

带软时间窗的多商品需求可拆分两阶段车辆路径问题研究*

徐东洋^{1,2}, 吕 闯², 王利娟³

(1. 河南大学 管理科学与工程研究所; 2. 河南大学 商学院, 河南 开封 475004;

3. 重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要:干线、支线作为电商企业物流配送的关键环节,两者协同优化对降本增效意义重大。基于干线、支线实际运营特征,提炼出软时间窗、多车场、多商品、需求可拆分两阶段车辆路径问题,建立以车辆路径成本、固定派车成本和惩罚成本(违反配送时间要求)为优化目标的混合整数规划模型;基于派车次数和运输距离节约的贪婪思想,设计高效启发式求解算法,并借助27个小规模算例和8个较大规模算例对模型和算法的求解效果进行验证。实验结果表明:1)借助优化软件,模型在2h内能够求解5个区域中心仓库、20个中转仓库、4种商品的算例;所设计的启发式算法能够在较短时间对现实中的较大规模问题求出可行解,求解能力和求解效率远优于优化软件CPLEX。2)问题复杂度随着问题规模即区域中心仓库个数、中转仓库个数和商品种类数的增加急剧增加,且中转仓库个数对问题复杂度的影响最大,区域中心仓库个数对问题复杂度的影响次之,商品种类数对问题复杂度的影响最小。3)对于较小规模算例,干线配送成本占比较大;随着算例规模增加,支线环节派车数量增幅较大,进而导致支线配送成本明显增加。4)延长车辆最大工作小时后,干线环节派车数量大幅降低,总配送成本明显降低;放宽配送第2阶段车容量限制,则该阶段的用车数量大幅度降低。研究成果不仅可拓展两阶段车辆路径问题现有理论,而且有助于电商企业实现多级配送网络高效协同运作;此外通过优化配送方案,可减少派车次数,并有助于缓解城市交通压力和改善城市交通环境。

关键词:两阶段车辆路径;多车场;多商品;软时间窗;需求可拆分;协同配送;数学规划;启发式算法

中图分类号:O221;U-9

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)02-0075-13

1 研究背景

近些年来,随着电子商务行业的逐渐发展与完善,生产、消费与物流活动方式均发生了很大改变^[1]。电商行业之间的竞争越来越集中于物流服务质量方面^[2],这是因为物流服务质量明显影响客户的满意度^[3],由此使得电商企业迫切需要以较低物流成本实现较高服务质量^[4]。当前,大型电商企业多采用如图1所示的“干线-支线-末端”一体式三级物流配送体系^[5],其中:区域中心仓库之间相互调拨为干线配送,区域中心仓库向中转仓库供货为支线配送,中转仓库向管辖范围内的终端客户配送为末端配送。在实际运营中,为快速响应终端客户的订单需求,企业通常需要通过区域中心仓库之间相互调拨(干线配送)以及区域中心仓库向中转仓库转运(支线配送),以提前完成中转仓库库存布局。然而在实际运营中,干线与支线的资源调度不协调现象越来越突出、并对末端配送产生叠加效应,不仅导致配送实际时效比标准时效更差且使得配送成本高昂。因此,探寻干线-支线协同配送优化方案将是电商企业实现降本增效的关键。

干线-支线协同配送问题在学术上被定义为两阶段车辆路径问题(two-echelon vehicle routing problem),如图1中虚线方框内部分所示。该问题由文献[6]以报纸配送为背景首次提出,主要探讨的是从印刷厂到中转站和从中转站到零售商的报纸协同配送决策。从问题结构来看,每个配送环节的优化问题均属于经典车辆路径问题的延伸,因此,两阶段车辆路径问题可看作车辆路径问题的高阶变体,属于NP-困难问题。由于两阶段车辆路

* 收稿日期:2023-09-05 修回日期:2024-03-03 网络出版时间:2024-05-13T17:07

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 71902054);国家社会科学基金一般项目(No. 23BGL047);河南省高校科技创新人才项目(No. 23HASTIT025);河南省哲学社会科学规划项目(No. 2022CJJ134);河南省高等学校重点科研项目(No. 22A630010);河南科技智库调研课题(No. HNKJZK-2024-36B)

第一作者简介:徐东洋,男,教授,博士生导师,研究方向为物流调度优化,E-mail:xdy_hust@163.com;通信作者:王利娟,女,博士研究生,E-mail:henulj@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20240513.0929.004

径问题在城市配送^[7]、货物转运^[8]、快递物流^[9]等方面具有广泛的应用前景,因此这类问题逐步受到了学者们的关注^[10]。已有相关研究多集中在单区域中心仓库^[11-12]、单车场^[13-14]、单商品或伪多商品^[15-16]、需求一次性满足^[17-18]、无配送时间窗或硬配送时间窗^[19-20]等方面,然而目前电商企业通常采用的是多区域中心仓库、多车场情景、采用多商品多批次联合配送模式,故这些研究成果显然无法满足电商企业的日常运营需求。此外,在实际运营过程中,要让商品需求恰好在期望的时间内得到充分满足是很难确保的,因此基于过早或过晚配送惩罚的软时间窗情况应得到进一步探讨。

基于上述研究背景,本文结合电商企业实际运营特征,在考虑多区域中心仓库、多车场、多商品、需求可拆分满足、软时间窗等因素情况下对两阶段车辆路径问题进行研究并探讨最优联合配送方案。本文首先建立以最小化总配送成本(包括车辆路径成本、固定派车成本和违反配送时间要求的惩罚成本)为目标的混合整数规划模型,然后基于相关文献和现实分布特征生成 36 组不同规模的算例进行仿真实验,以便对现有的两阶段车辆路径问题理论进行补充,同时期望为电商企业的配送调度决策提供支持。

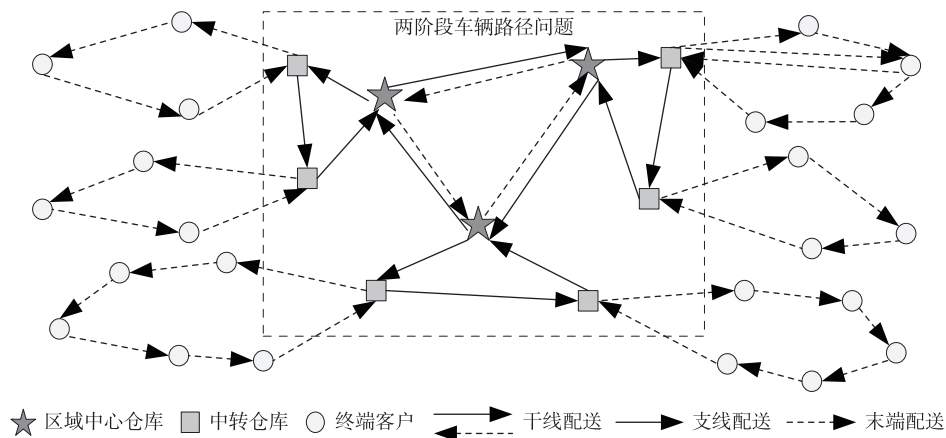


图 1 “干线-支线-末端”一体式三级配送网络

Fig. 1 The integrated three-level distribution network of trunk-branch-terminal

2 模型建立

2.1 问题描述与假设

基于电商企业实际运营特征,对带软时间窗的多商品需求可拆分两阶段车辆路径问题进行科学定义:配送网络中涉及多个区域中心仓库、多个中转仓库和多种商品;每个区域中心仓库和中转仓库的位置、每个区域中心仓库的供应量和中转仓库的需求量及期望到货时间已知,区域中心仓库所服务的中转仓库已知但区域中心仓库之间的商品供需匹配关系未知。研究目标是对区域中心仓库之间的供需匹配关系、区域中心仓库间的访问路径及车辆出发时间以及区域中心仓库到中转仓库的访问路径及车辆出发时间进行决策,寻找总成本(包括车辆路径成本、固定派车成本和配送第 2 阶段违反配送时间要求的惩罚成本)最小的配送方案以满足中转仓库的需求。为方便建模,基于现实情况,本文考虑如下假设:1) 每个区域中心仓库拥有 2 种型号配送车辆,大、小型货车分别用于配送第 1、第 2 阶段,同一阶段的车辆的数量、速度、单位里程耗油量、最大装载量、最大工作时间等参数相同。2) 区域中心仓库为 24 h 运营,中转仓库每日运营时间有限,过早和过晚满足中转仓库商品需求所造成的损失大小不同。3) 每个区域中心仓库或中转仓库被同一车辆最多访问 1 次。4) 区域中心仓库日常需求量大于货车容量,且需求量可由不同车辆分批满足,但同种商品的需求为一次性满足;中转仓库需求为一次性满足。5) 考虑到商品特性及重要程度不同,不同商品的装卸速率和不满足配送时间要求的惩罚不同。

