基于伏羲芯片的自主可控继电保护测试仪的研究与应用

苗国立[1]，吕小浩[1]，李　迪[1]，陈瑞峰[1]，段守胜[2]

（1.河南送变电建设有限公司，河南 郑州 450000；2.武汉凯默电气有限公司，湖北 武汉 430223）

摘要：为降低电力自动化测试设备对进口芯片的依存度，设计一种基于国产伏羲芯片的继电保护测试仪，采用多核心多子系统设计，简化硬件架构，同时使用国产紫光同创的 FPGA，实现了继电保护测试仪主要核心芯片的国产自主可控。经测试表明，该测试仪实现了数字量 SV、GOOSE 通信能力和模拟量电压电流输出等多种测试功能，验证了伏羲芯片在电力行业产业化的应用前景。

关键词：自主可控；光数字输出；模拟电压电流；伏羲芯片

Research and application of an independent and controllable relay tester based on Fuxi chip

MIAO Guoli[1] , LV Xiaohao[1], LI Di[1], CHEN Ruifeng[1], DUAN Shousheng[2]

(1. Henan Power Transmission and Transformation Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
2. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: In order to reduce the dependence of power automation testing equipment on imported chips, a relay tester based on domestic Fuxi chips is designed, which uses multi-core and multi subsystem design to simplify the hardware architecture. At the same time, it uses domestic FPGA to realize an independent and controllable relay tester with the domestic core chips . The test results show that the tester has realized a variety of test functions, such as SV, GOOSE communication capability,and the output of analog voltage and current, etc. And it verified the application prospect of Fuxi chip in the power industry.

Key words: independent and controllable; optical digital output; analog voltage and current; Fuxi chip

0　引言

继电保护是保障电力系统安全稳定运行的第一道防线，而我国工业实时控制的专用芯片长期依赖国外技术和产品，受制于人。这种局面，一方面与我国电力技术整体快速发展，对装备能力的要求和智能化水平提升的迫切需求不符；另一方面，对我国工业系统的供应链安全造成重大威胁，甚至存在重大的网络安全和破坏电网稳定的隐患[1]。特别是2018—2019年，中兴、华为事件相继爆发，暴露出我国在核心半导体领域的重大短板，给电力自动化设备的生产和维护带来严重威胁。应用自主可控国产芯片是电力自动化设备发展的必然趋势[2]。

南方电网公司针对我国能源工控领域的“卡脖子”问题，历时8年成功研发出我国自主可控的第一款电力专用主控芯片——伏羲系列芯片[3]。目前伏羲作为我国首个基于国产指令架构、国产内核的电力专用主控芯片，已先后在电网控制保护、自动化和新能源等多个电网关键场景进行验证及应用。这标志着我国电力工控领域核心芯片

已经从“进口通用”向“自主专用”转变，对于逐步提高我国电网多领域场景新增设备的自主芯片覆盖率，实现国产工业控制芯片规模化应用具有重要意义[4]。

本文采用南方电网公司的伏羲芯片和紫光同创的FPGA，设计了多接口多功能的数模一体继电保护测试仪，以降低电力自动化测试设备对进口芯片的依存度。

1 继电保护测试仪需求分析

随着电网公司智能变电站的建设，智能变电站较传统变电站增加了过程层设备，原间隔层与过程层设备也全部数字化。所以在传统继电保护测试仪的基础上，运维人员不仅要测试原有传统变电站的电气特性，还要测试各种数字量通信状况。故要求数模一体继电保护测试仪可以对智能变电站过程层和间隔层的网络通信协议（IEC 61850-9-1、IEC 61850-9-2、IEC 60044-7/8、GOOSE和IEEE 1588）进行实时解析和监视[5]，同时对传统变电站可以输出高准确度的电压电流功率源进行模拟量的测试[6]。能够以直观的方式显示分析结果：如电压电流的有效值、相角、谐波和功率等电能量分析；开关状态及动作时间分析；时间同步的对时分析；光信号的光功率分析。该继电保护测试仪是变电站日常维护、 检测、调试过程层和间隔层设备运行状况的必备工具[7]。

近些年，随着我国半导体芯片企业的发展，我国 CPU/SOC 取得了长足进步。嵌入式CPU已经实现了与国外产品同台竞争，年销售达数亿颗。国产半导体存储器实现零的突破，三维闪存和动态随机存储器进入量产，技术接近国际先进水平。国产FPGA芯片全面进入通信和整机市场，在关键时刻起到了决定性的支撑作用[8]。因此本文以国产核心芯片自主可控的目标为主，适当应用外围电路芯片，研制出基于自主可控核心芯片的数模一体继电保护测试仪。

