doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.05.012

运输模式对同时送取货绿色车辆路径问题中碳排放的影响

蒋　丹[1],陆俐君[2]

(1.无锡太湖学院,江苏 无锡 214064)
(2.南京大学商学院,江苏 南京 210093)

[摘要]　为探究不同运输模式中各种因素对总成本和碳排放的影响,提出了同时配送和取货的绿色车辆路径规划问题模型. 该模型旨在确定环保路线,同时通过整合燃油消耗和碳排放等分项目的近似计算使总体成本最小化. 采用了一种两阶段技术来求解该问题. 对 Solomon 基准数据集进行重构,模型和算法的有效性与可行性已通过数值实验得到验证. 数据分析显示:在不同运输模式下,车辆速度、负载率、行驶距离和路线数量等因素对燃油消耗和碳排放的影响各不相同;使用异构车队能够通过减少所需运输车辆和路线的数量来增强集群的灵活性,从而大幅降低燃料消耗、碳排放以及整体运输成本;虽然通过运输模式选择可以使得碳排放大幅下降,但是,由于车辆数量的快速增加,还必须加强行政管理中的节能减排方案和实施措施的施行.

[关键词]　多种运输模式,能耗与碳排放,绿色车辆路径问题,同时配送与取货
[中图分类号]TP301.6;F252　[文献标志码]A　[文章编号]1001-4616(2026)05-0110-09

Impacts of Transportation Modes on Carbon Emissions in the Green Vehicle Routing Problem Synchronously Deliveries and Pickups

Jiang Dan[1],Lu Lijun[2]

(1.University Office,Wuxi Taihu University,Wuxi 214064,China)
(2.Business School,Nanjing University,Nanjing 210093,China)

Abstract:To explore the impact of various factors in different transportation modes on total cost and carbon emissions,a green vehicle routing problem model synchronously deliveries and pickups was proposed. This model aims to determine an environmentally friendly route while minimizing the overall cost by integrating approximate calculations of fuel consumption and carbon emissions. To solve this problem,a two-stage approach has been developed. Reconstruction and numerical experiments are conducted on the Solomon benchmark dataset. The experiments indicate that the proposed model and algorithms are effective and feasible. Data analysis shows that under different transportation modes,factors such as vehicle speed,load rate,driving distance and the number of routes have different impacts on fuel consumption and carbon emissions;The use of heterogeneous fleets can enhance the flexibility of the cluster by reducing the number of required transport vehicles and routes,thereby significantly lowering fuel consumption,carbon emissions,and overall transportation costs;Although transport mode selection can significantly reduce carbon emissions,due to the rapid increase amount of vehicles,it is still necessary to strengthen energy conservation and emission reduction plans and implementation measures in administrative management.

Key words:multiple transportation modes,energy consumption and carbon emissions,green vehicle routing issues,synchronously deliveries and pickups

自哥本哈根世界气候大会以来,物流业的节能减排问题日益受到学术界与产业界的共同关注. 物流运输作为供应链体系中的关键环节,其碳排放与氮氧化物排放问题尤为突出. 在此背景下,将环境因素纳

收稿日期:2026-04-15.
基金项目:江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大资助项目(23KJA630001).
通讯作者:陆俐君,博士,副教授,研究方向:绿色发展,绿色物流. E-mail:lulijun@smail.nju.edu.cn

入传统车辆路径规划,已成为运筹学与交通运输工程交叉领域的研究热点.

2007 年,Sbihi 等[1]首次提出了能耗最小化车辆路径问题(Energy Minimizing VRP,EMVRP),将节能降耗理念引入 VRP 框架. 2011 年,Bektas 等[2]进一步将燃油消耗、CO_2 排放量及行驶时间等因素融合到路径设计中,提出了污染路径问题(Pollution Routing Problem,PRP),并建立了综合模态排放模型(CMEM),为后续绿色车辆路径问题的定量研究奠定了基础. 2012 年,Erdogan 等[3]正式提出了绿色车辆路径问题(Green Vehicle Routing Problem,GVRP)的概念,旨在通过优化燃油消耗与碳排放实现更可持续的配送方案. 此后,GVRP 研究不断深入. Demir 等[4]和 Lin 等[5]分别对 2007—2012 年间 GVRP 研究进展进行了系统综述,指出该领域的研究仍主要集中在纯送货或纯取货场景,而对同时包含配送与取货需求的混合场景关注不足.

