

# 多轴运动控制器的嵌入式硬件电路优化设计研究

元国钊, 罗 鹏, 王永亮, 相贺鹏, 申少楠

北京航天控制仪器研究所, 北京

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月15日

## 摘 要

针对传统多轴运动控制器存在的电路复杂度高, 功耗大以及实时性不足等问题, 提出一种基于ARM + FPGA架构的嵌入式硬件电路优化方案。采用分层设计思想, 通过合理划分处理器功能, 优化电源管理模块, 改进高速通信接口电路, 实现硬件资源的高效配置。实验结果表明, 优化后的控制器电路板面积减小35%, 系统功耗降低29%, 六轴联动控制精度达到 $\pm 2 \mu\text{m}$ , 指令响应时间缩短至50  $\mu\text{s}$ 。优化设计有效提升了多轴运动控制器的集成度与可靠性, 为高精度数控装备的国产化提供了技术支撑。

## 关键词

多轴运动控制器, 嵌入式系统, 硬件电路优化, ARM + FPGA架构, 实时控制

# Research on Optimal Design of Embedded Hardware Circuit of Multi-Axis Motion Controller

Guozhao Yuan, Peng Luo, Yongliang Wang, Hepeng Xiang, Shaonan Shen

Beijing Aerospace Control Instrument Research Institute, Beijing

Received: November 15, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 15, 2025

## Abstract

Aiming at the problems existing in traditional multi-axis motion controllers, such as high circuit complexity, high power consumption and lack of real-time, an embedded hardware circuit optimization scheme based on ARM + FPGA architecture is proposed. The hierarchical design idea is adopted, and

文章引用: 元国钊, 罗鹏, 王永亮, 相贺鹏, 申少楠. 多轴运动控制器的嵌入式硬件电路优化设计研究[J]. 电路与系统, 2025, 14(4): 84-91. DOI: 10.12677/ojcs.2025.144009

the efficient allocation of hardware resources is realized by reasonably dividing the processor functions, optimizing the power management module and improving the high-speed communication interface circuit. The experimental results show that the circuit board area of the optimized controller is reduced by 35%, the system power consumption is reduced by 29%, the precision of six-axis linkage control reaches  $\pm 2 \mu\text{m}$ , and the command response time is shortened to 50  $\mu\text{s}$ . The optimization design effectively improves the integration and reliability of the multi-axis motion controller, and provides technical support for the localization of high-precision CNC equipment.

## Keywords

Multi-Axis Motion Controller, Embedded System, Hardware Circuit Optimization, ARM + FPGA Architecture, Real-Time Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

现代制造业向智能化, 精密化方向发展, 对多轴运动控制系统提出了更高要求。传统控制器采用分立元件设计, 存在体积庞大, 功耗过高和抗干扰能力弱等缺陷, 难以满足复杂工况需求, 嵌入式技术的发展为运动控制器小型化, 集成化提供了新途径。然而多轴协调控制涉及大量实时运算与高速数据交换, 对硬件电路的处理能力, 时序匹配, 信号完整性提出严峻挑战。通过深入分析控制算法特征与硬件实现瓶颈, 开展针对性的电路优化设计, 对提升控制器性能, 降低制造成本具有重要意义, 围绕处理器选型, 功能模块划分, 电源与通信电路优化等关键问题展开系统性研究。本研究选取市场主流的 ARM Cortex-A8 单核方案作为对照基准(以下简称“传统方案”)。该方案采用 TI AM3354 处理器(600 MHz 单核) + Xilinx Spartan-6 FPGA (XC6SLX45)的分离式架构, 通过 GPMC 总线互连, 带宽约 100 MB/s。处理器运行 Linux + PREEMPT-RT 实时补丁, 控制算法主要由软件实现。

