



基于多样化方案池的 即时配送订单实时响应方法

王 征¹, 李婷玉², 侯鑫垚²

1 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026

2 大连理工大学 软件学院, 辽宁 大连 116620

摘要:即时配送是随现代电子商务发展起来的一种新型物流活动,它需要根据顾客随时提出的紧急货品的配送要求,在一两个小时内就必须完成货物的取送服务。面对顾客提出的即时配送订单,目前电商大都采取“一律接单”的态度。然而,在既定的物流能力约束下,一旦顾客订单超出能力所及,延迟送货的情况在所难免,进而容易导致顾客满意度降低,甚至大面积取消订单的后果。因此,在顾客下单的瞬间,基于当前物流状态和能力,实时向顾客反馈能否按时送货等信息,成为解决顾客订单与物流能力不匹配问题的有效途径。

针对即时配送订单的实时响应问题建立数学模型,提出系统空闲期间事先缓存多样化的优质方案、在新订单进入时基于缓存方案快速生成应对方案的求解策略,建立基于多样化方案池的即时配送订单实时响应方法,设计该方法包含的基于适应性大邻域搜索技术的候选方案生成算法、基于方案差异度的缓存方案选择策略、基于方案池的订单实时响应算法3个关键模块。

研究结果表明,所提出的实时响应方法不仅大大缩短了计算时间,满足了实时响应的要求,而且保证了解的优化质量,与使用Cplex求解小规模问题模型得到的物流成本差异不超过2%,表现出良好的求解效果。

所提出的求解策略和实时响应方法为具有类似实时处理需求的一类动态问题提供了解决方法和思路,为即时配送公司提高顾客满意度、解决线下物流能力不足以支撑线上订单需求的关键问题提供了有效的途径,对于促进现代电子商务健康持续发展具有重要的现实意义。

关键词:即时配送;实时响应;方案池;大邻域搜索

中图分类号:F715.6

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1672-0334.2018.06.007

文章编号:1672-0334(2018)06-0092-12

引言

在现代电子商务环境下,一系列生鲜果蔬、零食小吃和鲜花礼物等顾客需求紧急且应快速完成配送的商品已成为大众网购的对象。该类紧急商品的订单需求在近年来呈快速增长趋势,季度订单超4亿^[1],市场规模保持了年逾40%的高速增长^[2]。

然而,在该类紧急需求订单快速扩张的背后,却存在着物流能力约束的致命问题。面对顾客随时提出的订单要求,配送公司通常在一两个小时内就必须完成货物的取送服务;目前几乎所有电商面对顾客订单往往都采取“来者不拒、一律接单”的态度;在配送公司既定的物流能力下,一旦顾客订单超出

收稿日期:2017-08-12 **修返日期:**2018-03-21

基金项目:国家自然科学基金(71271037, 71531002, 71571027);中央高校基本科研业务费专项项目(3132018161)

作者简介:王征,工学博士,大连海事大学航运经济与管理学院教授,研究方向为物流系统优化等,代表性学术成果为“Delivering meals for multiple suppliers: exclusive or sharing logistics service”,发表在2018年第118卷《Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review》,E-mail:drwz@dlut.edu.cn

李婷玉,大连理工大学软件学院硕士研究生,研究方向为电子商务和物流管理等,E-mail:lty1102@163.com

侯鑫垚,大连理工大学软件学院硕士研究生,研究方向为智能决策支持系统等,E-mail:734198697@qq.com

物流能力,延迟送货的情况在所难免,进而容易导致顾客满意度降低、甚至大面积取消订单的连锁反应。以上问题是相关电商及其配送公司都难以逾越且影响其生死存亡的关键问题,若处理不当,将会严重打击顾客信心,制约现代电子商务的健康持续发展^[3]。

在顾客下单的瞬间,系统基于当前的物流能力实时判断该单是否能够按时送货,并对顾客给予预计送达时间的实时反馈,让顾客心中有数(若无法按时送货,则顾客可选择取消订单),这成为解决这一问题的有效途径。然而,由于该问题所具有的复杂性,如何能够又快又准的对物流能力做出实时评估具有极高的难度。

(1)订单的实时响应,不能通过简单地将订单插入到某条车辆路线中来实现。一个新订单的插入,很有可能会导致路线上其他若干已有订单的送货时间超出要求,但由于系统已经给出了对已有订单按时送货的承诺,因此必须对受影响的已有订单进行相应的路线调整,而这一调整通常会引发其他车辆已有订单路线调整的连锁反应,从而导致车辆路线的大范围修改,最终往往会得到与原先截然不同的配送方案。

(2)订单响应具有实时性要求,必须在顾客下单的瞬间(通常1秒内)就给顾客一个实时的反馈。无论是该领域的精确算法^[4],还是大量的元启发式算法^[5-7]和迭代搜索算法^[8],都致力于在大面积范围内搜索全局最优解,通常需要消耗很长的求解时间,因此对此问题并不适用。

(3)订单响应不仅要快,而且要准。若给顾客反馈的结果不准确,则会产生极为负面的后果,即本来能按时服务却反馈给顾客“不能”,会损失掉该订单的利润;本来不能按时服务却反馈给顾客“能”,顾客会大失所望;本来能更早送货却反馈给顾客一个较迟的时间,顾客很可能会取消订单。

为此,本研究根据该问题的特点,提出基于多样化方案池的订单实时响应方法,并通过大规模实验,验证方法的科学性和有效性。

1 相关研究评述

即时配送订单实时响应问题属于一类带时间窗的车辆路径问题^[9],同时兼有动态车辆路径问题(dynamic vehicle routing problem, DVRP)、取送一体化车辆路径问题(vehicle routing problem with pickup and delivery, VRPPD)和多回程车辆路径问题(multi-trip vehicle routing problem, MTRVP)的特点。

在DVRP的研究中,问题的部分信息在车辆执行配送任务的过程中会逐渐被揭露或发生改变,从而车辆的任务安排和配送路线会因此而不断调整^[10]。贪婪式的重调度方法是学者们通常采用的一种求解思路,即问题信息一旦改变,则根据当前已知的问题状态重新快速生成新的配送方案。动态规划^[11]、列生成方法^[12]、蚁群算法^[13]、禁忌搜索^[14]、适应性记

忆^[15]、多计划方法^[16]、遗传算法^[17-18]、变邻域搜索算法^[19]是学者们采用的较多的一些方法。这些方法或者每隔一段时间就调度一次,或者在问题信息不变时不断优化已有方案,一旦问题信息发生变化就立即重调度^[20]。另一类DVRP的研究假设问题动态信息的概率分布已知,通过建立随机规划模型或采用Sampling的方法加以解决。该类问题的主要研究成果包括马尔可夫决策过程^[21]、近似动态规划(approximate dynamic programming, ADP)^[22]和线性规划方法^[23]等。然而本研究问题与DVRP有着本质的区别,DVRP通常以必须接受顾客订单为前提,致力于找出一种物流成本最小化的配送方案,且新顾客的插入很可能导致已有顾客时间窗的偏离。本研究问题以不能违反已有订单的时间窗约束、但可以违反新订单时间窗约束为条件,计算出一种使违反新订单时间窗约束最小化且物流成本最小化的配送方案。

