时变网络条件下带时间窗的食品冷链配送定位—运输路径优化问题*

石 兆[1,2], 符 卓[1]
(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 长沙商贸旅游职业技术学院, 长沙 410000)

摘 要: 为解决食品冷链配送系统优化问题,针对易腐品特性,结合配送网络时变特征进行行程时间分析,根据服务时间窗设计满意度函数,建立时变条件下的仿真模型;采用"预优化阶段 + 实时优化阶段"两阶段求解策略,利用分解法进行问题分解,设计最小包络聚类分析方法与混合遗传算法求解。仿真计算验证了模型和算法的有效性与研究的实用价值。

关键词: 时变网络; 冷链; 时间窗; 设施定位; 客户满意度; 混合遗传算法
中图分类号: TP301 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2013)01-0183-06
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.047

Distribution location routing optimization problem of food cold chain with time window in time varying network

SHI Zhao[1,2], FU Zhuo[1]
(1. *School of Traffic & Transportation Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410075, *China*; 2. *Changsha Trade & Tourism Professional College*, *Changsha* 410000, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of food cold chain logistics distribution system optimization problem, for perishable goods characteristics, combined with the distribution network time-varying characteristics to analyse travel time, this paper designed satisfaction degree function according to service time windows and established the simulation model under time-dependent. It designed the two-phase solution of preoptimization phase and real-time optimization phase, by using the decomposition method, it decomposed the problem, designed the minimum envelope clustering analysis method and tabu search algorithm to solve the problem. Simulation results show the effectiveness of the model and algorithm of practical value.

Key words: time-varying network; cold chain; time window; facility location; customer satisfaction degree; hybrid genetic algorithm

0 引言

所谓食品冷链,指将易腐食品从产地收购或捕捞之后,经过产品加工、储藏、运输、零售等环节传入到消费者手中的活动。由于易腐食品具有易逝性[1,2]和时效性强等特征,所以冷链供应链系统各个环节始终处于产品所必需的低温环境之下。经过多年探讨,传统物流理论的研究在我国已逐渐成熟,但作为特殊物流的冷链物流研究还没有得到应有的重视。

配送是冷链物流中最为重要的环节,冷链配送系统的研究滞后已成为制约相关物流业发展的瓶颈。因此,进行冷链配送中心的选址定位以及配送路径的优化研究,构建成本最小化的冷链物流配送模型具有重要的理论和实践意义。

由于冷链配送物流网络大多具备时变性质,使得其配送储运环节比一般商品的储运环节更为复杂、更具随机性,所以冷链配送路径优化问题不仅要考虑商品的运输成本,更要考虑商品因易逝性和时效性而产生的不同程度的价值损耗。

国内外已有一些学者针对时变条件下带时间窗的 VRP 进行了研究。Hashimoto 等人[3]利用动态规划求解了弹性时间窗及旅行时间的 VRPTW 问题; Woensel 等人[4]利用排队论的思想求解了时变 VRPTW 问题;Tagmouti 等人[5]用集覆盖模型描述时变 VRPTW 问题,并利用列生成法进行求解;Donati 等人[6]利用多蚁群系统求解时变 VRPTW 问题;Xiang 等人[7]研究了时变情况下的预定载送服务问题并对问题进行了求解;Opasanon[8]等人分别用遗传及改进 Dijkstra 标号法求解时变网络问题;魏航等人[9]研究了一般时变和随机时变两种时变并进行了建模求解;刘永强等人[10]设计了混合遗传算法求解时变最短路问题;李锋等人[11]对易腐货物配送中的时变车辆路径问题进行了研究;李妍峰等人[12]提出处理一般跨时段的新方法对时变旅行商问题进行了建模求解;李金华[13]探讨了一类时变条件下的旅行规划问题;赵佳虹[14]针对时变条件下的应急物流 LRP 提出了解决办法;杨善林等人[15]设计了模拟退火算法解决时变条件下的车辆路径问题;帅斌等人[16]对时变网络下危险品危害减灾的 LRP 进行了探讨。

上述学者主要基于单阶段两层(配送中心到客户或供应商到配送中心)时变网络问题进行研究。本文所探讨的也是时变网络条件下的车辆路径问题,但是问题涉及两阶段三层物流网络[17~23](供应商、配送中心、门店),并且涵盖上述研究中较少涉及的设施选址(定位)问题;同时,与传统两阶段三层物

收稿日期: 2012-06-01; **修回日期**: 2012-07-25 **基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(70671108)
作者简介: 石兆(1972-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为物流系统优化等(191941954@qq.com);符卓(1960-),男,教授,博导,主要研究方向为交通运输规划与管理、物流系统优化.

