

DOI: 10.3901/JME.2014.17.133

面向高效低碳的机械加工工艺路线 多目标优化模型*

李聪波¹ 李鹏宇¹ 刘飞¹ 崔龙国^{1,2} 税虹³

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030;

2. 重庆市标准化研究院 重庆 400023;

3. 重庆第二机床厂有限责任公司 重庆 401336)

摘要: 工艺路线规定了将毛坯变成零部件的整个加工过程, 工艺路线的低碳优化直接关系到产品生产全过程及整个车间的低碳生产。为实现机械加工工艺路线的低碳优化决策, 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。以某机床电动机座加工过程为例验证了所建模型的有效性和实用性。

关键词: 工艺路线; 高效低碳; 多目标优化; 遗传算法

中图分类号: TH162

Multi-objective Machining Process Route Optimization Model for High Efficiency and Low Carbon

LI Congbo¹ LI Pengyu¹ LIU Fei¹ CUI Longguo^{1,2} SHUI Hong³

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Chongqing Institute of Standardization, Chongqing 400023;

3. Chongqing NO.2 Machine Tool Works Co.,Ltd, Chongqing 401336)

Abstract: The process route rules the whole machining process from blanks to parts. It can directly affect the low carbon production of the mechanical product. To achieve the low-carbon optimization decisions of machining process route, the concept of feature element and machining element is introduced to express the component characteristics, and a multi-objective optimization model is established, which takes the minimum total processing time and the lowest total carbon emissions as the optimization objectives. Then the optimization model is solved based on NSGA-II (Non-dominated sorting genetic algorithm II). An experiment case of a motor seat machining process is performed to verify the feasibility and practicability of the proposed model.

Key words: process route; high efficiency and low carbon; multi-objective optimization; genetic algorithm

0 前言

工艺路线规定了将毛坯变成零部件的整个加工过程,在很大程度上影响着产品零件的加工效率、加工质量、加工成本、加工过程能耗等企业经营目标。工艺路线优化(Process route optimization, PRO)

是计算机集成制造系统的重要组成部分,对于提高生产效率和加工质量、降低生产成本和能耗以及增加系统柔性起着十分重要的作用。

目前,国内外已有许多学者对加工工艺路线的优化问题进行了研究。常志勇等^[1]将缩短加工周期、提高加工质量和降低加工成本的综合目标表达为制造资源更换率最低,提出了一种以制造资源更换率最低为优化目标的自适应蚁群优化算法以寻求符合生产实际的加工工艺路线。WANG等^[2]综合考虑零

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2014AA041506)和国家自然科学基金(51035001)资助项目。20130910 收到初稿, 20140213 收到修改稿

部件的表面特性、几何形状和体积等因素,应用几何推理和泛型加工特征方法对数控加工工艺进行优化排序。LIU 等^[3]以零部件特征和机加工工艺的优先约束,采用混合的“知识-几何学推理”开展机加工工艺排序。LIAN 等^[4]考虑工艺路线柔性、排队柔性、机器柔性、刀具柔性和刀具方向柔性等因素,提出了一种帝国主义竞争遗传算法进行求解。GUO 等^[5-6]提出了粒子群优化算法用于解决工序排序问题,将工艺路线规划分为两个阶段,第一个阶段的目的是生成若干可行的工序序列,第二个阶段的目的是为每个工序选择相应的加工资源。LIU 等^[7]针对工艺路线优化问题进行建模,将工艺路线规划简化成带约束的旅行商问题,并提出了蚁群算法解决该问题。ZHANG 等^[8]分析了加工过程排序问题的多个约束变量,建立了基于权重的适应性模型,并提出以一种具有收敛性的遗传算法来获得最优的加工路径。DUFLOU 等^[9]对优化制造系统资源和能量利用率、环境影响等方面的文献进行综述,并总结了加工单元层、设备层、车间层和供应链层的能效改善策略。上述研究主要是针对机械制造系统工艺路线决策优化的研究,较多通过运用不同优化算法围绕制造效率、制造柔性、制造质量等目标展开研究,以低能耗和低排放为优化目标进行工艺路线优化的研究迫切需要展开。

基于此,本文对工艺路线的高效低碳优化问题进行了研究。首先,对机械零部件特征的表示方法进行详细分析,在此基础上,对工艺路线优化问题通用数学模型进行描述;然后,综合考虑工艺路线规划过程中所需满足的实际约束条件,建立工艺路线的高效低碳数学优化模型,它以最短总加工时间(高效)和最低碳排放(低碳)为优化目标函数;最后,基于遗传算法对建立的模型进行优化求解。

1 工艺路线优化模型的建立

1.1 机械零部件特征的表示

在对零部件进行工艺路线的规划和优化决策时,首先需要对零件特征信息进行知识表达。一般来说,每种零部件都是由某些具有加工意义的最基本的特征所构成,例如孔、槽、平面、倒角等。零部件的特征可分为主特征和辅特征两大类,主特征是用于构建零部件整体结构且无法进行再次拆分的几何拓扑特征,如平面、外圆、孔等,辅特征是依附于主特征上的局部几何结构,是对主特征的局部修饰,如倒角、键槽、螺纹等。零部件工艺路线的设计不仅涉及多特征的加工,还面临多个加工阶段、

