

# 智能切割产线中工艺知识图谱构建与机器人运动自主决策

黄 璜

上海大界智能设备有限公司 上海 201801

**摘 要:** 智能制造背景下, 切割产线面临柔性化、自动化升级的迫切需求。本文提出一种面向智能切割产线的坡口工艺知识图谱构建方法与机器人运动自主决策机制。通过多维度工艺数据采集与标准化处理, 构建工艺规则库与参数库, 实现知识结构化管理与动态更新。在此基础上, 设计基于规则驱动与协同算法的智能决策体系, 支持机器人对工艺参数的自动匹配、多机协同调度与安全监测控制。结合智能搬运、切割、打磨等核心模块开发, 以期为复杂制造环境中智能产线建设提供参考。

**关键词:** 工艺知识图谱; 机器人决策; 智能切割产线; 工艺参数匹配; 多机协同调度

## 引言

传统坡口切割产线朝着柔性、自动化、智能化发展, 柔性生产方式下的多品种、小批量生产模式下, 如何高效协调各设备、如何准确匹配工艺参数及控制各工序加工过程成为切割产线升级面临的重大问题。工艺知识图谱可作为一种方便的知识表达和知识推理手段, 从而实现复杂工艺知识结构化管理和有效应用, 本文将从工艺知识图谱构建在智能切割产线的系统应用, 以期为切割产线柔性调度作业及高效生产提供借鉴。

## 一、工艺知识库构建

### (一) 多维度工艺数据采集与标准化处理

山西煤机坡口火焰切割智能线建设项目中, 面向煤机刮板机的中底板坡口的加工自动化和智能化, 首先要建立工艺知识库(具有一定的扩展性和可应用性)。而工艺知识库的基础则是对多元工艺数据的充分采集及标准化。多元工艺数据主要涉及工件的几何尺寸、材质类别、坡口型式(V型、X型、斜坡口等)、火焰切割参数(功率、速度等)、打磨抛光路径、设备状态及环境温度等数据。基于工艺数据采集的时效性和准确性, 选用线激光传感器、力反馈传感器、视觉识别单元及温湿度传感器等传感设备实现对各环节工艺数据的高速采集和现场预处理。同时基于统一数据标准将原始工艺数据进行清洗、归一化和标签化, 构架数据模板, 完成异构设备之间的数据交互和知识图谱实体关系抽取。多元数据的标准化

处理使得采集的数据具有较高的可信度, 进而支撑后续的规则建模及智能决策。

### (二) 工艺规则库与参数库的建立

坡口切割智能生产线中的工艺规则库与参数库基于标准工法工艺数据构建。针对不同中底板类型, 系统分类定义切削任务, 提炼典型工艺路径、动作及重要性等级, 提取关键加工工况因素。构建工艺规则涵盖中底板工艺类型、切割类型选择、焦点位控制、路径规划、切割道数、打磨参数及角补偿设置等, 以IF-THEN语句表达。参数库以数据库形式存储对应加工参数, 如不同厚度中底板的火焰功率、气体压力、进给速度等。基于知识图谱结构, 规则与参数库动态更新扩展, 适应生产中的快速重配置与自适应执行, 为智能决策提供数据与逻辑支撑。

### (三) 工艺知识动态更新机制

在山西煤机刮板机中底板坡口切割智能产线中, 为应对多规格中底板在切割和打磨过程中可能出现的质量偏差与效率波动, 构建了一套“数据驱动+专家修正”的工艺知识动态更新机制, 具体如图1所示。

该机制借助工业相机、激光传感器、温度/力传感器等装置获取当前作业的生产参数, 如割炬的误差、打磨点的粗糙度、设备的载荷等信息, 并传送至MES系统和边缘计算平台进行实时处理。应用实物下料多因次误差对比模型对当前作业的工艺实施情况进行分析, 然后利用贝叶斯回归算法及K近邻模型找到过往的工况实例中与当前实例最相似的一例进行对比, 并用已存的规则和参数模板进行匹配。如果结论认为当前规则是失效或者是未达到预定精度, 该模型将生成一个在线调整命令,

