

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.005

基于遗传算法的混合流水车间批量调度研究

屈新怀, 姚腾佳, 丁必荣, 孟冠军

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:针对混合流水车间批量调度问题(hybrid flow-shop scheduling problem with lot-streaming, HFSP-LS),文章设计改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)。以最小化最大完工时间为目标函数,建立混合流水车间批量调度数学模型;结合先到先服务(first come first serve, FCFS)原则设计仅针对第 1 阶段的矩阵编码和解码策略;通过融合精英保留策略和轮盘赌法的选择操作、自适应交叉变异概率增强算法全局搜索能力。最终通过相关案例测试和算法比较验证了该算法的有效性和优越性。

关键词:混合流水车间;批量调度;改进遗传算法(IGA);遗传操作;精英保留策略

中图分类号:TH186

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0752-06

Research on batch scheduling of hybrid flow shop based on genetic algorithm

QU Xinhuai, YAO Tengjia, DING Birong, MENG Guanjun

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the hybrid flow-shop scheduling problem with lot-streaming (HFSP-LS), an improved genetic algorithm (IGA) with adaptive crossover probability and mutation probability is designed. Firstly, the mathematical model of batch scheduling in hybrid flow shop is established by minimizing the maximum completion time as the objective function. Secondly, the matrix encoding and decoding strategies for the first phase are designed according to the first come first serve (FCFS) principle. Then, the global search capability of the algorithm is enhanced by integrating the selective operation of elite retention strategy and roulette method, adaptive crossover probability and multi-fragment crossover operation, adaptive mutation probability and multi-fragment mutation operation. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed algorithm are verified by case test and algorithm comparison.

Key words: hybrid flow shop; batch scheduling; improved genetic algorithm (IGA); genetic operation; elite retention strategy

混合流水车间作业调度问题(hybrid flow-shop scheduling problem, HFSP)是传统流水车间作业调度问题(flow-shop scheduling problem, FSP)的扩展。HFSP 在 FSP 的基础上引入了并行机,提高了企业的生产效率,增加了产品柔性,但同时增加了企业的生产调度难度,因此关于 HFSP 的研究具有现实意义^[1]。根据并行机的功能和效率的差异进行划分,可以将 HFSP 划分^[2]为并行同速机、并行异速机和不相关并行机。HFSP 问题的复杂多样

受到众多学者的关注和研究^[3-8]。

上述大部分研究的对象是一个整体且不可拆分,而关于如何解决批量调度问题的研究较少。但是实际生产中工件批量的大小对完工时间影响较大。根据批量划分策略的不同,批量作业调度^[9-11]大致分为不分批策略、等批量策略、不等批量策略。

本文结合混合流水车间与多品种小批量的生产模式特点,提出等批量生产策略,以最小化最大完工时间为目标函数,建立混合流水车间批量调

收稿日期:2024-03-14;修回日期:2024-04-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB1705303)

作者简介:屈新怀(1971—),男,安徽金寨人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:659110524@qq.com.

度模型(hybrid flow-shop scheduling problem with lot-streaming, HFSP-LS)。随着计算机科学不断发展,各种智能算法不断被提出并应用于 HFSP-LS 的求解研究中^[12-16],鉴于遗传算法(genetic algorithm, GA)结构简单、参数较少、寻优能力强等优点,设计改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)对目标函数进行寻优。

1 HFSP-LS 介绍

1.1 问题描述及假设

HFSP-LS 可描述为:某次生产任务有 n 种工件,每种工件的批量为 $N_i (1 \leq i \leq n)$,每种工件按照最小批量 q 分为 L_i 个子批,各子批经过 m 个固定连续加工阶段,每个阶段有 $M_j (1 \leq j \leq m)$ 台设备可选择,通过合理安排子批的加工设备和加工顺序达到最小化最大完工时间的目的。

结合生产实际,提出以下假设:① 生产任务初始时间设置为 0;② 所有工件对应的设备加工所需时间已知;③ 所有子批加工阶段顺序固定且相同;④ 某一时刻,任一子批最多只能被一台设备加工;⑤ 某一时刻,任一加工设备最多只能加工一个子批;⑥ 不同子批之间没有优先级;⑦ 忽略设备故障、日常维护等人为或自然影响,加工过程不可中断;⑧ 子批某一阶段完工之后立即进入下一加工阶段,忽略前后阶段的搬运时间;⑨ 优先选择编号较小的空闲设备进行加工,若无空闲设备允许等待。

