

双载具式多层穿梭车立体仓库货位优化研究

杨玮, 王晓雅, 岳婷, 张据燕, 王婷
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 为提高双载具式多层穿梭车立体仓库的运作效率, 对其货位优化进行研究。**方法** 针对双载具式多层穿梭车立体仓库货位优化作业系统的特点, 考虑其运动过程中的加(减)速度特性, 建立以入库时间最短为目标的货位分配优化模型。通过设计结合交叉变异算子的混合植物繁殖算法对该模型进行优化求解, 从而确定最佳货位分配方案, 缩短货位分配时间。**结果** 实例分析表明, 混合植物繁殖算法与遗传算法和物繁殖算法相比, 收敛速度更快、优化效率更高。**结论** 混合植物繁殖算法能够有效地缩短双载具式多层穿梭车立体仓库的货位分配时间, 提高了仓库运作效率。

关键词: 双载具; 多层穿梭车; 立体仓库; 货位优化; 混合植物繁殖算法

中图分类号: TB485.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)07-0173-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.07.032

Slotting Optimization of Double-loading Multi-shuttle Automated Storage and Retrieval System

YANG Wei, WANG Xiao-ya, YUE Ting, ZHANG Ju-yan, WANG Ting
(Shaanxi University of Science & Technology, xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the operation efficiency of the double-loading multi-shuttle automated storage and retrieval system (DMS/RS) and studies its slotting optimization. With respect to the characteristics of slotting optimization operation of DMS/RS, considering the acceleration (deceleration) characteristics during the motion, the optimization model of slotting allocation aiming at the shortest warehousing time was constructed. A hybrid plant propagation algorithm combined with the crossover and mutation operator was designed for the optimization solution of the model, thus determining the best slotting allocation plan and shortening the slotting allocation time. The instant analysis showed that, the convergence speed was faster and the optimization efficiency was higher compared with the genetic algorithm and plant propagation algorithm. The hybrid plant propagation algorithm can effectively shorten the slotting allocation time of the DMS/RS and improve the operation efficiency of warehouse.

KEY WORDS: double-loading lift; multi-tier shuttle; storage & retrieval system; slotting optimization; hybrid plant propagation algorithm

多层穿梭车式立体仓库(MS/RS)是近年来新兴的一种快速存取系统,它主要依靠巷道口的提升机和巷道内每层的穿梭车配合完成调度任务。相比传统自动化立体仓库(AS/RS)中每个巷道只能由独立的堆垛机进行货物的搬运,MS/RS中升降机与穿梭车的配合作业大大提高了系统的运作效率。为了进一步提高升降机和穿梭车的配比效率,双载具式多层穿梭车立

体仓库(DMS/RS)随之得到应用。货位分配是双载具式多层穿梭车立体仓库一种常用作业方式,由于升降机的双载式特点加大了整个仓库作业的复杂性,因此,采用合理的货位分配策略是提高系统作业性能的有效手段,而这在很大程度上取决于系统货位分配作业是否合理。

目前,国内外学者对于立体仓库货位优化问题的

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(16JK1095); 西安市未央区项目(201607)

