

# 高精度数控车削自动线关键技术研究

吴红成 伍造桥 高滨

浙江旭辉智能装备有限公司 绍兴市新昌县 312500

**【摘要】**本文重点研究其五大核心关键技术模块，包括机床本体结构设计、伺服驱动与运动控制、在线检测与误差补偿、系统集成与协同控制。通过理论分析、借鉴专利技术和实际工程验证，阐述各技术原理、要点及优化措施，解决加工精度不足、运行效率低、稳定性差等行业问题，为自动线研发、优化和应用提供支撑。实践显示，基于该关键技术研发的自动线，加工精度达 $\pm 0.005\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ ，生产效率较传统单机提升超60%，可用于轴承等高精度零件批量加工，符合制造业发展需求。

**【关键词】**高精度；数控车削自动线；伺服驱动；在线检测；误差补偿；系统集成

Research on Key Technologies for High-Precision CNC Automatic Machining Lines

Wu Hongcheng Wu Zaoqiao Gao Bin

Zhejiang Xuhui Intelligent Equipment Co., Ltd., Xinchang County, Shaoxing City 312500

**【Abstract】**This study focuses on five core technological modules: machine tool structural design, servo drive and motion control, online inspection and error compensation, system integration, and collaborative control. Through theoretical analysis, patent technology references, and practical engineering validation, the paper elucidates technical principles, key implementation points, and optimization measures to address industry challenges such as insufficient machining accuracy, low operational efficiency, and poor stability. The research provides foundational support for automatic line development, optimization, and application. Practical results demonstrate that automated lines developed based on these key technologies achieve machining accuracy of  $\pm 0.005\text{mm}$  with repeat positioning accuracy  $\leq 0.002\text{mm}$ , while production efficiency exceeds traditional single-machine systems by over 60%. These solutions are suitable for batch processing of high-precision components like bearings, aligning with modern manufacturing demands.

**【Key words】**high precision; CNC turning automatic line; servo drive; online inspection; error compensation; system integration

## 一、引言

数控车削加工是轴类、盘类零件加工核心工艺，其精度和自动化水平影响下游行业产品质量。传统单机数控车削加工有人工干预多、精度一致性差等弊端，无法满足现代制造业需求。

高精度数控车削自动线将多种设备有机集成，实现全流程自动化作业，减少误差，提升精度与效率，成为主流装备。然而，高精度数控车削自动线研发面临诸多技术瓶颈，如机床刚性不足、伺服驱动系统性能差、工件定位夹持误差大、在线检测效率低、系统协同性差等。因此，深入研究其关键技术，优化方案，提升性能，有重要意义和价值。

## 二、高精度数控车削自动线关键技术研究

### 2.1 机床本体结构设计技术

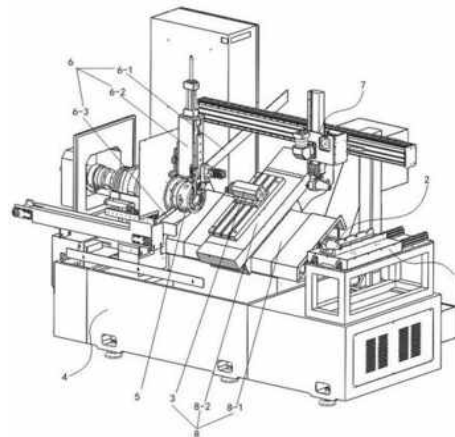
#### 2.1.1 床身结构设计

床身是机床基础部件，承担主轴、刀架等部件安装与支撑任务，其刚性、稳定性和精度保持性影响机床加工精度。传统铸铁床身结构简单，存在刚性不足、热变形大等问题，易产生振动致精度下降。

材料上，选用高强度灰铸铁 HT300，它强度高、刚性好、

减震与热稳定性优良，能减少振动与热变形。同时，对床身时效处理，人工时效温度  $550^\circ\text{C}$ 、保温 8 小时，自然时效不少于 20 天，消除内应力、减少变形、提升精度。

结构上，采用斜床身设计，相比平床身，能降低切削力影响、提升刚性，还便于排屑，避免影响运动精度。此外，床身内部设交叉式加强筋，厚 25mm、间距 300mm，提升抗弯、抗扭刚性、减少变形。



