

智能制造模式下机械加工工艺的标准化研究

张佳樑

核工业理化工程研究院 天津 300180

摘要: 智能制造技术不断深入应用正深刻改变现代机械加工行业生产方式, 工艺标准化是确保智能制造价值充分发挥的基础保障。对智能制造背景下机械加工工艺标准化理论体系与实践方法进行系统性分析, 阐明工艺流程规范化、加工参数精细化、设备操作统一化等关键要素提升生产效能和产品质量内在逻辑, 研究证实构建标准化体系可显著减少人为操作偏差、加速产品交付进程、优化资源配置效率。还能借助数据实现工艺参数动态改进, 冶金等关键领域实际应用案例充分证明标准化在节约生产成本、延长设备使用周期等方面成效突出, 为智能制造持续发展奠定实践基础。

关键词: 智能制造; 机械加工工艺; 标准化体系; 工艺参数优化; 数据驱动

引言

全球制造业现在正处在以智能化为导向的重大转型阶段, 信息技术和制造技术深度融合推动生产方式根本性革新。机械加工作为制造业关键组成部分长期存在诸多难题, 像工艺参数不稳定、操作方法不一致、产品质量参差不齐等。这些问题明显阻碍了智能制造优势的全面释放。工艺标准化通过制定统一流程标准、参数规范和操作指南, 为智能装备提供可信赖的运行依据, 保障自动化设备在标准化框架下精确操作与高效配合。现阶段在智能制造背景下构建完善工艺标准化体系, 有效结合传统经验与数据驱动方法, 已成为增强制造业核心竞争力的关键任务。

一、智能制造模式下机械加工工艺标准化概述

(一) 智能制造技术发展与工艺标准化内涵

智能制造把物联网、大数据和人工智能等信息技术与传统制造工艺进行深度融合。以此推动生产流程开展数字化与智能化改造, 相关数据显示智能制造市场正在快速增长, 这促使制造业从依赖人工的模式向自动化模式转型。从经验导向转变为数据驱动, 数控机床、工业机器人以及智能传感器的广泛普及, 实现了加工过程的实时监控、动态调整以及自主优化。工艺标准化是借助建立统一的流程规范、参数标准和操作准则, 将碎片化的加工知识转化成可复制的标准体系。在智能制造的背景之下, 标准化不但涵盖切削速度、进给量与切削深度等参数的量化。还扩展到工艺路径规划、刀具选择、质

量检测等全流程管理, 为智能系统的精准运行提供依据, 是传统工艺经验和现代智能技术融合的关键桥梁。

(二) 工艺标准化的必要性与框架体系

在传统机械加工这个领域当中, 工艺参数的设定主要依赖操作人员个人经验。这就导致粗加工环节能源损耗率高达18%至22%, 并且关键尺寸的闭环反馈周期往往超过4个小时。目前企业所使用的设备里面, 68%仍然是2010年之前安装的模拟控制系统。不同设备之间的数据协议不统一形成了信息孤岛, 严重影响生产系统的整体协同能力。在智能制造的大背景之下, 数控系统必须依赖精确的量化指标, 而传统像“适当提高转速”这类模糊表述无法让机器直接执行控制指令。通过标准化能够明确把42CrMo4合金钢的加工参数设定成切削速度120m/min、进给速度0.3mm/rev、切削深度2mm, 使得系统能够自动组合出最优方案^[1]。工艺标准化体系包含三个层次, 流程规范层负责制定典型零件的加工流程及工序衔接方式, 参数标准层构建材料-刀具-参数的关联数据库, 执行控制层统一设备操作规范与质量检测标准并利用深度学习算法实时优化刀具磨损预测模型, 将识别精度从 $\pm 0.15\text{mm}$ 提高到 $\pm 0.03\text{mm}$, 进而实现对加工过程的精确控制。

