

文章编号:1671-6833(2025)06-0102-10

考虑众包员供给动态性的末端配送优化方法

李嫚嫚, 雷海泷, 赵博选

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710021)

摘要:考虑众包员供给动态性,针对自营配送员与众包员共存情景,提出了一种末端配送优化方法。以众包员报酬、客户指派方案以及多行程车辆路径为待优化决策,基于时空网络建立客户服务约束、载重约束、时间窗约束以及车辆-众包员时空协同约束,构建以最小化配送成本为目标的混合配送优化模型。根据问题特征改进最小成本插入法,设计10种破坏算子,并依据模拟退火算法思想接受差解改进自适应大邻域算法求解模型,获取末端配送方案。结果表明:对于100个客户的案例,改进自适应大邻域算法以平均48.5 s获得的配送成本比GUROBI耗时1 h的更低,平均降低了24%;与模拟退火相比,改进自适应邻域算法获得的配送成本也更低,最大降低了5.5%。协同自营配送员与众包员的混合配送模式比自营配送模式的配送成本低;混合配送模式适用于时间窗紧凑、车辆行驶成本高、就业机会少的末端配送场景;众包员供给动态性显著且随机地影响混合配送模式的配送成本。

关键词:物流工程;末端配送;众包模式;众包供给动态性;车辆路径;自适应大邻域搜索算法

中图分类号:U9;TP29;F252.1

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2025.06.001

随着电子商务的迅速发展,越来越多的消费者倾向于网上购物,使得末端配送需求激增,导致传统自营配送模式面临着配送员短缺问题^[1]。因此,孟秀丽等^[2]提出了一种基于共享经济理念的众包配送模式。该模式通过互联网从社会招募非特定人员(又称众包员)从事配送服务,不仅可以扩展物流运力,而且能提高配送效率。

为充分利用物流运力,学者们针对不同末端配送情景,提出了融合众包配送模式的配送方案优化方法。Archetti等^[3]针对自营配送员与众包员共存情景,构建数学规划模型,提出了一种客户指派与车辆路径规划方法。在此基础上,Macrina等^[4-5]考虑客户配送时间窗要求、需求可分性以及不同的众包员取货点,提出了客户指派与车辆路径规划方法。杨华龙等^[6]考虑一项配送任务可由多个众包员接力完成,提出了客户指派与众包员调度方法。Daryarian等^[7]针对客户与配送员随机到达情景,在提出订单推迟处理规则的基础上,基于禁忌搜索算法给出了客户指派与车辆路径规划方法。Schur等^[8]考虑众包员随机到达特性以及服务价格对众包员配

送任务接收率的影响,基于动态规划提出了一种客户指派与服务价格制定方法,但并未明确车辆配送路径。Dai等^[9]基于自营配送员单次仅服务一个顾客的假设,提出了一种配送员调度与客户指派方法。针对纯众包员配送情景,Yildiz等^[10]考虑报酬对众包员参与度的影响,基于排队模型确定了最优众包员雇佣数量;Le等^[11]考虑众包服务价格对配送需求以及众包员参与度的双重影响,通过构建数学规划模型制定了服务价格与客户指派方案;王会静等^[12]考虑众包员具有客户选择权,确定了客户指派方案。

综上所述,在优化采用众包配送模式的末端配送方案时,鲜有研究考虑报酬对众包员参与度的影响^[13]。未考虑此影响会导致所得调度方案在实践中会因缺少众包员而不可行,或因向众包员支付报酬过高而导致配送企业利益受损。因此,本文考虑报酬对众包员参与度的影响,同时,考虑众包员供给数量随时间变化的动态特性^[14],提出更符合实践需要的自营配送员与众包员共存情景下的末端配送优化方法。其中,自营配送员驾驶卡车进行配送服务,一天可行驶多个行程,每个行程可服务多个客户,即

收稿日期:2025-04-12;修订日期:2025-05-20

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBQN-0479)

作者简介:李嫚嫚(1991—),女,陕西咸阳人,长安大学讲师,博士,主要从事交通运输系统建模与优化研究,E-mail: li-manman@chd.edu.cn。

引用本文:李嫚嫚,雷海泷,赵博选.考虑众包员供给动态性的末端配送优化方法[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(6):102-111.(LI M M, LEI H L, ZHAO B X. Optimization method for last mile delivery considering supply dynamics of crowdsourced personnel[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(6):102-111.)

多行程车辆路径问题^[15-16]。

为解决该问题,首先,本文根据众包员供给动态特性,基于时空网络^[17]构建数学规划模型对问题进行描述;其次,根据模型特征设计局部搜索算子提出求解大规模案例的自适应大邻域搜索算法;最后,通过案例对模型与算法的有效性进行验证,并分析自营配送员与众包员共存的混合配送模式的适用情景以及众包员供给动态性对混合配送模式的影响,为末端配送服务商提供决策参考。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

考虑众包员供给动态性的末端配送优化问题涉及配送中心、客户、自营配送员和众包员4个要素。

(1) 配送中心。一个配送中心 o 为若干个客户 $i(i \in I)$ 提供配送服务。它的营业时间为 $[e_o, l_o]$ 。在营业时间内,自营配送员和众包员都可以来取货,且取货次数不限。配送中心拥有的货物量可以满足所有客户需求。

(2) 客户。每个客户所需货物类型相同,所需货量为 $q_i(i \in I)$, kg;接受配送服务的时间窗为 $[e_i, l_i]$;所需服务时间为 s_i , h;客户之间以及与配送中心间的欧氏距离为 $d_{i,j}(i, j \in I \cup \{o\})$, km。

(3) 自营配送员。自营配送员驾驶卡车从配送中心出发为客户配送货物或将货物交由众包员。卡车固定使用成本为 C_f , 元;额定载重为 Q_c , kg;行驶速度为 V_c , km/h;单位距离行驶成本为 C_d , 元/km。在一天的配送过程中,自营配送员可以多次返回配送中心取货。

