

最小化碳排放的可持续机器调度问题

王 君[†]

(天津财经大学 商学院, 天津 300222)

摘 要: 针对单机器生产系统、允许在生产间歇开关机器的可持续调度问题,以最小化碳排放为目标建立数学规划模型,同时对机器的开关机和产品的生产计划进行决策. 利用动态规划算法对模型进行求解分析,提出阶段决策最优性条件,并给出精确算法. 通过模拟算例和企业案例的计算分析表明,利用所提出的可持续调度方法可以显著减少生产过程中的碳排放.

关键词: 可持续调度; 碳排放; 机器调度; 动态规划算法

中图分类号: F253.9 **文献标志码:** A

Sustainable machine scheduling problem to minimize carbon emission

WANG Jun[†]

(School of Business, Tianjin University of Finance & Economics, Tianjin 300222, China)

Abstract: Considering a sustainable scheduling problem for the single machine system in which the machine can switch between the processes of two jobs, a mathematical programming model is formulated with the goal to minimize carbon emissions. In the model, the job plan and the machine's switch plan are made simultaneously. Using the dynamic programming algorithm to analyze the model, we propose an optimality conditions of the stage decision and design an exact algorithm. Two simulation examples and an industrial case are given to illustrate that the sustainable scheduling method can significantly reduce the carbon emission in the process of production.

Keywords: sustainable scheduling; carbon emission; machine scheduling; dynamic programming algorithm

0 引 言

人类经济社会的高速发展对资源、环境和气候都产生了极大的影响. 特别是人类对能源的过度使用,使二氧化碳和其他有害气体大量排放,从而造成全球气候和空气质量不断恶化,因此需要人类转变生产和生活方式,实现低碳经济和低碳生活. 对工业企业而言,电力是能源消耗的主要形式. 根据中国能源局发布的数据,2015年中国工业用电量 $39\,348 \times 10^8$ kWh,约占全社会用电总量的70.90%. 而根据美国能源信息局的数据,同期美国工业用电量仅占全社会总用电量的29.26%. 由此说明中国在工业企业中节约能耗具有很大的潜力. 企业通过优化产量与库存^[1]、引用绿色生产技术^[2]等途径能实现节能减排,然而这两种方式很可能会影响企业的经济效益. 在生产调度层面上考虑节能减排能有效解决上述问题,所以可持续调度问题逐渐引起学者们的兴趣^[3].

生产环节是能源消耗的重要部分,所以在生产

调度中提高能源的效率是可持续调度的关键. Gahm等^[4]提出了“节能调度”(EES)的概念并给出了EES的研究框架,从能源覆盖、能源供给和能源需求3个维度对现有文献进行了综述研究. 由于机器调度是一个经典的运作管理问题,EES方法为该问题的各个分支都注入了大量的活力,如Lei等^[5]对车间调度问题的研究、Ding等^[6]对流水作业调度的研究、Kong等^[7]对平行机调度的研究、Shrouf等^[8]对单机器的研究等. 关于生产调度的研究大多假定机器在生产过程中一直处于运行状态. 而在实际的生产环境中,产品的需求具有波动性,当需求量较大时,机器需要一直处于生产状态;当需求量较小时,机器就会闲置. 虽然让机器处于待机状态是一种普遍的操作实践,但是会带来能耗的增加. 例如,Drake等^[9]通过对飞机制造企业一个车间的4个数控机床的数据进行分析发现,在每天8小时的工作时间中,平均每台机器处于待机的时间占16%. 如果在这些待机时间内关闭机

收稿日期: 2016-04-05; 修回日期: 2016-06-27.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61502331); 天津市哲学社会科学规划项目(TJGL16-004Q); 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(15JCQNJC00800).

作者简介: 王君(1983—),男,讲师,博士,从事低碳制造、物流与供应链管理等研究.

[†]通讯作者. E-mail: wangjun@tjufe.edu.cn

器,能减少13%的电力消耗.

