

DOI: 10.3901/JME.2021.10.220

考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化方法*

李聪波¹ 王睿¹ 寇阳² 吕岩¹ 赵希坤¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030;

2. 四川九州电器集团有限责任公司 绵阳 621051)

摘要: 随着能源成本的飙升和环境日益恶化,实现节能生产的策略越来越受到制造企业的关注。在车间实际生产调度过程中,机床设备的故障与维护会影响车间调度方案的顺利执行,进而导致出现车间加工资源冲突、能耗增大和完工时间延长等问题。为减少实际柔性作业车间加工过程中出现由于机床故障而导致加工中断的情况,提出一种考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化方法。分析考虑设备预维护的柔性作业车间能耗特性,建立考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化模型,设计机床预维护策略,并在此基础上提出一种启发式框架下的调度算法对节能优化模型进行求解,通过不同方案的对比分析,验证所提方法的有效性。

关键词: 柔性作业车间; 生产调度; 预维护; 节能; 多目标优化

中图分类号: TH162

Energy Saving Optimization Method of Flexible Job Shop Scheduling Considering Preventive Maintenance

LI Congbo¹ WANG Rui¹ KOU Yang² LÜ Yan¹ ZHAO Xikun¹

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

2. Sichuan Jiuzhou Electric Appliance Group Co., Ltd., Mianyang 621051)

Abstract: With the surging energy cost and environmental impacts, strategies to achieve energy-efficient production have attracted increasing concerns of the manufacturing enterprises. In the flexible job shop scheduling process, machine tools' breakdown and maintenance will lead to conflicts of machining resource, increase of energy consumption and delay of completion time. In order to reduce the machining interruption caused by machine tool breakdown in the actual flexible job shop machining process, an energy-saving optimization method for flexible job shop scheduling considering equipment preventive maintenance is proposed. Firstly, the energy consumption characteristics of flexible job shop are analyzed, then the energy-saving optimization model of flexible job shop scheduling considering equipment preventive maintenance is established, and the energy-saving optimization solution method based on which a rescheduling algorithm is proposed in the form of a heuristic framework. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by case comparison analysis.

Key words: flexible job shop; scheduling; preventive maintenance; energy-saving; multi-objective optimization

0 前言

制造业是能量消耗的主要行业之一,能耗约占全球总量的33%^[1]。机械加工系统作为典型的制造

系统,其能量源众多,能耗结构复杂,承担着制造过程的主要能耗。因此,从机械加工车间层面对整个生产系统的工艺路线、机床和刀具等资源的合理分配以及考虑机床故障、维护的柔性作业车间节能优化调度,是一个亟需解决的基础问题。

近年来,众多学者针对柔性作业车间的节能优化调度问题开展了深入研究。李聪波等^[2]以能耗和完工时间为目标建立了柔性作业车间分批调度优化

* 国家重点研发计划(2019YFB1706103)、国家自然科学基金(51975075)和重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2020jscx-msxmX0221)资助项目。20200515收到初稿,20210225收到修改稿

模型; MENG 等^[3]基于机床空闲时间和空闲能耗,以能耗为优化目标建立了六种考虑机床启停策略的柔性作业车间优化调度混合整数规划模型。在此基础上,一些学者考虑柔性作业中机床柔性和加工路线柔性,开展节能优化调度研究, ZHANG 等^[4]提出一种综合考虑加工路线、机床优选和车间调度的集成节能优化方法,并得出集成优化的节能潜力更大; WANG 等^[5]提出了一种两阶段节能优化调度方法,首先通过改进遗传算法优化机床选择,然后采用遗传算法和粒子群算法相结合的混合算法优化加工路线选择; ZHANG 等^[6]建立了混合整数线性规划模型,并提出机床选择、加工排序和机床启停节能优化控制策略。

上述研究中车间调度过程通常假设机床设备不会发生故障,一直可用。而在实际的加工过程中,随着役龄增加,可靠性降低,机床不可避免地会出现故障。机床故障会影响整个调度方案,增加后续加工机床空闲等待能耗,延后完工时间和交货期,给企业造成巨大损失。因此,在车间调度过程应提前考虑机床预维护(Preventive maintenance, PM)以降低损失。国内外学者对考虑机床预维护的车间调度问题展开了初步研究。WANG 等^[7]以完工时间和加工系统不可用性最低为优化目标,提出了一种考虑两种资源(机床和模具)和资源预防性维护的多目标并行机调度优化方法;在此基础上, KHATAMI 等^[8]以最小化完工时间和系统不可用性为优化目标,建立了流水作业车间调度与设备预维护集成优化模型;吴秀丽等^[9]提出了三种不同的机器预维修计划与生产计划集成调度策略,指出同步集成策略能有效降低了最大完成时间和预防性维修总成本; ZHOU 等^[10]针对串联多工位制造系统,考虑工位可靠性与产品质量的双向交互作用,提出了一种动态 PM 调度策略。

上述车间预维护调度研究,主要考虑以完工时间和系统可靠性等传统目标开展调度优化,尚未考虑柔性作业车间下的预维护节能优化调度。然而在柔性作业车间环境下能量流程复杂、能耗动态变化大,将工艺路线选择柔性、机床选择柔性与机床预维护同时优化,节能潜力更大。因此,本文以能耗和完工时间为优化目标,研究了考虑机床预维护的柔性作业车间节能优化调度问题。首先系统地分析了机床预维护对柔性作业车间能耗的影响;然后建立了面向能耗的柔性作业车间预防性维护调度优化模型,并提出机床预维护调度优化策略;最后通过实例验证模型和方法的有效性。

1 考虑机床预维护的柔性作业车间调度问题

1.1 问题描述

实际柔性作业车间加工过程中时常会出现由于机床设备故障而导致加工中断的情况。机床故障后再维修,会严重影响工件完工时间、加工能耗以及机床负载均衡等调度性,给企业造成重大损失。而在调度过程中提前考虑机床设备的预维护,能使车间调度研究更加符合实际生产,有效降低机床故障的影响,提高加工效率和降低能耗。

