

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.06.005

基于改进量子遗传算法的 重型装备生产调度研究*

张 琪, 杨晓英*

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要:针对机械工厂(车间)中存在的重型装备加工与装配集成调度精益性不足的问题,在研究了多产品综合作业调度的基础上,提出了一种改进量子遗传算法,以提高重型装备生产的精益化程度。以加工成本、精准交付、跨车间转运次数为目标,构建了多产品综合作业调度优化模型;结合产品加工与装配特点,设计了基于装配约束的编码方式;为避免量子遗传算法陷入早熟,将其与局部搜索能力较强的模拟退火算法结合,设计了改进量子遗传算法(SQGA),提高了全局搜索精度;同时,设计了自适应旋转角,使种群收敛速度更加平稳;采用 MATLAB 对综合作业调度算例和生产实例进行了仿真。研究表明:改进量子遗传算法平均收敛代数减少 18.6%,平均最优解占比增加 26%,具有更好的收敛效果和求解精度;在生产实例中,采用该算法可使加工成本减少 7.8%,跨车间转运次数减少 30.4%,产品达到精准交付,提高了机械工厂(车间)重型装备生产调度的精益性指标。

关键词:重型装备;加工与装配;综合作业调度;量子遗传算法

中图分类号:TH186

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)06-0689-08

Heavy equipment production scheduling based on improved quantum genetic algorithm

ZHANG Qi, YANG Xiao-ying

(School of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Aiming at the lean problem of heavy equipment processing and assembly integration scheduling, an improved quantum genetic algorithm (SQGA) was proposed to study the multi-product complete job-shop scheduling. The multi-product complete job-shop scheduling optimization model was established with the optimization objectives of processing cost, precise delivery, and transshipment times across the workshop. Combining with the characteristics of product processing and assembly, the coding method based on assembly constraints was designed. In order to avoid the quantum genetic algorithm falling into premature, it was combined with the simulated annealing algorithm with strong local searching ability, the improved quantum genetic algorithm (SQGA) was designed to improve the global searching precision. At the same time, the adaptive rotation angle was designed to make the convergence rate of the population more stable. MATLAB was used to simulate the complete job-shop scheduling calculation example and production example. The results show that the improved quantum genetic algorithm has better convergence effect and solution precision, with the average convergence algebra reducing by 18.6% and the average optimal solution proportion increasing by 26%. In the production example, the processing cost is reduced by 7.8%, the number of transshipments across workshops is reduced by 30.4%, the products achieve accurate delivery, and the lean index of heavy equipment production scheduling is improved.

Key words: heavy equipment; processing and assembly; complete job-shop scheduling problem (CJSSP); quantum genetic algorithm (QGA)

收稿日期:2020-10-30

基金项目:国家科技部创新方法工作专项资助项目(2016IM030200)

作者简介:张琪(1996-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要从事工业工程与信息化方面的研究。E-mail:839858294@qq.com

通信联系人:杨晓英,女,教授,博士生导师。E-mail:a1156572@163.com

0 引言

重型装备是典型的单件离散型产品,部件关联性强,加工与装配具有很强的并行性。传统的机械作业车间调度(job-shop scheduling problem, JSSP)通常把零件加工与产品装配分开,主要针对纯加工或纯装配调度进行研究,难以应对产品内在加工与装配的并行处理关系。综合作业调度(CJSSP)是具有实际应用背景的生产调度问题,充分考虑产品加工与装配的并行性,将分阶段调度模型转化为产品制造链调度^[1]。因此,对重型装备综合作业调度问题进行深入研究具有重要意义。

CJSSP 研究对象主要为大型复杂产品,其生产调度要遵循严格的装配顺序约束,一般以单个产品最小生产周期为优化目标^[2-4]。多产品综合作业调度方面,梁艳杰等^[5]的研究以多个产品总完工时间最小为优化目标,未能体现不同产品对交货期需求的差异性。谢志强等^[6]按产品交货期设置优先级,按优先级顺序完成多产品综合作业调度,该方法可高效求解小规模调度问题,但在大规模调度问题中难以取得最优解。

截止目前,智能算法在 JSSP 研究上已趋于成熟,但是关于 CJSSP 的研究尚有不足,由于 CJSSP 对生产工艺结构依赖过高,智能算法研究重点集中于编码设计方面。赵诗奎等^[7]设计出了一种分区编码方式,虽能有效求解 CJSSP 问题,但减少了初始种群的多样性。石飞等^[8]为避免分区编码方式遗漏解空间问题,采用了邻接矩阵修复方法,确保了初始解空间的完整性。王福吉等^[9]设计了基于可行域搜索的遗传算法,在可行域内进行了交叉、变异操作,但缩小了搜索范围,不利于搜索全局最优解。智能算法在 CJSSP 问题应用上多采用遗传算法^[10-12]。SEIDGAR H 等^[13]采用帝国竞争算法对装配作业车间进行了研究。蒋南云等^[14]设计混合智能算法对可重入综合作业调度进行了研究,建立了双层作业计划。

