

复杂模具零件高效数控加工工艺与编程技术研究

刘迪 齐超群

河北科技学院, 河北唐山 063200

摘要: 随着模具制造的高精度、复杂化、短周期化发展, 复杂模具零件结构异形化、曲面多样化现象日益凸显, 已有加工模式难以兼顾效率和精度, 改进数控加工工艺和编程方法成为突破瓶颈的关键。本文以复杂模具零件为对象, 分析高效数控加工的工艺规划理路、刀具选型原则、切削参数优化方法, 并围绕数控编程中的关键环节, 研究 CAD/CAM 融合应用、刀路优化、仿真校验和后置处理, 构建针对复杂模具特征的全流程加工和编程体系, 明确工艺和编程协同优化思路, 解决复杂型腔、深腔、异形曲面等典型结构的加工难题, 减小加工误差、缩短生产周期、延长刀具使用寿命, 为模具制造企业高效化、精密化生产提供理论指导和参考。

关键词: 复杂模具零件; 数控加工; 工艺优化; 高效编程

0 引言

随着汽车、航空航天、电子家电等工业的快速发展, 模具作为工业生产的主要工艺装备, 复杂度和精度不断提高, 复杂模具零件一般为异形曲面、深腔、窄槽、多台阶等结构, 材料普遍为高强度模具钢, 加工难度大大提高, 传统模具加工以机床加工、手工加工为主, 加工效率低、精度不稳定、周期长等问题, 难以满足快速交付模具市场。数控加工技术具有自动化、精度可控、适应性强等优势, 是复杂模具零件加工的主要技术方式, 加工工艺及编程技术的先进与否, 决定着模具生产效率、质量成本与市场竞争力。开展复杂模具零件高效数控加工工艺与编程技术研究, 有利于解决复杂结构加工难题, 推动模具制造业向智能化、高效化发展, 具有现实意义。

1 复杂模具零件工艺特性与加工难点分析

1.1 复杂模具零件的结构与材料特性

复杂模具零件按功能分为型腔模、凸模、镶件、滑块等, 结构上具有三维自由曲面、变曲率轮廓、深腔窄槽、小圆角, 部分零件兼顾多个加工面位置精度, 尺寸公差和形位公差要求较高, 表面粗糙度要求在 $Ra0.4\mu m$ 以下。材料上, 多采用 Cr12MoV、H13、P20 等高强度模具钢, 硬度高、切削阻力大, 属于难加工材料, 加工时刀具磨损快、切削热集中, 加工变形大。

1.2 数控加工核心难点与质量影响因素

复杂模具零件数控加工难点主要集中在复杂曲面的加工轨迹规划, 自由曲面的连续性和曲率变化导致刀路干涉、残留余量不均匀, 对表面质量造成影响; 深腔和窄槽结构的加工, 深腔和窄槽结构的刀具悬伸时刚性不足, 容易产生振刀、让刀现象, 尺寸不稳定; 难加工材料的切削适配, 切削参数、刀具选择不合理会

降低加工效率, 增加刀具损耗。加工质量和效率涉及到加工全过程, 工艺层面包含了加工顺序规划、余量分配和装夹定位方式; 刀具层面包含了材质、涂层、几何参数匹配; 编程层面包含了刀路轨迹、进给转速和进退刀方式等。

1.3 高效加工的工艺约束与优化方向

复杂模具高效数控加工是一个效率、精度和成本考虑问题, 同时涉及机床、刀具寿命、零件、生产批量等多重工艺约束, 盲目追求高速会导致精度降低、刀具崩损等问题。结合工艺约束, 高效加工可以分为三类, 一是工艺路线优化, 合理分配粗加工、半精加工和精加工, 均衡工序的余量, 减少重复装夹和空行程; 二是切削参数优化, 对于不同的材料和结构, 选择最合适的切削速度、进给量和切削深度, 达到高效切削和刀具保护的平衡; 三是加工方式优化, 复杂曲面和深腔结构, 可以选择多轴联动、摆线铣削、分层切削等多种工艺, 避免出现加工干涉和变形, 合理的工艺约束, 提升加工效率和加工质量。

2 复杂模具零件高效数控加工工艺设计

2.1 加工工艺路线规划与工序划分

工艺路线规划是高效加工的先决条件, 按照先粗后精、先主后次、先面后孔、减少装夹的原则, 根据模具零件的结构与精度, 合理划分加工工序。粗加工以快速去除余量为目标, 采用大直径、高刚性刀具、分层环切、等高切削等保留均匀的半精加工余量, 一般为 2-3mm, 避开重要的型面与精度部位, 减少后续精加工切削量。半精加工区隔粗加工与精加工, 主要以去除粗加工变形为目标, 去除余量不均, 保证精加工余量在 0.1-0.2mm 之间, 为精加工的高精度打下基础。精加工以尺寸精度与表面质量为关注点, 根据结构选取加工方法, 曲面可

