



控制与决策

CONTROL AND DECISION



考虑交付期限的订单配送策略

高展, 姜艳萍

引用本文:

高展, 姜艳萍. 考虑交付期限的订单配送策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2089–2096.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1545>

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>

[基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题](#)

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

[PI补充策略下供应链牛鞭效应的 \$H_{\infty}\$ 控制](#)

Reducing bullwhip effect in supply chain with PI replenishment rule via H_{∞} control

控制与决策. 2021, 36(11): 2817–2824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0441>

[需求波动下考虑乘运供应能力的网约车平台动态定价](#)

Dynamic pricing for ride-hailing platform with demand fluctuation and supply capacity

控制与决策. 2021, 36(6): 1499–1508 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0881>

[考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题](#)

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

考虑交付期限的订单配送策略

高展, 姜艳萍[†]

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110167)

摘要: 近年来, 一种新兴的高效同城配送服务模式迅速发展, 即针对随机到达的订单实现当天从点到点送货上门具有交付期限的订单配送服务. 针对具有交付期限的、随机到达的订单配送问题, 考虑平台可通过自有车辆服务订单, 同时也可委托第 3 方物流服务订单的特点, 提出一种决定是否接受该订单和确定车辆服务订单集合的订单配送策略. 首先, 以平台的运营成本最小为目标, 建立订单配送的马尔可夫决策模型; 然后, 分析最优策略的性质; 最后, 与 FCFS 策略和按时交付策略进行对比分析. 实验结果表明: 所提出订单配送策略相比于 FCFS 策略与按时交付策略, 不仅能够降低平台的总运营成本, 且能够提高顾客满意度, 保证服务质量, 并通过数值分析验证了所建立的模型和求解算法的有效性.

关键词: 订单配送; 马尔可夫决策过程; 交付期限; 配送策略

中图分类号: F719; F252; F713.36 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1545

引用格式: 高展, 姜艳萍. 考虑交付期限的订单配送策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 2089-2096.

Requests dispatch strategy with delivery constraints

GAO Zhan, JIANG Yan-ping[†]

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China)

Abstract: In recent years, a new efficient delivery service mode in city area has developed rapidly, that is, to realize the requests delivery service with delivery constraints from point to point on the same day for stochastic requests. Aiming at the requests delivery problem with delivery constraints and stochastic, considering the features that the platform can either accept the requests of its vehicle or entrust the requests of the third-party logistics, a requests dispatch strategy is proposed to decide whether to accept the requests and determine the vehicle service requests set. A Markov decision model for requests delivery is established to minimize the operating cost of the platform. Then, the properties of the optimal strategy are analyzed. Finally, the results show that compared with the FCFS strategy and on-time delivery strategy, the order distribution strategy proposed can reduce the total operating cost of the platform and improve customer satisfaction and ensure service quality. The effectiveness of the model and algorithm is verified by a set of numerical analyses.

Keywords: requests dispatch; Markov decision process; delivery constraints; dispatch strategy

0 引言

近年来, 随着以盒马鲜生、永辉云创等为代表的新零售企业的快速发展, 消费者对线下物流体验提出了更高的要求, 具有交付期限的订单配送服务作为一种新型的同城物流配送服务模式应运而生^[1-3]. 具有交付期限的订单配送服务是一种针对随机到达的订单实现当天从点到点送货上门的新兴的高效同城配送服务的统称. 这种订单配送服务模式根据配送主体可分为自有车辆配送、第 3 方物流配送和自有车辆协同第 3 方物流配送. 第 3 种配送模式能够结合前两种配送模式的优点, 保证服务质量的同时降低配送成

本, 因此, 众多企业均采用第 3 种配送模式. 如美团配送模式中的“混合送模式”是由专职骑手和兼职骑手混合配送, 在这种配送模式下, 订单主要是由专职骑手配送, 但是, 为了保证在交付期限内完成订单配送, 平台会将部分订单分配给兼职骑手进行配送. 顾客在新零售企业的线上自有平台选择商品下单, 在支付界面可选择交付期限(一般为 30 min、60 min、120 min 等), 平台根据选择的交付期限进行订单配送, 即确定是否接受订单以及由自有车辆配送的车辆服务订单集合, 线下门店按照确定的车辆服务订单集合将顾客在线上下单的商品送货上门. 对于这种具有交付期

收稿日期: 2022-08-30; 录用日期: 2023-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871048).

责任编委: 霍宝锋.

[†]通讯作者. E-mail: ypjiang@mail.neu.edu.cn.