随着电子商务的快速发展,包装回收及顾客退、换货等现象日益普遍,使得同时配送和取货的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups,VRPSDP)逐渐成为研究热点. Min[6]于 1989 年首次提出 VRPSDP 的基本思想,即车辆从仓库出发,沿指定路线向客户送货,同时从客户处取货返回仓库,每个客户仅被访问一次,以降低“空载回程”带来的额外运输成本. 近年来,GVRP 与 VRPSDP 的融合研究取得了系列重要进展. Huang 等[7]通过数值实验比较了距离最小化模型与排放最小化模型的差异,分析了影响碳排放的关键因素. Tajik 等[8]研究了包含时间窗约束及不确定场景的 GVRP. Bravo 等[9]探讨了多目标异构车队集成车辆路径问题,旨在最小化碳排放的同时优化总行驶时间和服务成本. Sun 等[10]研究了考虑碳排放最小化的异构车队 GVRPSDP. 在国内,范厚明等[11]针对带时间窗偏好的同时配集货且需求可拆分问题,建立了以派遣成本、装卸成本、时间窗惩罚成本及油耗成本之和最小化为目标的数学模型,并设计了混合遗传变邻域搜索算法. 周鲜成等[12]提出了考虑时间依赖和同时取送货的双目标绿色车辆路径模型,并采用 NSGA-II 与大邻域搜索混合算法求解. 李熠胥等[13]针对带同时取送货的绿色车辆路径问题,设计了三阶段拉格朗日启发式算法. 谢栋梁等[14]研究了时变路网下考虑软时间窗的多车场 GVRP. 周鲜成等[15]进一步提出时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径模型.

尽管如此,客户需求可拆分的同时配送与取货绿色车辆路径问题(GVRP with Simultaneously Split Deliveries and Pickups,GVRPS^{2}DP)的研究仍不充分. Mitra[16-17]率先放宽了每个客户只能被访问一次的限制,允许将客户的送货与取货需求拆分,从而提高了车辆装载效率,减少了使用车辆数并降低了行驶距离. 然而,现有研究多局限于同构车队或需求不可拆分的情形,对于异构车队、需求可拆分与不可拆分等多种运输模式组合下的综合成本分析尚缺乏系统性的探讨.

本文在上述研究基础上,引入 CMEM 模型[2],构建以总成本(包括燃料消耗费用、碳排放费用和驾驶费用)最小化为目标的 GVRPS^{2}DP 模型,旨在确定环境友好的绿色运输路线. 提出一种两阶段求解方法:第一阶段分别针对同构车队与异构车队采用 MRISA 聚类方法和 CMMD 聚类方法对客户区域进行聚类并确定车辆路径;第二阶段通过 CMEM 模型量化总成本. 基于 Solomon 基准数据集重构实例进行数值实验,系统分析异构车队、同构车队以及需求可拆分/不可拆分等多种运输模式下,车辆行驶速度、路径与载荷对燃料消耗、碳排放、驾驶费用及总成本的综合影响,以期为物流企业的低碳化运营与运输模式选择提供决策参考.

1　问题描述

GVRPS^{2}DP 问题可用拓扑图 $G=(V,A)$ 来表示. 其中,$V=\{0,1,\cdots,n\}$ 为节点集合,节点 0 表示配送中心;V_0 表示客户节点集合,$A=\{(i,j)\mid i,j\in V$ 且 $i\neq j\}$ 表示各对节点之间的弧. 配送中心拥有一批容量为 Q 的同类型车辆,用于满足多个客户的配送与取货需求. 每次行程均需满足每个客户的配送和取货要求,保证每个客户节点的总载货量不超过车辆容量 Q,并且从配送中心出发总配送量和再回到配送中心的总取货量不超过车辆容量 Q.

设 n 为 GVRPS^{2}DP 中的客户节点数量,m 为使用的车辆数量. 对于同构车队,$\sum_{i=1}^{n} qd_i(qd_i\geqslant 0)$ 表示从节点 1 到节点 n 的累计配送量,$\sum_{i=1}^{n} qp_i(qp_i\geqslant 0)$ 表示从节点 1 到节点 n 的累计取货量,所需最少车辆数量为

$\left[\max\left(\sum_{i=1}^{n} qd_i, \sum_{i=1}^{n} qp_i\right)/Q\right]$ [16-17]. 对于异构车队,假设每辆车 k'在运输路径上的最大载货量记为 $Q_{k'}|k'=\{1,2,\cdots,m'\}$,它等于 $\left[\max\left(\sum_{i'=1}^{n'} qd_{i'}, \sum_{i'=1}^{n'} qp_{i'}\right)\right]$,其中 i'指路径上的起始节点,n'指路径终点所在的聚类节点.

GVRPS^{2}DP 的目标是高效地安排车辆路径、保持环境可持续发展,以满足不同客户的需求,最小化总运输成本(包括:能源消耗/碳排放和驾驶费用). 旨在实现经济和环境方面的双赢. GVRPS^{2}DP 模型如下:

$$\min\left\{(F_f+\varepsilon\cdot F_e)\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{m}\left\{\left[\alpha_{ij}(\omega+f_{ij})+\beta v_{ij}^2\right]x_{ijk}d_{ij}/q\right\}\right\} \tag{1}$$

$$+\left\{F_d\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{m}(d_{ij}/v_{ij}+t_{sij})x_{ijk}\right\} \tag{2}$$

s.t:

$$\sum_{i=1}^{m} y_{ik}=1, k=1,2,\cdots,m; \tag{3}$$

$$\sum_{i=0}^{n} x_{ijk}=1, j=1,2,\cdots,n; k=1,2,\cdots,m; \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} qd_{0i}y_{ik}\leqslant Q, k=1,2,\cdots,m; \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{n} qp_{i0}y_{ik}\leqslant Q, k=1,2,\cdots,m; \tag{6}$$

