

基于数据驱动的多目标遗传算法在绿色物流路径规划中的应用

耿傲天

华北理工大学应急管理与安全工程学院，河北省唐山市，063210；

摘要：基于对传统物流路径规划方法在环保性、经济性与效率协同优化方面的不足，本文提出了一种融合多源物流数据与多目标遗传算法的智能规划模型。通过动态采集交通流量、碳排放、运输成本等多维度数据，构建绿色物流多目标优化框架，并结合遗传算法的全局搜索能力与数据驱动的实时决策优势，实现路径规划的低碳化、高效化与经济性平衡。案例分析表明，该方法能够显著降低物流运输的碳排放量，提升资源利用率，同时兼顾企业运营成本控制需求。通过一系列研究，笔者得到了为绿色物流的智能化转型提供了理论支持与技术路径，以期能够为相关工作人员提供借鉴和参考。

关键词：数据驱动；多目标遗传算法；绿色物流；路径规划；多目标优化

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.098

引言

随着全球碳中和目标的推进与物流行业的快速发展，如何在保障运输效率的同时减少碳排放、优化资源配置，已成为现代物流领域亟待解决的核心问题。传统的物流路径规划方法多侧重于单一目标（如最短路径或最低成本），难以满足绿色物流对环保性、经济性及社会效益的多维度协同需求。此外，现有研究在动态数据整合与实时决策方面存在明显局限，导致规划结果与实际场景适配性不足。本文立足于绿色物流发展的现实需求，结合数据驱动与智能优化算法，提出一种面向多目标协同优化的物流路径规划方法。研究将系统阐述模型构建的理论基础、数据融合的关键技术及算法改进策略，并通过实际案例验证其在降低碳排放、提升运输效率等方面的应用效果，旨在为物流行业的绿色化、智能化转型提供科学依据与实践参考，助力“双碳”目标的高效实现。

1 绿色物流路径规划的现状与挑战

随着全球贸易规模的扩大与电子商务的蓬勃发展，物流行业已成为支撑现代经济高效运转的核心环节。然而，传统物流路径规划方法在应对日益增长的环保压力与复杂市场需求时，逐渐暴露出诸多局限性。

1.1 传统物流路径规划的单一目标局限性

长期以来，物流路径规划的核心目标聚焦于经济效

益的最大化，例如通过最短路径算法优化运输距离，或基于线性规划模型降低燃油成本。此类方法虽能在单一维度上提升效率，却忽略了环境与社会效益的协同优化。这一矛盾凸显了单一目标优化的短板：在追求成本或时间最小化的过程中，环境污染、能源消耗等外部性成本被严重低估。

此外，传统规划模型对动态因素的适应性不足。现有算法多依赖静态历史数据，如固定路网拓扑结构或平均车速假设，而实际运输场景中，交通拥堵、天气突变、临时限行等动态变量会显著影响路径选择的合理性。

1.2 绿色物流的多维度协同需求

在全球“双碳”目标的推动下，绿色物流从概念倡导迈向实践落地的关键阶段。其核心诉求在于实现经济性、环保性与社会效益的多目标平衡。具体而言，路径规划需同时满足以下要求：

低碳减排：通过优化车辆负载率、减少空驶里程、选择低排放路线等方式降低单位运输的碳排放强度。

成本可控：在新能源车辆购置、碳排放权交易等新增成本压力下，维持企业运营的经济可行性。

时效保障：在复杂路网与客户需求多样化背景下，确保配送时效性与服务质量的稳定性。

然而，多目标间的权衡关系使得优化难度显著增加。例如，为降低碳排放而选择绕行低流量路段可能增加运输时间；采用新能源车辆虽能减少污染，但初期投入成

本与充电设施限制可能制约其大规模应用。

2 数据驱动与多源物流信息的融合机制

数据驱动与多源物流信息的融合机制是绿色物流路径规划实现智能化与动态优化的核心基础。该机制通过整合多维度、异构化的数据资源，构建从数据采集到决策输出的闭环链路，为多目标遗传算法提供高质量输入，进而支撑路径规划在环保性、经济性与效率间的协同优化。

2.1 多源物流数据的分类与功能界定

绿色物流路径规划所需数据具有显著的时空异质性与多模态特征，可依据其来源与功能划分为四类：

(1) 交通动态数据：涵盖实时路况、道路拓扑结构、交通管制信息等，用于评估路径通行效率与时间成本。此类数据通常以时序流形式存在，需通过高频率更新机制捕捉路网状态的动态变化。

(2) 环境与能耗数据：包括车辆类型、载重状态、能源消耗率及气象条件等参数，用于量化运输过程中的碳排放强度与能源利用效率。此类数据需与交通动态数据耦合，构建能耗-路径的关联模型。

