

基于低碳低成本的联轴器工艺参数优化

刘德牛, 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2日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年3月10日

摘要

为了更有效地推动制造业减排, 综合考虑机械切削加工过程中碳排放和加工成本的影响因素, 提出针对联轴器的工艺参数优化问题。首先建立了切削加工过程中包含电能、刀具和切削液在内的碳排放函数和加工成本优化函数, 在此基础上建立了以最小碳排放和最小加工成本为目标的加工工艺参数优化模型; 其次, 为提高万有引力搜索算法(Gravitational Search Algorithm, GSA)全局搜索能力, 将自适应变异触发函数引入算法, 同时将聚集度作为进行变异操作评价标准, 提出了改进GSA算法, 降低算法复杂度。最后, 针对某型号的联轴器切削加工工艺, 应用改进GSA算法搜索最优解, 获取对应的最佳工艺参数。结果表明, 采用改进GSA算法对平均碳排放量和加工成本分别降低了10.41%和13.81%, 表明该优化方法可行、有效。该研究提出的模型方法和工艺参数优化方法可为数控机床制造选择合理的切削工艺参数提供理论指导。

关键词

碳足迹, 绿色制造, 数控车削, 工艺参数优化, 改进GSA

Modeling and Optimization of Coupling Process Parameters Based on Low Carbon and Low Cost

Deniu Liu, Renwang Li

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

Received: Feb. 2nd, 2023; accepted: Mar. 3rd, 2023; published: Mar. 10th, 2023

Abstract

In order to promote the emission reduction of manufacturing industry more effectively, this paper

comprehensively considers the influencing factors of carbon emission and processing cost in the mechanical cutting process, establishes the carbon emission function and processing cost optimization function in the cutting process, including electrical energy, cutting tools and cutting fluid, and on this basis, establishes the optimization model of processing parameters with the goal of minimum carbon emission and minimum processing cost; In order to improve the global search ability of Gravitational Search Algorithm (GSA), the adaptive mutation trigger function is introduced into the algorithm, and the aggregation degree is used as the evaluation standard for mutation operation to reduce the complexity of the algorithm. Through an example, the improved GSA algorithm is applied to search the optimal solution and obtain the corresponding optimal process parameters. The results show that the average carbon emissions and processing costs are reduced by 10.41% and 13.81% respectively, which verifies the effectiveness and feasibility of the proposed optimization method. The model and method can provide theoretical support for selecting reasonable cutting parameters in NC machine tool manufacturing.

Keywords

Carbon Footprint, Green Manufacturing, NC Turning, Parameter Optimization, Gravitational Search 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

伴随着钢铁制造业的高速发展, 温室气体排放量急速上升, 全球气候变得愈发恶劣, 人们开始探讨节能减排的可持续发展方式。“低碳制造”是目前国内外都较认可的一种新型制造模式, 也是未来制造业的大方向[1]。实现低碳制造, 关键在于减少生产制造过程的各个工序阶段物料能源消耗, 提高加工效率和废料利用效益, 降低碳排放量。因此, 为了实现低碳制造, 如何描述制造生产过程排放状况, 并分析制造过程碳排放特性以及碳源分布流量、碳排放全过程变化规律, 是当前迫切需要解决的科学问题之一[2]。

针对碳足迹量化计算问题, 目前已有很多研究。郑楚威等[3]对滚齿加工做出碳排放定量优化分析, 以时间为单位对滚齿加工进行分析, 从而建立了批量生产的定量计算模型, 同时使用遗传算法进行仿真分析, 得到优化后的碳排放量。Hongming Na 等[4]结合材料参数、工艺参数和反应条件为约束条件, 以能源效率最大化为优化目标对典型 ISMP 进行优化, 并进一步分析了典型 ISMP 的能耗和 CO₂ 排放。Runying An 等[5]设计了一种 NET-IS 模型来预测钢铁生产需求并选择满足钢铁需求的生产技术, 计算能源消耗和 CO₂ 排放。Jiaying Peng 等[6]在研究中使用 IO-SPA 方法考虑到能源消耗带来的 CO₂ 排放, 识别出在供应链中所消耗某种类型的能源所推导出的排放量。上述研究从多种角度对碳足迹量化模型进行了研究, 为建立低碳低成本的加工工艺参数优化模型提供了理论支持。

