

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230117

基于国产芯片实现多功能测控的平台改进及关键技术

蔺立¹, 常乃超², 刘志远¹, 魏艳伟¹, 牟涛¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要: 多功能测控装置是电力自动化系统的关键设备, 其核心芯片均依赖进口, 威胁电网运行安全。针对目前适合电力系统自动控制的国产芯片选型少且部分外设芯片没有合适选型的现状, 结合多业务融合的需求, 提出基于国产 ARM 主控芯片加国产 FPGA 的多功能测控装置的平台改进及关键技术。首先, 基于 FPGA 编程替代部分无合适选型的芯片配合智能 I/O 技术设计硬件平台。然后, 基于数据共享和 FPGA 协作设计软件平台。再针对国产芯片制造水平的现状, 提出测量精度补偿、可靠性加固及功能拓展等改进技术。最后, 集成以上平台设计及改进技术研制了基于国产芯片的多功能测控装置, 并通过第三方专业检测验证其性能指标满足行业相关标准要求, 同时在国内变电站正式投入运行, 运行情况良好。

关键词: 国产芯片; FPGA; 多业务融合; 可靠性

Platform improvement and key technologies of multi-functional measurement and control equipment based on domestic chips

LIN Li¹, CHANG Naichao², LIU Zhiyuan¹, WEI Yanwei¹, MU Tao¹

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Dispatch & Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Multi-functional measurement and control devices are key equipment in a power automation system. Its core chips rely on imports. This threatens the safety of the power grid. The current situation is that few domestic chips suitable for a power automation system and some peripheral chips do not have suitable models, and this is combined with the demand for multi-service integration. This thus requires platform improvement and key technologies for multi-functional measurement and control devices based on domestic ARM and FPGA. First, this paper designs a hardware platform based on FPGA programming to replace chips without suitable models to fix intelligent I/O technology. Then, based on data sharing and FPGA collaboration, a software platform is designed. Given the current situation of domestic chip manufacture, improvement technologies are proposed to compensate for measurement accuracy and to reinforce reliability and expand functions. Finally, the above platform designs and improvement technologies are integrated and the multi-function measurement and control device is developed based on domestic chips. Its performance is verified by third-party professional testing and meets the requirements of relevant standards, and it has been officially put into operation in substations with good conditions.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

Key words: domestic chips; FPGA; multi-service integration; reliability

0 引言

当前电力系统二次核心设备的关键部件严重依

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000); 国家电网有限公司科技项目资助“基于国产芯片、自主可控的变电站自动化设备技术研究及应用”(5500-202055478A-0-0-00)

赖进口, 存在断供“卡脖子”风险。当不能购买到芯片等关键部件时, 会出现无法制造新设备或在运设备故障无法修复的问题。近几年, 国内主流电力设备制造厂商开展了基于国产元器件和芯片的自动化二次设备研发, 目前电力系统二次领域主流 SOC 采用 CPU 与 FPGA 集成的模式, 暂无可直接替代的国产产品。另外自动化二次装置需要的交换机芯片、光 PHY 芯片等硬件功能和性能需求不高, 直接借用

通信类设备的选型会造成硬件资源浪费，增加不必要的成本，亟需通过其他技术手段实现替代。

目前变电站二次设备可用的国产元器件和芯片可分三类。第一类为成熟应用类，其特点是通用，不局限于电力行业，市场用量大，价格和质量有较大竞争力，如阻/容等被动元件、各类逻辑器件、232/485 等接口芯片、电源芯片、小容量存储芯片等。第二类为未经历大规模应用的元器件和芯片，其特点是设计难度、生产工艺要求高，在其他行业应用广泛，但在电力系统自动控制领域用量小，包括 CPU、FPGA、AD 转换、大容量存储等。第三类为无合适替代型号的元器件和芯片，包括适用于智能变电站通信的光 PHY、小容量交换机芯片等，其特点是需求较专业，且用量小、适用领域窄。

国产主控芯片存在 MPIS^[1-2]和 ARM^[3-6]两种主流架构设计，在性能方面均不弱于主流进口芯片，如表 1 所示。其中基于 MPIS 架构的主控芯片生态应用发展相对薄弱，基于 ARM 架构的主控芯片设计与主流进口 ARM 架构处理器兼容性好，开发工具、周边配套等生态环境优越，国产替代具有快速研发和快速迭代的优势^[7-8]。

表 1 主控芯片标称参数对照表

Table 1 Comparison table of nominal parameters of CPU chip

芯片型号	ZYNQ XC7Z010	PowerPC MPC8377	某国产 MIPS	某国产 ARM
制造工艺/nm	28	90	40	40
主频/MHz	667	667	800	1.2
功耗/W	<3	<2.1	<5	<2
核心数	2	1	2	4
内核	ARM	e300C4s	MIPS	ARM
位数	32	32	64	32
工作温度/°C	-40~+85	-40~+85	-40~+85	-40~+85

本文针对部分暂无可直接替代产品的小用量芯片，利用 FPGA 逻辑编程模拟替代，再由 FPGA 通过功能拓展分摊部分运算任务，以适应通用测控、动态集群测控、同步相量测量、宽频域量测等多业务融合功能^[9-15]，最后结合国产元器件和芯片性能不足、可靠性不高^[16]的现状，研究了全回路采样误差自动补偿、软硬件可靠性加固等改进技术，提出了基于国产芯片的多功能测控平台设计方案，最后介绍了基于国产芯片的多功能测控装置工程应用情况及后续研发方向。