鉴于此,本文对考虑机床设备预维护的柔性作业车间节能优化调度问题进行研究,以车间调度方案和机床预维修计划在能耗和完工时间上达到协调最优为目标,为各工件选择适合的工艺路线,为各工序选择相应的加工机床和刀具。此外,为每台机床设备安排预维修计划,确定每台机床预维修的开始/完成时刻。

考虑设备预维护的柔性作业车间节能优化调度问题描述如下:① 初始时刻车间共有 n 种待加工工件 $J = \{J_i\}_{i=1,2,\dots,n}$, 其中工件 J_i 的批量为 q_i , k 台可用机床 $M = \{M_m\}_{m=1,2,\dots,k}$ 和 c 把刀具构成的刀具集合 $T = \{T_o\}_{o=1,2,\dots,c}$;② 每个工件 $J_i (i=1,\dots,n)$ 的可选工艺路线集为 $R_i = \{r_{ij}\}_{j=1,2,\dots,l}$, 其中第 r_{ij} 条工艺路线包括 s 道工序 $O_{ij} = \{o_{ijr}\}_{r=1,2,\dots,s}$, 各工序之间必须遵循紧前关系顺序约束;③ 每个工件需要选择加工路线,工艺路线中的每道工序需要选择相应的加工机床和刀具;④ 每台机床 M_m 的预维护周期和次数为 P_{mr} 。

同时需要满足以下假设条件:① 同一时刻同一台机床只能加工一个工件的一道工序,同一道工序只能在一台机床上加工;② 各工件具备相同的加工优先级,即在初始时刻,所有工件都可以被加工;③ 不同工件的工序之间没有先后约束关系;④ 工件可选工艺路线和可选机床无优先关系;⑤ 所有工件加工任务都是非抢占的;⑥ 机床故障发生情况服从威布尔分布,且随着时间的增加,机床役龄递减,故障率递增,预防性维修的频率增加,维护周期变短;⑦ 工序一旦开始加工,在未完工前不能中断,机床的预维护在某道工序完工后进行;⑧ 所有机床设备在完成全部作业加工前一直维持开机状态。

1.2 机床预维护模型

预维护区别于机床故障后的修复性维护

(Corrective maintenance, CM), 是一种在设备发生故障前进行的维护, 旨在减缓系统磨损过程, 降低故障发生频率, 提高系统可靠性^[11]。一般采用威布尔分布描述机床设备故障发生规律, 但在实际生产过程中, 机床设备发生故障具有多样性, 采用原始的威布尔分布误差较大。此外, 随着机床役龄和预防性维护次数的增加, 机床设备的可靠性逐渐降低, 故障率递增^[12]。因此, 本文采用一种改进的预维护模型——混合役龄模型, 表示不同机床设备的故障概率。机床 M_m 第 n 次预防性维护前后的设备故障率函数 f_{mn} 和 $f_{m(n+1)}$ 之间的关系可定义为^[13]

$$f_{m(n+1)}(t) = \beta_m f_{mn}(t + \alpha_m T_{mn}) \quad (1)$$

式中, $0 < \alpha_m < 1$ 是役龄递减因子, $\beta_m > 1$ 是故障率递增因子, T_{mn} 为机床 M_m 第 n 次预维护之前的役龄。

该模型的设备故障率函数

$$f_{mn}(t) = \beta_m \frac{\mu_m}{\eta_m} \left(\frac{t + \alpha_m T_{mn}}{\eta_m} \right)^{\mu_m - 1} \quad (2)$$

式中, μ_m 和 η_m 分别为威布尔分布的形状参数和尺度参数。

机床在 t 时刻的可靠度函数^[13]

$$R_{mn}(t) = \exp \left(- \int_0^t f_{mn}(t) dt \right) = \exp \left(\beta_m \left[\left(\frac{\alpha_m T_{mn}}{\eta_m} \right)^{\mu_m} - \left(\frac{t + \alpha_m T_{mn}}{\eta_m} \right)^{\mu_m} \right] \right) \quad (3)$$

所有的机床设备都应该在其可靠度高于可靠度阈值 ($R_{mn} > R_{m0}$) 之前进行预维护, 具体维护周期和维护次数根据每台机床的役龄、役龄递减因子和维修后工作时间等来决定。

2 机床预维护对柔性作业车间能耗的影响分析

柔性作业车间加工过程机床总能耗 E_{total} 主要由五部分组成, 包括所有机床的切削加工能耗 E_c 、工件装夹拆卸能耗 E_{cd} 、换刀能耗 E_{tc} 、对刀能耗 E_{ts} 、机床空闲能耗 E_i 之和^[14], 如式(4)所示。

$$E_{total} = \sum_{m=1}^k (E_c + E_{cd} + E_{tc} + E_{ts} + E_i) \quad (4)$$

车间调度过程考虑机床预维护会使得机床加工任务分配及机床资源产生冲突, 机床进行预维护时, 对于尚未开始加工的工序需要重新选择机床, 切削加工能耗、工件装夹拆卸能耗、换刀能耗、对刀能耗和机床空闲能耗均受到影响。以下对考虑机床预

维护时的各组成能耗进行具体分析。

2.1 切削加工能耗

工序 o_{ijr} 的切削加工能耗 E_c 与切削加工时间 t_{ijrmo}^c 随着工艺路线、机床预维护时选择的机床以及机床预维护时刻的不同而发生变化。当考虑机床设备的预维护时的切削加工能耗

$$E_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c \left[q_i x_{ijrmo} (1 - P_{mr}) (P_{st} + P_{auc} + P_u + P_c + P_a) t_{ijrmo}^c \right] \quad (5)$$

式中, P_{st} 、 P_{auc} 、 P_u 、 P_c 和 P_a 分别为待机功率、加工关联类辅助系统功率、空载功率、切削加工功率和附加载荷损耗功率。这些功率与机床、刀具等加工条件密切相关, 具体参见文献[14]。

x_{ijrmo} 为 0-1 变量, $x_{ijrmo}=1$ 表示在第 j 条工艺路线下, 工序 o_{ijr} 选择机床 M_m 和刀具 T_o 进行加工。 P_{mr} 为 0-1 变量, $P_{mr}=1$ 表示在机床 M_m 加工完成第 r 项任务后安排机床预维护, 反之 $P_{mr}=0$ 。

