

目的地拼箱与路线规划协同优化：多式联运约束下的多目标优化模型

王 蓉

上海泓实国际货运代理有限公司，上海

收稿日期：2025年10月25日；录用日期：2025年11月16日；发布日期：2025年11月28日

摘 要

面向中美跨境链路的“最后一公里”，本文围绕目的地拼箱(DBC) - 路线规划(VRPTW)协同优化这一研究缺口，提出在多式联运约束下的双目标混合整数线性规划(MILP)。模型将起运端的目的地拼箱决策与落地端的车辆路径 - 时间窗决策联动，并将铁路直达/小港泊船可用性、班期与堆场时窗等基础设施约束内生化的；以总时长与总成本为双目标，兼顾服务水平。求解上，采用 ϵ -约束标量化 + 分枝割(branch-and-cut)为主过程，辅以聚类 - 拼箱启发式暖启动与Benders样式分解加速。基于企业多源运营数据与可复现实例，开展拥堵(κ)/政策查验时延(δ)/运能松紧(φ)情景分析与稳健性检验。结果显示，所提一体化策略在中高拥堵与订单碎片化情景下相对分段基线具有稳定优势，且对铁路直达与小港泊船的可用性更为敏感。本文贡献在于：① 提出能捕捉拼箱 - 路径协同效应的可计算模型；② 给出工程可用的求解流程与性能报告框架；③ 提供面向不同情景的策略启示与适用边界，为跨境末端网络的时效 - 成本统筹提供方法论支撑。

关键词

最后一公里物流，目的地拼箱，车辆路径 - 时间窗(VRPTW)，多式联运，双目标MILP，协同优化

Collaborative Optimization of Destination-Based Consolidation and Route Planning: A Multi-Objective Optimization Model under the Constraint of Multimodal Transport

Rong Wang

Aershipping Logistics Co., Ltd., Shanghai

文章引用：王蓉. 目的地拼箱与路线规划协同优化：多式联运约束下的多目标优化模型[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(6): 1112-1117. DOI: 10.12677/mse.2025.146131

Abstract

Targeting the “last-mile” segment in China-US cross-border logistics, this study addresses the research gap on the collaborative optimization of destination-based consolidation (DBC) and vehicle routing with time windows (VRPTW). We formulate a bi-objective mixed-integer linear program (MILP) under multimodal constraints. The model links the destination-based consolidation decision at the origin end with the vehicle route-time window decision at the destination end, and internalizes infrastructure constraints such as rail direct/small port berthing availability, schedule and yard time window; it takes total time and total cost as dual objectives, while taking service level into account. To solve it, we adopt an ε -constraint scalarization coupled with a branch-and-cut framework, enhanced by a clustering-consolidation heuristic warm start and a Benders-style decomposition for acceleration. Using enterprise multi-source operational data and reproducible test instances, we conduct scenario analyses with port congestion (κ), inspection delay (δ), and capacity tightness (φ), together with robustness checks. The integrated approach consistently outperforms sequential baselines in medium-to-high congestion and fragmented-demand settings, and its gains are sensitive to the availability of rail-direct access and small-port transshipment. The contributions are threefold: 1) a computable model that captures the DBC-routing synergy; 2) providing a solution process and performance reporting framework that can be used in engineering; and 3) providing strategic insights and applicable boundaries for different scenarios, and providing methodological support for the timeliness-cost coordination of cross-border last-mile networks.

Keywords

Last-Mile Logistics, Destination-Based Consolidation, VRPTW, Multimodal Transport, Bi-Objective MILP, Collaborative Optimization

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

1.1. 研究背景与问题界定

中美跨境链路的“最后一公里”效率受两类决定因素共同作用：其一，起运端的目的地拼箱 (Destination-Based Consolidation, DBC) 决定落地后的投放粒度与装载率；其二，落地端的路线规划 (VRPTW) 决定在时窗与容量约束下的路径可行性与成本。现实环境中，港口拥堵、查验时延与运能波动等多式联运约束使两者的最优选择相互依赖。但既有研究多将拼箱与路径规划顺序化处理，缺乏在约束与不确定性下对协同效应的系统量化与机制识别。

据此，本文聚焦以下问题：

RQ1：在多式联运约束下，DBC 与 VRPTW 的协同能否显著改善时效与成本，并通过装载率、停靠密度、空驶率、路径重合度等变量传导？

RQ2：协同效应在拥堵、查验时延、运能松紧等情景下是否稳健，其适用边界为何？

RQ3: 如何以双目标优化模型 + 可计算算法刻画并求解该协同决策, 给出可执行策略?

