

文章编号: 1005-0523(2026)01-0071-11



考虑运输成本的多车型车辆配载研究

徐翔斌, 陈艳萍

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了解决多车型车辆配载过程中运输成本过高的问题, 研究了同时考虑运输成本和运输安全的多车型车辆配载问题。首先, 在车辆装载能力有限的前提下, 针对多车型多品种货物的车辆配载问题, 构建了一个以最小化用车成本为目标、同时考虑负载均衡的车辆配载数学模型; 其次, 提出了求解该问题的变邻域搜索算法; 最后, 基于“拟人化”的思路, 设计了甩尾箱算子、大车换小车算子、一大车换两小车算子、两小车换一大车等邻域算子和重装部分车辆的抖动算子, 并将其运用于变邻域搜索算法中。实例数据结果证明: 相比于传统的智能优化算法, 文章构建变邻域搜索算法具有较强的全局搜索能力, 并且模型与算法可以在保证负载均衡的基础上; 用车数量由4辆减少到3辆, 用车成本降低了17.44%, 装载率均值由0.69提高到0.89, 车辆配载率比例均值提高达28.99%, 优化效果明显。构建的模型与算法在保证运输安全的基础上, 可极大节省物流企业的用车成本, 提高运输利润, 有助于物流企业提质降本增效。

关键词: 多车型; 运输成本; 车辆配载; 负载均衡; 变邻域搜索

中图分类号: U169

文献标志码: A

本文引用格式: 徐翔斌, 陈艳萍. 考虑运输成本的多车型车辆配载研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 71-81.

Research on Multi-Type Vehicle Loading Considering Transportation Cost

Xu Xiangbin, Chen Yanping

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to solve the problem of high transportation costs in the process of multi-vehicle loading, a multi-vehicle loading problem that considers both transportation costs and transportation safety was studied. Firstly, under the premise of infinite vehicle loading capacity, a mathematical model for vehicle loading was constructed to minimize the cost of using vehicles and consider load balancing for the problem of vehicle loading of multiple vehicle types and varieties of goods. Secondly, variable neighborhood search algorithm was proposed to solve the problem. Finally, based on the idea of "personification", neighborhood operators such as tail box operator, large vehicle to small vehicle operator, one large vehicle to two small vehicle operator, two small vehicle to one large vehicle operator, and shaking operator to heavy-duty vehicles were designed and applied to the variable neighborhood search algorithm. The example data results demonstrate that compared with traditional intelligent optimization algorithms, the variable neighborhood search algorithm constructed in this paper has strong global search ability. The model and algorithm can reduce the number of vehicles from 4 to 3 while ensuring load balance, thereby reducing vehicle costs by 17.44%. The average loading rate is increased from 0.69 to 0.89, and improving the aver-

收稿日期: 2024-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(72261011)

age vehicle loading rate by 28.99%. The optimization effect is significant. The model and algorithm constructed in this article can greatly save the transportation costs of logistics enterprises, improve transportation profits, and help logistics enterprises improve quality, reduce cost, and increase efficiency while ensuring transportation safety.

Key words: multiple type vehicles; transportation cost; vehicle loading; load balancing; variable neighborhood search

Citation format: XU X B, CHEN Y P. Research on multi-type vehicle loading considering transportation cost [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 71–81.

当前我国物流业存在着运输成本高、服务效率低下等问题,合理的车辆配载可以提高车辆利用率,既是物流和运输企业实现降本增效的重要手段,也是降低社会物流成本的重要途径;车辆配载安全还直接影响到行车安全。因此,如何对车辆配载进行科学、合理地规划,从而有效降低运输成本和交通事故发生率,具有重要的研究价值。

车辆配载问题(vehicle loading problem, VLP)^[1]研究在规定约束条件下将待装载货物合理地装入车辆中,目标是最大化车辆装载率。该问题还适用于飞机装舱^[2]、铁路货运^[3]以及码头装货^[4]等诸多领域,具有重要的理论和应用价值,成为了交通和物流领域的研究热点。VLP是典型的NP难问题,一般采用精确算法、构造式启发式算法和智能优化算法求解。精确算法包括列生成^[5]和分枝定价^[6]等,精确算法虽然能够求得VLP的最优解,但随着问题规模的增大,算法的复杂度呈指数型增长,无法求解大规模VLP。构造式启发式基于人工经验求解VLP,包括最大空间法^[7]、极点法^[8]和分层法^[9]等,这类算法具有求解速度快和结果可解释性好等优点,适合求解大规模VLP,但是不能保证求得问题的最优解。智能优化算法包括模拟退火算法^[10]与遗传算法^[11]等,这类算法兼具精确算法和构造式启发算法的优点,可求解大规模VLP,是工业界求解VLP的主要方法。在智能优化算法中,基于多邻域结构的变邻域搜索的智能算法(variable neighborhood search, VNS)^[12],借助于多个邻域算子进行搜索,能够克服传统算法由于算子结构单一而容易导致陷入局部最优等问题,有效提升问题的优化效果,被广泛用于优化卫星调度^[13]和并行机调度^[14]等问题中。除考虑最大化车辆装载率之外,VLP实用性的另外一个关键因素是货物的配载平衡,这是能够确保车辆行车安全的关键。货物配载平衡一般需要考虑车辆轴重约束^[15]、

载荷稳定性^[16]及负载平衡等因素。当前研究VLP大多数只考虑单一车型,对于单一车型的VLP,主要以提升车辆配载率为优化目标,车辆配载率最高就意味着用车成本最低。大多数物流企业都拥有多种不同类型的车辆,不同类型的车辆意味着不同的用车成本,如何从用车成本的角度来研究多车型VLP对于物流企业的降本增效更具现实意义。

