

计算机应用研究 优先出版

原创性 时效性 就是科研成果的生命力
《计算机应用研究》编辑部致力于高效的编排
为的就是将您的成果以最快的速度
呈现于世

* 数字优先出版可将您的文章提前 8~10 个月发布于中国知网和万方数据等在线平台

含有 AGV 的柔性车间调度优化研究

作者	徐云琴, 叶春明, 曹磊
机构	上海理工大学
基金项目	国家自然科学基金资助项目 (71271138); 上海理工大学科技发展项目 (16KJFZ028); 上海市高原学科项目 (GYXK1201)
预排期卷	《计算机应用研究》 2018 年第 35 卷第 11 期
摘要	实际车间生产中, 为了实现自动化生产越来越多企业投资 AGV (automated guided vehicle) 来搬运工件。为了研究 AGV 最优调度方案和最佳 AGV 数量, 建立使用 AGV 搬运的柔性车间调度模型。针对该模型的特点, 提出基于搬运工序、机床和 AGV 分配的粒子编码方式, 并结合遗传算法的思想采用新的粒子群算法更新位置方式。通过数值算例验证了改进粒子群算法的有效性和可行性, 并发现 AGV 符合边际效用递减规律, 即随着 AGV 数量的增加, 总加工时间减少, 但每增加一台 AGV 缩短的时间变少。
关键词	柔性车间调度; AGV; 粒子群算法; 边际效用
作者简介	徐云琴 (1994-), 女, 江西丰城人, 硕士研究生, 主要研究方向为生产调度、智能算法 (1071709383@qq.com); 叶春明 (1964-), 男, 安徽宣城人, 博导, 主要研究方向为生产调度、工业工程等; 曹磊 (1989-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为组合优化、智能算法。
中图分类号	TP181
访问地址	http://www.arocmag.com/article/02-2018-11-012.html
发布日期	2017 年 11 月 10 日
引用格式	徐云琴, 叶春明, 曹磊. 含有 AGV 的柔性车间调度优化研究[J/OL]. 2018, 35(11). [2017-11-10]. http://www.arocmag.com/article/02-2018-11-012.html .

含有 AGV 的柔性车间调度优化研究 *

徐云琴, 叶春明, 曹 磊

(上海理工大学, 管理学院, 上海 200093)

摘 要: 实际车间生产中, 为了实现自动化生产越来越多企业投资 AGV (automated guided vehicle) 来搬运工件。为了研究 AGV 最优调度方案和最佳 AGV 数量, 建立使用 AGV 搬运的柔性车间调度模型。针对该模型的特点, 提出基于搬运工序、机床和 AGV 分配的粒子编码方式, 并结合遗传算法的思想采用新的粒子群算法更新位置方式。通过数值算例验证了改进粒子群算法的有效性和可行性, 并发现 AGV 符合边际效用递减规律, 即随着 AGV 数量的增加, 总加工时间减少, 但每增加一台 AGV 缩短的时间变少。

关键词: 柔性车间调度; AGV; 粒子群算法; 边际效用

中图分类号: TP181

Research on flexible Job-Shop scheduling problem with AGV constraints

Xu Yunqin, Ye Chunming, Cao Lei

(School of Business, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to realize automation production, more and more enterprises have invested in AGVs to pick workpieces. To obtain the optimal scheduling and the optimal number of AGVs, this paper introduces a model of flexible job shop scheduling with AGVs constraints. In light of the characteristics of the model, this paper raises a particle encoding method. The encoding method integrates with transport processes, selection of machine and selection of AGV. Besides, this paper put forward a new particle update method, which combines with the idea of genetic algorithm. The result of simulation indicates that the improved particle swarm optimization algorithm is feasible and effective. In the meantime, the result also demonstrates that AGVs conform to the law of diminishing marginal utility. In other words, as the number of AGVs increases, the total processing time decreases, but the shorten time of unit AGV becomes less.

Key Words: FJSP; AGV; PSO; marginal utility

0 引言

柔性生产较之传统“刚性化”单一品种生产线提高了设备利用率、减少设备投资、减少直接加工费用、提高生产应变能力, 因此成为制造业发展趋势。迄今为止, 国际上以柔性生产的产品占到全部产品的 75% 以上, 而且比率还在增加。实际柔性生产中的核心问题之一是柔性作业车间调度问题(flexible Job-Shop scheduling problem, FJSP), 这是个公认的 NP 难问题^[1]。这个问题自 1990 年 Bruker 和 Schlies^[2]提出, 得到国内外专家深入广泛的研究。比如 Pezzella 等人^[3]基于遗传算法来求解 FJSP, 并通过优化初始群来避免遗传算法容易陷入局部最优解。

AGV (automated guided vehicle) 是一种可以通过智能计算机控制系统进行控制^[4]的物料搬运移动式机器人。它在生产制造领域应用最广泛, 因此考虑 AGV 搬运约束的柔性车间调度有深入研究的价值。目前, 国内外对含有 AGV 的柔性车间调

