

基于动态规划的装配线物料搬运节能调度方法

胡理嫚¹, 李志伟¹, 刘雪垠¹, 陈鹏²

(1. 四川省机械研究设计院, 成都 610063; 2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要 为有效提升混流装配线的生产效率与环境效益, 提出了装配线多载量小车物料搬运节能调度方法. 以最小化最大线边库存与总能耗为目标, 建立了多目标混合整数规划模型. 通过问题性质分析, 将混合优化问题转为离散优化问题, 降低了模型复杂度. 针对动态规划算法维数灾问题, 提出了基于剪枝规则的多目标规划算法: 通过剪枝规则删除被支配状态, 缩减搜索空间以提高计算效率. 其中, 为满足动态规划的马尔可夫性, 定义了新的状态表示方式. 最后, 仿真实验验证了所提出的调度方法的优越性与算法的有效性.

关键词 调度; 能源; 物料搬运; 动态规划; 混流装配线

Dynamic programming-based energy-saving scheduling for material handling in assembly lines

HU Liman¹, LI Zhiwei¹, LIU Xueyin¹, CHEN Peng²

(1. Sichuan Provincial Machinery Research & Design Institute, Chengdu 610063, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract To effectively improve the performance and promote the environmental benefit of mixed-model assembly lines, an energy-saving scheduling method for the tow-train material handling in assembly lines is proposed in this paper. First of all, a multi-objective mixed integer programming model is constructed with two objective functions which aim to jointly minimize the maximum line-side inventory and the total energy consumption of the tow-train material handling in assembly lines. Subsequently, several problem properties are analyzed to convert this composite optimization problem to the discrete optimization one, simplifying the proposed multi-objective mixed integer programming model. Then, to overcome the dimension disaster of dynamic programming in solving the model, a multi-objective dynamic programming algorithm based on prune rules is presented. Due to the utilization of prune rules, the proposed algorithm is able to directly delete the dominated states and reduces the searching space in a relatively large degree, which leads to a great improvement in the computational efficiency performance. In addition, a new definition for each state during solving processes is provided to obtain Markov property, the premise requirement of using the dynamic programming algorithm. Finally, the outperformance of the energy-saving scheduling method and the effectiveness of the prune-rules-based algorithm are verified by the simulation results.

Keywords scheduling; energy; material handling; dynamic programming; mixed-model assembly line

1 引言

受能源价格高涨与大多数资源的不可再生性影响, 节能减排成为制造行业的关注热点^[1-4]. 其中, 物料搬运系统作为制造系统中的一个重要组成部分, 其能源消耗与搬运效率平衡成为了企业面临的一大新的挑战. 物料搬运系统能源降耗可有效降低企业制造运作成本, 碳排放与影响生产效率^[5-7], 因此研究混流装配准时化物料搬运能耗问题具有理论意义与实用价值.

收稿日期: 2017-11-29

作者简介: 胡理嫚(1993-), 女, 浙江温州人, 研究助理, 研究方向: 物料搬运系统, 建模仿真, E-mail: limannei@163.com.

中文引用格式: 胡理嫚, 李志伟, 刘雪垠, 等. 基于动态规划的装配线物料搬运节能调度方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(9): 2424-2433.

英文引用格式: Hu L M, Li Z W, Liu X Y, et al. Dynamic programming-based energy-saving scheduling for material handling in assembly lines[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(9): 2424-2433.

近几年, 混流装配线多载量小车物料搬运调度问题引起了国内外学者的重视. 例如, Emde 与 Boysen 等^[8]研究了汽车装配线的零部件准时化配送问题, 以最小化线边库存与小车投资总成本为目标, 建立了动态规划模型, 并采用嵌套动态规划算法同时求解了小车路径规划与装载问题. 在此基础上, Emde 等^[9]进一步研究了固定路线条件下的多载量小车调度与装载问题, 以最小化线边库存构建了混合整数规划模型, 证明了其为 NP-hard 问题并提出了基于分解方法的禁忌搜索算法. 李爱平等^[10]考虑了小车承载能力与配送时间窗等因素, 以工位物料需求紧急程度与小车满载率为优化目标, 建立了物料调度方案工位组划分优化模型. Maurizio 和 Mauro 等^[11]扩展了前人研究, 提出了看板系统下多载量小车配送调度优化问题, 为复杂的多条装配线提供了短期与长期的管理方法. 随后, 周炳海等^[12]以最小化看板配送系统总成本为目标, 建立了混合整数规划模型, 提出了次梯度和随机步长拉格朗日松弛算法并证明了算法的稳定性. Fathi 等^[13]首次建立了最小化搬运次数与线边库存双目标混合整数规划模型, 并提出了引入变异算子的粒子群算法, 有效求解多载量小车物料搬运调度与装载问题. 最近, 陆志强等^[14]将汽车装配线物料搬运调度方法推广到飞机移动装配线物料搬运问题, 引入了线边空间的物料存储决策, 以小车搬运次数最小化为目标建立 0-1 整数规划模型, 并设计了一种以免疫算法为框架的启发式算法. Battini 等^[15]提出了装配线物料搬运与生产平衡整合优化问题, 证明了整合优化能够提供更低的劳动力成本与灵活的决策.

但上述研究均未涉及能耗节省问题. 目前, 关于物料搬运节能研究大多集中于节能设备^[16,17]而节能调度的研究较少. 例如, Zheng 等^[18]为仓库的自动内部终端运输设计了节能调度方法, 最小化物料搬运系统总成本, 包括能耗成本与碳排放成本. Nielsen 与 Banaszak 等^[19]提出了普适制造系统中单个移动机器人物料搬运调度问题, 以最小化搬运距离实现最小化能耗目标. Muguerza 与 Briand 等^[20]假设搬运速度为常数, 以最小化总能源成本建立能源感知模型, 其研究表明最小化搬运距离并不意味着节省能源, 装载量与停靠次数及行驶距离均是搬运能耗的影响因素. 同样地, Qiu 等^[21]考虑了装载载重与搬运路径长度对搬运小车能源消耗的影响, 提出了基于能源消耗的异构引导搬运小车路径规划模型. Hu 等^[22]研究了轨道引导小车路径问题, 构建以总能耗为优化目标的混合整数规划模型, 提出的路径搬运策略在动态环境中降低了 15% 的能耗. Hu 等^[23]最近提出了准时制物料搬运节能调度方法, 考虑线边库存存储容量约束, 以最小化能耗为优化目标建立了混合整数规划模型.

