

基于遗传算法的柔性车间多目标优化调度*

方水良,姚嫣菲,赵诗奎

(浙江大学 机械工程学系,浙江 杭州 310027)

摘要:针对工件投料时间和机器起用时间不为零的柔性车间多目标优化调度问题,提出了一种改进遗传算法。染色体编码采用机器分配链和工序顺序链的双链结构;用均匀设计法、最短加工时间机器指配法、随机生成法三种方式产生初始种群;由锦标赛方法、最优保存策略和新生策略混合进行选择操作;以传统交叉方式、面向瓶颈机器的交叉方式,以及面向瓶颈工件的交叉方式混合进行交叉操作;以变动概率的方式进行变异操作;用启发式规则控制解码过程。最后,对典型算例进行了验证计算。研究表明该算法具有较强的寻优能力,并具有较快的求解速度。

关键词:柔性车间调度;遗传算法;多目标优化;均匀设计

中图分类号:TH165;TH18;TP301.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)03-0269-06

Flexible job-shop scheduling with multi-objective based on genetic algorithm

FANG Shui-liang, YAO Yan-fei, ZHAO Shi-kui

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For the multi-objective scheduling of the flexible job-shop problem with a non-zero part-arrive-time and machine-available-time, an improved genetic algorithm was proposed. Double-chain structure with machine-allocation-chain and operation-sequence-chain was used to code the chromosome; Population was initialized with three methods: uniform design, shortest-processing-time machine assignment, and random generation. Population selection was performed with tournament-selection, elitist-selection, and new-born-selection. A hybrid crossover method was proposed, including traditional crossover, machine-bottleneck oriented and job-bottleneck oriented crossover. The mutation was performed with an adaptable probability. The decoding process was controlled with heuristic rules. Finally, case-studies based on some typical benchmark-examples were carried out to evaluate the algorithm. The results show a quicker speed and powerful optimizing capability.

Key words: flexible job-shop scheduling; genetic algorithm; multi-objective optimization; uniform design

0 引 言

柔性车间调度问题(Flexible Job-Shop Scheduling Problem, FJSP)是带有机可选柔性的车间调度问题。由于该类问题的重要性和复杂性,国内外相关人士一直进行着多方面研究。为了求解更符合实际的调度问题或者使一般调度问题求解更加实用和高效,各种算法都在不断的改进和发展。

王笑蓉^[1]提出了柔性生产线的加工路径蚁群优

化和作业排序遗传算法优化的两级递阶进化优化方法;Parviz Fattahi^[2]对柔性车间调度问题建立了一个数学线性规划模型,用模拟退火启发式和禁忌搜索启发式方法分别提出了两种遗传算法;Andrea Rossi^[3]提出了用蚁群优化算法来解决带柔性路径的车间调度问题;Jie Gao^[4]将移动瓶颈法用于基因算法,求解多目标的柔性车间调度问题;Ghasem Moslehi^[5]提出了一种粒子群优化算法与局部搜索混合的算法;Celia Gutierrez^[6]对启发式遗传算法进行了修正,模块化设计混合遗传算法;Li-Ning Xing^[7]提出了一种基于知识的蚁群

收稿日期:2010-11-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA04Z146);浙江省制造业信息化重大科技攻关资助项目(2008C11012)

作者简介:方水良(1964-),男,浙江衢州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事制造执行系统、系统仿真、产品建模等方面的研究. E-mail: me_fangsl@zju.edu.cn

优化算法来求解柔性车间调度问题; Kyoung Seok Shin^[8]采用共生进化算法求解多目标柔性车间调度问题; 亓凌^[9]提出具有路径柔性的作业车间调度模型, 并给出了求解模型的自适应蚁群算法。

由于柔性车间调度问题具有其复杂性, 传统遗传算法在求解时存在搜索效率低, 易过早收敛等缺点, 现有的各种优化方法都有一定的局限性, 因此针对这些缺点, 笔者提出了一种改进遗传算法。用均匀设计法、最短加工时间机器指配法、随机生成法三种方式产生初始种群, 以提高种群的多样性; 由锦标赛方式、最优保存策略和新生策略进行选择操作, 以避免早熟; 以传统交叉, 面向瓶颈机器的交叉和面向瓶颈工件的交叉三种方式进行交叉操作, 以避免盲目交叉; 以变动概率的方式进行变异操作; 用启发式规则控制解码过程, 以提高搜索效率。仿真结果证实了该算法的有效性。