1.2. 研究思路与主要贡献

思路: 以“五段式联运”情境为约束载体, 构建双目标 MILP (最小化总时长与总成本), 将起运端 DBC 决策与落地端 VRPTW 联动建模, 并以可比算例与企业数据进行计算验证与情景检验。

主要贡献:

- 1) 协同机理 - 模型 - 体化: 把 DBC 对装载率/停靠密度与 VRPTW 对空驶/重合度的作用嵌入同一优化框架, 避免顺序化失真, 明确协同项对绩效的边际影响。
- 2) 多式联运内生约束: 用班期、泊位、堆场、司机工时与节点时窗等可操作参数刻画基础设施与制度约束, 反映跨境场景的可行域。
- 3) 可计算与可验证: 给出可复现实施的求解算法与算例性能(求解时间、最优性/近优性), 并以情景族(拥堵/查验/运能)报告区间化效果与鲁棒性。
- 4) 策略边界清晰: 形成“前置拼箱粒度 - 港后节点切换 - 动态重规划阈值”的最小可执行策略包, 明确在不同情景下的适用与限度。

2. 文献综述与研究空白

2.1. 主题化整合评述: 多式联运约束下的“拼箱 - 路线”一体化问题

既有研究在三个维度上提供了关键但彼此割裂的证据: 其一, 跨境链路效率取决于干线 - 港口 - 末端的联动。海铁联运与内河/沿海驳船能缓解拥堵与班期不确定, 但多停留在干线/港口结构优化, 对“干线扰动如何经由节点与时窗传导至末端路径”的机制刻画不足。其二, 目的地拼箱(DBC)在起运端通过聚合合同域订单提升装载率、降低分拨复杂度, 进而影响单位成本与准时性, 但主流做法将 DBC 视为独立上游决策, 鲜少将拼箱粒度作为可调参数联动到末端结构特征(停靠密度、路径重合度、空驶率)[1]。其三, VRP/VRPTW 与其情景/鲁棒扩展在容量与时间窗约束下显著提升配送效率, 近年启发式与元启发式提升了大规模可解性, 但路线规划多与上游合单/拼箱脱耦求解, 难以解释拥堵、查验时延与运能波动下的真实表现[1][2]。综合来看, 跨境情境要求把联运可用性(铁路直达、小港泊船)内生为末端可行域与参数, 并将 DBC-VRPTW 联立建模, 以识别两者的协同效应与情景敏感性[1]。

2.2. 研究空白与本文定位

面向跨境电商“最后一公里”, 现阶段主要存在三点实质性缺口:

- (A) 协同缺口: 缺少把 DBC 粒度与 VRPTW 路径决策联立的一体化模型与因果识别框架, 难以量化二者对时效/成本/准时率的协同效应;
- (B) 鲁棒性缺口: 对拥堵(κ)、查验时延(δ)、运能松紧(φ)等扰动下协同策略的区间化表现与边界条件证据不足;
- (C) 联运内生约束缺口: 铁路直达、小港泊船等多式联运可用性鲜被内生为末端优化的可行域与成本/时长参数, 导致模型与实践脱节[2][3]。

据此, 本文以多式联运约束为外生框架, 构建双目标 MILP, 将目的地拼箱 - 路线规划联立并内生至同一优化系统, 以总时长与总成本为目标, 显式刻画装载率、停靠密度、空驶率与路径重合度的传导机制; 在情景参数 $\{\kappa, \delta, \varphi\}$ 下检验协同效应的有效性与稳健性, 从而对[1]-[4]在“拼箱 - 路线 - 联运”三者之间的断裂给予系统性回应。

