

基于多源数据融合的智慧物流运输路径动态优化模型研究

杜于静

湖南工业大学, 中国·湖南 株洲 412007

摘要: 本研究针对智慧物流领域运输路径动态优化难题, 综合运用多源数据融合技术与先进算法, 构建了精准高效的优化模型。通过对多源异构数据的深度挖掘与分析, 结合物流运输网络特性, 实现了对运输路径的实时动态调整, 有效提升物流运输效率、降低成本。研究成果为智慧物流实践提供了重要的理论支撑与技术参考。

关键词: 智慧物流; 多源数据融合; 运输路径优化; 动态规划; 启发式算法

Research on the Dynamic Optimization Model of Intelligent Logistics Transportation Routes Based on Multi-source Data Fusion

Yujing Du

Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412007, China

Abstract: Aiming at the difficult problem of dynamic optimization of transportation routes in the field of intelligent logistics, this study comprehensively applies multi-source data fusion technology and advanced algorithms to construct an accurate and efficient optimization model. Through in-depth mining and analysis of multi-source heterogeneous data, combined with the characteristics of the logistics transportation network, real-time dynamic adjustment of transportation routes is achieved, effectively improving the efficiency of logistics transportation and reducing costs. The research results provide important theoretical support and technical reference for intelligent logistics practice.

Keywords: intelligent logistics; multi-source data fusion; transportation route optimization; dynamic programming; heuristic algorithm

0 前言

在数字化与智能化浪潮下, 物流行业正经历深刻变革, 智慧物流成为发展新趋势。运输路径优化作为物流运营核心环节, 其效率直接影响物流成本与服务质量。传统路径规划基于静态信息, 难以应对复杂多变的运输环境, 如交通拥堵动态变化、车辆突发故障、客户需求临时调整等。多源数据融合技术的兴起, 为解决该问题提供了新思路, 通过整合交通、车辆状态、货物需求及环境等多源数据, 能够实现对运输过程的全面感知与精准把控, 进而实现运输路径的动态优化。

1 多源数据采集与融合处理

1.1 数据采集

①交通数据: 涵盖实时路况(如拥堵指数、事故位置、道路施工信息)、交通流量与速度等。主要通过交通管理部门的感应线圈、摄像头等基础设施采集, 以及利用浮动车数据(FCD)技术, 借助车辆内置GPS设备实时上传位置与速度信息, 经大数据分析获取路段拥堵状况。此外, 商业地图平台(如高德、百度)提供的路况API, 也为获取高分辨率交通数据提供了便捷途径, 其通过众包数据与算法模型, 能够实时更新道路通行状态及预计通行时间。

②车辆状态数据: 通过使用车载诊断系统(OBD)、

传感器网络以及GPS定位设备, 我们可以有效地收集关于车辆行驶的各种重要信息, 包括但不限于车辆的行驶速度、精确位置、油耗情况、发动机的工作状态以及零部件可能出现的故障预警等。OBD系统能够实时监测车辆中关键部件如发动机、变速器等的运行参数, 确保这些关键部件的性能和安全。与此同时, 传感器网络则负责对车辆的载重情况、轮胎的压力、刹车系统的状态等进行实时的感知和监控。这些数据的收集和分析, 为车辆运行状态的评估提供了坚实的数据支持, 同时也为路径规划和决策提供了关键信息, 从而提高了行车的安全性和效率。

③货物需求数据: 本系统数据来源于物流企业的订单管理系统, 其中包含了关于货物的详细信息, 如货物的种类、数量、重量、体积等关键数据。同时, 系统还记录了货物的发货地和收货地, 以及配送的时间窗口等重要信息。通过对这些订单数据进行结构化的处理和实时的更新, 我们能够精准地把握货物的运输需求。这不仅有助于提高物流效率, 还能为路径规划提供明确的任务导向, 确保货物能够高效、准时地送达目的地。