#### 2.1.2 主轴结构设计

主轴采用一体化结构，选用 40CrNiMoA 合金结构钢，经调质、淬火与磨削加工，淬火硬度达 HRC60-62，磨削精度控制在  $0.001\text{mm}$  以内，提升表面粗糙度与尺寸精度。

在轴承选型上, 主轴采用高精度角接触球轴承与圆柱滚子轴承组合支撑, 前端双列角接触球轴承, 后端圆柱滚子轴承, 精度等级 P4 级, 提升旋转精度与刚性。同时对轴承预紧, 预紧力 1500N-2000N, 减少间隙、避免振动。主轴润滑采用油气润滑, 用 32 号极压抗磨液压油, 润滑压力 0.4MPa, 每小时润滑 60 次, 每次 0.1ml, 保证润滑且降低成本。

### 2.1.3 刀架结构设计

刀架采用 C3 级精度、导程 10mm 的滚珠丝杠传动, 与伺服电机直连, 减少间隙, 提升定位精度与响应速度。定位用端面齿盘, 齿距精度控制在 0.001mm 内, 定位间隙在 0.0005mm 内, 提升定位与重复定位精度。

同时, 优化刀架结构, 本体用 QT500-7 球墨铸铁, 经时效处理与磨削加工, 提升刚性与精度保持性。换刀机构用凸轮传动, 换刀速度 0.5s/刀, 换刀重复定位精度  $\leq 0.002\text{mm}$ , 提升加工效率。

## 2.2 伺服驱动与运动控制技术

### 2.2.1 高精度伺服驱动系统选型与优化

在伺服电机选型上, 主轴伺服电机选永磁同步伺服电机 1FT7 系列, 功率 7.5kW, 额定转速 3000r/min, 最大转速 6000r/min, 扭矩 24N·m, 特点是高效率、高功率密度等, 可满足高速高精度加工需求; 刀架进给伺服电机选永磁同步伺服电机 1FK7 系列, 功率 1.5kW, 额定转速 3000r/min, 最大转速 6000r/min, 扭矩 4.8N·m, 定位精度高、响应快, 能实现刀架精准进给。

伺服驱动器选西门子 S120 系列, 有高控制精度、高响应速度等特点, 支持三种控制模式, 可灵活切换。编码器采用高精度绝对式编码器, 主轴编码器分辨率 2048 线, 进给轴编码器分辨率 10240 线, 能实时反馈电机信息, 减少定位误差。

同时, 对系统进行优化。采用矢量控制策略, 优化驱动器参数设置, 提升响应速度与控制精度; 用电子齿轮箱功能, 实现主轴与刀架同步运动, 减少同步误差。

### 2.2.2 运动控制算法优化

位置控制方面, 传统 PID 控制算法存在响应慢、抗干扰弱、定位精度不足等问题。本文采用模糊 PID 控制算法, 结合 PID 易懂与模糊控制抗干扰强、自适应好的优点, 通过模糊控制器实时调整 PID 参数, 根据电机位置误差与变化率自动优化系数, 提升响应速度与精度。

轨迹插补方面, 传统线性与圆弧插补算法存在精度低、轨迹平滑性差等问题, 难以满足高精度曲面加工需求。本文采用 NURBS 曲线插补算法, 能精准插补复杂曲面, 精度高、轨迹平滑, 可减少加工表面粗糙度, 提升质量。

## 2.3 在线检测与误差补偿技术

### 2.3.1 在线检测系统集成与检测方法优化

结合高精度数控车削自动线加工需求, 本文采用接触式测头 + 光学检测传感器组合方案集成在线检测系统。

接触式测头选 RenishawMP250, 精度  $\leq 0.0005\text{mm}$ , 检测精度高、响应快、稳定性好, 可实时检测工件尺寸等。光学检测传感器选 KeyenceIV2 系列, 精度  $\leq 0.001\text{mm}$ , 能非

接触检测工件表面情况, 避免损伤。

检测工装为可调式, 结合工件设计, 定位精度  $\leq 0.001\text{mm}$ , 适配不同轴类零件, 确保检测精度。数据采集模块选 NIcDAQ-9178 数据采集卡, 采样频率 1000Hz, 可实时采集数据传至控制系统用于误差补偿。

