

中小型盘类零件全自动车削生产线设计研究

伍造桥 高滨 吴红成

浙江旭辉智能装备有限公司 浙江 绍兴 312500

【摘要】：本文开展中小型盘类零件全自动车削生产线设计研究，重点解决生产线布局优化等关键技术难题。通过理论分析和工程验证，明确生产线整体设计方案和各模块技术要点及优化措施，实现全流程自动化作业。实践表明，该生产线适配直径20mm-200mm、厚度5mm-50mm的零件加工，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加工提升70%以上，加工合格率提升至99.2%，换产时间缩短至15分钟以内，降低人工成本与废品率，适配多品种、小批量柔性生产需求，为自动化加工提供可靠方案与参考，有重要工程应用价值和推广前景。

【关键词】：中小型盘类零件；全自动车削生产线；柔性定位；在线检测；系统集成；协同控制

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.051

1 引言

在《中国制造2025》推进及制造业转型升级背景下，精密机械加工领域对中小型盘类零件的加工精度、效率、柔性化提出更高要求。中小型盘类零件是机械装备基础零部件，包括法兰、端盖等多种类型，结构直径适中、厚度较薄，部分为薄壁结构，加工易变形、定位偏差，对装备精度与稳定性要求高。

目前，国内多数企业加工中小型盘类零件依赖传统单机数控车床，采用“人工上下料+单机加工+人工检测”模式，存在诸多痛点：一是人工干预多，劳动强度大，加工精度一致性差，合格率约92%；二是生产效率低，单件节拍约25分钟，人工上下料耗时占30%，难满足批量生产；三是柔性化不足，多品种切换需人工调整，换产时间达90分钟；四是薄壁件加工易变形，平面度误差常超0.03mm/m。

为解决加工痛点，适配行业需求，本文开展中小型盘类零件全自动车削生产线设计研究，推动加工模式升级，提升企业竞争力。

2 中小型盘类零件全自动车削生产线总体设计

结合加工流程与功能单元特点，参考先进经验，采用U型布局设计生产线，具有占地小等优点，较传统线性布局场地占用减少60%。生产线占地约32m²，分五大功能区域：毛坯上料区在一端，设分层式立体料仓与自动上料机构；核心加工区在中部，布置2台高精度数控车床；在线检测区在核心与成品下料分拣区之间，集成检测与分拣设备；成品下料分拣区在另一端，设成品与不合格品料箱；辅助功能区分布周边，提供保障。物流路径采用“闭环式”，通过桁架机械手实现全程自动化转运，有效缩短物流耗时。

3 中小型盘类零件全自动车削生产线关键技术研究

3.1 核心加工单元设计（数控车床优化）

3.1.1 车床床身结构优化

床身是数控车床基础部件，传统平床身刚性不足、易振动和切屑堆积，影响加工精度。本文优化的床身采用45°斜床身

结构，能降低切削力影响、提升刚性、便于排屑。材料选用高强度灰铸铁HT300，结合人工与自然时效处理消除内应力。床身内部设交叉式加强筋，经测试，优化后床身刚性提升40%以上，热变形量控制在0.003mm以内，保障加工精度。

3.1.2 主轴结构优化

主轴是数控车床核心运动部件，其性能影响零件形位公差。主轴采用一体化设计，选用40CrNiMoA合金结构钢，经多种处理提升精度。

轴承采用高精度角接触球轴承与圆柱滚子轴承组合，预紧处理减少间隙。润滑采用油气润滑，冷却采用主轴内置冷却通道，主轴径向与轴向跳动大幅降低，适配高精度加工需求。

3.1.3 刀架与切削工艺优化

刀架选用LD4B-80型高精度电动刀架，具备8个刀该刀架可满足端面、外圆、内孔、沟槽等多工序加工。采用滚珠丝杠传动，精度等级C3级，导程10mm，与伺服电机直连，减少传动间隙，提升定位精度与响应速度。定位采用端面齿盘，齿距精度控制在0.001mm内，定位间隙在0.0005mm内，定位精度达0.001mm，重复定位精度 $\leq 0.0008\text{mm}$ ，换刀速度0.5s/刀，提升加工效率。