多种加工方法、多种加工资源的选择,这就造成工艺路线设计时的多种柔性,进而导致选择合理的工艺路线是一项复杂的工作,为了方便工艺路线优化决策问题的描述,这里引入特征元和加工元概念对零部件特征进行表示。

对于零部件的每一个特征,称为该零部件的一个特征元,一个工件的全部特征元构成该零件的特征集合,表示为

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n\}$$

式中 F_i ——零件的第 i 个特征元;

n ——零件特征元的总数目。

以零部件某一特征为核心的、有关该特征加工所需要的信息实体,称为零部件的一个加工元,其内容一般包括零部件加工特征、加工阶段、加工方法、加工资源及装夹位置等。加工元在数学上可表示为一个五元组

$$me_{ijlu} = \{F_i, S_j, P_l, R_u, D\}$$

式中 F_i ——零件的第 i 个特征;

S_j ——零件特征 F_i 的第 j 个加工阶段;

P_l ——零件特征 F_i 的阶段 S_j 的第 l 种加工方法;

R_u ——零件特征 F_i 的第 j 个加工阶段可选用的第 u 种加工资源;

D ——零件特征 F_i 在 S_j 阶段加工时的装夹位置。

一般来说,在机械加工过程中,相同的加工方法可以采用不同的加工资源组合来完成。加工资源主要是指机床、刀具、工装夹具等设备。因此, R_u 可以看做是一个加工资源的集合。设机床集合为 $m = \{m_1, m_2, \dots, m_o\}$, 刀具集合为 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_p\}$, 工装夹具集合为 $f = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$, o, p, q 表示系统加工资源中机床、刀具、工装夹具的总数,则加工资源集合可表示为 $R_u = \{m_s, t_k, f_r\} (1 \leq s \leq o, 1 \leq k \leq p, 1 \leq r \leq q)$ 。

一个零件的全部加工元构成该零件的加工元集合,零部件的某一条工艺路线就是加工元集合元素的某一种组合。零部件工艺规划就是分析零部件特征,进行加工元序列合理排序的过程。

1.2 工艺路线优化问题描述

工艺路线优化决策包括两个部分:工艺选择和工序排序。根据加工元的定义,将工艺路线优化问题转化为在满足工艺排序的不同约束如加工方法选择、机床选择、刀具选择、夹具选择、工艺约束等制约条件下,寻求使得目标最优的加工元优化排序

问题。因此, 工艺路线优化问题实际上就是一个约束组合优化问题, 优化变量为加工元顺序, 可以描述为

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } h_j(x) = 0 \quad j=1, 2, \dots, l \\ g_i(x) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \\ x \in \Omega \quad \Omega = (x_1, x_2, \dots, x_{n!}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_{n!}\}$ 为零部件所有加工元不同排序序列构成的集合, 该集合元素个数为 $n!$ 个, 实际上, 由于工艺约束的存在, 集合 Ω 中真正满足工艺约束的可行解的个数要远小于 $n!$; x 为集合 Ω 中的某个特定解; $f(x)$ 为目标函数, $h_j(x)$, $g_i(x)$ 为约束条件。

1.3 工艺路线高效低碳优化模型建立

1.3.1 约束条件

在零部件加工过程中, 各工艺特征之间及特征表面的加工之间存在各种约束关系, 根据强制性程度的不同, 可将各类约束分为合理性约束和最优化性约束两种, 在工艺路线规划与优化排序过程中, 前者是必须满足的约束, 后者是应尽量满足的约束。加工工艺路线优化排序的基本思路就是先找出所有满足合理性约束的工艺路线集, 然后根据最优化性约束的标准进行判断和评价, 从而找到最好或较好的工艺路线^[10]。合理性约束包括先粗后精、先主后次、先基准后其他、先面后孔等; 最优化性约束包括尽量减少机床更换次数、尽量减少换刀次数、尽量减少装夹次数等。

1.3.2 优化目标函数的建立

(1) 低碳目标函数。机械加工系统低碳目标主要体现为工艺路线的所有加工工艺产生的总碳排放量最小。加工工艺主要可分为两大类: 冷加工工艺和热加工工艺。

1) 冷加工工艺碳排放。冷加工工艺是机械加工工艺过程的主要组成部分, 某一冷加工工艺 i 产生的碳排放主要包括工艺 i 加工设备消耗电能引起的碳排放, 切削液和刀具使用引起的碳排放^[11]。计算方法如下

$$C_{Ei} = C_{Ei}^e + C_{Ei}^c + C_{Ei}^t \quad (2)$$

式中, C_{Ei}^e 、 C_{Ei}^c 、 C_{Ei}^t 分别表示工艺 i 加工设备消耗电能引起的碳排放、消耗切削液引起的碳排放、刀具引起的碳排放。

a. C_{Ei}^e 确定。机械加工设备电能消耗主要包括切削能耗和辅助能耗两部分, 切削能耗主要是指机床实施切削加工的驱动系统(主传动系统、进给传动

系统)消耗的能量, 辅助能耗是指机床加工时的一些辅助系统(照明系统、润滑冷却系统、排屑系统等)的能量消耗。 C_{Ei}^e 计算如下

$$C_{Ei}^e = C_{EF,ele}(E_{Ci}^{cut} + E_{Ci}^{au}) \quad (3)$$

式中 $C_{EF,ele}$ ——电能的碳排放因子;

