

顾客时间窗变化的物流配送问题干扰管理方法研究

杨文超¹, 胡祥培^{*2}, 王 征³

(1. 大连理工大学 大连半导体技术学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024;

3. 大连理工大学 软件学院, 辽宁 大连 116620)

摘要:为解决物流配送过程中顾客时间窗变化而导致的物流配送计划无法实现的难题,运用干扰管理方法,以干扰事件发生时的问题状态为基础,提出了新车增派策略和多车协作策略及其实施条件,并在此基础上建立了问题扰动救援的一种启发式算法.该算法针对受扰车辆路线上的所有顾客,根据新车增派策略和多车协作策略,依次将每一顾客在原计划的送货车辆、其他在途车辆,以及增派的新车之间分配,并重新规划分配之后的车辆路线.最后在标准算例上使用该算法与文献遗传算法进行了比较分析,结果表明该算法对于干扰事件发生后的车辆路线重排结果在系统整体扰动程度方面明显优于文献算法.

关键词:顾客时间窗变化;物流配送;扰动救援;干扰管理

中图分类号: TP39; C93 **文献标志码:** A

0 引言

为顾客提供及时、满意的配送服务是物流配送公司必须解决的关键问题.然而,对于一个稍大规模的配送公司而言,配送过程中总有一两个顾客临时要求变更配送时间,这种要求不仅难以预测,而且会对配送车辆的路线计划产生一定扰动.这时,为提高顾客满意度,配送公司需要在均衡考虑这一变更对配送系统整体扰动的基础上,给顾客一个明确答复.

物流配送中的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)本身就是一类经典的 NP 难题^[1],顾客配送时间窗的变化更是给这类问题的求解增添了困难.面对这类动态车辆路径问题,人们目前主要采取的方法有:(1)re-scheduling 方法^[2,3].该方法以实现全局费用最低为目标,但可能因严重损害了其他顾客的局部利益,而对系统产生较大扰动.(2)随机 VRP^[4,5]、动态 VRP^[6,7]、模糊 VRP^[8,9]等非确定性问题的研究.该类方法通过预测未来可能发生的干扰事件,而采用相应的事前防范措施,以减小干扰的负作用.但顾客配送时

间的变更难以预测,所以,该方法是一种普遍意义上的干扰处理手段.(3)基于预案的方法^[10].预案所能涵盖的顾客配送时间变化情况相当有限,一旦实际与预案稍有偏差,预案将会失效.

上述方法对于动态车辆路径问题的研究都有一定局限性,因此,学术界逐渐转向运用干扰管理方法解决这一问题,该方法以“系统整体扰动最小化”为目标,文献^[11]给出了干扰管理的相关研究综述.这些成果在干扰事件的定性处理策略方面进行了探索性研究,但由于问题的复杂性,该领域的理论体系远未形成,并存在如下两点关键问题尚待深入:一是缺乏对各类干扰事件影响规律及其处理方法的定量研究,单纯定性的扰动救援策略对问题的处理不够精确;二是不同干扰事件对配送系统造成的影响不同,解决方案也必然不同,目前研究中过于通用的解决方案在针对具体事件的效率上会有所欠缺.

在物流配送活动的多类干扰事件中,顾客对配送时间的改变是最难预测的事件之一,没有任何规律可循.本文就对这类干扰事件发生后如何救援带时间窗的车辆路径问题(VRP with time windows, VRPTW)进行定量研究,建立问题的一

收稿日期: 2010-08-09; 修回日期: 2011-12-07.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(70725004); 国家自然科学基金资助项目(70801008).

作者简介: 杨文超(1977-),男,博士,助理研究员, E-mail: yangwch@dlut.edu.cn; 胡祥培*(1962-),男,教授,博士生导师, E-mail: drhxp@dlut.edu.cn.

种启发式算法,为物流配送公司干扰事件的处理提供决策支持.

1 问题定义

从图论角度,VRPTW 可定义在一张完全赋权图 $G = (V, A)$ 上,其中 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, v_0 代表车场, $v_1, \dots, v_n$ 代表所有 n 个顾客点,每个点 v_i ($v_i \in V, v_i \neq v_0$) 都关联如下几个值:需求量 d_i 、服务时间 s_i 、最早开始时间 e_i 、最迟开始时间 l_i ,车场的 e_i 和 l_i 代表车场的开放和关闭时间, $A = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ 代表顾客点间路线的弧集,每条弧都关联一个代表行驶时间或成本的非负值 c_{ij} ,车场停有 K 辆用于服务顾客的车辆,每辆车的容量和最长在途行驶时间分别为 L_k 和 D_k ,每个顾客必须且只能由一辆车来服务.