限的订单配送问题,若新订单到达车辆直接出发进行配送,则能够增加订单按时交付的可能性,提高顾客满意度,但是,由于在配送期间可能会错过服务潜在订单的机会致使总成本增加;若车辆不立即出发配送,在门店继续等待新的订单到达,则能够增加单次配送订单数量,从而降低订单配送边际成本,但是,可能超出已知订单的交付期限配送致使产生惩罚成本。因此,考虑订单随机到达、具有交付期限要求的订单配送问题是一个值得研究的课题。

具有交付期限的订单配送问题是近几年比较热门的研究课题,已引起了国内外许多学者的关注^[4],根据时态不同,订单配送问题可分为静态车辆路径问题和动态车辆路径问题。针对前一类问题的研究主要包括:Zhen等^[5]针对多仓库问题,研究了一个具有时间窗和订单到达日期的多行程车辆路径问题,构建了以总行程时间最小化的混合整数规划模型;相同地,Li等^[6]针对大型家电零售公司的第3方物流,研究了考虑订单到达日期和提供服务的带有时间窗的车辆路径问题,提出了自适应大邻域搜索算法进行求解;Li等^[7]在车辆和无人机协同配送情形下,构建了配送成本最小化的带有时间窗的两阶段车辆路径模型;Soysal等^[8]提出了随机电池损耗下电动汽车取送货问题的混合整数非线性规划模型;Song等^[9]研究了在冷链物流系统中,考虑时间窗、异质车辆以及车辆不同能耗的车辆路径问题,通过人工鱼群算法考虑不同车辆类型的特征,最后通过插入启发式方法进行求解。针对第2类问题的研究,根据是否考虑时间窗可分为不考虑时间窗的动态车辆路径问题和考虑时间窗的动态车辆路径问题。不考虑时间窗的动态车辆路径问题的研究主要包括:Klapp等^[10]通过构造动态调度波来研究当日交付系统,构建了动态规划模型,提出了一种求解确定性变量的有效动态规划方法求解模型;在此基础上,Klapp等^[11]考虑了顾客位置为网络状分布情况下的动态调度波问题,构建动态规划模型并设计了局部搜索启发式算法来求解模型;Ulmer^[12-13]针对当日达服务中的动态车辆路径问题,分别考虑了包裹取件站与自动驾驶车辆相结合、无人机与常规配送车辆相结合的动态规划问题;王征等^[14]针对当日达服务问题,建立了基于多预测场景的在线优化调度方法;Pan等^[15]研究了一个考虑时变的行程时间的多行程车辆路径问题,构建了总行程距离最小化的混合整数线性规划模型;Ulmer等^[16]研究了一个工作时间有限情况下,车辆满足服务区域内的取送包裹的动态车辆路径问题,构建了总服务订单

数量最大化的动态规划模型。考虑时间窗的动态车辆路径问题的研究主要包括:Voccia等^[17]考虑一个硬时间窗下的多车动态取货和配送问题,构建了以服务订单数量最大化为目标的动态规划模型;Ulmer等^[18]针对餐厅送餐服务问题,考虑一个具有时间约束的动态取货和送货问题,应用可参数化成本函数近似得出了最优订单分配决策;Ulmer^[19]针对带有送货期限的当日达问题,构建了一种预期定价和车辆路径策略的马尔可夫决策过程,提出了一种基于状态空间聚合的值函数近似方法进行求解;周林等^[20]基于现实场景中存在的自提、带时间窗的送货上门和柔性服务需求,提出了多元个性化需求驱动的选址-路径问题;杨华龙等^[21]针对众包同城配送司机与包裹匹配的问题,提出了一种由零售店作为包裹送取或中转节点、私家车司机顺路捎带的配送策略,以平台总收益最大化为目标,构建了允许中转和绕行的众包同城配送司机与包裹匹配问题的混合整数规划模型,并设计了改进的自适应大邻域搜索算法进行模型求解;李楠等^[22]针对模糊需求下多时间窗车辆路径问题,以最小化总成本为优化目标,构建了基于模糊可信性理论的模糊机会约束规划模型。

上述文献对具有交付期限的订单配送问题进行了深入研究,但是,关于带有交付期限的服务订单配送问题研究大多为静态车辆路径问题研究和不考虑时间窗的动态车辆路径问题研究,仍然存在一些值得进一步研究的问题。如虽然有零星文献研究了带有交付期限的动态车辆路径问题,但是,以往研究很少考虑订单到达时间分布不均匀情形下的订单配送问题,进一步地,以往关于动态车辆路径问题的研究成果大多数考虑的触发决策时间点是新订单到达时或是等长的时间间隔。如Ulmer^[19]等考虑的触发决策时间点为新订单到达时;Klapp等^[10-11]、王征等^[14]将一天划分为若干个时长相等的决策期。前一种方式忽视了在低谷时段可能没有订单到达导致车辆等待时间过长的情形,后一种方式忽视了订单到达时间分布不均匀导致各决策期的订单数量相差较多,从而可能造成决策期内订单积压的情形。因此,本文考虑的触发决策时间点为新订单到达时和车辆等待时间达到阈值时。本文针对新零售中线下门店随机到达的带有交付期限的订单,考虑订单配送服务中车辆配送的路径成本、超出交付期限的惩罚成本以及委托第3方物流配送成本,以平台的运营成本最小作为决策目标,建立订单配送的马尔可夫决策过程模型,给出该问题的最优配送策略。

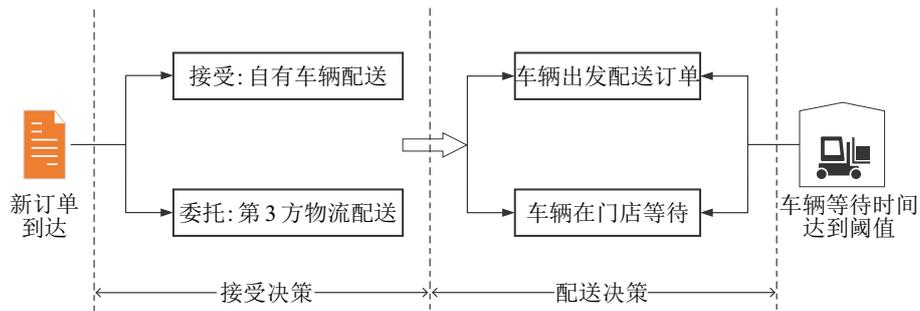


图1 订单配送决策

1 订单配送模型

1.1 问题描述

本文考虑的在一天(一个工作日)内订单配送决策问题如图1所示. 平台所做决策为接受决策和配送决策.