上述学者虽对 CJSSP 问题有一定研究,但在多产品综合作业调度方面的研究仍有不足,难以实现对各个产品的高效调度;智能算法研究在编码设计上难以保证解空间的完整性,有时设计过于繁琐,对 CJSSP 问题的应用研究尚有欠缺。

针对上述存在的问题,本文以某重型装备为研究对象,针对不同交货期下的多产品综合作业调度问题,以加工成本、精准交付、跨车间转运次数为优化目标,建立多产品综合作业调度优化模型,设计改进量子遗

传算法对模型求解;同时设计基于装配约束的编码方式,使染色体满足装配约束关系,最终确定各工序最佳执行时间,以提高重型装备生产调度的精益性指标。

1 重型装备生产调度问题分析

通常,重型装备是定制化生产的大型产品,由机械工厂(车间)按订单组织生产,由物料经非连续移动加工装配而成,生产设备以通用型为主,跨车间生产^[15]。由于生产环境复杂多变,零件跨车间生产容易造成生产混乱,应尽量减少零件跨车间的转运次数。重型装备各部件关联性强,一般将产品分解为部件,根据订单交货期设定各部件排产优先级,按优先级从高到低进行排产,生成可行的作业计划。

精益生产强调“消除浪费,降低成本”的理念,上述排产方式只考虑交货期单一指标,且这种方式生成的作业计划很难确保订单精准交付。订单提前完工会产生库存,造成浪费;拖期完工又会给企业带来额外费用,影响客户满意度,难以实现生产调度精益性目标。

重型装备通常在多订单并行条件下组织生产,由于设备资源有限,产品对设备资源的不良占用会影响到其他产品的生产进度,导致订单不能按期交付,直接影响企业核心竞争力。多产品综合作业调度不同于单个产品综合作业调度,不能以产品完工时间最短为优化目标,需要合理安排各个产品每道工序的最佳执行时间,实现订单精准交付,对求解精度要求更高。重型装备生产调度要合理安排每个车间加工任务,使每个产品订单都能精准交付且成本最低。

2 多产品综合作业调度优化模型

2.1 模型假设

n 个产品需要在多个车间加工装配,每个产品由 o 个工件组成,每个工件有 q 道工序,每道工序根据其工艺特点可在不同车间的设备上加工,工件的加工顺序严格按照工艺约束。

要求工件各工序对应合适的机床,确定最优调度方案,在生产中满足以下假设:

- (1) 工件的每道工序只能在一台设备上加工;
- (2) 在工件的紧前工件加工完成后才可开始加工;
- (3) 一台设备同时只能加工一道工序;
- (4) 加工过程中设备没有故障发生;
- (5) 零件的转运时间忽略不计。

2.2 相关符号定义

相关符号及定义如表 1 所示。

表 1 符号定义	
符号	定义
i	产品编号, $i=1,2,\cdots,n$
j	设备编号, $j=1,2,\cdots,m$
k	工件编号, $k=1,2,\cdots,o$
r	工序编号, $r=1,2,\cdots,q$
B_{ik}	产品 i 工件 k 的紧前工件集
S_{ikrj}	产品 i 工件 k 第 r 道工序在设备 j 上的开工时间
T_{ikrj}	产品 i 工件 k 第 r 道工序在设备 j 上的加工时间
C_{ikrj}	产品 i 工件 k 第 r 道工序在设备 j 上的完工时间
F_i	产品 i 的交货期
E_j	设备 j 的单位加工费用
EC_i	产品 i 的提前完工惩罚系数
FC_i	产品 i 的拖期完工惩罚系数
a_{ikrj}	整数变量,若产品 i 工件 k 第 r 道工序在设备 j 上加工,变量设置为 1;否则设置为 0
D_{ikr}	整数变量,若产品 i 工件 k 第 r 道工序开始加工前需跨车间转运,变量设置为 1,否则设置为 0

2.3 优化模型

综合考虑产品内部加工装配约束关系,笔者以加工成本、精准交付、跨车间转运次数为优化目标,建立多产品综合作业调度优化模型。

目标函数表示为:

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \tag{1}$$

式中: λ_i —目标函数加权系数; f_i —第 i 个目标函数。

(1)加工成本。重型装备生产要考虑生产成本,以成本最低为目标,最小加工成本表示为:

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^o \sum_{r=1}^q \sum_{j=1}^m a_{ikrj} T_{ikrj} E_j \tag{2}$$

(2)精准交付。产品订单应满足交货期要求,提前或拖期完工都会给企业带来损失。设置提前/拖期惩罚函数,若产品订单实际完工时间与交货期出现偏差会产生惩罚值,通过减小惩罚值实现产品精准交付,提前/拖期惩罚函数表示为:

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^n \left[EC_{i\max}((F_i - C_i), 0) + LC_{i\max}((C_i - F_i), 0) \right] \tag{3}$$

