

低碳背景下混合车队车辆路径优化研究

邱莹莹, 干宏程

上海理工大学 管理学院, 上海 200092

摘要:目的 针对绿色物流的需求现状,降低能源消耗成本和碳排放成本,提出了低碳目标下的混合车队车辆路径优化研究并探索混合车队的物流运输方案,综合考虑混合车队与燃油车队和电动汽车车队在行驶里程、能源消耗、碳排放量的差异,构建了以固定成本、行驶成本、能源消耗成本和碳排放成本最小化为目标的优化模型。方法 采用粒子群算法并结合 Metropolis 准则以提高算法的高效性,设计多组实验,对问题进行分析并比较了混合车队与单一车型车队在行驶里程、能源消耗、碳排放量等方面的不同。结果 混合车队在降低碳排放量、碳排放成本和运营成本方面有较大优势,混合车队有效降低了能源消耗和碳排放量,与传统燃油车队相比总成本下降约12%。最后,研究逐步增加电动汽车的最大载重和充电速率对混合车队各项成本的影响进行了灵敏度分析。结论 表明适当提高电动汽车的车辆载重和充电速率能有效降低车队运营成本,有助于物流企业考虑能源消耗成本和碳排放成本,能够为相关物流企业制定合理的运输方案提供了理论依据。

关键词:低碳物流;混合车队;电动汽车;车辆路径优化

中图分类号:U492.31 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0006.015

Research on Vehicle Routing Optimization of Mixed Fleets under Low-carbon Target

QIU Yingying, GAN Hongcheng

Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200082, China

Abstract: Objective In response to the current demand for green logistics and the need to reduce energy consumption costs and carbon emissions costs, this paper proposed a study on the optimization of vehicle routing in a mixed vehicle fleet under low-carbon goals and explored logistics transportation solutions for mixed fleets. Considering the differences in mileage, energy consumption, and carbon emissions between the mixed fleet and the fuel-fired fleet or the electric vehicle fleet, an optimization model was constructed to minimize fixed costs, travel costs, energy consumption costs, and carbon emissions costs. **Methods** In this study, the particle swarm optimization algorithm was employed in conjunction with the Metropolis criterion to improve algorithm efficiency. Multiple sets of experiments were designed to analyze and compare the differences in driving mileage, energy consumption, and carbon emissions between the mixed vehicle fleet and a single vehicle type fleet. **Results** The results demonstrated that the mixed vehicle fleet had significant advantages in reducing carbon emissions, carbon emissions costs, and operating costs. The mixed vehicle fleet effectively reduced energy consumption and carbon emissions, leading to a 12% decrease in total costs compared with traditional fuel vehicle fleets. Finally, this study conducted a sensitivity analysis on the impact of gradually increasing the maximum load and charging rate of electric vehicles on various costs of the mixed fleet. **Conclusion** The analysis indicates that appropriately increasing the vehicle load and charging rate of electric vehicles can effectively reduce the operating costs of the fleet. The research results help logistics enterprises consider energy consumption costs and carbon emission costs and provide a

收稿日期:2023-07-05 修回日期:2023-09-11 文章编号:1672-058X(2024)06-0114-07

基金项目:国家自然科学基金项目资助(71871143)。

作者简介:邱莹莹(1999—),女,江苏南通人,硕士研究生,从事绿色物流研究。

通讯作者:干宏程(1978—),男,浙江宁波人,教授,博士,从事交通系统工程、物流管理研究。Email: hongchenggan@126.com.

引用格式:邱莹莹,干宏程. 低碳背景下混合车队车辆路径优化研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(6):114-120.

QIU Yingying, GAN Hongcheng. Research on vehicle routing optimization of mixed fleets under low-carbon target[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(6): 114-120.

theoretical basis for relevant logistics enterprises to develop reasonable transportation plans.

Keywords: low carbon logistics; mixed fleet; electric vehicles; vehicle path optimization

1 引言

燃油车是城市物流配送的主要运载工具,但这类车辆会对环境造成不同程度的污染,其中二氧化碳是主要污染物之一。国际能源署的报告称,由于清洁能源的部署,2022年全球二氧化碳排放量仅增长了0.9%,否则,二氧化碳排放量的增长将接近三倍。因此使用清洁能源替代化石能源,并综合考虑车辆的能源消耗和碳排放水平,对推动我国经济的可持续发展有着重要意义。通过将碳排放转化为经济成本,可以激励企业寻求更加环保和高效的运营方式,促进低碳经济的发展。

