B2C环境下带信息流的多阶段订单配送问题

李琳^{1,2}, 刘士新¹, 唐加福¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 沈阳航空航天大学 理学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 根据B2C(商家对客户)环境下订单配送问题的特点, 建立了相应的多阶段订单配送问题的模型. 利用电子订货系统提供的信息流预测订单的未来信息. 在处理配送问题时考虑订单信息, 可降低企业的配送成本并提高企业的配送效率. 提出两种有效整合订单配送的方案, 将禁忌搜索算法与插入算法相结合对模型进行求解. 仿真实验与比较验证了模型的合理性及算法的有效性.

关键词: B2C电子商务; 信息流; 多阶段配送模型; 禁忌搜索算法; 插入算法; 整合订单配送

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Multistage order-delivery problem with information flow under B2C environment

LI Lin^{1,2}, LIU Shi-xin¹, TANG Jia-fu¹

(1. College of Information Science and Engineering, Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industrial of MOE, Shenyang Liaoning 110819, China;

2. College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: According to characteristics of the order-delivery problem under B2C(business to customer) environment, a corresponding multistage order-delivery model is developed. It can predict the information of future order by using the information flow provided by the electronic order system. By taking account of the order information in dealing with the delivery problem, it can reduce the delivery cost and improve the delivery efficiency for an enterprise. Two effective methods that can merge the order delivery are proposed. The tabu-search algorithm and the insertion algorithm are combined to solve the problem. Experiments are done and analyzed to prove the rationality of the model and effectiveness of the given algorithm.

Key words: B2C electronic commerce; information flow; model of multistage delivery; tabu-search algorithm; insertion algorithm; merging order and delivery

1 引言(Introduction)

配送是企业直接面对最终用户时所提供的物流服务, 在满足用户需求方面发挥着非常重要的作用^[1], 许多关于配送问题方面的研究将其归结为车辆路径问题^[2~4]. B2C电子商务是在因特网开放的网络环境下, 从企业到终端客户(包括个人消费者和组织消费者), 实现消费者网上购物的一种新型的商业运营模式^[5,6], 电子商务环境下的物流具有信息化、自动化、网络化等特点, 其中, 物流信息化表现为物流信息收集的数据库化和代码化、物流信息处理的电子化和计算机化、物流信息传递的标准化和实时化、物流信息存储的数字化等^[5]. 目前, 越来越多的学者开始关注B2C电子商务方面的研究^[7~10].

对于电子商务环境下的物流方面的研究多集中在对这种商业运营模式的定性方面的研究^[11~14], 或者将其转化为经典的车辆路径问题进行讨论^[15~18]. 电子商务环境下的配送问题与传统的配送问题的区别在于在做配送计划时, 传统的配送只能安排做计划当天必须配送的订单的配送路线, 即最基本的配送方案; 而在电子商务环境下, 配送企业可以充分利用电子商务中存在的信息流了解订单的实时信息, 预测订单的未来情况, 从而制定更为合理的配送方案.

本文讨论了B2C环境下订单配送的特点, 建立了多阶段的订单配送模型. 车辆路径问题是一个NP难题, 本文讨论的配送问题考虑了未来订单的信息, 是VRP问题的扩展, 也是一个NP难题, 当问题规模

较大时,使用精确算法^[19]很难在可接受的时间内得到全局最优解,因此,用启发式方法在可接受的计算时间内求得问题的满意解成为人们研究的重要方向^[20,21].本文设计了一种启发式求解算法,算法分为两个阶段:第1阶段,用禁忌搜索算法求得计划日当天最基本的配送方案;第2阶段,根据电子订货系统预测第二天的配送方案,根据测定方案确定计划日当天需要整合配送的订单,从而到达用较低的成本将更多的订单及时准确地送到顾客手中的目的.最后,本文通过算例验证了模型的合理性及算法的有效性.

2 多阶段订单配送问题的数学模型(Model of multistage order delivery problem)

在B2C环境下,用户订单的配送较订单相关信息的获得具有一定的滞后性,如:配送中心已得到订单的信息,但由于上游供货点的原因,货物可能会延迟一段时间才能送到配送中心;货物已被送到配送中心,距交货期还可能有一段时间,因此可以延迟几天配送.当订单到达配送中心后,最终必须送到顾客手中.当顾客采取预先付款后收货的采购方式时,从长期来看,当订单的数目确定时,配送中心在不考虑其他成本的情况下,其收益也就确定了.

