

考虑并行批处理的复杂机电产品装配排程优化

邓凯博¹, 汤 辉¹, 谢乃明², 闫 华¹, 于一豪¹

(1. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471109; 2. 南京航空航天大学经济管理学院, 南京 211106)

摘要: 复杂机电产品装配产线多采用模块化设计以实现多型产品并行生产, 各模块装配过程中存在部分工序组批处理、多机并行加工等复杂情况, 为车间排程方案的制定带来巨大挑战。本文以复杂机电产品柔性装配作业车间为研究对象, 多品种小批量生产模式下考虑多机并行批处理, 以最小化最大完工时间、最小化拖期时间和最大化平均设备利用率为目标, 建立多目标整数规划模型。根据问题特性, 设计嵌入启发式规则的快速非支配排序遗传算法求解模型。实验表明, 本文提出的排程策略及模型能提供合理的批产机组批方案; 改进算法与传统非支配排序遗传算法相比, 最大完工时间平均缩短 4.25%, 总拖期时长平均降低 32.30%, 平均设备利用率增长 0.69%。

关键词: 复杂机电产品; 计划排程; 非支配排序; 不相关并行机; 批处理

中图分类号: TJ760; TH186

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)03-0547-10

Assembly Scheduling Optimization of Complex Electromechanical Products Considering Parallel Batch Processing

DENG Kaibo¹, TANG Hui¹, XIE Naiming², YAN Hua¹, YU Yihao¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471109, China; 2. College of Economics and Management,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Complex electromechanical product assembly lines often adopt modular design to achieve parallel production of multiple types of products. During the assembly process of each module, there are complex situations such as batch processing of some process groups and parallel processing of multiple machines, which brings huge challenges to the formulation of workshop scheduling plans. This paper takes the flexible assembly workshop of complex electromechanical products as the research object, considers the parallel batch processing of multiple machines under the multi-variety small batch production mode, and establishes a multi-objective integer programming model with the goals of minimizing the makespan and the delay time, and maximizing the average equipment utilization. According to the characteristics of the problem, a fast non-dominated sorting genetic algorithm solution model embedded with heuristic rules is designed. Experiments show that the scheduling strategy and model proposed in this paper can provide a reasonable batch plan for batch production units. Compared with the traditional non-dominated sorting genetic algorithm, the improved algorithm shortens the maximum completion time by 4.25% on average, reduces the total delay time by 32.30% on average, and increases the average equipment utilization by 0.69%.

Key words: complex electromechanical products; planning and scheduling; non-dominated sorting; unrelated parallel machine; batch processing

收稿日期: 2024-12-02; 修订日期: 2025-02-27

通信作者: 汤辉, 男, 研究员, 硕士生导师, E-mail: tangh123@126.com。

引用格式: 邓凯博, 汤辉, 谢乃明, 等. 考虑并行批处理的复杂机电产品装配排程优化[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(3): 547-556. DENG Kaibo, TANG Hui, XIE Naiming, et al. Assembly scheduling optimization of complex electromechanical products considering parallel batch processing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(3): 547-556.

随着中国工业技术水平的不断提升,精密器械和高端电子产品领域快速发展。复杂机电产品由多种机械构件、电子器件和控制装置组成,融合了机械和电子产品的特性,体现了我国制造业发展水平,并在装备制造领域中发挥着关键作用^[1]。为实现《中国制造 2025》的战略规划,打破发达国家高端技术产品的制造壁垒,智能制造,包括智能装备和智能工厂等,已成为复杂机电产品制造企业的产线建设目标^[2]。但在产品需求多样化的环境下,为便于快速调整产线,复杂机电产品装配多采用模块化设计和离散制造,形成多型号混线生产、多设备并行加工的生产模式,导致装配现场生产计划的编制难度显著提升。

复杂机电产品的生产过程包括元件生产组装、组件壳体制造、组件装配、总体装配及测试等多个环节,产品生产周期长且工艺流程复杂^[3]。在有限的设备资源条件下,任一环节的延误都会对产品的按期交付带来严重风险。当前,复杂机电产品制造企业普遍依赖人工排程,排程效率及可行性都难以满足实际需求,导致产线设备利用率低、在制品堆积严重以及现场管理混乱等问题。当订单任务紧急度较高时,人工排程方案往往会产生大量的延期时间。对此,研究在生产过程中如何应用先进的制造技术和管理方法,成为我国未来复杂机电产品产线建设亟待解决的关键问题^[4-5]。

目前,针对复杂机电产品的相关研究多集中在工艺技术优化方面。王发麟等^[6]以某相控阵雷达中的线缆装配为例,针对复杂机电产品装配路径困难的问题,提出快速搜索随机数算法进行求解。针对复杂机电产品装配模块设计,文献^[7]提出了面向核心组件的模块化设计方法。文献^[8]通过研究深度代理模型的复杂机电产品多目标优化方法,实现对产品的仿真优化。文献^[9]为优化复杂机电产品产线布局、工作站负载、物流分配以及设备测试,提出基于数字孪生的多目标耦合优化方法。文献^[10]为提高复杂机电产品线路装配规划效率,提出了基于先验路径复用的路径规划算法。综合已有研究,对复杂机电产品装配工艺、现场布局、仿真技术及工作单元负载的优化能有效提高产品装配效率,降低生产成本^[11-13]。但复杂机电产品的现场生产管理也会对产品的交付起到关键作用,该类产品车间排程技术的改进也同样是企业面临的重要问题。

此外,复杂机电产品作业车间使用混合流水生产模式,侧重资源的重组优化,其产线排程属于典型的 NP-hard 问题^[4]。而遗传算法在求解静态生产排程、调度问题中具有明显优势,已被学者广泛

使用^[14-16]。文献^[17]基于某复杂机电产品多生产单元制造车间,在考虑换线、运输等时间的基础上,以最小完工时间为目标构建多生产单元协同调度模型,并使用遗传算法进行求解。文献^[18]结合航空复合材料热压的生产特点,提出二维装箱约束的批调度方法,结合领域搜索策略改进并设计遗传算法进行求解。综上所述,遗传算法具有良好的全局搜索能力,其灵活的编码方式能够应对多种复杂情景,更适用于复杂机电产品作业车间排程问题。

