

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.027

基于双曲正切函数改进蚁群算法的冷链物流配送路径优化

李春发, 米新新*, 崔鑫
(天津理工大学 管理学院, 天津 300384)

摘要: 为研究冷链物流配送路径优化问题, 考虑客户需求量、车辆最大承载量和客户时间窗要求等影响因素, 构建了一个以油耗成本、惩罚成本等综合配送成本最小为目标函数的数学优化模型。针对原始蚁群算法收敛速度较慢、容易陷入局部最优等问题, 设计了一种基于双曲正切函数改进的蚁群算法。将变参数思想引入蚁群算法, 利用双曲正切函数实现算法在迭代过程中自动调整参数。首先, 构建由配送中心与多个目标客户组成的冷链物流运输模型; 其次, 由于蚁群算法优化性能受启发式因子、信息素挥发率等关键参数影响, 采用双曲正切函数改进蚁群算法的参数设计; 最后, 通过考虑和不考虑时间窗情形下的模拟实例进行仿真试验, 验证模型和算法的有效性。通过与原始蚁群算法对比分析, 证明了基于双曲正切函数改进的蚁群算法性能更加优越。结果表明: 改进后的蚁群算法既保持了迭代初期优秀的全局搜索能力, 又可以在迭代末期实现快速收敛。利用基于双曲正切函数改进的蚁群算法可以有效地解决冷链物流配送路径优化问题, 对企业实现经济与环保双赢局面具有重要的现实意义。

关键词: 物流工程; 车辆路径优化; 蚁群算法; 冷链物流; 变参数

中图分类号: U492.3⁺36.4; U116.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 12-0236-09

Optimization of Cold Chain Logistics Distribution Routing Based on Improved Ant Colony Algorithm with Hyperbolic Tangent Function

LI Chun-fa, MI Xin-xin*, CUI Xin
(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the continuous expansion of fresh market demand, cold chain logistics has become an important part of modern logistics. In order to study the distribution routing optimization problem of cold chain logistics, considering the influence of customer demand, maximum vehicle carrying capacity and customer time window requirements, a mathematical optimization model is constructed to minimize the comprehensive distribution cost, such as fuel consumption cost and penalty cost. An improved ant colony algorithm based on hyperbolic tangent function is designed to solve the problem that the original ant colony algorithm is slow in convergence and easy to fall into local optimum. The idea of variable parameters is introduced into ant colony algorithm. The hyperbolic tangent function is used to automatically adjust the parameters in the iterative process. First, a cold chain logistics transportation model composed of distribution centers and multiple target customers is constructed. Second, due to the optimization performance of ant colony algorithm is affected by heuristic factors, pheromone volatilization rate and other key parameters, hyperbolic tangent function is used to improve the parameter design of ant colony algorithm. Finally, the effectiveness of the model and algorithm

收稿日期: 2022-02-15

基金项目: 天津市科技计划项目 (20YDTPJC00010)

作者简介: 李春发 (1968-), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授. (chunfali@163.com)

* 通讯作者: 米新新 (1995-), 女, 河北保定人, 硕士. (xinxinmi1523@163.com)

is verified by simulation experiments with and without considering the time window. Comparing with the original ant colony algorithm, it is proved that the improved ant colony algorithm based on hyperbolic tangent function has better performance. The result shows that the improved ant colony algorithm not only maintains the excellent global search ability at the beginning of iteration, but also achieves fast convergence at the end of iteration. Ant colony algorithm based on hyperbolic tangent function can effectively solve the problem of cold chain logistics distribution routing optimization, that has important practical significance for enterprises to achieve a win-win situation of economy and environment protection.

Key words: logistics engineering; vehicle routing optimization; ant colony algorithm; cold chain logistics; variable parameter

0 引言

随着国内消费水平的不断提升、生鲜电商市场的迅猛发展和冷链物流现代技术的深入应用, 中国冷链物流行业进入快速发展时期^[1-2]。2019 年冷链物流市场规模达到 3 780 亿元, 2020 年市场规模已突破 5 000 亿元。冷藏运输车作为冷链物流主要运输设备, 近几年进入稳步增长阶段。2019 年 11 月, 我国冷藏车市场保有量达到 21 万辆, 2020 年其总量已经突破 26 万辆。据《中国物流与采购》的调查显示, 冷链运输的成本至少要比普通运输高 80%, 且冷链成本占到总成本的 40%; 冷链运输车的碳排放量至少比普通运输车高 20%。高油耗和高碳排放量不仅增加了物流企业的运营成本, 还对环境保护造成了巨大的压力^[3-4]。

中国二氧化碳排放量力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取在 2060 年前实现碳中和。这一减排承诺对物流运输特别是冷链物流提出了更高要求^[5]。碳排放量取决于油耗量, 优化配送路径不仅降低了燃油资源的使用, 同时也减少了对环境造成的碳污染^[6]。同时, 冷链物流具有“配送小批量、产品易腐坏”的特点, 冷链配送还需要考虑客户需求量、车辆最大承载量、客户时间窗要求等因素。无法按时按需、保质保量地完成配送任务极易引起客户满意度降低, 甚至导致用户流失。因此, 在满足客户需求的基础上, 科学规划配送路径能够有效提高冷链物流配送效率, 降低企业配送成本和碳排放量, 这对增加行业竞争力, 实现经济与环境双赢局面具有十分重要的意义。

近年来, 冷链物流相关研究备受关注。众多学者关注冷链技术^[7]、配送时间窗^[8]和冷链碳排放^[9]等热点问题, 研究内容聚焦于冷库选址、库存管理及冷链运输等各物流环节^[10-12]。李倩等^[13]考虑生鲜冷链行业时效性强、保鲜难度大等特点, 构建了一

