

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.11.006

基于正交试验的机械车间调度 并行遗传算法参数优化研究^{*}

张生芳, 王国庆, 马付建^{*}, 刘 宇, 杨大鹏, 沙智华
(大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要:针对调度并行遗传算法受参数影响,同一规模调度问题的求解性能大不相同的问题,通过采用正交试验方法,研究了调度并行遗传算法中子群个数、子群个体数、代沟、交叉率等 8 个因素对运行时间的影响规律。采用方差分析、极差分析方法,研究了因素主次顺序,分析了代沟与变异率、交叉率与变异率之间的交互作用,确定了参数最优水平组合,测试了所选参数下的 FT 类典型调度问题。研究表明:采用正交试验替代全因子试验优化调度并行遗传算法参数,能有效地改善进化过程,在保证算法质量的基础上缩短运算时间。

关键词:机械车间生产调度;并行遗传算法;正交试验;参数优化

中图分类号:TH165.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)11-1293-06

Parameter optimization of mechanical workshop scheduling parallel genetic algorithm based on orthogonal test

ZHANG Sheng-fang, WANG Guo-qing, MA Fu-jian, LIU Yu, YANG Da-peng, SHA Zhi-hua
(School of Mechanical Engineering, Dalian JiaoTong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the different performances affected by parameters in the scheduling parallel genetic algorithms, an orthogonal experiment method was used. The effects of eight factors on the computing time of the scheduling parallel genetic algorithm were studied, including the number of neutrons, the number of individuals, the generation gap, the crossover rate, etc. The primary and secondary order of factors was studied with the analysis of variance and range analysis. The interaction between generation gap and variation rate, crossover rate and variation rate was analyzed and the optimal horizontal combination of parameters was determined. The FT class typical scheduling problem with selected parameters was tested. The results indicate that using orthogonal experiment instead of the full factor test to optimize the parameters of parallel genetic algorithm can effectively improve the evolutionary process, reduce the computing time on the basis of ensuring the quality of the algorithm.

Key words: mechanical workshop production scheduling; parallel genetic algorithm; orthogonal test; parameter optimization

收稿日期:2020-03-06

基金项目:辽宁省重点研发计划资助项目(2019JH2/10100033);辽宁省高等学校轨道交通装备技术研究院重大(培育)项目(201801003);辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2017033)

作者简介:张生芳(1973-),男,河北保定人,博士,教授,主要从事难加工材料高效精密加工技术、虚拟制造与网络制造方面的研究。E-mail:zsf@djtu.edu.cn

通信联系人:马付建,男,博士,副教授。E-mail:mafj@djtu.edu.cn

0 引言

在大型机械的加工过程中,生产品种和生产设备的多样性使得其在生产过程中的组织管理工作更加复杂化。车间生产调度是流程工业和装备制造业等相关工业企业生产管理的关键环节,合理的生产安排与组织能实现生产过程的最优化^[1]。

遗传算法通用性强,具有隐含并行性和全局解空间搜索能力,在生产调度领域得到了广泛应用^[2]。

针对调度问题的编码技术,廖珊等^[3]结合遗传算法、自适应概率和模拟退火算法,重新设计了基于工件编号的交叉算子和变异算子,提高了算法搜索能力。

在混合遗传算法方面,Li^[4]提出了一种结合 TS 算法的混合遗传算法,改善了算法的搜索能力,提高了求解 FJSP 问题的效率。

为改进遗传算法性能,Deb 等人^[5]对 NSGA 作了改进,引入了精英保留策略和拥挤度计算,提出了 NSGA-II 算法,提高了算法的性能。朱晓霞等^[6]改进了 NSGA-II 算法,采用了合理有效的编解码方式、遗传算子和精英策略,解决了协同制造系统的任务调度问题。

借鉴并行理论的高效性,周荣等^[7]针对装卸一体化车辆路径的成本、路径、车辆数等多目标优化问题,提出了一种自适应并行遗传算法,并验证了算法的有效性。陈荣虎等^[8]通过对自动化立体仓库拣选路径优化模型的求解,验证了并行计算能有效提高算法优化效率。李运霞等^[9]针对动态路径的车间调度问题,设计了一种并行遗传算法,保证了算法的全局搜索性,并采用自适应算子,缩短了收敛时间。

