

探讨数控加工中心刀具路径优化及自动化编程的技术

王富成 汪道成 黄亚飞

富鼎电子科技(嘉善)有限公司 浙江 嘉兴 314000

【摘要】：数控加工中心在现代制造体系中地位关键，刀具路径规划直接影响加工效率与工件质量，分析刀具路径优化与自动化编程技术，研究各类路径生成策略对加工时间、刀具磨损及表面质量的作用，依托自动化编程方法，完成复杂零件加工路径智能生成与动态调整，增强加工连续性与稳定性。运用几何特征识别与参数化建模，提升编程效率并降低人工介入，减少误差累积，多轴联动与高速加工场景中，路径优化与自动化编程结合，推动加工过程向智能化、精细化发展，为制造系统整体性能提升提供技术支持。

【关键词】：数控加工中心；刀具路径优化；自动化编程；加工效率；智能制造

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.056

引言

复杂零件加工需求不断提升，加工精度与效率面临更高标准，传统数控编程多依靠经验，多曲面与高精度加工场景下，路径规划难度加大，加工时长与误差控制压力上升，高速切削与多轴联动技术持续进步，刀具路径合理性对加工质量的影响愈发突出，自动化编程技术为复杂零件加工开辟新路径，依托几何特征提取与算法驱动，路径生成效率更高，兼具智能化特征。兼顾加工质量，实现路径规划与编程流程的协同优化，是工程技术领域的研究重点，也为制造领域数字化转型提供有力支撑。

1 刀具路径规划中的关键矛盾

1.1 复杂曲面加工路径难度提升

复杂曲面零件在数控加工中心应用广泛，几何形态包含自由曲面、多曲率变化与局部密集特征，刀具路径规划难度随之提高，曲面整体连续性与局部细节存在差异，路径生成需兼顾平滑过渡与精细加工要求，多重约束提升路径计算复杂度^[1]。多轴联动加工时，刀具姿态与进给方向相互关联，设置不当易引发干涉或过切，曲面曲率突变区域易出现路径分布不均，影响表面成型效果，传统经验式编程无法同时适配效率与精度要求，需依靠算法实现精细化控制，满足高精度复杂加工需求。

1.2 路径冗余与加工效率冲突

刀具路径设计需平衡密度与加工效率，路径密度偏高可改善表面质量，但会延长加工时长、增加设备负载，拉低生产效率，路径密度偏低则易出现材料残留或粗糙度超标，影响工件成型效果，实际加工常存在重复切削与空行程等冗余路径，造成时间损耗与刀具损耗加剧。高速加工场景下，此类矛盾更为明显，路径优化需结合进给速度、加减速规则与机床动态性能，减少频繁启停造成的效率损耗，控制无效路径占比，在保障加工质量的基础上实现效率平衡，是路径规划需解决的核心问题，可通过优化算法与路径策略实现调控。

1.3 人工编程误差累积问题

人工数控编程多依托操作人员经验，复杂零件加工过程易出现误差累积，路径定义、参数配置与刀具选型等环节均可能产生偏差，多次叠加后直接影响加工成型效果，高精度加工场景中，细微偏差可转化为尺寸误差或表面缺陷，降低工件合格比例，人工编程缺少统一标准，不同人员的规划思路与参数设置存在差异，加工质量稳定性不足。零件结构复杂度提升后，人工处理多轴联动与复杂几何特征的效率降低，编程周期延长，无法适配现代制造的快速响应需求，误差累积制约加工质量与生产效率，促使路径规划逐步向自动化与智能化方向转型。

2 路径优化方法与实现机制

2.1 基于几何特征的路径生成

复杂零件加工里，几何特征识别是刀具路径优化的重要依托，对工件模型开展分区与特征提取，可对孔、槽、曲面等各类结构分类处理，形成更具针对性的加工路径，引入几何特征后，路径规划不再仅围绕整体轮廓开展，可依照局部结构特点开展精细化设计，增强路径适配能力，规则区域可选用标准化路径方案，提升编程效率，自由曲面区域需结合曲率变化完成路径动态调整，保障加工连续性与表面成型质量^[2]。参数化建模与特征映射技术在此环节发挥重要作用，让路径生成具备突出的自动化水平，构建几何特征与加工策略的对应关系，路径规划可快速适配结构变化，缩减重复计算与人工操作，提升编程效率与加工稳定性。

2.2 高速加工中的路径平滑处理

高速加工场景下，刀具运动的连续与平稳程度直接作用于加工质量与设备运行状态，路径出现尖角、突变或间断点位，会引发机床频繁减速乃至停顿，降低加工效率并增大机械冲击，路径平滑处理可有效改善高速加工表现，对原始路径开展曲线拟合与优化，让刀具运动轨迹更为连贯顺畅，样条曲线插值、圆弧过渡与加减速控制优化等方式，均可减弱路径突变带

