

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105715

一种脉冲中子氧活化测井仪数据采集电路

王 祥¹ 李 琼² 程晶晶² 李照浦²

(1. 中海油田服务股份有限公司 三河 065201; 2. 华中科技大学 人工智能与自动化学院 武汉 430074)

摘 要: 现有脉冲中子氧活化测井仪时间谱容易受地层环境干扰,在测井解释中需要基于能量谱信息滤除时间谱中的噪声。针对新的技术需求,设计了一种多路能谱采集处理电路,该电路以两片 STM32 为主控器件,根据恒比定时的原理以原始窄脉冲的后沿为峰值检测时刻,使用处于外部触发方式的 ADC 采集脉冲信号的峰值,同时获取 3 个探头产生的脉冲信号的时间谱和能谱信息,并通过 CAN 总线与地面系统建立通信。该电路具备体积小、功耗低、实时性高的特点,实验测试结果表明该电路能够准确采集能谱信息并满足氧活化仪器的需求。

关键词: 氧活化测井; 能谱采集; 时间谱采集; STM32

中图分类号: TH842 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 490.15

A data acquisition circuit for the pulsed neutron oxygen activation logging tool

Wang Xiang¹ Li Qiong² Cheng Jingjing² Li Zhaopu²

(1. China Oilfield Service Limited, Sanhe 065201, China; 2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The time spectrum is easily affected by the stratigraphic environment during the logging process, so it is necessary to filter out the noise in the time spectrum based on the energy spectrum information. For these requirements, a multi-channel energy spectrum acquisition and processing circuit was designed. This circuit used two STM32 as the main controller. Based on constant fraction discriminator(CFD), the circuit adopted the trailing edge of the original narrow pulse as the peak detection moment, and used external trigger ADC to collect the peak value of the pulse signal. It obtained the time spectrum and energy spectrum information of the pulse signal generated by the three probes at the same time, and communicated with the ground system through the CAN bus. The circuit has the characteristics of small size, low power consumption, and high real-time performance. Experimental results show that the circuit can accurately collect energy spectrum information and meet the needs of O/A tool.

Keywords: O/A logging; energy spectrum acquisition; time spectrum acquisition; STM32

0 引 言

氧活化测井是油田的开发过程中一种主流的井下水流测量方法,该方法利用中子发生器产生高能中子使水中的氧原子活化,生成具有放射性的同位素¹⁶N,在水流方向测量伽马射线的时间谱就可以根据水流到达探头的时刻计算出流速从而确定注入量^[1]。通过氧活化测井不仅能实现注入剖面水流量的测量,还在注聚合物^[2]、水饱和度测量^[3]、注水井漏失问题检查^[4]等方面取得了应用。氧活化测井方法目前主要依赖于时间谱^[5],只能实现单次定点采集,制约了测井效率。本文采集电路可以同时采集能谱信息和时间谱信息,利用能谱将活化氧产生的伽马与自

然背景的伽马区分开,从而可以实现复杂井下环境的连续测量。

与多路脉冲能谱及时间谱采集电路多采用 FPGA 加 MCU 的方式不同^[6-8],为了满足氧活化测井仪器对电路体积及功耗的需求,本文数据采集电路仅使用基于 STM32 的双路 MCU 实现了 3 个通道的能谱和时间谱采集,及辅助参数数据采集、上下机通信和脉冲中子发生器控制等功能,具有集成度高、功耗低等优势。