个基于模糊时间窗的多目标配送路径优化模型。周鲜成等^[14]在考虑了道路上不同时刻拥挤程度影响因素, 针对时间依赖型绿色车辆路径问题, 构建 TDGVRP 模型并提出优化算法。Macrina 等^[15]基于绿色物流视角, 考虑了由电动车辆和传统车辆组成的混合运输车队, 构建了一个综合能耗模型。鲍春玲等^[16]考虑了多个配送中心和多辆冷藏运输车场景下的冷链物流配送路径优化问题。王诺^[17]等提出了考虑中转冷库选址、中转运输和运输耗损等实际影响因素的远海岛礁渔获冷链物流的运行方案, 对优化海上冷链物流运输问题具有重要的理论和实用价值。

冷链物流配送路径优化作为车辆路径优化问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 的变体问题, 是典型的 NP-hard 问题^[18]。蚂蚁算法多用于解决旅行商问题 (Travelling Salesman Problem, TSP)。而车辆路径优化是旅行商问题的扩展, 许多学者将求解思路集中于改进蚂蚁算法^[19]。薛峰等^[20]将遗传策略和信息熵及混沌映射函数引入蚁群算法, 将蚁群算法中的轮盘策略和随机策略变换为遗传策略, 实现了遗传算法的全局快速收敛和蚁群算法的正反馈机制相融合。任腾等^[21]将禁忌搜索算子和动态概率选择的知识模型融合, 并以此设计了一种基于知识模型指导的蚁群算法。马贵平等^[22]考虑在复杂的交通环境下, 改变传统信息素更新方式, 建立了基于改进蚁群算法的物流运输路径优化模型。Zhang 等^[23]针对柔性时间窗的多目标车辆路径问题, 提出了基于蚁群优化和 3 个变异算子的优化算法。

蚁群算法具有良好的鲁棒性, 但该算法容易陷入局部最优且收敛时间过长, 且上述文献均采用固定参数思想求解。本研究提出了一种基于双曲正切函数改进的蚁群算法, 应用变参数思想, 在算法初期保证其良好的全局搜索能力, 在算法后期其保证收敛性。基于现实, 考虑了客户需求量、车辆最大承载量、客户时间窗要求等因素, 构建由油耗成本

和惩罚成本等总成本最小为目标的模型,应用基于双曲正切函数改进的蚁群算法对研究模型进行求解,旨在优化冷链物流配送路径,为冷链物流配送企业降低运营成本、提高客户满意度和推进节能减排提供决策参考。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

针对由配送中心与多个目标客户组成的冷链物流运输体系路径优化问题,考虑冷链企业实际配送中的成本约束,一个地区仅配备一个配送中心,配送中心配备一辆冷藏运输车,服务该地区若干目标客户。冷藏运输车装载着生鲜产品从配送中心出发,运往各个目标客户。假设任何单个目标客户的需求量小于车辆的载货极限。当车辆上货物剩余量小于任意一家客户需求量时,返回配送中心重新装货。一辆冷藏运输车可配送多个客户点,一个客户点只允许一辆冷藏车出发和到达一次。各个目标客户对送货时间有固定要求,未在规定时间内送达将会受到惩罚。总运输成本由耗油成本和惩罚成本构成。已知各个目标客户点位置、生鲜产品需求量、要求配送时间窗口和冷藏运输车最大载货量。冷藏运输车单位行程下的燃油消耗一致,忽略装、货卸货时间,且冷藏运输车匀速行驶。

基于冷链物流配送路径最优视角,研究在目标客户需求量、车辆最大承载量、客户时间窗要求的限制下,如何配置运输车辆线路,使得该体系运行总成本最低。同时,冷藏运输车的碳排放量取决于其油耗量,故不再单独考虑其碳排放成本,该简化不影响最后路径优化结果。

1.2 模型构建

根据以上假设,该区域只有一家配送中心,配送中心具有一辆冷藏配送车。设该地区共有 n 个目标客户,每个目标客户的需求为 q_i ,每辆车的单程运载能力为 $Q (Q > q_i)$ 。本研究考虑两种成本:耗油成本和惩罚成本。

假设耗油成本只与路径长度有关,冷藏运输车匀速行驶,设冷藏运输车单位路程耗油单价为 a ,节点 i 到 j 的路径长度为 L_{ij} 。每辆车配送过程中的油耗成本为 C_1 ,从而有:

$$C_1 = \sum aL_{ij} \quad (1)$$

惩罚成本参照文献 [24-26] 中的表达方式,当送达的时间在客户要求的时间窗口 $[T_1, T_2]$ 内时,

惩罚成本为 0。而惩罚成本随着偏离时间的增大而增大,当小于左窗口,惩罚系数为 u_1 ;当大于右时间窗时,惩罚系数为 u_2 。设惩罚成本函数为 C_2 ,从而有:

$$C_2 = \begin{cases} u_1(T_1 - t), & t < T_1 \\ 0, & T_1 < t < T_2 \\ u_2(T_2 - t), & T_2 < t \end{cases} \quad (2)$$

将配送中心节点和目标客户节点进行编号,设配送中心节点为 1,目标客户节点为 $2, 3, \dots, n-1, n$ 。引入决策变量 X_{ij} ,当 X_{ij} 等于 1 时,代表车辆可以从节点 i 驶向节点 j ,从而有:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{车辆由节点 } i \text{ 驶向节点 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

