

锻造生产计划动态调度优化

陈宙科

中航工业贵州安大航空锻造有限责任公司 贵州 安顺 561005

摘要: 本文针对锻造生产流程复杂、动态事件频发的特点,提出基于智能算法与实时反馈机制的动态调度优化方法。通过构建多目标优化模型,结合元启发式算法、机器学习与数字孪生技术,实现设备故障、紧急订单等不确定性场景下的高效调度。系统架构涵盖数据采集、决策优化与执行控制三层,集成工业物联网、云计算与边缘计算技术,构建“云-边-端”协同体系。为锻造生产智能化升级提供理论支撑与技术方案。

关键词: 锻造生产; 动态调度; 智能算法; 多目标优化

引言: 锻造生产作为金属加工核心环节,其工艺复杂性与设备约束性导致调度难度显著高于一般离散制造。传统静态调度方法难以应对设备故障、紧急订单等动态事件,易引发交货期延误与资源浪费。本文通过动态调度优化,提升生产效率与响应能力,为锻造企业数字化转型提供解决方案。

1 锻造生产动态调度基础理论

1.1 锻造生产流程与特性分析

锻造生产作为金属加工的核心环节,其工艺流程涵盖加热、锻造、热处理及精加工四大阶段。加热环节通过高温环境改变金属组织结构,使其具备良好塑性,为后续锻造提供基础条件。锻造阶段利用模具对金属坯料施加压力,使其产生塑性变形,形成特定形状与尺寸。热处理环节通过淬火、回火等工艺调整金属性能,以满足强度、韧性等指标要求。精加工阶段则通过车削、磨削等工艺进一步修正尺寸与表面质量,确保最终产品符合设计规范。锻造生产的特性体现在工艺复杂性与约束多样性。设备产能是关键限制因素,加热炉、锻压机、热处理炉等设备的运行效率直接影响整体生产节奏。工艺顺序需严格遵循,例如锻造前必须完成坯料加热,热处理需在锻造后立即进行以固定组织结构。模具切换时间构成隐性成本,不同产品需更换对应模具,切换过程耗时且影响设备利用率。锻造工艺对环境温度、压力等参数敏感,需在生产中实时监控并动态调整。

1.2 动态调度基本概念

动态调度是应对锻造生产不确定性的核心方法。动态事件可归纳为三类:紧急订单插入、设备故障及工艺变更。紧急订单通常具有高优先级,需在短时间内调整生产计划以插入新任务;设备故障导致生产线中断,需重新分配任务至备用设备或调整后续工序;工艺变更可能因设计修改或质量异常触发,需对已排产任务进行全

局优化。调度策略按响应机制分为三类:反应式调度、预测式调度及混合调度。反应式调度基于实时数据立即调整计划,适用于设备故障等突发性事件,但可能因缺乏全局视角导致局部最优^[1]。预测式调度通过历史数据与机器学习模型预测未来事件,提前优化生产计划,适用于订单波动等可预见性场景。混合调度结合两者优势,在稳定期采用预测式调度,突发事件时切换至反应式调度,兼顾效率与灵活性。

1.3 多目标优化模型构建

多目标优化模型是动态调度的数学基础,需平衡效率、成本与质量等多维度目标。核心目标包括最小化完工时间、最大化设备利用率及最小化能耗。完工时间直接关联交货期与库存成本,需通过任务优先级排序与设备分配优化缩短生产周期。设备利用率反映生产资源利用效率,需避免设备闲置与过载运行。能耗优化需考虑加热炉、锻压机等高耗能设备的运行参数,通过调整温度曲线与压力参数降低单位能耗。约束条件需覆盖资源、时间与工艺三个维度。资源约束包括设备产能、模具数量及操作人员技能匹配;时间窗约束涉及订单交货期、设备维护周期及工艺冷却时间;工艺依赖约束确保任务执行顺序符合工艺规范,例如锻造后必须进行热处理。模型需通过线性规划、整数规划或元启发式算法求解,在满足约束条件下寻找帕累托最优解集。动态调度需嵌入实时反馈机制,通过传感器网络采集设备状态、订单进度等数据,动态更新模型参数。优化结果需转化为可执行指令,通过MES系统下发至生产单元,实现计划与执行的闭环协同。未来研究可探索数字孪生技术与强化学习算法的融合,通过虚拟仿真验证调度方案,并通过在线学习持续优化调度策略,以适应锻造生产复杂多变的现实需求。