在机器调度中同时考虑产品的生产计划和开关机计划有利于实现节能减排^[10]. 目前已有学者对此问题进行了初步研究. Capón-García等^[11]指出,在批过程调度中,决策者不仅要考虑经济目标,还要考虑与环境目标的权衡问题,同时分析了在调度中不同指标的选取对经济和环境目标的影响,通过对一个丙烯酸纤维生产厂的案例研究,指出产品转换是调度的关键. Mashaei等^[12]针对一个闭环车间流水作业调度问题,研究了机器系统与托盘系统的协调问题,目标是 minimized 能源消耗. Dai等^[13]研究了柔性流水作业调度问题,在决策中考虑最小化能源消耗和最大完工时间,并提出一种遗传-模拟退火算法求解多目标模型. Pusavec等^[14]总结了多种可持续调度的方法,并指出在机器层面实现节能减排是最有效的策略. 侯彬^[15]研究了并行机的调度问题,考虑最小化加权完成时间和节省成本,设计了一个分支定界算法进行求解,限制每台机器只允许关闭一次. Yildirim等^[16]研究了单机器的可持续调度问题,目标是 minimized 总完工时间和能源消耗,用多目标遗传算法进行求解.

近些年针对碳排放和碳足迹度量的研究成果大量出现^[17],在可持续调度中最小化碳排放目标是一个新的趋势^[18-20]. Liu等^[21]在Yildirim等^[16]研究的基础上,考虑了碳排放决策目标,采用改进的非支配排序遗传算法改善了调度效果. 然而,他们的研究均假设产品在同一个时间进行交付,没有考虑交付时间不同的情况.

本文研究只有一台机器的生产系统,考虑产品具有不同的到达、生产和交付时间,对产品的调度和机器的开关机调度进行决策. 以最小化碳排放为目标建立模型,并提出一种基于动态规划的精确算法. 通过仿真算例和企业案例进行分析,结果表明本文提出的可持续调度方法能显著减少碳排放.

1 问题描述

在很多工业企业的生产过程中,机器一旦启动就不会关闭,直到完成最后一个生产任务. 如果机器在生产完一个产品后需要等待很长一段时间才能生产另一个产品,则机器一般会处于待机状态,而机器的待机状态会排放大量的二氧化碳. 因此,可以在完成前一个产品之后和生产下一个产品之前的这段时间关闭机器以减少碳排放. 条件允许的情况下,应尽量推迟产品的生产,达到连续生产多个产品的目的.

本文考虑只有一台机器的生产系统,决策者需要根据生产任务的到达时间安排产品(或工件)在机器

上的生产(或加工)计划. 假设采用先进先出的原则确定产品的生产顺序,已知每个产品(指原材料、半成品或工件)的到达时间、加工时间和交付时间. 考虑机器的运行、待机和关机状态,已知机器在不同状态以及状态转换之间的能源和时间消耗. 生产计划包括每个产品的开始生产时间,以及机器在等待下一个生产任务过程中是处于待机状态还是关机状态. 优化目标是在满足产品交付的前提下最小化碳排放.

问题假设:

- 1) 机器在某个时间只能生产一个产品;
- 2) 产品一旦开始生产就不能被打断,直到完成;
- 3) 机器可以保证持续不断的生产过程,即不考虑机器故障、停电及其他因素对机器的影响;
- 4) 产品在机器上的生产顺序采用先进先出的原则,如果两个产品同时到达,则随机处理它们;
- 5) 产品必须在交付时间之前完成生产;
- 6) 机器开启和关闭时只考虑时间消耗和碳排放.

2 模型建立

本文使用的符号和参数变量如下.

1) 参数.

J : 产品(或称为生产任务)的数量;

j : 产品序号, $j = 1, 2, \dots, J$;

a_j : 产品 j 的到达时间;

d_j : 产品 j 的交付时间;

p_j : 产品 j 在机器上的生产时间;

T_{on} : 开启机器的时间消耗;

T_{off} : 关闭机器的时间消耗;

E_{on} : 开启机器的电力消耗;

E_{off} : 关闭机器的电力消耗;

E_I : 单位时间内机器处于待机状态的电力消耗;

E_p : 单位时间内机器处于生产状态的电力消耗;

r : 电碳转化系数,表示一单位电力转化为碳排放的量;

E_{sum} : 生产所有产品的总电力消耗;

C_{sum} : 生产所有产品的总碳排放;

T_r : 机器休息的最少时间,指机器在考虑碳排放因素下需要关机再启动的最少耗时.

2) 决策变量.

x_j : 产品 j 在机器上的开始生产时间;

y_j : 机器生产产品 j 前的状态, $y_j \in \{0, 1\}$,如果需要关机休息,则 $y_j = 1$, 否则 $y_j = 0$.

