

文章编号: 1006-5911(2011)02-0321-08

基于改进量子微粒群的轨道导引小车系统建模与优化

罗 键, 吴长庆, 李 波, 尹华一, 张 倩
(厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为提高自动小车存取系统中轨道导引小车系统的出入库作业效率, 提出了一种基于改进量子微粒群的优化方法。分析了轨道导引小车系统出入库作业任务队列特征, 建立了数学模型。在此基础上利用量子微粒群算法进行优化调度, 并在该算法中引入高斯变异算子, 克服了其容易陷入局部最优的缺点。通过仿真实验表明了方法的可行性和有效性。

关键词: 自动小车存取系统; 轨道导引小车系统; 任务队列; 量子微粒群算法; 数学模型

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Modeling and optimization of RGV system based on improved QPSO

L UO Jian, W U Chang-qing, L I Bo, Y I N Hua-yi, Z H A N G Q ian

(School of Information Science & Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: To improve the performance of Rail Guided Vehicles System (RGVS) in Automatic Vehicle Storage and Retrieval Systems (AVS/RS), an optimization method based on improved Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) was proposed. Firstly, sequencing characteristics of tasks in RGVS were analyzed, and a mathematical model was established. Then, a QPSO algorithm was proposed to solve the scheduling problem. Meanwhile, the Gaussian mutation operator was introduced into this algorithm to overcome its shortcoming of falling into local convergence. Finally, feasibility and effectiveness of the presented method was shown by experimental results.

Key words: automatic vehicle storage and retrieval systems; rail guided vehicles system; sequencing of tasks; quantum particle swarm optimization algorithm; mathematical models

1 问题的提出

自动小车存取系统(Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems, AVS/RS)是美国 Rensselaer Polytechnic Institute 的 Malmberg 教授及其课题组于 2003 年提出的一种新型的货物存取系统, 主要包括轨道导引小车系统(Rail-Guided Vehicles System, RGVS)、升降机系统和货架以及货物缓存区, 如图 1^[1]所示。其中轨道导引小车(Rail-Guided Vehicles, RGV)通过在自动化立体仓库货位间的轨道上作水平运动实现货物的出入库操作, 其垂直

运动依靠安置在仓库边缘的升降机系统来完成^[2]。AVS/RS 与传统的自动化立体仓库(Automated Storage and Retrieval system, AS/RS)的主要区别在于存取工具不同。AVS/RS 采用 RGV 小车进行货物的存取, 在输送的过程中需要经过升降机的运载, RGV 小车可以服务任意货位, 不会因为某辆 RGV 小车发生故障而影响整个仓库的出入库操作, 另外用户还可以根据业务量调整 RGV 小车的数量; 而传统的 AS/RS 则采用堆垛机进行货物的存取, 只能服务于单一巷道的货位。

AS/RS 中的出入库任务优化调度一直是研究

收稿日期: 2009-10-14; 修订日期: 2010-06-02。Received 14 Oct. 2009; accepted 02 June 2010.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60975052); 厦门大学国家“211 三期工程建设”资助项目(0630 E62000)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 60975052), and the National 3rd Phase of “211 Project”, China (No. 0630 E62000).

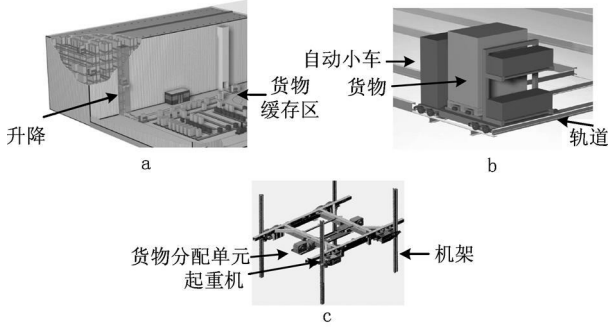


图1 自动小车存取系统的立体简图

的热点。魏飞等^[3]针对堆垛机的复合出入库作业问题,使用动态规划法建立堆垛机最优路径的逆序递归数学模型,求解复合作业的最佳配对组合,使堆垛机复合作业的路径优化方法更加简单;周军等^[4]针对多台堆垛机作业不均衡问题,提出了以各堆垛机作业时间总和最小与作业时间均衡为目标的出入库作业优化模型;Han等^[5]指出AS/RS中一系列出入库任务的优化求解问题为NP问题,并研究了求解的方法;田国会等^[6]针对自动化主体仓库的实际运行过程,提出了影响仓库运行效益的若干优化调度问题,分别采用Petri网、时态逻辑、模拟退火、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、神经网络等方法并结合计算机仿真技术进行了研究。由于出入库优化问题往往无法精确地建模求解,上述的若干优化方法也有一定的局限性。鉴于智能算法在优化问题的求解方面显示出的优越性,将其引入,为自动化立体仓库中货物存取过程优化控制方法的求解提供了新的途径;另一方面,智能算法的缺点在于收敛速度较慢以及求解时容易陷入局部最优,因此解决算法获得最终较优解的时间效率问题成为未来研究的重点,这也是智能算法在实际生产过程中的瓶颈问题。