1 初始条件不为零的柔性车间调度问题

本研究主要考虑各工件可能先后到达, 有些机器由于各种原因在调度开始不能马上使用的柔性车间多目标调度优化问题。设有 n 种待加工工件:

$$J_i = J_i(A_i, R_i, O_{ij}), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i) \quad (1)$$

式中: A_i —工件 J_i 到达系统时间, R_i —工件 J_i 要求完成时间, O_{ij} —工件 J_i 加工工序, $n_i (i = 1, 2, \dots, n)$ —工件 J_i 的工序数, 总工序数 $N = \sum_{i=1}^n n_i$ 。

有 m 台可用于加工的机器 $M_l (l = 1, 2, \dots, m)$, 其

可用的开始时间为 S_l ; 工序 O_{ij} 可用的加工机器集为 $M_{ij} \subseteq \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, 设 M_{ij} 中的机器数为 W_{ij} ; O_{ij} 的加工时间为 $t_{ij}^l (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_i; l = 1, 2, \dots, W_{ij})$ 。

例如有 3 种工件 J_1, J_2, J_3 , 工序数分别为 3、3、4 道; 各道工序的可选机器及对应的加工时间如表 1 所示, 4 台机器可开始使用的时间分别为 5、0、10、0。

调度的任务是在 m 台机器上安排 n 种工件的所有工序 o_{ij} 的加工, 同时优化既定的目标。本研究主要考虑的目标函数有:

(1) “最后完工工件的完工时间最短”, 即:

$$f_1 = \min(\max_{i=1}^n C_i) \quad (2)$$

式中: C_i —工件 J_i 完成时间。

(2) “所有工件延误时间之和最少”, 即:

$$f_2 = \min\left(\sum_{i=1}^n \max(0, C_i - R_i)\right) \quad (3)$$

式中: R_i —工件 J_i 需求时间。

(3) “所有机器总负载最小”, 即:

$$f_3 = \min\left(\sum_{i=1}^m L_i\right) \quad (4)$$

式中: L_i —机器 M_i 需要承担的加工时间。

为了简化问题, 假定每台机器同一时刻只能加工一个工件; 每个工件同一时刻只能被一台机器加工; 某道工序一旦在某台机器上开始加工就不能中断; 工件 $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的加工过程需符合预先给定的工艺路径, 即: $O_{i1} \rightarrow O_{i2} \rightarrow \dots \rightarrow O_{in_i}$ 。

表 1 3×8 调度问题

$J_i(A_i, R_i)$	$J_1(6, 40)$				$J_2(0, 40)$			$J_3(0, 60)$			
O_{ij}	O_{11}	O_{12}	O_{13}	O_{21}	O_{22}	O_{23}	O_{31}	O_{32}	O_{33}	O_{34}	
O_{ij} 统一编号 1~N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
O_{ij} 可选机器集 M_{ij}	1-2-3	3-4	2-4	2-3	1-2	1-4	1-3	2-4	2	2-3	
O_{ij} 加工时间 t_{ij}^l	12-10-9	17-15	11-10	16-10	8-12	10-9	15-21	18-9	16	8-11	
机器分配链 V_1	1	3	4	2	2	1	3	4	2	3	
工序顺序链 V_2	2	5	7	1	3	8	4	6	9	10	

2 调度解空间分析

求解柔性车间调度问题, 首先要确定 N 道工序的

机器指派, 总的指派组合数为: $Z_1 = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{n_i} W_{ij}$ 。

以表 1 数据为例, 机器可选组合数为: $Z_1 = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{n_i} W_{ij} = 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 1 \times 2 = 768$ 。

其次要确定 N 道工序的加工次序。考虑到同一种工件的各道工序必须满足给定的工艺要求, 因此表

1 问题的 10 道工序总的排序组合数为: $Z_2 = \frac{N!}{n_1! n_2! \dots n_n!} = \frac{10!}{3! 3! 4!} = 4\ 200$ 。

因此该类柔性车间调度的可行解全组合数为: $Z = Z_1 Z_2$; 如表 1 所示调度问题的全组合数为: $Z = Z_1 Z_2 = 3\ 225\ 600$ 。