(4) 众包员。为应对配送需求高峰,物流企业会招募一定数量的众包员提供配送服务。愿意执行配送任务的众包员数量随时间变化,因此,将一天平均划分为 $|T|$ 个时段,每个时段时长为 t_Δ ^[18]。时段 $t \in T$ 愿意执行配送任务的众包员数量(即潜在众包员数量)为 \bar{N}_t 。将物流企业在时段 t 实际招募到的众包员数量 N_t 与 \bar{N}_t, p_t 的函数关系^[19] 设为

$$N_t = f(p_t, \bar{N}_t) = \begin{cases} \lfloor \bar{N}_t e^{-\delta p_t} \rfloor, & p_t > 0; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_t 为时段 t 的众包员报酬,元/单; δ 为众包员供给-价格敏感系数; e 为常数。

每个众包员驾驶电动摩托车配送货物,最大配送距离为 D , km;行驶速度为 V_c , km/h。众包员每次仅为一个客户提供服务,其可携带货量能满足任

一客户需求,携带的货物来自配送中心或者卡车。物流企业以配送成本最小为目标,制定众包员报酬、指派客户并规划卡车配送路径,如图1所示。

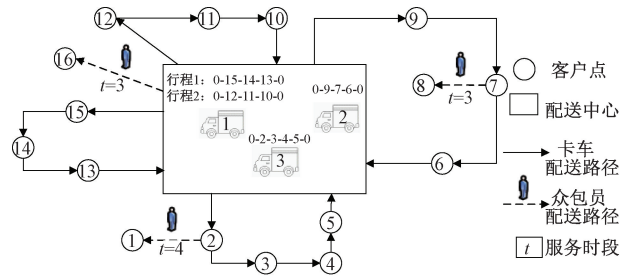


图1 考虑众包员供给动态性的末端配送优化

Figure 1 Last mile delivery optimization considering supply dynamics of crowdsourced personnel

1.2 问题建模

问题建模涉及的决策变量为

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{卡车从 } i \text{ 到 } j, i \in I_A, j \in I_B; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

$$x'_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{卡车从 } i \text{ 返回配送中心后到 } j, i, j \in I; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (3)$$

$$z'_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{时段 } t \text{ 众包员从 } i \text{ 取货并服务客户 } j, \\ & t \in T, i \in I_A, j \in I; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_A = \{o\} \cup I$ 为配送中心(卡车起点)和客户构成的集合; $I_B = \{d\} \cup I$ 为配送中心(卡车终点)和客户构成的集合。

优化模型如式(5)~(25)所示。其中,式(5)是目标函数,最小化卡车行驶成本、固定使用成本和众包员报酬之和;式(6)保证每个客户被服务一次;式(7)~(8)为卡车进出平衡约束;式(9)~(10)为卡车到达节点时刻与配送路径关系;式(11)~(12)为众包员到达节点时刻与其配送服务执行时段以及货物接收点关系;式(13)为到达节点时刻与节点服务开始时刻关系;式(14)为离开节点时刻与节点服务开始时刻关系;式(15)~(16)为时间窗约束;式(17)~(18)描述了卡车到达节点时的载重量与配送路径关系;式(19)为载重量约束;式(20)为众包员配送距离约束;式(21)~(23)为车辆-众包员时空协同约束,确保众包员在客户处接货时,卡车也位于此处;式(24)为众包员可得性约束;式(25)给出了物流企业招募的众包员数量与潜在众包员数量以及众包员报酬关系。

$$\min \varphi(\cdot) = C_d \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I_B} d_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} d'_{i,j} x'_{i,j} \right) + C_f \sum_{j \in I} x_{o,j} + \sum_{t \in T} p_t \sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I} z'_{i,j}; \quad (5)$$

s. t.

$$\sum_{j \in I} (x_{i,j} + x'_{i,j}) + x_{i,d} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in I_A} z'_{t,i} = 1, i \in I; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in I} (x_{j,i} + x'_{j,i}) + x_{o,i} - \sum_{j \in I} (x_{i,j} + x'_{i,j}) - x_{i,d} = 0, i \in I; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I} x_{o,j} = \sum_{j \in I} x_{j,d}; \quad (8)$$

$$a_j \geq r_i + \frac{d_{i,j}}{V_e} + M(x_{i,j} - 1), i \in I_A, j \in I_B; \quad (9)$$

$$a_j \geq r_i + \frac{d'_{i,j}}{V_e} + M(x'_{i,j} - 1), i \in I, j \in I; \quad (10)$$

$$a_j \geq (t-1)t_\Delta + \frac{d_{i,j}}{V_c} + M(z'_{t,i} - 1), \quad (11)$$

$$i \in I_A, j \in I, t \in T;$$

$$a_j \geq a_i + \frac{d_{i,j}}{V_c} + M(z'_{t,i} - 1), i \in I, j \in I, t \in T; \quad (12)$$

$$a_i \leq b_i, i \in I_A; \quad (13)$$

$$r_i \geq b_i + s_i, i \in I; \quad (14)$$

$$e_i \leq b_i \leq l_i, i \in I_A; \quad (15)$$

$$r_i + \frac{d_{i,d}}{V_e} + M(x_{i,d} - 1) \leq l_d, i \in I; \quad (16)$$

$$w_j \leq w_i - q_i - \sum_{j \in I} q_j \sum_{t \in T} z'_{t,i} + M(1 - x_{i,j}), \quad (17)$$

$$i \in I_A, j \in I_B;$$

$$w_d \leq w_i - q_i - \sum_{j \in I} q_j \sum_{t \in T} z'_{t,i} + M(1 - \sum_{j \in I} x'_{i,j}), i \in I; \quad (18)$$

$$0 \leq w_i \leq Q_e, i \in I_B; \quad (19)$$

$$\sum_{i \in T} z'_{i,j} d_{i,j} \leq D, i \in I_A, j \in I; \quad (20)$$

$$M \left(\sum_{j \in I} (x_{i,j} + x'_{i,j}) + x_{i,d} \right) \geq \sum_{t \in T} \sum_{j \in I} z'_{t,i}, i \in I; \quad (21)$$

$$a_i < t_\Delta t + M(1 - z'_{t,i}), i \in I, j \in I, t \in T; \quad (22)$$

$$r_i \geq t_\Delta(t-1) + M(z'_{t,i} - 1), i \in I, j \in I, t \in T; \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I} z'_{i,j} \leq N_t, t \in T; \quad (24)$$

$$N_t = f(p_t, \bar{N}_t) = \begin{cases} \lfloor \bar{N}_t e^{(-\delta/p_t)} \rfloor, p_t > 0; \\ 0, \text{其他}. \end{cases} \quad (25)$$