平台所做的接受决策即决定是接受订单由自有车辆配送还是委托第3方物流配送. 若平台决定接受订单, 则该订单将由潜在订单集合转入待服务订单集合中, 等待车辆提供服务; 否则, 平台将委托第3方物流配送, 该订单将会转入已完成订单集合中, 由第3方物流向顾客提供服务.

平台所做的配送决策是指根据待服务订单信息, 从待服务订单集合中选择车辆出发配送订单集合, 即车辆服务订单集合. 若车辆服务订单集合为空集, 即表示车辆在该时段不服务订单, 在线下门店等待, 则此时待服务订单集合和已完成订单集合保持原有状态; 若车辆服务订单集合不为空集, 即表示车辆需从线下门店出发配送订单, 则此时车辆服务订单集合中的订单将从待服务订单集合转入已完成订单集合中.

新订单到达触发平台做出接受决策和配送决策, 没有新订单到达但是车辆等待时间达到阈值触发平台做出配送决策.

若平台决定接受订单由自有车辆配送, 则会产生路径成本; 同时, 由于交付期限的存在, 若超出最晚交付时间配送, 则将会产生惩罚成本. 若平台决定委托第3方物流配送, 则会产生委托第3方物流配送成本, 此时订单由第3方物流进行配送, 因此, 可认为平台不再付出路径成本和惩罚成本.

1.2 模型假设和符号设定

根据本文所研究问题的特点, 给出如下模型基本假设.

- 1) 车辆行驶速度恒定;
- 2) 车辆一天开始时从门店出发, 一天结束后必须回到门店;
- 3) 车辆在服务完车上装载的所有订单后返回门店.

店.

模型中的符号说明如下.

T : 车辆的截止工作时间;

K : 决策期数, 每个决策期 k 至多有 1 个订单到达, $k=1, 2, \dots, K$;

t_k : k 时期的当前时间;

N : 全部订单集合;

R_k : k 时期的待服务订单集合;

P_k : k 时期的潜在订单集合, 显然 $\{(R_k, P_k) : R_k \cup P_k \subseteq N, R_k \cap P_k = \emptyset\}$, 表示待服务集合 R_k 与潜在订单集合 P_k 互不相交;

C : 已完成订单集合, 包括不在 R_k 集合或 P_k 集合中的订单视为已完成订单和委托第3方物流配送订单;

τ_i : 订单 i 的到达时间, 其中 $i \in N$, 若 $\tau_i \leq t_k$, 则订单 i 为已知订单;

h_i : 订单 i 的交付期限;

l_i : 订单 i 的最晚交付时间, 满足 $l_i = \tau_i + h_i$;

d_i : 配送订单 i 的行驶时间;

η : 允许车辆等待最大时间;

p : 单位委托第3方物流配送成本;

α : 车辆的单位路径成本;

β : 超出最晚交付时间配送的单位惩罚成本.

1.3 考虑订单交付期限的订单配送模型

考虑一个配送服务具有交付期限的新零售线上平台, 为了有效降低平台的总运营成本, 平台需要在一天工作中实时动态决策带有交付期限的随机到达的订单配送, 即决定是否接受订单以及每个决策期的车辆服务订单集合, 使得平台期望总运营成本最小化.

为了便于分析, 将一天分为 K 个足够短的决策时期, 每个时期 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 上至多有 1 个订单到达, 该问题可描述为一个含有 K 个时间段的有限离散时期的马尔可夫决策过程. 平台可做决策为 (X_k^i, O_k) . 其中: $X_k^i \in \{0, 1\}$ 为 0-1 变量, 若在 k 时期,

订单 i 由自有车辆提供订单配送服务, 则 $X_k^i = 1$, 否则为 0; O_k 为车辆服务订单集合, 表示在每个决策期平台的自有车辆需要服务的订单集合.

1) 系统状态. 在每个决策期, 平台需要确定待服务订单集合以及潜在订单集合. 定义系统状态空间集合为 (t_k, R_k, P_k) , $\tau_i \leq t_k$ 表示订单 i 的到达时间早于当前时间, 即订单 i 为已知订单, 因此, $R_k = \{i \in N : \tau_i \leq t_k, X_k^i = 1\}$ 为待服务订单集合; 同理, $P_k = \{i \in N : \tau_i > t_k\}$ 为潜在订单集合.

2) 行动. 当系统状态变化时, 平台需要做出决策. 根据系统状态变化的原因对可能的操作进行如下分类.

