

基于容重比的多车型车辆配载及外包策略研究

徐翔斌, 吴晶晶

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为解决企业多车型运输中重量—体积双资源利用不均、车辆配载与外包选择难以协同决策的问题, 提出考虑外包的多车型车辆配载优化方法。将货物表征为重量—体积二维向量, 构建系统总成本最小化模型; 设计遗传算法—动态容重比解码算法, 外层以二进制染色体搜索货物自营与外包方式, 内层依据车辆使用成本和动态容重比构造车辆启用与货物装载方案。在 $n=10$ 、20 和 30 随机算例中, 该算法所得结果与 Gurobi 最优解的相对偏差不超过 0.84%, 其中 $n=10$ 时结果一致; 企业算例中, 考虑外包后系统总成本降低 14.67%, 启用车辆数由 13 辆降至 5 辆。该方法能够协调自营装载与外包选择, 提高车辆资源配置效率, 并为企业运输降本增效提供参考。

关键词: 多车型车辆配载; 外包决策; 动态容重比; 二维向量装箱问题; GA-动态容重比解码

中图分类号: U169

文献标志码: A

Research on Multi-type Vehicle Loading and Outsourcing Strategy Based on Volume-Weight Ratio

XU Xiangbin, WU Jingjing

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

Abstract: To address the imbalance in weight-volume resource utilization and the difficulty of coordinating vehicle loading and outsourcing decisions in multi-type vehicle transportation, a multi-type vehicle loading optimization method considering outsourcing is proposed. Cargo items are represented as two-dimensional weight-volume vectors, and a total-cost-minimization model is established. A genetic algorithm-dynamic volume-weight ratio decoding algorithm is proposed. The outer layer uses binary chromosomes to search for in-house and outsourced transportation decisions, while the inner layer constructs vehicle activation and cargo loading schemes according to vehicle operating costs and dynamic volume-weight ratios. For random instances with $n=10$, 20, and 30, the algorithm yields solutions with relative deviations of no more than 0.84% from the Gurobi optimal solutions, and the result for $n=10$ coincides with the Gurobi optimal solution. In the enterprise case, allowing outsourcing reduces the total cost by 14.67% and decreases the number of activated vehicles from 13 to 5. The proposed algorithm coordinates in-house loading and outsourcing decisions, improves vehicle resource allocation efficiency, and supports transportation cost reduction and operational decision-making.

Key words: multi-type vehicle loading; outsourcing decision; dynamic volume-weight ratio; two-dimensional vector packing; GA-dynamic volume-weight ratio decoding

企业货物运输中, 车辆配载方案直接影响车辆投入、装载利用率和运输成本。实际运输任务通常同时受到重量与体积约束, 且企业可调用车辆具有多车型特征, 部分货物还可通过外包完成运输。在此条件下, 车辆配载不再是单一装载安排, 而是货物装载分配、车辆资源配置与外包选择之间的协同优化问题。分散决策极易造成车辆容量利用不均、车型配置不合理和运输成本增加。因此, 研究重量—体积双约束下的多车型车辆配载及外包策略, 对企业运输降本增效具有现实意义。

车辆配载问题的核心是在车辆载重和容积约束下实现货物与车辆的合理匹配。已有研究围绕多品种货物配装和车辆装载方案开展优化^[1-2], 并逐步拓展至多车辆条件下的货物分配和协同装载^[3]。随着企业运输任务和车辆资源的复杂化, 车辆配载不再仅关注货物能否装入车辆, 还需兼顾不同车辆的容量特征、使用成本及运力配置^[4-5]。在此背景下, 相关研究以多车型、多品种货物配载为对象, 综合考虑车辆使用成本与负载平衡进行优化^[6]。在企业内部运力配置的基础上, 已有研究将自营车队与公共承运人之间的服

务选择纳入运输组织决策^[7], 并进一步考虑部分货物外包情形^[8], 以权衡自营运输与外部服务成本。总体来看, 车辆配载研究已由给定车辆条件下的货物装载, 逐步发展为兼顾企业内部运力配置与外部运力协同的综合决策问题。

对于选择自营运输的货物, 需在重量与体积双容量约束下完成装载分配, 该过程可抽象为考虑一般成本的二维向量装箱问题 (two-dimensional vector packing problem, 2DVPP)^[9]。在模型拓展方面, 相关研究将二维装载与车辆发运决策协同考虑^[10], 并围绕异质车队运输组织^[11]、时间窗约束^[12]和变箱型条件^[13]等情形拓展了模型。在求解方法方面, 考虑一般成本的二维向量装箱问题已发展出精确算法^[14]和分支定价方法^[15]。但随着问题规模扩大及约束条件增多, 精确方法的求解效率受到限制, 遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和模拟退火 (simulated annealing, SA)^[16]等元启发式方法逐渐被用于装载问题求解^[17-18]。也有研究将遗传算法与贪心构造规则结合, 来提升装箱问题的优化效果^[19]。实际应用中, 双容量约束下的车货匹配规则也是影响装载效果的重要因素, 针对货物重量、体积属性与车辆容量结构不匹配的问题, 已有研究提出容重比平衡方法, 以协调重量与容积资源的利用^[20]。考虑到货物装入后车辆剩余载重与剩余容积会持续变化, 动态容重比方法通过更新剩余容量比值指导车辆选择和货物分配^[21], 为多车多品种货物配载提供了新的构造思路。