式中: $a_i (i \in I_A \cup \{d\})$ 为卡车或众包员到达节点 i 的时刻; $b_i (i \in I_A)$ 为卡车或众包员开始服务节点 i 的时刻; $r_i (i \in I_A)$ 为卡车或众包员离开节点 i 的时刻; $w_i (i \in I_A \cup \{d\})$ 为卡车到达节点 i 时的载重量。

1.3 线性化

当目标函数达到最小时,式(24)为等式,且 $\bar{N}_t e^{(-\delta/p_t)}$ 恰好为整数,因此,目标函数项中 $\sum_{t \in T} p_t \sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I} z'_{i,j}$ 可以

等价于 $\sum_{t \in T} f^{-1} \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} \right) \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} \right)$ 。令 $G_t = f^{-1} \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} \right) \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} \right)$, 引入参数 $c_{t,n} = n f^{-1}(n) = \delta n / [\ln \bar{N}_t - \ln n]$, $t \in T, n \in N_p = \{0, 1, 2, \dots, \bar{N}_t - 1\}$, 和新决策变量

$$g_{t,n} = \begin{cases} 1, \sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} = n, n \in N_p, t \in T; \\ 0, \text{其他}. \end{cases} \quad (26)$$

可将 G_t 线性化为

$$G_t = \sum_{n \in N_p} c_{t,n} g_{t,n}; \quad (27)$$

$$M(g_{t,n} - n) \leq \sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I, i \neq j} z'_{i,j} \leq M(n - g_{t,n}), n \in N_p; \quad (28)$$

$$\sum_{n \in N_p} g_{t,n} = 1, t \in T. \quad (29)$$

综上,模型更新为

$$\begin{cases} \min \varphi(\cdot) = C_f \sum_{j \in I} x_{o,j} + C_d \left(\sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I_B} d_{i,j} x_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} d'_{i,j} x'_{i,j} \right) + \sum_{t \in T} G_t; \\ \text{s.t. 公式(6) ~ (23), 公式(27) ~ (29),} \\ \sum_{i \in I_A} \sum_{j \in I} z'_{i,j} \leq \bar{N}_t, t \in T. \end{cases} \quad (30)$$

2 改进自适应大邻域搜索算法

线性化后的模型是一个混合整数线性规划模型,精确算法难以在有限时间内求解其大规模案例^[20],因此,本文结合模拟退火算法^[21]和自适应大邻域搜索算法^[22]设计了一个启发式求解算法,即改进自适应大邻域搜索算法(improved adaptive large neighborhood search, IALNS),如图2所示。该算法根据问题特征改进最小成本插入法生成初始解;利用基于问题领域知识设计的10种破坏算子和改进的最小成本插入法探索解空间;基于模拟退火算法思想接受次优解,避免算法陷入局部最优。

IALNS包括初始解构造阶段和改善阶段。初始解构造阶段利用改进最小成本插入法生成初始解。改进最小成本插入法针对每一个客户,计算卡车和众包员配送成本,并选取配送成本最低的方案。卡车配送成本为新增一条配送路径或将客户加入现有路径所增加成本的最小值,如图3所示,其中, $C(\cdot)$ 表示卡车配送成本。众包员配送成本为最低的众包员报酬,如图4所示。在计算众包员报酬时,需判断可行的货物接收地。满足以下3个条件,则一个货物接收地可行:①车辆现有载重加上客户需求量

(货物量)后,满足载重量约束;②货物接收地与客户的距离小于众包员最大配送距离;③众包员到达客户时间符合客户时间窗要求。

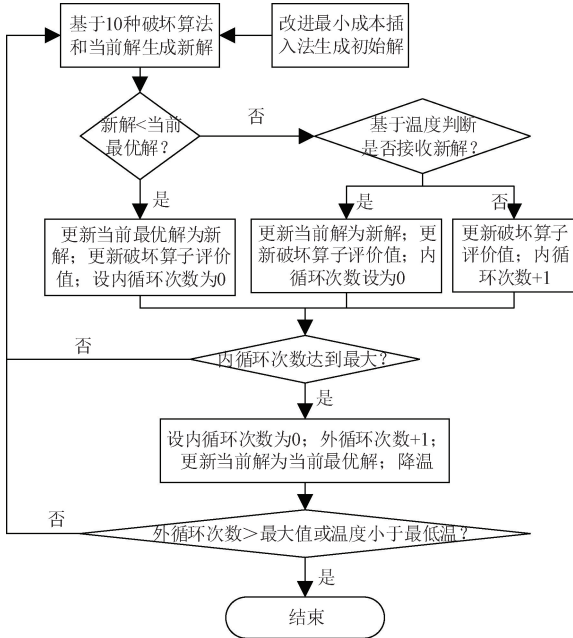


图 2 IALNS 算法流程

Figure 2 Flowchart of IALNS algorithm

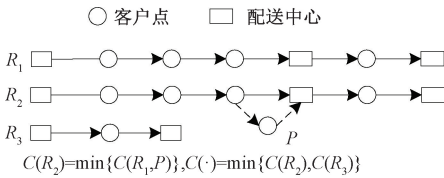


图 3 卡车配送成本

Figure 3 Delivery cost of truck

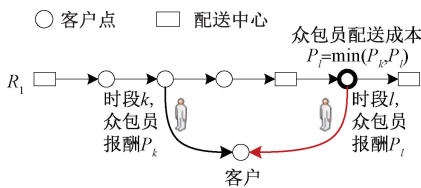
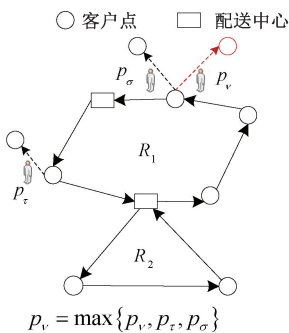
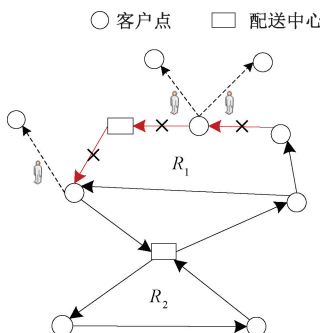


