

# 时变路网下带硬时间窗的城市生鲜物流配送路径选择

姜晶, 周骞, 胡轶群

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 综合考虑现实生活中城市道路交通的时变特性和生鲜物流的时效性, 以最小使用车辆数和最少行程时间为优化目标, 构建时变路网下带硬时间窗的生鲜物流配送路径选择模型, 通过随机方法构造初始解, 采用结合 2-opt 局部搜索机制的改进蚁群求解算法进行求解, 并以扩展 Solomon R104 基础算例对模型和算法进行了验证。

**关键词:** 物流; 配送路径; 时变路网; 硬时间窗; 生鲜物流; 蚁群算法

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0065-04

在城市物流配送中, 在现实道路网下, 受交通事故、交通管制、交通流量、道路施工、天气等不确定因素的影响, 车辆行驶过程中速度不断变化, 导致运输成本上下波动。如果只考虑静态道路网, 即假定运输过程中速度不变, 则得到的成本结果可能与实际结果相差甚远。城市物流的配送问题, 根据时间约束的严格与否可分为软时间窗和硬时间窗两种情况。软时间窗要求配送车辆尽可能在时间窗内到达, 否则将给予一定惩罚; 硬时间窗要求必须在时间窗内到达, 否则服务被拒绝。受运输时效性和配送点库场容量限制等的影响, 城市生鲜物流对配送到达的时间要求十分严格。

在时变车辆路径研究方面, 张得志等建立了考虑碳排放成本的配送车辆出发时刻和配送路径联合优化模型; 李嫚嫚等探讨了实际道路网中可获知偶发拥堵持续时间的动态车辆路径问题, 通过车载导航系统实时指导车辆行驶路线; 孙懿提出了考虑车载容量约束、不同类型道路时变不同的动态车辆路径问题; Yiyong Xiao 等提出了以油耗率为运载量时变函数、带容量约束的车辆路径问题。上述研究大都没有充分考虑顾客追求产品质量这一因素, 基本为带软时间窗的动态车辆路径问题。针对城市生鲜物流配送的特点, 该文对时变路网下带硬时间窗的城市生鲜物流配送路径选择进行研究。

## 1 问题描述

在时变路网下, 某城市生鲜物流配送中心向附近城市居民或超市配送生鲜产品, 每个配送点的需

求量及地理位置已知, 受时效性和库场容量限制等的影响, 每个配送点有自己的服务时间窗, 配送车辆不允许晚到, 可以早到但早到需等待; 配送车辆需在配送中心的服务时间窗内完成配送任务并回到配送中心。带硬时间窗的时变路网下城市生鲜物流配送车辆路径选择可描述为在满足各配送点需求及车载容量约束等条件下, 如何合理有效地安排车辆和路线使目标函数达到最优。

假设如下: 1) 城市只有一个配送中心, 配送中心及各配送点的位置坐标已知, 且各配送点的需求量已知; 2) 每个配送点只能由一辆配送车辆服务, 且需求量小于车载容量; 3) 各配送点的配送时间窗已知, 最早服务时间为  $E_i$ , 最晚服务时间为  $L_i$ ; 4) 配送中心有足够多的同类型配送车辆; 5) 配送中心生鲜产品无容量限制, 供给量足够。

## 2 模型构建

### 2.1 数学模型

一般的车辆路径优化目标可从两方面考虑: 从企业角度看, 考虑总成本问题; 从配送客户角度看, 考虑产品质量问题。这里以配送车辆数及配送车辆的行程时间为优化目标。配送车辆数量可直接反映企业成本, 而配送行程时间不仅可反映企业成本, 还能从侧面反映生鲜物流的时效特点, 间接体现产品质量。对配送点来说, 产品质量是指生鲜产品按规定时间接收。综上, 时变环境下带硬时间窗的生鲜物流配送车辆路径选择的数学模型如下:

$$z_1 = \min K \quad (1)$$

$$z_2 = \min JT, JT = \sum_{i \in SD} \sum_{j \in DE} \sum_{k=1}^K (T_{ij}^k x_{ij}^k) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in SD} \sum_{j \in DE} x_{ij}^k = 1, j \in DE \quad (3)$$

$$\sum_{j \in DE} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = 1, i \in SD \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1, i \in D \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in DE} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = \sum_{i \in SD} \sum_{j \in E} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k \quad (6)$$

$$\sum_{i \in D} (q_i y_{ik}) \leq Q_k; k=1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{aligned} \sum_{k=1}^K k(y_{ik} - y_{jk}) &\leq B(1 - \sum_{k=1}^K x_{ij}^k - 1), \\ i \in SD, j \in DE, i \neq j \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K k(y_{ik} - y_{jk}) \geq B(\sum_{k=1}^K x_{ij}^k - 1), \\ i \in SD, j \in DE, i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{i,j \in S} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k \leq |SC| - 1, SC \in D \quad (10)$$

