

# 反应堆保护装置校验设备设计

杨 洋, 韩文兴, 贺 理, 吴志强, 马 权

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

**摘要:** 为了实现反应堆保护装置各功能单元的快速、自动化功能校验, 设计反应堆保护装置校验设备。该设备通过基于现场可编程阵列逻辑 (FPGA) 的脉冲信号输出电路配合高速采集卡采样频率和缓冲区数据计数的方法, 实现定值单元自检接口的测试; 通过基于高精度恒压源、电压反馈、电流反馈模块的输出电路实现对高精度毫伏信号的模拟; 通过故障定位专家系统实现对各功能单元的智能化故障定位。各项测试和试验结果表明, 各项技术指标满足用户规定的要求。

**关键词:** 反应堆保护装置; 校验设备; 故障定位

**中图分类号:** TL362.01 **文献标志码:** A

## 0 前 言

反应堆保护装置 (简称“保护装置”) 属于核安全级设备, 对保障反应堆及运行人员的安全具有非常重要的作用。目前保护装置的校验方式是采用外加模拟信号源对保护装置进行整机功能性能校验。校验方式繁琐, 效率较低, 需要消耗大量的时间和人力, 有必要设计一种能自动对保护装置各功能单元进行功能性能检测的校验设备。

本项目基于定值单元自检接口测试原理、高精度毫伏信号模拟技术及智能化故障定位技术, 设计反应堆保护装置校验设备, 并进行测试和试验验证。

## 1 保护装置功能单元校验原理

保护装置各功能单元的校验原理为: 通过校验设备按照预先设定的组态向各功能单元对应端口输入测试信号, 同时采集各功能单元的输出结果, 将输出结果与故障定位数据库中的数据对比, 判断被校验各功能单元是否正常, 如果故障, 给出故障定位信息。

由于各功能单元的功能组态、输入/输出信号类型、测试方法各不相同, 部分功能单元还要对一些特殊接口进行测试, 因此各功能单元校验方法也各不相同。以高跳定值单元自检接口测试为例, 测试原理如图 1 所示。测试时向定值单元定

值比较电路的输入端加载幅值为 5 V, 脉冲宽度为 2 ms 的测试脉冲, 则:

(1) 在测试脉冲上升缘, 定值比较电路的输入端产生 5 V 的正向脉冲, 定值器动作, 在定值比较电路的输出端产生一个宽度约为 1.2 ms 的低电平信号。

(2) 在测试脉冲的下降缘, 定值比较电路的输入端产生 -5 V 的反向脉冲, 定值器复位, 在定值比较电路的输出端产生一个宽度约为 0.6 ms 的高电平信号。

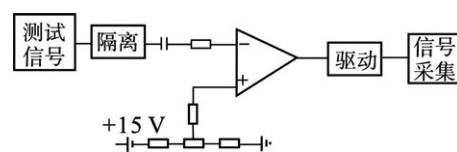


图 1 定值单元自检接口测试原理图

Fig. 1 Self-Test Interface of Setpoint Unit Test Chart

通过比较自检接口输出信号是否为高电平 ( $>4.5\text{ V}$ ) 和低电平 ( $<0.5\text{ V}$ ) 从而判断定值单元自检接口是否工作正常。

## 2 传统测试方法的问题及解决方案

由于定值单元自检接口测试要求在 0.6 ms 内对输出信号进行采集, 而基于 Windows 操作系统的高级语言软件定时采用计算机本身的时钟中

断,其基准为  $18\text{ s}^{-1}$  (即  $55\text{ ms}$  一次中断),加上 Windows 本身的任务调度机制,通常会有  $\pm 5\text{ ms}$  的误差,两者加起来累计误差为  $50\sim 60\text{ ms}$ ;如果采用此方法对自检电路输出信号进行采集,测试精度无法满足定值单元自检接口测试要求。在保护装置校验设备的研制中,将自检接口输出电平信号的采集转换为对采集到自检接口输出信号所经过的时间  $T_1$  的测量,以此判断自检接口电路是否工作正常,具体测量方法如下:

(1) 使用模拟量高速采集卡对定值单元自检接口输出脉冲信号的电平进行采集,将采集到的数据放在缓冲区中,缓冲区中存储的数据即是对脉冲信号数字化后的离散波形。

(2) 由于硬件采集频率稳定、准确,使存储区中相邻的数值被采集的时间间隔确定,通过峰值找出单个脉冲信号,并统计出期间缓冲区数据的数量,乘以采集频率,即得到从测试信号输入到采集到自检接口输出对应高电平所需要的时间。

(3) 通过判断  $T_1 - 2\text{ ms}$  是否小于  $0.6\text{ ms}$  判断定值单元自检输出接口功能是否正确。

### 3 校验设备设计结构

由于被测保护装置 24 种功能单元输入/输出信号种类复杂,因此需要对各种测试信号进行分类转接和调理。普通工业控制计算机板卡采用外设部件互联标准 (PCI) 或者工业标准结构 (ISA) 插槽的连接方式,不仅接线复杂,且可维修性较差。通过分析比较确定,保护装置校验设备采用基于兼容 AT96 和紧凑型外设部件互联标准 (APCI) 总线的工业级嵌入式测控系统方案。

(1) 整个校验设备包括专用测试机柜、操作控制台及检修平台 3 部分。采用机柜内放置各种机箱,机箱内配置各种功能插件的总体结构方案,操作控制台和专用测试机柜之间通过连接器进行连接。

(2) 在专用测试机柜内部配置 6 个机箱,按照信号走向,从上到下依次为 3 个功能接口箱、信号调理机箱、APCI 测试控制机箱和电源机箱。功能接口箱 (报警机箱接口箱、通道机箱接口箱、安注逻辑机箱接口箱) 与反应堆保护装置中放置各功能单元的机箱完全一致,用于放置被测试的 24 种功能单元。

(3) 设置信号调理机箱,对各种输入/出信号进行隔离、滤波、放大,以满足测试的要求。信号调理单元按 AT96 工业总线规范统一设计成插件形式,使得信号调理机箱的可靠性更高且易于维护。

(4) APCI 测控机箱用于发出保护装置校验所需要的各种测试信号,同时采集保护装置各功能单元的响应信号。机箱内根据各功能单元的校验要求配置了对应的各种功能板卡,各板卡按照 AT96 工业总线规范统一设计成插件形式。

(5) 设计一个操作控制台,用于测试人员进行操作和打印测试数据,操作控制台上放置了液晶显示器、键盘、打印机等外设;测试人员通过操作软件进行板卡测试。

反应堆保护装置校验设备结构见图 2。

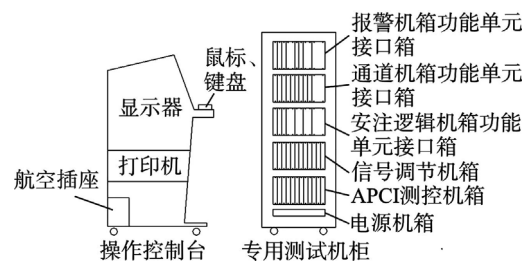


图 2 反应堆保护装置校验设备结构图

Fig. 2 Structure of Reactor Protection Equipment Checkout Console

## 4 校验设备设计

### 4.1 关键电路设计

4.1.1  $2\text{ ms}/5\text{ V}$  脉冲信号输出电路设计 保护装置定值单元自检接口测试时需产生  $2\text{ ms}/5\text{ V}$  窄脉冲,如果通过控制开/关频率的方式对常规功能板卡进行控制,难以模拟出满足技术指标要求的脉冲信号。