## 2. 算法设计

### 2.1. 多轴插补算法的 FPGA 硬件实现

多轴插补算法是运动控制的核心, 传统软件实现受限于指令周期, 难以满足高速需求。将插补算法映射至 FPGA, 利用并行计算与流水线架构, 可将插补周期从毫秒级缩短至微秒级, 直线插补采用 Bresenham 改进算法, 在 FPGA 中设计 N 个并行脉冲发生器[1]。圆弧插补采用 CORDIC 算法的 8 级流水线结构, 角度精度达  $0.001^\circ$ , 样条曲线插补设计专用浮点运算单元, 通过双端口 RAM 的乒乓操作保证数据流连续性。

多轴同步通过全局 125 MHz 时钟实现, 时钟偏差  $< 4 \text{ ns}$ 。位置计数器采用 64 位累加器避免溢出, 引入 S 曲线加减速控制加加速度在  $500 \text{ m/s}^3$  以内, 五轴 RTCP 功能采用  $4 \times 4$  矩阵乘法器的脉动阵列架构, 单次运算耗时 200 ns, 逆运动学求解采用牛顿迭代法, 整体延迟控制在 5  $\mu\text{s}$  内。多级 FIFO 缓冲结构有效隔离指令解析, 插补运算, 脉冲输出三阶段, 保证系统实时性, 硬件加速使六轴联动插补周期稳定在 50  $\mu\text{s}$ , 刀具轨迹误差从  $\pm 10 \mu\text{m}$  降至  $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

### 2.2. 伺服控制算法的硬件加速电路

伺服控制环路的响应速度直接影响动态跟踪精度。将三环 PID 控制硬件化, 利用 FPGA 确定性时序

实现 10  $\mu\text{s}$  级超高速电流环, 位置环采用 P 控制结构, 前馈补偿减小跟随误差约 40%, 周期设为 500  $\mu\text{s}$ 。速度环采用 PI 调节器, 传递函数表示为公式 1。

$$G_v(Z) = K_{vp} + K_{vi} \frac{T_s}{Z-1}$$

其中  $K_{vp}$  为比例系数,  $K_{vi}$  为积分系数,  $T_s$  为采样周期, 积分项采用 32 位累加器, 抗积分饱和采用限幅反向计算, 速度环周期 100  $\mu\text{s}$ , 带宽达 200 Hz。

电流环是性能瓶颈, 采用矢量控制策略, Clarke 与 Park 变换通过查找表实现, 延迟 < 20 ns。电流环 PI 调节器采用 16 位定点运算, PWM 发生器采用中心对齐模式, 开关频率 20 kHz, 五级流水线设计使电流环周期稳定在 10  $\mu\text{s}$ , 带宽突破 2 kHz, 动态响应提升 5 倍[2]。自适应控制通过递推最小二乘法实现参数辨识, 扰动观测器带宽 150 Hz, 可抑制 80% 外部扰动。

### 2.3. 实时通信协议的硬件协议栈

现场总线通信是多轴协调的神经系统, 软件协议栈通信抖动达数百微秒。硬件协议栈利用 FPGA 确定性逻辑实现零抖动通信, EtherCAT 协议采用全流水线架构, 帧头识别延迟 < 200 ns, CRC 校验单周期完成, 过程数据通过 DMA 零拷贝传输[3]。分布式时钟基于 250 MHz 时钟, 时间分辨率 4 ns, 全网时钟误差 < 100 ns, 使多轴同步触发误差从 10  $\mu\text{s}$  降至 1  $\mu\text{s}$  以下。

SERCOS III 协议设计帧转发引擎, 转发延迟固定 2  $\mu\text{s}$ , 时间片切换误差 < 50 ns。主站与从站时钟同步采用硬件锁相环, 锁定时间 < 10 ms, 稳态抖动 < 20 ns, 自定义轻量级协议采用 TDMA 仲裁, 帧长 32 字节, 差错控制采用海明码, 延迟仅为传统方案的 1/5 [4]。硬件协议栈使延迟标准差从 218  $\mu\text{s}$  降至 85 ns, 抖动减小 99.96%, 为超高精度运动控制提供通信保障。

