

基于遗传粒子群算法的低碳多式联运路径优化

张静卓, 邵绘楠

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年8月25日; 录用日期: 2025年9月17日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

多式联运作为一种高效的物流方式,能够有效整合各种运输方式的优势,降低能源消耗和碳排放。本文针对低碳多式联运路径优化问题,构建出将遗传算法与粒子群算法相融合的混合优化方法,并建立起涵盖运输时间、成本及碳排放要素的多目标优化模型,并设计了一种PSO-GA混合算法,实现了对多式联运路径的综合优化,最后通过算例分析验证了所提方法的有效性和可行性。研究结果表明,PSO-GA混合算法在保证运输效率的同时,能够有效降低多式联运的运输成本以及碳排放,为我国交通运输业的低碳发展提供理论支持和实践指导。

关键词

多式联运, 路径优化, 低碳

Low-Carbon Multimodal Transport Path Optimization Based on Genetic Particle Swarm Algorithm

Jingzhuo Zhang, Huinan Shao

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: August 25, 2025; accepted: September 17, 2025; published: September 25, 2025

Abstract

As an efficient logistics mode, multimodal transport can effectively integrate the advantages of various transportation modes and reduce energy consumption and carbon emissions. Aiming at the low-carbon multimodal transport path optimization problem, this paper provides a hybrid optimization method combining genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm, establishes a multi-objective optimization model considering transport time, cost and carbon emission, and

designs a PSO-GA hybrid algorithm to realize the comprehensive optimization of multimodal transport path. Finally, a numerical example is given to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method. The results show that the PSO-GA hybrid algorithm can effectively reduce the transportation cost and carbon emissions of multimodal transportation while ensuring transportation efficiency, and provide theoretical support and practical guidance for the low-carbon development of China's transportation industry.

Keywords

Multimodal Transport, Path Optimization, Low Carbon

Copyright © 2025 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

构建绿色高效的现代物流体系, 关键在于促进铁水联运、公铁联运、公水联运、空陆联运等多元联运模式的协同发展。作为不同运输方式的核心衔接载体, 多式联运货运枢纽的功能价值尤为突出[1]。基于此, 打造与城市功能定位深度匹配、符合高标准建设要求的现代化多式联运货运枢纽, 能够为多式联运的规模化推进提供重要支撑。不过, 在实际货物运输环节中, 各类运输载具运行时排放的二氧化碳, 已对居民生活环境造成显著影响。因此, 在开展货运路径规划工作时, 必须将碳排放因素纳入核心考量范畴, 以实现物流效率与环保目标的平衡。

近年来, 国内外学者对于多式联运路径规划问题做出大量研究。Moccia 等研究了在运输能力限制下的多式联运运输路径规划问题[2]。刘松等建立了以总成本最小为目标的路径优化模型[3]。Babagolzadeh 等研究了需求不确定性及碳税政策下的冷链物流供应链管理问题[4]。

为了提高多式联运的效率, 本文提出了一种综合考虑碳排放、成本和客户需求的多目标优化模型, 并利用 PSO-GA 混合算法寻找最优运输方式。精简路径可以显著减少碳排放, 同时满足成本和客户需求, 使物流企业能够做出决策, 实现高效、低碳的运输。

2. 问题描述与模型构建

2.1. 问题描述

为实现货物从城市 A 到城市 B 的运输, 需途经 N 个具备换装转运能力的中间城市。在运输方式选择上, 可灵活采用公路货车、铁路列车或水路轮渡等模式。结合多式联运方案决策中需要重点考量的运输距离、时效、成本及碳排放量等关键因素, 本文构建了以总成本最小化为核心目标的冷链物流多式联运路径优化模型, 通过该模型可计算出最优的货物运输方案。

为建模和计算需要, 本文对现实运输问题作出以下假设:

(1) 在本研究的时间周期内, 基于研究区域的历史运输数据, 假设转运节点的容量能够满足当前路径规划的货物吞吐量需求;

