

高精度轴类零件数控车削工艺及编程研究

杨泽宣 米树林

河北科技学院, 河北 唐山 063200

摘要: 轴类零件是机械传动、精密装备的核心零部件, 其尺寸、形位精度和表面质量直接影响整机的运行稳定性、使用寿命和传动精度。针对高精度轴类零件车削加工尺寸误差大、表面粗糙度高、加工效率低等问题, 结合数控车削技术开展工艺规划、刀具选择、切削参数优化、数控编程、精度控制研究。根据高精度轴类零件的结构特点和精度要求, 设计合适的数控车削工艺, 合理设计加工路径和编程逻辑, 解决精密车削中的振动控制、误差补偿、轮廓拟合等难题。实践证明, 优化后的工艺方案, 能够提高轴类零件加工精度, 满足 IT5-IT6 公差, 表面粗糙度在 Ra0.8 μ m 范围内, 兼顾加工效率和生产成本, 为同类精密轴类零件的数控车削加工提供经验借鉴。

关键词: 高精度轴类零件; 数控车削; 工艺优化; 切削参数

0 引言

高精度轴类零件是现阶段装备制造、航空航天、精密仪器等领域急需的, 随着轴类零件精度要求逐步提升, 普通车削已无法满足高精度微米级公差、低表面粗糙度的需求。数控车削具有自动化程度高、加工一致性好、精度可控性强等优点, 是目前高精度轴类零件加工的主流加工方式, 其工艺的合理性和编程规范性直接决定了零件最终质量。高精度轴类零件多为阶梯轴、锥面、圆弧、螺纹、退刀槽等复合形式, 尺寸公差一般控制在 0.005mm 以内, 形位公差以同轴度、圆跳动为主, 加工过程容易受到刀具磨损、切削振动、工装装夹、热变形等因素影响, 加工工艺难度大于普通轴类零件。在部分加工场景中存在工艺设计不合理、切削参数匹配不合理、编程路径冗余、误差补偿不够等问题, 导致零件精度低、返修率高、生产周期长。

1 高精度轴类零件加工特性与工艺分析

1.1 高精度轴类零件结构与精度要求

高精度轴类零件按结构可分为光轴、阶梯轴、异形轴, 其中, 阶梯轴和异形轴应用最为广泛, 同时具有外圆、端面、锥面、圆弧过渡、螺纹、键槽等多种加工, 轮廓复杂度大。此类零件的精度指标可归纳为尺寸精度、形位精度和表面质量, 尺寸精度通常为 IT5-IT6 级, 重要配合轴径公差在 0.003-0.01mm 范围内; 形位精度主要以同轴度、圆跳动、圆柱度为主, 同轴度误差不小于 0.005mm, 径向圆跳动不小于 0.002mm; 表面质量主要以配合表面粗糙度 Ra0.4-Ra0.8 μ m, 非配合表面 RA1.6 μ m 为主; 不同工况下轴类零件需要考虑材料的特性, 常用材料有 45# 钢、40Cr、20CrMnTi、不锈钢、铝合金等, 其中合金钢材料强度高、切削难度大,

对工艺参数和刀具性能要求更高。在加工前认真读懂图纸技术要求, 明确粗加工、半精加工、精加工工序的边界, 清楚各工序的精度目标和余量分配, 防止因工序划分不当造成精度失控。

1.2 数控车削工艺可行性与难点分析

数控车削工艺适用于高精度轴类零件加工, 通过数控系统定位、插补与闭环控制, 实现复杂轮廓切削, 有效避免人为误差。数控车削相比普通车削, 能够通过程序固化加工参数和路径, 保证批量加工相同, 并且可以随时调整切削速度、进给量与背吃刀量, 适合不同材料与精度加工。但在高精度加工中, 工艺实施仍然存在许多难点, 切削热引起工件、刀具热变形, 出现尺寸漂移; 刀具磨损直接影响轮廓精度与表面粗糙度, 磨损严重则引起公差超标; 工装装夹力不均匀则造成工件变形, 细长轴类零件出现切削振动与挠曲变形; 编程路径不合理易出现接刀痕、轮廓偏差等问题, 影响零件精度。针对上述难点, 需要结合零件、材料与精度目标制定工艺策略, 优化工序流程, 以消除加工误差。

2 高精度轴类零件数控车削工艺设计

2.1 工装选型与装夹工艺优化

工装选型与装夹方式决定了高精度轴类零件加工精度, 工装的主要任务在于使工件准确定位与被夹紧, 同时最大限度降低装夹变形。对于短粗型高精度轴类零件, 首先采用液压三爪自定心卡盘, 定心精度高, 夹紧力均匀, 可使工件轴线与机床主轴轴线同心, 重复定位误差小于 0.002mm; 对于细长轴、阶梯轴等变形零件, 采用一夹一顶装夹, 配合弹性顶尖和中心架支撑, 分散切削力, 抑制挠曲与振动, 顶尖采用硬质合金, 减小顶尖孔磨损与接触误差。