本文考虑物流企业使用多种类型车辆进行货物运输,基于降本增效的目的,研究如何在保证行车安全的前提下以最低的用车成本为目标来优化物流企业的车辆配载问题。构建了考虑运输成本最低的多车型车辆配载问题(multiple vehicle loading problem with transportation cost, MVLP-TC)模型,利用VNS算法多算子协同搜索的优势,设计了变邻域搜索算法和相应的邻域算子来优化配载问题。算例分析和企业实际应用表明,本文的模型与算法在确保负载平衡的基础上,不仅提高了车辆配载率,还有效地降低了运输成本。

1 问题描述及数学模型

1.1 问题描述

本文研究的MVLP-TC可描述为:某配送中心有车辆集合 $J=\{1,2,\dots,j\}$,车辆 j 的车厢长、宽、高和最大载重量分别为 L_j, W_j, H_j 和 G_j ,固定成本为 f_j ,单位里程可变成本为 c_j 。现有一批货物 $I=\{1,2,\dots,i\}$ 待配送至同一目的地,货物 i 的长、宽、高和重量分别为 l_i, w_i, h_i 和 g_i 。货物装载后的合重心位置与装载车辆的几何中心偏移距离所允许的范围为 Δ_j 。要求合理安排配载计划,在满足一定的约束条件下,得到配送中心选用的车辆型号、数量和货物具体配载方案,使得运输成本最低。

问题假设有:①所有货物质量分布均匀;②待

装的货物数量有限,货物能够被全部装完;③货物直接从始发地运往目的地;④车辆运输成本由固定成本与里程可变成本两部分组成。

1.2 符号定义

MVLP-TC相关参数定义如表1所示。

1.3 模型

表1 参数
Tab.1 Parameter

符号	定义
I	货物集合, $i \in I$
J	车辆集合, $j \in J$
l_i, w_i, h_i, g_i	货物 i 的长、宽、高和重量
L_j, W_j, H_j, G_j	车厢 j 的长、宽、高和额定载重量
f_j	车辆 j 的固定成本
c_j	车辆 j 的单位里程可变成本
d	运输距离
M	一个任意大的数
$(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)$	车辆 j 的理想装载重心
$(\bar{x}_j^*, \bar{y}_j^*, \bar{z}_j^*)$	车辆 j 中所有装载货物的合重心
$(\Delta_{jx}, \Delta_{jy}, \Delta_{jz})$	车辆 j 中货物合重心在 x, y, z 方向距离其理想装载重心的最大偏移量
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	货物合重心在 x, y, z 方向偏离理想装载重心的惩罚系数
α	罚函数的惩罚系数
(x_i, y_i, z_i)	实数变量, 货物 i 的左下角在车厢内部的坐标
n_j	0-1 变量, 若车辆 j 被使用, 则取1; 否则为0
p_{ij}	0-1 变量, 若货物 i 放于车辆 j 中, 则取1; 否则为0
$a_{ir}, b_{ir}, c_{ir}, d_{ir}, e_{ir}, f_{ir}$	0-1 变量, 若位于同一车厢内的货物 i 分别在货物 r 的左侧、右侧、后面、前面、下面以及上面, 则取1; 否则为0
o_i^u	0-1 变量, 若货物 i 以方向 $u(u=1, 2, \dots, 6)$ 放置在车厢中, 则取1; 否则为0

1) 目标函数

$$\text{Min}F = \sum_{j \in J} f_j n_j + \sum_{j \in J} c_j n_j d \quad (1)$$

2) 约束条件

$$\sum_{j \in J} p_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} \leq M n_j, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} g_i p_{ij} \leq G_j n_j, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\left| \bar{x}_j - \frac{\sum_{i \in I} (g_i x_i)}{\sum_{i \in I} g_i} \right| \leq \Delta_{jx}, \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\left| \bar{y}_j - \frac{\sum_{i \in I} (g_i y_i)}{\sum_{i \in I} g_i} \right| \leq \Delta_{jy}, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\left| \bar{z}_j - \frac{\sum_{i \in I} (g_i z_i)}{\sum_{i \in I} g_i} \right| \leq \Delta_{jz}, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$z_i + l_i(o_i^1 + o_i^3) + w_i(o_i^2 + o_i^4) + h_i(o_i^5 + o_i^6) \leq L_j + (1 - p_{ij})M, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$x_i + l_i(o_i^2 + o_i^5) + w_i(o_i^1 + o_i^6) + h_i(o_i^3 + o_i^4) \leq W_j + (1 - p_{ij})M, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

$$y_i + l_i(o_i^4 + o_i^6) + w_i(o_i^3 + o_i^5) + h_i(o_i^1 + o_i^2) \leq H_j + (1 - p_{ij})M, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (10)$$

$$o_i^1 + o_i^2 + o_i^3 + o_i^4 + o_i^5 + o_i^6 = 1, \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$a_{ir} + b_{ir} + c_{ir} + d_{ir} + e_{ir} + f_{ir} \geq p_{ij} p_{rj}, \quad \forall i, r \in I, \forall j \in J, i < r \quad (12)$$

$$z_i + l_i(o_i^1 + o_i^3) + w_i(o_i^2 + o_i^4) + h_i(o_i^5 + o_i^6) \leq z_r + (1 - a_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (13)$$

$$z_r + l_r(o_r^1 + o_r^3) + w_r(o_r^2 + o_r^4) + h_r(o_r^5 + o_r^6) \leq z_i + (1 - b_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (14)$$

$$x_i + l_i(o_i^2 + o_i^5) + w_i(o_i^1 + o_i^6) + h_i(o_i^3 + o_i^4) \leq x_r + (1 - c_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (15)$$

$$x_r + l_r(o_r^2 + o_r^5) + w_r(o_r^1 + o_r^6) + h_r(o_r^3 + o_r^4) \leq x_i + (1 - d_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (16)$$

$$y_i + l_i(o_i^4 + o_i^6) + w_i(o_i^3 + o_i^5) + h_i(o_i^1 + o_i^2) \leq y_r + (1 - e_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (17)$$

$$y_r + l_r(o_r^4 + o_r^6) + w_r(o_r^3 + o_r^5) + h_r(o_r^1 + o_r^2) \leq y_i + (1 - f_{ir})M, \quad \forall i, r \in I, i < r \quad (18)$$

$$x_i, y_i, z_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$n_j, p_{ij}, p_{rj}, o_i^1, o_i^2, o_i^3, o_i^4, o_i^5, o_i^6, a_{ir}, b_{ir}, c_{ir}, d_{ir}, e_{ir}, f_{ir} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, r \in I, \forall j \in J, i < r \quad (20)$$

