

考虑货物冲突关系的二维装箱问题研究

孙宝凤, 王 帅, 郑黎黎*, 乔 海

(吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 货物冲突及其处理方式直接影响货箱消耗量和货物装载成效, 通过构建冲突矩阵和“冲突货物不能放置同一货箱内”处理方式, 同时考虑负载安全因素, 建立了考虑货物冲突关系的二维装箱优化模型. 设计了改进的模拟退火算法, 其运用贪心算法对货物冲突预处理, 确保初始装箱序列为可行解; 提出了兼顾当前温度和适应度影响的动态随机扰动率 ε 方程, 增强了邻域解的搜索能力, 改善了算法整体性能. 算例分析表明模型和算法有效. 120 种货物冲突稀疏度[0.1,0.9]情景下, 货箱面积利用率均值为[0.342,0.732], 降低了装载单元使用数量, 提高了资源利用率. 不同样本量情景下, 改进算法的求解质量和运行效率表现良好.

关键词: 二维装箱问题; 货物冲突; 改进的模拟退火算法

中图分类号: O221.4; TB114.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2020) 02-0079-07

装箱问题(Bin Packing Problem, BPP)可追溯至 20 世纪 60 年代的切割问题, 其旨在将不同大小的物体装进有限数量的装载箱或容器, 使得利用的装载箱数量最小化^[1]. 在生产和流通物流快速发展实践中, 由于货物物理属性(如挥发气味、易碎等)、安全性(电池等)、卫生性(药品)等特殊处理要求, 在混合装载时不允许装入同一装载单元中, 处理货物冲突成为当前混合物流装载和运输情况下高频热点决策问题之一, 派生出带有货物冲突关系的装箱问题(Bin Packing Problem with Conflicts, BPPC), 并成为学者最热衷讨论和研究的离散组合优化模型问题之一^[2-3]. 其中, 二维装箱问题(Two-dimension Bin Packing Problem, BPP-2D)同时结合了经典 BPP 和图论中的顶点着色问题(Vertex Cover Problems, VCP), 研究内容为基于已知数量并存在强异构尺寸关系的矩形二维货物集合, 目标是在满足拒绝冲突货物放入同一装载单元的条件下, 利用最少的装载资源或最小的装载成本实现混合装载, 达到全局最优化, 其也被多次证明为 NP-hard 问题^[3].

冲突关系的定义和消去起源于图论中着色模型的最小色数问题^[4]. 关于冲突关系的建模, Jansen^[5]首次提出运用图论概念表示货物之间的冲突关系, 并给出了一个适用于 BPPC 的近似求解算法方案. Gendreau 等^[6]首次提出 BPPC 的整数规划模型, 并从装箱模型和图着色模型两个角度分别讨论了问题的下界, 选择应用了随机冲突图, 该应用对于确定装箱问题上下界具有优越性. Elhedhli 等^[2]在 Gendreau 等^[6]的基础上证明, 相比于解决具有间隔或随机性冲突关系的问题, BPPC 对于解决其生成的冲突阈值图更为简便. 元野^[7]解决冲突货物装箱问题时, 着重于先建立顶点着色模型解决货物之间的冲突关系, 再考虑重量约束构建非冲突货物装箱模型, 设计了基于贪心着色和最大团两种算法的性能比较方案, 研究发现: 基于最大团的启发式算法对货物冲突关系复杂度的适应度更高, 更有助于提高计算质量. Trivella 等^[8]基于负载均衡的装箱问题提出了一种多级搜索算法, 使用不同的搜索级别迭代来改善装箱方案的优化目标. Khanafer 等^[9]假设待装载货物为已知冲突关系、边

收稿日期: 2019-09-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 博士学科点专项科研基金(20130061110008); 吉林省交通科技发展计划(2019012); 国家自然科学基金(51308249).

