

车辆装配线边物料准时化配送算法

彭涛, 周炳海[†]

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了有效地解决带线边缓存容量约束的车辆装配线准时化物料配送问题, 提出了改进免疫克隆选择调度算法. 首先进行了问题域的描述, 以最小化搬运成本和线边库存成本总和为优化目标, 建立了数学规划模型. 针对这一多重约束的混合优化问题, 给出了问题的性质分析, 并将原问题转化为带缓存容量约束的离散优化问题. 在算法设计过程中, 开发了直接反映配送路径及配送量的变长双层整数编码机制. 为了提升算法的收敛性能, 在邻域生成机制中融入了疫苗接种操作和基于Metropolis接受准则的局部搜索算子. 最后, 对算法进行了仿真实验. 结果表明, 该配送算法可行、有效.

关键词: 准时化; 调度; 启发式算法; 疫苗接种; Metropolis准则

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Just-in-time distribution algorithm of line-side parts for automobile assembly lines

PENG Tao, ZHOU Bing-hai[†]

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Given the limited capacities of the line-side buffers, a modified immune clonal selection algorithm was proposed to investigate the just-in-time (JIT) part distribution for automobile assembly lines. Firstly, a JIT distribution problem domain was described. And the mathematical programming model was established with an objective of minimizing the sum of the inventory holding cost and delivery cost. For this composite optimization problem with multiple constraints, the relevant properties were analyzed to transform the original problem to the discrete optimization model with buffer capacities constraints. A two-level integer encoding mechanism with variant length was put forward in the algorithm design process, which reflected directly distribution routing and quantities. To improve the convergence performance of the proposed algorithm, the vaccine inoculation operator, as well as the local search schema based on Metropolis acceptance criterion, was introduced into the neighbourhoods generation mechanism. Finally, simulation experiments of the algorithm were carried out and the results demonstrate that the proposed method is feasible and effective.

Key words: just-in-time; scheduling; heuristic algorithms; vaccine inoculation; Metropolis criteria

1 引言(Introduction)

随着汽车产业在产品多样化和客户定制化等方面不断发展, 装配线的准时化物料配送调度已成为汽车装配业面临的关键问题^[1]. 传统的装配车间采用中心仓库实现对装配工位小批次、大批量的物料配送模式, 各工位维持较高的库存水平. 为了避免占用大量的线边空间、保证装配作业的顺畅运转, 基于超市系统的物料配送模式获得了广泛应用. 该模式通过在各装配工位区段设置物料超市暂存来自中心仓库的物料, 实现对邻近装配工位多批次、小批量的准时化物料更新作业^[2-3]. 由此可知, 为了提高车辆装配系统的运行效

率, 进行车辆装配线边物料准时化配送方法的研究具有理论与实际意义.

目前, 国内外许多学者针对装配线准时化物料配送问题进行了较深入的研究. Souza等^[4]以最小化库存费用和搬运费为目标, 建立了装配线物料供应问题的整数规划模型, 构建了包含贪婪随机自适应搜索过程的启发式算法. Emde等^[5]研究了Tow train的装载问题, 给定了行车路线、补货周期和装载能力, 以最小化线边库存水平为目标, 提出了求解该问题的多项式算法. Boysen等^[6]以最小化线边库存和Tow train的配置数量最少为目标, 建立了嵌套动态规划算法.

收稿日期: 2015-07-30; 录用日期: 2016-03-24.

[†]通信作者. E-mail: bhzhou@tongji.edu.cn; Tel.: +86 13564164374.

本文责任编辑: 阳春华.

国家自然科学基金项目(61273035, 71471135)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61273035, 71471135).

Fathi^[7]等针对Two train配送调度的多目标优化问题,提出了一种融合优先级规则的改进型模拟退火算法.上述文献在车辆装配线线边物料准时化配送的研究上具有借鉴意义,但仍存在一定局限.首先,这些文献研究仅限于行车线路固定的情形,并未考虑配送路线和配送频次分配的优化;其次,上述模型并未考虑装配线线边缓存容量的约束.

本文在分析上述文献的基础上,研究了带缓存容量约束的车辆装配线准时化物料配送问题,以最小化搬运费用和线边库存成本为目标构建了数学模型.通过对原问题性质的分析,将约束复杂的混合优化问题转化为带缓存容量约束的离散优化问题,但仍具有较高的复杂度,难以在合理时间内求得问题的精确解.

克隆选择算法已经被成功地应用于离散优化问题研究^[8-10],为了进一步改善基于人工免疫系统的智能算法的性能,并将其运用于车辆装配线准时化物料配送问题的优化调度,本文提出了一种改进免疫克隆选择算法.基于基本免疫克隆选择算法的框架,该改进型算法通过融入疫苗接种操作及结合Metropolis接受准则的局部搜索算子,有效地提升了算法的搜索深度及收敛性能,避免陷入局部最优.

2 数学建模(Problem formulation)

2.1 问题描述(Problem statement)

在混流汽车装配车间,待装配车辆依次通过各工位进行装配作业,物料超市暂存来自中心仓库的各类物料,并通过搬运车实现对邻近各工位多批次、小批量的准时化物料配送,典型的基于超市系统的装配线物料供应模式如图1所示.

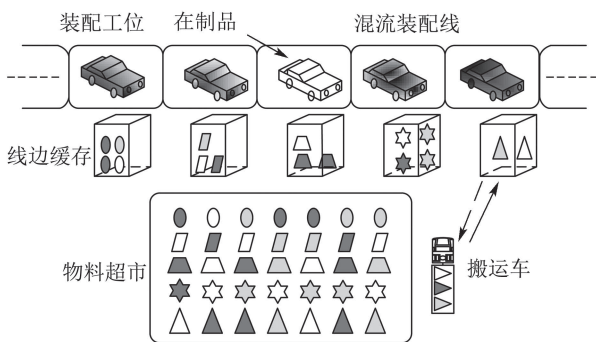


图1 装配线物料供应

Fig. 1 The part supply for assembly lines

2.2 数学模型(Mathematical formulation)

基于上述问题描述,建立车辆装配线物料配送问题的数学模型如下:

1) 模型假设.