设集合 L 为车辆路径的集合, $L = \{L_1, L_2, \dots, L_k\}$ 。集合 P 记录了每次移动的路径长度,路径规划的目标为使得总成本最小,其目标函数如式 (4) 所示:

$$\min C = \min(C_1 + C_2) \quad (4)$$

为了满足前文叙述的目标客户需求量、车辆最大承载量的限制,限制条件如下:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i = 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, j = 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^n X_{ij} = n, \quad (7)$$

$$q_i \leq Q \quad (8)$$

式 (5)、(6) 代表每个节点的出度和入度一致;式 (7) 表示除起始节点外,每个节点送货次数只有一次,且保证每个节点都可以遍历;式 (8) 表示单个目标客户的需求量不大于车辆载重量。

2 算法设计

2.1 蚁群算法核心机制

蚁群算法是一种启发式算法,其本质上是一种基于正反馈的迭代算法。蚁群算法的关键节点步骤有两个,一个是下一节点的选择,另一个是信息素的更新规则。节点选择常见的策略为随机选择、轮盘赌等。信息素的更新策略也有不同的方法,原始蚁群算法基本采用全局更新策略,即当所有蚂蚁完成搜索后才进行信息素的更新。随后在精英蚁群算法中引入了精英策略来提高收敛性,精英策略下无需等待所有蚂蚁完成搜索,只在每次循环中最优蚂蚁的路径上更新信息素。最大最小蚁群算法在基本蚁群算法的基础上,将信息素上的浓度范围限制在一定区间,从而增加了搜索最优解的可能。

原始蚁群算法中, 下一节点的选择是基于概率的, 下一节点选择过程中节点 k 被选择的概率为:

$$P_{i,j}^k[t] = \frac{(\tau_{i,j}(t))^\alpha (\eta_{i,j}(t))^\beta}{\sum_{h \notin tabu_k} (\tau_{i,j}(t))^\alpha (\eta_{i,j}(t))^\beta}, j \notin tabu_k, \quad (9)$$

式中, $\tau_{i,j}(t)$ 为留在 t 时刻停留在路径 (i, j) 上的信息素浓度; $\eta_{i,j}(t)$ 为启发函数, 其包含着路径上已知的信息, $\eta_{i,j}(t)$ 常用的表达式为 $1/C_{i,j}$; α 为可调参数之一, 被称为信息启发因子; β 是另一个可调参数, 被称为期望启发因子; $tabu_k$ 代表禁忌表, 其记录了可选节点以及已选节点。

信息素的更新原则, 当所有蚂蚁结束完全搜索 (从第一个设定点开始并返回) 时, 任意两个设定点

之间路径上的信息素水平需要更新为:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \tau_{i,j}(t) + (1-\rho) \Delta \tau_{i,j}(t), \quad (10)$$

式中, ρ ($\rho \in [0, 1)$) 表示信息素挥发率; $\Delta \tau_{i,j}(t)$ 是每次循环结束后信息素增量, 其数学表达为

$\Delta \tau_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{i,j}^k(t)$ 。设 Q_m 为所有蚂蚁的信息素总量, C_k 为蚂蚁 k 一次遍历所有目标客户所需的总成本, $\Delta \tau_{i,j}^k(t)$ 为单只蚂蚁在从节点 i 移动到节点 j 时遗留的信息素, 有:

$$\Delta \tau_{i,j}^k(t) = Q_m / C_k. \quad (11)$$

蚁群算法程序设计总体上由 2 个循环嵌套构成。外部循环为迭代次数的循环, 用来模拟蚁群系统的多次探索; 内部循环为蚁群系统中单只蚂蚁搜索过程的循环, 如图 1 所示。

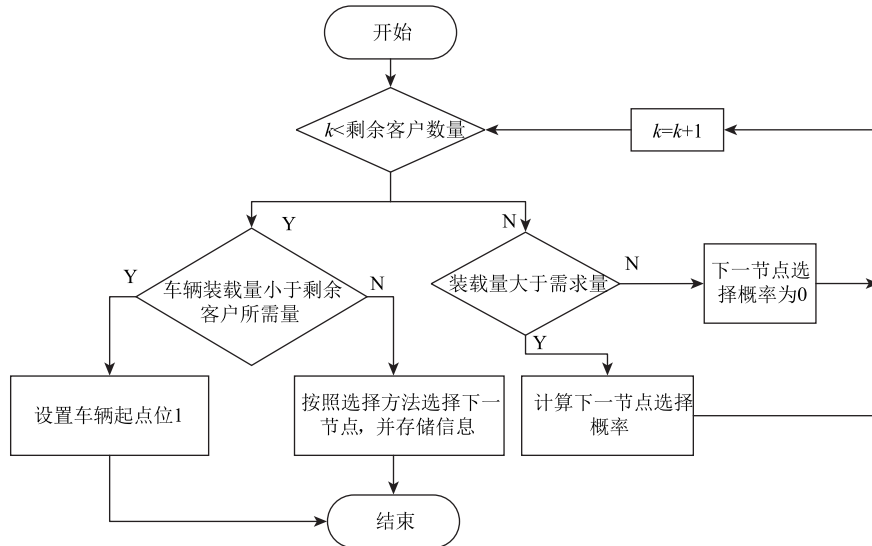


图 1 蚁群算法基本流程

Fig. 1 Basic flow of ant colony algorithm

考虑冷藏运输车载重的限制, 单辆车的载货量无法满足下一目标客户的需求时, 冷藏运输车需要中途返回配送中心。其内部包含一个循环, 即运输车是否完成所有目标客户节点的遍历。冷藏运输车遍历目标客户规则如图 2 所示。

2.2 改进蚁群算法的参数设计

蚁群算法优化性能的高低受到启发式因子、信息素挥发率等关键参数的影响。各参数之间联系紧密且对蚁群算法的全局搜索能力和求解效率有着决定性作用。蚁群算法中采用固定参数, 具有一定的局限性^[27], 设信息启发因子为 α , 期望启发因子 β 的经验值范围为 $[0, 5]$ 。信息素挥发率 ρ 的取值区间为 $[0, 1]$ 。各个参数之间相互耦合, 且与研究问题相关。