第一作者: 孙宝凤(1970—), 女, 吉林长春人, 博导/教授, 主要研究方向: 物流系统规划与仿真优化. E-mail: sunbf@jlu.edu.cn

*通信作者: 郑黎黎(1975—), 女, 吉林长春人, 副教授, 主要研究方向: 道路交通网络动态分析. E-mail: zlldtq1024@163.com

长和重量因素的矩形货物,采用基于树分解的新算法框架来解决带冲突约束的二维装箱问题(BPPC-2D),并提出了几种启发式策略有效利用分解.由此可见,冲突关系作为重要约束条件,如何定义和处理成为BPPC-2D建模的重要环节,本文拟根据冲突矩阵和“冲突货物不能放置同一货箱内”冲突预处理原则,建立带冲突约束的线性规划优化模型.

关于BPPC-2D求解算法策略,以系统化解法为主导,如分支定界法和启发式算法等,寻求有助于深度和广度搜索解空间的算法组合,是BPPC求解的关键所在.

分支定界法是一种确定BPPC的上界和下界,进而在问题的解空间树上搜索问题解的方法,代表性研究如Muritiba等^[10].启发式算法也是一种全局优化算法,如模拟退火算法、贪心算法、禁忌搜索算法等.启发式算法的优越性之一在于依赖于问题的过程确定解,因而,与建模过程(约束条件)相辅相成.代表性研究如Khanafer等^[11]构建了装箱冲突解决线性规划模型及其启发式算法,Pereira^[12]亦提出了分解的线性规划模型,利用元启发式算法、列生成方法以及禁忌搜索算法予以求解.可见,这种系统化构造解的方法既要结合问题过程,又要寻求较高效率获得全局最优解,本文据此提出了一种改进的模拟退火算法来求解带冲突关系的二维装箱问题.

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述及参数说明

BPPC-2D问题具体描述为:

给定 n 件已知特征参数的货物组成的货物集合 $I=\{i|i=1,2,3,\dots,n\}$,宽度 w_i ,高度 h_i ,重量 q_i .所有货物对应一个冲突货物关系矩阵 $G(i,j)$,若货物 i 与 j 之间存在冲突关系,矩阵对应位置 g_{ij} 为1,即不允许这两种货物同时装入同一货箱当中,否则 g_{ij} 为0.

已知有 m 个同类型的最大宽度、高度、承受载荷、允许重心偏移量分别为 W 、 H 、 Q 、 Δ 的装载单元货箱 k ;使用同类型的装载单元(货箱)对货物进行装箱操作,使得同一货箱内不存在具有冲突关系的货物,并且满足货箱的尺寸、载重以及重

心载荷约束的条件下,确保货箱使用的数量最少以及装载运输的经济效益最好.

变量 δ_{ik} 在货物 i 装入货箱 k 时为1,否则为0;变量 m_{ik} 为货物 i 在货箱 k 中以左下角为原点的力矩;变量 t_k 在货箱 k 被使用时为1,否则为0;当货物 i 位于货物 j 的左侧时,变量 p_{ij} 为1,同样的,当货物 i 位于货物 j 的下侧时,变量 d_{ij} 为1; (x_i, y_i) 为货物 i 在箱中左下角为定位点的位置坐标.

1.2 模型建立

本文所建立的BPPC-2D模型以使用的装载货箱数量最小化为目标函数,通过建立冲突矩阵并采用“冲突货物不能放置同一货箱内”处理原则,同时考虑负载安全因素,增加了货物装箱重心约束,也补充了 $i \neq j$ 的货物装箱位置关系约束必要条件.文献[2-3,7,9]所建立的BPPC优化模型仅仅考虑货物之间的位置关系,忽略了 p_{ij} 与 d_{ij} 决策变量在 $i=j$ 情况下不具有数学意义这一情况,该约束条件的不完整导致在对已建立模型求解的过程中会产生干扰而无法得出有效解.据此本文对该必要条件进行优化完善,数学规划模型为:

