

# Job-shop 提前/拖期调度问题的研究\*

姚伟力 杨德礼 胡祥培  
(大连理工大学系统工程研究所 116023)

**摘要** 基于模糊控制和遗传算法,提出了求解 Job-shop 提前/拖期问题的联合算法。用遗传算法确定可行调度序列,然后用模糊控制器对开工时间加以调整。模糊控制的引入为有效地求解 Job-shop 提前/拖期调度问题提供了新方法。仿真实验证明了联合算法的有效性。

**关键词** 提前/拖期调度,作业车间,遗传算法,模糊控制,联合算法

**分类号** TB 49

## Earliness/Tardiness Job-shop Scheduling Problem

Yao W eili, Yang D eli, Hu X iangpei  
(Dalian University of Technology)

**Abstract** Based on genetic algorithm and fuzzy control theory, a united algorithm for solving E/T scheduling problem is presented. This genetic algorithm is used to determine feasible scheduling sequence and fuzzy controller is adopted to adjust the leading time. A new method is proposed to study scheduling problem. The numerical result obtained proves the correctness and efficiency of the united algorithm.

**Key words** earliness/tardiness scheduling, job-shop, genetic algorithms, fuzzy control, united algorithm

## 1 引言

随着 JIT 思想在制造业的广泛传播,提前/拖期(E/T)调度问题的研究得到普遍重视。Baker 和 Sudder<sup>[1]</sup>对此问题做了较全面的综述,对单机调度的模型和求解方法进行了系统的归类。目前,对 E/T 问题的研究主要集中在单机问题上,也有一些文献处理并行机的情形,但对 Job-shop 提前/拖期调度问题的研究则较少。在假定工件的开工时间为零的前提下,Falkenauer 和 Bouffouix<sup>[2]</sup>采用遗传算法求解 Job-shop 提前/拖期调度问题,所得结果并不理想。这是由于实际调度中工件的开工时间应根据交货期、工件的流程时间而定,开工时间选取的好坏直接关系到调度结果,只有给出较精确的开工时间和好的调度方案,才能保证调度结果的最优性。

本文针对 Job-shop 提前/拖期调度问题提出分层调度模式,把问题分解为给定工件开始加工时

间情况下的调度问题,以及在给定调度序列情况下对开始加工时间进行调节的控制问题,并构造了基于模糊控制和遗传算法的联合算法。仿真实验证明了该算法的有效性。

## 2 Job-shop 提前/拖期调度模型及算法

### 2.1 提前/拖期的调度模型

Job-shop 提前/拖期问题要求在指定时间内在  $m$  台机器上加工完  $n$  类工件。为定量表述一般作业调度过程,现做如下假设及符号说明:

**假设 1** 假定每种机器各只有一台;每台机器可加工多种类型的工件,且至多只能加工某种工件的一道工序;每种工件的任一道工序只能在一台机器上加工。

对任意给定的正整数  $p$ ,定义指标集  $I_p \triangleq \{1, 2, \dots, p\}$ 。设  $J_i$  表示第  $i$  类工件,  $J = \{J_i | i \in I_n\}$  表示  $n$  类工件的集合;  $X_i$  是第  $i$  类工件的件数,  $D_i$  是第  $i$  类工件的期限,  $C_i$  是第  $i$  类工件的完工时间;机器编

\* 1998-12-28 收稿, 1999-01-20 修回

码为  $1, 2, \dots, m$ , 即  $I_m$  为  $m$  台机器代码的集合;  $o_{ik}$  表示  $J_i$  在机器  $k \in I_m$  上加工,  $(o_{ik}, o_{ik})$  表示工件  $J_i$  先在机器  $k \in I_m$  上加工, 然后在机器  $k \in I_m$  上加工。记  $A = \{(o_{ik}, o_{ik}) \mid k, k \in I_m, i \in I_n\}$ ,  $E_k = \{o_{ik} \mid i \in I_n, k \in I_m\}$  表示在机器  $k$  上加工的  $J_i$  的集合,  $E = \bigcup_{k=1}^m E_k$  是所有  $o_{ik}$  的集合;  $p_{ik}^u$  为  $J_i$  的单个工件在机器  $k$  上的加工时间,  $p_{ik} = p_{ik}^u X_i$  表示加工  $o_{ik}$  的时间,  $t_{ik}$  表示  $o_{ik}$  的开始加工时间。