1.2 数学模型

1.2.1 参数说明

HFSP-LS 问题模型参数说明见表 1 所列。

表 1 参数说明

参数	含义
n	工件种类数
i	工件种类索引, $i=1, 2, \dots, n$
N_i	工件 i 的数量
q	最小批量
L_i	工件 i 的子批数
l_i	工件 i 的子批索引, $l_i=1, 2, \dots, L_i$
m	阶段数量
j	阶段索引, $j=1, 2, \dots, m$
M_j	阶段 j 的设备数量
k_j	阶段 j 的设备索引, $k_j=1, 2, \dots, M_j$
$T_{sl_i k_j}$	工件 i 第 l_i 子批在阶段 j 第 k_j 台设备开始加工时间
$T_{pl_i k_j}$	工件 i 第 l_i 子批在阶段 j 第 k_j 台设备加工时间
$T_{cl_i k_j}$	工件 i 第 l_i 子批在阶段 j 第 k_j 台设备完工时间
C_{l_i}	工件 i 第 l_i 子批最终完工时间
$X_{l_i k_j}$	变量 0-1, 工件 i 第 l_i 子批在阶段 j 第 k_j 台设备加工为 1, 反之为 0
$Y_{l_i k_j}$	变量 0-1, 某一时刻, 工件 i 第 l_i 子批在阶段 j 第 k_j 台设备加工为 1, 反之为 0

1.2.2 模型建立

HFSP-LS 数学模型及约束条件如下:

$$F = \min(\max\{C_{l_i} \mid l_i = 1, 2, \dots, L_i, i = 1, 2, \dots, n\}) \quad (1)$$

$$X_{l_i k_j} = \begin{cases} 1, & \text{工件 } i \text{ 第 } l_i \text{ 子批在阶段 } j \text{ 第 } k_j \text{ 台设备加工;} \\ 0, & \text{工件 } i \text{ 第 } l_i \text{ 子批不在阶段 } j \text{ 第 } k_j \text{ 台设备加工} \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_{l_i k_j} = \begin{cases} 1, & \text{某时刻工件 } i \text{ 第 } l_i \text{ 子批在阶段 } j \text{ 第 } k_j \text{ 台设备加工;} \\ 0, & \text{某时刻工件 } i \text{ 第 } l_i \text{ 子批不在阶段 } j \text{ 第 } k_j \text{ 台设备加工} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{k_j=1}^{M_j} X_{l_i k_j} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l_i=1}^{L_i} Y_{l_i k_j} \leq 1 \quad (5)$$

$$T_{sl_i k_j} + T_{pl_i k_j} = T_{cl_i k_j} \quad (6)$$

$$T_{sl_i k_j} \geq T_{cl_i k_{j-1}'} \quad (7)$$

$$T_{sl_i k_j} \geq T_{cl_i' k_j} \quad (8)$$

式(1)为目标函数;式(2)为子批 l_i 是否选择设备 k_j 的进行加工;式(3)为某一时刻子批 l_i 在任意设备 k_j 的加工状态;式(4)、式(5)为加工资源约束,分别表示任意子批 l_i 在任意阶段 j 有且只能选择一台设备进行加工,任意设备 k_j 在同一

时刻最多只能进行一项加工任务;式(6)表示加工过程不可中断;式(7)、式(8)为工艺约束,表示任意子批 l_i 必须完成该子批上一阶段加工任务并且该阶段的加工设备 k_j 完成该设备的上一项加工批次 l_i' ,才能开始进行加工。

2 改进遗传算法求解 HFSP-LS

2.1 改进遗传算法设计流程

遗传算法是一种启发式算法,通过模拟自然界中的物种演化,对个体间的染色体实行选择、交叉、变异等遗传操作达到优胜劣汰的目的,进而求得问题的最优近似解。本文设计的改进遗传算法流程如图 1 所示。