系统选用节拍时间作为基本时间单位;装配线不允许发生零件缺货;每次搬运作业更新一个工位的线边物料;搬运量不得超过搬运车的装载能力 V_s ,零件

的线边库存量不得超过缓存能力 G_s ;零件的搬运成本与搬运车的作业时间 d_s 成正比,系数为 β ,物料库存成本与其在装配线线边缓存中的滞留时间成正比,系数为 α_s ;各工位所需零件依据车型的准配顺序依次装车进行配送;各工位装配作业开始时,线边缓存立刻消耗一单位线边库存用于生产线的装配作业.

2) 符号规定.

参变量:

N : 装配车辆总数;

p : 装配顺序中的车辆索引;

S : 搬运车辆负责的工位总数;

s : 装配工位索引;

i : 搬运车辆的第 i 次搬运;

V_s : 工位 s 的线边缓存能力;

G_s : 工位 s 物料的装载能力上限;

d_s : 超市与工位 s 间的行车时间,包含装、卸载时间;

α_s : 工位 s 的线边存储成本系数;

β : 搬运车的行驶成本系数;

$T_{p,s}$: 工位 s 进行第 p 辆车装配作业的开始时间;

$C_D(A)$: 方案 A 的搬运成本;

$C_I(A)$: 方案 A 的库存成本;

$C(A)$: 方案 A 的搬运成本和库存成本总和;

中间变量:

$K(i, s)$: 完成 i 次搬运后,工位 s 的线边零件到达量;

$B(t, s)$: t 时刻工位 s 线边缓存中的零件数量;

决策变量:

t_i : 第 i 次搬运的发车时刻;

s_i : 第 i 次搬运的目标工位;

n_i : 第 i 次搬运的搬运量;

(t_i, s_i, n_i) : 搬运车的一次搬运作业;

$A = \{(t_i, s_i, n_i)\}$: 一个完整的搬运方案.

此外,给出二元阶跃函数 $\mu_1(u, v)$, $\mu_2(u, v)$ 的定义如下:

$$\mu_1(u, v) = \begin{cases} 1, & u = v, \\ 0, & u \neq v, \end{cases} \quad \mu_2(u, v) = \begin{cases} 1, & u \geq v, \\ 0, & u < v. \end{cases}$$

根据上述问题描述、模型假设及符号规定,对车辆装配线物料配送问题建模如下:

令 $T_{1,1} = 0$,则工位 s 进行第 p 辆车装配作业的开始时间 $T_{p,s}$ 为 $T_{p,s} = p + s - 2$.

故各装配工位的线边缓存在 t 时刻所维持的零件库存量 $B(t, s)$ 可表示为

$$B(t, s) = \sum_{i=1}^{|A|} n_i \mu_1(s_i, s) \mu_2(t, t_i + d_{s_i}) -$$

$$\sum_{j=1}^N \mu_2(t, T_{j,s}),$$

其中: 第 1 部分表示在 t 时刻工位 s 处缓存中零件的累积到达量; 第 2 部分表示在 t 时刻工位 s 处缓存中零件的累积消耗量。

搬运车完成 i 次搬运后, 工位 s 的线边零件到达量 $K(i, s)$ 为

$$K(i, s) = \begin{cases} \sum_{j=1}^i n_j \mu_1(s, s_j), & i \geq 1, \\ 0, & i = 0. \end{cases}$$

基于 $K(i, s)$ 定义变量 $\theta(i) = K(i - 1, s_i) + 1$, 则 $T_{\theta(i), s_i}$ 为第 i 次搬运的交货期, 方案 Λ 的目标函数为

$$C(\Lambda) = \beta \sum_{i=1}^{|\Lambda|} 2d_{s_i} + \sum_{i=1}^{|\Lambda|} \alpha_{s_i} \left(n_i (T_{\theta(i), s_i} - t_i - d_{s_i}) + \frac{n_i(n_i - 1)}{2} \right),$$

其中: 第 1 部分表示方案 Λ 的搬运成本 $C_D(\Lambda)$, 第 2 部分表示物料在缓存中耗费的库存成本 $C_I(\Lambda)$.

s.t.

$$\sum_{i=1}^{|\Lambda|} n_i \mu_1(s, s_i) = N, \quad s = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

$$1 \leq n_i \leq G_{s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, |\Lambda|, \quad (2)$$

$$t_i \leq t_{i+1} - 2d_{s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, |\Lambda| - 1, \quad (3)$$

$$0 \leq B(t, s) \leq V_s, \quad t \in \mathbb{R}, \quad s = 1, 2, \dots, S, \quad (4)$$

其中: 式(1)表示装配作业期间各工位的零件需求总量约束; 式(2)表示搬运设备的装载能力约束; 式(3)表示发车时间约束, 即搬运设备完成前一次物料配送后才能进行下一次配送作业; 式(4)表示装配线不允许缺货约束和各工位线边缓存的容量约束。

3) 性质推导。

给定搬运方案 $\Lambda = \{(t_i, n_i, s_i)\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, |\Lambda|\}$, 其中变量 n_i, s_i 为离散变量, t_i 为连续变量, 故该问题为混合优化问题, 为了有效地求解该调度问题, 给出了如下性质分析。

性质 1 基于约束(3)和装配线不允许缺货约束, 给定搬运方案 $\Lambda = \{(t_i, n_i, s_i)\}$, 则第 i 次搬运作业的最优发车时间 t_i^{opt} 为

$$t_i^{\text{opt}} = \begin{cases} \min\{T_{\theta(i), s_i} - d_{s_i}, t_{i+1} - 2d_{s_i}\}, & i \leq |\Lambda| - 1, \\ T_{\theta(|\Lambda|), s_{|\Lambda|}} - d_{s_{|\Lambda|}}, & i = |\Lambda|. \end{cases}$$

