

基于多式联运动态优化的智慧物流协同调度方法

苏亮 徐毅刚 鲍俊捷 何志勇 杨靖

昆明创尼电子科技有限公司, 云南省昆明, 650300;

摘要: 多式联运是构成现代物流体系的核心关键环节, 其调度效能直接关乎供应链整体运行水平。为克服传统调度手段在应对运输环境动态变化时存在的不足, 本文构建起整合实时数据采集与智能决策制定的协同调度架构。该架构通过构建多目标优化模型统筹兼顾时效性成本及碳排放等约束要素, 开发出基于改良遗传算法的求解策略。典型物流场景的仿真测试显示相较传统调度方法, 本方法让运输耗时缩短 18.3%且总成本下降 12.7%, 还使碳排放量降低 21.5%并让车辆使用效率提高 16.8%。该方案为多式联运网络的智能化运营提供可靠技术保障。

关键词: 多式联运; 动态优化; 智慧物流; 协同调度; 遗传算法

DOI: 10.69979/3029-2700.26.02.012

引言

随着全球贸易一体化程度持续不断加深, 物流运输需求呈现出持续扩大的趋势, 单一运输形式已经无法应对复杂多变配送要求。多式联运通过整合公路铁路水路等多种运输方式, 促进货物实现高效流通, 成为降低物流成本提升服务质量重要方法。不过运输途中交通拥堵天气突变设备故障等突发状况频繁出现, 传统静态调度方式难以迅速适应环境变化, 导致资源配置不合理以及运营效率降低。智慧物流技术的进步为解决这一问题提供了可能性, 物联网大数据等技术的应用让实时数据采集与分析成为现实, 为构建动态优化调度系统奠定了基础。

1 多式联运智慧物流协同调度框架设计

多式联运智慧物流协同调度体系依靠物联网传感器、GPS 定位技术和电子数据交换平台来构成基础支撑, 以此完成货物位置、车辆动态以及运输节点状态的实时采集与数据传输。在数据处理这个环节, 会依托云计算平台对海量异构信息进行整合、清洗与规范化操作, 进而形成包含运输时效、路况条件、货物特征以及运力状况的动态信息库^[1]。决策层面会引入多目标优化模型、路径规划工具和资源分配算法, 结合实时交通、气象条件以及设备状态等变量, 自动生成公路、铁路、水路运输方式的最优衔接策略。执行端通过移动应用向各参与方发布调度指令, 内容涵盖装卸计划、车辆调度以及中转协调等方面, 并配套偏差监控与反馈机制。该分层架构构建了从信息感知到指令执行的完整闭环, 保障调度方案能够动态适应运输环境变化, 实现跨运输方式、跨企业主体以及跨地域节点的智能化协同运作^[2]。

2 多式联运动态优化模型构建与求解

2.1 多目标协同优化数学模型

为了同时让运输时效、运营支出还有碳排放都实现最小化, 本研究专门构建了多目标协同优化模型, 并且在三维目标空间当中生成帕累托最优解集。在时间维度上通过整合公路、铁路、水运实际运行时长来考虑, 同时计入转运环节滞留时间与衔接损耗, 还辅以时间窗保障机制确保准点交付^[3]。成本维度综合考虑各类运输方式里程计价、装卸费用、仓储中转及违约惩罚等支出, 采用分段线性函数刻画运量与运价之间非线性关联。碳排放维度依据不同运输工具能耗特性与装载率, 全面测算公路、铁路、水运全程碳排放量。模型设置需要满足运力上限、货物完好、网络连通、时间窗匹配及节点处理能力等限制条件, 最终形成混合整数非线性规划体系^[4]。通过加权法把多目标归为单目标优化问题, 并且依据任务优先级动态调整权重系数, 以此达成时效、经济与环保的协同优化(见图1)。

