

控制与决策

Control and Decision

考虑多时段影响的第四方物流运营策略联合优化

蔡近近, 宋瑞, 何世伟, 何维, 丛铭, 颜凯

引用本文:

蔡近近, 宋瑞, 何世伟, 等. 考虑多时段影响的第四方物流运营策略联合优化[J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 44-54.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0445>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划

Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization

控制与决策. 2021, 36(6): 1397-1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1323>

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589-598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

控制与决策. 2021, 36(2): 505-512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

基于微波无线传能的动态无线传能链路多目标规划问题

Multi-objective planning of dynamic wireless energy transmission link based on microwave wireless energy transmission

控制与决策. 2021, 36(12): 3039-3048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1187>

现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market

控制与决策. 2021, 36(11): 2794-2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

考虑多时段影响的第四方物流运营策略联合优化

蔡近近, 宋瑞[†], 何世伟, 何维, 丛铭, 颜凯

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 第四方物流作为供应链资源的集成协调者, 能够通过资源整合有效降低供应链成本. 首先, 从第四方物流作为供应链集成商的视角出发, 聚焦其在运营过程中面临的多时段采购、仓储、多式联运以及第三方物流服务商选择等问题, 构建以最小化总运营成本为目标的联合优化模型. 然后, 为提升求解质量和效率, 设计一种结合图采样聚合算法与 K 最短路径算法的量子微进化算法. 接着, 基于 Chicago-regional 数据集, 构建小规模和大规模网络进行数值实验. 实验结果显示, 所提出模型在测试算例中相较于不含仓储的联合优化策略与未联合优化策略, 最高可降低 11.8% 和 15% 的总运营成本. 在大规模网络中, 将所提出算法与微进化算法、量子遗传算法、遗传算法以及粒子群算法进行对比, 结果表明所提出算法在求解质量和效率方面均表现更优. 最后, 通过分析参数波动场景下运营成本的变化, 验证了所提出模型具备应对多时段变化的能力, 最高可降低 18.07% 的运营成本.

关键词: 第四方物流; 多时段运营策略; 联合优化; 多服务商多式联运; 图采样聚合; 量子微进化算法

中图分类号: U116.1 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0445

引用格式: 蔡近近, 宋瑞, 何世伟, 等. 考虑多时段影响的第四方物流运营策略联合优化 [J]. 控制与决策, 2026, 41(1): 44-54.

Joint optimization of fourth-party logistics operation strategies considering multi-period effects

CAI Jin-jin, SONG Rui[†], HE Shi-wei, HE Wei, CONG Ming, YAN Kai

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As an integrator and coordinator of supply chain resources, the fourth-party logistics (4PL) provider can effectively reduce supply chain costs through resource integration. From the perspective of a 4PL as a supply chain integrator, this paper focuses on the challenges of multi-period procurement, warehousing, multimodal transportation, and the selection of third-party logistics (3PL) service providers. A joint optimization model is constructed with the objective of minimizing total operational costs. To enhance the quality and efficiency of the solution, a quantum micro-evolution algorithm that combines a graph sample and aggregate algorithm and a K -shortest path algorithm is designed. Numerical experiments are conducted on both small-scale and large-scale networks based on the Chicago-regional dataset. The results indicate that, in the tested instances, the proposed model can reduce total operational costs by up to 11.8% and 15% compared to a joint optimization strategy without warehousing and a non-joint optimization strategy, respectively. In the large-scale network, a comparison with the micro-evolution algorithm, quantum genetic algorithm, genetic algorithm, and particle swarm optimization demonstrates the superiority of the proposed algorithm in terms of both solution quality and efficiency. Finally, by analysing the changes in operational costs under scenarios of parameter fluctuations, the model's capability to handle multi-period variations is validated, achieving a maximum cost reduction of 18.07%.

Keywords: fourth-party logistics; multi-period operation strategy; joint optimization; multi-service provider multimodal transport; graph sample and aggregate; quantum micro-evolution algorithm

0 引言

面对日益复杂的物流需求, 传统第三方物流

(3PL) 模式局限性凸显^[1-2]. 第四方物流 (4PL) 作为供应链的系统集成者, 通过对采购、仓储、运输以及

收稿日期: 2025-04-26; 录用日期: 2025-09-15.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2024JBZX038).

责任编委: 黄敏.

[†]通信作者. E-mail: rsong@bjtu.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

3PL 服务商等全链条资源进行整合和协同优化,旨在提供一站式解决方案.其核心目标在于降低供应链的总成本,提升服务质量和可持续性,尤其是在“双碳”战略背景下推动绿色转型.

4PL 优化的关键在于构建一体化的运营策略.与 3PL 不同,4PL 着眼于整个运营流程,涵盖采购、仓储、运输以及对 3PL 服务商的选择和管理^[3].在多时段、大规模的网络物流操作中,传统的即时采购模式易导致采购成本过高,而单一追求低采购成本则可能会引发过高的仓储成本.因此,为了最小化总运营成本并实现各环节间的成本均衡,对采购、仓储、运输以及 3PL 服务商选择等决策进行系统性协同优化至关重要.

在现有研究中,学者们主要聚焦于 4PL 的运作机制、3PL 服务商选择、服务网络设计以及路径优化等问题.

在运作机制方面,Feng 等^[4]指出了 4PL 在合同协调、信息共享和风险分担中的桥梁作用及其合作、合同和演化博弈机制对供应链稳定的关键保障;Guchhait 等^[5]构建了 4PL 与柔性生产协同的运作机制并评估经济效益.

在 3PL 服务商选择方面,Liu 等^[6]针对 4PL 中多源异质信息和专家判断犹豫问题,提出了混合模糊集交互式决策模型;Nila 等^[7]结合对数百分比变化法、全一致性方法和多米诺排序法,提出了三角模糊数多准则混合决策模型.

在服务网络设计方面,Huang 等^[8]引入用户心理行为,构建了成本约束下最大化客户满意度的非线性整数规划模型;董丽薇等^[9]以最小化网络建设成本为目标,构建了集成末端配送的 4PL 网络设计模型;Yin 等^[10]考虑服务时限和随机需求,提出了两阶段网络设计模型,以满足客户服务时间并最小化总成本.随着研究的深入,逐渐将多周期(时段)因素纳入网络设计问题.Yin 等^[3]构建了多周期两阶段随机规划模型,结合临时外包应对需求不确定性,并采用了样本平均近似法进行求解;Zhang 等^[11]在多周期 4PL 网络设计中引入了客户满意度对需求的动态影响,构建了混合整数非线性规划模型.

路径优化作为 4PL 的核心问题之一,其同时涉及路径选择和 3PL 服务商选择.路径选择侧重于在网络中选取最优路径;3PL 服务商选择则关注服务能力 and 成本等因素,以确定最适合的 3PL 服务商.黄敏等^[12]针对含费用折扣的多任务 4PL 路径优化问题,提出了基于动态调整策略的改进蚁群算法;Hong 等^[13]基于排队论,构建了融合 3PL 服务商、路径和

运输方式选择的多目标优化模型,涵盖了运输成本、时间和碳排放等因素;Gao 等^[14]考虑了完全信息对称和对称运输决策情形,针对单制造商向多个具有不确定时间和随机供应特征的分销商运输的 4PL 路径问题,构建了以总成本最小为目标的不确定随机规划模型.

现有 4PL 研究多聚焦于单一环节优化,普遍忽视了采购、仓储、运输以及 3PL 服务商选择等跨时段决策的内在耦合关系,限制了对整体成本的优化效果.为降低 4PL 运营成本,本文聚焦于 4PL 企业在面对多订单需求时的以下问题:

- 1) 如何为各运输订单决策适配的采购时刻和供应商;
- 2) 如何选择合适的 3PL 服务商、运输方式以及路径以完成订单运输;
- 3) 如何仓储提前采购的物资以规避额外费用.