在制定配送计划当天,到达配送中心的订单可以分为已到交货期的订单与未到交货期的订单.对于已到交货期的订单,在当天必须送到顾客手中.如果配送中心只递送此类订单,可将该问题转化为经典VRP问题^[22],即制定配送中心最基本的配送方案.为了提高企业的配送效率,将到达配送中心的订单尽早送到客户手中,本文对在制定配送计划当天已经到达配送中心但未到最终交货期的订单引入惩罚值;为了最小化配送中车辆的使用数目,令每辆车具有一定的固定启动费用,从而,配送中心在满足合同交货期的情况下,其目标是最小化车辆使用的总费用(包括车辆的固定启动费用和行驶费用)与未送订单的惩罚费用之和.因配送中心每天都要制定相应的配送计划,该问题可以归结为多阶段的订单配送问题.

2.1 数学模型(Mathematical model)

为便于建立模型,本文做以下假设:1) 订单需要的商品是同种类型的;2) 配送车辆是同种车型的;3) 每辆车有固定的启动费用;4) 每个订单的需求量不超过车辆的最大容量;5) 只考虑一个配送中心的情况;6) 每个顾客的订单不能拆分,只能由一辆车配送;7) 配送中心有足够多的车辆满足每天必送订单的配送任务;8) 订单所属客户之间的距离矩阵是对称的.

模型中符号含义如下:

K : 配送中心的车辆集合; F_k : 车辆 k 的固定启动费用; Z_k : 决策变量,车辆 k 是否被使用; α : 车辆行驶距离费用与订单惩罚值相比所占的比重; β : 车辆单位行驶费用; i, j 表示订单的编号,也可用来标记订单所属客户的编号; d_{ij} : 客户 i 到 j 的距离, $d_{ij} = d_{ji}$; P_i : 订单 i 在制定计划日未被送出的惩罚费用; V : 在做配送计划当天,已到配送中心,可以参加配送的订单集合; V_k : 车辆 k 访问的客户的集合; x_{ij}^k : 决策变量,车辆 k 服务客户 i 以后是否直接服务客户 j ; y_i^k : 决策变量,客户 i 是否被车辆 k 服务; Q : 车辆装载能力约束; q_i : 客户 i 的需求量,且 $q_0 = 0$,即配送中心的需求量为0; D 是车辆的最大行驶距离; t : 制定配送计划的阶段,本文以一天作为一个阶段; T : 制定配送计划的阶段总数,可以由配送企业自行调整.

该问题的数学模型描述如下:

$$\min Z = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{k \in K} F_k Z_k + \alpha \sum_{k \in K} \sum_{i \in V_k} \sum_{j \in V_k \setminus i} \beta d_{ij} x_{ij}^k + (1 - \alpha) \sum_{i \in V} P_i (1 - \sum_{k \in K} y_i^k) \right), \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in V_k \setminus j} x_{ij}^k = y_j^k, \quad \forall j \in V_k, k \in K, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V_k \setminus i} x_{ij}^k = y_i^k, \quad \forall i \in V_k, k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k \leq 1, \quad \forall i \in V, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_k} q_i y_i^k \leq Q, \quad \forall k \in K, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V_k} \sum_{j \in V_k \setminus i} d_{ij} x_{ij}^k \leq D, \quad \forall k \in K, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V_k} x_{0i}^k = \sum_{i \in V_k} x_{i0}^k = 1, \quad \forall k \in K, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_k} \sum_{j \in V_k \setminus i} x_{ij}^k \leq |V_k| - 1, \quad \forall k \in K, \quad (8)$$

$$Z_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \quad (9)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad i, j \in V, \quad \forall k \in K, \quad (10)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\}, \quad i \in V, \quad \forall k \in K. \quad (11)$$

目标函数(1)是最小化 T 阶段内总的配送费用,每个阶段 t 的配送费用包括车辆的固定启动费用、车辆的行驶距离费用及因订单未被送出所对应的惩罚费用;约束(2)表示车辆 k 在服务客户 j 之前只能递送一个订单 i ;约束(3)表示车辆 k 在服务完客户 i 后直接服务且只能服务客户 j ;约束(4)表明每个订单 i 至多只能由一辆车进行配送;约束(5)表示车辆 k 所配送的订单的需求总和不超过车辆的最大容量限制;约束(6)表示车辆 k 总的行驶距离不超过车辆的最大行驶距离限制;约束(7)表明参与配送的车辆 k 从配送中心出发,完成配送任务后,最终必须回到

配送中心; 约束(8)是避免配送过程中产生子回路。 Z_k, x_{ij}^k 及 y_i^k 为决策变量: 当车辆 k 被使用时, $Z_k = 1$; 否则, $Z_k = 0$. 当车辆 k 配送完订单 i 后直接配送订单 j 时, $x_{ij}^k = 1$; 否则, $x_{ij}^k = 0$. 当订单 i 由车辆 k 配送时, $y_i^k = 1$; 否则, $y_i^k = 0$.