AVS/RS中最主要的控制系统是RGVS,除了垂直运动不同外,RGVS与通常讨论的自动导引小车系统(Automated Guided Vehicles System, AGVS)相似。Malmberg^[7]首先使用状态方程模型研究了RGVS利用交叉存取对AVS/RS性能的影响;Fukunari^[8]则以讨论交叉存取为主干,建立了RGVS在交叉存取模式下的循环时间模型,在此基础上使用排队论的方法进行了理论分析和实验研究。然而,因为AVS/RS中的RGVS同时承担了AS/RS中的AGV和堆垛机的输送功能和存取功能,所以出入库过程区别于传统的AS/RS出入库作业过程,造成了RGVS任务队列特征的特殊性。

体现在AS/RS产生的堆垛机任务队列形成的是一种多队一多服务台的并列系统,服务于各自巷道;而在AVS/RS中产生的RGVS任务队列的特征则类似于单队一多服务台的系统,各辆RGVS所分配的存取任务形成了一个缓冲队列,如图2所示。因此,本文首先分析了AVS/RS中货物的存取方式,并建立了RGVS任务队列的数学模型,在此基础上探讨RGVS出入库问题的智能优化求解方法,以期提高系统的运行效率。

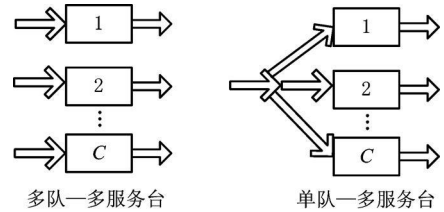


图2 AS/RS与AVS/RS的队列

2 问题描述与建模

2.1 轨道导引小车系统出入库作业方式

RGV小车在出入库过程中完成货物的存取任务时,货物存取的方式通常有单一作业方式和复合作业方式两种基本形式。单一作业方式指RGV小车完成单一的入库或出库任务。对于单一作业方式,若已分配任务,则确定了起始点与目标点,RGV小车所需花费的时间就是一个定值,因此RGV小车在单一作业方式下所花费的时间与任务执行的顺序无关。而复合作业方式是在一批出入库任务指令中,执行完入库指令后马上执行出库指令,出库任务和入库任务交叉进行。如图3所示,OA表示RGV小车的入库过程,在完成了入库存储任务后,RGV小车停留在任务完成点。当接到出库任务时,RGV小车空跑移动一段距离AB到达货位点B,取出B点的货物返回至O点,即BO为RGV小车的出库过程。因此在一次复合作业下的出入库任务中,总时间分为入库时间、空载时间和出库时间。对于成批产生的任务,它是从某一起始点出发,循环交叉执行出入库任务,直至任务完成。因为成批待完成的出入库任务货位是随机的,RGV小车可以按不同的顺序经过待完成任务货位,所以所花费时间是不同的,存在着待完成任务货位的最优访问顺序。若出库和入库货位确定,则入库时间和出库时间是个定值,要提高RGV小车复合作业方式的效率,就应该减少RGV小车的空载时间。

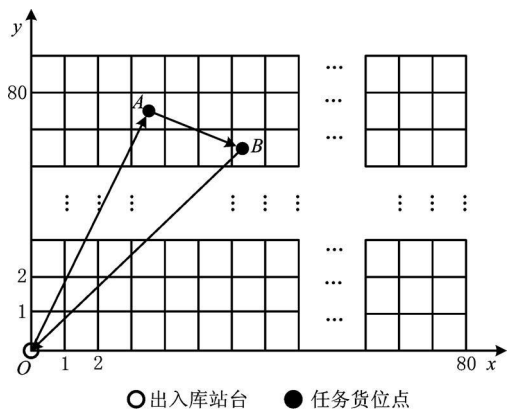


图3 XY平面RGV小车一次复合作业循环

2.2 问题的描述

为讨论方便,不失一般性,假设如下:

- (1) RGV 小车运行轨道单一,且可双向运行。
- (2) 不考虑 RGV 运行过程中的延迟、故障等干扰因素,由于货物存取时间固定,本文不再纳入作业时间的分析中。
- (3) RGV 小车沿 x, y, z 轴做匀速运动,分别为 V_x, V_y, V_z 。
- (4) 出入库站台在同一端,其初始位置设为 $(0,0)$ 。

单一 RGV 小车复合作业的数学模型可以描述如下:

若某一辆 RGV 小车共接收到 N 条出入库任务,入库作业数为 m ,出库作业数为 n ,即 $m + n = N$;每一个任务的起始地址与目的地址都已确定, RGV 小车采用复合作业方式,入库、出库任务交叉进行。则 RGV 小车优化控制的目标函数就是完成这批任务所用的总时间 T_k 最小,即

$$T_k = \min \left\{ \sum_{i=0}^k t_i \right\}, \quad (1)$$

$$t_i = t_{OA_i} + t_{A_i B_i} + t_{B_i O} + t_z, \quad (2)$$

$$t_{OA} = \max \{ |X_A - 0| / V_x, |Y_A - 0| / V_y \}, \quad (3)$$

$$t_{AB} = \max \{ |X_A - X_B| / V_x, |Y_A - Y_B| / V_y \}, \quad (4)$$

$$t_{BO} = \max \{ |X_B - 0| / V_x, |Y_B - 0| / V_y \}. \quad (5)$$

式(1)是 RGV 小车的目标函数, T_k 为完成这批任务所用的总时间, t_i 为第 i 次复合作业 RGV 小车的运行时间;式(2)为每次复合作业的时间,包括入库过程的运行时间 t_{OA_i} 、空跑移位的运行时间 $t_{A_i B_i}$ 和升降机接送的运行时间 t_z ,以及出库过程的运行时间 $t_{B_i O}$, $t_z = qt_z$, t_z 为经过每层货架的时间, q 为层数; $k = \max \{ m, n \}$ 表示该批次作业采用复合作业方式时,复

合作业循环的总次数。 X_{A_i} 为第 i 次复合作业入库货位点的横坐标, X_{B_i} 为第 i 次复合作业出库货位点的横坐标, Y_{A_i} 为第 i 次复合作业入库货位点的纵坐标, Y_{B_i} 为第 i 次复合作业出库货位点的纵坐标。

单一 RGV 小车多次复合作业的调度结构示意图如图 4 所示,其中: A_i 表示第 i 阶段入库, B_i 表示第 i 阶段出库, D_i 表示第 i 阶段位移。在出库数量大于入库数量的情况下,可以将调度过程分为复合作业和单一作业两个阶段。从图 4 中可得, RGV 小车多次复合作业的调度问题是一种并联结构,由若干个子环构成,每个子环包含 3 个节点(入库、库内移位、出库)或 2 个节点(入库、出库),所有子环都有一个共同的节点(出入库站台); RGV 小车按循环(子环)完成出入库任务,某循环的作业点(待取出货位)可以转化成以后循环的作业点(待存入货位),因此具有动态的特点。

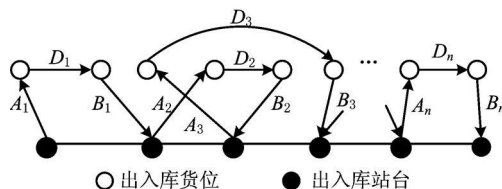


图4 RGV小车复合作业循环调度网络结构示意图

2.3 问题的转化

由于 RGV 小车每次复合作业时都必须返回入库站台或出库站台,而出入库站台的数量一般都是有限的, RGV 小车在多次复合作业的过程中必然会重复返回到同一个出入库站台。如果要将多次复合作业的出入库问题转化为便于求解的旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP),则必须对上述问题进行若干转化。TSP 问题要求每个路径只能访问一次,不能重复,为此本文通过添加了若干个虚拟的出入库站台作为虚拟的货位点,并修订了任意两个货位的运行时间,从而把多次复合作业出入库问题转化为 TSP 问题。若 RGV 小车重复回到出入库站台,此时添加一个虚拟出入库站台,虚拟出入库站台并不改变原来的实际路线。重新修正两个货位点间的运行时间,如表 1 所示。

表 1 任意两个货位点间的运行时间

货位	入库货位 j	出库货位 j	出入站台 j
入库货位 i	$t_{A_1 O} + t_{OA_2}$	t_{AB}	t_{AO}
出库货位 i	$t_{BO} + t_{OA}$	$t_{B_1 O} + t_{OB_2}$	t_{BO}
出入站台 i	t_{OA}	t_{OB}	

表中 $t_{A_i,0} + t_{0A_i}$ 表示从入库货位 i 到出入库站台的运行时间与从出入库站台到货位 j 间的运行时间之和; t_{AB} 表示从入库货位 i 点到出库货位点的运行时间; $t_{AO} = t_{OA}$ 表示从入库货位 i 点到出入库站台 j 的运行时间; $t_{BO} + t_{OB}$ 表示从出库货位 i 到出入库站台的运行时间与从出入库站台到入库货位点 j 的运行时间之和; $t_{B_i,0} + t_{0B_i}$ 表示从出库货位 i 到出入库站台的运行时间与从出入库站台到出库货位 j 的运行时间之和; $t_{OB} = t_{BO}$ 表示从出库货位 i 点到出入库站台 j 的运行时间。

通过修正任意两个货位点间的运行时间, 复合作业方式下的问题可转化为以时间为代价的 TSP 问题, 问题描述如下:

设有 m 个入库作业和 n 个出库作业待访问的 $m+n$ 个货位点, 从出入库站台开始, 依次访问这 $m+n$ 个货位点一次且仅一次后返回出入库站台, 寻找一条运行时间最小的巡回路径 I 。则其目标函数转化为

$$\min T(I) = \sum_{j=1}^{m+n-1} T_{i_j, i_{j+1}} + T_{0, i_1} + T_{i_{m+n-1}, 0} \quad (6)$$

式中: $I = (i_1, i_2, \dots, i_{m+n})$ 表示转化后任意一条循环回路, $\sum_{j=1}^{m+n-1} T_{i_j, i_{j+1}}$ 表示访问从货位 i_1 一次到货位 i_{m+n-1} 的时间; T_{0, i_1} 表示从入库台开始到货位点 i_1 的时间, $T_{i_{m+n-1}, 0}$ 表示从货位点 i_{m+n-1} 到出库台的时间。

3 基于量子微粒群的轨道导引小车系统出入库优化控制

RGVS 复合作业问题可转化为以时间为代价的 TSP 问题, 但是 TSP 问题是一个典型的组合优化问题, 并且是一个 NP 完全问题, 解的搜索空间随着待访问的 $m+n$ 个货位点的增加而增大, 可能的路径数目为 $(m+n-1)!/2$ 。在如此庞大的搜索空间中寻找最优解将非常困难, 目前通常利用一些智能算法来求解^[9-10]。与 GA、模拟退火算法等智能算法相比, 微粒群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法不但具有 GA 的全局寻优能力, 而且可通过调整参数改进算法的局部寻优能力。另一方面, 由于没有个体杂交等运算操作, PSO 的参数调整变得简单、易行, 更适合于计算机编程处理。但是在基本的 PSO 中粒子的收敛是以轨道形式实现的, 且由于粒子的速度总是有限的, 在搜索过程中粒子

的搜索空间不能覆盖整个可行空间, 基本的 PSO 算法不能保证以概率 1 搜索到全局最优解。目前应用 PSO 算法主要面临两个问题^[10]: ①速度向量难以在自然数编码的解空间内表达; ②迭代中易陷入局部最优。

因此本文利用改进的量子微粒群优化 (Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO) 算法对 RGVS 出入库作业所形成的 TSP 路径问题进行优化, 通过改进标准的 PSO 算法的粒子速度和位置更新公式, 并引入高斯变异算子克服了该算法容易陷入局部最优的缺点。

3.1 速度和位置的更新

在标准的微粒群算法中, 速度和位置更新公式如下^[11]:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + r_1 c_1 (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + r_2 c_2 (p_{gj}(t) - x_{ij}(t)), \quad (7)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (8)$$

式中: t 为迭代次数; ω 为惯性权值; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

QPSO 将粒子定义在由概率密度函数决定的一个量子空间内, 粒子的位置由波函数 $\Psi(x, t)$ 决定:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(X, t)|^2 dx dy dz = \int_{-\infty}^{\infty} Q dx dy dz = 1 \quad (9)$$

式中: Q 为粒子在时刻 T 出现在 (x, y, z) 位置的概率, 通过 Monte Carlo 方法的转换, 将粒子状态转换为传统状态, 并经过演变最终得到粒子位置的迭代公式。在 QPSO 算法中, 微粒的速度和位置信息都归结于一个参数。如下所示^[12]:

$$p_d = \frac{r_1 p_{id} + r_2 p_{gd}}{r_1 + r_2}, \quad (10)$$

$$mBest = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i, \quad (11)$$

$$X(t+1) = p_d \pm \beta mBest - X(t) \ln(1/u) \quad (12)$$

式中: p_d 是微粒在第 D 维的值; p_i 为第 i 个微粒所经历的最好位置, 称为个体历史最好位置; p_g 为所有微粒经历过的位置中的最好位置, 称为全局历史最好位置; $mBest$ 为中值最优位置; M 为群体中所含粒子数; r_1, r_2, u 是 $(0, 1)$ 之间的随机数; β 为系数创造力, 调节它的值能控制算法的收敛速度, 通常情况下, β 从 1.0 线性减小到 0.5 时, 算法可以达到比较好的效果。在迭代过程中, “ \pm ” 是由 $(0, 1)$ 之间产生的随机数决定的, 当产生的随机数大于 0.5 时取 “+”, 否则取 “-”。因为在 QPSO 算法中, 粒子的

