

基于NSGA-II算法的低碳多目标电动冷藏车路径优化

廖伊杰, 孟芳*

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年3月10日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月29日

摘要

随着国家对物流行业的绿色化和可持续发展的日益重视, 新能源相关行业正在蓬勃发展。针对引入电动冷藏车的冷链物流企业, 构建了一个同时考虑综合运输成本、碳排放量与企业配送水平的多目标优化模型, 并结合NSGA-II算法对使用电动冷藏车的冷链物流配送路径进行优化求解。对模型求解得到了Pareto前沿面, 并对Pareto解集中的几个典型解进行了分析, 分析结果可为引入电动冷藏车的冷链物流企业在考虑降低碳排放和提高企业物流服务水平的前提下进行路径优化提供一定的决策参考。

关键词

电动冷藏车, 路径优化, 碳排放, 多目标优化, NSGA-II

Path Optimization of Low-Carbon Multi-Objective Electric Refrigerated Truck Based on NSGA-II Algorithm

Yijie Liao, Fang Meng*

School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Mar. 10th, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

With the country's increasing attention to the greening and sustainable development of the logistics industry, new energy-related industries are booming. For the cold chain logistics enterprises

*通讯作者。

introducing electric refrigerated trucks, a multi-objective optimization model was constructed, which simultaneously considered the comprehensive transportation cost, carbon emission and the distribution level of the enterprise, and combined with the NSGA-II algorithm to optimize and solve the cold chain logistics distribution path using electric refrigerated trucks. The Pareto front surface of the model is obtained, and several typical solutions of the Pareto solution set are analyzed. The analysis results can provide certain decision-making reference for the cold chain logistics enterprises introducing electric refrigerated trucks to optimize the route under the premise of reducing carbon emission and improving the logistics service level of enterprises.

Keywords

Electric Refrigerated Truck, Path Optimization, Carbon Emissions, Multi-Objective Optimization, NSGA-II

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球对气候变化的关注日益加深,减少温室气体排放已成为许多国家和地区的重要政策目标。为了应对这一挑战,我国政府正在推动新的减排政策,同时鼓励物流企业采取行动,减少碳排放,以推动国家和全球的可持续发展。我国已明确提出“建设现代物流体系,加快发展冷链物流”的政策,冷链物流发展将成为重要发力点,因此研究冷链物流将更符合国家的发展战略。而根据文件《“十四五”冷链物流发展规划》,在实现碳达峰、碳中和目标背景下,冷链物流面临规模扩张和碳排放控制的突出矛盾,推广新能源冷藏车将成为有效的解决方案。而目前市面上新能源冷藏车动力来源多为纯电动型,电动冷藏车作为清洁能源车辆,不仅可以降低碳排放,提高能源效率,而且还可以提高冷链物流的运营效率和服务质量,推广电动冷藏车将有助于我国冷链物流行业的健康可持续发展,实现碳达峰、碳中和目标。但是,如何科学的对电动冷藏车进行调度和线路规划成为许多传统冷链物流企业当下所面临的难题。因此,深入研究电动冷藏车在多目标冷链物流路径优化问题对于传统冷链物流企业具有重要现实意义。

车辆路径问题最早是由 Dantzig 和 Ramser [1]于 1959 年首次提出。而电动车路径规划问题(英文简称作是 EVRP),其本质即是研究目标对象经燃油车转换为电动车。电动汽车路径规划问题(EVRP)相较于传统的车辆路径规划问题(VRP),由于需要考虑充电和电池的因素,变得更为复杂。而冷链物流配送由于客户对货物接收的时间通常有特定的需求,通常在研究的时候会考虑到时间窗的约束。Bruglier 等[2]等在研究带时间窗的电动汽车路径问题时结合了能耗模型中的有效载荷和车速等多个因素。Wang 等[3]提出了带时间窗和共享充电站的协同多车场作业电动汽车路径问题。Xiao 等[4]等在研究电动汽车路径问题时考虑到回程客户,提出了具有时间窗和混合回程的电动汽车路径问题。Zhang 等[5]则是基于可信性理论建立了带有时间窗和充电站的模糊电动汽车路径模糊优化模型。而针对冷链电动车辆路径问题的研究,刘志硕等分别构建了带软时间窗[6]和带硬时间窗[7]的冷链电动车辆路径优化模型。Zhao 等[8]等在考虑时变交通条件前提下研究了冷链电动汽车路径问题。

随着各国政府对减排政策的大力推行,许多学者对减排背景下的冷链物流进行了研究。Hou 等[9]总结了生鲜农产品冷链物流的现状,对低碳经济背景下生鲜农产品冷链物流的发展战略进行了分析。Zhang 等[10]研究了生鲜农产品冷链物流发展水平对区域碳排放的影响。在降碳的大背景下,近年来碳中和、碳

交易和碳税政策逐渐成为研究的热点。Jia [11]在碳中和视角下构建了农产品电商冷链物流配送路径优化模型。Li 等[12]在研究冷链物流时提出了一个综合考虑碳交易机制的 LRIP (位置 - 路径 - 库存问题)模型。Liu 等[13]构建一个具有碳交易机制的冷链物流联合配送 - 绿色车辆路径问题模型, 并利用模拟退火算法对其进行优化。

而对于冷链物流领域的多目标优化问题, 许多学者也进行了研究。Ma 等[14]构建了最小化配送成本和最大化客户满意度的双目标冷链物流车辆配送路径模型。李倩等[15]基于模糊时间窗构建了一个以客户满意度最大、配送总成本最小为目标的多目标冷链物流配送路径优化模型。吴暖等[16]提出时间容忍度概念及其量化方法, 并构建了以客户时间容忍度最大、冷链物流企业成本最小为目标的冷链物流配送路径多目标优化模型。

目前针对电动冷藏车研究尚处于起步阶段, 各方面的研究内容均较少。在研究电动车辆路径优化问题时, 由于电动车辆的直接碳排放为零, 很少有学者在研究路径优化问题时考虑碳排放问题。但是根据《物流企业温室气体排放核算方法(征求意见稿)》, 仍会对物流企业使用的电动或混动车辆在运输及配送活动中外购电力导致的温室气体排放量进行核算, 因此考虑使用电动冷藏车所间接产生的温室气体是有必要的。