图 4 众包员配送成本

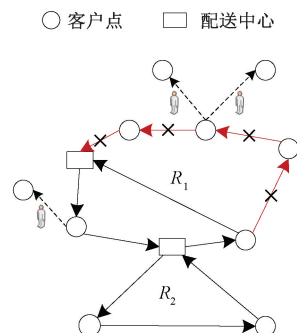
Figure 4 Delivery cost of crowdsourced personnel



(a) 报酬最高的众包员和其服务客户



(b) 路径中连续3个节点



(c) 行程中最后3个客户

图 6 破坏算子 4~6 的示意图

Figure 6 Schematic diagram of destruction operators No. 4 to No. 6

改善阶段操作步骤如下。

步骤 1 初始化参数,包括最大内循环次数 C_{in}^{max} ,最大外循环次数 C_{out}^{max} ,破坏算子性能增加值 P_{sco}^m , $m = 1, 2, 3$, 温度限值 H_{min} , 降温系数 α , $0 < \alpha < 1$, 客户删除量 N 。

步骤 2 根据 10 种破坏算子性能值,利用轮盘赌规则选择破坏算子,删除当前解中至少 N 个客户,并用修复算子将其修复成新解 X_{new} 。

步骤 3 如果新解优于当前最优解,则更新当前最优解为新解,内循环次数设为 0,破坏算子性能值加 P_{sco}^1 ;否则,如果 $e^{(obj-\varphi(X_{new}))/H} > random$,则更新当前解为新解,内循环次数设为 0,破坏算子性能值加 P_{sco}^2 ;否则,内循环次数加 1,破坏算子性能值加 P_{sco}^3 。

步骤 4 如果内循环次数小于等于 C_{in}^{max} ,返回步骤 2;否则,更新当前解为当前最优解,内循环次数设为 0,外循环次数加 1,温度降至当前温度的 α 倍。

步骤 5 如果外循环次数 $\leq C_{out}^{max}$ 或者温度 $> H_{min}$,则返回步骤 2;否则停止计算,输出结果。

改善阶段使用的 10 种破坏算子分别如下:①随机删除路径中的 1 个客户;②随机删除 1 名众包员和其服务的客户;③随机选择 1 条路径,删除引起配送成本增加最多的 1 个客户^[23],如图 5 所示;④删除报酬最高的 1 名众包员和其服务的客户,如图 6 (a) 所示;⑤随机选择 1 条路径,将路径中连续的 3

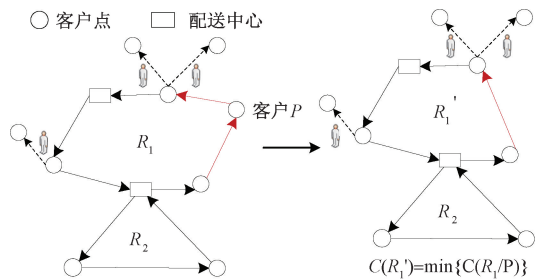


图 5 导致路径 R_1 配送成本增加最多的客户 P

Figure 5 Customer P that added the most delivery cost of route R_1

个节点删除,如图6(b)所示;⑥随机选择1个行程,将行程中最后3个客户删除,如图6(c)所示;⑦随机删除1辆卡车的配送路径;⑧删除时间窗最接近的客户,时间窗最接近的判断规则为 $\min(|e_i - e_j| + |l_i - l_j|)$, $i, j \in I, i \neq j$ ^[24];⑨删除地理位置最接近的客户;⑩随机选择1条路径,删除路径中地理位置最接近的客户。改善阶段使用的修复算子为改进最小成本插入法。

3 算例分析

因本研究所考虑问题是VRPTW(vehicle routing problem with time window)的扩展,故取VRPTW标准算例^[25]测试IALNS。VRPTW标准案例根据客户空间分布情况分为C案例集、R案例集和RC案例集。C案例集中,客户集中分布;R案例集中,客户

分散分布;RC案例集中,一部分客户集中分布,另一部分客户分散分布。算例参数^[26]设置: $C_f = 519$ 元/辆; $C_d = 4$ 元/km; $V_e = 60$ km/h; $Q_e = 100$ kg; $V_c = 37.5$ km/h; $D = 20$ km; $\delta = 80$ 人/元; $\bar{N}_i = 10$ 人, $t \in T$; t_{Δ} 与客户服务时间相同。

算例实验采用的计算机操作系统是Window 10,处理器是Intel(R) Core(TM) i7-10875H CPU @ 2.30 GHz,内存为32 GB,编译软件为C++23。

根据预实验结果,设定IALNS求解参数为 $C_{in}^{max} = 4$; $C_{out}^{max} = 20\ 000$; $P_{dest}^h = 1\ 000$, $\forall h$; $\{P_{sco}^1, P_{sco}^2, P_{sco}^3\} = \{100, 1, 0\}$; $N = 7$; $H = 2\ 000$; $H_{min} = 300$; $\alpha = e^{\frac{-1}{10\ 000}}$ 。GUROBI求解时间设定为1 h。