收敛速度和位置信息都归结于一个参数 β , 所以能够更快地在全局范围内找到最优解。

3.2 编码

算法的个体编码采用巡回路径所经过的各个库位的库位编号顺序排列来编码。例如, 设该次复合作业中待访问的 6 个货位点为 (4, 6), (4, 11), (9, 12), (11, 13), (15, 24), (7, 26)。将上述六个点依次分别以 1, 2, 3, 4, 5, 6 代表, 粒子的位置 x 用一个 D 维向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示, n 为自动小车待访问的货位点数。则 6 个货位点的一种排列为一种复合作业的一种方案, 编码串 (1, 5, 4, 6, 2, 3) 表示按照先访问 1 号货位点, 再访问 5 号货位点, …… , 最后访问 3 号货位点的方式完成该复合作业。

3.3 改进的量子微粒群优化算法

虽然 QPSO 算法的全局搜索性能能力远远优于一般的 PSO 算法, 但是与标准的 PSO 算法一样, QPSO 算法同样存在早熟的趋势。这是因为每个粒子都是通过学习自身的当前局部最优值和全局最优值进行下一步搜索, 并不管自身的信息是否具有局部最优的倾向, 因此本文通过引入高斯变异算子改进算法的局部收敛性。

高斯变异 (Gaussian mutation)^[13 14] 来源于高斯分布 (正态分布), 所谓高斯变异操作是指进行变异操作时, 用符合均值为 u 、方差为 σ^2 的正态分布的一个随机数来替代原有的个体值。由正态分布的特性可知, 高斯变异重点搜索原个体附近的某个局部区域, 由于有较好的局部搜索能力, 对于大量局部极小点的优化问题, 能够使算法高效高精度地找到全局极小点, 并且可以提高算法的鲁棒性。在 QPSO 算法中, 因为全局最好粒子 $gBest$ 吸引种群中的所有粒子向其飞行, 同时也吸引着中间变量 $mBest$ 向其飞行。 $mBest$ 表示每个粒子的最好位置之间具有一定的相关性。因此, 通过对某个粒子进行变异来引导种群离开当前的位置, 使这个变异过的个体有可能成为新的全局最好位置或平均最好位置。基于这个目标, 本文提出了一个以概率 P_m 来变异 $mBest$ 的变异算子, 通过添加一个高斯分布的随机值对 $mBest$ 每个向量元素独立地执行变异操作, 变异式为:

$$mut(x) = x \times (1 + Gau(\sigma))。 \quad (13)$$

式中: $mut(x)$ 是 x 变异后的值; $Gau(\sigma)$ 是一个概率分布的随机变量。具体实现高斯变异时, 符合正态分布的随机数 Q 可由一些符合 $[0, 1]$ 均匀分布的随

机数 $r_i (i = 1, 2, \dots, 12)$ 来产生, 则符合 $N(\mu, \sigma^2)$ 的一个随机数便可求得 $Q = \mu + \sigma(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6)$ 。在进行由个体 x 向新个体 $mut(x)$ 的高斯变异操作时, 若变异点 x 处的基因值取值范围为 $[a_k, b_k]$, 并假设 $\mu = \frac{a_k + b_k}{2}$, $\sigma = \frac{b_k - a_k}{6}$, 则 $mut(x) = \frac{a_k + b_k}{2} + \frac{b_k - a_k}{6}(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6)$ 。因为式 (13) 是在个体 x 的基础上增加了高斯分布型随机扰动项 $x \cdot (Gau(\sigma))$, 充分利用当前种群的信息扰动, 所以能使微粒中值最优位置的局部极值点的束缚收敛于全局极值点, 同时也提高了收敛速度。

改进的 QPSO 算法描述如下:

步骤 1 初始化 D 维搜索空间粒子的 p_i 和 p_g , 在解空间随机设置各粒子的解序列 $X(i)$, 群体大小 M 。

步骤 2 计算所有粒子的适应值, 判断是否更新 p_i 和 p_g 。如果 $f(x_i) < f(p_i)$, 则 $p_i = x_i$, $p_g = \min(p_i)$, 求出各解序列的路径长度。

步骤 3 计算出所有路径长度的中值最优值 $mBest$ 并对 $mBest$ 进行变异。 $p = (r_1 p_{id} + r_2 p_{gd}) / (r_1 + r_2)$, 如果 $rand(0, 1) > 0.5$, 则 $x_{id} = p - \beta |mBest - x_{id}| \ln(1/u)$, 否则 $x_{id} = p + \beta |mBest - x_{id}| \ln(1/u)$ 。