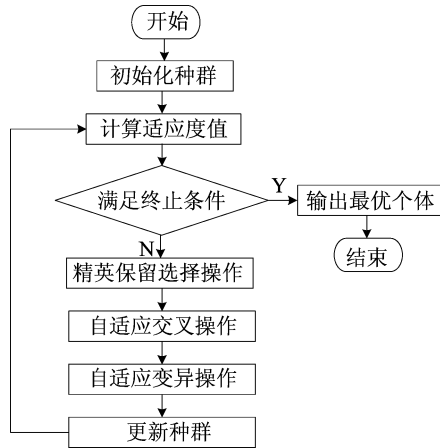


图 1 改进遗传算法流程

2.2 编码和解码策略

在求解 HFSP-LS 问题方面,传统遗传算法的编码和解码策略为全编码,精细的调度方案反而可能导致更差的结果^[17]。本文结合混合流水车间特点,设计了一种矩阵编码和解码策略。

该编码策略只针对第 1 阶段进行编码,同时改变传统染色体链式编码方法,设计矩阵式编码。其中:矩阵的行号为工件种类索引 i ;第 1 列为每种工件的批次数 L_i ;后续列为设备选择信息,整数部分代表分配的加工设备;小数部分表示加工优先级;小数部分越小优先级越高;“0”只是用于补充矩阵,无任何意义。矩阵编码 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 1.6 & 3.4 & 5.7 & 0 \\ 3 & 4.3 & 4.8 & 5.0 & 0 \\ 4 & 2.6 & 1.3 & 2.7 & 3.9 \\ 3 & 4.2 & 1.2 & 5.4 & 0 \\ 3 & 4.0 & 3.1 & 5.2 & 0 \end{bmatrix},$$

其中,第 1 行数据表示工件 1 被划分为 3 个子批,分配的加工设备分别为 1、3、5 号设备。工件 1 的第 3 子批与工件 2 的第 3 子批都被分配到 5 号设备,工件 1 的第 3 子批晚于工件 2 的第 3 子批加工。

每个子批在第 1 加工阶段的设备选择以及加工顺序随机生成,后续阶段根据先到先服务(first come first serve, FCFS)规则对子批进行设备的分配和顺序的确定。

2.3 精英保留选择操作

采用轮盘赌法作为选择操作的方法,为避免最优个体丢失,融合精英保留策略,具体操作为:

1) 记种群数为 N 、当前被选中的个体数 $n=0$,适应度值最大的 1 个或多个个体作为精英个体直接被选中,记作 c , $n=n+c$ 。

2) 计算个体被选中的概率 P :

$$P = \frac{F_{i_d}}{F_{\text{sum}}} \quad (9)$$

其中: F_{i_d} 为个体 i_d 的适应度值; F_{sum} 为种群的适应度值总和。

3) 将所有个体被选中的概率进行累加排序,例如当种群个体数为 4,其适应度值分别为 1、2、3、4,被选中的概率分别为 0.1、0.3、0.2、0.4,累加排序后分别为 0.1、0.4、0.6、1.0。

4) 判断是否终止选择操作,若 $n=N$,终止选择操作,输出新的种群;反之继续执行下一步骤。

5) 随机生成 $(0,1)$ 范围内的随机数 r 。

6) 选择操作,在步骤 3) 中累加排序数列中,第 1 个大于等于 r 的累加概率代表的个体就是被选中的个体, $n=n+1$,跳转至步骤 4)。

2.4 自适应交叉操作

本文根据矩阵编码特点,提出自适应交叉概率和多片段交叉方法,具体操作为:

1) 记种群数为 N 、变量 $m=0$ 。

2) 判断是否终止交叉操作, $m=m+1$,若 $m \leq N/2$,则随机选择 2 个不同的个体,继续执行下一步骤;反之输出新的种群。

3) 计算自适应交叉概率 $P_c =$

$$P_c = \begin{cases} P_{\text{cmax}}, & \max(F_{i_{d1}}, F_{i_{d2}}) < F_{\text{avg}}; \\ P_{\text{cmax}} - (P_{\text{cmax}} - P_{\text{cmin}}) \frac{\max(F_{i_{d1}}, F_{i_{d2}}) - F_{\text{avg}}}{F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}}, & \max(F_{i_{d1}}, F_{i_{d2}}) \geq F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (10)$$