度问题的研究主要集中在生产调度、机床分配、AGV 调度分配, AGV 路径选择四个方面, 通常文献是选择一个或两个方面进行优化求解^[5]。例如一些文献结合 AGV 的路径选择和调度问题进行研究: Nishi 等人^[6]用拉格朗日分解技术提供了路径问题的数学模型; Ghasemzadeh 等人^[7]基于网状拓扑提出了无冲突的调度和路径模型, 它可以在产生路径冲突时选择另一个最短路径。还有一些文献结合 AGV 调度分配以及生产调度问题进行研究: Maryam Mousavi 等人^[8]结合遗传算法和粒子群算法求解充电约束的 AGV 调度问题, 但作者假定 AGV 每次执行完一道搬运任务回 home 充电导致完工时间大大增长; 杨立熙等人^[9]在初始种群时, 一半随机生成, 一半使用较优解, 结果证明更容易得到考虑搬运时间的 FJSP 的较优调度方案, 但作者只是考虑了工序加工存在运输时间, 没有考虑运输工具 AGV 的调度; 龙传泽^[10]运用遗传算法求解含 AGV 搬运调度问题, 但只考虑了 2 台、3 台 AGV 的情况, 忽略深入研究最少 AGV 数量使完

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71271138); 上海理工大学科技发展项目 (16KJFZ028); 上海市高原学科项目 (GYXK1201)

作者简介: 徐云琴 (1994-), 女, 江西丰城人, 硕士研究生, 主要研究方向为生产调度、智能算法 (1071709383@qq.com); 叶春明 (1964-), 男, 安徽宣城人, 博导, 主要研究方向为生产调度、工业工程等; 曹磊 (1989-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为组合优化、智能算法。

工时间最短; Zheng 等人^[1]提出了一种基于禁忌搜索算法的混合整数线性最优化模型来解决加工机床和 AGV 的同时调度问题, 但作者也没有考虑到 AGV 数量对加工时间的影响。

笔者在查阅文献的过程发现: 含 AGV 的 FJSP 研究较少, 研究者往往将搬运模型求解后就结束了研究, 忽略分析 AGV 数量变化与完工时间变化的关系。粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 具有收敛速度快、参数少、易操作、易理解等优点, 是求解优化问题的重要方法^[12]。因此本文用 PSO 同时结合遗传算法中迭代的思想来研究含有 AGV 的柔性车间优化调度问题, 并深入研究 AGV 的边际效用。

1 含有 AGV 的 FJSP 描述与建模

1.1 问题描述

含有 AGV 的柔性车间调度问题考虑 n 种工件在 m 台设备上加工并由 AGV 负责工件在设备间的运输的过程, 且每台设备都由一个工人操作。每个零件都有 n_i 道不同的工序 $n_i < m$, 每个工序可在多台设备上加工。 r 个 AGV, 且 $r < m+2$ 。有如下假设:

- a) AGV 的搬运路线是固定的, AGV 搬运不延时, 不同 AGV 搬运互不干扰。
- b) AGV 工作内容是: 从上一道工序加工设备的缓存区立即搬运至下一道工序的缓存区。
- c) 零时刻, 所有设备和机器都可用
- d) 工件从加工设备的缓存区到开始加工的时间是瞬时完成, 消耗时间忽略不计
- e) 每台设备一次只能加工一个零件, 每个零件在设备上加工时不中断。
- f) 设备加工顺序约束, 机床按先到先加工 (FCFS) 规则。
- g) 不同工件先后无约束, 同种工件必须先完成上一道工序, 然后再进行下一道工序。
- h) AGV 搬运时间只与设备间距离有关, 为了使计算方便, 相邻设备间距离相等。
- i) 所有待加工的工件放在装载台 M_0 , 加工好的工件放在卸载台 M_{m+1} 处。

1.2 模型建立

参数设置如下:

n 种工件, 工件 $i: \{1, 2, 3, \dots, n\}$

m 台设备, 装载台 M_0 , 卸载台 $M_{m+1} j: \{0, 1, 2, 3, \dots, m, m+1\}$

r 台 AGV, AGV $R: \{1, 2, 3, \dots, r\}$

每个工件 i 有 n_i 道工序, 工序 $k: \{1, 2, 3, \dots, n_i\}$, 即工件 i 的第 k 道加工工序: $O_{i,k}$

$t_{i,k}^b$ 工序 $O_{i,k}$ 开始加工时刻, $t_{i,k}^c$ 工序 $O_{i,k}$ 完成加工时刻。

$p_{i,k}$ 工序 $O_{i,k}$ 的加工时间。

$rt_{i,k}^b$ 工序 $O_{i,k-1}$ 完成后, AGV 开始搬运工件至工序 $O_{i,k}$ 所在机床缓

存区的时刻。

$rt_{i,k}^c$ AGV 完成搬运时刻。

T_{j_1, j_2} : 表示 AGV 从设备 j_1 搬运工件至设备 j_2 所需要的时间

T_{j_1, j_2}' : 表示 AGV 从设备 j_1 搬运空载至设备 j_2 所需要的时间

目标函数: $f = \min(\max_{1 \leq i \leq n} t_{i,n_i}^c)$

约束条件:

a) 工件从装载台搬运出来进行第一道工序的加工, 且工序 $O_{i,1}$ 在机床 j 上加工

$$\sum_{j=1}^m p_{i,1} * x_{i,1,j} + T_{j_0, j} \leq t_{i,1}^c \quad (1)$$

b) 工序 $O_{i,k}$ 在机床 j 上加工

$$t_{i,k}^b + \sum_{j=1}^m p_{i,k} * x_{i,k,j} \leq t_{i,k}^c \quad (2)$$

c) 搬运完成之后才能进行加工

$$0 \leq rt_{i,k}^c \leq t_{i,k}^b \quad (3)$$

d) 工序 $O_{i,k}$ 加工完成, AGV 立即搬运

$$t_{i,k}^c \leq rt_{i,k+1}^b \quad (4)$$

e) 工件前后工序搬运时间约束: AGV 从工序 $O_{i,k}$ 所在加工设备搬运至工序 $O_{i,k+1}$ 所在加工设备

$$rt_{i,k+1}^c = \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m x_{i,k,j_1} * x_{i,k+1,j_2} * T_{j_1, j_2} + rt_{i,k+1}^b \quad (5)$$

f) AGV 相邻两道搬运任务时间约束: 一个 AGV 完成上道搬运任务, 空载到下道搬运任务的初始机床, 再将该工件搬运至加工设备上

$$rt_{i,k_1}^c + \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m x_{i,k_1,j_1} * x_{i,k_2-1,j_2} * T_{j_1, j_2}' + \sum_{j_2=1}^m \sum_{j_1=1}^m x_{i,k_2-1,j_2} * x_{i,k_2,j_1} * T_{j_2, j_1} \leq rt_{i,k_2}^c + M(1 - y_{i,k_1,k_2}) \quad (6)$$

g) 同一机床加工的工序约束: $O_{i1,k1} O_{i2,k2}$ 先后在同一机床加工

$$t_{i1,k1}^c + p_{i1,k1} \leq t_{i2,k2}^c + M(1 - z_{i1,k1,i2,k2}) \quad (7)$$

h) 一道工序只在机床加工一次

$$\sum_{j=1}^m x_{i,k,j} = 1 \quad (8)$$

i) 工序 $O_{i,k-1}$ 在机床 j 上加工, 运至卸载台。

$$t_{i,n_i}^b + \sum_{j=1}^m p_{i,n_i} * x_{i,n_i,j} + T_{j, j_{m+1}} \leq t_{i,n_i}^c \quad (9)$$

j) 其他

$$M = +\infty \quad (10)$$

$$x_{i,k,j} = \begin{cases} 1 & \text{若工序 } O_{i,k} \text{ 在设备 } j \text{ 上加工} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (11)$$

$$y_{i,k_1,k_2} = \begin{cases} 1 & \text{若工序 } O_{i,k_1} \text{ 和 } O_{i,k_2} \text{ 由同一AGV搬运} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (12)$$

$$z_{i,k_1,k_2} = \begin{cases} 1 & \text{若工序 } O_{i,k_1} \text{ 和 } O_{i,k_2} \text{ 在同一设备加工} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (13)$$

2 粒子群算法设计

2.1 算法编码

根据第一节含有 AGV 的柔性车间调度模型, 本文采用 3 个 L 维向量表示粒子位置, 分别记作 Tr (transport sequence) 向量和 M (machine) 向量和 R (robot) 向量, 其中 $L = \sum_{i=1}^n n_i + n$ (n 为工件数, n_i 为第 i 个工件的总工序数)。Tr 向量表示基于搬运工序的编码, 代表加工工序前一道的搬运工序, 那么每一个工件有 $n_i + 1$ 道搬运工序。M 向量基于机床的编码, 指的是搬运工序到达机床的位置, 那么每一个工件的最后一道搬运工序到达机床是卸载台 M_{m+1} 。R 向量表示基于 AGV 搬运的编码。

为了解释编码解码过程, 本文取 4×5FJSP 算例[13], 其加工时间如下表 1 所示。AGV 搬运时间只受机床位置的影响, 具体如表 2 所示。表 3 向量矩阵表示随机产生的一个粒子编码, 代表一种可行的搬运调度。例如表 3 第 6 维为 (3,5,2), 表示第二台 AGV 从机床 4 空载至机床 3, 然后将第三个工件搬运至机床 5 加工第二道工序。由此可得 AGV 的搬运路线, 其中 M0、M6 分别为装载台、卸载台, “—→” 代表 AGV 空载, “O14, t=0” 是在 M6 上加工的虚拟工序, 即工件 1 加工完成被搬运至卸载台的操作。