该类问题已被证明为 NP 完全问题, 即使用现今最快的计算装置来运行最好的算法, 也不可能在人们可接受的时间内得到问题的解, 因此只能运用一些近似求解的算法找出次优解。遗传算法就是其中一种简

单易行的智能算法,但是也存在着早熟收敛和快速收敛的矛盾,为解决这个问题,本研究提出了一种改进遗传算法。

3 改进遗传算法

3.1 调度解编码

编码问题是设计遗传算法的首要 and 关键问题。在编码方面有以下3个基本准则:

(1) 完备性:问题空间中的所有解都能作为GA空间中的染色体来表现。

(2) 健全性:GA空间中的染色体能对应所有问题空间中的候选解。

(3) 非冗余性:染色体和候选解一一对应。

基于这3个基本准则,本研究采用双链结构进行编码。第1条链 V_1 表示各加工工序 $O_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n_i)$ 对应分配的机器号 M_i ,每个基因代表各道工序选择加工的机器号,链的长度等于工序总数 N ;第2条链 V_2 表示各工序 O_{ij} 的加工顺序,每个基因代表各道工序的加工顺序,并满足工件给定的工艺顺序要求,链的长度也是等于工序总数 N 。

本研究以表1为例具体说明双链结构编码方式。其中机器分配链的解释为:工序 O_{11} 从其可选机器集 $M_{11} = \{M_1, M_2, M_3\}$ 中选择 M_1 ,因此对应基因编码为1;工序 O_{12} 所选的机器为 M_3 ,因此对应基因编码为3,依次类推得到此链。工序顺序链的解释为:各工序的加工顺序为 $O_{21}, O_{11}, O_{22}, O_{31}, O_{12}, O_{32}, O_{13}, O_{23}, O_{33}, O_{34}$ 。工序顺序链必须满足各工件的工艺路线顺序,即满足 $O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13}, O_{21} \rightarrow O_{22} \rightarrow O_{23}, O_{31} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{34}$,同一工件的后道工序不能先于前道工序进行加工。

3.2 混合方式种群初始化

设种群规模为 P ,本研究采用3种不同的方法产生 P 个初始染色体^[10],具体描述如下:

方法一:采用 $U_r(r^s)$ 均匀设计表^[11]的方式。

步骤1 计算单链的编码长度 L ;

步骤2 L 为奇数时,取试验数 $r=L$; L 为偶数时,取试验数 $r=L+1$;

步骤3 寻找比 r 小的正整数 h ,且使 r 和 h 的最大公约数为1。将符合条件的正整数生成一个向量 $h = (h_1, h_2, \dots, h_s)$;

步骤4 均匀设计表 $U_r(r^s)$ 的第 $j(j=1,2,\dots,s)$ 列由同余运算规律生成 $u_{ij} = i \cdot h_j \pmod{r}$,其中 \pmod{r} 为取余运算, i 为行号($i=1,2,\dots,r$);

步骤5 如果 $r=L+1$,则将设计表 $U_r(r^s)$ 的最后一行去掉;

步骤6 从所构造的设计表中选取第 j 列数($j=1,2,\dots,s$)。将元素 $u_{ij}(i=1,2,\dots,L)$ 通过表1中统一编号的第 i 号工序的可选机器数进行余运算,确定第 i 号工序的分配机器,从而形成染色体的机器分配链;再按该列数值初始化工序顺序链;共可以得到 s 个均匀分布的染色体。

方法二:选取最短工序时间的机器。

染色体的机器分配链选取最短工序时间的机器,使得机器总体负载最小,同时有意识地缩短任务加工时间。以表1模型为例,得到染色体具有最短工序时间的机器分配链如表2所示。

表2 最短加工时间机器链

工序	O_{11}	O_{12}	O_{13}	O_{21}	O_{22}	O_{23}	O_{31}	O_{32}	O_{33}	O_{34}
最短加工时间机器	M_3	M_4	M_4	M_3	M_1	M_4	M_1	M_4	M_2	M_2
对应的最短加工时间	9	15	10	10	8	9	15	9	16	8
机器链	3	4	4	3	1	4	1	4	2	2

方法三:随机编码方式。

机器分配链随机地从各工序 O_{ij} 的可加工机器集 $M_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n_i)$ 中选取机器号;工序顺序链随机安排工序顺序,并满足工件给定的工艺路线顺序。