2 锻造生产动态调度优化方法

2.1 智能算法应用

智能算法为锻造生产动态调度提供了高效求解工具。元启发式算法通过模拟自然现象实现全局搜索，其中遗传算法基于基因编码与交叉变异生成调度方案，适用于多目标优化场景，例如在满足交货期的同时降低设备能耗。粒子群优化算法依托群体协作机制，通过粒子速度与位置更新探索解空间，适用于设备故障后的快速重调度。模拟退火算法则通过模拟金属退火过程，在初期以较大概率接受劣解以跳出局部最优，后期逐步收敛至全局最优，适用于订单波动下的动态调整。机器学习与深度学习进一步提升了调度决策的智能化水平。预测模型通过历史数据训练，可提前预判设备故障概率、订单到达时间等关键参数，为调度策略提供支撑。例如，循环神经网络可捕捉订单到达的时间序列规律，生成未来订单的预测分布。强化学习调度策略通过构建生产环境仿真模型，使智能体在交互中学习最优调度动作，例如深度Q网络可通过状态-动作-奖励映射，在多设备、多任务场景下实现实时决策。混合算法设计融合了元启发式算法与机器学习的优势。例如，遗传算法与深度强化学习结合时，可利用遗传算法生成初始种群，通过深度强化学习对种群个体进行局部优化，提升算法收敛速度与解的质量。混合算法可针对不同生产阶段动态切换策略，在计划阶段采用遗传算法生成全局方案，在执行阶段通过深度强化学习进行在线调整，实现全局与局部优化的协同。

2.2 实时调度决策机制

实时调度决策机制需具备快速响应能力，以应对动态事件对生产计划的影响。动态事件检测与响应策略是其中的核心环节，通过实时监控设备状态、订单需求和工艺参数，及时发现异常事件并触发调度调整。例如，设备故障需通过快速切换备用设备或调整生产批次顺序减少对生产的影响，紧急订单插入则需通过优先级重排和资源重新分配确保按时交付。调度规则库设计基于生产经验与领域知识，通过预定义规则实现调度决策的快速执行。规则库通常包含优先级分配规则、资源分配规则和冲突解决规则。优先级分配规则根据订单交货期、设备利用率和工艺复杂度等指标确定任务优先级；资源分配规则则根据设备产能、模具状态和人力配置限制，为任务分配可执行资源；冲突解决规则用于处理资源竞争和工艺约束冲突，确保调度方案可行。滚动窗口调度与在线调整机制是应对动态不确定性的有效方法^[2]。滚动窗口调度将生产计划划分为多个时间窗口，每个窗口内进行局部优化，并根据实时数据动态更新后续窗口的计划。在线调整机制则允许在生产过程中实时调整调度方

案，以应对突发状况。例如，当设备故障导致某一工序延误时，系统可通过在线调整机制重新分配后续工序的资源，确保整体生产进度不受影响。

2.3 不确定性建模与处理

在动态调度中，不确定性建模与处理至关重要。对于设备故障概率、订单到达时间分布等随机变量，可借助概率模型表达。如设备故障建模为泊松过程，订单到达时间拟合为正态分布，同时要考虑变量间相关性，像设备老化程度与故障概率的关联、订单紧急程度与到达时间的负相关。鲁棒优化方法通过构建不确定性集合，生成抗参数波动的调度方案。例如定义设备故障概率置信区间，在优化目标中加入鲁棒性约束，保障方案在故障概率增加时仍能满足交货期要求。该方法分为基于场景和基于分布的优化两类，前者生成多个不确定性场景优化，后者直接在概率分布上优化，两者都可通过混合整数规划或元启发式算法求解。应对不确定性的调度策略需有弹性与自适应性。弹性策略通过预留缓冲时间、设备冗余等提升系统容错能力，如设置备用设备、预留任务时间缓冲；自适应性策略通过在线学习机制动态调整调度参数，如依实时故障数据更新设备可靠性模型、按订单波动调整滚动窗口长度，二者结合可让调度系统高效应对不确定性。动态调度优化要构建闭环反馈机制，通过实时数据采集与模型更新持续改进，如利用数字孪生技术构建虚拟生产环境验证调度方案并优化算法参数。未来研究可探索智能算法与区块链技术融合，通过分布式账本记录调度决策过程，提升透明度与可追溯性，为锻造生产动态调度提供更可靠方案。

3 锻造生产动态调度系统架构

3.1 系统功能模块设计

锻造生产动态调度系统架构需涵盖数据采集、决策优化与执行控制三个层级。数据采集层作为系统输入端，承担实时获取设备状态、订单信息及工艺参数的任务。设备状态借助工业物联网与传感器网络实现，如温度传感器监测加热炉运行，振动传感器捕捉锻压机状态。订单信息由企业资源计划系统同步，涵盖订单优先级、交货期及工艺路线等要素。工艺参数通过数字化工艺卡片传递，包括模具切换时间、热处理工艺曲线等关键数据。决策优化层是系统核心，负责调度算法运行与多目标优化。调度算法集成元启发式算法（如遗传算法、粒子群优化）与机器学习模型（如深度强化学习），在设备故障、紧急订单等动态事件下生成优化方案。多目标优化需平衡完工时间、设备利用率及能耗等指标，例如通过加权和法将多目标问题转化为单目标优

