

物流工程

子母穿梭车式立体仓库复合作业路径优化

杨玮, 李沁, 王晓雅, 岳婷

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究子母穿梭车式立体仓库中复合作业路径优化问题, 有利于提高系统运行效率, 降低成本。**方法** 对于子母穿梭车式立体仓库在一次存取货作业中复合作业方式的实际调度路径, 考虑到其运动机构的加(减)速度, 以完成复合作业总时间最短为目标建立数学模型。针对该系统复合作业的运行特征, 提出一种结合遗传和蚁群算法各自优点的混合粒子群算法进行优化求解。**结果** 实例验证可知, 与粒子群算法和蚁群算法相比, 文中提出的混合粒子群算法具有性能稳定、优化效率更高等优点。**结论** 文中所提复合作业路径优化方法能够有效地缩短子母穿梭车式立体仓库的复合作业时间, 提高了进出库调度效率。

关键词: 子母穿梭车式立体仓库; 复合作业; 路径优化; 混合粒子群算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)07-0134-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.020

Route Optimization of Compound Operations in a Shuttle-carrier
Warehousing System

YANG Wei, LI Qin, WANG Xiao-ya, YUE Ting

(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the route optimization problem for compound operations of the Shuttle-Carrier Warehousing System (SCWS), which is favorable to improve the operation efficiency and reduce the cost of the system. The actual scheduling route of SCWS in three kinds of different operating modes were analyzed in a couple of access operation; and the mathematical model with the goal of the shortest time to access the cargo was established by considering the acceleration and deceleration during the motion. According to the characteristics of compound operations in the system, a hybrid particle swarm algorithm combining ant colony algorithm and crossover and mutation operator was designed to optimize the model. The analysis result showed that compared with particle swarm and ant colony algorithm, the proposed hybrid particle swarm had more stable performance and higher optimization efficiency. The method proposed in the paper can effectively shorten the time of compound operations of the shuttle-carrier warehousing system to improve the efficiency of the loading/unloading scheduling.

KEY WORDS: shuttle-carrier warehousing system; compound operation; route optimization; hybrid particle swarm algorithm

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71390331); 陕西省农业科技创新与攻关项目(2014K01-29-01); 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。

子母穿梭车式立体仓库 (Shuttle-Carrier Warehousing System, SCWS) 是近些年新兴的快速存取系统, 其货物调度主要通过垂直巷道口的升降机、横向巷道中的穿梭母车以及纵向巷道中的穿梭子车协作运输来执行存取任务。相对于传统的自动化立体仓库, SCWS 不需要由各巷道内独立运动的堆垛机进行货物运输, 因此能够充分利用仓储空间, 并且具有运行速度快、可扩展性强、存储密度大等诸多优势, 在医药、电商以及冷链物流等行业均有广阔的市场前景。由于子母穿梭车式立体仓库中升降机与母车、子车存在协调配合作业的特点而加大了仓储系统调度的难度, 因此, 采用合理的调度策略、执行合理的调度作业路径则是进一步提高系统吞吐能力的关键。

目前研究人员对立体仓库多是传统 AS/RS^[1-8]和多层穿梭车式立体仓库^[9-10], 以成本最小和进出库效率高^[11-12]为目标建立模型, 采用粒子群蚁群算法结合、人工狼群算法及多项式时间算法等方法^[13-15]进行路径优化。而对于新兴的子母穿梭车式立体仓库优化问题研究甚少, 且对于已有涉及自动化立体仓库的优化问题研究中, 多以巷道式立体仓库在随机存储策略下的出/入库作业和货位分配为研究对象^[16], 作业时间多以概率模型计算得出, 未对出/入库作业流程建立准确的行程时间数学模型, 无法获得实时订单作业下的最优调度路径, 或是调度算法软件开发^[17]。采用的求解算法多为单一优化算法, 在解决复杂仓储调度的路径优化问题存在局限性。

基于上述原因, 文中从作业排序、作业路径的角度, 以子母穿梭车式立体仓库进出库复合作业为研究对象, 对其路径优化问题进行研究。由于子母穿梭车式立体仓库中升降机与母车、子车的配合作业特点加大了整个仓储调度的复杂性, 为提高系统吞吐性能, 文中考虑升降机和子母穿梭车的加(减)速特性, 建立了子母穿梭车式立体仓库进出库复合作业数学模型, 设计融合粒子群算法、蚁群算法以及遗传算法中交叉变异算子的混合粒子群算法对作业调度路径问题进行优化求解。最后, 将优化结果与粒子群算法和蚁群算法的优化结果对比, 验证了所提出算法的优越性。