E_{Ci}^{cut} ——工艺 i 的切削能耗, 其确定方法一般可通过理论计算法^[11]、比能法^[12]、工艺平均能耗法^[13]等求得; E_{Ci}^{au} 表示工艺 i 的加工设备的辅助能耗。本文采用理论计算法确定切削能耗

$$E_{Ci}^{cut} = P_i^u t_i^{idl} + P_i^{in} t_i$$

辅助能耗的计算方法如下

$$E_{Ci}^{au} = P_i^{au} (t_i^{idl} + t_i) \quad (4)$$

式中, P_i^u 、 P_i^{in} 分别表示工艺 i 加工设备的空载功率和输入功率, t_i^{idl} 表示工艺 i 加工设备的空载时间, t_i 表示工艺 i 的加工时间, P_i^{au} 表示工艺 i 所有辅助系统总功率。

b. C_{Ei}^c 确定。一般来说, 工艺路线中不同加工工艺所用的切削液种类不同, 并且不同切削液的碳排放因子和更换周期差别较大, 进而导致同一工艺使用不同切削液时碳排放有较大差异。工艺 i 切削液碳排放计算如下

$$\begin{aligned} C_{Ei}^c = \frac{t_i}{T_i^c} [C_{EFi}^{oil}(C_{Ci} + A_{Ci}) + \\ C_{EFi}^{wc}[(C_{Ci} + A_{Ci})/\delta_i] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T_i^c 表示工艺 i 的加工设备所用切削液更换周期, 一般为 1~3 个月; C_{EFi}^{oil} 表示工艺 i 的切削液碳排放因子, C_{EFi}^{wc} 表示工艺 i 的废切削液处理碳排放因子, C_{Ci} 、 A_{Ci} 分别表示工艺 i 的初始切削液用量、附加切削液用量, δ_i 表示工艺 i 的切削液浓度。

c. C_{Ei}^t 确定。工艺路线中不同加工工艺所用的刀具种类一般不同。不同刀具的碳排放因子和刀具寿命差别较大, 进而导致同一工艺用不同刀具加工时刀具碳排放有较大差异。工艺 i 刀具碳排放计算如下

$$C_{Ei}^t = \frac{t_i}{T_i^t} C_{EFi}^t W_i^t \quad (6)$$

式中, t_i 表示工艺 i 的加工时间, T_i^t 表示工艺 i 所用刀具的刀具寿命, C_{EFi}^t 表示工艺 i 所用刀具碳排放因子, W_i^t 表示工艺 i 所用刀具质量。

2) 热加工工艺碳排放。一条完整的工艺路线一般还涉及热处理等热加工工艺, 热处理方法很多, 目前最常采用电加热炉加热方式。热处理工艺的碳

排放确定方法如下

$$C_{Ej}^{ht} = C_{EF,ele} E_{Cj}^{ele} \quad (7)$$

式中 E_{Cj}^{ele} ——工艺 j 的电能消耗量。

电能消耗量 E_{Cj}^{ele} 可以根据热处理工艺电耗定额来估算, 具体计算如下

$$E_{Cj}^{ele} = N_b K_1^j K_2^j K_3^j K_4^j K_5^j \quad (8)$$

式中 N_b ——热处理标准工艺电耗, 其值取为 0.3 kWh/kg;

K_1^j ——热处理工艺 j 工艺折算系数;

K_2^j ——热处理工艺 j 加热方式系数;

K_3^j ——热处理工艺 j 生产方式系数;

K_4^j ——热处理工艺 j 工件材料系数;

K_5^j ——热处理工艺 j 装载系数。

这些系数的取值可参阅 GB/T17358-2009 热处理生产电耗计算和测定方法, 则热处理工艺的碳排放为

$$C_{Ej}^{ht} = C_{EF,ele} N_b K_1^j K_2^j K_3^j K_4^j K_5^j \quad (9)$$

综上分析, 机械加工系统工艺路线总的碳排放 C_E 表示如下

$$\begin{aligned} C_E = & \sum_{i=1}^n (C_{Ei}^e + C_{Ei}^c + C_{Ei}^t) + \sum_{j=1}^l C_{Ej}^{ht} = \\ & \sum_{i=1}^n \{C_{EF,ele} \times [P_i^u t_i^{idl} + P_i^{in} t_{ii} + P_i^{au} (t_i^{idl} + t_i)] + \\ & \frac{t_i}{T_i^c} [C_{EFi}^{oil} (C_{Ci} + A_{Ci}) + C_{EFi}^{wc} [(C_{Ci} + A_{Ci}) / \delta] + \\ & \frac{t_i}{T_i^t} C_{EFi}^t W_i^t] + \} + \\ & \sum_{j=1}^l C_{EF,ele} \times N_b K_1^j K_2^j K_3^j K_4^j K_5^j \end{aligned} \quad (10)$$

式中, n 和 l 分别表示工艺路线中冷加工工序总数和热处理工序的总数。

(2) 高效目标函数。高效目标主要体现为工艺路线总加工时间最短。总加工时间 T 与加工工艺时间、机床更换时间、刀具更换时间和夹具更换时间有关, 这些时间的定义如下。

1) 总加工工艺时间。假设工序 P_i 的加工时间为 t_i , 工艺路线中工序总数目为 n , 则总的加工工艺时间(Total processing time, MPT)计算如下

$$TPT = \sum_{i=1}^n t_i \quad (11)$$

2) 机床更换时间。一次机器更换是指相邻的两

个工序在不同的机器上加工。机床更换时间(Machine change time, MCT)计算如下

$$MCT = MCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(M_{i+1} - M_i) \quad (12)$$

式中, MCTI 是机床更换时间指数(更换一次机床所用时间), M_i 是第 i 个工序使用的机器

$$\Psi(M_{i+1} - M_i) = \begin{cases} 1 & M_i \neq M_{i+1} \\ 0 & M_i = M_{i+1} \end{cases} \quad (13)$$

3) 刀具更换时间。一次刀具更换是指相邻的两个工序需要用不同的刀具加工。刀具更换时间(Tool change time, TCT)计算如下

$$TCT = TCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(T'_{i+1} - T'_i) \quad (14)$$

式中, TCTI 是刀具更换时间指数(更换一次刀具所用时间), T_i 是第 i 个工序使用的刀具, 且满足

$$\Psi(T'_{i+1} - T'_i) = \begin{cases} 1 & T'_i \neq T'_{i+1} \\ 0 & T'_i = T'_{i+1} \end{cases} \quad (15)$$

4) 工装夹具更换时间。一次工装夹具更换是指相邻的两个工序需要用不同的夹具加工。夹具更换时间(Fixture change time, FCT)计算如下

$$FCT = FCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(F_{i+1} - F_i) \quad (16)$$

式中, FCTI 是夹具更换时间指数(更换一次夹具所用时间), F_i 是第 i 个工序使用的夹具

$$\Psi(F_{i+1} - F_i) = \begin{cases} 1 & F_i \neq F_{i+1} \\ 0 & F_i = F_{i+1} \end{cases} \quad (17)$$

综上分析, 工艺路线总的加工时间 T 表示如下

$$\begin{aligned} T = & TPT + MCT + TCT + FCT = \\ & \sum_{i=1}^n t_i + MCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(M_{i+1} - M_i) + \\ & TCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(T'_{i+1} - T'_i) + FCTI \times \sum_{i=1}^{n-1} \Psi(F_{i+1} - F_i) \end{aligned} \quad (18)$$

2 基于遗传算法的优化模型求解

NSGA-II 采用非支配解排序方法和拥挤距离计算, 并且加入精英策略, 使原种群中优秀的个体得到更好地保存, 同时算法的计算复杂度也大大降低。

2.1 零件编码方法

基因编码问题是设计遗传算法的首要 and 关键问题, 编码方法必须考虑染色体的合法性、可行性、有效性, 以及问题解空间表征的完全性。在 NSGA-II

算法中, 设备、刀具的选择以及工序排序需要在零件编码方法中合理地体现出来。

针对工艺路线优化问题, 其编码机制如下: 如图 1 所示, 种群中的每个个体都有三个子串——顺序 S_i , 设备 M_i , 刀具 T_i , 三个子串长度都和零件 i 的工序数相等。顺序子串 S_i 表示以连续列表表示的零件加工的操作顺序, 其基因要考虑加工优先顺序的约束。设备子串 M_i 由已分配给每个操作的设备编号组成, 子串上的第 j 位基因代表完成工序 j 所用的设备。刀具子串的含义与设备子串类似。

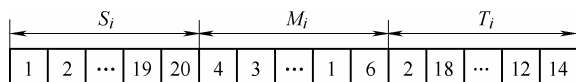
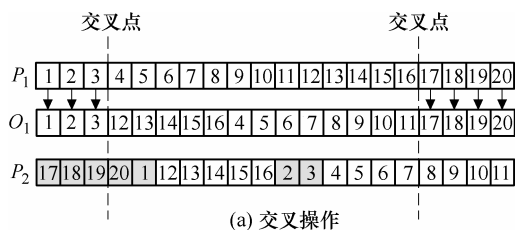