2.2 工件装夹拆卸能耗

工件装夹拆卸能耗 E_{cd} 是指在加工之前将工件装夹到机床上以及完工后将工件从夹具上拆卸下来所消耗的能耗, 如式(6)所示。

$$E_{cd} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c \left[x_{ijrmo} (1 - P_{mr}) P_{st} t_{ijrmo}^{cd} \right] \quad (6)$$

$$t_{ijrmo}^{cd} = t_{ijrmo}^c + t_{ijrmo}^p \quad (7)$$

式中, t_{ijrmo}^{cd} 表示工件装夹和拆卸时间的总和。 t_{ijrmo}^c 和 t_{ijrmo}^p 分别为工序 o_{ijr} 在机床 M_m 上开始加工前的装夹时间和加工完成后的拆卸时间, 可以通过单位装夹和拆卸时间乘以工件加工数量进行计算。

2.3 换刀能耗

工序加工过程换刀包括工序换刀和磨钝换刀。若工序 o_{ijr} 在机床上加工时所选择的刀具 T_o 与其前一道工序所选择的刀具 T_{o-1} 不同则需要换刀, 产生工序换刀能耗。此外, 随着工件切削加工时间的增加, 产生刀具磨钝换刀时间和磨钝换刀能耗。换刀能耗

$$E_{tc} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c \left(P_{st} t_{ijrmo}^{tc} + y_m^r P_{st} t_{ijrmo}^{tw} \right) (1 - P_{mr}) x_{ijrmo} \quad (8)$$

式中, y_m^r 为 0~1 变量, 若机床 M_m 加工工序 o_{ijr} 前不需要换刀, 则 $y_m^r=0$, 否则 $y_m^r=1$ 。 t_{ijrmo}^{tc} 为工序换刀时间, t_{ijrmo}^{tw} 为磨钝换刀时间, 磨钝换刀时间考虑为一次切削时间在刀具寿命周期内的分摊^[15]。

2.4 对刀能耗

工序加工前需要通过调整刀具位置确定刀具刀

位点在工件坐标系的位置, 以确保工序加工具有良好的精度。对刀时机床处于空载状态, 对刀能耗

$$E_{ts} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c (x_{ijrmo} P_u t_{ijrmo}^{ts}) (1 - P_{mr}) \quad (9)$$

式中, P_u 为机床空载功率, t_{ijrmo}^{ts} 为工序 o_{ijr} 在机床 M_m 上加工前需要的对刀时间。

2.5 机床空闲能耗

机床在两个工序的加工间隙处于空闲等待状态, 此时机床处于待机状态, 产生空闲等待能耗

$$E_i = \sum_{m=1}^k P_m^{st} t_m^i \quad (10)$$

$$t_m^i = \sum_{u=1}^{U-1} (ST_{u+1}^m - CT_u^m) \quad (11)$$

式中, U 表示机床 M_m 上安排的工序总数, 机床 M_m 上第 u 个工序和第 $u+1$ 个工序加工之间的空闲时间为第 u 个工序的完工时刻与第 $u+1$ 个工序的开工时间的差值。

3 面向能耗的柔性作业车间预防性维护调度优化模型

3.1 优化变量

由以上分析可知, 考虑设备预维护的柔性作业车间节能优化调度问题的优化变量包括: ① 各工件选择的工艺路线、工序选择的机床、工序在机床上的加工顺序以及各工序的加工刀具 x_{ijrmo} ; ② 各机床的预维护周期和预维护次数 P_{mr} 。

3.2 目标函数

3.2.1 总能耗目标函数

由上述能耗公式(4)~(11)得到考虑机床设备预维护的柔性作业车间节能优化调度问题的总能耗目标函数为

$$E_{total} = E_c + E_{cd} + E_{tc} + E_{ts} + E_i = \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c [q_i x_{ijrmo} (1 - P_{nr}) (P_{st} + P_{auc} + P_u + P_c + P_a) t_{ijrmo}^c] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c [(1 - P_{nr}) x_{ijrmo} P_{st}^{cd}] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c (P_{st}^{tc} + y_m^r P_{st}^{pw}) (1 - P_{nr}) x_{ijrmo} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{r=1}^s \sum_{m=1}^k \sum_{o=1}^c (x_{ijrmo} P_u t_{ijrmo}^{ts}) (1 - P_{nr}) + \sum_{m=1}^k P_m^{st} t_m^i \right\} \quad (12)$$

3.2.2 完工时间目标函数

完工时间为所有机床加工最后一个工序完工时

刻的最大值, 因此完工时间可由式(13)表示。

$$\max_{\forall m} CT_m^r \quad m \in [1, k] \quad (13)$$

3.3 约束条件

3.3.1 生产约束

(1) 同一时刻一台机床只能加工一个工件的一道工序。

$$\begin{cases} ST_m^{r+1} - ST_m^r \geq 0 \\ ST_m^{r+1} - CT_m^r \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, ST_m^r 为机床 M_m 加工第 r 道工序的开工时刻, CT_m^r 为机床 M_m 加工第 r 道工序的完工时刻。

(2) 每道工序只能在一台机床上加工。

$$\sum_{m=1}^k x_{ijrmo} = 1 \quad (15)$$

工件加工必须满足工序顺序约束, 即后一道工序必须在前一道工序完工后才能开始加工。

$$ST_{ij(r+1)mo} \geq CT_{ijrmo'} \quad \forall x_{ij(r+1)mo} = 1 \text{ 且 } \forall x_{ijrmo'} = 1 \quad (16)$$

(3) 0-1 变量约束。

$$x_{ijrmo}, P_{mr}, \alpha_{ijr} \in \{0, 1\} \\ i \in [1, n] \quad j \in [1, l] \quad r \in [1, s] \quad m \in [1, k] \quad o \in [1, c] \quad (17)$$