随着对气候变化和环境可持续性的关注不断增加,一些运输企业开始采取措施来改善其碳足迹,包括使用更高效的车辆、优化运输路线和选择新能源等。国内外许多学者对如何减少燃油车在物流运输中的碳排放量进行了广泛研究。张金良^[1]研究了动态车辆路径问题中的碳排放,分别对考虑碳排放和仅考虑运输成本的路径问题进行求解,发现考虑碳排放的运输方案能有效降低碳排放成本和运输成本。这对深入理解动态车辆路径问题的碳排放优化提供了有价值的参考。唐慧玲等^[2]则构建了最短行驶距离和最低碳排放的VRP模型,并采用改进的蚁群系统算法求解,这一研究在物流运输中平衡行驶距离和碳排放量方面提供了一种有效的优化方法。此外,陈雨蝶^[3]等以多中心冷链物流为研究对象,建立了一个以碳排放成本、配送成本等成本之和最小化为目标的冷链物流模型,并设计具有变邻域搜索操作和动态灾变机制的多种群遗传算法进行求解。现有的低碳研究的对象主要是传统燃油车,考虑了多个变量对碳排放量以及碳排放成本、固定成本、油耗等成本的影响。

电动汽车(Electric Vehicle, EV)作为一种“零碳排放”的交通工具,用电动汽车替代传统燃油车将大大推动物流行业节能减排的发展,传统车辆路径问题也被扩展为电动汽车车辆路径问题^[4](Electric Vehicle Routing Problem, EVRP)。在EVRP问题中,不同学者考虑了不同因素并构建了相应模型。例如,在充电模式方面,程坦等^[5]将部分充电策略与路径规划问题中多车型的使用相结合,这一方案与传统方式相比有效提高了电动汽车的配送里程,降低了配送成本。葛显龙^[6]针对电动汽车的特性引入了一种灵活的充电策略并设计混合模拟退火算法对其求解。这些改进方法为实现可持续发展目标提供了新的思路和实践基础。在

其他因素方面,Ming等^[7]研究了软时间窗并考虑到客户的容忍度,建立的相关模型,最后对模型的实际应用提出了管理意见。Zhu等^[8]则设计了NR-EGA算法来,用以研究电动汽车的电能消耗、负载等对路径的影响。综合而言,这些创新的充电策略和综合考虑各种因素的建模方法,为解决电动汽车路径规划的挑战和发挥其潜在优势开辟了新的途径。然而,仍然存在一些局限性和挑战,例如需要进一步探索不同因素之间的相互作用,以及将某些算法应用于大规模问题时可能出现的可扩展性问题。

以上研究都集中在单一的燃油车车队或电动汽车车队的研究上。然而在实际配送过程中,存在两个问题需要同时考虑:一方面,燃油车产生大量的碳排放,与绿色物流的目标相矛盾;另一方面,电动汽车的容量、充电时间和维护成本等方面的限制,限制了电动汽车在物流配送中的广泛应用。因此,为了兼顾配送效率和能源消耗,电动汽车和燃油车组成的混合车队更符合物流企业的需求现状。为此,Giusy^[9]将电动汽车与燃油车组成混合车队,研究该车队的污染排放限制、时间窗和充电策略对车辆使用和运营成本的影响。李得成等^[4]研究了带时间窗的混合车队问题,考虑了最大载重、充电行为等因素,建立了以最小成本为目标的整数规划模型,并设计分支定价算法进行求解。Goetze等^[10]将结合了速度、坡度和货物负载分布的现实能耗模型用于考虑时间窗的混合车队,并开发了一种自适应大规模领域搜索算法求解。Lebeau等^[11]考虑用户的时间窗约束和电动汽车的行驶里程,以降低总成本为目标建立混合车队车辆路径优化模型,并分析比较不同车辆对成本的影响。同时,Zhao等^[12]考虑能耗对混合车队的影响,建立了旨在降低总运营成本和惩罚成本的双目标规划模型,并分别对两个目标进行单目标优化。Stehling等^[13]研究了混合车队的时间窗问题,建立了混合整数线性规划公式并设计局部分支和可变邻域下降分支算法进行求解。李英等^[14]研究混合车队的最优配置及路径结果,同时考虑充电设施的影响,最后设计分散搜索和改进蚁群算法的混合启发式算法进行求解。

通过对以上文献的梳理可知,现有研究已取得一定成果,但存在缺点和不足。首先,现有的低碳研究对象主要集中在单一的传统燃油车和电动汽车,而对混合车队的研究文献相对较少。这限制了对混合车队的全面理解和优化。其次,大多数研究主要关注物流公司的运营成本、车辆电量的消耗和补充等问题,但缺乏

对混合车队的碳排放研究。在实现低碳目标的过程中,考虑碳排放是至关重要的,这将有助于指导物流企业在减少碳排放的同时提高整体运输效率。

通过对不同能源的车辆进行混合配置和管理,可以最大程度地减少碳排放,提高物流运输的环保性和效率。基于当前的研究现状,本研究的创新点在于考虑了一种燃油车和电动汽车混合车队运输的物流运输模式,并将该混合车队的能源消耗成本和碳排放成本添加到目标函数中。同时,关注了载荷、充电速率等因素的变化对各项成本的影响,以此为基础,探索了低碳背景下混合车队的最优解。通过这种方式,旨在充分发挥混合车队的优势,为物流企业提供更加环保和高效的配送方案,促进低碳物流的可持续发展。