综上, 本文将在前人研究的基础上, 在低碳理念的大背景下, 针对冷链物流企业使用电动冷藏车的情况, 考虑了配送过程中企业由于外购电力所产生的温室气体排放, 构建综合运输成本最低、企业配送水平最高和碳排放量最低的多目标冷链电动冷藏车路径优化模型, 并设计适用于电动冷藏车的 NSGA-II 算法对其进行求解。

2. 模型建立

2.1. 问题描述与假设

在本文中, 我们探讨了一个冷链物流配送企业如何在低碳理念的指导下, 使用电动冷藏车进行配送。该冷链物流企业的某个配送中心负责向多个客户点进行配送, 配送中心只在固定的时间段内营运, 电动冷藏车只能在该时间段内出发或者返回, 该地区的电动冷藏车都从这个配送中心出发, 完成配送后返回配送中心。客户有软时间窗要求, 允许车辆早到或者晚到, 但也会产生相应的成本。

为了更好的研究所需要解决的问题, 我们在这里做出以下假设:

- 1) 能源假设: 冷藏室制冷的能源消耗与时间成正比, 运输消耗的电能与距离成正比。
- 2) 车辆参数假设: 电动冷藏车型号是确定的, 其额定载重量、电池容量、充电时间和续航里程等参数都是已知的。
- 3) 充电站及充电模式假设: 充电站的位置是已知的, 并且每个充电站都有足够的位置供车辆充电, 对于进入充电站的电动冷藏车采用换电模式为电动冷藏车进行充电且电动冷藏车在充电站的服务时间为已知且固定。
- 4) 碳排放假设: 电动冷藏车的碳排放量可以通过其电力消耗量准确计算。
- 5) 线路假设: 每辆电动冷藏车在配送过程中每个充电站最多进入一次, 且经过充电站后电池是被充满的。每辆电动冷藏车从配送中心出发开始配送, 配送完成后返回配送中心进行充电, 不进行下一次配送。所有的电动冷藏车都在工作开始的时候有着满电量, 且在运输途中能够在电量耗尽前就近进入最近的充电站进行充电。
- 6) 客户点假设: 每个客户点的需求, 地理位置均已知, 且所有的客户点的需求都需要满足。每辆车可对多个客户点进行配送, 但每个客户点的需求至多一辆车即可满足。
- 7) 配送模型假设: 本文研究的是一个由单一物流配送中心、多个充电站、多个客户点构成的物流配送系统。

2.2. 符号说明

为解决上述所描述问题, 设立了一系列的模型参数与决策变量, 相关模型参数与决策变量的详细描述如下表 1、表 2 所示。

Table 1. Model parameters

表 1. 模型参数

参数	描述	参数	描述
0	配送中心	d_{i0}/m	表示节点 i 与配送中心 0 的距离
M	客户节点集合	$M/\text{元}$	单位碳排放量的碳税成本
F	充电站集合	EF_p	电网排放因子默认值
K	电动冷藏车集合	$d/\text{元}$	单位时间延迟成本
P	非配送中心集合, 即 $M \cup F$	t_{ej}	客户点 j 的最早服务时间
N	节点集合, 即 $\{0\} \cup M \cup F$	t_{lj}	客户点 j 的最晚服务时间
$a/\text{元}$	每辆车的固定成本	c_1	冷藏车早到对企业的配送水平影响系数
$b/\text{元}$	单位电量电价	c_2	冷藏车晚到对企业的配送水平影响系数
k_1/kWh	电动冷藏车单位里程所消耗的电能	q_j	j 点的货物需求量
$c/\text{元}$	养路费及其他费用的单位里程成本	Q	电动冷藏车的最大载货量
d_{ij}/m	节点 i 与节点 j 之间的距离	t_{ij}	电动冷藏车在节点 i 与 j 行驶的时间
k_2/kWh	单位时间的制冷耗电能	E	电动冷藏车的最大电量
t_j/h	电动冷藏车在节点 j 的服务时间		

Table 2. Model decision variables

表 2. 模型决策变量

参数	描述	参数	描述
x_{k0i}	车辆 k 从配送中心出发到节点 i 取 1, 否则取 0	T_{ikj}	$t_{ij}^k > t_{ej}$ 取 1, 否则取 0
x_{kij}	车辆 k 从节点 i 出发到节点 j 取 1, 否则取 0	u_i^k	车辆 k 在节点 i 的实际载货量
x_{ki0}	车辆 k 从节点 i 返回配送中心取 1, 否则取 0	u_0^k	车辆 k 在配送中心的载货量
t_{ij}^k	电动冷藏车 k 在节点 j 的实际到达	e_i^k	车辆 k 在节点 i 开始服务的电量
t_{sj}^k	电动冷藏车 k 在节点 j 的实际开始服务时间	x_{kif}	车辆 k 从节点 i 出发到充电站 f 取 1, 否则取 0
T_{ekj}	$t_{ij}^k < t_{ej}$ 取 1, 否则取 0		

2.3. 目标函数

本模型基于上述问题与假设, 所设立的多个目标函数分别为企业使用电动冷藏车的综合运输成本、配送过程中企业由于外购电力所额外产生的二氧化碳排放量和企业服务水平函数。

2.3.1. 综合运输成本

本研究所解决的 EVPRTW 问题, 所构建的综合运输成本目标函数包括了固定成本、运输成本、制冷成本、碳排放成本、制冷成本、等待成本和延迟成本等方面。

1) 固定成本一般包括电动冷藏车的固定成本, 其组成包括了车辆的购置成本、车辆维护费、车辆的管理费、日常维护与驾驶员的工资、平均到每一辆电动冷藏车的场地费用等构成, 这些成本一般来说主要与所使用的车辆的数量的有关, 在本研究中将其表示为:

$$C_1 = a \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} x_{k0i} d_{ij} \quad (1)$$

2) 电动冷藏车在运输的过程中会根据所行驶的里程产生一定的运输成本。运输成本主要包括了电动冷藏车在行驶过程中所消耗的电能成本、养路费与其他在运输过程中产生的成本, 我们可以将其表示为

$$C_2 = (bk_1 + c) \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} d_{ij} \quad (2)$$