$$\sum_{i=0}^{\theta} qp_i y_{ik}+\sum_{i=\theta+1}^{n} qd_i y_{ik}\leqslant Q,\quad i=0,1,\cdots\theta,\theta+1,\cdots,n; k=1,2,\cdots,m; \tag{7}$$

$$\sum_{i=0}^{n} qp_{0i}=0 \tag{8}$$

$$\sum_{i=0}^{n} qd_{i0}=0 \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}(x_{ijk}-x_{j(j+1)k})=0, k=1,2,\cdots,m; \tag{10}$$

$$\sum_{j=0}^{n} x_{0jk}=1,\ \sum_{j=0}^{n} x_{j0k}=1,\quad k=1,2,\cdots,m; \tag{11}$$

公式(1)表示运输路径中的燃油消耗成本与 CO_2 成本,该公式采用了 CMEM 中的燃油消耗模型. 公式(2)表示驾驶员的服务费用,涵盖工资、装卸费用及其他相关费用. 公式(3)表明车辆 k 为节点 i 提供服务;公式(4)、(5)和(6)说明,每次行程中每辆车在每个节点必须满足配送/取货需求且不能超过其容量 Q 的范围. 此外,公式(7)-(9)明确了任意节点或车场处配送/取货的数量约束条件:公式(7)指出,任意节点的配送/取货总需求量不得超过单车单次行程的容量 Q;公式(8)表明货物不会直接配送至车场,公式(9)则意味着货物不会直接从车场被取走. 最后,公式(10)-(11)对车辆进出站点进行了约束. 该模型中使用的符号和参数如表 1 所示.

表 1　GVRPS^{2}DP 模型中使用的符号和参数

Table 1　Notation and parameters used in the GVRPS^{2}DP model

序列号	符号	定义
1		**弧(i,j)上的燃油消耗 F_{ij}**
(1) of 1	F_{ij}	$F_{ij}\approx P_{ij}\approx P_t(d_{ij}/v_{ij})/q\approx(\alpha_{ij}(w+f_{ij})d_{ij})/q+(\beta v_{ij}^2 d_{ij})/q$
(2) of 1	P_t	总牵引功率需求,单位为瓦特 W=kg·m^2/s^3
(3) of 1	d_{ij}	点 i 和 j 之间的距离
(4) of 1	v_{ij}	弧(i,j)上的速度(m/s)
(4)-a	α_{ij}	$\alpha_{ij}=\alpha+g\sin\theta_{ij}+gC_r\cos\theta_{ij}$
(4)-b	a	加速度(m/s^2)
(d)-c	g	重力常数(m/s^2)

续表 1

Table 1 Continued

序列号	符号	定义
(d)-d	θ_{ij}	弧(i,j)的坡度
(d)-e	C_r	滚动阻力系数
(5)of 1	w	空车厢的重量(kg)
(6)of 1	f_{ij}	弧(i,j)上车辆负载重量(kg)
(7)of 1	q	燃油的热量值(Caloric value)
(8)of 1	β	$\beta=0.5C_dA\rho$
(8)-a	C_d	牵引系数
(8)-b	A	车辆的表面积(m^2)
(8)-c	ρ	空气密度(kg/m^3)
2		**弧(i,j)上的 CO_2 排放**
(1)of 2	E_{ij}	$E_{ij}=\varepsilon\cdot F_{ij}$
(2)of 2	ε	燃油的 CO_2 排放因子
3		**驾驶费用**
(1)of 3	F_d	单位时间驾驶员的工资
(2)of 3	T_d	弧(i,j)上的驾驶时间:d_{ij}/v_{ij}
(3)of 3	t_{sij}	弧(i,j)上的服务时间(上货/卸货)
4		**燃油/CO_2 单位成本**
(a)of 4	F_f	燃油的单位成本
(b)of 4	F_e	CO_2 的单位成本
5		**参数说明**
(a)of 5	x_{ijk}	假如车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j 则 $x_{ijk}=1$;否则 $x_{ijk}=0$.
(b)of 5	y_{ik}	假如节点 i 由车辆 k 服务,则 $y_{ik}=1$;否则 $y_{ik}=0$.

2　两阶段解决方案

基于“先聚类再路径”的思路,采用了两阶段求解方案. 第一阶段,对于同构车队,采用多重启迭代扫描算法(Multi-Restart Iterative Sweeping Algorithm,MRISA)[18],根据车辆容量 Q 对客户区域进行聚类,并确定边界点和运输值;对于异构车队,则采用最大最小距离聚类方法(Clustering-based on Max-Min Distance,CMMD)[19]对客户区域进行聚类,并确定每个聚类的配送/取货值. 然后,根据每个节点的负载波动,利用公式(7)确定每个聚类中客户点的访问顺序. 实验表明,MRISA 聚类方式可以保证一条路径上的客户点在框架上最接近花瓣样;CMMD 聚类方式可以保证每条路径上的客户相邻最近.