流网络问题求解一般采用分解法,即将问题分为若干个子问题,然后针对子问题分别进行探讨,但研究中各子问题多为相互独立不同,本研究求解方法也是运用分解法将问题分成两个子问题,但是子问题间是衔接而非独立关系,即第二个子问题最优解是建立在第一个子问题最优解基础之上,并采用"预优化阶段 + 实时优化阶段"的两阶段策略求解。

1　问题描述及模型的建立

本研究主要考虑在同一个城市有一个供应商、若干个配送中心及若干个门店(如图 1 所示,菱形、正方形、圆圈分别代表供应商、配送中心、门店),供应商及配送中心各有若干台配送车辆,门店需求信息首先通过配送中心进行处理,然后向供应商发出送货指令。供应商为配送中心及配送中心为门店提供配送服务都有时间窗要求,要求为供应商及配送中心车辆确定行驶线路,使得在满足装载量和时间限制的条件下,实现配送中心与门店满意度目标,以最少的车辆数、最低的行驶成本与最少时间窗偏离完成规定的配送业务。

1.1　配送成本构成分析

与其他商品配送比较,冷链物流配送具有一定的特殊性,其成本构成包括配送车辆的如下成本:

a)运输成本。不考虑与运输里程和门店位置无直接关系的固定成本,重点考虑配送车辆油耗、维修、保养等变动成本。变动成本与车辆所行驶的里程数成正比。

b)冷藏成本。现有商品冷链配送基本采用冷藏车制冷机组或者干冰的制冷模式,配送车辆的冷藏成本与完成配送所需的时间成正比。

c)货损成本。所有的易腐性食品,不管在什么条件下储存、运输,其保质期都是有限的,并可以分为两个阶段:第一阶段,食品处于良好、稳定的质量状态,无明显可见的质量变化;第二阶段,食品的质量开始发生明显的、可视的降低,直至完全不宜食用。在实践中,配送很少是在第一阶段完成的,因此,可以认为货损成本与完成配送所需的时间成正比。

d)超出时间窗的惩罚成本。配送车辆在实际行驶过程中,面临不同时段的意外事故、交通堵塞(因路况或交通流量过大引发)、天气情况和其他突发事件(如红绿灯断电失灵等)等因素的影响,并使得城市路网中各个路段上的权值(如行驶速度、行驶时间、运输成本、运输商品安全性等)产生相应变化。

1.2　时变条件下车辆行程时间分析

假设城市交通网络中某一 OD 对之间存在 n 条并行的车辆路径,每条路径都有各自的通行能力,各路径的行程时间 $t_{(r)}$ 受到路径长度 D_{ij} 和行驶速度 V_i 的影响,行驶速度 V_i 与拥挤系数 β 有着直接关系。由于交通网络的时变性质,如果配送车辆在路径上行至 A 点时 B 点发生了突发性交通事件,如图 2 所示,路段 AB 通行能力必然下降,导致车辆正常行驶时间 $t'_{(r)}$ 变为 $t''_{(r)}$,但事故对 AB 前后方路段 OA 和 BD 车辆没有影响,则路径 i 的旅行时间函数为

$$t_{(r)} = t_{(r)OA} + t_{(r)AB} + t_{(r)BD} = t'_{(r)} + t''_{(r)}$$

如果 OD 间多路段出现类似情况,则

$$t_{(r)} = \sum t'_{(r)} + \sum t''_{(r)} \tag{1}$$

$t'_{(r)}$ 为车辆在未产生拥挤路段 l 上的行驶时间

$$t'_{(r)} = R_{il}/V_{il} \tag{2}$$

其中:R_{il} 表示路径 i 上未产生拥挤路段 l 的长度, $\forall i,l$;V_{il} 表示路径 i 上未产生拥挤路段 l 车辆实际行驶速度, $\forall i,l$。

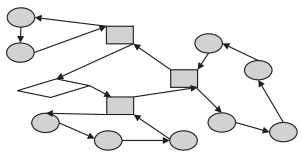

图1　供应商、配送中心、客户布局

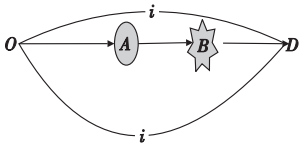

图2　车辆遇突发性交通事件的交通网络示意图

假设车辆在未产生拥挤直行无交叉路口路段都能达到配送所要求的正常行驶速度 V_i,实际路段行驶难度可以用转向系数 $\ddot{u}$ 来衡量,则 V_{il} 与车辆左转次数、右转次数、通过交叉路口的次数相关。

$$\ddot{u} = (3 \times \ddot{u}_L + \ddot{u}_R + 2 \times \ddot{u}_C)/R_{il} \tag{3}$$

其中:$\ddot{u}$ 为转向系数;$\ddot{u}_L$ 为左转次数;$\ddot{u}_R$ 为右转次数;$\ddot{u}_C$ 为通过交叉路口的次数。则

$$V_{il} = V_i \times (1 - 0.1 \times \ddot{u}) \tag{4}$$

$t''_{(r)}$ 为车辆在产生拥挤路段 m 上的行驶时间:

$$t''_{(r)} = R_{im}/V_{im} \tag{5}$$

其中:R_{im} 表示路径 i 上产生拥挤路段 m 的长度, $\forall i,m$;V_{im} 表示路径 i 上产生拥挤路段 m 车辆实际行驶速度, $\forall i,m$。

$$V_{im} = V_i \times (1 - 0.1 \times \ddot{u}) \times \beta \tag{6}$$

其中:β 为拥挤系数,与路径 i 的通行能力成反比。本文假设拥挤系数与意外事故 α_{1h}、交通堵塞 α_{2h}、天气情况 α_{3h} 和其他突发事件 α_{4h} 相关,它们对车速的影响度 h 分为四个等级:正常($h=1$)、轻度($h=2$)、中等($h=3$)和严重($h=4$)。

$$\beta = \alpha_{1h} \times \alpha_{2h} \times \alpha_{3h} \times \alpha_{4h} \qquad h \in \{1,\cdots,4\}$$

