

# 基于多轴机的复杂零件加工技术分析

陆 协

无锡威孚奥特凯姆精密机械有限公司 江苏无锡 214142

**摘要:** 随着制造业的不断发展,对复杂零件的加工需求日益增长。多轴机凭借其独特的优势,成为加工复杂零件的关键设备。本文深入剖析了基于多轴机的复杂零件加工技术,详细阐述了多轴机的工作原理与结构特点,全面分析了其在复杂零件加工中的应用优势,深入探讨了相关的加工工艺与编程技术,并结合实际案例展示了加工效果,最后对未来发展趋势进行了展望。通过本文的研究,旨在为推动多轴机在复杂零件加工领域的广泛应用和技术提升提供参考。

**关键词:** 多轴机;复杂零件;加工技术;应用优势

## 引言

在现代制造业中,复杂零件的加工精度和效率直接影响着产品的性能和质量。传统加工设备在面对复杂形状、高精度要求的零件时,往往显得力不从心。多轴机的出现,为复杂零件加工带来了新的解决方案。多轴机能够在多个坐标轴上同时进行运动控制,实现刀具或工件在空间中的多维度姿态调整,从而能够加工出各种复杂的曲面、异形结构等。它广泛应用于航空航天、汽车制造、模具加工、医疗器械等众多领域,成为提升制造业竞争力的重要技术手段。对基于多轴机的复杂零件加工技术进行深入研究,具有重要的现实意义。

## 一、多轴机的工作原理与结构特点

### (一) 工作原理

多轴机的工作原理基于数控系统对多个坐标轴的精确控制。以常见的五轴联动加工中心为例,它通常包括三个直线坐标轴(X、Y、Z轴)和两个旋转坐标轴(如A轴、B轴或C轴)。在加工过程中,数控系统根据预先编制好的加工程序,实时控制各坐标轴的运动速度、位移量和运动方向,使刀具与工件之间产生符合加工要求的相对运动轨迹<sup>[1]</sup>。通过多轴联动,刀具可以从不同的角度和方向对工件进行切削加工,能够完成传统三轴加工无法实现的复杂形状加工任务。例如,在加工航空发动机的叶片时,五轴联动可以使刀具沿着叶片的复杂曲面进行精确切削,确保叶片的型面精度和表面质量。

**作者简介:** 陆协(1988.03.16),男,汉族,江苏无锡人,本科,工程师,研究方向:机械工程、机械制造。

## (二) 结构特点

多轴机为应对大切削力并保障加工精度,关键部件如床身、立柱常选用优质铸铁或焊接钢结构,经时效处理消除内应力,提升结构稳定性。直线坐标轴配备滚珠丝杠副或直线导轨副,实现精准直线运动。滚珠丝杠副传动效率与定位精度高,部分高端多轴机直线定位精度达 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内。旋转坐标轴采用回转工作台或摆动头,借高精度蜗轮蜗杆传动或直接驱动技术,回转精度可达 $\pm 1\text{arcsec}$ 以内,为复杂零件高精度加工筑牢硬件根基<sup>[2]</sup>。数控系统是多轴机核心,负责精确控制各轴运动。其运算能力强、功能模块丰富,能快速处理复杂程序,实时计算运动参数,确保多轴联动精准协调,通过先进算法实现复杂曲面实时插补,保障刀具路径平滑。

## 二、多轴机在复杂零件加工中的应用优势

### (一) 提高加工精度

传统加工复杂零件需多次装夹,每次装夹都会产生定位误差。多轴机凭借多轴联动,可一次装夹完成多面、多特征加工。如五轴加工中心加工含复杂曲面与孔系的零件时,通过旋转轴调整刀具姿态,避免误差累积,相比传统加工精度可提升30%-50%。多轴机能依据零件复杂形状生成更优刀具路径。加工复杂曲面时,刀具可保持与加工面垂直或最佳角度,均匀分布切削力,减少刀具磨损与振动。以航空发动机涡轮叶片加工为例,五轴联动使刀具沿曲面法向切削,防止干涉偏斜,将零件表面粗糙度降至 $\text{Ra}0.8\mu\text{m}$ 以下,满足高端领域严苛要求<sup>[3]</sup>。

### (二) 提升加工效率

多轴机可在一次装夹中集成铣削、钻孔、镗孔、攻丝等工序。以复杂模具加工为例,传统方式需多台设备

周转，多次装夹调整耗时；而多轴机通过多轴联动快速换刀，一次完成全部工序，相比传统方式加工效率提升2-3倍。多轴机搭载高性能主轴与驱动系统，支持高速切削。部分高速五轴加工中心主轴转速超40000r/min，进给速度达60m/min。加工铝合金等轻质零件时，高速切削可大幅提升材料去除率，缩短加工时间，同时降低切削力对零件的变形影响，兼顾效率与精度<sup>[4]</sup>。

