

# 基于改进粒子群算法的车间作业排序的优化设计

黄 慧, 黎向锋, 左敦稳, 薛善良

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 兼顾车间作业排序中的制造周期和机器利用率, 建立了以最小化最大完工时间为主目标、以最大化机器利用率为从目标的优化模型。设计了引入自适应技术的惯性权重, 使基本粒子群算法的学习因子可动态变化地改进粒子群算法, 并用该改进后的算法对车间作业排序进行了优化设计。实例研究表明: 改进后的粒子群算法在收敛速度和收敛可靠性上均优于未改进的粒子群算法, 在求解车间作业排序问题的应用中具有更高的求解质量。

**关键词:** 车间作业排序; 自适应技术; 粒子群算法

**中图分类号:** TH165; TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1616(2011)21—0006—04

车间作业排序问题是一个典型的 NP 难题<sup>[1]</sup>, 是最困难的组合优化问题之一。由于其本身的复杂特性, 长期以来虽然 Job Shop 研究取得了一定的应用效果, 但是还存在着难以克服的弱点, 如计算规模不可能较大, 寻优结果不具备全局特性等。作业车间生产线的有效利用涉及两方面: 产品加工顺序的不同所产生的加工周期和机器利用率这两方面的变化。而现有的车间作业排序文献中, 大多只单方面研究排序方法所产生的制造周期的长短不同的问题<sup>[2-5]</sup>, 同时考虑制造周期和机器利用率的文献极少。

粒子群算法是模仿鸟类觅食过程的智能算法<sup>[6]</sup>。粒子群算法作为新兴的群体智能算法, 自从提出之后, 由于其概念简明、实现方便, 在解决复杂组合优化类问题方面具有优越性能, 因而被广泛地应用于各个领域。简单的粒子群算法容易早熟, 而且微粒在算法后期易在全局最优解附近“震荡”<sup>[7]</sup>。若对惯性权重引入自适应技术, 并使其学习因子可动态变化地改进粒子群算法, 则会具有较高的全局寻优能力和收敛速度。

本文兼顾车间作业排序问题中的机器利用率和作业排序两方面, 建立以最小化最大完工时间为主优化目标、以机器利用率为从优化目标的数学模型, 设计一种引入自适应技术的惯性权重及可动态变化的学习因子来求解该问题的改进粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, 简称 PSO), 并基于 MATLAB 对其性能进行测试。

## 1 问题描述与模型的建立

### 1.1 问题描述

一个典型的车间作业排序问题可描述为: 一个加工系统中有  $m$  台机器和  $n$  个待加工的工件, 所有工件的加工路径 (即技术约束条件) 预先给定, 但不要求一致, 各工件在各机器上的操作时间已知。排序的任务是如何合理地安排每台机器上工件的加工次序, 使约束条件得到满足, 同时使某些性能指标得到优化<sup>[8]</sup>。

典型的 Job Shop 问题一般会有以下条件:

- 同一时刻每台机器只能加工一个工序, 且每个工序只能被一台机器所加工, 同时加工过程不可间断, 整个过程中机器均有效;
- 在整个加工过程中, 每个工件不能在同一台机器上加工多次;
- 各工件必须按照工艺路线以指定的次序在机器上加工, 工件  $i$  的第  $j$  道工序必须在第  $(j-1)$  道工序完成后才能开始;
- 不考虑工件的优先权, 允许操作等待;
- 除非特殊说明, 工件的加工时间事先给定, 且在整个加工过程中保持不变。

### 1.2 数学模型

设车间作业系统中:

- 有  $n$  个工件, 用  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  表示工件集;
- 有  $m$  台机器, 用  $M = \{1, 2, \dots, m\}$  表示机

收稿日期: 2011-05-18

作者简介: 黄 慧(1987—), 女, 江苏盐城人, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要从事生产调度智能算法及其应用方面的研究工作。

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

器集;

c. 用  $OP=\{OP_1, OP_2, \dots, OP_n\}$  表示加工工序集, 其中  $OP_i=\{OP_{i1}, OP_{i2}, \dots, OP_{im}\}$  表示工件  $i$  的工序序列,  $OP_{ik}$  表示工件  $i$  的第  $k$  道工序, 若  $OP_{ik}=0(k=1, 2, \dots, m)$ , 则表示工件  $i$  在进行第  $k$  道工序时不加工;

d. 用  $T$  表示加工时间矩阵,  $t_{ij} \in T$ ,  $t_{ij}$  表示工件  $i$  在第  $j$  个机器上的加工时间, 若  $t_{ij}=0$ , 表示工件  $i$  在第  $j$  个机器上不需要加工。

