

带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题研究*

刘志硕, 李秋雨, 陈哲

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要:【目的】针对电动汽车应用于冷链物流配送的情形,充分考虑电动汽车能耗特点和社会充电桩的充电需求,研究了带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题。【方法】首先构建以配送总成本最少为优化目标的规划模型;然后基于蚁群算法,设计了充电站优化算法和局部优化策略,形成混合蚁群算法求解问题;最后,改编形成硬时间窗冷链电动车辆路径问题的算例集,通过实验比较验证了蚁群算法和混合算法的性能。【结果】搜索解的改进率达到11.82%。【结论】带局部优化策略的混合蚁群算法能较大程度改进求解能力,算法性能总体得到大幅提升,且结果更稳定。

关键词: 冷链物流; 电动汽车; 车辆路径问题; 蚁群算法

中图分类号: O223

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2023)01-0053-08

冷链物流路径优化问题是车辆路径问题在冷链物流领域的延伸。由于所载货物的特殊性,车辆从配送中心出发后,需要一直维持车厢的温度,直至送完该趟的最后一个客户。相对一般货物,冷链物流显然会对环境和能源产生更大影响。将电动汽车应用于冷链物流,可在一定程度上改善环境污染和能源消耗。

对冷链物流路径优化问题的研究主要集中在一般冷链物流路径优化问题^[1]、多种温度共同配送的冷链物流路径优化问题^[2]及面向低碳的冷链物流路径优化问题^[3]等方向。电动汽车路径优化问题最早的研究者为Conrad^[4],研究角度涵盖了混合车队、充电形式、充电策略、时间窗类型、充电站选址等。Schneider等人^[5]针对带软时间窗的电动汽车路径问题,考虑了充电站的因素,构建了以总出行距离最短为优化目标的数学模型。Goeke等人^[6]提出了传统汽车和电动汽车的混合车队下的车辆路径问题。Verma等人^[7]结合充电站充电和交换站更换电池两种方式构建了电动汽车配送路径优化模型。郭放等人^[8]提出了考虑货物分类配送的电动汽车路径优化问题。

尽管在冷链物流行业已经有一些企业采用电动汽车开展生鲜食品的末端配送,但尚没有文献考虑将电动汽车应用于冷链物流配送优化。本文将电动汽车与冷链物流配送相结合,考虑电动汽车能耗特点、社会充电桩的充电需求、客户的时间窗要求,提出了带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题,建立了以配送总成本最少为优化目标的数学模型,并设计了一种混合蚁群算法进行求解。

1 模型建立

带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题描述如下。

一个生鲜配送中心派出同质的电动冷藏汽车向多个客户配送同一温区的生鲜商品;配送中心和所有客户的时间窗定义为硬时间窗,即配送中心只在时间窗内运营,车辆只能在该时间段内出发或者返回,给客户配送商品不允许车辆迟到,但允许车辆提前到达,提前到达时车辆需要等待;各客户的需求量已知,且不超过车辆的最大容量;每个客户只允许由1辆车配送1次;车辆只跑1趟,车辆从配送中心出发时完全处于满电状态。车辆容量固定,续航里程有限,中途可能需要采用社会公共充电站充电,可充多次,但同一个车辆访问同一个充电站最多1次。充电速度恒定,且一次充满。假设车辆维持行驶状态的电能消耗速度与行驶里程成正比,制冷所消耗的电能与制冷时间成正比,当车厢为空时,不需要制冷。要求制定最优的配送方案以使得配送总成本最低。模型的相关参数见表1,决策变量见表2。

* 收稿日期:2021-09-11 修回日期:2022-12-04 网络出版时间:2023-02-22 17:02

资助项目:国家重点研发计划(No. 2017YFB1400100)

第一作者简介:刘志硕,男,副教授,博士,研究方向为智能运输与物流,E-mail:zhslu@bjtu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230222.1410.026.html

以配送总成本最小为目标函数,包含固定成本 Z_1 和可变成本,其中可变成本为运输成本 Z_2 、制冷成本 Z_3 和等待成本 Z_4 。固定成本是企业维持整个配送工作运行投入的资金,用 $Z_1 = a \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{0ik}$; 表示由于采用电动冷链车进行配送,维持车辆动力所消耗的电能构成配送过程中的运输成本,表示为: $Z_2 = bh \sum_{k \in K} \sum_{i \in V'_{N+1}, i \neq j} \sum_{j \in V'_{N+1}, i \neq j} x_{ijk} d_{ij}$; 为保证商品的质量,需提供对应的低温环境产生的制冷费用,表示为: $Z_3 = bl \sum_{i \in V} s_i + bl \sum_{k \in K} \sum_{i \in F} s_i^k - (bl/v_1) \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{i,n+1,k} d_{i,n+1}$ 。