围绕遗传算法的参数与算子选择,HR^[10]运用遗传算法,提出了用田口正交阵列代替全因子实验设计,来确定遗传算法的参数方法。刘文豪等^[11]以 FT06 典型车间作业调度问题为实例,通过变形遗传算法实验,对选择算子进行了比较分析。洪刘兵等^[12]引入人工免疫机制克隆选择算子和设计独特的交叉算子,提高了算法的收敛速度和种群的多样性。

当前研究主要集中在调度问题的编码技术、混合遗传算法、动态自适应技术等方面,但是受种群数目、交叉概率、变异概率、进化代数等参数影响,调度遗传算法性能差异较大。

因此,笔者利用正交试验设计技术,研究并行调度遗传算法的子群个数、迁移率、迁移代数以及各个参数间的交互作用对算法性能的影响规律,确定选用优化控制参数的一般方法。

1 调度并行遗传算法

1.1 调度问题描述

调度问题 Job Shop(简称 JSP)是一类典型的 NP 问题^[13]。

一个 3 个工件 3 个加工设备的典型 Job Shop 调度问题(FT03)的算例数据如下:

$$\mathbf{FT03} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 3 & 1 & 6 \\ 3 & 8 & 1 & 5 & 2 & 10 \\ 2 & 5 & 3 & 5 & 1 & 8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:第 1 行数据—工件 1 先在设备 2 上加工 1 个单位时间,再在设备 3 上加工 3 个单位时间,最后在设备 1 上加工 6 个单位时间;第 i 行数据—工件 i 的加工设备及加工时间。

在满足工艺约束的同时,该调度问题还应满足如下约束条件:

- (1) 同一时间一台设备只能加工一个工件;
- (2) 工件一旦开始加工则不能被中断;
- (3) 每个工件的工序必须依次加工。

对于 $n \times m$ 规模的调度问题,要求出一个最优调度使最后一个工件完工时间最短,可表示为:

$$T = \min(\max(C_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: C_i —工件 i 的完工时间。

1.2 调度遗传算法

调度遗传算法是通过编码对潜在调度解进行表示,然后进行选择等基本遗传操作,在潜在解空间里对解进行评估和选择的算法。

1.2.1 基因编码与解码

编码设计是遗传算法应用于调度问题的首要任务^[14],决定了算法进化过程的效果和效率。Job Shop 调度问题的基因编码就是对各工件加工先后顺序以编码的形式表现出来。笔者采用文献[15]所示的双层整数编码方式:第一层为所有工件的加工顺序,第二层为工件工序所对应的设备编号。

对于一个 $n \times m$ 规模的调度问题,其每层编码包含 $n \times m$ 位。如式(1)所示的算例,若编码为:

$$\begin{array}{l} \text{第一层: } 2 \quad 1 \quad 1 \quad 3 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \quad 2 \\ \text{第二层: } 3 \quad 2 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 1 \quad 3 \quad 1 \quad 2 \end{array} \quad (3)$$

则解码时,对应某一工件的工序表示为:

$$O_{ijk} \quad (4)$$

式中: O_{ijk} —工件 i 的工序 j 在设备 k 上加工。

依据式(3)所示第一层工序码获得的加工顺序为: $O_{213} \rightarrow O_{112} \rightarrow O_{123} \rightarrow O_{312} \rightarrow O_{131} \rightarrow O_{221} \rightarrow O_{323} \rightarrow$

$O_{331} \rightarrow O_{232}$,对应的 3×3 调度甘特图如图 1 所示。

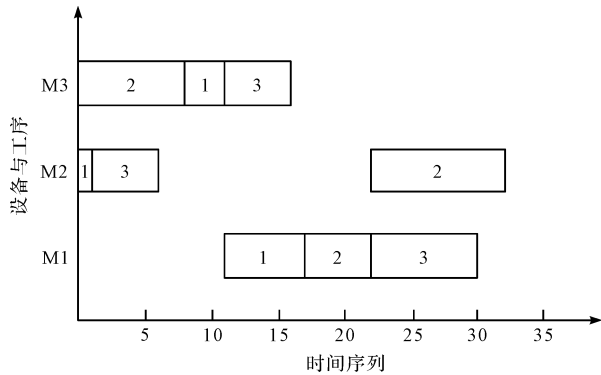


图 1 3×3 调度甘特图

图 1 中,最后一个完成加工的为工件 2,从开始加工至其加工结束需 32 个单位时间,其目标函数为 32。

1.2.2 选择操作

调度目标值即最大完工时间 T 值最小的个体适应度最高,应以最大概率被选择。对调度解目标值从大到小进行排序,个体被选择的概率为:

$$P_i = S_i / S_N \quad (5)$$

式中: S_i —个体 i 的排序; S_N —总的个体数。

然后基于轮盘赌的方式选择交叉个体。每轮产生一个 0 ~ 1 之间的随机数,若该随机数小于 P_i ,则该个体被选择。

1.2.3 交叉操作与变异操作

对于基因串交叉,可以采用基于路径表示部分匹配交叉操作、顺序交叉、循环交叉等。笔者分别采用二点倒序交叉的方式和二点互换的变异方式。

如式(3)所示的基因编码,若随机点为 3、7,则交叉操作后基因编码相应变为:

$$\begin{aligned} \text{第一层:} & 2 \ 1 \ 3 \ 2 \ 1 \ 3 \ 1 \ 3 \ 2 \\ \text{第二层:} & 3 \ 2 \ 2 \ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 2 \end{aligned} \quad (6)$$

交叉后生成的调度解加工顺序变为: $O_{213} \rightarrow O_{112} \rightarrow O_{312} \rightarrow O_{221} \rightarrow O_{123} \rightarrow O_{323} \rightarrow O_{131} \rightarrow O_{331} \rightarrow O_{232}$ 。

如式(6)所示的基因编码,若随机点为 2、4,则变

异操作后基因编码相应变为:

$$\begin{aligned} \text{第一层:} & 2 \ 2 \ 3 \ 1 \ 1 \ 3 \ 1 \ 3 \ 2 \\ \text{第二层:} & 3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 2 \end{aligned} \quad (7)$$

变异后生成的调度解加工顺序变为: $O_{213} \rightarrow O_{221} \rightarrow O_{312} \rightarrow O_{112} \rightarrow O_{123} \rightarrow O_{323} \rightarrow O_{131} \rightarrow O_{331} \rightarrow O_{232}$ 。可以看出交叉与变异后基因编码仍为可行调度解。

1.3 并行遗传算法

笔者通过引入并行计算的思想,将遗传算法中单个种群结构转化为多子群结构^[16]。笔者采用文献[17]所示迁移策略的并行遗传算法(PGA)的流程图,如图 2 所示。

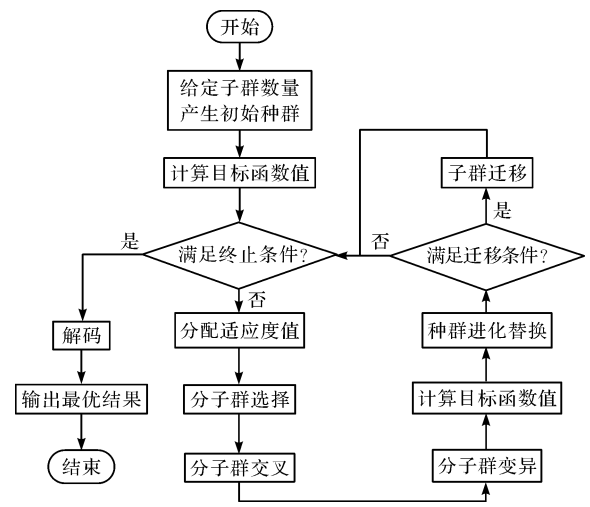


图 2 并行遗传算法流程图

2 正交试验及结果分析

2.1 正交试验因素及水平

此处并行遗传算法的关键部分为选择算子、交叉算子、变异算子和迁移算子,主要包括代沟、交叉率、变异率、子群个数、子群个体数、插入率、迁移率和迁移代数 8 个关键参数。

笔者选择三水平试验,试验水平表如表 1 所示。

表 1 并行遗传算法正交试验水平表

水平	代沟 <i>GGAP</i>	交叉率 <i>XOVR</i>	变异率 <i>MUTR</i>	子群个数 <i>SUBPOP</i>	子群个体数 <i>NIND</i>	插入率 <i>INSER</i>	迁移率 <i>MIGR</i>	迁移代数 <i>MIGGEN</i>
1	0.5	0.5	0.05	3	50	0.2	0.1	3
2	0.6	0.6	0.2	5	250	0.3	0.3	5
3	0.75	0.7	0.4	7	400	0.4	0.6	7