上述混合方式初始化种群的目的是,均匀设计初始化方式使个体具有均匀分布的统计特性;指配最短工序时间机器的初始化方式能有意识地在最短加工时间内指配机器,提高算法寻优效率;随机初始化方式能提高初始种群的多样性。

3.3 混合选择策略

本研究采用的选择策略是最优保存策略^[12]、锦标赛选择法^[13]和新生策略相结合。

最优保存策略的具体流程:记录当前种群中适应度最高的个体,经过选择、交叉和变异后,若下一代种群中所有个体的适应度均小于当前最佳个体的适应度,则用当前最佳个体替代下一代种群中最差的个体。

锦标赛选择法的具体流程:在种群中随机选取 e 个个体, e 为锦标赛规模($e \geq 2$),然后选择适应度最优的个体。如果要通过该方法选择 E 个个体,则重复 E 次。

新生策略的具体流程:当连续几代都没有更新最优个体时,为了避免陷入局部优化,种群中随机产生若干新的个体,以开辟新的寻优空间;当种群的最优个体又得到更新时,再返回到原先的选择策略。

采用上述混合选择策略的目的是,最优保存策略

能使当前最优个体不遭破坏,是保证遗传算法收敛性的一个重要条件;锦标赛选择法将种群中适应度较高的个体以较大概率选择到下一代,而适应度较低的个体以较小的概率选择到下一代;新生策略使算法避免局部优化。

3.4 混合式交叉

考虑到优化目标是最后完工工件(机器)的完成时间最短,因此最后完工工件(机器)即为调度问题的瓶颈工件(机器)。除了传统的交叉方法以外,笔者设计了一种优化瓶颈的交叉方式,分别对瓶颈工件和瓶颈机器进行优化。根据不同比例个体数,采用 3 种不同的交叉方式产生新的个体:

方法一:两条链分别采用传统的交叉方式。

机器分配链采用两点交叉法^[14],具体流程:在两个父代中,随机选取两个交叉位置,并相互交换这两个位置之间的基因串,以得到两条新的可行链。

工序顺序链采用顺序交叉法^[15],具体流程:在父染色体 1 中,首先随机选取两个交叉位置,将两个位置之间的基因串作为子染色体 1 对应位置的基因;然后在配对的父染色体 2 中删除与所选基因串中基因值相同的基因,并从左到右依次填入子染色体 1 的空白基因位;以同样方式获得子染色体 2。

方法二:采用瓶颈机器优化的交叉方式。

步骤 1 随机产生(0,1]内的数 p ,如果 $p < p_c$ (交叉概率),则从种群中选择个体,并进行步骤 2~5;否则不进行交叉操作,直接进行步骤 5;

步骤 2 通过解码得到该个体的瓶颈机器号;

步骤 3 将该个体的瓶颈机器所加工的全部工序找出;

步骤 4 对这些工序重新分配机器,得到新的可行个体;

步骤 5 重复步骤 1~4,可以得到多个个体。

方法三:采用瓶颈工件优化的交叉方式。

步骤 1 随机产生(0,1]内的数 p ,如果 $p < p_c$ (交叉概率),则从种群中选择个体,并进行步骤 2~5;否则该次不进行交叉操作,直接进行步骤 5;

步骤 2 通过解码得到该个体的瓶颈工件号;

步骤 3 将该个体的瓶颈工件的各道工序所选的机器找出;

步骤 4 对这些工序重新分配机器,得到新的可行个体;

步骤 5 重复步骤 1~4,可以得到多个个体。

改进的优化瓶颈交叉方法主要思想就是消除目前调度方案的瓶颈,以优化当前解。该交叉方式比传统

交叉方式更具有目的性,而不是完全的盲目随机。为了提高种群的多样性,将优化瓶颈交叉方法与传统交叉方法混合。

3.5 变动概率的变异策略

机器分配链采用单点变异法,具体流程:在父染色体中,随机选取一个基因位,考察该基因位上的其他可选机器号,从中随机选取一机器号来替换该基因值。

工序顺序链采用反转变异法^[16],具体流程:在父染色体中,随机选取两个变异位置,然后将其之间的子基因串反转。

笔者提出的变动概率的变异策略的具体方法为:在优化前期变异概率为 p_m ,当连续几代最优个体都没更新时,为了避免陷入局部优化,变异概率增大到 1;当最优个体又得到更新时,变异概率回到原值。