现有研究较少将重量—体积双约束下的自营车辆调度、货物装载与外包选择协同优化。基于此, 本文构建考虑外包的多车型车辆配载模型, 提出 GA-动态容重比解码算法: 外层采用 GA 算法搜索运输方式, 内层依据自营车辆使用成本和动态容重比构造配载方案, 并通过随机算例、企业算例和外包成本敏感性分析验证其有效性。

1 问题描述

1.1 问题描述

设企业运输任务包含货物集合 $I = \{1, 2, \dots, n\}$, 其中, n 为货物件数。每件货物 i 具有重量 g_i (t) 和体积 v_i (m³)。货物 i 可采用企业自营车辆运输, 也可外包给第三方服务商承运, 外包成本为 O_i (元)。企业拥有自营车辆集合 $J = \{1, 2, \dots, B\}$, 其中, B 为候选车辆数。车辆 j 的最大载重 G_j (t)、最大容积 V_j (m³) 和使用成本 C_j (元) 存在差异。在满足车辆重量和体积容量约束的条件下, 需要确定货物运输方式、自营车辆调度及货物装载分配方案, 使系统总成本最小。该问题假设如下:

1) 货物仅考虑重量和体积二维属性, 不考虑几何形状及长宽高尺寸。2) 货物不可拆分, 并且只能选择自营运输或外包运输。3) 不考虑路径规划、需求波动及多批次调度。

1.2 基于容重比配载的相关概念

本文基于容重比配载的相关概念及其相关指标如下:

1) 货物容重比 r_i (m³/t): 货物 i 的体积与重量之比 $r_i = v_i / g_i$;

2) 车辆容重比 R_j (m³/t): 车辆 j 的最大装载体积与最大装载重量之比 $R_j = V_j / G_j$, 其中, V_j 和 G_j 分别表示车辆 j 的额定体积容量和额定重量容量;

3) 车辆动态容重比 R_j^d (m³/t): 为车辆 j 在当前装载状态下剩余体积容量与剩余重量容量之比, 即 $R_j^d = V_j^r / G_j^r$, 其中, V_j^r (m³) 和 G_j^r (t) 分别表示车辆 j 的剩余体积容量和剩余重量容量。

4) 剩余自营货物集合容重比 R_K (m³/t): 剩余自营货物集合 K 的总体积与总重量之比, 即

$$R_K = \frac{\sum_{i \in K} v_i}{\sum_{i \in K} g_i}, \text{ 集合 } K \text{ 及其容重比 } R_K \text{ 随着车辆配载动态更新。}$$

5) 容重比偏差 $\delta_{i,j}$ (m^3/t): 待装货物 i 的容重比与车辆 j 动态容重比 R_j^d 之差的绝对值, $\delta_{i,j} = |r_i - R_j^d|$, $\delta_{i,j}$ 用于衡量货物 i 与车辆 j 当前剩余容量结构之间的匹配程度。其值越小, 表明货物与车辆剩余容量结构的匹配程度越高。

2 模型

模型中的相关参数和变量定义如表 1 所示。

表 1 参数和变量
Tab.1 Parameters and variables

类型	符号	定义
集合	I	货物集合 $i \in I$
	J	车辆集合 $j \in J$
常量	g_i	货物 i 的重量
	v_i	货物 i 的体积
	O_i	货物 i 外包成本
	G_j	车辆 j 的最大装载重量
	V_j	车辆 j 的最大装载体积
	C_j	车辆 j 的使用成本
	M	充分大的正数
变量	u_j	车辆 j 是否选用
	$p_{i,j}$	货物 i 是否装载到车辆 j
	q_i	货物 i 是否外包

目标函数:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} C_j u_j + \sum_{i \in I} O_i q_i \quad (1)$$

约束条件:

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

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

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

$$\sum_{i \in I} v_i p_{i,j} \leq V_j u_j, \forall j \in J \quad (5)$$

$$u_j, p_{i,j}, q_i \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

式 (1) 为目标函数, 以系统总运输成本最小化为优化目标, 成本由自营车辆使用成本与货物外包成本两部分构成。式 (2) 表示货物只能在“由自营车辆承运”与“选择外包”两种方式中择一。式 (3) 为自营车辆启用决策与货物装载之间的联动约束。式 (4) 为自营车辆的载重约束: 同一车辆上的货物总重不超过该车辆的最大载重。式 (5) 为自营车辆的体积约束: 同一车辆上的货物总体积不超过该车辆的最大容积。式 (6) 为变量取值范围约束。

