

考虑客户随机取消订单的电商快递配送优化模型

潘 旭, 袁鹏程

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年8月20日

摘 要

为解决电商快递配送中客户随机取消订单引发的需求不确定性问题, 突破传统确定性模型的局限, 本文构建了考虑需求随机波动的机会约束配送优化模型。将订单需求建模为服从泊松分布的随机变量, 通过分位数方法将随机机会约束转化为确定性形式。采用改进的NSGA-II算法求解, 设计基于订单分配的整数编码方案, 并结合部分匹配交叉、基因交换变异与2-opt局部搜索策略。基于PDPTW基准算例的数值试验表明, 所提模型与算法在总成本、车辆使用量与计算效率之间取得了较优平衡。

关键词

电商快递配送, 订单取消, 机会约束规划, 改进的NSGA-II算法

Optimization Model for E-Commerce Parcel Delivery Considering Random Customer Order Cancellations

Xu Pan, Pengcheng Yuan

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: July 1, 2026; accepted: July 16, 2026; published: August 20, 2026

Abstract

To address the demand uncertainty issue arising from customers' random order cancellations in e-commerce express delivery scenarios, and to break through the limitations of deterministic assumptions in traditional delivery optimization models, this paper constructs an opportunity-constrained

express delivery optimization model that considers random demand fluctuations. The order demand is modeled as a random variable following a Poisson distribution, and the random opportunity constraints are transformed into solvable deterministic forms through quantile methods. An improved NSGA-II algorithm is employed, incorporating an integer encoding scheme based on order allocation, partially matched crossover, gene swap mutation, and 2-opt local search strategies. Numerical experiments based on the PDPTW benchmark show that the proposed model and algorithm achieve a favorable balance among total cost, vehicle usage, and computational efficiency.

Keywords

E-Commerce Parcel Delivery, Order Cancellation, Chance-Constrained Programming, Improved NSGA-II Algorithm

Copyright © 2026 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

随着电子商务与即时零售的快速发展,末端配送面临订单碎片化、时效严苛和履约不确定性增大的多重压力。中国交通运输部《绿色交通“十四五”发展规划》(2021) [1]提出“绿色出行创建行动”。在同城零售、餐饮外卖等场景中,客户下单后取消、修改收货意愿等现象日益增多,使依赖确定性需求的传统路径优化与订单分配方法难以保持稳定绩效。作为物流链中成本最高、服务最敏感的环节,末端配送需在时效、成本与服务可靠性间动态权衡,因此研究考虑订单取消扰动的配送优化模型具有重要现实意义。

2. 文献综述

当前,电商末端配送与即时配送研究已形成以车辆路径优化、订单接收与调度协同、以及不确定环境下鲁棒决策为主的研究脉络。Özarık 等[2]将客户在家概率纳入末端配送路径与时刻协同决策,显著降低了失败配送成本。Xue 和 Wang [3]将即时配送中的订单接收与车辆调度建模为带时间窗的多行程取送货问题。Chu 等[4]进一步提出数据驱动的末端配送优化框架,将机器学习预测与容量车辆路径模型结合,提高了在线决策的准确性与效率。

在不确定性配送研究中,订单取消与服务可靠性已成为新的关注重点。Xue 等[5]研究了带预约时间和订单取消不确定性的餐食取送问题,将客户取消时间建模为随机变量,并构建两阶段随机规划模型以平衡路径成本与违约惩罚。Yu 等[6]在服务运输问题中综合考虑时间不确定性与客户取消,指出取消行为会显著增加车辆空闲与客户等待损失。Zhang 等[7]针对在线零售中的拆单配送问题提出末端订单整合方法,通过在配送站延后并合并发运来减少重复到访。Schrotenboer 等[8]面向本地零售即时配送平台,讨论了订单整合机会与配送紧迫性之间的平衡问题。Ouertani 等[9]对动态车辆路径问题进行综述,指出订单修改、取消和实时到达已成为现代物流调度的重要特征。

国内研究也开始关注取消行为对配送调度的影响。王征等[10]以即时配送为对象,构建考虑顾客取消订单的多行程车辆调度模型,并基于改进算法分析不同取消分布下的调度绩效差异。此外,订单需求的不确定性不仅源于取消行为,也与客户随机需求波动密切相关。李阳等[11]针对随机需求车辆路径问题,验证了在需求波动下采用鲁棒优化策略的有效性。李佑霖等[12]构建了考虑实时订单更新的拼车调度双