如果机器的待机时间大于 $T_{on} + T_{off}$, 并且待机的能源消耗大于重启的能源消耗, 则应关闭机器. 根据文献[16], 有

$$T_r = \max((E_{on} + E_{off})/E_I, T_{on} + T_{off}). \quad (1)$$

由此,总的电力消耗

$$E_{sum} = E_p \sum_{j=1}^J p_j + \sum_{j=2}^J (E_{on} + E_{off})y_j + E_{off} + E_{on} + E_I \sum_{j=2}^J (x_j - x_{j-1} - p_{j-1})(1 - y_j). \quad (2)$$

其中:对于任意的 $j = 2, 3, \dots, J$, 有

$$y_j = \begin{cases} 0, & x_j - x_{j-1} - p_{j-1} \leq T_r; \\ 1, & x_j - x_{j-1} - p_{j-1} > T_r. \end{cases} \quad (3)$$

式(2)的第1项表示生产所有产品的电力消耗;第2项表示机器在两个产品之间重启的能源消耗;第3、4项表示生产最后一个产品后和第一个产品前的开关机电力;第5项表示机器在两个产品之间待机的能源消耗. 对于给定的生产任务,无论调度计划如何调整,式(2)的第1、3、4项是固定不变的. 因此可以忽略这3项,式(2)可简化为

$$E_{sum} = \sum_{j=2}^J (E_{on} + E_{off})y_j + E_I \sum_{j=2}^J (x_j - x_{j-1} - p_{j-1})(1 - y_j). \quad (4)$$

考虑其他约束,该问题的数学规划模型如下:

$$\min C_{sum} = r \cdot E_{sum}. \quad (5)$$

$$\text{s.t. } x_j \geq a_j, \forall j = 1, 2, \dots, J; \quad (6)$$

$$x_j + p_j \leq d_j, \forall j = 1, 2, \dots, J; \quad (7)$$

$$x_{j+1} \geq x_j + p_j, \forall j = 1, 2, \dots, J - 1; \quad (8)$$

式(3), (4).

其中:式(5)表示最小化碳排放,碳排放量可由电碳转化系数和总电力消耗的乘积进行计算;式(6)表示产品的开始生产时间不早于其到达时间;式(7)表示产品的生产完成时间不晚于其交付时间;式(8)表示前一个产品生产完后才能开始生产下一个产品.

3 动态规划算法的求解分析

按照产品的生产顺序对 J 个生产任务划分成 J 个阶段,每个阶段需要对产品的开始生产时间进行决策. 对当前产品的决策会影响相邻产品的开始生产时间,每个产品的开始生产时间确定后便组成了一个决策序列. 显然,开始生产时间的确定是一个多阶段的决策问题,可以采用动态规划进行求解分析.

阶段划分:根据生产顺序划分为 J 个阶段, j 为阶段变量, $j = 1, 2, \dots, J$.

状态变量:机器生产完前一个产品的时刻为状态变量,记为 s_j .

决策变量:机器开始生产产品 j 的时刻,即 x_j . 允许决策集合为

$$\max \{a_j, x_{j-1} + p_{j-1}\} \leq x_j \leq d_j - p_j. \quad (9)$$

状态转移方程:确定阶段 j 的决策变量 x_j 之后,机器耗时 p_j 生产产品. 因此,状态转移方程为 $s_{j+1} = x_j + p_j$. 其中 $x_0 = 0, p_0 = T_{on}$.

指标函数为

$$f(s_j) = r(E_{on} + E_{off}) \sum_{i=2}^j y_i + rE_I \sum_{i=2}^j (x_i - x_{i-1} - p_{i-1})(1 - y_i), \quad (10)$$

$$g(s_j) = r(E_{on} + E_{off}) \sum_{i=j}^J y_i + rE_I \sum_{i=j}^J (x_i - x_{i-1} - p_{i-1})(1 - y_i). \quad (11)$$

对于任意阶段 j ,动态规划方程如下:

顺推方式为

$$f(s_{j+1}) = \min \{f(s_j) + r(E_{on} + E_{off})y_{j+1} + rE_I(x_{j+1} - x_j - p_j)(1 - y_{j+1})\}, \quad (12)$$

其中初始状态 $f(s_1) = 0$;

倒推方式为

$$g(s_j) = \min \{g(s_{j+1}) + r(E_{on} + E_{off})y_j + rE_I(x_j - x_{j-1} - p_{j-1})(1 - y_j)\}, \quad (13)$$

其中初始状态 $g(s_{J+1}) = 0$.