3.3.2 维护约束

(1) 同一时刻同一台机床上工序加工和预维护任务不能同时进行。

$$\begin{cases} (ST_m^r - CT_m^{pm}) x_{ijrmo} \geq 0 \\ (ST_m^{pm} - CT_m^r) x_{ijrmo} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, ST_m^{pm} 为机床 M_m 的预维护开始时刻, CT_m^{pm} 为机床 M_m 的预维护结束时刻。

(2) 任意时刻 t , 参与加工的机床设备 M_m 其可靠度 R_m 不能低于可靠度阈值 R_0 。

$$R_m > R_0 \quad (19)$$

4 考虑机床预维护的柔性作业车间调度方法

预防性维修与生产调度的集成优化方法是一种将预防性维修任务和生产任务集成优化的策略, 它决定了预防性维修任务和生产任务安排的顺序和优先级。在实际加工过程中, 机床进行预维护会影响正在加工或待加工工序, 进而影响车间整个调度方案的执行, 导致生产调度和机床维

护计划相互冲突。因此,合理安排工件加工方案和机床预维护计划达到两者协调最优,是进行节能优化调度的基础。

4.1 算法总体概述

考虑机床预维护的调度主要涉及生产任务安排和预维护周期两个问题,根据本文需求,将考虑预维护的柔性作业车间调度分为两个阶段。首先由调度方法 MOSA_S 生成初始调度方案,然后通过预维护决策机制 PM_S 根据机床的故障率和役龄情况动态安排机床的预维护计划。同时所有工件加工情况由 PC_S 分为三类,其中所有未完工的工件通过 MOSA_S 重新安排调度方案。重复此过程,直到所有工件全部完工。所提出的调度算法包括两个主要部分:机床预维护的决策机制和调度方案生成方法,整体流程见图 1。

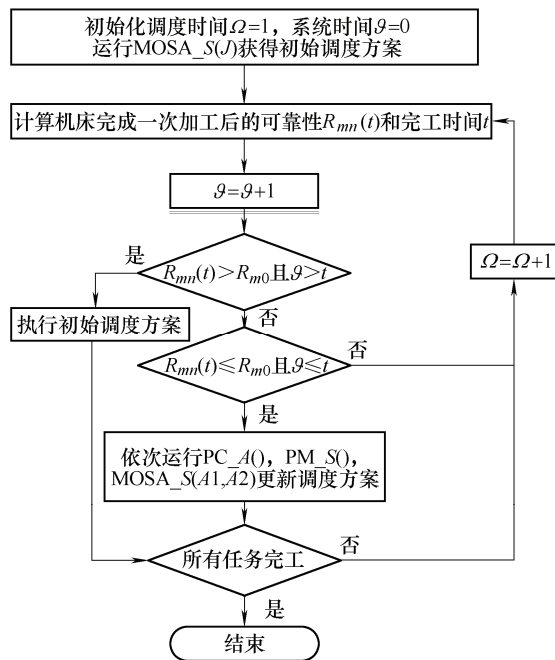


图 1 预维护调度优化算法的总体流程

4.2 车间调度机制及机床预维护策略

4.2.1 车间调度机制

当机床 M_m 实际可靠度大于可靠度阈值,即 $R_{mn}(t) \leq R_{m0}$, 该机床上的加工任务暂停,并且根据此时所有工件的加工状态将加工任务分成三个子集 (A_1 、 A_2 和 A_3)。 A_1 表示尚未开始加工的工件; A_2 代表至少有一个工序正在加工的工件; A_3 表示已经完工的工件。

(1) 尚未开始加工的工件 ($J \in A_1$) 重新选择工艺

路线,所有工序重新安排机床和刀具。

(2) 已开始加工的工件 ($J \in A_2$) 尚未开始加工的工序重新安排机床和刀具。

(3) 已完工的工件 ($J \in A_3$) 将不再进行调度安排。

三种加工任务集的具体调度策略的步骤如下。

(1) 记录 $R_{mn}(t) > R_{m0}$ 的时刻 Θ 。

(2) 如果 $ST_{ijrmo}(J, o_{ij1}) > \Theta$, 转到步骤(3), 否则转到步骤(4)。

(3) 重新安排新工艺路线 $a_{ij'r'm'o'}$ 。更新 $r_{ij'} = r_{ij'}$, 其中 $j' \neq j$, 更新 $o_{ij'} = o_{ij'}$ 和可用机床、刀具, 更新 $A_1 = A_1 \cup \{a_{ijrmo}\}$, 返回 A_1 , 结束。

(4) 如果 $CT_{ijrmo}(J, o_{ijs}) > \Theta$, 转到步骤(5), 否则转到步骤(6)。

(5) 定义第 h 个工件为 p_{ijrh} , 其完工时间为 ct_{ijrh} , 定义 $\varsigma = \{p_{ijrh}\}$, 其中 $CT_{ijrh}(a_{ijrmo}, p_{ijrh}) \leq \Theta$, 更新 $a_{ijrmz} \leftarrow a_{ijrmo} \setminus \varsigma$, 更新 $A_2 = A_2 \cup \{a_{ijrmo}\}$, 返回 A_2 , 结束。

(6) 所有加工任务完工, 更新 $A_3 = A_3 \cup \{a_{ijrmo}\}$, 返回 A_3 , 结束。

4.2.2 机床预维护策略

机床加工过程实时计算机床 M_m 在完成第 r 道工序后的可靠性 $R_{mn}(t)$, 当机床 M_m 实际可靠度小于可靠度阈值时 $R_{mn}(t) \leq R_{m0}$, 则在机床上下一道工序加工之前进行该机床的预防性维护, $P_{mr}=1$ 。具体预维护策略见图 2。

