

# 复杂零件数控加工工艺路线优化与刀具路径规划研究

闵致玮

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西西安 710089

**摘要:** 本文聚焦复杂零件数控加工领域中工艺规划与路径规划的协同优化问题展开系统性研究。研究过程中,通过搭建工艺路线决策模型并结合智能优化算法的应用,实现了对工序序列与加工参数的高效寻优;同时,针对刀具路径生成、优化及仿真验证等核心技术环节展开深入探究与分析。在此基础上,研究进一步提出工艺与路径的集成优化框架,选取典型加工案例开展实证分析,验证了该框架在提升加工效率、保障加工质量方面的实际效用与工程应用价值,最终为复杂构件的高性能数控加工打造了一套系统化的解决方案。

**关键词:** 复杂零件; 数控加工; 工艺路线优化; 刀具路径规划

## 引言

在高端制造领域对复杂零件加工精度与生产效率的要求持续提高的背景下,数控加工工艺路线的优化设计与刀具路径的科学规划,已成为制约加工水平提升的关键瓶颈问题。目前,相关研究虽在工艺参数细化优化、智能算法实践应用以及路径规划技术革新等方面取得了一定突破,但在工艺路线与刀具路径的协同优化层面仍存在明显短板,这一问题直接限制了整体加工效能的进一步提升。基于此,本文以突破这一技术瓶颈为目标,通过构建科学的工艺路线决策模型、研发适配的优化算法,并深度集成刀具路径规划技术,系统探索二者协同优化的综合应用框架,进而实现复杂零件加工全局效率与加工质量的双重提升,同时结合实际加工案例验证所提方法的可行性与工程应用有效性。

## 一、复杂零件数控加工工艺路线优化理论基础

### (一) 数控加工工艺路线概述

数控加工工艺路线是结合零件的结构特征、技术指标要求以及企业现有生产资源,对加工环节中的工序内容、工序先后排布顺序、工件装夹方式与加工基准选取等核心要素进行系统性规划后形成的专业技术文件。这份文件明确了从零件毛坯到成品的整套加工流程,是保障加工质量达标、加工效率稳定以及加工成本可控的核心技术依据。针对结构复杂的零件来说,工艺路线设计的合理性会直接作用于加工变形程度、切削加工效率以及刀具损耗速率等关键加工指标,它不仅是衔接产品设计环节与实际制造环节的重要枢纽,更是开展后续数控加工优化研究工作的逻辑出发点。

## (二) 工艺路线优化的数学模型

工艺路线优化工作的核心逻辑,在于把实际的工艺规划问题转化为可通过数值计算求解的数学问题。在具体操作中,研究人员通常会将加工时间最短、加工成本最低或加工质量最优等实际生产诉求设定为优化目标函数,同时把机床的性能参数、刀具的使用寿命、工序之间的几何约束关系以及工艺执行的优先级顺序等实际生产中的限制条件纳入考量,以此构建起多目标优化的数学模型。这一数学模型能够借助精准的数学语言,清晰刻画各类工艺要素之间的复杂关联,将现实中具象的工程问题抽象为在特定解空间内搜寻最优解或满意解的数学任务,进而为后续运用智能优化算法开展自动化寻优运算,提供了坚实的理论支撑与完整的计算框架体系。

## (三) 工艺路线优化的算法

要对前文构建的复杂数学模型进行有效求解,就需要依托高效可靠的优化算法作为支撑。在这一过程中,传统的精确算法受限于自身特性,面对工艺路线优化中普遍存在的组合爆炸问题时往往难以高效应对,因此当前相关研究领域已将元启发式智能算法作为核心求解工具,这类算法的典型代表包括遗传算法、模拟退火算法以及蚁群算法等。这些智能算法的核心优势在于,能够通过模拟自然界中的各类现象(如物理退火过程)或生物群体的智能行为(如蚁群觅食的协作机制),在规模庞大的工艺序列解空间中开展高效的全局搜索与寻优运算。

## 二、复杂零件数控加工工艺路线优化方法

### (一) 工艺参数优化

工艺参数优化的核心目标,是针对具体加工任务确定切削速度、进给量、切削深度等核心参数的最优组合,

实现加工效率、成本与质量的协同提升。传统静态优化方法存在明显局限，难以适配加工中刀具磨损这类动态变化的因素。近年来，深度强化学习等智能技术逐渐应用于该领域，其核心思路是将参数优化问题转化为马尔可夫决策过程，让系统可依据刀具磨损量等实时状态动态调整参数<sup>[1]</sup>。通过智能体与加工环境的持续交互，这种方法能学习形成适配刀具性能退化的优化策略，有效提升加工过程的智能化程度与整体效能。