装夹过程中应严格控制夹紧力, 避免因夹紧力较大使工件产生微变形, 精加工过程中可适当减小夹紧力, 同时采用软爪卡盘使其与工件接触面积增大以避免夹伤工件表面。

2.2 刀具选型与切削参数优化

刀具的性能决定切削效果和加工精度, 轴类零件车削需要精度高、耐磨性强的刀具, 粗加工选择硬质合金涂层刀具, 强度高、红硬性高, 能够大余量切削; 精加工选择金刚石刀具、立方氮化硼刀具或者超细晶粒硬质合金刀具, 刃口锋利, 耐磨性强, 可以微量切削, 保证表面质量和尺寸精度; 刀具几何参数需要有针对性优化, 精加工外圆车刀选择主偏角和副偏角小, 刀尖圆弧半径大, 降低切削振动, 减少表面粗糙度; 螺纹车刀、槽刀选择刃口精度和角度精准, 符合零件加工特点。切削参数优化的原则为“粗加工高效去余量、精加工高精度保质量”, 粗加工选择较大的背吃刀量和进给量、适中的切削速度, 快速去除毛坯余量; 精加工选择极小的进给量、较高的切削速度和很微小的背吃刀量, 避免切削力过大导致变形。

2.3 工序划分与加工路径规划

高精度轴类零件加工需要明确工序流程, 通常需要经过毛坯处理、粗加工、半精加工、精加工、光整加工五个工序, 加工的余量需要合理, 粗加工去除80%以上余量, 半精加工修正形状误差, 精加工保证最终尺寸和表面精度, 光整加工去除表面粗糙度。加工路径规划遵循“先粗后精、先主后次、就近加工、减少换刀”的原则, 先加工端面 and 中心孔; 再进行外圆粗车、阶梯面车削、锥面、圆弧加工, 然后进行槽加工、螺纹车削, 避免精加工后二次切削磨损已加工表面。刀具路径要避免急转弯和往复切削, 采用顺铣切削, 减少切削力波动与振动; 复杂轮廓用圆弧插补、斜线插补指令, 轮廓平滑过渡, 减小接刀痕; 合理设置刀具切入、切出路径, 避免工件和工装干涉区域, 保证切削过程安全顺畅; 细长轴类零件加工采用分段切削、反向切削的路径, 减小轴向切削力, 抑制变形。

3 高精度轴类零件数控编程核心技术

3.1 数控编程基础与坐标系设定

数控编程是将工艺方案转化为机床可行指令的主要过程。高精度轴类零件编程是基于ISO标准G代码、M代码, 利用机床数控系统实现运动控制和逻辑控制。编程前需要完成坐标系设定, 数控车削采用工件坐标系, 以工件右端面中心点作为原点, Z轴沿工件轴线方向, X轴沿径向方向, 对刀确定刀具刀位点与工件

坐标系的相对位置, 记录刀具补偿参数, 消除刀具安装误差和磨损误差。对刀精度直接影响零件尺寸精度, 高精度加工采用试切对刀或仪器对刀的方式, 反复校验坐标值, 保证对刀误差0.001mm。

3.2 循环指令应用与程序优化

高精度轴类零件通常采用固定循环指令, 简化程序结构, 减少编程误差, 提高加工效率。粗加工使用外圆粗车循环G71、端面粗车循环G72, 可应用于阶梯轴大余量切削, 实现分层切削与退刀, 无需分段编写; 精加工使用精车循环G70, 沿零件轮廓进行切削, 保证尺寸精度与表面质量; 槽加工使用切槽循环G75、螺纹加工使用螺纹切削循环G92、G76, 有效控制螺纹牙型及螺距精度。程序优化需兼顾精度与效率, 删除过多指令, 简化运动路径, 避免刀具空行程; 针对精密轮廓, 采用微小步距插补, 改善轮廓拟合精度; 添加误差补偿指令, 实时修正刀具磨损、热变形引起的尺寸误差, 添加暂停、检测指令, 方便在加工过程中抽检尺寸, 及时调整参数。编写完成后, 需进行模拟仿真, 检验刀具路径、干涉与尺寸精度, 确认无误后再试切加工, 减少废品率。

3.3 特殊结构编程技巧

高精度轴类零件有圆弧过渡、锥面、精密螺纹、窄槽等组成部分, 这些编程方法要适当使用。圆弧轮廓编程有顺时针圆弧G02和逆时针圆弧G03, 要准确设置圆弧起点、终点坐标和圆心参数; 锥面加工有斜线插补G01或锥面循环指令, 锥度误差控制在允许范围内; 精密螺纹编程有升速段和降速段, 以消除伺服系统滞后导致的螺纹牙型误差, 并且多次切削螺纹尺寸, 使切削力由小变大; 窄槽、深槽加工采用分层切削、间断进给方法, 刀具崩损和槽壁变形。对多台阶、多圆弧的复杂轴类零件可编写子程序, 将重复加工段编写为子程序调用执行, 缩短程序长度, 减少编程失误率。编程时要严格控制坐标值精度, 保留小数点后三位数字, 匹配机床的控制精度。