① 新的订单 i 随机到达. 当新的订单 i 随机到达时, 平台决定接受该订单 i 或委托第 3 方物流配送该订单 i , 平台同时决定车辆服务订单集合 $O_k \subseteq R_k$, 即平台可能的行动如下:

a) 接受新订单 i , 同时决定车辆出发配送服务订单. 此时, 平台将会产生路径成本以及可能超出最晚交付时间配送的惩罚成本.

b) 接受订单 i , 但是车辆等待. 此时平台不会产生成本.

c) 委托订单 i 由第 3 方物流配送, 同时决定车辆出发配送服务订单. 此时, 平台将会产生委托第 3 方物流配送成本、路径成本以及可能超出最晚交付时间配送的惩罚成本.

d) 委托订单 i 由第 3 方物流配送, 同时车辆等待. 此时, 平台将会产生委托第 3 方物流配送成本.

因此, 当新的订单 i 随机到达时的行动集可表示为

$$\varphi_k(X_k^i, O_k) = \{X_k^i \in \{0, 1\}, \{O_k \subseteq R_k : 2d_k^* \leq T - t_k\}\}. \quad (1)$$

其中: $d_k^* = \max_{j \in O_k} d_j$; $2d_k^*$ 为车辆服务订单集合所需配送时间, 约束 $2d_k^* \leq T - t_k$ 保证车辆在截至工作时间结束前回到门店.

② 车辆在线下门店等待时间达到阈值 η . 当车辆在门店等待时间达到阈值 η 时, 平台决定车辆服务订单集合 O_k , 即平台可能的行动如下:

a) 车辆出发配送服务订单. 此时, 平台将会产生路径成本以及可能超出最晚交付时间配送的惩罚成本.

b) 车辆等待. 此时平台不会产生成本.

因此, 当车辆在门店等待时间达到阈值 η 时的行动集可表示为

$$\xi_k(O_k) = \{O_k \subseteq R_k : 2d_k^* \leq T - t_k\}. \quad (2)$$

3) 转移方程. 设 $k + 1$ 时期的状态空间为 $S_{k+1} = (t_{k+1}, R_{k+1}, P_{k+1})$. 当 $k + 1$ 时期有新的订单 f 到达时, 触发 $k + 1$ 时期的决策 (X_{k+1}^f, O_{k+1}) 的同时状态发生改变. 此时, $t_{k+1} = \tau_f$, τ_f 为订单 f 到达时间. $P_{k+1} = P_k \setminus \{f\}$. 若接受订单 f , 即 $X_{k+1}^f = 1$, 则订单 f 从 P_k 集合中转换到 R_{k+1} 集合中, 此时, 待服务订单集合 $R_{k+1} = (R_k + \{f\}) \setminus O_{k+1}$; 若委托订单由第 3 方物流服务, 即 $X_{k+1}^f = 0$, 则订单 f 从 P_k 集合转换到 C 集合中, 此时, 待服务订单集合 $R_{k+1} = R_k \setminus O_{k+1}$.

当车辆在线下门店等待时间达到 η 时, 触发 $k + 1$ 时期的决策 O_{k+1} 的同时状态发生改变, 此时, $t_{k+1} = t_k + 2d_k^* + \eta$, 即车辆返回门店的时间加上车辆等待一定时间 η 为决策期 $k + 1$ 的当前时间. 由于是车辆在线下门店等待一定时间 η 触发的 $k + 1$ 时期的决策 O_{k+1} , 没有新的订单到达, $P_{k+1} = P_k$, $R_{k+1} = R_k \setminus O_{k+1}$.

4) 贝尔曼方程. 令 $C(S_k)$ 表示从当前决策期 k 的状态 $S_k = (t_k, R_k, P_k)$ 开始, 到计划期末尾的期望总运营成本. 在本文考虑交付期限的订单配送问题中, 目标是使得平台期望总运营成本最小化, 所考虑的成本包括: 车辆服务订单产生的路径成本、超出最晚交付时间配送的惩罚成本以及委托第 3 方物流产生的配送成本. 贝尔曼方程如下式所示:

$$\begin{aligned} C(S_k) = & \min_{O_k \in \varphi(X_k^i, O_k)} \left\{ (1 - X_k^i)p + 2\alpha d_k^* + \beta \sum_{j \in O_k} (t_k + d_j - l_j)^+ + E_f [C_{\min(\tau_f, t_k + 2\alpha d_k^* + \eta)}(R_{k+1}, P_{k+1})] \right\} + \\ & \min_{O_k \in \xi(O_k)} \left\{ 2\alpha d_k^* + \beta \sum_{j \in O_k} (t_k + d_j - l_j)^+ + E_f [C_{\min(\tau_f, t_k + 2\alpha d_k^* + \eta)}(R_{k+1}, P_{k+1})] \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

其中: $(1 - X_k^i)p$ 为委托第 3 方物流配送成本, $\sum_{j \in O_k} (t_k + d_j - l_j)^+$ 为订单超出最晚交付时间配送的惩罚成本, $\beta \sum_{j \in O_k} (t_k + d_j - l_j)^+$ 为在决策期 k 采取的行动 O_k 产生的惩罚成本, $2\alpha d_k^*$ 为配送集合 O_k 所需路径时间, $2\alpha d_k^*$ 为在决策期 k 采取的行动 O_k 产生的路径成本.