本文以某装备制造企业复杂机电产品装配作业车间为例,展开考虑不相关并行机及在制品部分工序组批处理情形下,多型产品装配的排程优化问题。针对该问题,建立复杂机电产品作业车间调度问题(Complex electromechanical products-job shop scheduling problem, CEP-JSP)整数规划模型,并对传统遗传算法进行改进,设计嵌入启发式规则的快速非支配排序遗传算法(Fast non-dominated sorting genetic algorithm II with heuristic rules, NS-GAH-II)对模型进行求解,最后通过实例验证模型和算法的可行性。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

本文研究复杂机电产品装配作业车间排程优化问题,该问题描述如下。在生产周期内共有 n 个订单任务,对应相同数量待装配工件,工件集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。所有工件需要在 m 台设备上装配,设备集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 。零时刻,在首个工件开始加工时,部分工件已到达,其他待装配工件在调度周期内到达,且到达时间已知。所有工件均经过 s 道工序进行装配,形成不同型号产品,工序集 $J = \{j_1, j_2, \dots, j_s\}$ 。不同型号工件有不同的装配工艺路线,且装配过程遵守工序顺序约束。第 i 件工件的第 l 道工序 O_{il} 可选设备数量为 Z_{il} 。每道工序只能选择 1 台设备进行加工,每台设备具有一定的加工能力 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$,表示同时可加工工件数量。当所有工序完成时,工件装配完成。根据问题描述,做出如下假设:

(1) 工件加工过程不存在质量及设备故障问题,即良品率为 100%;

(2) 同时刻每个工件只允许在 1 台设备上加工;

(3) 所有工件的工艺顺序不可改变,即工序的先后加工顺序不可逆;

(4) 不考虑在制品等待加工时的缓存区容量约束;

- (5) 忽略在制品的运输时间;
 (6) 忽略不同类型产品连续装配的换型时间;
 (7) 整个加工过程所需物料充足。

1.2 模型构建

针对提出的问题,以最小化最大完工时间、最小化拖期时间及最大化平均设备利用率为目标,构建了CEP-JSP模型。

(1) 参数定义

相关符号定义、目标函数及约束条件表征如表1所示。

表1 参数符号定义

Table 1 Definition of parameter symbols

参数符号	含义
x	工件编号
y	设备编号
j	工序编号
i	工件索引
k	设备索引
l	工序索引
O_{il}	工件 i 的第 l 道工序
$n/\text{个}$	总订单数量
$m/\text{个}$	设备数量
$s/\text{道}$	工序数量
Z_{il}	工件 i 的第 l 道工序可用设备数量
g_k	设备 k 的加工能力,即可同时加工工件数量
T_{ilk}/min	工件 i 的第 l 道工序在设备 k 上的加工时间
D_i	工件 i 的交期
CT_{il}/min	工件 i 第 l 道工序的开始加工时间
DT_{il}/min	工件 i 第 l 道工序的结束加工时间
L_i/min	工件 i 的拖期时间
ST_k/min	设备 k 开机时间,即首次使用时间
ET_k/min	设备 k 关机时间,即结束使用时间
b_k	设备 k 的组批加工数量
S_{ikq}/min	工件 i 在设备 k 上第 q 次批处理的 可开始加工时间
MT_{kq}/min	设备 k 第 q 次批处理的首个待加工 在制品的等待加工时间
t_{ikq}	工件 i 到达批处理设备 k 后,若 $t_{ikq}=1$ 则设备 停止等待并进行第 q 次批处理,此设备所有 待加工工件开始加工;若 $t_{ikq}=0$ 则继续等待
F_{ilk}	工件 i 的第 l 道工序在设备 k 上加工,则 $F_{ilk}=1$,否则为0

(2) 目标函数

$$f_1 = \min(\max(DT_{is})) \quad (1)$$

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^n L_i \quad (2)$$

$$f_3 = \max \left(\frac{1}{m} \left(\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^s T_{ilk} F_{ilk} \right) \right) \quad (3)$$

(3) 约束条件

$$L_i = \begin{cases} 0 & DT_{is} \leq D_i \\ DT_{is} - D_i & DT_{is} > D_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$0 \leq ST_k \leq ET_k \leq \max(DT_{is}) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m F_{ilk} = 1 \quad (6)$$

$$CT_{il} + \sum_{k=1}^m T_{ilk} F_{ilk} = DT_{il} \quad (7)$$

$$0 \leq DT_{il} \leq CT_{i(l+1)} \quad (8)$$

(4) 组批判断

$$I = \frac{S_{ikq}}{D_i} + \frac{MT_{kq}}{T_{ilk}} \quad (9)$$

$$r = \frac{D_i}{\max D_i} \quad (10)$$

$$t_{ikq} = \begin{cases} 0 & I \leq r \\ 1 & I > r \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

其中,式(1~3)为模型的目标函数,分别表示最小化最大工件完工时间、最小化拖期时间以及最大化平均设备利用率;式(4)为拖期时间的计算公式;式(5)为设备开工及完工时间约束;式(6)表示工件的各工序只能由1台设备进行加工;式(7)为工件 i 的第 l 道工序开始加工时间、加工时间及结束加工时间计算公式;式(8)表示工件加工顺序约束,即工件 i 第 l 道工序的结束时间应小于其下道工序的开始加工时间。

当工件 i 上道工序加工完成,且本工序所使用设备 k 未加工其他工件时,称该工件处于可加工状态,工件可加工状态持续时间为待加工在制品的等待加工时间。当设备 k 为批处理机,且工件 i 刚处于可加工状态时,对设备 k 进行组批判断。其中,式(9)由两部分组成:工件 i 的可开始加工时间与其交期时间比值判断加工紧急度;设备在第 q 次批处理首个待加工工件等待时间与工件 i 工序加工时间比值计算设备闲置因子。式(10)通过工件 i 交期与本订单最长交期比值判断的其交付紧急度。式(11)通过比较式(9、10)所得结果,判断是否将设备 k 第 q 次批处理中所有在制品进行组批加工。