2.2 订单惩罚值的确定(Determination of order punishment value)

订单 i 的惩罚值 P_i 可由它的订货日 d_1 、到达配送中心的日期 d_2 、交货日 d_3 、中心制定配送计划的日期 d_0 及订单的需求量 q_i 来确定, 且 $d_1 \leq d_2 \leq d_0 \leq d_3$.

当订单确认提交后, 在一周之内货物必须送到客户手中, 令 $dl_1 = d_0 - d_1$, 且 $0 \leq dl_1 \leq 7$; 订单到达配送中心后, 在中心的滞留时间不能超过3天, 令 $dl_2 = d_0 - d_2$, $0 \leq dl_2 \leq 3$, 因B2C环境下的订单具有小批量的特点, 不考虑订单在中心的保管费用; 订单必须在限定的交货期前送到客户手中, 令 $dl_3 = d_3 - d_0$, $dl_3 \geq 0$. 令Max是一个很大的数, $P_i = \text{Max}$ 表明订单 i 在做计划当天必须送出,

$$P_i = \max\{P_{i1}, P_{i2}\}, \forall i \in V,$$

$$P_{i1} = \begin{cases} q_i, & 0 \leq dl_1 \leq 3, \\ 2q_i, & dl_1 = 4, \\ 3q_i, & dl_1 = 5, \\ 4q_i, & dl_1 = 6, \\ \text{Max}, & dl_1 \geq 7. \end{cases}$$

表明惩罚值与 dl_1 有关, 当 d_0 与 d_1 之间的时间越长惩罚值越大; $P_{i2} = \begin{cases} q_i, & 0 \leq dl_2 \leq 2, \\ \text{Max}, & dl_2 \geq 3. \end{cases}$ 表明惩罚值与 dl_2 有关, 订单在配送中心滞留的时间越长惩罚值越大.

3 启发式求解算法(Heuristic algorithm)

根据问题的特点, 将计划日当天可以配送的订单分为必须配送订单集合 M 与可延迟配送订单集合 O , 则 $V = M \cup O$. 对于 M 中订单的配送问题, 可将其归结为经典的车辆路径问题, 因该问题是NP难题, 本文采用禁忌搜索算法^[17]进行求解, 能在较短的时间内求得问题的满意解. 对于 O 中的订单, 本文设计了两种整合配送方案, 并通过算例验证了其改进效果.

3.1 求解集合 M 中订单配送方案的禁忌搜索算法(Tabu search algorithm of solving delivery method about orders in set M)

从以上讨论可知, 制定 M 中订单的配送方案问题是NP难题, 因此采用禁忌搜索算法进行求解. 本文采用自然数编码方式, 例如: 有6个订单需要配送, 则6个不同的自然数的排列513624即可对应一种配送方案; 用Beasley^[23]提出的简单划分进行分组,

它依次考虑每个节点, 直到节点需求量的和大于车辆的容量或总的行驶路程超出车辆的最大行驶距离, 这时将以前考虑的节点作为一条路径, 继续考虑剩下的节点, 直到该排列结束, 便可得到相应的配送方案. 若得到的路径数小于或等于已知的车辆数, 则该排列对应一可行解; 否则, 该排列对应一不可行解, 予以一定的惩罚. 算法设计如下: 1) 初始解: 在多次扫描得到的配送方案中选取最优的方案作为初始解; 2) 邻域结构: 在某一排列中随机选取两个顶点进行交换; 3) 解的评价值: 可行解的评价值为所有车辆的行驶距离总和, 不可行解的评价值为车辆的行驶距离总和加上惩罚值; 4) 禁忌对象的确定: 在每次迭代中, 当邻域中的最好解较全局最优解有改进时, 将其加入到禁忌表中; 当邻域中的最好解较当前解有改进时, 也将其作为禁忌对象放入禁忌表中. 此方法可以有效地防止算法陷于局部最优解. 5) 禁忌表的长度: 禁忌表的长度是指被禁对象不允许被选取的迭代步数, 其值应根据问题的规模来确定, 本文选取禁忌表长度为一个常数; 6) 候选集合: 从当前解的邻域中随机选取若干个邻居作为候选集合; 7) 终止准则: 采用给定迭代步数的终止准则.

