

基于改进哈里斯鹰算法的生鲜品冷链物流路径优化研究*

张天瑞¹, 祝芳芳², 牛慧媛¹

(1. 沈阳大学 机械工程学院; 2. 沈阳大学 应用技术学院, 沈阳 110044)

摘要:严重的交通拥堵问题会导致生鲜产品在冷链物流配送过程中时效性降低。为了提升顾客满意度、保证商品新鲜度和降低配送成本,提出了考虑交通拥堵的生鲜品冷链物流配送模型,并改进了哈里斯鹰优化算法以提高求解精度。首先,基于传统的生鲜产品冷链物流模型,在考虑交通拥堵的情况下,综合考虑各项配送成本,构建了新的配送模型。其次,针对哈里斯鹰优化算法收敛速度慢、易陷入局部最优的不足,设计改进的哈里斯鹰算法,加强局部寻优能力,提高求解精度。最后,通过仿真实验,验证了所建模型和改进算法的性能。通过仿真实验和对比分析,证明了所提算法能够得到最小目标函数值和最优配送路线。因此,说明所提出的数学模型及改进算法是有效的。

关键词:冷链物流;路径优化;交通拥堵;改进哈里斯鹰算法

中图分类号:O221;U116.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)02-0001-13

随着生活水平不断提高,人们的消费观念逐渐转变,对生鲜冷链产品的需求越来越大,因此生鲜电商平台得到迅猛发展。在冷链物流快速发展的同时,人们对产品的时效性和新鲜度也提出了更高的要求。原来传统的大批量、少批次配送模式已经难以适应新需求,小批量、多品种、高频率的配送模式已经成为冷链生鲜产品的主要模式。但是,目前中国的机动车保有量位居世界第一^[1],日益严重的交通拥堵问题制约着冷链物流行业的发展。因此,如何合理规划冷链物流路径,在保证冷链运输的速度与保鲜品质的同时,尽量降低企业的配送成本,提高顾客满意度,是解决生鲜品冷链物流配送的关键问题。

车辆路径问题于1959年由Dantzig等人^[2]首次提出,而生鲜品冷链物流路径优化问题受时效性和高效性等要求,需要规划冷链物流配送路径。针对上述问题,学者们目前取得了大量的研究成果,Jabir等人^[3]综合考虑环境因素进行车辆路径规划,构建以运输成本和碳排放为目标的数学模型,并设计了蚁群算法求得最优解;Alkaabneh等人^[4]利用Benders分解和元启发式算法对易腐产品车辆配送问题求解最小运输成本、库存成本及碳排放成本,并设计改进算法求得最优解;Allahviranloo等人^[5]对条件不确定的路径问题进行求解,再使用并行的遗传算法对模型求解;Bektas等人^[6]提出污染车辆路径问题,其中设置的优化目标除配送成本外,还有碳排放成本;张梦^[7]基于生鲜产品配送时新增订单的需求,对需求的终端配送问题作了进一步研究;辜勇等人^[8]针对车辆与无人机协同配送问题,综合考虑动态能耗的约束,构建以总配送成本最小的混合整数规划模型,并设计混合蚁群算法进行高效求解。虽然上述研究都考虑了配送成本和时间窗,但还是存在一定的局限性,例如车辆配送行驶速度设定为匀速;总成本构成往往只考虑了固定成本、运输成本和制冷成本等有限的成本类型,而忽略了货损成本、交通拥堵造成的惩罚成本等其他可能对总成本产生较大影响的因素。因此,需要对车辆路径问题的数学模型进行改进和完善。

目前针对考虑交通拥堵的配送模型问题,赵志学等人^[9]将道路拥堵因素融入到数学模型中,综合考虑经济和环境成本,并设计改进蚁群算法求得最优解;张济风等人^[10]利用拥堵指数求得时变路网函数,并以时变路网函数代表车辆速度构建数学模型;姚源果等人^[11]构建了基于实时路况和接驳点的数学模型,并应用蚁群算法求解,证明该模型可以在降低成本的同时,提高了客户满意度;王恒等人^[12]建立车速特征模型,速度的影响率随路段不同而发生变化,从而实现时变路网,并综合考虑路况、时间窗构建生鲜品配送的多目标模型;狄卫民等人^[13]针对

* 收稿日期:2024-02-18 修回日期:2024-08-14 网络出版时间:2025-04-30T09:27

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 52075088);辽宁省研究生教育教学改革研究项目(No. LNYJG2022490)

第一作者简介:张天瑞,男,教授,博士,研究方向为生产物流管理,E-mail: trzhang@syu.edu.cn;通信作者简介:牛慧媛,女,E-mail: lareinaup@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250429.1610.016

常发性拥堵,对配送时段进行划分,用拥堵系数反映路段的拥堵状况,从而为车辆设置相应的速度。以上研究在反映交通情况时主要依靠早期车辆数据集建立模型,并应用交通拥堵指数构建考虑交通拥堵的数学模型,但早期数据并不一定能很好地反映当下的路况,存在一定的局限性。

哈里斯鹰优化(Harris hawks optimization, HHO)算法是 Heidari 等人^[14]于 2019 年提出的一种元启发式算法。该算法模拟哈里斯鹰捕食行为的探索、转换和开发这 3 个阶段,具有原理简单、参数较少、全局搜索能力强等特点,目前已运用于 TDOA 定位^[15]、图像分割^[16]、电机控制^[17]等领域。但是在处理复杂优化问题时,HHO 算法存在局限性,在开发过程中收敛精度低,易陷入局部最优空间且收敛速度慢。为此, Jia 等人^[18]通过修改动态控制参数来平衡 HHO 算法的全局搜索与局部开发。鲍浩等人^[19]引入离散化、混沌映射、反向学习等策略改进 HHO 算法,并应用改进算法求解光谱数据集的最优波段。由此不难看出,改进 HHO 算法在解决复杂的优化问题方面具有明显优势,因此,本文考虑将该算法应用于物流路径优化的研究。考虑交通拥堵情况下的生鲜品的冷链物流路径优化问题,构建以总配送成本最低为优化目标的优化模型,总成本包括固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本和惩罚成本,根据所建模型设计改进的 HHO 算法进行求解,进而验证改进算法的有效性。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

研究考虑交通拥堵的生鲜品冷链物流路径优化问题,由 1 个配送中心的车辆为客户配送生鲜产品,每辆车可为多个客户提供配送服务;且客户位置、货物需求量、服务时间窗已知;随着时间的变化,在不同节点速度不尽相同。综合考虑固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本和惩罚成本等多个优化目标,找到更优的配送路径方案。

1.2 模型假设与约束

为了更好地界定问题,做出以下假设和约束:

- 1) 配送中心拥有足够多的车辆,以保证所有配送需求得到满足;
- 2) 所有配送车辆从配送中心出发,在完成配送后,均返回配送中心;
- 3) 不同类型的生鲜产品对温度的需求不同,但本文仅考虑同一类型生鲜产品,并设定唯一腐败率;
- 4) 每辆车在配送过程中,确保分配的客户订单需求总量不超过车辆的额定载重量;
- 5) 配送中心拥有足够的车辆,以保证所有配送需求得到满足;
- 6) 每个客户仅被配送车辆访问 1 次,配送中心商品数量充足,能够满足所有客户的订单需求;
- 7) 如配送未能在客户指定的时间窗内完成,会产生的惩罚成本;
- 8) 配送时长除运输和装卸的时间外,不考虑其他形式的停歇时间;
- 9) 仅考虑交通拥堵对行驶速度的影响,不考虑天气状况、交通事故等突发事件的影响。