由表 1 可知:

(1) 确定代沟(*GGAP*):代沟越大,选择个体比例越大,交叉个体数量多,进化速度快。一般代沟应为 0.5 ~ 0.99,实验值选取{0.5,0.6,0.75}。

(2) 确定交叉率(*XOVR*):一般交叉率为 0.4 ~

0.8,试验值选取{0.5,0.6,0.7}。

(3) 确定变异率(*MUTR*):一般变异率为 0 ~ 0.5,试验值选取{0.05,0.2,0.5}。

(4) 确定子群个数(*SUBPOP*):一般交叉率为 2 ~ 10,试验值选取{3,5,7}。

(5) 确定子群个体数(*NIND*):群体数量决定了所能容纳的解空间大小。一般为 50 ~ 500, 试验值选取 {50, 250, 400}。

(6) 确定插入率(*INSER*):插入率决定了进化后选择替换原种群的概率。一般为 0.1 ~ 0.5, 试验值选取 {0.5, 0.6, 0.7}。

(7) 确定迁移率(*MIGR*):迁移率为各个种群引入精英个体,防止各子群无法跳出局部最优,一般为 0.1 ~ 0.7, 试验值选取 {0.1, 0.3, 0.6}。

(8) 确定迁移代数(*MIGGEN*):迁移代数决定了隔多少代进行一次迁移操作,应依据群体规模大小和子群数量选择,一般为 2 ~ 8, 试验值选取 {3, 5, 7}。

2.2 正交试验选择及结果

考虑调度遗传算法 8 个关键参数及 *GGAP* 和 *MUTR*、*XOVR* 和 *MUTR* 间的交互作用,其正交试验自由度为 $8 \times (3 - 1) + 2 \times (3 - 1)^2 = 24 < 27 - 1 = 26$,因此,笔者利用 Minitab 软件,选取正交设计表 $L_{27}(3^{13})$,采用 6 个工件、6 个加工设备的 FT06 算例进行试验,将其取得最优值的平均运行时间作为试验指标。

为避免随机因素的影响,每组试验重复 20 组取其平均值。正交试验表及结果如表 2 所示。

2.3 试验结果分析

由表 2 的数据可得极差分析结果,如表 3 所示。

表 2 正交试验表及结果

试验号	<i>GGAP</i>	<i>GGAP</i> × <i>MUTR</i>	<i>MUTR</i>	<i>XOVR</i> × <i>MUTR</i>	<i>MIGR</i>	<i>MIGGEN</i>	<i>NIND</i>	<i>SUBPOP</i>	<i>XOVR</i>	<i>INSER</i>	运行时间 /s
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	75.6
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	16.6
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	29.5
4	1	2	2	2	1	1	2	2	2	3	15.5
5	1	2	2	2	2	2	3	3	3	1	25.0
6	1	2	2	2	3	3	1	1	1	2	47.0
7	1	3	3	3	1	1	3	3	3	2	51.5
8	1	3	3	3	2	2	1	1	1	3	130.8
9	1	3	3	3	3	3	2	2	2	1	94.1
10	2	1	2	3	2	3	1	2	3	2	35.1
11	2	1	2	3	3	1	2	3	1	3	15.6
12	2	1	2	3	1	2	3	1	2	1	17.1
13	2	2	3	1	2	3	2	3	1	1	51.6
14	2	2	3	1	3	1	3	1	2	2	46.6
15	2	2	3	1	1	2	1	2	3	3	171.1
16	2	3	1	2	2	3	3	1	2	3	17.5
17	2	3	1	2	3	1	1	2	3	1	11.9
18	2	3	1	2	1	2	2	3	1	2	11.1
19	3	1	3	2	3	2	1	3	2	3	223.3
20	3	1	3	2	1	3	2	1	3	1	62.7
21	3	1	3	2	2	1	3	2	1	2	37.8
22	3	2	1	3	3	2	2	1	3	2	174
23	3	2	1	3	1	3	3	2	1	3	17.3
24	3	2	1	3	2	1	1	3	2	1	26.5
25	3	3	2	1	3	2	3	2	1	1	34.3
26	3	3	2	1	1	3	1	3	2	2	47.6
27	3	3	2	1	2	1	2	1	3	3	11.6

