

反应堆中子脉冲信号预处理系统研制

代航阳, 邓 圣, 崔 璨, 付国恩

(中国核动力研究设计院, 成都 610213)

摘要: 针对目前反应堆中子脉冲信号预处理系统信号传输干扰大和参数调节稳定性差的问题, 设计出一种集成前置放大器、脉冲主放大器 and 高压电源为一体, 具备智能调节控制参数的低噪声反应堆中子脉冲信号预处理系统; 采用集成化与模块化技术, 系统根据功能不同分为预处理装置和调节控制盒, 其中预处理装置包括脉冲放大模块、参数调节模块、低压电源模块和高压电源模块; 采用智能化调节技术, 设计了基于 SPI 总线的远程软件参数设置功能, 利用数字电位器实现无按键智能调节脉冲放大甄别阈和中子探测器工作高压; 试验结果表明, 该系统能有效便捷地获取关键工作参数, 满足了核测设备的数采装置获取准确中子计数率的要求。

关键词: 预处理系统; 集成化技术; 智能化技术; 脉冲放大

Development of Pre-processing System for Neutron Pulse Signal of Reactor

Dai Hangyang, Deng Sheng, Cui Can, Fu Guoen

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: Aiming at the problem of large interference in signal transmission and poor stability of parameter adjustment, a new neutron pulse signal pre-processing system is designed. This system has the function of adjusting parameters intelligently, and is integrated as a whole with the preamplifier, pulse main amplifier and high voltage power supply. Using integrated and modular technology, the system is divided into pre-processing device and adjustment control box according to different functions; the pre-processing device includes pulse amplifier module, parametric adjustment module, low voltage power supply module and high voltage power supply module. Using intelligent regulation technology, the remote software parameter setting function based on SPI bus is designed, and meanwhile, the digital potentiometer is introduced for keyless adjusting the screening threshold and high voltage. The test results illustrates that this system can effectively and conveniently acquire the key working parameters, and satisfies the requirement of acquiring accurate neutron counting rate by data acquisition device of nuclear measurement equipment.

Keywords: pre-processing system; integrated technology; intelligent technology; pulse amplification

0 引言

中子脉冲信号的预处理系统是针对反应堆内部中子探测器的输出信号进行就地处理的一种装置, 用于中子脉冲信号的甄别、整形和放大。该系统的信号处理结果用于远端核测设备^[1]的中子脉冲计数的采集。中子脉冲信号的监测是反应堆首次物理启动试验^[2]和运行期间获取动态参数的重要方式, 具体用于中子计数监督和反应堆临界外推, 这对于反应堆安全运行必不可少。中子脉冲信号的预处理系统是核测设备中的中子脉冲信号监测准确性的重要保障。

现有的中子脉冲信号预处理系统^[3]仅包括前置放大器, 而用于中子脉冲信号甄别的脉冲主放大器和用于中子探测器工作的高压电源安装在远端核测设备中, 中子脉冲信号在前置放大器与主放大器之间长距离传输容易受到噪声干扰, 造成中子脉冲信号采集的失真。另外, 现有中子脉冲信号预处理系统^[4]的控制参数设置是通过按键或者旋钮的方式完成的, 缺乏可维护性和参数的稳定性。

随着信息处理智能化技术的发展, 工业自动化设备向

着集成化、智能化和数字化方向发展。反应堆核测设备作为重要的工业自动化设备, 也需要跟随历时的潮流一起进步。因此, 一种集成度和可靠性高、操作灵活以及更加智能的中子脉冲信号预处理系统应运而生。

本文介绍一种集成前置放大器、脉冲主放大器和高压电源为一体、具备智能调节控制参数的低噪声反应堆中子脉冲信号预处理系统。该设备具备降低中子脉冲信号在传输过程中的干扰, 提高系统的可维护性和稳定性等特性。