可知, 目前关于混流装配线的物料搬运系统能耗问题尚未充分展开, 且已有文献局限于传统优化目标而忽略了能源消耗与传统搬运调度目标的平衡问题. 因此, 本文在已有研究基础上提出了新的混流装配线多载量小车物料搬运节能调度方法, 考虑最小化能耗与传统调度目标的冲突性, 以最小化最大线边库存与总搬运能耗为优化目标构建了多目标数学模型; 并为降低构建的动态模型状态维度, 提出了基于剪枝规则的多目标动态规划算法.

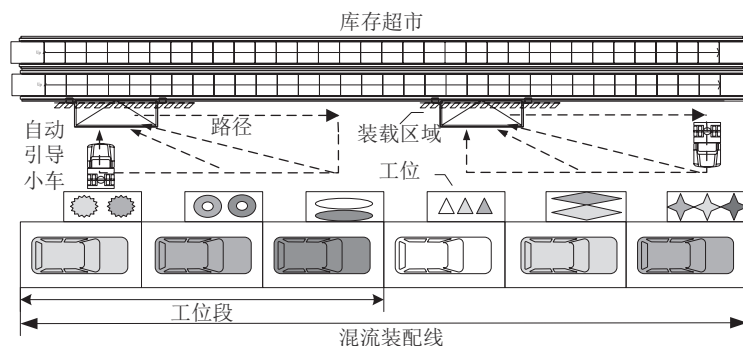


图 1 多载量小车配送系统示意图

2 问题描述及数学模型

混流装配线的多载量小车准时化物料搬运系统中, 多载量的自动引导小车负责将齐套料箱从库存超市搬运到装配线. 每次搬运可配送多种多箱物料, 需合理决策每次搬运出发时间、行驶速度与搬运返回路径, 称为多载量小车节能调度问题. 整个系统的运行逻辑关系如图 1 所示. 每辆小车独立负责装配线上一段工位的

零部件搬运任务. 首先小车到达装载区装载此次搬运零部件, 然后加速起步以最佳的稳定行驶速度依次为被搬运的零部件对应工位进行补给, 一旦完成当前所有补给任务小车就选择最近的路径返回, 最后减速安全驶入装载区.

为有效表述问题域, 做如下假设: 1) 根据准时化原则, 装载策略为: 每次搬运只装载这次搬运到下次搬运时间间隔内所需的零部件, 所以初始库存设置取决于第一次搬运出发时间, 则对应搬运视为一次无能耗的虚拟搬运; 2) 节拍为基本时间单位, 各工位各装配作业均耗时一个节拍; 3) 从第一个生产周期到小车第一次到达工位这段时间内消耗的零部件量为初始库存; 4) 物料箱均标准化, 一次搬运小车能装载若干数量的物料箱; 5) 每次搬运的能耗由滚动阻力、惯性阻力与空气阻力能耗组成; 6) 为防止行驶通道堵塞, 小车单向行驶; 7) 小车装卸时间忽略不计; 8) 生产顺序与每个工位每个节拍时间的零部件消耗与物料箱需求已知; 9) 每个工位装配一种零部件, 每种零部件有多种型号.

为清晰描述调度问题, 定义以下符号与变量:

S : 工位集合, $s = 1, 2, \dots, |S|$;

T : 生产时长, 即生产周期集合, $t = 1, 2, \dots, |T|$;

L : 搬运频次集合, $l = 0, 1, 2, \dots, |L|$, 0 表示虚拟搬运;

d_{st} : 第 t 生产周期第 s 工位零部件需求箱量;

T_{ls} : 第 l 次搬运到达工位 s 的实际时间;

p_{st} : 第 t 生产周期第 s 工位零部件消耗量;

u_s : 物料箱可容纳零部件 s 的数量;

d_s : 相邻两工位间距;

d_v : 装载区域到装配线的垂直距离;

ds_l : 第 l 次搬运最短路径的总长度;

ξ_l^r : 第 l 次搬运克服滚动阻力的能耗;

ξ_l^i : 第 l 次搬运克服惯性阻力的能耗;

ξ_l^σ : 第 l 次搬运克服空气阻力的能耗;

C_a : 单辆自动引导小车的最大装载料箱数目;

η : 小车动力效率, 为传动效率与电动效率乘积;

m : 小车质量;

ω_s : 单个零部件 s 质量;

ρ : 空气阻力计算系数;

g : 重力加速度;

μ_0 : 滚动阻力系数;

ε_{\min} : 小车允许最低搬运速度;

ε_{\max} : 小车允许最高搬运速度;

σ : 加(减)速度值;

s_l^{\max} : 第 l 次搬运需要配送的最后一个工位;

T_l : 决策变量, 第 l 次搬运的出发时间;

ε_l : 决策变量, 第 l 次搬运加速后的稳定行驶速度;

$\varepsilon_l(t)$: 第 l 次搬运加速期间在时刻 t 的瞬时速度;

π : 搬运调度方案, $\pi = \{(T_0, \varepsilon_0), (T_1, \varepsilon_1), \dots, (T_{|L|}, \varepsilon_{|L|})\}$.

