



计算机工程与应用
Computer Engineering and Applications
ISSN 1002-8331, CN 11-2127/TP

《计算机工程与应用》网络首发论文

题目: 多物流中心共同配送的车辆路径问题研究
作者: 付朝晖, 刘长石
网络首发日期: 2021-04-19
引用格式: 付朝晖, 刘长石. 多物流中心共同配送的车辆路径问题研究. 计算机工程与应用. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210419.1315.007.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

多物流中心共同配送的车辆路径问题研究

付朝晖¹, 刘长石²

1.长沙民政职业技术学院 软件学院, 长沙 410004

2.湖南工商大学工商管理学院, 长沙 410205

摘要: 研究多物流中心共同配送的车辆路径问题, 首先考虑客户服务关系变化与客户需求的异质性情况, 设计一种共享客户需求、配送车辆与物流中心的共享物流模式; 再综合考虑车辆容量、油耗、碳排放、最长行驶时间、客户需求量与服务时间等因素, 以总成本最小为目标构建多物流中心共同配送的车辆路径规划模型, 并设计一种改进蚁群算法求解; 最后采用多类型算例进行仿真实验, 结果表明共享物流模式能有效避免交叉配送与迂回运输等不合理现象, 降低物流成本、缩短车辆行驶距离、减少车辆碳排放, 促进物流与环境的和谐发展。

关键词: 共同配送; 多物流中心; 车辆路径问题; 改进蚁群算法

文献标志码: A 中图分类号: C93, F252 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2012-0337

Research on the multi-depot vehicle routing problem based on joint distribution mode

FU Zhaohui¹, LIU Changshi²

1. Department of Software, Changsha Social Work College, Changsha 410004, China

2. School of Management, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

Abstract: The multi-depot vehicle routing problem (MDVRP) based on joint distribution mode is studied. First, by considering the change of customer service relationship and the heterogeneity of customer demand, a joint distribution mode is designed to share customer demand, vehicles and logistics centers. Then, a MDVRP model was built by considering vehicle capacity, fuel consumption, carbon emissions, maximum driving time, customer demand and service time. The goal of the MDVRP model is to minimize total distribution cost. An improved ant colony algorithm was designed to solve the problem. Finally, simulation experiments are carried out with multiple types of instances. The results show that the joint distribution mode can effectively avoid unreasonable phenomena such as cross-distribution and roundabout transportation, reduce logistics costs, shorten vehicle driving distance, reduce vehicle carbon emissions, and promote the harmonious development of logistics and environment.

Key words: joint distribution; multi-depot, vehicle routing problem, improved ant colony algorithm

基金项目: 国家社科基金一般项目(No.17BJL091); 湖南省社科基金项目(No.16YBG004, No.18YBA267); 湖南省教育厅项目(No.18A297, No.17C0881); 湖南省社会科学成果评审委员会项目(No.GLX235)。

作者简介: 付朝晖(1972-), 男, 副教授, 研究领域: 智慧物流, E-mail: 44097486@qq.com; 通讯作者: 刘长石(1975-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究领域: 物流与供应链管理、农产品流通, E-mail: liuchangshi964@126.com。

1 引言

随着互联网、电子商务与新零售的发展,“共享经济”逐渐从虚拟资源拓展到实体资源,呈现出全面共享创新的局面。共享经济的发展为我国物流业带来新机遇,2018年《国务院办公厅关于推进电子商务与快递物流协同发展的指导意见》着重指出“鼓励快递企业开展投递服务合作,建设快递末端综合服务场所,开展联收联投”。资源共享逐渐成为业界的创新热点,基于资源共享的共享物流将是未来物流业的发展趋势。根据亿欧网的消息,2020年1月,圆通速递联合德邦快递、百世快递、北京航空航天大学等15家单位研究物流资源共享服务理论与方法,提出共仓、共运、共转与共配的全链协同的共享物流模式。

共享物流模式通过共享物流资源实现物流作业的规模化、生成最优共配路径,提高物流系统效率。共享物流模式中,可以共享的资源主要有客户资源、车辆资源、物流中心等设施资源、人力资源、信息资源以及其它跨界资源。在资源共享的基础上科学规划车辆行驶路线,是实现共享物流的关键,也是企业降低物流成本、提高客户满意度的关键。国内外学者已经在共享物流方面开展系列研究。起初,学者们主要关注基于车辆共享的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。文献[1]针对配送机构的车辆短缺问题引入多配送中心的车辆共享机制,综合考虑客户时间窗与动态需求等因素构建两阶段VRP数学模型。文献[2]针对企业运力不足的情况引入车辆共享机制,构建存在车辆租赁及共享的多中心开环VRP优化模型。文献[3]分析了车辆共享机制在多式联运公共交通网络中的优点。文献[4]构建基于车辆共享机制的开放式多中心车辆路径问题(multi-depot vehicle routing problem, MDVRP)优化模型。文献[5]设计一种电动汽车的车辆共享机制,设计多种定价策略提高车辆的使用率。以上文献能有效降低物流成本,减少车辆行驶距离,为后续研究提供借鉴。

随着研究的深入,大家发现共享多种资源更加有利于提升物流配送效率。学者们基于不同的资源共享视角研究多物流中心的共同配送问题。文献[6]引入物流信息与订单共享机制设计多物流中心联合配送模式,以总成本最小为目标构建半开放式的MDVRP优化模型,设计蚁群算法求解。文献[7]综合考虑联合配送、客户及车辆共享等因素构建集送货一体化的MDVRP数学模型,设计自适应邻域