3. 理论框架与方法论综述

3.1. 供应链协同与网络优化

本研究将“目的地拼箱-路线规划”视为一体化决策：前者在起运端聚合同域订单、提升装载率并降低停靠密度，后者在有时窗的路径约束下压缩里程与空驶。供应链协同理论提供信息共享与资源整合的逻辑，网络优化理论保证在多节点(铁路/小港/大港/分拨)下实现时效-成本权衡。核心命题是：拼箱粒度与路径重构需联动设计，方能在跨段衔接中稳定传导效率收益。

3.2. 运筹优化与不确定性处理

末端优化以 VRPTW 为基础，兼顾容量、时间窗与工时限制；多式联运条件通过节点可用性与班期/泊位等约束内生。不确定性由拥堵、查验时延、运能松紧等参数体现：采用情景分析评估策略区间效果，采用鲁棒优化思路控制最坏情形损失。要点是：在参数扰动下保持解的可行与性能下限，避免纸面最优在实务中失效[4]。

3.3. 仿真与因果识别

离散事件/基于代理的仿真用于刻画靠泊-卸船-出库-派送的动态耦合，验证策略在流量波动与节点拥堵下的表现；面板识别与 DID 用于估计协同策略相对基线的净效应；SEM 用于检验装载率、停靠密度、空驶率、路径重合度的中介作用。组合目标是：给出“模型可行-机制成立-效应稳健”三重证据。

3.4. 综合框架与实施要点

方法集成遵循“协同建模(MILP)-鲁棒/情景-仿真校核-因果验证”流程：先以双目标 MILP 耦合拼箱与路径，再以情景/鲁棒参数检验解的稳健性，随后以仿真复现动态瓶颈，最终用计量/SEM 确认效应链。实施上强调三点：

- 参数口径统一：装载率、停靠密度、空驶率、时窗满足率等须标准化；
- 可行性优先：对节点可用性、班期、司机工时等硬约束设定高优先级；
- 边界清晰：报告在不同拥堵/时延/运能情景下的适用范围与下降风险。

4. 方法论：双目标 MILP

4.1. 模型要点与符号

边界：已知订单集 I ，每单唯一目的地 $j(i) \in J$ 与需求 q_i 。预生成可行干线路径集 R (多式联运组合)。美国端为 VRPTW，车辆集 V ，容量 Q_v ，时间/距离矩阵 $\{t_{pq}\}$ ， $\{d_{pq}\}$ ，客户时间窗 $[a_p, b_p]$ 、服务时长 s_p 。

决策变量：

- 干线分配/拼箱： $x_{ir} \in \{0,1\}$ (订单 i 选择路径 r)， $y_{pr} \in \{0,1\}$ (目的地 p 在 r 开箱)， $u_{pr} \geq 0$ (装载量)。
- 末端路径： $a_{pqv} \in \{0,1\}$ (弧)， $z_v \in \{0,1\}$ (启用车)， $T_{pv} \geq 0$ (到达时刻)， $W_{pv} \geq 0$ (装载推进)。

主要参数(干线/末端)： T_r ， C_r ， F_r ， Q_r^{cont} ， K_r ； f_v ， c^{dist} ， t_{pq} ， d_{pq} ， Q_v ；大常数 M 。

4.2. 双目标表述

目标 1：总时长

$$Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} T_r \cdot x_{ir} + \sum_{v \in V} \sum_{(p,q)} t_{pq} \cdot a_{pqv}$$

目标 2：总成本

$$Z_2 = \sum_{p \in J} \sum_{r \in R} F_r \cdot y_{pr} + \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} C_r \cdot x_{ir} + \sum_{v \in V} \left(f_v \cdot z_v + \sum_{(p,q)} c^{dist} \cdot d_{pq} \cdot a_{pqv} \right)$$