(2) 假设在整个运输过程中, 货物数量始终保持恒定, 且在采用公路运输的环节, 货物重量始终未超出货车的最高限重。

(3) 在多式联运路径的相邻节点之间, 运输方式具有不可分割性, 每个节点区间仅能选取一种运输方

式;

- (4) 货物仅能在预设的枢纽节点发生中转, 并且中转次数必须满足枢纽节点的要求;
(5) 在运输途中不会发生意外因素导致货物受损[5]。

2.2. 相关参数及含义

相关参数及含义如表 1 所示。

Table 1. Relevant parameters and their meanings

表 1. 相关参数及含义

参数	含义
n	运输节点的集合
q	货运量
d_{ij}^k	第 k 种运输方式下, 节点 i 到节点 j 的运输里程
c_{ij}^k	第 k 种运输方式下, 节点 i 到节点 j 的单位运输费用
c_i^{kl}	在节点 i 处, 货物运输方式从 k 转换为 l 所用运输总成本
t_{ij}^k	第 k 种运输方式下, 货物从节点 i 送达到节点 j 所用运输时长
t_i^{kl}	在节点 i 处, 货物从运输方式 k 转为 l 的单位运输开销
ET	依据合同约定, 货物需抵达的最早时间
e_k	第 k 种运输方式下, 单位货运量的碳排放强度
E_{max}	货运过程中可接受的碳排放量最高值
X_{ij}^k	当且仅当第 k 种运输方式用于节点 i 至 j 的运输时, 变量值为 1, 其余情况为 0
y_i^{kl}	当且仅当运输方式在节点 i 从 k 转为 l 时, 变量值为 1, 无此转换则为 0

2.3. 模型构建

1. 运输成本

(1) 在途运输成本:

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 q d_{ij}^k c_{ij}^k x_{ij}^k$$

(2) 节点转换成本:

$$c_2 = \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 q c_i^{kl} x_i^{kl}$$

2. 运输时间

(1) 在途运输时间:

$$T_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 t_{ij}^k x_{ij}^k$$

(2) 节点转换时间:

$$T_2 = \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 q t_i^{kl} y_i^{kl}$$

3. 碳排放:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 q d_{ij}^k e_k x_{ij}^k$$

研究发现, 在多式联运场景里, 运输成本、运输时间与碳排放是三个重要目标, 这三者之间并非独立存在, 而是有着紧密的相互制约、相互作用的关联。通过对成本和时间公式的构建, 不难看出:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 q d_{ij}^k c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 q c_i^{kl} x_i^{kl}$$

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 t_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 q t_i^{kl} y_i^{kl}$$

为了使三个指标的计量单位和数量级统一从而便于计算, 本文使用归一化方法对构建的多目标路径优化模型进行无量纲化处理, 给定权重参数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的值, 再将归一化后的多目标函数值进行加权求和。故本文低碳多式联运的路径选择模型构建如下:

目标函数:

$$\min Z = \omega_1 \min C + \omega_2 \min T + \omega_3 \min E$$

约束条件:

$$\sum_{k=1}^3 x_{ij}^k = 1, \forall i, j \in n$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 y_i^{kl} = 1, \forall i \in (2, n-1), k \neq l$$

$$y_{i-1}^k + y_{i,i+1}^l \geq 2x_i^{kl}$$

$$\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1, 0 \leq \omega_i \leq 1$$

$$\mathcal{G}(t) \geq \lambda, \lambda \in (0, 1)$$

$$E \leq E_{\max}$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}$$

$$y_{ij}^k \in \{0, 1\}$$

3. 算法设计

本文旨在解决多式联运路径选择问题, 为了应对这一复杂问题, 本研究选用遗传算法与粒子群算法相结合的混合优化策略, 具体采用的是 PSO-GA 混合算法。在该算法的设计中, 充分吸纳了粒子群算法在实数编码方面的优势, 将搜索空间内所有潜在解均转化为染色体的形式呈现。同时, 通过构建粒子位置与解之间的对应映射关系, 进一步设计出适配的粒子编码方案。

