

# 机械制造工艺规程编制的发展趋势与展望

蒋 通

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215000

**摘要:** 机械制造工艺规程编制正经历数字化、智能化、协同化与绿色化变革。通过三维建模与虚拟规划融合缩短开发周期, 依托数据集成实现全生命周期管理, 借助智能化技术优化工艺决策与参数调整。协同化体系打破部门与供应链壁垒, 模块化编制提升复用效率。绿色化发展聚焦低能耗、环保工艺及资源循环利用。本文系统梳理发展趋势, 为企业工艺规程编制转型提供理论支撑与实践路径。

**关键词:** 机械制造工艺规程; 数字化集成; 智能化技术; 协同化编制; 绿色化发展

引言: 机械制造工艺规程编制是产品制造的关键环节, 直接影响产品质量、生产效率及成本。传统编制方式依赖经验, 存在周期长、灵活性差等问题。随着数字化、智能化技术发展, 机械制造工艺规程编制迎来变革契机。数字化技术实现工艺信息可视化与数据集成, 智能化技术提升工艺决策科学性, 协同化与模块化构建高效编制体系, 绿色化导向推动可持续发展。探索其发展趋势与路径, 对提升机械制造竞争力具有重要意义。

## 1 数字化驱动的机械工艺规程编制转型

### 1.1 机械三维工艺建模与虚拟工艺规划融合

三维工艺建模通过构建产品几何模型与工艺信息的关联体系, 为虚拟工艺规划提供可视化载体<sup>[1]</sup>。传统二维图纸难以完整表达复杂曲面、空间装配关系等关键信息, 而三维模型可直观呈现零件几何特征、公差要求及表面质量参数。例如, 某航空零件包含27个复杂曲面与15处空间装配关系, 采用三维建模后, 工艺规划时间从45小时缩短至12小时。虚拟工艺规划依托三维模型开展工艺路线仿真, 通过模拟切削路径、干涉检查及加工变形预测, 提前识别潜在工艺缺陷。这种融合模式将工艺验证环节从物理样机阶段前移至设计阶段, 显著缩短工艺开发周期。三维建模与虚拟规划的集成需解决多软件平台数据兼容性问题, 通过中间格式转换或统一数据模型实现几何信息与工艺知识的无缝传递。虚拟仿真结果可驱动三维模型动态修正, 形成“设计-仿真-优化”的闭环迭代机制, 最终生成包含完整加工参数的数字化工艺模型。

### 1.2 机械工艺数据的数字化集成与全生命周期管理

工艺数据集成需构建覆盖设计、制造、检测、维护等环节的统一数据平台。该平台以产品数据管理系统为核心, 整合设备状态数据、刀具磨损数据、质量检测数据等多源异构信息。通过标准化数据接口与语义映射

技术, 实现不同系统间的数据互联互通。全生命周期管理强调工艺数据的动态更新与价值挖掘, 在产品阶段嵌入工艺知识库, 为工艺方案选择提供数据支撑; 在制造阶段实时采集加工参数, 通过数据分析优化工艺路线; 在维护阶段利用历史工艺数据预测设备故障模式。这种管理模式突破传统工艺文件孤立存储的局限, 形成覆盖产品全生命周期的工艺数据资产, 为工艺持续改进提供量化依据。

### 1.3 机械数字化工艺文件的动态生成与协同共享

数字化工艺文件以结构化数据替代传统纸质文档, 通过工艺模板库与规则引擎实现自动化生成。系统根据零件特征自动匹配加工方法、设备类型及切削参数, 生成包含工序图、刀具清单、检验规范等要素的标准化工艺文件。动态生成机制支持工艺文件的实时修订与版本控制, 当设计变更或工艺优化时, 系统可自动追溯关联文件并推送更新通知。协同共享功能依托企业级云平台实现跨部门、跨地域的工艺知识传递, 设计人员、工艺工程师及生产人员可基于统一平台开展工艺评审与在线批注。这种模式消除信息孤岛, 确保工艺知识在企业内部的快速流转与有效沉淀, 为智能化制造奠定数据基础。

## 2 智能化技术在机械工艺规程编制中的深度应用

### 2.1 基于知识工程的机械工艺决策智能化

知识工程通过构建结构化工艺知识库, 将分散的工艺经验、标准规范及专家决策逻辑转化为可复用的智能资源。工艺知识库涵盖材料特性、加工方法、设备能力等多维度数据, 采用本体论方法建立知识关联模型, 实现工艺方案的快速检索与匹配。决策智能化系统依托知识推理引擎, 根据零件几何特征、精度要求及生产条件, 自动生成候选工艺路线并评估可行性。推理过程融合规则推理与案例推理, 既遵循标准化工艺规范, 又能结合历史成功经验处理非常规问题。知识更新机制支持