对于机加工切削工艺参数优化方面的研究, 张如敏等[7]采用响应面法与遗传算法, 以表面粗糙度为优化目标进行了切削参数优化。张楚锋等[8]采用回归分析法与遗传算法, 研究了以能耗和成本最低为目标下的工艺参数优化问题。詹欣隆等[9]结合传统制造业切削参数优化与柔性作业车间调度优化, 采用改进后的非支配排序遗传算法和离散化引力搜索算法对其提出的高效低碳车间改进算法进行比较分析, 验证了改进引力搜索算法在该领域的适用性。李聪波等[10]在刀具磨损状态连续变化下, 对面向能耗的数控车削批量加工切削参数优化问题进行了研究。上述研究主要从能耗和加工时间角度对切削加工碳排放进

行估算与优化,但过度强调高效会导致主轴转速增加进而刀具损耗增加等,进而增加加工成本[11],且这些研究主要采用传统的遗传算法求解,求解效率较低。

针对上述问题,本文综合考虑机床性能约束,建立了车削过程中以碳排放最低、加工成本最少为目标的工艺参数优化模型,最后运用改进的万有引力搜索算法(Gravitational Search Algorithm, GSA)对所建模型进行寻优求解,以实例验证所建模型的有效性。

2. 联轴器加工工艺参数优化模型建立

2.1. 优化变量确定

在数控切削加工过程中,合理制定加工工艺参数对高效低碳制造有着重要影响。切削速度、进给量和背吃刀量是切削用量三要素。因此本文设定优化变量为主轴转速 n 、工作台进给量 f 以及背吃刀量 a_p 。

2.2. 优化目标函数

本文研究的是基于绿色制造下的最大效益问题,如果将联轴器的切削加工成本以及切削碳排放进行优化,则能得到较高的切削碳效益。因此本文考虑低碳、低成本两个方面的因素,以减少加工成本和降低碳排放量为优化目标。

2.2.1. 切削加工过程碳排放函数

联轴器切削加工引起的碳排放主要途径有:1) 物料的切削用量;2) 机床消耗电能;3) 刀具磨损;4) 切削液使用;5) 其他辅助设备(公共场所照明、空调系统等)。其中前两个途径的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,只考虑剩余途径的碳排放量。根据机床活动状态,本文从切削加工过程碳排放和机床空载碳排放考虑加工车间碳排放。

联轴器机加工过程的总碳排放可用式(1)计算:

$$C_p = C_t + C_y \quad (1)$$

其中: C_p 为联轴器机加工产生的总碳排放量, g ; C_t 为联轴器生产过程中在切削加工工艺流程产生的碳排放量, g ; C_y 为机床空载时产生的碳排放, g 。

1) 切削加工过程碳排放

机床在切削加工状态下所产生的碳排放 C_t 可分为两部分:电能消耗产生的碳排放和切削刀具、切削液产生的碳排放,可用式(2)和式(3)计算:

$$C_e = C_d + C_f = \sum_{k=1}^K F_e (P_n + P_m) T_{mk} / 60 \quad (2)$$

$$P_n = F_n V_n = C_{Fc} a_{sp}^{z_{Fc}} f^{y_{Fc}} v_c^{n_{Fc}} K_{Fc} v_c \times 10^{-3} \quad (3)$$

其中: C_e 为电能消耗产生的碳排放, g ; C_d 为数控车床主传动系统的碳排放量, g ; C_f 为伴随切削加工过程中附加载荷能耗产生的碳排放量, g ; F_e 为电能碳排放因子, $kgCO_2e/(kW \cdot h)$; P_n 为切削功率, kW ; T_{mk} 为第 k 次切削加工时间, min ; F_n 为主切削力, N ; C_{Fc} 、 z_{Fc} 、 y_{Fc} 、 n_{Fc} 和 K_{Fc} 均为切削力计算相关系数, a_{sp} 为背吃刀量, mm ; f 为进给量, mm ; v_c 为切削速度, m/s 。

