

多订单切换成本下润滑油灌装排产策略优化研究

管祺昊（中国石化润滑油有限公司华东分公司，上海 200137）

摘要：为了应对润滑油灌装生产中多订单频繁切换所引发的成本上升与调度效率下降问题，文章采用多目标混合整数规划方法，构建了订单切换成本模型与排产优化目标函数，系统分析了切换路径下的设备调整、人力配置与物料损耗成本结构，并引入了改进型遗传算法融合局部搜索策略对排产方案进行优化。研究结合实际企业订单数据进行实验对比，结果表明所提模型在降低切换成本、提升订单准时交付率及目标函数稳定性方面显著优于传统调度策略，具备良好的实用性与鲁棒性。

关键词：润滑油灌装；排产优化；切换成本；遗传算法；多订单调度

中图分类号：TE974

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）031-0026-04

Optimization of lubricant filling and scheduling strategy under multi order switching cost

Guan zhenhao(Sinopec lubricants Co., Ltd. East China branch, Shanghai 200137, China)

Abstract: in order to deal with the problem of rising cost and decreasing scheduling efficiency caused by frequent switching of multiple orders in lubricant filling production, this paper uses the multi-objective mixed integer programming method to construct the order switching cost model and scheduling optimization objective function, systematically analyzes the cost structure of equipment adjustment, manpower allocation and material loss under the switching path, and introduces the improved genetic algorithm combined with local search strategy to optimize the scheduling scheme. The results show that the proposed model is significantly superior to the traditional scheduling strategy in reducing the switching cost, improving the order on-time delivery rate and the stability of the objective function, and has good practicability and robustness.

Keywords: lubricating oil filling; Production scheduling optimization; Switching cost; Genetic algorithm; Multi order scheduling

润滑油灌装生产具有多品类、小批量、高频切换的典型特征，订单切换过程中涉及的设备调节、人工操作与物料清洗所产生的非生产性成本日益突出，直接影响系统节拍与资源利用效率。在高度自动化与柔性化制造并存的环境中，如何兼顾多订单调度的可行性与切换经济性，成为排产策略优化的核心议题。针对现有调度模式中普遍存在的切换路径冗长、执行节奏失衡等问题，亟需构建具备成本敏感性与结构适应性的优化模型，并设计具备全局搜索能力与局部调整精度的算法以提升排产质量与调度稳定性。

1 润滑油灌装生产系统描述

润滑油灌装生产系统主要由灌装机组、输送装置、换型模块、控制单元及辅助包装环节构成，其运作核心在于实现不同规格润滑油产品的高效、准确投料与密封包装。生产线通常以并行灌装头的方式进行配置，以提升单位时间产出效率。然而，由于润滑油品类繁多、包装形式各异，系统运行过程中不可避免地需要频繁切换订单型号。每次切换不仅涉及灌装头参数调整、管路清洗，还伴随着包装瓶更换与贴标设置修改，导致生产节拍出现波动。为保障灌装精度，系统在切换过程中需执行定量校验与排气测试，这一阶段普遍

存在非生产性时间累积现象^[1]。此外，为配合自动化控制系统，灌装线各模块通过 PLC 与传感器实现闭环协调控制，但当订单批量较小时，频繁切换导致 PLC 程序段频繁切换、传感器状态重置，增加了设备响应延迟与调试难度^[2]。因此，系统的排产策略必须兼顾订单切换带来的资源损耗与设备效率波动，确保在复杂作业环境下的稳定生产节奏。

2 多订单切换成本模型构建

2.1 订单切换成本计算方法

订单切换成本主要由设备调整耗时、人力重配置费用与物料清洗损耗组成，其中不同订单间的差异性决定了切换强度的离散分布特征。灌装系统中，若前后订单在包装形式、灌装容量或油品类型上存在差异，则系统需执行一系列物理与逻辑参数切换操作^[3]。首先，设备调整耗时依赖于灌装头口径、输送带间距与贴标模具的调节复杂度；其次，人力重配置费用取决于更换模具所需工时与人工单价；再次，物料清洗损耗则与前订单残留润滑油的清理难度直接相关。在实际建模中，应对订单对之间的切换成本进行矩阵化表示，令订单集合为 $O=\{1,2,\cdots,n\}$ ，定义订单 i 切换至订单 j 的单位切换成本为 c_{ij} ，则整体切换成本可构建为

