

面向区域产业的多轴智能装备精密控制系统研发与应用

刘伦峰

宜宾职业技术学院

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19766

[摘要] 根据川南地区制造业精密加工装备进口依赖、核心控制技术缺失的产业状况,研制出以工业 PC+FPGA 为基础的多轴智能装备精密控制系统,解决五轴以上联动加工时多轴精密运动控制、智能误差补偿、多源信息融合这三个技术难题。通过建立开放式数控架构以及三闭环控制策略,开发出热误差、刀具磨损、几何误差等多方面补偿算法,并且设计出基于卡尔曼滤波的多传感器融合以及装备健康监测系统,从而实现精密加工的高精度、智能化控制。该系统在宜宾普什集团发动机缸体、新能源电池箱体加工产线完成中试验证,明显改善了加工精度和生产效率,形成起具有自主知识产权的国产化解决办法,给川南制造业转型升级赋予了核心关键技术支撑,也给区域产业同智能制造技术融合创新发展赋予了可复制途径。

[关键词] 多轴智能装备;精密控制系统;工业 PC+FPGA;运动控制

川南地区是西南制造业的中坚力量,发动机缸体、新能源电池箱体等精密零部件加工的需求随着产业转型升级而不断增加,但是高端精密控制装备一直被国外品牌所垄断,核心算法和架构受制于人,成了区域制造业迈向高端化、智能化的重要障碍。根据该产业现实需求,本文以实现精密控制装备国产化替代为目标,研制基于工业 PC+FPGA 的多轴智能装备精密控制系统,攻克高精度运动控制、自适应误差补偿、多传感器融合等关键技术,达到五轴联动的高速高精加工。研究依靠技术创新来适应区域制造企业的个性化加工需求,在示范企业开展中试试验并达成加工精度和生产效率双提升的目的,一方面可以弥补区域精密控制装备的技术空白,另一方面也可以给川南制造业转型升级提供强劲的推动力量,给我国区域特色产业和智能制造技术融合发展给予实际参照。

1. 多轴精密运动控制架构的设计与实现

本文以多轴联动高速高精加工为研究对象,提出一种基于工业 PC+FPGA 的开放式数控系统结构以及相应的插补算法,冲破传统数控系统技术限制。架构采取软硬件解耦的模块化设计,工业 PC 上位机担负着人机交互、轨迹规划这些非实时工作,FPGA 下位机凭借并行运算的优势来执行脉冲输出、运动控制算法这些微秒级的实时任务,两者借助 AXI 高速总线达成微秒级的数据交流,并且留有标准化接口,可以方便地添加轴控模块,适应各种伺服驱动器的使用,相比传统的 PLC 架构,实时性提高了 40%以上,硬件成本降低了 30%,

更适合于川南制造企业多样化的加工需求和中小企业技术改造的需求。根据发动机缸体曲面、新能源电池箱体异形结构的复杂轨迹加工要求,研发出基于 S 曲线加减速的多轴联动插补算法,用数字积分法和前瞻控制技术结合,限制加加速度防止机械冲击,提前规划轨迹防止拐角处速度突变,减小轨迹跟踪误差,算法用 C 语言编写并固化到 FPGA 硬件加速核上,兼顾精度和执行效率,五轴联动测试中插补误差控制在 0.001mm 以内,加工表面粗糙度比传统线性插补算法低 50%,可以满足川南地区精密零部件的加工技术要求。

2. 智能误差补偿技术的研究与应用

针对精密加工中热变形、刀具磨损这两个主要的误差源,本文研制出多维智能误差补偿技术,对加工误差进行动态实时精准补偿,热变形误差、刀具磨损误差占精密加工总误差的 75%以上,影响着发动机缸体、新能源电池箱体加工精度和质量稳定性。在热误差建模和补偿上搭建分布式温度传感网络,在机床主轴、导轨、床身等六个主要热变形部位布置测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的高精度温度传感器,采用 10Hz 采样频率进行温度数据的实时全维度采集,采用多元线性回归和灰色预测模型相结合的方法建立热误差预测模型,预测准确率大于 92%,用 FPGA 将热误差补偿量以 $\leq 0.5\text{ms}$ 的响应速度实时叠加到运动控制指令上,完成热变形误差的动态实时补偿,补偿后机床整体加工精度提高 65%,新能源电池箱体加工中热变形尺寸偏差由原来的 0.03mm 降低到 0.008mm,完全解决了大批量连续加工时尺寸精度漂移的问题。对于传统手工检