新工艺知识的动态注入,通过人工标注与机器学习协同完成知识库的迭代优化,确保决策系统始终反映最新工艺水平。这种模式将工艺设计从经验驱动转变为数据与知识双驱动,显著提升工艺方案的科学性与一致性。

### 2.2 机器学习驱动的机械工艺参数优化与自适应调整

机器学习算法通过分析历史加工数据建立工艺参数与加工质量之间的非线性映射关系,突破传统经验公式对复杂工艺场景的适应性局限。参数优化模型采用遗传算法、粒子群优化等智能优化技术,在多约束条件下搜索最优参数组合,平衡加工效率、表面质量及刀具寿命等目标。自适应调整系统集成在线监测模块,实时采集切削力、振动、温度等工艺信号,通过时序数据分析识别加工状态漂移<sup>[2]</sup>。当检测到异常时,系统基于预训练模型快速生成调整策略,动态修正切削速度、进给量等关键参数。这种闭环控制机制使工艺参数能够主动适应材料批次差异、设备磨损等扰动因素,维持加工过程的稳定性。模型训练数据来源于企业级工艺数据库,覆盖不同材料、设备及加工场景,确保优化结果的泛化能力。

### 2.3 机械工艺过程的智能感知与实时反馈修正

智能感知系统部署多类型传感器网络,全面采集加工过程中的几何、物理及化学信号。几何感知通过激光扫描、视觉检测等技术实时获取工件尺寸与形位误差,物理感知利用力传感器、声发射传感器监测切削状态,化学感知则关注切削液浓度、润滑效果等环境参数。数据融合模块对多源异构信号进行时空对齐与特征提取,构建反映工艺过程综合状态的数字镜像。反馈修正机制基于感知数据与工艺模型的偏差分析,通过边缘计算节点快速生成修正指令。对于简单偏差,系统直接调整数控程序参数;对于复杂异常,则触发远程专家系统进行协同诊断。这种实时响应能力使工艺过程具备自我调节能力,有效抑制质量波动,提升加工一致性。感知设备的精度与可靠性直接影响修正效果,需通过硬件冗余设计与软件滤波算法提升系统鲁棒性。

## 3 协同化与模块化的机械工艺规程编制体系构建

### 3.1 跨部门协同机械工艺规划模式的形成

跨部门协同规划通过打破设计、工艺、生产等职能壁垒,构建以产品为中心的工艺决策共同体。传统串行模式中,工艺部门需等待设计定稿后开展工作,导致周期冗长且信息衰减。协同模式下,设计阶段即引入工艺人员参与可制造性分析,利用三维模型开展虚拟装配与干涉检查,提前识别设计缺陷。工艺规划环节整合生产资源数据,结合设备负荷、刀具库存等现实约束生成可行方案。生产部门反馈的加工难题可逆向驱动设计优

化,形成“设计-工艺-生产”的闭环迭代。协同平台支持多角色在线协作,通过权限管理与版本控制确保数据一致性,工艺文件审批流程由线下流转转为线上电子审批,显著提升规划效率。这种模式要求企业重构组织架构,建立跨职能团队并制定协同工作标准,使工艺规划从部门级活动升级为企业级能力。

### 3.2 模块化机械工艺规程的标准化与复用

模块化编制将复杂工艺分解为独立工艺单元,每个单元包含完整加工信息与接口规范。通过定义标准化的工艺模块库,企业可沉淀通用加工方法、典型工序组合等知识资产。模块划分依据零件特征相似性原则,例如将轴类零件加工拆分为车削、磨削、热处理等模块,每个模块明确输入输出参数及质量标准。标准化工作涉及模块编码体系、数据接口协议及版本管理规则,确保不同模块间可无缝拼接。复用机制支持快速组合模块生成新工艺规程,系统根据零件特征自动匹配候选模块,工艺人员仅需调整局部参数即可完成定制化编制。模块更新时,关联工艺文件可批量同步修订,避免重复劳动。这种模式缩短了新工艺开发周期,特别适用于多品种、小批量生产场景,同时降低对经验工艺人员的依赖。

### 3.3 供应链协同下的机械工艺规程一体化编制

供应链协同将工艺编制范围延伸至原材料供应商与外协加工商,构建覆盖全价值链的工艺知识网络。上游供应商参与早期工艺规划,提供材料可加工性数据,帮助优化切削参数与刀具选择。外协加工商的设备能力、工艺水平等数据被纳入工艺可行性评估体系,确保外协工序质量可控。一体化编制平台支持供应链各方实时共享工艺数据,通过加密传输与权限管控保障信息安全。工艺文件编制时,系统自动关联供应商工艺规范,生成包含外协要求的完整规程。供应链异常事件触发工艺动态调整,例如原材料批次变更时,系统快速生成适配新材料的加工参数并推送至相关节点。这种模式要求建立供应链工艺数据交换标准,通过数字化手段消除信息孤岛,使工艺规程成为连接上下游的技术纽带,提升整体供应链响应速度与柔性。