作者简介: 杨玮(1972—),女,博士,陕西科技大学教授、硕导,主要研究方向为智能立体仓库优化调度。

研究基本为传统的 AS/RS 或单载式多层穿梭车立体仓库的研究。李鹏飞等^[1]提出以出入库效率和货架稳定性为优化因素的货位模型,并采取病毒协同遗传算法对优化模型进行仿真。Kovács A^[2]提出了一种 MIP 模型,用于寻找基于分类的存储货位分配策略,它可以最小化订单周期时间,平均采购工作量或者 2 个标准的线性组合。牟善栋^[3]针对单载式多层穿梭车立体仓库建立了作业时序数学模型,以出库时间、提升机空闲时间和穿梭车等待时间最小为目标函数建立了任务调度模型,并采用带精英策略的非支配排序遗传算法对其进行求解。Tone Lerher 等^[4-5]考虑了升降机和穿梭车的加(减)速特性,分别对单深式货架和倍深式货架的多层穿梭车立体仓库在单倍命令周期和双倍命令周期下的行程时间进行了建模,并与实际测试数据进行对比,验证了模型的准确性。Wang Yanyan 等^[6]将穿梭车和升降机视为不同阶段的服务器,建立两阶段开放排队网络模型,并提出了成对库存单位的平均到达时间差矩阵,以确定平均等待时间和队列长度,从而优化存储分配问题。对于双载具多层穿梭车立体仓库货位优化问题。Tone Lerher 等^[7]分别在双载具、三载具的情况下建立了四倍命令周期和六倍命令周期的多载具 AS/RS 行程时间模型。杨朋等^[8]以指令周期内的存取货行程时间最小为目标函数建立货位分配模型,并采用混合遗传算法对算例进行求解。Matej Borovinšek 等^[9]以平均吞吐时间最小、能耗最小和总投资最小为目标,建立多目标优化函数,设计多层穿梭车立体仓库的 7 个变量参数(通道数、层数、列数、提升机速度、提升机加速度、穿梭车速度、穿梭车加速度),采用 NSGA-II 求解得到 Pareto 最优解,为仓储建设规划提供决策方案。由以上文献可看出,双载具式多层穿梭车立体仓库的研究正处于初期阶段,相关文献较少,研究主要集中在升降机为单载的情况下,且大部分利用概率论知识建立数学模型,以及模型中穿梭车与升降机均假设为匀速运动,与实际情况有较大误差。并且采用的优化算法比较单一,针对立体仓库货位优化问题具有一定的局限性。根据以上分析,为力求在最接近实际作业的角度下最小化货位分配作业时间,提高仓库运转效率。

1 问题描述

一个典型的 DMS/RS 主要由高密度存储货架、升降机、多层穿梭车、轨道、控制系统和仓储管理系统(WMN)等构成,它是由巷道口的双载具升降机和每层的穿梭车共同协作完成调度,其中穿梭车在货架的轨道上运行,负责货物的水平运输,升降机安装在巷道口,负责货物的垂直运输,升降机单次可以运输 2 个货物,单个货架及俯视图见图 1。

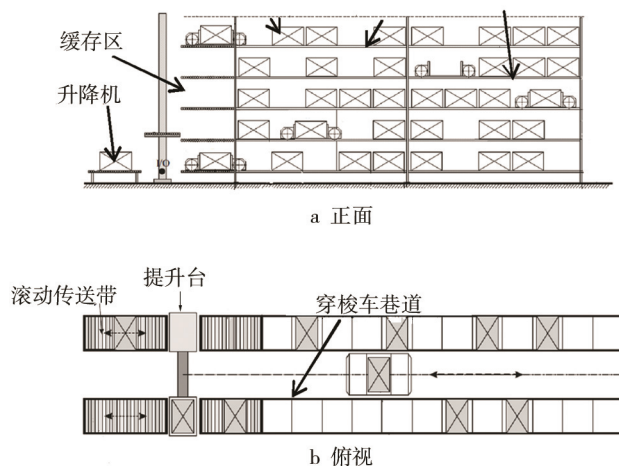


图 1 双载具式多层穿梭车立体仓库
Fig.1 Double-loading multi-shuttle storage & retrieval system

文中研究的货架为 60 列 12 层,且 1 个货格只能存放 1 个货物,基本参数主要有:货格长度 $l=0.4$ m,货格高度 $h=0.3$ m,提升机加速度 $a=3$ m/s²,提升机最大速度 $v_s=4$ m/s,穿梭车加速度 $a_c=2$ m/s²,穿梭车最大速度 $v_c=4$ m/s,提升机对准时间 $t_{sa}=0.5$ s,穿梭车对准时间 $t_{ca}=0.5$ s,提升机交互时间 $t_{sb}=1.5$ s,穿梭车交互时间 $t_{cb}=3$ s。文中所有模型的时间参数均以 s 为计量单位。系统完成一次入库作业示意图见图 2。

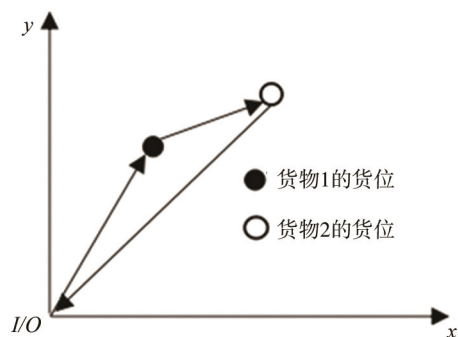


图 2 DMS/RS 入库作业
Fig.2 DMS/RS warehousing operation

2 货位分配模型

为了研究方便又不失一般性,特提出如下假设:货位与货位之间等距离分布;初始状态下,升降机停放在 I/O 点,每层的穿梭车停放在该层缓存区位置;升降机和穿梭车运动过程均存在加减速;所有货物为轻型货物,不考虑其重量。双载具式多层穿梭车立体仓库的作业调度由升降机和穿梭车配合完成,运动机构的运动过程伴随着启动和制动过程,运动机构的速度变化曲线见图 3。由于穿梭车和升降机的加速度变化过程所需时间极小,可忽略不计,因此为便于计算,将其简化为匀加减速过程。