3.6 启发式规则控制解码

为了减少无效的解码计算工作,在解码过程中增加了两条启发式规则,具体流程如下:

(1) 规则一。

步骤 1 假设每种工件每道工序都采用具有最短工序加工时间的机器,以表 1 为例,所分配机器及其工序时间如表 2 所示;

步骤 2 根据所选机器对应的加工时间 $t_{ij}^l (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n_i)$,分别计算各工件的工序总时间 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$,表 2 各工件的工序总时间分别为: $T_1=34$ 、 $T_2=27$ 、 $T_3=48$;

步骤 3 由各工件的工序总时间 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 求得最大的工序总时间 $T = \max T_i (i=1, 2, \dots, n)$,上述各工件工序总时间中,最大的工序总时间 $T = T_3=48$,该值即为该调度问题在没有考虑机器资源短缺情况下的“极限最优适应度值”;

步骤 4 每个个体解码得出的适应度值与“极限最优适应度值”比较,如果解码得到的适应度值已经达到该极限值,则算法结束,因为不可能再得到比“极限最优适应度值”更小的值。

该规则能及时停止遗传计算,提高调度优化效率。

(2) 规则二。

步骤 1 个体的机器分配链确定后,由机器分配链汇总各台机器 $M_j (j=1, 2, \dots, m)$ 所要加工的工序,以表 1 的机器分配链为例,该个体各机器分配的加工工序情况如表 3 所示。

步骤 2 根据所对应的加工工序时间 $t_{ij}^l (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n_i)$,分别计算各机器的工序总时间 $L_j (j=1, 2, \dots, m)$,表 3 中各机器承担的工序总时

间分别为: $L_1 = 22, L_2 = 44, L_3 = 49, L_4 = 19$;

表3 某个体各机器加工的工序

机器号	加工工序号	工序时间
M_1	O_{11}, O_{23}	12, 10
M_2	O_{21}, O_{22}, O_{33}	16, 12, 16
M_3	O_{12}, O_{31}, O_{34}	17, 21, 11
M_4	O_{13}, O_{32}	10, 9

步骤3 求得最大的机器加工时间 $L = \max L_j (j = 1, 2, \dots, m)$, 表1中最大的机器加工时间 $L = L_3 = 49$;

步骤4 如果 L 大于当前已求得的最优适应度值, 那么该个体被认定为淘汰个体, 不需要再进行解码, 因为无论工序顺序链如何变动, 该个体解码得到的适应度值都不可能小于 L , 也即不可能优于当前已求得的最优适应度值;

步骤5 为了保证种群的规模大小不发生变化, 被淘汰个体要由新个体取代, 并按照上述方法进行分析和解码。

规则二在解码前事先判断并淘汰劣势个体, 既减少了解码的计算量, 又能保证种群的性能向更优的方向发展。

具体解码算法根据调度解的双链 V_1, V_2 , 同时考虑各工件的不同到达时间 A_i , 以及各台机器的可取时间 S_i , 求出每道工序的起始和结束时间及其使用的机器号, 并进一步求出多目标值 f_1, f_2, f_3 等。用户可以选择上述某个单目标进行优化, 也可以选择两个目标的组合优化。

4 算例验证和分析

在本研究中, 改进的遗传算法用 Visual Basic 语言编程实现, 运行计算机的 CPU 为 Intel Core 2 Duo, 主频 2.53 GHz, 内存为 2.0 GB。15 × 10 问题调度优化过程的一个运行界面如图1所示。



图1 调度优化运行界面

为了验证本研究算法的有效性, 选择了很多文献所采用的 8 × 8、10 × 10、15 × 10 算例^[17-18]。本研究对 8 × 8、10 × 10、15 × 10 问题分别进行多次实验运行。由于遗传算法的随机性, 所得到的最优结果非唯一确