在车辆按照初始计划行驶途中,某顾客提出变更时间窗的要求,这时车辆如果仍按原路线行驶,则该顾客的需求得不到满足.这时,配送公司需要进行权衡,如果顾客变更后的时间窗对整个配送系统扰动程度可以接受,则同意顾客的变更请求.

整个配送系统涉及顾客、配送公司、车辆及驾驶员几类对象,每类对象在干扰事件发生后都会受到不同程度的扰动:(1) 顾客.在货物同质的假设前提下,对顾客的扰动主要取决于送货时间是否符合顾客的时间窗要求,实际配送时间偏离顾客要求的时间窗越小,则顾客越接近满意.设车辆 k 实际到达顾客 i 的时间为 a_i ,若 $a_i < e_i$,则送货时间偏离量为 0,但车辆 k 在 i 处产生一定的等待时间;若 $a_i > l_i$,则产生的送货时间偏离量为 $a_i - l_i$.若顾客 i 的送货时间偏离量为 w_i ,则干扰事件发生后某一方案的总的配送时间偏离量为 $\sum_{i=1}^n w_i$.(2) 配送公司.为处理干扰的影响并恢复系统的正常运行,配送公司通常要付出更多的成本,但并非成本越高,顾客越满意,配送公司所关注的是如何能以较少的成本增量实现各方的满意.成本是配送公司考虑的主要因素,它主要包括车辆行驶成本和派车成本(设为 C_0). (3) 驾驶员.车辆送货任务增加的同时也会导致车辆最长在途时间的延长,从而违反了车辆最长在途时间约束,违反这一约束应给予一定的惩罚.

基于对系统扰动的描述,设 P_1 为顾客时间窗偏离量的优先因子、 P_2 为配送公司所消耗的配送成本的优先因子、 P_3 为驾驶员行驶时间的优先因子;且有 d_1^+ 、 d_1^- 、 d_2^+ 、 d_2^- 、 d_3^+ 、 d_3^- 分别为上述 3 个目标与初始计划下顾客时间窗的偏离量、配送成本

的偏离量、驾驶员行驶时间延长量的正负偏差变量,则扰动度量函数可表示为 $z = (P_1 d_1^+ \quad P_2 d_2^+ \quad P_3 d_3^+)$.为实现与文献中仅考虑配送成本的单一目标相比较,对于一个决策方案 $s \in S$,设 $w(s)$ 、 $c(s)$ 、 $d(s)$ 分别代表该方案的送货时间违反量、成本、最长在途时间违反量,将针对顾客配送时间变化的扰动度量设计为 $f(s) = \alpha w(s) + c(s) + \beta d(s)$,其中 α 、 β 为正权值.

2 干扰管理算法

针对顾客时间窗变更后,配送公司如何能以较小的配送系统扰动,满足顾客要求的问题,本章首先给出单车在途条件下的新车增派策略,及多车在途条件下的车辆协作策略,然后基于这两个策略提出顾客配送时间变化的干扰管理算法.

2.1 单车在途条件下的新车增派策略

初始配送计划执行中,若顾客 i 改变配送时间,且这时其他所有顾客的送货任务都已完成,仅剩该顾客未服务,且仅有该顾客所对应的那台车辆 k 仍在途行驶,其他车辆都已返回车场.

(1) 若顾客 i 的配送时间提前,则需根据提前的时间、顾客 i 距离车场的位置,以及系统总体的扰动程度,在增派新车和仍使用在途车辆这两种策略中权衡:

a. 不派新车的方案为 s ,问题目标中 $d_2^+ = 0$ 且 $d_3^+ = 0$,所以 $z = (P_1 d_1^+)$,而 $d_1^+ = w_i$.

b. 增派新车的方案为 s' ,问题目标中 $d_3^+ = 0$,所以 $z' = (P_1 d_1^{+'} \quad P_2 d_2^{+'})$,而 $d_1^{+'} = w_i'$, $d_2^{+'} = C_0 + C_{0i} + C_{0i}$.

c. 只有在 $z' < z$ 时才增派新车,由于该问题的多目标特性,比较 z' 与 z ,实际上是按优先等级比较两个向量中每个元素的优劣.同时,由于 z 只包含目标 1,只需比较 z 与 z' 目标 1 的偏差变量,即可得到它们孰优孰劣的结果.在 $w_i - w_i' > 0$ 时,派车才是有意义的,这就是单车在途条件下某顾客的配送时间提前时增派新车的条件.

