

基于混合算法的环形轨道RGV系统调度优化研究

江 唯, 何 非, 童一飞, 李东波

JIANG Wei, HE Fei, TONG Yifei, LI Dongbo

南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094

College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China

JIANG Wei, HE Fei, TONG Yifei, et al. Hybrid algorithm for rounding rail guided vehicle optimization scheduling. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(22): 242-247.

Abstract: In order to find out the shortest time that traverses all blocks to solve the circular orbit RGV (rail guided vehicles) scheduling problem in automated warehouse, this paper analyzes the main influencing factors and then proposes the goal that find out the shortest path and the least clogging scheme. Mathematical model is established and rule-based Genetic Algorithm is designed to solve the problem. This paper uses adaptive crossover and mutation probability to replace traditional fixed parameters to solve the problem that genetic algorithm is easy to fall into the phenomenon of local optima. An improved dynamic exploring process is advanced for the multi-objective optimization. In the end, the genetic operators are analyzed by experimental comparisons and the algorithm is validated by experiments.

Key words: rail guided vehicles; annular shuttle scheduling; genetic algorithm; dynamic exploring process

摘 要: 针对自动化仓库中环形轨道RGV(有轨制导车辆)调度问题,以任务最短完成时间为目标,分析其主要影响因素。在此基础上提出路径最短和堵塞次数最少两个优化目标,并建立数学模型,设计基于规则的遗传算法求解。使用自适应的交叉变异概率代替传统遗传算法中的固定参数,改善遗传算法易陷入局部最优解的现象。同时,为解决多目标优化求解问题,提出了改进的自适应权重的求解方案。通过Matlab仿真实验分析比较算法性能,验证了算法的有效性。

关键词: 有轨制导车辆(RGV); 环形穿梭车调度; 遗传算法; 自适应权重

文献标志码: A **中图分类号:** TP391 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1604-0341

1 引言

随着控制工程、机电一体化、信息技术等多个领域的高速发展,物流系统开始向自动化、无人化、智能化发展。RGV(Rail Guided Vehicle)有轨制导车辆系统是集各种高新技术于一体,既可作为立体仓库的辅助设备,也可自己独立运行的系统。被广泛应用于现代化物流系统中。相对于直线往复式RGV系统,环形轨道RGV系统效率更高。但是,由于环形轨道RGV系统采用封闭式轨道,在运行过程中,易出现堵塞的情况,降低运行效率。如何合理调度穿梭车,提高RGV系统的运行效率,是促使物流行业高速发展的一个重要因素。聂峰、程珩^[1]针对某自动化立体库设计的轨道式RGV多功能穿梭车,在顺序排队原则的基础上提出了就近算法,结合策

略设置方法来优化作业调度,以提高作业入库效率。晏鹏宇、杨乃定^[2]提出基于遗传和禁忌搜索的混合启发式算法,通过搜索一组最满意的机器人搬运作业排序来求解自动化制造单元最小完工时间调度问题。陈华^[3]以某救灾物资自动化立体仓库为背景,建立基于区域划分的2-RGV调度问题的混合整数线性规划模型,目标是最小化所有物料的总出库时间,提出混合遗传算法求解该问题。顾红、邹平、徐伟华^[4]研究环形穿梭车(RGV)的工作特点和调度策略,同时考虑其起停、等待、复合作业对搬运能力的影响,并利用基于自学习和改进遗传算法的环形RGV实时调度算法求解了RGV搬运作业的多目标优化调度数学模型。徐伟华、熊坚^[5]在保证生产的前提下按穿梭车搬运能力最大原则对搬运任务进行排队,

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51575280)。

作者简介: 江唯(1991—),男,硕士研究生,主要研究领域为智能立体仓库运行效率优化, E-mail: 351183359@qq.com。

收稿日期: 2016-04-25 **修回日期:** 2016-07-11 **文章编号:** 1002-8331(2016)22-0242-06

CNKI网络优先出版: 2016-08-25, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20160825.1646.046.html>

