

4-16-2020

Multi-objective Dynamic Programming Algorithm of Energy-efficient Scheduling for Tow-train

Xinyan Zhang

1. *Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Yuqing Zhou

2. *Tongji University, Shanghai 201804, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-objective Dynamic Programming Algorithm of Energy-efficient Scheduling for Tow-train

Abstract

Abstract: To balance the performance and energy consumption of the mixed-model assembly lines effectively, a multi-objective energy-saving scheduling method for the tow-train is proposed. *The energy-saving objective is introduced* into the traditional material handling scheduling model for the tow-train and a multi-objective mixed integer programming model is constructed with two objective functions of minimizing the maximum line-side inventory and the total energy consumption. *A forwards multi-objective dynamic programming based on the time window and dominance rules is presented* to obtain the Pareto solutions: the definition for new states is given to obtain the Markov property, the time window and dominance rules are introduced through reducing the searching of non-dominated solution to improve the computational efficiency, running time can be reduced by 8.10%. The outperformance of the proposed method and the feasibility of the algorithm are verified by the simulation results.

Keywords

tow-train, dynamic programming, material handling scheduling, multiple objective, energy

Recommended Citation

Zhang Xinyan, Zhou Yuqing. Multi-objective Dynamic Programming Algorithm of Energy-efficient Scheduling for Tow-train[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 612-619.

多载量小车节能调度的多目标动态规划算法

张新艳¹, 周雨晴²

(1. 同济大学, 上海 201804; 2. 同济大学, 上海 201804)

摘要: 为有效平衡混流装配的生产效率与能耗, 提出多目标多载量小车物料搬运节能调度方法, 将能耗目标约束引入传统多载小车物料搬运调度模型, 建立最小化最大线边库存与总能耗的多目标混合整数规划模型。为获得问题模型的 Pareto 解, 提出基于时间窗与支配规则的正向多目标动态规划算法: 根据问题性质, 定义了多载量小车节能调度问题新的状态表示方式以获得动态规划算法的无后效性, 同时引入时间窗与支配规则以减少对非支配解的搜索, 有效提高了计算效率, 运行时间缩短 8.10% 以上, 仿真结果验证了该方法的优越性和算法的可行性。

关键词: 多载小车; 动态规划; 物料搬运调度; 多目标; 能耗

中图分类号: T-9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 04-0612-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0468

Multi-objective Dynamic Programming Algorithm of Energy-efficient Scheduling for Tow-train

Zhang Xinyan¹, Zhou Yuqing²

(1. Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To balance the performance and energy consumption of the mixed-model assembly lines effectively, a multi-objective energy-saving scheduling method for the tow-train is proposed. *The energy-saving objective is introduced* into the traditional material handling scheduling model for the tow-train and a multi-objective mixed integer programming model is constructed with two objective functions of minimizing the maximum line-side inventory and the total energy consumption. *A forwards multi-objective dynamic programming based on the time window and dominance rules is presented* to obtain the Pareto solutions: the definition for new states is given to obtain the Markov property, the time window and dominance rules are introduced through reducing the searching of non-dominated solution to improve the computational efficiency, running time can be reduced by 8.10%. The outperformance of the proposed method and the feasibility of the algorithm are verified by the simulation results.

Keywords: tow-train; dynamic programming; material handling scheduling; multiple objective; energy

引言

Boysen 等^[1]2012 年提出了准时制混流装配线的多载量小车物料搬运调度问题, 一直以来受到国

内外学者的重视。Boysen 等^[1]提出了库存超市系统的装配线准时制小批量零部件配送问题, 对小车路径规划与装载问题分别建立了动态规划模型。为进一步研究装载对调度的影响, Boysen 等^[2]提出了带有小车有限容量与避免物料线边库存量为目标, 建立混合整数规划模型并提出了精确多项式时间求解算法。在 Boysen 等的研究基础上, Emde 等^[3]证明了多载量调度问题属于 NP-hard 问题并针对



收稿日期: 2018-07-08

修回日期: 2018-12-05;

作者简介: 张新艳(1972-), 女, 江西九江, 博士, 讲师, 硕导, 研究方向为物流系统规划与设计; 周雨晴(1994-), 女, 湖南岳阳, 硕士, 研究方向为物流系统规划与设计。

<http://www.china-simulation.com>

大规模问题提出了启发式分解算法以获得近似最优解。随后, 彭涛等^[4]给出了准时化顺序供应的混流装配生产线物料补给问题的性质分析, 并将该问题转化为求解最优料箱配送序列的组合优化问题, 在此基础上, 构建反向动态规划求解算法以获得该问题的最优解, 并证明该算法具有指数级别的时间复杂度。胡理嫚等^[5]提出了基于看板模型的多封闭循环路径多载量小车物料配送调度方法——配线物料配送调度的拉格朗日松弛算法。徐炜达等^[6]研究了混流装配线平衡问题, 对混流装配线进行详细描述并建立任务超载时间最小模型, 设计混合遗传算法进行求解。董巧英等^[7]研究了混流装配线的多目标排序问题, 采用改进离散微粒群算法有效优化了排序问题的求解。