VRPPD是指顾客同时有送货和取货需求、每辆车需同时完成取货和送货服务的路径规划问题^[24]。多数已有研究通常假设要送的货物都在车辆出发地装载,从顾客处所取的货物都送回至车辆终止地,从而车辆在途中既有送货又有取货的服务^[25-26]。还有研究考虑取货点与送货点一对一关系的VRPPD问题,即每个订单所要求的货物都必须先从某个地点取货后才能送货^[27-28]。本研究问题与后一类VRPPD问题相似,但与其不同的是,本研究的即时配送问题中,取货点与送货点具有复杂的一对多的关系。该种关系导致订单与车辆间具有更多样的任务分配组合,并衍生出每辆车应何时出发、出发路线又应如何安排等一系列问题。相对于一对一关系中仅需要一辆车从某个取货点到其送货点行驶一次的安排而言,一对多关系中的多车协作配送方案显然具有更高的处理难度。

在MTRVP的研究中,由于车辆容量、顾客特殊要求等原因,为完成顾客订单,车辆需多次返回仓库取货。FLEISCHMANN^[29]首次针对该问题提出先构造路径、再安排车辆任务的两阶段求解方法,其他学者针对这一问题相继进行研究,代表性成果包括禁忌搜索^[30]、适应性记忆^[31]、遗传算法^[32]、文化基因^[33]、大邻域搜索^[34]等启发式算法,以及分支定界^[35]、列剪枝^[36]等精确算法。然而,这些研究均聚焦于静态MTRVP,且求解耗时相对较长,不能满足即时配送订单的实时响应要求。

综上,即时配送订单的实时响应问题是现代电子商务环境下的新问题,已有研究成果对该问题并不适用。该问题在求解上的快和准的双重要求以及特殊的问题约束和目标,使问题的求解极具挑战性,已有相关研究在求解时间、问题约束和目标方面无法满足要求。因此,本研究根据问题特点,通过缓存多样化的路径方案,满足求解速度和解的质量的双重要求,开发出一种新颖的、基于多样化方案池的在线求解算法。

2 问题及其重调度模型

即时配送订单的实时响应问题可描述为:某商户拥有多个同型车辆,为在线订单提供即时配送服务;当新订单实时下达后,商户需根据当时的车辆状态和订单要求,在保证已有订单按时送货的承诺下,向新订单的顾客给予能否按时送货的反馈;若不能按时送货,则向顾客反馈可行的送货时间,待顾客确认或取消订单。由于商户每天在确定的时段内(如9:00~21:00)接收顾客订单并进行配送活动,因此,顾客订单时间窗只能在该配送时段内。

由于即时配送问题所送的货物通常具有保鲜要求,其在途时间不宜过长,否则新鲜度将大打折扣。车辆如果针对其配送任务一次性装载所有货物,在途时间很可能超出最长时限的要求。因此,为满足最长在途时限的要求,车辆每次应从商户取走部分订单的货物,将其送完后再回商户取货。如此下来,车辆应多次返回商户取货,并不断地往返于商户与顾客之间,以便在最长在途时限的要求下,完成所有订单的取送任务。此外,由于车辆到达顾客处后仅需将货物交予顾客,所以假设每个订单点的服务时间为0。

需要说明的是,车辆每次从商户取得部分货物并离开商户进行配送后,车辆路线不会更改,车辆在本次旅途中即将服务的顾客应从未服务的订单中删除,同时该车辆的可用时间也应被设置为其结束本次配送、返回商户的时间。那么,新订单实时响应问题的模型应以所有车辆的可用时间要求、所有未服务订单的配送要求和车辆在途送货时限等为约束,以最小化物流配送成本和新订单的时间窗偏离惩罚为目标建立。

表1给出该问题涉及的一些参数和变量。

当新订单进入时,该订单的实时响应问题可基于上述参数和变量建模,即

$$\begin{aligned} \min z = & \alpha \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in K} x_{i,j,k} t_{i,j} + \beta (T_{p_{new}} - t_{p_{new}}^l) y \quad (1) \\ s. t. & \sum_{j \in P_C} x_{p_0^0, j, k} = \sum_{i \in P_C} x_{i, p_0^0, k} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2) \\ & \sum_{k \in K} \sum_{i \in P} x_{i, p, k} = \sum_{k \in K} \sum_{j \in P} x_{p, j, k} = 1 \quad \forall p \in P_0 \cup P_C \quad (3) \\ & \sum_{i \in P} x_{i, p, k} = \sum_{j \in P} x_{p, j, k} \quad \forall p \in P_0 \cup P_C, k \in K \quad (4) \\ & x_{p_0^0, p, k} (T_p - t_{p_0^0, p} - t_k^u) \geq 0 \quad \forall p \in P_0 \cup P_C, k \in K \quad (5) \\ & x_{i, j, k} (T_i + t_{i, j} - T_j) \leq 0 \quad \forall i, j \in P, k \in K \quad (6) \\ & t_j^l \leq T_j \leq t_j^l \quad \forall j \in P_{old} \quad (7) \\ & (y - 1)M < T_{p_{new}} - t_{p_{new}}^l \leq yM \quad y \in \{0, 1\} \quad (8) \\ & C_j = \sum_{i \in P_0 \cup P_C} \sum_{k \in K} x_{i, j, k} (C_i + q_j) \leq Q \quad \forall j \in P_C \quad (9) \\ & W_j = \sum_{i \in P_0 \cup P_C} \sum_{k \in K} x_{i, j, k} (W_i + T_j - T_i) \leq L \quad \forall j \in P_C \quad (10) \end{aligned}$$

其中,(1)式为目标函数,表示车辆行驶成本和订单时间窗偏离的惩罚成本之和最小化。 $T_{p_{new}}$ 为新订单

表1 参数和变量

Table 1 Parameters and Variables

参数或变量	含义
K	固定车辆集合,其中每辆车每次配送任务都从商户出发,最终返回商户
P	点集合。 $P = \{p_0^0, p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^{n+1}\} \cup P_{old} \cup \{p_{new}\}$,其中, p_0^i 为商户点, $0 \leq i \leq n+1, n$ 为当前时刻未服务的订单数, p_0^0 为所有车辆的起始点, p_0^{n+1} 为所有车辆的终止点,由于商户会被多次访问,而最坏情况下每个订单都需要回商户取货,所以 $\{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^n\}$ 为多个具有相同位置但不同访问时间的商户点,其元素分别是为每一个订单而复制的商户点; P_{old} 为已知订单的点集合; p_{new} 为新订单点。特别地,本研究用 P_0 表示商户点(不含起止点), $P_0 = \{p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^n\}$;用 P_C 表示新旧订单点集合, $P_C = P_{old} \cup \{p_{new}\}$ 。
Q	车辆最大容量
L	从商户取货后到访问配送订单点的最大时间限制
q_i	i 订单的货物所占用的车辆容量
$[t_i^e, t_i^l]$	i 订单的时间窗, t_i^e 为 <i>i</i> 订单最早的送货时间, t_i^l 为 <i>i</i> 订单最迟的送货时间, $i \in P_{old} \cup \{p_{new}\}$
$t_{i,j}$	i 订单点与 <i>j</i> 订单点两点间的行驶时间, $i \in P, j \in P; t_{i,j} = 0, i \in \{p_0^0, p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^{n+1}\}, j \in \{p_0^0, p_0^1, p_0^2, \dots, p_0^{n+1}\}$
t_k^u	k 车辆的最早可用时间, $k \in K$;当前时刻,若 <i>k</i> 车辆正在送货途中, t_k^u 为其返回商户时间,若 <i>k</i> 车辆正在商户待命,则 t_k^u 为当前时间
$x_{i,j,k}$	0-1决策变量,表示 <i>k</i> 车辆是否从 <i>i</i> 订单点行驶到 <i>j</i> 订单点, $i \in P, j \in P, i \neq j, k \in K$
y	0-1决策变量,表示新订单的服务时间是否偏离了其时间窗
T_i, T_j, T_p	决策变量,表示订单点的访问时间, $i \in P, T_{p_0^0} = 0$
C_i	决策变量,表示车辆从商户出发到 <i>i</i> 订单点累计占用的车辆容量, $C_i = 0, i \in \{p_0^0\} \cup P_0$
W_i	决策变量,表示从商户取货到访问 <i>i</i> 订单点的时间长度, $i \in P_C; W_i = 0, i \in \{p_0^0\} \cup P_0$
α	目标函数中的系数,表示每单位行驶时间所消耗的行驶成本
β	目标函数中的系数,表示每单位时间窗偏离的惩罚成本