(2) 若顾客 i 的配送时间拖后,则仍需根据拖后的时间、顾客 i 距离车场的位置,以及系统总体的扰动程度,在增派新车和使用在途车辆这两种策略中权衡:

a. 不派新车的方案为 s ,问题目标中 $d_1^+ = 0$ 且 $d_2^+ = 0$,所以 $z = (P_3 d_3^+)$.

b. 增派新车的方案为 s' ,问题目标中 $d_3^+ = 0$,所以 $z' = (P_1 d_1^{+'} \quad P_2 d_2^{+'})$,而 $d_1^{+'} = w_i'$, $d_2^{+'} = C_0 + C_{0i} + C_{0i}$.

c. 只有在 $z' < z$ 时才增派新车,由于 z 包含目

标3,而 z' 包含目标1和2,所以 $z' < z$,当且仅当 $d_1^+ = 0$ 且 $d_2^+ = 0$,但 $d_2^+ = 0$ 这一条件是不满足的,所以,若顾客 i 的配送时间拖后,则必采用不增派新车的方案。

2.2 多车在途条件下的车辆协作策略

(1) 初始配送计划执行中,若车辆 k 的下一未服务顾客 i 的配送时间提前,且除该车辆在途行驶外,仍有其他在途车辆,则这时对于顾客 i 可以有3类救援策略:仍由车辆 k 服务、由新车服务、由其他在途车辆服务.这3类策略对系统的总体扰动分别为

a. 车辆 k 服务顾客 i 的方案为 s ,问题目标中 $d_2^+ = 0$ 且 $d_3^+ = 0$,所以 $z = (P_1 d_1^+)$,而 $d_1^+ = w_i$.

b. 新车服务顾客 i 的方案为 s' ,问题目标中 $d_3^+ = 0$,所以 $z' = (P_1 d_1^+ \ P_2 d_2^+)$,而 $d_1^+ = w_i'$, $d_2^+ = C_0 + C_{0i} + C_{00}$.

c. 由其他在途车辆 l 服务顾客 i 时,车辆 l 的剩余载货量必须满足顾客 i 的货物需求量.由于车辆 l 可能存在 n_l ($n_l \geq 0$)个未服务的顾客,若 $n_l = 0$ 则车辆可立即开始救援顾客 i ;若 $n_l > 0$ 则车辆 l 的救援开始时间可以有 $n_l + 1$ 个,如图1所示,若车辆 l 还有2个未服务顾客,则它就可能3个救援的启动时间,分别是“驶往顾客1”、“结束顾客1并驶往顾客2”、“结束顾客2”.究竟应从哪个时间点启动,应根据这3个点上的扰动程度比较得出,选取扰动最小的一个作为方案 s'' .若车辆 l 选定了某一救援起始时间,且在该时间之后仍有 n_m 个未服务顾客,则车辆 l 因未能按计划对其路线上这 n_m 个顾客服务,而对系统产生一定扰动,该扰动可通过这些未服务顾客的时间窗违反量之和 $w(s'')$ 、顾客 i 的时间窗违反量、车辆 l 绕行的成本(设为 C_{li} ,其值为相比于原路线所多出的成本)、车辆 l 的在途行驶时间延长量(设为 $d(s'')$)来衡量.下式给出了将顾客 i 插入至车辆 l 路线中的第 $n_p + 1$ 个位置上时,对系统产生的总体扰动程度:

$$z'' = (P_1 d_1^{+''} \ P_2 d_2^{+''} \ P_3 d_3^{+''}) \quad (1)$$

而 $d_1^{+''} = \sum_{j=1}^{n_p} w_j + w_i'$, $d_2^{+''} = C_{li}$, $d_3^{+''} = d(s'')$.