2.2 数学模型

本文建立的模型参数定义如下: $N = N_d \cup N_s = \{1, 2, \dots, n_d + n_s\}$ 表示网络节点集合,其中 $N_d = \{1, 2, \dots, n_d\}$ 表示区域中心仓库集合; $N_s = \bigcup_{p \in N_d} N_s^p = \{n_d + 1, n_d + 2, \dots, n_d + n_s\}$ 表示中转仓库集合,其中 $N_s^p = \{1, 2, \dots, n_s^p\}$ 表示区域中心仓库 p 服务的中转仓库集合; M 表示商品种类集合, $M = \{1, 2, \dots, m_c\}$; S_{pm}^1 表示区域中心仓库 p 持有商品 m 的数量; D_{pm}^1 表示区域中心仓库 p 需求商品 m 的数量; D_{im}^2 表示中转仓库 i 需求商品 m 的数

量; $[e_i, l_i]$ 表示中转仓库 i 期望到货时间, 其中 e_i 和 l_i 分别表示中转仓库 i 期望的最早和最晚到货时间; $R_1 = \bigcup_{p \in N_d} R_1^p = \{1, 2, \dots, \sum_{p=1}^{n_d} r_p\}$ 表示用于第 1 阶段配送的大型货车集合, 其中 R_1^p 表示区域中心仓库 p 的大型货车集

合, r_p 表示区域中心仓库 p 的大型货车数量; $K_2 = \bigcup_{p \in N_d} K_2^p = \{1, 2, \dots, \sum_{p=1}^{n_d} k_p\}$ 表示用于第 2 阶段配送的小型货车集合, 其中 K_2^p 表示区域中心仓库 p 的小型货车集合, k_p 表示区域中心仓库 p 的小型货车数量; Q_1 和 Q_2 分别表示大、小型货车的最大装载量; T_1 和 T_2 分别表示大、小型货车最大工作时间; V_1 和 V_2 分别表示大、小型货车行驶速度; F_1 和 F_2 分别表示大、小型货车固定使用成本; c_{pq}^1 和 t_{pq}^1 分别表示大型货车从节点 p 直接行驶到节点 q 的行驶路径成本和行驶时间; c_{ij}^2 和 t_{ij}^2 表示小型货车从节点 i 直接行驶到节点 j 的行驶路径成本和行驶时间; t_{pj}^2 表示小型货车从区域中心仓库 p 直接行驶到节点 j 的行驶时间; ω_m 表示商品 m 的装卸速率, 单位为 $\text{h} \cdot \text{t}^{-1}$; π_m^e 和 π_m^l 表示中转仓库商品 m 需求过早和过晚满足的单位惩罚成本; t_{ope} 表示商品到达区域中心仓库后向中转仓库转运的必要准备时间; f_{pm}^1 (或 f_{qm}^1) 为辅助参数, 当区域中心仓库 p (或 q) 需求商品 m 时为 -1 , 供给商品 m 时为 1 , 否则为 0 ; L 为辅助参数, 一个足够大的正整数。

本文变量定义如下: x_{pqr}^1 为 0-1 变量, 若大型货车 r 连续访问区域中心仓库 p 和 q 为 1, 否则为 0; x_{ijk}^{2p} 为 0-1 变量, 若小型货车 k 连续访问区域中心仓库 p 所服务的中转仓库 i 和 j 为 1, 否则为 0; y_{pmr}^1 为 0-1 变量, 若大型货车 r 在区域中心仓库 p 投放商品 m 为 1, 否则为 0; u_{pm}^{1r} (或 u_{qm}^{1r}) 为实数变量, 表示大型货车 r 在区域中心仓库 p (或 q) 取走或投放商品 m 的数量; l_{pqm}^r (或 l_{qpm}^r) 为实数变量, 表示大型货车 r 从区域中心仓库 p (或 q) 行驶到 q (或 p) 装载商品 m 的数量; $t_{d,pr}^1$ 为实数变量, 表示大型货车 r 离开区域中心仓库 p 的时间; $t_{a,pr}^1$ (或 $t_{a,qr}^1$) 为实数变量, 表示大型货车 r 到达区域中心仓库 p (或 q) 的时间; $t_{a,pm}^1$ 为实数变量, 表示商品 m 到达区域中心仓库 p 的时间; $t_{d,k}^{2p}$ 为实数变量, 表示小型货车 k 离开区域中心仓库 p 的时间; $t_{a,ik}^{2p}$ (或 $t_{a,jk}^{2p}$) 为实数变量, 表示小型货车 k 到达中转仓库 i (或 j) 的时间; $t_{a,im}^{2p}$ 为实数变量, 表示商品 m 到达中转仓库 i 的时间。

所建立的目标函数如下:

$$\min \sum_{p \in N_d} \sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} \sum_{r \in R_1} c_{pq}^1 x_{pqr}^1 + \sum_{p \in N_d} \sum_{r \in R_1^p} F_1 (1 - x_{ppr}^1) + \sum_{p \in N_d} \sum_{i \in N_s^p} \sum_{j \in N_s^p \setminus \{i\}} \sum_{k \in K_2^p} c_{ij}^2 x_{ijk}^{2p} + \sum_{p \in N_d} \sum_{k \in K_2^p} F_2 (1 - x_{ppk}^{2p}) + \sum_{p \in N_d} \sum_{i \in N_s^p} \sum_{m \in \{M | D_{im}^2 > 0\}} (\pi_m^e \cdot \max\{0, e_i - t_{a,im}^{2p}\} + \pi_m^l \cdot \max\{0, t_{a,im}^{2p} - l_i\}). \quad (1)$$

配送第 1 阶段约束如下:

$$\sum_{q \in N_d} x_{pqr}^1 = 1, \forall p \in N_d, r \in R_1^p, \quad (2)$$

$$\sum_{q \in N_d} x_{qpr}^1 = 1, \forall p \in N_d, r \in R_1^p, \quad (3)$$

$$\sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} x_{pqr}^1 \leq 1, \forall p \in N_d, r \in R_1, \quad (4)$$

$$\sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} x_{pqr}^1 = \sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} x_{qpr}^1, \forall p \in N_d, r \in R_1, \quad (5)$$

$$\sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} l_{pqm}^r + f_{qm}^1 \cdot u_{qm}^{1r} - \sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} l_{qpm}^r - Q_1 \sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} x_{pqr}^1 \geq -Q_1, \forall q \in N_d, r \in R_1, m \in M, \quad (6)$$

$$\sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} l_{pqm}^r + f_{qm}^1 \cdot u_{qm}^{1r} - \sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} l_{qpm}^r + Q_1 \sum_{p \in N_d \setminus \{q\}} x_{pqr}^1 \leq Q_1, \forall q \in N_d, r \in R_1, m \in M, \quad (7)$$

$$u_{pm}^{1r} = D_{pm}^1 \cdot y_{pmr}^1, \forall p \in N_d, r \in R_1, m \in \{M | D_{pm}^1 > 0\}, \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R_1} u_{pm}^{1r} = D_{pm}^1, \forall p \in N_d, m \in \{M | D_{pm}^1 > 0\}, \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R_1} u_{pm}^{1r} \leq S_{pm}^1, \forall p \in N_d, m \in \{M | S_{pm}^1 > 0\}, \quad (10)$$

$$\sum_{m \in M} l_{pqm}^r \leq Q_1 x_{pqr}^1, \forall p \in N_d, q \in N_d \setminus \{p\}, r \in R_1, \quad (11)$$