步骤 4 根据群的进化方程式更新粒子的速度和位置。

步骤 5 如果未达到算法最大迭代次数, 则转步骤 2; 否则, 终止迭代, 输出结果。

4 实验及结果分析

4.1 实验参数环境

以文献 [15] 中某公司的自动化立体仓库为例, 货架长 80 m, 高 20 m; 单元货格高度 $h = 1$ m, 宽度 $w = 1$ m; 有 6 排货架, 每排 20 层, 80 列, 共 9 600 个货位。自动小车水平运行平均速度 $V_x = 2$ m/s, 垂直升降的平均速度 $V_y = 0.5$ m/s。为了验证改进的 QPSO 算法求解该问题的有效性, 随机生成 8, 15, 30 个货位点的算例, 分别用基本 PSO 算法、改进 GA 和改进的 QPSO 算法对三组测试算例进行实验比较。其算法参数如下: 设初始群体种群数为 30, 最大迭代数为 200, 三种算法采用的参数分别为:

基本 PSO: $\omega = 0.7$, $c_1 = c_2 = 1.5$;

改进的 GA: 变异概率 0.05, 交叉概率 0.6;

改进的 QPSO: r_1, r_2, u 为 (0, 1) 的随机数, 系数创造力 β 从 [1, 0.5] 线性减小。

三个测试算例分别为: 8 个作业任务的货位点 $D = [(0, 0); (3, 19); (13, 11); (42, 17); (47, 8); (48, 12); (50, 5); (62, 18)]$; 15 个作业任务的货位点 $D = [(0, 0); (3, 19); (13, 11); (42, 17); (47, 8); (48, 12); (50, 5); (62, 18); (25, 33); (10, 25); (23, 30); (14, 28); (6, 16); (8, 20); (25, 19)]$; 30 个作业任务的货位点 $D = [(0, 0); (3, 19); (13, 11); (42, 17); (47, 8); (48, 12); (50, 5); (62, 18); (25, 33); (10, 25); (23, 30); (14, 28); (6, 16); (8, 20); (25, 19); (8, 24); (10, 30); (21, 40); (16, 32); (17, 7); (19, 5); (22, 4); (29, 15); (17, 36); (34, 9); (17, 16); (24, 30); (23, 10); (30, 31); (29, 17)]$ 。

下面以随机生成的 8 个作业任务的货位点为例进行说明。RGV 小车从上位管理机接受了一张作业单, 任务序号为 1~7, 货位地址 $(X_k, Y_k) (k=1, 2, \dots, 7)$ 按顺序为 $(0, 0), (3, 19), (13, 11), (42, 17), (47, 8), (48, 12), (50, 2), (62, 18)$ 。其中 1, 4, 5, 7 为入库任务, 2, 3, 6 为出库任务。按照上文的转化方法, 得到 8 个货位之间的运行时间, 如表 2 所示。

表 2 8 个货位点的运行时间

货位	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-	38.0	22.0	34.0	23.5	24.0	25.0	36.0
1	38.0	-	16.0	18.5	61.5	62.0	23.5	74.0
2	22.0	60.0	-	56.0	45.5	46.0	47.0	58.0
3	34.0	72.0	56.0	-	57.5	58.0	59.0	70.0
4	23.5	61.5	17.0	18.0	-	47.5	12.0	59.5
5	24.0	62.0	17.5	10.0	47.5	-	20.0	60.0
6	25.0	63.0	47.0	59.0	48.5	49.0	-	61.0
7	36.0	74.0	24.5	10.0	59.5	60.0	32.0	-

4.2 实验结果分析

在 Matlab 2007 上分别运行三种算法各自 10 次, 以平均值作为实验结果, 如表 3 所示。对于 8 个货位点的作业任务, 三种算法都能寻找到最优解, RGV 小车访问的货位路径相同, 8 个货位点之间进行复合作业的顺序为 (1, 2, 5, 4, 6, 7, 3), 即 RGV 小车按照 $(0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0 \rightarrow 5 \rightarrow 0 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 0 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 0)$ 完成复合作业, 如图 5 所示, 其中 (1, 2), (4, 6), (7, 3) 为复合作业运行序对。图 6 所示为 8 个货位的 RGV 小车运行时间的最优值。所对应的 RGV 小