的访问时间, $t_{p_{new}}^i$ 为新订单要求的最迟送货时间。(2)式表示所有车辆,若被使用则从 p_0^0 出发至某个订单点,并最终从某个订单点返回 p_0^{n+1} ;若不被使用则对起止点的访问次数为 0,且不访问任何订单点。(3)式表示每个订单点仅被访问一次。(4)式表示每辆车针对每个订单点的进入和离开次数必须相同。(5)式表示车辆从起点 p_0^0 出发的时间应该在其最早可用时间之后, $t_{p_0^0, p}$ 为车辆从 p_0^0 到 p 的行驶时间。(6)式表示如果两个点被一辆车顺次访问,它们的访问时间应保证一定的连续性。(7)式表示每个已知订单必须在其时间窗内服务。(8)式表示若新订单的服务时间超出其时间窗, $y = 1$, 否则 $y = 0$, 其中的 M 为一个很大的正数。(9)式表示车辆容量约束。(10)式表示车辆每次从商户出发后的在途时间不会超出限制。该模型通过多个约束保证车辆路径的连通性,即车辆路径不会中断和分叉((5)式)、不会出现环路((3)式~(5)式),若被使用则必从 p_0^0 出发并最终返回 p_0^{n+1} ((3)式)。

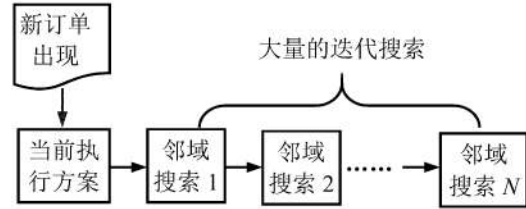
由上述模型可知,即使对于一个含有几十个订单和几辆车的问题而言,模型的变量和约束数量也会十分庞大,精确算法根本无法实时给出最优方案,而建立启发式算法是解决该问题的有效途径。为此,本研究将建立该问题的启发式求解方法。

3 基于多样化方案池的实时响应方法

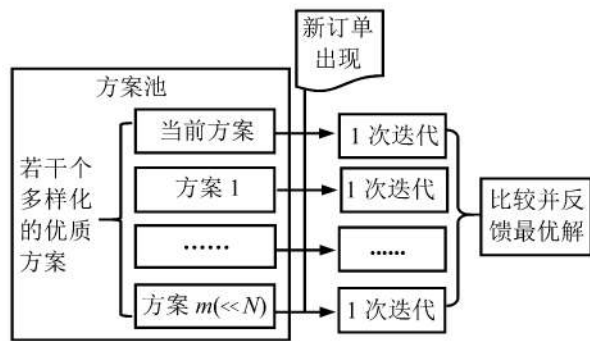
即时配送订单的实时响应问题属于一类动态的车辆路径问题,该类问题通常采用经典的事件驱动型处理方式^[37],即在特定事件发生时系统应立即响应或改变状态。新订单的产生、车辆的出发和返回是导致问题状态改变的3类事件,当新订单产生时,系统应立即向顾客反馈能否按时送货的信息;当车辆出发时,由于车辆每次出发的路线不会改变,应将车辆此次配送所服务的订单从未服务订单中删除,同时设置车辆的可用时间为其结束本次配送、返回商户的时间;当车辆返回时,应立即为车辆确定下一次配送任务和出发时间,本研究基于当前最优的候选方案而确定。本节给出新订单产生时的实时响应方法。

即时配送订单的实时响应问题具有实时和准确两种求解要求,问题的精确算法虽然可以准确给出最优方案,但无法满足实时要求;而与精确算法相比,尽管目前流行的元启发式算法^[5-7]和迭代启发式算法^[8]使用了更少的求解时间,但与实时要求仍有相当大的差距,需进行较大改进。现代启发式算法的精髓在于,通过禁忌表^[38]、毁坏重建算子^[34]、模拟退火思想^[39]、参数的适应性调整策略^[40]和多样化随机技术^[41-42]等各种技术,不断在当前解的邻域范围内搜索更好的解,这些技术往往需要一定的收敛时间才能找到优质解。本研究采用多样化方案池的策略,即在新订单到来之前,事先在池中缓存各种各样的优质方案,一旦新订单到来,利用池中的缓存方

案快速生成最佳的应对方案,从而大大缩短计算时间,既满足实时响应的要求,又能保证解的优化性。图1给出目前启发式算法的主流思想和本研究的多样化方案池策略示意图。



(a) 目前启发式算法的主流思想

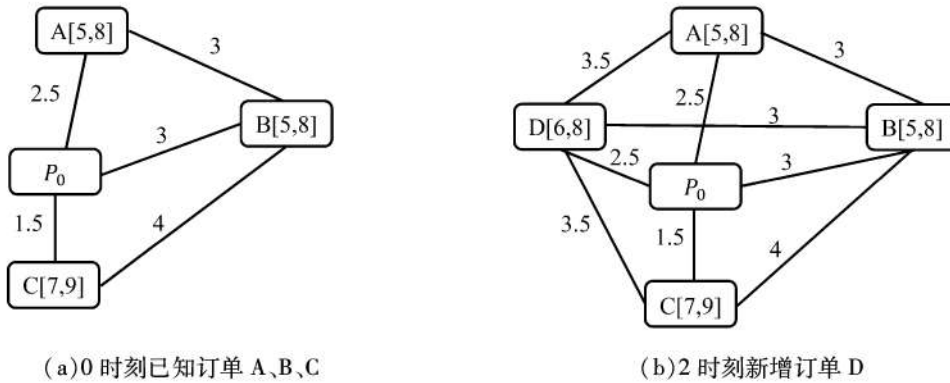


(b) 本研究的多样化方案池策略

图1 多样化方案池策略与目前启发式算法主流思想的差别

Figure 1 Differences between the Strategies for a Pool of Various Solutions and the Mainstream Ideas of Current Heuristics

图2给出即时配送订单实时响应问题的一个小例子,其中包含顾客、商户点间的行驶时间和顾客的时间窗要求。下面利用这个例子对多样化方案池策略进一步给出说明。表2依据图2所示的数据要求,给出针对0时刻的初始方案1、方案2、方案3以及在订单D出现后的调整方案4、方案5、方案6。该例在0时刻有3个订单,其最优配送方案为表2中的方案1。相对于表2中的方案2和方案3,方案1具有更少的行驶成本。因此,若按照目前启发式算法的主流思想,系统仅保留方案1,两辆车的最迟出发时刻分别为2.5和5.5;但根据本研究提出的多样化方案池策略,这3个方案都被保存在方案池中,以便后续的快速优化。在2时刻,订单D出现,此时两辆车仍未出发,而只要将订单D插入到方案3的第二条路线上即可快速得到新问题的最优解(表2的方案6),两辆车按照新问题的最优解执行即可;而前两种方案无论如何调整,都很难一步到位,即若每次迭代仅修改一个顾客位置,则方案4和方案5都最少需要5次邻域变换才能达到方案6的最优解。