目标函数

$$\min \sum_{k=1}^m t_k, \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^m \delta_{ik} = 1, \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\delta_{ik} \leq t_k, \forall i \in I, k=1, \dots, m, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \delta_{ik} \leq Q t_k, \forall i \in I, k=1, \dots, m, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[q_i \delta_{ik} \times \left(\frac{1}{2} W + \Delta \right) \right] \geq \sum_{i=1}^n m_{ik}, \quad \forall i \in I, k=1, \dots, m, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[q_i \delta_{ik} \times \left(\frac{1}{2} W - \Delta \right) \right] \leq \sum_{i=1}^n m_{ik}, \quad \forall i \in I, k=1, \dots, m, \quad (6)$$

$$p_{ij} + p_{ji} + d_{ij} + d_{ji} \leq 2 \sum_{k=1}^m \delta_{ik} \delta_{jk}, \quad \forall i, j \in I, i \neq j, \quad (7)$$

$$p_{ij} + p_{ji} + d_{ij} + d_{ji} \geq 1 - (1 - \delta_{ik}) - (1 - \delta_{jk}), \quad \forall i, j \in I, i \neq j, k=1, \dots, m, \quad (8)$$

$$x_i + w_i \leq x_j + W \times (1 - p_{ij}), \forall i, j \in I, i \neq j, \quad (9)$$

$$y_i + h_i \leq y_j + H \times (1 - d_{ij}), \forall i, j \in I, i \neq j, \quad (10)$$

$$x_i \leq W - w_i, \forall i \in I, \quad (11)$$

$$y_i \leq H - h_i, \forall i \in I, \quad (12)$$

$$g_{ij}(\delta_{ik} + \delta_{jk}) \leq 1, \forall (i, j) \in G, k = 1, \dots, m, \quad (13)$$

$$p_{ij}, d_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in I, i \neq j, \quad (14)$$

$$\delta_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, k = 1, \dots, m, \quad (15)$$

$$t_k \in \{0, 1\}, k = 1, \dots, m, \quad (16)$$

$$x_i, y_i \in N, \forall i \in I. \quad (17)$$

以上模型当中, 式(1)表示 BPPC-2D 模型的目标函数, 货物装箱所使用的货箱总数最小; 式(2)表示保证所有货物都要装入货箱中, 而且保证同种货物只能被装入同一货箱中; 式(3)表示货箱 k 中存在至少有一件货物则货箱 k 被计入使用; 式(4)表示保证货箱内所有货物的质量和不超过货箱的最大承载载荷; 式(5)、(6)表示保证装载后货箱的重心在允许的重心偏移限制内; 式(7)、(8)表示确定箱内货物相对位置约束; 式(9)、(10)表示保证货箱内货物不互相重叠; 式(11)、(12)表示保证货物装载不超过货箱容量; 式(13)表示禁止冲突货物放入同一箱内; 式(14)~(16)为模型所需的决策变量定义; 式(17)定义货物位置坐标。

2 改进模拟退火算法设计

装箱问题属于 NP-hard 问题, 大量的模拟实验表明, 模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法在解决组合优化问题时能跳出局部最优解, 产生令人满意、质量较好的解, 并且所用运算时间也较为理想。其算法思想包括: (1)采用固态退火冷却进度表控制算法进程; (2)将 Metropolis 准则作为新解的接受准则。

模拟退火算法具有渐近收敛性, 在理论上已被证明是一种以概率1收敛于全局最优解的全局优化算法。

2.1 算法设计

2.1.1 贪心算法构造初始解

模拟退火算法一般随机生成初始解, 而这种方法随机性太大, 可能会降低算法的稳定性或者搜索效率^[14]。针对本文提出的考虑冲突关系的二维货物装箱模型, 基于贪心算法可以快速求出满足计算精度要求的近似解这一特性, 设计了贪心

算法对解集进行预处理以快速得到可行初始解。

2.1.2 构造温度自适应邻域解

为了使改进算法获得更好的爬山能力, 兼顾温度和适应度两种考量因素, 引入了动态随机扰动率 ε 以构造邻域解。

$$\varepsilon = \exp \left[- \left(\frac{1}{T_k} + \left| \frac{D}{D_{\max}} \right| \right) \right].$$