将穿梭车作业调度由先到先搬运策略改为数学模型优化调度,提高了双工位穿梭车搬运能力。牟善栋^[6]以单层作业的多层穿梭车仓储系统为研究对象,综合运用开环排队网络、蚁群聚类算法和Pareto基于最优解的带精英策略的非支配排序遗传算法,从储位优化和任务调度两个方面对多层穿梭车仓储系统进行优化研究。郑雯、周炳海^[7]考虑搬运系统中各搬运设备之间的相互影响,以搬运完工时间最小为优化目标建立数学模型,提出一种基于事件驱动的派工调度算法解决了整合式布局环境下搬运设备所出现的碰撞、拥堵、死锁等问题。林佳良^[8]通过研究轨道式循环搬运系统的特点,提出了两种调度方法:随机调度规则、顺序调度规则。为减少穿梭车干涉的发生,在顺序调度规则的基础上提出了调整顺序规则来减少穿梭车每次循环时干涉的发生。

上述文献均单独从传统的规则调度或现代智能算法出发研究调度问题。在传统的规则调度中,通过设定各种规则来解决穿梭车和任务的分配问题,算法复杂度低,运算时间短,即使是大规模的调度问题,也不会出现“假死”的现象。现代智能优化算法,算法复杂度较高,调度结果更加合理。然而,其算法运算时间长,易陷入局部最优解,在解决仓储即时调度问题时,有不可回避的缺陷。本文在前人研究的基础上提出基于规则的GA混合算法,在规则调度的结果上进行优化,结合了规则调度和遗传算法的优点,既缩短了求解时间,又使得求解结果尽量最优。

2 环形穿梭车调度问题描述

环形穿梭车(通常为单轨形式)由直线往复穿梭车发展而来,轨道在平面内呈闭环布置,穿梭车沿轨道单向运行,该环形轨道可以同时运行多台穿梭车,从而改善了直线往复穿梭车输送能力有限的缺点。然而,由于系统采用封闭式轨道,在运行过程中,不合理的调度会加剧轨道堵塞,降低运行效率。

本文主要针对某物流仓储环形穿梭车的调度问题进行研究,该问题可描述如下:现有需要处理的运输任务集合 $Task=\{task_i|i=1,2,\dots,n\}$,可供使用的穿梭车集合为 $Car=\{c_j|j=1,2,\dots,m\}$,道口集合为 $O=\{Ok,k=1,2,\dots,num\}$ 。轨道为环形轨道,共由八段构成,其布置形式如图1所示。在此情况下调度,得到最短时间完成所有任务的调度方案。

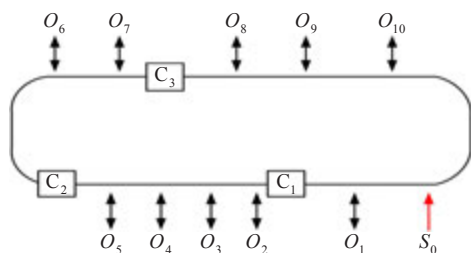


图1 RGV系统布置示意图

相关约定:

(1) 环形轨道穿梭车在封闭轨道按照固定顺序(顺时针或是逆时针)行走,均不可后退。

(2) RGV为单工位,即穿梭车每次只可同时负责一个搬运任务。

(3) 定义起始点为 S_0 ,道口 O_k 可为取/卸货道口两种形式。

(4) 穿梭车和道口位置为轨道从原点起沿标定方向展开的距离。

(5) RGV系统可以即时获取穿梭车位置和道口位置。

除以上约定外,相关假设条件如下:

(1) 穿梭车、道口在整个调度运行周期中有故障发生时,系统停止运行,对调度优化过程不产生影响。

(2) 穿梭车到达道口可立即上/下货。

(3) 穿梭车和道口编号沿顺时针依次编号。

(4) 穿梭车仅可按一个方向运行(顺时针方向)。

3 调度优化模型建立

在上述条件定义下,当所有任务完成时间最短时,即为RGV系统调度问题的最优方案。

可描述为:

$$\min \sum_{i=1}^n T_{\text{task}}^i \quad (1)$$

其中 T_{task}^i 为任务 i 从开始下达到完成所需要的时间 T_{task} ;由于 T_{task} 无法直接测定,可给出如下计算方式:

$$T_{\text{task}} = T_{\text{wait}} + T_{\text{deal}} \quad (2)$$

$$T_{\text{wait}} = t_{\text{calculate}} + t_{\text{befocal}} \quad (3)$$

$$T_{\text{deal}} = 2 \times t_{\text{upun}} + t_{\text{walk}} + t_0 \quad (4)$$

$$t_{\text{walk}} = \sum_{q_1=1}^{n_{\text{acc}}} t_{\text{acc}}(q_1) + \sum_{q_2=1}^{n_{\text{dec}}} t_{\text{dec}}(q_2) + \sum_{q_3=1}^{n_{\text{uni}}} t_{\text{uni}}(q_3) + \sum_{q_4=1}^{n_{\text{pause}}} t_{\text{pause}}(q_4) \quad (5)$$

式中 T_{wait} 为单个运任务从开始下达到开始执行之间的等待时间; T_{deal} 为RGV单个任务开始执行到执行结束所需要的总时间; t_{befocal} 任务下达到任务被有效调度的等待时间; t_{upun} 为取货/卸货时间,本文中认为其为定值; t_{walk} 为搬运过程中穿梭车行走和等待时间; t_0 为系统各部分通讯时间、定位时间等(t_0 为常量); t_{acc} 为加速行走时间; n_{acc} 为加速行走次数; t_{dec} 为减速行走时间; n_{dec} 为减速行走次数; t_{uni} 为匀速行走时间; n_{uni} 为匀速行走次数; t_{pause} 为任务执行期间由于道路阻塞而停止的等待时间; n_{pause} 为任务执行期间由于道路阻塞而停止的等待次数。

由于任务等待调度的时间 t_{befocal} 主要与之前任务的

完成时间 T_{task} 相关; $t_{\text{calculate}}$ 由算法运算效率决定, 本文将在稍后讨论。则由式(2)可知 T_{deal} 为任务完成时间的主要因素。由公式(4)和公式(5)可知, T_{deal} 由 t_{uni} 和 n_{pause} 决定。可将优化目标分解为所有穿梭车搬运距离之和最短及轨道堵塞造成停车次数最少两个方面。

3.1 目标函数

(1) 目标1: 所有穿梭车搬运距离和最短

$$\min \sum_{j=1}^m l_{cj} \times x_{cj} \quad (6)$$

其中 l_{cj} 为穿梭车 j 沿运行方向到所承担任务取货道口的距离; 若穿梭车未被分配任务, 本文中认为 l_{cj} 为0; x_{cj} 为穿梭车 j 的状态值, 若不可分配任务给穿梭车 j , 则 $x_{cj} = 0$, 否则 $x_{cj} = 1$ 。

(2) 目标2: 轨道堵塞造成停车次数最少

$$\min \sum_{j=1}^m n_{c(j,jj)} \quad (7)$$

其中 $n_{c(j,jj)}$ 穿梭车 j 由于穿梭车 jj 阻塞轨道而被迫停车的次数。

$$jj = \begin{cases} j+1, j < m \\ 1, j = m \end{cases} \quad (8)$$

3.2 约束条件

环形轨道穿梭车系统对该模型存在以下约束条件:

(1) 穿梭车 c_j 能准确无误地停到取货道口 O_k , 不会因为距离过短而使穿梭车驶过取货道口。 l_{stop} 为最短停车距离。

$$l_{cj} - l_{\text{stop}} > 0 \quad (9)$$

(2) 约束表示穿梭车 c_{j+1} 和 c_j 之间有足够的安全距离。 l_{safe} 为相邻穿梭车之间的安全距离; $l_{c(j,j+1)}$ 为穿梭车 j 和穿梭车 $j+1$ 之间的距离。

$$l_{c(j,j+1)} - l_{\text{safe}} > 0 \quad (10)$$

4 基于规则的混合遗传算法模型求解

遗传算法求解调度问题时多采用随机生成法形成染色体方案来获取初始种群, 以致于迭代开始前就可能形成多种合理性极低的方案, 要进行大量的迭代后才能得到优化方案。不仅降低了算法的运算效率, 也容易陷入局部最优解而得不到好的调度方案。而规则调度只能解决当下空闲穿梭车的调度问题, 无法对穿梭车任务分配作出预测, 从而在处理大规模调度问题时, 难以获得较优方案。本文提出了基于规则的混合遗传算法, 通过对初始种群获取方案进行改进, 获得高质量的初始种群, 从而提升算法收敛性能。