注：此例中有两辆车； P_0 为商户；A~D 为订单；方括号中数字为订单时间窗；点间连线上的数字为行驶时间。

图 2 多样化方案池策略的说明示例

Figure 2 An Example for the Strategies for a Pool of Various Solutions

表 2 图 2 示例中的初始方案及其调整策略

Table 2 Initial Design and Rescheduling Solutions to the Example in Figure 2

订单 D 出现前的车辆路线方案				订单 D 出现后的车辆路线方案				给顾客 D 的反馈	
方案	车辆 1 路线	车辆 2 路线	行驶成本 时间窗 偏离	方案	车辆 1 路线	车辆 2 路线	行驶成本 时间窗 偏离	能否按时送货	最早服务时间
方案 1	0-A-B-0	0-C-0	11.5 0	方案 4	0-A-B-0	0-C-D-0	16 2.5	否	10.5
方案 2	0-A-0	0-B-C-0	13.5 0	方案 5	0-A-D-0	0-B-C-0	17 0.5	否	8.5
方案 3	0-A-0-C-0	0-B-0	14 0	方案 6	0-A-0-C-0	0-B-D-0	16.5 0	能	8

注：方案 4、方案 5、方案 6 分别为与方案 1、方案 2、方案 3 对应的调整方案，0 代表 P_0 ，即商户。

当订单数很多时，启发式算法采用的迭代式邻域搜索相当耗时，且不见得每次迭代都能朝着最优解的方向递进一步，通常需要在尝试多个搜索方向之后才能确定哪个搜索途径最有希望。与之相比，本研究通过在系统闲置期间（本例中的 0~2 的时间内）搜索并缓存多样化的优秀方案，为实现从缓存方案到最优方案“一步到位”的实时响应奠定了基础，在求解速度和质量上都明显优于单一解的邻域搜索过程。应该看到，本例即使仅缓存了方案 1 和方案 2，也比只存储当前运行方案 1 要好。

由该例可知，基于多样化方案池的实时响应方法有 3 个关键问题：①如何生成候选方案（即表 2 中的方案 1、方案 2、方案 3）；②如何在候选方案中选择缓存方案（若方案池的容量有限，仅能容纳两个方案，那应选择哪两个方案）；③在新订单来临时，如何基于缓存方案生成最优的配送方案。下面将对这 3 个问题依次阐述。

车辆在按计划执行的过程中，没有新订单进入时，系统将使用 3.1 中的候选方案生成方法和 3.2 中的缓存方案选择策略，不断优化方案池中的候选方案；一旦有新订单进入，算法立即停止方案池的更新，并利用 3.3 中的方法对顾客进行实时的响应。

需要说明的是，方案池中的候选方案所面向的订单是所有未服务的订单，但不包括在途车辆即将服务的订单；一旦车辆从商户出发，即将该车辆服务的订单从未服务的订单集合中删除，该车辆的可用时间设置为其返回商户的时间，同时，系统再次面向未服务的订单集合生成并优化方案池中的候选方案。

3.1 候选方案生成方法

候选方案的整体质量决定方案池中缓存方案的优劣，也决定即时配送订单实时响应方案的好坏，因此候选方案生成工作是本研究实时响应方法的基础。尽管这一工作在系统闲置期间完成，但现实中很多商户在订单高峰期仅有平均几分钟的闲置时间，如何抓住有限的系统闲置时间、快速有效地生成高质量的候选方案是首先要解决的关键问题。

启发式算法依然是生成候选方案的有效途径。较早的启发式算法包括遗传算法^[17-18,32]、蚁群算法^[13]、禁忌搜索^[14,38]、模拟退火^[39]和神经网络^[43]等，近年来该领域启发式算法的研究已推进到迭代邻域搜索^[8]、大邻域搜索^[34]、适应性迭代搜索^[44]以及多方法的混合应用^[8,45]。因为大邻域搜索具有快速收敛的特性及很强的跳离局部最优的能力而被众

多学者采纳,该算法针对很多带时间窗车辆路径问题的标准算例都超越其他算法,而得到当前最优解^[46]。因此,本研究根据问题特点建立候选方案生成的适应性大邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法,利用该算法对问题的初始解进行迭代优化,而问题的初始解采用随机最优插入(randomized best insertion, RBI)^[42]方法得到。

在候选方案的生成中,路线的摧毁、重建以及算子的选择策略是算法的主要内容。

(1)路线的摧毁算法

根据问题特点,本研究给出改进的随机删除、Shaw删除和最坏删除^[46]3种算子,它们都是删除一定比例的订单即停止,本研究采用的比例为20%。随机删除算子随机找一个订单删除,一旦删除后有两个相同的商户点相邻,就删除其中一个(后两个删除操作也包含此过程)。Shaw删除算子根据订单的相关性删除,先随机选择一个订单,然后删除与其相关性最高的订单,再在已删除的订单中随机选择一个,删除与这个订单相关性最高的订单,……,直至删除足够的订单。本研究将*i*订单与*j*订单的相关性 $S_{i,j}$ 定义为

$$S_{i,j} = \frac{1}{t_{i,j} + \frac{|t_i^e - t_i^s - t_j^s + t_j^e|}{2}} \quad (11)$$

最坏删除算子则先计算每一订单删除之后成本差值,然后根据成本差值,使用轮盘赌方法随机选择订单,成本差值越大的越容易被选择。

(2)路线的重建算法

根据问题特点,本研究给出贪婪和悔恨^[46]两种算子。贪婪算子将订单依次插入到成本最小的位置上,如果是已知顾客,则插入位置必须符合顾客时间窗;如果是新订单,则可违反时间窗约束(两种算子都包含这一检查过程)。悔恨算子首先计算每个订单的最优插入位置和次优插入位置的成本差值,然后将差值最大的订单插入到其最优位置上。这两种插入都需要将车辆的出发时间推迟至其可用时间之后,同时检查车辆容量约束,如果不满足,则通过在其前后位置插入商户来满足车辆容量约束。

(3)算子的适应性选择策略

算子的适应性选择策略是适应性大邻域搜索算法的基本组成部分,它将在算法执行的不同阶段动态选择有效的算子。由于算法迭代到不同的阶段,路线的摧毁算子和重建算子对解的优化效果不同。因此,本研究根据前*N*次迭代中(本研究设*N* = 50)算子更新最优解的次数对每个算子予以评价,并基于算子的评价,利用轮盘赌方法在每次迭代时随机选择一个算子进行摧毁和重建操作。

3.2 缓存方案选择策略

考虑到订单响应的实时要求,方案池中不能无限制地存储大量的候选方案。在不同配置的计算机上,订单响应程序的执行时间不同,为实现订单实时

响应目标(1秒内响应),可通过实验确定不同计算机的方案池中最大可存储的方案个数(本研究的实验结果为330)。

缓存哪些方案是需要解决的关键问题。本研究希望在池中尽可能保留多样化程度较高的优质方案,而不是保留过于相似的劣质方案,以便在不同的新订单进入时都能找到一种有效方案应对。方案的质量和方案的相似度是选择候选方案的两个重要标准。

