

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.009

# 基于混合遗传算法的车间调度研究

冯世扣, 鲍敏\*, 张 伟

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对用遗传算法求解车间调度问题(job shop problem)容易早熟的缺点,对遗传算法的收敛性、搜索效率和最优解等方面进行了研究,改进了遗传算法,引入了模拟退火算法,提出了新的混合遗传算法。重新设计了基于工件编号的交叉算子和变异算子;采用自适应交叉概率和变异概率;在每一代遗传进化中引入了 Metropolis 接受准则。通过结合遗传算法、自适应概率和模拟退火算法的各自优点,提高了算法搜索能力。用遗传算法、模拟退火算法和混合遗传算法对 Job Shop Problem 中 FT06 问题进行了仿真。仿真结果表明,混合遗传算法提高了搜索效率,能够找到最佳的调度方案。

**关键词:**遗传算法;模拟退火算法;车间调度

中图分类号:TH165;TH186

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)10-1315-05

## Job shop scheduling based on hybrid genetic algorithm

FENG Shi-kou, BAO Min, ZHANG Wei

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the premature convergence of genetic algorithm in solving the job shop schedule problem(JSP), the convergence and searching efficiency and optimal solution of the genetic algorithm were studied, simulated annealing algorithm was introduced and the genetic algorithm was improved leading to the production of the new hybrid genetic algorithm. In the new algorithm, crossover operators and mutation operators based on the job number were redesigned. Adaptive crossover probability and mutation probability were adopted. Metropolis criterions were introduced in each generation of genetic evolution. The good combination of genetic algorithm and adaptive probability and hybrid simulated annealing algorithm could effectively improve the searching ability of the algorithm. FT06 scheduling problem was simulated by means of genetic algorithm and simulated annealing algorithm and hybrid simulated annealing algorithm. The simulated results indicate that the new hybrid genetic algorithm can improve the searching efficiency and the satisfactory scheduling scheme is obtained.

**Key words:** genetic algorithm; simulated annealing; job shop schedule

## 0 引 言

生产车间调度是离散制造系统中关键的一个环节,车间调度通过合理分配现有的资源、安排零件加工次序和加工时间,能够有效的提高生产效率,对车间调度进行研究具有深远的意义<sup>[1-2]</sup>。生产车间调度问题种类繁多,本研究主要针对单件作业车间调度问题(job shop problem, JSP)。在用遗传算法求解 JSP 问

题时,初期种群之间差异非常大,很容易造成整个种群过早收敛,算法后期种群趋于一致,个体之间优势不明显,导致种群进化停滞不前<sup>[3-5]</sup>。为了使调度方案更实用高效,遗传算法得到不断改进和发展。Parviz Fatah<sup>[6]</sup>在求解过程中建立一个数学性规划模型,用启发式遗传算法结合模拟退火算法求解;张超勇<sup>[7]</sup>设计了一个种基于工序和机器编码的改进遗传算法,具有更好的遗传特性;王万良等<sup>[8]</sup>提出了改进自适应遗传算

收稿日期:2015-04-03

作者简介:冯世扣(1991-),男,浙江苍南人,主要从事生产车间调度及先进制造技术方面的研究. E-mail:cow092@163.com

通信联系人:鲍 敏,男,博士,副教授. E-mail:mbao@zstu.edu.cn

法,改进自适应遗传算法提高了获得最优解的速度;Victor 等<sup>[9]</sup>改进了混合遗传算法的交叉操作,并将改进的算法应用与车间调度问题中。

本研究针对遗传算法搜索效率低,易于过早收敛等缺点,提出一种新的混合遗传算法。这种算法核心在于:在每一代遗传进化过程中,引入退火思想,在迭代初期退火算法具有很高温度,此时算法有很强的概率突跳性,有利于打破过早收敛问题;引入自适应交叉和变异概率,能使算法在优化过程中自动改变交叉和变异概率,避免盲目交叉,从而提高搜索效率;设计新型的交叉和变异算子,以避免交叉后产生不可行解,相对于传统的算子新算子能够使种群更加的多样化,从而提高找到最优解的概率。

## 1 JSP 问题的数学模型

JSP 问题主要研究  $n$  个工件( $J_1 J_2 \cdots J_n$ )在  $M$  个机器( $M_1 M_2 \cdots M_m$ )上完成加工,每个工件有  $k$  个工序,每个工序在不同的机器上完成,相应的完成时间也不同。JSP 问题的目标就是通过优化工件在机器上的加工顺序,使加工完成的时间最短。通常 JSP 问题有以下假设:

