

引文格式: 贾鑫悦, 周航, 于天浩, 等. 基于资源耦合网络的飞机总装排程优化算法研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(3): 25020075.
JIA Xinyue, ZHOU Hang, YU Tianhao, et al. Research on optimisation algorithm for aircraft final assembly scheduling based on resource coupling network[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(3): 25020075.

基于资源耦合网络的飞机总装排程优化算法研究

贾鑫悦, 周航, 于天浩, 法思雨

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 针对飞机总装排程算法对资源约束考虑不足导致计划无法执行的问题, 充分考虑空间约束、人员资质约束、资源对工序可执行性的影响, 提出一种资源加权改进算法: 在传统资源约束上, 添加并行工序引发的动态空间竞争约束, 优化作业空间连续性; 添加人员资质多样化约束, 减少人力冗余以适应实际生产; 创新性地构建物料-工序-空间耦合网络 (Material-process-spatial coupled network, MPSCN), 利用熵值法计算资源在工序网络的权重, 量化资源对工序执行的影响。以最小化完工时间为目标, 将空间和人员约束引入遗传算法 (GA) 和粒子群算法 (PSO) 的适应度函数, 并将工序权值引入初始解生成阶段, 得到资源加权的改进遗传算法 (Resource-weighted improved genetic algorithm, RW-IGA) 和粒子群算法 (Resource-weighted improved particle swarm optimization, RW-IPSO)。结果表明, RW-IGA 较 GA 工期均值缩短 9.26%; RW-IPSO 较 PSO 工期均值缩短 1.62%。随着种群规模增大, 二者优化提升率均值为 1.32% 和 2.03%。4 种算法对比, RW-IGA 优化效果最优, 最高优化百分比达 15.42%。

关键词: 飞机总装排程; 资源协同; 熵值法; 遗传算法; 粒子群算法; 调度优化

中图分类号: V268

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020075

Research on Optimisation Algorithm for Aircraft Final Assembly Scheduling Based on Resource Coupling Network

JIA Xinyue, ZHOU Hang, YU Tianhao, FA Siyu

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problem that insufficient consideration of resource constraints in aircraft final assembly scheduling algorithms results in unexecutable plans, a resource weighted improvement algorithm is proposed, fully considering the spatial constraints, personnel qualification constraints, and the impact of resources on process feasibility: Dynamic spatial competition constraints triggered by parallel processes were incorporated into traditional resource constraints to optimize the continuity of operational space; Diversified constraints on personnel qualifications were introduced to minimize labor redundancy and better align with real-world production requirements; And material-process-spatial coupled network (MPSCN) was innovatively constructed, in which the entropy weight method was employed to calculate resource weights in the process network, quantifying the impact of resources on process execution. With the objective of minimizing completion time, space and personnel constraints were embedded into the fitness functions of the genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO). Moreover, process weights were integrated into the initial solution generation stage, leading to the development of the resource-weighted improved genetic algorithm (RW-IGA) and the resource-weighted improved particle swarm optimization (RW-IPSO). The experimental results show that RW-IGA reduces the average makespan by 9.26% compared to standard GA, while RW-IPSO achieves a 1.62% reduction compared to standard PSO. As population size increases, the average optimization

收稿日期: 2025-03-18; 退修日期: 2025-04-09; 录用日期: 2025-05-08

通信作者: 周航, 副教授, 博士, 研究方向为交通运输规划与管理。

improvement rates of RW-IGA and RW-IPSO reach 1.32% and 2.03%, respectively. Among the four algorithms, RW-IGA demonstrates the best optimization performance, achieving a maximum improvement of 15.42%.

Keywords: Aircraft final assembly scheduling; Resource coordination; Entropy method; Genetic algorithm; Particle swarm optimization; Scheduling optimization

随着全球民航产业快速发展,飞机制造企业面临市场需求增长和激烈竞争的双重压力。在此背景下,提高生产线智能化水平和构建精益的生产体系是企业保持竞争力的关键。作为飞机制造核心环节,总装流程因工艺复杂、资源耦合强和任务并行性高而具有挑战性。目前,飞机总装主要采用脉动生产线模式^[1],虽提高了装配标准化,但仍存在工位节拍失衡、资源调配不当和专家经验依赖性强等问题。这不仅导致产线拥堵、资源利用低效及难以应对突发扰动,无法满足现代航空制造对生产柔性、实时响应和资源优化的要求,亟须通过智能化改造提升生产效能。

飞机装配资源协调与车间作业调度问题经常被抽象为资源受限项目调度问题(Resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)^[2], RCPSP指在资源有限的条件下,通过合理安排项目任务的开始和结束时间,使项目的工期最短或满足其他优化目标。

部分学者将生产车间多种资源视为整体,对飞机装配流程进行研究。Lu等^[3]在RCPSP中引入了项目分割与资源时间窗的概念。Urgo^[4]将具有不确定性的生产资源建模为无等待置换流水车间,并以最小化未完成任务量为优化目标。还有部分学者研究了人力资源或装配工时对总装效率的影响。鲍中凯等^[5]以人员投入成本最低为目标,在考虑工序工时可变的基础上,研究飞机总线装配人员调度效率提升的问题。朱宏伟等^[6]在RCPSP中引入了人员排班约束。Fang等^[7]提出了一个多阶段工作站的工人分配问题,并通过整数规划模型优化工作站周期和工作负载平衡。陈好^[8]考虑工时随着人力资源变动可变的特点,构建了以最小化工序开始时间偏差和最小化人力资源冲突成本的多目标优化模型。

在优化求解方面,常用方法可以分为精确算法与启发式方法。精确算法主要是分支定界算法及其变体^[9];启发式方法凭借自身高效、操作简单以及受模型限制较小的特点,得到了更广泛的应用,包括启发式规则^[10]、模拟退火算法^[11]、遗传算法^[12-13]、粒子群算法^[14-16]以及其他启发式方法^[17-18]。

尽管现有研究在一定程度上探索了多种资源调度优化的路径,但多数研究普遍存在以下局限:空间资源

约束未能得到充分建模,导致调度方案中工序间出现空间竞争和工序阻滞;人力资源的异构性未能准确反映,忽视了人员多技能调度及其对任务执行效率的影响;多种资源协同优化的维度割裂,未能综合考虑空间、物料、人力等资源对任务执行的综合影响。

为突破上述局限,本文重点研究内容如下:(1)精确建模并行工序之间的空间竞争,提出空间资源约束的方法;(2)深入研究多资质人员的协同调度机制,使得研究更贴近实际生产情况;(3)构建综合考虑空间、物料资源以及工序自身特性的耦合网络,提出多资源约束冲突的优先级量化评估方法,优化飞机总装排程结果。