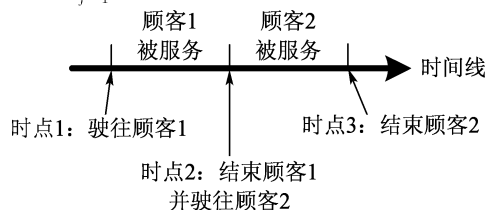


图1 在途车辆存在未服务顾客时的救援启动时间点

Fig. 1 The rescue startup time for a running vehicle which has unserved customers

为计算在途车辆救援顾客 i 对系统产生的总体扰动,应根据式(1)首先选择每辆在途车辆最合适的救援启动时间点,并以此作为该辆车实施救援的扰动程度,然后在除车辆 k 之外的所有其他在途车辆中选取车辆的剩余货物量足够顾客 i 的需求、且扰动程度最小的车辆作为在途候选车辆。

对于顾客 i ,应从 z, z', z'' 中选取扰动最小的一种车辆来实施救援。 z 与 z' 的比较规则已由前文给出,以下讨论 $z'' < z$ 和 $z'' < z'$ 的条件。

a. $z'' < z$ 时,当且仅当 $d_1^{+''} < d_1^+$,即 $\sum_{j=1}^{n_p} w_j + w_i' < w_i$;

b. $z'' < z'$ 时,当且仅当 $d_1^{+''} < d_1^+$ 且 $d_2^{+''} < d_2^+$,即 $\sum_{j=1}^{n_p} w_j + w_i' < w_i'$,且 $C_{li} < C_0 + C_{0i} + C_{00}$.

(2) 初始配送计划执行中,若车辆 k 的下一未服务顾客 i 的配送时间拖后,且除该车辆在途行驶外,仍有其他在途车辆,车辆 k 的货物量在扣除其原有未服务顾客后仍足够顾客 i 的需求,则这时对于顾客 i 仍有3类救援策略:由车辆 k 服务、由新车服务、由其他在途车辆服务.这3类策略对系统的总体扰动分别为

a. 车辆 k 服务顾客 i 的方案为 s ,问题目标中 $d_2^+ = 0$,所以 $z = (P_1 d_1^+ \ P_3 d_3^+)$,而 $d_1^+ = w_i$, $d_3^+ = d(s)$.

b. 新车服务顾客 i 的方案为 s' ,问题目标中 $d_3^+ = 0$,所以 $z' = (P_1 d_1^+ \ P_2 d_2^+)$,而 $d_1^+ = w_i'$, $d_2^+ = C_0 + C_{0i} + C_{00}$.

c. 由其他在途车辆 l 服务顾客 i 时,车辆 l 的剩余载货量必须满足顾客 i 的货物需求量.对于在途车辆 l 的选择与顾客 i 服务时间提前的做法一致,也是根据式(1)首先计算每辆在途车辆的最合适的救援启动时间点,并以此作为该辆车实施救援的扰动程度,然后在除车辆 k 之外的所有其他在途车辆中选取扰动程度最小的车辆作为在途候选车辆。

d. 对于顾客 i ,应从车辆 k 、新车,以及其他在途车辆中选取哪一种车辆来实施救援的方法仍然与顾客 i 的服务时间提前的做法一致,根据 z, z', z'' 的比较结果,选取扰动程度最小的一种车辆来实施救援,只不过顾客 i 的服务时间拖后的 z 要比顾客 i 服务时间提前的 z 多了一项 $P_3 d_3^+$.

2.3 干扰管理算法

针对前文定义的问题,设初始计划运行中,顾客 i 要求改变服务时间,这时在途车辆数为 n ($n \geq 1$),顾客 i 在原计划中由第 k 辆车负责送货,且该辆车仍有 n_k 个未服务的顾客($n_k \geq 1$).在 $n_k = 1$

时,可直接按照 2.2 中多车协作策略得到救援的解决方案;但通常情况下 $n_k > 1$,这时,需要将所有 n_k 个顾客的送货任务在车辆 k 、新车,及其他在途车辆中分配.为此,采取先将 n_k 个顾客排序,然后依次针对其中每一顾客按照 2.1、2.2 中的策略向车辆 k 、新车,及其他在途车辆中分配送货任务的方法,来处理顾客时间窗变化这一干扰事件.

顾客配送时间窗变化这一干扰事件对车辆 k

的 n_k 个未服务顾客首先产生扰动,这一扰动可通过将一部分未服务顾客分摊给其他在途车辆或新车来向系统的其他部分传递,传递工作以减少系统总体扰动为目标,以本文 2.1、2.2 中提出的新车增派策略和多车协作策略为原则.当对所有的 n_k 个受扰顾客都做出是否由其他车辆分摊,以及如何分摊的决定之后,系统的总体扰动也就达到最小化的目标.为此,本文提出如图 2 所示的救援流程.