(1) 不同工件的工序不存在先后顺序的约束。

(2) 各个工序一开始加工就不能中断。

(3) 每台机器可以加工不同工件的不同工序,但一台机器不能同时加工多种工序。

(4) 每一个工件只有当前一个工序完成加工后,才能开始加工该工件后一道工序。

(5) 每一个工序的加工时间和加工机器都是预先给定的。

JSP 问题的数学描述如下:

$$\text{Min} \max_{1 \leq k \leq m} \{ \max_{1 \leq i \leq n} C_{ik} \} \quad (1)$$

$$c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq t_{jk}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$c_{ik} - t_{ik} + M(1 - a_{ikh}) \geq c_{ih}, h = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式(1)表示目标函数。式中: $C_{ik}$ —工件  $i$  在机器  $k$  上的完成时间; $n$ —工件数; $m$ —机器数。

式(2)表示各工件的加工先后顺序。式中: $c_{jk}$ ,  $t_{jk}$ —工件  $j$  在机器  $k$  上的完成时间和加工时间; $M$ —一个足够大的正整数,如果工件  $j$  比工件  $i$  先在机器  $k$  上加工,则  $x_{ijk}$  为 1,反之为 0。

式(3)表示工艺条件约束下各工件的加工顺序。其中:如果机器  $h$  优先与机器  $k$  加工工件  $i$ ,则  $a_{ikh}$  为 1,反之为 0。

另外对一些符号作如下说明:

(1) 加工时间矩阵  $T$ 。 $T(i, j)$  表示加工第  $i$  个工

件的第  $j$  个工序所用的时间。

(2) 机器顺序矩阵  $J$ 。 $J(i, j)$  表示加工第  $j$  个工件的第  $j$  个工序所用的机器号。

## 2 混合遗传算法的设计

在用混合遗传算法求解 JSP 问题的过程中,关键步骤包括设计编码和解码方式、确定目标函数、设计遗传算子、确定遗传参数以及设计模拟退火过程等。

### 2.1 染色体编码

编码是遗传算法求解调度问题的关键,本研究采用基于工序的编码方式,该编码方式可以避免产生不可行解和死锁现象。当求解  $n$  个工件在  $m$  台机器上加工的问题时,染色体的基因数等于全部工序的数,为  $n \cdot m$  个。每一个工件的工序都用相应的工件号表示,第  $i$  次出现的工件号就表示加工该工件的第  $i$  道工序。如个体[2 3 1 2 3 1 1 2 3]表示 3 个工件在 3 台机器上加工,该染色体的加工顺序为工件 2,工件 3,工件 1,工件 2,工件 3,工件 1,工件 1,工件 2,工件 3。

### 2.2 染色体解码

对于已有的染色体,结合机器顺序矩阵,可以得到加工所有工序的机器序号,从而得到一个有效的生产调度。

### 2.3 适应度值

适应度值用来衡量个体适应环境的能力,适应度值越大越优秀,遗传到下一代概率越大<sup>[9]</sup>。对于车间调度问题,适应度值是加工完成所有工件的时间  $C_{\max}$  的最小值。

$$F(x) = \frac{1}{C_{\max}} \quad (4)$$

式中: $C_{\max}$ —加工完成所有工件的时间。

### 2.4 选择算子

选择算子是选择种群中高适应度值的个体进入下一代的操作。本研究采用比例选择方式,即被选中个体的概率正比与个体的适应度值:

$$P_i = \frac{F(x_i)1}{\sum_{i=1}^n F(x_i)} \quad (5)$$

式中: $P_i$ —选择的概率, $F(x_i)$ —个体适应值。

### 2.5 交叉操作

种群通过交叉操作产生新个体,从而推动种群进化,因此交叉操作是最重要的操作。对于 JSP 问题,笔者采用传统的交叉操作,产生的新染色体可能存在某

个工序的多余或缺失,因此交叉操作的难点在于如何保证交叉产生的新染色体是可行解。本研究设计了基于工件序号的交叉操作,具体步骤如下:

步骤 1:从父代中随机选择两个个体  $P_1P_2$ ,随机产生两个不同的随机数  $i_1$  和  $i_2$  ( $0 < i_1, i_2 < n$ ),然后把  $P_1P_2$  中  $i_1$  和  $i_2$  都提取出来,保存在新的基因串  $A_1A_2$  中,并且保持这些基因相对位置不变, $P_1P_2$  中相应的基因位置用 0 来代替。