证 给定方案 $\Lambda = \{(t_i, n_i, s_i)\}, \forall i \leq |\Lambda| - 1$, 依据约束(3)可知 $t_i \leq t_{i+1} - 2d_{s_i}; \forall i \leq |\Lambda|$; 依据装配线不允许缺货这一约束, 可知 $t_i \leq T_{\theta(i), s_i} - d_{s_i}$. 给定两组发车时间 t_i^1, t_i^2 构建两方案 Λ^1, Λ^2 满足 $t_i^1 = t_i^{\text{opt}}$ 和 $t_i^2 < t_i^{\text{opt}}$. 则方案 Λ^1, Λ^2 的搬运成本均为 $\beta \sum_{i=1}^{|\Lambda|} 2d_{s_i}$,

且两搬运方案 Λ^1, Λ^2 的库存成本之差 $C_I(\Lambda^1) - C_I(\Lambda^2) = \sum_{i=1}^{|\Lambda|} \alpha_{s_i} n_i (t_i^2 - t_i^1) < 0$ 恒成立, 故当 $t_i = t_i^{\text{opt}}$ 时目标函数最优, 性质 1 得证。

性质 2 考虑到装配线各工位每隔一节拍时间都将消耗一单元线边库存量, 故给定搬运方案 $\Lambda = \{(t_i, n_i, s_i)\}$, 线边缓存中的零件库存量 $B(t, s_i)$ 在 $[t_i + d_{s_i}, t_{i+1} + d_{s_{i+1}})$ 上为单调减函数, 在 $t = t_i + d_{s_i}$ 时刻取得极大值. 性质 2 显然成立, 证明略. 基于性质 2, 给定 $\Lambda, \forall i \in \{1, 2, \dots, |\Lambda|\}, t = t_i + d_{s_i}$ 时刻工位 s_i 处线边缓存中的库存量可能违反缓存容量约束, 故约束(4)中第 2 个不等号可转换为考察 $t_i + d_{s_i}$ 时刻工位 s_i 处的零件库存水平。

性质 3 若 $\exists i \in \{2, \dots, |\Lambda| - 1\}$, 满足

$$1) \quad t_{i+1} - d_{s_i} \leq T_{\theta(i), s_i};$$

$$2) \quad t_{i+1} - d_{s_{i-1}} \leq T_{\theta(i-1), s_{i-1}};$$

$$3) \quad n_{i-1} \alpha_{s_{i-1}} < n_i \alpha_{s_i}.$$

则交换两次搬运, $C_D(\Lambda)$ 不变, $C_I(\Lambda)$ 减小, 目标函数减小。

证 给出搬运作业 (s_{i-1}, n_{i-1}) 和 (s_i, n_i) 满足假设 1)–3), 如图 2 所示. 其中 $\Delta_{i-1, i}$ 表示搬运作业 $i - 1$ 结束至搬运作业 i 开始所经历的时间, 由假设 1)–2) 可知, 通过交换相邻两次搬运作业 $(s_{i-1}, n_{i-1}), (s_i, n_i)$ 并保持发车时间 t_{i-1}, t_i 不变所构建的新方案 Λ' 满足 $B(t, s) \geq 0$, 且有 $C_D(\Lambda') = C_D(\Lambda)$ 成立; 记 $\lambda_{i-1, i} = d_{s_i} + d_{s_{i-1}} + \Delta_{i-1, i}$, 由假设(3)可知 $n_i \cdot \alpha_{s_i} - n_{i-1} \cdot \alpha_{s_{i-1}} > 0$, 则

$$C_I(\Lambda') = C_I(\Lambda) + \lambda_{i-1, i} \cdot n_{i-1} \cdot \alpha_{s_{i-1}} - \lambda_{i-1, i} \cdot n_i \cdot \alpha_{s_i} = C_I(\Lambda) - \lambda_{i-1, i} \cdot (n_i \cdot \alpha_{s_i} - n_{i-1} \cdot \alpha_{s_{i-1}}) < C_I(\Lambda).$$

目标函数得到优化, 性质 3 得证. 基于该性质, 可通过构造相邻 2-opt 变异算子以探索问题的优质解。

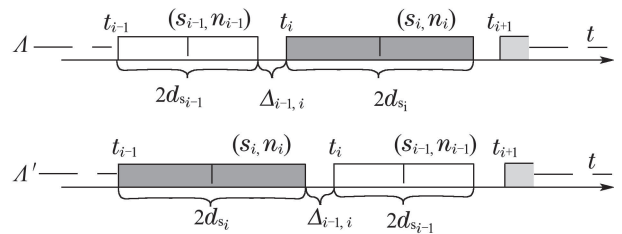


图 2 交换相邻两次搬运的甘特图

Fig. 2 The Gantt chart of exchanging two adjacent deliveries

性质 4 若存在两物料搬运方案 Λ, Λ' 满足: $\exists \xi \leq |\Lambda| - 1$, 对 $\forall i \in \{1, 2, \dots, |\Lambda| - \xi\}$, 有等式 $(s_{\xi+i}, n_{\xi+i}) = (s'_{|\Lambda|-\xi+i}, n'_{|\Lambda|-\xi+i})$ 恒成立. 则搬运方案 Λ, Λ' 的后 $|\Lambda| - \xi$ 次搬运作业构成的子方案 ψ, ψ' 满足 $C(\psi) = C(\psi')$.

证 由约束 $s_{\xi+i} = s'_{|\Lambda|-\xi+i}$ 以及搬运成本函数可知 $C_D(\psi) = C_D(\psi')$; 结合性质1可知集合 $\{(s_i, n_i), \dots, (s_{|\Lambda|}, n_{|\Lambda|})\}$ 唯一确定发车时间 $t_i (\forall i \in \{1, 2, \dots, |\Lambda| - 1\})$, 故 $C_1(\psi) = C_1(\psi')$, 因而等式 $C(\psi) = C(\psi')$ 成立, 性质4得证.

