

# 生鲜食品冷链物流配送路径优化

吕成瑶,邵可南,张帅帅,宫婧

(南京邮电大学理学院,江苏南京 210023)

**摘要:**由于模拟退火算法在求解优化路径的时候容易陷入局部最优,因此通过对传统的模拟退火路径优化算法进行改进来提高算法的求解效果。以冷链配送过程中的总成本为优化目标,以车辆载重以及客户要求为约束条件建立模型,分析温度和时间对各项成本的影响,分别讨论运输过程和卸货过程的制冷成本和货损成本,并用指数函数表示生鲜食品的腐败规律。通过调整模拟退火算法中 Metropolis 准则的接受概率并分别对不同接受概率的算法进行实验仿真,结果表明,接受概率对模拟退火算法在生鲜食品冷链物流配送路径优化问题上的求解效果产生影响,减小接受概率,可以提高算法的局部求解精度和收敛速度,降低平均收敛代数;提高接受概率,能够扩大搜索范围,降低算法陷入局部最优的概率。

**关键词:**冷链运输;路径优化;模拟退火算法;Metropolis 准则;组合优化

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)11-0168-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.11.031

## Optimization of Fresh Food Cold Chain Logistics Distribution Route

LYU Cheng-yao, SHAO Ke-nan, ZHANG Shuai-shuai, GONG Jing

(School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** When searching for the optimal path via the simulated annealing algorithm (SAA), it is easy to get trapped in local optimums, so we focus on improving the algorithm's efficiency by optimizing the traditional SAA. Taking the total cost in the cold chain transportation as the target and the vehicle load and customer requirements as the constraints, we establish a model to analyze the impact of temperature and time on each cost. We also figure out the cost of cooling and damage loss during the process of delivering and unloading the goods and describe the rate of food spoilage as an exponential function. By adjusting the acceptance probability of the Metropolis criterion in the simulated annealing algorithm and experimentally simulating the algorithms with different acceptance probabilities, it is concluded that the acceptance probability can affect the solving efficiency of SAA when working on the optimization problem of fresh food cold chain logistics distribution path. If reducing the acceptance probability, we can improve the accuracy of local solution, the convergence speed of the algorithm and also reduce the average convergence algebra. If increasing the acceptance probability, we can expand the search range and reduce the probability that the algorithm falls into local optimum.

**Key words:** cold chain transportation; path optimization; simulation annealing algorithm; Metropolis criterion; combinatorial optimization

## 0 引言

冷链物流指的是冷藏类产品经过加工、贮藏、运输、分销、零销环节,并且在所有的过程中产品都处于合适的低温环境下,以保证产品质量安全的系统性工程<sup>[1]</sup>。在整个冷链物流过程中,运输是最为重要的一环,优化的配送路径既能够保证生鲜食品的质量和客户的满意度,也能够降低运输公司的经济成本,因此研究生鲜食品冷链运输路径优化问题对客户和物流企业都具有重要影响。

该文研究的核心问题为车辆路径问题 (vehicle

routing problem), 简称 VRP 问题, 是由 Dantzig 和 Ramser<sup>[2]</sup>在 1959 年提出的, 此问题的经典描述为: 有一个配送中心和多个客户需求点, 并且它们的地理位置和相关参数值也是已知的, 在需要满足一定约束条件的情况下, 如何找到最优化的配送路径, 使得车辆能够在满足所有的客户需求之后重返配送中心。

在上述的经典 VRP 问题的基础之上, 国内外的很多专家学者进行了深入研究并且得到了许多具有价值的研究成果。

在建立模型方面, Solomon 和 Desrosiers 在经典

收稿日期: 2019-11-30

修回日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61972211); 大学生创新训练计划项目(省级)(SYB2019031)

作者简介: 吕成瑶(1998-), 女, 研究方向为计算机算法优化; 通信作者: 宫婧(1977-), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为计算机应用、计算机算法优化。