2 伏羲芯片

如图1所示，伏羲芯片包含1个双核CK860子核心和和2个单核CK810子核心，按照功能逻辑划分为两个区：实时逻辑区（Real-Logic Region），以单核CK810为主，运行实时操作系统；应用进程区（App-Process Region），以双核CK860为主，运行嵌入式图形化Linux[9]。

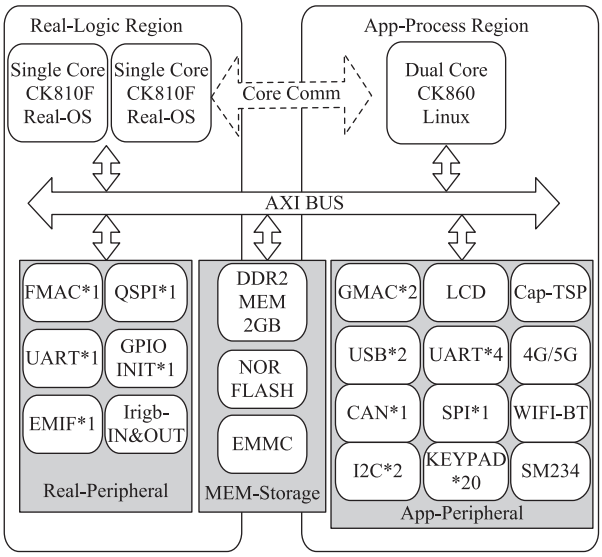


图 1 伏羲芯片功能逻辑划分

Fig. 1 Functional logic division of Fuxi chip

实时逻辑区（Real-Logic Region）用于处理实时数据和必要的控制逻辑，如模拟量采样、计算和保护控制算法等，主要外接设备为百兆以太网（FMAC）、四线制QSPI控制器、串口、外设寄存器总线（EMIF）、IRIG-B码对时输入输出和必要的GPIO中断[10]。

应用进程区（App-Process Region）主要运行图像化Linux，负责人机交互（液晶、触摸和按键）、定值管理以及主站通信等，主要外设千兆以太网接口（GMAC×2）、USB、UART、4G/5G和WiFi-BT等[11]。

为了提高伏羲芯片开发设计效率，将伏羲芯片设计为核心板模式，以便后续项目的快速开发。同时根据继电保护测试仪硬件的常用功能需求，设计其核心板的功能如图2所示。板载芯片有DDR3、EMMC、PHY(YT8521)、NorFlash和EEPROM，设计引出接口为 QSPI×1、IIC×2、串口×5、调试串口×1、USB×3、寄存器总线×1、GPIO×20、千兆MDI×1、RGMII×1、

百兆MDI×1 和液晶接口（RGB888）×1。

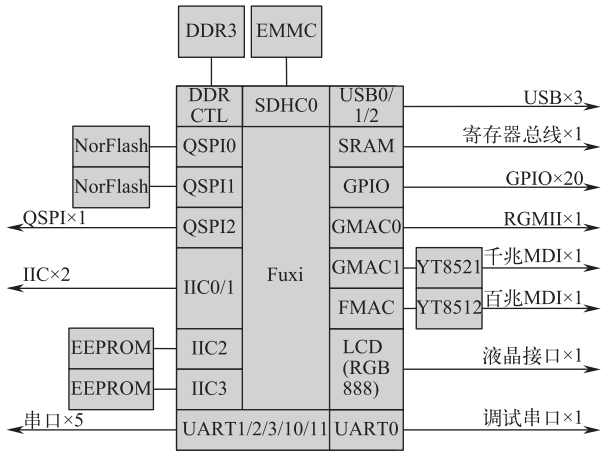


图 2　伏羲芯片核心板功能框图

Fig. 2 Functional block diagram of Fuxi chip core board

3　硬件系统设计

本文根据上述的现场测试需求，同时结合伏羲芯片的功能特点，硬件方案上设计3路LC光网口、4路模拟量电压输出，3路模拟量电流输出，1路接收ST光口、1路发送ST光口、1路MMS网电网口、1路电B码和1路RS 232接口，进行基于IEC 61850的数字量继电保护测试和基于电压电流模拟量的传统继电保护测试，内置GPS和WiFi，进行变电站时钟测试，与现场运维数据后台通信。

