考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化研究

王旭坪^{1,2}, 董杰², 韩涛², 阮俊虎³

(1. 大连理工大学系统工程研究所, 辽宁 大连 116023;2. 大连理工大学商学院, 辽宁 盘锦 124221;

3. 西北农林科技大学经济管理学院,陕西杨凌 712100)

摘要:针对多车型多品种的冷链多温共配问题,从汽车能耗的角度出发,提出了一种冷链多温车的碳排放计算方法, 将时空距离度量融入初始路径构造中,构建了考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化模型,设计了一种两阶段 启发式算法进行求解.在该启发式算法中,基于k-means聚类思想,选择合适车型依照就近原则进行配送,然后改进 模拟退火算法对初始路径进行优化,在传统模拟退火算法的基础上增加了记忆功能,设计了自适应的降温方式和多 种邻域操作方法,最后构造多组算例验证了该算法的有效性.

关键词:冷链;多温共配;碳排放;时空距离;改进模拟退火算法 中图分类号:TP301.6 文献标识码:A 文章编号:1000-5781(2019)04-0555-11

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.04.010

The optimization of cold chain delivery routes considering carbon emission and temporal-spatial distance

Wang Xuping^{1,2}, Dong Jie², Han Tao², Ruan Junhu³

(1. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
 2. School of Business, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China;
 a. of Economics and Management Northwest Assistance and Economy University Vanding 712100, Clina

3. College of Economics and Management, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to solve the cold chain problem of multi-temperature joint delivery with multi-vehicle and multi-cargo, this paper, introducing the temporal-spatial distance metric into initial paths construction, proposes a carbon emission calculation method of cold chain's multi-temperature vehicle from the perspective of vehicle energy consumption. Then, an optimization model of cold chain delivery routes considering carbon emission and temporal-spatial distance is built, and a two-phase heuristic algorithm is constructed to solve it. The heuristic algorithm chooses appropriate vehicles delivering in accordance with the proximity policy based on the clustering idea of k-means. An improved simulated annealing algorithm, which increases the memory function, designs the adaptive cooling mode, and adds a multi-neighborhood operation into traditional simulated annealing algorithms, is proposed to optimize initial paths. Finally, the results of examples demonstrate the validity of the algorithm.

Key words: cold chain; multi-temperature joint delivery; carbon emission; temporal-spatial distance; improved simulated annealing algorithm

收稿日期: 2016-03-31;修订日期: 2017-02-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71531002; 71471025; 71703122; 71973106);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2016JQ7005);教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(16YJC630102);中国博士后科学基金资助项目(2016M600209).

1 引 言

2009年12月哥本哈根世界气候大会重点强调节能减排,以"低能耗、低污染、低排放"为基础的低碳概念 日益受到重视. 欧盟于2012年率先开始增收碳税,我国也提出到2020年CO₂排放比2005年下降40%~45%. 与 此同时,交通运输业的碳排放占所有碳排放的比重超过40%,冷链运输作为满足居民多品种冷链食品需求的 行业正以每年超过10%的速度增长. 为此,以冷链物流配送路径优化为基础,从绿色低碳的视角,重点研究多 车型多品种的冷链多温共配问题,具有重要的理论意义与实际意义.

在考虑碳排放的车辆路径研究方面,国内外相关学者对该问题做了相应的研究.李进等^[1]和Jabali等^[2]从 速度优化的角度对考虑碳排放的物流配送问题进行了研究; Norouzi等^[3]和Alinaghian等^[4]对碳排放与时间 依赖相关的车辆路径问题展开了研究. Cinar等^[5]研究了时间限定条件下累计多趟车辆路径问题如何有效减 少CO₂排放,构建了混合整数规划模型并设计了模拟退火算法; Zhang等^[6]考虑了常规车辆燃油消耗和碳排 放,建立了一个考虑燃料成本、碳排放成本和使用成本的低碳车辆路径模型,并设计一种改进的禁忌搜索算 法RS-TS用于模型求解; Qian等^[7]研究了在速度取决于时间的路网中通过测定CO₂的排量减少车队的燃油消 耗,提出了解决该问题的禁忌搜索算法,最后对伦敦路网的真实交通数据进行测试. 迟国泰等^[8]以大连为实 证对象,确定了满足政府规划约束下的绿色城市工业烟尘排放的最佳规划路径; Jiménez等^[9]提出了在一组 固定线路中分配城市公交车队的最优化方法,以减少污染物的排放,最后将其应用到马德里城市公交调运 中去. 这些研究从影响碳排放因素、碳排放建模与算法、碳排放实证研究三个角度做了大量工作,但其中的 配送车辆均为常规车辆,而非多温共配冷链车辆. 此外对于冷链车辆能耗的计算,不是从发动机属性角度出 发,而是借鉴常规车辆所使用的单位里程油耗的方法,造成车辆能耗计算的误差较大.

在冷链物流研究方面,国内对冷链物流的研究主要集中在套用常规车辆配送的模型与算法解决冷链配送问题.都牧等^[10]基于物联网技术提出了蔬果商品网上直销的"农-宅"配送系统方案,为B2C下果蔬"最后一公里"配送提供了新思路;肖建华等^[11]构建了基于非等覆盖半径的生鲜农产品配送中心选址模型,基于自适应遗传算法设计了动态膜算法用于模型求解.这些研究是从系统架构和配送中心选址角度出发,较少从冷链车辆特性的角度研究冷链配送问题.国外的冷链物流研究更多集中在单温配送车辆路径等方面,而针对多温共配并考虑多种因素的研究匮乏.Govindan等^[12]对有时间窗的易腐品供应网络的集成决策与调配问题构建了一个多目标优化模型;Rabbani等^[13]研究了多个中间仓库下的确定性车辆路径问题,提出了易腐食品新鲜度的概念来获得最佳配送路径;Kim等^[14]和Xiao等^[15]分别从风险管理和技术应用的角度研究冷链物流,侧重对冷链配送中的监控管理.但是这些冷链配送中的距离采用常见的欧式距离度量,而没有考虑顾客点间的时间距离,使得构造的初始配送路径较差,得到最优路径所需的时间较长.