**个人简介:** 黄璜(1983.10-), 女, 汉族, 江苏兴化人, 本科学历, 研究方向: 工业机器人智能解决方案。

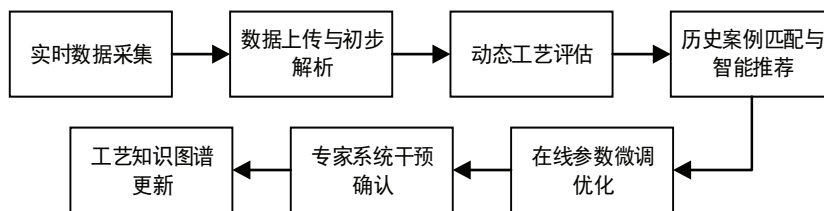


图1 工艺知识动态更新机制

并将调整目标工艺参数的数值更新至当前控制模式中，再传送至专家系统审核，经人工复核后，将新规则输入知识图谱，再做版本化处理<sup>[1]</sup>。控制单元在新规则执行完成后将其删除，当前版本会作为预排中的一次调度去执行相应的生产任务。

## 二、智能决策机制

### (一) 基于规则的工艺参数自动匹配

针对不同加工规格的中底板类零件，为了高效实现适应多规格件的快速加工，制定了规则驱动下的工艺参数自动匹配解决方案，基于知识图谱构造的“板型-工艺特征-加工需求”三元组实例化规则匹配实现板型与加工需求的高效快速匹配。采用带有相似度量度的加权匹配函数：

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \delta(p_{ij}, q_j)$$

其中， $S_i$ 为第*i*条规则与当前任务的匹配评分， $w_j$ 为第*j*个参数维度的权重， $p_{ij}$ 为规则中第*j*项参数， $q_j$ 为当前任务的对应参数， $\delta$ 为相似性判断函数。系统根据匹配得分 $S_i$ 自动选出最优规则，进而解包出对应的切割速度、坡口角度、打磨压力等参数值，并下发至设备控制层<sup>[2]</sup>。该机制支持规则级联与参数模板动态装配，极大提升了参数下发的准确性与响应速度，有效支撑了多品种任务的柔性化切换与精准执行。

### (二) 多机协同作业调度算法

为了有效协调多桁架机器人、切割器、打磨器的机器人协同生产，通过多机任务调度优化模型(Improved Genetic Algorithm, IGA)确定任务优先顺序，使任务调度时间最短的同时平衡负荷和控制关键路径；机器人任务调度模型如下：

$$\min C_{\max} = \max_{i \in M} \left( \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} + s_{ij} \right)$$

其中， $C_{\max}$ 表示所有加工设备的最大完工时间， $M$ 为设备集合， $t_{ij}$ 为第*i*台设备执行第*j*个任务所需时间， $s_{ij}$ 为任务切换或搬运时间。该算法采用初始化染色体启发算法，基于优先级以及工序在车间内的物理位置，对任

务进行初排序，并采用适应性交叉和适应性变异算法对调度工作进行更新迭代<sup>[3]</sup>。调度器包含在MES中运行，能够对实时负载和调度的插入变化进行监督，最终实现多台设备在空间和时间资源上的优化。从而提升了产线设备的使用率和加工效率，可用于中底板切割等流程强耦合柔性线。

### (三) 实时安全监测与预警

实时安全监测与预警模块利用工业摄像头、线激光传感器、扭矩和测温传感器采集切割机器人轨迹、设备状态、工况异常及工件偏移等信息。通过边缘计算单元快速去噪、特征提取和故障诊断，采用改进的长短时记忆网络深度神经网络算法进行故障演变趋势判断和安全风险预警评估。当监测目标出现异常状态和安全风险时，按预设门限值触发报警，联动切割机器人和搬运机构执行紧急刹车或减速，减少设备损害和人员安全威胁。同时，实时向中央控制单元和就地操控界面传输信息，实现运维人员快速响应与决策，保障产线连续高效、稳定运行，提升智能切割系统安全智能化性能。

## 三、核心功能模块

### (一) 智能搬运定位系统

智能搬运定位系统由工业视觉相机、线激光传感器和力传感器组成，可实时采集工件的空间位姿与尺寸。基于深度学习的图像处理技术，系统能智能辨识并全自动分类定位不同规格的中底板工件。激光测距建立三维空间模型，为机器人搬运提供精确坐标。改进的A\*算法结合动态避障，提高搬运效率和安全性。搬运机械臂配备多自由度关节和柔性抓手，实现刚性夹持与柔和放置。<sup>[4]</sup>系统与MES、ERP系统无缝对接，实现搬运任务的自动下达与反馈闭环运行，减少人工干预，提升搬运精确率和速度，保障后续工序顺利进行，显著提高产线自动化与智能化水平。

### (二) 自适应切割控制系统

自适应切割控制系统利用线激光传感器、工业相机和力反馈传感器实时检测中底板坡口切割过程，寻找偏置量并结合高精度定位装置控制切割斜度。通过传

传感器反馈和算法闭环调节,实时调整激光功率、切割速度和路径偏差,实现动态切割控制。采用模型预测控制(MPC),基于实时传感器数据和前件工艺条件优化参数,最小化误差,实现自动化切割坡口控制。