$$t_j = \max(E_i - t_i) + set_i + T_{ij}^k \leq L_j \quad (11)$$

$$t_{re}^k \leq T \quad (12)$$

式中:  $K$  为使用的车辆数量;  $JT$  为行程时间, 即所有车辆的全程总配送时间;  $SD$  为始发节点与需求节点的集合;  $DE$  为需求节点与终到节点的集合;  $T_{ij}^k$  为车辆  $k$  由配送点  $i$  驶向配送点  $j$  的行程时间, 受时变路网的影响; 若车辆  $k$  从配送点  $i$  驶向配送点  $j$ , 则  $x_{ij}^k = 1$ , 否则  $x_{ij}^k = 0$ ; 若车辆  $k$  服务配送点  $i$ , 则  $y_{ik} = 1$ , 否则  $y_{ik} = 0$ ;  $D$  为需求节点集合;  $S$  为始发节点集合;  $E$  为终到节点集合;  $q_i$  为配送点  $i$  的需求量;  $Q_k$  为车辆  $k$  的车载容量;  $B$  为一个无穷大的数; 若车辆  $k$  服务配送点  $j$ , 则  $y_{jk} = 1$ , 否则  $y_{jk} = 0$ ;  $SC$  为配送点集合的任意子集合;  $|SC|$  为集合  $S$  的配送点数量;  $t_i, t_j$  分别为车辆到达配送点  $i, j$  的时刻;  $[E_i, L_i]$  为配送点  $i$  接受服务的时间窗;  $E_i$  为配送点  $i$  的最早服务时间;  $set_i$  为配送点  $i$  需要的服务时间;  $t_{re}^k$  为车辆  $k$  回到配送中心的时刻;  $[0, T]$  为配送中心的服务时间。

式(1)、式(2)为优化目标, 分别表示所用配送车辆数最少、行程时间最短; 式(3)~(5)表示每个配送点只能由一辆车服务, 且只能服务一次; 式(6)为路径约束, 所有配送车辆完成配送任务后必须返回配

送中心, 出发车辆数与返回车辆数相等; 式(7)为车载容量约束; 式(8)、式(9)表示同一线路配送点由同一车辆服务; 式(10)用于消除不包含配送中心的子回路; 式(11)为时间窗约束, 到达某个配送点的时间点不能大于该配送点的最晚时间窗; 式(12)表示配送车辆返回配送中心的时间窗限制。

## 2.2 时变处理

在配送中心向配送点运输配送过程中, 随着时间的推移, 城市道路网的路段阻抗逐渐发生变化, 因而车辆的行驶速度具有时变特性, 各条路段上车辆的行驶时间取决于路段长度及车辆的出发时刻。如图1所示, 采用分段连续函数表示速度的时变特性。

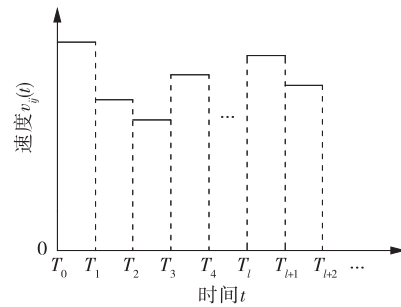


图1 路段时变行程速度

在足够小的时段内, 车辆的行驶速度趋于恒定。假定车辆完成配送任务需经历  $l$  个时段, 即时段 1  $[T_0, T_1]$ , 时段 2  $[T_1, T_2]$ , ..., 时段  $l$   $[T_{l-1}, T_l]$ 。为满足先入先出准则, 采用下式计算车辆在  $(i, j)$  上的行驶时间:

$$T_{ij}(d, t) = \begin{cases} t_{re} + T_{ij}(d - d_{re}, t + t_{re}), & d_{ij} - d_{re} > 0 \\ d/v_{ij}(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $T_{ij}(d, t)$  为车辆从配送点  $i$  出发, 行驶完剩余长度  $d$  所需要的时间, 即时刻  $t$ ;  $t_{re}$  为  $t$  时刻距离下一次速度发生变化的时间长度;  $d_{re}$  为  $t$  时刻开始以当前速度驶完  $t_{re}$  时间长度所能行驶的距离,  $d_{re} = t_{re} v_{ij}(t)$ 。

根据式(13), 如果按照  $t$  时刻的速度继续行驶下去, 直到行驶至下一次速度发生变化的时刻, 若不能到达  $j$  点, 则车辆需跨越到下一个速度来行驶, 则由  $t$  时刻起到达  $j$  点的时间长度为  $t_{re} + T_{ij}(d - d_{re}, t + t_{re})$ 。