聚类操作完成后,每个聚类簇对应 VRPSDP 问题的一条运输路径,为适配集送货一体化需求,采用改进的节约算法(Improved C-W)完成路径规划:

$$\sum_{i=1}^{n} qd_{0i}y_{ik}\leqslant Q,k=1,2,\cdots,m. \tag{12}$$

确保每条路径均从车场始发,装载该路径所有需求点的全部送货货物,且货物总重量严格控制在车辆额定容量 Q 的范围内.

$$\sum_{i=1}^{n} qp_{i0}y_{ik}\leqslant Q,k=1,2,\cdots,m. \tag{13}$$

需满足以下约束:各运输路径终点为车场,路径上所有集货点的货物需全部装载,且整车货物总重量不得超过车辆容量上限 Q.

$$\sum_{i=0}^{n} qp_iy_{ik}+\sum_{i=0}^{n} qd_iy_{ik}\leqslant Q, \tag{14}$$

保证每条路径上任何点 θ 的总集送货量在车辆的容量范围 Q 内.

第二阶段,根据公式(1)和(2)通过数值计算成本最小化目标函数,其中包括时间成本、燃油消耗与碳排放费用以及驾驶费用. 计算总成本:

- 弧(i,j)上燃油消耗 $F_{ij}=(a_{ij}(w+f_{ij})d_{ij})/q+(\beta v_{ij}^2d_{ij})/q$.
- 弧(i,j)上 CO_2 排放 $E_{ij}=\varepsilon\cdot F_{ij}$.

- 按照公式(1)计算油耗和碳排放成本=$(F_f+\varepsilon\cdot F_e)\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{m}\{[F_{ij}x_{ijk}]\}$.
- 弧(i,j)上驾驶费用 $T_{dij}=d_{ij}/v_{ij}$.
- 弧(i,j)上其他服务时间 t_{sij}=服务的次数·每次服务时间.
- 按照公式(2)计算驾驶成本=$F_d\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=1}^{m}[(T_{dij}+t_{sij})x_{ijk}]$.

3　实验

3.1　实验准备

3.1.1　实验基础数据准备

本研究中,为证明所给出模型和解决方法的合理性和可靠性,借助了 Solomon 基准数据集. 然而,由于 Solomon 数据集缺乏取货需求数据,无法直接用来进行 GVRPS^{2}DP 实验. 我们使用原始数据集构建了几个新的数据实例. 通过合并两个数据集来构建完整的新数据集,一个作为送货需求,另一个作为集货需求. 例如,新构建的实例 CR101-25 中各节点的坐标数据保持原 C101-25 的数据,CR101-25 的送货需求是原 C101-25 中的送货需求,而新实例 CR101-25 中的取货需求是原 R101-25 中的送货数据. 对构成新的数据实例,假设一个重量单位等于 0.01(吨 T),车辆容量 Q 为 200,则 Q=2 T,各点送取货值如表 2 中 D(T)和 P(T);基于该方法,根据客户节点不同的分布模式构建了 4 个实例,即 CR101/CR201/R_C101/RCR101. 该实验在 Windows 10 64 位操作系统的机器上运行,该机器配备 x64 处理器、Intel(R)Core(TM)i5-10300H CPU@2.50 GHz,内存为 16GB.

表 2　异构车队场景下车辆行驶速度变化对成本的影响

Table 2　Impact of vehicle speed variation on costs under heterogeneous fleet scenarios

实例 路径和各点 ---总点数;总送货量/总取货量; 选择车辆最大载重量	速度	分项成本				分项成本随速度变化的变化率			分项成本/总成本%(成本为 100)		
		CO_2	燃料	驾驶成本	总成本	CO_2 燃料	驾驶成本	总成本	CO_2	燃料	驾驶成本
CR101-25	40	3.538	56.490	88.490	148.510	1.000	1.000	1.016	2.382	38.036	59.585
1:(20,24,25,22,23,21)---6;8.6/7.64 T;9 T	60	4.156	66.370	75.660	146.180	1.175	0.855	1.000	2.843	45.401	51.758
2:(12,14,16,15,19,18,17,13)---8;9.2/6.4 T;10 T	80	5.023	80.190	69.250	154.460	1.420	0.783	1.057	3.252	51.916	44.834
3:(3,1,2,4,6,9,11,10,8,7,5)---11;5.6/4.24 T;6 T	100	6.137	97.970	65.390	169.500	1.735	0.739	1.160	3.621	57.799	38.578
CR201-25	40	4.890	78.070	103.400	186.360	1.000	1.000	1.018	2.624	41.892	55.484
1:(6,24,22,20,21,8,10,11,5)---9;7/6.08 T;7 T	60	5.749	91.770	85.590	183.120	1.176	0.828	1.000	3.139	50.115	46.740
2:(25,23,18,19,17,15,16,14,12,13,9)---11;12.2/9.04 T;13 T	80	6.950	110.950	76.700	194.600	1.421	0.742	1.063	3.571	57.014	39.414
3:(4,3,7,1,2)---5;4.2/3.16 T;5 T	100	8.495	135.620	71.300	215.490	1.737	0.690	1.177	3.942	62.936	33.115
RCR101-25	40	5.609	89.540	109.910	205.060	1.000	1.000	1.018	2.735	43.665	53.599
1:(2,6,7,8,4,5,3,1)---8;8.4/5.28 T;9 T	60	6.572	104.910	89.930	201.430	1.172	0.818	1.000	3.263	52.083	44.646
2:(21,20,19,18,22,23,25,24)---8;8.8/5.8 T;9 T	80	7.920	126.430	79.960	214.300	1.412	0.728	1.064	3.696	58.997	37.312
3:(11,9,13,15,16,17,14,12,10)---9;9.4/7.2 T;10 T	100	9.653	154.100	73.960	237.730	1.721	0.673	1.180	4.060	64.821	31.111
R_C101-25	40	6.209	99.110	120.970	226.300	1.000	1.000	1.020	2.744	43.796	53.456
1:(12,3,24,25,4,23,22,21)---8;6.32/7.2 T;8 T	60	7.349	117.330	97.320	221.980	1.184	0.805	1.000	3.311	52.856	43.842
2:(2,15,14,16,17,5,6,13)---8;5.92/9.6 T;10 T	80	8.946	142.820	85.480	237.260	1.441	0.707	1.069	3.771	60.196	36.028
3:(18,8,7,19,11,10,20,9,1)---9;6.04/6.6 T;7 T	100	10.999	175.600	78.380	265.000	1.772	0.648	1.194	4.151	66.264	29.577