凭借对两种算法优势的充分融合, 此方法能够更精准地定位多式联运的最优解, 为多式联运系统提供高效、经济且具备可行性的运输方案, 拥有重要的实际应用意义。该方法求解流程图如图 1 所示。

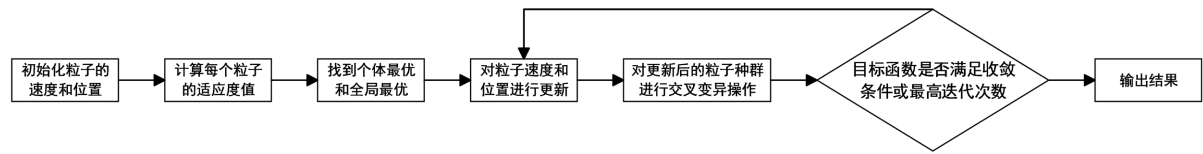


Figure 1. Flow chart of PSO-GA hybrid algorithm

图 1. PSO-GA 混合算法流程图

具体而言, 这种方法会把粒子的维度拆成两部分: 在 n 维的目标搜索空间里, 前 $n-2$ 个维度用来标识货物是否经过某节点, 后 $n-1$ 个维度则对应具体的运输方式。其中, 节点用“1”表示经过, 用“0”表示不经过; 运输方式的标注规则是, 2 代表公路运输, 3 代表铁路运输, 4 代表水路运输。实际应用时, 会根据最终选中的节点数量, 来匹配对应的运输方式。图 2 呈现的是粒子编码的示意图, 从该图中可明确, 此示例包含 8 个运输节点。对编码信息进行解码处理后, 即可得到如图 3 所示的多式联运具体运输方案。

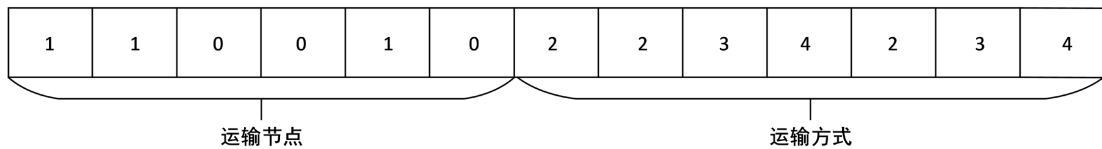


Figure 2. Schematic diagram of the encoding of the particle

图 2. 粒子的编码示意图

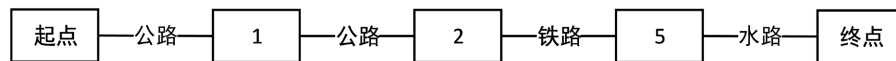


Figure 3. Example of the best transportation scenario for multimodal transport

图 3. 示例多式联运最佳运输方案

4. 实例分析

从 A 市运输一批货物至 B 市, 全程会途经 10 个节点城市。每个节点之间有多类可选择的运输方式, 我们已按照顺序对运输网络里的各个节点完成编号, 关于运输距离和具体运输方式的信息, 均可通过交通运输部网站查询获取。详情如表 2 所示。

Table 2. Transportation distance between nodes (unit: km)

表 2. 节点间的运输距离(单位: km)

起止节点	公路	铁路	水路	起止节点	公路	铁路	水路
(1,2)	394	303	—	(5,7)	242	515	—
(1,3)	352	—	661	(5,8)	717	—	670
(1,4)	432	628	—	(5,9)	580	456	—
(2,3)	680	—	952	(6,7)	481	996	574
(2,5)	1014	1109	1185	(6,8)	960	—	959
(2,6)	1107	1173	846	(6,9)	823	581	837
(3,5)	874	1194	—	(7,10)	439	535	524
(3,6)	894	972	—	(8,10)	124	—	—
(4,5)	822	795	1000	(9,10)	136	147	159
(4,6)	554	577	665				

