

文章编号: 1006-3080(2025)01-0098-12

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20240103002

入库车中断模式下生鲜品越库车辆调度研究

陶柏铭¹, 刘朝晖¹, 潘飞²

(1. 华东理工大学数学学院, 上海 200237; 2. 上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要:传统的生鲜品越库车辆调度问题通常采用非中断装/卸货模式, 这较易造成所卸非所需, 而所需货物未能及时卸载的问题。为加快生鲜品的越库转运, 降低生鲜度损耗, 提出采用允许入库车卸货过程可以中断的模式, 并建立以新鲜度总衰减量最小为目标的生鲜品越库车辆调度模型。针对该模式, 设计包含入库车序号、生鲜品种类、批次卸货数量的3层混合染色体编码方案, 构建并采用基于批次卸货数量的自适应遗传算法求解。数值实验结果表明, 入库车中断模式相较于传统的非中断模式, 平均能降低13.90%的新鲜度总衰减量, 且该优势会随着车辆转换时间、传送时间、批次卸/装货数量值、高衰减率生鲜品比重的降低而愈发显著。

关键词:越库; 生鲜品; 入库车中断模式; 遗传算法; 总衰减量

中图分类号:F224.3; F253.4

文献标志码:A

生鲜品新鲜度随时间逐渐衰减的特性使得其在流通过程中损耗严重, 如何缩短流通时间, 满足消费者对于新鲜度的高要求, 是企业非常关注的问题^[1]。Wang等^[2]指出, 我国蔬菜水果等生鲜品从采摘、存储、运输直到最终消费节点过程中的损耗高达25%~40%。即使是在美国等发达国家, 也有10%~20%的损耗发生在流通环节^[3]。实际上, 从消费者的角度而言, 生鲜品新鲜度是是否选择购买的一个非常重要的衡量标准^[4]。这就促使生鲜品物流企业亟需采用一种高效的车辆调度策略, 以加快物流转运, 降低生鲜品损耗, 从而增强企业竞争力。

而越库(Cross-Docking, CD)就是一种新型高效的车辆调度策略, 其特点是能将整合好的订单, 直接从收货流程过渡到出货流程, 越过库存, 满足生鲜品对于时效的高要求^[5]。在越库中心, 生鲜品从入库车上被卸载后, 根据出库车需求, 只经过简单的分拣等操作, 通过传送带或人工搬运, 到达装货站台; 如果到达的生鲜品不是当前出库车所需, 则会被存储在临时缓存区, 直到需要该批生鲜品的出库车到达站台^[6]。通常, 货物在越库中心的停留时间不超过24 h^[7]。

自从越库的概念被提出以来, 许多企业如沃尔玛、UPS、日本丰田^[8-9]等, 均采用其优化供应链流程, 显著增强了企业竞争力。

以往许多学者也将越库策略引入到易腐品/生鲜品的物流转运问题中, 并从不同角度构建了易腐品/生鲜品越库车辆调度模型。Buijs等^[10]依据经典的准时制(Just-In-Time, JIT)调度策略实现降低易腐品在越库中心存储时间的目的。谷金蔚等^[11]以传统的交货时间最短为目标构建了混合整数规划模型, 并提出基于量子理论和寄生理论的量子寄生遗传算法求解。张海刚等^[12]考虑软时间窗约束, 根据多相粒子群并行搜索的思想, 采用改进的粒子群算法求解。Agustina等^[13]考虑了生鲜品的硬时间窗约束, 以最小化总成本(包含库存持有和运输成本, 提前或延迟交付的惩罚成本)为目标建模。Dulebenets^[14]考虑了运输产品的易腐性, 以总服务成本最小为目标, 构建了混合整数规划模型并采用一种新的延迟启动并行进化算法求解。Bayá等^[15]针对多种类多生产线的越库调度问题, 结合发货时间窗约束, 基于乌拉圭粮食企业的真实案例, 以成本最小化为目标构建了

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 上海市科学技术委员会软科学研究项目(23692119100); 上海市白玉兰人才计划浦江项目(23PJC074)

作者简介: 陶柏铭(1999—), 男, 河南人, 硕士生, 主要研究方向为运筹学。E-mail: curtistao@163.com

通信联系人: 刘朝晖, E-mail: zhliu@ecust.edu.cn

引用本文: 陶柏铭, 刘朝晖, 潘飞. 入库车中断模式下生鲜品越库车辆调度研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 98-109.

Citation: TAO Baiming, LIU Zhaohui, PAN Fei. Truck Scheduling of Fresh Produce in Cross-Docking Systems with Interrupt Mode for Inbound Trucks[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(1): 98-109.

混合整数线性规划模型。Acevedo-Chedid 等^[16]结合了车辆速度、等待时间等因素,提出了一个更为复杂的混合整数非线性规划模型,并采用实验测试、帕累托优化、加权和等多种策略求解。Rahbari 等^[17]研究了出库车行驶时间不确定和生鲜品保质期不确定下的越库车辆调度问题,并针对性提出了双目标混合整数线性规划模型,其上层目标为总成本最小,下层目标为加权总新鲜度最大。

综上所述,以往针对易腐品/生鲜品越库车辆调度问题的研究,大多基于准时制策略或从成本角度构建目标函数,但这其实并不适用于易腐品/生鲜品的越库转运。一方面,当转运的生鲜品间存在较大衰减率差异时,若仍采用准时制或以最小化总成本为目标,较易造成高衰减率生鲜品转运过程的高损耗;另一方面,消费者在订购对时效性要求较高的生鲜品时,更在意的是收货时是否仍然新鲜^[18]。因此,在生鲜品的越库车辆调度问题中,应以尽量减少转运过程中生鲜品新鲜度的衰减量为原则。

近年来,除了目标函数,作为越库车辆调度模型约束条件出现的非中断和中断模式,也获得了学者们的关注。非中断模式指车辆一旦进入站台,需要完成自身所有卸/装货任务后,才能离开站台。而中断模式指入/出库车的卸/装货过程可以中断,即允许入/出库车重复多次进出站台。自从 Yu 等^[19]提出了非中断模式下经典的越库车辆调度模型后,大多数学者均在此模型基础上进行了扩展研究。而中断模式下的研究较少,且主要集中于求解算法上。Nascimento 等^[20]为中断模式下的越库车辆调度问题提出了被称为贪婪随机自适应搜索过程的求解算法。Mohtashami^[21]研究对比了非中断和仅允许出库车中断调度的、以最小化完工时间为目标的越库模型,并采用遗传算法求解。Ardakani 等^[22]针对入库车中断模式下的车-门排序问题,建立越库模型并开发了基于4种入库车与出库车产品匹配度的启发式算法求解。在 Theophilus 等^[23]针对目前车辆调度问题的综述报告中指出,未来的越库车辆调度问题的研究重点应该集中在允许入/出库车的卸/装货过程中断的模式上。

以往越库研究通常采用较为简单的非中断卸/装货模式,即使采用中断模式,也主要集中于算法上且并没有与所转运产品的特性相结合。实际上,非中断模式极易造成“所卸货物不是当前出库车所需要的”,或“所需货物未能及时得到卸载”的问题。此时若采用更加灵活的中断卸/装货模式,可以显著提高卸货与装货操作的匹配度,更快速地满足出库车需