表 1 参数设置

Tab. 1 Parameter setting

符号	描述	单位	符号	描述	单位
$0, N+1$	配送中心		g	充电功率	kW
V	客户集合		v_2	卸货速度	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
K	配送车辆集合		e_i, l_i	节点 i 最早/晚接受服务时间	
F	充电站集合		q_i	客户 i 的需求量	kg
I	$F \cup \{0\}$		d_{ij}	节点 i, j 间距离	km
V'	$V \cup F$		a	车辆固定成本	元 \cdot 辆 $^{-1}$
V'_0	$V' \cup \{0\}$		b	单位电量成本	元 \cdot (kW \cdot h) $^{-1}$
V'_{N+1}	$V' \cup \{N+1\}$		h	提供车辆动力单位里程消耗电能	kW \cdot h \cdot km $^{-1}$
$V'_{0,N+1}$	$V' \cup \{0\} \cup \{N+1\}$		l	制冷功率	kW
C	配送车辆载质量	kg	t_{ij}	车辆从 i 到 j 的行驶时间, $t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_1}$	h
Q	电池最大容量	kW \cdot h	s_i	客户 i 的服务时间, $s_i = \frac{q_i}{v_2}$	h
v_1	车辆行驶速度	km \cdot h $^{-1}$			

表 2 决策变量

Tab. 2 Decision variables

符号	描述	单位
x_{ijk}	车辆 k 从节点 i 到节点 j 取 1, 否则取 0	
o_{ki}	车辆 k 是否在充电站 i 充电, 是取 1, 否则取 0	
t_i	到达节点 i 的时刻	
t_{wi}^k	车辆 k 提前到达节点 i 的等待时间, $t_{wi}^k = \max\{0, (e_i - t_i)\}$	h
t_i^k	车辆 k 在节点 i 开始接受服务的时刻	
u_i^k	车辆 k 到达节点 i 时的装载量	kg
y_i^k	车辆 k 到达节点 i 的剩余电量	kW \cdot h
Q_i^k	车辆 k 在充电站的充电量	kW \cdot h
s_i^k	车辆 k 在充电站的充电时间, $s_i^k = \frac{Q_i^k}{g}$	h

车辆在客户最早接受服务时间之前到达客户,在客户处等待时车厢一直处于制冷状态,期间产生的制冷成本,表示为: $Z_4 = bl \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} t_{wi}^k$ 。

因此,建立如下数学规划模型。

目标函数:

$$Z = \sum_i Z_i,$$

约束条件:

$$\sum_{i \in V'_0} x_{i\omega k} = \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{\omega j k}, \forall \omega \in V', \forall k \in K, i \neq j, \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{0ik} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{j, n+1, k} = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V'_0} x_{ijk} = 1, \forall j \in V, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ijk} q_i \leq C, \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in F} o_{ki} \geq 0, \forall k \in K, \quad (5)$$

$$Q_i^k = o_{ki}(Q - y^k), \forall i \in F, \forall k \in K, \quad (6)$$

$$t_j \geq \sum_{k \in K} \sum_{i \in V'_0, i \neq j} x_{ijk} [t_i + t_{ij} + (1 - o_{ki})(s_i + t_{wi}^k) + o_{ki}s_i^k], \forall j \in V, \quad (7)$$

$$0 \leq u_j^k \leq u_i^k - q_i x_{ijk} + C(1 - x_{ijk}), \forall i \in V'_0, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K, i \neq j, \quad (8)$$

$$0 \leq u_0^k \leq C, \forall k \in K, \quad (9)$$

$$t_i^k + (t_{ij} + s_j + t_{wi}^k)x_{ijk} + l_0(1 - x_{ijk}) \leq t_j^k, \forall i \in V_0, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K, i \neq j, \quad (10)$$

$$t_i^k + (t_{ij} + s_j + t_{wi}^k)x_{ijk} + l_0(1 - x_{ijk}) \leq t_j^k, \forall i \in F, \forall j \in V'_{N+1}, \forall k \in K, i \neq j, \quad (11)$$