层规划模型, 对电商快递场景下应对订单状态变化具有借鉴意义。

3. 模型建立

3.1. 前提假设

- (1) 所有节点间的行驶时间确定, 不考虑行驶过程中其他因素的干扰;
- (2) 假设车辆的运行不受道路交通状况的影响, 车辆以恒定车速行驶;
- (3) 所有订单的基本需求信息在规划时刻可获得, 不考虑装卸过程中的额外随机扰动;
- (4) 一辆配送车辆可以服务多个订单, 但每个订单只能由一辆车执行取送服务;
- (5) 车辆初始位置已知, 无固定终点; 每辆车的最大装载能力有限并预先给定;
- (6) 客户发出订单后存在一定概率取消, 订单取消将导致有效需求发生随机变化。

3.2. 参数符号

集合

V ——节点集合; V_D ——司机起始节点集合; V_P ——订单取件点集合; V_R ——订单送达点集合;
 E ——路网中路段集合, $E = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$; K ——订单集合; D ——车辆集合。

决策变量

x_{ij}^d ——车辆 d 经过路段 (i, j) , $x_{ij}^d = 1$, 否则为 0; y_{dk} ——若司机 d 服务订单 k , $y_{dk} = 1$, 否则为 0;
 z_d ——若车辆 d 被启用, $z_d = 1$, 否则为 0。

参数

O_d ——车辆 d 的起点; 对应坐标 (x_{O_d}, y_{O_d}) ; O_k ——订单 k 的取件点; 对应坐标 (x_{O_k}, y_{O_k}) ; D_k ——订单 k 的送达点; 对应坐标 (x_{D_k}, y_{D_k}) ; Q_d ——车辆最大装载能力, 以包裹件数或标准化货量单位表示; d_{ij} ——路段 (i, j) 的距离; t_{ij} ——路段 (i, j) 的行驶时间; c_{ij} ——车辆单位行驶成本; c_2 ——订单在途时间单位成本; c_3 ——订单等待单位时间成本; $\hat{t}_k$ ——预计到达订单 k 取件点的时间, 该时间根据平台计算的车辆与取件点距离得到; T_k^O ——车辆到达订单 k 取件点的时间; T_k^D ——车辆到达订单 k 送达点的时间; $[e_k^O, l_k^O]$ ——订单 k 的取件时间窗; $[e_k^D, l_k^D]$ ——订单 k 的送达时间窗; μ ——未服务订单惩罚成本; M ——一个足够大的正数; a_1 ——每辆车的启动成本; q_{ij}^d ——车辆 d 在路段 (i, j) 上的装载量; ξ_k ——订单的需求(随机变量)。

3.3. 模型构建

根据上述问题的分析、描述及假设, 建立电商快递配送场景下的优化模型如下。此时的优化目标主要考虑车辆路径成本与订单履约相关成本。具体模型如下:

$$\min Z = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{d \in D} c_{ij} d_{ij} x_{ij}^d + a_1 \times \sum_{d \in D} z_d + \mu \sum_{k \in K} (1 - y_{dk}) + \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} c_k (t_k^d - t_k^o) y_{dk} \quad (1-1)$$

s.t.

$$\sum_{d \in D} y_{dk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (1-2)$$

$$\sum_{d \in D} y_{dk} \times Q_d \geq \xi_k \quad \forall k \in K \quad (1-3)$$

$$x_{ii}^d = 0 \quad \forall i \in V, \forall d \in D \quad (1-4)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^d = \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^d \quad \forall i \in V \setminus \{O_d\}, \forall d \in D \quad (1-5)$$

$$\sum_{j:(O_d,j) \in E} x_{O_d j}^d = z_d \quad \forall d \in D \quad (1-6)$$

$$x_{ij}^d \leq z_d \quad \forall (i,j) \in E, \forall d \in D \quad (1-7)$$

$$y_{dk} \leq z_d \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-8)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij}^d \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq V \setminus \{O_d\}, S \neq \emptyset, \forall d \in D \quad (1-9)$$

$$\sum_{i:(i,O_k) \in E} x_{i,O_k}^d \geq y_{dk} \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-10)$$

$$\sum_{i:(i,D_k) \in E} x_{i,D_k}^d \geq y_{dk} \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-11)$$