附加载荷功率 P_m 可通过切削功率计算[12]:

$$P_m = c_n P_n \quad (4)$$

其中 c_n 为附加载荷损耗系数,本文取 $c_n = 0.2$ 。

刀具磨损的碳排放量计算公式为:

$$C_h = \frac{T_m}{(N+1)L_t} F_m f_m \times 10^3 \quad (5)$$

其中: C_h 为刀具磨损的碳排放量, g; T_m 为切削加工时间, min; N 为刀具刃磨次数, L_t 为刀具寿命, min; F_m 为刀具材料碳排放因子, kgCO₂e/kg; f_m 为刀片质量, kg。

在机械加工过程中, 切削液的碳排放量主要考虑切削液制备使用以及废液的处理这两点。由切削液引起的碳排放可用式(6) [11]计算:

$$C_c = \frac{(T_m + T_{Nlt})}{C_L} (C_{pe} + C_{de}) V \times 10^3 \quad (6)$$

其中: C_c 为切削液产生的碳排放量, g; C_L 为切削液更换周期, min; V 为切削液体积, L; T_{Nlt} 为切削过程中的车床的空载时间, min; 生产切削液碳排放因子 C_{pe} 和废液碳排放因子 C_{de} 分别取 2.85 kgCO₂e/L 和 0.2 kgCO₂e/L [13]。

2) 机床空载碳排放

机床在空载闲置时产生的碳排放 C_y 为:

$$C_y = \sum_{k=1}^K F_e P_{Mnlp} T_{Nltk} / 60 \quad (7)$$

其中: P_{Mnlp} 为切削过程空载时的空载功率, kW; T_{Nltk} 为第 k 次切削加工空载时间。

根据车床切削过程和空载碳排放, 车间总碳排放量可通过式(8)计算:

$$\begin{aligned} C_p &= C_c + C_h + C_c + C_y \\ &= \sum_k \left[(1 + c_m) F_e C_{F_c} a_{sp}^{z_{F_c}} f^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} v_c T_{mk} / (6 \times 10^4) + F_e P_{Mnlp} T_{Nltk} / 60 \right] \\ &\quad + \frac{T_m}{(N+1)L_t} F_m^3 f_m^3 \times 10^3 + \frac{(T_m + T_{Nlt})}{C_L} (C_{pe} + C_{de}) V \times 10^3 \end{aligned} \quad (8)$$

2.2.2. 切削加工过程成本函数

加工过程中的成本包括机床加工费用、刀具损耗费用和辅助系统能耗费用, 其中机床加工费用可通过折旧费计算; 辅助系统能耗主要和车间布置有关, 与切削参数关系甚微, 在本文中不计入考虑。

在切削加工过程中, 根据刀具移动轨迹长度 l_{ck} 和数控机床设定的单位时间内刀具进给量 f_{ck} 估算出车削加工工艺中第 k 次切削的实际加工时间:

$$T_{mk} = \frac{l_{ck}}{60 \times f_{ck}} \quad (9)$$

同理空载时间 T_{Nltk} 为:

$$T_{Nltk} = \frac{l_{emk}}{60 \times f_{emk}} \quad (10)$$

其中: l_{emk} 为空载时的刀具移动轨迹长度, m; f_{emk} 为空载时的刀具移动速度, m/s。

机床加工费用为:

$$G_{eq} = T_m + T_e + T_{Nlt} = \left(\sum_{k=1}^K \frac{l_{ck}}{f_{ck}} + \sum_{k=1}^{K-1} T_{ek} + \sum_{k=1}^K \frac{l_{emk}}{f_{emk}} \right) \frac{R_{mt}}{60} \quad (11)$$

其中: T_{ek} 为第 k 次切削过程的换刀时间, min。

刀具损耗费用可通过切屑体积和刀具背吃刀量来计算。参考[14], 刀具损耗费用为:

$$G_{ep} = \sum_{q=1}^m \frac{S^{(q)} a_p^{(q)}}{L_t^{(q)} a_p a_q} C^{(q)} \quad (12)$$