1.3　客户满意度模型分析

根据供应链理论基本原理构建客户满意度基本模型,客户满意度是关于服务时间 t 的函数。

1)车辆模糊行驶时间　在配送车辆的行驶过程中,由于意外事故、交通堵塞、天气情况和其他突发事件等时变因素的影响,车辆在各节点间的行驶时间不能简单地定义为确定的常数。借助模糊数学的相关理论,设任意两节点 i,j 之间的行驶时间 ζ_{ij} 为一三角模糊数 $\zeta_{ij}(t_1,t_2,t_3)$。其中,t_1、t_3 分别表示该模糊数的左右边界,t_2 表示隶属度为 1 的点。$\mu_{\eta ij}(t)$ 表示关于服务时间 t 的隶属度,则配送车辆效用曲线如图 3 所示。

ζ_{ij} 的隶属度函数 $\mu_{\eta ij}(t)$ 为

$$\mu_{\eta ij}(t) = \begin{cases} 0 & t \leqslant t_1 \\ \dfrac{t - t_1}{t_2 - t_1} & t_1 \leqslant t < t_2 \\ \dfrac{t_3 - t}{t_3 - t_2} & t_2 \leqslant t < t_3 \\ 0 & t > t_3 \end{cases} \tag{7}$$

2)客户模糊预约时间分析　根据上述理论,可以用关于时间 t 的模糊数构建标准客户满意度模型(图 4)及软时间窗客户满意度模型。

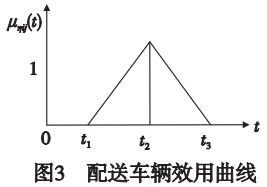

图3　配送车辆效用曲线

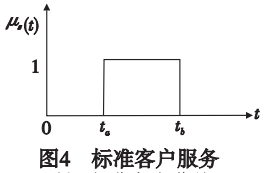

图4　标准客户服务时间窗满意度曲线

在图 4 中,t_a、t_b 分别表示客户预约服务时间的起始点与截止点。模型假设对客户提供服务的时间只要落在时间窗范围内客户就会完全满意。实际上,由于客户可能更偏好于服务在时间窗内的某一时段(t_a 时点到 t_b 时点)进行,而服务开始早于 t_a 时点或晚于 t_b 时点,客户的满意度都会产生变化,从而认为模糊预约时间应包含可容忍的时间范围和期望服务时间

两部分。当客户在期望服务时间服务时满意度最大(设为 1);否则,客户满意度随着服务时间与期望时间之间差距的增大而降低,若服务时间落在可容忍时间范围之外,则客户满意度为 0。即对 $\forall t>0$,客户满意度 $\mu_s(t)$ 可以表示为

$$\mu_s(t)=\begin{cases}1 & t_a\leqslant t\leqslant t_b\\ 0 & \text{否则}\end{cases}\tag{8}$$

配送中心及门店服务时间窗口均为软时间窗,即允许配送车辆到达服务点的时间有所偏离服务时间段,但要根据所带来的不方便程度支付一定的惩罚,在这期间其满意度单边下降,而在整个预约时间窗口内其满意度为一直线。其满意度曲线如图 5 所示。其满意度函数为

$$\mu_s(t)=\begin{cases}1 & t_a<t<t_b\\ \dfrac{t_c-t}{t_c-t_b} & t_b\leqslant t\leqslant t_c\\ 0 & t>t_c\end{cases}\tag{9}$$

根据效益背反定律(客户满意度最大化与配送成本最优目标难以同时实现),本文在最大化客户满意度的基础上进行车辆路径优化研究,当配送车辆效用曲线与客户的满意度曲线相互作用时,模型以客户满意度最大化为基准,如图 6 所示。

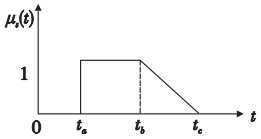

图5　软时间窗客户满意度曲线

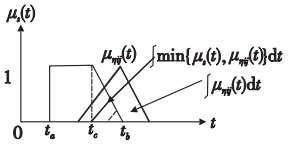

图6　配送车辆效用曲线与客户满意度曲线相互作用模型

按照上述模型的特征,以调整车辆利用效率为代价寻求客户满意度最大化的车辆路径安排,即车辆以最大化式(10)对客户进行选择服务。

$$\gamma=\max\frac{\int\min\{\mu_s(t),\mu_{\eta ij}(t)\}\,\mathrm{d}t}{\int\mu_{\eta ij}(t)\,\mathrm{d}t}\tag{10}$$

当意外事故、交通堵塞、天气情况或其他突发事件等时变因素对车速的影响度(h)信息产生作用时,拥挤系数(β)与车辆行驶时间会相应改变,致使商品送达时间延迟,配送车辆效用曲线将沿时间轴向右平行位移,从而导致配送车辆效用曲线与客户满意度曲线相互作用模型变化,如图 7 与式(11)所示。当满意度最大化目标没有实现时,模型将重新进行聚类分析并对原车辆行驶路径进行实时优化。

$$\gamma=\max\frac{\int\min\{\mu_s(t),\mu_{\eta ij}(t)\}\,\mathrm{d}t\downarrow}{\int\mu_{\eta ij}(t)\,\mathrm{d}t\downarrow}\tag{11}$$