化。实时调整机制基于滚动窗口调度框架,在每个时间片段内根据当前状态重新优化任务分配,确保方案适应动态变化。执行控制层负责将优化方案转化为可执行指令,通过制造执行系统下发至生产单元。指令包含设备启动时间、模具切换顺序及工艺参数设置等详细信息。设备协同机制通过分布式控制系统实现,多台锻压机可根据任务优先级自动调整运行节奏,避免资源冲突。

3.2 关键技术实现

工业物联网(IIoT)与传感器技术是系统数据采集的基础。IIoT通过边缘计算节点实现设备数据的本地处理,例如将温度传感器数据转换为设备健康状态评估值。传感器网络需具备高可靠性,例如采用冗余设计避免单点故障,并通过无线通信技术(如LoRa、NB-IoT)实现长距离数据传输。传感器数据需进行预处理,例如通过滤波算法去除噪声,通过特征提取算法识别设备异常模式。数字孪生与仿真优化技术为调度决策提供虚拟验证环境。数字孪生模型通过三维建模与物理引擎构建虚拟生产场景,可实时映射设备状态与工艺参数^[3]。仿真优化通过蒙特卡洛模拟或离散事件仿真,评估不同调度方案对生产效率的影响,例如模拟设备故障后的重调度过程,验证方案对交货期的保障能力。数字孪生模型需与物理系统保持同步,例如通过数字线程技术实现数据双向流动。云计算与边缘计算协同技术提升系统计算能力与响应速度。云计算平台承载复杂算法与全局优化任务,例如通过分布式计算框架(如ApacheSpark)处理大规模数据集,通过机器学习平台(如TensorFlow)训练预测模型。边缘计算节点部署于生产现场,负责实时数据处理与本地决策,例如通过边缘网关采集传感器数据,通过本地算法生成初步调度方案。云计算与边缘计算通过5G网络实现数据交互,边缘节点将关键数据上传至云端,云端将优化结果下发至边缘节点,形成“云-边-端”协同架构。

3.3 系统集成与协同

系统集成与协同工作中,构建与ERP、MES系统的标准化接口至关重要。ERP系统承担订单管理与物料需

求规划,MES系统则聚焦生产执行与质量管控,动态调度系统需借助API接口或中间件实现数据交互。基于ERP订单优先级及MES设备状态数据,动态调度系统可生成定制化调度方案。接口设计需兼顾数据格式兼容性与实时性,可采用RESTful API实现轻量级交互,通过消息队列完成异步传输。跨部门协同需覆盖生产、工艺、设备三大维度,生产部门通过系统获取实时生产数据支撑调度,工艺部门利用数字孪生技术提供工艺参数,设备部门通过传感器网络反馈设备状态。协同机制依托标准化流程与信息化平台,如搭建统一数据平台,通过角色权限控制实现信息共享,并通过联合培训提升协作效率。系统架构需具备可扩展性与可维护性,模块化设计支持以插件或微服务形式扩展功能,分层架构支持热插拔与快速迭代,可通过容器化技术实现模块独立部署。系统需建立知识库与案例库,记录设备故障模式及应对策略,为优化提供经验参考。未来研究可探索AI与区块链技术的融合应用,AI技术可通过自然语言处理优化调度规则库,借助智能合约实现数据安全与隐私保护;区块链技术则通过分布式账本记录调度决策过程,提升系统透明度与可追溯性,确保数据不可篡改。

结束语

锻造生产计划动态调度优化是提升锻造生产效能的关键。通过深入研究锻造生产特性、构建多目标优化模型、应用智能算法、设计实时调度决策机制及处理不确定性,并构建完善的系统架构,为锻造生产动态调度提供了系统化解决方案。未来,随着技术发展,需进一步探索新技术融合,不断优化调度策略与系统,以适应更复杂生产环境,推动锻造行业智能化升级。

参考文献

- [1]张永涛.锻造生产设备故障分析及优化创新方案[J].锻压装备与制造技术,2024,59(2):86-89.
- [2]宋雯.自动化生产在航空复合材料零件锻造中的应用研究[J].科技资讯,2024,22(22):145-147.
- [3]冯海芬.基于新质生产力锻造的职业教育创新逻辑与路径[J].职业技术教育,2024,45(9):24-31.