

控制与决策

Control and Decision

基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度

王黎明, 刘欣玥, 李方义, 李剑峰, 孔琳

引用本文:

王黎明, 刘欣, 李方义, 等. 基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 143–151.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度](#)

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling
控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

[基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度](#)

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers
控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

[一种基于双编码遗传算法的机动微波接力网组网方法](#)

Mobile microwave relay network construction method based on double coding genetic algorithm
控制与决策. 2020, 35(12): 2915–2922 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0347>

[参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制](#)

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters
控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

[基于操作风险的双模式传感器管理方法](#)

A dual-mode sensor management method based on operational risk
控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度

王黎明[†], 刘欣玥, 李方义, 李剑峰, 孔琳

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东大学高效洁净制造教育部重点实验室, 济南 250061)

摘要: 为降低流水车间能源消耗, 引入一种数控机床的超低待机状态, 相比于将数控机床待机状态切换为停机状态的节能研究, 可在不停机情况下降低数控机床加工间隔状态的功率, 避免数控机床频繁启停. 针对流水车间加工状态、待机状态及超低待机状态三元调度问题, 提出基于工序平移的混合遗传算法, 分别定义了不同的工序邻域移动操作, 实现数控机床待机状态向超低待机状态和停机状态的转化, 形成主动节能调度策略, 提升遗传算法求解考虑超低待机状态的流水车间调度问题的优化能力. 实验研究表明, 启用超低待机状态能够降低流水车间 10% 以上的能耗, 且基于工序平移的混合遗传算法求解考虑超低待机状态的流水车间调度问题性能优于遗传算法.

关键词: 绿色制造; 机床能效; 流水车间; 车间调度; 遗传算法; 混合算法

中图分类号: TH18

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0433

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王黎明, 刘欣玥, 李方义, 等. 基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 143-151.

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

WANG Li-ming[†], LIU Xin-yue, LI Fang-yi, LI Jian-feng, KONG Lin

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of the flow shop, an ultra-low idle state of the numerical control (NC) machine tools is introduced. Compared with the research on converting the idle state into the shutdown state, the ultra-low idle state can reduce the idle power without stopping the machine and avoiding frequent stopping the numerical control machine tools. A hybrid genetic algorithm based on process translation is proposed to solve the ternary scheduling problem in the flow shop considering the processing state, standby state and ultra-low idle state. The hybrid genetic algorithm defines different process neighborhood movement operations, and realizes the transformation of the NC machine tool from the standby state to the ultra-low idle state or off state. The hybrid genetic algorithm forms an active energy saving scheduling strategy and improves the optimization ability of the genetic algorithm to solve the flow shop energy consumption scheduling problem considering the ultra-low idle state. The experimental results show that the ultra-low idle state can effectively reduce energy consumption of the flow shop by 10%. The performance of the hybrid genetic algorithm is better than that of the genetic algorithm in solving flow shop energy saving scheduling problems considering the ultra-low idle state.

Keywords: manufacturing for environment; energy efficiency; flow shop; shop schedule; genetic algorithm; hybrid algorithm

0 引言

随着能源短缺和环境问题的日益突出, 低碳节能的生产运作方式引起了学术界的高度关注. 流水生产车间作为典型的机械加工系统, 其基础耗能设备

机床运行过程耗能巨大并间接产生大量二氧化碳排放^[1-2]. 文献[3]表明, 机床在运行过程中具有多源动态的功率特性. 根据加工任务调节机床功率状态, 是实现车间节能的重要方法.

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805297); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEE018).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: liming_wang@sdu.edu.cn.

机床功率状态主要分为加工和待机两种状态。文献[4-5]指出,机床不同状态功率变化与其部件运行情况 and 加工参数等有关;文献[6]指出,改进机床结构能够降低加工状态功率;文献[7-9]通过优化切削参数合理选择切削用量,优化数控机床加工状态能耗。上述研究集中于降低机床加工状态功率,忽略了待机状态功率对机床能耗的影响。文献[10-11]表明,机床待机能耗占比较高,以加工中心为例,非加工所需能耗高达40%以上。对于离散制造流水车间,机床待机状态在大多数情况下是无法避免的,因此,降低机床待机能耗能有效提高生产过程能耗利用率。

文献[12]表明,依据加工间隔时长直接将待机状态切换至停机状态,能够降低机床8%~30%的能耗,但频繁启停会对机床寿命产生一定影响。文献[13]总结了数控机床生产运行的能耗特性,指出待机功率主要由基础单元、伺服装置和辅助单元等耗能设备产生。基础单元用于保证机床热平衡和基本数控响应,而伺服装置和辅助单元用于控制伺服电机和辅助液压、照明等。文献[14]提出一种数控机床伺服装置电路急停方法,节省了数控机床近20%待机能耗。文献[15]指出,待机状态辅助单元耗能高于主轴单元,通过优化控制待机辅助单元,关闭照明、换刀等功率负载,能够进一步降低待机功率。

综上所述,机床待机状态下仍然可以关闭部分功率负载,具有进一步降低待机功率的潜力。但如何结合车间生产调度主动控制机床待机功率状态以实现车间节能的研究相对较少。目前,西门子840Dsl^[16]等型号数控系统已具备机床运行期间可选择性关闭功率负载的功能,能够用于调节机床待机状态功率负载,形成多元的机床能耗状态。但是,该系统只能针对单台机床进行多元能耗状态调节,缺乏针对车间级别设备多元状态调度模型和优化方法。