文化基因算法求解。文献[8]研究联合配送的开放式动态MDVRP,构建“多对多”的网络配送机制,建立考虑车载率的开放式MDVRP数学模型,设计云遗传算法求解。文献[9]研究两级设施的多中心共同配送问题,设计基于蚁群算法与遗传算法的混合算法求解。文献[10]以总配送费用最少为目标构建基于共同配送策略的集送货一体化MDVRP数学模型,设计改进蚁群算法求解。文献[11]针对交通限行条件下城市物流配送问题,提出多阶段跨区域联合配送策略,以总成本最小为目标构建多阶段跨区域联合配送模型,设计自适应遗传算法求解。文献[12]针对农村地区的配送难题,考虑无人机受地形影响小且成本低的特点,提出卡车-无人机联合配送模式,以总成本最低构建VRP优化模型。文献[13]针对冷链物流企业拥有多个配送中心且各中心在各决策阶段运力不均衡的情况,综合考虑碳排放成本和货损成本构建冷链物流联合配送的MDVRP优化模型,设计改进遗传算法求解。文献[14]针对快递企业在低配送密度区域配送时所面临的成本过高或客户流失的难题,设计快递企业在该领域内四级可用的共同配送模式。文献[15]研究基于物流中心共享机制的MDVRP,以车辆行驶成本为目标构建整数规划模型,设计混合遗传算法求解。文献[16]引入物流中心与客户信息共享策略,构建集送货一体化的MDVRP优化模型,设计混合启发式算法求解。文献[17]设计一种共享物流中心与配送车辆的共享物流模式,构建多目标MDVRP优化模型,设计变邻域搜索算法求解。文献[18]研究基于运输资源共享机制的多物流中心绿色VRP,综合考虑时变车速、时间窗等因素构建多目标MDVRP优化模型,设计一种两阶段启发式算法求解。这些文献能有效共享物流系统内的不同资源,降低物流配送成本,缩短车辆行驶时间,提高物流配送效率。

已有成果从不同视角研究了基于共享物流模式的MDVRP,为后续研究奠定良好基础。梳理已有文献,发现如下研究缺口:(1)已有研究大都设计某一种共享客户、共享车辆或者共享物流中心的共享物流模式,较少考虑客户服务关系变化与客户需求的异质性情况。实际上,共享物流模式应考虑客户需求的异质性。例如客户 i 原本由配送中心 a 服务,货物在配送中心 a 内;共享物流模式下,如果客户的服务关系发生变化,将客户 i 分配给配送中心 b 服务,就要先将客户 i 的货物运输到配送中心 b ,再由配

送中心 b 派出车辆服务客户 i 。(2)已有文献大多仅仅考虑物流配送的经济成本,忽略物流配送的环境代价。为加快向绿色经济转型、实现可持续发展,我国政府制定了一系列节能减排行动方案。物流企业正面临如何在运营决策中做好节能减排的问题。鉴于此,本文研究多物流中心共同配送的车辆路径规划模型与优化算法,首先考虑客户服务关系变化与客户需求的异质性情况,设计一种共享客户需求、配送车辆与物流中心的共享物流模式;然后,综合考虑多物流中心、车辆容量、油耗与碳排放等因素,以总成本最小为目标构建共同配送的 MDVRP 数学模型;再根据模型特征设计一种改进蚁群算法求解。以期能为采用共享物流模式的物流快递企业提供决策参考。

2 问题描述

某区域内有多个物流快递企业,各自拥有物流中心与多个客户。各客户的需求量均小于车辆容量,每个客户只能由一辆车服务一次,车载量不能超过车辆容量。为明确本文适用范围,提出如下假设:(1)车辆为同一类型,行驶速度固定;(2)采用共享物流模式,车辆可以配送区域内的任一客户,完成任务后可以停靠在任一物流中心;(3)物流中心没有容量限制,当客户服务关系变化时,这些客户的

货物应从原物流中心集中运输到新分配的物流中心;(4)各客户需要一定的服务时间;(5)车辆具有固定使用费用,根据使用时间产生使用费用,在行驶过程中产生油耗与碳排放费用;(6)车辆具有最长行驶时间限制。决策问题:在共享物流模式下如何合理规划车辆路径,满足客户需求并使得总配送成本最小?

3 数学模型

3.1 共享物流模式设计

为维持客户服务关系,物流快递企业通常采用独立配送模式,企业之间不共享物流资源,各企业独立配送自己的客户,导致区域内长期存在长距离配送与交叉配送等不合理现象(图 1a)。为合理规划车辆路径,本文设计一种共享客户需求、配送车辆与物流中心的共享物流模式(图 1b)。即车辆可以配送区域内的任一客户,完成任务后可以停靠在任一物流中心;当客户原有的服务关系变化时,这些客户的货物从原物流中心集中运输到新分配的物流中心。共享物流模式给车辆路径规划提供更大的组合优化空间,能有效缩短车辆行驶距离、减少车辆使用数量、降低物流成本、避免交叉配送与迂回运输等不合理现象。

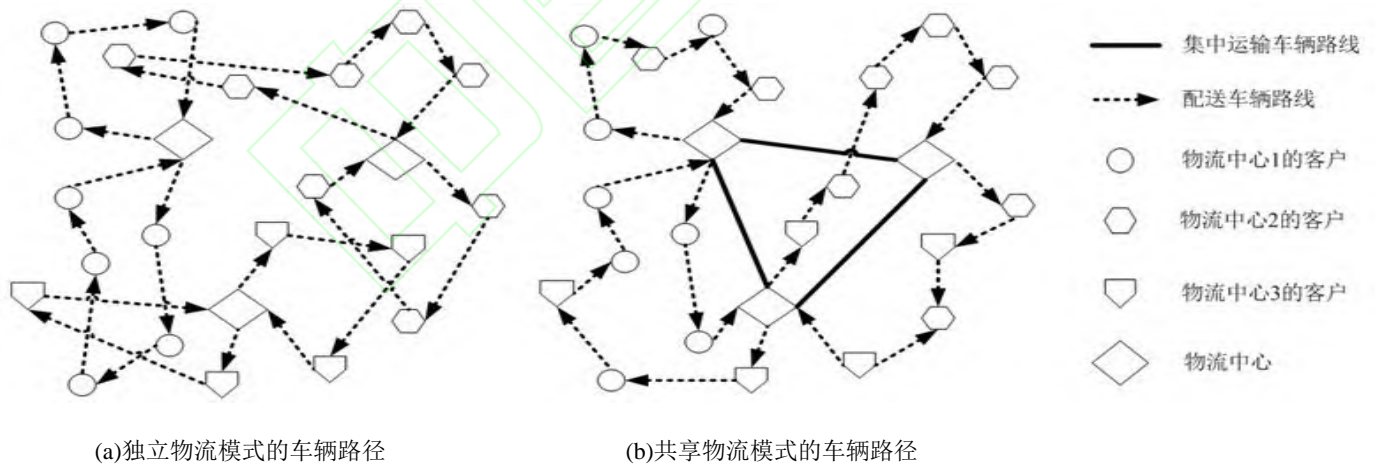


图 1 不同物流模式的车辆路径规划

Fig.1 vehicle routes planning based on different logistics mode

3.2 模型构建

3.2.1 符号与变量

符号: C 为客户集合; D 为物流中心集合; N 为区域内的所有节点集合, $N=C \cup D$; K 为车辆集合; d_i 为

客户 i 的需求量; Q 为车辆容量; c_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的距离; s 为车辆的行驶速度; t_{ijk} 为车辆 k 从节点 i 到节点 j 的行驶时间, $t_{ijk} = c_{ij} / s$; T_{ik} 为车辆 k 到达节点 i 的时间; g_i 为客户 i 的服务时间; T 为车辆的最长行驶时间;