3.2 整合配送订单的插入算法(Insert algorithm of merging order delivery)

电子商务环境下的物流配送与传统的物流配送的区别在于前者可以充分利用电子系统提供的信息, 提前了解订单的未来信息, 达到预测未来订单配送方案的目的. 对于 O 中的订单可以采用基于评价值的插入算法将其插入到 d_0 当天的基本配送路径中. 本文设计了两种改进方案, 将 O 中的订单进一步分类, 然后将部分订单与 d_0 当天最基本的配送方案进行整合配送.

通过电子订货系统预测 d_0 的第二天必须配送的订单集合 TM . 令 $C = O \setminus TM$, 则集合 C 表示在 d_0 及其第二天都可以延迟配送的订单的集合, 计算 C 中订单 i 的评价值 E_i . 假设 d_0 当天最基本的配送方案中配送路径为 R_1, R_2, R_3 , 其重心分别为 w_1, w_2, w_3 , 第二天最基本的配送方案中配送路径为 TR_1, TR_2 , 其重心为 w_4, w_5 , 令 $d_i = d(p, w_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)表示 C 中订单 p 所属客户距已有路径的重心 w_i 之间的欧式距离, 令 $d_{\min} = \min\{d_i\}$. 设 $d_{\min} = d_{\text{num}}$, 若 $1 \leq \text{num} \leq 3$, 表明订单 p 距离 d_0 当天的配送路径较近; 若 $4 \leq \text{num} \leq 5$, 表明订单 p 距离第二天的配送路径更近, 用此方法可将 C 中所有的订单分为距离今天配送方案近的订单及距离明天配送方案近的订单两大类. C 中订单 i 的评价值 E_i 确定方法如下:

$$E_i = P_i / d_{\min}, i \in C.$$

3.2.1 整合配送方案1(Merging delivery method 1)

定理 1 设订单 $p \in C$, p 的需求 q_p , 路径 R (d_0 当天的某一配送路径) 上所有客户点的需求 $\sum_{i \in R} q_i$, 若 $q_p + \sum_{i \in R} q_i \leq Q$, 且将 p 插入到 R 中得到路径 R' 后车辆的总行驶距离不超过车辆的最大行驶距离, 则阶段数 $T = 1$ 时, 目标函数值(1)减少(p 可以插入到 R 中进行配送)的充要条件是 $|\frac{\Delta P}{\Delta P + \beta \cdot \Delta d}| > \alpha$. 其中, ΔP 与 Δd 分别是 R 与 R' 间的惩罚值与行驶距离费用的变化量.

证 设将点 p 插入到路径 R 中仍满足车辆的容量限制与最大行驶距离约束, 得到的新路径记为 R' . 当 $T = 1$ 时, 令 $Z(R)$ 与 $Z(R')$ 分别表示原路径 R 与新路径 R' 的总费用.

$$\begin{aligned} & \text{目标函数值(1)减少} \Leftrightarrow \\ & Z(R) > Z(R') \Leftrightarrow \\ & \alpha \sum_{\substack{i,j \in R \\ i < j}} \beta(d_{0,\dots,i} + d_{ij} + d_{j,\dots,0}) + \\ & (1 - \alpha) \left(\sum_{i \in C \setminus \{p\}} P_i + P_p \right) > \\ & \alpha \sum_{\substack{i,j \in R \\ i < j}} \beta(d_{0,\dots,i} + d_{ip} + d_{pj} + d_{j,\dots,0}) + \\ & (1 - \alpha) \left(\sum_{i \in C \setminus \{p\}} P_i \right) \Leftrightarrow \\ & (1 - \alpha) P_p > \alpha \beta (d_{ip} + d_{pj} - d_{ij}) \Leftrightarrow \\ & (1 - \alpha) \Delta P > \alpha \beta \cdot \Delta d \Leftrightarrow \\ & \left| \frac{\Delta P}{\Delta P + \beta \cdot \Delta d} \right| > \alpha. \end{aligned}$$

证毕.

将 C 中订单按照评价价值从大到小排序, 优先考虑评价价值大的订单, 如果它距离 d_0 第二天的配送路径较近, 则不考虑该订单; 如果它距离 d_0 当天的配送方案近, 例如: $E_2 = P_2/d_1$ 表明 C 中的订单 2 的评价价值为 E_2 , 它距离路径 1 较近, 考虑在不增加配送费用的条件下, 能否将订单 2 插入到路径 1 中进行配送.