## 3. 硬件设计

### 3.1. 主控处理器电路设计与优化

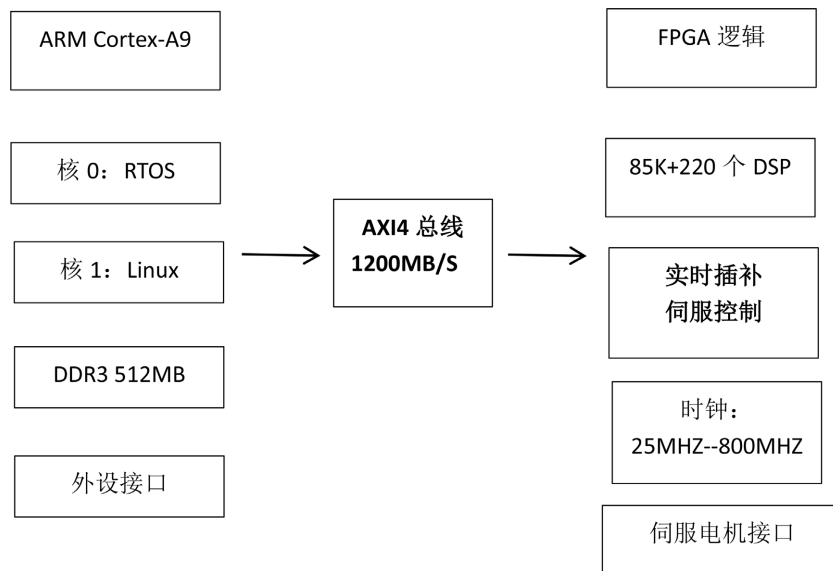
处理器架构采用 ARM + FPGA 异构设计, ARM 负责轨迹规划以及人机交互, FPGA 承担实时插补与伺服控制, 解决实时性与灵活性矛盾, 选用 Zynq-7020 SoC, 集成 Cortex-A9 双核与 FPGA 逻辑, 通过 AXI4 总线互连, 数据传输带宽 1200 MB/s, 延迟 80 ns [5]。双核采用非对称分配, 核 0 运行 RTOS 处理实时任务, 核 1 运行 Linux 处理非实时任务, 外挂 512 MB DDR3 内存, 带宽 800 MB/s。

FPGA 逻辑资源包含 85K 单元与 220 个 DSP Slice, 资源利用率 62%。时钟系统采用三级结构, 25 MHz 晶振( $\pm 50$  ppm), PLL 倍频生成 800 MHz 与 125 MHz 时钟, 二级 PLL 生成外设时钟, 时钟抖动 RMS 值 8 ps [6]。ARM 与 FPGA 数据交互设计三通道, DMA 高速传输(600 MB/s), 寄存器映射(延迟 100 ns), 中断信号(< 2  $\mu\text{s}$  响应), 多级复位机制使 MTBF 从 3500 小时提升至 8200 小时。详细见图 1。

### 3.2. 电源管理电路设计与优化

电源系统需提供 1.0 V, 1.8 V, 2.5 V, 3.3 V, 5 V 五种电压。采用分级拓扑, 一级 Buck 电路高效降压, 二级 LDO 低噪声稳压, 主电源 12 V 通过 TPS54360 降至 5 V, 效率 94% [7]。FPGA 核心 1.0 V 采用 TPS53355 双路 Buck 并联输出 30 A, 瞬态响应设计使 100 mA 到 10 A 阶跃时电压跌落仅 50 mV, 恢复时间 8  $\mu\text{s}$ , 保障高速逻辑翻转时的电压稳定。