式(1)为目标函数,表示总的用车成本最小化,包括车辆固定成本和行驶距离可变成本两部分;式(2)保证每件货物只能装入一辆车;式(3)保证所有货物均被装载;式(4)保证车辆装载的货物总重量不

超过其额定载重;式(5)~式(7)保证装入车厢中的货物的合重心在允许的重心范围内;式(8)~式(10)保证装入的货物必须整体位于车厢内;式(11)表示货物最终只能以一个方向放置在车厢中;式(12)~式(18)保证位于同一车辆中的所有货物互不重叠;式(19)~式(20)表示变量的取值范围。

2 算法设计

2.1 变邻域搜索(VNS)算法

VNS算法包括抖动(shaking)和变邻域下降搜索(variable neighborhood descent, VND)两个部分。VND是一个基于多邻域结构的局部搜索过程,它首先采用较小的邻域搜索,如果当前邻域陷入局部最优,则进入到大一点的邻域进行搜索;否则更新当前最优解,并回到第一个邻域重新开始搜索。如此循环,直到满足算法的终止条件。在VND优化停滞时,VNS算法执行抖动算子改变搜索地形,跳出当前局部最优解,算法寻优能力强。

利用VNS求解多车型VLP算法流程如算法1所示。

2.2 车辆装载启发式算法

2.2.1 货物排序

货物装载顺序是车辆配载优化的关键。货物排序就是确定货物装入车辆的先后顺序,本文中,待装载货物首先按体积降序排列,如果体积相同则依次比较货物长度、宽度、高度,按 l_i 、 w_i 、 h_i 降序排列。

2.2.2 空间管理

本文利用最大空间法管理车辆内部布局。最大空间由该空间的左后下角与右前上角坐标表示。未配载货物时,车辆的最大空间可以表示为 $\{(0,0,0),(L,W,H)\}$,如图1(a)所示。在车厢最深处装入一个长、宽、高分别为 l_i 、 w_i 、 h_i 的货物后,得到3个新生成的最大空间,分别是如图1(b)所示的前方空间 $\{(0,W-w_i,0),(L,W,H)\}$,图1(c)所示的右侧空间 $\{(L-l_i,0,0),(L,W,H)\}$ 以及图1(d)所示的上方空间 $\{(0,0,H-h_i),(L,W,H)\}$ 。最大空间可以相互重叠,从而最大限度地利用装载空间,进而提升车辆的空间利用率。

2.2.3 货物放置策略

货物和空间的匹配是影响车辆配载优化的另

算法1:多车型VLP变邻域搜索算法

输入:初始解 S_{initial} ,邻域算子集合 $N_l(l=1,\dots,l_{\text{max}})$,抖动算子集合 $N_k(k=1,\dots,k_{\text{max}})$,迭代次数 U

输出:最优解 S 。

初始化:令最优解 $S_c \leftarrow \emptyset$,当前迭代次数 $u \leftarrow 0$,当前最佳解 $S_c \leftarrow S_{\text{initial}}$

```

1  while  $u \leq U$ 
2       $k \leftarrow 1$ 
3      for  $k \leq k_{\text{max}}$ 
4          调用抖动算子 $N_k$ ,得到新的配载方案 $S'$ ,
           更新当前解,令 $S_c \leftarrow S'$ 
5          for  $l \leq l_{\text{max}}$ 
6              调用邻域搜索算子 $N_l$ ,得到新的配
           载方案 $S''$ 
7              if  $F(S'') < F(S_c)$ 
8                   $S'_c \leftarrow S''$ ,  $l \leftarrow l+1$ ,  $u \leftarrow u+1$ 
9              else
10                 令 $l \leftarrow l+1$ 
11             end if
12             更新当前解 $S_c \leftarrow S''$ 
13         end for
14         if  $F(S'_c) < F(S_c)$ 
15             令 $S_{\text{best}} \leftarrow S'_c$ ,  $k \leftarrow k+1$ ,  $l \leftarrow l+1$ ,  $u \leftarrow u+1$ 
16         else
17             令 $k \leftarrow k+1$ 
18         end if
19     end for
20      $u \leftarrow u+1$ 
21 end while
22 return  $S_c$ 

```

注:第7行表示计算新配载方案的用车成本,并与当前解比较;第8行更新当前算子的邻域局部最优解,并继续从第一个邻域结构开始搜索;第14行将当前局部最优解的用车成本与初始解比较,视情况更新全局最优解。

外一个关键因素。为了获得更为紧密的配载方案,本文采用DFTRC2(distance to the front-top-right corner2)方法来确定货物放置的最大空间和方向。DFTRC2是将货物放置到最大空间之后,该货物的右前上角坐标和车厢右前上角坐标之间的距离。为了确定货物最合理的放置状态,选择DFTRC2值最大的空间和方向进行摆放。如图2(a)所示,在车辆最深处放入货物1后,产生3个候选最大空间,由于货物2有6个放置方向,因此可产生18种(3个空间 \times 6个方向)放置方式。假定货物2仅能以方向1放入车厢,图2(b)、图2(c)、图2(d)分别是货物2放置在前空间、上空间、右空间的状态。由于计算得到DFTRC2最大值位于图2(c)所示状态,最终选定