2 模型构建及算法设计

2.1 问题描述

建立的混合车队配送模型由 m 个顾客点、 n 个充电站和一个配送中心组成。所有车辆在规定时间内从配送中心出发,完成配送任务后返回配送中心。其目标是在满足客户需求和车辆载荷限制的前提下,规划混合车队的配送方案,实现碳排放量和运输成本最小化。模型假设如下:每个客户的位置和需求已知;客户需求不可拆分且只能由一辆车服务;配送过程中车辆速度恒定不变;充电站的位置已知,且充电无需排队;充电策略为部分充电。

2.2 参数定义

根据以上问题描述及假设,相关参数及变量的符号定义如下: C 表示传统燃油车, E 表示电动汽车。 N 表示点集合($i=0,1,2,\dots,n$),其中 0 为配送中心; R 表示充电站集合; $Z=\{0\}\cup N\cup R$; B 表示电动汽车电池最大容量(kwh); K^C, K^E 表示车队的车辆集合($k\in K$); Q^C, Q^E 表示车辆最大负载(kg); p_i^C, p_i^E 表示车辆到达客户 i 时的载重量(kg); q_i 表示客户点 i 的需求(kg); c^C, c^E 表示车辆固定成本(元/辆); m^C, m^E 表示单位距离行驶成本(元/km); $[e_i, l_i]$ 表示客户 i 服务时间窗; F_{ij}^C 表示燃油车从 i 行驶到 j 的耗油量(L); E_{ij}^C 表示燃油车从 i 行驶到 j 的碳排放量(kg); FR 表示油耗率; e 表示燃油排放因子; τ_i 表示车辆到达客户点 i 的时间(min); h_{1i} 表示电动汽车到达客户点 i 时的剩余电量(W); h_{2i} 表示电动汽车离开客户点 i 时的剩余电量(W); s_i 表示客户点 i 的服务时间(h); r_i 表示电动汽车在充电桩 i 的充电量(kwh); T_i 表示电动汽车在充电桩 i 的充电时间(h); t_{ij} 表示客户 i 到客户 j 的行驶时间(h); d_{ij} 表示客户 i 到客户 j 的距离(km); g_v 表示电量消耗率(kwh/km); g_r 表示充电桩充电速率(kwh/h); w_r 表示单位电量费用(元/kwh); w_c 表示单位碳排放费用(元/kgCO₂);

w_o 表示单位燃油费用(元/L); β 表示充电量上限系数; x_{ijk}^C, x_{ijk}^E 表示 0-1 变量,车辆 k 从 i 驶向 j 时为 1,否则为 0; y_i 表示 0-1 变量,电车 k 在 i 处充电为 1,否则为 0。

2.3 模型构建

将同时考虑燃油车的碳排放与车队的能源消耗,计算配送企业的碳排放成本与运营成本,从而进一步优化物流车队配送路线。

根据对问题的分析和在实际配送场景中的运用,以车辆的固定成本、行驶费用、充电费用、能源费用以及碳排放成本之和最小化作为优化的目标函数,建立带时间窗的部分充电策略的物流配送车辆路径优化模型:

(1) 固定成本。车辆的固定成本不受行驶里程、载重量和行驶时间约束,是车辆被安排从配送中心出发所产生的费用,一般包含司机的工资、车辆的折旧率等。假设燃油车和电动汽车的固定成本分别为 c^C, c^E ,则物流企业配送中产生的固定费用如下所示:

$$C_1 = c^C \sum_{k \in K^C(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^C + c^E \sum_{k \in K^E(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^E$$

(2) 行驶成本。车辆在行驶过程中,车辆的行驶费用会因为行驶里程的变化而变化。行驶里程的增加,车辆的维修和保养费用也相应增加。假设两种车辆的单位里程行驶费用分别为 m^C, m^E ,则物流企业配送中产生的行驶费用为

$$C_2 = m^C \sum_{k \in K^C(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^C d_{ij} + m^E \sum_{k \in K^E(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^E d_{ij}$$

(3) 耗电成本。由于电池容量的限制,电动汽车在配送过程中需要额外充电,假设每 kwh 电量费用为 w_r ,则电动汽车配送中产生的电费为

$$C_3 = w_r \sum_{k \in K^E(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^E d_{ij} g_v$$