f_{ijk} 为车辆 k 在路段 (i, j) 上行驶时的油耗率; E_{ijk} 为车辆 k 在路段 (i, j) 上行驶时的碳排放率; $A_{i\gamma}$ 为客户 i 的原有服务关系属于物流中心 γ ; $Y_{\gamma\epsilon}$ 为从物流中心 γ 集中运输到物流中心 ϵ 的货物数量; p_1 为每辆车的固定费用 (元/辆); p_2 为车辆使用的单位时间费用 (元/分钟); p_3 为单位油耗费用 (元/升); p_4 为单位碳排放费用 (元/公斤)。

决策变量: h_k 为 0-1 变量, 当车辆 k 被使用时值为 1, 否则为 0; x_{ijk} 为 0-1 变量, 当车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j 时值为 1, 否则为 0; z_{ik} 为 0-1 变量, 当客户 i 由车辆 k 服务时值为 1, 否则为 0; $y_{i\gamma\epsilon}$ 为 0-1 变量, 当客户 i 的服务关系从物流中心 γ 转变为物流中心 ϵ 时值为 1, 否则为 0; $X_{\gamma\epsilon k}$ 为 0-1 变量, 当车辆 k 从物流中心 γ 集中运输货物到物流中心 ϵ 时值为 1, 否则为 0。

3.2.2 车辆油耗与碳排放量计算

由于 MEET 模型^[19]适应范围广, 本文采用 MEET 模型计算车辆碳排放量与油耗量, 具体如下:

车辆 k 以速度 s 在路段 (i, j) 上行驶单位距离产生的碳排放率 (公斤/公里) 为

$$E_{ijk} = e \times G_{ij} \times \psi_{ijk} / 1000 \quad (1)$$

其中, $e = (110 + 0.000375s^3 + \frac{8702}{s})$, 表示车辆 k 空载行驶在坡度为 0 的路段 (i, j) 上的碳排放率 (克/公里)。 G_{ij} 为路段的坡度修正因子。 ψ_{ijk} 为车辆 k 的载重修正因子。

$$G_{ij} = \exp((0.0059s^2 - 0.0775s + 11.936)\varpi_{ij}) \quad (2)$$

其中, ϖ_{ij} 为路段 (i, j) 的坡度 (%)。

$$\begin{aligned} \psi_{ijk} = & 0.27\mu_{ijk} + 1 + 0.0614s\mu_{ijk} - 0.0011s^3\mu_{ijk} \\ & - 0.00235\mu_{ijk}s - \frac{1.33\mu_{ijk}}{s} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, μ_{ijk} 为车辆 k 行驶在路段 (i, j) 上的实时载重与容量 Q 的比值, $\mu_{ijk} \in [0, 1]$ 。

根据文献[20], 1 升汽油产生 2.3 公斤碳排放量。车

辆油耗率为

$$f_{ijk} = E_{ijk} / 2.3 \quad (4)$$

3.2.3 基于共享物流模式的 MDVRP 数学模型

基于共享物流模式的 MDVRP 的总配送成本包括车辆使用成本、物流中心之间集中运输车辆的行驶时间成本、配送车辆的行驶时间成本与服务时间成本、车辆油耗费用与碳排放费用。

车辆使用成本 C_1 定义如下:

$$C_1 = p_1 \sum_{k \in K} h_k \quad (5)$$

物流中心之间集中运输车辆的行驶时间成本 C_2 定义如下:

$$C_2 = p_2 \sum_{\gamma \in D} \sum_{\epsilon \in D} \sum_{k \in K} X_{\gamma\epsilon k} t_{\gamma\epsilon k} \quad (6)$$

配送车辆的行驶时间与服务时间成本 C_3 定义如下:

$$C_3 = p_2 \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} t_{ijk} + \sum_{i \in C} \sum_{k \in K} g_i z_{ik} \right) \quad (7)$$

车辆油耗费用与碳排放费用 C_4 定义如下:

$$C_4 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} (p_3 f_{ijk} + p_4 E_{ijk}) \quad (8)$$

根据以上分析, 构建基于共享物流模式的 MDVRP 数学模型如下:

$$\min C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K} z_{ik} = 1, \forall i \in C \quad (10)$$

$$\sum_{j \in C} x_{ijk} \leq 1, \forall i \in D, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = \sum_{j \in N} x_{ijk}, \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} d_j \leq Q, \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in D} x_{ijk} = 0, \forall i \neq j, k \in K \quad (14)$$

$$Y_{\gamma\epsilon} = \sum_{i \in C} y_{i\gamma\epsilon} d_i, \forall \gamma \in D, \epsilon \in D \quad (15)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in C} x_{ijk} = \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} x_{ijk}, \forall k \in K \quad (16)$$

$$T_{jk} = T_{ik} + t_{ijk} + g_i, \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (17)$$

$$T_{ik} \leq T, \forall i \in N, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ijk} \leq |S| - 1, \forall S \subset N, k \in K \quad (19)$$

$$\begin{aligned} h_k &\in \{0,1\}, x_{ijk} \in \{0,1\}, z_{ik} \in \{0,1\}, \\ y_{i\gamma\epsilon} &\in \{0,1\}, X_{\gamma\epsilon k} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (20)$$