步骤 2:然后把  $A_2$  的基因插入到  $P_1$  中基因为 0 的位置,产生子代  $B_1$ ,把  $A_1$  的基因插入到  $P_2$  中基因为 0 的位置产生子代  $B_2$ 。

步骤 3:把子代  $B_1$  所有基因向左移动一位,子代  $B_2$  向右移动一位,分别得到最终个体  $C_1C_2$ 。例如:

- $P_1$  为:[4 2 3 1 1 4 2 3 1 3 2 4]
- $P_2$  为:[3 2 4 4 1 2 2 3 4 1 1 3]
- $A_1$  为:[4 3 4 3 3 4]
- $A_2$  为:[3 4 4 3 4 3]
- $P_1$  为:[0 2 0 1 1 0 2 0 1 0 2 0]
- $P_2$  为:[0 2 0 0 1 2 2 0 0 1 1 0]
- $B_1$  为:[3 2 4 1 1 4 2 3 1 4 2 3]
- $B_2$  为:[4 2 3 4 1 2 2 3 3 1 1 4]
- $C_1$  为:[2 3 1 1 4 2 3 1 4 2 3 3]
- $C_2$  为:[4 4 2 3 4 1 2 2 3 3 1 1]

通过以上交叉产生的个体不存在某个基因多余或缺失的情况,都是可行解。步骤 3 中将子代向左向右移动,可以提高种群多样性,避免遗传算法早熟。

### 2.6 变异操作

种群通过变异操作,产生新个体,在保证种群多样性的同时推动种群向前进化。本研究中变异操作具体步骤如下:首先随机选择一个个体,随机产生两个位置,将两个位置之间的基因片段逆转,获得新的个体。例如  $P_1$  为[4 2 3 1 1 4 2 3 1 3 2 4],两个交叉位置  $Pose_1$  和  $Pose_2$  分别为 4,9,则两个位置间的基因片段  $A_1$  为:[1 1 4 2 3 1],通过逆转  $A_1$ ,得到新片段  $A_2$  为:[1 3 2 4 1 1],最后用  $A_2$  替换  $A_1$ ,得到子代  $B_1$  为:[4 2 3 1 3 2 4 1 1 3 2 4]。

### 2.7 初始参数确定

在遗传算法中,交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  会直接影响算法的收敛性。因此本研究对  $P_c$  和  $P_m$  进行重新的设计, $P_c$  和  $P_m$  会随着适应度值变化而变化,具体如下:当个体的适应度值大于种群的平均适应度值时,该个体属于优良个体,应尽力保留,故  $P_c$  和  $P_m$  应该较小;反之, $P_c$  和  $P_m$  应取较大的值。具体计算公式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' > f_{avg} \\ P_{c2} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f > f_{avg} \\ P_{m2} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (7)$$

式(6~7)中: $f_{max}$ —当代种群中最大适应度值, $f_{avg}$ —当代种群适应度值的平均值, $f'$ —两个交叉个体中较大个体的适应度值, $f$ —要变异个体的适应度值。一般取  $P_{c1} = 0.9, P_{c2} = 0.6, P_{m1} = 0.1, P_{m2} = 0.001$  [10]。

### 2.8 模拟退火算法设计

本研究引入模拟退火算法中的 Metropolis 接受准则使算法跳出局部最优解的“陷阱”。Metropolis 接受准则是以一定的概率  $P$  来接受比原个体差的新个体,由该准则判断进过遗传算子新个体是否替代父代个体,具体公式如下:

$$P = \begin{cases} 1 & \Delta f > 0 \\ e^{-\Delta f/T} & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T$ —模拟退火算法中的温度; $\Delta f$ —经过遗传算子新个体与原个体适应度值之差,若  $\Delta f$  大于 0,则接受适应值更高的新个体,否则产生一个  $[0, 1]$  随机数  $b$ ,若  $P > b$ ,用新个体代替旧个体。

本研究给定初始温度  $T_0$ ,终止温度  $T_{end}$ ,以及降温系数  $K$ ,在每一次退温过程中,用 Metropolis 接受准则决定最终的个体,直到达到温度达到  $T_{end}$ 。