3 算法描述(Algorithm description)

由文献[11]可知, 该问题为强NP-Hard问题, 具有较高复杂度, 难以在合理的时间内求得问题的精确解.

为此, 本文构造了改进免疫克隆选择算法以有效地解决车辆装配线准时化物料配送问题. 在算法设计过程中, 开发了直接反映配送路径及配送量的变长双层整数编码机制; 在邻域生成机制中融合了疫苗接种操作以及基于Metropolis接受准则的局部搜索算子, 克服了传统免疫克隆选择算法搜索精度不高的缺陷, 提高了算法的搜索精度及收敛性能, 算法具体流程如图3所示.

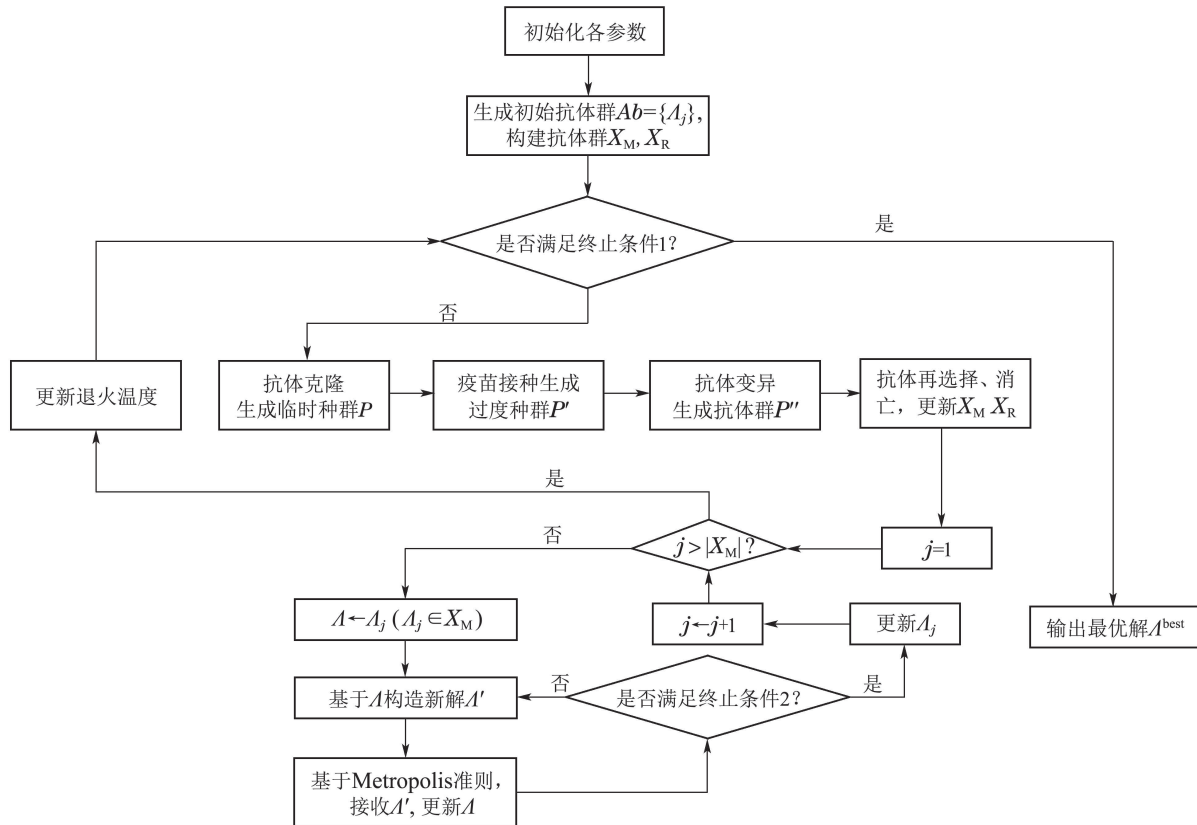


图3 算法流程图

Fig. 3 The flow diagram of the proposed algorithm

3.1 抗体编码方式(Encoded mode for antibodies)

本文采用变长双层实数编码表示抗体(问题的解) $Ab = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 其中 m 为抗体个数, 编码长度定义了搬运次数 $|\Lambda|$, 编码的第1, 2层分别定义了各次搬运作业的到达工位 s_i 及搬运量 n_i , 令 $S = 2, N = 5$, 给出了抗体的编码示例 A_1, A_2 , 如图4所示.

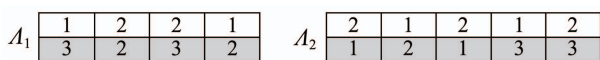


图4 抗体编码示意图

Fig. 4 The schematic diagram of encoded mode for antibodies

3.2 初始化(Initialization)

该问题为约束复杂的混合优化问题, 利用性质1

可有效地解决发车时间约束(约束(3))和装配线不允许缺货约束(约束(4)第1个不等号), 将原问题转化为离散组合优化问题; 与此同时, 为了保证车辆装载能力约束(约束(2))以及工位的缓存容量约束(即约束(4)中的第2个不等号), 搬运作业的搬运量上界为 $\min\{V_s + 1, G_s\}$; 此外为了满足约束(1), 当工位 $s (s \in \{1, 2, \dots, S\})$ 的搬运总量达到 N 时, 就不再对该工位进行物料搬运作业.

基于上述分析, 给定参数 W, N, G_s, v_s , 可依据如下步骤生成抗体:

Step 1 令 $A \leftarrow \emptyset$;

Step 2 随机生成 (s, n) , 满足 $1 \leq s \leq S$ 且 $1 \leq n \leq \min\{V_s + 1, G_s, N - K(|\Lambda|, s)\}$, 若 $\{(s, n)\} \neq \emptyset$ 则转Step 3, 否则输出 A ;

Step 3 令 $\Lambda \leftarrow \Lambda \cup \{(s, n)\}$, 转 Step 2.

