

轨道交通装备制造企业多项目月度计划排产方法研究

韩彩夏, 司 雯, 孔维荣

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266200)

摘要: 目前轨道车辆制造业呈现批量小、多项目并行生产、交货周期紧张等特点, 生产排产是生产过程中极为重要的一环。多项目并行生产, 需要同时对不同项目的产品进行调度排产。而现有的计划体系中, 月度计划排产仍然靠人工经验排产, 且无法实现基于有限产能的动态调度。鉴于此, 本文提出了利用改进后的 PSO 算法求解各项目月度计划的方法, 在分析企业计划排产体系基础上, 建立了有限产能条件下多项目并行生产总工期最短为目标函数的优化排产模型, 通过计算得出月度计划排产结果, 本方法在产能有限的情况下, 提供更合理智能的计划排产能力, 从总体上, 提高了产品的准时交货率, 缩短了产品的生产过程时间。

关键词: 粒子群算法; 多项目排产; 有限产能; 月度计划; 资源受限多项目调度问题

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A

1 引言

轨道交通装备制造企业有一套成熟的计划体系支撑生产计划管理, 包含“项目计划 - 月度推移计划 - 三日作业计划”三级计划体系。该体系以项目计划为源头, 以产品交期为指导, 基于公司、分厂两个层级, 对大部件交付数量、产品总组装修序分别进行排产, 从大部件交付数量到工序作业计划逐级细化, 通过建立“项目计划 - 月度推移计划 - 三日作业计划”三级联动关系, 实现产品交付节点驱动月度推移计划, 月度推移计划指导各工序三日作业计划, 从而支撑计划体系自上而下协同。项目计划、三日作业计划已分别纳入 ERP 和 MES 管控, 月

度计划仍然基于人工经验进行无限产能排产, 不具备与 ERP 项目计划和 MES 三日计划集成应用的条件, 无法自动实现计划与执行之间的反馈预警, 生产计划与项目计划、采购计划协同应用力度不够, 时效性弱。面对生产线能力、工装设备、物料供应等约束时, 主要依靠组织生产平衡会调度解决, 遇到新项目插单, 或者外部需求变化时, 计划调整工作量大、可执行性难以保证。

为实现自动计划排产, 将月度生产计划纳入系统管理, 实现基于有限产能的月度推移计划排产, 用信息化手段落实三级计划体系指导生产和采购, 支撑生产计划与项目计划、采购计划跨平台协同应用, 基于生产线标准产能, 按照项目交期、交付优先级、订单批量, 自动

生成月度推移计划，实现生产计划自上而下逐层分解细化，本文研究使用粒子群算法，计算月度推移计划，该方法能够在生产资源有限的情况下，获得多项目的总周期最短的排产方案，实现了月度计划的自动排产。

2 基于有限产能的多项目月度计划排产分析

基于有限产能的多项目计划排产，是从时间和资源角度安排调度多项目任务在资源最优利用的同时实现订立目标的最优化，常见的目标有以多项目资源约束下总工期最小为目标构建数学模型^[1]，基于工艺、质量、成本三目标均衡资源优化配置模型^[2]。针对 RCMPSP 问题模型求解，常见的求解算法有，基于多优先规则的启发式算法^[3]，综合使用约束求解和遗传算法^[4]，以及使用粒子群算法^[5]。在求解 RCMPSP 问题得到了广泛应用。

本文研究的多项目排产，在满足工艺路线、资源情况等约束条件的前提下，对不同的项目进行调度排产，这类问题属于 NP-hard 问题^[6]。现有的排产方法仅靠人工经验排产，无法达到在生产资源有限的情况下，使得多项目的周期最短的目标。尤其是当产能发生变化时计划无法自动实时调整。

