

# 物流配送系统干扰管理模型研究<sup>①</sup>

胡祥培, 孙丽君, 王雅楠

(大连理工大学系统工程研究所, 大连 116023)

**摘要:** 针对干扰事件导致物流配送计划难以顺利实施这一难题, 运用干扰管理方法, 从客户不满意度、配送成本以及路径偏离程度三个方面度量物流配送系统中的扰动, 建立字典序的多目标干扰管理模型, 采用能够融合多种邻域函数的禁忌搜索算法实现模型的求解, 以需求量变动的干扰事件为例, 设计算例以验证模型的有效性. 试验结果表明: 该模型比已有的全局重调度模型更科学——能够均衡各方的利益, 得到的干扰应对方案对系统的扰动更小. 实际应用中, 模型各目标的重要顺序可根据情况灵活更替, 客户不满意度的度量方法也可灵活选择, 实用性更高.

**关键词:** 物流配送; 干扰管理; 多目标规划模型; 需求量变动

**中图分类号:** N945; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)01-0050-11

## 0 引言

物流配送过程经常受到某些不确定事件的干扰, 如客户需求量变动, 客户时间窗变动, 车辆故障等, 这些干扰事件经常导致已有的配送计划不可行. 如何有效地处理干扰事件, 使干扰事件对整个物流配送系统产生的扰动最小, 已成为物流配送管理中的难点问题. 干扰管理(disruption management) 正是一种致力于实时处理这类问题的方法论, 是近年来国际上管理科学、运筹学和系统工程等领域备受关注的前沿性研究方向, 具有重要的科学意义和广阔的应用前景.

根据 Yu 和 Qi<sup>[1]</sup> 对干扰管理的定义可知, 干扰管理需要针对各种实际问题和干扰事件的性质, 建立相应的优化模型和有效的求解算法, 快速、及时地给出处理干扰事件的最优调整计划. 该调整计划不是针对干扰事件发生后的状态完全彻底地重新进行建模和优化, 而是以此状态为基础快速生成对系统扰动最小的调整方案, 虽然也考

虑节省费用, 但往往不是费用最省的方案. 干扰管理的概念自提出以来, 其应用研究涉及到了航空<sup>[2]</sup>、供应链<sup>[3]</sup>、项目管理<sup>[4]</sup> 等多个领域. 因为物流配送系统的复杂性, 在该领域的研究起步较晚. 目前该领域大部分的研究仍以全局重调度的方法实现路径的重排, 调整后的结果将先前的计划完全打乱, 往往会给配送系统中的各个实体带来更大的负面影响. 因此, 如何充分借鉴干扰管理的思想, 降低路线重排的负面影响, 变得十分关键. 另外, 由于物流配送系统是由多方参与的, 如何建立一个能够在路线重排过程中权衡各方利益的模型比较困难.

本文采用干扰管理思想, 考虑物流配送系统中顾客、物流配送运营商和车辆司机这三个行为主体, 从三方的利益角度对系统扰动进行度量, 以最小化客户不满意度、配送成本和路径偏离程度为目标构建物流配送系统的干扰管理模型, 并提供多种度量客户不满意度的函数, 可以根据不同的实际应用条件灵活选用, 实用性更高.

① 收稿日期: 2009-07-27; 修订日期: 2010-09-26.

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(70725004); 国家自然科学基金资助项目(70890080; 70890083; 70671014).

作者简介: 胡祥培(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. Email: drhxp@dlut.edu.cn

## 1 国内外研究现状及分析

由于干扰管理是一个相对较新的领域, 研究物流配送车辆调度与路径规划的干扰管理文献较少。相关的是动态车辆路径问题( dynamic vehicle routing problem, DVRP) 和车辆重调度问题的研究( vehicle rescheduling problem)。对于配送过程中有新需求出现的 DVRP 的研究, 代表性的成果有: Ichoua 等<sup>[5]</sup> 针对配送过程中的新增订单问题设计禁忌搜索算法, 为车辆寻找下一个任务点; Yang 等<sup>[6]</sup> 针对配送过程中不断到达的客户需求建立离线模型, 并用仿真方法比较了多种处理策略; 也有些研究将客户的需求量或客户的到达看作随机变量<sup>[7-8]</sup>, 用随机理论优化配送方案。对于车辆重调度问题的研究, 代表性的是 Li 等人<sup>[9-11]</sup> 的研究成果: 针对配送过程中, 某车辆故障而无法继续剩余任务的问题, 提出基于拉格朗日松弛的启发式算法, 求解由它车进行援救的策略<sup>[9-10]</sup>, 并设计重调度的决策支持系统<sup>[11]</sup>。就作者所知, 将干扰管理的思想结合到车辆路径重调度问题的研究中, Rhalibi 和 Kelleher<sup>[12]</sup> 是最早者, 他们对配送中某路段发生时间延迟的问题进行优化, 目标之一是新路线要尽量少地偏离原路线, 符合干扰管理的思想。其它同类研究有: Zhang 和 Tang<sup>[13]</sup> 对延迟问题建立了衡量原问题目标和时间窗偏离的多目标模型, 并设计了混合算法对模型求解; Huisman 等<sup>[14]</sup> 提出解决具有旅行时间延迟的多车场问题的方法, 其模型的目标函数最小化三个指标: 车辆使用数、服务时间延迟的客户数占总数的百分比、延迟费用; 王明春等<sup>[15]</sup> 针对有时间窗的车辆路径问题( vehicle routing problem with time windows, VRPTW) 中发生的需求量变动和时间窗变动问题, 将模型的目标函数定义为网络运行费用及与原计划偏离所需费用的加权和, 并设计了混合算法对模型求解。

由于物流配送系统由多行为主体参与, 各主体的目标不一致甚至互相矛盾, 而干扰管理决策又是一个实时的过程, 因此, 物流配送系统的干扰管理问题是一个多目标、动态实时的复杂问题, 建模极其困难。虽然上述相关研究已对类似问题的