标量化 A (ε -约束, 推荐): 最小化 Z_1 , 约束 $Z_2 \leq \varepsilon$ 。

标量化 B (加权和): 最小化 $\lambda_1 \cdot Z_1 + \lambda_2 \cdot Z_2$, 且 $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

4.3. 关键约束(最小闭环)

(A) 干线拼箱/路径:

- 1) 订单唯一路径选择: $\sum_{r \in R} x_{ir} = 1, \forall i \in I$ 。
- 2) 目的地 - 路径装载定义: $u_{pr} = \sum_{i: j(i)=p} q_i \cdot x_{ir}, \forall p \in J, r \in R$ 。
- 3) 开箱 - 容量联动: $u_{pr} \leq Q_r^{cont} \cdot y_{pr}, \forall p \in J, r \in R$ 。
- 4) 路径可用箱数上限: $\sum_{p \in J} y_{pr} \leq K_r, \forall r \in R$ 。

(B) 末端 VRPTW:

- 5) 客户被且仅被一次服务: $\sum_{v \in V} \sum_q a_{qp v} = 1, \sum_{v \in V} \sum_q a_{pq v} = 1, \forall p \in J$ 。
- 6) 车场流平衡/车辆启用: $\sum_q a_{0q v} = z_v = \sum_q a_{q0 v}, \forall v \in V$ 。
- 7) 容量推进(MTZ): $W_{qv} \geq W_{pv} + d_p - Q_v \cdot (1 - a_{pq v}), \forall v, (p, q), 0 \leq W_{pv} \leq Q_v$ 。
- 8) 时间窗推进(MTZ): $T_{qv} \geq T_{pv} + s_p + t_{pq} - M \cdot (1 - a_{pq v}), \forall v, (p, q), a_p \leq T_{pv} \leq b_p$ 。

(C) 干线 - 末端联动: $d_p = \sum_{i: j(i)=p} q_i$, 与上式一致。

4.4. 求解与计算性能(报告口径)

算法: Gurobi/CPLEX 分支定界 + 割平面, 按 ε -约束扫描帕累托; 先解干线子问题(得 x, y, u)热启动末端 VRPTW, 配节约启发式与 2/Or-opt 局部搜索; 做对称破除与时间窗紧化。

设置: MIPGap 1%~3%, 单实例时限 300~600 s, 线程 = 物理核; 大常数 $M \approx \max_{p,q} (b_p - a_q + s_p + t_{pq})$; ε 取历史成本 P50/P75。

报告: 不同规模下求解时间、MIPGap、帕累托点数, 以及装载率、停靠密度/百公里、空驶率、准时率等 KPI; 并与“分段基线(先拼箱后独立 VRPTW)”比较相对改进幅度[2]。

5. 实证分析

5.1. 数据与实施

样本覆盖“工厂 - 铁路堆场 - 小港驳船 - 大港海运 - 美国末端配送”的连续链路, 含服装、快消与 3C 品类, 观测期为连续 24 个月, 由企业运营、港口与清关日志汇总。变量口径与清洗流程已在方法部分统一; 核心指标为 LMDT (小时)、UCOST (\$/件或\$/kg)与 OTP (0~1), 过程变量包括 LF、SD (次/100 km)、EMR、OR, 关键解释变量为 DBC、RPQ 及其中心化交互项 $DBC \times RPQ$ [3]。

双目标 MILP 以“总时长 - 总成本”为目标, 采用 ε -约束并由 CPLEX 求解(默认 MIP gap $\leq 1\%$ 或 600 s 止); 基线为“无目的地拼箱 + 独立 VRPTW”, 协同为“目的地拼箱 + 联动 VRPTW”。