$$\sum_{m \in \{M | D_{pm}^1 > 0\}} u_{pm}^{1r} \leq Q_1 \sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} x_{pqr}^1, \forall p \in N_d, r \in R_1, \quad (12)$$

$$\sum_{m \in \{M | S_{pm}^1 > 0\}} u_{pm}^{1r} \leq Q_1 \sum_{q \in N_d \setminus \{p\}} x_{pqr}^1, \forall p \in N_d, r \in R_1, \quad (13)$$

$$t_{d,pr}^1 + t_{pq}^1 - L(1 - x_{pqr}^1) \leq t_{a,qr}^1, \forall p \in N_d, q \in N_d \setminus \{p\}, r \in R_1^p, \quad (14)$$

$$t_{d,pr}^1 + t_{pq}^1 + L(1 - x_{pqr}^1) \geq t_{a,qr}^1, \forall p \in N_d, q \in N_d \setminus \{p\}, r \in R_1^p, \quad (15)$$

$$t_{a,pr}^1 + \sum_{p \in N_d} \sum_{m \in M} w_m u_{pm}^{1r} + t_{pq}^1 - L(1 - x_{pqr}^1) \leq t_{a,qr}^1, \forall p \in N_d, q \in N_d \setminus \{p\}, r \in R_1, \quad (16)$$

$$t_{a,pr}^1 + \sum_{p \in N_d} \sum_{m \in M} w_m u_{pm}^{1r} + t_{pq}^1 + L(1 - x_{pqr}^1) \geq t_{a,qr}^1, \forall p \in N_d, q \in N_d \setminus \{p\}, r \in R_1, \quad (17)$$

$$t_{a,pr}^1 - L(1 - y_{pmr}^1) \leq t_{a,pm}^1, \forall p \in N_d, m \in M, r \in R_1, \quad (18)$$

$$t_{a,pr}^1 + L(1 - y_{pmr}^1) \geq t_{a,pm}^1, \forall p \in N_d, m \in M, r \in R_1, \quad (19)$$

$$\sum_{p \in N_d} \sum_{q \in N_d} x_{pqr}^1 t_{pq}^1 + \sum_{p \in N_d} \sum_{m \in M} w_m u_{pm}^{1r} \leq T_1, \forall r \in R_1, \quad (20)$$

2 个配送阶段衔接约束如下:

$$t_{a,pm}^1 + t_{ope} \leq t_{d,k}^{2p}, \forall p \in N_d, m \in \{M | D_{pm}^1 > 0\}, k \in K_2^p. \quad (21)$$

配送第 2 阶段约束如下:

$$\sum_{j \in N_s^p \cup \{p\}} x_{pjk}^{2p} = 1, \forall p \in N_d, k \in K_2^p, \quad (22)$$

$$\sum_{j \in N_s^p \cup \{p\}} x_{jpk}^{2p} = 1, \forall p \in N_d, k \in K_2^p, \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K_2^p} \sum_{i \in N_s^p \cup \{p\}} x_{ijk}^{2p} = 1, \forall p \in N_d, j \in N_s^p, \quad (24)$$

$$\sum_{i \in N_s^p \cup \{p\}} x_{ijk}^{2p} - \sum_{i \in N_s^p \cup \{p\}} x_{jik}^{2p} = 0, \forall p \in N_d, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (25)$$

$$\sum_{i \in N_s^p \cup \{p\}} \sum_{j \in N_s^p} x_{ijk}^{2p} = 0, \forall p \in N_d, k \notin K_2^p, \quad (26)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in N_s^p} D_{im}^2 \sum_{j \in N_s^p \cup \{p\}} x_{ijk}^{2p} \leq Q_2, \forall p \in N_d, k \in K_2^p, \quad (27)$$

$$t_{d,k}^{2p} + t_{pj}^2 - L(1 - x_{pjk}^{2p}) \leq t_{a,jk}^{2p}, \forall p \in N_d, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (28)$$

$$t_{d,k}^{2p} + t_{pj}^2 + L(1 - x_{pjk}^{2p}) \geq t_{a,jk}^{2p}, \forall p \in N_d, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (29)$$

$$t_{a,ik}^{2p} + \sum_{m \in M} w_m D_{im}^2 + t_{ij}^2 - L(1 - x_{ijk}^{2p}) \leq t_{a,jk}^{2p}, \forall p \in N_d, i \in N_s^p, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (30)$$

$$t_{a,ik}^{2p} + \sum_{m \in M} w_m D_{im}^2 + t_{ij}^2 + L(1 - x_{ijk}^{2p}) \geq t_{a,jk}^{2p}, \forall p \in N_d, i \in N_s^p, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (31)$$

$$t_{a,im}^{2p} = t_{a,ik}^{2p} + w_m D_{im}^2, \forall p \in N_d, m \in \{M | D_{im}^2 > 0\}, i \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (32)$$

$$\sum_{i \in N_s^p \cup \{p\}} \sum_{j \in N_s^p \cup \{p\}} x_{ijk}^{2p} t_{ij}^2 + \sum_{m \in M} \sum_{i \in N_s^p} w_m D_{im}^2 \sum_{j \in N_s^p \cup \{p\}} x_{ijk}^{2p} \leq T_2, \forall p \in N_d, k \in K_2^p, \quad (33)$$

$$0 \leq t_{d,pr}^1 \leq 24, \forall p \in N_d, r \in R_1^p, \quad (34)$$

$$0 \leq t_{a,pr}^1 \leq 24, \forall p \in N_d, r \in R_1, \quad (35)$$

$$8 \leq t_{d,k}^{2p} \leq 18, \forall p \in N_d, k \in K_2^p, \quad (36)$$

$$0 \leq t_{a,ik}^{2p} \leq 24, \forall p \in N_d, i \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (37)$$

$$x_{pqr}^1 = \{0, 1\}, \forall p \in N_d, q \in N_d, r \in R_1, \quad (38)$$

$$x_{ijk}^{2p} = \{0, 1\}, \forall p \in N_d, i \in N_s^p, j \in N_s^p, k \in K_2^p, \quad (39)$$

$$y_{pmr}^1 = \{0, 1\}, \forall p \in N_d, m \in M, r \in R_1, \quad (40)$$

$$u_{pm}^{1r} \geq 0, \forall p \in N_d, m \in M, r \in R_1, \quad (41)$$

$$l_{pqm}^r \geq 0, \forall p \in N_d, q \in N_d, m \in M, r \in R_1. \quad (42)$$

在以上式子中,式(1)为目标函数,表示最小化总配送成本,其中包括配送第 1 阶段车辆路径成本及固定派车成本、配送第 2 阶段车辆路径成本、固定派车成本及惩罚成本,此处需要特别指出: $x_{pqr}^1 = 1$ 表示大型货车 r 停留在区域中心仓库 p 未被派出, $x_{pqr}^1 = 0$ 表示大型货车 r 从区域中心仓库 p 派出;式(2)、(3)表示大型货车 r 从

所属区域中心仓库出发,完成配送任务后返回所属区域中心仓库,且每辆车最多被派出 1 次;式(4)保证每个区域中心仓库最多被同一车辆访问 1 次;式(5)表示车辆流平衡约束;式(6)、(7)表示装卸平衡约束,即车辆 r 到达区域中心仓库 q 装载商品 m 的数量加上(或减去)在区域中心仓库 q 取走(或投放)商品 m 的数量,应等于车辆 r 离开区域中心仓库 q 装载商品 m 的数量;式(8)、(9)表示每个区域中心仓库同种商品需求一次性满足;式(10)表示大型货车 r 访问区域中心仓库 p 时取走商品 m 的数量不超过持有商品 m 的数量;式(11)表示大型货车最大装载量约束;式(12)、(13)分别表示只有当大型货车 r 访问区域中心仓库 p 时,才允许它投放和取走商品;式(14)~(17)表示货车离开和到达各区域中心仓库的时间关系约束;式(18)和(19)表示区域中心仓库的商品到达时间与货车到达区域中心仓库时间的关系约束;式(20)表示大型货车最大工作时间约束;式(21)为配送第 2 阶段中小型货车离开区域中心仓库 p 的时间应不早于配送第 1 阶段中所有商品到达区域中心仓库 p 的时间加上必要准备时间(包括商品从大型货车卸载时间,商品往小型货车装载时间,必要等待时间等);式(22)、(23)表示小型货车从所属区域中心仓库出发完成配送任务后返回所属区域中心仓库且每辆车最多被派送 1 次,此处需要特别指出: $x_{ppk}^{2p}=1$ 表示小型货车 k 停留在区域中心仓库 p 未被派出, $x_{pj k}^{2p}=1$ 或 $x_{jpk}^{2p}=1$ 表示小型货车 k 从区域中心仓库 p 派出。式(24)表示每个中转仓库有且仅被访问 1 次;式(25)表示车辆流平衡约束;式(26)表示每个中转仓库只能由所属的区域中心仓库派车服务;式(27)表示小型货车最大装载量约束;式(28)~(32)表示小型货车离开区域中心仓库和到达各中转仓库的时间关系约束;式(33)表示小型货车最大工作时间约束;式(34)~(42)表示变量取值范围。