硬件系统框图如图3所示，整个系统主要由伏羲核心板和紫光同创的FPGA组成。

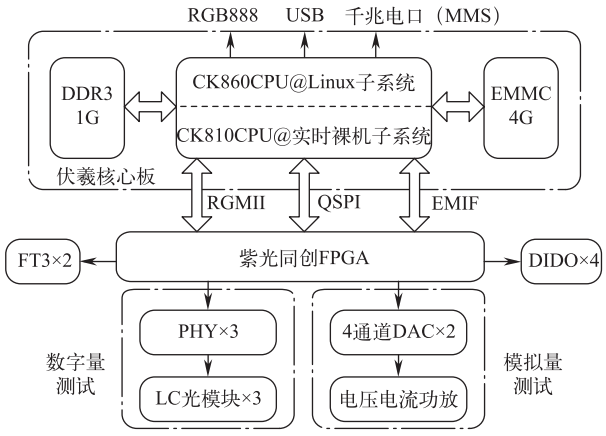


图 3　硬件系统框图

Fig. 3 Hardware system block diagram

伏羲核心板上的CK860运行Linux，使用天马微电子的1 024×600液晶屏和电容触摸屏，外置USB 2.0进行人机交互。通过苏州裕太车通的PHY（YT8521）拓展一个千兆网口并进行MMS口报文通信，使用RGMII与FPGA进行非实时性的界面命令交互。同时CK810.1上运行裸机子系统，主要负责命令解析、继电保护算法、傅里叶计算和对时管理等，要求具有极好的实时响应，故使用QSPI接口与FPGA进行实时性、大数据量的应用，如模拟电压电流量、SV输出数据，其理论带宽为50 MHz×4 bit=200 Mbit/s，且可支持DMA。同时使用EMIF总线，提供实时性、小数据量，寄存器方式读写接口，如读写FPGA某外设控制状态寄存器等。

紫光同创FPGA提供所有硬件测试的接口（如SV报文的PHY及LC光口、FT3报文的ST光口、开入开出的接口等），还提供电压电流模拟量输出的DAC[12]。

4　嵌入式系统设计

伏羲芯片内部采用多核心异构方式，可以实现3个主要的子系统（1个Linux子系统和2个裸机子系统）同时在CK860、CK810.0和CK810.1核心上运行。其采用共享内存方式进行子系统之间的通信，通过必要的信号量、消息等调度机制，保证通信的数据流、同步性和互斥操作等要求。

伏羲子系统的启动时序如图4所示，芯片上电后，CK810.0作为运行第一个软件的主CPU，用户可以在主CPU软件上启动协处理器（CK810.1、CK860、CK803.0和CK803.1）。ROMBoot搬运mtdblock1分区的SPL到片上RAM中运行，SPL初始化内存，并搬运mtdblock6分区的Uboot到内存运行，之后搬运mtdblock4分区的810.1裸机程序和mtdblock5分区的860 Linux程序到内存运行。裸机程序运行后，Uboot继续引导kernel加载等后续流程。