R1 路线: M0 (工件 1) →M1 (O11) —→M0 (工件 2) →M3 (O31) —→M2 (工件 2) →M1 (O22) →M2 (O23) —→M4 (工件 4) →M1 (O42) —→M5 (工件 3) →M4 (O33) →M3 (O34) —→M5 (工件 1) →M6 (O14, t=0)

R2 路线: M0→M2 (O21) —→M0 (工件 4) →M4 (O41) —→M3 (工件 3) →M5 (O32) —→M1 (工件 1) →M3 (O12) →M5 (O13) —→M2 (工件 2) →M6 (O24, t=0) —→M1 (工件 4) →M6 (O43, t=0) —→M3 (工件 3) →M6 (O35, t=0)

结合两台 AGV 的搬运路线、各工件加工时间、AGV 搬运时间得到该粒子的甘特图, 如下图 1 所示。从图可知该随机粒子所表示的加工时间为 31。

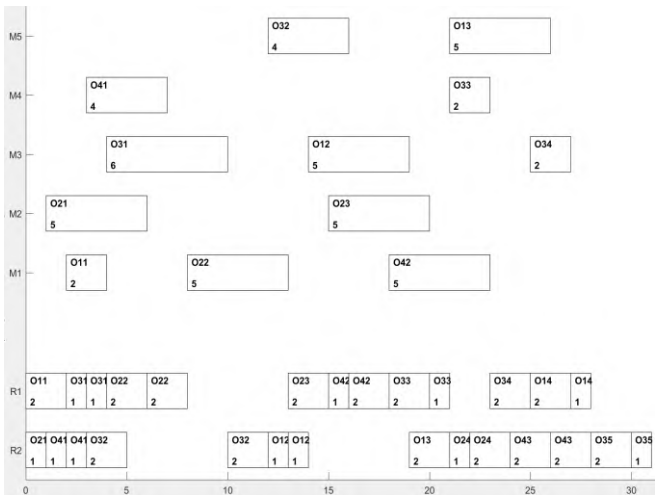


图 1 随机粒子甘特图

表 1 4×5FJSP 算例

工序	机床				
	M1	M2	M3	M4	M5
J1	1	2	5	4	1
	2	5	4	5	7
	3	4	5	5	4
J2	1	2	5	4	7
	2	5	6	9	8
	3	4	5	4	5
J3	1	9	8	6	7
	2	6	1	2	5
	3	2	5	4	2
J4	1	1	5	2	4
	2	5	1	2	1
	2	5	1	2	1

表 2 AGV 搬运时间

	M0 装载	M1	M2	M3	M4	M5	M6 卸载
M0 装载	0	2	1	1	1	2	2
M1	1	0	2	1	1	2	2
M2	1	2	0	2	1	1	2
M3	1	1	2	0	2	2	1
M4	2	2	1	2	0	2	2
M5	1	1	1	1	1	0	1
M6 卸载	2	2	1	2	2	2	0

表 3 粒子编码向量矩阵

粒子维数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tr向量	1	2	3	4	2	3	2	1	4	1	3	2	3	4	1	3
M向量	1	2	3	4	1	5	2	3	1	5	4	6	3	6	6	6
R向量	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

2.2 种群初始化

根据上文编码方式, 首先随机生成搬运序列。然后借鉴文献[14]初始种群定位法思想, 选择操作工序对应加工时间最短的机床。最后启发式生成 R 向量, 并借鉴文献[15]启发式调整的思想, 调整 R 向量, 使空载时间减少。具体步骤如下:

- a)算法实现随机生成多个搬运序列即 Tr 向量。
- b)为每个搬运序列所对应的加工工序分配加工时间最短的机床, 得到 M 向量。
- c)为每个搬运序列的搬运工序启发式均匀分配 AGV 搬运, 得到 R 向量。
- d)某 AGV 搬运工件 i_1 到达加工机床后, 检查该机床缓存区是否有工件 i_2 等待搬运。如果有, 则该 AGV 紧接着搬运缓存区的工件 i_2 , 即将工件 i_2 对应的搬运工序调整到该搬运操作之后, 从而减少该 AGV 的空载时间; 如果无, 则执行搬运序列的下一个搬运操作。根据 R 向量, 将搬运序列从左至右逐一检查,

从而调整 R 向量, 最终使 R 向量的 AGV 空载时间最短。

例如对表 3 进行解码, 得到 Makespan=31, 而采用本文初始化方法, Tr 向量保持不变, M 向量变为[4 1 3 1 1 2 1 2 2 1 1 6 4 6 6 6], R 向量变为[1 2 1 2 1 1 2 2 1 2 1 1 2 1 1 2], 得到 Makespan=29。可以看出, 本文方法能够产生更好的初始解从而确保算法得到较优的解。