2.3 有效不等式

考虑到所研究的两阶段车辆路径问题的高度复杂性,基于问题特性,推导一些有效不等式以提高模型性能,进而在规定时间借助 CPLEX 获得最优配送方案或高质量的可行配送方案。

2.3.1 派车数量不等式

对派出车辆最小数目进行界定,有:

$$\sum_{k \in K_2^p} (1 - x_{ppk}^{2p}) \geq \left\lceil \left(\sum_{m \in M_i} \sum_{s \in N_s^p} D_{im}^2 \right) / Q_2 \right\rceil, \forall p \in N_d, m \in M. \quad (43)$$

鉴于中转仓库需求必须全部满足及 $x_{ppr}^1=0$ 表示大型货车 r 从区域中心仓库 p 派出,式(43)表示在配送过程第 2 阶段,区域中心仓库 p 派出车辆的总数不小于它们所属中转仓库总需求量与小型货车车容量的比值。

2.3.2 车辆派遣顺序不等式

优先派出编号较小的车辆执行配送任务,有:

$$x_{ppr_1}^1 \leq x_{ppr_2}^1, \forall p \in N_d, r_1 \in R_1^p, r_2 \in \{R_1^p | r_1 < r_2\}, \quad (44)$$

$$x_{ppk_1}^{2p} \leq x_{ppk_2}^{2p}, \forall p \in N_d, k_1 \in K_2^p, k_2 \in \{K_2^p | k_1 < k_2\}. \quad (45)$$

鉴于 $x_{ppr}^1=1$ 表示大型货车 r 停留在区域中心仓库 p 未被派出,式(44)表示在配送第 1 阶段优先派出编号小(r_1)的大型货车;同理,式(45)表示配送第 2 阶段优先派出编号小(k_1)的小型货车。

3 启发式求解算法设计

由于所研究的两阶段车辆路径问题考虑了多区域中心仓库、多车场、多商品、需求可拆分满足、软时间窗等因素而变得高度复杂,而模型及有效不等式借助 CPLEX 在 2 h 内能够精确求解的最大规模算例为 5 个区域中心仓库、每个区域中心仓库服务 5 个中转仓库和 5 种商品,因此本文设计了一个求解效率更高的启发式算法,以解决电商企业运营实践中常见的大规模问题。

鉴于本文研究目标是采用最小运输成本配送方案以满足所有区域中心仓库和中转仓库需求,在配送第 1 阶段中仅考虑大型货车派车成本和运输成本,在配送第 2 阶段除了考虑小型货车的派车成本和运输成本,还额外考虑违反配送时间窗要求的惩罚成本。因此在设计配送方案时,需要尽最大可能节约派车次数和运输距离,并在第 2 阶段尽可能地减少过早或过晚服务中转仓库所产生的惩罚成本。相关算法具体流程见图 2。

4 数值实验

本节对模型有效性、求解能力及参数灵敏度进行实验测试,测试在 CPU 主频为 1.8 GHz,运行内存为 12 GB 的个人电脑中进行,采用 12.8 版本的 CPLEX 作为模型求解器,每个算例允许最大测试时间为 2 h,启发式算法

借助 C++ 编码实现。

```

1  将当前网络中的商品种类按编号大小排序:  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_c\}$ , 选取  $m_1$  供应量最大的区域中心仓库记作当前节点  $p_1$ ;
2  派出区域中心仓库  $p_1$  中编号最小的车辆  $r$ , 构建当前子路径  $r_c: p_1 \rightarrow p_1$ ;
3  从能够与  $p_1$  构成需求匹配关系的区域中心仓库集合中寻找距离  $p_1$  最近的区域中心仓库记作  $p_2$ ; 扩充初始路径  $r_c: p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_1$ ;
4  基于车辆  $r$  的装载能力从第 1 种商品开始由  $p_1$  向  $p_2$  进行商品需求匹配, 更新各区域中心仓库供需信息, 将  $p_2$  记为当前节点  $p_c$ ;
5  while 存在需求未满足的区域中心仓库 do
6      repeat
7          从能够与  $p_c$  构成需求匹配关系的区域中心仓库集合中寻找距离  $p_c$  最近的区域中心仓库记作  $p_n$ , 扩充初始路径  $r_c: p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow \dots \rightarrow p_n \rightarrow p_1$ ;
8          基于车辆装载能力从第 1 种商品开始向  $p_n$  进行商品需求匹配; 更新各区域中心仓库供需信息, 将  $p_n$  记为当前节点  $p_c$ ;
9          until 没有新区域中心仓库能够插入当前路径 (不满足最大装载能力或最大工作时间限制);
10         if 所有区域中心仓库的需求均已满足 then
11             将当前路径作为一条运输路径输出, 更新各车场可用车辆信息;
12             Break;
13         else
14             按照步骤 1~4, 构建新的当前子路径  $r_c$ ;
15  计算所有区域中心仓库所需商品的到货时间, 记区域中心仓库  $p$  的最晚到货时间为  $FA\_time_p$ ;
16  For  $p \in N_d$  do
17      将区域中心仓库  $p$  拥有的小型卡车  $K_2^p$  进行排序, 派出编号最小的小型货车  $k$  进行配送;
18      小型货车  $k$  的离开时间:  $t_{d,pk} = \min\{\text{小型货车最早开始工作时间}, \max(FA\_time_p) + t_{ope}\}$ , 其中  $t_{ope}$  表示商品到达区域中心仓库后向中
      转仓库转运的必要准备时间;
19      选择区域中心仓库  $p$  服务的中转仓库中需求未满足、服务时间窗最早关闭的中转仓库  $i$ , 构建当前路径  $k_c: p \rightarrow i \rightarrow p$ ;
20      While 区域中心仓库  $p$  所服务的中转仓库仍有需求未满足 do
21          repeat
22              尝试将每个需求未满足中转仓库插入到当前路径  $k_c$  中的每个位置形成一系列新路径  $k'$ , 若  $k'$  满足最大装载能力或行驶时间要求,
23              计算相应的增加成本  $Increase\_cost$ , 选择  $Increase\_cost$  最小的路径记为当前路径  $k_c$ ; 更新  $k$  的剩余容量及中转仓库的需求信息;
24              until 不存在新中转仓库能够插入当前路径;
25              if 所有中转仓库的需求均已满足 then
26                  将当前路径作为一条运输路径输出, 更新区域中心仓库可用小型货车信息;
27                  Break;
28              else
29                  按照步骤 17~19, 重新构建当前子路径  $k_c$ ;
30  返回 获得最终配送方案

```

图 2 算法流程

Fig. 2 The flow chart of algorithm

4.1 算例描述

本文探讨的问题是在文献[5]的基础上考虑多商品和软时间窗的延伸, 因此基于该问题的特性及文献[5]的参数生成方式, 随机生成 27 个小规模算例 ($n_d \in \{3, 4, 5\}$, $n_s^p \in \{5, 10, 15\}$, $m_c \in \{2, 3, 4\}$) 和 8 个较大规模算例 ($n_d \in \{7, 9\}$, $n_s^p \in \{10, 15\}$, $m_c \in \{8, 10\}$)。相应参数的具体设置见表 1。