同时有文献指出^[28-30]: 当要处理的问题规模比较大且信息素挥发率 ρ 较小时, 算法的随机性能和全局搜索能力增加的同时, 会使算法整体收敛性减弱。若 ρ 增大将会降低算法的随机性能和全局搜索能力, 同时减慢算法的收敛速度。若信息启发因子 α 太大, 搜索的随机性减弱则易使蚂蚁的搜索过早受限于局部最优。当期望启发因子 β 增大, 蚂蚁在某个局部点上选择局部最短路径的可能性越大, 导致蚂蚁搜索最优路径的随机性减弱, 易陷入局部最优; 反之, 启发因子越小, 搜索能力越强, 但是收敛性下降。

引用变参数思想在控制工程中已经得到了广泛的应用^[28], 如分段 PID 控制、参数自适应控制等。综上, 提出了一种朴素的思路: 在算法迭代初期保

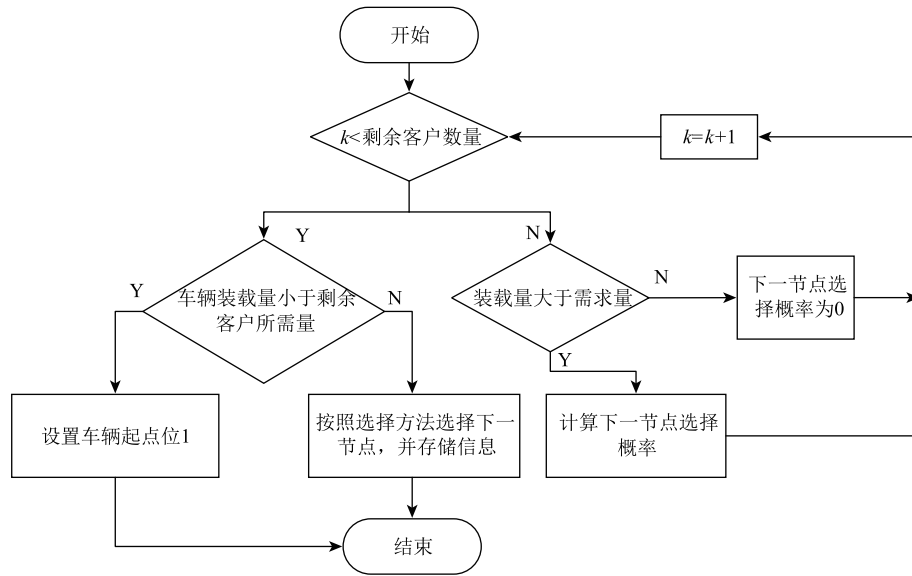


图2 冷藏运输车遍历规则

Fig. 2 Traversal rules of refrigerated transport vehicle

证其搜索能力,在算法迭代中段维持均衡,在迭代末期保证其收敛性能。为了实现上述思路,引入双曲正切函数,其数学表达为:

$$\tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}). \quad (12)$$

在循环搜索初期,为了更大范围地搜索全局最优, ρ 控制于较低水平;路径上的信息素较低,令信息启发因子 α 处于较低水平;为了防止直接陷入局部最优,令期望启发因子 β 也处于较低水平。而在循环搜索末期, ρ , β 均控制于较高水平,从而维持较快的收敛速度。具体的数学表达如式(13)~(15)所示:

$$\alpha = \alpha_{\max} - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \tanh[c_{\alpha}(Nc_{\max} - Nc)], \quad (13)$$

$$\beta = \beta_{\max} - (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \tanh[c_{\beta}(Nc_{\max} - Nc)], \quad (14)$$

$$\rho = \rho_{\min} + (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \tanh[c_{\rho}(Nc_{\max} - Nc)], \quad (15)$$

式中, c_{α} , c_{β} 和 c_{ρ} 是可调参数,用来控制 α , β 和 ρ 的范围; Nc_{\max} 为设定的最大迭代次数, Nc 为当前迭代次数; α_{\max} 和 α_{\min} 为 α 的上限和下限; β_{\max} 和 β_{\min} 为 β 的上限和下限; ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 为 ρ 的上限和下限。

为了减少运算压力,对信息启发因子 α 和期望启发因子 β 做出取整处理,取整规则可以按照四舍五入的规则或者截取规则,引入取整规则后,式(13)、(14)的数学表达分别如式(16)、(17)所示:

$$\beta = \text{Round}\{\beta_{\max} - (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \tanh[c_{\beta}(Nc_{\max} - Nc)]\}, \quad (16)$$

$$\alpha = \text{Round}(\alpha_{\max} - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \tanh[c_{\alpha}(Nc_{\max} - Nc)]). \quad (17)$$

3 算例分析

目标客户的信息如表1所示,将目标客户位置信息转化为二维坐标信息,其中 X 为目标客户位置信息的横坐标, Y 为目标客户位置信息的纵坐标, Q 为目标客户需求量, $Time_Left$ 和 $Time_Right$ 为客户要求时间窗左极限和右极限。时间窗表达方式为距离车辆开始工作时间的时间间隔,例如车辆上午5时开始工作,则 $Time_Left = 1$, $Time_Right = 2$ 意味着目标客户要求的时间窗为 $T[6, 7]$ 。

3.1 不考虑时间窗的冷链物流配送

首先不考虑时间窗限制,对比原始蚁群算法和引入双曲正切函数的蚁群算法解决冷链物流配送路径优化效果,以验证改进算法的有效性。单个目标客户需求量 q 如表1所示,设单位里程油价为2,客户惩罚函数中的惩罚系数 u_1 和 u_2 为0,仿真过程如下。