目标函数式(9)表示最小化总配送成本。约束式(10)表示每个客户能且只能由一辆车服务一次。约束式(11)表示每辆车至多使用一次。约束式(12)表示车辆进入某一节点,必须从该节点离开。约束式(13)表示车辆容量约束。约束式(14)表示不允许配送车辆从物流中心直接行驶到另外一个物流中心。约束式(15)表示物流中心之间的运输量等于服务关系改变的客户需求量之和。约束式(16)表示车辆完成任务后可以停靠在任一物流中心。约束式(17)表示车辆从上一个节点到达下一个节点的时间计算方法。约束式(18)表示车辆最大行驶时间限制。约束式(19)表示消除子回路。约束式(20)表示变量取值约束。

4 求解算法

VRP 属于 NP-hard 问题,难以求得精确解,通常采用启发式算法求得满意解。基于共享物流模式的 MDVRP 比 VRP 更加复杂,求解更困难。蚁群算法属于启发式算法,具有信息正反馈、分布计算和启发式搜索等优点,能有效解决复杂组合优化问题,已被应用到多个领域。因此,本文根据基于共享物流模式的 MDVRP 模型特点,设计一种改进蚁群算法求解,具体思路如下:(1)将共享物流模式思想嵌入改进蚁群算法;(2)针对基本蚁群算法容易陷入局部最优的特性,设计一种确定性选择和随机选择相结合的转移策略,以增加种群的多样性、扩大蚂蚁的搜索范围,增强蚁群算法的全局性搜索能力;(3)针对基本蚁群算法收敛速度慢的缺点,引入一种自适应启发式因子与精英蚂蚁策略,提高蚁群算法的运行效率。

改进蚁群算法的具体步骤如下:

步骤一:初始化。输入物流中心坐标、客户坐标、需求量、车辆容量、蚂蚁数量 M 等数据,令 $Maxiter$ 为算法最大运行次数、 $currenti$ 为当前迭代次数、 $bestcost$ 为最优物流成本、 $itercost$ 为当前迭代的最优总成本, $currentiter=1$, $bestcost=+\infty$ 。

步骤二:构造可行解。Step 1: 派出蚂蚁 m 。Step 2: 令蚂蚁 m 随机选择一个物流中心,当前使用车辆 k 的初始装载量 $load_k = Q$ 。Step 3: 设计确定性选择和随机选择相结合的转移策略,计算出蚂蚁 m 从当前节点 i 转移到下一个节点 j

$$j = \begin{cases} \arg \max \{ [\tau_{is}]^\alpha [\mathcal{Q}_{is}]^\beta \} \text{ for } s \in allowed_m, \text{ if } \xi \leq \xi_0 \\ J, \text{ else} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $allowed_m$ 为蚂蚁 m 的未访问客户集合; ξ 是随机数, $0 < \xi < 1$; ξ_0 是控制变量, $0 \leq \xi_0 \leq 1$; J 由轮盘赌规则计算得出

$$P_{ij}^m = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\mathcal{Q}_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in allowed_m} ([\tau_{is}]^\alpha [\mathcal{Q}_{is}]^\beta)}, j \in allowed_m \\ 0, \text{ else} \end{cases} \quad (22)$$

其中, τ_{ij} 是信息素启发因子; \mathcal{Q}_{ij} 能见度启发因子,

$\mathcal{Q}_{ij} = 1/F_{ij}$; α 、 β 分别为启发因子的重要性。Step 4: 选

择出当前最优的节点 j , 计算车辆 k 从当前节点 i 行驶到节点 j 的时间 T_{jk} , 判断节点 j 是否满足车辆容量限制与最大行驶时间限制, 如果 $d_j \leq load_k^m$ 且 $T_{jk} \leq T$,

$load_k^m = load_k^m - d_j$, $tabu_{mk}^{i+1} = j$, $j \notin allowed_m$, 判

断节点 j 是否发生服务关系改变并计算物流中心之间的运输量; 否则, 车辆 k 返回最近的物流中心, $k=k+1$,

转 Step 2。Step 5: 如果 $allowed_m \neq \emptyset$, 转 Step 3; 否则,

$m = m + 1$, 如果 $m \leq M$, 转 Step 1。

步骤三：当前迭代的结果计算。Step 1：计算每只蚂蚁行驶路径的总配送成本。Step 2：计算当前迭代的 $iter\ cost$ ，如果 $i\ tc\ < rs\ t$ ， $best\ cost = iter\ cost$ 。

步骤四：自适应启发式因子。参考文献[23]的方法，令信息素启发式因子 $\alpha = 1 + 2(iter / Maxiter)$ ，期望启发式因子 $\beta = 3 - 2(iter / Maxiter)$ 。

步骤五：信息素更新。采用普通蚂蚁与精英蚂蚁相结合的信息素更新策略。普通蚂蚁信息素更新规则如下：

$$\tau_{ij}^{iter+1} = \tau_{ij}^{iter} \cdot (1 - \rho) + \sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^m \quad (23)$$

$$\Delta\tau_{ij}^m = \begin{cases} X / cost_m, & \text{蚂蚁 } m \text{ 经过路段}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (24)$$

其中， ρ 为信息素挥发性， $0 \leq \rho < 1$ ； $\Delta\tau_{ij}^m$ 为信息素增量； X 为常数； $cost_m$ 为蚂蚁 m 的总成本。

令当前迭代中 $iter\ cost$ 最优的蚂蚁为精英蚂蚁，在算法中后期采用精英蚂蚁策略更新信息素。如果 $currentiter \geq Maxiter * 0.6$ ，精英蚂蚁信息素更新规则如下：

$$\tau_{ij}^{iter+1} = \tau_{ij}^{iter} \cdot (1 - \rho) + w_e \Delta\tau_{ij} \quad (25)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} X / cost_b, & \text{精英蚂蚁 } b \text{ 经过路段}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (26)$$

其中， w_e 为精英蚂蚁的信息素更新权重。

步骤六：算法结束规则。如果 $currentiter > Maxiter$ ，算法结束；否则 $currentiter = currentiter + 1$ ，转步骤二。

5 实验分析

5.1 实验设置

由于没有基于共享物流模式的 MDVRP 标准测试数

据库，同时考虑到区域内可能存在不同数量的物流中心、不同类型车辆、客户坐标、需求量与服务时间，采用 MDVRP 算例 [21]

(<https://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/multiple-depot-vrp-instances/>) 的物流中心、车辆容量、最长行驶时间、客户坐标、需求量与服务时间等数据作为本文算例的基本数据。MDVRP 算例分为 P 类型与 PR 类型，P 类型中大部分算例的车辆容量较小，部分算例没有车辆行驶时间限制；PR 类型算例的车辆容量较大，都有车辆行驶时间限制。本文采用算例的物流中心数量最少为 2 个、最多为 6 个，客户数量最少为 48 个、最多为 288 个，车辆容量最小为 60 单位、最大为 200 单位。

另外，为满足本文测试需求，补充如下数据：(1) 客户的服务关系数据，即根据各算例的物流中心数量，将客户按照序号平均分配给各物流中心。(2) 令 $s = 60$ 公里/小时、 $p_1 = 200$ 元/辆、 $p_2 = 0.5$ 元/分钟、 $p_3 = 7$ 元/升、 $p_4 = 0.0528$ 元/公斤。

算法程序采用 Matlab R2016a 开发，运行环境为 Windows 10、64 位操作系统，CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @3.40 GHz 3.41 GHz，内存为 8GB。算法参数设置如下： $Maxiter = 600$ 、 $M = 30$ 、 $\xi_0 = 0.05$ 、 $\rho = 0.2$ 、 $X = 20$ 、 $w_e = 2$ 。

5.2 实验结果分析

5.2.1 基于共享物流模式的车辆路径规划结果分析

采用 P 类型与 PR 类型的多个不同算例进行实验，计算结果如表 1 所示。表 1 中，IN 表示算例名称，ND 表示物流中心数量，NC 表示客户数量，VT 表示车辆最大行驶时间，VQ 表示车辆容量，TC 表示总配送成本(单位：元)，TD 表示总行驶距离(单位：千米)，VN 表示车辆使用数量(单位：辆)，FEC 表示油耗与碳排放费用(单位：元)，CO₂ 表示碳排放量(单位：公斤)，RT 表示算法运行时间(单位：秒)。

表 1 基于共享物流模式的车辆路径规划结果

Table 1 Vehicle routes planning based on joint distribution mode

IN	ND	NC	VT	VQ	TC	TD	VN	FEC	CO ₂	RT
P01	4	50	∞	80	4137	1152.4	12	1360.8	439.48	95.25
P02	4	50	∞	160	2600.1	769.43	7	1015.4	327.95	86.72
P03	5	75	∞	140	4627.8	1404.4	12	1725.6	557.32	143.83
P04	2	100	∞	100	5604	1477.7	17	1665.2	537.8	203.1
P05	2	100	∞	200	3550.9	1021.9	10	1240	400.46	187.59
P06	3	100	∞	100	5865	1554.3	18	1687.9	545.12	246.48
PR01	4	48	500	200	3360.1	1172.9	6	1525.7	492.74	81.67
PR02	4	96	480	195	5353.5	1777.5	9	2259.2	729.65	180.28
PR03	4	144	460	190	8394.4	2870.8	14	3697	1194	364.69
平均	-	-	-	-	4832.5	1466.81	11.67	1797.42	580.5	176.62

根据表 1 的计算结果可知：(1)根据 RT 的值，算法最小运行时间为 81.67 秒（4 个物流中心与 50 个客户）、最大运行时间为 364.69 秒（4 个物流中心与 144 个客户），平均运行时间为 176.62 秒。然而，Bezerra 等(2018)设计的变邻域搜索算法求解 MDVRP 算例（6 个物流中心与 240 个客户）的运行时间为 1850.4 秒^[22]。说明本文设计的改进蚁群算法能在较短时间内求解不同类型算例，具有可行性与有效性。(2)综合 TC、TD、VN 与 CO₂ 的值来看，虽然算例 P01 与 P02 的物流中心数量、物流中心坐标、车辆最大行驶时间、客户坐标与需求量完全一致，仅仅算例 P02 的车辆容量为算例 P01 的车辆容量的 2 倍，但是两个算例求解 TC、TD、VN 与 CO₂ 的值并没有成比例增加；算例 P04 与 P05 的物流中心数量、车辆最大行驶时间、客户坐标与需求量完全一致，仅仅物流中心坐标不同、算例 P05 的车辆容量为算例 P04 的车辆容量的 2 倍，同样两个算例求解 TC、TD、VN 与 CO₂ 的值并没有成比例增加。说明本文算法能根据实际情况科学规划配送车辆行驶路线，有效降低物流成本、缩短车辆行驶距离、减少碳排放。(3)根据 TC 与 FEC 的平均值，油耗与碳排放费用占总配送成本的 37.19%。说明物流配送需要消耗一定的能源，配送车辆路径规划不仅要考量经济成本，还要考虑环境成

本。(4)根据 CO₂ 的值，所有算例的平均碳排放量为 580.5 公斤，最低为 327.95 公斤，最高为 1194 公斤。说明物流配送会产生一定数量的碳排放，对环境造成一定污染，物流企业应尽可能采用新型清洁能源车辆、科学规划车辆路径，促进物流与环境的和谐发展。

共享物流模式下算例 P06 的车辆路径规划结果如图 2 所示。图 2(a)中的黑色四方形表示物流中心，米字型点表示客户，节点之间的连线表示车辆行驶路径。从图 2(a)可以看出，车辆路径比较有规律，同一区域内的客户都由同一车辆配送；各物流中心都服务近距离的客户，实现了客户共享；有一些车辆完成任务后回到了别的物流中心，实现了车辆共享与物流中心共享；物流中心之间存在集中运输的车辆行驶路径，说明本文设计的共享物流模式考虑了客户服务关系变化与客户需求的异质性情况，客户服务关系变化后，这些客户的货物从原物流中心集中运输到新分配的物流中心。图 2(b)为目标函数值均值曲线，从 2(b)可知目标函数值呈不断下降趋势，大约在 400 代以后趋向收敛。说明确定性选择和随机选择相结合的转移策略在进化初期能有效增加种群的多样性、扩大蚂蚁的搜索范围，增强蚁群算法的全局性搜索能力；自适应启发式因子与精英蚂蚁策略在蚁群算法进化后期能有效加快收敛速度。

