

基于混合蚁群算法的箱装农产品单车装载研究

林智崧¹, 张雪斌², 姜大立¹, 陈元文³

(1.陆军勤务学院 军事物流系, 重庆 401311; 2.重庆三峡职业学院, 重庆 404155;

3.武警工程大学 装备管理与保障学院, 西安 710086)

摘要: **目的** 提出一种求解考虑包装特点的箱装农产品单车装载优化问题的有效算法。**方法** 针对箱装农产品单车装载中的弱异类货物问题, 以容积利用率最优为目标构建装载数学模型; 分析农产品成箱包装的特点, 并重新描述了货物承重约束和方向约束; 针对模型求解提出了一种混合蚁群算法, 包括基于砌墙式的启发装载策略, 以及改进后的期望函数; 最后选取了5组标准数据, 构造了1组农产品数据, 设置了3套实验方案对算法进行验证。**结果** 实验1中算法较2种对比算法目标值分别高出3%和2.5%; 实验2, 算法平均体积利用率达到81.59%; 实验3, 改变初始参数后算法最大目标值为93.9%。**结论** 提出的算法求解单车弱异类货物装载问题有效且性能良好; 算法用于求解考虑包装特点的箱装农产品单车装载问题, 具有一定的可行性。

关键词: 物流; HWBACO 算法; 蚁群算法; 农产品; 单车装载

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)23-0209-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.031

Single Truck Loading of Case Packed Agricultural Products Based on Hybrid Ant Colony Algorithm

LIN Zhi-song¹, ZHANG Xue-bin², JIANG Da-li¹, CHEN Yuan-wen³

(1.Dept. of Military Logistics, Army Logistics University, Chongqing 401311, China;

2.Chongqing Three Gorges Polytechnic College, Chongqing 404155, China;

3.School of Equipment Management and Support, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose an effective algorithm on optimization of single truck loading of box packed agricultural products which considering packaging characteristics. Aiming at the problem of weak heterogeneous goods in single truck load of packaged agricultural products, the mathematical model of loading was established with the goal of optimal volume utilization ratio. The characteristics of agricultural products packed in boxes were analyzed. Cargo load-bearing and directional constraints were re-described. A hybrid ant colony algorithm was proposed for solving the model, including the heuristic loading strategy based on the wall, and the improved expectation function. Finally, five sets of standard data and one set of agricultural product data were selected, and three experimental schemes were set up to verify the algorithm. In experiment 1, the target value of the algorithm was 3% and 2.5% higher than that of the two algorithms. In experiment 2, the average volume utilization rate of the algorithm reached 81.59%. In experiment 3, the maximum target value of the algorithm was 93.9% after changing the initial parameters. The algorithm is effective and has good performance in solving the loading problem of single weak heterogeneous cargo. It is feasible to use the algorithm to

收稿日期: 2019-04-28

作者简介: 林智崧 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为现代物流管理和集装单元化。

通信作者: 张雪斌 (1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为物流管理、物流工程。

solve the single truck load problem of case packed agricultural products considering the packaging characteristics.

KEY WORDS: logistics; HWBACO algorithm; ant colony optimization; agricultural products; single truck loading

我国农产品物流规模大、品种多、发展空间广阔。随着国家政策对“三农”的进一步倾斜,农产品物流主体渐趋多元化,学者对农产品物流的研究也取得了长足发展。胡钰分析了大数据背景下我国农产品物流面临的挑战和发展趋势^[1];顾晋光探讨了“互联网+”背景下的农产品定制消费新零售模式^[2];励莉^[3]研究了我国农产品批发市场流通效率提升问题;王军^[4]、付焯^[5]、张弛^[6]等人分别对生鲜农产品冷链物流的中间层组织、风险传递、云服务系统展开了研究。然而,我国现阶段农产品物流仍存在许多不足,例如,与其他物流行业相比发展相对较慢;物流运作方式水平普遍偏低(导致效率低、成本高);农产品运输包装和保鲜这两个痛点一直没能得到很好解决。近年来,第三方物流的快速发展为优化农产品物流运作方式提供了一种方向。物流企业可以将揽收的零散农产品订单通过集装单元化的模式统一规划,并进一步按照集装单元进行冷链运输。这既有利于控制产品运输环境,也有利于对农产品实施实时状态监测和信息传输。因此,农产品集装单元化对发展农产品物流具有十分重大的意义。农产品装载是农产品集装单元化的关键环节,优化的装载过程能够有效提高物流效率,增强产品保鲜能力,降低运输成本。

农产品装载属于三维装箱问题,是一种 NP-完全问题。为解决此类问题,从 20 世纪 70 年代至今,“墙”、“层”、“塔”、“块”、“三空间分割”等概念和策略被先后提出,用于构建目标容器内货物的装载模式。而装载过程的优化方法可以归纳为组合优化法、数学规划法和人工智能法等。人工智能方法善于解决前 2 种方法在应用中常出现的计算量大、收敛条件难确定、难以获得解析解等问题。相比于其他智能算法,蚁群算法具有正反馈机制^[7](能够快速寻优),鲁棒性较强,采用分布式并行计算,使得全局寻优能力较好,且易与其他启发式算法融合^[8]。鉴于此,郭向阳等^[9]将蚁群算法应用于军用车辆器材装箱优化;闫淑娟^[10]提出了面向单箱弱异类 CLP 的一种改进启发式方法;Euchi 等^[11]用蚁群算法求解码头集装箱堆垛问题;Jovanovic 等^[12]提出了一种求解块重定位问题的高效蚁群优化算法。但蚁群算法也存在处理大规模问题时间代价较大、正反馈过激导致陷入局部最优的问题(这主要由参数设置不当造成)。李晨^[13]为避免算法过早收敛于次优解,提出了 3 种调整信息素量的方法;杨盛伟^[14]等为每次迭代后的路径信息素添加“赏罚”机制,再用粒子群算法对参数进行了进一步调优;裴振兵^[15]设计了动态自适应的信息素启发因子和期望启发因子,使算法跳离局部最优。