经过多次试验发现,当 $\alpha = 1$, $\beta = 5$ 时,固定参数的原始蚂蚁算法性能较优。设置参数为 $\alpha = 1$, $\beta = 5$,并且令参数 ρ 变化,分别为0.4, 0.5, 0.6。设置算法的最大迭代次数 Nc_{\max} 为300,每组参数运行3次,记录搜索出的冷链物流配送最小总成本和配送路径顺序。蚁群算法的评价指标有两项标准:

表 1 目标客户信息

Tab. 1 Information of target customers					
节点	X	Y	Q	$Time_Left$	$Time_Right$
1	70	40	0	1	2
2	39.2	70.4	0.102	1	4
3	22.4	45.6	0.113	4	5
4	97.1	45.6	0.095	2	4
5	6	28.7	0.131	2	3
6	62.3	79.6	0.029	4	5
7	42.8	88.5	0.306	5	6
8	86.7	3.4	0.532	5	7
9	87.4	61.2	0.617	5	7
10	88.8	91.3	0.232	3	4
11	14.6	13.2	0.459	3	5
12	46.7	77.6	0.121	3	6
13	20	34	0.3	5	7
14	45	56	0.4	5	9
15	67	24	0.6	6	7
16	89	68	0.5	6	8
17	65	53	0.2	5	8
18	35	89	0.3	4	6
19	45	51	0.24	4	7
20	65	41	0.26	6	8

以冷链物流配送最小总成本为主评价指标,以后 100 次运行结果的方差为次评价指标,其结果如表 2 所示。当 $\rho=0.5$ 和 $\rho=0.6$ 时,搜索结果较优,路径规划结果如图 3、图 4 所示。

表 2 原始蚁群算法解决冷链物流配送问题结果 (不考虑时间窗)

Tab. 2 Results of solving cold chain logistics distribution problem with traditional ant colony algorithm (without considering time window)		
参数 ρ	最小成本	方差
0.4	2 537	0
0.5	2 498	0.002
0.6	2 473	8.788

在蚁群算法中引入双曲正切函数,设置算法参数如下: $Nc_{max}=300$, $\rho_{min}=0.4$, $\rho_{max}=0.7$; $\alpha_{min}=1$, $\alpha_{max}=2.5$; $\beta_{min}=1$, $\beta_{max}=5$ 。经过路径规划后冷链物流配送系统最小成本为 2 433.4,方差为 0。其路径规划如图 5 所示。

对比原始蚁群算法和改进蚁群算法的运行结果,采用不同线型表示引入双曲正切函数的蚁群算法迭

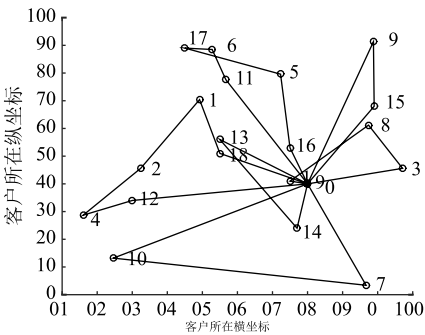


图 3 $\rho=0.5$ 时路径规划结果
Fig. 3 Path planning result when $\rho=0.5$

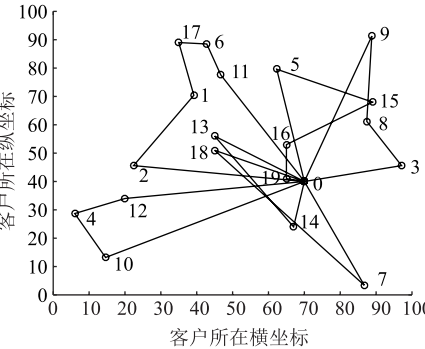


图 4 $\rho=0.6$ 时路径规划结果
Fig. 4 Path planning result when $\rho=0.6$

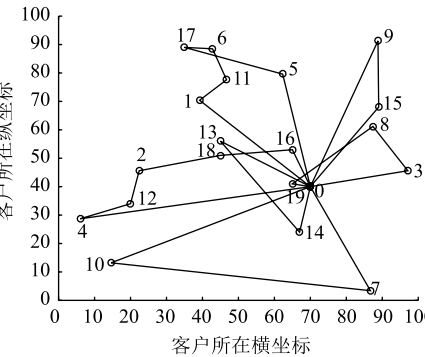


图 5 引入双曲正切函数路径规划结果
Fig. 5 Path planning result by introducing hyperbolic tangent function

代曲线和不同固定参数的原始蚁群算法迭代曲线,后者固定参数分别取 $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.6$; $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.5$; $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.4$ 。其结果如图 6 所示。

由图 6 可知,当 $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.6$ 时,原始蚁群算法收敛性较差,在迭代过程中几乎无法稳定;当 $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.4$ 时,原始蚁群算法虽收敛性较好,但是搜索到的最小成本较高。将双曲正切函数引入蚁群算法后,其收敛性及收敛速度都得到提升,同时冷链物流运输系统总成本最低。仿真结果表明,引入双曲正切函数可显著提升蚁群算法的性能。

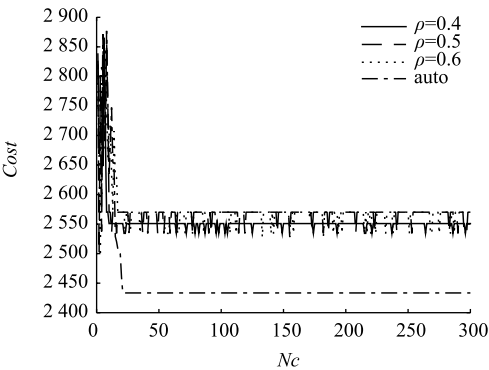


图 6 运行结果对比

Fig. 6 Comparison of operating results

3.2 考虑时间窗冷链物流配送问题

在验证蚁群算法引入双曲正切函数有效性的基础上,研究考虑时间窗的冷链物流配送路径优化问题。将单个目标客户需求量按表 1 设定,设单位里程油价为 2,客户惩罚函数中的惩罚系数设为 $u_1 = u_2 = 5$ 。赋予 u_1 和 u_2 的数值量并不具有单位,仅仅表示其对成本增加的贡献量。

首先采用原始蚁群算法进行最小成本路径的搜索,经过多次试验后,发现固定参数为 $\alpha = 1, \beta = 5$ 时搜索效果和鲁棒性较优。且采用固定参数的原始蚁群算法均可快速收敛,后 100 次方差运行几乎为 0。因此 3.1 节验证算法性能的指标不再适用,重新定义算法性能评价指标:搜索的总成本路径最小和收敛时循环次数最低。

在 $\alpha = 1, \beta = 5$ 的条件下,使得 ρ 分别等于 0.3, 0.5, 0.7 进行试验,确定 ρ 的最优参数。设置算法的最大迭代次数 Nc_Max 为 300,搜索得到的最小成本路径及收敛时迭代次数如表 3 所示,迭代过程如图 7 所示。由表 3 可知,当 $\rho = 0.7$ 时搜索得到的路径成本最小,迭代次数为 19 次。

表 3 原始蚁群算法解决物流配送问题结果

Tab. 3 Result of solving logistics distribution problem with traditional ant colony algorithm		
参数 ρ	最小成本	收敛迭代次数
0.3	2 601	7
0.5	2 558	11
0.7	2 547	19

采用引入双曲正弦函数的蚁群算法进行最小总成本路径搜索,各参数的上限和下限分别设置为 $\rho_{\min} = 0.4, \rho_{\max} = 0.7; \alpha_{\min} = 1.5, \alpha_{\max} = 3; \beta_{\min} = 1, \beta_{\max} = 5$ 。引入双曲正弦函数的蚁群算法规划得到的路径顺序如图 8 所示。将仿真结果与采用固定参数

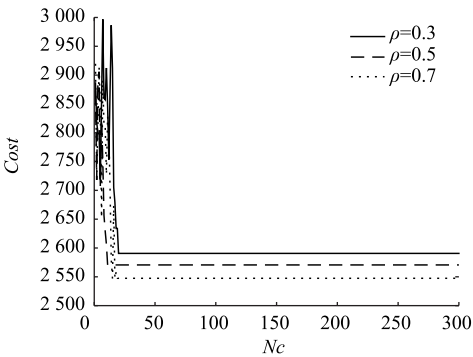


图 7 原始蚁群算法解决冷链物流配送问题迭代曲线

Fig. 7 Iterative curves of solving cold chain logistics distribution problem with traditional ant colony algorithm

的蚁群算法进行对比,对比结果如图 9 所示。

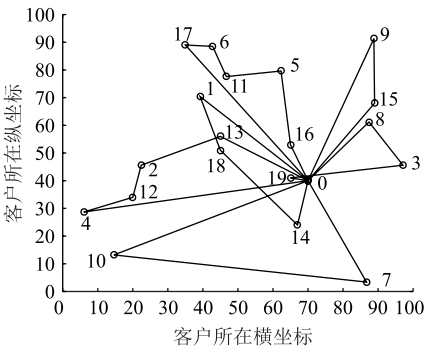


图 8 冷链物流配送最小成本路径规划

Fig. 8 Route planning for minimum cost of cold chain logistics distribution

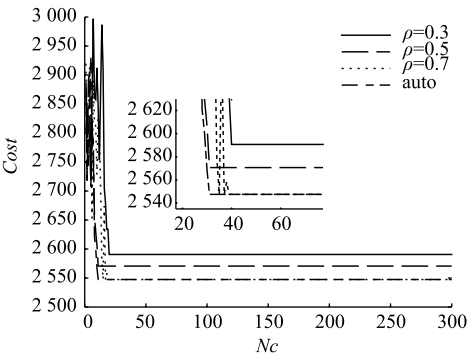


图 9 运行结果对比

Fig. 9 Comparison of operating results

由图 9 可知,固定参数, $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.7$ 下搜索得到的路径成本最小,但是收敛时迭代次数相对较长,在其他固定参数下虽然可以较快收敛,但是搜索得到的最小路径成本增大。而在蚁群算法中引入变参数思想后,搜索得到的最小路径成本为 2 547,迭代次数也控制在 11 次,即引入双曲正弦函数的蚁群算法在可以搜索到较优路径的前提下,显著提高收敛速度。由此可知,变参数思想有利于提

升全局搜索能力和收敛性的兼容性,通过双曲正弦函数实现变参数思想是一种可行的方法。

4 结论

冷链物流不同于普通物流,前者配送全程都处于低温条件下,其油耗成本和碳排放量远高出普通物流。随着节能减排发展理念的持续推进,冷链物流配送路径优化问题尤为重要。本研究在客户需求量、车辆最大承载量、客户时间窗要求等约束条件下建立以油耗成本和惩罚成本等综合配送成本最小为目标的数学优化模型。针对蚁群算法收敛速度较慢、容易陷入局部最优等问题,将变参数的思想引入蚁群算法,通过双曲正切函数实现在算法迭代过程中自动调整参数,从而达到算法初期全局搜索能力较强,算法后期收敛速度显著提升的目的。通过仿真和对比试验,验证了该模型和算法的有效性,可为冷链物流行业实现经济与环保双赢局面提供科学的方法支持。此外,双曲正弦函数的引入并不仅仅适用于蚁群算法,受参数影响较大的优化算法均可以引入此种思想。

