

企业信息化背景下电商到家平台跨站点协同履约的双目标优化模型与进化求解

邵芯苗

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年1月19日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年3月2日

摘要

本地生活到家服务平台在订单需求的时空波动与站点供给异质性作用下, 容易出现供需失衡; 此外, 随着多人协作类订单占比的增加, 履约过程呈现出技能互补和时间耦合特征。若无法在预约时间窗内实现多人员的同步到达与同步启动, 将导致等待、返工和投诉等体验损失。针对跨站点运力共享治理和协同订单同步约束难以在同一框架下进行统筹和优化的问题, 本文在多站点网络中引入了受控的跨站点运力共享机制, 构建了统一的派单与路径排程模型, 适用于普通订单和协同订单。为此, 本文提出了以服务体验损失最小化和履约成本及系统稳定性损失最小化为核心的双目标优化框架。体验目标主要从协同启动偏差、迟到成本项以及严重不同步或大幅迟到的额外成本项三个维度刻画服务质量; 成本与稳定目标在行驶、服务与加班成本的基础上, 引入工时差异成本项来反映负载均衡与人员稳定性; 同时, 对触发跨站点协同的订单设置额外成本项, 体现协调成本和治理风险。本文采用NSGA-II算法进行求解, 并与MOEA/D和SPEA2在统一编码/解码和目标评估框架下进行公平对比。基于扩展Solomon VRPTW的多站点协同履约算例体系和不同协同强度设置的实验结果表明: 随着协同订单比例的上升, 可行解域显著压缩, 求解难度加大。在多数算例及关键指标(HV、IGD、GD等)上, NSGA-II表现出更优的前沿覆盖和收敛性, 且统计检验结果表明其差异具有显著性。研究结果为平台在成本与体验权衡下的治理参数配置与跨站点协同调度策略提供了重要的决策支持。

关键词

多站点协同履约, 跨站点运力共享, 协同订单同步, 双目标优化, 多目标进化算法

Bi-Objective Optimization Model and Evolutionary Solution for Cross-Depot Collaborative Fulfillment in E-Commerce On-Demand Platforms under Enterprise Informatization

Xinmiao Shao

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

Received: January 19, 2026; accepted: February 2, 2026; published: March 2, 2026

Abstract

Local life on-demand service platforms are prone to supply-demand imbalances due to the spatio-temporal fluctuations in order demand and the heterogeneity of depot supply capacities. Additionally, as the proportion of multi-person collaborative orders increases, the fulfillment process exhibits characteristics of skill complementarity and temporal coupling. If simultaneous arrival and simultaneous start of multiple personnel cannot be achieved within the appointment time window, it will lead to experience losses such as waiting, rework, and complaints. To address the challenge of balancing cross-depot capacity sharing governance and collaborative order synchronization constraints within a single framework, this paper introduces a controlled cross-depot capacity sharing mechanism within a multi-depot network, and constructs a unified dispatching and routing scheduling model applicable to both standard and collaborative orders. Accordingly, this paper proposes a bi-objective optimization framework focused on minimizing service experience loss and minimizing fulfillment costs and system stability loss. The experience objective characterizes service quality from three dimensions: synchronization start deviation, lateness cost items, and additional cost items for severe asynchrony or significant delays. The cost and stability objective, based on travel, service, and overtime costs, introduces a labor-hour difference cost item to reflect load balancing and workforce stability. Additionally, an extra cost item is set for orders triggering cross-depot collaboration to reflect coordination costs and governance risks. The NSGA-II algorithm is employed for solving this problem, and a fair comparison is made with MOEA/D and SPEA2 under a unified encoding/decoding and objective evaluation framework. Experimental results based on an extended Solomon VRPTW multi-depot collaborative fulfillment instance system and various collaboration intensity settings show that as the proportion of collaborative orders increases, the feasible region significantly compresses, and the solving difficulty increases. NSGA-II demonstrates better frontier coverage and convergence in most instances and key metrics (such as HV, IGD, GD), with statistical tests confirming the significance of these differences. The research results provide important decision-making support for platform governance parameter configuration and cross-depot collaborative scheduling strategies under the trade-off between cost and experience.