求,从而减少生鲜品的衰减时间,降低生鲜品损耗。但这同时也对中断调度模式下数学模型的建立和算法求解提出了更高的要求。

本文针对具有高新鲜度要求、多种类需求和产品间存在衰减率差异特性的生鲜品越库车辆调度问题,提出采用更加灵活的入库车中断模式(同一辆入库车可以多次进出站台进行卸货),并以最小化新鲜度总衰减量(Total Deterioration, TD)为目标建立混合整数数学规划模型。在求解算法上,本文提出批次卸货数量(即一旦开始卸货,至少卸载该数量的生鲜品)的概念,并基于此参数设计包含入库车序号、生鲜品种类序号、卸货数量的3层染色体编码方案,进而提出基于批次卸货数量的遗传算法求解。数值实验结果也表明本文提出的入库车中断模式较传统的非中断模式在转运生鲜品方面的诸多优势。

1 模型构建

1.1 问题描述

考虑仅含有一个卸货站台和一个装货站台(部分文献也称为单入库门和单出库门)的“F”字母型的越库系统,所有入库车和出库车均已到达站台,越库中心的核心任务就是如何排列这些入、出库车的卸货和装货顺序,使得目标值最优。

在传统的非中断模式下,如果入库车卸载的生鲜品不是当前出库车所需的,会被放在临时缓存区(Temporary Storage, TS)中,直到需要该批生鲜品的出库车到达站台。这显然较易造成“所卸货物不是当前出库车所需要的”,或“所需货物未能及时得到卸载”的问题。通常情况下,出库车按照消费者需求,早已等在出库站台,为快速满足这些需求,本文提出,可以允许入库车的卸货过程中断,即可重复多次进出卸货站台,通过出库车的需求拉动、指引入库车的多次卸货操作,从而提高入、出库车的产品匹配度。

图1以一个简单的例子展示了入库车中断模式下的生鲜品转运流程,以出库车(Outbound Truck, OT)的需求为牵引,指引入库车(Inbound Truck, IT)的多段卸货操作。为尽快满足OT1的需求,IT1在卸载完1件种类1的产品后便离开站台,让IT2进入站台卸载1件种类2的产品后,OT1便能顺利发车。而满足OT2的需求存在两种策略:第1种是再次驶入IT1,然后再换为IT2,整个卸货过程,车辆累计转换了3次;第2种是让IT2卸载完所有产品后再驶入IT1,车辆累计转换了2次。最终采用何种策略,取决于何种策略能使得目标值最小。

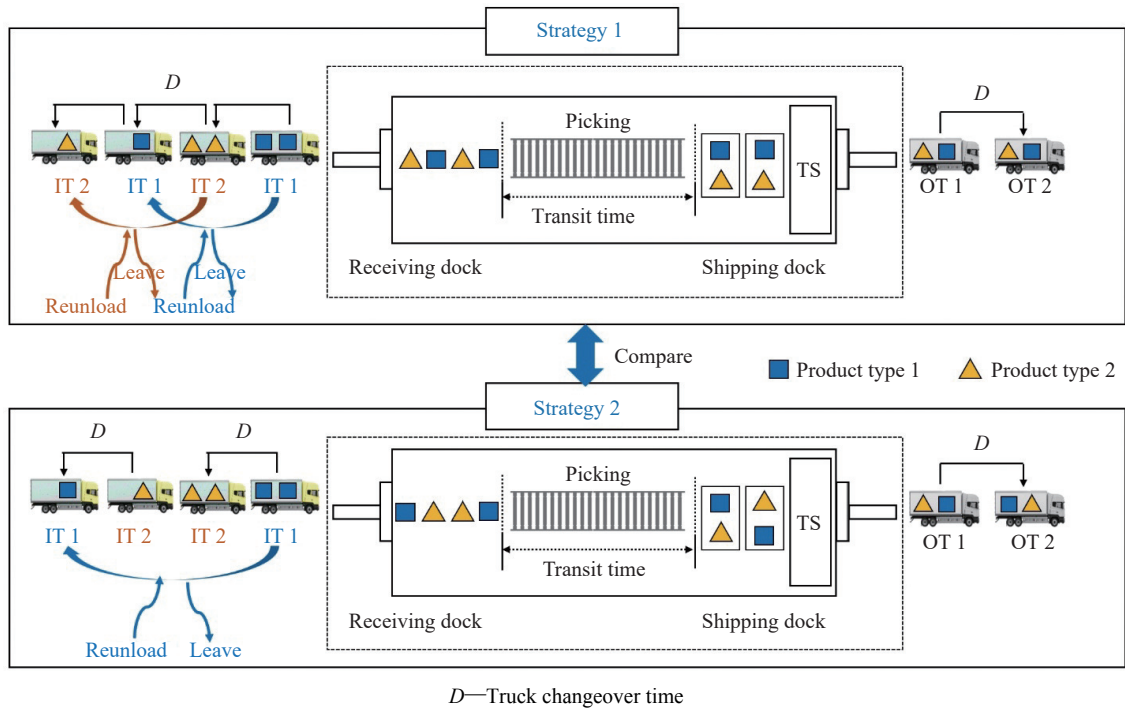


图 1 入库车中断模式下生鲜品转运流程

Fig. 1 Fresh produce transshipment process with inbound truck interrupt mode

本文研究在入库车中断模式下应如何调度入库车的多段卸货操作和出库车的进出站顺序,使得生鲜品在整个越库转运过程中新鲜度的总衰减量最小,即,应如何建立适用于入库车中断模式下的生鲜品越库车辆调度模型和如何设计算法求解。

本文有如下假设:(1)所有入库和出库车均已到达越库中心等待调度,且每辆入库车上的装载信息和出库车的需求信息已知;(2)卸载和装载单位生鲜品的时间相同,每卸/装载一单位生鲜品需要一单位时间;(3)上一辆入/出库车离开站台至下一辆入/出库车驶入站台需计算车辆转换时间,该值对于所有车辆是一致的;(4)生鲜品被卸载后,从卸货站台转运至装货站台的时间是一致的;(5)转运生鲜品的入库车和出库车均为冷链车;(6)生鲜品在越库中转过程中会经历 3 个存储区域:入库车、越库中心和出库车,而 3 个存储区域衰减率之间的大小关系为:越库中心 > 入库车 = 出库车。假设(1)~(4)普遍存在于经典的越库模型中^[19,24];本文的研究对象为生鲜品,因此提出假设(5);假设(6)中衰减率的大小关系常见于冷链车的调度研究中^[25]。

1.2 卸货规则

如何确定在何时中断哪辆入库车的卸货操作,是入库车中断模式需要解决的问题。理论上说,在卸载完每一件生鲜品后,均应判断该卸货操作是否需要中断。显然,这会在模型构建和算法求解上造成巨大困难。

为降低模型解空间的复杂度,引入参数批次卸货数量 $U \in \mathbb{Z}^+$,其含义是每次入库车执行卸货操作时,至少需要将 U 数量的生鲜品卸载下来,以此来规避每卸载完一件生鲜品后均应判断是否需要中断的问题。可见,通过 U 值可将某辆入库车的卸货过程分为多段,每一段称为一个卸货操作,其含义是从某辆入库车卸载某种生鲜品的数量。