定。3种调度问题的典型优化结果甘特图如图2~图4所示。

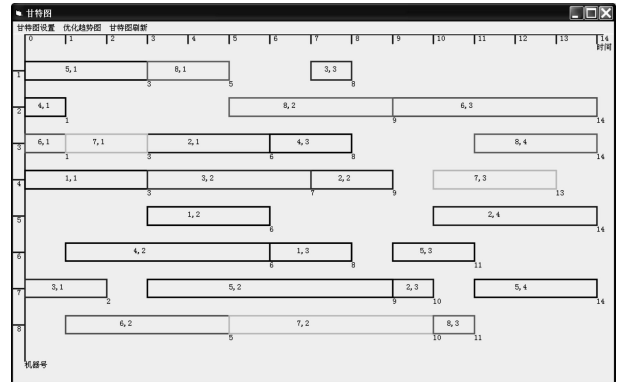


图2 8 × 8 调度问题优化结果 ($f_1 = 14, f_3 = 77$)

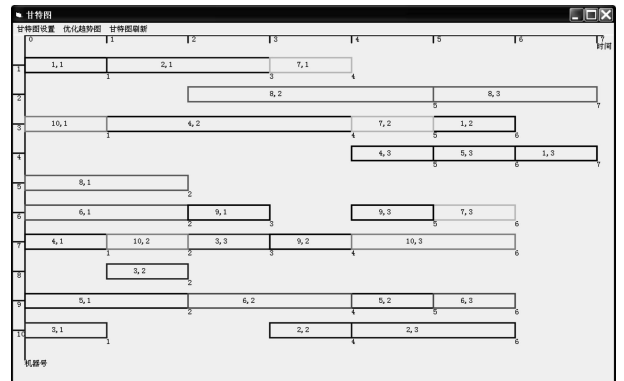


图3 10 × 10 调度问题优化结果 ($f_1 = 7, f_3 = 42$)

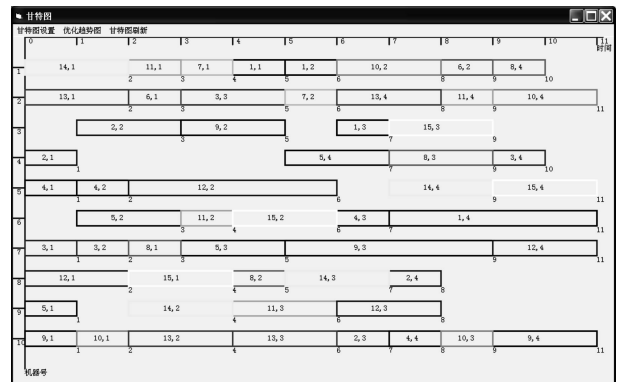


图4 15 × 10 调度问题优化结果 ($f_1 = 11, f_3 = 91$)

本算法与其它算法的比较结果如表4所示^[19-20]。对比结果表明, 对 8 × 8 问题, 本算法不但得到目前文献最好的结果 $f_1 = 14, f_3 = 77$, 而且可以得到更好的 $f_3 = 73$, 虽然 $f_1 = 16$ 有所变差; 同样对 10 × 10 问题, 本算法不但得到目前文献最好的结果 $f_1 = 7, f_3 = 42$, 而且可以得到更好的 $f_3 = 41$, 虽然 $f_1 = 8$ 有所变差。

下面针对表1给出的例子进行多目标优化调度分析。5种优化目标的运行结果如表5所示, 从表中可知, 组合优化往往可以得到更满意的结果。以 $f_1 + f_2$ 最小

为优化目标情况下的调度甘特图如图 5 所示,其中实框部分代表机器不可取时间段。从图中也可看出,工件 1 在它到达时刻(6 单位时间)后才安排加工^[21-23]。

表 4 不同算法的结果

问题	性能指标	文献[17] (2002)	文献[18] (2002)	文献[19] (2007)	文献[20] (2009)	本研究
8 × 8	最后完工工件时间	16	15/16	14/15	14	14/16
	所有机器总负载	77	79/75	77/75	77	77/73
10 × 10	最后完工工件时间	7	7	7	7	7/8
	所有机器总负载	53	45	43	42	42/41
15 × 10	最后完工工件时间	NA	23/24	12	11	11
	所有机器总负载	NA	95/91	91	91	91/92

表 5 表 1 例子多目标优化结果

选定优化目标	优化结果	目标解释
f_1	$f_1 = 53, f_2 = 13, f_3 = 118$	最后完工工件的时间最短
f_2	$f_1 = 62, f_2 = 3, f_3 = 120$	所有工件延误时间之和最少
f_3	$f_1 = 63, f_2 = 37, f_3 = 109$	所有机器总负载最小
$f_1 + f_2$	$f_1 = 53, f_2 = 6, f_3 = 122$	$(f_1 + f_2)$ 最小,实际中可以加上不同的权重
$f_1 + f_3$	$f_1 = 54, f_2 = 14, f_3 = 110$	$(f_1 + f_3)$ 最小,实际中可以加上不同的权重