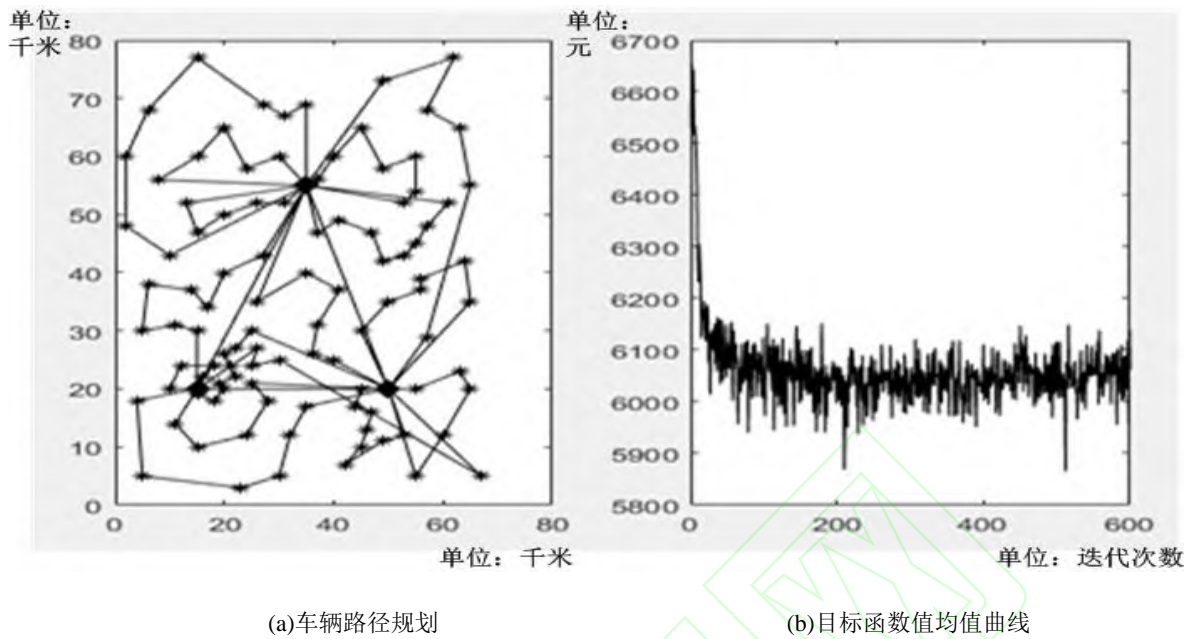


图2 算例 P06 基于共享物流模式的车辆路径规划

Fig.2 Vehicle routes planning based on joint distribution mode of instance P06

5.2.2 不同物流模式的车辆路径规划结果分析

为验证共享物流模式的合理性与有效性, 本文还使用 Matlab 编写基于独立物流模式的改进蚁群算法程序, 采用算例 P07、P08、P09、P10、P11、PR04、PR05 与 PR06 进行两种物流模式的车辆路径规划实验, 实验结果如表 2 所示。表 2 中的符号含义同表 1。

从表 2 的计算结果可知: (1)根据 TC 的值, 共享物流模式求解各算例的总配送成本都要明显优于独立物流模式求得值, 最低节约 7.29%, 最高节约 19.53%, 平均节约 13.27%。说明共享物流模式共享客户、配送车辆与物

流中心, 能给车辆路径规划提供更大的优化空间, 有效节约物流成本。(2)由 TD 的值可知, 共享物流模式求解各算例的车辆行驶距离都要明显优于独立物流模式求得值, 最低节约 12.57%, 最高节约 29.02%, 平均节约 18.47%。说明共享物流模式能有效缩短车辆行驶距离。(3)根据 CO_2 的值, 共享物流模式求解各算例的碳排放量都要显著优于独立物流模式求得值, 最低节约 23.66%, 最高节约 34.03%, 平均节约 29.22%。说明共享物流模式能有效降低车辆碳排放, 减少环境污染。因此, 物流企业应尽可能采用共享物流模式, 建设物流末端综合服务场所, 开展联收联送。

表2 不同物流模式的车辆路径规划结果

Table 2 Vehicle routes planning based on different logistics modes

IN	ND	NC	VT	VQ	共享物流模式			独立物流模式		
					TC	TD	CO_2	TC	TD	CO_2
P07	4	100	∞	100	5860.3	1472.4	556.82	6321.2	1725.5	729.39
P08	2	249	310	500	16063	6330.5	2227.9	18262	7241	3049.5
P09	3	249	310	500	18258	7590.5	2475	21156	8848.7	3724.2
P10	4	249	310	500	19586	7919.7	2721.5	21767	9191.3	3866.3
P11	5	249	310	500	20877	8482.7	3047.4	22843	9681.4	4070

PR04	4	192	440	185	10091	3194.5	1320.3	12499	4500.7	1895
PR05	4	240	420	180	11966	3520.6	1378.7	14204	4703.8	1983.8
PR06	4	288	400	175	14470	4565.3	1713.4	17981	6161	2597.4
平均	-	-	-	-	14646.41	5384.53	1930.13	16879.15	6506.67	2739.45

算例 P08 基于共享物流模式的车辆路径规划如图 3(a) 所示, 基于独立物流模式的车辆路径规划如图 3(b) 所示。从图 3(a) 可以看出, 基于共享物流模式车辆行驶路径比较有规律, 物流中心都服务距离较近的客户, 车辆路径鲜少有交叉与迂回等现象。图 3(b) 中, 星型客户为物流中心 1 的客户, 圈型客户为物流中心 2 的客户。从图 3(b) 可以看

出, 独立物流模式的车辆路径存在比较严重的交叉与迂回等现象。因此, 共享物流模式给车辆路径规划提供了更大的组合优化空间, 能有效避免交叉配送与迂回运输等不合理现象, 缩短车辆行驶距离、减少车辆使用数量、降低物流成本。