基于上述问题描述与符号, 建立混流装配线的多载量小车物料搬运节能调度模型如下:

Minimize

$$f(\pi) = \{f_1(\pi), f_2(\pi)\}$$

Subject to:

$$f_1(\pi) = \begin{cases} \max_{s=1, \dots, |\mathbf{S}|; l'=1, \dots, |\mathbf{L}|} \left\{ \sum_{l=0}^{l'} u_s \cdot \left(\sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} \right) \right\}, & \text{if } l = 0, \forall t \in \mathbf{T}, \\ \max_{s=1, \dots, |\mathbf{S}|; l'=1, \dots, |\mathbf{L}|} \left\{ \sum_{l=0}^{l'} u_s \cdot \left(\sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} \right) - \sum_{l=0}^{l'} \sum_{t=\lfloor T_{l-1, s} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{ls} \rfloor} p_{st} \right\}, & \text{if } l \geq 1, \forall t \in \mathbf{T}, \end{cases} \quad (1)$$

$$f_2(\pi) = \sum_{l=1}^{|\mathbf{L}|} (\xi_l^f + \xi_l^i + \xi_l^g), \forall l \in \mathbf{L}, \quad (2)$$

$$T_{ls} = \begin{cases} 0, & \text{if } l = 0, \forall s \in \mathbf{S}, \\ T_l + \frac{\varepsilon_l}{\sigma} + \frac{(s-1)d_s + d_v}{\frac{\varepsilon_l}{\sigma}} - \frac{\varepsilon_l^2}{2\sigma^2}, & \text{if } l \geq 1, \forall s \in \mathbf{S}, \end{cases} \quad (3)$$

$$T_l - T_{l-1} \geq 1, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (4)$$

$$s_l^{\max} = \max \left\{ s \mid \sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} > 0, \forall s \in \mathbf{S} \right\}, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (5)$$

$$ds_l = (s_l^{\max} - 1)d_s + d_v + (d_v^2 + (|\mathbf{S}| - s_l^{\max}))^{1/2}, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right) - \left(\left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right)^2 - \frac{4}{\sigma} \left(\frac{\varepsilon_{\min}^2}{2\sigma} + ds_l \right) \right)^{1/2} \leq \varepsilon_l, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^{|\mathbf{S}|} \sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} \leq C_a, \forall s \in \mathbf{S}, t \in \mathbf{T}, l \in \mathbf{L}, \quad (8)$$

$$\xi_l^r = \left(m + \sum_{s=1}^{|\mathbf{S}|} \omega_s u_s \sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} \right) g \cdot \mu_0 \cdot ds_l / \eta, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (9)$$

$$\xi_l^i = \int_0^{\varepsilon_l / \sigma} \frac{\sigma \varepsilon_l(t)}{\eta} \left(m + \sum_{s=1}^{|\mathbf{S}|} \omega_s u_s \sum_{t=\lfloor T_{ls} \rfloor + 1}^{\lfloor T_{(l+1)s} \rfloor} d_{st} \right) d(t), \forall l \in \mathbf{L}, \quad (10)$$

$$\xi_l^g = \int_0^{\varepsilon_l / \sigma} \frac{\varepsilon_l(t)}{2\eta} \rho \cdot \varepsilon_l^2(t) d(t) + \frac{1}{2} \rho \varepsilon_l^2 \left(ds_l - \frac{2\varepsilon_l^2 - \varepsilon_{\min}^2}{2\sigma} \right) / \eta, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (11)$$

$$T_l \in \mathbb{Z}, \forall l \in \mathbf{L}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_l \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}], \forall l \in \mathbf{L}. \quad (13)$$

约束 (1) 表示工位最大线边库存量等于目前搬运的总零部件量减去零部件消耗总量. 约束 (2) 为总能耗计算, 由滚动、惯性与空气阻力三种能耗构成. 约束 (3) 表示每次搬运到达各个工位的实际时间由出发时间和搬运速度决定. 约束 (4) 确保小车顺序执行搬运任务. 约束 (5) 表示每次搬运配送的最后一个工位. 公式 (6) 为最短路径计算公式. 约束 (7) 保证了每次搬运不超过小车最大装载量. 约束 (8) 表示每次搬运的行驶速度必须使得搬运任务顺利完成. 约束 (9)~(11) 为三种能耗计算公式. 约束 (12)(13) 分别定义决策变量 T_l 与 ε_l 的属性.

3 问题性质

由上述问题描述与混合整数规划模型可知, 混流装配线物料搬运节能调度问题具有以下性质:

性质 1 给定调度 $\pi = \{(T_0, \varepsilon_0), \dots, (T_{|\mathbf{L}|}, \varepsilon_{|\mathbf{L}|})\}$, 问题本质为离散优化问题, 即混合整数规划问题由 $\pi = \{(T_0, T_1), \dots, (T_{|\mathbf{L}-1}, T_{|\mathbf{L}|})\}$ 唯一确定.

证明 由公式 (7) 可知, 每次搬运的搬运速度均必须满足:

$$\frac{\sigma}{2} \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right) - \left(\left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right)^2 - \frac{4}{\sigma} \left(\frac{\varepsilon_{\min}^2}{2\sigma} + ds_l \right) \right)^{1/2} \leq \varepsilon_l, \forall l \in \mathbf{L}. \quad (14)$$

最小化能耗目标函数即必须最小化每次搬运能耗. 由于小车运行速度低, 每一次搬运能耗与速度呈递增关系, 最小化每次搬运能耗即为最小化每次搬运速度. 因此根据上述不等式得每次搬运最小速度为:

$$(\varepsilon_l)_{\min} = \frac{\sigma}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right) - \left(\left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + T_l - T_{l-1} \right)^2 - \frac{4}{\sigma} \left(\frac{\varepsilon_{\min}^2}{2\sigma} + ds_l \right) \right)^{1/2}, \forall l \in L. \quad (15)$$

从等式可知, ε_l 是关于 T_{l-1} 与 T_l 的函数, $\varepsilon_l = f(T_{l-1}, T_l)$; 将公式 (15) 代入目标函数 f_1 与约束 (9)~(11), 消除变量 ε_l , 可得两个目标函数是关于 T_{l-1} 与 T_l 调度时间解集的函数, 所以问题本质为离散优化问题且由 $\pi = \{(T_0, T_1), \dots, (T_{|L|-1}, T_{|L|})\}$ 唯一确定.