算法步骤如下:

Step 1 利用第 1 阶段的禁忌搜索算法求得 d_0 当天必送订单 M 的配送路径, 计算各条路径的重心;

Step 2 利用电子订货系统预测第二天必送订单集合 TM , 并用禁忌搜索算法求得相应的配送路径, 计算各条路径的重心;

Step 3 对集合 C 中的订单按其评价价值 E_i 从大到小排序, 如果它距离 d_0 第二天的配送路径较近, 转向 Step 8; 如果它距离 d_0 当天的配送方案近, 转向 Step 4;

Step 4 判断插入 i 到 d_0 当天与 i 距离最近的路

径 R 中时, 总需求是否满足车辆容量限制, 若满足条件则转向 Step 5; 否则, 删除路径 R 中的点 i , 转向 Step 8;

Step 5 对于符合条件的点 i 按节约插入方法插入到 R 中距离增加最小的位置;

Step 6 判断插入点 i 到路径 R 中后, 总行驶距离是否满足车辆最大行驶路程限制, 若满足条件则转向 Step 7; 否则, 删除路径 R 中的点 i , 转向 Step 8;

Step 7 将点 i 插入到路径 R 中后, 按定理 1 判断目标函数值是否减少, 如果减少则保留点 i ; 否则, 删除路径 R 中的点 i ;

Step 8 更新 C , $C = C \setminus \{i\}$, 判断 C 是否为空集, 若 C 不为空集, 则转向 Step 3; 若 C 为空集, 算法结束.

3.2.2 整合配送方案2(Merging delivery method 2)

定理 2 设订单 $p \in C$, p 的需求 q_p , 点 p 距离 d_0 当天的某一路径 R_t 较近, 距离 d_0 第二天的某一路径 R_m 较近, 点 p 与 R_t 和 R_m 都满足定理 1 的条件, 则阶段数 $T = 1$ 时, 目标函数值(1)减少(点 p 可以推迟到第二天送货)的充要条件是

$$\left| \frac{P_M - P_T}{\beta(\Delta d_T - \Delta d_M) + P_M - P_T} \right| < \alpha.$$

其中: P_T 与 P_M 分别是订单 p 在 d_0 当天与第二天的惩罚值; Δd_T 是将 p 插入到路径 R_t 中距离增加最小位置处时该路径的距离增加值; Δd_M 是将 p 插入到路径 R_m 中距离增加最小位置点时该路径的距离增加值.

证 点 p 与 R_t 和 R_m 都满足定理 1 的条件, 即 $\alpha \beta \Delta d_T - (1 - \alpha) P_T < 0$, 且 $\alpha \beta \Delta d_M - (1 - \alpha) P_M < 0$, 表明将点 p 插入到路径 R_t 和 R_m 后, 两天内新路径的总配送费用都不增加. 当 $T = 1$ 时, 令 $Z(R_t)$ 与 $Z(R_m)$ 分别表示将点插入到路径 R_t 与 R_m 后目标函数(1)的总费用.

$$\begin{aligned} & \text{目标函数值(1)减少} \Leftrightarrow Z(R_t) > Z(R_m) \Leftrightarrow \\ & \alpha[\beta(\Delta d_T - \Delta d_M)] > (1 - \alpha)(P_M - P_T) > 0 \Leftrightarrow \\ & \alpha[\beta(\Delta d_T - \Delta d_M) + P_M - P_T] > P_M - P_T \Leftrightarrow \\ & \left| \frac{P_M - P_T}{\beta(\Delta d_T - \Delta d_M) + P_M - P_T} \right| < \alpha. \end{aligned}$$

证毕.

方案 2 首先按照方案 1 中的方法确定 C 中订单 i 的评价价值 E_i , 将订单 i 按评价价值从大到小排序, 优先考虑评价价值大的订单. 在 Step 3 中, 如果订单 i 距离 d_0 第二天的配送路径较近, 且满足定理 2 的条件, 则转向 Step 8, 即将该订单延迟配送; 否则, 转向 Step 4, 判断它是否可以插入到 d_0 当天的与 i 距离最近的路径 R 中, 其他步骤相同.

4 实验设计与结果分析(Experimental design and interpretation of results)

4.1 实验设计(Experimental design)

因B2C环境下的订单配送方面的研究较少, 经典VRP中的数据也不适用于该问题, 本文采用随机生成数据模拟订单配送问题. 例如: 随机产生4月份的订单, 每天订单的个数在[40,60]上服从均匀分布, 共生成1516份订单. 订单的坐标 x, y 在[0,100]上服从均匀分布, 因B2C环境下的订单具有小批量的特点, 令每个订单的需求量在[1,20]上服从均匀分布, 并为每个订单随机生成订货日 d_1 、到货日 d_2 及交货日 d_3 , 且 $d_1 \leq d_2 \leq d_3$.