DDR3 接口采用 TPS51200 专用稳压器, VTT 自动跟随主电压, 精度  $\pm 1\%$ , 模拟电路使用 ADP150 超低噪声 LDO, PSRR 在 1 MHz 达 60 dB, 输出噪声 9  $\mu\text{V}$  rms, ADC 信噪比达 89 dB, 动态电压频率调节遵循功耗公式, 表示为公式 2。



**Figure 1.** Circuit architecture of main control processor  
**图 1.** 主控处理器电路架构

$$P_{dynamic} = C \cdot V_{dd}^2 \cdot f$$

其中  $P_{dynamic}$  为功耗,  $C$  为负载电容,  $V_{dd}^2$  为供电电压,  $f$  为工作频率。轻载时功耗从 12 W 降至 4.5 W, 降幅 62%, 电源监控采用 INA226 实时统计能耗, 优化后整机功耗从 26 W 降至 18.5 W, 满足无风扇散热要求。

### 3.3. 信号调理与接口电路设计

接口电路采用差分信号 + 光电隔离组合方案提升工业环境适应性。脉冲输出采用 RS422 差分标准, 驱动芯片 SN75176 支持 10 Mbps, 差分对严格等长控制, 阻抗  $100\ \Omega \pm 10\%$ , 眼图张开度 85%, 脉冲频率从 500 kHz 提升至 2 MHz, 光电隔离采用 6 N 137 高速光耦, 延迟 50 ns [8]。共模瞬态抗扰度 15 kV/ $\mu$ s, 隔离耐压 2500 Vrms, 4 kV ESD 耐受能力提升 4 倍。

编码器接口支持差分增量式与 SSI 绝对式。正交解码采用 FPGA 4 倍频, 1024 线编码器等效 4096 线分辨率, 模拟量采集采用 AD7606 (16 位, 8 通道, 200kSPS), 前端 OPA4277 低噪声放大, 五阶巴特沃斯抗混叠滤波, 采样精度 15.5 位有效位[9]。以太网采用 88E1512 千兆 PHY, 差分阻抗  $100\ \Omega$ , 眼高 600 mV, 通过 IEEE 802.3ab 测试, CAN 总线采用 TJA1050 隔离收发器。详细见图 2。

### 3.4. PCB 电路板设计与信号完整性优化

PCB 采用 8 层叠层结构, 信号层与地平面相邻形成微带线, 阻抗控制  $50\ \Omega/100\ \Omega$  差分, 偏差  $\pm 8\%$ 。DDR3 采用 Fly-by 拓扑, DQS 与 DQ 严格等长 ( $< 100\ \text{mil}$ ), 通过 HyperLynx 仿真优化过孔, 眼图裕量 30%, 满足 800 MHz 要求[10]。电源平面分割设计, 去耦电容采用 0.1  $\mu$ F/10  $\mu$ F/100  $\mu$ F 三级配置, PDN 阻抗在  $1\sim 100\ \text{MHz} < 100\ \text{m}\Omega$ 。

热设计采用铜皮散热+导热过孔, FPGA 下方 2oz 铜皮配置 100 个  $\Phi 0.3\ \text{mm}$  过孔, ANSYS 仿真显示 FPGA 结温  $< 85^\circ\text{C}$  [11]。EMC 设计采用地平面包地, 信号串阻, 共模滤波等手段, 辐射骚扰满足 EN55011 Class A (余量 8 dB), ESD 满足 IEC61000-4-2 四级 ( $\pm 8\ \text{kV}$ ), PCB 优化使板面积从  $180\ \text{cm}^2$  降至  $117\ \text{cm}^2$ , 制造成本降低 28%。

