

城乡配送体系下多商品同时取送货两阶段车辆路径问题研究*

王利娟¹, 赵颖², 崔利刚¹, 徐东洋³

(1. 重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074; 2. 河南黄河河务局会计核算中心, 郑州 450032;
3. 河南大学 商学院, 河南 开封 475004)

摘要:为推动城市工业品和农村农产品双向流动,基于城乡配送体系下县-乡-村三级物流网络的实际运营特征调研分析,考虑多商品和同时取送货的两阶段车辆路径问题。建立两阶段以车辆路径成本和固定派车成本之和最小为优化目标的混合整数规划模型,基于问题特性的分析提出有效不等式以提高模型性能,设计简便高效启发式算法以求解大规模问题,并借鉴河南省焦作市和鹤壁市的县-乡-村物流数据模拟生成27组不同规模的算例对模型、有效不等式和启发式算法的有效性及其求解效果进行验证分析。实验结果表明:1)建立的模型有效,在1h内可对小规模算例求得最优解;2)提出的有效不等式可帮助模型获得更多最优解或高质量问题的上下界;3)提出的启发式算法可快速对小规模算例获得近似最优解、大规模算例获得满意解;4)随着算例规模(乡镇物流中心数目、村落物流中心数目、商品种类数目)的增加,问题求解难度急剧增加;5)将大、小型货车的装载容量分别扩大50%,运输成本明显降低,通过合理配置车型来优化运输装载和运输路径决策,进而可有效降低运输成本。研究成果不仅将对两阶段车辆路径问题的现有理论进行了有益拓展,而且还可成为城乡配送提供决策支持,进而助力乡村振兴。

关键词:城乡配送;两阶段;车辆路径;同时取送货;多商品;混合整数规划;有效不等式;启发式算法

中图分类号: O221.4; U126

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2025)05-0029-13

随着数字经济和电商经济的兴起,乡村下沉物流市场逐步展现出发展潜力^[1]。根据商务大数据监测,2024年全国农村网络零售额为2.56万亿元^[2],每天农村地区揽收和投递的快递包裹超1亿件^[3]。2024年全国农业生产总值约为8.96万亿元^[4]。物流作为推动城市工业品下乡和农村农产品进城的重要抓手,逐步引起国家重视。2024年中央一号文件再次强调“健全县乡村物流配送体系”,全国多个县区已经或正在搭建县-乡-村三级物流配送网络(图1)。其中,县级物流中心向管辖(服务)的乡镇物流中心供货即为县-乡配送环节,乡镇物流中心向管辖(服务)的村落物流中心供货即为乡-村配送环节。

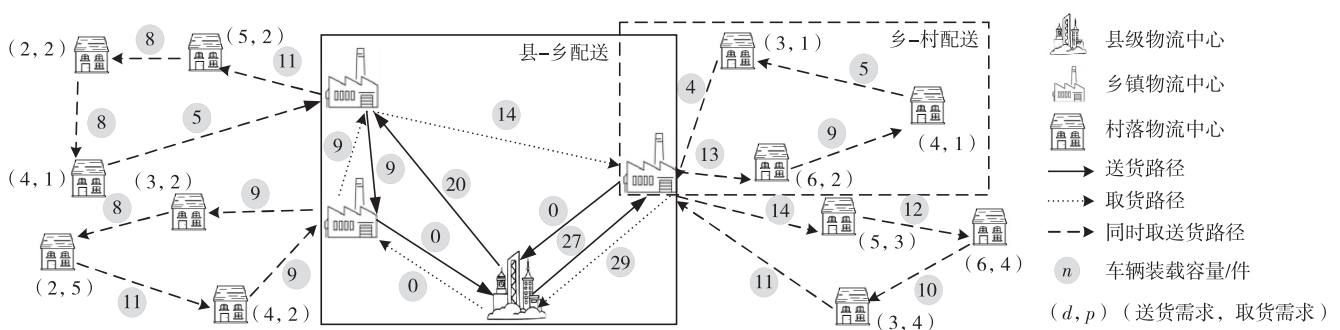


图1 县-乡-村三级物流网络

Fig. 1 County-township-village three-level logistics network

在实际运营中,县-乡配送环节与乡-村配送环节不协调现象越来越突出,导致物流成本浪费严重且效率低

* 收稿日期:2024-12-09 修回日期:2025-03-31 网络出版时间:2025-10-15T15:41
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);2024年重庆市研究生科研创新项目(No. CYB240264)
第一作者简介:王利娟,女,博士研究生,研究方向为物流调度优化,E-mail:henulj@163.com;通信作者简介:徐东洋,男,教授,博士生导师,E-mail:xdy_hust@163.com
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20251015.1433.002

下。据调查,超过 20% 的农村居民不满足当前物流配送形式^[5]。基于此,探讨县-乡与乡-村协同配送方案将是实现县域物流高质量服务的关键,同时显得尤为重要与迫切^[6]。考虑双向互动的县-乡(第 1 阶段)与乡-村(第 2 阶段)协同配送问题在学术上可被定义为两阶段同时取送货车车辆路径问题(two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, 2E-VRPSPD)。

2E-VRPSPD 可以看作两阶段车辆路径问题^[7-10](仅考虑送货或取货需求)的拓展,属于更难求解的 NP 问题。Hu 等人^[11]以整合正向投送(饮料)和逆向回收(空瓶子)为出发点,首次研究了 2E-VRPSPD。该问题主要探讨大型货车从配送中心到中转仓库和小型货车从中转仓库到终端客户的协同路径决策,以同时满足所有客户的取送货需求^[12]。为了适应新场景,最近有学者考虑第 1 阶段取货、送货分离(需要对取货路径和送货路径分别做决策)、第 2 阶段同时取送货的情况,对 2E-VRPSPD 作了进一步拓展^[13-19]。虽然这些研究与本文研究的城乡配送场景相匹配,但它们仅考虑单商品或伪多商品(将客户 i 的多种商品取送货需求分别简化成 p_i, q_i)的情形,导致无法满足多商品联合运输的日常运营需求(例如城乡配送体系中多种城市工业品和农村农产品配送等情况)。此外,现有的研究忽略了车辆(司机)工作时长限制,导致研究成果与实际需求存在差异。

综上所述,本文基于县-乡-村三级物流网络的实际运营特征,考虑多商品、车辆最大工作时长等现实因素,对 2E-VRPSPD 进行更深入的研究,以探讨适应性更强、应用范围更广的县-乡-村协同运输方案。为方便讨论,将本文的问题记为 MC-2E-VRPSPD。首先,建立以车辆路径成本和派车成本之和最小为优化目标的两阶段混合整数规划模型;其次,基于问题特性分析,提出有效不等式来提高模型求解能力以最优求解小规模问题;再次,设计简便高效启发式算法以近似最优求解大规模问题;最后,基于河南省焦作市和鹤壁市多个县-乡-村三级物流网络实际运营数据调研,模拟生成 27 组不同规模的算例对算法进行实验验证与分析。

1 模型构建

1.1 问题描述与假设

在对县-乡-村三级物流网络实际运营情况进行调研分析的基础上,可将 MC-2E-VRPSPD 描述为:在 1 个县级行政区域内,1 个县级物流中心服务多个乡镇物流中心,1 个乡镇物流中心服务多个村落物流中心;每个村落物流中心定期向上游上报取、送货需求量,每个乡镇物流中心的取、送货需求量等于服务的所有村落物流中心取、送货需求量之和;为满足村落物流中心的取、送货需求,县级物流中心需派车先向管辖(服务)的乡镇物流中心送货,乡镇物流中心接到县级物流中心送来的货物后派车向管辖的村落物流中心送货,同时取走相应的待取货量返回到乡镇物流中心,最后再由县级物流中心派车将乡镇物流中心取回的货物进行回收。本研究需对县级物流中心到乡镇物流中心的送货或取货路径和乡镇物流中心到村落物流中心的同时取送货路径进行协同决策,以设计总成本(包括车辆路径成本和固定派车成本)最小的取送货方案来满足村落物流中心的需求。