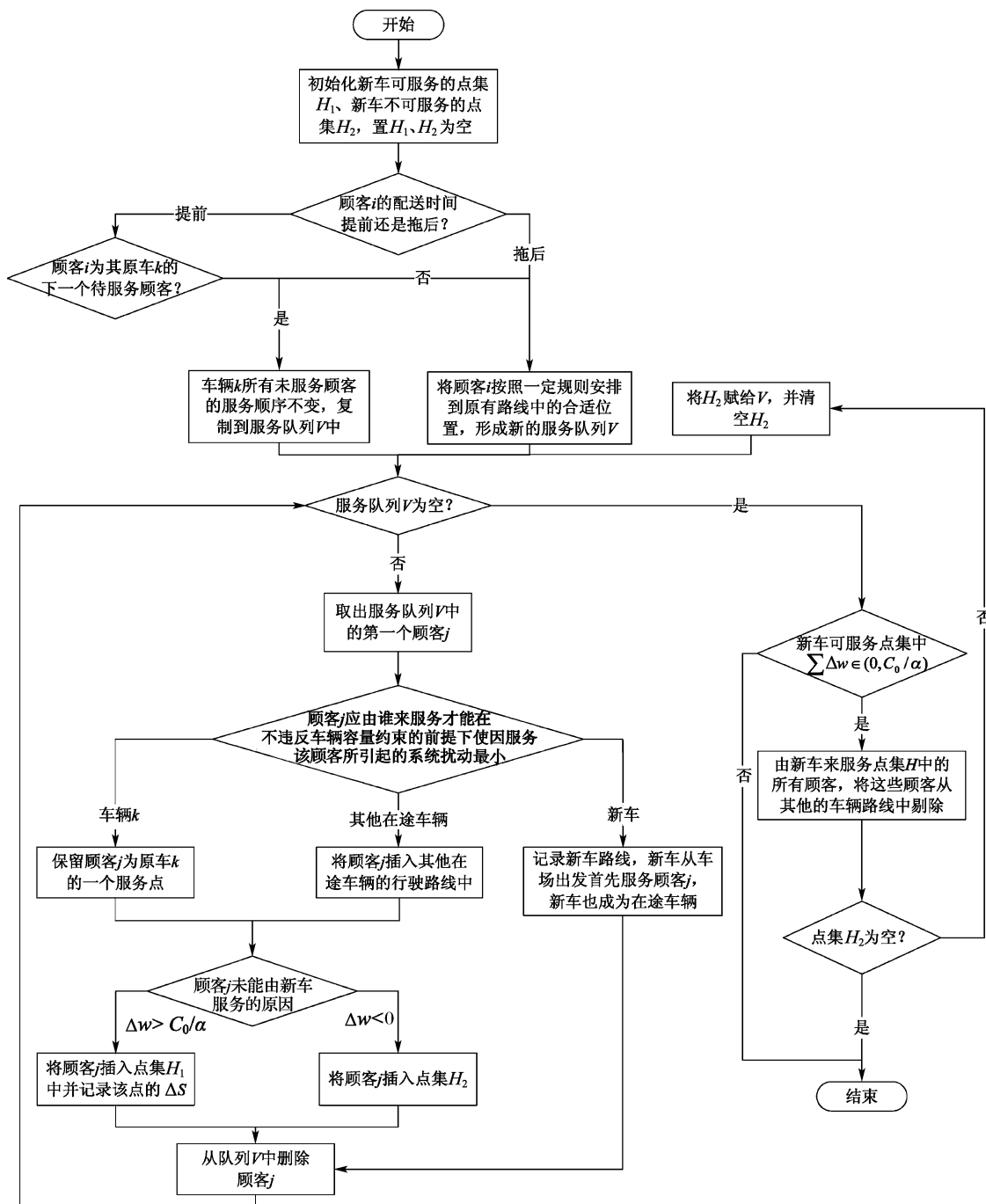


图 2 救援算法流程

Fig. 2 The procedure of the rescue algorithm

图2的主要原理是:

① 首先根据顾客 i 的时间窗变化, 将其安排到车辆 k 所有未服务顾客的合适服务位置上, 形成新服务队列; 若顾客 i 的时间窗提前且顾客 i 为车辆 k 的下一个未服务顾客, 则其在车辆 k 中服务顺序不变; 否则对其在车辆 k 路线中的安排应按照如下的规则和步骤来进行:

规则1 $l_i \leq e_j$ 时, 则只有在先 i 后 j 服务时才可能使 $w_i + w_j = 0$.

规则2 $e_i < e_j < l_i, e_j < l_i < l_j$, 且 $e_i + s_i + c_{ij} < l_j, e_j + s_j + c_{ji} > l_i$ 时, 则只有在先 i 后 j 服务时才可能使 $w_i + w_j = 0$.