1 采集电路设计

脉冲中子氧活化测井仪的系统结构包括两部分,一部分控制中子发生器向地层发射中子,构成中子发射短节;另

收稿日期:2021-01-19

一部分采集地层中产生的伽马射线并获取其中所包含的信息,构成数据采集短节。数据采集短节内部包含3个探头,

按照与中子发生器的距离分别记为短源探头 SS,长源探头 LS 以及超长源探头 XLS,其结构如图1所示。

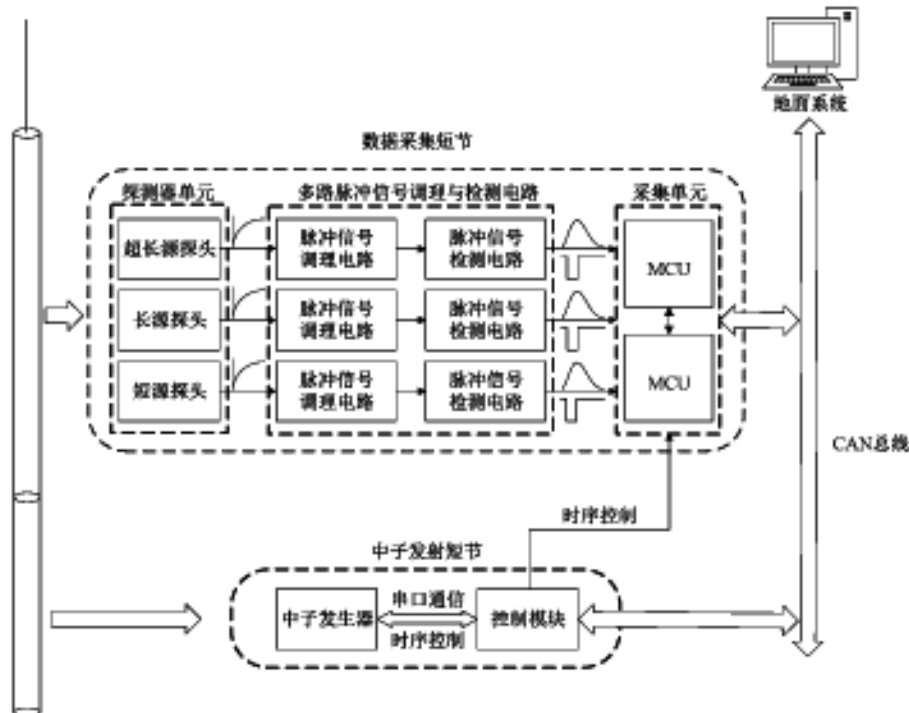


图1 仪器系统结构

1.1 数据采集电路结构

由于数据采集短节内一共有3个探头,每个探头内部封装了NaI晶体和光电倍增管,将外界伽马转换为电脉冲信号,因此采集电路需要同时对三路脉冲信号需要进行处理与采集。

针对每一个探头而言,其产生的脉冲信号首先需要通过前置放大器提高信噪比^[18]。前置放大器有两级,第1级采用电流灵敏型前置放大器对信号进行脉冲整形^[19];第2级采用了同相比例放大器,可以改变电阻的参

数来实现增益的调节,有利于后续能谱的标定。由于不同探头处于仪器的不同位置,因此采用了同轴线进行信号传输并通过无源CDD基线恢复电路^[12]来消除脉冲堆积造成的基线偏移现象。随后将信号分为两路,一路进行脉冲展宽同时获取展宽后脉冲的峰值时刻,从而触发ADC采集脉冲的峰值,获取能量信息;一路通过比较器将脉冲信号转换为数字信号,有利于计数信息的获取。最终,通过两个单片机对信号采集,成谱,上传,整个电路的结构如图2所示。

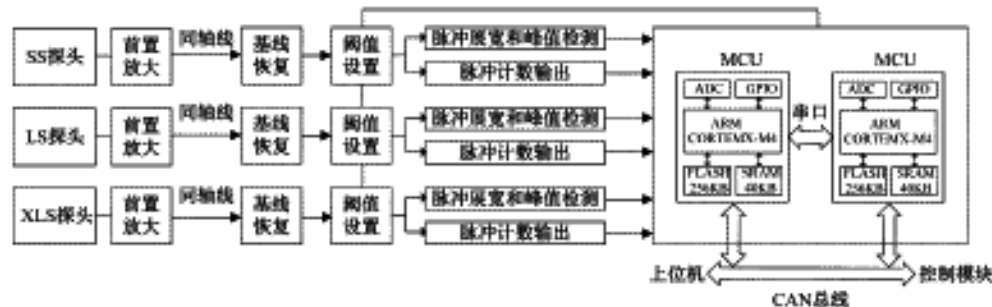


图2 数据采集电路结构

1.2 基于恒比定时的峰值检测电路

前置放大器产生的脉冲信号上升沿迅速,峰值持续时间短。为了准确采集脉冲峰值,需要将脉冲展宽,延长峰值持续的时间并且识别脉冲的峰值时刻^[15,16]。

峰值检测电路以恒比定时时刻鉴别法为基本原

理^[15,16],利用原始窄脉冲信号的后沿进行定时,使用一个RC电路对信号进行展宽和延时,同时实现峰值展宽和峰值检测的功能,在满足性能要求的同时具备体积小,结构简单的优点,该电路如图3所示。