4.2 基于 CPLEX 的小规模算例求解与结果分析

模型及有效不等式借助 CPLEX 对上述 27 个小规模算例进行求解, 所获得的结果如表 2 所示, 其中: 第 1 列算例规模中“3-5-2”表示区域中心仓库个数为 3, 每个区域中心仓库所服务的中转仓库个数为 5, 商品种类数为 2, 其余以此类推; 第 2~7 列表示 CPLEX 在 2 h 之内获得的结果, 依次包括获得的下界、上界、所花费的时间、上下界之间的百分比差距、模型中的决策变量个数、模型中的约束个数; 第 8~10 列分别表示配送第 1 阶段的总成本、使用大型货车车辆数和在总成本中的占比; 第 11~13 列分别表示配送第 2 阶段总成本、使用小型货车车辆数和在总成本中的占比。

在求解能力方面, 本文提出的模型借助 CPLEX 在 2 h 内能够对中转仓库个数为 5 的 9 个算例求得最优

解;对 9 个算例求得近似最优解(与最优解的差距在 10% 以内),对其他 9 个算例求得上下界(平均差距为 19.93%)。因此,本文所提出模型可在较短时间内获得问题最优解或高质量的可行解。

表 1 测试算例参数设置

Tab. 1 The parameter settings of test instances

参数	参数描述	数值	参数	参数描述	数值
n_d	区域中心仓库数目(单位:个)	3、4、5、7、9	F_1	大型货车的固定使用成本(单位:元·辆 ⁻¹)	300
n_s^p	区域中心仓库 p 服务的 中转仓库数目(单位:个)	5、10、15	F_2	小型货车的固定使用成本(单位:元·辆 ⁻¹)	200
m_c	商品种类数目(单位:种)	2、3、4、8、10	w_m	商品 m 的装卸速率(单位:h·t ⁻¹)	$U[0.02, 0.08]$
S_{pm}	区域中心仓库 p 持有商品 m 库存量(单位:件)	$U[0, 40]$	π_m^e	商品 m 早于最早时间要求送达的 单位惩罚成本(单位:元·h ⁻¹)	$U[1, 5]$
D_{pm}^1	区域中心仓库 p 需求商品 m 数量(单位:件)	$D_{pm}^1 = \sum_{i \in N_s^p} D_{im}^2$	π_m^l	商品 m 晚于最晚时间要求送达的 单位惩罚成本(单位:元·h ⁻¹)	$U[5, 10]$
D_{im}^2	中转仓库 i 需求商品 m 数量(单位:件)	$U[0, 3]$	t_{ope}	商品从区域中心仓库向中转仓库 转运的必要准备时间(单位:h)	$U[1, 3]$
e_i	中转仓库 i 要求的 商品最早到货时间(单位:h)	$U[8, 14]$	d_{pq}^1	表示第 1 阶段从节点 p 到节点 q 的 运输距离(单位:km)	$d_{pq}^1 = \sqrt{(a_p - a_q)^2 + (b_p - b_q)^2}$
l_i	中转仓库 i 要求的 商品最晚到货时间(单位:h)	$l_i = e_i + U[2, 4]$	d_{ij}^2	表示第 2 阶段从节点 i 到节点 j 的 运输距离(单位:km)	$d_{ij}^2 = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}$
Q_1	大型货车的最大 装载量(单位:t)	17	η_1	大型货车单位里程燃油 消耗成本(单位:元·km ⁻¹)	1.7
Q_2	小型货车的最大 装载量(单位:t)	6	η_2	小型货车单位里程燃油 消耗成本(单位:元·km ⁻¹)	0.9
T_1	大型货车的最大 工作时间(单位:h)	16	c_{pq}^1	大型货车从节点 p 到节点 q 的行驶路径成本(单位:元·km ⁻¹)	$c_{pq}^1 = \eta_1 d_{pq}^1$
T_2	小型货车的最大 工作时间(单位:h)	10	c_{ij}^2	小型货车从节点 i 到节点 j 的行驶路径成本(单位:元·km ⁻¹)	$c_{ij}^2 = \eta_2 d_{ij}^2$
V_1	大型货车的行驶 速度(单位:km·h ⁻¹)	50	t_{pq}^1	大型货车从节点 p 到节点 q 的行驶时间(单位:h)	$t_{pq}^1 = d_{pq}^1 / V_1$
V_2	小型货车的行驶 速度(单位:km·h ⁻¹)	40	t_{ij}^2	小型货车从节点 i 到节点 j 的行驶时间(单位:h)	$t_{ij}^2 = d_{ij}^2 / V_2$

注: a_p, b_p 和 a_q, b_q 分别表示配送第 1 阶段节点 p 和节点 q 的坐标值, a_i, b_i 和 a_j, b_j 分别表示配送第 2 阶段节点 i 和节点 j 的坐标值。

在成本方面,当算例规模较小时,配送第 1 阶段成本在总成本中占比较高,而算例规模较大时,配送第 2 阶段配送成本在总成本中占比较高。其中主要原因在于:随着算例规模即区域中心仓库个数、中转仓库个数和商品种类数增加,配送第 2 阶段派车数量相对配送第 1 阶段派车数量增幅更大,且算例规模越大增幅的差距也越大。

在问题复杂度方面,随着算例规模(区域中心仓库个数、中转仓库个数和商品种类数)增加,模型中决策变量数和约束条件数明显增加,导致问题求解难度即求解时间急剧增加。

为了进一步直观分析区域中心仓库数目、中转仓库数目以及商品种类数目对问题求解的影响,本文分别固定区域中心仓库个数、中转仓库个数和商品种类数目,以求解决策变量个数和求解约束个数的平均值为纵坐标

轴,绘制组合图进行辅助分析。由图 3、4、5 可知,中转仓库个数对问题复杂度的影响最大,区域中心仓库个数对问题复杂度的影响次之,商品种类数对问题复杂度的影响最低。