3.1 IALNS求解性能分析

表1为GUROBI、IALNS和模拟退火算法(SA)求解30个算例的结果。

表1 GUROBI、IALNS与SA性能比较

Table 1 Performance comparisons among GUROBI, IALNS and SA

客户 规模	案例 编号	GUROBI			IALNS				SA			
		TC/元	CT/s	RP/%	ATC/元	ACT/s	RSD/%	GAP1%	ATC/元	ACT/s	RSD/%	GAP2/%
10	C201	1 130.9	1.2	0	1 143.4	0.4	0	1.1	1 195.4	1.7	0.8	-4.5
	C202	1 108.5	48.8	0	1 108.5	0.5	0	0	1 118.5	2.6	1.4	-0.9
	C203	1 108.5	48.8	0	1 108.5	0.5	0	0	1 118.5	2.6	1.4	-0.9
	C204	1 108.5	3 600.2	30.1	1 108.5	0.6	0	0	1 123.7	2.9	1.4	-1.4
	C205	1 130.9	3.0	0	1 143.4	0.4	0	1.1	1 172.6	1.9	1.3	-2.6
	R201	1 237.4	108.9	0	1 237.4	0.7	0	0	1 266.7	4.0	0	-2.4
	R202	1 192.3	50.7	0	1 192.3	1.0	0	0	1 249.6	5.3	1.4	-4.8
	R203	1 192.3	50.7	0	1 192.3	1.0	0	0	1 249.6	5.3	1.4	-4.8
	R204	1 192.2	3 600.1	22.1	1 192.2	1.0	0	0	1 236.0	5.9	2.1	-3.7
	R205	1 199.6	11.3	0	1 199.6	0.8	0	0	1 254.0	4.6	0	-4.5
	RC201	1 503.0	112.9	0	1 503.0	0.8	0	0	1 503.0	4.5	0	0
	RC202	1 446.7	3 600.2	50.0	1 446.7	1.2	0	0	1 446.7	5.8	0	0
	RC203	1 446.7	3 600.2	50.0	1 446.7	1.2	0	0	1 446.7	5.8	0	0
	RC204	1 454.5	3 600.3	63.2	1 446.7	1.4	0	-0.5	1 446.7	6.9	0	0
	RC205	1 500.3	3 333.8	0	1 500.3	1.0	0	0	1 500.3	5.2	0	0
100	C201	8 672.6	3 601.3	55.4	7 715.4	19.7	3.3	-11.0	7 847.4	13.6	1.2	-1.7
	C202	9 753.5	3 602.9	75.2	7 602.9	45.7	4.1	-22.0	7 666.4	29.2	0.9	-0.8
	C203	8 712.7	3 601.1	74.1	7 447.4	54.4	2.6	-14.5	7 552.1	41.9	1.6	-1.4
	C204	9 057.2	3 601.8	76.8	7 228.5	84.0	1.6	-20.2	7 308.4	57.7	1.5	-1.1
	C205	11 664.5	3 604.1	78.7	7 388.6	21.9	3.4	-36.7	7 794.1	20.8	0.6	-5.5
	R201	8 307.7	3 601.4	63.7	6 998.5	25.5	2.5	-15.8	6 987.2	23.1	1.1	0.2
	R202	—	3 600.3	100.0	6 668.3	38.4	1.1	—	6 669.7	31.6	1.0	0
	R203	9 001.8	3 603.4	74.0	6 174.7	60.7	2.3	-31.4	6 355.2	47.0	1.8	-2.9
	R204	10 427.8	3 608.3	94.0	5 867.4	94.0	2.4	-43.7	5 918.0	70.4	0.5	-0.9
	R205	10 140.5	3 606.6	74.1	6 488.9	37.9	2.7	-36.0	6 684.2	34.1	0.7	-3.0
	RC201	10 975.9	3 602.3	73.4	9 173.9	29.2	1.4	-16.4	9 149.1	24.0	0.5	0.3
	RC202	11 200.2	3 606.0	78.6	8 497.4	41.9	1.9	-24.1	8 691.1	35.1	1.3	-2.3
	RC203	—	3 600.2	100.0	8 125.9	60.0	1.6	—	8 104.3	46.1	0.7	0.3
	RC204	10 306.6	3 604.7	80.2	7 922.9	80.5	2.0	-23.1	7 919.7	61.2	0.5	0
	RC205	10 695.5	3 601.4	76.1	8 801.2	34.8	3.4	-17.7	8 836.4	30.6	1.9	-0.4

在表 1 中, TC 为配送成本; CT 为求解时间; RP 为剩余进度; ATC 为平均配送成本; ACT 为平均求解时间; RSD 为相对标准偏差。

$$RP = \frac{\text{上界} - \text{下界}}{\text{上界}} \times 100\%; \quad (30)$$

$$RSD = \frac{\text{标准差}}{\text{平均值}} \times 100\%; \quad (31)$$

$$GAP1 = \left(\frac{\text{IALNS 获得的配送成本平均值}}{\text{GUROBI 获得的配送成本}} - 1 \right) \times 100\%; \quad (32)$$

$$GAP2 = \left(\frac{\text{IALNS 获得的配送成本平均值}}{\text{SA 获得的配送成本平均值}} - 1 \right) \times 100\%. \quad (33)$$

由表 1 可以看出, 客户规模为 10 时, GUROBI 在 10 个算例上取得最优配送成本, IALNS 稍差于 GUROBI, 获得了 8 个算例的最优配送成本, 但 IALNS 求解时间较短, 最大耗时仅 1.4 s。当客户规模为 100 时, GUROBI 花费 1 h 无法获得 2 个算例 (R202 和 RC203) 的可行方案; 对剩余的 13 个算例, IALNS 的平均配送成本比 GUROBI 降低了 24%。而且, IALNS 求解大规模算例所需平均时间为 48.5 s, 远小于 GUROBI 所用求解时间。与模拟退火算法相比, IALNS 的配送成本也更低, 最大降低了 5.5%。另外, 由 IALNS 多次求解结果的相对标准偏差小于 5% 可知, IALNS 的求解稳定性较好。综上, 本文模型正确, IALNS 有效。

3.2 混合配送模式的有效性分析

应用 100 个客户案例, 表 2 比较了自营配送模式与混合配送模式的配送成本, 其中, VTC 为卡车行驶成本; NV 为卡车数; NC 为众包员雇佣数; $AVCC$ 为卡车服务客户的平均成本; $ACCC$ 为众包员服务客户的平均成本。由表 2 可知, 混合配送模式通过减少卡车数量和行驶距离降低了末端配送成本, 例如 C201 案例配送模式从自营配送变成混合配送时, 服务相同客户所需卡车数从 4 辆减少至 3 辆, 节约车辆固定成本 519.0 元; 同时, 减少卡车行驶成本 1 707.6 元; 仅因需要众包员, 增加众包员雇佣成本 1 077.1 元, 最终减少成本 1 149.5 元。

为便于应用, 进一步应用 100 个客户案例分析混合配送模式的适用特性。表 3、表 4 和表 5 分别为时间窗扩展率 WL , 卡车单位距离行驶成本 C_d 以及众包员供给-价格敏感系数 δ 的影响结果。其中, Cov 为 Pearson 相关系数; AVC 为平均每辆卡车服务的客户数。由表 3~5 可知, 随 WL 增加, 物流公司雇佣的众包员数量会减少。对于 C201、R201 和

表 2 自营配送模式与混合配送模式比较

Table 2 Comparison between self-operational delivery mode and hybrid delivery mode