其中: $S(q)$ 、 a_q 、 $C(q)$ 分别为第 q 个刀具切除的面积、轴向吃刀量和购买成本。

综上可知, 机械加工总成本为:

$$G_s = G_{eq} + G_{ep} = \left(\sum_{k=1}^K \frac{l_{ck}}{f_{ck}} + \sum_{k=1}^{K-1} T_{ck} + \sum_{k=1}^K \frac{l_{emk}}{f_{emk}} \right) \frac{R_{mt}}{60} + \sum_{q=1}^m \frac{S^{(q)} a_p^{(q)}}{L_t^{(q)} a_p a_q} C^{(q)} \quad (13)$$

2.3. 约束条件

在加工过程中, 车削加工的功率不能超过最大功率 P_{max} :

$$\frac{F_n v_c}{1000} \leq P_{max} \quad (14)$$

车削加工后的零件表面粗糙度要达到相关工序要求的标准, 因此车削加工相关参数也受到工件表面质量的约束:

$$Ra = \frac{1000 f^2}{32 r_g} \leq Ra_{max} \quad (15)$$

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。

数控机床的最大切削力 F_{max} 必须大于切削所需要的切削力:

$$C_{F_c} a_{sp}^{z_{F_c}} f^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} \leq F_{max} \quad (16)$$

车床车削加工过程中, 选用的车削参数必须符合车床的额定参数要求:

$$n_{min} < n < n_{max} \quad (17)$$

其中: n_{min} 、 n_{max} 分别为最小主轴转速和最大主轴转速, $r \cdot \min^{-1}$ 。参考文献[15], 设待加工面直径为 d , 可得:

$$n = \frac{1000 v_c}{\pi d}$$

其中: f_{min} 和 f_{max} 分别为最小进给量和最大进给量, $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ 。综上所述, 以低碳低成本为目标的切削优化模型如下:

$$\min F(n, f, a_p) = (\min C_p, \min G_s)$$

$$s.t. \frac{F_n v_c}{1000} \leq P_{max}$$

$$\frac{1000 f^2}{32 r_g} \leq Ra_{max}$$

$$C_{F_c} a_{sp}^{z_{F_c}} f^{y_{F_c}} v_c^{n_{F_c}} K_{F_c} \leq F_{max}$$

$$n_{min} < n < n_{max}$$

$$f_{min} < f < f_{max}$$

3. 基于改进 GSA 的模型求解

3.1. 多目标函数转化

以降低碳排放和减少加工时间为目标的模型中含有两个待优化的非负目标函数, 并且包含 3 个优化

参数, 很难寻找到目标函数最优解。因此本文采用权重系数法, 将多目标函数转化为单目标函数:

$$\min F(v, f, a_p) = (w_1 \min C_p, w_2 \min G_s) \quad (18)$$

其中: w_1 、 w_2 分别为碳排放和加工成本相关的权重系数, 通过模糊评价法确定 $w_1 = 0.5$ 、 $w_2 = 0.5$ 。

为避免碳排放目标函数和加工成本目标函数量纲不同, 需要对目标函数进行量纲一化处理:

$$C_p^* = \frac{C_p - C_{p\min}}{C_{p\max} - C_{p\min}} \quad (19)$$

$$G_s^* = \frac{G_s - G_{s\min}}{G_{s\max} - G_{s\min}} \quad (20)$$

其中: $C_{p\max}$ 、 $C_{p\min}$ 分别是碳排放函数在约束条件下的最大值和最小值, g ; $G_{s\max}$ 、 $G_{s\min}$ 分别是加工成本函数在约束条件下的最大值和最小值, 元。

经处理后的单目标函数为:

$$\min F(v, f, a_p) = \min \left(w_1 \frac{C_p - C_{p\min}}{C_{p\max} - C_{p\min}} + w_2 \frac{G_s - G_{s\min}}{G_{s\max} - G_{s\min}} \right) \quad (21)$$