本文讨论的是多阶段的订单配送问题, 该配送计划的制定是滚动进行的, 阶段数 T 可以根据需要任意取定某一正整数, 本文以一周内的订单配送问题作为研究对象, 令 $T = 7$. 随机选取某一天作为制定计划的初始阶段, 如4月12日作为开始制定计划日 d_0 , 讨论4月12日到4月18日之间的订单配送问题.

因行驶距离费用在实际配送中占有较大比重, 取 $\alpha = 0.8; \beta = 1$. 在每一阶段 t 用公式 $K = [\sum_{i \in M} q_i / Q] + 1$ 来确定制定计划当天能够满足最基本配送任务所需要的最少车辆数.

禁忌搜索算法的参数设置如下: 初始解扫描次数60次, 邻域规模400, 禁忌表长度为20, 不可行解的惩罚值为1000000, 迭代次数iter = 50. 每天制定的基本配送方案对于制定未来几天的配送方案具有十分重要的意义, 好的配送方案可以优化整体配送方案, 因此, 在每日制定基本配送方案时将多次使用禁忌搜索算法求问题的解, 并选取最优解作为订单整合配送的基础路径, 本文采用选取5次使用禁忌搜索算法得到的最优解作为基础路径. 本算法用Java语言实现, 在Pentium IV 2.93 GHz微机上实现.

4.2 结果分析(Interpretation of results)

因算例中的数据较多, 本文仅给出比较结果: 根据配送中心所拥有车辆的型号不同, 设计了3组实验, 对不同配送方案得到的结果见表1.

表 1 不同订单配送方案的结果比较

Table 1 Comparison between results about different order delivery methods

方案	车辆型号(F, Q, D)								
	(150, 135, 370)			(200, 150, 400)			(270, 180, 460)		
	Cost	Orders	Time/s	Cost	Orders	Time/s	Cost	Orders	Time/s
基本方案	11709.10	376	36.14	12326.53	376	37.28	13349.40	376	38.41
方案A	11590.77	389	37.19	12265.45	386	38.31	13246.80	389	39.39
方案1	10693.46	382	52.28	11947.06	378	56.12	12216.85	382	63.10
方案2	10625.19	384	52.31	11653.69	395	56.40	12056.33	385	63.22

车辆型号为(F, Q, D), 其中 F 为车辆的固定启动费用、 Q 为车辆容量限制、 D 为车辆最大行驶距离限制. 基本方案: 配送中心在一周内每阶段 t 当天只配送计划日当天必须配送的订单, 即每阶段只配送集合 M 中的订单; 方案A: 将每个阶段 t 当天的可延迟配送的订单集合 O 中的订单按评价值从大到小的顺序插入到当天基本的配送方案中; 方案1: 将每个阶段 t 当天集合 C 中的订单按照文中设计的方案1插入到当天基本的配送方案中; 方案2: 将每个阶段 t 当天集合 C 中的订单按照文中设计的方案2插入到当天基本的配送方案中.

表1中第2,5,8列的Cost分别指使用不同型号的车型在不同配送方案下一周内配送费用总和; 第3,6,9列的Orders分别指使用不同型号的车型

在不同配送方案下一周内配送的订单总和; 第4,7,10列的Time分别指使用不同型号的车型在不同配送方案下一周内算法的运算时间总和; 运算时间以s为单位.

从表1可以得出以下结论: 当配送中心只配送每个阶段 t 当天的必送订单(集合 M 中的订单)时, 无论使用何种类型的车型, 每周内的配送订单总和为定值(376个订单). 方案A、方案1及方案2在每个阶段 t 都在不增加计划日配送费用的条件下尽量将可延迟配送的订单整合送出, 从长期来看, 整体的配送费用必然下降, 而且一周内配送订单总数与基本方案配送的订单总数相比都有所增加, 比较结果见第3,6,9列.