引入双曲正弦函数后,首先需要确定算法参数的上下极限,因此如何快速确定参数的上限和下限是值得研究的一项工作。同时蚁群算法参数对其性能影响的机理仍然不清晰,缺乏系统性的数学理论支撑,后续需要对参数影响搜索结果的机理进行更加深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] 原雅坤,陈久梅,但斌. 碳约束下冷链物流效率及其收敛性研究——以生鲜农产品为例 [J]. 科技管理研究, 2020, 40 (14): 253-260.
YUAN Ya-kun, CHEN Jiu-mei, DAN Bin. Research on the Efficiency and Its Convergence of Cold-chain Logistics Considering Carbon Constriction: Taking Fresh Agricultural Products as an Example [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40 (14): 253-260.
- [2] ZHAO H, LIU S, TIAN C, et al. An Overview of Current Status of Cold Chain in China [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 483-495.
- [3] 陈玉光,陈志祥. 基于准时送货和最小耗油的配送车辆路径问题研究 [J]. 中国管理科学, 2015, 23 (增1): 156-164.
CHEN Yu-guang, CHEN Zhi-xiang. Study on the Vehicle Problem with Objectives of On-time Delivery and Oil Consumption Minimization [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23 (S1): 156-164.
- [4] 周鲜成,周开军,王莉,等. 物流配送中的绿色车辆路径模型与求解算法研究综述 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41 (1): 213-230.
ZHOU Xian-cheng, ZHOU Kai-jun, WANG Li, et al. Review of Green Vehicle Routing Model and Its Algorithm in Logistics Distribution [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2021, 41 (1): 213-230.
- [5] 刘学之,上官强强,张博淳,等. 交通运输行业低碳多式联运模式的路径优化 [J]. 科技管理研究, 2021, 41 (12): 192-200.
LIU Xue-zhi, SHANGGUAN Qiang-qiang, ZHANG Bo-chun, et al. Path Optimization of Low-carbon Multimodal Transport Mode in Transportation Industry [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41 (12): 192-200.
- [6] 方文婷,艾时钟,王晴,等. 基于混合蚁群算法的冷链物流配送路径优化研究 [J]. 中国管理科学, 2019, 27 (11): 107-115.
FANG Wen-ting, AI Shi-zhong, WANG Qing, et al. Research on Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization Based on Hybrid Ant Colony Algorithm [J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27 (11): 107-115.
- [7] 杜琛,李怡靖. 基于客户满意度和最小损耗的冷链配送路径问题研究 [J]. 工业工程与管理, 2020, 25 (6): 163-171.
DU Chen, LI Yi-jing. Research on Cold Chain Logistics Distribution Routing Problem Based on Customer Satisfaction and Minimum Loss [J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25 (6): 163-171.
- [8] 袁志远,高杰,杨才君. 多种药品集中配送路径优化研究 [J]. 工业工程与管理, 2022, 27 (1): 21-29.
YUAN Zhi-yuan, GAO Jie, YANG Cai-jun. Study on Optimization of Centralized Distribution Route for Multiple Medicines [J]. Industrial Engineering and Management, 2022, 27 (1): 21-29.
- [9] 张思颖,陈宁,李延晖,等. 低碳视角下城市冷链物流配送系统优化决策研究 [J]. 工业工程与管理, 2022, 27 (1): 56-64.
ZHANG Si-ying, CHEN Ning, LI Yan-hui, et al. Research on Optimization Decision of Urban Cold Chain Logistics Distribution System from the Perspective of Low Carbon [J]. Industrial Engineering and Management, 2022, 27 (1): 56-64.
- [10] 付焯,严余松,岳昊,等. 考虑抗风险努力贡献度的生