设工件开始加工时间为 0, 那么车间作业排序的目标就是求当所有工件都加工完成时的时间是多少? 设  $T=\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ ,  $T_i$  表示工件  $i$  加工完的时刻, 那么所求的目标函数即为  $\min\{\max(T_i)\}$ 。

## 2 算法设计

### 2.1 粒子的编码与解码

本文结合遗传算法来求解 Job Shop 的染色体编码方式, 设计相应的粒子编码形式<sup>[9]</sup>。选用基于工序的粒子编码形式<sup>[10]</sup>, 在该编码形式中, 调度编码为整个工序的序列, 其中每个基因代表一道工序。解码过程: 通过染色体, 可以得到一有序工序表, 即先加工序列中排在第一号的工件的所有操作, 然后依次以最早允许加工时间完成后面各加工工件的所有操作。

### 2.2 算法设计与进化过程

调度问题属于离散空间的优化问题, 而粒子群算法是一种连续空间的优化算法, 所以利用 PSO 求解车间作业排序问题时, 在解的表示上不能直接用粒子位置表示, 需要在二者之间建立一种映射关系。

### 2.3 目标函数

最常用的 Job Shop 的目标函数是最小化最大完工时间, 即 makespan。在数学上, Job Shop 是为了寻找这样一个调度

$$\min(T(JM)) = \min\{\max[T(1), T(2), \dots, T(j), \dots, T(m)]\}$$

式中:  $T(j)$  是机器  $j$  上所有工件的最终完成时间;  $T(JM)$  是所有工件的最终完成时间。

在车间作业排序问题中, 根据已知的各工件的加工工序以及每道工序在各机器上加工的时间, 可以求出各机器既定载荷, 如机器  $j$  的既定载荷按式(2)可求得。当所有工件都加工完毕时, 机器  $j$  完成

所有工件作业时的时间记为  $F'(j)$ , 根据式(3)可求得机器  $j$  的利用率。

$$F(j) = t_{1j} + t_{2j} + \dots + t_{ij} + \dots + t_{nj} \quad (2)$$

$$f(j) = \frac{F(j)}{F(j)} \times 100\% \quad (3)$$

### 2.4 粒子群系统的更新方式

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_2[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (4)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (5)$$

自适应惯性权重系数<sup>[9]</sup>的计算表达式如下:

$$w = \begin{cases} w_{\min} + \frac{(w_{\max} - w_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} & f \leq f_{\text{avg}} \\ w_{\max} & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别表示  $w$  (惯性权重系数) 的最大和最小值;  $f$  为粒子当前的适应值;  $f_{\text{avg}}$  和  $f_{\min}$  分别为所有微粒的平均和最小适应值。

$$C_1(t) = C_1^\infty + (C_1^0 - C_1^\infty) \left[1 - \frac{t}{K}\right] \quad (7)$$

$$C_2(t) = C_2^\infty + (C_2^0 - C_2^\infty) \left[1 - \frac{t}{K}\right] \quad (8)$$

式中:  $t$  为当前进化代数;  $K$  为最大进化代数;  $\infty$  和 0 分别表示参数  $C_1$  (学习因子 1, 也称加速因子 1)、 $C_2$  (学习因子 2, 也称加速因子 2) 的起始和最终的值<sup>[11]</sup>。

### 2.5 算法流程

引入改进粒子群算法的车间作业排序优化的算法流程如图 1 所示。

## 3 实例分析

为了验证粒子群算法在车间作业排序中的应用, 笔者对其进行试验验证。设有 6 个工件、6 台机器, 加工时间和各加工工序见表 1。

表 1 6×6 加工工序表

工件	机器编号 ( $m$ ) / 加工时间 ( $t$ )					
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6
1	5/1	1/3	6/6	4/7	2/3	3/6
2	6/8	5/5	3/10	2/10	1/10	4/4
3	5/5	4/4	2/8	1/9	6/1	3/7
4	6/5	1/5	5/5	4/3	3/8	2/9
5	5/9	6/3	3/5	2/4	1/3	4/1
6	6/3	4/3	2/9	1/10	3/4	5/1