1 问题描述

典型的子母穿梭车式立体仓库组成包括升降机、子母穿梭车、轨道式存储货架、仓储控制系统以及仓储管理系统等组成, 水平方向的货物存取由子母穿梭车来实现, 其中横向轨道上由穿梭母车载着穿梭子车(后文统称为母车和子车)作业, 货架列中由子车作业; 而垂直方向则由升降机来完成货物的运输。子母穿梭车式密集立体仓库结构见图 1。

由于子母穿梭车式立体仓库高密度存储的货架结构特点, 一般来说, 该立体仓库多适用于少品种、

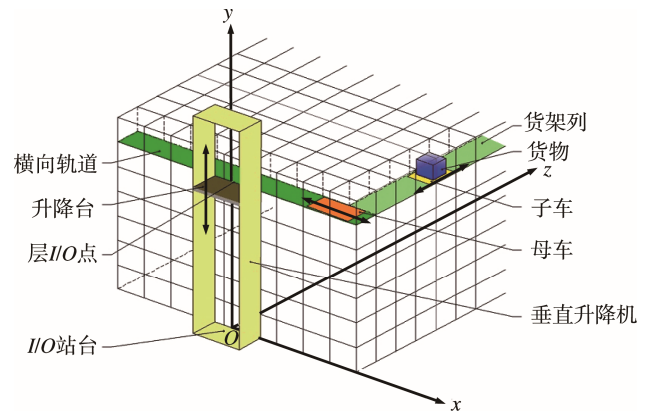


图 1 子母穿梭车式密集立体仓库结构示意图

Fig.1 Structure sketch map of Shuttle-Carrier Warehousing System

大批量的货物进行整箱存储或零货拣选, 其运行过程中按照批次订单任务进行作业, 存在单一作业和复合作业 2 种模式。在单一作业模式下, 立体仓库仅执行货物的入库任务或出库任务, 作业过程相对简单。在复合作业模式下, 立体仓库可同时对整箱货物进行入库和出库作业, 其工作过程更为复杂, 因此文中主要对在复合作业模式下的进出库调度进行研究。

当立体仓库接收到的批订单 N 项任务中, 有 N_1 项入库任务、 N_2 项出库任务。为整体提高作业效率, 仓储系统将入库作业与出库作业配对形成任务对, 即在一次作业周期中, 立体仓库先执行一个货物的入库作业, 再执行另一货物的出库作业, 如此循环直到订单中的任务全部执行完成。系统完成一次复合作业的示意图见图 2。

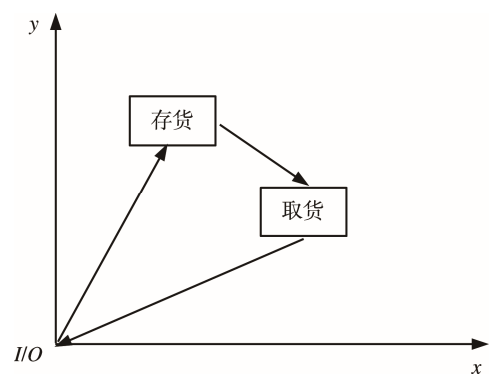


图 2 SCWS 复合作业示意图

Fig.2 Compound operation mode of SCWS

SCWS 的单次复合作业任务需经历 4 个步骤: 升降机将待存货物运送至相应层 I/O 点, 该层母车上货物后经由横向轨道将货物移送至对应货架列口; 母车释放子车, 子车将待存货物运送至相应货位后, 母车重新载上子车回到该层 I/O 点; 位于待出库货物所在层的子母穿梭车移动到货物所在列口, 待子车取货完成后, 母车将载着子车和货物一同运送至层 I/O 点; 垂直升降机的接驳将货物运送到 I/O 站台。

当系统接收到货品出入库订单后, 如何对货品出入

库顺序进行合理安排,使升降机和子母穿梭车高效配合完成订单任务是子母穿梭车式立体仓库调度路径优化的目的,因此,优化子母穿梭车式密集立体仓库中复合作业的调度路径,将成为提高仓库运行效率的关键点。

2 模型建立

文中对子母穿梭车式立体仓库调度问题的研究基于假设如下所述。

1) 单元货架中间有 1 台升降机,每层均有 1 套子母穿梭车。

2) 初始状态时,升降机位于 I/O 站台,每层子母穿梭车位于层 I/O 点位置。

3) 升降机和子母穿梭车每次只可载 1 个货物,且装载货物与否不影响其运行速度,即满载与空载情况下速度相同。

4) 升降机和母车在运行中均存在加(减)速度,子车因其运动距离短,故看作匀速运动。

5) 每一货位进行存取作业的概率相同。

在子母穿梭车式密集仓库中,升降机和子母穿梭

车协作完成进出库调度作业,在运行时,设备包含启动与制动过程,考虑设备加减速因素,根据运动机构在运行过程中是否达到最大速度而将其分为 2 类行程时间模型,其速度随时间的变化关系见图 3^[18-19]。

其中, a^+ , a^- 分别为运动机构的加速度与减速度,为研究方便,假定其值大小相同均为 a ; $v_{\max}$ 为机构的运行最大速度; T 为运动机构从启动到停止运行的总时间; t_a 为加速的时间; $v(t_a)$ 为运动设备在 t_a 时刻的峰值速度。根据运动机构的速度-时间变化曲线,当运动机构单次运行距离为 s 时,2 类行程时间模型的运行时间 T 见式(1)。

$$T = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{s}{a}} & (s < \frac{v_{\max}^2}{a}) \text{ 第1类行程时间} \\ \frac{v_{\max}^2}{a} + \frac{s}{v_{\max}} & (s > \frac{v_{\max}^2}{a}) \text{ 第2类行程时间} \end{cases} \quad (1)$$

仓库中货架的基本规格参数见表 1,文中所有模型中的时间单位为 s,距离参数的单位为 m。同时, $L=C \cdot l$, $W=A \cdot w$, $H=M \cdot h$ 。

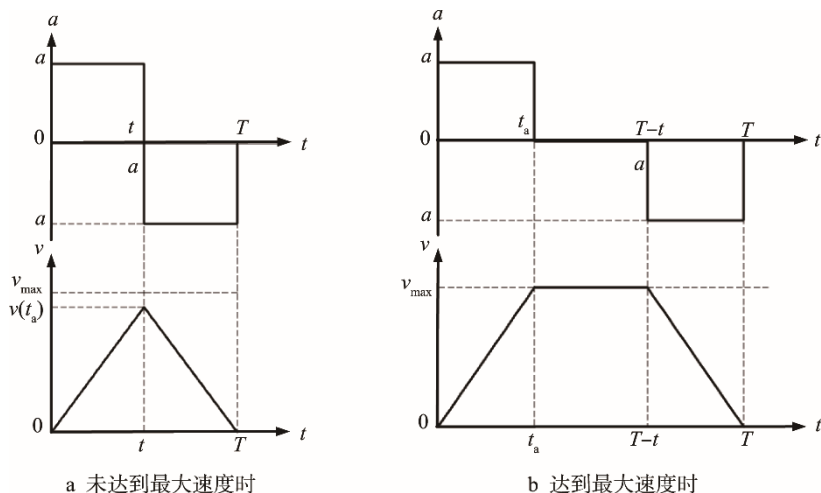


图 3 速度-时间关系

Fig.3 Map of velocity-time relationship

表 1 货架基本参数

Tab.1 Basic parameters of shelf

参数名称	符号	单位	参数名称	符号	单位
货格长度	l	m	升降机加速度	a_y	m/s^2
货格宽度	w	m	升降机最大速度	v_y	m/s
货格高度	h	m	母车加速度	a_x	m/s^2
货架长度	L	m	母车最大速度	v_x	m/s
货架宽度	W	m	子车行驶速度	v_z	m/s
货架高度	H	m	母车装(卸)子车时间	t_{cr}	s
货架层数	M	层	子车装(卸)货物时间	t_{zr}	s
货架列数	C	列	升降机与穿梭车交互时间	t_{sr}	s
货架排数	A	排	母车定位时间	t_{cf}	s
单元货架个数	N	个	子车定位时间	t_{zf}	s
			升降机定位时间	t_{sf}	s

结合对子母穿梭车式立体仓库联合进出库流程的分析, 设入库货物 i 坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 出库货物 j 货位坐标为 (x_j, y_j, z_j) , 根据出、入库货物所处货位是否位于同一层, 分 2 种情况进行讨论, 过程见图 4。

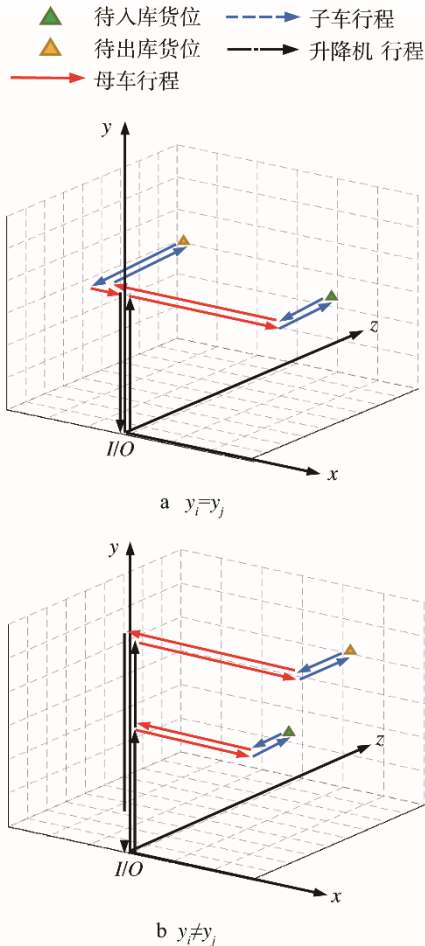


图4 $y_i=y_j$ 和 $y_i \neq y_j$ 情况下的出入库作业示意
Fig.4 Sketch map of import and export operation in case of $y_i=y_j$ and $y_i \neq y_j$

