

数字化驱动下金属棒料加工设备研发与工艺优化研究

文 | 张周屏

当前，数字经济与智能制造深度融合，金属棒料加工行业亟须从传统制造向数字化、智能化转型。大数据、人工智能及元宇宙等前沿技术的兴起，为金属棒料加工设备研发与工艺优化提供了全新驱动力。聚焦数字化技术在金属棒料加工领域的系统性应用，对推动设备智能升级与工艺精准调控具有重要的现实意义。

典型案例

某汽车传动轴棒料智能加工项目针对金属棒料在多工序加工过程中，微观组织难以实时追踪、工艺参数调控依赖人工经验等突出问题，系统地引入以深度学习为核心的图像智能解析技术、以物理信息神经网络为支撑的多尺度力学建模技术，以及以数字孪生为框架的虚拟映射技术，构建涵盖棒料锻造、热处理及成形全流程的数字化加工体系。该项目利用 Mask R-CNN 模型对棒料微观组织切片图像开展自动分割与物相识别研究，通过结合有限原子学习框架来建立微观结构和力学响应之间的映射关系，并且借助大数据平台对多源工艺数据进行融合处理操作，从而形成贯穿设备感知层、数据层及决策层的完整技术链路，为后续智能技术在棒料加工工艺中的深度融合提供可参照的实践范本。

智能技术驱动棒料加工工艺优化

大数据驱动的加工设备智能感知

在上述典型案例所构建的数字化加工体系基础上，大数据技术深度嵌入为金属棒料加工设备智能感知层提供核心支撑，各个工序节点会按照棒料材质的不同差异与工况的复杂程度来配置具有差异化的传感器类型，沿着棒料传输路径布设的多维传感器阵列，对切削力、主轴转速、振动频率及热场分布等物理量进行高频采集，所得数据经过边缘计算节点完成初步清洗与特征提取后，汇入工业大数据平台进行多源融合分析。设备运行状态的实时表征依靠以下感知模型来构建：

$$F=ma+cv+kx$$

其中，F 为切削合力 (N)，m 为等效质量 (kg)，a 为加速度 (m/s^2)，c 为阻尼系数 ($N \cdot s/m$)，v 为振动速度 (m/s)，k 为刚度系数 (N/m)，x 为位移 (m)。通过对上述参量的动态监测与大数据建模，感知系统对棒料加工过程中的异常工况形成快速响应机制，为后续人工智能赋能的设备数字化升级奠定数据基础。

人工智能赋能的设备数字化升级

在智能感知体系持续输出多维数据流的条件下，深度

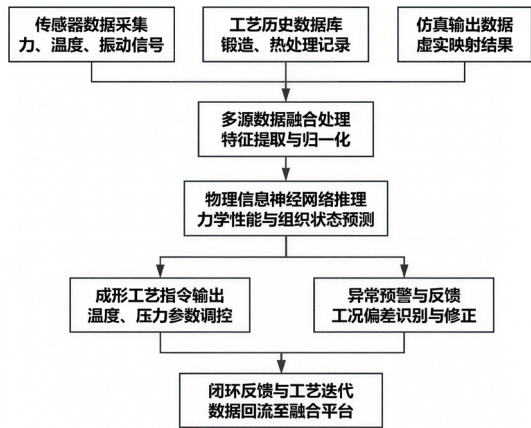
卷积神经网络视觉检测模块被部署到加工产线的关键工位处，针对棒料表面裂纹、尺寸偏差及微观组织异常等特征开展自动识别与分类标注工作，以此取代传统的人工抽检环节。基于迁移学习策略训练出来的设备健康管理模型，通过对历史工况数据进行挖掘，构建出包含主轴、刀架及进给系统等核心部件的故障预判图谱，一旦捕捉到异常征兆即刻启动预警。模型以滚动窗口方式持续摄入新增工况数据，知识图谱会随着生产周期的推进而进行动态扩充，进而让故障特征库的覆盖范围随着运行时长不断延伸。与此同时，强化学习算法应用于刀具路径的自适应规划，依据棒料的材质特性和实时切削反馈来动态调整加工指令，赋予设备控制层一定程度上的自主决策能力。上述各个人工智能模块以工业互联网平台为载体完成集成部署，与设备物理层构成闭环交互架构，为元宇宙场景下切削工艺的虚实仿真提供可靠的数字化设备镜像。

元宇宙场景下的切削工艺仿真

依托数字化设备镜像构建的虚拟空间，棒料加工设备的几何模型、运动学参数及材料本构关系被同步映射到数字孪生引擎，与物理产线保持实时联动。针对切削深度、进给速率及刀具几何角度等工艺变量的多组组合方案，在虚拟环境中进行并行推演，有限元仿真内核负责计算各方案下棒料的应力分布、切屑形态及温度场演变规律。在仿真过程中，各方案的推演结果以可视化热力图形式呈现于虚拟工作台，工艺工程师能够对比不同参数组合下棒料内部的应力梯度分布情况，直观判定各方案的工艺合理性边界。扩展现实技术使工艺工程师得以第一视角进入虚拟加工场景，对刀具与工件接触界面的动态行为进行直观研判，以此弥补传统二维仿真界面在空间感知层面存在的不足，经虚拟环境筛选验证的工艺方案随后反馈到物理设备执行层，实现虚实数据双向流动闭环，推动切削工艺知识持续积累与迭代，为多源数据融合驱动的成形工艺调控提供前置仿真依据。