以采用等高轮廓铣、平行铣,平面可以采用端铣,清角可以采用小直径球头铣刀等。

2.2 刀具选型与切削参数优化

刀具选用要结合模具材料、加工结构、工序类型,粗加工对模具钢选用 TiAlN 复合涂层的超细晶粒硬质合金立铣刀,刀具直径要选择大规格的刀具,提高切削效率和刚性;半精加工选用中等直径的球头铣刀,能够轮廓成型、去除余量;精加工选用小直径高锋利度的球头铣刀或立方氮化硼刀具。深腔选择悬伸比合理的长颈刀具,悬伸长度不小于刀具直径3倍,防止振刀。切削参数选择要结合刀具材质、材料硬度和机床性能,粗加工切削速度高、大进给量和适中的切深选择, H13 模具钢粗加工切削速度 80-120m/min, 进给量 1000-1500mm/Min; 精加工采用低进给、高转速、小切深的参数, 切削速度 150-200m/min, 进给量 200-500mm/Min, 切深 0.02-0.05mm, 通过参数进行动态匹配。

2.3 装夹定位与误差控制工艺

装夹定位对零件加工精度影响甚大,复杂模具零件应选用刚性大、定位精准的工装夹具,优先使用平口钳、分度头、专用夹具等,装夹牢固,定位基准统一,减少多次装夹基准误差。结构不对称零件采用多点支撑装夹,分散切削力减小加工变形;小型精密模具零件采用真空吸盘或磁性夹具,避免装夹应力导致尺寸偏差。误差控制全过程,粗加工前对毛坯进行时效处理,消除内应力;加工过程中用切削液冷却减少切削热引起的热变形;高精度型面,采用分段加工、余量补偿,监测尺寸偏差并调整工艺参数;控制加工环境温度,降低温度变化对机床、零件的影响,多维度误差防控保证模具零件加工精度。

3 复杂模具零件数控高效编程技术

3.1 CAD/CAM 集成编程流程构建

CAD/CAM 是实现复杂模具高效编程的主要方法,基于 UG、Mastercam、Powermill 等软件建立“三维建模—工艺设置—刀路设置—仿真校验—后置处理”的编程流程,首先从 CAD 模块进行模具零件的三维实体建模,还原曲面、型腔、圆角等结构,标注尺寸公差、工艺要求等;进一步导入 CAM 模块三维模型,绑定前面设置的加工工艺,设置加工坐标系、刀具参数、切削余量等基本信息,依靠软件自动编程生成初始刀路轨迹。此种编程方式,突破了建模和编程的束缚,降低了人工数据输入的误差,支持工艺参数的快速修改和迭代,相比手动编程效率提高 40% 以上,同时降低复杂结构的编程难度,适用于不同异形模具零件的编程。

3.2 刀路轨迹优化与干涉规避技术

刀路轨迹的优化是提高加工效率、提升表面质量的关键。针对复杂模具结构,进行多种优化来提高刀路合理性,曲面零件采用等残留高度刀路,切削余量均匀,后续抛光量减少;深腔窄槽结构采用摆线铣削刀路,刀具侧向受力减少刀具寿命延长,大面积平面采用平行铣削刀路,减少空行程,提高切削效率;优化进退刀方式,采用圆弧进退刀替代直线进退刀,避免刀痕残留,提高表面光洁度。干涉规避是刀路优化的重要内容,使用软件自带的干涉检测功能,预估刀具与零件、夹具、机床之间的碰撞风险,对检测到的干涉区域,调整刀轴方向、改变切削区域、优化走刀路径,消除加工干涉隐患,从而保证刀路轨迹安全可行。

3.3 智能编程与参数化控制应用

智能编程是通过软件的算法优化功能进行刀路和参数的自动对应,对同一模具零件建立参数化编程模板,将工艺参数、刀路方式、刀具选择固定在模板中,零件的加工只需修改零件的模型和参数,就可快速生成编程,大大降低编程时间。通过参数化控制,切削参数、刀路轨迹、余量均可实现精确的控制,对不同曲率的曲面自动调整进给速度和切削深度,曲率变化较大的位置降低进给;平缓部位增加进给,提高效率。部分高端 CAM 软件可将加工仿真与参数联动,基于加工仿真自动优化切削参数,智能化闭环控制编程过程,减少人工调试次数,改善编程质量和效率,适用于复杂模具小批量多品种生产。

4. 数控加工仿真校验与后置处理技术

4.1 加工过程仿真与精度校验

加工仿真是减少实际加工失误、编程合理的重要步骤,利用 Vericut、UG 仿真模块等软件,建立虚拟机床、刀具、夹具、零件的模型,还原真实加工环境,对刀路轨迹进行全程动态模拟,重点监测刀具运动轨迹、切削状态、干涉碰撞、余量残留,预判加工时可能存在的振刀、过切、欠切等问题,根据仿真结果回溯修改编程参数和刀路轨迹,直到加工结果满足要求。精度校验采用虚拟测量和仿真分析相结合的方式对重要尺寸、形位公差、表面粗糙度进行测量分析,测量理论尺寸和仿真加工尺寸之间的偏差,对误差补偿修正编程程序,保证实际加工精度,避免由于编程失误造成零件报废浪费。