1) 若待入库货物与待出库货物位于同一层 ($y_i=y_j$)

当子母穿梭车式密集立体仓库中待入库货物与待出库货物位于同一层时的复合作业行程时间 T_{ij}^S :

$$T_{ij}^S = 2 \cdot (t_i^h + t_{sf} + t_{sr}) + t_i^l + 3 \cdot t_{cf} + 4 \cdot t_{cr} + 2 \cdot (t_i^w + 2 \cdot t_{zf} + t_{zr}) + t_{ij}^S \quad (2)$$

t_i^h 为升降机运行至货物所在层时间, 计算见式 (3); t_i^l 为母车运行至 i 货物列口时间, 计算见式 (4); t_i^w 为子车运行至 i 货物所在货位时间, 计算见式 (5)。

$$t_i^h = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{y_i \cdot h}{a_s}} & (y_i \leq \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \\ \frac{y_i \cdot h}{v_s} + \frac{v_s}{a_s} & (y_i > \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \end{cases} \quad (3)$$

$$t_i^l = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{|x_i| \cdot l}{a_c}} & (|x_i| \leq \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \\ \frac{|x_i| \cdot l}{v_c} + \frac{v_c}{a_c} & (|x_i| > \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \end{cases} \quad (4)$$

$$t_i^w = \frac{z_i \cdot w}{v_z} \quad (5)$$

式中: t_{ij}^S 为母车从 i 货物列口开始运行直到子车取完 j 货物并将其运送至层 I/O 点所花费的时间。由于母车在行驶中存在 2 类行程时间, 故根据式 (1), t_{ij}^S 表示如下:

$$t_{ij}^S = \begin{cases} t_{ij1}^S & (|x_i| \leq \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \\ t_{ij2}^S & (|x_i| > \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \end{cases} \quad (6)$$

$$t_{ij1}^S = \begin{cases} 2 \cdot (\sqrt{\frac{|x_j - x_i| \cdot l}{a_c}} + \sqrt{\frac{|x_j| \cdot l}{a_c}}) + \frac{2 \cdot z_j \cdot w}{v_z} & (|x_j - x_i| \leq \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \\ \frac{|x_j - x_i| \cdot l}{v_c} + \frac{v_c}{a_c} + 2 \cdot (\frac{z_j \cdot w}{v_z} + \sqrt{\frac{|x_j| \cdot l}{a_c}}) & (|x_j - x_i| > \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \end{cases} \quad (7)$$

$$t_{ij2}^S = \begin{cases} 2 \cdot (\sqrt{\frac{|x_j - x_i| \cdot l}{a_c}} + \frac{z_j \cdot w}{v_z}) + \frac{|x_j| \cdot l}{v_c} + \frac{v_c}{a_c} & (|x_j - x_i| \leq \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \\ \frac{(|x_j - x_i| + |x_j|) \cdot l}{v_c} + 2 \cdot (\frac{v_c}{a_c} + \frac{z_j \cdot w}{v_z}) & (|x_j - x_i| > \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \end{cases} \quad (8)$$

2) 若待入库货物与待出库货物位于不同层 ($y_i \neq y_j$)

当子母穿梭车式密集立体仓库中待入库货物与待出库货物位于同一层时的复合作业行程时间 T_{ij}^D :

$$T_{ij}^D = \max(\max(t_i^h + t_{(j-i)}^h + 3 \cdot t_{sf} + 2 \cdot t_{sr}, 2 \cdot (t_j^l + 2 \cdot t_{cf} + 2 \cdot t_{cr} + t_j^w + 2 \cdot t_{zf} + t_{zr}) + t_j^h, 2 \cdot (t_i^l + t_{cf} + t_{cr} + t_i^w + t_{zf}) + t_{zr} + t_i^h + t_{sf})) \quad (9)$$