关于方案质量,3.1节大邻域搜索算法每次迭代都会产生一个候选方案,在方案池中已存满方案的情况下,只有方案池中存在物流成本比该候选方案高的方案时,本研究才将它作为优质方案来更新方案池。

关于方案相似度,本研究将具有最大多样化程度的若干优质方案缓存在池中。若*i*订单和*j*订单在两个方案中的服务顺序一样,即都是按照*i*→*j*或*j*→*i*的顺序服务,那么本研究称*i*订单和*j*订单是这两个方案的相同订单对。设*a*方案和*b*方案的相同订单对个数为 $R_{a,b}$,最大可能具有的相同订单对个数为 $R_{a,b}^{\max}$,两个方案的多样化程度为 $D_{a,b}$, $D_{a,b}$ 值越大,则两个方案的差异程度越大。

$$D_{a,b} = \frac{R_{a,b}^{\max} - R_{a,b}}{R_{a,b}^{\max}} \quad (12)$$

在更新方案池时,若方案池未达到个数上限,则直接将找到的候选方案插入到池中;否则,计算候选方案与池中方案的平均多样化程度,若大于池中所有方案之间的平均多样化程度,则将其加入方案池,并删除方案池中与其他方案平均多样化程度最小的一个方案。通过这一方法,可以始终使池中保留多样化程度较高的若干个方案。

3.3 基于方案池的实时响应方法

当有新订单进入时,算法立即停止对方案池的更新。利用插入方法^[9],尝试将新订单插入到方案池中所有方案的最佳位置上,找出成本最小且面向新订单的配送要求可行的方案;如果不存在可行方案,即新订单的要求无法满足,则找出满足所有旧订单送货时间窗的成本最小的方案。根据找出的方案给顾客反馈能否按时送货,若不能按时送货,则将可送货的最早时间告知顾客。如果顾客因不能按时送货而取消订单,则系统恢复到之前的状态继续更新方案池;如果能够按时送货,或者顾客接受了延迟后的送货时间,则系统将顾客插入到对应方案上,然后重新初始化并更新方案池。

4 实验和分析

本研究基于C#开发技术实现了订单实时响应算法程序,并采用若干个国际上公认的Solomon Benchmark算例^[47]对算法的科学性和有效性进行全面测试,整个测试过程在Win 10操作系统、配置为Intel i7 CPU、4GB内存的机器上运行。下面对测试算例、算法的参数设置、算法的计算结果进行详细阐述。

4.1 测试算例和参数设置

与本研究中的问题不同, Solomon Benchmark 算例是含有100个点、一个中心车场、每个订单带时间窗和服务时间的静态问题。为转化为本研究探讨的即时配送这一动态问题, 本研究将算例中的车场视为商户, 车辆从商户出发, 完成订单配送之后返回商户; 每个订单都需要从该商户取货并在规定的时间窗内送至顾客指定地点, 不考虑订单的服务时间; 将每一订单(如*i*订单)的下单时间设定为区间 $[0, t_i^e - t_{0,i}]$ 内的一个随机值; 将车场的 $[t_i^e, t_i^l]$ 作为整个程序的运行时间, 均匀分布在1.5小时内, 每一订单的下单时间和时间窗都等比例对应到1小时的时间内; 设置配送中心的最大可用车辆数为10; 每辆车的容量、每个订单的时间窗、送货坐标点、所占用的车辆容量等其他信息都从算例中获得。

根据订单送货点的地理分布特征, Solomon Benchmark的所有算例一共有3类问题, 即聚簇分布类问题(标号为C)、平均分布类问题(标号为R)、聚簇分布和平均分布混合类问题(标号为RC)。每类问题的时间窗宽窄不同, 本研究从窄时间窗的问题中选择6个算例, 即C101、C106、R101、R105、RC101、RC106。每个算例从0时刻起, 系统就不断地接到顾客订单, 每接到一个订单, 系统立即给出是否能够按时送货的响应。假设在不能按时送货时, 顾客对延迟送货的结果都表示接受, 当所有顾客的订单都已服务完成后, 车辆返回商户。

针对目标函数中的系数, 本研究设置 $\alpha = 1$, 而 β 设置为一个较大的值, 即 $\beta = 10$, 表示对新订单超时服务的惩罚。根据新订单实时响应的要求, 本研究设置方案池中方案个数为330个。在这一方案数内, 利用现有台式机可在1秒内完成新订单的响应时间, 超过这一方案数, 则新订单响应时间增加。在路线摧毁算法中, 本研究每次删除订单的比例为20%。

4.2 计算结果及其分析

针对转换后的算例, 本研究在系统中模拟每个订单实时下单、车辆动态调度的整个过程, 并运用本研究基于多样化方案池的订单实时响应方法对每一个新订单进行在线计算, 判断能否按时送货, 给出响应结果。顾客接受响应的结果后, 车辆按照新方案继续运行, 直至所有订单服务完成, 车辆返回商户。

基于上述实验思路, 本研究得到最终的计算结果, 见表3。表3给出每产生5个订单后采用两种方法计算的物流成本、按时服务订单数、求解时间, 两种方法分别是本研究方法和使用Cplex求解模型的方法。按时服务订单数是指系统已经向顾客反馈了能够按时送达的订单数。不同的算法给出不同的配送方案, 并给顾客不同的反馈结果, 因此按时服务订单数从客户服务的角度反映了算法的优劣。另外, 由于Cplex方法针对超过30个订单问题的求解难以在有限时间内完成, 所以表3仅列出Cplex方法针对30个以内订单规模问题的计算结果。为便于比较, 表格的最后一列给出了两种方法物流成本之差占本研究

方法物流成本的百分比。

需要注意的是, 在使用Cplex求解之前, 必须对第2部分建立的问题模型进行线性化处理, 因为该模型在目标函数和约束方程(5)式、(6)式、(10)式中都包含非线性成分。为此, 本研究基于该领域的常用方法^[48], 将模型中的非线性成分转化为若干个线性不等式。

由表3可知, 本研究的订单实时响应方法与Cplex方法所求解的模型结果非常接近, 最大差异不超过2%, 平均差异程度为0.556%。同时, 本研究方法的求解时间不超过1秒, 而Cplex方法的求解时间却从几秒到两千多秒不等, 在求解时间上本研究的方法具有明显的优势。这说明本研究的订单实时响应方法通过缓存多样化的配送方案, 将潜在的优质方案保存起来, 既可在新订单进入时给出优秀的配送方案, 又可兼顾计算时间, 满足该问题实时响应的时间要求。而在按时服务订单数方面, 本研究方法的结果与Cplex方法的结果相差不大, 在第30个顾客订单下达时, 两种方法的按时服务订单数基本一致, 有两个算例完全一样, 另外4个算例仅相差一到两个订单。本研究的订单实时响应方法虽然仅用了极短的求解时间, 但仍保证了较高的求解结果质量。

图3针对算例C101从更细的层面上描绘了本研究订单实时响应方法在每一个新订单进入时的计算结果, 给出每一个订单到来时本研究方法得到的物流成本和平均每个订单耗费的物流成本。