1 物料-工序-空间耦合网络构建

现代飞机总装围绕组装型架开展作业,如图1所示,组装中的飞机按照一定的时间周期在工位间流转,这个固定的周期称为“节拍”,工位1节拍为 $3T$,工位2为 $2T$ 等,这种生产线被称为脉动生产线。另外,脉动装配线的调度根据订单和装配周期决定,还需综合考虑物料、空间、工装、人员等资源约束及工序前后关系,如图2所示,生产区周围配备各类资源区,满足调用需求。

在飞机总装过程中,物料作为瓶颈资源,直接影响生产进度和质量,因此必须优先保障“关键性工序”的物料需求。此外,考虑到产线的“脉动模式”,工序间的空间衔接对生产的连贯性至关重要。合理分配空间资源,避免空间冲突并优化空间体积利用,不仅是工序顺利进行的必要条件,也显著提升了生产效率。基于上述分析,提出了物料-工序-空间耦合网络(Material-process-spatial coupled network, MPSCN),该网络综合考虑调度中关键资源对工序执行的影响,减少了对专家经验的依赖。

如图3所示,中心层网络为符合工艺流程的工序网络,顶层和底层分别为工序所需物料和空间资源编号。工序对顶层物料资源和底层空间资源产生需求,形成完整的耦合网络。以P5为例,其紧前工序为P2和P6,紧后工序为P7和P8,所需物料为M1、M3和M4,空间为S3和S4。在此网络中,物料和空间资源的需求被视为工序执行的前提,可以看作特殊的“紧前工序”,例如,P5的入度为7,出度为2。

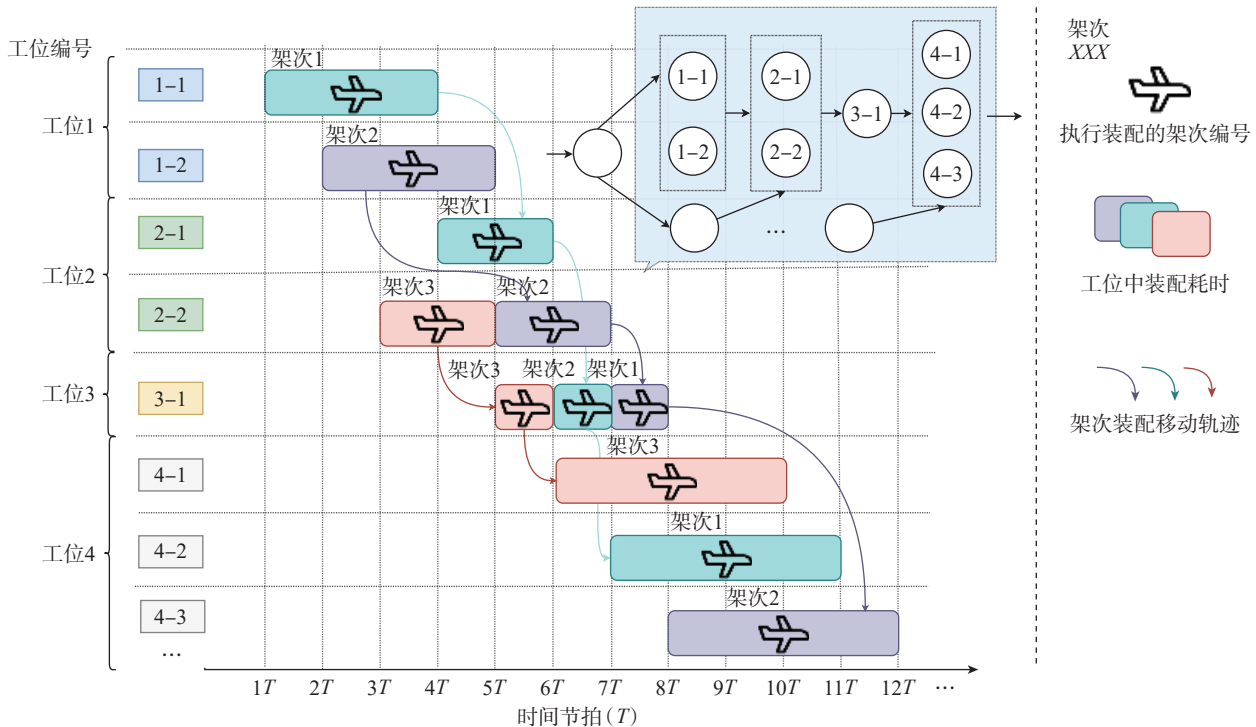


图1 飞机总装脉动生产线
Fig.1 Pulsed assembly line for aircraft final assembly

为客观确定耦合网络中边权,避免人为决策偏差,网络采用熵值法分析指标数据的离散程度。该方法基于实际数据驱动,可综合多维信息,科学处理不同量纲指标,进而全面反映各指标对工序的重要性。

图3展示了计算工序权值的流程:假设共有 m 个工序,每个工序由 n 个评价指标进行评价。

(1) 构造原始数据矩阵。

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (1)$$

式中, x_{ij} ($i=1,2, \dots, m; j=1,2, \dots, n$),表示工序 i 在指标 j 上的数值。

(2) 对矩阵 X 进行数据标准化。

正向指标标准化公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_j}{\max_i x_j - \min_i x_j} \quad (2)$$

逆向指标标准化公式为

$$y'_{ij} = \frac{\max_i x_j - x_{ij}}{\max_i x_j - \min_i x_j} \quad (3)$$

正向指标指对提升效率具有积极意义的指标(例如工序耗时,工序在MPSCN中的入度与出度等),优先解决对整体效率影响大的工序;逆向指标指对提升效率具有消极意义的指标(例如工序所需空间体积、物料数量等),对资源消耗小的工序优先处理,提高工序的并行数量,得到标准化后的 $Y=[y_{ij}]_{m \times n}$ 。