扰动率 ε 的决定因素为当前温度 T_k 、当前种群的最低适应度值 D 以及历史记录最高适应度值 $D_{\max}$ 。在温度 T_k 较高以及种群中 D 的结果较差时, 可以增强解的邻域搜索能力, 使得设计的改进模拟退火算法有较强的避障能力, 从而得到全局最优解。

在构造邻域解时, 对于当前解的各个解集中的编码序列, 按照概率 ε 对当前解进行扰动, 对种群内的解进行变异操作从而产生新的解集。具体的变异操作为: 产生伪随机数 $\tau \in (0, 1)$, 若 $\tau > \varepsilon$, 则保留种群中的当前解, 否则通过以下方式对结果进行变异, 从而得到邻域解:

(1)交换相邻两条序列中的任意两个元素;

(2)在序列中设置插入位和确定插入元素, 对其进行插入。

经过上述过程后, 遍历该序列, 并对原序列进行修正, 以保证序列不存在重复元素。

2.1.3 基于装箱效果设定适应度值

根据每个箱子内的装箱效果设计了算法的适应度值 f 。

$$f = M \sum_k^t \mu U_k + \beta(N - t),$$

式中: U_k 为货箱 k 的空间利用率; μ 为惩罚值, 货箱的载荷重心超过其重心偏移限制则会赋予惩罚值 $\mu = 0.05$; t 为当前解的目标函数; β 为权值系数; M 、 N 为控制参数。 β 、 M 、 N 可放大数据, 使之更易区分实验结果。

2.2 算法流程

算法流程如图1所示, 其实施步骤可分为两个阶段。

第 I 阶段: 贪心算法获取初始解。

步骤 0 设置未被分配所属货类的货物集合 TC , 执行的当前货物号 $v = 1$, 当前货物所属类别

物 $v(c)$, 当前货物的邻接货物集合 TV , 货物类别 $c=1$.

步骤 1 若 TV 中所有货物 $v(c)=\emptyset$, 则将当前类别赋予该货物 $v(c)=c$, 并从 TC 中除去货物 v , $v=v+1$; 否则 $v=v+1$. 循环执行步骤 1, 直至顺序遍历 TC 集合中所有元素跳出循环, 转至步骤 2.

步骤 2 若 $TC \neq \emptyset$, 则转至步骤 3, 否则转至步骤 4.

步骤 3 $c=c+1$, 返回步骤 1.

步骤 4 输出各个货物类别 i , 分别按照货物类别随机生成数量为 d 的装箱序列编码 $x(i)$, 作为可行初始解集进行第 II 阶段的运算.