采用基于现场可编程阵列逻辑 (FPGA) 技术的脉冲信号输出电路,解决  $2\text{ ms}/5\text{ V}$  窄脉冲的模拟问题。该脉冲信号输出电路由中央处理器 (CPU)、时钟源、FPGA、驱动电路和光隔电路 5 部分组成。CPU 系统接到信号发出指令后,通过系统总线向 FPGA 输出脉冲信号产生命令和数字量, FPGA 接收到命令后,内部的高精度定时器开始计时,达到需要的时间后, FPGA 内部的高稳定频率锁相环 (PLL) 将数字量转换为高精度、高稳定的脉冲信号,脉冲信号经驱动电路进行功率驱动后经光隔电路隔离后,输出给需要测

试的功能单元。

(1) 脉冲宽度调制：为保证输出 2 ms 宽度脉冲，在电路设计中采用时钟源时钟计数值与定时器定时基准值比对的方法调整输出脉冲宽度。定时计数器一方面将 CPU 系统发出的数字量作为定时器的定时基准值，另一方面同时对时钟源时钟进行计数，当计数值低于定时器的定时基准值时，模块输出高电平；当计数值等于定时器的定时值时，输出低电平，同时对计数器的值清零；延时所需时间后，计数器重新开始计数，通过改变定时器的定时基准值来改变输出脉冲的宽度。

(2) 输出脉冲频率稳定：采用时钟校正技术对外部输入的时钟进行整形校正，生成标准的方波，作为频率处理与脉冲宽度调节奠定基础。通过频率锁相环 (PLL) 模块保持输出脉冲频率的稳定。当脉冲频率低于设定的频率时，PLL 提高输出脉冲的频率；当脉冲频率高于需要的频率时，PLL 降低输出脉冲的频率。

4.1.2 高精度毫伏信号输出电路设计 在保护装置自检电源的数字面板显示功能的测试过程中，需要输入 3 路 0~200 mV 电压信号，精度要求 0.3%。本设计通过电压信号转换为电流信号，对输出电流信号通过高精度、低温漂精密电阻取样的方式来产生高精度的毫伏信号。毫伏信号输出电路原理如图 3 所示。

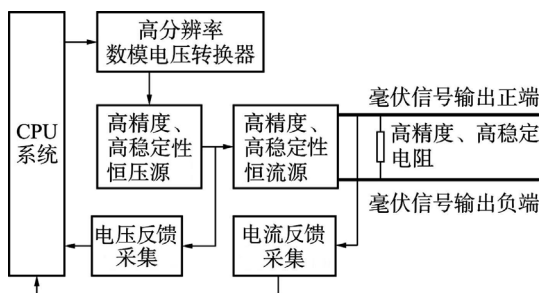


图 3 毫伏信号输出电路原理图

Fig. 3 mV Signal Output Circuit Chart

毫伏信号输出电路由 CPU 系统、模数 (D/A) 转换电路、高精度恒压源模块、高精度恒流源模块、电压反馈采集模块、电路反馈采集模块以及毫伏信号输出模块 (包括一个高精度的电阻) 7 部分组成。CPU 系统根据测试需要输出数字量，通过 D/A 转换电路将数字量变为模拟量，模拟量输入到高精度、高稳定恒压源，使恒压源输出稳

定的电压。恒压源再将电压送入恒流源，使恒流源输出与输入电压相对应的稳定电流。稳定的电流通过高精度、高稳定的电阻，转换为毫伏信号。

高精度毫伏信号输出电路在设计时采用以下技术保证毫伏信号的稳定输出：

(1) 采用电流信号作为中间转换参量的方式，利用电流信号在传递过程中抗干扰强，稳定性好的特点，保证毫伏信号的稳定输出。

(2) 采用高分辨率、高稳定性的 D/A 转换电路，保证数模转换精度和较高的温度稳定性，为恒压源提供稳定的控制电压输入信号。

(3) 在恒压源的设计中，通过深度负反馈设计，保证恒压源的稳定输出。

(4) 为了防止外界环境及信号对恒压源及恒流源输出信号的干扰，在电路中设计了电压反馈采集模块以及电流反馈采集模块跟踪恒压源与恒流源的输出，及时改变 CPU 输出的数字量，使输出毫伏信号保持稳定。