(3)跨车间转运次数。重型装备生产过程复杂多变,应尽量减少零件跨车间转运次数,避免造成生产混乱,最小跨车间转运次数表示为:

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^o \sum_{r=1}^q D_{ikr} \tag{4}$$

为使多产品综合作业调度优化模型有效求解,设

置约束条件如下:

$$\sum_{j=1}^m a_{ikrj} = 1 \tag{5}$$

$$S_{iklj} \geq C_{iw} \quad (v \in Bik) \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ikrj} S_{ikrj} \geq \sum_{j=1}^m a_{ik(r-1)j} T_{ik(r-1)j} + \sum_{j=1}^m a_{ik(r-1)j} S_{ik(r-1)j} \tag{7}$$

$$(S_{ikrj}, C_{ikrj}) \cap (S_{xyvj}, C_{xyvj}) = \phi \tag{8}$$

式(5)限制了工件 i 的每道工序,要求其只能在一台设备上加工;

式(6)限制了工件 i 第一道工序的开工时间,要求其不小于工件 i 紧前工件集的完工时间;

式(7)限制了工件的后道工序开始时间,要求其不早于前道工序的完工时间;

式(8)限制了每台设备,要求其同时只能加工一个工件。

3 改进量子遗传算法

量子遗传算法(QGA)在遗传算法(GA)的基础上融入量子计算,量子位编码方式增加了解空间的多样性。但是种群通过量子旋转门向最优个体逼近时,若没有更好的解出现,易陷入局部最优。模拟退火算法(SA)有很好的局部优化效果,以一定概率接受劣解。

改进量子遗传算法(SQGA)将 SA 与 QGA 结合,在种群迭代时易跳出局部最优,提高了算法全局搜索能力。同时,设计基于装配约束的编码方式和自适应旋转角,使其可以更平稳求解综合作业调度问题。

3.1 编码设计

CJSSP 问题编码的关键是保证染色体在解码时满足装配约束,避免不可行解产生。本文设计基于装配约束的工序-设备-父节点 3 层编码方式,确保解码时染色体的可行性和解空间的完整性。

QGA 采用量子位编码,使染色体基因处于“0”和“1”的叠加态, α_i 为转换为 0 的概率, β_i 为转换为 1 的概率,且 $\alpha_i^2 + \beta_i^2 = 1, i=1,2,\cdots,d$ 。

一条量子位编码染色体表示如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_d \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_d \end{bmatrix}$$

通过量子位测定可得到一条二进制串。对于 CJSSP 调度问题,设所有工件总工序数为 p ,令 $a = \lceil \log_2 p \rceil$,量子位编码位数 $d = a \times p$,对二进制串从左至右每 a 位划分为一个单元,进行十进制数值转换。

工序编码中,将十进制数值从小到大依次排列,将

原位置索引值填入排列后的位置即得到工序编码。设工序 i 转化后对应的十进制数值为 y_i , 可选设备的数量为 w_i , 则工序 i 的设备编码为 $\text{mod}(y_i, w_i) + 1$ 。父节点编码为每道工序对应所属工件的紧后工件编号, 根节点的父节点编码记为 0。

设某产品由 3 个工件组成, 每个工件 1 道工序, 工序可选设备数均为 2, 在 2 台设备上加工。

产品结构如图 1 所示。

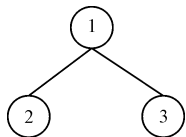


图 1 产品结构

假设基于该产品设计的某条染色体在进行量子位测定时, 量子位编码根据概率幅转换为二进制串 101101, 以此为列:

量子位编码 $\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 & \alpha_5 & \alpha_6 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 & \beta_5 & \beta_6 \end{bmatrix}$
二进制编码 [1 0 1 1 0 1]
十进制编码 [2 3 1]
工序编码 [3 1 2]
设备编码 [2 2 1]
父节点编码 [1 0 1]

解码时, 首先通过三层编码结构转换确保染色体的可行性, 使其满足产品内部装配顺序约束。

具体操作如图 2 所示。

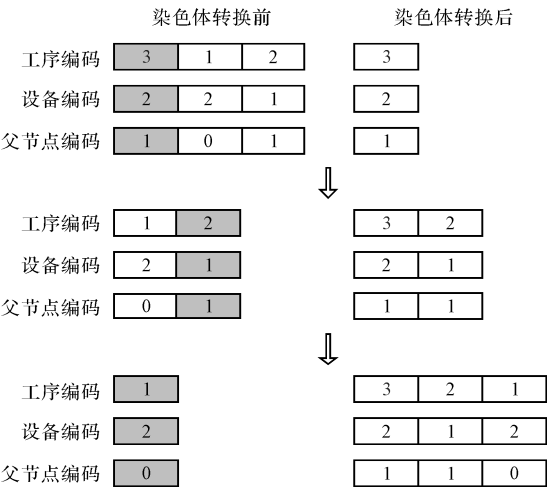


图 2 三层编码转换操作

图 2 中, 对工序编码从左至右进行遍历, 若在第三层父节点编码中含有该工序对应编码信息则跳过, 否则删除该工序编码对应索引位置的三层编码信息, 并将删除的三层编码信息重新依次记录在新集合中。重复以上操作直至三层编码为空, 即可得到符合装配约