VRP 问题中引入了时间窗的概念;Jabali 等<sup>[3]</sup>在时间窗的基础之上考虑了惩罚成本,建立了带有时间窗的 VRP 模型;Pedro Amorim 等<sup>[4]</sup>研究了其当地食品的配送路径优化问题,但他们忽略了食品的运输损耗;陈梦<sup>[5]</sup>建立了考虑惩罚成本的 VRP 模型,但是其惩罚成本只考虑超出客户要求的服务时间的迟到成本,没有考虑提前到达客户需求点的等待成本。在求解算法方面,邵举平等<sup>[6]</sup>建立了以运输总成本和客户满意度为目标的双目标优化模型,并设计改进的遗传算法进行求解;孙明明<sup>[7]</sup>等加入了货损成本,建立了以配送总成本最小为优化目标的模型,并通过节约成本法进行求解;缪小红等<sup>[8]</sup>以配送总成本最小作为目标、软时间窗为约束条件构建路径优化模型,利用改进的遗传算法进行求解;杨飞<sup>[9]</sup>研究了多节点的物流配送最短路径问题,并利用模拟退火算法进行求解,这为物流配送最短路线的优化问题提供了算法参考;何小锋等<sup>[10]</sup>在混合蚁群算法中引入了新的算子并对带有时间窗的 VRP 模型进行求解,有效避免了陷入局部解过快的情形;张玉琰<sup>[11]</sup>通过在传统的遗传算法中加入了期望繁殖率得到了新的遗传算法,改进后的求解能力得到提升;Khare 等<sup>[12]</sup>利用启发式算法来找到 VRP 问题的全局最优解;Brito 等<sup>[13]</sup>通过将模糊方法和启发式算法相结合对路径优化问题进行求解。

综上所述,现有文献在 VPR 问题上已经取得了较多的成果,但是将生鲜食品与 VPR 结合起来研究的文献较少,构建的模型没有充分考虑到各项成本随着时间、温度以及车辆载重的变化规律,与现实情况不太相符。在实际的配送中,影响配送路径选择的因素是十分复杂的,因此需要更加全面地构建模型<sup>[14]</sup>。

该文旨在研究带软时间窗的冷链物流配送路径优化问题。通过建立以最小综合成本为目标,时间窗、车辆载重和客户需求量为约束条件的单目标优化模型,综合成本包括冷藏车辆在运输过程中所产生的固定成本、运输成本、制冷成本、货损成本以及惩罚成本。其中在计算制冷成本和货损成本时,分别讨论运输过程和卸货过程对两种成本的影响,在计算惩罚成本时,结合时间窗充分考虑了时间与成本的联系,通过模拟退火算法对模型进行求解,得到最优化的配送路径,继而分析模型的实用性和算法的可行性,并对算法参数进行敏感性分析。

## 1 问题描述

为了使所研究的问题准确化,在描述问题之前先做出以下假设条件。

假设 1:仅一个配送中心且配送的产品均为生鲜食品。

假设 2:客户的需求均为固定且已知,并且每位客户只能由一辆配送车为其提供服务。

假设 3:所有运输车辆的型号均相同。

假设 4:所有运输车辆的行驶速度相同并保持匀速行驶。

研究的冷链配送问题可以简单描述为:生鲜食品从配送中心向特定的客户群体配送生鲜食品,以装有制冷设备的运输车作为运输工具,每个客户的需求量、地理位置和配送时间已知,车辆在完成约定的配送任务后返回配送中心,在客户需求量和车辆载重的约束下合理安排行车路线使目标函数最优化。

## 2 冷链物流配送路径优化模型的建立

该文主要从物流公司的角度出发,以配送中心在一次配送过程中运输车辆所花费的总成本最小为目标,结合客户需求量、车辆载重和时间窗作为约束条件。运输车辆在配送过程中的成本主要由固定成本、运输成本、制冷成本、货损成本以及惩罚成本组成,因此通过建立模型确定目标函数以及约束条件。

### 2.1 优化目标的确定

#### 2.1.1 固定成本

固定成本指的是运输车辆在配送过程中的车辆损耗以及雇佣司机所花费的费用,其往往为常数,与行驶距离和载重量无关。假设配送中心共有  $m$  辆车可供调用,由于每辆车的型号相同且司机是随机分配的,因此每辆车的固定成本  $s_1$  相同,所以在运输过程中所有车辆的固定成本  $C_1$  为:

$$C_1 = ms_1 \quad (1)$$

#### 2.1.2 运输成本

运输成本指的是车辆在行驶过程中的油耗费用,其与车辆的行驶距离成正比,可以得到车辆的运输成本  $C_2$  为:

$$C_2 = \sum_{k=1}^m \left( \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n s_2 d_{ij} x_{ij}^k \right) \quad (2)$$