$$t_i^k + t_{ij} + (1 - o_{ki})s_i + o_{ki}s_i^k \leq l_j, \forall i \in V', \forall j \in \{n+1\}, \forall k \in K, \quad (12)$$

$$e_i \leq t_i^k \leq l_i, \forall i \in V'_{0, N+1}, \forall k \in K, \quad (13)$$

$$0 \leq y_j^k \leq y_i^k - [hd_{ij} + (t_{wi}^k + s_i + t_{ij})l]x_{ijk} + Q(1 - x_{ijk}), \forall i \in V, \forall j \in V', \forall k \in K, i \neq j, \quad (14)$$

$$0 \leq y_j^k \leq y_i^k - [hd_{ij} + (s_i + t_{ij})l]x_{ijk} + Q(1 - x_{ijk}), \forall i \in V, \forall j \in V', \forall k \in K, i \neq j, \quad (15)$$

$$0 \leq y_j^k \leq Q - (hd_{ij} + lt_{ij})x_{ijk}, \forall i \in I, \forall j \in V, \forall k \in K, i \neq j, \quad (16)$$

$$0 \leq y_j^k \leq Q - (hd_{ij})x_{ijk}, \forall i \in F, \forall j \in \{n+1\}, \forall k \in K, i \neq j, \quad (17)$$

$$o_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{若 } \sum_{j \in V'_{N+1}} x_{ijk} = 1, i \in F, k \in K \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \quad (18)$$

其中:(1)、(2)式表示车辆给客户配送后必须离开;(2)式表示车辆从配送中心出发,最后再返回配送中心;(3)式表示每个客户只允许访问 1 次;(4)式表示车辆容量约束;(5)式表示每辆车在配送过程中允许多次充电;(6)式表示车辆在充电站的充电量;(7)式表示车辆到达节点的时刻;(8)式表示车辆到达任意节点的装载量为非负值;(9)式表示车辆在开始配送任务之前的装载量不超过车辆的最大容量;(10)、(11)式分别表示客户 i 与其他节点 j 、充电站 i 与其他节点 j 的时间关系;(12)式表示客户或充电站与配送中心的时间关系;(13)式表示配送点及配送中心满足的时间窗要求;(14)~(16)式表示车辆从某个节点出发并访问客户后有足够电量到达其他节点;(17)式表示车辆在充电站充完电后有足够电量回到配送中心;(18)式为车辆充电决策变量。

2 混合蚁群算法设计

上述数学模型是一个 0-1 整数规划模型。车辆路径问题是一个典型的 NP-难问题,当节点规模很小时,可以采用分支定界法、列生成法等精确方法求解;当节点规模较大时,解空间呈指数级增长,须采用近似方法、元启发式方法求解。目前求解车辆路径问题性能较好的元启发式算法主要有蚁群算法^[9-10]、模拟退火算法^[11]、遗传算法^[12]、禁忌搜索算法^[13]、粒子群算法^[14]、大规模邻域搜索算法^[15]等。本文针对带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题的特点,设计一种混合蚁群算法求解。

2.1 转移规则

蚁群算法转移规则设计如下:

$$\xi_{ij} = [\eta_{ij}]^\alpha [\tau_{ij}]^\beta [\mu_{ij}]^\gamma, P_{ij} = \xi_{ij} / \sum_{h \in A_k^w} \xi_{ih}, j \in A_k^w.$$

其中: ξ_{ij} 表示节点 j 对节点 i 的吸引值, τ_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的信息素浓度, μ_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的 C-W 节约值, η_{ij} 表示节点 i 到节点 j 距离的倒数, α, β, γ 为相关系数。 A_k^w 为备选节点 j 的集合, P_{ij} 表示从节点 i 转移至集合 A_k^w 中节点 j 的概率。

此外,为了提高搜索效率,缩小蚂蚁转移时的范围,减少无用的转移搜索,对 A_k^w 里面的候选点数量进行限制,即 Bell 提出的小窗口策略^[10],具体地,将 A_k^w 里面的候选点数量上限设置为客户总量的 $1/n$, n 一般可取值 2、3、4。

2.2 路径构造过程

节点分为配送中心、客户、充电站等 3 种类型,对类型的节点 i ,可以选择转移的节点 j 的类型不尽相同。

2.2.1 当蚂蚁位于配送中心 将尚未配送并且同时满足容量约束、电能约束、时间窗约束的客户,放入可行集合 A_k^w 。其中:时间窗约束为 $[e_0 + t_{0j}, l_0 + t_{0j}] \cap [e_j, l_j] \neq \emptyset$, 或者 $l_0 + t_{0j} < e_j$, 即蚂蚁在 $[e_0, l_0]$ 时段内的某时刻从配送中心出发,到达客户 j 的时刻小于 l_j 。