束的新染色体。

由于染色体转换前的编码是随机的, 通过三层编码结构转换为满足装配约束染色体的解空间是完整的。根据新染色体序列从左至右进行解码, 即可得到符合装配约束的各工序执行时间。

3.2 量子位更新策略

QGA 中采用量子旋转门作用于染色体, 通过改变量子位编码的概率幅更新染色体, 实现种群进化, 其更新如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: U —量子旋转门; θ —量子旋转角。

θ 值影响种群收敛速度, 太大会导致早熟, 反之导致收敛过慢。 θ 取值一般为 $0.01\pi \sim 0.05\pi$, 为使种群收敛速度更平缓, 本文设计自适应调整 θ 为:

$$\theta_i = \frac{fitness_n - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \times \Delta\theta \quad (10)$$

式中: $fitness_n$ —个体 n 的适应度值; f_{min} —种群中最小适应度值, 也是文中最佳个体适应度值; f_{max} —种群中最大适应度值; $\Delta\theta=0.05\pi$ 。

与最佳个体适应度值越接近的个体, 说明其性能优良, 采用较小的 θ 值, 降低收敛速度; 反之, 采用较大 θ 值。

3.3 模拟退火策略

量子位更新结束后, 笔者取适应度值较好的前 20% 个体进行退火操作, 以加快收敛速度; 采用 Pauli-X 门互换 α_i 和 β_i 的概率幅, 从而改变量子位测量值, 完成邻域搜索。

设每个量子位进行 Pauli-X 门转换的概率为 0.1, 转换过程如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = X \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: X —Pauli-X 门。

将邻域搜索后的最佳个体与之前最佳个体进行对比, 按照 Metropolis 准则确定新个体接受概率, 即:

$$P = \begin{cases} 1 & f(b) < f(a) \\ \exp\left[\frac{f(b) - f(a)}{T}\right] & f(b) \geq f(a) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P —新个体接受概率; $f(a)$ —邻域搜索前最佳个体适应度值; $f(b)$ —邻域搜索后最佳个体适应度值; T —退火温度, $T = D \times T_0$; D —温度衰减参数; T_0 —初始温度。

3.4 适应度函数

模型求解过程中, 依据适应度函数去评定个体的好坏, 适应度函数一般由目标函数进行尺度变换演变

生成。由于目标函数式(1)是由3个目标加权组合而成,单位不统一,在加权组合前要进行标准化处理,化为无量纲形式,适应度函数式为:

$$f_{\text{fitness}}(x) = \lambda_1 f'_1(x) + \lambda_2 f'_2(x) + \lambda_3 f'_3(x) \quad (13)$$

$$f'_i(x) = \frac{f_i(x) - \bar{f}_i}{f_{is}} \quad (14)$$

式中: $f'_i(x)$ —标准化无量纲处理后第*i*个目标函数值; $\bar{f}_i$ —当前种群所有个体的第*i*个目标函数均值; f_{is} —当前种群所有个体的第*i*个目标函数标准差。

3.5 算法流程

改进量子遗传算法(SQGA)将量子遗传算法(QGA)与模拟退火算法(SA)结合,具体算法流程如下:

- Step1 初始化量子位编码,产生随机初始种群 Q_0 ;
- Step2 将 Q_0 进行测定、转化,得到种群 S_0 ;
- Step3 将 S_0 进行染色体转换操作,形成新的可行染色体种群 S'_0 ;
- Step4 进行适应度计算,保留最佳个体 P_b ;
- Step5 量子门旋转,得到新的种群 S ;
- Step6 将 S 经染色体转换,进行适应度计算,保留新的最佳个体 P_b ;
- Step7 将适应度高的前 20% 个体进行邻域搜索,根据 Metropolis 准则确定邻域搜索的最佳个体 P'_b 是否替换原最佳个体 P_b ;
- Step8 判断是否满足终止条件,如果满足转向 Step9,否则种群迭代次数加 1,转向 Step5;
- Step9 算法搜索结束,输出最优解。