以上研究可以看出对于物料搬运调度的研究已较为深入, 在各种启发式算法的基础上还涌现出该问题的一些扩展形式, 但在绝大部分的研究中, 没有考虑多载量小车能耗这一因素。即使考虑到能耗问题也大部分针对传统装配线、单元制造和柔性制造系统。本文针对混流装配线的物料搬运调度问题, 为有效平衡生产效率与能耗, 将能耗目标约束引入传统多载量小车物料搬运调度模型, 建立了最小化最大线边库存与总能耗的多目标混合整数规划模型, 并通过基于时间窗与支配规则的正向多目标动态规划算法求解该模型, 以获得问题模型的 Pareto 解。

1 问题描述

图 1 为混流装配线的多载量小车库存超市物料搬运系统示意图。电动多载量小车负责将多种料箱从库存超市搬运到装配线。混流装配线上每一段工位的零部件搬运任务均由对应的单辆多载量小车负责。首先, 多载量小车到达装载区域装载此次搬运零部件, 然后以最佳的搬运速度依次补给零部件需求工位, 完成当前任务后沿固定路径返回装载区。在多载量小车节能调度问题中, 需决策每次搬运配送的搬运开始时间与搬运行进速度。

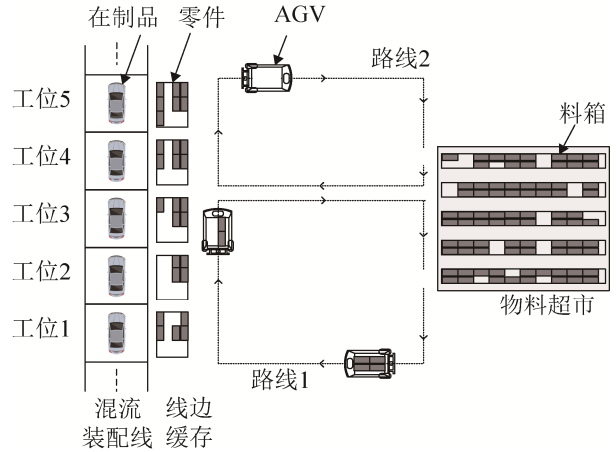


图 1 混流装配线多载量小车物料搬运系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of tow-train material handling system for mixed-model assembly line

问题假设如下:

- (1) 由于生产顺序确定, 各工位零部件消耗与物料箱需求已知;
- (2) 多载量小车第一次到达工位前消耗的零部件量等于初始库存量;
- (3) 多载量小车均沿固定路径单向行驶搬运;
- (4) 小车装卸时间极短, 因此不予以考虑;
- (5) 基本时间单位为生产节拍。

符号与变量定义如表 1。

约束条件:

$$f_1(\pi) = \begin{cases} \max_{\substack{w=1, \dots, |W|; \\ c'=1, \dots, |C|}} \left\{ \sum_{c=0}^{c'} u_w \cdot \left(\sum_{t=\lfloor T_{cw} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(c+1)w} \rfloor} d_{wt} \right) - \sum_{c=0}^{c'} \sum_{t=\lfloor T_{c-1,w} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{cw} \rfloor} p_{wt} \right\}, & \text{if } c \geq 1, \quad \forall t \in T \quad (1) \\ \max_{\substack{w=1, \dots, |W|; \\ c'=1, \dots, |C|}} \left\{ \sum_{c=0}^{c'} u_w \cdot \left(\sum_{t=\lfloor T_{cw} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(c+1)w} \rfloor} d_{wt} \right) \right\}, & \text{if } c = 0, \end{cases}$$

$$f_2(\pi) = \sum_{c=1}^{|C|} (\xi_c^t + \xi_c^i + \xi_c^a), \forall c \in C \quad (2)$$

$$T_{cw} = \begin{cases} 0, & \text{if } c = 0, \\ T_c + \frac{\varepsilon_c}{a} + \frac{(w-1) \cdot d_w + d_v}{\varepsilon_c} - \frac{\varepsilon_c^2}{2a^2}, & \text{if } c \geq 1, \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (3)$$