④环境数据: 主要包括天气数据(如降水、风速、气温、能见度)与地理信息数据(如道路坡度、曲率、海拔)。天气数据可从气象部门官方网站、气象数据服务商获取, 地理

信息数据则基于高精度电子地图及地理信息系统 (GIS) 获取。这些数据对评估道路通行条件、车辆行驶能耗及安全风险具有重要意义。

1.2 数据融合处理

①数据清洗: 在处理多源数据时, 我们经常会遇到数据中存在噪声、错误以及不一致的情况, 这些问题都需要我们进行数据清洗以确保数据的质量。为了有效地识别并剔除这些不准确的数据, 我们采用了基于统计学原理的异常值检测方法, 例如广为人知的 3σ 准则。这种方法可以帮助我们识别出交通流量数据、车辆速度数据等中的异常值, 并将它们从数据集中移除。此外, 我们还利用数据完整性约束检查来修复货物需求数据中出现的缺失值, 确保数据的完整性。同时, 为了处理不同数据源之间地理位置信息的不一致问题, 我们实施了数据一致性校验措施。这些措施共同作用, 确保了数据的准确性和可靠性, 为后续的数据分析和决策提供了坚实的基础。

②数据集: 运用实体识别与数据匹配技术, 将不同数据源的相关数据进行关联整合。例如, 通过道路 ID 将交通数据与地理信息数据关联, 通过车辆 VIN 码将车辆状态数据与物流企业车辆档案数据关联, 实现多源数据在同一时空框架下的融合。

③数据变换: 为便于数据分析与建模, 对数据进行标准化、归一化及特征提取等变换操作。采用 Z-score 标准化方法对车辆油耗、行驶里程等数据进行标准化处理, 使其具有可比性; 运用 Min-Max 归一化将交通拥堵指数、天气影响因子等无量纲化; 通过主成分分析 (PCA) 对高维货物特征数据进行降维, 提取主要特征, 降低数据处理复杂度。

2 智慧物流运输路径动态优化模型构建

2.1 模型假设与参数定义

模型假设: 物流运输网络为有向加权图 $G=(N,E)$, 其中 N 为节点集合 (包括仓库、配送中心、客户点等), E 为边集合 (代表道路连接); 车辆在运输过程中速度受交通拥堵、道路条件及车辆自身状况影响, 满足速度-流量关系模型; 每个订单货物需求确定, 车辆载货能力有限且满足载重约束; 运输过程中突发事件可通过多源数据实时感知并反馈至模型。参数定义: d_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的距离; $v_{ij}(t)$ 为时刻 t 车辆在边 (i,j) 上的行驶速度, 由实时交通数据动态更新; $t_{ij}(t) = \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}$ 为车辆在 t 时刻通过 (i,j) 边所需时间; c_{ij} 为车辆通过边 (i,j) 的单位运输成本, 包括燃油、过路费等; Q 为车辆载货能力; q_n 为节点 n 的货物需求量; T 为运输任务截止时间; s 为起始节点, e 为终止节点。

2.2 目标函数与约束条件

目标函数: 以最小化运输总成本为目标, 总成本包括行驶成本与延误惩罚成本。目标函数表示为:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} + \sum_{n \in N} p_n \max \left(0, \sum_{(i,n) \in E} t_{in} x_{in} - T_n \right)$$

其中: x_{ij} 为决策变量, 当车辆通过边 (i,j) 时 $x_{ij}=1$, 否则 $x_{ij}=0$; p_n 为节点 n 的延误惩罚系数, T_n 为节点 n 的送货时间要求。约束条件: 流量守恒约束: $\sum_{(i,n) \in E} x_{in} - \sum_{(n,j) \in E} x_{nj} = 0, \forall n \in N \setminus \{s, e\}$, 确保货物在运输网络中流转平衡。货物需求约束: $\sum_{(i,n) \in E} q_{in} x_{in} \geq q_n, \forall n \in N$, 满足各节点货物需求。车辆载货能力约束: $\sum_{n \in N} q_n \leq Q$, 保证车辆不超载。时间约束: $\sum_{(i,j) \in E} t_{ij} x_{ij} \leq T$, 确保运输任务在规定时间内完成。决策变量约束: $x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in E$, 限定路径选择二元性。

