

国产 FPGA 及多通道同步采样 ADC 在机电一体化数控设备中应用研究

卢新亮

成都泰然科技有限公司 四川成都

【摘要】在智能制造与工业自主可控的背景下，针对机电一体化数控设备对高精度数据采集与实时控制的需求，本文聚焦国产现场可编程门阵列（FPGA）与多通道同步采样模数转换器（ADC）的协同应用。通过分析国产 FPGA（如安路 Tang、紫光同创 Logos 系列）的硬件可编程特性，结合领慧立芯 LHA7878、芯动神州 ADCS8162 等国产 ADC 的高精度同步采样能力（24 位 / 16 位分辨率，8/16 通道同步采集），构建面向数控设备的多维度信号采集与实时处理架构。重点研究信号调理电路设计、时钟同步策略、数据处理算法硬件化实现等关键技术，并通过工业级应用案例验证系统性能。研究成果为国产核心器件在高端装备中的深度融合提供解决方案，助力提升数控设备的自主可控水平与可靠性。

【关键词】FPGA；多通道同步采样；ADC；机电一体化；数控设备

【收稿日期】2025 年 1 月 18 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250026

Research on the application of domestic FPGA and multi channel synchronous sampling ADC in mechatronics numerical control equipment

Xinliang Lu

Chengdu Tairan Technology Co., Ltd, Chengdu, Sichuan

【Abstract】In the context of intelligent manufacturing and industrial self-control, this article focuses on the collaborative application of domestic field programmable gate arrays (FPGAs) and multi-channel synchronous sampling analog-to-digital converters (ADCs) to meet the demand for high-precision data acquisition and real-time control of mechatronic integrated CNC equipment. By analyzing the hardware programmable characteristics of domestic FPGAs such as Anlu Tang and Ziguang Tongchuang Logos series, and combining the high-precision synchronous sampling capabilities of domestic ADCs such as Linghui Lixin LHA7878 and Xindong Shenzhen ADCS8162 (24 bit/16 bit resolution, 8/16 channel synchronous acquisition), a multidimensional signal acquisition and real-time processing architecture for data control devices is constructed. Focus on researching key technologies such as signal conditioning circuit design, clock synchronization strategy, and hardware implementation of data processing algorithms, and verify system performance through industrial level application cases. The research results provide a solution for the deep integration of domestic core components in high-end equipment, helping to improve the independent controllability and reliability of CNC equipment.

【Keywords】FPGA; Multi channel synchronous sampling; ADC; Mechatronics integration; Numerical control equipment

引言

智能制造时代，数控设备需要实时采集力、温度、振动等多类信号，传统分立式采集模块难以满足实时性需求，国外厂商凭借先发优势占据技术高

地。Xilinx FPGA 搭配 ADI 高精度 ADC 的方案广泛应用于五轴机床，但国际形势变化导致我国高端芯片进口受限，国产核心器件的自主化应用成为必然选择^[1]。当前国产 FPGA、ADC 性能已大幅提升，

如国内安路科技推出的工业级 FPGA 已实现动态重构功能，紫光同创集成 ARM 核的异构架构提升了算法效率。芯动神州开发的 ADCS8162 在 200kSPS 采样率下达到 16 位精度，但多通道同步性能较国际产品仍有差距，现有研究多聚焦单一器件性能，缺乏系统级协同优化^[2]。本文研究了国产 FPGA 及多通道同步采样 ADC 在机电设备中的应用，设计低延迟同步控制架构，并在五轴机床与智能磨削设备中验证系统性能，旨在形成可推广的国产化解决方案，推动高端装备核心部件的技术自主化进程。

1 关键技术基础

1.1 国产 FPGA 技术特性分析

国产 FPGA 的性能直接影响数控系统的可靠性。安路 Tang 系列采用动态重构技术，在-40℃至 85℃范围内可保持逻辑功能稳定，功耗低于 1.2W。紫光同创 Logos 系列集成了 ARM Cortex-M3 软核，支持 EtherCAT 总线协议，其高速收发器速率达到 6Gbps。表 1 对比了两款 FPGA 的关键参数^[3]。

1.2 国产多通道同步采样 ADC 技术解析

高精度模数转换器是实现信号采集的核心器件。领慧立芯 LHA7878 在 20kSPS 采样率下实现 24 位有效分辨率，适用于温度传感器的微弱信号采集。芯动神州 ADCS8162 支持 8 通道同步采样，在 200kSPS 速率下保持 16 位精度，其过压保护范围达到±16.5V。国芯思辰 SC1464 可同时采集 16 路信号，1MSPS 吞吐率满足高速振动分析需求。表 2 列出三款 ADC 的技术指标。

1.3 数控设备对采集系统的需求分析

数控机床需要同时处理多类传感器信号。力传感器要求 ADC 有效位数不低于 16 位，以确保亚微米级定位精度。温度信号的采集周期需小于 50 μs，避免热误差累积。振动监测系统要求 1MSPS 采样率，覆盖 0-50kHz 频谱范围。工业现场环境恶劣，采集