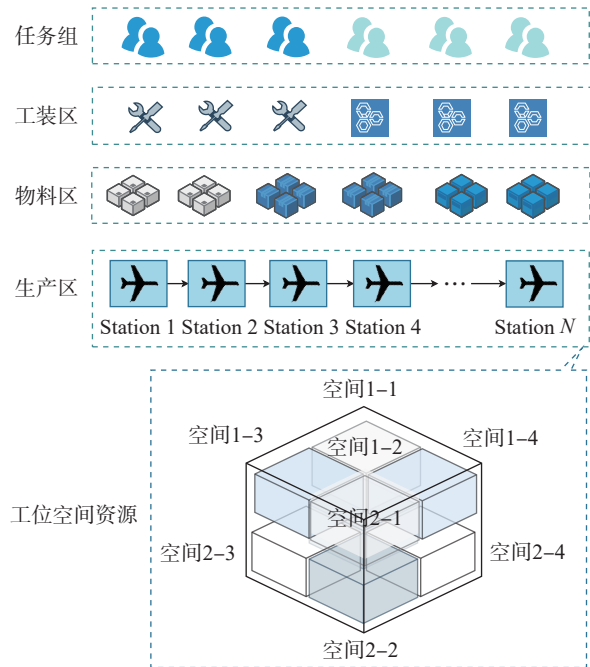


图2 飞机总装资源分类
Fig.2 Resource classification for aircraft final assembly

(3) 计算指标比例矩阵。

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (4)$$

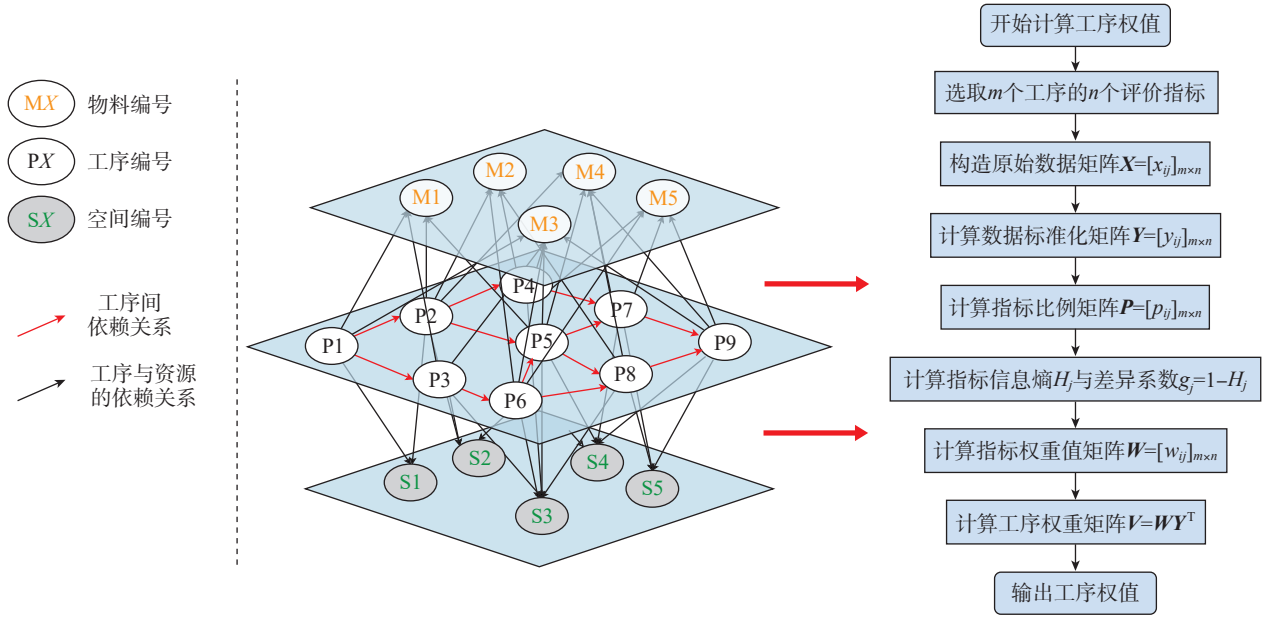


图3 构建物料-工序-空间耦合网络和熵值法计算网络工序权值
Fig.3 Constructing of MPSCN and calculating of network process weights via the entropy method

p_{ij} 表示工序 i 在指标 j 上的标准化权重, 得到 $P=[p_{ij}]_{m \times n}$ 。
(4) 计算信息熵。

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

式中, k 为信息熵计算系数, $k = \frac{1}{\ln m}$, $H_j \in [0, 1]$ 为指标 j 的信息熵, 确保熵值的归一化。当指标 i 固定, 所有 p_{ij} 都相等时, 指标 i 的所有数据无差异, 熵最大; 当 i 固定, 某个 $p_{ij}=1$, 其余为 0 时, 指标 i 的数据有明显差异, 熵最小 (为 0)。基于数据选取指标在后续评价的比重, 避免人为选择的偏差性。

(5) 计算差异系数。

$$g_j = 1 - H_j \quad (6)$$

式中, 差异系数 g_j 是对信息熵 H_j 的“补偿”。 g_j 越大, 说明指标的数据分布差异性越大, 信息量越多, 对综合评价的贡献越大; g_j 越小, 说明指标的数据分布差异性越小, 区分度越小, 对综合评价的贡献越小。差异系数也是权重归一化的基础。

(6) 计算工序指标权重。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (7)$$

式中, w_j 是第 j 个指标的权重值, 得到 $W=[w_j]_{1 \times n}$ 。

最后, 根据工序权重矩阵 W 和标准化矩阵 Y^T 得到工序权值矩阵 $V=WY^T$, V 是一个 $1 \times m$ 的矩阵, 表示 m 个工序的权值。

2 问题定义与建模

2.1 问题描述与假设

飞机在工位上流转装配, 单架次包括 J ($J \geq 1$) 个装配指令 (Assembly order, AO) 按照工艺流程装配。AO _{j} 表示第 j 个 AO, D ($D \in \{1, 2, \dots, d\}$) 表示装配架次工位集合, 不同 AO _{j} 在工位 d 上的装配耗时不同, 结果给出 AO _{j} 开始作业时间 $st_{d,j}$ 和结束作业时间 $et_{d,j}$, 目标为工期最小化。

此外, 模型遵守以下假设: (1) 调度开始前, 装配工艺流程已确定不变; (2) 每个 AO 只能在一个工位上进行; (3) AO 耗时为经验数据均值。

2.2 约束模型

基于 2.1 节中的问题背景与假设给出飞机总装排程优化模型。

(1) 变量说明。M 为无穷大的正数; 若 $y_j=1$, 则 AO _{j} 是主线任务, 若 $y_j=0$, 则 AO _{j} 不是主线任务。

(2) 目标函数。最小化最大工位装配时间为 $\min_d [\max(\text{et}_{d,j}) - \min(\text{st}_{d,j})]$ 。不同的工序装配顺序会产生不同的总工期, 该目标函数为最小化排程的工位最大工期。

