

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.001

面向管材存储的自动化立体仓库货位优化

屈新怀, 纪飞, 丁必荣, 孟冠军

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以自动化立体仓库(automated storage and retrieval system, AS/RS)中管材的货位分配为研究对象,采用悬臂式货架进行存储,以存取效率、货架稳定性和货架平衡性为原则,建立多目标货位优化模型;设计粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和遗传算法(genetic algorithm, GA)的混合算法求解模型,使用 MATLAB 编程并运行汽车制管厂的实例数据进行仿真分析。结果表明,该方法相较于传统 PSO 算法和 GA 算法具有一定的优越性,能够有效提高 AS/RS 的作业效率和货架安全性,对面向管材存储的 AS/RS 研究具有一定的理论和实践意义。

关键词:自动化立体仓库(AS/RS);货位优化;管材;悬臂式货架;多目标优化

中图分类号:TH692.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0001-05

Location optimization of automated storage and retrieval system for pipe storage

QU Xinhui, JI Fei, DING Birong, MENG Guanjun

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Taking the distribution of pipes in the automated storage and retrieval system(AS/RS) as the research object, cantilever racks are used for storage. Based on the principles of storage efficiency, shelf stability and shelf balance, a multi-objective storage location optimization model is established. A hybrid algorithm of particle swarm optimization(PSO) and genetic algorithm(GA) is designed to solve the problem. MATLAB is used to program and run the example data of the automobile pipe factory for simulation analysis. The results show that compared with traditional PSO and GA algorithms, this method has certain advantages, and can effectively improve the operating efficiency and shelf safety of AS/RS. It also has certain theoretical and practical significance for the research on AS/RS for pipe storage.

Key words: automated storage and retrieval system(AS/RS); storage location optimization; pipe; cantilever rack; multi-objective optimization

0 引 言

自动化立体仓库(automated storage and retrieval system, AS/RS)是现代仓储技术、计算机技术和自动化技术高度集成的产物。它能够加快货物流转,缩短生产周期,进而降低企业制造成本,是各类制造企业向着智能化转型不可或缺的

仓储形式^[1]。同时,汽车制管厂作为车企的一个重要组成部分,其主要职能是为各类汽车提供各类管材,如制动管路、动力转向管路、燃油管路、空调管路等。由于管材的种类多、尺寸长,致使存储困难,因此将汽车制管厂仓库改造为 AS/RS 是车企向智能化转型的一个重要步骤。

在 AS/RS 的研究中,货位优化是影响其性

收稿日期:2021-11-12;修回日期:2021-12-24

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB1705303)

作者简介:屈新怀(1971—),男,安徽金寨人,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

能的一个关键因素^[2]。文献[3]面向船舶行业,提出了一种以出库效率、货架稳定性、巷道负载均衡为目标的货位优化模型;文献[4]对于电子产品的存储,建立了一种以提高堆垛机存取效率和货架稳定性为目标的货位优化模型;文献[5]基于液压元器件的存储,考虑了货架稳定性、平衡性和出库效率,建立了货位优化模型;文献[6]基于防洪物资及其存储特点,建立了反映检索效率和货架稳定性为目标的货位优化模型。

结合上述文献可以看出,目前国内外对货位优化方面的研究主要集中在尺寸较短同时包装成块状的材料,并且货架主要是单元格式货架。对尺寸较长的管材和适合存放管材的悬臂式货架^[7]的研究很少。因此,本文基于悬臂式货架进行管材的货位优化,从存取效率、货架稳定性和货架平衡性出发建立货位优化问题的数学模型,进一步设计求解该模型的启发式算法,并采用某汽车制管厂的数据进行实例仿真。

1 问题描述

根据管材尺寸较长、种类较多、质量不一的特点,采用悬臂式货架进行存放,构建出 AS/RS 立面示意图,如图 1 所示。堆垛机从出入口(I/O)出发,可沿 X、Y、Z 方向进行作业并沿原路径返回,其中 X、Y、Z 分别代表货架的排方向、列方向、层方向。