1 基于国产芯片的多功能测控平台设计

1.1 基于国产芯片的硬件平台设计

受限于国产芯片目前集成度不够，无可直接替

代的 SOC 主控芯片，故采用国产 ARM 加国产 FPGA 的结构作为主控单元^[17]。前端输入及输出板卡使用智能 I/O 通过 CAN 总线的方式连接，可实现输入和输出资源根据业务情况灵活配置的需求，总体硬件架构如图 1 所示。

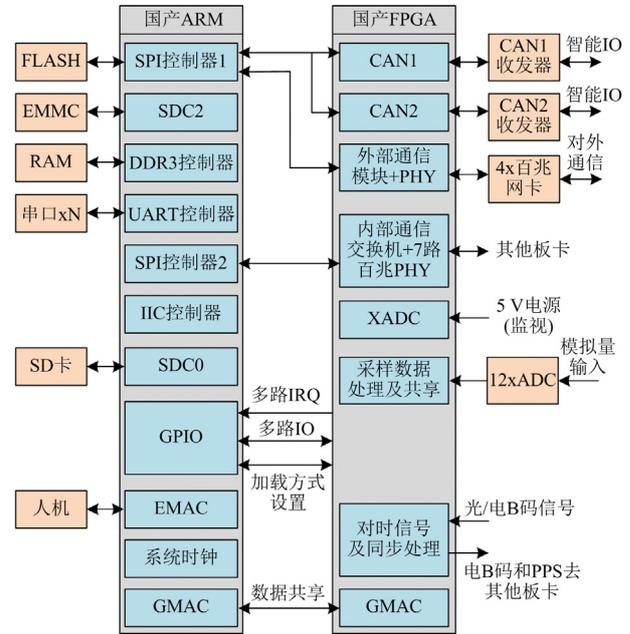


图 1 基于国产芯片的多功能测控通用硬件架构

Fig. 1 Hardware platform of multi-functional measurement and control equipment based on domestic chips

CPU 和 FPGA 之间通过 GMAC 以 LIO 总线 and 高速 PCIE 进行数据通信；采用 8 通道国产同步 ADC 芯片，最大可接入 96 路模拟量；在 FPGA 上模拟交换机芯片扩展 7 路百兆 PHY，实现多块板卡间的以太网通信，可根据业务规模扩展 CPU 等板卡数量；在 FPGA 上模拟 2 个 CAN 控制器，用于 CPU 板卡与智能 I/O 相连，可灵活配置开入、开出、直流模拟量采集和输出等 I/O 资源；对外通信接口模块也由 FPGA 模拟实现；人机模块通过 EMAC 以高速数据总线和 CPU 互联，避免使用带缆控制人机面板，提高设备集成度和可靠性^[18]。

1.2 面向多功能的智能 I/O 板卡

为实现输入和输出资源灵活配置，基于国产微型控制单元(micro controller unit, MCU)设计了智能 I/O 板卡，原理图如图 2 所示。MCU 将采集到的电气回路数据进行初步处理后通过 CAN 总线以通信的方式发送至各 CPU 板卡。同时，MCU 也可通过 CAN 总线接收 CPU 的控制数据，经过运算处理后控制电气回路的输出。最后，在智能 I/O 板卡的 MCU 中设置控制管理模块，通过总线获取板卡身份识别信

息和资源配置信息, 自动识别装置任意插槽位置的板卡, 从而实现多功能测控不同业务资源的灵活配置。

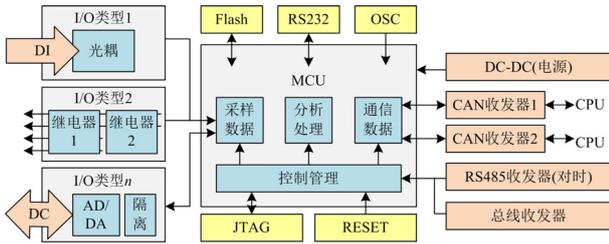


图2 基于MCU的智能I/O原理图

Fig. 2 Schematic diagram of smart I/O device based on MCU

1.3 基于国产系统的软件平台设计

软件底层采用国产 RTOS 操作系统与国产 ARM 处理器适配, 各板卡间大规模数据交互使用高速以太网通信, 小规模数据交互使用 CAN 网通信。平台层利用 FPGA 以协作的方式^[19]通过智能 I/O 完成原始数据的合并、对齐、缓存等前端处理, 并在指定内存位置维护共享数据, 该部分数据内存设置写保护以确保数据安全。应用层业务模块采用插件式管理, 各模块可通过引导配置根据实际需求灵活部署, 各模块均以只读权限从平台层获取统一的原始数据, 最终实现基于数据共享的多种业务融合并行且可相互交换信息的软件结构。

如图3所示, 软件平台采用两层数据共享结构, 第一层是由 FPGA 维护的原始采样数据共享缓存区; 第二层是由 CPU 维护的基于统一数据模型的多业务融合数据缓存区。基于第一层共享数据, 支撑多种业务同时部署并列运行; 基于第二层数据共享打通多种业务间的壁垒, 实现多种业务融合协作。