3 算法设计

考虑外包的多车型车辆配载涉及货物自营与外包选择、自营车调度和货物配载等决策，并受重量、体积双容量约束。遗传算法具有编码灵活和全局搜索能力较强的特点，适于搜索货物运输方式；但仅依赖遗传操作难以反映车辆剩余载重与剩余容积的动态匹配关系。为此，本文设计 GA-动态容重比解码算法：将“外包—自营”决策编码为 GA 算法的染色体，外层遗传搜索确定货物运输方式，内层依据车辆使用成本、动态容重比和剩余容量构造车辆启用与货物装载方案。算法流程如图 1 所示，种群经选择、交叉、变异、精英保留和周期性随机更新，满足终止条件后输出最优装载与外包方案。

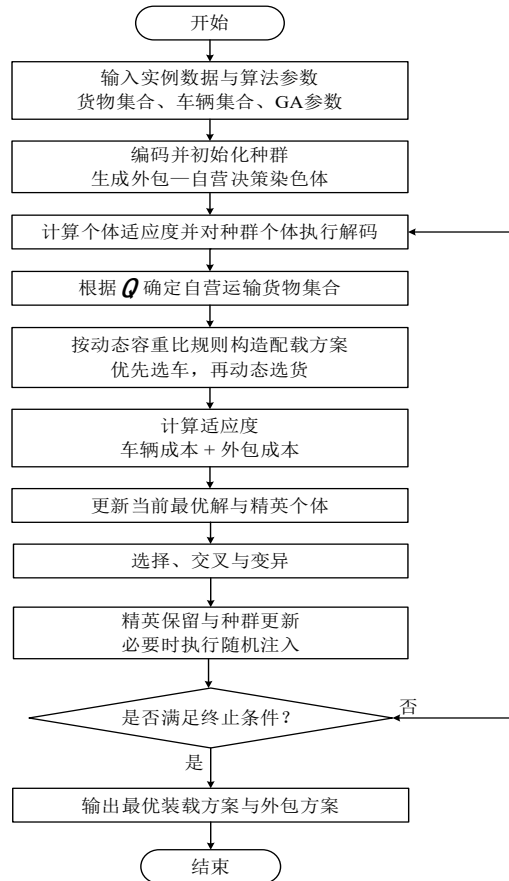


图 1 GA-动态容重比解码算法总体求解框架

Fig.1 Overall framework of the GA-dynamic volume-weight ratio decoding algorithm

3.1 动态容重比解码算法

算法 1 用于将外包—自营决策染色体 Q 转化为自营车辆启用方案、货物装载方案和总成本评价。该算法采用车辆驱动式动态容重比解码规则，先依据剩余自营货物集合的容重结构、候选车辆容量结构和单位等效容量成本选择自营车辆，再依据动态容重比偏差选择待装货物，并随装载过程更新自营车辆剩余容量和剩余自营货物集合，直至完成装载。

算法 1：动态容重比解码算法

输入： 货物集合 I ，车辆集合 J ，货物重量 g_i ，货物体积 v_i ，车辆载重 G_j ，车辆容积 V_j ，车辆使用成本 C_j ，货物外包成本 O_i ，外包—自营决策染色体 Q ，体积折算系数 ρ (t/m³)，容重比偏差权重 η (元/m³)

初始化： 剩余自营货物集合 $K \leftarrow \{i \in I | q_i = 0\}$ ， $u_j \leftarrow 0$ ，车辆装载集合 $L_j \leftarrow \emptyset$ ， $\forall j \in J$

输出： 装载方案 $\{L_j\}$ ，外包货物集合 $I_{\text{out}}(Q)$ ，总成本 $Z(Q)$ (元)

while $K \neq \emptyset$ do

根据剩余自营货物集合 K 计算集合容重比 R_K

构造候选启用车辆集合: $J_c \leftarrow \{j \in J | u_j = 0, \exists i \in K : g_i \leq G_j, v_i \leq V_j\}$

for each $j \in J_c$ do

计算车辆启用评分 $S_j = C_j / \max(G_j, \rho V_j) + \eta |R_j - R_K|$, 单位为元/t

end for

选择启用评分最小的车辆 $j^* \leftarrow \operatorname{argmin} \{j \in J_c\} S_j$

令 $u_{j^*} \leftarrow 1, G_{j^*}^r \leftarrow G_{j^*}, V_{j^*}^r \leftarrow V_{j^*}$