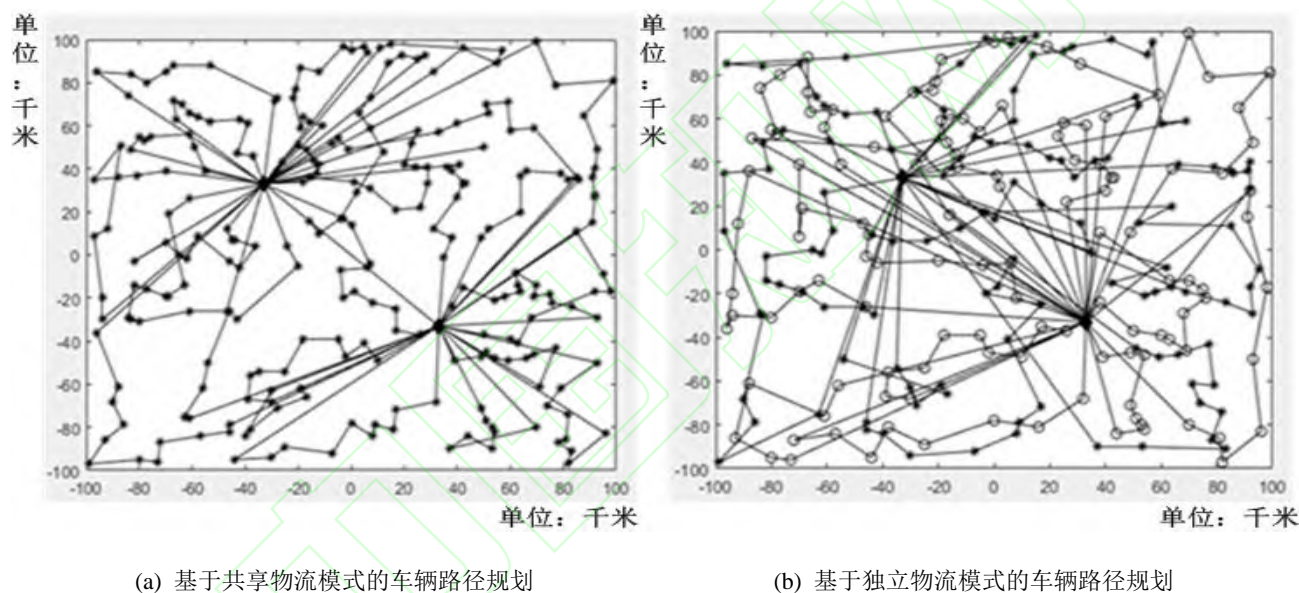


图 3 不同物流模式下算例 P08 的车辆路径规划

Fig.3 Vehicle routes planning based on different logistics modes of instance P08

5.2.3 不同算法的车辆路径规划结果分析

为验证改进蚁群算法的合理性与有效性, 使用 Matlab 编写求解本文 MDVRP 数学模型的遗传算法程序与经典蚁群算法程序, 采用算例 P14、P15、P16、P17、PR07、PR08、PR09 与 PR10 进行三种算法的车辆路径规划实验。设定遗传算法的种群规模为 100、迭代次数为 1000、变异概率为 0.1、交叉概率为 0.9, 其余变量与参数的值和改进蚁群算法一样。经典蚁群算法只有确定性选择转移策略、没有自适应启发式因子与精英蚂蚁策略, 其余变量与参数的值和改进蚁群算法一样。实验结果如表 3 所示。表 3 中的符号含义同表 1。

由表 3 的计算结果可知: (1) 根据 TC 的值, 改进蚁群算法求得每个算例的总配送成本在三种算法中最优, 明显优于遗传算法求得的解, 最少节约 9.61%, 最多节约 61.67%, 平均节约 40.39%; 略优于经典蚁群算法求得的解, 最少节约 0.28%, 最多节约 4.21%, 平均节约 1.51%。(2) 根据 TD 的值, 改进蚁群算法求得每个算例的车辆行驶距离在三种算法中最优, 明显优于遗传算法求得的解, 最少节约 58.39%, 最多节约 78.13%, 平均节约 73.08%; 稍微优于经典蚁群算法求得的解, 最少节约 0.23%, 最多节约 5.89%, 平均节约 2.27%。(3) 根据 CO₂ 的值, 改进蚁群算法求得每个算例的碳排放量在三种算法中最优, 明显优于遗传算法求得的解, 最少节约 53.58%, 最多节约 76.89%,

平均节约 67.28%；稍微优于经典蚁群算法求得的解，最少节约 0.45%，最多节约 4.2%，平均节约 1.96%。以上结果说明改进蚁群算法能合理规划车辆路径，有效降低配送

成本，缩短车辆行驶距离，减少环境污染，具有可行性、合理性与有效性。

表 3 不同算法的车辆路径规划结果

Table 3 Vehicle routes planning based on different algorithms

IN	ND	NC	VT	VQ	改进蚁群算法			遗传算法			经典蚁群算法		
					TC	TD	CO ₂	TC	TD	CO ₂	TC	TD	CO ₂
P14	2	80	180	60	4433.5	1459.3	614.87	9146.53	5510.77	1655.27	4448.7	1469.2	618.18
P15	4	160	∞	60	10256	3885.8	1586.7	10511.82	15975.17	6866.77	10285	3901.2	1593.8
P16	4	160	200	60	10229	3566.7	1500.4	26692.2	16314.53	4065.33	10514	3729.3	1566.2
P17	4	160	180	60	10678	3704	1558.7	27768.91	16413.74	4168.94	11148	3936.1	1608.4
PR07	6	72	500	200	4991.3	1859.8	782.36	5522.09	4470.57	1685.49	5025.3	1877.2	790.53
PR08	6	144	475	190	8745	2911	1225.3	11434.02	9423.14	3654.74	8893.2	2988.1	1260.7
PR09	6	216	450	180	12580	4202.1	1751.8	16698.53	13045.36	5057.06	12733	4297.7	1785.7
PR10	6	288	425	170	16458	5145.7	2095.9	23713.49	18169.53	6818.61	16521	5157.5	2114.3
平均	-	-	-	-	9796.35	3341.8	1389.5	16435.95	12415.35	4246.53	9946.03	3419.54	1417.23