(3) 约束条件如下。

工序约束: $\text{et}_{d,j} > \text{st}_{d,j} + T_j$

工艺流程约束: $\text{et}_{d,j-1} \leq \text{st}_{d,j} + M(1 - y_j y_{j-1})$

非主线工序约束: $\text{st}_{d,j} \leq \text{et}_{d,j} + M(1 - y_j)$ 且 $\text{st}_{d,j} + T_j \leq \max(\text{et}_{d,j})$

物料约束: $M_{t,k} \geq \sum_{j=1}^J m_{t,j,k}$

工装约束: $N_{t,q} \geq \sum_{j=1}^J n_{t,j,q}$

空间约束: $\exists S_1, S_2, \dots, S_m, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}, \forall AO_j, AO_j \in S_k, P_j \cap P_j = \emptyset$

人员多样性约束: $T_{W_i} \leq st_{d,j}, \min(\sum_{W_i \in S_{W_j}} 1) = R_j, Q_j \subseteq Q_i; \forall j \neq k, \text{若 } [st_{d,j}, et_{d,j}] \cap [st_{d,k}, et_{d,k}] \neq \emptyset, \text{则 } S_{W_j} \cap S_{W_k} = \emptyset$

约束说明: 工序约束为 AO 结束时间晚于其开始时间与额定工时 T_j 之和; 工艺流程约束为主线 AO 必须符合工艺流程顺序; 非主线工序约束为非主线 AO 结束时间需小于等于工位 d 装配结束时间; 物料约束为种类为 k 的物料数量 $M_{t,k}$ 满足所有 t 时刻 AO 组装所需种类为 k 的物料数量 $m_{t,j,k}$; 工装约束为种类为 q 的工装数量 $N_{t,q}$ 满足所有 t 时刻 AO 组装所需种类为 q 的工装数量 $n_{t,j,q}$; 空间约束为通过不断划分并行 AO 集合 S_m , 直到所有 AO 在各自的子集内装配位置 P_j 不冲突; 人员多样性约束为工人 W_i 的可开工时间早于 AO 装配开始时间, 被分配执行 AO_j 的工人集合 S_{W_j} 满足 AO_j 人员数量需求 R_j , 所需资格证 Q_j 在工人 W_i 资格证集合 Q_i 中, 并且一个工人 W_i 不会被同时分配给装配时间冲突的任务。

3 基于物料 – 工序 – 空间耦合网络的启发式算法改进

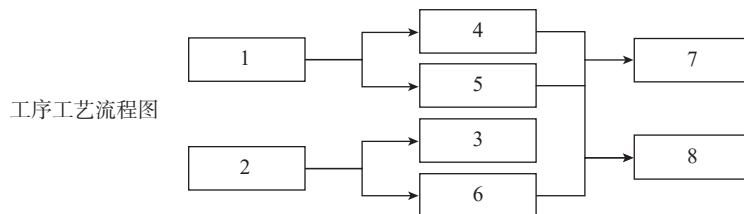
3.1 算法选择

遗传算法作为最具代表性的进化算法, 具有求解速度快、随机性强、过程简单和鲁棒性好等优点, 一直作为广大学者解决启发式优化问题的基准算法。因此本文选择遗传算法进行改进求解。此外, 为验证该改进方法在适应连续优化算法上的有效性, 进一步选择粒子群算法进行对比。

3.2 初始解优化

基于 MPSCN, 通过熵值法 (流程见图 3) 得到工序权值。其中, 7 个评价指标: 工序所需物料种类、物料数量、工序耗时, 工序在 MPSCN 中的入度与出度, 工序占用空间体积, 工序所在并行工序集合的空间冲突数。

图 4 中, 展示了算法根据工艺流程约束划分 [1, 2], [3, 4, 5, 6] 以及 [7, 8] 是可并行的工序列表, 并采用双层编码形式, 第 1 层数字代表 AO 编号, 第 2 层数字代表工序权值。初始解 1 基于工艺流程随机生成, 初始解 2~4 通过工序权值对初始解进行引导生成。基于初始解 1, 初始解 2 将权值较大的工序 4 和 5 提前执行, 工序 3 在工序 6 之前执行; 在初始解 3 中, 工序 5 移至工



初始解1	1	2	3	4	5	6	7	8
工序权值	1.0	0.053026	0.413103	1.020307	0.304031	0.043902	0.558873	0.519624
初始解2	1	4	5	2	3	6	7	8
工序权值	1.0	1.020307	0.304031	0.053026	0.413103	0.043902	0.558873	0.519624
初始解3	1	4	2	3	5	6	7	8
工序权值	1.0	1.020307	0.053026	0.413103	0.304031	0.043902	0.558873	0.519624
初始解4	1	4	2	5	6	7	8	3
工序权值	1.0	1.020307	0.053026	0.304031	0.043902	0.558873	0.519624	0.413103