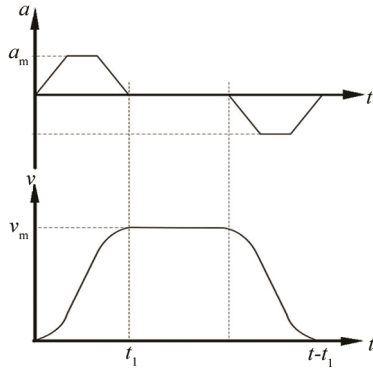


图3 运动机构加速度和速度变化过程

Fig.3 Change process of acceleration and speed of kinematic mechanism

根据运动机构的速度曲线,运动机构单次运行时间 t 见式(1) [10—11]。

$$t = \begin{cases} v_{\max} \cdot a^{-1} + s \cdot v_{\max}^{-1} & s \geq v_{\max}^2 \cdot a^{-1} \\ 2\sqrt{s \cdot a^{-1}} & s < v_{\max}^2 \cdot a^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v_{\max}$ 为运动机构的最大速度; a 为运动机构的加速度; s 为运动机构的运行距离。据此,设货架中列所在方向为 x ,层方向所在为 y ,所需存(取)货物所在货位为 (x_i, y_i) ,则升降机到达货位所在层的运行时间 t_s 见式(2),穿梭车达到该货位的运行时间 t_c 见式(3)。

$$t_s = \begin{cases} v_s \cdot a_s^{-1} + (y_i - 1) \cdot h \cdot v_s^{-1} & (y_i - 1) \cdot h \geq v_s^2 \cdot a_s^{-1} \\ 2\sqrt{(y_i - 1) \cdot h \cdot a_s^{-1}} & (y_i - 1) \cdot h < v_s^2 \cdot a_s^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$t_c = \begin{cases} v_c \cdot a_c^{-1} + x_i \cdot l \cdot v_c^{-1} & x_i \cdot l \geq v_c^2 \cdot a_c^{-1} \\ 2\sqrt{x_i \cdot l \cdot a_c^{-1}} & x_i \cdot l < v_c^2 \cdot a_c^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

结合双载具式多层穿梭车立体仓库货位分配过程,设批订单中共有 k 个入库任务对,任务开始初始时刻为 0,第 k 个入库任务分别为货物 i 和货物 j ,目标货位分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 。升降机完成第 k 个入库任务时刻为 t_{DSk} , t_{DSk} 等于升降机上任务完成时刻 ($t_{DS(k-1)}$) 加上升降机完成此次入库任务所需时间。 w 层的穿梭车完成第 k 个入库任务时刻 $t_{DC(k, w)}$ (其中 $w=1, 2, 3 \dots 11, 12$), $t_{DC(k, w)}$ 等于 w 层穿梭车上一任务完成时刻 ($t_{DC(k-1, w)}$) 加上该层穿梭车完成此次入库任务所需时间。按照入库货物目标货位所在层是否在同一层,分为 2 种情况进行分类讨论。

1) 入库 2 个货物的目标货位在同一层 ($y_i=y_j$)。在单次入库过程中,当 2 个入库订单目标货位在同一层时,入库作业见图 4。 t_{DSk} , $t_{DC(k, w)}$ 的计算见式(4—5)。

$$t_{DSk} = 2 \cdot t_{s(0, i)} + 4 \cdot t_{sb} + 2 \cdot t_{sa} + t_{DS(k-1)} \quad (4)$$

$$t_{DC(k, w)} = \begin{cases} t_{s(0, i)} + 2t_{c(0, i)} + 2t_{cb} + 2t_{ca} + 3t_{sb} + t_{sa} + t_{DC(k-1, w)} & k = i \\ t_{s(0, i)} + t_{s(i, j)} + 2t_{c(0, j)} + 2t_{cb} + 2t_{ca} + 4t_{sb} + 2t_{sa} + t_{DC(k-1, w)} & k = j \\ t_{DC(k-1, w)} & k \neq i, j \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{DC(k, w)} = \begin{cases} t_{s(0, i)} + 2t_{c(0, i)} + 2t_{c(0, j)} + 4t_{cb} + 4t_{ca} + 4t_{sb} + t_{sa} + t_{DC(k-1, w)} & k = i \\ t_{DC(k-1, w)} & k \neq i \end{cases} \quad (5)$$

