

DOI: 10.3901/JME.2022.19.242

考虑扰动事件的机械加工工艺参数与车间动态调度综合节能优化^{*}

吕 岩¹ 徐正军² 李聪波¹ 李玲玲³ 杨 秒¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044;

2. 重庆铁马工业集团有限公司 重庆 400050;

3. 西南大学工程技术学院 重庆 400100)

摘要: 随着能源消耗和环境问题的不断加剧,机械加工车间的高效节能生产越来越受到制造业的关注。传统动态调度优化时每道工序的工艺参数固定,未考虑工艺参数与车间调度之间的关联关系,限制了调度优化的潜力。为了更好地实现柔性作业车间节能增效,并快速有效地应对车间生产过程中出现的突发扰动事件,提出一种考虑扰动事件的加工工艺参数与车间动态调度综合优化方法。首先详细分析订单插入与机床故障下柔性作业车间的能耗特性,以总能耗与最大完工时间为目标,建立工艺参数与动态调度综合优化模型,然后设计一种面向扰动事件的动态决策机制,并提出改进的自适应形状估计进化算法(AGE-MOEA)进行优化求解,最后通过案例分析与算法对比,验证了所提出方法的有效性。

关键词: 节能; 扰动事件; 工艺参数; 动态调度; 柔性作业车间

中图分类号: TH162

Comprehensive Energy Saving Optimization of Processing Parameters and Job Shop Dynamic Scheduling Considering Disturbance Events

LÜ Yan¹ XU Zhengjun² LI Congbo¹ LI Lingling³ YANG Miao¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Chongqing Tiema Industries Group Co., Ltd., Chongqing 400050;

3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400100)

Abstract: As energy consumption and environmental problems continue to intensify, efficient and energy saving production in machining job shops has attracted more and more attention from the manufacturing industry. In traditional dynamic scheduling optimization, the processing parameters of each operation are fixed, and the relationship between processing parameters and job shop scheduling is not considered, which limits the potential of scheduling optimization. In order to better realize the energy saving and efficiency increase of the flexible job shop, and quickly and effectively deal with the sudden disturbance events, a comprehensive optimization method of processing parameters and job shop dynamic scheduling considering disturbance events is proposed. Firstly, the energy consumption characteristics of the flexible job shop under new job arrival and machine tool breakdown are explained in detail, and the comprehensive optimization model of processing parameters and dynamic scheduling is established with the objectives of total energy consumption and maximum completion time. Then, the dynamic decision-making mechanism for disturbance events is designed, and the improved adaptive geometry estimation based multi-objective evolutionary algorithm (AGE-MOEA) is proposed.

^{*} 国家自然科学基金(51975075, 51905449)和重庆市技术创新与应用示范专项(cstc2018jszx-cyzdX0183)资助项目。20220301收到初稿,20220721收到修改稿

Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by case analysis and algorithm comparison.

Key words: energy saving; disturbance event; processing parameter; dynamic scheduling; flexible job shop

0 前言

工业的发展产生了大量财富,创造了现代社会。制造业是最大的工业部门之一,提供了全球近 25% 的就业机会^[1],但也占据了世界能源使用总量的 30% 和碳排放总量的 36%^[2]。为实现全球碳中和的目标,制造业节能减排任务艰巨。机床是制造业的工作母机,是机械加工车间的核心装备。一方面,机床耗电量占制造业耗电量的 75%^[3],但机床在车间实际生产中常处于待机状态,待机及启停过程的能耗约占总能耗的 80%,有效能量利用率仅为 10%~15%^[4]。另一方面,研究表明机床设备 99% 的环境影响是由电力消耗引起的^[5]。因此,机械加工车间节能减排潜力巨大。

机械加工车间的总体能耗既受不同机床上工序加工顺序影响,也与工序的加工工艺参数有关,即调度方案决定了车间中机床的空闲能耗,工艺参数决定了加工能耗^[6]。而工艺参数会影响工序的加工时间,进一步影响车间调度的结果。传统多单独考虑工艺层面或车间层面,对工艺参数或车间调度分开进行优化,没有考虑工艺参数与车间调度之间的关联关系,很大程度限制了优化的潜力。

因此,有学者将工艺参数与车间调度整体进行考虑,从而实现更好的优化效果。WANG 等^[7]提出了一种以最大完工时间为目标的两阶段启发式并行机调度方法,在能耗不超过电力负荷的前提下优化加工任务的切削参数与机床分配。TIAN 等^[8]提出了一种基于目标级联法的切削参数、工艺路线和车间调度协同优化方法,相较于传统方法可以获得更小的碳排放和更短的完工时间。ZHANG 等^[9]建立了切削参数与调度集成优化模型,并提出了改进的多目标引力搜索算法求解,与传统单独优化方法相比能更进一步地减少碳排放和完工时间。刘琼等^[10]提出了以制造过程碳排放和完工时间为目标的切削参数与调度集成优化方法,并通过案例分析证明了其有效性。以上研究均对工艺参数和车

间调度进行了综合考虑,将两者进行集成优化,相较于传统单独优化有着更好的效果。但这些研究所建立的模型均为静态模型,并未考虑车间临时突发事件对于工艺参数和调度方案的影响,无法适应扰动事件下的车间动态调度问题。

在车间实际生产过程中,临时突发的意外事件经常发生,几乎无法避免,如机床故障、紧急插单、订单取消等。这些不确定的扰动事件使得提前制定的车间静态调度方案变得不可行。在处理此类问题时,必须制定动态调度方案,以尽量减少扰动事件对车间生产的负面影响。

一些学者对柔性作业车间动态调度问题进行了研究,例如,ZHANG 等^[11]建立了考虑插单的柔性作业车间动态调度模型,并设计了一种带有特征选择的两阶段基因编程超启发式算法进行求解。BAYKASOĞLU 等^[12]考虑了实际生产系统中经常发生的新订单到达、机器故障、紧急订单、订单取消、交货期变更等动态事件,建立了一种柔性作业车间生产与维护综合调度模型,并提出了一种贪婪随机自适应搜索算法进行求解。ZADEH 等^[13]以最小化完工时间为目标,提出了一种求解柔性作业车间动态调度问题的启发式模型。该动态模型考虑了由于工人效率、机器设置、环境条件等因素导致的加工时间改变。LUO^[14]以最小总延误为目标,研究了新订单插入下的柔性作业车间动态调度问题,并提出了 Deep Q-Network 进行求解。目前考虑扰动事件的柔性作业车间动态调度研究,多集中在调度方案的优化,未涉及具体工序中的工艺参数,即在每道工序能耗、完工时间等指标为定值的情况下,进行动态调度方案的制定,存在一定的局限性。

鉴于此,为了提升车间节能潜力,并使所制定方案能够适应车间发生的扰动事件,对扰动事件下的柔性作业车间加工工艺参数与动态调度综合优化问题进行研究。考虑订单插入与机床故障两种常见的扰动事件,以车间总能耗和最大完工时间为目标,建立加工工艺参数与车间动态调度综合优化模型;结合本文问题的特点,设计一

种面向扰动事件的动态决策机制,并改进自适应形状估计进化算法(AGE-MOEA),对模型进行优化求解;通过案例分析和算法对比,验证所提出模型与算法的有效性。

1 问题描述

本文在考虑订单插入、机床故障等机械加工车间扰动事件的基础上,对加工工艺参数与车间调度进行综合优化,使总能耗与完工时间达到协调最优。在扰动事件发生的情况,确定最优的加工工艺参数与车间动态调度方案。

该问题可描述为:一个机械加工车间中有 m 台机床 $MT=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, 在初始时刻 $T=0$ 有 n' 个独立工件 $JP=\{J_1, J_2, \dots, J_{n'}\}$ 进入车间进行加工, $T_{arr} > 0$ 时刻有紧急订单 $JN=\{J_1, J_2, \dots, J_{n''}\}$ 到达, $JA=JP \cup JN$ 。对于每个工件 $J_i \in JA (i=1, 2, \dots, n'+n'')$, 其批量为 b_i , 共需要经过 τ_i 道加工工序 $OP_{J_i} = \{op_{i1}, op_{i2}, \dots, op_{ij}, \dots, op_{i\tau_i}\}$ 。 J_i 的工艺路线是固定不变的。所有工件的工艺顺序约束已知且固定不变, 同一个工件的工序之间必须遵循特定的工艺顺序约束。机床 $M_x \in MT$ 在 $T_{bdx} > 0$ 时刻发生故障中断加工, 所需维修时间为 t_{rx} , 此时 M_x 上中断的工序需重新选择机床继续进行未完成的加工。

每个工件的每一道加工工序 op_{ij} , 都需要开展特定的加工工艺类型(如车、铣、钻等), 且可选择 $\forall M_s \in MT_{ij} (s=1, 2, \dots, w_{ij})$ 进行加工, 其中 $MT_{ij} \subsetneq MT$ 。即各工序需要的加工工艺类型是已知的, 选择在哪个机床上开展加工是可变的。对于 $\forall M_k \in MT$, 需要开展加工的工序数量为 s_k 。每个工序在不同机床上的加工工艺参数不是固定不变的, 不同加工工艺类型所对应的工艺参数组合不尽相同, 如式(1)所示

$$PP_{ijk} = \begin{cases} (n_{ijk}, f_{ijk}, a_{pijk}, a_{eijk}) & \text{铣削} \\ (v_{cijk}, f_{ijk}, a_{pijk}) & \text{车削} \\ (n_{ijk}, f_{ijk}) & \text{钻削} \end{cases} \quad (1)$$