下面给出最优策略应满足的两个性质.

性质 1 已知 $i, j \in R_k, d_i \leq d_j, \tau_i, \tau_j \leq t_k$, 若 $j \in O_k$, 则 $i \in O_k$.

证明 令 F_k, F_{k+1} 分别为在 $k, k + 1$ 决策期除了订单 i 和 j 的配送订单集合, c_1 为配送决策 $O_k = F_k \cup \{i, j\}$ 和 $O_{k+1} = F_{k+1}$ 的总成本, c_2 为配送决策

表1 大小关系

序号	位置关系	图示
1	$d_i \geq d_k^*, d_i \geq d_{k+1}^*$	
2	$d_i \geq d_k^*, d_i < d_{k+1}^*$	
3	$d_i < d_k^* \leq d_j, d_i \geq d_{k+1}^*$	
4	$d_i < d_k^* \leq d_j, d_i < d_{k+1}^*$	
5	$d_k^* > d_j, d_i \geq d_{k+1}^*$	
6	$d_k^* > d_j, d_i < d_{k+1}^*$	

$O_k^* = F_k \cup \{j\}$ 和 $O_{k+1}^* = F_{k+1} \cup \{i\}$ 的总成本. 令 $d_k^* = \max_{z \in F_k} d_z, d_{k+1}^* = \max_{x \in F_{k+1}} d_x$. 由于 $d_i \leq d_j, d_i, d_j, d_k^*, d_{k+1}^*$ 的位置关系分为6种情形, 如表1所示.

下面针对情形1和情形6进行证明.

1) 情形1: $d_i \geq d_k^*, d_i \geq d_{k+1}^*$. 有

$$\begin{aligned}
 c_1 - c_2 = & \left[2\alpha d_j + \beta(t_k + d_j - l_j)^+ + \beta \sum_{z \in F_k} (t_k + d_z - l_z)^+ \right] + \\
 & \left[2\alpha d_i + \beta(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ + \beta \sum_{x \in F_{k+1}} (t_{k+1} + d_x - l_x)^+ \right] - \\
 & \left[2\alpha d_j + \beta(t_k + d_j - l_j)^+ + \beta(t_k + d_i - l_i)^+ + \beta \sum_{z \in F_k} (t_k + d_z - l_z)^+ \right] - \\
 & \left[2\alpha d_{k+1}^* + \beta \sum_{x \in F_{k+1}} (t_{k+1} + d_x - l_x)^+ \right] = \\
 & 2\alpha(d_i - d_{k+1}^*) + \beta[(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ - (t_k + d_i - l_i)^+]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

由 $d_i \geq d_{k+1}^*, t_{k+1} \geq t_k$, 有 $d_i - d_{k+1}^* \geq 0, \beta[(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ - (t_k + d_i - l_i)^+] \geq 0$, 因此, $c_2 \geq c_1$.

2) 情形6: $d_k^* > d_j, d_i \leq d_{k+1}^*$. 有

$$\begin{aligned}
 c_1 - c_2 = & \left[2\alpha d_j + \beta(t_k + d_j - l_j)^+ + \beta \sum_{z \in F_k} (t_k + d_z - l_z)^+ \right] + \\
 & \left[2\alpha d_i + \beta(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ + \beta \sum_{x \in F_{k+1}} (t_{k+1} + d_x - l_x)^+ \right] - \\
 & \left[2\alpha d_j + \beta(t_k + d_j - l_j)^+ + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \beta(t_k + d_i - l_i)^+ + \beta \sum_{z \in F_k} (t_k + d_z - l_z)^+ \right] - \\
 & \left[2\alpha d_{k+1}^* + \beta \sum_{x \in F_{k+1}} (t_{k+1} + d_x - l_x)^+ \right] = \\
 & 2\alpha(d_i - d_{k+1}^*) + \beta[(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ - (t_k + d_i - l_i)^+]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

由 $d_i \geq d_{k+1}^*, t_{k+1} \geq t_k$, 有 $d_i - d_{k+1}^* \geq 0, \beta[(t_{k+1} + d_i - l_i)^+ - (t_k + d_i - l_i)^+] \geq 0$, 因此, $c_2 \geq c_1$.

情形2~情形5证明类似, 此略. 综上, 性质1成立. \square

推论1 车辆配送集合 O_k 所需单程行驶时间为 O_k 中的配送时间最大订单的行驶时间, 即 $d_k^* = \max_{i \in O_k} d_i$.

由性质1, 可直接证明推论1成立.

推论2 k 时期所做的配送决策 $O_k = \{i | i \in R_k, d_i \leq d_k^* = \max_{i \in O_k} d_i\}$.

由性质1, 可直接证明推论2成立.

性质2 令 $L_i = l_i - d_i (i \in O_k)$. 给定 $R_k \neq \emptyset$, 令 $g = \min_{i \in O_k} L_i - t_k$, 当 $g \geq 0$ 时, 令 $t_k \leq t_{k+\Delta k} \leq t_k + g$, 则车辆在 $t_{k+\Delta k}$ 时刻出发服务的订单数量 $|O_{k+\Delta k}|$ 不少于在 t_k 时刻出发服务的订单数量 $|O_k|$.