2 算法设计

本文所研究的复杂机电产品作业车间调度模型包含混合流水作业和工件组批处理,属于典型的NP-hard问题^[19]。因此,本文采用智能优化算法,结合Pareto优化方法,寻求多个优化目标的满意解。快速非支配排序遗传算法(Fast non-dominat-

ed sorting genetic algorithm, NSGA-II)通过引入精英策略和拥挤度比较算子,在多目标问题求解中表现出良好性能,被广泛应用于调度模型求解中^[20]。但原算法求解大型复杂排程问题时,易陷入局部最优,故对算法进行改进,设计NSGAH-II,对种群初始化方法改进,提高初始种群质量。

2.1 算法流程

NSGAH-II的基本流程如图1所示,其在经典GA算法的基础上,引入4种不同的启发式规则进行种群初始化,并对各层染色体的交叉、变异过程进行了调整。

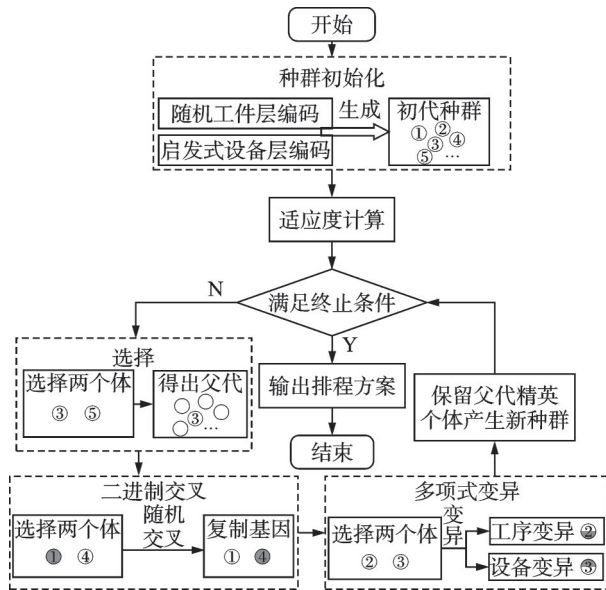


图1 算法流程

Fig.1 Flow chart of the algorithm

2.2 关键算法步骤设计

2.2.1 染色体编码及种群初始化

遗传算法中,染色体编码对模型的求解起到关键作用。由于复杂机电产品排程涉及工件装配顺序和设备选择,故采用工件-设备双层编码方式,如图2所示,工序层 O_{21} 对应设备层 M_1 ,表示首先装配工件2,且使用设备1进行加工。

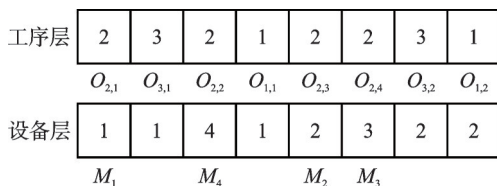
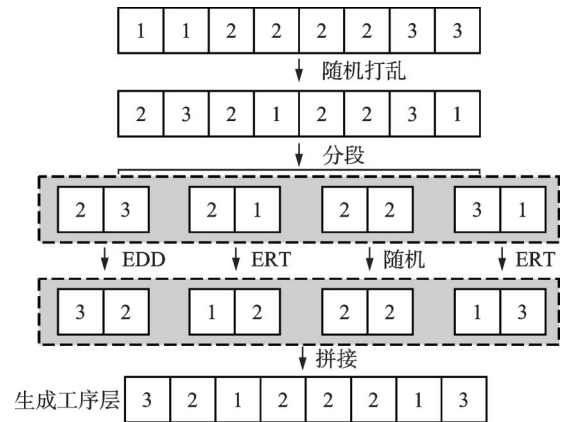


图2 染色体双层编码

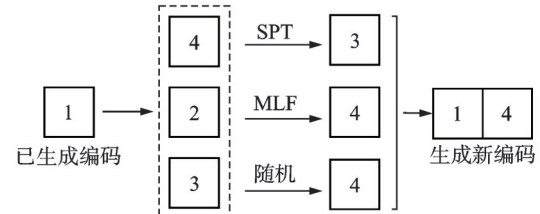
Fig.2 Chromosome double layer coding

此外,模型求解包含订单排序、设备选择以及批处理组批等复杂要素,故使用启发式规则生成染色体工序层和设备层编码,采用人工经验对初始种群编码进行合理性优化,以提升种群进化效果,降

低种群迭代次数。其中,工序层编码如图3(a)所示,首先将所有工件按照其工序数量顺序排列,随机打乱后生成初始编码。再将染色体的每两个基因进行分段,按照轮盘赌法选择排列规则对各片段中的编码进行调整。最后,将所有片段重新拼接生成新的工序码。而设备码在所生成工序码的基础上,顺次对每个工件的每次加工进行设备选择,依据轮盘赌法进行随机选择或启发式规则,如图3(b)所示。



(a) Heuristic-based operation code generation



(b) Heuristic-based equipment code generation

图3 初始染色体生成示例

Fig.3 Initial chromosome generation example

其中,工序码引入经典调度问题中常用的启发式规则,包括:(1) EDD(Earliest due date)规则:工件按到期时间增序排列;(2) ERT(Earliest release time)规则:按工件到达时间增序排列;(3) 随机排列规则,选择概率分别为0.3、0.3和0.4。而设备码同样采用启发式规则,包括:(1) SPT(Shortest processing time)规则:选择最短加工时间设备;(2) MLF(Maximum load first)规则:选择负荷能力最大设备;(3) 随机选择,选择概率分别为0.3、0.3和0.4。

2.2.2 染色体解码

基于CEP-JSP模型,需要对每条染色体解码形成工件加工顺序、各工序设备选择以及批产机组批方案。为求解该模型,本文设计包含前插机制的解码方式,以减少装配等待时间,加速收敛。以图2所示染色体为例,图4所示为解码策略,其详细步骤如下:

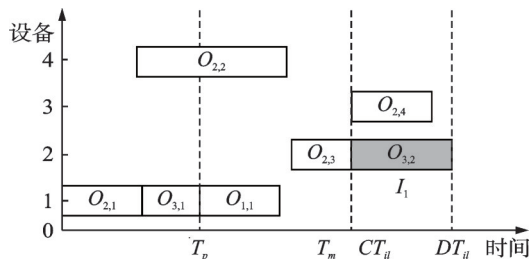


图4 染色体解码示例

Fig.4 Chromosome decoding example

Step 1 获取染色体 I_1 (取 $O_{3,2}$, 在图 2 中对应工序码第 7 位) 的工件号, 通过工件编号得到对应工件的到达时间, 获取该工件号在染色体中出现的次数即为工件加工次数, 设备码相同位置对应编码为加工设备号, 从而得到设备加工时间以及设备加工容量。

Step 2 计算基于工序约束的工件开始加工时间 T_p 。将工件上一工序结束加工时间 (首次加工则取零)、工件释放时间进行比较取大。

Step 3 计算基于设备约束的工件开始加工时间 T_m 。若所选用设备为批处理机 ($g_k > 1$), 判断批产机在制品等待加工数量, 若为 0 则取设备上上次加工的结束使用时间, 不为 0 则取待组批在制品中的最大开始加工时间; 若所用设备加工容量为 1, 则取设备上上次加工的结束使用时间。

Step 4 在制品组批。若设备为批处理机, 且该批处理机满足组批条件 (即 $t_{ikq} = 1$) 或待加工在制品达到设备容量 g , 则组批开始加工, 更新设备开始、结束使用时间, 此设备在制品等待数量清零; 若不符合组批条件, 则停止后续步骤, 储存工件可开始加工时间, 设备待加工在制品数量加 1。

Step 5 生成工件开始加工时间 CT_{il} 。将 Step 2 与 Step 3 所得时间进行比较, 取大为 CT_{il} 。

Step 6 前插操作。若所选设备为单处理机, 并且设备约束所得开始时间大于工序约束所得时间。计算开始加工时间之前, 所有可加工该工序设备的空闲时间段, 若存在空闲时间段大于加工时间, 并且空闲时间起点小于工序约束开始时间, 则更新开始加工时间为该起点。

Step 7 计算并储存设备结束加工时间 DT_{il} 。

2.2.3 适应度计算

对染色体进行解码后得到组批排程方案。为求解多目标函数并得到适应度值, 采用 Pareto 寻优方法对种群进行适应度排序。

首先依据 Pareto 支配规则进行分层, 将所有个体标记出层级编号, 各层级编号表示其所在的非支配前沿。例如, 第一前沿 F1 即层级为 0, 包含所有非支配个体, 而第二前沿 F2 即层级为 1, 包含所有

仅被第一前沿支配的个体, 以此类推。每层个体在优化过程中同等重要, 前沿等级越低, 越接近 Pareto 最优。

而同层个体, 需要进行拥挤度计算, 从而实现个体排序, 拥挤度越大则遗传概率更高, 同层中排序更靠前。个体拥挤度是其在所有目标函数中的拥挤距离之和, 个体拥挤度计算公式为

$$d_i^m = \frac{f_i^{m+1} - f_i^{m-1}}{f_{\max}^m - f_{\min}^m} \quad (12)$$

式中: d_i^m 表示个体 i 在第 m 个目标中的拥挤度; 分子 f_i^{m+1} 和 f_i^{m-1} 表示相邻个体第 m 个目标的函数值; 而分母 $f_{\max}^m$ 和 $f_{\min}^m$ 分别表示所有个体在第 m 个目标上的最大、最小目标函数值。

2.2.4 选择操作

选择操作采用二元竞标赛法, 随机选择 2 条个体进行适应度比较, 保留 Pareto 解更优个体, 重复操作, 直到淘汰一半个体。

2.2.5 交叉操作

考虑交叉后所得染色体的可行性, 采用改进模拟二进制交叉 (Simulated binary crossover, SBX) 方法, 针对工序码和设备码采用不同的交叉规则。

如图 5 所示为染色体工序码交叉过程, 首先随机生成交叉工件编号 {2, 3}, 将父代 1 中工件 2 和工件 3 的所有编码保留位置复制到子代 1, 而将父代 2 中剩余工件 1 和工件 4 的所有编码依次填入子代 1 其他位置, 生成子代 1。同类, 子代 2 保留了父代 2 中被选工件的所有编码位置。

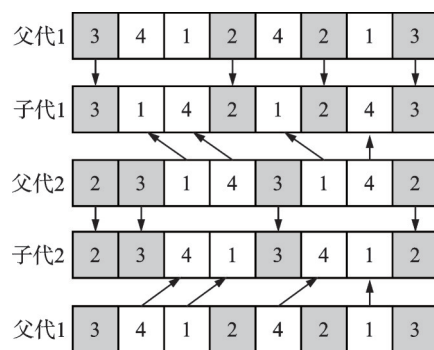


图5 工序码交叉示例

Fig.5 Example of process code crossover

为保证设备码在交叉过程中, 不违反工件可使用设备集约束, 对原交叉方式进行改进。如图 6 所示, 随机选择交叉位置 $\{I_2, I_6\}$ 。以交叉点 I_6 为例, 其设备码对应父代 1 中工序码 2 (见图 5), 为工件 2 的第 2 个工序, 而在父代 2 中, 该工件对应工序在 I_8 位置。故在设备码中对父代 I_6 与 I_8 位置进行交换, 得到子代。