(4) 燃油成本。根据对比多种油耗计算估计模型发现,综合排放测算模型(CMEM)在估算车辆碳排放时应用更加广泛,优化结果也更接近实际,因此燃油车油耗计算为

$$F_{ij}^C = F_R \cdot d_{ij} / v$$

根据油耗和碳排放量的关系,车辆从 i 行驶到 j 的碳排放量为

$$E_{ij}^C = F_{ij}^C \cdot e$$

假设燃油车每升油费为 w_o ,则物流企业配送中产生的燃油费用为

$$C_4 = w_o \sum_{k \in K^C(i,j)} \sum_{i \in N} x_{ijk}^C F_{ij}^C$$

混合车队在配送中的能源成本为: $C_3 + C_4$

(5) 碳排放费用。在物流配送过程中,电动汽车是“零碳排放”运载工具,故只考虑传统燃油车的碳排放。假设每千克碳排放费用为 w_c ,则物流企业配送中产生的碳排放费用为

$$C_5 = w_c \sum_{k \in K^C(i,j)} \sum_{k \in K} x_{ijk}^C E_{ijk}^C$$

综上所述,构建的目标函数公式为

$$\min F = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq j} \sum_{k \in K} (x_{ij}^C + x_{ij}^E) = 1, \forall j \in Z \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K^C} x_{0jk}^C \leq K^C, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K^C} x_{0jk}^E \leq K^E, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K^C} \sum_{i \in Z, i \neq j} x_{ijk}^C = \sum_{k \in K^C} \sum_{i \in Z, i \neq j} x_{jik}^C, \forall j \in Z \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K^E} \sum_{i \in Z, i \neq j} x_{ijk}^E = \sum_{k \in K^E} \sum_{i \in Z, i \neq j} x_{jik}^E, \forall j \in Z \quad (6)$$

$$\sum_{i \neq j} \sum_{k \in K^C} q_i x_{ijk}^C \leq Q^C, \forall i \in N, j \in Z \quad (7)$$

$$\sum_{i \neq j} \sum_{k \in K^C} q_i x_{ijk}^E \leq Q^E, \forall i \in N, j \in Z \quad (8)$$

$$p_j^C \leq p_i^C - q_i x_{ijk}^C + Q^C (1 - x_{ijk}^C), \forall i, j \in N \quad (9)$$

$$p_j^E \leq p_i^E - q_i x_{ijk}^E + Q^E (1 - x_{ijk}^E), \forall i, j \in N \quad (10)$$

$$e_i \leq \tau_i \leq l_i, \forall i \in N \quad (11)$$

$$\tau_j \geq \tau_i + (t_{ij} + s_i) x_{ijk}^C - l_0 (1 - x_{ijk}^C) \quad \forall i, j \in N \quad (12)$$

$$\tau_j \geq \tau_i + (t_{ij} + s_i) x_{ijk}^E - l_0 (1 - x_{ijk}^E) \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$\tau_j \geq \tau_i + t_{ij} x_{ijk}^E + T_i y_i - l_0 (1 - x_{ijk}^E) \quad \forall i \in R, j \in \{0\} \cup N \quad (14)$$

$$h_{1j} \leq h_{1i} - d_{ij} g_v x_{ijk}^E + B (1 - x_{ijk}^E) \quad \forall i \in N, j \in Z \quad (15)$$

$$h_{1j} \leq h_{2i} + r_i y_i - d_{ij} g_v x_{ijk}^E + B (1 - x_{ijk}^E) \quad \forall i \in R, j \in Z \quad (16)$$

$$0 \leq h_{1i} \leq \beta B, \forall i \in N \cup \{0\} \quad (17)$$

$$0 \leq h_{1i} + r_i \leq B, \forall i \in R \quad (18)$$

$$h_{1i} = h_{2i}, \forall i \in N \quad (19)$$

$$T_i = r_i / g_r, \forall i \in R \quad (20)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in Z \quad (21)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall i \in R \quad (22)$$

其中,目标函数式(1)表示混合车队配送成本的最小值。约束式(2)表示每个客户只被服务一次;约束式(3)、式(4)规定使用的车辆数不超过车队车辆的总数;约束式(5)、式(6)为流量的平衡,即每辆车进入节点的次数等于其离开的次数;约束式(7)、式(8)限制车辆载重不能超过额定载荷;约束式(8)、式(10)表示车辆在两相邻客户之间的载重量约束;约束式(11)表示服务时间满足客户时间窗约束;约束式(12)、式(13)表示相邻的两个客户之间的时间窗约束;约束式(14)为电动汽车在访问充电站后的时间窗约束;约束式(15)、式(16)分别表示电动汽车在离开

客户点和充电站后的电池电量约束;约束式(17)和约束式(18)分别表示电动汽车在行驶和充电中的电量约束,为避免过度充电损伤电池,设置充电量上限;约束式(19)表示电动汽车在服务客户中不消耗电量;约束式(20)为充电时间的计算公式;约束式(21)和式(22)表示二进制 0-1 变量。

2.4 算法设计

电动车车辆路径问题是传统 VRP 的变体,启发式算法求解的显著优势,求解质量和运行效率都很高。采用求解效率较高的粒子群算法进行求解,并结合模拟退火算法的 Metropolis 准则,增强粒子群算法的搜索能力,避免陷入局部最优。