依据 Step 1-3 生成 $Ab = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m\}$, 该初始化过程能够满足约束(1)-(3)及约束(4)的第 1 个不等号, 但各工位线边库存量在物料更新作业过程中仍可能违反缓存容量约束, 为此在计算抗体亲和力的过程中需要引入惩罚值.

3.3 亲和力计算(Calculation of the affinity)

给定 $\Lambda_j (j \in \{1, 2, \dots, m\})$, 考虑到上述初始化过程仍可能违反缓存容量约束, 故在亲和力计算过程中引入相应的惩罚值, 该方案亲和力值计算如下:

$$\text{affinity}(\Lambda_j) = \frac{E - F(\Lambda_j)}{\sum_{j=1}^m (E - F(\Lambda_j)) + \zeta},$$

其中: $F(\Lambda_j) = C(\Lambda_j) + \sum_{i=1}^{|\Lambda_j|} f(\delta_i)$ 表示方案 Λ_j 的目标函数值与惩罚值之和, $E = \max_{1 \leq j \leq m} \{F(\Lambda_j)\}$, ζ 为平滑系数; $\forall i = 1, 2, \dots, |\Lambda_j|$, 依据性质 2, 考察 $t = t_i + d_{s_i}$ 时刻工位 s_i 处的缓存容量, 惩罚函数 $f(\delta_i)$ 定义如下:

$$f(\delta_i) = k_1 \cdot 2\beta \cdot d_{s_i} + k_2 \cdot \alpha_{s_i} \cdot \left(\frac{\delta_i(\delta_i - 1)}{2} + 1\right),$$

其中: $\delta_i = \max\{B(t_i + d_{s_i}, s_i) - V_{s_i}, 0\}$, k_1, k_2 分别为与搬运成本及库存成本相关的惩罚系数.

算法经过上述初始化操作生成抗体初始种群 $Ab = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m\}$, 依据推论 1 计算各抗体的亲和力值, 选择 l 个优良抗体组成记忆库 X_M , 剩余部分构成保留种群 X_R .

3.4 抗体克隆(Cloning of antibodies)

$\forall j \in \{1, 2, \dots, |Ab|\}$, 依据抗体 Λ_j 的亲和力值 $\text{affinity}(\Lambda_j)$ 及目标函数值 $C(\Lambda_j)$, 计算抗体 Λ_j 的克隆规模 q_j , 公式如下^[12]:

$$q_j = \text{int} \left[\frac{\text{affinity}(\Lambda_j)}{\sum_{k=1}^m \text{affinity}(\Lambda_k)} * m * \lambda * e^{-\frac{C(\Lambda_j)}{\max_{1 \leq k \leq m} \{C(\Lambda_k)\}}} \right],$$

其中: $\text{int}[\]$ 为向上取整函数, λ 为与克隆规模相关的设定值. 经过克隆操作, 候选集 Ab 生成临时抗体种群 P .

3.5 疫苗接种(Vaccine inoculation)

将记忆库 X_M 作为候选疫苗种群, 基于 X_M 中抗体的亲和力值采用选择蒙特卡罗法获得疫苗抗体 $\Lambda^Y = \{(s_i^Y, n_i^Y)\}$, 对待接种抗体 $\Lambda = \{(s_j, n_j)\} (\Lambda \in P)$ 进行如下交叉接种操作:

Step 1 随机生成 $s_c \in \{s_1, s_2, \dots, s_S\}$;

Step 2 由抗体 Λ^Y, Λ 构建子集 $\{(s_c, n_i^Y)\}, \{(s_c, n_j)\}$ 分别记为 Π^Y, Π , 若 $|\Pi^Y| = |\Pi|$, 转 Step 3, 否则转 Step 4;

Step 3 则依据 Π^Y 中的搬运量依次更新 Λ 中工位 s_c 的搬运量;

Step 4 若 $|\Pi^Y| < |\Pi|$, 则依次更新 Λ 中工位 s_c 前 $|\Pi^Y|$ 的搬运量, 取消后 $|\Pi| - |\Pi^Y|$ 关于工位 s_c 的搬运作业; 若 $|\Pi^Y| > |\Pi|$, 则依次更新 Λ 中工位 s_c 前 $|\Pi|$ 的搬运量, 并将后 $|\Pi^Y| - |\Pi|$ 关于工位 s_c 的搬运作业至于方案 Λ 末尾.

种群 P 经过疫苗接种操作, 生成过度种群 P' .

3.6 抗体变异(Mutation of antibodies)

给定参数 $m_1 < m_2 < m_3 (m_1 > 0, m_3 < 1)$, 对抗体 $\Lambda (\Lambda \in P' \cup X_M)$ 进行如下变异操作:

Step 1 若 $\exists i \in \{2, \dots, |\Lambda| - 1\}$ 满足性质 3, 则交换 (s_{i-1}, n_{i-1}) 和 (s_i, n_i) 构建 $\Lambda', \Lambda \leftarrow \Lambda'$. 转 Step 2;

Step 2 $r = \text{rand}(0, 1)$, 若 $r < m_1$, 转 Step 3; 若 $m_1 \leq r < m_2$, 转 Step 4; 若 $m_2 \leq r < m_3$, 转 Step 5; 否则, 转 Step 6;

Step 3 任给 $j_1 \neq j_2 (j_1, j_2 \leq |\Lambda|)$, 交换 (s_{j_1}, n_{j_1}) 和 (s_{j_2}, n_{j_2}) 构建 $\Lambda', \Lambda \leftarrow \Lambda'$, 转 Step 6;

Step 4 若 $\exists j_1 \neq j_2 (j_1, j_2 \leq |\Lambda|)$, 满足 $s_{j_1} = s_{j_2}$ 且 $n_{j_1} + n_{j_2} \leq \min\{V_s, G_s\}$, 则 $n_{j_1} \leftarrow n_{j_1} + n_{j_2}, n_{j_2} \leftarrow 0$, 构建 $\Lambda', \Lambda \leftarrow \Lambda'$, 转 Step 6;

Step 5 若 $\exists n_j > 1 (j \leq |\Lambda|)$, 则任给 $v \in 1, 2, \dots, n_j - 1$, $n_j \leftarrow n_j - v, (s_{|\Lambda|+1} n_{|\Lambda|+1}) \leftarrow (s_j, v)$, 构建 $\Lambda', \Lambda \leftarrow \Lambda'$, 转 Step 6;

Step 6 抗体变异结束.