4.1 基于STDF的规则调度

规则调度广泛存在于当下已有的调度系统中, 是一种即时的调度策略, 其最大的优点为算法复杂度低, 能较好地应用于动态实时调度和复杂大规模调度问题。当RGV系统和任务下达系统等整合为一体时, 可由其他系统在新任务下达或穿梭车状态改变时触发规则调度, 当RGV系统独立运行仅通过数据库完成与其他系统的数据交换时, 可采用定时运行的方式触发规则调度^[9-11]。其流程如图2。



图2 规则调度流程图

规则1 最近站点优先STDF(Shortest Travel Distance First)^[10,12]; 穿梭车队列形似“贪吃蛇”, 则取货规则为, 从“蛇尾”(穿梭车队列末尾)开始, 空闲穿梭车完成任务起始道口距离最近位置的且未被分配的任务, 依次类推。穿梭车和任务之间的指派决策是基于两者之间的距离。但STDF指派规则对于起始道口相同终止道口不同的任务无法合理分配, 因此引入规则2。

规则2 起始道口相同, 终止道口不同的任务, 优先完成任务终止道口距离起始道口较远的任务。

4.2 自适应遗传算法

传统的遗传算法其交叉概率和变异概率大部分是依靠经验取值, 其参数的选择直接影响算法最终的优化效果好坏和计算时间的长短。且由于环形穿梭车调度是一种即时问题, 固定的参数不利于其调度问题的求解。而自适应遗传算法采用自适应的交叉变异参数, 当个体的差异大时, 它尽量缩小差距, 既让优秀的个体能充分发展, 也给较差的个体一定的进化机会; 当个体的差异小时, 它尽量增大差距, 能更好地推动群体的进化^[13]。

4.2.1 编码方式

染色体编码采用自然数编码方式, 对穿梭车和任务进行编码, 组成一个染色体, 编码如下规定:

(1) 染色体中, 同一任务不可重复出现;

(2) x_{cj} 为0的位置, 根据其实际承担的任务进行编码;

编码方式如下:

$$x_{c_1} \text{task}_1 \cdots x_{c_j} \text{task}_i \cdots x_{c_m} \text{task}_m, x_{c_1} \text{task}_{m+1} \cdots x_{c_j} \text{task}_{m+i} \cdots x_{c_m} \text{task}_{2m} \cdots$$

4.2.2 适应度函数

适应度函数是评价个体优劣程度的标准。本文中, 染色体各目标适应度函数如下:

路程最短:

$$f_{\text{fit1}}(x) = \min \left\{ \sum_{j=1}^{a-1} l_{cj} \times x_{cj} \right\} \quad (11)$$

堵塞最少:

$$f_{fit2}(x) = \min \left\{ \sum_{j=1}^m n_{c(j,j)} \right\} \quad (12)$$

为求解多目标优化问题,本文采用自适应权重的方式统一目标函数求解^[14],最终目标函数如下:

$$f(x) = \min \{ \alpha f_{fit1}(x) + \beta f_{fit2}(x) \} \quad (13)$$

为统一目标1和目标2函数,将其函数值映射到同一区间,其计算公式如下:

$$f_1(x) = \frac{f_{fit1}(x) - f_{fit1\min}}{f_{fit1\max} - f_{fit1\min}} \quad (14)$$

$$f_2(x) = \frac{f_{fit2}(x) - f_{fit2\min}}{f_{fit2\max} - f_{fit2\min}} \quad (15)$$

设种群为 N , 每条染色体各目标自适应的目标权重计算公式如下^[15]:

$$\alpha = \frac{1}{f_{1\max}(x) - f_{1\min}(x)} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1}{f_{2\max}(x) - f_{2\min}(x)} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{\alpha}{\alpha + \lambda \times \beta} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\lambda \times \beta}{\alpha + \lambda \times \beta} \quad (19)$$

式中针对环形穿梭车实际运行情况,引入参数 λ 。 $\lambda = \frac{t_{upun}}{t_{usu}}$, t_{usu} 为穿梭车沿轨道正常行驶一周所需要的时间。