(5) 为了保证毫伏信号 0.3% 的精度要求，在毫伏信号输出端，通过低温漂 ( $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 高精度 (0.02%) 高稳定性电阻对恒流源输出的电流信号进行取样、输出需要的毫伏信号；整个毫伏信号输出卡精度达到 0.2%，满足测试需求。

## 4.2 智能化故障定位设计

为提高检测效率和检测灵活性，进行了智能化故障定位技术配套研究，以实现保护装置 24 种功能单元的全自动故障检测和定位。

(1) 故障定位专家系统：将对所有功能单元、电路分析得到的故障类型、常见故障进行条目化处理，加上进行测试所需的各种信息，构建了故障定位数据库。

(2) 测试信息表：每种功能插件均设计端口信息表、故障定位表、配置信息表等 3 张表格；校验时软件自动调度上述数据表进行测试，实现对庞大的测试组态进行有序的管理。

(3) 故障分支树的分析：故障单元可能出现同一故障引起多个测试结果不符合项，或者多个故障并存等各种复杂情况，因此预先开展了故障分支树的分析，并将顶层事故分析结果纳入数据库。校验时，校验设备根据数据库中的信息表进行测试以及故障比对，并自动对故障比对结果进行整合、分析，找出顶层故障，采用层层递进的

分析方式，把故障的范围逐渐缩小，达到故障准确定位的目的。

(4)设计良好的人-机界面：故障定位成功后，自动以文字形式给出故障类型、故障信息、维修信息，同时以图片形式告知维修人员故障部分，人-机交互直观、友好。

## 5 试验验证结果

经过各项功能性能试验验证表明，校验设备的主要技术指标如下：

(1)实现保护装置 24 种功能单元自动测试、故障定位、测试结果输出、保存及打印功能。

(2)具有完备的自动故障定位功能，故障定位快速、准确（可定位到功能单元电路或主要元器件）。

(3)模拟量输出：0~10 V 电压信号：最大误差 0.215%，优于技术规格书在±0.3%（满量

程）以内的要求；4~20 mA 电流信号：最大误差 0.2%，优于技术规格书在±0.3%（满量程）以内的要求；0~200 mV 信号输出：最大误差 0.21%，优于技术规格书在±0.3%（满量程）以内的要求。

(4)单个模块自动测试时间小于 2 min。

## 6 结束语

设计的反应堆保护装置校验设备是用于反应堆保护装置检测和校验的专用设备，成功实现了反应堆保护装置 24 种功能单元的自动检测和校验。校验设备具有技术先进、自动化程度高、操作方便等特点；通过智能化自动故障定位技术对故障的功能单元进行快速故障定位，为及时进行故障单元维修，提高维修人员的检修能力提供了有力保障。

# Research on Design of Reactor Protection Equipment Checkout Console

Yang Yang, Han Wenxing, He Li, Wu Zhiqiang, Ma Quan

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** In order to improve the automatic testing level of maintainer and rapid test, fault detection for the unit of reactor protection assembly, this paper designs the reactor protection assembly checkout console. According to the method that pulse output circuit based on FPGA cooperates with fasting collection card sampling frequency and buffer data counting, the setpoint unit self-test interface test is conducted. The accurate mv signal simulation is realized according to the circuit of voltage feedback module and current feedback module. The fault locating of reactor protection assembly unit is realized also according to the fault locating expert system. After the testing and experimentation of Reactor Protection assembly checkout console, the result shows that the technical characters of Reactor Protection assembly checkout console satisfies the requirement of user.

**Key words:** Reactor protection equipment, Checkout Console, Fault location

作者简介：

杨 洋（1980—），男，工程师。2006年毕业于电子科技大学模式识别与智能系统专业。现主要从事反应堆仪表与控制系统研究。

韩文兴（1983—），男，工程师。2006年毕业于电子科技大学计算机科学与技术专业。现主要从事反应堆仪表与控制系统研究。

贺 理（1982—），男，工程师。2003年毕业于电子科技大学测控技术与仪器专业。现主要从事反应堆仪表与控制系统研究。

（责任编辑：张明军）