货物2以方向1放置在上空间,至此,完成货物2在车辆中的配载。

2.3 邻域算子

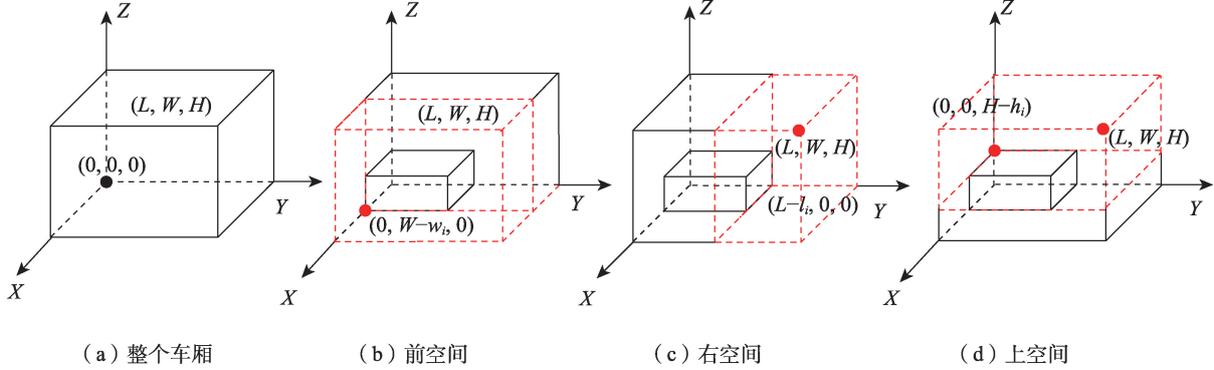


图1 最大空间法

Fig. 1 Maximum space method

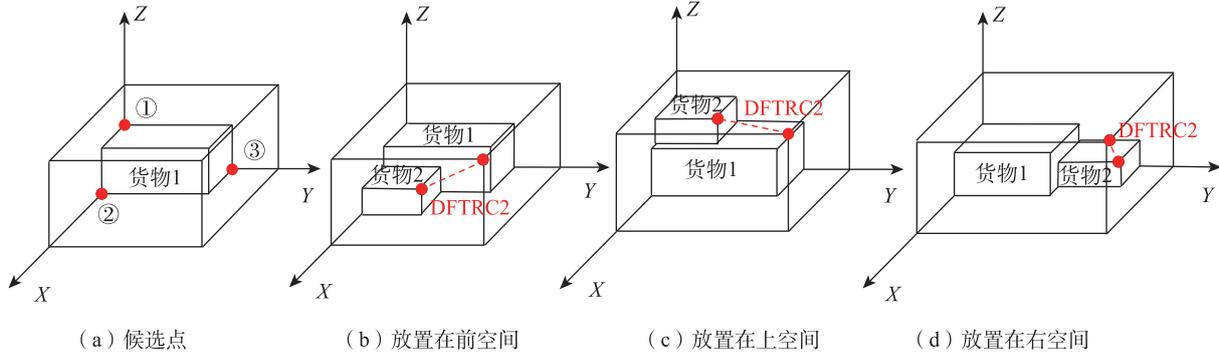


图2 DFTRC2的定位规则

Fig. 2 Localization rules of DFTRC2

邻域算子相关的变量如下: S_c 表示当前解, S_{new} 表示邻域解, σ_j 表示车辆 j 的装载率, U 表示未装载货物集合, $I_{unloaded}$ 表示本轮参与邻域交换的货物集合, J_{used} 表示已使用车辆集合, J_{unused} 表示未使用车辆集合, $J_{candidate}$ 表示候选车辆集合, $v_{unloaded}$ 表示参与邻域交换的货物总体积, v_j 表示第 j 辆车的容积。

VND部分包括4个邻域算子,分别是甩尾箱算子、大车换小车算子、一大车换两小车算子和两小车换一大车算子。

1) 甩尾箱算子。这里的尾箱指的是装载率最低的箱子,该算子思路非常简单,先从当前配载方案中找到装载率最低的车辆,卸下其中的已装载全部货物,并尝试将这些货物装载其他已使用车辆中;若全部货物能够被重新装载,则意味着即可以节约1辆车。算子描述如算法2所示。

2) 大车换小车算子。一般来说,大型车辆的使用成本比小型车辆大,因此若能将大型车辆内的货

算法2:甩尾箱

输入:当前解 S_c ,最低装载率 σ

输出:邻域解 S_{new}

- 1 按照装载率从小到大对 J_{used} 升序排序
- 2 取 J_{used} 中第1辆车 j_{worst}
- 3 if $\sigma_j > \sigma$ then
- 4 return S_c
- 5 end if
- 6 清空车辆 j_{worst} ,得到 j_{worst} 的货物集合 $I_{unloaded}$
- 7 令 $J_{used} \leftarrow J_{used} \setminus \{j\}, U \leftarrow U \cup I_{unloaded}$
- 8 将 J_{used} 中的车辆按剩余容积从大到小降序排列
- 9 将 U 中的货物按体积从大到小降序排列
- 10 调用构造式启发式算法将 U 中的货物装载到车辆 J_{used} 中
- 11 令 $U \leftarrow U \setminus I_{unloaded}$
- 12 构造邻域解 $S_{new} \leftarrow (J_{used}, J_{unused}, U)$
- 13 return S_{new}