3) 电动冷藏车在运输过程中, 根据货物的种类和保鲜要求, 在完成其配送任务之前需要消耗一定的电能来维持车厢内的低温环境, 一般与制冷时长有关, 在本研究中我们将其表示为

$$C_3 = bk_2 \left(\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} d_{ij}}{v_1} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} t_j - \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{ki0} d_{i0}}{v_1} \right) \quad (3)$$

4) 电动冷藏车在运输过程中, 如果车辆在客户最早接受服务时间之前到达, 则需要等待至最早接受时间。这部分成本通常考虑为车辆额外等待的时间内所产生的制冷成本, 我们在这里将其表示为:

$$C_4 = bk_2 \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} t_{wj}^k \quad (4)$$

5) 电动冷藏车在运输过程中, 如果超过了预定的配送时间, 可能会对企业造成一定的经济损失。这部分损失可能包括了因为延误导致的订单取消、客户投诉以及对品牌声誉的影响等。因此, 我们需要将这部分时间惩罚成本也考虑在内。在本研究中, 我们将其表示为:

$$C_5 = d \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} t_{dj}^k \quad (5)$$

6) 在使用电动冷藏车的过程企业由于外购电力中会产生二氧化碳, 对于企业而言需要政府对其征收的碳税, 对于这部分成本我们通常可以表示为:

$$C_6 = MZ_2 \quad (6)$$

其中 Z_2 为企业使用电动冷藏车进行配送过程由于外购电力所额外产生的二氧化碳排放量。

7) 根据上列各式可以将电动冷藏车在配送过程所产生的综合运输成本

$$Z_1 = \sum_i^6 C_i \quad (7)$$

2.3.2. 碳排放量的测算

电动冷藏车在进行配送时由于外购电量所产生的碳排放量一般与其在配送过程中所消耗的电量成正比, 该过程中所消耗的电量一般可以分为两部分进行计算, 一部分是车辆在行驶过程中所消耗的电量, 另外一部分制冷机在车辆完成配送任务之前运行时所消耗的电量。而碳排放的测算方法可以根据《物流企业温室气体排放核算方法(征求意见稿)》中的相关方法进行测算, 相关公式如下:

$$Z_{21} = k_1 \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} d_{ij} \quad (8)$$

$$Z_{22} = k_2 \left(\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} d_{ij}}{v_1} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{kij} t_j - \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{ki0} d_{i0}}{v_1} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} t_{wi}^k \right) \quad (9)$$

$$Z_2 = EF_p (Z_{21} + Z_{22}) \quad (10)$$

其中, Z_{21} 表示车辆在行驶过程中耗的电量, Z_{22} 表示制冷机运行时所消耗的电量。而电网排放因子 EF_p 默认值见表 3。

Table 3. Default values of electric power emission factors**表 3.** 电力排放因子默认值

名称	数值	单位
2022 年度全国电网排放因子	0.5703	tCO ₂ e / MWH

注：数据来源于《关于做好 2023~2025 年发电行业企业温室气体排放管理有关工作的通知》

2.3.3. 企业配送水平函数

在冷链物流企业中，配送水平函数是一个关键的评价指标，它是企业对自身配送水平的评价，主要受到客户点时间窗和客户点需求量的影响。在冷链物流配送过程中，客户一般都可以自主选择冷链产品的配送时间，而客户能否在自己期望的时间窗内接受到货物便是影响客户满意度的重要标准，而企业往往会优先更加重视需求量大的客户点的配送任务。电动冷藏车过早到达客户点冷藏车会进行等待，该部分的费用主要是由制冷机仍在工作所消耗的电量产生。而过晚到达客户点则会引起客户的不满，导致客户满意度下降从而影响企业的利益。简而言之，过早或是过晚到达客户点都会产生相应的影响对企业产生不必要的损失，从而影响企业的配送水平。我们这里用下式来对企业配送水平进行评价：

$$Z_3 = -(Z_{31} + Z_{32}) \quad (11)$$

$$Z_{31} = c_1 \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} T_{ekj} \frac{t_{wj}^k q_j}{(t_{lj} - t_{ej})} Q \quad (12)$$

$$Z_{32} = c_2 \sum_{k \in K} \sum_{j \in M} T_{lkj} \frac{t_{dj}^k q_j}{(t_{lj} - t_{ej})} Q \quad (13)$$

其中 Z_{31} 表示配送车辆由于早到货物点对企业配送水平的影响， Z_{32} 表示配送车辆由于晚到货物点对企业配送水平的影响。 Z_3 越大表示企业的配送水平越高。此外， c_1 的取值应该要比 c_2 小许多，也就是所对企业而言冷藏车晚到产生的后果要比早到产生的后果更加严重。

2.3.4. 多目标优化模型

上述对于各目标函数的描述，结合各种需要考虑的实际约束，本节以综合运输成本、碳排放量、企业配送水平为目标函数，建立以下多目标模型：

$$\min Z_1 = \sum_i^6 C_i$$

$$\min Z_2 = EF_p (Z_{21} + Z_{22})$$

$$\min(-Z_3) = Z_{31} + Z_{32}$$

$$\sum_{i \in M} x_{ki0} = \sum_{i \in M} x_{k0i} = 1, \quad k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in M} x_{kij} = 1, \quad \forall j \in M, \quad i \neq j \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in M} x_{kij} = 1, \quad \forall i \in M, \quad i \neq j \quad (16)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in M} x_{kij} q_j \leq Q, \quad \forall k \in K, \quad i \neq j \quad (17)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_1} \quad (18)$$

$$t_{wj}^k = \max \{0, t_{ej} - t_{rj}^k\}, \forall j \in M, k \in K \tag{19}$$

$$t_{dj}^k = \max \{0, t_{rj}^k - t_{lj}\}, \forall j \in M, k \in K \tag{20}$$

$$t_{sj}^k = t_{rj}^k + t_{wj}^k, \forall j \in M, k \in K \tag{21}$$

$$t_{rj}^k = \sum_{i \in P} x_{kij} (t_{si}^k + t_j + t_{ij}), \forall k \in K, j \in M, i \neq j \tag{22}$$

$$0 \leq u_j^k \leq u_i^k - q_j x_{kij} + Q(1 - x_{kij}), \forall j \in M, k \in K \tag{23}$$