E/T 调度问题可用数学模型描述如下

$$\begin{aligned}
 \text{(P)} \quad & \min \sum_{i=1}^n (C_i - D_i)^2 \\
 \text{s.t.} \quad & t_{ik} - (t_{ik} + p_{ik}) \leq 0 \\
 & \forall (o_{ik}, o_{ik}) \in A \\
 & \begin{cases} t_{ik} - (t_{ik} + p_{ik}) \leq 0 & \text{成立} \\ t_{ik} - (t_{ik} + p_{ik}) > 0 & \text{否则} \end{cases} \\
 & \forall o_{ik}, o_{ik} \in E_k, k \in I_m \\
 & C_i = \max\{t_{ik} + p_{ik} \mid \forall o_{ik} \in E\}, i \in I_n \\
 & t_{ik} \geq 0, \forall o_{ik} \in E
 \end{aligned}$$

模型(P) 描述了标准的 Job - shop 提前 / 拖期调度问题。本文对给定工件开始加工时间的调度问题, 用遗传算法来求解; 对给定调度序列对开始加工时间进行调整的控制问题, 用模糊控制来求解。

### 2.2 遗传算法求解调度问题

定义 1 各机器上的工序集对应染色体空间, 染色体空间中每个染色体所对应的有序字符串称为 JSS 个体。

每个 JSS 个体由若干子串构成, 每台机器对应一个子串, 每个子串描述在同一台机器上加工工序的优先关系。

本文采用自然码进行编码, 交叉和变异操作都在子串内进行。交叉操作采用 LOX 算子<sup>[2]</sup>, 变异操作采用逆转变异算子, 具体操作规则详见文献[3]。

令  $st_i(i \in I_n)$  为第  $i$  类工件的开始加工时间,  $T = (st_1, st_2, \dots, st_m)$  为  $n$  类工件的开始加工时间向量; 并令  $N_G$  为种群规模,  $it$  为迭代次数,  $G_{it}$  为第  $it$  代生成的种群, 种群的个体为调度序, 进化代数 Gen, list 存放最优调度方案,  $f^*$  是对应于 list 的目标函数。对于给定的  $T$ , 用遗传算法(GA) 求最优调度序。算法步骤为:

- G1: 输入  $T, N_G$  和 Gen, 随机生成初始种群  $G_0 = \{g_1, g_2, \dots, g_{N_G}\}$ , 并令  $f^* = +\infty, it = 0$ ;
- G2: 处理  $G_{it}$ , 即将所有存在死锁的个体解开;

G3: 计算个体  $g_{it} \in G_{it}, t \in I_{N_G}$  的适应度

$$f(g_{it}) = \sum_{i=1}^n (C_i - D_i)^2$$

若  $f(g_{it}) < f^*$ , 则  $f^* = f(g_{it})$ , list =  $g_{it}$ , 即保留适应度最小的个体;

G4: 若  $it = \text{Gen}$ , 则算法终止, list 即为最优调度方案; 否则, 转 G5;

G5: 计算个体  $g_{it} \in G_{it}, t \in I_{N_G}$  在下代中的选择概率

$$p(g_{it}) = \frac{f(g_{it})}{\sum_{i=1}^{N_G} f(g_{it})}$$

G6: 按  $p(g_{it}), t \in I_{N_G}$  选择优良个体进行交叉、变异和复制操作, 以产生新一代种群  $G_{it+1}$ , 并令  $it = it + 1$ , 转 G2。