针对上述问题,本文引入一种机床超低待机状态^[17]。该状态通过数控系统关闭待机状态下部分的辅助单元,实现不完全关闭机床情况下降低待机功率,构建流水车间加工状态、待机状态及超低待机状态三元调度模型。超低待机状态恢复至加工状态需要一定切换时间,为此,本文提出一种基于工序平移的流水车间主动节能调度策略,在不延长完工时间约束下,实现数控机床待机状态向超低待机状态和停机状态的转化,形成主动节能调度策略,用于求解考虑超低状态的流水车间能耗调度问题。最后,通过实例分析验证本文方法的节能潜力和有效性。

1 机床的超低待机状态及其功率特性

1.1 超低待机状态的产生

按照功能数控机床部件可分为加工单元、辅助单元、机床控制单元和基础单元。机械加工车间一般将数控机床运行状态分为加工状态和待机状态。一台数控机床运行状态如表1^[17-18]所示。

表1 数控机床运行状态与部件运行情况对照表

功能分类	单元部件	加工状态	待机状态	超低待机状态	停机状态
加工单元	主轴单元	ON	HOLD	OFF	OFF
	进给轴单元	ON	HOLD	OFF	OFF
辅助单元	切削液装置	ON	OFF	OFF	OFF
	切屑排屑装置	ON	OFF	OFF	OFF
	换刀装置	ON	ON	OFF	OFF
	主轴冷却装置	ON	ON	OFF	OFF
	照明装置	ON	OFF	OFF	OFF
数控单元	APC	ON	ON	OFF	OFF
	PLC	ON	ON	OFF	OFF
	输入输出装置	ON	ON	ON	OFF
基础单元	机床散热系统	ON	ON	ON	OFF
	电柜系统	ON	ON	ON	OFF

数控机床加工工件运行时可依据工件加工需求启用各功能单元直至工件加工完成。在数控机床等待工件到达过程中,即处于待机状态时,数控机床的部分辅助单元部件关闭。例如切削液装置和切屑排屑装置等部件;数控单元可编程逻辑控制装置(programmable logic controller, PLC)和位置控制系统(automatic position control system, APC)等部件开启;而主轴单元和进给轴单元则处于HOLD^[18]状态。当机床处于长时间待机状态时,可以在待机状态基础上进一步关闭机床部分辅助功能,为此,引入一种数控机床的超低待机状态。超低待机状态是在待机状态基础上,通过关闭机床数控系统中的PLC和APC,进而关闭加工单元和部分辅助单元,以避免待机阶段出现辅助单元过量供给的现象^[17]。

1.2 考虑超低待机的数控机床功率和时间特性

MXR-460立式加工中心功率曲线如图1^[17]所示。立式加工中心由加工状态切换至超低待机状态时,控制数控系统关闭其中的PLC和APC,同时关闭主轴单元和进给轴单元的驱动装置等功能部件,该过程切换时间较短。当机床从超低待机状态恢复至加工状态时,重新启动PLC和APC需要一定时间,因为数控系统需要完成各项检测工作,例如坐标轴定位等^[17]。将数控机床超低待机状态恢复至加工运行状态所需要数控开启和完成检测等工作的时间设置为状态切换阈值 T^* ,只有当加工间隔时长

$t_{wait}(t_{wait} \geq 0)$ 达到 T^* 时才能启用超低待机状态. 为方便优化调度操作, 类似于一般车间调度, 将3种状态功率取值简化为定值.

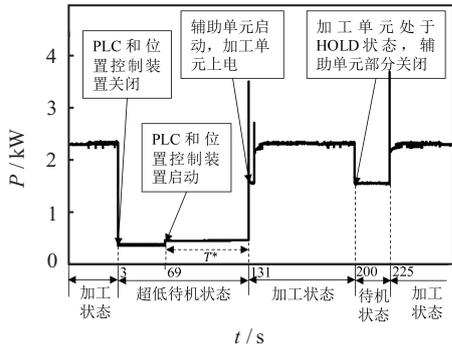


图1 立式加工中心加工过程功率曲线

2 考虑超低待机的流水车间调度问题

2.1 考虑超低待机的流水车间调度问题模型

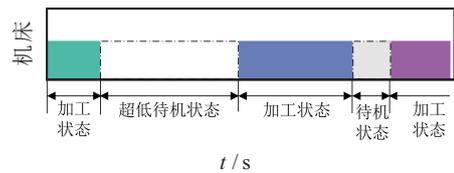
本文建立考虑超低待机状态的流水车间能耗调度问题模型: 以最小化生产能耗为目标, 求解工件集 $N = \{N^i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的各道工序在机床集 $M = \{M^j | j = 1, 2, \dots, m\}$ 上的加工顺序. 其中, 任意工件 N^i 完成加工均需要经过 m 道工序, 且任意工件的第 j 道工序能且仅能在机床 M^j 上加工, 机床 M^j 均为数控机床且均考虑加工状态、待机状态和超低待机状态. 此外, 考虑超低待机的流水车间调度需满足以下约束条件: 1) 各机床任意时刻不能加工两个及以上的工件; 2) 保证工件每道工序的加工时间; 3) 各机床加工功率、待机功率和超低待机功率不变.