注:第4行表示如果选择车辆的装载率高于设定的最低装载率,则意味着该车辆空间率达到企业的要求,放弃甩尾箱操作,结束算法。

物全部转移到一辆小型车辆中,就可以节约运输成本,算子描述如算法3所示。

3) 一大车换两小车算子。该算子尝试将一辆

算法3: 一大车换两小车

输入: 当前解 S_c

输出: 邻域解 S_{new}

```

1 按照装载率从小到大对  $J_{used}$  升序排序
2 取  $J_{used}$  中第1辆车  $j_{big}$ 
3 清空车辆  $j_{big}$ , 得到  $j_{big}$  的货物集合  $I_{unloaded}$ 
4 令  $J_{used} \leftarrow J_{used} \setminus \{j_{big}\}, U \leftarrow U \cup I_{unloaded}$ 
5 计算  $I_{unloaded}$  集合中货物的总体积  $v_{unloaded}$ 
6 for each  $j$  in  $J_{unused}$ 
7   if  $v_j \leq v_{j_{big}}$  and  $v_i \geq v_{unloaded}$  then
8      $J_{candidate} \leftarrow J_{candidate} \cup \{j\}$ 
9   end if
10 end for
11 从  $J_{candidate}$  中随机选1辆车  $j_{small}$ 
12 将  $U$  中的货物按体积从大到小降序排列
13 调用构造式启发式算法将  $U$  中的货物装载到车辆  $j_{small}$  中
14 令  $J_{used} \leftarrow J_{used} \cup \{j_{small}\}, J_{unused} \leftarrow J_{unused} \setminus \{j_{big}\}$ 
15 构造邻域解  $S_{new} \leftarrow (J_{used}, J_{unused}, U)$ 
16 return  $S_{new}$ 

```

注:第2行表示选择装载率最低的车辆;第7行从所有空车中找到容积大于待装载货物总体积的小车。

大型车辆的货物装载到两辆小型车辆中去,算子描述如算法4所示。

4) 两小车换一大车算子。该算子尝试将两辆小型车辆的货物装载到一辆大型车辆中去,算子描述如算法5所示。

2.4 抖动算子

抖动算子与邻域搜索算子的区别在于:抖动算子变动范围更大,可以避免陷入局部最优解。

抖动算子模拟实际车辆配载过程中大幅度倒货过程,即在实际车辆配载过程中,若多次调整无法提升的话,装卸工会清空一部分车辆,调整货物顺序后再重新装载,算子描述如算法6所示。

2.5 重心约束的处理和解的评价

货物合重心到车辆理想重心的距离为货物合重心的偏移距离,为了更好地实现车辆负载平衡,保证车辆运输过程中的行车安全,合理的配载方案应尽量减小重心偏离量,使整车负荷均衡。本文采用在解的评价函数中增加惩罚函数的方法加以限制。惩罚函数公式为

算法4: 一大车换两小车

输入: 当前解 S_c

输出: 邻域解 S_{new}

```

1 从当前解  $S_c$  得到  $J_{unused}$  集合中的车辆数  $m$ 
2 随机取  $J_{used}$  中1辆大车  $j_{big}$ 
3 清空车辆  $j_{big}$ , 得到  $j_{big}$  的货物集合  $I_{unloaded}$ 
4 令  $J_{used} \leftarrow J_{used} \setminus \{j_{big}\}, U \leftarrow U \cup I_{unloaded}$ 
5 计算  $I_{unloaded}$  集合中货物的总体积  $v_{unloaded}$ 
6 for each  $j$  in  $J_{unused}$ 
7   if  $v_j \leq v_{j_{big}}$  then
8      $J_{candidate} \leftarrow J_{candidate} \cup \{j\}$ 
9   end if
10 end for
11 从  $J_{candidate}$  中随机选2辆车  $j_{small1}, j_{small2}$ 
12 if  $v_{unloaded} \leq v_{j_{small1}} + v_{j_{small2}}$  then
13   将  $U$  中的货物按体积从大到小降序排列
14   调用构造式启发式算法将  $U$  中的货物装载到车辆  $j_{small1}, j_{small2}$  中
15   令  $J_{used} \leftarrow J_{used} \cup \{j_{small1}, j_{small2}\}, J_{unused} \leftarrow J_{unused} \setminus \{j_{big}\}$ 
16 end if
17 构造邻域解  $S_{new} \leftarrow (J_{used}, J_{unused}, U)$ 
18 return  $S_{new}$ 

```

注:第7行表示找出所有体积更小的空车;第12行表示选择的两辆小车体积之和必须大于待装载货物体积。

$$P = \lambda_1 \sum_{i \in I} \frac{|\bar{x}_i - \bar{x}_j^*| - \Delta_{jx}}{\Delta_{jx}} + \lambda_2 \sum_{i \in I} \frac{|\bar{y}_i - \bar{y}_j^*| - \Delta_{jy}}{\Delta_{jy}} + \lambda_3 \sum_{i \in I} \frac{|\bar{z}_i - \bar{z}_j^*| - \Delta_{jz}}{\Delta_{jz}}, \quad \forall j \in J \quad (21)$$

最终解的评价为车辆的总费用与惩罚函数的和,如下

$$E = F + \alpha P \quad (22)$$

式中: E 为解的评价函数。

3 实验结果与分析

算法程序代码用Java语言实现,运行环境WIN10、64 bit操作系统,运行的计算机配置为:AMD Ryzen 52 500U GHz处理器,8 GB内存。参数 $\alpha = 100$, 距离 $d = 1000$, 迭代次数 $U = 200$, CPLEX最长求解时间设置为3600 s。在已有文献算例基础上增加车辆型号、车辆数量、车辆租用价格、货物重量等,其中车辆的成本数据来自合作企业的调研。

3.1 算法性能分析

本文算法求解经典算例的收敛过程如图3所示。从图3中可以看出,在迭代20次的时候就能得

算法5: 两小车换一大车输入: 当前解 S_c 输出: 邻域解 S_{new}

- 1 从当前解 S_c 得到 J_{used} 集中的车辆数 m
- 2 随机取 J_{used} 中两辆小车 j_{small1}, j_{small2}
- 3 清空车辆 j_{small1}, j_{small2} , 分别得到 j_{small1}, j_{small2} 的货物集合 $I_{unloaded1}, I_{unloaded2}$
 $J_{used} \leftarrow J_{used} \setminus \{j_{small1}, j_{small2}\}$,
- 4 $I_{unloaded} \leftarrow I_{unloaded1} \cup I_{unloaded2}$,
 $ULCs \leftarrow ULCs \cup I_{unloaded}$
- 5 计算 $I_{unloaded}$ 集中货物的总体积 $v_{unloaded}$
- 6 for each j in J_{unused}
- 7 if $v_j \geq v_{unloaded}$ then
- 8 $J_{candidate} \leftarrow J_{candidate} \cup \{j\}$
- 9 end if
- 10 end for
- 11 从 $J_{candidate}$ 中随机选一辆车 j_{big}
- 12 将 U 中的货物按体积从大到小降序排列
- 13 调用构造式启发式算法将 U 中的货物装载到车辆 j_{big} 中
- 14 令
 $J_{used} \leftarrow J_{used} \cup \{j_{big}\}, J_{unused} \leftarrow J_{unused} \setminus \{j_{small1}, j_{small2}\}$
- 15 构造邻域解 $S_{new} \leftarrow (J_{used}, J_{unused}, U)$
- 16 return S_{new}