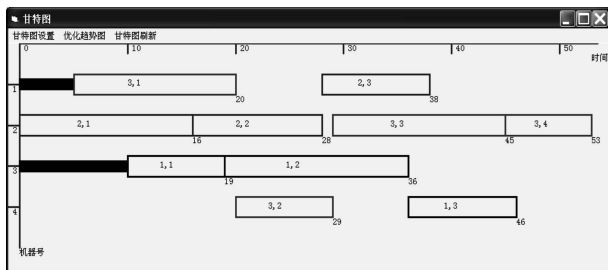


图 5 表 1 调度问题的优化结果($f_1 = 53, f_2 = 6, f_3 = 122$)

5 结束语

本研究针对工件到达时间和机器可用时间不为零的柔性车间多目标优化调度问题,开发了相应的改进遗传算法。提出的混合种群初始化方法,既能提高初始种群的多样性,又能使得个体有意识地在最短加工时间中搜索最优解;提出的混合选择策略能提高收敛速度,并保证优质个体不被破坏;提出的优化瓶颈交叉方法比传统的交叉方法目标更明确;变异概率随优化过程变动,可以有效避免陷入局优;在解码过程中增加启发式规则,能有效地判断算法结果是否已达到极限最优,并能在解码前及时淘汰明显劣质个体。通过典型案例的实验计算和分析比较,验证了该算法具有良好的收敛性和优化能力。

参考文献 (References) :

[1] 王笑蓉,吴铁军. 基于 Petri 网仿真的柔性生产调度一蚁群-遗传递阶进化优化方法[J]. 浙江大学学报,2004,38

(3):286-291.
 [2] 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.
 [3] ROSSI A, DINI G. Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimization method[J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**,2007,23(5):503-516.
 [4] GAO Jie, GEN M, SUN Lin-yan, et al. A hybrid of genetic algorithm and bottleneck shifting for multi-objective flexible job shop scheduling problems[J]. **Computers and Industrial Engineering**,2007,53(1):149-162.
 [5] MOSLEHI G, MAHNAM M. A pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search [J]. **International Journal of Production Economics**,2010, doi:10.1016/j.ijpe.2010.08.004.
 [6] GUTIERREZ C, GARCIA-MAGARINO I. Modular design of a hybrid genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem[J]. **Knowledge-Based Systems**,2010, doi:10.1016/j.knosys.2010.07.010.
 [7] XING Li-ning, CHEN Ying-wu, WANG Peng, et al. A knowledge-based ant colony optimization for flexible job shop scheduling problems[J]. **Applied Soft Computing**,2010,10(3):888-896.
 [8] SHIN K S, PARK J O, KIM Y K. Multi-objective FMS process planning with various flexibilities using a symbiotic evolutionary algorithm [J]. **Computers and Operations Research**,2010,38(3):702-712.
 [9] 亓 凌,杨建栋,李 保,等. 基于自适应蚁群算法的柔性作业车间调度问题[J]. 机电工程,2010,27(2):46-49.
 [10] 刘师宏. 基于遗传算法的车间调度优化技术与开发[D]. 杭州:浙江大学机械系,2010.
 [11] 方开泰. 均匀设计及其应用[J]. 数理统计与管理,1994,13(3):52-55.
 [12] GOLDBERG D E, KORB B, DEB K. Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results[J]. **Complex Systems**,1989,3(5):483-530.
 [13] DEJONG K A. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive System[D]. USA: University of Michigan,1975.
 [14] 刘 民,吴 澄. 制造过程智能优化调度算法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008:56-59.
 [15] DAVIS L. Applying adaptive algorithms to epistatic domains [C]//Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Los Angeles, California, USA: Morgan Kaufmann,1985:162-164. (下转第 304 页)