具体地,若基于批次卸货数量 U 来卸载 h 数量的生鲜品,则所需卸货次数 α 和每次卸货的数量 η_h 分别为:

$$\alpha = \begin{cases} \max\left(\left\lfloor \frac{Q}{U} \right\rfloor, 1\right), & \text{if } Q > 0 \\ 0, & \text{if } Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\eta_h = \begin{cases} Q, & \text{if } \alpha = 1, h = 1 \\ U, & \text{if } \alpha \geq 2, h = 1, 2, \dots, \alpha - 1 \\ Q - (\alpha - 1)U, & \text{if } \alpha \geq 2, h = \alpha \end{cases} \quad (2)$$

其中, h 为卸货操作次数的序号,符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 的含义为向下取整,可见, Q 数量生鲜品的卸货过程被分为了 α 段,每段卸载数量为 η_h 。

如下给出一个简单的例子以更好地理解上述公式的含义与应用细节。该算例包含两辆入库车和两种生鲜品,如矩阵所示,入库车 1 载有第 1 种类生鲜品 25 个,入库车 2 载有第 1 种类生鲜品 5 个、第 2 种类生鲜品 15 个。

$$r_{ik} = \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 5 & 15 \end{bmatrix}, U = 10$$

基于式(1)和(2), 入库车 1 对应的卸货次数为 2, 分别为卸载第 1 种类生鲜品 10 个、15 个; 入库车 2 对应的卸货次数也为 2, 分别为卸载第 1 种类生鲜品 5 个, 卸载第 2 种类生鲜品 15 个。由此可知, 算例中的卸货过程需执行 4 次卸货操作, 每次操作由入库车序号、生鲜品种类和卸载数量这 3 个要素构成。对 4 次卸货操作执行不同的排序, 会有不同的结果, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 基于入库车序号, 第 1 种可能的卸货顺序为 1-1-2-2, 由于前两次和后两次卸货操作都是针对同一辆入库车, 可以合并, 因此该卸货顺序下, 仅需要计算一次车辆转换时间 D 发生在卸货位置 2 到 3 时; 而第 2 种卸货顺序为 2-1-1-2, 需要计算两次车辆转换时间分别发生在卸货位置 1 到 2 和 3 到 4 时。

表 1 卸货次数为 4 时可能的卸货顺序

Unloading operation	g	i	k	η_h
Possible unloading sequence 1	1	1	1	10
	2	1	1	15
	3	2	1	5
	4	2	2	15
Possible unloading sequence 2	1	2	1	5
	2	1	1	10
	3	1	1	15
	4	2	2	15

i —Serial number of IT i ; k —Product type

不同的卸货顺序对应着不同的目标函数值。与非中断模式下仅仅是对车辆序号的排序不同, 在入库车中断模式下, 排序的对象变为卸货操作(由入库车序号、生鲜品种类和卸载数量这 3 个要素构成), 并由此建立入库车中断模式下的数学建立和针对性设计自适应遗传算法求解。

1.3 入库车中断模式下总衰减量模型

生鲜品新鲜度通常被认为服从指数衰减形式^[24-25]。因此, 若生鲜品处于不同衰减率 θ_i 下的时间分别为 t_i , 则经历 $\sum_i t_i$ 时间后, 生鲜品新鲜度的总衰减量(Total Deterioration, TD)为:

$$TD = q^0 - q^0 e^{-\sum_i \theta_i t_i} \quad (3)$$

其中, q^0 为生鲜品的初始新鲜度。

生鲜品在越库中转过程中会经历 3 个不同的存储区域: 入库车、越库中心和出库车。每个区域的衰

减率是不变的, 结合式(3), 计算总衰减量的核心是计算生鲜品处于每个存储区域下的衰减时间。

入库车 i 第 1 次进入卸货站台的时间为 C_i , 因此, 车上生鲜品处于入库车上的存储时间为 C_i ; 该批生鲜品最终会被装上满足 $v_{ij} = 1$ 的出库车 j 上, 则车上生鲜品处于越库中心的存储时间为 $E_j - C_i$; 在时刻 L_j , 出库车 j 的所有需求被满足, 离开装货站台, 则在出库车上的存储时间为 $L_j - E_j$ 。因此, 该批生鲜品处于入库和出库车上总的存储时间为 $L_j - E_j + C_i$ 。其中, E_j 、 L_j 分别是出库车 j 的进站和出站时间。

基于以上分析, 在入库车中断模式下, 以最小化生鲜品新鲜度总衰减量为目标的数学模型为:

$$\min TD = \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{h=1}^{\alpha_{ik}} \eta_{ikh} (q_k^0 - q_k^0 e^{-[\theta_{k1}(L_j - E_j + C_i) + \theta_{k2}(E_j - C_i)]v_{ij}}) \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^{|J|} X_{ijk} = r_{ik}, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} X_{ijk} = s_{jk}, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (6)$$

$$X_{ijk} \leq M v_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$\alpha_{ik} = \begin{cases} \max\left(\left\lfloor \frac{r_{ik}}{U} \right\rfloor, 1\right), & r_{ik} > 0 \\ 0, & r_{ik} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\eta_{ikh} = \begin{cases} r_{ik}, & \text{if } \alpha_{ik} = 1, h = 1 \\ U, & h = 1, 2, \dots, \alpha_{ik} - 1 \\ r_{ik} - (\alpha_{ik} - 1)U, & \text{if } \alpha_{ik} \geq 2, h = \alpha_{ik} \end{cases} \quad (9)$$

$$|G| = \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{k=1}^{|K|} \alpha_{ik} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} \sum_{k=1}^{|K|} x_{ikg} = 1, \quad \forall g \in G \quad (11)$$

$$\sum_{g=1}^{|G|} x_{ikg} = \alpha_{ik}, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{g=1}^{|G|} \sum_{h=1}^{\alpha_{ik}} \eta_{ikh} x_{ikg} = r_{ik}, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (13)$$

$$e_{g+1} \geq l_g + D - M(2 - x_{ikg} - x_{i'k',g+1}), \quad \forall i \neq i' \in I, k \in K, g \in G \quad (14)$$

$$e_{g+1} \geq l_g + D - M(2 - x_{ikg} - x_{i'k',g+1}), \quad \forall i \neq i' \in I, k \neq k' \in K, g \in G \quad (15)$$

$$e_{g+1} \geq l_g - M(2 - x_{ikg} - x_{ik',g+1}), \quad \forall i \in I, k \in K, g \in G \quad (16)$$

$$e_{g+1} \geq l_g - M(2 - x_{ikg} - x_{ik',g+1}), \quad \forall i \in I, k \neq k' \in K, g \in G \quad (17)$$

$$l_g \geq e_g + \eta_{ikh} x_{ikg}, \quad \forall i \in I, k \in K, h \in H^{ik}, g \in G \quad (18)$$

$$C_i \leq e_g x_{ikg}, \quad \forall i \in I, k \in K, g \in G \quad (19)$$

$$E_j \geq L_j + D - M(1 - Z_{jj}), \quad \forall j \neq j' \in J \quad (20)$$

$$E_j \geq L_j + D - MZ_{jj}, \quad \forall j \neq j' \in J \quad (21)$$

$$Z_{jj} = 0, \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$E_j \geq C_i + V - M(1 - v_{ij}), \quad \forall i \in I, j \in J \quad (23)$$