针对薄壁类中小型盘类零件加工易变形问题，优化切削工艺，采用小切深精加工，切削深度0.1mm-0.2mm，减少切削力致零件变形；对不锈钢等难加工材料盘类零件，用啄钻工艺分散切削应力，减少变形；同时采用局部制冷技术，冷却液温度控制在10℃左右，减少切削热影响，控制热变形。

3.2 自动上下料与柔性定位夹持技术

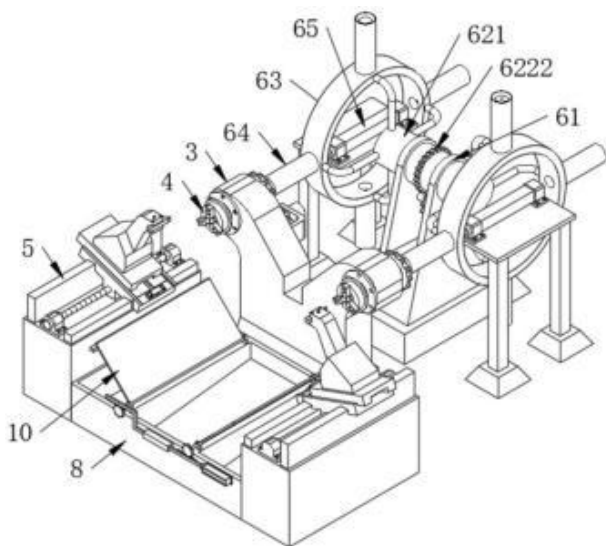
3.2.1 自适应自动上下料机构设计

自动上下料机构要实现多品种中小型盘类零件精准抓取、转运与定位，适配不同直径（20mm-200mm）、厚度（5mm-50mm）零件。通过采用桁架机械手+分层式立体料仓+同步带传送带方案，优化结构与抓取方式，提升效率与精准度。

桁架机械手选XYZ-1200型，有三个自由度，行程分别为

X轴 1200mm、Y轴 600mm、Z轴 400mm，重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ 。抓手用自适应气动夹爪，材质为硬质合金，表面防滑、防刮，开合行程 0-200mm，夹持力 50N-500N 可调。

分层式立体料仓由步进电机驱动，分度精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，每层有导向装置。同步带传送带用高精度同步带，速度 0.1m/s-0.5m/s 可调，两侧护栏间距可调。优化后，上下料效率达 12 件/分钟，重复定位精度 $\leq 0.002\text{mm}$ ，满足加工需求。



3.2.2 柔性定位夹持夹具设计

柔性定位夹持夹具要实现多品种中小型盘类零件精准定位与可靠夹持，减少误差与变形。参考专利（CN102806464A）理念，设计高精度柔性液压夹具。

夹具采用中空液压卡盘+自适应定位块结构。液压卡盘选 K11-250 型，直径 250mm，有三个 IT5 级精度的硬质合金卡爪，定位精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.0005\text{mm}$ 。液压系统压力 0.5MPa-3MPa 可调。

自适应定位块为可调式，定位面精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，位置可通过螺栓调整，适配不同厚度零件。针对薄壁零件，采用液压膨胀夹具与真空吸附结合方式，吸附力 100N-300N 可调，用自动对中技术，对中精度 $\leq 0.001\text{mm}$ 。

3.3 在线检测与误差补偿技术

3.3.1 在线检测系统集成与优化

在线检测系统由接触式测头、光学检测传感器、数据采集模块、检测工装组成。接触式测头选 RenishawMP250，精度 $\leq 0.0005\text{mm}$ ，可实时检测尺寸与形位公差；光学检测传感器选 KeyenceIV2 系列，精度 $\leq 0.001\text{mm}$ ，非接触检测表面质量，适用于薄壁件与精密表面。