电能约束为:

$$(t_{0j} + s_j + t_{wj}^k)l + d_{0j}h + \min\{d_{j,N+1}h, d_{jf^*}h + t_{jf^*}l\} \leq Q,$$

即蚂蚁去了 j 点后,有足够的电量返回配送中心 $N+1$,或到达离 j 点最近的充电站 f^* 。其中 t_{wj}^k 指蚂蚁 k 在客户 j 点的等待时长,有:

$$t_{wj}^k = \begin{cases} e_j - l_0 - t_{0j}, & \text{若 } l_0 + t_{0j} < e_j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}.$$

然后使用转移规则,计算 A_k^w 中各个节点的概率 P_{ij} ,并按概率从中随机选择一个节点 j 。离开 j 点时的剩余电量为:

$$y_j^k = y_i^k - (t_{0j} + s_j + t_{wj}^k)l - d_{0j}h.$$

用 E_j, L_j 分别表示蚂蚁 k 实际到达 j 点的最早和最晚时刻,则蚂蚁 k 实际到达 j 点的时间区间为:

$$[E_j, L_j] = \begin{cases} [\max\{e_0 + t_{0j}, e_j\}, \min\{l_0 + t_{0j}, l_j\}], & \text{若 } [e_0 + t_{0j}, l_0 + t_{0j}] \cap [e_j, l_j] \neq \emptyset \\ [e_i, e_j], & \text{若 } l_0 + t_{0j} < e_j \end{cases}.$$

2.2.2 当蚂蚁位于客户点 根据容量约束、电能约束和时间窗约束的不同情形,蚂蚁可以选择去下一个客户、充电站或者配送中心。

时间窗约束为:

$$[E_i + s_i + t_{ij}, L_i + s_i + t_{ij}] \cap [e_j, l_j] \neq \emptyset.$$

电能约束为:

$$y_i^k \geq (t_{ij} + s_j + t_{wj}^k)l + d_{ij}h + \min\{d_{j,N+1}h, d_{jf^*}h + t_{jf^*}l\},$$

其中:

$$t_{wj}^k = \begin{cases} e_j - (L_i + s_i + t_{ij}), & \text{若 } l_0 + t_{0j} < e_j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}.$$

1) 如果有可行的客户,则按转移规则转移到下一个客户 j 或者返回配送中心 $N+1$ 。若选择转移至客户 j , 则 $y_j^k = y_i^k - (t_{ij} + s_j + t_{wj}^k)l - d_{ij}h$, 到达 j 点的时间区间为:

$$[E_j, L_j] = \begin{cases} [\max\{E_i + s_i + t_{ij}, e_j\}, \min\{L_i + s_i + t_{ij}, l_j\}], & \text{若 } [E_i + s_i + t_{ij}, L_i + s_i + t_{ij}] \cap [e_j, l_j] \neq \emptyset \\ [e_i, e_j], & \text{若 } L_i + s_i + t_{ij} < e_j \end{cases}.$$

若选择返回配送中心,车厢中的货物应全部配送完,不再需要制冷。如果还有客户未配送,则将蚂蚁 k 移至节点 0,再模拟另一台车辆,重新出发配送。

2) 如果若存在客户 j 满足上述容量约束和时间窗约束,但不满足电能约束,且 $y_i^k \geq d_{jf^*}h + t_{jf^*}l$, 则将蚂蚁直接转移到离 i 点最近的充电站 f^* , 充电直至充满。充电时长为:

$$s_{f^*}^k = [Q - (y_i^k - t_{if^*}l - d_{if^*}h)]/g,$$

到达 f^* 的时间区间为:

$$[E_{f^*}, L_{f^*}] = [E_i + s_i + t_{ij}, L_i + s_i + t_{ij}]。$$

3) 若上述两种情形均不能满足,则蚂蚁返回配送中心。

2.2.3 当蚂蚁位于充电站 蚂蚁可以选择去下一个客户或者配送中心。

时间窗约束:

$$[E_i + s_i + t_{ij}, L_i + s_i + t_{ij}] \cap [e_j, l_j] \neq \emptyset。$$

电能约束:

$$(t_{ij} + s_j + t_{wj}^k)l + d_{ij}h + \min\{d_{j,N+1}h, d_{if^*}h + t_{jf^*}l\} \leq Q。$$