数学模型进行了初步的探索, 但仍存在以下不足:

①尚未提出系统化的扰动度量方法: 已有大部分研究采用全局重规划的方法, 虽然从数学上能得出相应的最优解, 但是这个最优解有时并不是解决实际问题的可行解, 它往往给参与配送过程的某些实体带来更大的扰动。②目标的设置不够合理: 多数研究采用赋权重的方法区分目标的重要度, 权重值的确定难以客观化, 使得模型与实际情况相差较大。

针对已有研究的不足, 本文考虑物流配送系统的顾客、物流配送运营商、车辆司机等多个行为主体, 从多方的利益角度对系统扰动进行度量。模型的建立和求解过程以字典序的多目标规划理论为指导。字典序的方法( lexicographic GP) 与权重法( weighted GP) 相比, 优势在于: 目标独立性强, 不强迫建模者或决策者为每个目标设定具体数值的权重, 目标的量纲不需要统一, 目标之间重要度的转换灵活。因此, 该方法的实际应用更为广泛<sup>[16]</sup>。

## 2 扰动的度量

物流配送干扰管理的目标是干扰事件发生后, 快速形成新的调整方案, 得到的新调整方案使整个物流配送系统的扰动最小。因此, 建立干扰管理模型时, 需要对扰动进行定量分析, 并将这些扰动的最小化作为目标函数。由于客户、物流配送运营商、司机是使得物流配送过程能够顺利运行的行为主体, 三者的利益往往是多目标车辆路径规划问题( vehicle routing problem, VRP) 研究中所关注的问题, 如 Jozefowicz 等人<sup>[17]</sup> 综述的研究多目标 VRP 问题的文献中就包含了提高客户满意度的多目标 VRP 问题, 平衡司机工作量的多目标 VRP 问题等等。本文在构建干扰管理模型时, 也将权衡三个行为主体的利益, 考虑三者的行为特征, 分别度量“客户不满意度”、“配送成本”以及“行车路线的偏离”, 原因如下:

1) 客户满意度的提高有利于提高客户对企业的忠诚度, 使得企业拥有长期稳定的客户群并吸引更多的新客户, 进而提高赢利。由于本文建立的数学模型的目标是最小化, 因此将使用客户不

满意度的扰动这一指标来反映对客户满意度的扰动.

2) 物流配送运营商在整个物流配送过程中,最关心的是运作成本.因此,干扰调整方案应适当兼顾成本因素,尽可能节约运作成本.

3) 当干扰管理过程生成新的配送方案后,配送中心需要通知车辆更改路线,如果频繁地更改路线,将会花费通讯费用,增加配送中心的成本,路线的过多更改也会影响司机的工作情绪.另外,按照干扰管理的思想,新生成的优化调度方案与原方案进行比较,二者间的偏差应该最小,即路径的变动应该尽量小.

虽然本文提出的模型从以上三个维度来度量扰动,是一个多目标模型,但其与多目标 VRP 模型有很大的区别:本文的模型是针对物流配送过程中干扰事件发生后,从系统当前的资源、约束和状态出发,寻找新的调整方案,使得对物流配送系统的各个行为主体带来的扰动最小,这个模型的目标与多目标 VRP 模型的目标具有显著的不同,它是关于扰动的度量函数,具有度量的模糊性、行为感知的离散性和多样性等特点,是一个十分复杂和难以度量的函数,而多目标 VRP 中的目标却是明确和具体的.因此,本文研究的问题比多目标 VRP 问题更复杂.

### 3 数学模型的建立及求解

#### 3.1 问题描述与界定

本文以需求量变动这类干扰事件为例进行建模,原因如下.

1) 需求量的变动在成品油销售企业中是频繁发生的干扰事件:由于油品的存储存在安全隐患,除加油站之外的零售客户多为服务行业,如,洗浴、餐饮、旅社等,他们不能够存储较大的锅炉用油(即柴油),因此必须小批量多频率订购,在这种情况下,需求量变动就会频繁发生.据统计,在该类客户订单的配送过程中,需求量变动(多为追加订购量)和紧急需求是发生频率最高的干扰事件.

2) 需求的变动问题一直是国内外学术界关注的热点问题研究:根据国内外的期刊文献可知,

学者们很早就开始研究物流配送需求量变动的问题,早在 1987 年, Powell 就研究了不确定性需求的动态车辆指派问题模型<sup>[18]</sup>. 与客户需求量变动相关的研究可根据客户需求量是否确定的特点,分为两类:第一类为确定性的需求量变化问题的研究,如钟石泉等人对有顾客时间窗和发货量变化的问题进行研究<sup>[19]</sup>,文献[20-21]对顾客需求变动问题的研究中也包含了确定性的需求量变化问题;第二类为不确定性的需求量变化问题的研究,如谢秉磊等人指出,需求预测产生的不确定性包含了需求量、需求时间的不确定性,它往往导致不确定需求的动态车辆路径问题<sup>[22]</sup>. 其中,随机需求量问题的研究<sup>[7-8, 23]</sup>以及模糊需求量问题的研究<sup>[24]</sup>均属此类.

物流配送车辆路径问题有很多种类,本文将问题类型界定为有时间窗的车辆路径问题.该问题的一个典型特征是客户对货物的送达时间较敏感,问题范围与条件为:单个配送中心,配送中心备有足够数量的同质货物和同型配送车辆,车辆必须从配送中心出发并且最终回到配送中心,每一客户只被一辆车访问一次,如图 1(a) 所示.为应付突发的需求量,车辆从配送中心出发时满载.本文设计算例时,将需求量增加作为干扰事件,即,在初始物流配送计划执行过程中,某待配送客户的需求量突然增加,如图 1 中的客户点 7,该增加的量超过了负责配送该点的车辆的剩余载货量,此时需要它车前来援助,援助策略仍需满足一个客户只能被一辆车访问一次的要求,如图 1(b) 所示,该策略以系统扰动最小为目标.