规则3 $e_i < e_j < l_i, e_j < l_i < l_j$, 且 $e_i + s_i + c_{ij} > l_j, e_j + s_j + c_{ji} > l_i$ 时, 则只有在顾客 i 与顾客 j 被两辆车并行服务时, 才可能出现 $w_i + w_j = 0$ 的结果.

按照上述规则, 顾客 i 的服务顺序调整流程为

步骤1 除顾客 i 之外的未服务顾客排列为 U , 设 V 为一空排列.

步骤2 若 U 为空, 则将 i 插入 V 的尾部, 转步骤6, 否则取出 U 中的第一个顾客 j , 转步骤3.

步骤3 将顾客 i 与顾客 j 进行规则1~3的校验; 若匹配规则1和2, 则转步骤4; 若匹配规则3, 则转步骤5.

步骤4 若按照规则1或2, 顾客 i 排在顾客 j 之前, 则将 U 复制给 V , 并将顾客 i 插入顾客 j 之前, 转步骤6; 若按照规则1或2, 顾客 i 排在顾客 j 之后, 则将顾客 j 从排列 U 中移动到排列 V 中, 转步骤2.

步骤5 按照步骤4对顾客 j 的后续顾客依次判断, 若找出一个顾客 j' 使顾客 i 应在某顾客 j' 之前, 则将 U 中的后续顾客复制到 V 的尾部, 并将顾客 i 插入到 V 中的 j' 前, 转步骤6; 否则依次将 i 和 U 中的后续顾客插入 V 的尾部, 然后复制 V 至 V' , 并将 V' 中顾客 i 与 j 的顺序调换, 转步骤6.

步骤6 结束, 排列 V 和 V' (若存在 V') 即为最终的顾客排序.

在扰动救援主流程中, 可分别对 V 和 V' 计算扰动程度, 选取较小的一个作为最终方案.

② 对队列中的每一顾客, 都依次判断顾客 j 的服务时间相比于原来计划中顾客 j 的服务时间是提前还是拖后, 再基于2.1和2.2中的救援策略, 选择由车辆 k 、其他在途车辆或新车中哪一类

车辆来服务顾客 j , 判断完所有队列中的顾客后即退出循环.

③ 若图2中点集 H_1 中所有顾客的 ΔS 之和超出了新车的派车临界条件, 则使用一辆新车完成所有这些顾客的送货任务.

3 算例分析

本文选用 Solomon 提供的 100 个点规模的 Benchmark 问题^[12]作为原始数据, 对本文干扰管理方法进行了测试. 测试过程是: 针对每个标准问题, 首先基于文献[13]的遗传算法生成初始行车方案, 然后随机生成初始方案执行过程中一个未服务顾客时间窗变化的干扰事件, 接着分别使用文献[13]的重调度策略和本文的干扰管理方法对于干扰事件发生后的问题状态进行车辆路线的重排, 对比两种解决方案的优劣. 测试选取的参数为 $C_0 = 80, \alpha = 30, \beta = 30$. 其他的问题参数都从测试问题中获得. 所有的实验程序都采用 C# 语言编写, 并且在 Pentium IV 2.8 GHz / 512 MB DDR PC 上执行通过.

表1的数据列分别针对选取的 Benchmark 问题提供了干扰事件发生的时间、配送时间有变化的顾客编号、配送时间变化后的顾客的新时间窗、干扰事件发生时仍未服务的顾客数, 以及重调度和干扰管理方法针对问题的求解结果, 该结果包括扰动度量中的 $c(s)$ 、 $w(s)$ 、 $d(s)$ 和 $f(s)$.

表1体现出如下几点:

(1) 虽然干扰管理方法在大部分案例的 $c(s)$ 结果上要略大于重调度策略, 但该方法的 $w(s)$ 和 $f(s)$ 在多数问题中都明显优于重调度策略. 也就是说, 重调度策略更注重配送成本的最小化, 而忽略了系统的整体扰动, 因此得到的解决方案在实际中会产生更大的 $w(s)$ 和 $f(s)$, 在实际中, 就会有更多的顾客不能按时服务, 或某些顾客有更大的服务时间偏差等. 而干扰管理方法从全局的扰动程度出发, 得到了使问题更趋于平稳的解决方案, 因而该方法更具实用价值.

(2) 从两种方法的比较结果来看, 干扰管理方法甚至在某些问题 $c(s)$ 上的表现比重调度策略还好. 这一现象可解释为, 扰动救援实际上是一种局部路线重排方法, 该方法是以初始方案为基础进行的调整, 这一过程可将初始方案中经过优化的路段传递到干扰管理方法中, 使其也保留下了一些优秀的路段.