基于上述研究,本文针对多车型多品种冷链多温共配问题,从汽车能耗的角度考虑冷链车辆产生的碳 排放符合绿色物流的社会背景,将传统欧氏距离度量转化为时空距离度量,使冷链配送贴近现实情况,以 带软时间窗的车辆路径问题为基础,构建了一个低碳冷链配送路径优化模型,基于聚类-优化的思想设计 了k-means算法与改进模拟退火算法相结合的两阶段启发式算法,并通过数值实验验证了该算法的有效性.

2 考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化模型

2.1 问题分析与模型假设

所研究的多车型多品种的冷链多温共配问题是传统车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)问题的 拓展类型,属于NP-hard问题.问题具体表述为:配送系统只有一个冷链配送中心和多个顾客需求点,采用三 种不同型号的多舱冷链配送车配送冷冻和冷藏两类食品,车辆的冷冻舱与冷藏舱可以通过车载温控系统自 由切换.各顾客点的需求量和配送时间窗已知.此外,对多车型多品种冷链多温共配问题做如下假设:

1) 冷链配送车辆均以配送中心作为起点和终点;

2) 对应舱室只能装对应温层的冷链食品, 且制冷所需能源由发动机提供;

3)冷链配送中心的货源充足并且有足够的配送能力完成配送,配送过程中车辆的速度固定为v;

4)顾客点需求不可拆分,任意顾客点对冷冻或者冷藏食品的最大需求不超过配送车辆对应舱室的最大 载量.

2.2 符号定义

使用完全有向图*G* = (*V*, *E*)表示整个冷链配送网络, 其中*V* = {0,1,...,*n*}表示冷链配送网络中的节 点, {0}表示冷链配送中心, *V*₀ = *V*\{0}表示顾客点的集合, *E* = {(*i*, *j*) |*i* ≠ *j* ∈ *V*}表示配送线路弧集; *K* = {*k* |1,2,...,*n*₁, *n*₁ + 1, *n*₁ + 2, ...,*n*₁ + *n*₂ + 1, *n*₁ + *n*₂ + 2, ...,*K*}表示冷链车辆的集合, 其 中*K*₁ = {*k* |1,2,...,*n*₁}, *K*₂ = {*k* |*n*₁ + 1, *n*₁ + 2, ...,*n*₁ + *n*₂}, *K*₃ = {*k* |*n*₁ + *n*₂ + 1, *n*₁ + *n*₂ + 2, ...,*K*} 分别表示大型、中型和小型冷链车辆的集合; *f_k*表示车辆*k*的固定派送成本, *f_k* ∈ *R*⁺; (*x_i*, *y_i*)表示顾客点*i*的 位置; [*e_i*, *l_i*]表示顾客点*i*的配送时间窗, 其中*e_inl_i*]别表示最早和最晚开始服务时间; 允许车辆提前到, 但 是必须等到*e_i*时才能开始服务, 服务时间为*s_i*; *dst*_{*i*}表示顾客点*i*到顾客点*j*的时空距离; *t_{ijk}*表示车辆*k*从顾客 点*i*到顾客点*j*间的配送时间, 有*t_{ijk}* = $\frac{d^{st}_{ij}}{v_k}$ 目*t_{ijk}* = *t_{jik}; t_{oki}表示第<i>k*车到达配送点*i*的时间; *P*表示冷链配送 食品的种类集合, *P* = {*p* |*p* = 1,2}, 其中*p* = 1表示冷冻食品, *p* = 2表示冷藏食品; *R_k*表示车辆*k*包含*R_k*个 舱室; *Q^k*表示车辆*k*第*r*个舱室的最大载量, *r* ∈ *R_k*; *q^p*表示顾客点*i*的冷链食品*p*的需求量; *M_q*表示第*q*种类 型的冷链配送车辆的总质量; *ΔT*表示车厢内外温度差; *c*₁表示车辆等待的单位时间惩罚成本, *c*₂表示车辆延 迟交货的单位时间惩罚成本; *w*表示单位碳排放的碳税; *x_{ijk}*和*y^{kp}*表示0, 1决策变量, 其中

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, 表示第k辆车服务于顾客点i和顾客点j之间 \\ 0, 其它, \end{cases}$$

2.3 时空距离度量与碳排放计算

1) 时空距离度量

区别于一般车辆路径问题只把空间距离作为衡量配送点远近的标志,综合考虑顾客点间的空间距离与时间距离,采用时空距离加以度量.这是因为在实际配送中,将地理位置邻近、配送时间窗相差很大的顾客点划归在同一配送线路上很显然不再合适.由于时间距离与空间距离的量纲不一致,在计算时空距离时,可先对时间和空间进行归一化处理,则加权平均后两点的时空距离为^[16]

$$d_{ij}^{st} = \alpha d_{ij}^{s} + (1 - \alpha) d_{ij}^{t}, \ \alpha \in [0, 1].$$
⁽¹⁾