3.2. 基于改进 GSA 的加工工艺参数优化

GSA 是 RASHEDI 等学者在 2009 年受万有引力的启发, 提出的一种基于牛顿万有引力定律和第二运动定律的启发式智能搜索算法[16]。该算法根据物体与物体之间会在引力的作用下相互吸引的特质来构造算法, 其实现简单, 收敛迅速, 并且具备较强的全局搜索能力。

3.2.1. 惯性质量计算

粒子 i 在 t 时刻相应的质量 $M_i(t)$ 可表示为:

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (22)$$

$$m_j(t) = \frac{f_{\text{fit}i}(t) - w_{\text{worst}}(t)}{b_{\text{best}}(t) - w_{\text{worst}}(t)} \quad (23)$$

其中: $f_{\text{fit}i}(t)$ 为粒子 j 在 t 时刻的适应度值; N 为种群中粒子数; $b_{\text{best}}(t)$ 为 t 时刻粒子 j 搜索的最佳适应度值, $w_{\text{worst}}(t)$ 为 t 时刻粒子 j 搜索的最差适应度值, 两者定义为:

$$b_{\text{best}}(t) = \min f_{\text{fit}j}(t) \quad (24)$$

$$w_{\text{worst}}(t) = \max f_{\text{fit}j}(t) \quad (25)$$

3.2.2. 万有引力计算

假设在一个 D 维的搜索空间中, 随机产生一个初始种群, 种群粒子个数为 N 。参考文献[17], 在 t 时刻, 第 j 个施力粒子和第 i 个受力粒子之间的作用力 $F_{dij}(t)$ 计算公式为:

$$F_{dij}(t) = G(t) \frac{M_i(t)M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} [x_{dj}(t) - x_{di}(t)] \quad (26)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2 \quad (27)$$

其中: x 为粒子所处位置; G 为引力常数; ε 为一个微小常量; $R_{ij}(t)$ 为 t 时刻受力粒子与施力粒子之间

的欧氏距离。

粒子 i 受到的力 $F_{di}(t)$ 可用式(28)计算:

$$F_{di}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}(0,1)_j F_{dij}(t) \quad (28)$$

3.2.3. 粒子属性更新

d 维空间中粒子在 t 时刻的加速度 $a_{di}(t)$ 表示为:

$$a_{di}(t) = \frac{F_{di}(t)}{M_i(t)} \quad (29)$$

粒子 i 的速度更新公式为:

$$v_{di}(t+1) = \text{rand}(0,1)_i v_{di}(t) + a_{di}(t) \quad (30)$$

结合式(30)可知当前粒子 i 所处位置为:

$$x_{di}(t+1) = x_{di}(t) + v_{di}(t+1) \quad (31)$$

3.2.4. 问题描述和算法改进

GSA 算法简单实用, 常用于处理非线性约束优化问题, 但 GSA 算法在搜索最优解的过程中, 很容易提前收敛, 从而陷入局部最优解, 降低实际应用的质量。而另一方面, 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)会通过交叉和变异这两步操作来提高每次迭代时种群的多样性, 可以避免过早收敛。根据 GA 算法这一特点, 本文提出了一种基于 GA 的改进 GSA 算法。该算法在求解粒子质量时增加了遗传算法中的粒子变异思想, 不直接对粒子进行变异操作, 而是在满足变异触发函数条件下, 让粒子在合适范围内产生变异。由于每次迭代对所有粒子都会判断变异是否触发, 算法执行效率低, 因此引入聚集度理论, 在种群多样性降低时进行变异。改进后具体操作步骤如下。

步骤 1: 种群初始化, 随机产生粒子的位置, 设置初始参数。

步骤 2: 计算粒子的适应度, 记录最优值粒子位置, 计算聚集度。

步骤 3: 如果 $\delta_t - \delta_{t-1} > 0$, 执行步骤 6。否则执行步骤 4。

步骤 4: 根据变异触发函数表达式来判断粒子是否满足变异, 符合条件的粒子进行正态变异操作。

步骤 5: 计算当前代最佳值 $b_{\text{best}}(t)$ 和最坏值 $b_{\text{worst}}(t)$, 并由此求出和更新当前全局最优解的位置。