### 2.9 算法流程图

混合遗传算法流程图如图 1 所示。

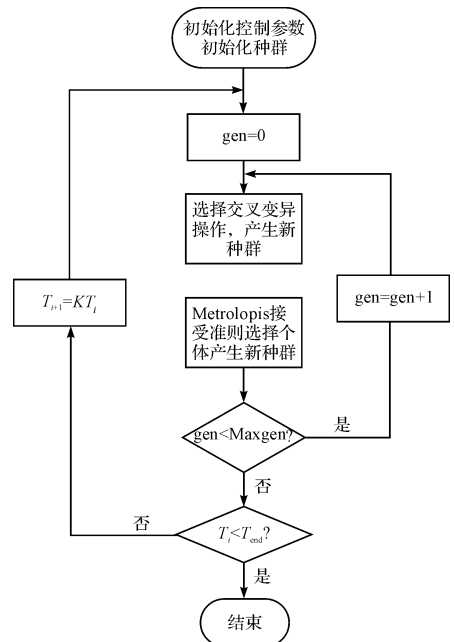


图 1 算法流程图

### 3 仿真结果与分析

在混合遗传算法仿真实验中,笔者采用 FT06 问题作为仿真案例<sup>[11]</sup>,即 6 个工件,6 台机器的调度问题。机器的顺序矩阵  $J$  和加工的时间矩阵  $T$  如下所示:

$$J = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 & 4 & 6 & 5 \\ 2 & 3 & 5 & 6 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 6 & 1 & 2 & 5 \\ 2 & 1 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 5 & 6 & 1 & 4 \\ 2 & 4 & 6 & 1 & 5 & 3 \end{bmatrix}$$

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

Matlab 仿真试验中,采用的初始参数为  $P_c$  为 0.9,  $P_m = 0.1$ ,  $Size = 40$ ,  $T_0 = 10\ 000$ ,  $T_{end} = 0.1$ ,  $K = 0.9$ 。用混合遗传算法得到最佳个体为 [3 3 2 6 1 1 3 2 6 4 2 4 5 3 4 6 2 1 1 1 5 4 5 2 3 6 5 2 3 4 5 5 6 1 6 4],需要的加工时间为 55 s,达到该问题的最优解。算法收敛曲线如图 2 所示,最佳个体的甘特图如图 3 所示,即工件加工顺序图。

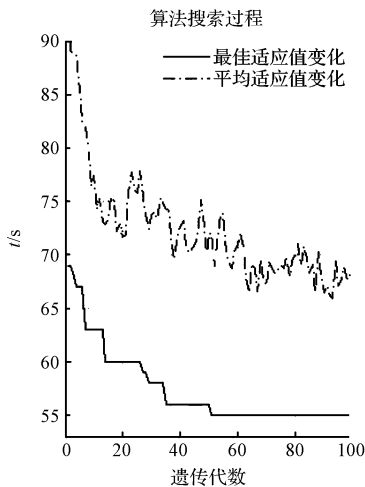


图 2 收敛曲线图

为验证混合遗传算法的可行性,在同样的参数下,笔者分别用遗传算法和模拟退火算法求解 FT06 问题,得到相应的结果,3 种算法的收敛曲线对比图如图 4 所示。

从图 2 中可以看到,混合遗传算法进过 50 代完成了收敛,得到的最佳完工时间为 55,与 FT06 问题的最优解一致,表明混合算法具有一定的搜索精度和较高的效率。

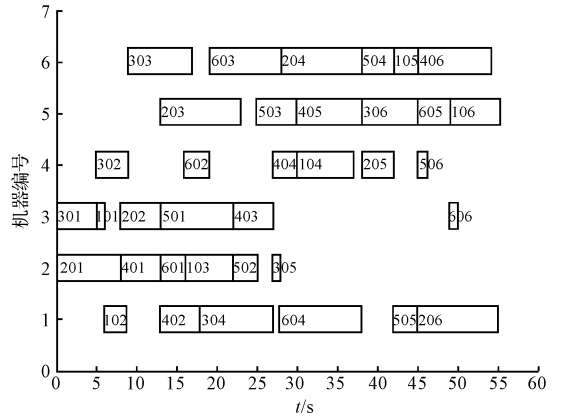


图 3 生产顺序图

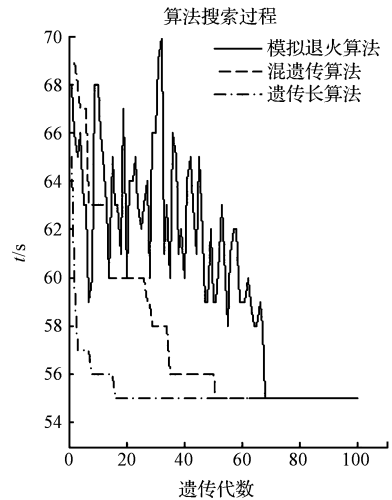


图 4 3 种算法收敛对比图

从图 3 中可以看到,每台机器加工工件的顺序,例如机器 1 的加工工序顺序依次为工件 1 第 2 工序、工件 4 第 2 工序、工件 3 第 4 工序、工件 6 第 4 工序、第 5 工件第 5 工序和第 2 工件第 5 工序。6 台机器上加工顺序包含了所有工件的所有工序,是一个完整的生产计划,也证明混合遗传算法编码方式避免了交叉和变异后产生非法个体。