注: 第7行表示选出所有容积大于待装载货物总体积的空车。

算法6: 重装部分车辆输入: 当前解 S_c 输出: 邻域解 S_{new}

- 1 按照装载率从小到对 J_{used} 升序排序, 并计算平均装载率 σ_{aver}
- 2 for each j in J_{unused}
- 3 if $\sigma_j < \sigma_{aver}$ then
- 4 清空车辆 j , 得到 j 的货物集合 $I_{unloaded}$
- 5 令 $J_{used} \leftarrow J_{used} \setminus \{j\}, U \leftarrow U \cup I_{unloaded}$
- 6 end if
- 7 end for
- 8 将 J_{unused} 中的车辆按容积从大到小降序排列
- 9 将 U 中的货物按体积从大到小降序排列
- 10 调用构造式启发式算法将 U 中的货物装载到车辆 J_{unused} 中
- 11 令 $U \leftarrow U \setminus I_{unloaded}$
- 12 构造邻域解 $S_{new} \leftarrow (J_{used}, J_{unused}, U)$
- 13 return S_{new}

注: 第3行表示找出所有低于平均装载率的车辆并清空其中的全部货物。

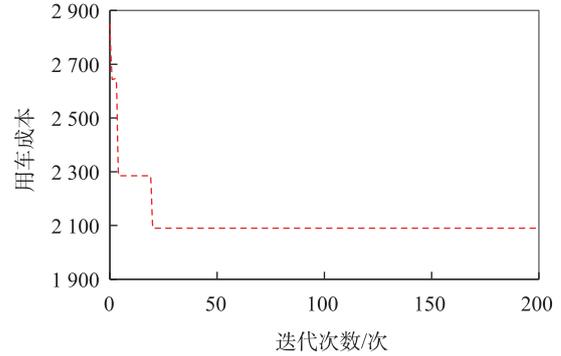


图3 迭代收敛过程

Fig. 3 Iterative convergence process

到最优解, 算法的收敛性较好。

为验证算法的寻优能力, 分别使用 CPLEX 和 VNS 对中小规模问题进行求解, 两者求解时间计算结果如图4所示, 成本对比如图5所示。计算结果表明, 对小规模数据而言, CPLEX 和 VNS 均能够求解出精确解, 得出最优值, 并且两者成本相同, 验证了 VNS 算法的有效性。随着问题规模的增大, CPLEX 在 30~40 个货物规模时计算时间显著增加。当货物规模增大到 60 个时, 从图5可以看出, CPLEX 已无法求出最优解, 而 VNS 计算时间增长较为缓慢, 表明 VNS 在求解大规模问题时是可行的。

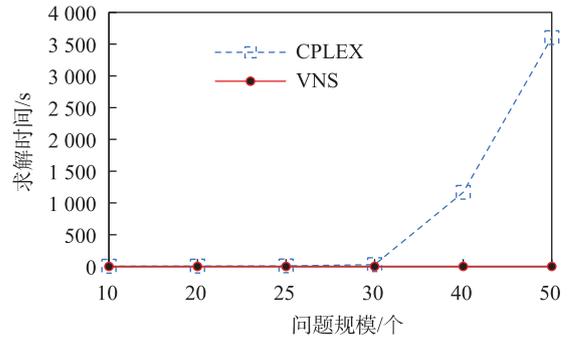


图4 求解时间对比

Fig. 4 Comparison of solution time

3.2 优化效果分析

和现有车辆配载相关文献进行对比, 为消除随机性, 每组实例共进行 20 次测试后取平均值。

本文算法较文献算例的用车成本对比如图6所示, 由图6可知, 本文算法平均优化效果达到 18% 以上, 优化效果明显。针对文献[17], 虽然未能减少用车, 甚至增加了一辆车, 但是却更好的实现了降低

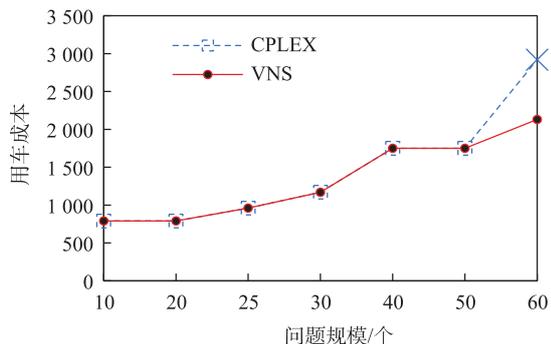


图5 求解成本对比

Fig. 5 Comparison of solution costs

运输成本的目标,这是邻域搜索算法中的“一大换两小”算子优化效果。由此可知,不同于传统方法仅仅考虑减少用车数量的目标,本文算法基于性价比对车辆调度方案进行统筹规划,更加符合企业实际情况。

以测试算例[18]为例,本文算法求解得到的货物装载合重心偏离情况如表2所示。可以看出载货后的货物合重心的重心偏移度较低,所选用的车辆配载后的平均偏移度仅3.24%,基本位于车辆理想装载重心附近,这表明本文算法能够在降低运输成