## 4 绿色化导向下机械工艺规程编制的创新发展及未来展望

### 4.1 机械低能耗工艺路线的规划与优化

低能耗工艺路线规划以能量利用效率为核心优化目标,通过分析加工过程中的能量流动规律,识别高能耗环节并实施针对性改进<sup>[3]</sup>。切削参数优化是关键手段,通过建立切削力、切削功率与进给量、切削速度的数学模型,在保证加工质量的前提下求解最小能耗参数组合。

加工方法选择需综合考虑设备功率特性与材料去除率,例如采用高速加工技术缩短单件加工时间,或选用干式切削替代湿式切削以减少切削液循环能耗。工艺路线排序优化则通过仿真分析不同工序组合的能量累积效应,优先安排能耗较低的工序以平衡设备负荷。能量回收技术集成进一步拓展节能空间,如将主轴制动能量、切削热能转化为辅助动力源。低能耗规划需与生产节拍、设备能力等约束条件协同考量,通过多目标优化算法生成兼顾效率与能耗的工艺方案,为绿色制造提供量化决策支持。

#### 4.2 环保型机械工艺方法的集成与应用

环保型工艺方法聚焦减少有害物质排放与资源消耗,通过技术替代与过程控制实现清洁生产。干式切削技术通过优化刀具几何角度与涂层材料,在无切削液条件下实现稳定加工,彻底消除切削液污染风险。准干式切削采用微量润滑(MQL)技术,将压缩空气与纳米级润滑颗粒混合喷射至切削区,润滑效果接近湿式切削但用量减少90%以上。低温切削技术利用液氮或冷风冷却工件与刀具,降低切削温度以减少刀具磨损,同时避免切削液高温分解产生的有害物质。工艺方法集成需建立环保技术评估体系,从加工质量、成本、环境影响等维度综合比选。环保指标纳入工艺规程编制规范,明确切削液种类、浓度、更换周期等参数限制,推动工艺方法向绿色化方向迭代升级。

#### 4.3 资源循环利用导向的机械工艺规程设计

资源循环利用设计将材料利用率、废弃物再生价值等指标纳入工艺规划框架,构建闭环制造体系。工艺规程中明确边角料分类标准与回收路径,通过优化排样算法提升板材利用率,例如采用嵌套排样技术将不同零件组合切割以减少余料。加工余量精准控制是另一重点,通过三维测量与数字孪生技术建立零件几何误差预测模型,动态调整加工余量以避免过度切削。废弃物再生工艺集成方面,金属切屑通过压块、重熔等工序转化为再生原料,切削液经过滤、分离后实现循环使用。工艺规程需标注可回收材料标识与再生处理要求,指导生产现场实施资源分类管理。循环利用设计还需考虑再生材料

性能衰减问题,通过调整加工参数补偿材料强度降低等影响,确保再生材料应用不影响产品质量,最终形成“设计-加工-回收-再制造”的全生命周期资源高效利用模式。

#### 4.4 机械制造工艺规程编制的未来展望

未来机械制造工艺规程编制将朝着技术深度融合与体系创新演进的方向发展。数字孪生技术将全面融入工艺规划流程,实现工艺模型与物理加工过程的实时映射,支撑工艺方案的动态优化与精准调控。知识自动化技术的持续成熟将推动工艺决策向自主化方向发展,减少对人工经验的依赖,提升工艺编制的效率与质量稳定性。跨领域技术融合将拓宽工艺规程编制的边界,生物制造、超精密加工等前沿技术的引入将催生新型工艺规划方法。工艺规程编制将更加注重全价值链的协同优化,从单一企业内部的流程优化转向产业链上下游的技术协同与资源共享。绿色化目标将全面贯穿工艺规划的各个环节,低能耗、低排放、高资源利用率将成为工艺方案评估的核心指标,推动机械制造行业向可持续发展模式转型。

#### 结束语

机械制造工艺规程编制的数字化、智能化、协同化、模块化及绿色化发展,是行业适应市场变化与技术进步的必然选择。这些创新实践优化了编制流程,提升了工艺方案的科学性与可行性,促进了企业内外部的信息流通与资源共享,为机械制造高质量发展提供了有力支撑。展望未来,随着前沿技术的持续突破与应用深化,工艺规程编制将不断突破现有边界,催生更多创新模式与方法,企业应紧跟趋势,积极应用新技术,推动工艺规程编制迈向更高水平。

#### 参考文献

- [1]杨秋玲.绿色制造工艺技术农业机械加工中的发展现状及前景趋势[J].河北农机,2023(10):39-41.
- [2]黄梁.制造业智能化发展中的机械加工工艺分析[J].模具制造,2024,24(12):197-199.
- [3]刘洁.数字化机械加工工艺在制造业智能化发展中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(5):100-102.