$$L_j \geq l_g + V - M(1 - x_{ikg} v_{ij}), \quad \forall i \in I, k \in K, g \in G \quad (24)$$

$$X_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (25)$$

$$e_g, l_g, E_j, L_j \geq 0, \quad \forall g \in G, j \in J \quad (26)$$

式(5)和(6)是生鲜品转运数量与入/出库车卸载/需求数量的关系;式(7)强调了转运数量与 v_{ij} 的关系;式(8)~(10)是基于批次卸货数量 U 的卸货规则约束,在 1.2 节中已强调;式(11)强调针对某批次卸货数量为 η_{ikh} 的生鲜品,必须且只能选择一个卸货位置;式(12)强调选择的这些位置与基于 U 计算得到的卸货次数相等;式(13)更进一步强调将所有位置上安排的生鲜品数量相加,与车辆上装载的货物数量相等;式(14)~(19)描述了针对每一个卸货位置 $g \in G$, 其卸货的开始时间和结束时间之间的关系;其中,式(14)和(15)强调,仅当卸货位置 g 和 $g+1$ 被不同的入库车 i 和 i' 占据时,需要考虑加上车辆转换时间 D ;而当入库车 i 同时占据卸货位置 g 和 $g+1$ 时,则不需考虑 D ,这是式(16)和(17)的含义;式(18)描述卸货位置 g 装载货物数量为 η_{ikh} 时的进出站时间关系;式(19)强调了入库车 i 第 1 次进入卸货站台的时间;式(20)强调,若出库车 j 排在 j' 之前,则出库车 j 的进站时间不早于出库车 j' 离站时间加上车辆转换成 j 的时间 D ;式(21)强调,若出库车 j 排在 j' 之后,则出库车 j 的进站时间不早于出库车 j' 离站时间加上车辆转换成 j 的时间 D ;式(22)强调没有车排在自己之前;式(23)强调了生鲜品从卸货站台到达装货站台的时间关系;式(24)进一步强调,出库车 j 只有在所需要的所有生鲜品均被装上车后,才能离开越库中心发货;式(25)~(26)是非负约束。

2 算法设计

2.1 染色体编码

采用自然数编码方案,以基于批次卸货数量 U 计算得到的多段卸货操作为基因。图 2 示出了入库车中断模式下的染色体组成,其包含车辆序号、生鲜

品种类序号和卸货数量 3 层信息。而出库车采用非中断模式,只需关注车辆序号的排序,无需区分生鲜品种类,第 3 行信息为车辆上所有种类生鲜品数量的求和。

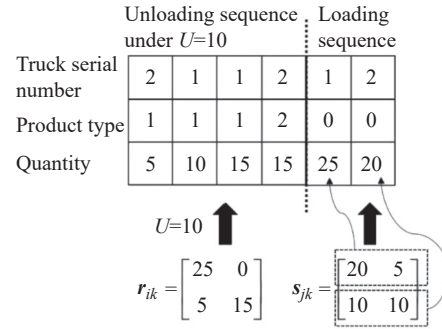


图 2 入库车中断模式下染色体构成

Fig. 2 Chromosome composition in inbound vehicle interruption mode

针对入库车中断模式,设计由入库车序号、批次卸货数量、生鲜品种类为基因的混合染色体编码方案,构建基于批次卸货数量的自适应遗传算法求解。

2.2 初始化策略

基于批次卸货数量 U 计算得到的 3 层染色体可以将对卸货操作的排序转化为对入库车辆的排序,具体步骤如图 3 所示:(1)基于批次卸货数量 U 将 r_{ik} 矩阵的卸货操作分为 $|G|$ 段,分解方法参见式(8)~(10);(2)将段卸货操作随机排列后,若相邻两次卸货操作来源于同一辆入库车,则合并,从而转化为采用矩阵形式表达。

值得注意的是, R_{ik} 的矩阵行数多于 r_{ik} 。这相当于把入库车重复进出卸货站台的行为变为增加了一些虚拟入库车执行卸货操作。通过 R_{ik} 和 s_{jk} 矩阵,可以方便地计算生鲜品在入库车、越库中心和出库车上的衰减时间,进而得到总衰减量值。

2.3 交叉和变异操作

自适应交叉概率:针对每代种群的适应度值分布,构造如下自适应交叉概率公式^[26]。

$$p_c = \begin{cases} \frac{\sigma_1 (f_{\max} - f_c)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & \text{if } f_c \geq f_{\text{avg}} \\ \sigma_2, & \text{if } f_c < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (27)$$

其中, f_{\max} 指种群中最大的适应度值, f_{avg} 指种群中的平均适应度值, f_c 指要交叉的两个染色体中较大的适应度值, σ_1 、 σ_2 取 (0,1) 区间的值即可实现自适应调整。

交叉算子选用部分映射交叉 (Partially Mapped Crossover, PMX), 操作流程如图 4 所示。

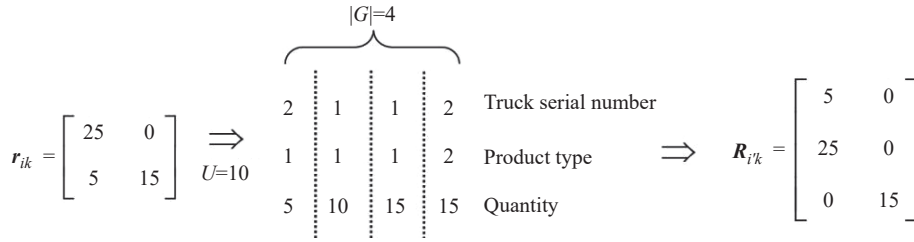


图 3 将卸货操作排序转化为车辆排序

Fig. 3 Unloading operation sequence is transformed into vehicle sequence

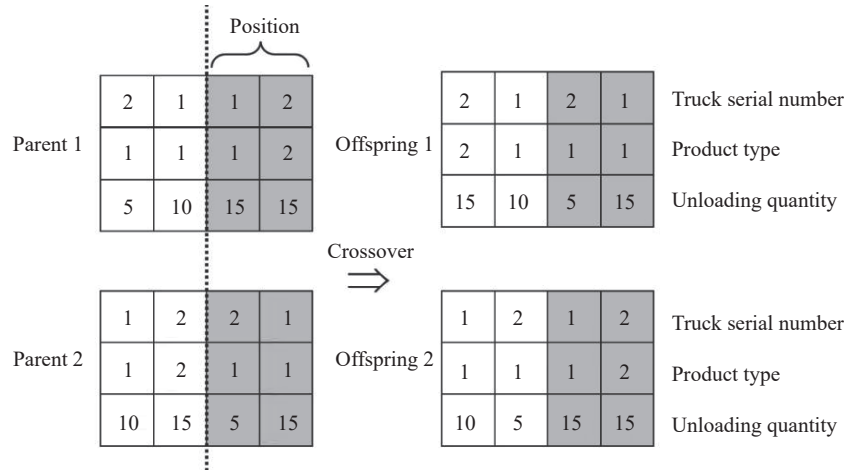


图 4 入库车中断模式下部分映射交叉算子

Fig. 4 Partial mapping crossover operator under the interrupt mode of inbound trucks