注: 白色代表工序顺序未改变; 紫色和蓝色代表工序执行位置已经发生变化。

图 4 基于工序权值的算法初始解优化

Fig.4 Algorithm initial solution optimization based on process weights

序3之后;在初始解4中,工序3移至工序7和8之后。通过权值偏好引导,既不违反工艺顺序,又可使物料资源、空间资源和工序本身特性融入解集的生成过程中。

3.3 改进算法流程说明

图5和6展示了将MPSCN用于传统GA和PSO进而得到资源加权改进的遗传算法(Resource-weighted

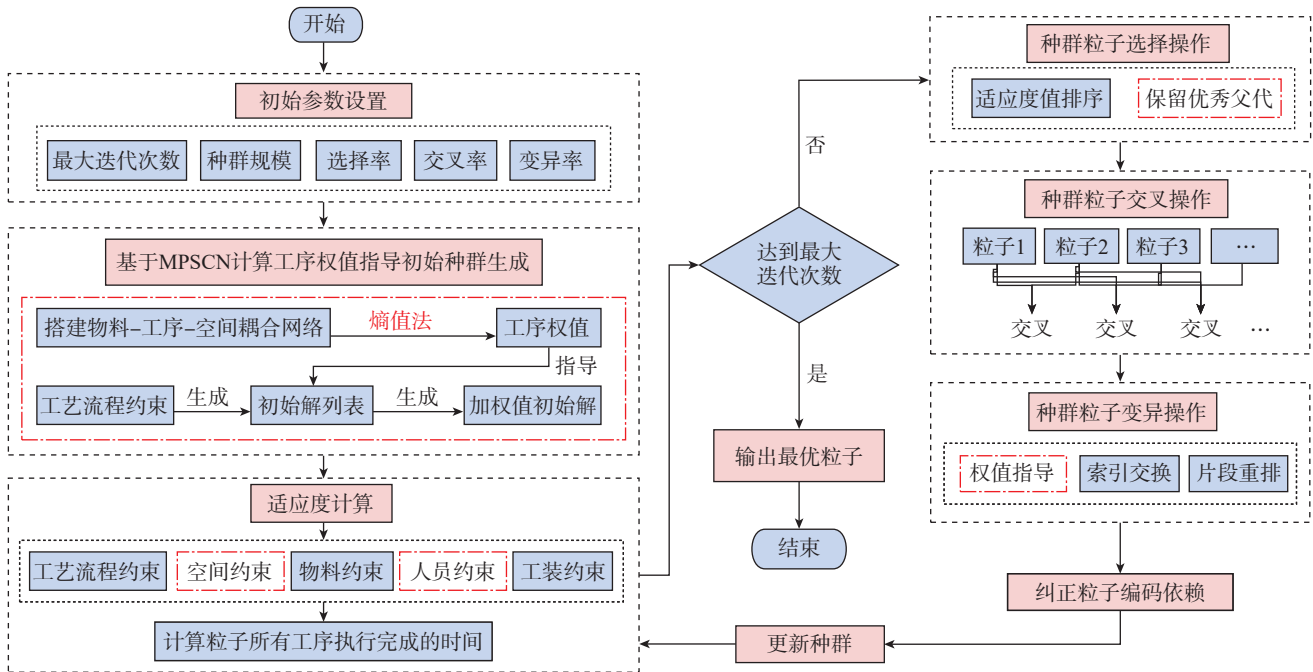


图5 基于MPSCN改进GA的算法流程
Fig.5 Algorithm process of improving GA based on MPSCN

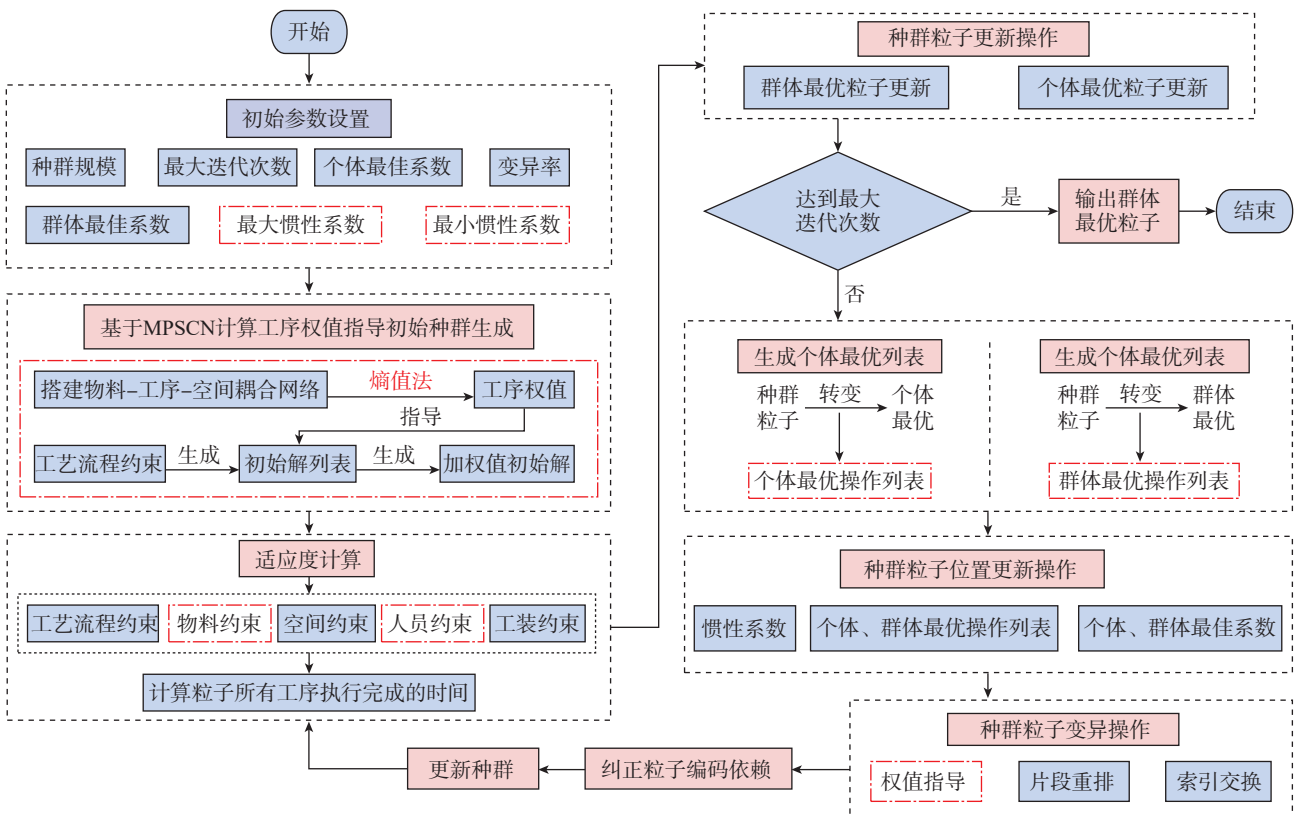


图6 基于MPSCN改进PSO的算法流程
Fig.6 Algorithm process of improving PSO based on MPSCN

improved genetic algorithm, RW-IGA) 和资源加权改进的粒子群算法 (Resource-weighted improved particle swarm optimization, RW-IPSO) 的算法流程, 其中, 粉色填充框表示算法流程中主要改进的环节。二者均通过 MPSCN 计算工序权值进行初始种群优化, 量化了资源对工序执行的影响, 兼顾了解集的多样性与质量。此外, 适应度计算时考虑工艺、空间、物料、工装和人员等多维约束。其中, 算法的空间约束通过不断对工序集合进行划分, 使同一集合内工序的装配空间不冲突, 减少实际生产中工序堆积。同时, 人员约束中, 每个工人拥有一种及以上资格证, 算法将优先选择可开工时间最早的装配人员进行分配, 减少实际生产中人员冗余的情况, 更符合实际生产需要。