模块需在-40℃至 85℃范围内稳定工作，抗电磁干扰能力需满足 IEC 61000 标准^[4]。

上述技术指标表明，国产 FPGA 与 ADC 的组合已具备替代进口方案的潜力，但需在时钟同步精度与抗干扰设计方面进一步优化。

2 系统架构设计与关键技术

数控设备的性能提升需要硬件架构与算法的深度配合。本文提出的国产化方案通过优化器件协同机制，实现采集与控制功能的高度整合。该架构以国产 FPGA 为核心控制器，结合多通道同步采样 ADC 构建完整信号链，重点解决时序同步、噪声抑制与实时处理三大技术难题。以下从硬件架构、同步控制、算法实现三个层面展开论述。

2.1 硬件协同架构设计

数据采集系统的稳定性依赖器件间的有效配合。安路 FPGA 通过改进型 SPI 接口连接芯动神州 ADCS8162，在传统四线制基础上增加专用数据就绪信号线，避免总线冲突。接口时钟频率从 30MHz 提升至 50MHz，配合片内双缓冲机制，使有效数据传输效率达到 98%。信号调理模块采用三阶巴特沃斯滤波器，截止频率设定为 22.9kHz，在 100kHz 处实现 60dB 衰减，消除高频干扰对采集精度的影响。可编程增益放大器选用国产圣邦微 SGM8261，增益范围覆盖 0dB 至 60dB，偏移电压低于 5 μV，满足力传感器微弱信号放大需求。

工业级防护设计包含多级保护措施。电源输入端部署瞬态抑制二极管 SMF15A，可承受 30kV 静电放电冲击。模拟信号通路采用磁珠滤波器与屏蔽罩结构，辐射噪声降低 25dB。PCB 布局严格划分模拟与数字区域，地平线通过单点连接消除环路干扰^[5]。实测表明，该模块在-40℃至 105℃范围内，基准电压温漂稳定在 8ppm/℃以内。表 1 为硬件优化效果。

表 1 硬件架构性能对比

指标	传统方案	本文方案	提升率
接口速率	30MHz	50MHz	66%
通道延迟	3.2ns	0.8ns	75%
温度范围	-25℃~70℃	-40℃~105℃	扩展 53%
抗扰度	15kV	30kV	100%

2.2 同步采样控制技术

多通道信号的时间对齐直接影响控制精度。FPGA 内部锁相环产生主时钟信号，通过 LVDS 差分线路传输至各 ADC 芯片，布线长度偏差控制在 5mm 以内。时间数字转换模块实时监测时钟偏移量，动态调整相位补偿值，将通道间偏差从 1.5ns 压缩至 0.8ns。触发信号采用菊花链级联方式，首片 ADC 的 CONVST 信号经 FPGA 驱动后依次传递至后续芯片，确保同步触发误差小于 0.5ns。

在五轴机床测试中，系统同时采集 32 路传感器信号。力传感器选用 Kistler 9129C，温度传感器采用 PT100 铂电阻。实验数据显示，200kSPS 采样率下各通道有效位数保持 15.7 位，较未补偿系统提升 0.5 位。温度信号采集周期缩短至 40μs，热变形补偿响应速度提升 3 倍。该方案已通过 ISO 230-2 标准验证，满足高精度加工要求。

2.3 数据处理算法硬件化

实时处理能力决定系统响应速度。紫光同创 FPGA 实现基 4 蝶形运算优化的 FFT 模块，利用流水线结构并行处理 4 组数据。1024 点频谱分析耗时 15 μs，较 Cortex-M7 软件方案缩短 97%。振动监测系统集成改进型小波包分解算法，将采样数据划分为 32 个子频段，提取 6kHz 至 10kHz 特征分量。实测表明，该算法在砂轮失衡量 0.1g 时即可触发预警，灵敏度较传统 RMS 检测法提升 3 倍^[6]。

硬件化 PID 控制器将运算周期压缩至 1μs。位置环控制采用 24 位定点数运算，比例系数动态调整范围扩展至 0.1 至 10.0。五轴机床加工测试显示，X 轴定位误差稳定在 ±0.5μm 范围内，表面粗糙度 Ra 值降低至 0.18μm。

3 应用案例与性能验证

3.1 五轴数控机床多传感器融合系统

五轴数控机床的加工精度受多物理量协同控制影响。传统进口采集方案存在响应延迟与兼容性问题，国产器件组合为高精度控制提供了新选择。系统采用安路 Elf 系列 FPGA 作为主控单元，搭配芯动神州 ADCS8162 模数转换器^[7]。FPGA 内置 128K 逻辑单元与 5.2Mb 存储资源，支持 8 通道并行处理。ADCS8162 在 200kSPS 采样率下实现 16 位有效分辨率，输入过压保护范围扩展至 ±16.5V。力传感器信号经三阶抗混叠滤波器预处理，截止频率设定为