图 1 个体编码方式

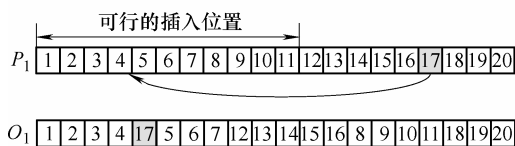
2.2 遗传操作

遗传操作通常分为两类: 交叉和变异。对于每个不同的子串来说, 遗传操作都不尽相同。ESHELMAN 等^[14]指出, 与单点交叉相比, 两点交叉在不引入分布偏差的前提下能有效减少位置偏差。因此, 出于算法效率考虑, 对于 M_i 和 T_i 子串使用两点交叉; M_i 和 T_i 的变异操作通过选择点替换任意可选的设备、刀具以及加工路径来进行。

对于顺序子串 S_i 使用如图 2 所示的改进的两点交叉法。操作因子将满足优先级约束有效顺序子串进行遗传, 并且避免了重复和遗漏。在子串中随机选取两个剪切点, 父代 P_1 中剪切位点 1 之前以及剪切位点 2 之后的基因直接复制到子代 O_1 的相同位点; 在父代 P_2 中移除 O_1 中已有的基因, 将剩余基因按照 P_2 中的顺序复制到 O_1 剩余位点(及两个剪切位点之间的基因段), 对于另一子代 O_2 , 对换 P_1 、 P_2 后按照相同的原理生成。该交叉操作可以产生不违反约束的操作顺序。



(a) 交叉操作



(b) 变异操作

图 2 顺序子串遗传操作

顺序子串 S_i 的变异操作如下, 先从 S_i 中随机选择一个工序, 其次在子串上定义潜在位点, 即被选择的工序可在不违反优先级约束的前提下被替换的

位点。在柔性顺序问题中, 被选择的操作需要满足它全部的紧前工序, 并且优先于它所有的紧后工序。因此, 潜在位点在子串上会连续出现。在潜在插入位点中, 随机选择其一, 替换开始被选择的位点, 如图 2b 所示。

2.3 适应度评价方法

适应度函数是一个用来评价每一个体适应能力的函数, 它反映了个体适应环境的能力, 即个体对应的目标函数与设计目标的接近程度。NSGA-II 的目的是寻找一系列接近 Pareto 最优且具有多样性的解。因此, 为了提升 NSGA-II 的搜索性能, 本文在进行适应度评价时综合考虑了最优 Pareto 解的收敛性和非支配解的多样性两方面的因素。

2.3.1 考虑惩罚值的目标矢量

本文所述问题有两个目标, 分别表述为式(10)和式(18), 即最小化碳排放和加工时间。令 f'_1, f'_2 分别代表目标 1, 2 的函数值, 但目标 1, 2 的函数值是在不考虑是否满足最优化约束的前提下计算出来的, 因此定义一个惩罚值对超出最优化约束电动机值的个体进行惩罚, 个体适应度使用适应度矢量评价, $f=(f_1, f_2)$ 。加入惩罚值的目标矢量 $f=(f_1, f_2)$ 表示如下

$$f_k = f'_k + c_1 \sum_m M_{pk}(m)^\alpha + c_2 \sum_m T_{pk}(m)^\beta \quad k=1, 2 \quad (19)$$

$$M_{pk}(m) = \begin{cases} \frac{(b_m - B_m)f'_k}{B_m} & b_m > B_m \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$T_{pk}(m) = \begin{cases} \frac{(h_m - H_m)f'_k}{H_m} & h_m > H_m \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

函数 $M_{pk}(m)$ 和 $T_{pk}(t)$ 用来计算当零件 m 的换设备次数和换刀次数超出上限时目标 $k(k=1, 2)$ 的惩罚值。 B_m 和 b_m 分别表示零件 m 的换设备次数电动机值和当前工艺规划下的换设备次数。类似地, H_m 和 h_m 分别表示零件 m 的换刀次数电动机值和当前工艺规划下的换刀次数。惩罚系数可用参数 c_1, c_2, α 和 β 来表示。

2.3.2 个体适应度

NSGA-II 中, 需要设计一个适应度评价方案来保证算法能够得到一系列接近 Pareto 最优解的解集。DEB 等^[15]提出了计算复杂度较小的快速非支配排序方法, 同时使用拥挤距离来保证解的多样性。

(1) 非支配解分级。对种群中所有个体进行非支配解分级,其过程如下:首先,一个种群中所有个体通过两两对比的方式,找出种群中所有非支配解,分配等级 1;这些个体从种群中移出,剩余的个体再次对比,找出新的非支配解,分配等级为 2;重复上述过程,直至种群中所有个体都被设定相应的等级。