对于该问题, 提出假设条件如下所述。

(1) 车间中所有机床设备在系统时刻 $T=0$ 保持开启并均可正常运行, 各个工件到达车间的时间各不相同。

(2) 除非工序加工过程中断, 否则一道工序只能在一台机床上进行加工。工件只有完成前一道工序后, 才能进入下一道工序。

(3) 每次只有一台机床发生故障, 且该机床的故障不影响其他机床。机床故障发生的时刻与修复的时刻均为已知。

(4) 除非机床发生故障, 各工序的加工过程一旦开始就不能中断。当某台机床发生故障时, 该机床上正在加工的工序立即中断, 然后重新选择新机床对该工序未完工的部分继续进行加工。

(5) 当各工序开始在机床上开展加工时, 首先需进行工件和刀具装夹定位。每一个工序的工件和刀具装夹时间是一个固定值。考虑到刀具定位是在机床主轴快速进给阶段完成, 所需时间较短, 因此这段时间内的能耗忽略不计。当工件和刀具装夹完成后即可开展机械加工。

(6) 忽略工件在各机床之间的物流运输时间。即一个工件的前一个工序加工完成后, 可立即到达下一个工序所选机床的暂存区中。

(7) 当工件到达空闲机床的暂存区后, 可以立即在该机床上进行加工; 若工件被分配的机床处于忙碌状态(即正在加工某道工序), 则需要在暂存区等该机床完成上一道工序后再进行加工。

在扰动事件发生前, 为各个工序选择最优的工艺参数, 并确定工序的机床选择与加工顺序, 生成初始工艺参数与静态调度方案。当扰动事件发生时, 根据工件的加工状态可将工件集分为 $JA=JA_1 \cup JA_2 \cup JA_3$, 其中 JA_1 为尚未开工的工件, JA_2 为已经开工但没有完工的工件(至少有一道工序正在加工), JA_3 为已经完工的工件(所有工序均已完工)。对应的, 将工序集也分为 $OP=OP_1 \cup OP_2 \cup OP_3$, OP_1 为 JA_1 的所有工序, OP_2 为 JA_2 尚未开工的工序, OP_3 为 JA_2 中已经完工的工序与 JA_3 的所有工序。采用事件驱动的重调度策略, 对 OP_1 与 OP_2 的工艺参数与调度方案进行更新。

当发生机床故障时, 根据机床的状态可将机床集分为 $MT=MT_1 \cup MT_2 \cup MT_3$: 故障机床 MT_1 , 正在加工的正常机床 MT_2 , 空闲的正常机床 MT_3 。 MT 为工序的可选机床集, $MT_2 \cup MT_3 \subseteq MT \subsetneq MT$ 。

本文相关符号和变量的定义如表1所示。

表 1 相关符号及其定义

符号	定义
MT	车间所有机床集合
m	车间机床总数
JP	初始工件集合
JN	紧急插单工件集合
JA	所有工件集合
J_i	JA 中的第 i 种工件
b_i	J_i 的批量数
n'	初始工件总数
n''	紧急插单工件总数
τ_i	J_i 所需加工工序数
OP_{J_i}	J_i 工序集合
op_{ij}	J_i 的第 j 道工序
M_k	MT 中第 k 台机床
MT_{ij}	op_{ij} 加工时可选的机床集合
M_s	MT_{ij} 中的第 s 台机床
S_k	M_k 上加工的工序数量
PP_{ijk}	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的工艺参数集合
$n_{ijk}, f_{ijk}, a_{pijk}, a_{eijk}$	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的主轴转速、进给量、切削深度、切削宽度
JA	所有工件集
JA_1	尚未开工的工件集
JA_2	已经开工但没有完工的工件集
JA_3	已经完工的工件集
OP	所有工件的加工工序集
OP_1	JA_1 的所有工序
OP_2	JA_2 中尚未开工的工序
OP_3	JA_2 中已完工工序和 JA_3 的所有工序
MT_1	故障机床集
MT_2	正在加工的正常机床集
MT_3	空闲的正常机床集
MT	工序可选机床集
P_{anc}^k, P_u^k	M_k 的辅助系统功率、待机功率
P_a^k, P_a^k, P_c^k	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的空载功率、载荷损耗功率、物料去除功率
$t_{air}^{ik}, t_c^{ik}, t_{cd}^{ik}$	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的空切时间、切削时间、换刀时间
t_{scr}^k, t_{td}^k	M_k 的工件装夹时间, 空闲时间
t_{ced}^{ix}	J_i 的 op_{ij} 在 M_x 上已经切削的时间
t_{rx}	M_x 的故障维修时间
C, r_1, r_2, r_3	刀具相关系数
k_c	切削力系数
c_0, c_1	拟合系数
t_{ms}	最大完工时间
t_{to}	总时间
E_{to}	总能耗
a_1, a_2, b_1, b_2	机械传动损耗系数
f_v	进给速度
n	主轴转速
T_f^{ka}	机床 k 上最后一道工序的完工时刻
T_s^{k1}	机床 k 上第一道工序的开工时刻
$e_i, r_{ij}, u_{ijk}, v_k$	0-1 变量
δ_{ijk}	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的加工顺序
T_n^{ik}	J_i 的 op_{ij} 在到达 M_k 的暂存区时刻
T_{ari}	J_i 到达车间的时刻
T_f^{ix}	J_i 的 op_{ij} 在 M_x 上的完工时刻
T_s^{ik}	J_i 的 op_{ij} 在 M_k 上的开工时刻
T_{bdc}	M_x 发生故障的时刻
t_{op}^{ik}	op_{ij} 在 M_k 上的加工时间

2 考虑扰动事件的工艺参数与车间动态调度综合优化模型

2.1 目标函数

(1) 总能耗

根据机械加工能耗时段特性分析可知^[15], 车间总能耗 E_{to} 由五部分组成, 分别为: ① 工件装夹时

段能耗 E_1 ; ② 空切时段能耗 E_2 ; ③ 切削时段能耗 E_3 ; ④ 磨钝换刀时段能耗 E_4 ; ⑤ 机床空闲时段能耗 E_5 。当出现订单插入和机床故障 2 种扰动事件时, 各部分能耗计算公式如下。

① 工件装夹时段能耗

当机床 M_x 在加工时发生故障, 当前工件需停止加工并卸下, 进行重调度后在新的可用机床 M_x 上重新装夹, 完成加工后再次卸下, 因此将会产生额外的工件装卸时段能耗。

$$E_1 = \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \sum_{k=1}^m P_{st}^k t_{set}^k e_i r_{ij} u_{ijk} b_i + P_{st}^{x'} t_{set}^{x'} \quad (2)$$

$$e_i = \begin{cases} 1 & J_i \in JA_1 \cup JA_2 \\ 0 & J_i \in JA_3 \end{cases} \quad r_{ij} = \begin{cases} 1 & op_{ij} \in OP_1 \cup OP_2 \\ 0 & op_{ij} \in OP_3 \end{cases}$$

$$u_{ijk} = \begin{cases} 1 & op_{ij} \text{ 在 } M_k \text{ 上加工} \\ 0 & op_{ij} \text{ 不在 } M_k \text{ 上加工} \end{cases}$$

② 空切时段能耗

当任意一台机床 M_x 故障发生时, 工序 $op_{ij} \in OP_2$ 将立刻停止加工并重新选择机床 M_x 开始加工。由于机床在非切削时段负载较小, 发生故障的可能性较小, 因此假设 M_x 总是在切削时段发生故障。

记录故障发生时工序已切削加工的时间 t_{ced} , 随后对该未完成工序进行重调度, 重新选择可用机床 M_x 完成该工序后续部分的加工。由于该工序已在 M_x 切削加工了一部分, 故其在 M_x 上继续加工时刀具所走的空切时间将会增加, 而刀具切削的时间则会减少。因此, 该未完成工序在 M_x 上的空切时间为其在 M_x 上的初始空切时间 $t_{air}^{ix'}$, 加上其已完成部分在 M_x 上的等效空切时间 $(t_c^{ix'}/t_c^{ix})t_{ced}^{ix}$ 。

$$E_2 = \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \sum_{k=1}^m \left[(P_{st}^k + P_{anc}^k + P_u^{ijk}) t_{air}^{ijk} e_i r_{ij} u_{ijk} b_i \right] + (P_{st}^{x'} + P_{anc}^{x'} + P_u^{ijx'}) \left(t_{air}^{ijx'} + \frac{t_c^{ix'}}{t_c^{ix}} t_{ced}^{ix} \right) \quad (3)$$

③ 切削时段能耗

切削时段为机床进行工件切削加工时的过程。根据上文分析, 当 M_x 发生故障时, 当前未完成工序在 M_x 上的切削时间, 应为其在 M_x 上的初始切削时间 t_c^{ix} 减去已完成部分在 M_x 上的等效切削时间 $(t_c^{ix'}/t_c^{ix})t_{ced}^{ix}$ 。

$$E_3 = \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \sum_{k=1}^m \left[(P_{st}^k + P_{anc}^k + P_u^{ijk} + P_c^{ijk} + P_a^{ijk}) t_c^{ijk} e_i r_{ij} u_{ijk} v_k b_i \right] + (P_{st}^{x'} + P_{anc}^{x'} + P_u^{ijx'} + P_c^{ijx'} + P_a^{ijx'}) t_{ced}^{ix} + (P_{st}^{x'} + P_{anc}^{x'} + P_u^{ijx'} + P_c^{ijx'} + P_a^{ijx'}) \left(t_c^{ijx'} - \frac{t_c^{ix'}}{t_c^{ix}} t_{ced}^{ix} \right) \quad (4)$$

$$v_k = \begin{cases} 1 & M_k \text{ 此时可用} \\ 0 & M_k \text{ 此时不可用} \end{cases}$$