#### 3.2 模型假设与符号定义

##### 3.2.1 假设

- \* 初始配送路线的生成以配送成本最低为目标;
- \* 车辆只要经过客户点,就对其进行服务;
- \* 配送过程中,车辆离开某客户点前已知其下一个客户点的实际需求量;
- \* 客户对货物不准时送达有一定的容忍限度,但无论何时送达,客户都不会拒收(实际情况往往如此,如图 2 所示);
- \* 客户不满意度只与送货时间相关;
- \* 路径的变动不考虑路段的方向,如果新

方案中的路段在原配送计划中, 则视为路径无变动。

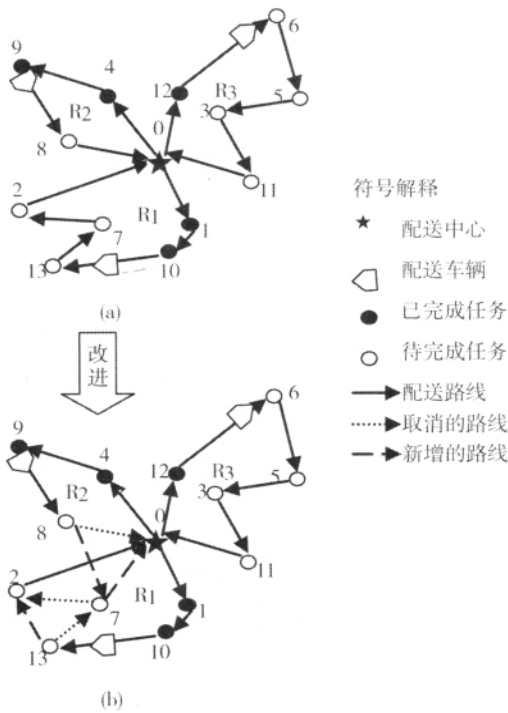


图 1 物流配送系统干扰管理示意图

Fig. 1 Disruption management in urban distribution system

### 3.2.2 符号定义

$e_j$ : 客户  $j$  要求的最早开始服务的时间;

$l_j$ : 客户  $j$  要求的最迟开始服务时间;

$\Delta t_j$ : 客户  $j$  对货物送达不准时的最大容忍量, 即能够容忍的比  $e_j$  提前或者比  $l_j$  迟到的最长时间;

$S_{jk}$ : 由第  $k$  辆车负责的客户端点  $j$  的不满意度;

$D_{jk}$ : 车辆  $k$  到达客户端点  $j$  的时间;

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ : 被使用的配送车辆的集合;

$M = \{0, 1, 2, \dots, m\}$ : 配送中心(以 0 表示)与  $m$  个客户点的集合;

$\overline{\{\}}$ : 集合的势;

$X^0$ : 干扰事件发生之前的配送路线;

$X$ : 调整后的新路线;

$D_v^+$ : 属于调整后路线  $X$  但不属于原路线  $X^0$  的边的集合;

$D_v^-$ : 属于原路线  $X^0$  但不属于调整后路线  $X$  的边的集合;

$D_v^+, D_v^-$ : 分别表示集合  $D_v^+$  和  $D_v^-$  的势;

$\beta^+$ : 与原路线相比, 新路线中新增了一条边的成本;

$\beta^-$ : 与原路线相比, 新路线中减少了一条边的成本;

$c_{ij}$ : 从点  $i$  到点  $j$  的配送成本;

$S$ : 新配送方案中的客户整体不满意度;

$S^0$ : 初始配送方案中的客户整体不满意度;

$f$ : 新配送方案的总配送成本;

$f^0$ : 初始配送方案的总配送成本;

$d_s^+, d_s^-$ : 顾客不满意度  $S$  和  $S^0$  的正偏差变量和负偏差变量;

$d_f^+, d_f^-$ : 总配送成本  $f$  和  $f^0$  的正偏差变量和负偏差变量;

$$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 对点 } j \text{ 进行服务;} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{点 } i \text{ 至点 } j \text{ 间的路径在车辆 } k \text{ 的} \\ & \text{配送路线中, 且 } i \neq j; \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$d_j$ : 客户  $j$  的需求量;

$\Delta d_j$ : 客户  $j$  需求量的变化, 默认值为 0 (增加需求量时  $\Delta d_j > 0$ ; 减少需求量时  $\Delta d_j < 0$ );

$q$ : 车辆的总载重能力.

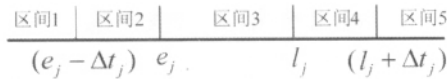
### 3.3 扰动的度量函数

#### 3.3.1 客户不满意度的度量

衡量是否对客户产生扰动的重要指标之一是客户的满意度是否发生了改变. 当货物在客户要求的时间窗内送达时, 与送达时间相关的客户满意度最高, 而当货物在要求的时间窗之外送达时, 将引起客户不满. 现有软时间窗车辆路径问题的研究, 均未对未满足要求的送货时间实施参数惩罚<sup>[25]</sup>, 但在实际应用中, 惩罚参数的值很难准确定义, 并且这种线性惩罚函数无法体现货物实际送达时间、客户要求的送达时间、以及客户的最长容忍时间对客户不满意度的影响关系. 例如, 当某客户的最长容忍时间  $\Delta t_j = 10$  分钟, 而货物送达时间比  $l_j$  迟到了 15 分钟, 那么客户的不满意度将很大; 但如果此情况发生在  $\Delta t_j = 60$  分钟的客户的身上, 那客户会有稍微的不满, 但不会很大. 基于此思想, 本文的模型采用货物实际送达时间、客户要求的送达时间、以及客户最长容忍时间三者之间的关系来表示客户的不满意度, 用  $S_{jk}$  表示,

其为分段函数,各段所属区间与代表的意义见图

2,函数见式(1).