为此,本文从 4PL 供应链集成商视角,将采购、仓储、多式联运以及 3PL 服务商选择等环节纳入统一决策,构建联合优化模型,并提出基于图采样聚合算法和 K 最短路径算法的量子微进化算法求解.通过不同规模的算例实验验证所提出模型的有效性和所提出算法的高效性;再对比参数波动场景下的运营成本变化,验证所提出模型应对多时段变化的能力.

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述

作为供应链集成商,4PL 需要系统耦合采购、仓储、运输与 3PL 服务商选择等关键环节决策,以实现全流程成本最低.其中:供应商选择和采购时间决定物资入网的时间和价格,仓储策略影响物资在时空维度的缓冲效果,多式联运路径规划保障货物适配运输方式特性,3PL 服务商选择则决定各环节的执行成本和时效.将这些相关环节联合优化求解,4PL 能够规避局部最优引发的成本转移和效率损失,实现各环节整体协同,最终达成运营成本最小化目标.

如图 1 所示:4PL 企业需要整合资源,为订单 $1 \sim$ 订单 q 制定供应商选择、采购时刻(时段)、多服务商多式联运路径(服务路径)以及是否仓储等策略,确保各订单在规定时间内送达需求点.上述决策横跨多个时段,不同时段间的采购价格、运价、运力和仓储费用等存在波动.为最小化不同时间段下的总运营成本(含采购成本、运输成本、3PL 服务商和运输方式的中转成本、时间窗违约惩罚以及碳税成本),需要为每个订单 $q \in Q$ 选择合适的采购时段 n 和

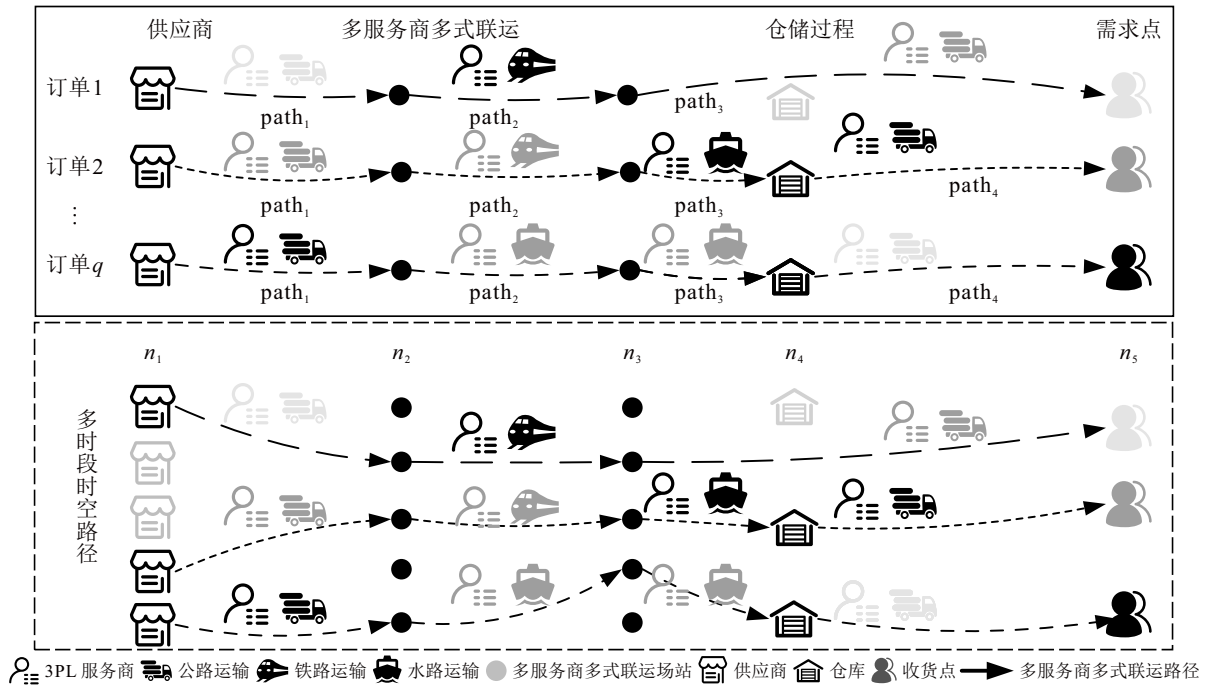


图1 第四方物流多时段采购、仓储、多式联运和3PL服务商选择示意图

供应商 s , 确定最优的 3PL 服务商和多式联运路径, 并制定合理的仓储策略. 当订单 q 在某一时段于仓库 b 进行仓储时, 会占用该时段该仓库的仓储容量. 因此, 需要利用不同时段间的运价、运力等参数差异, 灵活应对多时段运输过程中的动态变化, 以确保所有订单按期送达, 并尽可能减少运输过程中的碳排放. 因此, 本文构建第四方物流多时段运营策略联合优化模型 (4PL-JOMMPOS) 来解决上述问题, 通过决策各订单最优的采购供应商、采购时刻、服务方式、运输路径和仓储策略, 实现 4PL 的总运营成本最小.

为简化研究问题, 本文做出以下假设:

假设 1 订单在所有环节不可拆分^[15];

假设 2 订单在相邻节点间不可更换 3PL 运输服务商和运输方式;

假设 3 中转仅发生于中转节点, 且中转节点均配备满足换装需求的各种设备, 允许服务方式转换 (不允许仅更换 3PL 服务商);

假设 4 中转节点处仅考虑中转费用和中转时间, 不考虑其他因素;

假设 5 不考虑天气、运输设备故障等不可控因素对于运输过程的影响;

假设 6 订单在超出规定时间但是在可接受范围内送达时, 惩罚成本按照统一单价标准计取^[16];

假设 7 同一运输方式在各路段上均以相同速度匀速行驶;

假设 8 订单采购完成后立即开始运输, 即采购

完成时刻与开始运输时刻一致;

假设 9 各决策时段内所有参数恒定.

1.2 数学模型

数学模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} p_s^n \xi_q \chi_q^{sn} + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{\substack{a=(i,j,k,f) \in SA, \\ i \in V, j \in V, k \in K, f \in F}} c_a^n d_a \xi_q x_a^{qn} + \\ & \sum_{q \in Q} \sum_{i \in E} \sum_{\substack{(f_1, k_1) \in FK \\ (f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} \beta_{f_1 k_1}^{f_2 k_2} \xi_q y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{b \in B} \gamma_b^n \xi_q \rho \delta_b^{qn} + \sum_{q \in Q} \tau_q (z_q^u + z_q^d) + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} \sum_{\substack{a=(i,j,k,f) \in SA, \\ i \in V, j \in V, k \in K, f \in F}} \varsigma_n e_k d_a \xi_q x_a^{qn}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} \chi_q^{sn} = 1, \quad \forall q \in Q. \quad (2)$$

$$\sum_{q \in Q} \xi_q \chi_q^{sn} \leq l_s^n, \quad \forall s \in S, n \in N. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (n-1)\rho - M(1 - \chi_q^{sn}) & \leq t_q^{\text{start}} \leq \\ n\rho + M(1 - \chi_q^{sn}), & \quad \forall q \in Q, s \in S, n \in N. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{a_1=(s,j,k,f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_1}^{qn} - \sum_{\substack{a_2=(i,s,k,f) \in SA, \\ i \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_2}^{qn} & = \chi_q^{sn}, \\ \forall q \in Q, s \in S, n \in N. & \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_s^q = \sum_{n \in N} \chi_q^{sn}, \quad \forall s \in S, q \in Q. \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_1=(r_q, j, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_1}^{qn} - \sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_2=(i, r_q, k, f) \in SA, \\ i \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_2}^{qn} = -1, \quad \forall q \in Q. \quad (7)$$