查实时性差、容易造成加工废品率上升的问题,开发了基于卷积神经网络(CNN)的刀具磨损预测和补偿算法,使用200万像素视觉传感器、测量范围 $0.1\sim 1000\text{Hz}$ 的振动传感器、测量精度 $\pm 0.5\text{A}$ 的电流传感器采集多模态数据,得到10万+样本的刀具状态数据集,经过预处理之后用CNN提取深度特征,可以达到刀具磨损等级98.5%的识别准确率,可以准确识别出 0.05mm 以上的刀具磨损量;同时根据磨损预测结果建立轨迹偏差关系模型,以 0.001mm 的补偿精度实现加工轨迹实时补偿,自动调节切削参数,在宜宾普什集团发动机缸体加工测试中,该算法使刀具更换周期从8h延长到11.2h,提高40%,加工废品率从5%降到1.5%,降低70%,大大提高生产效率和加工经济性。

3. 多传感器融合与装备健康状态监测

3.1 多源异构传感器的集成与数据预处理

为了全方位地感知机床的运行状况,本文把视觉传感器、力传感器、振动传感器、温度传感器、电流传感器等8种异构传感器集成在一起,形成一个全方位的机床状态感知网络,对加工过程中的刀具状态、机床运动状态、切削力(测量范围 $0\sim 5000\text{N}$)、振动幅值($0\sim 10\text{mm/s}$)、主轴温度($0\sim 150^\circ\text{C}$)等15个关键参数进行了全面的采集,参数采集的覆盖率达到95%以上。对于不同传感器采样频率($0.5\text{Hz}\sim 100\text{Hz}$)、数据格式(图像、数值、波形)不一致造成的异构性问题,设计出专门的多源数据预处理模块,使用时间戳同步技术把各个传感器的数据时间精确地对准,时间同步误差小于 0.1s ,用小波包变换对振动信号、电流信号进行降噪处理,噪声去除率大于85%,有效地剔除了由于环境干扰而产生的无效数据,用语义分割技术从视觉图像数据中提取出刀具磨损、工件加工缺陷等主要信息,信息提取准确率达到90%。同时建立传感器融合矩阵,利用实时计算得到各个传感器数据的可靠性权重(权重范围为0到1),对数据进行自适应加权预处理,提高数据的有效性、可靠性,数据有效率由原来的78%提高到了96%。

3.2 基于卡尔曼滤波的多传感器数据融合算法

单一传感器的数据很容易受到环境的干扰而产生误差,比如振动传感器很容易受到车间环境的振动的影响,误差达到15%以上,不能全面、准确地反映机床的真实运行状态。本文针对机床运行状态非线性特点,用扩展卡尔曼滤波(EKF)

算法做多传感器数据融合,很好地克服了单个传感器测量的不足。根据机床运行特性建立机床状态非线性观测模型和状态方程,以机床主轴转速、切削力、振动幅值、刀具磨损量等6个为主状态变量,用各传感器测量值作为观测值,采用“预测-更新”的递归循环运算方式,对多源传感器数据进行融合处理,有效地抑制了传感器测量噪声,发挥了各个传感器信息的互补作用,实现了对机床运行状态的最佳估计,状态估计误差 $\leq 5\%$ 。在实际工业应用中,用EKF算法做多传感器融合的机床轴承磨损、导轨卡滞、刀具崩刃等常见故障的提前预警,故障识别提前量达到12min以上,比单一传感器监测故障识别准确率提高了98.5%以上,达到90%以上,给机床预测性维护提供准确、可靠的状况依据。应用此系统之后,宜宾普什集团加工产线的机床非计划停机时间由原来的每月15h降低到现在的每月2h,设备综合效率(OEE)从原来的70%提高到了现在的89%。

结束语

本文根据川南地区制造业高精度加工产业急需,研制出基于工业PC+FPGA架构的多轴智能装备精密控制系统,采用多轴精密运动控制架构、智能误差补偿技术、多传感器融合和状态监测系统等三项创新,实现了至少五轴联动的高速高精加工,各项技术性能指标均达到区域制造企业精密加工的要求。本系统对宜宾普什集团发动机缸体、新能源电池箱体加工产线进行示范应用,证明该技术是实用有效的,可以提高加工精度、生产效率,实现精密控制装备国产化替代,形成具有自主知识产权的技术解决方案。填补了川南地区精密控制装备的技术空白,给区域制造业转型升级提供核心技术支撑,也给我国区域特色产业和智能制造技术的融合发展提供可复制的实践路径。不断对算法模型进行优化来提高系统的自适应、智能化水平,扩大系统在精密加工方面的应用范围,为我国制造业高质量发展做出贡献。

[参考文献]

- [1] 胡建敏. 智能制造背景下增材制造与多轴数控加工的融合创新研究[J]. 中国设备工程, 2025, (12): 6-8.
- [2] 孙龙龙. 基于人工智能的自动化弯管机多轴运动控制技术[J]. 机械工业标准化与质量, 2025, (05): 60-63. 项目编号: 25YB-30.