两顾客点空间距离可以用欧式距离来刻画,假设在二维平面内顾客点*i*和顾客点*j*的坐标分别为(*x_i*, *y_i*)和(*x_j*, *y_j*),则顾客点*i*和顾客点*j*的欧氏距离为

$$d_{ij}^{s} = \sqrt{\left(x_{i} - x_{j}\right)^{2} + \left(y_{i} - y_{j}\right)^{2}}.$$
(2)

顾客点*i*和顾客点*j*的时间距离通过顾客点时间窗被满足的服务程度来刻画, 区别于文献[16]中超出配 送时间窗范围, 时间距离为正无穷大, 故采用软时间窗, 对超出时间窗范围的时间距离通过添加一定的惩罚 系数来刻画, 顾客点*i*, *j*的时间窗分别为[e_i , l_i]和[e_j , l_j], 不妨令 $e_i \leq e_j$, 若 $a_i \in [e_i, l_i]$, 则车辆到达顾客点*j*的 时间 $a_j \in [e_i + s_i + t_{ij}, l_i + s_i + t_{ij}]$, 记 $e'_j = e_i + s_i + t_{ij}$, $l'_j = l_i + s_i + t_{ij}$, 定义迟到的时间惩罚系数大于 等待的时间惩罚系数($\tau_2 > \tau_1$), 则顾客点*i*, *j*间的时间距离为

$$d_{ij}^{t} = \begin{cases} \tau_{1} \left(e_{j} - l_{j}' \right), \ \ddot{H} \ l_{j}' < e_{j} \\ a_{j} - a_{i}, \qquad \ddot{H} \ e_{j} \leq e_{j}' < l_{j} \ \vec{u} \ e_{j}' < e_{j} < l_{j}' \\ \tau_{2} \left(e_{j}' - l_{j} \right), \ \ddot{H} \ e_{j}' > l_{j}. \end{cases}$$
(3)

2) 碳排放计算

冷链车辆在配送过程中的碳排放主要来自两个方面:一方面与常规车辆一致,在正常行驶的过程中因燃油损耗会产生碳排放;另一方面维持冷冻舱和冷藏舱的目标温度会产生额外的碳排放.对于维持制冷产生的额外碳排放,相关研究成果^[17-19]表明,开门热负荷占到冷链车总热负荷的1/3以上,若再加上通过隔热厢体传入的热量,则这两部分热量占了总热量的近80%.因此,忽略其它方面的热散失,可以认为维持制冷产生的额外碳排放主要来自配送过程中的热传导和服务顾客点频繁开启车门的热交换.对于固定车型、一定环境下车辆油耗的计算,参考Barth等^[20]建立的比较经典的汽车能耗模型,得到针对发动机特点的冷链车能耗模型,冷链车的碳排放通过车辆发动机所做的功来计算,如下:

$$CE = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \frac{d_{ij}^{a}}{v_{ij}} Rh,$$

$$R = \phi \left(\psi NV_s + P_k / \eta\right) / \mu,$$

$$P_k = P_t / \eta_t + P_a,$$

$$P_t = \left(M_q av + M_q gv \sin \theta + 0.5C_d A\rho v^3 + M_q gv C_r \cos \theta\right) / 1\ 000,$$

$$P_a = P_{a1} + P_{a2},$$

$$P_{a1} = \gamma_1 \Delta T_1 \sqrt{S_{w1} S_{v1}} + \gamma_2 \Delta T_2 \sqrt{S_{w2} S_{v2}},$$

$$P_{a2} = \left(0.54n + 3.22\right) \left(\Delta T_1 + \Delta T_2\right) \lambda,$$
(4)

其中 CE表示冷链车的碳排量(单位: g), R表示单位时间的燃油消耗率(单位: g/s), P_k 表示冷链车辆k的功率(单位: W), P_t 和 P_a 分别表示有效功率和制冷产生的额外功率, P_{a1} 和 P_{a2} 分别表示冷链车厢热传导所需的功率和频繁开启车门造成热交换所需的功率.式(4)中其它参数影响冷链车的碳排放量,可以分为两大类^[20,21].第一类是固定值参数,包括油耗量与碳排放量的转化因子h = 1/2.7 L/kg^[22],燃油与空气的混合比 $\phi = 1$,引擎摩擦因子 $\psi = 0.2$,发动机效率参数 $\eta = 0.6$,能耗常数 $\mu = 44$,传动效率 $\eta_t = 0.45$,重力加速度g = 9.81 kg/m²,空气密度 $\rho = 1.204$ 1kg/m³,牵引力系数 $C_d = 0.4$,滚动阻力系数 $C_r = 0.01$.第二类是非固定值参数,分为与车型相关、与舱室相关和与道路相关的三类参数.其中,与车型相关的参数包括发动机转速N,排气量 V_s ,迎风面积A,冷藏舱内外表面积 S_{v1} 和 S_{w1} ,冷藏舱内外表面积 S_{v2} 和 S_{w2} ,车辆的总质量 M_q ,与路径相关参数包括车辆的总质量 M_q ,一条配送路上的顾客数量n,开门频率 λ ,时空距离 d_{ij}^{st} ,坡度角 θ ,车速v,加速度a;与舱室相关参数包括冷冻舱内外温度差 ΔT_1 ,冷藏舱内外温度差 ΔT_2 ,冷冻舱传热系数 γ_1 ,冷藏舱传热系数 γ_2 .