2 模型构建

本研究在考虑交通拥堵情况下,以总配送成本最小化为目标,构建了包含固定成本、运输成本、货损成本、制冷成本和惩罚成本的目标函数模型。同时设定约束条件,使车辆由配送中心出发,在完成配送任务后,最终返回配送中心。

2.1 成本函数分析

1) 固定成本。固定成本仅与配送车辆有关,与配送的时间和路程长短无关。这些成本主要包括参与配送的车辆保养、折旧费用以及司机的固定薪酬等。为简化计算,这些费用统一折合为车辆的固定成本,并根据参与配送的车辆数量来计算配送过程中所需的总固定成本。假设配送中心拥有足够多的配送车辆, $K = \{k | k = 1, 2, 3, \dots, k\}$, k 表示配送车辆,即共有 K 辆冷藏车可以提供冷链配送需求; $N = \{n | n = 1, 2, 3, \dots, n\}$, 其中 n 表示单个的顾客需求点, N 表示总需求点的个数; i, j 代表客户点编号。固定成本的计算公式为:

$$C_1 = f_1 \sum_{k=1}^K X_i^k,$$

式中: f_1 代表每辆车的固定成本; X_i^k 为 0-1 变量,如果使用第 k 辆车进行配送,则 X_i^k 的值设为 1,如果不使用此

辆车,则 X_i^k 值设为 0。

2) 运输成本。冷藏车的运输成本是指车辆从配送中心出发,经过各个客户需求点,最后返回配送中心所需的总能耗成本。这种成本主要与配送车辆行驶的总距离有关,运输距离越长,相应的运输成本就越高。因此,为了有效降低车辆运输成本,在车辆配送过程中,尽可能地减少车辆的总行驶里程。在本文所建模型中,运输成本 C_2 的计算公式为:

$$C_2 = f_2 \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N} X_{ij}^k d_{ij},$$

式中: f_2 代表车辆行驶每单位距离所需的距离成本; X_{ij}^k 用来代表车辆 k 从客户点 i 前往客户点 j ,若使用车辆 k 完成 i 点到 j 点的配送服务,则取值为 1,否则,取值为 0; d_{ij} 代表客户点 i 到客户点 j 的总行驶距离。

3) 货损成本。冷链产品具有抑郁损耗的特点,在配送和装卸搬运的过程中,随着时间的推移,生鲜冷链产品的品质会下降,从而导致经济损失,这种产品损耗可以直接转化为货损成本。货损成本在计算过程中,需要设置产品新鲜度衰减函数,综合考虑多个因素,例如温度波动、湿度变化、装卸频率等。新鲜度的衰减函数与时间紧密相关,能够预测生鲜产品在特定时间点的品质。依据产品新鲜度衰减函数可以对货损成本进行计算,具体计算公式如下:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-at},$$

式中: $\theta(t)$ 代表产品在 t 时刻的新鲜水平, θ_0 代表产品初始新鲜水平, a 代表产品腐败速率常数。产品的新鲜度衰减曲线如图 1 所示,产品新鲜度随着时间的推移迅速下降,开始时下降最快,随后降速减缓,但持续降低,反映了产品新鲜度随着时间的增长而降低。

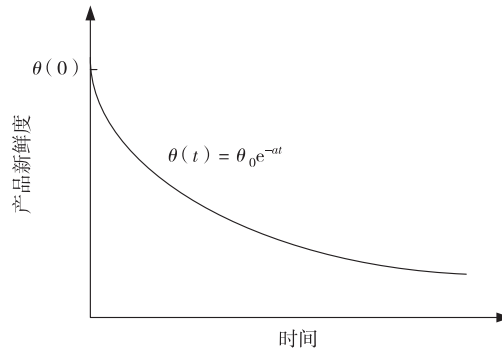


图 1 产品新鲜度衰减曲线图

Fig. 1 Product freshness decay curve chart

货损成本通常受到物流过程中运输和装卸作业时长的影响,这些作业时间越长货损成本越高。本文应用产品新鲜度衰减函数对配送车辆运输途中和装卸搬运期间产生的货损成本进行计算,具体计算公式如下:

$$C_4 = P \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} q_i x_i^k (1 - \exp(-a_1 T_i^k)) + P \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} Q_i^k x_i^k (1 - \exp(-a_2 t_i^k)),$$

式中: P 代表每单位生鲜产品的价格, q_i 代表客户点 i 对生鲜产品的需求量, a_1 和 a_2 分别对应车辆在运输途中和装卸搬运时生鲜产品的腐败率, Q_i^k 代表车辆 k 在离开客户点 i 时剩余的货物量。

4) 制冷成本。为保证冷链产品在运输过程中的品质,需要使用冷藏车完成配送任务。冷藏车通过消耗制冷剂维持车内的低温环境,制冷剂的消耗量取决于车辆在配送中产生的热负荷,因此,可以用热负荷衡量冷藏系统的制冷需求。

配送的冷藏车产生的热负荷主要由 3 个部分构成:首先,来源于外部环境对车厢内部的热传导;其次,是车厢内外空气的交换,冷藏车的门打开进行装卸货物时,暖空气进入车厢会带入热量,且冷空气的流失会造成能量损耗,从而产生热负荷;最后,冷藏车内的设备(如制冷系统的压缩机、风扇、照明设备等)在运行时也会产生热负荷。但在实际冷链物流配送过程中,来自外部的热传导和装卸过程中的空气交换产生的热负荷较大。因此,本文制冷成本的计算中主要包括配送和装卸这 2 个过程中产生的制冷成本,计算公式为:

$$C_3 = f_3 \sum_{i, j \in N} \sum_{k \in K} X_{ij}^k t_{ij}^k + f_4 \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} X_i^k t_i^k,$$

其中: f_3 为配送车辆行驶过程中每单位时间产生的制冷成本, t_{ij}^k 为车辆 k 从 i 点行驶至 j 点所需的时长, f_4 为

卸货过程中每单位时间产生的制冷成本,且 $f_4 > f_3$, t_i^k 为车辆 k 在 i 客户点完成装卸任务所需要的时间。

5) 时间窗惩罚成本。冷链物流的客户对配送时效性有着更高要求,当配送任务未能在客户指定的时间窗内完成时,会产生相应的惩罚成本。硬时间窗要求车辆必须在指定的时间范围内到达客户点,如果超出指定时间窗范围,则会导致配送失败或客户拒收。软时间窗对配送时刻的限制较为宽松,允许在一定程度上的提前或延迟,但仍会产生一定的惩罚成本。鉴于实际配送过程中可能遇到如交通拥堵、车辆故障等突发因素,在配送时使用硬时间窗与实际配送场景不符。因此,本文提出使用混合时间窗计算配送过程中产生的时间窗惩罚成本,设置 2 个配送区间,分别为客户可接受时间窗 $[T_i^E, T_i^L]$ 和客户期待的配送时间窗 $[T_i^{E'}, T_i^{L'}]$, 其中 $[T_i^{E'}, T_i^{L'}] \subset [T_i^E, T_i^L]$ 。时间窗惩罚成本随时间不断变化,当配送时间在可接受时间窗外时,惩罚成本最高;当配送时间接近客户期待的配送时间窗时,惩罚成本逐渐降低;当在期待配送时间窗时,没有时间窗惩罚成本。因此,时间窗惩罚成本的具体计算公式如下:

$$C_5 = \begin{cases} \epsilon_0 P_i, T_i^k < T_i^E, \\ \epsilon_1 (T_i^{E'} - T_i^k)^\varphi P_i \epsilon_0, T_i^E \leq T_i^k < T_i^{E'}, \\ 0, T_i^{E'} \leq T_i^k \leq T_i^{L'}, \\ \epsilon_1 (T_i^k - T_i^{L'})^\varphi P_i \epsilon_0, T_i^{L'} < T_i^k < T_i^L, \\ \epsilon_0 P_i, T_i^k > T_i^L. \end{cases}$$