$$t_{D_k}^d \geq t_{O_k}^d - M(1 - y_{dk}) \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-12)$$

$$e_k - M(1 - y_{dk}) \leq t_k^o \leq l_k + M(1 - y_{dk}) \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-13)$$

$$r_k - M(1 - y_{dk}) \leq t_o^d \leq s_k + M(1 - y_{dk}) \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (1-14)$$

$$t_j^d \geq t_i^d + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^d) \quad \forall (i,j) \in E, \forall d \in D \quad (1-15)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in E} w_{ij}^d - \sum_{\substack{k \in K \\ D_k = j}} \xi_k y_{dk} + \sum_{\substack{k \in K \\ O_k = j}} \xi_k y_{dk} = \sum_{m:(j,m) \in E} w_{jm}^d \quad \forall j \in V, \forall d \in D \quad (1-16)$$

$$w_{O_d j}^d = \sum_{\substack{k \in K \\ O_k = O_d}} \xi_k y_{dk} \quad \forall j:(O_d, j) \in E, \forall d \in D \quad (1-17)$$

式(1-1)表示所研究区域内配送系统总成本最小。式(1-2)、(1-3)为订单分配约束。式(1-4)表示节点自循环约束。式(1-5)表示非起点流平衡约束。式(1-6)为起点流出约束。式(1-7)、(1-8)表示车辆启用约束。式(1-9)表示子路径消除约束。式(1-10)、(1-11)表示订单起终点访问约束。式(1-12)表示起终点顺序约束。式(1-13)、式(1-14)为订单履约时间窗约束。式(1-15)为路径时间约束。式(1-16)为装载量守恒约束。式(1-17)为起点装载量初始化约束。

3.4. 机会约束规划

实际电商快递配送过程中, 客户可能因临时需求变化取消订单, 导致订单需求变量具有随机性。为降低随机性对决策的干扰, 基于 Charnes 等提出的机会约束规划思想, 将随机约束转化为确定性约束。由于式(1-3)含有不确定变量, 参照机会约束等价转换方法可得:

$$P\left(\sum_{d \in D} y_{dk} \times Q_d \geq \xi_k\right) \geq \alpha \quad \forall k \in K \quad (1-18)$$

由于每个订单 k 至多被一辆车服务, 设 $y_{dk} = 1$ 的车辆为 d_k , 假设需求 $\xi_k \sim \text{Poisson}(\lambda_k)$, 且相互独立, 总需求服从泊松分布:

$$P(\xi_k \leq Q_d) \geq \alpha \Leftrightarrow F(Q_d; \lambda_k) \geq \alpha \quad (1-19)$$

其中 $F(\cdot; \lambda_k)$ 是泊松分布累积分布函数。等价于:

$$Q_d \geq F^{-1}(\alpha; \lambda_k) \quad (1-20)$$

$F^{-1}(\alpha; \lambda_k)$ 是泊松分布的 α -分位数。故将(1-3)转化为

$$\sum_{d \in D} y_{dk} \times Q_d \geq F^{-1}(\alpha; \lambda_k) \times \left(\sum_{d \in D} y_{dk} \right) \quad \forall k \in K \quad (1-21)$$

同理将(1-16)、(1-17)转化为确定性形式。对式(1-16)改写成:

$$\sum_{m:(j,m) \in E} w_{jm}^d - \sum_{i:(i,j) \in E} w_{ij}^d \leq \left(\sum_{\substack{k \in K \\ O_k = j}} \lambda_k y_{dk} - \sum_{\substack{k \in K \\ D_k = j}} \lambda_k y_{dk} \right) + \Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\lambda_{jd}^+ + \lambda_{jd}^-} \quad \forall j \in V, \forall d \in D \quad (1-22)$$

同理, 对式(1-17)改写成:

$$w_{O_d j}^d \geq F^{-1} \left(\alpha; \sum_{\substack{k \in K \\ O_k = O_d}} \lambda_k y_{dk} \right) \quad \forall j: (O_d, j) \in E, \forall d \in D \quad (1-23)$$

综上, 将式(1-3)替换成(1-21), 式(1-16)替换成(1-22), 式(1-17)替换成(1-23)。

4. 求解方法

4.1. 改进 NSGA-II 算法

非支配排序遗传算法-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)由 Deb 等人于 2002 年提出。本文在此算法基础上引入 2-opt 局本部搜索优化进行改进。具体流程见下。

4.2. 编码方式

为便于体现取件点与送达点的区别, 采用基于订单分配的整数编码方式。染色体由订单 ID 和分割符组成, 订单 ID 表示待分配的快递订单。用分割符-1 区分不同车辆的路径分配。例如, 染色体[3,1,-1,4,5,-1,2]表示: 车辆 1 服务订单 3、1; 车辆 2 服务订单 4、5; 车辆 3 服务订单 2。

4.3. 解码过程

解码函数将染色体转换为各车辆的具体路径方案, 步骤为: ① 分割染色体: 按分割符-1 将染色体划分为多个订单子序列。② 路径生成: 对每个子序列, 结合车辆起点、订单取送点生成最短行驶路径。③ 可行性验证: 主要包含时间窗约束和容量约束, 超出则调整路径或重新分配订单; 容量约束则计算车辆负载, 若超过容量限制, 采用动态惩罚函数。④ 机会约束: 通过蒙特卡洛模拟评估订单取消风险, 若未服务概率超过置信水平, 则施加额外惩罚。

4.4. 适应度函数

基于模型的多目标优化目标, 适应度函数包含 5 个维度, 分别对应式(1-1)中的成本项及约束惩罚:

$$f_1 = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{d \in D} c_{ij} d_{ij} x_{ij}^d \quad (2-1)$$

$$f_2 = a_1 \times \sum_{d \in D} z_d \quad (2-2)$$

$$f_3 = \mu \sum_{k \in K} (1 - y_{dk}) \quad (2-3)$$

$$f_4 = \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} c_k (t_k^d - t_k^o) y_{dk} \quad (2-4)$$

$$f_5 = \mu_{\text{chance}} \times \frac{1}{N_{\text{sim}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{sim}}} I \left(\sum_{k \in \text{route}_d} \xi_{k,s} > Q_d \right) \quad (2-5)$$

其中 μ_{chance} 为不满足约束时添加的惩罚系数, N_{sim} 为模拟次数, $\xi_{k,s}$ 为第 s 次模拟的订单需求数, 函数 $I \left(\sum_{k \in \text{route}_d} \xi_{k,s} > Q_d \right)$ 为判定是否超过载重, 满足为 1, 否则为 0。

4.5. 快速非支配排序

首先, NSGA-II 引入了快速非支配排序方法, 将整个种群划分为多个不同的非支配层级。对于每个个体 p , 记录两个重要信息, 其被支配的个体集合 $S(p) = \{q | p \prec q\}$, 以及支配它的个体数量 $n(p) = \{q | p \succ q\}$ 。若 $n_p = 0$, 说明该个体未被任何其他个体支配, 则属于第一前沿 F_1 。在排序过程中, 首先将所有 $n_p = 0$ 的个体加入到 F_1 , 随后遍历 F_1 的每个个体 p , 对其支配的每个个体 q 执行 $n_q \leftarrow n_q - 1$, 一旦某个个体 q 满足 $n_q = 0$, 则将其加入下一层 F_2 , 以此类推, 直至所有个体被归入某一非支配层中, 完成种群的层级划分。

4.6. 拥挤度计算

为了在同一非支配层内部进一步甄别个体的优劣, NSGA-II 引入了拥挤距离作为评估个体分布密度的指标。该方法通过在每个目标函数维度上对个体排序, 计算相邻个体之间的目标值差异, 进而估算其所处“解空间”的稠密程度。设某一非支配层中共有 $N = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 个个体, 在第 m 个目标函数 f_m 上进行升序排序后, 对于中间个体 x_i (非边界个体), 其在该目标上的拥挤距离计算见式(2-6)。

$$d_i^{(m)} = \frac{f_m(x_i + 1) - f_m(x_i - 1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (2-6)$$

式(2-6)中, $f_m^{\max}$ 与 $f_m^{\min}$ 分别为当前层中目标 f_m 的最大值与最小值。最终, 个体 x_i 的总体拥挤距离为其在所有目标函数维度上的归一化距离之和, 具体见式(2-7)。

$$CD(x_i) = \sum_{m=1}^M d_i^{(m)} \quad (2-7)$$

4.7. 选择操作

采用锦标赛选择结合精英保留策略: 合并父代和子代种群, 按非支配排序优先选择前沿层级较低的个体。当某一层无法完全纳入新种群时, 按拥挤距离降序选择, 确保种群多样性。锦标赛选择中, 每轮随机抽取 K 个个体进行比较, 选取其中非支配等级更低者; 若等级相同, 则选择拥挤距离更大的个体。

4.8. 部分匹配交叉

采用部分匹配交叉(Partially Mapped Crossover, PMX)的方式, 提升优化效果。具体而言, 首先从两个父代染色体中随机选择两个交叉位置, 确定交叉片段区间。随后, 将父代 1 中该片段复制到子代 1 的对应位置, 将父代 2 中该片段复制到子代 2 的对应位置。对于子代 1 中未被交叉片段占据的非分隔符位置, 按照父代 2 中这些位置的原始排列顺序, 依次填充基因。类似操作对子代 2 进行, 同时保留分隔符在原始染色体中的相对位置, 确保每辆车的订单分配结构不被破坏。

4.9. 基因变异

在变异阶段为增强种群的多样性并避免过早收敛。具体为: 根据预先设定的变异概率 P_m 判断父代染色体是否变异, 若变异, 则随机选择两个基因位置, 交换这两个位置的基因, 形成新的子代。

4.10. 2-opt 局部搜索优化

为进一步提升路径质量, 在变异操作后以概率 P 执行 2-opt 局部搜索。这是一种路径内优化方法, 通过交换路径中的边来改进路径质量。具体操作如下:

- (1) 对于每条车辆路径, 随机选择两个非相邻节点位置 i 和 k ($1 \leq i < k \leq L-1$, 其中 L 为路径长度); (2) 交换路径段: 将路径 $[i, k]$ 段进行反转, 生成新路径 $route[i:k+1][:-1]$; (3) 成本评估: 计算新路径的总行驶成本; (4) 接受准则: 若新路径成本低于原路径且满足约束条件, 则接受该变化。

2-opt 操作最大迭代次数限制为 $T_{\max}$ 次, 确保在合理计算时间内获得质量提升。

4.11. 约束处理机制

该约束处理机制分为硬约束和随机机会约束。其中硬约束包含时间窗约束和容量约束。随机机会约束通过蒙特卡洛模拟生成订单取消场景, 计算车辆容量不足的概率; 若概率超过置信水平, 则在适应度函数中添加惩罚项, 并随迭代次数增加而逐步强化约束满足。

4.12. 终止条件

达到最大迭代次数或帕累托前沿收敛, 输出第一前沿 F_1 中的解作为帕累托最优解集。

5. 数值实验

由于缺少完全匹配“客户随机取消订单”场景的公开基准算例, 本文采用 Li&Lim 提出的 PDPTW 取送货基准算例对所提 NSGA-II 算法进行评估。由于该基准本身属于取送货问题, 因此仅对其参数进行适度调整。部分数据如见表 1 与表 2 所示。

Table 1. Vehicle data

表 1. 车辆数据

车辆数	车辆装载能力(件)	速度
25	4	5

Table 2. Partial task data

表 2. 部分任务数据

任务	X	Y	需求	最早取/送时间	最晚取/送时间	服务时间	取(同级索引)	送(同级索引)
1	45	68	-3	912	967	90	11	0
2	45	70	-2	825	870	90	6	0
3	42	66	1	65	146	90	0	75
4	42	68	-4	727	782	90	9	0
5	42	65	4	15	67	90	0	7
6	40	69	2	621	702	90	0	2

以任务 2 为例, 其坐标为(45, 70), 需求为-2, 表示该节点为订单的送达点, 需要完成 2 件包裹的交付; 其对应取件索引为 6, 对照任务 6 的送达索引为 2, 任务 6 的需求为 2, 表示在取件点装载 2 件包裹。根据模型设定, 对各项参数的标定结果见表 3 所示。

Table 3. Simulation parameter settings
表 3. 仿真参数设置

仿真参数	数值
车辆单位行驶成本 c_{ij}	0.3
订单在途时间成本	0.1
未服务订单惩罚成本 μ	100
车辆的启动成本 a_i	150
订单等待时间成本	0.004

为全面评估所提出算法的效果，将其与两类典型的优化模型进行对比。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA): 通过模拟自然选择和遗传进化机制进行搜索，以适应度函数为导向，通过交叉、变异等操作不断优化种群。

蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO): 仿照蚂蚁觅食行为构建的群体智能算法，通过信息素的正反馈机制强化优质路径，引导解的迭代优化。