(3) 政策与法规数据：涉及区域限行政策、碳排放税标准、环保法规等文本信息，需通过自然语言处理技术提取结构化约束条件，确保规划方案的合规性。

(4) 需求与运营数据：包括订单分布、配送时间窗、仓储节点容量等，用于动态匹配物流资源与客户需求，优化全局调度策略。

多源数据的协同作用体现在其互补性与联动性上。例如，交通动态数据与能耗数据的融合可量化不同路径的碳排放成本，而政策数据的引入则能进一步约束路径搜索空间，形成多维目标优化的决策依据。

2.2 数据采集与预处理的技术架构

数据采集层需实现多源异构数据的实时获取与标准化接入，其技术路径包括：

物联网传感技术：通过车载传感器、路侧单元等设备实时捕获车辆工况、位置及环境参数，形成高精度、低延迟的数据流。

第三方数据接口集成：对接交通管理平台、气象数据库等外部系统，补充宏观路况与环境信息，扩展数据覆盖维度。

边缘计算节点：在数据源头完成初步过滤与压缩，

减少网络传输负载，提升数据采集效率。

3 多目标遗传算法的优化策略设计

多目标遗传算法 (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA) 作为解决绿色物流路径规划中多维度目标冲突的核心工具，其优化策略设计需兼顾算法性能、计算效率与目标协同能力。