常见的冷链车传热系数γ和开门频率系数λ分别如表1和表2所示.

| Table 1Common heat transfer coefficient γ | | | | | | | | | |
|--|----------|---|--|--|--|--|--|--|--|
| 外界温度(°C) | 内部温度(°C) | $\gamma \mathbf{\hat{d}}(\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{K})$ | | | | | | | |
| 30 | +12/0 | 0.7 | | | | | | | |
| 30 | +12/-10 | 0.4 | | | | | | | |
| 30 | +12/-20 | 0.4 | | | | | | | |
| 30 | +2 | 0.7 | | | | | | | |
| 30 | -10 | 0.4 | | | | | | | |
| 30 | -20 | 0.4 | | | | | | | |
| 20 | -20 | 0.4 | | | | | | | |

通过式(4),求得冷辆配送车的油耗率R和碳排放量CE后,可得冷链配送车的配送成本和碳排放成本分别为

$$C_{1} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \frac{d_{ij}^{st}}{v_{ij}} Rc_{o},$$
(5)

$$C_{2} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \frac{d_{ij}^{st}}{v_{ij}} Rhw,$$
(6)

其中 co表示油价(单位:元/升), w表示碳税.

表 2 开门频率系数 λ Table 2 Open frequency coefficient λ

| 程度 | 开门频率 | λ |
|----|----------|-----------|
| Α | 关闭 | 0.25 |
| В | 程度C的一半 | 0.5 |
| С | 每小时2次~3次 | 1 |
| D | 超过程度C的一半 | 1.5 |
| Ε | 程度C的两倍 | 2 |

2.4 模型构建

根据以上分析,可以构建一个考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化模型为

$$\operatorname{Min} \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \frac{d_{ij}^{st}}{v_{ij}} Rc_0 + \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \frac{d_{ij}^{st}}{v_{ij}} Rhw + \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} f_k + c_1 \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \max\left(e_i - a_i, 0\right) + c_2 \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \max\left(a_i - l_i, 0\right),$$

$$(7)$$

s.t.
$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} x_{i0k} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{n} x_{0jk} = K, \quad \forall i, j \in V_0, k \in K,$$
(8)

$$\sum_{i=1}^{n} y_{ip}^{kr} q_i^p \leqslant Q_k^r, \ \forall k \in K, r \in R_k, p \in P,$$
(9)

$$\sum_{i=0}^{n} x_{ijk} \geqslant y_{ip}^{kr}, \quad \forall j \in V_0, k \in K, r \in R_k, p \in P,$$
(10)

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{r=1}^{R_k} y_{ip}^{kr} = 1, \ \forall i \in V_0, p \in P,$$
(11)

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{n} x_{0jk} \leqslant K, \quad \forall k \in K,$$

$$(12)$$

$$t_{0k(i+1)} = t_{0ki} + s_{ik} + t_{i(i+1)k}, \quad \forall k \in K, i \in V_0,$$
(13)

$$\sum_{j=0}^{n} \left(Q_{ji}^{p} - Q_{ij}^{p} \right) = q_{i}^{p}, \ \forall (i,j) \in A,$$
(14)

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} x_{ijk} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{n} x_{jik}, \quad \forall j \in V_0, k \in K,$$
(15)

$$q_i^p \ge 0, \ \forall i \in V_0, \tag{16}$$

$$x_{ijk} (1 - x_{ijk}) = 0, \ \forall i, j \in V, k \in K,$$
(17)

$$y_{ip}^{kr} \left(1 - y_{ip}^{kr} \right) = 0, \ \forall i \in N, p \in P, k \in K, r \in R_k.$$
 (18)

式(7)表示最小化总成本,其中第一项表示因车辆正常行驶和维持制冷所消耗燃油而产生的配送成本, 第二项表示因燃油消耗而产生的额外碳排放成本,第三项表示派遣车辆进行配送的固定成本,第四项和第 五项分别表示提前到达和延后到达的时间窗惩罚成本;式(8)表示所有车辆均从配送中心出发,完成配送 任务后返回配送中心;式(9)表示配送路线上某种冷链食品的需求之和不得超过配送车辆对应舱室的载量; 式(10)表示弧(*i*,*j*)可用时,顾客点*j*才被配送;式(11)表示每个顾客点的每种需求由且仅由一辆冷链配送车 辆的一个舱室完成且需求不可拆分;式(12)表示配送中心车辆数量限制;式(13)表示配送车辆*k*到达相邻顾 客点*i* + 1和*i*之间的时间关系;式(14)表示服务完一个顾客*i*,冷冻和冷藏食品的载量减少*qⁱ*;式(15)表示配送 车辆进出平衡关系;式(16)表示顾客点*i*对冷链食品*p*的需求量为非负;式(17)和式(18)表示决策变量的取值.

559

3 求解算法设计

为了对2.4中构建的模型进行求解,设计了一种二阶段求解算法.基本思想为:第一阶段采用k-means算法进行聚类,在考虑顾客点时间窗和地理位置的基础上,计算顾客点间的时空距离,根据时空距离远近构造初始配送路径;第二阶段结合变邻域搜索算法设计改进的模拟退火算法对初始配送路径进行优化.通过这种基于聚类-优化的算法,可以有效地搜索使总成本最低的冷链配送方案.

3.1 基于k-means算法的顾客聚类分析

在定义了顾客点间的时空距离后,需要选用合适的算法对顾客点进行聚类.由于k-means聚类算法 能简单快速有效处理大规模数据^[23],针对配送网络中每个顾客点的需求量小、顾客点数量多的特点,采 用k-means算法实现对顾客点的聚类.