如果没有可行的客户,则必须返回配送中心。否则按转移规则转移到下一个客户 j 或者返回配送中心。若选择转移至客户 j ,与上述情形 1)一样更新剩余电量及到达 j 点的时间区间。

2.3 充电站局部优化

由于蚂蚁在选择充电站时遵循就近原则,因此,可能会导致充电完成后,访问下一个客户(或返回配送中心)时行驶了更远的距离,如图 1 所示。

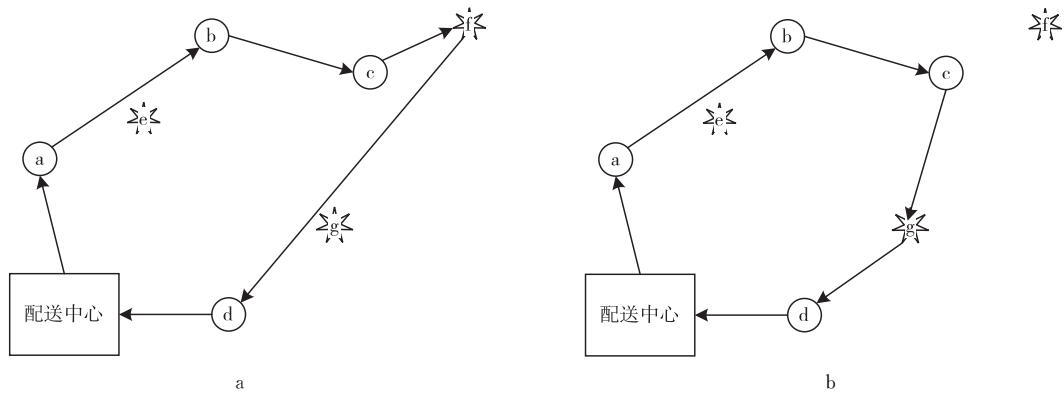


图 1 访问路线
Fig.1 Route

图 1a 表示蚂蚁在访问了客户 c 后,到最近的充电站 f 充电,充电完成后,再访问客户 d。

然而,如果蚂蚁访问客户 c 后,有足够的电量到达充电站 g,那么,显然,路线 $c \rightarrow g \rightarrow d$ 比路线 $c \rightarrow f \rightarrow d$ 更短,由此可能节约成本。如果蚂蚁到达客户 d 时满足时间窗约束并且成本更低,剩余电量更大,则调整蚂蚁的行走路线。

命题 1 已知路线段 $i \rightarrow f \rightarrow j, i, j \in V, f \in F$ 。如果充电站 $f' \in F$,且 $d_{if'} + d_{f'j} > d_{if} + d_{fj}$,那么 $c_{ifj} < c_{if'j}$ 。 c_{ifj} 指离开 i ,经过充电站 f 后,到达 j 这一时段所发生的成本。

证明 $\Delta d = (d_{if'} + d_{f'j}) - (d_{if} + d_{fj})$ 为两条路距离差,显然 $\Delta d > 0$; Δt 表示两条路线从离开客户 i 到开始给客户 j 提供服务这段时间的差值,有 $c_{ifj} - c_{if'j} = hb\Delta d + lb\Delta t$ 。

1) 当车辆到达 j 客户均需要等待时, $\Delta t = 0$,因此, $c_{ifj} < c_{if'j}$ 。

2) 当车辆到达 j 客户均不需要等待时, $\Delta t = (t_{if'} + s_{f'} + t_{f'j}) - (t_{if} + s_f + t_{fj})$ 。由 $d_{if'} + d_{f'j} > d_{if} + d_{fj}$,可得 $(t_{if'} + t_{f'j}) - (t_{if} + t_{fj}) > 0$;其次,再由 $s_{f'} = [Q - (y_i^k - t_{if'}l - d_{if'}h)]/g, s_f = [Q - (y_i^k - t_{if}l - d_{if}h)]/g$,有 $s_{f'} - s_f = [lh(d_{if'} - d_{if})]/v_1g > 0$ 。综上可知 $\Delta t > 0$,从而可得 $c_{ifj} < c_{if'j}$ 。