3 种算法收敛曲线对比图如图 4 所示。对比 SA 和 GASA 曲线,可以看到 SA 曲线前期有很大的波动, GASA 收敛更早,表明混合遗传算法能在全局进行搜索最优解,能够控制寻优方向,相对于 SA 具有更快的搜索速度。对比 GA 和 GASA 曲线,可以看到 GA 曲线前期收敛的非常快,在求解复杂问题时比较容易早熟,从而只求局部解。GASA 曲线收敛较为平滑,能克服 GA 容易早熟的缺点。

### 4 结束语

本研究描述了车间调度的数学模型,分析遗传算法在求解车间调度问题时存在的不足之处,重新设计基于工件编号的交叉算子和变异算子,优化了交叉和

变异过程,同时采用自适应交叉和变异概率,避免遗传算法在迭代后期出现停滞不前的现状。同时笔者在优化过程中引入模拟退火算法,克服算法容易早熟的缺点。仿真结果显示混合遗传算法能够找到全局最优解,很好的解决 JSP 调度问题。

本研究以产品的最小完工时间作为目标函数,找到了全局最优解,但实际生产过程中还应考虑客户满意度、生产成本、交货延期惩罚等其他指标,下一阶段应考虑多目标遗传算法的实现,提高算法实用性。

### 参考文献(References):

- [1] 邵新宇,饶运清. 制造系统运行优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 王 凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 吴 君,张京娟. 采用遗传算法的多机自由飞行冲突解脱策略[J]. 智能系统学报,2013,15(1):90-92.
- [4] CHUN B T, LEE S H. An efficient workload redistribution algorithm in grid computing systems using genetic information[J]. **Convergence and Hybrid Information Technology Communications in Computer and Information Science**,2012,310(2):164-171.
- [5] ZHANG Jing-jie, XV Chong-hai, YI Ming-dong, et al. De-

sign of nano composite ceramic tool and die material with back propagation neural network and genetic algorithms[J].

- Journal of Materials Engineering and Performance**, 2012,21(4):463-470.
- [6] FATTAHI P, MEHRABAD S M, JOLAI F. Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems[J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2007(18):331-342.
- [7] 张超勇,饶运清,李培根. 柔性作业车间调度问题的两级遗传算法[J]. 机械工程学报,2007,43(7):119-124.
- [8] 王万良. 人工智能及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [9] YAURIMA V, BURTSEVA L, TECRNYJH A. Hybrid Flow Shop with Unrelated Machines Sequence Dependent Setup Time and Availability Constraint: an Enhanced Crossover Operator for a Genetic Algorithm[C]//Proceedings of the 7th international conference on Parallel processing and applied mathematics. Gdansk: [s. n. ],2007:608-617.
- [10] 王万良,吴启迪,宋 毅. 求解作业车间调度问题的改进自适应遗传算法[J]. 系统工程理论与实践,2004,20(2):80-83.
- [11] 王 凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

[编辑:李 辉]

中国轻工机械协会 中国联合装备集团公司  
轻工业杭州机电设计研究院 主办

# 轻工机械

LIGHT INDUSTRY MACHINERY MAGAZINE  
全国轻工装备行业杂志



为您服务

全国邮局订阅全年6期60元  
邮发代号32-39  
广告经营许可证: 3300004000067

《轻工机械》为中国科技核心期刊、中国核心学术期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊。  
《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《万方数据-数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库》全文收录。  
英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、美国《乌利希期刊指南》(Ulrich)、波兰《哥白尼索引》(IC)收录期刊。

杂志社地址: 杭州市体育场路71号  
电 话: 0571-85186130、85187520  
联系人: 江仲文 王晓彬 高 蓝 叶 涛  
E-mail: qgjxzz@126.com (投稿) 或 qgjxzz@163.com (广告)

邮政编码: 310004  
传 真: 0571-85187520  
网 址: <http://www.qgjxzz.com>

### 本文引用格式:

冯世扣,鲍 敏,张 伟. 基于混合遗传算法的车间调度研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1315-1319.

FENG Shi-kou, BAO Min, ZHANG Wei. Job shop scheduling based on hybrid genetic algorithm[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015,32(10):1315-1319.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>