本文考虑研究假设如下:1) 县级物流中心的商品供应量充足^[20];2) 县级物流中心拥有大型货车用于县-乡(第 1 阶段)送货及取货,乡镇物流中心拥有小型货车用于乡-村(第 2 阶段)同时取送货,同一阶段的货车同质;3) 每个县级物流中心取、送货需求分开执行,且均一次性满足;4) 每个村落物流中心只能由对它进行管辖的乡镇物流中心服务,有且只有 1 次服务,即取、送货需求同时一次性满足。

1.2 数学模型

本模型的数学定义如下:0 代表县级物流中心, $N_s = \{1, 2, \dots, n_s\}$ 表示乡镇物流中心集合, $N_c = \bigcup_{w \in N_s} N_c^w = \{n_s + 1, n_s + 2, \dots, n_s + n_c\}$ 表示村落物流中心集合,其中 N_c^w 表示乡镇物流中心 w 所服务的村落物流中心集合。 $A_1 = \{(v, w) : v, w \in \{0\} \cup N_s, v \neq w\}$ 表示县-乡(第 1 阶段)路线弧集合, $A_2 = \bigcup_{w \in N_s} A_2^w = \{(i, j) : i, j \in \{w\} \cup N_c^w, i \neq j\}$ 表示乡-村(第 2 阶段)路线弧集合,其中 A_2^w 表示乡镇物流中心 w 所覆盖的路线弧集合。 $K_1^d = \{1, 2, \dots, |K_1^d|\}$ 和 $K_1^p = \{1, 2, \dots, |K_1^p|\}$ 分别表示县级物流中心用于送货、取货的大型货车集合。 $R_2^w = \{1, 2, \dots, |R_2^w|\}$ 表示乡镇物流中心 w 用于乡-村(第 2 阶段)同时取送货的小型货车集合。 d_{wm}^1 和 p_{wm}^1 分别表示第 1 阶段乡镇物流中心 w 对商品 m 的送货和取货需求量。 d_{jm}^{2w} 和 p_{jm}^{2w} 分别表示第 2 阶段隶属于乡镇物流中心 w 的村落物流中心 j 对商品 m 的送货和取货需求量。 c_{vw}^1 表示第 1 阶段路线弧 (v, w) 的长度; c_{ij}^{2w} 表示第 2 阶段乡镇物流中心 w 所覆盖的路线弧 (i, j) 的长度; t_{vw}^1 表示第 1 阶段大型货车访问路线弧 (v, w) 的行驶时间; t_{ij}^{2w} 表示第 2 阶段乡镇物流中心 w 派出的小型货车访问路线弧 (i, j) 的行驶时间; $Q_1/Q_2, T_1/T_2, V_1/V_2, F_1/F_2, G_1/G_2$ 分

别表示大、小型货车的最大装载容量、最大工作时长、平均行驶速度、固定使用成本、每公里燃油消耗成本; $M = \{1, 2, \dots, m_c\}$ 表示需要取、送的商品种类集合。

本文变量定义如下: $x_{v\omega k}^1$ 为 0-1 决策变量, 表示第 1 阶段大型货车 k 访问路线弧 (v, ω) 时为 1, 否则为 0; x_{ijr}^{2w} 为 0-1 变量, 表示第 2 阶段乡镇物流中心 w 派出的小型货车 r 访问路线弧 (i, j) 时为 1, 否则为 0; l_{ijmr}^{2w} 为实数变量, 表示第 2 阶段乡镇物流中心 w 派出的小型货车 r 访问路线弧 (i, j) 时装载商品 m 的数量。 t_{0k}^{1d} 和 t_{0k}^{1a} 分别表示第 1 阶段大型货车 k 离开和到达县级物流中心 0 的时间, $t_{\omega k}^{1a}$ 表示第 1 阶段大型货车 k 到达乡镇物流中心 ω 的时间, $t_{\omega r}^{2dw}$ 和 $t_{\omega r}^{2aw}$ 分别表示第 2 阶段小型货车 r 离开和到达乡镇物流中心 w 的时间, t_{jr}^{2aw} 表示第 2 阶段乡镇物流中心 w 派出的小型货车 r 到达村落物流中心 j 的时间。

1) 目标函数, 即 2 个阶段的车辆路径成本及固定派车成本之和最小:

$$\min \sum_{(v, \omega) \in A_1} \sum_{k \in K_1^d \cup K_1^p} C_{v\omega}^1 x_{v\omega k}^1 G_1 + \sum_{k \in K_1^d \cup K_1^p} (1 - x_{00k}^1) F_1 + \sum_{\omega \in N_s} \sum_{(i, j) \in A_2^w} \sum_{r \in R_2^w} C_{ij}^{2w} x_{ijr}^{2w} G_2 + \sum_{\omega \in N_s} \sum_{r \in R_2^w} (1 - x_{\omega\omega r}^{2w}) F_2。$$

2) 第 1 阶段相关约束。

大型货车从县级物流中心出发, 完成取、送货任务后返回县级物流中心的表达式分别为:

$$\sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{v0k}^1 = 1, \forall k \in K_1^d \cup K_1^p, \quad \sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{0v k}^1 = 1, \forall k \in K_1^d \cup K_1^p;$$

每个乡镇物流中心的送货和取货需求一次性满足, 表达式分别为:

$$\sum_{v \in \{0\} \cup N_s} \sum_{k \in K_1^p} x_{v\omega k}^1 = 1, \quad \sum_{v \in \{0\} \cup N_s} \sum_{k \in K_1^d} x_{v\omega k}^1 = 1, \forall \omega \in N_s;$$

大型货车访问乡镇物流中心的进出路径流平衡约束:

$$\sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{v\omega k}^1 - \sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{\omega v k}^1 = 0, \forall \omega \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p;$$

大型货车执行取、送货任务时最大装载容量限制表达式分别为:

$$\sum_{\omega \in N_s} \sum_{m \in M} p_{\omega m}^1 \sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{v\omega k}^1 \leq Q (k \in K_1^p), \quad \sum_{\omega \in N_s} \sum_{m \in M} d_{\omega m}^1 \sum_{v \in \{0\} \cup N_s} x_{v\omega k}^1 \leq Q (k \in K_1^d);$$

大型货车的最大工作时长限制表达式为:

$$\sum_{v \in \{0\} \cup N_s} \sum_{\omega \in \{0\} \cup N_s} x_{v\omega k}^1 t_{v\omega}^1 \leq T_1, \forall k \in K_1^d \cup K_1^p;$$

大型货车访问乡镇物流中心的时间关系约束表达式为:

$$\begin{aligned} t_{0k}^{1d} + t_{0v}^1 - L(1 - x_{0v k}^1) &\leq t_{v k}^{1a}, \forall v \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ t_{0k}^{1d} + t_{0v}^1 + L(1 - x_{0v k}^1) &\geq t_{v k}^{1a}, \forall v \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ t_{v k}^{1a} + t_{v\omega}^1 - L(1 - x_{v\omega k}^1) &\leq t_{\omega k}^{1a}, \forall v \in N_s, \omega \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ t_{v k}^{1a} + t_{v\omega}^1 + L(1 - x_{v\omega k}^1) &\geq t_{\omega k}^{1a}, \forall v \in N_s, \omega \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ t_{\omega k}^{1a} + t_{\omega 0}^1 - L(1 - x_{\omega 0 k}^1) &\leq t_{0k}^{1a}, \forall \omega \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ t_{\omega k}^{1a} + t_{\omega 0}^1 + L(1 - x_{\omega 0 k}^1) &\geq t_{0k}^{1a}, \forall \omega \in N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p. \end{aligned}$$