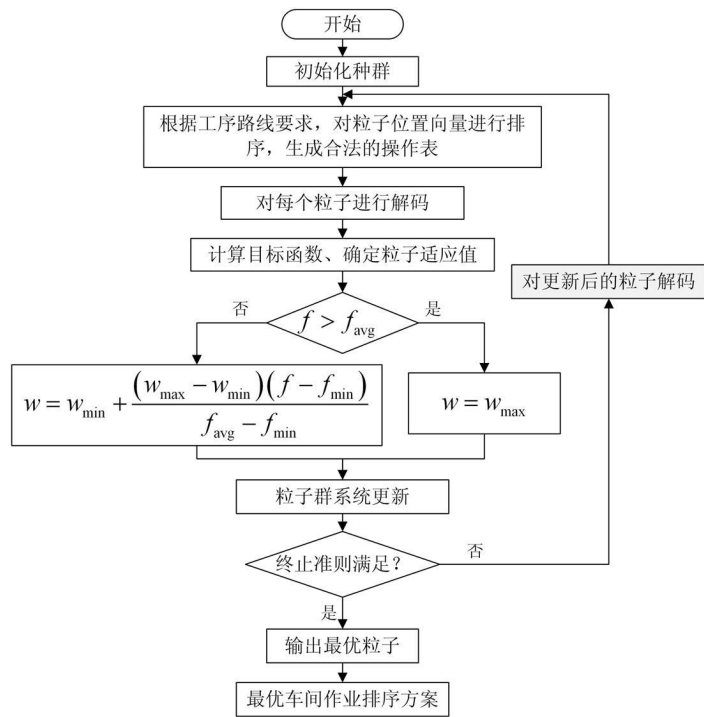


图 1 引入改进粒子群算法的车间作业排序优化的算法流程

在程序中输入加工时间矩阵  $T$  和工件对应的机器矩阵  $OP$  (工序集):

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 & 7 & 3 & 6 \\ 8 & 5 & 10 & 10 & 10 & 4 \\ 5 & 4 & 8 & 9 & 1 & 7 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 8 & 9 \\ 9 & 3 & 5 & 4 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 9 & 10 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$
$$OP = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 6 & 4 & 2 & 3 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 5 & 4 & 2 & 1 & 6 & 3 \\ 6 & 1 & 5 & 4 & 3 & 2 \\ 5 & 6 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 6 & 4 & 2 & 1 & 3 & 5 \end{bmatrix}$$

对未改进的标准的粒子群算法和改进后的粒子群算法分别进行 100 次运算, 得到的结果见表 2、表 3、图 2 和图 3。

表 2 最小化最大完工时间的计算结果对比

	最小值	最大值	平均值	标准差
未改进 PSO	55	63	57.09	2.035 5
改进的 PSO	55	59	55.30	1.000 0

从表 2 中可以发现, 改进后的粒子群算法比未改进的求得的解的质量更好。从表 3 中可以发现, 改进的粒子群算法机器总的利用率为 67.01%, 比未改进粒子群算法的机器利用率 64.98% 要高些。由此可见, 改进的粒子群算法使机器的利用率得到了改善。

表 3 机器的利用率

	机器 1	机器 2	机器 3	机器 4	机器 5	机器 6	总
未改进 PSO	75.47%	73.58%	72.73%	40.00%	52.00%	83.87%	64.98%
改进的 PSO	78.43%	72.22%	72.73%	41.51%	60.47%	81.25%	67.01%

从图 2 中可以发现, 应用未改进的粒子群算法, 目标函数在第 56 代时才收敛, 而应用改进粒子群算法, 目标函数在第 10 代就已经开始收敛了。因此, 改进的粒子群算法收敛速度得到了较大的提高。

4 结 论

将自适应技术引用到粒子群算法中, 并将该粒子群算法的学习因子设计成是可以动态变化的, 因而该改进的粒子群算法的收敛速度和收敛可靠性与一般的粒子群算法相比, 均得到了很大改善。本文的仿真结果验证了该改进的粒子群算法求解车间作业排序问题的可行性和有效性。