表 2 小规模算例测试结果
Tab. 2 The test results of small-scale instances

算例 规模	下界/元	上界/元	时间/s	差距/ %	变量 数/个	约束 数/个	配送第 1 阶段			配送第 2 阶段		
							成本/元	车辆数/辆	占比/%	成本/元	车辆数/辆	占比/%
3-5-2	4 855. 6	4 855. 6	19. 2	0	1 999	2 344	3 240. 4	2	66. 7	1 615. 2	4	33. 3
3-5-3	9 531. 9	9 531. 9	9. 8	0	2 175	2 673	7 099. 2	4	74. 5	2 432. 7	8	25. 5
3-5-4	8 012. 6	8 012. 6	5. 2	0	2 351	3 002	4 907. 6	3	61. 2	3 105. 0	10	38. 8
3-10-2	6 785. 8	7 488. 3	7 200. 0	9. 4	11 179	9 974	4 216. 5	3	56. 3	3 271. 8	9	43. 7
3-10-3	7 277. 6	8 006. 2	7 200. 0	9. 1	11 360	10 726	3 808. 7	2	47. 6	4 197. 5	11	52. 4
3-10-4	10 278. 3	10 997. 4	7 200. 0	6. 5	11 541	11 478	6 477. 2	4	58. 9	4 520. 2	13	41. 1
3-15-2	8 505. 8	10 665. 8	7 200. 0	20. 3	34 603	28 025	6 342. 5	4	59. 5	4 323. 3	12	40. 5
3-15-3	11 574. 6	12 341. 0	7 200. 0	6. 2	34 917	29 646	6 815. 3	4	55. 2	5 525. 7	17	44. 8
3-15-4	11 400. 0	12 774. 9	4 379. 1	10. 8	35 131	31 165	5 715. 2	4	44. 7	7 059. 7	21	55. 3
4-5-2	5 533. 9	5 533. 9	69. 0	0	3 763	3 953	3 195. 0	2	57. 7	2 338. 9	6	42. 3
4-5-3	6 088. 5	6 088. 5	49. 4	0	4 086	4 406	3 420. 7	2	56. 2	2 667. 8	8	43. 8
4-5-4	8 844. 4	8 844. 4	41. 3	0	4 550	5 078	4 951. 4	3	56. 0	3 893. 0	12	44. 0
4-10-2	7 844. 2	8 199. 3	7 200. 0	4. 3	19 793	14 138	4 076	3	49. 7	4 123. 3	11	50. 3
4-10-3	10 362. 0	11 246. 0	7 200. 0	7. 9	20 320	15 412	5 678. 3	4	50. 5	5 567. 7	16	49. 5
4-10-4	9 747. 9	10 362. 3	7 200. 0	5. 9	20 812	18 314	4 780. 3	3	46. 1	5 582. 0	17	53. 9
4-15-2	7 081. 9	8 112. 7	7 200. 0	12. 7	60 916	38 100	3 157. 7	2	38. 9	4 955. 0	12	61. 1
4-15-3	13 099. 7	14 547. 7	7 200. 0	10. 0	61 553	40 449	7 605. 4	5	52. 3	6 942. 3	21	47. 7
4-15-4	10 291. 3	13 236. 7	7 200. 0	22. 3	61 976	42 552	5 180. 1	5	39. 1	8 056. 6	25	60. 9
5-5-2	5 130. 4	5 130. 4	712. 4	0	6 461	6 465	2 494. 4	2	48. 6	2 636. 0	7	51. 4
5-5-3	8 483. 1	8 483. 1	4 938. 0	0	7 279	7 370	4 109. 7	3	48. 4	4 373. 4	14	51. 6
5-5-4	9 552. 1	9 552. 1	321. 0	0	7 997	8 275	4 358. 6	3	45. 6	5 193. 5	16	54. 4
5-10-2	7 930. 3	8 570. 6	7 200. 0	7. 5	31 241	19 215	3 508. 3	3	40. 9	5 062. 3	13	59. 1
5-10-3	10 391. 4	12 785. 2	7 200. 0	18. 7	32 174	20 944	6 354. 7	5	49. 7	6 430. 5	19	50. 3
5-10-4	9 395. 2	12 061. 7	7 200. 0	22. 1	33 021	25 500	5 257. 1	4	43. 6	6 804. 6	19	56. 4
5-15-2	7 112. 5	8 799. 7	7 200. 0	19. 2	95 155	49 190	3 216. 1	3	36. 5	5 583. 6	15	63. 5
5-15-3	10 244. 9	14 173. 3	7 200. 0	27. 7	96 087	52 095	6 417. 6	5	45. 3	7 755. 7	21	54. 7
5-15-4	12 293. 5	16 532. 6	7 200. 0	25. 6	97 203	55 268	6 329. 3	6	38. 3	10 203. 3	31	61. 7

注:加粗数字表示最优结果。

4. 3 基于启发式算法的大规模算例求解与结果分析

针对上述 8 个大规模问题,模型及有效不等式分别借助 CPLEX 和启发式算法进行求解,结果如表 3 所示,其中:第 1 列算例规模的具体含义与表 2 相同,第 2~6 列分别表示 CPLEX 在 2 h 内获得的下界、上界、所花费的时间、模型中的决策变量数、模型中的约束数,第 7~8 列分别表示启发式算法获得结果和所花费的时间。

从表 3 可知:对于大规模算例,模型求解的决策变量个数和约束个数大量增加,导致 CPLEX 不能在规定的 2 h 内获得上界即可行解;而本文所设计的启发式算法可以在极短时间内获得可行解即 2 个配送阶段的可行路线,因此它能够代替 CPLEX 高效地求解现实中的大规模配送问题。

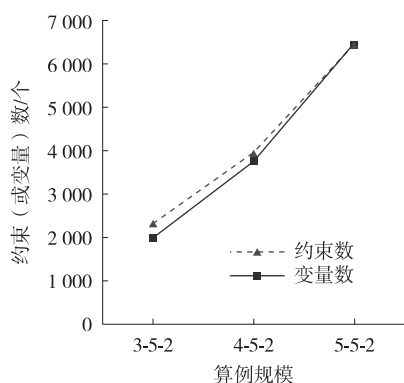


图3 区域中心仓库数目对问题求解影响

Fig. 3 The impact of the number of CDCs

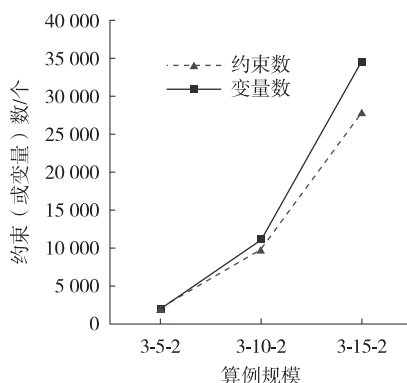


图4 中转仓库数目对问题求解影响

Fig. 4 The impact of the number of satellites

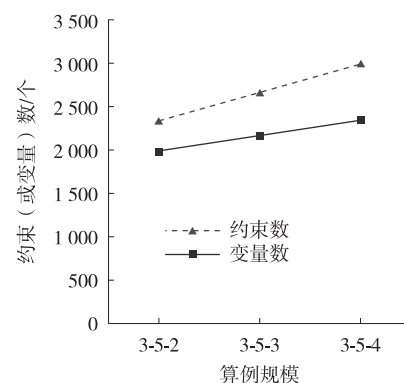


图5 商品种类数目对问题求解影响

Fig. 5 The impact of the number of commodities

表3 大规模算例测试结果

Tab. 3 The test results of large-scale instances

算例规模	CPLEX					启发式算法	
	下界/元	上界/元	时间/s	变量数/个	约束数/个	目标值/元	时间/s
7-10-8	24 280.8	—	7 200	82 489	59 863	67 570	0.05
7-10-10	29 369.8	—	7 200	88 395	66 598	59 197.5	0.06
7-15-8	34 731.1	—	7 200	207 803	119 026	104 337	0.06
7-15-10	43 150.9	—	7 200	213 929	129 332	87 164	0.06
9-10-8	35 362.0	—	7 200	159 611	102 768	92 686.1	0.06
9-10-10	41 321.7	—	7 200	157 013	100 808	91 704.6	0.06
9-15-8	50 111.0	—	7 200	365 945	181 565	121 439	0.08
9-15-10	57 621.0	—	7 200	381 479	198 119	142 920	0.09

4.4 车辆最大工作时间对配送方案的影响分析

在实际运营中,车辆最大工作时间对车辆能够行驶的距离产生限制,进而影响车辆行驶路径及商品装卸方案。为探究车辆最大工作时间对配送方案的影响,本文不仅考虑了大、小型货车最大工作时间分别为16、10 h的情况,还考虑了大、小型货车最大工作时间分别缩短到12、8 h和延长到20、12 h的情况。表4基于9个能够获得最优解的算例,呈现了3种不同车辆最大工作时间设置下的测试结果,其中:第1列中“16-10”表示大、小型货车最大工作时间分别为16、10 h,其余以此类推;算例规模的具体含义与表2相同。

根据表4可知:1) 当大、小型货车最大工作时间分别缩短到12、8 h后,部分算例出现无可行解;对于能够得出最优解的5个算例而言,与大、小型货车最大工作时间分别为16、10 h的情况相比,配送第1阶段车辆路径成本和固定派车成本分别平均增加了34.5%和60%,配送第2阶段车辆路径成本和固定派车成本无变化,但惩罚成本平均节约了38.2%,总成本平均增加了20.0%。2) 当大型货车、小型货车最大工作时间延长到20、12 h后,所有算例也能够求得最优解;对于所有算例而言,与大、小型货车最大工作时间分别为16、10 h的情况相比,配送第1阶段的车辆路径成本和固定派车成本分别平均增加了14.6%和27.8%,配送第2阶段车辆路径成本和固定派车成本同样无变化,但惩罚成本平均增加了172.2%,总成本平均节约了9.3%。出现上述结果的主要原因如下:1) 缩短(或增加)大型货车最大工作时间后,同一辆大型货车执行的取送任务随之减少(或增加),完成配送第1阶段取送货任务所需派车数量也随之增加(或减少),因而配送第1阶段的成本也增加(或减少);同时由于大型货车执行任务周期随之变短(或变长),它所载商品达到区域中心仓库的时间也会提前(或延后),为配送第2阶段提供了更大(或更小)的时间调整空间,进而将产生较少(或较多)的惩罚成本。2) 配送第2阶段小型