其中: ϵ_0 表示生鲜产品的利润系数, ϵ_1 表示配送车辆提前到达的等待惩罚系数, φ 表示调节惩罚成本的参数, T_i^k 表示车辆 k 从配送中心出发到达点 i 的时间, P_i 表示配送至客户需求点 i 的货物价值。

因此,配送过程中的总惩罚成本具体计算公式为 $C_5 = \sum_{i=1}^N C_{5i}$ 。

2.2 模型建立

综上所述,本文研究的考虑交通拥堵的生鲜品冷链物流路径优化模型为:

$$\min Z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5。$$

约束条件如下:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{ij}^k d_{ij} \leq D, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} X_i^k Q_i \leq Q, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} X_{ij}^k \leq 1, \forall i, j \in N, \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} X_i^k = 1, \forall i \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{ij}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} X_{ji}^k, \quad (5)$$

$$t_i^k = \frac{Q_i}{\delta}, \forall i \in N, \forall k \in K, \quad (6)$$

$$t_{ij}^k = \frac{X_{ij}^k}{v_\sigma}, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$T_j^k = t_i^k + t_{ij}^k + T_i^k, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \quad (8)$$

$$X_{ij}^k (X_{ij}^k - 1) = 0, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \quad (9)$$

$$y_i^k (y_i^k - 1) = 0, \forall i \in N, \forall k \in K. \quad (10)$$

在上述模型中,式(1)代表每个配送车辆在 1 个配送周期内行驶的总路程不超过该车辆可行驶的最远距离;式(2)规定了每辆配送车辆在配送过程中所承载的货物总量不能超过该车辆的最大载重能力;式(3),(4)限制了每个需求点只能接受 1 辆车的单次服务,以此避免重复进行配送;式(5)确保所有冷藏车在完成配送后,均需要返回配送中心;式(6)和式(7)分别代表车辆装卸搬运的时间和进行配送的时间,其中 δ 为装卸搬运效率;式(8)代表车辆到达各客户需求点的总时间;式(9)和式(10)代表 X_{ij}^k 和 y_i^k 为 0-1 变量,为模型增加了逻辑约束。

2.3 拥堵速度设定

为简化拥堵速度模型,本文参考文献[20],将时变交通的整个配送时间分为 l 个区间,每个区间对应不同的

时长,可以描述为:配送时间区间的集合 $Z = \{[T_0, T_1], [T_1, T_2], \dots, [T_{l-1}, T_l]\}$;同一区间的拥堵系数 σ 的变化率 ξ 为固定值,这一固定值能够直观地反映该时间段内道路的拥堵变化情况。当 $\xi > 0$ 时,表示该时间段内道路拥堵程度加剧;当 $\xi < 0$ 时,表示该时间段内道路拥堵状况得到缓解;当 $\xi = 0$ 时,表示该时间段内道路拥堵程度保持不变。

各时间段拥堵系数变化率的集合 $P = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_l\}$,拥堵系数 σ 在变化率 ξ 的影响下不断发生变化。当车辆行驶时间 $t \in [T_{l-1}, T_l]$,在 T_{l-1} 时刻的拥堵系数为 σ_{l-1} ,则车辆在 t 时刻的拥堵系数为 $\sigma_t = \xi_l(t - T_{l-1}) + \sigma_{l-1}$ 。配送车辆的实际行驶速度为 $v_\sigma = v/(1 + \sigma)$,其中: v 表示车辆在道路畅通无阻的情况下的平均行驶速度,本文设定车辆匀速行驶的速度为 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。通过本文设计的拥堵速度模型,可以有效避免车辆在行驶过程中跨过不同时间区间且速度频繁变化的复杂情况,不仅简化了配送路径的规划过程,还使结果更加贴近城市路网随时间波动的实际情况。

3 算法设计

3.1 HHO 算法

HHO 算法是一种自然启发算法,模拟哈里斯鹰捕食时和猎物之间的追逐逃跑行为,该算法可以分为探索、过渡和开发 3 个阶段。在使用 HHO 算法对冷链物流路径优化问题进行求解时,猎物的位置代表算法最优解的位置,即所求的成本最低点,哈里斯鹰的位置代表了当前的候选解,迭代次数代表了算法搜索最优解的过程中尝试的次数,每一次迭代,算法都会更新哈里斯鹰的位置,以更好地接近猎物的位置。

3.1.1 探索阶段

在搜索阶段,哈里斯鹰根据以下 2 种策略搜寻猎物,且 2 种策略找到猎物的机会均等,表达式如下:

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}_{\text{rand}}(t) - r_1 |\mathbf{X}_{\text{rand}}(t) - 2r_2 \mathbf{X}(t)|, & q \geq 0.5, \\ (\mathbf{X}_{\text{rabbit}}(t) - \mathbf{X}_m(t)) - r_3(B_L + r_4(B_U - B_L)), & q < 0.5. \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{X}(t+1)$ 表示哈里斯鹰第 $t+1$ 代的位置向量, $\mathbf{X}_{\text{rand}}(t)$ 表示任意哈里斯鹰第 t 代的位置向量, $\mathbf{X}(t)$ 表示哈里斯鹰第 t 代的位置向量, $r_1 \sim r_4$ 和 q 均表示 $(0, 1)$ 的随机数, $\mathbf{X}_{\text{rabbit}}(t)$ 代表迭代次数为 t 时猎物最优个体的位置, B_U 和 B_L 分别代表变量的上限和下限, $\mathbf{X}_m(t)$ 表示迭代第 t 次时哈里斯鹰的平均位置,表达式为 $\mathbf{X}_m(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{x}_i(t)$,其中: $\mathbf{x}_i(t)$ 表示在第 t 次迭代时第 i 只哈里斯鹰的位置, M 表示哈里斯鹰种群的数量。

3.1.2 过渡阶段

为了平衡搜索阶段和开发阶段,HHO 算法采用猎物逃逸能量 E 模拟哈里斯鹰追寻猎物时猎物的逃跑过程,当 $|E| \geq 1$ 时,HHO 算法执行探索阶段搜寻猎物,当 $|E| < 1$ 时,HHO 算法执行开发阶段搜寻猎物,表达式为:

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right), \quad (12)$$

其中: E 表示猎物的逃逸能量,用 $(-1, 1)$ 的随机数表示初始逃逸能量 E_0 , T_{\max} 表示最大迭代次数。

3.1.3 开发阶段

定义 λ 为猎物成功逃脱 ($\lambda < 0.5$) 和逃脱失败的 ($\lambda \geq 0.5$) 的机会。

情形 1:软包围 ($|E| \geq 0.5, \lambda \geq 0.5$)。此刻猎物虽具有足够的逃逸能量,但最终逃脱失败,哈里斯鹰实行软包围策略,位置更新表达式为:

$$\begin{aligned} X_{t+1} &= \Delta X_t - E |J X_{\text{rabbit},t} - X_t|, \\ \Delta X_t &= X_{\text{rabbit},t} - X_t. \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ΔX_t 表示当前哈里斯鹰与猎物的距离, J 为 $[0, 2]$ 的随机数。