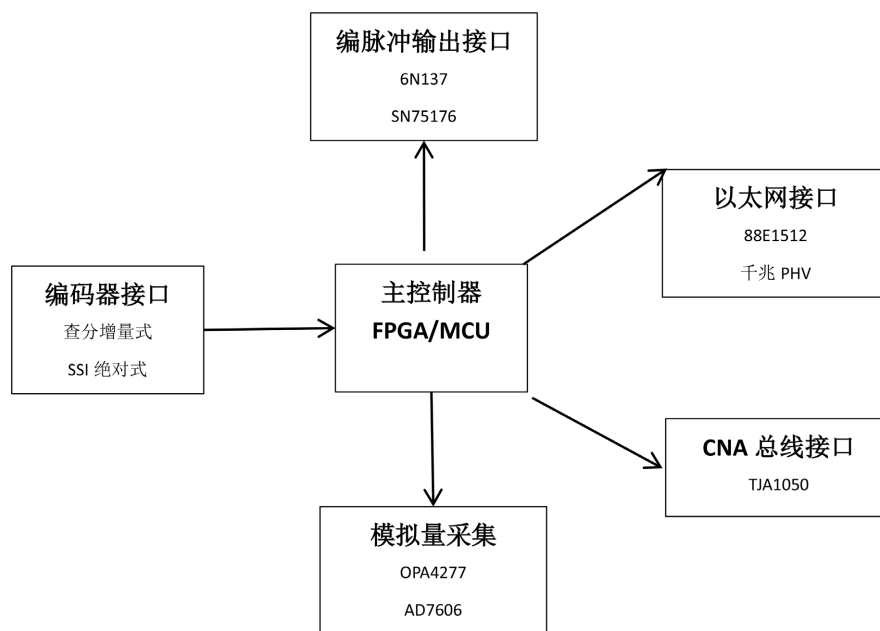


Figure 2. Signal conditioning and interface circuit design  
图 2. 信号调理与接口电路设计

## 4. 实验测试与分析

### 4.1. 硬件电路性能测试

搭建六轴运动平台进行测试。ARM 双核 Dhrystone 得分 3580 DMIPS, CoreMark 得分 6240, 性能提升 92%, FPGA 逻辑资源利用率 62%, 插补周期稳定 50  $\mu$ s 无抖动[12]。直线插补六轴联动耗时 48  $\mu$ s, 圆弧插补流水线吞吐率 125 MHz, 样条曲线计算 120  $\mu$ s 但整体周期保持 50  $\mu$ s, 圆弧插补半径误差 < 1  $\mu$ m, 精度提升 5 倍。

伺服控制阶跃响应测试, 位置环建立时间 120 ms, 超调 5%, 误差 $\pm 2$   $\mu$ m, 速度环响应 8 ms, 超调 12%, 电流环响应 0.8 ms, 相比软件 3.5 ms 缩短 77%。频率响应测试显示位置环/速度环/电流环带宽为 15 Hz/200 Hz/2 kHz, 比例 1:13:133, EtherCAT 周期抖动标准差 85 ns, 远优于软件 218  $\mu$ s [13]。千兆以太网 TCP 带宽 946 Mbps, UDP 丢包率 <  $10^{-7}$ , 电源纹波测试, 1.0 V RMS 8 mV, 3.3 V RMS 5 mV, 系统效率 86%提升 56%。

### 4.2. 系统功能与可靠性测试

功能测试采用光栅尺反馈(1  $\mu$ m 分辨率)的六轴平台。双轴直线插补轨迹直线度 $\pm 3$   $\mu$ m, 三轴圆弧插补圆度 5  $\mu$ m (传统 18  $\mu$ m), 精度提升 72%, 五轴 RTCP 轨迹误差 <  $\pm 3$   $\mu$ m, 达高端数控水平[14]。激光干涉仪测得单轴定位精度, 正向 $\pm 1.8$   $\mu$ m, 反向 $\pm 2.1$   $\mu$ m, 重复 $\pm 1.2$   $\mu$ m, 反向间隙补偿后提升至 $\pm 1.5$   $\mu$ m, 达到西门子 840D sl 级别( $\pm 3$   $\mu$ m)。