步骤 6: 求出粒子惯性质量, 更新引力常数。

步骤 7: 计算粒子加速度。

步骤 8: 更新粒子速度和位置。

步骤 9: 返回步骤 2 循环迭代, 直到符合迭代要求的次数后停止迭代。

步骤 10: 结束循环, 输出结果。

步骤 2 第 t 代粒子的聚集度, 其计算公式为:

$$\delta_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{f_{\text{fit}_i}(t) - f_{\text{avg}}(t)}{b_{\text{best}}(t) - w_{\text{worst}}(t)} \right| \quad (32)$$

其中: δ_t 为第 t 代粒子适应度平均值。

由式(32)可知, 当 δ_t 越大时, 粒子的多样性越好; 当 δ_t 变小时粒子的多样性会变差。因此可以设置当 δ_t 减小时, 对下一代粒子种群进行变异。但在算法后期应当减小种群内粒子变异率, 根据邢宇浩[18]对 GSA 的改进和应用研究, 自适应变异触发函数可以设为:

$$R_{it} = e^{\left(\frac{-D \times t}{2} \times T\right)} \times \left(r \times e^{\left(\frac{i-1}{N}\right)} + k \right) \quad (33)$$

其中： R_{it} 为第 t 代中的第 i 个粒子的变异触发函数值， T 为最大迭代次数， k 为取值在[0.25, 0.35]之间的一个常数，一般取 $k=0.3$ 。当 $R_{it} > 0.6$ 时，就会对当前粒子变异， r 为[0, 1]内均匀分布的随机数。

对于满足变异条件的粒子采用正态分布变异，表达式为：

$$\text{Normal}_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\lambda_{\text{best}} - f_{\text{fit}_i}(t))^2}{2\sigma^2}} \quad (34)$$

其中： $b_{\text{best}}(t)$ 为第 t 次迭代时全局最优解， σ 为正态分布的标准差。

4. 实例分析

4.1. 模型参数设置

以 CKP6152 数控机床(规格参数如表 1 所示，机床折旧费按 200 元/h 计算)车削加工某型号的电机联轴器零件为例(零件材质为灰铸铁，尺寸参数如图 1 所示，单边加工余量为 10 mm)，分析本文方法的可行性和效果。

Table 1. CKP6152 CNC lathe standard parameters

表 1. CKP6152 数控车床标准参数

主轴转速范围 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	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
14~1600	0.1~3.5	7.5	0.67	9000	0.8