1.4　设施定位分析

首先应用最小包络聚类方法分析门店应归属哪个配送中心配送,然后根据门店服务时间窗要求对门店归属进行定位调整。具体操作如下:

将客户集划分成若干子类,任意两个配送中心 D_i 和 D_j 距离已知,令 d_{ij} 和 R_{ij} 分别为 D_i 和 D_j 之间距离及距离的一半,即

$$R_{ij}=1/2d_{ij}\tag{12}$$

客户的数量为 C,d_{ip} 为任意一个配送中心 D_i 到任意客户 p 的距离。以 R_{ij} 为半径作相切圆 $O_1,O_2,\cdots,O_i,O_j,\cdots,O_m$,对应半径分别为 $R_1,R_2,\cdots,R_i,R_j,\cdots,R_m$。若 $r_{ip}=1/2d_{ip}$ 对应的客户位置 C_p 落在某一圆 O_i 内,则将 C_p 列入 O_i 类(C_p 由配送中心 D_i 提供服务),判定准则为:

a)如果满足

$$r_{ip}<R_{ij}\tag{13}$$

则将客户 C_p 聚为配送中心 D_i 类;否则,先不列入此类。

b)如果存在某一客户 C_p 到任意配送中心 D_i 的距离 $r_{ip}=1/2d_{ip}$ 大于最大的两个设施距离和的一半,即

$$r_{ip}>\max R_{ij}\tag{14}$$

则根据就近原则,以某一客户 C_p 到任意配送中心 D_i 距离的最小值为准,将 C_p 列入 D_i 类(C_p 由配送中心 D_i 提供服务)。

$$D_i=\begin{cases}1 & \text{选择 } D_i,d_{ip}=\min(d_{1p},d_{2p},\cdots,d_{ip}),i\in\{1,2,\cdots,p\}\\ 0 & \text{否则}\end{cases}\tag{15}$$

c)按照路径优化最小化配送车辆数,优先采用载重量较大配送车辆的原则。在 O_i 类中有客户 $C_1,C_2,\cdots,C_l,C_m$,令

$$V=\Big(\sum_{i=1}^{l}(n_i/Q_1)-\Big\lfloor\sum_{i=1}^{l}(n_i/Q_1)\Big\rfloor\Big)\times Q_1\tag{16}$$

其中:$\sum_{i=1}^{l}(n_i/Q_1)$ 表示计划由配送中心 D_i 提供服务的客户总需求量与 Q_1 型车载重量的比值;$\lfloor\sum_{i=1}^{l}(n_i/Q_1)\rfloor$ 表示不超过 $\sum_{i=1}^{l}(n_i/Q_1)$ 的最大整数;Q_1 表示 A 型车辆载重量;V 表示尚未采用 A 型车辆配送的商品重量;

$$X_{O_iQ_K}=\begin{cases}Q_K & V\leqslant Q_K\\ Q_{K-1} & Q_K<V\leqslant Q_{K-1}\\ \cdots & \\ Q_2 & Q_3<V\leqslant Q_2\\ Q_1 & Q_2<V<Q_1\end{cases}\tag{17}$$

根据以上判断式进行配送中心配送车辆型号选择,同时依照约束条件决定是否进行车型调整。

1.5　车辆路径模型基本假设

a)一个供应商、多个配送中心、多个门店分别分散在同一个城市各个不同地区。

b)所有配送中心所需商品都由供应商供给,配送中心之间不存在相互调剂的情况。

c)所有门店所需商品都由配送中心供给,门店之间不存在相互调剂的情况。

d)车辆非满载,配送中心所需商品需求量均小于供应商车辆的载容量,一辆车可以完成多个配送中心需求配送任务;门店所需商品需求量均小于配送中心车辆的载容量,一辆车可以完成多个门店需求配送任务。

e)供应商对配送中心或配送中心对门店服务都采取整车配送的策略,即每个配送中心或每个门店只由一辆配送车辆送货且所有服务点都得到服务。

f)配送车辆车型不同,且每一条线路上的送货任务只由一辆车承担。

g)各配送中心或门店的需求量确定并在一定时期内相对稳定。

h)配送车辆单位运价与车型相关,同型车单位运价相同,考虑路程中所发生的时变因素,如意外事故、交通堵塞、天气情况和其他突发事件等。

i)车辆通过交通网络中各路段的时间统计规律已知,车辆通过路段(A,B)的时间服从正态分布 $N(\mu_{AB},\sigma)$。

j)车辆在行驶过程中可以获得交通状况的动态信息,即车辆已知在较短的未来时间内通过各路段的最可能行驶时间。

1.6　车辆路径模型的建立

模型中的参数定义如下:

G 表示供货商的集合;D 表示配送中心的集合;C 表示门店的集合;M 表示供应商及配送中心的总数量集合,$M=C+D$;N 表示配送中心及门店的总数量集合,$N=C+D$;g 表示某供应商,$g\in G$;i 表示配送中心,$i\in D$;j 表示某门店,$j\in C$;L 表示车辆类型集合;K 表示车辆类型;m 表示 K 型车辆的数量;s