## 3 算法设计

车辆路径问题是 Np-hard 问题, 选择亚启发式算法中的蚁群算法进行求解。

### 3.1 初始化

通过随机方法构造初始解,取可行解里的最优解作为蚁群算法的初始解,并设定初始信息素强度 $\tau_0$ 。初始阶段,各条路段信息素相同。

### 3.2 节点选择规则

蚂蚁 $k$ 从当前节点 $i$ 转移到下一个邻域节点 $j$ 的概率 $P_{ij}^k$ 为:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \notin allowed_k \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为 $t$ 次循环时路段 $(i, j)$ 上的信息素强度; $\eta_{ij}(t)$ 为 $t$ 次循环时路段 $(i, j)$ 上的能见度,定义路段 $(i, j)$ 的能见度 $\eta_{ij}(t) = 1/l_{ij}$ ;  $l_{ij}$ 为路段 $(i, j)$ 的长度; $\alpha, \beta$ 为可调整的相对重要性参数; $allowed_k$ 为蚂蚁 $k$ 已经历的节点集合。

蚂蚁在路径选择时按“伪随机比例规则”移动,根据该规则,位于节点 $(i, j)$ 的蚂蚁 $k$ 可按照式(15)选择下一节点 $j$ 。步骤如下:1) 随机生成一个 $[0, 1]$ 间的随机数 $q$ 。2) 若 $q \leq q_0$ ,则选择 $[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta$ 值最大的节点;否则,按照转移概率公式,根据“轮盘赌法”随机选择下个节点。

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax} [\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta, & q \leq q_0 \\ \text{式(14),其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\operatorname{arg}$ 为取反函数; $q$ 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; $q_0$ 为预先给定的参数。

### 3.3 信息素更新

为防止蚂蚁搜索过早结束,导致结果不是全局最优解,采取最大最小蚂蚁系统(MMAS)信息素更新策略:将路段 $(i, j)$ 上的信息素强度控制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ,初始信息素强度 $\tau_0 = \tau_{\max}$ ,只有行程时间最小的蚂蚁才允许释放信息素,信息素更新规则见式(16)、式(17)。 $\tau_{\max}, \tau_{\min}$ 由式(18)定义。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t, t+1) \quad (16)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1/U, & (i, j) \text{ 为全局最优路径} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\rho$ 为信息素挥发常数, $0 < \rho < 1$ ,  $1-\rho$ 为信息素的持续性; $U$ 为全局最优可行解对应的行程时间。

$$\tau_{\max} = \frac{1}{U}, \tau_{\min} = \frac{\tau_{\max}(1-\sqrt[n]{P_{\text{best}}})}{(n/2-1)\sqrt[n]{P_{\text{best}}}} \quad (18)$$

式中: $n$ 为配送点数; $P_{\text{best}}$ 为选择最优解的概率,其值为0.05。

### 3.4 局部优化

在所有蚂蚁走完一次全程后,在信息素还未更

新之前,在算法中混入2-opt局部优化算法,加快蚁群算法的收敛速度。步骤如下:将边 $(i, i+1)$ 、 $(j, j+1)$ 删除,用边 $(i, j)$ 、 $(i+1, j+1)$ 代替,并将 $i+1$ 与 $j$ 之间的配送点序号颠倒,与前面的边结合形成新的路径。如果更换后新路径的行程时间变短,则保留该路径;否则继续尝试,直到尝试了所有变换方式且无法缩短行程时间,退出算法。

## 4 算例分析

### 4.1 算例构造

在传统车辆路径问题研究中,通常采用Solomon设计的基准算例进行分析。考虑到目前对于时变路网下的车辆路径问题还没有标准的基准算例,以Solomon R104算例为基础进行扩展,构造包含25个配送节点的新算例。根据道路交通的时变特性,将每天的时间分为早高峰(7:30—9:30)、晚高峰(16:30—19:00)及正常行驶时段(早晚高峰外的其他时间)3个时段。考虑到不同时段、不同类型道路的速度时变不同,建立基于行程车速的时间依赖函数(见表1)。

表1 基于行程车速的时间依赖函数

道路类型	各时段的车速/(km·h <sup>-1</sup> )		
	时段1	时段2	时段3
城市快速路(1)	50	80	50
主干路(2)	40	60	40
次干路(3)	30	40	30
支路(4)	20	30	20

设配送中心的工作时间窗为(9:00—17:00),可使用的车辆为25辆,车载容量为200,各配送点的时间窗、位置坐标、需求量及服务时间见表2。

表2 客户信息

配送点	坐标 X	坐标 Y	需求量	时间窗	服务时间/h
0	40	40	0	9:00—17:00	0.00
1	10	35	2	13:00—13:30	0.35
2	30	35	3	9:00—9:40	0.35
3	70	40	3	12:00—12:50	0.35
4	25	55	5	11:30—12:20	0.35
5	70	25	6	13:00—13:30	0.35
6	40	22	7	11:00—11:30	0.35
7	35	10	8	10:30—11:30	0.35
8	15	48	9	12:00—13:00	0.35