在种群进化阶段, RW-IGA 通过工序权值指导变异操作, 调整优秀个体的保留概率与种群多样性之间的平衡; 而 RW-IPSO 则针对飞机装配离散化问题的特性, 设计了重编码机制, 并创新性地引入个体最优列表与群体最优列表, 分别记录粒子朝向个体最优解和群体最优解的操作序列。与 PSO 相比, RW-IPSO 引入了动态惯性系数, 计算公式为

$$w_g = w_{\max} - \frac{g}{\max_g} \times (w_{\max} - w_{\min})$$

迭代中, 设置最大惯性系数 w_{\max} 和最小惯性系数 w_{\min} , 随迭代次数 g 呈线性递减趋势下降, 递减系数为 $\frac{w_{\max} - w_{\min}}{\max_g}$, 其中, \max_g 是最大迭代次数, 该系数提升粒子搜索多样性与收敛效率。

4 实例验证

为了验证算法与模型可行性, 以某客机总装制造厂脉动总装生产线单个工位的工序规模为算例, 工位涵盖 8 个站位, 共计 418 个 AO。试验通过 Python3.11.11 编程完成算法的实现, 数据测试平台选用 i5-4210U 处理器, 2.39 GHz 主频, 8 G 内存。

4.1 参数设置

试验采用传统 GA、PSO 与 RW-IGA、RW-IPSO 对飞机总装的单个工位所有 AO 进行排程, 算法参数经多

轮试验, 设置如表 1 所示。

4.2 试验结果对比与分析

基于表 1, 在 GA 与 RW-IGA 得出的调度方案中, 将工序 1~16 绘制成甘特图, 并标注工序所分配的作业人员与空间占用情况, 如图 7 所示。

根据工序的空间占用情况, 工序 6 和 9 与工序 8, 工序 10 与工序 13 均存在装配空间冲突, 造成工序堆积, 导致作业无法按照图 7 (a) 调度计划进行, 并影响后续装配进程。因此, 在 4 种算法中引入了并行工序的空间约束, 图 7 (b) 的调度方案解决了图 7 (a) 并行工序空间重叠的问题, 并使调度总时长合理增加。

在生产调度中, 需要权衡时间成本与人员成本的关系。在交付期紧张的情况下, 需要增加人员投入换取更短的工期。但在日常规律生产中, 适当增加时间成本以提升人员复用, 能更好控制用工成本, 进而实现企业整体成本的有效管控。图 7 (a) 与 (b) 的执行装配为单资质作业人员, 计划分配人员标号跨度为 p1~p18, 人员复用性低, 不符合企业聘用实际。在 4 种算法中引入人员资质多样性约束后, 图 7 (c) 中作业人员都具备 2~4 种装配资质, 并优先安排多资质人员, 人员标号范围缩小至 p1~p10, 复用性提高 1.8 倍, 有效降低人员成本, 且更符合日常规律生产时企业实际用工要求。

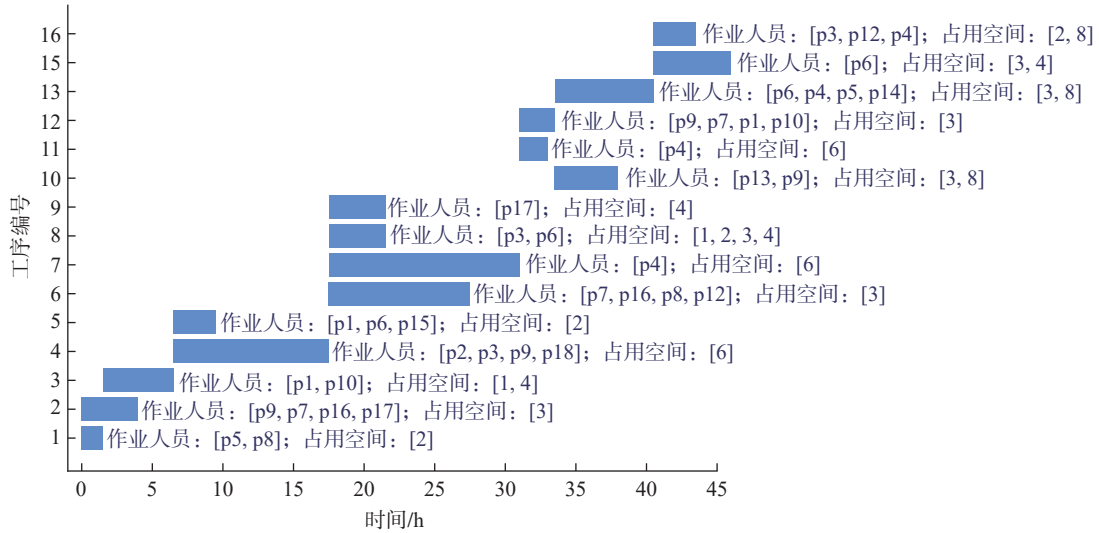
在种群规模为 30、40 和 50, 且最大迭代次数 100 次的条件下, 分别对 GA、PSO 与 RW-IGA、RW-IPSO 进行 15 次试验, 结果计算平均值, 并进行对比, 如表 2 所示。

随机选择 4 个算法在群规模为 50, 迭代次数为 100 的试验结果绘制迭代图, 如图 8 和 9 所示。试验结果表明, RW-IGA 和 RW-IPSO 的优化效果与效率均优于 GA 和 PSO。RW-IGA 较 GA 工期均值缩短 9.26%, RW-IPSO 较 PSO 工期均值缩短 1.62%。RW-IGA 较 RW-IPSO 优化效果更显著, 并且随种群规模的扩大, RW-IGA 最优值优化百分比最高达 15.42%, 均值优化百分比最高为 9.73%, 优化效果提升效率均值为 1.32%。RW-IPSO 最优值优化百分比最高为 5.74%, 随种群规模增大, 优化效果提升效率均值为 2.03%。从迭代对比图可以看出, 相同迭代次数下, RW-IGA 和 RW-IPSO 获得比传统算法更好的结果。在迭代后期, 优化差距进一步