通过文献检索发现,目前针对农产品装载进行的研究与相关资料极其匮乏。朱东岳^[16]考虑了多车型的情况,并根据农产品腐败时间构建了农产品优先系数;邢斌^[17]等建立了单车情况下体积利用率与货物价值结合的目标函数,但模型没有关于农产品的特别约束或者约束描述。文中以农产品成箱包装为切入点,根据不同包装方式的特点,分析对应的承重约束和方向约束。在此基础上,提出一种基于砌墙式装载启发策略的混合蚁群算法,即 HWBACO 算法(hybrid wall based ant colony optimization),旨在有效解决箱装农产品的单车装载问题。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

农产品成箱包装是农产品供应链中的常见包装形式,其包装箱是承载农产品贯穿整个物流过程的基本单元。箱装农产品的单车装载按照农产品的规模一般可以分为单种货物单车装车问题和弱异类货物单车装车问题。弱异类是指货物有几种不同的类别,但种类不会太多,且每种都有一定的数量;与之对应的是强异类,指货物种类很多,且每种数量很少。文中的研究背景是第三方物流对农产品进行集装单元化处理,可以认为强异类农产品运输情况并不多见。同时,弱异类货物单车装车的策略往往对解决单种货物单车装车问题有效,因此,研究主要针对弱异类箱装农产品单车装车问题展开。具体可以描述为:给定一批弱异类的农产品和一辆指定的货车,要求在满足约束的情况下,将该批货物装车,使得目标值最优。

1.2 问题假设

为限定模型条件,对问题进行如下假设:① 该批货物没有需要单独装车的货物;② 车厢以及单类货物包装的外形都是长方体或正方体;③ 单类货物尺寸小于车厢各边尺寸;④ 所有货物质量分布均匀;⑤ 该批货物放置方向只能与车厢正交;⑥ 该批货物优先级相同;⑦ 所有货物都有一定的承重能力。

1.3 符号说明

为方便建模,选择车厢一个顶点为原点(这里选择车头方向左下顶点为原点)建立车厢坐标轴,见图 1, x 轴负方向为车头方向。将货物放置到车厢中,沿 y 轴正方向为右边,沿 z 轴正方向为上边,沿 x 正方向为前边,图中相对应可以将剩余空间分为“右空

间”、“上空间”、“前空间”。由于货物质量分布均匀，因此认为其重心处于几何中心。

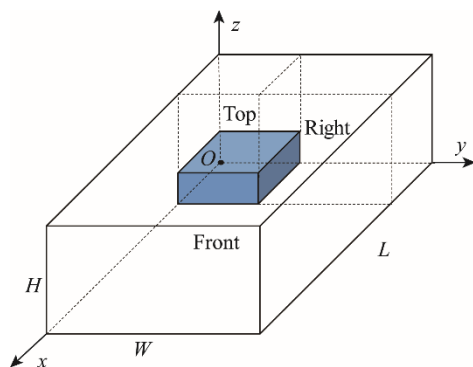


图 1 车厢坐标轴示意

Fig.1 Diagrammatic drawing of boxcar coordinate axis

相关符号说明： M 为蚂蚁数目； N 为货物的总数量； n 为货物总类数； $N_{\max}(i)$ 为第 i 类货物的总件数； $N_z(i)$ 为第 i 类货物被装载的数目； l_i, w_i, h_i, g_i 表示第 i 类货物的长、宽、高、重量； L, W, H 表示该型货车车厢的长、宽、高； $[c_{1x}, c_{2x}]$ 、 $[c_{1y}, c_{2y}]$ 、 $[0, c_z]$ 分别表示车厢在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的重心允许范围； (x_i, y_i, z_i) 表示第 i 件货物在车厢内的重心坐标； (rx_i, ry_i, rz_i) 表示货物 i 的右前上角顶点在车厢内的坐标； (lx_i, ly_i, lz_i) 表示货物 i 的左后下角顶点在车厢内的坐标； V 和 G 分别表示车厢最大载物容积和最大载重； S 为装载状态值矩阵，用来存储按顺序装载的货物种类编号和对应的数量、货物坐标以及放置方向； N_{c_max} 表示最大迭代次数； U_i 为决策变量，若货物 i 被装入车厢，则 $U_i=1$ ，否则， $U_i=0$ 。

1.4 目标函数

Z 表示货车运载能力综合利用率，表达式为：

$$\max Z = \frac{\sum_{i=1}^N l_i w_i h_i U_i}{V} \quad (1)$$

式 (1) 表示所有装载货物体积之和与车厢最大容积的比值，即车厢容积利用率。将容积利用率作为目标优化值在三维装箱研究领域和实际应用中都比较广泛。

1.5 约束条件

1) 数量约束。每类货物被装载的数目应在限制范围内：

$$N_z(i) \leq N_{\max}(i) \quad (2)$$

其中， $i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 容积约束。所有被装载货物的总体积应不大于车厢最大容积：

$$\sum_{i=1}^N l_i w_i h_i U_i \leq V \quad (3)$$

3) 重量约束。所有被装载货物的总重量应不大于货车载重：

$$\sum_{i=1}^N g_i U_i \leq G \quad (4)$$

4) 方向约束。若仅根据假设⑤，则货物可以有 6 种摆放方向：

$$\begin{cases} l_i // W \& w_i // L \& h_i // H & \text{direction 1} \\ l_i // W \& w_i // H \& h_i // L & \text{direction 2} \\ l_i // L \& w_i // W \& h_i // H & \text{direction 3} \\ l_i // L \& w_i // H \& h_i // W & \text{direction 4} \\ l_i // H \& w_i // L \& h_i // W & \text{direction 5} \\ l_i // H \& w_i // W \& h_i // L & \text{direction 6} \end{cases} \quad (5)$$