同时, 优化检测方法, 采用“加工中检测 + 加工后检测”双重模式。加工中, 粗加工后、精加工前, 接触式测头检测关键尺寸获误差数据, 控制系统调整参数; 加工后, 光学检测传感器全面检测表面, 接触式测头再次检测尺寸等, 确保加工精度。

### 2.3.2 误差补偿技术研究是实现

误差补偿技术根据在线检测系统获取的加工误差数据, 由控制系统发补偿指令, 调整伺服驱动系统、刀架位置等, 以减误差、提精度。

高精度数控车削自动线加工误差源于机床本体误差(床身变形、主轴跳动等)、伺服驱动误差(定位误差、同步误差等)、工件定位夹持误差和切削热变形误差。针对这些误差, 采用分层补偿方案。

在机床本体误差补偿方面, 在线检测系统实时检测误差数据并建模, 控制系统依模型发指令, 调整主轴与刀架位置, 如检测到主轴径向跳动 0.001mm 时调整刀架 X 轴位置。

对于伺服驱动误差, 结合误差数据用算法, 实时调整驱动器参数、优化运动控制算法, 如刀架定位误差 0.0008mm 时调整伺服电机位置指令。

在工件定位夹持误差补偿时, 根据检测数据调整液压卡盘夹持力与顶尖位置, 如工件轴向定位误差 0.001mm 时调整顶尖轴向位置。

在切削热变形误差补偿时, 温度传感器检测切削温度建模, 控制系统依模型发指令, 调整加工参数或刀架位置, 如切削温度升高致误差 0.0015mm 时, 降低切削速度、增加冷却流量并调整刀架位置。

误差补偿实现过程为: 在线检测系统采集数据传至控制系统, 控制系统分析处理、识别误差, 调用补偿模型发指令调整; 补偿后再检测, 超允许范围则重复补偿, 直至误差  $\leq 0.005\text{mm}$ 。通过该技术, 加工误差减少超 70%, 精度大幅提升。

## 2.4 系统集成与协同控制技术

### 2.4.1 系统集成方案设计

系统集成方案采用“硬件集成+软件集成”双重模式, 实现设备模块融合。硬件集成上, 将机床加工、自动上下料、在线检测、辅助等单元通过工业以太网和现场总线连接, 实现信号与数据交互。

同时设置中央控制机柜, 集成控制系统、电源模块、信号调理模块, 实现集中控制与供电。机柜采用防尘、防潮、防电磁干扰设计; 电源模块为高精度稳压电源, 输出电压精度  $\pm 0.5\%$ ; 信号调理模块减少信号干扰, 提升传输精度。

软件集成方面, 采用模块化设计, 开发高精度数控车削自动线控制系统软件, 集成加工控制、上下料控制、在线检测、误差补偿、数据管理等模块。

### 2.4.2 协同控制策略研究

本文采用“主从控制+分布式控制”策略，结合模糊与PID控制算法实现协同控制。

主从控制方面，以控制系统为主控制器，各设备模块为从控制器。主控制器接收反馈、发指令、协调工作；从控制器执行指令、采集数据并反馈。如主控制器依各单元数据发协同指令，控制上下料与加工单元协同。

分布式控制方面，将设备模块分多个子系统，子系统负责本模块控制，接受主控制器协调，实现分布式与集中管理结合。

同时，采用模糊PID协同控制算法，依自动线运行状态实时调整参数，提升控制精度与响应速度。如加工精度波动或运行速度调整时，算法协调各单元工作以确保协同。

## 三、工程应用验证

### 3.1 应用背景

为验证本文研究的高精度数控车削自动线关键技术的可行性与有效性，将其应用于浙江旭辉智能装备有限公司为某轴承制造企业研发的高精度轴承轴类零件数控车削自动线项目中。该项目要求加工的轴承轴类零件直径为20mm-30mm，长度为50mm-100mm，加工精度要求为 $\pm 0.005\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.2\mu\text{m}$ ，生产效率要求达到8件/分钟以上，批量加工数量为10000件。

该轴承制造企业此前采用传统单机数控车削加工模式，存在加工精度一致性差、生产效率低、劳动强度大等问题，加工合格率仅为92%，生产效率为5件/分钟，无法满足批量生产需求。

### 3.2 自动线配置与技术参数

基于本文研究的关键技术，研发的高精度数控车削自动线主要配置包括：2台高精度数控车床（采用本文优化设计的机床本体结构）、1套直角坐标机械手自动上下料机构、1套在线检测系统（接触式测头+光学检测传感器）、1套控制系统（西门子S7-1500PLC+WinCC上位机）、1套辅助系统（冷却、润滑、排屑）。

自动线的主要技术参数如下：加工范围为直径5mm-50mm、长度10mm-200mm；加工精度为 $\pm 0.005\text{mm}$ ；重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ ；表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.2\mu\text{m}$ ；上下料效率为10件/分钟；生产效率为8件/分钟以上；故障停机率 $\leq 5\%$ ；加工合格率 $\geq 99\%$ 。

### 3.3 应用验证结果与分析

该高精度数控车削自动线在某轴承制造企业试运行30

天，批量加工轴承轴类零件10000件，对其加工精度、生产效率、运行稳定性等性能指标全面验证，结果如下：

加工精度上，随机抽100件成品检测，尺寸误差在 $\pm 0.005\text{mm}$ 内，平均 $0.002\text{mm}$ ；重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ ，平均 $0.001\text{mm}$ ；表面粗糙度 $\leq \text{Ra}0.2\mu\text{m}$ ，平均 $\text{Ra}0.15\mu\text{m}$ ，满足项目要求，较传统单机加工提升超60%。

生产效率方面，试运行平均生产效率9件/分钟，超项目要求的8件/分钟，较传统单机加工（5件/分钟）提升超80%；实现全流程自动化，每班（8小时）加工4320件，较传统单机加工（2400件）产能提升80%。

运行稳定性上，30天累计运行720小时，故障停机28小时，停机率3.9%，低于项目要求的5%；故障多为机械手抓手轻微磨损等minor故障，维修快不影响生产，各模块协同好，无重大故障，稳定性大幅提升。

加工合格率方面，10000件零件中合格9920件，合格率99.2%，超项目要求的99%，较传统单机加工（92%）提升7.2%，减少废品率与生产成本。

应用验证表明，基于关键技术研发的该自动线各项性能指标满足要求，解决传统单机加工痛点，提升企业效益与产品质量，彰显关键技术可行有效。

## 四、结论

本文围绕高精度数控车削自动线关键技术展开研究，解决行业共性问题，得出如下结论：

1. 优化机床本体结构，选用HT300灰铸铁作床身材料，采用斜床身与交叉加强筋，主轴用一体化结构与高精度轴承，刀架用高精度电动刀架与滚珠丝杠传动，提升机床刚性与精度，床身热变形、主轴径向跳动、刀架定位精度均控制在 $0.001-0.003\text{mm}$ 以内。

2. 优化伺服驱动与运动控制技术，选用高精度永磁同步伺服电机与西门子S120驱动器，采用模糊PID与NURBS曲线插补算法，提升响应速度与控制精度，伺服系统响应时间、定位精度、插补误差分别控制在 $0.001\text{s}$ 、 $0.0005\text{mm}$ 、 $0.001\text{mm}$ 以内。

3. 研发在线检测与误差补偿技术，采用接触式测头与光学检测传感器组合检测，建立分层误差补偿模型，实现实时检测与精准补偿，加工误差减少70%以上，精度控制在 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内。

4. 提出系统集成与协同控制方案，采用“硬件+软件”双重集成、“主从+分布式”协同控制，实现设备模块集成与协同，自动线故障停机率 $\leq 3.9\%$ ，稳定性大幅提升。

## 参考文献

- [1]刘敏, 曲健. 圆锥轴承套圈车削自动线的研制[J]. 现代制造工程, 2005(4): 112-113.
- [2]孙建平. 十字轴高效车削自动线的总体设计[J]. 中国新技术新产品, 2018(12): 1-3.
- [3]李运生. 基于干式硬切削的轴承套圈高速车削自动线[J]. 轴承, 2011(8): 19-20.