对于一个给定的顾客点集合 $V_0 = \{1, 2, ..., n\}$,这些顾客点被划分为k簇,即 $(z_1, z_2, ..., z_k)$,簇 z_i 的聚类 中心为 o_i ,通过k-means算法定义函数

$$F = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j \in z_i / \{o_i\}} d_{ioj}^{st},$$
(19)

其中 聚类数目 $k = \max\left[\sum_{i=1}^{n} q_i^p / Q_{\max}\right], \sum_{i=1}^{n} q_i^p 表示配送量最大的第$ *p* $类冷链食品的总需求量, <math>Q_{\max}$ 表示对应 舱室的最大载量.

3.2 初始配送路径的构造

在对顾客点实行聚类划分以后,根据聚类的实际情况,结合各个聚类的需求量和冷链配送车辆的载量约束,选取合适的车型、合适的冷冻和冷藏装载比,对顾客点依据就近原则进行配送.令超出车辆载量约束的顾客点数量为J(J < k),并重新指派车辆进行配送.对每个聚类簇(z_i)的初始配送路径构造采取如下步骤:

步骤1 选取离冷链配送中心最近的顾客点指派车辆,即有 $k \leftarrow 1$;

步骤2 依据车辆的载量约束,剩余的配送按照顾客点间的时空距离进行任务指派,对超出车辆载量约束的顾客点执行步骤3;

步骤3 检测剩余运力是否满足对未配送和部分配送的顾客点的需求,如果满足,对剩余顾客点按时空距离由小到大顺序重新安排车辆进行配送,否则, $\Diamond k \leftarrow k + 1$,并将不满足剩余运力载量约束的顾客点并入一个新的聚类簇中;

步骤4 检测是否有未进行配送的聚类簇,如果有,跳转至步骤2,否则输出结果,初始配送路径构造结束.

3.3 改进模拟退火算法设计

1) 模拟退火算法原理与实现步骤

所研究的多车型多品种冷链多温共配问题属于NP-hard问题,对于大规模的VRP问题,精确算法几乎不可行,目前主要采用元启发式算法.鉴于模拟退火算法已在理论上被证明是一种以概率1收敛于全局最优解的优化算法,故采用改进的模拟算法对初始配送路径进行优化.该问题用模拟退火算法描述为:问题的一个解i及其目标函数f(i)分别与固体的一个微观状态i及其能量E(i)等价.

具体的算法流程如下:

步骤1 以聚类结果构造初始解*S*, 给定初始温度*T*₀, 令最优解Great \leftarrow *S*, 全局最优解Best \leftarrow *S*, *i* \leftarrow 1, *k* \leftarrow 0, Count \leftarrow 0;

步骤2 判断 $T_i > T_{\min}$, $i < i_{\max}$, Count < Count_{max}是否同时成立, 若成立则执行下一步, 否则执行步骤10;

步骤3 按规则选定邻域搜索方法,得到新解f(i);

步骤4 判断Great $\leq f(i)$ 是否成立,若成立则继续执行下一步,否则转至步骤9;

步骤5 $\diamond i \leftarrow i+1, k \leftarrow k+1, \text{Great} \leftarrow f(i), \text{Count} \leftarrow 0;$

步骤6 判断Best < Great是否成立, 若成立则令Best ← Great;

步骤7 判断 $k \ge \text{Roundup}(i/a_1) + a_2$ 是否成立, 若成立则执行下一步, 否则转至步骤3;

步骤8 令 $T_{i+1} \leftarrow T_i \times \text{Cooling}, k \leftarrow 0, 转至步骤2;$

步骤9 判断random < exp $(-\Delta f/T_i)$ 是否成立, 若成立则转至步骤5, 否则令 $i \leftarrow i + 1$, Count \leftarrow Count +1, 并转至步骤2;

步骤10 结束并输出结果.

2) 模拟退火算法的改进

针对传统模拟退火算法求解时间长、执行概率接受环节时遗失最优解的缺点,并根据多车型多品种冷链多温共配问题的特点,在传统模拟退火算法基础上,增加了记忆功能,设计了自适应的降温方式,利用多阈值控制程序运行次数,并结合变邻域搜索算法,设计了多种邻域操作方法,算法改进如下.

①邻域操作方法

由于问题的复杂程度高, 解空间巨大, 所以结合变邻域搜索算法, 考虑了以下六种变换构成的邻域:

变换1 某条路线中的一个配送任务插入到另一条路线中;

变换2 某两条路线中的配送任务互换;

变换3 某条路线中的同种冷链食品类型的配送任务全部插入其它路线;

变换4 某两条路线中的同种冷链食品类型的配送任务全部互换;

变换5 某条路线中某个顾客点的所有配送任务插入其它路线;

变换6 某两条路线中某两个顾客点的配送任务互换.

每次选定一种邻域搜索方法,如果得到的最优解比前一代好,则继续使用此方法,否则,连续多次产生的 解没有被接受,则选用下一种邻域搜索方法,依次循环.

(2) 自适应降温方式

每次迭代产生的新解若优于当前的最优解,则更新最优解为此次迭代得到的解,否则,以exp $(-\Delta E_{ij}/t)$ 概率接受此解.当连续更新最优解的次数k累加到数值 c_2 = Roundup $(i/a_1) + a_2$ 时,温度降为 $T_{n+1} = T_n \times$ Cooling.此方法使得在求解的最初的一段时间里,温度降低速率快,从而加快收敛,而后段时间里,温度降低速率慢,有利于找到全局最优解.

③ 最优解的记录

为了避免最好的解在优化过程中被忽略掉,在整个搜索过程中随时记下最好的值,在算法结束后从历代 保存的最优值中取得问题的最优解.