3.1.2　实验详细符号和变量

VRPSDP 问题的目标函数主要包括两个部分:排放成本和驾驶员报酬. 本文采用综合模态排放模型(Comprehensive Modal Emission Model,CMEM)来计算与排放和燃料消耗相关的成本. 当车辆在弧线(i,j)的拥堵路段 h 上以速度为 $v_{ijh}(m/s)$行驶时,总燃料成本 FC_{ij}由下式确定. 下式中使用的符号和变量详见表 2.

$$FC_{ij}=\lambda * d_{ijh}\left(\frac{kNV}{v_{ijh}}+\gamma\beta(v_{ijh})^2+\gamma\alpha(\mu+f_{ij})\right),$$

该式括号中包含 3 个项:第一项称为引擎模块 $kNV\ d/v=0.2\times33\times5\times d/v=33\times d/v$,它在运行时间上是线性的;

第二项称为速度模块 $\gamma\beta dv^2 = 1/(1\ 000\times0.9\times0.4)\times0.5\times0.7\times1.204\ 1\times3.912\times d\times v^2 = 0.002\ 777\ 777\times1.648\ 65\times d\times v^2$,它是速度的二次项(其中,$g=0.002\ 777\ 8$);最后一项是重量模块 $\gamma\alpha(\omega+f)d = 0.002\ 777\ 777\times0.098\ 1\times(6.350+f)\times d$,它与旅行时间和速度无关.

3.2　异构车队运输成本分析

基于 CR101/CR201/RCR101/R_C101 4 个实例,使用第 3 节中介绍的用于异构车队的 CMMD 聚类方法. 每条路径的起点和终点均为原点 0. 每个实例的 3 条路径、每条路径中的节点、送货量/取货量以及选择车辆最大载重量(车辆最大载重量>送货量)∩(车辆最大载重量>取货量),如表 2 最左列所示. 异构车队运输各分项成本的变化(碳排放、燃料消耗、驾驶费用以及总成本)随着速度的变化显示在"分项成本随速度变化的变化率"中,以及各分项成本在总成本中的占比显示在"分项成本/总成本%"列中,如表 2 所示. 数据表明:

(1)最低总成本:表 2 中"分项成本随速度变化的变动率"的"总成本"列揭示了在每种速度下的总成本和 60 km/h 时的总成本的关系,表明了各种成本随速度改变的比例. 60 km/h 的速度实现了"分项成本"的"最低总成本.

(2)碳排放:表 2"分项成本"栏呈现了不同行驶速度对应的碳排放数值;"分项成本随速度变化的变化率"栏则展示了车辆在各速度下的 CO_2 排放量与 40 km/h 工况下排放量的比值增幅. "分项成本/总成本%"的"CO_2"列,明确给出了各测试实例中碳排放占总成本的具体百分比. 以实例 CR101-25 为例,其碳排放占总成本的比例为 2.382%、2.843%、3.252%和 3.621%.

(3)燃油消耗:每个实例的燃油消耗量占总成本的百分比显示在表 2"分项成本/总成本%"的"燃油消耗"列中. 以 CR101-25 为例,燃油消耗在不同速度下的占比分别为总成本的 38.036%、45.401%、51.916%和 57.799%. 表 2 中,"分项成本"中 "燃油消耗"展示了各个实例在不同速度下的燃油消耗值. 而"分项成本随速度变化的变化率"显示了不同车辆速度的燃油消耗与 40 km/h 下的燃油消耗比率在增加.