式中: t_j^w 为子车运行至 j 货物货位的时间, 表示见式 (10)。

$$t_j^w = \frac{z_j \cdot w}{v_z} \quad (10)$$

式中: $t_{(j-i)}^h$ 为升降机从 i 货物所在层到达 j 货物所在层所用时间; t_j^l 为母车从 j 货物所在列口运行至该层 I/O 点的时间; t_j^h 为升降机从 j 货物所在层运行至 I/O 位置的时间。根据式 (1) 可知:

$$t_{(j-i)}^h = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{|y_j - y_i| \cdot h}{a_s}} & (|y_j - y_i| \leq \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \\ \frac{|y_j - y_i| \cdot h}{v_s} + \frac{v_s}{a_s} & (|y_j - y_i| > \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \end{cases} \quad (11)$$

$$t_j^l = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{|x_j| \cdot l}{a_c}} & (|x_j| \leq \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \\ \frac{|x_j| \cdot l}{v_c} + \frac{v_c}{a_c} & (|x_j| > \frac{v_c^2}{a_c \cdot l}) \end{cases} \quad (12)$$

$$t_j^h = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{y_j \cdot h}{a_s}} & (y_j \leq \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \\ \frac{y_j \cdot h}{v_s} + \frac{v_s}{a_s} & (y_j > \frac{v_s^2}{a_s \cdot h}) \end{cases} \quad (13)$$

因此,若订单任务中总共有 n 个存取对,第 k ($k=1,2,\dots,n$) 个存取对的作业行程时间为 T_{uk} ,则子母穿梭车式密集立体仓库执行该订单任务的出入库复合作业总时间 T_F 为:

$$T_F = \sum_{k=1}^n T_{uk} \quad (14)$$

$$\text{条件 } T_{uk} = \begin{cases} T_{ij}^S & y_i = y_j \\ T_{ij}^D & y_i \neq y_j \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

3 算法描述

子母穿梭车式立体仓库执行作业调度指令时的路径优化问题属于 NP-hard 问题^[20]。现阶段,研究者针对 NP-hard 问题的求解方法多为采用人工智能算法,在求解中虽然能够体现出优秀的求解能力,但也都各自存在局部搜索能力较弱、易陷入局部最优以及易产生早熟收敛等缺点。文中结合 3 种单一优化算法的各自优点,设计一种混合粒子群算法 (Hybrid Particle Swarm Optimization, HPSO) 用于子母穿梭车式密集立体仓库的调度路径优化问题优化求解。

使用 HPSO 算法进行进出库复合作业路径优化问题求解时,首先利用蚁群算法对粒子群算法优化参数,并在算法过程中以一定的概率融入遗传算子,通过交叉、变异从而不断产生新解,避免其陷入局部最优,以提高算法的性能。HPSO 算法流程见图 5,其中 gen 为种群当前迭代的代数, Gen 表示设定的种群代数极大值。

3.1 编码

根据子母穿梭车式密集立体仓库的运行特征和作业特点,文中编码方式采用混合整数编码。在复合作业调度过程中,对 X 个入库货物和 Y 个出库货物分别从 $1 \sim X, 1 \sim Y$ 随机编号,当 $X \neq Y$ 时,则利用编号

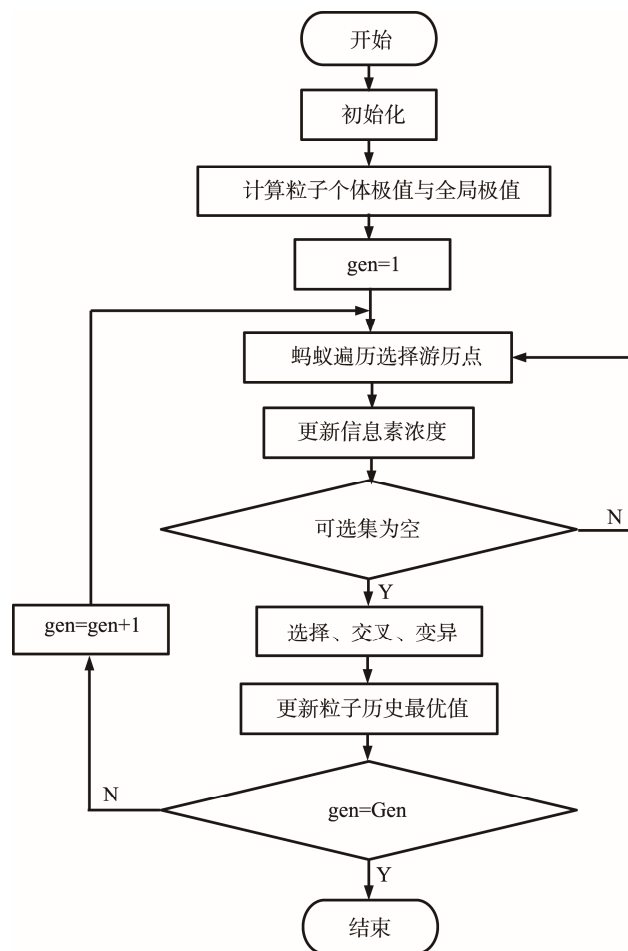


图 5 混合粒子群算法流程

Fig.5 Flow chart of hybrid particle swarm optimization

“0”(即 I/O 位置)将任务对补齐,其 I/O 站点位置标记为 $(0, 0, 0)$,此时相当于系统只执行单一的出库(入库)作业。例如,存货作业编号集 $X=\{1,2,3,4,5\}$,取货作业编号集 $Y=\{1,2,3,4,5,6,7\}$,优化后的存货作业、取货作业顺序为 $[(3,1,0,2,5,4,0,0),(5,2,6,4,1,3,7)]$ 。子母式穿梭车立体仓库将按照 3-5, 1-2, 0-6, 2-4, 5-1, 4-3, 0-3, 0-7 这 7 组任务对来执行货物进出库任务。