2.2 考虑超低待机的流水车间能耗建模

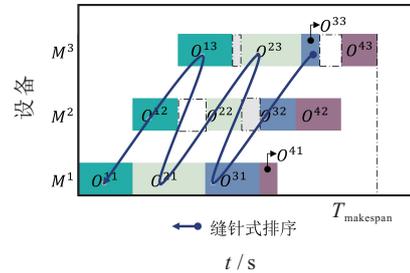
机床运行过程中会出现加工状态、待机状态和超低待机状态3种状态, 如图2(a)所示. 因此, 考虑超低待机状态的流水车间总能耗 E 由加工能耗 PE 、待机能耗 WE 和超低待机能耗 SWE 三部分组成. 加工能耗 PE 源于数控机床加工零件时所需的电能; 待机能耗 WE 和超低待机能耗 SWE 源于机床加工间隔期间产生的电能. 当机床 M^j 第 i 个加工间隔时长 $t_{wait}^{ij} (i \in [1, n-1])$ 达到机床 M^j 的状态切换阈值 T_j^* 时, t_{wait}^{ij} 进入超低待机状态, $x_{ij} = 1$; 否则进入待机状态, $x_{ij} = 0$. 即

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & t_{wait}^{ij} \geq T_j^*; \\ 1, & t_{wait}^{ij} < T_j^*. \end{cases} \quad (1)$$

图2(a)展示了MXR-460立式加工中心运行状态甘特图. 机床第1个加工间隔时间达到了状态切换阈值, 进入超低待机状态; 机床第2个加工间隔时间未达到状态切换阈值, 进入待机状态. 机床功率曲线如图1所示, 可见机床超低待机状态功率明显小于待机



(a) 机床运行状态甘特图



(b) 考虑超低待机的调度方案甘特图

■ 加工状态 □ 待机状态 ▨ 超低待机状态

图2 考虑超低待机的调度方案甘特图

状态功率, 启用超低待机状态能够降低机床加工间隔能耗 ($WE + SWE$), 进而降低车间总能耗.

图2(b)为考虑超低待机的流水车间甘特图^[17]. O^{ij} 表示调度方案第 i 个工件的第 j 道工序, $T_{makespan}$ 为最大流程时间. 若仅考虑机床加工和待机状态, 则耗能较大. 图2(b)中工序间隔 t_{wait}^{12} 和 t_{wait}^{33} 时间较大, 满足超低待机启动条件, 机床处于超低待机状态, 因此, 车间总体生产能耗降低. 考虑超低待机状态的流水车间的加工总能耗 PE 、待机总能耗 WE 和超低待机总能耗 SWE 统计模型如下所示:

$$PE = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_P^j \cdot t_{ij}, \quad (2)$$

$$WE = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} P_S^j \cdot t_{wait}^{ij} \cdot x_{ij}, \quad (3)$$

$$SWE = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} P_{SS}^j \cdot t_{wait}^{ij} \cdot |1 - x_{ij}|. \quad (4)$$

其中: P_P^j 表示第 j 台机床的加工功率, P_S^j 表示第 j 台机床的待机功率, P_{SS}^j 表示第 j 台机床的超低待机功率, t_{ij} 表示调度方案第 i 个工件第 j 道工序的加工时间. 该统计模型能够分别统计考虑超低待机状态流水车间加工状态、待机状态和超低待机状态总能耗, 这是车间调度优化研究的基础, 细化考虑超低待机状态流水车间能耗划分有助于后面3.3节优化研究和分析. 考虑超低待机能耗的流水车间能耗调度问题目标函数为各数控机床加工状态、待机状态和超低待机状态总能耗之和最小, 即

$$\min E = PE + WE + SWE. \quad (5)$$

约束条件

$$ft_{ij} - st_{ij} = t_{ij}, \tag{6}$$

$$st_{ij} - st_{(i-1)j} \geq t_{(i-1)j}, \tag{7}$$

$$st_{ij} - st_{i(j-1)} \geq t_{i(j-1)}. \tag{8}$$

其中: ft_{ij} 表示调度方案第 i 个工件第 j 道工序的完工时间, st_{ij} 表示调度方案第 i 个工件第 j 道工序的开工时间. 式(6)表示工序开工时间与完工时间的间隔等于工序的加工时间, 保证工件每道工序的加工时间; 式(7)表示工序需等到机床前一道工序完成后才能加工, 保证机床任意时间不能加工两个及以上的工件; 式(8)表示工序需等到工件前一道工序完成后才能加工, 保证工件每道工序的加工时间.

3 基于工序平移的混合遗传算法

3.1 混合遗传算法

大量研究将遗传算法^[19-21]用于求解车间调度问题. 本文将遗传算法与基于工序平移的节能策略相结合, 形成基于工序的混合遗传算法以求解考虑超低待机状态的流水车间调度问题. 该混合算法具体流程如图3所示.

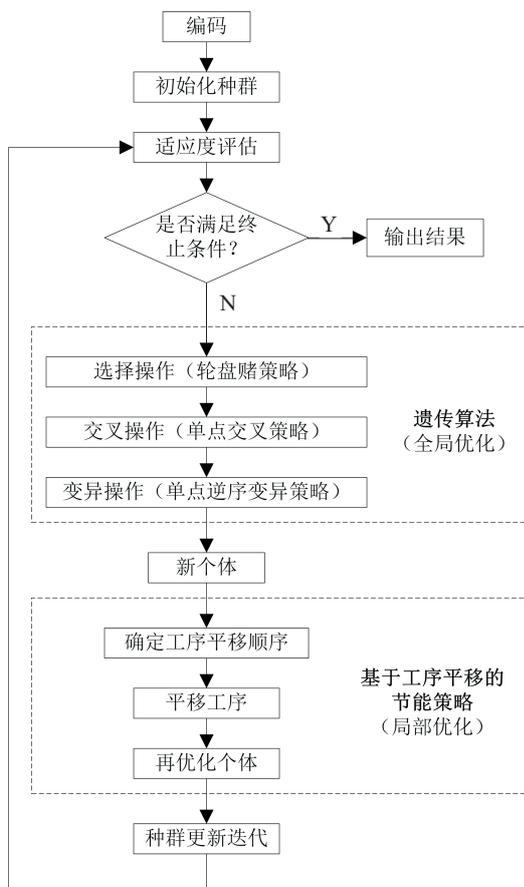


图3 混合遗传算法流程

在考虑超低待机状态的流水车间能耗调度问题中, 工序加工间隔时长是能否启用超低待机状态的重

要决定因素, 但遗传算法生成的可行解中忽略了加工间隔时长对机床启用超低待机状态的影响. 本文设计一种基于工序平移的节能策略, 对遗传算法生成的新个体方案进行工序间隔调整, 实现待机状态向超低待机状态和停机状态的主动转化, 从而提升遗传算法的局部优化能力.