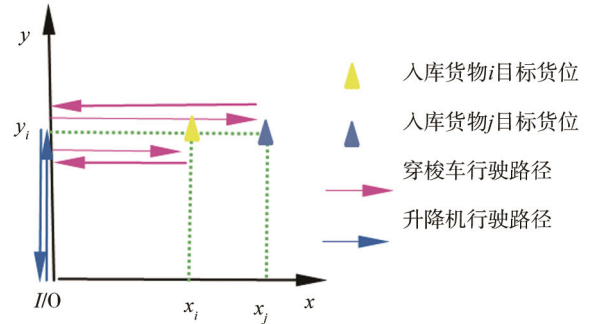


图4 入库货物在同层时的入库作业示意

Fig.4 Schematic diagram of warehousing operations of warehoused goods at the same floor

其中, $t_{s(0, i)}$ 为升降机在 I/O 点与货物 i 的目标层之间单程行驶所需时间; $t_{c(0, i)}$ 为 i 货物目标层穿梭车在巷道口与目标货位 (x_i, y_i) 之间单程行驶所需时间; $t_{c(0, j)}$ 为 j 货物目标层穿梭车在巷道口与目标货位 (x_j, y_j) 之间单程行驶所需时间。

2) 入库 2 个货物的目标货位在不同层 ($y_i \neq y_j$)。在单次入库过程中,当 2 个入库订单目标货位在不同层时,入库作业示意图见图 5。升降机完成第 k 个入库任务时刻为 t_{DSk} , w 层的穿梭车完成第 k 个入库任务时刻 $t_{DC(k, w)}$ 的计算见式(6—7)。

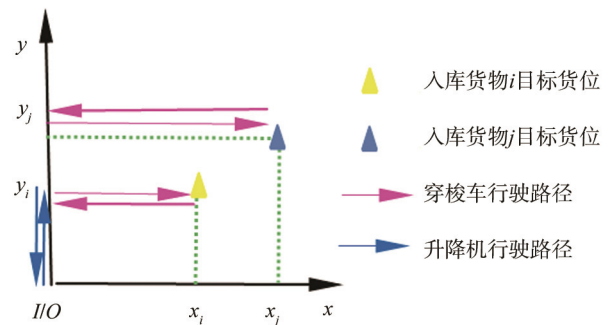


图5 入库货物在不同层时的入库作业示意

Fig.5 Schematic diagram of warehousing operations of warehoused goods at different floors

其中 $t_{s(0, j)}$ 为升降机在 I/O 点与货物 j 的目标层之间单程行驶所需时间; $t_{s(i, j)}$ 为升降机在货物 i 的目标层与货物 j 的目标层之间单程行驶所需时间。

$$t_{DSk} = 2t_{s(0, j)} + 4t_{sb} + 2t_{sa} + t_{DS(k-1)} \quad (6)$$

$$t_{DC(k, w)} = \begin{cases} t_{s(0, j)} + 2t_{c(0, j)} + 2t_{cb} + 2t_{ca} + 3t_{sb} + t_{sa} + t_{DC(k-1, w)} & k = j \\ t_{s(0, j)} + t_{s(j, i)} + 2t_{c(0, i)} + 2t_{cb} + 2t_{ca} + 4t_{sb} + 2t_{sa} + t_{DC(k-1, w)} & k = i \\ t_{DC(k-1, w)} & k \neq i, j \end{cases} \quad (7)$$

综上所述,批订单中有 k 个人库订单对,总作业时间 t_D 为最后一个完成任务的设备的停止时刻减去初始时刻,由于初始时刻设为 0,因此总作业时间 t_D 等于最后一个完成任务的设备的停止时刻,货位分配作业模型见式(8)。

$$t_D = \max \begin{cases} t_{DSk} \\ t_{DC(k,w)} \end{cases} \quad w=1,2,3 \dots 11,12 \quad (8)$$