类似地, 自适应变异概率公式如下:

$$p_m = \begin{cases} \frac{\sigma_3 (f_{\max} - f_m)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & \text{if } f_m \geq f_{\text{avg}} \\ \sigma_4, & \text{if } f_m < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (28)$$

其中, f_m 指要变异的两个染色体中较大的适应度值, σ_3 、 σ_4 取 (0,1) 区间的值即可实现自适应调整。

选用交换变异算子, 即随机选取两个卸货位置进行交换, 若交换后的染色体适应度值高于交换前, 则接受变异操作; 若交换后的适应度值低于交换前, 则保留原先染色体。

2.4 算法步骤

(1) 初始化算法参数。包含种群数量 N_p 、选择概率 P_s 、自适应交叉概率 P_c 、自适应变异概率 P_m 、最大迭代次数 N_g 、自适应参数 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 ;

(2) 生成初始解集。针对每一算例, 基于批次货物数量 U 生成由车辆序号、生鲜品种类序号、数量构成的 3 行 $|G|$ 列卸货操作矩阵, 并随机排列后计算其对应的总衰减量值;

(3) 采用总衰减量值的倒数形式, 计算每条染色体的适应度值;

(4) 采用轮盘赌策略选择出需要交叉的染色体, 并按照自适应交叉概率, 执行部分映射交叉操作;

(5) 将执行后交叉操作的染色体, 按自适应变异

概率, 执行变异操作;

(6) 计算执行完变异操作后每条染色体的适应度值;

(7) 记录适应度值最高和最低的染色体序号, 并用具有最高适应度值的染色体替换掉最低适应度值的染色体, 同时, 对应的适应度值也被替换掉;

(8) 判断是否满足终止条件, 满足则结束, 否则转入步骤 4。

3 算例分析

数值实验分析基于文献 [21] 中的测试算例, 如表 2 所示。

这些数据的侧重点在于不同种类生鲜品的数量, 而实际上, 在研究生鲜品的越库车辆调度问题时, 仅考虑不同种类生鲜品在数量上的差别是不合适的, 还需要关注其自身属性, 即不同种类生鲜品的衰减率是不同的。例如草莓的衰减率明显大于苹果的, 在进行转运时, 研究具有高衰减率的生鲜品是否存在优先被调度的问题以及高/低衰减率生鲜品占比情形不同对车辆调度的影响等问题, 具有较高的实践应用价值。

基于此, 本文将生鲜品分为两类, 一类具有高衰

表 2 算例的各属性值

Table 2 Characteristics and values of the instances

Instance	Number			Total
	ITs	OTs	Product type	
1	4	5	4	990
2	5	4	6	1030
3	3	3	8	890
4	5	5	8	1000
5	5	3	8	960
6	4	4	5	1020
7	5	6	8	1610
8	3	5	7	890
9	4	4	8	900
10	3	4	9	930

减率, 设定为 $\theta_{k_1}^H = 5 \times 10^{-6}$; 另一类具有低衰减率, 设定为 $\theta_{k_1}^L = 1 \times 10^{-6}$ 。一旦这些生鲜品从冷链车上卸载至传送区域, 由于温度的升高, 衰减率也会发生变化, 这里将处于该区域的生鲜品衰减率设置为 $\theta_{k_2}^H = 1 \times 10^{-5}$ 和 $\theta_{k_2}^L = 2 \times 10^{-6}$, 并根据高衰减率生鲜品占比分为情形 1(低)、情形 2(中)和情形 3(高)。

此外, 遗传算法的性能很大程度上取决于参数的取值, 如无特殊说明, 取 $D = 75$ 、 $V = 100$ 、 $N_p = 1000$ 、 $N_g = 500$ 。在自适应参数设定方面, 根据式(27)和式(28), 存在 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 这 4 个参数, 本文将它们划分为高、中、低 3 个不同的水平, 分别记作水平 1、水平 2、水平 3, 如表 3 所示。

表 3 不同参数高、中、低等级下的值

Table 3 Values of different parameters at high, middle and low levels

Level	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
1	0.5	0.7	0.1	0.1
2	0.6	0.8	0.2	0.2
3	0.7	0.9	0.3	0.3

如果要测试每个组合以确定最优参数组合, 则需要试验 $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ 次, 这在实践中是不适当且不切实际的。正交试验设计法是一种高效率、快速、经济的试验设计方法^[27-28]。Taguchi^[27]将通过正交试验选择的参数水平组合罗列成选用 $L_9(3^4)$ 正交表, 累计只需要做 9 次试验即可, 其具体排列组合见表 4。

表 4 中每 1 行代表遗传算法的一次参数水平组合试验, 在测试时每一行重复进行 3 次, 通过对表 4

表 4 $L_9(3^4)$ 正交试验表Table 4 Orthogonal experimental array of $L_9(3^4)$

Number of experiment	Parameter level			
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
1	$\sigma_1(1)$	$\sigma_2(1)$	$\sigma_3(1)$	$\sigma_4(1)$
2	$\sigma_1(1)$	$\sigma_2(2)$	$\sigma_3(2)$	$\sigma_4(2)$
3	$\sigma_1(1)$	$\sigma_2(3)$	$\sigma_3(3)$	$\sigma_4(3)$
4	$\sigma_1(2)$	$\sigma_2(1)$	$\sigma_3(2)$	$\sigma_4(3)$
5	$\sigma_1(2)$	$\sigma_2(2)$	$\sigma_3(3)$	$\sigma_4(1)$
6	$\sigma_1(2)$	$\sigma_2(3)$	$\sigma_3(1)$	$\sigma_4(2)$
7	$\sigma_1(3)$	$\sigma_2(1)$	$\sigma_3(3)$	$\sigma_4(2)$
8	$\sigma_1(3)$	$\sigma_2(2)$	$\sigma_3(1)$	$\sigma_4(3)$
9	$\sigma_1(3)$	$\sigma_2(3)$	$\sigma_3(2)$	$\sigma_4(1)$

$\sigma_1(1)$ represents 0.5 of level 1, $\sigma_1(2)$ represents 0.6 of level 2, and so forth

中参数水平组合测试 27 次后, 计算结果表明, 选用 $\sigma_1 = 0.6$ 、 $\sigma_2 = 0.8$ 、 $\sigma_3 = 0.1$ 、 $\sigma_4 = 0.2$ 时, 遗传算法在求解本章提出的模型时表现最好, 因此, 这个参数水平组合在接下来的计算中, 设置为默认值。

基于以上设定, 本文的算例分析主要分为两方面: (1) 探究入库车中断模式与非中断模式在降低生鲜品新鲜度总衰减量上的差异; (2) 探究不同情形和参数对模型的影响。

3.1 确定批次卸/装货数量

如果批次卸/装货数量 U 值过高, 意味着每次均可直接卸载较大数量的货物而不必中断, 则中断模式的优势相较于非中断模式, 无法体现出来; 如果 U 值过低, 会使得每辆入/出库车的卸/装货过程被分为较多段, 大大增大了空间和时间复杂度, 反而会使算法较难求得满意解。