针对遗传算法在迭代过程中会出现提前收敛的情形, 文献[4] 提出灾变算子, 灾变导致种族进化过程中新个体的出现, 拓展了求解空间。本文在群体进化过程中引入了灾变算子, 如果最小适应度值连续数代保持不变, 则下一代除保存适应度最小的个体外, 其他个体调用随机程序生成, 以此扩大对解空间的搜索范围。

### 2.3 对开工时间的控制

把生产系统作为受控对象, 开工时间对应系统的输入, 完工时间对应系统的输出。由于 Job-shop 的特点, 输入输出之间的关系很难用传统的控制模型来精确描述。本文引入模糊控制器调整开工时间, 使工件尽可能按期完工。

对给定的可行调度序列, 可根据完工时间和期限的偏差来调整开工时间。对第  $i(i \in I_n)$  类工件, 用  $e_i = D_i - C_i$  表示完工时间与期限的偏差,  $ce_i$  表示偏差  $e_i$  的变化率。令  $\tilde{E}_i, \tilde{CE}_i, \tilde{ST}_i$  分别为  $e_i, ce_i, st_i$  对应的模糊子集, 定义为

$$\{\text{NB, NS, ZO, PS, PB}\}$$

分别表示“负大”、“负小”、“零”、“正小”、“正大”。

$\tilde{E}_i, \tilde{CE}_i, \tilde{ST}_i$  对应的论域及隶属函数的选取由具体问题而定。对第 3 节的算例, 可把  $\tilde{E}_i, \tilde{CE}_i, \tilde{ST}_i(i \in I_6)$  的论域分成如下的档级

$$\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$$

隶属函数取三角形函数。

Job-shop 环境对应的生产调度系统是一个多输入多输出系统, 由于存在多个变量相互耦合, 很难进行控制。本文引入解耦因子  $\omega$  用以表示工件之间

的相互作用关系,即对工件  $i(i \in I_n)$  而言,  $st_i$  由  $e_i, ce_i, \omega$  确定。这样,通过引入解耦因子,把实际的调度系统化为  $n$  个单输入单输出的系统。  $\Omega \triangleq \{-1, 0, 1\}$  ( $|\Omega| = 3$ ) 表示集合  $\Omega$  的元素个数,  $\omega \in \Omega$ , 取值视具体问题而定。对第 3 节的算例,若已知调度中存在 3 个以上的工件提前,  $\omega = -1$ ; 如果存在 3 个以上的工件拖期,则  $\omega = 1$ , 否则  $\omega = 0$ 。

为制订模糊控制规则,令  $\tilde{E}_i^L, \tilde{CE}_i^L, \tilde{ST}_i^L$  分别为变量  $e_i, ce_i, st_i(i \in I_n)$  在第  $L$  条规则中对应的模糊子集,  $\bar{\omega} \in \Omega$  则第  $L$  条模糊控制规则确定如下

If  $e_i$  is  $\tilde{E}_i^L$  and  $ce_i$  is  $\tilde{CE}_i^L$  and  $\omega = \bar{\omega}$   
then  $st_i$  is  $\tilde{ST}_i^L$

对第 3 节的算例,规则数  $L$  最大为  $5 \times 5 \times |\Omega| = 75$ , 即  $L \in I_{75}$ ; 而引入解耦因子前的规则数为  $5 \times 5 \times 6^2$ 。显然,解耦因子的引入大幅度降低了规则数,使控制问题更易操作。

表 1 给出  $\omega = 0$  时的模糊控制规则。类似地,易给出  $\omega = -1, 1$  时的模糊控制规则。

表 1 模糊控制规则表

$ce_i$	$e_i$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	ZO	ZO
NS	NB	NS	NS	PS	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	ZO	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

对给定的  $S$  及  $T$ , 模糊控制器控制算法(FCA)步骤为:

- S1: 根据工件的工艺和期限要求, 确定  $st_i, e_i, ce_i(i \in I_n)$  的论域, 即其变化范围;
- S2: 在论域上建立参考模糊子集;
- S3: 建立模糊控制规则表(如表 1);
- S4: 确定  $e_i, ce_i(i \in I_n)$  在各自论域相应模糊子集上的隶属度, 找出具有最大隶属度的模糊子集;
- S5: 通过查询模糊规则表确定模糊输入, 将模糊输入转换为精确输入;

表 2 本文算法与文献[5]算法的比较

次 数		工件 1	工件 2	工件 3	工件 4	工件 5	工件 6	目标函数
文献[5]算法	$st$	0	0.33	0	0	0	0	
	$ct$	18.3	30.3	28.3	39	34	33	32.5
	WIP	18.3	30	28.3	39	34	33	
本文算法	$st$	0	5	5	7	6.67	5	
	$ct$	19.7	29.3	30	38	30.3	38.3	14.7
	WIP	19.7	24.3	25	31	24.7	33.3	
DWIP (%)		-0.07	0.165	0.118	0.20	0.27	-0.01	54.95

(下转第 332 页)

S6: 重复 S4, 直到偏差  $e_i(i \in I_n)$  属于模糊集 ZO 的隶属度大于 0.8, 则控制算法结束, 并输出开始加工时间和完工时间。

### 2.4 基于模糊控制和遗传算法的联合算法

本文基于遗传算法和模糊控制构造了联合算法(MA)。算法由  $J$  次迭代构成,  $J$  为最大迭代次数,  $T_0 = (st_1^0, st_2^0, \dots, st_n^0)$  为给定的初始加工时间向量,  $S_j(j \in I_J)$  为第  $j$  次迭代由 GA(此时  $T = T_{j-1}$ ) 得到的调度序,  $T_j = (st_1^j, st_2^j, \dots, st_n^j)(j \in I_J)$  为对求出的  $S_j$  由 FCA 得到的开始时间向量。算法步骤如下:

- M 1: 给定  $J, T_0$ , 令  $j = 1$ ;
- M 2: 对已知的  $T_{j-1}$ , 用 GA 求解目标函数尽可能小的调度序列  $S_j$ ;
- M 3: 对已知的调度序列  $S_j$  及开始加工时间向量  $T_{j-1}$ , 用算法 FCA 计算  $T_j$ ;
- M 4: 如果  $j = J$ , 则算法终止,  $S_j, T_j$  即为最优的调度序及相应的开始加工时间向量; 否则,  $j = j + 1$ , 转 M 2。

## 3 算法分析

以著名的  $6 \times 6$  标准(Benchmark)调度问题为例, 假定每类工件都加工 60 个, 设定工件的交货期  $D = (20, 30, 30, 40, 30, 36)$ 。交叉算子取 0.8, 变异算子取 0.05, 适应值连续 20 次迭代过程中不发生变化, 遗传算法发生一次灾变。本文测试 1 000 次发生 8 次灾变, 每次发生灾变前稳定的适应值作为灾变的初始值, 第 9 次表示 1 000 次迭代最终结果。开始加工时间和完工时间以小时计算。以  $st$  表示工件的开始加工时间,  $ct$  表示工件的完工时间; WIP 表示在制品加工时间, DWIP 表示在制品加工时间的减少。表 2 给出了本文算法和文献[5]算法的比较。结果表明, 本文算法明显缩短了在制品加工时间, 针对提前/拖期调度问题给出了较好的调度结果。