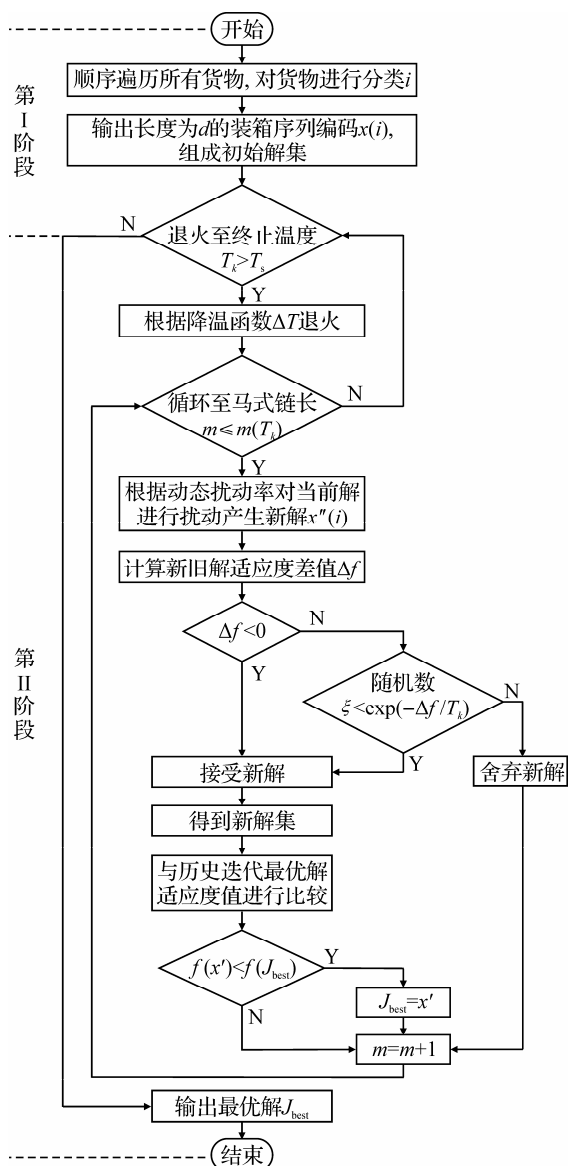


图 1 改进的模拟退火算法流程

第 II 阶段: 改进模拟退火算法求解.

步骤 0 设置初始温度 T_0 , 终止温度 T_s , 降温函数 ΔT , 马尔科夫链长 $m(T_k)$, 用上一阶段产生包含数量 d 不同的随机可行解 $x(i)$, 组成装箱初始解集 B_0 , 历史最优解记忆保留为 J_{best} .

步骤 1 若当前温度 $T_k > T_s$, 则记录在当前温度循环次数 $m=1$, 并转步骤 2; 否则外循环结束并输出最终运算结果 J_{best} .

步骤 2 若 $m \leq m(T_k)$ 则转至步骤 3; 否则内循环结束, 根据 ΔT 将 T_k 降温至 T_{k+1} , $k=k+1$, 转至步骤 1.

步骤 3 若 $m > m(T_k)$, 则按照邻域解产生机制产生新解 $x''(i)$, 更新解集 $B'(i)$, 计算新解 $x''(i)$ 与扰动前解 $x'(i)$ 的适应度的差值 $\Delta f = f(x''(i)) - f(x'(i))$, 若 $\Delta f < 0$, $x'(i) = x''(i)$ 则转至步骤 5; 否则转至步骤 4.

步骤 4 根据 Metropolis 接受准则, 产生均匀分布的伪随机数 $\xi \in (0, 1)$, 若 $\xi < \exp(-\Delta f / T_k)$, 则使 $x'(i) = x''(i)$, $m = m + 1$, 转回步骤 2; 否则舍弃新解 $x''(i)$, $m = m + 1$, 转回步骤 2.

步骤 5 若 $f(x') < f(J_{best})$, 则 $J_{best} = x'(i)$, $m = m + 1$, 转回步骤 2; 否则, $m = m + 1$, 转回步骤 2.

3 模型应用与数值实验

运用本文提出的考虑货物冲突关系的二维装箱模型及改进的模拟退火算法求解、剖析实验算例, 包括: (1) 分析不同冲突稀疏度 β 对装箱效果的影响, 检验模型应用效果; (2) 分析改进前后算法的性能; (3) 分析 β 变化对算法性能的影响.

3.1 实验数据

实验 1、2、3 样本货物总数量 N 分别为 120、250、500, 观测货物冲突稀疏度 β ($0.1 \leq \beta \leq 0.9$) 变化对最优解的影响, 进一步划分为 9 种情形. 冲突稀疏度 β 的计算方法为:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}}{10N},$$

式中, g_{ij} 为 N 阶 0-1 冲突矩阵的矩阵元, 根据货物冲突稀疏度和样本量随机生成.

实验 1 的货物尺寸数据基于文献[15], 实验数

据可以从网站 http://www.or.deis.unibo.it/research_pages/ORinstances/BPPC.html 下载, 实验 2、3 按照样本特征随机生成与重构; 货物的重量数据根据货物尺寸予以折算, $[1,100]$ kg; 装载货箱的尺寸规格为 $25\text{ dm}\times 10\text{ dm}$, 最大载荷为 500 kg .

3.2 实验分析

3.2.1 模型应用效果

应用所建立的 BPPC-2D 模型, 由实验 1, 运用改进后的模拟退火算法, 迭代次数为 600, 可得装箱效果观测表(表 1).