因此, 针对特定的算例, 考察不同 U 值对其总卸/装货次数 $|G|$ 的影响是有必要的。以入库车中断模式为例, 图 5 示出了每个算例下的批次卸货数量与总卸货次数 $|G|$ 的关系。

从图中可以看出, 总卸货次数 $|G|$ 随着 U 值的增加而急剧减小, 而当 U 大于 100 后, 再增加 U 值, 总卸货次数 $|G|$ 几乎不再减小, 这是由于本文所采用的算例中载有某种类生鲜品数量大于 200 的算例并没有太多, 故 U 值取 100 较适用于本文的算例。

3.2 入库车中断与非中断模式对比

理论上可以证明, 中断调度模式下求得的最优值一定优于非中断调度模式下的, 这主要是因为非中断模式下的最优解仅仅是中断模式下中断次数等

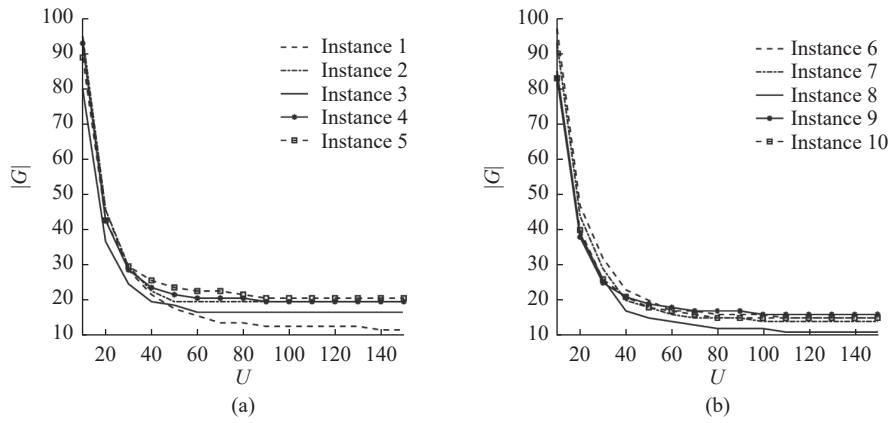


图 5 批次卸货数量与总卸货次数关系图

Fig. 5 Relationship between the unloading batch number and the total unloading quantity

于 1 的特例。

以情形 1 为例, 分别计算非中断、入库车中断下生鲜品的总衰减量, 并采用式(29)计算它们之间的百分偏差(Percentage Deviation, PD)。更进一步, 基于两种模式下的最优车辆调度序列, 计算这些序列下的完工时间(Makespan), 依然采用式(29)计算它们之间的百分偏差, 汇总结果于表 5 中。其中 NI(Non-interrupt)指非中断模式, ITI(Inbound truck interrupt)指入库车中断模式。

$$PD = \frac{TD_{NI} - TD_{ITI}}{TD_{NI}} \times 100\% \quad (29)$$

从表 5 中可以看出, 入库车中断模式下的总衰减量值显著小于非中断模式下的, 平均偏差达到了 13.90%, 从具体数据上看, 算例的百分偏差从 2.12%~20.32% 不等, 方差达到了 27.2%; 在完工时间指标方面, 入库车中断模式展现出了更大的优越性, 平均偏差达到了 21.90%, 从具体数据上看, 算例的百分偏差从 6.43%~39.67% 不等, 方差达到了 77.9%。表 5 中的结果仅仅是在批次卸货数量 U 取 100 时得到的, 可以预见, 若 U 取值更小时, 它们之间的百分偏差值会更大。

以上结果说明, 入库车中断模式相较于传统的非中断模式, 在总衰减量和完工时间两个指标上, 均呈现出了较大的优越性。即使部分算例在某一个指标上的偏差不大, 但在另一个指标上却呈现出了较大的偏差, 如算例 2 和算例 7。因此, 若生鲜物流企业的入库车中断模式实现的成本不高, 可以充分考虑采用此模式进行生鲜品的越库转运操作, 能同时实现总衰减量和完工时间的双赢。

其他两种情形下的结果汇总于表 6、图 6 中(这里仅考虑总衰减量指标)。结合表 5 得出, 平均 PD 值从情形 1 下的 13.90%, 降为情形 2 下的 12.70%, 再

表 5 情形 1 下的 NI、ITI 模式结果对比

Table 5 Comparison of NI and ITI mode in scenario 1

Instance	Under TD indicator			Under makespan indicator		
	NI	ITI	PD /%	NI	ITI	PD /%
1	1.95	1.63	16.35	1851	1541	16.75
2	2.42	2.20	9.02	2126	1580	25.68
3	2.45	1.95	20.32	1714	1369	20.13
4	2.92	2.47	15.38	2419	1780	26.42
5	2.72	2.38	12.54	1774	1660	6.43
6	1.50	1.33	11.28	1928	1512	21.58
7	1.54	1.51	2.12	2209	1530	30.74
8	1.99	1.58	20.28	1753	1444	17.63
9	2.64	2.23	15.59	1762	1525	13.45
10	1.81	1.51	16.57	1921	1159	39.67
Average	—	—	13.90	—	—	21.90

降为情形 3 下的 12.20%, 呈现出情形 1 > 情形 2 > 情形 3 的结果。图 6 示出了 3 种情形下总衰减量的百分偏差比较。可以看出, 虽然每个算例在不同情形下表现出了差异性, 但大小趋势近乎一致, 这说明了 PD 值与算例本身的结构是高度相关的, 此结构主要与入库车和出库车上货物的初始匹配度相关。若初始匹配度本身就很高, 无法充分发挥入库车中断模式的优势, 则计算得到的 PD 值就较低。

综上, 如果转运的生鲜品中有少部分高衰减率生鲜品, 相较于非中断模式, 入库车中断模式对于降低生鲜品的总衰减量具有更加显著的效果, 此时生鲜物流企业更应该采用入库车中断模式进行生鲜品的越库转运。

3.3 灵敏度分析

在中断模式下, 入库车会多次进出站台, 若车辆

表 6 情形 2 和情形 3 下的 NI、ITI 模式结果对比

Table 6 Comparison of NI and ITI mode in scenario 2 and scenario 3

Instance	Scenario 2			Scenario 3		
	NI	ITI	PD /%	NI	ITI	PD /%
1	4.04	3.92	3.06	5.29	4.76	10.09
2	4.19	3.81	9.04	5.02	4.84	3.59
3	4.54	3.18	29.95	5.17	4.23	18.22
4	4.91	4.35	11.30	6.02	5.56	7.64
5	3.84	3.48	9.39	5.27	4.25	19.24
6	2.28	1.97	13.48	3.13	2.74	12.61
7	3.99	3.58	10.31	4.20	3.80	9.45
8	4.49	3.93	12.54	5.13	4.47	12.85
9	4.08	3.59	12.00	5.34	4.58	14.30
10	2.10	1.76	16.33	3.35	2.89	13.66
Average	—	—	12.70	—	—	12.20

