

# 某柔性车间多要素集成调度优化方案研究

范鸿博 徐晓晗 刘巍巍

沈阳工业大学 辽宁 沈阳 110870

**【摘要】**：面对多品种、小批量的生产模式与绿色制造的转型需求，传统调度策略在应对柔性车间中工序、设备与能耗等多要素协同优化方面存在明显局限。本文以 A 公司主轴车间作为研究对象，针对车间工艺流程固化、设备使用率低以及能源消耗持续增长等关键问题，设计了一套融合工序柔性、设备优选策略以及能源管理的多要素集成调度优化方案。该方案通过融合工序柔性策略、设备优选机制与能源管控模块，构建了面向生产效率、资源均衡与绿色指标协同优化的集成调度模型，利用改进的多目标进化算法进行求解，并结合数字孪生仿真平台进行了验证。研究结果表明，该方案能有效缩短生产周期、提升设备利用率、显著降低单位产能能耗，为实现柔性车间多要素协同优化与绿色化提供了理论基础与实践参考。

**【关键词】**：集成调度；绿色制造；多要素协同；优化方案

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.005

## 1 引言

当前制造业正面向绿色化与智能化方向加速转型，集成调度技术已经成为支撑生产系统高效运行以及可持续发展的核心手段，传统调度模式很难统筹多个阶段的协同工作，面对具有复杂工艺约束的树状结构产品，会导致资源冲突和能源消耗。为此多要素协同调度方法已成为该领域的研究热点，该方法通过系统整合工序、设备、能源以及人力等关键要素，在优化生产效率和资源利用率的同时显著提升设备能耗利用率，可为制造企业绿色制造转型提供重要技术支撑。

Hemamalini 等（2021）构建了组合最小松弛和库恩塔克优化算法也就是 CLS-KTO 算法，该算法把平均拖期、最大完工时间以及作业完工时间当作优化目标，结合机器指派与工序调度模型实现柔性车间调度优化<sup>[1]</sup>。段建国等（2021）针对半组合式船用曲轴零件生产规模较小且规格十分复杂的特点，将缩短生产周期、减少机床作业能耗以及桥式吊装能耗作为优化目标，针对该类零件的绿色调度方案展开了深入研究<sup>[2]</sup>。Tamssaouet 等（2022）针对半导体制造领域多目标复杂车间调度问题，将设备不可用时段和任务最小拖期等多个要素当作考量因素，在优化过程中同时兼顾多个与工业应用相关的指标，改进遗传算法并提出评估高层次生产目标达成度新标准，实验数据显示该新方法能有效获取高质量调度方案<sup>[3]</sup>。蔡静雯等（2022）研究出基于 Q 学习的智能车间自适应调度方法，用于应对生产过程动态不确定性问题对产效造成的负面影响，该方法构建强化学习的自适应调度体系，采用 Q 学习算法并利用智能体与环境的交互训练调度模型，此模型能根据车间环境变化

实时进行调整，进而输出最优的生产作业方案<sup>[4]</sup>。张凯等（2023）构建了马尔可夫决策过程，开发出一种集成深度 Q 网络优化算法的混合策略，通过将元启发式算法以及其他强化学习方法进行对比，证实该方案不仅有效压缩了求解问题所耗费的时间，同时还具备良好的执行效率与应用价值<sup>[5]</sup>。

现有研究虽在柔性车间调度优化方面取得诸多成果，但针对工序、设备、能耗多要素的协同优化的研究仍不够深入，难以适配离散制造企业绿色化、精益化的生产需求。本文设计的融合工序柔性、设备优选以及能耗管控的多要素协同调度方案，通过构建集成优化模型与协同决策机制，系统性协调工序、设备与能耗之间的制约关系，从而实现生产效率、资源利用以及环境效益的统筹优化，对推动制造企业朝着精益化与绿色可持续发展方向转型具有重要的现实意义。

## 2 问题分析

### 2.1 车间生产环境与柔性特征

A 公司主轴车间属于典型的离散制造柔性作业车间，主要生产多种规格的汽轮机主轴产品，它的工艺流程涵盖车削、铣削、镗削、磨削和检测等复杂工序，采用的是多品种、小批量的订单式生产模式。本文以 DB4H 型汽轮机主轴作为实证对象，该主轴加工过程包含车、铣、镗、磨、检测等 20 余道关键工序，像粗车、精车、铣叶根槽、磨外圆等，其生产系统有两类明显的柔性特征：一是工序顺序具有柔性，部分检测与辅助加工工序在满足工艺约束条件下可调整顺序；二是机器选择存在柔性，精车主轴这道工序可在多台性能和能耗不同的数控机床床上完成。该零件结构复杂且精度要求高、资源竞争车主轴

