

基于改进禁忌搜索算法的整车混装配载优化方法^①

黎雪芬^{②*} 瞿佳伟^{**} 刘建胜^{③**}

(* 无锡职业技术学院控制技术学院 无锡 214121)

(** 南昌大学机电工程学院 南昌 330031)

摘 要 根据商品车、轿运车主要几何特征,分别对商品车结构和轿运车结构建模。考虑多目的地不同订单需求、商品车配载三维尺寸约束和轿运车运输能力约束为限制条件,以混合配载利润最大化为目标函数,建立轿运车配载优化模型。针对禁忌搜索算法易局部收敛的缺点,引入贪心算法,并在禁忌搜索算法中采用两种置换操作生成领域,进而设计了一种改进的禁忌搜索算法进行求解,应用 Matlab 软件进行仿真计算,仿真实验结果证明了算法的有效性。

关键词 整车配送;配载优化;贪心策略;禁忌搜索

0 引 言

随着汽车行业持续快速发展,市场竞争也越来越激烈,汽车行业的利润也不断下降。《中国制造 2025》和《关于推进电子商务与快递物流协同发展的意见》都强调加快智能物流管理在生产过程中的应用和深入实施“互联网 + 流通”行动计划,提高电子商务与快递物流协同发展水平,优化资源配置,提升供应链协同效率。降低整车配送成本并提高企业利润成为汽车行业的关注点。

整车配送是以整车作为商品,将其从制造商或配送中心运往分销商或客户手中的业务过程^[1]。整车配送包括整车配载和路径优化,现有研究主要集中于整车网络路径优化。文献[2]为解决需求不确定性车辆调度问题,提出将新需求点收集、路径优化、路径执行时间分开的实时优化策略。文献[3]为优化具有模糊预约时间车辆路径问题,应用模糊事件给出车队服务满意度的新度量方法和求最大满意度计算方法。文献[4]在考虑客户满意度基础

上,增加软时间窗配送约束,建立总成本最小化的整车路径优化模型,并且验证求解该模型的自适应遗传算法的有效性。文献[5]从整车配送的具体实例出发,利用整单和零单的思想和方法,得到轿运车的最佳配载运送方案。文献[6]考虑轿运车的板长利用率,建立相应的配载组合矩阵,将动态规划与穷举法结合求解不同配载方式下的轿运车数量。文献[7]针对整车物流路径优化问题,对 Dijkstra 算法进行了改进,并证明改进后的算法在网络规模较大时的有效性与适用性。

配载优化研究方面,一般商品配载优化问题往往把商品外形和运输车配载空间均简化为规则的几何尺寸和配载空间进行优化求解。例如文献[8]针对配载时三维尺寸约束,设计一种混合遗传算法,使配载数量最大化,提高轿运车空间利用率。文献[9]分析了物流配载问题,提出了一种混合模拟退火算法应用到物流配载,结果表明该算法时间效率较高。文献[10]研究了汽车专运船的装载问题,以车辆陈列顺序而造成的移货代价为优化目标,采用 GRASP 算法生成初始配载方案,进一步采用 Dijkstra 算法

① 国家自然科学基金(51565036)资助项目。

② 女,1979 生,硕士,讲师;研究方向:机电一体化及控制;E-mail: 26845479@ qq. com

③ 通信作者,E-mail: liujiansheng@ ncu. edu. cn
(收稿日期:2020-04-10)

和 ALNS 算法对配载方案进行优化。文献[11]针对集装箱整车配载时手工编织方案费时且不合理,设计了一种启发式遗传算法求解配载方案,验证了算法可以实现集装箱整车配载的智能化。文献[12]针对军用车辆装箱的配载问题,应用蚁群算法进行优化求解,使集装箱的利用率大幅度提高。文献[13]在分析了滚装船配载特征的基础上,设计了遗传算法与启发式算法相结合的交互式混合算法,通过数值仿真证明了算法的有效性。文献[14]针对铁路承运汽车的配载问题,运用禁忌搜索算法实现了多车型、多辆车的配载优化,通过算例证明了算法的可行性。对于单目标的配载问题,禁忌搜索算法、遗传算法以及蚁群算法通用性强、全局收敛速度快被广泛应用,而多目标问题的情况下通常采用混合算法进行求解。区别于上述商品规则几何尺寸及配载空间问题,整车配载问题具备整车结构不规则的外部几何形状,以及轿运车的配载空间分层及不规则特征,具有其独特性和复杂性^[15],因此整车配送的配载问题往往比常规的物流配载问题更加复杂。