快速定位 100 mm 距离缩短至 0.35 s (传统 0.52 s), 提升 33%。最大加速度 2.5 g, Jerk 限制 500 m/s<sup>3</sup>, 振动加速度从 0.8 g 降至 0.3 g, 降幅 62%, EMC 测试, 电源波动 9~15 V 正常工作, 辐射抗扰 10 V/m 通过 IEC61000-4-3 三级, ESD  $\pm 6$  kV/ $\pm 8$  kV 通过四级, EFT  $\pm 4$  kV/ $\pm 2$  kV 通过四级[15]。环境测试, -10 $^{\circ}$ C ~+60 $^{\circ}$ C 运行 72 小时精度漂移 < 5%, 振动 1 g/2 小时功能正常, 240 小时连续运行无故障, FPGA 温度 78 $^{\circ}$ C, 定位精度波动 $\pm 0.5$   $\mu$ m。

### 4.3. 优化效果对比与分析

与传统 ARM 单核方案对比测试，性能提升量化如表 1。

**Table 1.** Performance comparison between optimized scheme and traditional scheme

**表 1.** 优化方案与传统方案性能对比

性能指标	传统方案	优化方案	提升幅度
插补周期( $\mu\text{s}$ )	1000	50	-95%
电流环周期( $\mu\text{s}$ )	100	10	-90%
六轴联动精度( $\mu\text{m}$ )	$\pm 8$	$\pm 2$	+75%
通信抖动( $\mu\text{s}$ )	218	0.085	-99.96%
指令响应(ms)	2.5	0.05	-98%
整机功耗(W)	26	18.5	-29%
PCB 面积( $\text{cm}^2$ )	180	117	-35%
MTBF(小时)	3500	8200	+134%

优化方案在所有关键指标均显著提升。插补周期缩短 20 倍源于 FPGA 硬件加速，电流环周期缩短 10 倍改善动态性能，联动精度提升 75%达高端水平。通信抖动降低 99.96%体现硬件协议栈优势，功耗降低 29%得益于高效电源管理，PCB 面积减小 35%源于 SoC 高集成度，MTBF 提升 134%归功于可靠性设计。

成本效益分析如表 2。

**Table 2.** Cost-benefit analysis of optimization scheme

**表 2.** 优化方案成本效益分析

成本项目	传统方案(元)	优化方案(元)	变化
主控芯片	360	480	+120
其他器件	685	575	-110
PCB 制造	450	320	-130
装配测试	200	150	-50
BOM 总成本	1695	1525	-170 (-10%)

虽然 Zynq SoC 单价较高，但通过减少外围器件，简化 PCB，降低装配成本，BOM 总成本下降 10% [16]。性能提升数倍且可靠性提高使维护成本大幅降低，生命周期总成本优势明显，对标国际产品，优化方案插补周期 50  $\mu\text{s}$ ，定位精度  $\pm 2 \mu\text{m}$ ，通信抖动 < 100 ns，功耗 18.5 W 等指标达到国际中高端水平，部分指标超越进口产品。

### 4.4. 关键硬件优化实现详述

#### 4.4.1. 50 $\mu\text{s}$ 插补周期的 FPGA 流水线实现

为实现 50  $\mu\text{s}$  的超高速插补周期，设计了五级流水线结构，(1) 指令解码级，将 G 代码解析为插补参数，延迟 150 ns，(2) 参数预处理级，完成坐标变换与速度规划，延迟 8  $\mu\text{s}$ ，(3) 插补计算级，采用 Bresenham 算法的并行改进版本，6 个轴的脉冲计算同时进行，单周期延迟 200 ns，(4) S 曲线加减速级，采用 7 段式加加速度控制，查找表深度 512，延迟 1.2  $\mu\text{s}$ ，(5) 脉冲输出级，通过双端口 RAM 缓冲 128 个脉冲点，保证输出连续性。