步骤 1 初始化种群。根据设定的种群规模 $N = 200$,对粒子进行随机初始化,生成粒子 i 的初始位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 以及初始速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2 适应度值。确定初始粒子的位置和速度后,计算粒子群中每个粒子的适应度 $f(X_i)$ 值即目标函数值。

步骤 3 更新粒子的速度和位置。根据下列公式对粒子的位置和速度进行更新:

$$\text{位置更新公式: } x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$$

速度更新公式:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - x_{id}^k)$$

确定新粒子的个体极值 p_{best_i} 和种群群体极值 g_{best_i} , 比较新旧粒子的适应度值,若 $f(X_i) \geq f(p_{best_i})$, 则更新粒子 $p_{best_i} = X_i$; 在 PSO 流程中增加 Metropolis 准则, 定义一个粒子接受概率 p_t , 若 $f(g_{best_i}) < f(p_{best_i})$, 以概率 p_t 接受 $g_{best_i} = p_{best_i}$, 从而扩大解的搜索范围, 增强跳出局部最优的能力。概率 p 的计算公式如式(23), 其中 C_t 是与时间有关的系数, 时间越长 C_t 越大:

$$p_t = e^{-|f(g_{best_i}) - f(p_{best_i})| \times C_t}$$

步骤 4 判断。判断是否满足终止条件, 若不满足返回步骤 2, 否则结束算法。

利用 Metropolis 准则, 可以加速粒子群算法跳出局部最优解, 增强粒子群算法的早期搜索能力。该准则能够决定粒子的更新情况, 筛选出优质粒子, 加强后期粒子群算法的局部搜索能力。

3 实验与结果分析

3.1 算例求解

各节点具体信息如表 1 所示。其中节点 0 代表配送中心, 节点 1—20 为顾客, 21—25 为充电站位置。其余参数设置如下: 车辆行驶速度为 40 km/h, 车辆固定成本 $c^C = 200$ 元/辆, $c^E = 500$ 元/辆, 单位距离行驶成本

$m^C = 20$ 元/km, $m^E = 10$ 元/km, 碳排放成本 $w_c = 0.1$ 元/kgCO₂, 充电成本 $w_r = 0.8$ 元/km, 燃油费用参考上海地区柴油价格设置 $w_o = 7.5$ 元/L。

表 1 各节点信息

Table 1 Information of each node

| ID | 横坐标 | 纵坐标 | 需求量 /kg | 左时间窗 /min | 右时间窗 /min | 服务时长 /min |
|----|-----|-----|---------|-----------|-----------|-----------|
| 0 | 56 | 56 | 0 | 0 | 1 440 | 20 |
| 1 | 66 | 78 | 204 | 420 | 720 | 20 |
| 2 | 56 | 27 | 207 | 720 | 1 020 | 20 |
| 3 | 88 | 72 | 162 | 840 | 1 020 | 20 |
| 4 | 50 | 38 | 283 | 840 | 1 140 | 20 |
| 5 | 32 | 80 | 199 | 0 | 1 440 | 20 |
| 6 | 16 | 69 | 276 | 420 | 840 | 20 |
| 7 | 88 | 96 | 189 | 720 | 1 020 | 20 |
| 8 | 48 | 96 | 213 | 420 | 720 | 20 |
| 9 | 32 | 104 | 165 | 840 | 1 020 | 20 |
| 10 | 68 | 48 | 228 | 840 | 1 140 | 20 |
| 11 | 24 | 16 | 276 | 420 | 720 | 20 |
| 12 | 16 | 32 | 210 | 420 | 1 020 | 20 |
| 13 | 8 | 48 | 261 | 420 | 1 020 | 20 |
| 14 | 32 | 64 | 195 | 0 | 1 440 | 20 |
| 15 | 24 | 48 | 228 | 840 | 1 320 | 20 |
| 16 | 72 | 64 | 213 | 420 | 720 | 20 |
| 17 | 72 | 96 | 243 | 420 | 720 | 20 |
| 20 | 83 | 45 | 207 | 840 | 1 320 | 20 |
| 21 | 40 | 80 | 0 | 0 | 1 440 | 0 |
| 22 | 40 | 35 | 0 | 0 | 1 440 | 0 |
| 23 | 69 | 63 | 0 | 0 | 1 440 | 0 |
| 24 | 67 | 19 | 0 | 0 | 1 440 | 0 |
| 25 | 26 | 54 | 0 | 0 | 1 440 | 0 |

燃油车和电动汽车的参数设置如下: 车辆载荷 $Q^C = 1\ 500$ kg, $Q^E = 1\ 000$ kg; 电动汽车的电池容量 $B = 100$ kwh, 为避免车辆长时间充电对电池造成损害, 设置充电量上限为总电量的 80%, 参数 $\beta = 0.8$, 燃油车不设置行驶里程限制; 燃油车燃油排放因子设置参考文献[15], $e = 3.096$ kg/L, $F_R = 6$ L/h; 电量消耗率 $g_v = 1$ kwh/km; 充电速率 $g_r = 80$ kwh/h。

基于上述的数据, 用 MATLAB 分别对混合车队和

传统燃油车进行了 10 次重复试验, 得到了最优配送路径, 表 2 为混合车队配送的优化结果, 其中车辆 3、4、5 为电动汽车。表 3 为 3 种车队配送结果对比。在这 3 组实验中, 总车辆数均为 10 辆, 其中混合车队由 5 辆燃油车和 5 辆电动汽车组成。

根据表 3 的计算结果可以看出, 电动汽车车队的总成本最低, 其次是混合车队, 传统燃油车的总成本最高。

首先, 虽然混合车队的行驶里程相对于传统燃油车车队略有增加, 但是燃油车单位里程行驶成本较高, 消耗大量能源的同时也产生了大量的碳排放, 导致能源和碳排放费用增加。而混合车队则用一定数量的电动汽车替代了燃油车, 有效降低了能源消耗和碳排放量, 从而使总成本下降约 12%。使用混合车队可以明显降低运输成本, 不仅节约能源, 还更环保。其次, 与电动汽车车队相比, 混合车队的行驶路程大大降低, 这是因为电动汽车电池容量的限制, 使得车队需要多次前往充电站, 这不仅增加了行驶里程, 同时也需要增加使用的车辆数以满足用户需求。但是, 由于电动汽车车队行驶成本和能源费用较小, 所以车队的总成本小于混合车队。因此, 在不考虑车辆购置成本的前提下, 使用电动汽车更有利于降低物流企业配送成本。

本文改变了混合车队中电动汽车的电池容量, 测试了不同的电池容量对配送结果的影响, 测试结果如表 4 所示。随着电池容量的增加, 电动汽车对城市物流配送的适应性提高, 应用也更加广泛。从表 4 可以看出, 当电池容量为 140 kwh 时, 配送成本大幅降低, 在电池容量从 100 kwh 增加到 200 kwh 的过程中, 车队行驶里程总体趋势是不断减少的, 能源成本、碳排放成本和总成本也随着电池容量的增加而降低。

但是, 随着电池容量的继续增加, 电动汽车的电量可以不需要充电就能满足所有客户点的服务, 此时增大电池容量的优势逐渐减弱, 配送成本的下降趋势也逐渐平缓。当电动汽车数量在车队中比重高时, 虽然有更多的机会减少碳排放成本, 但企业也需要投入更多的资金购买电动汽车和维护电池等设备。因此, 对于物流企业来说, 一味提高车辆配置不仅无法获得更高效益, 而且会增加运营成本。

表 2 混合车队优化结果

Table 2 Mixed fleet optimization results

| 车 辆 | 配送路径 | 里程/km | 固定成本/元 | 燃油费/元 | 碳排放费/元 | 电费/元 | 总成本/元 |
|-----------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-----------|
| CV ₁ | 0-2-9-7-14-13-12-0 | 200.97 | 200 | 226.09 | 9.33 | — | 4,454.82 |
| CV ₂ | 0-4-8-19-21-20-16-0 | 259.29 | 200 | 291.70 | 12.04 | — | 5,689.54 |
| EV ₁ | 0-3-15-6-22-10-0 | 176.07 | 500 | — | — | 35.21 | 2,295.91 |
| EV ₂ | 0-5-11-0 | 53.99 | 500 | — | — | 10.80 | 1,050.70 |
| EV ₃ | 0-18-17-0 | 92.97 | 500 | — | — | 18.59 | 1,448.29 |
| 总计 | — | 783.29 | 1900 | 69.04 | 21.37 | 64.61 | 14,939.27 |

表 3 3 种车队优化结果对比
Table 3 Comparison of optimization results of three fleets

| 类 型 | 车辆数/辆 | 固定成本/元 | 行驶里程/km | 碳排放量/kg | 碳排放成本/元 | 能源成本/元 | 总成本/元 |
|--------|-------|--------|----------|---------|---------|--------|-----------|
| 燃油车车队 | 4 | 800 | 764.50 | 355.03 | 35.50 | 860.06 | 16 985.57 |
| 电动汽车车队 | 7 | 3 500 | 1 086.80 | — | — | 217.26 | 14 585.36 |
| 混合车队 | 5 | 1 900 | 783.29 | 213.74 | 21.37 | 582.40 | 14 939.27 |

表 4 不同电池容量配置的混合车队配送结果

Table 4 Distribution results of the mixed fleet with different battery capacity configurations

| 电池容量/W | 车辆数比例/(C:E) | 行驶里程/km | 碳排放量/kg | 碳排放成本/元 | 能源成本/元 | 总成本/元 |
|--------|-------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 100 | 3:2 | 783.29 | 213.24 | 21.32 | 582.4 | 14 939.27 |
| 120 | 2:3 | 789.28 | 192.97 | 19.30 | 542.212 | 14 509.51 |
| 140 | 2:3 | 749.97 | 166.74 | 16.67 | 482.115 | 13 489.01 |
| 160 | 2:3 | 739.7 | 138.19 | 13.82 | 423.19 | 12 709.71 |
| 180 | 2:3 | 686.22 | 137.48 | 13.75 | 411.11 | 12 147.76 |
| 200 | 2:3 | 692.81 | 122.21 | 12.22 | 381.98 | 11 853.80 |

3.2 灵敏度分析

在该算例的基础上,针对混合车队中车辆最大载荷和充电速率对配送成本和碳排放量的影响进行灵敏度分析。

3.2.1 车辆最大载荷

以 20%、40%、60%、80%、100%的比例依次增加车辆的最大载荷,引起的配送的各项成本变化如图 1 所示。

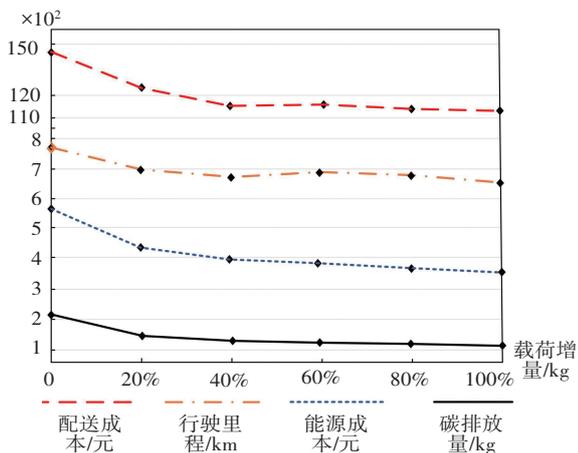


图 1 车辆载荷灵敏度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of vehicle loads

由图 1 可以看出,物流企业的配送成本随着车辆最大载荷增加而减少。原配送方案受车辆最大载荷的约束,较大的最大载荷可以使得一次配送的数量更多,从而在单位时间内完成更多的任务,故当载荷增加 20%时,配送成本、能源成本、行驶里程和碳排放量下降幅度较大。当最大载荷增加 60%时,行驶里程和配送成本出现小幅波动,这是因为燃油车在处理较大载荷时能源效率降低,而电动汽车在较大载荷下的行驶相对稳定,

因此车队中电动汽车使用数增加,使得行驶里程产生波动的同时维持能源成本和碳排放量稳步下降。

但当车辆最大载荷持续增加时,配送成本下降趋势却逐渐减缓。这是由于虽然增大了车辆载重,但是客户时间窗和电动汽车的行驶里程等因素仍约束着最小目标值,配送系统无法继续优化直至对配送方案不再产生影响。此外,在企业的实际运营中,较大的最大载荷意味着更高的维修和保养成本,会增加车辆的运营成本,从而导致配送成本上升。

3.2.2 充电速率

以 20%、40%、60%、80%、100%的比例依次增加电动汽车的充电速率,配送各项成本变化如图 2 所示。

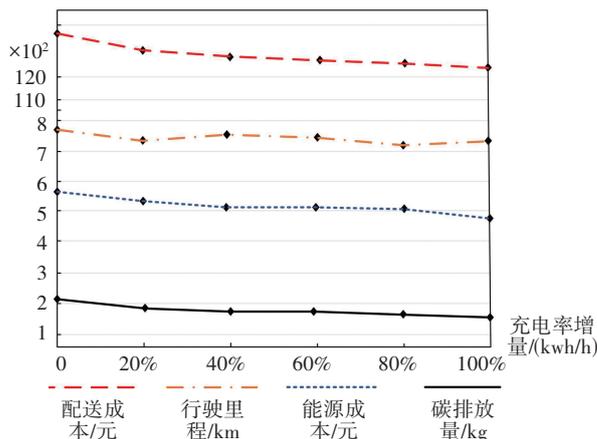


图 2 电动汽车充电率灵敏度分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of EV charging rate

从图 2 可以看出,当电池充电速率的增加 20%,配送成本、碳排放量、能源成本以及行驶里程均以不同幅度降低。随着电池充电率的增加,电动汽车的充电时间缩短,从而缩短了配送时间,缓解了客户时间窗的约束,能够同时满足更多客户需求。因此电动汽车的优势更加显著,能够有效地降低了物流企业的碳排放量和配送成本。但是,当充电率持续增加时,即使行驶里程不断地波动变化,此时配送成本处于稳定状态,不再发生大幅变化。这是因为充电时长的变化已经不再影响配送路径方案和配送成本,但其他因素的约束仍然影响发挥着作用。

因此,对于物流企业来说,在已有的车队配置下,可以根据实际情况优先选择载重量较大的车辆和充电速率较高的充电设施,能够有效提高配送系统的效益,但是车辆的载荷并不是越大越好,需要根据实际情况

选择合适的车辆。

4 结 论

研究了考虑碳排放的混合车队车辆路径规划问题,这是一种更适用于实际场景的物流运输模式。将电动汽车加入运输车队中,综合考虑了车辆的最大载重、客户时间窗、耗电率约束等,结果表明将电动汽车加入传统燃油车队在能够显著降低物流配送成本和碳排放量,不仅可以有效降低企业运营成本,还可以提高环境效益。

最后针对利益相关方提出管理意见:政府可以制定积极的政策,鼓励政企协作,督促企业提高低碳物流意识;对于企业而言,需要与其他利益相关者进行更紧密的合作,包括政府、学术界、非政府组织和客户。共同努力推动运输业向更可持续的方向发展,通过共享知识、经验和最佳实践,促进碳排放的减少。主动加强环境意识,合理使用电动汽车,降低碳排放,推动社会经济可持续,并树立良好的企业形象。

参考文献(References):

- [1] 张金良,李超.碳排放影响下的动态配送车辆路径优化研究[J].中国管理科学,2022,30(9):184-194.
ZHANG Jin-liang, LI Chao. Research on dynamic distribution vehicle routing optimization under the influence of carbon emission[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(9): 184-194.
- [2] 唐慧玲,唐恒书,朱兴亮.基于改进蚁群算法的低碳车辆路径问题研究[J].中国管理科学,2021,29(7):118-127.
TANG Hui-lin, TANG Heng-shu, ZHU Xing-liang. Research on low-carbon vehicle routing problem based on modified Ant Colony Algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7): 118-127.
- [3] 陈雨蝶,干宏程,程亮.“双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J].控制与决策:2023,38(7):1951-1959.
CHEN Yu-die, GAN Hong-cheng, CHENG Liang. Cold chain logistics model based on joint distribution and its optimization algorithm under the background of Double Carbon[J]. Control and Decision: 2023, 38(7): 1951-1959.
- [4] 李得成,陈彦如,张宗成.基于分支定价算法的电动车与燃油车混合车辆路径问题研究[J].系统工程理论与实践,2021,41(4):995-1009.
LI De-chen, CHENG Yan-ru, ZAHNG Zong-cheng. A branch-and-price algorithm for electric vehicle routing problem with time window and mixed fleet[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(4): 995-1009.
- [5] 程坦,陈鹏,张国伟,等.部分充电策略下的多车型电动汽车车辆路径优化问题研究[J].交通运输工程与信息学报,2022,20(2):105-114.
CHENG Tan, CHEN Peng, ZHANG Guo-wei, et al. Heterogeneous electric vehicles routing problem under partial charging strategy[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(2): 105-114.
- [6] 葛显龙,李祖伟,葛小波.考虑灵活充电策略的带时间窗物流配送路径优化研究[J].控制理论与应用,2020,37(6):1293-1301.
GE Xian-long, LI Zu-wei, GE Xiao-bo. Research on logistics distribution route optimization with time window considering flexible charging strategy[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(6): 1293-1301.
- [7] MENG MING, MA YUN. Route optimization of electric vehicle considering soft time windows and two ways of power replenishment[J]. Advances in Operations Research, 2020, 20(4): 1-10.
- [8] ZHU Y, LI C, LEE KY. The NR-EGA for the EVRP problem with the electric energy consumption model[J]. Energies. 2022; 15(10): 3681-3692.
- [9] MACTINA G, PUGLIESE L D P, et al. The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows[J]. Computers & Operations Research, 2018, 101(4): 183-199.
- [10] GOEKE D, SCHNEIDER M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 245(1): 81-99.
- [11] PHILIPPE L, CEDRIC D C, et al. Conventional, hybrid, or electric vehicles: which technology for an urban distribution centre?[J]. The Scientific World Journal, 2015, 2015(1): 1-11.
- [12] ZHAO P, LIU F, et al. Bi-Objective optimization for vehicle routing problems with a mixed fleet of conventional and electric vehicles and soft time windows[J]. Hindawi Limited, 2021, 2021(9): 1-11.
- [13] STEHLING T M, SOUZA M J F, et al. Variable neighborhood descent branching applied to the green electric vehicle routing problem with time window and mixed fleet[C]//International Conference on Variable Neighborhood Search. Springer, Cham. 2021.
- [14] 李英,张鹏威,吴一帆.电动汽车/传统汽车混合车队车辆配置及路径优化模型[J].系统管理学报,2020,29(3):522-531.
LI Ying, ZHANG Peng-wei, WU Yi-fan. Vehicle routing problem with mixed fleet of conventional and electric vehicles[J]. Journal of Systems and Management, 2020, 29(3): 522-531.
- [15] 张津.考虑碳排放的带时间窗约束的车辆路径问题研究[D].重庆:重庆大学,2016.
Zhang Jing. Vehicle routing problem with time windows constraint considering carbon emission[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

责任编辑:田 静