电路采用了1个LT1814四合一高速运算放大器和1个

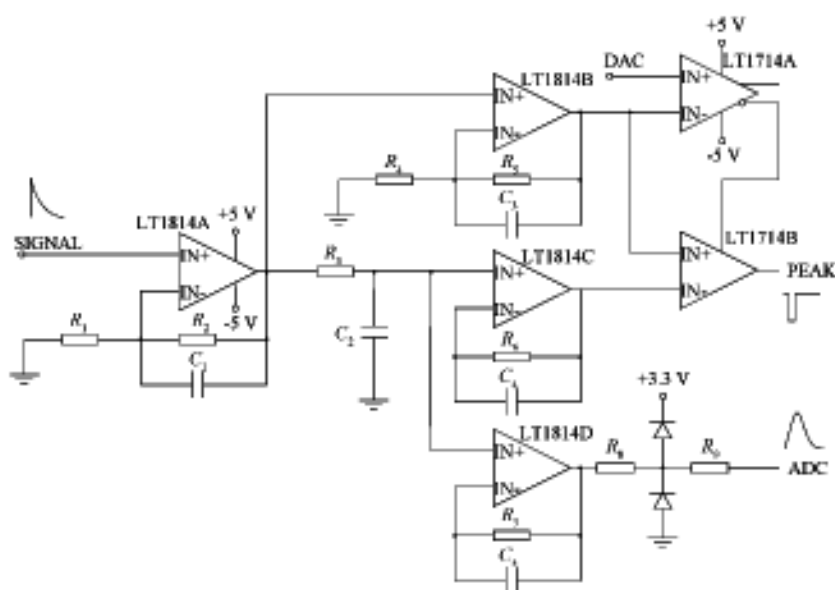


图 3 峰值检测电路

LT1714 二合一高速比较器对信号进行处理。脉冲信号经过一级放大后分为两路,一路经过二级放大器,一路经过 RC 延迟电路,这两个信号在比较器的两端可以等效为一个双极性信号,在双极性信号的零点触发比较器的电平转换,改变放大和延迟的参数就可以调节触发比直到比较器在脉冲信号峰值时刻进行触发,输出峰值信号 PEAK。最终延迟电路选取的电阻 $R_1 = 2.21 \text{ k}\Omega$, 电容 $C_2 = 68 \text{ pF}$, 该电路截止频率为 1 MHz , 能够将脉冲展宽至合适的范围同时抑制高频噪声。

为了避免噪声信号对比较器输出端的干扰,同时采用

了另外一个比较器进行预置甄别。该比较器输入端连接放大的脉冲信号和设定的阈值信号,输出端取非后连接到峰值检测比较器的锁存端,保证电路只对大于阈值的脉冲信号进行峰值检测,提高系统可靠性。

1.3 多路脉冲信号采集电路

为了对电路中的三路信号同时进行采集,采用了双单片机的结构。其中一块采集三路信号的计数信息和一路信号的峰值信息,另一块采集其它两路的峰值信息,二者通过中口传输数据,最大限度降低脉冲的漏检率,采集过程如图4所示。