过度种群 P' 经过变异操作, 生成抗体群 P'' .

3.7 抗体再选择及抗体消亡(Reselection and death of antibodies)

依据抗体群 P'' 中抗体的亲和力值, 更新记忆库 X_M 及保留种群 X_R ; 与此同时, 选择 P'' 中亲和力最低的 d 个抗体重新进行初始化操作, 以保持抗体的多样性.

3.8 邻域构造(Construction of neighbourhoods)

由完整搬运方案 Λ 的第 $(q + 1) \sim |\Lambda|$ 项搬运作业可构建搬运子方案 $\{(s_q, n_q)\}, \forall j > q$, 为获得 $t_q + d_{s_q}$ 时刻工位 s_q 处的库存量, 给出库存量反向计算公式如下:

$$B(t_q + d_{s_q}, s_q) = N - \sum_{i=q+1}^{|\Lambda|} n_i \mu_1(s_i, s) - \sum_{p=1}^N \mu_2(t_q + d_{s_q}, T_{p, s_q}) =$$

$$\arg \min_{1 \leq p \leq N} \{T_{p,s_q} > t_q + d_{s_q}\} - \sum_{i=q+1}^{|A|} n_i \mu_1(s_i, s),$$

$\forall \Lambda \in X_M$, 对 $s = 1, 2, \dots, S, t \in \mathbb{R}$, 依据下式生成 q 值:

$$q = \begin{cases} \arg \max_{1 \leq i \leq |A|} \{\delta_i > 0\}, & B(t, s) \leq V_s, \\ \arg \min_{1 \leq i \leq |A|} \{V_{s_i} - B(t_i + d_{s_i}, s_i)\}, & \text{其他.} \end{cases}$$

依据性质4, 保留 Λ 的第 $(q + 1) \sim |A|$ 项搬运作业, 从后向前依次生成剩余物料的搬运作业 (s, n) 以获得新的抗体, 令 $\Phi = \emptyset$, 给出如下邻域构建步骤:

Step 1 由上式计算当前搬运方案 Λ 对应的 q 值, $\Lambda' \leftarrow \{(s_j, n_j) | (s_j, n_j) \in \Lambda, \forall j > q\}$, 构建集合 $H, H \leftarrow \{\Lambda'\}$, 转Step 2;

Step 2 构建集合 $I(\Lambda') = \{(s, n)\}$, 其中: $1 \leq s \leq S$, 且 $1 \leq n \leq \min\{V_s + 1, G_s, N - K(|\Lambda'|, s)\}$, 转Step 3;

Step 3 $\forall \mathcal{Y}_j \in H, a_k \in \bigcup_{j=1}^{|H|} I(\mathcal{Y}_j)$, 生成 $\mathcal{Y}'_{j,k} = \{a_k\} \cup \mathcal{Y}_j$ 依据库存量反向计算公式判定 $\mathcal{Y}'_{j,k}$ 是否满足缓存容量约束, 构建集合 $\Omega_k = \{\mathcal{Y}'_{j,k} | 1 \leq j \leq |H| \mathcal{Y}'_{j,k} \text{ 且 } \mathcal{Y}'_{j,k} \text{ 满足缓存容量约束}\}$; 若 $|\Omega_k| \geq \eta$, 则保留 Ω_k 中 $\sum_{i=1}^{|\mathcal{Y}'_{j,k}|} n_i$ 最大的 η 个元素并转Step 4, 若 $\forall k |\Omega_k| = 0$, 则转Step 5;

Step 4 $H \leftarrow \bigcup_{k=1}^K \Omega_k$, 其中 $K = \left\lfloor \frac{|H|}{|\bigcup_{j=1}^{|H|} I(\mathcal{Y}_j)|} \right\rfloor$, 若 $\exists \mathcal{Y}_j \in H$ 满足约束(1), 则 $\Phi = \Phi \cup \{\mathcal{Y}_j\}$, 转Step 3;

Step 5 若 $|\Phi| \neq 0$, 则 $\Lambda' \leftarrow \Lambda_\gamma$, 其中 $\gamma = \arg \min_{1 \leq k \leq |\Phi|} \{C(\Lambda_k) | \Lambda_k \in \Phi\}$, 否则 $\Lambda' \leftarrow \Lambda$.

其中: 控制参数 η 与问题规模 N 正相关, 且直接影响 $|\Phi|$ 值、算法运行时间和算法求解精度; η 越大, Φ 的规模越大, 求解精度越高, CPU 耗费时间越长.

3.9 算法终止条件(Termination conditions)

终止条件1:

- 1) 算法迭代次数达到预设步长 G ;
- 2) 连续 H_0 ($H_0 < G$) 步 Λ^{best} 没有得到优化;

终止条件2:

- 1) 局部优化的迭代步数达到预设步长 L ;
- 2) 连续 H_1 ($H_1 < L$) 步 $\Lambda_j \in X_M$ 没有得到优化.

4 实验与分析(Experiments and analysis)

引用文献[4-5, 7]中混流装配线准时化物料配送研究的相关参数, 考虑工位数目 $S = 5$ 物料配送问

题, 表1给定本文实验涉及的各工位参数, 搬运车的行驶成本系数 $\beta = 45$ \$/h.