## （二）工艺路线决策模型

工艺路线决策模型的核心价值，在于将复杂且多维度的工艺规划问题，转化为逻辑清晰、层次分明的结构化决策框架。在模型构建过程中，会先明确工序内容、制造资源属性、零件几何特征等工艺规划的关键要素，深入剖析各要素间的依存、制约等关联关系，进而搭建起覆盖所有可行工艺路线的完整解空间。为精准传递工序之间的优先执行顺序与内在逻辑联系，这类模型常借助矩阵、有向图等数学工具进行具象化呈现——比如用矩阵中的数值量化工序关联强度，以有向图的节点与箭头直观展示工序流转逻辑。作为后续优化算法直接作用的核心对象，该模型为系统性评估不同工艺方案的可行性、客观比较各方案的优劣，以及最终筛选出最优工艺路线，提供了统一的逻辑基准和标准化数据结构，更是推动工艺规划从传统经验驱动的主观决策，迈向模型支撑的科学化、智能化决策的关键技术环节。

## （三）工艺路线优化算法实现

算法实现是连接优化模型与决策模型，并将其转化为具备实际应用价值的软件功能的核心技术步骤。在这一过程中，首先要依据工艺路线决策模型的结构特征，对各类可行工艺路线进行规范化编码处理，将抽象的工艺信息转化为智能优化算法可识别、可运算的数据形式，随后借助遗传算法等成熟的智能优化器开展多轮迭代求解。具体实现环节，不仅需要完成适应度函数的精准构建——以此量化评估各工艺方案的优劣，还需做好种群初始化、选择、交叉、变异等核心算子的设计与调试，同时重点处理好工序顺序约束等影响求解有效性的关键逻辑问题。通过反复的参数调优与多轮次迭代计算，算法最终会输出一批满足加工精度、设备能力等约束条件的优化工艺方案，这些方案将作为直接且可行的输入依据，为后续刀具路径规划工作的开展提供坚实支撑。

## 三、复杂零件数控刀具路径规划技术

### （一）刀具路径规划的基本概念<sup>[2]</sup>

刀具路径规划是数控加工流程中占据核心地位的关

键环节，其核心任务是结合零件的三维几何模型、实际选用的机床性能参数、刀具类型特性以及具体加工方式，遵循数控加工的既定技术规则，精确计算并生成连续的刀位点序列，最终形成能够直接控制刀具运动轨迹的指令数据。这一环节的规划质量，会从根本上决定零件的加工精度是否达标、加工效率能否提升，以及刀具的使用寿命是否可控，对整个数控加工的综合效益有着直接且关键的影响。具体来看，刀具路径规划的核心内容涵盖多个方面：包括根据零件结构特征与加工要求选择合适的走刀模式，常见的如行切、环切、螺旋线切削等；完成刀位点的精准计算与排布；科学确定加工过程中的步长与行距参数；同时还要做好加工过程中的干涉碰撞检测，以及残欠加工区域的识别与补加工处理。

### （二）刀具路径规划的关键技术

刀具路径规划的关键技术体系，核心目标是针对性解决轨迹生成过程中的各类核心技术难题，其具体内容涵盖多个重要方面。首先是刀轨生成算法的优化，以等残留高度法为例，这类算法通过精准控制加工表面的残留高度，为复杂曲面加工质量提供可靠保障；其次是全局干涉与碰撞检测技术，该技术能全面排查刀具、工件与机床部件间的干涉风险，在五轴加工这类运动关系复杂的场景中尤为关键；再者是拐角平滑与速度前瞻控制技术，通过对刀具在拐角处的运动轨迹进行平滑处理，并提前规划速度变化，有效减小机床运行冲击，同时进一步提升加工效率；最后是切削负荷优化技术，通过动态调整加工步距与行距参数，实现切削力的稳定控制，避免因负荷波动影响加工精度或损伤刀具。

### （三）刀具路径优化算法

刀具路径优化算法旨在对初始生成的刀轨进行再处理，以提升加工效率、质量与稳定性。其核心是通过数学建模，将路径优化问题转化为以空行程最短、切削负荷平稳或加工时间最少为目标函数的优化问题。在此基础上，常采用遗传算法、蚁群算法等智能优化方法进行求解，通过调整走刀顺序、优化拐角过渡策略及平滑刀轨连接，有效缩短非切削时间、减小机床振动，从而在几何精度与动力学性能之间取得最佳平衡，实现高效高质量的数控加工。