1 系统结构及原理

该系统包括预处理装置和调节控制箱两个部分。预处理装置结构为一个便携式机箱, 系统内部结构采用模块化设计方式, 根据实现的功能不同, 分为脉冲放大模块、参数调节模块、低压电源模块和高压电源模块。外部接口采用带隔离的连接器与中子探测器、调节控制箱及远程核测系统^[5]进行数据交互。

预处理装置的脉冲放大模块把脉冲信号前置放大组件和主放大组件就近集成, 实现脉冲信号的甄别、整形和放大等所有预处理功能, 减少长距离传输脉冲信号造成的噪声干扰; 构间建独立的智能化参数调节模块, 通过 SPI 总线接口接收调节控制箱的参数设置, 并利用数字电位器实

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-03-29。

作者简介: 代航阳(1981-), 男, 四川夹江县人, 工学博士, 副研究员, 主要从事核电子学与核技术应用方向的研究。

现无按键数字信号调节脉冲放大甄别阈和中子探测器工作高压。调节控制箱接收远程控制系统参数设置命令，并存储和转换为 SPI 通讯格式的数据发送给参数调节模块。中子脉冲信号预处理系统结构原理图如图 1 所示。

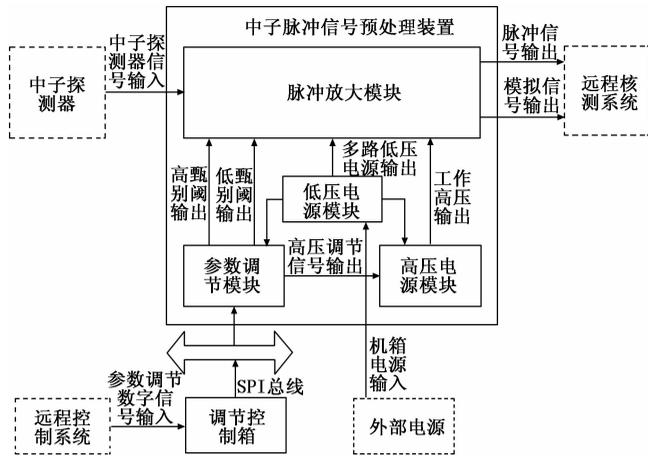


图 1 中子预处理装置结构原理图

2 系统硬件设计

2.1 关键技术

系统硬件设计以集成化与智能化技术为基础，形成了以下两种关键技术：

1) 中子脉冲信号的集成化预处理技术。基于中子脉冲信号传输过程易受干扰的特点，采用脉冲前置放大器和主放大器集中就地配置的方法，实现脉冲信号甄别、整形和放大功能。脉冲放大模块集成了前置放大组件和主放大组件，它们之间的信号传输在模块内部实现。前置放大组件接收中子探测器输出的脉冲信号，经过隔离、放大和缓冲电路后送入主放大组件；主放大组件经过积分/微分脉冲放大、基线恢复、幅度甄别、整形和缓冲电路后输入到远端脉冲信号采集设备。

2) 控制参数的智能化调节技术。基于数字电位器智能调节技术，参数调节模块采用 SPI 总线^[6]接口的形式与调节控制箱连接，实现远程软件设置控制参数的功能。参数调节模块集成了 SPI 通讯接口^[7-8]和数字电位器。SPI 通讯接口经过串口连接器接收远程控制系统经由调节控制箱转换输出的参数调节数字信号，并经过隔离缓冲芯片后送入两组数字电位器；两组数字电位器通过远程控制系统的编程把控制参数的数字信号转换为模拟信号，经过跟随电路缓冲隔离后分别输出给脉冲放大模块和高压电源模块。

2.2 预处理装置结构

预处理装置结构采用模块化和小型化设计技术，整体设计成一个具备输入输出接口的便携式机箱，内部结构根据不同功能分为四个相对独立的模块。箱内部布置分为上下两层，上层为脉冲放大模块和参数调节模块，下层为低压电源模块和高压电源模块，每个模块都有独立的方形壳体保护，壳体表面都有相应的连接器，模块之间通过连接

