

双伸位自动化立体仓库货位分配优化算法研究

黄欣¹ 杨晓军^{2*}

HUANG Xin YANG Xiaojun

摘要

随着中国烟草行业规模化、集约化发展的加速推进,卷烟物流体系正面临仓储效率提升与空间资源优化的双重挑战。文章针对卷烟成品双伸位立体仓库的货位分配问题,以货架稳定性、堆垛机作业效率两个目标为原则建立模型,采用正余弦算法优化货位分配问题。首先,通过基于卷烟需求关联度的种群初始化策略对种群进行初始化操作,获取一定质量的解,加速算法收敛;然后,基于差分变异的多种群共享技术,避免陷入局部最优的同时推进帕累托解集的求解;最后,有效从堆垛机运行距离的角度提升了仓储管理的效率,同时使同种类的货物在货架上的分布具有更好的聚集度,整体上对货位分配问题进行了优化。

关键词

卷烟成品仓储;正余弦算法;差分进化算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.007

0 引言

随着中国烟草行业规模化、集约化发展的加速推进,卷烟物流体系正面临仓储效率提升与空间资源优化的双重挑战。据统计,截至2024年,卷烟年流通量突破4 800万箱,传统平面仓储模式的空间利用率普遍低于40%,单巷道作业效率仍存在<35托/h的瓶颈,难以匹配现代烟草大流通体系的需求。双伸位立体化仓库(Double Deep AS/RS)通过货架双深度布局和堆垛机双叉臂技术创新,将仓储空间利用率提升至65%以上,已成为行业智能化升级的核心基础设施。然而,其特殊的货位结构对存储策略提出了更高要求——如何在有限巷道资源下,通过货位分配优化实现存储密度、作业效率与设备损耗的协同平衡,成为制约行业降本增效的关键瓶颈。

针对烟草行业特性,国内相关领域工作者开展了一系列研究。湖南常德烟草物流中心通过全多穿立体高架库实现储备流程精益化,结合ABC分类法对高频品规(占比15%)优先分配中段货位,存储密度提升16%;毕节烟草根据总体工艺设置,通过对在库物料分类、出库站台功能分类、货区分类进行货位优化,使堆垛机总运行时间较日常缩短近2h;郑雪梅^[1]在S卷烟配送中心案例中,通过对货位优化的基本思路引入货位优化的方法,利用遗传算法实现货位分配

全局优化,为商业烟草物流的货位优化问题提出了一种可行方法;张兵^[2]以石家庄市卷烟配送中心为例,根据优化目标建立了货位分配的优化数学模型,将多目标问题通过权重系数变化法转化为单目标问题,建立最短路径数学模型,用遗传算法求出堆垛机拣选作业路径的最优解;钟科艾^[3]基于卷烟出库频次预测和需求相关性分析,建立动态货位分配模型,高频品规优先分配至中段货位,减少堆垛机移动距离,使存储密度提升16%。对于立体仓库货位分配问题,近些年的研究大致是围绕传统优化算法的改进与拓展、多目标优化模型的创新及混合算法三大类。例如,郑单单^[4]根据立体仓库货架稳定性及卷烟出入库时间最小原则建立了货位分配的数学模型利用遗传算法对货位分配问题进行深入研究。韩彩云^[5]结合货位优化的存储策略与货位分配的原则,建立了一种以提高卷烟周转效率为目标,同时又能满足货架稳定性要求的货位优化模型,并采用多目标遗传算法来解决该优化问题。曹旭^[6]考虑货架稳定性、卷烟周转率等情况下以出入库过程中能耗最小为主要目标,以遗传算法为核心,分别嵌套改进粒子群算法、遗传算法和改进灰狼算法,对出入库货位及路径优化模型进行求解。郭纪廷^[7]根据仓库追求的较低作业成本的目标,引入最小耗能模型,与锈蚀度最小模型联合作为入库货位分配优化模型采用Pareto遗传算法求解多目标货位分配模型,有效降低维护成本;陈港生等^[8]以立体仓库堆垛机完成某一卷烟的作业时间与该卷烟的出入库频率的乘积最小进行出入库效率建模,通过改进的自适应多种群遗传算法AMPGA对多目标优化模型进行求解,优化效果更佳,收敛