- 鲜农产品运输损耗控制 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (7): 144-151.
- FU Zhuo, YAN Yu-song, YUE Hao, et al. Controlling Transport Loss of Fresh Agricultural Products Considering Contribution of Risk-resisting [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (7): 144-151.
- [11] 唐燕, 许睿, 黄锴迪, 等. 基于温区细化的多温共配车辆路径优化 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (3): 136-143.
- TANG Yan, XU Rui, HUANG Kai-di, et al. Optimization of Multi-temperature Co-distribution Vehicle Route Based on Temperature Zone Refinin [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (3): 136-143.
- [12] 山红梅, 杨雪静. 基于云模型-IAHP 的生鲜农产品冷链物流服务水平评估 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (10): 142-150.
- SHAN Hong-mei, YANG Xue-jing. Evaluation of Cold Chain Logistics Service Level of Fresh Agricultural Products Based on Cloud Model-IAHP [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (10): 142-150.
- [13] 李倩, 蒋丽, 梁昌勇. 基于模糊时间窗的多目标冷链配送优化 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (23): 255-262.
- LI Qian, JIANG Li, LIANG Chang-yong. Multi-objective Cold Chain Distribution Optimization Based on Fuzzy Time Window [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57 (23): 255-262.
- [14] 周鲜成, 刘长石, 周开军, 等. 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法 [J]. 管理科学学报, 2019, 22 (5): 57-68.
- ZHOU Xian-cheng, LIU Chang-shi, ZHOU Kai-jun, et al. Improved Ant Colony Algorithm and Modelling of Time-dependent Green Vehicle Routing Problem [J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22 (5): 57-68.
- [15] MACRINA G, LAPORTE G, GUERRIERO F, et al. An Energy-efficient Green-vehicle Routing Problem with Mixed Vehicle Fleet, Partial Battery Recharging and Time Windows [J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276 (3): 971-982.
- [16] 鲍春玲, 张世斌. 考虑碳排放的冷链物流联合配送路径优化 [J]. 工业工程与管理, 2018, 23 (5): 95-100.
- BAO Chun-ling, ZHANG Shi-bin. Route Optimization of Cold Chain Logistics in Joint Distribution: with Consideration of Carbon Emission [J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23 (5): 95-100.
- [17] 王诺, 王翊萱, 田玺环, 等. 远海岛礁冷链物流体系优化模型及其集成算法 [J]. 中国管理科学, 2019, 27 (10): 100-109.
- WANG Nuo, WANG Yi-xuan, TIAN Xi-huan. The Optimization Model and Integrated Algorithm of Cold Chain Logistics of South Chinese Sea [J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27 (10): 100-109.
- [18] 符卓, 刘文, 邱萌. 带软时间窗的需求依订单拆分车辆路径问题及其禁忌搜索算法 [J]. 中国管理科学, 2017, 25 (5): 78-86.
- FU Zhuo, LIU Wen, QIU Meng. A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Soft Time and Split Deliveries by Order [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25 (5): 78-86.
- [19] BRANDÃO J. A Memory-based Iterated Local Search Algorithm for the Multi-depot Open Vehicle Routing Problem [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 284 (2): 559-571.
- [20] 薛锋, 王慈光, 牟峰. 基于信息熵和混沌理论的遗传-蚁群协同优化算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (1): 44-48.
- XUE Feng, WANG Ci-guang, MOU Feng. Genetic and Ant Colony Cplaborative Optimization Algorithm Based on Information Entropy and Chaos Theory [J]. Control and Decision, 2011, 26 (1): 44-48.
- [21] 任腾, 罗天羽, 李姝萱, 等. 面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (3): 545-554.
- REN Teng, LUO Tian-yu, LI Shu-xuan, et al. Knowledge Based Ant Colony Algorithm for Cold Chain Logistics Distribution Path Optimization [J]. Control and Decision, 2022, 37 (3): 545-554.
- [22] 马贵平, 潘峰. 基于改进蚁群算法的物流运输路径研究 [J]. 计算机工程与科学, 2020, 42 (3): 523-528.
- MA Gui-ping, PAN Feng. Logistics Transportation Route Research Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42 (3): 523-528.
- [23] ZHANG H, ZHANG Q, MA L, et al. A Hybrid Ant colony Optimization Algorithm for a Multi-objective Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows [J]. Information Sciences, 2019, 490: 166-190.
- [24] NACCACHE S, CÔTÉ J-F, Coelho L C. The Multi-pickup and Delivery Problem with Time Windows [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269 (1): 353-362.
- [25] MARINAKIS Y, MARINAKI M, MIGDALAS A. A Multi-adaptive Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Time Windows [J]. Information Sciences, 2019, 481: 311-329.

(下转第 258 页)

- [30] 曲冲冲, 王晶, 黄钧, 等. 考虑时效与公平性的震后应急物资动态配送优化研究 [J]. 中国管理科学, 2018, 26 (6): 178-187.
- QU Chong-chong, WANG Jing, HUANG Jun, et al. Dynamic Emergency Materials Distribution Optimization with Timeliness and Fairness Objective for Post-earthquake Emergency Rescue [J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26 (6): 178-187.
- [31] 周鲜成, 刘长石, 周开军, 等. 时间依赖型绿色车辆路径模型及改进蚁群算法 [J]. 管理科学学报, 2019, 22 (5): 57-68.
- ZHOU Xian-cheng, LIU Chang-shi, ZHOU Kai-jun, et al. Improved ant Colony Algorithm and Modelling of Time Dependent Green Vehicle Routing Problem [J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22 (5): 57-68.
- [32] 吴丽荣, 胡祥培, 饶卫振. 考虑燃料消耗率的车辆路径问题模型与求解 [J]. 系统工程学报, 2013, 28 (6): 804-811.
- WU Li-rong, HU Xiang-pei, RAO Wei-zhen. New Capacity-vehicle-routing-problem Model and Algorithm for Reducing Fuel Consumption [J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28 (6): 804-811.
- [33] DEMIR E, BEKTAS T, LAPORTE G. A Comparative Analysis of Several Vehicle Emission Models for Road Freight Transportation [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2011, 16: 347-357.
- [34] HICKMAN A J. Methodology for Calculating Transport Emissions [J]. Cold Starts, 1999, 12 (3): 12-15.
- [35] SOLOMON M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints [J]. 1985. 22 (2): 26-30.
- [36] 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 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34 (12): 3063-3072.
- LI Jin, ZHANG Jiang-hua. Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Carbon Emissions and Speed Optimization [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2014, 34 (12): 3063-3072.
-
- (上接第 244 页)
- [26] MACRINA G, PUGLIESE L D P, GUERRIERO F, et al. The Green Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Partial Battery Recharging and Time Windows [J]. Computers & Operations Research, 2019, 101: 183-199.
- [27] PELLEGRINI P, STUTZLE T, BIRATTARI M. A Critical Analysis of Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization [J]. Swarm Intelligence, 2012, 6 (1): 23-48.
- [28] WU H G, GAO Y L, WANG W T, et al. A Hybrid Ant Colony Algorithm Based on Multiple Strategies for the Vehicle Routing Problem with Time Windows [J]. Complex & Intelligent Systems, 2021, 9: 2491-2508.
- [29] 李亮, 康铭鑫, 宋健, 等. 汽车牵引力控制系统的变参数自适应 PID 控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (12): 92-98.
- LI Liang, KANG Ming-xin, SONG Jian, et al. Adaptive PID Controller with Variable Parameters for Vehicle Traction Control System [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (12): 92-98.
- [30] 张艳, 王淑云. 控制力影响定价的生鲜品供应链优化模型 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (11): 150-158.
- ZHANG Yan, WANG Shu-yun. Comparison of Fresh Product Supply Chain Performances Considering Control Power [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 38 (11): 150-158.