3) 两阶段衔接约束。

第 1 阶段大型货车 k 送货到乡镇物流中心 ω 的时间应不晚于第 2 阶段小型货车 r 离开乡镇物流中心 ω 的时间, 即第 1 阶段将商品送到乡镇物流中心后才允许第 2 阶段送货, 表达式为:

$$t_{\omega k}^{1a} \leq t_{\omega r}^{2d}, \forall k \in K_1^d, r \in R_2^w;$$

第 1 阶段大型货车 k 到乡镇物流中心 ω 的取货时间应不早于第 2 阶段小型货车 r 将商品送到乡镇物流中心 ω 的时间, 即第 2 阶段将商品取回到乡镇物流中心 ω 后才允许第 1 阶段取货, 表达式为:

$$t_{\omega r}^{2a} \leq t_{\omega k}^{1a}, \forall k \in K_1^p, r \in R_2^w。$$

4) 第 2 阶段相关约束。

小型货车 r 从所属乡镇物流中心出发, 完成取、送货任务后返回所属乡镇物流中心的表达式分别为:

$$\sum_{j \in \{w\} \cup N_c^w} x_{wj r}^{2w} = 1, \quad \sum_{j \in \{w\} \cup N_c^w} x_{jw r}^{2w} = 1,$$

其中: $\forall \omega \in N_s, r \in R_2^w$;

每个村落物流中心被访问有且仅有 1 次,即取送货需求同时且一次性满足,表达式为:

$$\sum_{r \in R_2^w} \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w} = 1, \forall w \in N_s, j \in N_c^w;$$

小型货车访问村落物流中心的进出路径流平衡约束表达式为:

$$\sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w} - \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{jir}^{2w} = 0, \forall w \in N_s, j \in N_c^w, r \in R_2^w;$$

小型货车的最大装载容量限制表达式为:

$$\sum_{m \in M} l_{ijmr}^{2w} \leq Q_2 x_{ijr}^{2w}, \forall w \in N_s, i \in \{w\} \cup N_c^w, j \in \{w\} \cup N_c^w, r \in R_2^w;$$

小型货车 r 离开乡镇物流中心 w 装载商品 m 的数量等于小型货车 r 所访问的村落物流中心对商品 m 的送货需求量之和,表达式为:

$$\sum_{j \in N_c^w} l_{wjmr}^{2w} = \sum_{j \in N_c^w} d_{jm}^{2w} \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w}, \forall w \in N_s, m \in M, r \in R_2^w;$$

小型货车 r 返回乡镇物流中心 w 装载商品 m 的数量等于小型货车 r 所访问的村落物流中心对商品 m 的取货需求量之和,表达式为:

$$\sum_{j \in N_c^w} l_{jwmr}^{2w} = \sum_{j \in N_c^w} p_{jm}^{2w} \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w}, \forall w \in N_s, m \in M, r \in R_2^w;$$

商品装卸平衡约束表达式为:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} l_{ijmr}^{2w} - d_{jm}^{2w} + p_{jm}^{2w} - \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} l_{jimr}^{2w} - Q_2 \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w} &\geq -Q_2, \\ \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} l_{ijmr}^{2w} - d_{jm}^{2w} + p_{jm}^{2w} - \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} l_{jimr}^{2w} + Q_2 \sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w} &\leq Q_2, \end{aligned}$$

其中: $\forall w \in N_s, j \in N_c^w, m \in M, r \in R_2^w$;

小型货车的最大工作时长限制表达式为:

$$\sum_{i \in \{w\} \cup N_c^w} \sum_{j \in \{w\} \cup N_c^w} x_{ijr}^{2w} l_{ij}^{2w} \leq T_2, \forall r \in R_2^w, w \in N_s;$$

小型货车访问村落物流中心的时间关系约束表达式分别为:

$$\begin{aligned} t_{wr}^{2dw} + t_{wi}^{2w} - L(1 - x_{wik}^{2w}) &\leq t_{ik}^{2aw}, t_{wr}^{2dw} + t_{wi}^{2w} + L(1 - x_{wik}^{2w}) \geq t_{ik}^{2aw}, \\ t_{ir}^{2aw} + t_{ij}^{2w} - L(1 - x_{ijr}^{2w}) &\leq t_{jr}^{2aw}, t_{ir}^{2aw} + t_{ij}^{2w} + L(1 - x_{ijr}^{2w}) \geq t_{jr}^{2aw}, \\ t_{jr}^{2aw} + t_{jw}^{2w} - L(1 - x_{jwr}^{2w}) &\leq t_{wr}^{2aw}, t_{jr}^{2aw} + t_{jw}^{2w} + L(1 - x_{jwr}^{2w}) \geq t_{wr}^{2aw}, \end{aligned}$$

上述式中: $\forall w \in N_s, r \in R_2^w, i \in N_s^w, j \in N_s^w$;

5) 变量取值范围约束。

0-1 变量的取值范围表示为:

$$\begin{aligned} x_{vuk}^1 &\in \{0, 1\}, \forall v \in \{0\} \cup N_s, w \in \{0\} \cup N_s, k \in K_1^d \cup K_1^p, \\ x_{ijr}^{2w} &\in \{0, 1\}, \forall w \in N_s, i \in \{w\} \cup N_c^w, j \in \{w\} \cup N_c^w, r \in R_2^w. \end{aligned}$$

实数变量的取值范围表示为:

$$\begin{aligned} l_{ijmr}^{2w} &\geq 0, \forall w \in N_s, i \in \{w\} \cup N_c^w, j \in \{w\} \cup N_c^w, m \in M, r \in R_2^w; \\ 0 &\leq t_{ok}^{1d} \leq T_1, \forall k \in K_1^d; \\ 0 &\leq t_{uk}^{1a} \leq T_1, \forall w \in N_s, k \in K_1^d, 0 \leq t_{ok}^{1a} \leq T_1, \forall k \in K_1^d; \\ 0 &\leq t_{ok}^{1d} \leq 2T_1 + T_2, \forall k \in K_1^p; \\ 0 &\leq t_{ok}^{1a} \leq 2T_1 + T_2, \forall k \in K_1^p; \\ 0 &\leq t_{uk}^{1a} \leq 2T_1 + T_2, \forall w \in N_s, k \in K_1^p; \\ 0 &\leq t_{wr}^{2dw} \leq T_1 + T_2, \forall w \in N_s, r \in R_2^w; \\ 0 &\leq t_{wr}^{2aw} \leq T_1 + T_2, \forall w \in N_s, r \in R_2^w; \\ 0 &\leq t_{jr}^{2aw} \leq T_1 + T_2, \forall w \in N_s, j \in N_s^w, r \in R_2^w. \end{aligned}$$

1.3 有效不等式

1) 派车数量不等式。

在第 1 阶段县级物流中心执行取、送货任务时派出的大型货车总装载容量不少于服务的乡镇物流中心的商品取、送货需求量之和,表达式分别为:

$$\sum_{k \in K_1^p} (1 - x_{00k}^1) \geq \left[\frac{\sum_{w \in N_s} \sum_{m \in M} p_{wm}^1}{Q_1} \right], \sum_{k \in K_1^d} (1 - x_{00k}^1) \geq \left[\frac{\sum_{w \in N_s} \sum_{m \in M} d_{wm}^1}{Q_1} \right];$$