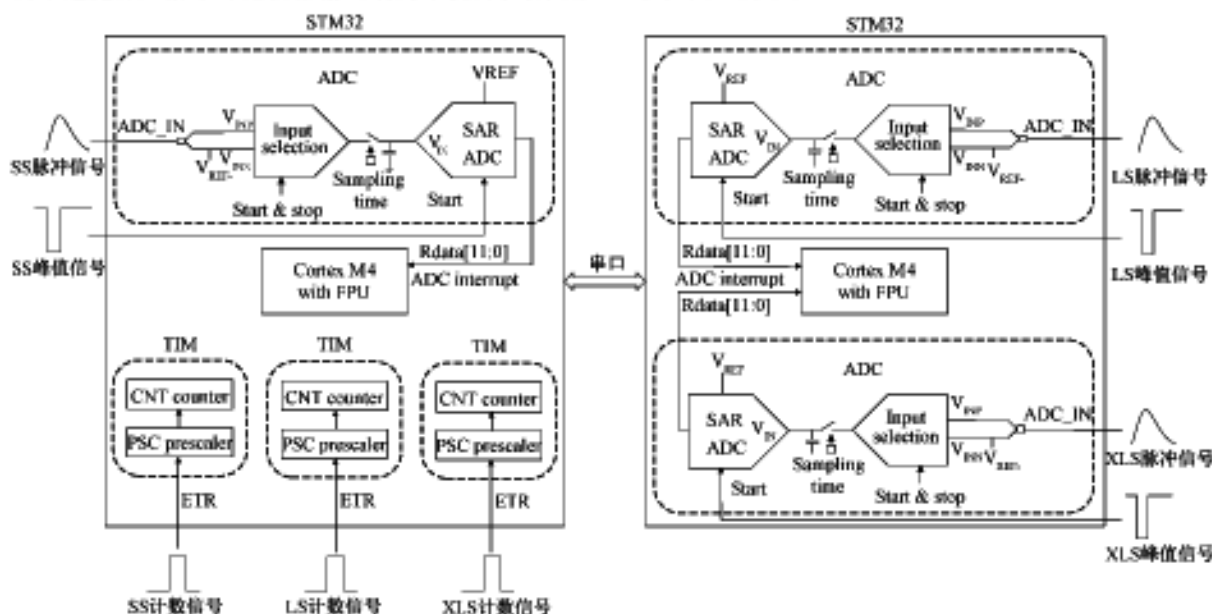


图 4 多路脉冲信号采集电路

本文使用 STM32F303 作为主控 MCU,其内部包含了 256 KB 的 FLASH 以及 40 KB 的 SRAM,满足能谱和时间

谱的存储需求,且具有4路采样率最高可达5 MSPS的独立12位ADC,可同时实现多路高精度高速信号采集。ADC内部存在采样保持电路,在ADC的工作时钟为系统高速时钟64 MHz,采样保持时间为1.5个时钟周期时采样保持时间为 $0.023\ \mu\text{s}$ 。脉冲信号宽度在 $1\ \mu\text{s}$ 左右,其中峰值持续时间约为 $0.1\ \mu\text{s}$,大于采样保持时间,因此ADC能够满足采样需求。ADC工作方式外部触发,用外部中断引脚直接作为ADC的触发开关,一旦峰值检测信号到来无需CPU进行控制立即进行采集,采集完成后将峰值大小对应的能量道址加1,生成能谱。脉冲的计数信息则作为定时器外设的外部时钟输入,因此可以利用单片机的累加器自动统计脉冲计数,按照一定的周期获取寄存器内的计数值即可得到时间谱。这种电路结构有较好的实时性,能适应脉冲中子活化测井仪器的高计数率条件下能谱和时间谱采集需求。

2 仪器工作时序和软件设计

2.1 工作时序

作为仪器的一部分,数据采集电路的程序设计需要和仪器整体的工作时序相匹配,仪器的工作时序如图5所示。

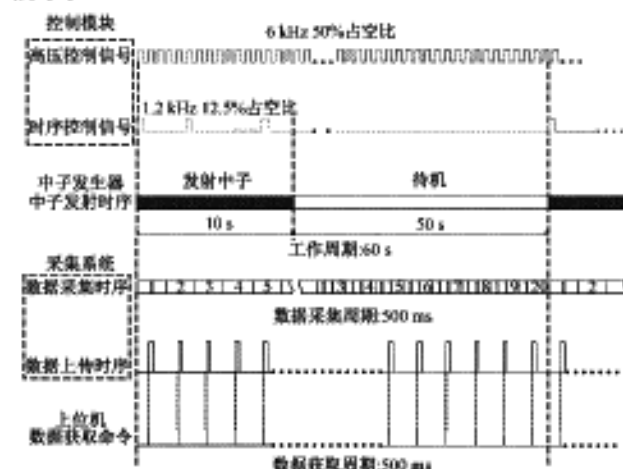


图5 仪器的工作时序

在地面系统下发工作命令后,控制模块首先产生高压控制信号和时序控制信号驱动中子发生器按照10 s发射中子,50 s待机的活化时序工作,然后采集系统以中子爆发时刻为起点进行数据采集。

为了避免数据采集过程中内存的溢出,设置了500 ms的采集周期以及双缓存机制,每一个缓存变量包含逐渐增加的ID,3个探头的256道能谱以及10道时间谱。两个缓存区域按照采集周期轮流进行数据存储,确保任意时刻都会存在一个完整周期的数据,在上位机要数据时避免数据传输和数据采集之间的矛盾。

上位机要数据周期与采样周期相同,均为500 ms,在接收到要数据指令后首先会进行片内数据传输,然后打包

上传,根据数据大小和波特率可以计算出数据传输时间约为50 ms,因此不同采集周期的数据在传输过程中不会产生冲突,同时可以在上位机通过ID变化的连续性判断数据是否发生丢失。

2.2 软件设计

根据仪器工作时序,采集系统的数据采集是一个连续的过程,必定会和数据的传输占用同一段时间。鉴于单片机无法并行处理的特点,在主程序中进行数据的通信,在中断进行数据的采集,利用中断的特性避免数据采集和传输之间的矛盾。主程序流程如图6所示,中断程序流程如图7所示。