5) 重心约束。已被装载的所有货物形成的车厢新的重心在坐标轴的各个方向须满足：

$$\begin{cases} c_{1x} \leq \frac{\sum_{i=1}^N g_i U_i x_i}{\sum_{i=1}^N g_i U_i} \leq c_{2x} \\ c_{1y} \leq \frac{\sum_{i=1}^N g_i U_i y_i}{\sum_{i=1}^N g_i U_i} \leq c_{2y} \\ 0 \leq \frac{\sum_{i=1}^N g_i U_i z_i}{\sum_{i=1}^N g_i U_i} \leq c_z \end{cases} \quad (6)$$

6) 货物稳定性约束。货物的装载稳定性通常包括水平稳定性和竖直稳定性，分别与货物受到的水平方向作用力和竖直方向作用力有关。水平方向力主要是由货车加速、减速、转弯、摇晃、碰撞等引起的来自车厢或其他货物的水平压力；竖直方向力主要来自货车颠簸、上下坡以及其他货物重力产生的竖直压力。前者失衡会使货物产生水平偏移和旋转，后者则可能让货物发生弹跳，而二者都有可能造成货物受挤压而损坏。文中研究的货物稳定性约束主要关注车厢或者其他货物在水平方向和竖直方向对货物的支撑作用。这里设定，只有同时满足以下 2 个条件才认为货物摆放稳定：货物的底面被相邻货物或者车厢完全支撑；货物至少有一个侧面受到来自相邻货物或者车厢的支撑力。

竖直方向，当货物 i 摆放于货物 j 上方，应满足：

$$\begin{cases} lz_i = rz_j \\ lx_i \geq lx_j \\ rx_i \leq rx_j \\ ly_i \geq ly_j \\ ry_i \leq ry_j \end{cases} \quad (7)$$

水平方向,当货物*i*摆放于货物*j*侧方,应满足:

$$\begin{cases} l x_i = r x_j \\ l z_j \leq l z_i \leq r z_j \\ (l y_j \leq l y_i \leq r y_j) \text{ or } (l y_i \leq l y_j \leq r x_i) \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} l y_i = r y_j \\ r z_j \geq l z_i \geq l z_j \\ (l x_i \leq l x_j \leq r x_i) \text{ or } (l x_j \leq l x_i \leq r x_j) \end{cases} \quad (8)$$

只有当式(7)和(8)同时成立时,稳定性约束才能满足。但注意到,为研究方便,此处公式中的货物*j*为广义的货物。这里广义的货物是指其性质既可以为普通货物中的一员,又可以是装载中几个相邻的货物,还可以是车厢的箱壁。当*j*为车厢的箱壁时,货物稳定性约束不能完全按照式(7)和(8)进行,因为货物*i*应当不能超出车厢尺寸进行放置,即满足:

$$\begin{cases} l x_i \geq 0 \\ l y_i \geq 0 \\ l z_i \geq 0 \end{cases} \quad \text{and} \quad \begin{cases} 0 < r x_i \leq L \\ 0 < r y_i \leq W \\ 0 < r z_i \leq H \end{cases} \quad (9)$$

7) 货物承重约束。为尽可能减少货物被压坏造成的损失,可以对货物承重能力进行分析。这里用底置水平(Bottom level)描述货物的承重能力级别,用 $dz(i)$ 表示,其大小设置为正整数 $\{1, 2 \dots n_z\}$,底置水平值越低代表货物越适宜放置在底层,即承重能力越强。为了尽量让底置水平值小的货物放到底层,做出如下约束

$$\begin{cases} l z_i \geq r z_j \\ dz(j) - dz(i) \leq Q \end{cases} \quad (10)$$

式(10)的意思是当货物*i*摆放在比货物*j*更高的位置的时候,货物*i*的底置水平值不能比货物*j*小 Q 个级别以上(Q 为一固定值)。第2个不等式右边的数值 Q ,是鉴于假设⑦中所有货物都有一定承重能力而做出的设定,可以根据不同货物的承重能力确定具体的值。

1.6 考虑箱装农产品包装特点的约束调整

常见的箱装农产品包装方式包括筐包装、木箱包装、纸箱包装、塑料箱包装等。不同的包装材料和包装形式导致了包装之间承重能力的显著差异,这不仅得重新考虑货物承重约束,还得认真选择货物的摆放方向。

常见的一种筐包装是竹筐,特点是轻便,却不够坚固结实,不能承受较多货物的重量,不能倒置或侧放;另一种筐包装是塑料筐,已经被广泛应用在集装箱单元化中,特点是箱体强度大,常见于仓储堆码,但其盖子往往不结实或者没有盖子,因此不能倒置或侧放。木箱包装的缓冲能力不强,但硬度高,不易发生形变,静止状态对货物的保护效果很好,在无封口的

情况下不能倒置或侧放。纸箱以瓦楞纸箱为代表,有一定缓冲能力,但传统的纸箱结构使其承重能力不强,一般允许6个方向放置,但顶面向上优先。塑料箱最常见的是泡沫塑料箱,承重能力弱,但在满足承重条件下,若箱体封闭结实可以考虑6个方向放置。