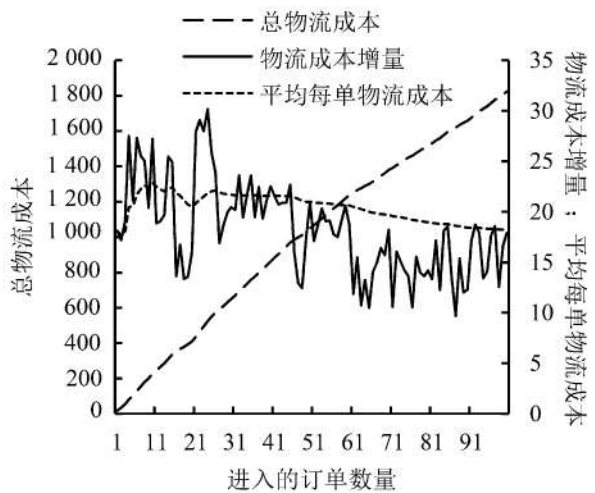


图3 针对C101算例
在每个新订单进入时的计算结果
Figure 3 Results Obtained from the Instance
of C101 When Any New Order is Just Placed

由图3可知, 随着新订单的进入, 总物流成本一直呈上升趋势, 但平均每单的物流成本则呈缓慢下降趋势, 说明本研究算法可以在不过多增加物流成本的情况下, 针对新订单给出配送方案, 同时保证每个已有订单的服务时间。另外, 图3给出的物流成本增量一直处于上下波动的状态。应该看到, 不同新

表3 实时响应方法和 Cplex 方法的计算结果
Table 3 Results from the Presented Real-time Response Method and Cplex

算例	订单数	本研究实时响应方法			Cplex 方法			两种物流成本的差距/%
		物流成本	按时服务订单数	求解时间/秒	物流成本	按时服务订单数	求解时间/秒	
C101	5	102.962	5	0.096	102.962	5	4.132	0
	10	228.489	10	0.111	228.489	10	19.159	0
	15	336.504	14	0.158	332.810	14	106.061	1.098
	20	409.897	18	0.203	404.013	19	918.443	1.435
	25	550.902	23	0.224	544.228	24	1 546.492	1.211
	30	650.721	27	0.242	644.724	28	2 473.127	0.922
	100	1 824.551	91	0.938				
C106	5	129.872	5	0.066	129.872	5	5.846	0
	10	268.807	10	0.120	268.807	10	21.610	0
	15	376.685	15	0.191	376.685	15	107.387	0
	20	422.753	18	0.217	417.345	18	1 009.568	1.279
	25	580.267	22	0.224	571.061	23	1 586.681	1.587
	30	674.615	26	0.248	662.370	28	2 496.304	1.815
	100	1 985.730	89	0.948				
R101	5	138.802	5	0.095	138.802	5	3.762	0
	10	291.771	10	0.108	291.771	10	15.366	0
	15	430.648	14	0.181	430.648	14	97.417	0
	20	556.226	19	0.214	552.170	19	940.284	0.729
	25	687.229	23	0.217	680.543	23	1 245.222	0.973
	30	810.346	27	0.259	800.194	28	2 632.903	1.253
	100	2 431.927	87	0.883				
R105	5	148.079	5	0.012	148.079	5	5.137	0
	10	265.273	10	0.131	264.454	10	19.285	0.309
	15	394.459	14	0.174	393.007	14	103.533	0.368
	20	539.776	18	0.211	535.502	18	1 021.861	0.792
	25	683.273	23	0.221	678.389	23	1 195.183	0.715
	30	848.991	28	0.257	840.464	28	2 570.044	1.004
	100	2 529.412	90	0.891				
RC101	5	159.804	5	0.040	159.804	5	4.428	0
	10	326.886	10	0.124	326.886	10	17.921	0
	15	449.010	14	0.187	449.010	14	100.703	0
	20	608.194	19	0.214	606.404	19	987.492	0.294
	25	693.651	24	0.225	688.588	25	1 061.507	0.730
	30	864.946	27	0.245	858.913	28	2 463.468	0.698
	100	2 682.493	88	0.905				
RC106	5	162.231	5	0.054	162.231	5	4.910	0
	10	321.054	10	0.101	321.054	10	20.384	0
	15	451.986	13	0.185	451.986	13	102.229	0
	20	569.082	18	0.203	564.934	18	998.920	0.729
	25	679.167	23	0.237	671.269	23	1 035.165	1.163
	30	794.952	27	0.258	787.818	27	2 385.203	0.897
	100	2 576.042	87	0.946				

订单的进入,在不同的车辆运行状态下,会有不同的调整方案。有的新订单容易被插入到已有路线中,形成较低成本的配送方案,但有的新订单则需要较多的物流成本来应对。因此,为响应新订单而产生的物流成本增量就会呈现出正常的上下波动现象,这也说明本研究的订单实时响应方法会随着新订单和系统状态的不同,而对物流方案进行不同程度的调整。除C101算例外,其他算例的计算结果也都呈现出相似的变化趋势。

在本研究的订单实时响应方法中,方案池中缓存方案的个数是影响计算效率和解的质量的关键因素。为判断不同个数缓存方案对算法结果的影响,本研究仍以C101算例为例,将缓存方案设置为从1到400(每次增加50个缓存方案),分别计算每一个缓存方案个数下本研究算法针对100个订单都下达后的总体计算结果,包括总物流成本、按时服务订单数、求解时间,得到的结果见图4。

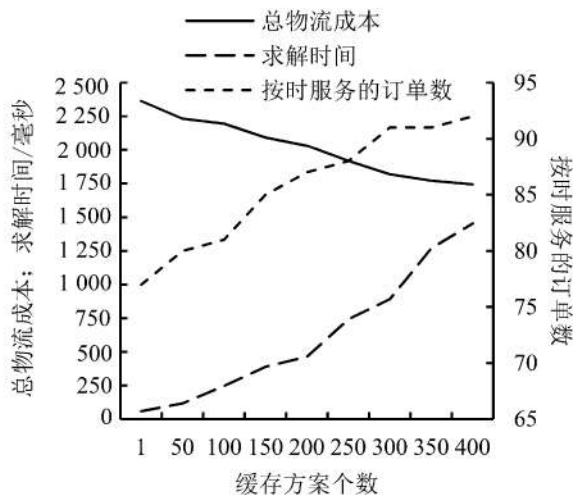


图4 不同缓存方案个数下算法针对C101算例100个订单都下达后的最终计算结果

Figure 4 Final Results Obtained from the Instance of C101 When All the 100 Orders are Placed with Different Numbers of Solutions

由图4可知,随着缓存方案个数的不断增长,总物流成本持续下降,但求解时间却快速增长,并且针对100个订单的按时服务订单数也在增加。这说明当缓存较多方案时,算法能够给出较高质量的解,但需要花费大量时间。由于给顾客的反馈需要控制在1秒内实时完成,因此本研究选择缓存330个方案这一策略,在保证系统实时响应时间的同时,尽可能地提高解的优化质量。

5 结论

即时配送问题是支撑现代电子商务发展的一种新型物流活动,在实际操作中,由于配送公司物流能力的限制,不是所有顾客订单都能按时送货。那么

在顾客下单的瞬间,如何根据配送公司当前车辆状态及新旧订单的配送要求,对顾客立即给出一个能否按时送货以及最早可送货时间的实时响应是配送公司亟待解决的关键问题。

针对这一问题,本研究建立数学模型,根据该问题实时性和准确性两方面求解要求,建立包含大邻域搜索算法、缓存方案选择策略以及基于多样化方案池的即时配送订单实时响应方法。在新订单到来之前,基于大邻域搜索算法和候选方案选择策略,事先在池中缓存各种各样的优质方案,一旦新订单到来,立即利用池中的缓存方案快速生成最佳的应对方案,从而大大缩短计算时间。实验针对含有100个订单的Solomon算例,模拟从0时刻起不断接到订单的过程,针对每一订单采用本研究基于多样化方案池的响应方法加以应对,并以Cplex方法求解重调度模型的结果作为比较。实验结果表明,本研究的订单实时响应方法求得的方案成本与Cplex方法针对重调度模型的最优方案成本平均相差仅为0.556%,且本研究方法的计算时间在1秒以内,远远低于Cplex方法,表现出良好的求解效果,满足了该问题求解实时性和准确性两方面要求。