6 结论

共享物流将是物流业的发展趋势，在资源共享的基础上科学规划车辆行驶路线，是实现共享物流的关键，也是企业降低物流成本、提高客户满意度的关键。本文首先设计一种共享客户需求、配送车辆与物流中心的共享物流模式，再综合考虑车辆最大行驶时间、容量、油耗、碳排放、客户需求等因素构建共同配送的 MDVRP 数学模型，并根据模型特征设计一种改进蚁群算法求解；仿真实验表明：(1)物流配送需要消耗一定的能源、产生一定数量的碳排放，配送车辆路径规划不仅要考量经济成本，还要考虑环境成本。物流企业应尽可能采用新型清洁能源车辆、科学规划车辆路径，促进物流与环境的和谐发展。(2)共享物流模式能更合理规划车辆路径，有效避免交叉配送与迂回运输等不合理现象，降低配送成本，缩短车辆行驶距离，减少环境污染，具有可行性、合理性与有效性。物流企业应尽可能采用共享物流模式，建设物流末端综合服务场所，开展联收联送。

参考文献:

- [1] 王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 张景玲. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 1056-1063.
Wang WL, Huang HP, Zhao YW, Zhang JL. Dynamic customer demand VRP with soft time windows based on vehicle sharing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(5): 1056-1063.
- [2] 刘家利, 马祖军. 存在车辆租赁及共享且有时间窗的多配送中心开环 VRP[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 666-675.
Liu JL, Ma ZJ. Multi-depot open vehicle routing problem with time windows based on vehicle leasing and sharing[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(3): 666-675.
- [3] Friedrich M, Noekel K. Modeling intermodal networks with public transport and vehicle sharing systems[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2017, 6(3): 271-288.
- [4] Wang Y, Assogba K, Fan J X, et al. Multi-depot green vehicle routing problem with shared transportation resource: Integration of time-dependent speed and piecewise penalty cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 12-29.
- [5] Jin F L, Yao E J, An K. Analysis of the potential demand for battery electric vehicle sharing: Mode share and spatiotemporal

- distribution[J]. Journal of Transport Geography, 2020, 82: 102630.
- [6] 范厚明,杨翔,李荡,李阳,刘鹏程,吴嘉鑫. 基于生鲜品多中心联合配送的半开放式车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(1):256-266.
- Fan HM, Yang X, Li D, Li Y, Liu PC, Wu JX. Half-open multi-depot vehicle routing problem based on joint distribution mode of fresh food[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(1):256-266.
- [7] 范厚明,刘鹏程,刘浩,侯登凯. 多中心联合配送模式下集货需求随机的 VRPSDP 问题[J]. 自动化学报, 2019,45(x):1-15.
- Fan HM, Liu PC, Liu H, Hou DK. The multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deterministic delivery and stochastic pickup based on joint distribution[J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2019,45(x):1-15.
- [8] 葛显龙,王旭,邓蕾. 基于联合配送的开放式动态车辆路径问题及算法研究[J]. 管理工程学报, 2013,27(3):60-68.
- Ge XL, Wang X, Deng L. Research on open and dynamic vehicle routing problems based on joint distribution[J]. Journal of Industrial Engineering/ Engineering Management, 2013, 27(3): 60-68.
- [9] Wang Y, Ma X L, Liu M W, et al. Cooperation and profit allocation in two-echelon logistics joint distribution network optimization[J]. Applied Soft Computing, 2017, 56: 143-157.
- [10] 盛虎宜,刘长石,鲁若愚. 基于共同配送策略的农村电商集送货一体化车辆路径问题[J]. 系统工程, 2019,37(3):98-104.
- Sheng HY, Liu CS, Lu RY. Vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery in rural electronic commerce based on joint distribution strategy[J]. Systems Engineering, 2019,37(3):98-104.
- [11] 葛显龙,黄钰,谭柏川. 城市物流跨区域联合配送模型与算法[J]. 控制与决策, 2017,32(5):789-796.
- Ge XL, Huang Y, Tan BC. Multi-stage combined city logistics distribution problem considering the traffic restrictions[J]. Control and Decision, 2017,32(5):789-796.
- [12] 郭秀萍,胡运霞. 卡车与无人机联合配送模式下物流调度的优化研究[J]. 工业工程与管理, 2020-05-06(网络首发)
- Guo XP, Hu YX. Research on logistics scheduling optimization problem with truck-drone joint delivery[J]. Industrial Engineering and Management, 2020-05-06
- Bao CL, Zhang SB. Route optimization of cold chain logistics in joint distribution: with consideration of carbon emission[J]. Industrial Engineering and Management, 2018,23(5):95-101.
- [14] 许茂增,周翔,崔利刚,刘永,余国印. 低配送密度区域快递共同配送模式及利益分配[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 181-190.
- Xu MZ, Zhou X, Cui LG, Liu Y, Yu GY. Research on joint distribution mode and profit allocation of express enterprise in low distribution density area[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020,26(1):181-190.
- [15] Li J, Li Y, Pardalos PM. Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2016,31:515-532.
- [16] Wang Y, Zhang J, Assogba K, Liu Y, Xu MZ, Wang YH. Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup[J]. Knowledge-Based Systems, 2018,160:296-310.
- [17] Zhang WY, Chen ZX, Zhang S, Wang WR, Yang SQ, Cai YS. Composite multi-objective optimization on a new collaborative vehicle routing problem with shared carriers and depots[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,274:122593.
- [18] Wang Y, Assogba K, Fan JX, Xu MZ, Liu Y, Wang HZ. Multi-depot green vehicle routing problem with shard transportation resource: Integration of time-dependent speed and piecewise penalty cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,232:12-29.
- [19] Hickman J, Hassel D, Joumard R, Samaras Z, Sorenson S. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption[R]. Technical Report, Transport Research Laboratory, 1999.
- [20] Toro EM, Franco JF, Echeverri MG, Guimarães FG. A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact[J]. Computer & Industrial Engineering, 2017,110(8):114-125.
- [21] Oliveira FB, Enayatifar R, Sadaei HJ, Guimarães FG, Potvin J. A cooperative coevolutionary algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem[J]. Expert Systems with Applications, 2016,43:117-130.
- [22] Bezerra SN, de Souza SR, Souza MJF. A GVNS algorithm for solving the multi-depot vehicle routing problem[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2018,66:167-174.
- [23] 李琳,刘士新,唐加福. 改进的蚁群算法求解带时间窗的车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2010,25(9):1379-1383.
- Li L, Liu SX, Tang JF. Improved ant colony algorithm for solving vehicle routing problem with time windows[J]. Control and Decision, 2010,25(9):1379-1383.