根据以上分析的农产品包装的特点,对货物承重约束和方向约束进行重新描述。一般认为,体积一定的情况下承重能力强的包装能装载更重的物资。因此这里假设承重能力强的包装,对应的货物种类也更重。按照包装的种类相应地将车厢高度方向初始分为5层,且假定当货物放置在对底置水平的层时,能够承载上方所有底置水平不超过自身 Q 个等级的货物重量。那么为方便满足约束条件7),应尽量将货物装在对应的层,但是在装载过程中这样难免浪费空间,而且分层形式是动态变化的。由此,尽可能地使底置水平低的往下,底置水平高的往上。约束调整情况见表1。

表1 箱装农产品货物承重约束和方向约束
Tab.1 Load bearing and direction constraints of container loaded agricultural products

包装	$dz(i)$	方向
竹筐	5	1, 3
塑料筐	2	1, 3
木箱	1	1, 3
瓦楞纸箱	3	1, 3 优先
泡沫塑料箱	4	1~6

2 问题求解

提出一种基于砌墙式装载启发策略的混合蚁群算法,即HWBACO算法。传统蚁群算法解决货物装载问题的基本流程:随机放置蚂蚁;根据概率选下一种货物;判断约束条件,不满足则继续选货物,满足则允许装载;直到车厢装不下,完成一只蚂蚁的遍历;全部蚂蚁完成遍历,更新信息素,进入下一次迭代,直到最大迭代次数。

其中,蚂蚁选择下一种货物的概率函数为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{S \in \text{allow}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{allow}_k \\ 0, & j \notin \text{allow}_k \end{cases} \quad (11)$$

式中: allow_k 为第*k*只蚂蚁的待选货物集合; $\eta_{ij}(t)$ 为期望函数,表示蚂蚁从第*i*种货物选择爬向第*j*种货物的意愿; $\tau_{ij}(t)$ 为*t*时刻路径*ij*的信息素强度; α 和 β 分别为信息素启发因子和期望启发因子。

由于信息素每个时刻都在挥发或增强，其迭代公式为：

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = \rho \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, 0 < \rho < 1 \\ \Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^M \Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) \\ \Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) = Q_c \times Z(N_c, k) \end{cases} \quad (12)$$

式中： ρ 为信息素残留系数； $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ 为所有爬过路径 ij 的蚂蚁释放的信息素总和； $\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1)$ 为第 k 只蚂蚁在路径 ij 上新释放的信息素； Z 为货车运载能力综合利用率； N_c 为迭代次数； Q_c 为信息素增强系数，凭经验选取。

2.1 基于砌墙式的装载启发策略

砌墙式装载策略是 George 和 Robinson 提出的一种高效实用的货物装载模式。其中的“墙”也可以称之为“竖直层”（与此相对应的另一种层的形式是“水平层”）。它的原理是当一件货物被装进容器后，容器被分为墙空间和非墙空间，墙空间以货物沿砌墙方向的尺寸作为墙的厚度。将货物分别装入这 2 种空间，方法是当墙空间被装满后再在非墙空间筑起新墙，直到容器无法再砌墙。这样可以降低处理剩余空间的复杂性，同时通过一定数量的迭代得到更优的结果。文中采用基于砌墙式的装载策略，制定装载原则如下所述。

1) 三空间分割。三空间分割原则是一种常用的解决三维装箱问题的有效策略。参考 1.3 节建立的车厢坐标轴，装入的第一个货物成为第一面墙的基准货物，这时把墙空间的剩余空间分成 3 个长方体子空间，沿货物 y 轴正方向为右空间，沿货物 z 轴正方向为上空间，沿货物 x 轴正方向为前空间（第一个货物产生的前空间的长度为 0）。下一个货物将摆放在其中一个子空间，同时将该子空间的剩余空间再分为右、上、前 3 个子空间。以此类推，每装入一个货物都将把所在空间的剩余空间分成 3 个子空间。这里规定，子空间的长为沿 x 轴方向的尺寸，宽为沿 y 轴方向的尺寸，高为沿 z 轴方向的尺寸。

2) 墙内摆放，先右空间再前空间后上空间。考虑到货物承重约束，应尽可能优先选择货物承重能力强（即底置水平值低）的货物放置在更底层的地方。选择沿 x 轴正方向砌墙，这样基准货物沿 x 轴的尺寸就是该面墙的厚度。因此在墙内进行货物装载时，优先选择底置水平值低的货物将墙内如图 1 所示的 xy 平面装满，再向更高的层发展。这意味着墙内装载顺序是先填满右空间和前空间，再选择上空间。

3) 墙内摆放，同类货物优先。为了减少相邻货物摆放产生的浪费空间，同时提高装卸环节的效率，在同一面墙内进行装载时，优先选择同类货物。在真实生产作业中，一般会采用泡沫塑料等填充物来支撑

货物以弥补空间间隙带来的不平衡受力，或是将货物捆绑在一起加以固定。将同类货物放置在一起有利于减少填充物的使用，减少经济损失和环境污染，同时方便货物捆绑，降低人工作业工作量。

4) 墙间摆放，重货、大货优先。为了保证车厢整体稳定性和安全性，应当优先选择质量大的货物摆在靠近车头的方向，即砌新墙时让重货靠近坐标原点方向摆放。这样做的好处是装载完毕后车厢的整体重心更靠近整辆车的中部，有利于货车行驶。另外，为了合理利用空间，优先选择体积更大的货物作为新墙的基准货物（即一面墙的第一个货物）。

5) 基准货物摆放，最长边优先。在基于砌墙式的装载策略中，基准货物沿 x 轴方向的尺寸决定了整面墙的厚度，进而限制了能够装进该墙的货物尺寸。因此，当确定了基准货物的种类后，在选择其摆放方向时应当优先考虑将货物的最长边摆放在 x 轴方向，继而是次长边，最后才是短边。

6) 让新空间最短边更长。通过对许多优秀方法的研究，以及凭借长期货物装箱经验，得出无论是选择新墙第 1 种货物还是在墙内选择新的货物，在空间允许的情况下，应当选择使即将形成的新空间的最短边更长的货物，这样使得新空间允许装下的新的货物种类更多，从而货物装载组合更加丰富，有利于得出更优的结果。

7) 剩余空间合并。当一面墙没有足够的剩余空间让一种货物继续装载时，对这些剩余空间进行合并。用 $V_r = [l_r, w_r, h_r, lx_r, ly_r, lz_r]$ 表示一个剩余子空间，其中 l_r, w_r, h_r 分别为空间 V_r 的长宽高， lx_r, ly_r, lz_r 分别为 V_r 左后下顶点的 x 轴、 y 轴以及 z 轴坐标。考虑 2 种合并策略。一种是 2 个空间沿 y 轴相邻的情形，考虑到货物的支撑约束，只允许左下角 z 轴坐标相等的空间进行合并。当 2 个沿 y 轴相邻的空间左下角顶点的 x 坐标和 z 坐标都相等时，将二者宽度合并，具体过程如下。

令索引数组 $pp = [1, 3, 4, 5, 6]$ ：

$$\text{if } lz_{r1} = lz_{r2} \ \& \ lx_{r1} = lx_{r2} \ \& \ (ly_{r1} + w_{r1}) = ly_{r2} \quad (13)$$

$$\text{then } V_{r1}(2) = V_{r1}(2) + V_{r2}(2) \quad (14)$$

$$V_{r1}(pp) = \min(V_{r1}(pp), V_{r2}(pp)) \quad (15)$$

另一种，当 2 个沿 x 轴相邻的空间左下角顶点的 y 坐标和 z 坐标都相等时，将二者宽度合并，具体过程如下。

令索引数组 $pp = [2, 3, 4, 5, 6]$ ：

$$\text{if } lz_{r1} = lz_{r2} \ \& \ ly_{r1} = ly_{r2} \ \& \ (lx_{r1} + l_{r1}) = lx_{r2} \quad (16)$$

$$\text{then } V_{r1}(1) = V_{r1}(1) + V_{r2}(1) \quad (17)$$

$$V_{r1}(pp) = \min(V_{r1}(pp), V_{r2}(pp)) \quad (18)$$

2.2 蚁群算法期望函数调整

期望函数体现了蚂蚁对下一个目的地的选择期

望值,其大小直接影响选择概率的值。墙与墙之间由于基准货物的不同,导致墙内空间布局和对下一个货物的需求都有所区别。根据2.1节的装载策略,希望在墙内尽可能多地摆放相同的货物,而当一种货物放置完毕时,希望下一类会是体积相近、重量更轻、底置水平更高的货物。在新墙开始时,希望选择体积大、重量大、底置水平低的货物,因为本墙的第一类货物会率先把底层铺满。这样,通过区别墙内和墙间对货物的选择方式,尽量地将体积大、重量大、底置水平低的货物摆在每一面墙的底层位置,同时避免了上层货物过重而压损下层货物。同时,为了尽量让新空间最短边更长,对长宽高最小尺寸更大的货物优先考虑。因此,设置双重期望函数,分别为墙间期望函数 $\eta_{ij1}(t)$ (选取新墙基准货物)和墙内期望函数 $\eta_{ij2}(t)$ (选取本墙下一类货物),用 i 表示上一种货物, j 表示下一种货物,则:

$$\eta_{ij1}(t) = \frac{v_j \times g_j \times \min_size_j}{dz(j)^2} \quad (19)$$

$$\eta_{ij2}(t) = \frac{g_j \times \min_size_j}{|v_i - v_j| \times dz(j)}$$

式中: v_j 和 g_j 分别表示货物的体积与重量; $\min_size_j$ 表示货物 j 的长宽高尺寸中的最小值。

2.3 HWBACO 算法求解步骤

步骤(1):初始化。初始化蚂蚁数,货物类数,各类货物数目、尺寸、重量、底置水平,车厢尺寸、最大容积、最大载重、重心范围,各路径信息素初值(设为相同值),信息素残留系数,装载状态值矩阵,最大迭代次数等。

步骤(2):迭代开始。将蚂蚁随机放置到各类货物上。

步骤(3):砌新墙。用 $\eta_{ij1}(t)$ 计算概率函数,选择本墙第一个货物,对允许方向按 x 轴尺寸排序,优选尺寸大的。

步骤(4):同类货物同向装载。如果约束条件允许,那么选择相同种类的货物作为下一个装载货物,按相同的方向装载,直至本面墙按这个方向装不下该类货物,或者所有该类货物被全部装载完成。

步骤(5):同类货物换方向装载。若该类货物未被装完,则进行空间合并;然后新的剩余空间中尝试随机选取允许的方向装入该类货物,直至本面墙不能再装该类货物,或者该类货物被全部装完。

步骤(6):选择本墙下一类货物。若该类货物已被全部装完,或者本面墙按任意允许的方向都无法再装入该类货物,则进行空间合并;若待装载货物中没有能够装入剩余空间的,进入步骤(7);若待装载货物中有能够装入剩余空间的,用 $\eta_{ij2}(t)$ 计算概率函数,选择本墙下一类货物,摆放方向在符合空间要求

的允许方向里随机选取,然后重复步骤(4—6)。

步骤(7):判断能否继续砌墙。由于是沿着 x 轴正方向砌墙的,判断如果车厢沿 x 轴正方向的剩余尺寸大于任意待装载货物允许沿墙方向摆放的最小边,则重复步骤(3—7);否则,本只蚂蚁装车过程结束,进入步骤(8)。

步骤(8):对该蚂蚁的装载方案判断是否满足车厢重心约束和货物承重约束。若满足,则计算目标函数,更新本次迭代的最优方案信息;若不满足,则该次目标函数值记为0。重复步骤(3—8),直至所有蚂蚁完成任务。