4.2.3 交叉

(1) 自适应交叉概率

在遗传算法的参数中,交叉和变异算子直接影响算法的收敛速度和跳出局部极小的能力。传统遗传算法中,固定的交叉概率和变异概率不利于收敛到全局最优。

自适应交叉、变异概率能够较好地改善这一现象^[16]。其中自适应交叉概率 p_{cross} 计算公式如下:

$$p_{cross} = \begin{cases} k_1 \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}\right), f' > f_{\text{avg}} \\ k_2, f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (20)$$

式中 f_{\max} 表示最大适应度值; f_{avg} 表示平均适应度值; f' 为个体适应度值。

(2) 交叉方式

本文中采用两点交叉方法,交叉位置采用随机选取方式。交叉示意图如图3。

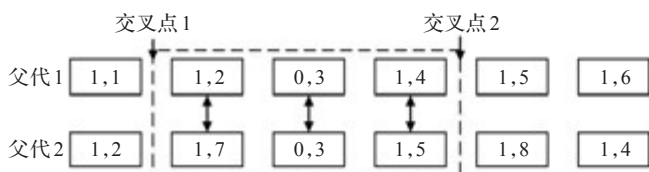


图3 交叉示意图

(3) 染色体修复

由于同一任务不能由两辆车同时执行,因此,在交叉完毕后需要对染色体进行修复。操作如图4。



图4 染色体修复示意图

4.2.4 变异

本文根据仓储物流实际情况,针对变异基因的获得范围选用两种变异方式。其中,当任务较多,有多余任务未参与染色体编码且个体适应度值小于平均适应度值时,选择外部变异;否则采用自交叉变异。

(1) 外部变异:选用原染色体中不存在的基因替换变异位置基因。其方式如图5。

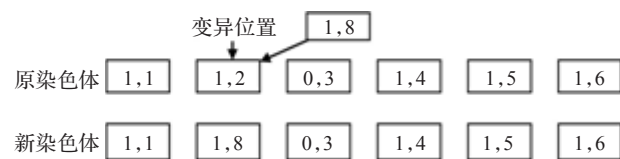


图5 外部变异示意图

(2) 自交叉变异:随机生成两个交叉位置,交换变异位置上的基因。方式如图6。

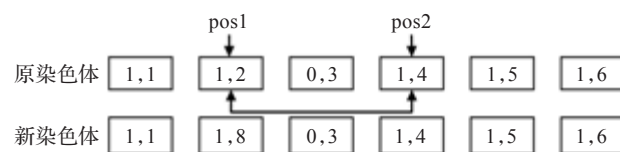


图6 自交叉变异示意图

自适应变异概率:

$$p_m = \begin{cases} k_3 \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}\right), f' > f_{\text{avg}} \\ k_4, f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (21)$$

4.3 基于规则的混合遗传算法

针对实际工程应用中任务指令间断发出,对调度计算有时间性要求的特点,本文将规则调度算法和现代智能算法的优点相结合,提出基于规则的混合算法。

为保证初始种群质量,优化初始种群编码,本文中提出规则3。

规则3 染色体中,优先使同一辆穿梭车分配的相邻任务中,后一个任务的起始道口位置尽量靠近上一个任务的终止道口且不超过上一个任务的起始道口。示意图如图7。



图7 规则3示意图

算法主要步骤如下:

(1) 算法依据调度规则进行调度,得到中间结果。

(2) 算法根据中间结果结合遗传算法编码方式和规则3获得初始种群的一半个体,剩下的一半个体基于规

则3获得。

(3)GA算法进行优化运算得到最终结果,通过解码获得调度方案。

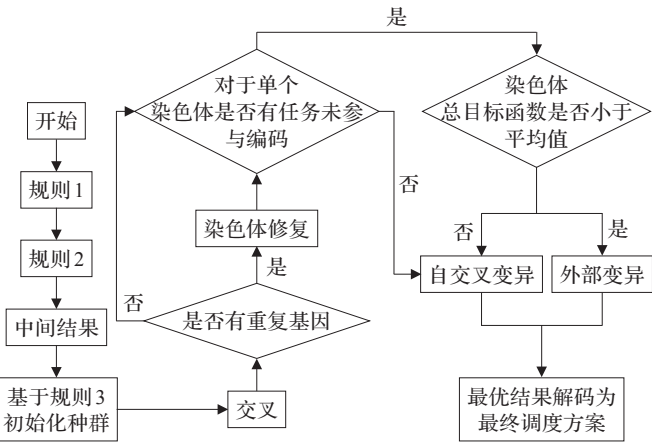


图8 混合算法流程图

5 算例分析

本文针对某公司仓库实际运行情况,采用轨道长 $L=32\text{ m}$,穿梭车数量 $m=3$ 辆,道口数量 $num=20$ 进行实验,改变任务数量进行实验。其中针对任务数量 n 的每一个取值,均进行10次实验。

表1 穿梭车编号及其对应位置

编号	1	2	3
位置/mm	1 500	5 500	15 500

表2 道口编号及其对应位置

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
位置/m	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	26	28	30

表3和表4表示当任务数量 $num=20$ 时任务所对应的起始道口和终止道口及某次有效计算解码后的结果。

由表5可知基于规则的遗传算法收敛到最优解的概率相对于普通自适应遗传算法要高。由图9可知不

表4 $n=20$ 时混合算法计算结果

穿梭车编号	任务编号						
穿梭车1	20	13	17	6	11	12	3
穿梭车2	4	17	14	15	8	9	2
穿梭车3	18	5	16	7	1	10	0

同任务数量下基于规则的混合遗传算法相对于规则调度的优化效果要好,且随着任务数量的增加,这种差别更加明显。由图10可知基于规则的遗传算法能在较少的迭代次数后得到最佳方案。

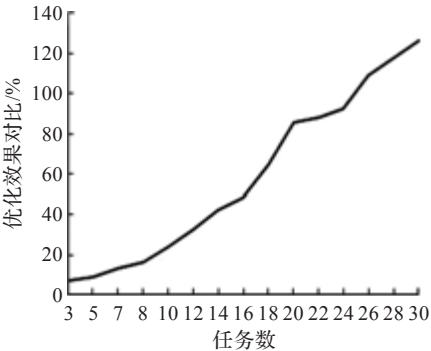


图9 算法优化效果对比图

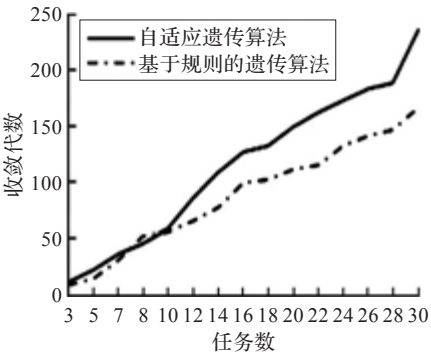


图10 算法收敛代数对比图

规则调度算法具有复杂度低的特点,短时间内即可得到调度方案解。但是由于其调度规则的局限性,调度

表3 $n=20$ 时任务集合

任务编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
起始道口	1	3	5	7	9	11	13	15	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	12	9
终止道口	2	4	6	8	10	12	14	16	2	3	4	5	6	7	8	1	13	8	7	12

表5 算法性能对比表

性能指标	算法	任务数					
		3	12	16	20	24	30
时间(s)/收敛代数(代)	规则调度	0.17	0.19	0.16	0.20	0.23	0.19
	自适应遗传算法	12	57	127	150	173	236
	基于规则的遗传算法	9	49	99	112	132	166
目标函数最大值	规则调度	0.812 5	0.622 0	0.637 5	0.444 0	0.474 0	0.370 0
	自适应遗传算法	0.867 5	0.824 0	0.947 5	0.824 0	0.912 0	0.836 7
	基于规则的遗传算法	0.860 0	0.866 0	0.980 0	0.858 0	0.870 0	0.831 7
收敛到最大值次数	规则调度	10	10	10	10	10	10
	自适应遗传算法	10	8	7	8	6	7
	基于规则的遗传算法	10	7	5	5	3	4

算法最终得到的解决方案随着仓储规模的提升,其合理性也随之降低。

而自适应遗传算法相比传统遗传算法,其交叉变异算子采用的自适应概率计算公式使算法不易陷入局部最优解。然而,由于算法自身的局限性,算法收敛代数受初始种群的质量影响较大,不易收敛到全局最优解。基于规则的混合遗传算法将规则调度和GA算法结合起来,算法通过优化初始种群的质量,促使算法尽快收敛到一个比较好的计算结果。

6 结束语

随着工业4.0的推行,智能物流中的概念越发普及。作为物流中最重要的一环,智能仓储中的环形轨道穿梭车调度问题引起更多人的注意。在实际工况中,由于调度问题的即时性,遗传算法计算时间的高成本使其不适应工程问题的求解。在实际工程应用中,多采用规则调度,然而其调度结果的合理性有待提高。本文中以规则调度为主,在自适应遗传算法的基础上,提出混合算法。在满足实际工程对算法运行效率要求的同时尽可能优化调度结果。

参考文献:

- [1] 聂峰,程珩.多功能穿梭车优化调度研究[J].物流技术,2008,27(10):251-253.
- [2] 晏鹏宇,杨乃定,车阿大.自动化制造单元最小完工时间调度问题的混合启发式算法[J].计算机集成制造系统,2010,16(4):847-854.
- [3] 陈华.基于分区法的2-RGV调度问题的模型和算法[J].工业工程与管理,2014,19(6):70-77.
- [4] 顾红,邹平,徐伟华.环形穿梭车优化调度问题的自学习算法[J].系统工程理论与实践,2013,33(12):3223-3230.
- [5] 徐伟华,熊坚,王文才,等.双工位穿梭车系统能力优化[J].烟草科技,2013(9).
- [6] 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.
- [7] 郑雯,周炳海.基于事件驱动的高架提升传输小车派工与路径调度算法[J].计算机集成制造系统,2013,19(1):75-82.
- [8] 林佳良.基于现实的自动化立体仓库轨道式循环搬运系统构建与调度优化[D].北京:北京物资学院,2014.
- [9] Koff G A. Automatic guided vehicle systems: applications, control, planing[J]. Material Flow, 1987, 14(4): 3-16.
- [10] 邹敢.柔性搬运系统的智能作业调度方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [11] Kim ByungIn, Oh Seungjin, Shin Jaejoon, et al. Effectiveness of vehicle reassignment in a large-scale overhead hoist transport system[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(4): 789-802.
- [12] Wu L H, Mok P Y, Zhang J. An adaptive multi-parameter based dispatching strategy for single-loop interbay material handling systems[J]. Computers in Industry, 2011, 62(2): 175-186.
- [13] 龙锋.基于自适应遗传算法的W公司仓库货位分配与优化研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [14] 王军强,郭银洲,崔福东,等.基于多样性增强的自适应遗传算法的开放式车间调度优化[J].计算机集成制造系统,2014,20(10):2479-2493.
- [15] 尹作海,邱洪泽,周万里.基于改进变异算子的遗传算法求解柔性作业车间调度[J].计算机系统应用,2009,18(10):156-159.
- [16] 田景文,孔垂超,高美娟.一种车辆路径规划的改进混合算法[J].计算机工程与应用,2014,50(14):58-63.
- [10] Yang Z, Zhou Z, Liu Y. From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response[J]. Acm Computing Surveys, 2013, 46(2).
- [11] Wang X, Gao L, Mao S, et al. DeepFi: Deep learning for indoor fingerprinting using channel state information[C]// Wireless Communications and NETWORKING Conference. IEEE, 2015.
- [12] Xiao J, Wu K, Yi Y, et al. FIFS: Fine-grained indoor fingerprinting system[C]// 2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2012: 1-7.
- [13] Wu K, Xiao J, Yi Y, et al. FILA: Fine-grained indoor localization[J]. Proceedings-IEEE INFOCOM, 2012, 131(5): 2210-2218.
- [14] 丁雪芳,王琪.基于改进支持向量机的Wi-Fi室内定位算法[J].计算机工程与应用,2014,50(6):90-93.
- [15] Li Y, Seshadri N, Ariyavisitakul S. Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 17(3): 461-471.
- [16] Halperin D C. Simplifying the configuration of 802.11 wireless networks with effective SNR[J]. Hughes Mansel & Websters Benign Disorders & Diseases of the Breast, 2013, 36(5).

(上接241页)