

文章编号: 2095-2163(2021)05-0143-05

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

复杂路况下考虑碳排放成本的冷链车辆配送路径优化研究

马丽, 茅健, 阮大文, 路玉凤

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 本文考虑了多数没有考虑的实际路况与路面情况这些复杂路况下的配送成本,同时秉承着低碳绿色的理念,将碳排放因素考虑到总配送路径成本中,采用改进粒子群算法求解,以配送成本和货损率最小为分析依据,分析求解结果。以浙江义乌某冷链中心为研究对象进行冷链运输车辆配送路径优化,将优化后的成本与原方案成本进行实验对比,结果表明货损率、碳排放量与总成本均降低了约4%到15%。

关键词: 冷链运输; 改进粒子群算法; 车辆配送路径优化; 碳排放因素

Optimization of cold chain vehicle distribution route under complex road conditions with carbon emission cost taken into account

MA Li, MAO Jian, RUAN Dawen, LU Yufeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] This paper considers the most papers did not consider the actual road conditions and road conditions distribution cost analysis of these complex road conditions, uphold the concept of low carbon green at the same time, the carbon emission factor considering the total distribution in the path cost, with the improved particle swarm algorithm, the minimum distribution costs and damage rate as the analysis on the basis of analysis results. Taking a cold chain center in Yiwu, Zhejiang Province as the research object, the distribution path optimization of cold chain transportation vehicles was carried out. The optimized cost was compared with the original scheme cost and other comparative experiments. The results showed that cargo loss rate, carbon emission and total cost were all reduced by about 4% to 15%.

[Key words] cold chain transport; improved particle swarm optimization; vehicle distribution path optimization; carbon emission factor

0 引言

从果蔬生鲜生产到消费者的一系列环节中,冷链运输占绝大部分时间,所以冷链运输路径的优化尤为重要^[1]。Brito等运用模糊算法和混合GRASP-VNS启发式算法进行优化^[2]; Zhang等通过实时动态地收集冷链配送过程中产品的信息,利用三阶段调度控制决策模型,做出更合理的决策; Qi Mei以零售模式的冷链配送路径为研究对象,采用贴近实际的软时间分配方法和免疫粒子群优化算法进行求解^[4]; Pedro Amorim等采用适应性大领域搜索框架,这种算法的优势是收敛快速^[5]; 马尚兵采用遗传算法和蚁群算法综合优化,采用混合时间窗进行模型的构建^[6]; 张倩采用鲁棒优化方法处理不确定问题,运用果蝇算法进行算例求解^[7]。

1 模型构建

1.1 基本假设

(1) 车辆假设: 以县域为单位,车辆足够多,且规格相同,最大载重量已知,车辆不能超载,且能满足所有客户的需求量。车辆从配送中心出发,又返回至配送中心。

(2) 客户假设: 同一客户的各种需求产品都由配送中心安排同一辆车送达,配送路径固定,并且需求量、配送时间窗已知。

(3) 配送中心假设: 配送中心货源充足。

1.2 总成本分析

1.2.1 固定成本

与运输路程没有关系,为常量,在最优路径的成本分析中不进行考虑。

作者简介: 马丽(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:冷链仓储及其配送、机械制造及其自动化、精密检测与控制; 茅健(1972-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向:精密检测与控制、装备自动化、智能机器人等; 阮大文(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:机械制造及其自动化、精密检测与控制; 路玉凤(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向:冷链仓储及其配送、机械制造及其自动化。

收稿日期: 2020-11-24

1.2.2 运输成本

运输成本主要指油耗维修和保养等成本,一般认为运输成本与行驶距离成正比,但大多文献没有考虑道路颠簸情况,而生鲜产品的货损情况和路面情况有很大关系,所以要以成本为目标,必须降低货损率,提高客户的满意度,选择合适的道路质量。

设 C_1 是运输成本,有式(1):

$$C_1 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m s d_{ijk} x_{ijk} u_{ijk}. \quad (1)$$

其中, n 表示客户数量; m 表示运输车数量; s 为单位行驶里程成本; d_{ijk} 为 i 与 j 之间距离; u_{ijk} 为路面颠簸系数,见表1。 x_{ijk} 为 0,1 变量,若第 k 辆车经过 (V_i, V_j) 路段,那么 x_{ijk} 为 1,若不经过,则为 0。