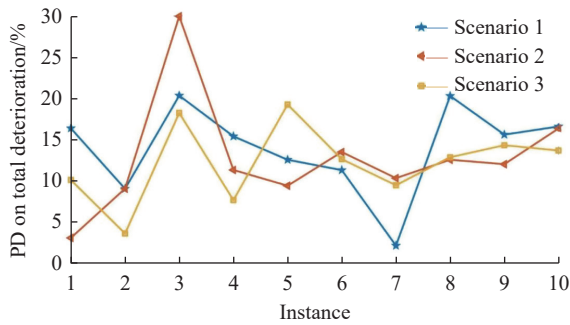


图 6 3 种情形下总衰减量百分偏差比较

Fig. 6 Comparison of percentage deviation of total deterioration under three scenarios

转换时间 D 较大,则会浪费大量时间在车辆转换上,这样反而会增加生鲜品的衰减时间,降低中断模式的优势。表 7 示出了在情形 1 中,NI 和 IPI 模式下的总衰减量在 $D \in \{0, 25, 50, 75, \dots, 125\}$ 时的百分偏差。可以看出,随着 D 值的增加,ITI 模式较 NI 模式的优越性逐步降低,而降速逐渐变缓。当 $D = 0$ 时,两模式间的平均偏差达到 22.40%,这实际上是 ITI 模式较 NI 模式优越性的阈值上限了。因为 $D = 0$ 可以理解为,只要入库车需要,其可以多次进出站台而不浪费时间成本,这已经充分挖掘了 ITI 模式的潜力;当 $D = 125$ 时,平均偏差降为 12.30%。可以预见,随着 D 值继续增加,两个模式间的差距会逐渐趋于 0。

传送时间 V 的改变也会显著影响两模型间的百分偏差。表 8 示出了在情形 1 中,NI 和 ITI 模式下的总衰减量在 $V \in \{0, 25, 50, 75, \dots, 125\}$ 时的百分偏差。当 $V = 0$ 时,两模式间的平均偏差达到 18.60%,

表 7 基于不同 D , NI 和 ITI 模式下的总衰减量百分偏差

Table 7 Percentage deviation of total deterioration between NI and ITI mode based on D

Instance	PD /%					
	$D = 0$	$D = 25$	$D = 50$	$D = 75$	$D = 100$	$D = 125$
1	20.48	17.91	17.23	15.16	13.92	12.29
2	21.18	16.15	9.79	8.19	4.79	5.47
3	33.18	28.98	25.17	21.95	18.15	14.11
4	28.27	24.07	20.63	18.81	16.20	15.13
5	23.05	18.21	15.73	12.96	12.47	12.85
6	20.94	14.05	12.41	8.97	13.38	10.48
7	14.36	10.95	8.45	0.59	2.58	5.14
8	19.47	18.09	17.97	20.28	17.22	19.08
9	20.93	16.89	16.35	14.70	14.22	13.60
10	22.15	21.50	19.55	17.75	16.18	14.91
Average	22.40	18.70	16.30	13.90	12.90	12.30

当 $V = 125$ 时,两模式间的平均偏差降为 13.60%,降幅为 5%,显著低于表 7 中从 22.40% 到 12.30% 的 10.10% 的降幅。此外,随着 V 值的增加,ITI 模式较 NI 模式的优越性也在逐步降低,而降速逐渐变缓。

表 8 基于不同 V , NI 和 ITI 模式下的总衰减量百分偏差

Table 8 Percentage deviation of total deterioration between NI and ITI mode based on V

Instance	PD /%					
	$V = 0$	$V = 25$	$V = 50$	$V = 75$	$V = 100$	$V = 125$
1	18.78	19.03	16.83	17.30	15.16	14.48
2	11.62	12.43	12.47	9.24	8.19	5.69
3	25.82	24.73	21.97	22.81	21.95	19.59
4	22.99	22.32	19.76	20.12	18.81	16.33
5	17.21	17.05	16.37	15.23	12.96	13.17
6	17.13	16.39	15.71	15.08	8.97	9.86
7	8.60	8.20	7.81	7.46	0.59	6.82
8	23.54	20.01	21.79	21.01	20.28	19.60
9	18.73	17.83	16.05	16.22	14.70	14.11
10	21.60	20.49	19.42	18.54	17.75	15.86
Average	18.60	17.90	16.80	16.30	13.90	13.60

综合表 7 和表 8 可以看出,相较于传送时间 V ,车辆转换时间 D 对降低生鲜品的总衰减量具有更加明显的效果。当 D 和 V 值较小时,生鲜物流企业更应该考虑采用入库车中断模式而放弃非中断模式进行生鲜品的越库转运,且应通过一些技术或其他手

段, 尽量降低车辆转换时间和传送时间, 以强化入库车中断模式的优越性。

4 结束语

本文通过详细刻画特定转运数量的生鲜品处于入库车、越库中心、出库车 3 个存储区域下的衰减时间及衰减率, 从而得到总衰减量的数学表达式, 并以最小化总衰减量为目标, 构建了入库车中断模式下的生鲜品越库车辆调度模型。在求解算法方面, 以车辆序号、生鲜品种类、卸/装货数量作为基因, 构建基于批次卸货数量 U 的混合染色体编码方案, 进而提出并采用自适应遗传算法求解。算例分析主要根据各参数和不同情形, 对比了非中断模式、入库车中断模式的总衰减量值。主要结论如下:

(1) 总卸/装货次数随着批次卸/装货数量 U 值的增加而急剧降低, 当 U 大于某值后, 总卸/装货次数便不再变化, 生鲜企业可以采用此方法来确定参数 U 的取值;

(2) 在降低生鲜品总衰减量方面, 情形 1(低)>情形 2(中)>情形 3(高), 即随着高衰减率生鲜品比重的增加而降低。因此当生鲜物流企业转运衰减率差异较大的生鲜品时, 采用入库车中断调度模式会取得更加显著的效果;

(3) 随着车辆转换时间 D 和传送时间 V 的增加, 入库车中断模式较非中断模式的优越性在逐步降低, 这启示生鲜物流企业应通过一些技术或其他手段, 尽量降低车辆的转换时间和传送时间, 以强化入库车中断模式的优越性。

本文研究不仅丰富了生鲜品越库车辆调度理论, 而且对降低生鲜品损耗、提高消费者满意度、增强企业竞争力具有现实意义。但本文在越库模式选择、求解算法、算例分析等方面可以进一步探讨, 在未来的研究中可以考虑完全中断模式下的越库车辆调度问题, 采用更加新颖的求解算法、基于真实企业的真实案例进行算例分析等。

符号说明:

C_i —— 入库车 i 第一次进入卸货站台的时间
 D —— 车辆转换时间
 e_g —— 第 g 个卸货位置开始卸货的时间
 E_j —— 出库车 j 进入站台开始装货的时间
 $|G|$ —— 总卸货次数
 G —— 卸货位置集合, $g \in \{1, 2, \dots, |G|\}$
 H —— 总卸货次数, $h \in \{1, 2, \dots, H\}$