其中,  $m$  为可调动车辆总数,  $n$  为客户需求点个数,  $s_2$  为每辆车行驶一公里的油耗费用,  $d_{ij}$  为客户需求点  $i$  到需求点  $j$  之间车辆的行驶距离,  $x_{ij}^k$  为第  $k$  辆车是否从需求点  $i$  到需求点  $j$ , 当  $x_{ij}^k = 1$  时,表示车辆从需求点  $i$  到需求点  $j$ , 当  $x_{ij}^k = 0$  时,表示车辆不从需求点  $i$  到需求点  $j$ 。

#### 2.1.3 制冷成本

由于所有的运输车都配置制冷设备,而制冷设备主要是通过消耗制冷剂来发挥制冷作用,因此车辆在运输过程中的制冷成本指的是制冷设备所消耗的制冷剂总费用。假设所有的运输车辆仅需一趟就能将车内的生鲜食品全部配送完毕,车辆在返回时车内已无生

鲜食品,即返回时制冷设备处于未工作状态。考虑到制冷剂的消耗量与外界环境有关,因此分别讨论运输过程的制冷成本和卸货过程的制冷成本来表示制冷成本  $C_3$ 。

运货过程中的制冷成本  $C_{31}$  为:

$$C_{31} = \sum_{k=1}^m \sum_{i,j=0}^n s_{31} x_{ij}^k t_{ij}^k \quad (3)$$

其中,  $s_{31}$  为每辆车在运货过程中单位时间内的制冷成本,为运输车辆从客户需求点到客户需求点的运输时间。

卸货过程中的制冷成本  $C_{32}$  为:

$$C_{32} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n s_{32} T_j \quad (4)$$

其中,  $s_{32}$  为每辆车在卸货过程中单位时间内的制冷成本,  $T_j$  为每个需求点  $j$  的卸货时间。

因此,制冷成本  $C_3$  应为:

$$C_3 = C_{31} + C_{32}$$

#### 2.1.4 货损成本

货损成本指的是生鲜食品在运输过程中随着时间和温度的变化而腐败产生的成本,其中,由时间而引起的损耗成本是伴随着运输和卸货两个过程的,由温度引起的损耗成本是在卸货过程中的。因此,分别研究运输和卸货这两个过程的货损成本。参考文献[15]中利用指数表示生鲜食品的腐败趋势,采用相同方式得到以下关系式:

运输过程的货损成本  $C_{41}$  为:

$$C_{41} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n s_4 q_j y_j^k (1 - e^{-a_1 t_{ij}^k}) \quad (5)$$

卸货过程中的货损成本为:

$$C_{42} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n s_4 q_j y_j^k (1 - e^{-a_2 T_j}) \quad (6)$$

其中,  $s_4$  为单位产品的价格,  $q_j$  为需求点的货物需求量,  $y_j^k$  表示运输车辆  $k$  是否对客户需求点  $j$  进行配送,  $y_j^k = 1$  表示车辆  $k$  对需求点  $j$  进行配送,  $y_j^k = 0$  表示车辆  $k$  不需要对需求点  $j$  进行配送。运输过程中物品的变质率为  $a_1$ ,卸货过程中物品的变质率为  $a_2$ ,  $t_{ij}^k$  为车辆  $k$  从需求点  $i$  到需求点  $j$  的行驶时间,  $T_j$  为运输车辆在客户需求点  $j$  的卸货时间。

因此,得到货损成本为:

$$C_4 = C_{41} + C_{42}$$

#### 2.1.5 惩罚成本

惩罚成本指的是运输车辆没有按照客户要求的时间到达需求点而产生的成本,其既包括运输车辆提前到达客户需求点产生的等待成本,也包括运输车辆推迟到达客户需求点而产生的超时成本。