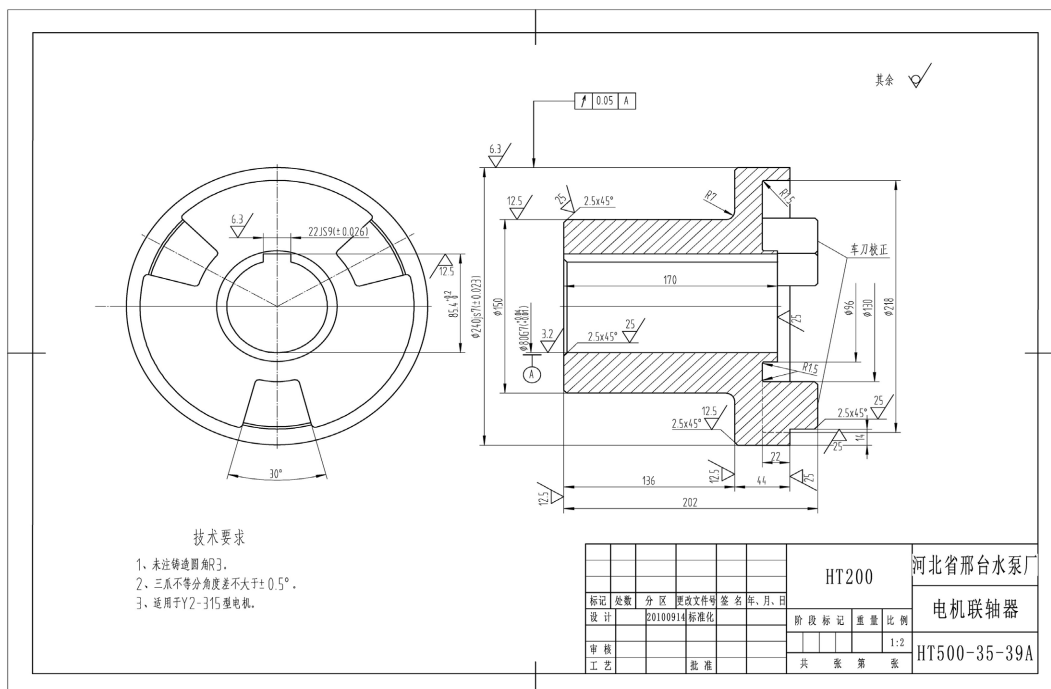


Figure 1. Dimensional drawing of three-jaw coupling parts

图 1. 三爪联轴器零件尺寸图

零件未优化前单边切削加工安排为: 3 次粗加工和 1 次半精加工, 前两次粗加工、最后一次粗加工和半精加工的切削深度分别为: 4.0 mm、1.5 mm 和 0.5 mm。将切削参数带入模型可得出其碳排放量和加工成本, 具体参数如表 2 所示。

Table 2. Original cutting parameters
表 2. 原始切削加工参数

工艺名称	主轴转速 $n/(r/min)$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	背吃刀量 a_p/mm	碳排放量/g	成本/元
粗加工	400	0.20	4.0		
粗加工(末)	400	0.20	1.5	672.11	38.46
半精加工	600	0.05	0.5		

刀具材料为硬质合金车刀, 刀具主偏角、前角和刀倾角分别为 75° 、 15° 和 0° , 刀尖圆弧半径为 1 mm。材料、前角和主偏角对切削力的修正系数分别为 1.00、0.95 和 0.92, 式(6)中 K_{Fc} 为前三者乘积。切削液用量和更换周期分别为 13 L 和 28,000 min, 切削力相关系数见表 3, 与刀具碳排放相关参数见表 4。

Table 3. Correlation coefficient of cutting force calculation
表 3. 切削力计算相关系数

C_{Fc}	x_{Fc}	y_{Fc}	n_{Fc}
2795	1.0	0.75	-0.15

Table 4. Correlation coefficient of cutting force calculation
表 4. 刀具碳排放相关系数

刀具碳排放系数 $F_m/(kgCO_2e/kg)$	刀片质量 f_m/kg	刃磨次数 N	刀具寿命 L_t/min	刀具价格 $C/\text{元}$
75	0.015	1	60	200

4.2. 优化结果及分析

分别采用 GSA 算法、改进后的 GSA 算法对切削参数进行优化。根据经验设置粒子规模为 100, 迭代次数为 120。实验结果如图 2。

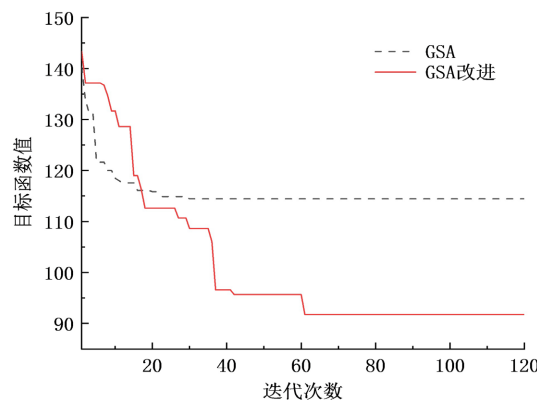


Figure 2. GSA, improved GSA algorithm
图 2. GSA、改进 GSA 算法

分析图 2, GSA 算法虽然在迭代初期收敛速度比较好, 但是在迭代次数为 25 时收敛, 很快就陷入局部最优解, 不再随着迭代次数增加而优化; 改进后的 GSA 算法的收敛后的最优解与 GSA 算法比较有比较好的改善, 由改进的 GSA 算法搜索到的优化结果如表。