④ 磨钝换刀时段能耗

随着切削过程的持续,机床的刀具会逐渐磨损,当达到刀具寿命 t_{tl} 时进行磨钝换刀。每次换刀的时间视为定值,换刀时的功率为机床待机功率。

$$E_4 = \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \sum_{k=1}^m P_{st}^{ijk} e_i r_{ij} u_{ijk} b_i + P_{st}^{x'} t_{tc}^{ijx'} \quad (5)$$

由于刀具磨损是一个逐渐累积的过程,因此将一次换刀时间 t_{tl} 均摊在每次切削的过程中^[16],每次

$$E_5 = \sum_{k=1}^m \left\{ P_{st}^k \left\{ T_f^{ksk} - \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \left[(t_c^{ijk} + t_{air}^{ijk} + t_{set}^k) b_i + t_{tc}^{ijk} \right] e_i r_{ij} u_{ijk} \right\} \right\} - P_{st}^x t_{rx} \quad (7)$$

机床待机功率、辅助系统功率与工艺参数无关,而空载功率、物料去除功率、附加载荷功率与加工工艺参数有关,具体计算公式如下^[16]

$$P_c + P_a = k_c + c_0 k_c MRR + c_1 k_c^2 MRR^2$$

$$P_u = P_m + a_1 n + a_2 n^2 + b_1 f_v + b_2 f_v^2 \quad (8)$$

式中, P_m 为电机损耗、变频器、驱动器的功率,对于同一机床可以视为定值。 MRR 为物料去除率,由

切削过程的等效换刀时间为

$$t_{tc} = \frac{t_{tc1} t_c}{t_{tl}} = \frac{\pi \bar{n} D \bar{n}^{n_1+r_2} z^{r_2} f_z^{r_2} a_p^{r_3}}{1000 C} t_{tc1} t_c \quad (6)$$

⑤ 空闲时段能耗

机床空闲时段为当机床无加工任务时处在待机状态的时间,即机床除去空切、切削、工件装卸、换刀等时段后剩余的时间。当机床发生故障,需要将其关停进行维修,此时机床不消耗功率。

加工工艺参数所决定^[6]。

$$MRR = \begin{cases} n z f_z a_p a_e & \text{铣削} \\ 1000 v_c f a_p & \text{车削} \\ (\pi D^2/4) n f & \text{钻削} \end{cases} \quad (9)$$

综上,车间动态调度过程总能耗为

$$E_{to} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 =$$

$$\sum_{k=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \left\{ A e_i r_{ij} u_{ijk} b_i \right\} + P_{st}^k \left\{ T_f^{ksk} - \sum_{i=1}^{n'+n''} \sum_{j=1}^{\tau_i} \left[(t_c^{ijk} + t_{air}^{ijk} + t_{set}^k) b_i + t_{tc}^{ijk} \right] e_i r_{ij} u_{ijk} \right\} \right\} +$$

$$P_{st}^{x'} \left(t_{air}^{ijx'} + \frac{t_c^{ijx'}}{t_c^{ijx}} t_{ced}^{ijx} \right) + \left[P_{st}^x + P_{auc}^x + P_m^x + a_1^x n_{ijx} + a_2^x n_{ijx}^2 + b_1^x f_v^{ijx} + b_2^x (f_v^{ijx})^2 + \right.$$

$$\left. k_c^x MRR_{ijx} + c_0^x k_c^x MRR_{ijx} + c_1^x (k_c^x)^2 MRR_{ijx}^2 \right] t_{ced}^{ijx} +$$

$$\left[P_{st}^{x'} + k_c^{x'} MRR_{ijx'} + c_0^{x'} k_c^{x'} MRR_{ijx'} + c_1^{x'} (k_c^{x'})^2 MRR_{ijx'}^2 \right] \left(t_c^{ijx'} - \frac{t_c^{ijx'}}{t_c^{ijx}} t_{ced}^{ijx} \right) + P_{st}^{x'} (t_{set}^{x'} + t_{tc}^{ijx'}) - P_{st}^x t_{rx}$$

$$A = \left[P_{st}^k + P_{auc}^k + P_m^k + a_1^k n_{ijk} + a_2^k n_{ijk}^2 + b_1^k f_v^{ijk} + b_2^k (f_v^{ijk})^2 \right] t_{air}^{ijk} +$$

$$\left[P_{st}^k + P_{auc}^k + P_m^k + a_1^k n_{ijk} + a_2^k n_{ijk}^2 + b_1^k f_v^{ijk} + b_2^k (f_v^{ijk})^2 + \right.$$

$$\left. k_c^k MRR_{ijk} + c_0^k k_c^k MRR_{ijk} + c_1^k (k_c^k)^2 MRR_{ijk}^2 \right] t_{tc}^{ijk} v_k + P_{st}^k t_{set}^k + P_{st}^{ijk} t_{tc}^{ijk} \quad (10)$$

(2) 最大完工时间。

$T=0$ 为车间运行的起始时刻,因此最大完工时间即为车间所有工序中最后一道工序完成的时刻。

$$t_{ms} = \max T_f^{ksk}, k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

2.2 优化变量

由目标函数的建立过程可以看出,本文问题中的决策变量包括:① 各工序选择的机床 u_{ijk} ; ② 各工序的工艺参数组合 PP_{ijk} ; ③ 各工件各道工序在机床上的加工顺序 θ_{ijk} 。

2.3 约束条件

考虑动态事件的工艺参数与车间动态调度综合优化问题的相关约束条件描述如下。

(1) 工件在暂存区的时刻约束。当工件的前一个工序加工完后,可立即被运送到分配的下一台机

床的暂存区中。

$$T_{ia}^{ijk} = \begin{cases} T_{ari} & u_{ijk} = 1 \quad j = 1 \\ T_{ij'k'} & \begin{cases} u_{ijk} = u_{ij'k'} = 1 \\ j = j' + 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 各工序开工时刻约束。当工件 J_i 到达某个暂存区时,若 MT_{ij} 中至少有一台机床处于空闲状态,则 J_i 到达暂存区后可直接进行加工;若 J_i 到达后 MT_{ij} 中的机床均处于忙碌状态,则需要等机床完成上一道工序后再进行加工。

$$T_s^{ijk} = \begin{cases} T_{ia}^{ijk} & u_{ijk} = 1 \quad g_{ijk} = 1 \\ \max(T_{ia}^{ijk}, T_{ij'k'}) & \begin{cases} u_{ijk} = u_{ij'k'} = 1 \\ g_{ijk} = g_{ij'k'} + 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 各工序的完工时间约束。正常机床各工序

的完工时刻, 等于该机床上工序的开始加工时刻, 加上其工件装夹、空切、切削以及磨钝换刀所需的时间, 具体如下

$$T_f^{ijk} = T_s^{ijk} + t_{air}^{ijk} + t_c^{ijk} + t_{set}^k + t_{tc}^{ijk} \quad (14)$$

(4) 机床空闲时间约束。机床在加工相邻两道工序时, 若前一道工序的完工时刻小于后续工序的到达时间, 则机床处于空闲状态, 直至新工件到达该机床的暂存区中。

$$t_{id} = T_s^{ijk} - T_f^{i'j'k} \begin{cases} u_{ijk} = u_{i'j'k} = 1 \\ g_{ijk} = g_{i'j'k} + 1 \end{cases} \quad (15)$$

(5) 机床加工工序约束。在任意一个时刻, 任何机床只能对一道工序进行加工, 任何工序只能在一台机床上进行加工。

$$\begin{aligned} & (T_s^{ijk} - T_s^{i'j'k})(T_f^{ijk} - T_f^{i'j'k}) \times \\ & (T_s^{ijk} - T_s^{i'j'k})(T_f^{ijk} - T_f^{i'j'k}) \neq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

(6) 工艺参数范围约束。① $PP_{\min}^{ijk} \leq PP_{ijk} \leq PP_{\max}^{ijk}$, PP_{\min}^{ijk} 和 PP_{\max}^{ijk} 分别是工艺参数允许的最小和最大值; ② $t_{il} \geq [t_{il}]$, $[t_{il}]$ 是刀具寿命允许的最小值; ③ $Ra \leq [Ra]$, $[Ra]$ 是工件表面粗糙度的要求值。

3 基于动态决策机制与改进自适应形状估计进化算法的求解

3.1 工艺参数与调度方案动态决策机制

工序的工艺参数与调度方案均会直接影响最终的总能耗与最大完工时间, 同时, 扰动事件的出现会使原先的方案不再适用, 需要及时对工艺参数与调度方案进行动态优化更新, 实现尽可能小的总能耗与最大完工时间。为此, 设计了一种面向扰动事件的工艺参数与调度方案动态决策机制, 该机制的总体流程如下所示。

(1) 在系统时刻 $T=0$ 时, 基于优化算法求解得初始静态调度方案, 并在扰动事件发生前始终按照初始方案进行生产。

(2) 随机生成车间扰动事件的发生时刻: 新工件到达时刻 T_{ari} 和机床故障时刻 T_{bdx} , 在扰动事件发生时不再使用初始方案。

(3) 若扰动事件发生时现场存在未开工工件或未完工工件, 即 $OP_1 \cup OP_2 \neq \emptyset$, 则运行程序 1 获得工序集 OP_1, OP_2, OP_3 以及可选机床集 MT 。

(4) 基于算法对 OP_1 和 OP_2 进行重调度, 求解得重调度方案 $\{(u_{ijk}, PP_{ijk}, T_s^{ijk})\}$, 并在下一次扰动事件发生时执行该方案。

(5) 若扰动事件发生时现场工件都已完工, 即 $OP_1 \cup OP_2 = \emptyset$, 则继续按原有方案生产, 系统时间 $T \leftarrow T+1$, 直到可供重调度的工序出现。