实现基于有限产能的多项目月度计划排产，首先要明确约束条件，然后需要确定排产目标，约束条件主要有工序执行顺序、有限产能^[7]。

1) 工序执行方式。每个项目有多道工序构成，工序分为串行工序和并行工序，串行执行工序，只有上工序执行完成后，后工序才可执行。月度计划排产仅考虑关键工序的执行方式，本文研究的关键工序执行方式为串行方式。

2) 约束条件：资源有限，物料齐套，工序的前后关系。

3) 目标函数：基于有限产能的多项目排产问题，目标包含，多项目总工期最短，成本最低，产能平衡等^[8]。本文研究的目标为多项目总工期最短。多项目月度计划排产其执行流程如图 1 所示。

2.1 项目优先级

基于有限产能的多项目月度计划排产，首先要计算项目优先级，根据项目优先级对项目进行排序。因此首先需要构建项目优先级模型，项目优先级模型构建之前需要确定影响项目优先级因素，确定各指标的权重^[9]。通过分析业务现状可知，影响项目优先级的因素包括项目需求数、项目交付日期、订单加急程度。本文研究的指

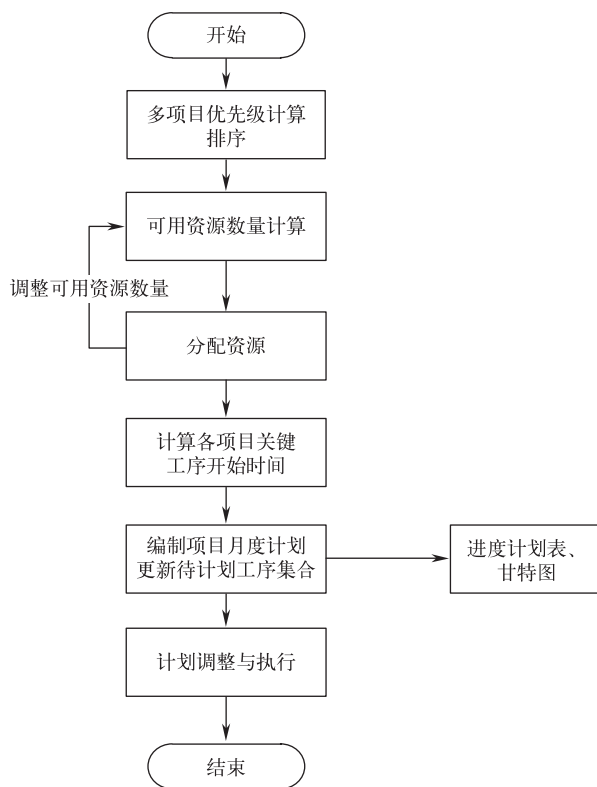


图 1 基于有限产能的多项目月度计划排产流程

标权重规则如下。

1) 根据订单中的需求数量，为各个订单配置需求权重，项目数量越多，权重值越小；需求权重以算数平均法确定。

$$\text{需求权重} = \text{项目交付数量} / \text{总项目数量} \quad (1)$$

2) 根据交付时间，为各个订单配置交付时间权重，交付时间越晚权重值越小。

$$\text{交付时间权重} = \text{项目标准制造周期} / \text{交付时间} \quad (2)$$

3) 根据订单加急程度为各个订单配置加急权重，采用专家经验值赋值，加急程度越重，权重值越大。

根据订单的需求权重、交付时间权重和加急权重，三个权重的乘积即为各个订单的综合权重，并对综合权重进行降序排序，权重最高的订单最先处理。

基于指标及指标权重，本文采用的各指标加权求和，作为项目优先级值，值越大，优先级越高。

2.2 可用资源计算

可用资源仅指各种设备的生产能力，生产计划所需要的设备，涉及生产设备、质检设备、装配设备和运输设备等。排产时保证设备标准产能大于实际需求能力。排产过程中，优先选择产量低的设备。可用资源公式

$$R_k = W_k \times T_b \times P_s \times P_t \quad (3)$$

式中, W_k 为第 K 种设备的可用数量 (台位数), T_b 为每台设备的工作时数, P_s 为设备开工率, P_t 为生产力。

3 基于粒子群算法的月度推移计划

在确定项目优先级及共享资源的基础上, 构造基于项目优先级的多项目加权总工期最少为目标的有限产能多项目调度问题模型^[10]。采用改进的 PSO^[11-12] 算法对排产模型进行求解, 得出各项目月度计划, 保证所有项目均能准时交付^[13]。