4 数值实验

由于目前对冷链多温配送的研究较少,数据获取难度大.故设置各顾客点位置在边长为60 km的正方形 范围内随机产生,配送中心坐标为(30,30),冷链车辆的分舱情况和其它参数如表3和表4所示.

| 表 3 冷链年分舱参数 | | | | | | | | | |
|---|-----|--------|-----|-----|-----|--|--|--|--|
| Table 3 Subdivision parameters of cold chain vehicles | | | | | | | | | |
| 左刑 | 分舱数 | 载重量(t) | | | | | | | |
| 十王 | | 分舱1 | 分舱2 | 分舱3 | 总计 | | | | |
| 东风小霸王 | 1 | 1.5 | 0 | 0 | 1.5 | | | | |
| 福田欧马可 | 2 | 2.5 | 2.5 | 0 | 5 | | | | |
| 东风天锦 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | | | | |

设单一顾客某类冷链食品需求量不超过配送车辆对应分舱载量,随机产生各个顾客点的需求量.各顾客点的配送时间窗限制在早上6:00到下午13:00之间随机产生,且时间窗长度在3h范围内,各顾客点服务时

间为20 min. 假定整个配送过程中车辆匀速行驶,车速v = 36 km/h,坡度角 $\theta = 0$,外界温度为30°C,冷冻舱为-10°C,冷藏舱为2°C.

| Table 4 Other parameters of cold chain vehicles | | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------------------|-------------------|--------|--|--|--|--|--|
| 车型 | N(r/min) | Vs(L) | 整车尺寸(mm) | 车厢尺寸(mm) | 质量(kg) | | | | | |
| 东风小霸王 | 36 | 1.051 | 4 375*1 650*2 400 | 3 000*1 480*1 500 | 1 510 | | | | | |
| 福田欧马可 | 26 | 3.76 | 7 995*2 420*3 520 | 6 000*2 150*2 200 | 5 305 | | | | | |
| 东风天锦 | 25 | 6.7 | 9 990*2 490*3 850 | 7 400*2 280*2 400 | 6 505 | | | | | |

表 4 冷链车其它参数 ble 4 Other parameters of cold chain vehic

在完成冷链物流相关配送参数设置后,下面需要对模拟退火算法的参数做如下设置: 令初始温度 $T_0 = 50^{\circ}$ C,每连续更新10次最优解后温度降为 $T_{n+1} = 0.95T_n$,连续3次产生的解没有被接受,则选用下一种邻域搜索方法,连续迭代500次没有更优解出现或者迭代次数达到10 000次上限或者温度达到 $T_{min}=0.01$ 时程序结束.

设置5组算例进行计算,比较是否考虑时空距离对算法最后计算结果的影响.算法通过MATLAB2014a编程实现,所有程序均是在主频2.0Ghz、4GB内存、Windows7操作系统环境下进行.由表5可以看出,在顾客点数量较少时,是否考虑时空距离,优化效果不明显;随着配送顾客点数量的增多,考虑时空距离相较于不考虑时空距离,其所需车辆数更少,目标值更小,优化效果越好.对于现实中的冷链配送企业来说,随着冷链物流的持续升温,当顾客数达到一定规模,采用时空距离能科学合理地为顾客聚类提供依据,从而实现最优配送,降低企业的运营成本.

| | companio | · ···································· | | | ening temperat | spana aistairee | |
|--------------|----------|--|-------|-----|------------------|-----------------|-----------|
| 質例(| 考虑时空距离前 | | | | 供化 家(171) | | |
| 异内(灰谷点) 女) - | 车辆数 | 目标值 | 迭代次数 | 车辆数 | 目标值 | 迭代次数 | 1016年(70) |
| R1(20) | 8 | 2 028 | 1 000 | 9 | 1 995 | 1 000 | 1.63 |
| R2(40) | 12 | 2 872 | 1 000 | 9 | 2 499 | 1 000 | 12.99 |
| R3(60) | 14 | 4 010 | 1 000 | 10 | 2 930 | 1 000 | 26.93 |
| R4(80) | 11 | 5 733 | 1 000 | 7 | 4 326 | 1 000 | 24.54 |
| R5(100) | 12 | 8 092 | 1 000 | 9 | 5 067 | 1 000 | 37.38 |

表 5 考虑时空距离前后的计算结果对比 Table 5 Comparison of the calculated results before and after considering temporal-spatial distance

为了更清晰的展现是否考虑时空距离在多车型多品种冷链多温共配中的区别,选取R5(100)作为实验对象,实验结果如图1所示.



Fig. 1 Comparison of the iteration results before and after considering temporal-spatial distance

考虑时空距离的模拟退火算法初始解明显优于不考虑时空距离的初始解,随着迭代过程的继续,考虑时 空距离的模拟退火算法在迭代次数为100次时目标函数值迅速下降,迭代次数在300次左右目标函数值收敛. 而不考虑时空距离的模拟退火算法的初始解较差,算法直到迭代到800次左右才最终收敛,收敛速度慢,生 成的最优解较差.基于聚类-优化思想,对于需求量已知的配送,考虑顾客点间时空距离,一方面有利于构造 合适的初始路径,另一方面在初始路径确定后有利于根据线路实际配送需求选择合适冷冻舱和冷藏舱装载 比的冷链车型,进而不断优化初始路径以实现有限运力的最优化利用.