### (三) 柔性打磨执行单元

柔性打磨执行单元是山西煤机坡口切割智能生产线的组成部分,根据工件表面轮廓和表面粗糙度检测信息、三维力反馈信息实时在线自适应优化打磨角度、压力和轨迹,并控制打磨参数,从而保证打磨质量满足工艺要求,实现加工过程的精确性和稳定性;根据工件规格型号动态加载打磨加工的策略和参数,柔性变换打磨参数、快速满足各种规格的工件,实现全柔性切换;加载工件数据和工件的规格型号,将优化后的加工参数及工艺通过工艺知识库快速获取并储存,避免人的主观因素<sup>[5]</sup>;针对整个生产工艺过程的信息集成,加载相应的工艺信息;在系统执行过程中监测故障振动,保护工件及设备;监控磨头工作环境的温度、异常振动和力的反馈,实现异常状态预警。

## 四、系统集成与验证

### (一) 虚拟调试平台搭建

虚拟调试是一种在数字化仿真环境中进行的调试技术,通过模拟真实传感器和机器人控制系统接口,对坡口切割智能产线的子系统功能和方案进行论证与验证。它主要用于完成多机调试,减少工作量,避免实际运行中的误操作、安全隐患和经济风险。同时,虚拟调试还能优化产线的坡口切割工艺和调度,通过搭建多机虚拟实验模型,仿真工艺控制与调度算法,优化分体线组合,设定最优工作参数,确保产线在实体运行前完成预先测试。

### (二) 产线实际运行测试

产线实际运行测试是将虚拟调试之后的系统应用到山西煤机坡口切割智能产线系统中,在此产线进行切割工序、打磨工序、搬运工序、集控系统的逐步测试,实现多个工序之间的协同作业功能。测试期间分别记录控制系统的主要工艺参数、设备参数和产品参数,并将系统响应时间和异常报警作为评估系统测试的主要性能指标,对各工段及子系统间的协调、同步性和智能决策功能进行验证。利用系统预设的工艺方案和在线动态调整方法,验证系统在中底板不同规格零件加工条件下各子系统运行的稳定性与适应性,并开展模拟故障、紧急停

机、保护报警等相关测试工作,评估系统保护的安全有效性。根据测试结果调整设备的运行状态参数及调度决策逻辑,形成高效的、稳定的和安全的实际生产制造能力。

### (三) 效能评估与优化

坡口切割智能产线在正常工况下表现出较高的切割精度和打磨质量,设备运行稳定且响应及时,产能达标。

在多规格多工件切割测试,通过修改工件规格,能够兼顾对不同工件的使用,较之前略增大了误差范围以及故障次数,但是基本性能是不错的。在故障模拟、突发断电实验中检测出系统对报警的判断及紧急停机响应性能,确保生产过程的安全性。通过测试结果分析并优化了其切割策略和调度策略,发现了优化余地,在切割误差上的波动以及运行反应时间方面进行调整,使得系统具有更高的容错能力及性能效率,为即将进行的连续批量切割提供了保证。

## 结语

本文围绕山西煤机坡口切割智能产线,系统阐述了工艺知识图谱的构建及机器人运动自主决策机制。通过多维度数据采集、动态工艺知识更新和基于规则的智能决策,实现了工艺参数的精准匹配与多机协同高效调度。核心功能模块的设计提升了搬运定位、切割控制及打磨执行的柔性智能化水平。虚拟调试平台与现场测试验证了系统的稳定性和安全性。未来,结合人工智能与大数据分析,持续优化工艺知识库和决策算法,将进一步推动智能产线的自主化与高效化发展。

## 参考文献

- [1] 袁浩洲, 张建新, 盖建敏, 等. 铁路敞车智能切割系统优化研究[J]. 机车车辆工艺, 2025, 61(02): 43-46.
- [2] 魏小林, 唐传江, 魏宇君. 基于PLC和工业机器人的激光切割系统应用设计[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(11): 125-127+146.
- [3] 安升辉, 杨海涛, 刘兴坤, 等. 大型工件的三维激光切割机器人系统及自主编程[J]. 机电工程技术, 2025, 54(03): 132-137.
- [4] 石林潇, 张庆, 封沛, 等. 机器人激光切割自动化生产线[J]. 锻压装备与制造技术, 2023, 58(04): 22-25.
- [5] 林少晶. 基于人工智能的机器人激光切割焦点跟踪控制技术[J]. 石河子科技, 2022, (04): 19-21.