表1 路面颠簸系数

Tab. 1 Road bump coefficient

序号	路面材料	μ_{ijk}
1	混凝土	1.02
2	沥青碎石	1.13
3	半整齐石块	1.24
4	团聚体强化土壤	1.48

1.2.3 货损成本

货损成本包含 2 种情况:一种是因为运输累计时间,生鲜食品腐坏;另一种是因为货车门的开关闭合导致的空气流通,室外的热空气造成的生鲜食品腐坏。

设 C_2 是货损成本,有式(2):

$$C_2 = P \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n y_{jk} q_j (a_1 t_{0jk} + a_2 t_{jk}). \quad (2)$$

其中, P 为产品单价, y_{jk} 为 0,1 变量,若第 k 辆冷链送货至 j 客户,那么 y_{jk} 为 1,不送货,则为 0。

a_1 为运输过程中损失的货物所占比例; a_2 为装卸过程中损失的货物所占比例; q_j 为 j 客户的货物数量; t_{0jk} 为第 k 辆车从配送中心到 j 的总时间; t_{jk} 表示第 k 辆车在 j 客户卸车时间。

1.2.4 制冷成本

设 C_3 是制冷成本,有式(3):

$$C_3 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} a_3 t_{ijk} T + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} a_3 t_{jk} \Delta T. \quad (3)$$

其中, t_{ijk} 表示第 k 辆车从 i 到 j 的时间; a_3 为制冷系数; T 为车内温度; ΔT 为因开门关门导致的温度差。

1.2.5 惩罚成本

配送车辆在实际行驶过程中会遇到不同的交通

情况或者其它突发情况,配送会有延迟会超过规定时间范围,但在客户可以接受的时间范围内,需支付惩罚成本。

设 C_4 是惩罚成本,有式(4):

$$C_4 = dp q_j \sum_{j=1}^n \max(E_j - S_{jk}, 0) y_{jk} + ep q_j \sum_{j=1}^n \max(S_{jk} - T_j, 0) y_{jk}. \quad (4)$$

其中, $[e_j, l_j]$ 为客户 j 期望送达时间段; $[E_j, L_j]$ 为客户 j 可以接受配送时间段,但超过期待时间在可接受配送时间段也需要赔偿,以及早到的等待成本; S_{jk} 为第 k 辆车到达客户 j 的时间; d 为早到的等待成本系数; e 为超过配送时间但可接受的时间段的惩罚系数。

1.2.6 碳排放成本

通过对碳排放收税,可以保护环境,引起人们重视。

设 C_5 是碳排放成本,有式(5):

$$C_5 = \alpha c \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m t_{ij} x_{ijk}. \quad (5)$$

其中, α 为碳排放价格, c 是单位时间碳排放量。

综上,总成本 C 成本函数(6)为:

$$\begin{aligned} \min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = & \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m s d_{ijk} x_{ijk} u_{ijk} + \\ & P \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n y_{jk} q_j (a_1 t_{0jk} + a_2 t_{jk}) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} a_3 t_{ijk} T + \\ & \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} a_3 t_{jk} \Delta T + dp q_j \sum_{j=1}^n \max(E_j - S_{jk}, 0) y_{jk} + \\ & ep q_j \sum_{j=1}^n \max(S_{jk} - T_j, 0) y_{jk} + \alpha C \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m t_{ij} x_{ijk}. \end{aligned} \quad (6)$$

约束条件式(7)~式(10):

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, (j = 1, 2, \dots, n, i \neq j), \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, (i = 1, 2, \dots, n, i \neq j), \quad (8)$$

表示一个客户只能由一辆车配送。

$$E_j \leq S_{jk} \leq L_j, \quad (9)$$

表示车辆配送 j 客户不能早到和超时。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n y_{jk} q_j \leq Q. \quad (10)$$

确保每辆车的配送量小于每辆车的最大容量 Q 。

2 粒子群算法

2.1 粒子群算法的主要流程(PSO)

粒子群算法的主要流程如下:

(1)粒子与速度初始化,初始化任意粒子的位置和速度。

(2)计算各个粒子适应度值。

(3)更新个体极值与全局极值。

(4)根据公式(11)和公式(12)更新粒子的速度与位置。

$$v_{id}^{k+1} = \tilde{\omega} * v_{id}^k + c_1 r_1 * (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 * (p_{gd} - x_{id}^k). \quad (11)$$

其中, c_1 和 c_2 是加速因子,本文取值均为 2,以便最有效的搜索; $\tilde{\omega}$ 是用来控制历史速度对当前速度的影响程度的惯性权重系数; x_{id}^k 表示当粒子的位置; v_{id}^{k+1} 表示粒子的速度; r_1 和 r_2 是 0~1 的随机数。

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad 1 \leq i \leq n; 1 \leq d \leq D. \quad (12)$$