表 3 极差分析结果

水平	<i>GGAP</i>	<i>XOVR</i>	<i>MUTR</i>	<i>INSER</i>	<i>SUBPOP</i>	<i>MIGR</i>	<i>MIGGEN</i>	<i>NIND</i>
1	53.97	47.37	24.83	46.77	59.98	52.18	32.53	85.44
2	41.99	48.20	27.66	56.11	49.22	39.18	71.86	32.93
3	53.15	53.54	96.62	46.23	39.92	44.73	30.74	30.74
<i>R</i>	11.98	6.17	71.79	9.88	20.06	18.57	39.33	54.70
排序	6	8	1	7	4	5	3	2

表 3 中,8 种因素对运算时间的影响程度:*MUTR* > *NIND* > *MIGGEN* > *SUBPOP* > *MIGR* > *GGAP* > *INSER* > *XOVR*,其中,*MUTR*、*NIND* 和 *MIGGEN* 是主要影响因素,其他是次要影响因素。

主效应关系图如图 3 所示。

图 3 中,交叉概率对运算时间的影响相对较小,原因是交叉操作主要作用为大范围搜索,加之分子群的进化方式优化了整体解的分布空间,保证了种群多样性,

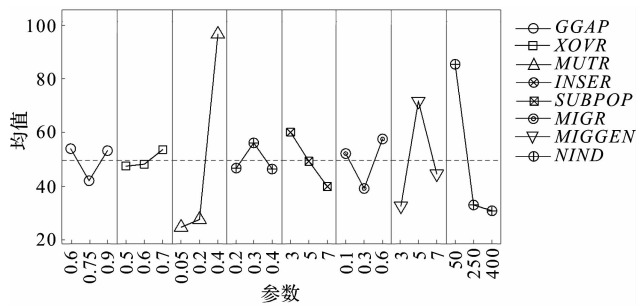


图3 主效应关系图

且在 0.4 – 0.8 的范围内对整体进化过程影响不大。

方差分析结果如表 4 所示。

表 4 方差分析结果

方差来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
GGAP	2	806.9	806.9	403.4	0.13	0.884
XOVR	2	201.8	201.8	100.9	0.03	0.968
MUTR	2	29 752.3	29 752.3	1 4876.1	4.85	0.171
INSER	2	554.9	554.9	277.5	0.09	0.917
SUBPOP	2	1 814.5	1 814.5	907.3	0.30	0.772
MIGR	2	1 634.4	1 634.4	817.2	0.27	0.790
MIGGEN	2	7 296.9	7 296.9	3 648.4	1.19	0.457
NIND	2	17 265.7	17 265.7	8 632.8	2.82	0.262
GGAP × MUTR	4	1 082.0	1 082.0	270.5	0.09	0.978
XOVR × MUTR	4	1 878.6	1 878.6	469.7	0.15	0.945

注:Seq SS—连续平方和;Adj SS—修正平方和;Adj MS—校正均方

表 4 中, F 值反映了各因素间交互作用。

交互作用关系如图 4 所示。

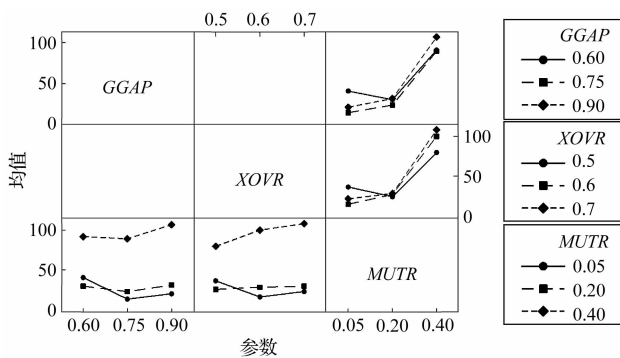


图4 交互作用关系图

由图 4 知,曲线之间不平行说明相关因素间存在交互效应,其中,GGAP 和 MUTR 间的交互作用最大,其次是 XOVR 和 MUTR 间的交互作用;在并行遗传算法及相应参数范围内,可以忽略交叉概率与变异率的交互影响。