情形 2:硬包围 ($|E| < 0.5, \lambda \geq 0.5$)。此刻猎物没有足够的逃逸能量,哈里斯鹰突击进行狩猎,此时哈里斯鹰实行硬包围策略,位置更新表达式为:

$$X_{t+1} = X_{\text{rabbit},t} - E |\Delta X_t|. \quad (14)$$

情形 3:渐进式快速俯冲软包围 ($|E| \geq 0.5, \lambda < 0.5$)。此刻猎物具有足够的逃逸能量,哈里斯鹰实行更智能化的包围策略,不断根据猎物位置调整自身的位置,位置更新表达式为:

$$X_{t+1} = \begin{cases} Y: X_{\text{rabbit},t} - E | J X_{\text{rabbit},t} - X_t |, F(Y) < F(X_t), \\ Z: Y + S \times F^L(D), F(Z) < F(X_t). \end{cases} \quad (15)$$

其中: D 表示维度大小, F^L 为 levy 飞行函数, S 表示 D 维随机变量。

情形 4: 渐进式快速俯冲硬包围 ($|E| < 0.5, \lambda < 0.5$)。此刻猎物有机会逃脱追捕, 但缺少逃逸能量, 此时哈里斯鹰实行硬包围, 不断尝试缩短与猎物的距离, 位置更新表达式为:

$$X_{t+1} = \begin{cases} Y: X_{\text{rabbit},t} - E | J X_{\text{rabbit},t} - X_{m,t} |, F(Y) < F(X_t), \\ Z: Y + S \times F^L(D), F(Z) < F(X_t). \end{cases} \quad (16)$$

3.2 改进 HHO 算法

HHO 算法易陷入局部极值, 且存在收敛精度低等缺陷。针对以上问题, 本文提出了融合 Circle 混沌映射、柯西变异以及动态自适应权重的改进哈里斯鹰优化(improved Harris hawk optimization, IHHO)算法。

3.2.1 Circle 混沌映射

利用混沌序列对哈里斯鹰初始位置进行初始化操作, 能够改善初始解易出现的聚集、个体差异性小等问题。首先, 使用 Circle 映射对种群位置进行初始化, 使种群初始位置均匀分布, 扩大种群的搜索范围; 然后, 将变量映射到混沌变量空间; 最后, 通过线性变换将所得的混沌变量映射到需要进行优化的解空间, 表达式为:

$$x_{d+1} = \text{mod}\left(x_d + 0.2 - \left(\frac{0.5}{2\pi}\right) \sin(2\pi x_d), 1\right)。$$

3.2.2 柯西变异

应用柯西变异进行随机干扰, 可以更好地提高 HHO 算法的全局搜索能力和稳定性。柯西分布在原点的概率密度较大, 两侧形状又扁又长, 加入柯西变异后, 可以对哈里斯鹰个体产生较大干扰, 使之在较短时间内搜索邻域空间, 将主要精力用来寻找更好的全局最优解:

$$X_{\text{rabbit}}(t) = X_{\text{best}}(t) + X_{\text{best}}(t) \times \text{Cauchy}。 \quad (17)$$

其中: Cauchy 为柯西变异中的柯西算子。

3.2.3 动态自适应权重

通过动态自适应权重因子 ω 对全局最优个体进行调节, 当取较大的自适应权重因子 ω 时, 算法会用更多的时间进行全局最优个体搜寻; 当取较小的自适应权重因子 ω 时, 算法会用更多的时间进行邻域搜寻, 找到局部最优个体。受文献[21]的启发, 引入一种自适应权重因子来提高哈里斯鹰的局部寻优能力, 表达式为:

$$\omega = \sin\left(\frac{\pi t}{2T} + \pi\right) + 1,$$

其中: ω 表示动态自适应权重因子; t 表示当前迭代次数; 最大迭代次数 $T=500$, 猎物的位置更新表达式如下:

$$X_{\text{rabbit}}(t) = \omega \times X_{\text{rabbit}}(t)。 \quad (18)$$

IHHO 算法的流程图如图 2 所示。

4 实验分析

4.1 算法评估

本文选取 21 个标准测试函数评估改进算法的性能, 并与北方苍鹰优化(northern goshawk optimization, NGO)算法、灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法以及 HHO 算法进行对比。为确保实验的公平性和客观性, 设置种群数量 $N=30$, 最大迭代次数 $T=500$, 除此之外, 算法的其他参数均保持一致, 且都使用 Matlab 2021b 软件进行编码, 在 Intel Core i7、CPU 1.80 GHz, 内存为 8 GB 的计算机上运行。由图 3~图 5 的函数拓扑图和收敛曲线可见, 测试函数分别选择了单峰、多峰、固定维多峰测试函数, 根据运行结果可知, IHHO 算法不仅可以在短时间内找到高质量解, 在收敛精度上也高于 PSO、GWO、NGO、HHO 这 4 种对比算法。

在算法性能测试的指标中, 均值表示测试结果, 均值越低则算法的质量就越高。方差表示测试结果与均值的偏离程度, 方差越小则算法稳定性越好。由表 1 的测试函数结果可知, 在相同维度的测试条件下, IHHO 算法的性能大多优于其他 4 种对比算法。均值越小通常表示算法在测试函数上的性能越好, 得到的结果更接近全局最优解。IHHO 算法在多数测试函数上的均值接近于 0, 且在大部分情况下, 相较于其他 4 种对比算法, IHHO