在第 2 阶段乡镇物流中心执行同时取送货任务时派出的小型货车总装载容量不少于服务的村落物流中心的商品取、送货需求量之和,表达式为:

$$\sum_{r \in R_2^w} (1 - x_{wvr}^{2w}) \geq \left[\frac{\max \left\{ \sum_{j \in N_c^w} \sum_{m \in M} p_{jm}^{2w}, \sum_{j \in N_c^w} \sum_{m \in M} d_{jm}^{2w} \right\}}{Q_2} \right], \forall w \in N_s。$$

2) 派车顺序不等式。

在第 1 阶段县级物流中心执行送、取货任务时优先派出编号较小的大型货车,表达式分别为:

$$x_{00k_1}^1 \leq x_{00k_2}^1, \forall k_1 \in K_1^d, k_2 \in \{K_1^d | k_1 < k_2\};$$

$$x_{00k_1}^1 \leq x_{00k_2}^1, \forall k_1 \in K_1^p, k_2 \in \{K_1^p | k_1 < k_2\}。$$

在第 2 阶段乡镇物流中心执行同时取送货任务时先派出编号较小的小型货车,表达式为:

$$x_{wvr_1}^{2w} \leq x_{wvr_2}^{2w}, \forall w \in N_s, r_1 \in R_2^w, r_2 \in \{R_2^w | l_1 < l_2\}。$$

2 求解算法设计

由于涉及多商品运输网络及多个运输阶段,2E-VRSPD 高度复杂,借助 CPLEX(模型+有效不等式)在 1 h 内能精确求解的最大规模算例为:7 个乡镇物流中心、每个乡镇物流中心服务 7 个村落物流中心(总共 49 个村落物流中心)、6 种商品。因此,设计一个高效启发式算法以求解实际运营中的大规模算例。考虑到优化目标为 2 个阶段的车辆路径成本和固定派车成本,此算法需基于运输距离和派车数量节约的贪婪思想,主要步骤见图 2。

3 数值实验

本节对模型、有效不等式和启发式算法的有效性及其求解效果进行验证测试,测试机器为 1 台 CPU 主频为 3.2 GHz、RAM 为 2 GB、运行内存为 12 GB 的计算机,并采用 CPLEX 22.1.1 作为求解器。

3.1 算例描述

以河南省的城乡配送为例,经调研焦作市的修武县、武陟县、温县、博爱县和鹤壁市的浚县、淇县共 6 个县所辖的乡镇和村落数量,确定生成 27 组不同规模的算例, $n_s \in \{5, 7, 10\}$, $n_c^w \in \{7, 10, 15\}$, $m_c \in \{2, 3, 4\}$, 具体见表 1。

3.2 模型有效性验证及协同运输方案展示

为验证模型的有效性,选取 3 个小规模算例:乡镇物流中心数目为 3,村落物流中心数目为 3,商品种类数目分别为 4、6 或 8,并借助优化软件 CPLEX 进行求解,具体求解方案见表 2。经手工计算与核验,求解方案满足模型的所有约束,即本文所建立的模型有效。

3.3 有效不等式提升作用分析

为了验证有效不等式对模型求解能力的提升效果,将第 1.2 节的模型记为模型 1、模型 1 加上有效不等式后的模型记为模型 2,用这 2 个模型分别对上述的 27 个算例进行测试,表 3 呈现了 CPLEX 在 1 h 之内获得的结果。其中, $\Delta 1$ 表示模型 1 获得下界和模型 2 获得下界之间的百分比差异, $\Delta 2$ 表示模型 1 获得上界和模型 2 获得上界之间的百分比差异。

从表 3 可知,由于本文所研究的问题高度复杂,建立的模型在 1 h 内仅能够最优求解 1 个算例(即 5-7-4),而

本文提出的有效不等式可帮助模型的最优求解增加到 4 个算例(即 5-7-6、5-7-8、7-7-4、7-7-6)。由 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 的值可知,这些有效不等式还可将问题下界平均提高 16.04% 和问题上界(可行解)平均改善 3.25%。

```

1  将县级物流中心  $w$  拥有送货的大型货车  $K_1^d$  进行排序;
2  大型货车  $k$  的离开时间:  $t_{ok}^{1d} (k \in K_1^d)$ ;
3  选择距离县级物流中心 0 最近的乡镇物流中心  $w$ , 构建当前路径  $k_c: 0 \rightarrow w \rightarrow 0$ ;
4  While 县级物流中心 0 所服务的乡镇物流中心仍有送货需求未满足 do
5      repeat
6          尝试将每个送货需求未满足的乡镇物流中心插入到当前路径  $k_c$  中的每个位置形成一系列新路径  $k'$ , 若  $k'$  满足最大装载能力和行驶时间要求, 计算相应的增加成本, 选择增加成本最小的路径记为当前路径  $k_c$ ;
7          更新大型货车  $k$  的剩余装载容量及乡镇物流中心的送货需求信息;
8          until 不存在乡镇物流中心能够插入当前路径;
9          if 所有乡镇物流中心的送货需求均已满足 then
10             将当前路径作为一条运输路径输出, 更新县级物流中心用于送货的大型货车信息;
11             Break;
12         else
13             按照步骤 1~3, 重新构建当前子路径  $k_c$ ;
14  输出第 1 阶段县级物流中心向乡镇物流中心送货的方案;
15  计算所有乡镇物流中心所需商品的到货时间  $t_{uk}^{1a} (k \in K_1^d)$ ;
16  For  $w \in N_s$  do
17      将乡镇物流中心  $w$  拥有的小型货车  $R_2^w$  进行排序;
18      小型货车  $r$  的离开时间:  $t_{wr}^{2d} = t_{uk}^{2a} (k \in K_1^d)$ ;
19      选择距离乡镇物流中心  $w$  最近的村落物流中心  $i$ , 构建当前路径  $r_c: w \rightarrow i \rightarrow w$ ;
20      While 乡镇物流中心  $w$  所服务的村落物流中心仍有取、送货需求未满足 do
21          repeat
22              尝试将每个取、送货需求未满足的村落物流中心插入到当前路径  $r_c$  中的每个位置形成一系列新路径  $r'$ , 若  $r'$  满足最大装载能力和行驶时间要求, 计算相应的增加成本, 选择增加最小的路径记为当前路径  $r_c$ ;
23              更新小型货车  $r$  的剩余装载容量及村落物流中心的取、送货需求信息;
24              until 不存在村落物流中心能够插入当前路径;
25              if 所有村落物流中心的取、送货需求均已满足 then
26                  将当前路径作为一条运输路径输出, 更新乡镇物流中心  $w$  的小型货车信息;
27                  Break;
28              else
29                  按照步骤 17~19, 重新构建当前子路径  $k_c$ ;
30  输出第 2 阶段乡镇物流中心向村落物流中心的取、送货方案;
31  将县级物流中心  $w$  拥有取货的大型货车  $K_1^p$  进行排序
32  大型货车  $k$  的离开时间:  $t_{ok}^{1d} (k \in K_1^p) = t_{wr}^{2a}$ ;
33  选择距离县级物流中心 0 最近的乡镇物流中心  $w$ , 构建当前路径  $k_c: 0 \rightarrow w \rightarrow 0$ ;
34  While 县级物流中心 0 所服务的乡镇物流中心仍有取货需求未满足 do
35      repeat
36          尝试将每个取货需求未满足乡镇物流中心插入到当前路径  $k$  中的每个位置形成一系列新路径  $k'$ , 若  $k'$  满足最大装载能力和行驶时间要求, 计算相应的增加成本, 选择增加最小的路径记为当前路径  $k_c$ ; 更新大型货车  $k$  的剩余装载容量及乡镇物流中心的取货需求信息;
37          until 不存在乡镇物流中心能够插入当前路径;
38          if 所有乡镇物流中心的取货需求均已满足 then
39              将当前路径作为一条运输路径输出, 更新县级物流中心用于取货的大型货车信息;
40              Break;
41          esle
42              按照步骤 31~33, 重新构建当前子路径  $k_c$ ;
44  输出第 1 阶段县级物流中心向乡镇物流中心取货的方案, 进而结合前面方案得到第 1 阶段和第 2 阶段协同取、送货方案。