(4)驾驶费用:假设基于驾驶时间来计算费用,驾驶成本会相应降低. 以 CR101-25 为例,不同速度下驾驶成本占据了总成本的 59.585%、51.758%、44.834%和 38.578%. "分项成本随速度的变化率"显示了不同车速下的驾驶成本与 40 km/h 车速下的驾驶成本随速度的提高而减少.

(5)分项目成本分析:表中数据表明,碳排放在总支出中所占比例较小,而驾驶费用则占总成本的最大份额.

3.3　同构车队运输成本分析

基于 CR101/CR201/RCR101/R_C101 4 个实例,使用第 3 节中介绍的 MRISA 聚类方法获得了聚类结果. 每条路径的起点和终点均为原点 0. 每个实例的总送货量/总取货量,拆分/不拆分时的路径数以及相应的运输距离如表 3 最左列所示. 同构车队运输各分项成本(CO_2/燃料消耗、驾驶费用和总成本)分别展示在"需求不可拆分时分项目成本随速度的变化"和"需求可拆分时分项目成本随速度的变化"列,如表 3 所示.

数据表明:

(1)CO_2 排放量或油耗:CO_2 排放量或油耗随车速成比例增加.

(2)驾驶费用:在行驶距离相同的情况下,驾驶费用随着车速的提高而降低. 以 CR101-25 为例,在基准车速为 40 km/h 的情况下,车速每提高 20 km/h,需求不可拆分驾驶成本分别降低 24.748%、16.427%和 11.804%,需求可拆分驾驶成本分别降低 21.491%、13.681%和 9.509%. 然而,由于需求可拆分,装卸活动量增加(详见第 3 节),各速度下的需求可拆分驾驶成本比需求不可拆分驾驶成本分别增加了 4.415%、8.934%、12.513%和 15.441%.

(3)总成本最低:在 60 km/h 的速度下,总运输成本最低. 在需求不可拆分情况下、速度每增加 20 km/h,CR101-25 的总成本分别增加-3.274%、11.992%和 19.442%. 同样,当需求可拆分时,总成本增加了-2.942%,10.717%和 17.540%. 需求可拆分与需求不可拆分运输相比,总成本分别增加 1.153%、1.500%、0.345%和-1.253%.

(4)同构车队运输成本变化分析:表 3 分析了在同构车队情况下,随着速度变化,CO_2 排放、燃料消耗、驾驶员费用和总体成本的变动. 很明显,客户需求可拆分提高了运输载重率,减少了车辆的使用,从而

减少了旅行距离,实现了 GVRPS^{2}DP 的目标. 然而,从环境的角度来看,考虑到“减排”的目标,至关重要的是要考虑到,虽然 CO_2 排放、燃料消耗和驾驶成本以相似的速度下降;但是,由于运输过程中更高的装货率和更长的装卸时间,服务成本增加. 因此,尽管运输距离减少了,但总体成本没受到大影响.

表 3　同构车队场景下车辆行驶速度变化对需求可拆分和不可拆分成本的影响

Table 3　Impact of vehicle speed variation on costs with and without split deliveries under homogeneous fleet scenarios

实例 总送货量/总取货量 运输距离 路径数	速度	需求不可拆分时分项目成本随速度的变化				需求可拆分时分项目成本随速度的变化			
		CO_2	燃油	驾驶成本	总成本	CO_2	燃油	驾驶成本	总成本
CR101	40	4.312	68.830	193.986	267.139	3.988	63.667	202.550	270.220
送货量/取货量 23.40/18.28T	60	6.626	105.778	145.978	258.394	6.087	97.175	159.020	262.270
运输距离 652.759/719.953 km	80	9.866	157.504	121.998	289.380	9.029	144.067	137.264	290.378
路径数 12/14	100	14.032	224.018	107.597	345.640	12.796	204.266	124.211	341.309
CR201	40	4.916	78.472	214.600	298.010	4.885	77.988	231.250	314.120
送货量/取货量 23.40/18.28T	60	7.562	120.713	159.734	288.000	7.476	119.363	178.160	305.020
运输距离 796.258/823.085 km	80	11.266	179.868	132.310	323.450	11.060	176.581	151.614	339.250
路径数 12/14	100	16.028	255.903	115.846	387.760	15.668	250.130	135.689	401.500
R_C101	40	5.284	84.358	232.172	321.807	5.203	83.066	241.180	329.450
送货量/取货量 26.20/18.28T	60	8.212	131.108	171.426	310.766	7.955	127.001	184.120	319.080
运输距离 855.921/910.811 km	80	12.311	196.549	141.078	349.938	11.808	188.480	155.603	355.890
路径数 14/16	100	17.581	280.700	122.859	421.150	16.760	267.560	138.482	422.800
RCR101	40	7.595	121.249	308.700	437.570	7.787	124.321	333.410	465.490
送货量/取货量 18.28/23.40T	60	11.754	187.651	222.470	421.860	11.925	190.359	247.600	449.890
运输距离 1287.027/1293.613 km	80	17.575	280.590	179.364	477.540	17.718	282.840	204.690	505.250
路径数 14/16	100	25.062	400.090	153.476	578.620	25.164	401.740	178.960	605.870

3.4　比较分析同构车队与异构车队的成本

把表 3 和表 2 中的“分项目成本”结合起来,可以分析、比较同构车队(包括需求可拆分和需求不可拆分)和异构车队两种情况下各种成本随速度的变化.

(1) CO_2 排放或油耗:在相同车速条件下,由于行驶距离的缩短,异构车队及需求可拆分模式的 CO_2 排放与油耗较对比模式显著降低. 如 CR101-25 所示:

(a)需求可拆分与需求不可拆分对比:表 3 显示,可拆分时,每个车速下 CO_2 排放量比不拆分时分别减少 7.501%、8.136%、8.531%和 8.817%.

(b)异构车队与同构车队需求可拆分情景的比较:两表结合显示,对于一个实例来说,由于异构车队运输距离的缩短,异构车队与需求可拆分情景相比,各个车速的 CO_2 排放量和油耗分别显著减少 11.286%、31.722%、44.366%和 52.041%.

(2)驾驶费用:同一运输模式下,驾驶费用随车速提高而降低;但由于需求拆分增加装卸次数,可拆分情形下的驾驶成本在各车速下均高于不可拆分情形. 如 CR101-25 所示:

(a)需求可拆分与不可拆分的比较:虽然速度的提高使得驾驶员工资减少,但由于需求拆分导致的装卸时间的增加导致驾驶服务成本上升. 表 3 显示,在不同车速下,需求可拆分与不可拆分驾驶成本分别增长 4.415%、8.934%、12.513%和 15.441%.

(b)异构车队与同构车队需求可拆分的比较:两表结合显示,对于一个实例来说,由于异构车队运输距离的缩短,异构车队比同构车队需求可拆分的成本在各个速度下分别下降 56.312%、52.421%、49.550%和 47.356%.

(3)总成本:在相同车速条件下,异构车队的总成本显著低于同构车队. 对于同构车队,总成本在 60 km/h 达到最低;需求可拆分与不可拆分模式之间的总成本差异则受速度影响较小. 以 CR101-25 为例:

(a)需求可拆分与不可拆分的比较:表 3 显示,在每一个速度下可拆分运输距离的下降带来 CO_2 排放和能源消耗的降低,但同时带来驾驶成本的上升,从而造成整体成本的提高. 在各个速度上,可拆分总成本分别比不可拆分总成本高出 1.153%、1.500%、0.35%和-1.25%.

(b)异构车队与同构车队可拆分的比较:

异构车队(Heterogeneous Fleet)与同构车队的核心差异在于车辆类型多样(载重、能耗、速度、燃料类型等),可拆分(Split Delivery)机制需在多维能力约束下动态匹配任务. 在异构车队的情况下,运输距离的减少导致成本的显著降低. 因此,两表联合显示,与需求可拆分相比,异构车队各个速度总成本分别降低45.041%、44.264%、46.807%和50.338%.

(4)采用异构车队对企业更有利:以上分析表明,异构车队可以使用基于距离最小化的CMMD聚类方法将客户域细分为多个子域. 这种方法不受固定车辆容量的限制,尽可能充分利用多种车辆的资源,减少运输任务需用的车辆数量、最小化旅行距离、降低旅行成本、降低总体成本、降低 CO_2 排放和燃料消耗. 因此,采用异构车队对提高企业经济效益和社会效益更为有利.

4　结论

本文建立了GVRPS^{2}DP的数学模型,旨在达到运输总成本最小化,效益和环保效果最优化. 为了解决该问题,我们设计了两阶段的求解方案. 第一阶段,采用CMMD聚类方法和MRISA聚类方法分别对运输域聚类,并确定每个聚类的车辆路径. 第二阶段,通过CMEM能源消耗模型估算总成本. 在Solomon基准数据集的基础上,建立了CR101-25、CR201-25、RCR101-25和R_C101-25共4个客户分布不同的典型实例,证明了方法的可行性与正确性. 另外,还研究了车辆速度、行驶距离和负载对碳排放量、油耗量、运输费用以及总成本的影响. 实验结果表明:

(1)碳排放和燃油消耗与速度成正比,而驾驶费用相应降低. 然而,总成本在60 km/h的速度下达到最低.

(2)碳排放和燃料消耗在整体成本中的比重随着速度的加快而增长,而驾驶成本则随着速度的增加而减少.

(3)针对客户需求实行拆分装卸,导致驾驶服务成本增加,影响驾驶成本占总支出的比例. 一旦拆分次数达到一定的阈值,虽然减少总行驶距离可能会降低 CO_2 排放和燃料消耗,但仍然会导致成本的总体上升.

(4)从节能减排的角度考虑,通过距离聚类客户要求,选取合适的大型运输车辆,能够有效提高集群灵活性,减少与行驶路径、行程长度、碳排放、油耗、货运成本、物流配送有关的成本. 这种模式让公司不但能够得到经济效益,而且可以得到社会效益.