- 区间 1: 在容忍限度外, 不满意度很大
- 区间 2: 在容忍限度内, 但超过了预定时间窗, 不满意度不为 0
- 区间 3: 客户要求的时间窗范围, 不满意度为 0
- 区间 4: 在容忍限度内, 但超过了预定时间窗, 不满意度不为 0
- 区间 5: 在容忍限度外, 不满意度很大

图 2 客户对送货不准时的容忍程度示意图

Fig. 2 The tolerant level of a customer for the time-window-violating delivery

$$S_{jk} = \begin{cases} \infty & D_{jk} < e_j - \Delta t_j; \text{ (区间 1)} \\ y_{jk} \cdot \frac{e_j - D_{jk}}{\Delta t_j} & e_j - \Delta t_j \leq D_{jk} < e_j; \text{ (区间 2)} \\ 0 & e_j \leq D_{jk} \leq l_j; \text{ (区间 3)} \\ y_{jk} \cdot \frac{D_{jk} - l_j}{\Delta t_j} & l_j < D_{jk} \leq l_j + \Delta t_j; \text{ (区间 4)} \\ \infty & D_{jk} > l_j + \Delta t_j \text{ (区间 5)} \end{cases} \quad (1)$$

$S_{jk}$  在区间 2 和区间 4 的意义为: 货物送达时间早于  $j$  点要求的最早开始时间的量(区间 2), 或者晚于  $j$  点要求的最迟开始时间的量(区间 4), 与  $j$  点能够容忍的最大不按时量的比值, 该比值越大, 客户的不满意度将越高.

式(1)是对单一客户不满意度的度量, 对于配送系统中所有客户整体不满意度的度量, 则根据物流配送公司的标准不同而有所不同. 本文提供三种系统整体客户不满意度的度量方法, 各方法的名称、意义与公式见表 1. 三者的区别在于: 平均法的目的是降低系统平均的客户不满意度; 抓重点法的目的是减少不满意度非常大的客户的数量; 而百分比法的目的是尽量让更多客户满意.

### 3.3.2 成本偏离的度量

此目标也是目前所有 VRP 问题必然关注的目标之一. 由于初始配送计划成本最低, 因此在衡量成本干扰的时候, 只需要计算新路线与原路线相比变动部分的成本, 见式(2).

$$f - f^0 = \sum_{ij \in D_s^+} c_{ij} - \sum_{hl \in D_v^-} c_{hl} \quad (2)$$

表 1 系统整体客户不满意度的度量方法

Table 1 Methods for measuring whole customer dissatisfaction

名称	意义	公式
平均法	以平均客户不满意度评价整体不满意度.	$S = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m S_{jk}}{m} \quad (1.1)$
抓重点法	系统中不满意度超过了 100% 的客户数量.	$S = \frac{ \{S_{jk} \mid S_{jk} > 100\%; j=1, 2, \dots, m; k \in N\} }{m} \quad (1.2)$
百分比法	系统中不满意度客户的数量占总客户数量的百分比.	$S = \frac{ \{S_{jk} \mid S_{jk} \neq 0; j=1, 2, \dots, m; k \in N\} }{m} \quad (1.3)$

### 3.3.3 路线偏离的度量

本文依照 TSP 干扰问题的思想<sup>[1]</sup>, 使用路径的偏差成本以及路径的变动数量两类变量衡量路线的偏离程度, 见式(3). 其中  $g(D_v^+, D_v^-)$  是路线偏差成本的评价函数.

$$g(D_v^+, D_v^-) = \beta^+ D_v^+ + \beta^- D_v^- \quad (3)$$

### 3.4 字典序的多目标干扰管理模型

本节以 3.3 节定义的干扰度量函数为依据, 采用字典序的多目标规划的方法, 构建物流配送干扰管理模型如下:

$$\min(P_1 d_s^+, P_2 d_f^+, P_3 g(D_v^+, D_v^-)) \quad (4)$$

$$P_1 \gg P_2 \gg P_3; \quad (5)$$

$$S - S^0 = d_s^+ - d_s^-; \quad (6)$$

$$f - f^0 = d_f^+ - d_f^-; \quad (7)$$

$$X - X^0 = D_v^+ - D_v^-; \quad (8)$$

$$d_s^+, d_s^-, d_f^+, d_f^- \geq 0; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m (d_j + \Delta d_j) y_{jk} \leq q \quad \text{其中 } k = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^n y_{jk} = 1 \quad \text{其中 } j = 1, \dots, m; \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^n y_{0k} = \sum_{k=1}^n y_{k0} = n; \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^m x_{ijk} = y_{jk} \quad \text{其中 } j = 0, 1, \dots, m; \\ k = 1, \dots, n; i \neq j; \quad (13)$$

$$\sum_{j=0}^m x_{ijk} = y_{ik} \quad \text{其中 } i = 0, 1, \dots, m; \\ k = 1, \dots, n; i \neq j; \quad (14)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}; y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \text{其中 } i \in M; \\ j \in M; i \neq j; k \in N. \quad (15)$$

公式(4)~(9)保证新方案与原方案的偏离度最小,即对系统造成的扰动最小.在本模型中,最小化客户不满意度为第一级目标,最小化配送成本为第二级目标,最小化路径的偏离程度为第三级目标.实际应用中,如果物流公司想更换各级目标的重要顺序,只需更换式(5)中 $P_i$ 的顺序即可.公式(4)~(9)中, $S^0, f^0, X^0$ 已知,决策变量为 $X$ ,而公式(10)~(15)为求 $X$ 时应该遵守的约束条件的数学表达式.其中,式(10)为载重量约束,式(11)保证每个客户只能由一辆车服务,式(12)保证所有车辆都从配送中心出发并最终回到配送中心,式(13)与(14)表示变量之间的关系,式(15)限定了变量与参数的取值范围.当 $X$ 确定之后,车辆实际到达客户点的时间也将随之确定,客户的不满意度 $S$ 可以由3.1节定义的公式(1.1)~(1.3)中的某个求得,将 $S$ 代入到式(6)可得到对客户的扰动;由式(8)可得 $D_v^+$ 与 $D_v^-$ 的值,进一步由式(3)可得路线的偏离,即对司机的扰动;当 $D_v^+$ 与 $D_v^-$ 已知后,将式(2)代入到式(7)可得对物流配送运营商的成本扰动.

