第27卷 第3期
2001年5月
自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA
Vol. 27, No. 3
May, 2001

短文

带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题的一种遗传算法[1)]

刘 民 吴 澄 尹文君
(清华大学自动化系 北京 100084)
(E-mail: liumin@cims. tsinghua. edu. cn)

摘 要 研究带特殊工艺约束的并行机器生产线的调度方法. 以完工时间、拖期时间和超库存时间的惩罚量之和最小为调度目标，对该优化调度问题提出了一种遗传算法，并在问题建模、遗传算法编码、初始种群的产生办法、交叉及变异方法等方面作了研究. 数值计算结果表明所提出的遗传算法是有效的.

关键词 并行机器生产线，遗传算法，调度，工艺约束.

SOLVING IDENTICAL PARALLEL MACHINE PRODUCTION LINE SCHEDULING PROBLEM WITH SPECIAL PROCEDURE CONSTRAINT BY GENETIC ALGORITHM

LIU Min WU Cheng YIN Wen-Jun
(*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing* 100084)
(E-mail: liumin@cims. tsinghua. edu. cn)

Abstract In this paper, identical parallel machine production line scheduling problem with special procedure constraint is researched. The scheduling objective is to minimize the total punishment of makespan, tardy time and overstock time, and a genetic algorithm is presented for solving the optimization scheduling problem. Researches are made in aspects such as problem modeling, coding, crossover and mutating of genetic algorithm and so on. Digital computation results show the effectiveness of the proposed genetic algorithm.

Key words Identical parallel machine production line, genetic algorithm, scheduling, procedure constraint.

1) 国家自然科学基金(60004010)和国家科技部中英科技合作基金资助项目.
收稿日期 1999-02-04 收修改稿日期 1999-05-25

1 引言

目前对并行机器生产线调度问题的研究主要局限在加工能力完全相同的并行机器生产线，且大多采用启发式算法[1,2]. 为了提高调度算法的性能，文献[3]对加工能力完全相同的并行机器生产线调度提出了一些遗传算法，得到了比较好的调度结果. 但在工业生产中，特别是钢铁、化工、纺织生产中经常遇到加工能力不完全相同的并行机器生产线，即生产线中每台机器可加工的任务的类型受工艺约束. 对这类带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题，国际上很少有文献报道，用文献[1～3]中介绍的方法也很难有效地解决这类问题，在生产实践中则主要凭经验来排产. 文献[4]针对冷轧精整生产中的并行机器生产线调度问题提出了一种遗传算法解法，但由于在每次交叉、变异后需检查工艺约束是否满足，不仅寻优效率低，解的质量也不令人满意. 本文对带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题提出了一种新的遗传算法方法，并在问题的描述、遗传算法编码、初始种群的产生办法、交叉方法、变异方法等方面作了研究，所提出的方法能自动满足工艺约束. 用来自国内某厂的实际数据进行了数值仿真，结果表明本文提出的遗传算法是有效的，且优于文献[4]提出的遗传算法.

2 问题的描述

带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题可描述如下：在生产线中，有 n 个相互独立的工件，m 台机器，每个工件只有一道工序，且可由 m 台机器中的某一台完成加工，每台机器的加工能力可以不相同，即每台机器可加工的工件的类型受限. 设全体机器的集合为 A，可加工工件 k 的机器的集合为 A_k，则特殊工艺约束可表示为 $A_k \subseteq A$. 要找一个最小调度，即在满足特殊工艺约束的前提下，确定每台机器上加工的工件代号及其加工顺序，使加工完所有工件后的完工时间、滞后成本、库存成本总和最小. 设 m_j 为任一台机器 j 上加工的工件总数，$k(j,i)$ 为机器 j 上第 i 次加工的工件代号，t_j 为机器 j 的完工时间，显然 $j \in [1,m], i \in [1,m_j], k(j,i) \in B_j$，其中 B_j 为机器 j 上可加工的工件集合. 设每个工件在各自可加工的机器上的加工时间确定，$t(k(j,i),j)$ 为工件 $k(j,i)$ 的加工时间，则工件 $k(j,i)$ 的完工时间可表示为 $\sum_{i_0=1}^{i} t(k(j,i_0),j)$. 设调度又受到工件 $k(j,i)$ 的交货期 $d(k(j,i))$ 和最长库存时间 $t_B(k(j,i))$ 的限制，则工件 $k(j,i)$ 的拖期时间可表示为 $\max(0, \sum_{i_0=1}^{i} t(k(j,i_0),j) - d(k(j,i)))$，超库存时间可表示为 $\max(0, \sum_{i_0=1}^{i} t(k(j,i_0),j) - d(k(j,i)) - t_B(k(j,i)))$.