性质 2 受小车装载容量限制, 两个相邻搬运时间间隔存在上限 UT , $T_l - T_{l-1} \leq UT$, 使得一次搬运量不超过小车最大装载容量 C_a 必须满足:

$$UT = \max \left\{ \text{ceil} \left\{ C_a / \min_{s=1, \dots, |S|} \{R_s\} \right\}, T_{1s} - 1 \right\}, \quad (16)$$

$$T_{1s} = \left\{ T_{ls} \mid \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{t=1}^{\lfloor T_{ls} \rfloor} d_{st} \leq C_a \text{ and } \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{t=1}^{\lfloor T_{ls+1} \rfloor} d_{st} > C_a, l=1 \right\}. \quad (17)$$

证明 初始生产时, 产品是从第一个工位 $s=1$ 顺序走向下一个工位. 因此, 产品到达工位 s' 的时间均较第一个工位延迟 $s'-1$ 个节拍, 即每个工位在 $s'-1$ 个生产节拍前的零部件消耗为零. 此后零部件消耗按照生产顺序消耗. 在生产初期, 第一个工位后的工位会因为等待第一个产品到达而出现较长时间的无零部件消耗情况, 导致在第一次搬运时存在最大搬运时间间隔 $T_{1s}-1$. 而在后续搬运过程中, 平衡生产线上各工位零部件消耗稳定, 消耗率 R_s 越低小车搬运时间间隔越大, 则最大搬运时间间隔为 $C_a / \min_{s=1, \dots, |S|} \{R_s\}$. 所以在整个生产过程中, 最大时间间隔为: $UT = \max \{ \text{ceil} \{ C_a / \min_{s=1, \dots, |S|} \{R_s\} \}, T_{1s} - 1 \}$.

4 基于剪枝规则的多目标逆序动态规划算法构建

根据问题模型与性质 1 可知, 该离散优化问题由调度 $\pi = \{(T_0, T_1), \dots, (T_{|L|-1}, T_{|L|})\}$ 唯一确定, 为多阶段决策过程, 可有效地使用多目标动态规划算法 (multi-objective dynamic programming algorithm, MODP) 求解^[24,25]. 其中, 物料搬运决策是由 T_{l-1} 与 T_l 联合确定, 因此混流装配线物料搬运节能调度问题动态模型为二维的. 为克服多维动态规划运行时长缺陷, 本文将剪枝规则引入动态迭代过程以缩减算法搜索空间, 从而提高二维动态算法的计算时效性与保证获取所有 Pareto 解.

4.1 多目标逆序动态规划

由性质 1 知, 搬运决策中相邻两次搬运到达工位时间 (T_{l-1} 与 T_l) 相互依赖, 违反了马尔可夫性. 因此, 本节提出了新的状态定义方式以满足 MODP 的马尔可夫性并构建了基于剪枝规则的多目标逆序动态规划算法 (multi-objective dynamic programming based on prune rules, MODP-PR) 获取最优 Pareto 解集.

在逆序动态规划中, 决策阶段数 $R = |T|$, 每个决策阶段 r 表示第 $R-r+1$ 次搬运, $r \in \{1, \dots, R\}$; 每个阶段状态 t_r 表示第 $R-r+1$ 次搬运的出发时间. 为保证问题的马尔可夫性, 如果在 $r+1$ 阶段能够转移到同一个状态值 t_r 的状态 t_{r+1} 有 K 个, 那么该状态 t_r 必须在 r 阶段重复出现 K 次. 决策空间为 $X_r(t_r)$, 每个阶段的状态决策集合 $x_r(t_r) \in X_r(t_r)$. 根据构建的数学模型, 建立转移方程, 即允许下次搬运出发时间如下:

$$t_{r+1} = \left\{ x_r \mid \varepsilon_{\min} \leq \frac{\sigma}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + x_r - t_r \right) - \left(\left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\sigma} + x_r - t_r \right)^2 - \frac{4}{\sigma} \left(\frac{\varepsilon_{\min}^2}{2\sigma} + ds(t_r, x_r) \right) \right)^{1/2} \right. \\ \left. \leq \varepsilon_{\max} \cup x_r \geq 1 + t_r \cup \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{\tau=\lfloor t_{rs} \rfloor+1}^{\lfloor x_{rs} \rfloor} d_{s\tau} \leq C_a \right\}. \quad (18)$$

其中, t_{rs} 与 x_{rs} 分别由公式 (19) 与 (20) 计算得:

$$t_{rs} = \begin{cases} 0, & \text{if } r=1, \forall s \in S, \\ t_r + \frac{\varepsilon(t_r, x_r)}{\sigma} + \frac{(s-1)d_s + d_v}{\varepsilon_l} - \frac{\varepsilon(t_r, x_r)^2}{2\sigma^2}, & \text{if } r \geq 2, \forall s \in S. \end{cases} \quad (19)$$

$$x_{rs} = \begin{cases} 0, & \text{if } r = 1, \forall s \in S, \\ x_r + \frac{\varepsilon(x_r, x_{r+1})}{\sigma} + \frac{(s-1) \cdot d_s + d_v}{\varepsilon_l} - \frac{\varepsilon(x_r, x_{r+1})^2}{2\sigma^2}, & \text{if } r \geq 2, \forall s \in S. \end{cases} \quad (20)$$