干扰管理除了满足新需求和新约束之外,必须同时遵守原问题的约束条件,因此,上述模型中,公式(10)~(15)与现有研究载重约束的非满载VRP或者VRPTW的文献<sup>[26]</sup>描述约束条件的数学公式是一致的.公式(1)~(9)则体现了干扰管理对扰动的度量以及与原方案的偏离尽量少的思想.

### 3.5 模型的求解

#### 3.5.1 算法的选择

本文构建的模型考虑了干扰管理过程对物流配送系统多方参与者的扰动因素,必须优化多个目标,求解过程很复杂,采用精确算法无法获得解;而一些求解VRP问题的传统启发式算法,如交换算法,插入算法等,由于其邻域函数单一,获得较好解的能力差;而在元启发式算法中,遗传算法与蚁群算法等一些相对高级的算法的编码过程复杂,算法设计需要很高的技巧,算法运行结果的好坏很大程度上依赖于编码者.鉴于上述这些问题,本文采用禁忌搜索算法(Tabu search algorithm)<sup>[27]</sup>对模型进行求解.禁忌搜索是对局部邻域搜索扩展后的一种全局逐步寻优算法,该算法的搜索速度快、效率高,适用于大规模的优化计算.随着VRP复杂性的提高和问题领域的延伸,该算法近些年来备受研究者的青睐<sup>[28]</sup>.该算法的邻域结构可以融合多种插入、交换等邻域函数,加上算法本身的记忆功能,获得较好解的能力强,并且算法的设计技巧性不强,不依赖于编码者,实用性更强.

#### 3.5.2 算法的设计

本文设计算法求解多目标规划模型时,引入目标逐级优化的思想,即:算法完整迭代运行三轮,每轮的优化目标分别是式(4)定义的三个目标.第一轮迭代以优化 $P_1$ 定义的目标为目标,当迭代结束后,得到 $P_1$ 目标的最优值,设为 $S_1$ ,将该值作为约束条件加入到算法的第二轮迭代中,即,第二轮迭代时,可行解必须满足 $P_1$ 目标的值不大于 $S_1$ ,设第二轮迭代结束得到 $P_2$ 目标的最优值为 $S_2$ ,则第三轮迭代的可行解必须同时满足 $P_1$ 目标的值不大于 $S_1$ 并且 $P_2$ 目标的值不大于 $S_2$ 两个约束.

禁忌搜索算法的主要模块和参数有:初始解、邻域结构、候选解集合、禁忌表、藐视准则、终止准则.下文结合模型重点讨论这几大模块与参数的设计.

##### 1) 初始解

该文研究的问题是干扰事件发生后对现有配送计划的调整,因此初始解即为干扰事件发生时

刻的当前配送状态,设计算法时不需要初始解的产生模块,只需要设计读入当前配送计划的模块即可,因此初始解与该算法是相互独立的,这同时克服了禁忌搜索算法对初始解的依赖的缺陷。

### 2) 邻域结构设计

邻域结构采用 VRP 问题禁忌搜索算法中常用的两种邻域函数:  $\lambda$ -interchange 和 2-opt,前者用于对点的操作,后者用于对边的操作,由约束条件(10)~(15)负责验证邻域解是否可行。邻域函数的详细介绍可参考文献[29],此处不再赘述。

### 3) 候选解集合

候选解的集合是发挥禁忌搜索算法记忆功能的重要参数。候选解的评价依赖于模型的目标函数,按照评价价值由小到大排序。邻域函数运行一次时,新解的评价价值如果小于候选解集合中的评价价值最大的解时,则用新解更新该候选解,并对候选解集合中的解重新排序。候选解的评价函数为式(6)、(7)和式(3),分别对应于算法的第一到第三轮迭代。

### 4) 禁忌表设计

禁忌表也是体现禁忌搜索算法记忆功能的参数之一,本文将客户在某条路线中的某个位置作为禁忌对象,记作  $tabu(i, r, p) = l$ ,即,当邻域函数运行时,将客户点  $i$  从路线  $r$  中的位置  $p$  移出后,在规定的  $l$  次搜索内,不允许邻域函数执行使该客户点返回该位置的操作,  $l$  是禁忌表的长度。依据常用的固定禁忌长度的设定方法,考虑数据集合中总客户数  $m$ ,本文将禁忌表的长度设定为  $l = 2\sqrt{m}$ 。

### 5) 藐视准则

藐视准则基于解的评价价值来设定,即,如果某个解的评价价值小于以往最优解的评价价值,则此解不受禁忌表的限制,被设定为当前解。

### (6) 终止准则

终止准则是当迭代达到预先给定的最大步数时,算法终止。三轮迭代的步数设定相同。

## 4 算例验证与结果分析

由于干扰管理问题尚未有标准的测试数据

集,因此,本文首先设计了一个车辆路径问题的算例,以配送成本最低为目标,通过遗传算法得到最优配送方案,之后将此方案作为物流配送系统需求量变动的干扰管理问题的背景,运用本文建立的模型和求解算法对该问题进行干扰管理,通过与传统全局重调度的结果对比,验证模型的有效性和可行性。

### 4.1 算例设计

算例设计如下:某配送中心有 20 个客户点,配送车辆的满载量为 8t。配送中心的坐标为 (14.5km, 13km),编号为 0。20 个客户点的坐标、需求量以及时间窗的要求等信息见表 2。设配送车辆在配送过程中的平均行驶速度为 20km/h,配送车辆的装卸货时间不计,即服务时间为 0。初始配送计划情况如表 3 所示。