3 算法实现

双载具式多层穿梭车立体仓库的货位分配优化类似于 TSP(旅行商问题)^[12],是一种经典的离散求解问题。近年来,遗传算法、免疫算法等人工智能算法在此领域得到广泛应用^[13],但在应用过程中发现遗传算法和免疫算法均具有收敛速度慢、容易陷入局部最优等问题。为了解决传统算法的以上弊端,文中设计了适用于双载具式多层穿梭车立体仓库货位分配优化问题的植物繁殖算法,其在收敛速度、运行效率等方面均具有一定优势。

植物繁殖算法(PPA)是一种模拟草莓植株的人工智能算法,也是一种邻域搜索算法和基于群体的元启发式算法^[14]。草莓在生长的过程中依据本地生存策略和蔓延生存策略进行寻优,以克服不利的生存条件。针对离散问题,植物繁殖算法主要运用 k-opt 交换方法实现种群优化,即在当前解的邻域中通过交换边界寻找更好的解,是一种局部搜索方法^[15],因此,其大范围的搜索能力不强,容易陷入局部最优。并且当作业规模变大时, k 的值也需随之变大,方法复杂,适用性不强。

文中设计混合植物繁殖算法(HPPA)对货位分配问题进行求解。在植物繁殖算法中融入遗传算法(GA)的交叉算子,通过交叉的方式不断产生新解,避免算法容易过早收敛的问题。其次,为降低 k-opt 交换方法的复杂度,通过将固定边界的复杂交换转换为固定边界的随机乱序,在保证全局搜索能力的同时简化算法过程。算法流程见图 6。

3.1 编码

基于双载具式多层穿梭车立体仓库货位分配作业模型的特点,货位分配采用混合整数编码方式。每一个货位被赋予一个唯一的标志号码,从 1 到最大货位数。货位位置信息表示了货位在货架中所处的具体位置,以列、排和层表示。货位从第 1 列开始,由排到列按顺序从小到大依次编码,例如,第 1 列货架中第 1 排第 1 层的货位号是 1,第 1 列货架中第 2 排第 1 层的货位为 2。第 1 列货架货位编码示意图 7(货架为 60 排 12 层)。

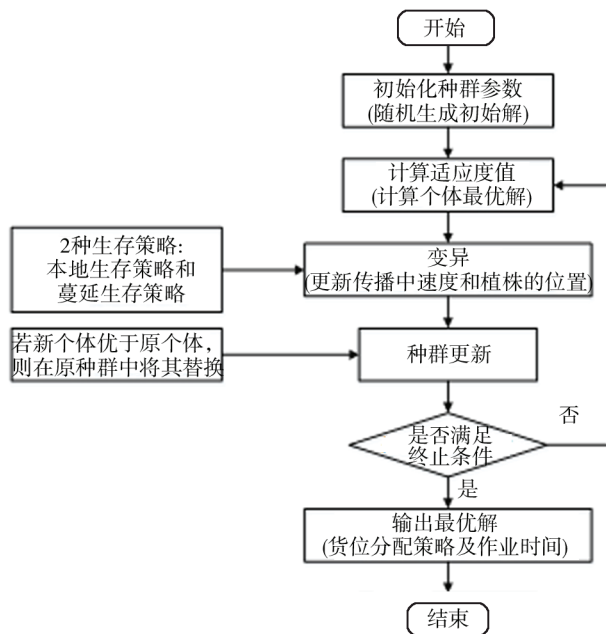


图 6 混合植物繁殖算法流程

Fig.6 Flow chart of hybrid plant propagation algorithm

661	662		719	720
601	602		659	660
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
61	62		119	120
1	2		59	60

图 7 第 1 列货架货位编码

Fig.7 The first column of the shelf and slotting codes

将 X 个入库货物分别从 1~ X 随机编号,货位按其编码方式编号为 1~ Y ,其中 I/O 位置坐标为(0,0,0),此时该任务执行单一货位分配作业。例如,存货货物编号集 $X=\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$,货位编号集 $Y=\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$,优化后的货物和货位的编码分别为[(2,1,3,5,6,7,4,8),(3,9,1,6,8,2,4,5,7,10)],即双载具式多层穿梭车立体仓库以 [(2-3),(1-9)], [(3-1),(5-6)], [(6-8),(7-2)], [(4-4),(8-5)]这 4 个任务对的形式执行货位分配作业。