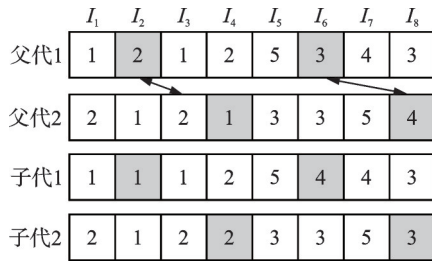


图6 设备码交叉示例

Fig.6 Example of device code crossover

2.2.6 变异操作

由于本文采用双层编码,故对原有多项式变异进行改进,如图7所示。随机选取两点 $\{I_2, I_7\}$ 进行染色体变异。将父代工序层对应位置编码交换,得到子代工序码。以 I_2 为例,对设备层编码调整,父代 I_2 位置对应工件4,将其设备码中工件4所有工

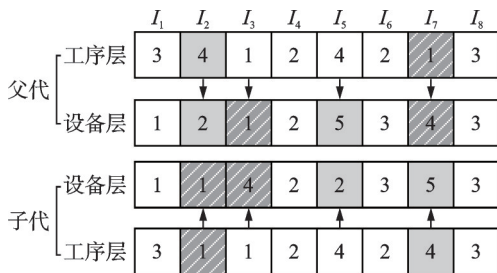


图7 染色体变异示例

Fig.7 Example of chromosomal variations

序对应加工设备序号、次序进行记录,找出子代设备层工件4所有工序对应编码位置,将父代信息依次填入。同理,调整 I_7 位置对应工件所有设备码,得到子代设备层编码。

3 实例验证

本文以实际生产作业车间为案例,通过对比实验验证 CEP-JSP 模型的准确性,以及改进后 NSGAH-II 的求解效果及可行性。实验仿真环境为: Windows64 位操作系统, CPU 为 Intel(R) Core (TM) i5-8300H, 处理器主频为 2.30 GHz, 8 GB 内存, 编程环境为 Matlab 2020a。

3.1 实例数据

某装备研制企业主要生产多型复杂机电产品,产品更新迭代快,使用离散-流水混合生产模式,符合多品种小批量生产特点。以该企业总体装配车间为研究案例,其产线采用混合流水作业模式,部分装配工序使用批处理机进行加工,且可同时加工不同型号产品。由于装配工艺复杂,多型产品混线生产,该产线排程方案制定主要依靠车间班组人员。以某月订单需求的四型产品为例,产品 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 所对应的装配工序、可用设备及其参数,如表2所示。

表2 各型产品装配参数

Table 2 Assembly parameters of various types of products

产品型号	可用设备	工序1	工序2	工序3	工序4	工序5	工序6	工序7	工序8
P_1	编号	1	2	{3,4}	6	{7,8}	9	{10,11}	13
	加工时间/min	20	20	60、50	10	30、40	15	240、270	25
P_2	编号	1	2	{4,5}	6	{7,8}	9	{11,12}	13
	加工时间/min	15	30	60、70	10	40、30	15	280、300	30
P_3	编号	1	2	{3,5}	6	{7,8}	9	{11,12}	13
	加工时间/min	20	30	70、80	10	40、50	15	200、230	25
P_4	编号	1	2	{3,5}	6	{7,8}	9	{11,12}	13
	加工时间/min	20	30	70、80	10	40、50	15	200、230	25

此外,该产线共13台设备,各设备同时可加工在制品数量如表3所示。可知,设备集 $\{1,2,6,9,13\}$ 为单处理机,设备集 $\{3,4,5,7,8,10,11,12\}$ 为批产机。根据月订单需求,随机选取5天交付任务,待加工工件信息如表4所示。

表3 设备加工能力

Table 3 Equipment processing capacity

设备编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
加工能力/个	1	1	4	3	3	1	4	3	1	3	4	3	1

3.2 参数设置

本文所提出的 NSGAH-II 包含4个关键参数,分别为种群规模(n_p)、最大迭代次数($G_{\max}$)、交叉

概率(p_c)及变异概率(p_m)。上述参数对于算法性能会产生较大影响,故通过测试实验选取最佳参数组合,发挥算法最大效用。经过初步测试,最大算例规模($n=20$)能够在150代内达到收敛状态,因此 $G_{\max}$ 设定为150。而其余参数在初步测试中难以确定,本文采用正交实验的方法进行调参。在 $L_9(3^3)$ 正交实验中,为保持算例规模的一般性,设定订单数量为18,运用正交实验对 n_p 、 p_c 和 p_m 寻找最优参数组合。

根据正交实验规则,每个关键参数各取3个水平,其中 $n_p \in \{100, 150, 200\}$, $p_c \in \{0.7, 0.8, 0.9\}$, $p_m \in \{0.10, 0.15, 0.20\}$ 。将 NSGAH-II 在不同参数组合下独立运行20次,各目标函数结果平均值如

表 4 待装配工件参数				
Table 4 Assembly workpiece parameters				
序号	编号	产品型号	到达时间	交付时间
Day1	1、2、3	P_1	0	1 440
	4、5	P_1	90	1 440
	6、7	P_1	120	1 440
	8	P_1	150	1 440
	9	P_1	180	1 440
	10、11	P_3	0	1 200
	12、13	P_3	60	1 200
	14	P_3	150	1 200
Day2	1、2	P_1	0	1 400
	3	P_1	60	1 400
	4、5、6	P_1	180	1 400
	7、8	P_2	0	900
	9	P_2	60	900
	10	P_2	90	900
	11、12	P_2	420	900
	13、14	P_3	0	1 200
	15、16	P_3	150	1 200
	17、18	P_3	180	1 200
Day3	1、2、3、4、5、6	P_1	0	1 440
	7、8	P_1	90	1 440
	9、10	P_1	120	1 440
	11、12	P_1	180	1 440
	13、14、15、16	P_3	0	1 200
	17、18	P_3	90	1 200
	19、20	P_3	150	1 200
Day4	1、2	P_1	0	900
	3、4、5	P_1	90	900
	6、7、8	P_1	150	900
	9、10	P_3	0	1 400
	11、12	P_3	60	1 400
	13、14	P_3	210	1 400
	15、16	P_3	300	1 400
Day5	1、2、3	P_1	0	900
	4、5、6	P_1	90	900
	7、8	P_1	180	900
	9、10	P_2	0	1 200
	11、12	P_2	120	1 200
	13、14	P_4	0	800
	15、16	P_4	300	800
	17、18、19	P_4	360	800