### （三）实现复杂形状加工

航空航天、汽车等领域的复杂曲面零件，如飞机机翼、汽车覆盖件模具，多轴机凭借多轴联动，可使刀具贴合曲面曲率变化切削。相较于传统三轴加工，多轴机能更精准还原设计模型，满足产品气动性能等高精度要求。医疗器械等行业的异形零件，含不规则孔系与凸起结构，精度和表面质量要求高。多轴机通过精确控制各轴运动，灵活调整刀具姿态，实现复杂异形结构的精准加工，保障零件功能与安全性。

## 三、基于多轴机的复杂零件加工工艺与编程技术

### （一）加工工艺规划

#### 1. 零件工艺分析

在进行复杂零件加工前，需要对零件进行详细的工艺分析。首先要了解零件的设计要求，包括尺寸精度、形状精度、表面粗糙度、材料性能等方面的要求。然后分析零件的结构特点，确定加工的难点和重点。例如，对于一个具有薄壁结构和复杂曲面的航空零件，薄壁结构容易在加工过程中产生变形，复杂曲面的加工精度控制难度较大。针对这些特点，需要制定相应的加工工艺措施，如选择合适的刀具、切削参数，采用合理的装夹方式等，以确保加工质量<sup>[5]</sup>。

#### 2. 刀具选择与切削参数确定

刀具的选择直接影响加工质量和效率。对于复杂零件加工，需要根据零件的材料、加工特征和加工工艺要求选择合适的刀具。例如，在加工铝合金材料的复杂零件时，可选用硬质合金刀具或金刚石涂层刀具，以提高刀具的耐磨性和切削性能。对于曲面加工，通常选择球头铣刀，以保证刀具能够在不同角度下与加工表面良好接触。切削参数的确定也至关重要，包括切削速度、进给量和切削深度。合理的切削参数可以提高加工效率、降低刀具磨损、保证加工精度。

#### 3. 装夹方式设计

由于复杂零件的形状不规则，装夹方式的设计对加工精度和稳定性有很大影响。在设计装夹方式时，要遵循六点定位原则，确保零件在加工过程中的定位准确。

同时，要尽量减少装夹对零件加工部位的干涉，避免因装夹力过大导致零件变形。对于一些薄壁零件或异形零件，可能需要采用特殊的装夹方式，如真空吸附装夹、柔性夹具装夹等。例如，在加工薄壁铝合金零件时，采用真空吸附装夹可以均匀地施加夹紧力，减少零件变形。

### （二）编程技术

#### 1. 数控编程基础

数控编程是将零件的加工工艺过程、工艺参数、刀具运动轨迹等信息，按照数控系统规定的指令格式编写成加工程序的过程。数控编程的方法主要有手工编程和自动编程两种。手工编程适用于形状简单、程序段较少的零件加工，它要求编程人员具备丰富的数控加工知识和经验，能够熟练掌握数控系统的指令代码。自动编程则借助计算机辅助编程软件，通过对零件的三维模型进行分析和处理，自动生成加工程序。自动编程具有效率高、准确性好的优点，特别适用于复杂零件的加工编程。

#### 2. 多轴加工编程特点

多轴加工编程相较于传统三轴加工编程更为复杂，具有以下特点：一是需要考虑多个坐标轴的联动控制，编程时要精确计算各坐标轴的运动参数，确保刀具路径的准确性和流畅性。二是要处理刀具与工件之间的干涉问题，由于多轴加工中刀具的姿态变化多样，容易与工件或夹具发生干涉，因此在编程过程中需要进行严格的干涉检查和避让处理。三是对编程人员的专业知识要求更高，编程人员不仅要熟悉数控编程的基本原理和方法，还要深入了解多轴机的结构特点、运动方式以及加工工艺。

#### 3. 常用编程软件及应用

目前，市场上有许多功能强大的多轴加工编程软件，如UG、Mastercam、PowerMILL等。这些软件都具备丰富的多轴加工编程功能模块。以UG软件为例，它具有强大的CAD/CAM集成功能，可以方便地进行零件的三维建模和加工编程。在进行多轴加工编程时，用户可以通过UG软件的多轴加工模块，根据零件的形状和加工要求，选择合适的加工策略，如曲面铣削、轮廓铣削、钻孔等，并设置相应的刀具路径参数。软件会自动生成刀具路径，并进行仿真模拟，以便编程人员检查刀具路径的合理性 and 是否存在干涉现象。通过这些编程软件的应用，大大提高了多轴加工编程的效率和质量。