Keywords**Multi-Depot Collaborative Fulfillment, Cross-Depot Capacity Sharing, Collaborative Order Synchronization, Bi-Objective Optimization, Multi-Objective Evolutionary 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**

本地生活到家服务平台(如家政、维修、安装、护理陪护、搬运等)在运营中同时受到需求峰谷波动与空间分布异质性的影响,导致多站点网络内供需错配现象突出[1][2]:部分站点在特定时段出现需求集中与运力不足,而邻近站点存在阶段性产能闲置,单站点内部调度难以有效吸收波动,跨站点资源调度则受制于协调成本与治理约束,难以实现高频、可控的调用[3]。与此同时,伴随服务内容向高复杂度与专

业化演进，多人协作类订单比例持续提升。该类订单在技能覆盖之外还具有显著的时间耦合特征，即服务人员需在预约时间窗内同步到达并同步启动；不同步将引发等待、返工与投诉等体验损失，进而放大平台的服务风险与管理成本[4] [5]。

围绕上述问题，既有研究主要集中于三类方向：(1) 以车辆路径问题及其带时间窗扩展为基础的派单与路径排程研究，强调在时空约束下的成本效率优化[6]；(2) 面向多站点/多中心的资源共享与调度研究，通过跨区域调度、共享配额或弹性供给缓解局部供需不均，但多侧重效率与成本，较少将体验与人员稳定性纳入统一优化[7]；(3) 面向同步协作服务的建模研究，能够刻画多人协作任务的同步到达与同步启动约束，但通常在单中心或忽略跨站点共享治理的设定下展开[8]。总体来看，“跨站点共享治理”与“协同订单同步约束”仍缺乏统一建模与系统权衡，尤其缺少面向到家平台业务的多目标研究框架。

基于此，本文在多站点平台网络中引入受控的跨站点运力共享机制，面向普通订单与协同订单构建统一派单与路径排程双目标优化模型：以服务体验损失最小化刻画同步偏差与迟到风险；以履约成本及系统稳定性损失最小化刻画直接成本、负载均衡与跨站点治理代价。进一步地，本文将“受控共享、克制调用、稳态排班”等治理诉求以内嵌惩罚与约束的方式融入模型，并采用 NSGA-II 进行求解，在统一实现框架下与 MOEA/D、SPEA2 进行公平对比，结合多目标指标与非参数统计检验验证算法性能差异，从而为平台调度策略选择与治理参数配置提供可操作的决策依据。

2. 数学建模

2.1. 问题描述

本文关注的主要问题是在电商到家平台中，如何在多站点网络内合理调度资源，并同时解决站点之间供需错配及协同订单同步等问题。随着协同订单比例的增加，如何平衡服务体验损失与履约成本，成为平台运营的核心挑战。本研究提出了一个双目标优化模型，其中一个目标是最小化服务体验损失，另一个目标是最小化履约成本与系统稳定性损失。

2.2. 模型符号、参数与决策变量定义

为了清晰地描述问题并构建相应的数学模型，本节首先对模型中涉及的集合、索引、参数及决策变量进行统一定义。表 1 汇总了模型中主要的符号及其含义。

Table 1. Description of model symbols, sets, and decision variables

表 1. 模型符号、集合与决策变量说明

集合与索引	D : 站点(服务商)集合
	$K = \bigcup_{d \in D} K_d$: 全体服务人员集合
	K_d : 站点 d 的服务人员集合
	I : 订单(任务)集合
	$I_s \subseteq I$: 协同(同步)订单集合
	G : 协同订单组集合
	d : 站点索引
	k : 服务人员索引
	i, j : 订单或路径节点索引
	g : 协同订单组索引

续表

决策变量	$x_{i,k} \in 0,1$: 若订单 i 分配给人员 k , 则取 1 $y_{i,j,k} \in 0,1$: 若人员 k 从订单 i 行驶到订单 j , 则取 1 $t_{i,k} \geq 0$: 人员 k 到达订单 i 的时间 $o_k \geq 0$: 人员 k 的加班时长 $u_d \geq 0$: 站点 d 的跨站点调用强度 $\delta_i \in 0,1$: 订单 i 是否触发跨站点协同
派生量	W_k : 人员 k 的总工作时长 $N_k = \sum_{i \in I} x_{i,k}$: 人员 k 的服务订单数 E_i : 订单 i 的实际开始时间 $late_i$: 订单 i 的迟到量
时间与能力参数	$[a_i, b_i]$: 订单 i 的预约时间窗 s_i : 订单 i 的服务时长 $\tau_{i,j}$: 从节点 i 到节点 j 的行驶时间 T^{norm} : 正常工作时长阈值 T^{max} : 最大允许工作时长 Δ_{sync}^{max} : 最大允许同步偏差阈值
技能与容量参数	R_i : 订单 i 的技能需求集合 S_k : 人员 k 的技能集合 Cap_d : 站点 d 的可派单能力上限 Q^{share} : 跨站点共享额度上限 N^{max} : 单人最大服务订单数
成本与惩罚函数项参数	C_{travel} : 行驶成本系数 $C_{service}(k)$: 人员 k 的服务成本系数 $C_{overtime}$: 加班成本项系数 $C_{balance}$: 负载均衡成本项系数 C_{cross} : 跨站点协同成本项系数 P_{late} : 迟到体验成本项系数 P_{sync} : 同步质量成本项系数

2.3. 目标函数

本文构建双目标优化模型, 设决策变量集合为 X , 目标一为服务体验损失 $F_1(X)$, 目标二为履约成

本与系统稳定性损失 $F_2(X)$ 。

目标一：最小化服务体验损失。

$$\min f_1 = \sum_{i \in I_s} \left(\max_{k|y_{mu}=1} \{A_{ik}\} - \min_{k|y_{mu}=1} \{A_{ik}\} \right) + \sum_{i \in I} P_{late} \cdot \max(0, E_i - l_i) \\ + \sum_{i \in I_s} P_{sync} \cdot \max(0, \max(0, E_i - l_i) - \Delta_{sync}^{max})$$

该目标从协同服务同步性与时间窗履约质量两方面刻画体验损失：第一项度量协同订单中参与人员的同步启动偏差(同一订单内到达/开工时间的最大差值)；第二项度量订单超出预约最晚时间的迟到成本项；第三项对严重不同步或大幅迟到情形设置额外成本项，以反映高投诉风险与潜在返工成本。通过上述设计， F_1 能综合反映等待、迟到与协同失配对用户体验的影响。

目标二：最小化履约成本与系统稳定性损失。

$$\min f_2 = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K_h} \left(C_{travel} \sum_{i,j} T_{ij} x_{ijkh} + C_{service}(k) \sum_{i \in I} D_i y_{ikh} + C_{overtime} \max(0, W_{kh} - T_{normal}) \right) \\ + C_{balance} \cdot \left(\max_{k,h} \{W_{kh}\} - \min_{k,h} \{W_{kh}\} \right) + \sum_{i \in I_s} C_{cross} \cdot \delta_i$$

该目标由三部分构成：其一为行驶成本、服务成本与加班成本等直接运营成本；其二通过工时差异成本项抑制极端不均衡排班，以刻画负载均衡与人员稳定性；其三对触发跨站点协同调用的订单施加额外成本项，用于表征跨站点协调带来的管理成本与治理风险。上述目标能够在成本控制与稳态运营之间建立可权衡的优化依据。

2.4. 约束体系

模型约束可视为平台治理规则的形式化表达，主要包括：(1) 产能与劳动约束：最大任务数、最大工时与加班定义，防止人员过载并保障服务质量；(2) 时间窗与路径可行性：时间窗软约束、流守恒、闭环等，保证履约路径与到达时间的可行性；(3) 跨站点治理约束：禁止双向调度、共享额度上限、先本地后跨站点等，体现“受控共享、克制调用”的治理原则；(4) 协同服务约束：协同订单人数需求、技能互补覆盖、同步偏差阈值等，刻画协同任务的“技能覆盖 + 时间耦合”特征。

(1) 单人最大任务数约束

$$\sum_{i \in I} x_{i,k} \leq N^{max}, \forall k \in K$$

(2) 最大工时与加班定义

$$W_k \leq T^{max}, \forall k \in K$$

$$o_k \geq W_k - T^{norm}, o_k \geq 0, \forall k \in K$$

(3) 时间窗约束(软化迟到)

$$t_{i,k} \geq a_i - M(1 - x_{i,k}), \forall i, k$$

$$t_{i,k} \leq b_i + late_i + M(1 - x_{i,k}), \forall i, k$$

$$late_i \geq 0, \forall i \in I$$

(4) 路径可行性与流守恒

普通订单唯一指派:

$$\sum_{k \in K} x_{i,k} = 1, \forall i \in I \setminus I_s$$

协同订单人数需求:

$$\sum_{k \in K} x_{i,k} = m_i, \forall i \in I_s$$

路径流守恒:

$$\sum_{j \in I} y_{i,j,k} = x_{i,k}, \sum_{j \in I} y_{j,i,k} = x_{i,k}, \forall i \in I, \forall k \in K$$

(5) 服务半径与行驶限制

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \tau_{i,j} y_{i,j,k} \leq T^{\max}, \forall k \in K$$

(6) 单周期(日内闭合)

$$t_{i,k} + s_i \leq T^{\text{day}} + M(1 - x_{i,k}), \forall i, k$$

(7) 禁止双向调度(防止资源漂移)

$$\sum_{i:d(i) \neq h(k)} x_{i,k} \leq Mz_k, \sum_{i:d(i)=h(k)} x_{i,k} \geq 1, \forall k$$

(8) 跨站点共享额度上限

$$u_d = \sum_{i:d(i)=d} \sum_{k:h(k) \neq d} x_{i,k}, \forall d \in D$$

$$\sum_{d \in D} u_d \leq Q^{\text{share}}$$

(9) 协同订单统一时间窗

$$a_i = a_j, b_i = b_j, \forall g \in G, \forall i, j \in I_g$$

(10) 先本地后跨站点(混合协同规则)

$$x_{i,k} \leq w_i, \forall i \in I_s, \forall k : h(k) \neq d(i)$$

$$\sum_{k:h(k)=d(i)} x_{i,k} \geq m_i - Mw_i, \forall i \in I_s$$

(11) 协同技能互补覆盖

$$\sum_{k \in K} a_{k,s} x_{i,k} \geq r_{i,s}, \forall i \in I_s, \forall s \in S$$

(12) 同步启动差(软约束)

$$T_i^{\max} \geq t_{i,k} - M(1 - x_{i,k}), \forall k$$

$$T_i^{\min} \leq t_{i,k} + M(1 - x_{i,k}), \forall k$$

$$\delta_i^{\text{sync}} = T_i^{\max} - T_i^{\min}$$

$$\delta_i^{\text{sync}} \leq \Delta_{\text{sync}}^{\max} + \eta_i, \eta_i \geq 0$$

(13) 最小休息间隔(软约束)

$$\xi_{i,j,k} \geq 0$$

(14) 路径闭环与低效绕行(软约束)

$$\sum_{i,j} \tau_{i,j} y_{i,j,k} \leq \underline{L}_k + \epsilon_k, \epsilon_k \geq 0$$

(15) 策略违背成本项(软约束)

$$\pi_i \geq \sum_{k:h(k)=d(i)} x_{i,k}, \pi_i \geq 0$$

3. 算法设计

为统一处理多站点普通订单与协同订单的派单及路径排程, 本文采用“站点 - 需求序列矩阵”进行个体编码。矩阵的行对应站点, 非零元素表示该站点承接的需求点及其访问顺序, 零表示未分配。该表示方式能够显式表达需求在站点间的分配关系, 并可在解码阶段依据时间窗与服务时长进行时序推进, 从而构造人员服务路径与到达时间序列, 用于计算成本项、迟到惩罚与协同同步偏差[9]-[11]。

本文以 NSGA-II 作为主求解框架。算法流程包括: 种群初始化、个体评价、非支配排序与拥挤度距离计算、选择 - 交叉 - 变异生成子代、父子代合并与环境选择迭代直至终止。环境选择阶段遵循“等级优先、拥挤度优先”的排序截断策略, 以维持解集的收敛性与多样性。交叉与变异算子在矩阵编码结构上实现需求在站点间的重分配与局部扰动, 从而增强搜索的全局探索与局部开发能力, 并在可行性检查与修复机制约束下生成候选解[12]。

为保证对比的可重复性与可解释性, 本文在一致的编码/解码、可行性检查与目标评估模块下, 引入 MOEA/D 与 SPEA2 作为对照算法, 并统一种群规模、迭代预算、交叉变异概率与终止条件; 各算例独立重复运行并进行统计汇总, 以降低随机性对结论的影响[13] [14]。

4. 数值检验

4.1. 算例构造

本文参考 Solomon VRPTW 测试框架构建面向到家业务的多站点协同履约算例体系, 并在原有设定上扩展协同订单组结构(技能互补与时间耦合)、多技能需求映射以及跨站点共享额度与协调成本等要素[15]。为覆盖典型空间形态, 设计三类订单分布: C 类(聚类)用于模拟需求集中场景; R 类(均匀)用于检验路径鲁棒性与站点均衡性; RC 类(混合)用于刻画热点与长尾并存的真实形态。进一步设置 0%/20%/40% 三种协同订单比例以构造不同协同强度场景, 并从站点数量、订单规模、空间结构与协同强度等维度组合筛选形成 18 组代表性算例, 用于多目标模型与算法性能评估。

4.2. 性能评价指标

本文从收敛性与多样性两个维度评价多目标优化性能。基于归一化后的目标空间, 将各算法输出的非支配解集作为近似帕累托前沿, 并以“所有算法所有运行的非支配点集合”构造参考前沿。采用 HV、GD、IGD 与 SP 等指标分别衡量解集的覆盖能力、收敛水平与分布均匀性[16] [17]。为验证差异的统计稳健性, 对各算例进行多次独立重复运行, 并先采用 Friedman 非参数检验判断多算法间总体差异[18]; 当差异显著时, 进一步使用 Wilcoxon 配对符号秩检验开展两两比较, 从而识别差异方向与显著性水平[19]。

4.3. 实验结果

基于第 4.2 节构建的指标体系与统计检验流程, 本文在 C 类、R 类与 RC 类三类算例上对 NSGA-II、

MOEA/D 与 SPEA2 的多目标求解性能进行了系统对比；为保证结果展示的代表性与可比性，本文从三类算例中分别选取规模固定为 60 且覆盖三种协同强度(Sync0/Sync20/Sync40)的典型实例进行汇总展示，即 C 类采用 3-C101-60-Sync0/Sync20/Sync40, R 类采用 3-R101-60-Sync0/Sync20/Sync40, RC 类采用 3-RC101-60-Sync0/Sync20/Sync40，并据此在表 2 中报告三种算法在不同协同订单比例(0%、20%、40%)下的 HV、IGD 与 GD 等关键指标表现。总体结果表明，NSGA-II 在大多数算例中取得更大的 HV 值以及更小的 IGD 和 GD 值，显示其在解集收敛性与对参考帕累托前沿的覆盖能力方面具有明显优势；MOEA/D 在部分算例中体现出一定的间距稳定性，但在协同订单比例较高时收敛性与覆盖性有所下降；SPEA2 在低协同强度或相对简单场景下尚能获得可接受结果，但在高协同强度及复杂空间结构下解集质量波动更明显，尤其在 HV 与 IGD 方面弱于 NSGA-II。进一步地，随着协同订单比例提高，三种算法的求解难度均显著上升，集中体现为 HV 下降、IGD 与 GD 增大，反映了协同订单引入的时间耦合与同步约束对搜索空间的压缩效应；在此背景下，NSGA-II 仍保持相对稳定的性能优势，体现出其在“跨站点共享 + 协同同步”强耦合多目标优化问题上的鲁棒性。

Table 2. Test results of the three algorithms on representative C-, R-, and RC-class instances

表 2. 三种算法在 C 类、R 类、RC 类典型算例的测试结果

算例类型	测试算例	评价指标	NSGA-II (mean ± std)	MOEA/D (mean ± std)	SPEA2 (mean ± std)
C 类	3-C101-60-Sync0	HV	0.9622 (0.0722)	0.8142 (0.0667)	0.8103 (0.0607)
		IGD	0.1092 (0.0379)	0.1891 (0.0377)	0.2043 (0.0393)
		GD	0.0814 (0.0375)	0.1674 (0.0437)	0.1819 (0.0577)
		SP	0.0161 (0.0050)	0.0148 (0.0054)	0.0308 (0.0095)
	3-C101-60-Sync20	HV	0.9720 (0.0338)	0.8615 (0.0858)	0.8274 (0.0821)
		IGD	0.1020 (0.0274)	0.1529 (0.0575)	0.1811 (0.0487)
		GD	0.0977 (0.0332)	0.1293 (0.0604)	0.1527 (0.0530)
		SP	0.0153 (0.0048)	0.0134 (0.0035)	0.0242 (0.0067)
	3-C101-60-Sync40	HV	0.8978 (0.0594)	0.7840 (0.0837)	0.7652 (0.0705)
		IGD	0.1906 (0.0398)	0.2486 (0.0576)	0.2676 (0.0422)
		GD	0.1499 (0.0510)	0.1689 (0.0695)	0.1761 (0.0628)
		SP	0.0138 (0.0045)	0.0124 (0.0041)	0.0247 (0.0103)
R 类	3-R101-60-Sync0	HV	1.0209 (0.0481)	0.8799 (0.0913)	0.8986 (0.0652)
		IGD	0.0792 (0.0314)	0.1617 (0.0598)	0.1561 (0.0380)
		GD	0.0716 (0.0353)	0.1360 (0.0577)	0.1124 (0.0497)
		SP	0.0159 (0.0056)	0.0143 (0.0038)	0.0254 (0.0057)
	3-R101-60-Sync20	HV	0.8969 (0.0456)	0.7126 (0.0932)	0.7090 (0.0769)
		IGD	0.0820 (0.0219)	0.1875 (0.0593)	0.1868 (0.0475)
		GD	0.0709 (0.0287)	0.1558 (0.0671)	0.1555 (0.0507)
		SP	0.0164 (0.0037)	0.0158 (0.0055)	0.0288 (0.0072)
	3-R101-60-Sync40	HV	0.8874 (0.0727)	0.7403 (0.0764)	0.7212 (0.0806)
		IGD	0.1238 (0.0385)	0.2017 (0.0486)	0.2204 (0.0496)

续表

RC 类	3-RC101-60-Sync0	GD	0.1068 (0.0461)	0.1706 (0.0484)	0.1991 (0.0556)	
		SP	0.0144 (0.0029)	0.0130 (0.0035)	0.0306 (0.0143)	
		HV	1.0098 (0.0644)	0.8616 (0.0695)	0.8693 (0.0635)	
		IGD	0.1143 (0.0453)	0.2085 (0.0553)	0.1996 (0.0388)	
		GD	0.1109 (0.0435)	0.1911 (0.0460)	0.1660 (0.0486)	
		SP	0.0162 (0.0043)	0.0144 (0.0038)	0.0223 (0.0063)	
	3-RC101-60-Sync20	HV	0.8860 (0.0562)	0.7294 (0.0767)	0.7390 (0.0800)	
		IGD	0.0923 (0.0323)	0.1762 (0.0498)	0.1795 (0.0528)	
		GD	0.0791 (0.0324)	0.1471 (0.0537)	0.1593 (0.0599)	
		SP	0.0163 (0.0045)	0.0143 (0.0043)	0.0313 (0.0089)	
		3-RC101-60-Sync40	HV	0.9393 (0.0702)	0.8221 (0.0672)	0.7527 (0.0890)
			IGD	0.1130 (0.0422)	0.1667 (0.0447)	0.2184 (0.0646)
GD	0.1077 (0.0421)		0.1347 (0.0474)	0.2014 (0.0628)		
SP	0.0155 (0.0043)		0.0162 (0.0056)	0.0250 (0.0076)		

进一步地，图 1 所示的帕累托解集对比结果验证了上述结论：在三类空间结构下，NSGA-II 所获得的非支配解集能够在目标 f_1 与 f_2 两个维度上覆盖更广的权衡区间，前沿形态更加连续和平滑；而 MOEA/D 与 SPEA2 的解集在部分权衡区间存在明显空缺或收敛不足，表现为前沿覆盖不完整或局部密度不均。

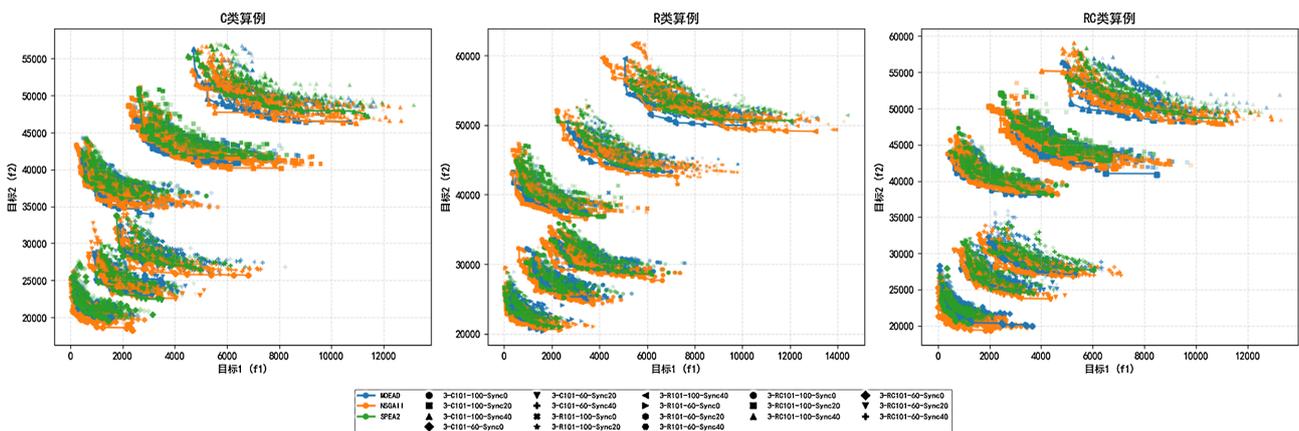


Figure 1. Comparison of the Pareto fronts obtained by each algorithm on C-class, R-class, and RC-class instances

图 1. 各个算法在 C 类、R 类、RC 类算例中获得的 Pareto 前沿对比图

本文进一步对各算例下的多目标性能指标结果进行了 Friedman 非参数检验(表 3)，并在显著性检验通过的基础上，采用 Wilcoxon 配对符号秩和检验进行两两比较(表 4)。统计结果表明，在 HV、IGD 和 GD 等关键指标上，不同算法之间普遍存在显著差异，且 NSGA-II 在大多数算例中相较于 MOEA/D 和 SPEA2 具有显著优势，尤其在高协同强度和复杂空间结构下，NSGA-II 能够保持更好的性能表现。综上所述，实验结果表明，在面向本地生活到家服务平台的跨站点运力共享与协同订单同步派单双目标优化问题中，NSGA-II 能够更有效地刻画成本与稳定性之间的权衡关系，为后续治理参数分析与策略启示提

供了可靠的解集基础。

Table 3. Friedman test results of multi-objective performance indicators for each algorithm on representative instances
表 3. 典型算例下各算法多目标性能指标的 Friedman 检验结果