```

图 2 算法流程图

Fig. 2 The flow chart of algorithm

表 1 测试算例具体参数设置
Tab. 1 Parameters of test instances

参数	参数描述	数值
n_s	乡镇物流中心数目	5,7,10
n_c^w	乡镇物流中心所管辖(服务)的村落物流中心数目	7,10,15
m_c	商品种类数目	4,6,8
d_{wm}^1	乡镇物流中心 w 对商品 m 的送货需求量	$d_{wm}^1 = \sum_{j \in N_s} d_{jm}^{2w}$
d_{jm}^{2w}	乡镇物流中心 w 所管辖的村落物流中心 j 对商品 m 的送货需求量	$U[0,20]$
p_{wm}^1	乡镇物流中心 w 对商品 m 的取货需求量	$p_{wm}^1 = \sum_{j \in N_s} p_{jm}^{2w}$
p_{jm}^{2w}	乡镇物流中心 w 所管辖的村落物流中心 j 对商品 m 的取货需求量	$U[0,4]$
c_{vw}^1	县乡(第 1)阶段路线弧 (v,w) 的长度,其中 $(v,w) \in A_1$	$d_{vw}^1 = \sqrt{(X_v - X_w)^2 + (Y_v - Y_w)^2}$
c_{ij}^{2w}	乡村(第 2)阶段路线弧 (i,j) 的长度,其中 $(i,j) \in A_2^w$	$d_{ij}^{2w} = \sqrt{(X_i^{2w} - X_j^{2w})^2 + (Y_i^{2w} - Y_j^{2w})^2}$
t_{vw}^1	大型货车访问县-乡(第 1)阶段路线弧 (v,w) 的行驶时间	$t_{vw}^1 = c_{vw}^1 / v_1$
t_{ij}^{2w}	小型货车访问乡-村(第 2)阶段路线弧 (i,j) 的行驶时间	$t_{ij}^{2w} = c_{ij}^{2w} / v_2$
Q_1	大型货车的最大装载量(单位:件)	200
Q_2	小型货车的最大装载量(单位:件)	40
T_1	大型货车的最大行驶时间(单位:h)	6
T_2	小型货车的最大行驶时间(单位:h)	4
V_1	大型货车的平均行驶速度(单位:km · h ⁻¹)	50
V_2	小型货车的平均行驶速度(单位:km · h ⁻¹)	40
F_1	大型货车的固定使用成本(单位:元 · 辆 ⁻¹)	100
F_2	小型货车的固定使用成本(单位:元 · 辆 ⁻¹)	60
G_1	大型货车单位路程燃油消耗成本(单位:元 · km ⁻¹)	1.2
G_2	小型货车单位路程燃油消耗成本(单位:元 · km ⁻¹)	0.9

表 2 两阶段协同运输方案
Tab. 2 The display of two-echelon collaborative transportation scheme

算例	阶段	环节	路径 1	路径 2	路径 3	路径成本/元	派车成本/元	总成本/元
算例 3-3-4	县-乡 (第 1)阶段	送货	0→1→0	0→3→2→0		302.94	200	1 647.76
		取货	0→3→2→1→0			280.32	100	
	乡-村 (第 2)阶段	送货	1→(5)→(4)→ (6)→1	2→(9)→(7)→ (8)→2	3→(10)→(11)→ (12)→3	584.50	180	
算例 3-3-6	县-乡 (第 1)阶段	送货	0→1→0	0→2→3→0		302.94	200	2 263.73
		取货	0→1→2→3→0			280.32	100	
	乡-村 (第 2)阶段	送货	1→(4)→1, 1→(5)→1, 1→(6)→1	2→(7)→(9)→2, 2→(8)→2	3→(11)→(10)→3, 3→(12)→3	960.47	420	

续表 2

算例	阶段	环节	路径 1	路径 2	路径 3	路径成本/元	派车成本/元	总成本/元
算例 3-3-8	县-乡 (第 1)阶段	送货	0→1→0	0→3→2→0		302.94	200	2 649.78
		取货	0→1→0	0→3→2→0		302.94	200	
	乡-村 (第 2)阶段	送货	1→(4)→1, 1→(5)→1, 1→(6)→1	2→(7)→2, 2→(8)→(9)→2	3→(10)→3, 3→(11)→3, 3→(12)→3	1 163.90	480	

注:乡-村(第 2)阶段的路径 1、路径 2 和路径 3 分别指乡镇物流中心 1,2,3 的路径。

表 3 有效不等式效果测试

Tab. 3 The test performance of valid inequalities by comparing model 1 with model 2

算例	模型 1				模型 2				百分比差距	
	下界	上界	时间/s	节点数	下界	上界	时间/s	节点数	Δ1	Δ2
5-7-4	1 898.77	1 898.77	324.68	74 641	1 898.77	1 898.77	14.90	5 734	0	0
5-7-6	2 205.69	2 244.85	3 600.00	157 945	2 243.03	2 243.03	42.20	14 648	1.69%	-0.08%
5-7-8	2 531.24	2 852.69	3 600.00	927 081	2 846.14	2 846.14	4 569.03	33 0591	12.44%	-0.23%
5-10-4	2 824.06	3 278.50	3 600.00	137 655	3 029.44	3 263.89	3 600.00	196 356	7.27%	-0.45%
5-10-6	3 323.56	4 364.41	3 600.00	54 561	3 718.74	4 198.07	3 600.00	86 098	11.89%	-3.81%
5-10-8	4 775.01	5 556.56	3 600.00	70 156	4 792.29	5 453.01	3 600.00	74 789	0.36%	-1.86%
5-15-4	3 115.88	5 200.93	3 600.00	35 112	3 837.68	5 089.11	3 600.00	42 936	23.17%	-2.15%
5-15-6	4 915.74	6 914.02	3 600.00	22 396	5 032.73	6 671.46	3 600.00	25 772	2.38%	-3.51%
5-15-8	5 462.16		3 600.00	17 834	5 594.94		3 600.00	13 239	2.43%	
7-7-4	2 503.46	2 932.56	3 600.00	59 316	2 932.56	2 932.56	53.69	21 503	17.14%	0
7-7-6	3 038.09	3 754.98	3 600.00	148 169	3 706.40	3 706.40	1 148.90	148 011	22%	-1.29%
7-7-8	2 991.77	4 604.26	3 600.00	79 934	3 904.40	4 545.49	3 600.00	192 118	30.5%	-1.28%
7-10-4	3 180.79	4 591.26	3 600.00	107 053	3 937.07	4 587.18	3 600.00	226 267	23.78%	-0.09%
7-10-6	3 998.11	7 035.66	3 600.00	76 347	4 872.64	5 741.46	3 600.00	36 998	21.87%	-18.39%
7-10-8	6 581.10	8 634.43	3 600.00	46 326	6 617.84	7 872.30	3 600.00	87 710	0.56%	-8.83%
7-15-4	4 495.55	7 044.38	3 600.00	110 189	5 543.00	6 923.67	3 600.00	180 440	23.3%	-1.71%
7-15-6	7 453.96		3 600.00	8 741	7 649.65	11 302.50	3 600.00	26 194	2.63%	
7-15-8	8 292.95		3 600.00	24 193	8 434.71		3 600.00	19 067	1.71%	
10-7-4	3 497.64	5 271.34	3 600.00	51 952	4 492.72	4 730.57	3 600.00	415 420	28.45%	-10.26%
10-7-6	3 788.57	6 465.46	3 600.00	86 840	5 384.96	6 411.54	3 600.00	165 452	42.14%	-0.83%
10-7-8	4 433.62	7 958.04	3 600.00	59 785	5 968.45	7 876.88	3 600.00	131 321	34.62%	-1.02%
10-10-4	4 406.75	7 022.78	3 600.00	156 719	5 915.75	6 958.06	3 600.00	71 581	34.24%	-0.92%
10-10-6	5 900.98	9 904.66	3 600.00	31 662	7 302.21	9 761.20	3 600.00	40 428	23.75%	-1.45%
10-10-8	10 100.60	14 144.00	3 600.00	37 774	10 293.50	13 179.30	3 600.00	58 720	1.91%	-6.82%
10-15-4	6 140.13		3 600.00	13 412	8 064.22		3 600.00	17 485	31.34%	
10-15-6	11 254.80		3 600.00	3 488	11 506.70		3 600.00	9 788	2.24%	
10-15-8	12 605.50		3 600.00	2 901	16 302.18		3 600.00	3 105	29.33%	
平均值	5 026.54		3 478.69	96 377	5 771.21		3 204.10	97 843	16.04%	-3.25%