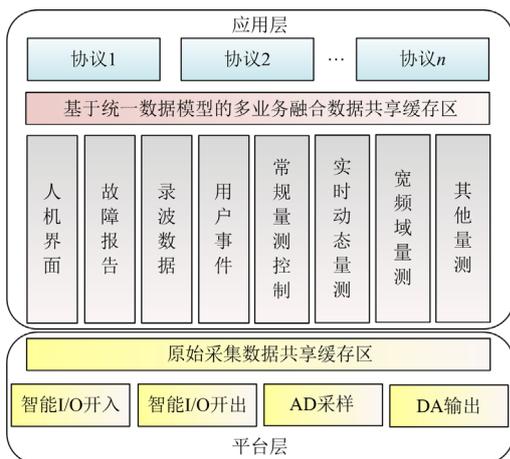


图3 基于数据共享的多业务融合示意图

Fig. 3 Diagram of multi-service integration based on data sharing

1.4 基于国产化设计的平台优势

首先, 平台全部元器件和芯片均采用国产化选

型, 操作系统采用国产 RTOS, 从根本上解决了对进口元器件和芯片的依赖问题。其次, 基于国产 FPGA 模拟替代部分外设芯片使改进平台减少 5 类芯片的使用: CAN 控制器、交换机、HuB 接口、MAC、PHY, 大幅减少 PCB 板占用面积, 在电路设计时可加宽电路线径和间距, 并布置更大的接地面积, 总体提高抗干扰能力, 同时可绕开部分芯片无合适选型的困境。最后, 由 FPGA 分摊传统设计中由 CPU 承担的部分任务(如 AD 采样), 可大幅降低运行期间的 CPU 占用率, 更好地支撑应用层多业务并行需求。

在传统平台以 CPU 实现采样功能的设计下, 通过操作系统控制台查看 CPU 占用率, 如图4所示, 配置 48 路模拟通道每周采样 256 点的情况下, AD 采样任务的 CPU 占用率约为 16%。如将 AD 采样任务分摊到 FPGA, 可以节约约 16% 的 CPU 资源。

```
[root@.../root]# top -all
CPU usage checking, please wait...
CPU usage show (measurement accuracy 1.0%)
```

NAME	TID	PID	PRI	CPU
HTsk6Prn	401006b	1	166	0.0%
HTsk9Dit	401006a	1	166	0.0%
HTsk8Fst	4010069	1	88	0.0%
HTsk2Pc	4010068	1	166	0.0%
HTsk1Gui	4010067	1	166	0.3%
HTsk4CTD	4010066	1	166	0.0%
TASKSPMU	4010065	1	95	0.0%
GTSkMMS	4010064	1	166	0.0%
61850LOG	4010063	1	166	0.0%
pmusvrs	401005e	1	166	0.0%
pmusvrc	401005d	1	95	0.0%
pmusvrs	401005c	1	166	0.0%
pmusvrc	401005b	1	95	0.0%
HTimer0	401005a	1	87	0.0%
GTSkLog	4010059	1	166	0.0%
nd1	4010058	1	166	0.0%
PTSK_AD	4010057	1	82	16.3%
GTSK0	4010056	1	166	0.0%
...

图4 系统任务列表中 AD 采样任务 CPU 占用率

Fig. 4 List of system task manager for showing CPU occupancy rate of AD sampling task

2 国产化多功能测控平台改进技术

受限于芯片设计、生产、工艺等技术水平差距, 基于国产元器件和芯片设计的装置平台在高精度测量、长期稳定运行和配套齐全 3 个方面存在一定不足, 须针对这些不足提出相应的解决方案, 使基于国产化平台设计的设备总体水平不落后于采用进口元器件和芯片设计的设备。

2.1 全回路采样误差自动补偿技术

测量精度是多功能测控最主要的性能指标之一。相较主流进口 ADC 芯片, 国产 ADC 芯片在信噪比、功耗等性能指标方面无太大差异, 但高采样率的型号单片容量较小, 且基于国产平台设计的采样回路综合参数受环境温度影响较大, 环境温度过高和过低时, 测量精度不能满足要求, 需要进行软件补偿。

经大量试验验证, 采用静态修正和动态补偿相

结合的误差修正算法, 对于解决环境温度影响产生的测量超差问题具有不错的效果。

采样回路综合参数决定了采样回路的系数 C_{off} , 如式(1)所示。

$$C_{off} = (k \cdot C_{offsta} + C_{offdyn}) / 2 \quad (1)$$

式中: k 为校准系数; C_{offsta} 为 RC 回路系数; C_{offdyn} 为环境温度影响的动态系数。

利用实验数据曲线拟合出动态采样系数 C_{offdyn} 随温度 T 的变化曲线如图 5 所示。

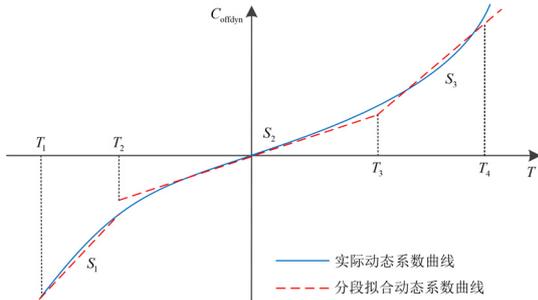


图 5 采样系数随温度变化曲线

Fig. 5 Curve of sampling coefficient changing with temperature

C_{offdyn} 与温度 T 的函数如式(2)所示。

$$C_{offdyn} = f(T) \quad (2)$$

将动态系数曲线基于温度坐标 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分为三段 S_1 、 S_2 和 S_3 , 为便于实践应用采用多项式分段拟合来简化计算, 得到如式(3)所示的分段函数。

$$C_{offdyn} = f(T) = \begin{cases} k_1 \cdot T + b_1 & T_1 \leq T < T_2 \\ k_2 \cdot T + b_2 & T_2 \leq T \leq T_3 \\ k_3 \cdot T + b_3 & T_3 < T \leq T_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 为三段拟合曲线的斜率; b_1 、 b_2 、 b_3 为三段拟合曲线在纵坐标的截距。