表示 K 型车辆；Q_K 表示 K 型车辆的最大载重量；W_K 表示 K 型车辆的最大容积；l_{gi} 表示 M 集合内任意两节点间距离；C_{ij} 表示 N 集合内任意两节点间距离；e_i 表示配送中心 i 的商品需求量；e_{iw} 表示配送中心 i 所需商品体积；y_i 表示配送中心发往门店的其他混装商品运量；n_j 表示门店 j 的商品需求量；n_{jw} 表示门店 j 所需商品体积；P_i 表示配送中心 i 运营固定费用与因商品中转所产生的变动费用之和；V_K 表示类型为 K 的车辆的单位行驶费用；Y_{Ks} 表示类型为 K 的车辆空载成本；F_{Ks} 表示类型为 K 的车辆冷藏成本；H_{Ks} 表示类型为 K 的车辆货损成本；T_O 表示供应商配送车辆出发时间；t_{oo} 表示供应商配送车辆回到出发地的时间；t_O 表示配送中心配送车辆出发时间；t_{oo} 表示配送中心配送车辆回到出发地的时间；T_i 表示车辆 s 到达配送中心 i 的时间；A_i 表示配送中心最早能服务的时间；B_i 表示配送中心最晚能服务的时间；f_1 表示早于 A_i 到达配送中心 i 并开始服务的惩罚系数；f_2 表示晚于 B_i 到达配送中心 i 并开始服务的惩罚系数；t_i 表示车辆 s 到达门店 j 的时间；a_j 表示门店最早能服务的时间；b_j 表示门店最晚能服务的时间；f_3 表示早于 a_j 到达客户 j 并开始服务的惩罚系数；f_4 表示晚于 b_j 到达客户 j 并开始服务的惩罚系数。

建立模型如下：

$$\min Z_1 = \sum_{g=0}^{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{giKs} l_{gi} V_K + \sum_{i=1}^{D} P_i W_i + \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{ijKs} C_{ij} V_K + (F_{Ks}+H_{Ks})\sum_{g=1}^{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m}(T_O - T_{DO}) + (F_{Ks}+H_{Ks})\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m}(t_O - t_{DO}) + f_1\sum_{i=1}^{D}\max(A_i - T_i, 0) + f_2\sum_{i=1}^{D}\max(T_i - B_i, 0) + f_3\sum_{j=1}^{C}\max(a_j - t_i, 0) + f_4\sum_{j=1}^{C}\max(t_i - b_j, 0) \tag{18}$$

$$\min Z_2 = \sum_{g=0}^{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} Y_{Ks}((2 - e_i X_{iKs}/Q_K) - e_{iw} X_{iKs}/W_K) + \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} Y_{Ks}((2 - n_{jw} X_{jKs}/Q_K) - n_{jw} X_{jKs}/W_K) \tag{19}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{D} e_i + \sum_{i=1}^{D} y_i = \sum_{j=1}^{C} n_j \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{giKs} = \sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{igKs} \leqslant 1, g = 0 \tag{21}$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{ijKs} = \sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{ijKs} \leqslant 1, i = 0 \tag{22}$$

$$\sum_{g=0}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{giKs} = 1, i \in \{1, 2, \cdots, M\} \tag{23}$$

$$\sum_{i=0}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{giKs} = 1, g \in \{1, 2, \cdots, M\} \tag{24}$$

$$\sum_{j=0}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{jiKs} = 1, i \in \{1, 2, \cdots, N\} \tag{25}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} X_{jiKs} = 1, j \in \{1, 2, \cdots, N\} \tag{26}$$

$$\sum_{g=0}^{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} e_i X_{giKs} \leqslant Q_K \tag{27}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} n_j X_{ijKs} \leqslant Q_K \tag{28}$$

$$\sum_{g=0}^{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} e_{iw} X_{giKs} \leqslant W_K \tag{29}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{K=1}^{L}\sum_{s=1}^{m} n_{jw} X_{ijKs} \leqslant W_K \tag{30}$$

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{表示配送中心 } i \text{ 被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{iKs} = \begin{cases} 1 & \text{配送中心 } i \text{ 送货任务由 } K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{jKs} = \begin{cases} 1 & \text{门店 } j \text{ 送货任务由 } K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车完成} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{giKs} = \begin{cases} 1 & K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车从配送中心 } g \text{ 行驶到配送中心 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{ijKs} = \begin{cases} 1 & K \text{ 型车中第 } s \text{ 辆车从门店 } i \text{ 行驶到门店 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

优化目标式(18)表示商品从供应商，经配送中心配送到门店产生的费用最小化；式(19)表示配送车辆空载成本最低；约束条件式(20)为确保配送中心将供应商送货完全用于门店配送，不会存留或用于同城调剂；式(21) 确保车辆从供应商处出发并回到出发地；式(22)确保车辆从配送中心出发并回到中心；式(23)(24)确保各配送中心只被同一供应商车辆服务一次且最多一次；式(25)(26)确保各门店只被同一配送中心车辆服务一次且最多一次；式(27)为受车辆载重量的限制，确保供应商每辆车的送货量不超过其载重量；式(28)为受车辆载重量的限制，确保配送中心每辆车的送货量不超过其载重量；式(29)为受供应商车辆容量的限制，确保每辆车的送货量不超过其容量；式(30)为受配送中心车辆容量的限制，确保每辆车的送货量不超过其容量。