来的负面影响。实际应用时，路径平滑既要兼顾几何连续性，也要匹配机床动态特性与控制系统响应能力，保障运动过程协同统一，经过平滑处理的路径可减少振动与冲击，提升加工表面质量，延长刀具使用周期，让加工过程保持稳定可靠。

2.3 多轴联动下的路径协调控制

多轴联动加工赋予复杂零件更高的加工自由度，也对刀具路径控制提出更严苛的要求，多轴加工环境中，刀具位置与姿态需同步调节，各轴配合效果直接决定加工精度与运行安全，路径规划除空间轨迹设计外，还需整合刀具倾角、进给方向与干涉规避等要素，提升路径控制复杂度。引入运动学模型与实时控制算法，可实现各轴运动协同，保证刀具加工过程中维持合理姿态，曲面加工时，刀具姿态变化与曲率分布关联紧密，需动态调整路径参数，防止出现局部过切或欠切，协调控制需结合机床结构特点与控制系统性能，对路径开展优化分解，让各轴运动更为平缓。

3 自动化编程技术的融合路径

3.1 参数化建模与编程集成

参数化建模技术可为数控加工自动化编程提供有效支撑，通过对几何尺寸、结构特征及加工参数做变量化设置，模型可依据设计需求完成快速变更，编程系统可直接提取模型内的参数信息，完成路径生成与加工策略的自动匹配，缩减重复建模与手动编程的工作量^[9]。参数间的关联特性可简化复杂零件的修改与优化流程，关键尺寸变动后，对应路径与加工参数可同步更新，规避多次调整产生的误差累积，搭配数据库技术，可完成典型加工特征与对应路径规则的存储及调取，提升编程流程的复用性，这一模式可提升编程效率，保障加工过程的一致性与稳定性，在复杂结构与多品类生产场景中优势显著。

3.2 智能算法驱动的路径生成

计算技术持续发展，智能算法逐步融入刀具路径生成环节，通过整合加工条件与几何特征信息，完成路径规划的自主判定，依托优化算法生成路径，可在加工时长、刀具使用寿命与表面成型质量等多目标约束下实现平衡调控，优化路径方案合理性。引入机器学习手段后，系统可从历史加工数据中总结规律，持续优化路径策略，提升对复杂加工场景的适配性，复杂曲面加工时，智能算法可依据曲率变动自动调节路径间距与进给方案，提升加工精细度与作业效率，算法驱动的路径生成可降低对人工经验的依赖，规范编程流程，为实现自动化加工提供技术支撑。

3.3 减少人工干预的编程模式

自动化编程的核心发展方向为降低人工操作依赖，提升编程效率与稳定性，系统整合特征识别、路径规划与参数配置等功能后，可在低人工参与度下完成核心编程工作，操作人员仅需完成基础参数设定与结果核验，系统便可自动生成完整加工

程序，大幅缩短编程周期，降低人为因素造成的加工波动，复杂零件加工时，自动化编程可快速适配设计变更，减少反复修改造成的时间损耗。构建标准化流程与规则库，可提升不同加工任务间的执行一致性，助力整体生产效率提升，软件系统与控制技术持续升级，编程环节逐步向智能化、集成化迈进，优化加工准备环节的效率与可靠性。

4 优化路径与编程协同方式

4.1 路径与加工参数动态匹配

刀具路径与加工参数联系紧密，路径合理性需与进给速度、切削深度、主轴转速形成协同，实际加工中，不同区域几何特征与材料去除量存在差异，单一参数无法适配全程加工，动态匹配策略可依据路径位置与局部加工状态，实时调整参数，适配复杂结构变化^[4]。曲率较大或特征突变区域，适当降低进给速度保障稳定；平缓区域可提高切削效率，缩短加工时长，匹配过程依托路径与参数的数据关联，编程系统自动调用调整参数，减少人工操作，动态匹配能提升加工质量，降低刀具负荷波动，保持加工平稳，增强整体加工性能。

4.2 加工稳定性与精度控制策略

加工稳定性与精度是数控加工质量的核心，二者与刀具路径、编程策略密切相关，路径规划需兼顾机床动态响应能力与切削受力变化，维持刀具平稳运动，路径急剧转折或速度突变易引发振动，影响表面质量与尺寸精度，优化路径结构与控制策略，可减少加工不稳定因素。采用平滑过渡减少路径突变，结合加减速控制，保证刀具运动连续，精度控制需依托误差补偿机制，修正机床误差与热变形，提升加工准确性，编程阶段将稳定性与精度控制融入路径设计，增强加工可控性，实现高质量加工目标。