器之间的电缆进行信号连接。装置箱体内部结构如图 2 所示。

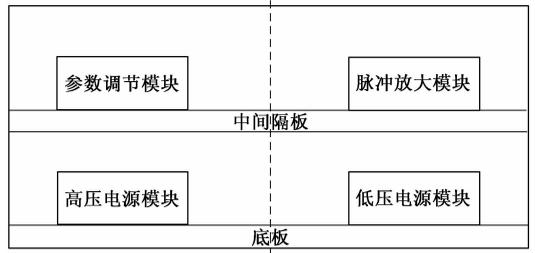


图 2 预处理装置箱体内部结构图

2.3 脉冲放大模块

脉冲放大模块是中子脉冲信号预处理装置的核心模块，完成脉冲信号的集成化预处理。该模块具体结构分为前置放大组件和主放大组件。其中，前置放大组件集成于一个独立屏蔽盒中，通过连接器安装在主放大组件电路板之上，并通过连接器与其它模块实现信号的输入输出，脉冲放大模块原理框图如图 3 所示。

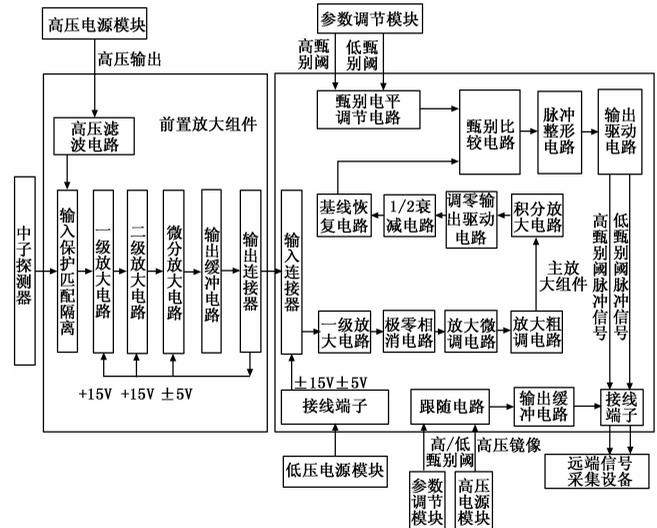


图 3 脉冲放大模块原理框图

前置放大组件通过多层屏蔽同轴电缆直接与中子探测器连接，中子脉冲信号经过阻抗匹配与隔离电路保持信号的有效性，随后利用两级三极管放大电路进行信号的输入保护，并通过微分整形后匹配阻抗输出到主放大组件；同时，高压电源模块输出的高压信号经过组件内置的高压滤波电路进行去噪处理，然后通过同轴电缆加载在中子探测器作为其工作电压；放大电路的工作电源由低压电源模块供给；前置放大组件与主放大组件通过连接器直接对接，消除了电缆传输信号带来的噪声干扰。

主放大组件接收前置放大组件处理后的中子脉冲信号，这些信号经过第一级放大电路，极零相消，放大倍数可调的放大电路，再通过积分、调零、衰减和基线恢复等功能电路，最后通过甄别比较电路处理，整形输出后传输到远

端信号采集设备; 参数调节模块和高压电源模块会通过主放大组件分别输出高/低甄别阈和高压镜像模拟信号到远端信号采集设备; 组件内部电路工作电源由低压电源模块供给; 整个预处理装置的所有输出信号汇集在主放大组件输出, 通过输出缓冲、隔离和驱动电路后输出远端采集设备, 实现了信号传输的集成化

2.4 参数调节模块

参数调节模块采用数字电位器调节的方式控制参数调节, 以此代替传统手动旋钮调试方式, 在装置中设计为独立的参数调节模块。该模块具体结构分为 SPI 通讯接口组件和数控调节组件。两部分组件集成在一块电路板上, 并通过外部壳体与其它模块连接, 参数调节模块原理框图如图 4 所示。

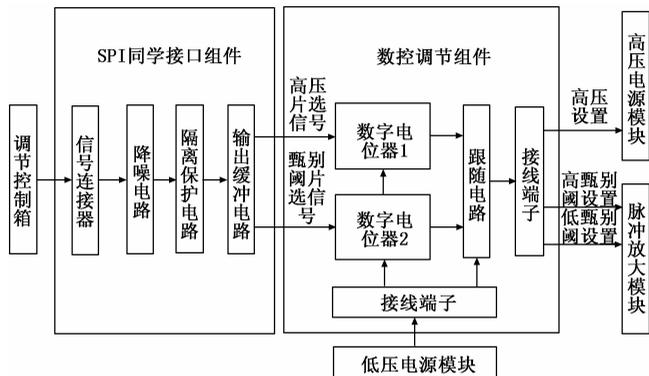


图 4 参数调节模块原理框图

SPI 通讯接口组件通过 SPI 总线协议与调节控制箱连接, 实现数字信号的隔离缓冲功能。整个过程如下: 按照 SPI 总线协议规定, 信号连接器接收调节控制箱输入的 6 路数字信号, 包括时钟信号、输入信号、输出信号、高压片选信号、甄别阈片选信号和准备信号; 输入的 6 路数字信号首先经过降噪电路处理, 保证数字电位器输入信号的准确性, 主要是利用电容、磁珠等器件的抑制信号线噪声功能来实现; 其后经过隔离保护电路, 确保外界误插入电源时起保护作用, 主要是利用开关二极管的限幅和保护功能来实现; 再次经过输出缓冲电路, 将远程输入的缓慢输入信号转变成清晰无抖动的输出信号, 并作为数字电位器的输入信号, 主要利用施密特触发器的反相缓存器功能来实现。

数控调节组件通过两片数字电位器芯片与 SPI 通讯接口组件相连, 实现高压和甄别阈的数字命令信号转换为模拟信号的远程设置功能。整个过程如下: 经过 SPI 通讯接口组件的隔离缓冲处理后, 6 路数字信号分别送入两片数字电位器芯片, 当片选信号使能数字电位器芯片, 输入的 24 位数字信号通过编程的方式输入到芯片内的电位器寄存器中, 用于设置片内电位器触点的位置, 不同的触点位置代表了不同的远程设置, 同时触点位置信息会存储在片内存储器中, 用于装置重新加电后加载触点位置信息; 根据片选信号的不同实现高压和甄别阈两类参数的转换, 第一个

数字电位器输出 1 路高压模拟信号, 第二个数字电位器输出高甄别阈和低甄别阈模拟信号; 3 路模拟信号利用电压跟随器作为中间级, 隔离输入输出信号的互相影响, 跟随电路输出端通过接线端子分别输出到高压电源模块控制端和脉冲放大模块甄别阈输入端; 另外, 数字电位器的工作电源由低压电源模块供给。

2.5 高压电源模块

高压电模块主要用于为中子探测器提供工作高压, 使探测器能够输出中子脉冲信号。高压电源的输入调节方式采用低电压 (0~5 V) 控制, 输出高电压 (0~3000 V) 直接通过脉冲放大模块的前置放大组件加载在中子探测器上。相比传统的高压供电模式, 高压信号输入到中子探测器的距离缩短为预处理机箱内部短距离传输, 解决了高压信号传输在长距离传输中把噪声引入脉冲前置放大的问题。

2.6 低压电源模块

低压电源模块为脉冲放大模块、高压电源模块和参数调节模块提供工作电源。低压电源模块通过 DC-DC 转换器把预处理机箱输入电源 (直流 +24 V) 转换为固定的直流电压输出, 提供给机箱内其他模块使用, 具体原理如图 5 所示。模块内部集成了电源滤波器、DC-DC 电源模块和正负电压调节器, 分别实现了电源降噪、数值变换和极性变换功能。其中, 隔离降噪功能减少了外部噪声对高压电源和脉冲放大器的影响。

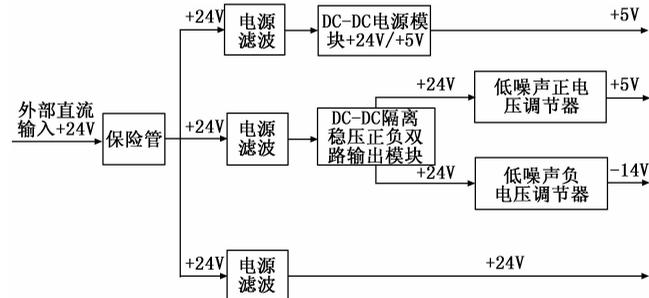


图 5 低压电源模块原理框图

2.7 调节控制箱

预处理装置中的控制参数不能用手动按键或者旋钮进行调节, 只能通过临时接入调节控制箱进行设置。该调节控制箱具备独立输入输出接口, 当需要调节中子探测器工作高压或者脉冲放大器甄别阈时候, 输出接口与预处理装置相接, 输入接口与远程控制系统相接。调节控制箱能存储远程控制系统的参数设置命令, 同时通过 FPGA^[9] 的逻辑控制功能驱动 SPI 总线数据传输。它的具体工作原理如图 6 所示。

2.8 硬件接口

装置的硬件接口包括箱体接口、脉冲放大模块接口、参数调节模块接口、高压电源模块接口和低压电源模块接口。

预处理装置箱体有 3 路输入接口和 5 路输出接口。输入接口包括中子脉冲信号输入接口、参数调节信号输入接口

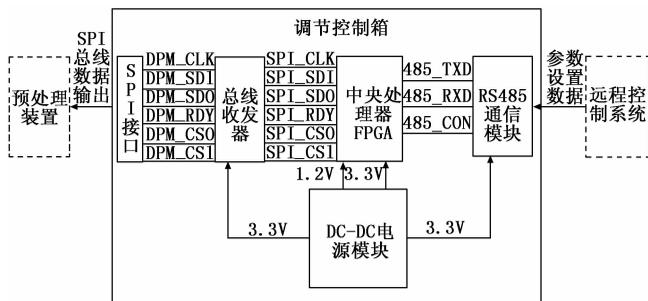


图 6 调节控制箱原理框图

和外部电源输入接口。中子脉冲信号输入接口与中子探测器相连，接收中子探测器输出的脉冲信号；参数调节信号输入接口与调节控制箱相连，接收参数调节的数字信号；箱外部电源输入接口与外部低压电源相连，接收外部电源供给。输出接口包括 2 路中子脉冲信号输出接口和 3 路模拟信号输出接口。中子脉冲信号输出接口与远端脉冲信号采集设备连接，发送经过甄别、整形和放大的高甄别阈和低甄别阈脉冲信号；模拟信号输出接口与远端模拟信号采集设备连接，发送脉冲放大模块的高甄别阈和低甄别阈信号，以及高压电源的镜像信号。

脉冲放大模块实现中子脉冲信号的预处理功能，包括 5 路输入接口和 5 路输出接口。输入接口包括脉冲信号预处理接口、高甄别阈输入接口、低甄别阈输入接口、高压电源输入接口和低压电压输入接口。输出接口包括高甄别阈脉冲信号输出接口、低甄别阈脉冲信号输出接口、高压电源镜像信号输出接口、高甄别阈输出接口、低甄别阈输出接口。

参数调节模块实现与调节控制箱的通讯，以及参数调节的数字信号转模拟信号功能，包括 2 路输入接口和 2 路输出接口。输入接口包括 SPI 通讯接口和低压电源输入接口；输出接口包括高甄别阈输出接口、低甄别阈输出接口和高压控制信号输出接口。

高压电源模块包括 2 路输入接口和 2 路输出接口。输入接口包括高压控制信号输入接口、低压电源输入接口；输出接口包括高压电源输出接口和高压镜像（0~5V）信号输出接口。

低压电源模块包括 1 路输入接口和 4 路输出接口。输入接口为外部低压电源提供给箱体的工作电源；输出接口为内部功能模块提供低压工作电源。

3 系统软件设计

系统软件设计主要包括远程参数调节人机界面设计、调节控制程序设计、远程信号采集系统人机界面设计。系统软件构架如图 7 所示。

远程参数调节人机界面提供参数设置的人机接口界面，包括中子探测器工作高压设置、脉冲放大器高甄别阈和低甄别阈设置。设置的命令以数字信号形式通过 RS485 通讯协议发送给调节控制程序。