表 1 符号与变量的定义
Tab. 1 Definition of symbols and variables

符号	含义	单位
W	工位段, $w=1, \dots, W $	-
T	生产周期集合 $t=1, \dots, T $	-
C	搬运集合, $c=1, \dots, C $	-
d_{wt}	不同节拍点不同工位需求的零部件箱数	unit
T_{cw}	每次搬运实际到达各个工位的时刻	-
p_{wt}	不同节拍点不同工位需求的零部件数量	unit
u_w	不同零部件种类物料箱容量	unit
d_w	相邻工位之间的水平距离	m
d_v	装载区域与装配线之间的距离	m
d_{wc}	固定路径总长度	m
ξ_c^r	克服滚动阻力所需能耗	kJ
ξ_c^i	克服惯性阻力所需能耗	kJ
ξ_c^a	克服空气阻力所需能耗	kJ
C_a	多载量小车最大装载量	(箱数)
η	多载量小车机械动力效率	-
m	多载量小车质量	kg
ω_w	不同单个零部件质量	kg
ρ	空气质量密度	kg/m ³
A_f	多载量小车前端面积	m ²
u_a	空气阻力系数	-
g	重力加速度	m/s ²
u_0	滚动阻力系数	-
ε_{\min}	最小搬运配送速度	m/s
ε_{\max}	最大搬运配送速度	m/s
a	加速度	m/s ²
T_c	决策变量, 每次搬运配送开始时间	-
ε_c	决策变量, 每次搬运配送最佳速度	m/s
S	解空间大小	-
I	算法复杂度	-

注: $|W|, |T|, |C|$ 表示为 W, T, C 的模长。

多载量小车节能调度模型如下:

目标函数: minimize $f(\pi) = \{f_1(\pi), f_2(\pi)\}$

优化变量: T_c, ε_c

$$T_c - T_{c-1} \geq 1, \forall c \in C \quad (4)$$

$$\varepsilon_c \geq \min$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_c^2 \left| \frac{\varepsilon_c^2}{a} - \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{a} + (T_{c+1} - T_c) \right) \cdot \varepsilon_c' + \right. \\ \left. \frac{\varepsilon_{\min}^2}{2a} + d_{wc} = 0 \right\}, \forall c \in C \quad (5)$$

$$\xi_c^r = \left((m + \sum_{w=1}^{|W|} \omega_w u_w \sum_{t=\lfloor T_{cw} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(c+1)w} \rfloor} d_{wt}) g \cdot \mu_0 \cdot d_{wc} + \frac{1}{2} \cdot \right.$$

$$\left. \rho \cdot \varepsilon_c^2 \cdot (d_{wc} - \frac{2\varepsilon_{\min}^2}{2a}) \right) / \eta, \forall c \in C \quad (6)$$

$$\xi_c^i = \int_{t_c}^{t_c + v_c/a} \frac{a \cdot \varepsilon_c(t)}{\eta} \times$$

$$\left(m + \sum_{w=1}^{|W|} \omega_w u_w \sum_{t=\lfloor T_{cw} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(c+1)w} \rfloor} d_{wt} \right) d(t), \forall c \in C \quad (7)$$

$$\xi_c^a = \int_{t_c}^{t_c + v_c/a} \frac{\varepsilon_c(t)}{2\eta} \rho \cdot \varepsilon_c^2(t) d(t), \forall c \in C \quad (8)$$

$$T_c = \text{integer}, \forall c \in C \quad (9)$$

$$\varepsilon_c \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}], \forall c \in C \quad (10)$$

公式(1)表示工位最大的线边库存量计算公式, 为当前搬运到达零部件个数与零部件消耗个数差值。公式(2)为总能耗计算公式。公式(3)计算每次搬运配送实际到达各工位际时间。公式(4)保证了多载量小车按时间顺序依次执行各个搬运配送任务。公式(5)表示每次搬运配送的零部件箱数小于或等于多载量小车载量容量。公式(6)~(8)分别为克服滚动、惯性与空气阻力的能耗计算公式。公式(9)表示变量 T_c 为整数变量。公式(10)表示 ε_c 为在区间 $[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$ 的离散变量。

2 基于时间窗与支配规则的多目标正向动态规划算法

多目标动态规划算法(Multi-objective dynamic algorithm, MDA)需要计算每个状态节点对应的所有 Pareto 解并存储, 包括计算走向支配解的路径所有的状态节点, 降低了算法的求解效率且增大了所需的存储空间。针对这一问题, 提出基于时间窗与支配规则的多目标动态规划算法(Multi-objective dynamic algorithm based on time window and dominance rules, MDATWDR)。

2.1 多目标正向动态规划模型

物料搬运调度问题需确定搬运次数与每次搬运到达第一个工位的节拍时间。在每次搬运过程中,

电动多载量小车将 $[T_c + 1, T_{c+1}]$ 时间内工位所需的零部件按箱在 T_c 时间搬运至第一个工位, 当前搬运允许的最长时间长度为当前搬运到达第一个工位的时间与上次到达时间的间隔 $(T_c - T_{c-1})$, 即第 c 次搬运与前一次搬运有关, 因此不满足动态规划的无后效性。为满足动态规划算法的无后效性条件, 多载量小车节能调度问题的正向动态规划模型如下。