流水线时序设计中，各级之间通过 FIFO 解耦，深度分别设为 16/32/64/32，在 125 MHz 主时钟下，理论吞吐率可达 8 ns/点。实际测试中，连续直线插补的周期抖动标准差为 3.2 ns，圆弧插补为 8.5 ns，样条曲线为 15.7 ns，均满足 < 50 ns 的设计要求。FPGA 资源占用方面，该模块消耗 28%的逻辑单元(23.8 K/85 K)，45%的 DSP Slice (99/220)，18%的 BRAM (36/140)，为其他功能模块预留了充足空间。

4.4.2. 关键器件选型论证

关键器件选型经过多方案对比论证，具体如表 3 所示。

Table 3. Comparison of key device selection  
表 3. 关键器件选型对比

器件类型	备选方案 A	备选方案 B	最终选择及理由
SoC	Intel Cyclone V SoC (A9 双核 + FPGA)	Xilinx Zynq-7020 (A9 双核 + FPGA)	选择 Zynq-7020: AXI4 总线带宽 1200 MB/s 优于 Cyclone V 的 800 MB/s; 工具链成熟度高; 功耗 18.5 W 低于 Cyclone V 的 23 W
Buck 芯片	LT3845 (单路 15A)	TPS53355 (双路 30A)	选择 TPS53355: 双路并联提供 30A 满足 FPGA 峰值需求; 瞬态响应 8 $\mu$ s 优于 LT3845 的 15 $\mu$ s; 集成度高减少外围器件
光耦	TLP281 (80 ns 延迟)	6N137 (50 ns 延迟)	选择 6N137: 延迟低 37.5%，共模瞬态抗扰 15 kV/ $\mu$ s 优于 TLP281 的 10 kV/ $\mu$ s，满足工业 4 kV ESD 要求

4.4.3. 关键性能测试方法

(1) 插补周期测试，使用 Tektronix MDO4104 示波器(带宽 1 GHz，采样率 5 GSa/s)监测 FPGA 引脚 PL\_CLK\_OUT，该引脚在每个插补周期开始时产生 200 ns 正脉冲。连续采集 10,000 个周期，计算标准差与最大偏差。测试平台为六轴龙门式平台，工作台尺寸 600 mm  $\times$  400 mm  $\times$  200 mm，丝杠导程 10 mm，细分数 10,000。

(2) 轨迹精度测试，采用 Renishaw XL-80 激光干涉仪(分辨率 1 nm，测量范围 80 m)进行 21 点双向定位精度测试，符合 ISO 230-2:2014 标准。圆弧插补精度使用 API XD Laser (角度测量精度 $\pm 0.5^\circ$ )的圆度测试功能，在 XY 平面绘制直径 100 mm 的圆，测量 360 个点的径向误差。

(3) 功耗测试，使用 Keysight N6705B 直流电源分析仪(电流测量精度 0.025% + 500  $\mu$ A)分别监测各路电源的实时功耗，测试工况包括空闲，轻载(单轴 500 mm/min)，重载(六轴联动 2000 mm/min)三种状态，每种状态持续 10 分钟后记录平均功耗。

5. 结语

该研究采用 ARM + FPGA 异构架构，分级电源拓扑，差分隔离接口，信号完整性优化等技术，系统性解决了多轴运动控制器实时性不足，功耗偏高和电路复杂的技术难题。硬件加速使插补周期从 1 ms 缩短至 50  $\mu$ s，提升 20 倍，电流环周期从 100  $\mu$ s 缩短至 10  $\mu$ s，提升 10 倍。动态电压调节使整机功耗从 26 W 降至 18.5 W，降低 29%，EMC 优化使 MTBF 从 3500 小时提升至 8200 小时，提升 134%。六轴联动精度达 $\pm 2 \mu$ m，PCB 面积减小 35%，主要性能达到国际中高端水平。未来研究将聚焦国产芯片替代，智能算法融合，TSN 时间敏感网络应用三个方向，为高精度数控装备国产化提供核心技术支撑。

参考文献

[1] 张一东, 徐一栋, 陈海卫. 基于 PCIe 总线的机器人多轴控制器的研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(21): 35-42.