调度目标是在满足工艺约束的前提下，分配 n 个工件给 m 台机器，使加工完所有工件后由下式

$$f = \lambda_1 \max_{1 \leqslant j \leqslant m} t_j + \sum_{k(j,i)=1}^{n} [\lambda_2 \max(0, \sum_{i_0=1}^{i} t(k(j,i_0),j) - d(k(j,i))) +$$

$$\lambda_3\max(0,\sum_{i_0=1}^{i}t(k(j,i),j)-d(k(j,i))-t_B(k(j,i)))]=$$

$$\lambda_1\left\{\max_{1\leqslant j\leqslant m}t_j+\sum_{k(j,i)=1}^{n}\left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\max\left(0,\sum_{i_0=1}^{i}t(k(j,i_0),j\right)-d(k(j,i)))+\right.\right.$$

$$\left.\left.\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\max\left(0,\sum_{i_0=1}^{i}t(k(j,i_0),j\right)-d(k(j,i))-t_B(k(j,i)))\right]\right\} \tag{1}$$

所表示的目标函数最小,其中$\max\limits_{1\leqslant j\leqslant m}T_j$为总完工时间,$\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$分别为完工时间、拖期时间和超库存时间的单位惩罚成本.在本文中为了研究问题的方便,不失一般性,可假定$\lambda_1=1,\frac{\lambda_2}{\lambda_1}=\alpha,\frac{\lambda_3}{\lambda_1}=\beta$,则(1)式可改写为

$$f=\max_{1\leqslant j\leqslant m}T_j+\sum_{k(j,i)=1}^{n}\left[\alpha\max\left(0,\sum_{i_0=1}^{i}t(k(j,i_0),j)-d(k(j,i))\right)+\right.$$

$$\left.\beta\max\left(0,\sum_{i_0=1}^{i}t(k(j,i_0),j)-d(k(j,i))-t_B(k(j,i))\right)\right]. \tag{2}$$

3　算法

下面我们来构造适用于带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题的遗传算法.

1)编码设计

把每个工件k的加工机器a_k和在a_k上相应的加工顺序定义成二维数组$\begin{pmatrix}a_k\\b_k\end{pmatrix}$,则按自然数递增顺序$1\Rightarrow2\Rightarrow\cdots\Rightarrow n$排列的$n$个工件号相应的二维数组可组成一个$n\times2$矩阵$\begin{pmatrix}a_1a_2\cdots a_k\cdots a_n\\b_1b_2\cdots b_k\cdots b_n\end{pmatrix}$.设$A_k$为可加工工件$k$的机器集合,$m_{a_k}$为机器$a_k$加工的工件总数,则$a_k\in A_k,b_k\in[1,m_{a_k}]$.在本文中将$a_k,b_k(k=1,\cdots,n)$组成的$n\times2$矩阵$\begin{pmatrix}a_1a_2\cdots a_k\cdots a_n\\b_1b_2\cdots b_k\cdots b_n\end{pmatrix}$作为染色体.

2)产生初始种群

随机产生N个n维行向量$(a_1a_2\cdots a_k\cdots a_n)$作为初始种群中$n\times2$矩阵的第1行,其中$a_k$为自然数,且满足$a_k\in A_k$,$A_k$为可加工工件$k$的机器集合.

设机器j上加工的工件总数为m_j,则染色体中与机器j相应的第2行的元素随机地从$[1,m_j]$中选择不重复的自然数,以确定相应的工件在机器j上的加工顺序.

用本文方法产生的个体不仅能自动满足约束条件,从而大大减小了产生初始可行解的计算量.

3)交叉

考虑到每个个体每行的基因串分别代表不同的含义,为了使交叉时满足调度的约束要求,提高交叉效率,本文对染色体的两行对应的基因串分别独立进行交叉.

由于每个工件可加工机器的集合是确定的,对用于交叉的两个个体的第1行基因串采用两点交叉后,仍然满足工艺约束条件.采用两点交叉是为了使信息交换更充分,提高交

叉效率.

对用于交叉的两个个体的第2行基因串,则先采用两点交叉后在尽可能多地保留父代信息(此处主要指同一台机器上被加工的工件的先后顺序)的原则下,按以下原则进行修正.经过两点交叉后第2行基因串中与机器 j 相应的 m_j 个元素为 $b_{j1},b_{j2},\cdots,b_{jl},\cdots,b_{jm_j}$,令 $b_{jl}(1\leqslant l\leqslant m_j)$ 的最小值对应的新的基因值为1,次小值对应的新的基因值为2,依此类推.若经过交叉后 $b_{jl}(1\leqslant l\leqslant m_j)$ 中有 p 个相同的值应对应新基因值 q,则从 $[q,q+p-1]$ 中随机地选取互不相同的 p 个值作为修正后的相应位置的 p 个基因值.通过以上方法得到 m_j 个新基因值作为修正后的个体第2行基因串与机器 j 相应的位置上的基因值.