3.2 遗传算法

考虑超低待机状态的流水车间遗传算法采用整数编码^[22]形成调度方案, 通过轮盘赌选择策略、单点交叉策略和单点逆序变异策略^[22-23]产生新调度方案. 然后, 采用锦标赛选择策略^[23]评估个体适应度, 满足终止条件后输出结果.

1) 编码与解码. 采用基于工件的整数编码方式, 每个染色体代表一个调度方案, 基因编号代表工件编号, 如染色体 [1; 2; 3; 4] 加工顺序为 $[N^1; N^2; N^3; N^4]$. 得到加工顺序后采用主动调度方式解码, 解码规则是将工序开工时间安排在工序最早开工时间, 以保证调度方案完工时间最短.

2) 选择操作. 采用轮盘赌选择策略, 任取两个父代染色体, 选取其中适应度值较高者进入下一代.

3) 交叉操作. 采用单点交叉策略, 首先随机选择父代染色体 $parent1$ 和 $parent2$ 上的某一位置基因作为交叉点; 然后将交叉点后面的基因片段互换, 生成新染色体. 若出现非法染色体, 则对其进行修正. 首先标记染色体交叉点前的重复基因; 然后将非法染色体的重复基因按顺序插入另一非法染色体重复基因出现的位置上, 从而得到最终染色体.

4) 变异操作. 采用单点逆序变异策略, 随机选择染色体上的某一位置基因作为变异点, 将变异点后的基因片段逆向排列即完成变异操作.

5) 适应度评估. 适应度评估首先需要定义适应度函数, 然后选取合适个体进入下一代. 适应度函数是调度方案适应度值的统计方法, 计算过程需要保证适应度值为正. 考虑超低待机状态的流水车间调度问题以能耗最小为目标, 因此, 利用所定义的适应度函数对调度方案的总能耗进行评价. 流水车间能耗是一个非负变量, 选取的适应度函数 f 为

$$f(X_a) = \frac{1}{E(X_a)} \times 10^n. \tag{9}$$

其中: $E(X_a)$ 表示第 a 个调度方案总能耗, n 表示适应度尺度变换参数. 适应度评估采用锦标赛选择策略, 每次从种群中取出一定数量染色体(放回抽样), 然后选择最好的一个进入子代种群. 重复该操作, 直到新的种群规模达到原来的种群规模.

3.3 基于工序平移的节能策略

基于工序平移的节能策略通过调整工序前后加工间隔时长,将待机状态转化为超低待机状态和停机状态以降低调度方案能耗. 算法包括以下两个步骤.

1) 建立平移工序链. 在流水车间生产中, 工序 O^{ij} 的平移空间受工件下一道工序 $O^{i(j+1)}$ 和机床下一道工序 $O^{(i+1)j}$ 的限制. 这里引入工序链排序法如图 2(b)^[17] 所示. 具体步骤: ①将工件各工序由第 m 道工序连接至第 1 道工序; ②将第 i 个工件最后一道工序与第 $i+1$ 个工件第 1 道工序相连接, 直至第 $n-2$ 个工件, 车间工序链建立完成. 工序链不连接最后一个工件是为了保证车间加工效率, 固定机床最后一道工序开工时间和完工时间, 即机床现有完工时间不变. 如图 2(b) 将调度方案工序按照工序链排序法制定的规则形成一条工序链, 方案中最后一个工件所有工序 $[O^{43}; O^{42}; O^{41}]$ 的开工时间和完工时间固定, 从而保证调度方案和机床流程时间不变.

2) 进行平移工序. 确定调度方案平移工序链序列后, 依次选取序列中的工序进行平移, 如图 2(b) 所示. 为了不影响机床现有流程时间, 工序 O^{ij} 完工时间最多平移至其最晚完工时间 lft_{ij} , 工序最晚完工时间受工件下一道工序开工时间和所在机床下一道工序开工时间限制, 如下式所示:

$$lft_{ij} = \min(st_{(i+1)j}, st_{i(j+1)}). \quad (10)$$

工序平移过程可能出现的情况和具体平移方法如图 4 所示.

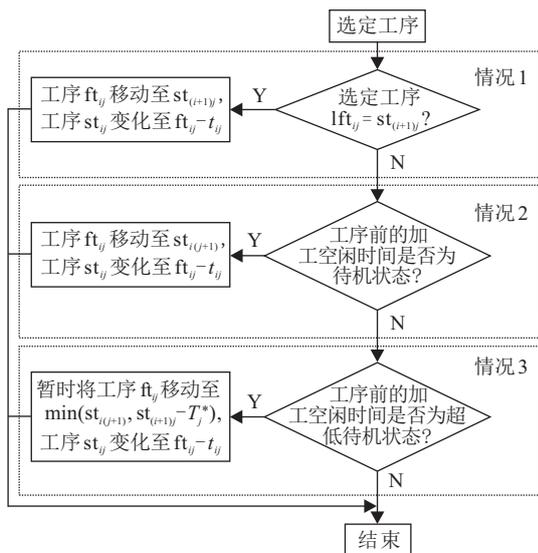


图 4 工序平移方法流程

情况 1: 当选定工序 O^{ij} 的 $lft_{ij} = st_{(i+1)j}$ 时, 如图 5(a) 所示^[17]. 将选定工序平移至 $st_{(i+1)j}$, 工序的开工时间和完工时间更新如下式所示:

$$ft_{ij} = st_{(i+1)j}, \quad (11)$$

$$st_{ij} = ft_{ij} - t_{ij}. \quad (12)$$

平移操作后工序前后的加工间隔合并为 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$, 如图 5(b) 所示. 当 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 达到 T_j^* 时进入超低待机状态 (工序属于调度方案第 1 个工件时, $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 进入停机状态), 从而降低调度方案能耗.

情况 2: 当选定工序 O^{ij} 的 $lft_{ij} < st_{(i+1)j}$ 且 $t_{wait}^{(i+1)j} < T_j^*$ 时, 如图 5(c) 所示. 将选定工序平移至 $st_{i(j+1)}$, 工序的开工时间和完工时间更新如下式所示:

$$ft_{ij} = st_{i(j+1)}, \quad (13)$$

$$st_{ij} = ft_{ij} - t_{ij}. \quad (14)$$

平移操作后 $t_{wait}^{(i-1)j}$ 与 t_{wait}^{ij} 的一部分加工间隔时间合并为 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$, 如图 5(d) 所示. 当 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 达到 T_j^* 时进入超低待机状态 (工序属于调度方案第 1 个工件时, $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 进入停机状态), t_{wait}^{ij} 被合并的加工间隔时间由待机状态转化为超低待机状态或停机状态, 加工间隔能耗降低, 从而调度方案能耗降低.

情况 3: 当选定工序 O^{ij} 的 $lft_{ij} < st_{(i+1)j}$ 且 $t_{wait}^{(i+1)j} \geq T_j^*$ 时, 如图 5(e) 和图 5(g) 所示. 暂时将选定工序平移至 $st_{i(j+1)}$ 和状态切换时间节点 $st_{(i+1)j} - T_j^*$ 二者较小处, 即

$$ft_{ij} = \min(st_{i(j+1)}, st_{(i+1)j} - T_j^*), \quad (15)$$

$$st_{ij} = ft_{ij} - t_{ij}. \quad (16)$$

平移操作后加工间隔 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 和 $New_t_{wait}^{ij}$ 如图 5(f) 和图 5(h) 所示. $New_t_{wait}^{ij}$ 仍处于超低待机状态不变, 若 $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 处于超低待机状态或停机状态, 则保留平移结果; 否则, $New_t_{wait}^{(i-1)j}$ 部分会转化为待机状态, 调度方案能耗增加, 如图 5(h) 所示, 因此取消此平移操作, 恢复至原来的状态.

若任意机床 M^j 的总加工间隔时间均小于其状态切换阈值 T_j^* , 则可不进行平移操作以降低算法运行时间.

4 案例分析

4.1 实验案例

本文以某机械加工车间为研究对象, 该车间有 5 种工件, 每个工件需要经过 5 道工序, 各工序加工数据及设备的功率数据见表 2. 案例选择每种法兰工件加工 n 个, 共 $5n$ 个工件, 以车间能耗最小为目标, 形成 $5n \times 5$ (工件数量 \times 工序数量) 的流水车间能耗调度问题.

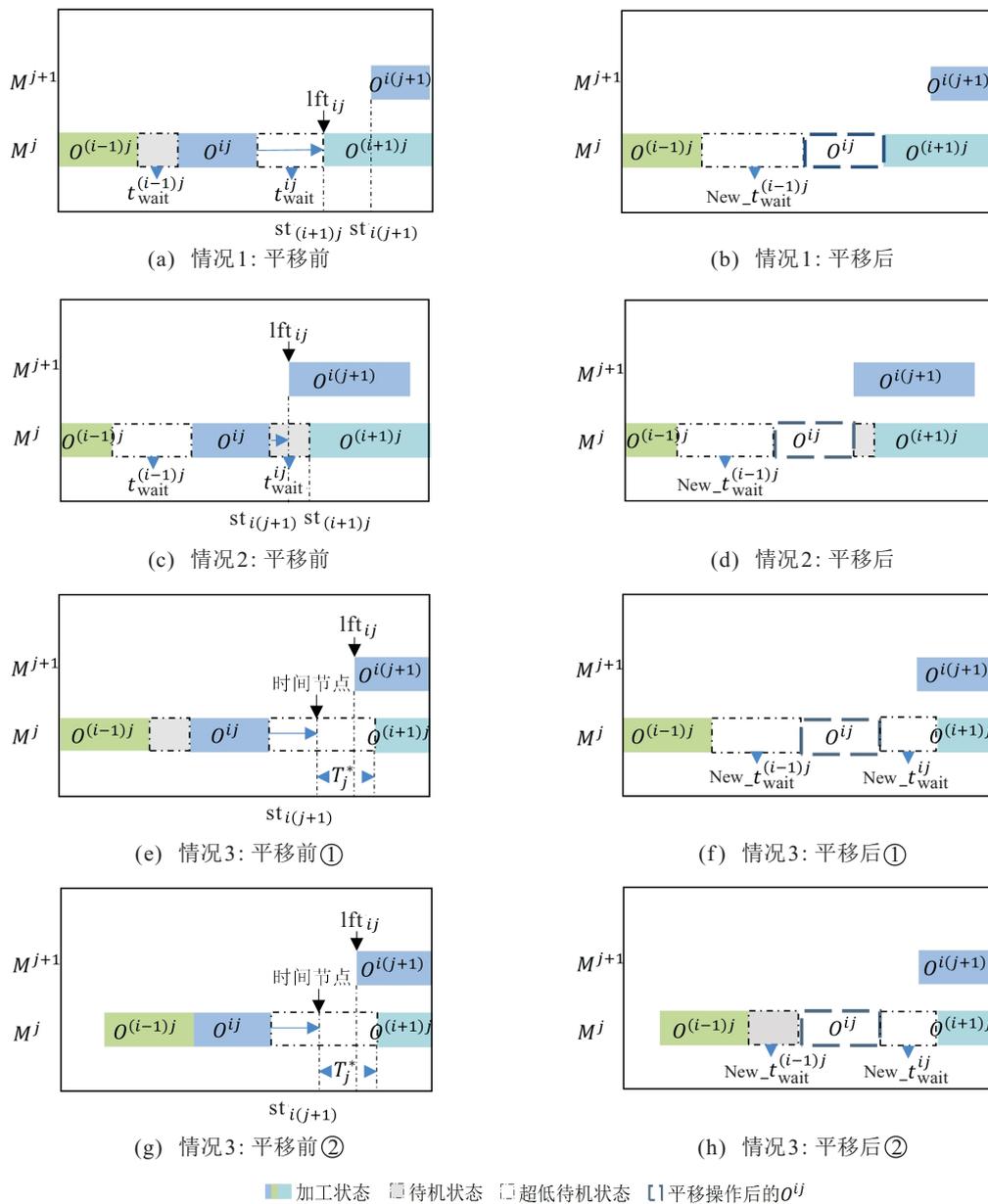


图5 平移选定工序方法说明

表2 流水车间加工参数表

工序名称	设备编号	加工时间/min					加工功率/kW	待机功率/kW	超低待机功率/kW	状态切换阈值
		工件1	工件2	工件3	工件4	工件5				
车削	M^1	8.2	7.2	9.5	7.6	8.5	2.5	1.8	0.6	1.5
钻孔	M^2	5.9	7.8	5.6	5.1	6.7	2.8	1.6	0.4	2.6
攻丝	M^3	5.3	5.6	6.9	5.7	5.2	3.6	2.8	0.7	2.9
镗孔	M^4	3.0	3.0	4.1	3.1	4.3	4.1	3.2	0.4	3.0
磨削	M^5	4.1	4.6	5.8	6.0	5.2	3.6	3.0	0.8	2.1

4.2 实验说明

针对该案例,本文设计实验问题分别为:1)问题1(2 states):求解流水车间能耗调度问题,问题仅考虑机床加工状态和待机状态;2)问题2(3 states):求解考虑超低待机状态的流水车间能耗调度问题,问题考虑机床加工状态、待机状态和超低待机状态.算

法参数选取:种群规模为100个,最大迭代次数为120,交叉概率为0.5,变异概率为0.1,适应度尺度变换参数 $n = 3$,竞赛规模为4个.仿真实验在Matlab R2014a环境下进行,电脑配置如下:16GB RAM/Intel(R) Core(TM)i7-7500U CPU @ 2.70GHz 2.90 GHz/Windows10操作系统.

4.3 实验分析

4.3.1 实验1

基于遗传算法求解实验案例,问题规模分别为 5×5 、 10×5 、 15×5 、 20×5 、 30×5 和 50×5 的 2 states 和 3 states 调度问题,以验证超低待机状态的节能效果.因本实验强调所提出的超低待机状态的节能潜力,故以算法求解的最优结果作为评价指标.每个问题求解 20 次,取最优值 E_{best} ,最终优化结果如表 3 所示,其中

$$ESC = \frac{(E_{best} \text{ of 2 states} - E_{best}) \text{ of 3 states}}{E_{best} \text{ of 2 states}}$$

表3 实验1仿真优化结果

问题模型	GA		ESC (%)
	E_{best} of 2 states (kW·min)	E_{best} of 3 states (kW·min)	
5×5	563.51	491.34	12.81
10×5	1192.06	996.21	16.43
15×5	1820.61	1506.57	17.25
20×5	2449.16	2013.70	17.78
30×5	3706.26	3041.70	17.93
50×5	6220.46	5090.51	18.17

由实验结果可见,机床启用超低待机状态能够降低流水车间 10% 以上的能耗,且随着问题规模的增加,启用超低待机状态的能耗降低率 ESC 越大,节能效果越明显.

4.3.2 实验2

基于工序平移的混合遗传算法 (hybrid genetic algorithm, HGA) 和遗传算法 (GA) 求解实验案例,问题规模分别为 5×5 、 10×5 、 15×5 、 20×5 、 30×5 和 50×5 的 3 states 能耗调度问题.为对比两种算法求解考虑超低待机状态的流水车间能耗调度问题性能,引入可反映数据集中趋势程度的均值和可反映算法收敛性的收敛代数作为评价指标.每个问题求解 20 次,取能耗均值 E_{avg} 和收敛代数均值 ENG_{avg} ,最终优化结果如表 4 所示.

表4 实验2仿真优化结果

问题模型	HGA		GA	
	E_{best} of 3 states (kW·min)	ENG_{avg} (代)	E_{best} of 2 states (kW·min)	ENG_{avg} (代)
5×5	459.57	5.3	491.34	5.9
10×5	920.34	9.9	997.10	10.5
15×5	1381.11	20.1	1507.61	22.3
20×5	1840.68	33.2	2019.15	36.5
30×5	2762.22	51.5	3042.05	55.8
50×5	4604.10	77.6	5089.13	82.6

由表 4 中可见,本文提出的混合遗传算法求解 3 states 能耗调度问题性能明显优于遗传算法,混合遗传算法求解各规模调度问题的 E_{avg} 均小于遗传算法,且收敛性优于遗传算法.

4.3.3 实验3

考虑规模为 10×5 的实验案例,基于遗传算法求解 2 states 问题、基于遗传算法求解 3 states 问题和基于混合遗传算法求解 3 states 问题 3 组仿真实验.每个问题求解 20 次,取最优值 E_{best} ,最终优化结果如表 5 所示.

表5 实验3仿真优化结果 kW·min

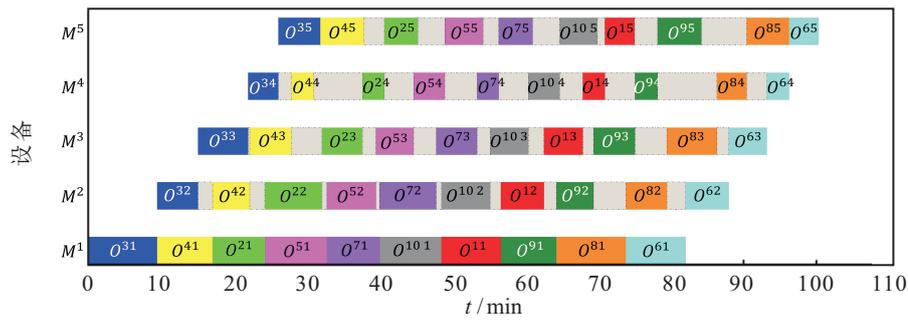
实验结果	E_{best}		
	GA+2 states	GA+3 states	HGA+3 states
总能耗	1192.06	996.21	920.34
加工能耗	914.34	914.34	914.34
加工间隔能耗	277.72	81.871	5.01

由表 5 可知,流水车间的加工能耗恒定不变,加工间隔能耗是影响调度方案总能耗的重要因素.对比 GA+2 states 实验和 GA+3 states 实验的加工间隔能耗可知,启用超低待机状态能够降低车间约 70.52% 的加工间隔能耗.对比 GA+3 states 实验和 HGA+3 states 实验的加工间隔能耗可知,基于工序平移的混合 GA 算法能够进一步降低车间 27.68% 的加工间隔能耗,从而表明本文提出的基于工序平移的节能策略是有效的.

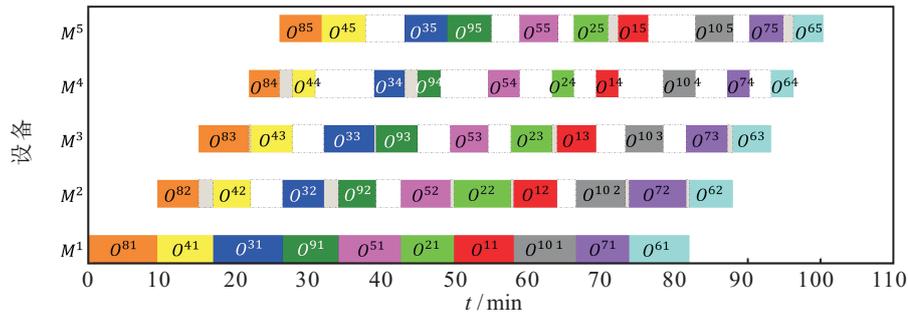
图 6 是 3 组仿真实验最优调度方案甘特图,其中两个工件 1 的编号为 N^1 和 N^6 、两个工件 2 的编号为 N^2 和 N^7 、两个工件 3 的编号为 N^3 和 N^8 、两个工件 4 的编号为 N^4 和 N^9 、两个工件 5 的编号为 N^5 和 N^{10} .

由图 6(b) 可见,启用超低待机状态可使加工间隔能耗降低.图 6(c) 加工间隔状态全部进入超低待机状态和停机状态,因此能耗进一步降低.

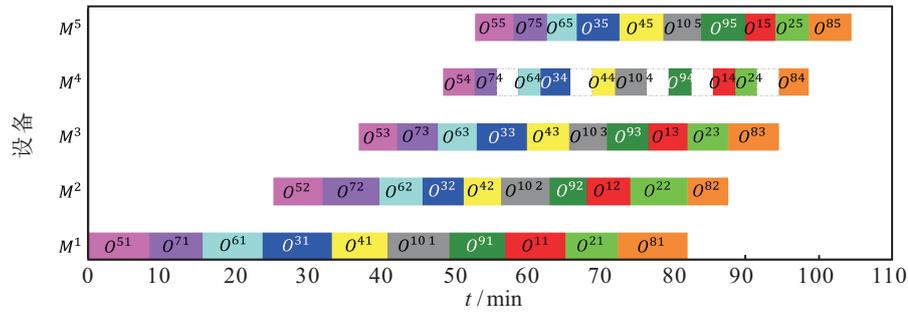
图 6(d) 是图 6(b) 和图 6(c) 所示调度方案的实时功率曲线,该曲线反映了流水车间实时能耗需求.与 GA 求解方案相比,HGA 求解方案能耗需求有明显的分级特点,流程时间前期能耗需求小,流程时间后期能耗需求大,有利于企业对用电需求的调节.工业用电执行峰谷分时计价,以山东省工业用电为例,用电高峰、低谷时段电价按基础电价上下浮 50%,尖峰时段电价上浮 70%.实际生产过程中,用电高峰期安排 HGA 求解方案前期加工任务,可降低车间用电需求,从而降低用电成本.