## 四、基于多轴机的复杂零件加工案例分析

### （一）案例一：航空发动机叶片加工

#### 1. 零件特点与加工要求

航空发动机叶片是典型的复杂零件，其形状复杂，

具有高精度的曲面型线，对叶片的型面精度、表面质量和尺寸公差要求极为严格。叶片的材料通常为高温合金或钛合金，这些材料具有强度高、硬度高、切削加工性差的特点。以某型号航空发动机叶片为例，叶片的型面精度要求控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内，表面粗糙度要求达到 $\text{Ra}0.4\mu\text{m}$ 以下。

### 2. 加工过程与技术应用

采用五轴联动加工中心对该叶片进行加工。在加工工艺规划方面，首先进行零件工艺分析，根据叶片的材料和结构特点，选择了合适的刀具，如硬质合金涂层球头铣刀。切削参数经过多次试验优化确定，切削速度为 $80\text{--}120\text{m/min}$ ，进给量为 $0.05\text{--}0.1\text{mm/z}$ ，切削深度为 $0.1\text{--}0.3\text{mm}$ 。装夹方式采用专用的叶片夹具，通过真空吸附和机械夹紧相结合的方式，确保叶片在加工过程中的稳定性。在编程方面，使用UG软件进行多轴加工编程，根据叶片的三维模型生成刀具路径，并进行仿真验证，确保刀具路径的准确性和无干涉。在加工过程中，利用五轴联动的优势，使刀具始终保持与叶片型面垂直，进行精确切削。同时，通过数控系统的精确控制，保证各坐标轴的运动精度，从而实现了叶片的高精度加工。

### 3. 加工效果评估

经过加工后的叶片，通过三坐标测量仪等检测设备进行检测。结果显示，叶片的型面精度完全满足设计要求，尺寸公差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内，表面粗糙度达到了 $\text{Ra}0.3\mu\text{m}$ 左右。加工后的叶片表面质量良好，无明显的加工痕迹和缺陷，叶片的性能得到了有效保障，满足了航空发动机的使用要求。与传统加工方式相比，采用五轴联动加工中心加工航空发动机叶片，加工效率提高了约2倍，加工精度也得到了显著提升。

## (二) 案例二：汽车模具复杂型腔加工

### 1. 零件特点与加工要求

汽车模具复杂型腔形状复杂、尺寸大，精度要求严苛。以某汽车覆盖件模具为例，其型腔含不规则曲面与凸起结构，尺寸精度需控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 内，表面粗糙度要求达 $\text{Ra}1.6\mu\text{m}$ 以下，且因批量生产需求，对加工效率要求高。

### 2. 加工过程与技术应用

采用大型五轴龙门加工中心进行加工。选用高强度硬质合金铣刀，切削速度设为 $60\text{--}100\text{m/min}$ ，进给量 $0.1\text{--}$

$0.2\text{mm/z}$ ，切削深度依余量分配。通过四点支撑与压板夹紧结合的装夹方式保障模具稳固。运用Mastercam软件编程，基于型腔三维模型生成优化刀具路径并仿真避干涉。加工时，五轴联动与大行程优势凸显，借助高速切削技术，提升材料去除率，缩短加工时间。

### 3. 加工效果评估

加工后检测显示，型腔尺寸误差控制在 $\pm 0.08\text{mm}$ 内，表面粗糙度达 $\text{Ra}1.2\mu\text{m}$ 左右，满足设计与成型要求。相比传统三轴加工，加工周期缩短约40%，显著提升生产效率，降低成本。

## 结束语

综上所述，在复杂零件加工领域，我们经不断探索实践，成果显著。从铝合金薄壁件到复杂立方结构零件，从五金件到复杂曲面与箱体零件，运用数控加工、仿真技术、柔性制造系统及先进软件辅助等手段，攻克变形控制、精度提升、效率优化难题，提高了加工质量与生产效率。这些技术为当下制造业提供高效方案，也为未来筑牢根基。展望未来，随着材料科学、工艺工程与数字技术深度融合，如增材与减材工艺协同发展，复杂零件加工极限将持续被突破，迈向更高精度与柔性化制造新境界，为制造业创新发展注入强大动力。

## 参考文献

- [1] 郝娟, 高新勤, 刘永, 等. 考虑零件重用的复杂产品模块划分方法[J]. 现代制造工程, 2025, (05): 20-26+52. DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2025.05.003.
- [2] Gersmann S. 轻松地加工复杂零件[J]. 现代制造, 2025, (04): 49-51.
- [3] 王天琦, 马晓龙, 刘佳, 等. 复杂零件工业机器人抛磨重力补偿算法研究[J/OL]. 机械科学与技术, 1-14[2025-06-03]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250038>.
- [4] 彭沛阳. 基于视觉辅助的复杂零件机器人去毛刺关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2024. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2024.005679.
- [5] 梁土珍, 谢贇, 鲁储生, 等. 复杂零件的逆向重构及数控加工仿真[J]. 机电工程技术, 2024, 53(03): 81-84+210.