4 加工精度控制与质量保障措施

4.1 误差来源分析与补偿策略

高精度轴类零件加工误差主要来源于机床误差、工艺误差、编程误差、环境误差等。机床误差包括主轴回转误差、导轨直线度误差、丝杠定位误差, 机床误差通过定期校准、闭环控制补偿; 工艺误差包括装夹误差、刀具磨损误差、热变形误差、切削振动误差, 装夹误差通过工装、装夹方式进行控制, 刀具磨损误差

通过实时监测刀具状态、更换刀具、填入磨损补偿值进行补偿；热变形误差通过充分冷却、控制切削参数、预留散热时间进行控制，切削振动误差通过调整刀具参数、调整切削速度、加装减振装置进行抑制；编程误差主要为坐标计算错误、路径规划错误导致，编程误差通过程序仿真、试切校验进行解决；环境误差包括温度、湿度，高精度加工需在恒温车间完成，控制环境温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，降低环境因素对加工精度的影响。针对不同误差，建立全流程误差补偿机制，从工艺设计、编程、加工、检测等环节对误差进行控制，最大限度减少误差累积。

4.2 切削过程监控与参数动态调整

切削过程监测是保证高精度加工的主要途径，可以通过监控切削力、切削温度、刀具磨损、工件尺寸等参数，发现异常及时调整工艺参数。粗加工时期重点监控切削力与刀具状态，避免因切削力过大导致工件变形和刀具崩损；精加工时期重点监控尺寸精度与表面粗糙度，通过在线检测设备实时获取工件尺寸数据，对照图纸要求动态调整切削速度、进给量、刀具补偿值。加工过程中要保持切屑清洁，避免切屑缠绕工件，划伤已加工表面，切削液保持足够流量和清洁度，冷却润滑效果好。细长轴、薄壁轴等易变形零件采用分段加工、间断切削，每加工一段，留有少量停顿时间，释放切削应力，减小变形量。

4.3 成品检测与质量管控

高精度轴类零件成品检测应采用高精度检测仪器，如外径千分尺、杠杆百分表、圆度仪、粗糙度仪、三坐标测量机等，检测尺寸精度、形位精度及表面质量，按照先粗后精、先尺寸后形位的原则，先检测基本尺寸、公差、形位公差、最后检测表面粗糙度，检测重点配合部位及精密结构。建立质量控制体系，实行毛坯、半成品、成品全流程检测，记录检测数据，追溯加工过程，找出不合格零件，检验误差来源，改善工艺、程序，防止重复出现，批量加工时首件检验、巡检、终检，先对批量零件进行检验合格后再批量生产，在加工过程中定时抽检。

参考文献：

- [1] 张振环. 数控车床提升轴类零件总长精度的工艺实践 [J]. 纺织器材, 2025, 52 (06): 9-12.
- [2] 金美花. 农业机械零件数控车削加工方法探究 [J]. 南方农机, 2025, 56 (12): 114-116.
- [3] 杨勇考. 零件数控车削加工工艺设计与仿真加工 [J]. 内燃机与配件, 2024, (05): 117-119.

作者简介：杨泽宣（2004.09—），男，汉族，河北省石家庄市，专科，研究方向：机械制造及自动化。

检测后，对零件进行防锈、防护处理，规范存放，避免磕碰、划伤影响零件质量。

4.4 加工实例验证

选取某精密设备传动阶梯轴为例，零件材料为40Cr调质处理，轴径公差IT6级，同轴度0.005mm，表面粗糙度 $RA0.8\mu\text{m}$ ，包括外圆、阶梯面、圆弧过渡、退刀槽、精密螺纹等。采用数控车削工艺方案，工装为液压三爪卡盘+弹性顶尖一夹一顶装夹，粗加工采用硬质合金涂层刀具，精加工采用超细晶粒硬质合金刀具，分为毛坯处理、粗车、半精车、精车、螺纹加工5道工序，切削速度采用粗车速度120m/min，进给量0.2mm/r，背吃刀量2mm；精车速度180m/min，进给量0.08mm/r，背吃刀量0.1mm。编程采用G71粗车循环、G70精车循环、G92螺纹循环，改变刀具路径，采用刀具补偿与误差补偿指令。经加工后检测零件尺寸公差、形位公差符合图纸要求，表面粗糙度达标，批量加工废品率小于1%，加工效率高于传统工艺30%。

5 结论

本文围绕高精度轴类零件数控车削工艺及编程展开系统研究，明确了零件加工特性与工艺难点，优化了工装选型、切削参数、工序划分与加工路径，梳理了数控编程核心技巧与精度控制措施，形成了一套完整的高精度轴类零件数控车削解决方案。研究表明，合理的工艺规划、精准的刀具选型、优化的切削参数、规范的数控编程与全流程精度控制，是保证高精度轴类零件加工质量的关键，能够有效解决加工误差、表面质量差、效率低等问题，满足高端装备制造的精度需求。随着数控技术、智能检测技术与刀具技术的不断发展，未来高精度轴类零件加工将朝着智能化、自动化、无人化方向迈进，可进一步融合在线检测、自适应控制、人工智能优化等技术，实现工艺参数的自主优化与加工误差的实时补偿，持续提升加工精度与效率。