定义1(子决策序列和子优化问题) 对于给定的状态 s_j ,由以后各阶段的决策组成的决策序列称为由 s_j 确定的子决策序列,记为 $(x_j, x_{j+1}, \dots, x_J)$;由该子决策序列确定的优化问题,即 $g(s_j)$,称为由 s_j 确定的子优化问题.

定义2(最优阶段决策和最优阶段状态) 给定状态变量 s_j ,由状态变量 s_j 确定的子优化问题取得最优时,阶段 j 的决策变量 x_j 的取值称为最优阶段决策,记为 $x_j^* | s_j$ 或者 x_j^* ;由 x_j^* 确定的 s_{j+1} 称为最优阶段状态,记为 $s_{j+1}^* | s_j$ 或者 s_{j+1}^* .

定理1(状态转移最优性决策) 考虑状态转移 $s_j \rightarrow s_{j+1}$,给定 s_j ,如果 $y_j = 1$,则满足 $\min \{g(s_{j+1}) | s_{j+1} \in S_{j+1}\}$ 的最优阶段决策之一是 $x_j^* =$

$$\min \left\{ d_j - p_j, d_{j+1} - p_{j+1} - p_j, \dots, d_J - \sum_{i=j}^J p_i \right\},$$

其中 S_{j+1} 是满足 $\min g(s_j)$ 有可行解的条件下, 阶段 $j+1$ 的状态变量取值集合.

证明 由 $y_j = 1$ 可知, 从状态 s_j 之后机器需要关闭并重新启动以生产产品 j , 显然 $\max\{a_j, s_j + T_r\} \leq x_j \leq d_j - p_j$. 考虑根据子优化问题, 倒推 x_j 取值的上限, 即产品 j 的最迟开始生产时间. 由 $x_J \leq d_J - p_J, x_{J-1} \leq \min\{d_{J-1} - p_{J-1}, x_J - p_{J-1}\}, \dots, x_j \leq \min\{d_j - p_j, x_{j+1} - p_j\}$, 可得

$$x_j \leq$$

$$\min \left\{ d_j - p_j, d_{j+1} - p_{j+1} - p_j, \dots, d_J - \sum_{i=j}^J p_i \right\}.$$

记 $[\underline{x}_j, \bar{x}_j] = \left[\max\{a_j, s_j\}, \min \left\{ d_j - p_j, d_{j+1} - p_{j+1} - p_j, \dots, d_J - \sum_{i=j}^J p_i \right\} \right]$, x_j 在 $[\underline{x}_j, \bar{x}_j]$ 内的取值决定了状态变量 s_{j+1} , 从而影响由 s_{j+1} 确定的子优化问题的最优解. 记由策略 $x_j = \bar{x}_j$ 决定的状态为 \bar{s}_{j+1} , 研究由 \bar{s}_{j+1} 确定的子优化问题.

考虑策略 $x'_j = \bar{x}_j - \delta, 0 < \delta < \bar{x}_j - \underline{x}_j$, 与策略 \bar{x}_j 进行比较.

情景1: 相比 \bar{s}_{j+1} , 由 x'_j 确定的状态 s'_{j+1} 不会改变机器在 $j+1$ 及以后各阶段的状态. 考虑 s_{j+1} 之后机器的3种状态: 连续生产、待机、关机.

1) 连续生产状态.

该状态下, 把阶段向后移动一个单位, 继续考虑 s_{j+2} 之后的问题, 用递归方法处理.

2) 待机状态.

由 \bar{s}_{j+1} 给定的阶段 $j+1$ 机器的待机时间要小于由 s'_{j+1} 给定的阶段 $j+1$ 机器的待机时间, 故由 \bar{s}_{j+1} 确定的子优化问题的最优值较小.

3) 关机状态.

显然由 \bar{s}_{j+1} 和 s'_{j+1} 确定的子优化问题的最优值相同.

情景2: 相比 \bar{s}_{j+1} , 由 x'_j 确定的状态 s'_{j+1} 改变了机器在 $j+1$ 及以后各阶段的状态. 不失一般性, 假设状态变化发生在阶段 $j+1$. 下面分两种情况讨论.

1) 由 s'_{j+1} 确定的问题, 阶段 $j+1$ 待机; 由 \bar{s}_{j+1} 确定的问题, 阶段 $j+1$ 连续生产. 显然待机会产生电力消耗, 故 \bar{s}_{j+1} 优于 s'_{j+1} .