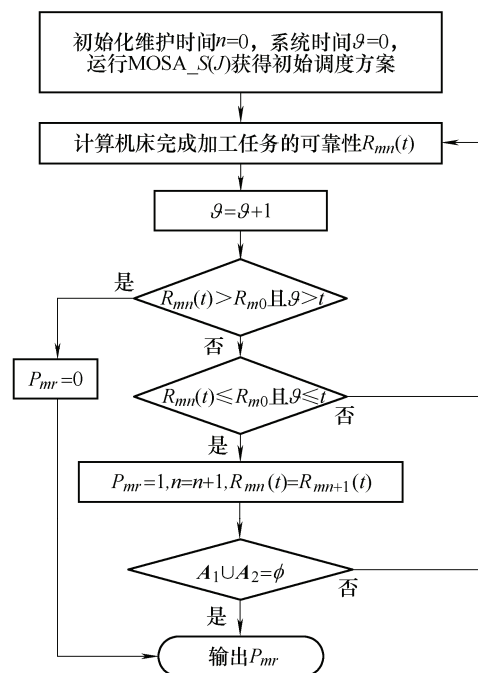


图 2 机床预维护机制

4.3 基于多目标模拟退火算法的优化求解

多目标模拟退火算法 (Multi-objective simulated annealing, MOSA) 是一种模拟固体退火降温过程, 并基于 Monte-Carlo 随机寻优机制所设计的多目标优化问题求解算法。它从某一较高初温出发, 伴随温度的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找最优解, 并能概率性地跳出局部最优解而最终趋于全局最优^[16]。MOSA 因其独特的优化机制及通用性、灵活性在组合优化领域得到了广泛应用。本文所提出的考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化问题, 是一个典型的多目标、多变量和多约束的非线性组合优化问题, 因此采用 MOSA 算法进行求解。同时, 考虑到所提出柔性作业车间调度问题涉及了工艺路线选择、机床和刀具选择、机床加工顺序、机床预维护等多重柔性, 因此对 MOSA 算法的关键步骤作了改进, 主要包括解的表现形式、初始解生成、相邻解生成和相邻解的接受准则。MOSA 算法的具体流程如下。

(1) 初始化种群规模 Ge 和温度 T_0 。

(2) 对 Ge 中的当前解 α , 若 $\alpha > \zeta \in Arc$, 将 α 纳入 Arc 。

(3) 对每个 Ge 的 α , 生成相邻解 α' , 若 $\alpha' > \zeta \in Arc$, 将 α' 纳入 Arc 。

(4) 选择最近非支配解 β , 如果没有符合条件的 β , 跳转步骤(5), 否则跳转步骤(6)。

(5) 随机设置权重, 满足

$$\forall i, \tau_i^\beta \geq 0 \text{ 且 } \sum_i \tau_i^\beta = 1 \quad (20)$$

(6) 对每个目标 f_i

$$\tau_i^\beta = \begin{cases} \partial \tau_i^\alpha & f_i(\alpha) \geq f_i(\beta) \\ \tau_i^\alpha / \partial & f_i(\alpha) \leq f_i(\beta) \end{cases} \quad (21)$$

归一化权重以满足

$$\sum_i \tau_i^\beta = 1 \quad (22)$$

(7) 用接受概率 $Z(\alpha, \alpha', T, \Lambda^\beta)$, 用 α' 更新 α 。

(8) 根据冷却计划降低温度 T 。

(9) 如满足终止条件, 程序结束, 否则跳转至步骤(3)。

4.3.1 解的表现形式

考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能优化问题的解 $\alpha=(X, P)$ 主要包括车间调度方案 X 和加工设备预维护方案 P 两个部分。车间调度方案包括工

艺路线、机床、刀具和工件加工顺序, 因此采用矩阵 $X=[x_{ijrmo}]_{n \times l \times s \times k \times c}$ 表示车间所有加工方案安排; 预维护方案 $P=[P_{mr}]_{m \times r}$ 包括机床预维护开始时间和预维护周期, 具体表示如下

$$P=[P_{mr}]_{m \times r} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1r} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mr} \end{pmatrix} \quad (23)$$

4.3.2 初始解的生成

初始解确定了算法搜索过程的起点位置, 其质量好坏直接影响算法的收敛性能。为了生成较优的初始方案, 按照 FCFS(First come first served)调度规则生成初始解。

4.3.3 相邻解的生成

为了更好地探索和利用搜索空间, 采用以下邻域机制来开展相邻解的生成。

(1) 改变工件的加工工艺路线。从工件集 J 中随机选择工件 J_i 改变其加工工艺路线 r_{ij} , 其余工件保持不变。

(2) 重新分配机床和刀具。为改变工艺路线的工件 J_i 分别在可选机床集和刀具集中重新选择工序加工机床和刀具。

(3) 改变工序在机床上的加工顺序。随机改变调度过程中某时刻机床 M_m 上工序的加工顺序。

(4) 相邻解的接受准则。相邻解通过概率接受准则 Z 搜索和更新, 该准则公式如下。

$$Z(\alpha, \alpha', T, \Lambda^\beta) = \min \left\{ 1, \exp \left(\sum_{i=1}^D \tau_i^\alpha (f_i(\alpha) - f_i(\alpha')) / \Lambda^\alpha \right) \right\} \quad (24)$$

式中, 当相邻解 α' 支配或等于当前解 α 时, $Z=1$ 。 $f_i(\alpha)-f_i(\alpha')$ 是解 α 和 α' 第 i 个目标值的变化, D 是目标的数量 (本文 $D=2$), T 是退火温度, $\Lambda^\alpha = (\tau_1^\alpha, \dots, \tau_D^\alpha)$ 为解 α 的加权矢量, Λ^α 用于确保 Pareto 前沿上生成解的分散性。对于给定目标的权重越大, 则增加目标值的概率越大, 对于解 $\alpha \in Ge$, 改变权重以增加其远离最近非支配解 β 的概率。