注:加黑的数据表示算例最优解。

3.4 启发式算法求解效果分析

为验证本文第 1.2 节所提出的启发式算法求解效果,用模型 2 借助 CPLEX 在 1 h 内所求解结果与本文算法对 3.1 节确定的 27 个算例的求解结果进行对比分析,结果见表 4。其中, $\Delta 1$ 表示本文启发式算法获得目标值(可行解)与模型 2 获得上界(可行解)之间的百分比差距, $\Delta 2$ 表示本文启发式算法耗时与模型 2(CPLEX)耗时之间的百分比差距。

表 4 启发式算法效果测试

Tab. 4 The test performance of heuristic algorithm by comparing with model 2

算例	模型 2(CPELX)			启发式算法		百分比差距	
	下界	上界	耗时/s	目标值	耗时/s	$\Delta 1$	$\Delta 2$
5-7-4	1 898.77	1 898.77	14.90	1 918.31	0.51	1.03%	-96.58%
5-7-6	2 243.03	2 243.03	42.20	2 273.40	0.60	1.35%	-98.58%
5-7-8	2 846.14	2 846.14	4 569.03	3 079.52	0.68	8.2%	-99.99%
5-10-4	3 029.44	3 263.89	3 600.00	3 616.85	0.75	1.1%	-99.98%
5-10-6	3 718.74	4 198.07	3 600.00	4 118.51	0.77	-1.9%	-99.98%
5-10-8	4 792.29	5 453.01	3 600.00	5 787.54	0.80	6.13%	-99.98%
5-15-4	3 837.68	5 089.11	3 600.00	5 222.55	0.85	2.62%	-99.98%
5-15-6	5 032.73	6 671.46	3 600.00	6 657.31	0.90	-0.21%	-99.98%
5-15-8	5 594.94		3 600.00	7 561.11	1.11		-99.97%
7-7-4	2 932.56	2 932.56	53.69	3 097.67	0.74	5.63%	-98.62%
7-7-6	3 706.40	3 706.40	1 148.90	3 970.41	0.80	7.12%	-99.93%
7-7-8	3 904.40	4 545.49	3 600.00	4 781.73	0.82	5.2%	-99.98%
7-10-4	3 937.07	4 587.18	3 600.00	4 626.04	0.88	0.85%	-99.98%
7-10-6	4 872.64	5 741.46	3 600.00	6 164.39	0.92	7.37%	-99.97%
7-10-8	6 617.84	7 872.30	3 600.00	8 273.41	1.05	5.1%	-99.97%
7-15-4	5 543.00	6 923.67	3 600.00	7 019.63	1.23	1.39%	-99.97%
7-15-6	7 649.65	11 302.50	3 600.00	10 001.90	1.47	-11.51%	-99.96%
7-15-8	8 434.71		3 600.00	11 604.70	1.65		-99.95%
10-7-4	4 492.72	4 730.57	3 600.00	4 336.06	0.96	-2.0%	-99.97%
10-7-6	5 384.96	6 411.54	3 600.00	6 963.60	1.28	7.39%	-99.96%
10-7-8	5 968.45	7 876.88	3 600.00	8 091.46	1.36	2.72%	-99.96%
10-10-4	5 915.75	6 958.06	3 600.00	7 001.28	1.52	0.62%	-99.96%
10-10-6	7 302.21	9 761.20	3 600.00	10 285.20	1.85	5.37%	-99.95%
10-10-8	10 293.50	13 179.30	3 600.00	13 312.72	2.06	1.01%	-99.94%
10-15-4	8 064.22		3 600.00	11 257.80	2.17		-99.94%
10-15-6	11 506.70		3 600.00	15 311.80	2.45		-99.93%
10-15-8	16 302.18		3 600.00	17 232.40	2.86		-99.92%
平均值	5 771.21		3 149.21	7 049.31	1.22		-99.74%

从表 4 的结果可知,针对模型 2(CPLEX)在 1 h 内能够求得最优解的 5 个算例,本文所提出的启发式算法在 1 s 内所获得可行解与最优解的差距均在 10% 以内,因此本文所提出的启发式算法能够快速对小规模算例求出

近似最优解。针对中规模算例(CPLEX 能够获得上界,有些很可能是最优解),本文启发式算法获得可行解与 CPLEX 获得上界的差距也在 10% 以内,但耗时相对 CPLEX 平均节约了 99.97%。针对大规模算例(CPLEX 在 1 h 内无法获得上界,例如算例 7-15-8、10-15-4、10-15-6 和 10-15-8),本文启发式算法在 3 s 内能够提供可行解。

3.5 问题求解复杂度分析

首先,为进一步探究乡镇物流中心数目对问题求解复杂度的影响,固定村落物流中心数量(7 个)和商品种类(4 种),选取算例 5-7-4、7-7-4 和 10-7-4,并将模型求解这些算例涉及的决策变量数目和约束数目进行对比分析。从图 3 可知,随着乡镇物流中心数目的增加,决策变量数目和约束数目增加,特别当乡镇物流中心数目从 7 增加到 10 时,问题求解复杂度增幅明显。其次,为探究村落物流中心对问题求解复杂度的影响,固定乡镇物流中心数目(5 个)和商品种类数目(4 种),选取算例 5-7-4、5-10-4 和 5-15-4,同样将模型求解这些算例涉及的决策变量数目和约束数目进行对比分析。类似地,从图 4 可知,问题求解复杂度随着村落物流中心数目增加而迅速增加。同理,图 5 展示了商品种类数目对问题求解复杂的影响,即随着商品种类数目增加,求解复杂度变大,但总体增加相对缓慢(相较乡镇物流中心数目和村落物流中心数目的变化)。