本研究针对即时配送订单的实时响应问题提出的基于多样化方案池的响应方法,通过在系统空闲时间缓存多样化的方案,实现订单进入时从缓存方案到最佳方案的快速生成,既满足了订单实时响应的要求,又能保证解的优化质量。在理论上,本研究结果为一类在线、实时、优化调度难题开辟了新途径,有利于提高即时配送订单响应的科学性、有效性和智能性,有利于提高优化理论解决动态问题的自适应能力。在实践中,本研究为解决即时配送公司普遍面临的线下物流能力不足以支撑线上订单需求的问题提供了有效途径,对于提高顾客满意度、避免顾客大面积取消订单、促进现代电子商务健康持续发展具有重要的实际意义。

本研究仍存在不足之处,有待未来加以解决。
①本研究针对一个商户订单的实时响应问题进行研究,这适用于商户订单量较多且配送公司仅为该商户提供专门配送服务的情况。现实中也存在一个配送公司为多个商户订单提供统一即时配送服务的情况,而多商户订单的实时响应要比单个商户订单的实时响应问题更复杂。在这种情况下,车辆面向多个商户的订单应该如何协作、车辆连续取货的路线顺序应该如何规划、各个商户订单的服务质量应该如何权衡,都是本研究未涉及且在多商户背景下亟待解决的关键问题。
②将本研究的理论方法与配送公司实际的背景和数据相结合,从而实现订单实时响应的智能决策系统,也是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 易观. 中国互联网即时配送专题研究报告. (2016-08-03)[2018-01-02]. <http://www.useit.com.cn/thread-12940-1-1.html>.

- ANALYSYS. *Special report on internet instant delivery in China*. (2016-08-03) [2018-01-02]. <http://www.useit.com.cn/thread-12940-1-1.html>. (in Chinese)
- [2] 艾媒咨询. 2017 上半年中国即时配送行业市场研究报告. (2017-09-29) [2018-01-02]. <http://www.iimedia.cn/57429.html>.
IIMEDIA Research. *China real-time distribution industry market research report for the first half of 2017*. (2017-09-29) [2018-01-02]. <http://www.iimedia.cn/57429.html>. (in Chinese)
- [3] 葛显龙, 蒋莎. 电子商务环境下多阶段动态路径问题研究. *工业工程与管理*, 2016, 21(4):166-173.
GE Xianlong, JIANG Sha. Research on multi-period dynamic vehicle routing problem in e-commerce environment. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(4):166-173. (in Chinese)
- [4] 揭婉晨, 杨珺, 杨超. 多车型电动汽车车辆路径问题的分支定价算法研究. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7):1795-1805.
JIE Wanchen, YANG Jun, YANG Chao. Branch-and-price algorithm for heterogeneous electric vehicle routing problem. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2016, 36(7):1795-1805. (in Chinese)
- [5] SCHYNS M. An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(3):704-718.
- [6] 张婷, 赖平仲, 何琴飞, 等. 基于实时信息的城市配送车辆动态路径优化. *系统工程*, 2015, 33(7):58-64.
ZHANG Ting, LAI Pingzhong, HE Qinfei, et al. Optimization of dynamic vehicle routing of urban distribution based on the real-time information. *Systems Engineering*, 2015, 33(7):58-64. (in Chinese)
- [7] 宁涛, 陈荣, 郭晨, 等. 一种基于双链量子编码的动态车辆路径问题解决策略. *运筹学学报*, 2015, 19(2):72-82.
NING Tao, CHEN Rong, GUO Chen, et al. A scheduling strategy for dynamic vehicle routing problem based on double chains coding. *Operations Research Transactions*, 2015, 19(2):72-82. (in Chinese)
- [8] HO S C. An iterated tabu search heuristic for the single source capacitated facility location problem. *Applied Soft Computing*, 2015, 27:169-178.
- [9] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 1987, 35(2):254-265.
- [10] PSARAFTIS H N, WEN M, KONTOVAS C A. Dynamic vehicle routing problems: three decades and counting. *Networks*, 2016, 67(1):3-31.
- [11] RITZINGER U, PUCHINGER J, HARTL R F. Dynamic programming based metaheuristics for the dial-a-ride problem. *Annals of Operations Research*, 2016, 236(2):341-358.
- [12] BOUARAB H, HALLAOUI I E, METRANE A, et al. Dynamic constraint and variable aggregation in column generation. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(3):835-850.
- [13] 蔡婉君, 王晨宇, 于滨, 等. 改进蚁群算法优化周期性车辆路径问题. *运筹与管理*, 2014, 23(5):70-77.
CAI Wanjun, WANG Chenyu, YU Bin, et al. Improved ant colony algorithm for period vehicle routing problem. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(5):70-77. (in Chinese)
- [14] 王茜, 吉清凯, 胡祥培. 多车型多车槽VRP的混合导引反应式禁忌搜索算法. *管理工程学报*, 2016, 30(3):179-187.
WANG Qian, JI Qingkai, HU Xiangpei. A hybrid guided reactive tabu search for heterogeneous fixed fleet multi-compartment vehicle routing problem. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(3):179-187. (in Chinese)
- [15] GOUNARIS C E, REPOUSSIS P P, TARANTILIS C D, et al. An adaptive memory programming framework for the robust capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, 2014, 50(4):1239-1260.
- [16] BENT R W, VAN HENTENRYCK P. Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, 2004, 52(6):977-987.
- [17] 王旭坪, 许传磊, 胡祥培. 有顾客时间窗和发货量变化的车辆调度干扰管理研究. *管理科学*, 2008, 21(5):111-120.
WANG Xuping, XU Chuanlei, HU Xiangpei. Study on disruption management of vehicle routing problem with the changes of time windows and delivery weight of customers. *Journal of Management Science*, 2008, 21(5):111-120. (in Chinese)
- [18] 侯玉梅, 贾震环, 田歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究. *系统工程学报*, 2015, 30(2):240-250.
HOU Yumei, JIA Zhenhuan, TIAN Xin, et al. Research on the optimization on the vehicle logistics distribution with soft time windows. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(2):240-250. (in Chinese)
- [19] 王征, 王建军, 杨文超. 顾客时间窗变化的多车场车辆调度干扰管理模型研究. *管理科学*, 2010, 23(3):103-112.
WANG Zheng, WANG Jianjun, YANG Wenchao. Disruption management of multiple depot vehicle routing problem with changes of time windows of customers. *Journal of Management Science*, 2010, 23(3):103-112. (in Chinese)
- [20] PILLAC V, GENDREAU M, GUÉRET C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 2013, 225(1):1-11.
- [21] KIM G, ONG Y S, CHEONG T, et al. Solving the dynamic vehicle routing problem under traffic congestion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(8):2367-2380.
- [22] POWELL W B. Perspectives of approximate dynamic programming. *Annals of Operations Research*, 2016, 241(1/2):319-356.
- [23] VICTORIA J F, AFSAR H M, PRINS C. Vehicle routing problem with time-dependent demand in humanitarian logistics // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Seville: IEEE, 2015:686-694.