作者简介：

范鸿博（2002-），男，硕士研究生，研究方向：集成调度。

徐晓晗（1999-），女，硕士研究生，研究方向：车间生产调度。

刘巍巍（1973-），女，博士生导师，研究方向：企业资源优化。

这道工序可在多台性能和能耗不同的数控机床上完成。该零件结构复杂且精度要求高、资源竞争激烈，具有多工序、多资源、高能耗的特点，是典型的研究工序柔性、设备调度与能耗协同优化问题的案例。

### 2.2 调度问题分析

本文运用质量管理工具因果图法，结合主轴车间实际数据，从人、机、料、法、环、测六方面对 A 公司订单交付不及时的原因进行具体分析（因果图见图 1）。由图 1 可知，该主轴柔性作业车间的主要问题如下：第一，工序流程固化限制了生产灵活性引发设备利用率不均，设备选取时未充分考虑能耗差异导致能源效率低下；第二，工序安排、设备配置与能源消耗这三个关键要素因资源竞争和目标矛盾相互制约，进而导致拉长生产周期、运营成本增加、阻碍可持续发展；第三，车间管理没有把生产现场的实际数据信息如工时统计、能源消耗之类充分纳入闭环管理和模型优化过程，未能建立起依靠数据的实时反馈以及持续改进机制，进而无法实现调度策略的持续自我迭代和智能化升级。

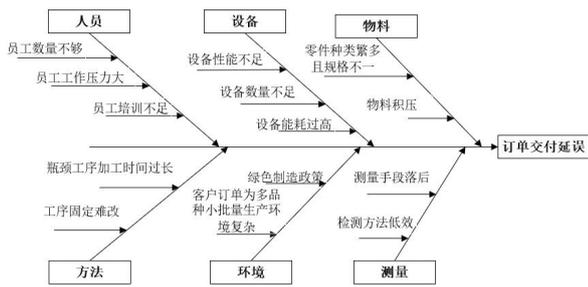


图 1 柔性车间多要素调度问题因果图

### 3 多要素协同集成调度体系构建

本文系统性识别并整合各生产环节的调度要素需求，开展多维度关联分析，为集成调度模型构建奠定基础；首先对 DB4H 主轴这类产品的生产部门进行评审，绘制出“工序顺序约束图”来划分不可调整的固定工艺链和可调整顺序的柔性工序，生成工序网络图并量化工序顺序调整空间。其次建立统一的“工序-设备-能耗”映射表，列出每道工序的可选设备及标准工时，将各备选设备的实时可用状态、额定加工功率、空载功耗及启停能耗特性绘入同一视图。最后通过与管理层明确完工时间、设备负荷、能耗这三大类目标的权重排序或可接受绩效区间。

本文构建了“目标导向-要素联动-机制融合”三级递进决策流程（见图 2），按照“目标、输入、决策、执行、反馈”路线，将工序、设备、能耗这三大要素整合进关键决策环节，通过“优化、校验、迭代”的步骤进行决策。

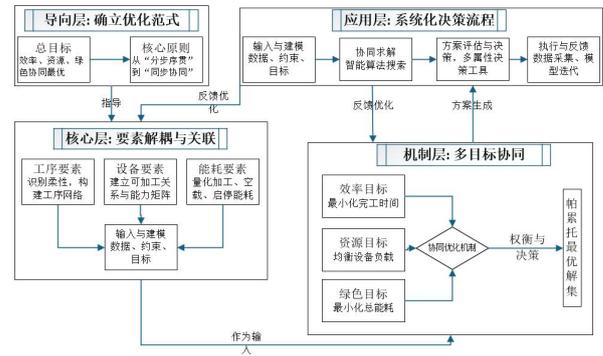


图 2 多要素协同调度体系图

由图 2 可知，该协同调度体系顶层明确效率资源与绿色优化的整体路径；中层对工序柔性设备性能及能耗特性关联分析，底层借助协同优化算法与闭环反馈体系达成多目标动态平衡和持续完善的多要素集成调度目标。

### 4 多要素集成调度方案的设计

#### 4.1 模型开发与算法实现

采用混合整数规划方法建立多要素集成调度数学模型，将工序排序、设备指派及工序开工时刻设为决策变量，以最小化最大完工时间、生产总能耗与设备负载均衡度为优化目标，通过加权和形式与多目标帕累托策略实现多目标集成优化。智能求解算法设计选用增强型 NSGA-II 算法作为求解核心，嵌入基于工序模块交换的局部搜索机制以提高优化效率，设计“双层协同求解架构”上层负责全局工序序列优化，下层专门处理设备分配与能耗最小化子问题，数字孪生仿真平台搭建依托 FlexSim、Anylogic 自主研发平台构建高精度车间仿真系统，实现优化算法与仿真模型的自动集成调度方案的批量验证及关键性能指标预测。