2) 由 s'_{j+1} 确定的问题, 阶段 $j+1$ 关机; 由 \bar{s}_{j+1} 确定的问题, 阶段 $j+1$ 待机. 根据式(1)~(3), 在阶段 $j+1$ 关机的电力消耗大于待机的电力消耗, 故 \bar{s}_{j+1} 优于 s'_{j+1} . \square

虽然机器在时刻 s_j 可以用来生产产品 j , 但是出于节能的考虑, 选择推迟生产并关闭机器. 定理1描

述了推迟到何时开始生产产品 j 才能保证子优化问题取得最优值. 在满足交付约束的条件下, 如果机器处于关机状态, 则应尽量推迟产品 j 的生产, 压缩后面产品的生产工期, 从而减少待机时间.

定理2 (阶段决策最优性充分条件) 考虑状态 s_j 下, $\min g(s_j)$ 取得最优值的充分条件是, 在阶段 j 机器的状态选择必须遵循以下的顺序:

1) 机器如果可以连续生产 (即 $s_j = \underline{x}_j$), 则 $x_j^* = s_j$;

2) 机器如果可以关机 (即 $\bar{x}_j - s_j > T_r$), 则关闭机器, 且 $x_j^* = \bar{x}_j$;

3) 机器待机 (即 $0 < \bar{x}_j - s_j \leq T_r$), $x_j^* = \underline{x}_j$.

证明 机器状态的优先级显然成立. 根据定理1可得顺序2)的决策变量. 下面证明顺序3).

由动态规划方程的倒推公式可知

$$\min g(s_j) =$$

$$\min \{ g(s_{j+1}) + rE_I(x_j - s_j) \mid x_j \in [\underline{x}_j, \bar{x}_j] \} \geq$$

$$rE_I(\underline{x}_j - s_j) + \min \{ g(s_{j+1}) \mid s_{j+1} = \underline{x}_j + p_j \},$$

显然取得最小值的条件是 $x_j = \underline{x}_j$. \square

定理2给出了在每个阶段下子优化问题取得最优值的决策规则. 因为连续生产没有待机的电力消耗, 所以优先级最高, 关机次之. 如果满足关机的条件, 则关机显然比待机更加节能, 按照定理1, 关机后应尽量延迟下一个产品的生产. 如果只能选择待机, 则应尽早开始生产下一个产品, 可以为以后的产品调度增加灵活性. 更富裕的生产工期会增加在以后的机器调度中满足关机条件的可能性, 从而节省电力. 由此, 可以得到求解模型的精确算法如下.

Step 1: 初始化 $j = 0$.

Step 2: 根据定理1计算 \underline{x}_j 和 \bar{x}_j , 然后根据定理2确定 x_j^* .

Step 3: 判断 $j = J$ 是否成立. 如果成立, 则计算 C_{sum} , 算法结束; 否则, 令 $j = j + 1$, 并转 Step 2.

4 数值计算分析

4.1 仿真算例分析

为了验证模型和算法的有效性, 假定生产系统的参数为: 机器开机与关机的时间消耗分别为10h、2h, 电力消耗为2kWh和1kWh; 机器待机的电力消耗为0.4kW; 电碳转化系数为0.785 kg CO₂/kWh. 考虑两个仿真算例, 算例1包含3个产品的生产任务, 算例2包含5个产品. 算例的参数如表1所示, 每个算例包含两种交付情景: 在情景a中, 所有产品的交付时间均相同; 在情景b中, 产品的交付时间不同.

表 1 仿真算例的产品参数

参数	算例 1 的产品			算例 2 的产品				
	1	2	3	1	2	3	4	5
到达时间	0	40	60	0	30	50	80	150
生产时间	10	10	20	10	20	20	30	10
交付时间(情景 a)	100	100	100	200	200	200	200	200
交付时间(情景 b)	35	80	100	50	90	100	190	200