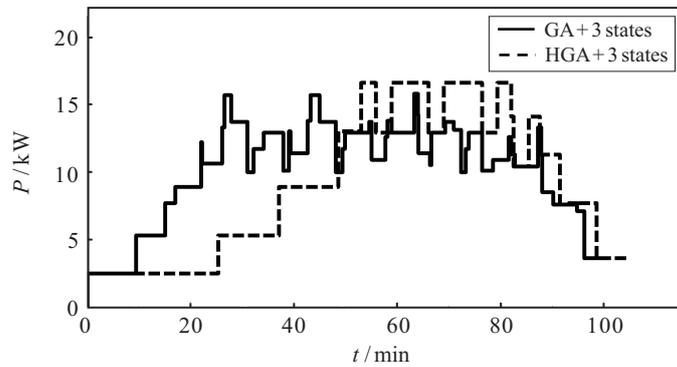
(a) GA + 2 states 最优调度方案甘特图



(b) GA + 3 states 最优调度方案甘特图



(c) HGA + 3 states 最优调度方案甘特图



(d) 调度方案实时功率曲线

图6 最优调度方案

5 结论

本文引入一种机床超低待机状态,以实现不完全关闭机床情况下降低待机功率.针对考虑超低待机状态的流水车间构建了三元调度模型,实现了机床功率状态的主动切换.进而提出了基于工序平移的混合遗传算法,分别定义了不同的工序邻域移动操作,在不延长完工时间约束下,实现数控机床待机状态向超低待机状态和停机状态的转化,提升遗传算法求

解考虑超低待机状态的流水车间调度问题的优化能力.案例分析表明,启用超低待机状态来降低流水车间能耗效果明显,且基于工序平移的节能策略,能够实现待机状态向超低待机状态和停机状态的转化,进一步降低流水车间能耗,对工程实际有较强的指导意义.

超低待机状态目前仍有一些问题值得进一步研究.启用超低待机状态后能够充分降低数控机床能

耗,但存在延长完工时间的风险. 因此,通过引入完工时间约束条件改进优化模型,同时实现降低能耗和高效生产将是下一步研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Yoon H, Lee J, Kim M S, et al. Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 78: 54-62.
- [2] Jiang Z G, Zhang H, Yan W, et al. A method for evaluating environmental performance of machining systems[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2012, 25(6): 488-495.
- [3] Zhou L R. Research on modeling energy consumption of CNC machine tools and energy oriented machining parameters optimization[D]. Ji'nan: School of Mechanical Engineering, Shandong University, 2018: 19-25.
- [4] Zhou L R, Li J F, Li F Y, et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 3721-3734.
- [5] Li L L, Li C B, Tang Y, et al. Influence factors and operational strategies for energy efficiency improvement of CNC machining[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 220-238.
- [6] Klocke F, Döbbeler B, Lung D. Energy saving potentials of high pressure lubricant supply[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 26: 355-360.
- [7] Li C B, Li L L, Tang Y, et al. A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30(1): 123-138.
- [8] Chen X Z, Li C B, Jin Y, et al. Optimization of cutting parameters with a sustainable consideration of electrical energy and embodied energy of materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 775-788.
- [9] Zhou Z H, Zhang C Y, Xie Y, et al. Cutting parameters optimization for processing energy and efficiency in CNC lathe[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(9): 2410-2418.
- [10] Li C B, Tang Y, Cui L G, et al. A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(5): 911-922.
- [11] Kordonowy David N. A power assessment of machining tools[M]. Massachusetts, 2002: 35-69.
- [12] He Y, Chen P W, Yan P, et al. Energy-saving operation method of machine tool oriented to work piece random arrival[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(4): 1029-1036.
- [13] Cao H J, Luo Y. Analysis and prospect of high energy efficiency green machine tool technology[J]. *Metal Working: Cold Working*, 2012(12): 14-17.
- [14] Nagawaki T, Hirogaki T, Aoyama E, et al. Application of idling stop technology for servo motors in machine tool operations to reduce electric power consumption[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 939: 169-176.
- [15] Schmitt R, Bittencourt J L, Bonefeld R. Modelling machine tools for self-optimisation of energy consumption[C]. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Braunschweig, 2011: 253-257.
- [16] Chen P, Cao H J, Zhang Y, et al. The process parameters optimization model of gear high-speed dry hobbing and its application system development[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 190-197.
- [17] Liu X Y, Wang L M, Kong L, et al. A hybrid genetic algorithm for minimizing energy consumption in flow shops considering ultra-low idle state[C]. *The 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*. Procedia, 2019, 80: 192-196.
- [18] ISO 14955-1, Machine tools-environmental evaluation of machine tools—Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools[S]. Switzerland: ISO, 2010.
- [19] Wang L, Wang J J, Wu C G. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 385-391.
- [20] Zeng Z Q, Hong M N, Man Y, et al. Multi-object optimization of flexible flow shop scheduling with batch process—Consideration total electricity consumption and material wastage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 925-939.
- [21] Wang L, Zheng D Z. Advances in job shop scheduling based on genetic algorithm[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(S1): 641-646.
- [22] Wang W L, Wu Q D. Intelligent production scheduling algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007: 46-58.
- [23] Wang L. Shop scheduling and its genetic algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 40-42.

作者简介

王黎明(1986—), 男, 副教授, 从事绿色设计等研究, E-mail: liming_wang@sdu.edu.cn;

刘欣玥(1995—), 女, 硕士生, 从事车间调度的研究, E-mail: liuxinyue_sdu@qq.com;

李方义(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事绿色设计等研究, E-mail: lifangyi@sdu.edu.cn;

李剑峰(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事绿色制造等研究, E-mail: ljf@sdu.edu.cn;

孔琳(1992—), 女, 博士生, 从事车间调度的研究, E-mail: konglin.edu@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)