其中: P_{cmin} 、 P_{cmax} 分别为 P_c 的最小值、最大值; $F_{i_{d1}}$ 和 $F_{i_{d2}}$ 为被选择的 2 个个体的适应度值; F_{avg} 为种群适应度值的平均值; F_{max} 为种群中适应度值的最大值。

4) 随机生成 $(0,1)$ 范围内的随机数 r 。

5) 若 $r > P_c$,父代个体直接进入新种群,跳转至步骤 2),反之执行下个步骤。

6) 随机选取若干行染色体片段,2 个父代个体对应的行染色体片段进行交换得到 2 个子代个体,子代个体进入新种群,跳转至步骤 2)。

2.5 自适应变异操作

本文针对矩阵编码特点,采用多片段变异方法,设计自适应变异概率,具体操作为:

1) 记种群数为 N 、个体索引 $i_d=0$ 。

2) 判断是否终止变异操作, $i_d=i_d+1$,若 $i_d \leq N$,选取个体 i_d 作为本次变异对象,继续执行

步骤 3);反之终止变异操作,输出新种群。

3) 计算自适应变异概率 P_m ,其公式为:

$$P_m = \begin{cases} P_{\max}, & F_{i_d} < F_{\text{avg}}; \\ P_{\max} - (P_{\max} - P_{\min}) \frac{F_{i_d} - F_{\text{avg}}}{F_{\max} - F_{\text{avg}}}, & F_{i_d} \geq F_{\text{avg}} \end{cases}, \quad (11)$$

其中, $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 分别为 P_m 的最小值、最大值。

4) 随机生成一个(0,1)范围内均匀分布的随机数 r 。

5) 若 $r > P_m$,个体 i_d 直接进入新种群,跳转至步骤 2),反之执行下一步骤。

6) 随机选取若干行染色体片段,生成新的染色体片段,新个体进入新种群,跳转至步骤 2)。

3 实验结果与分析比较

3.1 测试案例

本文所用测试案例来自文献[17],按照生产任务规模选取 3 组测试案例,结果见表 2 所列。

表 2 测试案例规模信息

测试案例	n	m	M
Small	10	4	3
Middle	20	4	3
Large	50	10	5

表 2 中,首行表示测试案例 Small 包含 10 种工件,4 道加工阶段,每道加工阶段配备 3 台并行同速机。以此类推。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 对照实验

为了验证 IGA-HFSP-LS 的有效性,设计对照组算法,详情见表 3 所列。

表 3 算法模型对照说明

序号	算法	说明
1	IGA-HFSP-LS	改进遗传算法、等批量策略
2	GA-HFSP-LS	传统遗传算法、等批量策略
3	IGA-HFSP-ULS	改进遗传算法、不等批量策略
4	GA-HFSP-ULS	传统遗传算法、不等批量策略
5	IGA-HFSP-NLS	改进遗传算法、不分批策略
6	GA-HFSP-NLS	传统遗传算法、不分批策略

3.2.2 参数设置

种群规模为 20、迭代次数为 500,传统遗传算法 P_c 为 0.5、 P_m 为 0.1,改进遗传算法 P_c 范围为 $[0.35, 0.80]$ 、 P_m 范围为 $[0.001, 0.100]$,最小批量 $q=10$ 。

所有算法均仅针对第 1 阶段进行编码。其中:传统遗传算法采用传统链式编码;改进遗传算法均采用本文设计的矩阵式编码。

3.2.3 实验结果

利用 MATLAB R2023a 平台进行仿真实验,所有算法各自对 3 组测试案例独立进行 10 次实验,结果见表 4、表 5、表 6 所列。

表 4 6 种算法在测试案例 Small 中最大完工时间 单位:s

算法 1	算法 2	算法 3	算法 4	算法 5	算法 6
9 220	9 430	10 280	11 020	15 060	15 690
9 160	9 220	10 800	10 750	14 550	15 400
9 180	9 610	10 160	11 490	15 010	15 290
9 280	9 320	10 610	11 340	14 950	15 390
9 070	9 200	10 750	11 850	14 550	15 420
9 280	9 420	10 780	11 220	15 290	15 660
9 280	9 450	10 660	11 480	14 730	15 470
9 220	9 520	10 020	11 640	15 180	15 400
9 250	9 330	10 000	11 540	14 830	15 320
9 180	9 460	10 170	11 440	15 070	15 250