(6) 在车间生产过程中不断循环执行以上步骤, 直到车间所有加工任务完成。

在扰动事件下对工序与机床进行动态决策时, 首先对扰动事件类型进行判断, 当发生订单插入时, OP_1 中的工序在重调度时需重新选择机床和工艺参数组合; OP_2 中尚未加工的工序在重调度时重新选择机床, 若所选机床与重调度之前相同, 则保持原有工艺参数组合, 否则需要在新机床上选择新的工艺参数组合; OP_3 中的工序不进行重调度。

当发生机床故障时, 即机床 M_x 出现故障需要维修, 在该机床上的正在加工的工序会暂停, 并被立刻分配给可选机床集 MT , 同时将 M_x 划分入机床集 MT_1 中。具体过程的伪代码如程序 1 所示。

程序 1 扰动事件下工序与机床动态决策

Input: 新工件到达时刻 T_{ari} , 工序开工时刻 T_s^{ijk} 和完工时刻 T_f^{ijk} , 机床故障时刻 T_{bdx} 和维修时间 t_{rx}

Output: 工序集 OP_1, OP_2, OP_3 , 可选机床集 MT , 工序已切削时间 t_{ced}^{ijk}

```

1: if  $T=T_{ari}$  then
2:   if  $T_s^{ijk} > T_{ari}$  ( $J_i \in JP$ ) then
3:      $OP_1 \leftarrow OP_1 \cup \{op_{ijk}, op_{i'j'k}\}$ 
4:     为所有  $op_{ijk} \in OP_1$  重新分配  $M_k$ 
5:     if  $k=k'$  then
6:        $PP_{ijk} \leftarrow PP_{ijk}$ 
7:     else 重新选择  $PP_{ijk}$ 
8:     end if
9:   end if
10: return  $OP_1$ 
11: if  $T_s^{ijk} < T_{ari}$  且  $T_f^{ijk} > T_{ari}$  then
12:    $\Gamma = \{op_{ij}\}, J_i \in JA_2$ 
13:    $\Xi = \{op_{i'j'}\}, T_s^{i'j'} \leq T_{ari}$ 
14:    $OP_2 \leftarrow OP_2 \cup (\Gamma - \Xi)$ 
15:   为所有  $op_{ijk} \in OP_2$  重新分配  $M_k$ 
16:   if  $k=k'$  then
17:      $PP_{ijk} \leftarrow PP_{ijk}$ 
18:   else 重新选择  $PP_{ijk}$ 
19:   end if
20: end if
21: if  $T_f^{ijk} < T_{ari}$  then
22:    $\Pi = \{op_{ij}\}, J_i \in JA_3$ 
23:    $OP_3 \leftarrow OP_3 \cup \Pi$ 
24: end if
25: return  $OP_3$ 
26: if  $T=T_{bdx}$  then
27:   for 所有  $M_k \in MT_1$  do
28:     if  $T > T_{bdx} + t_{rx}$  then
29:        $MT \leftarrow MT \cup \{M_k\}$ 
30:     end if
31:   end for
32:   for 所有  $M_k \in MT_2$  do

```

```

33:   if  $T > T_f^{ijk}$ 
34:      $MT \leftarrow MT \cup \{M_k\}$ 
35:   end if
36: end for
37: for 所有  $M_k \in MT_3$  do
38:   if  $T > T_{bdx}$  then
39:      $MT \leftarrow MT \cup \{M_k\}$ 
40:   end if
41: end for
42: if  $T_s^{ijx} < T_{bdx} < T_f^{ijx}$  then
43:    $OP_2 \leftarrow OP_2 \cup \{op_{ijx}\}$ 
44:    $MT \leftarrow MT - \{M_x\}$ 
45:    $t_{ced}^{ijx} \leftarrow T_{bdx} - T_s^{ijx} - t_{air}^{ijx} - t_{set}^x$ 
46: end if
47: return  $OP_2, MT, t_{ced}^{ijx}$ 

```

3.2 改进的自适应形状估计进化算法

所提出的综合优化问题涉及到多维度柔性, 包括工艺参数柔性、机床柔性、工序加工顺序柔性, 其中工艺参数则为连续变量, 而机床与工序加工顺序为离散变量。为了解决这一多变量、高维度、连续-离散混合优化的复杂问题, 提出改进的 AGE-MOEA 算法对该问题进行求解。

AGE-MOEA 继承了带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)的总体框架, 用个体生存值取代了拥挤距离, 更好的结合了非支配前沿中解的多样性和邻近性, 提升了算法的性能^[17]。该算法的总体流程如图 1 所示。

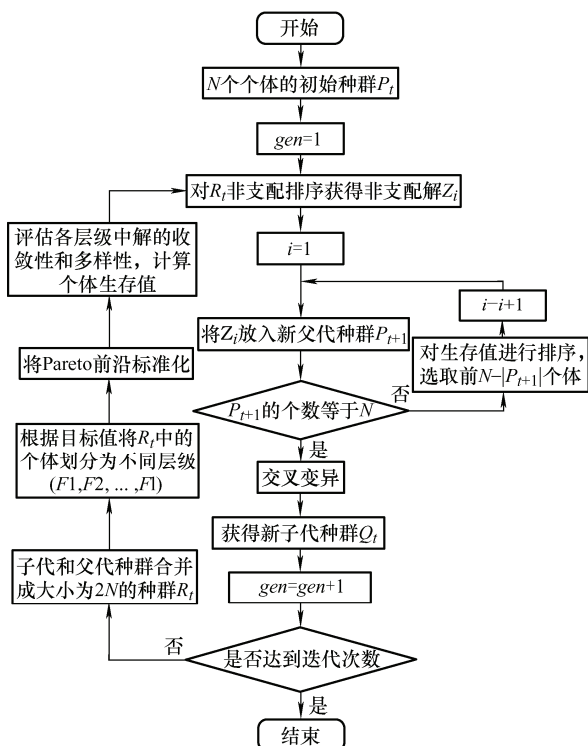


图 1 AGE-MOEA 算法流程图

针对所提出的问题特点, 对 AGE-MOEA 算法

的关键步骤进行改进, 包括编码和解码、初始解的生成、相邻解的生成等, 具体如下所述。

(1) 编码和解码。

考虑到问题中优化变量的特性, 设计了一种基于随机键^[18]的三段式编码对机床选择、工艺参数、工序加工顺序进行处理。第一段编码为机床选择, 如图 2 所示。具体过程如下。



图 2 机床选择编码

① 确定每道工序加工时可选的机床数量, 在 (0,1) 区间为每道工序分别取随机键;

② 将每道工序的可选机床数与随机键相乘, 所得结果向上取整, 得到机床索引值;

③ 将每道工序可选机床按编号从小到大依次排列, 根据索引值为工序选择相应次序的机床。图中阴影部分即为该工序所选机床。

第二段编码为工艺参数值, 具体过程如图 3 所示。以工序 op_{11} 的工艺参数 n_{111} 为例, 该工艺参数的取值范围为 $[n_{111min}, n_{111max}]$, 随机键为 0.61, 则在编码过程中该工序的工艺参数 n_{111} 的取值为 $n_{111}^* = n_{111min} + 0.61(n_{111max} - n_{111min})$ 。

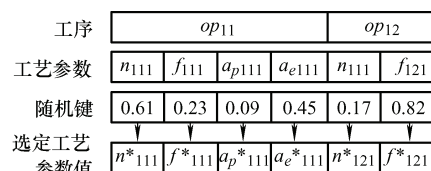


图 3 工艺参数编码

图 4 为第三段编码的具体过程, 即工序加工顺序编码。首先, 为每道工序取随机键, 根据随机键数值由小到大对工序进行排序, 得到初始顺序。其次, 根据实际加工过程中的加工顺序约束对初始顺序进行调整, 得到调整顺序。最后, 根据调整顺序得出编码过程中各工序的加工顺序。

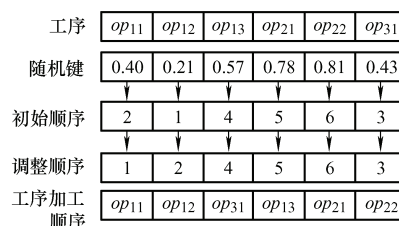


图 4 工序加工顺序编码

在获取优化变量的三段式编码后, 需对其进行解码, 从而获得相应的调度方案。设计了相应的解

码方式, 具体步骤如下。

步骤 1: 获取未分配工序 op_{ij} 的在机床 M_k 上的加工时间 t_{op}^{ijk} 。

步骤 2: 若 op_{ij} 为 M_k 上的第一个工序, 则继续步骤 3, 否则跳转到步骤 4。

步骤 3: 若 M_k 上第一道工序的开工时刻 T_s^i 大于 op_{ij} 的开工时刻, 则设置 op_{ij} 在 M_k 上开工时刻为 T_s^i , 否则设置 op_{ij} 在 M_k 上开工时刻为 T_f^i 。跳转到步骤 8。

步骤 4: 若 op_{ij} 为 J_i 的第一道工序, 则继续步骤 5, 否则跳转到步骤 6。

步骤 5: 若 M_k 存在空闲时间 $t_{id}^k > t_{op}^{ijk}$, 则设置 op_{ij} 的开工时刻为空闲时间的开始时刻, 否则设置 op_{ij} 的开工时刻为 M_k 上最后一道工序的完工时刻 T_f^{ks} 。跳转到步骤 8。

步骤 6: 若 M_k 上 op_{ij} 前一个工序 op_{ij} 的完工时刻 T_f^{jk} 加上 t_{op}^{ijk} , 小于空闲时间结束时刻则设置 op_{ij} 的开工时刻为 T_f^{jk} , 否则设置 op_{ij} 的开工时刻为 T_f^{ks} 。跳转到步骤 8。