案例编号	配送模式	CT/ 元	VTC/ 元	NV/ 辆	NC/ 人	AVCC/ 元	ACCC/ 元
C201	混合配送	7 284.1	4 650.1	3	31	90.0	34.7
	自营配送	8 433.7	6 357.7	4	0	84.3	0
R201	混合配送	7 037.5	3 033.0	3	67	139.1	36.5
	自营配送	9 144.4	6 549.4	5	0	91.4	0
RC201	混合配送	9 409.3	5 342.3	4	53	157.8	37.6
	自营配送	10 809.2	7 695.2	6	0	108.1	0

表 3 时间窗扩展率的影响

Table 3 Effects of time window extend ratio

案例编号	WL	CT/ 元	VTC/ 元	NV/ 辆	NC/ 人	Cov
C201	0.5	7 333.4	4 535.3	3	34	
	0.8	7 278.8	4 555.0	3	31	
	1.1	7 264.7	4 496.5	3	34	-0.7
	1.4	7 228.6	4 599.4	3	30	
	1.7	7 201.0	4 507.1	3	31	
R201	0.5	6 915.9	2 951.0	3	65	
	0.8	6 696.6	3 124.4	3	58	
	1.1	6 634.9	2 789.7	3	65	-0.7
	1.4	6 581.1	2 974.3	3	59	
	1.7	6 474.6	2 833.0	3	60	
RC201	0.5	9 065.2	5 048.4	4	55	
	0.8	9 031.4	5 058.9	4	52	
	1.1	8 731.2	5 153.3	3	53	-0.9
	1.4	8 665.0	5 186.4	3	51	
	1.7	8 497.6	5 173.5	3	50	

表 4 卡车单位距离行驶成本的影响

Table 4 Effects of truck's travel cost per kilometer

案例编号	C_d / (元·km ⁻¹)	CT/ 元	VTC/ 元	NV/ 辆	NC/ 人	AVC/ 人
C201	2	4 989.4	2 737.6	3	20	26.7
	4	7 458.0	4 877.9	3	26	24.7
	8	11 816.1	7 873.2	3	52	16.0
	16	19 848.4	14 179.6	3	71	9.7
	32	34 310.0	27 317.9	4	79	5.3
R201	2	4 769.3	2 065.7	3	33	22.3
	4	6 677.9	3 036.3	3	60	13.3
	8	9 674.6	5 217.4	3	74	8.7
	16	14 872.7	9 029.1	4	87	3.3
	32	24 060.1	18 166.3	4	85	3.8
RC201	2	6 333.2	3 115.4	4	32	17.0
	4	9 216.3	5 268.9	4	53	11.8
	8	13 956.3	9 048.5	4	70	7.5
	16	22 752.3	17 203.7	4	81	4.8
	32	40 111.8	34 173.1	5	78	4.4

表5 众包员供给-价格敏感系数的影响

Table 5 Effects of supply-price sensitivity factor of crowdsourced personnel

案例编号	$\delta /$ (人·元 ⁻¹)	CT/ 元	VTC/ 元	NV/ 辆	NC/ 人
C201	8	5 358.9	3 770.0	2	81
	16	5 687.5	3 740.2	2	76
	32	6 458.0	4 296.3	2	58
	64	7 112.0	4 351.3	3	39
	128	7 642.7	5 140.6	3	17
R201	8	4 411.3	2 428.5	3	85
	16	4 766.4	2 473.1	3	86
	32	5 309.5	2 379.5	3	84
	64	6 549.6	3 030.7	3	68
	128	7 896.4	3 893.4	3	44
RC201	8	6 886.5	4 440.2	4	81
	16	7 175.4	4 912.5	3	76
	32	7 795.5	4 642.8	4	68
	64	8 631.9	4 768.5	4	60
	128	10 239.1	6 058.4	4	37

RC201算例,它们间的相关系数分别为-0.7, -0.7和-0.9,相关系数较高。因此,混合配送模式在时间窗紧凑的末端配送中意义显著,如生鲜配送。随 C_d 增加,物流公司会招募更多的众包员,混合配送模式更有意义。这是因为雇佣众包员可以减少卡车行驶距离,仅需按单支付众包员报酬,因此,混合配送模式适用于卡车行驶成本较高时,如能源价格上涨。物流公司雇佣的众包员数量会随 δ 的增加而显

表6 众包员供给动态性的影响

Table 6 Effects of supply dynamics of crowdsourced personnel

案例编号	σ	PC/人	CT/元	NV/辆	NC/人	NT	NCPT/(人·时段 ⁻¹)	ACP/(元·人 ⁻¹)
C201	Inf	5.4	7 050.6	2	49	36	1.4	64.9
	9.0	6.2	7 333.6	2	45	30	1.5	64.9
	4.5	8.3	6 975.1	2	47	28	1.7	62.4
	3.0	11.0	6 710.3	2	40	28	1.4	53.9
	1.0	20.6	6 893.2	3	34	10	3.4	47.0
	0	21.6	7 540.9	3	48	10	4.8	56.3
R201	Inf	2.0	8 769.1	2	41	41	1.0	113.8
	9.0	2.3	8 687.7	2	50	50	1.0	101.7
	4.5	3.1	8 082.1	2	54	54	1.0	89.2
	3.0	4.1	7 657.9	2	47	47	1.0	88.1
	1.0	7.7	7 192.1	3	43	25	1.7	56.4
	0	8.1	7 104.5	3	42	25	1.7	54.1
RC201	Inf	2.1	10 266.0	3	43	43	1.0	107.5
	9.0	2.4	9 811.4	3	47	47	1.0	96.5
	4.5	3.2	9 216.2	3	46	46	1.0	83.3
	3.0	4.3	9 870.2	3	52	52	1.0	88.2
	1.0	8.0	8 742.3	3	46	25	1.8	57.7
	0	8.4	8 779.0	3	52	25	2.1	61.7

著下降,表明混合配送模式更适用于就业机会少、众包服务平台少的地区。

3.3 众包员供给动态性的影响

为模拟众包员供给动态性,本文利用正态分布生成各时刻的众包员到达概率密度,如图7所示,然后,统计各时段的客户到达概率,将其与一天的众包员供给总量相乘,得到各时段众包员供给量。正态分布均值为配送中心营业时间中点,标准差为 σ 。 σ 越小,众包员供给在时间上越集中。