构造当前车辆可装入货物集合: $\Omega_{j^*} \leftarrow \{i \in K | g_i \leq G_{j^*}^r, v_i \leq V_{j^*}^r\}$

while $\Omega_{j^*} \neq \emptyset$ do

在 Ω_{j^*} 中选择容重比偏差最小的货物: $i^* \leftarrow \operatorname{argmin} \{i \in \Omega_{j^*}\} \delta_{i,j^*}$

将货物 i^* 装入车辆 j^* , 并更新 $L_{j^*}, G_{j^*}^r, V_{j^*}^r$ 和 K

$G_{j^*}^r \leftarrow G_{j^*}^r - g_{i^*}, V_{j^*}^r \leftarrow V_{j^*}^r - v_{i^*}$

重新构造当前车辆可装入货物集合 Ω_{j^*}

end while

end while

$I_{\text{out}}(\mathcal{Q}) \leftarrow \{i \in I | q_i = 1\}$

$Z(\mathcal{Q}) = \sum_{\{j \in J : u_j = 1\}} C_j + \sum_{\{i \in I_{\text{out}}(\mathcal{Q})\}} O_i$

return $\{L_j\}, I_{\text{out}}(\mathcal{Q}), Z(\mathcal{Q})$

3.2 遗传操作

3.2.1 编码与解码设计

编码是将原问题中的决策信息转化为遗传算法可操作的染色体形式, 解码则是在给定染色体的基础上进一步构造实际执行方案。编码阶段仅对货物运输方式进行二进制表示, 设货物集合为 $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$, 则染色体表示为 $\mathcal{Q} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ 。其中, $q_i = 0$ 表示货物 i 为自营运输, $q_i = 1$ 表示货物 i 为外包运输。如图 2 所示, 染色体中每一位基因与货物集合中的每件货物一一对应。例如, 当染色体为 $\mathcal{Q} = (0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)$ 时, 基因值为 0 的货物 i_1, i_3, i_4, i_6, i_8 为自营车运输的货物集合, 再由算法 1 进行车辆选择与装载分配; 基因值为 1 的货物 i_2, i_5, i_7 为外包运输集合, 其成本直接计入外包成本。即染色体 $\mathcal{Q}$ 仅决定货物运输方式划分, 最终装载方案则需通过解码过程生成。

	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8
$\mathcal{Q}$	0	1	0	0	1	0	1	0

图 2 货物运输决策编码示意图

Fig.2 Schematic diagram of the encoding of transportation decisions

3.2.2 交叉变异算子和选择策略

交叉与变异用于生成新个体并增强搜索能力。交叉操作采用单点交叉方式，在两个父代染色体中随机确定交叉位置，并交换该位置后的基因片段。变异操作采用按位翻转方式，即以给定概率将基因值在 0 和 1 之间转换，从而改变对应货物的运输方式。交叉与变异后再重新调用动态容重比解码算法，并计算总成本作为适应度评价依据。

选择过程采用锦标赛选择方式，从种群中随机抽取若干个体组成候选集合，并选择适应度较优者作为父代。

种群更新阶段结合精英保留与周期性随机注入机制，前者用于避免优良个体丢失，后者用于补充种群多样性，从而降低早熟收敛风险。

3.2.3 GA 优化装载-外包决策算法

算法 2 完成编码、动态容重比解码及遗传操作。染色体 Q 仅表示货物运输方式决策，车辆启用和装载分配由算法 1 解码生成。

算法 2: GA 优化装载-外包决策算法

输入: 种群规模 N (个), 迭代代数 $T_{\max}$ (代), 交叉概率参数 p_c , 变异概率参数 p_m , 种群重生周期 H (代), 重生比例 γ , 精英保留数量 E (个), 当前迭代代数 t

初始化: 随机生成种群 P_t , 并加入全自营个体和全外包个体作为边界个体 Q_{best}

输出: 最优装载方案 $\{L_j^*\}$, 最优外包集合 $I_{\text{out}}(Q_{\text{best}})$, 最优总成本 Z^*

for each $Q \in P_t$ do

 调用算法 1 对染色体 Q 进行解码, 得到装载方案 $\{L_j\}$, 外包货物集合 $I_{\text{out}}(Q)$ 和总成本 $Z(Q)$

end for

按适应度值 $Z(Q)$ 升序排列 P_t

令 $Q_{\text{best}} \leftarrow P_t$ 中适应度值最小的个体, $Z_{\text{best}} \leftarrow Z(Q_{\text{best}})$

for $t=1$ to $T_{\max}$ do

$p_c, p_m \leftarrow$ 动态调整($t, T_{\max}$)