其中, v_{id} 取 $[-V_{maxd} \sim V_{maxd}]$, 减少粒子离开搜索区域的几率。

(5)判断是否满足终止条件,若满足则终止程序,若没有满足则继续步骤(2)。

粒子群优化算法的流程图如图 1 所示。

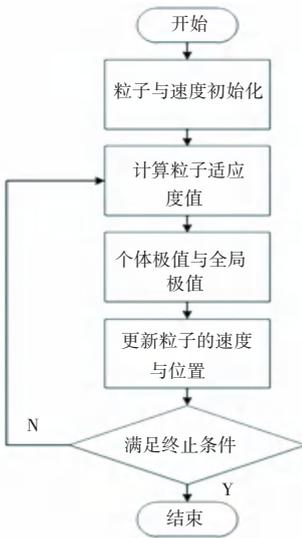


图 1 粒子群优化算法的主要流程图

Fig. 1 Main flow chart of particle swarm optimization algorithm

2.2 改进的粒子群算法 (IPSO)

通过式(13)引入群体适应度方差判断粒子聚集程度,采用变异算子跳出局部最优解,得出全局最优解,式(13)。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{f_i - f_{av}}{f}}{m} \quad (13)$$

其中, $f = \max\{1, \max_{1 \leq i \leq n} |f_i - f_{av}|\}$ 限制 σ^2 的大小; m 为粒子总数; f_i 为第 i 粒子的适应度值; $f_{av} =$

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i.$$

跳出局部最优解需要引入变异算子,公式(14)如下:

$$P_k = (P_{max} - P_{min}) (\sigma_k^2/n)^2 + (P_{min} - P_{max}) (2\sigma_k^2/n) + P_{max}. \quad (14)$$

其中, P_k 是第 k 次迭代中群体全局极值的变异概率; σ_k^2 为第 k 次迭代中群体的适应度方差; P_{max} 为变异概率的最大值; P_{min} 为变异概率的最小值; β 为粒子总数。

变异操作:按照适应值排序,取适应值最好的 a 个粒子(a 取所有粒子个数的一半),对前 $p_k * a$ 个粒子使用式(15)进行变异。

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t (1 + 0.5\beta). \quad (15)$$

3 应用实例

3.1 配送中心和社区的相关数据

本文以浙江义乌某冷链配送中心为研究对象,该配送中心向同城的 10 个社区配送。配送中心共有 3 辆冷藏车,每辆车的载重量为 3 t。车辆每次配送最大路程为 100 km,单位里程运输成本是 3 元,车速平均为 40 km/h,道路颠簸系数为 1.13。在社区可接受的时间窗内但超过预定时间窗的惩罚系数和在可接受时间窗之前到达的惩罚系数均为 50 元/h。假设外界温度为 25 ℃,车内温度为 -4 ℃。设配送中心地理位置为(0,0),其余社区为 1-10 依次排列,服务时间、预定时间窗和可接受时间窗见表 2,各社区要求合理安排路线,使配送成本最低。

表 2 各社区需求
Tab. 2 Community needs

节点	预定时间窗	可接受时间窗	服务时间/ min	需求量/ t
1	5:30-6:30	5:10-6:50	6	0.7
2	6:30-7:30	6:10-7:50	9	0.8
3	6:50-7:50	6:30-8:10	8	0.7
4	6:10-7:10	5:40-7:30	9	1.0
5	5:30-6:30	5:10-7:00	6	1.3
6	6:50-7:50	6:30-8:10	7	0.5
7	5:50-6:50	5:30-7:10	10	0.8
8	6:10-7:10	5:40-7:30	9	0.7
9	5:30-6:30	5:10-7:00	6	0.9
10	6:10-7:10	5:40-7:30	8	0.4

3.2 结果与灵敏度分析

3.2.1 结果分析

得到配送路线图如图2所示。仿真结果表明运用改进的粒子群算法优化后的配送路径总成本为310.42元,碳排放量是31.60kg,碳排放成本为35.69元。在进行改进的粒子群算法优化后的配送路径总成本仿真后,进行四组对比实验。具体实验对比结果见表3。