货车车容量较小且仅执行送货任务,派车数量及配送路径主要受制于车容量而非最大工作时间,导致小型货车的最大工作时间调整对配送第 2 阶段车辆路径成本及固定派车成本无影响。3) 车辆路径成本和派车成本在总成本中占比较高,惩罚成本在总成本中占比较低;总成本的变化主要受配送第 1 阶段车辆路径成本和固定派车成本影响,而受配送第 2 阶段惩罚成本影响较小。

表 4 不同车辆最大工作时间下的测试结果

Tab. 4 The test results of different maximum working time of vehicles

元

最大工 作时间	成本		算例规模								
			3-5-2	3-5-3	3-5-4	4-5-2	4-5-3	4-5-4	5-5-2	5-5-3	5-5-4
16-10	总成本		4 855.6	9 531.9	8 012.6	5 533.9	6 088.5	8 844.4	5 130.4	8 483.1	9 552.1
	配送第 1 阶段成本	路径成本	2 640.4	5 899.2	4 007.6	2 595.0	2 820.7	4 051.4	1 894.4	3 209.7	3 458.6
		派车成本	600	1 200	900	600	600	900	600	900	900
	配送第 2 阶段成本	路径成本	724.0	812.6	931.5	1 078.8	1 055.3	1 377.0	1 134.1	1 359.7	1 792.9
		派车成本	800	1 600	2 000	1 200	1 600	2 400	1 400	2 800	3 200
		惩罚成本	91.2	20.1	173.5	60.1	12.5	116.0	101.9	213.7	200.6
12-8	总成本		—	—	—	7 639.5	7 898.8	—	5 130.4	9 461.8	11 540.5
	配送第 1 阶段成本	路径成本	—	—	—	4 127.4	4 031.0	—	1 894.4	4 097.5	4 944.4
		派车成本	—	—	—	1 200	1 200	—	600	1 200	1 500
	配送第 2 阶段成本	路径成本	—	—	—	1 078.8	1 055.3	—	1 134.1	1 359.5	1 792.9
		派车成本	—	—	—	1 200	1 600	—	1 400	2 800	3 200
		惩罚成本	—	—	—	33.3	12.5	—	101.9	4.8	103.2
20-12	总成本		3 795.2	6 059.0	7 947.8	4 739.7	6 070.5	8 407.7	5 130.4	8 052.3	9 552.1
	配送第 1 阶段成本	路径成本	1 865.1	1 812.6	4 007.6	1 904.8	2 691.7	3 975.5	1 894.4	3 215.0	3 458.6
		派车成本	300	600	600	300	600	600	600	600	900
	配送第 2 阶段成本	路径成本	724.0	812.6	931.5	1 080.4	1 055.3	1 374.5	1 134.1	1 354.4	1 792.9
		派车成本	800	1 600	2 000	1 200	1 600	2 400	1 400	2 800	3 200
		惩罚成本	106.1	80.0	408.7	254.5	123.5	57.7	101.9	82.9	200.6

4.5 车容量限制对配送方案的影响分析

基于上一小节的分析结果,为进一步探究小型货车车容量对配送第 2 阶段车辆路径和派车方案的影响,在大、小型货车最大工作时间分别为 16、10 h 和 20、12 h 这 2 种情况下,将配送第 2 阶段小型货车车容量由 6 t 提升为 12 t,同样基于表 2 中能够获得最优解的 9 个算例进行测试对比分析,测试结果见表 5。

由表 5 可知,1) 在大、小型货车最大工作时间分别为 16、10 h 的情况下,当小型货车车容量限制由 6 t 提升为 12 t 时,配送第 2 阶段车辆路径成本和固定派车成本分别平均减少了 14.9%和 38.6%,但惩罚成本平均增加了 61.6%,配送第 2 阶段总成本平均节约了 27.0%。2) 在大、小型货车最大工作时间分别为 20、12 h 的情况下,当小型货车车容量限制由 6 t 提升为 12 t 时,配送第 2 阶段车辆路径成本和固定派车成本分别平均减少了 10.2%和 38.6%,但惩罚成本平均增加了 146.0%,配送第 2 阶段总成本平均节约了 23.3%。出现上述结果的主要原因是:扩大小型货车车容量后,同一辆小型货车执行的送货任务增加,完成配送第 2 阶段送货任务所需派车数量减少,进而导致配送第 2 阶段总成本减少;同时由于小型货车执行任务周期变长,它所载商品达到中转仓库的时间延后,更容易产生商品晚于时间窗到达的情况,进而产生较多的惩罚成本。此外,通过对比表 5 中 4 种不同设置下的结果可以看出,提升小型货车车容量对配送第 2 阶段派车数量及配送路径影响较大,而延长车辆最大工作时间对配送第 2 阶段派车数量及配送路径影响较小,进一步验证了在配送第 2 阶段的配送方案主要受制于车容量而非最大工作时间。因此,电商企业在实际运营中选择合适的车型和设置合理的最大工作时间可以非常有效地降低配送成本。

表 5 不同车容量下的测试结果

Tab. 5 The test results of different load capacity of vehicles

元

算例规模	大、小型货车最大工作时间分别为 16、10 h				大、小型货车最大工作时间分别为 20、12 h			
	小型货车车容量为 6 t				小型货车车容量为 6 t			
	配送第 2 阶段总成本	路径成本	派车成本	惩罚成本	配送第 2 阶段总成本	路径成本	派车成本	惩罚成本
3-5-2	1 615.2	724.0	800	91.2	1 630.1	724.0	800	106.1
3-5-3	2 432.7	812.6	1 600	20.1	3 646.4	812.6	1 600	80.0
3-5-4	3 105.0	931.5	2 000	173.5	3 340.2	931.5	2 000	408.7
4-5-2	2 338.9	1 078.8	1 200	60.1	2 534.9	1 080.4	1 200	254.5
4-5-3	2 667.8	1 055.3	1 600	12.5	2 778.8	1 055.3	1 600	123.5
4-5-4	3 893.0	1 377.0	2 400	116.0	3 832.2	1 374.5	2 400	57.7
5-5-2	2 636.0	1 134.1	1 400	101.9	2 636.0	1 134.1	1 400	101.9
5-5-3	4 373.4	1 359.7	2 800	213.7	4 237.3	1 354.4	2 800	82.9
5-5-4	5 193.5	1 792.9	3 200	200.6	5 193.5	1 792.9	3 200	200.6

算例规模	大、小型货车最大工作时间分别为 16、10 h				大、小型货车最大工作时间分别为 20、12 h			
	小型货车车容量为 12 t				小型货车车容量为 12 t			
	配送第 2 阶段成本	路径成本	派车成本	惩罚成本	配送第 2 阶段成本	路径成本	派车成本	惩罚成本
3-5-2	1 402.3	709.7	600	92.6	1 433.0	709.7	600	123.3
3-5-3	1 729.8	697.9	1 000	31.9	1 807.9	697.9	1 000	110.0
3-5-4	1 965.7	735.4	1 000	230.3	2 211.0	735.4	1 000	474.4
4-5-2	1 858.1	995.1	800	63.0	2 106.7	995.1	800	347.6
4-5-3	1 997.6	956.9	1 000	40.7	3 441.8	956.9	1 000	1 048.2
4-5-4	2 481.0	1 085.4	1 200	195.6	2 591.4	1 085.4	1 200	306.8
5-5-2	2 152.7	1 028.5	1 000	124.2	2 152.7	1 028.5	1 000	67.2
5-5-3	3 142.5	1 068.2	1 800	274.3	2 971.8	1 068.2	1 800	115.2
5-5-4	3 314.8	1 287.4	1 600	427.4	3 133.8	1 287.4	1 600	246.4

5 结束语

干线、支线配送网络的衔接是制约整个物流体系时效平衡、协同运作的关键,对干线、支线进行协同调度优化能够实现降本增效。因此,本文基于电商企业实际运营特征,考虑多车场、多商品、干线配送供需匹配关系未知且需求可拆分、支线配送软时间窗等因素,对干线-支线协同配送问题进行研究,进而提炼出带软时间窗的多商品需求可拆分两阶段车辆路径问题并对它进行了深入探讨。