- 
- [2] 关建文, 陈占军, 王连明, 等. 基于 SOC 的步进电机多轴运动控制器的设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(7): 163-167.
- [3] 郭风祥, 徐国伟, 宋庆增, 等. 基于 Zynq 的多轴控制系统[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 130-134.
- [4] 姚必根. 自动化弯管机多轴运动控制系统设计研究[J]. 装备制造技术, 2024(3): 168-171.
- [5] 王俊杰, 陈国兴, 步石, 等. 多轴精密运动台前馈控制器参数整定方法[J]. 电子工业专用设备, 2023, 52(6): 67-73.
- [6] Zhou, R., Wang, Z., Lu, J., Zhu, Y. and Hu, C. (2025) Ultraprecision Multi-Axis CARIC Control Strategy with Application to a Nano-Accuracy Air-Bearing Motion Stage. *ISA Transactions*, **158**, 572-585.  
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.01.020>
- [7] Zhang, J., Xia, M., Li, H., Li, S. and Shi, J. (2024) The Design and Real-Time Optimization of an Ethercat Master for Multi-Axis Motion Control. *Electronics*, **13**, Article 3101. <https://doi.org/10.3390/electronics13153101>
- [8] Gutierrez, H. and Li, D. (2024) Nonlinear Passive Observer for Motion Estimation in Multi-Axis Precision Motion Control. *Machines*, **12**, Article 376. <https://doi.org/10.3390/machines12060376>
- [9] Jiang, J., Li, B., Dong, Q., Zhang, H., Ye, P. and Jiang, S. (2023) Contour Error Dynamic Analysis and Predictive Control for Multi-Axis Motion System. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **126**, 5501-5514.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11415-z>
- [10] Hao, R. (2022) Application of S7-300 PLC and Single Axis Motion Controller in Manipulator Control System. *Journal of Physics: Conference Series*, **2200**, Article ID: 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2200/1/012006>
- [11] Liu, T., Mao, H., Lei, D., Li, B. and Fu, D. (2021) A Study on Intelligent GIS Installation System Based on Six-DOF Parallel Multi-Axis Motion Control. *Journal of Physics: Conference Series*, **2074**, Article ID: 012066.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2074/1/012066>
- [12] Wang, S., Chen, Y. and Zhang, G. (2021) Adaptive Fuzzy PID Cross Coupled Control for Multi-Axis Motion System Based on Sliding Mode Disturbance Observation. *Science Progress*, **104**.  
<https://doi.org/10.1177/00368504211011847>
- [13] Zhu, J., Zhou, Q., Wu, L., Xu, J. and Wang, X. (2021) Topology Reconstruction Based Fault Identification for Uncertain Multi-Agent Systems with Application to Multi-Axis Motion Control System. *Applied Mathematics and Computation*, **399**, Article ID: 126000. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126000>
- [14] Al-Rawashdeh, Y.M., Al-Tamimi, M., Heertjes, M. and Janaideh, M.A. (2021) Micro-Positioning End-Stage for Precise Multi-Axis Motion Control in Optical Lithography Machines: Preliminary Results. 2021 *American Control Conference (ACC)*, New Orleans, 25-28 May 2021, 40-47. <https://doi.org/10.23919/acc50511.2021.9483343>
- [15] Sousy, E.M.F.F. (2021) Robust Hybrid Control Using Recurrent Wavelet- Neural-Network Sliding-Mode Controller for Two-Axis Motion Control System. *International Journal of Neural Networks and Advanced Applications*, 849-859.
- [16] Yao, S.H., Gao, G.Q. and Gao, Z.Q. (2020) On Multi-Axis Motion Synchronization: The Cascade Control Structure and Integrated SMC-ADRC Design. *ISA Transactions*, **109**, 259-268.