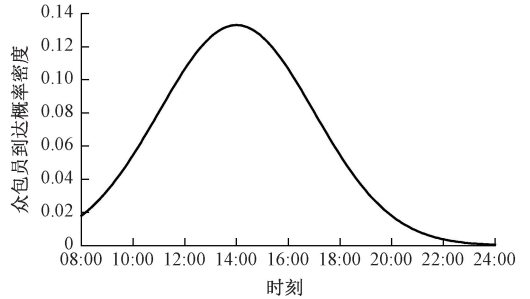


图7 各时刻的众包员到达概率密度

Figure 7 Arriving probability density of crowdsourced personnel at each moment

对100个客户案例,在一天的众包员供给总量为200人、众包员最大配送距离为40 km的条件下,不同众包员供给动态下的求解结果如表6所示。表6中,PC为一个时段的潜在众包员数最大值;NT为雇佣众包员的时段数量;NCPT为一个雇佣时段的众包员平均雇佣量,等于 NC/NT ;ACP为众包员平

均雇佣报酬。可知,众包员供给动态特性显著地影响混合配送模式的配送成本,但影响模式是随机的。这是因为众包员供给动态特性对众包员报酬有双向作用:一方面,它会因增加一部分时段的众包员供给数量而降低众包员报酬;另一方面,它会减少另一些时段的众包员供给数量而导致众包员报酬增加。在雇佣众包员时,物流公司会选择在供给量较多、报酬较低的时段雇佣,因此,可观测到众包员雇佣报酬随 σ 的减少而降低,而一个雇佣时段的众包员平均雇佣量会随之增加。

4 结论

(1)所建模型和提出的算法能够有效协同自营配送员和众包员,降低末端配送成本。首先,考虑众包员供给动态性的影响,优化众包员报酬和雇佣数量;然后,以配送成本最小为导向,合理指派客户并安排卡车配送路径。算例结果表明,与自营配送模式相比,协同自营配送员与众包员的混合配送模式通过减少卡车数量和行驶路径,降低了末端配送成本。

(2)采用的模型和算法能够有效解决考虑众包员供给动态性的末端配送优化问题。对于15个客户的小规模案例,直接求解构建的混合整数线性规划模型能够得到66.7%案例的最优配送方案,其余案例的近似最优方案;对于100个客户的大规模问题,设计的IALNS算法能以平均48.5s获得问题的近似最优方案。

(3)协同自营配送员与众包员的混合配送模式适用于时间窗紧凑、车辆行驶成本较高、就业机会少的场景;众包员供给动态性会显著且随机地影响混合配送模式的配送成本。

本文提供的末端配送优化方法适用于静态需求情景,未来可拓展其至动态需求情景。对于模型求解方法,可结合强化学习提升分支定界算法的求解效率。

参考文献:

[1] 杜子超,卢福强,王素欣,等. 众包物流配送车辆调度模型及优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(8): 1210-1216.
DU Z C, LU F Q, WANG S X, et al. Vehicle scheduling model and optimization of crowdsourcing logistics distribution[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(8): 1210-1216.

[2] 孟秀丽,吴一凡,刘波. 考虑延误险的多期众包物流服务质量优化[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12):

87-95.

MENG X L, WU Y F, LIU B. Multi-period crowdsourcing logistics service quality optimization considering delay insurance[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(12): 87-95.

- [3] ARCHETTI C, SAVELSBERGH M, SPERANZA M G. The vehicle routing problem with occasional drivers[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(2): 472-480.
- [4] MACRINA G, DIPUGLIAPUGLIESEL, GUERRIERO F, et al. The vehicle routing problem with occasional drivers and time windows[C]// Optimization and Decision Science: Methodologies and Applications. Cham: Springer, 2017: 577-587.
- [5] MACRINA G, DIPUGLIAPUGLIESEL, GUERRIERO F, et al. Crowd-shipping with time windows and transshipment nodes[J]. Computers & Operations Research, 2020, 113: 104806.
- [6] 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, 2024, 39(3): 1021-1029.
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, 2024, 39(3): 1021-1029.
- [7] DAYARIAN I, SAVELSBERGH M. Crowdsourcing and same-day delivery: employing in-store customers to deliver online orders[J]. Production and Operations Management, 2020, 29(9): 2153-2174.
- [8] SCHUR R, WINHELLER K. Optimizing last-mile delivery: a dynamic compensation strategy for occasional drivers[EB/OL]. (2024-12-26)[2025-02-10]. <https://doi.org/10.1007/s00291-024-00796-6>.
- [9] DAI H Y, LIU P. Workforce planning for O2O delivery systems with crowdsourced drivers[J]. Annals of Operations Research, 2020, 291(1): 219-245.
- [10] YILDIZ B, SAVELSBERGH M. Service and capacity planning in crowd-sourced delivery[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 100: 177-199.
- [11] LE T V, UKKUSURI S V, XUE J W, et al. Designing pricing and compensation schemes by integrating matching and routing models for crowd-shipping systems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 149: 102209.
- [12] 王会静,袁鹏程. 考虑骑手异质性的众包配送策略优化[J]. 计算机系统应用, 2024, 33(12): 210-221.
WANG H J, YUAN P C. Optimization of crowdsourcing delivery strategy considering rider heterogeneity[J]. Com-