### （四）刀具路径规划软件与工具

当前，刀具路径规划主要依赖于专业的CAD/CAM软件平台实现，如UG/NX、CATIA、PowerMill等。这些工具集成了强大的几何造型引擎与路径生成模块，能够将三维CAD模型自动或交互式地转化为驱动数控机床的NC

代码。它们通常内置了多种加工策略库与参数化模板，支持从2.5轴到五轴联动等复杂加工，并集成碰撞检查、材料移除仿真等验证功能。这些软件与工具是实现路径规划算法从理论走向工程应用的关键载体，其智能化与自动化水平直接决定了工艺准备的效率与可靠性。

#### 四、复杂零件数控加工工艺路线优化与刀具路径规划综合应用

##### (一) 综合应用框架

为实现工艺路线规划与刀具路径设计的协同增效，突破二者分立优化的局限，本文构建了一套完整的闭环综合应用框架。该框架以零件的CAD三维模型作为核心数据输入源头，整体结构分为上下两个紧密关联的功能模块。框架上层是工艺路线优化模块，其核心职能是基于零件特征与生产资源条件，通过智能算法迭代求解，生成最优的工序执行序列与制造资源分配方案；框架下层则为刀具路径规划模块，该模块并非独立运作，而是以上层输出的工艺决策结果为直接依据，开展针对性的刀轨精准计算与路径详细规划。两个模块通过共享统一的制造特征信息数据库与加工约束条件清单实现深度耦合，同时框架特别引入加工过程仿真与效果评估反馈机制，形成“工艺决策-路径规划-仿真验证-迭代优化”的完整闭环循环。

##### (二) 工艺路线与刀具路径的集成优化

工艺路线与刀具路径的集成优化，核心目的在于打破传统数控加工中“先确定工艺路线、再规划刀具路径”这种串行规划模式的固有局限，构建起二者之间高效的双向信息交互通道与协同决策机制。这种集成化方法并非简单地将两个环节叠加，而是通过深度融合实现数据互通：在工艺路线决策的早期阶段，就引入刀具路径规划的相关约束条件，提前评估不同工艺方案对应的路径规划可行性与潜在加工效率；同时，在刀具路径生成的具体过程中，实时采集并反馈切削负荷波动、刀具磨损状态等加工现场数据，以此为依据反向调整优化工艺参数设置与工序执行顺序。

##### (三) 实际加工案例分析

为验证前文工艺与路径协同优化理论的有效性，本节以航空发动机重要部件——开式整体叶盘叶片的精加工为案例展开分析。该叶片曲面曲率变化大、精度要求

高，传统球头刀因切削范围有限加工效率低。针对此问题，本研究采用基于鼓形刀的刀具路径优化方法，通过毫米级精度计算刀触点轨迹并结合曲面特征优化刀轴矢量，在保证表面残留高度达标的同时，大幅减少了精加工刀路。实际加工表明，该方法生成的刀路光滑无干涉，刀轴运动平稳，有效提升了复杂曲面加工的效率与质量，印证了所提理论的可行性与实用价值<sup>[3]</sup>。

#### 结论

本研究针对复杂零件数控加工需求，构建了工艺路线与刀具路径规划的集成方法体系。通过建立工艺决策模型并结合智能优化算法，实现了工序序列与刀具路径的协同优化，典型案例验证其能有效提升加工效率与质量。研究的主要创新点体现在两个关键方面：一是提出了工艺规划与路径设计的闭环优化框架，打破了传统二者分立规划的局限，形成“决策-执行-反馈-优化”的完整链路；二是引入智能算法实现加工参数的动态自适应调整，让工艺方案能更好适配加工过程中的动态变化。不过，当前研究仍存在一定局限性，具体表现为算法在不同类型加工工艺中的通用性有待加强，同时在多物理场耦合优化方面尚未形成完善方案。基于此，未来研究将重点推进两方面工作：一方面拓展算法的适用范围，使其能更好地应用于各类复杂工艺场景；另一方面深入探究切削过程中力、热、变形的耦合作用机制，构建综合控制策略，从而进一步提升研究成果的工程实用价值。

#### 参考文献

- [1] Mo X, Xia M, Mei S, et al. Deep reinforcement learning-based optimization for machining process: Cutting parameters dynamic optimization considering tool condition degradation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 156(Part A): 1006-1031.
- [2] 钟建琳, 刘忠和, 杨庆东. 空间自由曲面五轴联动数控加工[J]. 机械设计与制造, 2011(9): 129-131.
- [3] 张洪, 欧阳克良, 郑周义, 等. 开式整体叶盘鼓形刀叶片精加工刀路规划研究[J]. 新技术新工艺, 2020(7): 38-41.