算法得到的均值更小,说明在这些函数上的性能更好。因此,IHHO 算法在大部分情况下表现出更好的性能和收敛速度,证明了它是有效的。

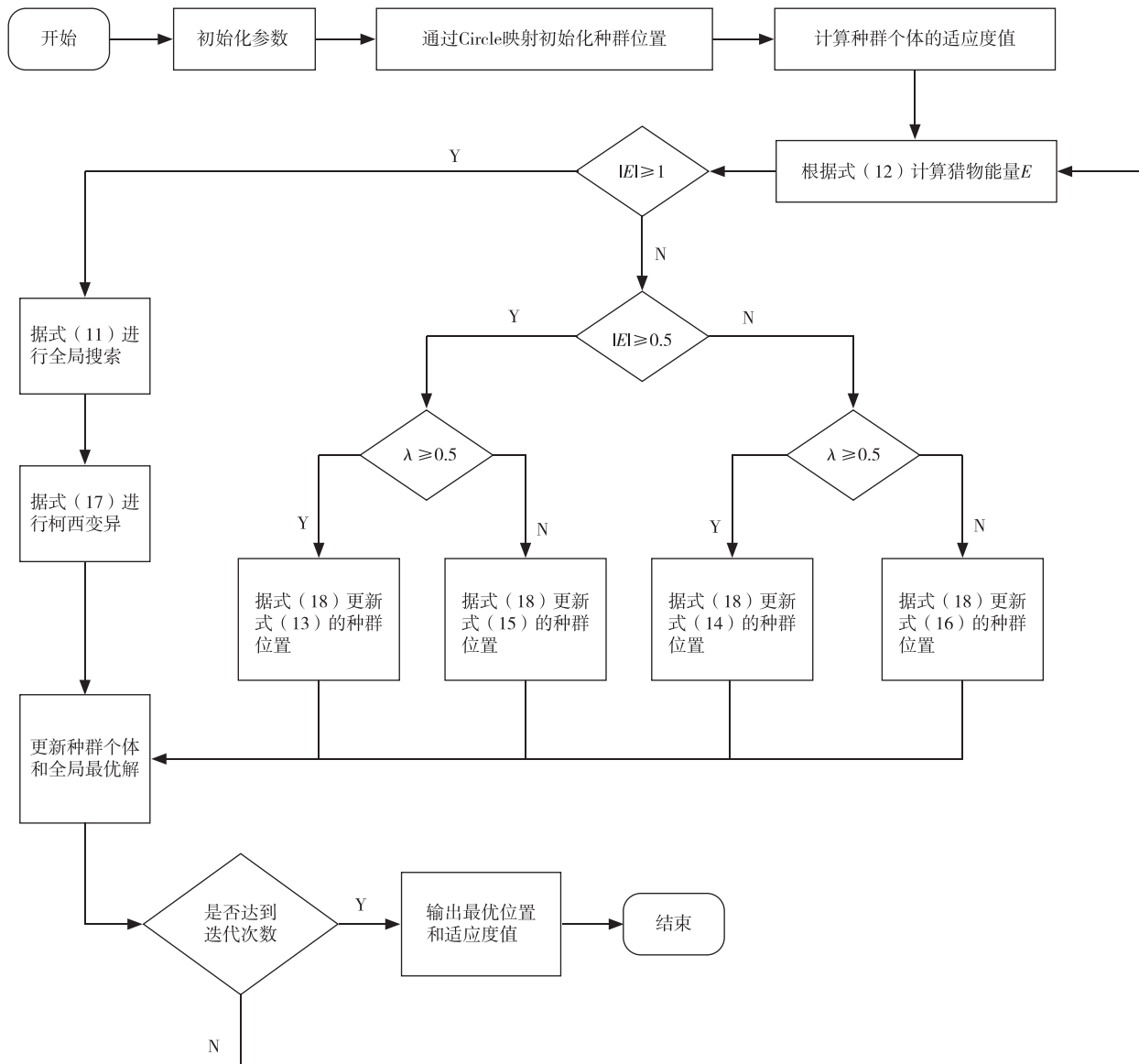


图 2 IHHO 算法流程

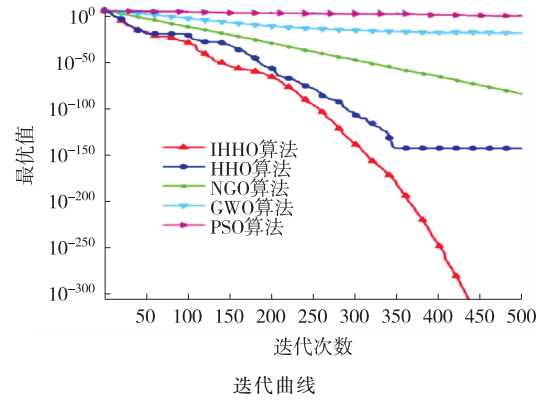
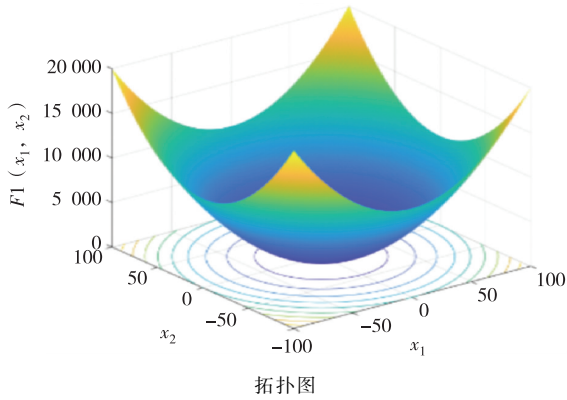
Fig. 2 Flow chart of IHHO algorithm

4.2 实例仿真

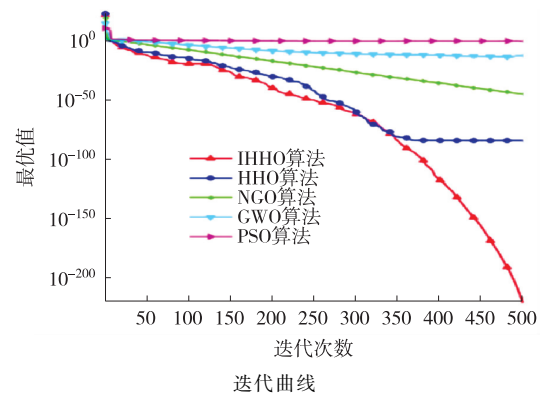
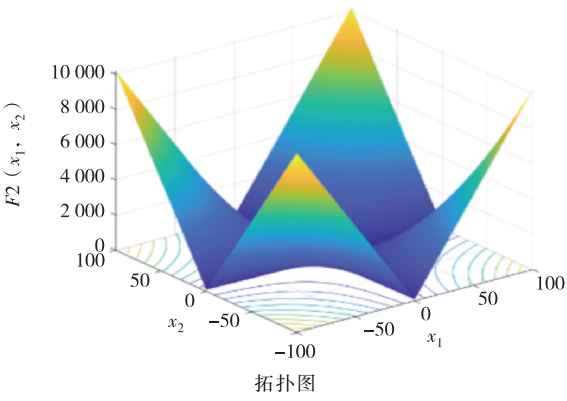
本文选取某市某生鲜电商企业为研究对象,该企业共有 11 辆冷藏车,需要对 30 个客户点进行生鲜产品物流配送服务,配送中心的坐标点为(35,35)。客户点位置及需求信息如表 2 所示,其中包括客户点的位置、订单质量以及时间窗等关键数据;冷藏车辆在各个客户点之间的平均速度为 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,模型各项参数设置表 3 所示。

4.2.1 算法对比分析

为了验证本文算法改进的有效性,选择 NGO 算法、GWO 算法、PSO 算法、HHO 算法以及 IHHO 算法对所提出的考虑交通拥堵的生鲜品冷链物流配送数学模型进行求解。不同算法求解总成本函数的运行结果见图 6 所示,PSO 算法在迭代 30 次时趋于稳定;NGO 算法在迭代 38 次时趋于稳定;GWO 算法在迭代 12 次时趋于稳定;HHO 算法在迭代 16 次时趋于稳定。而 IHHO 算法虽在迭代 30 次时趋于稳定,但却可以较快地得到更优的目标函数值,即获得最低成本,有效避免了传统 HHO 的“早熟”现象,提高了 HHO 算法性能。综合图 6 的目标函数对比结果可知,与 HHO 算法相比,IHHO 算法求解结果使配送总成本降低了 16.6%,充分证明了该算法的优越性。



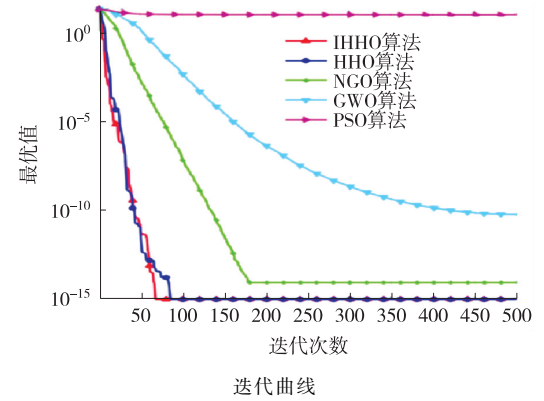
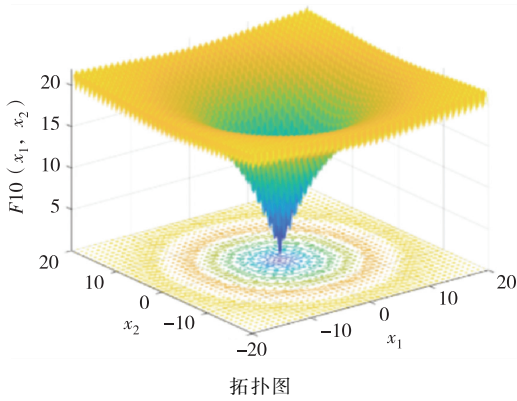
a 算例 1