5 案例分析

5.1 待加工工件与车间配置信息

某柔性作业车间共有 8 台机床, 每台机床的型号、功率信息见表 1, 车间 5 种待加工工件的加工批量、到达时间、交货期见表 2, 车间工件所有工

艺路线下每道工序的可选机床、刀具集等信息见表 3, 机床的维修参数见表 4。设定每台机床的可靠性阈值为 0.85。

表 1 机床功率信息

机床编号	机床类别	机床型号	待机功率 P_{st}/W	空载功率 P_w/W	主轴额定功率 P/W	辅助系统功率 P_{aux}/W
M1	数控车床	CHK6446P	527	1 385	6 500	386
M2	数控车床	CHK3250	1 433	1 917	5 500	435
M3	数控车床	CHK560	972	1 576	6 000	352
M4	数控车床	C2-6150K	641	2 839	5 500	320
M5	加工中心	VGC1500	1 590	2 930	18 500	725
M6	数控铣床	XK5032	362	1 053	7 500	360
M7	数控钻床	ZXK50	421	565	6 000	431
M8	外圆磨床	M1332C	241	658	8 000	750

表 2 工件加工信息

工件 J	工件名称	批量 q_i	到达时间/s	交货期/s
J_1	轴	50	0	30 000
J_2	销套	30	300	30 000
J_3	过线轮	60	560	30 000
J_4	顶尖座	75	1 039	30 000
J_5	阀盖	100	1 360	30 000

根据上述机床和工件信息, 首先由调度方法 MOSA_S 生成以总能耗和完工时间为目标的初始调度方案, 如图 1 所示。甘特图中的标识为“工件编码-工序编码”, 如“1-1”表示工件 1 的第 1 道工序。初始时刻车间按照图 3 所示的初始调度方案进行加工。

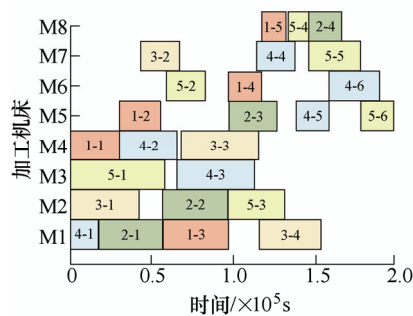


图 3 初始调度方案甘特图

表 3 工件加工工序、可选机床和刀具信息

工件编号	工艺路线 r_{ij}	加工工序 o_{ijr}	可选机床 Mm	可选刀具 To
J_1	r_{11}	o_{111} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{112} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{113} 钻孔	M5,M7	T12
		o_{114} 铣削	M5,M6	T03
		o_{115} 磨削	M8	T15
	r_{12}	o_{121} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{122} 钻孔	M5,M7	T12
		o_{123} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{124} 铣削	M5,M6	T03
		o_{125} 磨削	M8	T15
J_2	r_{21}	o_{211} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07
		o_{212} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{213} 磨削	M8	T15
		o_{214} 钻孔	M5,M7	T14
	r_{22}	o_{221} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07
		o_{222} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{223} 钻孔	M5,M7	T14
		o_{224} 磨削	M8	T15
J_3	r_{31}	o_{311} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{312} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{313} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{314} 钻孔	M5,M7	T10
	r_{32}	o_{321} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{322} 钻孔	M5,M7	T10
		o_{323} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{324} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
J_4	r_{41}	o_{411} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{412} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{413} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07
		o_{414} 钻孔	M5,M7	T11
		o_{415} 钻孔	M5,M7	T12
		o_{416} 铣削	M5,M6	T01,T04
	r_{42}	o_{421} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{422} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{423} 铣削	M5,M6	T01,T04
		o_{424} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07
		o_{425} 钻孔	M5,M7	T11
		o_{426} 钻孔	M5,M7	T12
J_5	r_{51}	o_{511} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{512} 铣削	M5,M6	T01,T02
		o_{513} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07, T10
		o_{514} 磨削	M8	T15
		o_{515} 钻孔	M5,M7	T13
		o_{516} 铣削	M5,M6	T05
	r_{52}	o_{521} 车削	M1,M2,M3,M4	T08,T09
		o_{522} 铣削	M5,M6	T01,T02
		o_{523} 钻孔	M5,M7	T13
		o_{524} 车削	M1,M2,M3,M4	T06,T07, T10
		o_{525} 铣削	M5,M6	T05
		o_{526} 磨削	M8	T15

表 4 机床维修参数

机床	役龄递减因子 α_m	故障率递增因子 β_m	形状参数 μ_m	尺度参数 η_m	机床役龄 T_{mn}
M1	0.12	1.10	1.80	95	280
M2	0.05	1.10	2.00	105	480
M3	0.06	1.10	1.60	115	73
M4	0.08	1.10	1.60	90	200
M5	0.12	1.10	2.20	180	300
M6	0.13	1.10	2.40	125	287
M7	0.12	1.10	2.10	135	500
M8	0.10	1.10	2.00	220	86

5.2 优化结果分析

在考虑机床预维护的调度过程，实时计算每台机床 M_m 在完成第 r 道工序后的可靠性，当达到可靠性阈值时，在当前初始调度方案的基础上安排机床的预维护计划得到考虑机床预维护的调度方案。同时为了分析机床预维护对柔性作业车间调度能耗

的影响和评价所提出调度方法的节能优化性能，分别与两种常用的车间预维护调度策略进行对比分析，具体如下。

方案 1(右移调度策略)：在初始调度方案的基础上，根据机床可靠性阈值得到预维护计划，若机床在维护计划内空闲则安排维护；若机床在维护计划内则正在加工，则先进行维护计划，机床上正在加工的工序右移。

方案 2(周期性维护策略)：机床加工过程中，无论是否故障都进行固定周期维护，将维修计划占用时间段标记为不可用状态，只在机床可用时间段上安排生产加工。

方案 3：所提出考虑机床预维护的车间调度策略。

三种调度方案的甘特图见图 4，具体优化结果见表 5、表 6、图 5 和图 6，对比分析优化结果可知，所提出调度策略得到的调度方案相较于右移调度策略和周期性维护策略节能优化效果更好。