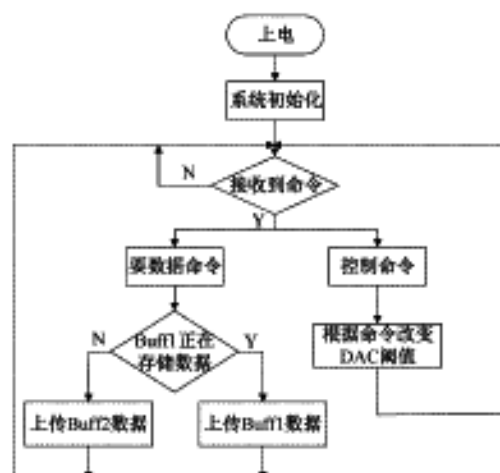


图6 主程序流程

3 测试与结果分析

由于电路的主要功能是能谱采集,因此测试过程以Cs137为基准源,对每个通道单独进行测试。在单片机内编写测试程序上传采集的能谱数据,通过这些数据验证能谱采集功能同时利用Cs137的特征峰标定能谱范围,实验过程如图8所示。

在实验过程中,稳压电源IPS4303提供正负18 V电源来模拟井下设备的供电状态,通过电源模块可以将正负18 V转换为电路和探头所需的电压。采集电路的CAN总线则是通过转接器转换为USB信号与PC连接,在PC上通过与转接器相匹配的软件来实现地面系统功能,完成命令的下发和数据的上传。

为了方便对比进行了两组实验,一组没有任何放射源,只采集自然界中的伽马射线以及电路本身的噪声信号,对应本底测量,一组在探头旁放置Cs137豁免源,两组能谱均采集10 min。在测试环境没有发生变化时可以认为本底和噪声是稳定的,因此将测量能谱减去本底能谱就可以得到扣除本底与噪声干扰的Cs137能谱如图9所示。

根据Cs137的能谱可知,其特征峰对应的能量为662 keV。从图9中可以看出能量峰值落在第19道,而能

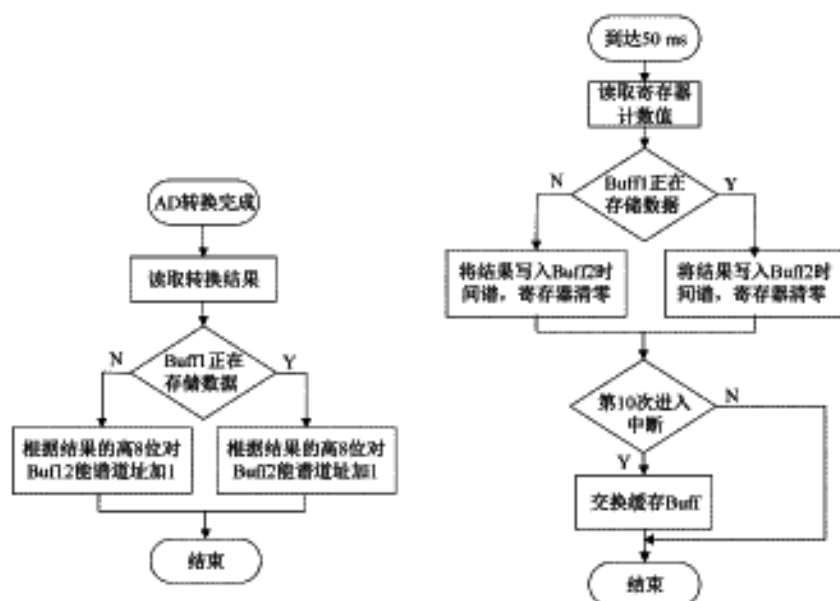


图 7 中断程序流程

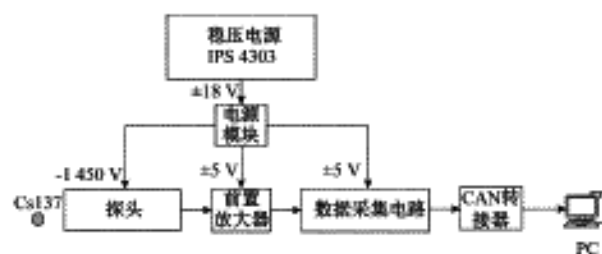


图 8 测试流程

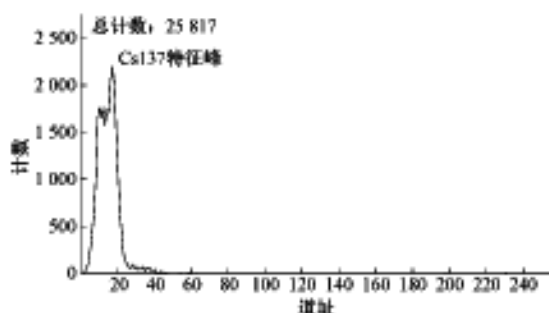


图 9 扣除本底的 Cs137 能谱 (10 min 累计)