3) 当车辆经过 f 到达客户 j 需要等待,而经过 f' 到达客户 j 不需要等待时, $\Delta t \geq 0$,因此, $c_{ifj} < c_{if'j}$ 。在 $d_{if'} + d_{f'j} > d_{if} + d_{fj}$ 的情形下,成本不可能节约。因此,仅考虑 $d_{if'} + d_{f'j} \leq d_{if} + d_{fj}$ 的情形。证毕

命题 2 已知路线 $i \rightarrow f \rightarrow j, i, j \in V, f \in F$ 。如果存在充电站 $f' \in F$,使得 $d_{if'} + d_{f'j} < d_{if} + d_{fj}$,那么除 $t_{wj} = 0, t'_{wj} \neq 0$ 情形外,蚂蚁经充电站 f' 离开客户 j 时的剩余电量 $y_j^{(f')} > y_j^{(f)}$ 。

证明 由 f 是离客户 i 最近的充电站可知: $d_{if'} \geq d_{if}$,故 $d_{fj} \geq d_{f'j}$ 。

由 $y_j^{(f')} = Q - d_{f'j}[1 + (h/v_1)] - (s_j + t'_{wj})h, y_j^{(f)} = Q - d_{fj}[1 + (h/v_1)] - (s_j + t_{wj})h$,可得:

$$y_j^{(f')} - y_j^{(f)} = [1 + (h/v_1)](d_{fj} - d_{f'j}) - (t'_{wj} - t_{wj})h。$$

1) 当车辆到达客户 j 均不需要等待时, $t_{wj} = t'_{wj} = 0$,有 $y_j^{(f')} - y_j^{(f)} > 0$ 。

2) 当 $t_{wj} \neq 0, t'_{wj} = 0$, 有 $y_j^{(f')} - y_j^{(f)} > 0$ 。

3) 当车辆到达客户 j 均需要等待时, $t_{wj} \neq 0, t'_{wj} \neq 0$ 。设车辆在充电站充满电后离开的时刻为 $t_{f'}, t_f$, 由于 $d_{if'} > d_{if}, s_{f'} > s_f$, 显然 $t_{f'} > t_f$, 因此有 $(d_{f'j}/v_1) + s_j + t'_{wj} < (d_{fj}/v_1) + s_j + t_{wj}$, 故 $y_j^{(f')} - y_j^{(f)} > 0$ 。

4) 当 $t_{wj} = 0, t'_{wj} \neq 0$, 二者大小关系不确定。

证毕

这就意味着, 充电站局部优化后, 可以节约更多的成本, 从而使车辆保有更多的电量以访问更多潜在客户。

2.4 信息素更新策略

本文采用蚁群算法信息素全局更新策略, 即在所有节点间设定初始信息素浓度, 当蚂蚁构造好一个完整的路径后, 需要对路径中的信息素进行更新。具体地, 仅对每次迭代的若干个最好解以及迄今为止的最好解施放信息素。

2.5 局部优化策略

本文的局部优化策略采用 Lim 和 Balseiro 中的局部优化操作^[16-17], 分为单路径 (Sing-route) 和多路径 (Multi-route) 两类算子, 其中单路径算子包括交换 I (Exchange I)、2-opt 两种算子, 多路径算子包括重定位 (Relocate)、交换 II (Exchange II) 两种算子, 受篇幅限制, 不再赘述。

3 数学实验与分析

本文针对带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题的特点, 对 Goeke^[6]的算例加以改造, 制作出这一问题的算例集。操作系统为 CPU:3.4 GHz、内存:16 G、Dev-C++ 编程软件。算例中节点的规模均为 100 个客户节点、20 个充电站。算法相关参数设置如表 2 所示。

表 2 问题及算法相关参数

Tab. 2 The related parameters of ant colony algorithm

参数	描述	取值	参数	描述	取值
m_Antnum	蚂蚁数量	50	r_p	轮盘赌参数	0.1
m_Maxiter	迭代次数	200	θ_1	因子得分增量	20
ρ	信息素耗散率	0.05	θ_2	因子得分增量	20
α	转移概率系数	3	θ_3	因子得分增量	20
β	转移概率系数	2	T	初始温度/°C	100
γ	转移概率系数	3	H	冷却率	0.999
δ	转移概率系数	3			

车辆的相关性能参数为 $a=200, b=0.5, v_1=60, v_2=100, h=1, l=5$ 。将局部优化策略与蚁群算法组合, 形成混合蚁群算法。针对每个算法和算例, 运行 10 次, 记录每次运行得到的目标值以及程序的运行时间。实验结果见表 3。其中, Z^* 表示算法运行 10 次所搜索到的最好解, s 为标准差, t 表示程序运行时间, ΔZ 表示混合蚁群算法相较于蚁群算法对目标的改进率。