$$v_{r_q}^q = 1, \quad \forall q \in Q. \quad (8)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_1=(i, j, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_1}^{qn} = \sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_2=(j, i, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_2}^{qn} = v_i^q, \quad \forall q \in Q, \\ i \in V \setminus (SU\{r_q\}). \quad (9)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{a=(i, j, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_a^{qn} \leq v_i^q, \quad \forall i \in V, q \in Q. \quad (10)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{a=(j, i, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_a^{qn} \leq v_i^q, \quad \forall i \in V, q \in Q. \quad (11)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_1=(i, j, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_1}^{qn} + \sum_{n \in N} \sum_{\substack{a_2=(j, i, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_2}^{qn} \geq v_i^q, \quad \forall i \in V, q \in Q. \quad (12)$$

$$t_{qj}^{\text{arrive}} \geq t_{qi}^{\text{leave}} + h_a - M(1 - x_a^{qn}), \quad \forall i \in V, j \in V, \\ k \in K, f \in F, a = (i, j, k, f) \in SA, \\ n \in N, q \in Q. \quad (13)$$

$$t_{qi}^{\text{leave}} \geq (n-1)\rho - M(1 - x_a^{qn}) - M(1 - v_i^q), \\ \forall q \in Q, i \in V, j \in V, k \in K, f \in F, \\ a = (i, j, k, f) \in SA, n \in N. \quad (14)$$

$$t_{qi}^{\text{leave}} \leq n\rho + M(1 - x_a^{qn}) + M(1 - v_i^q), \quad q \in Q, \\ \forall i \in V, j \in V, k \in K, f \in F, \\ a = (i, j, k, f) \in SA, n \in N. \quad (15)$$

$$\sum_{(f_1, k_1) \in FK} \sum_{\substack{(f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} = 0, \\ \forall q \in Q, i \in V \setminus E. \quad (16)$$

$$\sum_{(f_1, k_1) \in FK} \sum_{\substack{(f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} \leq 1, \\ \forall q \in Q, i \in E. \quad (17)$$

$$y_{qi}^{f_1 k f_2 k} = 0, \quad \forall q \in Q, i \in E, \\ k \in K, f_1, f_2 \in F. \quad (18)$$

$$\sum_{n \in N} x_{a_1}^{qn} + \sum_{n \in N} x_{a_2}^{qn} \leq 1 + y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2}, \quad \forall q \in Q, \\ i \in E, j \in V, (f_1, k_2) \in FK, \\ (f_1, k_2) \in FK, (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2), \\ a_1 = (j, i, k_1, f_1) \in SA, \\ a_2 = (i, j, k_2, f_2) \in SA. \quad (19)$$

$$\sum_{b \in B} \varphi_b^q \leq 1, \quad \forall q \in Q. \quad (20)$$

$$\delta_b^{qn} \leq \varphi_b^q, \quad \forall b \in B, q \in Q, n \in N. \quad (21)$$

$$\sum_{n \in N} \delta_b^{qn} \geq \varphi_b^q, \quad \forall q \in Q, b \in B. \quad (22)$$

$$\sum_{q \in Q} \xi_q x_a^{qn} \leq \omega_a^n, \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K, f \in F, \\ a = (i, j, k, f) \in SA, n \in N. \quad (23)$$

$$\sum_{q \in Q} \xi_q \delta_b^{qn} \leq \Omega_b^n, \quad \forall b \in B, n \in N. \quad (24)$$

$$v_b^q = \varphi_b^q, \quad \forall b \in B, q \in Q. \quad (25)$$

$$\delta_b^{qn} = \delta_b^{q(n-1)} + \sum_{\substack{a_1=(i, b, k, f) \in SA, \\ i \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_1}^{q(n-1)} - \sum_{\substack{a_2=(b, j, k, f) \in SA, \\ j \in V, k \in K, f \in F}} x_{a_2}^{q(n-1)}, \\ \forall q \in Q, b \in B, n \in N \setminus \{1\}. \quad (26)$$

$$\delta_b^{q1} = 0, \quad \forall q \in Q, b \in B. \quad (27)$$

$$x_{a_1}^{qn_1} + x_{a_2}^{qn_2} \leq 1, \quad \forall q \in Q, i \in V, j \in V, \\ h \in V, k \in K, k' \in K, f \in F, \\ f' \in F, a_1 = (i, j, k, f) \in SA, \\ a_2 = (j, h, k', f') \in SA, \\ n_1, n_2 \in N, n_2 < n_1. \quad (28)$$

$$t_{qi}^{\text{leave}} \geq t_{qi}^{\text{arrive}} - M(1 - v_i^q) + \begin{cases} \sum_{(f_1, k_1) \in FK} \sum_{\substack{(f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} t_{f_1 k_1}^{f_2 k_2} y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2}, \\ i \in E; \\ \rho \sum_{n \in N} \delta_i^{qn}, \quad i \in B; \\ \sum_{(f_1, k_1) \in FK} \sum_{\substack{(f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} t_{f_1 k_1}^{f_2 k_2} y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} + \\ \rho \sum_{n \in N} \delta_i^{qn}, \quad i \in E \cap B; \\ 0, \text{ otherwise;} \end{cases} \\ \forall i \in V, q \in Q. \quad (29)$$

$$t_q^{\text{dest}} \geq t_q^{\text{start}} + \sum_{\substack{a=(i, j, k, f) \in SA, \\ i \in V, j \in V, k \in K, f \in F}} \sum_{n \in N} h_a x_a^{qn} +$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{(f_1, k_1) \in FK} \sum_{\substack{(f_2, k_2) \in FK \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2)}} t_{f_1 k_1}^{f_2 k_2} y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} + \sum_{i \in B} \sum_{n \in N} \rho \delta_i^{qn}, \quad \forall q \in Q. \quad (30)$$

$$t_q^{\min} - z_q^n \leq t_q^{\text{dest}} \leq t_q^{\max} + z_q^d, \quad \forall q \in Q. \quad (31)$$

$$t_q^{\text{dest}} = t_{qrq}^{\text{arrive}}, \quad \forall q \in Q. \quad (32)$$

$$0 \leq t_{qi}^{\text{arrive}}, t_{qi}^{\text{leave}} \leq M v_i^q, \quad \forall i \in V, q \in Q. \quad (33)$$

$$\chi_q^{sn} \in \{0, 1\}, \quad \forall q \in Q, s \in S, n \in N. \quad (34)$$

$$x_a^{qn} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K, f \in F, \\ a = (i, j, k, f) \in SA, q \in Q, n \in N. \quad (35)$$

$$y_{qi}^{f_1 k_1 f_2 k_2} \in \{0, 1\}, \quad \forall q \in Q, i \in E, \\ (f_1, k_1) \in FK, (f_2, k_2) \in FK, \\ (f_1, k_1) \neq (f_2, k_2). \quad (36)$$

$$\delta_b^{qn} \in \{0, 1\}, \quad \forall b \in B, q \in Q, n \in N. \quad (37)$$

$$v_i^q \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, q \in Q. \quad (38)$$

$$t_q^{\text{start}}, t_q^{\text{dest}} \geq 0, \quad \forall q \in Q. \quad (39)$$