该框架体系采用分层架构设计, 从底层流程规范到顶层知识管理, 实现工艺标准化的系统化构建与持续优化。根据文献[1]工艺优化研究框架整理绘制。

二、机械加工工艺标准化的技术应用

(一) 工艺流程标准化的实施路径

工艺流程标准化的要求是把传统依靠经验的操作转

变成可量化的规范工序，就拿液压支架顶梁制造来说该流程被划分成预处理、粗加工、半精加工、精加工和检验这五个标准化阶段。并且每个阶段都明确了输入输出标准以及质量监控要点，在粗加工阶段通过设定切削速度120m/min、进给量0.3mm/rev、切削深度2mm这样的固定参数组合来消除人为操作差异保障加工过程的一致性与可重复性，工艺文件采用数字化卡片形式将传统二维图纸升级为整合材料属性、刀具规格、切削参数及检测要求的多维数据集使其机器可读性提高90%从而为智能装备的自主运行创造标准化接口。工序间实行严格的交接检验制度并设置关键控制指标即粗加工后尺寸公差需控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 范围内、精加工最终精度须达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ，借助OPC UA协议实现设备间加工状态的实时数据共享让工序衔接等待时间由原来的47分钟缩短至8分钟。标准化流程的落地有效增强了生产的连贯性与整体效能。

（二）加工参数标准化的方法体系

加工参数标准化的关键要点是构建材料-工艺-设备关联模型，把切削速度、进给量、切削深度等独立参数整合为标准化体系，参数制定需要充分考虑材料特性方面的差异。像铝合金这类轻质材料适合采用高速切削方案，可将切削速度设定为300m/min且进给量取0.25mm/rev。以此兼顾加工效率与表面质量，高强度合金钢由于切削阻力较大，应把切削速度降低至120m/min并将进给量提升至0.3mm/rev^[2]。从而在加工效率与刀具寿命之间取得平衡，参数数据库采用的是三层结构，基础层会收录各类材料力学性能与工艺范围数据。以此作为参数选择的理论基础，应用层会依据零件几何特征、精度要求及表面质量需求，来制定具体的加工参数方案，优化层通过强化学习算法建立参数自适应决策模型。系统通过分析历史加工数据自动挖掘切削参数与表面质量、刀具寿命的内在关联。实现参数的智能化迭代优化，动态调整功能依赖在线监测系统，当切削力变化超出设定范围时系统自动进行参数微调，确保加工过程在标准体系内稳定运行。

（三）智能装备操作规程标准化

智能装备操作流程要实现规范化，得建立详尽操作指南与维护标准，以此减少设备运行随意性和不稳定性。数控机床启动前要核查相关清单，需确认工装夹具安装稳固、检查冷却液液位确保超过标准容量80%、验证气压供应稳定维持在0.6~0.8MPa范围内、检查电气系统连接是否完整，操作步骤需严格遵循。先接通主电源启动

控制系统，等自检程序完成显示正常状态后才可进行程序加载与参数设置，智能监测系统持续采集主轴负荷、切削温度、振动频率等核心运行数据。数据刷新频率为100Hz，数据超出正常范围时会自动发出预警，维护保养采用定期管理机制，每日检查润滑与冷却系统、每周清洁导轨并紧固零部件、每月更换润滑油并检测电气设备，预防性维护策略借助振动频谱分析和温度趋势监测提前发现潜在故障。标准化操作规程让设备平均故障间隔时间从200小时增加到350小时、使设备综合利用率提高15%、让产品不良率从3%下降至1.2%。

（四）质量检测与控制标准化

质量检测与控制实现标准化，形成包含检测方法、判定标准和数据分析的完整流程体系，检测技术依据特征类型来匹配选择，像尺寸精度检测选用三坐标测量设备。测量精度能控制在0.001mm，形位公差检测采用激光扫描技术，可完成复杂曲面的全方位测量，表面质量检测利用粗糙度轮廓仪。建立包含Ra、Rz等参数的多维评价体系，智能化质量预测系统采用卷积神经网络，构建多维质量分析模型。把实时检测数据同步上传至云端分析平台，通过X-R控制图与机器视觉技术联合保障加工过程稳定性。当监测到连续7个点持续位于中心线单侧或者连续3个点接近控制边界时，系统会自动启动预警机制并向操作终端发送提示信息，深度学习模型通过对大量加工数据深度分析，自主发现进给参数与工件表层残余应力间的非线性关联规律。为工艺参数优化提供科学依据，质量追溯系统运用二维码标识技术，完整记录零部件从原材料到成品全流程工艺参数与检测数据，将追溯时间从72小时压缩至2小时。