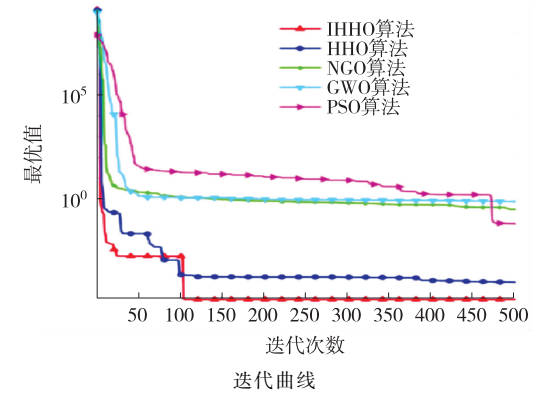
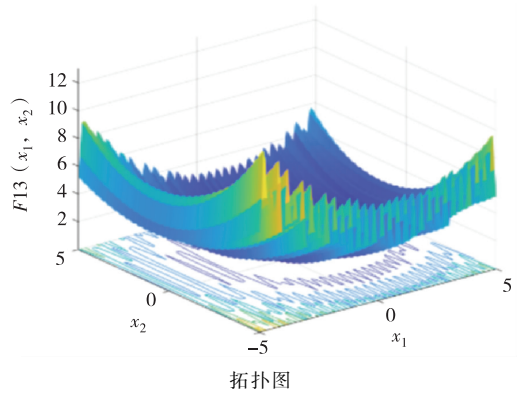
b 算例 2

图 3 单峰函数拓扑图及收敛曲线

Fig. 3 Unimodal function topology and convergence curve



a 算例 1



b 算例 2

图 4 多峰函数拓扑图及收敛曲线

Fig. 4 Multi-peak function topology diagram and convergence curve

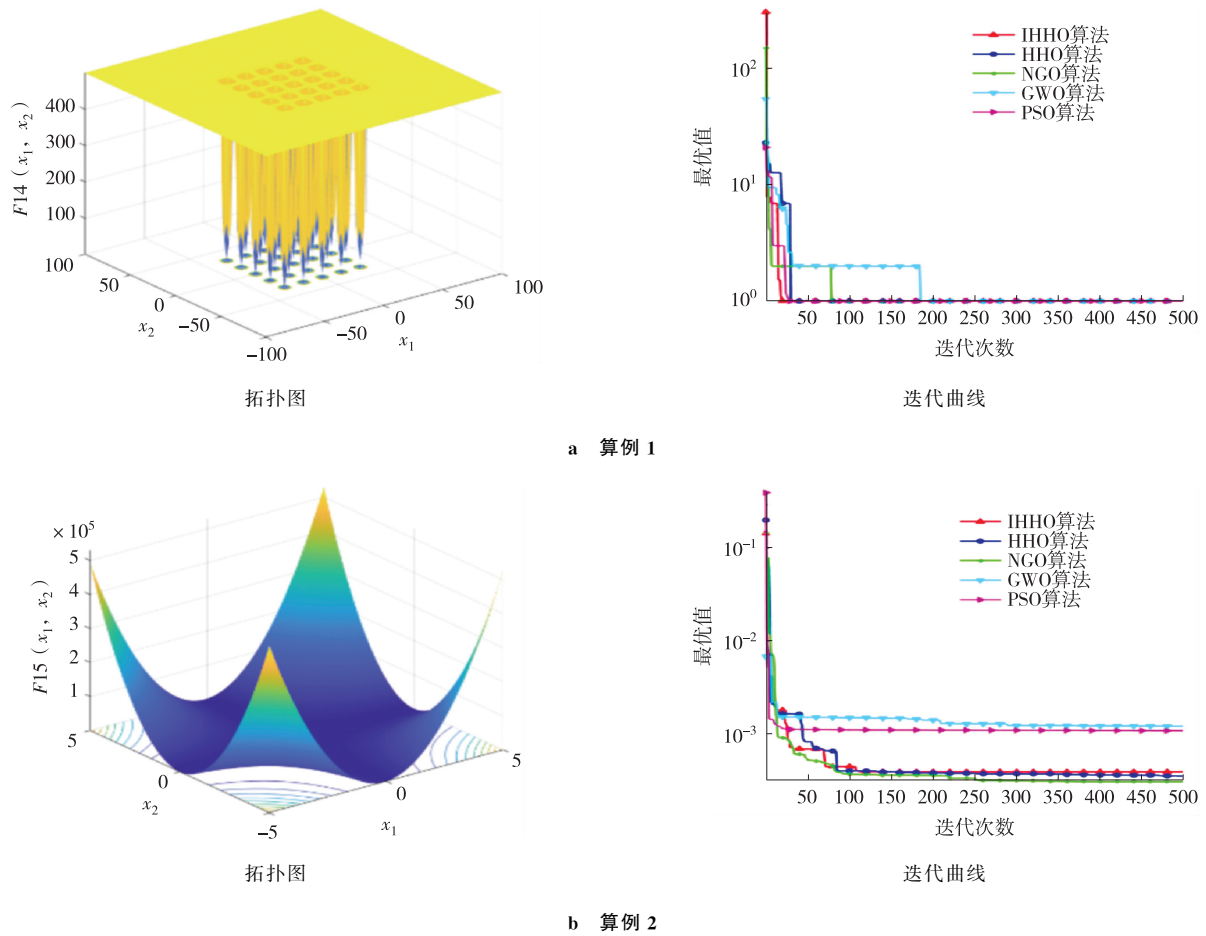


图 5 固定维多峰函数拓扑图及收敛曲线

Fig. 5 Fixed-dimensional multimodal function topology and convergence curve

表 1 测试函数实验结果

Tab. 1 Test function experimental results

函数	PSO 算法		GWO 算法		NGO 算法		HHO 算法		IHHO 算法	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
F1	6.0E+00	1.7E+01	8.7E-20	9.4E-20	2.4E-85	4.0E-85	4.2E-13	1.7E-13	0.0E+00	0.0E+00
F2	1.0E+01	5.4E+00	3.3E-12	1.8E-12	2.4E-44	2.5E-44	2.0E-58	1.1E-57	4.1E-220	0.0E+00
F3	8.8E+00	1.7E+00	5.2E-11	2.5E-11	6.7E-15	1.7E-15	8.9E-16	0.0E+00	8.9E-16	0.0E+00
F4	4.7E+00	5.0E+00	6.6E-01	2.8E-01	2.8E-01	2.4E-01	7.2E-04	7.3E-04	3.5E-03	1.5E-02
F5	2.8E+00	3.2E+00	4.6E+00	4.5E+00	1.0E+00	0.0E+00	2.3E+00	3.0E+00	2.0E+00	2.1E+00
F6	6.4E-04	4.4E-04	5.1E-03	8.6E-03	3.1E-04	1.7E-07	3.7E-04	8.7E-05	6.6E-04	4.2E-04

4.2.2 结果分析

在 Matlab 软件中执行改进算法程序,进行多次运行,验证了该程序具有较快的寻优性能。这表明 IHHO 算法能够在较短时间有效地找到最优的配送路线。改进算法与对比算法的配送路线信息如图 7~11 所示。