以一个收发测试项目的图示说明嵌入式系统内部工作流程，如图5所示。

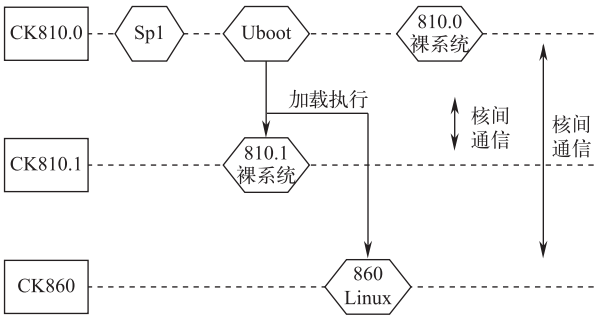


图 4　伏羲子系统的启动时序图

Fig. 4 Startup sequence diagram of Fuxi subsystem

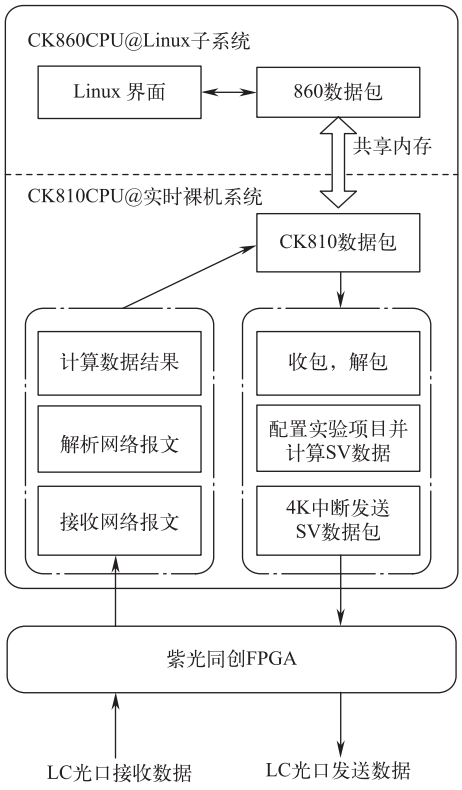


图 5　收发测试项目的流程图

Fig. 5 Flow chart of receiving and sending test projects

发送SV数据包时，CK860 Linux子系统在界面设置完实验参数后，将参数打包通过共享内存发送到CK810裸机子系统上。CK810裸机子系统对其数据包进行解析，分析出数据包中所带的配置，例如SV的个数、幅值、相位和GOOSE的个数等。CK810裸机子系统根据这些配置计算出SV和GOOSE数据包，并在4K中断中将这些数据包发送到FPGA中。

接收SV数据包时，CK810裸机子系统接收从FPGA的外部网络报文，并将这个报文解析存储。将解析完的数据包进行相应的计算，例如幅值、频率等。最后将计算完的结果数据通过共享内存的方式传递给Linux子系统，并在嵌入式软件界面显示测试结果。

5　界面功能设计

伏羲芯片CK860核心上运行的是Linux子系统，其支持常用的嵌入式Linux GUI开发工具Qt[13]。Qt是一个跨平台的用于创建精彩用户界面和强大原生应用的框架，包括一套跨平台的类库、一套整合的开发工具和一个跨平台的集成开发环境Qt Creator，是进行嵌入式系统人机交互界面开发的最佳选择之一[14]。如图6所示，根据测试功能需求，设计了4个测试大类（通用测试、保护测试、综合测试和MMS数据源），其中每个测试大类中包含具体的测试项目，如保护测试大类中有整组测试、距离保护、零序过电流、主变压器差动、母线差动和复压过电流等多个测试项目。

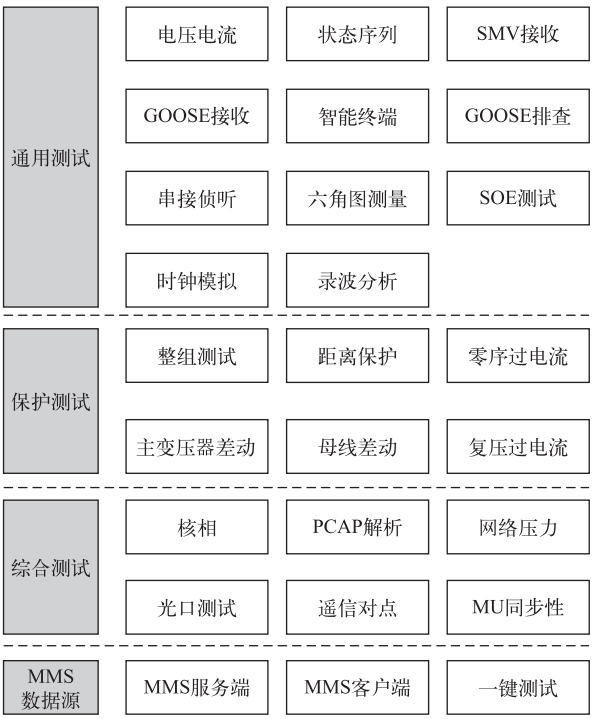


图 6　界面功能设计

Fig. 6 Interface function design

6　测试与验证

6.1　SV收发能力测试

如图7所示，使用测试仪LC光口发送90 Mbit/s左右的SV报文流量，通过手持式继电保护测试仪接收SV报文数据，并统计网络流量以及时间间隔离散值等相关信息，测试结果如图8所示。从结果可以看出，本测试仪发送90 Mbit/s的SV报文流量时，其时间间隔离散值小于1 μs，无丢包。同样，反方向可以测试，当手持式继电保护测试仪发送90 Mbit/s的SV报文流量时，本测试仪接收无丢包。此测试表明，本测试仪的单光口的SV报文能力和报文间的时间间隔离散值指标满足DL/T 1501—2016《数字化继电保护试验装置技术条件》中的要求。



图 7　测试仪发送 SV 报文

Fig. 7 Tester sends SV message

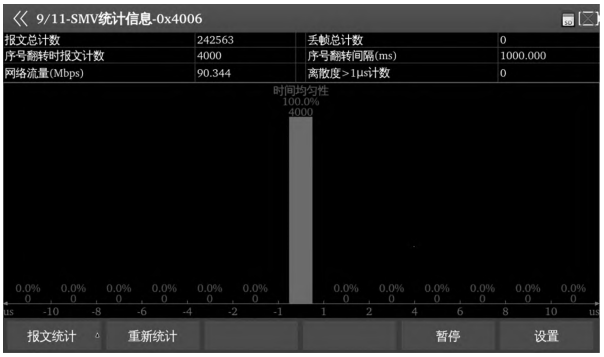


图 8　测试仪 SV 发送能力测试结果

Fig. 8 Tester SV sends achievement test results

6.2　模拟量电压电流输出测试

如图9所示，使用本测试仪输出三相电压和三相电流，使用高准确度功率分析仪进行准确度和波形校验，结果见下表。可以看出本装置的电压电流准确度在0.2%以内，同时波形平滑无失真。