由性质 2 得, 前后两次搬运存在最大时间间隔 UT, 因此转移公式中 $x_r \geq 1 + t_r$ 进一步修正为:

$$t_r + 1 \leq x_r \leq \text{UT} + t_r. \quad (21)$$

阶段指标函数为 $\psi^r(t_r, x_r) = \{\psi_1^r(t_r, x_r), \psi_2^r(t_r, x_r)\}$, 即每次搬运后的最大线边库存量与能耗为:

$$\psi_1^r = \begin{cases} \max_{s=1, \dots, |S|} \left\{ u_s \left(\sum_{\tau=1}^{\lfloor x_{rs} \rfloor} d_{s\tau} \right) \right\}, & \text{if } r = 1, \\ \max_{s=1, \dots, |S|} \left\{ u_s \left(\sum_{\tau=\lfloor t_{rs} \rfloor+1}^{\lfloor x_{rs} \rfloor} d_{s\tau} \right) - \sum_{\tau=r-1}^{\lfloor t_{rs} \rfloor} p_{s\tau} \right\}, & \text{if } r \geq 2. \end{cases} \quad (22)$$

$$\psi_2^r = \begin{cases} 0, & \text{if } r = 1, \\ \left(\left(m + \sum_{s=1}^{|S|} \omega_s \sum_{\tau=\lfloor t_{rs} \rfloor+1}^{\lfloor x_{rs} \rfloor} d_{s\tau} \right) + \rho ds(t_r, x_r) \right) \cdot \varepsilon(t_r, x_r)^2 / 2\eta - \frac{3\rho}{8\eta} \cdot \varepsilon(t_r, x_r)^4 + \\ \frac{\rho \varepsilon(t_r, x_r)^2}{4\eta\sigma} \varepsilon_{\min}^2 + m \cdot g \cdot \mu_0 ds(t_r, x_r) + \sum_{s=1}^{|S|} \omega_s u_s \sum_{\tau=\lfloor t_{rs} \rfloor+1}^{\lfloor x_{rs} \rfloor} d_{s\tau} \cdot g \cdot \mu_0 \cdot ds(t_r, x_r), & \text{if } r \geq 2. \end{cases} \quad (23)$$

其中, ψ_1^r 表示第 $R-r+1$ 次搬运最大线边库存量, ψ_2^r 表示当前阶段能耗. 但是, 如果阶段 r 的状态 t_r 的值等于最后阶段的 t_1 状态值, 则从状态 $t_{r-1} = t_1$ 到状态 $t_r = t_1$ 的阶段指标函数将变为:

$$\psi^r(t_r, x_r) = \{\psi_1^r(t_r, x_r), \psi_2^r(t_r, x_r)\} = \{0, 0\}. \quad (24)$$

这是因为一旦状态值等于 t_1 , 一个完整的调度 $\pi = \{(0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{R-1}, t_R)\}$ 立即完成, 但是动态规划必须递推到最后阶段才会结束. 因此, 为保证递推的连续性, 从状态 $t_{r-1} = t_1$ 到状态 $t_r = t_1$ 必须连接. 由于其不满足转移方程 (18), 将之称为虚拟转移.

根据阶段指标函数, 最优指标函数则为:

$$G^r(t_r) = \{G_1^r(t_r), G_2^r(t_r)\} = \{\min\{\max\{\psi_1^r(t_r, x_r), G_1^{r+1}(t_{r+1})\}\}, \min\{\psi_2^r(t_r, x_r) + G_2^{r+1}(t_{r+1})\}\}. \quad (25)$$

$G_1^r(t_r)$ 与 $G_2^r(t_r)$ 分别表示到第 $R-r+1$ 搬运为止的最大库存量与能耗. 初始状态的最优阶段指标函数: $G_1^{R+1}(t_{R+1}), G_2^{R+1}(t_{R+1})$ 均为零. 则最优调度方案 $\pi = \{(0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{R-1}, t_R)\}$ 由最后阶段状态 t_1 到初始阶段状态 t_R 的路径组成.

4.2 剪枝规则

为获取最优 Pareto 解集, 动态规划在各阶段均需存储到达当前状态的所有非支配解, 占用了大量的存储空间与时间成本. Pereira 等^[26]指出分支定界与动态规划具有相似性, 分支定界节点等价于动态规划状态且前者不需要使用大量地存储空间. 因此, 利用两者的相似性, 可将剪枝规则引入动态规划中缩小计算空间与提高计算效率. 本节提出了基于非支配关系的剪枝规则, 删除多目标规划中的被支配状态, 从而减少搜索状态与计算时间.

对于每个阶段, 最优目标函数值为 $\{G_1^r(t_r), G_2^r(t_r)\}$. 如果阶段 r 中存在 $t_r = t_1$ (即形成完整调度 π), 则到阶段 r 为止获得的非支配解集为 $\min_{i=r, \dots, R} \{G^i(t_i = t_1)\}$. 如果 $r-1$ 阶段的最优目标函数值 $\{G_1^{r-1}(t_{r-1}), G_2^{r-1}(t_{r-1})\}$ 支配于 $\min_{i=r, \dots, R} \{G^i(t_i = t_1)\}$ 中的任意一个解, 由于动态规划递推的单调递增性, 逆序最终获得的解必然为支配解. 对于状态 $t_r = t_1$, 由于虚拟转移过程只是将当前最优目标函数值传递到最后阶段, 因此这些状态对应的状态 $t_r - 1 = t_1$ 最终不能够获得比当前 $\min_{i=r, \dots, R} \{G^i(t_i = t_1)\}$ 更优的解. 因此, 剪枝规则定义为: 如果阶段 r 中存在 $t_r = t_1$, 有非支配解集 $\min_{i=r, \dots, R} \{G^i(t_i = t_1)\}$, 则删除所有的状态值等于 t_1 的状态 t_r 与阶段 $r-1$ 中对应最优目标函数值支配于非支配解集的状态 t_{r-1} . 剪枝规则示例如图 2 所示.

4.3 基于剪枝规则的多目标动态规划计算步骤

MODP-PR 算法从初始阶段 t_R 开始, 非支配最优解集 $\min_{i=r, \dots, R} \{G^i(t_i = t_1)\}$ 存储于外部存档 \mathcal{R} . 通过引入剪枝规则删除导致支配解的状态, 减少状态搜索计算与存储. 改进算法计算步骤如图 3 所示.