决策阶段 $r \in \{1, 2, \dots, R\}$, $R = \lfloor T \rfloor / \Delta T + 2$, 对应状态变量 T_r , 决策变量 x_r 。 r 阶段下的状态 ΔT 表示第一次搬运开始时间, $T_r \in \{1, 2, \dots, \lfloor T \rfloor\}$ 表示到达第一个工位的时间, T_{r+1} 为第 $r+1$ 阶段与第 r 阶段 T_r 对应的状态, 表示 $[T_r, T_{r+1}]$ 时间内需求的零部件搬运到达第一个工位的时间为 T_r ; $[T_{r-1}, T_r]$ 为这次搬运允许的时间长度。第 $r=1$ 与 $r=R$ 阶段的状态分别为 $T_1 = 1 - \Delta T$ 与 $\lfloor T \rfloor$, T_1 表示初始线边库存对应的虚拟搬运到达时间。

状态转移方程为:

$$T_r \in \{T_r \mid T_{r+1} - T_r \geq \Delta T \& \sum_{i=1}^I \sum_{t=[T_r]+1}^{\lfloor T_{r+1,i} \rfloor} d_{it} \leq C_{agv}\} \quad (11)$$

阶段指标函数 $\psi^r = (\psi_1^r, \psi_2^r)$, ψ_1, ψ_2 分别为最大线边库存、能耗的阶段指标函数:

$$\psi_1^r = \begin{cases} \max_{i=1, \dots, I} \left\{ v_i \cdot \left(\sum_{t=1}^{\lfloor T_{r+1,i} \rfloor} d_{it} \right) \right\}, & r=1 \\ \max_{i=1, \dots, I} \left\{ v_i \cdot \left(\sum_{t=1}^{\lfloor T_{r+1,i} \rfloor} d_{it} \right) - \sum_{t=1}^{\lfloor T_r \rfloor} p_{it} \right\}, & r \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

已知原多目标问题存在后效性, 第 r 阶段的能耗阶段指标函数 ψ_2^r 受前阶段决策形成的前一次搬运影响, 即 ψ_2^r 是关于前阶段决策 x_{r-1} 与 x_r 的函数:

$$\psi_2^r = \begin{cases} 0, & r=1 \\ -\frac{3}{8} \cdot \frac{\rho A_f u_a}{\eta_1 \eta_2 a} \cdot \varepsilon(x_r, x_{r-1})^4 + \left(\frac{\rho_{air} A_f u_a}{4 \eta_1 \eta_2 a} \varepsilon_{\min}^2 + \frac{m + \rho_{air} A_f u_a \cdot ds}{2 \eta_1 \eta_2} \right) \cdot \varepsilon(x_r, x_{r-1})^2 + m g u \cdot d_w, & r \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: 由于 ψ_1^1 表示的初始库存实际上没有搬运, 所以对应的阶段能耗指标函数为 0; $\varepsilon(x_r, x_{r-1})$ 为:

$$\varepsilon(x_r, x_{r-1}) = \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{a} + x_r - x_{r-1} \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{\varepsilon_{\min}}{a} + T_r - T_{r-1} \right)^2 - \frac{4}{a} \left(\frac{\varepsilon_{\min}^2}{2a} + d_w \right) \right)} \quad (14)$$

为消除后效性, 若 $r-1$ 阶段下, $|x_{r-1}| = K$, 则 r 阶段中转移到 x_{r-1} 的 x_r 状态重复 K 次并分别与 x_{r-1}, T_{r+1} 连接, 从而保证当前决策不受前面的决策影响, 各阶段独立。

动态规划必须递推到最后阶段得到最优决策, 因此对于状态 $T_r = \lfloor T \rfloor$ 的 $r < R$ 阶段, 只由 $T_{r+1} = T_r$ 的状态转移得到状态 $T_r = \lfloor T \rfloor$, 虽不满足状态转移公式但是保证了递推的连续性且不影响决策结果, T_{r+1} 称为虚拟状态。对应的阶段指标函数变为:

$$\psi^r = (\psi_1^r, \psi_2^r) = (0, 0) \quad (15)$$

根据阶段指标函数, 最优指标函数为:

$$G_r(T_{r+1}) = \{G_1^r(T_{r+1}), G_2^r(T_{r+1})\} = \begin{cases} \min \{ \max \{ \psi_1^r(x_r), G_1^{r-1}(T_r) \} \}, \\ \min \{ \psi_2^r(x_r) + G_2^{r-1}(T_r) \} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $G_1^0 = 0, G_2^0 = 0$; $G_1^r(T_{r+1}), G_2^r(T_{r+1})$ 为当前决策对应的最优函数值, 为 Pareto 解值。

2.2 时间窗与支配规则

由正向动态规划算法的状态转移公式知, 第 r 阶段的状态 T_r 是由当前决策变量 x_r 与第 $r+1$ 阶段的状态 T_{r+1} 决定。根据性质 1, 第 r 阶段的决策量 x_r 与第 $r+1$ 阶段的状态 T_{r+1} 必须满足:

$$T_{r+1} - x_r \leq UT \quad (17)$$

第 r 阶段的决策 $x_r \in [T_{r+1} - UT, T_{r+1} - \Delta T]$, UT 与 ΔT 为硬时间窗。通过时间窗, 对不满足约束的状态直接不进行转移, 从而节省了状态转移计算时间。

多目标动态规划算法中, 每个阶段(从第二阶段起)的阶段指标函数中的能耗阶段指标函数值大于或等于 0, 每个阶段的能耗过程指标函数值均大于或等于前一个阶段的能耗过程指标函数, 因此, 随着动态规划算法不断往后递推, 能耗过程指标函数值随着阶段数的增加而增加(除阶段中 $T_r = \lfloor T \rfloor$ 状态, 因其阶段指标函数为零)。原多目标动态规划

算法中, 对于存在 $T_r=|T|$ 状态的阶段 $\{r, r+1, r+2, \dots, R\}$, $r+1$ 阶段 $T_r=|T|$ 状态对应的最优指标函数 $G_r(T_{r+1}=|T|)=\{G_1^r(T_{r+1}=|T|), G_2^r(T_{r+1}=|T|)\}$, 取出其中的 Pareto 非支配解 $G_r(T_{r+1}=|T|)^*=\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*, G_2^r(T_{r+1}=|T|)^*\}$ 是最终决策结果的 Pareto 解集中的 n 组解的函数值 ($n \geq 1$), 即此时 $\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*, G_2^r(T_{r+1}=|T|)^*\}=\{f_1^*, f_2^*\}$, 同时到达该状态节点的路径构成了 n 组完整解, 到达 $T_r < |T|$ 的状态节点构成部分解。对于 $T_r < |T|$ 的状态, 由于随着阶段数增多最优能耗指标函数 $G_2^r(T_{r+1})$ 递增且每个阶段 $\psi_2^r(x_r) \leq |G_2^r(T_{r+1}) - G_2^r(T_{r+1})|$, 所以阶段 $r+1$ 中任意一个能耗最优指标函数 $G_2^{r+1}(T_{r+2})$ 均大于前阶段 r 中所有的能耗最优指标函数 $G_2^{r+1}(T_{r+1})$, 必然有 $G_2^r(T_{r+1}=|T|)^* \leq G_2^r(T_{r+1})$, 因此为保证在后续阶段构成完整解的状态 $T_{r+1}=|T|$ 对应的解满足非支配关系, $r+1$ 阶段对应的最优最大库存指标函数值 $G_1^{r+1}(T_{r+2})$ 必须满足:

$$\min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\} > G_1^{r+1}(T_{r+2}) \quad (18)$$

则 r 阶段中, 如果存在 $T_r < |T|$ 的状态 T'_r 对应的最大库存最优指标函数值: $G_1^r(T'_r) \geq \min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\}$, 根据最优最大库存指标函数定义有: $G_1^{r+1}(T_{r+2}) \geq G_1^r(T_{r+1})$, 所以 $G_1^{r+1}(T'_r) \geq \min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\}$; 所以违反条件 $\min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\} > G_1^{r+1}(T_{r+2})$, 即由该状态节点分支向后递推获取的解, 一定不是非支配解。

因此, 根据上述推证, 将在 r 阶段中最大库存最优指标函数值 $G_1^r(T'_r) \geq \min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\}$ 对应的 $T_r < |T|$ 的状态分支剪除, 能够避免对所有组成支配解的状态节点计算, 甚至降低一定的状态维度, 进而可提高计算效率与减少占用的存储空间。由于该剪枝方法依赖支配关系构成, 故称之为支配规则。

由于算法在寻求非支配解的过程是沿 Pareto 前沿以目标函数 f_2 递增的方向搜索所有有效解, 因此最终求解得的解为所有的 Pareto 解。

2.3 基于时间窗与支配规则的多目标动态规划计算步骤

引入时间窗与支配规则的多目标动态规划算法计算步骤如下:

step 1: 令 $r=1, G_1^0=0, G_2^0=0$, 外部存档 $R=\emptyset$;

step 2: 在 r 阶段, 决策变量 x_r 满足 $T_{r+1} - x_r \leq Ub_{r+1,r}$ 计算 $G_r(T_{r+1})$; 否则不计算;

step 3: 重复 step 2 直至完成 r 阶段的所有的决策判定计算;

step 4: 检查 r 阶段中是否存在 $T_r=|T|$ 的状态, 如果存在, 将 r 阶段中 $T_r=|T|$ 状态对应的最优指标函数值中的非支配解存入外部存档 R 并在 r 阶段中删除该状态; 否则重复 step 2 与 step 3;

step 5: 将在 r 阶段中最大库存最优指标函数值 $G_1^r(T_{r+1}) \geq \min\{G_1^r(T_{r+1}=|T|)^*\}$ 对应的 $T_r < |T|$ 的状态分支剪除并删除该状态;

step 6: 检查阶段 r 下剩余状态个数 k , 如果 $k > 0$, $r \leftarrow r+1$, 返回 step 2; 如果 $k=0$, 终止计算, 输出外部存档 R 中的所有解。