1. 昆明市烟草公司物流分公司 云南昆明 650000

2. 云南交通职业技术学院 云南昆明 650000

[基金项目] 云南交通职业技术学院科学研究基金项目(2025KJ013)

更快。

正余弦算法 (sine cosine algorithm, SCA)^[9] 是一种结构简单、参数少、易于实现、改进潜力大的算法。大量研究报告表明,混合元启发式算法是解决复杂高维问题的最新研究趋势,以克服一种算法的探索能力差和另一种算法的开发能力差的问题。目前来看,还未有将正余弦算法应用于解决立体仓库货位分配的研究。因此,本文尝试对正余弦算法进行货位分配问题适用性方面的改进。通过与差分进化算法 (differential evolution, DE) 这种效率高、参数设置简单、鲁棒性好、灵活性强的算法^[10-12] 进行混合,改善其收敛速度较慢,易陷入局部最优的问题。

1 双伸位立体仓库货位分配模型

1.1 货位分配模型基本假设

本文以双伸位立体仓库为研究对象,考虑卷烟商业企业立体仓库运行过程中遇到的实际问题以及相关优化原则,为了便于仓储模型的构建以及进行后续研究,对货架和堆垛机的运行参数提出以下设定:

假设立体仓库规模为 a 列、 b 层、 c 排,仓库左侧设有卷烟出入库缓存区,定义货架左端出入库缓存区中心为三维坐标系的坐标原点,货架第 x 列、 y 层、 z 排的卷烟坐标表示为 (x, y, z) , 如图 1 所示。

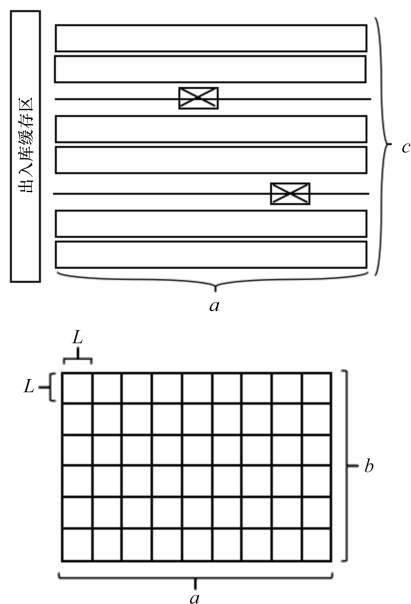


图 1 货架示意图

在研究货位分配问题时,忽略堆垛机的启动制动加速减速过程,视为匀速运动,且水平速度设为 V_x 、竖直方向速度为 V_y 、货叉伸出速度为 V_z ; 卷烟存放在托盘中,每个货位只能存放一个托盘,所有货位长、宽、高尺寸均为 L 。对货架进行建模如图 2 所示。

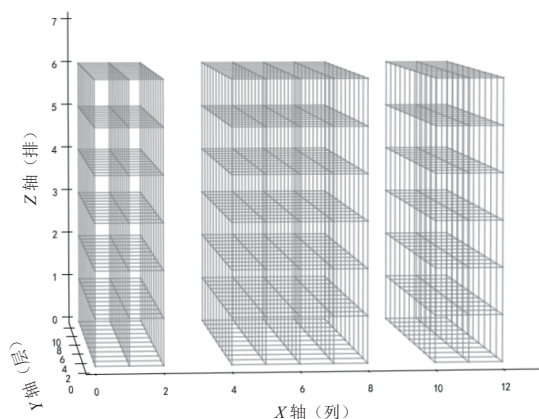


图 2 货架模型

1.2 货位分配目标模型设计

本文货位分配模型遵循以下两个优化原则:

(1) 考虑到货物周转率的影响,高周转率的货物在仓储系统长期运转中,往往需要大量使用,如果存放在较高且远离出入库台的位置,则在大量出入订单的情况下会造成堆垛机运行距离的冗余。因此以卷烟周转率 P_i 作为频率系数建立以堆垛机仓库作业效率为目标的优化函数 F_1 , 即堆垛机进行出入库任务的总运行时间与货物的周转率乘积最小^[13], 表示为:

$$F_{1\min}(x, y, z) = \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^b \sum_{z=1}^c [t_l + t(i)] \cdot P_i \quad (1)$$