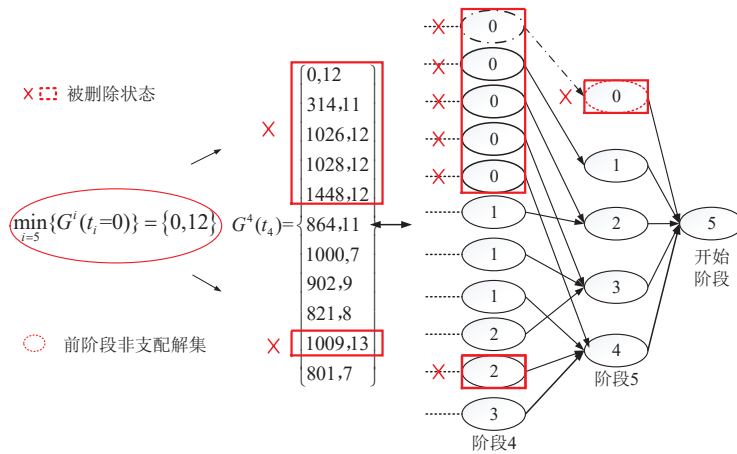


图 2 剪枝规则示例

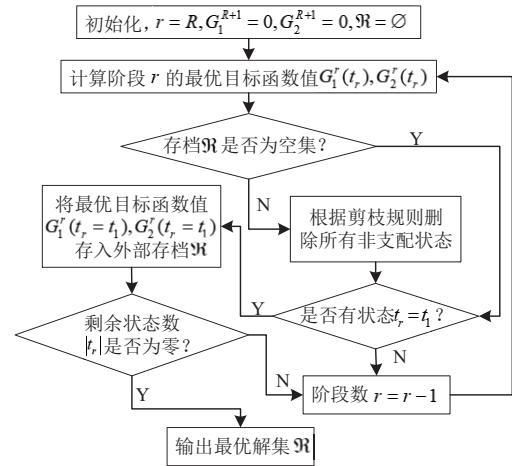


图 3 MODP-PR 算法计算步骤

5 仿真实验与分析

为验证提出的物料搬运节能调度方法 (energy-efficient scheduling method, ESM) 与 MODP-PR 算法的有效性, 本文以一家汽车企业的混流装配线为例: 混流装配线上三种汽车 $\{A, B, C\}$, 生产顺序 $\{C, C, B, A, A\}$, 引用文献 [8] 的参数分别进行实验分析. 本实验在主频 2.70GHz, 内存为 8GB 的 PC 机上通过 MATLAB 编程实现.

5.1 调度方法对比分析

为有效评价节能调度方法 ESM, 本文选取了其他四种考虑不同能耗影响因素的调度方法与之比较: 装载调度方法 (scheduling method considering loading weight, SMLW), 速度调度方法 (scheduling method considering speed, SMS), 路径调度方法 (scheduling method considering route, SMR) 与文献 [8] 所提出的传统调度即简化假设调度方法 (scheduling method with simplified hypotheses, SMSH). 五种调度方法关系如表 1 所示.

图 4~6 为不同规模的物料搬运调度问题下五种调度方法对比结果. 其中, 节能、装载、路径、速度与传统曲线分别与表 1 中的调度方法顺序对应. 由图 4~6 知, 1) ESM 与 SMLW 能耗远高于其他调度方法, 说明搬运装载量对能源消耗有极大地影响, 已有文献中忽略装载量的调度方法不适用于物料搬运调度节能问题, 而 ESM 与 SMLW 能够准确地描述物料搬运系统能源消耗情况; 2) SMS 与 ESM 两种调度方案均增加了调度方案的多样性, 说明每次搬运速度不为同一固定常数这一变速策略增加了更好的调度方案 (线边的最大库存量更小或能耗更低的调度方案), 且为决策者提供了更多选择方案; 3) 较 SMSH, SMR、SMS 均可有效降低物料搬运能源消耗, 但是每次搬运选择最短路径这一变路径策略较变速策略为物料搬运节省更多能耗, 这是因为低速行驶的自动引导小车总能耗主要取决于受路径影响的滚动阻力, 其次为惯性阻力; 4) 提出的 ESM 整合了变路径与变速两种策略, 不仅提高了调度方案的多样性, 寻求潜在的更优方案, 也有效降低了各个物料搬运调度方案的总能耗. 综合以上分析, 本文提出的物料搬运节能调度方法 ESM 准确刻画了物料搬运能耗情况, 可有效地降低物料搬运能耗并提供潜在更优调度方案. 因此, 提出的 ESM 适用于解决混流装配准时化物料搬运节能问题.

表 1 五种调度方法关系

调度方法	装载量	每次搬运路线	每次搬运稳定速度
节能	考虑	变动	变动
装载	考虑	固定	固定
路径	忽略	变动	固定
速度	忽略	固定	变动
传统	忽略	固定	固定