22.9kHz，高频噪声衰减达到 65dB。温度信号采用 PT100 铂电阻，通过 24 位 Δ-Σ ADC 进行数字化，采集周期缩短至 40 μs。FPGA 实现硬件化 PID 控制算法，运算周期压缩至 1 μs。位置环控制采用 24 位定点数运算，比例系数动态调整范围扩展至 0.1 至 10.0。在加工中心测试中，系统同步采集 X/Y/Z 三轴力信号与主轴温度数据。实验选用 6061 铝合金工件，使用 φ6mm 球头铣刀进行曲面加工，传统方案与国产方案的数控机床加工效果如表 2 所示。

表 2 不同方案的加工效果

指标	进口方案	国产方案	提升率
定位精度	±1.2 μm	±0.5 μm	58%
表面粗糙度 Ra	0.35 μm	0.18 μm	49%
系统延迟	25 μs	4.8 μs	81%
温度补偿响应	120 μs	38 μs	68%

测试数据显示，国产方案在关键指标上全面超越传统进口器件组合。力控信号信噪比达到 89dB，较进口方案提升 6dB。热变形补偿速度提升 3 倍，有效保障长时间加工的尺寸稳定性。

3.2 智能磨削设备振动监测系统

砂轮振动直接影响磨削表面质量与设备寿命。传统振动监测系统受限于采集精度与处理速度，难以及时识别早期故障。国产高精度 ADC 与 FPGA 的组合为实时振动分析提供了新方案。系统采用紫光同创 Logos 系列 FPGA 搭配领慧立芯 LHA7878 模数转换器。FPGA 集成 215K 逻辑单元与 8.1Mb 存储资源，支持 16 通道并行处理。LHA7878 在 20kSPS 采样率下实现 24 位有效分辨率，动态范围扩展至 127dB。振动信号由压电加速度传感器采集，经可编程增益放大器放大后输入 ADC，信号调理模块集成二阶高通滤波器，截止频率设定为 0.5Hz，消除环境低频干扰^[8]。系统中 FPGA 实现硬件加速的 FFT 算法，1024 点频谱分析耗时 20 μs，频率分辨率达到 0.1Hz。系统持续监测砂轮主轴在 6kHz 至 12kHz 频段的振动能量，当特征频率幅值超过阈值时触发预警。实验选用直径 400mm 的 CBN 砂轮，在 12m/s 线速度下进行轴承套圈磨削测试。不同方案的监测

效果如表 3 所示。

表 3 不同方案的监测效果

指标	进口方案	国产方案	提升率
磨削精度	$\pm 8 \mu m$	$\pm 4.8 \mu m$	40%
异常检测准确率	92%	98%	6%
系统功耗	15W	10.5W	30%
频谱分析延迟	150 μs	20 μs	87%

根据表 3 可知,国产方案在砂轮失衡量 0.05g 时即可准确识别异常,较进口方案灵敏度提升 2 倍。功耗降低主要源于 FPGA 动态功耗管理技术的应用,空闲时段自动关闭未使用逻辑单元。

4 结论

综上所述,本研究验证了国产 FPGA 与 ADC 在数控设备中的工程可行性。安路 FPGA 通过优化 SPI 接口将数据传输效率提升至 98%,芯动神州 ADCS8162 实现 0.8ns 通道同步偏差。五轴机床测试表明,系统定位精度达到 $\pm 0.5 \mu m$,磨削设备振动检测准确率提升至 98%。硬件化 PID 算法将控制周期缩短至 1 μs ,功耗降低 30%。国产器件组合在精度、速度与可靠性方面已具备替代进口方案的能力,但该方案在极端工况下的稳定性仍需完善。测试设备类型集中于机床与磨床,未覆盖铸造等高污染场景。国产 ADC 的基准电压温漂较国际产品高 2ppm/°C,影响长期精度一致性。部分 FPGA 的 IP 核生态不完善,开发周期较长。后续需扩展测试范围,优化 ADC 基准源设计,推动国产 EDA 工具链升级。随着智能

数控设备的广泛应用,需持续研究 FPGA 集成 AI 协处理器,实现加工参数自适应调整。国产 ADC 需向更高采样率(5MSPS 以上)发展,满足高速主轴监测需求。建议建立行业级测试平台,制定国产器件选型与适配标准,加速技术成果转化。通过算法与硬件的深度协同,推动高端装备全面自主化。

参考文献

- [1] 杨见,陈伟,许杰,等.Xilinx FPGA 高速资源合理利用的一种思路[J].电子技术与软件工程,2020(14):2.
- [2] 孙永超,李金龙,郭玉英.FPGA 在精密车床开放式数控系统的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(9):2.
- [3] 领慧立芯. LHA7878 数据手册及应用指南 [Z]. 电子发烧友网,2023.
- [4] 芯动神州. ADCS8162 技术白皮书 [R]. 2024.
- [5] 郭威,彭卫东,漆军,等.基于 FPGA 的大动态范围数据采集系统设计[J].仪表技术与传感器,2024(2):56-64.
- [6] 国芯思辰. SC1464 多通道同步采样 ADC 应用方案 [J]. 电子技术,2024 (5): 45-49.
- [7] 创龙科技.基于 RK3568+FPGA 的国产数据采集平台开发指南 [Z]. 2025.
- [8] 中国仪器仪表行业协会.国产 ADC 在工业控制中的应用白皮书 [R]. 2023.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS