

考虑分时拥堵与返回时限的多车辆同时取送 路径优化研究

李美娇

济南大学 管理科学与工程学院, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ASDS.2026080010

摘 要 : 针对城市快递末端配送中投递与取货并行、道路通行时间随时段变化且车辆需按时回场的作业特征, 构建考虑分时拥堵与返回时限的多车辆同时取送路径优化模型。模型以车辆固定成本和分时路网距离成本之和最小为目标, 约束客户唯一服务、车辆容量、路径连续、分时时间传播和最大作业时长。为求解该问题, 设计插入式构造启发式与改进模拟退火相结合的算法, 并通过禁忌记忆和容量辅助候选搜索提升解的多样性。基于真实服务网点得到高德时间—距离矩阵, 经 Solomon 数据集仿真客户需求量, 构造 TD-SPDP-50 算例。结果显示, 动态拥堵方案总成本为 1275.99 元, 使用 7 辆车, 最晚返回 16:57:47; 静态平均速度方案动态复算后最晚返回 17:09:26, 未满足返回时限。研究表明, 分时拥堵建模能够提高路径方案的执行可靠性。

关 键 词 : 同时取送; 车辆路径问题; 分时拥堵; 返回时限; 模拟退火

Multi-Vehicle Simultaneous Pickup and Delivery Routing with Time-Dependent Congestion and Return Deadline

Li Meijiao

School of Management Science and Engineering, University of Jinan, Jinan, Shandong 250000

Abstract : To address urban express delivery operations in which delivery and pickup services are performed simultaneously, travel times vary by departure period, and vehicles must return to the depot before a prescribed deadline, this paper develops a multi-vehicle simultaneous pickup and delivery routing model with time-dependent congestion. The objective is to minimize fixed vehicle costs and time-dependent travel-distance costs subject to customer assignment, vehicle capacity, route continuity, time propagation and route-duration constraints. An insertion-based construction heuristic and an improved simulated annealing algorithm with tabu memory are designed. A semi-empirical TD-SPDP-50 instance is constructed from anonymized real road-network time-distance matrices and Solomon-inspired simulated customer demands. Computational results show that the dynamic model obtains a feasible solution with a total cost of 1275.99 yuan, 7 vehicles, and the latest return at 16:57:47, whereas the static average-speed solution violates the return deadline when re-evaluated with dynamic matrices. The results confirm the necessity of time-dependent routing evaluation in deadline-constrained urban delivery.

Keywords : simultaneous pickup and delivery; vehicle routing problem; time-dependent congestion; return deadline; simulated annealing

引言

城市快递与电商末端配送网络的特点是: 订单波动强、节点分散、道路通行状态变化快等。车辆在一次配送作业中通常既要完成投递, 又要回收退件或揽收件, 车辆载荷随访问顺序动态变化。若按传统静态距离或平均速度进行路径规划, 得到的路线虽运输成本较低, 却在真实道路拥堵条件下出现返回超时、车辆等待或局部线路过载等问题。对于具有固定回场要求的午班配送作业而言, 返回时限不仅关系到车辆周转, 也关系到分拣交接、后续班次衔接和服务可靠性。

本文围绕单配送中心、多车辆、同时取送和分时拥堵条件下的路径优化问题, 建立一种考虑返回时限的同时取送车辆路径模型。与客户时间窗为主的车辆路径模型不同, 本文聚焦于车辆整体作业周期约束, 即所有启用车辆必须在给定配送周期内返回配送中心。该

设置更贴近城市快递网点午后集中配送后，需回场作业的实际。

本文的主要工作包括三点：第一，构建以固定出车成本和分时路网距离成本为目标的多车辆同时取送路径模型；第二，设计结合插入式构造、分时时间传播、载荷可行性判定和改进模拟退火的启发式算法；第三，基于某市真实路网时间—距离矩阵和 Solomon 数据集仿真生成客户需求算例，比较静态平均速度方案与动态拥堵方案，并分析关键参数对优化结果的影响。

从管理意义看，本文不是单纯缩短行驶距离，而是在固定回场时间约束下提高路径方案的可执行性。对末端配送企业而言，车辆晚归会压缩包裹交接、异常件处理和下一波次作业准备时间；对算法设计而言，若仅以静态距离最短作为评价标准，搜索过程可能倾向于形成长尾线路，导致某些车辆在拥堵时段无法按时返回。因此，将分时通行矩阵直接嵌入路径评价过程，是提升配送计划可靠性的关键。

一、研究现状

车辆路径问题最早由 Dantzig 和 Ramser^[1] 提出，其核心目标是在访问所有客户并返回起点的条件下，实现总行驶距离的最小化。Solomon^[2] 进一步构建带时间窗车辆路径基准算例和算法框架，使客户时限、服务时间和路径评价成为车辆路径研究的重要基础。在逆向物流中，Min^[3] 较早指出客户节点可能同时存在配送与取货需求，车辆载荷随服务顺序发生双向变化，不能按单向配送的容量逻辑进行简单判定。近年来，城市电商配送更强调车辆在限定作业周期内完成服务并返回，Cokyasar 等^[4] 围绕送达时间限制的车辆路径问题建立模型，说明最大作业时长与车辆容量会共同影响车辆数量、行驶里程和配送组织方式；范厚明等^[5] 研究电动车—无人机协同配送问题，综合考虑分时段禁飞的无人机禁飞区、同时取送货等因素，建立电动车—无人机协同配送优化模型，证明真实交通状态会改变路径执行结果。

围绕同时取送货问题，近年来研究重点从基础 VRPSPD 逐步转向多约束、多场景和可精确求解的扩展模型。Praxedes 等^[6] 提出统一的分支割定价方法，处理同时取送货车车辆路径问题及其多种扩展形式，表明同时取送载荷约束可通过一般的路径集合框架表达。郭放等^[7] 将前置仓选址、服务策略和同时取送货路径优化结合，说明中间补货/卸货节点会改变车辆服务范围 and 路线结构；吴腾宇等^[8] 研究非对称网络下在线取送货路径优化问题，强调实时订单、非对称路网和任务匹配会增加路径可行性判定难度。这些研究与本文关注的同时取送载荷演化相契合，但本文进一步将取送载荷与车辆统一返回时限共同嵌入分时路径评价过程。

在服务时限和扰动恢复方面，现有文献多从客户时间窗、订单释放时间或动态异常出发。Hu 等^[9] 面向在线餐饮配送中的带时间窗取送问题构建扰动恢复模型，指出在动态订单和异常事件下，路径方案需兼顾执行稳定性。孙欣蕊等^[10] 将订单可服务时刻、服务时限等纳入取送货车车辆路径优化，体现末端配送中时间约束的多层次特征。Zhou 等^[11] 在两级配送、硬时间窗、分时速度函数和中转节点同步之间建立模型，说明交通时段变化会通过中转等待、装卸同步和车辆出发时刻影响总成本。针对客户时间窗频繁变动，丁秋雷等^[12] 剖析了干扰事件对客户、车辆及产品的影响，在此基础上，构建了时间窗变动下生鲜产品同时取送车辆路径干扰管理模型。与上述研究相比，本文不设置客户硬时间窗，而将作业周期结束前返回配送中心作为核心时限约束，更贴

合午班快递车辆需按时回场、衔接分拣与下一波次作业的场景。

在城市共同配送和新能源配送方向，研究者开始将路径优化与资源共享、交通拥堵、充电排队等因素结合。王勇^[13] 比较分析了不同配送模式下多中心共同配送优化方案各指标的差异，为多级多中心共同配送的网络优化问题研究提供方法参考和决策支持。Zhou 等^[14] 针对带时间窗的电动车取送货问题引入队列因素，说明车辆在作业点或充电站的等待会改变路径成本和到达时间，不能只依据静态行驶距离评价方案优劣。Zhao 等^[15] 面向拥堵路网构建时间依赖车辆路径模型，进一步说明同一节点对之间的通行时间会随出发时刻和道路状态变化。这些研究为本文采用分时路网时间—距离矩阵提供了依据。

综合已有成果可以发现，在车辆路径优化问题中，同时取送、时间依赖和服务时限均已形成较丰富的研究积累，但三者在城市快递午班回场场景中的结合仍有进一步细化空间：1. 部分研究以客户时间窗为主，较少突出所有车辆统一返回配送中心的作业周期约束；2. 同时取送货模型虽关注容量变化，若不进行逐节点载荷传播，难识别服务顺序导致的瞬时超载；3. 静态距离或平均速度评价难以揭示拥堵时段下的晚归风险。基于此，本文将分时拥堵矩阵、同时取送载荷演化和返回时限约束整合，并通过静态方案动态复算验证分时建模的必要性。

二、数学模型及求解

（一）问题描述与基本假设

本文研究单配送中心条件下，考虑午班配送分时通行状态的多卡车同时取送路径规划问题。车辆从配送中心出发，按确定顺序访问被分配客户，在每个客户点同时完成投递和取货服务，然后返回配送中心。所有车辆为同质车辆，容量、固定使用成本和单位距离成本相同。客户需求在计划阶段已知，且每个客户只能由一辆车服务一次，不允许拆分配送或拆分取货。

为刻画城市午后道路通行状态变化，将配送周期划分为若干连续时段。车辆从节点 i 驶向节点 j 时，其通行时间和行驶距离由车辆离开节点 i 的时刻决定。若离开时刻落入时段 p ，则调用该时段对应的路网时间—距离矩阵；车辆进入弧段后不再在弧段内部重新划分时段。

该问题需同时决定车辆是否启用、客户分配关系、每辆车的客户访问顺序、车辆在各节点的到达和离开时刻，以及车辆服务

过程中的剩余配送量和累计取货量。优化目标是在满足客户唯一服务、车辆容量、路径连续、分时时间传播和返回时限约束的前提下，使总运营成本最小。

为保证模型边界清晰，本文作如下假设：

(1) 系统仅包含1个配送中心和多辆同质卡车，均从配送中心出发，并最终返回配送中心。

(2) 客户需求在计划阶段已知，配送量和取货量不可拆分。

(3) 客户服务时间与节点需求规模相关，车辆到达客户后必须完成该节点全部服务。

(4) 为刻画午班配送过程中的分时通行状态，将14:00—17:00划分成连续时间阶段，以30分钟为间隔构建对应的通行时间和路网距离矩阵。各时间阶段的边界在模型求解前已知，边界时刻统一划入后一时间阶段。

(5) 不考虑车辆途中等待、充电、司机换班和临时订单插入。

(二) 符号说明

本文集合、参数、变量具体含义如表1所示：

表1：符号说明

集合	含义	集合	含义
N	客户点集合： $\{1, 2, \dots, n\}$	K	车辆集合
V	节点集合： $\{0\} \cup N$	P	分时阶段集合
参数	含义	参数	含义
Q	车辆容量	l_{ij}^p	时段 p 下节点 i 到节点 j 的路网距离
F	单车固定成本	t_{ij}^p	时段 p 下节点 i 到节点 j 的通行时间
c	单位距离成本	d_i	客户 i 的配送量
$T_{\max}$	最大作业时长	q_i	客户 i 的取货量
s_i	服务时间		
变量	含义	变量	含义
x_{ij}^k	车辆 k 是否从 i 直接行驶至 j	a_i^k	车辆 k 到达节点 i 的时刻
u_k	车辆 k 是否启用	b_i^k	车辆 k 离开节点 i 的时刻
y_i^k	客户 i 是否由车辆 k 服务	D_i^k	离开节点 i 后的剩余配送量
z_{ijp}^k	车辆 k 在时段 p 离开 i 经弧 (i, j)	R_i^k	离开节点 i 后的累计取货量

(三) 模型构建

1. 目标函数

模型目标为最小化总成本：

$$\min Z = c \sum_{k \in K} \sum_{ij} l_{ij}^p z_{ijp}^k + F \sum_{k \in K} u_k \quad (1)$$

第一项为分时路网距离产生的运输成本，按照高德地图 API 在不同阶段返回的实际路径距离计取第二项为车辆启用成本。

2. 路由约束

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k = u_k, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i0}^k = u_k, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^k = y_i^k, \forall i \in N, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ji}^k = y_i^k, \forall i \in N, k \in K \quad (6)$$

$$x_{ii}^k = 0 \quad (7)$$

上述约束分别是：客户唯一服务约束；车辆出发与返回约束；客户节点流守恒约束以及禁止自环约束。

3. 时间约束

$$\sum_{p \in P} z_{ijp}^k = x_{ij}^k, i \in V, j \in V, k \in K \quad (8)$$

$$a_j^k \geq b_i^k + t_{ij}^p - M(1 - z_{ijp}^k), i \in V, j \in V, k \in K, p \in P \quad (9)$$

$$b_i^k = a_i^k + s_i, i \in V, k \in K \quad (10)$$

$$T_{\max} \leq 180 \quad (11)$$

式为分时时段匹配约束；若车辆 k 离开节点 i 时处于时段 p，则通过大 M 约束限定 b_i^k 落入该时段边界，并由约束实现时间传播。客户服务关系由描述，配送中心出发时刻设为 0，车辆返回配送中心的到达时刻需满足约束。

4. 载荷与容量约束

$$D_i^k + R_i^k \leq Q, i \in V, k \in K \quad (12)$$

$$D_i^k \geq 0, R_i^k \geq 0, i \in V, k \in K \quad (13)$$

$$q_j^k \geq q_i^k - d_j - M(1 - x_{ij}^k), \forall i \in V, j \in V, i \neq j, k \in K \quad (14)$$

$$q_j^k \leq q_i^k - d_j + M(1 - x_{ij}^k), \forall i \in V, j \in V, i \neq j, k \in K \quad (15)$$

载荷约束体现同时取送特征，车辆出发时装载本路径全部配送货物，服务客户后剩余配送量减少 d_i ，累计取货量增加 q_i 。任一路径执行过程中需满足。约束为载重变量的非负性约束。约束和为剩余配送量的流量守恒约束，刻画车辆行驶过程中剩余配送量的动态变化。

三、算法描述与实验

(一) 算法描述

1. 两阶段启发式算法设计

本文采用两阶段启发式算法。第一阶段构造初始可行解：初始化所有车辆为空路径，将未分配客户按成本增量最小且满足容量和返回时限的位置插入。若客户无法插入现有路径，则尝试启用空闲车辆。该策略避免单纯最近邻方法忽视载荷峰值和返回时限的问题。

第二阶段采用改进模拟退火搜索。候选解以多车辆路径序列表示，邻域算子包括单点重置、两点交换、路径内逆序和块交

换。每次扰动后重新进行客户唯一性检查、分时时间传播、载荷演化和返回时限判定。若候选解可行且优于当前解，则直接接受；若成本较高，则按模拟退火概率接受，以增强跳出局部最优的能力。禁忌表记录近期弧段变动，抑制搜索在相近解之间往返。

考虑到同时取送路径中容量约束会显著影响客户组合，动态求解阶段增加一个90%容量辅助搜索。该辅助搜索只用于产生结构差异更大的候选路径，所有候选最终仍按基准容量和基准成本函数重新评价并择优。

2. 评价函数

路径评价函数是算法的关键。对给定车辆路径，首先统计该路径所有客户的配送量，作为车辆出发时的初始配送载荷；随后按访问顺序逐点减配送量、加取货量，并记录最大载荷。若最大载荷超过Q，则该路径立即判为不可行。容量可行后，再从0分钟开始进行时间传播：车辆离开当前节点时，根据已累计作业时间判断所属时段，调用该时段的通行时间和距离，计算到达下一节点的时刻，并加入客户服务时间。路径最终返回配送中心的时刻若超过 T_{max} ，则判为时间不可行。

3. 初始解构造

初始解构造是在所有未分配客户和所有可插入位置中，寻找可行且成本增量较小的插入操作。评价指标依次考虑成本增量、作业时间、最大有效载荷和当前路径客户数。该策略可以在较短时间内得到满足容量和返回时限的初始解，为后续模拟退火提供稳定起点。

4. 改进模拟退火算法

邻域设计兼顾客户分配调整和路径内部顺序优化。单点重置可将客户从一条路径移动到另一条路径，适合改善车辆间负载不均；两点交换可以在两条路径之间互换客户，适合修复局部绕行；路径内逆序主要减少同一路径内部折返；块交换一次调整连续客户片段，有助于识别空间上成组但被分散服务的客户。多种邻域交替使用能够提高搜索覆盖面。

模拟退火接受准则允许算法在高温阶段以一定概率接受成本较高但可行的候选解，从而避免过早陷入局部最优。禁忌记忆记录近期被删除和新增的弧段，短期内限制反向操作，减少无效往返。降温结束后，算法再执行确定性重定位强化，即枚举单个客户在不同路径中的可行插入位置，若发现成本下降则接受。该强化步骤用于消除随机搜索结束后仍存在的明显局部可改进结构。

算法终止后并不直接采用搜索过程中名义成本最低的方案，而是统一调用动态矩阵和基准参数进行复算。复算内容包括客户覆盖、车辆数、每条路径的最大有效载荷、各弧段所属时段、返回时刻以及总成本。这样处理可以避免辅助搜索或静态搜索口径与最终评价口径不一致的问题。对于不可行候选解，算法不采用罚函数强行保留，而是直接拒绝或通过重定位方式修复，保证输出结果便于解释。

表2：改进模拟退火算法流程

步骤	操作
1	读取客户、参数和分时时间—距离矩阵，构造问题实例

2	采用插入式构造启发式生成满足容量与返回时限的初始解
3	设置初始温度、终止温度、降温系数、迭代次数和禁忌长度
4	随机选择单点重置、两点交换、路径内逆序或块交换生成候选解
5	对候选解执行客户唯一性、容量、时间传播和返回时限检查
6	依据模拟退火准则与禁忌准则判断是否接受候选解
7	温度递减并重复搜索，最后执行确定性重定位强化
8	对候选池内所有方案按基准模型复算，输出成本最低可行方案

(二) 算例设计

考虑真实道路环境，本文构造仿真算例 TD-SPDP-50。算例包含1个配送中心和50个客户节点，节点空间位置来自某城市快递服务网络。

通过高德地图 API 获取不同出发时段下节点对之间的路径规划结果，形成各时间阶段对应的通行时间矩阵与路网距离矩阵。以14:00为起点，将配送周期划分为14:00、14:30、15:00、15:30、16:00、16:30和17:00七个出发时段，分别获取任意节点对之间的通行时间和路网距离。由此形成 $51 \times 51 \times 7$ 的分时矩阵，能够反映同一节点对在不同时段出发时通行时间变化的影响。

客户需求采用 Solomon 车辆路径基准的实验设计思想仿真生成。Solomon 实例包含固定客户规模、可控需求分布和可复现实验参数，但其原始数据主要面向欧氏距离和时间窗配送问题，不能直接表示真实城市路网分时通行和同时取送需求。因此，本文采用真实路网节点上依据 Solomon 式基准构造思想，以固定随机种子生成配送量、取货量和服务时间。

基础参数如表所示：

表3：参数设置

参数	取值	说明
客户数	50	服务节点仿真客户数量
车辆容量 Q	1500 kg	单车最大有效载重
固定成本 F	137 元 / 车次	启用一辆车产生的固定成本
距离成本 c	1.25 元 / km	单位路网距离运输成本
返回时限 T_{max}	180 min	14:00起算，要求17:00前回场

(三) 求解与结果分析

1. 算例求解

基准实验比较三类方案：构造启发式初始方案、静态平均速度优化方案和动态拥堵优化方案。静态方案在求解时使用各时段平均距离和全局平均速度，求解完成后用动态分时矩阵复算。三类方案对比见表4。

表4：三类方案求解结果对比

方案	可行	车辆	成本 / 元	距离 / km	最晚返回 / min	返回时刻	装载率
初始方案	是	7	1289.99	264.79	178.31	16:58:19	70.48%
静态方案	否	7	1292.13	266.50	189.43	17:09:26	69.35%
动态方案	是	7	1275.99	253.59	177.78	16:57:47	71.09%

由表4可知，静态平均速度优化方案在静态求解口径下具有较低作业时间，但按动态矩阵复算后最晚返回17:09:26，超过17:00返回要求，说明忽略分时拥堵会导致路径执行风险。而动态拥堵优化方案在降低成本的同时均满足客户唯一服务、容量和返回时限。

2. 优化结果

表5: 动态拥堵优化方案路线明细

车号	路径	客户数	成本 / 元	距离 / km	返回时刻	MEL/kg
1	0->7->3->1->2->5->6->4->42->43->0	9	165.43	22.74	16:45:33	1312.80
2	0->24->20->19->18->34->33->32->31->0	8	172.56	28.45	16:43:26	1260.60
3	0->41->23->40->16->48->49->21->30->0	8	175.19	30.56	16:53:34	1278.60
4	0->35->37->38->39->12->13->15->36->0	8	178.08	32.87	16:37:16	1177.50
5	0->17->46->44->45->26->47->0	6	183.12	36.89	16:50:54	946.20
6	0->29->8->27->28->25->22->0	6	183.49	37.19	16:52:44	867.50
7	0->14->10->9->11->50->0	5	218.12	64.90	16:57:47	621.50

从路线结构看，动态方案将距离较近、载荷互补且返回时刻可控的客户组合在同一车辆路径中，并避免在拥堵时段形成过长尾部路径。路线明细见表5，空间分布见图1。图中不同颜色表示不同车辆路径，节点编号表示客户服务点，配送中心位于网络中心附近。

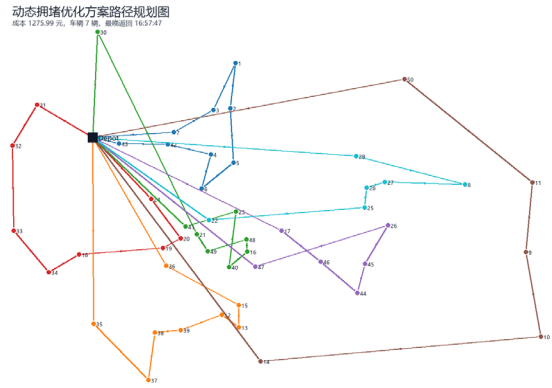


图1: 动态拥堵优化方案路径规划图

对比三类方案可以得出，启发式初始方案已经能够满足基本约束，但总距离高于动态优化方案；静态平均速度方案在规划阶段倾向于压缩车辆数和合并部分路径，表面可在179.93min内完成，但动态复算后得到部分车辆在实际分时段下返回时刻推迟，最晚达到17:09:26；动态方案虽仍使用7辆车，但通过调整客户组合与访问顺序，降低总距离至253.59km，并把最晚返回控制在规定时限。

动态方案的优势除了降低总成本，更体现在提升约束可靠性。对于有返回时限的配送场景，静态方案虽成本接近动态方案，但存在超时返回车辆。动态复算机制能在搜索过程中提前识别超时路径，并引导算法将客户重新分配给更合适的车辆组合中。

静态方案超时不是因为客户总量超过车辆能力，而是部分路径在后续时段进入交通状态较差的弧段，低估了实际通行时间。

动态方案则通过调整访问顺序，避开长距离弧段和服务时间较长的节点组合，同时重新平衡客户数量和载荷峰值。这说明，在具有统一返回时限的配送任务中，路径评价的时间一致性比单次距离优化更重要。

四、敏感性分析

为检验关键参数对模型结果的影响，分别对车辆容量（ $\pm 10\%, \pm 20\%$ ）、固定出车成本（ $\pm 25\%, \pm 50\%$ ）、单位距离成本（ $\pm 25\%, \pm 50\%$ ）、返回时限（ $\pm 5\%, \pm 10\%$ ）和拥堵强度（ $\pm 7.5\%, \pm 15\%$ ）进行敏感性分析。每次仅改变一个参数，其余参数保持基准值。拥堵强度系数用于同比例放大或缩小分时通行时间，距离矩阵保持不变。主要结果见表6。

表6: 敏感性分析结果汇总

因素	水平	成本 / 元	车辆	距离 / km	最晚返回
车辆容量	1200	1438.02	8	273.61	16:58:10
	1350	1275.99	7	253.59	16:57:47
	1500(基准)	1275.99	7	253.59	16:57:47
	1650	1275.99	7	253.59	16:57:47
	1800	1275.99	7	253.59	16:57:47
固定成本	68.5	796.49	7	253.59	16:57:47
	102.75	1036.24	7	253.59	16:57:47
	137(基准)	1275.99	7	253.59	16:57:47
	171.25	1515.74	7	253.59	16:57:47
	205.5	1755.49	7	253.59	16:57:47
距离成本	0.625	1117.50	7	253.59	16:57:47
	0.9375	1196.74	7	253.59	16:57:47
	1.25(基准)	1275.99	7	253.59	16:57:47
	1.5625	1355.24	7	253.59	16:57:47
	1.875	1434.49	7	253.59	16:57:47
返回时限	150	1601.72	9	294.98	16:28:39
	165	1450.66	8	283.73	16:43:46
	180(基准)	1275.99	7	253.59	16:57:47
	195	1275.99	7	253.59	16:57:47
	210	1106.58	6	227.66	17:25:23
拥堵强度	0.85	1108.96	6	229.57	16:59:35
	0.925	1275.32	7	253.06	16:56:58
	1.00(基准)	1275.99	7	253.59	16:57:47
	1.075	1459.24	8	290.59	16:56:01
	1.15	1453.01	8	285.60	16:59:35

从车辆容量看，容量降至1200kg时，模型需8辆车才能保持容量和返回时限可行，且总成本上升；当容量为1350kg及以上时，基准路径已能满足载荷要求，继续放宽容量对成本影响有限。返回时限对车辆数和成本影响更明显， T_{max} 为150min时需9辆车，总成本1601.73元； T_{max} 放宽至210min时可用6辆车完成任务，总成本降至1106.58元。

固定成本和单位距离成本主要改变目标函数数值。在本算例中，基准路径结构对这两类成本变化较稳定，说明返回时限与容量约束是决定车辆组合的主要因素。拥堵强度分析显示，当通行时间缩短15%时可使用6辆车；当拥堵强度增大7.5%或15%时，需8辆车或更分散的路径组合以保证按时回场。该结果进一步说明

分时拥堵对车辆数量、路径长度和返回时刻均具有实质影响。

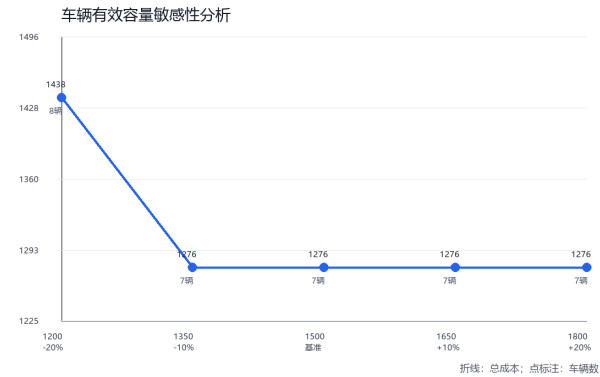


图2: 车辆容量敏感性分析

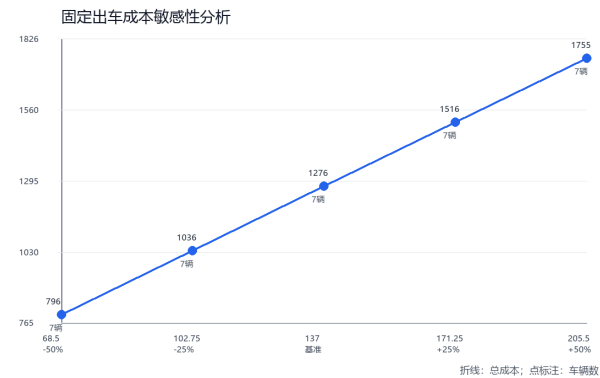


图3: 固定出车成本敏感性分析

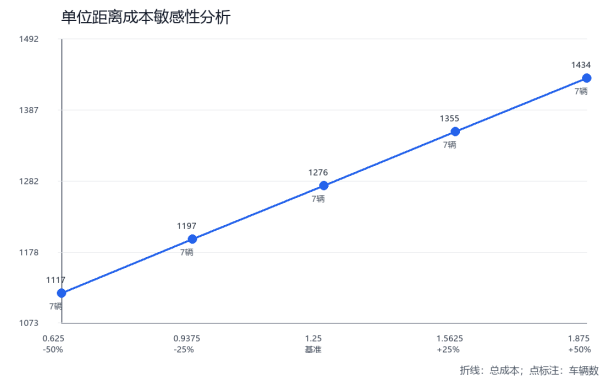


图4: 单位距离成本敏感性分析

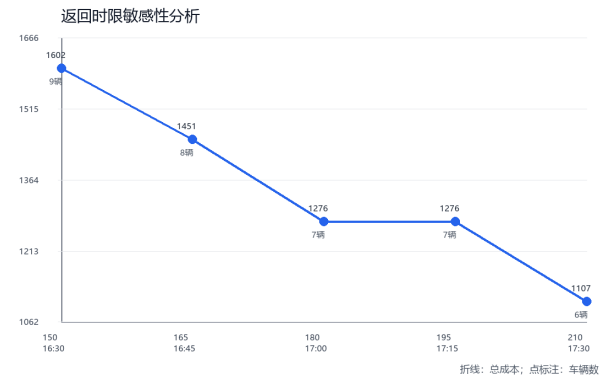


图5: 返回时限敏感性分析

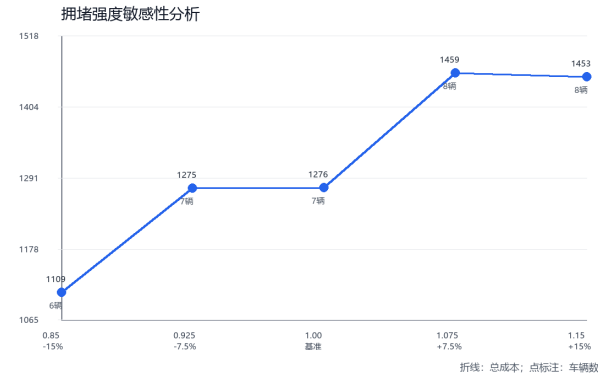


图6: 拥堵强度敏感性分析

由图2可知，容量从1200kg 提升到1350kg 后成本明显下降，因此较小容量会使算法拆分客户集合并启用更多车辆；容量放宽后，路径结构受返回时限约束限制，成本不再明显降低。图3和图4呈现近似线性变化，这是因为在对应参数水平下车辆组合未发生明显改变，成本变化主要由固定成本或距离成本系数直接放大。图5显示返回时限越宽松，车辆合并空间越大，成本随之降低。图6表明拥堵强度并非只改变作业时间，也会通过可行性筛选影响车辆数和路径距离。