谱一共有 256 道,由此可以得出能谱采集能量的最大范围为:

$$E_m = \frac{662 \text{ keV}}{19} \times 256 = 8.92 \text{ MeV} \quad (1)$$

对于氧来说,其活化后释放的伽马射线能量集中在 6.13 MeV,能够落在能谱范围内较为合适的区间。在实际使用中即能够明显地观察到活化氧峰值区域,又不会使氧峰附近的数据被边界剔除,满足氧活化仪器的工作需求。

4 结 论

本文设计了脉冲中子氧活化测井仪的数据采集系统,

该系统能够同时对仪器内 3 个探头产生的脉冲信号进行处理与采集,获取能谱和时间谱信息。在信号的处理过程中,根据恒比定时鉴别法,同时实现了脉冲信号的展宽和峰值时刻获取,使其功耗、体积显著减小,从而满足测井仪器工作的需求。最终仪器的能谱范围标定在 8.92 MeV,能够较为明显地显示活化氧产生的 6.13 MeV 特征伽马。在氧活化测井过程中,利用采集的能谱数据可以提取出活化氧释放的伽马计数,过滤其它能量范围伽马射线产生的干扰,从而提高仪器的测量精度。

参考文献

- [1] 张羽. 氧活化测井仪数据采集方法研究[J]. 测控技术, 2020, 39(9): 99-102, 107.
- [2] 杨硕. 脉冲中子氧活化测井在注聚井的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2016, 42(Z2): 15-16.
- [3] CHANCE D, INANC F, ZHANG Q, et al. A new salinity-independent cased hole water saturation method using pulsed neutron oxygen activation logging: Physics, modeling and interpretation[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2015, DOI: 10.2118/175104-MS.
- [4] 王连波. 氧活化、示踪相关测井在低压找漏找窜中的应用[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(1): 89-93.
- [5] 黄桂, 姜晓君, 焦俊青, 等. 基于脉冲中子氧活化测井中水流时间谱的属性分析及研究[J]. 天津科技, 2019, 46(11): 9-13.
- [6] 李晋宇, 马双宝. 基于脉冲中子源的元素分析测井仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(6): 67-70.
- [7] 陈源林, 孙尚民, 许西宁. 基于 FPGA 和 STM32 的多通道超声信号同步采集系统设计[J]. 电子测量技术,

- 2017, 40(11): 142-147.
- [8] 梁青青, 马超, 张志文. 多通道脉冲数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 92-96.
- [9] 柳加成, 吕雪艳, 杨斌, 等. 液体闪烁计数 α/β 能谱测量系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(5): 641-646.
- [10] DOMINGUEZ M, JORGE L. Design of a preamplifier card for the photomultiplier tubes of a gamma camera[J]. Journal of Physical Science and Application, 2018, 8(1): 46-54.
- [11] 叶莉华, 汪海洋, 王文轩, 等. 基于光电倍增管的低噪声前置放大器的设计及其信号处理[J]. 电子器件, 2013, 36(3): 340-343.
- [12] 杨俊, 彭进先, 周荣华, 等. 核电子学系统中基线恢复器的设计[C]. 中国电子学会、中国核学会核电子学与核探测技术分会, 2012: 45-48.
- [13] 聂高宁, 马双宝, 齐波. 地层元素分析仪中多道能谱采集处理电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(7): 766-770.
- [14] 李兆龙, 谢裕颖, 王华明, 等. 基于 MSP432 的能谱采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(8): 62-64, 116.
- [15] 许万鹏, 黄庚华. 基于恒比定时鉴别的激光雷达时间测量前沿技术研究[J]. 红外, 2014, 35(4): 18-24.
- [16] ZHENG R, WU G. Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding[J]. 中国光子学前沿(英文版), 2012, 5(2): 182-186.

作者简介

王祥, 工学硕士, 工程师, 主要从事测井仪器研制工作。
E-mail: wangxiang4@cosl.com.cn