表 5 6 种算法在测试案例 Middle 中最大完工时间 单位:s

算法 1	算法 2	算法 3	算法 4	算法 5	算法 6
19 460	19 730	20 980	21 010	22 860	24 590
19 400	19 520	21 130	22 340	23 370	24 870
19 540	19 610	20 970	22 890	23 590	24 930
19 300	19 690	20 890	21 940	23 400	24 640
19 260	20 040	20 430	23 270	22 500	24 400
19 580	20 050	21 060	21 830	23 550	25 510
19 580	19 850	20 290	22 100	23 290	25 140
19 560	19 600	20 200	22 280	22 900	24 890
19 360	20 110	20 910	22 100	23 570	24 220
19 580	20 110	21 390	22 170	22 870	24 560

表 6 6 种算法在测试案例 Large 中最大完工时间 单位:s

算法 1	算法 2	算法 3	算法 4	算法 5	算法 6
30 620	30 980	38 650	43 270	49 630	52 520
30 440	30 890	41 370	44 740	51 000	52 970
30 650	31 320	41 610	45 710	50 430	53 070
30 440	30 900	41 790	45 540	51 340	52 580
30 510	30 990	41 390	43 630	51 650	52 830
30 520	30 980	39 790	43 350	51 700	52 700
30 630	31 000	40 040	43 300	51 750	53 220
30 400	30 890	40 470	45 740	51 780	52 580
30 580	31 260	40 500	43 560	50 340	52 740
30 680	31 400	40 150	43 020	50 770	53 730

各算法模型最大完工时间如图 2 所示。由图 2 可知:同一测试案例下对比算法 1 与算法 2、算法 3 与算法 4、算法 5 与算法 6 可看出,在相同的批量策略下改进遗传算法优于传统遗传算法;同一测试案例下对比算法 1 与算法 3 和 5、算法 2

与算法 4 和 6 可看出,在相同的算法下等批量策略优于不等批量策略和不分批策略。

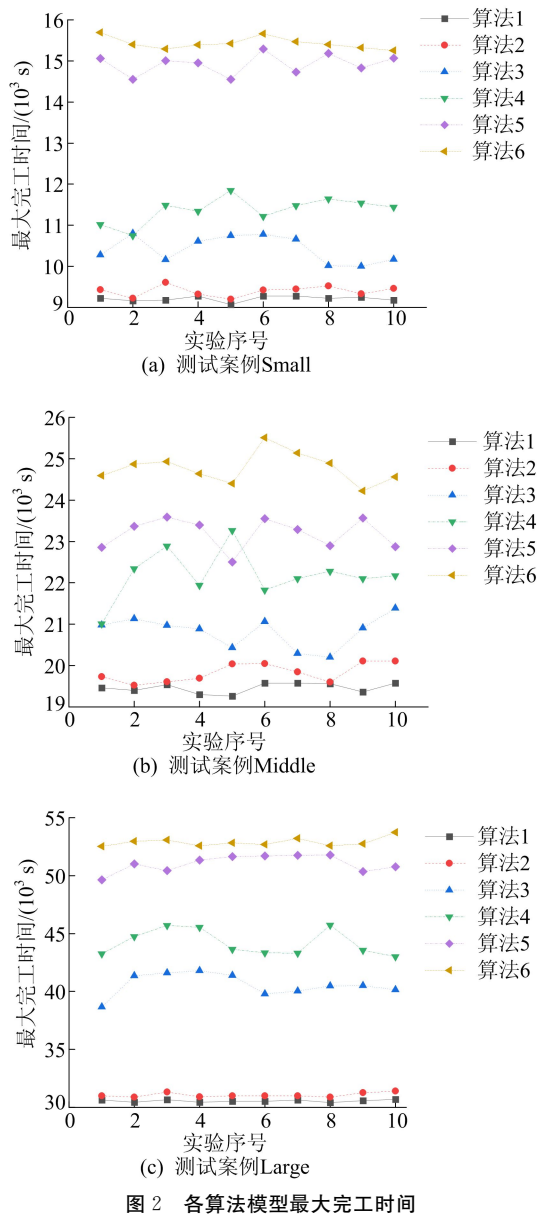


图 2 各算法模型最大完工时间

各算法模型的实验结果对比见表 7 所列。由表 7 可知,在 3 组测试案例中算法 1 的最优完工时间、最差完工时间、平均完工时间均少于其他 5 种。

3 组测试案例中各算法模型最优结果的进化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:同一测试案例下对比算法 1 与算法 2、算法 3 与算法 4、算法 5 与算法 6 可看出,在相同的批量策略下改进遗传算法更容易跳出局部最优,具有更强的全局搜索能力;同一测试案例下对比算法 1 与算法 3 和 5、算法 2 与算法 4 和 6 可看出,在相同的算法下等批量策略使初始解的质量得到了明显的提高。