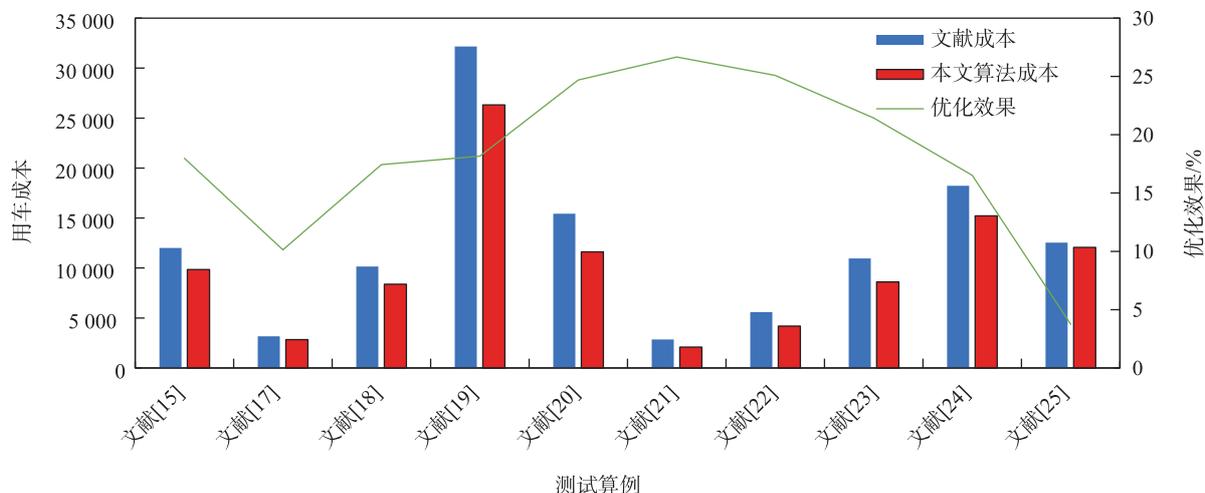


图6 用车成本优化效果对比

Fig. 6 Comparison of vehicle cost optimization effect

表2 重心偏移度

Tab.2 Center of gravity deviation

车型	车辆理想重心	货物合重心	允许重心偏移量	重心偏移度/%
车型1	(2 958,1 168,1 100)	(2 807,1 186,1 113)	300-100-1 100	3.32
车型2	(2 075,1 030,900)	(1 994,999,975)	300-120-900	3.45
车型3	(1 500,1 000,400)	(1 449,975,482)	120-90-400	2.95

本的同时保证行车安全。

3.3 实例验证

LH公司是一家主要为图书提供仓储和配送服务的物流企业,利用本文算法对该企业某一天的配送任务进行配载优化,车辆型号分为5种,具体参数见表3,货物类型分为28种,具体参数见表4。

求解平均计算时间为55.34 s,计算结果如表5所示,由表5可以看出,文献[18]的装箱算法和本文算法对1 071个货物进行装载分别需要使用4辆车和3辆车,本文算法求得装载率为0.89,提升了

28.99%。此外,本文算法减少了1辆车,比该企业当前系统的求解结果节省了17.44%的运输成本,有

表3 车辆信息

Tab.3 Vehicle information

型号	L	W	H	N	F	C
型号1	5 917	2 336	2 249	1	2 300	1.43
型号2	4 150	2 060	2 000	1	1 500	1.31
型号3	3 000	1 400	1 300	1	600	1.17
型号4	3 000	2 000	1 000	1	620	1.22
型号5	3 200	1 500	1 300	1	650	1.28

表4 货物信息
Tab.4 Goods information

序号	l_i	w_i	h_i	n	序号	l_i	w_i	h_i	n
1	240	140	40	3	15	480	380	520	59
2	240	140	280	11	16	480	620	40	18
3	240	140	520	5	17	480	620	280	61
4	240	380	40	30	18	480	620	520	20
5	240	380	280	93	19	720	140	40	9
6	240	380	520	20	20	720	140	280	78
7	240	620	40	6	21	720	380	280	63
8	240	620	280	17	22	720	140	280	6
9	240	620	520	2	23	720	140	520	2
10	480	140	40	19	24	720	380	40	18
11	480	140	280	78	25	720	380	520	15
12	480	140	520	16	26	720	620	40	14
13	480	380	40	71	27	720	620	280	6
14	480	380	280	329	28	720	620	520	2

表5 计算结果
Tab.5 Calculation results

算法	用车数量	装载率	用车成本
文献[18]	4	0.69	10 150
本文算法	3	0.89	8 380
优化效果	25.00%	28.99%	17.44%

效地提高该企业的运输效益。

4 结论

车辆配载优化是运输环节降本增效的关键,本文从运筹优化视角出发,在分析了多车型、多品种货物以及多现实约束的基础上,构建MVLP-TC车辆配载模型,并设计了基于最大空间法与VNS相结合的算法求解,以及对多个邻域算子的优化设计,最后通过算例和企业实际应用数据,分别进行算法性能分析、优化效果分析以及实例验证,得到如下结论。

1) 相比于考虑单车型的用车数量最少问题,直接考虑多车型的运输成本最小化有利于更直观体现企业成本的变动。加入负载平衡因素的考虑有利于提升行车安全,降低安全隐患。

2) 与CPLEX、文献算例比较,验证了本文算法在求解考虑运输成本的多车型车辆配载模型时的有效性,多个邻域算子的设计,满足尽可能保证车辆配载平衡以及行车安全的前提下,减少用车数量,使得企业运输成本最低。

3) 将本文模型和算法用于企业实际车辆配载优化中,能够快速求解并得到了较好的优化效果。由于实际运输成本受到多方面因素影响,当配载货物数量大规模增加时,后续可考虑装卸成本以及燃油消耗等因素。

参考文献:

- [1] 李鹏, 汤勇. 三维货物装箱问题的研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1232-1242.
LI P, TANG Y. Review on three-dimensional bin packing problem[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 1232-1242.
- [2] 张长勇, 刘佳瑜. 基于混合遗传算法的多箱型集装箱装载问题分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 747-755.
ZHANG C Y, LIU J Y. Multi-box container loading problem based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 747-755.
- [3] 雷定猷, 闫红莹, 洪舒华, 等. 铁路集装箱轻重货物混合平衡装载研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 1-9.
LEI D Y, YAN H Y, HONG S H, et al. Research on mixed and balanced loading of light and heavy cargo in railway container[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 1-9.
- [4] ZHU W W, CHEN S, DAI M, et al. Solving a 3D bin packing problem with stacking constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 188: 109814.