证明 由推论2可知, t_k 时刻所做的配送决策 $O_k = \{i | i \in R_k, d_i \leq d_k^* = \max_{i \in O_k} d_i\}$, $t_{k+\Delta k}$ 时刻所做的配送决策 $O_{k+\Delta k} = \{i | i \in R_{k+\Delta k}, d_i \leq d_{k+\Delta k}^* = \max_{i \in O_{k+\Delta k}} d_i, d_k^* \leq d_{k+\Delta k}^*\}$, 且 $O_k \subseteq O_{k+\Delta k}$, 则 $|O_k| \leq |O_{k+\Delta k}|$. \square

2 数值实验

本节给出数值算例和相应的结果分析. 考虑某门店订单随机到达, 门店配备单个骑手进行订单配送服务. 使用 random 函数随机生成15个订单, 订单信息如表2所示.

车辆的最大工作时间为400, 即 $T = 400$. 取参数 $\alpha = 0.3, \beta = 0.5, p = 15, \eta = 30$. 采用 Python 3.7

表2 订单信息

订单编号	到达时间 τ_i	最晚交付时间 l_i	行驶时间 d_i
1	10	70	20
2	30	60	24
3	32	152	16
4	67	127	30
5	81	261	40
6	106	166	10
7	185	245	6
8	200	320	32
9	220	280	34
10	234	264	26
11	245	365	56
12	252	282	4
13	270	390	46
14	285	375	42
15	290	350	14

编程语言设计值迭代算法进行求解. 算法运行环境为CPU: Intel (R) Core (TM) i5-3337 U CPU@1.80 GHz (4 CPUs) 1.8 GHz, RAM: 4.00 GB, 操作系统: Windows 10.1 中文版64位.

表3为该门店在一天工作时间内的订单配送策略的最优行动、委托第3方物流配送成本、超出最晚交付时间配送的惩罚成本以及总成本.

由表3可见,在所提出订单配送策略中,车辆分别在 $t_3, t_6, t_9, t_{11}, t_{17}$ 时刻出发配送已接受订单,超出最晚交付时间配送的订单为4,委托第3方物流

配送订单11、12、14,总成本为120.3,其中惩罚成本为4.5,委托第3方物流配送成本为45.为了表明所提出订单配送策略的优越性,下面与FCFS策略、按时交付策略进行对比.

FCFS策略和按时交付策略均考虑订单的交付期限.在FCFS策略中,全部订单由自有车辆配送,订单可超出最晚交付时间配送,同时先到达的订单具有优先级,即按到达时间顺序进行服务.因此,在FCFS策略下,总运营成本由路径成本和超出最晚交付时间配送的惩罚成本构成.在按时交付策略中,订单可由平台自有车辆或第3方物流服务,但是,全部订单在交付期限内配送,不允许超出最晚交付时间配送.因此,在按时交付策略下,总运营成本由路径成本和委托第3方物流配送成本构成.

表4为FCFS策略下的最优行动、超出最晚交付时间配送的惩罚成本以及总成本.由表4可见,在FCFS策略中,车辆分别在 $t_3, t_5, t_7, t_{11}, t_{15}$ 时刻出发配送订单,超出最晚交付时间配送的订单为6、9、10、12、14、15,总成本为187.7,其中惩罚成本为84.5.

表5为按时交付策略下的最优行动、委托第3方物流配送成本以及总成本.由表5可见,在按时交付策略中,车辆分别在 t_3, t_6, t_{10}, t_{16} 时刻出发配送已接受订单,委托第3方物流配送订单4、5、11、12、14,总成本为124.2,其中委托第3方物流配送成本为75.

表3 订单配送策略的最优行动

t_k	最优行动 $\varphi_k \setminus \xi_k$	委托成本	惩罚成本	$C(S_k)$	t_k	最优行动 $\varphi_k \setminus \xi_k$	委托成本	惩罚成本	$C(S_k)$
$t_1 = 10$	$X_1^1 = 1, O_1 = \emptyset$	0	0	0	$t_{10} = 220$	$X_{10}^9 = 1, O_{10} = \emptyset$	0	4.5	46.5
$t_2 = 30$	$X_2^2 = 1, O_2 = \emptyset$	0	0	0	$t_{11} = 234$	$X_{11}^{10} = 1, O_{11} = \{8, 9, 10\}$	0	4.5	66.9
$t_3 = 32$	$X_3^3 = 1, O_3 = \{1, 2, 3\}$	0	0	14.4	$t_{12} = 245$	$X_{12}^{11} = 0, O_{12} = \emptyset$	15	4.5	81.9
$t_4 = 67$	$X_4^4 = 1, O_4 = \emptyset$	0	0	14.4	$t_{13} = 252$	$X_{13}^{12} = 0, O_{13} = \emptyset$	30	4.5	96.9
$t_5 = 81$	$X_5^5 = 1, O_5 = \emptyset$	0	0	14.4	$t_{14} = 270$	$X_{14}^{13} = 1, O_{14} = \emptyset$	30	4.5	96.9
$t_6 = 106$	$X_6^6 = 1, O_6 = \{4, 5, 6\}$	0	4.5	42.9	$t_{15} = 285$	$X_{15}^{14} = 0, O_{15} = \emptyset$	45	4.5	119.9
$t_7 = 185$	$X_7^7 = 1, O_7 = \emptyset$	0	4.5	42.9	$t_{16} = 290$	$X_{16}^{15} = 1, O_{16} = \emptyset$	45	4.5	119.9
$t_8 = 200$	$X_8^8 = 1, O_8 = \emptyset$	0	4.5	42.9	$t_{17} = 332$	$O_{17} = \{13, 15\}$	45	4.5	120.3
$t_9 = 216$	$O_9 = \{7\}$	0	4.5	46.5					