本文首先建立了以配送第 1 阶段车辆路径成本、固定派车成本和配送第 2 阶段车辆路径成本、固定派车成本、惩罚成本之和为优化目标的混合整数规划模型,然后基于节约派车次数和运输距离的贪婪思想,设计了高效启发式求解算法,最后基于相关文献生成 27 个小规模算例和 8 个较大规模算例进行数值实验。实验结果表明:

1) 本文所设计的模型可在 2 h 内求解规模为 5 个区域中心仓库、20 个中转仓库和 4 种商品的算例,具有较高效的求解能力,而本文所设计的启发式算法在较短时间内能够求解现实中的大规模问题。

2) 问题复杂度随着问题规模即区域中心仓库个数、中转仓库个数量和商品种类数的增加急剧增加,中转仓库个数对问题复杂度的影响最大,区域中心仓库个数对问题复杂度的影响次之,商品种类数对问题复杂度的影响最小。

3) 对于较小规模算例,干线配送成本占比较大;随着算例规模增加,支线环节派车数量增幅较大,进而导致支线配送成本明显增加。

4) 延长车辆最大工作小时后,干线环节派车数量减幅较大,配送总成本明显降低;放宽配送第 2 阶段车容量限制,则该阶段的用车数量大幅度降低。

本文不仅拓展了两阶段车辆问题现有理论,而且为电商企业实际运营提供了决策支持。基于干线-支线协同运作与资源集中管控思想,通过有效衔接并联合优化 2 个层级的配送网络,来制定全局视角下干线-支线联合配送方案,有助于电商企业实现多级配送网络高效协同运作、降低物流运作成本。此外,通过优化配送方案,减少派车次数,可有效提高城市物流整体配送效率、缓解城市交通压力,促进城市物流向规范化、网络化、智慧化和绿色化方向发展。

参考文献:

- [1] 李姗姗,韩阳洁,赵英姿,等. 不确定环境下快递包装物逆向物流网络设计[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2022,39(1):100-107.
LI S S, HAN Y J, ZHAO Y Z, et al. Reverse logistics network design of express package under uncertain environment[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2022, 39(1): 100-107.
- [2] 王勇,罗思好,镇璐,等. 考虑违约追偿和损失补偿的多中心集配网络联盟优化问题[J]. 中国管理科学,2023,31(3):10-25.
WANG Y, LUO S Y, ZHEN L, et al. Multi-center pickup and delivery network alliance optimization considering default penalties and loss compensations for breach of contract[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(3): 10-25.
- [3] 姜晓雪,杨杰庆,赵克全. 基于满意度的可持续物流设施选址问题的多目标优化方法[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(4):24-32.
JIANG X X, YANG J Q, ZHAO K Q. Multi-objective optimization method for sustainable logistics facility location with satisfaction[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(4): 24-32.
- [4] 葛显龙,刘小宁,梁永宏. 考虑具有不同交付选择的物流配送路径问题研究[J]. 计算机应用研究,2023,40(7):1964-1969.
GE X L, LIU X N, LIANG Y H. Research on problem of logistics distribution routes with different delivery options[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(7): 1964-1969.
- [5] LI H Q, ZHANG L, LÜ T, et al. The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 94: 169-188.
- [6] JACOBSEN S K, MADSEN O B G. A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem[J]. European Journal of Operational Research, 1980, 5(6): 378-387.
- [7] BELGIN O, KARAOGLAN I, ALTIPARMAK F. Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 115: 1-16.
- [8] DELLAERT N, SARIDARQ F D, van WOENSEL T, et al. Branch-and-price-based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows[J]. Transportation Science, 2019, 53(2): 463-479.
- [9] FONSECA-GALINDO J C, de CASTRO SURITA G, NETO J M, et al. A multi-agent system for solving the dynamic capacitated vehicle routing problem with stochastic customers using trajectory data mining [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 195: 116602.
- [10] SLUIJK N, FLORIO A M, KINABLE J, et al. Two-echelon vehicle routing problems: a literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 304(3): 865-886.
- [11] BREUNING U, SCHMID V, HARTL R F, et al. A large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems[J]. Computers & Operations Research, 2016, 76: 208-225.
- [12] ENTHOVEN D L J U, JARGALSAIKHAN B, ROODBERGEN K J, et al. The two-echelon vehicle routing problem with covering options: city logistics with cargo bikes and parcel lockers[J]. Computers & Operations Research, 2020, 118: 104919.
- [13] LIU T, LUO Z X, QIN H, et al. A branch-and-cut algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 266(2): 487-497.
- [14] AGÁRDI A, KOVÁCS L, BÁNYAI T. Two-echelon vehicle routing problem with recharge stations[J]. Transport and Telecommunication, 2019, 20(4): 305-317.
- [15] LI H Q, BAI M, ZHAO Y B, et al. Vehicle flow formulation for two-echelon time-constrained vehicle routing problem[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2019, 4(2): 75-90.
- [16] YU V F, JODIAWAN P, HOU M L, et al. Design of a two-echelon freight distribution system in last-mile logistics considering covering locations and occasional drivers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 154: 102461.
- [17] ZHOU L, BALDACCI R, VIGO D, et al. A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(2): 765-778.

- [18] ZHOU H, QIN H, ZHANG Z, et al. Two-echelon vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(7): 3345-3360.
- [19] WANG K Z, SHAO Y M, ZHOU W H. Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 262-276.
- [20] DELLAERT N, van WOENSEL T, CRAINIC T G, et al. A multi-commodity two-echelon capacitated vehicle routing problem with time windows: Model formulations and solution approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 127: 105154.

Special Topics on Operations Research and Modern Intelligent Transportation

Multi-Commodity Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Split Delivery and Soft Time Windows

XU Dongyang^{1,2}, LÜ Chuang², WANG Lijuan³

(1. Institute of Management Science and Engineering, Henan University;

2. School of Business, Henan University, Kaifeng He'nan 475004;

3. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China)

Abstract: As crucial components of logistics and distribution in e-commerce enterprises, the coordination and optimization of trunk and branch routes have significant importance in cost reduction and efficiency improvement. Based on the operational characteristics of trunk and branch logistics, the two-echelon vehicle routing problem involving soft time windows, multiple depots, multiple commodities and split delivery is extracted, and a mixed integer programming model is established with the objective of minimizing vehicle routing cost, fixed cost and penalty cost (violation of delivery time requirements). Employing a greedy idea focusing on dispatch frequency and transportation distance savings, an efficient heuristic algorithm is designed and validated through experiments involving 27 small-scale instances and 8 larger-scale instances. The experimental results show that: 1) The proposed model can solve instances involving 5 distribution centers, 20 satellites, and 4 commodities within 2 hours by using optimization software. The proposed heuristic algorithm efficiently produces feasible solutions for large-scale problems in a short time, demonstrating superior solving capability and efficiency compared to CPLEX. 2) The complexity of the problem increases sharply with the increase of the scale of the instance, and the number of satellites has the greatest impact on the complexity of the problem, followed by the number of city distribution centers, and the impact of the number of commodity types is the smallest. 3) For small-scale instances, linehaul distribution costs account for a relatively large proportion. With the increase of the scale of the instance, the number of vehicles in the delivery level increased significantly, which leads to a significant increase in the distribution cost of the delivery level. 4) After increasing the maximum working hours of vehicles, the number of vehicles in the linehaul level decreases significantly, and the total cost is significantly reduced. With the relaxation of the capacity limit in the delivery level, the number of vehicles used in the delivery level was significantly reduced. The research results can not only expand the existing theory of two-echelon vehicle routing problem, but also help e-commerce enterprises to achieve efficient and collaborative operation of multi-level distribution networks. In addition, by optimizing the distribution schedule and reducing the number of dispatches, it will help alleviate the pressure on urban traffic and improve the urban traffic environment.

Keywords: two-echelon vehicle routing problem; multi-depot; multi-commodity; soft time window; split delivery; collaborative distribution; mathematical programming; heuristic algorithm

(责任编辑 方 兴)