2 优化算法设计

本问题采用分解法，即将物流网络整体优化问题分解为两个相互衔接的子问题。首先求解门店归属定位的问题；然后对供应商至配送中心及配送中心至门店配送路径问题求解，将第二个子问题最优解建立在第一个子问题最优解基础之上；最后根据以上解求得网络整体优化问题目标解，问题运用 MATLAB 编程并采用混合遗传算法求解。

尽管时变条件下车辆路径问题中车辆通过各路段的时间因时变因素的变化而实时变动，但在某一具体时刻交通状况是已知的，如具有相同的拥挤程度、相同的流量等，因此车辆通过各路段的最可能时间也是已知的。所以，可以将时变条件下的车辆路径问题转换成分阶段确定的静态车辆路径问题来进行求解，并在车辆执行任务的每一个时间段的结束时刻实行时变信息的插入，根据车辆当前的位置和更新后的信息实时地调整车辆行驶路线，使得优化目标最优。

2.1 算法基本思路

根据动态搜索策略思想，算法思路阐述如下：

a)随机产生一初始可行解。

b)根据静态环境信息对问题进行求解，并迭代当前解。

c)当总迭代次数达到一给定值，或在给定的连续迭代步数内当前的最好解没有改变时，转 f)，否则执行 d)。

d)若有动态因素变化，则转 e)；否则搜索当前解的邻域解空间，计算目标函数值，记录当前最好解，返回 b)继续求解。

e)记录动态因素变化的时刻 t，实现动态信息的插入，将动态问题转换成静态问题，求出动态初始解，返回 b)继续求解。

f)算法终止。

2.2 算法基本过程及特点

该混合遗传算法设计主要思路为：首先采用遗传算法进行全局搜索，采用自然数将所有客户与可分派车辆进行编码，将各客户商品送货需求及车辆装载能力进行全局路径优化；然后运用禁忌搜索对种群中个体以一定的概率进行局部搜索，即对同一车辆所有客户进行局部服务路径优化。

2.2.1 遗传算法

本算法编码原理如下：对可分派的车辆和有需求的客户分别排序，按顺序从车辆序列中取一辆车，考察客户序列中的节点，依次将满足条件的客户放入该车辆的路径；当路径上总的服务量超过车辆能力时，再取下一辆车，继续上面的工作，直到客户序列中所有点均已派车为止。

1)分段组合编码　采用车辆客户分段组合编码。

2)初始解的形成　按上述编码规则产生的一个染色体并不能直接表示问题的解，还需利用解码规则对其解码，才能生

成问题的解。解码规则为:

a)从 1 开始首先选用最大车型,并依次建立车辆序列中车辆 s 的路径 r_s;

b)根据客户序列依次分派客户给路径 r_s;

c)路径 r_s 上客户总服务量≤车辆 s 的装载能力;

d)路径 r_s 总里程≤车辆 s 的最大行驶里程;

e)当全部车辆总能力 < 所有客户总需求时,允许分派虚拟的租用车辆;

f)所有客户均加入到配送路线时(即配送路线初步形成时),逐一用没有配送任务的较小型车来替换大型车,看是否满足车辆载重和容量的限制,如果小型车能够完成配送任务,即进行车型替换;

g)一直重复这个过程,直到将每个客户都纳入新配送路径中。

3)确定适应度评估方法　采用

$$E = Z + M \times P_w \tag{31}$$

为解的评价值,Z 为对应的配送路径方案的目标函数值,M 为不可行路径数,P_w 为对不可行路径的惩罚权重,则可用

$$f = 1/E = 1/(Z + M \times P_w) \tag{32}$$

进行适应度计算。

4)选择操作　本文采用保留最佳个体与赌轮选择相结合的选择策略。

5)交叉操作　对染色体的每段分别进行交叉,采用类 OX 算子。

6)变异操作　采用基因连续多次对换变异技术。

7)利用禁忌搜索算法对解进行改进(详见 2.2.2 节)。

8)终止准则　采用进化指定代数的终止准则。

2.2.2　禁忌搜索算法

对于通过遗传操作形成的每代群体中的最优个体,要应用禁忌搜索对其进行局部改进。这里介绍禁忌搜索中邻域的定义和禁忌表的构成。在本文中,禁忌搜索算法的解的编码方式以及评价函数与遗传算法中相同。

1)候选集合的确定　采用随机混合邻域结构,本文设计了四种邻域,即顶点重新指派、顶点交换、2-opt 和"尾巴"交换,以随机的方式选择其中一种应用于当前解。

2)禁忌表和禁忌长度　引入随机多样性增强算法的搜索能力,随机选用上述邻域变换中的一种,禁忌长度也随机地在 5 ~ 10 之间选取。

3)终止准则　当总迭代次数达到一个给定值,或在给定的连续迭代步数内当前的最好解没有改变时,则算法终止。

4)算法步骤

变量说明:

iter 为当前的迭代步数;

max-iter 为最大的迭代步数;

cons-iter 表示当前最好解保持不变的当前连续迭代步数;

max-cons-iter 表示当前最好解保持不变的最大连续迭代步数;

cand-list 是当前的候选解数量;

max-cand-list 是最大的候选解数量。

算法:

置遗传算法优化解为当前解和当前最好解;

置 iter 和 cons-iter 为 0;

while(iter≤max-iter) and (cons-iter≤max-cons-iter) do

begin

　while(cand-list≤max-cand-list) do

　begin

　　随机挑选两个顶点及四种邻域变换之一;

　　对当前解作变换,并把产生的新解加入到候选解集中;

　　cand-list: = cand-list + 1;

　end;

从候选解集中选择非禁忌的最佳候选解,或优于当前最好解的禁忌候选解作为最佳候选解;置新的最佳候选解为当前解;

若新的最佳候选解优于当前最好解,则更新当前最好解,

cons-iter: = 0;否则 cons-iter: = cons-iter + 1;

iter: = iter + 1;

end.

3　算例分析

本文采用 MATLAB 程序对湖南省内某配送边长长宽均为 100 km 的正方形地域内的食品冷链配送网络进行计算仿真。该区域内有 1 个供应商、3 个配送中心、16 个门店,供应商有 A、B、C 三型配送车辆若干台,其中 A 型车载重量为 800 单位,B 型车载重量为 600 单位,C 型车载重量为 400 单位;配送中心有 D、E、F 三型配送车辆若干台,其中 D 型车的载重量为 200 单位,E 型车载重量为 160 单位,F 型车载重量为 100 单位。供应商、配送中心、门店坐标矩阵如表 1 所示,空间布局如图 8 所示。中心商品中转变动费用为 1 元/单位。

表 1　供应商、配送中心及客户坐标位置

供应商	坐标/km	配送中心	坐标/km	门店	坐标/km
G_1	69,53	D_1	38,70	C_1	72,34
		D_2	53,30	C_2	21,16
		D_3	88,60	C_3	74,91
				C_4	44,43
				C_5	34,77
				C_6	70,47
				C_7	90,85
				C_8	86,20
				C_9	65,85
				C_{10}	28,51
				C_{11}	61,53
				C_{12}	62,31
				C_{13}	19,70
				C_{14}	27,59
				C_{15}	64,21

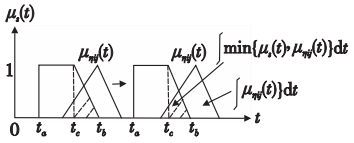

图7　配送车辆效用曲线与客户满意度曲线相互作用变化模型

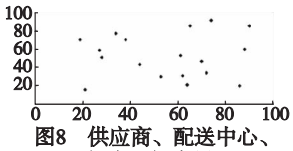

图8　供应商、配送中心、门店空间布局

3.1　预优化阶段

3.1.1　门店归属定位分析

根据已知信息,通过运用最小包络聚类方法结合时间窗要求确定静态环境下门店归属,分析结果如图 9 所示。

3.1.2　配送路径优化

根据已知信息确定静态环境下的预优化阶段配送模型,通过编程求解得出供应商使用 A 型车 1 台,行驶里程 142 km;配送中心 D_1 使用 D 型车与 E 型车各 1 台,配送中心 D_2 使用 D 型车与 E 型车各 1 台,配送中心 D_3 使用 E 型车 1 台即可完成配送任务。对应的五条网络配送路径见图 10,具体路径见表 2,行驶总距离为 392.1 km,目标函数最小费用为 1 743.2 元。

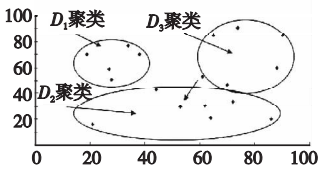

图9　预优化阶段门店归属定位

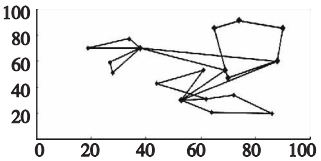

图10　预优化阶段冷链物流网络配送路径

表 2 预优化阶段供应商及配送中心配送服务路径

提供服务节点	服务车型	服务路径
G_1	A	$(G_1\text{-}D_2\text{-}D_1\text{-}D_3\text{-}G_1)$
D_1	D	$(D_1\text{-}C_{13}\text{-}C_5\text{-}D_1)$
D_1	E	$(D_1\text{-}C_{10}\text{-}C_{14}\text{-}D_1)$
D_2	D	$(D_2\text{-}C_{12}\text{-}C_1\text{-}C_8\text{-}C_{15}\text{-}D_2)$
D_2	E	$(D_2\text{-}C_{11}\text{-}C_4\text{-}C_{12}\text{-}D_2)$
D_3	E	$(D_3\text{-}C_6\text{-}C_9\text{-}C_3\text{-}C_7\text{-}D_3)$

3.2 实时优化阶段

当时变因素产生变化,继续执行预优化方案将导致配送中心或部分门店满意度目标无法实现,此时须根据变化后的实时信息重新进行目标优化。

3.2.1 门店归属定位分析

根据时变信息,运用最小包络聚类方法结合门店客户满意度要求对门店归属重新定位,分析结果如图 11 所示。

3.2.2 配送路径优化

根据变化信息确定时变网络条件下的实时优化阶段配送模型,通过编程求解得出供应商使用 A 型车 1 台,行驶里程 142 km;配送中心 D_1 使用 F 型车 2 台,配送中心 D_2 使用 D 型车 1 台、E 型车 2 台,配送中心 D_3 使用 E 型车 1 台即可完成配送任务。对应的六条网络配送路径见图 12,具体路径见表 3,行驶总距离为 390.3km,目标函数最小费用为 1 740.45 元。

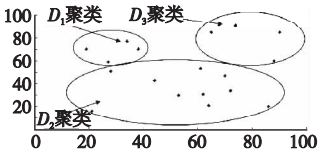

图11 实时优化阶段门店归属重新定位

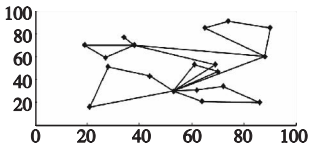

图12 实时优化阶段冷链物流网络配送路径

表 3 实时优化阶段供应商及配送中心配送服务路径

提供服务节点	服务车型	服务路径
G_1	A	$(G_1\text{-}D_2\text{-}D_1\text{-}D_3\text{-}G_1)$
D_1	F	$(D_1\text{-}C_{14}\text{-}C_{13}\text{-}D_1)$
D_1	F	$(D_1\text{-}C_5\text{-}D_1)$
D_2	E	$(D_2\text{-}C_4\text{-}C_{10}\text{-}C_2\text{-}D_2)$
D_2	E	$(D_2\text{-}C_{11}\text{-}C_6\text{-}D_2)$
D_2	D	$(D_2\text{-}D_{12}\text{-}C_1\text{-}C_8\text{-}C_{15}\text{-}D_2)$
D_3	E	$(D_3\text{-}C_7\text{-}C_3\text{-}C_9\text{-}D_3)$

4 结束语

本文在分析食品冷链配送特点的基础上,引入时间窗约束,针对配送过程中行驶路段时变因素变化而导致时间延误的问题,提出在最大化客户满意度的基础上进行车辆路径优化研究,设计了合理的目标函数并构建数学模型,采用预优化与实时优化两阶段求解策略,利用分解法进行问题分解,设计最小包络聚类分析方法与混合遗传算法进行算例测试,用较短时间获得问题的满意解,在实际应用中具有一定的参考价值;同时,与传统优化研究重配送企业成本轻客户满意度相比较,本研究兼顾企业和客户利益,因而提高了优化方案的实用性和可行性。但本文未考虑门店时变需求问题,对涉及门店退货及回收物资的逆向物流问题也未进行探讨,相关研究还有待继续深入。

参考文献:

[1] TARANTILIS C D, KIRANOUDIS C T. Distribution of fresh meat[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 51(1): 85-91.

[2] FAULIN J. Applying Mixalg procedure in a routing problem to optimize food product delivery[J]. Omega, 2003, 31(5): 387-395.

[3] HASHIMOTO H, IBARAKI T, IMAHORI S, *et al*. The vehicle routing problem with flexible time windows and traveling times[J]. Discrete Applied Mathematics, 2006, 154(16): 2271-2290.

[4] WOENSEL T V, KERBACHE L, PEREMANS H, *et al*. Vehicle routing with dynamic travel times: a queueing approach[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(3): 990-1007.

[5] TAGMOUTI M, GENDREAU M, POTVIN J Y. Arc routing problems with time-dependent service costs[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(1): 30-39.

[6] DONATI A V, MONTEMANNI R, CASAGRANDE N, *et al*. Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(3): 1174-1191.

[7] XIANG Zhi-hai, CHU Cheng-bin, CHEN Hao-xun. The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(2): 534-551.

[8] OPASANON S, MILLER-HOOKS E. Multicriteria adaptive paths in stochastic, time-varying networks[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 173(5): 72-91.

[9] 魏航,魏洁. 随机时变网络下的应急路径选择研究[J]. 系统工程学报, 2009, 24(1): 99-103.

[10] 刘永强,常青,熊华钢. 改进蚁群算法求解时变网络中最短路径问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1245-1248.

[11] 李锋,魏莹. 易腐货物配送中时变车辆路径问题的优化算法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(4): 492-498.

[12] 李妍峰,李军,高自友. 时变网络环境下旅行商问题研究[J]. 系统工程学报, 2010, 25(5): 585-591.

[13] 李金华. 时变条件下追求最大效用的旅行规划问题[J]. 中国管理科学, 2010, 19(4): 137-143.

[14] 赵佳虹. 时变条件下应急物流多目标 LRP 研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(4): 138-148.

[15] 杨善林,马华伟,顾铁军. 时变条件下带时间窗车辆调度问题的模拟退火算法[J]. 运筹学学报, 2010, 14(3): 84-90.

[16] 帅斌,陈钢铁. 基于时变网络下危险品危害减灾系统 LRP 研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2011, 9(3): 1-11.

[17] AMIRI A. Designing a distribution network in a supply chain system[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 171(2): 567-576.

[18] SYAM S S. A model and methodologies for the location problem with logistical components[J]. Computers and Operations Research, 2002, 29(9): 1173-1193.

[19] KUTANOGLU E, LOHIYA D. Integrated inventory and transportation mode selection: a service parts logistics system[J]. Transportation Research, 2008, 44(5): 665-683.

[20] CORDEAU J F, LAPORTE G, PASIN F. An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 113(2): 626-640.

[21] WANG Zhuan, ZHANG Qing-hua, YANG Bo, *et al*. 4/R/I/T distribution logistics network 0-1 programming model and application[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 55(2): 365-378.

[22] LEE B K, KANG K H, LEE Y H. Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(4): 945-959.

[23] 陈松岩,今井昭夫. 物流网络选址与路径优化问题的模型与启发式解法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 118-121.