为了验证改进模拟退火算法的有效性,设置了一组对照实验,比较邻域搜索算法与改进模拟退火算法的 优劣,如表6所示.两种算法均选取相同的5个算例R1(20)、R2(40)、R3(60)、R4(80)、R5(100),并且都考虑时 空距离.结果表明,改进的模拟退火算法计算所需车辆数要少、目标函数值要小.相较于变邻域搜索算法容 易收敛于局部最优解,改进模拟退火算法可以在变邻域搜索算法的基础上避免局部最优,从而找到全局最 优解.设计的改进模拟退火算法融合了变邻域搜索算法对大规模组合优化问题效果好的优点,同时克服了 传统模拟退火算法全局搜索能力差的缺点,能为冷链多车型多品种冷链配送提供科学指导.

| Table 6 Comparison of the calculated results between variable neighborhood search algorithm | | | | | | | | | |
|---|-----|-------|-----------|-------|-------------|--|--|--|--|
| 質励 | 变邻均 | 或搜索算法 | 改进模 | 拟退火算法 | 日标传减小的五朵比 | | | | |
| 开内 | 车辆数 | 目标函数值 | 车辆数 目标函数值 | | - 日你阻贼少的日力比 | | | | |
| R1(20) | 10 | 2 092 | 9 | 1 995 | 4.63 | | | | |
| R2(40) | 10 | 2 709 | 9 | 2 499 | 7.75 | | | | |
| R3(60) | 11 | 4 028 | 10 | 2 930 | 27.26 | | | | |
| R4(80) | 10 | 5 390 | 7 | 4 326 | 19.74 | | | | |
| R5(100) | 11 | 7 588 | 9 | 5 067 | 33.22 | | | | |

表 6 改进模拟退火与变邻域搜索算法计算结果比较

最后,为了验证改进模拟退火算法的稳健性,在算例R5(100)的基础上,重复做了10次实验,实验结果如表7所示.

| | | | · · · | 1 | | | | 5 . 8 | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 计算次序 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 平均 |
| 总配送成本(元) | 5 074 | 4 738 | 4 902 | 5 073 | 4 939 | 4 877 | 5 006 | 4 802 | 4 766 | 4 913 | 4 909 |
| 碳排放、配送成本(元) | 1 984 | 1 685 | 1 725 | 1 725 | 1 692 | 1 932 | 1 793 | 1 690 | 1 735 | 1 877 | 1 783.8 |
| 固定成本(元) | 1 390 | 1 450 | 1 350 | 1 320 | 1 350 | 1 480 | 1 390 | 1 520 | 1 350 | 1 420 | 1 402 |
| 等待时间成本(元) | 182 | 170 | 251 | 141 | 215 | 201 | 213 | 103 | 150 | 222 | 184.8 |
| 迟到时间成本(元) | 1 518 | 1 433 | 1 576 | 1 887 | 1 682 | 1 264 | 1 610 | 1 489 | 1 531 | 1 394 | 1 538.4 |
| 车辆数(辆) | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 11 | 9 | 10 | 10 |
| 计算时间(s) | 120 | 127 | 97 | 85 | 160 | 169 | 152 | 132 | 164 | 161 | 136.7 |

表 7 改进模拟退火算法稳健性实验 Table 7 Robust experiment of improved simulated appealing algorithm

由表7可以看出,采用时空聚类的改进模拟退火算法在10次求解过程中解的质量都很高,其总配送成本的平均值为4909元,优化比为35.3%,平均使用车辆数为10辆,优化比为9.09%.算法达到目标值需要的平均计算时间为136.7 s,鲁棒性强,收敛速度快,能够在比较短的时间内收敛到较优的解.对于冷链配送企业来说,可变配送成本(包括碳排放成本和配送成本)、固定成本以及迟到惩罚成本占到总配送成本的九成以上,因此,冷链配送企业可以从选择合适配送路径和冷链车型、提高车载率减少车辆派出数量和提高配送准时性三个方面减少总配送成本,提升企业竞争力.

5 结束语

本文对多车型多品种的冷链多温共配问题展开研究,在考虑碳排放与时空距离基础上,建立了基于汽车 能耗的冷链配送模型,针对模型设计了k-means与改进模拟退火算法相结合的先聚类后优化的启发式算法, 最优通过多组算例验证了算法的有效性.研究表明,相较于传统变邻域搜索算法,考虑配送顾客时空距离的 初始解以及针对冷链多舱配送特点构造的邻域搜索结构均能大幅提高模型求解质量,加快算法收敛速度. 对于冷链配送企业了来说,考虑碳排放符合当前时代背景并能为企业赢得较好的社会声誉;根据实际配送 任务情况选择合适冷冻舱和冷藏舱装载比的多温共配冷链车辆能最大限度地降低配送成本;在实际配送中, 将时空距离度量融入配送路径构造中并采用所设计的改进模拟退火算法能快速有效地为最优调配决策提 供科学依据.

当前研究还存在一些有待改进的地方,例如:未考虑配送的路况、一天之内的外界温度等是变化的.此 外,对于时效性要求很高的冷链配送,冷链食品安全也是未来值得深入研究的方向.