3.2 适应度函数

文中的优化目标为完成订单内所有货位分配作业的入库时间时间最小,则适应度函数为:

$$f_i = \min t_D = \max \begin{cases} t_{DSk} \\ t_{DC(k,w)} \end{cases} \quad (9)$$

3.3 DMS/RS 货位分配模型的 HAPP 算法步骤

1) 基于 DMS/RS 货位优化模型的特点, 初始化解草莓植株种群和相关参数, 包括草莓植株的数量 N_p 、最大迭代次数 $g_{\max}$, 每株草莓最多传播者数 $n_{\max}$ 以及各草莓植株的位置 X_i , $i=1,2,\dots,N_p$, 其中 $X_i=\{x_{i,j}, j=1\sim n\}$, n 为搜索空间维度, 即穿梭车的数量。对于每个 X_i , 用 N_i 表示归一化后的目标函数值。

2) 计算各草莓植株所在位置的适应度函数值, 记录最优个体和最优解。适应度函数所计算的个体适应度值为执行一次订单任务的总时间。

3) 运用式 (10—11) [16] 进行传播者距离和草莓植株位置更新, 判断算法是否达到最大迭代次数 $g_{\max}$, 若达到则输出适应度值最小的植株个体的位置, 即所求问题的最优解; 否则转至步骤 4)。

传播距离更新公式:

$$dx_j^i = (1 - N_i)(\alpha - 0.5) \quad j=1\sim n \quad (10)$$

草莓植株位置更新公式:

$$y_{i,j} = x_{i,j} + 2 \cdot (b_j - a_j) \cdot dx_j^i \quad j=1\sim n \quad (11)$$

式中: $y_{i,j}$ 为新位置的植株; $x_{i,j} \in [a_j, b_j]$ 为 X_i 的第 j 条路径值, a_j, b_j 分别为搜索空间的上边界值与下边界值; α 为 $[0,1]$ 的随机数。

将种群按照适应度值优劣分为 2 类, 将适应度值好的一类采用本地生存策略, 即当前的生存区域已经有较好的生存条件, 草莓植株可在当前区域进行生长。本地生存策略在使用 2-opt 交换方法的基础上融入遗传算法的交叉算子, 采用双链单点交叉, p_c 为交叉概率, 如果 $p_c > r_{\text{and}}$, 将原个体与最优个体进行交叉, 见图 8。

原个体	22	11	6	9	12	3	7	8	4	5	10	1
最优个体	5	10	2	11	6	3	4	7	1	9	12	8
交叉算法个体	2	9	6	11	12	3	7	8	11	5	10	1

图 8 交叉算子
Fig.8 Crossover operator

4) 为增强算法的全局性, 在算法中加入遗传算法的变异算子, p_m 为变异概率, 若 $p_m > r_{\text{and}}$, 则随机选择 2 点进行变异操作。

5) 更新种群, 计算所有的新个体适应度值, 并与原个体适应度值进行对比, 保留较优个体为下一代种群个体。

6) 一次迭代完成, 判断是否达到最大迭代次数 $g_{\max}$, 若达到则输出最优解, 即得到最优调度作业顺序, 否则返回步骤 2)。

4 实例分析

对双载具式多层穿梭车立体仓库货位分配作业的情况进行分析, 设计具有不同参数场景的问题进行

数值实验。具体的参数设置为: 草莓植株的数量 $N_p=50$, 最大迭代次数 $g_{\max}=2000$, 每株草莓最多传播者数 $n_{\max}=5$, 交叉概率 $p_c=0.7$ 和变异概率 $p_m=0.3$ 。以系统执行一次 30 任务对货位分配作业为例进行分析。其中 30 任务对货位分配作业列表见表 1。根据程序随机所得一组货位分配作业路径顺序为: [(1-10), (23-22)]→[(3-27), (8-13)]→[(5-5), (20-12)]→[(11-7), (18-20)]→[(26-9), (10-1)]→[(7-11), (27-6)]→[(13-30), (14-14)]→[(30-15), (16-6)]→[(24-17), (2-25)]→[(22-19), (21-3)]→[(6-21), (19-2)]→[(4-28), (17-24)]→[(25-18), (9-26)]→[(12-8), (28-23)]→[(29-29), (15-16)], 作业时间为 $t_R=326.84$ s。经过混合植物繁殖算法优化后所得一组货位分配路径顺序为: [(13-28), (4-22)]→[(17-5), (25-29)]→[(5-27), (20-12)]→[(24-7), (18-20)]→[(23-10), (10-1)]→[(16-11), (27-6)]→[(1-30), (30-14)]→[(14-15), (7-6)]→[(11-17), (15-25)]→[(22-19), (21-16)]→[(12-26), (6-2)]→[(26-9), (3-24)]→[(8-18), (9-21)]→[(19-8), (28-23)]→[(29-13), (2-3)], 作业时间 $t_R=249.71$ s, 优化效率提高了 23.6%。