表 1 各工位参数

Table 1 Parameters of each station

s	d_s/h	α_s/h	V_s/h	G_s/h
1	0.14	30	8	10
2	0.16	38	8	5
3	0.16	75	7	6
4	0.17	36	5	4
5	0.19	68	6	8

基于MATLAB2013a仿真平台, 本文作者在主频为2.4 GHz、内存4 GB、Intel(R)Core(TM)i5-2430M CPU的便携式计算机上进行实验, 实验结果和分析如下.

4.1 算法评价(Algorithm evaluations)

本文围绕车辆装配线的优化调度问题进行了建模, 并构建了改进免疫克隆选择算法进行求解. 该问题复杂度较高, 目前尚无标准算例可以参照. 为了有效地评价算法性能, 给出了本文算法与其他算法的优化结果比较分析, 包括不同规模下优化结果的GAP值分析以及解的优度(performance ratio, PR)分析^[13].

GAP值为不同算法在相同算法终止条件下优化结果的相对误差, GAP值越大, 表明本文所构建算法的搜索深度较其他常规算法越优. 令问题规模 N 分别取值10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 比较本文所构建的算法(PO)的优化结果与标准遗传算法(GA)、免疫克隆选择算法(ICS)、模拟退火算法(SA)、粒子群算法(PSO)以及变邻域搜索算法(VNS)的搜索结果, 如图5所示.

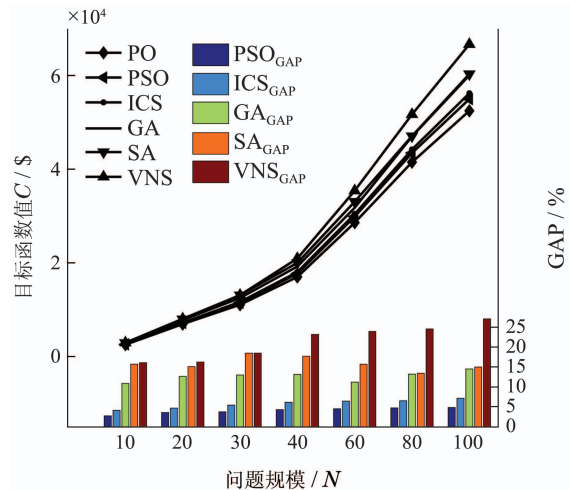


图 5 各类算法实验结果对比

Fig. 5 Comparisons of experimental results between different metaheuristics

由图5可知, 本文提出的算法(PO)在不同规模下寻优能力上优于GA, ICS, SA, PSO, VNS等传统优化算法, 优化结果的GAP值主要分布在区间[5%, 25%]; 此外, 优化后的目标函数值与规模 N 呈近似线性关系, 表明了算法的有效性.

$$PR = \frac{V(H, T, Y)}{\text{Best}(Y)},$$

其中: $V(H, T, Y)$ 为用算法 H 在迭代次数为 T 时对算例 Y 的优化结果; $\text{Best}(Y)$ 为实例 Y 求解所能获得的参照最优解, 实验中将改进免疫克隆选择算法经过1000次迭代后对算例 Y 的求解结果记为 $\text{Best}(Y)$. PR 值能够较好地反映算法的收敛性能, 其值越小, 表明算法的收敛性能越好. 如图6所示, 给出了问题规模 $N = 80$ 情形下迭代次数对3种算法 PR 值的影响分析.

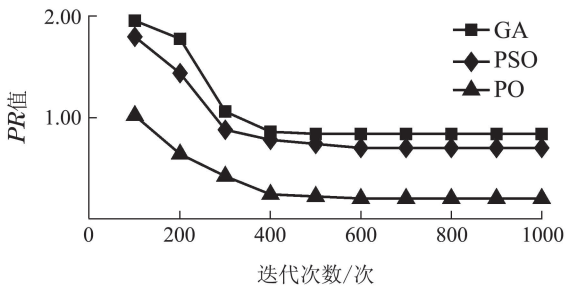


图 6 迭代次数对PR值的影响

Fig. 6 Number of iterations versus the values of PR

由图6可知, 用本文所构建算法(PO)的 PR 值优于GA, PSO, 说明改进免疫克隆选择算法的求解性能优于GA, PSO算法.

4.2 平均库存水平(Average inventory levels)

令问题规模 $N \in \{10, 20, \dots, 100\}$, 表2给出了不同规模下各工位平均库存水平的优化结果.

表 2 不同规模问题的平均库存水平

Table 2 Average inventory level of different problem scales

N	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
10	1.5	1.39	0.78	0.99	0.89
20	2.06	1.53	1.16	1.11	1.10
30	2.37	1.74	1.33	1.2	1.28
40	2.61	1.86	1.39	1.28	1.36
50	3.04	2.05	1.47	1.33	1.51
60	3.17	2.15	1.57	1.39	1.59
70	3.2	2.23	1.63	1.40	1.70
80	3.22	2.28	1.57	1.57	1.84
90	3.24	2.36	1.77	1.63	1.82
100	3.25	2.42	1.99	1.89	2.14

4.3 搬运成本系数和库存成本系数对搬运频率的影响 (Effects of delivery- and inventory-related coefficients on delivery frequencies)

令问题规模 $N = 50$, 给定搬运成本系数的变动系数 r_1 , 库存成本系数 α_1 的变动系数 r_2 , 即 $\beta' = (1 + r_1) \cdot \beta$, $\alpha'_1 = (1 + r_2) \cdot \alpha_1$. 改变系数 r_1, r_2 , 考察搬运成本系数 β 和库存成本系数 α_1 对工位1搬运频率 f_1 的影响, 如图7所示.