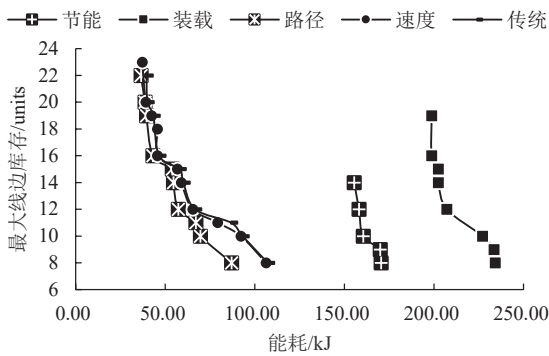


图 4 小规模问题下五种调度方法结果

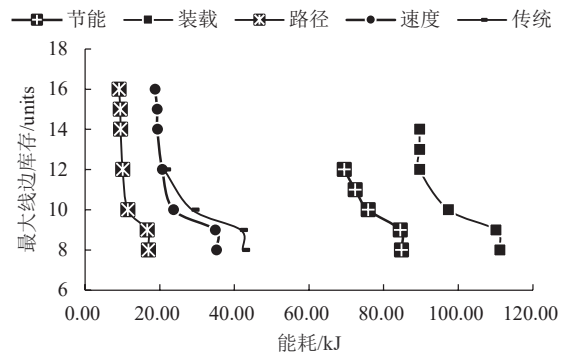


图 5 中规模问题下五种调度方法结果

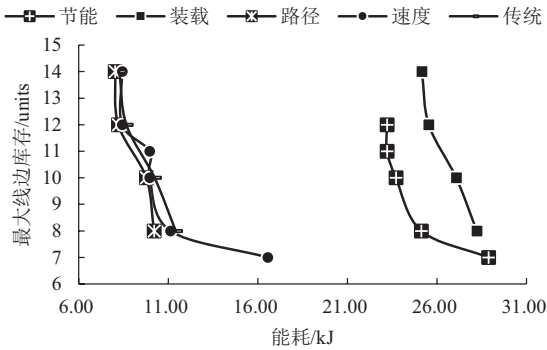


图 6 大规模问题下五种调度方法结果

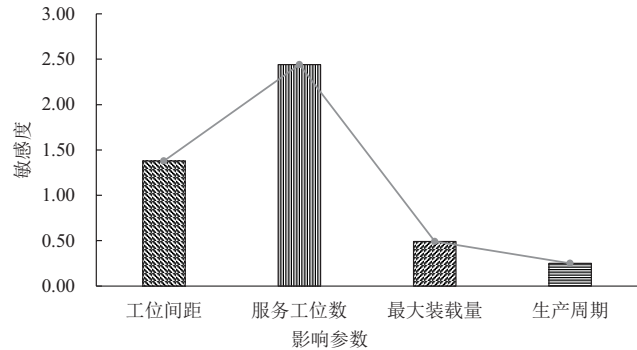


图 7 敏感度分析

5.2 影响因素分析

为进一步分析各能耗影响因素对物料搬运节能调度的影响程度, 选取世代距离 (generational distance, GD) 用于描述调度结果的差异性. p_m 表示影响因素集合 $\{|T|, |S|, C_a, d_s\}$ 中的第 m 个影响因素, 敏感因素定义如下:

$$\frac{\Delta f(\pi)}{\Delta p} = \max \left\{ \left| \frac{\Delta f(\pi)_1}{0.1 * p_1} \right|, \dots, \left| \frac{\Delta f(\pi)_m}{0.1 * p_m} \right| \right\}. \quad (26)$$

其中, $0.1 * p_m$ 表示影响因素的单个增量; $\Delta f(\pi)_m$ 表示影响因素 p_m 微小变化造成的结果差异大小. 由图 7 可知, 服务工位数量 S 为敏感因素, 因此, 优化多载量小车服务工位数量问题可进一步降低物料搬运能耗.

5.3 算法对比分析

为有效评价动态规划算法 MODP 与改进算法 MODP-PR 的性能, 选取求解时间、搜索节点个数与反向世代距离 (inverted generational distance, IGD) 作为评价指标. IGD 综合指标用于评价非支配解集与最优解集的逼近程度及非支配解集的分布性, 计算公式如下:

$$IGD(P^*, P) = \frac{\sum_{v \in P^*} d(v, P)}{|P^*|}. \quad (27)$$

其中, P^* 为非支配最优解集, $d(v, P)$ 表示非支配最优解 v 到非支配解集 P 中的最近点的欧氏距离. 在多目标混流装配线的物料搬运节能调度问题中, MODP 与 MODP-PR 的解分别为非支配最优解集、非支配解集. 设置算法运行时间为 1800 s, 实验运行结果如表 2 所示.

由表 2 可知, 1) 无论是对于小规模问题还是大规模问题, MODA-PR 计算效率均高于 MODP 算法 20% 以上, 特别是对于中大规模问题, MODP-PR 较 MODP 提高了近 30%; 2) MODP-PR 较 MODP 减少了搜索节点数目约 25%, 剪枝规则有效的缩小了搜索空间; 3) IGD 指标均为 0, 说明 MODP-PR 算法获得的解与 MODP 算法完全相同, 获得了最优 Pareto 解集; 4) 问题规模小于 700 个生产周期时, MODP 算法能够在规定的时间内获得问题的 Pareto 解, 随着问题规模增加计算时间急剧上升, 当规模达到 700 个生产周期及以上时, MODP 无法在规定时间内 (1800 s) 内获得问题的所有 Pareto 解, 但 MODP-PR 算法仍能有效求解. 说明改进动态算法能够有效求解不同规模的混流装配线物料搬运节能调度问题.

由此可见, 较 MODP 算法, MODP-PR 内存占用量更小, 计算成本更低. 对于不同规模的多目标混流装配线物料搬运节能调度问题, 改进算法保证了最优 Pareto 解, 有效缓解了多维动态规划问题的维数灾问题.

表 2 MODP 与 MODP-PR 计算性能评价

规模/节拍	计算时间/s		时间缩短比 例/%	搜索节点/个		节点减少比 例/%	反向世 代距离
	动态规划	改进算法		动态规划	改进算法		
20	0.27	0.19	28.89	353	161	54.39	0
50	1.22	0.97	20.33	1940	1347	30.57	0
150	18.07	14.35	20.58	15400	11260	26.88	0
250	77.23	59.64	22.78	41385	30869	25.41	0
270	95.14	73.49	22.76	48091	35806	25.55	0
290	116.43	90.17	22.56	55290	41345	25.22	0
310	162.53	118.27	27.23	62999	47117	25.21	0
330	183.41	130.63	28.78	71200	53441	24.94	0
350	219.79	155.47	29.26	79912	59811	25.15	0
370	273.37	192.46	29.60	89116	66935	24.89	0
390	305.17	225.42	26.13	98830	74261	24.86	0
410	356.12	270.39	24.07	109037	82054	24.75	0
430	385.48	295.28	23.40	119754	89889	24.94	0
450	446.19	330.74	25.87	130963	98802	24.56	0
470	506.69	375.41	25.91	142683	107513	24.65	0
500	527.2	407.72	22.66	161275	120853	25.06	0
600	918.54	726.07	20.95	231154	173967	24.74	0
650	1197.57	913.30	23.74	270675	204502	24.45	0
700	-	1273.09	-	-	236358	-	-
720	-	1499.95	-	-	256831	-	-