$$0 \leq z_q^n, z_q^d \leq \Delta t_q, \quad \forall q \in Q. \quad (40)$$

其中: 式 (1) 为目标函数, 表示最小化 4PL 的采购成本、运输成本、服务方式转换成本、仓储成本、时间惩罚成本与碳税成本的和; 式 (2) 表示订单只能在单一时段在单一供应商处采购; 式 (3) 为供应商能力约束; 式 (4) 表示订单开始运输时间与采购时段间的逻辑关联; 式 (5) ~ (12) 为节点的流量平衡和节点访问逻辑约束; 式 (13) ~ (15) 为订单到达节点时刻、离开节点时刻与弧段选择、节点访问间的逻辑关系; 式 (16) 限制服务方式中转仅可在中转节点进行; 式 (17) 限制订单在中转节点最多只能进行一次服务方式中转; 式 (18) 禁止仅进行服务商更换而不变更运输方式; 式 (19) 为服务方式中转与服务弧段选择间的逻辑关系; 式 (20) 限制订单在运输过程中最多只能进行一次仓储操作; 式 (21) 和 (22) 为仓储变量的逻辑约束; 式 (23) 为服务弧段的运输能力约束; 式 (24) 限制每个时段内仓储总量不超过相应仓库容量; 式 (25) 约束仓储变量与节点选择变量间的逻辑关系; 式 (26) 和 (27) 为订单仓储时段与服务弧段选择间的逻辑关系; 式 (28) 为时段与路径选择变量的逻辑约束; 式 (29) 为节点到达时刻、离开时刻与在该节点中转作业时间和仓储时间的逻辑关系; 式 (30) 和 (31) 为订单的时间窗约束; 式 (32) 和 (33) 为运到时间变量的逻辑关系; 式 (34) ~ (40) 用于定义各变量

的取值范围.

2 GKQMEA 算法设计

4PL-JOMMPOS 对多环节进行联合优化, 属于 NP-难问题. 在大规模运输服务网络中, 难以在多项式时间内求得最优解. 相关研究多将其抽象为多重图进行建模和优化^[12]. 本文引入图采样聚合算法 (GraphSAGE), 结合 K 最短路径算法、量子计算和微进化算法 (MEA), 构建基于图采样聚合算法和 K 最短路径算法的量子微进化算法 (GKQMEA) 以求解该问题. 首先, 通过对网络进行采样聚合, 生成节点优先级; 然后, 结合 K 最短路径算法生成服务路径集合; 接着, 在此基础上, 借助量子比特叠加态跳出局部最优; 最后, 融合 MEA 的优势基因结构保留机制, 实现高效求解.

2.1 网络特征融合与服务路径集获取

2.1.1 GraphSAGE 嵌入学习

图神经网络 (GNN) 可建模图结构数据, 已被应用于交通运输网络的特征聚合^[17-18]. GraphSAGE 作为 GNN 的经典算法之一, 采用邻域采样高效提取并融合网络特征. 本文采用 GraphSAGE 实现网络时空特征的有效融合.

step 1: 引入如下 3 类异构特征:

- 1) 节点特征, 包括节点类型、客户需求量、供应商供给能力以及仓储能力等;
- 2) 弧段特征, 包括弧段里程、运力以及服务方式支持情况等;
- 3) 起讫点 (OD) 对交互特征, 包括历史出行需求、运输需求量、历史流量等.

step 2: 每类特征经两层全连接网络统一维度并非线性映射为特征向量, 特征融合模块合并 3 组向量, 得到节点初始表示 $h_i^{(0)}$. 该向量流入 SAGE 卷积层. 卷积层每层对节点随机采样固定规模 k 阶邻域: 第 1 层用平均池化聚合邻域向量, 与中心节点向量拼接后经线性变换和 ReLU 激活得到中间表示 $h_i^{(1)}$, 加 dropout 防过拟合; 第 2 层复用同维度设置, 再采样聚合邻域信息得到 $h_i^{(2)}$. 将初始向量 $h_i^{(0)}$ 与二级卷积输出向量 $h_i^{(2)}$ 再融合, 得到最终节点嵌入向量.

step 3: 计算节点相似度矩阵后, 对节点排序生成优先级, 如下所示:

$$CS(i, j) = \frac{v_i \cdot v_j}{\|v_i\| \|v_j\|}. \quad (41)$$

其中: $CS(i, j)$ 为向量 v_i 与向量 v_j 的余弦相似度, 用于衡量二者夹角, 值越小, 节点间相似度越高; $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数.

2.1.2 基于 GraphSAGE 的改进 K 最短路径算法

结合 GraphSAGE 得到的节点优先级, 提出一种改进的 K 最短路径算法 (GIKSP), 生成考虑节点优先级的初始运输服务路径集合。

step 1: 将运输服务网络建模为有向多重图。其中: 节点表示运输网络中的运输点, 边表示多服务商多式联运弧段。

step 2: 提取运输服务网络中的节点特征、弧段特征和 OD 特征, 进行 GraphSAGE 嵌入学习。

step 3: 基于 K 最短路径算法^[19], 在考虑网络基础属性寻路过程中, 优先考虑邻居节点 $N(v)$ 中高优先级节点, 得到从源节点到目标节点的多条物理路径, 结合网络弧段特征, 形成 k 条候选服务路径。

2.2 基于量子微进化算法的联合决策优化

微进化算法基于遗传算法 (GA) 改进而来, 其重点在于保留种群迭代中的优势基因结构^[20-21]。本文基于量子计算改进 MEA, 提出量子微进化算法 (QMEA)。QMEA 中将微进化算法的进制编码改为量子比特编码, 使得在微进化算法中完全确定的染色体上的编码点位成为量子态的线性组合, 利用量子叠加特性, 可在大规模的解空间中实现高效搜索。使用如下所示的适应度函数评估每个量子个体:

$$\text{fitness} = M/Z. \quad (42)$$

2.2.1 量子染色体编解码

量子比特^[22]是构成量子染色体的基本单元, 其表示为 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 。其中: $|\alpha|^2$ 和 $|\beta|^2$ 分别为量子比特坍缩至 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。设量子染色体 (QC) 中包含 n 项决策内容, 即 $\text{QC} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 。首先, 为每项内容分配量子比特实现染色体编码; 然后, 观测量子染色体, 使得量子比特坍缩至 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$; 最后, 按照解码规则对量子染色体解码。

1) 编码。

4PL-JOMMPOS 同时决策 4PL 的采购、仓储、运输以及 3PL 选择等环节。各环节对应 QC 中的不同基因片段, 各基因片段分配的量子比特数不同。供应商选择片段上每个供应商的量子比特数为 1; 采购和开始运输时刻片段进行归一化, 量子比特数为 tt , 误差约为 $1/2^u$; 多服务商多式联运路径片段的量子比特数为 rc ; 仓库选择片段的量子比特数为 wh ; 仓储时期片段的量子比特数为 wt 。 tt 、 rc 、 wh 以及 wt 计算如下所示:

$$tt = \lceil \log_2(|N|\rho) \rceil, \quad (43)$$

$$rc = \lceil \log_2(\text{RC}) \rceil, \quad (44)$$

$$wh = \lceil \log_2(|B| + 1) \rceil, \quad (45)$$

$$wt = \lceil \log_2(|N| + 1) \rceil. \quad (46)$$

其中: $|N|$ 为时段集合的长度, RC 为初始多服务商多式联运路径数, $|B|$ 为仓库点数量, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

2) 观测。

对量子比特施加观测算子 OB , 其定义为 $\text{OB}|0\rangle = 0|0\rangle$, $\text{OB}|1\rangle = 1|1\rangle$ 。量子比特将以 $|\alpha|^2$ 或 $|\beta|^2$ 的概率坍缩为 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 。观测操作使得量子染色体能够根据概率分布形成多种可能的决策方案。