该文采用软时间窗对惩罚成本进行表示。假设  $[T_{ej}, T_{lj}]$  为需求点  $j$  的客户的期望时间窗,  $t_j^k$  为运输车

辆  $k$  到达需求点  $j$  的时间。因此,得到客户需求点  $j$  的惩罚成本为:

$$C_5(j) = \begin{cases} s_e(T_{ej} - t_j^k), & 0 \leq t_j^k < T_{ej} \\ 0, & T_{ej} \leq t_j^k \leq T_{lj} \\ s_l(t_j^k - T_{lj}), & T_{lj} < t_j^k \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $s_e$  为每辆运输车辆在单位时间内的等待成本,  $s_l$  为每辆运输车在单位时间内的超时成本。

因此,得到惩罚成本为:

$$C_5 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n (s_e \max(T_{ei} - t_i^k) + s_l \max(t_i^k - T_{li}, 0)) \quad (8)$$

## 2.2 约束条件分析

以实际生活中的配送模型为基础,结合客户需求量、车辆载重以及时间窗问题,对生鲜食品的配送最优路径模型做出以下约束:

①所有的运输车辆在配送完成后统一回到配送中心。

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = \sum_{j=1}^n x_{ji}^k \leq 1, i = 0, k = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

②配送中心共有  $m$  辆运输车辆,且每个客户需求点有且仅有一辆运输车辆配送完成。

$$\sum_{k=1}^m y_j^k = \begin{cases} m, & j = 0 \\ 1, & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

③配送结束后所有的客户需求点均被配送完成。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m y_j^k = n \quad (11)$$

④所有运输车辆的载重量不得超过车本身的最大载重量。

$$\sum_{j=1}^n y_j^k W_j \leq W_{\max} \quad (12)$$

## 2.3 优化模型的构建

综上,生鲜食品冷链运输路径优化模型可以描述为:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij}^k = \sum_{j=1}^n x_{ji}^k \leq 1, i = 0, k = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{k=1}^m y_j^k = \begin{cases} m, & j = 0 \\ 1, & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \\ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m y_j^k = n \\ \sum_{j=1}^n y_j^k W_j \leq W_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

## 3 模拟退火算法

### 3.1 模拟退火算法的基本原理

模拟退火算法是一种以蒙特卡洛迭代求解法为基

础的启发式随机搜索算法。它来源于固体退火原理,首先将固体加热到温度足够高,然后让其自然冷却,当固体被加温时,其内部粒子随着温度的升高变为无序状,并且内能增大,当其自然冷却时,其内部粒子随着温度降低逐渐趋于有序状,即在所有温度均为平衡态,最终在常温时达到基态,内能降低到最小。根据 Metropolis 准则,粒子在温度  $T$  时达到平衡态的概率为  $\exp(-\frac{\Delta E}{kT})$ ,其中  $E$  为温度  $T$  时的内能,  $\Delta E$  为内能改变量,  $k$  为 Boltzmann 常数。通过固体退火模拟来解决组合优化问题时,可以将目标函数值  $f$  通过内能  $E$  模拟,控制参数  $t$  通过温度  $T$  得到,即得到求解组合优化问题的模拟退火算法。

由于模拟退火算法的求解性能是与降温过程有关的,当降温过程足够缓慢,解的性能较好,但是算法的收敛速度较慢,当降温过程足够快,虽然提高了收敛速度,但是算法有可能无法收敛到全局最优解。考虑到算法实际应用中常数  $k$  的选取往往和温度 and 实际问题有关,选取不好的  $k$  会导致算法的效果变差,因此通过调整模拟退火算法中的参数  $k$  来研究  $k$  对算法求解效果的影响。

3.2 优化求解的流程步骤

算法流程如图 1 所示。

Step1:初始化冷却进度表:  $T_0, T_f, \alpha, L_k$ , 其中  $T_0$  为初始温度,  $T_f$  为终止温度,  $\alpha$  为温度更新常数,  $L_k$  为 Markov 链的长度(任一温度  $T$  的迭代次数)。