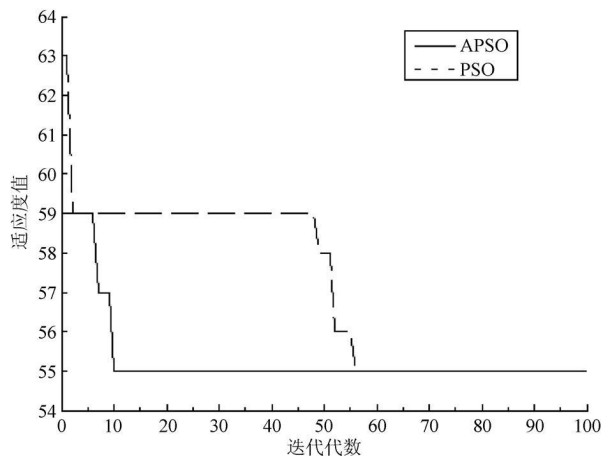


图2 最小化最大完工时间随迭代代数的收敛情况

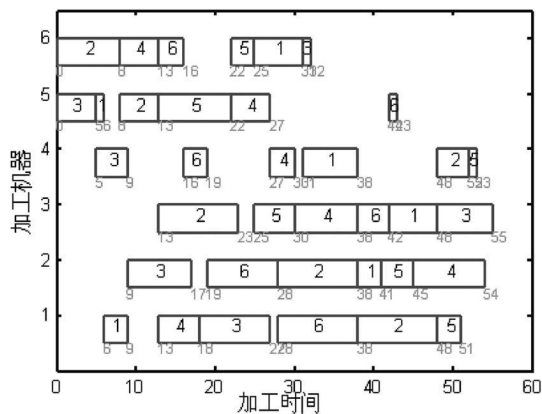


图3 基于改进粒子群算法的  
车间作业排序优化结果示意图

## 参考文献:

- [1] Garey E L, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flow shop and job-shop scheduling[ J]. Mathematics of Operations Research, 1976, 21(1): 117—129.
- [2] Chen Xiong, Kong Qingsheng, Wu Qidi. Hybrid algorithm for job-shop scheduling problem[ J]. Intelligent Control and Automation, 2002, 3(6): 1 739—1 743.
- [3] 黄孔亮, 雍正正. 一种求解作业车间调度问题的协同进化算法[ J]. 深圳大学学报: 理工版, 2004, 21(3): 272—275.
- [4] Nowicki E, Smutnicki C. A fast taboo search algorithm for the Job Shop problem[ J]. Management Science, 1996, 42(6): 797—813.
- [5] 葛茂根, 扈 静, 蒋增强, 等. 一种求解车间作业调度问题的混合微粒群算法[ J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(15): 6—8.
- [6] 王 凌, 刘 波. 微粒群优化与调度算法[ M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [7] 孙德轩, 赵 息, 杨黎明. 基于提高收敛性能的微粒群优化研究[ J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(5): 78—82.
- [8] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[ M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] 张 磊. 协同粒子群算法及其在车间调度中的应用[ D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [10] Cheng R, Gen M, Tsujimura Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms[ J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(4): 983—997.
- [11] 曾建潮, 介 婧, 崔志华. 微粒群算法[ M]. 北京: 科学出版社, 2004.

## Design of Job Shop Scheduling Based on Improved Particle Swarm Algorithm

HUANG Hui, LI Xiang-feng, ZUO Dun-wen, XUE Shan-liang

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Jiangsu Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the changes of manufacturing cycle and machine availability, it establishes an optimization model to minimize the maximum completion time and maximize the machine availability, designs an improved particle swarm optimization. This optimization includes the adaptive technology and the dynamic learning factor. The improved particle swarm optimization is used for a optimum design of job shop scheduling. The application shows that the improved particle swarm optimization is much better than the standard PSO algorithm at the convergence rate and convergence reliability, and can be get a much better solution quality on the job shop scheduling.

**Key words:** Job Shop Scheduling; Adaptive Technology; Particle Swarm Algorithm

## 欢迎订阅

《中国制造业信息化》(原《机械设计与制造工程》)是中华人民共和国科学技术部主管、中国生产力促进中心协会和江苏省机械研究设计院有限责任公司主办、国内外公开发行的的大型科技刊物,是中国科技核心期刊,中国科技论文统计源期刊。

读者可直接向《中国制造业信息化》编辑部订阅。

地址:南京市长虹路445号《中国制造业信息化》编辑部

邮编:210012 电话:(025)52409751, 66062041 联系人:吴建红