#### 4.2 系统集成与试点运行

搭建多要素集成调度可视化操作平台，运用甘特图、设备负荷热力图及能耗变化曲线等可视化工具，直观呈现帕累托最优方案组，同时融入 TOPSIS 决策分析组件，系统可根据企业实际生产需求，设定优先交付、优先控耗、成本最优等偏好参数，自动生成并推荐最佳调度决策方案。然后搭建和现有 MES 系统的双向数据交互通道，接收订单及工艺信息并下发生产调度指令，并且开发与能源管理系统的对接接口，获取实时电价及碳排放数据。选取 1 至 2 条 DB4H 主轴生产线开展试点应用，在试点期间让新旧两套调度系统并行运行，并且采集不少于一个月的对比分析数据，从缩短生产周期、平衡工作负载及降低能源消耗等方面验证该方案的成效。

#### 4.3 预期成果与评估指标

为系统评估所提出的集成调度方案的成效，本文从效率资源绿色及系统四个维度设计了关键绩效指标 (KPI) 体系。其中，效率维度的目标是缩短平均生产周期达到 10%-15%，把订

单准时交付率提升到95%以上；资源维度预计提高设备综合利用率达8%，通过降低负载均衡度，降低20%以上来优化资源配置，绿色维度聚焦降低单位产值综合能耗在8%-12%，并且减少峰值时段能耗占比，减少5%；系统维度追求在10分钟以内生成调度方案，同时将计划与执行偏差率控制在5%以内。该体系运用历史数据对比系统实时监测及统计分析等方法进行度量，全面验证方案在提升生产效率，实现资源精益利用，贯彻绿色制造及增强系统智能化等方面的成效。

#### 4.4 风险分析与应对措施

针对本集成调度方案在执行过程中可能面临的各类风险，结合技术特性与企业实际运营需求，从技术、数据、组织、集成四个维度制定针对性防控策略，保障方案顺利落地实施：

(1) 技术风险。方案实施过程中易出现优化求解效率衰减问题，影响调度系统的实时性。对此，结合云边协同计算机制，将复杂的模型求解、方案优化等运算任务部署于云端执行，同时依托边缘端完成生产现场仓储、设备状态等信息的实时动态调控，规避运算效率损耗对系统运行的负面影响。

(2) 数据风险。生产现场数据采集不完整、数据质量偏低，易引发数据质量缺陷，影响系统决策的准确性，可在项目启动前期开展专项数据治理工作，明确数据质量管控规范，同步建立数据补充采集机制，从源头保障数据的完整性与有效

性。

(3) 组织风险。主要体现为一线作业人员对系统变革存在抵触情绪，为此通过强化变革全流程管理、吸纳核心用户参与方案设计的方式化解，重点凸显优化后系统对工作人员作业负荷的减负效用，提升员工接受度与参与积极性。

(4) 集成风险。调度系统与企业现有MES、ERP等生产管理系统易出现接口对接兼容性不足问题，导致跨系统数据互通不畅，针对此需预先开展系统接口兼容性评估，可依托中间件或API网关技术，实现调度系统与现有生产管理系统的高效集成及跨系统数据互通。

## 5 结论

本文提出的柔性车间多要素集成调度方案，融合工序柔性判定、设备能耗关联分析与帕累托优化技术，针对传统调度模式中工序固化、资源分配失衡、能源消耗偏高的行业痛点，构建多要素协同调控机制并结合智能决策方案，实现了柔性车间集成调度的全局优化。该方案在显著提升车间生产效率与资源综合利用率的同时，有效降低了生产过程中的能源消耗，充分践行绿色制造发展理念，为柔性车间的智能化、绿色化调度实践提供了系统化的方法支撑与应用指导，也为相关制造领域的调度优化研究提供了有益参考。

#### 参考文献：

- [1] Hemamalini T, Geetha G. Combinatory least slack and kuhn tucker optimization for multiobjective flexible job shop scheduling[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1947(1): 2058-2069.
- [2] 段建国, 李豪晨, 张青雷. 面向绿色制造的半组式船用曲轴结构件生产车间多目标调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(06): 1714-1727.
- [3] Tamssaouet K, Dauzere-Peres S, Knopp S, et al. Multiobjective optimization for complex flexible job-shop scheduling problems[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 296(1): 87-100.
- [4] 蔡静雯, 马玉敏, 黎声益, 等. 基于Q学习的智能车间自适应调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(11): 3727-3737.
- [5] 张凯, 毕利, 焦小刚. 集成强化学习算法的柔性作业车间调度问题研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(02): 201-207. Research, 2021, 28(5): 2733-2758.