Step2:设置温度为初始温度,随机生成一个初始路径  $x_0$ ,并计算其对应的目标函数值  $E(x_0)$ 。将初始路径保存至当前路径  $x_c$  和最佳路径  $x_b$  中。

Step3:对当前路径  $x_c$  进行扰动,生成一个新路径  $x_n$ ,计算相应的目标函数值  $E(x_n)$ ,并得到两者路径差  $\Delta E = E(x_n) - E(x_c)$ 。

Step4:若  $\Delta E < 0$ ,则接受新路径  $x_n$ ,新路径  $x_n$  保存至当前路径  $x_c$  中,并且若  $E(x_n) < E(x_b)$ ,则新路径  $x_n$  还要保存至最佳路径  $x_b$  中。若  $\Delta E > 0$ ,则新路径  $x_n$  按概率  $\exp(-\frac{\Delta E}{kT})$  被当前路径  $x_c$  接受。

Step5:在温度  $T$  下,重复  $L_k$  次步骤 3、4。

Step6:判断温度  $T$  是否小于终止温度  $T_f$ ,如果是,

则结束算法,输出最佳路径  $x_b$ ,否则根据  $T = \alpha T$  更新温度,并且转步骤 3。

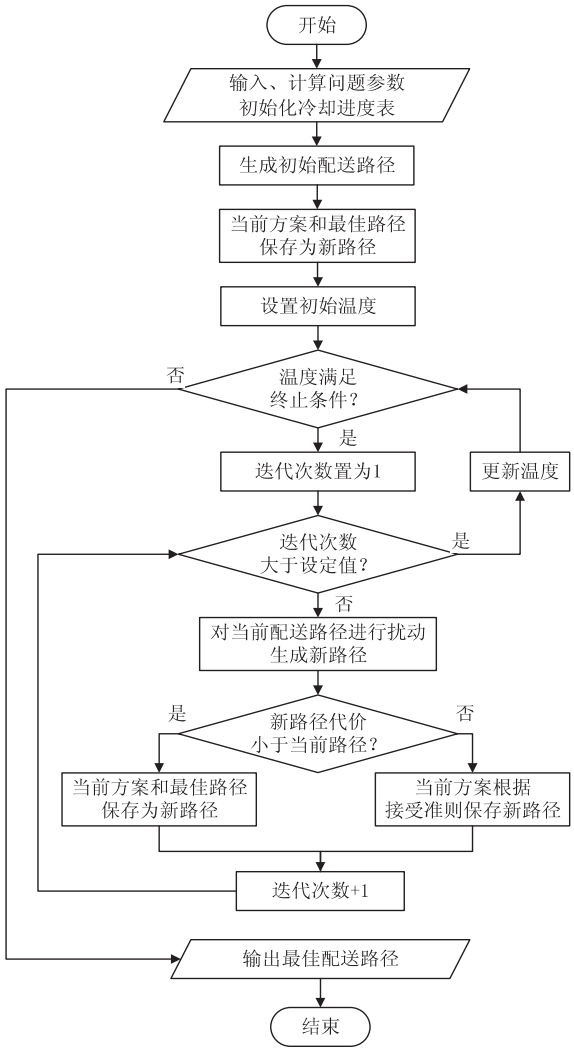


图 1 模拟退火算法的流程图

3.3 实验仿真

通过实验仿真分别验证传统的模拟退火算法和改进的算法求解生鲜食品冷链物流运输最优路径问题的效果。参考文献[16],以某冷链运输物流企业为例,选取坐标点(35,35)为配送中心,运输车辆于上午 6:00 从配送中心(编号为 21)出发,前往 20 个客户需求点配送生鲜食品,车辆的最大载重量为 9 吨。在仿真实验中,京津冀地区的所有客户的位置坐标、需求量、可接受时间窗、期待时间窗以及服务时间如表 1 所示。

表 1 京津冀地区的客户信息

编号	位置坐标	需求/t	可接受时间窗	期望时间窗	卸货时间/min
1	(31,52)	3	6:10-10:00	6:25-9:30	20
2	(35,69)	1	6:20-10:30	6:45-10:00	10
3	(53,52)	2	6:15-9:40	6:40-9:20	20
4	(65,55)	3	6:30-10:30	7:00-10:00	30