设用于交叉的两个个体为 $\begin{pmatrix}A_1\\B_1\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}A_2\\B_2\end{pmatrix}$,其中 $A_1(A_2)$,$B_1(B_2)$ 分别表示个体的第1行和第2行基因串,$A'_1(A'_2)$ 和 $B'_1(B'_2)$ 分别为经过两点交叉后个体的第1行和第2行基因串,B''_1,B''_2 为交叉后经过修正的个体的第2行基因串.则交叉过程可用下式表示:

$$A_1\times A_2\Rightarrow A'_1,A'_2,\quad B_1\times B_2\Rightarrow B'_1,B'_2,\ B'_1\oplus\Rightarrow B''_1,\quad B'_2\oplus\Rightarrow B''_2,$$

此处符号 $\times$,$\oplus$ 分别表示对第1行基因串和第2行基因串的交叉操作和交叉后对第2行基因串的修正操作,个体的第1行和第2行基因串选取相同的交叉位置,并分别以概率 p_c 进行交叉运算,$\begin{pmatrix}A'_1\\B''_1\end{pmatrix}$,$\begin{pmatrix}A'_2\\B''_2\end{pmatrix}$ 即为交叉后的新个体.

例1. 以下举例对本文提出的交叉方法予以说明.

交叉前个体 $\begin{pmatrix}A_1\\B_1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}13\vdots 312\vdots 212\\21\vdots 213\vdots 132\end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix}A_2\\B_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}32\vdots 112\vdots 331\\12\vdots 321\vdots 231\end{pmatrix}$,

交叉后个体 $\begin{pmatrix}A'_1\\B'_1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}13\vdots 112\vdots 212\\\underline{2}1\vdots \underline{\underline{3}}\underline{2}1\vdots 1\underline{\underline{3}}2\end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix}A'_2\\B'_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}32\vdots 312\vdots 331\\12\vdots 213\vdots 231\end{pmatrix}$,

交叉后对个体的第2行基因串经过修正的个体 $\begin{pmatrix}A'_1\\B''_1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}13\vdots 112\vdots 212\\\underline{1}1\vdots \underline{\underline{4}}\underline{2}1\vdots 2\underline{\underline{3}}3\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}A_2\\B''_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}32\vdots 312\vdots 331\\11\vdots 212\vdots 342\end{pmatrix}$,其中带有下划线—,=的位置表示经过交叉后第1个个体的第2行基因串中与机器1相应的4个基因中有相同的基因值2和3,需产生随机正整数进行修正的情形,符号 $\vdots$ 表示交叉点的位置.

4)变异

由于染色体第1行基因串每个元素均属于相应的机器集合 $A_k(k=1,2,\cdots,n)$,故本文采用一种有约束的变值变异方法,即对第1行的每1位随机地选取(0,1)之间的实数 r_k,若 $r_k<p_m$,则随机地从 A_k 选取 a'_k 取代 a_k.

对染色体第2行基因串,不进行变异,但为了满足问题的约束,在尽可能多地保留父代信息(此处主要指同一台机器上的被加工工件的先后顺序)的原则下,按以下原则进行修正.变异后个体的第2行基因串中与机器 j 相应的 m_j 个元素为 $b_{j1},b_{j2},\cdots,b_{jl},\cdots,b_{jm_j}$,令 b_{jl} $(1\leqslant l\leqslant m_j)$ 的最小值对应的新的基因值为1,次小值对应的新的基因值为2,依此类推.若经过变异后 $b_{jl}(1\leqslant l\leqslant m_j)$ 中有 p 个相同的值应对应新基因值 q,则从 $[q,q+p-1]$ 中随机地选取互不相同的 p 个值作为修正后的相应位置的 p 个基因值.通过以上方法得到 m_j 个新基因值作为修正后的个体第2行基因串与机器 j 相应的位置上的基因值,从而可确定

变异后相应个体的第2行基因串的各个元素值.