3.2 适应度函数

以完成所有订单内复合作业的调度总时间最少为优化目标,则适应度函数构建为:

$$f(T_j) = T_{\max}^J - g(T_j) \quad (15)$$

3.3 SCWS 调度模型的 HPSO 算法步骤

1) 根据 SCWS 调度模型的特点,初始化粒子群与蚁群参数,其中粒子群参数包括:速度 v 、惯性权重 w 、粒子总数量 N ,非负学习因子 c_1, c_2 。蚁群参数包括:信息素浓度 τ 、蚂蚁的数量 N_A 、蚂蚁释放的信息量 Q 、信息启发式因子 α 、信息素挥发系数 ρ 、能见度相对重要性 β 。

2) 通过 PSO 算法得到个体与全局最优极值。个体适应度值由适应度函数计算所得,含义为执行一次订单任务的总时间。

3) 全局更新信息素。计算各蚂蚁走过的路径长度,并将长度最短的路径保留。同时将所有路径中的信息素浓度根据式(16)进行全局更新。

$$\tau_{ij}(t+n)=\rho\cdot\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}\tag{16}$$

式中： ρ 为信息素挥发系数，且 $0<\rho\leq1$ ； $\Delta\tau_{ij}$ 为蚂蚁每次遍历过程中 ij 边上信息素浓度增加量，且

$$\Delta\tau_{ij}^k=\begin{cases}\frac{1}{d_{ij}}, & \text{若第}k\text{只蚂蚁在本次周游中经过边}ij \\ 0, & \text{else}\end{cases}。$$

4) 在算法过程中以一定概率融入遗传算法的交叉和变异算子，交叉概率为 p_c ，当 $p_c>rand$ ，将原个体与最优个体交叉；变异概率为 p_m ，当 $p_m>rand$ ，则随机选取 2 点进行变异。

5) 根据式(17)和式(18)进行粒子速度及位置的更新，以得到新的个体与全局极值。

其中粒子速度：

$$v_{i,j}^{n+1}=\omega\cdot v_{i,j}^n+c_1\cdot r_1\cdot(P_{i,j}^n-x_{i,j}^n)+c_2\cdot r_2\cdot(P_{g,j}^n-x_{i,j}^n)\tag{17}$$

位置更新公式：

$$x_{i,j}^{n+1}=x_{i,j}^n+v_{i,j}^{n+1}\tag{18}$$

式中： n 为迭代次数， $i=1,2\dots N$ ， $j=1,2\dots D$ ； ω 为惯性权重； c_1 ， c_2 为学习因子； r_1 ， r_2 为 $(0,1)$ 之间的随机数。

6) 更新个体最优极值以及全局最优极值。

7) 判定算法是否结束，若没有结束，则返回步骤 2) 继续迭代；若结束，则最优解输出。

4 实验与仿真

为对不同作业任务下子母穿梭车式立体仓库的调度路径优化问题进行示例分析,并验证 HPSO 算法的优越性,需要设计具有不同参数场景的问题进行数值实验。HPSO 算法中设置种群大小为 100、最大迭代次数为 500，其他相关参数设置见表 2。

表 2 HPSO 算法参数设置
Tab.2 Parameter setting of HPSO

参数	参数名称	参数值
c_1, c_2	学习因子	2
ω	惯性权重	0.9
τ_0	初始信息素浓度	100
α	轨迹相对重要性	1.5
β	能见度相对重要性	2
P_c	交叉概率	0.8
P_m	变异概率	0.2

实验中，选取仓储系统接收执行进出库任务为 25 任务对及 50 任务对为例。其中 25 任务对的进出库作业见表 3。

表 3 复合作业任务
Tab.3 Tasks of compound operation

入库 编号	入库任务坐标			出库 编号	出库任务坐标		
	X (列)	Y (层)	Z (排)		X (列)	Y (层)	Z (排)
1	16	11	17	1	16	2	11
2	-9	2	1	2	-20	4	3
3	-16	9	16	3	-14	0	9
4	6	10	10	4	-19	3	17
5	-14	12	14	5	5	10	0
6	-19	1	1	6	18	4	10
...	...	...	...	...	...	...	...
21	12	1	10	21	15	1	17
22	-19	5	15	22	10	8	9
23	5	11	13	23	-16	10	12
24	5	3	2	24	2	4	11
25	11	8	15	25	12	7	11