表 7 实验结果的对比

单位:s

测试案例	算法	最优结果	最差结果	平均结果
Small	算法 1	9 070	9 280	9 212
	算法 2	9 200	9 610	9 396
	算法 3	10 000	10 800	10 423
	算法 4	10 750	11 850	11 377
	算法 5	14 550	15 290	14 922
	算法 6	15 250	15 690	15 429
Middle	算法 1	19 260	19 580	19 462
	算法 2	19 520	20 110	19 831
	算法 3	20 200	21 390	20 825
	算法 4	21 010	23 270	22 193
	算法 5	22 500	23 590	23 190
	算法 6	24 220	25 510	24 775
Large	算法 1	30 400	30 680	30 547
	算法 2	30 890	31 400	31 061
	算法 3	38 650	41 790	40 576
	算法 4	43 020	45 740	44 186
	算法 5	49 630	51 780	51 039
	算法 6	52 520	53 730	52 894

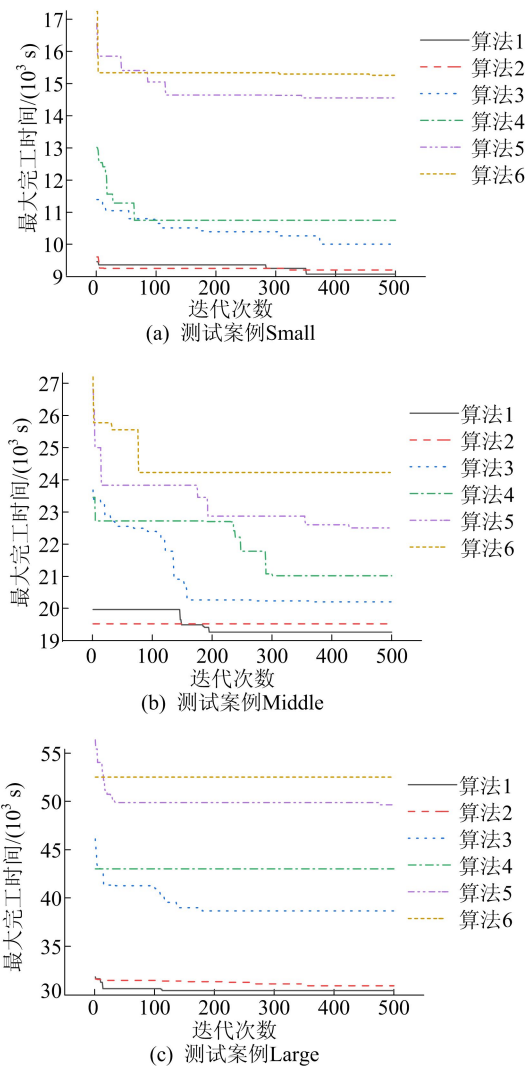


图 3 不同案例各算法模型进化曲线

3.3 实际案例应用

为验证本文设计的改进遗传算法在实际案例中的应用效果,现将上述 6 种算法应用于实际案例,该案例工件信息及各阶段加工时间见表 8 所列。

表 8 工件信息及各阶段加工时间 单位:s

工件	数量	加工阶段				
		I	II	III	IV	V
1	20	32	39	70	96	81
2	10	39	97	53	20	38
3	20	15	46	35	47	67
4	30	16	21	98	78	42
5	40	45	24	98	71	77
6	30	62	23	68	65	65
7	30	81	18	34	60	94
8	10	65	98	55	57	45
9	20	34	55	53	80	22
10	30	91	76	49	55	25
11	40	81	57	32	54	17
12	40	79	40	98	20	95