3.1 模型建立

以基于有限产能条件下寻求项目并行生产的总工期最短为目标的最优求解问题转化为数学模型^[14], 即为在 m 个项目, 每个项目有 (第 i 个项目的工序数) 工序, 共享 K 种生产资源 (K 种设备) 的情况下, 实现总工期最短目标函数, 对有限资源的竞争是之间的唯一联系, 实现目标函数最优。约束条件为工艺步骤及可用资源数量。

多个项目的加权总工期最短构建工期目标函数如公式 (4), 约束条件如公式 (5) 至公式 (9)。

$$\min \sum_{i=0}^m a_i |t_{i(n_i+1)} - t_{i0}| \quad (4)$$

$$t_{ij} - t_{ih} \geq d_{ij}, \forall h \in P_{ij} \quad (5)$$

$$t_{00} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{T_{ij} \in A_i} r_{ijk} \leq R_k \quad (7)$$

$$t_{ij} \geq 0, d_{ij} \geq 0, r_{ijk} \geq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (9)$$

公式 (4) 为工期目标函数, 用以表示 m 个项目的加权总工期最短, $t_{i(n_i+1)}$ 为项目 i 的最终工序完成时间, t_{i0} 为项目 i 的初始工序开始时间, a_i 为项目 i 的优先级权重。通过计算获初始任务开始时间与最终任务完成时间之间的时间差值。根据项目优先级及时间差值进行加权求和计算, 获得所有项目的总工期。

公式 (5) 表示工序的串行约束关系, 表示前工序完成后后工序方能开始; 其中, d_{ij} 第 i 个项目里第 j 个工序的加工工期, P_{ij} 为第 i 个项目里第 j 个工序的所有紧前工序的集合, t_{ij} 第 i 个项目第 j 个工序的完成时间, h 为第 i 个项目中所有紧前工序, t_{ih} 为第 i 个项目中所有紧前工序的完成时间。

公式 (6) 表示项目的虚拟任务的起始时间为 0, 即不占用项目资源与时间。

公式 (7) 为共享资源约束, 即表示在时刻 t 进行的所有项目对资源 k 的需求总量不能超过其供应量, T_{ij} 表示 t 时刻正在执行的项目 i 第 j 道工序, A_t 为时点 t 下正在进行工序的集合, r_{ijk} 为第 i 个项目里第 j 个工序每天对第 k 种资源的使用数量, R_k 第 k 种共享资源的日最大供应量。

公式 (8) 表示任务开始时间、任务工期和资源均为非负数。

公式 (9) 表示各项目优先级权重系数之和为 1。

3.2 模型求解

本文研究月度计划排产时, 仅考虑对关键工序进行排产, 研究对象的关键工序为串行方式, 即上工序结束后, 方可执行下一工序。本文采用 PSO 算法^[15] 对问题进行求解, 计算月度计划。以为多个项目的总工期最小为目标函数, 约束条件为可用资源以及产品制造工序。对粒子群参数、粒子、初始化、已计划工序集合及可计划工序集合进行初始化, 获得初始粒子群参数、初始粒子、初始已计划工序集合及初始可计划工序集合等信息。

1) 种群初始化: 粒子编码长度

$$L = n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots + n_m + 2 \quad (10)$$