当装置运行时, 基于温度传感器通过式(3)确定当前温度和 C_{offdyn} 的函数关系, 自动计算出 C_{offdyn} , 实现采样数据在温度变化情况下的自动补偿, 解决环境温度影响下装置测量精度下降的问题。

2.2 基于多核处理器的可靠性设计

电力行业自动化设备可靠性要求高, 而设计国产化平台采用的国产元器件和芯片长期运行的可靠性未得到验证^[20-21]。需研究国产化平台的可靠性提升技术, 从多核多任务时序配合互校、内存关键数据校验等方面提出多种措施来提高多核处理器的可靠性。

2.2.1 基于多核多任务时序配合的控制命令互校

控制命令的处理是基于国产芯片的装置平台可靠性最薄弱的环节, 如果主控芯片故障误发控制命

令, 可能引起输出信号回路误置位, 会导致严重的误跳/合闸等操作事故。

如图 6 所示利用主控处理器多核心的特性, 在两个不同的核心上分别创建任务 A 和任务 B, 控制输出时以一定时序分两次将相同的信息传递给任务 A、B, 正常时先后两次传递的控制信息一致, 如果控制信息输出到操作回路时, 先后两次传递的控制信息不一致将闭锁电气回路, 如果一致则正常通电控制电气回路开放。

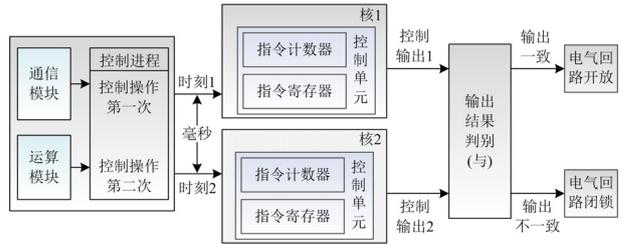


图 6 多核多任务时序配合的控制命令互校原理图

Fig. 6 Schematic diagram of sequential cooperation for control mutual checking based on multi-core and multi-task

2.2.2 内存关键数据校验

考虑国产存储器在现场复杂电磁工况下存在数据错误风险, 需要通过软件提升防误能力, 如图 7 所示。

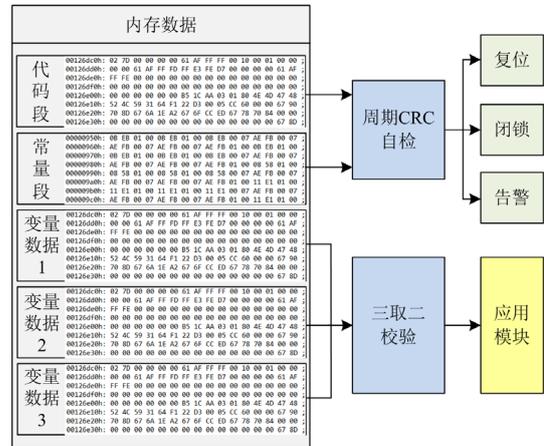


图 7 内存关键数据校验原理图

Fig. 7 Schematic diagram of memory critical data verification

1) 内存关键数据冗余校验

针对内存发生异常翻转导致关键数据错误引起误动的情况^[22-23], 有厂家提出使用数据冗余的方式预防该问题, 全部数据冗余配置会消耗大量资源, 降低整体性能, 故本文采用关键内存数据冗余配置的方式减少资源消耗。当处理关键数据时, 根据重要程度和硬件资源情况, 可单任务将同一数据分多次写入不同内存位置, 也可通过多任务冗余形成多

份数据, 后端采用三取二的方式先进行校验纠错再进行使用。

2) 内存关键数据周期自检

在装置上电后, 将各应用模块程序代码段以及常量数据段的 CRC 计算结果存放于 EEPROM 中, 管理模块周期读取代码段和常量段的内存数据计算 CRC, 与上电时存放的 CRC 进行比较, 不一致则判为内存自检出错。第一次内存自检出错时, 闭锁出口, 并复位异常模块; 再次自检出错时, 闭锁装置功能并输出告警提示。

2.3 基于 FPGA 编程的功能拓展

目前, 部分用量较小或使用领域较专业的芯片和元器件缺少合适的国产化选型是国产化装置平台设计的常见问题。可通过 FPGA 编程模拟技术替代此类芯片以解决问题。另外, 为解决多业务融合导致主控芯片运算压力激增的问题, 可基于 FPGA 进行功能拓展, 以协作的方式分摊部分任务以降低主控芯片运算压力。

基于逻辑编程技术模拟的外设芯片有 CAN 控制器、HuB 接口、(光)以太网模块、MAC、交换机芯片。通过软件编程, 可在物理接口环节增加传统通信设计方案不具备的校验及纠错功能, 提高输入信号源的质量, 从而提升通信可靠性。另外, 也可减少外设芯片数量、种类, 在减少成本的同时降低产品对部分芯片的依赖, 提高产品供应链的安全。

由 FPGA 协作分摊的功能有内、外时钟信号处理, 原始电气信号采集及控制, 原始采集数据汇总、对齐、插值处理, 内存共享数据缓存区维护, 模拟通信外设芯片实现内、外通信等。以此降低主控芯片运算压力, 使更多资源用于处理业务功能。

基于 FPGA 模拟 CAN 控制器原理如图 8 所示。

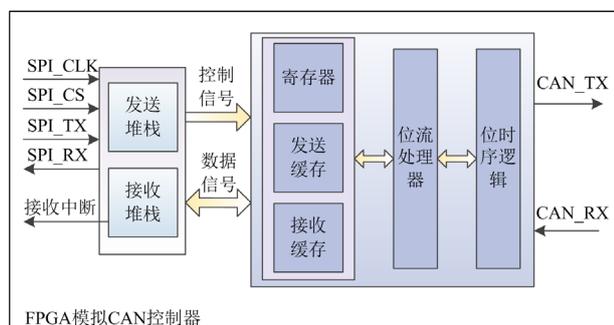


图 8 模拟 CAN 控制器原理图

Fig. 8 Schematic diagram of simulating for CAN controller

基于 FPGA 模拟 HuB 接口原理如图 9 所示, 可通过该接口增加可挂载的外设数量。

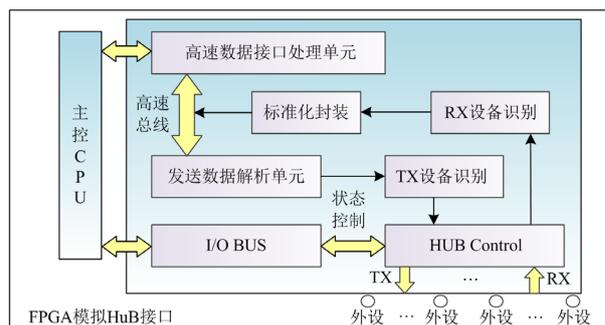


图 9 模拟 HuB 接口原理图

Fig. 9 Schematic diagram of simulating for HuB interface

基于 FPGA 模拟网络通信模块原理如图 10 所示, 其中包含 MAC 和(光)以太网模块, 光或电通信需要对模拟的 PHY 配置不同的运行参数。基于 FPGA 模拟小规模交换机原理图如图 11 所示。

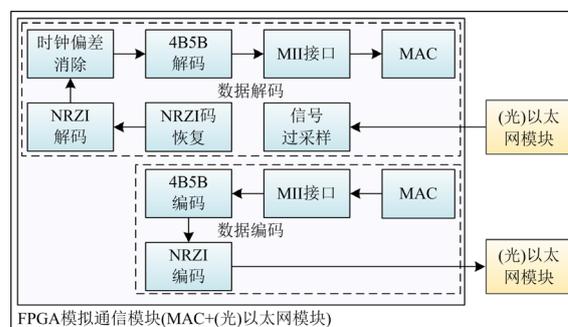


图 10 模拟网络通信模块原理图

Fig. 10 Schematic diagram of simulating for comm-module

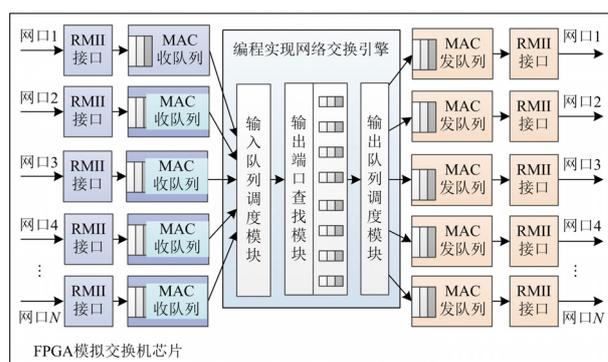


图 11 模拟小规模交换机原理图

Fig. 11 Schematic diagram of simulating for small-scale switch

3 仿真实验

3.1 运算能力验证

通过运行 FFT 的耗时情况评估国产 ARM 处理器的运算能力。使用 FPGA 晶振计数做计时统计, 考虑数据长度对运算性能的影响, 将测试数据按长度分 6 组。另外考虑一轮运算耗时极短, 计时器误

差的影响被放大,使用相同数据以 1 轮算 10 次的方式再测一遍放大计时基数,减小计时误差的影响。

由表 2 的最终测试结果可见,国产 ARM 主控处理器完成相同长度、相同次数的 FFT 运算耗时均略短于进口 Zynq 的主控处理器,由此可以说明国产 ARM 主控处理器总体上运算性能不弱于进口 Zynq 的主控处理器。

表 2 综合 FFT 运算能力测试结果对照表

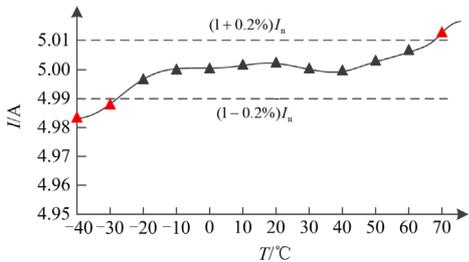
Table 2 Comparison table of FFT calculation ability test results

数据长度	μs			
	10 次总时间		单次	
	国产 ARM	进口 Zynq	国产 ARM	进口 Zynq
32	98	100	9.8	10
64	212	217	21.2	21.7
128	453	470	45.3	47
256	969	1005	96.9	100.5
512	2067	2133	206.7	213.3
1024	4399	4531	439.9	453.1