3) 解码。

量子染色体观测后需要经解码规则对应实际含义。供应商片段表示每个供应商是否被运输订单 q 选择; 采购和开始运输时刻片段用归一化表示占决策周期 $|N|\rho$ 的比例; 多服务商多式联运路径、仓库选择以及仓储片段, 解码后 10 进制值分别对应路径编号、仓库编号、仓储时段数。

2.2.2 优势基因结构提取

每次迭代时记录最优染色体基因片段。引入优势基因结构记录矩阵 (DRM) 记录各订单在供应商选择、仓库选择以及仓储时期片段上的优势基因结构。DRM 的元素为对应分配累积次数。首先, 选取量子种群中最适应的前 $\mu\%$ 个体, 对其基因进行频繁结构挖掘^[23], 如图 2(a) 所示。记录优势基因前, 会执行 DRM 的重置, 将元素的初始值设置为 0。根据频繁结构挖掘结果, 在 DRM 中更新供应商、仓库以及仓储时期分配到相应订单的累积次数。考虑可能记录到伪优势的情况, DRM 每隔几代将重置, 同时保留值较低的元素, 避免误删潜在的真实优势基因。

2.2.3 量子门操作

量子门是量子计算中操作量子比特的基本单元。GA 和 MEA 中, 交叉和变异是重要的遗传机制。本文用量子门旋转来实现量子染色体的交叉和变异。量子门旋转的数学形式为

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (47)$$

其中: $R(\theta)$ 为量子旋转矩阵, θ 为旋转角度。

1) 交叉。

通过量子门旋转, 可根据父代个体基因间的差异, 使用 θ 引导交叉操作, 如图 2(b) 所示。对于每对基因块, 首先计算父代基因的差异。假设在某一基因块上的父代基因为 $\text{gene}_1 = (\alpha_1, \beta_1)^T$ 和 $\text{gene}_2 = (\alpha_2, \beta_2)^T$, 按照下文式 (48) 计算父代差异值 diff_1 。然后,

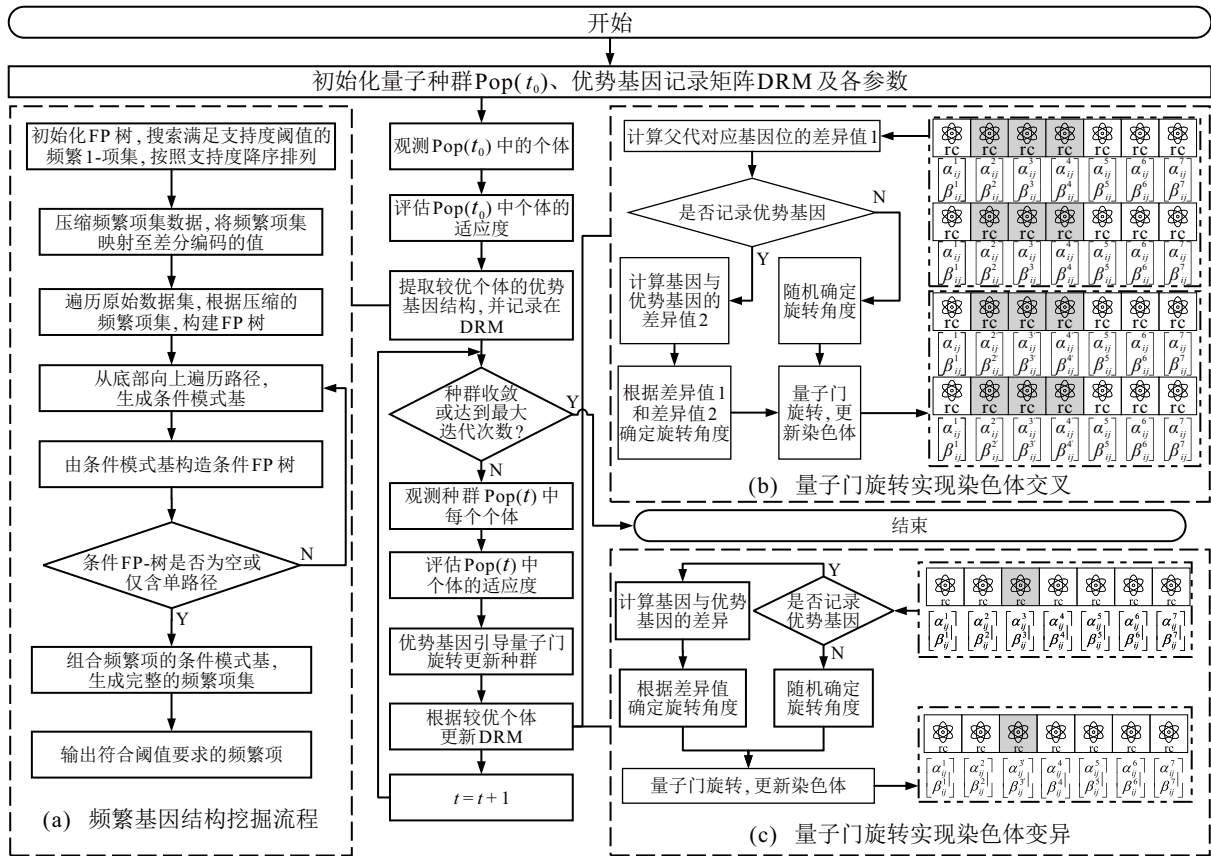


图2 量子微进化算法流程

判断 DRM 中是否记录优势基因结构. 若记录, 则按照下文式 (49) 计算与优势基因的差异值 diff_2 ; 否则, diff_2 为无穷大. 根据计算得到的差异值, θ 会与差异值成正比, 计算公式如下所示:

$$\text{diff}_1 = \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\beta_1 - \beta_2)^2}, \quad (48)$$

$$\text{diff}_2 = \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_{\text{elite}})^2 + (\beta_1 - \beta_{\text{elite}})^2}, \quad (49)$$

$$\theta = \text{dir}_1 \times \frac{\pi}{8} \times \min(\text{diff}_1, \text{diff}_2). \quad (50)$$

其中: $\text{elite_gene} = (\alpha_{\text{elite}}, \beta_{\text{elite}})^T$ 为优势基因; dir_1 为旋转的方向, 通过比较 gene_1 与 gene_2 的大小确定.

新的基因 $\text{gene}_{\text{new}} = (\alpha_{\text{new}}, \beta_{\text{new}})^T$ 为父代基因 $\text{gene} = (\alpha, \beta)^T$ 应用该旋转矩阵 $R(\theta)$ 的旋转结果, 计算公式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\text{new}} \\ \beta_{\text{new}} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}. \quad (51)$$

2) 变异.

如图 2(c) 所示, 变异操作中, 基因会根据优势基因进行调整. 假定 $\text{gene} = (\alpha, \beta)^T$ 为当前基因, 优势基因为 $\text{elite_gene} = (\alpha_{\text{elite}}, \beta_{\text{elite}})^T$, 则 θ 计算如下所示:

$$\theta = \text{dir}_2 \times \frac{\pi}{8} \times |\alpha - \alpha_{\text{elite}}|, \quad (52)$$

其中 dir_2 为旋转的方向, 通过比较 α 与 α_{elite} 的大小决定. 旋转后的基因按照式 (51) 进行更新.

交叉和变异后的基因需要进行归一化处理, 以确保其满足单位圆约束, 计算方法如下所示:

$$\alpha'_{\text{new}} = \frac{\alpha_{\text{new}}}{\sqrt{\alpha_{\text{new}}^2 + \beta_{\text{new}}^2}}, \quad (53)$$

$$\beta'_{\text{new}} = \frac{\beta_{\text{new}}}{\sqrt{\alpha_{\text{new}}^2 + \beta_{\text{new}}^2}}. \quad (54)$$

量子微进化算法的整体流程如图 2 所示.