代价矩阵。

2.2 生产排程优化目标函数

在多订单调度场景中,系统需在满足交货期约束的前提下,最小化整体切换成本与订单完工偏差。考虑调度过程中任意两个相邻订单*i*与*j*,其切换成本由切换矩阵 $C=[c_{ij}]$ 提供;同时,每个订单的完工时间与其计划交付时间之间的差值构成时间偏差成本。因此,排产优化问题可建模为一个混合整数规划,其目标函数定义如下:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} \times c_{ij} + \alpha \times \sum_{i=1}^n |C_i - D_i| \quad (1)$$

其中, x_{ij} 表示订单*i*是否紧邻订单*j*被排产(若是则为1,否则为0), c_{ij} 表示从订单*i*切换至订单*j*的切换成本, C_i 为订单*i*的实际完工时间, D_i 为其计划交付时间, α 为时间偏差惩罚系数。该目标函数在结构上分为切换成本最小化与交付偏差最小化两个子目标,前者体现了设备运行效率的优化要求,后者反映了对客户交付承诺的严格遵循。

2.3 关键约束条件数学建模

在构建多订单切换优化模型时,必须严格考虑调度过程中的可行性约束,主要包括顺序约束、资源约束、时间约束及唯一性约束。

第一,顺序约束确保所有订单均被安排且不得重复调度,使用如下表达式建模:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

第二,资源约束要求任一时间点仅允许一台灌装线处理一个订单,即每个时间段的订单排布不得重叠。

第三,时间可行性约束限制了每个订单的完工时间必须在其交付时间之前,表示为:

$$C_i \leq D_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

第四,为防止解空间出现循环路径,需引入消除子环的 Miller Tucker Zemlin(MTZ) 约束,定义辅助变量 u_i 表示订单*i*的调度位置,构造如下不等式:

$$u_i - u_j + n \times x_{ij} \leq n - 1, \forall i \neq j \quad (4)$$

如图1为排产路径中节点2与3之间形成的子环结构,并通过MTZ约束对该子环进行抑制。虚线圈出子环区域,箭头表示调度顺序,MTZ标注指明其用于打破非法环路,确保调度路径线性无回路。

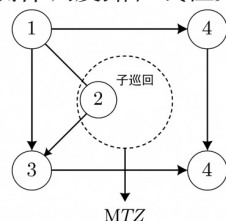


图1 排产路径中的子环冲突及MTZ约束对其消除的示意图

3 排产策略优化算法设计

3.1 基于启发式算法的求解方法

为快速获得多订单排产问题在切换成本影响下的可行解结构,引入基于局部评价机制的启发式策略进行初始解生成^[4]。该方法核心是构造评价函数 $f(i,j)$,综合考虑订单*i*与订单*j*之间的切换代价 c_{ij} 、交货期紧迫性 d_j-t 以及订单加工时间 P_j ,通过构造如下局部贪婪函数进行启发式排序:

$$f(i, j) = \lambda_1 \times c_{ij} + \lambda_2 \times \max(0, C_j - D_j) + \lambda_3 \times p_j \quad (5)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为切换成本、交期偏差与加工时间的权重系数, C_j 为订单*j*的完工时间, D_j 为其交期。该函数指导每步调度时优先选择 $f(i,j)$ 最小的订单插入当前位置,从而避免局部切换代价积累过快。

3.2 改进型遗传算法设计

为提升多订单排产问题在大规模解空间下的搜索效率,可在标准遗传算法基础上引入结构性个体编码与多阶段局部重构机制以增强其可行解保持能力与局部收敛速度。

①采用位置排列编码方式表示订单调度序列,每个染色体为一个长度为*n*的排列向量:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (6)$$

其中, p_n 表示第*n*个调度位置上的订单编号。

②在交叉阶段,为保留相对优质子结构,设计了基于部分映射交叉(PMX)的结构保护交叉算子,并引入邻域引导的选择算子,使高适应度区域得以扩展。具体操作中,局部结构保留交叉在设定的交叉概率下触发,用于提升后代序列的可行性与结构稳定性;而选择阶段则采用局部适应度加权的轮盘赌机制,有效规避陷入局部最优的风险。

③在变异阶段,为抑制早熟收敛问题,采用双机制并行操作:一为经典交换变异,随机交换染色体中两个基因位点;另一为基于切换成本梯度的扰动变异,即以一定概率 β 替换当前切换成本最敏感的订单位置对:

$$P' = \text{Swap}(p_i, p_j), \text{ where } (i, j) = \arg \max_{(i, j)} (c_{p_i, p_j} + c_{p_j, p_i}) \quad (7)$$