为简化计算过程, 本文在查询行业统计公报获取所需信息后, 以平均速度为依据进行计算, 结果如表 3 所示。

Table 3. Average speed of different modes of transportation (unit: Km/h; yuan/TEU·Km; KG/TEU·Km)

表 3. 不同运输方式的平均速度(单位: Km/h; 元/TEU·Km; KG/TEU·Km)

运输方式	运输速度	单位运费	碳排放量
公路	80	0.5	0.04795
铁路	60	0.35	0.00841
水路	30	0.3	0.01733

节点间的转换成本如表 4 所示。

Table 4. Unit cost/transit time of transportation mode conversion between nodes (unit: yuan/t; h)

表 4. 节点间运输方式转换的单位成本/中转时间(单位: 元/t; h)

运输方式	公路	铁路	水路
公路	0/0	3.09/1	5.23/1
铁路	3.09/1	0/0	26.62/2
水路	5.23/1	26.62/2	0/0

本案例最大迭代次数和种群规模均为 5000。现将本文所用参数转换如表 5 所示。

Table 5. Parameter value definition table

表 5. 参数数值界定表

符号	数值	符号	数值
ω	0.5	规定时间窗	[25,45]
α	0.4	额定碳排放量	300t
交叉概率	0.7	ω_1	0.5
变异概率	0.3	ω_2	0.3
货运量	2000t	ω_3	0.2

本文算法在 MATLABR 2024a 的运行计算下, 得出最佳运输方案, 如图 4 所示。在该多式联运方案中, 全程均采用铁路运输模式。经核算, 此运输方式下的总成本为 1,602,300 元, 完成全程运输所需时间为 76.3 小时, 同时整个运输流程产生的碳排放总量达 38,500 千克。

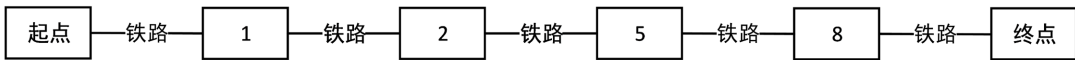


Figure 4. Case optimal transportation scheme

图 4. 案例最佳运输方案

5. 结论

在多式联运路径选择问题的处理中, 除了重点考量运输成本与运输时间这两大关键因素外, 还全面纳入了碳排放影响的分析。在此过程中, PSO-GA 混合算法展现出了突出的有效性, 能够成功求解多式联运路径选择问题, 并且在多目标优化领域呈现出良好的性能。该算法凭借对 PSO 算法与 GA 算法各自

优势的充分利用, 得以更高效地挖掘多式联运的最优路径方案, 为多式联运系统的运转提供了高效、经济且切实可行的运输策略, 具备重要的实际应用价值。

展望未来, 在本文的研究基础上可进一步拓展该算法在动态需求、不确定运输条件等更为复杂的多式联运相关问题中的应用潜力, 以持续提升多式联运系统的整体优化水平与运行可靠性。

参考文献

- [1] 邓红梅. 中欧班列公铁多式联运集货枢纽选址研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆工商大学, 2018.
- [2] Moccia, L., Cordeau, J.F., Laporte, G., *et al.* (2011) Modeling and Solving a Multimodal Transportation Problem with Flexible-Time and Scheduled Services. *Networks*, 57, 53-68. <https://doi.org/10.1002/net.20383>
- [3] 刘松, 邵毅明, 彭勇. 碳排放限制下的冷藏集装箱多式联运路径优化[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(2): 204-215.
- [4] Babagolzadeh, M., Shrestha, A., Abbasi, B., *et al.* (2020) Sustainable Cold Supply Chain Management under Demand Uncertainty and Carbon Tax Regulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80, Article ID: 102245. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102245>
- [5] 朱欣媛, 赵建有, 张璐璐, 等. 碳排放约束下考虑模糊时间窗的多式联运路径选择[J]. 物流科技, 2020, 43(11): 77-82.