步骤(9):比较更新各次迭代的最优方案信息;更新信息素。判断是否到达最大迭代次数。是,则算法结束,输出最优方案信息;否,则重复步骤(2—9)。

3 实验

1)关于数据来源。由于直接针对农产品单车装载进行研究的文献和数据都比较少,设置了3套实验,前2套实验方案分别证明HWBACO算法的有效性和可用性,第3套实验方案分析初始参数对算法的影响,分别称为实验1、实验2、实验3。实验1选取了与文中模型假设一致的数据,来源于Loh和Nee^[18],其在论文中给出了15组经典数据,抽选了其中5组,分别是:LN02, LN03, LN04, LN08, LN11。实验2数据来源于研究对象同样为农产品的文献^[17],根据农产品包装特点,从文献^[17]中抽取了前5种货物的数据进行实验。实验3采用LN02作为实验对象。

2)关于比对算法。实验1选择了2种经典算法进行比对,证明算法的有效性。一种是Bischoff和Ratcliff^[19]提出的旨在提高装载稳定性和货物分布均匀程度的启发算法,策略是从容器底层按垒层的模式向上装载,每次使用最多2种不同的盒子类型,盒型和方向的选择由放置层的加载表面的利用率决定。另一种是Gehring和Bortfeldt^[20]提出的CBGAT算法,这是一种改进的遗传算法,先构造相互隔离的塔,再根据优化的标准对塔在容器层内规划分布。这2种算法都采用了容积利用率作为目标函数,且允许任意6个方向放置。实验2不进行算法比对,只证明HWBACO算法用于求解考虑包装特点的箱装农产品单车装箱的可行性。

3)关于实验环境。实验在软件Matlab R2015a中完成,系统为WIN10,处理器为Intel Core i7-3520 2.9 GHz, RAM为8.0 GB。根据经验,选择蚂蚁数目为 $M=1.5n$;重心约束 $c_{1x}=0.1L$, $c_{2x}=0.75L$, $c_{1y}=0.25W$, $c_{2y}=0.75W$, $c_z=0.5H$;信息素残留系数 $\rho=0.6$ (实验1,2);信息素增强系数 $Q_r=10$ (实验1,2);启发因子 α 和 β 在 $[1, 9]$ 间随机选取。假设

货车容积与车厢体积相等，且容重足够。

3.1 实验 1

LN02 和 LN03 包含 8 种货物，LN04 包含 7 种货物，LN08 和 LN11 包含 6 种货物，由于原数据没有给出货物重量及货物承重能力，假设对于全部货物来说这 2 项值相等。货物尺寸和车厢规格见文献[18]，实验结果见表 2。

表 2 实验 1 结果 Tab.2 Result of the first experiment					
算法	容积利用率/%				
	LN02	LN03	LN04	LN08	LN11
Bischoff & Ratcliff	90.0	53.4	55.0	59.4	62.2
CBGAT	89.5	53.4	55.0	59.4	62.2
HWBACO	92.5	53.4	55.0	59.4	62.2

在对 LN03，LN04，LN08，LN11 的实验中，所有的货物都被装进了车厢，因此 3 种算法得到的体积利用率相同，这验证了文中算法（HWBACO）的有效性。第 2 组数据 LN02 的所有货物总体积是车厢容积的 1.11 倍，因此必然产生被遗留的货物。通过表 3 中 LN02 一栏看到算法 HWBACO 目标值达到 92.5%，比 CBGAT 算法提高 0.03，比 Bischoff 和 Ratcliff 的算法提高 0.025。由于数据 LN02 被认为是测试弱异类装箱问题的经典数据，因此该实验说明 HWBACO 对于单车弱异类货物装载问题求解可以取得良好的性能。本实验 HWBACO 计算得到的三维效果见图 2。

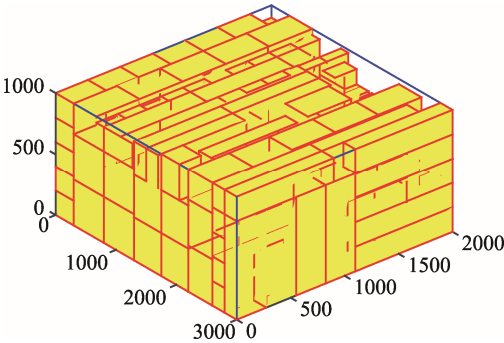


图 2 HWBACO 得到的三维效果图（LN02）
Fig.2 3D rendering of HWBACO (LN02)

3.2 实验 2

在实验 2 中根据箱装农产品约束特点，结合表 1 和文献[17]中抽取的 5 种货物数据，构建了一组农产品货物数据，见表 3。第 1—5 种货物分别用竹筐、塑料筐、木箱、瓦楞纸箱、泡沫塑料箱进行包装。底置水平和各货物的方向约束设置都来自表 1（第 1, 2, 3 种货物只能选方向 1, 3，第 4, 5 种货物可从 6 个

方向选择）。为了使 5 种货物总体积大于车厢体积，对原货物数量进行了随机调整。车厢规格为长 200，宽 140，高 150，载重 1400，均为无量纲。设置 $Q=3$ 。

表 3 实验 2 结果数据 Tab.3 Result of the second experiment					
长	宽	高	重	$dz(i)$	数量
38.8	14.3	28	6.65	5	60
35.3	13.3	25.3	5	2	78
40.5	16.1	32.5	7.5	1	80
39	14	28.5	7	3	65
30.5	19	20.5	8	4	63