综上,本文以运力有限为重要研究前提,考虑订单多目的地配载需求,以及商品车的三维尺寸装载和轿运车的运输能力为主要约束条件,以最大化利润为目标,构建整车配载优化模型。同时,对传统禁忌搜索算法进行改进,设计一种基于贪心策略的禁忌搜索算法求解,通过仿真实验验证实算法的有效性。

1 整车配载结构模型

整车配载是指将商品车陈列到轿运车上,由于商品车、轿运车具有不同的结构特征,直接影响到配载方案,所以需要商品车的结构、轿运车的结构以及将商品车陈列到轿运车上的配载结构进行建模。

1.1 商品车结构建模

商品车是整车配送中的运输对象,种类繁多,结构参数不尽相同,对每种类型的商品车进行单独建模不符合实际情况,本文提取商品车主要的几何特征,建立商品车的结构模型,如图 1 所示,商品车参数说明如表 1 所示。

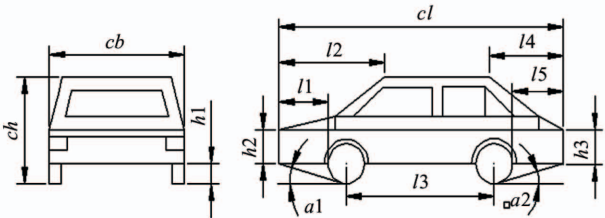


图 1 商品车结构模型

表 1 商品车参数说明

符号	备注	符号	备注
cb	车身宽度	$a2$	离去角
ch	车身高度	$l1$	前悬距
cl	车身长度	$l2$	前顶至车头距离
$h1$	底盘高度	$l3$	轴间距
$h2$	前脸高度	$l4$	后顶至车尾距离
$h3$	尾部高度	$l5$	后悬距
$a1$	接近角		

1.2 轿运车结构建模

轿运车是整车配送中的运输工具,包括牵引车和半挂车两部分。轿运车的上底架由多块孔板拼接组成,结构简单,可视为水平面;下底架则相对复杂,其中额颈部分可视为水平面和斜坡构成,中间部分为水平面,后轿在装载完毕后升起,视为斜坡。轿运车结构模型如图 2 所示,参数说明如表 2 所示。

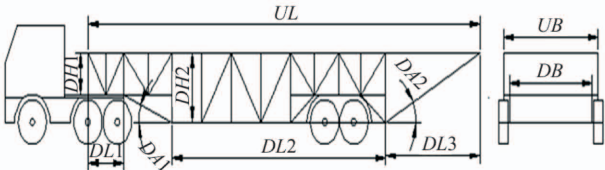


图 2 轿运车结构模型

表 2 轿运车参数说明

符号	备注	符号	备注
UL	上层长度	$DL1$	额颈平面长度
UB	上层宽度	$DL2$	下层平面长度
DB	下层宽度	$DL3$	后轿水平长度
$DH1$	额颈高度	$DA1$	额颈斜坡倾角
$DH2$	下层高度	$DA2$	后轿倾角

1.3 整车配载结构建模

为了保证商品车不被碰撞,其摆放在轿运车内遵循一定的规则,通常要求商品车之间的距离大于

10 cm,下层的商品车车顶离上底架的距离大于10 cm,两侧车身离侧板的距离大于5 cm。此外,由于轿运车下层额颈部位的特殊性,商品车与挂车车头的距离也应大于10 cm。轿运车配载模型如图3所示,参数说明如表3所示。

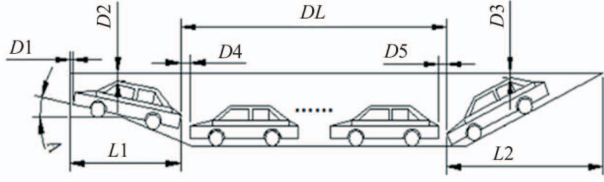


图3 轿运车配载模型

表3 轿运车配载参数说明

符号	备注	符号	备注
$D1$	商品车与挂车车头距离	DL	下层水平长度
$D2$	额颈部位商品车与上层底架距离	A	额颈部位接近角
$D3$	后轿部位商品车与上层底架距离	$L1$	额颈水平长度
$D4$	额颈部位商品车与下层底架商品车距离	$L2$	后轿水平长度
$D5$	后轿部位商品车与下层底架商品车距离		