算例	HV	IGD	GD	SP
	p-value (Significant)			
3-C101-60-Sync0	1.94046E-05 (Y)	1.94046E-05 (Y)	1.3041E-06 (Y)	1.06495E-05 (Y)
3-C101-60-Sync20	7.13856E-06 (Y)	0.001294022 (Y)	0.003887457 (Y)	1.7558E-05 (Y)
3-C101-60-Sync40	5.03046E-06 (Y)	6.44256E-05 (Y)	0.637628152 (N)	0.000409735 (Y)
3-R101-60-Sync0	1.7558E-05 (Y)	1.18E-06 (Y)	0.0002139 (Y)	1.06495E-05 (Y)
3-R101-60-Sync20	3.05902E-07 (Y)	3.05902E-07 (Y)	4.31857E-05 (Y)	2.37622E-06 (Y)
3-R101-60-Sync40	1.43753E-05 (Y)	4.32975E-06 (Y)	4.31857E-05 (Y)	5.03046E-06 (Y)
3-RC101-60-Sync0	1.94046E-05 (Y)	0.000193545 (Y)	0.000389752 (Y)	0.005799405 (Y)
3-RC101-60-Sync20	3.37202E-06 (Y)	1.94046E-05 (Y)	0.000193545 (Y)	4.32975E-06 (Y)
3-RC101-60-Sync40	3.37202E-06 (Y)	8.74162E-07 (Y)	7.86896E-05 (Y)	0.003697864 (Y)

Table 4. Wilcoxon paired signed-rank test results of algorithm performance differences on representative instances
表 4. 典型算例下算法性能差异的 Wilcoxon 配对符号秩检验结果

算法	算例	HV	IGD	GD	SP
		p-value (Significant)			
NSGA-II vs SPEA2	3-C101-60-Sync0	2.67029E-05 (Y)	2.67029E-05 (Y)	9.53674E-06 (Y)	1.90735E-05 (Y)
	3-C101-60-Sync20	5.72205E-06 (Y)	9.53674E-06 (Y)	0.001432419 (Y)	0.000585556 (Y)
	3-C101-60-Sync40	5.72205E-06 (Y)	3.8147E-06 (Y)	0.001016617 (Y)	9.53674E-06 (Y)
	3-R101-60-Sync0	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	0.000167847 (Y)	4.76837E-05 (Y)
	3-R101-60-Sync20	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	1.33514E-05 (Y)
	3-R101-60-Sync40	3.8147E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	5.72205E-06 (Y)	3.8147E-06 (Y)
	3-RC101-60-Sync0	3.62396E-05 (Y)	8.2016E-05 (Y)	0.00365448 (Y)	0.000167847 (Y)
	3-RC101-60-Sync20	1.90735E-05 (Y)	3.8147E-06 (Y)	6.29425E-05 (Y)	3.8147E-06 (Y)
	3-RC101-60-Sync40	3.8147E-06 (Y)	3.8147E-06 (Y)	6.29425E-05 (Y)	0.001209259 (Y)
NSGA-II vs MOEA/D	3-C101-60-Sync0	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	0.388376236 (N)
	3-C101-60-Sync20	6.29425E-05 (Y)	0.00365448 (Y)	0.05316925 (N)	0.388376236 (N)
	3-C101-60-Sync40	0.000167847 (Y)	0.001209259 (Y)	—	0.202449799 (N)
	3-R101-60-Sync0	2.67029E-05 (Y)	1.90735E-05 (Y)	0.000707626 (Y)	0.368276596 (N)
	3-R101-60-Sync20	1.90735E-06 (Y)	1.90735E-06 (Y)	0.000261307 (Y)	0.621513367 (N)
	3-R101-60-Sync40	9.53674E-06 (Y)	2.67029E-05 (Y)	0.000850677 (Y)	0.388376236 (N)
	3-RC101-60-Sync0	3.8147E-06 (Y)	8.2016E-05 (Y)	0.000104904 (Y)	0.132726669 (N)
	3-RC101-60-Sync20	1.90735E-05 (Y)	6.29425E-05 (Y)	0.000209808 (Y)	0.348810196 (N)
	3-RC101-60-Sync40	1.33514E-05 (Y)	8.2016E-05 (Y)	0.026641846 (Y)	0.84082222 (N)