(5)通过运输模式选择,碳排放量可以降低到占总成本的比例很小,在四个实验实例中仅为2.38%至4.15%. ①这说明运输模式的选择非常重要,合理的路径可以降低行驶距离、合理的速度可以减低燃油消耗、合理的调度可以减少使用的车辆数、合理的负载安排可以降低驾驶成本;②虽然可以通过运输模式的选择较大的实现节能减排,但是使用车辆的总数不断增加,仍然会带来空气污染的危害,因此必须采取行政节能减排的措施,③行政部门要积极推动绿色物流:鼓励使用公共交通工具、推广电动汽车、限制高排放车辆,从而有效地降低交通领域的碳排放. 当然现实是物流业主要依赖商用车,电动化进展相对缓慢,特别是承担干线运输的重型卡车,因其对续航、载重、补能效率要求极高,目前仍以燃油动力为主是当前物流行业转型中的核心矛盾. 干线运输的重型卡车电动化进程缓慢,其背后是技术、成本与基础设施多重瓶颈的叠加;④在具体实现中,制定具体的节能减排的目标、方案、考核标准、奖惩措施和实施计划、人员安排等等,加强监督、发现问题及时整改.

(6)选择固定的区域作为拥堵区域只是一种尝试,例如,通常认为以城市中心为原点、半径为10或20 km的圆形区间交通拥堵;通过选择圆形区间作为拥堵区域的假定,找到一种运输路径与拥堵边界交汇点,以便分别求出在拥堵区间内外的运输路径、速度以及各项成本;现实社会中拥堵区域可能千差万别,但是只要能够对拥堵区域进行描述、给出边界曲线,就能用文中给出的方法分别求出拥堵区间内外的运输路径、速度以及各项成本.

本研究是对GVRPS^{2}DP中碳排放减少的初步探索. 它缺乏对在现实世界的物流操作中实施所提出的模型和建议的实际挑战的详细讨论. 随后的研究将包括更全面的实际物流业务,同时考虑大容量车辆相关人员成本增加以及时变速度对节能减排的作用.

[参考文献]

[1] Sbihi A,Eglese R W. Combinational optimization and green logistics[J]. 4OR:A Quarterly Journal of Operations Research,2007,5:99-116.

[2] Bektas T,Laporte G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B,2011,45:1232-1250.

[3] Erdogan S,Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E,2012,48(1):100-114.

[4] Demir E,Bektas T,Laporte G. A review of recent research on green road freight transportation[J]. European Journal of Operational Research,2014,237:775-793.

[5] Lin C H,Choy K L,Ho G T S,et al. Survey of green vehicle routing problem:past and future trends[J]. Expert Systems with Applications,2014,41:1118-1138.

[6] Min H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points[J]. Transportation Research Part A,1989,23(5):377-386.

[7] Huang Y,Shi C,Zhou L,et al. A study on carbon reduction in the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries[C]//IEEE SOLI 2012. Suzhou,2012:302-307.

[8] Tajik N,Tavakkoli-Moghaddam R,Vahani B,et al. A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty[J]. Journal of Manufacturing Systems,2014,33:277-286.

[9] Bravo M,Rojas L P,Parad V. An evolutionary algorithm for the multi-objective pick-up and delivery pollution-routing problem[J]. International Transactions in Operational Research,2019,26(1):302-317.

[10] Sun W,Yu Y,Wang J. Heterogeneous vehicle pickup and delivery problems:formulation and exact solution[J]. Transportation Research Part E,2019,125(5):181-202.

[11] 范厚明,任晓雪,刘浩. 带时间窗偏好的同时配集货且需求可拆分车辆路径问题[J]. 运筹与管理,2022,31(11):65-72.

[12] 周鲜成,余玮瑛,李松明,等. 考虑时间依赖和同时取送货的双目标绿色车辆路径问题[J]. 系统科学与数学,2023:1-19.

[13] 李熠胥,胡蓉,吴绍云,等. 三阶段拉格朗日启发式算法求解带同时取送货的绿色车辆路径问题[J]. 控制与决策,2023,38(12):3525-3533.

[14] 谢栋梁,彭琨琨,邓旭东. 时变路网下考虑软时间窗的多车场绿色车辆路径优化模型与算法[J]. 物流工程与管理,2025,47(1):1-7.

[15] 周鲜成,郑梓亮,杨堃,等. 城市物流配送中时间-位置依赖型多目标绿色车辆路径问题研究[J]. 控制与决策,2025,40(2):413-422.

[16] Mitra S. An algorithm for the generalized vehicle routing problem with backhauling[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research,2005,22(2):153-169.

[17] Mitra S. A parallel clustering technique for the vehicle routing problem with split deliveries and pickups[J]. Journal of the Operational Research Society,2008,59(11):1532-1546.

[18] 金成,闵嘉宁. 集送货可拆分车辆路径问题的两阶段构造启发式方法[J]. 制造业自动化,2021,43(11):120-125.

[19] 闵嘉宁,陆俐君,金成. 解决需求可拆分车辆路径问题的先聚类后路径方法[J]. 制造业自动化,2018,40(11):142-147.

[责任编辑:陆炳新]