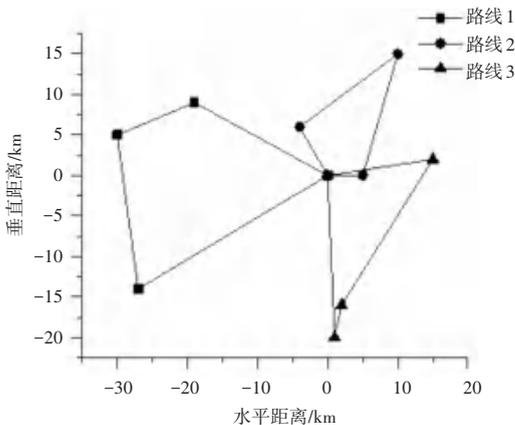


图2 配送路线图

Fig. 2 Distribution roadmap

表3 不同情况下结果对比

Tab. 3 The results were compared under different circumstances

	成本/ 元	碳排放成本/ 元	碳排放量/ kg
案例原配送方案	353.75	47.58	37.71
改进方案	310.42	35.69	31.60
运用粒子群算法的方案	330.58	40.12	34.24
不考虑碳排放的方案	325.39	39.95	33.51

将不考虑碳排放的函数模型进行仿真的结果与考虑碳排放的函数模型仿真的结果对比可以得出,考虑碳排放的总成本减少了6.1%,碳排放量减少了5.6%。将运用粒子群算法进行仿真的结果与运用优化后的粒子群算法仿真的结果对比可以得出,考虑碳排放总成本减少了4.5%,碳排放量减少了7.7%。将优化后的成本与原方案的成本对比可以得出,考虑碳排放的总成本减少了12.2%,碳排放量减少了16.6%。说明本文的优化方案起到了减少碳排放量和总成本的作用。

3.2.2 灵敏度分析

本文建立的成本分析模型中,耗油量是与相对距离、车辆行驶速度和车辆负载相关的。其中相对距离是社区之间距离决定的,车辆负载是由社区需求决定的。本文探究不同车辆行驶速度和不同碳价

格对车辆行驶成本和碳排放量的影响,结果如图3和图4所示。

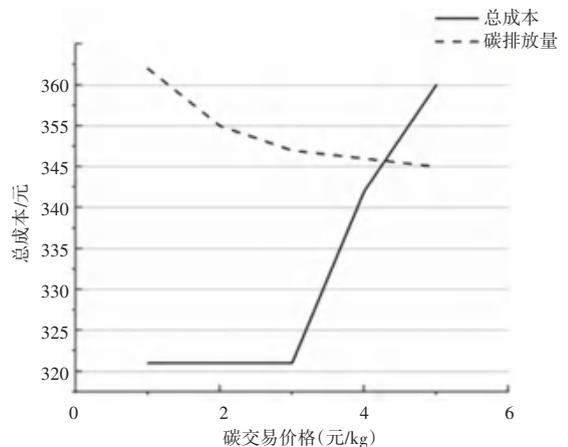


图3 总成本与碳排放量随碳排放单价变化示意图

Fig. 3 Diagram of total cost and carbon emission change with carbon emission unit price

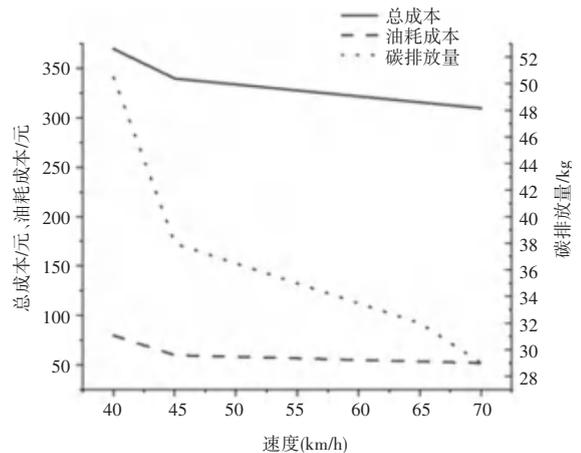


图4 不同车辆行驶速度下总成本、碳排放量与油耗成本变化图

Fig. 4 Diagram of total cost, carbon emission and fuel consumption cost at different vehicle speeds

由图3可以得到如下结论:碳排放单价的增加会导致车辆运输总成本的增加,碳排放量的减少。因此,适当的增加碳排放单价会对减少碳排放量有积极的作用,总成本的增加量也比较小。可以适当调控价格的增加,这样有助于减少碳排放量。

由图4可以得出以下结论:随着车辆行驶速度的增加,冷链仓储中心配送总成本、油耗成本与碳排放量随之下降。所以在保证安全的情况下,驾驶人员可以适当调高车速来降低成本。

4 结束语

为了构建绿色的良好环境,减少碳排放,在冷链配送路径中应当考虑碳排放对总成本的影响。大部分对冷链配送路径成本分析过于理想化,并没有考

(下转第151页)