6 总结

本文针对混流装配线物料搬运能耗问题, 提出了考虑能耗与传统调度目标冲突性的物料搬运节能调度方法, 建立了多目标混合整数规划模型, 并引入剪枝规则构建了逆序动态规划算法. 仿真实验表明, 提出的节能调度方法不仅降低了混流装配线物料搬运的能源消耗, 而且为决策者提供了潜在更优的灵活决策方案, 便于决策者在能耗与传统调度目标之间取舍; 为求解多目标混合整数规划模型, 提出的算法保证了在合理的时间对不同规模的节能调度问题获取最优 Pareto 解集. 同时, 实验证明了将剪枝规则引入多维多目标动态规划, 可显著降低算法的内存占用量与运行时间成本, 有效克服了多维动态规划的维数灾问题.

目前对混流装配线物料搬运节能调度问题的研究, 考虑了速度与路径对单辆多载量小车的物料搬运能耗与线边库存的影响, 后续研究将考虑多辆多载量小车与多服务工段等影响因素提高模型的实用性.

参考文献

- [1] Zhang Z, Tang R, Peng T, 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.
- [2] 郭栋, 张洪浩, 郑春燕, 等. 未来中国汽车类型发展预测及节能减排效益分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(6): 1593–1599.
Guo D, Zhang H H, Zheng C Y, et al. Analysis of the future development of Chinese auto energy saving and environmental benefits[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(6): 1593–1599.
- [3] 曲卫华, 颜志军. 公众参与下的企业能源消费行为演化研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2537–2548.
Qu W H, Yan Z J. Study on evolution of enterprise's energy consumption behavior under public participation[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(10): 2537–2548.
- [4] Fioi C, Ahn K, Rakha H A. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 257–268
- [5] Pan C, Zhang J, Qin W. Real-time OHT dispatching mechanism for the interbay automated material handling

- system with shortcuts and bypasses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 663–675.
- [6] Wan J, Tang S, Hua Q, et al. Context-aware cloud robotics for material handling in cognitive industrial internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017: 1–1.
- [7] Emde S. Scheduling the replenishment of just-in-time supermarkets in assembly plants[J]. OR spectrum, 2017, 39(1): 321–345.
- [8] Emde S, Boysen N. Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 217(2): 287–299.
- [9] Emde S, Gendreau M. Scheduling in-house transport vehicles to feed parts to automotive assembly lines[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(1): 255–267.
- [10] 李爱平, 张燕红, 郭海涛, 等. 混流装配线车间内物料调度工位组划分优化法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2017(8): 1191–1197.
Li A P, Zhang Y H, Guo H T, et al. Station groups division of material dispatching system in mixed-model assembly line[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017(8): 1191–1197.
- [11] Maurizio F, Mauro G, Alessandro P, et al. Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains: A general framework[J]. Manage Control, 2013, 24(2): 187–208.
- [12] 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 B H, Hu L M. Lagrangian relaxation algorithm for material handling problems of assembly lines[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(4): 491–498.
- [13] Fathi M, Rodríguez V, Fontes D B M M, et al. A modified particle swarm optimisation algorithm to solve the part feeding problem at assembly lines[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(3): 878–893.
- [14] 胡鑫铭, 陆志强. 飞机移动生产线物料配送与线边存储集成优化 [J]. 工程科学学报, 2018, 40(1): 108–119.
Hu X M, Lu Z Q. Integrated optimization of material delivery and line-side storage problem for aircraft moving assembly line[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1): 108–119.
- [15] Battini D, Calzavara M, Otto A, et al. Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(24): 7452–7472.
- [16] 杜汶娟, 马书根, 李斌, 等. 可变结构体机器人滚动步态参数优化 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 127–136.
Du W J, Ma S G, Li B, et al. Parameter optimization for rolling motion of structure variable robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 127–136.
- [17] Tang R, Wu Z, Fang Y. Maximum power point tracking of large-scale photovoltaic array[J]. Solar Energy, 2016, 134: 503–514.
- [18] Zheng H, Negenborn R R, Lodewijks G. Closed-loop scheduling and control of waterborne AGVs for energy-efficient Inter Terminal Transport[J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 2016, 105: 261–278.
- [19] Nielsen I, Do N A D, Banaszak Z A, et al. Material supply scheduling in a ubiquitous manufacturing system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 45: 21–33.
- [20] Muguera M, Briand C, Jozefowicz N, et al. A mass-flow MILP formulation for energy-efficient supplying in assembly lines[J]. arXiv preprint arXiv: 1511.06236, 2015.
- [21] Qiu L, Wang J, Chen W, et al. Heterogeneous AGV routing problem considering energy consumption[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2015: 1894–1899.
- [22] Hu W, Mao J, Wei K. Energy-efficient rail guided vehicle routing for two-sided loading/unloading automated freight handling system[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(3): 943–957.
- [23] Hu L M, Zhou B H, Li Y. An energy saving scheduling method for just in time material handling in mixed-model assembly line[C]// ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing, American Society of Mechanical Engineers, 2017: V004T05A032-V004T05A032.
- [24] 范捷, 王国庆. 带分段仓储能力决策的动态批量优化问题研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2592–2599.
Fan J, Wang G Q. Dynamic lot sizing problem with section storage capacity decisions[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(10): 2592–2599.
- [25] 朱伟. 基于规则导向的柔性作业车间多目标动态调度算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2690–2699.
Zhu W. Multi-objective scheduling algorithm for flexible job-shop problem based on rule orientation[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(10): 2690–2699.
- [26] Pereira J, Vilà M. An exact algorithm for the mixed-model level scheduling problem[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(19): 5809–5825.