其中各加工阶段均配备 3 台加工设备。将表 3 所列的 6 种算法按照 3.2.2 节所述进行参数设置,针对表 8 实际案例各自独立进行 1 次实验,实验结果见表 9 所列。

表 9 6 种算法在实际案例中最大完工时间 单位:s

算法 1	算法 2	算法 3	算法 4	算法 5	算法 6
8 710	9 050	9 290	10 520	13 760	14 110

由表 9 可知,在实际案例应用中,采用算法 1 得出的实验结果最优,进一步证明本文设计的改进遗传算法的有效性和优越性。

4 结 论

本文针对混合流水车间作业调度问题提出等批量调度策略,并进行了问题描述、建立数学模型,设计改进遗传算法进行求解。根据“先到先服务”原则设计了仅针对第 1 阶段的矩阵编解码策略;设计改进遗传算法;设计对照组进行案例测试。结果表明,本文设计的改进遗传算法在多种类型的生产任务中都具有更优的初始解以及更强的全局搜索能力,在解决 HFSP-LS 问题中具有一定的优越性和适用性,为企业降本增效提供了一种方法。

[参 考 文 献]

- [1] 周永强,王翠雨,李颖俐,等.改进果蝇算法求解混合流水车间调度问题[J].控制理论与应用,2023,40(4):597-606.
- [2] 李颖俐,李新宇,高亮.混合流水车间调度问题研究综述[J].中国机械工程,2020,31(23):2798-2813,2828.
- [3] 王静,雷德明.考虑批处理机的绿色模糊混合流水车间调度问题[J].控制与决策,2024,39(10):3413-3421.
- [4] 李先,张振,周玉龙,等.基于遗传算法的航空航天环锻件混合流水车间调度优化[J].锻压技术,2023,48(11):196-203.
- [5] 酆仕云,杨孟平,易文超,等.基于混合离散差分进化算法的分布式异构混合流水车间调度[J].计算机集成制造系统,2025,31(7):2515-2528.
- [6] 轩华,关潇风,王薛苑.含不相关机的多目标混合流水车间调度[J].计算机工程与设计,2024,45(1):315-321.
- [7] 郑堃,练志伟,顾新艳,等.采用改进两点交叉算子的改进自适应遗传算法求解不相关并行机混合流水车间调度问题[J].中国机械工程,2023,34(14):1647-1658,1671.
- [8] 卫晨昊,胡晓兵,张哲源,等.改进的樽海鞘群算法求解带设置操作员的混合流水车间调度问题[J].计算机集成制造系统,2025,31(10):3694-3706.
- [9] 宁方华,黄丙齐,周晓敏.基于改进遗传算法的混合流水车间批量调度问题求解[J].软件导刊,2024,23(2):84-91.
- [10] LI X,ZHAO Q,TANG H,et al. Joint scheduling optimisation method for the machining and heat-treatment of hydraulic cylinders based on improved multi-objective migrating birds optimisation[J]. Journal of Manufacturing Systems,2024,73:170-191.
- [11] ZHU Y,TANG Q,CHENG L,et al. Solving multi-objective hybrid flowshop lot-streaming scheduling with consistent and limited sub-lots via a knowledge-based memetic algorithm[J]. Journal of Manufacturing Systems,2024,73:106-125.
- [12] MENG L,ZHANG C,SHAO X,et al. More MILP models for hybrid flow shop scheduling problem and its extended problems[J]. International Journal of Production Research,2020,58(13):3905-3930.
- [13] 汤洪涛,王丹南,邵益平,等.基于改进候鸟迁徙优化的多目标批量流混合流水车间调度[J].上海交通大学学报,2022,56(2):201-213.
- [14] 孟涛.基于群智能算法的车间批量流调度方法研究[D].上海:上海大学,2021.
- [15] 宋存利.求解多目标混合流水车间调度的改进 NSGA-II[J].计算机集成制造系统,2022,28(6):1777-1789.
- [16] 张彪.基于候鸟迁徙算法的批量流混合流水车间调度方法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [17] PAN Q,RUIZ R,ALFARO-FERNANDEZ P. Iterated search methods for earliness and tardiness minimization in hybrid flowshops with due windows[J]. Computers and Operations Research,2017,80:50-60.

(责任编辑 吴 亮)