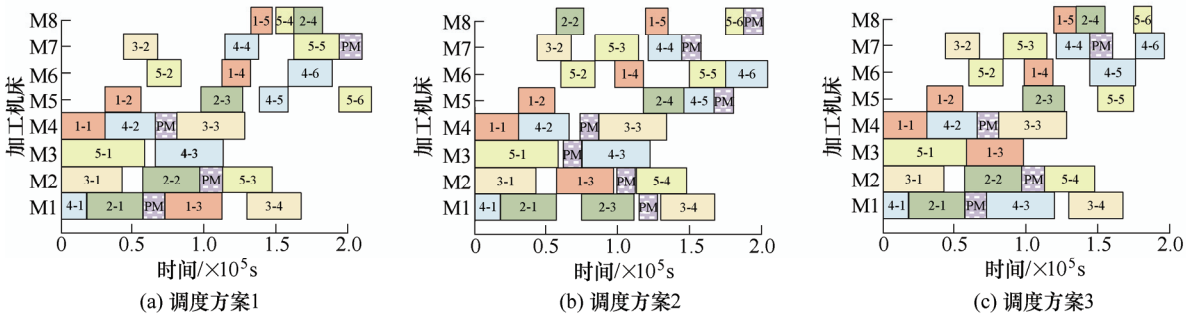


图 4 三种调度方案甘特图

表 5 能耗优化结果

调度方案	优化目标	总能耗 $E_{total}/\times 10^9 J$	能耗构成/J				
			切削能耗 E_c	装拆能耗 E_{cd}	换刀能耗 E_{tc}	对刀能耗 E_{ts}	空闲能耗 E_i
方案 1	$E_{total}\&TC$	1.82	1.56×10^9	2.72×10^7	1.30×10^6	3.30×10^6	2.32×10^8
方案 2	$E_{total}\&TC$	1.79	1.58×10^9	2.55×10^7	1.21×10^6	3.08×10^6	1.75×10^8
方案 3	$E_{total}\&TC$	1.72	1.57×10^9	2.28×10^7	1.10×10^6	2.81×10^6	1.30×10^8

表 6 时间优化结果

调度方案	优化目标	完工时间 TC/s	时间/s				
			切削时间 t_c	装拆时间 t_{cd}	换刀时间 t_{tc}	对刀时间 t_{ts}	空闲时间 t_i
方案 1	$E_{total}\&TC$	221 960	758 290	34 215	1 575	1 897	278 496
方案 2	$E_{total}\&TC$	198 975	752 390	34 635	1 625	1 952	245 928
方案 3	$E_{total}\&TC$	197 111	757 910	34 280	1 635	1 890	202 948

(1) 在能量和时间构成方面，如图 5 和图 6 所示，加工能耗 E_c 所占比重最大，对总能耗的影响至

关重要，其次是机床空闲能耗 E_i 和工件装夹拆卸能耗 E_{cd} ，换刀能耗 E_{tc} 和对刀能耗 E_{ts} 对总能耗的影响

最小。在时间构成方面也能找到相似规律。

(2) 方案 3 与方案 1 相比,总能耗 E_{total} 降低了 5.5%,最大完工时间 TC 缩短了 11.2%。由图 4a 和图 4c 可知,右移调度策略不改变初始调度方案工件的工艺路线安排和每道工序的机床选择,机床 M1、M2 和 M4 进行预维护时,其维护时段对应安排的加工工序 O_{123} 、 O_{513} 和 O_{313} 开工时间延迟,进而导致后续安排工序 O_{124} 、 O_{125} 、 O_{214} 、 O_{314} 、 O_{514} 、 O_{515} 和 O_{516} 加工推迟,增加了 M1、M3、M5、M6 和 M7 的空闲等待时间和机床空闲能耗。而调度方案 3 在机床进行维护过程中给未完工工件重新选择合理的工艺路线和空闲机床,降低了机床空闲时间、切削能耗、空闲能耗和加工任务的最大完工时间,从而提高了机床利用率和生产效率。

(3) 方案 3 与方案 2 相比,有效地降低了机床预维修次数。调度方案 3 能充分利用机床的空闲时间安排加工任务,总能耗 E_{total} 降低了 3.9%。而周期性维护策略预先确定了机床维护计划,限制了机床安排加工任务的空闲可用时间段。如图 4b 所示, O_{415} 在机床 M7 不可用时选择 M5 进行加工,增加了切削加工能耗,同时由于 M5 的预维护计划, O_{416} 的选择 M6 加工,延长了整个调度方案的完工时间。因此,考虑机床预维护的车间调度策略能有效降低车间总能耗 E_{total} 和完工时间 TC 。

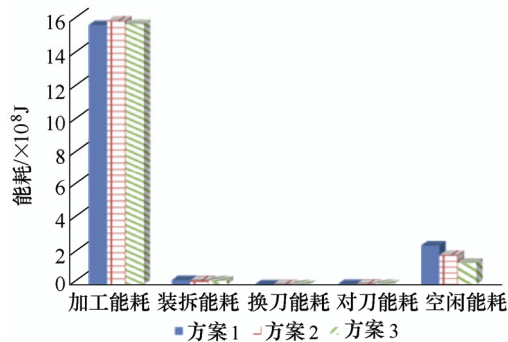


图 5 各方案能耗构成

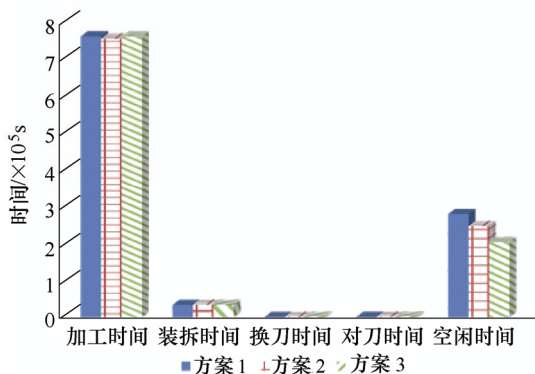


图 6 各方案时间构成

5.3 总能耗目标和完工时间目标集成优化的必要性

为了验证以总能耗和完工时间最小开展多目标优化的必要性,在方案 3 的基础上设计了方案 4 和方案 5,这两个案例采用与方案 3 相同的调度策略,但优化目标不同,方案 4 单独优化能耗,方案 5 单独优化完工时间,优化结果见表 7。