3 算例分析

本节对 4PL-JOMMPOS 和 GKQMEA 进行数值实验. 实验所用计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-13400 2.50 GHz, 48 GB 内存, NVIDIA RTX 5060 8 GB 显存, Gurobi 求解器版本为 12.0.0. 算法均采用 Python 实现.

3.1 算例描述

实验网络来源于 Chicago-regional 数据集^[24]. 该网络被 AequilibraE 等平台视为与真实规模相当的重要基准实例, 广泛应用于测试算法的收敛性和性能^[25].

为充分验证所提出模型的有效性和所提出算法的性能, 从小规模网络和大规模网络两个角度进行数值实验. 小规模网络的节点数为 34, 假设包含 3 个供应商、2 个可用仓库, 运输订单随机生成, 每一订单使用 GIKSP 计算 2^7 条备选服务路径; 大规模网络

的节点数为 12982, 假设包含 5 个供应商、4 个可用仓库, 运输订单随机生成, 每一订单使用 GIKSP 计算 2^{10} 条备选服务路径。

参考文献 [15] 和文献 [26] 确定各运输方式的运输速度、单位碳排放因子以及运输价格; 由于不同 3PL 服务商在服务时效、价格上存在差异, 设定运输时效系数和运价系数, 如表 1 所示。

3.2 模型有效性验证

通过设置联合优化策略、不含仓储的联合优化策略和未联合优化策略, 比较 3 种策略下的总运营成本。三者目标函数一致。联合优化策略即所提出

表1 3PL 服务商运输时效系数和运价系数

3PL服务商	运输时效系数	运价系数
1	0.8	1.25
2	1.1	1.1
3	1.2	0.75

4PL-JOMMPOS; 不含仓储联合优化策略是在 4PL-JOMMPOS 的基础上增加订单在任一时段禁止仓储的约束; 未联合优化策略则采用两阶段优化, 先决策采购, 再决策运输和仓储。在小规模网络中, 算例订单规模分别为 5、10、20 和 30, 均采用 Gurobi 求解器求解。3 种策略下的总成本如图 3 所示。

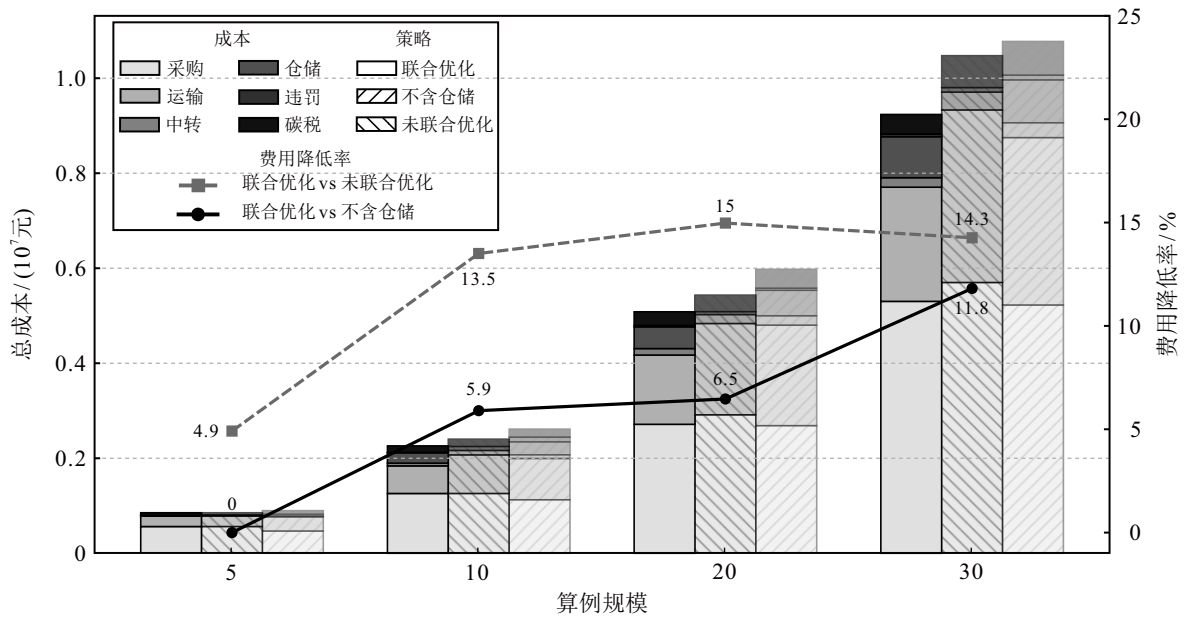


图3 3种不同优化策略下的总成本

在不同算例规模下, 联合优化策略的总运营成本均低于不含仓储策略与未联合优化策略。随着规模增大, 联合优化策略相较于两种策略的成本降低率整体呈上升趋势。其中: 与不含仓储策略相比, 运营成本最高降低了 11.8%; 与未联合优化策略相比, 最高降低了 15%。结果表明联合优化策略能够有效降低 4PL 企业的总运营成本, 验证了其有效性。

对比不同算例规模下联合优化策略与不含仓储联合优化策略的运营成本发现, 除规模为 5 时二者成本相同, 其他规模下联合优化策略成本均更低。表明在小规模订单算例中无需仓储即可降低总运营成本; 而在大规模订单场景中, 仓储能够有效降低总运营成本。

3.3 算法性能验证

3.3.1 小规模网络

将所提出算法与 Gurobi 求解器进行对比, 在 7 组小规模网络中不同算例规模下重复运行 20 次,

实验结果如表 2 所示。相对差值 (Gap) = (满意解 - Gurobi 满意解) / Gurobi 满意解。

表2 本文算法与 Gurobi 求解器的实验结果比较

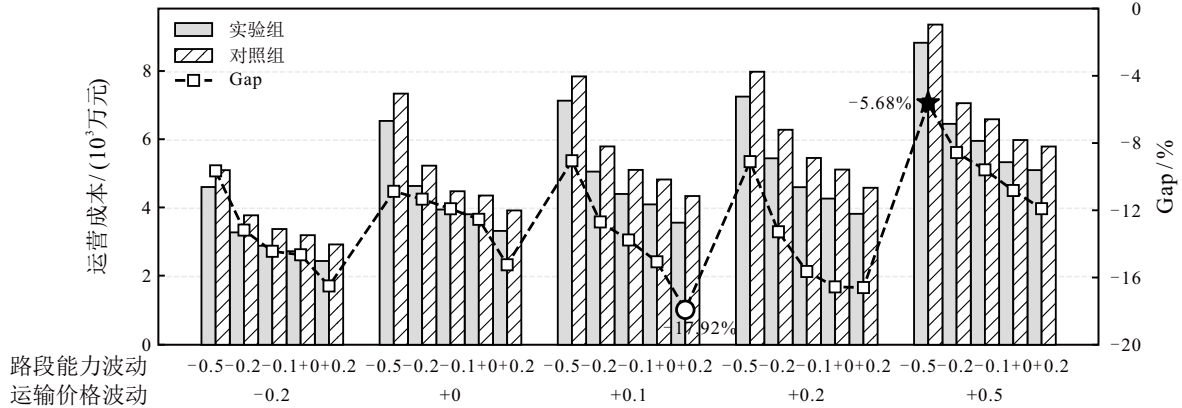
算例名称	订单数	Gurobi		GKQMEA		Gap/%
		满意解/万元	t/s	满意解/万元	t/s	
case_n5	5	85.33	348.46	85.33	9.21	0.00
case_n10	10	226.07	891.65	226.07	22.72	0.00
case_n15	15	338.95	1355.96	349.85	30.20	3.22
case_n20	20	508.36	1946.76	528.48	35.36	3.96
case_n30	30	923.74	2765.12	966.19	45.02	4.60
case_n50	50	1908.56	3600.00	2002.66	59.88	4.93
case_n70	70	2954.99	3600.00	3139.47	72.89	6.24
平均值		992.29	2072.56	1042.58	39.33	4.59*

