.2.2. 加工过程成本函数

在加工过程中, 加工成本主要包含: 用电成本, 刀具成本, 切削液成本。

1) 用电成本

用电成本主要指在加工过程中由于设备用电产生的成本。可表示为:

$$C_1 = \left(\int_{t_{cu}}^{t_{cv}} P_c(t) dt + \int_{t_{ku}}^{t_{kv}} P_k(t) dt + \int_{t_{cu}}^{t_{cv}} P_g(t) dt \right) \times C_p \quad (6)$$

C_p 为单位电能单价。

2) 刀具成本

刀具成本采用加工时间和刀具寿命折算的方式进行计算, 如式(7)所示:

$$C_2 = \frac{t_c}{Q_u} \times M_f \times C_r \quad (7)$$

其中 C_r 为刀具的价格。

3) 切削液成本

切削液的成本如式(8)所示:

$$C_3 = \frac{t_w}{T_c} \times (C_s + I_s) \times C_l \quad (8)$$

式中 C_l 为切削液的价格。

综上, 总的加工过程成本为:

$$C_{\text{总}} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (9)$$

2.3. 约束条件

1) 最大功率约束

切削加工时的功率应不大于加工最大功率:

$$P_c \leq \eta P_{\text{max}} \quad (10)$$

式中 η 为机床效率系数, P_{max} 为机床最大切削功率。

2) 进给量约束

$$f_{\text{min}} \leq f \leq f_{\text{max}} \quad (11)$$

式中 f_{min} 、 f_{max} 分别为机床最小、最大进给量。

3) 加工参数约束

在加工过程中选择的参数必须符合规范要求:

$$n_{\text{min}} \leq n \leq n_{\text{max}} \quad (12)$$

式中 n_{\min} 、 n_{\max} 分别为主轴最小、最大转速。

2.4. 建立多目标优化模型

在实际的生产加工过程中, 应该综合考虑成本和碳排放量的问题, 因此本文建立以加工过程碳排放量和加工成本为综合目标值 Y_{\min} 为目标函数, x_1 、 x_2 为碳排放量、成本所占的权重值, 可得目标函数如式(13)所示。

$$Y_{\min} = x_1 E(x) + x_2 C(x) \quad (13)$$

满足约束条件下的碳排放量、成本统一纲量计算公式如式(14)、(15)所示:

$$E'(x) = \frac{E(x) - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (14)$$

$$C'(x) = \frac{C(x) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (15)$$

式中 E_{\min} 、 E_{\max} 分别为碳排放量的最小值与最大值, C_{\min} 、 C_{\max} 分别为成本的最小值与最大值, 在此将碳排放量和成本看作同等程度重要, 取 $x_1 = x_2 = 0.5$, 目标函数如式(16)所示:

$$Y_{\min} = x_1 \frac{E(x) - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + x_2 \frac{C(x) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (16)$$

3. 算法

3.1. 灰狼算法

在 2014 年, 学者 Mirjalili 等人提出了一种被称为灰狼优化算法(GWO)的启发式群智能优化算法。该算法模拟了灰狼群体的等级制度和捕食过程。这种算法具有结构简单、收敛快速、参数可调性较低等优点。灰狼算法适用范围广, 在处理复杂非线性问题上有一定优势, 但同时也存在求解精度较低、容易陷入早熟等缺点。其位置更新公式如式(17)和式(18)所示:

$$\bar{A} = \left| \bar{B} \cdot \bar{X}_r(n) - \bar{X}(n) \right| \quad (17)$$

$$\bar{X}(n+1) = \bar{X}_r(n) - \bar{C} \cdot \bar{A} \quad (18)$$

式中 n 表示迭代次数, $\bar{X}_r(n)$ 表示猎物位置, $\bar{X}(n)$ 表示灰狼当前位置, $\bar{X}(n+1)$ 表示灰狼更新后的位置。 \bar{B} 和 \bar{C} 为随机向量, 更新规则如式(19)和式(20)所示:

$$\bar{C} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (19)$$

$$\bar{B} = 2\bar{r}_2 \quad (20)$$

式中 a 由 $[2, 0]$ 线性衰减, r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 内随机数。

由于猎物位置的最优解是未知的, 所以灰狼算法通过最优的 Alpha 狼、Beta 狼、Delta 狼的位置来完成灰狼位置更新, 其更新规则如式(21)、式(22)和式(23)所示:

$$\begin{cases} D_\alpha = \left| \bar{B}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X} \right| \\ D_\beta = \left| \bar{B}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X} \right| \\ D_\delta = \left| \bar{B}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X} \right| \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \overline{X}_1 = \left| \overline{X}_\alpha - \overline{C}_1 \cdot \overline{D}_\alpha \right| \\ \overline{X}_2 = \left| \overline{X}_\beta - \overline{C}_2 \cdot \overline{D}_\beta \right| \\ \overline{X}_3 = \left| \overline{X}_\delta - \overline{C}_3 \cdot \overline{D}_\delta \right| \end{cases} \quad (20)$$

$$\overline{X}_{(t+1)} = \frac{\overline{X}_1 + \overline{X}_2 + \overline{X}_3}{3} \quad (20)$$