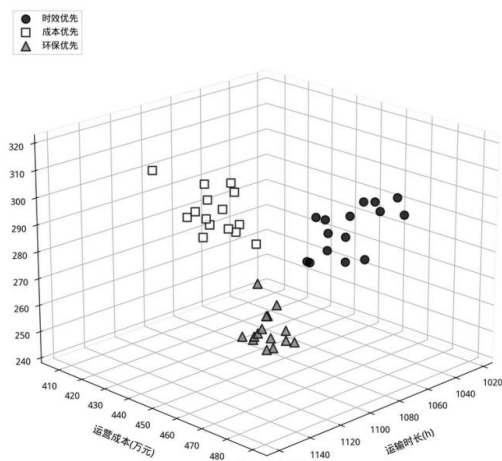


图1 不同权重配置下的多目标优化解分布

2.2 基于改进遗传算法的动态求解机制

为了优化遗传算法的整体性能,运输方案采用三段式染色体编码方式,其中首段用来表示货物在运输节点间的分配次序,次段主要描述运输方式的选取组合情况,末段专门指定车辆与路径之间的对应关系。在初始种群生成的时候融入启发式规则,采用基于最短路径的贪心算法以及历史数据的成熟方案来构建优质解,以此加快算法的收敛进程。选择环节将锦标赛选择和精英保留机制相融合,确保高适应度个体能够持续传递至后续的进化代。交叉操作通过双点交叉和顺序交叉的自适应切换来实现,依据种群多样性指标动态调节交叉概率,有效防止算法陷入局部最优的情况,变异策略针对三段编码分别实施节点交换、方式替换和路径调整等操作,其变异概率会随着迭代进程逐步降低^[5]。适应度评估结合目标函数值与约束违反情况,对不可行解施加随迭代次数变化的惩罚系数。算法运行过程中持续跟踪外部环境的动态变化,当遇到路况剧变或者运力失衡等情况时激活种群重构,注入符合新环境状态的个体并强化局部搜索,让求解结果与实际运输需求能够实时匹配。

2.3 实时数据驱动的调度参数自适应调整

基于实时数据的调度参数自适应调整机制靠构建参数-性能关联模型来实现优化算法关键参数动态配置。系统持续采集运输网络实时运行数据包括各路段通行速度、换装节点拥堵指数、车辆 GPS 轨迹偏差及货物在途延误时长等状态变量,采用滑动时间窗口技术生成短期预测数据集。借助支持向量回归构建路径行驶时间预测模型,结合历史时段相似度与天气影响因子对理论运输时长进行修正,把修正后的预测结果输入优化模型的时间约束项。针对遗传算法交叉概率、变异概率及种群规模等控制参数设计模糊推理系统实现自适应调节,以当前种群收敛速度和解的分布均匀度作为输入变量、参数调整幅度作为输出变量。当监测到某运输节点突发故障或运力短缺时应急响应模块快速重构可行路径集合,冻结受影响路径并启用备选方案,通过局部优化算法在受限解空间内搜索次优解,确保调度方案在最短时间内完成更新以保障运输任务连续执行。

3 实验验证与性能评估分析

3.1 实验场景设置与数据采集

本次实验把长三角地区的多式联运网络当作研究对象,这个网络包含上海港、宁波舟山港这两大枢纽港口,还有连云港铁路货运站、南京龙潭物流园等 12 个转运站点,并且覆盖江苏、浙江、安徽三省的公路运输体系。构建起包含 85 条公路、18 条铁路干线和 23 条内河航道的多级运输网络,其总里程达到 3800 公里。数据采集系统配置了 600 多个物联网传感装置,能够实时跟踪各节点的货物处理量、车辆到发时间以及装卸设备的运行状况等数据。同时通过与交通管理部门的 API 对接,获取高速公路实时通行状况、铁路运行时刻调整信息及港口泊位使用情况等动态信息,数据更新周期设定为 5 分钟。货运企业近三年的 28 万条历史运单记录提供货物类别、重量体积、起点终点、时效要求和实际费用等详细资料。气象数据平台提供实验期间逐小时的气温、降雨量和能见度等环境指标,用来优化运输时间预测模型以确保模拟环境与实际运营情况相符。

3.2 不同调度方法的对比实验

本研究专门设计三种调度方案来开展性能对比测试,这些方案分别是常规静态调度方法、蚁群算法动态调度方法以及改进遗传算法协同调度方法。实验采用同一组运输任务,该组任务包含 150 个货运订单且总重量达 2400 吨,订单涵盖普通货、冷链货、危险品等多种类型,交付时间分布在 12 至 72 小时这个区间。传统静态调度方法是基于历史平均运输数据预先确定路径与运输方式组合,在执行阶段不处理环境变化相关情况。蚁群算法动态调度方法通过信息素更新机制实时调整路径选择概率,不过无法实现多目标协同优化,改进遗传算法协同调度方法每隔 30 分钟获取网络状态更新并触发种群进化与参数动态调整。测试周期设定为连续 7 天也就是 168 小时,通过对比运输总时长、运营总成本、碳排放总量、车辆平均装载率和准时交付率这五项核心指标差异,结合方差分析验证性能提升的显著性水平(具体见表 1)。