表 7 单目标优化结果对比

调度方案	优化目标	优化结果	
		总能耗 $E_{total}/\times 10^9 J$	完工时间 TC/s
方案 3	$E_{total}\&TC$	1.72	197 111
方案 4	E_{total}	1.64	227 688
方案 5	TC	1.93	192 120

由表 7 可知,集成优化 $E_{total}\&TC$ 与单独优化 E_{total} 相比, E_{total} 增加了 4.9%, TC 降低了 13.4%。同样与单独优化 TC 相比, E_{total} 降低了 10.9%, TC 增加了 2.6%。据此分析发现能耗和完工时间目标之间存在相互冲突关系,同时优化能耗和完工时间与单目标优化相比能达到能耗和完工时间两个目标的协调最优。

5.4 算法性能对比

为了进一步分析采用改进 MOSA 求解所提出的多目标柔性作业车间调度优化问题的性能,将改进 MOSA 与多目标遗传算法(Multi-objective genetic algorithm, NSGA)和多目标差分进化算法(Multi objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D)进行了性能对比分析。以初始调度方案生成为例进行对比测试,由三种优化算法得到的 Pareto 前沿见图 7。由图 7 可以看出,NSGA 和 MOEA/D 求解得到的 Pareto 解,均被 MOSA 算法求解得到的 Pareto 解所支配。因此针对本文所提出的多目标柔性作业车间调度优化问题,MOSA 的求解性能优于 NSGA 和 MOEA/D。

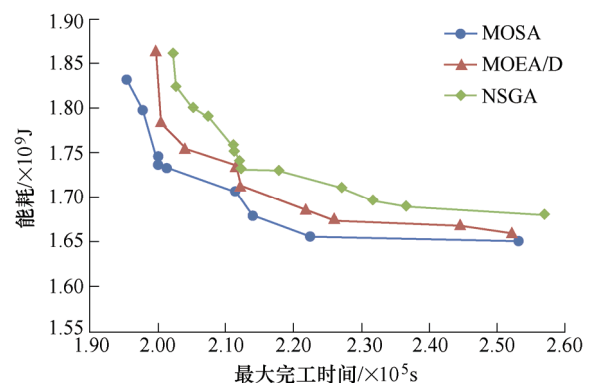


图 7 Pareto 最优解集

6 结论

对考虑机床设备的柔性作业车间高效调度优化问题进行了研究, 得出以下结论。

(1) 系统分析了考虑机床设备预维护时柔性作业车间的能耗特性, 并建立了以车间总能耗和最大完工时间最小为目标的考虑机床设备预维护的柔性作业车间高效调度优化模型。

(2) 结合实际案例, 采用多目标模拟退火算法进行模型求解, 并通过不同方案的对比, 验证了该方法可有效解决制造车间加工和机床预维护冲突的问题, 具备一定应用前景。

(3) 本文提出的柔性作业车间调度问题尚未考虑生产设备约束、稀缺资源约束和配作约束等, 因此综合考虑多种扰动约束将是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2018[EB/OL]. <http://www.iea.org/weo/>, 2018-09-18.
- [2] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23.
LI Congbo, SHEN Huan, LI Lingling, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 12-23.
- [3] MENG Leilei, ZHANG Chaoyong, SHAO Xinyu, et al. MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 710-723.
- [4] ZHANG Zhongwei, TANG Renzhong, PENG Tao, et al. A method for minimizing the energy consumption of machining system: Integration of process planning and scheduling[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 1647-1662.
- [5] WANG Han, JIANG Zhigang, WANG Yan, et al. A two-stage optimization method for energy-saving flexible job-shop scheduling based on energy dynamic characterization[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 575-588.
- [6] ZHANG Liping, TANG Qiuhua, WU Zhengjia, et al. Mathematical modeling and evolutionary generation of rule sets for energy-efficient flexible job shops[J]. Energy, 2017, 138: 210-227.
- [7] WANG Shijin, LIU Ming. Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37: 182-192.
- [8] KHATAMI M, ZEGORDI S H. Coordinative production and maintenance scheduling problem with flexible maintenance time intervals[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 28: 857-867.
- [9] 吴秀丽, 张志强, 赵宁, 等. 超启发式文化基因算法优化生产与预维修集成调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 1885-1896.
WU Xiuli, ZHANG Zhiqiang, ZHAO Ning, et al. Schedule production plan and preventive maintenance plan simultaneously with a hyper memetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 1885-1896.
- [10] ZHOU Xiaojun, LU Biao. Preventive maintenance scheduling for serial multi-station manufacturing systems with interaction between station reliability and product quality[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122: 283-291.
- [11] LU Zhiqiang, CUI Weiwei, HAN Xiaole. Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 80: 236-244.
- [12] ZHOU Xiaojun, XI Lifeng, LEE J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(4): 530-534.
- [13] 刘繁茂. 面向故障过程的多设备可靠性分析与维修决策[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
LIU Fanmao. Reliability analysis and maintenance decision-making method of multi-machine for failure process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [14] 李聪波, 朱岩涛, 李丽, 等. 面向能量效率的数控铣削加工参数多目标优化模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 130-137.
LI Congbo, ZHU Yantao, LI Li, et al. Multi-objective optimization model for numerical control milling machining parameters for energy efficiency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 130-137.
- [15] LI Lingling, LI Congbo, TANG Ying, et al. An integrated approach of process planning and cutting parameter optimization for energy-aware CNC machining[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 458-473.
- [16] ZARETALAB A, HAJIPOUR V, SHARIFI M, et al. A knowledge-based archive multi-objective simulated

annealing algorithm to optimize series parallel system with choice of redundancy strategies[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 80: 33-44.

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

王睿, 男, 1996 年出生。主要研究方向为低碳制造。

E-mail: wrcqu1996@cqu.edu.cn

寇阳, 女, 1995 年出生。主要研究方向为低碳制造。

E-mail: kouyang0928@163.com

吕岩, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为低碳制造。

E-mail: yanlv@cqu.edu.cn

赵希坤, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造与智能制造。

E-mail: xikunzhao@163.com