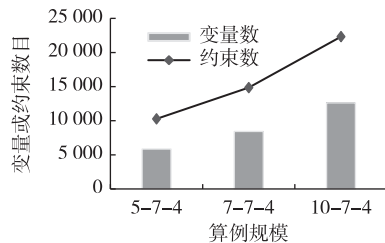


图 3 乡镇物流中心数目对问题求解影响

Fig. 3 The influence of the townships number

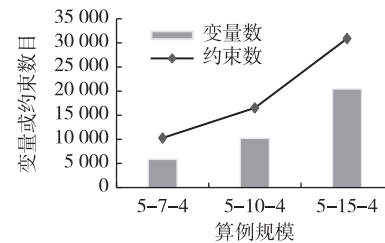


图 4 村落物流中心数目对问题求解影响

Fig. 4 The influence of the villages number

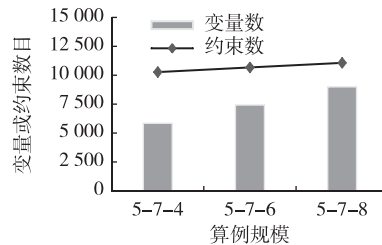


图 5 商品种类数目对问题求解影响

Fig. 5 The influence of the commodities number

3.6 车辆装载容量对问题求解的影响

在实际运营中,大、小型货车的装载容量会直接影响乡镇物流中心和村落物流中心的访问路径及派车数量,进而影响商品的取送货方案,为研究大、小型货车装载容量对商品取送货方案的影响,本文将大、小型货车装载容量分别为 200 和 40 的情况扩展为大、小型货车装载容量分别为 250 和 50、300 和 60 这 2 种情况,并用启发式算法对 3.1 节确定的 27 个算例获得的结果进行对比分析,结果见表 5。

由表 5 可知:1) 当大、小型货车装载容量分别扩大至 250 和 50,总成本平均节约了 7.22%,第 1 阶段车辆路径成本平均节约了 0.58%、固定派车成本平均节约了 2.62%,第 2 阶段车辆路径成本平均节约了 6.27%、固定派车成本平均节约了 18.14%。2) 当大、小型货车装载容量分别扩大至 300 和 60,总成本平均节约了 17.26%,第 1 阶段车辆路径成本平均节约了 15.86%、固定派车成本平均节约了 25.35%,第 2 阶段车辆路径成本平均节约了 9.41%、固定派车成本平均节约了 26.96%。基于以上结果可知:增加大、小型货车的装载容量,可以使车辆服务更多的乡镇物流中心或村落物流中心,同时带来更大的路径组合和优化空间,进而可以同时达到节约派车数量和车辆路径成本的效果。另外,从算例 7-7-6、7-10-4 和 10-10-4 可知,当车辆装载容量达到一定程度后,运输成本优化空间有限。因此,在县-乡-村三级物流网络的实际运营中,选择合适的车型对成本节约比较关键,应引起相关部门的重视。

表 5 不同车容量限制下的测试结果

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

元

算例	大、小型货车装载容量分别为 200 和 40					大、小型货车装载容量分别为 250 和 50					大、小型货车装载容量分别为 300 和 60				
	总成本	第一阶段		第二阶段		总成本	第一阶段		第二阶段		总成本	第一阶段		第二阶段	
		路径成本	派车成本	路径成本	派车成本		路径成本	派车成本	路径成本	派车成本		路径成本	派车成本	路径成本	派车成本
5-7-4	1 918.3	722.5	300	475.8	420	1 861.3	722.5	300	478.8	360	1 645.5	688.5	200	457.0	300
5-7-6	2 273.4	746.2	400	527.3	600	2 273.4	746.2	400	527.3	600	1 918.3	722.5	300	457.8	420
5-7-8	3 079.5	903.0	600	676.6	900	2 658.4	903.0	600	555.4	600	2 318.5	751.3	400	567.1	600
5-10-4	3 299.7	746.2	300	1 653.6	600	3 151.7	746.2	300	1 565.6	540	2 979.0	722.5	300	1 536.5	420
5-10-6	4 118.5	903.0	600	2 075.6	840	4 303.3	903.0	600	2 080.3	720	4 016.1	746.2	400	2 209.9	660
5-10-8	5 787.5	1 109.6	1 000	2 596.1	1 080	5 396.2	1 109.6	1 000	2 326.6	960	4 301.4	903.0	600	2 078.5	720
5-15-4	5 222.6	903.0	600	2 819.6	900	4 474.0	903.0	600	2 311.0	660	4 220.5	746.2	400	2 474.4	600
5-15-6	6 657.3	1 109.6	1 000	3 347.7	1 200	6 388.5	1 109.6	1 000	3 258.8	1 020	5 343.9	903.0	600	2 940.9	900
5-15-8	7 561.1	1 109.6	1 000	3 831.5	1 620	6 951.3	1 109.6	1 000	3 521.7	1 320	6 249.9	1 040.3	900	3 169.6	1 140
7-7-4	3 097.7	970.9	400	1 306.8	420	2 983.5	882.9	400	1 280.7	420	2 644.9	744.2	200	1 280.7	420
7-7-6	3 970.4	851.6	600	1 618.8	900	3 560.4	882.9	400	1 677.5	600	3 560.4	882.9	400	1 677.5	600
7-7-8	4 781.7	1 173.0	800	1 848.8	960	4 384.1	1 173.0	800	1 571.2	840	3 847.5	815.1	500	1 692.4	840
7-10-4	4 626.0	851.6	200	2 774.5	600	4 459.4	880.3	200	2 579.1	600	4 459.4	880.3	400	2 579.1	600
7-10-6	6 164.4	1 265.5	800	3 078.9	1 020	5 830.1	1 173.0	800	2 897.2	960	5 165.9	851.6	600	2 874.3	840
7-10-8	8 273.4	1 520.3	1 400	3 793.1	1 560	7 578.1	1 520.3	1 400	3 337.8	1 320	6 572.2	1 173.0	800	3 399.2	1 200
7-15-4	7 019.6	1 173.0	800	3 906.7	1 140	6 557	1 173.0	800	3 624.1	960	5 935.4	851.6	600	3 643.8	840
7-15-6	10 001.9	1 520.3	1 400	5 341.5	1 740	9 244.6	1 520.3	1 400	4 824.3	1 500	7 569.8	1 173.0	800	4 336.8	1 260
7-15-8	11 604.7	1 520.3	1 400	6 404.4	2 280	10 195.8	1 520.3	1 400	5 145.5	1 860	9 381.1	1 451.0	1 300	5 010.1	1 620
10-7-4	4 636.1	941.2	400	2 634.8	660	4 181.5	941.2	400	2 240.5	600	4 115.2	874.9	400	2 240.3	600
10-7-6	6 885.3	1 261.3	800	3 624.0	1 200	6 885.3	1 261.3	800	3 624.0	1 200	5 290.2	941.2	400	3 049.0	900
10-7-8	8 091.5	1 582.7	1 000	4 268.8	1 540	7 349.3	1 582.7	1 000	3 566.6	1 200	6 522.9	1 152.4	600	3 570.5	1 200
10-10-4	7 001.3	1 241.1	800	3 760.1	1 200	6 914.0	1 163.9	500	4 230.1	1 020	6 914.0	1 163.9	500	4 230.1	1 020
10-10-6	10 285.2	1 589.4	1 000	5 895.8	1 800	9 047.1	1 589.4	1 000	5 017.7	1 440	7 763.9	1 241.1	800	4 522.7	1 200
10-10-8	13 312.7	2 162.2	2 000	6 990.6	2 460	11 979.6	2 162.2	2 000	5 777.5	2 040	9 696.0	1 582.7	1 000	5 433.4	1 680
10-15-4	11 257.8	1 599.4	1 000	3 858.5	1 800	9 417.4	1 599.4	1 000	5 438.0	1 380	8 441.7	1 261.3	800	5 180.4	1 200
10-15-6	15 311.8	2 162.2	2 000	8 449.6	2 700	13 821.5	2 162.2	2 000	7 559.3	2 100	11 408.5	1 599.4	1 000	7 009.1	1 800
10-15-8	17 232.4	2 162.2	2 000	9 770.3	3 300	15 397.8	2 162.2	2 000	8 595.7	2 640	14 416.2	2 092.8	1 900	8 083.4	2 340