4.3 刀具磨损与路径调整关系

刀具加工中承受持续切削负荷，磨损状况直接影响加工质量与路径执行效果，使用时间延长会导致刀口钝化、加工力增大，进而降低表面质量，甚至产生尺寸偏差，此时单一固定路径无法适配刀具状态变化，需通过路径调整维持加工稳定，路径与刀具磨损相互影响，监测刀具状态可修正路径参数，如调整切削深度、改变进给策略，减轻刀具负担。磨损严重区域可优化路径分布，避免重复切削带来的额外损耗，编程系统结合刀具状态动态调整路径，能延长刀具寿命，提高加工可靠性，这种关联体现路径优化与实际加工条件的紧密结合，让加工更灵活可控。

5 加工性能提升的综合表现

5.1 加工效率与时间缩减分析

数控加工中心运行中，加工效率与时间管控直接影响生产能力与成本控制，刀具路径优化与自动化编程相结合，可精简

加工流程,减少空行程与重复切削,缩短整体加工周期,合理规划路径可让刀具运动轨迹保持连续,机床加减速过程更为平顺,降低频繁变速产生的时间损耗,加工参数动态匹配可让切削过程保持较佳状态,提升单位时间材料去除率^[5]。自动化编程可大幅压缩编程准备时长,快速生成复杂零件加工程序,减少生产等待时长,多任务加工时,路径与工序衔接更为顺畅,降低工序切换产生的时间消耗,加工效率提升既体现在单件工件加工速度上,也体现在生产节拍优化与设备利用率提升,让加工系统运行更为高效。

5.2 表面质量与精度改善效果

刀具路径优化可直接作用于工件表面质量与加工精度,合理的路径设计可让刀具在加工中保持稳定接触,减少路径不连续或突变引发的振动,提升表面光洁度,复杂曲面加工中,优化路径间距与走刀方式可降低残留高度,让加工表面更为均匀,路径与机床动态性能相匹配,配合路径平滑处理,可减少机床运动误差对加工结果的影响,强化尺寸控制效果。自动化编程在参数设定与路径生成上一致性更高,可弱化人为误差对精度的干扰,提升批量加工工件质量稳定性,刀具磨损状态与路径调整相互配合,可维持加工质量稳定,避免刀具性能下降引发表面缺陷。

5.3 制造过程的智能化发展趋势

数控加工技术正持续向智能化方向发展,刀具路径优化与

自动化编程的融合提供了重要支撑,依托数据驱动与算法应用,加工过程可依据实际工况完成自适应调整,让路径规划与加工参数更贴合现场需求,自动化编程系统集成特征识别、路径生成与参数优化功能,逐步构建具备自主决策能力的加工支撑体系。加工数据采集与反馈机制可帮助系统分析刀具状态、加工负荷与设备运行情况,实现路径与参数的动态优化,制造模式逐步脱离人工经验主导,转向数据与算法为核心的运行方式,各加工环节协同性持续提升,技术持续升级后,数控加工系统应对复杂零件加工的能力显著增强,生产过程更为高效稳定,智能化特征更为突出。

6 结语

数控加工中心刀具路径优化与自动化编程相结合,加工过程在效率、精度及稳定性上均有明显提升,针对路径规划中的核心问题,运用几何特征识别、路径平滑处理与多轴协调控制等技术,可优化路径设计,适配复杂零件加工要求,自动化编程技术的应用,降低了编程环节对人工经验的依赖,提高加工一致性与响应效率。路径与加工参数相互配合,加工过程更为平稳,刀具运行状态得到管控,加工质量获得稳定保障,路径优化与自动化编程的整合,优化了单一加工环节表现,也推动制造系统运行模式转变,助力数控加工向高效化、精细化方向持续发展。

参考文献:

- [1] 赵国宏.数控卧式加工中心齿轮齿根裂纹焊接修复技术研究[J].焊接技术,2025,54(08):78-81+86.
- [2] 伍贤洪,巫瑞智.基于波搜索算法的数控加工中心可靠性优化分配研究[J].机床与液压,2025,53(10):50-57.
- [3] 王秀珍,高延武,郑立波.大数据分析在数控加工中心设备维护中的应用研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(05):94-96.
- [4] 钟先煌.旋转超声辅助岩板加工工艺及其刀具路径优化的研究[D].广东工业大学,2024.
- [5] 司徒风云.数控深孔钻削的挑战与刀具路径优化策略[J].农业技术与装备,2024,(02):27-29.