3.1 编码与解码机制

路径编码方式：采用基于节点的顺序编码（如排列编码）表示车辆行驶路径，确保解的合法性。例如，染色体基因序列可映射为配送节点的访问顺序，基因值代表节点编号。

约束嵌入编码：在编码阶段直接排除违反硬约束的解。例如，通过禁忌列表禁止车辆进入限行区域对应的基因位点，减少无效搜索。

3.2 适应度函数设计

非支配排序：基于 NSGA-II（非支配排序遗传算法）框架，将种群个体按 Pareto 层级排序，层级越高（被支配次数越少）的个体适应度越高。

拥挤度计算：在相同层级的个体中，计算其在目标空间的分布密度，优先保留拥挤度大的个体以维持种群多样性。

3.3 Pareto 前沿维护与多样性保障

多目标优化的核心挑战在于高效生成并维护分布均匀的 Pareto 前沿，具体策略包括：

(1) 精英保留策略：通过精英库 (Archive) 存储历史最优非支配解，避免优秀个体在进化过程中丢失。精英库容量需根据解空间复杂度动态扩展，防止过早收敛。

(2) 参考点引导机制：引入基于分解的方法（如 MOEA/D），将多目标问题转化为一组单目标子问题，利用参考点引导种群向 Pareto 前沿均匀分布。

(3) 目标空间网格化：将目标空间划分为超立方网格，通过密度估计淘汰冗余个体，确保前沿解的分布均匀性。

3.4 收敛性与计算效率优化

混合局部搜索：在遗传算法中嵌入模拟退火、禁忌搜索等局部优化算子，提升对 Pareto 前沿的精确逼近能力。

并行化计算架构：采用岛模型（Island Model）将种群划分为子群并行进化，通过周期性迁移策略交换个体信息，加速全局搜索。

代理模型辅助：利用径向基函数（RBF）或高斯过程（GP）构建目标函数的近似模型，替代部分高耗时的真实评估过程，降低计算负载。

3.5 算法参数自整定与鲁棒性增强

MOGA 的性能高度依赖参数设置（如种群规模、交叉率、变异率），需通过以下方法实现参数自整定：

（1）超参数优化：结合贝叶斯优化或元启发式算法，在离线阶段搜索最优参数组合，提升算法泛化能力。

（2）在线自适应调整：根据种群进化状态动态调节参数。例如，当种群陷入局部最优时，提高变异率以跳出局部区域。

（3）鲁棒性验证：通过蒙特卡洛模拟测试算法对输入噪声（如交通数据误差）的敏感性，优化目标函数权重分配策略以增强稳定性。

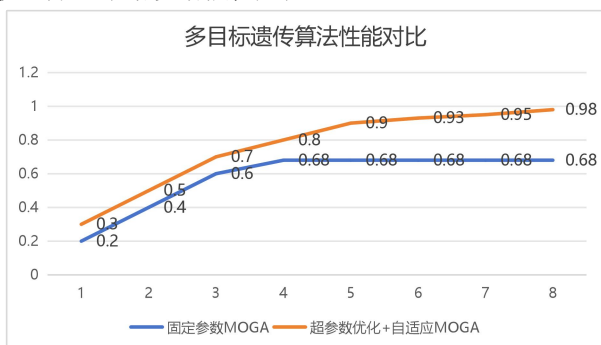


图 1: 多目标算法性能预览图

4 绿色物流路径规划模型的构建与关键技术

4.1 多目标协同优化的模型设计

绿色物流路径规划需同时满足碳排放最小化、运输成本优化、时效性提升等多个目标。这些目标之间存在天然冲突，例如选择低排放路线可能增加运输时间，而

追求成本最低可能导致车辆空载率上升。为此，模型需采用多目标优化框架，通过数学方法量化目标间的权衡关系。

在数学建模中，目标函数需涵盖碳排放量（基于车辆能耗与道路坡度数据）、运输成本（结合燃油价格与过路费）、配送时间（依赖实时交通流量与天气数据）等指标。同时，约束条件需整合车辆载重限制、政策法规（如限行区域）以及路网连通性等现实因素。为协调目标冲突，模型引入动态权重分配机制——根据实时数据（如油价波动或突发拥堵）自动调整各目标的优先级。例如，在高峰时段优先保障时效性，而在平峰期侧重降低碳排放。此外，通过生成 Pareto 最优解集，模型能够为决策者提供多种可行方案，支持灵活选择。

4.2 动态路径调整与算法优化

物流环境的动态性要求模型具备实时响应能力。传统静态规划难以应对交通拥堵、天气突变等突发事件，因此需通过算法改进与动态调整机制实现路径优化。

在算法层面，多目标遗传算法（MOGA）通过自适应交叉与变异策略增强灵活性。例如，当检测到某路段突发拥堵时，算法自动提高该区域路径节点的变异概率，引导搜索避开拥堵区域。同时，引入精英保留策略，确保历史最优解（如低排放路径）不被淘汰，维持解的多样性。在动态调整中，模型结合实时数据流（如 GPS 定位、交通监控）持续更新路径评价函数，每隔固定时间窗口（如 10 分钟）重新生成优化方案，避免决策滞后。

此外，车辆载重均衡与路径可靠性通过约束嵌入实现。例如，在交叉操作中限制超载路径的产生，或基于历史事故数据筛选高风险路段。这些策略不仅提升了运输效率，还降低了因路径中断导致的额外成本。通过算法优化与动态反馈机制的协同，模型能够快速响应环境变化，在保障多目标协同的同时，实现绿色物流路径规划的智能化升级。

表 1: 绿色物流路径规划多目标优化模型关键技术及效益对照表

| 优化目标 | 数据驱动指标 | 算法处理方式 | 实际应用效益 |
|---------|---------------|-----------------|-------------------|
| 碳排放最小化 | 车辆能耗数据、道路坡度数据 | 基于历史数据的能耗模型构建 | 降低运输环节碳足迹 15%-25% |
| 运输成本优化 | 燃油价格数据、过路费数据库 | 动态成本权重调整机制 | 平均节省物流成本 8%-12% |
| 时间效率提升 | 实时交通流量数据、天气数据 | 自适应变异算子设计 | 配送准时率提升至 92% |
| 车辆载重均衡 | 订单重量体积数据、车型参数 | 精英保留策略结合负载均衡约束 | 车辆利用率提高 20% |
| 路径可靠性增强 | 道路维修数据、事故历史数据 | 基于 GIS 数据的可行性筛选 | 路径意外中断率降低 40% |

5 结束语

在全球碳中和目标与物流行业智能化转型的双重驱动下,绿色物流路径规划的优化已成为平衡经济效益与环境责任的关键课题。笔者通过构建数据驱动的多目标遗传算法模型,系统解决了传统规划方法在目标单一、动态响应不足等方面的局限性,实现了碳排放、运输成本与时效性等多维度目标的协同优化。数据融合机制与动态调整策略的结合,不仅提升了路径规划的实时性与可靠性,更通过算法改进与模型创新,为物流企业提供了兼顾环保与效率的决策支持。未来,随着 5G、边缘计算等技术的普及,绿色物流路径规划将进一步向实时化、精细化方向发展。同时,政策法规的完善与行业标准的统一,将为多目标优化技术的规模化应用创造更广阔的空间。期待本研究能够为物流行业的绿色转型注入新动能,助力“双碳”目标的高效落地,推动经济高质量发展与生态环境保护的深度融合。

参考文献

- [1] 沈倩. 基于绿色供应链数智化冷链物流平台构建: 框架、机理、路径[J]. 物流科技, 2025, 48(6): 107-110, 114.
- [2] 陈媛瑞. 创新驱动政策协同对物流业绿色效率的影响效应与作用机制[J]. 商业经济研究, 2024(12): 99-102.
- [3] 武勇杰, 原悦, 侯柳茹. 黄河流域绿色物流与绿色经济协调发展的驱动因素[J]. 科技管理研究, 2024, 44(24): 57-66.
- [4] 王黎明, 孙澎升. 数字新基建、技术进步与绿色物流高质量发展[J]. 商业经济研究, 2025(1): 85-88.
- [5] 陈媛瑞. 创新驱动政策协同对物流业绿色效率的影响效应与作用机制——来自国家自主创新示范区与创新型城市的证据[J]. 商业经济研究, 2024(12): 99-102.