(2) 拥挤距离计算。为了保证种群的多样性,引入小生境技术中的拥挤距离,对种群中的个体进行评估。拥挤距离计算方式:对某一等级中的个体 i ,分别按每个目标计算其左右两边相邻个体间的距离。则个体 i 的拥挤距离为所有距离之和

$$d_i = \sum_{j=1}^m |f_j(i+1) - f_j(i-1)| \quad (20)$$

式中, m 为目标个数, f_j 为目标函数矢量。边界点的拥挤距离取无限大。

在得到个体 i 的拥挤距离和非支配等级以后,适应度可用式(21)计算

$$e(l_i) = r(i) + \frac{1}{1 + d(i)} \quad (21)$$

式中, $r(i)$ 和 $d(i)$ 分别代表个体 i 的非支配等级以及在同一级内部的拥挤距离。评价函数值越高,适应度越低。

3 案例分析

以某机床电动机座加工过程为例,验证上述机械加工工艺路线低碳优化模型的有效性。电动机座的三维模型及三视图如图 3 所示。

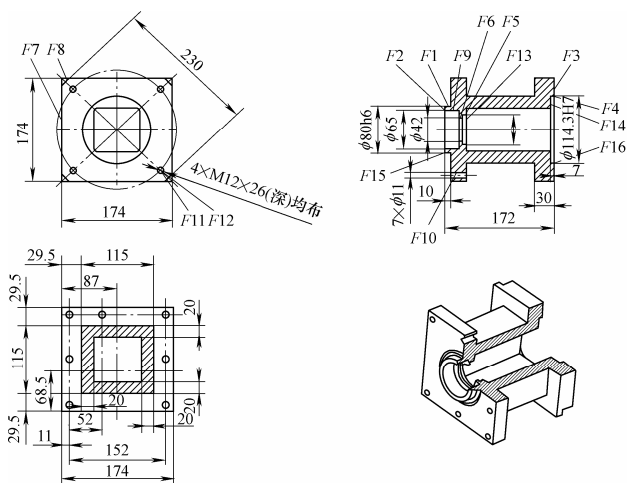


图 3 电动机座视图特征分析

3.1 电动机座加工特征分析

该电动机座主要包含有 16 个典型加工特征,主要包括外圆、端面、孔、内孔台阶面、倒角、孔

倒角、四方、四面等加工特征。电动机座各工艺特征及其加工方案如表 1 所示。

表 1 电动机座特征加工方案

特征编号	特征名称	加工方案
F1	外圆	粗车-半精车-精车
F2	左端面	粗车-半精车-精车
F3	右端面	粗车-半精车-精车
F4	孔 $\phi 14.3$	粗车-精车
F5	孔 $\phi 52$	粗车-精车
F6	孔 $\phi 42$	粗车-精车
F7	174×174 四方	粗铣-精铣
F8	230×230 四面	粗铣-精铣
F9	孔 $\phi 65$	精车
F10	孔 $\phi 11 \times 7$	钻
F11	孔 $\phi M12 \times 4$	钻
F12	孔 $\phi M12 \times 4$	攻
F13	内孔台阶面 $\phi 52$	精车
F14	内孔台阶面 $\phi 14.3$	精车
F15	倒角	精车
F16	孔倒角	精车

加工该电动机座可用的加工设备和刀具如表 2 和表 3 所示,其相关参数可查阅文献[16]得到。

表 2 设备列表

设备编号	设备名称	设备功率/kW
M01	普通车床	10
M02	数控车床	22
M03	数控立式铣床	15
M04	立式铣床	11
M05	摇臂钻床	4
M06	摇臂钻床	3
M07	加工中心	18.5

表 3 刀具列表

刀具编号	刀具名称	寿命/min	质量/g	主要用途
T01	车刀 1	60	9.5	车削加工
T02	车刀 2	100	10.0	车削加工
T03	车刀 3	90	9.0	车削加工
T04	铣刀 1	240	7.5	铣削加工
T05	铣刀 2	180	50.0	铣削加工
T06	钻头 1	60	375.0	钻孔
T07	钻头 2	75	475.0	钻孔
T08	丝锥	75	275.0	攻丝