其中, c_{p_i, p_j} 表示订单 p_i 与 p_j 之间的切换成本。该机制通过引导搜索方向向低切换成本区域演化,提升全局解质量。此外,为提高初代种群的可行性与收敛基础,初始化阶段引入邻域启发式初解生成策略,确保每个个体均触发并具备初始结构优势。

3.3 局部搜索策略优化

为提高排产解的局部最优质量并增强遗传搜索的解空间精炼能力,引入基于邻域扰动结构的局部搜索

策略,通过设计多种局部操作算子以跳出浅层收敛陷阱。在邻域构建方面,采用基于双位置交换、子序列逆转与局部插入三种基本算子,定义邻域解 P' 为原始序列 P 在有限位置扰动下的可行调度解。

针对每一可行邻域解 P' ,计算其对应的目标函数值 $Z(P')$,并采用最小化准则选取最优邻域解:

$$P^* = \arg \min_{P' \in \aleph(P)} Z(P') \quad (8)$$

其中, $\aleph(P)$ 表示当前解 P 的邻域集合, $Z(P')$ 表示在给定顺序下由切换成本与交期偏差共同构成的目标函数值。为避免算法陷入局部最优点,进一步引入带扰动的局部重启机制,每隔 T 次未改进迭代后重构当前解的一部分,形成新的搜索起点。

4 实验案例分析

4.1 实验设计

为验证改进型排产策略在多订单切换成本情境下的适应性与优化能力,本文基于某润滑油生产企业实际订单数据构建实验环境,选取 10 组具有代表性的多品类订单作为测试样本(见表 1)。每组订单在包装容量、油品配方及交付周期上存在明显差异,覆盖典型切换路径特征。在算法参数设置方面,为保持实验可比性,遗传算法种群规模设为 60,最大迭代次数设为 300,交叉与变异概率分别设定为 0.8 与 0.3。为评价排产效果,实验设计了两组对照策略:一组为启发式-改进遗传算法联合求解策略,另一组为常规 FCFS(先来先服务)调度规则,并通过统一切换成本矩阵、订单交期参数与加工时间约束确保实验变量一致。评价指标方面,重点统计总切换成本、订单准时完成率及整体目标函数值,并基于不同订单密度与交付约束强度设置三档压力场景。

表 1 实验样本订单的主要参数结构

订单编号	包装类型	油品种类	加工时间 (min)	计划交期 (min)	单位切换成本 (元)
O1	1L, 圆瓶	A 型	45	300	0
O2	4L, 扁壶	A 型	60	380	45
O3	18L, 桶装	B 型	75	420	65
O4	1L, 圆瓶	C 型	50	360	70
O5	4L, 扁壶	B 型	65	390	50
O6	18L, 桶装	C 型	80	450	60
O7	1L, 圆瓶	A 型	48	310	40
O8	4L, 扁壶	B 型	62	400	55
O9	18L, 桶装	A 型	70	430	68
O10	4L, 扁壶	C 型	55	370	52

4.2 模型验证与比较

在执行优化排产策略后,将其与传统 FCFS 方案以及忽略切换成本的基准策略进行对比,结果表明改进模型在多项指标上均具有明显优势。首先,在总切换成本方面,启发式-遗传算法融合策略将成本控制

在 456 元,较 FCFS 方案的 677 元下降了 32.6%,也优于无切换成本优化策略下的 598 元,显示出对高代价路径的有效规避能力。

在订单准时完成率方面,改进模型表现出较强的交付响应能力,达到 91.2%,相比 FCFS 方案的 73.4% 提升了近 18 个百分点,也明显高于无优化策略下的 78.6%,特别是在交期密集场景中仍保持良好稳定性。

在目标函数表现方面,改进模型综合考虑切换成本与时间偏差,所得均值为 1076,远低于 FCFS 方案的 1421 和无成本策略的 1320,体现了更优的调度性价比。此外,该优化模型在多维指标上展现出较强的收敛稳定性,其目标函数波动幅度仅为 ± 4.7 ,明显低于 FCFS 的 ± 9.2 和无优化策略的 ± 8.5 。