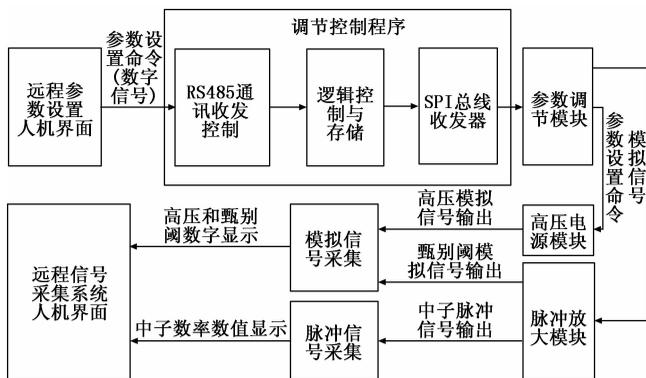


图 7 系统软件构架图

调节控制程序包括 RS485 通讯收发控制模块、逻辑控制与存储模块和 SPI 总线收发器模块。RS485 通讯收发控制模块隔离缓冲远程参数设置命令；再通过 FPGA 的逻辑控制功能把这些命令按照 SPI 串行通讯的方式发送给总线收发器；经过总线收发器缓冲后的数据通过 SPI 通讯协议的格式发送给中子脉冲信号预处理装置；最终通过数字电位器把数字信号转换为可加载的模拟信号。

远程信号采集系统人机界面显示预处理装置输出的数据，根据数据类型分为脉冲信号采集模块和模拟信号采集模块。脉冲信号采集模块分为定时、定数和自动控制三种模式，分别采集高甄别阈和低甄别阈状态下的中子计数率。模拟信号采集模块定时采集和显示中子探测器工作高压、以及高低甄别阈。

4 试验结果及分析

在中子脉冲预处理系统软硬件集成及调试完成以后，将开展坪曲线和阈曲线获取试验，获得中子探测器工作高压和脉冲放大模块的甄别阈。

4.1 坪曲线获取试验

4.1.1 试验方法

- 1) 确定高甄别阈和低甄别阈为定值，并通过远程参数设置界面设置；
- 2) 远程参数设置界面输入高压数值，由低到高，从有计数率开始记录不同高压时候的计数率；
- 3) 利用获取的数据绘制平均计数率与高压之间的关系曲线，得到中子探测器工作坪区，在坪区中选取合适点作为中子探测器工作高压。

4.1.2 试验结果

脉冲放大模块的高甄别阈和低甄别阈定值分别设置为 0.8 V 和 0.5 V，中子探测器的工作高压从 550 V 调节到 840 V，获取的坪曲线获取试验数据见表 1，坪曲线见图 8 和图 9 所示。

4.1.3 数据分析

当甄别阈为 0.8 V 时，工作高压的坪区为 740~840 V，坪长 100 V，坪斜 35.4%/100 V；当甄别阈为 0.5 V 时，工作高压的坪区为 700~800 V，坪长 100 V，坪斜 15%/100

V; 综合选择高低甄别对应的坪区范围, 选择中间节点 760 V 作为工作高压。

表 1 坪曲线获取试验数据

序号	高压(V)	平均计数率(cps) (高甄别阈 $VH=0.8$)	平均计数率(cps) (低甄别阈 $VH=0.5$)
1	550.0	0.19	231.46
2	600.0	34.40	1195.09
3	650.0	945.61	2180.08
4	700.0	2003.92	3012.42
5	720.0	2397.25	3269.76
6	740.0	2749.09	3502.50
7	760.0	3037.97	3702.37
8	780.0	3302.37	3891.34
9	800.0	3538.66	4074.23
10	820.0	3724.26	4305.03
11	840.0	3930.62	4927.50