车辆按表 3 中的路线执行配送任务,在任务执行 1 h 时,配送中心收到一个需求量变动的干扰事件。为验证模型的有效性,采用多次试验的方法,设立以下 4 个需求量变动方案:

- \* 方案 1: 客户点 6 增加 2t 货物;
- \* 方案 2: 客户点 20 增加 2t 货物;
- \* 方案 3: 客户点 16 增加 0.5t 货物;
- \* 方案 4: 客户点 19 增加 0.5t 货物。

四个方案中,客户点增加的需求量均是该点在原计划需求量基础上额外增加的。

在任务执行 1h 时刻,系统的配送状态如图 3 所示。其中,实心的小方块代表此时已经配送完毕的客户点,而空心的则代表尚未配送完毕的客户点,圆圈代表配送中心。已经配送完毕的点不能够参加路线的改变运算,后续的运算只能改变尚未配送过的点。

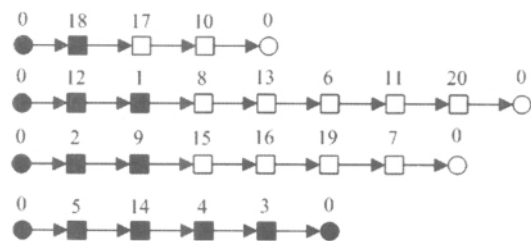


图 3 任务执行 1 h 时刻的系统配送状态  
Fig. 3 Distribution state at the time of 1 h

表 2 某日的客户订单信息

Table 2 Customer order information

客户点 编号	X 坐标 /km	Y 坐标 /km	需求量 /t	时间窗 始点 /h	时间窗 终点 /h
0	14.5	13	0	0	0
1	12.8	8.5	0.1	4.7	10.5
2	18.4	3.4	0.4	1.5	6
3	15.4	16.6	1.2	4.7	10.2
4	18.9	15.2	1.5	5.1	9.5
5	15.5	11.6	0.8	3.7	8.9
6	3.9	10.6	1.3	6.7	12.3
7	10.6	7.6	1.7	7.9	12.9
8	8.6	8.4	0.6	0.6	5.7
9	12.5	2.1	1.2	2.6	6.8
10	13.8	5.2	0.4	2.5	8.1
11	6.7	16.9	0.9	4.1	10.1
12	14.8	2.6	1.3	3.4	8.1
13	1.8	8.7	1.3	0	6
14	17.1	11	1.9	5.3	10.3
15	7.4	1	1.7	2.1	6.3
16	0.2	2.8	1.1	6.8	12
17	11.9	19.8	1.5	7.7	13.4
18	13.2	1.1	1.6	6	10.4
19	6.4	5.6	1.7	5.4	9.6
20	9.6	14.8	1.5	5.8	11.7

表 3 初始配送计划

Table 3 Initial distribution plan

路线 编号	$X^0$	路线 总需 求量	剩余 载货 量	$S^0$	$f^0$
1	0-18-17-10-0	3.5	4.5		
2	0-12-1-8-13-6-11-20-0	7	1	47.05%	162.08
3	0-2-9-15-16-19-7-0	7.8	0.2		
4	0-5-14-4-3-0	5.4	2.6		

### 4.2 结果与分析

采用式(1.1)定义的“平均法”度量系统整体客户不满意度,采用 C++ 语言实现算法的编码,模型与算法的参数如下:最大迭代步数 500;最大候选解的数量 8;禁忌长度  $l = 9$ ;  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_{20} = 7$ ;  $\beta^+ = \beta^- = 1$ ;  $c_{ij}$  为  $i$  点与  $j$  点间的欧几里德距离. 用本文建立的模型分别求解上述 4 个方案,以及用全局重调度模型,也使用禁忌搜索算法分别求解 4 个方案,运算得到的结果见表 4.

据表 4 中的数据绘制结果比较图(见图 4、5、6),分别从客户不满意度、配送成本、路径偏离程度三方面比较干扰管理模型的结果与重调度模型的结果. 其中,在路径偏离程度的计算中,路径  $i \rightarrow j$  与路径  $j \rightarrow i$  视为同一条路径.

表 4 干扰管理模型生成的结果以及重调度模型生成的结果

Table 4 Results generated by the proposed model and the global rescheduling model

方案	扰动指标	干扰管理 模型结果	重调度 模型结果
方案 1	客户不满意度 $S$	46.86%	51.07%
	成本 $f$	174.73	161.64
	路径偏离程度 $g(D_v^+, D_v^-)$	16	16
方案 2	客户不满意度 $S$	44.49%	47.40%
	成本 $f$	196.92	172.63
	路径偏离程度 $g(D_v^+, D_v^-)$	18	22
方案 3	客户不满意度 $S$	46.00%	46.16%
	成本 $f$	178.74	178.51
	路径偏离程度 $g(D_v^+, D_v^-)$	18	20
方案 4	客户不满意度 $s$	46.05%	47.51%
	成本 $f$	181.23	177.22
	路径偏离程度 $g(D_v^+, D_v^-)$	22	22

从图中的柱形高度对比中可以得到以下现象和结论:

1) 客户不满意度对比中(图 4),方案 1、2 和 4 的柱形高度相差较大,表示干扰管理模型结果较大程度上低于重调度模型的结果. 虽然方案 3 的对比结果不太显著,但前者仍然低于后者. 这一对比结果图说明干扰管理模型在降低客户不满意度上的效果是比较显著的.

2) 配送成本对比中(图 5),虽然干扰管理模型的结果高于重调度模型的结果,但只有方案 2 的对比结果显著,其它方案两者的柱形高度相差很小,说明干扰管理模型得到的成本很接近重调度模型得到的成本.

3) 路径偏离程度对比中(图 6),虽然方案 1 和 4 的结果是两者相同,但方案 2 和 3 的干扰管理模型的结果明显低于重调度模型的结果,说明干扰管理模型对于控制路径的偏离程度能够起到较为明显的作用.



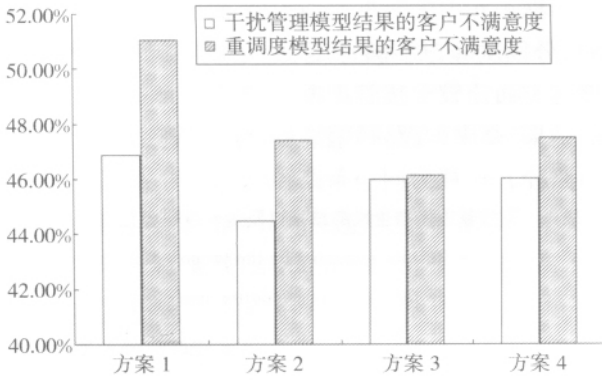


图 4 客户不满意度比较

Fig. 4 The comparison of customer dissatisfactory levels

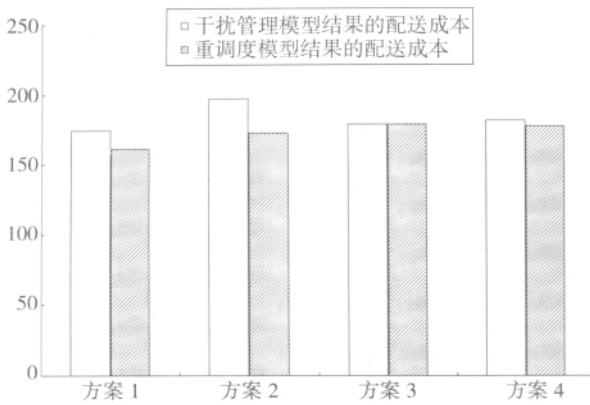


图 5 配送成本比较

Fig. 5 The comparison of distribution costs

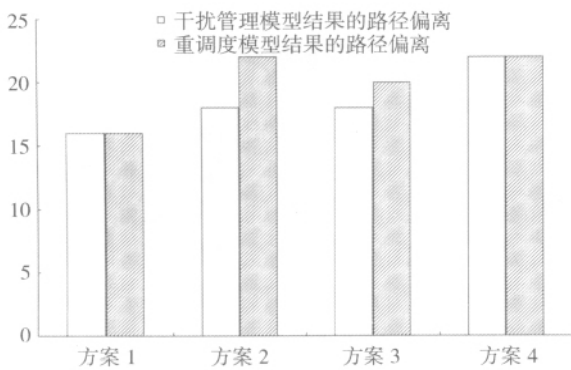


图 6 路径偏离程度比较

Fig. 6 The comparison of road deviations

综上所述,与全局重调度模型相比,本文提出的干扰管理模型以牺牲较少的配送成本换来了客户不满意度与路径偏离程度较大幅度的降低。因此,该模型更能平衡物流配送系统各个行为主体之间的利益,得到的结果更科学。并且,从短期看,虽然企业牺牲了一点配送成本,但从长期的战略角度看,客户满意度的提高将有利于提高客户对企业的忠诚度,使得企业拥有稳定的客户群并吸

引更多的新客户,进而提高赢利。

## 5 结束语

1) 本文提出了物流配送系统扰动度量的方法和函数,从参与物流配送过程的行为主体——客户、物流配送运营商、司机三方的利益角度,分别构建客户不满意度、配送中心成本偏差、路径偏离程度三个函数,对扰动进行度量,为这种具有度量模糊性、感知多样性的扰动度量提供了手段,有助于克服全局重调度对系统带来更大扰动的缺陷,为物流配送系统干扰管理建模提供扰动度量的思路与方法。

2) 本文采用字典序多目标规划的方法,构建物流配送干扰管理多目标优化模型,并引入目标逐级优化的思想,通过局部优化调整,得出新的调整方案,为物流配送系统处理干扰事件提供了建模与求解的新思路。

3) 本文构建的模型在企业的实际应用中具有以下优势:由于采用了字典序的多目标规划方法,各个目标之间优先级别的转化非常灵活,其适用范围较广泛。如,有些大的物流公司为了维持长期的客户关系,以客户满意为最重要的目标,此时将模型中的降低客户不满意度这一目标的优先级设定为最高即可;而一些小的物流公司为了生存,以自己的成本最低为最重要的目标,然后兼顾其它,此时将模型中的降低配送成本这一目标的优先级设定为最高即可。另外,字典序的方法也使得模型的各个目标相互独立,互不影响。如,针对降低客户不满意度这一目标,有些公司希望降低客户的平均满意度,有些公司希望降低不满意客户的数量等等,该模型可以根据公司的不同要求,灵活采用不同的整体客户不满意度的度量公式,模型中的其它两个目标将不会受到任何影响。综上所述,本文提出的模型具有更强的实际操作性,实用性更强。

目前,物流配送干扰管理的研究都集中在单一要素变动引发的干扰事件上,现实的物流配送过程存在着多要素同时发生变动的情况,因此,多要素同时变动引发的干扰问题有待于进一步的研究,从而完善物流配送干扰管理模型,使其更贴近现实世界,实用性更强。