式中: t_l 为货叉存取货时间, 计算为:

$$t_l = \begin{cases} \frac{2L}{V_z} & l = 1(\text{内侧货架}) \\ \frac{4L}{V_z} & l = 2(\text{外侧货架}) \end{cases} \quad (2)$$

$t(i)$ 为堆垛机单次运行时间, 堆垛机在进行一次出/入库任务时, 运行时间由水平方向与竖直方向上最远的一项决定, 计算为:

$$t(i) = \max\left(\frac{x - \frac{1}{2}}{V_x} \cdot L, \frac{y - \frac{1}{2}}{V_y} \cdot L\right) \quad (3)$$

(2) 考虑到将同品规卷烟集中放置, 在后续的存取任务中, 可以减少堆垛机运动冗余, 提高存取效率。货架上共有 k 类品规的卷烟, 每类卷烟的数量为 m , 当有一批待入库卷烟进行存放时, 按照此时货架上同品规卷烟的货位坐标, 定义此时所有同品规卷烟的组内平均坐标为 (d_k, e_k, f_k) , 称为该品规卷烟的中心货位 s_k , 其中:

$$\begin{cases} d_k = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \\ e_k = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \\ f_k = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{n} \end{cases} \quad (4)$$

在为待入库的一个该品规卷烟分配货位时, 该卷烟的坐标 (x_i, y_i, z_i) 与中心货位 s_k 的距离为:

$$d = \sqrt{(x_i - d_k)^2 + (y_i - e_k)^2 + (z_i - f_k)^2} \quad (5)$$

因此, 为使所有待存放卷烟距离同品规卷烟尽量近, 即待入库卷烟的分配货位坐标与中心货位 s_k 距离最短。则优化目标函数 F_2 为:

$$F_{2\min}(x, y, z) = \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^b \sum_{z=1}^c \sqrt{(x - d_k)^2 + (y - e_k)^2 + (z - f_k)^2} \quad (6)$$

2 算法设计

正弦余弦算法是受三角函数正弦和余弦的特点启发而开发的一种新的元启发式算法。标准 SCA 算法能够充分利用个体信息, 在一些简单问题上表现出良好的性能, 因此被广泛运用于各种实际问题。然而, 当面对高维复杂的工程问题时, 该算法往往会很快收敛到局部最小值, 从而错过找到更优解的最好机会。本文使用标准 SCA 算法小步进行局部搜索, 以使部分解决方案围绕着当前较优解决方案的领域发展。开发阶段结束后, 利用 DE 算法, 在全局进行搜索寻找更有希望的解决方案的同时, 推进全局解决方案靠近帕累托前沿, 以克服标准 SCA 算法收敛快的问题。

2.1 基于卷烟需求关联度的种群初始化策略

传统算法中种群初始化的随机性, 极易生成无效或低质量的初始解。由于初始解对启发式算法有较大影响, 随机解很容易延迟收敛代数 and 运行时间。为了生成具有一定质量的解, 本文引入关联规则算法 (Apriori 算法)^[14] 来计算卷烟需求关联矩阵 (demand correlation matrix), 卷烟关联度越高货位分配越近, 能节省卷烟拣选出库时间, 以此来控制初始化个体的质量。初始化过程如算法 1 所示: 首先给每一垛卷烟都随机生成一个货位 (算法 1 中 1~5 行); 然后, 对于每一垛卷烟, 生成一个随机数 rand, 当 rand 小于质量概率 quality 时: 在具有最高关联度卷烟的货位附近分配新货位, 否则随机选择具有关联度值 ($D_{ij} > 0$) 的卷烟附近的货位作为新货位 (算法 1 中 6~13 行), 在一定程度上可以提高初始解的质量, 以加快算法收敛速度, 又避免了种群的单一性。

算法 1: 基于关联度的种群初始化

输入: 结构相似度矩阵 D , 种群大小 popsize, 个体维度 dim

输出: 初始化种群 X

1. for $i \leftarrow 0$ to popsize
2. for $j \leftarrow 0$ to dim and interval 3
3. $X_{i,j} \leftarrow \text{rand}[0, a]$

4. $X_{i,j+1} \leftarrow \text{rand}[0, b]$
5. $X_{i,j+2} \leftarrow \text{rand}[0, c]$
6. for $i \leftarrow 0$ to popsize
7. for $j \leftarrow 0$ to dim
8. if ($\text{rand}[0,1] < \text{quality}$)
9. index $\leftarrow$ node with $\max(D_j)$
10. $X_{ij} \leftarrow X_{i,\text{index}+1}$
11. else
12. index $\leftarrow$ Randomly choose a nodes with $D_{ij} > 0$
13. $X_{ij} \leftarrow X_{i,\text{index}+1}$
14. return X

2.2 基于差分变异的多种群共享技术

正余弦算法在面对高维复杂的工程问题时, 往往会很快收敛到局部最优值, 加上前一节介绍的基于关联度的种群初始化, 算法整体都侧重于开发操作, 让个体在优化过程的后期走向最佳解决方案。在本小节中, 将差分进化算法设计为种群信息共享策略以及探索操作, 在强调种群的多样化, 避免陷入局部最优的同时推进帕累托解集的求解。根据基本的 DE 算法, 通过将先前种群中随机选择的两个目标个体的加权差加到另一个个体中来生成变异个体。并将另外一个种群的个体通过差分变异的方式生成新个体, 作为候选解放入当前个体中, 因此变异策略可以表示为:

$$\text{Pop}_k^{i,t+1} = \text{Pop}_k^{i,t} + Z \cdot (\text{Pop}_k^{i,t} - \text{Pop}_p^{i,t}) \quad (7)$$

式中: $\text{Pop}_k^{i,t}$ 、 $\text{Pop}_p^{i,t}$ 表示迭代 t 中的两个种群, 其中 $k, p \in [0,1]$, 且 $k \neq p$, 分别表示两个种群; i 表示该种群的第 i ($1 \leq i \leq \text{popsize}$) 个个体; $\text{Pop}_k^{i,t+1}$ 表示种群 k 中个体 i 的下一代候选解; Z 表示一个变异因子, 取值范围为 $[0,1]$ 。

这里, 将对每一个结点的下一位置都乘以一个新的变异因子 Z , 目的是在一定概率上打乱原有的卷烟品规关联度, 以增加种群多样性。但是, 这样就有可能会产生一些不可行解, 通过去重复策略对产生的变异个体 X_i^{t+1} 进行修复, 将其生成的解转化为货位条件允许下的可行解即可。

2.3 算法整体框架

DEMPSCA 算法伪码如算法 2 所示。首先基于卷烟需求关联度对种群进行初始化, 加快收敛速度; 然后, 采用正余弦算法来围绕最优解开发部分搜索空间; 最后, 采用多种群多目标技术使用两个种群分别优化 F_1 和 F_2 两个目标以获取更具较高作业效率的货位分配。为了求解帕累托解集的同时不乏种群多样性, 算法将通过基于差分变异的多种群共享技术来更新种群。

算法 2：基于多种群差分变异的多目标正余弦算法

输入：种群大小 popsize，个体维度 dim，最大迭代次数 max_iter，变异概率 Mr，结构相似度矩阵 D

输出：最优解 X_{gbest}^k 和 $f(X_{gbest}^k) (k = \{0,1\})$

1.for $k \leftarrow 0$ to 2

2. $Pop_k^i \leftarrow$ 基于卷烟需求关联度的种群初始化策略

3. $iter \leftarrow 0$

4. while ($iter < max_iter$)

5. for $k \leftarrow 0$ to 2

6. for $i \leftarrow 0$ to popsize

7. 计算每个个体 X_i 的目标函数值 $f_k^i(Pop_k^i)$

8. 按照对应的目标函数值进行排序并记录 X_{gbest}^k 和 $f(X_{gbest}^k)$

9. 正余弦算法更新种群

10. if ($f(ind) > f(Pop_k^i)$) then $Pop_k^i \leftarrow ind$

11. if ($f(ind) > f(X_{gbest}^k)$) then 更新 X_{gbest}^k 和 $f(X_{gbest}^k)$

12. /* 基于差分变异的多种群共享技术 */

13.for $i \leftarrow 0$ to popsize

14. $ind \leftarrow Pop_k^i$

15. $ind \leftarrow$ 按照公式 (7) 更新 ind

16. $ind \leftarrow$ 去重复

17. if ($f(ind) > f(Pop_k^i)$) and ($rand \leq Mr$) then $Pop_k^i \leftarrow ind$