$P_{t+1} \leftarrow$ 当前种群中前 E 个精英个体

 while $|P_{t+1}| < N$ do

 锦标赛选择父代 Q_a 和 Q_b

 以概率 $p_c(t)$ 对 Q_a 和 Q_b 执行单点交叉, 生成子代 Q_c 和 Q_d

 对子代 Q_c 和 Q_d 的各基因位, 分别以概率 $p_m(t)$ 执行按位翻转变异

 调用算法 1 计算 Q_c 和 Q_d 的适应度 $Z(Q)$

 将 Q_c 和 Q_d 加入 P_{t+1}

 若 $|P_{t+1}| > N$, 则按 $Z(Q)$ 升序排列 P_{t+1} , 并保留前 N 个个体

 若 P_{t+1} 中存在个体 Q 满足 $Z(Q) < Z_{\text{best}}$, 则令 $Q_{\text{best}} \leftarrow Q, Z_{\text{best}} \leftarrow Z(Q)$

 end while

$P_t \leftarrow P_{t+1}$

if $t \bmod H = 0$ then

按比例 γ 生成若干随机新个体

调用算法 1 计算随机个体的适应度值

将其并入 P_t 并按 $Z(\boldsymbol{q})$ 升序排列, 保留前 N 个个体

若存在个体 $\boldsymbol{q}$ 满足 $Z(\boldsymbol{q}) < Z_{\text{best}}$, 则令 $\boldsymbol{q}_{\text{best}} \leftarrow \boldsymbol{q}$, $Z_{\text{best}} \leftarrow Z(\boldsymbol{q})$

end if

end for

调用算法 1 对 $\boldsymbol{q}_{\text{best}}$ 解码, 得到最优装载方案 $\{L_j^*\}$, 最优外包集合 $I_{\text{out}}(\boldsymbol{q}_{\text{best}})$ 和最优总成本 Z^*

return $\{L_j^*\}, I_{\text{out}}(\boldsymbol{q}_{\text{best}}), Z^*$

4 算例设计与结果分析

4.1 实验设置与参数

为验证模型与算法有效性, 随机算例参照文献^[1]的数据生成方式, 货物重量 g_i 在 0.306~3.00 t 范围内随机生成, 货物体积 v_i 在 0.65~5.60 m³ 范围内随机生成。设置 6 种车型, 并根据各车型可用数量展开为候选车辆集合 J , 每辆候选车辆继承其所属车型的载重、容积和使用成本参数。成本设定参考二维向量装箱一般成本结构^[9]及外包运输分项成本刻画方法^[8], 引入等效计费量 $w_{\text{chg}} = \max(g, \rho v)$, 单位为 t, 来刻画货物或车辆的重量、体积资源占用。相应外包成本表示为 $O_i = F_{\text{out}} + r_{\text{out}} \cdot \max(g_i, \rho v_i)$, 车辆使用成本为 $C_j = F_{\text{veh}} + r_{\text{veh}} \cdot \max(G_j, \rho V_j)$; 式中 F_{out} 和 F_{veh} 分别为外包固定成本和车辆固定成本, 单位均为元; r_{out} 和 r_{veh} 分别为外包单位和车辆单位等效计费量成本, 单位均为元/t。参数取 $\rho = 1 \text{ t/m}^3$, $F_{\text{out}} = 140$ 元, $r_{\text{out}} = 34$ 元/t; $F_{\text{veh}} = 570$ 元, $r_{\text{veh}} = 31$ 元/t。

问题规模为 $n = 10, 20, 30$ 和 60 , GA 参数设置为 $N = 100$ 个、 $T_{\text{max}} = 150$ 代、 $\eta = 18$ 元/m³、 $H = 50$ 代、 $\gamma = 0.20$ 、 $E = 8$ 个。交叉概率由 0.80 线性递减至 0.60, 变异概率由 0.05 线性递增至 0.12。为消除不确定性, 每组算例随机运行 5 次, 收敛曲线取最优总成本均值, 结果取最低总成本方案。算法采用 Python 3.11 实现, 求解器为 Gurobi 11.0.3, 求解时限为 3 600 s; 运行环境为 Windows 64 位操作系统, Intel Core i7-8550U 处理器、8 GB 内存。

4.2 算法有效性分析

为验证本文算法的有效性, 选取 Gurobi、贪心算法^[19]和 SA 算法^[18]进行对比, 结果见表 2。Gurobi 用于小规模算例的精确求解; 贪心和 SA 分别采用贪心构造与局部搜索的策略求解。各规模算例均独立重复运行 5 次, 表中列示各算法总成本最低的结果; 本文算法总成本的变异系数均不超过 1.76%, 结果较稳定。

表 2 不同算法在随机算例上的求解结果比较

Tab.2 Comparison of solution results of different algorithms under random instances