$$0 \leq u_0^k \leq Q, \forall k \in K \tag{24}$$

$$0 \leq e_j^k \leq e_i^k - x_{kij} k_2 t_{sj}^k - t_{si}^k + t_j^k - x_{kij} k_2 d_{ij} + E(1 - x_{kij}), \forall j \in M, i \in M, i \neq j, k \in K \tag{25}$$

$$0 \leq e_i^k \leq E, i \in P, \forall k \in K \tag{26}$$

$$e_f^k = E x_{kif}, i \in M, f \in F, i \neq j, k \in K \tag{27}$$

其中式(14)表示每辆电动冷藏车都从配送中心出发并且最后返回配送中心；式(15)，式(16)表示每个客户点都只有一辆电动冷藏车进行服务，即只有一辆车到达且只有一辆车出发；式(17)为某车辆配送各点载货量和约束；式(18)表示车辆的行驶时间；式(19)表示车辆早到的等待时间；式(20)表示车辆晚到的延迟时间；式(21)表示电动冷藏车 k 在节点 j 的开始服务时间；式(22)表示电动冷藏车 k 到达节点 j 的时间；式(23)表示任意节点的载货量不小于 0；式(24)表示任意车辆 k 的初始载货量非负并且不超过最大载货量；式(25)表示车辆 k 在配送两个连续客户节点前后的电量关系；式(26)表示车辆 k 在任意节点的电量非负并且小于最大电量；式(27)表示车辆 k 进入充电站后将充满电。

3. NSGA-II 算法概述

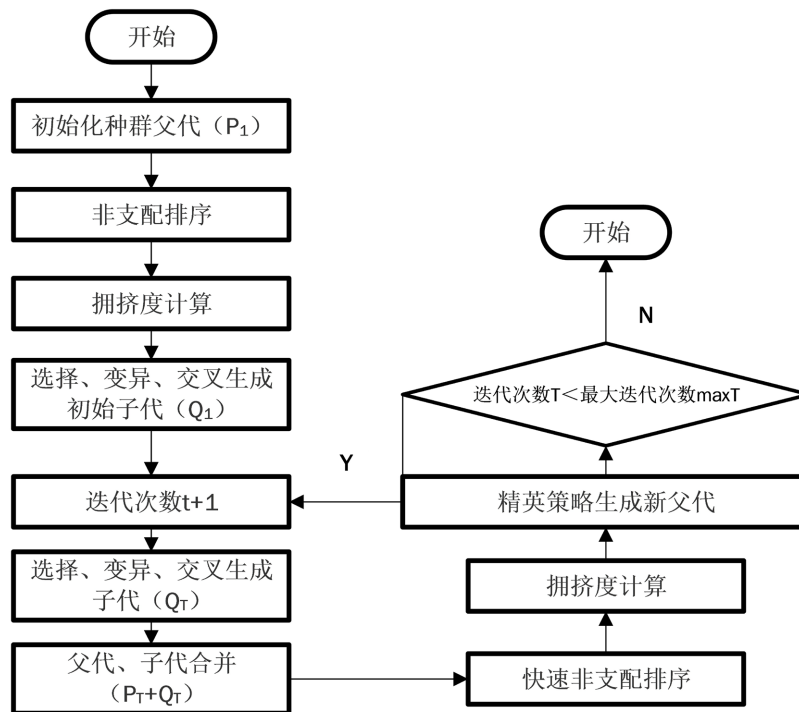


Figure 1. Flowchart of NSGA-II algorithm

图 1. NSGA-II 算法流程图

在处理 EVPRTW 问题时, 尽管传统遗传算法在解决单目标路径优化问题上表现出了优秀的性能, 但在处理多目标路径优化问题时, 其效果可能会受到一定的影响。因此, 本文选择使用适合多目标优化的 NSGA-II 算法来解决这个问题。NSGA-II 算法是由 Srinivas 和 Deb 在 2000 年提出的, 该算法是基于他们在 1995 年提出的 NSGA 算法。NSGA-II 是一种基于 Pareto 最优概念的遗传算法, 在多目标优化问题中, 它展现出了强大的性能。NSGA-II 算法的主要特性包括快速非支配排序、拥挤度测量、拥挤度比较操作符以及精英策略。多目标遗传算法 NSGA-II 的具体流程如图 1 所示。

3.1. 染色体编码及种群初始化

在上述所描述问题中, 每辆配送车辆仅进行一次配送, 即产生一条配送路径。每个客户仅由一辆车进行配送, 并结合电动冷藏车的特点, 这里采用自然数编码。染色体的长度 $m+f+k+1$, 其中 m 表示客户点数量, f 表示充电站数量, k 为电动冷藏车的数量。这里将电动冷藏车的编码赋予 0, 将客户点的自然数编码设置为 1, 2, 3, ..., n , 将充电站的编码设置为 $n+1, n+2, n+3, \dots, n+f$ 。

根据模型的特点和假设, 我们将所有客户点按照编码数进行随机排列, 作为初始种群的一个个体。对于每个个体, 我们根据各客户点的需求量, 将其对应的编码数拆分为多段路径, 每段路径代表一辆电动冷藏车的行驶路径。然后, 根据电量约束判断是否要在路径中插入充电站的编码点, 如果需要就在最合适的位置插入充电站。通过重复这些步骤, 我们获得初始种群, 确保每个个体都有对应的路径编码。

3.2. NSGA-II 关键步骤

3.2.1. 快速非支配排序

快速非支配排序是 NSGA-II 算法的核心部分, 它用于对种群进行排序和选择。其步骤如下:

- 1) 首先, 我们为每个解分配两个关键参数: 支配该解的个体数目(记为 $N(i)$)和被该解支配的解集合(记为 $S(i)$)。
- 2) 然后, 我们从种群中找出所有满足 $N(i)=0$ 的个体, 将它们归入当前集合 $F(1)$ (即第一层)。
- 3) 对于 $F(1)$ 中的每个个体, 我们检查它所支配的个体集合 $S(j)$, 将其中每个解的 $N(k)$ 减 1。
- 4) 如果某个解的 $N(k)$ 减到 0, 我们将该解存入另一个集合 H 。
- 5) 重复上述步骤, 直到所有个体都被分配到某一层。