2 配载优化模型

基于第1节对整车配载结构模型的建立,第2节进行配载过程数学模型的建立,界定求解问题的范畴。

2.1 问题描述

已知商品车、轿运车的结构参数,客户点对商品车的需求量,每种商品车运送到客户点的收入,在满足商品车配载尺寸约束、轿运车运输能力约束的条件下,使得总利润最大。

2.2 参数说明

i : 轿运车的类型, $i \in I$ 。

j : 商品车的类型, $j \in J$ 。

k : 客户点的类型, $k \in K$ 。

r : 轿运车的层级, $r \in R$, $R = \{1, 2\}$ 。

α_i : 轿运车 i 额颈部位接近角。

c_{ijk} : 轿运车 i 配载商品车 j 发往客户点 k 的收入

单价。

cf_i : 轿运车 i 的启用成本。

d_{jk} : 客户点 k 对商品车 j 的需求量。

g_i : 轿运车 i 的载重。

n_i : 轿运车 i 的可用数量。

l_i : 轿运车 i 额颈部分水平长度。

cb_i^r : 轿运车 i 第 r 层的宽度。

ch_i^r : 轿运车 i 第 r 层的高度。

cl_i^r : 轿运车 i 第 r 层的长度。

cb_{ij}^r : 轿运车 i 第 r 层配载商品车 j 的宽度。

ch_{ij}^r : 轿运车 i 第 r 层配载商品车 j 的高度。

cl_{ij}^r : 轿运车 i 第 r 层配载商品车 j 的长度。

s_i : 轿运车 i 挂车部分与半吊车部分距离。

x_{ijk}^r : 轿运车 i 第 r 层配载商品车 j 发往客户点 k 的数量。

w_j : 商品车 j 的重量。

2.3 决策变量

x_{ijk} : 轿运车 i 配载商品车 j 发往客户点 k 的数量。

y_i : 轿运车 i 的使用数量。

2.4 目标函数

$$f = \max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} c_{ijk} - \sum_{i \in I} y_i cf_i \quad (1)$$

2.5 约束条件

$$\sum_{j \in J} \left(\sum_{k \in K} x_{ijk} \right) w_j \leq g_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} = d_{jk} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (3)$$

$$x_{ijk} = \sum_{r \in R} x_{ijk}^r \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4)$$

$$\max(ch_{ij}^1) + 100 \leq ch_i^1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\max(cb_{ij}^r) + 100 \leq cb_i^r \quad \forall i \in I, r \in R \quad (6)$$

$$\left(\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk}^1 - 3 \right) \times 100 + \sum_{j \in J} \left(\sum_{k \in K} x_{ijk}^1 \right) cl_{ij}^1 \leq cl_i^1, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\left(\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk}^2 - 1 \right) \times 100 + \sum_{j \in J} \left(\sum_{k \in K} x_{ijk}^2 \right) cl_{ij}^2 \leq cl_i^2, \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$l_i - \max(cl_{ij}^1) \cdot \cos \alpha_i + s_i \geq 100 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$y_i \leq n_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$x_{ijk}, y_i \in z^*, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (11)$$

2.6 公式说明

式(1)表示满足商品车配载尺寸约束和轿运车运输能力约束下的最大利润;式(2)表示每辆轿运车满足载重限制;式(3)表示客户点对商品车的需求量等于所有轿运车对该种商品车配载量的总和;式(4)表示轿运车给客户点配送的商品车量等于该轿运车底层、上层对该种商品车配载量的总和;式(5)表示轿运车底层满足配载高度限制;式(6)表示轿运车底层、上层满足配载宽度限制;式(7)表示轿运车底层满足配载长度限制;式(8)表示轿运车上层满足配载长度限制;式(9)表示轿运车底层满足挂车车头与商品车的距离限制;式(10)表示轿运车可用数量限制;式(11)表示取值为非零正整数约束。

3 算法设计

禁忌搜索算法是对爬山算法和局部领域搜索算法的延伸,它通过模拟人类的记忆功能来进行算法的搜索^[16]。禁忌搜索算法涉及移动领域、禁忌表、藐视准则等概念,通过藐视准则破除禁忌表的限制,实现搜索空间的多样化,具有较强的通用性,但禁忌搜索算法全局搜索精度低,搜索结果主要依赖初始解和移动领域。贪心算法在对最优解问题求解时将当前状态下目标值作为最优选择,不考虑解空间的减少,能快速求得满意解。本文引入贪心算法,生成禁忌搜索算法的初始解,并选择两种领域生成准则,实现算法的全局优化。

3.1 算法流程

改进的禁忌搜索算法是根据贪心策略先求解单辆轿运车的最优配载方案,进而解决所有轿运车的配载方案生成初始解,再通过禁忌搜索算法对该初始解进行优化,从而降低计算多类型轿运车配载多类型商品车的复杂度,提高算法寻优效率,其算法流程如图 4 所示。