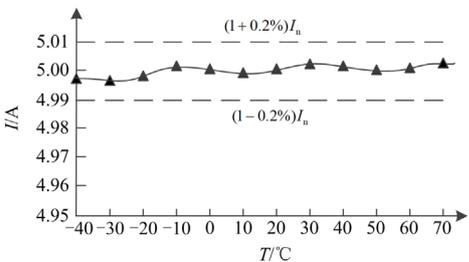
3.2 环境温度影响下的测量精度

选某一电流通道使用继电保护测试仪施加额定值进行测量精度验证,补偿前后环境温度影响的测量精度结果见图 12 和表 3。图 12 中“▲”为电流幅值的测点,曲线为测量值受温度影响的变化趋势。

其中图 12(a)是补偿前的情况,可以看出在环境温度过高或过低时测量误差均会超过 0.2% 的要求,测量值的离散度大。图 12(b)是补偿后的情况,测量



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 12 采样系数动态补偿效果

Fig. 12 Line chart of sampling coefficient dynamic compensation effect

精度在环境温度-40~70 °C 范围内均能满足误差不大于 0.2% 的要求,且测量值稳定离散度小。

表 3 中测量数据为多次测量误差的最大值,可以看出,采用补偿后的测量误差在环境温度过高和过低时均大幅降低,且最大误差距离主流标准 0.2% 的精度要求仍保留较大裕度。

表 3 基于国产 ADC 的电压/电流测量精度评估

Table 3 Accuracy of voltage/current measurement based on domestic ADC

测量误差	国产 ADC 无软件补偿			国产 ADC 有软件补偿		
	常温	70 °C	-40 °C	常温	70 °C	-40 °C
$U_n/\%$	0.02	0.26	0.43	0.01	0.08	0.10
$I_n/\%$	0.03	0.04	0.23	0.03	0.03	0.09

3.3 基于 FPGA 模拟的通信模块性能验证

首先使用光电示波器通过眼图^[24]的方式对 FPGA 模拟的百兆通信模块进行性能验证,根据 IEEE802.3 等行业一般要求建立眼图模板,即上下两道粗线和中间的标准六边形,信号波形触碰模板则表示波形不满足要求。对比试验结果见图 13 和图 14,基于 FPGA 模拟的通信模块眼图与基于进口芯片设计的通信模块眼图效果相当,码元波形上冲和下冲交叉点清晰,说明码元波形质量较好,眼图关键数据比较及坐标参数见表 4。但是,采用 FPGA 模拟的通信模块眼图的交叉点面积略大,且上冲和下冲波形均略宽,说明信号波形抖动略大。

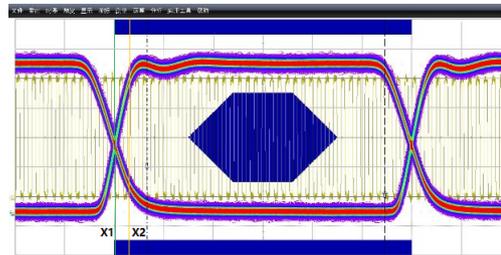


图 13 进口 MAC 与 PHY 组成的通信模块

Fig. 13 Eye pattern of communication module designed with imported MAC & PHY

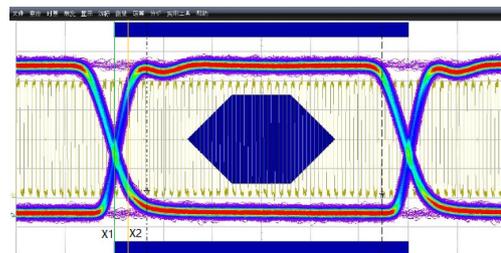


图 14 FPGA 模拟的通信模块

Fig. 14 Eye pattern of communication module simulated by FPGA

如表 4 所示, 进口芯片模块性能略优, 其交叉比更接近 50%, 眼宽和眼高数据差距不大说明 FPGA 模拟的通信信号码元波形质量与进口芯片模块相当, 从横坐标看交叉点抖动不足 0.5 ns, 相较于眼宽可忽略。

表 4 眼图参数对比表

Table 4 Table of eye pattern parameters comparison

	眼高/ μW	眼宽/ns	交叉比/%
进口芯片	27.27	7.82	44.0
FPGA 模拟	26.07	7.81	40.1

注: 眼高坐标 5 $\mu\text{W}/\text{div}$, 眼宽坐标 1.34 ns/div

然后使用误码仪模拟物理层信号测试。根据 IEEE802.3 标准允许的信号失真范围 40%~60%, 分别取占空比 50%(5%)、37.5%(62.5%)、18.75%(81.25%) 进行测试, 结果如表 5 所示。基于 FPGA 模拟通信模块在网络信号严重失真时, 仍未出现接收误码, 但是基于进口芯片的通信模块出现接收误码, 由此可见通过软件编程实现的信号校验和纠错功能在信号严重失真时能够提高通信可靠性。