步骤 7: 若 M_k 上不存在空闲时间, 则设置 op_{ij} 的开工时刻为 T_f^{ks} 。

步骤 8: 若所有工序均完成分配, 则过程结束, 否则跳转到步骤 1。

(2) 初始解的生成。

当检测到扰动事件时, 系统将被触发以生成重调度的初始解决方案。随机生成初始解可以增加种群多样性, 从而增加获得最优解的机会。因此, 该问题的初始解 $\{u_{ijk}, P_{ijk}, \theta_{ijk}\}$ 是随机生成的。在本问题中, 由于重调度在车间生产的中间阶段发生, 故此时有三类工件集 JA_1, JA_2, JA_3 同时存在, 需要分情况进行处理。随机生成初始解的步骤如下。

① 对于 JA_1 的 OP_1 和 JA_2 中的 OP_2 , 从 MT 中随机选用机床进行加工, 在约束条件下随机生成每道工序的 u_{ijk} 和 PP_{ijk} ; ② 对于 JA_2 和 JA_3 中的 OP_3 , 从初始解中剔除; ③ 确定每道工序的 T_s^{ik} 和 T_f^{ik} , 进而获得重调度的初始解。

(3) 相邻解的生成。

为了提升算法的搜索性能, 从变异的角度设计了两种相邻解生成机制, 以增加种群的多样性并选择优秀个体。当每次生成相邻解时, 随机选择以下两种策略。

① 相邻解生成策略 I: a) 从工序集 OP_1 中选择多个工序。对于每个选定的工序, 从 MT 中重新为其分配一个新机床, 即重新确定 u_{ijk} 。未选定的工序, 其加工机床与初始解保持一致; b) 对于重新确定 u_{ijk} 的所有工序, 在约束范围内重新选择 PP_{ijk} ; c) OP_2 中工序的 u_{ijk}, PP_{ijk} 与初始解保持一致。

② 相邻解生成策略 II: a) OP_1 和 OP_2 中工序的 $u_{ijk}, PP_{ijk}, \theta_{ijk}$ 与初始解保持一致; b) 对于 OP_1 和 OP_2

中的工序, 从 MT 中随机选择一台或多台机床; c) 对于每台选定的机床, 随机颠倒该机床上两次连续加工工序的顺序。

4 案例分析

4.1 案例背景

以重庆市某制造企业柔性作业车间为例, 该车间的产品主要为各种非标零部件, 定制化程度较高, 具有多品种、小批量的特点。在车间生产过程中, 存在新订单插入的情况。此外, 由于服役时间长、零部件老化等原因, 个别机床在加工过程中可能会出现故障而暂时不可用, 在维修后恢复正常。

在本案例中, 有 6 种不同类型和批量的工件需在该柔性作业车间中开展加工。各类工件的加工信息如表 2 所示。

表 2 工件加工信息

工件编号	工件名称	工件数量	工序编号	工序名称	工序内容	可选机床
J_1	油缸连接板	40	op_{11}	铣削	铣 $\Phi 70$ 端面	M_1, M_2, M_3
			op_{12}	铣削	铣 $120 \times 120 \times 40$ 端面	M_1, M_2, M_3
			op_{13}	铣削	铣 $\Phi 40$ 孔	M_1, M_2, M_3
			op_{14}	攻丝	攻 $M42$ 螺纹孔	M_1, M_2, M_4
			op_{15}	钻削	钻 $4 \times \Phi 13$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{16}	钻削	铰 $4 \times \Phi 20$ 沉头孔	M_1, M_2, M_4
J_2	尾座体盖	40	op_{21}	车削	车两端 $\Phi 40$ 外圆	M_5, M_6
			op_{22}	铣削	铣 $100 \times 100 \times 35$ 左右端面	M_1, M_2, M_3
			op_{23}	钻削	钻 $\Phi 22$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{24}	钻削	钻 $\Phi 9$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{25}	钻削	钻 $\Phi 18$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{26}	钻削	钻 $\Phi 9$ 孔	M_1, M_2, M_4
J_3	传动轴	30	op_{31}	车削	车 $\Phi 110$ 外圆	M_5, M_6
			op_{32}	车削	车 $\Phi 100$ 外圆	M_5, M_6
			op_{33}	车削	车 $\Phi 90$ 外圆	M_5, M_6
			op_{34}	铣削	铣 $25 \times 9 \times 105$ 键槽	M_1, M_2, M_3
J_4	主轴	40	op_{41}	车削	车 $\Phi 40$ 外圆	M_5, M_6
			op_{42}	车削	车中间 $\Phi 36$ 外圆	M_5, M_6
			op_{43}	车削	车两端 $\Phi 30$ 外圆	M_5, M_6
			op_{44}	车削	车两端 $\Phi 28$ 外圆	M_5, M_6
			op_{45}	车削	车两端 $\Phi 25$ 外圆	M_5, M_6
			op_{46}	铣削	铣 $8 \times 10 \times 53$ 键槽	M_1, M_2, M_3
J_5	主轴箱底座	45	op_{51}	铣削	铣 $400 \times 180 \times 140$ 底平面	M_1, M_2, M_3
			op_{52}	铣削	铣 $205 \times 180 \times 140$ 上平面	M_1, M_2, M_3
			op_{53}	铣削	铣 $265 \times 180 \times 25$ 凹槽	M_1, M_2, M_3
			op_{54}	铣削	铣 $75 \times 180 \times 60$ 台阶面	M_1, M_2, M_3
			op_{55}	铣削	铣 $85 \times 180 \times 60$ 台阶面	M_1, M_2, M_3
			op_{56}	铣削	铣 30° 斜面	M_1, M_2, M_3
			op_{57}	铣削	铣 $180 \times 60 \times 400$	M_1, M_2, M_3
			op_{58}	铣削	铣 $180 \times 60 \times 400$	M_1, M_2, M_3
			op_{59}	铣削	铣 $50 \times 30 \times 60$ 凹槽	M_1, M_2, M_3
			op_{510}	车削	车 $\Phi 100$ 中心孔	M_5, M_6
			op_{511}	钻削	钻 $4 \times \Phi 20$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{512}	钻削	钻 $2 \times \Phi 30$ 孔	M_1, M_2, M_4
J_6	轴承座	35	op_{61}	车削	车 $\Phi 90$ 孔	M_5, M_6
			op_{62}	车削	车 $\Phi 52$ 孔	M_5, M_6
			op_{63}	钻削	钻 $\Phi 16$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{64}	钻削	钻 $\Phi 30$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{65}	钻削	钻 $6 \times \Phi 7$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{66}	钻削	铰 $6 \times \Phi 11$ 沉孔	M_1, M_2, M_4
			op_{67}	钻削	钻 $3 \times \Phi 4$ 孔	M_1, M_2, M_4
			op_{68}	攻丝	攻 $3 \times M5$ 螺纹孔	M_1, M_2, M_4

案例中工件的加工特征信息如图 5 所示。车间中用于加工的机床信息如表 3 所示, 表中的机床的部分功率数据通过 HC-33C3 功率传感器采集获得。

表 4 中是各机床相关功率的计算系数, 均通过切削实验数据拟合计算求出^[19]。

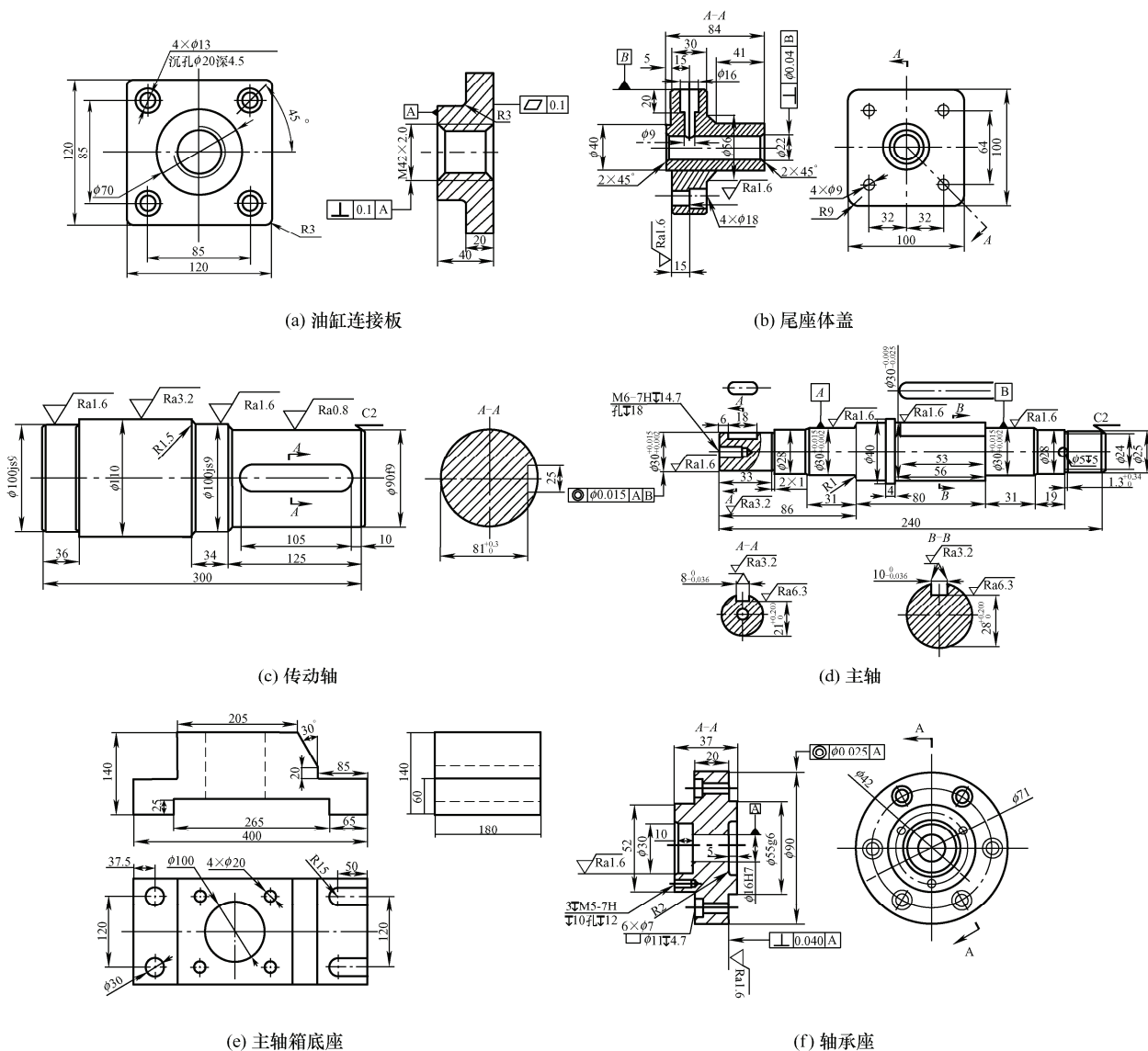


图 5 工件加工特征信息

表 3 车间机床信息

机床编号	机床名称	机床型号	主电机额定功率/W	最大转速/(r/min)	最大进给量/mm	待机功率/W	辅助系统功率/W
M_1	立式加工中心	TH5656	15 000	4 000	1 200	820	371
M_2	立式加工中心	VGC1500	18 500	6 000	1 500	1 580	369
M_3	卧式镗铣床	TPX6113/2	15 000	800	2 000	920	410
M_4	立式钻床	ZXK50	5 500	2 000	850	421	145
M_5	数控车床	CW6163D	11 000	1 100	600	780	260
M_6	数控车床	CHK560	15 000	3 000	750	670	243

表 4 机床功率计算系数

机床编号	k_c	c_0	c_1	P_m	a_1	a_2	b_1	b_2
M_1	9.61	0.085	6.59×10^{-6}	583.09	-0.061	2.45×10^{-6}	0.029	1.17×10^{-5}
M_2	11.01	0.009	5.22×10^{-6}	435.07	-0.078	2.02×10^{-6}	0.035	1.31×10^{-5}
M_3	8.87	0.081	6.98×10^{-6}	392.21	-0.056	6.12×10^{-5}	0.053	1.60×10^{-5}
M_4	12.11	0.064	3.97×10^{-6}	266.87	-0.062	2.43×10^{-6}	0.029	1.53×10^{-5}
M_5	-142.79	-0.046	-1.91×10^{-7}	-293.91	0.861	1.31×10^{-4}	0.052	5.81×10^{-5}
M_6	-185.71	-0.032	-1.13×10^{-7}	-237.14	0.829	1.08×10^{-4}	0.039	5.12×10^{-5}

4.2 工艺参数与动态调度综合优化结果

订单插入和机床故障分别在车间生产过程中的不同时刻发生。在扰动事件未发生时, 先由算法生成初始的工艺参数组合与静态调度方案并执行。而后, 在随机的某两个时刻先后分别出现订单插入和机床故障这 2 种扰动事件。本文中所有程序运行平台为 Python 3.8.5, 使用的工作站硬件配置为 Intel Core i9-10900K CPU 3.70 GHz, 64 GB RAM。

根据工件与机床信息, 以总能耗与最大完工时间为目标, 基于改进的 AGE-MOEA 算法对工艺参数和调度方案优化求解, 生成未发生扰动事件时的初始工艺参数与静态调度方案, 如图 6 所示。此时车间中有 M_1 到 M_6 共 6 台机床工作, J_1 到 J_5 共 5 批工件需要加工, 总能耗为 7.121×10^7 J, 最大完工时间为 2.709×10^4 s。

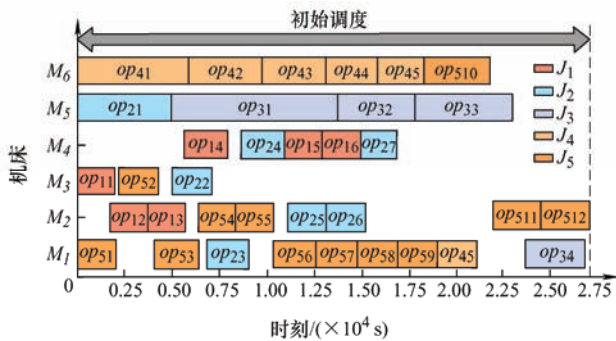


图6 初始静态调度方案

在车间按照初始工艺参数与调度方案运行过程中, 分别随机出现订单插入与机床故障 2 种扰动事件。设定新到达工件为 J_6 , 故障机床为 M_1 , 扰动事件的发生时刻均为随机生成, $T_{arr}=4\ 583$ s, $T_{bd1}=14\ 402$ s, $t_{r1}=2\ 100$ s。基于改进算法对工艺参数取值与调度方案优化求解, 生成扰动事件下的工

艺参数与动态调度方案, 作为方案 1。

改进的 AGE-MOEA 算法主要参数设置为: 最大迭代次数 2 000, 种群规模 100, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.1。优化求解得方案 1 的 96 组 Pareto 解, 如表 5 所示。可以看到, 由于在扰动事件发生前 op_{11} 等工序已经完工, 属于工序集 OP_3 , 因此它们的工艺参数和调度方案在优化过程中不再变化。

选择方案 1 优化结果中第 48 组能耗与时间均衡的 Pareto 解, 绘制动态调度甘特图, 如图 7 所示。由图 7 可见, 由于订单插入和机床故障的影响, 导致总能耗和最大完工时间增加。

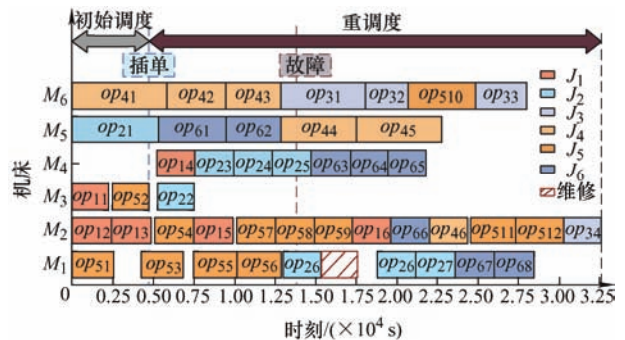


图7 方案1动态调度方案

对比表 5 中第 1 到第 96 号 Pareto 解可以看出, 在工艺参数与车间调度方案的共同作用下, 总能耗减小而最大完工时间增加。这是由于, 一方面随着工序工艺参数值的减小, 物料去除率降低, 使工序的切削时间与切削时段能耗增加, 但这同时也减缓了刀具磨损的速度, 减小了磨钝换刀的时间与能耗。另一方面, 调度方案的调整使工序偏向于分配在功率较低的机床上, 有助于降低总能耗, 但工序在部分功率较低机床上的相对集中, 增大了车间机床总体的空闲时间, 导致了最大完工时间的延长。

表5 方案1工艺参数与动态调度综合优化结果

编号	$E_{10}/(\times 10^7 \text{ J})$	$t_{ms}/(\times 10^4 \text{ s})$	$PP_{ijk}=(n_{ijk}, f_{ijk}, a_{pijk}, a_{eijk})$					工件序列	机床序列
			op_{11}	...	op_{33}	...	op_{68}		
1	10.341	2.132	(506.9, 2.164, 2.132, 29.06)	...	(186.8, 0.112, 1.002)	...	(1 993, 0.477)	5-1-2-4-1-5-1-5-2-1-6-4-5-2-1-5-2-4-6-5-2-5-3-4-2-6-6-5-6-5-4-3-1-2-5-2-4-6-6-3-5-6-5-3	1-3-5-6-2-3-2-1-3-4-5-6-2-4-2-1-4-6-5-1-4-2-6-5-1-4-4-2-4-2-5-6-2-1-6-1-2-1-1-6-2-1-2-1
2	10.249	2.142	(506.9, 2.164, 2.132, 29.06)	...	(186.7, 0.110, 1.000)	...	(1 992, 0.465)	5-1-2-4-1-5-1-5-2-1-6-4-5-2-1-5-2-4-6-5-2-5-3-4-2-6-6-5-6-5-4-3-1-2-5-2-4-6-6-3-5-6-5-3	1-3-5-6-2-3-2-1-3-4-5-6-2-4-2-1-4-6-5-1-4-2-6-5-1-4-4-2-4-2-5-6-2-1-6-1-2-1-1-2-6-1-2-1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	7.785	3.261	(506.9, 2.164, 2.132, 29.06)	...	(168.8, 0.102, 0.921)	...	(1 856, 0.432)	5-1-2-4-1-5-1-5-2-1-6-4-5-2-1-5-2-4-6-5-2-5-3-4-2-6-6-5-6-5-4-3-6-2-1-5-2-4-6-6-5-3-5-3	1-3-5-6-2-3-2-1-3-4-5-6-2-4-2-1-4-6-5-1-4-2-6-5-1-4-4-2-4-2-5-6-2-1-2-6-1-2-1-1-2-6-2-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95	6.795	5.443	(506.9, 2.164, 2.132, 29.06)	...	(89.6, 0.095, 0.838)	...	(1 721, 0.391)	5-1-2-4-1-5-1-5-2-1-6-4-5-2-1-5-2-4-6-5-2-5-3-4-2-6-6-5-6-5-4-6-2-4-2-5-1-6-6-3-5-5-3-3	1-3-5-6-2-3-2-1-3-4-5-6-2-4-2-1-4-6-5-1-4-2-6-5-1-4-4-2-4-2-4-2-1-2-1-6-2-1-1-6-2-2-6-2
96	6.788	5.490	(506.9, 2.164, 2.132, 29.06)	...	(89.5, 0.094, 0.829)	...	(1 720, 0.388)	5-1-2-4-1-5-1-5-2-1-6-4-5-2-1-5-2-4-6-5-2-5-3-4-2-6-6-5-6-5-3-6-2-4-1-2-6-4-5-6-5-3-5-3	1-3-5-6-2-3-2-1-3-4-5-6-2-4-2-1-4-6-5-1-4-2-6-5-1-4-4-2-4-2-6-2-1-6-2-1-1-2-6-2-2-6-2

对结果的能耗与时间组成进行分析,可得各时段能耗与时间的信息,如表 6 所示。其中切削时段能耗占总能耗的 81.84%,切削加工时间占总时间的 72.35%,这两者分别占比最高,即切削时段对能耗与时间影响最大。这说明通过调整工艺参数优化每道工序切削时段的能耗与时间,对于减小车间总能耗与完工时间具有十分重要的作用。

表 6 方案 1 结果能耗与时间组成分析

	E_{to}	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
能耗/($\times 10^7$ J)	7.785	0.370	0.336	6.371	0.098	0.609
占比/%	100	4.755	4.322	81.841	1.265	7.822
	t_{to}	t_{set}	t_{air}	t_c	t_{tc}	t_{id}
时间/($\times 10^4$ s)	13.861	1.239	0.182	10.029	0.332	2.080
占比/%	100	8.937	1.312	72.349	2.398	15.011

4.3 与单独优化方法的对比

为了说明所提出综合优化方法相较于传统的单独优化工艺参数或动态调度方法的优越性,将综合

优化方法与单独优化方法的结果进行对比。

单独的工艺参数或动态调度优化,即第一阶段以能耗与时间为目标,对每道工序在所有可选机床上的工艺参数进行优化,再根据结果将每道工序的工艺参数方案固定,使每道工序在机床上的能耗与时间为定值。第二阶段在扰动事件发生时,以总能耗和最大完工时间为目标,在工艺参数固定不变的条件下对所有工序进行的动态调度优化。

在分阶段的单独优化过程中,第一阶段优化会得到工艺参数的若干组 Pareto 解。若随机选择其中一组解作为工艺参数的取值,代入第二阶段进行优化,则存在很大局限性。因此,选取第一阶段优化结果中 1 组能耗最小、1 组时间最小以及 2 组能耗与时间兼顾,共 4 组 Pareto 解,作为第二阶段优化时工艺参数的取值,从而分别得到能耗优先的固定工艺参数动态调度、时间优先的固定工艺参数动态调度以及兼顾能耗与时间的固定参数动态调度 3 个方案的最终优化结果,如表 7~9 所示。

表 7 方案 2 能耗优先的固定工艺参数动态调度优化结果

编号	$E_{to}/$ ($\times 10^7$ J)	$t_{ms}/$ ($\times 10^4$ s)	工件序列	机床序列
1	7.603	4.222	5-1-2-4-5-1-5-2-6-5-1-2-4-6-5-2-2-5-3-6-4-6-	1-2-5-6-2-1-2-1-5-2-1-4-6-5-2-4-4-2-6-1-5-1-
			5-2-5-2-6-5-3-4-1-6-6-1-5-1-4-6-6-5-3-4-5-3	2-4-3-4-2-3-6-5-4-2-2-4-6-2-5-4-2-2-6-3-2-3
2	7.553	4.341	5-1-2-4-5-1-5-2-6-5-1-2-4-6-5-2-2-5-3-6-4-6-	1-2-5-6-2-1-2-1-5-2-1-4-6-5-2-4-4-2-6-1-5-1-
			5-2-5-1-6-5-3-6-4-1-2-6-5-1-4-6-5-3-4-5-3-6	2-4-3-4-2-3-6-2-5-4-2-4-6-2-5-2-2-6-3-2-3-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
14	6.880	5.920	5-1-2-4-5-1-5-2-6-5-1-2-4-6-5-2-2-5-3-6-4-6-	1-2-5-6-2-1-2-1-5-2-1-4-6-5-2-4-4-2-6-1-5-1-
			5-2-5-1-6-5-2-4-3-1-6-5-6-6-6-4-5-4-3-1-3	2-4-3-4-2-3-2-5-6-4-2-6-2-2-2-6-2-2-3-6-2-3
15	6.865	6.013	5-1-2-4-5-1-5-2-6-5-1-2-4-6-5-2-2-5-3-6-4-6-	1-2-5-6-2-1-2-1-5-2-1-4-6-5-2-4-4-2-6-1-5-1-
			5-2-5-1-6-5-2-3-1-6-4-6-1-5-6-6-5-4-5-4-3-3	2-4-3-4-2-3-2-6-4-2-6-2-2-6-2-2-2-6-2-3-6-3

表 8 方案 3 时间优先的固定工艺参数动态调度优化结果

编号	$E_{to}/$ ($\times 10^7$ J)	$t_{ms}/$ ($\times 10^4$ s)	工件序列	机床序列
1	11.471	2.182	1-5-2-4-1-5-1-5-2-1-4-5-6-2-5-6-2-5-6-3-4-1-	2-3-5-6-2-3-1-3-2-4-5-1-6-1-3-6-4-1-2-6-5-1-
			5-5-6-6-1-3-5-5-6-5-1-6-2-6-4-2-5-3-2-5-4-3	2-3-4-2-4-6-3-5-2-6-2-4-1-4-5-1-4-6-1-2-1-2
2	11.352	2.233	1-5-2-4-1-5-1-5-2-1-4-5-6-2-5-6-2-5-6-3-4-1-	2-3-5-6-2-3-1-3-2-4-5-1-6-1-3-6-4-1-2-6-5-1-
			5-1-5-3-6-5-4-6-5-2-1-6-2-4-6-2-5-3-6-5-4-3	2-4-2-6-4-2-5-2-6-1-2-4-1-5-4-1-2-6-4-2-1-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	10.711	4.761	1-5-2-4-1-5-1-5-2-1-4-5-6-2-5-6-2-5-3-6-4-1-	2-3-5-6-2-3-1-3-2-4-5-1-6-1-3-6-4-1-6-2-5-1-
			5-2-5-3-6-5-1-3-6-1-3-5-6-2-6-2-6-4-5-5-4-4	2-4-2-6-4-2-4-6-2-4-2-6-4-2-4-2-4-6-2-2-6-2
19	10.702	4.812	1-5-2-4-1-5-1-5-2-1-4-5-6-2-5-6-2-5-3-6-4-1-	2-3-5-6-2-3-1-3-2-4-5-1-6-1-3-6-4-1-6-2-5-1-
			5-2-5-3-6-6-1-3-5-6-6-1-5-6-3-2-4-2-5-4-5-4	2-4-2-6-4-2-4-6-2-4-4-2-6-4-2-2-6-2-2-6-2-2

表 9 方案 4 兼顾能耗与时间的固定工艺参数动态调度优化结果

编号	$E_{to}/(\times 10^7 \text{ J})$	$t_{ms}/(\times 10^4 \text{ s})$	工件序列	机床序列
1	8.725	2.626	1-5-2-4-1-5-1-5-5-4-2-1-5-2-3-1-5-1-5-6-2-5- 2-4-6-5-3-6-2-6-4-5-2-6-2-6-4-6-5-3-6-5-4-3	2-3-5-6-2-3-1-2-3-5-1-2-3-1-6-2-3-1-2-5-2-2- 4-5-6-2-6-4-4-1-5-6-4-1-1-4-5-4-1-6-4-4-2-1
2	8.652	2.671	1-5-2-4-1-5-1-5-5-4-2-1-5-2-3-1-5-1-5-6-2-5- 2-4-6-5-3-6-2-6-4-5-2-6-2-6-4-6-5-3-6-5-4-3	2-3-5-6-2-3-1-2-3-5-1-2-3-1-6-2-3-1-2-5-2-2- 4-5-6-2-6-4-4-1-5-6-4-1-1-4-5-4-1-6-4-2-1-2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
17	7.913	4.207	1-5-2-4-1-5-1-5-5-4-2-1-5-2-3-1-5-1-5-6-2-5- 2-4-6-5-3-6-2-6-4-5-6-2-2-6-4-6-5-3-6-5-4-3	2-3-5-6-2-3-1-2-3-5-1-2-3-1-6-2-3-1-2-5-2-2- 4-5-6-2-6-4-4-1-5-6-1-4-1-4-5-4-1-6-4-1-2-1
18	7.895	4.524	1-5-2-4-1-5-1-5-5-4-2-1-5-2-3-1-5-1-5-6-2-5- 2-4-6-5-3-6-2-6-4-5-2-6-2-6-4-6-5-3-6-5-4-3	2-3-5-6-2-3-1-2-3-5-1-2-3-1-6-2-3-1-2-5-2-2- 4-5-6-2-6-4-4-1-5-6-4-1-1-4-5-4-1-6-4-4-1-1

对比方案 1~4 的结果可见, 方案 2、3、4 的 Pareto 解数量分别为 15、19 和 18, 明显少于方案 1 的 96, 这是由于第二阶段的单独调度优化属于离散优化问题, 因此最终结果的 Pareto 解数量较少。对 4 个方案的能耗与时间优化结果值进行对比, 如表 10。方案 1 得到的最小能耗为 $6.788 \times 10^7 \text{ J}$, 最小时间为 $2.132 \times 10^4 \text{ s}$, 均优于其余方案, 且其结果的取值范围更大。因此, 方案 1 有更好的优化潜力。