表 1 $N=120$ 的装箱效果观测表

β	装箱数/个	货箱面积利用率/%		
		最优值	最差值	均值
		最优值	最差值	均值
0.1	20	96.4	10.0	73.2
0.2	21	99.2	4.8	67.5
0.3	21	89.2	8.8	56.3
0.4	24	82.4	11.2	59.1
0.5	28	83.6	10.4	54.1
0.6	34	90.8	9.2	58.2
0.7	35	79.2	13.2	47.2
0.8	43	88.4	16.4	48.4
0.9	53	57.6	2.4	34.2

(1)首先, 冲突稀疏度 β 由 0.1 变化至 0.9 时, 装箱方案的货箱面积利用率均值由 73.2%降为 34.2%, 冲突关系越显著以及程度越高, 装箱效果越差, 表现为装箱数大、消耗资源多、面积利用率低. 其次, 最优值在 $[57.6\%,99.2\%]$ 波动, 最差值在 $[2.4\%,16.4\%]$ 波动, 装箱效果难以保障.

(2) β 对模型最优解的影响呈现分阶段差异.

当 $0.1 \leq \beta \leq 0.2$ 时, 货箱面积利用率最优值可达 99.2%. 可见, 货箱内货物装载方案受冲突关系的影响较小, 货箱最优装载效果能够得以实现.

当 $0.2 < \beta \leq 0.7$ 时, 货物之间冲突关系复杂性提高, 随着货物冲突稀疏度的增大, 整体装箱方案的成效会受到其限制而呈现不同程度的降低, 但是货箱内货物装载方案效果仍可保持在较高水平, 货箱面积利用率最优值均高于 79%.

当 $0.7 < \beta \leq 0.9$ 时, 货箱最优面积利用率最低仅为 57.6%.

3.2.2 改进算法性能分析

为检验和比较改进的模拟退火算法的性能,

开展样本量 N 分别为 120、250 和 500 的系列情景实验. 算法运行环境为 CPU 2.60 GHz, Windows 10, MATLAB 2016, 比较内容包括每组算例得出目标函数的最优值、最差值、均值和平均运算时长, 并通过均值和运算时长的结果来比较算法的改进效率, 算例结果见表 2.

表 2 改进前后模拟退火算法的性能比较

N	β	装箱数/个						装箱 数改 进率/ %	平均运算		运算 时间
		改进算法			原算法				改进 算法	原算 法	
		最优	最差	均	最优	最差	均				
		值	值	值	值	值	值				
120	0.1	18	21	19	20	25	22	13.64	170	190	10.53
	0.2	18	22	20	21	24	22	9.09	182	205	11.22
	0.3	19	22	21	21	25	23	8.70	189	209	9.57
	0.4	22	26	23	26	27	26	11.54	204	218	6.42
	0.5	29	30	29	30	31	30	3.33	229	248	7.66
	0.6	30	34	31	31	34	33	6.06	256	264	3.03
	0.7	35	35	35	35	37	36	2.78	324	349	7.16
	0.8	43	44	43	43	44	44	2.27	533	590	9.66
	0.9	52	53	52	52	54	53	1.89	738	756	2.38
250	0.1	24	30	28	30	34	32	12.50	321	364	11.81
	0.2	30	35	32	32	41	37	13.51	305	353	13.60
	0.3	39	44	41	40	45	43	4.65	296	344	13.95
	0.4	44	47	46	46	49	47	2.13	325	368	11.68
	0.5	47	48	47	51	53	52	9.62	315	390	19.23
	0.6	54	56	55	59	62	60	8.33	415	430	3.49
	0.7	62	63	62	66	68	66	6.06	425	462	8.01
	0.8	75	76	75	77	77	77	2.60	616	799	22.90
	0.9	100	100	100	102	102	102	1.96	1156	1314	12.02
500	0.1	59	73	63	62	81	72	12.50	673	691	2.60
	0.2	67	70	68	69	87	76	10.53	707	749	5.61
	0.3	79	83	80	86	93	88	9.09	656	723	9.27
	0.4	82	86	84	89	93	91	7.69	657	701	6.28
	0.5	96	98	97	100	106	102	4.90	679	726	6.47
	0.6	108	112	110	114	120	117	5.98	799	932	14.27
	0.7	108	112	110	103	124	116	5.17	839	959	12.51
	0.8	142	143	142	143	145	144	1.39	1041	1183	11.50
	0.9	177	177	177	177	178	178	0.56	187	2221	15.58