本文选取 HHO 算法和 IHHO 算法进行详细对比分析。由图 11 可知,IHHO 算法的配送路线为:车辆 1, 0—1—12—21—4—29—3—26—27—2—6—18—5—0; 车辆 2, 0—8—17—13—28—30—9—20—7—19—11—10—14—16—0; 车辆 3, 0—15—23—22—24—25—0。总成本为 2 057.035 7。

HHO 算法配送路径如图 10 所示。具体车辆路径分别为:配送路线 1, 0—22—21—11—18—8—13—17—

3—16—14—15—26—29—25—27—6—0; 配送路线 2, 0—2—12—30—1—9—24—23—20—10—4—5—19—7—0; 配送路线 3, 0—28—0。最低总成本为 2 469. 255 8。IHHO 算法比 HHO 算法的成本降低了 16. 69%。

表 2 客户点信息

Tab. 2 Information of customer points

编号	位置坐标	需求/kg	时间窗	编号	位置坐标	需求/kg	时间窗
1	(41,49)	10	161~171	16	(10,20)	35	75~85
2	(35,17)	7	50~60	17	(5,30)	24	157~167
3	(55,45)	13	116~171	18	(20,40)	32	87~97
4	(55,20)	19	149~159	19	(15,60)	17	76~86
5	(15,30)	26	34~44	20	(45,65)	29	126~136
6	(25,30)	30	99~109	21	(45,20)	11	62~72
7	(20,50)	25	81~91	22	(45,10)	30	97~107
8	(10,43)	39	95~105	23	(55,5)	29	68~78
9	(55,60)	16	97~107	24	(65,35)	13	153~163
10	(30,60)	16	124~134	25	(65,20)	36	172~182
11	(20,65)	12	67~77	26	(45,30)	17	132~142
12	(50,35)	31	63~73	27	(35,40)	16	37~47
13	(30,25)	23	159~169	28	(41,37)	26	39~49
14	(15,10)	20	32~42	29	(64,42)	29	63~73
15	(30,5)	38	61~71	30	(40,60)	27	71~81

表 3 各项模型参数表

Tab. 3 Various model parameter tables

参数	符号	取值
固定成本	f_1	200 元·辆 ⁻¹
单位生鲜产品的价格	P	20 元·kg ⁻¹
额定载重	Q	500 kg
运输时的产品腐败率	a_1	0.2%
车辆早或晚于客户期待时间窗到达的惩罚系数	ϵ_1	5%
行驶单位距离的运输成本	f_2	2 元·km ⁻¹
运输过程中单位时间的制冷成本	f_3	3 元·h ⁻¹
搬运过程中单位时间的制冷成本	f_4	5 元·h ⁻¹
时间惩罚成本的调节参数	φ	0.5
生鲜产品的利润系数	ϵ_0	15%

5 结论

本文针对交通拥堵情况下的生鲜品冷链物流路径优化问题, 提出 IHHO 算法, 对配送总成本进行优化。主

要体现在以下 3 个方面:

1) 考虑交通拥堵情况,构建了配送成本最小化的生鲜品冷链物流配送模型,该数学模型可以反映交通拥堵情况,更贴合实际,具有较强的现实意义。

2) 设计了 IHHO 算法,将 Circle 混沌映射、柯西变异以及动态自适应权重引入到传统 HHO 算法中,改进后的算法具有更优良的寻优性能,提高了算法求解的精度。

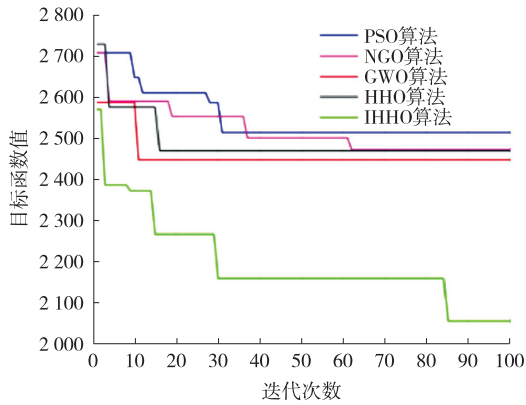


图 6 改进 HHO 算法的迭代曲线

Fig. 6 Iterative curve of improved HHO algorithm

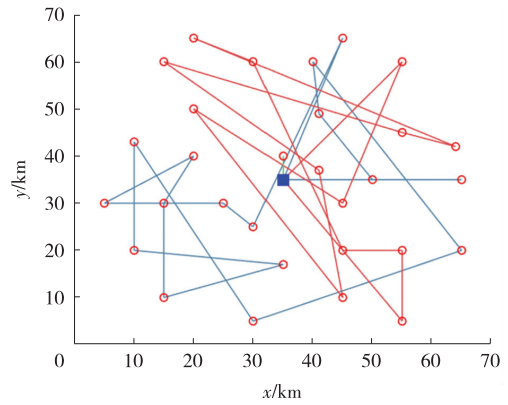


图 7 PSO 算法配送路径图

Fig. 7 PSO distribution path diagram

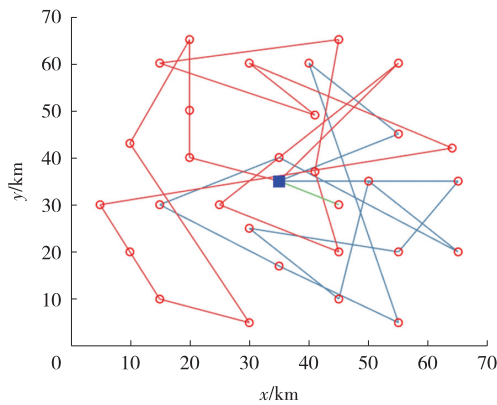


图 8 GWO 算法配送路径图

Fig. 8 GWO distribution path diagram

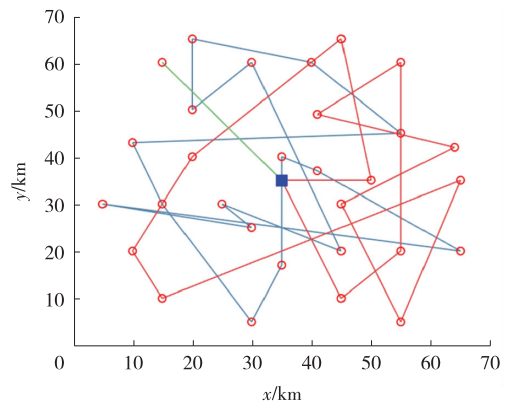


图 9 NGO 算法配送路径图

Fig. 9 NGO distribution path diagram

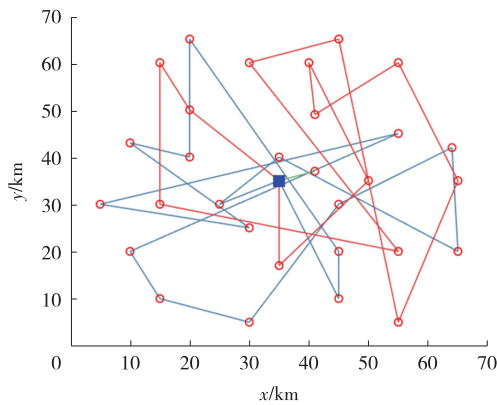


图 10 HHO 算法配送路径图

Fig. 10 HHO distribution path diagram

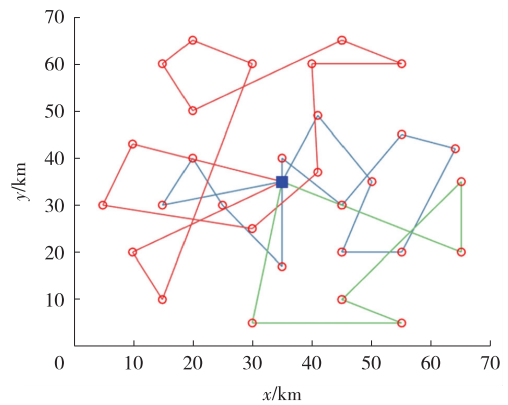


图 11 IHHO 算法的配送路径图

Fig. 11 Distribution path diagram based on improved HHO algorithm

3) IHHO 算法相较于另外 4 种对比算法在解决生鲜品冷链物流问题上,具有更好的寻优能力和稳定性,成本相较于其他 4 种算法至少降低了 16.6%,在降低冷链物流企业成本方面具有一定优势。