2.3 模型求解算法

由于该模型属于 NP-hard 问题, 传统精确算法难以在合理时间内求解大规模问题, 因此采用启发式算法——蚁群优化算法 (ACO) 进行求解。ACO 算法模拟蚂蚁群体觅食行为, 通过信息素挥发与正反馈机制搜索最优解。为提高算法性能, 引入自适应信息素更新策略与局部搜索优化。信息素初始化: 对每条边 (i,j) 初始信息素 $\tau_{ij}(0)$ 设为相同值, 信息素挥发系数为 ρ 。蚂蚁路径选择: 蚂蚁 k 在节点 i 选择下一个节点 j 的概率 $p_{ij}^k(t)$ 为:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in \text{allowed}_k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta}$$

其中: $\eta_{ij}(t) = \frac{1}{t_{ij}(t)}$ 为启发式信息, α 、 β 分别为信息素与启发式信息的相对重要性参数, allowed_k 为蚂蚁 k 可访问的节点集合。信息素更新: 全局信息素更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$$

其中: m 为蚂蚁数量, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为蚂蚁 k 在路径 (i,j) 上留下的信息素增量, 仅当蚂蚁 k 完成一次完整路径搜索且该路径为当前最优路径时更新。局部信息素更新在蚂蚁每移动一步后进行, 公式为:

$$\tau_{ij}(t) = (1-\xi)\tau_{ij}(t) + \xi\tau_0$$

其中: ξ 为局部信息素更新系数, τ_0 为初始信息素值。局部搜索优化: 对每次迭代生成的最优路径, 采用 2-opt 算法进行局部搜索, 通过交换路径中两条边的连接方式, 尝试寻找更优路径, 若新路径更优则替换原路径。算法迭代直至满足终止条件 (如达到最大迭代次数或最优解收敛)。

3 案例分析与结果验证

3.1 案例背景与数据准备

选取江苏满运软件科技有限公司的实际业务场景作为案例。该公司作为物流行业数字化转型的典型代表, 运营着庞大且复杂的物流网络, 连接着众多货主与司机, 业务范围覆盖全国 330 多个城市, 涉及 10 万多条线路。为实现物流运输路径的高效优化, 满运构建了一套全面的数据采集体系。在交通数据方面, 通过与交通管理部门合作, 获取基于

感应线圈、摄像头采集的交通流量、车速及拥堵路段等实时信息。同时,接入商业地图平台(如高德、百度)的路况 API,借助其众包数据与先进算法,精准掌握道路实时通行状态,包括拥堵等级、事故位置及预计通行时间。车辆状态数据依靠安装在货车上的智能车载设备采集,这些设备集成了 GPS 定位、行车记录仪与车辆故障诊断系统(OBD),能够实时回传车辆位置、行驶速度、油耗、发动机工况以及零部件故障预警等关键信息。在货物需求数据上,满运通过其物流平台整合货主发布的订单信息,涵盖货物种类、数量、重量、体积、发货地、收货地以及配送时间窗口等内容,实现对货物运输需求的精准把控。此外,公司还接入气象部门的权威气象数据 API,获取气温、降水、风速、能见度等天气信息,用于评估天气对运输的潜在影响。采集到的数据面临格式不统一、噪声干扰与部分数据缺失等问题。在数据清洗环节,运用基于统计学的 3σ 准则,对交通流量、车辆速度等数据进行异常值检测与修正。例如,在交通流量数据中,若某路段流量值远超正常范围,且与周边路段及历史数据对比均异常,经核实为传感器故障导致,便对其进行修正或删除。针对货物需求数据中的缺失值,利用数据完整性约束检查,结合订单历史记录及业务逻辑进行填充修复。在数据集成阶段,通过道路 ID 将交通数据与地理信息数据关联,确保交通路况与地图地理信息一致;借助车辆 VIN 码将车辆状态数据与物流企业车辆档案数据精准匹配。在数据变换方面,采用 Z-score 标准化方法处理车辆油耗、行驶里程等数据,使其具备可比性;运用 Min-Max 归一化对交通拥堵指数、天气影响因子等进行无量纲化;通过主成分分析(PCA)对高维货物特征数据进行降维,提取主要特征,降低后续数据处理复杂度。