表 5 所示。根据实验结果知,最优参数组合为 $n_p=200, p_c=0.8, p_m=0.1$ 。

3.3 优化结果分析

分别使用两种算法对 5 组数据求解排程策略,每组数据各运行 20 次,目标函数值取测试结果平均值,如表 6 所示。对数据测试结果进行分析,NSGAH-II 相比原算法对各目标函数值的增长、降低比例如表 7 所示。相比于原 NSGA-II,其最大完工时间平均降低 4.25%,总拖期时长平均降低 32.30%,平均设备利用率增长 0.69%。结果表明,针对紧急交付情况,如 Day2、Day3、Day4,NSGAH-II 能够有效降低装配产线的拖期时间,并在

表 5 NSGAH-II 的正交实验分析表						
Table 5 Orthogonal experimental analysis table of NSGAH-II						
实验	n_p	p_c	p_m	最大完工时间/min	拖期/min	平均设备利用率/%
1	100	0.7	0.10	1 508.75	2 814.5	93.08
2	100	0.8	0.15	1 516.25	2 953	93.62
3	100	0.9	0.20	1 481.5	2 550.25	93.73
4	150	0.7	0.15	1 466	2 420	94.69
5	150	0.8	0.20	1 462.5	2 370.25	94.79
6	150	0.9	0.10	1 483.25	2 559	94.61
7	200	0.7	0.20	1 451.75	2 036.5	94.38
8	200	0.8	0.10	1 442	1 983.5	95.12
9	200	0.9	0.15	1 445	2 008.75	94.31

注:表中增黑字体表示数据所在列目标函数下,实验组结果表现最优。

表 6 算法测试对比				
Table 6 Algorithm test comparison				
序号	算法	最大完工时间/min	拖期/min	平均设备利用率/%
Day1	NSGA-II	1 159	0	97.69
	NSGAH-II	1 132	0	98.22
Day2	NSGA-II	1 509	2 965	94.52
	NSGAH-II	1 413	1 775	94.99
Day3	NSGA-II	1 484	654	95.32
	NSGAH-II	1 418	216	96.93
Day4	NSGA-II	1 309	1 615	95.05
	NSGAH-II	1 236	936	95.56
Day5	NSGA-II	1539	5672	93.06%
	NSGAH-II	1499	4970	93.22%

表 7 测试结果分析					
Table 7 Test result analysis					
目标	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5
f_1	-2.3	-6.4	-4.4	-5.6	-2.6
f_2	0.0	-40.1	-66.9	-42.0	-12.4
f_3	+0.5	+0.5	+1.7	+0.5	+0.2

注:表中 f_1 表示最大完工时间, f_2 表示拖期时间, f_3 表示平均设备利用率;“-”表示降低,“+”表示增长。

一定程度上能够减少完工时间、提高设备使用率。对于日排程计划,改进算法能够平均减少完工时间 60.3 min,优化效果显著。

以 Day2 算例测试结果为例,取两种算法最大完工时间中最优结果,对应各目标迭代曲线如图 8 所示。综合对比图 8(a,b,c)中两种算法的迭代过程,NSGAH-II 的初始解质量在最大完工时间、拖期时间中均高于原始算法,迭代后达到更优结果,而设备利用率迭代结果无明显差异。此外,在目标 2 最短拖期时间迭代中,改进算法初始解质量表现更优,在迭代达到收敛时,与原算法形成明显差距。表明启发式种群初始策略能有效减少初始种群总拖期时间,提升该目标后续迭代效果。针对高

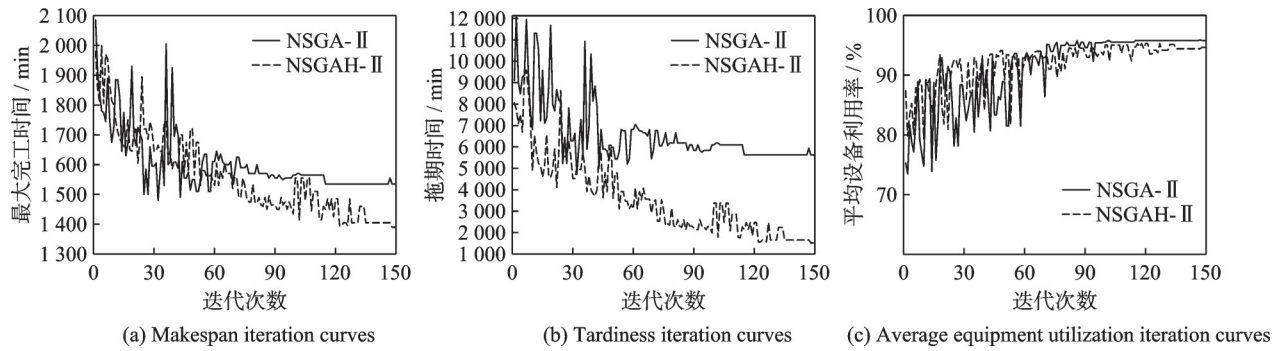


图8 算法迭代曲线对比

Fig.8 Comparison of algorithm iteration curves

任务紧急度的订单计划,改进算法降低拖期时间的效果显著。

在车间生产装配现场,订单计划的执行通过班组调度人员进行管理,调度人员需要根据生产订

单、资源可用性、设备加工能力及工艺流程设计排程方案。在 Day2 中随机选取算法运行结果绘制甘特图,与人工排程方案甘特图进行对比,如图 9 所示。其中,对批处理机进行标注,例如 $P(8,7,6)$ 表

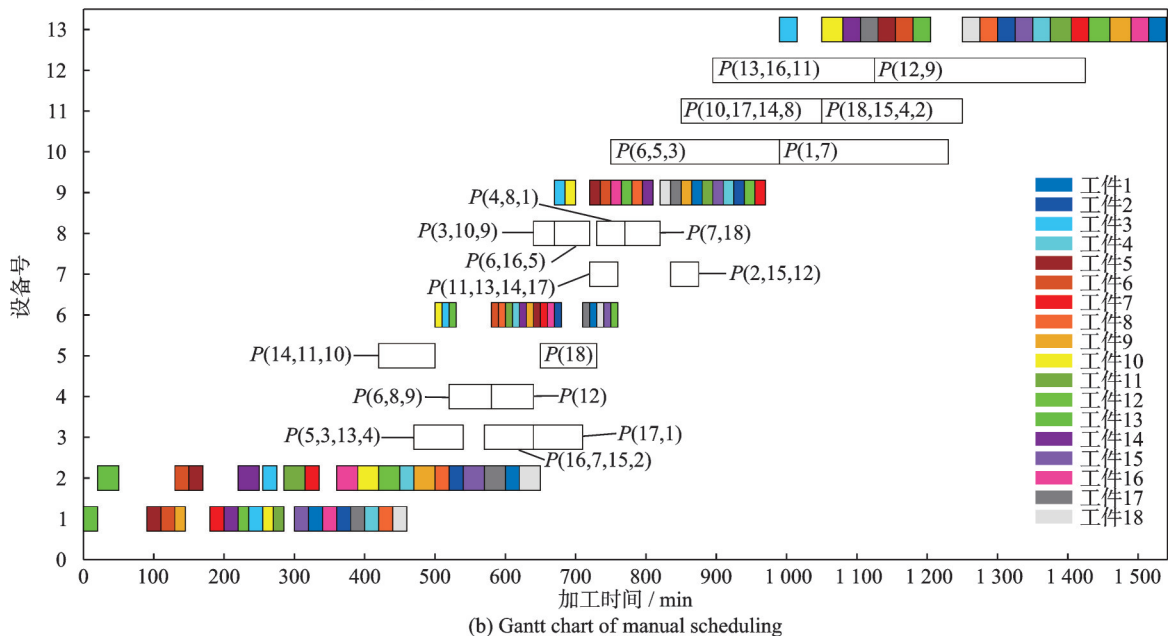
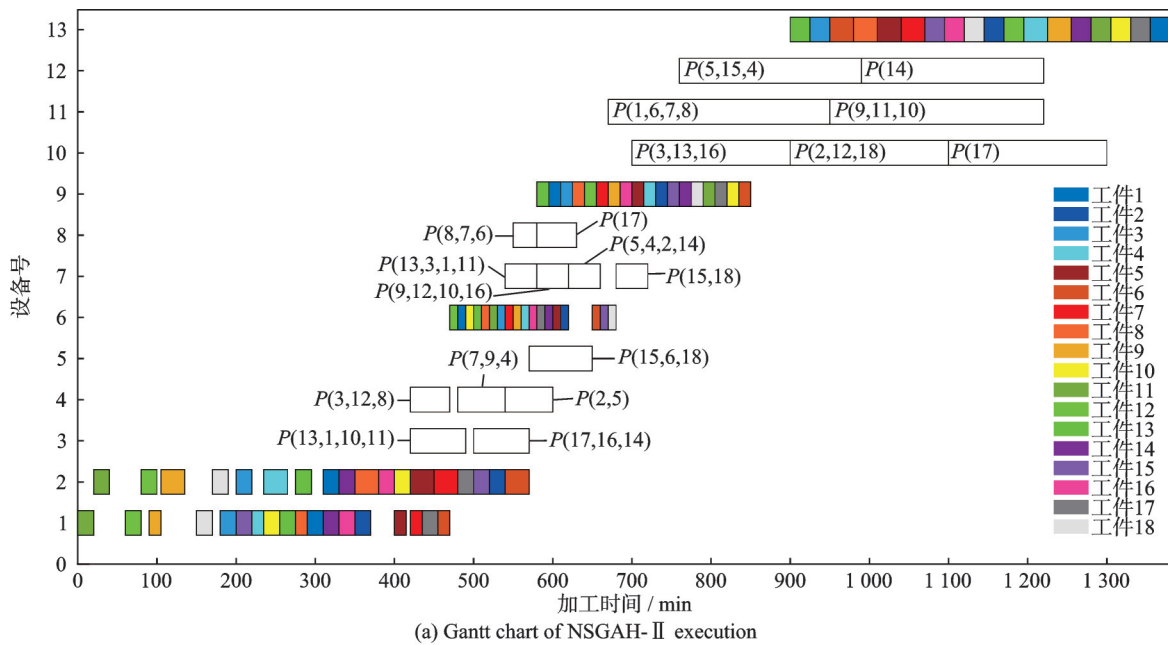


图9 实例运行甘特图对比

Fig.9 Gantt charts from examples

示该设备此阶段同时加工 x_8 、 x_7 及 x_6 这3个不同工件。结果显示,算法所得排程结果3个目标函数值分别为1 405 min、1 620 min和96.96%,而人工排程结果对应目标函数值为1 540 min、5 550 min和82.83%。相比人工排程,算法运行所得最大完工时间、拖期时间及平均设备利用率均达到较好优化结果,且总拖期时间显著降低。表明所建模型能够有效对复杂机电产品装配作业车间制定排程方案,且能够合理对并行批处理机加工进行组批。对于订单任务紧急度较高的状况,对比人工排程方案,NSGAH-II算法所得方案能显著减少总拖期时间,降低产品延期交付所造成的损失。此外,在多次实验中算法的运行时长为22~30 min,而人工排程根据订单规模大小,为90~120 min,表明算法排程效率优势明显。

4 结 论

本文针对复杂机电产品装配作业车间排程问题,构建了CEP-JSP调度模型对作业车间现场进行描述。根据模型设计工序-设备双层染色体编码方式,以及对应的解码策略。提出基于启发式规则的NSGAH-II算法,对种群初始化策略进行改进。依据模型约束,对遗传算法中各层染色体的交叉、变异过程进行了调整,以实现排程问题的求解。