从表 3 中可以看出, 在解决大规模算例时, 混合蚁群算法的目标值相对蚁群算法均有较好的改进效果, 平均改进率达 11.82%, 特别是在 R 和 RC 类算例中, 混合蚁群算法的优化性能明显优于蚁群算法。

运行时间方面, 蚁群算法的平均用时 168.47 s, 混合蚁群算法的平均用时 199.15 s, 由于混合蚁群算法是对蚁群算法产生的可行解进行改进, 在算例中构造可行的邻域解时花费了较长的时间, 因此混合蚁群算法的平均运行时间要高于蚁群算法的程序平均运行时间。

4 结束语

本文研究了带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题的优化模型, 重新设计了蚁群算法的转移规则, 以及充电站优化和局部优化策略, 并设计大规模算例开展实验, 验证了所设计算法的有效性和优化效果。实验结果表明, 与优化策略混合后, 所有算例的最好解均不同程度优于蚁群算法, 算法性能总体得到大幅提升, 对实际的电动冷

链车辆的配送路径优化有一定的参考价值。但是现实中的需求复杂多变,比如多配送中心、多车型、车辆带隔舱等,在本文研究的基础上,有必要针对这些场景做进一步研究。

表 3 大规模算例实验数据

Tab.3 Experimental results

算例	蚁群算法				混合蚁群算法				$\Delta Z/\%$
	Z^*	Avg(Z)	s	t/s	Z^*	Avg(Z)	s	t/s	
c101	3 191.80	3 357.08	78.63	151.79	2 866.51	3 101.69	161.04	152.96	10.19
c102	3 115.61	3 136.32	18.48	198.74	2 868.00	2 874.68	116.06	184.10	7.95
c103	2 840.88	2 874.12	22.07	184.44	2 514.95	2 609.13	111.45	152.82	11.47
c104	2 688.74	2 741.38	41.64	150.33	2 497.64	2 525.43	112.70	117.13	7.11
c105	3 044.92	3 075.85	25.60	166.25	2 830.42	2 847.33	122.86	144.05	7.04
c201	1 347.95	1 355.69	6.10	186.30	1 217.54	1 226.62	116.08	662.18	9.67
c202	1 418.54	1 454.07	17.87	151.08	1 239.90	1 303.17	97.60	396.58	12.59
c203	1 180.22	1 249.32	78.20	153.11	1 025.34	1 133.35	57.12	218.76	13.12
c204	1 176.72	1 219.73	64.23	171.12	1 116.78	1 197.16	61.48	266.90	5.09
c205	1 196.98	1 293.74	42.69	177.03	1 021.46	1 198.45	34.84	273.73	14.66
r101	7 682.61	7 871.30	88.78	178.78	6 050.78	6 136.39	76.73	124.98	21.24
r102	8 340.39	8 425.03	108.45	157.05	5 130.29	5 316.42	62.33	146.37	38.49
r103	6 056.73	6 360.68	149.35	163.29	4 866.25	5 175.34	126.77	118.05	19.66
r201	2 157.56	2 197.51	62.65	186.08	2 007.87	2 123.40	45.86	133.22	6.94
r202	1 923.99	2 090.64	83.96	175.18	1 773.13	1 946.15	59.86	148.25	7.84
r203	1 818.50	1 836.15	10.15	175.45	1 732.36	1 770.37	9.41	154.62	4.74
r204	1 273.14	1 391.33	111.31	179.46	1 194.61	1 292.94	77.60	221.26	6.17
r205	1 800.49	1 818.79	10.80	168.69	1 677.88	1 699.28	10.22	161.59	6.81
rc101	9 262.97	9 359.47	112.74	146.86	7 424.50	7 595.99	98.39	128.88	19.85
rc102	8 131.93	8 464.77	186.35	155.02	6 524.51	6 859.07	102.57	210.97	19.77
rc103	7 380.48	7 522.32	112.79	173.09	5 537.70	5 653.87	76.04	184.84	24.97
rc201	3 187.45	3 338.13	112.18	169.85	3 011.73	3 308.73	87.59	168.14	5.51
rc202	3 127.15	3 177.28	41.69	161.82	2 946.58	2 947.49	29.05	104.27	5.77
rc203	2 580.51	2 716.88	108.54	167.09	2 410.74	2 420.74	17.30	114.94	6.58
rc204	2 032.59	2 125.10	104.52	165.13	1 916.37	1 996.37	13.45	314.33	5.72
rc205	2 836.35	2 857.78	14.49	167.12	2 598.48	2 599.45	9.21	174.02	8.39
平均目标值			69.78	168.47			46.29	199.15	11.82