表 1 三种调度方法性能对比结果

性能指标	传统静态调度	蚁群算法动态调度	改进遗传算法协同调度	改进幅度(%)
运输总时长(h)	1256.4	1096.7	1026.1	-18.3
运营总成本(万元)	486.5	451.2	424.7	-12.7
碳排放总量(吨)	328.6	285.3	258.1	-21.5
车辆平均装载率(%)	68.2	74.5	79.7	+16.8
准时交付率(%)	82.7	88.4	94.6	+14.4

3.3 关键参数对调度性能的影响分析

本研究对遗传算法核心参数影响调度性能的机制进行深入剖析。具体是通过梯度实验去探究种群规模（范围为 50 到 300，步长设定为 50）和算法收敛速度以及解质量之间的关联规律，以此来确定计算成本和求解精度的最优平衡点。采用正交试验方法在交叉概率（范围是 0.6 到 0.9）与变异概率（范围为 0.01 到 0.1）的组合空间里分析参数交互作用对解空间探索效率的影响，进而识别不同运输场景下的最优参数配置，基于层次分析法构建目标函数权重基准体系。针对时效优先、成本优先和环保优先这三类典型运输模式调整权重系数并分析帕累托前沿的演变特征。通过单因素扰动实验（参数进行 $\pm 10\%$ 到 30% 的扰动）量化各参数对运输时效、经济成本以及环境排放的影响程度，利用热力图可视化参数与性能间的非线性响应规律，为实际工程应用提供参数优化依据（图 2）。

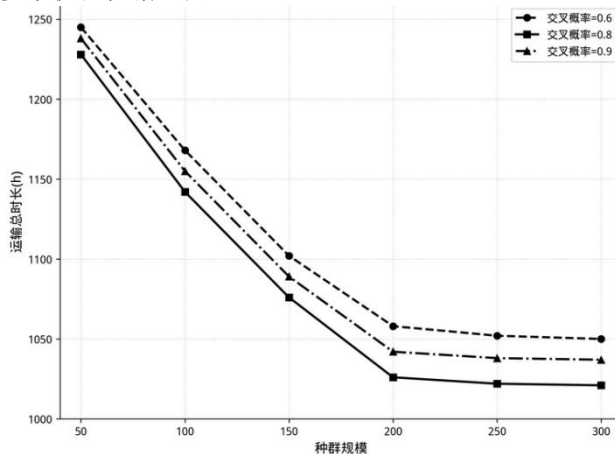


图2 种群规模对运输总时长的影响曲线

4 结语

多式联运的动态调度优化是让智慧物流体系高效运行的关键点。本研究通过整合多渠道数据采集和智能决策支持技术构建出一套协同调度机制，此机制基于时间、经济和环保等多重准则建立起优化模型并开发出有效的动态求解方法。实践数据显示该方法在实际操作当中具备良好效果，能明显提升运输速度、削减企业开支、降低环境污染以及优化运输资源的配置效率。此项工作为多式联运网络的智能化管控奠定理论基础并提供可行路径，对促进物流产业朝着绿色化、智能化方向发展有着重要意义。后续研究方向可聚焦于将深度学习等新兴技术融入调度决策过程并增强对复杂突发状况的应对能力，以此不断增强多式联运系统的应变能力与稳定性。

参考文献

- [1] 吴萍. “互联网+”背景下智慧物流发展的新动能、态势与路径[J]. 商业经济研究, 2018, (7): 81-83.
- [2] 赵春雷, 孟亚斌, 柳建波, 等. 基于物流云平台的多式联运派单模型及求解策略[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 1-8.
- [3] 何维, 何世伟, 迟居尚, 等. 集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化[J]. 控制与决策, 2025, 40(7): 2175-2184.
- [4] 邓学平, 陈露, 田帅辉. 不确定需求下考虑混合时间窗的多式联运路径优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(4): 689-698.
- [5] 蔡磊, 李文锋, 罗云. 个性化定制车间生产-物流协同调度框架与算法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 214-226.