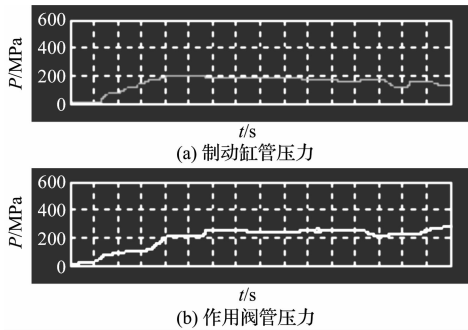


图 5 压力变化曲线

逐条匹配,其他规则都没有生效,此时共出现两种故障,需要通过结论的置信度,进一步推出最终的结论,也就是置信度最高的结论,比较可知作用阀故障的置信度高于变向阀故障的置信度,故得出最终诊断结果:作用阀发生故障。结果与实际情况相符,如图 4 所示,作用阀出现闪烁报警,在故障报警栏中显示报警原因与维修建议^[13-14]。

6 结束语

本研究以制动机系统压力速率作为研究对象,采用小波多尺度边缘检测法提取出 10 种故障征兆,并结合多征兆加权模糊产生式规则的知识表示方法,解决了机车制动机故障诊断系统中不确定性的求解,在保证故障诊断准确性、实时性要求的同时,实现了预知故障的效果,有很大的使用价值和应用前景。

参考文献 (References):

[1] 丁建波,欧长劲. 内燃机车空气制动机故障树的建立[J]. 机车电传动,2007(5):60-62,65.

- [2] 刘 泉,高殿柱,陈爱军. 电空制动机故障诊断系统设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2007,30(6):8-10.
- [3] 陈广程,陈特放. 电力机车空气制动系统的控制与故障诊断[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院,2004.
- [4] 梁建辉,王旭东,李庆全,等. 阵地降温机实时故障诊断专家系统研究[J]. 机电工程技术,2010,39(6):61-62.
- [5] 张 琴. 饲料加工设备故障诊断专家系统知识库的设计研究[J]. 机电工程技术,2009,38(11):16-18.
- [6] 杜文正. 基于小波多尺度边缘检测的液压缸内泄漏故障诊断[J]. 液压与传动,2003(3):52-53.
- [7] STEPHANE M. A Wavelet Tour of Signal Processing[M]. 2nd ed. USA: Academic Press,1999.
- [8] NUNEZ J, FORS X O, PRADES A, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition[J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1999,37(3):1204-1210.
- [9] SLANG W. Scheduling as a fuzzy multiple criteria optimization problem[J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 1996(77):197-222.
- [10] YEUNG D S, TSANG E C C. Weighted fuzzy production rules[J]. **Fuzzy Sets and Systems**,1997(88):299-313.
- [11] 刘晓波,黄其柏. 水轮发电机组故障诊断模糊专家系统研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):71-73.
- [12] 胡文兵,孟 波,王少梅. 基于贝叶斯网络的权重自学习方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(12):1781-1784.
- [13] 黄亚勤,冯剑威,王会强. 可拆式板式换热器故障分析及结构优化[J]. 轻工机械,2010,28(2):100-102.
- [14] 周将坤,陆森林. 基于 EHD 平均能量法的滚动轴承故障诊断[J]. 轻工机械,2010,28(2):36-40.

[编辑:张 翔]

(上接第 274 页)

[16] FOGEL D B. A parallel processing approach to a multiple traveling salesman problem using evolutionary programming [C]//Proceedings on the Fourth Annual Parallel Processing,1990:318-326.

[17] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Approach by localization and multi-objective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problem[J]. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Application and Reviews**,2002,32(1):1-13.

[18] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic [J]. **Mathematics and Computers in Simulation**,2002,60(3-

5):245-276.

- [19] 袁 坤,朱剑英. 一种求解多目标柔性 Job Shop 调度的改进遗传算法[J]. 中国机械工程,2007,18(2):156-160.
- [20] 张国辉,高 亮,李培根,等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械工程学报,2009,45(7):145-151.
- [21] 董玲娇. 基于遗传算法的 RBF 神经网络在铂电阻温度传感器非线性补偿中的应用[J]. 轻工机械,2010,28(1):60-63.
- [22] 杜海霞. 锥齿轮减速器的遗传算法优化设计[J]. 现代制造技术与装备,2010(4):22-23.
- [23] 葛惠民,蔡炯炯. 皮革类专用冲裁设备的控制策略和关键算法[J]. 轻工机械,2008,26(4):70-72.

[编辑:张 翔]