- [5] MAHVASH B, AWASTHI A, CHAUHAN S. A column generation-based heuristic for the three-dimensional Bin packing problem with rotation[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2018, 69(1): 78-90.
- [6] KURPEL D V, SCARPIN C T, JUNIOR J E P, et al. The exact solutions of several types of container loading problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(1): 87-107.
- [7] PARREÑO F, ALVAREZ-VALDES R, TAMARIT J M, et al. A maximal-space algorithm for the container loading problem[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2008, 20(3): 412-422.
- [8] CRAINIC T G, PERBOLI G, TADEI R. Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2008, 20(3): 368-384.
- [9] IWASAWA H, HU Y N, HASHIMOTO H, et al. A heuristic algorithm for the container loading problem with complex loading constraints[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2016, 10(3): JAMDSM0041.
- [10] 徐翔斌, 曹搏悦. 考虑收入均衡的家居配送物流优化研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(9): 2592-2600.
XU X B, CAO B Y. Research on optimization of household distribution logistics considering income balance[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(9): 2592-2600.
- [11] 郑长江, 陈宜恒, 沈金星. 基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化[J]. *华东交通大学学报*, 2022, 39(1): 89-98.
ZHENG C J, CHEN Y H, SHEN J X. Distribution routing optimization of ground-underground closed-loop logistics based on metro network[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(1): 89-98.
- [12] HANSEN P, MLADENOVIĆ N, TODOSIJEVIĆ R, et al. Variable neighborhood search: basics and variants[J]. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2017, 5(3): 423-454.
- [13] WANG T Y, GU Y, WANG H L, et al. Adaptive variable neighborhood search algorithm with Metropolis rule and tabu list for satellite range scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 170: 106757.
- [14] BAMATRAF K, GHARBI A. Variable neighborhood search for minimizing the makespan in a uniform parallel machine scheduling[J]. *Systems*, 2024, 12(6): 221.
- [15] 朱向. 带轴重约束货物平衡装载问题优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 164-171.
- ZHU X. Optimization of freights loading problem with balancing and axle weight constraints[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 164-171.
- [16] 雷定猷, 宋文杰, 张英贵. 平衡装载约束下的车辆路径问题研究[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(6): 1622-1625, 1641.
LEI D Y, SONG W J, ZHANG Y G. Research on vehicle routing problem under balance loading constrain[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(6): 1622-1625, 1641.
- [17] 张钧, 贺可太. 求解三维装箱问题的混合遗传模拟退火算法[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(14): 32-39, 47.
ZHANG J, HE K T. Study on hybrid genetic and simulated annealing algorithm for three-dimensional packing problems[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(14): 32-39, 47.
- [18] 江宝钊, 熊伟清. 一种求解三维集装箱装箱问题的混合遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(26): 200-202.
JIANG B C, XIONG W Q. Hybrid genetic algorithm solving for three-dimensional container loading problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(26): 200-202.
- [19] 张煜, 黄啟盛, 李文锋. 面向PI集装箱的组合适配装箱算法[J]. *大连海事大学学报*, 2021, 47(4): 39-46, 64.
ZHANG Y, HUANG Q S, LI W F. Combined adaptive packing algorithm for physical internet container[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2021, 47(4): 39-46, 64.
- [20] 阎威武, 邵惠鹤, 田雅杰. 集装箱装载的一种启发式算法[J]. *信息与控制*, 2002, 31(4): 353-356.
YAN W W, SHAO H H, TIAN Y J. A heuristic algorithm for three dimension packing problem[J]. *Information and Control*, 2002, 31(4): 353-356.
- [21] 卓雪艳, 何勇, 吴灵芳, 等. 大型车辆配载与装箱优化方法及系统设计研究[J]. *机械设计与制造*, 2019(10): 20-23.
ZHUO X Y, HE Y, WU L F, et al. Research on cargo allocation and vehicle loading problem and system design[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(10): 20-23.
- [22] TAKAHARA S. Loading problem in multiple containers and pallets using strategic search method[C]//TORRA V, NARUKAWA Y, MIYAMOTO S. Modeling decisions for artificial intelligence. Berlin: Springer-Verlag Berlin Hei-

delberg, 2005: 448-456.

- [23] 唐颖, 高倩芸, 张文婷, 等. 卷烟运输车辆配载研究: 以上海烟草卷烟配送中心车辆装载为例[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(4): 111-114.

TANG Y, GAO Q Y, ZHANG W T, et al. Study on stowage of cigarette transport vehicle: take vehicle loading of Shanghai tobacco distribution center as an example[J]. Logistics Engineering and Management, 2022, 44(4): 111-114.

- [24] 翟钰, 孙小明. 多种物品三维装箱问题的一种启发式算法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(8): 1244-1247.

ZHAI Y, SUN X M. A heuristic algorithm for three-dimensional container loading problem with non-identical items[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(8): 1244-1247.

- [25] 陈宏程. 多车型多车辆的物流配载问题优化研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.

CHEN H C. Study on optimization of multi-vehicle logistics stowage problem[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.



第一作者:徐翔斌(1975—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为车辆配载智能优化算法、车辆配载优化、智能运输系统。E-mail:xuxiangbin@ecjtu.edu.cn。



通信作者:陈艳萍(1999—),女,硕士研究生,研究方向为车辆配载优化。E-mail:1925421246@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)