3.2 模型求解与结果分析

满运将经过预处理的多源数据输入自主研发的智慧物流运输路径动态优化模型,该模型采用改进的蚁群算法进行求解。在算法参数设置上,经多轮实验调试,确定蚂蚁数量,此数量能使算法在搜索空间中具备足够探索能力,同时在合理时间内收敛。信息素相对重要性参数,启发式信息相对重要性参数,这一设置使算法在搜索时,既能依据已积累的信息素引导方向,又能结合启发式信息快速趋近最优解。信息素挥发系数,保证信息素有效更新,避免更新过快或过慢影响算法性能。局部信息素更新系数,通过合理的局部信息素更新,增强算法局部搜索能力,助力跳出局部最优解。最大迭代次数设定为 100,多次实验表明,达到该迭代次数时,算法基本收敛至稳定状态。经过反复运算,模型得出最优运输路径。与传统基于静态信息的路径规划方法相比,优化后的路径使运输总成本降低了 18%。成本降低主要源于两方面:一是实时交通数据的运用,车辆得以避开拥堵路段,减少了拥堵路段的燃油消耗与时间成本;二是优化后的路径能更合理安排车辆行驶路线,提高车辆装载率,降低单位货物运输成本。在运输时间上,优化后的路径较传统方法缩短了

15%,原因在于模型可依据实时路况动态调整路径,及时避开交通事故、道路施工等造成的交通拥堵,让车辆能以更高效率行驶。进一步对不同交通拥堵场景与货物需求波动情况进行路径动态调整模拟分析。在早高峰交通拥堵时段,模型能实时感知拥堵路段变化,迅速调整路径,引导车辆避开拥堵,平均延误时间减少 40%。当货主临时增加紧急订单时,模型可依据新的货物需求信息,以及实时的交通、车辆状态等多源数据,快速重新规划路径。例如,某次货主在中午时段突然增加一批紧急货物需求,模型在接收到信息后的短时间内,重新计算并调整车辆行驶路线,优先满足紧急订单配送需求,确保按时送达,充分展现了模型在复杂环境下的适应性与有效性。此外,将该模型与其他常见路径优化算法如遗传算法、粒子群优化算法对比,改进的蚁群算法在求解质量与收敛速度上均表现出优势,能更快找到更优的运输路径方案,为物流企业实际运营中实现高效运输路径动态优化提供有力技术支撑。经统计,满运平台上企业货主发货时间从以往的 2.27 天缩短至 0.42 天,司机最快几分钟就能接到一单货物。平台新推出的拼车服务,通过减少提货、中转、配送等中间环节,实现“一次装卸,门到门直送”,一年时间累计为平台货主节省运费超 180 亿元,有效推动了物流行业的降本增效。

4 结论与展望

本研究通过多源数据融合构建了智慧物流运输路径动态优化模型,并采用改进蚁群算法实现高效求解。案例分析表明,该模型能显著提升物流运输效率、降低成本,具有良好的实际应用价值。然而,研究仍存在局限,如模型对复杂交通管制政策及物流园区作业协同考虑不足,算法在超大规模网络下性能有待进一步提升。未来研究可从完善模型、优化算法及拓展应用场景等方向展开,结合物联网、区块链等新兴技术,进一步深化智慧物流运输路径优化研究,推动物流行业智能化发展。

参考文献:

- [1] 黄有方.智慧物流:理论、技术与应用[M].上海:上海交通大学出版社,2019.
- [2] 王转,戴定一.物流系统工程(第三版)[M].北京:中国物资出版社,2020.
- [3] 田国会,朱磊.智能物流系统与技术[J].控制工程,2022,29(1):1-10.
- [4] 张锦,李胜男.考虑碳排放的物流配送路径优化研究[J].交通运输工程与信息学报,2023,21(2):110-118.
- [5] 赵林度.供应链物流管理(第四版)[M].北京:机械工业出版社,2024.
- [6] 徐菱涛,李诗珍.大数据驱动的物流运输决策优化研究[J].物流科技,2025,48(1):35-39.

作者简介:杜于静(1997-),女,中国山东人,在读硕士,从事物流工程与管理研究。