4.2 后置处理程序定制与优化

后置处理是把 CAM 编程与机床加工的结合,将软件编程的刀路轨迹文件转换为机床可以识别的 G、M 文件,后置处理程序的对应性决定了加工指令的对应性。不同品牌、不同型号的数控机床其控制系统和指令格式存在很大差异,需要根据机床特点编制后置处理程序,

包括坐标轴、换刀指令、冷却控制、进给转速输出,避免指令冲突与机床报错。优化后置处理程序可以减少冗余指令,优化换刀过程和坐标转换过程,减少辅助动作时间;针对多轴联动加工机床,优化刀轴控制指令,保证五轴运动平稳,可以使编程程序和机床完美匹配,提升加工指令的执行效率。

4.3 程序调试与现场加工适配

后置后生成的数控程序需要现场调试才能进行加工,调试的方法遵循“单段运行—低速试切—批量加工”的原则,先通过机床单段执行校验程序指令准确性,观察刀具运动和换刀是否正常;通过低速试切加工零件局部重要部位,测量尺寸、表面质量,根据试切结果调整切削参数和刀路补偿值;待试切达标后再进行全程序自动加工。针对现场加工时存在的突发问题,如刀具磨损、尺寸偏差、振刀等,快速回溯程序和工艺参数,针对性修改,实现编程程序和现场加工的动态适应。

5 典型复杂模具零件加工实践与效果分析

5.1 典型零件工艺与编程方案实施

采用汽车覆盖件型腔模具作为典型零件,该模具包含大面积自由曲面、深腔结构及微小圆角,用钢为H13模具钢,硬度48HRC,尺寸公差 $\pm 0.02\text{mm}$,表面粗糙度 $\text{Ra}0.4\mu\text{m}$,结合上文研究可设计三段式加工,粗加工采用D32硬质合金飞刀分层去除毛坯余量,切削速度 $100\text{m}/\text{min}$,进给量 $1200\text{mm}/\text{min}$;半精加工采用D10球头铣刀,等高轮廓铣削,余量控制在 0.15mm 以内;精加工采用D6球头铣刀,等残留高度刀路,切削速度 $180\text{m}/\text{min}$,进给量 $300\text{mm}/\text{min}$ 。编程使用UG软件三维建模及刀路生成,仿真校验以避免干涉,定制FanUC系统后置处理程序生成G代码,现场采用三轴加工中心,使用乳化液冷却控制加工温度。

5.2 加工效果检测与数据对比

对加工完成的汽车覆盖件型腔模具进行全

面检测,使用三坐标测量仪测量,尺寸偏差都在 $\pm 0.015\text{mm}$ 范围内;表面粗糙度检测仪检测 $\text{Ra}0.32\mu\text{m}$:达到设计要求;曲面轮廓连续光滑,无过切、振刀、刀痕。经过上述工艺和编程,加工周期缩短35%,刀具损耗减少28%,人工调试时间减少50%,生产效率显著提高。针对加工过程中Minor残留余量问题,进行精加工刀路轨迹的微调,实现模具零件无抛光精加工。

5.3 技术优化总结与推广建议

通过典型零件加工实践可知,复杂模具零件高效数控加工是一个工艺与编程相结合的过程,合理的工艺路线、精确的刀具与参数搭配、合理的刀路轨迹、精密的仿真校验是实现复杂模具零件高效精密加工的前提。针对不同形状的复杂模具零件,灵活地采用不同工艺与编程方式,多曲面模具采用多轴联动加工与等残留刀路,深腔模具采用摆线铣削与长颈刀具,小型精密模具强化装夹与误差补偿;在行业推广方面,可建立工艺与编程模板,加强操作人员培训,提高CAD/CAM应用水平。

6 结论

本文围绕复杂模具零件高效数控加工工艺与编程技术展开系统性研究,明确了复杂模具的结构、材料特性与加工难点,构建了“工艺规划—编程优化—仿真校验—实践应用”的全流程技术体系。研究表明,通过精细化划分加工工序、适配刀具与切削参数、优化CAD/CAM集成编程流程、定制化后置处理程序,可有效解决复杂模具零件的加工瓶颈,实现加工效率与精度的同步提升。典型零件实践验证了该技术体系的可行性,加工精度、生产周期、刀具损耗等指标均得到显著改善,为模具制造企业提供了可复制的技术方案。未来,可结合人工智能、大数据技术,进一步实现工艺参数的智能决策与刀路的自主优化,推动复杂模具数控加工向更高水平的智能化、高效化方向发展。

参考文献:

- [1] 孙丽娟,杜奇,张英明.基于五轴数控技术的复杂模具零件加工路径优化研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):156-161.
- [2] 李志玲.复杂模具型腔零件数控加工工艺的设计[J].中阿科技论坛(中英文),2020,(11):116-118.
- [3] 付建军,尹帅.基于UG复杂曲面合金零件的数控加工[J].世界有色金属,2019,(11):184-185.

作者简介:刘迪(2005.07—),男,汉,河北省秦皇岛市,专科,研究方向:机械制造及自动化。