18. if ($f(ind) > f(X_{gbest}^k)$) then 更新 X_{gbest}^k 和 $f(X_{gbest}^k)$

19. $iter = iter + 1$

20.return X_{gbest}^k 和 $f(X_{gbest}^k)$

3 货位分配实例仿真验证

3.1 实验环境及参数设置

验证用 Python 编程语言实现，在 Windows 11 操作系统上进行，具有 3.2 GHz Inter(R) Core(TM) i3 CPU 550 机器和 4 GB 内存。仓库的各参数如表 1 所示。

表 1 仓库基本参数

仓库各项参数	数值
堆垛机水平速度	1 m/s
堆垛机竖直速度	1 m/s
货叉方向速度	0.5 m/s
货架排数	8 排
货架列数	10 列
货架层数	6 层
货位长宽高	1 m

本文采用多目标正余弦算法（MOSCA）、多目标差分进化算法（MODE）和本文提出的基于多种群差分变异的多目标正余弦算法（DEMPSCA）算法进行优化对比。由于实

验环境问题，本文只对小批量入库任务（入库量为 30 垛烟，种群维度为 90）进行了测试，各算法参数如表 2 所示。

表 2 算法参数

MODE	MOSCA	DEMPSCA
Population size:300	Population size:300	Population size:300
Dim: 90	Dim: 90	Dim: 90
Maximum number of generations: 300	Maximum number of generations: 300	Maximum number of generations: 300
Archive size: 100	Archive size: 100	Mutation Rate: 0.8
Crossover operator: 0.8	—	Initial population quality probability: 0.1
Mutation operator: 0.05	—	—

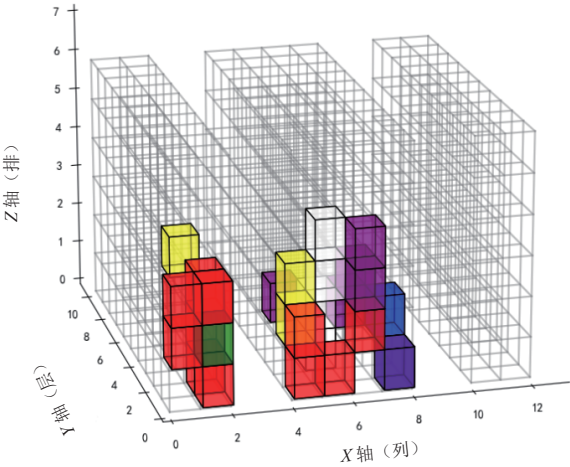
以 K 公司为例，该公司双伸位立体车库采取件烟码垛入库、整垛出库再拆垛的形式，存储有 200 多种品牌卷烟成品。目前执行的库存策略为分区存储、品规均衡分布策略，即每种品牌卷烟成品（主要是库存数量较多的品规）均匀分布在每个巷道及每排货架。如表 3 所示，选取 2024 年 9 月—11 月期间库存数量较多、中间及较少的 2 种品规在仓储管理系统中的出入库订单信息作为算例进行分析。

表 3 卷烟成品月度库存周转率

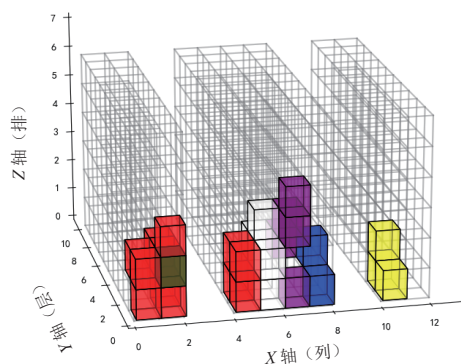
编号	卷烟品规	月度库存周转率 P_i
1	云烟（紫）	1.28
2	云烟（软珍品）	0.31
3	红河（软 99）	1.57
4	钻石（荷花）	2.80
5	玉溪（软尚善）	0.92
6	云烟（小熊猫家园）	3.26