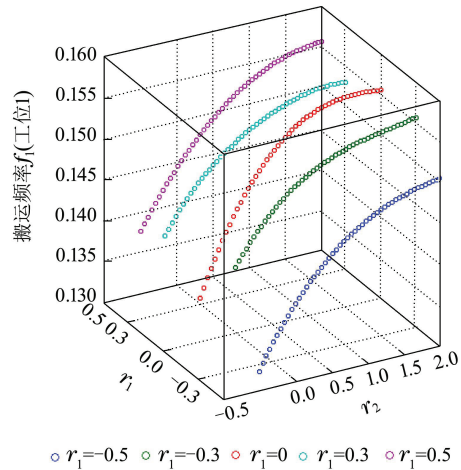


图 7 搬运成本系数和库存成本系数对搬运频率的影响

Fig. 7 Effects of delivery- and inventory-related coefficients on delivery frequencies

任给成本变动系数 $r_1 \in \{\pm 0.5, \pm 0.3, 0\}$, $r_2 \in (-0.5, 2]$, 由图7可知, 工位1的搬运频率 f_1 与其库存成本系数 α_1 正相关, 且 f_1 的增长速率随 α_1 的增长逐渐减小, f_1 趋于定值. 相对于库存成本系数而言, 搬运成本系数 β 的变动对搬运频率 f_1 的影响较小.

4.4 缓存容量对目标函数值的影响 (Effects of buffer capacities on objectives)

令问题规模 $N = 50$, 考虑线边缓存容量 V_s 对目标函数值 C 的影响, 选取工位1, 2, 3, 4, 取 $V_s \in \{5, 6, \dots, 12\}$, 结果如图8所示.

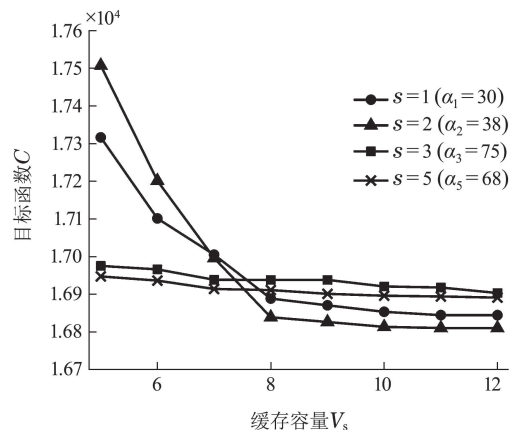


图 8 缓存容量对目标函数值的影响

Fig. 8 Effects of buffer capacities on objectives

由图8可知,缓存容量对目标函数值的影响分为两类:1)线边库存成本系数相对较小(如 $s = 1, 2$),随着缓存容量 V_s 的增大,目标函数值 C 逐步减小,且趋于定值;2)线边库存成本系数相对较大(如 $s = 3, 5$),缓存容量 V_s 对目标函数值 C 影响较小。

5 结论(Conclusions)

1) 本文研究了带线边缓存容量约束的装配线准时化物料供应调度问题,构建了以最小化搬运成本和线边库存成本总和为优化目标的数学模型;通过对问题的性质分析,将原约束复杂的混合优化问题转化为带缓存容量约束的离散优化问题,提出了改进免疫克隆选择算法,实验结果表明该配送算法可行、有效。

2) 通过实验分析可知,优化后的物料配送方案使得各工位都保持较低的库存水平;各工位的搬运频率受其线边缓存的库存成本系数影响较大,受搬运成本系数影响较小;缓存容量对目标函数值的影响受限于库存成本系数。

后续研究可以考虑多个搬运设备的联合调度问题以及带生产线停机等不确定因素的装配线物料配送调度问题。

参考文献(References):

- [1] BOYSEN N, FLIEDNER M, SCHOLL A. Assembly line balancing: Joint precedence graphs under high product variety [J]. *IIE Transactions*, 2007, 41(3): 183 – 193.
- [2] BATTINI D, BOYSEN N, EMDE S. Just-in-time supermarkets for part supply in the automobile industry [J]. *Journal of Management Control*, 2012, 24(2): 209 – 217.
- [3] BOYSEN N, EMDE S, HOECK M, et al. Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(1): 107 – 120.
- [4] SOUZA M C D, CARVALHO C R V D, BRIZON W B. Packing items to feed assembly lines [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184(2): 480 – 489.
- [5] EMDE S, FLIEDNER M, BOYSEN N. Optimally loading tow trains for just-in-time supply of mixed-model assembly lines [J]. *IIE Transactions*, 2012, 44(2): 121 – 135.
- [6] 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.
- [7] FATHIA M, ALVAREZA M J, RODRÍGUEZ V, et al. A multi-objective optimization algorithm to solve the part feeding problem in mixed-model assembly lines [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 11(1): 809 – 812.
- [8] SHANG R H, ZHANG K, JIAO L C, et al. Discrete polynary coding immune clonal selection-based joint subcarrier and power allocation in uplink cognitive OFDM network [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2016, 29(1): 64 – 83.
- [9] SANG Hongyan, PAN Quanke. A discrete invasive weed optimization algorithm for the integrated lot-streaming flow shop scheduling problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2015 32(2): 246 – 250. (桑红燕, 潘全科. 求解流水车间批量流集成调度的离散入侵杂草优化算法 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2): 246 – 250.)
- [10] DIABAT A, KANNAN D, KALIYAN M, et al. An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2013, 74(5): 156 – 169.
- [11] FATHI M, RODRÍGUEZ V, ALVAREZ M J. A novel memetic ant colony optimization-based heuristic algorithm for solving the assembly line part feeding problem [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1-4): 629 – 643.
- [12] SHANG R, MA H, WANG J, et al. Immune clonal selection algorithm for capacitated arc routing problem [J]. *Soft Computing*, 2015, DOI: 10.1007/s00500-015-1634-4.
- [13] QU P, MASON S J. Metaheuristic scheduling of 300 mm jobs containing multiple orders [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2005, 18(4): 633 – 643.

作者简介:

彭涛 (1992–), 男, 博士研究生, 主要从事智能优化和生产系统建模、调度等方向的研究, E-mail: tao.100824@foxmail.com;

周炳海 (1965–), 男, 博士, 工业工程研究所所长, 博士生导师, 主要从事离散系统建模、调度与仿真等方向的研究, E-mail: bhzhou@tongji.edu.cn.