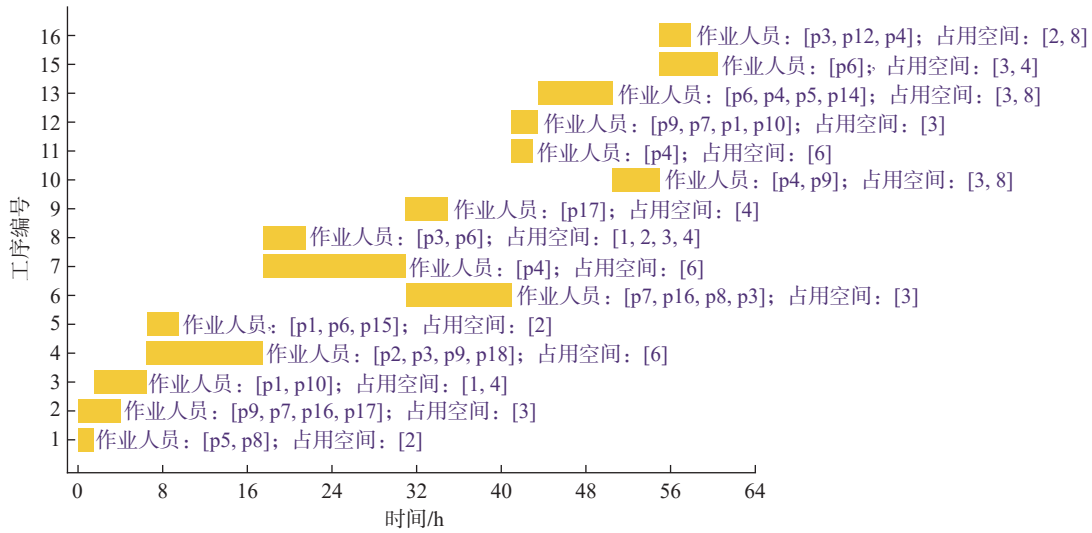
表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

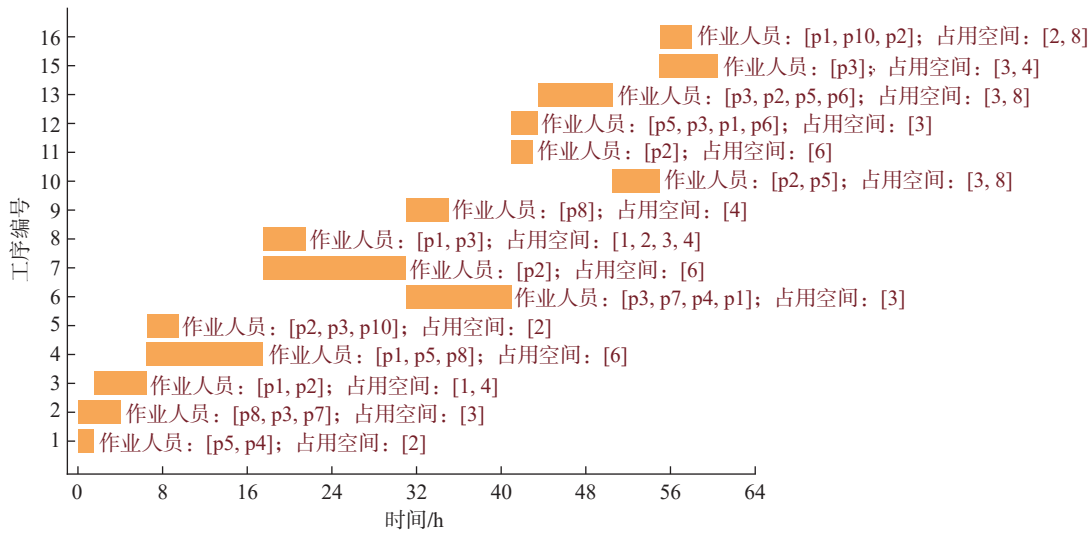
算法名称	选择率	交叉率	变异率	优秀父代保留个数	算法名称	个体最佳系数	群体最佳系数	惯性系数	最大惯性系数	最小惯性系数	变异率
GA	0.75	0.2	0.1	—	PSO	0.6	0.7	0.6	—	—	0.1
RW-IGA	0.75	0.2	0.1	4	RW-IPSO	0.6	0.7	—	0.7	0.3	0.1



(a) 不考虑空间和人员多样性约束的调度



(b) 考虑空间但不考虑人员多样性约束的调度



(c) 考虑空间和人员多样性约束的调度

图7 空间与人员多样性约束对调度可行性与资源冲突影响的可视化对比

Fig.7 Visualization of impact of spatial and personnel diversity constraints on scheduling feasibility and resource conflicts

表 2 GA、PSO、RW-IGA 与 RW-IPSO 的试验结果对比
Table 2 Comparison of experimental results of GA, PSO, RW-IGA and RW-IPSO

对比项	种群规模 30					
	遗传算法			粒子群算法		
	GA	RW-IGA	优化百分比	PSO	RW-IPSO	优化百分比
最优值	974.5 h	850 h	12.78%	925 h	897 h	3.03%
均值	945.4 h	858.4 h	9.20%	913.7 h	898.3 h	1.69%
对比项	种群规模 40					
	遗传算法			粒子群算法		
	GA	RW-IGA	优化百分比	PSO	RW-IPSO	优化百分比
最优值	964.5 h	825.5 h	14.41%	924.5 h	889.5 h	3.79%
均值	938.4 h	855.2 h	8.87%	912.1 h	896.9 h	1.67%
对比项	种群规模 50					
	遗传算法			粒子群算法		
	GA	RW-IGA	优化百分比	PSO	RW-IPSO	优化百分比
最优值	972.5 h	822.5 h	15.42%	931.5 h	878.0 h	5.74%
均值	930.5 h	840.0 h	9.73%	909.3 h	895.5 h	1.52%

扩大,表明二者具有更高的收敛效率和全局搜索能力。综上所述, RW-IGA 在优化效果和效率上均表现出显著优势,且随着种群规模的扩大,其优化结果和效率优势将更加明显,因此推荐优先采用 RW-IGA 进行飞机总装排程等复杂优化问题。

5 结论

(1) 空间约束解决基于工艺流程的并行工序间存在的空间冲突,确保物理区域合理分配,解决因空间重叠而导致的工序堆积问题;多资质人员约束使多技能人员跨任务流动,提升人力资源利用率,符合实际生产环境。

(2) 创新性地构建物料-工序-空间耦合网络(MPSCN),并采用熵值法客观地确定工序权值。工序权值综合量化资源对工序调度的影响,融合进传统 GA 和 PSO 的解集初始化与更新操作中,改进了传统算法收敛速度慢以及收敛结果差的问题。

(3) 试验结果表明, RW-IGA 与 RW-IPSO 的优化结果与优化效率均优于 GA 与 PSO,工期均值优化百分比均值分别为 9.26% 和 1.62%,并且随种群规模增大, RW-IGA 和 RW-IPSO 优化效果提升率均值为 1.32% 和 2.03%。RW-IGA 优化效果较 RW-IPSO 更为显著,最优值优化百分比最高达到 15.42%。