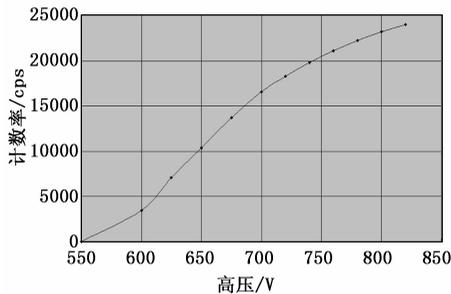


图 8 坪曲线 (高甄别阈 $VH=0.8$)

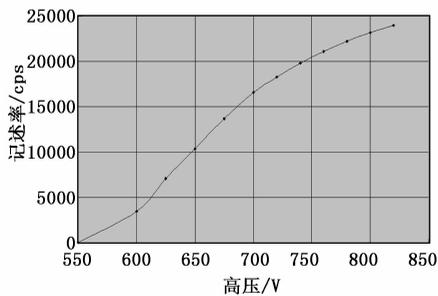


图 9 坪曲线 (低甄别阈 $VL=0.5$)

4.2 阈曲线获取试验

4.2.1 试验方法

1) 把坪曲线获取试验确定的工作高压作为定值, 并通过远程参数设置界面设置;

2) 在远程参数设置界面输入甄别阈数值, 由低到高, 从有计数率开始记录不同甄别阈时候的计数率;

3) 利用获取的数据绘制平均计数率与甄别阈之间的关系曲线, 选取曲线平坦区域的甄别阈点作为脉冲放大的甄别阈。

4.2.2 试验数据

工作高压由坪曲线试验确定为 760 V, 获取阈曲线, 试验数据见表 2, 阈曲线见图 10 所示。

表 2 阈曲线获取试验数据

序号	阈压(V)	平均计数率(cps) (低甄别阈系列)
1	0.2	48190.13
2	0.3	4719.11
3	0.4	3834.07
4	0.5	3516.30
5	0.6	3250.39
6	0.7	3002.74
7	0.8	2759.81
8	0.9	2515.82
9	1.0	2301.35
10	1.1	2072.31
11	1.2	1856.40

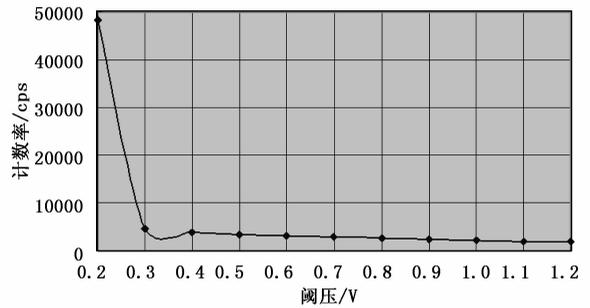


图 10 阈曲线

5 结束语

本文设计并实现了一种具有集成化与智能化特点的反应堆中子脉冲信号预处理系统, 解决已有系统信号传输干扰大和参数调节稳定性差的问题。该系统主要应用于反应堆中子脉冲信号的预处理以及相关工作参数的调节。系统集成成为预处理装置和调节控制箱两部分; 预处理装置基于模块化的设计方法, 包括脉冲放大模块, 参数调节模块, 高压电源模块和低压电源模块, 其中以脉冲放大模块为核心, 各模块间相互配合, 实现脉冲信号的隔离和放大、远程命令模拟信号输入以及高压电源的加载; 调节控制箱以 FPGA 芯片为核心, 实现远程命令数字信号存储以及提供 SPI 总线接口控制。试验结果表明, 该系统能有效及便捷地获取中子探测器工作高压和脉冲放大甄别阈等关键参数, 为核测设备的数采装置获取准确的计数率提供了重要的保障。该系统在许多核测量设备中均有很好的应用, 包括启堆计数装置、硼浓度测量装置、集中数据采集系统^[10]等。

参考文献:

[1] 周 荣, 王忠海. 核电子学实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
 [2] 黄礼渊. 反应堆启堆用智能化外推临界装置堆上考验试验 [J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31 (10): 1171-1174.