方案1只将距离计划日近的订单整合送出, 而

距离费用与订单惩罚值费用相比距离费用所占的比重较大,对于距离计划日第二天路径近的订单来说计划日当天配送该订单的距离增加值要大于将订单延迟一天配送所增加的惩罚值,从长期来看延迟配送该类订单其整体配送费用也必然下降;方案2是方案1的改进,只有当集合 $C = O \setminus TM$ 中的订单满足定理2时才将该订单延迟配送,从定理2的证明过程可知:此时, $\alpha[\beta \cdot (\Delta d_T - \Delta d_M)] > (1 - \alpha)(P_M - P_T)$, 即订单插入不同路径的距离费用的减少量大于它的惩罚费用的增加量时,延迟配送该类订单可以减少整体配送费用;费用比较结果见第2,5,8列. 实验数据表明:方案A、方案1、方案2对不同型号的车辆均适用,其中,方案2的改进效果最好.

在计算时间方面,读取并判断订单状态一周内平均耗时2.57 s;基本方案采用禁忌搜索算法求相应的配送路径,一周内平均耗时2.48 s,这表明该算法可以在合理的时间内求得问题的满意解:方案A是在禁忌搜索算法的基础上采用贪婪插入算法,该插入算法一周内平均耗时0.11 s,因此,方案A在计算时间上较基本方案有所增加.方案1与方案2通过电子订货系统预测订单的未来信息,并且两次使用禁忌搜索算法来求解相应的配送路径,耗时有所增加,但增加的运算时间不超过30 s,

其中,方案2还需增加对定理2的判断,方案2的耗时多于方案1,从实验数据可以看到对于不同型号的车辆,方案2与方案1的最大时差不超过0.3 s.从第4,7,10列可以看出:车辆的容量越大,使用禁忌搜索算法的局部改进时所用的循环次数增加,搜索到全局最优解的耗时也有所增加.

从优化效果来看,虽然方案1、方案2与基本方案和方案A相比时间增幅较大,但是配送费用方面也有很大的改进.与方案1相比,方案2用不超过1 s的时间使配送费用减少,这对于减少配送企业的运营费用具有一定实用价值,因此,所有订单配送方案中方案2更有效.

不同配送方案对于多阶段配送问题的车辆使用情况也有一定的影响,以(150, 135, 370)型号的车为例,不同阶段车辆使用情况见表2.

从表2可以看出,方案A、方案1、方案2都是在制定计划日 d_0 当天最基本的配送方案基础上,在不增加配送费用的前提下将当日可延迟配送订单进行整合配送,因此,在制定计划的初期各个方案的用车数基本相同.随着制定计划阶段数的增加,本文提出的改进的整合方案其优势逐渐显露出来:经过几个阶段的运作,在某一阶段的用车数减少了,方案2在15日的用车数只有3辆,这也从另一角度说明3种整合配送方案中,方案2的效果最好.

表2 一周内不同配送方案下车辆使用情况比较结果

Table 2 Comparison between results of vehicles used under different delivery methods in a week

方案	制定计划日 d_0							总用车数
	04-12	04-13	04-14	04-15	04-16	04-17	04-18	
基本方案	5	4	5	4	5	5	5	33
方案A	5	4	5	4	5	5	5	33
方案1	5	4	5	4	5	5	5	33
方案2	5	4	5	3	5	5	5	32

上述实验结果表明:本文提出的改进的整合配送方案1及方案2对于不同型号的车辆均有效,而且随着制定计划的阶段数增加,改进方案能够有效地减少配送企业的运作成本,提高企业的配送效率.

5 结论(Conclusion)

本文分析了B2C环境下订单配送问题的特点,建立了相应的多阶段订单配送模型,并设计了一种有效的启发式算法.实验结果表明:本文设计的算法中禁忌搜索算法部分能在较短的时间内(一

周内平均耗时2.48 s)求得基本配送问题的满意解;方案1、方案2与基本方案和方案A相比虽然在运算时间上有所增加,但在配送费用方面有很大改进,而且增加的运算时间不超过30 s,其中方案2的优化效果最好.本文建立的模型及设计的算法具有一定的实用价值,它能够通过有效利用电子订货系统预测未来订单的详细信息,达到优化订单配送方案的目的,从而用较低的成本将更多的订单及时准确地送到顾客手中.本文提出的整合配送方案可以帮助企业有效地优化配送资源,节约配

送成本, 提高客户满意度, 提升企业核心竞争力。

随着电子商务的蓬勃发展, B2C环境下的订单配送问题将呈现出许多新的特点, 相关问题的研究也将引起更多学者的关注。

参考文献(References):