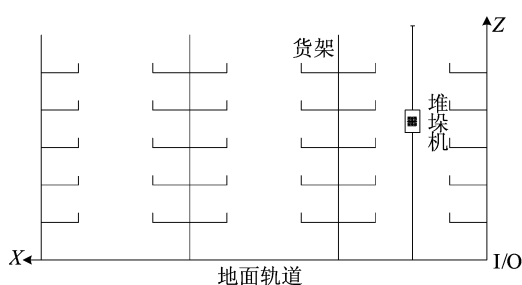


图 1 AS/RS 立面示意图

为了提高 AS/RS 的存储效率,保证其货位分配的合理性和安全性,需要使用恰当的货位分配原则,因此提出了以下货位分配的优化原则:

(1) 存取效率原则。将周转率较高的管材放置在离出入口较近的位置,以减少堆垛机行程,从而提高 AS/RS 的存取效率。

(2) 稳定性原则。将质量较大的管材放置在货架的低层,将质量较小的管材放置在货架的高层,从而降低货架的整体重心。

(3) 平衡性原则。考虑管材的质量和悬梁臂货架的结构特点,需要考虑货架的平衡性,以保证 AS/RS 具有足够的安全系数^[8]。

为了方便 AS/RS 模型构建和问题研究,基本假设如下:

(1) 仓库只有 1 个出入库端口,堆垛机只进行单一作业。

(2) 堆垛机匀速运行,不考虑加减速,不考虑堆垛机存取货物的时间,不考虑堆垛机与运输设备的交接时间。

(3) 每个货位只存放 1 种管材,且货位与管材尺寸相匹配。

2 AS/RS 货位优化模型建立

2.1 模型参数

货物位置采用三维坐标 (x, y, z) 表示,即货物在仓库的第 x 排 y 列 z 层。仓库沿 X 方向共有 a 排,沿 Y 方向共有 b 列,沿 Z 方向共有 c 层。设定堆垛机沿 X 方向的速度为 v_x ,沿 Y 方向的速度为 v_y ,沿 Z 方向的速度为 v_z ;单位货格沿 X 方向的长度为 l ,沿 Y 方向的宽度为 w ,沿 Z 方向的高度为 h ;货架之间巷道的宽度为 L ;货位 (x, y, z) 上货物的质量为 m_{xyz} ,周转率为 p_{xyz} ,决策变量为 d_{xyz} ,即当货位 (x, y, z) 上有货物时 d_{xyz} 为 1,否则为 0。

2.2 多目标货位优化模型建立

根据管材和悬臂式货架的结构特点,同时结合上文提出的货物的存取效率、货架的稳定性和平衡性 3 个货位分配原则,建立多目标货位优化模型。

2.2.1 提高存取效率

通过将周转率较高的货物放置在距离 I/O 近的地方可以减少堆垛机的作业时间,从而提高存取效率。堆垛机在对货位 (x, y, z) 处的货物进行作业时,其在 X 方向上的路程为 $(2 \frac{x+1}{2} - 1 - 1)l + \frac{x}{2}L$, Y 方向上的路程为 yw , Z 方向的路程为 $(z-1)h$,再结合堆垛机的运行速度可以求得堆垛机的作业时间。由于堆垛机在 Y 和 Z 方向同时做匀速运动,堆垛机在 Y 和 Z 方向花费的总时间应为这 2 个方向运动所花费时间之中的最大值。综上,存取效率的数学模型可描述为:

$$\min f_1 = \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^b \sum_{z=1}^c p_{xyz} \times$$

$$\left\{ \frac{\left(2 \left\lfloor \frac{x+1}{2} \right\rfloor - 1 \right) l + \left\lfloor \frac{x}{2} \right\rfloor L}{v_x} + \max \left[\frac{y\omega}{v_y}, \frac{(z-1)h}{v_z} \right] \right\} \quad (1)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