注:刀具碳排放因子为 30.153 kgCO₂/kg,切削液碳排放因子为 0.469 kgCO₂/kg^[17];切削液更换周期取 2 个月。

根据以上可选用的设备和刀具,电动机座各工艺特征对应具体工步及每一工步可选用的设备和刀具如表 4 所示。

表4 电动机座各工艺特征加工方案可用设备刀具及对应时间

加工特征	特征描述	加工工步	工步编码	机床设备	时间/min	加工特征	特征描述	加工工步	工步编码	机床设备	时间/min				
F1	外圆	粗车	01	M01T01	2.0	F6	孔	粗车	15	M02T02	1.1				
				M01T02	2.1					M02T03	1.1				
				M02T02	2.1					M01T01	1.3				
				M02T03	2.1					M01T02	1.3				
				M01T01	2.0					M02T02	1.2				
				M01T02	2.1					M02T03	1.1				
		半精车	02	M02T02	2.2	F7	174×174 四方	粗铣	16	M03T04	1.0				
				M02T03	2.1					M04T05	1.0				
				M01T01	2.0					M07T04	1.1				
				M01T02	2.1					M07T05	1.2				
				M02T02	2.2					M03T04	1.2				
				M02T03	2.1					M04T05	1.1				
精车	03	M01T01	2.0	精铣	17			M07T04	1.2						
		M01T02	2.1					M07T05	1.3						
		M02T02	2.2					F8	230×230 四面	粗铣	18	M03T04	2.5		
		M02T03	2.1									M04T05	2.6		
		M01T01	2.0									M07T04	2.4		
		M01T02	2.1									M07T05	2.5		
M02T02	2.0	M03T04	2.6												
M02T03	2.1	M04T05	2.6												
F2	端面	粗车	04	M01T01	2.0	精铣	19			M07T04	2.4				
				M01T02	2.0					M07T05	2.4				
				M02T02	2.0					F9	孔	精车	20	M01T01	3.2
				M01T01	2.0									M01T02	3.3
				M01T02	2.1									M02T02	3.1
				M02T02	2.0									M02T03	3.2
		M02T03	2.1	F10	孔	钻	21	M05T06	2.9						
		M01T01	2.0					M06T07	2.8						
		M01T02	2.1					M07T06	3.2						
		M02T02	2.0					M07T07	3.0						
		M02T03	2.0					F11	孔	钻	22	M05T06	1.7		
		M01T01	2.2									M05T07	1.8		
M01T02	2.2	M06T07	1.6												
M02T02	2.0	M07T06	1.8												
M02T03	2.1	M07T07	1.7												
F3	端面	粗车	07	M01T01	2.2	F12	孔					攻	23	M06T09	1.2
				M01T02	2.2			M07T09	1.5						
				M02T02	2.0			F13	内孔台阶面	精车	24			M01T01	2.4
				M02T03	2.0									M01T03	2.5
				M01T01	2.2									M01T02	2.6
				M01T02	2.0									M02T02	2.5
		M02T02	2.1	M02T03	2.6										
		半精车	08	M02T03	2.0	F14	内孔台阶面					精车	25	M01T01	2.8
				M01T01	2.2			M01T02	2.8						
				M01T02	2.2			M02T02	2.7						
				M02T02	2.0			M02T03	2.9						
				M02T03	2.1			F15	倒角	精车	26			M01T01	2.2
M01T01	2.3			M01T02	2.5										
M01T02	2.25	M02T02	2.2												
M02T02	2.0	M02T03	2.5												
M02T03	2.2	F16	孔倒角	精车	27	M01T01	2.4								
F4	孔					粗车	10					M01T01	1.2	M01T02	2.1
								M01T02	1.2	M02T02	2.3				
								M02T02	1.1	M02T03	2.5				
								M02T03	1.2	F5	孔	精车	13	M01T01	1.1
								M01T01	1.1					M01T02	1.2
		M01T02	1.2	M02T02	1.3										
		M02T02	1.15	F6	孔	粗车	14	M01T01	1.0						
		M02T03	1.2					M01T02	1.2						

3.2 基于遗传算法的工艺路线优化

电动机座的 16 个工艺特征一共要经过 27 个工步才能完成加工,其工艺路线就是由 27 个工步组成的有序集合。工步的编码方案如表 4 所示。

遗传算法计算参数设置如下:初始种群大小 $N=50$,交叉概率 $P_c=0.7$,变异概率 $P_m=0.05$,迭代次数 $M=200$,设备更换次数和刀具更换次数的电动机值均取 15。采用 Matlab 编程进行优化求解,以高效低碳为目标进行优化求解,结果与单独对高效和低碳优化结果对比数据如表 5 所示。

表 5 优化结果

优化结果	以高效为目标	以低碳为目标	以高效低碳为目标
T/min	76.22	112.76	86.45
C_E/kg	6.95	5.64	6.13

高效低碳工艺路线的算法收敛图及最优染色体表现形式分别如图 4 和图 5 所示。

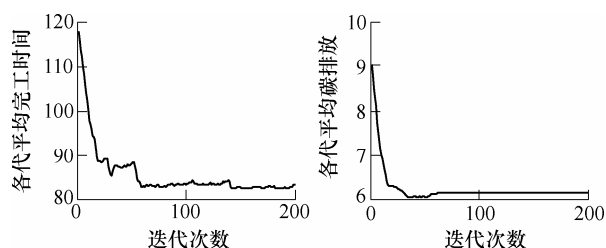


图 4 算法迭代收敛图

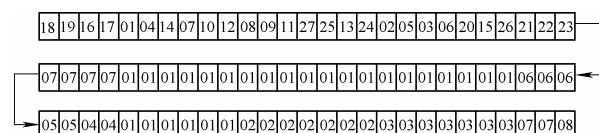


图 5 高效低碳染色体表现形式

将上述最优染色体编译成最优的工艺路线如表 6 所示。

3.3 优化结果分析

对比三种条件下的优化结果可以发现,以高效为目标对工艺路线优化时,得到的工艺路线有较小的更换刀具和设备的次数,以此来减小加工时间,但由于刀具、设备的选择向少数几种集中,引起了较高的碳排放。而以低碳为目标对工艺路线进行优化时,刀具、设备的选择较为分散,更换更加频繁,导致了较长的加工时间。而对高效低碳两个目标同时进行优化时,可得到加工时间、碳排放值都可以接受的工艺路线。