表 10 各方案能耗与时间优化结果范围

编号	$E_{to}/(\times 10^7 \text{ J})$		$t_{ms}/(\times 10^4 \text{ s})$	
	最小值	最大值	最小值	最大值
方案 1	6.788	10.341	2.132	5.490
方案 2	6.865	7.603	4.222	6.013
方案 3	10.702	11.471	2.182	4.812
方案 4	7.895	8.725	2.626	4.524

由图 8 中各方案的 Pareto 解集分布情况可知, 方案 1 的解集分布更加均匀, 且分布的范围更广。方案 2 由于在第一阶段优化时能耗优先, 可以得到与方案 1 接近的能耗值结果, 但同时时间值则会明显大于方案 1。方案 3 在第一阶段优化时优先使单个工序时间最短, 最终结果可以得到与方案 1 相近的时间值, 但能耗值却显著高于方案 1。方案 4 的结果一定程度上兼顾了能耗与时间, 但大部分结果均不如方案 1。可见, 方案 1 可以同时优化每道工序的能耗与时间以及所有机床的调度安排, 其结果优于方案 2~4 的固定工艺参数动态调度优化。

总的来说, 方案 1 的 Pareto 解集几乎能够全部支配方案 2~4 的解, 且分布范围大于其余 3 个方案, 此外方案 1 的 Pareto 解数量也多于其余方案。因此, 证明了所提出的考虑扰动事件的工艺参数与动态调

度综合优化方法的有效性 with 优越性。

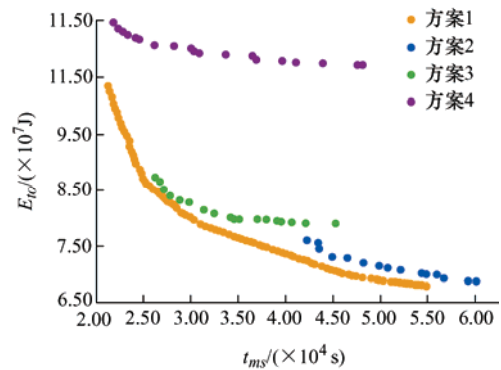


图 8 4 种方案的 Pareto 前沿

4.4 算法对比

为了分析所提出改进算法的性能, 将改进的 AGE-MOEA 与第三代非支配排序遗传算法 (NSGA-III)、基于分解的多目标进化算法 (MOEA/D) 等 2 种算法进行比较。测试场景为方案 1, 对 2 种比较算法均做了相应的参数调整以适应问题。采用超体积 (HV) 与间距指标 (SP) 来评估算法的收敛和分布指标, 计算参考点设定为 $(6 \times 10^4, 11 \times 10^7)$ 。HV 值越大, SP 值越小, 表明算法的性能越好。每种算法的实验测试均独立运行 20 次, 所得 HV 和 SP 的平均值和标准差如表 11 所示。

表 11 3 种算法测试结果对比

算法	HV		SP	
	平均值	标准差	平均值	标准差
改进的 AGE-MOEA	1.328×10^{12}	1.071×10^{11}	7.953×10^5	4.212×10^4
NSGA-III	1.189×10^{12}	1.258×10^{11}	1.125×10^7	1.145×10^6
MOEA/D	1.186×10^{12}	1.426×10^{11}	9.184×10^5	7.873×10^4

由测试结果可知, 改进的 AGE-MOEA 在 HV 和 SP 指标上均优于 NSGA-III 和 MOEA/D。这一结

果表明,对于方案1的综合优化问题,改进的AGE-MOEA的Pareto解在目标空间中可以更好的收敛和分布,这主要是因为该算法针对该问题改进了算法机制,从而提高了算法的搜索效率。改进的AGE-MOEA的解在目标空间中分布更均匀,同时可以获得更多的Pareto解。此外,从实验测试结果可以看出,改进的AGE-MOEA具有更好的稳定性,这也表明其更好地适应了该问题。

为了更直观地比较3个算法,从每个算法的所有实验测试结果中各挑选一组,绘制该算法的Pareto前沿图,如图9所示。从图9中可以看出,改进的AGE-MOEA的Pareto解集几乎完全支配了NSGA-III和MOEA/D的所有解,且其Pareto解的数量更多,分布更均匀,范围更广。

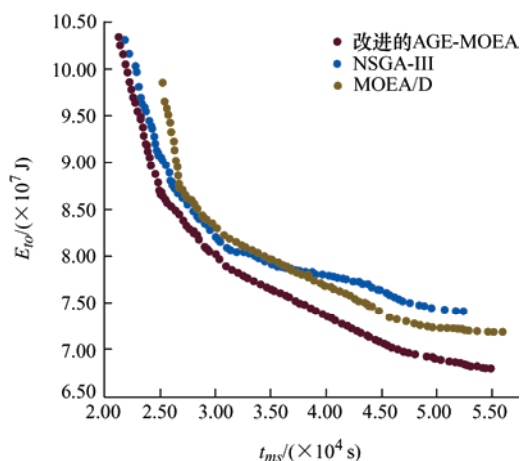


图9 3种算法的Pareto前沿

综上所述,改进的AGE-MOEA获得的Pareto解的数量和质量均优于NSGA-III和MOEA/D,说明了所提出的改进算法在考虑扰动事件的综合优化问题上具有更好的性能。

5 结论

(1) 建立了工艺参数与动态调度能耗目标函数。将工序工艺参数优化与车间动态调度优化相结合,以总能耗与最大完工时间为目标,提出了考虑扰动事件的工艺参数与动态调度综合优化模型。

(2) 设计了一种面向扰动事件的动态决策机制,提出了改进的AGE-MOEA算法进行求解,对算法关键步骤进行了改进。在案例中通过与传统的单独优化方法进行对比,说明综合优化方法的有效性。将改进算法与NSGA-III与MOEA/D进行了对比,验证了其优越性。

(3) 本文中所有工件的工艺路线均为固定的,

在柔性作业车间中生产过程中,单个工件可能有多个工艺路线可以选择。下一步工作将考虑工艺参数与工艺路线均可变的情况,研究扰动事件下工艺路线、工艺参数与动态调度综合优化问题。

参考文献

- [1] TRIEBE M J, ZHAO F, SUTHERLAND J W. Genetic optimization for the design of a machine tool slide table for reduced energy consumption[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2021, 143(10): 101003.
- [2] PAPETTI A, MENGHI R, DOMIZIO G D, et al. Resources value mapping: A method to assess the resource efficiency of manufacturing systems[J]. Applied Energy, 2019, 249: 326-342.
- [3] ZHAO J, LI L, YUE W, et al. Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 2891-2905.
- [4] 孟磊磊, 张超勇, 邵新宇, 等. 面向节能的工艺规划与调度集成问题建模研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 185-196.
MENG Leilei, ZHANG Chaoyong, SHAO Xinyu, et al. Mathematical modeling of energy-efficient integration of process planning and scheduling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 185-196.
- [5] KARA S, LI W. Unit process energy consumption models for material removal processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 37-40.
- [6] LI L, LI C, TANG Y, et al. An integrated solution to minimize the energy consumption of a resource-constrained machining system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(3): 1158-1175.
- [7] WANG Y C, WANG M J, LIN S C. Selection of cutting conditions for power constrained parallel machine scheduling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 43: 105-110.
- [8] TIAN C, ZHOU G, LU F, et al. Cooperative optimization of cutting parameters, process routes, and scheduling considering carbon emissions with analytic target cascading[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(1): 1-19.
- [9] ZHANG Y, LIU Q, ZHOU Y, et al. Integrated optimization of cutting parameters and scheduling for

- reducing carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 886-895.
- [10] 刘琼, 周迎冬, 张漪. 面向低碳的切削参数与调度集成优化[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 24-33.
- LIU Qiong, ZHOU Yingdong, ZHANG Yi. Integrated optimization of cutting parameters and scheduling for reducing carbon emissions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 24-33.
- [11] ZHANG F, MEI Y, SU N, et al. Evolving scheduling heuristics via genetic programming with feature selection in dynamic flexible job-shop scheduling[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 99: 1-15.
- [12] BAYKASOĞLU A, MADENOĞLU F S. Greedy randomized adaptive search procedure for simultaneous scheduling of production and preventive maintenance activities in dynamic flexible job shops[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(23): 14893-14932.
- [13] ZADEH M S, KATEBI Y, DONIAVI A. A heuristic model for dynamic flexible job shop scheduling problem considering variable processing times[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(10): 3020-3035.
- [14] LUO S. Dynamic scheduling for flexible job shop with new job insertions by deep reinforcement learning[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 91: 106208.
- [15] CHEN X, LI C, TANG Y, et al. Energy efficient cutting parameter optimization[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2021, 16(2): 221-248.
- [16] LI C, LI L, TANG Y, et al. A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30: 123-138.
- [17] PANICHELLA A. An adaptive evolutionary algorithm based on non-Euclidean geometry for many-objective optimization[C]// *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. New York: ACM, 2019: 595-603.
- [18] KRÖMER P, UHER V, SNÁŠEL V. Novel random key encoding schemes for the differential evolution of permutation problems[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2021, 26(1): 43-57.
- [19] XIAO Q, LI C, TANG Y, et al. A knowledge-driven method of adaptively optimizing process parameters for energy efficient turning[J]. *Energy*, 2019, 166: 142-156.

作者简介: 吕岩, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机床能效、车间节能调度。

E-mail: cqulvyan@163.com

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、制造系统能效。

E-mail: congboli@cqu.edu.cn