5.2. 基准结果

在控制路线与时间固定效应后, 协同策略相对基线表现为: LMDT 下降约 8%~13%, UCOST 下降约 6%~10%, OTP 提升约 2~4 个百分点。分解后, DBC、RPQ 对绩效的方向均显著(LMDT/UCOST 为负、OTP 为正), 交互项 $DBC \times RPQ$ 显著为正, 表明前置拼箱与末端路径重构存在协同增益。将 LF、SD、EMR、OR 纳入后, DBC/RPQ 直接效应收敛、过程变量方向稳定, 支持部分中介链路: $DBC \rightarrow (LF \uparrow, SD \downarrow) \rightarrow$ 绩效改善; $RPQ \rightarrow (EMR \downarrow, OR \downarrow) \rightarrow$ 绩效改善。就量级而言, SD 每降低 0.1 次/100 km, LMDT

约降 1.2%~1.6%；EMR 每下降 1 个百分点，UCOST 约降 0.4%~0.6%。

5.3. 识别与稳健性

1) 指标替代：拥堵指数分解为“靠泊等待/堆场滞留/查验时延”单口径替换；成本在“\$/件\$/kg”口径切换；协同效应方向与显著性保持一致。

2) 样本切片：疫情前后、旺淡季与企业规模分组下，结论稳健；在高碎片化订单与美西目的地，协同改善更强。

3) 安慰剂/并行趋势：未见“提前改善”，前后趋势差异不显著；按“路线 × 周”聚类稳健标准误后，结果不变。

5.4. 情景分析

引入拥堵(κ)、关检查验时延(δ)与运能松紧(φ)参数：

- κ 升高：协同边际上升，LMDT 与 UCOST 平均改善扩至 9%~15%与 7%~12%；
- δ 升高：协同对 OTP 与 LMDT 的改善更突出，成本降幅收敛；
- φ 收紧：协同对 UCOST 更敏感，高密度线路获益更大，低密度尾段需提高拼箱粒度或合并站点。

总体呈条件性成立与区间化提升：外部约束越强，协同优势越明显；在低拥堵或运能充裕时，协同仍有效但边际收益下降。

5.5. 计算性能与落地

在中等规模算例(目的地 $\approx 80\sim 120$ 、车辆 $\approx 40\sim 60$)中，中位求解时间 35~55 s，MIP gap 0.6%~0.9%；在较大规模(目的地 200+、车辆 80+)中，经温启动与候选路径池，3~6 min，MIP gap 1.2%~1.8%。与启发式基线(贪婪聚类 + 独立 VRPTW)相比，MILP 在多数算例上取得更优的时效 - 成本折中。实施上，仅需在装箱阶段完成目的地分箱映射，并于到港后进行一次滚动重规划，以生成可执行指令；当运能紧张时，先保障高密度线路与时间窗，再向边缘节点扩展[4]。

6. 结论

在多式联运约束下，本文将目的地拼箱(DBC)与末端路线规划(VRPTW)联动为双目标 MILP，结果表明：相较顺序优化，协同优化在相同网络与需求条件下对末端时长、单位成本与准时率呈稳定改善；其机理通过提高装载率、降低单位里程停靠次数、空驶率与路径重合度得以验证，且当 DBC 与路线规划质量同时较高时存在正向协同效应；在中高拥堵、查验时延上升或运能收缩情境下效果更显著，并受铁路直达与小港泊船可用性影响。管理上应前置信息与决策联动、设定动态重规划触发阈值并按情景调整拼箱粒度与节点；政策上宜推进港铁一体化与数据互操作。局限在于样本外推、在线大规模求解与未显式纳入碳目标；后续可向多目标鲁棒与动态在线优化扩展，并以准实验进一步校验适用边界。

参考文献

- [1] Toth, P. and Vigo, D. (2014) Vehicle Routing Problems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **74**, 4-16.
- [2] Adamo, T., Gendreau, M., Ghiani, G. and Guerriero, E. (2024) A Review of Recent Advances in Time-Dependent Vehicle Routing. *European Journal of Operational Research*, **319**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016>
- [3] Cordeau, J.F. and Laporte, G. (2021) The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and Future Directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **51**, 153-180.
- [4] Mladenović, N. and Hansen, P. (2018) Variable Neighborhood Search: Methods and Applications. *European Journal of Operational Research*, **237**, 573-593.