- [1] 黄中鼎, 周旻. 现代物流管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 213.
(HUANG Zhongding, ZHOU Min. *Modern Logistic Management*[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 213.)
- [2] ROPKE S, PISINGER D. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(3): 750 – 775.
- [3] JEON G, LEEP H R, SHIM J Y. A vehicle routing problem solved by using a hybrid genetic algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 53(4): 680 – 692.
- [4] DONDO R, MENDOZA C A, CERDÁ J. Optimal management of logistic activities in multi-site environments[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2008, 32(11): 2547 – 2569.
- [5] 杨天翔. 电子商务概论[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2006: 1 – 5.
(YANG Tianxiang. *Introduction to E-commerce*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2006: 1 – 5.)
- [6] NAIM M M. The impact of the net present value on the assessment of the dynamic performance of e-commerce enabled supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 104(2): 382 – 393.
- [7] HAWK S. A comparison of B2C e-commerce in developing countries[J]. *Electronic Commerce Research*, 2004, 4(3): 181 – 199.
- [8] HOLSAPPLE C W, SASIDHARAN S. The dynamics of trust in B2C e-commerce: a research model and agenda[J]. *Information Systems and E-Business Management*, 2005, 3(4): 377 – 403.
- [9] 蒋熙敏, 黄京华, 王晖. 电子商务系统评价模型及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(S1): 1019 – 1024.
(JIANG Ximin, HUANG Jinghua, WANG Hui. E-commerce performance evaluation model and its application[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(S1): 1019 – 1024.)
- [10] WONG Y K, HSU C J. A confidence-based framework for business to consumer (B2C) mobile commerce adoption[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2008, 12(1): 77 – 84.
- [11] MOKHTARIAN P L. A conceptual analysis of the transportation impacts of B2C e-commerce[J]. *Transportation*, 2004, 31(3): 257 – 284.
- [12] AYANSO A, DIABY M, NAIR S K. Inventory rationing via dropshipping in Internet retailing: a sensitivity analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(1): 135 – 152.
- [13] AGATZ N A H, FLEISCHMANN M, NUNEN J A E. E-fulfillment and multi-channel distribution—a review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(2): 339 – 356.
- [14] MAHAR S, WRIGHT P D. The value of postponing online fulfillment decisions in multi-channel retail/e-tail organizations[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(11): 3061 – 3072.
- [15] 蒋忠中, 汪定伟. B2C电子商务中物流配送路径优化的模型与算法[J]. 信息与控制, 2005, 34(??): 481 – 485.
(JIANG Zhongzhong, WANG Dingwei. Model and algorithm for logistics distribution routing of B2C E-commerce[J]. *Information and Control*, 2005, 34(4): 481 – 485.)
- [16] 段风华, 符卓. B2C电子商务环境下物流配送路径模型与算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(??): 580-582.
(DUAN Fenghua, FU zhuo. B2C e-commerce logistic distribution routing model and algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(2): 580-582.)
- [17] 李琳, 刘士新, 唐加福. B2C环境下订单配送问题的模型与算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(11): 1554 – 1557.
(LI Lin, LIU Shixin, TANG Jiafu. Model and algorithm for distribution/delivery of goods on order in B2C e-commerce[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(11): 1554 – 1557.)
- [18] FRANCIS P, SMILOWITZ K. Modeling techniques for periodic vehicle routing problems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(10): 872 – 884.
- [19] TOTH P, VIGO D. Exact solution of the vehicle routing problem[M] // *Fleet Management and Logistics*. Dordrecht: Kluwer, 1998: 1 – 31.
- [20] 陈宝文, 宋申民, 陈兴林. 基于混合算法的带时间窗车辆路径问题[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 807 – 810.
(CHEN Baowen, SONG Shenmin, CHEN Xinglin. Hybrid meta-heuristics for the vehicle routing problem with time windows[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(5): 807 – 810.)
- [21] 唐加福, 孔媛, 潘震东, 等. 基于划分的蚁群算法求解货物权重车辆路径问题[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 699 – 702.
(TANG Jiafu, KONG Yuan, PAN Zhendong, et al. An ant colony optimization algorithm for vehicle routing problem with cargo coefficient[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 699 – 702.)
- [22] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. *Management Science*, 1959, 6(1): 80 – 91.
- [23] BEASLEY J E. Route first cluster second methods for vehicle routing[J]. *Omega*, 1983, 11(4): 403 – 408.

作者简介:

李琳 (1978—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为物流系统建模与优化算法, E-mail: LL49705055@126.com;

刘士新 (1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为生产计划与调度、项目管理、最优化理论与应用, E-mail: sxliu@mail.neu.edu.cn;

唐加福 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为供应链管理、进化算法、Fuzzy优化理论与方法, E-mail: jftang@mail.neu.edu.cn.