3.2 算法实现

在基本的禁忌搜索算法寻优过程中,通过贪心策略即步骤 1~步骤 3 的操作,对初始解进行优化,同时,禁忌搜索算法的生成领域阶段,采用两种置换

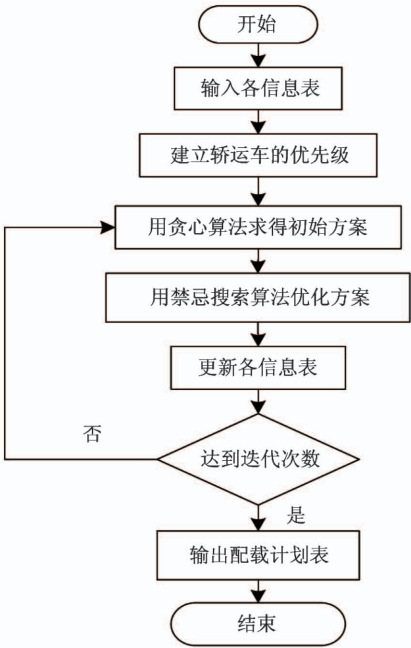


图 4 改进禁忌搜索算法流程图

操作即步骤 6,提高寻优的全局性。

步骤 1 读取轿运车、商品车和客户点信息表,计算轿运车载重与启用成本的比值 g_i/cf_i 以确定其优先级,比值越大优先级越高。

步骤 2 用贪心算法对不同优先级的轿运车依次进行商品车配载,贪心准则为符合轿运车空间约束的情况下,优先装载收入 c_{ijk} 高的商品车。

步骤 3 初始解,贪心算法求得的解作为禁忌搜索算法的初始解,解的形式为轿运车按类编号,再将装载的商品车以编号的形式排成一个序列。

步骤 4 渴望水平函数,以目标函数作为渴望水平函数,值越大则越优。

步骤 5 解的评价,判断解在渴望水平函数中的值是否合法。

步骤 6 生成领域,通过两种置换操作生成领域,一种是在解中产生一个变异位,在未装载的商品车序列中产生一个变异位,两者进行置换操作,判定是否合法,选出候选解集;另一种是在解中产生两个变异位,两者进行置换操作,判定是否合法,补充候选解集,最后从候选解集中选出适配值最好的一个为当前解。

步骤 7 禁忌对象,禁忌对象为邻域的移动。

步骤 8 禁忌长度,统计各类轿运车车位数的

中间值 N , 禁忌长度为 $\sqrt{N(N-1)/2}$ 。

步骤9 终止条件,迭代次数为 500,达到终止条件输出配载计划表,否转到步骤 2。

4 仿真实验及分析

4.1 仿真实验

目前整车配载仿真还未有标准的实验样本,假设某物流公司装车库保存的商品车相关信息如表 4 所示,可用轿运车的相关信息如表 5 所示,轿运车额颈部位接近角都为 30°,挂车部分与半吊车部分距

离 1200 mm,客户点对商品车需求情况如表 6 所示。

表 4 商品车信息表

型号	长度 /mm	宽度 /mm	高度 /mm	重量 /kg	数量 /辆
A	4900	1875	1900	2170	100
B	3665	1616	1689	1940	90
C	4568	1855	1710	1580	80
D	5325	1828	1910	2100	70
E	5240	1895	1862	2310	60

表 5 轿运车信息表

型号	下层长/mm	上层长/mm	限宽/mm	限高/mm	载重/kg	数量/辆	启用费用/元/辆
c1	27 000	28 000	2900	2700	25 000	3	120
c2	29 000	33 000	2900	2700	33 000	2	140

表 6 客户点需求表

客户点编号	商品车型号	收入/元/辆	数量/辆
d1	A	400	20
d1	B	380	20
d1	D	410	20
d2	A	400	20
d2	C	370	20
d2	D	480	20
d3	D	450	20
d3	E	500	20

表 8 算法求解结果对比

	禁忌搜索算法	改进禁忌搜索算法	优化比
最优值	11 891	12 649	6.37%
收敛耗时	29.85 s	5.13 s	82.81%
平均装载率	77.32%	86.95%	12.45%

4.2 结果分析

从表 7 和表 8 中可知,改进禁忌搜索算法求得的配载方案中轿运车的平均装载率为 86.95%,相比禁忌搜索算法求得的配载方案,空载率降低12.45%,更符合实际运输需求。此外,改进禁忌搜索算法求得的目标值更优,收敛耗时更短,目标值优化比为 6.37%,收敛耗时优化比为 82.81%,这得益于贪心策略的运用使得初始解更优,大幅度降低了解求时间,而禁忌搜索算法中两种置换策略的运用能跳出局部最优解,使解更趋于全局最优,在求解质量与求解速度上都得到较大改善。