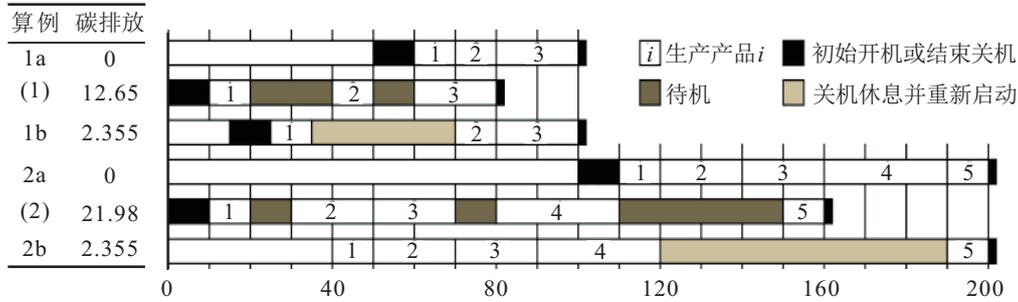


图 1 仿真算例的计算结果及甘特图

从图 1 的碳排放数值可以看出,在调度中考虑减排目标可以大幅度地减少碳排放.例如算例 1 中,情景 a 与情景 b 分别比传统调度方法减少碳排放 12.65 kg CO₂ 与 10.295 kg CO₂;算例 2 中分别减少 21.98 kg CO₂ 与 19.625 kg CO₂. 从甘特图可以看出:如果所有产品的交付时间均相同,则情景 a 下,产品的开始生产时间的调度原则是越晚越好,因为延迟生产可以使机器连续生产所有产品,保证机器的运行效率最高;在情景 b 下,可持续调度方法同样是在满足交付约束的条件下推迟产品的生产,尽量连续生产多个产品.如算例 1 的调度计划是在时刻 25 生产产品 1 然后关机休息、重启;在时刻 70 连续生产产品 2 和产品 3,机器只有一个时间段处于休息状态,时长 35. 传统调度模式下,机器有两个时间段处于待机状态,总时长为 50. 显然,与可持续调度方法相比,较长的待机时间将导致碳排放的增加.

4.2 现实企业的案例分析

本文提出的模型和算法能够应用于现实生产企业中,特别是对那些高耗能的机器调度问题.该案例来自文献[21],企业主要制造大型精密带材压制设备和加工设备,大型铸件和锻件.选取该企业的重型数控铣床作为研究对象,该机器的参数为:生产状态的电力消耗为 63.4 kW;待机状态的能源消耗为 47.6 kW;

算例的计算结果如图 1 所示.在图 1 中,算例分两种表示方法:第 1 种是数字加字母,如“1a”,表示算例 1 在情景 a 模式下,由本文提出的模型和算法计算得到的最优解;第 2 种是数字加括号,如“(1)”,用于与传统企业的调度方法进行对比分析.该算例的调度方法是:生产任务到达后尽快安排生产,机器一旦开始生产就一直运行,直到生产完最后一个产品才关机.

开机与关机的时间消耗分别为 15 min、3 min,电力消耗为 25.3 kWh 和 1.5 kWh. 案例选取一天的机器调度计划作为研究内容,包含 7 个产品的生产任务,产品的参数设置见表 2. 因为本文研究的生产系统允许产品具有不同的交付时间,所以设置交付时间为 12: 00、16: 00 和 24: 00,生产时间的单位为 min.

表 2 案例的产品参数

参数	产 品						
	1	2	3	4	5	6	7
到达时间	6:00	8:00	11:42	14:14	15:45	19:10	21:08
生产时间	50	152	135	67	216	30	127
交付时间	12:00	12:00	16:00	16:00	24:00	24:00	24:00

案例的计算结果如图 2 所示,生产计划见表 3. 本文提出的可持续调度方法比传统方法减少碳排放 139.636 kgCO₂. 从甘特图可以看出,机器连续生产完 4 个产品后,有 2 小时 25 分钟的休息时间,然后才开始连续生产最后 3 个产品.该休息时间关闭机器并重新启动排放 21.038 kgCO₂. 而传统的调度计划仅连续生产第 5、第 6 个产品,从而有 5 个时间段机器处于待机状态,因此排放了大量的 CO₂. 对比两种调度方式,推迟产品的开始生产时间,能够达到连续生产产品且减少机器待机时间的目的.从本案例可以看出,可持续调度方法对企业节能减排具有重要的效果.