3.2 实验结果及分析

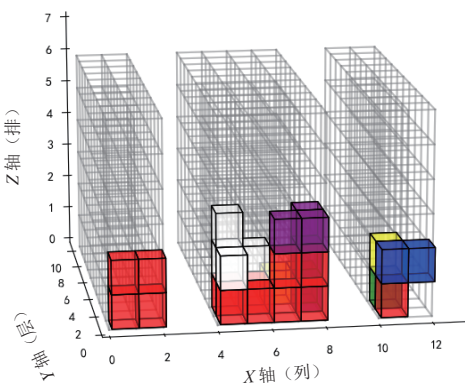
通过 MOSCA、MODE 以及 DEMPSCA 算法对入库卷烟的货位分配仿真求解，结果如图 3 所示。



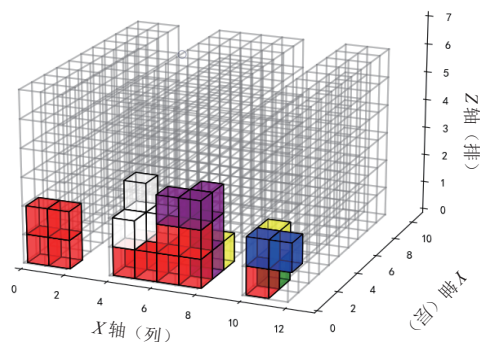
(a) MOSCA



(b) MODE



(c) DEMPSCA (左侧视角)



(d) DEMPSCA (右侧视角)

图3 测试仿真结果

观察图3对比三种优化算法的仿真结果,可以得出:随机货位分配的结果是混乱无序的,会为堆垛机的出入库任务造成严重困扰。MOSCA算法的解集有明显瑕疵,存在不合理的货位,会造成堆垛机的空载运行。MODE算法比MOSCA算法的解集稍微好一些,但货位分配不够均匀,而DEMPSCA算法的仿真结果稳定,层次分明,内侧货位与外侧货位品规基本一致。

4 结语

本文针对双伸位立体仓库的货位分配问题,以货架稳定性、堆垛机作业效率两个目标为原则建立优化模型,采用SCA算法优化货位分配问题,首先通过基于卷烟需求关联度的种群初始化策略对种群进行初始化操作,获取一定质量的

解,加速算法收敛。然后,基于差分变异的多种群共享技术,避免陷入局部最优的同时推进帕累托解集的求解。最后有效从堆垛机运行距离的角度提升了仓储管理的效率,同时使得同种类的货物在货架上的分布具有更好的聚集度,整体上对货位分配问题进行了优化。

参考文献:

- [1] 郑雪梅.S卷烟配送中心的货位优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
- [2] 张兵.石家庄市卷烟配送中心自动化立体仓库出入库优化问题的研究[D].石家庄:石家庄铁道大学(原石家庄铁道学院),2014.
- [3] 钟科艾.BTC卷烟自动化立体仓库货位分配优化研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [4] 韩彩云.基于遗传算法的自动化立体仓库的货位优化研究[D].太原:太原科技大学,2009.
- [5] 郑单单.立体仓库货位分配及拣选算法的研究[D].南京:南京理工大学,2012.
- [6] 曹旭.自动化立体仓库货位优化的模型与算法研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- [7] 郭纪廷.自动化立体仓库货位分配系统的分析与设计[D].成都:电子科技大学,2011.
- [8] 陈港生,谢家翔,付建林,等.一种多巷道立体仓库货位分配优化方法[J].机械工程师,2023(12):40-44.
- [9] MIRJALILI S. SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems[J].Knowledge-based systems, 2016, 96: 120-133.
- [10] 方强,陈德钊,俞欢军,等.基于优选策略的差分进化算法及其化工应用[J].化工学报,2004(4):598-602.
- [11] 周濠,郑柏林,廖瑞金,等.基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):33-37.
- [12] 邱威,张建华,刘念.自适应多目标差分进化算法在计及电压稳定性的无功优化中的应用[J].电网技术,2011, 35(8): 81-87.
- [13] 温睿思.双伸位立体仓库货位分配及调度优化方法研究[D].西安:西安大学,2024.
- [14] 陆丽娜,陈亚萍,魏恒义,等.挖掘关联规则中Apriori算法的研究[J].小型微型计算机系统,2000(9):940-943.

【作者简介】

黄欣(1997—),女,硕士研究生,助理工程师,研究方向:烟草物流。

杨晓军(1981—),通信作者(email:yangxj1981@126.com),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:人工智能、智慧物流。

(收稿日期:2025-09-02 修回日期:2026-04-07)