实验进行 30 次，得出平均体积利用率为 81.59%，最低为 76.62%，最优值为 83.6%；平均货物装载数量为 210。记录最优一次重心坐标为 [99.78, 63.79, 69.51]，符合重心约束。货物遍历顺序为 [1(3); 3(3) 4(4) 4(2); 3(3) 4(2); 3(3) 4(3) 4(4) 4(2) 4(4) 4(2) 2(3); 4(3) 1(3)]，其中 1(3) 表示第 1 种货物，方向为 3（括弧中数字代表方向），“;” 表示一面墙遍历结束。共装载 5 面墙，第 1 面墙仅有货物 1，没有产生底置水平差异；第 2 面墙包括 [3, 4] 2 种货物，3 在下，4 在最上层，且 4 仅有 3 件，分布符合设置的承载约束；第 3 面墙分布与第 2 面墙相似，区别仅在于一件货物 4 的方向不同；第 4 面墙包括 [3 4 2] 3 种货物，3 在下，4 在上，2 仅有 1 件且位于最上层，三者底置水平差异符合承载约束；第 5 面墙包括 [4 1] 2 种货物，4 在下，1 在上，底置水平差异符合承载约束。综上所述，实验结果符合约束条件，证明了算法用于求解考虑包装特点的箱装农产品单车装箱具有一定的可行性。然而当用底置水平代替承重能力本身进行计算后，虽然使选择货物的过程变得更加简便，而且在不同货物之间考虑承重能力时做出的排序基本正确，但是在货物数量较多时，有可能出现“自身超重”，指其上方装载的同类货物过多而超过了承重限制。鉴于此，可以在采用底置水平作为货物期望要素的同时，限定量化的承重约束。实验 2 结果的三维立体效果见图 3。

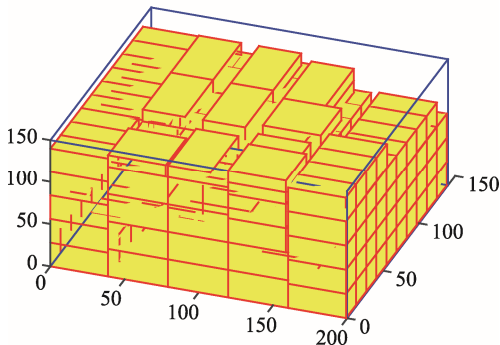


图 3 HWBACO 得到的三维效果图（实验 2）
Fig.3 3D rendering of HWBACO (Experiment 2)

3.3 实验3

信息素残留系数 ρ 和信息素增强系数 Q_r 是能够对蚁群算法结果产生一定影响的初始参数。实验1直接根据经验设定了二者值的大小,在实验3中改变二者的值,观察在不同初始条件下算法对LN02的装载结果。 ρ 变化区间为[0.1, 0.9],间隔为0.1,共9组; Q_r 变化区间为[10, 100],间隔为10,共10组。实验结果见图4。

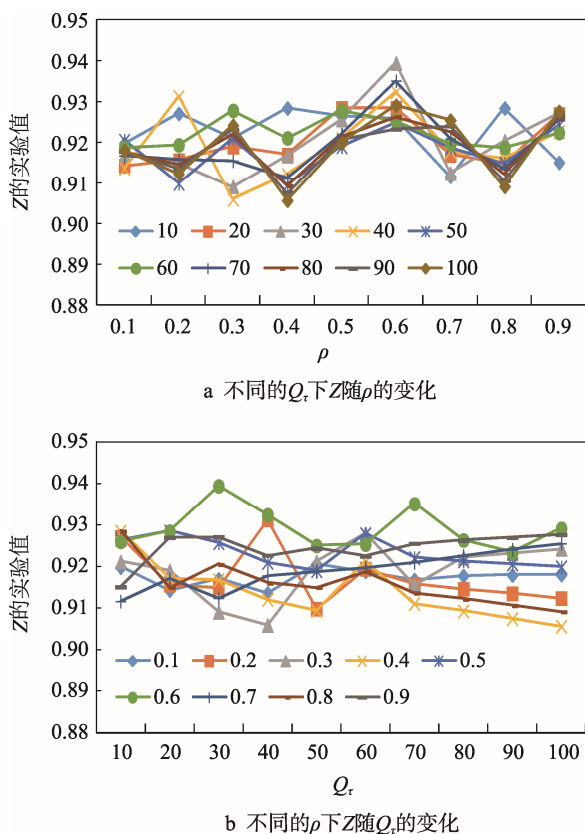


图4 初始参数 ρ 与 Q_r 对车厢容积利用率 Z 的影响

Fig.4 Influence of initial parameters ρ and Q_r on the volume utilization ratio Z of truck

图4中,全部90组实验的最大目标值为93.9%,在 $\rho=0.6$, $Q_r=30$ 的时候取到;当 ρ 取0.6时,平均利用率最高,为92.9%;当 Q_r 取10时,平均利用率最高,为92.3%;全部实验的平均利用率为92.0%。实验结果表明,算法对初始参数较为敏感,但总体稳定性较强,在改变 ρ 与 Q_r 时该算法依然能够取得实验1中对数据LN02的实验结论。

4 结语

针对考虑包装特点的箱装农产品单车装载问题,提出了基于砌墙式启发装载策略的混合蚁群算法(HWBACO)。通过分析农产品主要的5类箱式包装方式,总结包装特点,调整了货物的承重约束和方

向约束。在此基础上对蚁群算法进行改进,提出了适用于箱装农产品单车装载的砌墙策略;为使算法趋于全局最优,且货物空间布局更加合理,构造了双重期望函数。实施了3套实验方案,在实验1中,HWBACO目标值达到92.5%,比CBGAT算法提高0.03,比Bischoff和Ratcliff算法提高0.025,验证了算法的有效性和较优的性能;在实验2中,HWBACO对构造的具有包装特点的货物数据进行了计算,结果证明算法用于求解考虑包装特点的箱装农产品单车装箱是可行的;实验3验证了算法虽然对初始参数敏感,但总体性能较为稳定可靠。HWBACO的提出对于研究ACO算法更好地应用于解决货物装载问题具有良好的促进意义,但算法中一些条件的构造和部分参数的设置不一定完全合理,因此下一步将在这2个方面进行优化。