2.3 粒子位置更新

本文通过同时结合文献[16]提出的更新方法与文献[17]提出的 RPX 交叉, 提出了粒子群位置更新方法。由基本粒子群思想可知, 粒子的位置是“自身”“认知”“社会”三部分互相影响作用的结果。因此定义粒子位置更新公式如下:

$$x_i^{k+1} = c_2 r_2 \otimes h(c_1 r_1 \otimes g(\omega \otimes f_i^k, pB_i^k), gB_i^k) \quad (14)$$

其中: ω , c_1 , c_2 , r_1 , r_2 与基本粒子群算法一致, pB_i^k 表示第 k 次迭代时单个粒子的历史最优位置, gB_i^k 表示第 k 次迭代时全局最优位置。

1) 自身部分

$$F_i^k = \omega \otimes f(x_i^k) = \begin{cases} f(x_i^k) & rand < \omega \\ x_i^k & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

自身部分表示粒子对上一次自身的思考, $f(x_i^k)$ 表示粒子速度, 当 rand 产生的随机数小于 ω 则执行以下操作, 否则保持不变。

第一步变换 Tr 向量: 从以下三个操作随机选择一个执行。并且在执行操作时, M, R 向量跟随 Tr 向量变换。

a) 交换。随机选择两个不同工件的工序, 交换两个基因位置, 其余保持不变。操作示意图如图 2 所示。

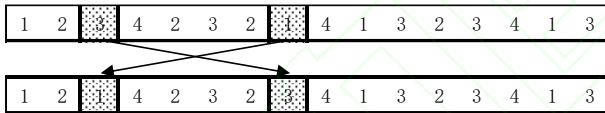


图 2 Tr 向量交换

b) 插入。随机选择两个位置 a 和 b, 将 b 基因插入到 a 的前面, a 到 b 之间的基因后移一位。操作示意图如图 3 所示。

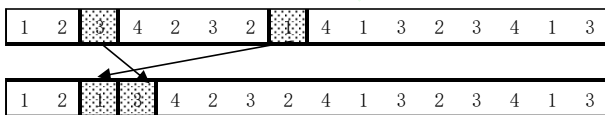


图 3 Tr 向量插入

c) 反序。随机选择两个位置 a 和 b, 将 a、b 之间 (包括 a、b) 的基因序列反转, 其余片段不变。操作示意图如图 4 所示。

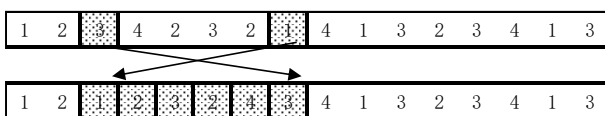


图 4 Tr 向量反序

第二步变换 M 向量。随机选取一个位置 a, 随机从该工序可行加工机床集选取另一个机床替换 a。如果第一步随机选择

的是交换操作, 则 M 向量及 M 向量变换如图 5 所示。

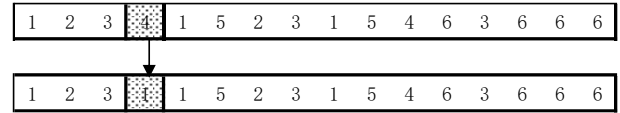


图 5 M 向量变换

第三步变换 R 向量。随机选取一个位置 a, 随机从搬运 AGV 集中选取另一个 AGV 替换 a。操作示意图如图 6 所示。

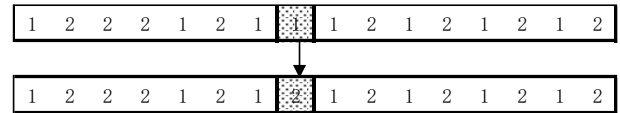


图 6 R 向量变换

认知部分

$$G_i^k = c_1 r_1 \otimes g(F_i^k, pB_i^k) = \begin{cases} g(F_i^k, pB_i^k) & rand < c_1 r_1 \\ F_i^k & otherwise \end{cases} \quad (16)$$

认知部分表示粒子对历史位置的思考。当 rand 产生的随机数小于 $c_1 r_1$ 则执行 POX 交叉操作, 否则保持上一步自身部分操作结果不变。随机选择工件 a, 经 POX 交叉所得两个子代, 随机选择一个作为 G_i^k , 操作示意图如图 7 所示。

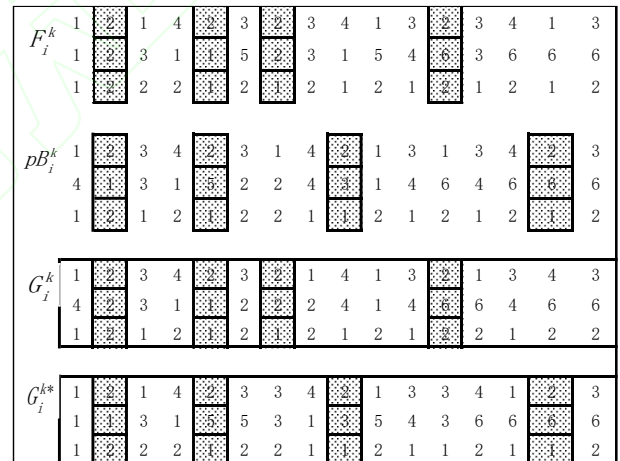


图 7 POX 交叉

3) 社会部分

$$H_i^k = c_2 r_2 \otimes h(G_i^k, gB_i^k) = \begin{cases} h(G_i^k, gB_i^k) & rand < c_2 r_2 \\ G_i^k & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