## 7 结 语

本文提出的变速趋近律所产生的切换区为扇形,可期待原点的稳定性。因此,其稳态为原点。由变速趋近律和指数趋近律构成的组合控制策略(即PCV控制),可保持指数趋近律快速趋近的优点,克服稳态为抖动的缺点,因而具有较好的稳态精度。关于PCV控制的鲁棒性问题,还须做进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Y Dote, R G Hoft M icroprocessor based sliding mode controller for DC motor drives In: Presented at the Ind Applic Soc Annu Meeting Cincinnati, 1980
- 2 S Z Sarpurk, Y I Stefanopuls O Kaynak On the stability of discrete- time sliding mode control systems IEEE Trans on Autom Contr, 1987, 32(10): 930\_ 932
- 3 K Furuta Sliding mode control of a discrete system. Syst Contr Lett, 1990, 14(2): 145\_ 152
- 4 Gao Weibing, Wang Yufu, A Homafa Discrete- time variable structure control systems IEEE Trans on Ind Electr, 1995, 42(2): 117\_ 122
- 5 高为炳,程勉. 变结构控制系统的品质控制. 控制与决策, 1989, 4(4): 1—6
- 6 A Bartoszewicz Discrete- time quasi- sliding mode control strategies IEEE Trans on Ind Electr, 1998, 45

(4): 633\_ 637

- 7 A Bartoszewicz Remarks on "Discrete- time variable structure control system" IEEE Trans on Ind Electr, 1996, 43(1): 235\_ 238
- 8 姚琼荟,黄继起,吴汉松. 变结构控制系统. 重庆:重庆大学出版社, 1997
- 9 徐国顺,姚琼荟,吴汉松. 固定形式的变结构控制对应的趋近律. 海军工程学院学报, 1998, (4): 12—17
- 10 W J Wang, G H Wu, D C Yang Variable structure control design for uncertain discrete- time systems IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(1): 99\_ 102
- 11 高为炳. 离散时间系统的变结构控制. 自动化学报, 1995, 21(2): 154—161

### 作 者 简 介

姚琼荟 男, 1946年生。1981年获南京航空航天大学飞行器自动控制硕士学位, 1989年到俄罗斯圣彼得堡理工大学研究自动控制系统, 现为海军工程大学电气工程系教授, 研究方向为数字控制系统, 变结构控制等。

宋立忠 男, 1969年生。1993年毕业于海军工程大学电气工程系, 现任海军某舰副机电部门长, 海军工程大学硕士研究生。研究方向为变结构控制及其在电力系统中的应用。

温洪 女, 1964年生。1998年获海军工程大学自动控制理论及应用硕士学位, 现为海军潜艇学院讲师。研究方向为潜艇火控系统。

(上接第 324 页)

## 4 结 语

本文把控制论的思想引入Job-shop提前/拖期调度问题的研究。针对加工车间的特点,在调度算法中引入模糊控制器,对工件的开始加工时间进行仿真控制,并提出了有效求解该问题的联合算法。实际算例证明了该算法的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Kenneth R Baker, Gary D Scudder Scheduling with earliness and tardiness penalties: A review. Operation Research, 1990, 28(1): 22\_ 36
- 2 E Falkenauer, S Bouffouix A genetic algorithm for job shop. In: Int Conf on Robotics and Automation. 1991. 824\_ 829
- 3 姚伟力,杨德礼,胡祥培. 遗传算法对车间作业调度问题的研究. 见:中国系统工程与管理科学年会论文集. 大

连:大连理工大学出版社, 1998. 55—58

- 4 金希东,李治. 进化算法及其改进. 西南交通大学学报, 1996, 32(2): 138—144
- 5 Yao Weili, Yang Deli, Hu Xiangpei Genetic algorithms in job shop scheduling to minimize earliness penalties In: Proc of Int Conf on Management Science & Engineering. 1998. 303\_ 309

### 作 者 简 介

姚伟力 男, 1972年生。大连理工大学系统工程研究所博士生。主要研究方向为控制与优化, 车间作业调度。

杨德礼 男, 1939年生。大连理工大学管理学院院长, 教授, 博士生导师。长期从事决策知识系统, 企业信息化的研究工作。

胡祥培 男, 1962年生。大连理工大学系统工程研究所教授, 博士后。主要从事生产系统建模, 运筹学, 决策知识系统和知识工程的研究工作。