需要注意的是,由于本文没有研究多温共配和多配送中心的生鲜产品冷链物流路径问题,因此所构建的数学模型存在一定的局限性。后续的研究工作将在现有基础上对数学模型进行进一步完善。

参考文献:

- [1] 中国新闻网. 公安部:中国机动车保有量和增量位居世界第一[EB/OL]. (2024-06-13)[2024-08-14]. <http://www.chinanews.com.cn/sh/shipin/cns-d/2024/06-13/news992203.shtml>.
China News Network. Ministry of Public Security of the People's Republic of China: the number and increment of motor vehicles in China ranks first in the world[EB/OL]. (2024-06-13)[2024-08-14]. <http://www.chinanews.com.cn/sh/shipin/cns-d/2024/06-13/news992203.shtml>.
- [2] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. *Management Science*, 1959, 6(1): 80-91.
- [3] JABIR E, PANICKER V V, SRIDHARAN R. Design and development of a hybrid ant colony-variable neighbourhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 422-457.
- [4] ALKAABNEH F, DIABAT A, GAO H O. Benders decomposition for the inventory vehicle routing problem with perishable products and environmental costs[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 113: 104751.
- [5] ALLAHVIRANLOO M, CHOW J Y J, RECKER W W. Selective vehicle routing problems under uncertainty without recourse[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 62: 68-88.
- [6] BEKTAŞ T, LAPORTE G. The pollution-routing problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [7] 张梦. 新零售业态下 Y 生鲜超市动态需求终端配送路径优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHANG M. Research on dynamic demand terminal distribution route optimization of fresh supermarket under the new retail format[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [8] 辜勇, 柴子艺, 刘迪, 等. 基于 HACO-ALNS 的车辆与无人机协同配送问题研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2024, 46(2): 69-79.
GU Y, CHAI Z Y, LIU D, et al. Research on collaborative delivery of vehicles and drones based on HACO-ALNS[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2024, 46(2): 69-79.
- [9] 赵志学, 李夏苗, 周鲜成, 等. 考虑交通拥堵的冷链物流城市配送的 GVRP 研究[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(1): 224-231.
ZHAO Z X, LI X M, ZHOU X C, et al. Research on green vehicle routing problem of cold chain distribution: considering traffic congestion[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(1): 224-231.
- [10] 张济风, 杨中华. 时变路网环境下多温冷链配送路径优化研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(1): 119-126.
ZHANG J F, YANG Z H. Research on distribution path optimization of multi-temperature cold chain in time-varying road network environment[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2020, 37(1): 119-126.
- [11] 姚源果, 贺盛瑜. 基于交通大数据的农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. *管理评论*, 2019, 31(4): 240-253.
YAO Y G, HE S Y. Research on optimization of distribution route for cold chain logistics of agricultural products based on traffic big data[J]. *Management Review*, 2019, 31(4): 240-253.
- [12] 王恒, 徐亚星, 王振锋, 等. 基于道路状况的生鲜农产品配送路径优化[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(1): 126-135.
WANG H, XU Y X, WANG Z F, et al. Distribution routing optimization of fresh agricultural products based on road conditions[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(1): 126-135.
- [13] 狄卫民, 杜慧莉, 张鹏阁. 考虑动态拥堵的多车型绿色车辆路径问题优化[J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(9): 2614-2620.
DI W M, DU H L, ZHANG P G. Optimization of multi-vehicle green vehicle routing problem considering dynamic congestion[J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(9): 2614-2620.
- [14] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: algorithm and applications[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 97: 849-872.
- [15] 马一鸣, 石志东, 赵康, 等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的 TDOA 定位[J]. *计算机工程*, 2020, 46(12): 179-184.
MA Y M, SHI Z D, ZHAO K, et al. TDOA localization based on improved Harris hawk optimization algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(12): 179-184.
- [16] JIA H M, PENG X X, KANG L F, et al. Pulse coupled neural network based on Harris hawks optimization algorithm for image segmentation[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(37): 28369-28392.

- [17] SARAVANAN G, IBRAHIM A M, KUMAR D S, et al. IoT based speed control of BLDC motor with Harris hawks optimization controller[J]. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 2020, 13(1):1902-1915.
- [18] JIA H M, LANG C B, OLIVA D, et al. Dynamic Harris hawks optimization with mutation mechanism for satellite image segmentation[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12):1421.
- [19] 鲍浩, 张艳. 基于改进哈里斯鹰优化算法的光谱特征波段选择模型研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(1):148-157.
BAO H, ZHANG Y. Research on spectral feature band selection model based on improved Harris hawk optimization algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(1):148-157.
- [20] 刘思远, 陈天恩, 陈栋, 等. 时变多车型下的生鲜农产品配送路径优化模型[J]. *智慧农业(中英文)*, 2021, 3(3):139-151.
LIU S Y, CHEN T E, CHEN D, et al. Time-varying heterotypic-vehicle cold chain logistics distribution path optimization model [J]. *Smart Agriculture*, 2021, 3(3):139-151.
- [21] 柴岩, 任生. 多策略协同优化的改进 HHO 算法[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(12):3658-3666.
CHAI Y, REN S. Improved HHO algorithm based on multi-strategy cooperative optimization[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(12):3658-3666.

Optimization Algorithms and Its Applications

Research on Cold Chain Logistics Path Optimization of Fresh Products Based on Improved Harris Hawks Optimization

ZHANG Tianrui¹, ZHU Fangfang², NIU Huiyuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University;

2. School of Applied Technology, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: In recent years, with the increasing number of vehicles, traffic congestion has become more serious, resulting in the reduction of timeliness of fresh products in the cold chain logistics distribution process. In order to improve customer satisfaction, ensure the freshness of goods and reduce distribution costs, a cold chain logistics distribution model of fresh products considering traffic congestion was proposed, and the Harris hawks optimization algorithm was improved to improve the solution accuracy. Firstly, based on the traditional cold chain logistics model of fresh products, a new distribution model was constructed by considering various distribution costs while considering traffic congestion. Secondly, in view of the shortcomings of the Harris hawks optimization algorithm, which has slow convergence speed and is easy to fall into local optimality, an improved Harris hawks algorithm was designed to enhance the local optimization ability and improve the solution accuracy. Finally, the performance of the constructed model and the improved algorithm was verified through simulation experiments. Through simulation experiments and comparative analysis, it is proved that the proposed algorithm can obtain the minimum objective function value and the optimal distribution route. The mathematical model and improved algorithm proposed here are effective.

Keywords: cold chain logistics; path optimization; traffic congestion; improved Harris hawks optimization

(责任编辑 黄 颖)