社会部分表示粒子对全局位置的思考, 同时展现了粒子之间的协作。当 rand 产生的随机数小于 $c_2 r_2$ 则执行 RPX 交叉操作, 否则保持上一步自身部分操作结果不变。随机产生长度与搬运序列相同的 Rand 序列, 计算自适应调整概率 (其中 t 为当前迭代次数, T 为总次数, f_{max} 为 Rand 序列最大值, f_{min} 为最小值), 经 RPX 交叉得子代 H_i^k , 操作示意图如图 8 所示 (假设 $f=0.7$)。自适应调整概率表达式如下:

$$f = f_{max} - (f_{max} - f_{min}) \frac{t}{T} \quad (18)$$

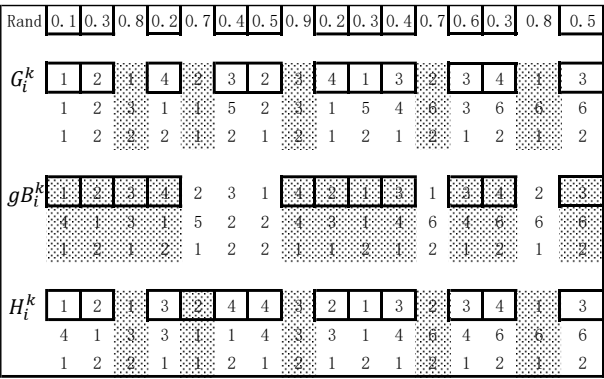


图 8 RPX 交叉

2.4 算法求解步骤

- a) 参数初始化设置。设置粒子种群规模 $particles$, 迭代次数 $iteration$, 惯性常量 ω , 学习因子 c_1 、 c_2 。
- b) 初始化种群。按 2.3 中的规则初始化种群, 并计算每个粒子的适应值, 且此时 $pB_i^1 = x_i^1$, $gB_i^1 = \min(x_i^1)$
- c) 更新粒子群位置。按 2.4 中规则更新粒子群位置, 同时更新并记录 pB_i^k 、 gB_i^k 。首先采用精英策略, 每次迭代种群适应度前 10 的粒子作为精英保持不变, 其他粒子进行位置更新, 这样保留优秀粒子的同时丰富粒子的多样性。然后判断是否更新, 规则为: 若粒子适应度优于 pB_i^k , 则令 pB_i^k 等于该粒子适应度; 若粒子适应度优于 gB_i^k , 则令 gB_i^k 等于该粒子适应度。
- d) 判断当前迭代次数是否等于 $iteration$, 若等于终止循环, 若不等于则跳到步骤 c)。在终止循环后, 将第 $iteration$ 次迭代的精英粒子 (即种群适应度前 10 的粒子) 的 R 向量进行启发式调整, 再从中得到最优值。

3 问题求解

3.1 算法寻优能力验证

实验仿真环境为 Windows7 64 操作系统, 处理器主频 2.5 GHz, 内存 4 GB, 采用 MATLABR2014 编译软件, 每个算例运行 20 次取最优值。粒子种群规模 $particles$ 为 500, 迭代次数 $iteration$ 为 100, 惯性常量 ω 取 0.9, 学习因子 c_1 、 c_2 都取 0.9。

为了验证粒子群算法的寻优能力, 从 Bilge 等人^[18]提出的 40 个算例中选取部分进行计算: 4 台加工设备, 装载台, 卸载台, 与 AGV 构成了四种布局, 并且考虑 AGV 的搬运时间和空载时间, 求出最短加工时间。算例 “Ex31” 表示, 3 表示 Jobset3, 1 表示 layout1。MAS 表示文献[19]提出算法的结果。GAHA-2、GAHA-3 表示文献[10]提出的 2 个和 3 个 AGV 在考虑工件加工完成搬运至卸载台的情况下, 采用遗传算法与启发式混合算法所得到的结果。FDE、FMAS 分别表示文献[20, 21]提出算法的结果。PSO 和 FPSO 表示使用本文改进粒子群算法, 分别计算车间调度和柔性车间调度的最短加工时间。通过实验结果可知本文提出的改进粒子群算法有较好的寻优能力: 运用本文算法计算车间调度问题时, 66.67%的解优于 MAS (R=2) 与 GAHA (R=2) 的最优解, 100%的解优于 GAHA (R=3) 的解。在计算柔性车间调度问题时, 50%的解优于 FDE (R=2) 与 FMAS (R=2) 的最优解。同时不难发现, 增加 AGV 能够缩短整个完工时间, 完工时间越长, 增加 AGV 更有效。