参考文献:

- [1] 李 进,张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3063–3072.
 Li J, Zhang J H. Vehicle routing problem with time emissions and speed windows based on carbon optimization. Systems Engineering: Theory & Practice, 2014, 34(12): 3063–3072. (in Chinese)
- [2] Jabali O, Woensel T V, Kok A G D. Analysis of travel times and CO₂ emissions in time-dependent vehicle routing. Production and Operations Management, 2012, 21(6): 1060–1074.
- [3] Norouzi N, Sadegh-Amalnick M, Tavakkoli-Moghaddam R. Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle routing problem: minimizing fuel consumption. Optimization Letters, 2016: 1–14.
- [4] Alinaghian M, Naderipour M. A novel comprehensive macroscopic model for time-dependent vehicle routing problem with multialternative graph to reduce fuel consumption: A case study. Computers & Industrial Engineering, 2016, 99: 210–222.
- [5] Cinar D, Gakis K, Pardalos P M. Reduction of CO₂ emissions in cumulative multi-trip vehicle routing problems with limited duration. Environmental Modeling & Assessment, 2015, 20(4): 273–284.
- [6] Zhang J, Zhao Y, Xue W, et al. Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission. International Journal of Production Economics, 2015, 170: 234–242.
- [7] Qian J, Eglese R. Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. European Journal of Operational Research, 2016, 248(3): 840–848.
- [8] 迟国泰, 杜永强, 石宝峰. 绿色城市工业烟尘排放规划路径选择. 系统工程学报, 2014, 29(03): 309–314.
 Chi G T, Du Y Q, Shi B F. Path selection of industrial dust emissions of green city. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 309–314. (in Chinese)
- [9] Jiménez F, Román A. Urban bus fleet-to-route assignment for pollutant emissions minimization. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 85: 120–131.
- [10] 都 牧, 胡祥培, 周宽久, 等. 基于物联网的蔬果网上直销"农-宅"配送系统. 系统工程学报, 2014, 29(2): 215-222.
 Du M, Hu X P, Zhou K J, et al. IoT based farm-to-door delivery system for fruit and vegetable online retail. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(2): 215-222. (in Chinese)
- [11] 肖建华, 王 飞, 白焕新, 等. 基于非等覆盖半径的生鲜农产品配送中心选址. 系统工程学报, 2015, 30(3): 406–416.
 Xiao J H, Wang F, Bai H X, et al. Location of distribution centers for fresh agricultural products based on non-equal coverage radius. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(3): 406–416. (in Chinese)
- [12] Govindan K, Jafarian A, Khodaverdi R, et al. Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. International Journal of Production Economics, 2014, 152(2): 9–28.
- [13] Rabbani M, Farshbaf-Geranmayeh A, Haghjoo N. Vehicle routing problem with considering multi-middle depots for perishable food delivery. Uncertain Supply Chain Management, 2016, 4(3): 171–182.
- [14] Kim K, Kim H, Kim S K, et al. i-RM: An intelligent risk management framework for context-aware ubiquitous cold chain logistics. Expert Systems with Applications, 2016, 46: 463–473.
- [15] Xiao X, He Q, Fu Z, et al. Applying CS and WSN methods for improving efficiency of frozen and chilled aquatic products monitoring system in cold chain logistics. Food Control, 2016, 60: 656–666.

[16] 戚铭尧, 张金金, 任 丽. 基于时空聚类的带时间窗车辆路径规划算法. 计算机科学, 2014, 14(3): 218–222.
 Qi M Y, Zhang J J, Ren L. Vehicle routing algorithm based on spatiotemporal clustering. Computer Science, 2014, 14(3): 218–222. (in Chinese)

- [17] 谢 晶,徐 倩,方恒和. 多温区冷藏车热负荷计算的研究. 食品与机械, 2007, 23(4): 98-101.
 Xie J, Xu Q, Fang H H. The calculation of heat load in a multi-temperature refrigeration truck. Food & Machinery, 2007, 23(4): 98-101. (in Chinese)
- [18] Hsu C I, Chen W T, Wu W J. Optimal delivery cycles for joint distribution of multi-temperature food. Food Control, 2013, 34(1): 106–114.
- [19] Zhang Y, Chen X D. An optimization model for the vehicle routing problem in multi-product frozen food delivery. Journal of Applied Research & Technology, 2014, 12(2): 239–250.
- [20] Barth M, Boriboonsomsin K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2009, 14(6): 400–410.
- [21] 饶卫振,金 淳,王新华,等.考虑道路坡度因素的低碳VRP问题模型与求解策略.系统工程理论与实践, 2014, 34(8): 2092-2105.

Rao W Z, Jin C, Wang X H, et al. A model of low-carbon vehicle routing problem considering road gradient and its solving strategy. Systems Engineering: Theory & Practice, 2014, 34(8): 2092–2105. (in Chinese)

- [22] Salimifard K, Raeesi R. A green routing problem: Optimising CO₂ emissions and costs from a bi-fuel vehicle fleet. International Journal of Advanced Operations Management, 2014, 6(1): 27–57.
- [23] Cosby A M, Falzon G A, Trotter M G, et al. Risk mapping of redheaded cockchafer (Adoryphorus couloni)(Burmeister) infestations using a combination of novel k-means clustering and on-the-go plant and soil sensing technologies. Precision Agriculture, 2016, 17(1): 1–17.

作者简介:

王旭坪(1962—), 男, 辽宁锦州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流管理; 信息系统集成, Email: wxp@dlut.edu.cn; 董杰(1990—), 男, 湖北荆州人, 硕士生, 研究方向: 物流管理; 电子商务物流优化, Email: 342450924@mail.dlut.edu.cn; 韩 涛(1993—), 男, 山东莱芜人, 硕士生, 研究方向: 物流管理; 电子商务物流优化, Email: smart_hantao@mail.dlut.edu.cn; 阮俊虎 (1983—), 男, 河南周口人, 博士后, 副教授, 研究方向: 电子商务物流优化; 应急管理, Email: rjh@nwsuaf.edu.cn.