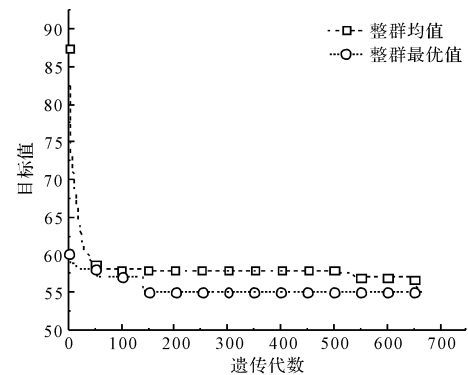
3 并行遗传算法参数优选及验证

3.1 算法性能分析

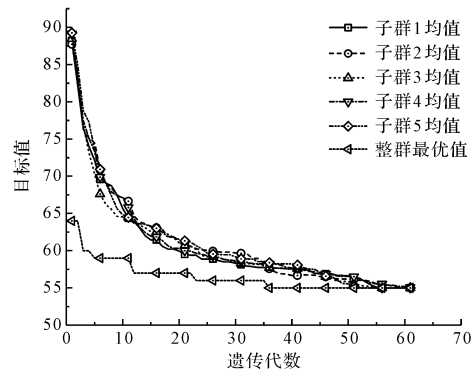
此处取 $GGAP = 0.75$ 、 $XOVR = 0.6$ 、 $MUTR = 0.05$ 、 $INSER = 0.2$;为使种群规模相同,单种群遗传算法

$SUBPOP = 1$ 、 $NIND = 1\ 750$ 、 $MIGGEN = \text{无穷}$ (即不采取迁移操作);并行多子群遗传算法 $SUBPOP = 7$ 、 $NIND = 250$ 、 $MIGGEN = 3$ 、 $MIGR = 0.3$ 。

两种算法运行中,种群最优解及子群平均解进化图分别如图 5 所示。



(a) 单种群进化图



(b) 多种群进化图

图5 单种群与并行多种群进化对比图

图 5 显示:(1) 单种群遗传算法在 130 代左右达到最优解,而并行遗传算法在 35 代左右已达到最优值,求解时间缩短;(2) 从整群最优值来看,多种群并行遗传算法成梯度式下降,明显改善了单种群种群过早收敛现象。

下面对算法的求解质量和求解时间进行分析:

(1) 从收敛性能来看,并行遗传算法主要是针对普通遗传算法搜索效率不高和过早收敛问题,通过增加并行子群的方式以分解解空间,利用种群隔离保证了种群多样性,同时保留优良个体基因,避免了种群同化;

(2) 从并行性能来看,并行遗传算法削弱了普通遗传算法中交叉操作的重要性,降低了交叉率对整体算法中全局搜索的影响。在保持总群体规模不变的情况下,并行遗传算法能够充分利用各个计算进程,减少运算时间,改善算法性能;

(3) 从参数影响来看,并行遗传算法改善了普通遗传算法中交叉概率与变异概率的交互作用,取而代之的是种群数量、迁移率、迁移代数之间的影响。

3.2 参数选取及验证

综合考虑,笔者针对 FT06 问题, $MUTR$ 选水平 1,

NIND 选水平 1, *MIGGEN* 选水平 1, *SUBPOP* 选水平 2, *MIGR* 选水平 2, *GGAP* 选水平 2, *INSER* 选水平 1, *XOVR* 选水平 2。

随着问题规模的扩大, 可通过适当增大子群个体数或子群数量来增大解容量, 同时增大迁移概率及迁

移代数, 以适应不同规模调度问题的求解。

在以上参数选取的基础上, 笔者针对 FT06、FT10、FT20 调度问题进行研究, 选取的参数及相关运行结果如表 5 所示。

表 5 并行遗传算法参数及结果

典例	<i>GGAP</i>	<i>XOVR</i>	<i>MUTR</i>	<i>INSER</i>	<i>SUBPOP</i>	<i>MIGR</i>	<i>MIGGEN</i>	<i>NIND</i>	最优值	运行时间 /s
FT06	0.75	0.6	0.05	0.2	5	0.3	3	250	55	4.843
FT10	0.75	0.6	0.05	0.2	7	0.4	4	300	967	2 359.614
FT20	0.75	0.6	0.05	0.2	8	0.5	6	400	1 191	100.667