规模	精确求解 Gurobi 总成本/元	对比算法		本文算法		总成本降幅/%	
		贪心成本/ 元	SA 成本/ 元	总成本/元	相对最优偏 差/%	较贪心算法	较 SA 算法
$n = 10$	1 794.36	2 279.93	1 797.12	1 794.36	0.00	21.30	0.15
$n = 20$	3 762.21	4 703.39	4 325.67	3 793.92	0.84	19.34	12.29
$n = 30$	4 640.71	6 001.17	5 121.66	4 678.23	0.81	22.04	8.66
$n = 60$	—	13 482.18	12 849.86	11 478.02	—	14.87	10.68

在 Gurobi 获得最优解的 $n=10$ 、20、30 算例中，本文算法的相对最优偏差分别为 0.00%、0.84%和 0.81%，均低于 1%；其中， $n=10$ 时与 Gurobi 最优解一致。与贪心算法和 SA 算法相比，本文算法的总成本分别降低 14.87%~22.04%和 0.15%~12.29%。对于 $n=60$ 算例，Gurobi 在 3 600 s 内未获得最优解，故不计算相对最优偏差，但本文算法仍优于两种对比算法。

除成本外，本文算法在大规模算例中仍保持较好的装载效果。以 $n=60$ 算例为例，平均重量装载率和平均体积装载率分别达到 97.85%和 96.84%，表明动态容重比解码能够较好地优化车辆重量与体积资源利用，在降低系统总成本的同时保持较高的装载水平。

4.3 算法收敛性分析

图 3 给出了 $n=30$ 和 $n=60$ 随机算例在 5 个随机种子下的平均当前最优总成本收敛曲线。两组曲线均呈现先快速下降、后趋于稳定的变化特征； $n=30$ 算例较早进入稳定阶段， $n=60$ 算例前期下降明显、后期仍有小幅改进，表明本文算法在不同规模下具有较好的收敛稳定性。

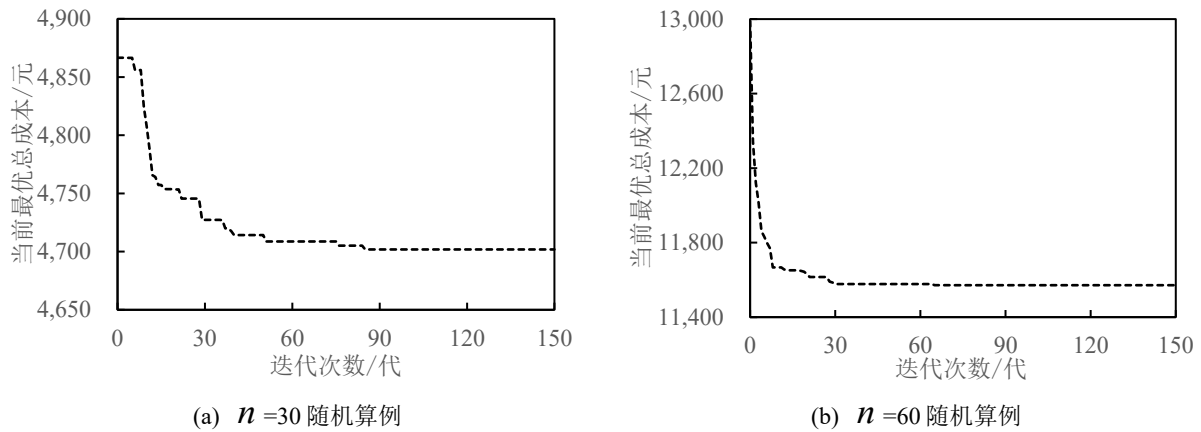


图 3 不同规模随机算例下本文算法收敛曲线

Fig.3 Convergence curves of the proposed algorithm for random instances of different scales

5 实例验证

5.1 数据准备

企业算例基于 J 专线物流公司一天配送任务数据构建^[22]，该公司主要从事家具及建材货物运输。为检验 GA-动态容重比解码算法在实际运输场景中的适用性，设置六类候选车型，车辆参数如表 3 所示，货物类型分为 60 种，具体参数如表 4 所示。

表 3 车辆信息

Tab.3 Vehicle information

型号	参数		
	最大载重/t	最大容积/m ³	可用车辆数/辆
车型 1	5.00	13.00	8
车型 2	10.00	40.00	7
车型 3	12.00	45.00	5
车型 4	18.00	60.00	4
车型 5	30.00	75.00	3
车型 6	30.00	120.00	2