- [24] PARRAGH S N, DOERNER K F, HARTL R F. A survey on pickup and delivery problems. *Journal für Betriebswirtschaft*, 2008, 58(1): 21–51.
- [25] 李建, 达庆利, 何瑞银. 多车次同时集散货物路线问题研究. *管理科学学报*, 2010, 13(10): 1–7, 62.
LI Jian, DA Qingli, HE Ruiyin. Simultaneous deliveries and pickups. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(10): 1–7, 62. (in Chinese)
- [26] AI T J, KACHITVICHYANUKUL V. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(5): 1693–1702.
- [27] 潘立军, 符卓. 求解带时间窗取送货问题的遗传算法. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(1): 120–126.
PAN Lijun, FU Zhuo. Genetic algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2012, 32(1): 120–126. (in Chinese)
- [28] ATTANASIO A, CORDEAU J F, GHIANI G, et al. Parallel tabu search heuristics for the dynamic multi-vehicle dial-a-ride problem. *Parallel Computing*, 2004, 30(3): 377–387.
- [29] FLEISCHMANN B. *The vehicle routing problem with multiple use of vehicles*. Hamburg: Universität Hamburg, 1990.
- [30] BRANDÃO J, MERCER A. A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 1997, 100(1): 180–191.
- [31] OLIVERA A, VIERA O. Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(1): 28–47.
- [32] SALHI S, PETCH R J. A GA based heuristic for the vehicle routing problem with multiple trips. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2007, 6(4): 591–613.
- [33] CATTARUZZA D, ABSI N, FEILLET D, et al. A memetic algorithm for the multi trip vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(3): 833–848.
- [34] FRANCOIS V, ARDA Y, CRAMA Y, et al. Large neighborhood search for multi-trip vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 2016, 255(2): 422–441.
- [35] AZI N, GENDREAU M, POTVIN J Y. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(3): 756–763.
- [36] MINGOZZI A, ROBERTI R, TOTH P. An exact algorithm for the multitrip vehicle routing problem. *Inform Journal on Computing*, 2013, 25(2): 193–207.
- [37] PILLAC V, CUÉRET C, MEDAGLIA A L. An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing. *Decision Support Systems*, 2012, 54(1): 414–423.
- [38] GENDREAU M, GUERTIN F, POTVIN J Y, et al. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation Science*, 1999, 33(4): 381–390.
- [39] 魏江宁, 夏唐斌. 基于混合模拟退火算法的多阶段库存路径问题研究. *工业工程与管理*, 2015, 20(3): 90–97.
WEI Jiangning, XIA Tangbin. Reearch on inventory routing problem with multiple phases based on hybrid simulated annealing algorithm. *Industrial Engineering and Management*, 2015, 20(3): 90–97. (in Chinese)
- [40] 于滨, 靳鹏欢, 杨忠振. 两阶段启发式算法求解带时间窗的多中心车辆路径问题. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(8): 1793–1800.
YU Bin, JIN Penghuan, YANG Zhongzhen. Two-stage heuristic algorithm for multi-depot vehicle routing problem with time window. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2012, 32(8): 1793–1800. (in Chinese)
- [41] MENDOZA J E, VILLEGAS J G. A multi-space sampling heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands. *Optimization Letters*, 2013, 7(7): 1503–1516.
- [42] GÓMEZ A, MARIÑO R, AKHAVAN-TABATABAEI R, et al. On modeling stochastic travel and service times in vehicle routing. *Transportation Science*, 2015, 50(2): 627–641.
- [43] AVSAR B, ALIABADI D E. Parallelized neural network system for solving Euclidean traveling salesman problem. *Applied Soft Computing*, 2015, 34: 862–873.
- [44] AZI N, GENDREAU M, POTVIN J Y. An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple routes. *Computers & Operations Research*, 2014, 41(1): 167–173.
- [45] 张文博, 苏秦, 程光路. 基于动态需求的带时间窗的车辆路径问题. *工业工程与管理*, 2016, 21(6): 68–74.
ZHANG Wenbo, SU Qin, CHENG Guanglu. Vehicle routing problem with time windows based on dynamic demands. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(6): 68–74. (in Chinese)
- [46] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 455–472.
- [47] SOLOMON M M. *Vrptw benchmark problems*. (2005–03–24)[2018–01–02]. <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>.
- [48] GROSSMANN I E. Review of nonlinear mixed-integer and disjunctive programming techniques. *Optimization and Engineering*, 2002, 3(3): 227–252.

A Real-time Response Method to Instant Delivery Orders Based on a Pool of Various Solutions

WANG Zheng¹, LI Tingyu², HOU Xinyao²

1 School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2 School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116620, China

Abstract: The instant delivery is a new type of logistics activity developed with the modern electronic commerce. It needs to complete in a couple of hours the pickups and deliveries required by customers according to their requests made at any time for urgently needed products. Now, electronic commerce providers usually adopt the policy of accepting all the orders when they are faced with the requests from customers for instant deliveries. However, constrained by a given logistics capacity, delays of deliveries are inevitable once customer orders are beyond the reach of the given logistics capacity, which will further and easily lead to the decreasing of customers' satisfaction degree and the cancellation of orders in a wide range. Therefore, at the moment that any customer places her order, giving the customer a real-time response about the information like if her order can be delivered on time based on the current logistics status and capacity is an effective way to solve the mismatching problem between the customer requirements and the given logistics capacity.

As to the problem of the real-time response to an instant delivery order, a mathematical model is constructed, and a solution strategy is presented, in which various good solutions are memorized during the system idle period and a response solution to a new order can be quickly generated based on memorized solutions. A real-time response method to instant delivery orders based on a pool of various solutions is presented. Three key components of the response method are designed: the method of generating alternative solutions based on the technique of adaptive large neighborhood search; the strategy of selecting memorial solutions based on the difference degree of solutions; and the real-time response method based on a pool of various solutions.

Extensive experiments show that the presented real-time response method can satisfy the requirement of real-time responses to orders by greatly reducing the computation time, and at the same time guarantee the quality of the optimized solution. The difference between the logistics costs of the presented method and Cplex on small-sized problems is not more than 2% averagely, which proves a good effect in solving the problem.

The presented solution strategy and real-time response method not only provide a solution method and idea for a type of dynamic problems with real-time processing requirements, but also provide an effective way for logistics companies in improving customer satisfaction degrees and solving the problem that the offline delivery capacity cannot support the requirements of online orders. This research is of practical significance to promote the healthy and continuous development of modern electronic commerce.

Keywords: instant delivery; real-time response; a pool of solutions; large neighborhood search

Received Date: August 12th, 2017 **Accepted Date:** March 21st, 2018

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (71271037, 71531002, 71571027) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132018161)

Biography: WANG Zheng, doctor in engineering, is a professor in the School of Maritime Economics and Management at Dalian Maritime University. His research interest focuses on logistics system optimization. His representative paper titled "Delivering meals for multiple suppliers: exclusive or sharing logistics service" was published in the *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (Volume 118, 2018). E-mail: drwz@dlut.edu.cn

LI Tingyu is a master degree candidate in the School of Software Technology at Dalian University of Technology. Her research interests include electronic commerce and logistics management. E-mail: lty1102@163.com

HOU Xinyao is a master degree candidate in the School of Software Technology at Dalian University of Technology. Her research interest focuses on intelligent decision support system. E-mail: 734198697@qq.com

□