表 6 高效低碳最优工艺路线

特征	工序名称	工步内容	加工设备	加工刀具
F8 四面 F7 四方	铣削	18)粗铣 F8 四面	M07	T05
		19)粗铣 F7 四方		T04
		16)精铣 F7 四方		
		17)精铣 F8 四面		
F1 外圆	车削	01)粗车 F1 外圆	M01	T01
F2 端面		04)粗车 F2 左端面		
F6 孔		14)粗车 F6 孔		
F3 右端面	车削	07)粗车 F3 右端面	M01	T01
F4 孔		10)粗车 F4 孔		
F5 孔		12)粗车 F5 孔		
F3		08)半精车 F3 右端面		
F3	车削	09)精车 F3 右端面	M01	T02
F4		11)精车 F4 孔		
F16		27)F17 孔倒角		
F14		25)精车 F15 内孔台阶面		
F5		13)精车 F5 孔		
F13		24)精车 F14 内孔台阶面		
F1		02)半精车 F1 外圆		
F2	车削	05)半精车 F2 左端面	M01	T03
F1		03)精车 F1 外圆		
F2		06)精车 F2 外圆		
F9		20)精车 F9 孔		
F6		15)精车 F6 孔		
F15	钻削	26)F16 倒角	M06	T07
F10		21)钻 F10 孔		
F11		22)钻 F11 孔		
F12		23)攻 F12 孔		T08

4 结论

(1) 引入特征元和加工元概念表示机械零部件特征,建立了一种以总碳排放和总加工时间最小为优化目标的机械加工系统工艺路线高效低碳优化模型。

(2) 基于遗传算法对上述工艺路线高效低碳优化模型进行寻优求解,实现不同工艺特征加工工步的优化排序,得到可行并优化的工艺路线。

(3) 本文对工艺路线低碳优化问题进行了研究,而工艺路线规划和车间调度在现代制造系统中关系非常紧密,如何面向低碳制造对零部件工艺路线规划和车间调度问题进行集成研究,将是下一步重点研究方向。

参 考 文 献

- [1] 常智勇,杨建新,赵杰,等.基于自适应蚁群算法的工艺路线优化[J].机械工程学报,2012,48(9):163-169.

- CHANG Zhiyong, YANG Jianxin, ZHAO Jie, et al. optimization of process based on adaptive ant colony algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 163-169.
- [2] WAND L, CAI N, FENG H Y, LIU Z. Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing[J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(8): 1479-1501.
- [3] LIU Z K, WANG L H. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning[J]. Computers in Industry, 2007, 58(4): 295-303.
- [4] LIAN K L, ZHANG C Y, SHAO X Y, et al. Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(2): 815-828.
- [5] GUO Y, MILEHAM A, OWEN G, et al. Operation sequencing optimization using a particle swarm optimization approach[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220 (12): 1945-1958.
- [6] SALEHI M, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22 (8): 1179-1187.
- [7] LIU X J, YI H, NI Z H. Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(1): 1-13.
- [8] ZHANG W B, LU Z H, ZHU G Y. Optimization of process route by genetic algorithms[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(2): 180-188.
- [9] DUFLOU J R, SUTHERLAND J W, SORNFELD D, et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61 (2): 587-609.
- [10] 郑永前, 王阳. 基于遗传算法的加工工艺决策与排序优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(1): 59-65.
- ZHENG Yongqian, WANG Yang. Optimization of process selection and sequencing based on genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(1): 59-65.
- [11] 李聪波, 崔龙国, 刘飞, 等. 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.
- LI Congbo, CUI Longguo, LIU Fei, et al. Multi-objective NC machining parameters optimization model for high efficiency and low carbon[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 87-96.
- [12] 卡帕克金, 施米德. 制造工程与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- KALPAKJIAN S, SCHMID S. Manufacturing engineering and technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [13] DUQUE C N, GUTOWSKI T G, GARETTI M. A tool to estimate materials and manufacturing energy for a Product[C]// IEEE/International Symposium on Sustainable Systems and Technology, Washington D.C., USA, 2010, 5, 16-19.
- [14] ESHELMAM L J, CARUANA R A, SCHAFFER J D. Biases in the crossover landscape[J]. Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, 1989: 10-19.
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-97.
- [16] 艾兴, 肖诗纲. 切削用量简明手册[M]. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- AI Xing, XIAO Shigang. A concise manual of machining parameters[M]. 3th ed. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [17] NARITA H, FUJIMOTO H. Analysis of environmental impact due to machine tool operation[J]. Int. J. of Automation Technology, 2009, 3(1): 49-55.
-
- 作者简介: 李聪波(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。
- E-mail: congboli@cqu.edu.cn
- 李鹏宇, 男, 1988 年出生。主要研究方向为低碳制造。
- E-mail: pyli999@163.com
- 刘飞, 男, 1948 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造及制造业信息化。
- E-mail: liuf@cqu.edu.cn
- 崔龙国, 男, 1984 年出生。主要研究方向为低碳制造。
- E-mail: myclg@sina.com
- 税虹, 女, 1965 年出生, 工程师。主要研究方向为机床制造工艺。
- E-mail: jszxxx2004@126.com