表 4 货物信息

Tab.4 Goods information

序号	g_i/t	v_i/m^3	件数	序号	g_i/t	v_i/m^3	件数	序号	g_i/t	v_i/m^3	件数
1	1.90	2.00	2	21	0.57	4.90	2	41	0.84	7.60	3
2	1.00	18.00	1	22	0.55	2.10	2	42	0.23	2.10	3
3	0.20	0.60	8	23	0.15	3.60	3	43	0.90	7.50	3
4	2.30	12.00	1	24	0.10	1.00	8	44	0.32	1.50	4
5	0.15	1.20	6	25	2.10	10.00	2	45	0.80	2.90	2
6	0.05	1.50	3	26	0.14	1.00	6	46	0.08	0.90	5
7	1.60	3.00	2	27	0.10	0.20	10	47	0.08	1.00	10
8	2.00	0.50	10	28	0.40	0.80	9	48	0.10	1.20	8
9	0.21	1.00	8	29	1.70	5.20	6	49	0.15	1.50	5
10	0.10	1.60	5	30	0.10	1.80	7	50	2.60	1.00	6
11	1.00	8.20	2	31	0.12	0.20	6	51	0.32	0.80	10
12	0.20	3.50	3	32	0.76	3.60	3	52	0.32	0.50	3
13	1.40	1.50	5	33	0.90	15.00	3	53	1.00	0.20	10
14	0.10	1.30	3	34	0.05	2.00	5	54	0.76	10.70	3
15	0.36	0.60	7	35	0.80	2.80	8	55	0.90	3.10	7
16	2.10	9.00	3	36	0.40	4.00	5	56	0.60	5.10	6
17	0.10	0.30	9	37	0.26	1.80	3	57	1.00	3.20	2
18	0.35	0.80	8	38	0.32	2.50	7	58	1.50	4.50	1
19	0.40	5.00	6	39	0.80	3.00	1	59	0.30	1.90	3
20	0.05	0.80	7	40	0.53	0.80	10	60	0.90	2.50	1

5.2 算例结果分析

企业算例分别在禁止外包与允许外包两种情形下求解，允许外包方案采用 GA-动态容重比解码算法独立运行 3 次，选取总成本最低的方案，关键指标见表 5。结果表明，允许外包后系统总成本降低，启用车辆数减少，平均重量和体积装载率均有所提升。这说明外包机制可通过分流部分容量匹配性较弱或自营运输成本较高的货物，改善车辆装载结构并降低系统总成本。

表 5 不考虑外包与考虑外包的车辆配载方案对比

Tab.5 Comparison of vehicle loading schemes with and without outsourcing

方案	总成本/元	车辆成本/元	外包成本/元	启用车辆数/辆	外包/总件数	平均重量/体积装载率/%
禁止外包	30 970.00	30 970.00	0.00	13	0/300	80.09/87.21
允许外包	26 427.80	20 345.30	6 082.50	5	65/300	91.69/97.38

5.3 外包成本敏感性分析

为分析外包成本变化对运输组织方案的影响，对外包成本按倍率 λ 进行缩放，取值范围为 0.6~1.8，并基于 3 个随机种子计算平均结果。不同倍率下的成本构成如图 4 所示。

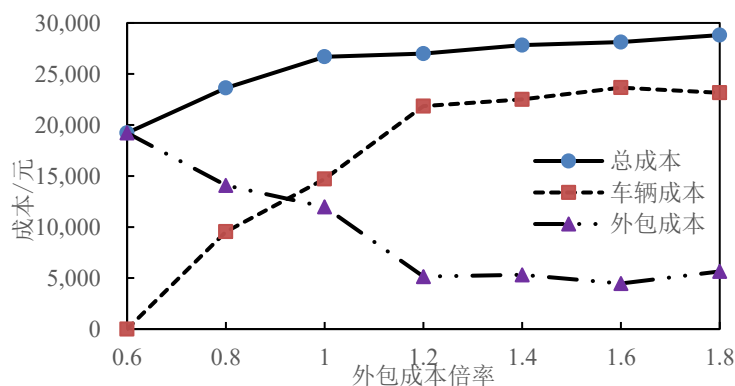


图 4 外包成本变化下的成本构成

Fig.4 Cost composition under changes in outsourcing cost

由图 4 可见,随着外包成本倍率提高,系统总成本整体上升,车辆成本占比逐渐增加。结合不同倍率下的求解结果可知,外包成本提高会促使部分货物由外包转向自营,表现为外包件数减少、启用车辆数小幅增加,说明外包成本变化是影响自营运输与外包服务决策的关键。

6 结论

针对重量—体积双约束下多车型车辆配载及外包协同优化问题,本文构建了考虑外包的多车型车辆配载优化模型,并设计 GA-动态容重比解码算法,主要结论如下。

1) 构建了货物外包、车辆启用与货物装载分配协同决策模型。模型以系统总成本最小为目标,在统一框架下刻画自营车辆使用成本与货物外包成本之间的权衡关系,实现了多车型运输条件下运力配置与货物运输方式的联合优化。

2) 提出了“外层遗传搜索—内层动态容重比解码”的求解方法。外层仅编码货物自营与外包方式,以缩减搜索空间;内层依据车辆使用成本和动态容重比完成车辆启用与货物分配,实现运输方式决策与重量—体积双资源匹配的协同。