在模型运行中，采用基于改进的 NSGA-II 的进化算法作为求解框架。参数设置通过初步实验与网格搜索优化，在解集覆盖性、收敛速度与稳定性之间获得合理折中。最终选定参数见表 4 所示。

Table 4. Algorithm parameter settings
表 4. 算法参数设置

算法参数	数值
种群数量	120
迭代次数	600
泊松分布均值	1.0
机会约束置信水平	0.85
机会约束模拟次数	15
交叉概率	0.90
变异概率	0.08

6. 结果分析

6.1. 模型训练结果

为验证所构建的机会约束配送优化模型在时空约束与不确定性需求条件下的调度性能，采用改进的 NSGA-II 算法对调整后的 Li & Lim PDPTW 取送货算例进行了 600 轮训练迭代，重点考察总成本目标的动态演化过程。训练结果见图 1 所示。

由图 1 可得，迭代前期(0~100 代)总成本从超 4650 的较高水平快速下降，迭代中后期(100 代以后)则迅速收敛至最优解 4382.26，并在 200~600 代持续保持稳定、无明显波动。

6.2. 不同算法结果比较

本节选取了三种优化算法进行对比分析，分别为 GA、ACO 与 NSGA-II。最终对比结果见表 5 所示。

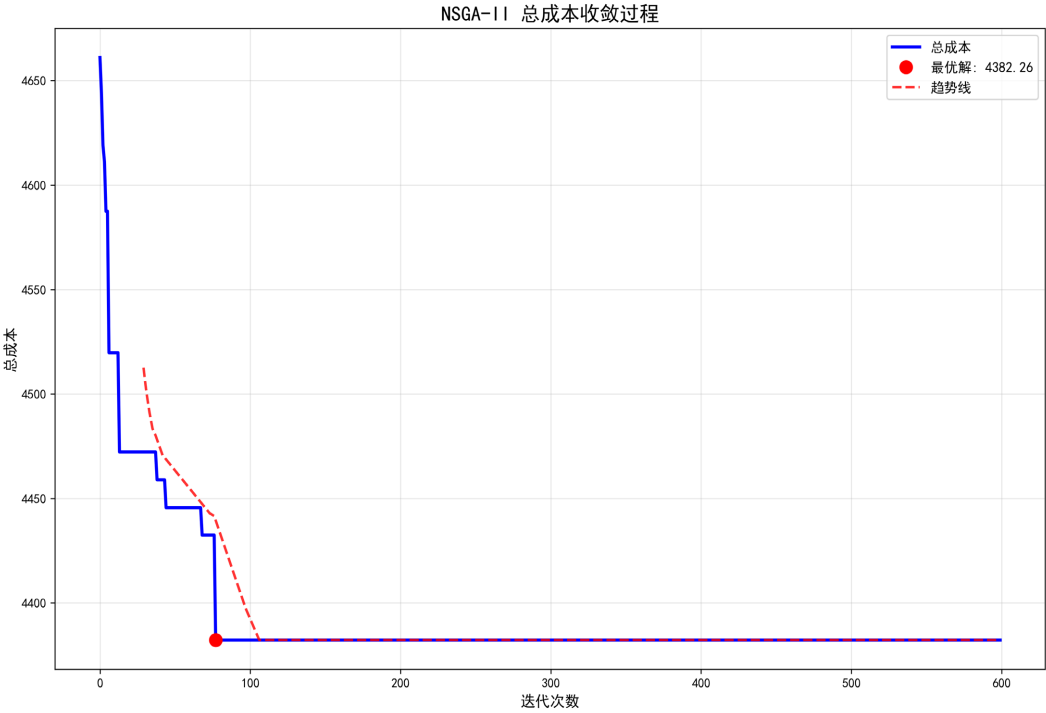


Figure 1. Training results of improved NSGA-II
图 1. 改进的 NSGA-II 训练结果

Table 5. Results of different algorithms
表 5. 不同算法结果

算法	CPU/s	使用车辆数	成本(元)
GA	676.4	25	4669.56
ACO	823.5	25	4719.11
改进的 NSGA-II	743.3	24	4382.26