2.2.2 提高货架稳定性

采用上轻下重的原则存放货物以降低货架的整体重心,从而提高货架的稳定性,其数学模型可描述为:

$$\min f_2 = \sum_{x=1}^a \sum_{y=1}^b \sum_{z=1}^c z m_{xyz} \quad (2)$$

2.2.3 提高货架平衡性

基于货物载荷和悬臂梁式货架的结构特点,应该尽量使货架两侧载荷均衡,以提高货架的平衡性,其数学模型可描述为:

$$\min f_3 = \sum_{x=1}^{a/2} \sum_{y=1}^b \sum_{z=1}^c | m_{(2x)y z} d_{(2x)y z} - m_{(2x+1)y z} d_{(2x+1)y z} | \quad (3)$$

2.3 权重系数分配

通过赋予权重系数,可以将复杂的多目标函数优化问题转化为单目标函数优化问题,以便于求解。由于 3 个目标函数的量纲不一致,在分配权重系数前先采用反正切函数转换法对 3 个目标函数做归一化处理,得到 $\min f_1'$ 、 $\min f_2'$ 、 $\min f_3'$,则单目标数学模型可描述为:

$$\begin{aligned} \min f &= \omega_1 \min f_1' + \omega_2 \min f_2' + \omega_3 \min f_3'; \\ \text{s. t.} \quad &\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1, \\ &0 \leq \omega_1 \leq 1, \\ &0 \leq \omega_2 \leq 1, \\ &0 \leq \omega_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

权重系数 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的取值采用层次分析法^[9]确定,经过分析设定判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1 \\ 4 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

求解得到 3 个目标函数的权重系数分别为 0.17、0.63、0.20,最终获得的单目标数学模型可描述为:

$$\min f = 0.17 \min f_1' + 0.63 \min f_2' + 0.20 \min f_3' \quad (5)$$

3 货位优化算法设计

传统粒子群算法 (particle swarm optimiza-

tion, PSO) 仅需速度和位置的迭代进化就可以逼近全局最优解,其原理简单且运行高效,比较适合求解本文的货位优化问题,文献[10-11]均采用了 PSO 进行货位优化方面的研究,并且通过实验取得了良好的优化结果。传统 PSO 中粒子 i 的迭代过程可描述为:

$$\begin{aligned} v_{id}^k &= \alpha v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (p_{best\ id} - x_{id}^{k-1}) + \\ &c_2 r_2 (g_{best\ id} - x_{id}^{k-1}), \\ x_{id}^k &= x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \end{aligned} \quad (6)$$

其中: v_{id}^k 、 x_{id}^k 分别为第 k 次迭代时粒子 i 速度矢量的第 d 维矢量和位置矢量的第 d 维矢量; $p_{best\ id}$ 、 $g_{best\ id}$ 分别为粒子 i 经历过的最佳位置和种群经历过的最佳位置; α 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速度常数; r_1 、 r_2 为随机函数。

同样广泛应用于自动化立体仓库货位优化问题的还有全局寻优能力强、鲁棒性高的遗传算法 (genetic algorithm, GA)。

但是考虑到 PSO 搜索精度不高、局部搜索能力差且易陷入局部最优的缺陷^[12]以及 GA 收敛速度慢、控制变量多、易早熟的问题,本文构建了 PSO 与 GA 的混合算法,即粒子群遗传算法 (PSOGA),进行货位优化分析。

PSOGA 通过将 GA 算法中合适的变异算子、交叉算子与 PSO 算法相结合^[13],可以保证种群中个体的多样性,扩展算法的搜索范围,从而增强 PSOGA 的局部搜索能力,并在一定程度上提高解的质量。PSOGA 的具体实现流程如图 2 所示。

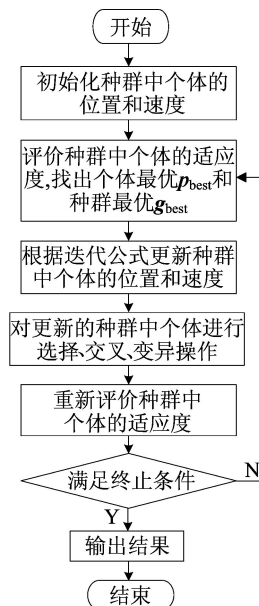


图 2 PSOGA 流程

PSOGA 的具体实现步骤如下:

(1) 将需要入库的货物看作一个个粒子,对其随机分配初始货位并给予初始速度,形成初始种群,每个带有位置和速度信息的粒子作为种群的个体。

(2) 以(5)式作为适应度评价函数,计算种群中各个体的适应度值,选出个体最优和全局最优。

(3) 以(6)式作为迭代公式,更新种群中个体的位置和速度,选出新的个体最优和全局最优。

(4) 对迭代更新后的种群执行 GA 中的选择、交叉、变异操作。其中选择操作采用锦标赛选择法,交叉操作采用两点交叉,变异操作选取逆转变异算子。

(5) 重新根据(5)式计算适应度值,并判断是否满足终止条件;满足则接受当前解,并获取货位优化后仓库的信息,不满足则循环以上操作。

4 实例计算与仿真分析

以某汽车品牌制管厂仓库的实例数据进行仿真分析,仓库的基本参数信息见表 1 所列。

表 1 仓库基本参数

参数	a	b	c	l/m	ω/m
数值	6	6	5	1.0	3.0
参数	h/m	L/m	$v_x/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$v_y/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$v_z/$ ($m \cdot s^{-1}$)
数值	0.8	1.2	1.0	1.0	0.8

选取 16 种不同的管材进行货位优化分析,管材基本信息见表 2 所列。

表 2 管材数据信息

管材编号	每份质量/kg	周转率/%
1	5.3	55
2	39.0	70
3	12.0	25
4	5.9	53
5	7.5	75
6	18.0	74
7	31.5	76
8	5.7	26
9	12.9	94
10	15.0	7
11	12.0	7
12	22.5	95
13	30.0	53
14	40.5	44
15	27.0	40
16	36.0	54

经过分析比较设定 PSOGA 中的参数为:加速度常数 $c_1=c_2=1$; r_1, r_2 选取 0~1 之间的随机数;惯性权重 α 采用线性递减权值法确定,最大值和最小值分别设定为 1.0 和 0.8;种群数量为 50;迭代次数 N 为 200;选择概率为 0.8;变异概率为 0.1。

第 i 次迭代的惯性权重 α 可描述为:

$$\alpha = \alpha_{\max} - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \frac{i}{N} \quad (7)$$

使用 MATLAB 分别运行 GA、PSO、PSOGA 算法,求解得到的具体目标函数值见表 3 所列,同时得到 3 种算法迭代收敛的对比结果,如图 3 所示。

表 3 目标函数值优化结果对比

目标函数	未优化	GA	PSO	PSOGA
f_1/s	32.45	38.21	32.51	16.36
$f_2/(kg \cdot m)$	291.90	164.80	93.60	108.90
$f_3/(kg \cdot m)$	114.00	0	0	0

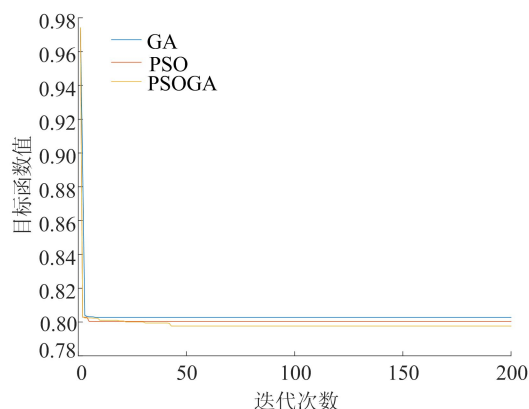


图 3 3 种算法迭代收敛对比结果

观察表 3 数据可以看出,相较于未优化前,经过 3 种算法优化后的目标函数值在货架的平衡性和稳定性上均有大幅度提升,但在存取效率方面,GA 和 PSO 的优化并不理想,只有 PSOGA 具有较好的优化结果;同时结合图 3 的迭代收敛对比结果可以发现,PSOGA 虽然收敛稍慢,但其归一化后的总目标函数值小于其余 2 种算法,即解的综合质量高于 GA 和 PSO 算法,且不易陷入局部最优。因此选用 PSOGA 进行货位优化具有一定的优越性。