设用于变异的个体为 $\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$，其中 A_1，B_1 分别表示个体的第1行和第2行基因串，A'_1 为经过变异后个体的第1行，B'_1 为变异后经过修正的个体的第2行基因串，则变异过程可用下式表示：

$$A_1 \uparrow \Rightarrow A'_1, \quad B_1 \oplus \Rightarrow B'_1,$$

此处符号 $\uparrow$，$\oplus$ 分别表示第1行基因串的变异操作和变异后对第2行基因串的修正操作，$\begin{pmatrix} A'_1 \\ B'_1 \end{pmatrix}$ 即为变异后的新个体.

例2. 以下举例说明本文的变异方法.

变异前个体 $\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13\underline{3}12212 \\ 21213132 \end{pmatrix}$，

第1行基因串变异后个体 $\begin{pmatrix} A'_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13\underline{1}12212 \\ 21213132 \end{pmatrix}$，

变异后对第2行基因串经过修正的个体 $\begin{pmatrix} A'_1 \\ B'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13112212 \\ 21311243 \end{pmatrix}$，

其中带有下划线的位置为个体的第1行基因串中需变异的位.

4　实例计算

为了检验本文算法的有效性，我们用来自国内某钢铁厂冷轧精整生产调度中的实际数据进行数值仿真. 在冷轧精整生产中，根据钢卷的宽度和厚度分为一定的类别，不同的类别的钢卷有不同的加工条件，分配给不同的生产线，同时生产调度又受到钢卷交货期和库存时间的限制.

该厂某横切机组共有4条生产线，一条只能加工宽度小于1.0米的，一条只能加工1.5米以下的，一条可加工2.0米以下的，另一条可加工所有宽度的钢卷. 这个问题显然属于本文所描述的带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题，我们将本文算法和文献[4]算法应用于该问题，并在586微机上进行了数值仿真. 表1为机器可加工的钢卷类型，表2为两种算法各运行20次得到的数值计算结果.

表1　机器可加工的钢卷类型

机器	可加工的钢卷类型				
m1	A	B	C	D	E
m2	A	B	C	D	
m3	A	B	C		
m4	A	B			

表2　数值计算结果

算法 \ 性能	f_{avg}	f_{worst}	N_{avg}	N_{worst}	λ_{avg}	$\Delta f(\%)$
算法1	6.20	8.00	1.55	4	0.86	7.00
算法2	5.75	6.50	1.20	2	0.98	

说明. 算法1即文献[4]算法；算法2即本文算法；f_{avg} 为成本函数平均值；f_{worst} 为成本函数最差值；N_{avg} 为拖期工件数平均值；N_{worst} 为拖期工件数最差值；λ_{avg} 为机器利用率平均值；$\Delta f(\%)=\dfrac{f^2_{avg}-f^1_{avg}}{f^1_{avg}}\times 100\%$ 成本函数平均值下降率.

从表2可看出，在考虑钢卷交货期和库存时间的限制时，用本文算法得到的成本函数

的平均性能大大优于文献[4]中的算法;另外用本文算法在满足成本函数较优的前提下,能使得拖期工件数较少,也即它能同时实现多个目标较优.同时,用本文算法得到的机器的平均利用率也大大优于文献[4]算法,即算法能确保负载较均衡.

3 小结

带特殊工艺约束的并行机器生产线调度问题是一个很困难的问题,至今未有令人满意的算法.本文提出了一种新的遗传算法方法,并在遗传算法编码设计、初始种群产生方法、交叉、变异方法等方面提出了新的方法.用来自工厂的实际数据进行了数值仿真,结果表明本文提出的遗传算法是有效的,且优于文献[4]提出的遗传算法.

参 考 文 献

1 Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput. & Ops. Res.*, 1986, **13**(5): 533～549

2 Gursel, Suerand Eduardo baez. Minimizing the number of tardy jobs in identical machine scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 1993, **25**(4): 243～246

3 Liu Min, Wu Cheng, Jiang Xinsong. Genetic algorithm method for minimizing the number of tardy jobs in identical parallel machine scheduling problem. *Chinese Journal of Electronics*, 1998, **7**(2): 188～192

4 董斌,李颢,邵惠鹤,王洪水.基于遗传算法的一类 Job-shop 调度,控制与决策,1998,**13**(1):72～74

刘 民 1965年生,清华大学自动化系国家 CIMS 工程技术研究中心讲师、博士,中国自动化学会名词工作委员会副主任兼秘书长.目前感兴趣的研究方向为进化计算及复杂制造系统建模、分析和优化等.已在国内外核心刊物和会议上发表论文40多篇.

吴 澄 中国工程院院士,“八六三”计划自动化领域首席科学家,清华大学自动化系教授、博士生导师、国家 CIMS 工程技术研究中心主任.目前感兴趣的研究方向为进化计算及复杂制造系统建模、分析和优化等.已在国内外核心刊物和会议上发表论文100多篇.