由表 5 可得, 改进的 NSGA-II 算法展现出显著优于传统启发式算法 GA、ACO 的综合性能。在总成本方面, 改进的 NSGA-II 的总成本较 GA (4669.56 元)降低 307.3 元, 较 ACO (4719.11 元)降低 336.85 元。在车辆资源配置维度, GA 与 ACO 均需调用 25 辆车完成任务, 而改进的 NSGA-II 仅需 24 辆车。就计算效率而言, GA 计算时间最短(676.4 s)但需以更高成本和更多车辆投入为代价, ACO 在效率与结果上均无明显优势, 而改进的 NSGA-II 的 CPU 时间为 743.3 s, 虽略慢于 GA 但显著快于 ACO。

7. 结论

本文围绕客户随机取消订单的电商快递配送优化问题展开研究, 构建了融合随机过程理论与机会约束规划的动态配送优化框架, 主要成果如下:

- (1) 突破传统配送 VRP 模型的确定性假设局限。将订单需求定义为服从泊松分布的随机变量, 量化客户取消行为带来的需求波动, 并通过分位数方法将机会约束转化为确定性形式, 实现了从“静态确定性优化”向“随机扰动下稳健优化”的转变。
- (2) 提出了高效的改进 NSGA-II 求解算法。设计基于订单分配的整数编码与解码方案, 通过部分匹配交叉(PMX)维持路径连贯性, 结合基因交换变异增强种群多样性, 并引入 2-opt 局部搜索优化路径质

量。数值试验表明, 该算法在总成本、车辆资源配置与计算效率方面均优于 GA、ACO 等传统算法。

本文研究仍存在一定局限: 数值试验尚未完全贴合真实电商快递网络中的订单结构、客户分布与道路约束; 模型也未进一步考虑退货逆向物流、骑手/司机接单行为和实时路况等因素。未来可从三方面深化: 一是引入真实电商或即时配送平台数据构建算例; 二是考虑交通拥堵、客户改约与多仓协同等多源不确定性; 三是开发面向实时订单更新的在线调度机制, 提升模型在实际物流场景中的部署价值。

参考文献

- [1] 交通运输部关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. 2021-10-29. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm, 2026-04-03.
- [2] Özark, S.S., Veelenturf, L.P., Woensel, T.V. and Laporte, G. (2021) Optimizing E-Commerce Last-Mile Vehicle Routing and Scheduling under Uncertain Customer Presence. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **148**, Article 102263. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102263>
- [3] Xue, G. and Wang, Z. (2023) Order Acceptance and Scheduling in the Instant Delivery System. *Computers & Industrial Engineering*, **182**, Article 109395. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109395>
- [4] Chu, H., Zhang, W., Bai, P. and Chen, Y. (2023) Data-Driven Optimization for Last-Mile Delivery. *Complex & Intelligent Systems*, **9**, 2271-2284. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00293-1>
- [5] Xue, G., Wang, Z. and Sheu, J.B. (2024) Meal Pickup and Delivery Problem with Appointment Time and Uncertainty in Order Cancellation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **193**, Article 103845. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103845>
- [6] Yu, X., Shen, S. and Wang, H. (2021) Integrated Vehicle Routing and Service Scheduling under Time and Cancellation Uncertainties with Application in Nonemergency Medical Transportation. *Service Science*, **13**, 172-191. <https://doi.org/10.1287/serv.2021.0277>
- [7] Zhang, Y., Sun, L., Hu, X. and Zhao, C. (2019) Order Consolidation for the Last-Mile Split Delivery in Online Retailing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **122**, 309-327. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.011>
- [8] Schrottenboer, A.H., Uit het Broek, M.A.J., Buijs, P. and Ulmer, M.W. (2021) Fighting the E-Commerce Giants: Efficient Routing and Effective Consolidation for Local Delivery Platforms.
- [9] Ouertani, N., Ben-Romdhane, H. and Krichen, S. (2023) The Dynamic Vehicle Routing Problem: A Comprehensive Survey. In: *Unsupervised and Semi-Supervised Learning*, Springer, 1-36. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50036-7_1
- [10] 王征, 薛桂琴, 王艺雪. 考虑顾客取消订单的即时配送车辆调度问题[J]. 系统管理学报, 2025, 34(5): 1295-1304.
- [11] 李阳, 范厚明, 张晓楠, 等. 随机需求车辆路径问题及混合变邻域分散搜索算法求解[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(12): 1594-1604.
- [12] 李佑霖, 袁鹏程, 林徐勋, 等. 考虑实时订单更新的拼车调度双层规划模型[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(6): 1714-1721.