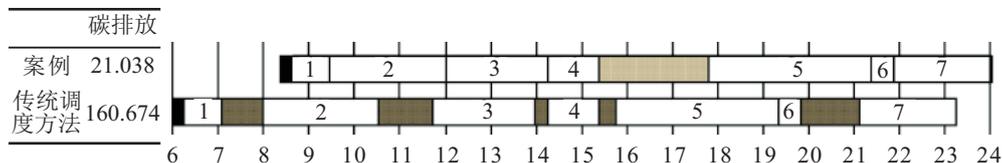


图 2 案例的计算结果及甘特图

表3 案例的可持续调度计划

计划	产 品						
	1	2	3	4	5	6	7
开始生产时间	8:38	9:28	12:00	14:15	17:47	21:23	21:53

5 结 论

绿色生产是企业发展的方向,是实现企业节能减排和社会可持续发展的重要途径.本文研究了单机器人的可持续调度问题,考虑机器在两个生产任务中间的空闲时间段,是选择保持待机状态,还是选择关闭机器休息一段时间然后重新启动,并对每个产品的开始生产时间进行决策.建立了最小化碳排放的数学规划模型并给出了一个基于动态规划的精确算法进行求解.通过两个仿真算例和一个真实的企业案例验证了模型和算法的正确性.从计算结果可以看出,可持续调度方法可为企业大大减少碳排放.

参考文献(References)

- [1] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *IEEE Trans on Automation Science & Engineering*, 2013, 10(1): 99-116.
- [2] Pusavec F, Kramar D, Krajnik P, et al. Transitioning to sustainable production, Part II: Evaluation of sustainable machining technologies[J]. *J of Cleaner Production*, 2010, 18(12): 1211-1221.
- [3] Zhang R, Chiong R, Michalewicz Z, et al. Sustainable scheduling of manufacturing and transportation systems[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 741-743.
- [4] Gahm C, Denz F, Dirr M, et al. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 744-757.
- [5] Lei D, Guo X. An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 159(1): 296-303.
- [6] Ding J, Song S, Wu C. Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 248(3): 758-771.
- [7] Kong W, Chai T, Ding J, et al. Multifurnace optimization in electric smelting plants by load scheduling and control[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 850-862.
- [8] Shrouf F, Ordieres-Meré J, García-Sánchez J, et al. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs[J]. *J of Cleaner Production*, 2014, 67(6): 197-207.
- [9] Drake R, Yildirim M B, Twomey J M, et al. Data collection framework on energy consumption in manufacturing[C]. Orlando: Institute of Industrial Engineering Research Conf. 2006.
- [10] Mouzon G, Yildirim M B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine[J]. *Int J of Sustainable Engineering*, 2008, 1(2): 105-116.
- [11] Capón-García E, Bojarski A D, España A, et al. Multiobjective optimization of multiproduct batch plants scheduling under environmental and economic concerns[J]. *AIChE J*, 2011, 57(10): 2766-2782.
- [12] Mashaei M, Lennartson B. Energy reduction in a pallet-Constrained flow shop through on-off control of idle machines[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 45-56.
- [13] Dai M, Tang D, Giret A, et al. Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(5): 418-429.
- [14] Pusavec F, Krajnik P, Kopac J. Transitioning to sustainable production, Part I: Application on machining technologies[J]. *J of Cleaner Production*, 2010, 18(2): 174-184.
- [15] 侯彬. 考虑机器开关的并行机调度研究[J]. *工业工程与管理*, 2011, 16(2): 60-64.
(Hou B. A study parallel machine scheduling with consideration of machines' power on/off[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2011, 16(2): 60-64.)
- [16] Yildirim M B, Mouzon G. Single-machine sustainable production planning to minimize total energy consumption and total completion time using a multiple objective genetic algorithm[J]. *IEEE Trans on Engineering Management*, 2012, 59(4): 585-597.
- [17] Güereca L P, Torres N, Noyola A. Carbon footprint as a basis for a cleaner research institute in Mexico[J]. *J of Cleaner Production*, 2013, 47(47): 396-403.
- [18] Zheng H, Wang L. Reduction of carbon emissions and project makespan by a Pareto-based estimation of distribution algorithm[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 164: 421-432.
- [19] 马常松,陈旭,罗振宇,等. 随机需求下考虑低碳政策规制的企业生产策略[J]. *控制与决策*, 2015, 30(6): 969-976.
(Ma C S, Chen X, Luo Z Y, et al. Production strategy of considering low carbon emission on policies regulation under stochastic demand[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(6): 969-976.)
- [20] Zhang R, Chiong R. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 112(4): 3361-3375.
- [21] Liu C, Yang J, Lian J, et al. Sustainable performance oriented operational decision-making of single machine systems with deterministic product arrival time[J]. *J of Cleaner Production*, 2014, 85: 318-330.

(责任编辑:李君玲)