注: *为去除0值后的平均值

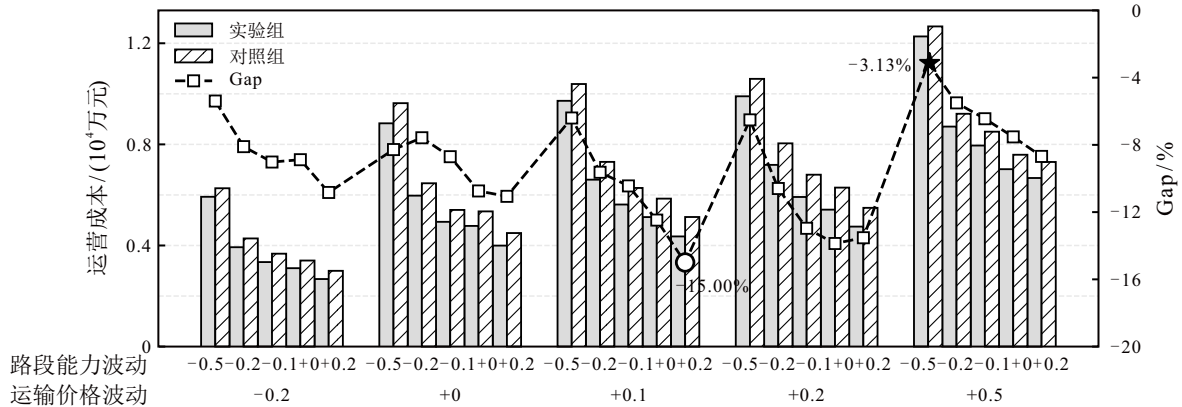
表 2 显示, GKQMEA 相较于 Gurobi 求解器具有更高的求解效率, 表明算法能够在明显短的时间内获得较小 Gap 的满意解。其中: 2 组算例的满意解与 Gurobi 的求解结果相同; 5 组算例的满意解的平

表3 本文算法与 MEA、QGA、GA 以及 PSO 的实验结果比较

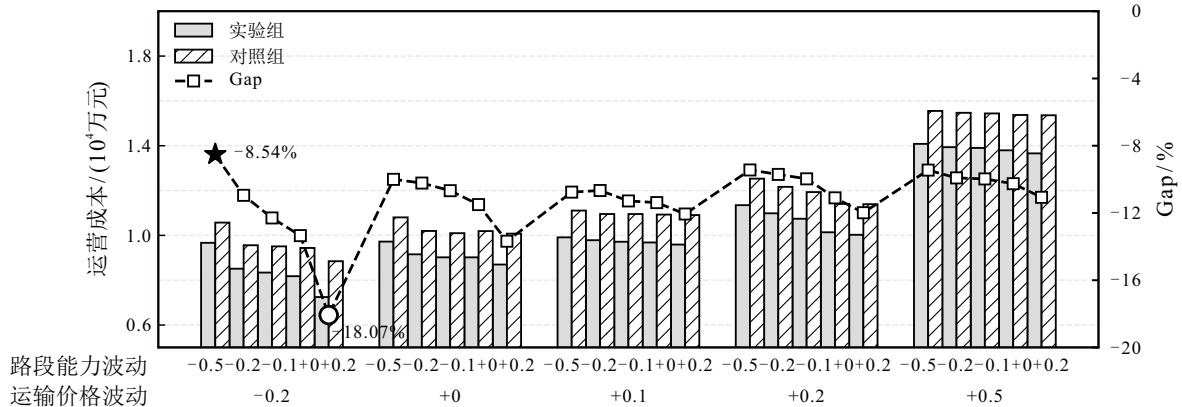
算例名称	订单数	QMEA		MEA		QGA		GA		PSO	
		满意解/万元	t/s	满意解/万元	t/s	满意解/万元	t/s	满意解/万元	t/s	满意解/万元	t/s
case_n10	10	920.66	22.88	920.66	27.82	981.14	34.73	981.24	39.77	981.24	40.68
case_n30	30	3827.52	44.66	3827.52	51.34	4031.97	58.67	4196.14	61.53	4279.42	59.74
case_n50	50	4246.22	62.14	4648.97	70.27	5074.21	74.99	5248.78	79.71	5568.37	71.55
case_n70	70	7480.12	83.59	8526.44	94.42	9304.20	103.85	9429.06	105.77	9616.18	106.24
case_n90	90	10192.07	100.88	11914.38	112.79	12697.10	129.77	12549.30	127.95	12883.07	114.99
case_n110	110	12678.10	119.98	12733.71	132.57	13364.58	149.57	13497.60	129.75	13621.04	127.66
case_n130	130	13419.00	148.72	15134.56	172.14	15388.80	169.77	15388.80	148.12	15847.16	138.92



(a) case_n30



(b) case_n60



(c) case_n90

图4 路段能力和运输价格联合波动对于运营成本的影响

均 Gap 为 4.59%; 7 组算例的求解时间均显著低于 Gurobi.

3.3.2 大规模网络

GKQMEA 先基于 GIKSP 获取服务路径备选集,

再通过 QMEA 求解. 其中: QMEA 由 MEA 改进而来, 引入了量子比特编码和优势基因频繁结构挖掘; MEA 则基于 GA 改进, 引入了优势基因结构. 此外, 既有量子遗传算法 (QGA) 是 GA 引入量子比特编码后的改进算法; 粒子群算法 (PSO) 是解决 4PL 优化问题的常用算法之一^[9]. 因此, 将 QMEA 与 MEA、QGA、GA 以及 PSO 对比. 各组均采用 GIKSP 构建服务路径备选集, 在 7 组大规模网络的不同算例规模下重复运行 20 次, 对比求解质量和效率, 结果如表 3 所示.

表 3 显示, QMEA 的整体求解质量和效率优于 MEA、QGA、GA 与 PSO. 其中: 2 组算例中 QMEA 的满意解与 MEA 一致, 优于其余 3 种算法; 5 组算例中 QMEA 满意解优于 4 种算法; 6 组算例中 QMEA 的运行时间优于 4 种算法. 大规模网络下的算例实验结果验证了所提出算法相比于 MEA、QGA、GA 与 PSO 具有显著优势.

3.4 参数波动影响分析

本节通过大规模网络下不同订单规模算例, 探讨参数波动对于运营成本的影响. 实验组采用联合优化策略, 对照组为未联合优化策略. 运输价格波动范围为 $-0.2 \sim +0.5$ (降 20% ~ 升 50%); 路段能力波动范围为 $-0.5 \sim +0.2$ (降 50% ~ 升 20%). 如运输价格波动 +0.5 指决策周期各时段价格均上浮但是不超 50%. 两组实验均用相同参数的 GKQMEA 求解, 结果如图 4 所示. 相对差值 (Gap) = (实验组满意解 - 对照组满意解) / 对照组满意解. 结果显示, 运输价格和路段能力联合波动对于运营成本影响显著, 波动幅度越大, 总成本越高, 但是 Gap 值始终小于 0, 表明联合优化策略能够有效控制运营成本, 减少波动负面效应 (最高达 18.07%), 即便在 50% 波动时, 仍然能够降低至少 3.13% 的运营成本.