3.2. 差分进化算法

差分进化算法(DE)是一种基于模拟生物进化的随机选择模型,它核心包括初始化、变异、交叉、和选择这三个基本操作。在这个算法中,使用随机选择的不同个体生成比例差分矢量来扰动当前种群中的个体,而不需要通过概率分布来生成新个体。然而,需要注意的是,对于不同的问题,差分算法需要不断调整参数,因为在迭代过程中,当算法陷入某一局部区域时,差异性减少可能导致陷入局部最优解的问题。

3.3. 算法改进

由于灰狼算法和差分算法在单独使用时存在容易早熟、较慢的后期收敛速度、求解精度低、多样性不足、容易陷入局部最优解等问题,因此本文结合两种算法的优点,形成差分进化-灰狼混合算法。通过差分进化的差分变异操作,维持种群的多样性,从而避免在种群迭代到特定区域时出现差异性减小的情况。接着,这个多样性维护后的种群被用作灰狼算法的初始种群。然后,计算每个个体的目标函数值,找到适应度最高的前三个解,分别标记为 x_b 、 x_c 、 x_c ,以确保算法的收敛性。最后,使用差分进化的交叉和选择操作来不断更新灰狼群的位置。通过反复的迭代更新,直至找到最佳的目标函数值,然后将其输出。这个过程能够确保算法找到最优解,不仅能够改善搜索速度和解的质量,还能够更好地克服问题中的局部最优解,提高了整个系统的性能。

差分进化-灰狼混合算法的步骤如下:

Step 1: 首先设置该混合算法的相关参数,最大迭代次数、缩放因子、搜索范围、搜索空间维数、种群规模和上下界、交叉概率参数。

Step 2: 初始化算法变量、收敛因子、摇摆因子等变量并对其进行编码,对种群进行变异操作,产生中间体,再通过选择操作产生初始化种群个体,设迭代次数从 1 开始。

Step 3: 计算种群个体适应值,并进行筛选,择出前三最优个体,分别为 X_a 、 X_b 、 X_c 。

Step 4: 计算剩余种群个体与 X_a 、 X_b 、 X_c 的距离,并更新个体位置。

Step 5: 更新混合算法变量、收敛因子和摇摆变量等的值,对狼群个体位置进行交叉操作,对保留的优势个体进行选择操作后产生新个体,并计算所有狼群个体的目标函数值并更新前三最优值 X_a 、 X_b 、 X_c 。

Step 6: 判断迭代次数是否达到最大,若达到最大,则结束算法,输出最优解;若否,则转至 Step3 执行。

4. 实例分析

4.1. 参数设置

本文用 XH7126 加工中心对行星齿轮箱上端盖(尺寸参数如图 1 所示)进行加工,以钻削 8 个螺纹孔为例,进行可行性分析。其中加工中心的规格参数如表 1 所示,钻削加工相关参数如表 2 所示,加工产生

相关的碳排放如表 3 所示。

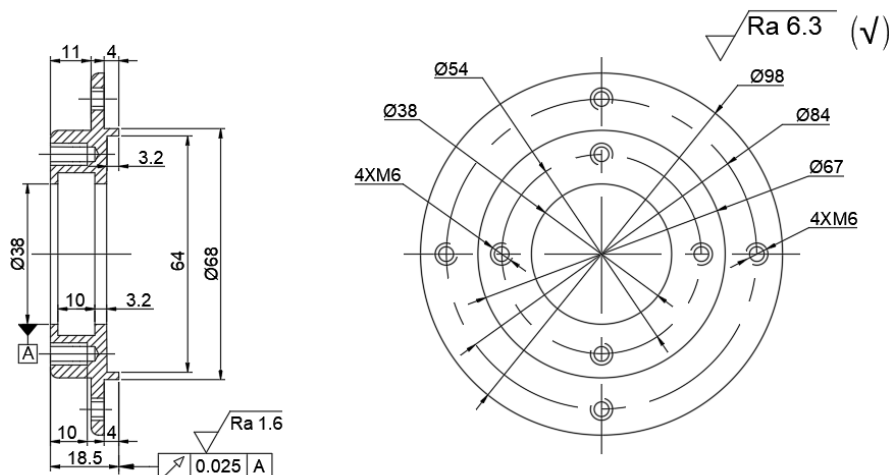


Figure 1. Upper cover component diagram of planetary gear reduce
图 1. 行星减速器上端盖零件图