为了验证算法的稳定性与鲁棒性, 将混合植物繁殖算法与遗传算法、植物繁殖算法分别在 30 任务对、50 任务对和 80 任务对作业规模下运行 50 次货位分配作业进行对比, 结果见表 2。

遗传算法、植物繁殖算法和混合植物繁殖算法 3 种算法对货位分配作业调度问题在不同的作业规模下的算法收敛效果见图 9。

由表 2 和图 9 可看出, 遗传算法的收敛速度较慢, 并且求解精度很差; 植物繁殖算法收敛快, 但很快陷入局部最优, 无法得到最优解; 混合植物繁殖算法相对于其他 2 种算法的求解精度和稳定性的优势也不断扩大, 并且随着种群数目的增加, 收敛结果过程更为稳定, 表明该算法更适用于求解大规模的货位优化问题。

表 1 入库任务列表
Tab.1 List of warehousing tasks

货物编号X	货位编号Y	货物编号X	货位编号Y
1	10	16	6
23	22	24	17
3	27	2	25
8	13	22	19
5	5	21	3
20	12	6	21
11	7	19	2
18	20	4	28
26	9	17	24
10	1	25	18
7	11	9	26
27	6	12	8
13	30	28	23
14	14	29	29
30	15	15	16

表 2 3 种算法在不同规模问题下的实验结果
Tab.2 Experimental results of three algorithms at different scales

入库任务数量	算法	均值/s	平均偏差/s	优化效率/%	计算时间/s
30	GA	140.17	2.65	10.98	37.98
	PPA	136.53	1.85	11.42	35.53
	HPPA	124.74	1.65	22.47	34.63
50	GA	230.16	3.25	10.45	94.15
	PPA	227.21	1.95	11.98	87.92
	HPPA	216.80	1.28	15.23	81.07
80	GA	369.22	4.05	10.82	186.19
	PPA	362.47	1.32	13.08	169.71
	HPPA	350.71	2.95	15.67	158.20