具体流程图如图 2 所示。

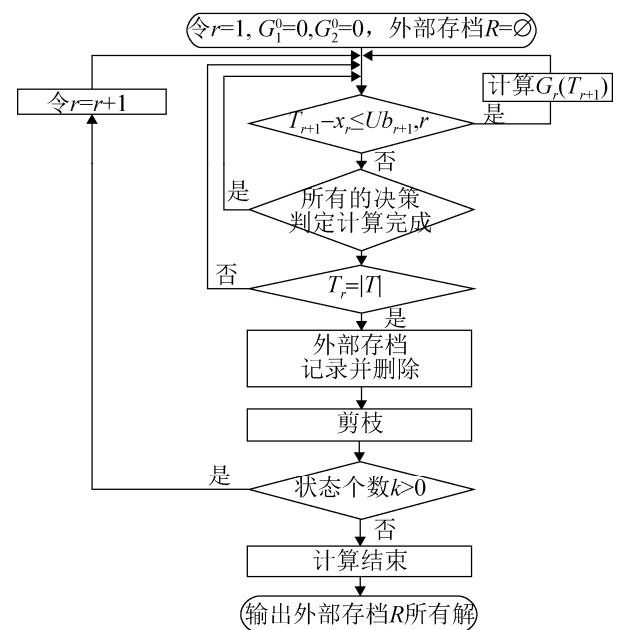


图 2 引入时间窗与支配规则的多目标动态规划算法流程图
Fig. 2 Flow chart of multi-objective dynamic programming based on time window and dominance rules

2.4 复杂度分析

原始问题的解空间大小:

$$S = O((|T|-1)!) \quad (19)$$

式中: 令 $h_r = |T_r|$, $\mu = (|T|/\Delta T + 2)$, 表示阶段 r 下的状态个数与阶段数, MDATWDR 复杂度为:

$$I = O((\mu-1) \cdot \sum_{r=2}^{\mu-1} h_r \cdot \sum_{r=1}^{\mu} h_r + h_{\mu}(h_{\mu}+1)/2) \quad (20)$$

3 实验及分析

为研究多目标多载量小车物料搬运调度问题的影响因素与验证提出的基于时间窗与支配规则的动态规划算法的有效性, 作以下仿真分析。

3.1 影响因素分析

令问题规模 $|T|=50, C_{avg}=12$, 考虑小车服务工位数对 f_1, f_2 的影响, 选取 $|W| \in \{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, 结果如图 2 所示; 令 $C_{avg} \in \{2, 4, 6, 8, 10\}$, 问题规模 $|T|=50, |W|=3$, 不同装载容量下的调度结果由图 3 给出。由图 3 与图 4 可知, (1) 小车服务的工位数量越多或是装载容量越小, 保持相同 f_1 所需的能耗越大且可供选择的调度方案越少; 反之, 更容易获得 f_2 能耗较低的方案; (2) 小车装载容量不影响最小的最大线边库存量, 说明 f_1 主要受服务工位数量影响; (3) $|W|=8$ 与 $C_a=2$ 时调度问题均无解, 说明 $|W|$ 与 C_a 其装载容量存在匹配关系, 说明工厂管理人员在考虑小车路径与容量选择时需保证调度可行性。图 3 与图 4 验证了搬运能耗随着路径的增长而增长, 并随着小车装载量的增大其最小能耗值越小。