表 1 重调度策略与干扰管理方法对顾客配送时间变化干扰的处理结果

Tab.1 The results of the rescheduling strategy and the disruption management method to deal with the customer time window changing

问题	干扰事件 发生时间	顾客 编号	新时间窗	未服务 顾客数	重调度结果				干扰管理结果			
					$c_1(s)$	$w_1(s)$	$d_1(s)$	$f_1(s)$	$c_2(s)$	$w_2(s)$	$d_2(s)$	$f_2(s)$
R101	35	97	[39,41]	78	1 672.41	54.76	0	3 315.16	1 744.24	51.43	0	3 287.00
R102	62	89	[82,83]	65	1 487.71	68.72	0	3 549.34	1 503.31	67.40	0	3 525.45
R103	17	83	[32,39]	96	1 947.42	37.35	0	3 068.01	2 082.90	28.70	0	2 943.78
R104	54	76	[153,160]	73	1 518.94	51.19	0	3 054.66	1 384.87	51.19	0	2 920.59
R105	121	73	[133,145]	37	853.44	60.49	0	2 668.29	834.34	60.49	0	2 649.18
R106	75	69	[78,92]	61	1 391.23	85.82	0	3 965.85	1 440.31	84.03	0	3 961.17
R107	89	79	[106,110]	56	1 143.41	41.17	0	2 378.54	1 108.84	40.79	0	2 332.53
R108	41	99	[55,56]	79	1 409.24	9.04	0	1 680.49	1 322.03	9.04	0	1 593.28
C101	281	73	[322,325]	59	1 308.10	5.85	0	1 483.58	1 208.80	5.85	0	1 384.28
C102	521	13	[524,525]	38	799.89	35.36	0	1 860.61	870.88	35.36	0	1 931.60
C103	706	68	[710,713]	23	490.42	8.81	0	754.77	469.21	8.81	0	733.55
C104	402	10	[428,438]	60	1 009.38	9.65	0	1 298.79	1 005.79	9.65	0	1 295.19
C105	13	86	[27,28]	97	2 037.57	10.50	0	2 352.42	2 359.20	10.50	0	2 674.06
C106	289	63	[301,308]	57	1 233.99	4.83	0	1 378.80	1 083.03	2.65	0	1 162.59
RC101	23	75	[37,45]	93	2 338.78	29.74	0	3 230.98	2 120.46	22.19	0	2 786.23
RC102	83	99	[86,87]	58	1 685.44	147.44	0	6 108.71	1 677.66	147.44	0	6 100.86
RC103	25	63	[37,38]	93	1 929.48	11.82	0.33	2 293.84	1 960.78	7.62	0	2 189.25
RC104	34	37	[47,52]	88	1 958.57	20.00	0	2 558.61	1 851.32	19.20	0	2 427.39
RC105	72	45	[83,86]	69	1 982.98	76.18	0	4 268.37	2 008.05	56.25	0	3 695.52
RC106	46	49	[73,73]	84	1 942.97	12.91	0	2 330.35	1 937.16	8.34	0	2 187.40

(3) 在 20 个标准问题中, $f_1(s)$ 只在两个问题上劣于 $f_2(s)$, 这两个问题都是 C 类问题, 而 C 类问题的 $w_1(s)$ 与 $w_2(s)$ 基本相同. 深入分析不难发现, 该类问题的顾客点呈聚簇分布的特征, 这会导致簇内邻近车辆非常容易相互救援, 但簇间车辆则难于协作, 这就产生了干扰事件发生后车辆协作的一种刚性, 要么可救援, 要么不可救援. 所以, $f_1(s) < f_2(s)$ 的两个问题都是在 $w_1(s) = w_2(s)$ 、顾客服务的扰动无法继续优化时, 由 $c_1(s) < c_2(s)$ 所导致的.

(4) 由表 1 还可见, 干扰事件发生的时间越早, $f_2(s)$ 越优于 $f_1(s)$, 即系统扰动程度越低, 这一现象符合常识: 干扰越早出现, 越容易准备和应对.

(5) 测算发现, 尽管运行在同一台计算机上, 但两种方法的运行时间差异很大. 本文干扰管理方法的平均运行时间为 1.51 s, 这一数据远远小于重调度算法平均 165.86 s 的时间. 这一现象可解释为由于干扰管理方法是一种局部路线重排的启发式算法, 而重调度所采用的是多条染色体在全局范围内的随机搜索, 其在针对具体干扰事件的处理效率上不如干扰管理方法.