其中, 图 9 所示为 R=2 时, FDE、FMAS、FPSO 三种算法求解各算例的最小加工时间。

表 4 算例实验结果

算例	MAS ^[19]	GAHA ^[10]	PSO 本文	FDE ^[20]	FMAS ^[21]	FPSO 本文	GAHA ^[10]	PSO 本文
	R=2	R=2	R=2	R=2	R=2	R=2	R=3	R=3
EX11	130	116	116	96	111	99	96	90
EX12	98	91	92	82	87	80	86	79
EX13	109	100	98	84	91	83	90	90
EX14	168	140	139	103	128	108	110	110
EX21	143	121	125	100	128	101	104	104
EX22	86	88	92	76	88	74	84	81
EX23	98	95	94	86	102	87	86	86
EX24	169	151	162	106	131	114	118	116
EX31	142	134	98	99	114	96	105	87
EX32	114	101	79	85	99	76	89	74
EX33	103	107	81	86	102	79	91	74
EX34	167	166	133	110	128	127	130	100

其中, 图 10 所示为 EX32 算例用 2 台 AGV 搬运时的最优调度的甘特图, 左下方的椭圆代表装载台, 右上方椭圆代表卸载台, 实线箭头为 R1 路线示意图, 虚线箭头为 R2 路线示意图。

3.2 AGV 边际效用

边际效用理论指出商品价值由该商品的边际效用决定, 意思是每多买一单位商品或服务给消费者带来的总效用增量[22]。根据理论, 本文用效用代表加工所有工件减少的时间, 商品指

的是 AGV, 公式如下。

$$MU = \frac{\Delta TU}{\Delta Q} = \frac{\Delta Time}{\Delta Q} = \Delta Time \tag{19}$$

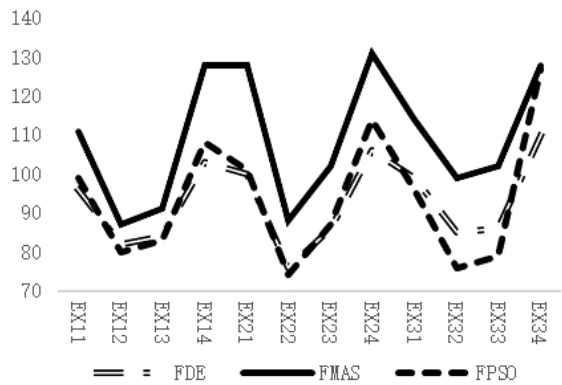


图 9 R=2 时算法 Makespan 折线图

为了深入研究 AGV 的边际效用, 本文选取机床和加工工件较多的算例 15×10^[8], 取不同数量的 AGV, 分别计算 20 次, 所得结果如表 5 所示。从表 5 可以发现当 AGV 超过 12 时, 最优完工时间在 181 附近波动, 波动原因笔者认为计算次数不是足够多。因此在绘制边际效用曲线时, 将 AGV 大于 12 台的最优完工时间都修正为 181。

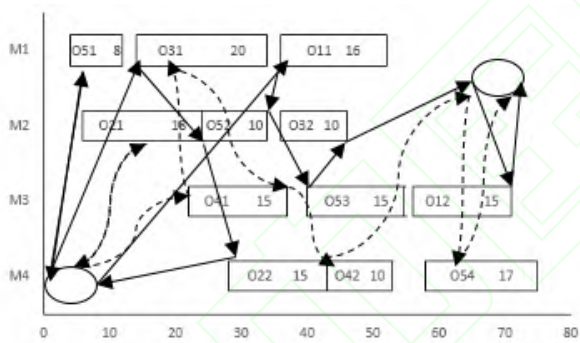


图 10 EX32 算例 PSO-2 甘特图

表 5 基于不同数量 AGV 的最优加工时间

15×10	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最优时间	1554	768	524	404	333	282	252	232	214
15×10	10	11	12	13	14	15	16	17	18
最优时间	199	191	185	181	182	184	184	181	181

图 11 表明 AGV 的边际效用符合边际效用递减规律, 随着 AGV 数量的增加, 总效用增加 (整个加工时间减少), 但边际效用递减 (增加一台 AGV 缩短的时间减少)。当 AGV=14 时, 边际效用为 0, 说明 13 台和 14 台 AGV 总效用相同, 即总效用在 AGV=13 时达到最大。此时加工时间主要受机床和工序的约束, 不能通过简单的增加 AGV 来减少加工时间。