车运行时间为 264.5 s, 但是改进后的 QPSO 算法的收敛速度是最快的。

表 3 8 个货位的实验结果

算法	最优解	平均收敛迭代次数
标准 PSO	264.5	26
改进的 GA	264.5	50
改进的 QPSO	264.5	11

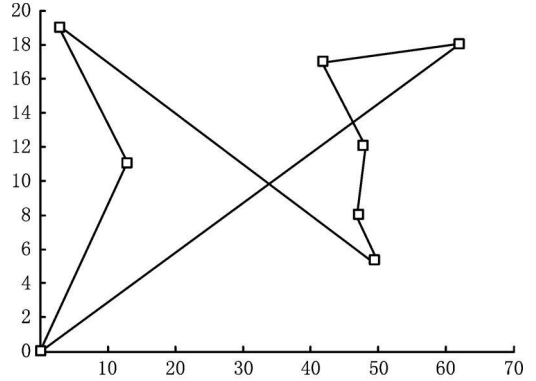


图 5 8 个货位的 RGV 小车复合作业最短路径

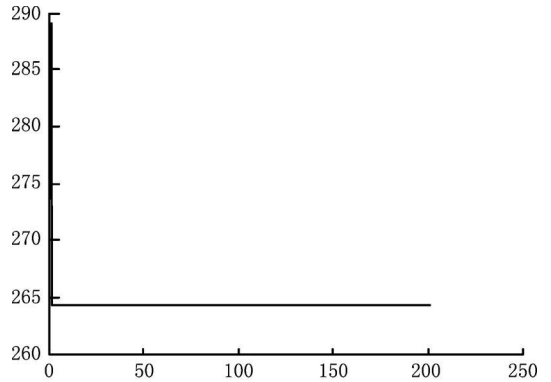


图 6 8 个货位的 RGV 小车运行时间最优值

15 个和 30 个作业任务的最短路线和运行时间最优值分别如图 7~ 图 10 所示。

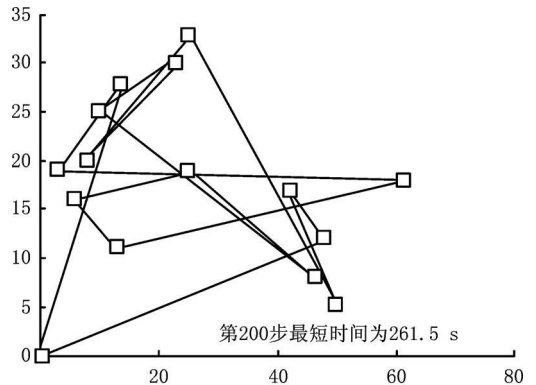


图 7 15 个货位的 RGV 小车复合作业最短路径

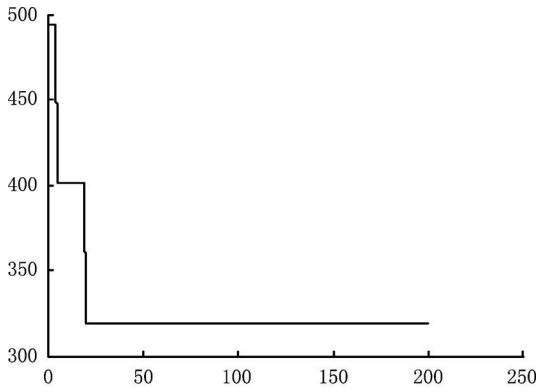


图8 15个货位的RGV小车运行时间最优值

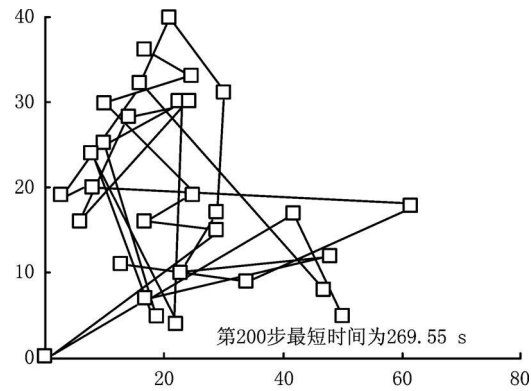


图9 30个货位的RGV小车复合作业最短路径

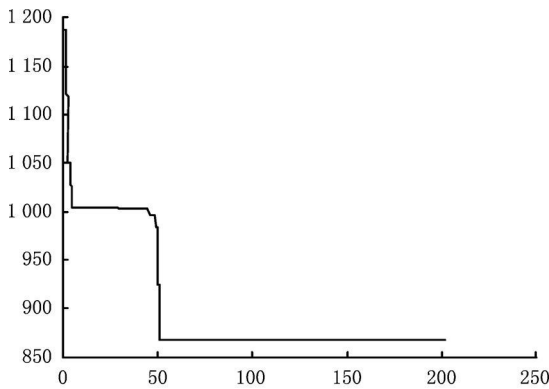


图10 30个货位的RGV小车运行时间最优值

比较这三种算法 10 次运行的结果, 从表 4 和表 5 可以得出, 改进的 QPSO 算法在最优解和平均收敛迭代次数两个指标上均优于其他两种算法。主要因为在 QPSO 算法中, 粒子能够以某一确定的概率出现在整个可行的搜索空间中的任意一个位置, 甚至是一个远离 p_d 点的位置, 而这样的位置可能比当前其他货位中的全局最优值具有更好的适应值。改进的 QPSO 算法的收敛速度更快, 全局收敛能力更强, 由此表明了该算法对轨道导引小车系统中小规模任务队列优化求解的可行性和有效性。