续表 1

编号	位置坐标	需求/t	可接受时间窗	期望时间窗	卸货时间/min
5	(63,65)	2	6:45-10:15	7:15-10:00	20
6	(2,60)	2	6:30-10:30	7:00-10:00	20
7	(20,20)	2	6:15-9:30	6:30-9:15	20
8	(5,5)	1	6:45-10:30	7:15-10:15	10
9	(60,12)	2	6:30-10:00	6:45-9:45	20
10	(40,25)	1	6:00-9:45	6:15-9:30	15
11	(42,7)	1	6:15-10:30	6:45-9:45	15
12	(24,12)	1	6:10-10:00	6:30-9:45	10
13	(23,3)	2	6:30-10:30	6:45-10:00	20
14	(11,14)	3	6:30-10:00	6:45-10:15	25
15	(6,38)	2	6:15-10:00	6:45-9:45	25
16	(2,48)	3	6:20-10:40	6:45-10:15	30
17	(8,56)	2	6:30-10:30	6:40-10:15	20
18	(13,52)	1	6:15-10:00	6:30-9:45	10
19	(6,68)	3	6:50-10:45	7:15-10:15	30
20	(47,47)	1	6:00-10:15	6:20-9:30	10

假定模型中的各个参数值如下所示:每吨生鲜食品的价格为 5 000 元,每辆车在配送过程中的固定成本为 300 元,每千米的运输成本为 5 元,每小时的行驶速度为 60 千米,运输过程中每小时的制冷成本为 15 元,货物变质率为 0.02,卸货过程中每小时的制冷成本为 20 元,货物变质率为 0.04,每小时的等待成本为 4 元,超时成本为 8 元。

将算法的参数设置为:初温 100,末温 5,降温系数 0.970 5,Markov 链长度 100,  $k=0.01$ ,在仿真实验中,使用 20 次模拟退火算法求出的结果如表 2 所示。

表 2  $k=0.01$  的求解结果

最小成本	平均成本	标准差	平均收敛代数
15 254.097 1	15 416.503 8	173.444 9	43

根据模拟退火算法求解得到的最优解对应的车辆路线如表 3 所示,最优路径图如图 2 所示。

表 3 最优车辆路线

车辆	配送路径
车辆 1	0→1→16→15→10→0
车辆 2	0→20→3→4→5→9→0
车辆 3	0→18→17→6→19→2→0
车辆 4	0→7→14→8→13→12→11→0

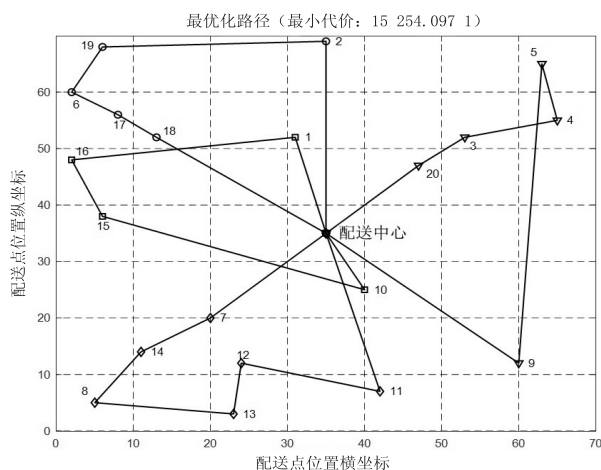


图 2 最优化路径

分别设置  $k=10^{-6}$ ,  $k=10^{-4}$ ,  $k=1$ ,  $k=10$ ,使用 20 次模拟退火算法求解的结果如表 4 所示。

表 4 改变  $k$  值的求解结果

$k$	最小成本	平均成本	标准差	平均收敛代数
10	15 263.415 5	15 424.670 9	127.872 8	88.65
1	15 261.158 7	15 331.573 2	74.914 5	65.85
0.01	15 254.097 1	15 416.503 8	173.444 9	43.00
$10^{-4}$	15 254.097 1	15 429.914 8	186.484 9	34.80
$10^{-6}$	15 254.097 1	15 423.950 9	186.361 2	38.85