4 结 语

本文针对顾客时间窗变化之后的物流配送车辆调度问题, 通过提炼人工调度经验, 以干扰事件发生后的系统整体扰动最小化为目标, 提出一种求解该问题的干扰管理方法. 算例分析表明, 本文方法所得到的处理方案能够同时考虑顾客时间窗偏离、配送成本、最长行驶距离等多方面因素, 在系统整体扰动程度方面相比于文献重调度算法有了一定的降低, 克服了传统重调度算法不考虑顾客及驾驶员满意度的缺陷, 提高了问题处理方案的实用性, 是干扰管理思想在物流配送领域中的成功运用. 另一方面, 对于考虑多类干扰事件的交叉影响及其处理方法的研究, 是本文下一步的研究方向.

参考文献：

[1] QURESHI A G, TANIGUCHI E, YAMADA T. An exact solution approach for vehicle routing and scheduling problems with soft time windows [J]. **Transportation Research**, 2009, **45**(6):960-977

[2] VAN DUIN J H R, TAVASSZY L A,

- TANIGUCHI E. Real time simulation of auctioning and re-scheduling processes in hybrid freight markets [J]. **Transportation Research**, 2007, **41**(9): 1050-1066
- [3] DOUKIDIS G J, VRECHOPOULOS A P. A **Dynamic Real-Time Vehicle Routing System for Distribution Operations** [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 23-37
- [4] 郑丽群, 王德东, 李大卫. 随机车辆路径问题综述 [J]. 鞍山科技大学学报, 2005, **28**(3): 199-203
- [5] HVATTUM L M, LOKKETANGEN A. Solving a dynamic and stochastic vehicle routing problem with a sample scenario hedging heuristic [J]. **Transportation Science**, 2006, **40**(4): 421-438
- [6] TIAN Y, SONG J, YAO D, *et al.* Dynamic vehicle routing problem using hybrid ant system [C] // **Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems**. Shanghai: IEEE, 2003: 970-974
- [7] 谢秉磊, 郭耀煌, 郭强. 动态车辆路径问题: 现状与展望 [J]. 系统工程理论方法应用, 2002, **11**(2): 116-120
- [8] GOMES L C T, ZUBEN F J. Vehicle routing based on self-organization with and without fuzzy inference [C] // **Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE' 2002)**. Honolulu: IEEE, 2002: 1310-1315
- [9] 张建勇, 李军. 具有模糊旅行时间的 VRP 的一种混合遗传算法 [J]. 管理工程学报, 2006, **20**(4): 13-16
- [10] 王旭坪, 傅克俊, 胡祥培. 应急物流系统及其快速反应机制研究 [J]. 中国软科学, 2005(6): 127-131
- [11] 胡祥培, 丁秋雷, 张漪, 等. 干扰管理研究评述 [J]. 管理科学, 2007, **20**(2): 2-8
- [12] SOLOMON M M. Solomon benchmark problems [EB/OL]. [2009-10-8]. <http://www.idsia.ch/~luca/macsvrptw/problems/welcome.htm>.
- [13] BERGER J, BARKAOU M. A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows [J]. **Computers & Operations Research**, 2004, **31**(12): 2037-2053

Research on management method for logistics distribution system under disruptions of customer time window changing

YANG Wen-chao¹, HU Xiang-pei^{*2}, WANG Zheng³

(1. Dalian Institute of Semiconductor Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116620, China)

Abstract: During the process of logistics distribution, disruption events caused by customer time window changing often lead to the infeasibility of the initial logistics distribution plan. For vehicle routing problems with time windows in logistics distribution, disruption management methodology is applied. Based on the problem state at the time when disruption event occurs, the strategies of dispatching a vehicle from the depot and arranging a running vehicle in order to rescue the disrupted customers are studied, and a heuristic method for problem logistics disruption rescue is presented. The method assigns the delivery tasks of every disrupted customer respectively to the planned vehicle, other running vehicles, or a new vehicle from the depot based on the proposed strategies, and then reroutes the vehicles. Finally, analysis and comparison between the heuristic method and a typical genetic algorithm from a reference are made on benchmark problems. The analytical results show the heuristic method is evidently better than the algorithm from a reference for rerouting of the vehicles after disruption events in the aspect of systemic disruption degree.

Key words: customer time window changing; logistics distribution; disruption rescue; disruption management