3) 本文算法能够根据货物重量—体积属性、车辆容量结构及外包成本变化生成相应的运输组织方案,为企业多车型运力配置与外包决策提供方法支持。

参考文献:

- [1] 卜雷,尹传忠,蒲云.优化普零货物拼箱配装的遗传算法[J].交通运输工程学报,2004,4(4):84-87.
Bu Lei, Yin Chuanzhong, Pu Yun. Genetic algorithm for optimal arrangement of general piece goods [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 84-87.
- [2] Yüceer Ü, Özakça A. A truck loading problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(4): 766-773.
- [3] 朱向,向延平.多车多件货物平衡装载优化研究[J].工业工程,2020,23(3):123-131.
Zhu Xiang, Xiang Yanping. An optimization of multi-freights loading into multi-cars with balancing constraints [J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(3): 123-131.
- [4] Liu Jiansheng, Smith A E, Qian Dan. The vehicle loading problem with a heterogeneous transport fleet [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 97: 137-145.
- [5] He Zhaolei, Zhang Miaohan, Chen Qiyong, et al. Optimization of heterogeneous vehicle logistics scheduling with multi-objectives and multi-centers [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 14169.
- [6] 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.
Xu Xiangbin, Chen Yanping. Research on multi-type vehicle loading considering transportation cost [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 71-81.
- [7] Dabia S, Lai D, Vigo D. An exact algorithm for a rich vehicle routing problem with private fleet and common carrier [J]. Transportation Science, 2019, 53(4): 986-1000.
- [8] Baller A C, Dabia S, Dullaert W E H, et al. The vehicle routing problem with partial outsourcing [J]. Transportation Science, 2020, 54(4): 1034-1052.
- [9] Hu Qian, Wei Lijun, Lim A. The two-dimensional vector packing problem with general costs [J]. Omega, 2018, 74: 59-69.
- [10] Yücel E, Salman F S, Erdoğan G. Optimizing two-dimensional vehicle loading and dispatching decisions in freight logistics [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 302(3): 954-969.
- [11] Ji Bin, Zhang Zheng, Yu S S, et al. Modelling and heuristically solving many-to-many heterogeneous vehicle routing problem with cross-docking and two-dimensional loading constraints [J]. European Journal of Operational Research, 2023, 306(3): 1219-1235.
- [12] Gao Mujin, Chen Yanru, Li Junheng, et al. Hybrid branch-and-price-and-cut algorithm for the two-dimensional vector packing problem with time windows [J]. Computers & Operations Research, 2023, 157: 106267.

- [13] Zhang Zongcheng, Jiang Yangsheng, Gao Mujin, et al. Deep reinforcement learning-based column generation for the two-dimensional vector variable-sized packing problem [J]. Expert Systems with Applications, 2025, 271: 126534.
- [14] Wang Ting, Hu Qian, Lim A. An exact algorithm for two-dimensional vector packing problem with volumetric weight and general costs [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 300 (1): 20-34.
- [15] Wei Lijun, Lai Minghui, Lim A, et al. A branch-and-price algorithm for the two-dimensional vector packing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 281 (1): 25-35.
- [16] Wu Y, Zhang N, Feng H. Solving the 3D bin-packing problem using a hybrid genetic algorithm with a simulated annealing operator[J]. Applied Soft Computing, 2017, 57: 446-458.
- [17] Chien Chenfu, Lan Yubin, Sethanan K, et al. Digital system for dynamic container loading with neural network-based memory exploiting hybrid genetic algorithm for carbon reduction [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 191: 110149.
- [18] 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 Changyong, Liu Jiayu. Multi-box container loading problem based on hybrid genetic algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48 (5): 747-755.
- [19] Martinez G, Duta E A, Sanchez-Romero J L, et al. An efficient algorithm for irregular pattern nesting based on genetic algorithm and greedy strategy [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2026, 50 (2): 292-306.
- [20] 刘小群, 马士华, 徐天亮. 装载能力有限下多品种货物配装的容重比平衡法 [J]. 工业工程与管理, 2004, 9 (3): 62-66.
Liu Xiaoqun, Ma Shihua, Xu Tianliang. The Cubadge_Weight balance algorithm for the loading of multi-category goods under the limited loading capacity [J]. Industrial Engineering and Management, 2004, 9 (3): 62-66.
- [21] 徐翔斌, 严梦荣. 基于回溯树的动态容重比平衡货物配载研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30 (9): 3406-3418.
Xu Xiangbin, Yan Mengrong. Backtracking tree-based dynamic volumetric weight balance of cargo loading [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30 (9): 3406-3418.
- [22] 刘晓梅. J 专线物流公司货物装车管理优化决策研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2021: 62-63.
Liu Xiaomei. Research on optimal decision of cargo loading management of J dedicated line logistics company [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021: 62-63.



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。



通信作者: 吴晶晶 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为车辆配载优化。