检测工装可调，适配不同零件，定位精度 $\leq 0.001\text{mm}$ 。数据采集模块选 NIcDAQ-9178，采样频率 1000Hz，实时采集数据传至控制系统。同时集成红外热像仪，为热变形误差补偿提

供数据。

优化检测方法，采用“加工中检测+加工后检测”模式。加工中，粗加工后、精加工前，接触式测头检测关键尺寸，调整精加工参数；加工后，光学检测传感器检测表面质量，接触式测头再次检测尺寸与形位公差。

3.3.2 误差补偿技术研究是实现

针对机床本体误差，实时检测误差数据，建立误差模型，控制系统调整主轴与刀架位置。如检测到主轴径向跳动误差 0.001mm，调整刀架 X 轴位置。

针对伺服驱动误差，结合误差数据，采用模糊 PID 补偿算法，调整伺服驱动器参数。如检测到刀架定位误差 0.0008mm，调整伺服电机位置指令。

针对工件定位夹持误差，根据检测数据调整液压卡盘夹持力与定位块位置。如检测到工件轴向定位误差 0.001mm，调整定位块轴向位置。

针对切削热变形误差与刀具磨损误差，通过红外热像仪检测切削温度，建立热变形误差模型，监测刀具磨损量，控制系统据此处理。根据刀具磨损数据，调整切削速度、进给量等加工参数或刀架位置，补偿热变形与刀具磨损误差。

误差补偿实现过程：在线检测系统实时采集加工误差数据与相关参数并传至控制系统；控制系统分析处理数据，识别误差来源与大小，调用对应补偿模型；控制系统发出补偿指令，调整伺服驱动系统、刀架位置和加工参数；补偿后，在线检测系统再测工件精度，若误差超允许范围（ $\leq 0.005\text{mm}$ ），重复补偿直至误差受控。

3.4 系统集成与协同控制技术

3.4.1 系统硬件集成

硬件集成通过工业以太网、现场总线连接毛坯上料、核心加工、自动上下料与定位夹持、在线检测与分拣、辅助等单元，实现信号传输与数据交互。工业以太网选 Profinet 总线，速率 100Mbps，延迟 $\leq 1\text{ms}$ ；现场总线选 CAN 总线连接辅助单元。

设置中央控制机柜，集成 PLC 控制器、上位机监控系统等，实现集中控制与供电。机柜防尘、防潮、防电磁干扰，电源模块输出电压精度 $\pm 0.5\%$ ，信号调理模块减少信号干扰。

集成安全防护系统，在周边设围栏，关键区域设传感器与急停按钮，异常时停机。集成数据采集与存储模块，采集运行、加工、检测等数据，存储不少于 1 年。

3.4.2 系统软件集成与协同控制策略

软件集成采用模块化设计，开发控制系统软件，集成加工控制、上下料控制等功能模块。选用西门子 WinCC 作上位机监控软件，S7-1500 系列 PLC 作下位机控制器，各模块通过接口交互协同。

上位机监控软件有参数设置等功能,操作人员可实时查看状态、设置任务等;下位机 PLC 执行指令、采集数据、控制协同。

协同控制策略采用“主从控制+分布式控制”结合模糊 PID 算法。主从控制以 PLC 为主,各设备模块为从,主接收反馈、发指令,从执行指令、反馈数据。分布式控制将设备模块分多个子系统,各子系统独立又协同。

4 工程应用验证

4.1 应用背景

为验证本文设计的中小型盘类零件全自动车削生产线可行性与有效性,将其应用于浙江旭辉智能为某汽车零部件企业研发的中小型法兰盘全自动加工项目。该项目加工的中小型法兰盘为典型中小型盘类零件,直径 50mm-150mm,厚度 10mm-30mm,薄壁占比 40%,加工精度 $\pm 0.005\text{mm}$ 等,生产效率 8 件/分钟以上,支持多品种混流生产,换产时间 ≤ 15 分钟。此前企业用传统单机数控车削,存在加工精度一致性差等问题,无法满足需求。本文设计的生产线解决痛点,提升效益。