在实例验证中,与传统快速非支配排序遗传算法相比,NSGAH-II算法可使最大完工时间平均减少4.25%,总拖期时间平均缩短32.30%,平均设备利用率提高0.69%。在小批量日排程结果中,与手工排程方案对比,改进算法的排程效果和效率均得到明显提高。此外,通过迭代曲线得出,改进方案的初始种群质量高于原始算法,针对任务紧急度较高的订单计划,NSGAH-II算法能够显著降低拖期时间。

复杂机电产品多品种小批量的生产模式,也同样使产线排程计划受到各类扰动因素影响。产品的质量返修问题、临时插单问题等,将会是下一步研究的重点。未来可考虑将CEP-JSP模型及求解方法引入MES系统中,对装配现场提供排程方案指导。

参考文献:

- [1] 荣双龙,赵朋飞,刘艳,等.复杂环境应力下典型机电产品贮存-值班寿命加速试验方法研究[J].装备环境工程,2024,21(7): 19-27.
RONG Shuanglong, ZHAO Pengfei, LIU Yan, et al. Research on accelerated test method of storage-duty life of typical electromechanical products under com-

plex environmental stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 19-27.

- [2] 何靓,郭俊刚,朱攀星,等.航空复合材料智能制造探索与实践[J/OL].航空工程进展,2024.http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20240918.1320.004.html.
HE Liang, GUO Jungang, ZHU Panxing, et al. Exploration and practice of intelligent manufacturing of aviation composite materials[J/OL]. Progress in Aeronautical Engineering, 2024. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20240918.1320.004.html.
- [3] 景立挺.复杂机电产品概念设计原理方案博弈决策与优化的研究[D].杭州:浙江工业大学,2020.
JING Liting. Research on game decision-making and optimization of conceptual design principle schemes for complex electromechanical products[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [4] 王振华.不确定因素下复杂机电产品装配车间重调度问题研究与应用[D].重庆:重庆大学,2022.
WANG Zhenhua. Research and application of rescheduling problem of complex electromechanical product assembly workshop under uncertain factors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [5] 晋严尊,王中一,汤辉.智能制造技术在机载武器制造中的应用[J].航空兵器,2021,28(6): 1-6.
JIN Yanzun, WANG Zhongyi, TANG Hui. Application of intelligent manufacturing technology in airborne weapon manufacturing[J]. Aviation Weaponry, 2021, 28(6): 1-6.
- [6] 王发麟,郭耀文,龚建华.基于改进快速搜索随机树算法的复杂机电产品线缆装配路径求解[J].计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(8): 1298-1310.
WANG Falin, GUO Yaowen, GONG Jianhua. Assembly path solution for cable of complex electromechanical products based on improved fast search random tree algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Graphics, 2024, 36(8): 1298-1310.
- [7] 王帅.面向不同复杂度的机电产品模块化设计若干关键问题研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
WANG Shuai. Research on several key issues of modular design of electromechanical products of different complexity[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [8] 林景亮.基于深度代理模型的复杂机电产品仿真优化方法及应用[D].广州:广东工业大学,2021.
LIN Jingliang. Simulation optimization method and application of complex electromechanical products based on deep agent model[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] GANG Y, XIAOJUN L, CHANGBIAO Z, et al. Multi-objective coupling optimization of electrical ca-

- ble intelligent production line driven by digital twin[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 86: 102682.
- [10] GUODONG Y, CHUANYUAN Z, YANPENG C, et al. Rapid planning of an assembly path by reusing the prior path[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 633.
- [11] 杨开海, 程世明, 李仁花, 等. 基于文献计量的复杂机电产品线缆装配技术研究发展态势分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(16): 55-60, 64.
- YANG Kaihai, CHENG Shiming, LI Renhua, et al. Analysis of research and development trend of cable assembly technology for complex electromechanical products based on bibliometrics[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2021, 11(16): 55-60, 64.
- [12] MA J T, LIU J H, DING X Y, et al. Motion planning for deformable linear objects under multiple constraints[J]. Robotica, 2020, 38(5): 819-830.
- [13] ELLIPS M, SOMAYÉ G. ASPPR: A new assembly sequence and path planner/ replanner for monotone and nonmonotone assembly planning [J]. Computer-Aided Design, 2020, 123: 102828.
- [14] 付红艳. 基于遗传算法车间调度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- FU Hongyan. Research on workshop scheduling based on genetic algorithm[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [15] 乐细有, 余建国. 基于改进的 NSGA-II 算法求解作业车间调度问题的研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(1): 110-114, 197.
- LE Xiyu, YU Jianguo. Research on solving job shop scheduling problems based on improved NSGA-II algorithm[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2024, 53(1): 110-114, 197.
- [16] FAN J, ZHANG C, YANG F, et al. A matheuristic with re-lot-sizing strategies for flexible job-shop re-scheduling problem with lot-streaming and machine re-configurations[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 319(3): 747-762.
- [17] 赵东方, 张晓冬, 周宏丽. 面向并行制造的多生产单元协同调度研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8): 188-195.
- ZHAO Dongfang, ZHANG Xiaodong, ZHOU Hongli. Research on collaborative scheduling of multiple production units for parallel manufacturing[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 188-195.
- [18] 周楠, 谢乃明, 郑绍祥. 考虑释放时间和装箱约束的航空复材热压成型单机批调度[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(5): 1-13.
- ZHOU Nan, XIE Naiming, ZHENG Shaoxiang. Single-machine batch scheduling of aviation composite hot pressing molding considering release time and packing constraints[J]. Industrial Engineering and Management, 2024, 29(5): 1-13.
- [19] 万国华. 排序与调度的理论、模型和算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- WAN Guohua. Theory, model and algorithm of sequencing and scheduling[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [20] 汪豪, 谢辉, 李艳武. 基于动态双种群 NSGA2 算法的分布式柔性作业车间调度研究[J]. 机电工程, 2024, 41(12): 2252-2260.
- WANG Hao, XIE Hui, LI Yanwu. Research on distributed flexible job shop scheduling based on dynamic dual population NSGA2 algorithm[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2024, 41(12): 2252-2260.

(编辑: 刘彦东)