多源数据融合的成形工艺调控

在切削工艺虚拟仿真输出的结构化数据基础上，金属棒料成形工艺的精准调控进一步依托多源数据融合架构加以推进。如图 1 所示，整体调控流程涵盖数据采集、融合处理、



来源：浙江泽创机械有限公司

图1 多源数据融合成形工艺调控流程

模型推理及指令输出四个层级。各层级之间以工业互联网总线作为通道形成有序衔接，传感器阵列采集的切削力、温度及振动信号，与工艺历史数据库、虚拟仿真输出数据经工业总线汇聚之后，进入融合处理层完成特征提取与归一化操作，继而驱动物理信息神经网络对棒料成形过程中的力学响应与微观组织状态进行同步推理。推理结果分别向成形工艺指令输出端与异常预警端传递决策信号，前者将温度场与压力场的协同调控指令直接下发至设备执行层，后者对工况偏差进行实时捕捉与修正。两路输出最终汇入闭环反馈环节，将新生数据持续回流至融合平台，使成形工艺调控体系在长周期运行中具备稳定的自适应能力，为后续数字化效果的综合评估提供翔实的过程数据支撑。

表1 设备研发效能数字孪生量化评估结果

评估指标	数字化部署后	行业平均水平	评估结论
设备研发周期(月)	8.2	14.6	显著缩短
虚拟调试准确率(%)	96.3	78.5	明显高于均值
故障预判响应时效(min)	3.7	22.4	大幅提前预警
设备空载率(%)	4.1	12.8	有效管控空耗

来源：浙江泽创机械有限公司

棒料加工数字化效果综合评估

设备研发效能的数字孪生量化评估

在智能感知、人工智能赋能元宇宙仿真及多源数据融合等技术协同部署完毕之后，数字孪生平台针对金属棒料加工设备研发全周期的效能表现开展系统性量化评估。以典型汽车传动轴棒料智能加工项目为评估对象，依托数字孪生平台对设备研发周期、虚拟调试准确率及故障预判响应时效等核心指标进行追踪记录，在评估过程中同步引入设备空载率作为辅助性效能指标，以此全面反映数字化部署设备资源利用状态的影响，如表1所示。由表1可知，数字孪生平台部署后，汽车传动轴棒料加工设备的研发周期从行业均值14.6个月压缩至8.2个月，虚拟调试准确率达到96.3%，相

比行业平均水平高出17.8%，故障预判响应时效从22.4分钟缩短至3.7分钟，设备空载率也从12.8%降至4.1%。上述数据表明，数字孪生技术在设备研发效能的多维度评估当中，均展现出显著的量化优势，虚拟调试环节所积累的仿真数据与故障图谱为设备迭代设计提供可追溯的数据链路，有效支撑设备研发决策科学化转型。

表2 工艺优化前后棒料加工质量对比评估

质量指标	优化前	优化后	变化幅度
表面粗糙度 Ra (μm)	1.82	0.74	改善59.3%
尺寸合格率(%)	87.4	97.6	提升10.2pp
硬度均匀性偏差(HRC)	±3.6	±0.9	收窄75.0%
微观裂纹检出率(%)	6.8	1.2	下降82.4%

来源：浙江泽创机械有限公司

工艺优化前后的加工质量对比评估

在设备研发效能得到系统量化的基础上，棒料加工工艺优化前后的质量变化成为综合评估的核心维度，针对汽车传动轴棒料在锻造、热处理及成形各工序中的关键质量指标，依托多源数据融合平台对优化前后的检测数据进行系统整理。各工序的检测数据均经三次独立采样后取均值处理，以排除单次工况波动对评估结论的干扰，如表2所示。由表2可知，经过数字化工艺优化之后，棒料表面粗糙度Ra值从1.82 μm降至0.74 μm，改善幅度达59.3%，尺寸合格率从87.4%提升至97.6%，硬度均匀性偏差从±3.6 HRC收窄至±0.9 HRC，收窄幅度达到75.0%，微观裂纹检出率也从6.8%降至1.2%，综合对比数据显示，大数据感知、人工智能识别及多源数据融合调控技术协同介入，让棒料加工质量在表面完整性、尺寸精度及组织均匀性等多个核心维度呈现系统性改善，数字化工艺调控体系对棒料成形质量的稳定管控能力得到充分验证。

结束语

大数据感知、人工智能赋能、元宇宙仿真及数字孪生技术的协同应用，系统性地破解了金属棒料加工设备研发周期长、工艺参数调控精度不足等核心问题。智能感知体系的构建实现了设备状态的实时监控，虚实融合仿真环境显著降低了工艺试错成本，多源数据融合模型有效提升了成形与热处理工艺的稳定性。展望未来，随着“制造强国战略”的深入推进与工业互联网平台的持续完善，数字化技术将进一步向金属棒料加工全链条渗透，推动行业在绿色制造与高端智造双重目标下实现跨越式发展。

作者简介：张周屏 浙江泽创机械有限公司

责任编辑：徐培炎 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com