仿真实验运行在 Matlab 2016a 平台上,运行环境为 Intel(R)Core(TM)i7-8586U CPU@1.8 GHz,运算得出轿运车具体配载计划如表 7 所示。为了验证改进禁忌搜索算法的有效性,采用标准禁忌搜索算法对同一案例进行计算,两种算法的求解结果对比如表 8 所示。

表 7 配载计划表

轿运车	下层	上层	具体配载计划	载重/kg
c1(No.1)	5E	5E	d3(10E)	23 100
c1(No.2)	3B + 1C + 2D	5D	d1(3B), d2(1C + 7D)	22 100
c1(No.3)	5D	5D	d2(10D)	21 000
c2(No.1)	7B	8B	d1(15B)	29 100
c2(No.2)	2B + 4E	6E	d1(2B), d3(10E)	26 980

5 结 论

汽车行业竞争激烈,汽车企业合理配置资源规划配载运作降低环节成本,获取最大利润是企业发展的需要。本文针对商品车和轿运车的结构特点,

提取商品车和轿运车的关键参数建立其结构模型, 根据企业实际运作情况, 考虑订单多目的地属性和运输能力约束, 建立了以利润最大化为目标的整车配载优化模型, 引入贪心算法和两种置换操作生成规则改进禁忌搜索算法, 通过仿真实验分析, 证明了模型的适用性和算法的有效性。

参考文献

[1] 胡元, 帅宇红. 整车物流运输多式联运与路径优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(1):13-18

[2] 陈晓咪, 孟志青, 徐杰. 基于混合禁忌搜索算法的动态车辆路径研究[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(5):580-585

[3] 王君, 李波. 带模糊预约时间的车辆路径问题的多目标禁忌搜索算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011(4):188-196

[4] 侯玉梅, 贾震环, 田歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2015, 30(2):240-250

[5] 杨树国, 李春霞. 一类整车物流问题优化模型的研究[J]. 数学的实践与认识, 2018,48(12):11-19

[6] 覃亮, 王志成, 孟磊, 等. 整车物流中轿运车装载方案优化研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8):1868-1874

[7] 袁彬, 刘建胜, 钱丹, 等. 一种基于改进 Dijkstra 的物流网络路径优化算法分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(9):86-88, 105

[8] Kang K, Moon I, Wang H. A hybrid genetic algorithm with a new packing strategy for the three-dimensional bin packing problem[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, 219(3):1287-1299

[9] 蓝启明, 张东站. 公路物流智能配载的研究和装载算法设计[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(33):237-243

[10] 孙霄峰, 沈晔, 许昕鹭, 等. 汽车专运船单层甲板装载配载优化[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(6):638-647

[11] 杨广全, 马玉坤, 刘飞. 基于遗传算法的集装箱装车配载方案的优化[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6):124-130

[12] 郭向阳, 杨冰峰, 张春和. 基于蚁群算法的军用车辆器材装箱配载问题[J]. 包装工程, 2016, 37(11):195-198

[13] 靳志宏, 杨丹, 邱波, 等. 多层滚装船配载优化建模与算法设计[J]. 系统工程学报, 2013, 28(2):218-226

[14] 高立杰, 王帅. 基于禁忌搜索算法的铁路运输汽车专用车配载优化[J]. 铁道货运, 2015, 33(6):29-33

[15] Liu J S, Luo Z W, Duan D Z, et al. A GA approach to vehicle routing problem with time windows considering loading constraints[J]. *High Technology Letters*, 2017, 23(1):56-64

[16] 李飞龙, 赵春艳, 范如梦. 基于禁忌搜索算法求解随机约束满足问题[J]. 计算机应用, 2019, 39(12):3584-3589

An optimization approach of the finished vehicle mixed loading problem based on improved Tabu search algorithm

Li Xuefen *, Qu Jiawei **, Liu Jiansheng **

(* School of Control Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121)

(** School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

Abstract

According to the main geometric features of the finished vehicle and transport vehicle, the geometry structure modeling of finished vehicle and transport vehicle are carried out respectively. Considering the constraint of different orders of multi-destinations, three-dimensional of finished vehicle and the constraint of capacity of transport vehicle, a mixed loading optimization modeling of the transport vehicle is built in order to get the max profits. In view of the local converge shortcoming of tabu search algorithm, a greedy algorithm is introduced, and two permutation operations are used to generate the domain of Tabu search algorithm, and then an improved tabu search algorithm is designed to solve the problem with Matlab. Finally, the effectiveness of the algorithm is proved by simulation experiments.

Key words: vehicle distribution, stowage optimization, greedy strategy, Tabu search