- puter Systems & Applications, 2024, 33(12): 210-221.
- [13] 张念, 刘志学, 李锋. 考虑服务供应能力和服务质量的众包物流服务定价策略[J]. 管理学报, 2024, 21(1): 127-136.
ZHANG N, LIU Z X, LI F. Pricing strategy for crowdsourced logistics services considering service supply capacity and service quality[J]. Chinese Journal of Management, 2024, 21(1): 127-136.
- [14] 王文杰, 孙中苗, 徐琪. 考虑社会配送供应能力的众包物流服务动态定价模型[J]. 管理学报, 2018, 15(2): 293-300, 316.
WANG W J, SUN Z M, XU Q. Dynamic pricing for crowdsourcing logistics services with socialized providers[J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15(2): 293-300, 316.
- [15] 张燕, 李子鑫, 刘进平. 考虑工作量平衡的餐饮垃圾多行程收运路线优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 239-249.
ZHANG Y, LI Z X, LIU J P. Multi-trip food waste collection routing optimization with workload balance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(6): 239-249.
- [16] HUANG N, QIN H, XU G Y, et al. An enhanced exact algorithm for the multi-trip vehicle routing problem with time windows and capacitated unloading station[J]. Computers & Operations Research, 2024, 168: 106688.
- [17] ZHAO M, LI X P, YIN J T, et al. An integrated framework for electric vehicle rebalancing and staff relocation in one-way carsharing systems; model formulation and Lagrangian relaxation-based solution approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 117: 542-572.
- [18] XU M, MENG Q, LIU Z Y. Electric vehicle fleet size and trip pricing for one-way carsharing services considering vehicle relocation and personnel assignment[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 111: 60-82.
- [19] CHEN X Q, ZHENG H Y, KE J T, et al. Dynamic optimization strategies for on-demand ride services platform; surge pricing, commission rate, and incentives[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 138: 23-45.
- [20] YAO C Q, CHEN S B, YANG Z Y. Joint routing and charging problem of multiple electric vehicles: a fast optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 8184-8193.
- [21] 陈可嘉, 司徒腾宽, 方云飞, 等. 灵活车场多类型叫车接送问题的改进模拟退火算法[J/OL]. 控制理论与应用, 2024:1-9. (2024-10-11)[2025-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20241010.1711.034.html>.
CHEN K J, SITU T K, FANG Y F, et al. Improved simulated annealing algorithm for multiple depotsheterogeneous dial-a-ride problem with flexible depots[J/OL]. Control Theory & Applications, 2024:1-9. (2024-10-11)[2025-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20241010.1711.034.html>.
- [22] 靳文舟, 邓钦原, 郝小妮, 等. 改进人工蜂群算法的农村DRT路径优化研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 84-90.
JIN W Z, DENG Q Y, HAO X N, et al. Research on route optimization of rural DRT based on improved ABC algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 84-90.
- [23] 何美玲, 杨梅, 韩珣, 等. 带时间窗的时间依赖型同时取送货车车辆路径问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(4): 231-242, 262.
HE M L, YANG M, HAN X, et al. Time-dependent vehicle routing optimization considering simultaneous pickup-delivery and time windows[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 231-242, 262.
- [24] 李嫚嫚, 孙加辉, 丁楠, 等. 考虑服务定价的选择性众包配送优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(8): 1495-1504.
LI M M, SUN J H, DING N, et al. Selective crowdsourcing distribution optimization considering service pricing[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(8): 1495-1504.
- [25] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254-265.
- [26] 张晓楠, 范厚明. 带时间窗偏好的多行程模糊需求车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2461-2477.
ZHANG X N, FAN H M. Optimization for multi-trip vehicle routing problem with fuzzy demands considering time window preference[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2461-2477.

Optimization Method for Last Mile Delivery Considering Supply Dynamics of Crowdsourced Personnel

LI Manman, LEI Hailong, ZHAO Boxuan

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Considering the supply dynamics of crowdsourced personnel, an optimization method was proposed for last-mile delivery in scenarios involving both self-operated personnel and crowdsourced personnel in this study. A hybrid delivery optimization model was developed to minimize delivery costs, incorporating decision variables such as crowdsourced personnel compensation, customer assignment schemes, and multi-trip vehicle routing. The constraints was constructed based on a spatio-temporal network, including customer service requirements, load capacities, time windows, and spatio-temporal coordination between vehicles and crowdsourced personnel. To address the problem's characteristics, the minimal cost insertion algorithm was improved, and ten types of destruction operators were designed. An adaptive large neighborhood search algorithm was then improved by integrating the simulated annealing algorithm's concept of accepting inferior solutions to optimize delivery plans. Case studies with 100 customers demonstrated that the improved adaptive large neighborhood search algorithm achieved solutions with 24% lower in delivery cost on average compared with those obtained by GUROBI with 1 hour computation time, while taking only 48.5 seconds on average. The proposed algorithm also outperformed simulated annealing, achieving a maximum cost reduction of 5.5%. The hybrid delivery mode combining self-operated and crowdsourced personnel significantly reduced costs compared to the self-operated-personnel only mode. The hybrid mode proved particularly suitable for scenarios with tight time windows, high vehicle travel costs, and limited job opportunities. The supply dynamics of crowdsourced personnel exhibited significant and stochastic impacts on delivery costs.

Keywords: logistics engineering; last mile delivery; crowdsourced mode; supply dynamics of crowdsourced personnel; vehicle routing; adaptive large neighborhood search algorithm

(上接第 83 页)

Consideration of Dual-layer Hybrid Energy Storage Capacity Configuration Accounting for Photovoltaic Forecasting Errors and Grid Fluctuation Rates

WANG Mingdong¹, ZHOU Zhengyu¹, YANG Hongjie², LI Zhongwen¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: To meet grid connection requirements and ensure robust operation of the power system, a two-layer optimization model was proposed with objectives of reducing PV prediction errors, smoothing grid-connected power fluctuations, and minimizing annual equivalent costs. The upper-layer planning aimed to minimize annual equivalent costs, which included system investment, equipment replacement, maintenance costs, and carbon emission benefit costs. To improve system economic efficiency, a fuzzy genetic particle swarm algorithm was developed to optimize and analyze the model. In the lower-layer planning, the model aimed to minimize prediction errors and grid connection volatility. Based on distinct characteristics of supercapacitors and batteries, a charging-discharging power allocation strategy was constructed to enhance system response speed and extend battery cycle life. A solver was employed for control implementation to achieve PV prediction error compensation and PV output fluctuation smoothing. Finally, a model evaluation index function was established based on the proposed framework, with a PV power plant serving as a case study. Results demonstrated that the proposed algorithm exhibited faster convergence speed and superior optimization capability in this model. The *RMSE* and *MAPE* of prediction errors were reduced by 99.95% and 99.97% respectively, while the maximum grid connection fluctuation rate decreased by 96.08% after optimization. These findings verified the effectiveness and practicality of the proposed strategy.

Keywords: photovoltaic power generation; hybrid energy storage; leveled annual cost; compensation for prediction error; grid fluctuation smoothing; bilevel planning model