3.2.2. 拥挤度计算

拥挤度在 NSGA-II 算法中拥挤度用于在同一层级的个体之间进行比较。对于每个解, 我们计算其拥挤度, 通常是通过测量解在目标空间中的密度来实现。拥挤度大的解表示在周围有更多其他解, 从而保持了种群的多样性。假设种群 P 中有 a 个个体, 每个个体都有 b 个目标函数, 拥挤度的具体计算步骤如下:

1) 对于每个个体的第 i 个目标函数 $f_i(x)(x=1,2,\dots,a)$, 首先对种群中的所有个体按照该目标函数的值进行升序排序。

2) 再对种群中位于非边界计算其拥挤度, 通常使用以下公式:

$$D_i(x) = \frac{|f_{i+1}(x) - f_{i-1}(x)|}{f_{\max}(x) - f_{\min}(x)} \quad (28)$$

其中, $f_{i+1}(x)$ 和 $f_{i-1}(x)$ 分别表示个体 x 在第 i 个目标函数上的相邻的下一个和上一个个体所对应的函数值。而 $f_{\max}(x)$ 和 $f_{\min}(x)$ 则表示个体 x 在第 i 个目标函数上的最大值和最小值。

3) 对于每个个体而言, 将其所有目标函数上的拥挤度相加, 得到最终的拥挤度。

$$D(x) = \sum_{i \in b} D_i(x) \quad (29)$$

这样计算得到的拥挤度越大, 表明种群在进行繁衍时, 算法会优先选择拥有较大拥挤度的个体, 以促进帕累托前沿的均匀分布。

3.2.3. 精英策略

NSGA-II 算法采用了精英策略, 即在每一代中, 都会从父代和子代中选择出最好的个体组成新的种群。这样可以确保优秀的解不会在进化过程中丢失, 从而提高算法的收敛性。同时, 通过使用非支配排序和拥挤度比较, 精英策略也能保持种群的多样性, 避免过早陷入局部最优。通过引入精英策略, NSGA-II 能够在搜索过程中维护帕累托前沿中的高质量个体, 促使算法更快地收敛到全局帕累托前沿。这有助于提高算法的有效性和稳定性。在具体实现中, 可以根据问题的特性和性质来调整精英策略的参数, 以获得更好的性能。

3.2.4. 选择、交叉和变异

选择、交叉和变异作为遗传算法的三个基本操作, 在种群迭代中起着至关重要的作用。而每一种操作都有着许多种不同的策略, 而本文各操作所使用策略如下:

1) 选择: 本文的选择策略是锦标赛选择法。每个个体被选择参与繁殖的概率是由其在非支配排序中的位置和拥挤度决定的。

2) 交叉: 本文使用的交叉方法是模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX)。这种交叉方式是在父代个体之间进行的, 生成的子代个体在解空间中位于其父代个体附近。

3) 变异: 本文使用的变异方法是多项式变异算子, 用于产生新的个体。

简而言之, NSGA-II 通过不断地选择、交叉和变异操作, 逐步优化种群中的个体, 从而得到一组非劣解集合。

4. 算例分析

4.1. 算例参数设定

针对所构建模型问题的特点, 创建出相应的算例。算例数据来源改编自 Solomon 数据集 R111, 各节点相关详细参数如下表 4 所示。采用 Python3.11.4 编程实现本文所设计的算法, 运行环境为 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz CPU, 16G 运行内存, Windows11 操作系统。迭代次数为 300, 种群大小为 100, 选择概率为 0.6, 变异概率为 0.4。

Table 4. Related parameters of each node

表 4. 各节点相关参数表

序号	坐标	需求量	最早时间	最晚时间	服务时间	序号	坐标	需求量	最早时间	最晚时间	服务时间
0	(35,35)	0.00	0.0	10.6	0.00	22	(45,10)	0.36	4.0	6.6	0.28
1	(41,49)	0.20	0.8	10.5	0.20	23	(55,5)	0.58	3.0	4.5	0.39
2	(35,17)	0.14	0.9	9.8	0.17	24	(65,35)	0.06	3.0	9.9	0.13
3	(55,45)	0.26	2.8	8.8	0.23	25	(65,20)	0.12	8.0	9.7	0.16
4	(55,20)	0.38	7.2	10.4	0.29	26	(45,30)	0.34	3.0	10.9	0.27
5	(15,30)	0.52	1.0	6.8	0.36	27	(35,40)	0.32	0.4	3.9	0.26
6	(25,30)	0.06	4.0	8.9	0.13	28	(41,37)	0.32	0.3	7.1	0.26
7	(20,50)	0.10	1.1	5.8	0.15	29	(64,42)	0.18	1.5	7.8	0.19

续表

8	(10,43)	0.18	4.5	6.0	0.19	30	(40,60)	0.42	2.6	5.3	0.31
9	(55,60)	0.32	4.6	7.8	0.26	31	(31,52)	0.54	0.9	10.3	0.37
10	(30,60)	0.32	5.6	4.5	0.26	32	(35,69)	0.46	3.5	9.7	0.33
11	(20,65)	0.24	3.0	10.0	0.22	33	(53,52)	0.22	1.3	4.8	0.21
12	(50,35)	0.38	0.8	9.4	0.29	34	(65,55)	0.28	1.9	9.5	0.24
13	(30,25)	0.46	7.7	9.8	0.33	35	(63,65)	0.16	6.1	9.3	0.18
14	(15,10)	0.40	1.7	4.2	0.30	36	(2,60)	0.10	2.1	5.8	0.15
15	(30,5)	0.16	2.6	7.3	0.18	37	(20,20)	0.16	2.2	10.3	0.18
16	(10,20)	0.38	1.5	9.9	0.29	38	(5,5)	0.32	3.9	5.3	0.26
17	(5,30)	0.04	6.5	7.1	0.12	39	(60,12)	0.62	1.7	5.7	0.41
18	(20,40)	0.24	2.5	7.6	0.22	40	(40,25)	0.18	3.4	5.9	0.19
19	(15,60)	0.34	1.7	9.5	0.27	41	(50,30)	0	0	12	1
20	(45,65)	0.18	4.1	10.2	0.19	42	(45,40)	0	0	12	1
21	(45,20)	0.22	0.9	10.6	0.21						

上述表中节点 0 为配送中心, 节点 1~40 为客户节点, 节点 41 和节点 42 为充电站。配送中心运营时间为早上 8 点至晚上 8 点, 分别记为(0.0, 12.0)。