Table 5. Final optimization result
表 5. 最终优化结果

工艺名称	主轴转速 $n/(r/min)$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	背吃刀量 a_p/mm	碳排放量/g	成本/元
粗加工	427	0.24	3.4		
粗加工(末)	427	0.24	2.7	602.13	33.15
半精加工	891	0.07	0.5		

为保证零件表面粗糙度达到要求, 优化过程中设置半精加工次数和刀具背吃刀量不变。对比表 2 和表 5 可知, 排除其废屑等材料造成的固定碳排放, 每次联轴器切削加工造成的最小碳排放为 602.13 g, 相比原碳排放量 672.11 g 而言, 降低了 10.41% 的碳排放。采用优化后的加工参数进行车削加工, 可得其成本为 33.15 元, 相比原成本 38.46 元, 降低了 13.81%, 达到了优化效果, 从而证明了本文所提优化模型及改进 GSA 算法的有效性。

5. 结论与展望

1) 在分析了联轴器零件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切削加工工艺参数优化模型。

2) 提出一种基于改进 GSA 算法的切削加工工艺参数优化求解方法。将自适应变异触发函数引入 GSA, 提高了算法全局搜索能力, 并采用聚集度作为进行变异操作评价标准, 降低了算法复杂度。

3) 通过一个具体实例, 采用改进 GSA 对所建碳效益模型进行优化计算, 得到了合理的切削参数优化结果, 所建模型和方法对机械制造行业实现低碳低成本制造有一定的借鉴意义。

4) 由于数控加工类型多样, 本文只是对数控加工中联轴器的切削加工工艺参数优化进行了研究, 而实际制造加工过程绝大多数零件加工需要多工序、多工步完成, 因此多工序、多工步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] 梁晓菲. 新发展理念与气候变化——以国家自主贡献为视角[J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2019, 33(2): 7-16.
- [2] 尹瑞雪. 普通机械零件制造过程工艺碳排放估算[J]. 机械工程师, 2018(4): 8-11.
- [3] 郑楚威, 阎春平, 曹卫东. 滚齿加工过程碳排放定量计算模型及其优化方法[J]. 现代制造工程, 2018(10): 23-30.
- [4] Na, H.M., Sun, J.C., Qiu, Z.Y., Yuan, Y.X. and Du, T. (2022) Optimization of Energy Efficiency, Energy Consumption and CO₂ Emission in Typical Iron and Steel Manufacturing Process. *Energy*, **257**, Article ID: 124822. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124822>
- [5] An, R.Y., Yu, B.Y., Li, R. and Wei, Y.-M. (2018) Potential of Energy Savings and CO₂ Emission Reduction in China's Iron and Steel Industry. *Applied Energy*, **226**, 862-880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.044>

-
- [6] Peng, J.Y., Xie, R. and Lai, M.Y. (2018) Energy-Related CO₂ Emissions in the China's Iron and Steel Industry: A Global Supply Chain Analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, **129**, 392-401.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.019>
- [7] 张如敏, 张建锋. 基于遗传算法的高速加工切削参数优化[J]. 机械研究与应用, 2011, 24(5): 56-57.
- [8] 张楚锋, 梁祖欣. 基于遗传算法的数控铣床切削参数优化[J]. 机电工程技术, 2016, 45(1): 85-87.
- [9] 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.
- [10] 李聪波, 余必胜, 肖溱鸽, 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] 胡韶华, 刘飞, 何彦, 等. 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.
- [13] 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.
- [14] 张雷, 赵希坤, 蒋诗新, 宋豪达. 低碳低成本约束下箱体零件加工路线优化方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(23): 2836-2844.
- [15] 华楚生. 机械制造技术基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012.
- [16] 刘勇, 马良. 引力搜索算法及其应用[M]. 上海: 上海人民出版社, 2014.
- [17] 赵允坤, 胡军, 杨斌. 基于万有引力搜索算法优化 BP 的尾矿坝浸润线预测[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 97-100.
- [18] 邢宇浩. 万有引力搜索算法的改进与应用[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2018.