对 25 任务对和 50 任务对作业模式分别采用 ACO，PSO 以及 HPSO 算法步骤进行优化,使用 Matlab R2016b 编程求得复合作业顺序及总作业行程时间,3 种算法收敛见图 6。

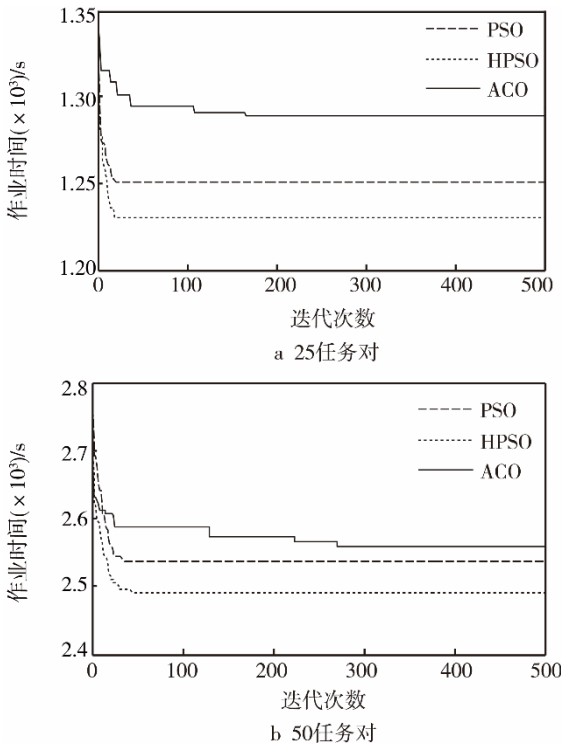


图 6 25 和 50 任务对的复合作业收敛效果
Fig.6 Convergence effect diagram of compound operation with 25 and 50 dual tasks

分析图 6 中数据和收敛曲线可以看出,在不同作业规模下,ACO 算法、PSO 算法分别存在求解精度差、易陷入局部最优等缺点,而 HPSO 算法在收敛速度及迭代初期求解效率均有优势,并且在交叉变异操作后,算法能够不断跳出局部最优,求解精度较高。

以 25 任务对为例根据 HPSO 算法优化最终得到的路径顺序为:(1-17)→(2-23)→(3-5)→(4-4)→(5-15)→(6-1)→(7-22)→(8-7)→(9-2)→(10-18)→(11-16)→(12-11)→(13-8)→(14-9)→(15-25)→(16-24)→(17-19)→(18-13)→(19-6)→(20-12)→(21-20)→(22-14)→(23-21)→(24-3)→(25-10),总作业时间 $T=1228.3$ s。

将各算法程序运行 100 次,计算其不同方法下的作业行程时间均值、平均偏差、平均优化效率,见表 4。

表 4 不同作业规模下 3 种算法的复合作业模拟结果
Tab.4 Experimental results of three algorithms on different scale problems by compound operation

作业规模 (任务对)	算法	作业时间 均值/s	平均 偏差/s	平均优化 效率/%
25	ACO	1290.3	9.3	3.6
	PSO	1246.9	6.5	10.1
	HPSO	1229.1	2.1	15.1
50	ACO	2561.3	16.3	4.7
	PSO	2539.1	8.9	9.3
	HPSO	2508.1	3.5	16.7

由表 4 可以看出,在不同作业规模下,HPSO 算法的作业时间均值最短,且算法的鲁棒性和优化效率较 ACO, PSO 算法有着明显的优势,同时,算法优化效率随着作业规模的增多而得到提高。

5 结 语

文中研究了子母穿梭车式立体仓库在复合作业下的路径优化问题。首先,结合实际仓储系统运行中联合出入库作业的运行特征,将升降机及子母穿梭车的加(减)速特性纳入考虑;其次,以完成复合作业调度时间最小为优化目标建立了调度路径优化模型;然后,针对该问题,提出了混合粒子群算法进行优化求解,利用 ACO 算法优化粒子群算法参数,并结合 GA 算法中的交叉和变异不断产生新解,避免过早陷入局部最优,提高了算法性能;最后,将结果与这 2 种单一的优化算法所得结果进行比较,结果表明了文中所提出的混合粒子群算法鲁棒性更好、优化效率更高,能够实现子母穿梭车式立体仓库中复合作业调度路径的优化,并提高系统运行效率。

文中主要进行优化的是子母穿梭车式立体仓库进出库复合作业路径问题,今后可以对订单任务中同时存在单一作业、复合作业以及拣选作业的复合作业

情况时,如何建立相应符合实际过程的行程时间模型,并采用合适的算法对该调度路径模型优化求解进行研究。

参考文献:

- [1] BOZER Y, WHITE J. Travel-time Models for Automated Storage/Retrieval Systems[J]. AIIE Transactions, 1984, 16(4): 10.
- [2] LERHER T, POTRČ I, ŠRAML M, et al. Travel Time Models for Automated Warehouses with Aisle Transferring Storage and Retrieval Machine[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 205(3): 571—583.
- [3] 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.
- [4] 杨玮, 刘江, 高贺云. 堆垛机式密集立体仓库复合作业三维空间路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(7): 1552—1560.
YANG Wei, LIU Jiang, GAO He-yun. Three-dimensional Spatial Path Optimization for Compound Operation of Stacker dense Storage System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(7): 1552—1560.
- [5] POPOVIĆ D, VIDOVIĆ M, BJELIĆ N. Application of Genetic Algorithms for Sequencing of AS/RS with a Triple-shuttle Module in Class-based Storage[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2014, 26(3): 432—453.
- [6] GHAREHGOZLI A H, YU Y, ZHANG X, et al. Polynomial Time Algorithms to Minimize Total Travel Time in a Two-depot Automated Storage/Retrieval System[J]. Transportation Science, 2017, 51(1): 19—33.
- [7] KHOJASTEH Y, SON J D. A Travel Time Model for Order Picking Systems in Automated Warehouses[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5/6/7/8): 2219—2229.
- [8] GHAREHGOZLI A H, YU Y, ZHANG X, et al. Polynomial Time Algorithms to Minimize Total Travel Time in a Two-Depot Automated Storage/Retrieval System[J]. Transportation Science, 2017, 51(1): 19—33.
- [9] 杨玮, 王晓雅, 岳婷, 等. 双载具式多层穿梭车立体仓库货位优化研究[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 173—179.
YANG Wei, WANG Xiao-ya, Yue-ting, et al. Research on Slotting Optimization of Double-loading Mul-

- ti-shuttle AS/RS[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(7): 173—179.
- [10] CARLO, HÉCTOR J, VIS I F A. Sequencing Dynamic Storage Systems with Multiple Lifts and Shuttles[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 140(2): 844—853.
- [11] MALEKI B, VISHKEAI M, EBRAHIM N, et al. A Fuzzy Multi-Objective Class Based Storage Location Assignment[J]. *International Journal of Applied Operational Research*, 2011, 1(1): 19—33.
- [12] GHOMRI L, SARI Z. Mathematical Modeling of Retrieval Travel Time for Flow-rack Automated Storage and Retrieval Systems[J]. *IFAC-Papers on Line*, 2015, 48(3): 1906—1911.
- [13] 王登科, 李忠. 基于粒子群优化与蚁群优化的云计算任务调度算法[J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(1): 290—293.
WANG Deng-ke, LI Zhong. A Task Scheduling Algorithm Based on PSO and ACO for Cloud Computing [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(1): 290—293.
- [14] 方彦军, 唐猛. 自动小车存取系统复合作业三维空间路径优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(3): 702—708.
FANG Yan-jun, TANG Meng. Three-dimensional Rounting Optimization for AVS/RS Composite Operation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(3): 702—708.
- [15] GHAREHGOZLI A H, YU Y, ZHANG X, et al. Polynomial Time Algorithms to Minimize Total Travel Time in a Two-depot Automated Storage/Retrieval System[J]. *Transportation Science*, 2017, 51(1): 19—33.
- [16] 杨玮, 岳婷, 李国栋, 等. 子母式穿梭车仓储系统复合作业路径优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(9): 2349—2356.
YANG Wei, YUE Ting, LI Guo-dong, et al. Routing Optimization of Compound Operations in Shuttle-carrier Warehousing System[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2018, 24(9): 2349—2356.
- [17] 乐康康. 立体仓储系统中子母穿梭车优化调度控制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
LE Kang-kang. Researches on the Dispatch Control for Shuttle Vehicles in Stereo Warehouse System[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [18] HWANG H, LEE S B. Travel-time Models Considering the Operating Characteristics of the Storage and Retrieval Machine[J]. *The International Journal of Production Research*, 1990, 28(10): 1779—1789.
- [19] LERHER T, SRAML M, KRAMBERGER J, et al. Analytical Travel Time Models for Multi Aisle Automated Storage and Retrieval Systems[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(3/4): 340—356.
- [20] 杨朋, 缪立新, 秦磊. 多载具自动化存取系统作业调度优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(7): 1626—1632.
YANG Peng, MIAO Li-xin, QIN Lei. Job Scheduling Optimization in Multi-shuttle Automated Storage and Retrieval System[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(7): 1626—1632.