参考文献:

- [1] 胡钰. 大数据背景下我国农产品物流面临的挑战及发展趋势[J]. 改革与战略, 2016(4): 30—32.
HU Yu. Challenges and Development Trend of Agricultural Products Logistics in China under the Background of Big Data[J]. Reform and Strategy, 2016(4): 30—32.
- [2] 顾晋光. “互联网+”背景下的农产品定制消费新零售探索[J]. 农经, 2018(3): 40—44.
GU Jin-guang. New Retail Exploration of Customized Consumption of Agricultural Products under the Background of "Internet +"[J]. Agricultural Economics, 2018(3): 40—44.
- [3] 励莉. 我国农产品批发市场流通效率提升问题研究[J]. 农业经济, 2015(10): 143—144.
LI Li. Study on the Improvement of Circulation Efficiency of China's Wholesale Agricultural Products Market[J]. Agricultural Economics, 2015(10): 143—144.
- [4] 王军, 李红昌. 时空视角下中间层组织在农产品冷链物流中的作用研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2019(2): 1—9.
WANG Jun, LI Hong-chang. Research on the Role of Mesostructure in Cold Chain Logistics of Agricultural Products from the Perspective of Space-time[J]. Journal of Beijing Jiaotong University(Social Science Edition), 2019(2): 1—9.
- [5] 付焯, 严余松, 郭茜, 等. 生鲜农产品供应链物流风险传递机理及控制[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 654—660.
FU Zhuo, YAN Yu-song, GUO Qian, et al. Logistics Risk Transfer Mechanism and Control of Fresh Agricultural Products Supply Chain[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 654—660.
- [6] 张驰, 张晓东, 王登位, 等. 基于组件库的生鲜农产品冷链物流云服务系统设计与实现[J]. 农业工程学

- 报, 2016, 32(12): 273—279.
- ZHANG Chi, ZHANG Xiao-dong, WANG Deng-wei, et al. Design and Implementation of Fresh Agricultural Products Cold Chain Logistics Cloud Service System Based on Component Library[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 273—279.
- [7] DORIGO M, STUTZLE T. Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances. *Handbook of Metaheuristics*[M]. Springer, Cham, 2019: 311—351.
- [8] MOUSSI R, EUCHI J, YASSINE A, et al. A Hybrid Ant Colony and Simulated Annealing Algorithm to Solve the Container Stacking Problem at Seaport Terminal[J]. *International Journal of Operational Research*, 2015, 24(4): 399—422.
- [9] 郭向阳, 杨冰峰, 张春和. 基于蚁群算法的军用车辆器材装箱配载问题[J]. *包装工程*, 2016, 37(11): 195—198.
- GUO Xiang-yang, YANG Bing-feng, ZHANG Chun-he. Problems of Packing and Stowage of Military Vehicle Equipment Based on Ant Colony Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(11): 195—198.
- [10] 闫淑娟. 面向单箱弱异类 CLP 的一种改进启发式方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- YAN Shu-juan. Research on an Improved Heuristic Method for Single-box Weak Heterogeneous CLP[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [11] EUCHI J, MOUSSI R, NDIAYE F, et al. Ant Colony Optimization for Solving the Container Stacking Problem: Case of Le Havre(France) Seaport Terminal[J]. *International Journal of Applied Logistics(IJAL)*, 2016, 6(2): 81—101.
- [12] JOVANOVIĆ R, TUBA M, VOB S. An Efficient Ant Colony Optimization Algorithm for the Blocks Relocation Problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 274(1): 78—90.
- [13] 李晨, 陈宇星, 殷自力, 等. 基于改进蚁群算法的电网故障恢复决策系统研究[J]. *电气应用*, 2016, 35(19): 66—70.
- LI Chen, CHEN Yu-xing, YIN Zi-li, et al. Research on Power Grid Fault Recovery Decision System Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. *Electrical Applications*, 2016, 35(19): 66—70.
- [14] 杨盛伟, 张少平. 改进蚁群算法及参数优化研究[J]. *电子技术与软件工程*, 2016(13): 186—188.
- YANG Sheng-wei, ZHANG Shao-ping. Research on Improved Ant Colony Algorithm and Parameter Optimization[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2016(13): 186—188.
- [15] 裴振兵. 蚁群算法的改进及其应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- PEI Zhen-bing. Improvement and Application of Ant Colony Algorithm[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2015.
- [16] 朱东岳. 复杂条件下农产品配装问题研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
- ZHU Dong-yue. Research on Agricultural Product Packaging under Complex Conditions[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [17] 邢斌, 杨信廷, 钱建平, 等. 基于遗传算法的规则包装农产品三维装箱模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 237—241.
- XING Bin, YANG Xin-ting, QIAN Jian-ping, et al. 3d Container Model of Regular Packaging Agricultural Products Based on Genetic Algorithm[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 237—241.
- [18] LOH T H. A Packing Algorithm for Hexahedral Boxes [C]// *Proceedings of the Conference of Industrial Automation*, Singapore. 1992: 115—126.
- [19] BISCHOFF E E, RATCLIFF M S W. Issues in the Development of Approaches to Container Loading[J]. *Omega*, 1995, 23(4): 377—390.
- [20] GEHRING H, BORTFELDT A. A Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem[J]. *International Transactions in Operational Research*, 1997, 4(5/6): 401—418.