表4 FCFS策略的最优行动

t_k	最优行动 O_k	惩罚成本	$C(S_k)$	t_k	最优行动 O_k	惩罚成本	$C(S_k)$
$t_1 = 10$	$O_1 = \emptyset$	0	0	$t_9 = 220$	$O_9 = \emptyset$	14.5	58.9
$t_2 = 30$	$O_2 = \emptyset$	0	0	$t_{10} = 234$	$O_{10} = \emptyset$	22.5	58.9
$t_3 = 32$	$O_3 = \{1, 2, 3\}$	0	14.4	$t_{11} = 245$	$O_{11} = \{8, 9, 10, 11\}$	22.5	100.5
$t_4 = 67$	$O_4 = \emptyset$	0	14.4	$t_{12} = 252$	$O_{12} = \emptyset$	22.5	100.5
$t_5 = 81$	$O_5 = \{4, 5\}$	0	38.4	$t_{13} = 270$	$O_{13} = \emptyset$	22.5	100.5
$t_6 = 106$	$O_6 = \emptyset$	14.5	38.4	$t_{14} = 285$	$O_{14} = \emptyset$	22.5	100.5
$t_7 = 185$	$O_7 = \{6, 7\}$	14.5	58.9	$t_{15} = 290$	$O_{15} = \{12, 13, 14, 15\}$	84.5	187.7
$t_8 = 200$	$O_8 = \emptyset$	14.5	58.9				

表5 按时交付策略的最优行动

t_k	最优行动 $\varphi_k \setminus \xi_k$	委托成本	$C(S_k)$	t_k	最优行动 $\varphi_k \setminus \xi_k$	委托成本	$C(S_k)$
$t_1 = 10$	$X_1 = 1, O_1 = \emptyset$	0	0	$t_9 = 216$	$X_9 = 1, O_9 = \emptyset$	30	50.4
$t_2 = 30$	$X_2 = 1, O_2 = \emptyset$	0	0	$t_{10} = 220$	$X_{10} = 1, O_{10} = \{7, 8, 9, 10\}$	30	70.8
$t_3 = 32$	$X_3 = 1, O_3 = \{1, 2, 3\}$	0	14.4	$t_{11} = 234$	$X_{11} = 0, O_{11} = \emptyset$	45	85.8
$t_4 = 67$	$X_4 = 0, O_4 = \emptyset$	15	29.4	$t_{12} = 245$	$X_{12} = 0, O_{12} = \emptyset$	60	100.8
$t_5 = 81$	$X_5 = 0, O_5 = \emptyset$	30	44.4	$t_{13} = 252$	$X_{13} = 1, O_{13} = \emptyset$	60	100.8
$t_6 = 106$	$X_6 = 1, O_6 = \{6\}$	30	50.4	$t_{14} = 270$	$X_{14} = 0, O_{14} = \emptyset$	75	115.8
$t_7 = 185$	$X_7 = 1, O_7 = \emptyset$	30	50.4	$t_{15} = 285$	$X_{15} = 1, O_{15} = \emptyset$	75	115.8
$t_8 = 200$	$X_8 = 1, O_8 = \emptyset$	30	50.4	$t_{16} = 290$	$O_{16} = \{13, 15\}$	75	124.2

由表3和表4可见: 相比于FCFS策略, 所提出订单配送策略可将总成本降低35.91%, 将惩罚成本降低41.28%, 超出最晚交付时间配送的订单数量可减少33.33%。由表3和表5可见: 相比于按时交付策略, 所提出订单配送策略可将总成本降低3.14%, 将委托第3方物流配送成本有效降低了22.98%。所提出订单配送策略、FCFS策略和按时交付策略总成本比较如图2所示。

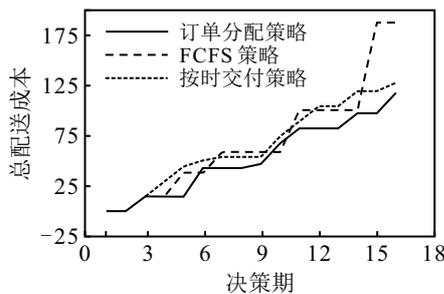


图2 3种策略的总成本比较

3 结论

本文针对订单随机到达、具有交付期限要求的订单配送问题, 考虑了委托第3方物流配送成本、路径成本和惩罚成本, 以平台运营成本最小化为目标, 基于马尔可夫决策过程设计了合理有效的订单配送策略。数值实验结果表明, 所提出订单配送策略具有明显的优势, 相比于FCFS策略而言, 不仅能够降低平台的总运营成本, 尤其是能够降低超出最晚交付时间的惩罚成本, 提高配送效率, 提高了顾客满意度; 相比于按时交付策略而言, 不仅能够降低总运营成本, 且能够较少地委托订单由第3方物流服务, 保证了服务质量。所提出订单配送策略可广泛应用于现实中对配送时效要求高的配送服务中, 如同城餐饮外卖、同城搬家等服务。在未来的研究中, 可考虑多车场情形下的订单取送问题等。

参考文献(References)

[1] 余海燕, 唐婉倩, 吴腾宇. 带硬时间窗的O2O生鲜外卖即时配送路径优化[J]. 系统管理学报, 2021, 30(3): 584-591.