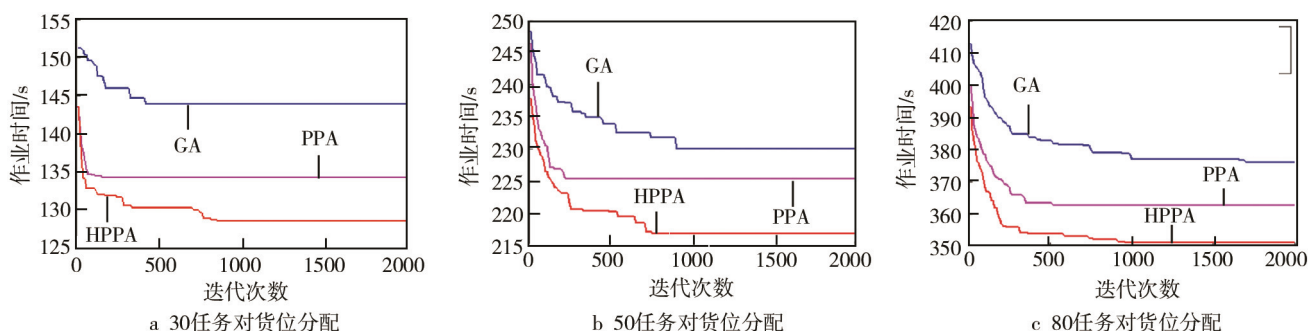


图 9 不同入库任务的货位分配收敛效果

Fig.9 Convergence effect of slotting allocation with different warehousing tasks

5 结语

针对双载具式多层穿梭车立体仓库的作业特点,对货位分配问题进行详细的研究。通过分析货物入库作业的实际操作流程,考虑升降机与穿梭车的加(减)速特性,以此建立了以入库时间最短为目标的货位分配优化模型。针对该问题,文中采用混合植物繁殖算法进行优化求解,将算法中的固定边界复杂交换转换为固定边界的随机乱序,降低了 k-opt 交换方法的复杂度,加快了算法的运算速度。同时,在算法中融入交叉算子,构成带有交叉算子的植物繁殖算法,一定程度上避免了算法容易过早收敛及陷入局部最优的问题,提高了算法的性能。与遗传算法、植物繁殖算法所得结果进行比较,验证了文中所提出的混合植物繁殖算法运算速度更快、优化效率更高,以及在求解双载具式多层穿梭车立体仓库货位分配优化问题中具有有效性和优越性。

参考文献:

- [1] 李鹏飞, 马航. 基于病毒协同遗传算法的自动化立体仓库货位优化模型[J]. 中国管理科学, 2017(5): 70—77.
- [2] LI Peng-fei, MA Hang. Location Optimization Model of Automated Warehouse Based on Virus Cooperative Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017(5): 70—77.
- [3] KOVACS A. Optimizing the Storage Assignment in a Warehouse Served by Milkrun Logistics[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 133(1): 312—318.
- [4] 牟善栋. 多层穿梭车仓储系统建模与优化[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [5] MOU Shan-dong. Modeling and Optimization of Multi-layer Shuttle Warehousing System[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [6] TONE L, EKREN B Y, DUKIC G, et al. Travel Time Model for Shuttle-based Storage and Retrieval Systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9): 1705—1725.
- [7] TONE L. Travel Time Model for Double-deep Shuttle-based Storage and Retrieval Systems[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(9): 1—22.
- [8] WANG Yan-yan, MOU Shan-dong, WU Yao-hua. Storage Assignment Optimization in a Multi-tier Shuttle Warehousing System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 421—429.
- [9] TONE L. Multi-tier Shuttle-based Storage and Retrieval Systems[J]. FME Transactions, 2016, 3(44): 285—290.

- [8] 杨朋, 缪立新, 戚铭尧. 多载具自动化存取系统货位分配优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 1050—1055.
YANG Peng, MIAO Li-xin, QI Ming-yao. Slotting Optimization in a Multi-shuttle Automated Storage and Retrieval System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(5): 1050—1055.
- [9] MATEJ B, EKREN B Y, BURINSKIENE A, et al. Multi-objective Optimisation Model of Shuttle-based Storage and Retrieval System[J]. Transport, 2017, 32(2): 1—18.
- [10] HWANG H, LEE S B. Travel-time Models Considering the Operating Characteristics of the Storage and Retrieval Machine[J]. International Journal of Production Research, 1990, 28(10): 1779—1789.
- [11] LERHER T, SRAML M, KRAMBERGER J, et al. Analytical Travel Time Models for Multi Aisle Automated Storage and Retrieval Systems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(3/4): 340—356.
- [12] 吴虎胜, 张凤鸣, 李浩, 等. 求解 TSP 问题的离散狼群算法[J]. 控制与决策, 2015(10): 1861—1867.
WU Hu-sheng, ZHANG Feng-ming, LI Hao, et al. Discrete Wolf Pack Algorithm for Traveling Salesman Problem[J]. Control and Decision, 2015(10): 1861—1867.
- [13] 吴建辉, 章兢, 张小刚, 等. 分层协同进化免疫算法及其在 TSP 问题中的应用[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 336—344.
WU Jian-hui, ZHANG Jing, ZHANG Xiao-gang, et al. Hierarchical Co-Evolution Immune Algorithm and Its Application on TSP[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 336—344.
- [14] SALHI A, FRAGA E S. Nature-inspired Optimisation Approaches and the New Plant Propagation Algorithm[C]// Icemath, 2011.
- [15] 易剑, 谭树彬, 李维刚, 等. 连铸组中间包问题的 MTSP 模型及混合优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9): 22—26.
YI Jian, TAN Shu-bin, LI Wei-gang, et al. Hybrid Optimization Algorithm for Solving Combining Tundish MTSP Model on Continuous Casting Plan[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2012, 33(9): 22—26.
- [16] SULAIMAN M, SALHI A, SELAMOGLU B I, et al. A Plant Propagation Algorithm for Constrained Engineering Optimization Problems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(1): 1—10.