Table 1. The specifications and parameters of the machining center

表 1. 加工中心规格参数

主轴最高转速 n	进给量 f	主轴功率 P	切削力 F	效率系数 η
(r/min)	(mm/r)	(kw)	(N)	
8000	0.1-0.35	5.5	9000	0.8

Table 2. Drilling process parameters

表 2. 钻削加工参数

加工工艺	主轴实际转速 n (r/min)	进给量 f (mm)	背吃刀量 a (mm)
钻削加工	800	0.15	1.5

钻孔时选用麻花钻钻头刀具，钻削液选用极压乳化液，表面张力低渗透性好，能及时冷却钻头。

Table 3. Carbon emission-related parameters

表 3. 碳排放相关参数

刀具碳排放系数	钻削液浓度	钻削液碳排放系数
29.6	0.1	1.5

4.2. 实验结果

Table 4. Experimental data statistics

表 4. 实验数据统计

	灰狼算法	差分进化 - 灰狼混合算法
平均 CO ₂ 排放/(g·CO ₂)	566.4	511.6
平均加工成本/元	8.8	9.6

根据表 4 实验结果可得, 差分进化 - 灰狼混合算法碳排放为 408.5 g, 相比灰狼算法, 减少了 9.6%; 加工成本优化后为 3.8 元, 灰狼算法的 4.6 元, 减少了 9.1%, 后经过多次重复计算验证都得到类似结果, 同时对模型进行误差分析后确认误差均处于可接受范围, 综合考虑多种因素并根据专业知识和实际经验对计算结果进行全面评估, 由此可见所建优化模型的有效性, 对生产加工具有重要意义。

5. 结语

本文以行星齿轮箱的上端盖为研究对象, 针对其加工过程中的“低碳”和“经济”目标进行研究。建立了一种以总碳排放和总成本最小为优化目标的机械加工高效低碳优化模型, 采用差分进化 - 灰狼优化混合算法对模型寻优求解, 得出的主要结论如下:

1. 运用差分进化 - 灰狼混合算法, 既避免了灰狼算法容易过早陷入局部最优的缺陷, 同时又解决了差分进化算法迭代过程缓慢的问题。
2. 用差分进化 - 灰狼混合算法对模型进行求解, 得到的参数优化结果可将碳排放量降低 9.6%, 加工成本降低 9.1%, 有利于企业低碳制造, 降低生产加工成本。
3. 钻削加工只是零件众多加工工序中的一部分, 因此后续的研究将围绕其他工序展开。

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] 李洪丞, 曹华军, 刘兰微, 等. 碳达峰碳中和背景下低碳制造研究现状与技术路径研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 225-240.
- [2] 张泽琳, 李鸿菲, 王蕾, 等. 考虑低碳的再制造工艺方案选择方法[J/OL]. 计算机集成制造系统, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230801.1446.004.html>, 2023-10-26.
- [3] 李聪波, 李鹏宇, 刘飞, 等. 面向高效低碳的机械加工工艺路线多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 133-141.
- [4] 仇阳. 高效低碳背景下机械加工工艺路线多目标优化模型分析[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(3): 72-74. <https://doi.org/10.16107/j.cnki.mmte.2022.0144>
- [5] 鲍宏, 刘光复, 王吉凯. 采用碳足迹分析的产品低碳优化设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(2): 264-272.
- [6] 孙良峰, 裘乐淼, 张树有, 等. 面向低碳化设计的复杂装备碳排放分层递阶模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2381-2390. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2012.11.29.sunlf.018>
- [7] 詹欣隆, 张超勇, 孟磊磊, 连裕翔, 薛燕社. 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] Delgado-Antequera, L., Caballero, R., Sánchez-Oro, J., Colmenar, J.M. and Martí, R. (2020) Iterated Greedy with Variable Neighborhood Search for a Multiobjective Waste Collection Problem. *Expert Systems with Applications*, **145**, Article 113101. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113101>
- [9] Su, S., Zhou, F.Z. and Yu, H.J. (2019) An Artificial Bee Colony Algorithm with Variable Neighborhood Search and Tabu List for Long-Term Carpooling Problem with Time Window. *Applied Soft Computing Journal*, **85**, Article 105814. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105814>
- [10] Ic, Y.T., Güler, E.S., Cabbaroğlu, C., Yüksel, E.D. and Sağlam, H.M. (2018) Optimisation of Cutting Parameters for Minimizing Carbon Emission and Maximising Cutting Quality in Turning Process. *International Journal of Production Research*, **56**, 4035-4055. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442949>
- [11] Yin, L.J., Li, X.Y., Gao, L., Lu, C. and Zhang, Z. (2017) A Novel Mathematical Model and Multi-Objective Method for the Low-Carbon Flexible Job Shop Scheduling Problem. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, **13**, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2016.11.002>