### 3.4 结果分析

根据表4,可知在本次仿真实验中,模拟退火算法对于参数 $k$ 的敏感性较低,当 $k$ 在相当大的数量级里变动的时候,模拟退火算法的寻优效果都在可接受的范围之内,但是不同的 $k$ 值对应的求解效果是存在差异的。

适当提高 $k$ 的值,可以扩大搜索范围,从而降低算法陷入局部最优的概率,算法总体上会收敛至局部最优解,例如当 $k=1$ 时,算法求解结果的平均成本和标准差都较小,表示算法的收敛效果都很好。不过这样做会出现求解精度不高和收敛代数增加的现象,如果对于求解的精度要求较高,势必要提高计算量。

适当降低 $k$ 的值,可以提高算法的局部搜索精度,从而加快算法的收敛速度,当 $k=10^{-4}$ 和 $k=10^{-6}$ 时,算法都能收敛到全局最优,并且平均收敛代数均较少,这样可以减少算法的计算代价。不过这样做容易导致算法陷入局部最优的概率增加,从平均成本和标准差也可以看出求解的质量也不好。

## 4 结束语

分析了生鲜食品在冷链配送运输过程中总成本的构成,以总成本最小作为优化目标,建立了带有软时间窗的冷链运输配送路径优化模型,并改进模拟退火算法对模型进行求解。通过实验仿真,发现参数 $k$ 的取值对算法的求解效果具有影响,并且这些影响随着 $k$ 的大小变化具有差异性,因此可以根据不同的生鲜食品冷链配送路径优化问题中对算法不同的求解需求去选择合适的参数 $k$ ,也可以通过设置动态参数调整算法的求解性能。

### 参考文献:

- [1] 杨珍花,赖平仲,汤 洋,等.冷藏车多车型混合配送调度优化[J].系统工程,2015,33(10):28-36.
- [2] 葛显龙,孔 阳.带有时间窗的生鲜物流配送路径优化研

- 究[J].数学的实践与认识,2016,46(12):78-87.
- [3] JABALI O, LEUS R, WOENSEL T V, et al. Self-imposed time windows in vehicle routing problems [J]. OR Spectrum, 2015, 37(2):331-352.
- [4] AMORIM P, PARRAGH S, SPERANDIO F, et al. A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: a case study [J]. Top, 2014, 22(2):489-508.
- [5] 陈 梦,曾 阳,唐 驿,等.食品冷链物流配送路径优化问题研究[J].物流工程与管理,2015,37(1):145-147.
- [6] 邵举平,曹 倩,沈敏燕,等.生鲜农产品配送中带时窗的VRP模型与算法[J].工业工程与管理,2015,20(1):122-127.
- [7] 孙明明,张辰彦,林国龙,等.生鲜农产品冷链物流配送问题及其路径优化[J].江苏农业科学,2017,45(11):282-285.
- [8] 缪小红,周新年,林 森,等.第3方冷链物流配送路径优化研究[J].运筹与管理,2011,20(4):32-38.
- [9] 杨 飞.模拟退火算法在物流线路选择方面的研究[J].电脑知识与技术,2019,15(4):270-271.
- [10] 何小锋,马 良.带时间窗车辆路径问题的量子蚁群算法[J].系统工程理论与实践,2013,33(5):1255-1261.
- [11] 张玉琰,樊建华,徐建刚.车辆路径问题的改进遗传算法研究[J].天津理工大学学报,2006,22(5):79-82.
- [12] KHARE A, RANGNEKAR S. A review of particle swarm optimization and its application in solar photovoltaic system [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5):2997-3006.
- [13] BRITO J, MARTINEZ F J, MORENO J A, et al. Fuzzy optimization for distribution of frozen food with imprecise times [J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2012, 11(3):337-349.
- [14] 张云川,邹 婷.生鲜食品冷链物流配送路径优化[J].江苏农业科学,2019,47(3):315-319.
- [15] YU M, NAGURNEY A. Competitive food supply chain networks with application to fresh produce [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 224(2):273-282.
- [16] 肖 超.基于改进蚁群算法的冷链低碳物流路径优化研究[D].天津:天津商业大学,2018.