4 结束语

针对调度并行遗传算法受参数影响, 同一规模调度问题的求解性能大不相同的问题, 笔者采用正交试验方法, 研究了调度并行遗传算法中子群个数、子群个体数、代沟等 8 个因素对运行时间的影响规律。主要结论如下:

(1) 在子群个数 2 ~ 8, 子群个体数 10 ~ 500, 代沟 0.5 ~ 1, 交叉率 0.4 ~ 0.8, 变异率 0 ~ 0.5, 插入率 0.1 ~ 0.6, 迁移率 0.1 ~ 0.7, 迁移代数 2 ~ 8 的范围内, *MUTR*、*NIND* 和 *MIGGEN* 对进化过程对运行时间的影响最大, 其他因素的影响程度相比略小。同时, 3 种因素间存在交互作用, *GGAP* 和 *MUTR* 交互作用 > *XOVR* 和 *MUTR* 交互作用;

(2) 在建立调度并行遗传算法时, 在参数范围内, 可不考虑 *GGAP* 与 *MUTR*, *XOVR* 与 *MUTR* 间的交互作用。并行子群的方式, 能够保证子群多样性, 一定程度上解决普通遗传算法过早收敛的问题;

(3) 利用所得参数优选规律, 对 FT10 和 FT20 类典例进行了试验, 结果表明: 所选参数能够有效改善进化过程, 在保证算法结果的基础上缩短运算时间; 通过正交试验的方式优选并行遗传算法参数, 以改善算法性能的方法是有效的。

参考文献 (References):

- [1] 崔晓康, 肖艳秋, 王磊, 等. 面向工艺规划与车间调度的集成方法研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(3): 134-137.
- [2] 王凌, 郑大钟. 基于遗传算法的 Job Shop 调度研究进展[J]. 控制与决策, 2001(51): 641-646.
- [3] 廖珊, 翟所霞, 鲁玉军. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度方法研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 729-733.
- [4] LI X, GAO L. An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 174

(1): 93-110.

- [5] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [M]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [6] 朱晓霞, 王成亮, 李泉林. 基于改进 NSGA-II 算法的协同制造任务调度研究[J]. 制造技术与机床, 2019(4): 155-162.
- [7] 周蓉, 沈维蕾. 装卸一体化车辆路径问题的自适应并行遗传算法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(22): 2740-2749.
- [8] 陈荣虎, 何运杰. 基于 SPMD 的粗粒度并行遗传算法在立体仓库路径优化中的应用[J]. 软件导刊, 2018, 17(12): 108-112.
- [9] 李运霞. 基于并行遗传算法的动态路径车间调度问题的研究[D]. 太原: 太原科技大学机械工程学院, 2014.
- [10] YAZGAN H R. Genetic algorithm parameter optimisation using taguchi method for a flexible manufacturing system scheduling problem [J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(3): 897-915.
- [11] 刘文豪, 黄宗南. 针对作业调度问题的遗传选择算子性能分析[J]. 制造技术与机床, 2011(3): 124-128.
- [12] 洪刘兵, 杨艳丽. 求解车间调度问题的一种改进遗传算法[J]. 机床与液压, 2010, 38(5): 101-103.
- [13] 杨晓梅, 曾建潮. 采用多个个体交叉的遗传算法求解作业车间问题[J]. 计算机集成制造系统, 2004(9): 1114-1119.
- [14] 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.
- [15] 侯媛彬, 薛斐, 郑茂全, 等. 基于多层编码的遗传-粒子群融合算法流水线优化控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 159-164.
- [16] 金敏, 鲁华祥. 一种遗传算法与粒子群优化的多子群分层混合算法[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1231-1238.
- [17] 李想, 魏加华, 傅旭东. 粗粒度并行遗传算法在水库调度问题中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 28-33.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

张生芳, 王国庆, 马付建, 等. 基于正交试验的机械车间调度并行遗传算法参数优化研究[J]. 机电工程, 2020, 37(11): 1293-1298.

ZHANG Sheng-fang, WANG Guo-qing, MA Fu-jian, et al. Parameter optimization of mechanical workshop scheduling parallel genetic algorithm based on orthogonal test [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(11): 1293-1298.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>