4 结论

本文基于第四方物流企业作为供应链集成商的视角, 从联合决策优化的角度出发, 以总运营成本最小为目标, 构建了 4PL 采购、仓储、多式联运和 3PL 服务商选择的联合优化模型, 设计了基于图采样聚合算法和 K 最短路径算法的量子微进化算法. 最后, 基于 Chicago-regional 数据集, 构建了多服务商多式联运网络, 开展了多规模算例下的实验分析和参数波动性分析.

1) 相比于不含仓储的联合优化策略与未联合优化策略, 4PL-JOMMPOS 在测试算例中最高降低了 11.8% 和 15% 的总运营成本, 能够充分结合多时段

的特点, 选择恰当的采购时间、仓储点、多式联运路径和 3PL 服务商.

2) GKQMEA 能够在较短的时间内实现对 4PL-JOMMPOS 的求解, 在小规模路网下能够以高效的求解效率求得满意解, 在大规模路网下的求解质量和求解效率优于既有算法.

3) 当运输价格和路段能力出现不同程度的波动时, 4PL-JOMMPOS 均能够有效降低因运价和能力波动带来的运营成本上升, 相比于未联合优化策略, 最高能够降低 18.07% 的运营成本.

未来, 可在本研究的基础上考虑运输订单的可拆分以及多时段的不确定性因素, 对 4PL 联合优化策略进行进一步探讨. 此外, 可针对 GKQMEA 嵌入自适应调整算子, 进一步提高算法的求解效率.

参考文献 (References)

- [1] Ta H, Esper T L, Hofer A R, et al. Reconceptualizing E-logistics service quality (E-LSQ) in emerging contexts: The case of crowdsourced delivery[J]. *Journal of Business Logistics*, 2025, 46(1): e12401.
- [2] 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. (He W, He S W, Chi J S, et al. Collaborative optimization of door-to-door transport routes and drayage truck scheduling in container intermodal transport[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(7): 2175-2184.)
- [3] Yin M Q, Huang M, Wang D Z, et al. Multi-period fourth-party logistics network design with the temporary outsourcing service under demand uncertainty[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 164: 106564.
- [4] Feng L, Li X D, Zhang X X, et al. Modelling the roles of fourth-party logistics (4PL) on the improvements of supply chain stability of port logistics services: The case of Ningbo-Zhoushan Port in China[J]. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023, 10: 2239137.
- [5] Guchhait R, Sarkar B. Economic evaluation of an outsourced fourth-party logistics (4PL) under a flexible production system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2025, 279: 109440.
- [6] Liu Y M, Zhou P, Li L Y, et al. An interactive decision-making method for third-party logistics provider selection under hybrid multi-criteria[J]. *Symmetry*, 2020, 12(5): 729.
- [7] Nila B, Roy J. A new hybrid MCDM framework for third-party logistics provider selection under sustainability perspectives[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 234: 121009.
- [8] Huang M, Dong L W, Kuang H B, et al. Supply chain network design considering customer psychological behavior—a 4PL perspective[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 159: 107484.
- [9] 董丽薇, 黄敏, 匡韩斌, 等. 一种集成最后一公里的四

- 方物流网络设计问题启发式算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1601-1608.
(Dong L W, Huang M, Kuang H B, et al. A heuristic algorithm for fourth logistics network design problem with last-mile delivery[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(6): 1601-1608.)
- [10] Yin M Q, Huang M, Qian X H, et al. Fourth-party logistics network design with service time constraint under stochastic demand[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, 34(3): 1203-1227.
- [11] Zhang Y X, Huang M, Fu Y P, et al. Mathematical modeling and optimization of multi-period fourth-party logistics network design problems with customer satisfaction-sensitive demand[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 278: 127219.
- [12] 黄敏, 崔妍, 林婉婷, 等. 带有费用折扣的多任务第4方物流路径优化问题[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 997-1001.
(Huang M, Cui Y, Lin W T, et al. Multi-task fourth party logistics routing problem with cost discount[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 997-1001.)
- [13] Hong W, Xu Z L, Liu W, et al. Queuing theory-based optimization research on the multi-objective transportation problem of fourth party logistics[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(8): 1327-1337.
- [14] Gao X Y, Gao X, Liu Y. A symmetric fourth party logistics routing problem with multiple distributors in uncertain random environments[J]. *Symmetry*, 2024, 16(6): 701.
- [15] 郭放, 牛润柳, 黄志红. 不确定环境下多时段采购与多式联运联合决策鲁棒优化研究[J]. 中国管理科学, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1059.
(Guo F, Niu R L, Huang Z H. Robust optimization of procurement and routing strategy of multi-period multimodal transport in uncertain environment[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1059.)
- [16] Cao W, Wang X F. A multiobjective multiperiod mixed-integer programming optimization model for integrated scheduling of supply chain under demand uncertainty[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 63958-63970.
- [17] Deng Z P, Huang D R, Liu J Y, et al. An assessment method for traffic state vulnerability based on a cloud model for urban road network traffic systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(11): 7155-7168.
- [18] 陈柘, 刘嘉华, 赵斌, 等. 基于 GCN 和 TCN 的多因素城市路网出租车需求预测[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1031-1038.
(Chen Z, Liu J H, Zhao B, et al. Multi-factor taxi demand forecasting for urban road network based on GCN and TCN[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(4): 1031-1038.)
- [19] Yen J Y. Finding the K shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712-716.
- [20] 宋瑞, 边疆, 何世伟, 等. 考虑超重超远客户的卡车无人机协同配送研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 395-406.
(Song R, Bian J, He S W, et al. Truck-drone joint delivery with consideration given to customers with great demands and at great distances[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(3): 395-406.)
- [21] Bian J, Song R, He S W, et al. Truck-drone hybrid delivery routing: A mathematical model and micro-evolutionary algorithm[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(9): 12187-12202.
- [22] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation and quantum information[M]. The 10th anniversary edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [23] 蔡近近, 宋瑞, 何世伟, 等. 基于改进 FP-Growth 算法和贝叶斯的营业线施工安全风险[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(8): 3370-3381.
(Cai J J, Song R, He S W, et al. Construction safety risk analysis of business lines based on improved FP-Growth algorithm and Bayesian[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(8): 3370-3381.)
- [24] Stabler B, Bar-Gera H. Transportation Networks for Research Core Team. Chicago regional network[EB/OL]. (2020-07-29)[2025-06-24]. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks/tree/master/chicago-regional>.
- [25] AequilibraE Development Team. AequilibraE documentation v1.4.3[EB/OL]. (2025-06-18)[2025-06-24]. <https://www.aequilibrae.com/develop/python/downloads/6af71d6aa09186862f040ad5c50d2ca1/aequilibrae.pdf>.
- [26] 吴雪妍, 毛保华, 周琪, 等. 交通运输业不同方式碳排放因子水平比较研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 41-47.
(Wu X Y, Mao B H, Zhou Q, et al. Comparative of carbon emission factor levels in different modes of transportation industry[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(4): 41-47.)

作者简介

蔡近近 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为运输与物流理论与技术, E-mail: jjincai1210@163.com;

宋瑞 (1971-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为运输与物流理论与技术、城市公共交通, E-mail: rsong@bjtu.edu.cn;

何世伟 (1968-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为铁路运输组织理论与技术、运输与物流理论与技术, E-mail: shwhe@bjtu.edu.cn;

何维 (1999-), 女, 博士生, 主要研究方向为运输与物流理论与技术, E-mail: 21114048@bjtu.edu.cn;

丛铭 (1997-), 男, 博士生, 主要研究方向为铁路运输组织理论与技术, E-mail: 22115053@bjtu.edu.cn;

颜凯 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为智能交通与物流, E-mail: 24115075@bjtu.edu.cn.