PSOGA 算法优化前、后仓库的货位分配示意图如图 4 所示。

分析计算表 3 数据可得,相较于未优化前,经 PSOGA 优化后存取效率提高 49.58%,货架稳定

性提高 62.69%,货架平衡性提高 100%。从图 4 可以看出,经 PSOGA 优化后的货位分配明显更加合理。

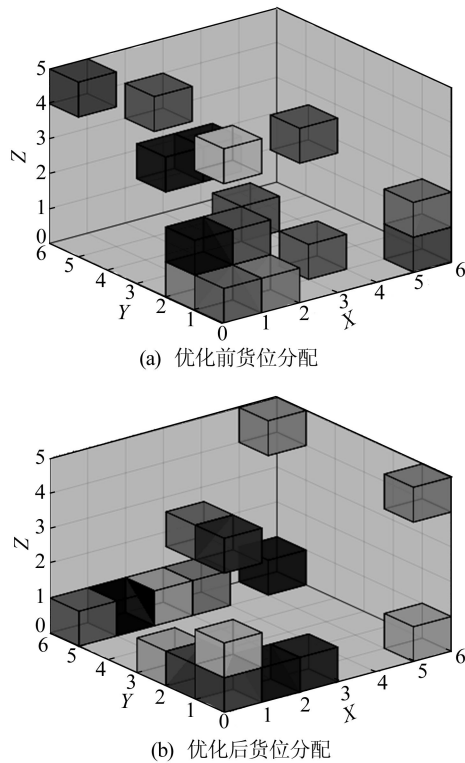


图 4 PSOGA 优化前、后货位分配图

5 结 论

本文面向管材存储构建了 AS/RS 模型研究货位优化问题。根据管材特点采用悬臂式货架进行存储并选取了合适的货位分配策略和原则,建立了货位优化的多目标数学模型;通过 MATLAB 编程并采用 PSOGA 求解,获得了全局最优解。结果表明,本文方法有效且切实可行,能够较全面地提高仓库的存取效率、货架稳定性和平衡性。本文对面向管材存储的 AS/RS 研究具有一定的理论和实践意义。

[参 考 文 献]

- [1] 史彦军,韩俏梅,沈卫明,等. 智能制造场景的 5G 应用展望[J]. 中国机械工程,2020,31(2):227-236.
- [2] LAM C, CHOY K L, CHUNG S H. Framework to measure the performance of warehouse operations efficiency[C]// 2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics. [S. l. : s. n.],2010:634-639.
- [3] 唐文献,彭伟,苏世杰,等. 面向船舶行业的多巷道自动化立体仓库货位优化[J]. 计算机集成制造系统,2020(2):384-392.
- [4] YANG D, WU Y H, MA W K. Optimization of storage location assignment in automated warehouse[J]. Microprocessors and Microsystems,2020,80(3):103356.
- [5] 胡小建,袁恒星. 液压元件数字化车间立体仓库货位优化研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(2):274-279.
- [6] WANG W, YANG J, HUANG L, et al. Intelligent storage location allocation with multiple objectives for flood control materials[J]. Water,2019,11(8):1537.
- [7] 秦凯,周骥平,潘殿生,等. 管材存储自动化立体仓库的开发设计[J]. 制造业自动化,2021,43(5):84-88.
- [8] 吴炳,瞿畅. 铝型材立体仓库货位分配优化[J]. 机械设计与制造,2020(9):58-61,65.
- [9] 冯慧. 自动化立体仓库货位分配研究[J]. 物流技术,2021,40(4):86-89.
- [10] 杨玮,刘江,岳婷,等. 多载具自动化立体仓库货位分配与作业调度集成优化[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(1):247-255.
- [11] 闫军,王璐璐,常乐. 多色集合在仓配一体化仓库货位分配建模中的应用[J]. 包装工程,2019,40(23):203-208.
- [12] 黄少荣. 粒子群优化算法综述[J]. 计算机工程与设计,2009,30(8):1977-1980.
- [13] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2004,8(3):240-255.

(责任编辑 胡亚敏)