I —— 入库车集合, $i \in \{1, 2, \dots, |I|\}$
 J —— 出库车集合, $j \in \{1, 2, \dots, |J|\}$
 K —— 生鲜品种类数集合, $k \in \{1, 2, \dots, |K|\}$
 l_g —— 第 g 个卸货位置完成卸货的时间
 L_j —— 出库车 j 进入站台完成装货的时间
 M —— 一个足够大的数
 q_k^0 —— 第 k 种生鲜品的初始新鲜度
 r_{ik} —— 入库车 i 装载第 k 种生鲜品数量
 s_{jk} —— 出库车 j 需要第 k 种生鲜品数量
 U —— 批次卸货数量
 V —— 生鲜品从卸货站转运到装货站台的时间
 $v_{ij} \in \{0, 1\}$ —— 如果有生鲜品从入库车 i 转运至出库车 j 上则为 1, 否则为 0
 X_{ijk} —— 从入库车 i 转运至出库车 j 上第 k 种生鲜品数量
 $x_{ikg} \in \{0, 1\}$ —— 若从入库车 i 卸载第 k 种类且数量为 η_{ikh} 的生鲜品分配至第 g 个卸货位置则为 1, 否则为 0
 $Z_{jj'} \in \{0, 1\}$ —— 若出库车 j 排在 j' 前面则为 1, 否则为 0
 α_{ik} —— 基于 U 计算得到的卸载 r_{ik} 数量生鲜品所需的卸货次数
 θ_{k1} —— 第 k 种生鲜品在车辆上的衰减率
 θ_{k2} —— 第 k 种生鲜品在越库中心的衰减率
 η_{ikh} —— 第 h 次卸载 r_{ik} 数量生鲜品时的卸货数量

参考文献:

- [1] BESIK D, NAGURNEY A, DUTTA P. An integrated multi-tiered supply chain network model of competing agricultural firms and processing firms: The case of fresh produce and quality[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 307(1): 364-381.
- [2] WANG C, CHEN X. Option pricing and coordination in the fresh produce supply chain with portfolio contracts[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 248(1/2): 471-491.
- [3] MAHMOODI A. Joint pricing and inventory control of duopoly retailers with deteriorating items and linear demand[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 132: 36-46.
- [4] BROEKMENLEN R A C M, VAN DONSELAAR K H. Quantifying the potential to improve on food waste, freshness and sales for perishables in supermarkets[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 209: 265-273.
- [5] ZHENG F, PANG Y, XU Y, et al. Heuristic algorithms for truck scheduling of cross-docking operations in cold-chain logistics[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(21): 6579-6600.
- [6] TORBALI B, ALPAN G. A literature review on robust and real-time models for cross-docking[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(7): 2372-2401.
- [7] 张政, 季彬. 考虑随机旅行时间与二维装载约束的越库配

- 送车辆路径优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 769-778.
- [8] TIRKOLAEI E B, GOLI A, FARIDNIA A, *et al.* Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 122927.
- [9] GELAREH S, GLOVER F, GUEMRI O, *et al.* A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem[J]. *Omega*, 2020, 91: 102015.
- [10] BUIJS P, DANHOF H W, WORTMANN J (HANS) C. Just-in-time retail distribution: A systems perspective on cross-docking[J]. *Journal of Business Logistics*, 2016, 37(3): 213-230.
- [11] 谷金蔚, 顾满占, 顾幸生. 量子寄生遗传算法求解 Flow Shop 及两阶段配送的集成调度问题[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(2): 235-243.
- [12] 张海刚, 顾幸生, 徐震浩. 基于免疫算法的带软时间窗车辆调度问题[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(1): 104-107, 132.
- [13] AGUSTINA D, LEE C K M, PIPLANI R. Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 152: 29-41.
- [14] DULEBENETS M A. A delayed start parallel evolutionary algorithm for just-in-time truck scheduling at a cross-docking facility[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 212: 236-258.
- [15] BAYÁ G, CANALE E, NESMAHNOW S, *et al.* Production optimization in a grain facility through mixed-integer linear programming[J]. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 12(16): 8212.
- [16] ACEVEDO-CHEDID J, SOTO M C, OSPINA-MATEUS H, *et al.* An optimization model for routing-location of vehicles with time windows and cross-docking structures in a sustainable supply chain of perishable foods[J]. *Operations Management Research*, 2023, 16(4): 1742-1765.
- [17] RAHBARI A, NASIRI M M, WERNER F, *et al.* The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: Two robust bi-objective models[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 70: 605-625.
- [18] ZAERPOUR N, YU Y, KOSTER R B M DE. Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system[J]. *Production and Operations Management*, 2015, 24(8): 1266-1284.
- [19] YU W, EGBELU P J. Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184(1): 377-396.
- [20] NASCIMENTO M C V, RESENDE M G C, TOLEDO F M B. Grasp heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 200(3): 747-754.
- [21] MOHTASHAMI A. Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 36: 468-486.
- [22] ARDAKANI A, FEI J, BELDAR P. Truck-to-door sequencing in multi-door cross-docking system with dock repeat truck holding pattern[J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2020, 11: 201-220.
- [23] THEOPHILUS O, DULEBENETS M A, Pasha J, *et al.* Truck scheduling at cross-docking terminals: A follow-up state-of-the-art review[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5245.
- [24] NASSIEF W, CONTRERAS I, Jaumard B. A comparison of formulations and relaxations for cross-dock door assignment problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 94: 76-88.
- [25] GRUNOW M, PIRAMUTHU S. RFID in highly perishable food supply chains: Remaining shelf life to supplant expiry date?[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(2): 717-727.
- [26] PAN F, ZHOU W, FAN T, *et al.* Deterioration rate variation risk for sustainable cross-docking service operations[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 232: 107932.
- [27] TAGUCHI G, PHADKE M S. *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*[M]. Boston, MA: Springer US, 1989: 77-96.
- [28] WU H, WAN Z. A multiobjective optimization model and an orthogonal design-based hybrid heuristic algorithm for regional urban mining management problems[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, 68(2): 146-169.

Truck Scheduling of Fresh Produce in Cross-Docking Systems with Interrupt Mode for Inbound Trucks

TAO Baiming¹, LIU Zhaohui¹, PAN Fei²

(1. School of Mathematics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The traditional fresh food inventory vehicle scheduling problem usually adopts a non-interrupted loading/unloading mode, which can easily lead to the problem of unloading non-required goods and the failure to unload required goods in a timely manner. To accelerate the cross-warehouse transportation of fresh products and reduce the loss of freshness during the transshipment process in cross-docking systems, this paper proposes an interrupt mode for inbound trucks, i.e., the unloading process of inbound trucks can be interrupted, meanwhile, establishes a truck scheduling model of fresh produce with the goal of minimizing the total freshness deterioration in cross-docking systems. According to the interrupt mode for inbound trucks, a three-layer hybrid chromosome coding scheme is designed by taking the inbound truck serial number, fresh produce types, and batch unloading quantity as genes. Thereby, an adaptive genetic algorithm based on batch unloading quantity is constructed to solve the problem. Numerical experimental results show that, compared with the traditional non-interrupt mode, the interrupt mode of the inbound trucks can effectively reduce the total deterioration by an average of 13.90% during the cross-docking transshipment process of fresh produce, and this advantage will become more significant with the decrease of truck changeover time, transshipment time, batch unloading/loading quantity, and the proportion of high deterioration rate of fresh products.

Key words: cross-docking; fresh produce; inbound truck interrupt mode; genetic algorithm; total deterioration

(责任编辑: 李娟)