参考文献:

- [1] OSVALD A, STRIN L Z. A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 285-295.
- [2] 戴夏静, 梁承姬. 带时间窗的蓄冷式多温共配冷链配送问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(5): 23-30.
DAI X J, LIANG C J. Research on the distribution problem of cold storage type multi-temperature co-matching cold chain with time window[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2017, 34(5): 23-30.
- [3] HAASS R, DITTMER P, VEIGT M, et al. Reducing food losses and carbon emission by using autonomous control: a simulation study of the intelligent container[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 400-408.
- [4] CONRAD R G, FIGLIOZZI M A. The recharging vehicle routing problem[C]//DOOLEN T, Van AKEN E. Proceedings of the

- Industrial Engineering Research Conference, 2011, Reno, USA, 2011:1-8.
- [5] SCHNEIDER M, STENGER A, GOEKE D. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations[J]. *Transportation Science*, 2014, 48(4):500-520.
- [6] GOEKE D, SCHNEIDER M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1):81-99.
- [7] VERMA A. Electric vehicle routing problem with time windows, recharging stations and battery swapping stations[J]. *Euro Journal on Transportation and Logistics*, 2018, 7(4):415-451.
- [8] 郭放, 杨珺, 杨超. 基于货物分类配送的电动汽车路径优化与换电策略研究[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(9):37-48.
GUO F, YANG J, YANG C. Research on electric vehicle route optimization and power exchange strategy based on goods classification and distribution[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(9):37-48.
- [9] BELL J E, Mc MULLEN P R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2004, 18(1):41-48.
- [10] HUANG Y H, BLAZQUEZ C A, HUANG S H, et al. Solving the feeder vehicle routing problem using ant colony optimization [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127:520-535.
- [11] YU V F, REDI A A N P, HIDAYAT Y A, et al. A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 53:119-132.
- [12] ABIDI H, HASSINE K, MGUIS F. Genetic algorithm for solving a dynamic vehicle routing problem with time windows[C]// 2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation, July 16–20, 2018, Orleans, France. Piscataway: IEEE, 2018:782-788.
- [13] NGUYEN D T, THANH D D. Improved tabu search algorithm for vehicle routing problem with time windows[J]. *Science and Technology*, 2017, 10:283-291.
- [14] NOROUZI N, SADEGH A M, ALINAGHIVAN M. Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem[J]. *Measurement*, 2015, 62:162-169.
- [15] AKPINAR S. Hybrid large neighborhood search algorithm for capacitated vehicle routing problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 61:28-38.
- [16] LIM A, ZHANG X W. A two-stage heuristic with ejection pools and generalized ejection chains for the vehicle routing problem with time windows[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2007, 19(3):443-457.
- [17] BALSEIRO S R, LOISEAU I, RAMONET J. An ant colony algorithm hybridized with insertion heuristics for the time dependent vehicle routing problem with time windows[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(6):954-966.

Operations Research and Cybernetics

Research on Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows for Cold Chain

LIU Zhishuo, LI Qiuyu, CHEN Zhe

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: [Purposes] In view of the situation of cold chain logistics distribution of electric vehicles, fully considering the characteristics of electric vehicles and the charging needs of social charging piles, the cold chain electric vehicle routing problem with hard time window (EVPRHTW-CC) is studied. [Methods] First, a planning model with the minimum distribution cost as the optimization goal is constructed. Then based on the ant colony algorithm, a kind of charging station optimization algorithm and local optimization strategy are designed to form a hybrid ant colony algorithm conversion problem. Finally, a set of examples of the hard time window cold chain electric vehicle routing problem are adapted and the performance of the ant colony algorithm and the hybrid algorithm is verified through experiments. [Findings] The improvement rate of the search solution reaches 11.82%. [Conclusions] The results show that the hybrid ant colony algorithm with local optimization strategy can greatly improve the solution ability, the overall performance of the algorithm is greatly improved, and the solution is more stable.

Keywords: cold chain; electric vehicle; vehicle routing problem; ant colony algorithm

(责任编辑 黄颖)