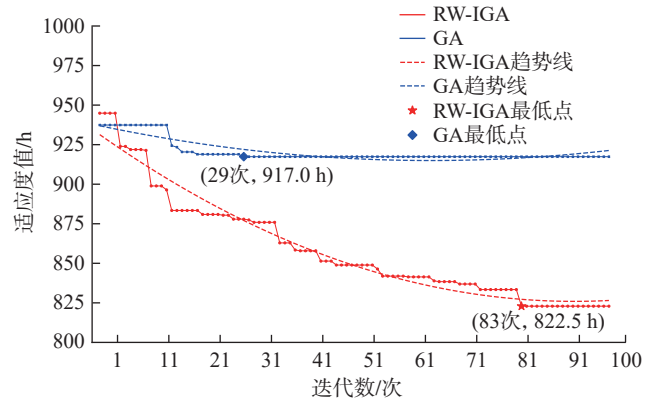


图 8 GA 与 RW-IGA 迭代对比
Fig.8 Comparison of iterations between GA and RW-IGA

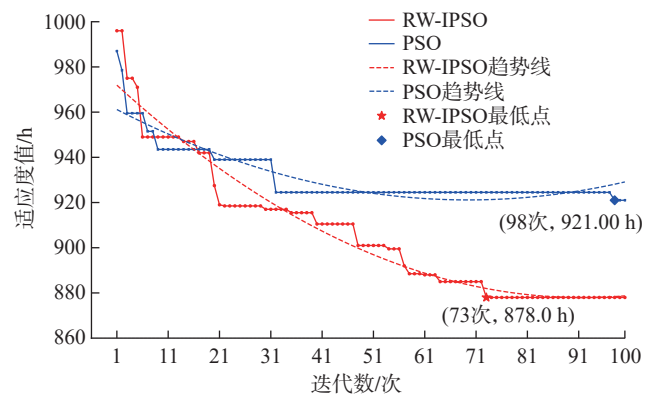


图 9 PSO 与 RW-IPSO 迭代对比
Fig.9 Comparison of iterations between PSO and RW-IPSO

参考文献

- [1] 裴书梅, 杨根军, 陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 41-47.
CHANG Shumei, YANG Genjun, CHEN Jun. Research and application of intelligent manufacturing technology for aircraft final assembly pulse production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 41-47.
- [2] ARKHIPOV D, BATTAI A O, CEGARRAJ, et al. Operator assignment problem in aircraft assembly lines: A new planning approach taking into account economic and ergonomic constraints[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 63-66.
- [3] LU Z Q, REN Y F, WANG L, et al. A resource investment problem based on project splitting with time windows for aircraft moving assembly line[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135: 568-581.
- [4] URGO M. A branch-and-bound approach to schedule a no-wait flow shop to minimize the CVaR of the residual work content[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129: 67-75.
- [5] 鲍中凯, 裴柯钧, 陈璐. 考虑工时可变的飞机总装资源配置与作业调度[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1424-1434.
BAO Zhongkai, QIU Kejun, CHEN Lu. Aircraft final assembly resource allocation and scheduling considering variable working hours[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1424-1434.
- [6] 朱宏伟, 陆志强. 考虑人力资源排班的资源受限项目调度问

题建模与优化[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(6): 624–635.

ZHU Hongwei, LU Zhiqiang. Modeling and optimization of resource-constrained project scheduling considering human resource scheduling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(6): 624–635.

[7] FANG P C, YANG J J, LIAO Q M, et al. Flexible worker allocation in aircraft final assembly line using multi-objective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7468–7478.

[8] 陈妍. 考虑工时不确定的飞机装配动态调度问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.

CHEN Yu. Research on dynamic scheduling of aircraft assembly considering uncertain working hours[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.

[9] 吴怡薇, 陆志强. 飞机移动装配线资源水平问题的建模研究[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(1): 95–101, 114.

WU Yiwei, LU Zhiqiang. Modeling resource leveling problem for aircraft moving assembly line[J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22(1): 95–101, 114.

[10] COELHOJ, VANHOUCKE M. An exact composite lowerbound strategy for the resource-constrained project scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2018, 93: 135–150.

[11] 于琪, 张静. 融合模拟退火参数的自适应遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 电脑与信息技术, 2024, 32(3): 12–16.

YU Qi, ZHANG Jing. Solving flexible job shop scheduling problem with adaptive genetic algorithm integrating simulated annealing parameters[J]. Computer and Information Technology, 2024, 32(3): 12–16.

[12] 裴小兵, 李依臻. 新型混合改进遗传算法求解零等待流水线车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 815–827.

PEI Xiaobing, LI Yizhen. Solving zero-wait flow shop scheduling problem with a novel hybrid improved genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 815–827.

[13] 陈龔斌, 李欢庆. 改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(6): 221–225.

CHEN Yanbin, LI Huanqing. Optimization of aircraft structural component assembly sequence based on improved genetic algorithm[J]. Machinery Manufacturing & Automation, 2023, 52(6): 221–225.

[14] 唐红涛, 曾骄, 刘歆. 改进粒子群算法求解生产计划与柔性作业车间调度集成问题[J]. 机床与液压, 2024, 52(14): 136–144.

TANG Hongtao, ZENG Jiao, LIU Xin. Solving integrated production planning and flexible job shop scheduling problem with improved particle swarm optimization algorithm[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2024, 52(14): 136–144.

[15] 玉海龙, 何陶. 基于粒子群优化算法的柔性生产线排产方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 84–91.

YU Hailong, HE Tao. Scheduling method for flexible production lines based on particle swarm optimization algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 84–91.

[16] 刘婷, 庞小兰. 基于粒子群算法的装配线优化研究[J]. 价值工程, 2024, 43(32): 4–7.

LIU Ting, PANG Xiaolan. Assembly line optimization based on particle swarm optimization algorithm[J]. Value Engineering, 2024, 43(32): 4–7.

[17] 梅中义, 付豪. 基于混合算法的飞机部件装配静态调度方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2024(3): 7–10.

MEI Zhongyi, FU Hao. Research on static scheduling method for aircraft component assembly based on hybrid algorithm[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2024(3): 7–10.

[18] 王智斌, 邓超, 龙建宇, 等. 基于多目标混合候鸟优化算法的装配作业车间调度[J]. 工业工程, 2024, 27(6): 156–168.

WANG Zhibin, DENG Chao, LONG Jianyu, et al. Assembly job shop scheduling based on multi-objective hybrid migratory bird optimization algorithm [J]. Industrial Engineering, 2024, 27(6): 156–168.

(责编 七七)