在运营管理中，若降低车辆使用数量，单纯提高容量可能无效，应结合回场时限和拥堵时段进行综合调度。在实际业务中，放宽回场时限可能影响后续分拣处理，因此企业需要在运输成本与站内作业衔接之间权衡。

五、结束语

本文针对城市快递末端配送中同时投递与取货、道路分时拥堵和车辆回场时限并存的作业特点，建立了考虑分时拥堵与返回时限的多车辆同时取送路径优化模型。模型以固定出车成本和分时路网距离成本之和最小为目标，综合考虑客户唯一服务、路径连续、容量限制、分时时间传播和最大作业时长约束。

基于真实路网时间—距离矩阵和 Solomon 数据集仿真客户需求，构造了 TD-SPDP-50 算例。实验结果表明，静态平均速度方案动态复算后最晚返回 17:09:26，违反返回时限；动态拥堵优化方案以 1275.99 元总成本、7 辆车和 16:57:47 最晚返回时刻获得可执行路径。敏感性分析显示，返回时限、车辆容量和拥堵强度是影响车辆数量和总成本的关键因素。

综上，本文得出在同时取送和固定回场约束并存的场景下，真实路网分时矩阵具备研究价值。虽然客户数量不大，但静态平均速度模型仍可能得到不可执行路线。将分时时间传播纳入启发式搜索过程，可以在不显著增加模型复杂度的情况下提高路径方案的稳健性和现实可用性。

参考文献

- [1] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, 6(1): 80–91.
- [2] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254–265.
- [3] MIN H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points[J]. Transportation Research Part A: General, 1989, 23(5): 377–386.
- [4] COKYASAR T, SUBRAMANYAM A, LARSON J, et al. Time-constrained capacitated vehicle routing problem in urban e-commerce delivery[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(2): 190–203.
- [5] 范厚明, 甘兰, 陈天磊, 等. 时变路网及区域限时禁飞下车辆-无人机同时取送货路径问题 [J]. 系统管理学报, 2025, 34(1): 50–67.
- [6] PRAXEDES A, BULHÕES T, SUBRAMANIAN A, et al. A unified exact approach for a broad class of vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery[J]. Computers & Operations Research, 2024, 162: 106467.
- [7] 郭放, 黄志红, 黄卫来. 考虑前置仓选址与服务策略的同时取送货车辆路径问题研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 962–978.
- [8] 吴腾宇, 张景露, 余海燕. 非对称网络下的在线取送货路径优化问题 [J]. 中国管理科学, 2023, 31(9): 214–221.
- [9] HU Y, LIU J, LI Y, et al. Disruption recovery for pickup and delivery problem with time windows: A scenario-based approach for online food delivery[J]. Computers & Operations Research, 2023, 157: 106282.
- [10] 孙欣蕊, 李昆鹏, 刘腾博. 考虑订单取件时间和柔性时间窗的取送货车辆路径问题 [J]. 运筹与管理, 2022, 31(7): 9–16.
- [11] ZHOU G, LI D, BIAN J, et al. Two-echelon time-dependent vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and satellite synchronization[J]. Computers & Operations Research, 2024, 167: 106600.
- [12] 丁秋雷, 刘目康, 胡祥培, 等. 时间窗变动下生鲜品同时取送车辆路径问题的干扰管理方法 [J]. 运筹与管理, 2025, 34 (9): 61–69.
- [13] 王勇, 罗思好, 周雪, 等. 多中心共同配送开闭混合式的车辆路径优化问题 [J]. 系统管理学报, 2023, 32(2): 215–232.
- [14] ZHOU S, ZHANG D, YUAN W, et al. Pickup and delivery problem with electric vehicles and time windows considering queues[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 167: 104829.
- [15] ZHAO F, SI B, WEI Z, et al. Time-dependent vehicle routing problem of perishable product delivery considering the differences among paths on the congested road[J]. Operational Research, 2023, 23(1): 1–23.