4.2 生产线配置与技术参数

基于本文设计方案,为企业配置的生产线包括 2 台高精度数控车床等多套设备。生产线主要技术参数为:加工范围直径 20mm-200mm、厚度 5mm-50mm;加工精度 $\pm 0.005\text{mm}$ 等;上下料效率 12 件/分钟;生产效率 8 件/分钟以上;换产时间 ≤ 15 分钟;故障停机率 $\leq 5\%$;加工合格率 $\geq 99\%$;连续运行时间 ≥ 8 小时(无人干预);占地面积约 32 m²。

4.3 应用验证结果与分析

该生产线在企业试运行 30 天,批量加工 10000 件中小型法兰盘,对其加工精度、生产效率等性能指标全面验证。

在加工精度上,抽检 100 件成品,各项精度指标均达标,相比传统单机加工,精度提升 60%以上,一致性大幅改善。

在生产效率上,试运行平均效率 9 件/分钟,超项目要求,相比传统单机提升 80%以上;每班产能提升 80%;换产时间平均 12 分钟,缩短 87%,满足柔性化要求。

在运行稳定性上,试运行 30 天累计运行 720 小时,故障

停机 27 小时,停机率 3.75%,低于要求,故障多为轻微故障。生产线各模块协同良好,连续无人干预运行最长达 10 小时,运行稳定性大幅提升,设备综合效率(OEE)超 90%。

在加工合格率方面,10000 件批量加工零件中合格 9920 件,合格率 99.2%,超项目要求,较传统单机加工提升 7.2%,减少废品 800 件,降低生产成本。

应用验证显示,本文设计的生产线性能指标均达项目要求,解决传统单机加工痛点,提升企业效益与产品质量,证明研究技术可行有效。

5 结论

本文围绕中小型盘类零件全自动车削生产线设计展开研究,解决传统加工模式痛点,完成生产线整体设计与关键技术优化,结论如下:

(1) 生产线整体方案合理,采用 U 型布局,集成五大功能单元,占地小、物流路径短、协同便捷,适配直径 20mm-200mm、厚度 5mm-50mm 的中小型盘类零件,实现全流程自动化作业。

(2) 核心加工单元优化设计,采用斜床身+交叉加强筋结构,主轴与刀架选用高精度配置,优化切削工艺,提升加工精度与稳定性,床身热变形、主轴径向跳动、刀架定位精度、薄壁件加工变形量均控制在较小范围内。

(3) 自动上下料与柔性定位夹持机构采用桁架机械手+自适应夹爪+柔性夹具方案,参考专利优化结构,实现多品种零件精准抓取等操作,提高上下料效率,减少工件定位误差,缩短换产时间。

(4) 在线检测与误差补偿系统采用接触与非接触结合检测方式,借鉴分层误差补偿方法,实现加工误差实时检测与精准补偿,提升加工精度一致性。

(5) 采用双重集成模式与协同控制策略,实现各单元有机集成与精准协同,降低生产线故障停机率,提升运行稳定性、生产效率与加工合格率。

工程应用验证表明,该生产线性能优良,可行性与有效性得到验证,能解决传统加工痛点,助力企业降本增效,有重要工程应用价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 张丽敏. 自动轴承车削生产线研究[D]. 浙江:浙江大学,2003.
- [2] 常新革,刘红丽. 汽车发动机凸轮轴生产线车削工艺方案[J]. 金属加工(冷加工),2012(11):51-52.
- [3] 许黎明,胡德金,宋刚. 全自动加工生产线中数控车削专机的研究开发[J]. 组合机床与自动化加工技术,2003(4):60-61.