三、工艺标准化实施效果的评估分析

（一）典型行业应用案例分析

冶金行业作为重载加工领域典型代表，近年推行工艺标准化成效显著。以某大型钢铁企业来说，其在高炉冶炼环节建立系统化标准化管理体系，把焦炭、矿石及熔剂等原材料配比精确设定为3:5:2固定比例，还借助智能配料系统实现全程动态监控与精准调控。在温度控制方面，通过优化冶炼温度管控机制，成功将炉温稳定维持在1500~1600℃理想区间，让铁水合格率从原先92%显著提升至96%。在轧制工艺环节，针对45号钢种制定详尽标准化操作规范，具体有将加热温度精准控制在1200℃，把轧制速率严格维持在2m/s，且确保轧制压力稳定在1500吨水平。实施标准化措施后，钢板厚度偏

差控制效果显著改善，公差范围从 $\pm 0.5\text{mm}$ 精准收窄至 $\pm 0.2\text{mm}$ 。同时基于数字孪生技术的设备健康管理系统实现操作与维护规程标准化升级，使设备故障发生率从每月5次大幅降低至每月1次。综合数据显示该企业整体产品达标率从95%提升至98%，年度生产成本同比下降12%，充分证明标准化体系为企业带来显著质量提升与经济效益。

（二）生产效率与产品质量提升评估

推进工艺标准化使得生产效率得到大幅提高，规范化运作模式有效缩减各环节等待与协调时间。某机械制造企业产品交付周期从28天缩短到24天，生产敏捷性因此得到显著增强，设备综合效率（OEE）从68%提升至82%，成效源于标准化参数缩短设备调试周期和统一操作规范减少人为操作失误。材料利用率从85%提升到91%，精准工艺参数控制降低材料损耗与次品率让资源使用效率显著优化，产品质量稳定性通过工序能力指数（CPK）评估。标准化实施后关键尺寸CPK值从1.1提升至1.5使工序能力达优秀水平，标准化体系固定最优工艺参数消除人为经验差异对质量的影响。让批次质量一致性显著提高，返工率从8%降至2.5%直接减少了与质量相关的成本。市场反馈方面客户投诉率下降55%且产品交付准时率从88%提升至96%，稳定质量表现和可靠交付能力赢得客户信任，建立标准化体系提升企业市场认可度并增强行业竞争力。

（三）经济效益与成本控制评估

工艺标准化带来的经济价值主要体现在成本管控和生产效率双重优化上。在刀具管理这一块，通过统一技术参数，刀具耐用性提升到原来的2.1倍，相关采购开支一年节省了38%。在设备维护领域，预防性维护体系的实施让故障停机时长压缩了65%，紧急维修支出从年均120万元降到了42万元。人力资源培养周期大幅缩

短，新员工从入职到能独立上岗的时间从3个月优化成了6周，人均创造的经济效益提高了23%。质量控制环节成效十分突出，产品返工报废损失占销售收入的比例从4.8%下降到了1.6%。从投资效益角度来说，企业为推进标准化投入550万元用于设备升级、数字化系统建设以及员工技能培训，凭借明显的降本增效成果，投资回本周期只需1.8年，三年累计实现净利润1650万元，投入产出比达到1:3，充分证明该标准化模式有突出的经济价值和可持续竞争优势。

结语

在智能制造的大背景之下，机械加工工艺进行标准化系统化实施，为制造业高质量发展提供了新探索方向。该标准化体系依靠数据赋能与算法改进来持续优化工艺参数，实践表明能让生产效率提高15%以上且将产品缺陷率控制在1.5%以下。后续研究需要重点关注三个主要领域，分别是建立覆盖多设备多环节的协同标准化框架、强化强化学习联邦学习等人工智能技术在参数自优化中的运用、推动数字孪生技术与标准化体系进行有机结合。随着边缘计算5G等技术不断日益完善，标准化体系会朝着智能灵活自主方向持续发展，为打造世界级智能制造体系奠定坚实有力基础。

参考文献

- [1] 唐佳. 基于智能制造的矿业机械加工工艺优化研究[J]. 中国金属通报, 2025, (05): 106-108.
- [2] 韦再峰. 现代机械加工中智能制造技术的应用与技术分析[J]. 模具制造, 2025, 25(01): 187-189. DOI: 10.13596/j.cnki.44-1542/th.2025.01.062.
- [3] 李小亮. 智能制造模式下机械加工工艺的标准化研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 46-48.