式中, n_i 为第 i 个项目的工序数, n_m 为第 m 个项目的工序数, m 表示项目总数。构造第 1 个节点为虚拟起始节点, 第 n 个节点为虚拟结束节点, 节点的工期和资源需求都为 0, 因此总节点数为全部项目子任务数之和加 2, 进而将粒子的维数设定为 L , 每个粒子的 L 个元素代表多个项目所包含的全工序, 最优粒子的 L 个参数即表示任务优先级。粒子群第 n 个粒子的位置

$$X_n = \{x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nl}, \dots, x_{nL}\} \quad (11)$$

式中, x_{nl} 为第 n 个粒子第 l 维值 ($l=1, 2, \dots, L$), x_{nl} 表示工序优先级值。在工序前后关系约束前提下, x_n 的值即代表相应工序的优先级别, 对位置向量中的各元素进行排序, 可得到一个节点编号排序序列, 从而获得一个可行的调度方案。

2) 粒子适用度函数: 根据多项目排产优化工期目标函数设定粒子适应度函数

$$Fitness(X_n) = \frac{C}{T} = \frac{C}{\sum_{i=0}^m a_i |t_{i(n_i+1)} - t_{i0}|} \quad (12)$$

式中, C 为非零非负的适应度函数调节系数, m 项目总数, n_i 为项目 i 的工序数, T 为工期目标函数, $t_{i(n_i+1)}-t_{i0}$ 为项目 i 的最后一道工序与项目 i 第一道工序之间的时间差。 $Fitness(X_n)$ 值越大, 工期目标函数 T 越小, 计划结果的完成时间越优。

上述粒子适用度函数为粒子群算法的中一个初始参数, 用于评价粒子位置的优劣。通过粒子适用度函数可以求得粒子适用值。如果当前适用度值大于之前所计算到的最优值, 则当前位置为粒子经历的最佳位置, 此时, 当前适用度为粒子经历的最优适用度。

3) 初始工序集合 $C_n=\cup$, 初始可计划工序集合 $S_n=\phi$, 时间 $t=0$ 。

4) 计算流程如下:

① 初始粒子群参数包括粒子种群数 $popsiz=50$, 迭代次数 $ITmaxgen=200$, 初始惯性系数 $\omega_{max}=0.9$, $\omega_{min}=0.2$ 学习系数 $c_1=c_2=2$ 。粒子初始化的过程即为选择第 $n=1$ 个粒子作为初始粒子, $n=1, 2, \dots, P$, 其中 P 为粒子种群规模。初始可计划工序集合 $C_n=\cup$, 初始已计划工序集合 $S_n=\phi$, 时间 $t=0$;

② 根据项目优先级从初始可计划工序集合 C_n (为第 n 个粒子对应的初始可计划工序集合) 中选择优先级高的工序 j 作为确定的可计划工序, 并获取该确定的可计划工序 j 的标准周期 d_j ;

③ 判断确定的可计划工序 j 对于第 k 种资源的需求量 r_{jk} 是否少于 k 种资源在 t 时刻的剩余量 ΔR_{kt} , 也即 $r_{jk} < \Delta R_{kt}$ 。在 $r_{jk} < \Delta R_{kt}$ 的情况下, 将确定的可计划工序 j

作为新的已计划工序放入集合 S_n 中, 同时, 在集合 C_n 中删除确定的可计划工序 j , 从而获得新的初始可计划工序集合及新的初始已计划工序集合, 该新的初始可计划工序集合及新的初始已计划工序集合即为调整后的资源分配方案。在获得新的初始已计划工序集合之后, 计算工序 j 的最早开始时间 EST_j 和最早结束时间 EFT_j ;

④ 判断工序 j 是否为项目的最后一道工序 J , 若 $j=J$, 则执行⑤, 若工序 j 不是项目的最后一道工序 J , 则 $j=j+1$, 重复执行②;

⑤ 判断初始粒子的数量 n 是否达到粒子种群规模 P , 即 n 是否为 P , 若 $n=P$, 转⑥, 从 P 个调整后的资源分配方案中选出所有已计划工序的计划时间最小的调整后的资源分配方案, 并作为最优资源分配方案; 若 $n \neq P$, 则令 $n=n+1$, 转①;