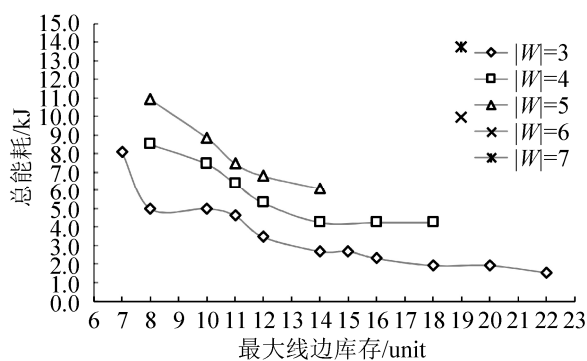


图 3 小车服务的工位数对调度的影响

Fig. 3 Influence from length of workstations served by tow-train on scheduling

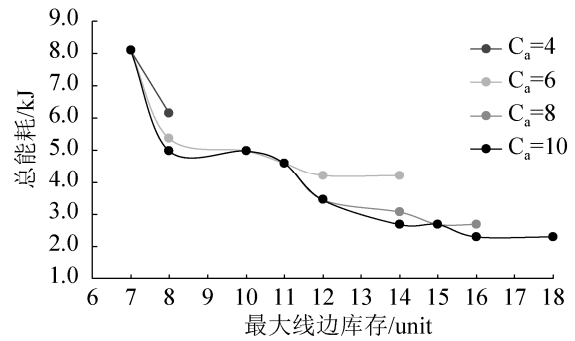


图 4 小车装载量对调度的影响

Fig. 4 Influence from loading capacity of tow-train on scheduling

令问题规模 $|T|=\{50, 100, 500\}$, $C_{avg}=6$, $|W|=3$, 图 5 给出了不同问题规模下恒定搬运速度与变动搬运速度的优化结果。从图 5 可知, (1) 相同最小化最大线边库存下, 恒定速度调度结果消耗的搬运能耗始终高于变速调度方法; (2) 恒定速度调度获取的调度方案比变动速度获取的调度方案少, 是因为变速搬运方法考虑了速度变动对能耗与调度的影响, 体现在最终求解所获调度方案的差异性上; (3) 2 种调度方式能耗上差距不是很大, 说明小车的能耗中滚动阻力能耗占据较大部分, 2 种调度方法的差异在于惯性阻力能耗不同。因此, 在固定搬运路径下, 多载量小车变速搬运方法优于传统的搬运方法。

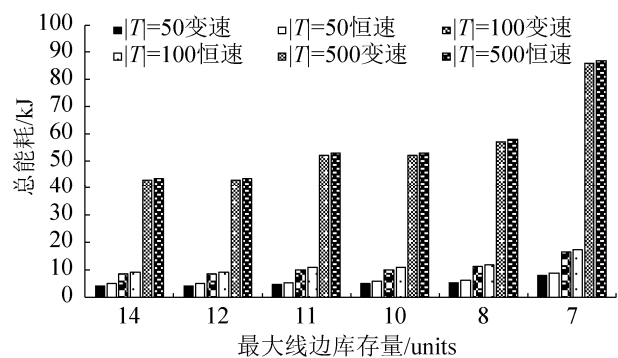


图 5 生产周期对调度的影响

Fig. 5 Influence from length of production period on scheduling

3.2 算法对比分析

考虑能耗的情况下, 以最大生产周期为 700 节拍, 最小生产周期分别为 490, 560, 630 节拍为

例,改进前的动态规划算法程序运行时间分别为 1 064.70 s, 907.89 s, 987.45 s, 引入时间窗与支配规则以减少对非支配解的搜索后,改进后算法程序的运行时间分别为 978.25 s, 735.82 s, 732.54 s, 程序运行时间分别降低 8.10%, 18.90%, 25.80%。如图 6 所示,算法改进后 3 种算例下的程序运行时间明显下降,改进后的算法相对改进前的算法在运行时间上减少了 8.10%以上。

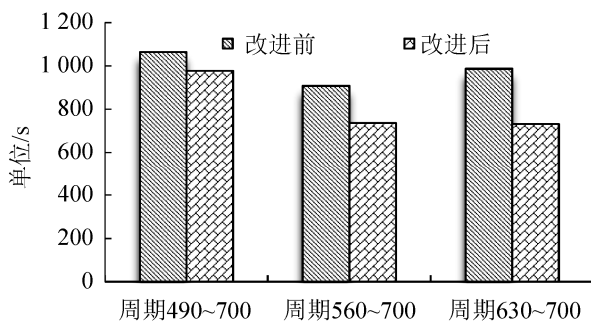


图 6 不同生产周期下算法改进前后程序的运行速度
Fig. 6 Speed of algorithm before and after improvement under different production cycles

不考虑能耗的情况下,以最大生产周期为 700 节拍,最小生产周期分别为 490, 560, 630 节拍为例,改进前的动态规划算法程序运行时间分别为 971.20 s, 996.48 s, 922.70 s, 改进后算法程序的运行时间分别为 536.12 s, 505.80 s, 547.43 s, 如图 7,算法改进后 3 种算例下的程序运行时间明显下降,且比考虑能耗的情况下降幅度更大。考虑能耗与不考虑能耗两种情况下的对比,均表明了改进后动态规划算法的有效性。

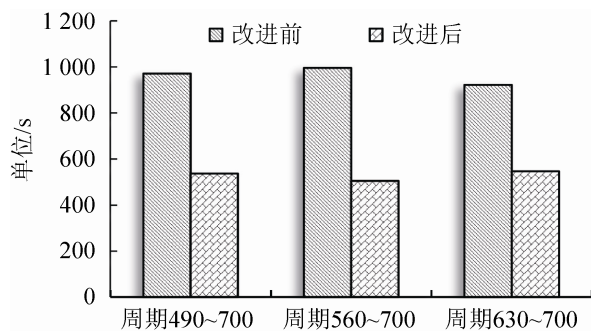


图 7 不同生产周期下算法改进前后程序的运行速度
Fig. 7 Speed of algorithm before and after improvement under different production cycles