综上,所提出的优化模型在控制切换成本的同时,兼顾了交付可靠性与调度效率,验证了其在复杂多订单生产环境下的实用价值与工程适应性。

4.3 实验结果分析

对三类排产策略在典型订单任务场景下的结果进行分析发现,改进算法在多维指标上展现出显著优势。在生产效率方面,该算法通过优化调度顺序与压缩高频切换行为,有效减少了设备空转与等待时间,使单位时间内平均完成订单数量从 FCFS 方案下的 7.2 单提升至 8.6 单,产出效率提升幅度达到 19.4%^[5]。在总成本控制方面,改进模型表现出对高代价切换路径的显著规避能力。相较于 FCFS 与未优化方案,该模型在大多数订单节点均实现了切换成本的有效压缩,累计成本节省达到 221 元,显示出其在应对高频异构订单调度中的实际节支效益。

此外,在订单完成率维度,该模型具备较强的交付稳定性。在多个交期紧张的仿真场景中,系统始终维持 90% 以上的准时交付率,有效避免了因排程冲突引发的批量性延迟。同时,针对出现延迟的个别订单,其时间偏差峰值均控制在 15min 以内,未出现极端拖期现象,表明模型在调度冲突缓解和交期风险控制方面具备良好的鲁棒性。

4.4 灵敏度分析

在不同切换成本水平下,随着单位切换成本由原始设定分别上调至 1.2 倍、1.5 倍和 1.8 倍,系统排产结构逐步趋向压缩高频切换行为,优先选择局部连续性强的订单排列方案。当切换成本上调至 150% 时,模型调整频率较原始设定下降 17.8%,平均切换次数由 9 次降至 7 次,同时总切换成本上升至 594 元。尽管调度策略有效规避了高代价路径,但订单准时完成率由 91.2% 下降至 87.5%,表现出一定的调度滞后性,

目标函数值相应上升至 1210。

进一步分析调度指标可见,在成本倍率上调至 1.2 倍与 1.5 倍之间的临界区间,系统的排产结构发生明显重组,模型展现出对成本阈值的敏感响应特性。当成本进一步上升至 1.8 倍时,平均切换次数下降至 6 次,总切换成本增至 648 元,准时完成率降至 85.9%,目标函数值达到 1295。整体结果表明,模型在中低倍率调整阶段具备较强鲁棒性,但在成本压力持续增大的条件下,调度性能出现一定波动。

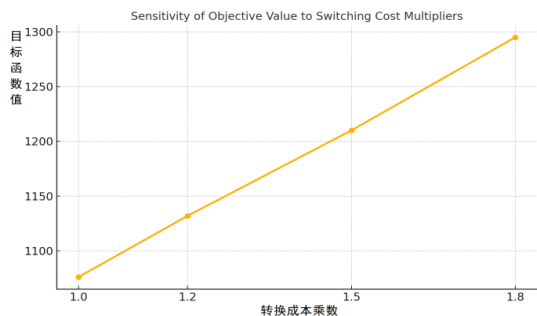


图 2 切换成本倍率变化对目标函数值影响的敏感性曲线图

图 2 为不同成本水平下总目标函数值的变化趋势,结果表明模型在成本增长初期具备较强鲁棒性,但在临界点之后优化能力受限。

5 结论

多订单频繁切换所引发的结构性成本问题,是制约润滑油灌装系统排产质量的核心瓶颈。通过构建成本敏感的优化模型,并引入融合局部搜索的进化算法,能够实现在复杂资源约束下对调度节奏与切换路径的协同控制。而未来可进一步拓展模型对不确定交期、动态订单插入等情境的适应性研究。

参考文献:

- [1] 张展鹏. 润滑油灌装生产线顶线量的优化 [J]. 石油商技, 2024, 42(1): 72-79.
- [2] 孙启鹏. DGP-CZ6 型润滑油灌装机控制系统改造设计研究 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(12): 226-228.
- [3] 杜希荣. 润滑油调和灌装生产线的自动化实践和发展趋势 [J]. 石化技术, 2019, 26(3): 139-139.
- [4] 付伟健. 润滑油调和灌装生产线的自动化实践和发展趋势 [J]. 化工管理, 2020(27): 178-179.
- [5] 刘俊. 基于精益生产的 B 润滑油厂生产管理改进研究 [D]. 大连理工大学, 2024.

作者简介:

管祺昊 (1997-), 男, 汉族, 上海人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 计划管理。