## 参 考 文 献:

- [1] Yu G, Qi X. Disruption Management: Framework, Models and Applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004.
- [2] Wu C-L. Inherent delays and operational reliability of airline schedules [J]. Journal of Air Transport Management, 2005, 11(4): 273–282.
- [3] Qi X, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruption [J]. Omega, 2004, 32(4): 301–312.
- [4] Zhu Z, Bard J F, Yu G. Disruption management for resource-constrained project scheduling [J]. Journal of the Operational Research Society, 2005, 56(4): 365–381.
- [5] Ichoua S, Gendreau M, Potvin J Y. Diversion issues in real-time vehicle dispatching [J]. Transportation Science, 2000, 34(4): 426–438.
- [6] Yang J, Jaillet P, Mahmassani H. Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problems [J]. Transportation Science, 2004, 38(2): 135–148.
- [7] Bertsimas D J. A vehicle routing problem with stochastic demand [J]. Operations Research, 1992, 40(3): 574–585.
- [8] Gendreau M, Laporte G, Séguin R. An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers [J]. Transportation Science, 1995, 29(2): 143–155.
- [9] Li J-Q, Mirchandani P B, Borenstein D. Real-time vehicle rerouting problems with time windows [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(3): 711–727.
- [10] Li J-Q, Mirchandani P B, Borenstein D. A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem [J]. Transportation Research Part E, 2009, 45(3): 419–433.
- [11] Li J-Q, Borenstein D, Mirchandani P B. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(4): 1008–1032.
- [12] Rhalibi A E, Kelleher G. An Approach to Dynamic Vehicle Routing, Rescheduling and Disruption Metrics [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003, 4: 3613–3618.
- [13] Zhang X, Tang L. Disruption Management for the Vehicle Routing Problem with Time Windows [C]. Third International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2007, CCIS 2, 2007: 225–234.
- [14] Huisman D, Freling R, Wagelmans A P M. A robust solution approach to the dynamic vehicle scheduling problem [J]. Transportation Science, 2004, 38(4): 447–458.
- [15] 王明春, 高成修, 曾永廷. VRPTW 的扰动恢复及其 TABU SEARCH 算法 [J]. 数学杂志, 2006, 26(2): 231–236.  
Wang Mingchun, Gao Chengxiu, Zeng Yongting. Recovery of the VRPTW disruption and the TABU SEARCH algorithm [J]. Journal of Mathematics, 2006, 26(2): 231–236. (in Chinese)
- [16] Tamiz M, Jones D F. A review of goal programming and its applications [J]. Annals of Operations Research, 1995, 58(1): 39–53.
- [17] Jozefowicz N, Semet F, Talbi E-G. Multi-objective vehicle routing problems [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(2): 293–309.
- [18] Powell W B. An operational planning model for the dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1987, 21(3): 217–232.
- [19] 钟石泉, 杜纲, 贺国光. 有顾客时间窗和发货量变化的紧急车辆调度研究 [J]. 管理工程学报, 2007, 21(4): 114–118.  
Zhong Shiquan, Du Gang, He Guoguang. Study on urgency vehicle scheduling problem with the changes of time windows and delivery weight of customers [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2007, 21(4): 114–118. (in Chinese)
- [20] 王旭坪, 杨德礼, 许传磊. 有顾客需求变动的车辆调度干扰管理研究 [J]. 运筹与管理, 2009, 18(4): 16–24.  
Wang Xuping, Yang Deli, Xu Chuanlei. Study on disruption management for vehicle routing problem with the request changes of customers [J]. Operations Research and Management Science, 2009, 18(4): 16–24. (in Chinese)
- [21] 孙丽君, 胡祥培, 于楠, 等. 需求变动下的物流配送干扰管理模型的知识表示与求解 [J]. 管理科学, 2008, 21

(6): 112 – 120.

Sun Lijun, Hu Xiangpei, Yu Nan, et al. Knowledge representation and solution method for disruption management model in distribution decisions associated with requirement changes [J]. *Journal of Management Sciences*, 2008, 21(6): 112 – 120. (in Chinese)

- [22] 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. Xie Binglei, Guo Yaohuang, Guo Qiang. Dynamic vehicle routing problems: Status and prospect [J]. *Systems Engineering: Theory Methodology Application*, 2002, 11(2): 116 – 120. (in Chinese)
- [23] Stewart W R, Golden B L. Stochastic vehicle routing: A comprehensive approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 1983, 14(4): 371 – 385.
- [24] Teodorović D, Pavković G. The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain [J]. *Fuzzy Set and Systems*. 1996, 82(3): 307 – 317.
- [25] Ioannou G, Kritikos M, Prastacos G. A problem generator-solver heuristic for vehicle routing with soft time windows [J]. *Omega*, 2003, 31(1): 41 – 53.
- [26] 谢秉磊, 李军, 郭耀煌. 有时间窗的非满载车辆调度问题的遗传算法 [J]. *系统工程学报*, 2000, 15(3): 290 – 294. Xie Binglei, Li Jun, Guo Yaohuang. Genetic algorithm for vehicle scheduling problem of non-full loads with time windows [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2000, 15(3): 290 – 294. (in Chinese)
- [27] 张颖, 刘艳秋. 软计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. Zhang Ying, Liu Yanqiu. Soft calculation method [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [28] 孙丽君, 胡祥培, 王征. 车辆路径规划问题及其求解方法研究进展 [J]. *系统工程*, 2006, 24(11): 31 – 37. Sun Lijun, Hu Xiangpei, Wang Zheng. Reviews on vehicle routing problem and its solution methods [J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(11): 31 – 37. (in Chinese)
- [29] Chiang W-C, Russell R A. A metaheuristic for the vehicle-routing problem with soft time window [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, 55: 1298 – 1310.

## A model for disruption management in urban distribution systems

*HU Xiang-pei, SUN Li-jun, WANG Ya-nan*

Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

**Abstract:** Unexpected events, which may disable the original distribution plan, occur occasionally in urban distribution systems. In order to solve the difficult problem, the author adopted the methodology of disruption management to construct a lexicographic multi-objective disruption management model to handle the disruption caused by an unexpected event in urban distribution systems. This model measured disruptions from the following three aspects: Customer dissatisfaction, operational cost and path deviation. Tabu search algorithm, which combines several kinds of neighborhood functions, was adopted to solve the model. The computational results of the model proved that, due to the tradeoff between all parties involved in the distribution system, the model is more effective than existing global rescheduling models. Moreover, it is more flexible and feasible than traditional models in the aspects of objective ranking and customer dissatisfaction measuring in practical applications.

**Key words:** logistic distribution; disruption management; multi-objective programming model; demand changing