3.3 算法敏感性分析

为有效刻画参数 $C_a, |T|, |W|$ 对算法运行效率的影响,选取敏感度系数指标评价 MDATWDR 算法对 3 个参数的敏感性。算法 CPU 运行时间可以表示为关于所有参数 $p_i, i=1,2,\dots,n$ 的函数 $CPU = f(p_1, p_2, \dots, p_n)$, 则敏感度系数计算如下:

$$\text{敏感度系数} = \left| \frac{\partial CPU_i}{\partial p_i} \cdot \frac{CPU_i}{p_i} \right| \times 100\% \quad (21)$$

式中: p_i 为参数集合 $\{C_a, |T|, |W|\}$ 中的第 i 个参数, $n=3$ 。敏感度系数越大对算法影响越大,计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,生产时长 $|T|$ 对中大规模问题计算影响大于对小规模的影响;不同问题规模下,多载量小车装载量 C_a 为 MDATWDR 算法的敏感因素,是因为 C_a 越大,动态规划算法中每个阶段(除 $r=1, R$)的状态由于该约束的放松而增多 M_r 个,需计算状态节点总数为 $\prod_{r=2}^{R-1} (M_r + T_r)$, 从而单位装载量变化引起状态节点数增长急剧。

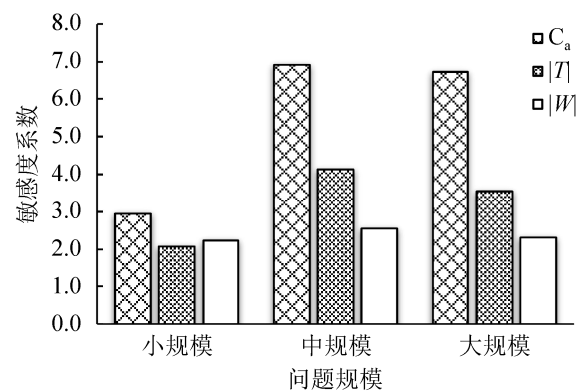


图 8 MDATWDR 算法对参数的敏感度
Fig. 8 Sensitivity of MDATWDR to parameters

4 结论

将能耗目标约束引入传统多载小车物料搬运调度模型,建立了最小化最大线边库存与总能耗的多目标混合整数规划模型。为获得问题模型的 Pareto 解,提出了基于时间窗与支配规则的正向多目标动态规划算法,结论如下:

(1) 对混流装配线物料搬运能耗问题,提出了多载量小车变速物料搬运节能调度方法,在保证线

边库存波动最小情况下最小化了搬运对环境的影响。通过分析比较可知, 变速搬运调度方法较已有文献的恒速搬运方式更加节能, 且为管理者平衡经济与环境关系提供了多种物料搬运节能方案。

(2) 在不同生产周期下, 基于时间窗和支配规则的多目标动态规划算法的运行时间相对于改进前的算法明显下降。

(3) 仿真实验表明, 改进算法对小车装载量敏感, 验证了解个数与算法求解时间与可行解空间呈正向关系。

由于动态规划算法在混流装配线物料搬运大规模问题求解中有空间溢出问题, 因此对大规模问题可进一步考虑新的调度方法, 如人工智能算法。

参考文献:

- [1] Emde S, Boysen N. Optimally Routing and Scheduling Tow Trains for JIT-supply of Mixed-model Assembly Lines[J]. *European Journal of Operational Research*, (S0377-2217), 2012, 217(2): 287-299.
- [2] Emde S, Fliedner M, Boysen N. Optimally Loading Tow Trains for Just-in-time Supply of Mixed-model Assembly Lines[J]. *IIE Transactions (S0740-817X)*, 2012, 44(2): 121-135.
- [3] Emde S, Gendreau M. Scheduling In-house Transport Vehicles to Feed Parts to Automotive Assembly Lines[J]. *European Journal of Operational Research (S0377-2217)*, 2017, 260(1): 255-267.
- [4] 周炳海, 彭涛. 混流装配生产线准时化物料补给调度方法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(6): 976-982.
Zhou Binghai, Peng Tao. Scheduling Methods of Just-in-time Material Replenishment in Mixed-model Assembly Lines[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(6): 976-982.
- [5] 周炳海, 胡理嫚. 装配线物料搬运的拉格朗日松弛算法[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(4): 491-498.
Zhou Binghai, Hu Liman. Lagrangian Relaxation Algorithm for Material Handling Problems of Assembly Lines[J]. *Control Theory and Application*, 2017, 34(4): 491-498.
- [6] 徐炜达, 肖田元. 可跨工位操作的随机混流装配线平衡问题研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(18): 5896-5910.
Xu Weida, Xiao Tianyuan. Modeling and Simulation of Stochastic Assembly Line Balancing Problem with Drifting Operations[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(18): 5896-5910.
- [7] 董巧英, 阚树林, 桂元坤, 等. 基于改进离散微粒群优化算法的混流装配线多目标排序[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(22): 7103-7108.
Dong Qiaoying, Kan Shulin, Gui Yuankun, et al. Mixed Model Assembly Line Multi-objective Sequencing Based on Modified Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(22): 7103-7108.