改进量子遗传算法的算法流程图如图 3 所示。

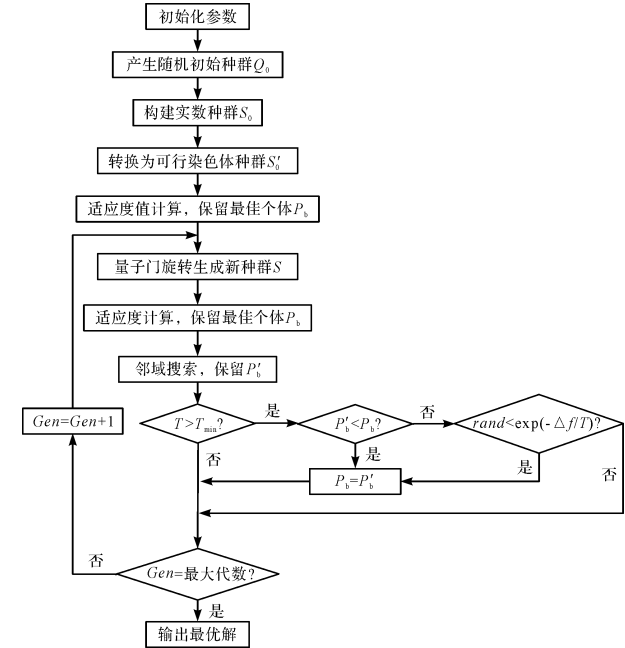


图3 算法流程图

4 实验仿真与分析

笔者采用 MATLAB R2014a 进行实验。算法参数设置如下:种群规模 100,迭代次数 200,GA 交叉概率 $P_c = 0.85$,变异概率 $P_m = 0.2$,QGA 固定旋转角,SQGA 温度衰减参数 $D = 0.95$,初始温度 $T_0 = 100$,终止温度 $T_{\min} = 1$ 。

实例验证首先对标准算例仿真,验证 SQGA 算法性能,再将算法应用到重型机械企业的生产实例中。

4.1 算例测试

目前,对 CJSSP 基准测试问题研究较少,为验证改进量子遗传算法的有效性,笔者采用文献[11]中的 10 个算例测试,以 makespan 为优化目标,使产品完工时间最短。

产品结构如图 4 所示。

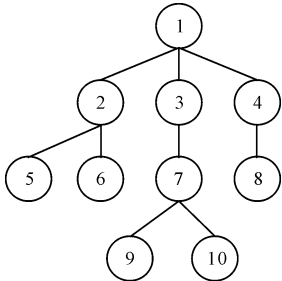


图4 算例产品结构

笔者采用 GA、QGA、AQGA、SQGA 算法进行实验且都采用本文设计的基于装配约束的编码方式,其中,AQGA 在 QGA 的基础上加入自适应旋转角,算法其余部分相同。

每个算例仿真实验次数为 10 次,以最优解(Optimal)、最优解占比(Ratio)、平均收敛代数(Gen)为衡量指标。

具体数据如表 2 所示。

由表 2 可知:

(1)Optimal 指标上,SQGA 效果最好,求解精度最高,10 个算例均能取得最优解;QGA 和 AQGA 寻优效果接近,仅在 Orb3C 算例没能收敛至最优;GA 寻优效果最差,但大部分算例也能收敛至最优。可知本文设计基于装配约束的编码方式在 CJSSP 问题上具有非常好的效果;

(2)Ratio 指标上,SQGA 在 Orb3C、Orb4C、Orb6C 3 个算例上分别为 0.8、0.9、0.8,其余算例为 1,均优于 GA、QGA、AQGA,说明 SQGA 求解过程平稳,该算法有较好的稳定性;

(3)Gen 指标上,SQGA 仅在 Orb3C 算例没取得最

表 2 不同算法数据对比

算例	最优解	GA			QGA			AQGA			SQGA		
		Optimal	Ratio	Gen	Optimal	Ratio	Gen	Optimal	Ratio	Gen	Optimal	Ratio	Gen
Ft10C	1 985	1 985	0.8	26.3	1 985	0.9	20.8	1 985	0.9	17.1	1 985	1	12.9
La16C	2 199	2 199	1	25.7	2 199	0.9	20	2 199	1	17.1	2 199	1	13.3
Orb1C	2 152	2 152	0.8	30.2	2 152	1	28.8	2 152	1	27.9	2 152	1	24.6
Orb2C	2 180	2 180	0.9	30	2 180	1	26.7	2 180	0.9	27.6	2 180	1	22.3
Orb3C	2 140	2 156	0	28.9	2 145	0	28.6	2 143	0	29.1	2 140	0.8	32.5
Orb4C	2 073	2 074	0	26.5	2 073	0.3	23	2 073	0.4	21.8	2 073	0.9	20.7
Orb5C	1 958	1 958	0.7	27.4	1 958	0.8	26.6	1 958	0.8	25	1 958	1	22.7
Orb6C	2 200	2 244	0	29.4	2 200	0.2	31.2	2 200	0.5	28.1	2 200	0.8	26
Orb7C	1 001	1 001	1	23.5	1 001	1	17.8	1 001	1	17.6	1 001	1	14.1
Orb8C	2 023	2 023	0.9	22.2	2 023	0.8	18.3	2 023	1	18	2 023	1	17.8

小值,但寻优效果均优于其余 3 种算法。整体上,SQGA 算法收敛速度最快。此外,AQGA 仅在 Orb2C 和 Orb3C 两个算例上的平均收敛代数大于 QGA;在 Orb3C 算例上,AQGA 寻优效果优于 QGA,说明 QGA 采用自适应旋转角可以提高收敛速度。

综合以上 3 项指标,可见 4 种算法中性能最好的为 SQGA,其次为 AQGA、QGA、GA;综合 10 个算例,SQGA 相比 QGA,平均收敛代数减少 18.6%,平均最优解占例增加 26%,SQGA 具有更好的收敛效果和求解精度。

笔者以 Ft10C 为例进行说明,其最优结果甘特图如图 5 所示。

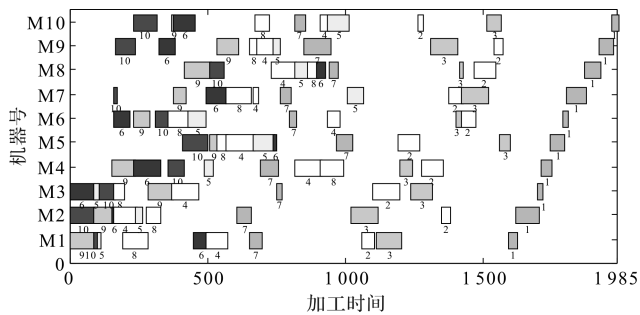


图 5 Ft10C 甘特图

数字—工件号;横坐标—加工时间;纵坐标—机器号

由图 5 可知:4 种算法均能取得 Ft10C,其中算例最优完工时间 1 985。

算法最优收敛曲线如图 6 所示。

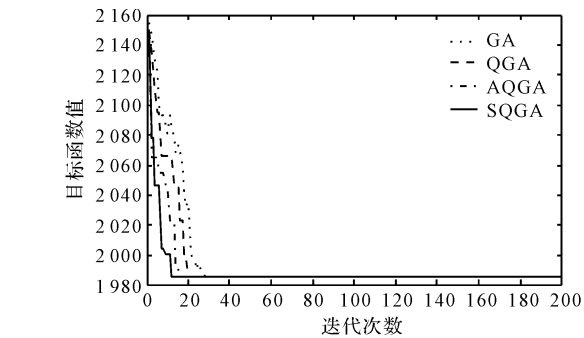


图 6 Ft10C 不同算法收敛曲线

由图 6 可知:SQGA 算法在 11 代收敛至最优,GA、QGA、AQGA 分别在 25、20、16 代收敛至最优;由此可见,SQGA 收敛效果最好,验证了改进机理的合理性和有效性。

4.2 实例验证

4.2.1 实例数据

现有 $\Phi 7 \times 3.5$ m 半自磨机 1 台, $\Phi 5.5 \times 1.8$ m 半自磨机 2 台,以二班制方式生产,每班 8 h,交货期分别为 25 d 和 35 d。

半自磨机产品结构如图 7 所示。

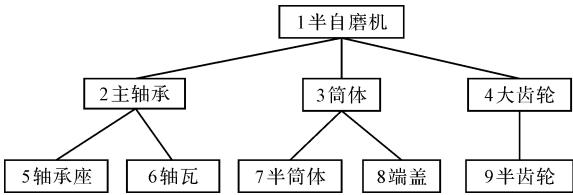


图 7 半自磨产品结构

半自磨机由主轴承、筒体、大齿轮 3 大零部件构成,产品拖期一天扣除合同金额千分之一,拖期惩罚系数 FC1 取 450,FC2、FC3 取 350;产品提前完工会占用库存、设备资源。经综合考虑,笔者设置提前惩罚系数 ECI 为 200。

实例中设备信息如表 3 所示。

表 3 设备信息

设备	设备描述	费用 /(元·h ⁻¹)	设备	设备描述	费用 /(元·h ⁻¹)
M1	划线,下料	50	M8	数控铣床	220
M2	滚齿机	300	M9	装配筒体	150
M3	16M 立车	270	M10	装配主轴承	150
M4	摇臂钻床	150	M11	装配半自磨机	200
M5	数控镗床	170	M12	大镗床	280
M6	探伤单元	210	M13	5M 立车	130
M7	划线,下料	70	M14	大钻床	300

由表 3 可知:M1 ~ M6 属于数一车间,M7 ~ M11 属于数二车间,M12 ~ M14 属于粗加车间,半自磨机在

表4 工序信息

工件名称	各工件工序可选设备/加工时间(h)									
	1		2		3		4		5	
7×3.5 半自磨机	M11/8									
5.5×1.8 半自磨机	M11/7									
7×3.5 主轴承	M10/7		M1/7	M7/8	M8/14		M13/20			
5.5×1.8 主轴承	M10/6		M1/6	M7/7	M8/12		M13/16			
7×3.5 筒体	M9/5		M3/60		M5/45	M12/50	M14/20	M4/16		
5.5×1.8 筒体	M9/5		M3/43		M5/40	M12/46	M14/18	M4/14		
7×3.5 大齿轮	M1/10	M7/12	M2/100		M5/57	M12/62	M1/10	M7/12	M3/28	
5.5×1.8 大齿轮	M1/8	M7/9	M2/85		M5/50	M12/55	M1/8	M7/9	M3/22	
7×3.5 轴承座	M1/8	M7/9	M5/34	M12/37	M13/28		M14/30	M4/27		
5.5×1.8 轴承座	M1/7	M7/8	M5/30	M12/33	M13/24		M14/26	M4/20		
7×3.5 轴瓦	M1/7	M7/9	M3/30		M1/8	M7/9	M8/19			
5.5×1.8 轴瓦	M1/7	M7/8	M3/27		M1/8	M7/9	M8/16			
7×3.5 半筒体	M1/9	M7/10	M5/48	M12/50	M6/5					
5.5×1.8 半筒体	M1/8	M7/9	M5/36	M12/44	M6/5					
7×3.5 端盖	M1/8	M7/9	M5/38	M12/40	M8/18		M14/31	M4/28		
5.5×1.8 端盖	M1/7	M7/8	M5/27	M12/28	M8/16		M14/25	M4/19		
7×3.5 半齿轮	M1/7	M7/9	M5/40	M12/44	M3/31		M6/6		M5/36	M12/48
5.5×1.8 半齿轮	M1/7	M7/8	M5/34	M12/38	M3/28		M6/5		M5/24	M12/35

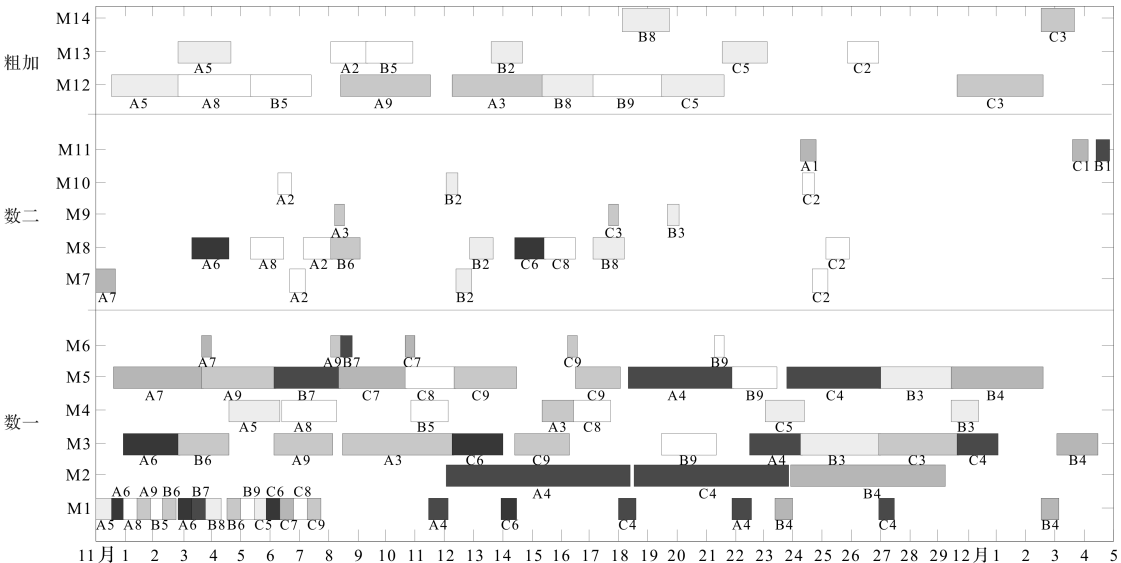


图8 半自磨机排产调度甘特图

数一、数二、粗加 3 个车间进行生产。

工序可选择机床和加工时间如表 4 所示。

4.2.2 实例仿真

实例仿真以式(13)为适应度函数,根据目标重要程度设置权重 $\lambda_1 = 0.4, \lambda_2 = 0.4, \lambda_3 = 0.2$,以保证相应指标达到最优,采用 SQGA 算法对多产品综合调度模型进行求解。

半自磨机排产调度甘特图如图 8 所示。

图 8 中,A 代表 7 m×3.5 m 半自磨机,B 和 C 代表 5.5 m×1.8 m 半自磨机,字母后的数字代表工件,如:A2 表示 7 m×3.5 m 半自磨机的第 2 个部件主轴承。

SQGA 算法的收敛曲线如图 9 所示。

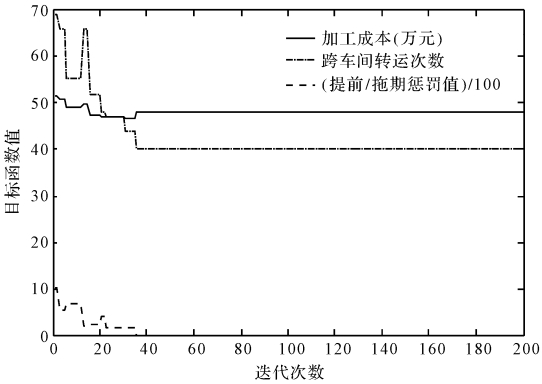


图9 SQGA 收敛曲线

4.2.3 效果分析

目前,该企业采用 APS 制定作业计划,将产品分

解为部件,每个部件根据交货期紧迫度设定排产优先级,按照排产优先级进行排产。即当某个部件排产完成后,才开始为优先级低的部件排产,这样使得解空间缩小,很难排出较好的调度结果。采用综合调度对产品进行排产,可以将产品分阶段调度变为产品链调度,有效缩短产品生产周期。

笔者将 SQGA + 综合作业调度与企业采用的 APS + 部件优先级调度进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 数据对比		
参数	APS + 部件优先级调度	SQGA + 综合调度
加工成本/万元	51.275	47.296
提前完工天数	0	0
拖期完工天数	6	0

由表 5 可见:SQGA + 综合调度方法使加工成本减少了 7.8%,跨车间转运次数减少了 30.4%,产品达到精准交付,提高了机械工厂(车间)的生产调度精益性指标。

5 结束语

针对重型装备加工与装配集成调度精益性不足的问题,综合考虑加工成本、精准交付、跨车间转运次数等目标,笔者建立了多产品综合作业调度优化模型;为使模型得到有效求解,笔者设计了改进量子遗传算法;针对量子遗传算法易陷入局部最优的缺点,将其与模拟退火算法相结合,提高了算法的搜索精度;在编码方式上设计了一种基于装配约束的工序-设备-父节点三层编码结构,使染色体在解码时,既能够满足装配约束关系,又能够满足解空间的完整性;最后,通过算例和生产实例对算法和模型的效果进行了验证。

研究表明:与传统量子遗传算法相比,改进量子遗传算法具有更好的寻优效果,收敛速度和求解精度更优,可高效求解综合作业调度问题。此外,该模型和算法可以提高重型装备精益化生产调度指标,为重型装备精益化生产提供理论依据。

在接下来的研究中,笔者将以鲁棒性为目标,对多产品综合作业调度进行研究,以应对重型装备生产过程中的突发情况对调度计划带来的不良影响。

参考文献 (References):

[1] 王林平,贾振元,王福吉,等. 多产品综合作业调度问题及

其求解[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(9):73-77.
[2] 廖不凡,雷琦,吴文烈,等. 基于混合教学优化算法的多车间协作综合调度[J]. 中国机械工程,2020,31(16):1940-1949.
[3] 张晓欢,谢志强,辛宇,等. 基于择时的二车间综合调度算法[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(9):1938-1949.
[4] NA H, PARK J. Multi-level job scheduling in a flexible job shop environment[J]. **International Journal of Production Research**,2014,52(13):3877-3887.
[5] 梁杰艳,杨明顺,高新勤,等. 加工与装配车间集成调度的多目标优化模型[J]. 计算机工程与应用,2016,52(10):247-253.
[6] 谢志强,常宁宁,杨静. 基于交货期紧迫度的综合调度算法[J]. 机械工程学报,2011,47(22):181-190.
[7] 赵诗奎,韩青,王桂从. 基于虚拟零部件级别分区编码的产品综合调度算法[J]. 计算机集成制造系统,2015,21(9):2435-2445.
[8] 石飞,赵诗奎. 基于工序约束链编码的遗传算法求解产品综合调度问题[J]. 中国机械工程,2017,28(20):2483-2492.
[9] 王福吉,赵国凯,贾振元,等. 基于可行域遗传算法的装配作业调度[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):115-120.
[10] 郭伟飞,雷琦,宋豫川,等. 基于虚拟零部件的零等待约束复杂产品综合调度算法[J]. 机械工程学报,2020,56(4):246-257.
[11] 王林平,贾振元,王福吉,等. 综合作业调度问题基于可行域的遗传算法[J]. 大连理工大学学报,2011,51(2):205-209.
[12] 曾垂飞,刘建军,陈庆新,等. 优化交货可靠性的装配作业车间分批调度[J]. 工业工程,2019,22(6):45-56.
[13] SEIDGAR H, KIANI M, ABEDI M, et al. An efficient imperialist competitive algorithm for scheduling in the two-stage assembly flow shop problem[J]. **International Journal of Production Research**,2014,52(4):1240-1256.
[14] 蒋南云,严洪森. 不确定可重入定点装配车间集成生产计划与调度[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(3):584-598.
[15] 杨晓英,施国洪,王雪,等. 基于精益物流的单件离散型生产作业排程优化[J]. 工业工程与管理,2013,18(3):11-18.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

张琪,杨晓英. 基于改进量子遗传算法的重型装备生产调度研究[J]. 机电工程,2021,38(6):689-696.
ZHANG Qi, YANG Xiao-ying. Heavy equipment production scheduling based on improved quantum genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021,38(6):689-696.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>