(Yu H Y, Tang W Q, Wu T Y. Vehicle routing problem with hard time windows for instant delivery of O2O fresh takeout orders[J]. Journal of Systems & Management, 2021, 30(3): 584-591.)

[2] 田丹, 唐加福, 任悦. O2O模式下即时配送服务系统弹性的提升策略优化[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(2): 310-318.
(Tian D, Tang J F, Ren Y. Improving operation resilience of instant delivery service in online to offline business model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(2): 310-318.)

[3] 韩盼盼, 陈钰湘. 新零售驱动下即时配送发展研究[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(4): 113-115.
(Han P P, Chen Y X. Research on the development of instant delivery driven by new retail[J]. Logistics Engineering and Management, 2020, 42(4): 113-115.)

[4] 王新玉, 赵志明. 动态取送问题研究综述[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(2): 319-331.
(Wang X Y, Zhao Z M. Survey of the dynamic pickup and delivery problems[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(2): 319-331.)

[5] Zhen L, Ma C L, Wang K, et al. Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates[J]. Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 135: 101866.

[6] Li W L, Li K P, Kumar P N R, et al. Simultaneous product and service delivery vehicle routing problem with time windows and order release dates[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 89: 669-687.

[7] Li H Q, Wang H T, Chen J, et al. Two-echelon vehicle routing problem with time windows and mobile satellites[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2020, 138: 179-201.

[8] Soysal M, Çimen M, Belbağ S. Pickup and delivery with electric vehicles under stochastic battery depletion[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 146: 106512.

[9] Song M X, Li J Q, Han Y Q, et al. Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics[J]. Applied Soft Computing, 2020, 95: 106561.

- [10] Klapp M A, Erera A L, Toriello A. The one-dimensional dynamic dispatch waves problem[J]. *Transportation Science*, 2016, 52(2): 402-415.
- [11] Klapp M A, Erera A L, Toriello A. The dynamic dispatch waves problem for same-day delivery[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(2): 519-534.
- [12] Ulmer M W, Streg S. Same-day delivery with pickup stations and autonomous vehicles[J]. *Computers & Operations Research*, 2019, 108: 1-19.
- [13] Ulmer M W, Thomas B W. Same-day delivery with heterogeneous fleets of drones and vehicles[J]. *Networks*, 2018, 72(4): 475-505.
- [14] 王征, 李婷玉, 岳彩凡. 同城即时配送问题基于多预测场景的在线调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(12): 3197-3211.
(Wang Z, Li T Y, Yue C F. Online scheduling for the instant delivery problem in a city based on multiple prediction scenarios[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(12): 3197-3211.)
- [15] Pan B B, Zhang Z Z, Lim A. Multi-trip time-dependent vehicle routing problem with time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(1): 218-231.
- [16] Ulmer M W, Mattfeld D C, Köster F. Budgeting time for dynamic vehicle routing with stochastic customer requests[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(1): 20-37.
- [17] Voccia S A, Campbell A M, Thomas B W. The same-day delivery problem for online purchases[J]. *Transportation Science*, 2017, 53(1): 167-184.
- [18] Ulmer M W, Thomas B W, Campbell A M, et al. The restaurant meal delivery problem: Dynamic pickup and delivery with deadlines and random ready times[J]. *Transportation Science*, 2021, 55(1): 1-26.
- [19] Ulmer M W. Dynamic pricing and routing for same-day delivery[J]. *Transportation Science*, 2020, 54(4): 1016-1033.
- [20] 周林, 朱芳彬, 代应, 等. 多元个性化需求驱动的最后公里配送选址-路径研究[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2745-2752.
(Zhou L, Zhu F B, Dai Y, et al. Multiple personalized demands driven last mile delivery location-routing problem[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2745-2752.)
- [21] 杨华龙, 梁晓萍, 王征, 等. 允许中转与绕行的众包同城配送司机包裹匹配优化[J]. *控制与决策*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0687.
(Yang H L, Liang X P, Wang Z, et al. Optimization of driver-parcel matching for crowdsourced intra-city delivery with multi-hop and detour[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0687.)
- [22] 李楠, 胡蓉, 钱斌, 等. 两阶段混合优化算法求解模糊需求下多时间窗车辆路径问题[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1573-1582.
(Li N, Hu R, Qian B, et al. Two stage hybrid optimization algorithm for vehicle routing problem with multiple time windows under fuzzy demand[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(6): 1573-1582.)

作者简介

高展(1996—), 女, 博士生, 从事管理决策分析的研究, E-mail: 18204007455@163.com;

姜艳萍(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事管理决策分析、服务建模与优化等研究, E-mail: yppjiang@mail.neu.edu.cn.