续表 2

配送点	坐标 X	坐标 Y	需求量	时间窗	服务时间/h
9	50	70	9	10:20—11:00	0.35
10	46	54	10	9:00—10:00	0.35
11	50	25	11	12:30—13:30	0.35
12	25	70	12	10:30—11:10	0.35
13	25	45	12	16:00—16:30	0.35
14	60	50	13	11:30—12:30	0.35
15	60	65	16	11:00—11:40	0.35
16	35	65	16	10:00—13:30	0.35
17	20	65	17	11:00—12:00	0.35
18	50	15	18	12:00—12:40	0.35
19	60	25	19	14:30—15:30	0.35
20	55	40	19	15:00—16:00	0.35
21	15	25	19	13:30—14:00	0.35
22	20	15	20	14:30—15:30	0.35
23	35	30	23	9:30—10:20	0.35
24	20	35	26	15:20—16:20	0.35
25	60	10	29	13:30—14:20	0.35

注:配送点 0 为配送中心。

两配送点之间的道路类型由式(19)判定,路段起止节点编号之和除以 5 所得余数就是道路类型。

$$Grade(i, j) = Mod(i + j, 4) \quad (19)$$

式中:  $Grade(i, j)$  为路段  $(i, j)$  的道路类型;  $Mod(i + j, 4)$  表示  $(i + j) / 4$  的余数。

#### 4.2 参数设定及结果分析

蚁群算法的参数如下:蚂蚁数  $m = 10$ ;信息挥发常数  $\rho = 0.4$ ;信息素强度  $\tau = 10$ ;随机数  $q_0 = 0.3$ ;相对重要性参数  $\alpha = 2, \beta = 10$ 。算法采用 MATLAB 编程实现。计算结果显示:使用车辆数为 3 辆,最少行程时间为 8.73 h,每辆车的配送路径见表 3。

表 3 车辆配送路径

车辆编号	配送路径
1	0—16—12—17—4—8—1—21—22—24—13—0
2	0—2—23—7—6—18—11—0
3	0—10—9—15—14—3—5—25—19—20—0

## 5 结语

该文考虑顾客对生鲜农产品追求时效性及城市

道路的时变特性建立时变路网环境下带硬时间窗的城市生鲜物流配送路径优化模型,并为模型求解设计了结合 2-opt 的改进蚁群算法,同时对 Solomon R104 算例进行扩展设计新的算例,算例结果表明该模型具有适用性、算法具有有效性。但由于现实路网的影响因素众多,时变性十分复杂,且城市配送中还存在多车型、多配送中心、大规模配送节点、配送中心容量限制、出发时刻优化等多种情况,还需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 张得志,龚浩翔,李双艳,等.在时变速度下的车辆出行时刻和路径联合优化[J].铁道科学与工程学报,2017,14(3).
- [2] 蔡延光,汤雅连,蔡颢.时变路网条件下车辆路径问题的自适应蚁群算法[J].计算机应用研究,2015,32(8).
- [3] 李慢慢,陆建,郭文倩.可获知偶发拥堵持续时间的动态车辆路径问题[J].交通信息与安全,2018,36(2).
- [4] 葛显龙,张慧.城市实时交通路网车辆路径优化问题研究[J].工业工程与管理,2018,23(3).
- [5] 吴瑶,马祖军.时变路网下带时间窗的易腐食品生产—配送问题[J].系统工程理论与实践,2017,37(1).
- [6] 李妍峰,高自友,李军.基于实时交通信息的城市动态网络车辆路径优化问题[J].系统工程理论与实践,2013,33(7).
- [7] 孙懿.混合算法求解时变路网中车辆调度规划问题[D].上海:上海交通大学,2014.
- [8] 曹莉艳.多目标动态冷链物流配送路径优化研究[D].济南:济南大学,2016.
- [9] 张煜璐.考虑碳排放的时变路网多车型城市配送路径优化研究[D].杭州:浙江工商大学,2017.
- [10] 李亚南.基于车联网的冷链物流配送路径优化研究[D].西安:长安大学,2016.
- [11] Yiyong Xiao, Qihong Zhao, Ikou Kaku, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2012, 39(7).
- [12] 段征宇.基于动态交通信息的车辆路径优化[M].上海:同济大学出版社,2015.
- [13] 钟志新,薛茂炎,黄武国.灾害情况下应急运输路径选择问题研究[J].公路与汽运,2010(4).
- [14] 段征宇,杨东援,王上.时间依赖型车辆路径问题的一种改进蚁群算法[J].控制理论与应用,2010,27(11).
- [15] 孔阳,陈珊.层次分析法在生鲜物流配送路径选择中的应用[J].中国市场,2015(33).

收稿日期:2018-10-11