为详细说明改进模拟退火算法的求解特点, 选取样本量为 120, $\beta = 0.1$ 的实验, 迭代次数为 600, 对比原 SA 算法求解的运算过程, 其适应度值收敛图像如图 2 所示.

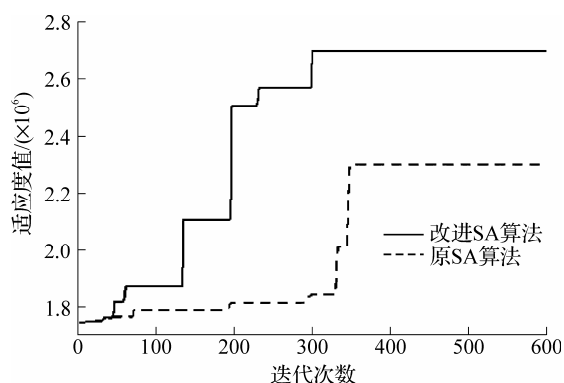


图2 算例下算法性能对比

图2表明,改进的SA算法具有更快的收敛速度和更高的求解质量.传统SA算法在迭代到347次后得到最优解,改进的SA算法在迭代至298次之后收敛.相比于原算法,改进算法不仅在时间性能上有所提高,还在解的质量上得到了优化,有效地提升了原模拟退火算法的性能.

3.2.3 β 变化对算法性能的影响分析

(1) $0.1 \leq \beta \leq 0.2$, 货物之间冲突约束较小,算法对于装箱可操作性更高,改进的模拟退火算法对于冲突消去和装箱整体结果的计算效果提升较为明显,最大改进率为13.64%,最小改进率为9.09%.

(2) $0.2 < \beta \leq 0.7$, 货物之间冲突约束成为影响决策的主要因素,直接影响装箱效率.以装箱数为例,最大改进率为11.54%,最小改进率为2.13%.

(3) $0.7 < \beta \leq 0.9$, 货物冲突关系对于可行解的限制成为主要约束,整体方案的可优化程度较小,两类算法的计算结果差别较小,最大改进率为2.60%,最小改进率为0.56%,但是运算时间缩短更为明显,最高可得到22.9%的优化率.

4 结论

论文建立了考虑货物冲突关系的二维装箱优化模型,进而设计了模拟退火算法和贪心算法相结合的组合优化算法,有助于避免陷入局部最优解,快速求出满足计算精度要求的初始可行解.最后,通过算法分析验证模型及其算法的有效性和优越性.

论文得出如下结论:

(1)建立了冲突矩阵 $G(i, j)$,以“冲突货物不能放置同一货箱内”为冲突处理原则,同时添加了货

物冲突关系、装载质量、装载空间(货物及其货箱尺寸)、重心偏移量等约束,随着冲突稀疏度 β 由小变大,货箱面积利用率最优值范围为[57.6%, 99.2%],所建立的模型和算法有效,能够解决二维装箱问题.

(2)改进的模拟退火算法与贪心算法相结合,运用贪心算法的局部搜索优越性(局部最优解)构造了初始解;还通过引入基于温度和适应度的动态随机扰动率 ε 以及建立降温函数 ΔT ,构造了温度自适应邻域解搜索策略,提高了邻域解搜索能力.改进的模拟退火算法使得目标函数和平均运算时间的改进率分别为[0.56%, 13.64%]和[2.38%, 22.90%],相对于原算法,其解的质量和平均运算时间都得到不同程度的改善,解的稳定性以及全局性亦较好.