表 4 15 个货位的实验结果

算法	最优解	平均收敛迭代次数
标准 PSO	346.3	76
改进的 GA	352.1	100
改进的 QPSO	261.5	25

表 5 30 个货位的实验结果

算法	最优解	平均收敛迭代次数
标准 PSO	965.2	102
改进的 GA	1053.1	134
改进的 QPSO	869.5	51

5 结束语

本文分析了 RGVs 出入库作业过程, 建立了 RGVs 出入库复合作业的数学模型, 并通过定义任意两点货位间的运行时间, 把它转化为便于求解的 TSP 问题。在此基础上提出了一种改进的 QPSO 算法, 在寻找全局最优位置的同时, 引入高斯变异算子克服了该算法容易陷入局部最优的缺点。最后通过三组测试算例的仿真实验, 验证了其可行性和有效性。下一步工作主要研究如何提高 AVS/RS 的整体性能。

参考文献:

- [1] MALMBORG C J. Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(8): 1807-1822.
- [2] ROODBERGEN K J, VIS I F A. A survey of literature on automated storage and retrieval systems[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(2): 343-362.
- [3] WEI Fei, ZHOU Yanfei. Optimize combined in/out tasks of AS/RS[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2007(7): 70-72 (in Chinese). [魏飞, 周燕飞. 自动化仓库中复合出入库作业的优化[J]. 起重运输机械, 2007(7): 70-72.]
- [4] ZHOU Jun, ZHAO Changyou, LIU Zhanqiang, et al. Operation optimization of storage and retrieval for stackers in AS/RS of raw tobacco material[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(4): 772-776 (in Chinese). [周军, 赵长友, 刘战强, 等. 烟丝原料立体仓库堆垛机出入库作业优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4): 772-776.]
- [5] HAN M H, MCGINNIS L F, SHIEH J S, et al. On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system[J]. IIE Transactions, 1987, 19(1): 56-66.
- [6] TIAN Guohui, LIU Changyou, LIN Jiaheng, et al. Research and development on optimization and scheduling problems in an automated warehouse[J]. Journal of Shandong University of

- Technology, 2001, 31(1): 12-17 (in Chinese). [田国会, 刘长有, 林家恒, 等. 自动化立体仓库若干优化调度问题及其研究进展[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(1): 12-17.]
- [7] MALMBORG C J. Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(5): 1057-1069.
- [8] FUKUNARI M, MALMBORG C J. A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 152-167.
- [9] GAO Shang, HAN Bin, WU Xiaojun, et al. Solving traveling salesman problem by hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Control & Decision, 2004, 19(11): 1286-1289 (in Chinese). [高尚, 韩斌, 吴小俊, 等. 求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1286-1289.]
- [10] ZHANG Xu mei, QIU Hanguang. Improved particle swarm optimization based on k center and its application in travelling salesman problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(1): 99-104 (in Chinese). [张旭梅, 邱晗光. 基于 k 中心点法的改进粒子群算法在旅行商问题中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(1): 99-104.]
- [11] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, N. J., USA: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [12] SUN Jun, XU Wenbo, FENG Bin. A global search strategy of quantum behaved particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004: 111-116.
- [13] SHI Jinfeng, FENG Bin, SUN Jun. Solving Job Shop scheduling problem with QPSO algorithm with mutation operator [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(8): 49-52 (in Chinese). [石锦风, 冯斌, 孙俊. 用带变异因子的 QPSO 算法解决 Job Shop 调度问题[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(8): 49-52.]
- [14] GÜNTER R. Local convergence rates of simple evolutionary algorithm with Cauchy mutations[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(4): 249-258.
- [15] WEI Fei. Research on Petri net modeling and output/input optimization management in AS/RS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007 (in Chinese). [魏飞. 自动化仓库系统 Petri 网建模及出入库优化管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.]

作者简介:

罗 键(1954-), 男, 福建连城人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 计算机集成制造系统和物流自动化系统, E-mail: jianluo@xmu.edu.cn;
 吴长庆(1982-), 男, 福建晋江人, 博士研究生, 研究方向: 物流自动化系统;
 李 波(1981-), 男, 辽宁铁岭人, 博士研究生, 研究方向: 物流自动化系统;
 尹华一(1980-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 研究方向: 物流自动化系统;
 张 倩(1987-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向: 模式识别、智能算法。