5. 结论与展望

本文面向到家服务平台在站点间供需错配与协同订单并存条件下的调度难题，构建了覆盖普通订单与协同订单的统一派单与路径排程双目标优化模型：以服务体验损失最小化刻画协同同步偏差与时间窗履约风险；以履约成本与系统稳定性损失最小化刻画直接成本、负载均衡与跨站点治理代价，从而将受控共享、克制调用与稳态排班等治理诉求以内生方式融入优化框架。在扩展算例体系与不同空间结构、协同强度设置下的系统对比表明：协同订单比例上升显著提高问题难度，但 NSGA-II 在多数算例上仍表现出更好的收敛性与覆盖性，并能形成连续、覆盖更广的近似帕累托前沿；结合 Friedman 与 Wilcoxon 非参数检验，差异在关键指标上具有统计显著性。上述结果说明，该框架能够为平台在成本—体验权衡下的调度策略选择与治理参数配置提供可解释、可操作的决策依据。

未来研究可从三方面进一步深化：(1) 考虑交通时变、服务时长波动、临时取消/改约等不确定性，结合滚动优化实现在线调度；(2) 引入更细粒度的体验建模，如用户 SLA、订单价值分层与协同优先级，完善目标与约束设计；(3) 进一步扩展跨站点共享治理机制(结算与激励、动态配额与责任分担等)，并融合启发式与学习方法提升大规模与高协同强度场景下的可行性修复与求解效率，最终基于真实业务数据开展参数标定与系统集成验证。

此外，面向平台治理落地，未来将进一步基于近似帕累托前沿开展场景化运营分析：在完整非支配解集留存的基础上，结合平台偏好(如成本优先型、体验优先型)制定可复现的解选择规则(例如权重标定、拐点/膝点解识别或 ε -约束设定)，并将模型决策变量映射为可解释的运营口径(如人均单量、跨区里程占比、跨站配额利用率等)，从而形成面向跨站配额等治理参数的配置建议与策略启示。

基金项目

国家社会科学基金资助项目(数字经济时代新就业形态劳动者权益保障及联动机制研究, 24AGL033)。

参考文献

- [1] Toth, P. and Vigo, D. (2014) *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. SIAM.
- [2] Drexler, M. (2012) Synchronization in Vehicle Routing—A Survey of VRPs with Multiple Synchronization Constraints. *Transportation Science*, **46**, 297-316. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0400>
- [3] Bredström, D. and Rönnqvist, M. (2008) Combined Vehicle Routing and Scheduling with Temporal Precedence and Synchronization Constraints. *European Journal of Operational Research*, **191**, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.033>
- [4] Crainic, T.G., Ricciardi, N. and Storchi, G. (2009) Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, **43**, 432-454. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- [5] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [6] Zhang, Y., Wang, X. and Liu, C. (2023) Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows Considering Service Synchronization. *Transportation Research Part E*, **173**, Article ID: 103090.
- [7] Li, J., Chen, X. and Zhou, Y. (2024) Collaborative Routing and Scheduling in Last-Mile Delivery with Service Synchronization. *European Journal of Operational Research*, **312**, 152-168.
- [8] Xu, Z., Wang, Y. and Zhang, L. (2023) Multi-Site Workforce Scheduling for On-Demand Service Platforms. *Transportation Research Part E*, **170**, Article ID: 102999.
- [9] Chen, L., Laporte, G. and Wang, Y. (2024) Scheduling of Synchronized Services with Time Windows in On-Demand Platforms. *Transportation Science*, **58**, 389-407.
- [10] Wang, S., Liu, Z. and Li, K. (2023) Modeling and Optimization of Collaborative Service Orders in Urban On-Demand Platforms. *Omega*, **117**, Article ID: 102835.
- [11] Li, H., Zhang, Q. and Deng, J. (2023) Advances in Decomposition-Based Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **27**, 680-697.

-
- [12] Zhou, A., Jin, Y. and Zhang, Q. (2024) A Survey on Multiobjective Evolutionary Algorithms in Logistics and Transportation. *Swarm and Evolutionary Computation*, **83**, Article ID: 101382.
- [13] Gao, K., Zhang, Y. and Sadollah, A. (2023) Multiobjective Optimization for Complex Scheduling Problems: Recent Developments. *Computers & Operations Research*, **151**, Article ID: 106045.
- [14] Ishibuchi, H., Masuda, H. and Tanigaki, Y. (2023) Performance Evaluation of Multiobjective Optimizers: Recent Issues and Challenges. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **27**, 237-252.
- [15] Solomon, M.M. (1987) Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, **35**, 254-265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
- [16] Garcia, S. and Herrera, F. (2023) An Extension on Statistical Comparisons of Evolutionary Algorithms. *Information Sciences*, **621**, 1-18.
- [17] 马会明, 张立, 王凌. 面向即时服务平台的协同调度优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(7): 1741-1754.
- [18] 刘志刚, 陈晓红. 多站点即时配送与服务协同调度模型[J]. 管理科学学报, 2024, 27(3): 45-60.
- [19] 王强, 李明. 面向到家服务平台的多技能协同派单与调度研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(11): 1-12.