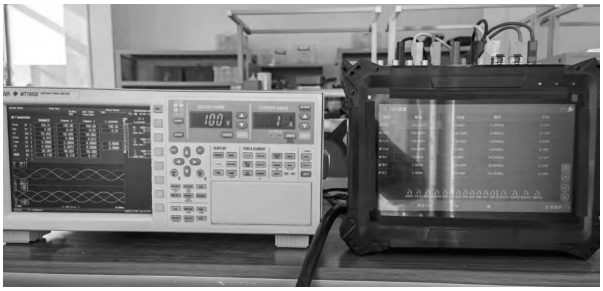


图 9　测试仪模拟量电压电流输出测试

Fig. 9 Test instrument analog voltage and current output test

表　模拟量电压电流输出测试结果

Tab. Analog voltage and current output test results

电压输出			电流输出		
设置值 / V	实测值 / V	准确度（%）	设置值 / A	实测值 / A	准确度（%）
0.2	0.200 3	0.15	0.1	0.100 1	0.1
2	2.002 8	0.14	0.2	0.200 2	0.1
10	10.013	0.13	1	1.000 8	0.08
100	100.12	0.12	5	5.003	0.06
120	120.12	0.10	6	6.004	0.06
150	150.18	0.12	10	10.005	0.05

7　结束语

本文设计了一种基于伏羲芯片的数模一体继电保护测试仪，采用多核心、多子系统设计，简化硬件架构，同时使用国产紫光同创FPGA，实现了主要核心芯片的国产自主可控。本测试仪支持丰富的多种类规约测试接口，实现了数字量SV、GOOSE通信能力和模拟量电压电流输出等多种测试功能，完成了伏羲芯片在继电保护测试仪中的实际运用。

参考文献

[1]　叶青．南网数研院：研发我国首款电力专用主控芯片“伏羲”实现规模化应用[J]．广东科技，2021，30(9)：29-30．

[2]　任辉，姚志强，邢文红，等．基于国产核心芯片的变电站数据通信网关机设计[J]．电子设计工程，2021，29(8)：150-155．

[3] 李文华．中国自主可控的第一款电力专用主控芯片“伏羲”[J]．电力设备管理，2021(7)：235．
[4] 陈军健，李肖博，姚浩，等．基于国产伏羲芯片的智能站继电保护装置软硬件平台设计[J]．电子器件，2022，45(3)：688-694．
[5] 谢宇翔，林杰．光数字继电保护测试仪[J]．大众用电，2015，30(10)：46．
[6] 李晓，陈铸华，周有庆．微机型继电保护测试仪功率放大电路的设计与制作[J]．现代电子技术，2007(7)：145-148，155．
[7] 周勤，熊华强，熊茹，等．光数字继电保护测试仪时间特性的分析及检验[J]．电气应用，2015，34(19)：30-34．
[8] 肖汉平．稳步推进高端芯片国产化进程的战略路径[J]．国家治理，2021(26)：29-34．
[9] 南方电网数字研究院有限公司．FUXI-H2 用户手册V1．0[Z]．2021．
[10] 南方电网数字研究院有限公司．FUXI-H2 裸机环境用户手册V1．0[Z]．2021．
[11] 南方电网数字研究院有限公司．FUXI-H2 Linux环境用户手册V1．0[Z]．2021．
[12] 周前，赵阳．基于 FPGA 实现的继电保护系统中光纤收发器相关数据的读取与控制方法 [J]．电工技术，2022(2)：49-50，54．
[13] 王晓燕，刘军霞，杨先文．基于Qt和Flash的嵌入式Linux软件架构设计[J]．现代电子技术，2017，40(1)：13-16．
[14] 陈尧杰，李璋，等．基于嵌入式Qt的新能源汽车电池监控系统[J]．物联网技术，2016，6(4)：25-27．

作者简介

苗国立（1979－），男， 高级工程师，主要研究方向：智能化变电站调试、网络安全，继电保护和高压试验。

段守胜（1984－），男，通信作者，工程师，主要研究方向：继电保护测试技术研究与开发。

（收稿日期：2023-01-06）