⑥ 结束。

利用改进后的粒子群算法对工期目标函数为多个项目的总工期最小且约束条件为可用资源及产品制造工序的问题进行最优求解, 求解得到各个项目中每一工序的最优资源分配。进而, 根据最优资源分配确定每一工序的生产周期 (即确定各项目中关键任务的生产周期), 根据生产周期及各个项目的进度计划表、甘特表编制排产计划, 该排产计划为各个项目的月度计划。

另外, 在获得初始的排产计划之后, 按照排产计划进行执行, 并实际执行情况动态调整初始的排产计划, 再基于调整后的排产计划执行, 不断重复。

多项目月度计划排产结果如图 2 所示。

项目名称	分厂	2024-05																		
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
香港市区线项目	总装	1			1				1			1				1			1	
芝加哥地铁项目	总装						1			1					1			1		
成都地铁27号线	总装	1	1	1	1		2	1	1	1	1	2		1	1	1	1	2	1	
深圳地铁13号线项目 (江门)	总装			1				1			1				1			1		
郑州地铁8号线项目	总装						1		1		1									

图 2 多项目月度计划排产结果

4 结论

本文研究将多个项目的总工期最小作为工期目标函

数, 将可用资源及生产工艺作为约束条件, 并利用改进后的粒子群算法求解得到各个项目中每一工序的周期,

根据资源约束条件, 计算资源分配方案, 根据资源分配方案获得排产计划。本文提出的基于粒子群算法的有限产能排产, 在产能有限的情况下, 提供更合理智能的计划排产能力, 从总体上, 提高了产品的准时交货率, 缩短了产品的生产过程时间, 还为多个共同实施的项目制定了合理的资源配置, 保证多项目工期最短, 实现质量最优的目标。IM

参考文献

- [1] 陈焰. ETO 型机械制造企业项目管理的资源优化方法及应用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [2] 余剑峰, 李原, 于海山, 等. 基于自适应蚁群算法的协同制造项目资源优化配置 [J]. 计算机集成制造系统, 2008 (3): 576-580.
- [3] 彭武良, 黄敏. 资源约束多项目调度问题研究现状与展望 [J]. 系统工程学报, 2022, 37 (3): 417-432.
- [4] GONCALVES J, MENDES J J M, RESENDE M G. A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189 (3): 1171-1190.
- [5] 王凯, 李原, 张杰. 航空多项目资源约束下计划优化的改进型粒子群算法 [J]. 航空制造技术, 2008 (19): 74-79.
- [6] 朱雪晶. 复杂装备产品生产计划方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [7] 何诗兴, 张吾胜. 高级计划排程系统在马钢新区板带生产中应用和分析 [C]// 中国金属学会. 第八届 (2011) 中国钢铁年会论文集. 2011: 5.
- [8] 郭金亮. 复杂约束条件下的项目资源投入优化问题研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [9] 徐迎兴, 任钰. 基于 ANP-TOPSIS 的船舶修理项目优先级评价体系 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2023, 46 (5): 58-64.
- [10] 蒋淳, 习俊通. 基于混合算法的项目型产品装配作业调度研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020 (1): 164-168.
- [11] SUN J, FENG B, XU W. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior[C]//Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation. IEEE, 2004: 325-331.
- [12] 张静. 基于混合离散粒子群算法的柔性作业车间调度问题研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [13] 王海鑫. 建设施工企业多项目资源优化配置方法及组织模式研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [14] 程月明. 装配式建造模式中混凝土预制构件调度优化 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [15] 李万庆, 刘玉丁, 孟文清, 等. 基于改进微粒群算法的建设项目多目标动态优化 [J]. 数学的实践与认识, 2016, 46 (1): 93-101.

收稿日期: 2024-05-17