4 结论

本文基于县-乡-村三级物流网络双向流动的实际优化需求,考虑多商品、同时取送货、车辆最大工作时长等现实因素,提出并深入研究了 MC-2E-VRPSPD。首先,建立以车辆路径成本和固定派车成本为优化目标的两阶段混合整数规划模型;其次,基于问题特性分析,提出 2 类实用有效不等式来提升模型的求解能力;再次,基于成本节约的贪婪思想设计了高效的启发式求解算法;最后,基于县-乡-村物流网络的运营实践,模拟生成 27 组不同规模的算例对模型、有效不等式和启发式算法的有效性及其求解效果进行了验证,并对协同运输方案、问题求解复杂度和参数灵敏度进行了展示和深入分析,以得到实践管理启示。实验结果表明:1) 本文所建立的模型有效;

2) 本文提出的有效不等式可帮助模型获得更多最优解或更紧的问题上下界;3) 本文所提出的启发式算法可快速对小规模算例获得近似最优解,对大规模算例获得高质量的可行解;4) 随着算例规模(乡镇物流中心数目、村落物流中心数目、商品种类数目)的增大,问题求解难度急剧增加;5) 将大、小型货车的装载容量分别扩大 50%,运输成本显减少(节约 17.26%),尤其两阶段的固定派车成本分别节约了 25.35%和 26.96%,通过合理配置车型来优化运输装载和运输路径决策,可有效降低物流成本。本研究不仅将对两阶段车辆路径问题的现有理论进行拓展,而且可以促进县-乡-村物流体系的高质量发展。

参考文献:

- [1] 赵广华. 基于共享物流的农村电子商务共同配送运作模式[J]. 中国流通经济, 2018, 32(7): 36-44.
ZHAO G H. Research on the joint distribution operation model of rural E-business based on sharing logistics[J]. China Business and Market, 2018, 32(7): 36-44.
- [2] 央视网. 我国县域消费市场活力涌动[EB/OL]. (2025-03-23)[2025-04-31]. https://www.gov.cn/yaowen/shipin/202503/content_7015216.htm.
CCTV.com. The county-level consumer market is buzzing with activity across the country[EB/OL]. (2025-03-23)[2025-04-31]. https://www.gov.cn/yaowen/shipin/202503/content_7015216.htm.
- [3] 韩鑫. 快递下乡 投递幸福[N]. 人民日报, 2024-10-22(7).
HAN X. To the countryside with packages of happiness[N]. People's Daily, 2024-10-22(7).
- [4] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2024-12-09]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Bureau of Statistics. National data[EB/OL]. [2024-12-09]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [5] 马萌. 农村电商物流现状分析与发展研究[J]. 农业经济, 2022(4): 130-132.
MA M. Analysis and development of rural E-commerce logistics[J]. Agricultural Economy, 2022(4): 130-132.
- [6] 王胜, 屈阳, 王琳, 等. 集中连片贫困山区电商扶贫的探索及启示: 以重庆秦巴山区、武陵山区国家级贫困区县为例[J]. 管理世界, 2021, 37(2): 95-106.
WANG S, QU Y, WANG L, et al. Exploration and enlightenment of E-commerce poverty alleviation in contiguous poverty-stricken mountainous areas: taking national-level poverty-stricken districts and counties in Qinling-Daba mountainous areas and Wuling mountainous areas of Chongqing as an example[J]. Journal of Management World, 2021, 37(2): 95-106.
- [7] PERBOLI G, TADEI R, VIGO D. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics[J]. Transportation Science, 2011, 45(3): 364-380.
- [8] BALDACCI R, MINGOZZI A, ROBERTI R, et al. An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem [J]. Operations Research, 2013, 61(2): 298-314.
- [9] 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.
- [10] 徐东洋, 吕闯, 王利娟. 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[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 75-87.
XU D Y, LÜ C, WANG L J. Multi-commodity two-echelon vehicle routing problem with split delivery and soft time windows [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2024, 41(2): 75-87.
- [11] FAZI S, FRANSOO J C, VAN WOENSEL T, et al. A variant of the split vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups for inland container shipping in dry-port based systems [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102057.
- [12] HU Z H, SHEU J B, ZHAO L, et al. A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55: 273-297.
- [13] 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.
- [14] LI J L, XU M, SUN P. Two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints and simultaneous pickup and delivery[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 162: 261-291.
- [15] ZHOU H, QIN H, ZHANG Z Z, et al. Two-echelon vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery[J]. Soft Computing, 2022, 26(7): 3345-3360.

- [16] ZHOU G H, LI D, BIAN J S, et al. Two-echelon time-dependent vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and satellite synchronization[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 167: 106600.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张振. 考虑碳排放的县乡村三级物流网络选址与路径优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- ZHANG Z. Research on the location and route optimization of county and village logistics networks considering carbon emission [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

Operations Research and Cybernetics

Multi-Commodity Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery in Urban-Rural Distribution System

WANG Lijuan¹, ZHAO Ying², CUI Ligang¹, XU Dongyang³

(1. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 2. Accounting Center,

Henan Yellow River Bureau, Zhengzhou 450003; 3. School of Business, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China)

Abstract: In order to promote the two-way flow of “urban industrial products to the countryside” and “rural agricultural products to the city”, based on the investigation and analysis of the operation characteristics of the logistics network of county-township-village under the urban-rural distribution system, a new variety of two-echelon vehicle routing problem is investigated by considering multi-commodity and simultaneous pickup and delivery. A mixed integer programming model with the optimization objective of minimizing the traveling route cost and fixed dispatching cost is established, some valid inequalities are derived to improve the performance of the model, a high-efficiency heuristic is designed to solve large-scale problems. Using the county-village-village logistics data of Jiaozuo city and Hebi city in Henan province to simulate and generate 27 different sized instances to verify the effectiveness and solving performance of the model, valid inequalities and heuristic algorithm. The experimental results show that: 1) The model established is effective, and the optimal solution can be obtained for small-sized instances within 1 hour. 2) The valid inequalities proposed can help the model obtain more optimal solutions or high-quality upper and lower bounds. 3) The heuristic algorithm proposed can quickly obtain near optimal solutions for small sized instances and satisfactory solutions for large sized instances. 4) With the increase of the size of the instances (the number of township logistics centers, the number of village logistics centers, and the number of commodity types), the difficulty of solving the problem increases sharply. 5) If the loading capacity of large/small trucks is expanded by 50% respectively, the transportation cost will be significantly reduced. Thus, the logistics cost can be effectively reduced by optimizing the loading decisions and travel route decisions through reasonable configuration of models. This research will not only expand the existing theory of two-echelon vehicle routing problem, but also provide decision support for urban and rural logistics decision-making, and then help the rural revitalization strategy.

Keywords: urban and rural distribution; two-echelon; vehicle routing; simultaneous pickup and delivery; multi-commodity; mixed integer programming; valid inequalities; heuristics

(责任编辑 黄颖)