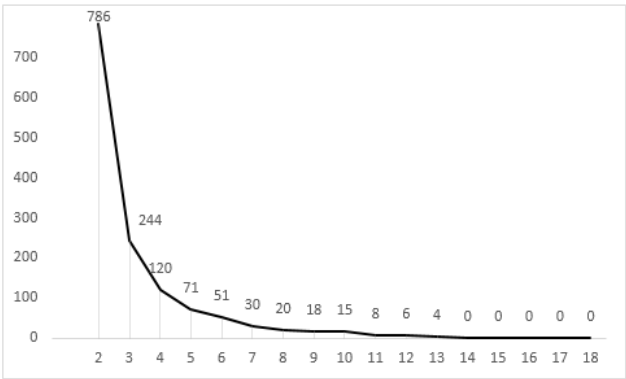


图 11 AGV 的边际效用曲线

4 结束语

本文创新性地提出了基于搬运工序的粒子群编码方式, 采用 3L 维向量表示 1 种可行的生产调度。并将遗传算法种群迭代方式运用到粒子群算法中, 有效的避免迭代中非法解的产生, 提高算法的运行效率。同时结合启发式选择、调整 AGV 和精英策略确保算法得到更优的结果。最后从算例表明了改进的粒子群算法具有较高的优化性能, 并发现整个加工周期越长, 增加一台 AGV 效果越好; 随着增加 AGV 的数量增多, 缩短的时间变短。但是粒子群算法容易受输入几个参数的影响, 难以把握最佳参数组合。因此, 在以后的研究中有必要进一步分析算法参数对结果的影响。又因为粒子群算法易陷入局部最优, 因此有必要进一步结合局部搜索算法, 使混合算法能够找到更优解。

参考文献:

[1] Garey M R, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flow shop and job-shop scheduling [J]. Mathematics of Operations Research, 1976, 1 (2): 117–129.

[2] Bruker P, Schlie R. Job Shop Scheduling with Multi-purpose Machines [J]. Computing, 1990, 4 (2): 369-375.

[3] Pezzella F, Morganti G, Ciaschetti G. A genetic algorithm for the flexible Job-Shop scheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2011, 35 (10): 3202-3212.

[4] Lacomme P, Larabi M, Tchernev N. Job-shop based framework for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 143 (1): 24-34.

[5] Fazlollahtabar H, Saidi-Mehrabad M, Balakrishnan J. Mathematical optimization for earliness/tardiness minimization in a multiple automated guided vehicle manufacturing system via integrated heuristic algorithms [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 72 (1): 131-138.

[6] Nishi T, Ando M, Konishi M. Distributed route planning for multiple mobile robots using an augmented Lagrangian decomposition and coordination technique [J]. IEEE Trans on Robotics, 2005, 21 (6): 1191-1200.

[7] Ghasemzadeh H, Behrang E, Azgomi M A. Conflict-free scheduling and routing of automated guided vehicles in mesh topologies [J]. Robotics and

- Autonomous Systems, 2009, 57 (6): 738-748.
- [8] Maryam M, Hwa J Y, Siti N M, et al. Multi-objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization [J]. PLoS One, 2017, 12 (3): 1-24.
- [9] 杨立熙, 余慧慧. 考虑运输时间的柔性作业车间调度问题研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39 (1): 608-613.
- [10] 龙传泽. 柔性多机器人制造单元调度算法研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [11] Zheng Yan, Xiao Yujie, Seo Y. A Tabu search algorithm for simultaneous machine//AGV scheduling problem [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52 (19): 5748-5763.
- [12] Wang Hui, Sun Hui, Li Changhe, et al. Diversity enhanced particle swarm optimization with neighborhood search [J]. Information Sciences, 2013, 223 (2): 119-135.
- [13] Deng Qianwang, Gong Guiliang, Gong Xuran, et al. A bee evolutionary guiding nondominated sorting genetic algorithm II for multiobjective flexible Job-Shop scheduling [J]. Computational Intelligence & Neuroscience, 2017: 1-20.
- [14] Kacem I, Hammadi S, Borne P. Approach by localization and multi-objective evolutionary optimization for flexible job shop scheduling problems [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2002, 32 (1): 1-13.
- [15] 龙传泽, 杨煜俊. 基于遗传算法的柔性机器人制造单元调度问题研究 [J]. 组合机床与加工技术, 2015, 148 (11): 141-144.
- [16] 王磊. 基于改进离散粒子群算法的作业车间调度方法研究及应用 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [17] 张静, 王万良, 徐新黎等. 基于改进粒子群算法求解柔性作业车间批量调度问题 [J]. 控制与决策, 2012, 27 (4): 513-518.
- [18] Bilge U, Ulusoy G. A Time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in FMS [J]. Operations Research, 1995, 43 (6): 1058-1070.
- [19] Rizvan E, Cenik S, Adil B, et al. A multi-agent based approach to dynamic scheduling of machines and automated guided vehicles in manufacturing systems [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12 (6): 1720-1732.
- [20] Kumar M V S, Janardhana R, Rao J S P. Simultaneous scheduling of machines and vehicles in an FMS environment with alternative routing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53 (1): 339-351.
- [21] Sahin C, Demirtas M, Erol R, et al. A multi-agent based approach to dynamic scheduling with flexible processing capabilities [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015: 1-19.
- [22] 李阳, 王珏. 基于边际效用函数的最佳人力资源管理模型研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (1): 106-112.