表 5 误码率测试对比表

Table 5 Table of bit error rate test comparison

码元占空比	进口芯片误码率	FPGA 模拟误码率	%
50(50)	0	0	
37.5(62.5)	0	0	
18.75(81.25)	3.75	0	

由以上测试结果可知, 基于 FPGA 模拟的通信模块性能能够满足应用需求, 且与由进口芯片设计的通信模块的性能相当, 同时还具有基于软件的信号校验和纠错优势。

3.4 装置综合性能测试与对比

将本文所述基于国产芯片实现的多功能测控装置与基于进口元器件和芯片设计的装置进行综合性能对比测试, 在采集资源配置、业务功能配置、参数配置、信息量、通信服务要求完全相同的情况下, 详细对比测试结果见表 6。

从测试数据看, 本方案设计的装置主要技术指标总体上与基于进口元器件和芯片设计的装置持平, 且满足电力系统自动化领域现行标准^[25]的要求, 由于 ADC 等部分国产元器件和芯片与进口仍存在一定差距, 部分指标略低于基于进口元器件和芯片设计的装置。

3.5 工程应用情况

基于本文所述方案设计并研制的融合高压量测控制、同步相量、宽频量测等业务的多功能测控

表 6 多功能测控主要技术参数对照表

Table 6 Comparison table of main tech-indicators of multi-functional measurement and control device

项目	标准要求	进口部件方案装置	国产替代方案装置
电压电流幅值最大误差/%	0.2	0.12	0.17
电压电流相位最大误差/($^{\circ}$)	0.2	0.11	0.14
功率测量最大误差/%	0.5	0.13	0.2
频率测量最大误差/Hz	0.005	0.001	0.001
谐波影响最大误差/%	0.4	0.24	0.33
50 次谐波误差 1/%	5	2.48	2.68
50 次谐波误差 2/%	0.05	0.02	0.03
直流量测量最大误差/%	0.2	0.08	0.1
SOE 分辨率/ms	<1	<1	<1
遥控成功率/%	100	100	100
同步误差/ μs	1	0.511	0.476

注 1: 50 次谐波误差 1: 幅值大于 1% 额定值时以被测量为基准。

注 2: 50 次谐波误差 2: 幅值小于 1% 额定值时以额定值为基准。

装置, 已在洛阳周山于 2022 年 9 月 27 日正式投入运行。该站安装此装置 11 台, 其中 2 台用于高/低压侧母线, 2 台用于高压侧 2 回出线, 3 台用于#1 主变高低压侧和本体, 4 台用于#2 主变高低压侧和本体。同时, 基于相同方案研制的融合稳态量测控制和继电保护业务的低压线路、电容器、电抗器、站用变保护测控装置, 在河南、河北、山东、吉林、青海、天津等地区进行了大量应用, 运行设备达数百台。

经长期现场运行验证, 装置连续无异常运行时间已超过 400 天, 运行期间遥控成功率为 100%, 截取周山变电站运行中某条出线 1 h 负荷电流曲线如图 15 所示。图 15 中负荷曲线连续无间断, 可见采用本文研制的装置性能稳定可靠。

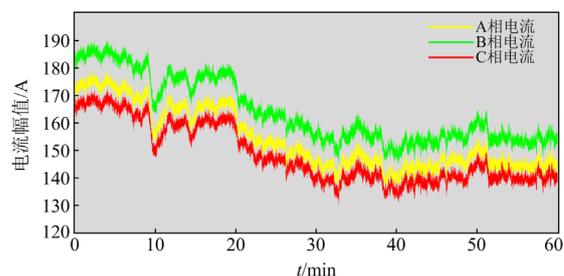


图 15 周山变某条线路的负荷电流曲线

Fig. 15 Load current curve of a certain transmission line of Zhoushan substation

4 结语

本文通过对比分析, 选用国产 ARM 作为多功能测控的主控芯片, 设计了基于国产芯片实现支持

多业务融合的多功能测控装置平台方案，解决了国产替代方案中核心芯片选型困难、配套元器件和芯片性能不足或无合适选型、可靠性不高等问题，经过测试及运行验证可知，采用该方案设计的多功能测控装置指标满足相关标准要求，性能稳定可靠。

目前适用于电力系统自动化的国产可替代元器件和芯片选型不多，基于国产芯片实现的多功能测控装置平台设计偏复杂，稳定性、可靠性仍需通过长期、大量现场实践来进行验证，后续继续关注国产芯片行业发展，挖掘更多国产可替代的元器件和芯片，加速电力自动化领域国产化替代技术迭代。

参考文献

[1] 李友军, 郭勋, 周华良, 等. 基于龙芯处理器的稳控系统装置平台及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 146-153.
 LI Youjun, GUO Xun, ZHOU Hualiang, et al. Device platform and application of a stability control system based on a Loongson processor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 146-153.

[2] 段祉鸿, 狄世超, 陈令刚. 基于龙芯处理器定瞄计算机的定位瞄准控制方法[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(8): 43-46.
 DUAN Zhihong, DI Shichao, CHEN Linggang. Location and collimation control method based on aiming computer using Loongson processor[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(8): 43-46.

[3] 习伟, 姚浩, 蔡田田, 等. 芯片化保护测控装置方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 91-97.
 XI Wei, YAO Hao, CAI Tiantian, et al. Research on chip-based protection and measuring and control devices[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 91-97.

[4] 丁俊, 毛志宇, 刘文许, 等. 基于多维信息融合的配电网故障研判系统研发与应用[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 252-260.
 DING Jun, MAO Zhiyu, LIU Wenxu, et al. Development and application of distribution network fault diagnosis system based on multi-dimensional information fusion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 252-260.

[5] 习伟, 姚浩, 陈波, 等. 基于SOC系统数据交互的保护装置设计[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 121-125.
 XI Wei, YAO Hao, CHEN Bo, et al. Design of protection device based on SOC system data exchange[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 121-125.

[6] 杨帆, 高吉普, 卢继平, 等. 基于ZYNQ平台的线路差动保护方案设计[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 91-99.

YANG Zhi, GAO Jipu, LU Jiping, et al. Line differential protection scheme design based on ZYNQ platform[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 91-99.

[7] 仲伟, 王仲, 陶保震, 等. 新一代自主可控保护装置硬件平台技术[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 135-140.
 ZHONG Wei, WANG Zhong, TAO Baozhen, et al. Software and hardware platform technology of an independent controllable relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 135-140.

[8] 丁毅, 陈新之, 潘可, 等. 基于电力专用多核异构芯片架构的低压保护测控装置设计[J]. 南方电网技术, 2020, 14(1): 58-64.
 DING Yi, CHEN Xinzhi, PAN Ke, et al. Design of low voltage protection device integrated with measurement and control function based on power dedicated multi-core heterogeneous chip architecture[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(1): 58-64.

[9] ZUHAIB M, RIHAN M, SAEED M T. A novel method for locating the source of sustained oscillation in power system using synchrophasors data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 320-331.

[10] 任志航, 邓茂军, 王磊, 等. 基于间隔功能动态部署的智慧变电站集群测控装置研制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 167-173.
 REN Zhihang, DENG Maojun, WANG Lei, et al. Development of a smart substation cluster measurement and control device based on interval function dynamic deployment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 167-173.

[11] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 电网宽频振荡实时监测技术方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 152-159.
 FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Technical scheme for real-time monitoring of wide-frequency oscillation in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 152-159.

[12] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 1-8, 57.
 FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Discussion on wide-frequency measurement technology for power electronized power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 1-8, 57.

[13] 党皓天, 刘东, 陈飞, 等. 基于SoC FPGA硬件并行化计算的配电网电压控制技术[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 39-47, 91.
 DANG Haotian, LIU Dong, CHEN Fei, et al. Voltage control strategy for distribution network based on SoC

- FPGA hardware parallel computing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 39-47, 91.
- [14] 吴艳平, 姚建国, 常乃超, 等. 多功能宽频测量装置的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 136-141. WU Yanping, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 136-141.
- [15] 王杨, 王超群, 晁苗苗, 等. 基于同步相量数据幅频特征的次超同步振荡模式辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 1-11. WANG Yang, WANG Chaoqun, CHAO Miaomiao, et al. Sub-and super-synchronous oscillation mode identification based on amplitude and frequency characteristics of synchronous phasor data[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 1-11.
- [16] 郭长荣. 基于软硬件协同的国产处理器可靠性环境试验技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. GUO Changrong. Research on reliability environment testing technology of domestic processor based on coordination of hardware and software[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [17] 吕玄兵, 王振华, 周东杰, 等. 一种多片 FPGA 集成系统的设计方案[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(5): 84-87. LÜ Xuanbing, WANG Zhenhua, ZHOU Dongjie, et al. Design of multi-chip FPGA integrated system[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2022, 22(5): 84-87.
- [18] 王淇森, 李莎莎, 张荣良, 等. 基于国产 ARM 与 FPGA 的智能人机交互系统设计[J]. 信息技术, 2022(4): 42-48. WANG Qisen, LI Shasha, ZHANG Rongliang, et al. Intelligent human-computer interaction system based on domestic ARM and FPGA[J]. Information Technology, 2022(4): 42-48.
- [19] 杨光绕, 郝正航, 陈卓, 等. 基于 FPGA-CPU 的双馈风电系统异步协同仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 72-81. YANG Guangrao, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Asynchronous co-simulation of a double-fed wind power system based on FPGA-CPU[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 72-81.
- [20] 章家欢. 计及核心元器件的继电保护装置可靠性分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022. ZHANG Jiahuan. Reliability analysis of relay protection device considering core components[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [21] 陈晓帆. 核心元器件国产化继电保护装置架构的可靠性设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2021. CHEN Xiaofan. Reliability design of relay protection device architecture based on localization of core components[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [22] 周浩, 石磊, 彭涛, 等. 一起继电保护装置单粒子翻转软错误分析及应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 144-149. ZHOU Hao, SHI Lei, PENG Tao, et al. Analysis and countermeasures of single event upset soft errors in a relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 144-149.
- [23] 李肖博, 于杨, 姚浩, 等. 新一代智能变电站采控装置[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 85-92. LI Xiaobo, YU Yang, YAO Hao, et al. Sample-control-device of smart substation[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 85-92.
- [24] 高强, 马世敏, 刘杰. 矢量网络分析仪的眼图交叉点估计方法[J]. 计量学报, 2023, 44(5): 777-782. GAO Qiang, MA Shimin, LIU Jie. The estimation algorithm of eye diagram cross-point for vector network analyzer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(5): 777-782.
- [25] 中国电力企业联合会. 远动终端设备: GB/T 13729—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. China Electricity Council. Remote terminal unit equipment: GB/T 13729—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-11-03

作者简介:

蔺立(1985—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动控制和动态监测; E-mail: xjtc_linli@126.com

常乃超(1977—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为调度自动化、智能电网; E-mail: changnaichao@sina.com.cn

刘志远(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统量测与控制. E-mail: xjtc_liuzhiyuan@126.com
(编辑 张颖)