4.2. 算例求解及分析

对于上述算例利用 Visual Studio Code 软件运行 Python 程序十次, 各次结果中 Pareto 前沿解集中各目标函数均值如下表 5 所示。

Table 5. Table of the mean value of each objective function in the results of 10 program runs

表 5. 10 次程序运行结果各目标函数均值表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
综合运输成本/元	2401.7	2473.7	2289.7	2589.1	2501.7	2478.5	2597.6	2564.8	2486.0	2635.6
碳排放量/kg	143.3	141.7	147.4	140.5	138.9	140.1	137.5	139.5	142.8	139.1
企业配送水平	-33.4	-33.7	-26.0	-40.9	-38.3	-35.8	-43.1	-41.5	-37.9	-43.2

在这里我们选取 Pareto 最优解各目标函数均值相对最优的第三次作为求解结果。在该求解结果解集中有 12 个 Pareto 解, 其在各目标函数上的值如下表 6 所示。

Table 6. Table of objective function values for 12 Pareto solutions

表 6. 12 个 Pareto 解各目标函数值表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
综合运输成本/元	2223.5	2484.2	2258.7	2177.5	2176.9	2136.1	2068.7	2330.3	2510.8	2301.6	2533.3	2274.8
碳排放量/kg	141.8	153.9	154.9	145.2	148.7	155.6	150.7	158.0	130.7	132.5	148.0	149.2
企业配送水平	-30.9	-19.0	-23.3	-23.6	-40.9	-22.6	-24.6	-15.2	-44.8	-28.5	-19.2	-20.2

其 Pareto 解在解空间的表现如下图 2 所示; 从不同角度观看, 其 Pareto 解集构成的 Pareto 前沿面如

图 3 所示(为了观察的方便, 图中的 z 轴为企业配送水平的绝对值)。

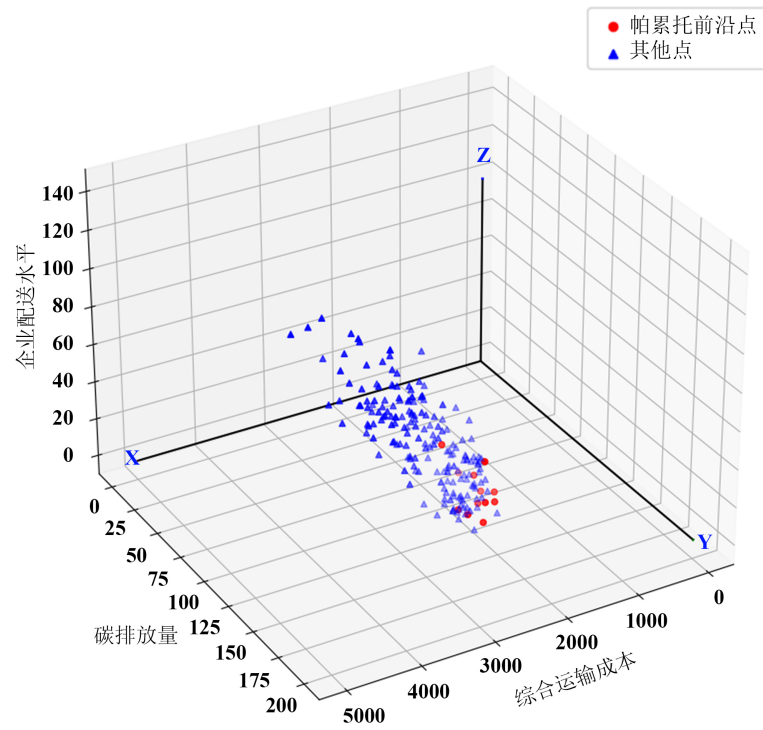
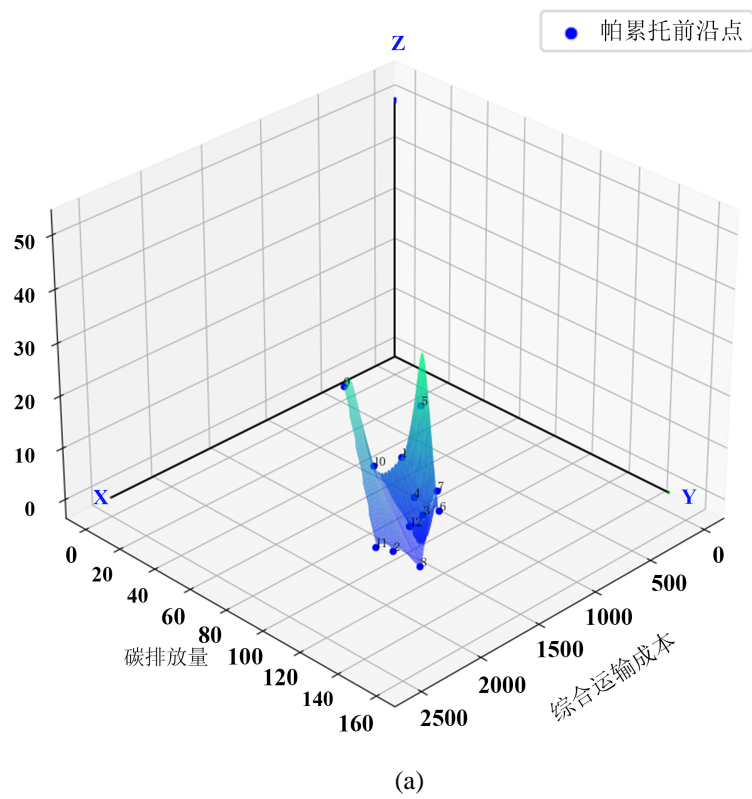


Figure 2. Location diagram of Pareto solution in solution space
图 2. Pareto 解在解空间的位置图



(a)

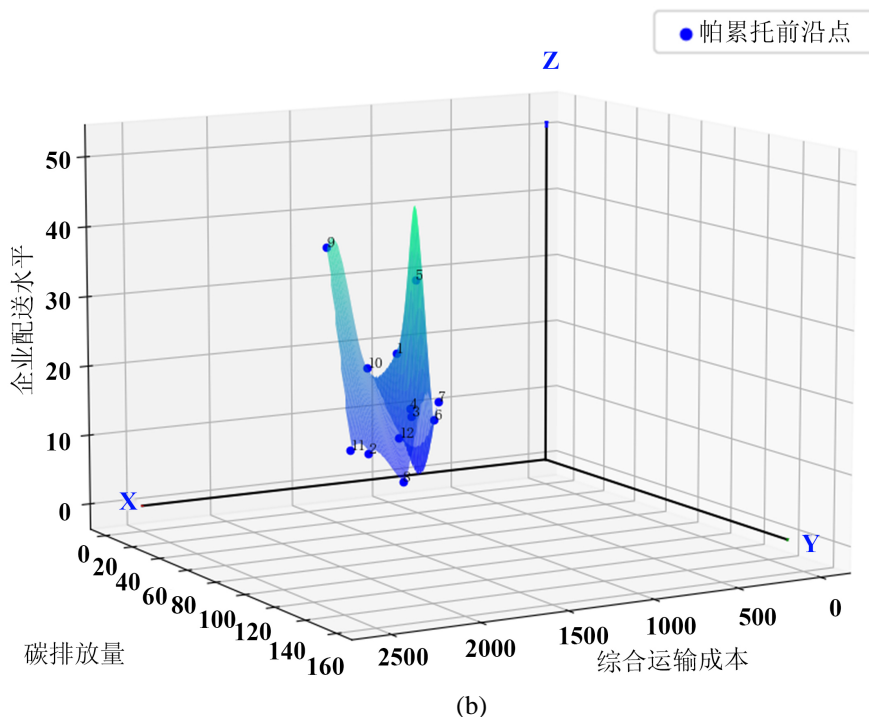


Figure 3. Pareto front surfaces from different angles
图 3. 不同角度的 Pareto 前沿面

由于多目标问题往往没有绝对最优的解, 一般来说会在 Pareto 解集中选择几个典型的解来进行进一步的分析。我们从上述结果中 12 个 Pareto 解中挑选 4 个解作为典型方案来进行详细分析, 其中极端点 3 个: 综合运输成本最低的点 7 作为方案 a; 碳排放量最低的点 9 作为方案 b; 企业配送水平最高的点 8 作为方案 c。而最靠近均值点(2289.7, 147.4, -26.0)的点 12 作为折中方案 d。各个典型方案的各目标函数值如下表 7 所示。

Table 7. Objective function value table of typical scheme
表 7. 典型方案目标函数值表

目标函数方案	a	b	c	d
综合运输成本/元	2068.7	2510.8	2330.3	2274.8
碳排放量/kg	150.7	130.7	158.0	149.2
企业配送水平	-24.6	-44.8	-15.2	-20.2

经由多目标优化后各个典型方案的车辆路径图如下图 4 各个分图所示, 不同颜色表示不同的车辆所行驶的路径。

图 4 中(a)、(b)、(c)、(d)四个分图分别对应了四种典型方案的车辆配送路径图。根据上述图表进行分析:

1) 从几个极端点的角度看, 方案 b 较于方案 a 在综合运输成本上提高了 21.3%, 碳排放量小了 13.2%, 企业服务水平降低了 20.1; 而方案 c 较于方案 a 在综合运输成本上提高了 12.6%, 碳排放量提高了 5%, 企业服务提高了 9.4; 方案 c 较于方案 b 而言, 综合运输成本降低了 7.2%, 碳排放量提高了 21%, 企业服务水平提高了 29.5。

2) 从折中方案的角度来看, 方案 a 较于方案 d 在综合运输成本降低了 9%, 碳排放量提高了 1%, 企业配送水平降低了 4.4; 方案 b 较于方案 d 在综合运输成本上提高了 10.4%, 碳排放量降低了 12.5%, 企业配送水平降低 24.5; 方案 c 较于方案 d 在综合运输成本上提高了 2.4%, 碳排放量提高了 5.9%, 企业配送水平提高了 5。

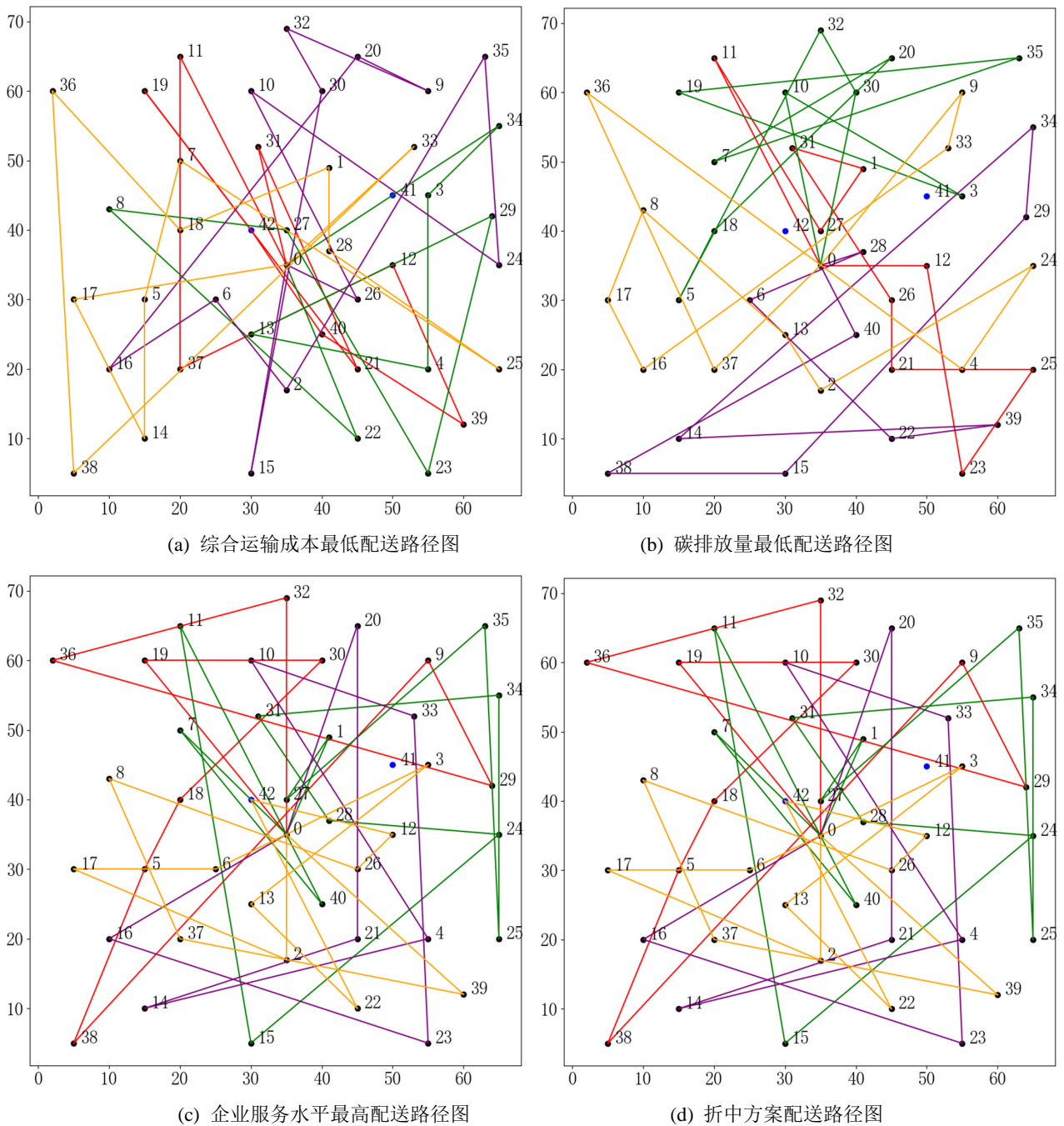


Figure 4. Vehicle distribution route diagram of each scheme based on multi-objective path optimization

图 4. 基于多目标路径优化的各方案车辆配送路径图

综上所述, 在基于同时考虑综合运输成本、碳排放量和企业服务水平的前提下, 冷链物流企业在使

用电动冷藏车时往往需要从自身发展战略与国家政策的角度出发, 根据实际情况选择最为合适的方案来进行配送。

5. 结束语

针对国家对新能源冷藏车的大力推行, 本文从电动冷藏车配送路径优化问题出发, 依据政府依旧会对使用电动车辆的物流进行温室气体的核算, 构建了综合运输成本、碳排放量与企业配送水平的多目标优化模型, 并利用 NSGA-II 算法对模型进行了求解, 验证了模型的有效性。其结果在一定程度上可以为冷链物流企业在兼顾碳排放量、企业服务水平和运输成本的同时为电动冷藏车制定出最为合适的配送方案提供一定的参考。不过本文在研究时并未考虑到配送过程中车辆速度的变化以及路况的变动, 实际生活中由于各种原因车辆往往并不能以固定速度匀速行驶。此外, 客户的货物量需求与时间窗需求的动态变化都可能对电动冷藏车的配送产生多方面的影响。因此, 在未来的研究可以考虑这些因素进一步对配送路径进行优化。

参考文献

- [1] Dantzig, G.B. and Ramser, J.H. (1959) The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, **6**, 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- [2] Bruglieri, M., Paolucci, M. and Pisacane, O. (2023) A Matheuristic for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and a Realistic Energy Consumption Model. *Computers and Operations Research*, **157**, Article ID: 106261. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106261>
- [3] Wang, Y., Zhou, J.X., Sun, Y.Y., et al. (2023) Collaborative Multidepot Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Shared Charging Stations. *Expert Systems with Applications*, **219**, Article ID: 119654. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119654>
- [4] Xiao, J.H., Du, J.G., Cao, Z.G., et al. (2023) A Diversity-Enhanced Memetic Algorithm for Solving Electric Vehicle Routing Problems with Time Windows and Mixed Backhauls. *Applied Soft Computing Journal*, **134**, Article ID: 110025. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110025>
- [5] Zhang, S., Chen, M., Zhang, W., et al. (2020) Fuzzy Optimization Model for Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. *Expert Systems with Applications*, **145**, Article ID: 113123. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113123>
- [6] 刘志硕, 李秋雨, 陈哲. 带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 53-60.
- [7] 刘志硕, 李秋雨, 董子琦, 等. 带软时间窗的冷链电动汽车路径问题研究[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3): 57-66.
- [8] Zhao, Z.X., Li, X.M. and Zhou, X.C. (2020) Distribution Route Optimization for Electric Vehicles in Urban Cold Chain Logistics for Fresh Products under Time-Varying Traffic Conditions. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, Article ID: 9864935. <https://doi.org/10.1155/2020/9864935>
- [9] Hou, R.Z., Li, G.P. and Chen, P. (2023) Development Strategy Analysis of Cold Chain Logistics of Fresh Agricultural Products under the Background of Low-carbon Economy. *SHS Web of Conferences*, **154**, Article No. 03002. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202315403002>
- [10] Zhang, Y.D., Fan, X.M., Ma, Y.H., et al. (2022) Spatial Impacts of Cold Chain Logistics for Fresh Agri-Products on Carbon Emissions. *Transportation Research Part D*, **113**, Article ID: 103525. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103525>
- [11] Jia, X.Z. (2022) Research on the Optimization of Cold Chain Logistics Distribution Path of Agricultural Products E-Commerce in Urban Ecosystem from the Perspective of Carbon Neutrality. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **10**, Article ID: 966111. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.966111>
- [12] Li, K., Li, D. and Wu, D.Q. (2022) Carbon Transaction-Based Location-Routing- Inventory Optimization for Cold Chain Logistics. *Alexandria Engineering Journal*, **61**, 7979-7986. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.062>
- [13] Liu, G.K., Hu, J.Y., Yang, Y., et al. (2020) Vehicle Routing Problem in Cold Chain Logistics: A Joint Distribution Model with Carbon Trading Mechanisms. *Resources, Conservation Recycling*, **156**, Article ID: 104715. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104715>

- [14] Ma, Z.C., Zhang, J., Wang, H.H., *et al.* (2023) Optimization of Sustainable Bi-Objective Cold-Chain Logistics Route Considering Carbon Emissions and Customers' Immediate Demands in China. *Sustainability*, **15**, Article 5946. <https://doi.org/10.3390/su15075946>
- [15] 李倩, 蒋丽, 梁昌勇. 基于模糊时间窗的多目标冷链配送优化[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(23): 255-262.
- [16] 吴暖, 代焕杰, 李季涛, 等. 考虑时间容忍度的冷链物流配送路径多目标优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 275-284.