(3)冲突稀疏度 β 越大,冲突化解难度越高,货物冲突关系对于装箱效果的影响越大. β 较小时,采取冲突分类预处理的化解原则是有效的,装箱效果较好; β 较大时,冲突预处理失去主导作用,装箱效果较差.即装箱效果受冲突稀疏度 β 的变化影响显著,应视 β 的不同情形而采用不同的冲突化解方法.

本文基于运载货物的特殊性,在满足所有货物特殊需求的条件下,为节省运营成本而开展了装箱问题研究.鉴于启发式算法与模型构建过程的结合度高,未来可尝试探索其他启发式算法如蚁群算法和禁忌搜索算法等的创新应用.

参考文献:

- [1] Liao C S, Hsu C H. New lower bounds for the three-dimensional orthogonal bin packing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(2): 244-252.
- [2] Elhedhli S, Li L, Gzara M, et al. A branch-and-price algorithm for the bin packing problem with conflicts[J]. INFORMS Journal on Computing, 2011, 23(3):404-415.
- [3] Maiza M, Radjef M S, Sais L. Efficient lower bounds for packing problems in heterogeneous bins with conflicts constraint[J]. Intelligent Mathematics II: Applied Mathematics and Approximation Theory, 2016, 441:263-270.
- [4] Galinier P, Hertz A. A survey of local search methods for graph coloring[J]. Computers & Operations Research,

- 2006, 33(9):2547-2562.
- [5] Jansen K. An approximation scheme for bin packing with conflicts[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1999, 3(4):363-377.
- [6] Gendreau M, Laporte G, Semet F. Heuristics and lower bounds for the bin packing problem with conflicts[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(3):347-358.
- [7] 元野. 基于图着色模型的零担物流调度优化问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] Trivella A, Pisinger D. The load-balanced multi-dimensional bin-packing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 74:152-164.
- [9] Khanafer A, Clautiaux F, Talbi E G. Tree decomposition based heuristics for the two-dimensional bin packing problem with conflicts[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39:54-63.
- [10] Muritiba A E F, Iori M, Malaguti E. Algorithms for the bin packing problem with conflicts[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2010, 22(3):281-288.
- [11] Khanafer A, Clautiaux F, Hanafi S, et al. The min-conflict packing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(9):2122-2132.
- [12] Pereira J. Procedures for the bin packing problem with precedence constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3):794-806.
- [13] 卢宇婷, 林禹攸, 彭乔姿. 模拟退火算法改进综述及参数探究[J]. *大学数学*, 2015, 31(6):96-103.
- [14] 孙宝凤, 史俊妍, 杨雪, 等. 基于实时信息的取送货动态车辆路径问题研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(3):93-100.
- [15] Bengtsson B E. Packing rectangular pieces--A heuristic approach[J]. *The Computer Journal*, 1982, 25(3):353-357.

Research on two-dimensional packing problem with cargo conflicts

SUN Baofeng, WANG Shuai, ZHENG Lili*, QIAO Hai
(College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Cargo conflicts and their handling methods directly affect the efficiency of the cargo loading and unloading. A two-dimensional packing optimization model solving the cargo conflict is established in this paper. The conflict matrix and the rule “conflicting goods cannot be placed in the same container” are applied. Improved simulated annealing algorithm is designed for the model, in which the greedy algorithm is employed to preprocess the cargo conflicts to ensure that the initial packing sequence guarantees a feasible solution. Its neighborhood solution search ability and calculation speed are strengthened by dynamic random perturbation ε equation which takes into consideration the current temperature and fitness for improvement of the overall algorithm performance. Simulation tests show that the model proposed and algorithm improved can achieve the satisfying results. For example, under the context of 120 cargo with the conflict sparsity range being [0.1,0.9], the average utilization rate of container area is [0.342,0.732]. These readings show the capability of reducing the number of loading units and improving the resource utilization. Other simulations with varying cargo samplings also demonstrate promising results.

Key words: two-dimensional packing problem; cargo with conflicts; improved simulated annealing algorithm

(责任编辑 韩 超)